

关于一类拟总体列紧算子的几个新的性质

陈晓雷

(浙江财经大学 数据科学学院, 杭州 310018)

摘要:进一步讨论了 p -阶拟总体列紧算子的几个新的性质, 是文献[1]工作的一个注记。

关键词: p -阶拟总体列紧算子; 谱半径; 性质

中图分类号: O177

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)03-0001-02

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.001

Several New Properties About a Class of Quasi-total Collectively Compact Operators

Chen Xiaolei

(School of Data Sciences, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper further discusses several new properties of the p th-order quasi-collectively compact operator, which is a note on the work of [1].

Keywords: p th-order quasi-collectively compact operator; spectral radius; property

文献[1]在 Banach 空间中引进并研究了一类称之为 $p \geq 1$ -阶拟总体列紧算子, 可看着是对 1971 年, 由 Anselone 所引进和研究的那类总体列紧算子的一种特殊扰动的结果, 将这类拟总体列紧算子理论应用于线性迁移问题, 建立了拟总体列紧算子逼近理论及其应用。本文则在文献[1,2]的基础上对 p -阶拟总体列紧算子 T 的性质进一步作了深入的讨论, 得到了一些新的结果。

1 引言及主要结果

一些相关的概念。

以下设 X 是 Banach 函数空间, $S = \{x \in X \mid \|x\| \leq 1\}$ 是 X 中的单位闭球。 $B(X, X)$ 表示 X 到 X 的一切有界线性算子 T 所成集, 它按通常的算子范数 $\|T\| = \sup_{\|x\| \leq 1} \|Tx\|$ 构成

Banach 空间。

定义 1^[4]: 设 X 与 Y 是 Banach 空间, $D \subset X$, 算子 $T: D \rightarrow Y$, 若 T 将 D 中任何有界集 S 映成 Y 中的列紧集 $T(S)$, 则称 T 是映 D 入 Y 的紧算子 (见 [3] P₂₁)。

定义 2^[1]: 算子集合 $F \subset B(X, X)$ 称为总体列紧的, 如果集合 $P = \{Tx \mid x \in S, T \in F\}$ 的闭包是 X 中的列紧集。

因列紧集的子集是列紧集, 故此时集合 $\bar{P} = P \cup P'$ 的子集 P 是列紧集, P 中任意无穷序列都有收敛子列。若算子集 F 均由算子列组成, 即 $F = \{T_n\}$, 则集合 P 可表为 $\bigcup_{n=1}^{\infty} T_n(S)$ 。显然, 若算子集 F 总体列紧, 则每个 $T \in F$ 都是紧算子。

定义 3^[1]: 算子列 $F = \{T_n\} \subset B(X, X)$ 称为 p -阶拟总体列紧的, 若有分解

收稿日期: 2018-12-19

基金项目: 浙江省一流学科 A 类 (浙江财经大学统计学) 建设项目资助。

作者简介: 陈晓雷 (1964-), 男, 教授, 主要从事非线性泛函分析的研究。E-mail: cxl310012@163.com。

$T_n^p = K_n + R_n \quad n = 1, 2, \dots, p$ 为正整数;

其中 $\{K_n\}$ 是总体列紧的, 且 $\|R_n\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ 。

特别 $p = 1$ 时, 算子列 $F = \{T_n\}$ 称为拟总体列紧的。

定义 4^[3]: 设 T 是 X 到 Y 的有界线性算子, 其中 X 与 Y 是复的 Banach 空间, 称 $\gamma_\sigma(T) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\|T^n\|} = \inf_n \sqrt[n]{\|T^n\|}$ 为算子 T 的谱半径^[2]。

定理 1: 设算子列 $\{T_n\} \subset B(X, X)$ 是总体列紧的, 又算子列 $\{A_n\}, \{B_n\} \subset B(X, X)$, 且 A_n 强收敛于 A , 即 $\exists A \in B(X, X)$, 使对每个 $x \in X$, 均有 $A_n x \rightarrow Ax (n \rightarrow \infty)$, 则算子列 $\{A_n T_n B_n\}$ 也是总体列紧的。

定理 2: 设算子列 $\{T_n\} \subset B(X, X)$ 是 p -阶拟总体列紧的, 又算子列 $\{A_n\}, \{B_n\} \subset B(X, X)$, 且 A_n 强收敛于 A , 则算子列 $\{A_n T_n B_n\}$ 也是 p -阶拟总体列紧的。

定理 3^[1]: 设算子列 $\{T_n\} \subset B(X, X)$ 是拟总体列紧的, 若对 $\forall x \in X$, 有 $T_n x \rightarrow 0, (n \rightarrow \infty)$, 则 $\|T_n^2\| \rightarrow 0$, 且 $\gamma_\sigma(T_n) \rightarrow 0, (n \rightarrow \infty)$ 。

2 定理的证明

定理 1 的证明: 任取 $\{y_k\} \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n T_n B_n(S)$, 分以下几种情况来讨论:

(1) $\{y_k\}$ 有如下形式的子列: $\{A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_0\}$, 这里 $x_0 \in S$ 。 $\because \{A_n\}$ 是有界线性算子, $\therefore \|A_n\| \leq M, n = 1, 2, \dots, M$ 为正的常数。又 $\because \{T_n\}$ 是总体列紧的, $\therefore$ 据总体列紧的定义及列紧集的性质知, 点列 $\left\{\frac{1}{M} T_{n_k} B_{n_k} x_0\right\}$ 有收敛子列。为方便记, 不妨设:

$T_{n_k} B_{n_k} x_0 \rightarrow y_0, (k \rightarrow \infty), y_0 \in X$ 据已知条件 A_n 强收敛于 A , 故有 $A_{n_k} y_0 \rightarrow A y_0, (k \rightarrow \infty)$, 从而

$$\begin{aligned} \|A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_0 - A y_0\| &\leq \|A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_0 - A_{n_k} y_0\| \\ &+ \|A_{n_k} y_0 - A y_0\| \\ &\leq \|A_{n_k}\| \cdot \|T_{n_k} B_{n_k} x_0 - y_0\| + \|A_{n_k} y_0 - A y_0\| \\ &\rightarrow 0, (k \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

因此 $\{A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_0\}$ 收敛, 从而有收敛子列。

(2) $\{y_k\}$ 的子列为: $\{A_{n_0} T_{n_0} B_{n_0} x_k\}$, 其中 $x_k \in S, \because \{A_n\}$ 是有界线性算子, $\therefore \|A_n\| \leq M, n = 1, 2, \dots$, 又 $\because \{T_n\}$ 是总体列紧的, $\therefore T_{n_0}$ 是紧算子, 据紧算子定义知, 点列 $\left\{\frac{1}{M} T_{n_0} B_{n_0} x_k\right\}$ 有收敛子列, 类似

于(1)的讨论, 子列 $\{A_{n_0} T_{n_0} B_{n_0} x_k\}$ 收敛。

(3) 异于(1)(2)的情形, 设 $\{y_k\}$ 子列为: $\{A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_k\}$, 这里 $x_k \in S, \because \{T_n\}$ 是总体列紧的, $\therefore$ 点列 $\left\{\frac{1}{M} T_{n_k} B_{n_k} x_k\right\}$ 有收敛子列, 不妨设: $T_{n_k} B_{n_k} x_k \rightarrow y_0, (k \rightarrow \infty), y_0 \in X$ 则也有: $A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_k \rightarrow A y_0, (k \rightarrow \infty)$ 。因此 $\{A_{n_k} T_{n_k} B_{n_k} x_k\}$ 有收敛子列。

综上所述, 不任哪种情形, $\{y_k\}$ 都有收敛子列, 故点集 $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n T_n B_n(S)$ 列紧, 又因列紧集的闭包是列紧集, 因此点集 $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n T_n B_n(S)$ 的闭包列紧, 从而算子列 $\{A_n T_n B_n\}$ 是总体列紧的。

定理 2 的证明: 由 p -阶拟总体列紧的定义立即可知, 相关结论对 p -阶拟总体列紧的情形也是成立的。

定理 3 的证明: 文献[1]已证明了定理 3, 这里我们给出定理 3 的另一种证法。

由于 $\{T_n\}$ 拟总体列紧, 故

$$T_n = K_n + R_n, n = 1, 2, \dots$$

此处 $\{K_n\}$ 是总体列紧的, $\|R_n\| \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$, 由定义知 $\bigcup_{n=1}^{\infty} K_n(S)$ 是列紧集, 又已知对 $\forall x \in X$, 有 $T_n x \rightarrow 0, (n \rightarrow \infty)$, 推知对 $\forall x \in X$ 也有 $K_n x \rightarrow 0, (n \rightarrow \infty)$, 因列紧集必定全有界, 故 $\bigcup_{n=1}^{\infty} K_n(S)$ 是全有界集, 极限 $K_n x \rightarrow 0, (n \rightarrow \infty)$ 在 $\bigcup_{n=1}^{\infty} K_n(S)$ 上一致成立。从而 $\forall \varepsilon > 0, \exists N = N(\varepsilon)$, 当 $n \geq N$ 时, 有 $\|K_m(K_n x)\| < \varepsilon, m = 1, 2, \dots, x \in S$

亦即当 $n \geq N$ 时, 有

$$\|K_n^2 x\| \leq \varepsilon, x \in S$$

于是当 $n \geq N$ 时,

$$\|K_n^2\| \leq \varepsilon$$

又因 $\{K_n\}$ 是有界线性算子, 故 $\{\|K_n\|\}$ 有界, 于是由

$$T_n^2 = (K_n + R_n)^2 = K_n^2 + K_n R_n + R_n K_n + R_n^2$$

可知

$$\begin{aligned} \|T_n^2\| &= \|K_n^2 + K_n R_n + R_n K_n + R_n^2\| \\ &\leq \|K_n^2\| + \|K_n R_n\| + \|R_n K_n\| + \|R_n^2\| \\ &\rightarrow 0, (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

又由于

$$\begin{aligned} \gamma_\sigma(T_n) &= \lim_{m \rightarrow \infty} \|T_n^{2^m}\|^{\frac{1}{2^m}} = \inf_{m \geq 1} \|T_n^{2^m}\|^{\frac{1}{2^m}} \leq \\ &\|T_n^2\|^{\frac{1}{2}} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

解抛物型方程的一族三层九点隐格式

谭志明

(广东开放大学 广东理工职业学院 公共教学部, 广州 510091)

摘 要:提出了求解一维抛物型方程的一族三层九点隐式格式。格式的截断误差为 $O(\tau^2 + h^4)$ 。利用 Fourier 方法证明了当 $r > 1/3$ 时,差分格式是稳定的。通过数值试验,比较了差分格式的解与精确解的差别,说明了差分格式的有效性。
关键词:一维抛物型方程;隐式差分格式;截断误差

中图分类号:O241. 82 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0003-04
DOI:10. 13774/j.cnki.kjtb.2020. 03. 002

A Class of Implicit Difference Schemes of Three-level Nine Points for Solving The Parabolic Equations

Tan Zhiming

(Department of Public Teaching, The Open University of Guangdong, Guangdong Polytechnic Institute, Guangzhou 510091, China)

Abstract:Proposed in this paper is a class of three-level implicit difference schemes for solving one-dimension parabolic equation. The truncation error of the schemes are $O(\tau^2 + h^4)$. By Fourier method, the difference schemes are proved to be unconditionally stable if $r > 1/3$. The numerical experiment showed the difference schemes are effective and theoretical analysis of them coincides with practical calculation of them.
Keywords:one-dimension parabolic equation; implicit difference schemes; truncation error

在渗流、扩散、热传导等领域中经常会遇到求解抛物型方程的问题.在一维的情形,其模型为初边值问题

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T, a > 0 \\ u(x, 0) = \varphi(x), 0 \leq x \leq L \\ u(0, t) = u(L, t) = 0, 0 \leq t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

对问题(1)的求解,有限差分法是解决此类问题的常用方法,常见的差分格式^[1,2],诸如古典隐格式, Crank-Nicolson 格式和 Dufort-Frankel 格式等,虽

都是绝对稳定的,但它们的截断误差均较低.前两者分 别 是 $O(\tau + h^2)$, $O(\tau^2 + h^2)$; 后 者 为 $O\left(\tau^2 + h^2 + \left(\frac{\tau}{h}\right)^2\right)$, 当 $\tau = h$ 时还失去了相容性。因此,欲获得高精度的解,时间及空间步长就必须取得足够小,这就大大增加了计算的工作量和存储量。对上述问题的改进,目前已经有了许多好的研究成果^[3-10]。本文构造了一族三层九点隐式差分格式求解方程(1),格式精度达到 $O(\tau^2 + h^4)$,并且证明了当 $r > 1/3$,格式是无条件稳定的。

1 格式的构造

设时间步长为 τ , 空间步长为 $h = L/M$ (M 为正整数), 对区域 $[0, L] \times [0, T]$ 作矩形剖分, 取局部结点集为 $\{(x_{j-1}, t_{n+1}), (x_j, t_{n+1}), (x_{j+1}, t_{n+1}), (x_{j-1}, t_n), (x_j, t_n), (x_{j+1}, t_n), (x_{j-1}, t_{n-1}), (x_j, t_{n-1}), (x_{j+1}, t_{n-1})\}$

其中 $x_j = jh, t_n = n\tau$, 并令 $u_j^n = u(x_j, t_n)$ 。

当问题(1)的解充分光滑时, 有关系式

$$\frac{\partial^{m+n} u}{\partial x^m \partial t^n} = a^n \frac{\partial^{m+2n} u}{\partial x^{m+2n}}, \quad m, n \in N \quad (2)$$

将 9 个节点上 u 的值在节点 $(jh, n\tau)$ 处作 Taylor 展开, 并使用(2)式进行整理, 可导出各差商的渐近表达式:

$$\Delta_t u_{j-1}^n = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n - ha \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_j^n + \frac{h^2 a(r+1)}{2} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n - \frac{h^3 a(3r+1)}{6} \left(\frac{\partial^5 u}{\partial x^5}\right)_j^n + O(\tau^2 + h^4)$$

$$\Delta_t u_j^n = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n + \frac{h^2 ar}{2} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + O(\tau^2)$$

$$\Delta_t u_{j+1}^n = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n + ha \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_j^n + \frac{h^2 a(r+1)}{2} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + \frac{h^3 a(3r+1)}{6} \left(\frac{\partial^5 u}{\partial x^5}\right)_j^n + O(\tau^2 + h^4)$$

$$\Delta_t u_{j-1}^{n-1} = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n - ha \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_j^n + \frac{h^2 a(r+1)}{2} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n - \frac{h^3 a(1-3r)}{6} \left(\frac{\partial^5 u}{\partial x^5}\right)_j^n + O(\tau^2 + h^4)$$

$$\Delta_t u_j^{n-1} = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n - \frac{h^2 ar}{2} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + O(\tau^2)$$

$$\Delta_t u_{j+1}^{n-1} = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n + ha \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_j^n + \frac{h^2 a(1-r)}{2} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + \frac{h^3 a(1-3r)}{6} \left(\frac{\partial^5 u}{\partial x^5}\right)_j^n + O(\tau^2 + h^4)$$

$$\delta_x^2 u_j^{n+1} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_j^n + h^2 \left(r + \frac{1}{12}\right) \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + O(\tau^2 + h^4)$$

$$\delta_x^2 u_j^{n-1} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_j^n + h^2 \left(-r + \frac{1}{12}\right) \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n +$$

$$O(\tau^2 + h^4)$$

$$\text{其中 } r = \frac{a\tau}{h^2}, \Delta_t u_j^n = \frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau}, \delta_x^2 u_j^n =$$

$$\frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2}, \text{ 其余类推。}$$

用上述差商建立含多参数的差分算子:

$$L_h u_j^n = \frac{c_1}{3} (\Delta_t u_{j-1}^n + \Delta_t u_j^n + \Delta_t u_{j+1}^n) + \frac{c_2}{3} (\Delta_t u_{j-1}^{n-1} + \Delta_t u_j^{n-1} + \Delta_t u_{j+1}^{n-1}) - ac_3 \delta_x^2 u_j^{n+1} - ac_4 \delta_x^2 u_j^{n-1} \quad (3)$$

逼近微分算子

$$L_u = \frac{\partial u}{\partial t} - a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

其中 $c_i (i = 1, \dots, 4)$ 是待定系数, 把各差商的渐近表达式代入(3), 整理得:

$$L_h u_j^n = (c_1 + c_2) \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_j^n - (c_3 + c_4) a \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_j^n + ah^2 r \left[\frac{1}{2}(c_1 - c_2) - (c_3 - c_4) \right] \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + \frac{ah^2}{12} [4(c_1 + c_2) - (c_3 + c_4)] \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}\right)_j^n + O(\tau^2 + h^4) \quad (5)$$

为了使式(5)的截断误差达到 $O(\tau^2 + h^4)$, 须解下列方程组

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = 1 \\ c_3 + c_4 = 1 \\ \frac{1}{2}(c_1 - c_2)r + \frac{1}{3} = \frac{1}{12} + (c_3 - c_4)r \end{cases} \quad (6)$$

在方程组(6)中, 令 $c_4 = \theta$, 可解得: $c_1 = \frac{6r - 8r\theta - 1}{4r}, c_2 = \frac{8r\theta - 2r + 1}{4r}, c_3 = 1 - \theta$, 得到一族含参数的三层九点隐式差分格式

$$(12r^2\theta - 12r^2 + 6r - 8r\theta - 1)(u_{j+1}^{n+1} + u_{j-1}^{n+1}) + (6r - 8r\theta - 1 + 24r^2 - 24r^2\theta)u_j^{n+1} = (8r - 16r\theta - 2)(u_{j+1}^n + u_{j-1}^n) + (8r - 16r\theta - 2)u_j^n + (12r^2\theta + 8r\theta - 2r + 1)(u_{j+1}^{n-1} + u_{j-1}^{n-1}) + (8r\theta - 2r + 1 - 24r^2\theta)u_j^{n-1} \quad (7)$$

2 稳定性和收敛性

利用 Fourier 分析法, 可算出格式(7)的传播矩阵为

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{aligned} g_{11} &= \frac{24r - 48r\theta - 6 + (-32r + 64r\theta + 8)s}{18r - 24r\theta - 3 + (-48r^2\theta + 48r^2 - 24r + 32r\theta + 4)s}, \\ g_{12} &= \end{aligned}$$

$$\frac{24 r \theta - 6 r + 3 + (-48 r^2 \theta - 32 r \theta + 8 r - 4) s}{18 r - 24 r \theta - 3 + (-48 r^2 \theta + 48 r^2 - 24 r + 32 r \theta + 4) s},$$

$$g_{21} = 1, g_{22} = 0, s = \sin^2 \frac{kh}{2} \in [0, 1]$$

传播矩阵 $G(s)$ 的特征方程为

$$\lambda^2 - g_{11} \lambda - g_{12} = 0 \quad (8)$$

引理 1^[11] 特征方程(8)的根满足 $|\lambda_{1,2}| \leq 1$ 的充要条件是

$$|g_{11}| \leq 1 - g_{12} \leq 2 \quad (9)$$

引理 2^[11] 差分格式(5)稳定, 即矩阵族 $G^n(s)$ ($s \in [0, 1], n = 1, 2, \dots$) 一致有界的充要条件是

(1) $|\lambda_{1,2}| \leq 1$ ($\lambda_{1,2}$ 是方程(8)的两个根);

(2) 使 $1 - g_{11}^2/4 = g_{11}^2 + 4g_{12} = 0$ 成立的 s 或不存在, 或不属于区间 $[0, 1]$ 。

首先考虑条件(2), 当 $g_{12} \neq -1$ 时, 使 $1 - g_{11}^2/4 = g_{11}^2 + 4g_{12} = 0$ 的 s 不存在。再由条件(1)和式(9)知, 格式(5)稳定的条件为 $-1 + g_{12} \leq g_{11} \leq 1 - g_{12} < 2$ 。

由 $g_{11} \leq 1 - g_{12}$ 得

$$\frac{-24 r \theta + 18 r - 3 + (-48 r^2 \theta + 32 r \theta - 24 r + 4) s}{18 r - 24 r \theta - 3 + (-48 r^2 \theta + 48 r^2 - 24 r + 32 r \theta + 4) s} \leq 1 \quad (10)$$

为确定起见, 不妨假定

$$18 r - 24 r \theta - 3 + (-48 r^2 \theta + 48 r^2 - 24 r + 32 r \theta + 4) s > 0$$

该式成立的一个充分条件是

$$18 r - 24 r \theta - 3 > 0 \quad (11)$$

$$-48 r^2 \theta + 48 r^2 - 6 r + 8 r \theta + 1 > 0 \quad (12)$$

由(11)式解得

$$\theta < \frac{6 r - 1}{8 r} \quad (13)$$

当 $r > \frac{1}{6}$ 时, 由(12)式解得

$$\theta < \frac{48 r^2 - 6 r + 1}{8 r(6 r - 1)} \quad (14)$$

而 $\frac{6 r - 1}{8 r} < \frac{48 r^2 - 6 r + 1}{8 r(6 r - 1)}$ 成立, 故(13)式优于(14)式, (13)式成立时(14)式也成立。

当(11), (12)两式成立时, 可得到(10)式对任意 $r > 0$ 均成立, 故(10), (11), (12)三式同时成立的一个充分条件是

$$r > \frac{1}{6} \text{ 且 } \theta < \frac{6 r - 1}{8 r}$$

又由 $1 - g_{12} < 2$ 可得

$$12 r + (48 r^2 - 16 r - 96 r^2 \theta) s > 0$$

该式成立的一个充分条件是

$$-4 r + 48 r^2 - 96 r^2 \theta > 0 \quad (15)$$

由(15)式解得

$$\theta < \frac{12 r - 1}{24 r} \quad (16)$$

而当 $r > \frac{1}{3}$ 时, $\frac{6 r - 1}{8 r} > \frac{12 r - 1}{24 r}$ 成立, 故

(16)式优于(13)式, (16)式成立时(13)式也成立。

再由 $-1 + g_{12} \leq g_{11}$ 得

$$-48 r + 96 r \theta + 12 + (64 r - 16 - 48 r^2 - 128 r \theta) s \leq 0$$

上式成立的一个充分条件是

$$-4 r + 8 r \theta + 1 \leq 0 \quad (17)$$

$$16 r - 4 - 48 r^2 - 32 r \theta \leq 0 \quad (18)$$

由(17)式解得

$$\theta \leq \frac{4 r - 1}{8 r} \quad (19)$$

由(18)式解得

$$\theta \geq \frac{4 r - 1 - 12 r^2}{8 r} \quad (20)$$

而 $\frac{4 r - 1}{8 r} < \frac{12 r - 1}{24 r}$ 成立, 故(19)式优于

(16)式, (19)式成立时(16)式也成立。

综上所述, 并根据 Lax 的稳定性与收敛性等价定理可得

定理 1 当 $r > \frac{1}{3}$ 且 $\frac{4 r - 1 - 12 r^2}{8 r} \leq \theta \leq \frac{4 r - 1}{8 r}$ 时, 差分格式(5)稳定且收敛。

特别地, 当 $\theta = \frac{4 r - 1 - 12 r^2}{8 r}$ 时, 格式(7)成为

$$\begin{aligned} & \left(-18 r^3 + 6 r^2 + \frac{r}{2} \right) (u_{j+1}^{n+1} + u_{j-1}^{n+1}) + \\ & (36 r^3 + 24 r^2 + 5 r) u_j^{n+1} = 24 r^2 (u_{j+1}^n + u_{j-1}^n) + \\ & 24 r^2 u_j^n + \left(-18 r^3 - 6 r^2 + \frac{r}{2} \right) (u_{j+1}^{n-1} + u_{j-1}^{n-1}) + \\ & (36 r^3 - 24 r^2 + 5 r) u_j^{n-1} \end{aligned} \quad (21)$$

3 数值例子

考虑扩散方程

表 1 格式 (21) 和 C-N 格式的数值解与精确解的比较

Table 1 Comparing the difference scheme (21) and the C-N scheme's solution with the precise solution

<i>r</i>	项目	<i>x</i> = 0.1	<i>x</i> = 0.3	<i>x</i> = 0.5	<i>x</i> = 0.7	<i>x</i> = 0.9
0.5	精确解	0.06055202	0.17924206	0.29078628	0.39073777	0.47511178
	C-N 格式	0.06055423	0.17924810	0.29079445	0.39074538	0.47511532
	格式(21)	0.06055203	0.17924208	0.29078631	0.39073780	0.47511179
1	精确解	0.03672666	0.10871580	0.17637079	0.23699444	0.28816986
	C-N 格式	0.03672801	0.10871951	0.17637580	0.23699909	0.28817202
	格式(21)	0.03672667	0.10871585	0.17637086	0.23699450	0.28816989
2	精确解	0.01351098	0.03999431	0.06488319	0.08718538	0.10601176
	C-N 格式	0.01351147	0.03999566	0.06488501	0.08718708	0.10601255
	格式(21)	0.01351100	0.03999438	0.06488328	0.08718547	0.10601181
4	精确解	0.00182851	0.00541264	0.00878098	0.01179925	0.01434713
	C-N 格式	0.00182857	0.00541281	0.00878122	0.01179948	0.01434723
	格式(21)	0.00182852	0.00541268	0.00878104	0.01179931	0.01434715

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, 0 < x < 1, t > 0 \\ u(x, 0) = \sin x, 0 \leq x \leq 1 \\ u(0, t) = 0, u(1, t) = e^{-t} \sin 1, t \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

利用格式 (21) 求数值解, 并与精确解进行比较。由于格式 (21) 是一个三层格式, 因此初始条件还需加上 u_j^1 的值, 为简便起见, 我们用式 (22) 的精确解 $u(x, t) = e^{-t} \sin x$ 计算第一层 u_j^1 的值。取 $M = 20, h = \frac{1}{20}, x_j = jh (j = 0, 1, \cdots, M), t_n = n\tau (n = 0, 1, \cdots), r = \frac{\tau}{h^2}$ 为网格比。当 r 分别取 0.5、1、2 和 4 时,

将本文格式 (21) 和经典的 Crank-Nicolson 格式的数值解与方程 (22) 的精确解进行比较, 计算到 $n = 400$ 时结果如表 1。

从表 1 可以看出, 本文所构造的格式比 C-N 格式的误差精度高 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 。格式的解与精确解有很好的吻合, 这与理论分析完全一致, 说明本文所构造的差分格式是一族有效的高精度隐式差分格式。

参考文献:

[1] 陆金甫, 关治. 偏微分方程数值解法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 82-85.
[2] 戴嘉尊, 邱建贤. 微分方程数值解法 [M]. 南京: 东南

大学出版社, 2008: 47-56, 79-83.
[3] Ma Mingshu, Wang Xiaofeng. An explicit difference scheme with high accuracy and branching stability for solving parabolic partial differential equation [J]. Chinese Quarterly Journal of Mathematics, 2000, 15 (4): 99-103.
[4] Ma Mingshu, Wang Xiaofeng. A-high-order Accuracy implicit difference scheme for solving the equation of parabolic type [J]. Chinese Quarterly Journal of Mathematics, 2000, 15 (2): 94-97.
[5] 徐金平, 单双荣. 解抛物型方程的一个高精度显示差分格式 [J]. 华侨大学学报, 2009, 30 (4): 473-475.
[6] 詹涌强. 解抛物型方程的一族六点隐式差分格式 [J]. 安徽大学学报, 2012, 36 (4): 26-29.
[7] 詹涌强. 求解热传导方程的一个高精度格式 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2015, 40 (1): 18-22.
[8] 田振夫. 解抛物型方程的一种高精度加权差分格式 [J]. 吉林大学自然科学学报, 1997 (3): 31-33.
[9] 马明书. 解抛物型方程的一个高精度两层显格式 [J]. 河南师范大学学报 (自然科学版), 2001, 24 (1): 80-81.
[10] 张莉, 张大凯. 解抛物型方程组合差商法 [J]. 贵州大学学报, 2004, 21 (4): 349-353.
[11] 马驹良. 二阶矩阵族 $G^n(k, \Delta t)$ 一致有界的充要条件及其对差分方程稳定性的应用 [J]. 高等学校计算数学学报, 1980: 2 (2): 41-53.

多尺度内聚力有限元方法在锂离子电池中的应用

陈 莉^{1, 2}, 刘立胜^{1, 2*}, 刘齐文^{1, 2}

(1. 武汉理工大学 理学院 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室,
武汉 430070; 2. 武汉理工大学 力学系, 武汉 430070)

摘 要:锂离子电池电极材料中锂离子扩散与结构应力的耦合作用是影响电池性能和安全的重要因素,为了模拟该过程中的浓度扩散和应力演化,提出了一种基于多尺度内聚力有限元方法的扩散-应力耦合模型,通过将化学能与应变能相结合,分别建立浓度场及应力场控制方程并推导了其有限元格式。以负极材料薄膜硅为例建立了二维的数值算例模型,计算了无晶界和含晶界情况下,不考虑材料损伤的电极材料中由于锂离子嵌入所引起的浓度及应力变化。多尺度有限元模型从原子尺度出发计算结构应力,丰富了材料的本构关系和物理性质,内聚力单元在描述界面处的物理特性如浓度、应力时具有很高的灵活性和有效性,该模型的提出为更准确地理解锂离子电池电极中的锂离子扩散-应力耦合过程提供了理论方法。

关键词:锂离子电池;扩散-应力耦合;多晶电极;多尺度方法;内聚力有限元

中图分类号:O331 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0007-09
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.003

Application of Multiscale Cohesive Finite Element Method in
Lithium-ion Battery

Chen Li^{1, 2}, Liu Lisheng^{1, 2*}, Liu Qiwen^{1, 2}

(1. Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Department of Engineering
Structure and Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The coupling of lithium-ion diffusion and stress in the electrode material of lithium-ion battery is an important factor affecting the performance and safety of the battery. In order to simulate the concentration variation and stress evolution in this process, a diffusion-mechanics coupling model based on the multiscale cohesive finite element method is proposed, where the controlling equations of stress field and concentration field are established by combining the chemical energy with the strain energy and the finite element formula of this model is deduced. A two-dimensional numerical calculation of the concentration and stress variation caused by lithium ion intercalation in the electrode in the case of grain boundaries-free and grain boundaries-containing is both established by taking the thin-film silicon as an example without considering the material damage. With the atomistic information, the mesoscale constitutive relations and physical properties of materials are enriched. The cohesive elements have high flexibility and effectiveness in describing the physical properties such as concentration and stress at the

收稿日期:2019-03-19
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018IB006)。
作者简介:陈莉(1995-),湖南省郴州市,硕士研究生,研究方向:计算力学与数值仿真。
* 通信作者:刘立胜(1969-),湖北省武汉市,教授,研究方向:计算力学及其应用。

interface. With the newly coupled approach, a more realistic understanding of diffusion-mechanics coupling process in electrodes of lithium-ion battery can be provided.

Keywords: lithium-ion battery; diffusion-mechanics coupling; polycrystalline electrode; multiscale method; cohesive finite element

锂离子电池由于其能量密度高、重量轻等诸多优点而备受关注,作为可充电电池,其依靠锂离子在正负极间的移动扩散来工作。目前主流的锂离子电池以碳基、硅基材料为负极,正极主要使用过渡金属氧化物如钴酸锂、锰酸锂等。所有这些电极材料都要受到来自电池充放电过程中锂离子的反复嵌入和脱出而引起的体积膨胀和收缩,由此产生的应力可引起材料的开裂和失效,威胁电池安全的同时也会导致其容量的损失和能量的衰减^[1]。可见,锂离子电池中电极材料的力学损伤是影响电池性能的重要因素。浓度和应力梯度驱使锂离子进行扩散,而离子浓度变化引起的体积应变又导致材料产生应力,对于各种电极材料中的这一耦合过程已有大量研究。Swaminathan^[2]对离子固体中的力-化耦合做了较为详细的理论介绍,基于这一理论,锂离子在电极中的扩散势和应力势被提出^[3]并广泛运用于负极材料中扩散-应力耦合的模拟^[4,5]。但这些模型多未考虑结构的微观特性,而电极材料的微观结构对锂离子的扩散和应力的产生都有重要影响,尤其对于含有晶界的多晶态电极材料,晶粒之间的扩散在锂传输中起着重要作用^[6],有大量实验在正极与负极多晶材料中均观测到沿晶断裂的现象,并指出这一现象对于材料的电化学性能和力学性能都存在至关重要的影响^[7,8]。为了模拟多晶材料中的锂离子扩散及其应力演化,一些学者利用相场方法从二维^[9]、三维^[10]角度模拟分析了锂离子在钴酸锂中的晶间扩散及晶粒尺寸等微观属性对该过程的影响,但是在应力计算及对结构破坏的模拟方面有待完善。

对于多晶电极材料中锂离子扩散及应力情况的模拟,与多晶模型相结合的多尺度内聚力有限元方法是一种行之有效的方法。多尺度内聚力有限元方法是一种将基于原子尺度的 Cauchy-Born 准则和内聚力有限元法相结合的多尺度方法。基于这种方法,大量的研究成果涌现并致力于解决一些实际问题,如高弹材料、复合材料、晶体材料等各种材料的破坏问题^[11-13],多晶结构的破坏问题^[14,15]。Liu^[16]还将该方法与温度计算相耦合用于模拟有限温度下的材料强度问题。这些工作证明了该方法的有效性

和与其他问题相结合的可行性。本文基于多尺度内聚力有限元法,在系统中引入化学能,推导了扩散-应力耦合方程及其有限元格式,以负极材料薄膜硅为例,从二维角度对无晶界和含晶界情况下的电极材料中由于锂离子嵌入所引起的浓度及应力变化均进行了模拟。

1 锂化过程中的扩散和变形

在锂离子电池的充放电过程中,锂离子在两种电极之间往返嵌入和脱嵌:充电时,锂离子从正极脱嵌,经过电解质嵌入负极,放电时则相反。该反应不断发生,使得电极材料中的锂离子浓度不断变化,进而产生变形引起结构应力。该过程主要由锂离子的扩散所控制,而锂离子在固体中的扩散与浓度梯度、应力和过电势等有关。为简化问题,本文仅考虑浓度梯度和应力对扩散过程的影响,将电势等其它因素的影响均纳入扩散系数中,且假设扩散是各项同性的。

下面引入两种对锂浓度的不同描述,摩尔浓度(单位体积混合物中所含锂的摩尔数)和摩尔分数,本文用 $\bar{c}$ (mol/L) 和 c (无量纲) 分别表示摩尔浓度和摩尔分数,记反应过程中电极材料中的最大锂离子摩尔浓度为 $\bar{c}_{\max}$, 则有以下关系:

$$c = \frac{\bar{c}}{\bar{c}_{\max}} \quad (1)$$

本文以摩尔分数 c 为研究对象,下文所说浓度均指摩尔分数 c 。

整个锂化过程的变形 F 主要包含两部分:一部分是浓度变化所引起的变形 F^c , 另一部分是组分间变形的不协调性所导致的弹性变形 F^* :

$$F_{ij} = F_{ik}^* F_{kj}^c = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (2)$$

为简化问题,假设由浓度变化导致的变形 F^c 是各项同性的体积膨胀:

$$F_{ij}^c = (J^c)^{1/3} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$J^c = 1 + V_{Li}(\bar{c} - \bar{c}_0) = 1 + V_{Li}(c\bar{c}_{\max} - c_0\bar{c}_{\max}) \quad (4)$$

式中, V_{Li} 为锂的摩尔体积, c_0 和 c 分别表示参考构型和当前构型的浓度。

2 基于 Cauchy-Born 准则的多尺度内聚力有限元方法

在本文所采用的多尺度内聚力有限元方法中包含 3 种类型的单元,即体单元;用于描述材料破坏的内聚力单元,用于描述晶界的内聚力单元。内聚力单元是在任意一对三角形体单元相邻边之间的窄条状四边形单元,如图 1。

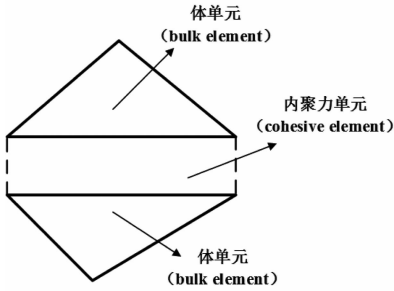


图 1 本文所用单元类型

Fig.1 Element type used in this paper

为了计算单元内的应力,Cauchy-Born 准则被同时应用于体单元和内聚力单元^[11],具体做法为:考虑一个维格纳-赛兹原胞如图 2,假设单元内积分点处的变形是均匀的,则每个积分点的变形梯度为 F_e ,晶胞内任意一个键矢量 r_i 都可以通过其对应的布拉菲晶格矢量变换得到,如图 3 所示,也就是由未变形的键矢量 R_i 变换得到变形后的矢量 r_i :

$$r_i = F_e R_i, i = 1, 2, \dots, n_b \quad (5)$$

式中, n_b 是晶胞中的原子键数目。

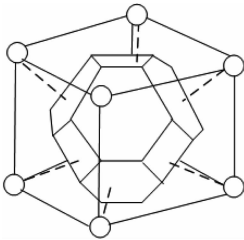


图 2 体心立方点阵的维格纳-赛兹原胞示意图

Fig.2 Schematic diagram of Wigner-Seitz unit cell of body-centered cubic lattice

系统内亥姆霍兹自由能由应变能和化学能组成,一个原胞的自由能 $\sum_{uc}$ 可表示为:

$$\sum_{uc} (F, c) = W_{uc}(F) + \Omega_0^{uc} \varphi(c) \quad (6)$$

式中 W_{uc} 为一个原胞的应变能, φ 为化学能密度。

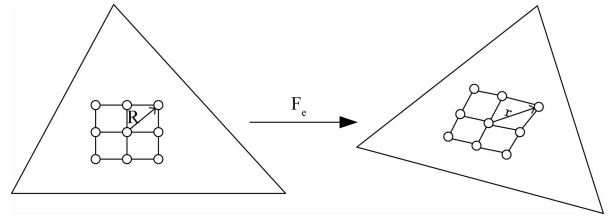


图 3 基于 Cauchy-Born 准则的单元变形示意图

Fig.3 Schematic diagram of element deformation based on Cauchy-Born rule

而由于单元内的变形是均匀的,其弹性应变能密度 W_e 可以通过单元内任意原胞的势能密度来计算:

$$W_e(F) = \frac{W_{uc}}{\Omega_0^{uc}} = \frac{1}{\Omega_0^{uc}} \sum_{i=1}^{n_b} \varphi(r_i) \quad (7)$$

式中, Ω_0^{uc} 是参考构型的原胞体积, $\varphi(r_i)$ 是原子作用势, $r_i, i = 1, 2, \dots, n_b$ 是原胞内当前键的键长。键长是晶胞所属单元变形梯度的函数:

$$r_i = |r_i| = r_i(F) \quad (8)$$

由此就可以建立体单元内的本构关系,假设化学能与变形梯度无关而仅与浓度有关,PK-I 应力可以写成如下表达:

$$P = \frac{1}{\Omega_0^{uc}} \frac{\partial W_{uc}}{\partial F} = \frac{1}{\Omega_0^{uc}} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{\partial \varphi}{\partial r_i} \frac{r_i \otimes R_i}{r_i} \quad (9)$$

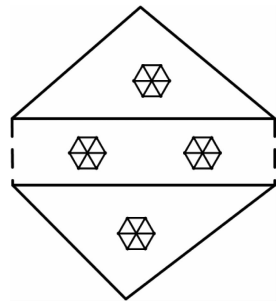


图 4 单元积分点

Fig.4 Integration points of the element

由 Cauchy-Born 准则,只要知道了每个单元的变形梯度就可以计算它的应力状态,对于均匀变形的体单元来说,由一个单元内的一个原胞,仅用一个积分点就可以完成该单元内的积分运算,但是内聚力单元是高度非线性和非均匀的,直接运用 Cauchy-Born 准则会使计算不够准确,因此我们可以通过高阶插值和增加积分点的方法来捕捉单元内的不均匀变形。为简化计算^[18],本文只用了两个积分点来对内聚力单元内的弱形式方程进行积分,每个积分点代表一个原胞,如图 4 所示。

内聚力单元作为 2 个均匀材料单元的弱连接,有着与体单元不同的材料特性,我们采用一种胶状晶体方法,认为材料中内聚力的本质是一种胶体附着力,保持原始的晶体结构不变,用胶体物理中的损耗势代替本来的原子间作用势。该损耗势可以通过解析积分来得到:

$$\varphi_{\text{cohe}}(r) = \int_{\text{halfspace}} \beta \varphi_{\text{bulk}}(r - r') dV' \quad (10)$$

式中, φ_{cohe} 是内聚力单元的势能, φ_{bulk} 是体单元的势能, β 是单位体积的原子数。

由于内聚力单元与体单元共用结点,其变形梯度等信息均可以由形成该内聚力单元的 2 个体单元的相邻结点的结点位移获得。与体单元相同的,内聚力单元内的 PK-I 应力可以由下式计算:

$$P = \frac{1}{\Omega_0^c} \frac{\partial W^c}{\partial F^c} = \frac{1}{\Omega_0^c} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{\partial \varphi_{\text{cohe}}}{\partial r_i} \frac{r_i \otimes R_i}{r_i} \quad (11)$$

式中上标 c 表示内聚力单元。

3 扩散-应力耦合方程

如前所述,本文所研究的系统内原胞自由能由应变能和化学能组成,表达式如下:

$$\prod_{uc}(F, c) = \frac{1}{\Omega_0^{uc}} \sum_{i=1}^{n_b} \varphi(r_i) + \Omega_0^{uc} \varphi(c) \quad (12)$$

其中, Ω_0^{uc} 为一个原胞的体积, $\varphi(c)$ 为单位体积的化学能, c 作为方程的求解对象是一个独立的变量。

3.1 扩散方程

锂化过程主要由扩散势 μ 驱动,根据热力学平衡定律,可得:

$$\mu = \frac{1}{\bar{c}_{\max} \Omega_0^{uc}} \frac{\partial \prod_{uc}}{\partial c} \quad (13)$$

而扩散势包含化学反应引起的 μ_1 和应力引起的 μ_2 两部分,其中

$$\mu_1(c) = \frac{1}{\bar{c}_{\max}} \frac{\partial \varphi(c)}{\partial c} \quad (14)$$

$$\mu_2(F, c) = \frac{1}{\Omega_0^c \bar{c}_{\max}} \frac{\partial W_{uc}}{\partial c} \quad (15)$$

引入化学反应势的标准本构关系^[3],扩散势的应力无关项为:

$$\mu_1(c) = RT \ln(\gamma c) \quad (16)$$

式中, R 为理想气体常数, T 为开氏温度, γ 为反映原子间相互作用的活度系数,本文取 $\gamma = 1$, 则

可得

$$\mu_2(F, c) = \frac{1}{\bar{c}_{\max}} P : \frac{\partial F}{\partial c} \quad (17)$$

由式(3)~(4)可以得到

$$\frac{\partial F}{\partial c} = \frac{V_{Li} \bar{c}_{\max}}{3J^c} F \quad (18)$$

至此,得到了扩散势的表达式:

$$\mu = RT \ln(\gamma c) + \frac{V_{Li}}{3J^c} P : F \quad (19)$$

本文关于锂离子在电极中的扩散有两种假设:(1)锂离子在电极材料中的扩散行为符合菲克第二定律;(2)不考虑温度对扩散的影响。则由扩散势计算得到的单位面积的锂通量为:

$$j = - \frac{\bar{c}_{\max} c D}{RT} \nabla \mu = - \frac{\bar{c}_{\max} c D}{RT} \left(\frac{RT}{c} \nabla c + \nabla \mu_2 \right) \quad (20)$$

由菲克第二定律,扩散方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= - \frac{1}{\bar{c}_{\max}} \nabla \cdot j \\ &= D \left(\Delta c + \frac{c}{RT} \Delta \mu_2 + \frac{1}{RT} \nabla \mu_2 \cdot \nabla c \right) \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\mu_2 = \frac{V_{Li}}{3J^c} P : F \quad (22)$$

3.2 应力平衡方程

在连续介质力学中,系统的运动方程如下:

$$\nabla \cdot P + B - \rho \ddot{u} = 0 \quad (23)$$

式中, P 为 PK-I 应力, B 为体力, ρ 为材料的质量密度, u 为位移。

4 有限元格式

4.1 扩散方程

由伽辽金法,方程(21)可写为:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_0} \frac{\partial c}{\partial t} \delta c d\Omega - \int_{\Omega_0} D \Delta c \delta c d\Omega - \int_{\Omega_0} \frac{Dc}{RT} \Delta \mu_2 \delta c d\Omega - \\ \int_{\Omega_0} \frac{D}{RT} \nabla \mu_2 \cdot \nabla c \delta c d\Omega - \int_{\partial \Omega_0} \frac{1}{\bar{c}_{\max}} (j \cdot n - j_{BC}) \delta c d\partial\Omega - \\ \int_{\Omega_0} \frac{1}{\bar{c}_{\max}} (j \cdot n - j_{cz}) \delta c d\partial\Omega = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

其中, j_{BC} 表示边界处的锂离子通量边界条件,即单位时间通过单位面积的锂离子数,在晶界处的内聚力单元为 j_{cz} , 其计算方式同式(20)。进一步推出方程(24)的弱形式为:

$$\int_{\Omega_0} \frac{\partial c}{\partial t} \delta c d\Omega + \int_{\Omega_0} D \nabla c \cdot \nabla \delta c d\Omega + \int_{\Omega_0} \frac{Dc}{RT} \nabla \mu_2 \cdot \nabla \delta c d\Omega + \int_{\partial\Omega_0} \frac{1}{\bar{c}_{\max}} j_{BC} \delta c d\partial\Omega + \int_{\partial\Omega_0} \frac{1}{\bar{c}_{\max}} j_{cz} \delta c d\partial\Omega = 0 \quad (25)$$

在每个单元线性插值:

$$c = N\bar{c} \quad (26)$$

则由有限单元法标准离散化程序推导得到扩散方程的有限元方程:

$$\sum_e \left\{ \int_{\Omega_0^e} N^T N d\Omega \dot{\bar{c}} + \int_{\Omega_0^e} D \left[\frac{\partial N}{\partial X} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial X} \right] d\Omega \bar{c} + \int_{\Omega_0^e} \frac{D}{RT} \left[\frac{\partial N}{\partial X} \right]^T \{ \nabla \mu_2 \} N d\Omega \bar{c} + \int_{\Omega_0^e} N^T j_{BC} \cdot n d\partial\Omega + \int_{\partial\Omega_{cz}^e} N^T j_{cz} \cdot n d\partial\Omega \right\} = 0 \quad (27)$$

其中 N 为插值函数矩阵, $\bar{c}$ 为单元结点浓度列阵, X 为空间坐标向量。

4.2 应力平衡方程

由伽辽金法, 应力平衡方程(23)有如下表达:

$$\int_{\Omega_0} (\nabla \cdot P + B - \rho \ddot{u}) \cdot \delta u d\Omega - \int_{\partial\Omega_T} (P \cdot n - \bar{T}) \cdot \delta u d\partial\Omega - \int_{\partial\Omega_{cz}} (P \cdot n - T_{cohe}) \cdot \delta u d\partial\Omega = 0 \quad (28)$$

其中, $\bar{T}$ 为边界处的外力边界条件, 内聚力单元处为 $T_{cohe} = P_{cohe} \cdot n$ 。进一步推出其弱形式为:

$$\int_{\Omega_0} \rho \ddot{u} \delta u d\Omega + \int_{\Omega_0} P : \delta F d\Omega = \int_{\Omega_0} B \cdot \delta u d\Omega + \int_{\partial\Omega_T} \bar{T} \cdot \delta u d\partial\Omega + \int_{\partial\Omega_{cz}} T_{cohe} \cdot \delta u d\partial\Omega \quad (29)$$

在每个单元内对位移线性插值:

$$u = Nd \quad (30)$$

同样地由有限单元法标准离散化程序可得应力平衡方程的有限元格式:

$$\sum_e \left\{ \int_{\Omega_0^e} \rho N^T N d\Omega \ddot{d} + \int_{\Omega_0^e} \frac{\partial N^T}{\partial X} \cdot P d\Omega - \int_{\Omega_0^e} N^T B d\Omega - \int_{\partial\Omega_T^e} N^T \bar{T} d\partial\Omega - \int_{\partial\Omega_{cz}^e} N^T T_{cohe} d\partial\Omega \right\} = 0 \quad (31)$$

其中 d 为单元结点位移列阵。

5 数值算例应用与分析

5.1 计算模型与条件

为了验证本文理论的正确性, 以负极材料薄膜硅为例, 对锂离子在该材料中的扩散及应力演化进行二维情况的模拟。计算模型如图 5, 模型是尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的正方形。计算中各参数取值如表

1 所示。边界条件是四边均为固定浓度 1.0, 如图 5(a)。初始时刻除边界外浓度均为 0.1, 模型处于零应力状态。扩散系数取 $D = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

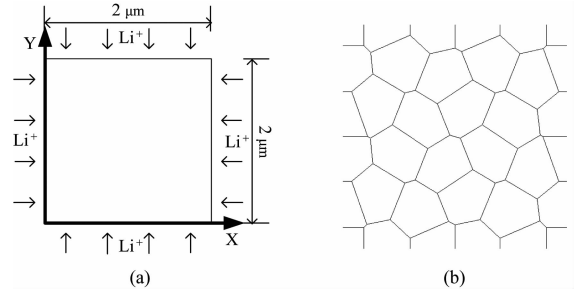


图 5 (a) 计算模型及锂离子浓度边界条件示意图 (b) Voronoi 划分

Fig.5 (a) Model and boundary condition for calculation (b) Sketch of Voronoi cell

含晶界情况的建模是应用二维 Voronoi 算法进行晶粒的几何建模, 采用多尺度内聚力模型模拟晶界的分离现象, 且为简化问题暂不考虑晶胞的晶向问题。如图 5(b), 每个 Voronoi 单元代表一个晶粒, 晶粒由三角形体单元来划分, 而晶界则由虚拟的内聚力单元来描述, 晶界宽度取为 10 nm。对于多晶情况也取 $D_{boundary} = D_{grain} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

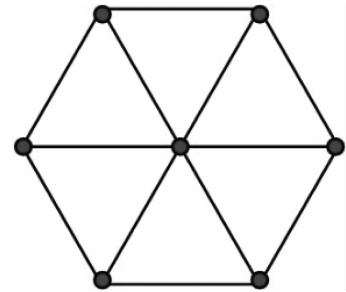


图 6 本文所用六方晶格原胞

Fig.6 Hexagonal lattice used in this paper

模型网格划分为 11072 个体单元和 16468 个内聚力单元。在此问题中, 将积分点上的原子构型用 1 个二维六方晶格原胞来表示, 如图 6 所示。采用标准的 L-J 作用势来描述体单元内的原子间作用:

$$\varphi_{bulk}(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (32)$$

对于内聚力单元, 其损耗势为:

$$\varphi_{cohe}(r) = \frac{\pi\varepsilon}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{45} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^9 - \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^3 \right] \quad (33)$$

计算中体单元和内聚力单元的所有材料参数取为相同, 势函数待定参数取 $\varepsilon = 3153 \text{ J/mol}$, $\sigma = 1.84 \text{ \AA}$ 。若要研究晶粒与晶界相对强度大小对模

拟结果的影响可将晶界处势阱深度 ε_{gb} 和晶粒处势阱深度 ε_g 取不同值,即若假设晶粒处的强度大于晶界处强度,则取 $\varepsilon_g > \varepsilon_{gb}$, 反之同理^[14]。由于暂不考虑对材料的破坏,本文假设内聚力单元的势阱深度均与体单元相同,算例计算所用参数取值均列在表 1 中。

表 1 本文所用参数	
Table 1 Parameters used in the simulation	
参数	取值
LJ 势能参数 $\varepsilon/(\text{J/mol})$	3153 ^[17]
LJ 势能参数 σ/nm	0.184 ^[17]
气体常数 $R/(\text{J/K/mol})$	8.314
温度 T/K	300
锂离子摩尔体积 $V_{Li}/(\text{m}^3/\text{mol})$	8.5×10^{-6} ^[18]
最大锂离子浓度 $\bar{c}_{\max}/(\text{mol/m}^3)$	1.18×10^4 ^[18]
扩散系数 $D/(\text{m}^2/\text{s})$	1.0×10^{-7}

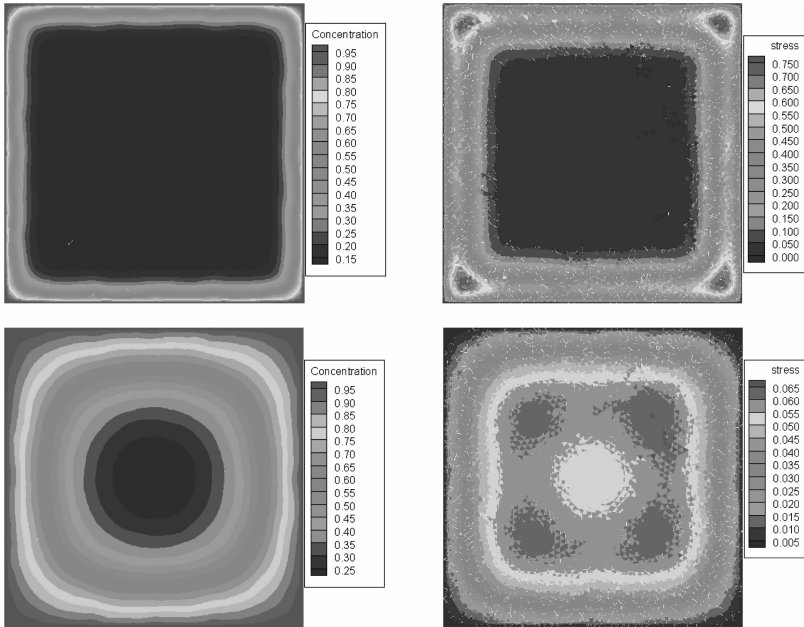
5.2 计算结果分析

本文首先对无晶界的情况进行了模拟,锂离子浓度及静水应力结果如图 7。随着锂离子由外部向内部的扩散,锂化层由于锂离子的嵌入发生体积膨胀而受拉,随着锂化层向内部的转移,锂化层外部已锂化的部分和内部未锂化的部分均受到挤压,锂化层外围应力逐渐由拉应力转变为零应力甚至压应力,模型四角处的浓度梯度较大故而拉应力也较大,锂离子浓度与应力的分布是一致的。锂离子从外围开始嵌入产生拉应力,更促使锂离子往内部扩散,随

着锂化层向内部的推进,应力相应地发生变化,这与李斌^[19]和 Zuo^[18]等人的结果相吻合。另外由不同时刻应力结果还可以看出,由于应力波的传播速度远大于浓度的扩散速度,模型由于锂离子嵌入而产生的拉应力很快向内部释放,整体应力水平有了很大程度的下降。需要指出的是,由于模型中设置有用于描述不含晶界的材料自内部破坏的内相内聚力单元,使得有限元计算模型不再完全对称,因此图 7 (d) 中的应力结果出现了部分不对称的情况,但结构的应力水平和演化趋势仍具有探讨意义。

如图 8 所示为含晶界的电极材料在不同时刻的浓度及静水应力分布,模型整体的浓度和应力变化趋势及数值情况与无晶界时相近。浓度方面,由于晶界的存在对锂离子的扩散有一定的阻碍作用,虽然此时 $D_{gb} = D_g$, 依然可以看到锂离子在晶界处受到一定阻滞而发生轻微的程度累积,这与 Wu L^[10]的结论相吻合。应力方面,与无晶界相似,模型四角处首先饱和从而使该区域由拉应力转变为压应力。0.02 μs 时,晶界的存在造成了一定程度的应力集中,此时整体应力水平略高于无晶界,之后随着应力的释放,应力水平逐渐降低,而晶界的存在降低了结构的整体性,从而使得应力更容易被释放,故 0.28 μs 时含晶界模型的应力水平略低于无晶界模型。

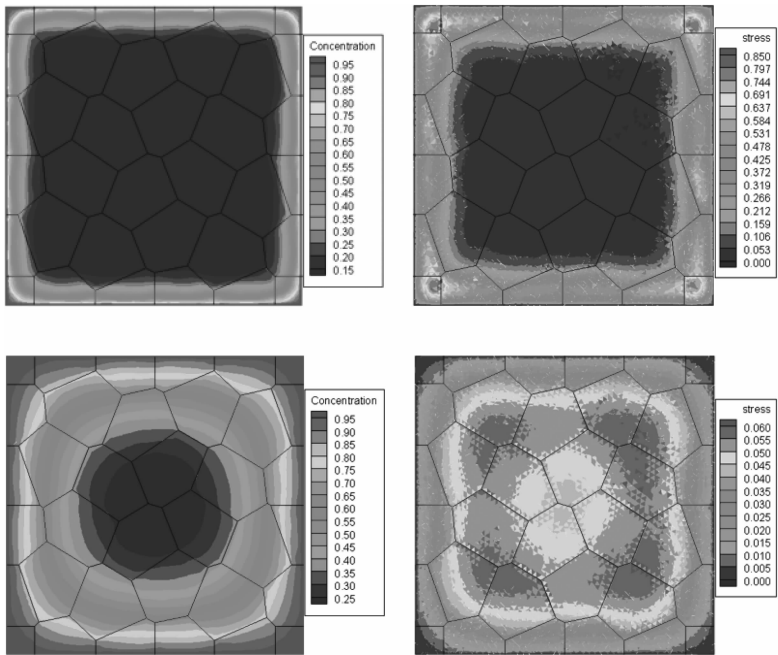
为了更清楚地分析嵌入过程的浓度变化及应力



(a) 0.02 μs 时的浓度分布(无量纲) (b) 0.02 μs 时的静水应力分布($1.6605402 \times 10^7 \text{Pa}$)
(c) 0.28 μs 时的浓度分布(无量纲) (d) 0.28 μs 时的静水应力分布($1.6605402 \times 10^7 \text{Pa}$)

图 7 无晶界情况

Fig.7 The film electrode without grain boundary



(a) 0.02 μs 时的浓度分布(无量纲)(b) 0.02 μs 时的静水应力分布($1.6605402 \times 10^7\text{Pa}$)
(c) 0.28 μs 时的浓度分布(无量纲)(d) 0.28 μs 时的静水应力分布($1.6605402 \times 10^7\text{Pa}$)

图 8 含晶界情况

Fig.8 The film electrode with grain boundary

演化和进一步对比晶界对离子嵌入电极材料这一过程的影响,取模型左上部分坐标为(0.1 μm , 1.9 μm)点处的浓度及应力进行分析,其随时间变化曲线如图 9 所示。计算刚开始由于边界处浓度梯度大,锂离子浓度扩散速度较快因而离子浓度增长较快,进而使得拉应力迅速产生,之后随着该点处锂离子浓度的增加,浓度梯度逐渐减小,离子扩散速度也逐渐减缓,导致该点处的应力水平由于应力释放而逐渐下降。

如图 10 为模型中线 0.28 μs 时,沿 $Y=1\text{ }\mu\text{m}$ 处含晶界与无晶界情况的离子浓度和静水应力结果对

比,如图 10(a)所示,在模型左右边缘处,含晶界情况的锂离子浓度水平略大于无晶界情况,这是由于在左右边缘处离子主要沿晶界纵向扩散,未受到沿晶界横向的阻碍作用,且晶界的存在提供了更多的扩散路径。而模型中部含晶界情况下离子的扩散由于受到晶界横向的阻碍,使得离子往模型中部扩散的程度较低,因此中部的浓度水平要低于无晶界情况,但由于越往模型中心浓度梯度越小,所以这种差异也逐渐减小。总体而言,含晶界模型的离子扩散速度要略小于无晶界模型,也说明了电极材料中晶界的存在对于锂离子的扩散是有一定阻碍作用的。

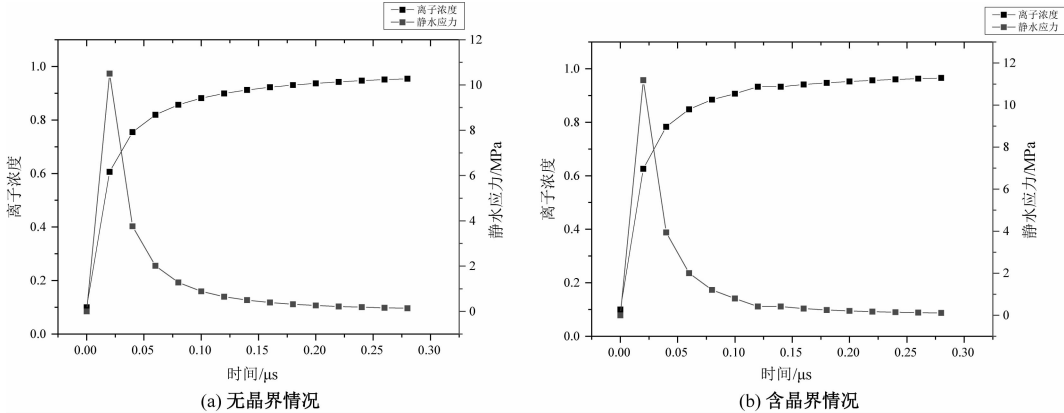


图 9 模型中坐标为(0.1 μm , 1.9 μm)点处的浓度变化及应力演化

Fig.9 Concentration variation and stress evolution at the point coordinates (0.1 μm , 1.9 μm) in this model

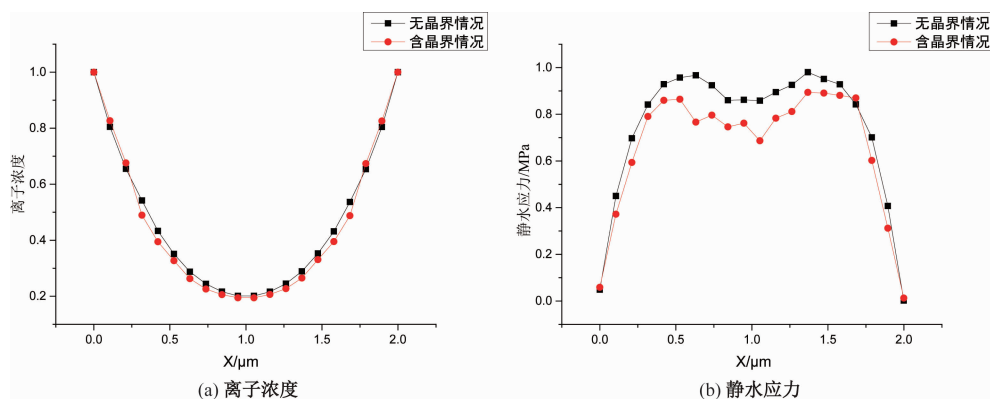


图10 $Y=1\ \mu\text{m}$, $0.28\ \mu\text{s}$ 时刻有无晶界情况的离子浓度及应力结果对比

Fig.10 Comparison of ion concentration and stress results in the presence or absence of grain boundary at $0.28\ \mu\text{s}$ and $Y=1\ \mu\text{m}$

应力对比如图 10(b) 所示,模型两侧浓度先达到饱和并开始由拉应力逐渐转化为压应力,因而应力水平最低。由于晶界对应力释放的促进作用,中间部分无晶界情况的应力水平平均高于含晶界情况。可见,晶界的存在使得结构的应力更容易得到释放,能减小锂离子扩散的诱导应力,这与 Han^[20] 的结论是一致的。

6 结论

电极材料中锂离子的扩散过程与材料微观结构密不可分,该过程中除了锂离子浓度变化还涉及到应力演化,而多尺度内聚力有限元方法将微观的原子作用与宏观的物理现象相结合,为更真实地理解研究对象提供了有力的工具,其内聚力单元在描述界面处的物理特性如浓度、应力时具有很高的灵活性和有效性。通过以上计算分析,可得到如下结论:

(1) 本文提出了一种基于多尺度内聚力有限元方法的扩散-应力耦合模型,能够较好地实现对锂离子在不含晶界及含晶界的电极材料中扩散过程的浓度变化及应力演化的模拟。计算结果在变化趋势和研究结论上与相关文献的结果具有较好的一致性,相较于已有的计算模型,本文所建立的多尺度内聚力有限元扩散-应力耦合模型能够在同一理论模型中完成不含晶界和含晶界情况的模拟,并从材料的微观属性出发使模拟更接近真实情况。未来将考虑更多的材料属性和结构特点进行算例建模,以进行更具体的定量分析。

(2) 不含晶界情况与含晶界情况的模拟结果对比显示,晶界的存在使得电极材料的应力更容易得到释放,能减小锂离子扩散的诱导应力,更利于电极

结构的安全性。

(3) 本文暂未考虑对材料损伤和裂纹扩展的模拟,但是结合模型中设置的内聚力单元建立相关的断裂准则,本文的多尺度理论可用于研究晶界破坏和晶粒内相破坏的情况。另外,本文目前只进行了二维情况的算例计算,但本文的理论可以直接扩展到三维情况,我们将在今后的工作中完成这部分的算例实现。

参考文献:

- [1] Vetter J, P. Novák, Wagner M R, *et al.* Ageing mechanisms in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 147(1): 269-281.
- [2] Swaminathan N, Qu J. An electrochemomechanical theory of defects in ionic solids. I. Theory [J]. *Philosophical Magazine*, 2007, 87(11): 1705-1721.
- [3] Cui Z, Gao F, Qu J. A finite deformation stress-dependent chemical potential and its applications to lithium ion batteries [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2012, 60(7): 1280-1295.
- [4] Guduru P R, Bower A F. A simple finite element model of diffusion, finite deformation, plasticity and fracture in lithium ion insertion electrode materials [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2012, 20(4): 45004-45023.
- [5] Dal, Hüsni, Miehe C. Computational electro-chemomechanics of lithium-ion battery electrodes at finite strains [J]. *Computational Mechanics*, 2015, 55(2): 303-325.
- [6] Wilson J R, Cronin J S, Barnett S A, *et al.* Measurement of three-dimensional microstructure in a LiCoO₂ positive electrode [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 196(7): 3443-3447.

[7] Swallow J G, Woodford W H, Mcgrogan F P, *et al.* Effect of electrochemical charging on elastoplastic properties and fracture toughness of Li_xCoO_2 [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161 (11): F3084-F3090.

[8] Harris S J, Deshpande R D, Qi Y, *et al.* Mesopores inside electrode particles can change the Li-ion transport mechanism and diffusion-induced stress [J]. Journal of Materials Research, 2011, 25 (8): 1433-1440.

[9] Yamakawa S, Yamasaki H, Koyama T, *et al.* Numerical study of Li diffusion in polycrystalline LiCoO_2 [J]. Journal of Power Sources, 2013, 223: 199-205.

[10] Wu L, Zhang Y, Jung Y G, *et al.* Three-dimensional phase field based finite element study on Li intercalation-induced stress in polycrystalline LiCoO_2 [J]. Journal of Power Sources, 2015, 299: 57-65.

[11] Zeng X, Li S. A multiscale cohesive zone model and simulations of fractures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199 (9 - 12): 547-556.

[12] He M, Li S. An embedded atom hyperelastic constitutive model and multiscale cohesive finite element method [J]. Computational Mechanics, 2012, 49 (3): 337-355.

[13] Li S, Zeng X, Ren B, *et al.* An atomistic-based interphase zone model for crystalline solids [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 229-232: 87-109.

[14] Qian J, Li S. Application of multiscale cohesive zone model to simulate fracture in polycrystalline solids [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2011, 133 (1): 839-858.

[15] Fan H, Li S. Multiscale cohesive zone modeling of crack propagations in polycrystalline solids [J]. GAMM-Mitteilungen, 2015, 38 (2): 268-284.

[16] Liu L, Li S. A finite temperature multiscale interphase zone model and simulations of fracture [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2012, 134 (3): 031014.

[17] 王进, 王军霞, 曾凡桂, 等. 蒙脱石晶体结构构型及其 XRD、IR 的分子模拟 [J]. 矿物学报, 2011, 31 (1): 133-138.

[18] Zuo P, Zhao Y P. A phase field model coupling lithium diffusion and stress evolution with crack propagation and application in lithium ion batteries [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 17 (1): 287-297.

[19] 李斌. 含裂纹锂离子电池电极结构力学性质研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014.

[20] Han S, Park J, Lu W, *et al.* Numerical study of grain boundary effect on Li^+ effective diffusivity and intercalation-induced stresses in Li-ion battery active materials [J]. Journal of Power Sources, 2013, 240 (1): 155-167.

(上接第 2 页)

故
 $\gamma_\sigma(T_n) \rightarrow 0, (n \rightarrow \infty)$ 。

参考文献:

[1] 阳名珠, 朱广田. $p \geq 1$ —阶拟总体列紧算子理论及其在线性迁移理论中的应用 [J]. 数学物理学报, 1983, 3 (4): 419-439.

[2] 孟京华. 一类拟总体列紧算子逼近的正则值 [J]. 河北师范大学学报 (自然科学版), 2003, 27 (4): 331-334.

[3] [法] F. 沙特琳. 线性算子的谱逼近 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1987.

[4] 郭大钧. 非线性泛函分析 [M]. 济南: 山东科技出版社, 1985.

[5] 夏道行, 吴卓人, 严绍宗等. 实变函数论与泛函分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.

土质滑坡参数反演计算方法探讨

——以陈溪乡太平山滑坡为例

刘佳伟¹, 魏阳², 黄曼², 黄永亮¹, 张飞¹

(1. 浙江省有色金属地质勘查局, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要:以绍兴市上虞区陈溪乡太平山大型土质滑坡为工程案例,探讨了相关反演的计算方法和适用范围,在此基础上总结了一套差分拟合的计算理论,即采用差分的方法计算不同抗剪强度组合条件下的滑坡稳定性系数,在此基础上引入粘聚力 c 和内摩擦角 φ 对滑坡稳定性的敏感性分析,建立稳定性系数(F_s)与粘聚力 c 、内摩擦角 φ 之间的拟合关系,根据拟合结果反向计算最危险滑动面的位置,并与实际钻探和试验结果进行对比,将传统意义上单纯的抗剪强度数据反演提升为试验数据与滑坡结构特征的双重关系分析,从而在增加反演计算可靠性的同时,也扩大了该种方法的适用范围。

关键词:土质滑坡;反演计算;差分拟合;敏感性;可靠性

中图分类号:O 319.56 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0016-06
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.004

Discussion on Calculation Method of Soil Landslide Parameters Inversion ——Taking the Taipingshan Landslide in Chenxi Township as An Example

Liu Jiawei¹, Wei Yang², Huang Man², Huang Yongliang¹, Zhang Fei¹

(1. Zhejiang Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau, Shaoxing Zhejiang 312000, China;
2. School of Civil Engineering, Shaoxing University of Arts and Sciences, Shaoxing Zhejiang 312000, China)

Abstract: This paper takes the large-scale soil landslide of Taiping Mountain in Chenxi Township, Shangyu District, Shaoxing City as an engineering case, and discusses the calculation method and application scope of related inversion. On this basis, a set of calculation theory of differential fitting is summarized, that is, the method of differential is adopted. Calculate the stability coefficient of landslide under different shear strength combinations. On this basis, the sensitivity analysis of the cohesion c and internal friction angle φ on the stability of the landslide is introduced, and the stability coefficient (F_s) and cohesion c are established. The fitting relationship between the internal friction angles φ , the position of the most dangerous sliding surface is calculated inversely according to the fitting result, and compared with the actual drilling and test results, the traditional inversion of the simple shear strength data is promoted to the test. The double relationship analysis between the data and the structural characteristics of the landslide, while increasing the reliability of the inversion calculation, also expands the scope of application of the method.

Keywords: soil landslide; inversion calculation; differential fitting; sensitivity; reliability

收稿日期:2019-08-22
基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY18D020003);绍兴市科技计划项目(2018C30001)。
作者简介:刘佳伟(1986-),男,浙江诸暨,硕士研究生毕业、工程师,主要从事水文地质、工程地质及岩土工程方向。
E-mail:414695398@qq.com。

滑坡治理工程当中,滑动面抗剪强度指标(粘聚力 c 、内摩擦角 φ)作为核心参数贯穿整个勘查和设计过程,参数的重要性不言而喻^[1],其取值的正确性和可靠度,直接反应了勘查工作的质量,决定了滑坡下滑推力的计算,最终影响设计方案的编制。目前获取滑动面抗剪强度指标的方法主要有 3 类^[2],分别为土工试验法,工程经验类比法和反演计算法。其中土工试验法反应数据最为直接,在特定条件下对野外所取土样进行抗剪强度试验,直接获得 c 、 φ 指标^[3]。但该方法受试验样品和试验条件以及人为操作水准的影响较大,所得试验结果往往离散性很大^[4],虽然测试数据经过数理统计和概率分析,但其最终结果的可靠度仍然值得怀疑。工程经验类比法一般适用地质环境条件简单的小型滑坡,常用于定性的评价和分析,不作为直接计算参数。反演计算法适用范围相对较广^[5],尤其是中大型滑坡以及滑动面地质情况相对复杂的滑坡,滑动面埋深大,地层结构较复杂,现场剪切试验难度大,室内试验难以模拟野外实际的环境条件,在上述情况下反演计算法将发挥更为重要的作用。

反演作为一种定量的评价计算方法,其结果的可靠性与公式、计算方法的选择相关性极大^[6]。由于计算过程中存在粘聚力 c 和内摩擦角 φ 2 个未知变量,一般在实际运用中常常根据滑坡性质和变形特征,在人为确定一个变量的基础上反向计算另外一个变量。操作过程中个人的经验选择等不确定因素对计算结果的干扰程度较大,同时忽略了粘聚力 c 和内摩擦角 φ 对滑坡稳定的敏感性,反演所得结果可靠性将大打折扣^[7],因此选用何种计算方法,如何确定滑坡计算参数至关重要。

本文研究的主要意义就是从适用性和可靠性角度对传统反演计算方法进行探讨,在此基础上以实际工程案例为背景,通过改进计算方法、增加相关计算分析内容等手段总结差分拟合的反演计算理论。

1 滑坡案例背景介绍

1.1 滑坡情况简介

本次研究的滑坡位于上虞区陈溪乡南西部,以丘陵地貌单元为主(图 1)。主要岩性为燕山晚期二长花岗岩($\eta\gamma$),自然斜坡表面为第四系残坡积层($el-dlQ$)和坡洪积($dl-plQ_3$)含碎石粉质黏土。地下水包含孔隙潜水和基岩裂隙水。滑坡前后缘相对高差约 80 m,平面形态呈圈椅状,主滑方向约 140°,滑



图 1 滑坡区域地形影响示意图
Fig.1 Schematic diagram of terrain impact
in landslide area

坡体斜长约 330 m,前缘宽 150~180 m,后缘宽度约 75~105 m,滑体厚 15~25 m,体积 $105\times10^4\text{ m}^3$ 。属于大型滑坡。自 2000 年初次滑动变形以来,基本呈蠕动变形状态,滑动速度缓慢,但受 2015 年“灿鸿”台风影响变形加剧。根据前后两次勘察作业成果反应,滑坡体组成自上而下依次为第四系(残坡积、坡洪积)粉质黏土层,全风化砂砾层和全风化粉质黏土层。滑带土以全风化粉质黏土为主,滑动面位于全风化层与强风化基岩的接触带上,现有稳定性较差。

1.2 抗剪强度试验数据分析

室内土工试验对滑带土提取了 16 组数据,如下表所示。

表 1 土工试验滑带土抗剪强度指标原始数据
Table 1 Geotechnical test slide soil soil shear
strength index raw data

编号	C/kPa	$\Phi/^\circ$	编号	C/kPa	$\Phi/^\circ$
1	16.2	8.4	9	12.4	19.7
2	15.1	11.2	10	15.9	16.5
3	16.8	15.8	11	21.4	18.7
4	12.2	28.0	12	24.7	16.0
5	11.8	19.0	13	18.4	20.7
6	21.6	15.6	14	22.3	19.5
7	19.2	12.3	15	23.0	14.6
8	20.3	10.7	16	17.5	18.9

根据室内试验,抗剪强度指标中粘聚力 c 取值区间为(11.8,24.7),统计标准值为 19.0 kPa,变异系数和修正系数分别为 0.534 和 0.625;内摩擦角 φ 取值区间为(8.4,28.0),统计标准值为 17.5°,变异系数和修正系数分别为 0.695 和 0.842。结合图 2

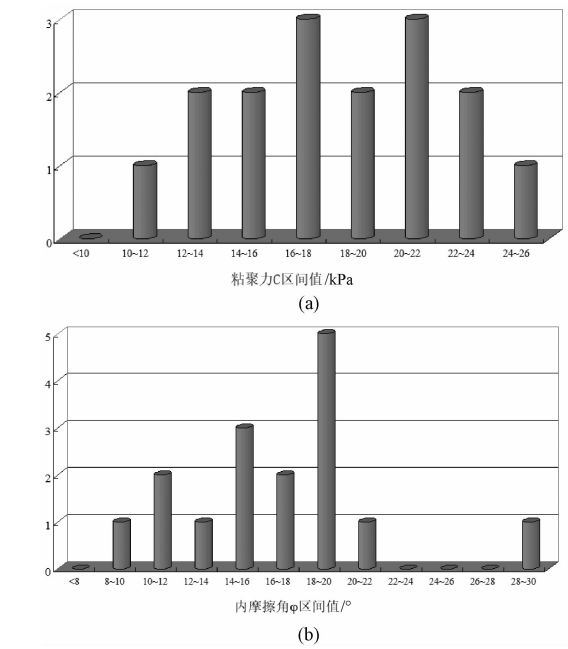


图 2 抗剪强度试验数据区间分布统计图

Fig.2 Shear strength test data interval distribution statistics

对抗剪强度指标进行等步距区间分布统计及其统计计算系数结果显示,试验数据离散程度较大。将该组合数据作为稳定性验算依据,则滑坡在不利工况条件下的剩余下滑力仍然为负值,表明试验结果数值偏高,与实际情况存在不符,直接采用试验标准值作为后期设计依据风险较大。因此需要结合反演计算对试验结果进行修正。

2 传统反演方法计算

2.1 传统反演方法

反演计算方法现阶段已经广泛运用于工程实践领域,但作为一种辅助性手段,对其适用性和可靠性研究相对缺乏^[8],国内除三峡库区内对局部滑坡开展过相关理论方法的分析外,其他地区 and 领域内未见深入分析和总结,现阶段仍停留在传统方法的应用上。传统反算法的原理是在建立滑动面模型的基础上,根据滑体所处状态人为确定滑体的安全系数,然后反求滑动面抗剪强度指标^[9]。属于非常典型的逆向型算法。现在运用最为广泛的两种反算法为单参数反演和双参数反演,其中单参数反演又可根据滑动面的实际情况细分为综合 c 值法和综合 φ 值法;双参数反演又可称为 (c, φ) 反算法。

2.2 综合 C 值法

当查明滑动面抗剪强度主要受粘聚力 c 控制

时,可选用综合 c 值反算法。以折线型滑动面为例(图 3),其计算方法如下^[10]:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} = \frac{\sum_{j=1}^n W_{2j} \sin \alpha_j \cos \alpha_j + c (\sum_{i=1}^m l_i \cos \alpha_i + \sum_{j=1}^n l_j \cos \alpha_j)}{\sum_{i=1}^m W_{1i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i} \quad (1)$$

式中: W_{1i} 为滑体下滑部分第 i 条块所受的重力(kN); W_{2j} 为滑体阻滑部分第 j 条块所受的重力(kN); α_i 为滑体下滑部分第 i 条块所在折线段滑面的倾角($^\circ$); α_j 为滑体阻滑部分第 j 条块所在折线段滑面的倾角($^\circ$); l_i 为滑体下滑部分第 i 条块所在折线段滑面的长度(m); l_j 为滑体阻滑部分第 j 条块所在折线段滑面的长度(m); c 为折线型滑面上的综合单位粘聚力(kPa)。

根据公式 1,在确定稳定性系数 F_s 和滑动面结构形态的前提下,可以反算出综合单位粘聚力。根据太平山滑坡的实际情况,以极限平衡状态作为反算状态条件,根据建立的计算方程算得结果为综合 c 值为 42.7 kPa。

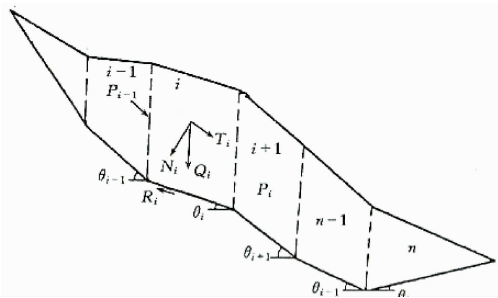


图 3 折线法滑动面参数计算简图

Fig.3 Fractal method of sliding surface parameter calculation

2.3 综合 φ 值法

与综合 c 值法基本类似,当查明滑动面抗剪强度主要受内摩擦角 φ 控制时,可选用综合 φ 值反算法。仍以折线型滑动面为例(图 3),其计算方法如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} =$$

$$\frac{\sum_{j=1}^n W_{2j} \sin \alpha_j \cos \alpha_j + \tan \varphi \left[\sum W_{2j} \cos^2 \alpha_j + \sum W_{1i} \cos^2 \alpha_i \right]}{\sum_{i=1}^m W_{1i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i} \quad (2)$$

式中: φ 为折线型滑面上的综合单位内摩擦角 ($^{\circ}$); 其余符号同前。

根据公式(2), 在确定稳定性系数 F_s 和滑动面结构形态的前提下, 可以反算出综合单位内摩擦角 φ 。根据太平山滑坡的实际情况, 以极限平衡状态作为反算状态条件, 根据建立的计算方程算得结果为综合 φ 值为 27.5° 。

2.4 c 、 φ 反算法

当考虑到滑动面通常情况下抗剪强度中 c 、 φ 皆会起到作用, 因此在单因素反演的基础上进化出了双因素反演法—— c 、 φ 值法。仍以折线型滑动面为例(图 3), 其计算方法如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n W_{1i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^m W_{1i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i} = \frac{\tan \varphi \left[\sum W_{2j} \cos^2 \alpha_j + \sum W_{1i} \cos^2 \alpha_i \right] + c \left(\sum l_i \cos \alpha_i + \sum l_j \cos \alpha_j \right)}{\sum_{i=1}^m W_{1i} \sin \alpha_i \cos \alpha_i} \quad (3)$$

式中: c 为折线型滑面上的综合单位粘聚力 (kPa); φ 为折线型滑面上的综合单位内摩擦角 ($^{\circ}$); 其余符号同前。

公式(3)是一个二元方程式, 需要联立两个等式才能求出未知数 (c 、 φ), 通常情况下存在 2 种处理方法:

方法 1: 选择一处典型滑动剖面, 在不同时间但条件相似的情况下, 保持其他条件参数不变, 通过不同的 F_s 联立进行联立求解;

方法 2: 选择两处典型剖面, 在稳定性系数 F_s 一致的前提下, 改变滑体和滑动面结构参数联立两个独立方程进行求解。

本处根据案例滑坡的实际情况, 采用方法 1, 在极限平衡状态下选取两处滑坡断面模型进行反演计算, 计算结果抗剪强度组合值为 (23.4 kPa, 13°)。

2.5 传统反演计算结果总结

针对同一个工程案例, 采用了 3 种以往运用较多的反演计算方法, 结果大相径庭, 同时与土工试验数据之间的差距也相对较大。从滑坡实际的地质情

况角度出发, 综合 c 值法和综合 φ 值法都不适宜于该处案例的实际应用, 因为两者皆属于单因素反演法, 在计算过程中直接忽略了另一指标的作用, 是一种极端情况, 针对均一性良好的砂性堆积体或者粘性堆积体存在一定的适用性, 但实际应用领域绝大多数的滑坡抗剪强度是 c 、 φ 共同作用的结果。

第 3 种计算方法双因素反演法弥补了这一缺陷, 但联立方程和稳定性系数的确定仍然无法避免人为选择因素的影响, 尤其是在未知滑坡稳定性系数与 c 、 φ 值敏感性的前提下, 冒然选择系数进行计算, 将会对结果造成很大的影响。另外正如本次案例应用过程中出现的情况, 当计算结果与实际试验结果存在较明显的差异时, 我们无法对正确结果做出有依有据的取舍判断, 因此在地质条件复杂、规模较大的滑坡治理工程当中, 对参数的反演计算提出了更高的要求。

3 差分拟合反算法在滑坡强度参数获取中的应用

3.1 方法原理介绍

在差分试算法的基础上, 增加抗剪强度敏感性分析, 同时根据分析结果建立稳定性系数 (F_s) 与粘聚力 c 、内摩擦角 φ 之间的拟合关系, 通过拟合结果反向计算最危险滑动面的位置, 并与实际钻探和试验结果进行对比, 将传统意义上单纯的抗剪强度数据反演上升为数据与滑坡特征的反演, 从而增加了反演计算方法的适用范围, 同时也提高了反演的可靠性。

差分拟合反算法主要分为 3 个步骤^[11], 步骤一为结合勘查钻探成果, 在初步确定滑坡滑动面和相应抗剪强度指标值 (c 、 φ) 的基础上, 选择合适的步距, 将 c 、 φ 进行差分, 采用极限平衡的原理, 试算不同 c 、 φ 组合情况下的稳定性系数, 形成接近等差关系的稳定性系数 F_s 矩阵。根据试算矩阵, 建立稳定性系数与抗剪强度指标之间的映射关系, 通过映射关系进行拟合, 进一步确定相应的函数关系式。由此获取稳定性系数与抗剪强度指标值 (c 、 φ) 之间的敏感性程度关系, 为最终通过稳定性系数确定反演 (c 、 φ) 值提供极为重要的分析依据。

在此基础上将勘查所得各地层抗剪强度指标值 (c 、 φ) 值代入拟合函数进行稳定性计算, 所得稳定性系数最小值连线即为反演模拟的滑动面^[12]。将此滑动面位置与勘查推测滑动面位置进行对比, 既

可分析勘查结论的准确性,也能验证反演计算的可靠性。

3.2 工程实例应用

太平山滑坡前后缘相对距离约 330 m,长度较大,下伏地层受地形地貌影响存在一定的起伏,因此按照折线形滑动面,传递系数法对其进行差分试算。

$$F_s = \frac{\sum R_i \psi_i \psi_{i+1} \cdots \psi_{n-1} + R_n}{\sum T_i \psi_i \psi_{i+1} \cdots \psi_{n-1} + T_n} (i + 1, 2, 3, \cdots, n - 1)$$

(4)

$$\psi_i = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_i$$

(5)

根据土工试验获得的抗剪强度参数分布区间来看,滑动面粘聚力 c 值主要集中于 15~20 kPa,内摩擦角 φ 值主要集中于 12°~20°,由于离散程度较大,各取差值 2 作为计算步距。计算矩阵表格如表 2 所示。

参考《工程地质手册》第四版^[13],反演计算过程中稳定性系数 F_s 的取值可参考表 3。本工程案例仍以极限平衡状态下的 1.0 作为计算条件,与其最为接近的组合为(13 kPa, 12°)和(15 kPa, 12°),可按照内插的方法,计算在 1.0 极限平衡条件下的组合为(13.5 kPa, 12°)。

差分法作为第一步,其主要作用是寻找最接近极限平衡状态的抗剪强度指标组合。该组合与实际情况是否符合或者接近,仍有待进一步验证。在计算结果矩阵的基础上,绘制

粘聚力 c 值和内摩擦角 φ 值与稳定性系数的关系曲线,如图 4、5 所示。

表 2 差分试算结果表

Table 2 Differential trial result table

C	ϕ						
	8	10	12	14	16	18	20
11	0.69	0.83	0.97	1.11	1.26	1.41	1.56
13	0.72	0.86	1.00	1.14	1.29	1.44	1.60
15	0.75	0.89	1.03	1.17	1.32	1.47	1.63
17	0.78	0.92	1.06	1.20	1.35	1.50	1.66
19	0.82	0.95	1.09	1.23	1.38	1.53	1.69
21	0.85	0.98	1.12	1.27	1.41	1.57	1.72
23	0.88	1.01	1.15	1.30	1.45	1.60	1.76

表 3 反演计算稳定性系数取值参考表

Table 3 Inversion calculation stability coefficient value reference table

滑坡状态	F_s 取值参考
后缘出现陆续变形裂缝	1.20~1.15
滑坡形成剪出口瞬间	1.00
滑坡形成剪出口后由等速滑动转变为加速滑动	0.95
产生大滑动破坏	0.90

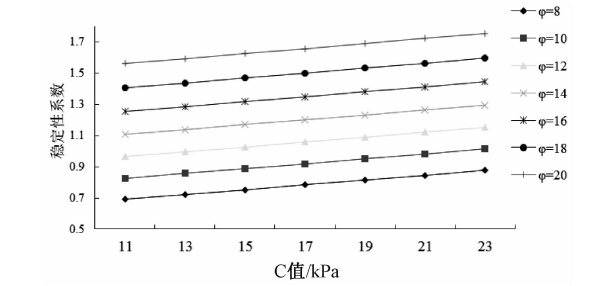


图 4 粘聚力 c 值与稳定性系数关系曲线
Fig.4 Fractal method of sliding surface parameter calculation

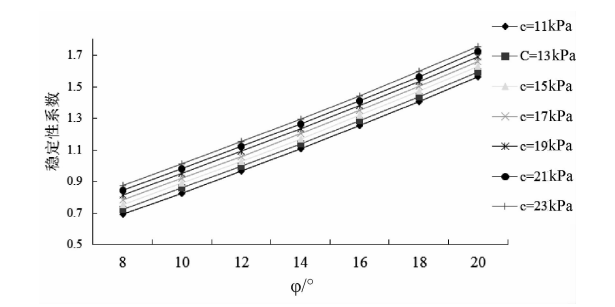


图 5 内摩擦角 φ 值与稳定性系数关系曲线
Fig.5 Fractal method of sliding surface parameter calculation

图中稳定性系数 F_s 与 c 、 φ 值呈线性相关。从曲线斜率即可判断,在相同系数区间内, φ 值对 F_s 的影响程度明显大于 c 值,表明 φ 值对 F_s 的敏感性较强,滑坡稳定性与滑动面的内摩擦角关系更为密切。在本工程实例运用中,由于差分步距较大,未出现相同系数下不同组合的现象,

因此敏感性分析的重要性并未得以凸显。其他情况下极有可能出现同一个系数,不同的组合条件,如果出现这种情况,则在敏感性分析的基础上,结合试验数据和滑坡地质条件进行综合分析,以确定最优组合指标^[14]。

在反求 c 、 φ 值的基础上,根据试算所得数据,可对 F_s 和 c 、 φ 值的相互关系进行函数拟合,确定三者之间的函数关系: $F_s=f(c, \varphi)+a$ (a 为常数项)拟合软件多种多样,较为常用的有 SPSS, MATLAB, EXCEL 等。考虑到本次拟合数据较为简单,同时 F_s 由 c 、 φ 值采用相同步距条件下计算得出,三者之间的关系以二元一次函数为主。因此采用 EXCEL 在置信度为 95% 的条件下进行拟合,确定拟合方程为:

$$F_s = 0.0157c + 0.0729 - 0.078$$

其相关系数达到 0.999383,说明其 3 者之间相关程度较高; φ 值对 F_s 结果的贡献较 c 值大,与敏

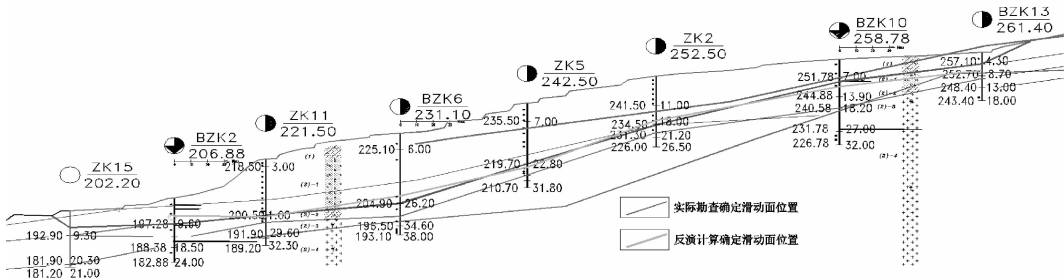


图 6 勘查滑动面与反演计算滑动面位置对比

Fig.6 Survey sliding surface and inversion calculation sliding surface position comparison

感性分析结论一致,因此拟合结果一定程度上可反应实际情况。

通过拟合公式,将差分计算剖面上分布的钻孔不同深度土样抗剪强度指标 c 、 φ 值分别代入拟合关系式进行稳定性系数计算,剔除部分离散性较大的点,所得稳定性系数最小值连线即为反演模拟的滑动面。

如图 6 所示,红线代表勘查推断滑动面,黄线表示反演计算滑动面。除去滑坡前后缘部分由于受钻孔取样少和地形地貌的影响外,滑坡主体上勘查线和反演推测线吻合程度较高。说明勘查结论基本准确性,反演计算可靠性较高。

4 结论

本文以上虞区陈溪乡太平山大型土质滑坡为例,对反演方法在滑坡抗剪强度参数获取过程中的应用进行了探讨。从传统反演计算方法入手,讨论了综合 c 值法、综合 φ 值法和 c 、 φ 值反算法等计算方法的适用性和可靠性,阐述了上述方法在工程实际运用过程中存在的主要缺陷和不足。同时在当下比较流行的差分试算反演分析理论的基础上,增加了敏感性和相关性反拟合分析,减小了人为选择、经验等不确定因素在滑坡反演计算过程中的干扰程度,充实了反演计算的理论体系,降低了在试验数据和反演计算结果筛选过程中的盲目性,从而提高了反演计算获得参数的可靠性。

参考文献:

[1] Sauvin G, Bazin S, Vanneste M, *et al.* Towards joint inversion/interpretation for landslide-prone areas in Norway-integrating geophysics and geotechnique [C] Near Surface 2011 - 17th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2011.

[2] Kawakatsu H. Centroid single force inversion of seismic waves generated by landslides [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94 (B9): 12363-12374.

[3] 林鲁生, 蒋刚, 白世伟等. 土体抗剪强度参数取值的统计分析法 [J]. 岩土力学, 2002, 23 (5): 570-574.

[4] Wang C, Cai J, Li Z, *et al.* Kinematic Parameter Inversion of the Slumgullion Landslide Using the Time Series Offset Tracking Method with UAVSAR Data [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(9): 8110-8124.

[5] 胡剑. 次摸地古滑坡运动特征反演分析 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(03): 361-365.

[6] 朱友谊. 基于监测数据和参数反演的滑坡动态设计与施工 [D]. 西南交通大学, 2015.

[7] 高德军, 徐卫亚, 郭其达. 常见三峡大石板滑坡参数反分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34 (1): 74-78.

[8] 周平根. 滑带土强度参数的估算方法 [J]. 水文地质工程地质, 1998, (6): 30-32.

[9] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法 [J]. 岩土力学, 2008, 24: 528-532.

[10] 陈静瑜. 滑坡抗剪强度参数反演研究 [D]. 湖南: 中南大学, 2014.

[11] 徐汉斌, 王军. 反算法中滑坡稳定性系数的取值问题 [J]. 四川地质学报, 1999, 19 (1): 86-89.

[12] Sun G, Zheng H, Huang Y, *et al.* Parameter inversion and deformation mechanism of Sanmending landslide in the Three Gorges Reservoir region under the combined effect of reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. Engineering geology, 2016, 205: 133-145.

[13] 张有良. 工程地质手册 (第四版) [M]. 北京: 中国知识出版社, 2006.

[14] 石崇, 张玉, 孙怀昆等. 争岗滑坡堆积体滑面强度参数反演分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (z2): 3728-3734.

基于修正的偶应力理论的双层粘弹性纳米板 双轴屈曲分析

王少扬, 庞 苗
(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要:基于修正的偶应力理论、Kelvin-Voigt 模型,研究微观结构旋转影响下简支状态的双层粘弹性纳米板屈曲分析。首先,结合考虑修正的偶应力弹性理论和弛豫理论,将粘弹性微观结构、局部旋转和应力松弛分别纳入了经典粘弹性板理论中。通过分析粘弹性纳米板,得到了偶应力张量。基于达朗贝尔原理和 Kirchhoff 板理论,采用变分方法求出了粘弹性纳米板的尺寸相关微积分方程及其边界条件。该模型利用 Boltzmann 叠加原理,利用积分型本构关系对线性非老化材料的粘弹性行为进行了研究。利用 Navier 的方法 Laplace 变换得出了简支的粘弹性双层板的屈曲荷载。根据解析解,分析发现介质的温克尔模量和剪切模量,极限弹性模量与初始弹性模量比值等因素对系统的屈曲荷载有一定的依赖关系。

关键词:双层粘弹性纳米板; 双轴屈曲; 修正的偶应力效应; 弛豫理论; 依赖

中图分类号:O631. 2⁺21 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0022-03
DOI:10. 13774/j.cnki.kjtb.2020. 03. 005

Biaxial Buckling Analysis of Double-viscoelastic-nanoplates Based on Modified Couple Stress Theory

Wang Shaoyang, Pang Miao
(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract:Based on the modified couple stress theory and Kelvin-Voigt model, the Biaxial Buckling of double-viscoelastic-nanoplates considering the influence of microstructural local rotation is studied in this paper. Firstly, the modified couple stress elasticity and relaxation theory are reconsidered and harnessed to incorporate respectively the viscoelastic microstructure, local rotation and stress relaxation effects into the classical viscoelastic plate theory. The couple stress tensor is obtained incorporating measures for the viscoelastic behaviors of the nanoplate. Afterwards, a variational approach on the basis of D’Alembert’s principle in conjunction with the Kirchhoff plate theory is utilized to establish the size-dependent integral-differential governing equations of viscoelastic nanoplate. The developed model accounts for the viscoelastic behavior of the linear non-aging materials using integral-type constitutive relations through the Boltzmann’s principle of superposition. Finally, the analytical solution for buckling load is derived by using Navier method and Laplace transformation. It is demonstrated that the buckling load is dependent upon the Winkler modulus, shear modulus of the medium and the ratio of delayed elastic modulus to initial tensile elastic modulus.

收稿日期:2019-08-22
基金项目:国家“十三五”重点研发计划资助项目(2016YFC0701309)。
作者简介:王少扬(1991-),男,山西忻州,硕士研究生,研究方向:纳米材料的力学性能研究。

Keywords: double-viscoelastic-nanoplates; biaxial buckling; modified couple stress theory; relaxation theory; dependence

双层纳米板体系作为纳米结构体系的典型模型近年来引起了人们的广泛关注。该体系在制备新型纳米器件方面有许多潜在的应用前景,可作为嵌入结构应用于聚合物复合材料中,以提高其强度^[1]。纳米材料具有非常复杂的粘弹性行为,在施加载荷和温度变化时,其力学性能和破坏机制是非常敏感的。近年来,一些研究者^[2-4]开始研究记忆依赖性对纳米材料结构的影响。然而,关于对纳米材料考虑弛豫理论的研究还不多见。为了更加准确地分析纳米板的力学性能,本文通过引入修正的偶应力理论来研究纳米板的屈曲行为。

1 控制方程的推导与求解

1.1 几何模型建立

本文的纳米板系统是由高为 h , 边长为 L_x, L_y 的 2 块相同的矩形薄板组成。

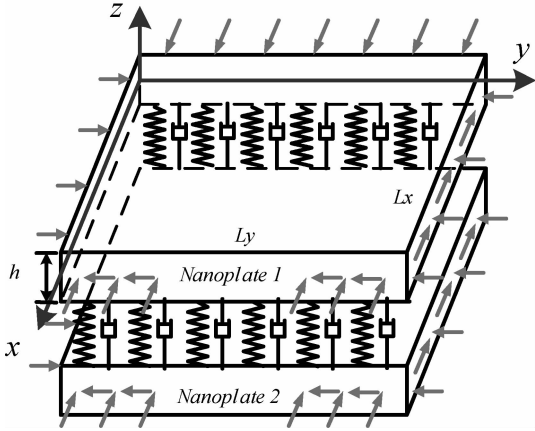


图1 双层粘弹性纳米板示意图

Fig.1 Schematic of double-viscoelastic - nanoplates

1.2 控制方程推导

根据 Attia 和 Mahmoud^[5] 提出考虑修正偶应力利用积分形式表达的应力应变关系:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(x, t) = & \lambda_0 \varepsilon_{kk}(x, t) \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{kk}(x, t) \\ & - \left[\int_0^t \lambda(t - \xi) \frac{d\varepsilon_{kk}(x, \xi)}{d\xi} \delta_{ij} d\xi + \right. \\ & \left. \int_0^t 2G(t - \xi) \frac{d\varepsilon_{kk}(x, \xi)}{d\xi} d\xi \right], \xi < t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_{ij}(x, t) = & 2l^2 G \chi_{ij}(x, t) - \\ & \int_0^t 2l^2 G(t - \xi) \frac{d\chi_{ij}(x, \xi)}{d\xi} d\xi, t < \xi \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\sigma_{ij}(x, t)$, $m_{ij}(x, t)$ 为应力张量和偶应力张量; δ_{ij} 为克罗内符号; l 为细观材料常数; λ 和 G 为拉梅常数; χ 对称曲率张量。

根据明 Kirchhoff 薄板理论, 板上任意一点 (x, y, z) 延 x 轴、 y 轴和 z 轴的位移和应变可以表示为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}(x, t) = & -zw_{,xx}(t), \varepsilon_{xy}(x, t) = \\ & -zw_{,xy}(x, t), \varepsilon_{yy}(x, t) = -zw_{,yy}(x, t), \\ \theta_x(x, t) = & w_{,y}(t), \theta_y(x, t) = \\ & w_{,x}(t), \chi_{xx}(x, t) = w_{,xy}(t), \\ \chi_{xy}(x, t) = & \chi_{yx}(x, t) = \frac{1}{2} [w_{,yy}(t) - w_{,xx}(t)], \\ \chi_{yy}(x, t) = & -w_{,xy}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

假设板材料是各向同性, 线性非老化, 应用广义麦克斯韦模型, Williams 和 Schapery 所提出了松弛模量 $E(t)$ 的普朗尼算法表达式

$$E(t) = E_\infty + \sum_{m=1}^N E_m e^{-\frac{t}{\tau_m}} \quad (4)$$

利用虚位移原理, 参照经典板理论控制方程:

$$\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + q_i = 0 \quad (5)$$

其中介质荷载模型^[6] 根据卡尔文模型可以得到两板间力

$$\begin{aligned} q_i = & (-1)^i \\ & \left[k_w(w_1 - w_2) - k_s \nabla^2(w_1 - w_2) + C_d \frac{\partial(w_1 - w_2)}{\partial t} \right], \\ i = & 1, 2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 k_w 为温克尔模量系数; k_s 为剪切模数; C_d 为粘弹性介质系数。

1.3 控制方程求解

假设处于相向移动的相位的简支纳米板的位移表达式为^[7]:

$$\begin{aligned} w(x, y, t) = & w_1(x, y, t) - w_2(x, y, t) \\ = & \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} W_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) e^{I\omega t} \\ (m, n = & 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 I 为虚数, $I = \sqrt{-1}$; W_{mn} 为整幅; ω 为振动频率。

将位移和上述参量带入控制方程, 得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left(1 + \tau_d \frac{\partial}{\partial t} \right) \left[C_{mn}^2 D_0 \nabla^4 W_{mn}(x,t) - \frac{C_{mn}^2 D_1}{\xi_1} \int_0^t e^{-\frac{t-\xi}{\xi_1}} \nabla^4 W_{mn}(x,\xi) d\xi \right] + 2 \left[k_w W_{mn}(x,t) + C_{mn} k_s \nabla^2 W_{mn}(x,t) + C_d \frac{\partial W_{mn}(x,t)}{\partial t} \right] + \left(\frac{m\pi}{L_x} \right)^2 N_{xx} \frac{\partial^2 W_{mn}(x,t)}{\partial x^2} + \left(\frac{n\pi}{L_y} \right)^2 N_{yy} \frac{\partial^2 W_{mn}(x,t)}{\partial y^2} \right\} \times \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) = 0 \tag{8}$$

为了简介对下列参数无量纲化：

$$\bar{k}_w = \frac{k_w L_x^4}{D_0}, \bar{k}_s = \frac{k_s L_x^2}{D_0}, \bar{C}_d = \frac{C_d L_x^2}{D_0} \sqrt{D_0 m_0}$$
$$\bar{\tau}_d = \frac{\tau_d}{L_x^2} \sqrt{\frac{D_0}{m_0}}, \bar{\xi}_1 = \frac{\xi_1}{L_x^2} \sqrt{\frac{D_0}{m_0}}, \bar{C}_d = \frac{C_d L_x^2}{D_0} \sqrt{D_0 m_0}$$
$$\bar{D}_1 = \frac{D_1}{D_0}, \bar{D}_\infty = \frac{D_\infty}{D_0}, \beta = \frac{L_y}{L_x}, \bar{N} = \frac{N_{xx} L_x^2}{D_0} \tag{9}$$

结合上式,可得到了在修正的应力理论下,相向相位的双层粘弹性纳米板的屈曲荷载表达式

$$\bar{N} = \frac{A^* - A^* D^* + 2[\bar{k}_w + C^* \bar{k}_s]}{B^*}$$
$$A^* = (m^2 + n^2 \beta^{-2})^2 \pi^4 \quad B^* = (m^2 + \delta n^2 \beta^{-2}) \pi^2$$
$$C^* = (m^2 + n^2 \beta^{-2}) \pi^2$$
$$D^* = \frac{E_0}{E_\infty} + \left(1 - \frac{E_0}{E_\infty} \right) e^{-\frac{1}{\xi_1} \frac{E_\infty}{E_0} t} H(t) \tag{10}$$

2 数值结果及分析

本文数值取值是在粘弹性框架^[8]研究了松弛时间、延迟模量与初始拉伸弹性模量之比等因素对简支粘弹性双层基尔霍夫纳米板弯曲的影响。有效参数选择如下：

$$L_x = 10 \text{ nm}$$
$$E_0 = 90 \text{ GPa}, \kappa = 0.6, E_\infty = \kappa E_0$$
$$m = 1, n = 1, h = 10 \text{ nm}$$
$$E_1 = (1 - \kappa) E_0, v = 0.23 \text{ and } \zeta_1 = 0.5 \text{ sec} \tag{11}$$

图 2 描述了屈曲载荷与长宽比的关系。如图,当长宽比一定时,临界屈曲荷载随着剪切模量和温克尔模量的增加而增大,其中剪切模量较温克尔模量对荷载影响大;临界屈曲荷载随着长宽比的增加而减小并趋于平缓。

图 3 描述了屈曲载荷与松弛模量的关系。如图,随着极限弹性模量与初始弹性模量比值增加板

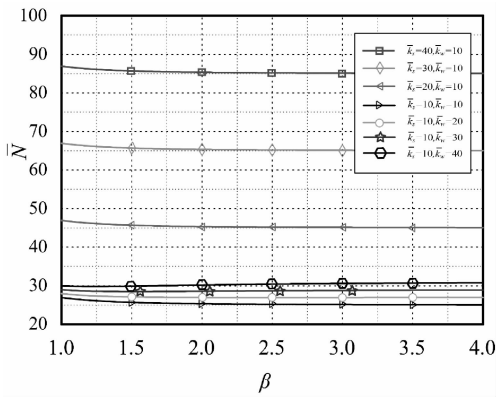


图 2 不同介质模量下,临界屈曲荷载与纳米板长宽比的关系图

Fig.2 Non-dimensional buckling load for length-width ratio with various shear modular parameters and Winkler modular parameters

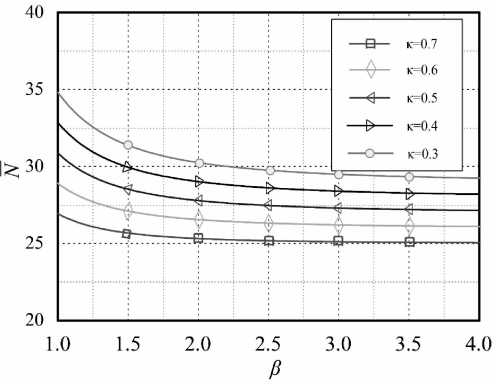


图 3 考虑不同极限弹性模量与初始弹性模量比值(κ),板系统中长宽比与无量纲荷载的关系

Fig.3 Relationship among the nonlocal effect on the buckling load and the aspect ratios of the nanoplate

系统的临界屈曲荷载减小,随着长宽比的增加板系统的屈曲荷载减小并趋于平缓。

3 结论

本文基于修正的偶应力理论,得到了粘弹性纳米板双轴屈曲的一般控制方程,并用 Navier 方法解得了屈曲载荷的解析解。讨论了粘弹性介质对对纳米板屈曲载荷的影响。通过分析发现考虑了偶应力效应时的屈曲行为依赖粘弹性影响,考虑松弛模量后板系统的抗屈曲的性能减弱;板系统的屈曲行为依赖板介质的温克尔模量、剪切模量和极限弹性模量。

基于 Java EE 与 SuperMap 的浙江近海赤潮遥感监测系统开发与应用

朱杭杰¹, 雷 惠^{1,2}, 潘玉良^{1,2}, 黄 备^{2,3}, 邵君波^{2,3}, 唐静亮^{2,3}, 周 斌^{1,2*}
(1.杭州师范大学 遥感与地球科学研究院, 杭州 311121; 2.海洋生态系统监测与健康评价联合实验室, 浙江 舟山 316021; 3.浙江省舟山海洋生态环境监测站, 浙江 舟山 316021)

摘 要:赤潮是我国常见的一类海洋灾害,对海洋环境、海洋旅游、人类健康都有较大威胁。遥感技术具有观测面积大、时效性强、数据综合性和可比性好等特点,是监测赤潮的有力手段。本研究使用 Java EE (Java Platform Enterprise Edition) 和 SuperMap 软件开发了一套基于 WebGIS 的赤潮遥感监测系统。该系统能够实现 MODIS 遥感数据的自动下载及参数提取,并基于已公开发表的赤潮识别算法,实现赤潮疑似区及其发生类型的识别。通过对近十年(2008–2017 年)浙江近海 MODIS 遥感数据的回溯检验,共识别出 413 起疑似赤潮发生事件,与《全国灾害性海洋公报》中的相关记录对比识别率达到 90%,且发生频次最高区域分布与相关监测部门历年统计结果具有良好的 consistency。
关键词:赤潮监测系统;遥感;WebGIS;Java EE;SuperMap

中图分类号:P208;TP79;X87 文献标识码:A 文章编号:1001–7119(2020)03–0025–09
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.006

Development and Application of Zhejiang Coastal HABs Remote Sensing Monitoring System Based on Java EE and Supermap

*Zhu Hangjie¹, Lei Hui^{1,2}, Pan Yuliang^{1,2}, Huang Bei^{2,3},
Shao Junbo^{2,3}, Tang Jingliang^{2,3}, Zhou Bin^{1,2*}*

(1.Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China; 2.Joint Laboratory of Marine Ecosystem Monitoring and Health Assessment, Zhoushan Zhejiang 316021, China; 3.Zhejiang Provincial Zhoushan Marine Ecological Environmental Monitoring Station, Zhoushan Zhejiang 316021, China)

Abstract: Harmful algal blooms (HABs) is a type of common ocean disaster in coastal seas of China, which threatens human health, marine ecosystem and marine tourism. Remote sensing technology is one of the most reliable means to monitor HABs owe to its ability on large area observation, strong timeliness, good data comprehensiveness and comparability. A remote sensing monitoring system based on WebGIS is presented using Java EE (Java Platform Enterprise Edition) and SuperMap software to detect HABs. Reflectance parameters could be extracted from MODIS imagery automatically, and the suspected HABs

收稿日期:2019–03–06
基金项目:浙江省环保厅科研项目(2016A012)。
作者简介:朱杭杰(1993–),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为海洋遥感与地理信息应用。
E-mail: zhuhangjietiancai@foxmail.com
* 通信作者:周斌(1972–),教授,主要从事全球变化及大数据分析、生态环境遥感等研究工作。
E-mail: zhoubin@hznu.edu.cn

areas could be identified along with the causative type by a published HABs detection algorithm. 413 images are identified in the Zhejiang coastal sea between April and September during latest 10 years (2008–2017). Compared with the HABs events recorded in the National Disastrous Marine Bulletins, the recognition success rate of this system could up to 90%. Furthermore, a satisfied consistency on the distribution of the highest frequency areas of HABs is achieved according to marine and environmental protection monitoring departments over the years.

Keywords: HABs monitoring system; remote sensing; WebGIS; Java EE; SuperMap

传统的赤潮监测方法如海面船测、飞机巡航和浮标监测等^[1],存在时效性弱、观测范围小、成本高等不足。得益于近年来遥感技术的飞速发展,渔业、环保等监测部门及其相关领域对近海海域赤潮灾害的监测需求获得了更为密切的关注和响应,卫星遥感已逐渐成为目前赤潮监测领域最有力的手段之一^[2-4]。

赤潮的有效监测,需要同时保证识别模型的有效性和监测系统的实时性。浙江近海海域的赤潮高发期通常在每年的4~9月,优势藻种以东海原甲藻(甲藻类)和中肋骨条藻(硅藻类)为主,海域光学性质复杂,受悬浮颗粒与黄色物质主控,是典型的二类水体,国际通用叶绿素反演算法在该海域偏差大,很难用于赤潮信息的有效判别^[5-7]。

受限于模型效果,早期在与赤潮相关的监测系统中,很少直接使用专门的赤潮判别模型形成结论,如:2006年,张涛等^[8]在其建立的赤潮监控预警系统中,通过MODIS卫星影像提取叶绿素等赤潮相关参数,对赤潮的消长过程进行监测;2008年,杨建洪等^[9]开发的系统,实现了对叶绿素、海温等赤潮相关参数的自动化提取,但赤潮情况仍需由专家人工判定;2014年,李雪丁等^[10]基于C/S架构开发的赤潮预警WebGIS系统,通过互联网为用户提供遥感产品中与赤潮相关的参数信息。

2006年,丘中锋等^[7]基于MODIS数据提出了适用于东海近海赤潮的多波段差比值法反演模型,2009年王云飞^[11]在此基础上利用MERIS-MCI指数,对东海水体赤潮情况进行了分级;2011年,雷惠^[12]提出了一种基于RH指数的东海赤潮水体识别模型,并对东海甲藻与硅藻型赤潮的光谱特性进行了研究,2015年Tao等^[13]在此基础上,进一步提出了基于PDI和DI指数的东海原甲藻型赤潮识别模型。

据此,开始有学者将专门的赤潮识别模型与系统结合,实现赤潮信息的自动监测功能:2016年,朱乾坤等^[14]用C++语言开发的基于C/S架构的东海

赤潮监测系统,利用RH指数模型识别赤潮区域,实现了从数据接收到成图的全自动业务流程;2017年,孙笑笑^[15]使用C++与Java语言,选择 R_{rs} 指数提取赤潮信息,获得了与浮标数据一致的结果;同年,孙嘉敏^[16]同样使用RH指数,基于Java EE和GeoServer开发了浙江近海赤潮遥感监测系统,借助Servlet和JDBC技术实现了从下载到地图服务发布的自动化业务流程。

相较于C/S架构,B/S架构的系统无需用户安装、升级特定客户端,只要通过浏览器就能对空间数据进行GIS操作。同时,Java EE也是目前最流行的企业级Web开发平台之一^[17],具备了面向对象、开发效率较高、可移植性、多线程等优势,综合来说更适用于Web服务器的开发。

本研究以孙嘉敏^[16]的开发为基础,构建了浙江近海赤潮遥感监测系统(Zhejiang coastal HABs remote sensing monitoring system, ZHRMS)。该系统选择目前Java EE开发平台上应用最广泛的Spring和Mybatis框架,极大地提升了系统的开发效率、可维护性以及扩展性^[18]。同时还使用了SuperMap的商业GIS平台,其与开源的GeoServer相比具有专业的技术团队支持,以及更高的安全性。SuperMap的iServer服务器(GIS服务器)是基于Java EE和SuperMap IObjects Java构建的面向服务式架构的企业级GIS产品^[19],实现了将空间数据库中的数据以GIS服务的形式实时发布和自动更新,并通过HTTP协议与前端框架SuperMap iClient进行交互,为用户在浏览器客户端提供GIS功能。SuperMap iObjects Java为超图公司开发的GIS组件,提供地图编辑采集、空间分析、地图可视化、布局输出等全面的GIS功能^[20]。系统选择海域适用性最优的Tao^[13]算法提取赤潮信息,实现了对卫星遥感数据的自动化下载、处理和专题图制作,并具备通过SuperMap iServer(GIS服务器)将地图服务自动发布到互联网的功能,实现了用户在浏览器端访问的需求,能够为相关海监部门提供了更具针对性的参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本系统使用的遥感影像来自 NASA Oceancolor (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 提供的 MODIS/Aqua 传感器二级产品。该级别的产品已经过官方的大气校正、几何校正等处理,包含叶绿素浓度、水色波段遥感反射率、影像经纬度等信息。

在赤潮识别结果的验证中,使用了 2008–2017 年《中国海洋灾害公报》^[21] 中的浙江近海赤潮事件数据。根据公报中赤潮事件的发生时间下载对应的遥感影像,在与影像对应的赤潮事件发生区位中,对有云层等干扰的无效像元进行掩膜处理,最终得到可以用于赤潮监测系统验证的影像。

1.2 赤潮识别模型

本系统使用 Tao 等人^[13]提出的赤潮识别模型。该模型充分考虑了东海水体的光学复杂性,能够有

效区分赤潮疑似区水体与近海浑浊水体以及混合型水体,并进一步给出赤潮发生类型的判断,与本文对浙江近海海域的赤潮监测需求十分贴合。具体流程如图 1 所示。

2 系统的设计

2.1 功能设计

针对需求,系统按功能分为以下四个模块:地图控制模块、空间分析模块、赤潮信息模块、辅助信息模块。具体功能模块设计如图 2 所示。

2.2 结构设计

本系统由 SuperMap iServer 服务器和 Web 服务器组成。Web 服务器基于 Java EE 开发,负责系统的数据自动化处理、数据库交互以及对浏览器客户端的 HTTP 请求进行接受和响应。其整体采用了 MVC(model view controller)的设计模式,该模式具有设计清晰、易于扩展、运行可分布的特点,其主要

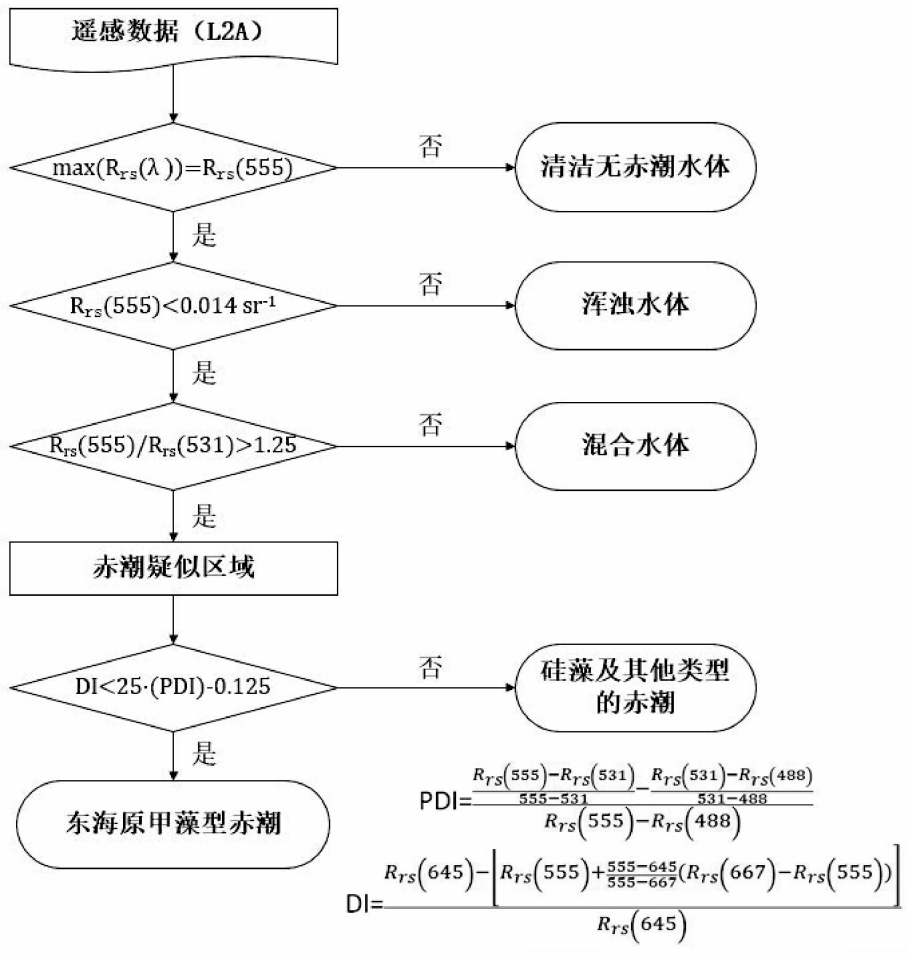


图 1 赤潮监测系统使用的赤潮疑似区提取流程^[13]
Fig.1 HABs suspect zone extraction process used in ZHRMS

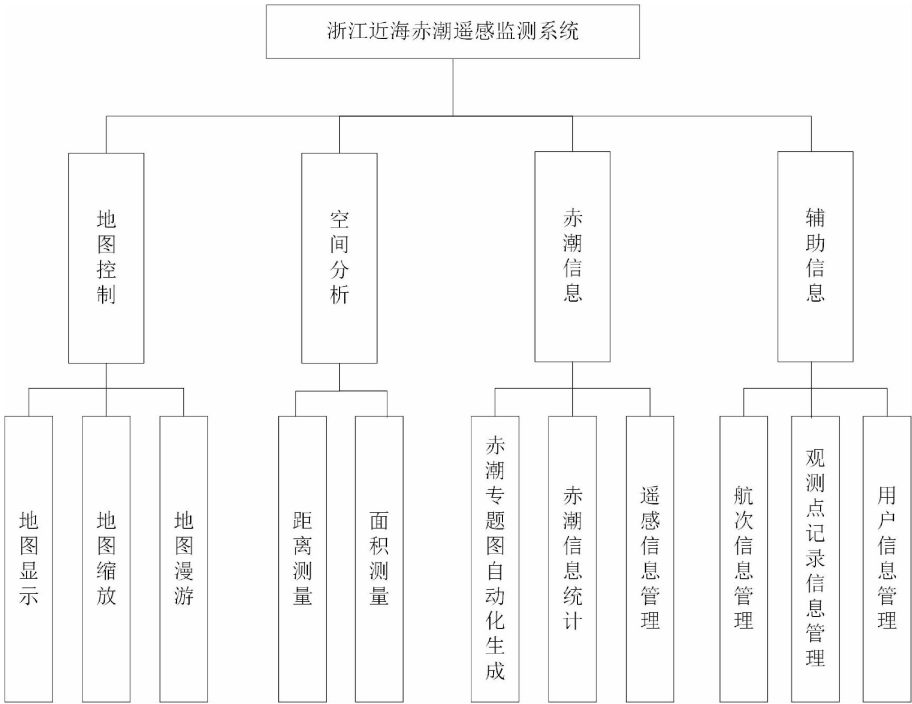


图 2 浙江近海赤潮遥感监测系统功能模块图

Fig.2 Function module diagram of ZHRMS

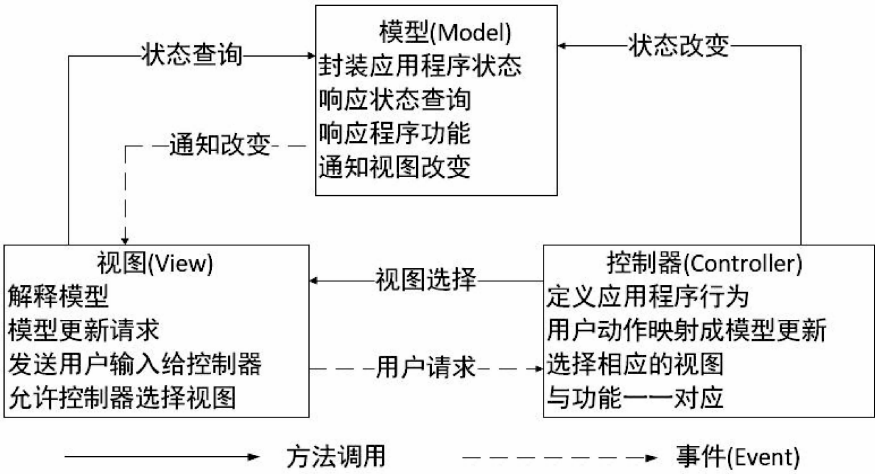


图 3 MVC 模式的关系和功能图

Fig.3 Relationship and function diagram of MVC pattern

工作原理如图 3 所示^[22]。

系统应用了 Java EE 的 3 层体架构^[23],分为表现层、服务层以及数据层,整体结构如图 4 所示。

(1)表现层

Web 服务器使用 Spring 框架作为容器,选择其中的 SpringMVC 功能模块实现表现层的功能。用户通过浏览器客户端对 Web 服务器发送 HTTP 请求,服务器根据请求内容调用对应的服务层接口,并将结果封装在 HTTP 响应中返回给前端页面。JSP 页

面负责对表现层或 iServer 服务接传来的数据进行渲染,最终以图像或控件的形式呈现给用户。

(2)服务层

负责处理系统核心业务,包括遥感数据下载、遥感数据处理、专题图成图、信息查询等逻辑,并将处理或查询结果返回给表现层。

(3)数据层

数据层负责实现程序与数据库之间的交互,并向服务层提供数据管理方法的接口。本系统使用

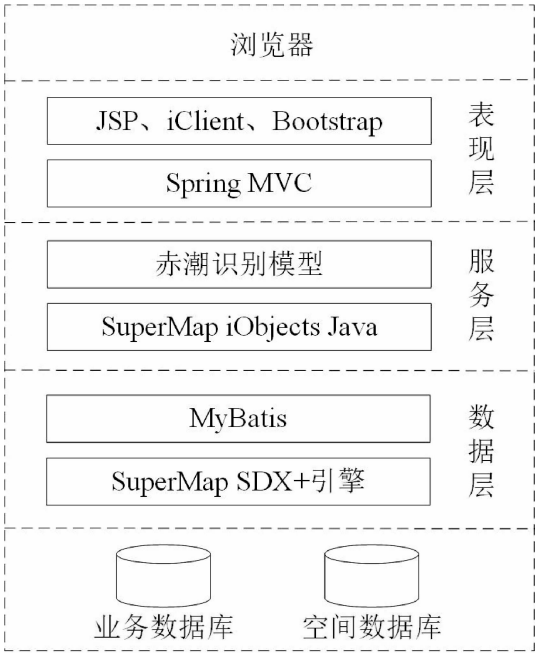


图 4 Web 服务器结构

Fig.4 Application Server Structure of ZHRMS

Mybatis 框架控制程序与数据库之间的交互,该框架基于 JDBC 框架实现,在保留了 JDBC 优势的同时能自动生成相关配置,开发人员通过编写配置文件中的 SQL 语句就能实现相应的业务逻辑。同时,系统使用 SuperMap iObjects Java 完成与空间数据库的交互,其中封装的 SuperMap SDX+引擎实现了对空间数据的管理。

3 系统的实现

系统的开发环境为 Windows 10 平台,使用 Eclipse 4.5.0 作为 IDE (integrated development environment)工具,JDK 版本为 1.8,用 maven 作为项目管理工具,同通过 SVN 控制项目版本。系统的运行环境为 Windows xp 及以上版本,或 Linux CentOS 6 以上版本平台,Web 容器为 Tomcat 7.0。

3.1 地图控制模块

该模块使用了基于 Javascript 的开发技术,应用了 Bootstrap 框架以及 SuperMap 的 iClient 框架,为用户提供了基本的 GIS 功能,如图 5 所示。页面提供了赤潮和叶绿素专题图的显示、放大、缩小、平移等操作。可通过日期控件查看指定日期的专题图信息,不同类型赤潮疑似区通过色块区。

3.2 空间分析模块

赤潮跨度与面积的测量通过 iClient 与 iServer 服务器实现。iClient 框架中的量测函数将鼠标与地图事件的参数传递给 iServer 服务器,经过空间分析后将计算结果返回给用户。图 6 显示了赤潮疑似区域面积量测结果,可以将结果保存到数据库,以便于统计分析。

3.3 赤潮信息模块

赤潮信息模块为该系统核心模块,基于第三方工具包和框架,实现了赤潮专题图自动化生成、遥感数据管理、赤潮信息统计功能。

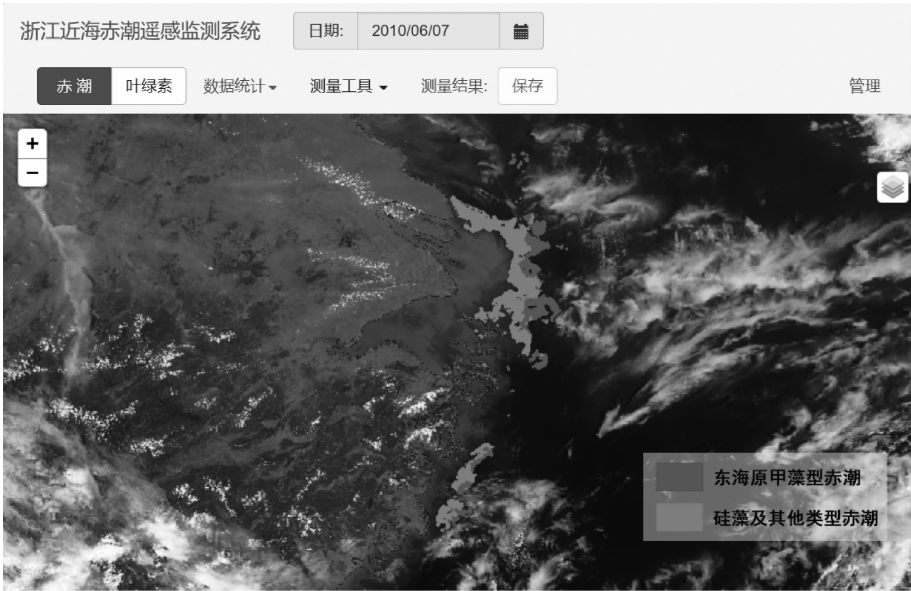


图 5 赤潮监测系统主界面

Fig.5 Main user interface of ZHRMS



图 6 赤潮面积量测

Fig.6 HABs area measurement

遥感数据的定时下载与自动化处理功能的具体流程,如图 7 所示。系统每日定时下载当日的 MODIS L2 级影像数据,提取波段、地理信息等参数,通过赤潮遥感识别模型获得赤潮疑似区信息,并将其输出为矢量数据。调用 SuperMap iObjects Java 生成赤潮疑似区专题图,以空间数据的形式保存到数据库,最后通过 SuperMap iServer 实现赤潮信息的自动发布与更新。

遥感信息统计功能基于 Highcharts 图表框架,查询数据库中赤潮面积数据,渲染成折线统计图呈现给用户。遥感数据信息管理功能可以为用户提供影像的添加、删除、修改以及按日期查询等功能,主要包括文件名、影像日期、自动及手动量测的赤潮面积等信息。

3.4 辅助信息管理模块

辅助信息管理模块包括航次信息管理、观测点信息管理以及用户信息管理功能。该模块为系统后台管理模块,相关页面使用基于 JQuery 的 EasyUI 框架实现。

航次信息主要包含航次编号、日期、参与人员等

字段信息。观测点信息包含点位名称、经纬度、所属航次等字段信息。用户可以对航次信息及观测点信息进行增加、删除、修改和查询。用户信息管理功能为用户提供了注册、登录、信息查询与信息修改等功能,并实现了用户与指定航次的关联操作。

4 系统应用与验证

4.1 系统应用

本系统于 2018 年 7 月部署到一线业务监测单位试运行。系统每日生成一期赤潮识别专题图,从卫星影像自动下载到业务化识别处理,流程所需时长一般控制在 5 min 以内。数据处理业务逻辑代码使用了同步锁,支持多线程添加赤潮监测产品,从而确保了系统批处理时的运行效率。

利用系统批量下载并处理了 2008–2017 年间 4~9 月的影像数据,在剔除云层遮挡等无效数据后,其中有 413 期赤潮产品专题图中识别出赤潮疑似区,赤潮发生频次统计结果如图 8 所示。

为了更好的对赤潮多发区进行监测和预警,本

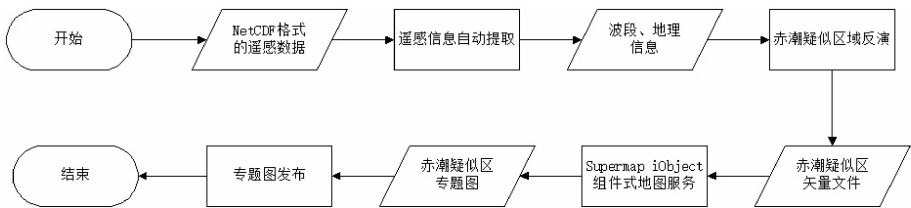


图 7 系统的数据处理流程

Fig.7 Data processing flow of ZHRMS

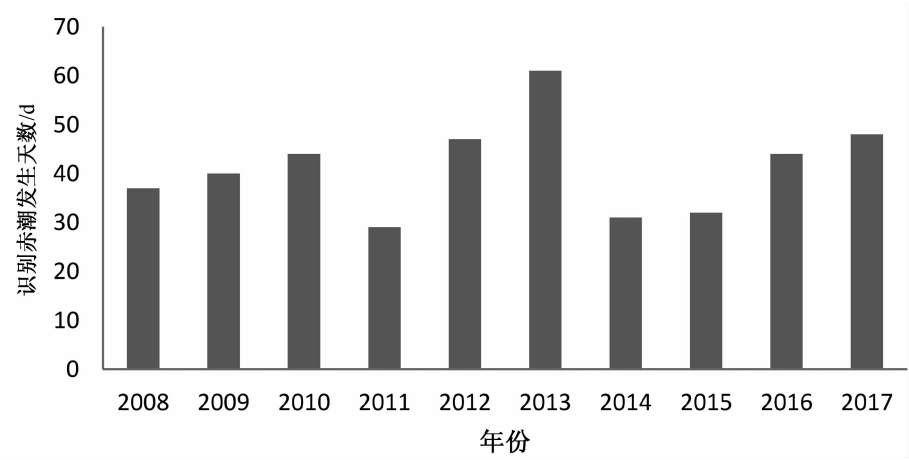


图 8 近 10 年浙江近海赤潮灾害发生频次识别结果统计图

Fig.8 Frequency chart of HABs disasters in Zhejiang coastal sea in the past decade by HZRMS

研究整合了 413 期赤潮识别专题图中所有赤潮点位,生成网格矢量图,通过自然断点法^[24]对所有网格进行分类,最终得到浙江近海海域赤潮频次分级专题图,如图 9 所示。

图 9 中,赤潮频次表示近 10 年内网格数据中被系统识别出的赤潮天数。红色区域为赤潮发生频次最高的类级,主要分布在长江口、花鸟山、嵎山、东极岛、东福山、朱家尖东南、韭山列岛东部到东南部以及渔山列岛北部海域。该结果与相关海洋监测站统计的赤潮发生分布信息具有很高的一致性。

4.2 赤潮识别效果验证

近 10 年《全国灾害性海洋公报》中共记载了 74

起浙江近海赤潮事件,排除云覆盖等不利条件,筛选获得了与公报中的 30 起赤潮事件有效匹配影像,用于赤潮识别结果验证。在这 30 起赤潮事件中,系统识别判定为赤潮疑似区域的有 27 起,赤潮识别率达到了 90%。被识别出的赤潮事件及相应的识别日期如表 1 所示。

5 结论

本文基于现有赤潮遥感识别模型,借助 Java EE 和 SuperMap iServer 构建了一套 WebGIS 系统,用于浙江近海海域的赤潮信息监测。该系统调用第三方

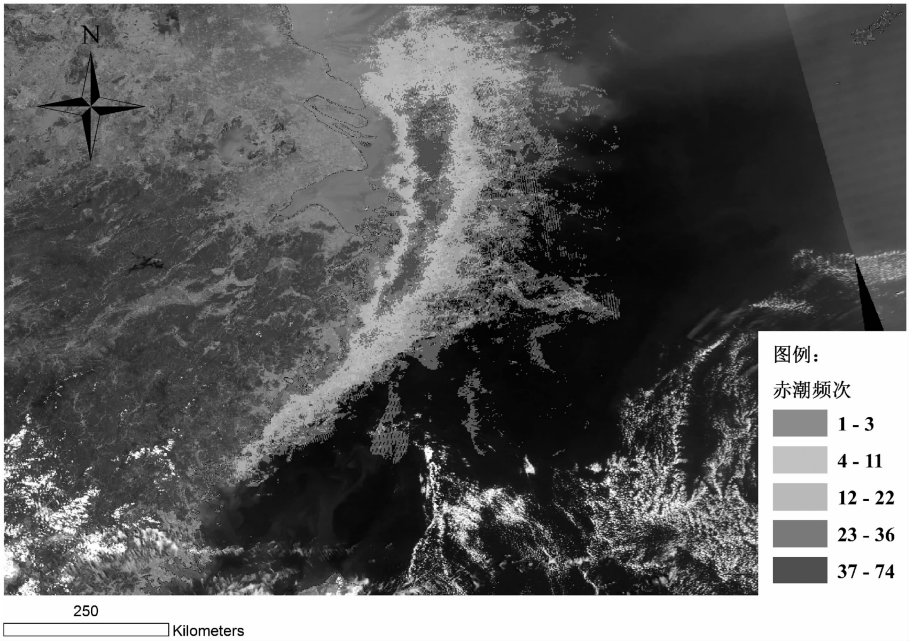


图 9 近十年浙江近海赤潮频次分布识别结果专题图

Fig.9 Frequency distribution of HABs in Zhejiang Province in the past decade by HZRMS

表 1 赤潮遥感识别信息统计

Table 1 HABs remote sensing identification information statistics

序号	赤潮事件时间	地点	成功识别日期
1	2008 年 5 月 5 日~5 月 31 日	舟山朱家尖东部海域	2008 年 5 月 7/11/18 日
2	2008 年 5 月 6 日~5 月 12 日	温州市南麂海域	2008 年 5 月 7 日
3	2008 年 5 月 6 日~5 月 8 日	东福山—渔山列岛南部	2008 年 5 月 7 日
4	2008 年 5 月 11 日~6 月 3 日	嵎山岛和枸杞岛南侧海域	2008 年 5 月 11/18 日
5	2008 年 5 月 16 日~5 月 24 日	朱家尖北侧—中街山列岛—嵎山—花鸟山附近海域	2008 年 5 月 18 日
6	2008 年 7 月 16 日~7 月 18 日	岱山县—长涂山南部海域	2008 年 7 月 17 日
7	2008 年 8 月 5 日~8 月 6 日	东福山附近—普陀山东侧连线海域	2008 年 8 月 5 日
8	2009 年 4 月 28 日	台州外侧海域	2009 年 4 月 28 日
9	2009 年 5 月 2 日~5 月 7 日	渔山列岛—台州列岛海域	2009 年 5 月 5 日
10	2009 年 5 月 7 日~5 月 12 日	温州苍南大渔湾海域	2009 年 5 月 8/10 日
11	2009 年 5 月 19 日~5 月 30 日	长江口外、舟山北部海域	2009 年 5 月 19/21/26/28 日
12	2009 年 6 月 17 日~6 月 22 日	舟山朱家尖岛以及东海域	2009 年 6 月 18/19 日
13	2009 年 6 月 17 日~6 月 22 日	嵎山西南海域	2009 年 6 月 18 日
14	2009 年 8 月 4 日~8 月 5 日	舟山朱家尖东部海域	2009 年 8 月 5 日
15	2010 年 5 月 26 日~6 月 10 日	浙江省苍南海域	2010 年 6 月 6/7 日
16	2011 年 5 月 13 日~6 月 4 日	浙江省温州苍南石坪附近海域	2011 年 5 月 18/30/31 日
17	2012 年 6 月 3 日~6 月 7 日	舟山嵎泗海域	2012 年 6 月 5 日
18	2013 年 5 月 13 日~5 月 29 日	温州苍南海域	2013 年 5 月 14/21/23 日
19	2013 年 5 月 18 日~6 月 2 日	台州玉环坎门海域	2013 年 5 月 23/28 日
20	2013 年 5 月 20 日~5 月 24 日	宁波韭山列岛东南海域	2013 年 5 月 21 日
21	2014 年 5 月 21 日~6 月 9 日	台州温岭海域	2014 年 6 月 2 日
22	2016 年 5 月 16 日~5 月 21 日	舟山嵎山海域	2016 年 5 月 17 日
23	2016 年 5 月 22 日~5 月 30 日	苍南鳌江口—霞关海域	2016 年 5 月 27 日
24	2016 年 7 月 5 日~7 月 14 日	舟山朱家尖以东海域	2016 年 7 月 5/7 日
25	2016 年 7 月 24 日~7 月 27 日	舟山朱家尖东南海域	2016 年 7 月 24/25/26 日
26	2016 年 8 月 8 日~8 月 11 日	嵎山东南海域	2016 年 8 月 8/10/11 日
27	2017 年 6 月 16 日~7 月 6 日	渔山列岛与檀头山之间中部海域	2017 年 6 月 17 日、7 月 3/4 日

工具包实现遥感数据自动化处理与发布,使用 SuperMap iClient 实现页面与系统服务器交互,为用户提供地图显示、空间分析等 GIS 功能。经验证,系统对浙江近海十年来的赤潮时间识别成功率达 90%。据此形成的赤潮频次分布专题图,能为相关部门对赤潮的监控与预警防治措施提供有效的科学依据。

致谢 感谢孙嘉敏同学在系统构建方面给予的指导、超图公司在技术上的支持以及浙江省舟山海洋生态环境监测站所提供的系统试运行环境。

参考文献:

[1] 刘雪芹,夏新,张建辉,等. 赤潮监测技术的现状与发展[J]. 中国环境监测, 2002, 18(6):64-67.

[2] 刘君臣,杨玉忠,黄勇. 遥感技术在海洋赤潮的监测与防治方面的应用[J]. 北京测绘, 2015(3):122-126.

[3] 王其茂,马超飞,唐军武,等. EOS/MODIS 遥感资料探测海洋赤潮信息方法[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(1).

[4] 黄韦良,毛显谋,张鸿翔,等. 赤潮卫星遥感监测与实时预报[J]. 海洋预报, 1998(3):110-115.

[5] 孙霞. 光照对东海赤潮高发区赤潮藻类生长的影响[D]. 青岛:中国海洋大学, 2005.

[6] Mao Z, Chen J, Pan D, *et al.* A regional remote sensing algorithm for total suspended matter in the East China Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124(124):819-831.

[7] 丘仲锋. 东海赤潮高发区水色遥感算法及赤潮遥感监测研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2006.

[8] 张涛,周忠海,卜志国,等. 潮监控预警系统的研究[J]. 山东科学, 2006, 19(5):12-15.

[9] 杨建洪,陈艳拢,赵冬至,等. 赤潮卫星遥感监测系统软件构建[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(s2):80-83.

[10] 李雪丁,曾银东,任在常,等. 福建省赤潮预警系统研究与应用[J]. 海洋预报, 2014, 31(4):77-84.

[11] 王云飞. 东海赤潮监测卫星遥感方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009.

[12] 雷惠. 基于固有光学量的东海赤潮遥感提取算法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.

[13]

Tao B, Mao Z, Lei H, *et al.* A novel method for discriminating *Prorocentrum donghaiense* from diatom blooms in the East China Sea using MODIS measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158:267-280.

[14]

朱乾坤, 陶邦一, 雷惠, 等. 东海赤潮遥感自动监测系统开发与应用[J]. *海洋学研究*, 2016, 34(2):18-24.

[15]

孙笑笑. 联合浮标与卫星数据的赤潮预警与决策服务[D]. 杭州:浙江大学, 2017.

[16]

孙嘉敏. 基于 WebGIS 的浙江近海海洋遥感赤潮卫星监测系统的研究与实现[D]. 杭州:杭州师范大学, 2017.

[17]

王向兵. Java EE 多层架构 Struts2+Spring3+Hibernate3 +Ajax 的整合[D]. 大连:大连海事大学, 2009.

[18]

Walls C, Breidenbach R. *Spring in Action*. 5th edition [M]. Greenwich: Manning Publications Co. 2018.

[19]

汪秀兵, 张广弟, 耿衬. 基于 SuperMap iServer 的赣州市旅游信息服务发布研究[J].

[20]

丁晓光. 基于 SuperMap Objects 的盟市级数字林业信息系统的开发与实现[D]. 呼和浩特:蒙古师范大学. 测绘标准化, 2012(2):25-28.

[21]

国家海洋局. 中国海洋灾害公报[EB/OL].<http://m.lc.mlr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgg/zghyzhgb>

[22]

任中方, 张华, 闫明松, 等. MVC 模式研究的综述[J]. *计算机应用研究*, 2004, 21(10):1-4.

[23]

于涛. 基于 Java EE 的信息管理系统研究与设计实现[D]. 上海:华东师范大学, 2010.

[24]

Chen J, Yang S T, Li H W, *et al.* Research on Geographical Environment Unit Division Based on the Method of Natural Breaks (Jenks) [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, XL-4/ W3(4):47-50.

(上接第 24 页)

参考文献:

[1]

Frégonèse S, Meng N, Nguyen H N. Electrical compact modelling of graphene transistors [J]. *Solid State Electronics*, 2012, 73:27-31.

[2]

Kiasat M S, Zamani H A, Aghdam M M. On the transient response of viscoelastic beams and plates on viscoelastic medium [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 83(7-8):133-145.

[3]

Attia M A, Mahmoud F F. Analysis of viscoelastic Bernoulli - Euler nanobeams incorporating nonlocal and microstructure effects [J]. *International Journal of Mechanics & Materials in Design*, 2016:1-22.

[4]

Ansari R, Oskouie M F, Sadeghi F, *et al.* Free vibration of fractional viscoelastic Timoshenko nanobeams using the nonlocal elasticity theory [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2015, 74:318-327.

[5]

Attia M A, Mahmoud F F. Size-dependent behavior of viscoelastic nanoplates incorporating surface energy and microstructure effects [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 123:117-132.

[6]

Liu J C, Zhang Y Q, Fan L F. Nonlocal vibration and biaxial buckling of double-viscoelastic-FGM-nanoplate system with viscoelastic Pasternak medium in between [J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(14):1228-1235.

[7]

刘建超. 考虑表面效应的双层 FGM 纳米板双轴屈曲分析[J]. *科技通报*, 2018(6).

[8]

Lu L, Guo X, Zhao J. On the mechanics of Kirchhoff and Mindlin plates incorporating surface energy [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2018, 124:24-40.

江苏一次强对流天气的中尺度诊断分析

赵虹^{1,2}, 燕成玉^{3*}, 刘寅⁴, 陆一磊⁵

(1.江苏省南京市六合区气象局,南京 211500;2.中国气象局 交通气象重点开放实验室,南京 210000;

3.河北省秦皇岛市气象局,河北 秦皇岛 066000;4.江苏省气象探测中心,南京 210000;

5.江苏省南京市高淳区气象局,南京 211300)

摘要:利用再分析资料、地面观测数据和新一代单站雷达资料对2015年8月6日发生在江苏地区的一次大范围强对流过程从多个角度对其进行了诊断分析。研究表明:地面飑线是本次强对流天气的直接影响系统。本次过程发生在高空槽东移,副高西伸北抬的过程之中,高空干冷,低层暖湿;飑线过境前后风向突变、风力猛增、气压涌升、气温急降、相对湿度大幅上升;地面能量堆积,中低层存在能量锋区,气层处于不稳定状态,低层强烈的垂直上升速度,水汽通量散度低层辐合高层辐散,这些因素都为强降水提供了有利的条件;雷达回波显示,六合地区雷暴单体的右侧有明显的阵风锋,同时在回波的左前方有明显弱窄带回波,对应雷暴单体后侧的出流边界,强风速带紧贴雷暴单体的右前方,后侧辐散区域对应雷暴内部冷下沉气流在地面扩散和暖空气交汇后形成的一道飑锋,垂直方向可以观察到质心迅速下降,这些特征对灾害性大风的预报有很好的指示意义。

关键词:地面飑线;强对流;大风

中图分类号:P456.1

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)03-0034-09

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.007

Mesoscale Diagnostic Analysis of a Strong Convective System in Jiangsu Province

Zhao Hong^{1,2}, Yan Chengyu^{3*}, Liu Yin⁴, Lu Yilei⁵

(1. Nanjing Liuhe District Meteorological Bureau, Nanjing 211500, China; 2.Laboratory of Traffic

Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210000, China; 3.Qinhuangdao

Meteorological Observatory of Hebei, Qinhuangdao Hebei 066000, China;

4. Jiangsu Meteorological Exploration Center, Nanjing 210000, China;

5. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 211500, China)

Abstract: A large-scale strong convection which is occurred in Jiangsu Province on August 6 2015 is diagnosed and analyzed from various angles using reanalysis data, surface observation data and the new generation radar data. The main conclusions are the followings: (1) the ground squall line is the direct impact system of this strong convection. The process occurred in the eastward movement of the high-altitude trough and the westward extension and northward lift of subtropical high. The upper air is dry and cold and the low level is warm and humid. During this convection, the wind direction is suddenly changed, wind speed is shot up, the pressure is upwelling, the temperature is dropped sharply, and the relative humidity rises sharply. The atmosphere energy is accumulated in the ground, there is an energy

收稿日期:2019-03-13

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20161074),南京市气象局科研项目(NJ201805,NJ201806)。

作者简介:赵虹(1985-),女,工程师,主要从事天气预报工作。E-mail:hongzh0309@163.com。

*通信作者:燕成玉(1970-),女,高级工程师,主要从事天气预报工作。E-mail:1075594512@qq.com。

front area between the middle level and lower level, the strong vertical rising speed, the low-level convergence and high-level divergence of water vapor flux are the favorable factors for heavy precipitation. The radar echo shows that there is a clear gust front on the right side of the thunderstorm in Liuhe area, simultaneously, and there is a distinct weak narrow-band in the left front of the echo, corresponding to the outflow boundary of the rear side of the thunderstorm. The strong wind speed belt is closely attached to the right side of the thunderstorm, the rear side divergent area corresponds to a squall front formed by the confluence of the cold downward flow from the inside of thunderstorm and the warm air in the surface. In addition, the center of the radar echo is observed decline rapidly in the vertical direction. The above characteristics have a good indication of the prediction of severe winds.

Keywords: ground squall line; strong convection; gale

强对流天气是各种天气尺度系统相互作用而产生的中小尺度现象,具有发生时间短、灾害强度大、影响范围小、持续时间短的特征。在强对流天气背景下,往往是雷雨、大风、冰雹等灾害性天气同时发生,这些灾害性天气发生时间短、破坏性强,且预报难度高,预警时效短,常对人们的生命财产造成严重危害^[1]。因此强对流天气一直以来是天气预报工作的重点和难点,许多专家对此都做了深入的专项研究^[2-4],我国强对流天气的分析预报能力也有了较大的提高。

由于强对流天气产生的灾害性天气过程有一定的突发性和无规律性,在实际工作中一般只能通过雷达、卫星等对其进行监测和预报,因此国内外气象工作者对其环境条件和雷达回波结构特征进行了许多研究^[5-10]。吴芳芳^[11]等发现含有中气旋的对流风暴通常产生在对流有效位能较高和垂直风切变较大的环境条件下。许爱华^[12]从强对流的不稳定条件和主要触发条件的角度,提出中国强对流天气5种基本类别并给出了基本解释;朱君鉴^[13,14]等分析了雷达的冰雹指数、垂直积分液态含水量、中气旋等产品,揭示了一次冰雹风暴的发生、发展和消亡的过程;杨晓霞^[15]对山东省一次飏线天气过程进行诊断分析,研究发现低能舌叠加在高能舌之上,导致大气对流性不稳定,较强的上升运动与风垂直切变相互作用,促使对流系统发展形成飏线,产生雷雨大风。张芳华等^[16]对飏线天气过程成因进行天气动力学诊断分析后发现,对流层上层干冷空气侵入和低层暖湿气流强烈辐合是飏线天气的触发机制;郁珍艳对冷涡成熟阶段的中尺度对流系统(MCS)的发生发展特征进行了分析^[17];梁建宇等^[18]对一次产生地面大风的“人字形”强对流过程进行了观测资料分析和研究。

2015年8月6日江苏多个县市出现了一次破

坏性较强的飏线天气过程,给当地的工农业生产及人们生活带来严重影响。此类灾害突发性强,破坏性大,当地基层预报员对这类天气过程也没有进行过详细的诊断研究,因此本文利用再分析资料、自动气象站资料以及雷达资料,采用天气学动力诊断方法,对这次过程进行了中尺度分析,探讨飏线产生的环境条件,以此加强对飏线天气的认识,以期提高对此类强对流天气的监测和预报能力。

1 天气环流形势

2015年8月6日02时(北京时,下同)亚洲高纬地区为两槽一脊,东南洋面有台风苏迪罗逐渐向台湾方向移动,副高位于台风与东亚大槽之间。江苏处于高空槽前,副高边缘,高层较干。随着台风向西北方向移动,到6日14时,高空槽逐渐北抬,副高进一步西伸(图1a)。低层850 hPa(图1b)和925 hPa(图1c)上,安徽中部到江苏北部一带有明显的切变且有明显的湿区配合。

此次强对流过程影响江苏的主要时段为13时到17时,因此给出8月6日14时到17时自动站观测到的逐小时降水量(图2)。从图中可以看到14时的最大降水量位于六合,1 h降水量可达46.7 mm。15时的六合地区的强降水仍持续,并向东北方向蔓延,最大小时降水量为20.9 mm,位于江苏北部连云港地区。16时的最大降水量位于江苏中部的宝应地区,小时最大降水量可达76.8 mm,为这4个时次小时降水之最。17时强降水中心位于盐城建湖,最大小时降水量为34.6 mm。从降水量的逐小时变化可以看出,此次强对流过程从江苏的西南部向东北部发展,沿途造成了较强的短时强降水天气。

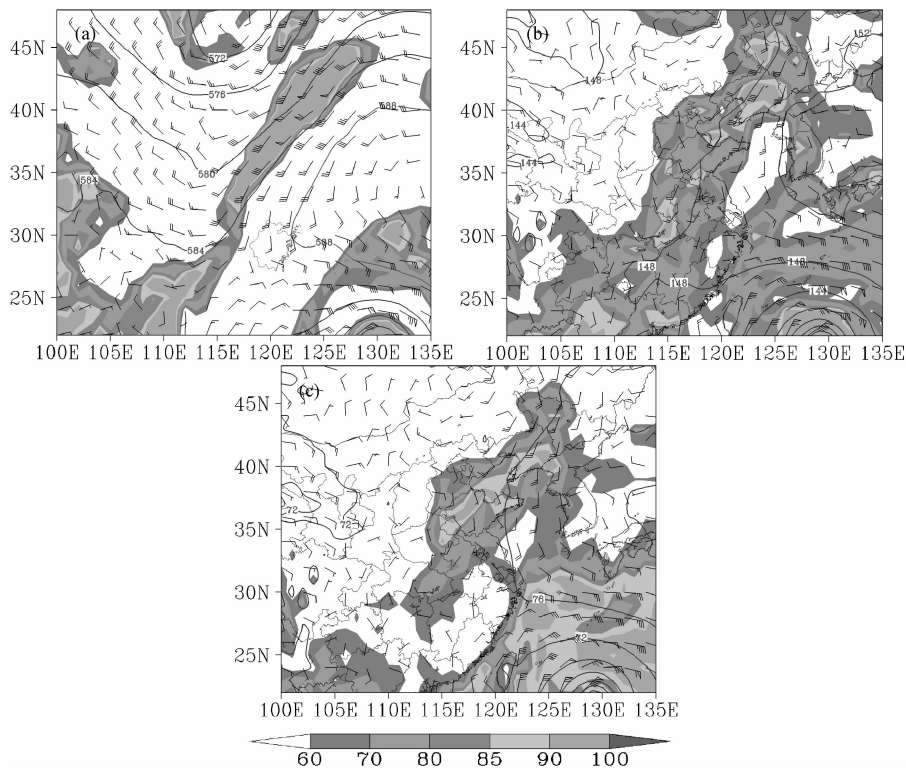


图 1 2015 年 8 月 6 日 14 时的 500、850 hPa 和 925 hPa 的高度场(实线)、风场(风向杆)和相对湿度(阴影)空间分布
Fig.1 The height fields (gpm, black solid line), wind fields(m/s, wind shaft) and relative humidity (%)
on 500 hPa(a), 850 hPa(b) and 925 hPa(c) on 14:00 BJT at 6 April 2015

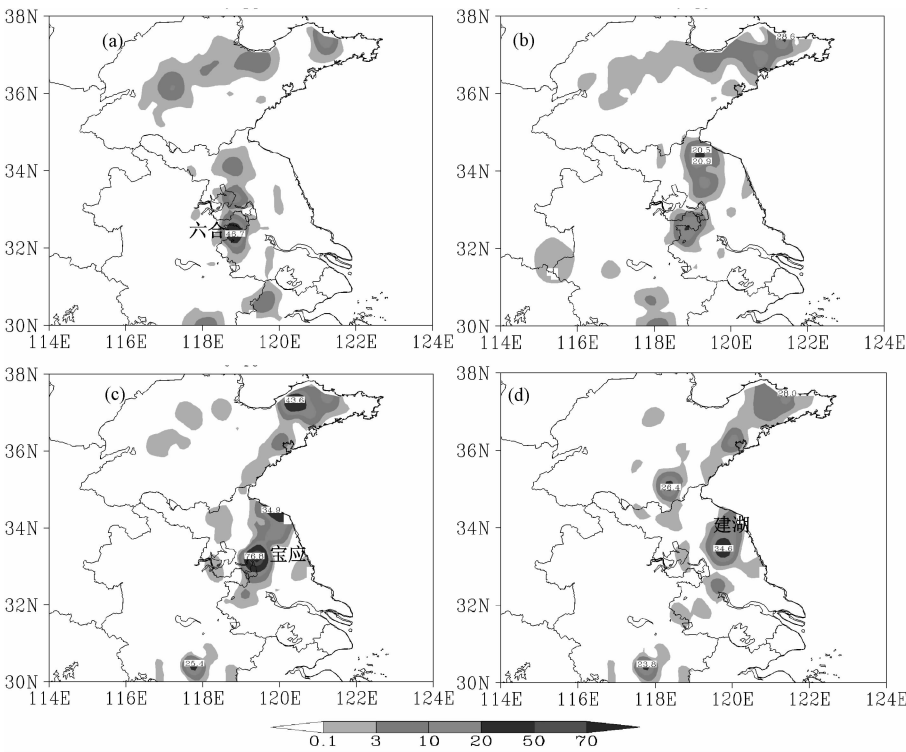


图 2 2015 年 8 月 6 日 14 时(a)、15 时(b)、16 时(c)、17 时(d)自动站 1 h 小时降水量
Fig.2 The hourly precipitation from surface observations on 14:00 BJT (a), 15:00 BJT (b),
16:00 BJT (c) and 17:00 BJT (d) at 6 April 2015

2 自动站要素场分析

飊线出现会引起风向突变、风力猛增、气压涌升、气温急降、相对湿度大幅上升。这次飊线过境前后,从安徽到江苏自西南到东北的多个气象要素记录先后出现了明显的不连续变化。以六合站为例,分析了此次过程前后的逐分钟气压、2 min 风速、气温、相对湿度和降水随时间的逐分钟变化曲线。由图中可见,从气温和相对湿度的变化图上可以很明显的看出,二者呈一个反位相的关系。13 时~16 时,温度陡降,湿度陡升。气压在 13 时~15 时涌升,升幅达到 2.0 hPa,15 时~16 时又陡降 1.5 hPa,呈现一个明显的“雷暴鼻”;2 min 风速在 12 时 30 分开始迅速增大。统计逐分钟的降水量可以发现,最强降水发生在 13:30-14:00,随着强降水的出现,风速继续增大,2 min 风速上升到 16.7 m/s,极大风速达到 34.7 m/s(13:46),且风向由原来的偏东南风转为偏北风。风速和气压的剧烈变化时段与降水的集中时段基本吻合。六合站 12:43 分出现降水到 14:47 分降水停止,强降水集中时段为 13:30 分到 14:30 分,1 h 累积降水达到 54.5 mm。地面气象要素的这些变化特征与典型飊线过境时的情形一致。

3 热力和动力分析

3.1 假相当位温

假相当位温作为综合表征温度和湿度的参数,其高低值在一定程度上代表了湿静力能量的高值区,假相当位温场中的等值线密集区又称为能量锋区。中尺度气象学指出,假相当位温随高度递减代表气层处于不稳定状态。图 3 为 8 月 6 日 08 时、14 时及 18 时的假相当位温沿 118.5°E 的高度剖面图。从图中可以看出,6 日 08 时,在 31°N~34°N 之间 800~450 hPa 附近为假相当位温的低值带,且在 33°N 上空 700 hPa 附近有一个低值中心为 325 K。14 时,800~450 hPa 附近仍维持假相当位温的低值带,中心仍位于 33°N 上空,600 hPa 附近,中心强度为 327 K,且近地面 33°N 附近有假相当位温发展。500 hPa 以下,假相当位温随高度的升高而减小,且假相当位温在 600 hPa 以下分布密集,说明此时大气低层处于层结不稳定状态。到了 18 时,随着降水潜热能量释放,不稳定能量减弱,大气的层结不稳定状态也迅速减弱,向不利于对流发展的趋势演变。

3.2 对流有效能

6 日 08 时,自低层到高层都有明显的东西向高能舌自安徽伸向江苏。在低层,安徽中东部和江苏

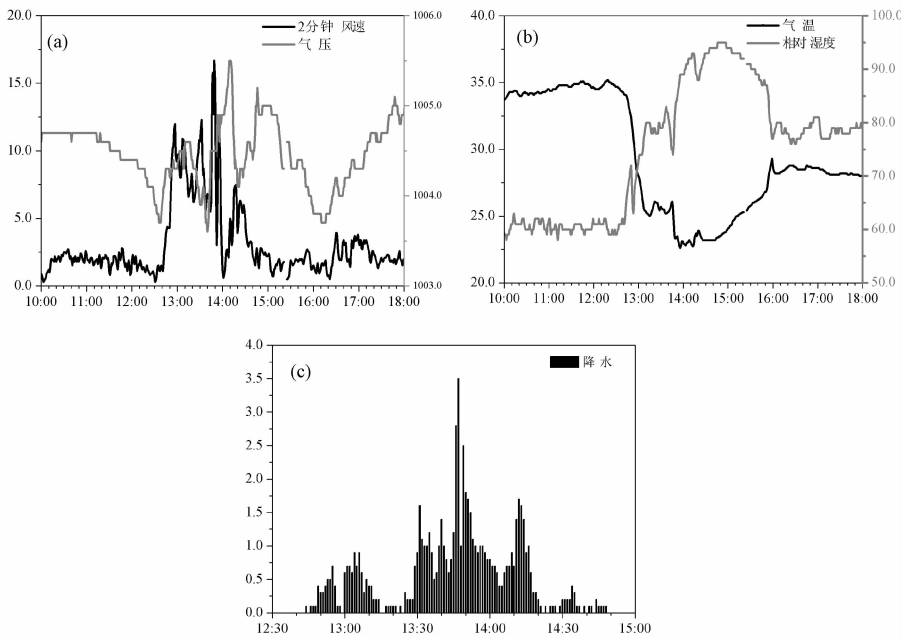


图 3 2015 年 8 月 6 日江苏六合站逐分钟 2 分钟风速和气压(a)、气温和相对湿度(b)以及降水的变化

Fig.3 The minutely variation of the 2 minute wind speed and pressure(a), temperature and relative humidity(b) and precipitation(c) at Luhe station on April 6, 2015

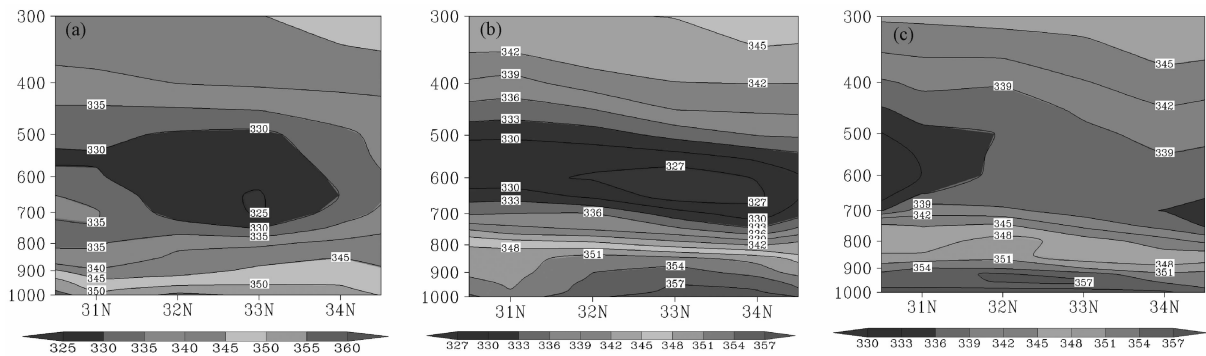


图 4 2015 年 8 月 6 日 08 时(a)、14 时(b)和 18 时(c)假相当位温沿 118.5°E 的高度剖面图
Fig.4 The height profile of potential pseudo-equivalent temperature along 118.5°E on 08:00 BJT, 14:00 BJT and 18:00 BJT at 6 April 2015

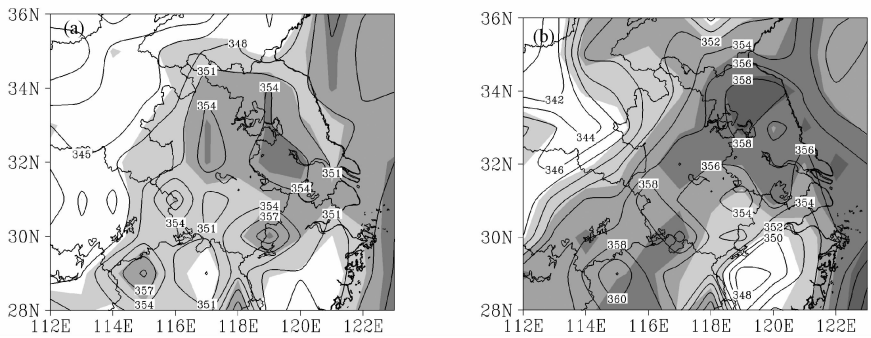


图 5 2015 年 8 月 6 日 08 时和 14 时不稳定能量 CAPE(阴影)和假相当位温的空间分布图
Fig.5 The space distribution of convective available potential energy and potential pseudo-equivalent temperature on 08:00 BJT and 14:00 BJT at 6 April 2015

的东部地区为 CAPE 值的大值区,有两个高值中心,一个位于安徽中部,数值达 1500 J/kg,另一个位于江苏中东部地区,中心值可达 1600 J/kg(图 5a)。6 日 14 时,高能舌向东扩展到了江苏的北部地区,其中心的 CAPE 值达到了 2100 J/kg(图 5b)。这种不稳定能量的堆积有利于强对流的发生。

3.3 垂直运动

图为 6 日 14 时的垂直速度场沿强降水区的剖

面图。从图中可以看出,此次过程,垂直方向影响高度不是很高,沿强降水一带 700 hPa 以下为一致的上升气流,最大上升速度中心位于 120°E,高度位于 800 hPa 左右观测资料显示,120°E 附近的六合地面观测站 1 h 降雨量达 54.5 mm,说明中低层的垂直速度和降雨量有很好的对应关系。

3.4 水汽通量散度

水汽通量散度(Divergence)在诊断降水中有重要的作用。当 $D>0$ 时为辐散, $D<0$ 时为辐合。低层辐合高层辐散是构成垂直运动的充分和必要条件,水汽的汇合和抬升主要也是靠低空流场的辐合来完成。从图 7 中可以看出,6 日 08 时低层和高层的辐合辐散不是很明显。14 时,沿 32.0°N 的径向方向上,在 120°E 附近 850 Pa 以下均为辐合上升区,近地面辐合强度较大,中心值为 $-3.0\times10^{-5} \text{ s}^{-1}$;而 850 hPa 以上为辐散场,最大辐散中心位于 800~700 hPa 之间,中心值为 $2.0\times10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。水汽通量散度的这种垂直分布正好对应低层辐合高层辐散的对称结构,这样的空间垂直流场对强降水的形成比较有利,一方面促进了空气上升运动的发展,另一方面

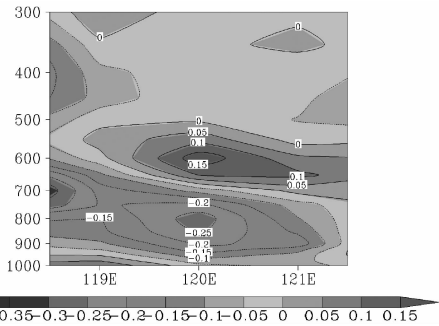


图 6 2015 年 8 月 6 日 14 时沿 32°N 的垂直速度剖面图
Fig.6 The vertical velocity along 32°N on 14:00 BJT at 6 April 2015

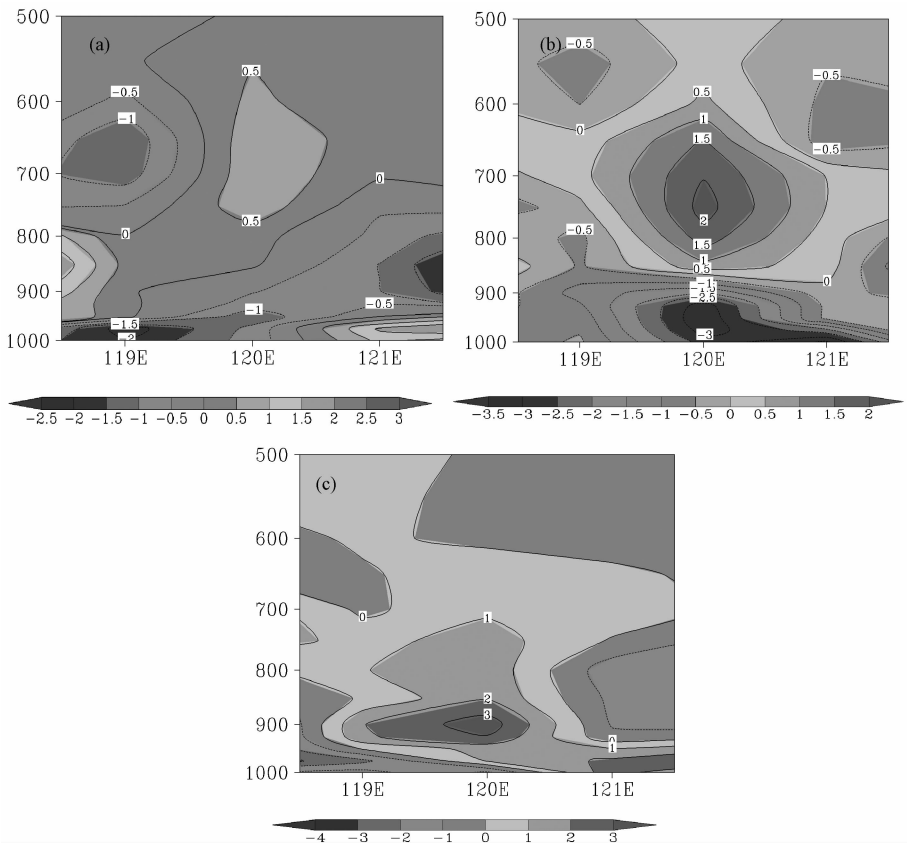


图 7 2015 年 8 月 6 日沿 32°N 08 时、14 时和 18 时水汽通量散度的垂直剖面图
Fig.7 The section of Water vapor flux divergence along 32°N on 08:00 BJT, 14:00 BJT and 18:00 BJT at 6 April 2015

也有利于低层湿空气的聚合和向上抬升。到 18 时,低层辐合高层辐散的结构已经消失,取而代之的是近地层较强的辐合下沉运动,说明此时对流能量释放完毕,大气层结稳定。

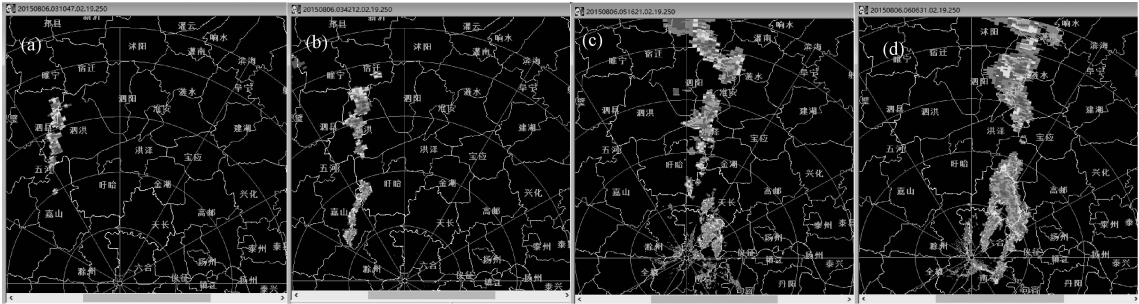
4 雷达回波特征分析

通过分析南京和盐城站的雷达回波可以看出,此次短时强对流过程影响范围比较广,从西南到东北横跨江苏地区,给多地带来了灾害性的天气,所到之处造成大风和短时强降水天气。根据国家站和区域站的监测显示,有 42 个站出现了 8 级以上大风,盱眙的官滩满江红区域站出现 35.0 m/s 的 12 级大风,六合国家一般站出现 34.7 m/s(13:46)的大风。

南京站 1.5°仰角基本反射率因子图上显示,总体而言,此次过程是局地不断有回波生成、发展并合并的过程。11:10,在江苏泗洪的西部地区有窄带回波生成、发展并向东北方向移动(图 8a);11:42 在安徽嘉山到江苏盱眙一带又有局地回波生成并向东北方向移动,最大回波强度达到 66 dBZ(图 8b)。

13:16 主要有 3 大回波块(图 8c)。北面沐阳到涟水一带有新的强回波生成,中心强度为 55 dBZ,随后与洪泽附近的回波在往东北移动中合并加强;中间嘉山附近的窄带回波分裂,北部的往东北移动并入由泗洪往东移动的回波,两回波合并后移动到洪泽附近,且强回波范围增大;南部的窄带回波移动到盱眙东部附近。与此同时南面的六合地区也有较强回波生成,强回波中心可达 60 dBZ。14:05(图 8d),北部从洪泽到沐阳一带的回波合并;南部盱眙东部附近弱的窄带回波与六合附近的块状回波也在往东北移动中合并发展,中心强度为 65 dBZ。从盐城 1.5°仰角的反射率因子图上可以看出,窄带回波在东移的过程中不断的分裂合并,18 时左右,主体回波带东移入海,消散减弱,对江苏的影响结束(图略)。

为分析六合大风形成的原因,重点对该地区的回波进行分析。12:57(图 9a),六合中南部地区有一大一小 2 块回波生成,强回波中心可达 60 dBZ,速度图(图 9b)显示雷暴单体的右侧有明显的阵风锋,长约 50 km,中心最大速度为 15 m/s,且最大速度中心与强回波中心相吻合。



(a) 11:10; (b) 11:42; (c) 13:16; (d) 14:05

图 8 2015 年 8 月 6 日南京站 1.5°仰角上的反射率因子

Fig.8 The reflectivity at 1.5° from Nanjing Radar at 6 April 2015

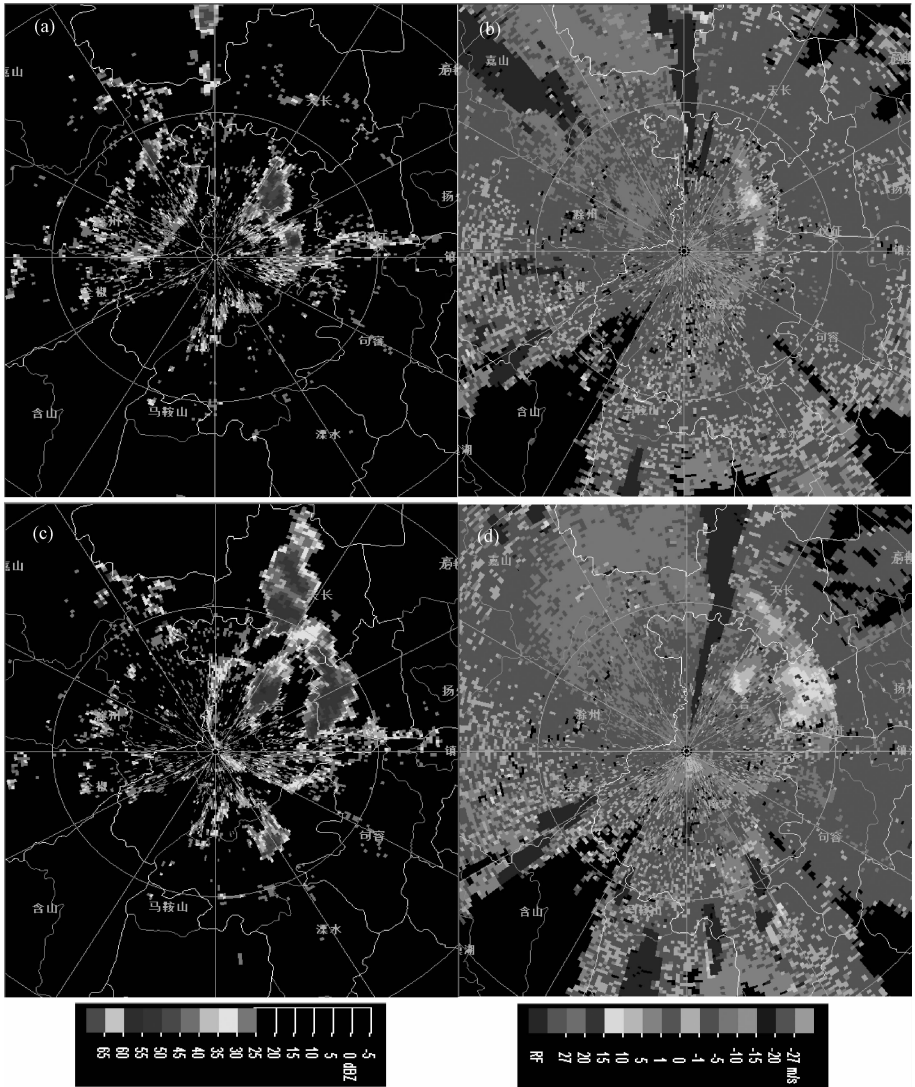


图 9 2015 年 8 月 6 日 12 时 57 分和 13 时 47 分的南京站 0.5°仰角上的反射率因子 (a, c) 和径向速度图 (b, d)

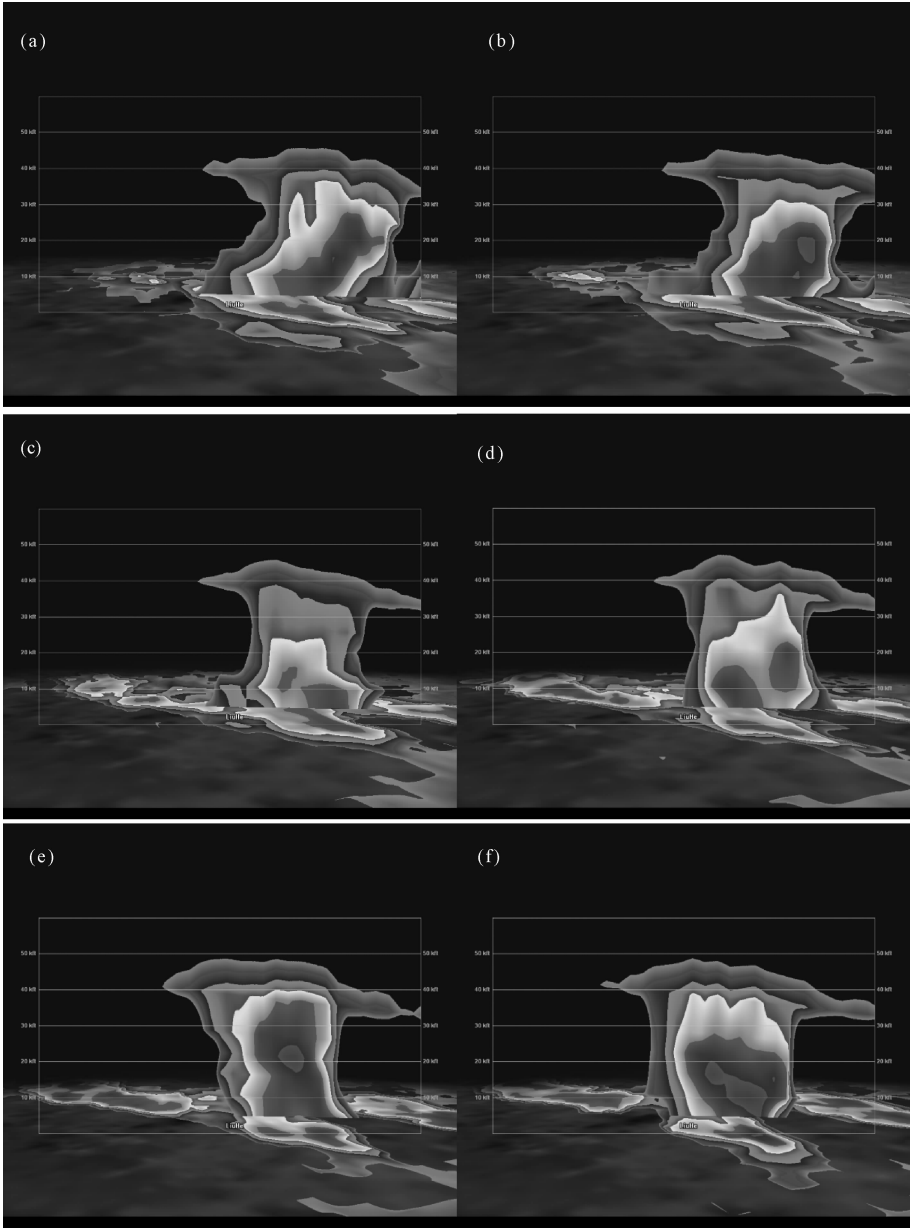
Fig.9 The reflectivity and radial velocity at 1.5° in Nanjing in 12:57 BJT (a, b) and 13:47 BJT (c, d) at 6 April 2015

由于阵风锋前有较强辐合,上述一大一小 2 个回波块在往东北移动过程中不断发展加强。13:47 (图 9c),回波明显增大,回波图中显示有 3 块较强回波单体,强回波中心为 60 dBZ,同时在回波的左

前方有明显弱窄带回波,它的出现往往与后侧的强雷暴主体回波伴随,对应雷暴单体后侧的出流边界。速度图(图 9 d)上显示强风速带依然紧贴雷暴单体的右前方,风速加大,风速中心值达到 20 m/s,强风速带前侧辐合后侧辐散,后侧辐散区域正好对应于雷暴内部冷下沉气流在地面扩散和暖空气交汇后形成的一道飑锋,极易出现大风。实际上此时六合国家一般站确实也出现了 34.7 m/s(13:46)的大风。

利用常州雷达的观测数据,沿强回波方向做了高度剖面图(图 10)。从回波的垂直特征来看,六合大风形成过程是单体不断生成向上延伸、加强而又

向下消散的过程。13:03(图 10a),六合上空的强回波可以延伸到地面向上 12 km 左右,且回波具有斜压结构,有利于雷暴的发展。13:09(图 10b)雷暴发展加强,出现较强回波中心,高度在 5~6 km,随后强回波中心开始下降,质心高度约为 4 km 左右;13:21(图 10c)中心下降至地面消散,整体回波强度明显变弱。但是到 13:27(图 10 d),六合上空的回波强度再次增强,垂直方向出现两个较强的回波中心,到 13:33(图 10e)该地上空强回波进一步向上伸展,垂直方向上有大于 60 dBZ 的强中心,高度约为 6 km 左右,13:39(图 10f)强回波中心开始下降,高度在



(a) 13:03; (b) 13:09; (c) 13:21; (d) 13:27; (e) 13:33; (f) 13:39

图 10 常州雷达 1.4°仰角上沿六合方向的反射率因子的剖面图

Fig.10 The section of reflectivity at 1.4° from Changzhou Radar along Liuhe

地面到4 km之间,之后强回波块开始消散。强回波中心的迅速下降是大风预报的重要指标,此次过程强回波中心不断上升又下降,造成地面出现在灾害性大风。

5 总结与讨论

本文针对2015年8月6日发生在江苏的一次短时强对流过程,利用再分析资料、地面观测数据和新一代单站雷达资料从多个角度对其进行了诊断分析,尤其是针对六合地区出现的罕见雷暴大风进行了分析,得到以下结论:

(1)地面飚线是本次强对流天气的直接影响系统。本次过程发生在高空槽东移,副高西伸北抬的过程之中,高空干冷低层暖湿,这种上干下湿的配置促使对流强烈发展。地面观测资料显示,此次强对流过程从安徽到江苏自西南到东北的多个气象要素记录先后出现了明显的不连续变化,风向突变、风力猛增、气压涌升、气温急降、相对湿度大幅上升。

(2)地面能量堆积,自低层到高层都有明显的东西向高能舌自安徽伸向江苏,且对流发生前,高能舌扩展到了江苏北部地区。垂直方向上,中低层存在能量锋区,且假相当位温随高度递减,气层处于不稳定状态。这些因素为强对流的发生发展提供了较好的热力条件。除此之外,低层强烈的垂直上升速度,低层辐合高层辐散的水汽通量散度也都为强降水提供了有利的条件。

(3)从雷达回波来看,整体而言此次地面飚线过程是局地不断有回波生成、发展并合并的过程。六合地区形成大风的主要原因是其雷暴单体的右侧有明显的阵风锋,强风速带紧贴雷暴单体的右前方,前侧辐合后侧辐散,后侧辐散区域正好对应于雷暴内部冷下沉气流在地面扩散和暖空气交汇后形成的一道飚锋,另外其垂直方向上回波质心也出现了迅速下降。这些特征都对地面灾害性大风有很好的指示意义。

参考文献:

[1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001:420-426.

- [2] 孙继松,陶祖铨.强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J].气象,2012,38(2):164-173.
- [3] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,2012,70(3):311-337.
- [4] 张小玲,湛芸,张涛.对流天气预报中的环境场条件分析[J].气象学报,2012,70(4):642-654.
- [5] Johns R H, Doswell C A I. Severe Local Storms Forecasting [J]. Weather & Forecasting, 1992, 7(4): 588-612. (in Chinese)
- [6] 李淑玲,刁秀广,朱敏,等.一次飚线过程多普勒雷达资料分析[J].气象,2009,35(3):60-65.
- [7] 曹艳华,马中元,叶小峰,等.江西外来飚线的常见卫星云图特征[J].自然灾害学报,2010,(04):054-59.
- [8] 郭媚媚,赖天文,罗焯坤,等.2011年4月17日广东强冰雹天气过程的成因及特征分析[J].热带气象学报,2012,28(3):425-432.
- [9] 梁维亮,农孟松,屈梅芳.广西一次区域性强对流天气的诊断分析[J].自然灾害学报,2015,(03):208-215
- [10] 周梅,许洪泽,方桃妮,等.浙中一次强对流天气动力热力场和雷达回波特征分析[J].气象科技,2015,43(1):116-124.
- [11] 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等.对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J].气象,2012,38(11):1330-1338.
- [12] 许爱华,孙继松,许东蓓,等.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,40(4):400-411
- [13] 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶.一次冰雹风暴的CINRAD/SA产品分析[J].应用气象学报,2004,15(5):579-589.
- [14] 朱君鉴,刁秀广,曲军等.4.28临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J].气象,2008,34(12):21-26.
- [15] 杨晓霞,李春虎,杨成芳等.山东省2006年4月28日飚线天气过程分析[J].气象,2007,33(1):74-80.
- [16] 张芳华,张涛,周庆亮,等.2004年7月12日上海飚线天气过程分析[J].气象,2005,31(5):47-51.
- [17] 郁珍艳,张依慈,何立富,等.一次中尺度对流系统的发生发展特征分析[J].自然灾害学报,2012,(04):091-98.
- [18] 梁建宇,孙建华.2009年6月一次飚线过程灾害性大风的形成机制[J].大气科学,2012,36(2):316-336.

基于 YOLOv3 网络的高分光学遥感影像 海上舰船分类检测

王浩君,周 斌,潘玉良
(杭州师范大学 遥感与地球科学研究院,杭州 310000)

摘 要:海上舰船目标分类检测技术可广泛用于海事监管、船只救援、打击非法犯罪等活动,具有重要应用价值。本文选取高分辨率光学遥感影像进行数据筛选及预处理,建立了含有 2.4 万艘不同类型舰船的分类检测数据集。依据中华人民共和国海事局《船舶登记工作规程》中的舰船分类规则,结合遥感影像实际情况,建立了基于遥感影像的海上舰船分类体系。通过搭建深度学习训练平台,使用 YOLOv3 神经网络算法对舰船进行分类检测。在测试集上对训练完成的模型进行验证,舰船分类检测结果的召回率达到 91%以上,准确率达到 95%以上。在 GPU 加速的情况下,可达 30 fps 以上的检测速率,使得该模型在具备鲁棒性和准确性的同时也具备实时分类检测的能力。
关键词:舰船分类;高分光学遥感影像;目标检测;YOLOv3;

中图分类号:P237 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0043-06
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.008

Ship Detection and Classification from High Resolution Optical Remote Sensing Images Based on YOLOv3 Neural Network

Wang Haojun,Zhou Bin,Pan Yuliang
(Institute of Remote Sensing and Earth, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310000, China)

Abstract:Ship detection and classification technology has important application value. It can be widely used in maritime supervision, ship rescue, and combating illegal crimes. High-resolution optical remote sensing images were selected for data screening and pre-processing, and a marine ship classification detection data set containing more than 24,000 ships of different types was established. According to the ship classification rules in the “Regulations on Ship Registration” of the Maritime Safety Administration of the People’s Republic of China, combined with the actual situation of remote sensing images, a basic classification system for marine vessels based on remote sensing images was established. A deep learning training platform was built, and the ship was classified and detected using the YOLOv3 neural network algorithm. The model completed by the training is verified on the test set. The recall rate of the ship classification test results is over 91%, and the accuracy rate is over 95%. In the case of GPU acceleration, the detection rate above 50fps can be achieved, which makes the model robust and accurate, as well as real-time classification detection.

Keywords:ship classification;remote sensing;object detection;YOLOv3

海上舰船目标的分类检测技术对于人们的生产生活和国防军事都具有重要意义。目前,海域舰船的动态监测主要使用 AIS (automatic identification system) 系统进行被动监测,在使用过程中易受到雨

雪、海浪及其他电磁的干扰,具有一定的局限性^[1]。基于遥感影像的舰船目标检测技术作为一种主动监测的舰船动态监测新兴技术,使得大范围,远海域的监测成为可能,极大地丰富海事部门的监测手段^[2]。

舰船目标检测主要基于 SAR (synthetic aperture radar) 影像和光学遥感影像^[3]。SAR 遥感图像采用主动微波遥感技术,能够全天时、全天候、多极化、多视角进行观测,其探测距离远、覆盖范围大,穿云透雾等优势,使得传统遥感舰船目标检测主要集中使用 SAR 遥感图像。相较于 SAR 影像,光学遥感影像在目标检测中也有其独特的优势。高分辨率光学遥感影像空间分辨率高,图像直观容易理解,光照条件较好时,光学遥感影像的地物特征细节更加丰富,目标结构清晰等。但是目前基于光学遥感影像的舰船目标检测技术研究相对滞后,公开的研究成果比较少,主要原因有:光学影像经常容易受到光照、云层干扰,并且海域影像容易受风浪等复杂干扰,难以建立统计模型;光学影像中目标与背景差异性复杂,目标物灰度相比背景可以表现为暗目标或者亮目标,难于统一处理^[4]。

深度学习算法的出现为解决这些问题提供了转机,相较于传统方法,深度学习算法可以从海量原始数据集中进行无监督特征学习,充分提取检测目标的底层特征。在训练样本充足的情况下,模型的泛化能力很强,能在复杂环境下保持很好的鲁棒性。已经有很多学者也将其引入到光学遥感舰船目标检测中^[5-10]。

但是,进行舰船检测的现存深度学习算法也存在以下缺陷^[4]:深度学习算法需要大量的人工标注数据;尚未有对舰船的系统性的分类型检测;现有的模型算法对小型舰船目标检测能力较差且难以到达检测精度和检测速度的平衡。因此,有必要选择更优的深度学习算法来进行海上舰船检测。

卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 作为深度学习图像识别的核心算法,在目标检测领域取得了革命性进展。在 2014 年的 CVPR 大会上, R-CNN 目标检测网络由 Ross Girshick 等人提出;滑动窗口被选择性搜索 (Selective Search) 所替代,使得 VOC2012 数据集上的平均检测准确率 (mean average precision, mAP) 获得了 30% 的提升。在接下来的一年中, Fast R-CNN 和 Faster R-CNN 又接连被提出。引入了 region proposal network (RPN) 的 Faster R-CNN 可以使检测帧速率达到 5 fps, 无论

是候选区域的提取速度和准确度都有了较大比例的上升^[11]。而在 2016 年, Redmon 等提出了 YOLO 模型^[12], 将目标检测帧速率提高到 45 fps。之后, Redmon 等再次提出了 YOLOv2, 相较于前代 YOLO 其 mAP 和检测速度均得到了显著提高, 但是对于小目标物的检测并不是很理想^[13]。2018 年 Redmon 提出了 YOLOv3 网络模型^[14]。YOLOv3 相较于前代模型力求达到检测速度与精度的平衡, 采用了更深层的网络模型结构和多尺度检测技术等, 这将有助于提升小目标物的检测效果。

因此, 本文选取了 1.4 万张高分辨率遥感影像进行数据筛选和预处理, 建立了含有 2.4 万艘以上不同类型舰船的海上舰船分类检测数据集。通过搭建深度学习神经网络训练平台, 结合基于遥感影像的舰船分类体系, 使用 YOLOV3 神经网络进行了海上舰船分类检测的研究。

1 YOLOv3 神经网络模型

1.1 YOLOv3 基本原理

YOLO 将输入图像划分成 $N \times N$ 个网格, 若目标物的中心在网格内, 该网格就承担预测该目标物的责任。每个网格需要生成目标物在该网格内的预测框及置信度分数共计 5 个参数 (b_x , b_y , b_w , b_h , $confidence$)。 b_x , b_y , b_w , b_h 生成公式如下:

$$b_x = \sigma(t_x) + c_x \quad (1)$$

$$b_y = \sigma(t_y) + c_y \quad (2)$$

$$b_w = p_w e^{t_w} \quad (3)$$

$$b_h = p_h e^{t_h} \quad (4)$$

式中, t_x 和 t_y 为预测框的中心坐标值, t_w 和 t_h 分别为预测框的长宽值。 c_x 、 c_y 为偏移量 p_w 、 p_h 为候选框 (anchor box) 的长宽值。 b_x 和 b_y 为归一化的预测框中心坐标后的值, b_w 和 b_h 为归一化的预测框长和宽值。 $\sigma(x)$ 函数为 logistic 函数, 起到归一化作用。

预测框的目标物置信度计算公式如下所示:

$$\sigma(\text{to}) = \text{Pr}(\text{object}) \times \text{IOU} \quad (5)$$

其中, 当人工标记框的范围落入网格中, 则 $\text{Pr}(\text{object})$ 的取值为 1, 反之则为 0。

将网络模型输出的预测框和真实的人工标记框计算 IOU (intersection-over-union), IOU 的计算公式为:
$$\text{IOU} = \frac{\text{DetectionResult} \cap \text{GroundTruth}}{\text{DetectionResult} \cup \text{GroundTruth}} \quad (6)$$

其中 DetectionResult 为系统预测框的范围,

GroundTruth 为训练前真实人工标记框的范围。

假设该网格预测 C_i 个类,对于舰船数据集而言 i 取值 $(1,2,3\cdots 9)$ 且该网格内有 B 个目标,每个候选框的置信度与网格预测的类别信息相乘,YOLOv3 对每一类都单独使用了逻辑回归分类器,通过 sigmoid 函数将每一类的概率区间在 $[0,1]$ 之间, $\Pr(c_i|object)$ 为目标物属于该单独类的概率,而不是所有类中属于该类的概率,所有概率总和并不为 1。则得到分类置信度为

$$\begin{aligned} & \Pr(c_i|object) * \Pr(object) * IOU \\ & = \Pr(c_i) * IOU \end{aligned} \tag{7}$$

设置阈值 $thresh$,滤掉分类权重值较低的候选框,然后进行非极大值抑制 NMS 处理。YOLOv3 使用逻辑回归预测每个边界框的对象分数,如果先前的边界框比之前的任何其他边界框重叠 ground truth 对象,则该值应该为 1。反之则忽略这个预测。最终为每个 ground truth 对象分配一个边界框。

YOLOv3 损失计算:

$$Loss = Loss_{xy} + Loss_{wh} + Loss_{conf} + Loss_{class} \tag{8}$$

其中 $Loss_{xy}$ 为中心坐标损失, $Loss_{wh}$ 为宽高损失, $Loss_{conf}$ 为置信度损失, $Loss_{class}$ 为分类损失。

1.2 YOLOv3 模型改进之处

1.2.1 多尺度预测

为了改善 YOLO 前两代主要存在对于小目标检测效果差的情况,YOLOv3 使用了类 FPN 架构(feature pyramid networks for object detection)来实现多尺度检测。以输入图像尺寸为 256×256 为例,YOLOv3 将在 (8×8) 、 (16×16) 、 (32×32) 3 个尺度上进行特征提取。YOLOv3 使用 k-means 聚类的方法在单位单元网格生成 3 个候选区域框(anchor box),相比于 YOLOv2 的 5 个有所减少。但实际因为 YOLOv3 的三尺度特征提取使得 YOLOv3 的候选区域框总数远多于 YOLOv2,从而显著提升了 YOLOv3 对于小目标物的检测能力^[14]。

1.2.2 类别预测

YOLOv3 使用独立用于多标签多分类的逻辑回归分类器(logistic classifier)取代前几代模型用于单标签分类的 softmax 层。在目标检测时,会遇到单目标物同时属于多个重叠标签的情况,例如在舰船检测中同时有船(ship)类和货船(cargo ship)类,当对图像中的货船进行检测时,检测结果标签类别中货船同时属于 ship 类和 cargo ship 类。通过 softmax 层可得到目标物属于不同类的概率,但 softmax 层默认单目标物只属于单个类别。而逻辑回归使用

sigmoid 函数对每一类逐一使用分类器,当大于某一阈值时则认为该目标物属于该类。与此同时,YOLOv3 在训练过程中也改为使用二元交叉熵(binary cross-entropy loss)计算类别预测的损失。

1.2.3 网络结构

YOLOv3 的网络结构从 YOLOv2 的 Darknet-19 升级为 Darknet-53,Darknet-53 借鉴了 Resnet 的残差网络结构,增加了网络的深度从 19 层变为 53 层。网络使用了许多 1×1 和 3×3 的卷积层,并且为了防止随着网络层数的增加而产生的梯度弥散,增加了短链接(shortcut connection)结构。模型训练方面采用原来 YOLOv2 中的多尺度训练(multi-scale training)。Darknet-53 具体网络结构如图 1 所示。

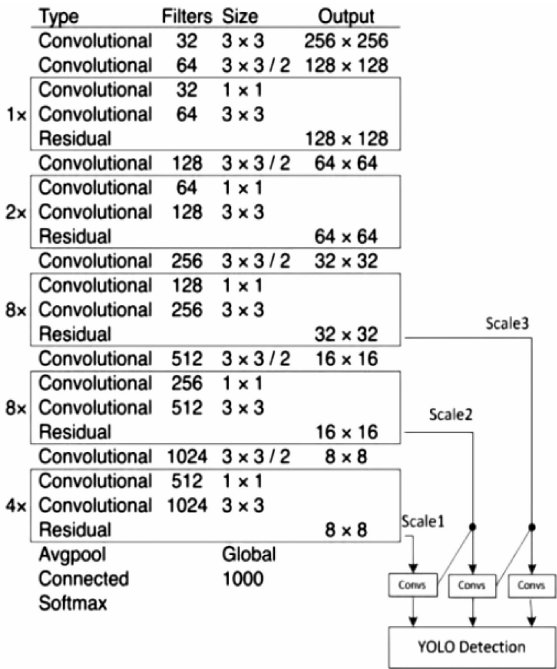


图 1 Darknet-53 具体网络结构
Fig.1 Darknet-53 network structure

2 光学遥感图像舰船分类数据集的建立

2.1 舰船分类体系

海事管理中船舶分类依据为中华人民共和国海事局 2004《船舶登记工作规程》中的附录表《船舶种类字典》中,代码与相应的分类为:01 客船类;02 普通货船类;03 液货船类;04 工程船类;05 工作船类;06 拖船类。

结合光学遥感影像中舰船的实际情况,考虑到工作船类舰船获取困难,人工数据集标注过程中工

作船类标注较难区分等因素,未对工作船类进行分类。鉴于海面舰船货船类数量巨大,将普通货船类细分为散货船、集装箱船、驳船 3 种。增加游艇类和军事舰船类。最终分类体系见表 1。

表 1 本研究采用的舰船分类体系

Table 1 Ship classification system used in this study		
代码	一级分类	二级分类
01	普通货船类	客船
02		散货船
03		集装箱船
04		驳船
05	液货船类	液货船
06	工程船类	工程船
07	拖船类	拖船
08	其他类船只	游艇
09		军事船只

2.2 数据集构建

为训练和测试神经网络,从 Goolge earth 和第三方机构提供的高分遥感影像中获取了大量舰船的遥感图像,并对这些图像数据进行了包括格式转换与裁剪、数据标注等处理。最终得到统一了格式和大小、拥有数据标签的遥感图像数据集。该数据集可直接用于神经网络的训练和测试。

2.2.1 遥感数据预处理

为保证检测算输入具有统一的格式和尺寸的训练样本,对原始遥感数据进行归一化处理。研究的数据来源既有互联网图像数据,也有第三方提供的遥感原始影像数据。为便于存储和统一处理,将 PNG、JPG、TIFF、IMG 等格式的图像统一转换为 JPG 格式;将 8 位或 16 位等不同颜色深度的图像颜色深度统一调整至 8 位,让原始数据归一化分布到[0, 255]的量化区间。为减少大尺寸图像训练时的内存占用量和降低训练时间,增加样本量,将较大的图像进行横纵向滑窗切分,切分成为选定的 $W\times H$ 的图像,切分步长为长宽的中点,横向切分步长为 $S_w = \frac{1}{2}W$,纵向切分步长为 $S_H = \frac{1}{2}H$ 。本文取 $W=480$, $H=480$, $S=240$ 。

2.2.2 舰船分类标注

基于卷积神经网络的目标检测算法是一种有监督的机器学习算法,因此需要人工对数据进行标注,以辅助卷积神经网络算法学习输入图像 X 到标注 Y 的映射关系 $f(x)=y$ 。在该映射关系中, X 即为遥感图像数据, Y 则为要检测目标舰船在图像中的表示。本文用包围盒(bounding box)的方式对预处理完成的舰船遥感影像按照分类体系进行分类标注。

在标注过程中,同时进行数据筛选,剔除无意义的图像数据。删除因设备故障等原因产生的纯噪声数据或是没有任何信息的纯“黑”数据;删除切分后目标舰船位于图像边缘且总体船身小于三分之二的图像;因海上舰船检测场景各种条件复杂多变,为使得训练出的神经网络模型具有更强的鲁棒性,数据集还需保证场景的多样性。在保留包含目标的正样本数据以及一定比例的纯背景负样本数据以外,还需保证每一类型的舰船样本中包含其近岸的样本,单艘、多艘、密集,不同、相同舰船在同一图像的样本,有海浪、天气干扰(雪天)的样本等。最终的样本集共包含近 14000 张图像和超过 24000 个舰船目标。各类型的舰船样例如图 2 所示。

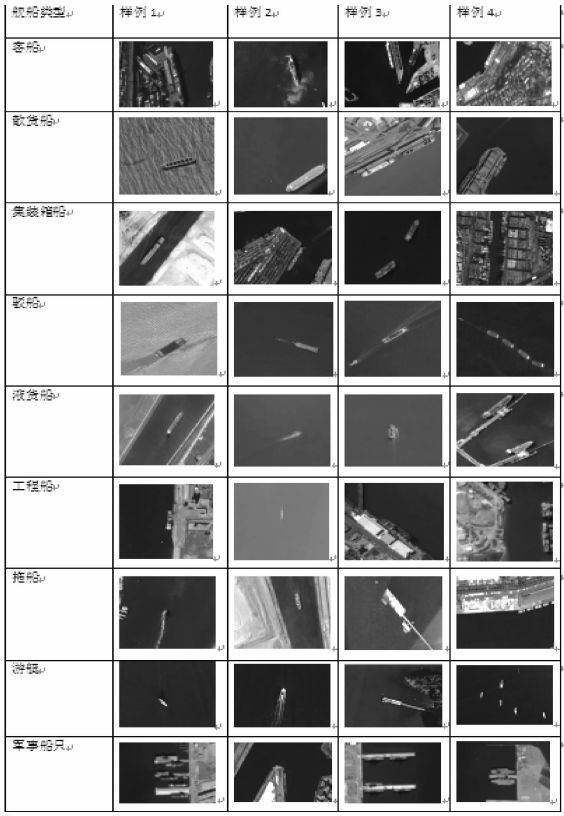


图 2 各类型舰船样本样例

Fig.2 Examples of various types of ships

3 神经网络训练

3.1 实验平台

训练和测试数据均在 Darknet 框架下进行。使用的计算平台为曙光工作站, CPU 为 E5-2620V3, GPU 为 NVIDIA GeForce GTX 1080Ti, Ubuntu 16.04 64 位操作系统,python 为 2.7 版本。

3.2 训练具体参数设置

在训练过程中,设定的配置参数具体如下:最大迭代次数设置为 120000,批次大小(Batch size)设置为 64,冲量(momentum)设置为 0.9,衰减率(decay)设置为 0.0005,学习率(learning rate)设置为 0.001,训练策略(poily)选择分步(steps)策略采取逐步下降学习率的方法进行训练.,在迭代次数为 20000、30000、40000 对学习率进行调整。

网络训练的迭代次数与召回率的散点图如图 3 所示。

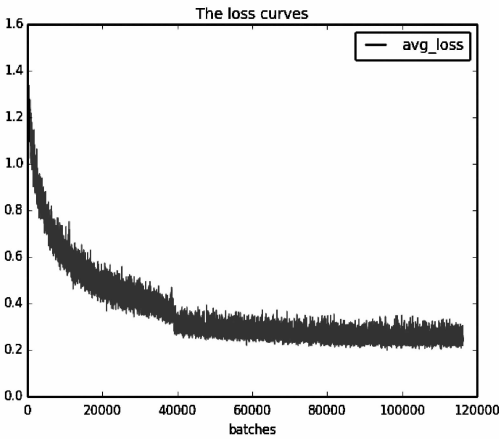


图 3 迭代次数与损失的散点图

Fig.3 Scatter plot of iterations and losses

从迭代次数与损失的散点图可知,网络训练时学习率对于训练的收敛和效果有较大影响,使用了分步下降学习率的训练策略,当在 20000、30000、40000 次迭代时系统自动降低了学习率,在图中损失(loss)有很明显的下降,随着迭代次数的增加,在 80000 次迭代后 loss 趋于平缓,损失在 0.2 附近徘徊,说明模型已经得到了良好的收敛,经过 10 万次迭代的权重模型用于测试。

4 结果与评价

随机抽取数据集中的 20%作为测试样本集,共计测试样本为 2700 张。因在一些低 IOU 值的情况中,网络模型输出的预测框虽无法精确包围被检舰船,但依然能标记出正确的舰船类型。本研究意在追求预测舰船类型的准确性,所以在测试时将 IOU 阈值设为 0.5。

在不同置信度阈值 $thresh_{ship}$ 下,模型检测的召回率和准确率如表 4 所示,表中 Rps/Img 为平均每张测试样本中模型预测框的数量。召回率(Recall)

的计算公式为

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

准确率(Precision)的计算公式为

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

FN 被模型预测为负的正样本。 FP 被模型预测为正的负样本。 TN 被模型预测为负的负样本。 TP 被模型预测为正的正样本。

由表 2 可知当置信度阈值较高时模型检测的准确率较高,但是召回率则明显下降,说明无法检测到所有检测目标。当之置信度阈值设置较低时,召回率上升但是模型检测的准确率下降。为了使模型的检测准确率和召回率都同时到达较好水平,取置信度阈值为 0.4,召回率为 91.02%,准确率为 94.96%。

表 2 不同阈值下的召回率准确率对比表

Table 2 Comparison of recall rate accuracy rates under different thresholds

Thresh _{ship}	召回率	准确率	Rps/Img
0.1	0.96	0.66	2.52
0.2	0.95	0.83	1.99
0.3	0.94	0.91	1.78
0.4	0.91	0.95	1.65
0.5	0.86	0.97	1.51
0.6	0.79	0.98	1.37
0.7	0.63	0.99	1.13
0.8	0.25	1	0.55

本文使用各舰船类型的准确率和召回率两项指标来评价 YOLOv3 的检测效果,表 3 展示了 YOLOv3、YOLOv2、Faster R-CNN 3 种模型的训练实验结果。这些模型均使用本文的 pascal VOC2007 格式的高分遥感舰船分类数据集进行训练与测试。

表 3 各舰船类型准确率召回率

Table 3 Accuracy and recall rate of various types of ships

舰船类型	YOLOv3 模型		YOLOv2		Faster R-CNN	
	准确率	召回率	准确率	召回率	准确率	召回率
客船	0.86	0.93	0.92	0.89	0.89	0.89
散货船	0.96	0.99	0.97	0.98	0.96	0.95
集装箱船	0.98	0.99	0.97	0.97	0.96	0.96
驳船	0.82	0.88	0.92	0.84	0.93	0.87
液货船	0.97	0.97	0.97	0.93	0.95	0.94
工程船	0.87	0.92	0.92	0.94	0.93	0.94
拖船	0.85	0.83	0.40	0.79	0.72	0.73
游艇	0.93	0.92	0.86	0.87	0.87	0.88
军事船只	0.96	0.97	0.91	0.83	0.93	0.87

由表 3 可知 YOLOv3 算法在小目标舰船的检测能力上明显优于 YOLOv2 以及 Faster R-CNN。

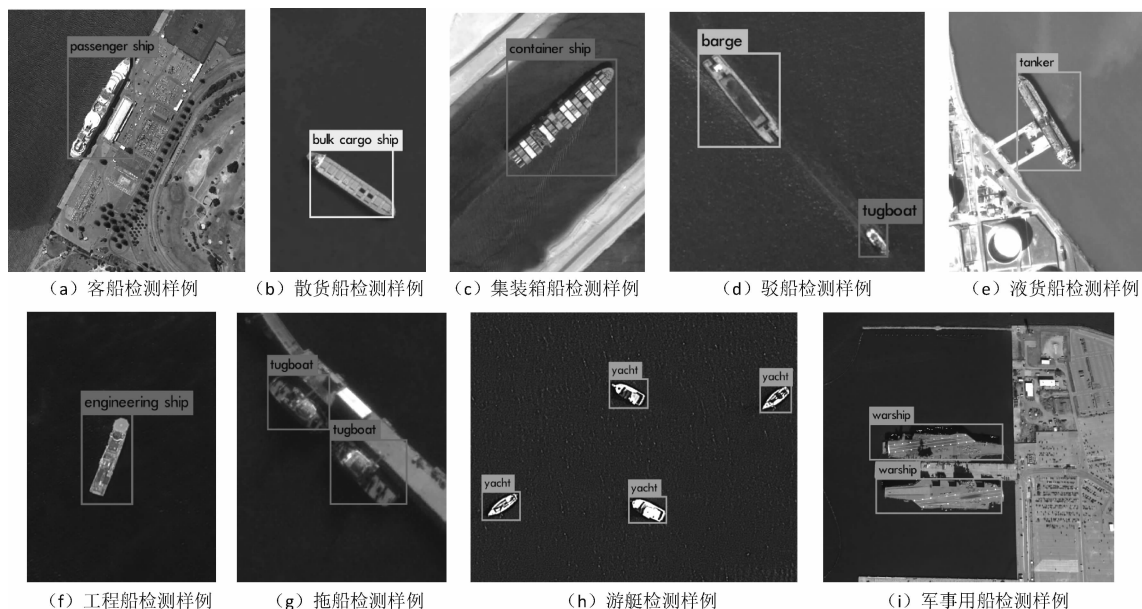


图 4 各类型舰船成功检测样例

Fig.4 Successful detection examples each types of ships

YOLOv3 在对小型目标拖船的检测达到 83% 的召回率和 84% 的准确率, YOLOv2 拖船的召回率为 79%, 准确率只有较低的 40%, Faster R-CNN 的表现则介于两者之间, 拖船有 72% 的准确率和 73% 的召回率。说明 YOLOv3 的多尺度检测使其对于小物体的检测能力相较于 YOLOv2 有明显的提高并优于 Faster R-CNN。在大目标舰船的检测上, YOLOv3 在散货船、集装箱船、液货船、军事船只的检测准确率达到 96% 以上, 召回率均在 97% 以上, 略优于 YOLOv2 及 Faster R-CNN。使用 YOLOv3 模型对各类型舰船的成功检测样例见图 4。

5 结论

本文对于光学遥感图像中的舰船分类识别进行了研究, 结合国家在海事领域的舰船分类标准, 并结合光学遥感图像中的实际情况, 提出了在光学遥感图像中的舰船分类体系。本研究建立了光学图像舰船样本库, 累计整理并标注了超过 14000 张包含约 24000 个目标的数据集。建立的数据集包含了各种复杂天气及场景, 如海洋、港口等。本文使用了 YOLOv3 模型进行舰船分类检测。经过训练, 模型取得了较好的检测效果, 在测试集上总体达到了 91% 的召回率和 95% 的准确率, 其中主要舰船类型均到达 90% 以上的识别准确率。检测模型在通过 GPU 1080Ti 加速后可以达到 30.52 fps 的检测速度, 满足现实中对于遥感目标检测及时性的基本

要求。

参考文献:

- [1] 韩亮. 基于高分辨率遥感影像的船舶识别研究 [D]. 2018
- [2] 周艳果. 高分辨率光学遥感数据海上船舶提取 [D]. 2016.
- [3] 邢相薇, 计科峰, 康利鸿, 等. HRWS SAR 图像舰船目标监视技术研究综述 [J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 107-121.
- [4] 王彦情, 马雷, 田原. 光学遥感图像舰船目标检测与识别综述 [J]. 自动化学报, 2011, 37(9).
- [5] 刘峰, 沈同圣, 马新星等. 基于多波段深度神经网络的舰船目标识别 [J]. 光学精密工程, 2017.
- [6] Tang J, Deng C, Huang G B, *et al.* Compressed-Domain Ship Detection on Spaceborne Optical Image Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 53(3): 1174-1185.
- [7] Zhang R, Yao J, Zhang K, *et al.* S-Cnn Ship Detection from High-Resolution Remote Sensing Images [J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B7: 423-430.
- [8] Liu Y, Cui H Y, Kuang Z, *et al.* Ship Detection and Classification on Optical Remote Sensing Images Using Deep Learning [J]. 2017, 12: 05012. 125 (11): 2939-2946.

大壁虎多节段脊柱定位装置和电生理实验

江远瀚^{1,2}, 王文波^{2,3*}, 王晓清^{2,3}, 蔡 雷⁴

(1.南京航空航天大学 航天学院,南京 210016;2.南京航空航天大学 江苏省仿生功能材料重点实验室,南京 210016;
3.南京航空航天大学 机电学院,南京 210016;4.山东省科学院生物研究所,济南 250014)

摘 要:大壁虎运动能力卓越,可以三维空间无障碍运动,是仿生研究的良好模型。脊髓包含执行基本运动必不可少的网络;可靠方便的脊柱立体定位装置,是进行大壁虎在体脊髓制备及相关电生理实验,探索大壁虎运动脊髓调控机制的基础。本文根据大壁虎脊柱解剖学结构,研制了一套适于大壁虎脊柱固定的立体定位装置。该装置以通用脑立体定位仪为平台,在保持头部立体定位的同时,实现大壁虎脊柱不同节段的定位夹持。通过大壁虎颈膨大-腰膨大脊髓制备、脊髓内给药实验及中脑化学刺激-脊髓电生理同步记录实验,结果表明,所研制的大壁虎脊柱立体定位装置定位可靠、操作方便,能够满足大壁虎脊髓运动控制机理的相关实验研究。

关键词:大壁虎;脊柱;立体定位;电生理实验;运动控制

中图分类号:R318; Q337 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0049-06
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.009

Stereotaxic Apparatus and Electrophysiological Experiment for Multi-segmental Vertebral Column of *Gekko Gekko*

Jiang Yuanhan^{1,2}, Wang Wenbo^{2,3*}, Wang Xiaoqing^{2,3}, Cai Lei⁴

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Bionic Functional Materials, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;3.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;4. Biology Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: *Gekko gekko*s are well-known for their remarkable motion capability on various surfaces, which is a good model for bionic research. The spinal cord contains many of the necessary network for performing basic movements. Exploring the spinal cord control mechanism of the gecko movement, performing spinal cord preparation and electrophysiological experiments, requires a stereotaxic device for the spinal column. Based on the anatomical of the gecko vertebral column, a stereotaxic device was developed. The stereotaxic device was designed to hold on different segments of the vertebral column in *Gekko gekko* and can be attached to the universal brain stereotaxic apparatus. The device was used for the experiments such as spinal cord preparations of cervical enlargement and lumbar enlargement of gecko, and the spinal cord microinjection and the electrophysiology recording. The results showed that the stereotaxic apparatus for multi-segmental vertebral column of *Gekko gekko* is easy to operate and reliable in the fixation of vertebral

收稿日期:2019-01-09
基金项目:国家自然科学基金重点项目(51435008);国家自然科学基金面上项目(51975283)、国家自然科学基金青年项目(31500858);
江苏省仿生功能材料重点实验室基金(NJ2019015)资助。
作者简介:江远瀚(1991-),男,安徽六安人,硕士研究生,主研领域:生物机器人。E-mail: 1152218009@qq.com。
* 通信作者:王文波(1971-),男,副研究员,主研领域:生物机器人。E-mail: ww523@nuaa.edu.cn。

column, and can meet the needs of in vivo spinal cord research of Gekko gekko.

Keywords: *Gekko gekko*; Vertebral column; Stereotaxic; Electrophysiological experiment; Locomotion control

大壁虎(*Gekko gekko*)俗称蛤蜊,具有卓越的三维空间运动能力。国内外科研人员对大壁虎的黏附机理^[1,2]、运动及生物力学^[3-5]、仿生壁虎机器人^[6,7]及大壁虎动物机器人^[8,9]开展了大量研究。仿壁虎机器人的运动控制一直是难点和重点,引进脊椎动物中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)的仿生调控^[11],具有更好地稳定性和适应性。脊髓是动物中枢神经系统与四肢关节、肌肉之间信息交换的主要通道,包含执行基本运动行为必不可少的网络^[10]。探索大壁虎运动的脊髓调控机制,对于理解四足匍匐运动的动物运动的神经调控,研制仿壁虎机器人有重要意义。

探索动物运动脊髓控制机理,进行在体脊髓制备及相关神经电生理实验,离不开脊柱立体定位装置。国内外针对不同实验动物设计了不同立体定位装置。Cunningham^[12]开发了适用于幼年及成年啮齿类动物电生理实验的脊柱适配器。Fiford^[13]设计了针对大鼠脊髓损伤模型的脊髓损伤装置。Narishige^[14]和瑞沃德^[15]等商业公司也生产相关的脊柱立体定位夹持装置,用于啮齿类动物的脊柱固定。大壁虎脊柱和啮齿类动物解剖结构的差异,使得针对啮齿类动物设计的脊柱适配器不适用于大壁虎。刘磊^[16]以瑞沃德 MP8001 通用脑立体定位仪为平台,设计了能够单独对大壁虎脊柱进行夹持的脊柱适配器,利用该仪器夹持大壁虎椎骨前关节突与后关节突之间的内凹区域,可实现对大壁虎脊柱 3~4 个节段的可靠夹持定位。可以单次完成颈膨大、腰膨大以及其他脊柱部位的脊髓制备。然而,该脊柱夹持定位装置仅能用于部分脊柱的定位夹持,无法在进行脊柱夹持的同时实现进行大壁虎头部的立体定位;更不能在一次实验中对大壁虎脊柱进行两个不同部位的脊髓制备(例如同时进行颈膨大和腰膨大两处的脊髓制备)和定位夹持;限制了对大壁虎脊髓调控四肢协同运动以及高位神经中枢(如大脑和中脑)参与下,脊髓对四肢协同控制的相关实验研究。

针对文献[16]大壁虎脊柱定位夹持器的应用限制,结合大壁虎脊柱解剖结构特点,我们以通用脑立体定位仪为平台,设计了一套适用于大壁虎脊柱解剖结构的脊柱定位夹持装置。该脊柱定位夹持装

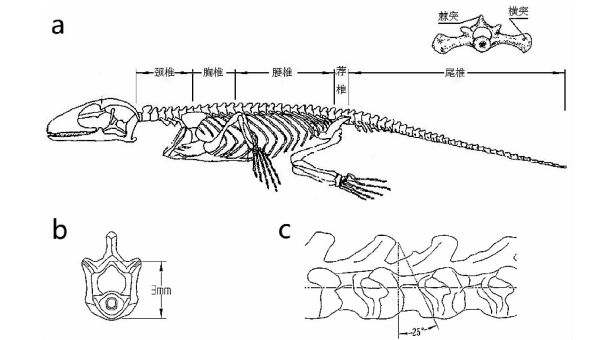
置与大壁虎脑立体定位装置^[17]相结合,可以在保持头部定位的同时,实现对大壁虎两处不同的脊柱节段(如颈膨大和腰膨大)的同步定位夹持,进行脊髓制备并开展相关实验。

1 大壁虎脊骨解剖学研究及定位方法

大壁虎(*Gekko gekko*)属爬行纲(Reptilia),有鳞目(Squamata),蜥蜴亚目(Lacertilia),壁虎科(Gekkonidae)。实验用大壁虎雌雄不限,体长(吻部到泄殖孔的体长 S-V)在 15 cm 以上,体重 60 g 以上。

1.1 大壁虎骨骼解剖学

陈振昆等^[18]的研究表明大壁虎脊柱由 60 块椎骨组成,椎式为 C₈T₅L₁₃S₂Cy₂₇₋₃₃。分别为颈椎、胸椎、腰椎、荐椎和尾椎。椎骨由腹面的椎体和背面的椎弓构成,围成椎管结构。椎体为两凹型,椎弓背正中向上方突出成棘突,椎弓两侧上部向前、后各突出一对前、后关节突。其中椎骨前关节突与后关节突之间有一段内凹弧形区域,该部分骨骼强度高。两节荐椎的椎骨伸出明显的横突结构(图 1a)。除荐椎外不同位置椎骨内凹弧形区域横截面形状尺寸较为接近,高约为 3 mm,接近椭圆形(图 1b)。此外,如图 1c,椎骨的内凹弧形区域与体轴横断面存在约 25°的倾角。



(a)大壁虎脊柱结构图(右上为第一荐椎横前视图,根据文献[18]修改);(b)大壁虎椎骨横断面(根据骨骼断面标本照片绘制);(c)大壁虎椎骨的内凹弧形区域的倾斜结构(侧面观,根据骨骼标本照片绘制)

图 1 大壁虎脊柱解剖图

Fig.1 Schematic drawing of vertebral column anatomical of the Gekko gekko

1.2 大壁虎椎骨定位方法

前述大壁虎椎骨解剖结构的研究显示,通过夹持某一节椎骨两侧的内凹弧形区域,可实现椎骨的固定。考虑同时对大壁虎的颈膨大和腰膨大两个部位进行定位夹持的实验要求,颈膨大需夹持的区域确定为颈椎的后缘及胸椎的前缘;腰膨大由于荐椎横突的存在,夹持部位定为腰椎的后缘和尾椎的第一个节段。

2 大壁虎多节段脊柱定位装置的研制

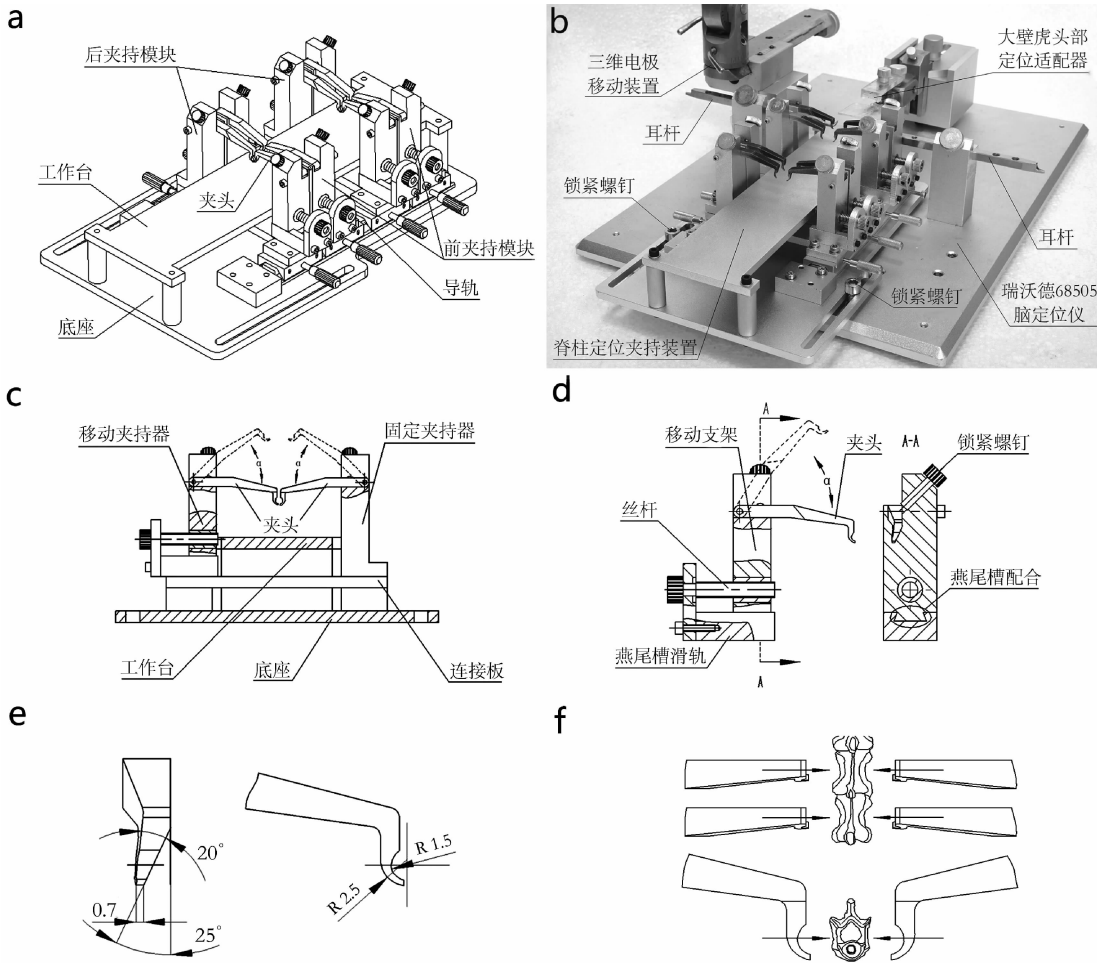
2.1 大壁虎脊柱定位夹持装置结构

本系统以瑞沃德 68505 脑定位仪为平台进行大壁虎脊柱定位夹持装置的设计。考虑实验方便和仪器的利用,脊柱定位夹持部分设计成整体可拆卸部

件。需要脊柱定位夹持时,将脊柱定位夹持装置安装在脑立体定位仪上即可。

所设计的脊柱定位夹持装置其结构如图 2a 所示:由底板、工作台、导轨及可沿导轨移动的四对脊柱夹持装置组成。脊柱定位夹持装置主体材料为铝合金,通过底板两个锁紧螺钉固定在脑定位仪的底座上(图 2b)。四对脊柱夹持装置两两配对使用。

配对使用的脊柱夹持装置分为前/后两个互为镜像的夹持模块(图 2a),每个夹持模块上有一对椎骨夹头负责夹持。所有的夹持模块安装于导轨上并可沿导轨前后移动。前/后两个互为镜像的夹持模块组成一个脊柱夹持模组(图 2a),可以实现对一段脊骨区域的夹持,两个夹持模组可以完成对两处脊椎骨区域的定位夹持(如颈膨大和腰膨大)。夹持模块的脊骨夹头互为镜像,前/后夹持模块的两对夹



(a) 脊柱定位夹持装置;(b)大壁虎多节段脊柱定位装置;(c)后夹持模块;(d)移动夹持器;
(e)夹头结构图;(f)脊柱相邻两节段夹持原理图

图 2 大壁虎多节段脊柱定位装置结构及夹持原理图

Fig.2 Structure of stereotaxic apparatus for multi-segmental vertebral column of gecko and schematic drawing of vertebral column fixation

头分别夹持待制备椎骨节段的前部椎骨和后部椎骨。

以后夹持模块(图2c)为例说明脊柱夹持装置的结构。后夹持模块包括:固定夹持器、移动夹持器、连接板和一对夹头。固定夹持器和移动夹持器通过连接板相互连接固定,固定夹持器固定于连接板上不可移动。移动夹持器(图2d)由移动支架、滑轨、丝杆和夹头等组成,并通过滑轨固定于连接板上。移动支架和滑轨采用燕尾槽配合,并通过丝杆传动实现支架的移动。夹头设计成可翻转结构(范围 $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$,图2c),通过螺钉固定于支架上,并可在夹持模块移动支架的带动下实现夹紧。

夹头结构如图2e所示。由于大壁虎脊柱内凹弧区域横断面弧形半径约为1.5 mm(图1b),夹头设计了半径1.5 mm的卡口,与配对使用的夹头夹持脊柱内凹弧形区域。同时针对前述椎骨的内凹弧形区域与体轴横断面成约 25° 的倾角(图1c),在夹头夹持端为 20° 锥形的基础上也设置为 25° 倾角,以便更好地适应椎骨弧形区域的结构,形成可靠的夹持。夹头夹持脊柱原理如图2f:通过脊柱夹持模组的两对夹头相向配对夹持,可以实现夹持2~4节椎骨的定位夹持。

2.2 大壁虎多节段脊柱定位装置夹持定位的方法

大壁虎脊柱定位夹持装置依靠夹持模块上成对使用的夹头实现对某一节椎骨的固定夹持,通过一对夹持模块构成的夹持模组实现相邻2~4节椎骨的定位夹持,以便后续的脊髓制备等手术操作。具体实施方法如下:

(1)将大壁虎消毒麻醉后放置于手术台上,暴露需要夹持的脊骨节段,之后放置于脊柱定位夹持装置的工作台上;

(2)腰膨大固定:放下后夹持模块固定夹持器上的夹头,将待夹持的脊骨节段对准后夹持模块的夹头卡口位置,拧紧夹头锁定螺钉,将大壁虎需要夹持椎骨的内凹弧结构贴在夹头上;

(3)转动丝杆推动夹持模块移动支架前进直至夹头靠近椎骨位置,拧紧锁定螺钉使夹头固定,之后微调丝杆直至固定;

(4)移动前夹持模块,夹头对准需要夹持的椎骨节段,后续操作与(2)(3)相同;

(5)完成腰膨大位置的夹持后,利用另一对夹持模组夹持颈膨大,操作同上;

(6)完成脊柱夹持后,将脊柱定位夹持装置通过底板的锁紧螺钉固定在大壁虎脑立体定位仪上,

适当调节脊柱定位夹持装置和大壁虎头部定位装置之间的相对位置,可以同步完成头部定位,如图3,a所示。脑立体定位按文献[17]所述方法进行。

3 大壁虎脊髓制备及脊髓电生理相关实验验证

通过对大壁虎实施颈膨大-腰膨大联合脊髓制备、脊髓内微量注射标记以及中脑化学刺激-脊髓电生理同步记录实验对设计的大壁虎多节段脊柱定位装置进行实验验证。

3.1 颈膨大-腰膨大联合脊髓制备及脊髓内给药实验

按照2.2方法固定大壁虎颈膨大和腰膨大处脊柱,进行联合脊髓制备。用手术刀划开大壁虎颈膨大部位皮肤,手术剪钝性分离周围组织,剔除椎骨附近的肌肉,暴露颈膨大和腰膨大处椎骨并完成脊柱夹持。然后进行颈膨大和腰膨大区域椎骨的椎板切除术,暴露脊髓完成联合脊髓制备(图3a)。脊髓制备完毕便可进行后续的髓内给药实验了。

脊髓内给药实验是大壁虎脊髓神经通路的逆行示踪实验的基础。实验使用微量注射器注射颈膨大处C₈神经节,药物为1%的溴胺天蓝,注射针头为直径30 μm的玻璃微管。利用微电极推进器将玻璃微管推进至脊髓内注射,注射时间20 min,完成后留针20 min,结束后对大壁虎进行灌流^[19]。然后取出相应脊髓节段,在含有4%多聚甲醛的生理盐水中后固定过夜。利用冷冻切片机进行组织学切片,切片厚度30 μm,中性红染色并在显微镜下拍照(图3b)。

3.2 大壁虎中脑化学刺激-脊髓电生理同步记录实验

3.2.1 中脑暴露手术

按照0.75 mL/100 g体重标准对大壁虎进行戊巴比妥钠(浓度4%)腹腔注射麻醉。待大壁虎完全麻醉后,用酒精进行全身消毒,放置于脊柱夹持器的工作台上,并使用大壁虎脑立体定位夹持器固定头部。

手术刀按T形切口切开大壁虎头部皮肤并钝性分离周围组织,使用牙科钻按照7×8 mm的矩形打磨去除颅骨,之后使用维纳斯剪和眼科镊去除硬脑膜和蛛网膜,暴露中脑。

手术刀切开颈膨大及腰膨大处的皮肤,并钝性分离周围组织,剔除脊骨附近的肌肉,暴露脊柱。之

后按照 2.2 的方法进行脊柱夹持,并在大壁虎前肢的肱三头肌和后肢的髂颈肌植入肌电电极。

3.2.2 大壁虎四肢协同运动的诱导及肌电信号的记录

采用电刺激和化学刺激方法诱发大壁虎四肢协同运动。电刺激使用 YC-2-S 双极型程控刺激器。利用微电极推进器夹持刺激电极(直径 130 μm 的镍镉合金丝),植入大壁虎中脑;缓慢进给(进给精度 5 μm)同时给予 1 μA 的电流刺激,观察大壁虎肢体反应。待出现到四肢协同运动后停止刺激,记录刺激位点空间三维坐标并在与该刺激位点对称的对侧脑区给予化学刺激。

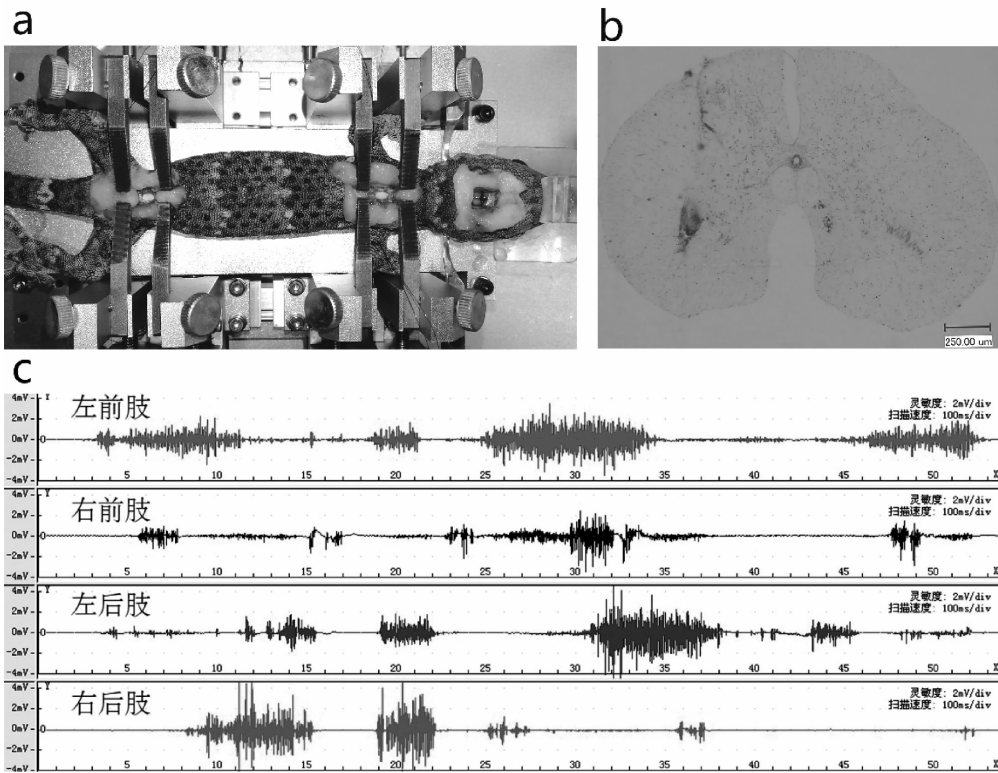
按照 3.1 的方法将 0.1 mol/L 谷氨酸钠注射至刺激位点诱发四肢运动,使用 RM6240BD 多通道生理采集仪同步记录肌电信号,结果如图 3c。

4 结果与讨论

本文根据大壁虎椎骨解剖结构,研制了一套适于大壁虎的多节段脊柱定位装置,并将该装置应用于大壁虎颈膨大-腰膨大联合制备(图 3a)、脊髓内微量注射标记实验(图 3b)和中脑化学刺激-脊髓电

生理同步记录(图 3c)等一系列验。实际实验结果表明,该装置不仅适于大壁虎多节段脊髓在体制备,而且操作简单,能够可靠定位夹持选定脊柱部位。此外,多节段脊柱定位装置设计成整体可拆卸结构,方便与大壁虎脑立体定位仪结合使用。在不影响原脑定位仪的功能前提下,可实现与头部立体定位一体化的实验操作,能够在一次实验中完成大壁虎的头部-颈膨大-腰膨大三个区域的同步定位夹持,利于开展大壁虎运动脊髓调控的相关研究。

在脊髓制备时,因椎板去除处脊髓裸露,脊髓在外界刺激条件下(如,触压和电刺激)极易引起大壁虎脊柱弯曲。若无可靠的脊柱定位固定装置,则脊柱弯曲牵拉会极大影响脊髓电生理记录电极或者脊髓内微量注射定位的准确性。所研制的大壁虎多节段脊柱定位装置通过夹持待制备脊髓相邻节段的前/后椎骨,确保了在大壁虎脊髓制备及脊髓电生理实验的条件下,大壁虎脊柱的立体定位,避免了由于脊柱位移所带来的信号干扰。不过,因大壁虎脊柱相邻节段连接具有一定柔性,随着夹持脊柱节段的增加,定位的稳定性也会有所下降。实际实验表明,同时定位的脊柱节段以相邻 2 节段(图 2f)或 3 节段为宜,最多不要超过 4 个相邻节段。



(a) 颈膨大-腰膨大联合脊髓制备;(b) 脊髓内微量注射标记;(c) 中脑化学刺激-脊髓电生理同步记录

图 3 实验验证

Fig.3 Experimental verification

大壁虎脊柱解剖学研究表明,其胸椎、腰椎和尾椎节段较多,但形状较为接近;脊柱夹持器夹头按照这些节段的形状设计(图2e),能较好的实现夹持功能。另外,连接头部的颈椎由8节椎骨组成,排列较为致密。虽然颈椎椎骨的形状和其他椎骨有所差异,但并不影响本装置的定位夹持功能。

Daghfous 等^[20]将七鳃鳗分离出脑及脊髓,对中枢运动区域进行化学刺激诱发虚拟运动并同步记录脊髓神经干信号。采用类似方法对大壁虎进行离体脊髓电生理实验,难以全面研究其相关肢体尤其是其足端黏附的运动的神经调控机制。鉴于目前尚缺少对大壁虎中脑运动区域的研究,采用在体的方法进行高位神经中枢参与下大壁虎的脊髓对四肢协同运动调控研究还需进一步深入探索;大壁虎多节段脊柱定位装置的研制实现了大壁虎头部与多节段脊柱的同步定位,为后续此类神经调控机理的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, *et al.* Adhesive force of a single gecko foot-hair. [J]. *Nature*, 2000, 405 (6787):681-685.
- [2] Liu Y, Zhou Q, Wang Y, *et al.* Gekko japonicus genome reveals evolution of adhesive toe pads and tail regeneration [J]. *Nature Communications*, 2015, 6:10033.
- [3] Wang Z, Xing Q, Wang W, *et al.* Contribution of friction and adhesion to the reliable attachment of a gecko to smooth inclines[J]. *Friction*, 2017.
- [4] 王周义, 戴振东. 大壁虎斜面运动力学、脚趾外翻脱附力学及其仿生研究[J]. *机械工程学报*, 2017(4).
- [5] Wang Z, Dai Z, Li W, *et al.* How do the substrate reaction forces acting on a gecko's limbs respond to inclines? [J]. *The Science of Nature*, 2015, 102(1-2).
- [6] Wang Z, Dai Z, Yu Z, *et al.* Optimal attaching and detaching trajectory for bio-inspired climbing robot using dry adhesive [C]// *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2014.
- [7] Jiang H, Hawkes E W, Fuller C, *et al.* A robotic device using gecko-inspired adhesives can grasp and manipulate large objects in microgravity [J]. *Sci. Robot*, 2017, 2 (7).
- [8] 王文波, 戴振东, 郭策, 等. 电刺激大壁虎(Gekko gekko)中脑诱导转向运动的研究[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(9):979-986.
- [9] Wenbo W, Ce G, Jiurong S, *et al.* Locomotion Elicited by Electrical Stimulation in the Mesencephalon of the Lizard Gekko gekko [C]//*Proceedings of International Conference on Intelligent Unmanned Systems*. 2007, 3.
- [10] Catela C, Shin M M, Dasen J S. Assembly and Function of Spinal Circuits for Motor Control[J]. *Annual Review of Cell & Developmental Biology*, 2015, 31(1):669-98.
- [11] Nachstedt T, Tetzlaff C, Manoonpong P. Fast Dynamical Coupling Enhances Frequency Adaptation of Oscillators for Robotic Locomotion Control [J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2017, 11.
- [12] Cunningham M G, Donalds R A, Scouten C W, *et al.* A versatile, low-cost adaptor for stereotaxic and electrophysiologic spinal preparations in juvenile and adult rodents [J]. *Brain Research Bulletin*, 2005, 68 (3):157-162.
- [13] Fiford R J, Bilston L E, Waite P, *et al.* A vertebral dislocation model of spinal cord injury in rats [J]. *Journal of neurotrauma*, 2004, 21(4):451-458.
- [14] <http://products.narishige-group.com/group1/STS-A/stereotaxic/english.html>
- [15] <http://www.rwdls.com/Product/3548793623.html>
- [16] 刘磊, 郭策, 王文波, 等. 大壁虎脊柱立体定位的方法与装置[J]. *生物医学工程研究*, 2012, 31(3):137-142.
- [17] 王文波, 郭策, 孙久荣, 等. 大壁虎脑立体定位的方法与装置[J]. *科学通报*, 2007, 52(21):2524-2528.
- [18] 陈振昆. 大壁虎骨骼系统的解剖[J]. *云南农业大学学报*, 1990(1):1-6.
- [19] Hoops D. A perfusion protocol for lizards, including a method for brain removal[J]. *Methods*, 2015, 2:165-173.
- [20] Daghfous G, Green W W, Alford S T, *et al.* Sensory Activation of Command Cells for Locomotion and Modulatory Mechanisms: Lessons from Lampreys [J]. *Frontiers in Neural Circuits*, 2016, 10.

基于用户行为的智能电网负荷优化分配算法研究

刘 琳¹,张启伟²,胡美琳²,王汝英²

(1.国网信息通信产业集团有限公司,北京 100000;2.北京国电通网络技术有限公司,北京 100000)

摘 要:传统的需求侧管理系统策略的制定大多依据电网自身的特点来定制,算法没有普适性,而且管理系统在开发时所使用的是动态编程与线性规划,因而这样的系统在面对多设备、海量计算时难以应付。本文针对这些问题设计一种基于遗传算法的电网需求侧管理系统,使得电网用户可以依据自己的实际情况制定出合理的能源使用计划,且可以使得电力公司的峰值负荷得到缓解,优化电力公司负荷结构,从而达到电网供电平稳、可持续的要求。
关键词:用户行为;智能电网;负荷优化;分配算法

中图分类号:TM714 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0055-04
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.010

Research on Load Allocation Algorithm of Smart Grid
Based on User Behavior

Liu Lin¹,Zhang Qiwei²,Hu Meilin²,Wang Ruying²

(1.State Grid Information and Communication Industry Group Co., Ltd. Beijing 100000,China;
2.Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd. Beijing 100000,China)

Abstract: The traditional demand-side management system strategy formulation is mostly customized according to the characteristics of the power grid itself, the algorithm is not universal, and the management system in the development of the use of dynamic programming and linear programming, so such a system in the face of multi-equipment, mass computing difficult to deal with. These problems, the author of this paper designed a kind of power demand side management system based on genetic algorithm, and makes the grid users can according to own actual situation to develop a reasonable plan of energy use, and can make the peak load of power companies, so as to achieve stable, sustainable of power supply requirements.
Keywords: user behavior; smart grid; load optimization; allocation algorithm

电网与用户之间的交流成为了当前电网技术发展重点所在。传统的电网架构是以化石燃料发电厂的标准来处理的,随着科学技术水平不断发展,这种模式已经不能符合时代要求,智能电网的出现为电网技术的发展提供了新的动力^[1,2]。

自上个世纪 60 年代以来,世界能源危机的爆发使得发电投资大幅上升,自然环境也因能源的过度开发而受到威胁。虽然核能以清洁能源著称,但其安全性问题被很多人质疑。这些问题使得电力企业

面临着巨大的压力,其效益也大大降低^[3]。美国等为了解决这些弊端,开始了对智能电网以及在智能电网下需求侧管理的相关研究。2006 年,欧盟正式颁布《欧洲可持续发展的、竞争的和安全的电能策略》,标志着智能电网进入了新的发展阶段^[4]。2008 年,Boulder 第一次在美国建立起智能化电网城市。他所建立的智能电网为用户提供了实时电价,使得用户可以及时调整自己的用电时间,从而降低用电费用,也为电网的用电平衡提供了助力^[5]。

2007 年 10 月,国内第一次开始分析智能电网开发的可行性和有效性,并制定了发展智能电网的“三步走战略”。第一步在 2010 年实现电网智能基地,第二步在 2020 年形成数字电网化,使我国的电网智能化满足相关标准,第三步就是在 2030 年实现国家电网的智能网络^[6]。该计划为我国的智能电网发展提供了明确的方向,相关的技术也提上分析开发的日程。

1 对智能电网需求侧管理控制器的优化

传统的需求侧管理系统策略的制定大多依据电网自身的特点来定制,算法没有普适性,而且管理系统在开发时所使用的是动态编程与线性规划,因而这样的系统在面对多设备、海量计算时难以应付。本文针对这些问题设计一种基于遗传算法的电网需求侧管理系统,使得电网用户可以依据自己的实际情况制定出合理的能源使用计划,且可以使得电力公司的峰值负荷得到缓解,优化电力公司负荷结构,从而达到电网供电平稳、可持续的要求。

本文所设计的算法对用电预测的周期为 24 h,系统会依据预测的结果对设备负荷进行转移控制,达到电网削峰填谷的目的。

电力能源的削峰填谷有利于电网运行的稳定,因此在设计算法时要让每一个设备的实际功耗曲线与目标功耗相符。如下的公式表述:

最小化

$$\sum_{kT=1}^N (P_L(kT) - P_0(kT))^2 \quad (1)$$

上式中, $P_0(kT)$ 是指在时刻为 kT 时目标消耗曲线, $P_L(kT)$ 是实际消耗曲线。实际消耗曲线如下所示:

$$P_L(kT) = P_F(kT) + P_C(kT) - P_D(kT) \quad (2)$$

此处 $P_F(kT)$ 就是对应预测消耗,而 $P_C(kT)$ 则是负荷连接消耗, $P_D(kT)$ 是断开时消耗。

$P_C(kT)$ 的计算公式如下:

$$P_C(kT) = \sum_{i=1}^{kT-1} \sum_{n=1}^D X_{nikT} P_{ln} + \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{i=1}^{kT-1} \sum_{n=1}^D X_{nikT} P_{(l+1)n} \quad (3)$$

$P_C(kT)$ 的值是由 2 个负荷增量组成的,一是设备在转移连接时间 kT 内的增量,另一个是设备在预定连接时间 kT 内的增量。 X_{nikT} 是指时间步长,即 i 到 kT 的步长, n 指的是设备类型, D 是型设备的总

量, P_{ln} 指的就是在时间 l 内, n 型设备的功耗率, j 则对应设备消耗的总时间。

同理, $P_D(kT)$ 的主要组成部分也有两部分,如下公式所示:

$$P_D(kT) = \sum_{q=kT+1}^{kT+m} \sum_{n=1}^D X_{nkTq} P_{ln} + \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{q=kT+1}^{kT+m} \sum_{n=1}^D X_{n(kT-1)q} P_{(l+1)n} \quad (4)$$

如上式所示, $P_D(kT)$ 的组成由因为设备连接时间的延迟而带来的负载减量, X_{nkTq} 控制周从 kT 推迟到 q 的对应设 n 设备的总数, m 就是允许延迟的最大时间。该最小化的问题需要注意以下两个条件:

一是设备转移的数量在这里不能为负即,

$$X_{nikT} > 0 \quad \forall i, j, n \quad (5)$$

而且,在同一个时间步内,转移的设备数量不能大于当前时间步可控的数量,即:

$$\sum_{kT=1}^N X_{nikT} \leq \text{Ctrlable}(i) \quad (6)$$

上式中, $\text{Ctrlable}(i)$ 是指在一个周期内可以控制的设备数量。

2 本文所提出的遗传算法

为了提高算法的灵活性,本文的算法对不同的电网用户进行考虑,以找出最适合用户的模式。举例来说,人们使用咖啡机的时间段多在早上,洗衣机却没有固定的时间,全天候都可能有人在使用,因此洗衣机的负荷可以进行转移,因为它对时间的要求不敏感。

不同设备类型的负荷具有不同的优先级,可以依据算法将这些负荷进行安排,达到最合理的设备工作安排。本文的仿真展示了这些不同的负荷类型,对于可控设备来说,其最大的特点就是其连接的时间可以被延迟,但是不能提前。另一方面,本文算法考虑了多设备、多数据的情况,使得设备的多少只对算法中染色体的长度有影响,减少了算法的复杂度。

实际设备控制中,用户的设备一般可以延迟但是不能早于定下的时间,设备的连接时间为 $X_{nikT} = 0$ 。

在设备控制的约束项上,对所有设备的最多可以延迟的时间以及设备可以负荷转移的时间进行设定。所以可知: $X_{nikT} = 0 \quad \forall (kT-i) > m$ 。此处的 m 是被允许的最大延迟时间。

综上,最大时间步长的数目 N 计算如下:

$$N = n \times \sum_{p=1}^m p \tag{7}$$

此处的 N 是设备类型,而 p 则是指设备连接的延迟时间。

遗传算法中的染色体可以用于表示相关问题最终的解决办法。在本文所设计的算法中,电网负荷转移的问题由染色体来表示,染色体是一个数组的值,其长与设备的控制周期有着直接的关联,其长度 $= N \times B$ 。这里 B 代表的是在遗传算法中需要编码的个数,即在一个控制周期内所转移设备的数量。算法的目标是将电网中的负荷曲线与目标曲线相符,其方式如下:

$$\int = \frac{1}{1 + \sum_{kT=1}^{24} (PL(kT) - P_0(kT))^2} \tag{8}$$

算法中新的种群从当代的种群中生成。通常情况下,可以使用一个大交叉率来使得算法的收敛性得到提升,也可以利用大的遗传突变概率使得算法不会过早地收敛,但是这样可能会使得解决方案遗失。为了得到最佳的数值,在实验中证明了交叉率为 0.9、基因变异率为 0.1 时本文算法的表现最好。算法的终止条件是迭代的数量达到了最预定数或者算法的适应度值小于阈值。本文遗传算法的基本步骤如下:

第一步:种群初始化,算法的染色体长度是在 5 个控制周期内所需要进行负荷转移的用户设备数量,初始种群在实验中设为 100。

第二步:将交叉率和变异率设置为上文所述的 0.9 与 0.1;

第三步:迭代的数量达到了最预定数或者算法的适应度值小于阈值时终止算法;

第四步:利用算法找出的最优解染色体转化成为设备转移的时间步长,并控制相关设备,实现设备在步长时间内的负荷转移。

为了检测算法的有效性,为算法构建检测模型,设置每个用户设备上有控制器与需求侧管理系统相联,在模拟时,为设置最大的延迟时间为 12 h。如果将电网削峰填谷的时间设定为 0 到 24 点,电力负荷的峰值会因实际的情况而难以被转移到谷值时间。因此,该周期设定为第一天的 8 点到第二天的 8 点。该方法的具体步骤如下:

第一步:对目标的用电区域信息进行收集,得到相关设备信息数据、电力费用模式等。然后利用前文的公式得到相关的算法数据信息。

第二步:对设备在 kT 时实际的功耗进行测算,

得到算法的适值函数。
第三步:以算法的结果为参数控制设备的负荷转移。

3 基于用户行为的智能电网负荷优化分配仿真分析

本文主要是利用 Matlab/Simulink 来构建智能电网模型,用以对本文所提出的算法进行改进。

在电网需求侧管理系统中,客户可以依据用电种类的不同分成 3 个部分,即住宅区、工业区以及商业区。在这 3 个区中,它们各自的连接电压相同,都是 10 kV,3 个区的智能电网连接长度分为 3、5 km 和 6 km,运行电压都是 400 V,3 个区域与主电网之间的电阻 0.005 pu、电抗为 0.002 pu,传输最大极限是 500 kVA。另外,在模拟时设定电网调度不会出现拥堵的现象。本文算法的主要目的是为了提高电网资源的利用率,使得用户的电力花费得到减少。因此,负荷曲线要与实时电力价格呈反比。在模拟时设定所有的区域用电价格相同。

模拟仿真的结果如表 1 所示。在通常情况下,负荷的低谷耗能曲线会在峰值出现之间。

表 1 需求侧负荷预测与实时电价
Table 1 Demand side load forecasting and real-time electricity price

时间	电价/ (元/kWh)	商业 区/h	住 宅区/h	工业 区/h
8~9	0.97	934.7	730.6	2134.1
9~10	0.75	1237.3	723.5	2581.3
11~12	1.77	1668.1	818.2	2835.3
12~13	2.04	1543.9	844.5	2551.4
13~14	2.08	1823.2	781.3	2777.6
14~15	1.22	1653.1	755.2	2719.3
15~16	1.41	1599.3	674.7	2834.5
16~17	1.32	1603.4	676.9	2544.8
17~18	0.93	946.8	1783.2	2132.4
18~19	0.89	1724.8	0.70	1822.7
19~20	0.72	1499.2	1411.8	1509.3
20~21	0.68	1354.3	1278.4	1367.8
21~22	1.43	1099.8	1349.1	1342.7
22~23	1.30	930.5	1142.4	1233.6
23~24	0.80	777.4	563.8	1033.5
24~1	0.74	567.4	744.2	1123.9
1~2	0.66	364.1	423.5	875.3
2~3	0.77	364.1	354.1	857.4
3~4	0.76	441.2	344.4	768.3
4~5	0.73	443.8	268.9	746.2
5~6	0.78	441.5	265.3	774.3
6~7	0.77	453.2	433.1	1214.5
7~8	0.83	754.3	545.5	1423.5

本文所设计的策略是广义上的电力平衡策略,对我国的智能电网的建设有重要意义。在本文的算法中,输入的变量有设备的控制周期及其功耗、各种不确定性的因素及负载耗能模式下的离散模型功耗等,算法在收敛性上表现良好,对上述的 3 个区域进行仿真测试时,耗时约为 6 h,这对于 24 h 的需求侧管理来说是可以接受的。

参考文献:

[1] Xin M, Zhang Y, Li S, *et al.* A Location-Context Awareness Mobile Services Collaborative Recommendation Algorithm Based on User Behavior Prediction [J]. International Journal of Web Services Research, 2017, 14(2) :45-66.

[2] Wang Q, Hui F, Wang X, *et al.* Research on early warning and monitoring algorithm of financial crisis based on fuzzy cognitive map [J]. Cluster Computing,

2018(2) :1-9.

[3] Inga E, Hincapie R. Matched Channel Allocation for Advanced Metering Infrastructure based on Cognitive Mobile Virtual Network Operator [J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(4) :1780-1785.

[4] Liu T, Wen X, Wang S, *et al.* Research on Fault Diagnosis Method of Board-level Circuit Based on Genetic Algorithm [J]. Procedia Computer Science, 2018, 131:495-501.

[5] Cao Z, Lin J, Wan C, *et al.* Optimal Cloud Computing Resource Allocation for Demand Side Management in Smart Grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4) :1943-1955.

[6] Hao P, Chen Z, Jiang S, *et al.* [Research on non-rigid registration of multi-modal medical image based on Demons algorithm] [J]. Sheng wu yi xue gong cheng xue za zhi = Journal of biomedical engineering = Shengwu yixue gongchengxue zazhi, 2014, 31(1) :161-165.

(上接第 48 页)

[9] Zhu C, Zhou H, Wang R, *et al.* A Novel Hierarchical Method of Ship Detection from Spaceborne Optical Image Based on Shape and Texture Features [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(9) :3446-3456.

[10] Proia N, Pagé V. Characterization of a Bayesian Ship Detection Method in Optical Satellite Images [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2010, 7(2) :226-230.

[11] Faster R-CNN Ren S, He K, Girshick R, *et al.* Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks [J]. IEEE Trans Pattern Anal

Mach Intell, 2015, 39(6) :1137-1149.

[12] Redmon J, Divvala S, Girshick R, *et al.* You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2016:779-788

[13] Redmon J, Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2017: 6517-6525.

[14] Redmon J, Farhadi A. YOLOv3: An Incremental Improvement [J]. 2018.

某增压发动机正时系统动态特性试验研究

丁 佳¹,白云龙¹,林 辉²

(1. 陕西矩阵动力科技有限公司,西安 710016;2. 浙江工业大学 机械工程学院,杭州 310014)

摘 要:为了评估某增压发动机正时系统动态特性,以 AVL 试验台架为基础,设计正时系统动力学试验,测量发动机在不同工况下正时系统受力以及振动情况。试验结果表明:正时链条张力随着发动机负荷增加而增加,在定轨侧链条张力比动轨侧张力大;在相同测试工况下,磨损的旧链条比新链条柱塞运动距离明显大;机油温度越低张紧器柱塞运动距离较小,不同发动机负荷对张紧器柱塞运动距离影响很小。该测试方法可以准确测量和评估正时系统振动频率,为发动机正时系统设计提供设计输入。
关键词:正时系统;动态特性;链条张力;柱塞位移

中图分类号:TK402 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0059-04
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.011

The Experimental Research on the Timing System Dynamic Characteristics of the Turbocharge Engine

Ding Jia¹, Bai Yunlong¹, Lin Hui²

(1. Shaanxi Matrix Power Technology Co., Ltd. Xian 710016, China;
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract:In order to evaluate the influence on timing system dynamic characteristic of the turbocharged engine, the dynamic experiment of engine timing system was conducted to measure tension of the timing chain and tensioner vibration in this paper. The results show that the tension of the timing chain increase with the engine load, and the slack side chain tension are bigger than fixed side. The tensioner piston motion in the new chain timing system absolutely is smaller than in the worn chain system at the same test condition. The tensioner motion decreases with oil temperature, but engine load has a little effect on the tensioner motion. The test method can accurately measure and evaluate the vibration frequency of timing system and provide design input for engine timing system design.
Keywords:timing system;dynamic characteristic;chain tension;piston motion

发动机正时系统是连接配气机构与曲柄连杆机构最为关键的系统。目前正时系统传递的方式有 3 种:链条传动、带传动、齿轮传动。链条传动具有传动可靠、耐久性好、耐磨性强、噪音较低以及结构紧凑等特点,因而汽车发动机正时传动系统越来越多的采用正时链条^[1-3]。链传动主要有滚子链、套筒链以及齿形链。与套筒、滚子链相比,齿形链能够更好的承受高速、变载、重载等复杂的工况,并且有相对较高的 NVH 性能,目前齿形链被广泛应用在汽车发动机上。

收稿日期:2019-08-22
基金项目:陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-G-11-4)。
作者简介:丁佳(1987-),男,陕西西安,硕士,中级工程师,主要从事发动机关键零部件可靠性研究。
E-mail:dingjia625@163.com。

正时系统主要包含正时链条、正时链条动轨、正时链条定轨、链条张紧器以及链轮(或者 VVT 相位器)等关键零部件。在设计正时系统时,链条作为最重要的核心零部件之一,需要考虑其静强度、NVH 性能以及可靠性外,还需考虑其动态特性。在正时系统动力学仿真应用发展中,吉林大学孟繁忠、冯增铭等人通过利用 RecurDyn 中的链条模块,建立正时链传动系统,对链条的张力、接触力、链板的应力以及造成的冲击等进行分析,不断地对系统进行改善,为正时链条的研发提供了技术支持,但精确度还有待提高^[4-6]。而正时系统动态特性的好坏直接影响发动机正时系统疲劳可靠性以及寿命,因此本文设计正时系统动态试验,分别测量正时链条和链条张紧器动态参数,计算正时导轨受力情况,评估发动机正时系统动态特性随发动机转速以及负荷的关系,为正时系统设计提供参考。

1 测试试验介绍

本试验主要通过 AVL 综合测试台架控制系统,在发动机不同转速、不同负荷以及不同机油温度的工况下,测量发动机新链条和 0.7% 的伸长率的磨损旧链条 2 种链条受拉力情况以及张紧器柱塞运动状况。与其他测试手段不同,该测试方法可以通过传感器直接测量正时链条载荷以及正时系统其他零部件动态参数。该增压发动机相关关系如表 1 所示。

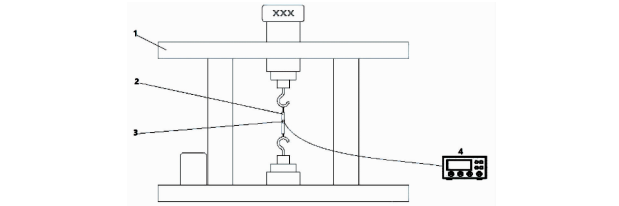
表 1 发动机相关参数

Table 1 The key parameter of the engine	
项目	参数
发动机排量/L	1.499
发动机型式	直列四缸、涡轮增压
缸径/mm	75
冲程/mm	84.8
点火顺序	1-3-4-2
缸心距/mm	83
进气方式	气道喷射
VVT	VVT-i
压缩比	9:1
配气机构类型	DOHC 直驱式
额定功率/kW	110 kW@6000 r/min
扭矩/(N·m)	210 N·m @2000~4500 r/min

1.1 拉力测试台静态标定试验

拉力测试台静态标定试验是依托拉力试验台,如图 1 所示,通过加载多次不同拉力,分别读取采集系统中应变片电压读数,形成拉力读数与应变片电压读数的一定对应关系。

通过最小二乘法得出正时链条受张力与应变片对应动态应变仪关系 K_1 ;



1.拉力测试台; 2. 正时链条;3. 应变片;4. 动态应变仪

图 1 拉力测试台静态标定

Fig.1 Static calibration of tensile tester

$$K_0 = F_0/V_0 + C_0$$

其中, V_0 代表动态应变仪电压值, F_0 代表拉力测试台力数值, C_0 为最小二乘法计算常数。

1.2 台架静态标定

在发动机耐久试验台架准确连接待测发动机,该待测发动机更换之前拉力测试台正时链条(含应变片),在动轨和定轨中正确安装力传感器、数据采集卡,通过多次向正时链条(含应变片)施加外力,分别多次读取正时链条应变片电压值和力传感器值,再次形成应变片电压读数与力传感器数值一一对应关系,即链条拉力和力传感器的一一对应关系;

$$K_a = F_a/V + C_a$$

同理,亦可以通过最小二乘法得出力传感器 b 与应变片对应动态应变仪关系 K_b ;

$$K_b = F_b/V + C_b$$

其中, V 分别代表动态应变仪电压值, F_a 代表力传感器 a 数值, F_b 代表力传感器 b 数值, C_a 和 C_b 为最小二乘法计算常数。

根据拉力测试台静态标定数据,可以推算力传感器 a 与正时链条受力变化关系:

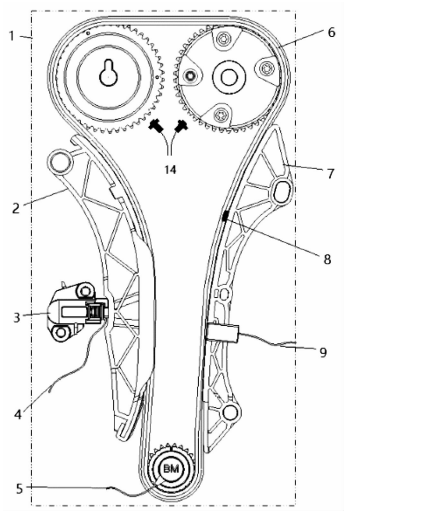
$$K_a \cdot K_0 = (F_a/V + C_a) \cdot (F_0/V_0 + C_0)$$

同理,可以推算力传感器 a 与正时链条受力变化关系:

$$K_b \cdot K_0 = (F_b/V + C_b) \cdot (F_0/V_0 + C_0)$$

表 2 试验中主要传感器型号及参数

Table 2 The related parameters of the sensor		
主要传感器	型号	参数
应变式力传感器	FUTEK	量程:0~1000 N;
	LCB-1000lb	精度:±1 N
直线位移传感器	LVTD-MHR250	量程:0~12 mm;
		精度:±0.01 mm
测试台控制系统	AVL PUMA	转速:0~8000 r/min±0.3%
		扭矩:0~1400 Nm±0.1%
发动机测功机	AVL	转速:0~8000 r/min±0.3%
	INDI S22-4	扭矩:0~1400 Nm±0.1%
温度传感器	PT100	控制精度:0.2%~0.3%
磁感应传感器	Ono Sokki	量程:400~100000 Hz
	MP-992	



1. 发动机正时系统;2. 动轨;3. 张紧器;4. 力传感器 a;5. 转角编码器;6. 正时链条;7. 定轨;8. 应变片;9. 力传感器 b;10. AVL 发动机综合测试台架;11. 动态应变仪;12. 数据采集系统;13. 数据存储电脑;14. 磁感应传感器

图 2 正时系统动态测试装置示意图
Fig.2 The dynamic test device of timing system

2 试验结果分析

发动机正时系统经张紧器张紧,在运动过程中定轨侧和张紧侧受力是不同的,且两侧链条振幅也是不同。在本次验中,测量发动机正时系统的动态参数,主要测量发动机正时系统定轨侧链条受力、张紧侧正时链条摆动幅值即为张紧器柱塞运动行程以及正时系统的频率。测试主要分为 2 种工况,一种是同一转速线性增加发动机负荷,另一种是发动机满负荷从怠速工况线性增加至最高转速工况。在发动机正时系统中,张紧器属于液压元件,机油粘度受温度影响较大,需要测量和评估不同发动机油温下各个工况的动态参数。

2.1 链条张力

发动机正时链条是由多个链节组成,由于在机械传动中受到多边形效应和啮合冲击的影响,每一节链节受力大小均不同,并且在不同位置受力也不一样。该测量方法可以直接反应出沿着链条方向的拉力大小,不需要再次进行几何转换计算。经过不同发动机机油温度 and 不同发动机负荷,正时系统定轨侧受力最大值如图 3 所示。结果表明新链条的受力明显较磨损的旧链条大,且随着发动机负荷增大而明显增加,此外还可以看出,发动机机油温度对其链条张力影响较小。

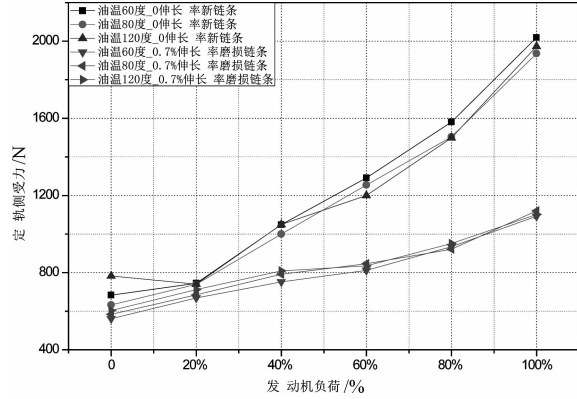


图 3 定轨侧受力随发动机负荷变化情况
Fig.3 The fixed guide load VS. engine load

考虑到转速发动机负荷、机油温度以及链条状态均会影响链条张力,在 80 ℃ 机油温度情况下,发动机从怠速到最大转速全负荷运转,分别测量到定轨侧链条张力变化曲线如图 4 和图 5 所示。可以看出,在分别在发动机扭矩最大时刻均出现正时链条张力的波峰值。此外,同一时刻下,定轨侧链条张力比动轨侧链条张力要大。

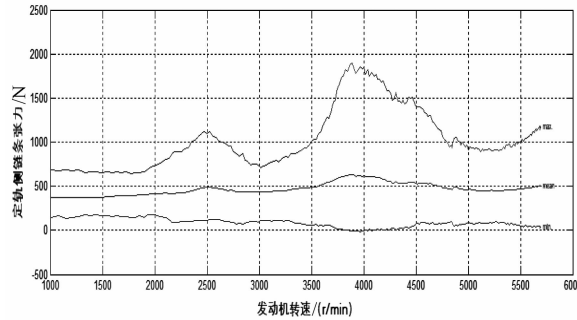


图 4 定轨侧张力变化情况
Fig.4 The fixed guide tension VS. engine speed

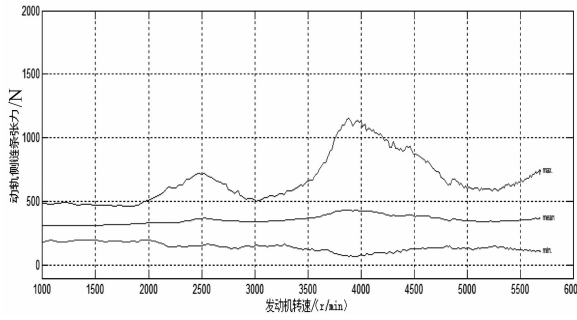


图 5 动轨侧张力变化情况
Fig.5 The primary guide tension VS. engine speed

2.2 张紧器柱塞运动行程

正时系统中张紧侧链条振幅是评估正时系统重

要指标,也是发动机机械振动和噪声的来源之一,该系统的可靠性和 NVH 性能同样备受关注^[7-9]。液压张紧器柱塞运动行程可以直接反应这一参数。而机油粘度对温度比较敏感,且随着温度升高粘度降低^[5]。通过测量在不同发动机油温、不同发动机负荷及不同状态链条下的张紧器柱塞运动行程,如图 6 所示。

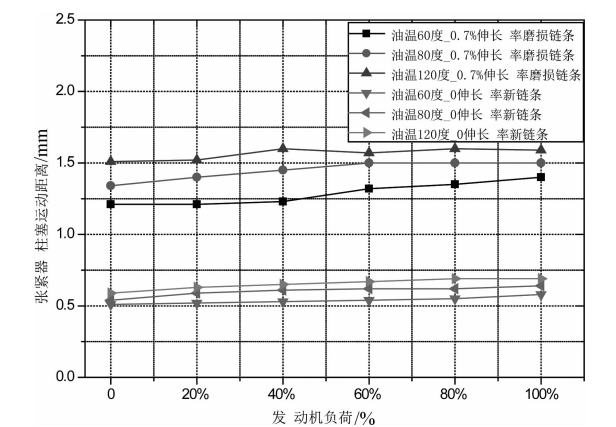


图 6 张紧器柱塞运动距离情况
Fig.6 The primary tensioner piston VS.
engine load

试验结果表明,在相同测试工况下,磨损的旧链条比新链条柱塞运动距离明显大;机油温度越低张紧器柱塞运动距离较小,主要是由于机油温度对机油粘度影响较大造成的,机油温度越低,其粘度越小,张紧器中的流量阀流动阻力越大。此外,不同发动机负荷对张紧器柱塞运动距离影响很小。

2.3 正时系统频率

在正时系统测试中,分别在进、排气链轮处布置磁感应传感器。磁感应传感器是一种能将被测对象的机械量转换成易测电信号的传感器,其利用电磁感应原理将被测物体的振动信号转换成电信号。一般来说,机械振动的波形不是纯粹的正弦波,而是有不同频率的谐波合成,这些复杂的振动波形可以通过傅里叶变换,分解成一系列的谐波分量,不同的谐波分量含有对应的幅值和相位。

凸轮轴齿轮经磁感应传感器拾取并转换成相应的电信号,配合凸轮轴转速以及时间关系,经有效的数模转换,就可以得出振动系统的振幅、加速度频率和频率等。该方法为轴系振动提供一种测量系统共振频率发方法,可以有效解决并且避免轴系设计缺陷。经数据整理后,综合系统振动谱次及振动频谱图可以明显看出该发动机正时系统的共振频率为

252.4 Hz,如图 7 所示。

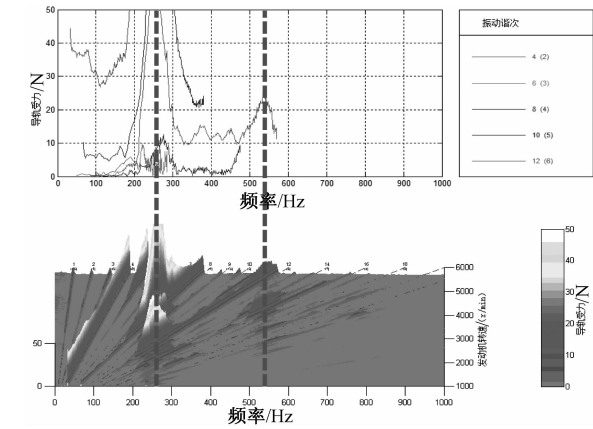


图 7 正时系统振动频率幅值和频谱图
Fig.7 The Vibration frequency and spectrum
of the timing system

由于系统中存储有振动能量,所在共振频率下,很小的周期驱动力便可产生很大的振动,比其他频率以更大的振幅做振动的情形^[10]。在正时系统零部件开发过程中,需要考虑子部件以及各系统振动频率,避免出现共振现象。通过该方法可以准确评估系统振动频率,为发动机正时系统设计提供设计输入。

3 结论

本文设计发动机正时系统动态测试试验,通过 AVL 台架控制发动机在不同转速、不同负荷以及不同机油温度下,分别测试正时系统定轨侧链条张力情况、动轨侧张紧器柱塞运动情况以及正时系统的振动频率。试验结果表明:

- (1) 正时链条受张力随着发动机负荷增加而增加,在定轨侧链条张力比动轨侧张力更大;且分别在发动机扭矩最大工况均出现正时链条张力的波峰值。
- (2) 在相同测试工况下,磨损的旧链条比新链条柱塞运动距离明显大。
- (3) 机油温度越低张紧器柱塞运动距离较小,主要是由于机油温度对机油粘度影响较大造成的,机油温度越低,其粘度越小,张紧器中的流量阀流动阻力越大;此外,不同发动机负荷对张紧器柱塞运动距离影响很小。
- (4) 该测试方法可以准确测量和评估正时系统振动频率,为发动机正时系统设计提供设计输入。

基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计

魏君雅

(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院,山东 青岛 266000)

摘 要:传统的信息安全监控系统设计中,对用户体验考虑不足,导致系统的交互能力差,事故发生率低,为此,提出并设计了基于用户体验的交互式信息安全监控系统。根据用户体验要素设计系统总体框架,通过 ZigBee 无线通信技术,从终端感知模块、开关模块、客户端模块入手设计监控节点硬件结构。计算信息对应的优先级程度,提取优先级较高的交互式信息进行处理,获取用户反馈,完成交互式系统设计。实验结果表明,所设计系统的监控精准度高、交互能力好,系统响应效率高。

关键词:用户体验;交互式信息;监控节点;优先级

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)03-0063-05

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.012

Design of Interactive Information Security Monitoring System Based on User Experience

Wei Junya

(School of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum,
Qingdao 266000, China)

Abstract: In the traditional design of information security monitoring system, the user experience is not considered, resulting in poor interaction ability and low accuracy of monitoring results. Therefore, an interactive information security monitoring system based on user experience is proposed and designed. According to the user experience element design system overall framework, through ZigBee wireless communication technology, design monitoring node hardware structure from terminal sensing module, switch module and client module. Calculate the priority level corresponding to the information, extract the interactive information with higher priority for processing, obtain user feedback and complete the interactive system design. The experimental results show that the monitoring of the designed system is accurate. High degree, good interaction ability, high system response efficiency.

Keywords: user experience; Interactive information; monitoring node; priority

在网络信息安全中交互式信息安全是较为重要的一部分,成为人们关注的重点^[1-3]。计算机交互式地显示抽象数据,科学可视化、人机交互、数据挖掘、图像技术和图形学等诸多学科的理论和方法被结合在一起,使抽象信息以直观的视觉方式表现出来,人们能够充分利用视觉和感知能力去观察、处理

信息。但由于网络用户一些不规范和无意识的操作,网络管理出现漏洞,交互式信息发生泄露^[4]。交互式信息安全监控系统,用于提高其信息安全性,但当前存在的系统存在精准度低和交互能力差的问题,需要进一步的优化^[5]。

基于 GPS 的交互式信息安全监控系统设计方

收稿日期:2019-06-15

作者简介:魏君雅(1994-),女,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向:计算机与通信工程。

法结合 SQL Server 数据库技术、检测技术和 GSM/GPRS 技术构建 C/S 体系架构的信息安全监控系统,通过 FIR 滤波算法和 IIR 算法对前端信号和位置信号进行处理,根据获取的数据构建信息传输机制,对交互式信息进行安全监控,该方法对交互式信息进行监控的过程中存在漏洞,系统监控精度较低^[6]。基于分层设计的交互式信息安全监控系统设计方法对交互式信息安全监控系统进行分层设计,采用监测单元采集网络中存在的交互式信息,统一处理采集到的交互式信息,并对其进行整合,根据获得的数据评价信息的状态,利用统一接口将信息状态数据上传到监控中心,实现交互式信息的安全监控,该方法设计的系统与用户之间的交互较差^[7]。

本文设计系统针对上述方法存在的问题进行优化。

1 系统设计

基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法在用户体验五要素的基础上设计交互式信息安全监控系统,用户体验要素如图 1 所示。



图 1 用户体验要素
Fig.1 User experience elements

其中表现层是由文字和图片构成的,通过点击其中的图片可以执行对应的功能。框架层的主要目的是对布局进行优化,实现文本区域、组件、控件等元素达到最好的效率和效果。结构层的主要目的是确定不同功能和特性之间的最佳组合方式。用户使用某个功能时,通过范围层实现对功能的感知。战略层的主要功能是决定交互式信息安全监控系统的范围。

基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法通过无线综合布置方法在用户体验要素的基础上对网络中存在的节点进行增减处理,实现交互式

信息安全的监控。基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法设计的系统架构如图 2。

通过图 2 可知,由六部分构成交互式信息安全监控系统,采用无线通信方式将数据发送到节点中,节点通过汇聚处理实现数据的汇总,并采用无线通信方式将汇总的数据传送到协调器中,通过协调器协调处理节点。系统内存储各项监控数据,发现警报信号后,对显示界面进行更新处理,使系统管理员发现系统中存在的不安全信息,实现交互式信息的安全监控。

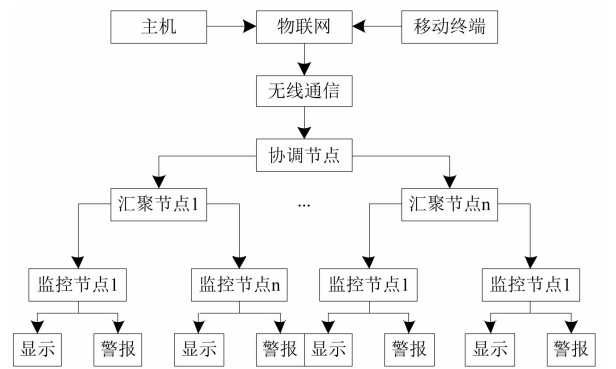


图 2 系统框架图
Fig.2 System framework diagram

基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法将模块化理念应用在硬件的设计中,实现模块之间的独立性。

通过 ZigBee 无线通信技术对网络中存在的监控节点进行设计,结合传感器和 CC2530 型号芯片采集网络中需要监控的交互式信息,并利用无线传输方式将采集到的交互式信息发送到汇聚节点中,对节点进行汇聚处理。交互式信息安全监控系统中监控节点的硬件结构如下:

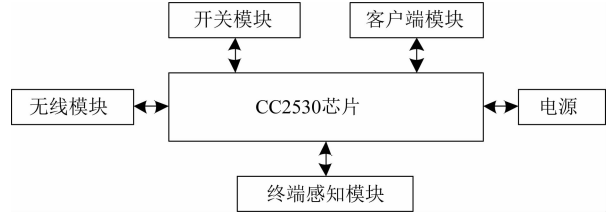


图 3 节点硬件结构
Fig.3 Node hardware structure

监控节点主要由终端感知模块、开关模块、客户端模块构成:

(1)终端感知模块,终端感知单元在监控节点中的主要目的是监控交互式信息,通过物联网信息技术实现终端感知模块中的信息传输。在交互式信

息中存在的信息种类较多,为了保证系统可以监测到每类信息,需要设计对应的终端感知单元。

(2)开关模块:采用物联网服务器协调信息在监控开关模块的设计中实现无线传输,各个模块的信息通信通过收发器串口完成。

将STM32f107VC信号的半导体芯片应用在监控服务器中,该半导体芯片的可达到50 MHz的最高工作频率,可以应用在复杂的物联网环境中,满足交互式信息安全监控系统的要求。

(3)客户端模块:用户可以通过客户端模块查看该监控系统内的监控结果,实现远程监控。客户端模块采用Windows8操作系统控制物联网服务器,节点在网络中通过上述服务器实现通信。

在硬件结构图的基础上分析客户端模块、开关模块和终端感知模块,终端感知模块的主要目的是保证系统可以感知到每种信息,实时监控不安全信息;开关模块的主要目的是保证在复杂的物联网环境下系统可以安全使用;客户端模块的主要目的是实现交互式信息安全监控系统的远程监控,方便用户在系统中查看该交互式信息的监控结果。

2 信息优先级提取

设 P_w 代表的是发布者活跃度,用来描述在周期 T 内信息发布者发布信息的总数 S ,表达式如下:

$$P_w = e^{-[\sum_{i=1}^S \text{weight}(t_i)]^{-1}} \quad (1)$$

式中, $\text{weight}(t_i)$ 代表的是时间权重函数; t_i 代表的是间隔时间。

设 V_w 为信息累计传输量,通过在周期 T 内信息发布的信息总数衡量发布者对系统的重要程度,其计算公式如下:

$$V_w = e^{-[\sum_{i=1}^S m_i \times \text{weight}(t_i)]^{-1}} \quad (2)$$

式中, m_i 代表的是第 i 个数据包中存在的信息数量。

设 W_{pro} 代表的是信息发布者的权重,通过发布者活跃度 P_w 和信息累计传输量计算得到:

$$W_{pro} = \omega P_w + (1 - \omega) V_w \quad (3)$$

式中, ω 代表的是信息发布者对应的权重因子,在区间 $[0,1]$ 内取值,通过测试可知,权重因子 ω 的值为0.4时,效果最好。

设 C_{mod} 代表的是模块复杂度,在数据流图和系统架构图的基础上,通过各个子模块在监控系统中的复杂度计算得到:

$$C_{mod} = \sum_{i=1}^n ev(G_i) \quad (4)$$

式中, n 代表的是系统中存在的模块数量; $ev(G_i)$ 为第 i 个子模块在系统中对应的复杂度。

设 C_{des} 为设计复杂度,在模块和系统之间存在的调用关系的基础上计算得到:

$$C_{des} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{i,j} \quad (5)$$

式中, $C_{i,j}$ 描述的是模块 j 是否被模块 i 所调用,当 $C_{i,j}$ 的值为1时,表明模块 j 被模块 i 所调用;当 $C_{i,j}$ 的值为0时,表明模块 j 没有被模块 i 所调用。

设 C_{str} 代表的是数据复杂度,通过路径在数据流图中的长度和总数进行度量,其计算公式如下:

$$C_{str} = \sum_{k=1}^m L_k \quad (6)$$

式中, m 代表的是路径在数据流图中存在的总数; L_k 代表的是第 k 条路径对应的长度。

通过上述过程获得信息复杂度 C_{str} ,其计算公式如下:

$$C_{str} = \alpha C_{mod} + \beta C_{des} + \gamma C_{tas} \quad (7)$$

其中,参数 α 、 β 、 γ 满足下式:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (8)$$

设 B 代表的是信息效益,通过下式计算得到:

$$B = e^{-C_{tas}/Q} \quad (9)$$

式中, Q 代表的是信息的总报价。

设 U 为信息对应的紧急程度,其计算公式如下:

$$U = e^{-AT/C_{tas}} \quad (10)$$

式中, AT 代表的是信息期限。

基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法通过对数Logistic模式对信息权重 W_{tas} 进行计算:

$$W_{tas} = \frac{1}{1 + e^{-\lambda B - \mu U}} \quad (11)$$

式中, λ 代表的是信息效益对应的权重因子;参数 λ 和 μ 满足下式:

$$\lambda + \mu = 1 \quad (12)$$

设 δ 代表的是信息的优先级,通过信息权重 W_{tas} 计算得到:

$$\delta = \varphi W_{pro} + (1 - \varphi) W_{tas} \quad (13)$$

式中, φ 代表的是信息优先级因子,在区间 $[0,1]$ 内取值,经调查发现当优先级因子 φ 的值为0.6时,计算得到的信息优先级越精准。

根据信息的优先级,提取关键的交互式信息,并

对其进行交互处理,实现交互式信息安全监控系统的设计,交互式信息监控流程如图 4 所示。

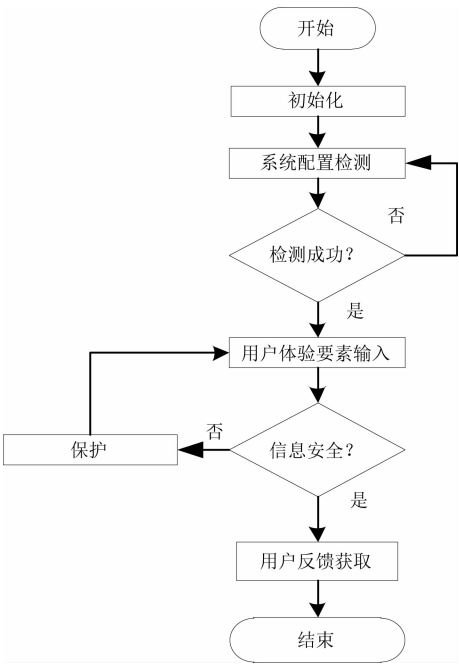


图 4 交互式信息监控流程

Fig.4 Interactive information monitoring process

3 实验结果与分析

为了验证所提方法的整体有效性,在 Mulan 平台中对基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法进行测试,分别采用所提方法(方法 1)、基于 GPS 的交互式信息安全监控系统设计方法(方法 2)、基于分层设计的交互式信息安全监控系统设计方法(方法 3)进行测试,3 种不同方法的监控精准度测试结果如图 5 所示。

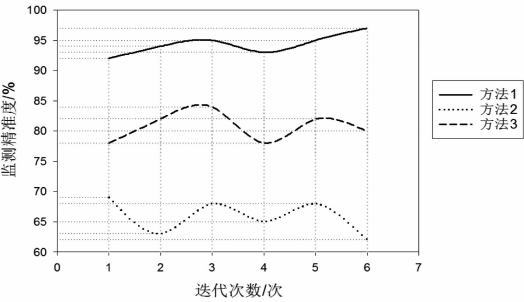


图 5 3 种不同方法的监控精准度

Fig.5 Monitoring accuracy of three different methods

分析图 5 可知,在多次迭代中基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法得到的监控精准度均高于基于 GPS 的交互式信息安全监控系统设

计方法和基于分层设计的交互式信息安全监控系统设计方法的监控精准度,因为基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法设计对应的终端感知单元检测不同种类的交互信息,提高了所提方法的监控精准度。

φ 为信息优先级因子,在区间 $[0,1]$ 内取值,优先级因子 φ 的值为 0.6 时,计算得到的信息优先级越精准。采用基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法进行测试,测试结果如图 6 所示。

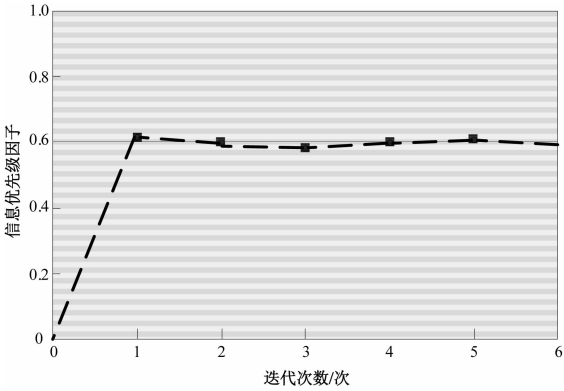


图 6 本文方法测试结果

Fig.6 Test results of the proposed method

分析图 6 可知,在多次迭代中基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法计算得到的信息优先级因子均在 0.6 附近,当信息优先级因子为 0.6 时,计算得到的信息优先级准确率最高,表明基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法可准确的计算得到信息的优先级,提高了交互式信息安全监控系统的交互能力。

为检验监测系统的反应效率,进行反应设计时间测试,图 7 中反应时间由 1 s 到 8 s,同时请求次数由 1×10^3 次到 10×10^3 次。分析图 7 可知,3 种方法在同时请求次数增加时,响应时间均增加,方法 1 即本文方法的响应时间明显小于 1 s;而方法 2 在请求

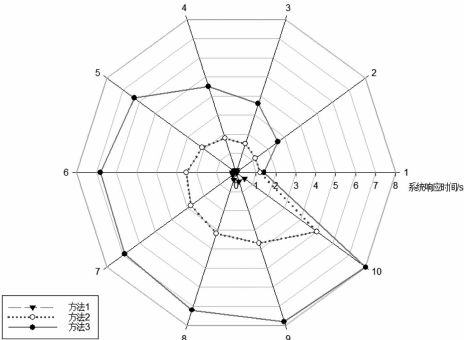


图 7 3 种不同方法的响应时间

Fig.7 Response time of three different methods

次数达到 10×10^3 次时,响应时间超过 5 s,方法 3 在请求次数为 10×10^3 次时,响应时间已经接近 10 s。次数用户等待时间过长,系统的反应效率差,会影响用户体验,用户满意度差。本文方法能够在大量请求下保持高效的反应速度。

4 结束语

信息技术的进步增加了信息管理的难度,使信息安全监控系统设计方法成为目前研究的热点。当前信息安全监控系统设计方法存在监控精度低、交互能力差的问题。提出基于用户体验的交互式信息安全监控系统设计方法,通过计算信息的优先级,提取关键的交互式信息,在用户体验要素的基础上完成交互式信息安全监控系统的设计,解决了当前方法中存在的问题,提高了系统的监测准确性,有效提升了用户体验,为信息安全监控系统的发展奠定了基础。

参考文献:

[1] 廖建尚. 基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11):233-243.

[2] 余国雄, 王卫星, 谢家兴, 等. 基于 ASP.NET 技术的荔枝园智能灌溉远程监控系统的设计与实现[J]. 福建农业学报, 2016, 31(7):770-776.

[3] 屈志坚, 徐振清, 林宏平, 等. 设计模式在调度主站监控系统兼容性处理中的应用[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7):156-162.

[4] 董淑娟. 水稻生长信息动态监控系统设计-基于物联网技术[J]. 农机化研究, 2017, 39(8):216-219.

[5] 王恩亮, 华驰, 陈洁. 基于 STM32 F103 ZET6 的自定义通信协议电梯监控系统设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12):160-165.

[6] 李远茂, 刘桂雄, 曾成刚. 基于 GPS 的室外放射源信息监控系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1244-1254.

[7] 吴志鹏, 杨苹, 姜新宇, 等. 在线监测信息系统结构层次设计与实践[J]. 电子学报, 2018, 46(11):245-250.

(上接第 62 页)

参考文献:

[1] 郑志峰, 王义行, 柴邦衡. 链传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.

[2] 吕林, 林辉. 小型汽油机气门落座刚度、阻尼试验研究[J]. 科技通报, 2016. 32(8):115-118.

[3] 孟繁忠著. 齿形链啮合原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[4] 孟繁忠, 李启海, 冯增铭. 新型 Hy-Vo 齿形链与链轮的啮合分析及其设计方法[J]. 机械工程学报, 2007 (01).

[5] Zhang W M. An analysis on vibration of moving silent chain by multi-body dynamics[C]. ASME, 2005: 1707-1712

[6] 林辉, 丁佳, 等. 小型汽油机配气机构凸轮轴扭振研究[J]. 机械强度, 2016, 38(3), 464-469.

[7] 叶慧飞. 某车用柴油机配气机构及皮带传动系统动力学分析与改进设计[D]. 浙江大学, 2010.

[8] 刘功文, 郝志勇, 郑康, 等. 汽油机正时链轮系统设计优化与动力学特性研究[J]. 汽车技术, 2013(11): 1-6.

[9] Weber C, Herrmann W, Stadt Mann J. Experimental investigation into the dynamic engine timing chain behavior[C]. SAE, 1998: 980840.

[10] 曾庆华, 靳晓雄, 刘波. 同步带传动对发动机前端噪声的影响[J]. 汽车技术, 2009(8):30-33.

基于 B/S 和 C/S 混合架构的无人值守机房 智能计费系统设计

于 群

(海军航空大学 岸防兵工程学院,山东 烟台 264001)

摘 要:单一架构的无人机房计费系统,很容易出现系统负载问题,为了维持系统均衡,降低系统载荷,将传统网络中的 C/S 架构与最新网端 B/S 架构融合,提出一种混合架构下的智能计费系统。首先对系统的硬件进行设计,给出系统整体拓扑框架,并制备感应数据处理器,对系统外部请求进行及时接收。其次对系统的软件进行设计,建立 C/S 和 B/S 的混合架构下的链路映射,以此实现客户端、服务器以及浏览器的联通功能。为了更好地管理用户,构建树状视图,对用户进行分组归类,利用接口管理编码对银行账户接口和用户信息账户接口进行权限管理和权限验证,根据消费终端信息反馈完成计费交易,实现对教育数据的存储和归档功能,并给出系统程序设计语言,最终完成对无人值守机房智能计费系统的设计。通过实验数据可以确定,与传统单架构的智能计费系统相比,混合架构计费系统具有更强的系统稳定性,系统载荷较低。

关键词:混合架构;交易请求;角色权限;数据输入;链路映射;

中图分类号:TP273+.5 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0068-05
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.013

Design of Intelligent Billing System for Unattended Machine Room Based on B/S and C/S Hybrid Architecture

Yu Qun

(College of Naval Air Defense Engineering, Naval Air University, Yantai 264001, China)

Abstract:In order to maintain the balance of the system and reduce the load of the system, the C/S architecture in the traditional network is integrated with the latest B/S architecture in the network, and an intelligent billing system based on the hybrid architecture is proposed. Firstly, the hardware of the system is designed, the overall system topology framework is given, and the induction data processor is prepared to receive the external requests of the system in time. Secondly, the software of the system is designed, and the link mapping under the mixed architecture of C/S and B/S is established to realize the communication function of client, server and browser. In order to better manage users, construct tree view, classify users into groups, use the interface management code to manage and verify the authority of bank account interface and user information account interface, complete billing transaction according to the feedback of consumer terminal information, realize the storage and archiving function of educational data, and give the system programming language, and finally complete the unattended value. Design of Intelligent Billing System for Watch Room. Through the experimental data, it can be confirmed that the hybrid architecture billing system has stronger system stability and lower system load than the traditional single architecture intelligent billing system.

Keywords:hybrid architecture; transaction request; role permissions; data input; link mapping

现代通讯网络技术的不断发展延伸,部分收费项目均开始利用网络计费的方式,收取相应服务费或产品使用费。这样不仅可以有效节约大量劳动力资源,同时可以极大提高收费管理效率,减少不必要的矛盾分歧。如今现代高速公路、收费站、地铁监控中心服务区等均开始普及无人值守机房,极大的体现了我国现代化进步与升级。设备机房内设备种类较多,整个机房的平稳运行主要除了依赖于外部机房整体环境因素如:供电情况、环境情况、防火防盗等,其最主要的因素,还在于无人值守机房智能计费系统的升级和管理。随着现代无线网络技术的飞速发展,通过各类监控设备以及各类信息数据管理技术,建立相应的智能化管理系统,已经成为电子信息化建设重要的研究区域。

根据当前无人值守机房智能计费相关网络技术的研究现状,可以将其概括为网络设备和服务端的协调运行。C/S (Client/Server) 结构在现代网络服务中,被称之为客户端和服务端架构。在很长一段时间内,C/S 架构一直是无人值守机房智能计费系统的核心网络架构。在该架构下,系统客户端和服务端处于分离状态。通过客户端请求递交,服务器端答复的模式,实现智能计费。单一的 C/S 架构很容易因为服务器或数据库中的缓存数据量提高,产生系统载荷问题,甚至直接崩溃。为了缓解这一现象,需要在 C/S 架构的基础上进行升级,其结果就是 B/S 架构。B/S 架构为浏览器/服务器架构,与 C/S 架构相比,B/S 架构无需复杂的客户端,只需一台电脑通过浏览器就可进行计费系统的使用;但是 B/S 架构需要在 C/S 架构以上才能实现两端均衡。对此,设计基于 B/S 和 C/S 架构相关技术,并将其应用于混合型架构无人值守机房智能计费系统,用于维持系统均衡,降低系统载荷^[1]。

1 混合架构智能计费系统硬件设计

1.1 系统整体架构设计

混合架构智能计费系统的使用,需要借助使用者外部感应消费。当感应消费产生后,感应机回想服务器传输整体消费信息,包括卡机 ID 信息、感应装置信息、消费信息以及相关流失账号等。服务器接收到外部信息以后,需要通过系统数据库^[2]进行数据查找,对比数据库信息等。系统整体拓扑框架如图 1 所示。

根据使用用户的感应信息,可以验证当前感应

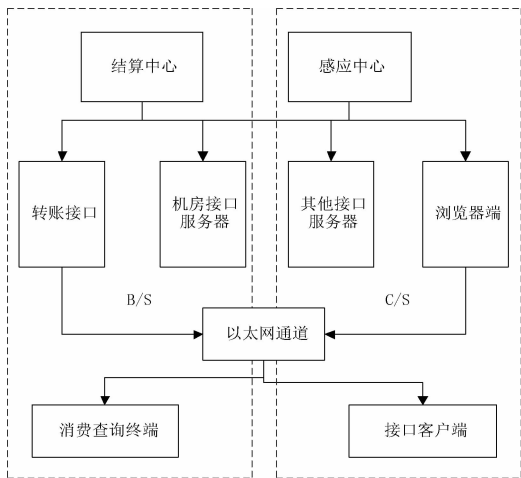


图 1 消费系统拓扑结构
Fig.1 Consumption system topology

装置是否存在,因为系统将 B/S 架构和 C/S 架构进行混合,所以混合后的系统包括三层即服务器、客户端和浏览器客户端。服务器连通数据库和后台驱动程序,负责计费数据的存储和录入,运通媒介以以太网通道为核心。外部服务端与浏览器相连,负责进行请求缔约^[3]。

1.2 感应数据处理器

系统感应数据处理器,主要作为混合架构无人值守机房计费系统的外部请求接收装置。因为市面上大部分的智能感应计费系统均采用电磁感应信号,涉及到部分银行或财政方面的数据链时,很容易出现兼容问题,难以直接用于感应处理。所以在感应数据处理器内部,添加了系统数据调理器,将外部感应信号转化为数字信号,然后并入后台数据库或感应中心中。对于请求信号感应来说,数字信号与系统以太网总线结构兼容性更强,连入到服务器以后,不会出现明显的系统阻隔,可以有效提高感应数据的传输效率^[4]。以下为感应数据处理器详细的设计方案:

感应数据处理器内部具有多重总线接口,因为处于系统最外侧,直接与外部感应请求相连;对于系统来说属于硬件物理层,所以需要在感应器内设计处理协议,作为感应器与内部软件层的通信协议。为了提高系统兼容性,以 MODULI 协议作为感应数据处理器的通信协议^[5]。MODULI 协议的延展性可以用于直接连通系统内部以太网总线上的每个控制器,再将控制器的延伸连通到感应数据处理器的引脚上。根据不同感应请求,生成询问信号码,并利用以太网控制器接口,传输到系统服务端上。MODULI 协议在设计过程中需要完全符合 B/S 架构

和 C/S 架构的运行规律,即服务器、客户端以及浏览器需要制定完整的问答形式。数据的输入和输出采用 Master/slave 方式。Master/slave 是 B/S 和 C/S 架构专用的数据问答形式,Master 端主要负责与客户端对接,生成数据请求,而 slave 端则负责接收请求,并发送到服务端。此外,Master 端在个别情况下会直接发送命令请求的修改语句,直接修改 slave 端的驱动程序,保证拼读双向性^[6]。

2 混合架构智能计费系统软件设计

2.1 B/SC/S 数据混合链路映射

经过感应处理器调解处理的请求会以数字信号的形式通过以太网,传输到系统服务端。因为系统为了实现均衡,整体采用 C/S 和 B/S 的混合架构,在该架构下无法将两种以太网线并联,所以设计建立了 C/S 和 B/S 的混合架构链路映射,即链路数据集,实现客户端、服务器以及浏览器的联通^[7]。

链路映射的核心设计点,在于 C/S 和 B/S 两种不同架构下,节点带宽的兼容性,并在保证兼容的前提下,建立联系重新定义网络物理资源和数字信号。链路映射整体采用 TP_LINK.063 映射链路算法。该链路主要通过建立目标函数,将网关内的链路资源进行重新定义,在此基础上,通过负载重组和平衡,降低系统负荷。映射建立流程如图 2 所示。

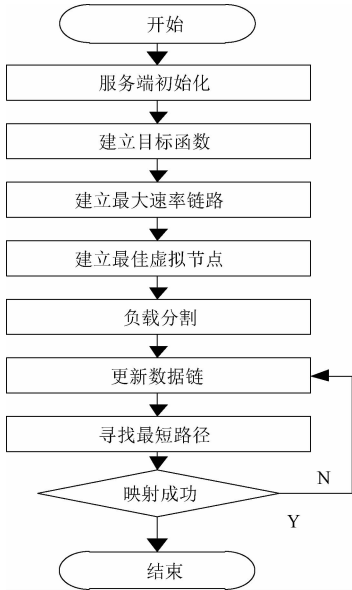


图 2 链路映射建立流程

Fig.2 Link mapping establishment process

映射建立的核心在于节点映射和网关链路映射两部分。两种映射分别服务于服务器和浏览器,在

混合架构下,二者并不是单独存在,而是一种相互耦合的过程^[8]。

设当前服务器入网协议函数为:

$$\partial xy(n)=\sum_{r=1}^N x(r)\times y(r-n) \tag{1}$$

在公式(1)中, n 为入网服务端数据信号的实际测量值; r 为当前处理器信号的值域; ∂ 为网关数据的频域^[9]。

根据入网协议函数,对当前数字信号进行拆分,确定当前网关链路映射的最大速率,其计算公式为:

$$V_{\max}=\frac{\left(\frac{tRISE\times 0.2n}{rns}\right)}{10} \tag{2}$$

根据速率对比,确定最佳虚拟节点,节点函数为:

$$G(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=k_p\left(1+\frac{1}{T_{i,s}}T_d s\right) \tag{3}$$

在公式(3)中, k_p 表示节点数据在网关内的变换比例; $T_{i,s}$ 为当前网关链路内的数据量常数; T_d 为数据变换常数。

确定最佳虚拟节点以后,利用节点和网关链路两个映射,可以完成请求发送。当一个虚拟映射网络数据请求进入到下一时间节点的时间窗内时,即可宣告映射成功。

2.2 银行接口管理

银行接口分为两种,包括银行账户接口和用户信息账户接口。接口管理就是针对系统服务端内,两个接口实体之间的软件管理,主要指两个接口之间的网关应用程序和接口代理程序。因为感应数据处理器传输的是数字信号,包括使用者的用户名及特征 ID,所以服务端的数据管理中心会根据用户识别以及相关权限数据,查询当前使用者的账户信息,包括使用账户权限、余额。如果当前用户权限可以完成支付任务,即通过识别,否则提示失败消息。部分接口管理数据编码如下。

表 1 银行接口管理编码

Table 1 Bank interface management code	
Bank name AcqUisition	银行名称获取
Bank qualification	银行资质获取
User access	用户权限获取
CurrentService Code fetch	当前服务代码获取
Logical code acquisition	逻辑代码获取
System code acquisition	系统代码获取
Disk code acquisition	磁盘代码获取
Process the code	处理代码。

为了对用户进行有效管理,需要对用户以及用

户与权限。用户与角色之间的关系进行分类和解释。图 3 是用户-角色-权限的树状视图。

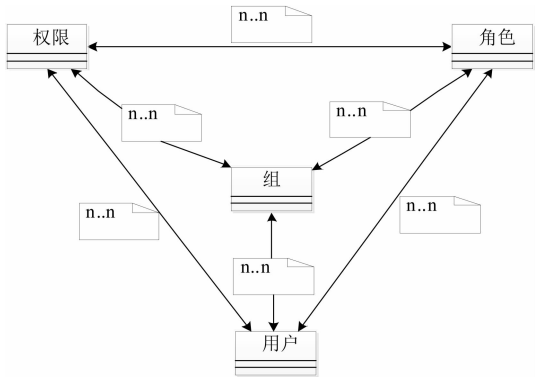


图 3 用户-角色-权限树状图
Fig.3 User-role-permission tree

通过该树状图可以看出，三者之间具有上下级的关系，在实际情况中，用户可以具有自己的角色信息、权限信息，因此需要设计一个通用的消费信息终端对用户角色、权限进行管理。

2.3 消费信息终端设计

消费信息终端是系统的最后一环，主要对用户角色、权限进行管理，并负责完成交易计费操作，进行数据归档。其核心工作在于确保消费的正确性，防止重复扣除金额和未扣除消费金额现象的发生，以确保整个交易信息记录可以正确存入到系统数据库中。首先根据银行接口传输信息和消费数据，生成数据列表，并上传最近 5 笔数据记录。根据当前数据记录，对其权限和消费记录进行判定，判定待验证的数据消费记录是否存在于数据库中，如果存在则宣告数据操作完成。若验证的数据记录并不存在与之前生成的数据序列中，则将数据库中的消费数据与生成的数据系列进行比对，针对各消费记录的时间顺序进行测定，判断当前消费数据的顺序关系。最后根据消费时间，计算当前消费差值，并将差值直接录入到消费记录序列中，并在服务器处理后，更新数据消费记录。数据正常检测并录入后，整个智能计费操作即可宣告完毕^[10]。

在上述设计基础上，基于 B/S 和 C/S 混合架构的无人值守机房智能计费系统程序设计语言代码如下所示：

```
#include "pch.h"
#include <iostream>
#include<string>
#include<cctype>
#include<map>
```

```
#include<sstream>
using namespace std;
enum Token_value{ NAME,NUMBER,END,
    PLUS='+',MINUS='-',MUL='*',DIV='/',
    PRINT=';',ASSIGN='=',LP='(',RP=')'
};
```

综上所述，在硬件与软件设计的基础上，实现对基于 B/S 和 C/S 混合架构的无人值守机房智能计费系统的设计。

3 实验数据分析

实验数据的分析和整理是系统技术开发实现的关键因素，真实实验数据不仅可以记录系统运行过程，验证系统效果，更能为后续技术系统的改造和升级提供数据支持。为了验证设计的混合架构无人值守机房智能计费系统的功能，分别针对经营者和使用用户两方面操作，进行系统负荷测评。实验具体测试工作如表 2 所示。

表 2 实验测试项

Table 2 Test items			
算例编号	CASE	测试项目	注册用户
测评数据		管理员权限	
测试内容		添加用户	
		添加用户信息	
		删除用户信息	
		查询用户账户	
测评数据		使用者权限	
测试内容		账户充值	
		交易预测	
		交易完备	
		账户提取	
预测结果		操作成功	
测试结果		操作成功	

近年来国内最常用的无人值守机房智能计费系统均为单结构系统，实验以传统 B/S 单结构系统作为实验参照，进行对比测试。实验模拟测试的时间为 1 d，根据外部感应和服务器请求，对其压力进行测评。

3.1 经营者项目负荷对比

根据管理员权限，对系统经营者项目运行时的负荷进行对比。实验随机选取多种工作进行组合操作，记录当前负荷值，单位为常数，如图 4。

根据图 4 数据可以看出，执行不同经营者项目时，单体 B/S 结构计费系统与混合系统的实际负荷具有明显差别。图 4 上半部分为单体 B/S 结构下智能计费系统的负载波动，其波动量明显高于图 4

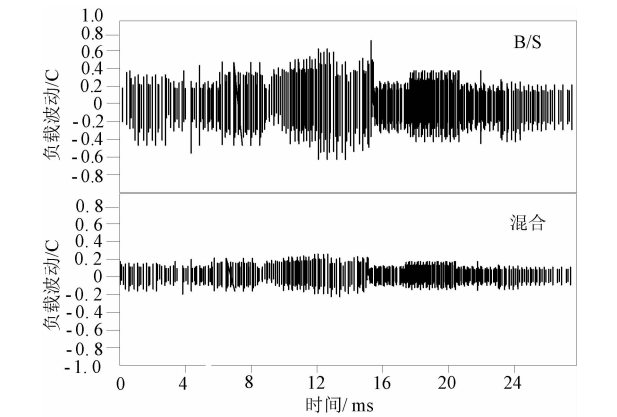


图 4 经营者项目负荷对比

Fig.4 Contrast of project load of operators

下半部分混合结构。为了进一步验证数据结果,按照上述实验方式进行使用用户项目负荷对比。

3.2 使用用户项目负荷对比

以使用用户项目为核心进行数据重组,在上述实验环境下进行实验分析,对比负荷情况。为了更直观体现负荷数据差异,经过数据算例,将数据结果转换为数据表的形式,并随机提取 10 组数据如下。

表 3 使用用户项目负荷对比数据表

Table 3 Uses the user project load comparison data table		
项目序号	混合结构	单一结构
1	1.39	2.09
2	2.07	3.10
3	1.15	2.27
4	1.52	1.39
5	2.08	1.49
6	1.14	1.52
7	1.36	2.05
8	1.52	1.98
9	1.39	1.75
10	2.15	3.09

根据表 3 数据结果可以再次对比看出,混合结构的无人值守机房智能计费系统,其项目运行负荷要远小于单一结构。2 次实验数据表明,设计系统具有真实有效性。

4 结束语

为了有效降低无人值守机房内智能计费系统的运行负载,提高其系统内部的平衡性,将传统 C/S 架构和 B/S 架构进行混合,设计混合架构下的智能计费系统。经过实验数据对比可以肯定,该架构下的智能计费系统运行负荷更小,更具稳定性。

参考文献:

[1] 谢伟明. 基于 C/S 和 B/S 混合架构的教务管理系统的设计与实现[J]. 科技风, 2017,2(2):39-40.

[2] 宋钰涛, 丁冬. 基于 node.js 和 Qt 的 B/S+C/S 混合模式下的专用业务信息系统研究与设计[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2018, v.31; No.120(2):34-38.

[3] 黄兴禄. 基于 B/S 与 C/S 混合模式的高校实验室报修系统设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2017,7(16):118-120.

[4] 刘颖. 基于 B/S 和 C/S 混合模式的变压器技术资源系统的设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2017, 2(9):153-154.

[5] 袁鹏, 江媛媛. 基于 B/S 与 C/S 协同架构的航道整治三维辅助系统设计[J]. 地理空间信息, 2017, 15(5):107-109.

[6] 张海宾. 基于 C/S 架构客户端嵌入 B/S 架构系统的设计与实现[J]. 电子世界, 2017,7(17):125-126.

[7] 王慕斗, 刁宗宪. 基于 C/S-B/S 混合模式的煤矿高位水仓自动化供水系统[J]. 自动化应用, 2018,2(1):29-30.

[8] 张宝龙. C/S 模式网管系统向 B/S 模式的迁移与优化[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(1):63-67.

[9] 黄维. 基于 B/S 架构的网络信息安全管理系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(10):53-57.

[10] 刘晓欣. 基于 B/S 三层架构的调度综合业务管理系统的设计与开发——以怒江供电局为例[J]. 企业改革与管理, 2017,7(21):49-50.

地-电离层波导中 VLF 场的两种球面 模型解对比分析

蒲玉蓉,韩雪妮,王丹丹,席晓莉*
(西安理工大学,西安 710048)

摘 要:针对甚低频电波在各向同性地-电离层波导中传播时场量解算原理及其所涉及的关键问题进行研究,重点分析了基于 W.K.B 方法与基于 Airy 函数方法的高度增益函数求解过程,对比了不同频率下 2 种方法所得相对相速度以及各阶模式之间的差异性,分析了叠加模式数、信号发播频率、电离层高度等对接收点场强的影响。仿真分析表明:W.K.B 方法适用于 VLF 的较低频段,而基于 Airy 函数的方法在 VLF 的中/高频段具有更高的可靠性。
关键词:甚低频电波;W.K.B 方法;Airy 函数方法

中图分类号:TN 011 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0073-07
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.014

Comparative Analysis of the Two Methods for VLF Signal Propagation in Earth-ionospheric Waveguide

*Pu Yurong, Han Xueni, Wang Dandan, Xi Xiaoli**
(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of
Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper deals with the principle and key problems of field component computation of VLF wave propagation in isotropic earth-ionospheric waveguide. The solution process of height gain function based on W.K.B method and Airy function method is emphatically analyzed. The differences between the two methods in relative phase velocity and various modes are compared. The effects of the number of superposition modes, the frequency of signal transmission and the height of ionosphere on the field strength of the receiving point are analyzed. Simulation analysis shows that the W. K. B method is applicable to the lower frequency band of VLF, and the Airy function-based method has higher reliability in the middle/high frequency band of VLF.

Keywords: Very low frequency wave; W.K.B method; Airy function method

甚低频(3~30 kHz)无线电波作为无线电频谱中极具特点的频段,被广泛应用于超远程导航、授时、通信,特别是对潜艇通信和导航^[1-3]。美国欧米伽系统和俄罗斯阿尔法系统作为最典型的甚低频导航系统,

收稿日期:2019-09-25

基金项目:十三五装备预研领域基金(No.6140518020205);中国博士后基金(No. 2015M582687);国家自然科学基金(No. 61771389)。

作者简介:蒲玉蓉(1983-),女,陕西人,博士,讲师,主要从事长波/超长波电波传播、电磁场数值计算等领域的研究。
E-mail:puyurong@xaut.edu.cn。

* 通信作者:席晓莉(1967-),女,陕西人,博士,教授,主要从事导航、电波传播与天线设计、电磁场数值计算等领域的研究。
E-mail:xixiaoli@xaut.edu.cn。

是最早的能够提供全球覆盖的超远程陆基无线电导航系统。虽然 GPS、北斗、GLONASS 等卫星导航系统的飞速发展对其造成了一定的影响,但随着电磁环境的日益复杂、对卫星导航系统固有缺陷的进一步认识以及对星、地平衡发展从而构建完备国家 PNT 体系的迫切需求,甚低频无线电波及其相关技术与导航定位系统再次引起人们的重视^[3,4]。

VLF 无线电波作为一种在地面与低电离层形成的全球性“地-电离层”波导中传播的电磁波,因受地球表层、空气层与低电离层介电特性及其复杂的空、时变化影响,其传播特性难以精确预测,从而导致该类系统精度有限。

对于甚低频电波传播特性的研究^[5-10]可追溯到 20 世纪初,Austin 在半实验基础上推导出奥斯汀经验公式,后经过 Kitchen、Pressey、Tremellen 和 Pierce 等人的许多修正,得到更符合实验的修正奥斯汀经验公式,但由于该公式基于大量简化与近似处理,因此仅适用于白天海上的 VLF 波传播以及初步的定性分析;Hollinworth 最早将射线理论引入 VLF 频段,用于研究天波和地波组合效应,并证明在地面上确实存在天波和地波叠加所产生的干涉图,但距离不同,占优势的跳数也不同,当传播距离超过 2500 km 时,则需计算多跳天波,导致计算复杂、收敛很慢;目前,应用最广泛的 VLF 电波传播预测方法是波导模理论,该理论于 20 世纪 60 年代初最先在美国和俄罗斯提出并逐步发展完善,Bremmer、Budden、Krasnushkin、Field、Crombie、Harper、Spies、Wait、潘威严、熊浩、李凯等学者都对此做出了很大贡献。

波导模理论是基于 VLF 波在地面与电离层之间来回多次反射,被两个反射壁引导向前传播的机理推导而来。其接收点的电磁场可以理解为各个满足地面和电离层阻抗边界条件的传播波型之和。基于波动方程构建满足边界条件的微分方程并求解即可获得各场分量。在整个求解过程中,高度增益函数的求解成为关键。为此,本文深入研究了两种球面模型下高度增益函数的求解方法:基于 W.K.B 方法与基于 Airy 函数的方法,并将两种算法结果进行了比较,旨在进一步明确不同方法的差异与适用性,为相关研究提供参考。

1 球面模型算法

在地面与电离层所构成的球形波导中,垂直电偶极子所激励的场的求解过程,均可归结为在给定

上、下边界条件和初始条件下,求位函数所满足的波动方程的解的过程。通常采用分离变量的方法将位函数分离为分别依赖一个坐标变量的常微分方程,而后利用边界条件进行求解。下面将以均匀各向同性地电离层波导为例分析其求解过程。

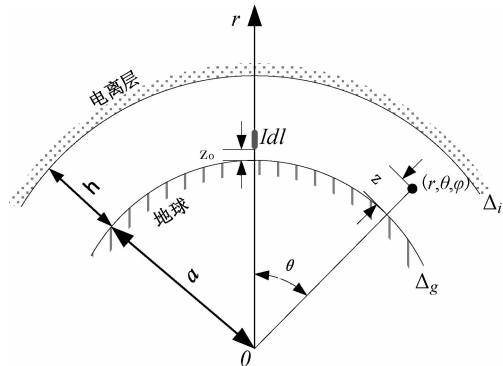


图 1 球面模型示意图

Fig.1 Hyperbolic positioning schematic

取二维球坐标系(如图 1),将地面和低电离层分别看作是位于 $r=a$ 和 $r=a+h$ 、归一化表面阻抗为 Δ_g 和 Δ_i 的两个反射壁,则位于极轴 ($\theta=0, r=a+z_0$) 处的垂直电偶极子所产生的各场分量均可以用位函数 U 来表示,即^[1]:

$$\begin{cases} E_r = \left(k^2 + \frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) (rU) \\ E_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} (rU) \\ H_\varphi = i\omega\epsilon \frac{\partial U}{\partial \theta} \\ H_r = H_\theta = E_\varphi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

且在上、下边界上满足阻抗边界条件,即

$$\left. \frac{E_\theta}{H_\varphi} \right|_{r=a} = -\Delta_g \eta, \quad \left. \frac{E_\theta}{H_\varphi} \right|_{r=a+h} = \Delta_i \eta \quad (2)$$

而位函数 U 必须满足亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0 \quad (3)$$

利用分离变量法,将 U 表示成仅与高度方向 r 相关的高度增益函数 $Z(r)$ 和仅与传播方向 θ 相关的传递函数 $\Phi(\theta)$, 即 $U = Z(r)\Phi(\theta)/r$, 则式(3)可转化为两个常微分方程:

$$\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta} \right) + v(v+1)\Phi(\theta) = 0 \quad (4)$$

和

$$Z''(r) + k^2 \left(1 - \frac{v(v+1)}{k^2 r^2} \right) Z(r) = 0 \quad (5)$$

方程(4)的解为勒让德函数 $P_v[\cos(\pi - \theta)]$, 可取其渐进近似式:

$$\Phi(\theta) = P_v(\cos(\pi - \theta)) \approx \left(\frac{2}{\pi v \sin \theta} \right) \cos \left[\left(v + \frac{1}{2} \right) (\pi - \theta) - \frac{\pi}{4} \right] \quad (6)$$

而方程(5)的求解则较为复杂,下面将重点描述并对比分析基于 W.K.B 与基于 Airy 函数的高度增益函数求解过程。

2 两种高度增益函数求解方法

记 $z(0 < z < h)$ 为观察点离地面的高度,则 $r = a + z$ 。鉴于 $z \ll a$, 则

$$\frac{v(v+1)}{k^2 r^2} = \frac{v(v+1)}{k^2 (a+z)^2} \approx \frac{v(v+1)}{k^2 a^2} \left(1 - \frac{2z}{a} \right) \quad (7)$$

故式(5)可写为

$$Z''(z) + k^2 \left[1 - \frac{v(v+1)}{k^2 a^2} \left(1 - \frac{2z}{a} \right) \right] Z(z) = 0 \quad (8)$$

此时,阻抗边界条件可转换为:

$$\left(\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial}{\partial z} Z(z) \right) \bigg|_{z=0} = -ik\Delta_g \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial}{\partial z} Z(z) \right) \bigg|_{z=h} = ik\Delta_i \quad (10)$$

高度增益函数求解过程即为:求解满足边界条件式(9)和(10)的微分方程(8)。下文以上标 W 和 A 对2种方法进行区分。

2.1 W.K.B 方法

(1) 高度增益函数

对方程(8)进行变量置换,令 $\frac{v(v+1)}{k^2 a^2} = S^2, C^2 = 1 - S^2$, 则(8)式变为

$$Z''(z) + k^2 \left(C^2 + \frac{2z}{a} S^2 \right) Z(z) = 0 \quad (11)$$

当 $q(z) = k \left[C^2 + \frac{2z}{a} S^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ 是 z 的缓变函数时,方程(8)的解为

$$Z^W(z) = A^W \exp \left(-ik \int_0^z \left(C^2 + \frac{2z}{a} S^2 \right)^{\frac{1}{2}} dz \right) + B^W \exp \left(ik \int_0^z \left(C^2 + \frac{2z}{a} S^2 \right)^{\frac{1}{2}} dz \right) \quad (12)$$

式(12)为高度增益函数的一般表达式,其必须满足阻抗边界条件。为此,将(12)式分别代入(9)和(10)式后可得:

$$R_g^W(C) R_i^W(C) \cdot \exp \left(2ik \int_0^h \left(C^2 + \frac{2z}{a} S^2 \right)^{\frac{1}{2}} dz \right) = 1 \quad (13)$$

其中,

$$R_g^W(C) = \frac{B^W}{A^W} = \frac{C - \Delta_g}{C + \Delta_g},$$

$$R_i^W(C) = \frac{C' - \Delta_i}{C' + \Delta_i}, C' = \left(C^2 + \frac{2h}{a} S^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

式(13)称为模方程。则能使高度增益函数的一般表达式同时满足 $z=0$ 和 $z=h$ 处边界条件的 C , 必须是方程(13)的根。

为归一化起见,规定在地面上的高度函数 $Z_n^W(0) = A^W + B^W = 1$, 则归一化高度函数为:

$$Z_n^W(z) = \frac{1}{1 + R_g^W(C_n)} \left[\exp \left(-ik \int_0^z \left(C_n^2 + \frac{2z}{a} S_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} dz \right) + R_g^W(C_n) \exp \left(ik \int_0^z \left(C_n^2 + \frac{2z}{a} S_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} dz \right) \right] \quad (14)$$

其中 C_n 为模方程(13)的第 n 个根。

(2) 位函数

通过上述分析可知,垂直电偶极子所产生的电磁场的位函数为一系列传播波型的叠加,即

$$U = \sum_n \frac{1}{r} \Lambda_n^W Z_n^W(z) P_v(\cos(\pi - \theta)) \quad (15)$$

Λ_n^W 是垂直电偶极子在波导中激起的 n 阶模式的激励因子,可表示为:

$$\Lambda_n^W = - \frac{i \omega \epsilon_0 N_n^W(z_0)}{4 \omega \epsilon_0 N_n^W \sin v \pi} \quad (16)$$

其中,

$$N_n^W = \int_0^h Z_n^W(z) dz = \frac{4 R_g^W}{(1 + R_g^W)^2} \frac{a C_n'}{3 S_n^4}$$

$$\left[C_n^3 - C_n^3 + \frac{3 S_n^2}{2} \left(C_n' \left(1 - \frac{2h}{a} \right) - C_n \right) \right] - \frac{i C_n' \Delta_g}{2 C_n^3 k} + \frac{i \left(1 - \frac{2h}{a} \right) [e^{-2ikH} - (R_g^W)^2 e^{2ikH}]}{2k C_n' (1 + R_g^W)^2}$$

$$H = \int_0^h \left(C_n^2 + \frac{2z}{a} S_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} dz = \frac{a}{3 S_n^2} [C_n^3 - C_n^3]$$

此时,勒让德函数 $P_v[\cos(\pi - \theta)]$ 可表示为:

$$P_v(\cos(\pi - \theta)) \approx \left(\frac{1}{2\pi v \sin \theta} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-ika S_n \pi + i \frac{\pi}{4}} e^{ika S_n \theta} \quad (17)$$

由此可见,每一个传播波型的相对相速和衰减率可分别表示为:

$$\frac{v_n^w}{c} - 1 \approx \operatorname{Re}\left(\frac{C_n^2}{2}\right) \quad (18)$$

$$\alpha_n^w = \frac{8.68}{\lambda} 2\pi \operatorname{Im}\left(-\frac{C_n^2}{2}\right) \text{ dB/km} \quad (19)$$

2.2 Airy 函数近似

(1) 高度增益函数

对方程(8)进行变量置换,令 $y = \left(\frac{2v(v+1)}{a^3}\right)^{\frac{1}{3}} z, t = \left(\frac{a^3}{2v(v+1)}\right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{v(v+1)}{a^2} - k^2\right]$, 则(8)式变为标准的斯托克斯(stokes)方程

$$\frac{d^2 Z(y)}{dy^2} - (t - y)Z(y) = 0 \quad (20)$$

其解的一般形式为

$$Z_n^A(y) = A^A W_1(t - y) + B^A W_2(t - y) \quad (21)$$

其中, $W_1(t - y)$ 和 $W_2(t - y)$ 分别为第一类和第二类 Airy 函数。式(21)同样须满足阻抗边界条件。故将(21)式分别代入(9)和(10)式后可得:

$$R_g^A(t) R_i^A(t) = 1 \quad (22)$$

其中,

$$R_g^A(t) = \frac{B^A}{A^A} = -\frac{W_1'(t) - qW_1(t)}{W_2'(t) - qW_2(t)}$$

$$R_i^A(t) = -\frac{W_2'(t - y_0) + q_i W_2(t - y_0)}{W_1'(t - y_0) + q_i W_1(t - y_0)}$$

$$q = i\left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta_g, q_i = i\left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta_i, y_0 = \left(\frac{2}{ka}\right)^{\frac{1}{3}} kh$$

式(22)亦称为模方程。则能使高度增益函数的一般表达式同时满足 $z = 0$ 和 $z = h$ 处边界条件的 t , 必须是方程(22)的根。

当规定 $Z_n^A(0) = A^A + B^A = 1$ 时,归一化高度增益函数为

$$Z_n^A(y) = \frac{W_1(t_n - y) + R_g^A(t_n) W_2(t_n - y)}{W_1(t_n) + R_g^A(t_n) W_2(t_n)} \quad (23)$$

其中 t_n 为模方程(22)的第 n 个根。

(2) 位函数

此时,位函数可表示为

$$U = \sum_n \frac{1}{r} \Lambda_n^A Z_n^A(y) P_v(\cos(\pi - \theta)) \quad (24)$$

n 阶模的激励因子 Λ_n^A 可表示为:

$$\Lambda_n^A = -\frac{i \operatorname{Id} l Z_n^A(z_0)}{4\omega \varepsilon_0 N_n^A \sin v \pi} \quad (25)$$

其中,

$$N_n^A = \int_0^h Z_n^2(z) dz = \frac{1}{k} \left(\frac{ka}{2}\right)^{1/3} \left[t_n - q^2 - (t_n - q_i^2 - y_0) \left(\frac{W_1'(t_n) - qW_1(t_n)}{W_1'(t_n - y_0) + q_i W_1(t_n - y_0)} \right)^2 \right]$$

$$\text{当 } |t_n| \ll (ka)^{2/3} \text{ 时, } v + \frac{1}{2} \approx 1 + \frac{t_n}{\sqrt[3]{2}(ka)^2}.$$

此时,勒让德函数 $P_v[\cos(\pi - \theta)]$ 可表示为:

$$P_v(\cos(\pi - \theta)) \approx \left(\frac{1}{2\pi v \sin \theta}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-ika\left(1 + \frac{t_n}{\sqrt[3]{2}(ka)^2}\right) \pi + i\frac{\pi}{4}\right] \cdot \exp\left[ika\left(1 + \frac{t_n}{\sqrt[3]{2}(ka)^2}\right) \theta\right] \quad (26)$$

则每一个传播波型的相对相速和衰减率可分别表示为:

$$\frac{v_n^A}{c} - 1 = -\operatorname{Re} \frac{t_n}{\sqrt[3]{2}(ka)^2} \quad (27)$$

$$\alpha_n^A = \frac{8.68}{\lambda} 2\pi \operatorname{Im} \frac{t_n}{\sqrt[3]{2}(ka)^2} \text{ dB/km} \quad (28)$$

3 两种方法对比分析

通过上述分析可知,位函数是一系列满足上、下边界条件的波型的叠加,每一个波型均对应着不同的衰减率、相速和激励因子。而无论是 W.K.B 方法还是基于 Airy 函数的方法,都是:①通过变量置换,将高度增益函数所满足的微分方程转化为某一标准形式,并得到其一般解式;②利用上下边界条件,推得各波型特征根所满足的模方程;③解模方程,获取各波型的特征根,进而确知各波型的激励因子、高度函数以及传递函数。其区别主要表现在:①因变量置换方式不同而导致高度函数转化为不同的形式,从而使得解的形式存在差异;②转换与求解的过程中近似情况不同,其适用情况与精度亦不同。

为了分析其差异,本文分别采用上述两种方法仿真分析了不同情况下甚低频波在理想球面地-电离层波导(即 $\Delta_g = 0, \Delta_i = \infty$)中的传播情况。

3.1 各阶模式变化情况对比分析

(1) 相对相速随频率变化情况

分别采用基于 W.K.B 方法和基于 Airy 函数的方法,计算了 1~4 阶模式的相对相速随频率变化情况(如图 2 所示)。其中,电离层高度 $h = 80 \text{ km}$ 。

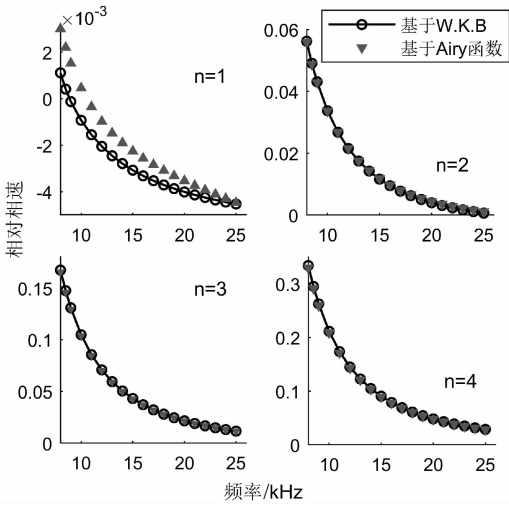


图 2 各阶模式下相对相速度随频率变化曲线
Fig.2 Relative phase velocity versus the frequency

从图 2 中可以看出,高阶模式的相对相速高于低阶模式,且阶数越高,相对相速越大;随着频率的增大,相对相速逐渐减小,尤其在 3~15 kHz 频段,相速度随频率增加迅速减小。

同时,对于基模($n=1$)而言, Airy 函数方法与 W.K.B 方法计算结果存在一定的差异,频率越低,其差异性越大,而对于高阶模式,两种方法吻合较好。其原因在于,当频率较低时(理想情况下 <11 kHz), Airy 函数方法的近似条件 $|t_n| \ll (ka)^{2/3}$ 不再满足,将式(6)中的 $(v+1/2)$ 近似为 $1+t_n/\sqrt[3]{2(ka)^2}$ 时存在一定的误差。

(2) 1 阶和 2 阶模式的 E_r 变化情况

计算了电离层高度 h 分别为 60 km 和 90 km 时,距离发射点 3000 km 处 r 方向 1 阶与 2 阶模式的场强 E_r 随频率变化情况(如图 3 所示),以及发播频率分别为 8 kHz 和 24.5 kHz 时 1、2 阶模 E_r 随距离变化情况(如图 4 所示,图例与图 3 相同)。

由图可见,频率越高且电离层距地面越高时, r 方向电场强度越小。理想情况下,基模($n=1$)场强低于高阶模式。随着传播距离增大、频率升高以及电离层高度增加, Airy 函数并未表现出衰减,而 W.K.B 方法却表现出明显的衰减特性。对于基模而言,随着频率的提高,基于 W.K.B 方法的计算结果与基于 Airy 函数的计算结果差异越来越大,在 VLF 的高频段甚至达到 40 dB 以上;对于 2 阶模式,当电离层高度为 90 kHz、频率高于 20 kHz 时, W.K.B 计算结果迅速减小。其原因在于: W.K.B 方法的近似

条件是仅当方程(11)的系数 $q(z) = k \left[C^2 + \frac{2z}{a} S^2 \right]^{1/2}$

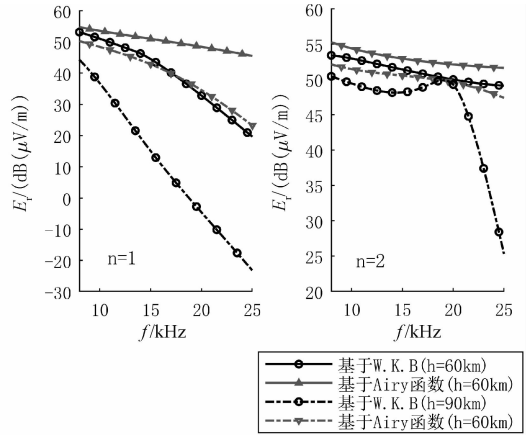


图 3 1、2 阶模式 E_r 随频率及电离层高度的变化曲线
Fig.3 Magnitudes of the field component E_r in first and second modes versus the frequency with $h=60$ km and $h=90$ km.

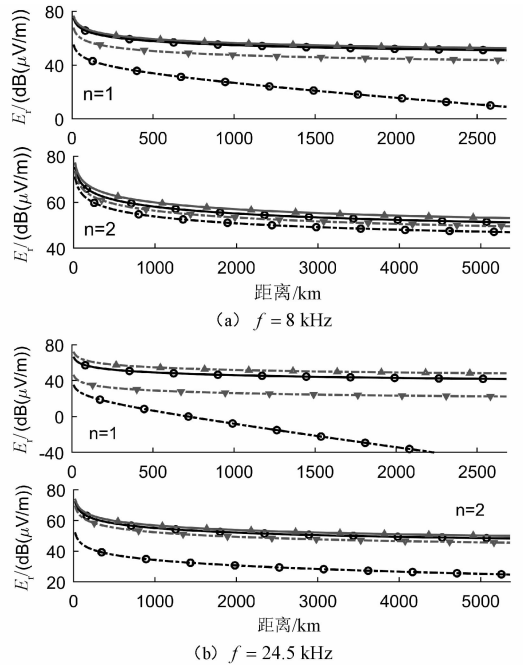


图 4 1、2 阶模式 E_r 随距离及电离层高度的变化曲线
Fig.4 Magnitudes of the field component E_r in first and second modes versus the distance with $h=60$ km and $h=90$ km.

是 z 的缓变函数时才是比较精确的,即 $C_n^3 \gg 1/ka$, 对于理想情况,当频率较高时,这个条件将不再满足, W.K.B 方法所得模方程的根出现复数(因理想情况下无衰减,模方程的根应为实数),使其随传播距离的增加衰减严重。

3.1 接收点总场强 E_r 变化情况对比分析

(1) 叠加模式数对总场强 E_r 的影响

垂直电偶极子在地-电离层波导中激起的 VLF 场,实为满足边界条件下的各个传播波型(亦成模式)的叠加。因各传播模式有各自不同的相速,因

此必然在某些位置产生同相增强、另一些位置产生反相减弱的情况,即多模干涉现象。因而,当考虑的模式数不同时,总场的形式将会发生变化。为此,仿真分析了 8 kHz 和 24.5 kHz 电波,分别考虑前两阶、前四阶和前六阶模式时,场强 E_r 随传播距离变化情况(如图 5 所示)。其中,电离层高度 $h = 80$ km。

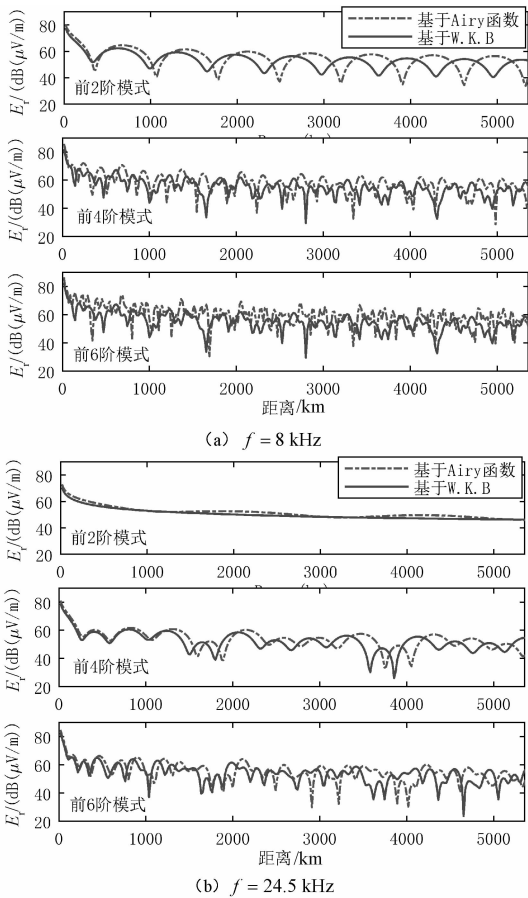


图 5 不同叠加模式数下的总场强 E_r 分布
Fig.5 The total field intensity E_r distribution under different superposition modes.

从图中可以看出,当考虑的模式越多时,模干涉情况就越复杂。(需要说明的是,对于非理想情况,由于高阶模随距离增加衰减严重,故仅在近距离处需要考虑多阶模。)频率越高,干涉距离(两个最大点之间的距离)越大。

此外,对比 2 种方法可知:①频率越低、考虑的模式越多,两种方法因相速度上的差异致使总场强度的差别越发显著;②频率较高时,尽管 W.K.B 方法基膜误差较大,但理想情况下高阶模因未衰减且强度大而起主要作用,使得 2 种方法吻合较好(尤其叠加模数少、距离发射点较近时);③传播距离较

远时,W.K.B 方法因模方程的根出现虚部所造成的衰减影响将随距离增加而增大,从而表现出最大最小点出现的位置越来越靠前。

(2) 发播频率对总场强 E_r 的影响

为了进一步系统分析发播频率不同时,总场强度的变化,图 6 给出 4 种频率下,场强 E_r 随传播距离变化情况。其中,电离层高度 $h = 80$ km; E_r 总场仅考虑前四阶。由图可见,频率越低,模干涉现象越严重。同时,频率越低, Airy 函数方法因近似导致相速度的差异所表现出的总场差别越突显;频率越高,传播距离越远,W.K.B 方法函数计算结果中最大最小点出现的位置愈来愈超前 Airy 函数近似方法。

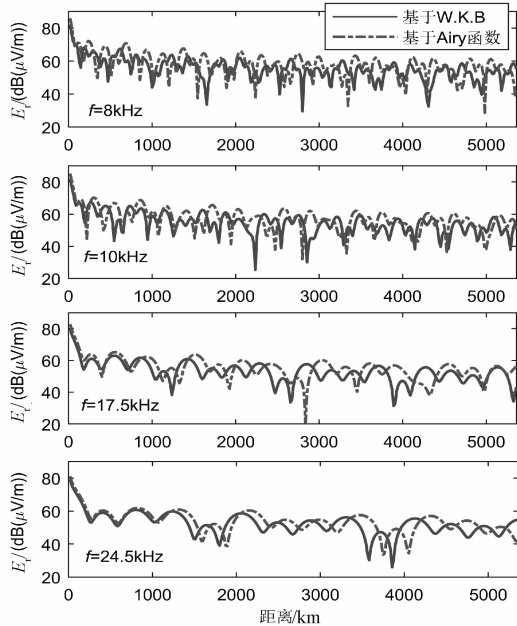


图 6 不同频率下两种方法计算结果对比
Fig.6 The total field intensity E_r versus propagation distance on different frequency.

(3) 不同电离层高度下,总场强 E_r 变化情况

图 7 给出电离层高度不同时,2 种方法的比对结果。其中,电波频率 $f = 24.5$ kHz。

从图 7 可以看出,模干涉现象的显著程度亦与电离层的高度密切相关,对同一频率的电波而言,电离层距离地面越高时,场强随距离出现最大最小点变化的周期性越显著,且干涉距离越长。比较 2 种方法的计算结果可以看出,在 1000 km 以内,2 种方法吻合较好。随着传播距离的增加,W.K.B 方法干涉点的位置越来越超前 Airy 函数计算结果。电离层高度越高时(如 90 km),W.K.B 方法的衰减影响将愈发突显。

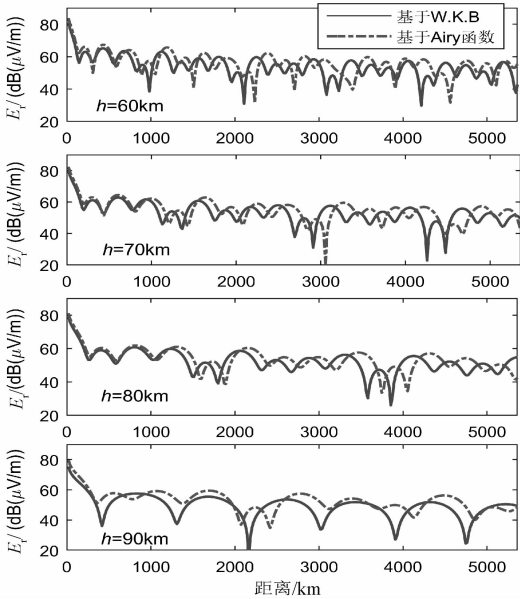


图 7 不同电离层高度下两种方法计算结果对比
Fig.7 The total field intensity E_r versus propagation distance on different height of ionosphere

4 结论

本文针对甚低频电波传播特性解析计算中所涉及的关键问题——高度增益函数的求解,进行了深入研究。对比分析了基于 W.K.B 方法与基于 Airy 函数方法的高度增益函数求解过程及其近似条件。仿真结果显示,对于甚低频的低频段,采用 W.K.B 方法将获取较高的精度,而对于 VLF 的中/高频段,基于 Airy 函数的求解过程更可靠。同时,电离层等效高度、传播距离、所叠加的模式个数等均会对计算

结果产生较大的影响。

参考文献:

[1] 潘威炎. 长波超长波极长波传播[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.

[2] 胡安平. 陆基超远程无线电导航发展研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(5): 1-6.

[3] DARPA-BAA-16-23. Spatial, temporal and orientation information in contested environments (STOIC) very low frequency (VLF) positioning system [S]. Strategic Technology Office, 2016-2-24.

[4] 吴海. DARPA 计划明年完成 STOIC 项目的演示验证[EB/OL]. 国防科技要闻, 2018-6-25, http://www.sohu.com/a/237628615_635792.

[5] A.D. Wait. 甚低频无线电工程[M]. 北京: 国防工业出版社. 1973.

[6] 熊皓. 无线电波传播[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 331-363.

[7] 李凯, 潘威炎, 苗永瑞. 非均匀电离层中 VLF 辐射源在海面上产生的场[J]. 电波科学学报, 1998(3): 265-269.

[8] 赵庶凡, 申旭辉, 潘威炎, 等. VLF 波从大气层到低电离层的传输特性分析[J]. 空间科学学报, 2011, 31(2): 194-200.

[9] 张世田, 陈恩平, 王元新, 等. 甚低频在多模干涉区的场强起伏标准偏差估计[J]. 电波科学学报, 2011. 26(02): 286-290.

[10] Tong He, Juan Zheng, Weiyan Pan, *et al.* Multiple-Mode Interference and Phase Standard Deviation of VLF Wave Propagation in an Anisotropic Earth - Ionosphere Waveguide. IEEE Trans. Antennas Propag., 2018. 66 (12): 7265-7272.

基于极大似然函数的独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型

刘舒畅,王淑娟
(黑龙江大学 数学科学学院, 哈尔滨 150080)

摘 要:传统方法在对网络拓扑结构可靠性进行评估的过程中,存在参数方向不明确的问题,提出基于极大似然函数的独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型。利用 Weibull 函数代表故障率模型,分析网络部件故障率的时间曲线,并构建网络节点和链路效能的时变模型,获得独立分布网络的时间效能模型;计算独立分布网络的拓扑结构函数,获得网络的开失效和短失效概率,根据极大似然估计对参数的偏导数进行求取,可以获得似然方程,利用得到的偏导数来构建独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型,最终实现对独立分布网络拓扑结构可靠度的评估。实验结果得知,提出方法在对独立分布网络拓扑结构可靠度进行评估时,测试结果与期望输出结果的拟合度较高,并且评估时间较短,验证了模型的有效性。

关键词:极大似然函数;独立分布;网络拓扑结构;可靠度评估模型;

中图分类号:TN915. 02 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0080-04
DOI:10. 13774/j.cnki.kjtb.2020. 03. 015

Reliability Evaluation Model of Topological Structure of Independent Distributed Network Based on Maximum Likelihood Function

Liu Shuchang, Wang Shujuan
(Heilongjiang University, School of Mathematical Science, Harbin 150080, China)

Abstract:In the process of evaluating the reliability of network topology, the parameter direction is not clear, and an independent distributed network topology reliability evaluation model based on maximum likelihood function is proposed. The failure rate model is represented by the Weibull function, the time curve of the failure rate of network parts is analyzed, and the time-varying model of network node and link efficiency is built, and the time efficiency model of independent distribution network is obtained. The topological structure function of the independent distribution network is calculated, the open failure probability and the short failure probability of the network are obtained, and the partial derivatives of the parameters are obtained based on the maximum likelihood estimation, and the likelihood equation can be obtained. Based on the partial derivatives, the reliability evaluation model of independent distributed network topology is constructed and the reliability evaluation of independent distributed network topology is realized. The experimental results show that the reliability of independent distributed network topology is evaluated by the proposed method, the similarity between the test results and the expected output results is high, and the evaluation time is short, which verifies the validity of the model.

Keywords: maximum likelihood function; independent distribution; network topology; reliability assessment model

独立式分布网络能够实现人们信息和通信的交互,是以传输、处理和采集为一体的网络信息系统。随着独立分布网络从理论到实际的应用^[1,2],更需要考虑系统高效且可靠的运转问题,这成为网络技术推广的障碍,更要对独立分布网络拓扑结构的可靠度进行评估^[3,4]。

文献[5]提出基于模糊神经网络的独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型,从网络拓扑结构可靠性机制的角度来剖析独立分布网络拓扑结构的可靠度,并提取影响其可靠度的性能指标;将部分性能指标筛选出来,构建用来指标模糊量化的可靠度评估标准值矩阵;根据内插所生成的样本数据构建网络拓扑结构可靠度评估模型。实验结果表明,该模型能够站在系统层次角度对独立分布网络进行评估,但测试结果与期望输出结果的拟合度较低。文献[6]提出基于复杂网络理论的独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型,以网络中端和全网效能可靠度两个指标作为网络受到攻击时的可靠度评估指标,分析网络拓扑结构的可靠度,并建立网络拓扑结构可靠度评估模型。实验结果表明,该模型使网络信息系统的可靠度得到了提高,但存在网络拓扑结构可靠度评估用时长的问题。

针对上述两种研究方法存在的缺陷,提出基于极大似然函数的独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型。

1 基于极大似然函数的网络拓扑结构可靠度评估模型

1.1 模型故障率与效能

1.1.1 初始故障率

硬件组件的可靠度不断提高,平均无故障时间也随之增加。硬盘、内存和CPU的可操作生命期均以年为单位^[7,8]。当硬件组件可以构成独立分布网络中的节点和链路时,平均无故障时间表达式如下:

$$R_s = \left(\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k} \right)^{-1} \quad (1)$$

其中, R_k 表示组件 k 的无故障时间^[9], N 表示组件个数,根据公式(1)可知,系统组件的无故障时间长度会直接影响系统的可靠度。

1.1.2 使用过程的故障率

使用网络部件之前,需要经过老化或者使用的过程来对合格部件进行筛选。图1为独立分布网络部件故障率的时间曲线。

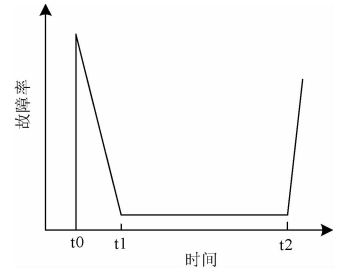


图1 网络部件故障率的时间曲线

Fig.1 Time curve of network component failure rate

图1中,在 $0 \sim t_0$ 内,网络部件未出现失效,其故障率为0;在 $t_0 \sim t_1$ 内,网络部件失效多^[10],故障率 α 逐渐下降,是网络部件老化和使用的过程;在 $t_1 \sim t_2$ 内,网络部件失效少, α 与常量相接近,能够当作正常使用期^[11];在 t_2 之后,失效的网络部件变多, α 上升,是网络部件衰竭过程。为描述独立分布网络部件故障率的时间曲线,利用 Weibull 函数对该曲线 $\alpha(t)$ 进行表示:

$$\alpha(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{a}{b}(t+c-t_1)^a, & t_0 \leq t \leq t_1 \\ \alpha, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \frac{a}{b}(t-t_2)^a + \alpha, & t_2 \leq t \end{cases} \quad (2)$$

公式(2)中, a, b, c 代表形状系数^[12], $\alpha(t)$ 在 t_1 处的连续性得到 α , 则有:

$$\alpha = \frac{a}{b}c^a \quad (3)$$

1.1.3 链路和节点总效能

在独立分布网络中,链路和节点效能是链路和节点完成网络任务能力占最大有效能力的比值,节点处理能力的大小为节点效能,链路承担流量的大小为链路效能。

根据公式(2)可以获得链路和节点总效能函数:

$$E(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq t_0 \\ R_s \exp\left(-\frac{a}{b} \int_0^t (t+c-t_1)^a dt\right), & t_0 \leq t \leq t_1 \\ e^{-\alpha t}, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ R_s e^{-\alpha t} \exp\left(-\frac{a}{b} \int_0^t (t-t_2)^a dt\right), & t_2 \leq t \end{cases} \quad (4)$$

当 α 与 t 无关时,则有:

$$E(t) = e^{-\alpha t} \quad (5)$$

在独立分布网络拓扑结构中,网络部件经过使用和老化期之后,可以进入到正常的试用期,此时 $E(t_1) = 1$, 可以当作分析网络部件效能变化的起点^[13,14]。

对于可修复网络拓扑结构来说,根据其可靠度,链路和节点总效能的表达式如下:

$$E(t) = \frac{\beta}{\alpha(t) + \beta} + \frac{\alpha(t)}{\alpha(t) + \beta} R_s \exp\left(-\int_0^t (\alpha(t) + \beta) dt\right) \quad (6)$$

其中, β 代表修复率与 t 无关^[15], 假设 α 也与 t 无关, 则可以从公式(6)中获得稳态效能 E 的表达式如下:

$$E = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \quad (7)$$

通常情况下, α 也与 t 相关并且满足公式(2), 此时有如下表达式:

$$E = \lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0 \quad (8)$$

1.1.4 独立分布网络效能

网络效能模型是网络中全部节点可以通过有效链路实现通信的模型。该效能是由网络链路和节点效能通过拓扑关系获取的, 表达式为:

$$E_N(t) = E_e(t) E_v(t) \quad (9)$$

其中, $E_v(t)$ 表示总节点效能, 当网络中的节点效能为 0 时, 说明网络失效, 此时, $E_v(t)$ 有如下表达式:

$$E_v(t) = \prod_{i=1}^n E_{v_i}(t) \quad (10)$$

公式(11)中, $E_{v_i}(t)$ 代表节点 i 的效能, n 代表节点数量。 $E_e(t)$ 代表网络总链路效能, 必须确保网络中的 i 条链路与全部节点相连, 并且 $i \geq n - 1$, $E_e(t)$ 可以表示为:

$$E_e(t) = \sum_{i=n-1}^m C_i E_{e_i}(t) (1 - E_{e_i}(t))^{m-i} \quad (11)$$

其中, C_i 代表 i 条网络链路连接全部网络节点并且 $m - i$ 条网络链路无效的独立分布网络状态数量; $E_{e_i}(t)$ 代表网络链路 i 的效能, 当 E_{e_i} 与 t 无关时, 并且 $E_{e_i}(t)$ 采用网络链路可靠度 p_i 来替代时, 公式(11)与网络可靠度问题是等价的。

1.2 网络拓扑可靠度评估模型

设 C_1, C_2 为图 $G(V, E)$ 的两个割集, V_1, V_2 为 $G(V, E)$ 的 V 中相对应 C_1 的不共用且非平凡的真子集组, V_3, V_4 为 $G(V, E)$ 的 V 中相对应 C_2 的不共用且非平凡的真子集组。

其中, $V_1 \cup V_2 = V$ 和 $V_1 \cap V_2 = \phi$, $V_3 \cup V_4 = V$ 和 $V_3 \cap V_4 = \phi$, 设子集组 $(V_1 \cap V_4) \cup (V_2 \cap V_3)$ 为 V_5 , 将其定义为 V_1, V_3 的环和, 即 $V_1 \oplus V_3$, 设子集组 $(V_1 \cap V_3) \cup (V_2 \cap V_4)$ 为 V_6 , 将其定义为 V_2, V_3 的环和, 有 $V_2 \oplus V_3$ 。

从 G 中将 $C_1 \oplus C_2$ 删除后, 当包含 V_5, V_6 的子图连通时, 说明 $C_1 \oplus C_2$ 为割集组, 环和运算的总数量为 2^{n-1} , 此时全部割集的环和运算数量如下所示:

$$C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^n = \sum_{i=1}^n C_n^i = 2^{n-1} \quad (12)$$

则全部割集的吸收运算总数量 L 可以表示为:

$$L = \sum_{i=1}^n C_n^i - n = 2^n - n - 1 \quad (13)$$

假设 $C_1, C_2, \dots, C_k$ 为独立分布网络图 $G(V, E)$ 经过初始生成树 $T_{i'}$ 获得的全部割集, 独立分布网络的拓扑结构函数如下:

$$f(G) = C_1 \otimes C_2 \otimes \dots \otimes C_k \quad (14)$$

则有:

$$Q(G) = f(G) \big|_{q_i^0} \quad (15)$$

$$S(G) = 1 - f(G) \big|_{(1-q_i^s)} \quad (16)$$

式中, $\otimes$ 表示集合不交和运算符, $q_{i'}^0, q_{i'}^s$ 分别表示 i' 边相对应的开失效和短失效概率。

根据极大似然估计对关于参数 β 和 γ 的偏导数进行求取, 可以获得似然方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \beta} = -n \ln \gamma + \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln t_i + \frac{\ln \gamma}{\gamma^\beta} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \\ -\frac{1}{\gamma^\beta} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \ln t_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \gamma} = -\frac{\beta n}{\gamma} + \beta \frac{1}{\gamma^{\beta+1}} \sum_{i=1}^n t_i^\beta = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中, t_i 表示样本, 利用求取的 β, γ 偏导数来构建独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型, 表达式如下:

$$Y_B = \beta + \gamma + E_N(t) + E(t) + Q(G) + S(G) \quad (18)$$

以上通过极大似然估计实现了对参数偏导数的求取, 明确了参数方向, 同时获取似然方程, 实现了独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型的构建。

2 实验结果

实验的操作系统为 WindowsXP, CPU 为 Intel Pentium 2.0 GHZ, 其内存为 3 G, 为了验证基于极大似然函数的独立分布网络拓扑结构可靠度评估模型

的有效性,对测试结果与期望输出结果的拟合度进行测试,测试结果如图 3 所示。

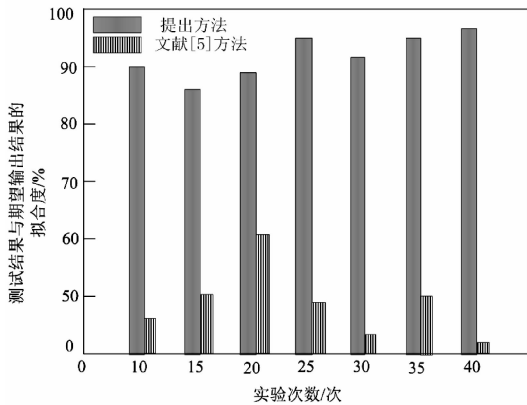


图 3 不同方法测试结果与期望输出结果的拟合度
Fig.3 The fit of the test results of different methods to the expected output

分析图 3 可知,40 次实验中,提出方法所建模型测试结果与期望输出结果的拟合度大于 80%,并且第 25 次实验之后,拟合度在 90%以上,说明该方法所建的模型更能准确的对独立网络拓扑结构的可靠度进行评估。

在对测试结果与期望输出结果拟合度实验的基础上,进一步测试网络拓扑结构可靠度的评估时间,评估用时越短,说明方法的效率越高,测试结果如图 4 所示。

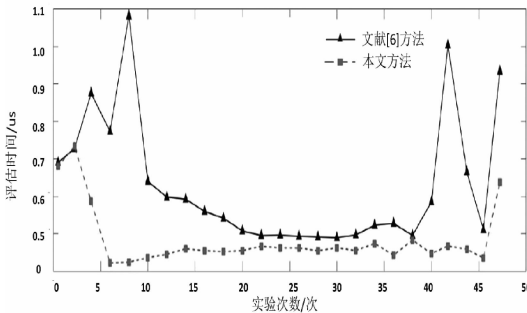


图 4 不同方法的评估时间对比结果
Fig.4 Comparison of evaluation time of different methods

分析图 4 可知,为验证网络拓扑结构的可靠度,进行 50 次评估时间实验,实验数据得知提出方法的评估用时在 0.1~0.75 μs 之间,在第 6 次到第 45 次,评估实验中,提出方法的用时稳定且低于 0.5 μs,而文献[6]方法的评估用时在 0.75~1.1 μs 之间,且波动性较大。从对比结果中可以看出,提出方法的评估用时更短,证明提出方法的效率更高,可以有效的完成评估。

3 结论

本文对独立分布网络拓扑结构的可靠度展开了研究,利用极大似然函数构建可靠度评估模型,解决了传统方法存在参数方向不明确的问题,并对测试结果与期望输出结果的拟合度、可靠度评估用时分别展开了实验研究,实验结果得到,提出方法所得到测试结果与期望输出结果的拟合度较高,并且评估用时较短,验证了提出方法所建模型的有效性。

参考文献:

[1] 张亚利. 大数据中网络节点拓扑不稳定性的评估模型设计[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15):284-289.

[2] 范慕炜, 宫敬, 伍阳, 等. 基于简化拓扑结构的陕京天然气管网供气可靠性分析[J]. 天然气工业, 2017, 37(4):123-129.

[3] 孙超, 王瑛, 崔利杰, 等. 基于复杂网络的装备系统安全性评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(9):3028-3031.

[4] 刘强, 马艳波. 于改进 UGF 算法的线性拓扑 WSN 系统可靠性评估[J]. 运筹与管理, 2016, 25(2):49-56.

[5] 李建平, 王晓凯. 基于模糊神经网络的无线传感器网络可靠性评估[J]. 计算机应用, 2016, 36(a02):69-72.

[6] 李洋, 王栋, 李刚, 等. 基于复杂网络理论的智能电网信息系统可靠性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(06):63-71.

[7] 朱林, 方胜良, 胡卿, 等. 卫星时变拓补网络节点重要度评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(6):1274-1279.

[8] 许悦, 余涛. 网络拓扑结构与供电可靠性的数学关系分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(02):246-260.

[9] 孙超, 王瑛, 崔利杰, 等. 基于复杂网络的装备系统安全性评估模型[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(34):3031.

[10] 沈士根, 范恩, 胡珂立, 等. 面向恶意程序传播的传感网可靠度评估[J]. 电子学报, 2018, 46(1):75-81.

[11] 孔江涛, 黄健, 龚建兴, 等. 基于复杂网络动力学模型的无向加权网络节点重要性评估[J]. 物理学报, 2018, 67(9):249-265.

[12] 冀星沛, 王波, 董朝阳, 等. 电力信息-物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1867-1873.

掺泡沫混凝土板渣的保温砂浆性能研究

施 韬, 蔡 钰, 胡国华
(浙江工业大学 土木工程学院, 杭州 310023)

摘 要:通过 XRD 分析发现泡沫混凝土板(FC)板渣具有活性,可以用来替代粉煤灰掺入保温砂浆中改变其性能。本文主要研究了不同替代量的 FC 板渣替代粉煤灰,以及不同细度的 FC 板渣对保温砂浆性能的影响。实验结果表明 FC 板渣替代量在 75%时,保温砂浆的干密度、导热系数、力学强度、线性收缩率、抗冻性等性能均能满足要求;随着 FC 板渣细度的增大,保温砂浆的抗压强度、拉伸粘结强度减小、收缩率增大。因此得出粒径为 133 μm 左右,替代量为 75%的 FC 板渣为最优掺比的结论。

关键词:泡沫混凝土;保温砂浆;导热系数;建筑节能

中图分类号: TU578.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-7119(2020)03-0084-06
DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.016

Study on Properties of Thermal Insulation Mortar Mixed with Foamed Concrete Slab Slag

Shi Tao, Cai Yu, Hu Guohua
(College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: In this paper, XRD analysis shows that foam concrete slab slag has activity and can be used to replace fly ash into thermal insulation mortar. The effects of different mass fraction (25%, 50%, 75%, 100%) of foam concrete slab slag instead of fly ash and foamed concrete slabs with different fineness (133 μm , 600–900 μm , 1250–1430 μm) on the performance of thermal insulation mortar were studied. The results show that when the replacement amount of foam concrete slab slag is 75%, dry density, the thermal conductivity, mechanical properties, linear shrinkage and frost resistance of the thermal insulation mortar can meet the requirements. With the increase of the fineness of the FC slab slag, the compressive strength and tensile bond strength of the thermal insulation mortar would decrease, and the linear shrinkage would increase. Therefore, the FC slab slag with a particle size of about 133 μm and replacing 75% of the fly ash is used as the optimal ratio.

Keywords: foam concrete; thermal insulation mortar; thermal conductivity; building energy saving

泡沫混凝土(foam concrete, FC)是通过物理或化学方式将各种气体引入混凝土浆体中,经自然养护后所形成的一种含有大量封闭气孔的新型轻质保温材料。由于其容重小、保温隔热性能良好、耐火性

好及低静态弹性模量等优点,在土木工程应用中具有很大的发展潜力^[1-5]。泡沫混凝土在切割成板材的过程中,产生的边角料形成了大量废渣。这些废渣不仅无处堆放,也很难进行处置,甚至为此产生了

额外的费用,是生产厂家头疼的问题。

保温砂浆是一种用于建筑物表面保温层的建筑材料,由各种轻质骨料和砂浆材料混合而成,主要用于改善建筑结构外墙结构的保温问题,减少建筑能耗^[6-9]。本文基于 FC 板渣资源化利用的考虑,将处理后的板渣替代部分粉煤灰掺入到保温砂浆体系中,并对该保温砂浆体系的干密度、导热系数、力学性能、线性收缩率和抗冻性等进行分析测试,通过上述研究对 FC 板渣的资源化利用进行了一些初步的探索和尝试。

2 试验材料及试验方法

2.1 试验材料

本文中水泥采用 P·C 42.5R 水泥,其物理参数和化学组成如表 1 和表 2 所示。粉煤灰是由灵寿县燕国矿产品加工厂生产的一级粉煤灰,其化学成分见表 3。为了改善保温砂浆的施工性、保水性和抗裂性,加入改性组分,改性组分的主要成分为可再分散性乳胶粉,其主要成分为乙烯醋酸乙烯共聚物,以及增稠粉,其主要成分为羟丙基甲基纤维素,增强纤维为聚丙烯纤维。

表 1 水泥的主要物理性能参数

Table 1 Main physical properties of cement					
凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
189	253	4.6	9.7	23.6	50.3

表 2 水泥的化学组成 (wt%)

Table 2 Chemical compositions of cement (wt%)						
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂
含量	21.80	5.25	2.70	64.76	1.33	2.12

表 3 粉煤灰的化学组成 (wt%)

Table 3 Chemical compositions of fly ash (wt%)					
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
含量	63.03	19.42	8.83	2.77	2.42

2.2 试验方法

本文主要研究了掺 FC 板渣保温砂浆性能,主要的分析测试指标如下:

(1)干密度。干密度是保温砂浆性能的重要指标,干密度的大小与保温砂浆的导热系数和抗压强度密切相关。本文将试块标准养护至 28 d 后放入温度为 105 ℃ 的烘箱中烘干至恒重。取出后测量其质量和体积并计算出干密度值。

(2)导热系数。导热系数是反映材料保温性能好坏的主要指标。本文采用稳态平板法来测试不同

替代量的 FC 板渣保温砂浆的导热系数,其导热原理见公式:

$$K_x = -q_x'' / \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)$$

式中: x 为热流方向; q_x'' 为该方向上热流密度, W/m²; $\frac{\partial T}{\partial X}$ —该方向上的温度梯度, K/m。

(3)线性收缩率。主要反映材料变形性能。试样制备时在其两端预埋侧头,成型后用聚乙烯薄膜覆盖,在标准条件下养护 7 d 后除去聚乙烯薄膜。4 h 后测试试件的初始长度 L_0 。试块测定初始长度后,将其置于温度 (20±2) ℃、相对湿度为 (60±5)% 的养护室内养护,,分别在 7、14、28、56 d 测定试件的长度 L_1 ,并计算线性收缩率:

$$\varepsilon = (L_0 - L_d) / (L - L_d)$$

式中: ε 为自然干燥收缩率,%; L 为试件的长度,mm; L_d 为 2 个伸缩头埋入砂浆中的长度之和,mm。

(4)软化系数。材料的软化系数是反映材料耐水性的参数指标。本文软化系数测定为将试块养护至 28 d,一组用来测定其抗压强度;另一组放入温度为 105 ℃ 的烘箱中烘干至恒重后,在水中浸泡 48 h,然后从水中取出并用湿毛巾擦去表面附着的水并测定这组试块的抗压强度值。软化系数计算公式为:

$$K = P_0 / P$$

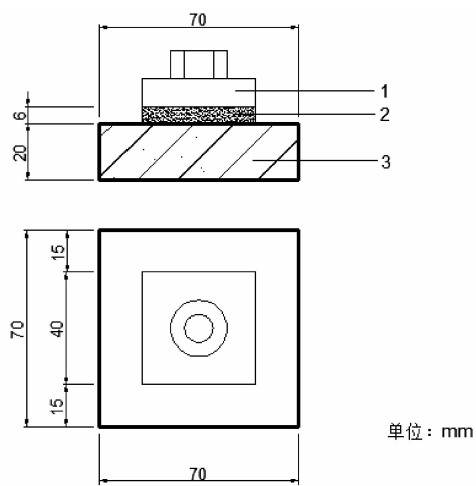
式中: K 为试块软化系数; P_0 为浸水后试块的抗压强度,MPa; P 为未浸水的 28 d 试块的抗压强度,MPa。

(5)拉伸粘结强度。是保温砂浆的重要力学性能指标。本试验制备 6 个 (70 mm×70 mm×20 mm) 水泥砂浆试块,将内框尺寸为 40 mm×40 mm,厚度 6 mm 的成型框放在按制备好的水泥砂浆试块的成型面上 (见图 1),将制备好的湿拌砂浆试样倒入成型框中,均匀捣实,然后用刮刀以 45° 方向抹平砂浆表面,小心脱模并编号。用聚乙烯薄膜覆盖养护 14 d,去掉薄膜后继续养护至 27 d,用双组份环氧树脂粘结上钢质夹具,放置 24 h。养护期满后采用 XBD2503 微机控制电子万能实验机进行拉伸粘结强度试验。拉伸粘结强度计算公式如下:

$$\sigma = F / A$$

式中: σ 为砂浆的粘结拉伸强度,MPa; F 为试件破坏时的荷载,N; A 为粘结面积,mm²。

(6)抗冻性。是保温砂浆的耐久性指标,抗冻性的好坏直接影响保温砂浆的适用性。本文按照砂



1—拉伸用钢制夹具;2—保温砂浆;3—水泥砂浆试块
图 1 保温砂浆拉伸粘结强度试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile bond strength sample of thermal insulation mortar

浆标准抗冻性实验方法,将养护至 28 d 的冻融试件放入冷冻箱冷冻 4 h,结束后将其放入 15 ℃~20 ℃的水槽中浸水 4 h 为一次冻融循环。如此循环 15 次计算砂浆试件的强度损失率和质量损失率。

本文配合比基于水泥的基础上,以 25%为梯度的 FC 板渣质量来替代粉煤灰制备保温砂浆试块,用 FC 板板渣 25%、50%、75%、100%来替代粉煤灰,同时设置一个不含 FC 板渣的试块作为对照组。各梯度的适宜配合比如表 4。

3 试验结果及分析

3.1 FC 板渣替代粉煤灰的可行性分析

FC 板渣是 FC 板在生产过程中所产生的边角料。根据水泥化学的常识,水泥颗粒一般在 28 d 时完成大部分水化,而 FC 板在切割时基本都为水化早期,因此理论上推断板渣还具有较大的残余活性。为研究 FC 板渣替代粉煤灰的可行性,本试验对 FC 板渣进行了 X 射线衍射分析。图 2 是 FC 板渣磨细后的 XRD 图谱。从图 2 中可以看出水泥中的主要活性矿物阿利特(Alite)和贝利特(Belite)的特征峰

依然存在且峰值不低。这说明 FC 板渣中还存在着大量未水化水泥颗粒,这些未水化的水泥成分依然存在活性,因此用 FC 板渣来替代粉煤灰是可行的。

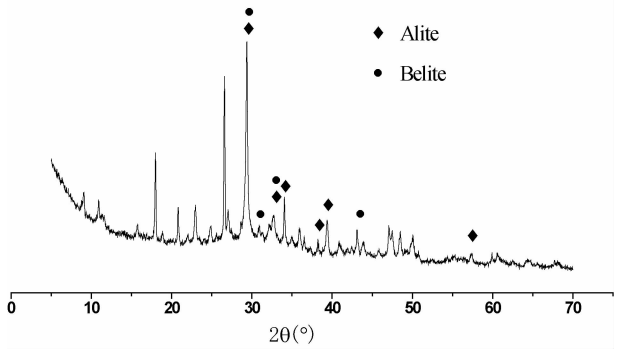


图 2 FC 板渣的 XRD 图谱
Fig.2 XRD pattern of FC slab slag

3.2 FC 板渣替代量对保温砂浆性能的影响

3.2.1 FC 板渣替代量对保温砂浆干密度的影响

不同 FC 板渣替代量对保温砂浆干密度的影响如图 3 所示。由图 3 可知随着 FC 板渣替代粉煤灰量的增加,保温砂浆的干密度随之下降。当 FC 板渣替代量为 75%时,干密度的下降幅度较大。这主要是因为粉煤灰在保温砂浆中起填充润滑的作用,粉煤灰的二次水化作用,使保温砂浆的密实度提高,从而会使得孔隙率降低,而泡沫混凝土板渣自身干密度较小,因此用 FC 板渣来代替粉煤灰掺入到保温砂浆中时可以达到减少砂浆的干密度的效果。

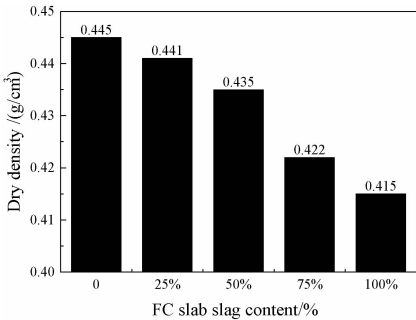


图 3 FC 板渣替代量对水泥砂浆干密度的影响
Fig.3 The effect of replacement amount of FC slab slag on dry density of thermal insulation mortar

表 4 改性保温砂浆的配合比(g)

Table 4 Mixing proportion of thermal insulation mortar(g)

编号	板渣替代量	水泥	粉煤灰	板渣	增稠粉	胶粉	增强纤维	玻化微珠	水
B0	0%	533.0	113.3	0	16.7	2.7	1.0	333.4	800.0
B1	25%	533.0	85.0	28.3	16.7	2.7	1.0	333.4	800.0
B2	50%	533.0	56.7	56.7	16.7	2.7	1.0	333.4	800.0
B3	75%	533.0	28.3	85.0	16.7	2.7	1.0	333.4	800.0
B4	100%	533.0	0	113.3	16.7	2.7	1.0	333.4	800.0

3.2.2 FC 板渣替代量对保温砂浆导热系数的影响

不同 FC 板渣替代量对保温砂浆导热系数的影响如图 4 所示。由图 4 可知,导热系数随着 FC 板渣替代粉煤灰量的增加而减小,当 FC 板渣替代量为 100% 时的保温砂浆的导热系数为 0.072 W/(m·k),与未掺 FC 板渣的保温砂浆的导热系数 0.082 W/(m·k)相比下降了 12%。说明 FC 板渣的加入会使保温砂浆的导热系数有所降低,这对提高保温砂浆的保温隔热性能是有利的。

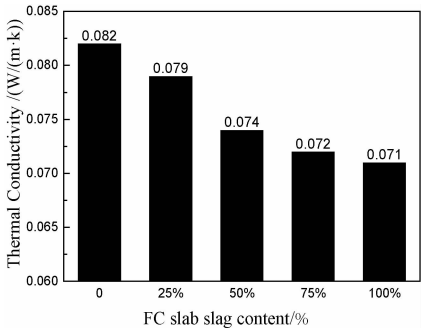


图 4 FC 板渣替代量对导热系数的影响

Fig.4 The effect of replacement amount of FC slab slag on thermal conductivity of thermal insulation mortar

3.2.3 FC 板渣替代量对保温砂浆线性收缩率的影响

不同 FC 板渣替代量对保温砂浆线性收缩率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,保温砂浆的线性收缩缓慢。在养护前期,收缩率相对增长较快,到 28 d 后趋于平缓。砂浆的收缩主要来自水泥,而 FC 板渣的主要成分是未水化水泥,粉煤灰的活性物质一定程度上会限制砂浆的收缩。随着 FC 板渣替代粉煤灰量的增加,线性收缩率越来越大。

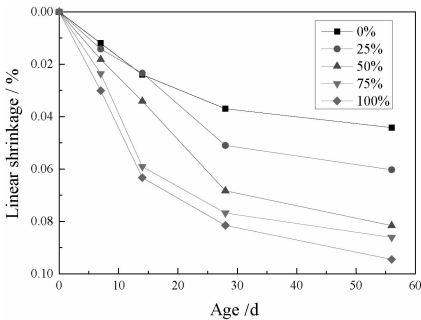


图 5 FC 板渣替代量对保温砂浆线性收缩率的影响

Fig.5 The effect of replacement amount of FC slab slag on linear shrinkage of thermal insulation mortar

3.2.4 FC 板渣替代量对保温砂浆软化系数的影响

不同 FC 板渣替代量对保温砂浆软化系数的影响如图 6 所示,由图 6 可知随着 FC 板渣替代粉煤灰

的比例增大,保温砂浆的软化系数随之减小。

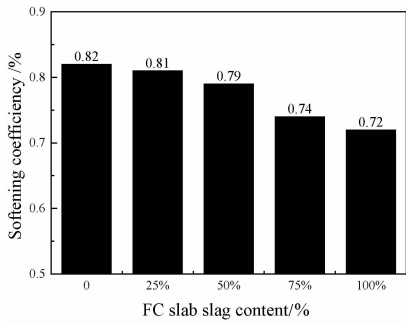


图 6 FC 板渣替代量对保温砂浆软化系数的影响

Fig.6 The effect of replacement amount of FC slab slag on softening coefficient of thermal insulation mortar

3.2.5 FC 板渣替代量对水泥砂浆拉伸粘结强度的影响

不同 FC 板渣替代量对保温砂浆拉伸粘结强度的影响如图 7 所示。由图 7 可知,拉伸粘结强度随着 FC 板渣替代粉煤灰量的增加整体呈下降趋势。但在 FC 板渣替代量为 50% 时有略微增加,随后随着替代量的增加而减小,当 FC 板渣替代量为 100% 时,拉伸粘结强度降至 0.18 MPa,并不能满足工程要求。其原因是水泥水化生成的氢氧化钙会与粉煤灰中的活性氧化物发生反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,随着龄期的增长转变为晶体,从而增强砂浆的拉伸粘结强度,但随着 FC 板渣替代量的增加,粉煤灰所起的作用越来越小,砂浆的拉伸粘结强度也随之降低。

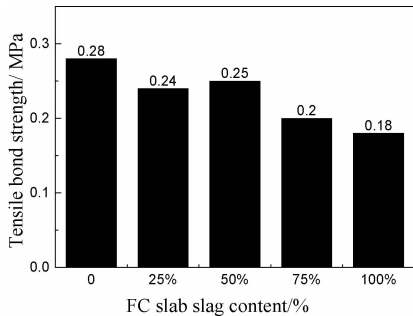


图 7 FC 板渣替代量对保温砂浆拉伸强度影响

Fig.7 The effect of replacement amount of FC slab slag on tensile bond strength of thermal insulation mortar

3.2.6 FC 板渣替代量对保温砂浆抗冻性的影响

不同 FC 板渣替代量对保温砂浆质量和强度损失率的影响如图 8 所示。由图 8 可知,随着 FC 板渣替代粉煤灰比例增大,保温砂浆的质量损失率和强度损失率都不断增大。这是由于泡沫混凝土板渣替代粉煤灰后使得保温砂浆内的孔隙不均匀,导致保

温砂浆抗冻性能降低,使得保温砂浆质量损失率和强度损失率增大。

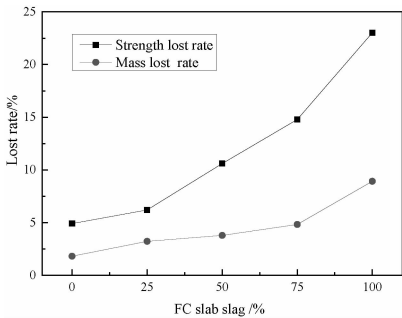


图 8 FC 板渣替代量对保温砂浆质量损失率和强度损失率的影响

Fig.8 The effect of replacement amount of FC slab slag on lost rate of thermal insulation mortar

3.3 FC 板渣细度对保温砂浆的影响

由上述实验结果来看,FC 板渣替代粉煤灰的量为 75%时制备而成的保温砂浆的各项性能都满足工程要求。从以往的文献来看,粉煤灰的细度对砂

浆的性能有很大的影响。李益进,周世琼^[10]等人研究了超细粉煤灰对高性能混凝土力学性能的影响,发现超细粉煤灰的掺入改善了混凝土的力学性能。刘宝举^[11]等研究粉煤灰细度和掺量的不同都会对水泥净浆和胶砂的流动度产生影响,粉煤灰的掺入会降低砂浆的早期强度,粉煤灰细度的增大对硬化浆体的影响较大。根据粉煤灰粒度对水泥基材料产生的影响,来研究 FC 板渣的细度对保温砂浆性能的影响。3 组不同细度 FC 板渣改性保温砂浆配合比如表 5 所示。

图 9 为 FC 板渣细度对保温砂浆干密度、抗压强度、拉伸粘结强度和线性收缩率的影响。由图可知 FC 板渣细度越大,软化系数随之减小,主要是由于 FC 板渣本身孔隙率大,当其细度增大时,自身结构未完全破坏,基本不参与水泥的水化反应,更多是以细骨料的形式存在,骨料内部孔隙存在,导致砂浆浸水后湿胀作用影响比较大,使得软化系数减小。线性收缩率增大是因为 FC 板渣中存在聚丙烯纤维

表 5 不同细度 FC 板渣保温砂浆配合比 (g)

Table 5 Mixing proportion of different fitness FC slab slag of thermal insulation mortar(g)									
编号	FC 板渣粒径/ μm	FC 板渣	水泥	粉煤灰	增稠粉	胶粉	增强纤维	玻化微珠	水
A	133	85.0	533.0	28.3	16.7	2.7	1.0	333.4	815.7
B	600~900	85.0	533.0	28.3	16.7	2.7	1.0	333.4	815.7
C	1250~1430	85.0	533.0	28.3	16.7	2.7	1.0	333.4	815.7

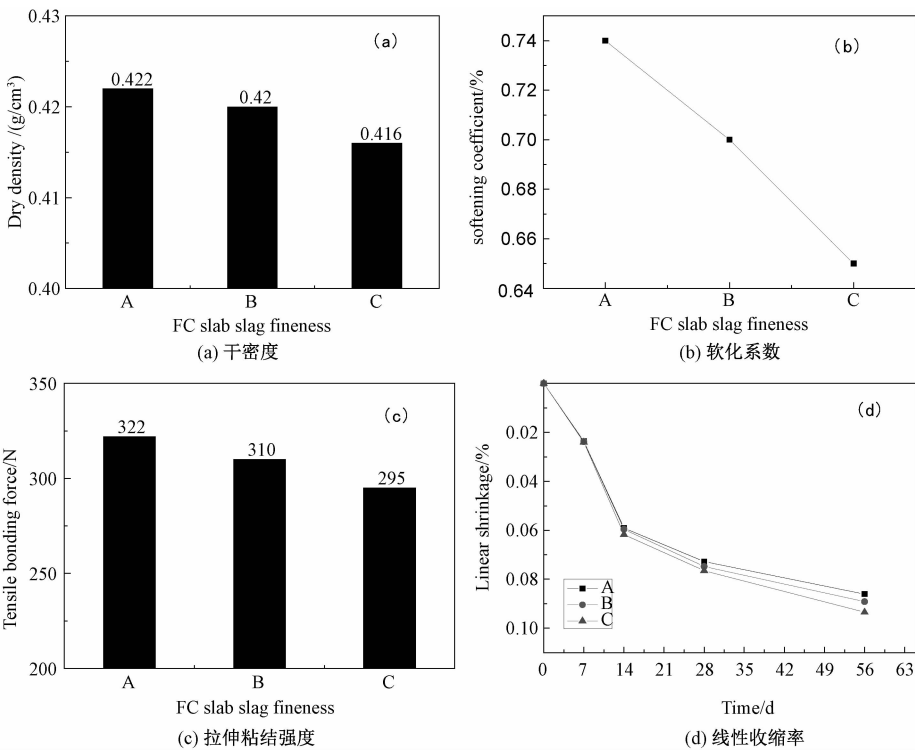


图 9 FC 板渣细度对保温砂浆性能的影响

Fig.9 The Effect of fineness of FC slab slag properties of thermal insulation mortar

抗裂能力抵消不了自身水化不充分导致的水分散失引起的收缩。拉伸粘结强度和干密度随细度增大而减小是因为细度大的 FC 板渣以骨料的形式存在, 活性物质不能很好地与其他胶凝材料发生反应, 参与到化学反应中的水分变少, 更多的水分通过蒸发散失, 导致反应不充分。综上所述, 在这 3 组细度中, 133 μm 粒径最优。

4 结论

1) 根据理论分析及板渣 XRD 测试可知, 早期切割产生的板渣中存在较多未水化水泥颗粒, 板渣残余活性较大。将板渣部分替代粉煤灰制备保温砂浆可行。

2) 随着板渣掺量的增加, 保温砂浆的导热系数、拉伸粘结强度和软化系数都逐渐降低, 而线性收缩率、质量损失率和强度损失率都有所增大。综合各项指标, 当 FC 板渣掺量为 75% 时, 保温砂浆的性能最优。

3) FC 板渣的细度对保温砂浆的性能影响较大。随着细度的增大, 改性保温砂浆的抗压强度和拉伸粘结强度降低, 线性收缩率增大。研究显示 FC 板渣细度不宜太大, 本试验中粒径为 133 μm 时效果较好。

参考文献:

[1] Xie Y, Li J, Lu Z Y, *et al.* Effects of bentonite slurry on air-void structure and properties of foamed concrete [J]. Construction And Building Materials, 2018, 179:

207-219.

[2] Cui Y, He H. Influence of Utilization Efficiency of Foaming Agent on Foam Concrete Performances [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 12-16.

[3] Ramamurthy K, Kunhanandan Nambiar E K, Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(6): 388-396.

[4] 周明杰, 王娜娜, 赵晓艳, 等. 泡沫混凝土的研究和应用最新进展[J]. 混凝土, 2009, (04): 104-107.

[5] Amran Y H M, Farzadnia N, Ali A a A. Properties and applications of foamed concrete; a review [J]. Construction And Building Materials, 2015, 101: 990-1005.

[6] 彭家惠, 陈明凤, 张建新. EPS 表面改性及其保温砂浆的耐候性与抗裂性[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, (01): 24-27.

[7] 范树景, 王培铭. 引气剂对玻化微珠保温砂浆长期干燥收缩的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(01): 1-7.

[8] 王伟鉴. 无机轻集料聚合物保温砂浆配比设计及试验方法研究[D]. 浙江大学, 2008.

[9] Gong J Q, Duan Z R, Sun K Q, *et al.* Waterproof properties of thermal insulation mortar containing vitrified microsphere [J]. Construction And Building Materials, 2016, 123: 274-280.

[10] 李益进, 周士琼, 尹健, 等. 超细粉煤灰高性能混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2005, (01): 23-29.

[110] 刘宝举, 谢友均, 张艳芹. 粉煤灰细度和掺量对水泥基材料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2003, (04): 426-430.

(上接第 83 页)

[13] 王耀升, 张英敏, 王畅. 一种基于力学模型的电力通信网脆弱性评估方法[J]. 电信科学, 2019, 35(01): 60-67.

[14] 孙雨潇, 朱俊澎, 袁越. 基于动态孤岛混合整数线性规划模型的主动配电网可靠性分析[J]. 电力建设,

2019, 40(5): 90-97.

[15] 阮闯, 江道灼, 朱乃璇, 等. 蜂巢状有源配电网拓扑及其可靠性评估[J]. 电力建设, 2019, 40(3): 77-84.

基于多目标优化的雨水管网耐受度分析

方咸根,陶若凌,尹 航,林若洲
(浙江大学 土木工程学系,杭州 310058)

摘 要:雨水管网是城市防洪排涝体系中重要的组成部分,科学合理的雨水管网设计,对建设海绵城市、缓解消除城市内涝问题具有重要意义。建立以降低造价同时提高雨水系统排水能力的多目标优化设计模型,以管径值为决策变量,利用 Borg 多目标优化算法求解,基于 c 语言运行平台,将 SWMM 源代码嵌入寻优过程,从而实现程序自动调用源码计算引擎,得到大量满足约束条件的方案解集;在此基础上,提出雨水管网耐受度概念,利用正态分布模拟降雨空间分布的差异性,从而辅助决策者甄选方案。将设计思路应用于工程实例,结果表明,以优化再加耐受度评估方式,对于雨水管网设计具有较好的实际应用价值。

关键词:雨水管网;多目标优化;Borg;SWMM;耐受度

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1001-7119(2020)03-0090-06
DOI: 10. 13774/j.cnki.kjtb.2020. 03. 017

Resilience Analysis of Storm Sewer System Based on Multi-objective Optimization

Fang Xiangen, Tao Ruoling, Yin Hang, Lin Ruozhou
(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The storm sewer system is an important part of the urban flood control system. The scientific and rational design of the storm sewer system is of great significance for the construction of sponge city and the alleviation of urban flooding problem. A multi-objective optimization design model is established to reduce the cost and improve the drainage capacity of rainwater system. While pipe diameter of the pipe is took as the decision variable. Using Borg multi-objective optimization algorithm to solve, based on the c language running platform, the SWMM source code is embedded into the optimization process, so that the program automatically calls the source code calculation engine, and obtains a large number of solutions that satisfy the constraint conditions. On this basis, the concept of resilience is proposed, using the normal distribution to simulate the spatial distribution of rainfall, to assist decision makers in the selection process. The design method is applied to the engineering example. The results show that the method has good practical application value for storm sewer system design.

Keywords: storm sewer system; multi-objective optimization; Borg; SWMM; resilience

城市雨水排放系统是城市雨水收集、输送和排出等工程措施的总和,是城市基础设施的重要组成部分,也是城市的“生命线”。近年来,我国东部地区许多城市出现普遍内涝问题,给居民的经济造成

巨大损失、生活造成很大困扰。造成内涝的因素很多,如极端天气、雨水管网设计标准偏低及下垫面条件改变等^[1]。因此在雨水管网设计时应围绕多目标开展,同时将优化思想引入设计中。目前,优化设计在雨水管网研究中已经很多^[2-5],研究者大多以管网造价单目标优化为主,少量同时考虑造价和排水性能的多目标优化。此外,针对多目标优化方案多解问题往往还需要我们花费一定人工操作。针对以上问题,本文提出了以平均充满度表示管网系统的排水能力,利用多目标算法 Borg 和水力模型 SWMM 联合求解出多个方案;同时提出雨水管网耐受度概念来辅助选择方案。

1 雨水管网多目标优化模型及耐受度分析

1.1 雨水管网的多目标优化模型

雨水管网多目标优化时需要将实际问题转换成数学问题。在现有管网布局下,以管径值为决策变量。目标函数为最小化造价(公式 1)和最小化管道平均充满度(公式 2)。约束变量分为解空间约束变量和决策空间变量。具体表达如下:

最小化造价:

$$C_T = L_i \sum_{i=1}^n C(D_i)$$

(1)

最小化平均充满度:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_i \frac{h_i}{D_i}$$

(2)

解空间的约束变量

(1) 节点不溢流:

$$V_j = 0$$

(3)

(2) 管道相对充满度:

$$e_{\min} \leq \frac{h_i}{D_i} \leq e_{\max}$$

(4)

决策空间的约束变量

(1) 下游管道不小于上游管道

$$D_i \geq \text{Max}\{\Omega(D_i)\}$$

(5)

(2) 管径符合商业管径:

$$D_i \in Z$$

(6)

上式中, C_T 是管网总造价,由铺设单位管道费用 $C(D_i)$ (包含管道购买及安装成本)乘以管道长度 L_i 而得; h_i 是管道水位深度, h_i/D_i 是管道相对深度, $\bar{e}$ 是管道平均充满度。平均充满度的范围在(0, 1),当该值越小时则表示雨水管网系统排水能力越

强,而对应的造价也会更高。在多目标优化时,节点溢流量为 0 常为我们考虑的一个约束变量。将管道平均充满度限制在一定范围是为了避免管径过大或者过小,从而避免造价过高或者过低。对于决策变量的约束是为了优化所得的结果满足我们工程实际需要。

表 1 管道造价

Table 1 List of cost of pipes

管径/mm	造价/(¥/m)
200	68. 5
300	104. 0
400	134. 0
500	178. 67
600	218. 0
800	333. 33
1000	451. 33
1200	724. 67
1500	1061. 67
1800	1123. 33
2000	1342. 33
2200	2903. 5
2400	3426. 0

1.2 优化算法及水力模拟

Borg 属于多算子混合策略超启发式算法,由于 Borg 算法包含了一系列新的特性,如为了维持整个搜索过程的收敛性和多样性,应用 ε -box 支配,并建立外部解集档案;鉴于某些多目标优化问题过早收敛,导致搜索陷于局部最优解,引起搜索受阻,采用 ε -progress 指标方法来搜索测试过程及重启动功能^[6]。Borg 算法的主循环流程图见图 1。此外,相比其他多目标算法,一些学者已经证实效率、有效性及可靠度上 Borg 具有更好的表现^[7-9],因而本文采用 Borg 算法来解决雨水管网优化问题。在 Borg 算法应用中一些参数的设置很重要,如种群数量、 ε 值及总的评价次数。种群的大小直接关系到优化过程中过早收敛的问题,也就是说,如果初始总体规模较大,可能会产生更优的初始解,从而更有可能找到一组好的解。 ε 值用于定义问题的分辨率,它可以控制产生帕累托的最优解以及他们之间的距离。一组合适的值将在数量上及空间上产生更好的帕累托解集。此外,迭代次数也是影响其性能的主要因素。在本次研究中,将初始种群设置为 1000, ε 定义为 0.005,迭代 30 万次,其他参数为算法原先默认值。

SWMM 模型,全称为 Storm Water Management Model,最先是美国环保署为了解决城市排水问题而开发。由于经过几十年的开发,功能比较完善,且源代码对外开放,本次水力模拟采用该软件模型^[10]。

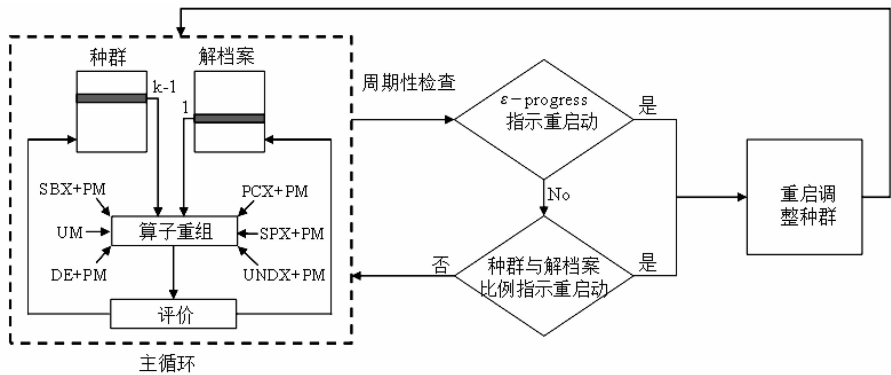


图 1 Borg 算法的主循环流程图

Fig.1 Main loop flow chart of Borg algorithm

1.3 多目标优化求解流程

在多目标优化中,优化算法与 SWMM 程序间优化流程见图 2,可以描述如下:Borg 随机产生初始种群,当 Borg 算法生成初始决策变量之后,优化程序打开 SWMM 原始文件,进而设置管网的管道属性,建立雨水管网模型;接着利用 SWMM 计算引擎部分进行计算并读取计算结果,将数据传入程序中得到目标函数值,并检验其是否满足相应的约束条件。如果不满

足,Borg 算法的流程会调整下一代的进化策略,从而改变优化目标的数值。多次迭代计算直到设定的计算次数,其计算结果也逐渐逼近 Pareto 最优解集。

1.4 雨水管网耐受度分析

耐受度是城市基础设施管理的新概念,可以理解为系统处理和适应外界干扰的能力^[11-13]。雨水管网系统中的不确定性不可避免。由于降雨空间分布、城市化的随机性,管道雨水输入量在时空上存在很大的波动性。输入量的波动性必然会导致管道发生失效,这里的失效是指在雨水管网系统中出现节点溢流。将系统耐受度指标 (system resilience index, SRI) 概念引入到雨水管网系统中,建立造价与耐受度的平衡关系。

降雨量的空间差异通过概率密度函数来描述,通过海量的随机取样,表达不确定性事件的发生,查阅相关文献,这种波动可服从各种各样的概率密度函数,而选取正态分布被学者广泛接受^[14],所以本文选择该分布作为降雨量的空间波动。通过遍历的方法,模拟降雨中心的转移。即划分的子汇水面积为 N ,则在一种雨水管网设计方案下,将进行 N 次模拟,若在第 i 次模拟中有一个节点溢流,则认为此时耐受度 $SRI_i = 0$,否则 $SRI_i = 1$,该设计方案的最终耐受度值按公式(7)来进行计算。在一定的经济能力下,通过比较在不同造价下系统的耐受度指标值、平均溢流时间和平均溢流总量来决定最终设计方案。

$$SRI_{net} = \frac{1}{N} \sum_i^N SRI_i \tag{7}$$

2 工程案例结果与分析

2.1 工程概况

图 3 为某地块雨水管网情况,包含了土地利用

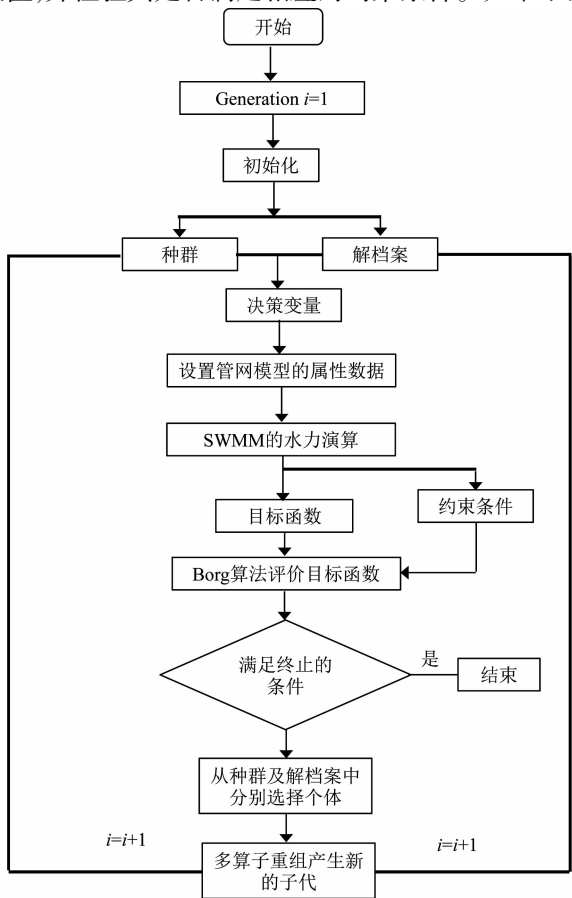


图 2 Borg 算法多目标优化流程图

Fig.2 Multi-objective optimization flow chart of Borg algorithm

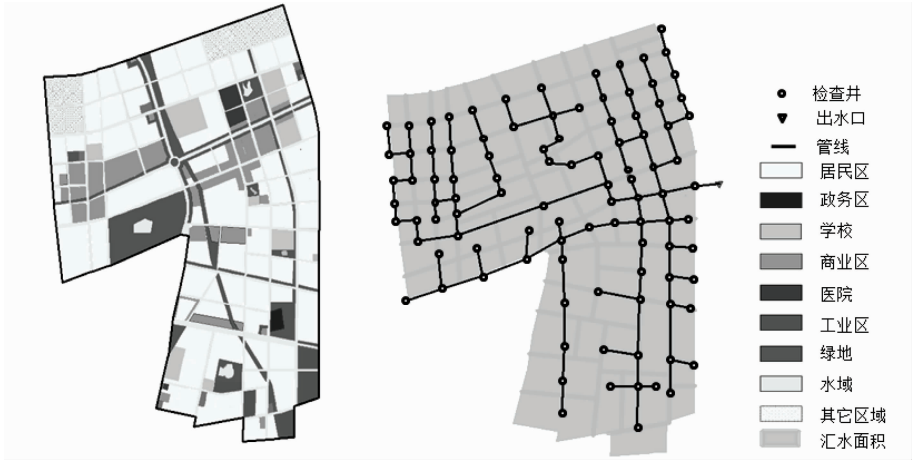


图 3 (a)土地利用图和(b)管网分布图
Fig.3 (a)land uses and (b) the drainage system

图及管网分布图。地块总面积 3.2 km²,划分 102 个子汇水面积,雨水管网系统 102 根管道总长 3.9 km,系统包含 102 个检查井和 1 个出水口。该雨水管网最先根据推理公式法按 5 年一遇标准进行设计,在 SWMM 模拟中出现部分节点溢流及管道超载的现象。因此有必要将雨水管网中的部分参数进行更改。

2.2 多目标优化结果

经过 30 万次多目标优化计算,解的数量已经较稳定且质量较优,选取最后 1 次迭代结果作为备选方案集,管网造价与平均充满度的帕累托前沿如图 4。此时,管网的最低造价为 1514 万元,对应平均充满度为 0.775,管网最高造价为 2255 万元,对应平均充满度为 0.540。

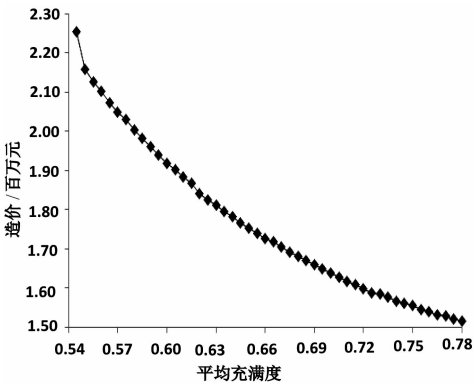


图 4 多目标优化结果
Fig.4 Multi-objective optimization results

2.3 不同正态分布下耐受度分析

正态分布中,正态分布曲线的形态由均值和方差决定。为了保证整个汇水面积中降雨总量不变,4 种分布均值不变,只改变方差。在不同方差下降雨

量的分布图见图 5。
图 6 反映了不同正态分布下造价与耐受度之间的关系。在不同正态分布下,总体趋势为:当造价较低时耐受度都为 0,随着造价的提高,耐受度快速提高,并随着造价的进一步增长而缓慢增长直至趋向 1。随着 σ 的增大,耐受度变小。图 7 反映了造价与平均溢流时间及方差、平均溢流量及方差的关系,总体来看,这四个指标都随着造价的提高而逐渐降低。随着 σ 的增大,相应指标也在变大。由于在不同 σ 扰动下运算结果相似,为了简化分析,只取 $\sigma=1$ 进行讨论。

造价在工程方案决策中往往起到决定性作用。在此将造价级别分为较低、适中及较高 3 类。在造价较低时,以方案 1 和 8 为代表,此时管网系统耐受度值为 0,系统抵抗外界扰动能力较弱,对比 2 种方案,造价相差 4 万元,但是方案 8 平均溢流总时间只有 1.69 h,平均溢流总量为 79.18 m³,明显低于方案 1 中的 3.42 h、55.63 m³,溢流时间方差与溢流量也明显小于方案 1。在承建该雨水管网工程中,若资金有限,推荐方案 8 作为设计方案。

由于在多目标优化中只以管径作为决策变量,而每根管道的长度不一样,这就会产生造价相近,而其他值存在差异。而这些差异凸显了此方案的优越性。如在造价级别定义适中下,方案 38 和 39,虽然方案 39 的造价更高一点,但方案 38 却与其有着一样的耐受度,且平均溢流总时间和平均溢流总量等指标也较小。当建设资金适中,推荐方案 38 为设计方案。

随着造价的提高,系统抵抗外界干扰的能力趋缓并稳定,此时继续增加造价意义不大。如在最后

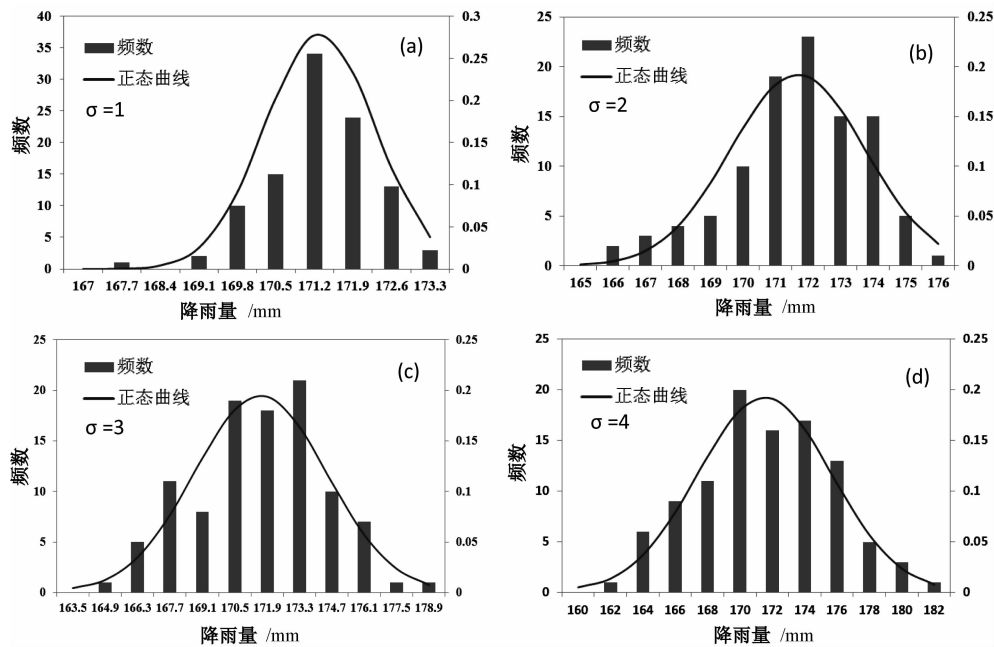


图 5 不同正态分布下降雨量分布图

Fig.5 Rainfall distribution maps of different normal distributions

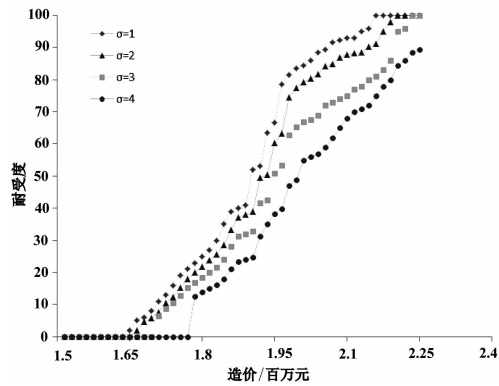


图 6 不同正态分布下造价与耐受度关系

Fig.6 The relation between cost and resilience under different normal distributions

4 种方案中,耐受度等其他值均为 0,而方案 46 造价最低。当建设资金冲突,推荐该方案为设计方案。

各设计方案分析指标及判断详见表 2。

3 结论

与城市雨水管网设计相关研究相比,本文具有以下方面改进:(1)重新构建了包含 2 个目标的多目标优化模型,首次提出平均充满度概念,并以此来衡量雨水管道系统排水能力;(2)通过接口函数,首次将 SWMM 源代码嵌入 Borg 优化计算雨水管网过程,将水力模拟与优化算法结合,有效得到较多满足要求的方案解集;(3)鉴于多目标优化解集较多,通过建立耐受度指标来辅助决策方案,在一定经济能力下,可甄选出更好的方案。通过真实案例的应用,表明了所提出的方法对于雨水管网设计具有重要的借鉴意义。

表 2 具体方案比较								
Table 2 Comparison of specific schemes								
方案序号	造价/ 百万元	耐受度	平均溢流 总时间/h	溢流总时 间方差	平均溢流 总量/m³	溢流总 量方差	造价承 受能力	是否 推荐
方案 1	1. 51	0	3. 42	1. 07	79. 18	22. 06	较低	否
方案 8	1. 55	0	1. 69	0. 78	55. 63	22. 55	较低	是
方案 38	1. 92	0. 92	0. 04	0. 31	0. 09	1. 08	适中	是
方案 39	1. 94	0. 92	0. 62	0. 48	19	14. 18	适中	否
方案 46	2. 1	1	0	0	0	0	较高	是
方案 47	2. 13	1	0	0	0	0	较高	否
方案 48	2. 16	1	0	0	0	0	较高	否
方案 49	2. 26	1	0	0	0	0	较高	否

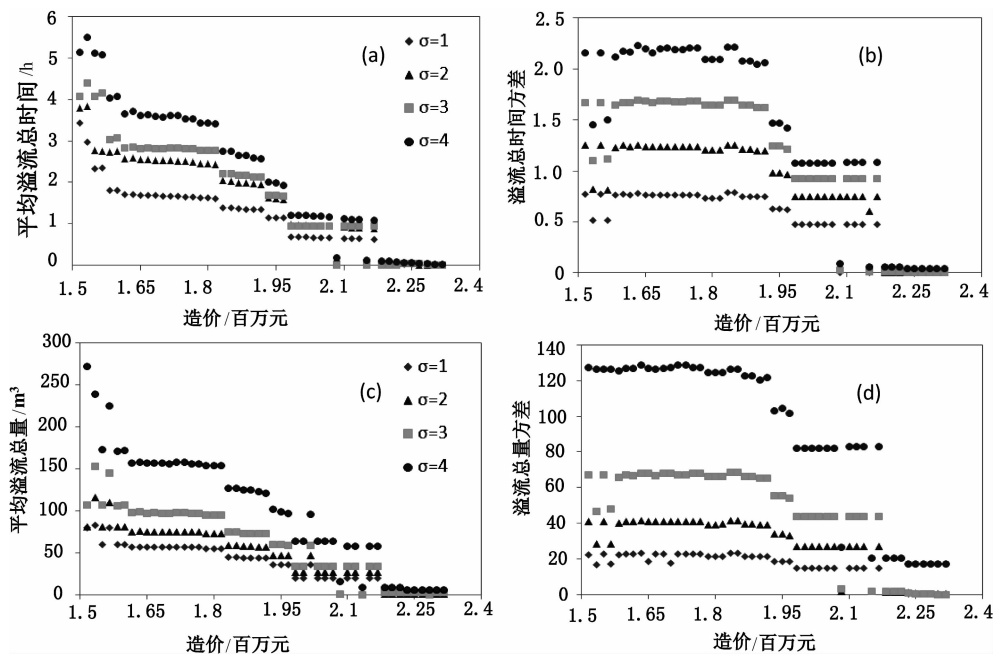


图 7 不同正态分布下造价与相关指标关系

Fig.7 The relation between cost and relative index under different normal distributions

参考文献:

[1] 吴玉成.我国城市内涝灾害频发的原因分析[J].城市道桥与防洪,2019(9): 175-177.

[2] 李阳.城市雨水管网系统优化设计研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.

[3] 张桂彬.基于可靠性的城市雨水管网优化设计研究[D].成都:西南交通大学,2009.

[4] 王赫婧.城市雨水管网多目标优化设计研究[D].天津:天津大学,2011.

[5] 崔颖.排水管道设计优化的遗传与模拟退火混合算法研究[D].重庆:重庆大学,2009.

[6] Hadka, D., & Reed, P.Borg: An auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework. Evolutionary Computation, 2013,21(2), 231-259.

[7] Reed, P. M, Hadka, D, Herman, J. D, et al. Evolutionary multiobjective optimization in water resources: The past, present, and future [J]. Advances in Water Resources, 2013,51, 438-456.

[8] Wang, Q, Guidolin, M, Savic, D, et al. Two-objective design of benchmark problems of a water distribution system via MOEAs: Towards the best-known approximation of the true Pareto front [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014,141(3), 04014060.

[9] Zheng, F, Zecchin, A. C, Maier, H. R, et al. Comparison of the searching behavior of NSGA-II, SAMODE, and Borg MOEAs applied to water distribution system design problems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2016,142(7), 04016017.

[10] Rossman L A. Storm water management model user's manual version 5.0 [M]. USA: United States Environmental Protection Agency, 2010.

[11] Seith N. Mugume, Diego E. Gomez, Guangtao Fu, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems [J]. Water Research, 2015,81:15-26.

[12] Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach [J]. Urban Water, 2000, 2(2): 115-122.

[13] 张朝. 供水管网系统优化调度及耐受度评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.

[14] 刘海星. 给排水管网系统耐受度指标体系的研究与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

近场动力学方法在缝隙腐蚀问题中的应用

刘飞^{1,2}, 刘齐文^{1,2*}, 陈景涛^{1,2}, 刘立胜^{1,2}

(1. 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 工程结构与力学系, 武汉 430070)

摘要:采用基于键的近场动力学方法来模拟研究 304 不锈钢在海水环境中的缝隙腐蚀过程, 用物质点处的浓度来描述该物质点的特性, 引入扩散键来描述物质点间的连接, 以 Nernst-Planck 方程为基础, 推导了对应扩散项微模量, 建立了考虑扩散项的缝隙腐蚀近场动力学模型。利用近场动力学方法研究缝隙腐蚀行为时, 不需要考虑边界处连续性, 可以简化模型。采用 Fortran 语言编程, 模拟计算了缝隙腐蚀问题算例, 并与实验结果、数值模拟结果进行了对比分析, 结果表明: 近场动力学方法与传统数值方法模拟得到的 pH 值分布, 变化趋势基本一致, 且在数值上更接近实验值, 能初步实现对缝隙腐蚀问题的描述, 从而验证了本文建立的近场动力学模型在缝隙腐蚀研究中的可行性, 可为近场动力学方法在缝隙腐蚀问题领域中的应用提供参考。

关键词: 缝隙腐蚀; 近场动力学; 键理论; 数值模拟

中图分类号: TG172.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)03-0096-07

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.018

Application of Peridynamic Method to Analysis of Crevice Corrosion

Liu Fei^{1,2}, Liu Qiwen^{1,2*}, Chen Jingtao^{1,2}, Liu Lisheng^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics,

Wuhan 430070, China; 2. Department of Engineering Structure and Mechanics,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The bond-based peridynamic method is used to simulate the crevice corrosion process of 304 stainless steel in seawater environment. The concentration of the material point is used to describe the characteristics of the material point, and the diffusion bond is introduced to describe the connection between the material points. Based on the Nernst Planck equation, the micromodulus of the corresponding diffusion term is derived, and the peridynamic model of crevice corrosion considering the diffusion term is established. When using the peridynamic method to study the crevice corrosion behavior, it is not necessary to consider the continuity at the boundary, and the model can be simplified. The Fortran language programming is used to simulate and calculate the crevice corrosion problem. The results are compared with the experimental results and the finite element simulation results. The results show that the pH distribution and the change trend of the peridynamic method and the finite element method are basically the same, and the former is numerically closer to the experimental value, the description of the crevice corrosion problem can be initially realized, which indicates that the peridynamic method proposed

收稿日期: 2018-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(批准号 11802214)。

作者简介: 刘飞(1993-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 计算力学与数值仿真, 缝隙腐蚀。

E-mail: liufei20180408@whut.edu.cn。

* 通信作者: 刘齐文, 男, 副教授, 博士, 研究方向: 计算力学及其应用研究。

in the paper is feasible to handle the problem for crevice corrosion and the research provides reference for the application of peridynamic method in the field of crevice corrosion problems.

Keywords: crevice corrosion; peridynamic; bond-based theory; numerical simulation

近年来,随着海洋经济迅速发展,深海油气勘探与采集日益活跃,作为连接海陆的输送通道,海底管道的铺设长度也大幅增加,我国的海底管道铺设总量已经超过 4000 km,正在运行使用的各种海底管道有 138 条之多^[1],然而海水中含盐量高,其中包含的多种自由离子均属于自然界中的强腐蚀性天然电解质^[2],如果存在合适的电极及反应环境,就会形成原电池,给金属及其合金等材料带来严重的电化学腐蚀^[3,4]。在海底管道的管件连接件或焊接接头缺陷处存在狭窄的缝隙,足以使海水渗入,并且在缝内发生强烈的缝隙腐蚀^[5],会影响海底管道的安全运行并造成巨大的经济损失。因此,通过合适的手段,研究海底管道常见金属的缝隙腐蚀行为,对减少缝隙腐蚀造成的经济损失十分有意义。

实验方法研究缝隙腐蚀直观性强,但是周期长,成本高,相比于实验方法,数值模拟方法可以更高效地研究不同因素对缝隙腐蚀的影响,目前,大量学者针对缝隙腐蚀进行了数值模拟研究。Oldfield 和 Sutton^[6]建立了一个临界缝隙溶液理论模型,该模型假设不锈钢缝隙内的没有浓度梯度,并预测了缝隙腐蚀的孵化阶段。刘冬鹏等^[7]采用有限元方法对 304 奥氏体不锈钢在 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中的缝隙腐蚀过程进行了数值模拟,计算得到了在二维稳态条件下缝隙内部的电势场分布和不同的外加电位下的电势场和浓度场。文博^[8]采用 COMSOL 有限元软件对 316 L 不锈钢在循环水中的缝隙腐蚀过程进行了数值模拟与计算,考虑腐蚀过程中的离子扩散和电迁移过程,计算了缝隙内的 pH 和氯离子浓度分布。

在缝隙腐蚀研究工作中,腐蚀边界条件与结果是耦合的,用传统的有限元方法模拟起来十分复杂。Chen 等^[9]建立了点腐蚀的近场动力学模型,用近场动力学有效扩散模型来模拟点腐蚀的损伤发展演变过程,腐蚀边界会自发地移动,从而简化了模型,为研究腐蚀问题提供了一种新的思路。

近场动力学方法于 2000 年由 Silling^[10]提出,经过十几年的发展,已成功运用于裂纹扩展^[11]、热传导^[12]等领域。近场动力学理论对于问题的连续性没有要求。在研究缝隙腐蚀问题时,解决固液扩散问题的传统模型,要考虑边界处连续性。当采用近

场动力学方法研究缝隙腐蚀行为时,腐蚀边界会自发移动,可以简化模型,具有天然的优势。

基于上述研究,本文采用基于键的近场动力学方法来模拟 304 不锈钢在海水环境中的缝隙腐蚀损伤演化,用物质点处的浓度特征来描述该物质点的特性,引入扩散键来描述物质点间的连接,以 Nernst-Planck 方程为基础,推导了对应扩散项的微模量,建立了考虑扩散项的缝隙腐蚀近场动力学模型。采用 Fortran 语言编程,利用该方法计算相应的算例,并与文献中的实验结果进行了对比,从而验证了近场动力学方法在研究缝隙腐蚀问题中的可行性和有效性,促进了近场动力学方法在缝隙腐蚀问题领域的应用研究。

1 缝隙腐蚀的近场动力学模型

1.1 几何模型

缝隙腐蚀模型通常以一个金属间的狭长缝隙作为研究对象,并假设缝隙长度远远大于缝隙的深度和宽度。因此,模型可以简化为如图 1 所示的二维模型。

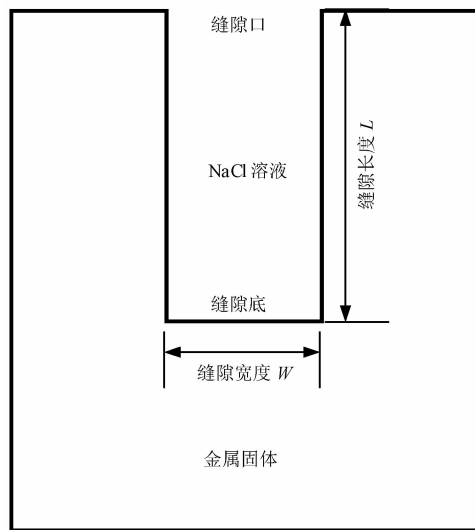


图 1 缝隙腐蚀二维几何模型

Fig.1 Geometry model of crevice corrosion in 2D

1.2 模型假设

为了计算简便,本模型进行了如下假设:

(1) 假设缝隙内溶液静止且处于稳态;

(2)假设缝隙内反应沉淀物不会对离子运输造成障碍;

(3)假设缝隙内的化学反应处于平衡状态;

(4)只考虑金属离子的一次水解过程。

1.3 控制方程

考虑在电势梯度下的电迁移、浓度梯度下的离子扩散和离子对流,根据 Nernst-Planck 方程有:

$$J_i = -K_i \nabla C_i - \frac{n_i F}{RT} K_i C_i \nabla \Phi + u_i C_i \quad (1)$$

式中右边的第一项是扩散项,第二项是电迁移项,第三项为对流项。 J_i 为第 i 种离子的通量, $\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; K_i 为第 i 种离子的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; C_i 为第 i 种离子浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; Φ 为溶液电势, V; u_i 为表示离子对流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; n_i 为第 i 种离子电荷数; F 为法拉第常数, $96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$, T 为绝对温度, 298 K 。

由于在静止溶液中对流速度为零,因此缝隙内的质量通量可以表示为:

$$J_i = -K_i \nabla C_i - \frac{n_i F}{RT} K_i C_i \nabla \Phi \quad (2)$$

1.4 化学反应平衡

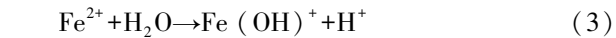
溶液中的反应包括金属离子的水解反应,表 1 给出 304 不锈钢中 3 种主要金属离子的一次水解反应及反应平衡常数。

表 1 离子水解反应及反应平衡常数

Table 1 Ion hydrolysis reaction and equilibrium constant	
化学反应	lg/K
$\text{Cr}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cr}(\text{OH})^{2+} + \text{H}^+$	-3.8
$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{H}^+$	-8.3
$\text{Ni}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})^+ + \text{H}^+$	-9.5

稳态时,缝隙内发生的化学反应达到平衡,平衡状态下的物质浓度是根据一系列平衡关系和物质守恒关系来求解的。

本文是对近场动力学方法在缝隙腐蚀问题的初步探索,做出了一定简化,仅考虑了亚铁离子的水解,对于亚铁离子的水解反应:



用 $C_{\text{Fe}^{2+}}$ 、 $C_{\text{Fe}(\text{OH})^+}$ 、 C_{H^+} 分别表示 3 种离子的浓度,那么反应平衡常数可以表示为:

$$K_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{C_{\text{Fe}(\text{OH})^+} C_{\text{H}^+}}{C_{\text{Fe}^{2+}}} \quad (4)$$

根据平衡方程的系数关系可知 $C_{\text{Fe}(\text{OH})^+} = C_{\text{H}^+}$, 因此氢离子浓度为:

$$C_{\text{H}^+} = \sqrt{K_{\text{Fe}^{2+}} C_{\text{Fe}^{2+}}} \quad (5)$$

进而求出 pH 值为:

$$\text{pH} = -\lg[C_{\text{H}^+}] = -\frac{1}{2} \lg[K_{\text{Fe}^{2+}} C_{\text{Fe}^{2+}}] \quad (6)$$

这样便建立起缝隙内金属离子浓度与氢离子浓度的数值关系,得到缝隙内 pH 值分布。

1.5 近场动力学方程的推导

缝隙腐蚀问题中,金属(固体相)与溶液(液体相)的相互作用进而发生腐蚀,将公式(2)应用于固体相,可以将电势项的影响考虑到由过势决定的有效扩散率 $K(\eta)$ 中;在液体相中,由于扩散系数较大,在质量传递过程中占主导地位,可忽略电势项,扩散率用 K_L 表示。因此,缝隙腐蚀动力学方程可简化为:

$$J_i = \begin{cases} -K(\eta) \nabla C, & \text{固体相} \\ -K_L \nabla C, & \text{液体相} \end{cases} \quad (7)$$

过势与固体扩散率之间的关系式如下:

$$K(\eta) = K_0 \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \quad (8)$$

式中, K_0 为零过势时的扩散系数,通过实验结果校准得到^[9] $K_0 = 6.8 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$; α 为转换系数,范围从 0 到 1; n 为溶解产物所带的电荷量; η 为过电势, $\eta = E - E_e$, 其中 E 是外加电位, E_e 是平衡电位。

在扩散的过程中存在一个饱和浓度^[13] C_{sat} , 当某点金属固体粒子浓度降低到饱和浓度时,说明该处已完全溶解,属于液体粒子,溶液中的金属浓度都不会超过饱和浓度。对于两相材料扩散有如下经典控制方程:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = K(x) \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (9)$$

$$K(x) = \begin{cases} K(\eta), & C(x) > C_{\text{sat}} \\ K_L, & C(x) \leq C_{\text{sat}} \end{cases} \quad (10)$$

公式(9)常用于建模模拟溶液中的扩散,但是需要考虑交界面的通量连续性。公式(10)表示当物质点的浓度大于饱和浓度时,该物质点属于固体物质点,相应的扩散率为固体扩散率,当物质点浓度不超过饱和浓度时,说明该物质点属于液体物质点,相应的扩散率为液体扩散率。也就是说,在近场动力学方法中,一旦固体物质点处的浓度降到饱和浓度时,该点处的扩散率就从固体扩散率转变为液体扩散率,这样也就实现了交界面的自发移动。

本文基于近场动力学键理论思想^[14],构建了缝隙腐蚀的二维近场动力学模型,如图 2 所示。在一个空间域 Ω 中, H_x 是物质点 x 的邻域范围,邻域半

径为 δ , 物质点 x 的特性用该处的物质点浓度 $C(x, t)$ 描述, 在近场范围中的任意其他物质点 x' 通过扩散键与物质点 x 相互作用, 通过扩散键, 离子从浓度高的物质点处向浓度低的物质点处扩散, 有效微扩散系数用 $k(x, x')$ 表示。

类似于 Bobaru^[15] 对二维情况热传导的研究, 可以由传统的扩散方程得到如下的金属浓度变化公式:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \int_{H_x} J(x', x, t) dA_{x'} \quad (11)$$

上式中 $J(x', x, t)$ 为微扩散通量, $A_{x'}$ 为物质点 x 邻域范围内物质点 x' 所占的面积。

微通量与微扩散系数的关系表示如下:

$$J^{peri}(x', x, t) = \begin{cases} k(x, x') \frac{C(x', t) - C(x, t)}{|x' - x|}, & |x' - x| \leq \delta \\ 0, & |x' - x| > \delta \end{cases} \quad (12)$$

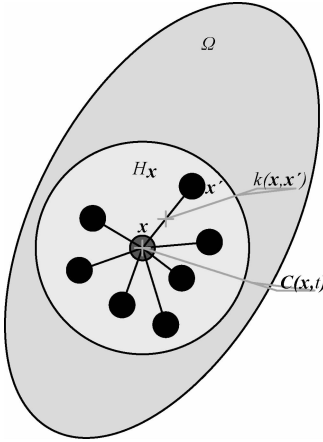


图2 二维近场动力学模型

Fig.2 Peridynamic model in 2D

类比二维情况热传导近场动力学方程的建立过程^[15], 假设浓度分布函数是如下形式: $C(x, y, t) = ax + b$ 式中 a, b 均为常数, 为了找到扩散系数 $K(x)$ 与微扩散系数 $k(x, x')$ 的关系, 令通过某一表面的近场动力学扩散通量与传统方法的扩散通量相等, 有:

$$\begin{aligned} J_i &= K(x) \nabla C = K(x) \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} = K(x) a \\ &= J^{peri}(x', x, t) \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\delta k(x, x') \frac{C(x', t) - C(x, t)}{x' - x} \cos^2 \varphi r dr d\varphi \\ &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\delta a k(x, x') \cos^2 \varphi r dr d\varphi = k(x, x') a \pi \delta^2 / 4 \end{aligned} \quad (13)$$

可求得二维情况下, 微扩散系数 $k(x, x')$ 为:

$$k(x, x') = \frac{4 K(x)}{\pi \delta^2} \quad (14)$$

当键两端的粒子所处的区域发生变化时, 扩散系数 $K(x)$ 的取值也相应的改变为

$$K(x) = \begin{cases} K(\eta), & C(x) > C_{sat} \text{ 且 } C(x') > C_{sat} \\ K_L, & C(x) < C_{sat} \text{ 且 } C(x') < C_{sat} \\ \frac{2 K(\eta) K_L}{K(\eta) + K_L}, & C(x) \geq C_{sat} \geq C(x') \\ K(\eta) + K_L, & \text{或 } C(x') \geq C_{sat} \geq C(x) \end{cases} \quad (15)$$

当扩散键两端的物质点 x 和 x' 处的浓度都大于饱和浓度时, 扩散系数 $K(x) = K(\eta)$; 当扩散键两端的物质点 x 和 x' 处的浓度都小于饱和浓度时, 扩散系数 $K(x) = K_L$; 当扩散键一端的物质点的浓度小于饱和浓度 (物质点在液体中), 另一端的物质点的浓度大于饱和浓度 (物质点在固体中) 时, 可以近似取其扩散系数为固体扩散系数和液体扩散系数的调和扩散系数。

1.6 边界条件

模型的边界条件包括: 阳极, 阴极金属表面边界, 主体溶液边界。

金属阳极反应边界上, 第 i 种金属离子的浓度通量与电流的关系为:

$$N_i \cdot n = \frac{M_i z_i}{\sum_j M_j z_j} \left(\frac{i_{M_i}}{z_i F} \right) \quad (16)$$

式中 M_i 表示第 i 种金属; z_i 为相应的金属离子所带的电荷数; i_{M_i} 表示第 i 种离子发生电极反应时产生的电流。

阴极反应边界 (以氢离子消耗反应为例) 上, 氢离子的浓度通量表示为:

$$N_{H^+} \cdot n = - \frac{i_{H^+}}{F} \quad (17)$$

对于主体溶液边界, 浓度均为定值, 即:

$$C = \text{constant} \quad (18)$$

2 缝隙腐蚀问题的计算流程

2.1 空间离散与时间积分

采用统一的粒子间距 Δx 对缝隙腐蚀几何模型进行离散, 如图3所示。

于是, 物质点 x_i 处缝隙腐蚀近场动力学方程空间离散格式为:

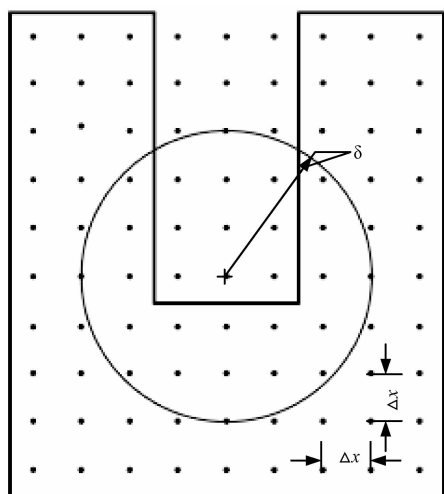


图3 缝隙腐蚀的离散模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of discrete model of crevice corrosion

$$\frac{\partial C(x_i, t)}{\partial t} = \sum_p k(x_i, x_p) \frac{C(x_p, t) - C(x_i, t)}{(x_p - x_i)^2} A_{ip} \quad (19)$$

公式(19)中的求和是对物质点 x_i 邻域范围内的所有物质点 x_p 遍历求和, A_{ip} 代表物质点 x_p 占据物质点 x_i 邻域范围的面积。

需要对物质点 x_i 的邻域范围内的物质点 x_p 的面积进行适当的修正, 一种简单的修正方法是考虑物质点 x_i 和 x_p 之间的相对距离, 对面积修正因子 $factor$ 的格式^[15] 如下:

(1) 计算物质点 x_i 与物质点 x_p 之间的相对距离 ξ_{ip} ;

(2) 如果 $\xi_{ip} < \delta - \frac{\Delta x}{2}$, 修正因子 $factor = 1$;

(3) 如果 $\delta - \frac{\Delta x}{2} \leq \xi_{ip} \leq \delta + \frac{\Delta x}{2}$, 修正因子 $factor = (\delta + \Delta x/2 - \xi_{ip})/\Delta x$;

(4) 如果 $\xi_{ip} > \delta + \frac{\Delta x}{2}$, 修正因子 $factor = 0$;

(5) 面积 $A_{ip} = factor * (\Delta x)^2$ 。

对公式(19)采用向前差分格式变换, 可得,

$$\frac{C(x_i, t + \Delta t) - C(x_i, t)}{\Delta t} = \sum_p k(x_i, x_p) \frac{C(x_p, t) - C(x_i, t)}{(x_p - x_i)^2} A_{ip} \quad (20)$$

整理可得:

$$C(x_i, t + \Delta t) = \Delta t \sum_p k(x_i, x_p) \frac{C(x_p, t) - C(x_i, t)}{(x_p - x_i)^2} A_{ip} + C(x_i, t) \quad (21)$$

其中, Δt 表示时间步长, 将写成下式

$$C_i^{n+1} = \Delta t \sum_p k(x_i, x_p) \frac{C_p^n - C_i^n}{(x_p - x_i)^2} A_{ip} + C_i^n \quad (22)$$

式中 n 代表第 n 个时间步长, 对于某粒子 i , 假设其邻域内某一粒子为 p , 根据式, 可计算得到粒子当前时刻的浓度, 进而计算出下一个时刻的浓度, 完成粒子浓度分布状态的更新。

2.2 计算流程

根据上述推导出的缝隙腐蚀的近场动力学方程的离散格式, 可根据当前时刻的浓度分布计算出下一时刻的浓度分布, 对粒子浓度进行更新, 根据 1.4 节内容, 通过浓度值计算出相应的 pH 值。缝隙腐蚀问题的计算流程见图 4。

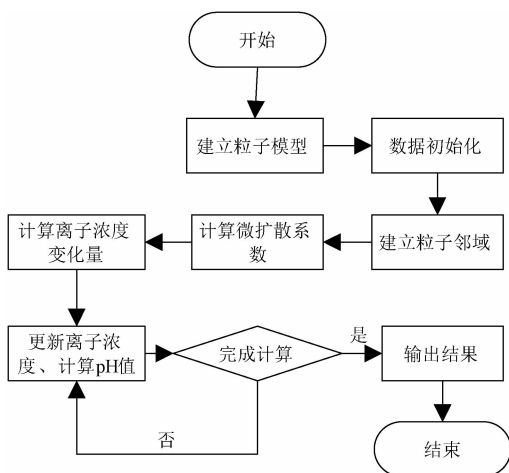


图4 缝隙腐蚀问题的计算流程图

Fig.4 Flow chart of crevice corrosion

3 算例验证与分析

3.1 缝隙腐蚀问题的计算模型

本文模拟了 304 不锈钢在 0.6 mol/L NaCl 中的缝隙腐蚀情况, 模型的尺寸和边界条件见图 5。

模型尺寸为缝隙宽度 $W = 9 \times 10^{-5}$ m, 缝隙长度 $L = 8 \times 10^{-2}$ m, 与 Alavi 和 Cottis^[16] 的实验采用的模型尺寸对应。整个缝隙中充满 0.6 mol/L NaCl 溶液, 缝隙两边的固体均为 304 不锈钢, 且可溶。在初始时刻, 固体区域内物质点浓度为金属固体浓度^[13] 即 $C(0, t)_s = 143000$ mol/m³, 液体区域内物质点浓度

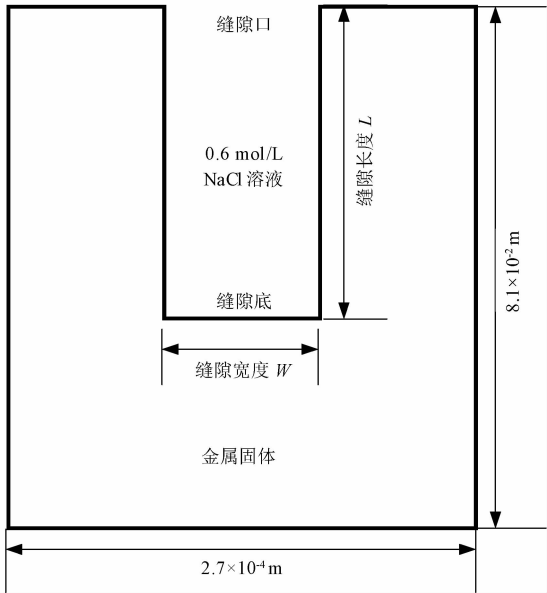


图 5 模型尺寸和边界条件

Fig.5 Geometry and boundary conditions of model

为零,即 $C(0,t)_l = 0$, 缝内金属离子饱和浓度为 $C_{sat} = 5100 \text{ mol/m}^3$, 固体扩散系数取 $K(\eta) = 4 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, 液体扩散系数^[17]取 $K_L = 8.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 粒子间距 $\Delta x = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$, 邻域半径为 $\delta = 3\Delta x$, 计算域离散成 218700 个粒子, 计算时间步长取 1 s, 计算时间步为 324000 步。计算模拟采用 Fortran 语言编程实现。

3.2 数值计算结果

本文利用近场动力学方法模拟得到 90 h 时缝内的离子浓度分布和 pH 分布, 缝隙两边金属粒子浓度最小值为 138986 mol/m^3 , 大于固液粒子转换的临界浓度 C_{sat} , 因此, 判断缝隙两边金属尚未被腐蚀掉。将 pH 分布结果与 Alavi 和 Cottis 的实验结果, 以及 Sharland^[18] 的数值模拟结果进行对比, 详情见图 6。

由图 6 可见, 本文提出的近场动力学方法可在相同的初始条件, 边界条件下初步计算缝内的 pH 值, 与文献中的 pH 分布具有相同的变化趋势, 且在数值上更接近实验值, 从而验证了模型的准确性。

计算结果表明, 缝隙内 pH 值随深度增加而逐渐降低, 缝隙底 pH 值达到最低, 约为 2.1。

图 7 给出了距离整个缝隙内的 pH 值随时间的演化过程, 从上至下, 依次是 1、5、10、30、50、70、90 h 时的 pH 值分布。可以看出, 随时间增长, 缝内 pH 值持续减小, 在腐蚀初期, 缝隙内 pH 值下降速度较快, 在腐蚀后期, pH 值下降速度较慢。这可能是因

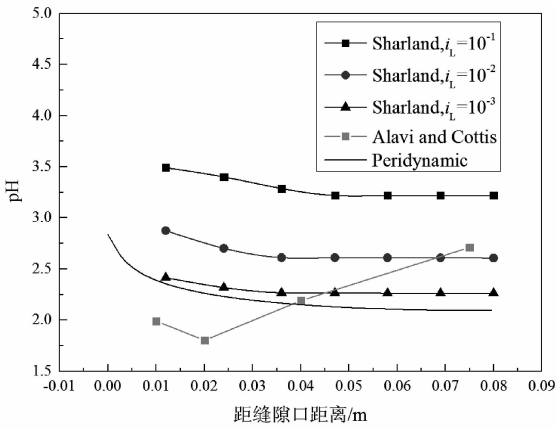


图 6 缝内 pH 分布对比图

Fig.6 pH vs. literature and experiments

为, 在腐蚀初期, 缝内外粒子浓度差较大, 缝内粒子 (携带金属离子浓度信息) 浓度增长较快, pH 值也相应地以较快速度下降; 在腐蚀后期, 缝内外粒子浓度差减小, 缝内粒子 (携带金属离子浓度信息) 浓度增长较慢, pH 值也相应地以较慢速度下降。

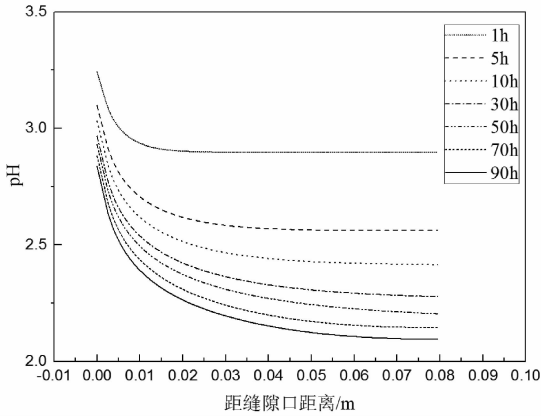


图 7 缝内 pH 值分布随时间的演化过程

Fig.7 The variation of pH along the crevice with time

4 结论与展望

本文推导了二维情况下缝隙腐蚀的近场动力学公式, 对给定条件下的缝隙腐蚀问题算例进行了数值模拟分析, 得到如下主要结论:

(1) 以 Nernst-Planck 方程为基础, 利用通过固定面扩散通量相等的关系, 推导了对应扩散项的微模量, 建立了考虑扩散项的缝隙腐蚀近场动力学模型。

(2) 相比于传统的数值方法, 本文采用的近场动力学方法不需要考虑边界处连续性, 可以简化模型。采用 Fortran 语言编程, 模拟计算了缝隙腐蚀问

题算例,并与实验结果、数值模拟结果进行了对比分析,结果表明:本文建立的近场动力学模型与传统数值方法模拟得到的 pH 值分布,变化趋势基本一致,且在数值上更接近实验值,能初步实现对缝隙腐蚀问题的描述,从而验证了本文建立的近场动力学模型在缝隙腐蚀研究中的可行性,对近场动力学方法在缝隙腐蚀方面的应用和探究做出了一定贡献。本文主要研究了缝隙内的阳极反应,在后续研究中可同时考虑阳极反应和阴极反应,对缝隙腐蚀进行更全面的分析,还可考虑引入损伤指标,研究缝内的腐蚀形貌,分析出腐蚀最严重的区域,从而为实际工程中管道防腐蚀设计提供参考。

参考文献:

- [1] 马平. 海底天然气管道腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2012, 26(8): 1-4.
- [2] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 曾荣昌, 韩恩厚. 材料的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 李海洪, 赵永韬, 王洪仁, 等. 海洋环境中渗锌层和锌铬涂层的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 14-16.
- [5] 史洪微, 刘福春, 王震宇, 等. 海洋防腐涂料的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(1): 43-46.
- [6] Oldfield J W, Sutton W H. Crevice Corrosion of Stainless Steels: I. A Mathematical Model[J]. British Corrosion Journal, 1978, 13(1): 13-22.
- [7] 刘冬鹏, 王亚飞, 程光旭, 等. 奥氏体不锈钢缝隙腐蚀的数值模拟研究[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(s2): 72-76.
- [8] 文博. 循环水中不锈钢缝隙腐蚀数值模拟研究[J]. 广州化工, 2016, 44(3): 95-97.
- [9] Chen Z, Bobaru F. Peridynamic modeling of pitting corrosion damage [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2015, 78: 352-381.
- [10] Silling S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2000, 48(1): 175-209.
- [11] Ha Y, Bobaru F. Characteristics of dynamic brittle fracture captured with peridynamics [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(6): 1156-1168.
- [12] Bobaru F, Duangpanya M. The peridynamic formulation for transient heat conduction[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2010, 53(19): 4047-4059.
- [13] Scheiner S, Hellmich C. Finite Volume model for diffusion- and activation-controlled pitting corrosion of stainless steel [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2009, 198(37 - 40): 2898-2910.
- [14] Silling S A, Askari E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics[J]. Computers & Structures, 2005, 83(17 - 18): 1526-1535.
- [15] Bobaru F, Duangpanya M. A peridynamic formulation for transient heat conduction in bodies with evolving discontinuities[J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(7): 2764-2785.
- [16] Alavi A, Cottis R. The determination of pH, potential and chloride concentration in corroding crevices on 304 stainless steel and 7475 aluminium alloy[J]. Corrosion science, 1987, 27(5): 443-451.
- [17] Scheiner S, Hellmich C. Stable pitting corrosion of stainless steel as diffusion-controlled dissolution process with a sharp moving electrode boundary[J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 319-346.
- [18] Sharland S M. A mathematical model of the initiation of crevice corrosion in metals [J]. Corrosion Science, 1992, 33(2): 183-201.

杭州软土地质条件下基坑开挖对邻近隧道影响分析

许建锋,王金昌,边 驰,赫 平
(浙江大学 建筑工程学院,杭州 310058)

摘 要:目前杭州地铁总线网规划已有 13 条,总长 562 km。随着杭州各类基坑工程的发展,如何保护地铁隧道显得更为紧迫。本文在研究杭州地区十几个近邻隧道的基坑工程案例中,分析了各因素的影响效果,包括相对距离、开挖深度、基坑开挖空间时间效应、土体加固和施工条件等影响,将各类影响因素划分为可变因素和非可变因素,可以得出具体的影响规律。研究得出以下结论:基坑开挖过程中影响邻近隧道位移,过程中水平位移相较竖直位移往往更大;隧道与基坑的水平距离与隧道的变形呈现幂函数关系,而两者高差却无明显规律,且杭州地区下基坑开挖的影响范围明显大于其他地区;基坑开挖深度作为影响隧道位移的重要因素,在初期成明显正比关系,后期曲线逐渐平缓,基坑深度较大时隧道位移则出现较大波动性。综合各类影响因素分析,可以帮助我们规范控制标准,并采取相关的控制措施,切实有效保护基坑周边隧道的正常通行。

关键词:邻近地铁隧道;基坑开挖;杭州软土;统计分析

中图分类号:U45 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0103-06
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.019

Analysis of Foundation Pit Excavation' S Influence Towards Adjacent Tunnels Under Soft Soil Geological Conditions in Hangzhou

Xu Jianfeng, Wang Fujian, Bian Chi, He Ping
(Architectural Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract:At present, there are 13 metro lines in Hangzhou with a total length of 562 km. With the development of various foundation pit projects in Hangzhou, how to protect the subway tunnel becomes more urgent. In this paper, the effects of various factors, including relative distance, excavation depth, space-time effect of foundation pit excavation, soil reinforcement and construction conditions, are analyzed in more than a dozen cases of foundation pit projects in Hangzhou area. Various factors are divided into variable factors and non-variable factors, and the specific influence rules can be obtained. The following conclusions are drawn: during the excavation of foundation pit, the displacement of adjacent tunnels is affected, and the horizontal displacement is larger than the vertical displacement; the horizontal distance between the tunnel and the foundation pit is a power function relationship with the deformation of the tunnel, but the height difference between the two is not obvious, and the influence range of the excavation of the foundation pit in Hangzhou area is obviously larger than that in other areas; the excavation depth of the foundation pit is the position of the tunnel. The important factors of displacement are obviously proportional in the initial stage, and the curve is gradually smooth in the later stage. When the depth of foundation pit is large, the displacement of tunnel will fluctuate greatly. Comprehensive analysis of various influencing factors can help us standardize control standards and take

relevant control measures to effectively protect the normal passage of tunnels around foundation pits.

Keywords: adjacent metro tunnel; foundation pit excavation; Hangzhou soft soil; statistical analysis

自中国步入 21 世纪以来,城市化进程愈发加快。地铁线路成为地产开发的热点地块,保护标准也逐步提上日程。《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T202-2013)^[1]规定:地铁结构最终绝对位移不得超过 20 mm,变形的曲率半径应不小于 15000 m,相对弯曲不该大于 1/25000。而基坑开挖将破坏土层维持的应力平衡,使地铁隧道结构承受额外内力和额外变形。同时也可能会造成隧道结构破坏、地下水渗漏等问题。因此,有必要通过相关手段把握影响规律,为相似案例作参考。

杭州属于第四纪地层,其中大部分土层多以粉土、粉质粘土、粘土和淤泥质粘土为主。从分布范围来看,性质较好的粉土、粉质粘土层多分布于城西及城西北广大平原地带,而中偏高压性土诸如粘土、粉质粘土层多分布于翠苑、朝晖、武林等广大地区。全市皆有淤泥质粘土、粉质粘土层分布,该层土体性质较差,应额外基于关注。杭州的地下空间发展在近几年得到了飞速发展,各综合体之间将会有不同性质的区块联系,这也导致大量基坑工程的兴起,对邻近地铁隧道结构产生了较大影响。

邻近隧道的基坑工程本身具有极高的复杂性,目前也尚无理论能同时考虑包括土层地质、降水方式、基坑与隧道相对位置、时空效应、支护方法以及坑内外土体加固方法等因素的具体影响。而软土地区土质具有灵敏度高、含水量高、压缩性高、等特点,在基坑设计和施工时的考虑将更为复杂。本文首先

介绍了杭州地下空间的发展情况和地质情况,指出地下工程发展必须注意保护邻近地铁隧道的要求,在此基础上,本文通过收集杭州软土地区十几个邻近地铁隧道的基坑实例,通过整理监测数据,将其中可变因素分类统计分析,总结基坑开挖对邻近既有地铁隧道位移和变形影响的普遍规律,同时,对于非可变因素而言,本章通过查阅相关文献,也得出相关因素的定性规律。所得到的研究成果可以作为杭州软土地区类似工程的借鉴和参考。

1 工程实测原型案例统计分析

基坑开挖所产生的附加应力和附加变形是一种极其复杂的现象。本文通过收集近十几个杭州软土案例从中分析共同点,同时根据过往学者的研究结果分析影响因素,研究案例如表 1 所示。

本文通过整理杭州软土区域十几个实践开挖建设案例,总结实测数据后对该类工程中隧道变形规律与范围进行了论证与归纳,由归纳结果可知,水平位移方面,隧道位移分布范围从 1.7 mm 到 18 mm 范围不等,其中 1~7 mm 测点数 3 个,7~13 mm 测点数 8 个,13~18 mm 的测点数则有 2 个。由此可见,工程实际案例中的隧道位移多集中于 7~13 mm 附近,该区段隧道水平位移值普遍低于预警值,这得益于良好的工程维护体系、施工方案和监测预警系统。此外,所有测点值均指向基坑,分析原因可知为

表 1 邻近隧道的基坑工程实例

Table 1 Examples of foundation pit projects adjacent to tunnels

编号	工程名称	基坑 挖深/m	隧道与基坑水 平距离/m	隧道与基坑高差 (隧道在上为正)/m	隧道最大水 平位移/mm	隧道最大竖 直位移/mm
1	杭州下沙经济 开发区某基坑 ^[2]	11.4	11	2	6.5	4.5
2	杭政储出 86 地块某基坑 ^[3]	15.8	4.5	6.7	18	12
3	杭州市萧山区某基坑 ^[4]	15.8	9.5	4.6	11.7	10.5
4	杭州市江干区某房建地下室深基坑工程 ^[5]	5.7	24	-5.2	1.7	3.1
5	杭州某项目基坑 ^[6]	8.4	6.5	2	7.1	4.9
6	杭州市萧山区中心某基坑工程 ^[7]	15.5	11	1.4	9.6	8.7
7	杭州某深基坑工程 ^[8]	16.1	15.4	5.1	7.1	6.9
8	杭州某深基坑工程 ^[9]	11.8	11	-2.3	7	6.9
9	杭州某深基坑工程 ^[10]	17.3	6.4	8.3	15	13
10	杭州某深基坑工程 ^[11]	10.3	9.8	-7.25	9.4	4.1
11	某工程位于杭州下沙经济技术开发区 ^[12]	16.8	9.3	7.7	9.9	7.8
12	杭州某深基坑工程 ^[16]	15	10	6.1	9.1	7.1
13	杭州市临平理想银泰城三期基坑工程 ^[22]	15	9.2	6.2	7.9	6.2

基坑开挖卸荷,位移指向坑底所致。而竖直位移方面,1~7 mm 测点数有 7 个,7~13 mm 的测点有 6 个,没有 13 mm 以上测点。这表明,隧道的竖直位移的影响相对水平位移而言较小,且分布较为平均,在较低的范围内处于波动状态。这也表明隧道的沉降状况较为复杂且随机性较大。

综合各工程案例的实际情况来看,影响邻近隧道结构位移的影响因素主要有两类,一类包括隧道与基坑的相对距离与相对高差、基坑的开挖深度等定量影响因素,这些影响因素在施工过程中是确定下来的,不会随着施工的进行而改变,这里统称为非可变影响因素。而另一类影响因素包括时空效应、施工措施等定性影响因素,可以随着施工的措施而不断调整,这里统称为可变影响因素。本文将针对这两类影响因素进行总结,展开分析影响规律。

关于基坑开挖对邻近隧道的影响分析,许多学者也进行过类似的分析,刘方梅^[3]收集了长三角地带 28 个工程实测数据,并进行了统计分析。对比其分析结果可知,杭州软土邻近隧道的基坑工程案例,其 7~13 mm 分段较高,高于 0~4 mm 分段。这说明,杭州地区软土存在其特殊性的一面。杭州软土具有天然含水量高,压缩性高和承载力低等工程性质。在某些方面,也是导致了隧道位移与一般案例差异化的原因。

2 非可变影响因素分析

2.1 基坑与隧道距离对隧道位移的影响

图 1 和图 2 为统计的基坑与隧道水平距离对隧道水平位移和竖直位移的关系图。隧道水平位移指向坑外为正,竖直位移向上为正。由于所选案例皆为杭州典型的软土案例,土体的物理学及工程性质都较为接近,故而可以一起进行统计分析。

由图 1 可知,基坑与隧道之间水平距离增加后,隧道的最大水平位移会减小,且呈幂指数型减小。而仔细研究其分布趋势可知,这种衰减的趋势是可以

$$y = 29.47x^{0.887}$$

用幂函数进行拟合的,拟合公式为
其中, y 表示隧道最大水平位移,单位 mm, x 表示隧道与基坑水平距离,单位 m。公式拟合度 $R^2 = 0.807$, 拟合效果较好。其中仔细研究规律发现,当水平距离在 10 m 以内时,隧道的水平位移基本高于 10 mm;而当水平距离在 10~20 m 以内时,隧道的水平位移基本集中于 5~10 mm 之内。而当水平距离

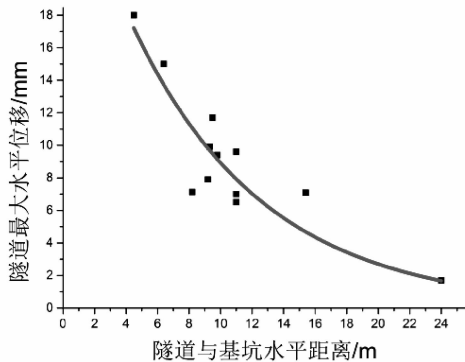


图 1 隧道与基坑水平距离对隧道水平位移的影响

Fig.1 Effect of horizontal distance between tunnel and foundation pit towards horizontal displacement of tunnel

大于 20 m 时,隧道的水平位移已然很小,已逐渐远离基坑开挖的影响区了。由此可知,在杭州地区软土地质条件下,基坑开挖 10 m 以内地区的隧道位移较严重,需要尤其格外地引起重视。

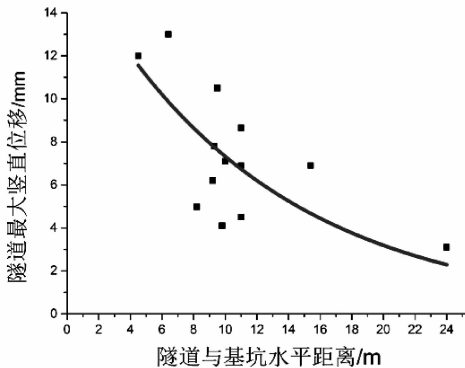


图 2 隧道与基坑水平距离对隧道竖直位移的影响

Fig.2 Effect of horizontal distance between tunnel and foundation pit towards vertical displacement of tunnel

同样的方法对隧道的竖直位移进行分析,由图 2 可知,隧道的竖直位移同样随隧道与基坑的水平距离呈现幂指数衰减的趋势,拟合公式为:

$$y = 16.81x^{0.921}$$

其中 y 表示隧道最大竖直位移,单位 mm, x 表示隧道与基坑水平距离,单位 m。公式拟合度 $R^2 = 0.563$, 这表明相对水平位移而言竖直位移的波动性较大,但仍旧具备相关规律。与水平位移不同的是,竖直位移在幂指数曲线上波动较大,可见其变化较为复杂,随机性较大。当然,隧道的整体竖直位移都相对水平位移偏小,可见多数情况在同距离条件下,邻近基坑的隧道位移,水平位移比竖直位移更要引起重视。

2.2 基坑与隧道高差对隧道位移的影响

由图 3、4 可知,隧道顶部与基坑底部之间的相对高差对隧道的水平和竖直没有较为明显的影响,整体的曲线是相对离散。结合相关理论知识可知,土体内部的应力变化是极其复杂的,应力释放进而影响隧道位移的过程是多种因素共同作用的结果,而隧道与基坑的水平距离直接影响到应力的影响区域,故而影响规律较明显。而竖向距离则没有那么明显的特征。

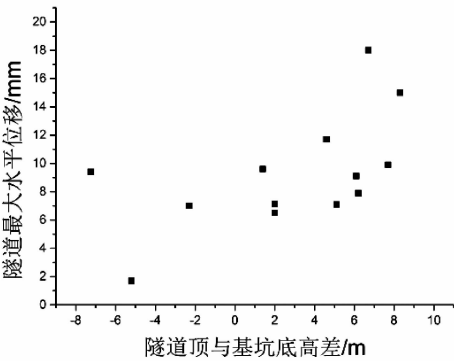


图 3 隧道与基坑的高差对隧道水平位移的影响

Fig.3 Effect of vertical distance between tunnel and foundation pit towards horizontal displacement of tunnel

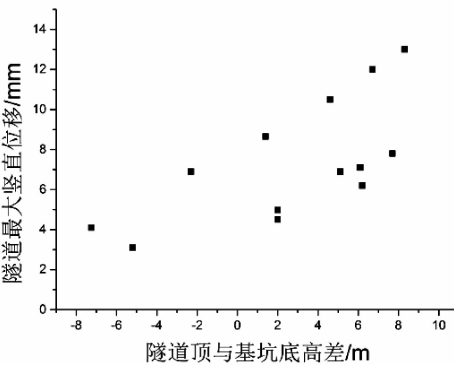


图 4 隧道与基坑的高差对隧道沉降的影响

Fig.4 Effect of vertical distance between tunnel and foundation pit towards vertical displacement of tunnel

2.3 基坑开挖深度对隧道位移的影响

基于上述关于水平位移和竖直位移的对比分析,可以发现隧道的水平位移比竖直位移更敏感,更应获得更多的关注。故此,开挖深度的影响因素是仅针对水平位移进行分析。基坑开挖深度一直以来是影响周边环境的关键因素,但关于不同深度情况下的倾向规律以及不同深度情况下受支护结构影响的规律一直不明。图 5 给出了杭州地区软土情况下,不同深度情况的工程案例,基坑开挖深度与其邻

近地铁隧道的最大水平位移之间的关系曲线图。由图可知,数据存在一定的离散型,但仍然具备相应的规律。开挖深度在 10 m 以内时,隧道最大水平位移较小,且在 10 mm 以内呈现出一定的正比趋势,当开挖深度在 10~15 m 内时,隧道的位移基本在 10 mm 以内波动,此时大致处于平衡状态,推测原因应当为支护体系强度最大值,此时开挖卸荷量和围护结构之间处于相对稳定的状态。而当开挖深度大于 15 m 时,隧道的位移波动性很大,此时基坑工程开挖深度较大,而是否采取良好的防护措施是控制隧道位移的关键,因此之后的波动性和差异性会较大。综合来看,前半部分的正比趋势说明,基坑开挖深度对于隧道的位移具有着很强的正相关影响。但后半部分也说明支护结构的取值也对邻近隧道的位移产生了相关的控制影响。由此可见,掌握好基坑开挖深度和支护结构细部取值的影响规律,对于邻近隧道的基坑支护设计具有重要的意义。

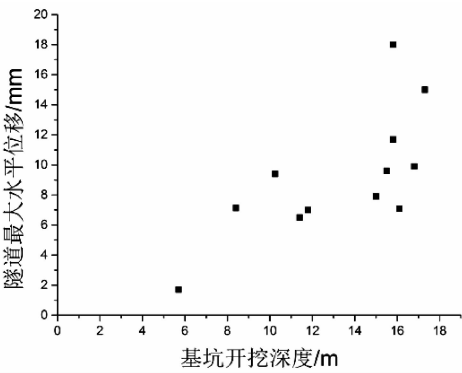


图 5 基坑开挖深度对隧道水平位移的影响

Fig.5 Effect of excavation depth of foundation pit on horizontal displacement of tunnel

3 可变影响因素分析

3.1 时间空间效应对隧道位移的影响

基坑时空效应多指在基坑开挖过程中工程基坑的大小尺寸与耗时,施工次序与空间布局在隧道位移上的联系与影响。合理考虑时空效应的影响规律,采用盆式开挖的方式,先对基坑中部和保护性要求较低的土体进行开挖,开挖分层,施工平衡并及时形成支撑,是当今此类工程之共识。整个过程严格控制时间并实时监控基坑和邻近隧道的变形和稳定性变化。同时预留邻近地铁隧侧土体的宽度,在最后再开挖该部分土体,对周边环境和隧道进行保护。

有关基坑开挖时空效应的研究,柳晔^[13],贾夫

子^[14]孙廉威^[16]等学者都做过类似的分析,其中庞晋^[17]通过二维数值计算分析了基坑在是否进行有效分区开挖情况下其邻近隧道相关位移规律,研究表明对基坑进行有效分区,合理把握开挖顺序对于控制基坑和隧道的变形具有显著的影响。王立峰^[15]通过实测近邻地铁隧道基坑工程开挖案例的监测数据,分析了不同施工步下隧道位移的变化情况,由于施工案例前后期施工措施变化很大,也能间接反映依据时空效应施工能有效控制基坑开挖的位移场分布,减小邻近隧道的位移变化。

3.2 坑内土层加固对隧道位移的影响

当在相应地质条件下,因为基坑周边环境或相关施工因素所导致基坑支护体系性价比不高,无法达到相关变形要求时,则可以考虑采取土层加固的方式来降低位移影响。土体加固按区域不同可分为对坑内和坑外,其主要是通过提高围护结构被动区抗力或者减少主动区压力的方法来控制附加应力的增加,进而控制位移的。

有关土体加固方案效果的研究,依据加固土体模量和加固范围以及相应的工程环境不同而各有所异。相关学者诸如邵凯平^[18],梁克鹏^[19],徐建勇^[20]等都进行过相关的研究,其中胡琦^[21]通过采取不同方案对比坑内土体加固的影响,其加固方案分别采取了不加固、坑边加固和抽条加固的方案,结果表明加固方案有效地控制了基坑围护结构的位移和邻近隧道的位移。而宋海滨^[22]则通过分析加固区和非加固区基坑开挖变形和隧道变形的不同来分析土体加固的影响,从实际效果来看,加固区的位移变化明显小于非加固区,这主要是因为加固区的土体刚度较大,有效限制了土体的侧移倾向,进而阻断了土体的位移传递所致。

3.3 基坑降水开挖对隧道位移的影响

软土地区地下水位通常较高,地下水位对土层位移影响往往较为明显,进而影响邻近隧道位移。有效原理告诉我们,当地下水位下降时,土体的有效应力会增加,从而会限制土体的位移,进而影响周边隧道结构的位移。其中,袁静^[23]高健^[24]通过分析实际案例中承压水开关前后的位移变化来推断降水措施的影响,而汪小兵^[25]则通过模拟不同的降排水方案研究隧道的位移变化进行分析,这些降排水方案的实际效果很好,有效减少了基坑和邻近隧道的位移,这也更能说明合理的降排水方案可以巩固基坑及其周边环境,并使邻近隧道的位移得到了明显的改善。

3.4 新型支护技术的影响

主要包括自适应支撑系统、逆作法施工和基坑地铁信息化监测等技术。自适应支撑系统结合计算机信息处理技术、现代自动化控制技术以及可视化监控系统等高新技术,对围护结构支撑轴力进行全时段不间断监测,并根据高精度传感器所测值对支撑轴力进行适时的补偿调整,以达到控制基坑变形的目的。汪小兵^[25]通过采用相应方案,结果表明其可以有效帮助控制变形。

逆作法施工主要分为全逆作法施工和半逆作法施工,其主要的优势在于可节约施工空间,并减少周边土体的位移,可以使围护结构和邻近隧道的位移都较传统方法有了有效的控制。

信息化监测技术在目前看来已经得到普遍应用。深基坑邻近地铁隧道施工时,则更有必要对地铁隧道进行较为密切的变形监测。基坑自身的监测项目主要包括:围护结构的水平侧移、土体的测斜的水平位移、立柱沉降、支撑轴力、坑外潜水和承压水水位变化等。而基坑开挖影响范围内的隧道监测项目包括:隧道的水平位移、隧道的竖向位移、管片的收敛变形、轨道的差异沉降、裂缝观测等。对于风险性高、重要性大的基坑施工,必须布设自动化监测设备,以便实时监控隧道变形情况。

4 结论

通过收集杭州地区十几个工程案例和查阅相关工程案例文献,分析了杭州软土地质条件下邻近基坑工程隧道变形的影响因素,得到结论如下:

(1)近邻地铁隧道的基坑开挖,其位移场和内力场的变化受多种因素的影响,但总体来看,可分为可变因素和非可变因素两类影响。其中,可变因素的影响特征往往呈现出一定的规律性,而非可变因素影响规律只能定性地进行相关的表达。

(2)从案例统计分析来看,隧道的水平位移往往大于竖直位移,其影响范围往往也大于竖直位移,应当对隧道的水平位移给予更多的重视。

(3)在杭州地质条件下,隧道与基坑的水平距离与隧道的变形往往呈现幂函数的关系。水平距离在10 m之内时,隧道位移影响效果明显,隧道最大水平变形在10 mm以上,此范围将被界定为重度影响区;当水平间距在10~20 m时,研究发现隧道最大水平位移多存在于5~10 mm以内,可界定为中度影响区;而当水平间距在20 m以外时,隧道水平位

移呈现很小趋势,大致坐落于在5 mm以下,可界定此范围为轻度影响区。同理,隧道的竖直位移也遵循同样的规律。分析结果对于基坑开挖工程附近邻近隧道的变形控制具有很大的意义。

(4)基坑开挖的深度范围往往对于周边环境也会有很大的影响,相关的工程案例往往也表现出一定的特征性。综合来看,基坑开挖深度在10 m以内时,隧道位移大致与开挖深度成正比趋势。但当基坑开挖深度大于15 m以后,隧道的位移差异性很大,这表明是否采取有效措施以及工程的现场环境在基坑开挖深度很大时对邻近隧道的位移影响很敏感。由此可见,对于深基坑而言,对于邻近隧道的位移控制应投入更多的精力。

(5)实际案例分析发现,隧道与基坑的高差关系对于隧道的变形影响不明显,但从整体趋势上来看,当隧道处于基坑底以上高度的侧边时,隧道往往具备较大的位移,而隧道处于基坑底以下高度的侧边时,隧道的位移往往较小。这往往与基坑开挖的影响范围和影响深度相关。

(6)在近邻地铁隧道的基坑工程开挖案例中,有效依据时空效应施工,合理采用加固方案和降排水方案,同时积极依据现场环境推进新型支护技术的采用往往能有效控制基坑开挖的影响,降低邻近地铁隧道的位移变化。

参考文献:

[1] 广州地铁设计研究院有限公司.城市轨道交通结构安全保护技术规范(CJJ/T 202-2013)[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[2] 徐长节,孙凤明,陈金友,等.基坑相邻地铁隧道变形与应力控制措施[J].土木建筑与环境工程,2013,(S1):75-80.

[3] 刘方梅.深基坑开挖对邻近地铁隧道的影响[D].浙江大学,2015.

[4] 魏纲,厉京,宣海力,等.大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J].铁道科学与工程学报,2018(15 3):718-726.

[5] 曾晓鑫,丁文湘,彭玲,等.隔离桩间距对基坑开挖引起地铁隧道的位移影响分析[J].中国科技论文,2018(13 1):17-22.

[6] 陈勇勤.基坑开挖对邻近公路盾构隧道变形影响分析[J].公路工程,2013(38 3):165-170.

[7] 陈建中,简要,鲍文挺,等.邻近轨交的深基坑施工保护技术[J].地基基础,2015:1039-1041.

[8] 马永峰,周丁恒,曹力桥,等.临近地铁隧道的软土深基坑施工影响分析[J].青岛理工大学学报,2015(36 1):34-40.

[9] 王伊丽.已建隧道的影响分析及安全控制研究[D].浙江大学,2016.

[10] 胡琦,祁晓翔,许四法,等.软弱土地基深基坑坑底加固对邻近地铁隧道的保护作用分析[J].科技通报,2015(31 7):59-62.

[11] 陈俊辉,杨磊,李慧慧,等.砂土地基地铁隧道受旁侧基坑开挖变形影响实例分析[J].浙江建筑,2018(35 3):26-30.

[12] 俞建霖,夏霄,张伟,等.砂性土地基深基坑工程对周边环境的影响分析[J].岩土工程学报,2014(36 S2):311-318.

[13] 柳晔.杭州深基坑开挖对已建地铁车站、区间影响数值分析[J].建筑资讯,2016(43 5):9-12.

[14] 贾夫子,王立峰,逯武全,等.基坑开挖对近邻地铁车站和隧道的影响[J].岩土力学,2016(37 S2):673-714.

[15] 王立峰,庞晋,徐云福,等.基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J].岩土力学,2016(37 7):2004-2010.

[16] 孙廉威.外界荷载作用下已建盾构隧道结构性状[D].浙江大学,2016.

[17] 庞晋.基坑开挖对邻近既有地铁隧道影响的研究[D].浙江科技学院,2017.

[18] 邵凯平,刘翔,俞宏,等.超深基坑施工对地铁盾构保护的施工实践[J].施工技术,2013,13:6-8+42.

[19] 梁克鹏.基坑开挖对既有地铁隧道变位影响及技术措施分析[J].建材与装饰,2017:229-230.

[20] 徐建勇,钱丽英,周时.软土地区深基坑施工对邻近运营地铁隧道影响的实测分析[J].公路交通技术,2016(32 4):110-114.

[21] 宋海滨,李刚柱,殷刘帅.深基坑对紧邻地铁盾构区间隧道变形的影响性分析[J].隧道/地下工程,2012:97-101.

[22] 胡琦,许四法,陈仁朋,等.深基坑开挖土体扰动及其对邻近地铁隧道的影响分析[J].岩土工程学报.2013(35 S2):537-541.

[23] 袁静,刘兴旺,陈卫林.杭州粉砂土地基深基坑施工对邻近地铁隧道、车站的影响研究[J].岩土工程学报2012,(S1):398-403.

[24] 高健.基坑开挖对邻近隧道位移影响的数值模拟分析[D].暨南大学,2016.

[25] 汪小兵,贾坚.深基坑开挖对既有地铁隧道的影响分析及控制措施[J].城市轨道交通研究,2009(05):52-57.

板桁组合结构桥梁悬索钢带底端节点受力性能的有限元分析

刘俊英, 朱 成

(嘉兴学院 南湖学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘 要:某跨黄河大桥为板桁组合结构桥梁, 为了对其钢带低端节点受力特征进行研究, 本文首先基于有限元软件 ANSYS 对目前国内外常用的两种节点形式进行了详细的受力分析, 经对比分析并结合本桥特征, 选择节点形式 B。然后本文对该节点的关键节点及各杆件典型剖面的应力特征及分布进行了详细的仿真研究, 本文的研究结论可有效指导桥梁设计并保证结构安全。

关键词:钢结构桥; 板桁组合; 节点受力; 钢带

中图分类号: U488.25

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)03-0109-06

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.020

Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of Bottom End Joints of Bridge Suspension Steel Strips

Liu Junying, Zhu Cheng

(Nanhu College, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang 314001, China)

Abstract: A trans-Yellow River Bridge is a composite structure bridge. In order to study the mechanical characteristics of the low-end joints of the steel strip, this paper firstly analyzes the two types of joints commonly used at home and abroad based on the finite element software ANSYS. After comparative analysis and combining the characteristics of the bridge, node form B is selected. Then the paper makes a detailed simulation study on the key nodes of the node and the stress profiles and distributions of the typical sections of the joints. The conclusions of this paper can effectively guide the bridge design and ensure the structural safety.

Keywords: Steel structure bridge; plate and raft combination; joint force; steel belt

近些年, 随着我国桥梁事业的不断发展, 越来越多的桥梁采用钢桁桥的形式^[1], 其中比较有代表性的有金沙江大桥^[2]、东江大桥^[3]和嘉陵江大桥^[4]等。钢桁桥主要由桥道系、联结系和主桁等结构组成, 其中目前国内外主桥主要采用正交异性板钢桥面钢桁梁^[5-7], 并由位于多个平面内的钢桁架连接形成的整体稳定结构, 具有刚度大、跨越能力强、行车通透性好、节省钢材、减轻结构自重低等优

点^[8,9], 钢桁梁桥既有刚性又有韧劲^[10]。位于黄河中游的某在建大桥全长 700 m, 其跨径分布为 170 m+360 m+170 m, 桥面全宽 27.5 m, 桥型为板桁组合结构。由于该大桥整体结构受斜腹杆角度影响, 而且其节点规模较大, 此外其上弦杆和加劲悬索之间的大节点, 导致其内力的组成及分布十分复杂^[11], 为了对该大桥悬索钢带底端节点进行受力性能, 优化设计方案, 本文基于有限元软件 ANSYS 建立有限

收稿日期: 2019-11-28

作者简介: 刘俊英(1976-), 女, 吉林辽源人, 汉族, 讲师, 本科, 研究方向: 结构工程。E-mail: hn61886@163.com。

元模型,对其关键节点进行详细仿真研究,主桥悬索钢带桥型平面布置图如图 1 所示(其中方框为选择的关键节点处)。

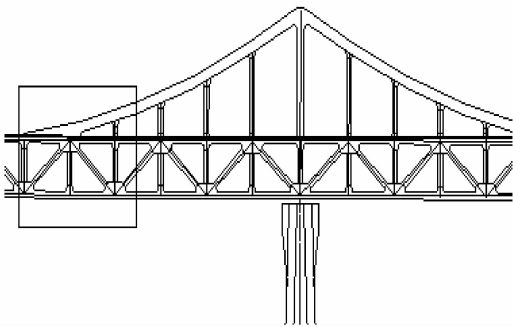


图 1 主桥悬索钢带处桥型平面示意图
Fig.1 Schematic diagram of the bridge type of the main bridge suspension cable strip

1 有限元模型的建立

由于该大桥节点尺寸较大且其内力分布较为复杂,需要建立板壳单元对受力复杂的关键节点进行应力分析^[12]。本文利用大型有限元程序 ANSYS 进行仿真研究。考虑程序运行效率,在不影响模型性能的情况下,只对主要构件(如斜腹杆板件、节点板件)进行建模分析。为了减小有限元模型的边界对精度的影响,同时为满足圣维南原理^[13],需要在桥梁纵向上在两端各延伸节点宽度的两倍。具体建模参数为:材料:Q345 钢;弹性模量: 2.06×10^5 MPa;密度: 7834 kg/m^3 ;泊松比:0.31。桥梁的桥面板、腹杆、钢带、吊杆、上弦杆和横梁利用 ANSYS 软件中的壳单元 shell181 进行模拟。利用 ANSYS 有限元软件建立的节段有限元模型如图 2 所示,图 3 为节点大样图。

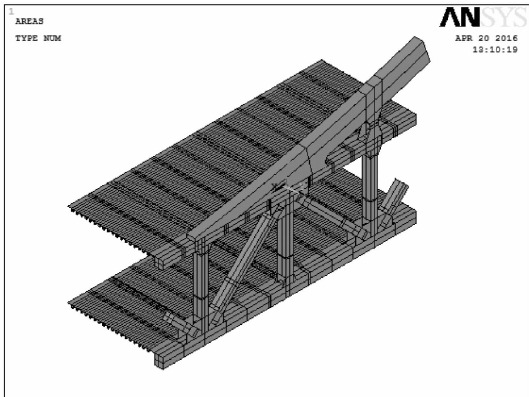


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

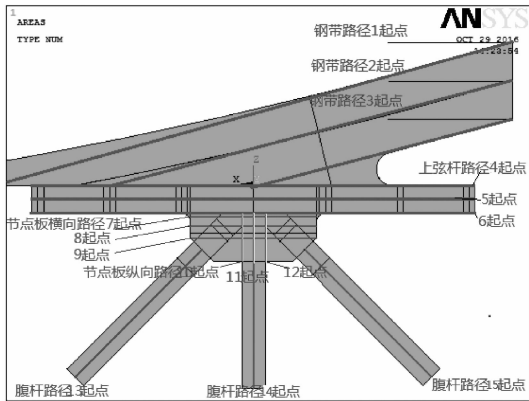


图 3 节点大样图
Fig.3 Node large sample

2 节点构造分析

目前国内外在工程中常用的板桁组合结构梁桥的节点主要有以下 2 种^[14],如图 4 所示。
节点构造形式 A:如图所示,小节点竖杆和加劲悬索钢带两者的中心线相交于上弦杆。因此如果沿杆件的轴向荷载作用在主桁架上时,节点形式 A 传递和扩散作用力的过程更快也更合理。但同时会导

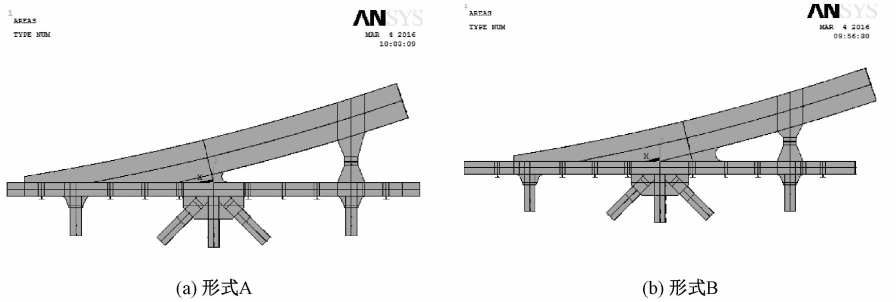


图 4 节点构造形式
Fig.4 Node construction form

致大节点处的弯矩过大,增大大节点各杆件的应力值。节点构造形式 B:加劲悬索在上弦杆方向上向右移动,大节点中心线和底端的延伸线两者的中心线相交点位于上弦杆上。节点构造形式 B 可以有效改善节点形式 A 的缺点,减小大节点受钢带轴向荷载的影响,但其缺点为钢带轴向荷载的传递和扩散作用较差。在实际工程中,需要对这两种构造形式进行分析,根据具体情况及需要选取合理的节点构造形式。两种形式主要杆件的仿真计算结果如下图 5 和图 6 所示。

由图 5 所示,由于加劲悬索钢带的轴向荷载较大,节点杆件受到的偏心作用较大,所以该节点中主要板件具有较高的应力值。但是由于钢带上的应力

扩散速度较快,会对节点造成有害影响。由图 6 可知,节点 B 的钢带位置整体向右偏移,因此作用在该节点上的偏心力会变小,所以改善了应力作用的分布水平,其等效应力最大约为 192 MPa。同时左右两侧腹杆板件的应力水平都有较大程度的改善,部分板件应力水平能降低至钢材本身屈服极限以下,甚至不足 100 MPa。所以节点 B 的钢带应力扩散速度较小,但其它方面,比如整体的荷载传递状况及应力分布状态均优于节点 A。

综上所述,当节点的尺寸及斜腹杆角度比较大时,节点 B 优于节点 A,根据本桥特点,选择节点 B,因此本文详细研究节点 B 的受力特征。

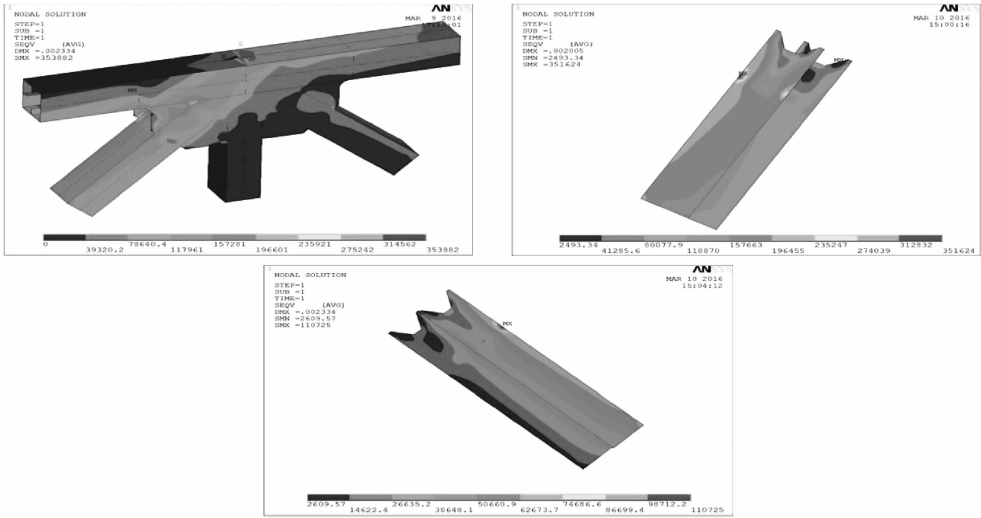


图 5 节点形式 A 主要板件的应力云图
Fig.5 Stress pattern of the main plate of node form A

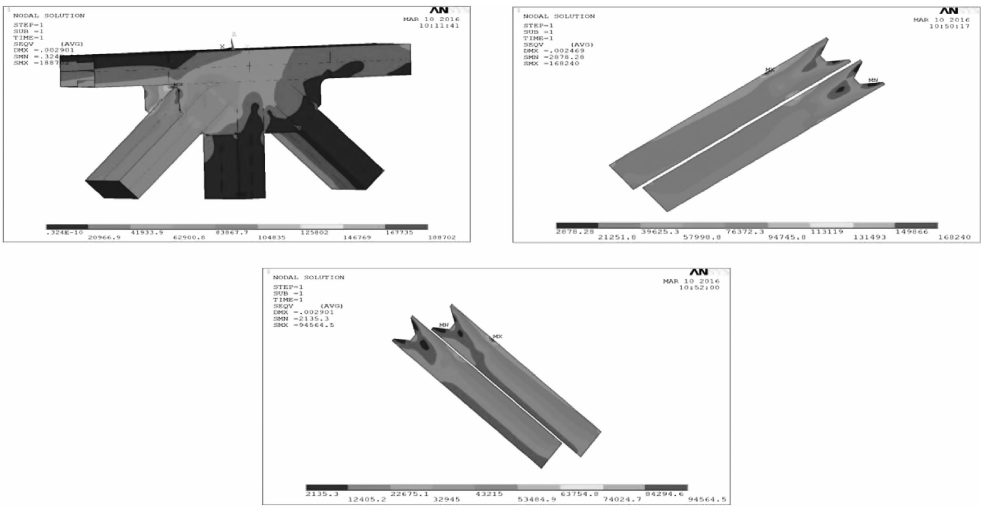


图 6 节点形式 B 主要板件的应力云图
Fig.6 Stress pattern of the main plate of node form B

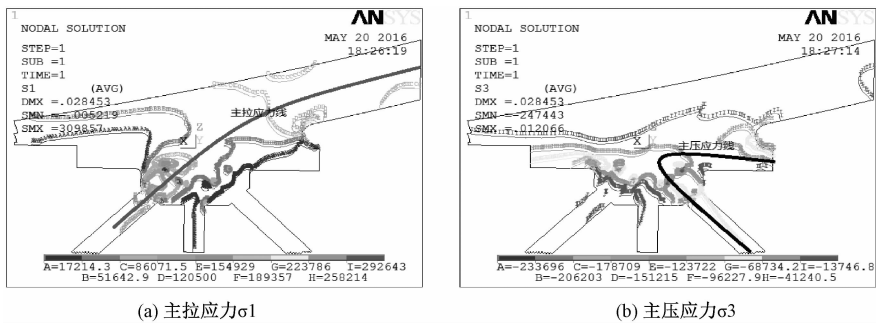


图 7 应力云图(单位:MPa)
Fig.7 Stress Cloud Diagram (Unit: MPa)

3 受力特性分析

3.1 关键节点的应力特征分析

节点中最关键部位就是节点板,节点板是各路杆件的交汇处,其受力状态直接影响整个节点的使用状态及结构安全^[15],因此在工程中,节点板的厚度可达 50~60 mm,是所有构件中最厚的。在构件的局部统计分析计算中,节点板通常也是主要关注的部位。根据本大桥成桥状态下的受力特征,分析节点的应力可得节点板的主拉应力 σ_1 和主压应力 σ_3 云图如图 7 所示,其中受拉为正,受压为负。

根据上图可知,节点板的整体主拉及主压应力分布较为均匀,只有个别点出现了应力集中的现象。根据计算结果可知,压应力最大值小于 185 MPa,拉应力最大值小于 195 MPa,满足规范要求。

图 8 为分析节点板的应力轨迹图。

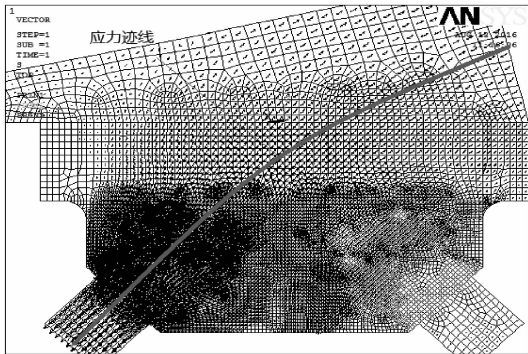


图 8 主应力的迹线图
Fig.8 Trace diagram of principal stress

由图 8 可知,沿悬索钢带-弦杆-节点板-左侧斜腹杆方向是主应力的主要分布区域。其中悬索钢带在恒载作用下,沿轴向受到拉;上弦杆沿轴向,主要受到压力;节点板应力分布较为均匀,主要为压力;左侧斜腹杆轴向主要受到拉力。

3.2 关键节点各杆件剖面的应力特征分析

同上,沿悬索钢带-弦杆-节点板-左侧斜腹杆方向,对各关键节点做轴向或横纵向的剖面分析,得到相关的应力分布曲线图。各剖面的轴向应力图如图 9。

图 9(a)为在路径 1、2、3 时,钢带轴应力 SX 曲线图。其中 $X=0\sim 14\text{ m}$ 为进入节点板范围, $X=14\sim 17\text{ m}$ 的范围内为倒圆角位置。总体上,路径 1、2、3 三个剖面均处于受拉状态,且端部的拉应力最大,随着轴向距离的变大,拉应力逐渐变小。路径 1 和路径 2 的曲线较为平滑,总体上拉应力逐渐变小,路径 3 在 $X=16\text{ m}$ 时,拉应力出现最大值为 165 MPa。当 $X>17\text{ m}$ 时,路径 1、2、3 的拉应力均开始变小,且路径 3 的减小速度最大,路径 2 其次,路径 1 最小。

图 9(b)为在路径 4、5、6 时,上弦杆轴应力 SX 曲线图。其中 $X=11\sim 17\text{ m}$ 为节点板范围。由图可知上述 3 个路径下,上弦杆均受压力。在 $X=0\sim 11\text{ m}$ 时,3 条曲线变化均较缓。当 $X=11\sim 15\text{ m}$ 时,上弦杆的压力均急剧减小,其中路径 4 的减小速度最大,5 次之,6 最小,最后三者的轴向应力达到一个较小值,均小于 10 MPa。当 $X>15\text{ m}$ 时,三者的压力值急剧变大,其中路径 6 最大,5 次之,4 最小。

图 9(c)为在路径 7、8、9 时,节点板轴应力 SX 曲线图。其中 $X=0\sim 2\text{ m}$ 为节点板横向与左侧斜腹杆有交汇的区域。随着 X 的不断增大,三者轴力的绝对值不断减小,最后达到最小值。

图 9(d)为在路径 10、11、12 时,节点板轴应力 SZ 曲线图。其中路径 12 的极值对应的位置为左腹杆与节点板的交汇处,路径 10 的极值对应的位置为右腹杆与节点板的交汇处。竖杆与节点板相交处右侧主要受压,左侧主要受拉,应力分布相对均匀且应力值较小。在个别范围内,出现了应力集中现象,从而形成刚度突变,其原因为受左右两侧斜腹杆的影响。

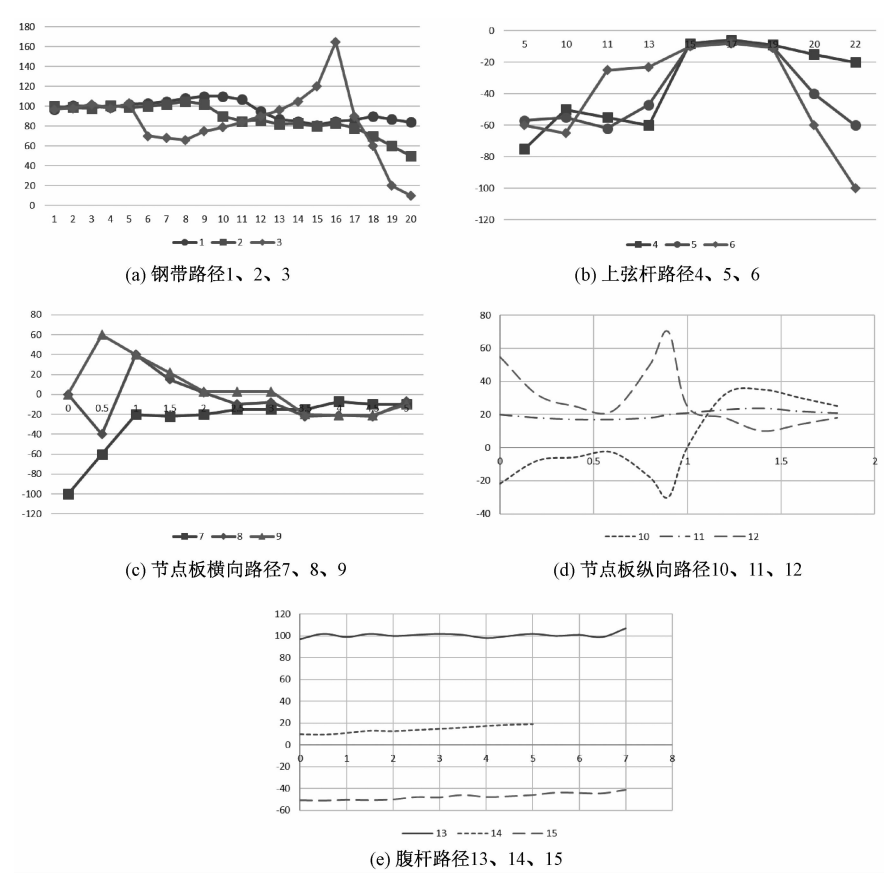


图 9 SX 曲线图(X 轴单位:m;Y 轴单位:MPa)
Fig.9 SX graph (X-axis unit: m; Y-axis unit: MPa)

图 9(e)为在路径 13、14、15 时,腹杆轴应力 SX 曲线图。竖杆和斜腹杆在轴向应力上均处于较为均匀的状态,应力值变化较小。其中受拉的为左侧斜腹杆,受压的为右侧斜腹杆,中间竖杆也受拉力,但其拉力值很小。

为了验证上述分析的准确性,本文通过有限元计算得到各个剖面的 VonMises 图,如图 10 所示。图 10 所反映的应力分布规律与前文分析的规律相同,验证了前文分析的正确性。悬索钢带应力的变化规律为:节点板前,应力值分布较为稳定,变化不

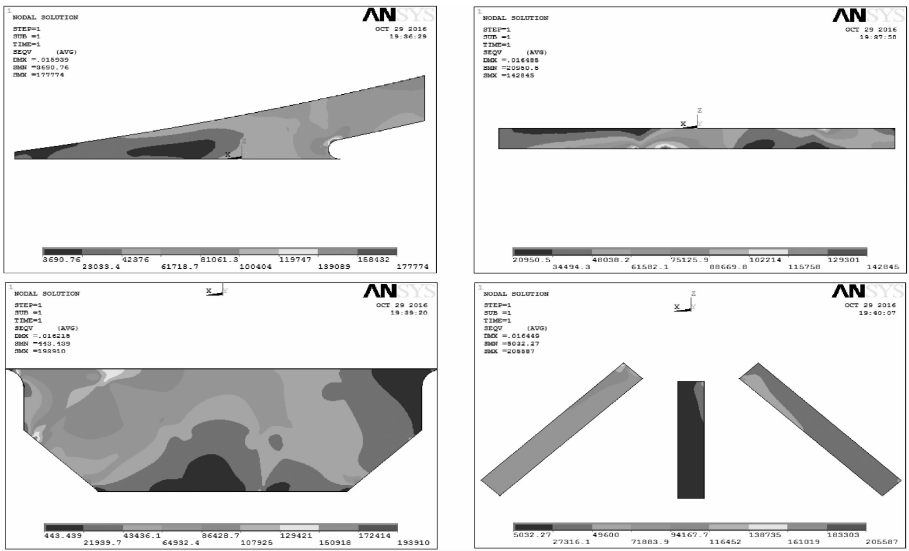


图 10 各剖面的 VonMises 应力图(单位:MPa)
Fig.10 VonMises stress diagram for each section (unit: MPa)

大;节点板中,应力产生较大的变化,应力值急剧减小;节点板后,应力值趋于稳定,并达到一个相对小的值。上弦杆右侧的应力较为均匀,开始扩散的位置位于悬索钢带交界处,先变小到 25 MPa,然后以较大速率变大。节点板应力较大,尤其是左侧,其因为受悬索钢带轴向应力的影响较大。竖杆和斜腹杆的应力变化较小,分布均匀。其中上弦杆和钢带在跨越节点板之后,应力值较小。其因为,此时由于钢带的轴向荷载已完成一定程度的扩散,当超出节点范围后,轴力基本上已经完成了扩散作用,所以其应力值较小。利用本规律,在进行桥梁设计时,可以在此处节约钢材,且在此处可以增加美化设计,以提高桥梁的艺术性及美感。

4 结语

1)相比于节点 A,节点 B 可以使得钢带发生整体向右偏移,使作用在节点上的轴向荷载变小,从而优化作用在节点上各个杆件的应力分布情况。在斜腹杆角度较大时,节点 B 相比于节点 A 更优。

2)由于节点的各个杆件均相交于节点板上,因此其受力情况极为复杂。而且作用在其上的悬索钢带轴向应力较大,因此节点板左侧的应力值较大,且常出现应力集中现象。相比于节点板左侧,其右侧应力水平较低,且腹杆应力分布较为明确。

3)在超过节点板的范围(以钢带端部为起点向右 1/2 宽度),钢带的轴向应力几乎已完全扩散,因此该区域出现应力水平较低的现象,在此处可以节约钢材,进行景观设计,增添艺术美感。

参考文献:

- [1] 李宁,王盼.大跨径双层钢桁梁悬索桥主桁杆件疲劳寿命评估[J].公路工程,2017,42(4):69-75.
- [2] 黎训国,汪丽君,卢磊,等.山区悬索桥超大隧道锚施施工工艺[J].公路,2017,62(05):111-115.
- [3] Zhai M S, Wang C S, Cui B, *et al.* Study of Fatigue Load Models for Steel Bridge Decks Based on WIM[J]. Bridge Construction, 2017, 47(2):31-36.
- [4] 秦清华.蔡家嘉陵江特大桥长期健康监测系统的设计及实施[J].中外公路,2017(05):186-190.
- [5] 张阿敏,吴汉立,马鹏飞,等.BWIM 系统应用于正交异性钢桥面的整体效应分析[J].公路工程,2017,42(06):261-267.
- [6] 肖林,姚昌荣,李亚东,等.热轧纵肋与传统纵肋正交异性钢桥面铺装层受力特性对比研究[J].公路工程,2017,42(05):352-358.
- [7] 张建强,郑清刚.沪通长江大桥主航道桥公路桥面钢-混结合段设计[J].桥梁建设,2016,46(4):6-10.
- [8] Lan Kang, Kazuya Magoshi, Hanbin Ge, *et al.* Accumulative response of large offshore steel bridge under severe earthquake and ship impact due to earthquake-induced tsunami flow [J]. Engineering Structures, 2017, 134-135.
- [9] 周尚猛,杨成.正交异性钢桥面合理栓焊工序实桥试验研究[J].桥梁建设,2016,46(3).
- [10] 于向东,尹兴权,闫斌.相邻桥跨对大跨钢桁梁桥-轨道系统的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(6):137-142.
- [11] 李兴田,张丽萍.基于 GiD 的钢桁梁桥有限元建模研究[J].兰州交通大学学报,2016(6).
- [12] 王凌波,刘鹏,李源,等.宽幅钢箱梁斜拉桥悬拼匹配技术研究[J].中国公路学报,2016,29(12):102-108+141.
- [13] Fu Z, Ji B, Zhang C, *et al.* Experimental study on the fatigue performance of roof and U-rib welds of orthotropic steel bridge decks [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2018, 22(3):1-9.
- [14] Duchaczek A, Mańko Z. Influence of the holes spacing in bolted connections on propagation of fatigue cracks in steel bridge girders [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3):1-13.
- [15] 孙伟斌,伍子鸿,李祚华.桁腹式组合桁梁桥剪力滞效应分析[J].建筑结构,2016(S1):617-620.

成本约束下重金属企业治理污染的博弈模型研究

马子茹

(中国人民解放军陆军勤务学院,重庆 401331)

摘要:城市化与工业化的快速发展,使得城市重金属污染问题愈加严重,已成为一项城市重大污染问题,由于企业追求利益最大化的心理,所以当前的污染治理方法不能满足企业的需求,为了满足企业需求,对成本约束下重金属企业治理污染博弈模型进行了研究。实验分析结果表明,采用重金属企业治理污染的博弈模型可以有效治理重金属污染问题,且成本较低,该模型能够满足重金属企业对利益最大化的需求,对提高城市环境质量有着极为重要的意义。

关键词:成本约束;重金属企业;污染治理;博弈模型

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)03-0115-04

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.021

Game Model Research on Pollution Pollution of Heavy Metal Enterprises Under Cost Constraints

Ma Ziru

(Army Logistics University of PLA, Chongqing 400000, China)

Abstract: The rapid development of urbanization and industrialization has made the problem of heavy metal pollution in cities more serious. It has become a major pollution problem in cities. Due to the psychology of maximizing profits, the current pollution control methods cannot meet the needs of enterprises, in order to meet the needs of enterprises. The paper studies the pollution game model of heavy metal enterprises under cost constraints. The experimental results show that the game model of pollution control by heavy metal enterprises can effectively deal with the problem of heavy metal pollution, and the cost is low. The model can meet the demand of the heavy metal enterprises for maximizing the benefits and is of great significance for improving the environmental quality of the city.

Keywords: cost constraint; heavy metal enterprise; pollution control; game model

环境污染主要由两方面引起,一是人类从自然中获取的资源数量远远高于资源的再生数量,导致资源枯竭、生态环境退化。二是人类向自然环境中排放的有害物质远远高于自然环境的自我净化的最大值^[1]。

环境污染中最为严重的是重金属污染。重金属污染通常是由重金属或重金属化合物所导致的环境污染。主要由采矿、废气排放、污水灌溉以及重金属

超标制品等人为因素所致^[2,3]。

我国目前拥有的污染耕地约 2×10^7 hm²,大部分耕地没有得到有效治理。重金属污染不仅影响力粮食的收获情况,还影响了人们的身体健康。人类食用了由重金属污染土壤生长的食物后,食物中的金属会破坏人们身体的平衡,导致各种疾病的发生,例如骨痛病、癌症、食物中毒等,严重的甚至会致人死亡。这些事件的发生,使得重金属污染防治得到了

国家的重视。人们对重金属污染治理方法进行了积极研究^[4,5]。

一些重金属治理企业由于追求利润最大化,所以需要着重于在低成本的情况下实现重金属污染治理。

1 重金属污染治理方法特点

重金属污染特性:

(1) 普遍性

随着科学技术的进步,各个国家都会存在工业企业,工业产品的加工使得重金属污染趋于普遍,威胁着各个国家。

(2) 隐蔽性

通常受到重金属污染的土壤在其表征上与正常土壤是相同的,不会被人类的感知系统所发现,在累积到一定程度时才会反映出来,让人类所察觉。

(3) 表聚性

重金属污染物普遍存在于土壤耕层,污染物由耕层移动到土壤下层的现象很少出现。

(4) 不可逆性

重金属在土壤中累积到最大限度时,会致使土壤结构和功能发生改变,因为重金属降解困难,所以土壤遭受污染后很难恢复。

常见的重金属污染治理方法主要有工程、化学、生态和生物 4 种。

重金属污染治理方法特点:

(1) 工程治理

这种治理方法通过物理或者物理化学的原理实现对重金属污染的治理。

这种治理方法的效果是几种方法中最彻底、稳定的,但实施起来较为复杂、治理成本高。

(2) 化学治理

这种方法通过投加改良剂、抑制剂的方式实现重金属污染治理。

该方法便于实施、成本低,对环境造成的影响较小,但治理效果较差。

(3) 生态治理

这种方法通过种植植物的方式实现对重金属污染的治理。

这种重金属污染治理方法操作简便、成本低,但具有治理周期长、治理效果不理想。

(4) 生物治理

生物治理又称生物修复,主要指微生物和植物

修复。

这种重金属污染治理方法便于实施、成本低,对环境造成的影响较小,但治理效果较差。

2 重金属企业治理污染的博弈模型

将重金属企业污染治理过程看作是政府监管部门和企业间的博弈过程。我国重金属冶炼企业技术较为落后,能源消耗过高,收获效益较低,污染排放量大,由于重金属企业超标排污受到的处罚远远低于排污所需成本,所以重金属冶炼企业不愿进行重金属污染治理。为了解决这种情况,利用博弈论构建了重金属企业污染治理模型^[6]。

2.1 污染治理模型假设

(1) 假设政府部门与重金属冶炼企业均追求利益最大化。

(2) 政府部门有企业污染监管与不监管两种策略。

假设 A 为政府部门监管所需资金,由政府部门疏于督导监管导致的损失,在未来可能会需要投入大量的金钱来弥补,这时投入的金钱为 B 。政府部门监管概率为 x , 不监管概率为 $1 - x$ 。

(3) 重金属企业的治理策略包括治理和不治理两种情况。

假设 C 为重金属企业治理环境污染的成本, T 表示重金属污染治理后得到的税收减免及补贴, F 表示企业所需支付的罚金, U 表示企业治理重金属污染后给社会带来的收益,由于该收益也是政府部门绩效考评的内容之一,所以也可以将其作为政府收益。 y 表示企业治理重金属污染的概率, $1 - y$ 表示企业不治理重金属污染的概率^[7]。

重金属冶炼企业收益与政府部门收益,如表 1 所示。

表 1 企业和政府的收益

Table 1 Earnings of enterprises and governments		
政府企业	治理重金属污染(y)	不治理重金属污染($1-y$)
监管(x)	$U-A-T, T-C$	$F-A, -F$
不监管($1-x$)	$U-T, T-C$	$-B, 0$

2.2 重金属污染治理模型分析

政府部门的期望收益 E_1 , 计算公式如下:

$$E_1 = x[y(U - A - T) + (1 - y)(F - A)] + (1 - x)[y(U - T) + (1 - y)(-B)] \tag{1}$$

由于政府部门与重金属冶炼企业均追求收益最大化,所以对政府部门的期望收益 E_1 进行求导^[8],令政府部门期望收益的导数 $\partial E_1/\partial x = 0$, 则所得公式为:

$$y = \frac{F - A + B}{F + B} = 1 - \frac{A}{F + B}$$

(2)

重金属冶炼企业期望收益 E_2 的计算公式如下:

$$E_2 = y[x(T - C) + (1 - x)(T - C)] + (1 - y)[x(-F) + (1 - x)0]$$

(3)

由于政府部门与重金属冶炼企业追求收益最大化,所以对重金属冶炼企业的收益 E_2 进行求导^[9],令重金属冶炼企业期望收益的导数 $\partial E_2/\partial y = 0$, 得到:

$$x = \frac{F}{C - T}$$

(4)

由式(4)可知,提高政府部门监管概率的可行方法如下:

(1)加大处罚力度;(2)降低重金属污染治理成本 C ;(3)增加政府补贴。

从式(2)能够看出,政府部门收益最大时,监管概率的求解公式如下:

$$y = 1 - \frac{A}{F + B}$$

(5)

由式(5)可知,提高政府部门监管概率的可行方法如下:

(1)降低政府部门监管所需资金 A ;(2)增加企业所需支付的罚金 F ;(3) 提高弥补投入的成本 B 。

通过式(1)~式(5),完成了对重金属污染治理博弈模型的构建。

2.3 重金属企业污染治理成本核算

某重金属企业污染虚拟治理成本核算公式为:

$$Gcost = \sum_{n=1}^5 Es \times Uc \times P$$

(6)

式(6)中, $Gcost$ 表示重金属企业污染虚拟治理成本, Es 表示重金属污染物排放量, Uc 表示单位污染物虚拟治理成本, P 表示污染物虚拟去除率。

2.4 重金属综合污染指数

内梅罗综合污染指数法是采用比较普遍的一种方法,通常用于评价综合污染指数^[10],综合污染指数求解公式如下:

$$P_N = \left\{ \frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2} \right\}^{1/2}$$

(7)

其中, P_N 表示综合污染指数, $(C_i/S_i)_{\max}$ 表示

各类重金属污染物中污染指数最大值, $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 表示各类重金属污染物的污染指数算术平均值。

3 实验材料采集

以土壤重金属污染为例,将某地区的土壤作为实验监测对象,监测对象分为未受重金属污染的土壤和受重金属污染的土壤两种。监测采用博弈模型和不采用博弈模型下的两种重金属污染物治理情况。

工业废水废气的排放、化肥的不合理施用等,都会对土壤造成严重污染,使土壤中的重金属物质含量超标。重金属污染元素主要指砷、铅、汞、镉、六价铬等毒性大的元素。以电镀重金属污染物和重金属污水排放为例,这两种排放的重金属污染排放限量标准如表 2 所示。

表 2 重金属排放标准

Table 2 Heavy metal emission standards

重金属名称	电镀污染物排放标准/(mg/L)	污水排放标准/(mg/L)
砷	—	0.5
镉	0.05	0.1
六价铬	0.2	0.5
总镍	0.5	1.0
总银	0.3	0.5
铅	0.2	1.0
汞	0.01	0.05
硒	—	—
铝	3.0	—
铁	3.0	—
锰	—	5.0
铜	0.5	2.0
锌	1.5	5.0

由表 2 可知,一旦冶炼重金属企业的重金属元素排放含量高于标准值,当前土壤种植作物的重金属含量值就会超出标准值,食用就会破坏人类的身体健康。为治理重金属污染,重金属企业需要对土壤中的重金属污染物进行控制。

4 实验测试结果与分析

4.1 博弈模型的重金属污染治理效果

在实验周期内,平均每 7 d 对实验样本的砷、镉、六价铬、铅和汞等重金属的浓度值进行异常监测,根据监测结果分析博弈模型的治理效果。

随着实验时间的增长,博弈模型对砷、镉、六价铬、铅、汞的污染治理效果如图 1 和图 2 所示。

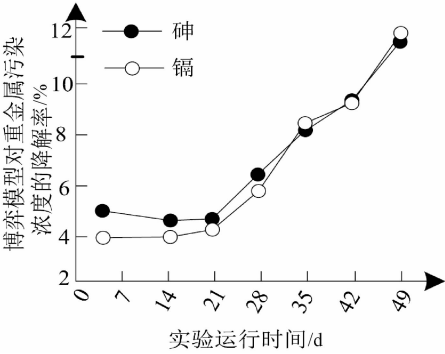


图 1 博弈模型对砷和镉的污染治理效果
Fig.1 Effect of game model on arsenic and cadmium pollution control

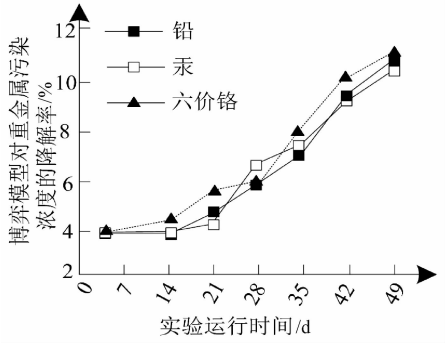


图 2 博弈模型对铅、汞、六价格的污染治理效果
Fig.2 Effect of Game Model on pollution Control of lead, Mercury and hexavalent Chrome

砷的超标可能会造成细胞和毛细血管中毒,甚至引发恶性肿瘤。镉的超标会引起心脑血管类疾病,破坏人体骨钙,造成肾功能失调。

由图 1 可知,实验运行 3 d 时,砷和镉的初始降解率为 5.7%和 4%;实验运行 49 d 时,砷和镉的降解率为 11.5%和 11.7%。通过上述实验数据可以发现,随着实验时间的增长,砷和镉的浓度值也随之降低,逐渐接近于国家的含量标准,降低了由砷和镉引发的人体疾病。

汞的超标会破坏人类的大脑视力神经,严重甚至会造成失明。铅在侵入人体后极难排除,会直接破坏人体脑细胞。六价铬在侵入人体时会有皮炎和湿疹产生,长期接触后有致癌危险。

由图 2 可知,实验运行 3 d 时,铅、汞和六价格的初始降解率分别为 4%、4%和 4.1%;实验运行 49 d 时,铅、汞和六价格的降解率分别为 10.9%、10.4%和 11.1%。通过上述实验数据可以发现,随着实验时间的增长,铅、汞和六价格的浓度值也随之降低,逐渐接近于国家的含量标准。

4.2 博弈模型的成本约束效果

冶炼企业采用博弈模型治理重金属污染前后的成本对比如图 3 所示。

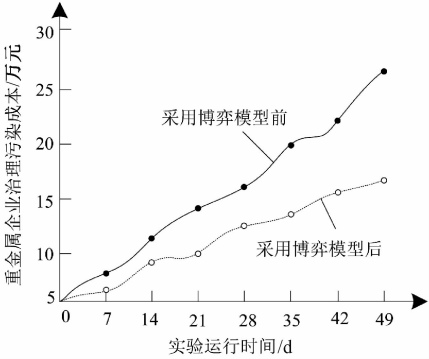


图 3 重金属企业治理污染所需成本对比
Fig.3 Comparison of costs required by heavy metal enterprises to control pollution

由图 3 可知,采用博弈模型能够有效降低治理重金属污染所需的成本。当实验运行天数为 28 d 时,冶炼企业未采用博弈模型,重金属污染治理成本为 16 万元左右;采用博弈模型后重金属污染治理成本降低到 12.5 万元左右,成本降低约 21.8%,由于企业不治理污染的原因就是成本太高,在成本降低的基础上,企业进行污染治理的概率大大提高。

5 结论

针对现今重金属污染治理存在的成本较高等问题,为了满足企业和政府部门的共同利益,对重金属企业治理污染博弈模型进行了研究,该模型的污染治理成本较其他方案的污染治理成本明显降低,可以满足重金属企业和政府部门所追求的利益最大化。

为了使企业和政府部门能够更好的治理重金属污染问题,接下来会对重金属企业治理污染的博弈模型治理效果和治理成本进行更为深入的研究。

参考文献:

[1] 张艳楠,孙绍荣. 基于 Stackelberg 博弈模型的化工企业安全生产管理机制治理研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(3):159-168.
[2] 刘素霞. 环境污染治理中企业、政府及环境非政府组织三方博弈分析[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5):574-577.

污水处理的最优污泥浓度初选

姜澜慧, 方程冉, 王 群, 毛宏智

(浙江科技学院 浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室, 杭州 310023)

摘 要:选取某化工厂污泥,采用不同浓度污泥处理生活污水和渗滤液两类污水,比较各污泥浓度下污泥性能及对污水中污染物(COD、TOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等)的去除率,得出 $8\sim 11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的污泥浓度是处理效率最佳的浓度范围。72 h 时,生活污水在好氧条件下 COD 去除率为 81.97%,TOC 去除率为 88.63%,TN 去除率为 93.66%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 89.15%;厌氧条件下 COD 去除率为 62.68%,TOC 去除率为 72.74%,TN 去除率为 93.61%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 38.80%。与生活污水相比,渗滤液在相同条件下污染物去除率较低,如 COD 去除率在好氧条件下为 12.81%。该化工厂污泥可直接用于处理生活污水,而对污染物浓度较高、成分较为复杂的渗滤液处理效率不佳,需经驯化后再投入使用。

关键词:生活污水;渗滤液;污泥浓度;处理效率

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0119-05
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.022

Optimum Concentration of Activated Sludge on Sewage Treatment

Jiang Lanhui, Fang Chengran, Wang Qun, Mao Hongzhi

(Key Laboratory of Recycling and Eco-treatment of Waste Biomass of Zhejiang Province,
Zhejiang University of Science and Technology, Zhejiang 310023, China)

Abstract:The sludge of a chemical plant was selected to treat domestic sewage and leachate by different sludge concentrations. The sludge characters and the removal rates of pollutants (COD, TOC, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, etc.) in the sewage were compared. The results showed that the sludge concentration of $8\sim 11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ was the best concentration range of sewage treatment efficiency. At 72 h, the removal rates of COD, TOC, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 81.97%, 88.63%, 93.66% and 89.15% under aerobic conditions respectively. They were 62.68%, 72.74%, 93.61% and 38.80% under anaerobic conditions respectively. Compared with domestic sewage, the removal rates of pollutants in leachate were lower under the same conditions. The COD removal rate was 12.81% under aerobic conditions. The sludge can be directly used to treat domestic sewage. However, the treatment efficiency was low of the leachate with high pollutant concentrations and complex composition. Therefore the sludge should be acclimated first and then be used to treat the leachate.

Keywords:domestic sewage; leachate; activated sludge concentration; treatment efficiency

随着我国生活水平的不断提高、经济的快速增长,污水日污染量也不断增加,活性污泥法处理废水

依旧是我国现阶段的主流处理方式^[1]。活性污泥是指人工培养和驯化的微生物群体,主要种类包括

收稿日期:2018-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(NO.51678531)。

作者简介:姜澜慧(1993-),女,浙江江山,硕士研究生,研究方向:市政工程。E-mail:501824795@qq.com。

细菌、放线菌、真菌、原生动物和藻类等^[2]。活性污泥法主要是利用活性污泥中的好氧细菌及其他微生物对污水中的有机物进行吸附、氧化并进行有效的分解,最终将有机物转变成二氧化碳和水。废水中有机污染物的去除效率与多种因素有关^[3-5],主要包含 3 个方面,一是活性污泥本身的组成及性质,如生物量及活性指标等,二是各环境因子的影响,如有害物质浓度、温度、pH 等,三是工艺运行参数的影响,如溶解氧、水力停留时间、污泥停留时间、回流比等。因此利用活性污泥法如何最高效地去除水中污染物可从这三个方面着手研究。本文主要研究对比在不同污泥浓度下污泥对废水中污染物的去除效率,以寻求最优处理条件。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验选用某化工厂污泥处理两种污水:人工配制生活污水(简称生活污水);人工配制渗滤液(简称渗滤液)。污泥性质见表 1,两种污水配方见表 2~5^[6,7],生活污水水质、渗滤液水质分别见表 6、7。

表 1 污泥性质		
Table 1 Properties of activated sludge		
污泥指标	厌氧污泥	好氧污泥
颜色	黑色	棕褐色
粒径/mm	0. 26	4. 82
密度/g·cm ⁻³	1. 05	1. 01
SVI/mg·L ⁻¹	47. 71	51. 85
沉降速度/m·h ⁻¹	23	49

表 2 生活污水配比		
Table 2 Composition of domestic sewage		
物质	浓度/mg·L ⁻¹	
蔗糖	300	
NH ₄ Cl	100	
KH ₂ PO ₄	40	
NaHCO ₃	500	
MgSO ₄ ·7H ₂ O	40	
无水 CaCl ₂	20	

表 3 渗滤液配比		
Table 3 Composition of leachate		
物质	浓度/mg·L ⁻¹	
乙酸	750	
NaOH	250	
KH ₂ PO ₄	10	
CaCl ₂ ·2H ₂ O	5. 6	
MgSO ₄ ·7H ₂ O	300	
KHCO ₃	1250	
NH ₄ Cl	6500	
NaNO ₂	4500	
微量元素 1(见表 3)	1. 25 mL·L ⁻¹	
微量元素 2(见表 4)	1. 25 mL·L ⁻¹	

表 4 微量元素 1 配比		
Table4 Composition of Trace elements 1		
物质	浓度/mg·L ⁻¹	
EDTA	5000	
FeSO ₄ ·7H ₂ O	9000	

表 5 微量元素 2 配比		
Table 5 Composition of Trace elements 2		
物质	浓度/mg·L ⁻¹	
EDTA	1000	
H ₃ BO ₄	14	
MnCl·4H ₂ O	990	
CuSO ₄ ·7H ₂ O	250	
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	430	
NiCl·6H ₂ O	190	
NaMoO ₄ ·2H ₂ O	220	

表 6 生活污水水质特征		
Table 6 Characteristics of domestic sewage		
水质指标	浓度/mg·L ⁻¹	
pH	7. 92	
COD	385	
TOC	136. 4	
TN	369. 29	
NH ₄ ⁺ -N	21. 82	
TP	8. 28	

表 7 渗滤液水质特征		
Table 7 Characteristics of leachate		
水质指标	浓度/mg·L ⁻¹	
pH	7. 46	
COD	2100	
TOC	261. 2	
TN	2014. 68	
NH ₄ ⁺ -N	1790. 79	
TP	6. 485	

1.2 检测方法

污泥基本指标 SV₃₀、MLSS 等采用国家标准方法测定^[8]。水质 pH 由 pH 计(梅特勒-托利多仪器公司 pH 计)测定;TOC 由 TOC 分析仪(岛津公司 TOC-L)测定;COD 由 COD 分析仪(美国 HACH 公司 DBR 200 和 DR 1010 COD)测定;TN、NH₄⁺-N、TP 由流动分析仪(德国 seal 公司 AA3)测定。

1.3 实验方法

实验反应器为 5 L 烧杯,共两组,每组分别接种厌氧、好氧两种活性污泥。厌氧烧杯中加入搅拌装置,并将烧杯口用锡纸包住,使水中溶解氧控制在 0~1. 8 mg·L⁻¹之间,保证其厌氧环境;好氧烧杯中加入曝气装置,调节曝气量使水中溶解氧保持在 6~8 mg·L⁻¹之间,保证其好氧环境。用量筒取 100 mL 泥水混合液,静置 30 min 后记录 SV₃₀并分析污泥沉降

性能,用滤纸过滤上述液体,将滤纸放入烘箱测 MLSS 并计算 SVI,将过滤后的水样保存在 4 ℃ 冰箱中,及时测量水质基本指标。

(1)2 组烧杯分别设 2、5、8、11 和 15 g·L⁻¹ 的污泥浓度^[9-11],以寻求处理污水的最优污泥浓度。在上述 2 组烧杯中加入生活污水,定期取样分析水质基本指标,直至水中污染物浓度基本保持不变,计算各项指标的去除率,对比分析出最佳污泥浓度。

(2)在 2 组烧杯中加入新的污泥及渗滤液,污泥浓度与上述条件一致。定期取样分析水质基本指标,直至水中污染物浓度基本保持不变,计算各项指标的去除率,对比分析出最佳污泥浓度。

2 结果与讨论

2.1 污泥浓度对生活污水中污染物去除效率的影响

通过对各项指标的浓度随时间的变化趋势进行拟合,可得出其变化趋势符合一级动力学方程 $C_t = C_0e^{-kt}$ 。利用一级动力学方程进行拟合,结果见图 1。可以看出,两组污泥的处理效率均较好。图 1(a)、(b)中,厌氧烧杯中 5 种污泥浓度对 COD 的去除率高达 99%;好氧烧杯中去除效率有较明显差异,在污泥浓度为 2、5、8 g·L⁻¹时相对较好,去除率在 95% 以上。图 1(c)、(d)中,厌氧烧杯中在 2、5、8、11 g·L⁻¹时 TOC 去除率在 95% 以上;好氧烧杯中 5 种污泥浓度的去除率接近 100%。图 1(e)、(f)中,2 组烧杯中 TN 浓度均由 370 mg·L⁻¹降至几乎没有,去除率接近 100%。图 1(g)、(h)中,厌氧烧杯中 NH₄⁺-N 的去除效率不佳,无明显差异,其中污泥浓度为 2、5、8 g·L⁻¹时去除率为 40%,而在污泥浓度为 11、15 g·L⁻¹时去除率仅为 30%;好氧烧杯中 5 种污泥浓度的去除率均较好,去除率接近 100%,但可明显看出污泥浓度为 11、15 g·L⁻¹时去除效率较高。图 1(i)、(j)中,厌氧烧杯中 TP 的去除率在污泥浓度为 2 g·L⁻¹时为 80%,在其他 4 种浓度下去除效率较接近,去除率均在 90%~95%;好氧烧杯中 TP 几乎未被去除,其中效率最差的为 2、15 g·L⁻¹ 2 种浓度。综合厌氧、好氧 2 种情况去除率情况可得,在污泥浓度为 5~11 g·L⁻¹ 时处理均相对较好。由于本实验为静态实验,并未将厌氧菌与好氧菌联动,因此厌氧烧杯中 NH₄⁺-N 的去除率与好氧烧杯中 TP 的去除率均较差^[12]。

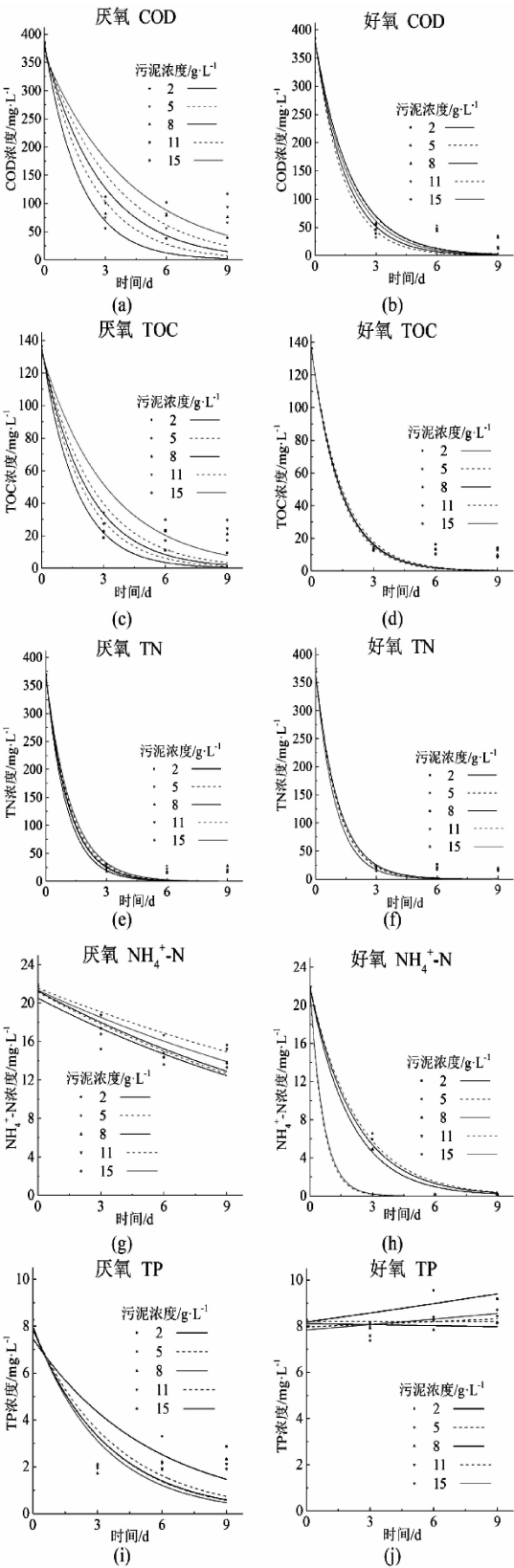


图 1 污泥对生活污水的处理能力
Fig.1 The sludge treatment effects on domestic sewage

2.2 污泥浓度对渗滤液中污染物去除效率的影响
根据一级动力学方程,拟合不同污泥浓度条件

下,2 组活性污泥对渗滤液的处理效率,结果见图 2。图 2(a)、(b)中,2 组烧杯中 5 种污泥浓度对 COD 的去除率无明显差异,在污泥浓度为 $5、15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时相对较好。图 2(c)、(d)中,厌氧烧杯中 TOC 去除效率在污泥浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时相对较好,去除率可达 62.71%;好氧烧杯中污泥浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 TOC 去除率为 71.33%。图 2(e)、(f)中,2 组烧杯中 TN 浓度变化可明显观察出,厌氧条件下污泥浓度为 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 TN 去除率最高,为 20.49%,好氧条件下污泥浓度为 $11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时去除率最高,为 20.92%。图 2(g)、(h)中,厌氧烧杯中 NH_4^+-N 的去除效率较好,好氧烧杯中的不明显,仅在污泥浓度为 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时去除率在 10%以上,而在污泥浓度为 $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时在处理 NH_4^+-N 时效率低于 5%;而好氧烧杯中在污泥浓度为 $11、15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时去除率在 15%以上。图 2(i)、(j)中,2 组烧杯中 TP 的去除效率均明显,结束时 TP 几乎完全去除。综合厌氧、好氧 2 种情况,在污泥浓度为 $8\sim 15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时处理均相对较好。

2.3 污泥对 2 种污水的处理效率对比

对比图 1 和图 2,可看出污泥对生活污水去除效率较渗滤液明显,由于本实验污泥未经驯化便直接处理渗滤液,而渗滤液污染物浓度较高,污染物复杂,超出了污泥荷载,因此各烧杯中污染物的去除率均较差。若要使用该化工处理厂的污泥处理渗滤液,需进一步驯化后才可投入使用。

对比污泥在 3 d 时对 2 种污水中污染物的去除效率,2 图 (a)、(b)中,2 组烧杯在污泥浓度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对 COD 的去除率均相对较好;(c)、(d)中,2 组烧杯中 TOC 去除效率在污泥浓度为 $2\sim 11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时相对较好;(e)、(f)中,2 组烧杯中 TN 浓度变化趋势最明显是在污泥浓度为 $8\sim 15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时;(g)、(h)中,除好氧污泥处理生活污水时 NH_4^+-N 去除较为明显,剩余烧杯均不明显,综合对比得处理效率较好的污泥浓度为 $11、15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;(i)、(j)中,除厌氧污泥处理生活污水时 TP 处理效率有明显差异,剩余烧杯均不明显,仅观察 2 组烧杯对生活污水中 TP 的处理效率不难看出在污泥浓度为 $11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时处理效率相对较好。综合上述结论,污泥浓度在 $8\sim 11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时处理各污水效率相对较好。

3 总结

通过上述一系列的污泥驯化培养,得到了以下结论:

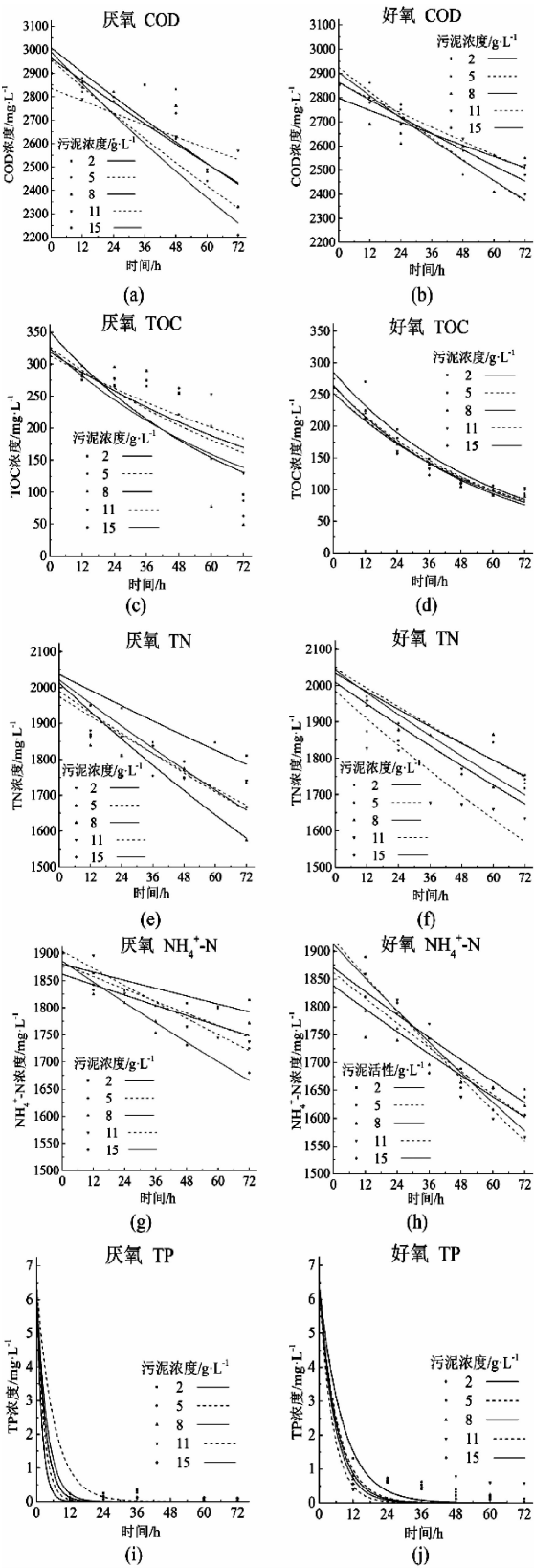


图 2 污泥对渗滤液的处理能力

Fig.2 The sludge treatment effects on leachate

(1)使用不同污泥浓度处理生活污水和渗滤液,并观察污水的各项指标,得出 $8\sim 11\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的污

泥浓度范围对 2 种污水的处理效率较好。

(2)该污泥处理生活污水的效率较好,而对渗滤液的处理效率相对较差,因此,该污泥可直接处理生活污水,而用于处理渗滤液,需进一步培养驯化。

参考文献:

[1] 龙博.污水处理新技术应用现状及发展趋势[J].资源信息与工程, 2018, 33(02): 179-180, 182.

[2] 周大石,夏澜.活性污泥培养和驯化[J].环境科技, 1990, 9(2): 35-37.

[3] 李晓明.活性污泥体系中磷化氢生物降解特性浅析[J].资源节约与环保, 2018(07): 84-85.

[4] 孙艺齐,卞伟,王盟,等.活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比[J].环境科学, 2017, 38(12): 5222-5228.

[5] 方芳,刘国强,郭劲松,等.活性污泥法对水溶性腐殖酸的去除效能与机制研究[J].环境科学, 2008(08): 2266-2270.

[6] 唐致文. A ~ 2/O 工艺处理系统脱氮除磷优化研究 [D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[7] 曹天昊,王淑莹,苗蕾,等.不同基质浓度下 SBR 进水方式对厌氧氨氧化的影响[J].中国环境科学, 2015, 35(08): 2334-2341.

[8] 国家环境护局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境出版社, 2002: 258-281.

[9] 苏高强,王淑莹,郑冰玉,等.温度和污泥浓度对碱性条件下剩余污泥水解酸化的影响[J].环境工程学报, 2013, 7(04): 1231-1236.

[10] 杨小丽,王世和.污泥浓度与曝气强度对 MBR 运行的综合影响[J].中国给水排水, 2007(01): 77-80.

[11] 杨赛,华涛.污水处理工艺的生态安全性研究进展[J].应用生态学报, 2013, 24(05): 1468-1478.

[12] 张勇,王淑莹,赵伟华,等.中试规模 AAO-曝气生物滤池双污泥系统的启动运行[J].化工学报, 2015, 66(10): 4228-4235.

(上接第 118 页)

[3] 王雨,何乐萍,吴双. 甘肃省涉重金属企业重金属污染防治管理模式研究[J]. 甘肃科技, 2017, 33(19): 82-87.

[4] 王世进,魏洁琼. 多元共治:土壤重金属污染治理机制的实现路径[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2017, 19(5):52-58.

[5] 龚亚龙,李红艳,李喜青,等. 郴州市王仙岭尾砂库重金属污染治理工程实例[J]. 环境工程, 2016, 34(2):170-174.

[6] 薛涛, XueTao. 环保 PPP 的八维变量分析及在重金属污染治理中的应用[J]. 环境保护科学, 2016, 42(2):38-41.

[7] 马永贤,赵文英,王菲. 河北省重金属污染防治现状及建议[J]. 环境与发展, 2016, 28(2):76-79.

[8] 王美舒. 论重金属污染防治环境标准制定的法律规制[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版), 2016, 14(3):64-71.

[9] 阳艺,李银秀. 湘江株洲段沉积层的重金属污染及治理对策[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(1):189-190.

[10] 刘佳丽,温馨. 基于 3S 技术的垃圾焚烧气体监测与扩散模型的研究与建立[J]. 电子设计工程, 2017, 25(18):161-163.

海上石油终端生产污水 A/O 处理中的微生物构效关系

苏三宝¹, 王林海², 林 军², 喻高明¹, 余跃惠^{1,*}

(1. 长江大学 石油工程学院, 武汉 430100; 2. 中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司, 广东 湛江 524057)

摘 要:为了探索海上石油终端生产污水 A/O 生化处理中的菌群构效关系,使用氯气校正法测量 COD 含量和基于 16S rDNA 基因构建克隆文库。结果发现上岸油水样 OW、厌氧处理 ABR 进口、ABR 出口和好氧处理 SBR 出口污水的 COD 分别为(630±52)、(776±40)、(385±31)、(76±13) mg/L。文库的 α 多样性指数表明 ABR 的微生物种类最多;冗余分析表明 COD 含量对 SBR 菌群影响最小。对于微生物组成,OW 主要包含:*Tepidiphilus* (33.6%)、脱硫弧菌(9.0%)、脱铁杆菌(7.40%)和紫单胞菌(4.9%);ABR:海细菌(15.6%)、弓形杆菌(9.4%)、互营菌(7.0%)、*Desulfocaldus* (4.7%)和脱硫微菌(2.3%);SBR:*Caloranaerobacter* (20.2%)、着色菌(8.3%)和小红卵菌(2.4%)。这些发现有助于提高海上油田生产污水处理效率、减少海洋石油工业对海洋环境的影响。

关键词:海上石油终端;化学需氧量;微生物多样性;冗余分析;构效关系

中图分类号:X741

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)03-0124-06

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.023

The Microbial Structure Activity Relationship in the Waste Water Treatment by A/O Process on an Offshore Oil and Gas Terminal

Su Sanbao¹, Wang Linhai², Lin Jun², Yu Gaoming¹, She Yuehui^{1,*}

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, WuHan 430100, China;

2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., ZhanJiang Guangdong 524057, China)

Abstract: To explore the microbial communities and structure activity relationship in the waste water treatment by A/O process on an offshore oil and gas terminal, COD was determined by chlorine correction method and 16S rDNA gene clone libraries were constructed. The COD of the water samples onshore oil-water OW, the influent of anaerobic ABR, the effluent of ABR and the effluent of aerobic SBR were 630±52, 776±40, 385±31, 76±13 mg/L, respectively. The α diversity indexes showed that ABR was most abundant in microbial species; and redundancy analysis demonstrated that the effect of COD on microbial community of SBR was minimum. Microbial composition of OW: *Tepidiphilus* (33.6%), *Desulfovibrio* (9.0%), *Deferribacteraceae* (7.40%) and *Porphyromonadaceae* (4.9%); ABR: *Marinobacterium* (15.6%), *Arcobacter* (9.4%), *Syntrophomonas* (7.0%), *Desulfocaldus* (4.7%) and *Desulfomicrobium* (2.3%); and SBR: *Caloranaerobacter* (20.2%), *Chromatiales* (8.3%) and *Rhodovulum* (2.4%). These findings could be used for improving the efficiency of production water treatment and alleviating the potential pollution caused by offshore oil and gas industry.

收稿日期:2018-08-18

基金项目:国家自然科学基金(51474034 和 51574038)。

作者简介:苏三宝(1986-),男,湖北省宜昌市人,博士生。

* 通信作者:余跃惠,E-mail:sheyuehui@163.com。

Keywords: offshore oil and gas terminal; microbial community; chemical oxygen demand (COD); redundancy analysis; structure activity relationship

海上石油终端接收、处理来自海上采油平台的采出液,是海洋石油工业重要的组成部分;其每天都会分离出大量生产污水,继而排放到附近海域。生产污水排放之前,必须经过严格处理,尤其是生化处理^[1]。

A/O 法(厌氧-好氧生物法)具有效率高、适应性强和操作简便的优点,被广泛用于处理工业污水;例如张楠等人使用 A/O 法处理石化综合废水,使出水 COD 达到 (63 ± 12) mg/L^[2];吕宝一等人使用 A/O 生物法处理高盐有机废水,系统的 COD 去除率达到 87.5%^[2];赵维电等人使用 A/O 法在 10 °C 低温条件下处理煤化工污水,使出水 COD 维持在 60 mg/L 以下,COD 去除率达到 90%^[4]。本研究中的海上石油终端也采用 A/O 生物法;生产污水首先进入厌氧 ABR(厌氧折流板反应器),进行厌氧降解有机物;ABR 的流出液接着进入 SBR(序列间歇式反应器),进行好氧处理。

微生物菌群强烈影响 A/O 法的处理效果,因此备受关注,例如张洪军等人使用变性梯度凝胶电泳(PCR-DGGE)和荧光原位杂交(FISH)检测 A/O 系统中的硝化菌群^[5];罗晓等人研究不同污泥浓度(MLSS)对微生物群落结构的影响^[6];而张楠等人检测发现,在 A/O 系统中变形菌群占比最大(60.0%)^[2]。

本文采用 16S rDNA 基因克隆文库方法^[7,8],分析海上石油终端生产污水 A/O 生化处理中的细菌群落,并使用 RDA(冗余分析)方法解析微生物菌群与 COD 含量之间的构效关系,从而为进一步提高生产水处理效率、减少海上石油工业对海洋环境的影响提供基础。

1 材料与方法

1.1 A/O 系统简介和样品采集

海上石油终端的 A/O 处理系统包括一座 ABR 和一座 SBR。ABR 容积约 2000 m³,主要作用为厌氧水解有机物,水力停留时间 1.5 d,连续进水。SBR 池容积约 1500 m³,平均分为 3 格,主要作用为好氧降解有机污染物,批式处理。

采集上岸油水混合物(OW)、ABR 进口水样、ABR 出口水样和 SBR 出口水样,并从 ABR 和 SBR

反应池中采集活性污泥泥样。

1.2 COD 测试和细菌基因组 DNA 提取

生产污水氯离子含量较高(约 15000 mg/L),使用氯气校正法测定 COD 含量^[9]。

水样取 200 mL/份,0.22 μm 无菌微孔滤膜过滤收集菌体;泥样取 0.5 g/份。各样品取 1 式 3 份,使用 PowerSoil © DNA Isolation Kit (MO BIO laboratories Inc.,USA),提取细菌基因组 DNA。电泳检测,-80 °C 冷冻保存。

1.3 克隆文库构建

用细菌基因组 DNA 为模板、27F/1492R 为引物,PCR 扩增细菌 16S rDNA 基因片段,扩增产物电泳分离,切胶回收;使用 pEASY-T3 克隆试剂盒(Trans Gen Biotech,BeiJing)克隆 16S rDNA 基因片段,转化进入感受态细胞。随机挑取若干白斑单克隆,建立克隆文库。使用载体引物 T7/SP6 二次扩增;扩增产物使用 *Hinf* I 和 *Hea* III (Thermo Scientific,USA)进行 rDNA 扩增片段限制性内切酶分析(ARDRA),划分 OTU(分类操作单元);每个 OTU 随机挑选 1~2 个代表克隆,使用引物 27F 测序^[8];测序结果上传至 GeneBank,并在 NCBI 上 BLASTn 检索。

1.4 多样性和系统发育分析

基于文库数据,使用 Rstudio (Version 0.99.892),搭载 spaa,vegan,permute 软件包,计算 α 多样性指数(辛普森指数、香农-威尔指数);以及进行评价细菌群落和 COD 含量关系的 RDA 分析^[10]。

使用 MEGA7 (Version 7.0.14),对文库 OW、ABR 和 SBR 中的主要 OTU(含量>3%)进行系统发育分析,构建邻接法系统发育树。

1.5 GeneBank 登录号

GeneBank 登录号: KY082911-KY082928, KY082930-KY082961, KY087963- KY087978。

2 结果

2.1 COD 含量

使用氯气校正法测试的水样 OW、ABR 进口、ABR 出口、SBR 出口的 COD 值,分别为 (630 ± 52) 、 (776 ± 40) 、 (385 ± 31) 、 (76 ± 13) mg/L,如图 1 所示。结果发现,ABR 进口水样的 COD 含量比 OW 的

COD 含量更高,这是因为在油气处理过程中添加了多种化学试剂,如破乳剂、清水剂等,不仅增加了 COD 含量,同时也增加了生产污水中有机污染物的复杂程度,从而增加了降解难度。根据图 1,ABR 的 COD 去除率为 $(49.6\pm9.0)\%$,SBR 的 COD 去除率为 $(80.0\pm4.9)\%$,A/O 系统的 COD 去除率为 $(90.2\pm1.5)\%$ 。

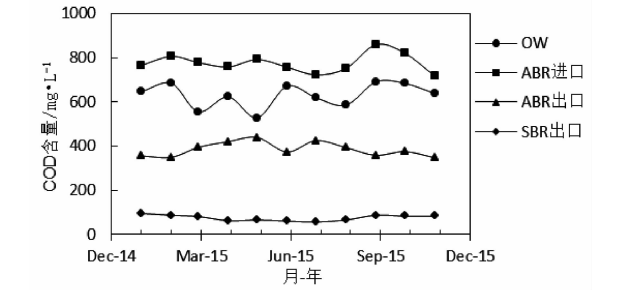


图 1 水样的 COD 含量曲线

Fig.1 The COD content of water samples

2.2 微生物多样性

α 多样性指数(辛普森指数和香农-威尔指数)均表明生物多样性次序 $ABR>SBR>OW$,说明厌氧反应池(ABR)微生物种类最多、均匀性最好(表 1)。

β 多样性分析(RDA 分析)发现文库 OW、ABR 和 SBR 没有聚类(图 2),说明 OW 水样、ABR 活性污泥和 SBR 活性污泥菌群相互关联性较小。在

表 1 文库的详细信息

文库名称	克隆数	OTU 数	α 多样性指数	
			辛普森	香农-威尔
OW	122	18	0.842	2.3
ABR	128	32	0.952	3.21
SBR	84	16	0.899	2.47

RDA 分析中,COD 值使用 OW 水样、ABR 出口水样和 SBR 出口水样 COD 平均值,结果发现文库 OW、ABR 和 SBR 与原点的连线和 COD 向量的夹角 $\alpha<\beta<90^\circ<\gamma$;夹角越小说明关联越强,因此 COD 含量对 OW 影响最大,对 SBR 活性污泥影响最小。

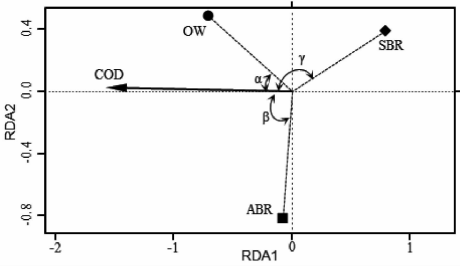


图 2 RDA 分析结果

Fig.2 The result of RDA analysis

2.3 物种组成

在门水平,如图 3 所示,OW 的物种主要分布在变形菌门(66.5%)、厚壁菌门(11.4%)和脱铁菌门(7.40%);ABR 则主要为变形菌门(50.8%)、互营

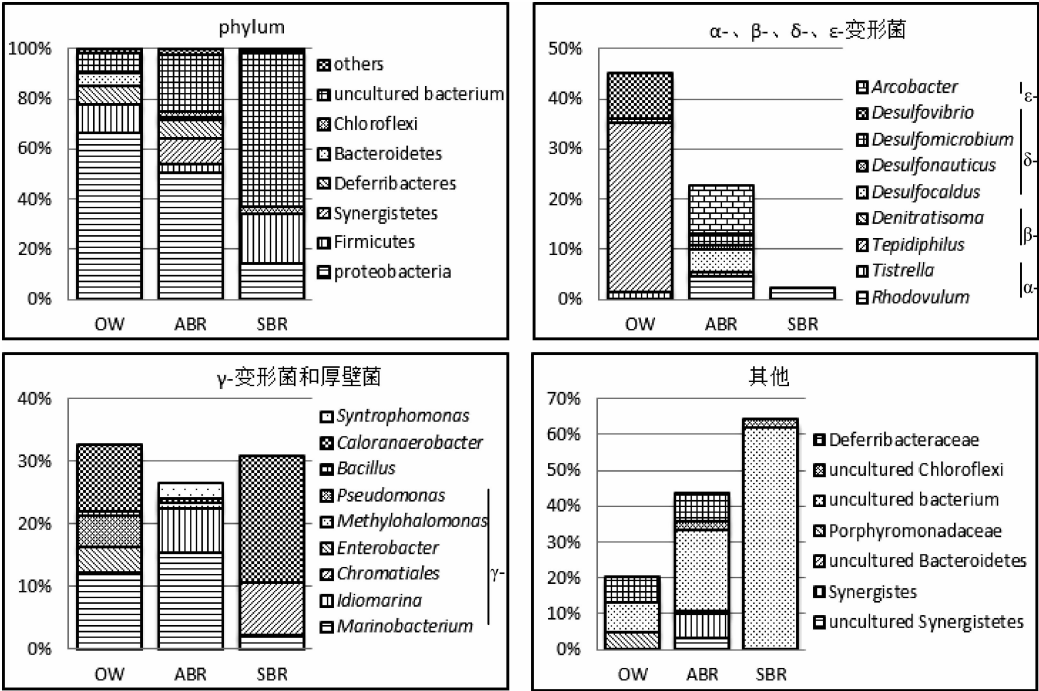


图 3 样品 OW、ABR 和 SBR 的物种组成

Fig.3 The microbial communities of OW, ABR and SBR

菌门(10.2%)和脱铁菌门(7.8%);而 SBR 主要为厚壁菌门(20.2%)和变形菌门(14.3%)。

在属水平,OW 主要含 *Tepidiphilus* (33.6%)、海细菌 (12.3%)、脱硫弧菌 (9.0%)、脱铁杆菌 (7.40%)和紫单胞菌(4.9%);ABR 主要含海细菌 (15.6%)、弓形杆菌(9.4%)、脱铁杆菌(7.8%)、互营菌 (7.0%)、海源菌 (7.0%)、*Desulfocaldus* (4.7%)、脱硫微菌 (2.3%);而 SBR 主要含 *Caloranaerobacter* (20.2%)、着色菌 (8.3%)、小红卵菌(2.4%)、海细菌(2.4%)。

另外,在 OW、ABR 和 SBR 中未培养菌的含量依次增大,分别为 8.2%、22.7%和 61.9%。

2.4 系统发育分析

系统发育分析结果(图 4)发现,OW 的主要 OTU 聚类在脱铁杆菌门、 δ -变形菌门、厚壁菌门、 β -

变形菌门和 γ -变形菌门;ABR 的主要 OTU 聚类在脱铁杆菌门、 δ -变形菌门、互营菌门、 ε -变形菌门、 α -变形菌门和 γ -变形菌门;而 SBR 的主要 OTU 聚类在厚壁菌门和 γ -变形菌门。

大量 SBR 和 ABR 的主要 OTU 与未培养菌亲缘关系较近(图 4 星号标记),其中 ABR-10、SBR-9 和 ABR-14 聚为 ClusterA;ABR-11、SBR-2、SBR-15 和 SBR-13 聚为 ClusterB;它们可能是一些新的微生物,存在于 ABR 活性污泥和 SBR 活性污泥中,有待进一步研究。

3 讨论

使用 A/O 法对海上石油终端生产污水处理后,排海污水 COD 含量达到 (76 ± 13) mg/L,系统的

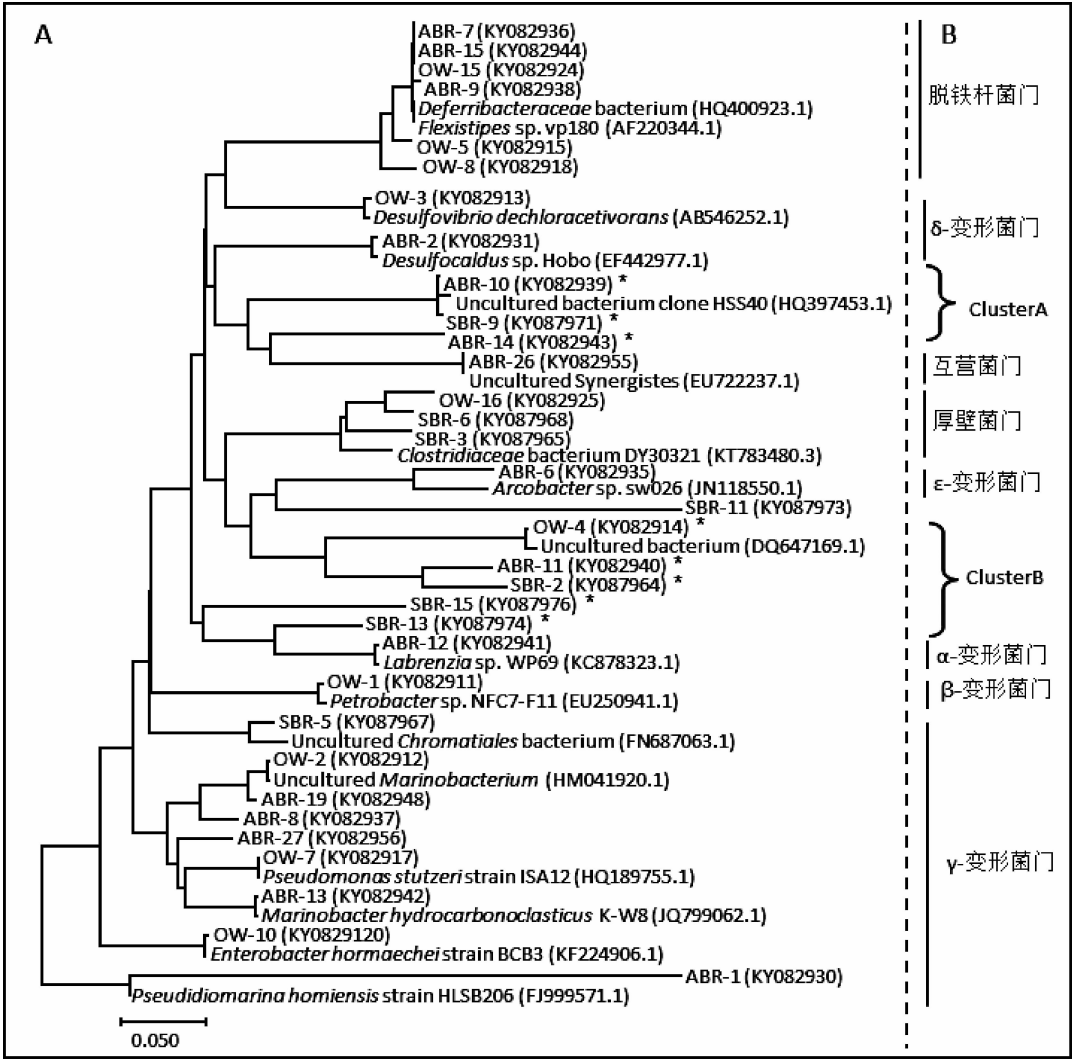


图 4 A:主要 OTU(含量>3%)的系统发育树,未培养菌用 * 标记;B:对应的门分离水平
Fig.4 A:The phylogeny tree for the main sequences (>3%) in clone libraries OW, ABR and SBR. The uncultured bacterium was marked by star. B:The phylum levels correspondence to each main OTUs.

COD 去除率达到 $(90.2 \pm 1.5)\%$, 处理效率高, 稳定性较好, 结果与文献报道大致相当^[2]。

鉴于菌群关系对 A/O 处理系统的重要性^[2, 5, 6], 本文对海上石油终端生产污水 A/O 生化处理中的微生物菌群进行了研究。结果发现, α 多样性指数表明 ABR 活性污泥细菌种类最多、均匀性最好(表1)。在 β 多样性分析(RDA 分析)的结果中, OW 水样、ABR 活性污泥和 SBR 活性污泥的细菌群落相互关联性小(图2), 这不仅是因为 ABR 和 SBR 条件迥异(ABR 处理缺氧状态、SBR 处于充分曝气状态)^[3, 4], 而且还因为 ABR 和 SBR 功能互补(ABR 以水解大分子为主、SBR 需要彻底降解有机污染物)^[2]。RDA 分析还发现, COD 含量对 OW 水样的细菌群落影响最大, 对 SBR 活性污泥的细菌群落影响最小; 这是因为 OW 水样源自油层, 属于寡营养特征, 因此对 OW 水样中存在的细菌有较强选择压力; 而 SBR 在操作运行中会添加各种功能菌和营养物, 因此以 COD 反映的有机物对 SBR 活性污泥中的细菌群落影响较小, 一定程度上反映了 SBR 活性污泥的细菌群落较稳定。

系统发育分析发现(图4), 在文库 OW 中, OW-1(33.6%)与 *Tepidiphilus* 相似性高, Salinas M B 等人从采油井井口样品分离出一株 *Tepidiphilus*, 嗜热, 可还原硝酸盐降解石油烃^[11]; OW-3(9.0%)与脱硫弧菌(*Desulfovibrio*)亲缘关系近, Mori 等人从油田地面设备分离出一株脱硫弧菌, 可以还原硫酸盐降解石油^[12]。OW-7(4.10%)与施氏假单胞菌(*Pseudomonas stutzeri*)的相似性 100%, 其可还原硝酸盐和降解石油烃^[13]。Hua 等人研究的阴沟肠杆菌(*Enterobacter cloacae*)与 OW-10(4.10%)相似性很高(99%), 其也可以进行石油烃降解^[14]。总结发现, 在上岸油水样 OW 中的微生物主要涉及硫酸盐还原、硝酸盐还原和厌氧石油烃降解。

在 ABR 文库中, ABR-26(7.0%)与互养菌亲缘关系近; 互养菌可以厌氧降解石油, 产物为乙酸盐^[15]; 乙酸盐可以作为厌氧菌的碳源和电子供体, 说明互养菌在厌氧石油烃降解中处于中间环节, 从而关联其他各类微生物。ABR-6(9.4%)与弓形杆菌相似性高, 其在严重生物降解的油砂矿中被检测到^[16], 说明其可能在油砂矿生物降解过程起作用。ABR-2(4.7%)与 δ -变形菌门的 *Desulfocaldus* 相似性高, 其涉及还原硫酸盐降解石油烃^[17]。ABR-7(3.9%)和 ABR-9(3.9%)与脱铁杆菌亲缘关系近, 其在油藏中也被检测到, 可以以固相铁矿物作为电

子受体厌氧氧化石油烃^[18]。

在文库 SBR 中, SBR-3(7.1%)和 SBR-6(10.7%)与厚壁菌门的梭菌相似性高, 其在油藏产出水烃降解富集物中被检测到^[19]。而 SBR-5(8.3%)与 γ -变形菌门的着色菌亲缘关系近, 其在原油和多环芳烃降解实验中被检测到^[20]。

因此, 本研究发现海上石油终端生产污水 A/O 法生物处理中的微生物主要涉及石油烃降解, 在 ABR 中主要涉及厌氧石油烃降解; 在 SBR 中涉及石油烃、多环芳烃等的好氧降解。

然而, SBR 活性污泥中未培养细菌占比太高(61.9%), 说明当前对 SBR 活性污泥细菌群落认识程度较低, 需要进一步研究。

4 结论

本文研究发现:

(1) α 多样性指数表明 ABR 微生物种类最多、均匀性最好;

(2) RDA 分析说明 COD 对 OW 影响最大, 对 SBR 影响最小;

(3) OW 主要包含: *Tepidiphilus*、脱硫弧菌、脱铁杆菌和紫单胞菌; ABR 主要含: 海细菌、弓形杆菌、互营菌、*Desulfocaldus* 和脱硫微菌; SBR 主要含: *Caloranaerobacter*、着色菌和小红卵菌;

(4) 在 ABR 中主要涉及厌氧石油烃降解; 在 SBR 中涉及石油烃、多环芳烃等的好氧降解。

本研究结果可指导进一步提高海上石油终端生产污水处理效率、减少海上石油工业对海洋环境的影响。

参考文献:

- [1] 杜春安, 潘永强, 吴晓玲. 海上油田污水处理技术研究进展[J]. 化工进展, 2012(05): 1149-1153.
- [2] 张楠, 初里冰, 丁鹏元, 等. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J]. 中国环境科学, 2015(01): 80-86.
- [3] 吕宝一, 谢冰, 邵春利, 等. 两段 A/O 生物接触氧化法处理高盐有机废水研究[J]. 中国给水排水, 2011(01): 102-104.
- [4] 赵维电, 王新华, 高宝玉. A/O-生物膜系统处理煤化工废水[J]. 环境工程学报, 2012(10): 3481-3484.
- [5] 张洪军, 朱彤. A/O 工艺膜生物反应器处理生活污水的脱氮特性及硝化菌群的分子检测[J]. 环境污染与防治, 2009(01): 47-50.

- [6] 罗晓, 郑向阳, 赵丛丛, 等. A/O 工艺中污泥浓度对微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2018(01):275-283.
- [7] Zhang F, She Y H, Chai L J, *et al.* Microbial diversity in long-term water-flooded oil reservoirs with different in situ temperatures in China. [J]. Scientific Reports, 2012,2(760):760.
- [8] Fan Z, She Y H, Li H M, *et al.* Impact of an indigenous microbial enhanced oil recovery field trial on microbial community structure in a high pour-point oil reservoir[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012,95(3):811-821.
- [9] 彭跃, 胥学鹏, 张丽华, 等. 氯气校正法测定高氯废水中化学需氧量方法的改进[J]. 中国环境监测, 2005(02):55-56.
- [10] Kambura A K, Mwirichia R K, Kasili R W, *et al.* Bacteria and Archaea diversity within the hot springs of Lake Magadi and Little Magadi in Kenya [J]. BMC Microbiology, 2016,16(1):136.
- [11] Salinas M B, Fardeau M L, Cayol J L, *et al.* *Petrobacter succinatimandens* gen. nov., sp. nov., a moderately thermophilic, nitrate-reducing bacterium isolated from an Australian oil well [J]. International Journal of Systematic & Evolutionary Microbiology, 2004, 54 (Pt 3):645.
- [12] Mori K, Tsurumaru H, Harayama S. Iron corrosion activity of anaerobic hydrogen-consuming microorganisms isolated from oil facilities. [J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2010,110(4):426-430.
- [13] Sorokin D Y, Teske A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic oxidation of thiosulfate to tetrathionate by obligately heterotrophic bacteria, belonging to the *Pseudomonas stutzeri* group[J]. Fems Microbiology Ecology, 1999,30(2):113.
- [14] Hua X F, Wu Z J, Zhang H X, *et al.* Degradation of hexadecane by *Enterobacter cloacae* strain TU that secretes an exopolysaccharide as a bioemulsifier. [J]. Chemosphere, 2010,80(8):951-956.
- [15] Pham V D, Hnatow L L, Zhang S, *et al.* Characterizing microbial diversity in production water from an Alaskan mesothermic petroleum reservoir with two independent molecular methods [J]. Environmental Microbiology, 2009,11(1):176-187.
- [16] Hubert C R, Oldenburg T B, Fustic M, *et al.* Massive dominance of Epsilonproteobacteria in formation waters from a Canadian oil sands reservoir containing severely biodegraded oil[J]. Environmental Microbiology, 2012, 14(2):387.
- [17] Meyer B, Kuever J. Phylogeny of the alpha and beta subunits of the dissimilatory adenosine - 5'-phosphosulfate (APS) reductase from sulfate-reducing prokaryotes--origin and evolution of the dissimilatory sulfate-reduction pathway[J]. Microbiology, 2007,153 (Pt 7):2026.
- [18] Yousuf B, Sanadhya P, Keshri J, *et al.* Comparative molecular analysis of chemolithoautotrophic bacterial diversity and community structure from coastal saline soils, Gujarat, India[J]. BMC Microbiology, 2012,12(1):150.
- [19] Wang L Y, Gao C X, Mbadinga S M, *et al.* Characterization of an alkane-degrading methanogenic enrichment culture from production water of an oil reservoir after 274 days of incubation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(3):444-450.
- [20] Reunamo A, Ylihemminki P, Nuutinen J, *et al.* Degradation of crude oil and PAHs in iron-manganese concretions and sediment from the northern Baltic Sea [J]. Geomicrobiology, 2016.

偏远地区怎么留住高学历人才

——以新疆地区为例

吴印佳

(西南交通大学 希望学院, 成都 610400)

摘 要:高学历人才是偏远地区经济发展的宝贵资源,现阶段偏远地区高学历人才紧缺的问题十分严重,人才流动性相对较强。本文以新疆地区为例,针对高学历人才比重偏低、行业分布不均、产业分布不合理的现状,从区位、制度、环境以及薪资等方面分析了新疆地区人才流动的成因,最后探讨了偏远地区留住高学历人才的途径,从资金支持、环境改善、薪资管理等方面为偏远地区留住高学历人才提供了建议。

关键词:偏远地区;高学历人才;新疆地区

中图分类号:G316 文献标识码:A 文章编号:1001-7119(2020)03-0130-04
DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.03.024

How Do Remote Areas Retain Highly Educated Talents

——Taking Xinjiang Uygur Autonomous Region as An Example

Wu Yinjia

(Southwest Jiaotong University Hope College, Chengdu 610400, China)

Abstract: Highly educated talents are precious resources for the economic development of remote areas. At present, the shortage of highly educated talents in remote areas is very serious, and the mobility of talents is relatively strong. Taking xinjiang as an example, this paper analyzes the causes of talent flow in xinjiang from the aspects of location, system, environment and salary, aiming at the low proportion of talents with high academic qualifications, uneven industrial distribution and unreasonable industrial distribution. Finally, this paper discusses the ways to retain the well-educated talents in the remote areas, and provides some Suggestions from the aspects of financial support, environmental improvement and salary management

Keywords: remote area; Highly educated talents; Xinjiang region

高学历人才是具有较高文化素养的新生化人才,其在推动经济发展过程中扮演着主力军的角色。而人才,尤其是高学历人才,是推动偏远地区实现全面化发展的重要要素。偏远地区高学历人才越少,经济发展就越缓慢,进而就越不能够吸引到高学历人才,此种状况对偏远地区来讲,将会是一个严峻的考验。如若不能够及时采取有效举措,该地区高素质人才流失情况会更加严重。目前,国内学术界对

高学历人才的研究仍然停留在流动性原因或者是流动性的经济影响效用等方面,尽管有些学者的研究涉及到高素质人才流动的对策,但从整体上来讲对这类问题的研究还是比较欠缺的,尤其是针对偏远地域的研究则更少。故而,本文以新疆地区为例,对偏远地区怎么留住高学历人才进行探讨,具有一定的创新性。

收稿日期:2019-06-26

作者简介:吴印佳(1986-),女,四川眉山人,硕士,讲师,研究方向:区域经济,人力资源管理。

1 新疆地区高学历人才现状

根据新疆人力资源和社会保障部的用工情况调查结果显示,新疆地区劳动力市场主要存在以下问题:

(1)高学历人才比重偏低。据有关数据显示,2018 年新疆地区大学专科学历以上的从业人员占总人数的 13.86%,而高中学历及其以下的占到了 86.14%,这说明了高学历人才在新疆地区人才总数中的比重较低,同时也表明新疆高学历人才的缺乏^[1-3]。

(2)高学历人才行业分布不均。在新疆地区,大专及以上学历人才主要集聚在教育行业(百分比为 20.34%)、社会公共事业管理行业(百分比为 22.50%),而工业行业(包含有制造行业、生产与供应行业、采矿业)中高素质人才的总数量为 201945,在新疆地区高学历从业人员总数的百分比为 14.95%,可见从新疆地区高学历人才的行业分布状况上来看,教育行业与社会公共事业管理等知识密集化行业中展现了高学历人才聚集的趋势^[4],而有的以体力劳动为主的密集型行业以及以生产行业则出现人才离散化趋势,可见高素质人才行业分布不均。

(3)人才产业分布不合理。据经济普查数据显示:专科及以上学历的人员在第一产业中的数量为 60184 人,比重 4.46%,在第二产业中的数量为 87786 人,比重 19.88%,在第三产业中的数量为 1022036 人,比重 75.66%,据此可知,高学历人才在新疆地区大多集聚在第三产业中,而第一第二产业中高学历人才比较匮乏^[5]。

2 新疆地区人才流动的成因

2.1 区位不佳,经济水平较低

偏远地区基本上都分布在我国边疆地区,新疆省位于我国西北边陲,以山地与盆地为主,地理资源条件较差。现阶段,新疆地区物质条件、生活环境以及工作设施等都远远落后于其他省份,再加上新疆省经济发展水平明显较低,这就会导致该地区高学历人才不断流失的现象^[6]。据有关统计显示,有 34.6%的高学历人才认为新疆地区地理位置不佳,不是理想的工作城市。同时有 22.5%的高学历人才认为新疆地区经济发展水平不高,不能够更好的

展示自己的才华,实现自己的理想。有 32.2%的高学历人才认为新疆地区薪资水平不高,再加上 15.7%本土化高学历人才不愿意留在本地就业,这些状况从整体上造成了新疆地区高学历人才的流动^[7]。图 1 为 2018 年新疆各地区经济综合指数与人口综合指数情况。

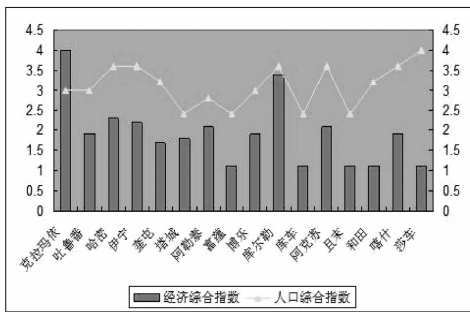


图 1 新疆地区人口指数与经济指数

Fig.1 Xinjiang Population Index and Economic Index

由图 1 可知,新疆各地区除克拉玛依与库尔勒处于 4.0 左右外,其他地区经济指数在 2.0 左右,而像高蕴、库车等地区,经济发展指数仅为 1.0。而人口指数也不高,由此可以说明,新疆各地区的经济及人口都较低。十分需要高质量人才的引入。但高质量人才需要响应的薪资为基础,下节对此进行具体分析。

2.2 薪资不高,人本思想欠缺

官方数据显示:薪资待遇方面,新疆地区有一半以上的高学历人才平均月薪在 2000 元以下,月薪 5000 元以上的还不足 3%,与我国东南沿海发达地区相比,相差甚远。福利待遇方面,仅有不到 30%的高学历人才所在的企业为他们缴纳比较健全的“五险一金”,而 70%以上的高学历人才所在的企业只提供部分或不提供“五险一金”,这就造成了绝大多数高学历人才不愿意在该地区长期就业^[8]。

此外,许多企业除了提供给高学历人才餐补、带薪休假之外,其余福利则很少见。由此可以看出,薪资水平不高、福利待遇不全在很大程度上影响着新疆地区高学历人才的去留情况。除此之外,在新疆地区,大部门高学历人才所在的企业很少为其提供详细的职业规划,并且晋升空间不足,但是最为重要的是该地区企业比较欠缺对员工的人文关怀,进而使得高学历人才的大批量流失趋势^[9]。依据以上论述可以看出,新疆地区众多企业的薪资福利待遇水平不高,管理过程中缺少人本化思想,故而,该地区很难留住和吸引高学历人才。

2.3 环境不好,市场发育较慢

通过对高学历就业倾向调查显示,对待就业地的选择 32% 的人 would 依据地域环境,新疆省地处偏远,在经济环境、人才策略、产业制度、科教事业以及社会政治等方面的软环境比较欠缺。同时,新疆地区人才市场发展比较缓慢,整个人才招聘机制还不是很健全,比如,大多数高学历人才获取招聘信息的渠道集中于网络或者是朋友介绍,却很少涉及报刊杂志、电视广告等招聘渠道,而校园招聘、人才市场的招聘就更少^[10]。大部门高学历人才认为通畅的招聘渠道是吸引他们的主要要素,而新疆地区环境不好,人才市场发育缓慢,使得该地区招聘途径受限,进而致使新疆地区很难留住高学历人才。

2.4 制度不全,管理过程偏颇

新疆地区在人才培训体制、绩效评估体系、社会保障制度等方面的建设还不完善,进而导致对高学历人才管理的不合理化、不科学化,使得该地区高学历人才大量流动^[11]。据有效数据显示,在新疆地区仅有不到 30% 的高学历人才可以享有完整的保险待遇,现有企业对高学历人才的重视度不够,所提供的保险业务不足,甚至有些企业宁愿选择没有保险要求的低学历人才,也不愿意投资高学历人才。再加上新疆地区多数企业绩效评估体系的完整性不强等要素,进一步导致新疆地区对高学历人才的吸引力不足^[12]。同时该地区的人才培训体制还不是很完善,多数企业对高学历人才的培训只是停留于基本的入职培训,而很少涉及到专业技能、理论知识以及管理能力的培训。这种人才制度不健全,管理过程偏颇的现状使得新疆地区不能很好地管理高学历人才,使得大量高学历人才离职。

3 偏远地区留住高学历人才的途径

3.1 增加资金支持,加快产业升级

新古典经济增长理论中提出,经济增长的核心元素是资本,资本量的增加有效促进经济发展,而资本的欠缺是偏远地区经济发展的瓶颈,经济发展缓慢又是偏远地区人才流失与人才不足的首要原因。故而,政府部门需要重视高学历人才对新疆地区发展的影响效用,增加财政支持^[13]。银行部门需要提升对中小企业信贷支持力度,拓宽金融服务范围以及增多产品的种类,加快企业发展速度,提升对高学历人才的吸引力。此外,新疆地区还可以有效发挥自身的资源优势,来解决自身资金不足的困境。大

力兴建产业园区,建设产业群体,并且逐步引进与开发高新技术产业,为引进高学历人才提供有效的硬件设备,基于自身的优势产业,及时淘汰落伍的产业,加快新疆地区的产业升级,着力引入生命力旺盛的新型产业项目。增加资金支持与加快产业升级,是有效留住高学历人才的途径。

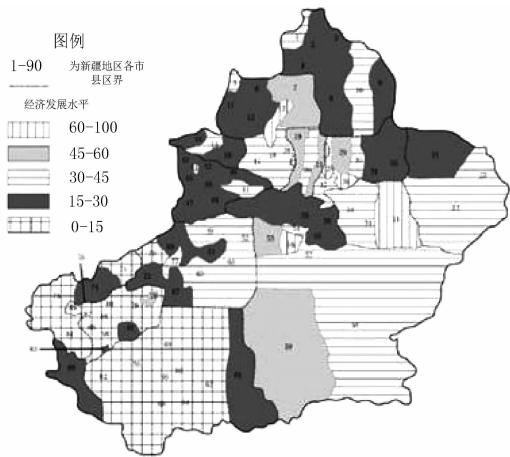


图 2 新疆各地区经济发展水平

Fig.2 Economic development level of various regions in Xinjiang

分析图 3 可知,新疆各地区经济发展水平不同。其中左下部分经济发展水平仅在 0~15 分内,占总面积的五分之一,而 15~30 分及 30~45 分占总面积的三分之二左右,而 60~100 分的仅为总面积的二十分之一。由此可知,新疆大部分地区都处于经济发展落后阶段。

3.2 改善人才环境,推动市场健全

改善新疆地区人才建设环境,尤其需要进一步建设人才的软环境,创建吸引人才的优质化环境。通过观察发现,某一地域能够长久留住高学历人才的主要原因里,环境要素占主要地位,比如交通便利的城市能够吸引到更多的高学历人才。而软环境在留住高学历人才的过程中同样发挥着重要的作用,因而新疆地区需要进一步完善软环境,比如高学历人才的优惠政策、户口问题的解决,有调查显示 70% 以上的高学历人才认为居住地户口问题对他们能否长久留在偏远地区有重要影响。因而,新疆地区在地处偏远的情况下,要想更好的留住高学历人才,在完善各种硬件环境的前提下,还需要创建一个重视人才、重视知识的软环境。此外,还需要推动人才市场体系的健全发展,提升人才市场、企事业以及政府部门之间信息共享的力度,破除高学历人才的求职信息屏障,及时提供给外来高学历人才所需的

求职信息,健全流动性人才社会保障机制以及档案管理机制,进一步完善高学历人才的工作环境。为此新疆地区开展了相关培训会,以提高新疆地区的全面发展。

3.3 健全考核机制,促使薪资提升

科学、公平、有效、公正的绩效考核机制是发挥人才潜力、激起人才工作热情、有效利用人才资源的前提条件,因而位处偏远地区的企业,一是需要建立起公平、科学的绩效考核机制,标准化管理绩效考核;二是选取恰当的考核模式开展科学、公平、有效、公正的考核;三是将人才利益与绩效考核结合在一起,尤其是营销人才与技术性人才。偏远地区尤其是在新疆地区企业工资水平比较低,同时还具有比较低的福利与社保水平。数据调查发现,新疆地区为高素质人才缴纳养老保险的企业有25%,缴纳医疗与工商保险的企业有24%,然而,在各种福利待遇中提供孩子教育补助、交通补助的企业还不到10%,所以偏远地区企业需要公平化的薪酬福利待遇,合理的提升薪资福利标准,实施科学的奖惩措施,推行待遇倾斜制度,确保高学历人才的实际收入水平有很大的提升,进而鼓励高学历人才的地区建设功劳。此外,还需要健全企业的薪资福利待遇,有计划、有目的地保留和吸纳高学历人才,增强高学历人才的地域满意度与忠诚度。

3.4 强化人本思想,激发工作热情

除了上述三点措施,新疆地区还需要强化人本管理思想,激发他们的工作热情,将竞争机制引入到人才管理过程中,摒弃传统的按资论辈的观点,依据业绩与能力选拔人才,及时将高学历人才安排在适合的岗位,推行多元化晋升机制,完善人才晋升体系。此外还需要,完善帮扶机制,给予高学历人才必要的关怀,提供给他们必要的医疗支持,并落到实处。借助于相应的激励手段有效激发高学历人才投身偏远地区的积极性,充分发挥高学历人才在偏远地区经济建设中的效应。健全人才培训体系,增加对高学历人才培训费用,新疆地区企业需要转变人才理念,不但要完善高学历人才的入职培训体制,还需要顺应目前职位的需要,制定出长期人才培训计划,相应地加大资金的支持,进行创新性培训,进而构建出全方位、多层次人才培训机制,这不仅可以提升高学历人才的工作绩效,还可以激发他们对工作

的热情,使他们真正体会企业重视人才的价值理念,对企业产生归属感,降低人才的流失率。

参考文献:

- [1] 中共宁夏区委政策研究室课题组,蔡珺,袁红起. 推进人才向西部地区和基层一线流动问题研究[J]. 领导科学,2014,30:40-42.
- [2] 陈玉兰. 我国人才结构失衡现象及其对策研究——基于结构偏离度分析视角[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版),2013,06:109-112.
- [3] 周凯,苏懂美,苗瑾超. 南疆地区应用型高校人才培养方案的研究与设计——以新疆大学科学技术学院通信工程专业为例[J]. 软件导刊.教育技术,2019,18(5):88-90.
- [4] 吴江,董博,薛泽林. 吉林省偏远地区企事业单位人才开发困境问题研究[J]. 延边大学学报(社会科学版),2019,52(3):121-127+146.
- [5] 姜国春. 探索偏远地区高校人才引进新机制[J]. 现代经济信息,2018(17):447.
- [6] 刘玲,李慧萍,杨思宇,等. 新疆科技人才流动调查与对策建议[J]. 中国科技资源导刊,2017,49(4):93-102.
- [7] 和晶,宋海军,杨大鹏,等. 新疆科技人才分类评价机制改革研究调研报告[J]. 科技创新导报,2019,16(2):249-250.
- [8] 于迎霞. 高校电子信息类创新型人才培养的实践探索——以新疆大学为例[J]. 高教论坛,2018(3):22-27.
- [9] 季茂岳,王晓峰,孙卫国. 新疆师范大学创新创业教育开展现状与对策研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版),2018,37(1):74-78.
- [10] 官鑫,刘建成. “一带一路”倡议对新疆高校人才培养的几点思考[J]. 现代职业教育,2017(24):71-71.
- [11] 刘培俊. 新时代中国特色新疆风格的艺术人才培养机制刍议——“艺术教育”与“教育艺术”融合提升[J]. 新疆艺术学院学报,2018, v. 16; No. 60(1):4-10.
- [12] 毛晓峰,窦雪,阿地力江·伊明. 新形势下新疆高校引进科技人才的思考[J]. 中华医学科研管理杂志,2018,31(3):211-214.
- [13] 地里夏提·买买提. 加强新疆双语教育,促进少数民族人才培养[J]. 当代教育实践与教学研究,2018(04):46-47.

《科技通报》文稿编排和参考文献著录规则

1.文稿编排

文稿编排顺序:中文题名,作者中文姓名,单位、所在城市、邮政编码,中文摘要,关键词(首个关键词为二级学科名),中图分类号,英文题名,作者英文姓名,单位、所在城市、邮政编码、国别,英文摘要,英文关键词,引言,正文,参考文献。首页下脚注明基金项目名称及编号,作者简介(包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称或学位、主要研究方向、E-mail 地址)。正文图、表应附在文中相应位置,写明图序、图题。表格采用三线表,写明表序、表题。图题、表题需附英文。计量单位采用中华人民共和国法定计量单位。

2.参考文献

参考文献请遵循 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录规则》的规定,采用顺序编码制。文中序号与文后参考文献表序号一一对应。文献数量一般不少于 8 条/篇。每条参考文献左起顶格排;序号用阿拉伯数字表示,加方括号,空一字格后接内容。文献作者 3 人以内全列出,若超过 4 人,则必须列出前 3 人,后再加“等”或“et al.”。具体格式如下:

- a.专著、论文集、学位论文、报告
[序号] 著者.题名[文献类型标志].其他责任者.版本.出版地:出版者,出版年:引文页码[引用日期].获取和访问路径
[1] 赵耀东.新时代的工业工程师[M/OL].台北:天下文化出版社,1998[1998-09-26].<http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.new.htm>.
- b.期刊文章
[序号] 作者.题名[文献类型标志].刊名(外文刊名和作者的名字部分可缩写,并省略缩写点“.”),年,卷(期):页码[引用日期].获取和访问路径
[2] 何龄修.读顾城《南明史》[J].中国史研究,1998,27(3):167-173.
[3] Sharpley A N, Chapara S C, Wedepohl R, et al. Managing Agriculture Phosphorus for Protection of Surface Waters: Issues and Options[J]. J Environ Qual. 1994,18(6):392-399.
年、卷、期、页的几种排法:1)年,卷(期):页 2)年,卷:页;3)年(期):页
- c.专著中的析出文献
[序号] 著者.题名[文献类型标志]//源文献责任者.书名.版本.出版地:出版者,出版年:析出文献页码[引用日期].获取和访问路径
[4] 钟文发.非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮.运筹学的理论与应用--中国运筹学会第五届大会论文集.西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- d.报纸文章
[序号] 作者.题名[文献类型标志].报纸名,年-月-日(版次)[引用日期].获取和访问路径
[5] 谢希德.创造学习的新思路[N].人民日报,1998-12-25(10).
- e.技术标准
[序号] 责任者.标准代号 标准名称[文献类型标志].出版地:出版者,出版年:引文页码[引用日期].获取和访问路径
[6] 全国技术委员会.GB/T16159-1996 汉语拼音正词法基本规则[S].北京:中国标准出版社,1996:40-42.
- f.专利
[序号] 专利申请者或所有者.专利题名:专利国别,专利号[文献类型标志],公告日期或公开日期[引用日期].获取和访问路径
[7] 姜锡洲.一种温热外敷药制备方案:中国,88105607.3[P].1989-07-26.
- g.学位论文
[序号] 作者.题名[文献类型标志].出版地或保存地:出版者或保存者,出版年
[8] 陈淮金.多机电力系统分散最优励磁控制器的研究[D].北京:清华大学电机工程系,1988.
- h.电子文献
[序号] 责任者.题名[文献类型标志/文献载体标志].出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期].获取和访问路径
[9] 王明亮.关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[CP/DK].(1998-08-16)[1998-10-04].<http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.
文献类型标志:普通图书 M;会议录 C;汇编 G;报纸 N;期刊 J;学位论文 D;报告 R;标准 S;专利 P;数据库 DB;计算机程序 CP;电子公告 EB。电子文献载体类型标志:磁带 MT;磁盘 DK;光盘 CD;联机网络 OL。