

荞麦文献分析及相关进展研究

李玲, 闫旭宇, 王延峰

(延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 荞麦是一种国际公认的具有独特营养价值和医疗保健功能的药食兼用作物, 荞麦的加工及开发利用是国内外的研究热点。本文利用科学引文索引 (SCI&SCI-E) 和 Innography 为数据源, 采用 thomson data analyzer (TDA) 分析软件分析了 2000–2017 年间荞麦研究领域发表的文献, 阐述了近年来国际上荞麦的研究开发利用情况。结果发现, 荞麦的研究论文总体呈上升趋势, 而且近十年持续增长, 我国发表荞麦论文数量占全部文献总量的 20%, 位居第一, 但是篇均被引频次却不乐观, 仅 6.15%~15.95%, 论文质量仍需提高。本文的分析结果有助于明确当前荞麦的主要研究方向和研究内容, 为进一步深入研究荞麦提供理论参考。

关键词: 荞麦; 营养物质; 加工; 种植技术; 文献数量

中图分类号: S517

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)01-0001-07

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.001

Analysis of Literature and Related Research Progress of Buckwheat

Li Ling, Yan Xuyu, Wang Yanfeng

(College of Life Science, Yanan University, Yanan Shaanxi 716000, China)

Abstract: Buckwheat is a one of the internationally recognized crops combined use of food and medicine, as it has be of unique nutritional value and health care function. Researchers focus research on the processing, development and utilization of buckwheat at home and abroad. Using the Science Citation Index (SCI) and Science Citation Index Expanded (SCI-E) version and Innography as data sources, the relevant literature concerning buckwheat during 2000 to 2017 are analyzed through the Thomson Data Analyzer (TDA), and the dynamic research and development of buckwheat are discussed. The results showed that the research papers of buckwheat present an upward trend and continued to grow in the last ten years. It was dominate to the number (20% of the total literature) of published papers, but the average quoting rate of papers was not optimistic, only 6.15%~15.95%, so the quality of papers still needed to be improved. The results of this study help to clarify the current main research direction and content of buckwheat, and provide a theoretical reference for further research on buckwheat.

Keywords: buckwheat; nutrients; process; planting technology; number of document

荞麦属于蓼科 (*Polygonaceae*) 荞麦属 (*Fagopyrium*), 是一年生草本双子叶植物^[1]。荞麦

起源于中国和亚洲北部地区, 目前世界上主要有中国、前苏联、日本、波兰、法国、加拿大和美国等国家

收稿日期: 2018-06-06

基金项目: 延安大学博士科研启动项目 (YDBK2017-35); 延安大学 2019 年科学研究项目 (YDZ2019-07, YDQ2019-26)。

作者简介: 李玲 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 植物生物技术。E-mail: liling7826@126.com。

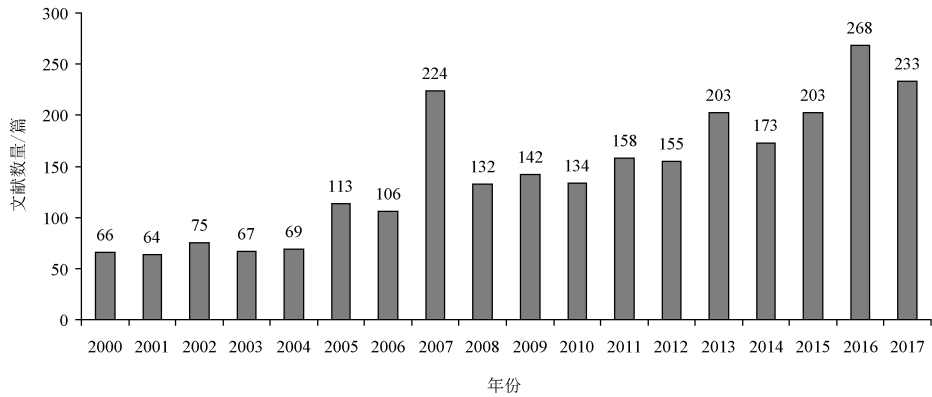


图1 荞麦研究论文发表量的年度变化趋势

Fig.1 Variation trend of papers published for the buckwheat research

种植生产荞麦^[2]。我国作为荞麦生产大国,种植栽培荞麦历史悠久,经过大约2500年的栽培驯化,农业生产上主要形成了苦荞和甜荞两个栽培种。荞麦在我国种植面积广,在南方和北方、高原和山地等不同地区栽种的荞麦适应不同的生态气候条件,由此逐渐形成了四大荞麦产区,即内蒙西部阴山丘陵白花甜荞产区、内蒙东部白花甜荞产区、陕甘宁红花甜荞产区、中国西南(川、贵、云)苦荞产区^[1]。荞麦生育期短、全生育期仅2~3个月,适应性广、抗逆性强,是粮食作物中比较理想的填闲补种作物^[3]。

荞麦作为一种国际公认的药食兼用作物,早在《本草纲目》就记载“荞麦,实肠胃、益气力、续精神,能炼五脏滓秽;降气宽肠、磨积滞,消热肿风痛,除百浊、白带、脾积泄泻”^[4]。现代研究表明,荞麦不仅富含人体所必需的蛋白质、淀粉、脂肪等营养物质,还含有膳食纤维、维生素、矿物质等微量物质,以及黄酮类化合物、多酚类化合物、糖醇、D-手性肌醇、活性肽等活性成分,具有降三高、抗肿瘤、抗氧化、抗疲劳、增强免疫力等功效^[1,2,5]。随着人们食品营养和保健意识的增强,加工与开发利用具有独特营养价值和医疗保健功能的荞麦已成为国内外的研究热点。本文分析了2000-2017年间国际和国内荞麦研究领域被科学引文索引收录的文献,阐述了近年来荞麦的研究开发利用情况,以期明确当前荞麦的主要研究方向和研究内容,为进一步深入研究荞麦提供理论参考。

1 荞麦研究的文献分析

通过对Web of Science数据库中收录的荞麦文献进行检索,2000-2017年间数据库共收录2585篇荞麦研究相关的文献。

1.1 国际荞麦研究发展现状分析

1.1.1 年度分布

由图1可知,荞麦论文发表量逐年上升,荞麦研究呈现出良好的发展态势。虽然在2000-2004年这5年增长较慢,但在2007年呈现爆发式增长,之后逐年增加,于2016年达到最高,为268篇。2016年的论文发表量是2000年的4倍左右,增幅为306.06%;是2010年的2倍左右,增幅为100%。

1.1.2 国家分布

从不同国家的荞麦文献发表数量来看(图2),中国处于领先地位,共发表了511篇论文,占全部文献总量的20%;日本论文发表数量位居世界第二,为399篇,占15%;排名第3~5位的分别是美国、波兰和韩国,文献数量分别为292、235和190篇,而欧洲各国,如德国、捷克、俄罗斯等国在荞麦研究领域发表的论文数量则较少,均低于5%。

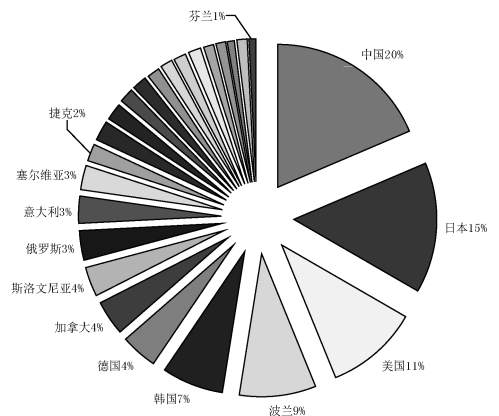


图2 各国荞麦研究论文占世界文献量的比例

Fig.2 Proportion of papers for buckwheat research published in each country

1.1.3 研究机构分布

论文发表数量居世界前10位的机构中,中国占

3 个, 分别是中国科学院、山西大学、西北农林科技大学, 发表论文数量依次是 45 篇、41 篇、41 篇, 总计 127 篇, 在总体数量上体现了中国在荞麦研究领域的优势。发文量最多的研究机构是日本国家农业食品研究组织, 发表了 95 篇论文。爱尔兰考克大学论文篇均被引频次最高, 为 40.38, 表明考克大学在荞麦研究中的论文质量非常高; 其次是斯洛文尼亚卢布尔雅那大学, 篇均被引频次为 20.50。波兰科学院单篇被引最高频次最高, 为 371, 表明波兰科学院在荞麦研究中的某一研究方向论文质量非常高; 其次是斯洛文尼亚卢布尔雅那大学和中国山西大学, 单篇被引最高频次均为 239。我国荞麦论文的发表数量虽在世界上占领先地位, 但篇均被引频次相对偏低, 可见我国荞麦研究论文的质量有待于进一步提高(表 1)。

1.1.4 期刊分布

从荞麦文献发表的前 10 种期刊来看, JOURNAL OF AGRICULTURAL AND FOOD CHEMISTRY、

表 1 2000~2017 年荞麦研究论文发表量
排名前 10 的研究机构

Table 1 Top ten research institutions of paper published for buckwheat research from 2000 to 2017

排名	国家机构	论文数量	被引频次	篇均被引频次	单篇被引最高频次
1	日本国家农业食品研究组织	95	998	10.51	72
2	斯洛文尼亚卢布尔雅那大学	74	1517	20.50	239
3	波兰科学院	67	1201	17.93	371
4	韩国忠南国立大学	54	452	8.37	42
5	俄罗斯科学院	53	417	7.87	102
6	美国农业部	46	657	14.28	74
7	中国科学院	45	681	15.13	101
8	爱尔兰考克大学	45	1817	40.38	192
9	中国山西大学	41	654	15.95	239
10	中国西北农林科技大学	41	252	6.15	46

FOOD CHEMISTRY、ADVANCES IN BUCKWHEAT RESEARCH 3 种期刊上发表的论文明显高于其他期刊, 分别为 118 篇、113 篇、107 篇, 分别占世界文献总量的比例高达 4.57%、4.37%、4.14%(图 3)。

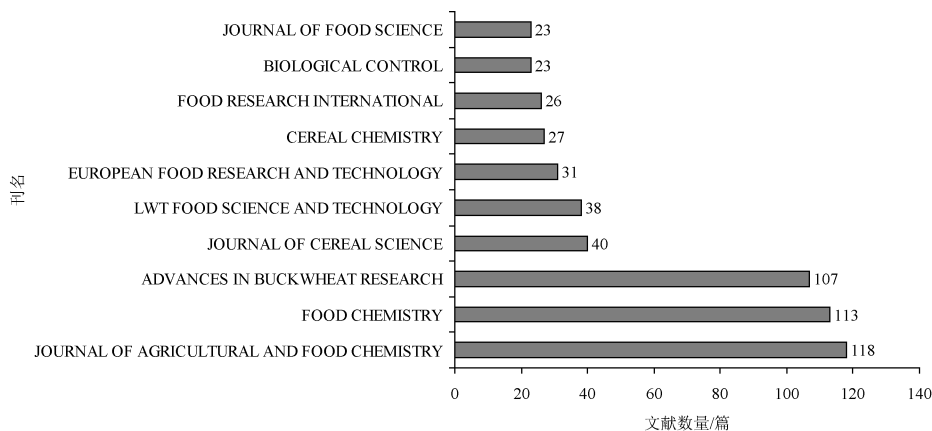


图 3 荞麦研究论文主要发表的 10 种刊物

Fig.3 The ten kinds of journals published for the buckwheat research papers

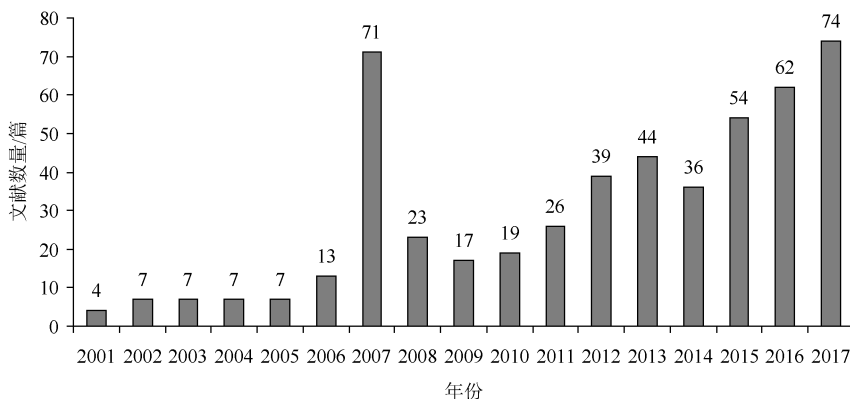


图 4 中国荞麦研究论文发表量的年度变化趋势

Fig.4 Variation trend of papers for buckwheat research published in China

1.2 中国荞麦研究发展现状分析

1.2.1 年度分布

我国荞麦研究文献数量的趋势和国际的变化趋势基本一致,在2007年之前发表的论文较少,在2007年呈现爆发性增长,之后虽有所下降,但呈现逐年增长,到2017年达到最高,为74篇,占全球文献总量的27.6%。

1.2.2 机构分布

在荞麦研究领域,中国科学院、山西大学、西北农林科技大学是我国的领军机构,分别发表相关论文45篇、41篇、41篇;四川农业大学、中国农业科学院也分别针对荞麦展开了大量研究。另外,成都大学、山西农业科学院、中国农业大学、贵州师范大学等也展开了相应研究(图5)。

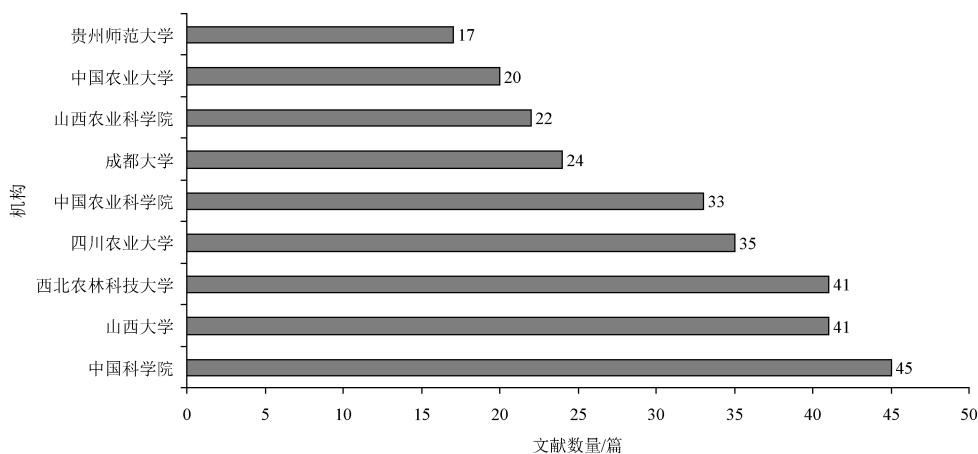


图5 2000-2017年中国荞麦研究论文发表的研究机构

Fig.5 The research institutions of paper published for buckwheat research from 2000 to 2017

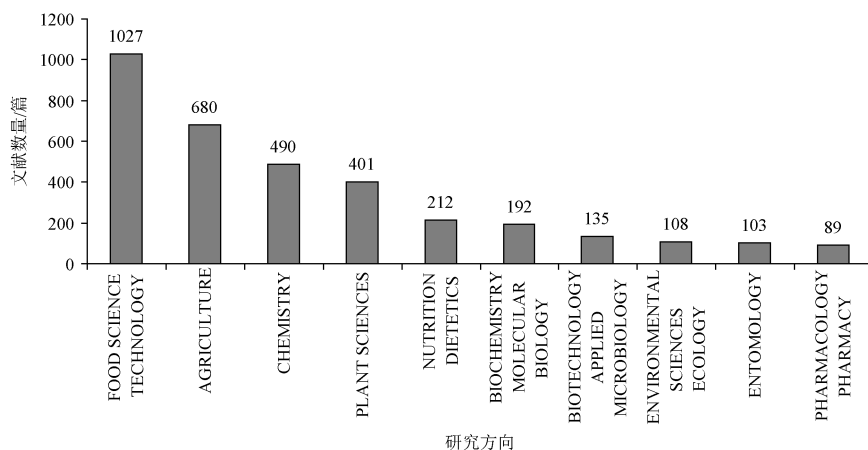


图6 荞麦研究的主要方向

Fig.6 The main directions of buckwheat research

2 荞麦的主要研究方向

由 Web of Science 数据库中收录的荞麦研究文献(2000-2017年)类型可以看出,荞麦的研究方向主要有食品科学与加工技术、农业、化学、植物科学、营养疾病等方面(图6)。

2.1 荞麦营养保健

荞麦是一种具有营养保健功能的重要粮食作物。荞麦蛋白质含量较低,但其质量优于小麦、大米和玉米^[6];且氨基酸组成均衡,富含人体必需的8种氨基酸,尤其是赖氨酸含量高于一般谷物,但苏氨酸和甲硫氨酸含量较低^[7]。荞麦脂肪、淀粉和膳食纤维含量同其他绝大多数谷物的含量相似^[8]。荞麦种仁脂肪含量为2.6%~3.2%,麸皮脂肪含量为11%^[1,9]。荞麦脂肪酸种类较多,其中含量最高的是

油酸和亚油酸,这两种不饱和脂肪酸占总脂肪酸的87%,具有良好的降低血脂功能^[10]。荞麦种仁的淀粉含量为60%~75%,其中直链淀粉占总淀粉含量的16%~33%^[11-13]。荞麦淀粉粒(2~14 μm)比小麦和玉米小,比大米稍大,较易被人体消化吸收^[6,14]。荞麦膳食纤维在籽粒中含量为3.4%~5.2%,麸皮中为17%,可溶性膳食纤维在籽粒中含量为20%~30%,远远高于麸皮中的含量(7.7%~9.2%)^[1,9]。

荞麦不仅含有蛋白质、脂肪和淀粉等营养物质,还含有黄酮类、多酚类化合物以及活性肽等成分。荞麦黄酮类化合物主要有芦丁、槲皮素和山奈酚等,其中其它粮食作物缺乏的芦丁含量较高,占黄酮类物质的70%~85%,具有较强的抗氧化性^[9]。苦荞活性肽主要有抗菌肽、降血压肽和胰蛋白酶抑制剂等多肽,具有抗菌、抗肿瘤、抗氧化、降低胆固醇等多种生理活性,可作为功能性食品添加剂^[15]。另外,荞麦中铁、锰、铜、镁、钾、锌、钙等元素的含量远远超过禾谷类作物,但分布于荞麦籽粒的外层和壳中的碘、硒、硼等微量元素含量受种植地区和栽培品种的影响而有所不同^[9,16]。因此,荞麦非常适宜与其他谷类作物相互搭配,混合食用,提高食物的营养价值。

2.2 荞麦食品加工

在物质生活日益丰富的今天,人们不断追求食品营养和保健的双重效益,具有独特营养价值和医疗保健功能的荞麦及其制品越来越受到人们的青睐^[6],荞麦的加工与开发利用已成为研究热点。利用荞麦面粉为原料,进一步加工成各种食品是目前荞麦食品加工的主要产品。在国外,人们将荞麦面粉制作成面包、面条、春卷、麦片等早餐及日常小食品,以及荞麦意大利面、荞麦通心粉等^[6,17];我国的荞麦食品花样繁多,除了有荞麦面条、面包、荞麦片,还有荞麦烙饼、荞麦凉粉、荞麦碗坨、荞麦麻食和荞麦粥等产品,这些食品已成为陕甘晋等地区的特色主打产品^[6]。

荞麦除了可以加工成各种食品外,其副产物如荞麦麸皮不仅可以作为动物饲料,而且可以作为膳食纤维开发的原材料。荞麦醋、荞麦酱油、荞麦酒、荞麦酸奶和荞麦酱等发酵食品也作为荞麦加工与利用的产品逐渐进入市场^[6]。荞麦柿叶茶、苦荞乌龙茶等荞麦茶,以及苦荞咖啡、荞麦饮料等产品也越来越受到消费者的欢迎^[18]。随着科研人员的不断研究,荞麦产品得到了广泛的开发利用,苦荞的药用价

值也不断被发掘,人们对荞麦的研究将逐渐由传统的简单加工转向食品深加工及药品的开发利用。

2.3 荞麦种植栽培技术

作物的繁殖方式是决定其品种特性和产量的主要因素,异花授粉的作物如玉米等具有杂种优势,杂种子一代的产量高于亲本。普通甜荞通过异花授粉进行繁殖,但是由于其具有自交不亲和性,在自然条件下的结实率仅有10%~15%^[19],导致普通甜荞产量很低。自交不亲和性是制约普通甜荞产量的关键因素,选育自交亲和性的品种是提高产量的根本途径。近来研究发现,等花柱甜荞具有自交亲和性,在自然条件下可大大提高结实率,是改良甜荞品种和提高产量的优良种质资源^[20]。由此可见,优良的遗传种质资源是影响荞麦农业生产的根本因素。

荞麦生育期短,对光、热资源利用率较高,仅2~3个月即可收获^[20]。但是,选地、播种时间、种植密度、施肥以及其他栽培技术如地膜覆盖技术等都会影响荞麦的产量。因此,合理的栽培种植模式也是影响荞麦生产的因素。荞麦耐旱耐贫瘠,适应性强,合理施用N、P、K等外肥,可以增加荞麦群体叶片数量和叶面积,有效提高光合速率,促进干物质的积累及向籽粒的运转,最终提高产量^[20]。混合喷施大量元素、微量元素和植物生长调节剂,有助于提高甜荞叶片的酶活性、叶绿素含量、产量和品质^[21]。叶面喷施硼有利于苦荞的生长、产量的提高及黄酮类物质的积累^[22]。优良的品种与合理的种植栽培技术相结合,是提高荞麦的产量和品质的前提。

2.4 荞麦生长发育环境

荞麦主产区大部分位于西北内陆,干旱少雨是该区域的主要气候特点。荞麦是需水较多的作物,需水量比小麦多一倍,尤其是在种子萌发期、开花期和籽粒成熟期,是荞麦生长发育的需水高峰期。因此,水分是影响荞麦生长的主要因素。在干旱缺水条件下,抗旱性强的金荞麦通过累积脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质以维持细胞膨压;通过增加SOD、POD和CAT等抗氧化酶活性来保护细胞膜免遭伤害;通过增加地下生物量以保证较高的水分利用率^[23]。在轻度干旱条件下,苦荞株高、主根长、根体积、侧根数、单株籽粒质量等指标较正常灌水和重度胁迫处理增加,而重度干旱缺水则严重影响荞麦的生长发育^[24]。

我国南方气候湿润,但土壤偏酸且近年来重金属污染严重,这是影响西南苦荞产区荞麦生长的重要因素。低浓度的Cd²⁺溶液促进荞麦种子发芽,高

浓度的 Ca^{2+} 处理则降低荞麦种子的发芽势、发芽率、根长、芽长、发芽指数和活力指数^[25],影响荞麦的生长发育。含铝的酸性土壤抑制荞麦根系伸长,导致根尖 Al 积累,但根尖边缘细胞可以通过降低细胞壁多糖含量及提高酸性磷酸酶活性,来缓解 Al 对根伸长的抑制,对荞麦根尖具有一定的防护效应^[26]。施加外源硒可抑制荞麦对土壤中铅的吸收和转运,提高荞麦幼苗叶绿素含量、促进光合作用、增强根系活力,进而提高荞麦对铅胁迫的耐受性^[27]。可见,生态环境条件是决定荞麦农业生产的重要因素。通过改变荞麦根系形态、抗氧化系统、渗透调节物质等来应答土壤干旱缺水 and 重金属污染等逆境胁迫,以确保其高产稳产。

2.5 荞麦分子生物学研究

荞麦作为重要的小杂粮作物,近几年在分子生物学研究领域取得了令人瞩目的成果,尤其是对黄酮类化合物的合成及代谢途径中关键酶和转录因子的研究成果丰富。苯丙氨酸解氨酶(PAL)是黄酮类化合物的合成途径的第一个关键酶,查耳酮合成酶(CHS)、黄酮醇合成酶(FLS)等均是催化生成黄酮类物质的关键酶。利用 RT-PCR 技术,从甜荞中克隆到 PAL 和 CHS 的 cDNA 开放阅读框(ORF)序列,分别命名为 *FePAL* 和 *FeChs*^[28,29];从苦荞中克隆到的 *FtPAL* 在茎中高表达,在叶片和种子种低表达^[30];2个 CHS 基因,*FtCHS1* 和 *FtCHS2*,在幼胚和花中表达量高于其他组织^[31]。在 NaCl、干旱及 UV-B 逆境胁迫下,黄酮合成关键酶基因(*CHI*、*F3H*、*FLS*、*FLS1*)的 mRNA 表达量均有不同程度的增加,与总黄酮含量变化趋势相一致^[32]。可见,荞麦黄酮合成途径关键酶活性及其相关基因的表达情况,对不同部位黄酮类物质的合成有重要的影响。

对荞麦黄酮合成途径相关酶基因进行转录水平调控,可以调控目的次生代谢产物的合成方向和合成量。MYB 是植物黄酮代谢调控最主要的一类转录因子基因家族。目前,借助转座子标签、T-DNA 激活标签和同源克隆等分子生物学方法,已先后克隆出 MYB 类转录因子 *FtMYB1*、*FtMYB2*、*FtMYB3*、*FtMYB7*、*FtMYB9*、*FtMYB12*、*FtMYB21* 等。其中,*FtMYB1* 和 *FtMYB2* 可显著增强烟草花青苷的合成,抑制黄酮醇的合成^[33]; *FtMYB3* 抑制转基因烟草花青素合成^[34], *FtMYB7* 可能在苦荞芦丁积累的过程中起到正调控作用,而 *FtMYB9* 则为负调控作用^[35]; *FtMYB12* 参与苦荞对不同冷胁迫的应答过程^[36], *FtMYB21* 可能参与苦荞抗高盐和干旱等非生

物胁迫的应答反应^[37]。DREB 类转录因子 *FtDREB1*、*FtDREB2* 参与苦荞对不同非生物胁迫的应答过程^[38]。因此,克隆荞麦黄酮类合成的关键基因,从分子水平研究荞麦黄酮类物质合成代谢途径,有助于定向提高荞麦黄酮含量。

3 结论

根据文献统计分析发现,有关荞麦的研究尤其是荞麦的营养、生产、加工及分子生物学方面的论文总体呈上升趋势,而且近十年持续增长,这充分说明我国发表荞麦论文数量占优势,但是篇均被引频次却不乐观,我国研究论文的质量仍需提高。

随着人们营养和保健意识的增强,加工与开发利用小杂粮荞麦已成为趋势。但是,荞麦的产量较低一直是其大规模种植及利用的主要限制因素。选育高产品种及配套高产栽培技术是提高荞麦产量的根本途径,而利用生物技术手段克服荞麦的自交不亲和性是今后培育高产品种的研究方向。同时,从分子水平定向提高荞麦黄酮含量,开发其药用价值,可以促进荞麦的综合开发利用。

参考文献:

- [1] 秦培友. 我国主要荞麦品种资源品质评价及加工处理对荞麦成分和活性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [2] 贾玮玮, 刘敦华. 宁夏荞麦开发利用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2009, 9(1): 1-4.
- [3] 彭荟芳, 杜先锋. 滚筒干燥条件对荞麦雪花片质构特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(6): 927-931.
- [4] 刘仁杰. 不同生长期荞麦中降糖因子含量的测定及保健饮料的研制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2006.
- [5] 黄娟, 邓娇, 陈庆富. 荞麦根的转录组学分析及黄酮合成基因的鉴定[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(2): 9-19.
- [6] 郭翠翠. 甜荞麦皮粉膳食纤维的制备及其物化特性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
- [7] Zhang Chengnan, Zhang Rui, Li Yuk Man, et al. Cholesterol-lowering activity of tartary buckwheat protein [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2017, 65(9): 1900-1906.
- [8] 杨淑芳. 荞麦麸皮多糖的提取分离、结构分析及抗氧化活性研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [9] Zhang Zhen, He Caian, Zhu Ruixue, et al. Seed oils of five black tartary buckwheat cultivars with biochemical

- characterization and antioxidant properties [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2016, 93(8): 1127-1136.
- [10] 李园园. 苦荞酒发酵工艺研究及质量评价[D]. 成都: 西华大学, 2014.
- [11] 李志西, 杜双奎, 于修焯, 等. 荞麦粉营养品质与加工特性研究[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(5): 771-776.
- [12] 肖文艳. 不同品种荞麦淀粉特性的研究及面制品开发[D]. 上海: 上海海洋大学, 2008.
- [13] 刘航, 徐元元, 马雨洁, 等. 不同品种苦荞麦淀粉的主要理化性质[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(5): 47-51.
- [14] 刘瑞, 冯佰利, 晁桂梅, 等. 苦荞淀粉颗粒及淀粉糊性质研究[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(12): 31-36.
- [15] 李宗杰. 苦荞蛋白的制备、生物活性鉴定及其在猪群中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [16] 张国治, 张虹, 次仁欧珠, 等. 西藏日喀则地区荞麦成分检测分析[J]. *郑州工程学院学报*, 2002, 23(4): 52-54.
- [17] 陈花. 苦荞麦功能肽的提取及其降血压活性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2008.
- [18] 李晶晶. 荞麦酶解液植物乳杆菌发酵乳生产工艺及抗氧化活性分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2015.
- [19] 杜莹. 甜荞不同花柱类型杂交后代遗传表现及自交不亲和性的SSR标记分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [20] 李腾辉. 不同播种方式下旱地荞麦生产性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [21] 陈文晋, 盛晋华, 张雄杰. 不同营养元素混合喷施对甜荞生理指标、产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2015, 44(4): 21-26.
- [22] 胡丽雪, 刘学仪, 向达兵, 等. 叶面喷施硼对苦荞麦生长、产量及黄酮类物质的影响[J]. *作物杂志*, 2014, 25(1): 105-108.
- [23] 赵丽丽, 王普昶, 陈超, 等. 持续干旱对金荞麦生长、生理生态特性的影响及抗旱性评价[J]. *草地学报*, 2016, 24(4): 825-833.
- [24] 谭茂玲, 廖爽, 万燕, 等. 干旱胁迫对苦荞麦农艺性状、产量和品质的影响[J]. *西南师范大学学报*, 2015, 40(10): 88-93.
- [25] 杨柳青, 王宇飞, 肖华, 等. 镉对荞麦种子萌发的影响[J]. *内蒙古民族大学学报: 自然科学版*, 2015, 25(4): 314-316.
- [26] 蔡秒珍, 王宁, 王志颖, 等. 边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应对细胞壁多糖的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 915-922.
- [27] 秦成, 裴红宾, 吴晓薇, 等. 外源硒对铅污染下荞麦生长及生理特性的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(4): 447-453.
- [28] 李成磊, 蒙华, 张晓伟, 等. 甜荞苯丙氨酸解氨酶基因 *PAL* 的克隆及序列分析[J]. *食品科学*, 2011, 32(7): 255-257.
- [29] 李成磊, 张晓伟, 吴琦. 甜荞查尔酮合酶基因 *Chs* 的克隆及序列分析[J]. *广西植物*, 2011, 31(3): 383-387.
- [30] Li Chengli, Bai Yuechen, Hui Chen, *et al.* Cloning, Characterization and Functional Analysis of a Phenylalanine Ammonial-yase Gene (*FtPAL*) from *Fagopyrum tataricum* Gaertn [J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2012, 30(5): 1172-1182.
- [31] 孙朝霞, 侯思宇, 郭彬. 苦荞查尔酮合成酶基因序列特征及分子进化分析[J]. *分子植物育种*, 2014, 12(4): 772-779.
- [32] 侯伶俐, 杨雄榜, 董雪妮. 逆境胁迫对苦荞花期总黄酮含量及关键酶基因表达的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(1): 184-192.
- [33] 虎萌. 苦荞转录因子 *FtMYB1* 和 *FtMYB2* 对烟草黄酮合成关键酶基因表达和黄酮积累的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [34] Bai Yuechen, Li Chenglei, Zhang Jinwen, *et al.* Characterization of two tartary buckwheat R2R3-MYB transcription factors and their regulation of proanthocyanidin biosynthesis. [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 152(3): 431-4.
- [35] 孙朝霞, 侯思宇, 令狐斌, 等. 苦荞全生育期芦丁积累与其生物合成途径相关基因表达分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3473-3481.
- [36] Zhou Meiliang, Wang Chenglong, Qi Leipeng, *et al.* Ectopic expression of *Fagopyrum tataricum FtMYB12* improves cold tolerance in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2015, 34(2): 362-371.
- [37] 黄云吉, 邓仁榆, 高飞, 等. 苦荞转录因子基因 *FtMYB21* 的克隆及其非生物胁迫下的表达分析[J]. *基因组学与应用生物学*, 2015, 34(9): 1939-1945.
- [38] 刘为远, 刘桂男, 陈双, 等. 苦荞转录因子基因 *FtDREB1* 和 *FtDREB2* 的克隆及其对非生物胁迫的应答[J]. *基因组学与应用生物学*, 2018, 37(5): 1985-1992.

干旱对作物生长的影响机制及抗旱技术的研究进展

杨 阳^{1,2}, 申双和^{1*}, 马绎皓³, 王润元², 赵 鸿²

(1.南京信息工程大学 应用气象学院,南京信息工程大学 江苏省农业气象重点实验室,南京 210044;

2.中国气象局 兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局干旱

气候变化与减灾重点开放实验室,兰州 730020; 3 皋兰县气象局,甘肃 皋兰 730200)

摘要:从作物的光合生理、根系生长、作物形态、产量形成等方面阐述了干旱胁迫抑制作物生长发育的原因,简析了作物的抗旱现状及提高抗旱性的途径,提出了作物在干旱胁迫影响下存在的问题并对今后的相关研究进行了展望。现有的研究表明:在作物生育期内发生干旱胁迫,叶片的光合生理所受影响最大,净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著降低。在作物生长发育前期遇干旱胁迫,多数作物会维持较高的根系活力,保证地上部植株的正常生长,到胁迫后期,根系活力逐渐降低,地上部植株的生长受抑制作用明显,导致作物产量下降。干旱胁迫对各生育期作物产量的影响程度略有不同,小麦产量受干旱胁迫影响最严重的是孕穗期和抽穗期,拔节期和灌浆期受干旱胁迫的影响次之;对于玉米而言,开花期和灌浆期遇干旱可导致玉米严重减产。作物抗旱性的研究十分复杂,且不同作物的抗旱性存在很大差异,应综合考虑作物遗传学、生态学、分子生物学等,同时结合干旱诱导蛋白和基因工程技术措施等加深对作物抗旱性的研究。

关键词:干旱;光合作用;产量;干旱胁迫;抗旱性

中图分类号:S423

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0008-08

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.002

Advances in the Effects of Drought on Crop Growth and Research on Drought Resistance Techniques

Yang Yang^{1,2}, Shen Shuanghe^{1*}, Ma Yihao³, Wang Runyuan², Zhao Hong²

(1. Applied Meteorological College Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Lanzhou Institute of Arid Meteorological, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China; 3. Gaolan County Meteorological Bureau, Gaolan Lanzhou 730020, China)

Abstract: In this paper, the causes of drought stress inhibition of crop growth and development were described from the aspects of photosynthetic physiology, root growth, crop morphology and yield formation

收稿日期:2018-08-14

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106043, GYHY201506001);国家自然科学基金(41505099, 41275118);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-2);中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室科研项目(CAMF-201801);甘肃省气象局面上项目(GSMAMs2017-14)共同资助。

作者简介:杨阳(1992-),女,内蒙古锡林郭勒盟人,硕士研究生,主要从事农业气象研究。

E-mail: yanggy120300@163.com。

*通信作者:申双和,教授,博士生导师,主要从事农业气象与生态环境气象研究。E-mail: yqzhr@nuist.edu.cn。

of crops, the drought resistance status of crops and the ways to improve drought resistance were analyzed, the problems of crops under the influence of drought stress were put forward and the related research was prospected. Existing research results indicate: drought stress occurs during the growth period of the crop, and the photosynthetic physiology of the leaves is most affected, significantly reduce the net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of the leaves. Drought stress occurs in the early stage of crop growth and development, most crops maintain high root vigor and ensure normal growth of aboveground plants, in the later stage of drought stress, the root activity gradually decreased, and the growth of aboveground plants was significantly inhibited, resulting in crop yield reduction. The effect of drought stress on the yield of crops in each growth period is obviously different, the most severely affected wheat yield by drought stress is the booting stage and heading stage, followed by drought stress in the jointing stage and the filling stage; For corn, drought in the flowering and filling stages can lead to severe yield reduction in maize. The research on drought resistance of crops is very complicated, and the drought resistance of different crops is very different, plant genetics, ecology, molecular biology, etc. should be considered comprehensively, at the same time, combined with drought-inducing proteins and genetic engineering techniques to deepen the research on drought resistance of crops.

Keywords: drought; photosynthesis; yield; drought stress; drought resistance

干旱被称为影响各个行业最昂贵的自然灾害,也是目前全世界雨养系统作物生产的主要制约因素之一,由于其持续时间长、影响范围广泛,不仅对农作物的生长发育有极大影响,还制约着环境和社会的发展^[1-3]。我国是一个自然灾害频发、水资源短缺的农业大国,干旱半干旱区占地面积达到我国国土面积的 50% 左右,随着气候变化,干旱发生的频率将会进一步增加,因此干旱研究成为人们关注的焦点。有研究发现,过去的 60 年里,我国西南地区、西北地区和华北北部的干旱事件变得更加频繁^[4],在半干旱的黄土高原地区,干旱和严重的土壤侵蚀是两个重要的环境问题^[5],而降水是影响半干旱地区作物生长的主要水资源,在这些地区,低强度和不可预测的降水以及高蒸发总是严重限制作物产量^[6]。据统计,气温升高使得我国主要作物玉米、冬小麦平均减产 3.4%、5.8%,降水减少且水资源亏缺致使我国的受旱面积在不断增加^[7]。因此,研究干旱对作物的影响机理,有利于全面认识和揭示干旱对作物的影响规律,为进一步提高作物抗旱性、培育抗旱品种具有重要意义。

小麦、玉米是我国主要的粮食作物,其产量的高低直接影响我国的粮食安全^[8,9],但小麦、玉米等农作物在生长发育期很容易受到如极端温度、干旱等不良环境因素的影响,其中干旱则是限制农作物生长发育的主要因子^[10]。近些年已有许多学者关于干旱对作物的影响进行了大量的分析,主要研究内容有:干旱致使作物叶面积指数、生态系统的总初级

生产力下降^[11],并通过改变小麦籽粒各组织结构发育影响籽粒生长发育^[12];干旱通过影响气孔导度、限制蒸腾和水分吸收抑制作物光合作用效率^[13,14],同时影响作物的生理代谢,降低蛋白质和淀粉含量,增加游离氨基酸和可溶性糖含量,致使作物生长发育受阻,造成作物减产^[15]。干旱延迟玉米吐丝和籽粒败育,其中主要影响玉米雌穗上部花丝的抽出,从而造成作物减产^[16,17]。也有研究表明,玉米产量增加伴随着干旱敏感度的上升,特别是对高蒸汽压差的敏感性,一直在稳步增加,对未来作物产量具有重要影响^[18]。作物遇干旱胁迫时,会发生一系列生理生化变化来适应生长环境,并决定其农艺性状的形成^[19]。这样一来,应更加注重种植作物的选择,选取抗旱性强的品种来保证产量提升^[20],然而,由于植物的抗旱性是多基因控制的复杂数量性状,同时还受环境的影响,且不同作物和品种间对干旱的适应性有很大差异,很难确定统一的抗旱指标,因此今后对于作物抗旱性研究应更为全面^[21]。

1 干旱对作物光合生理及生长发育的影响

1.1 干旱对作物光合生理的影响

光合作用是作物生长的基础,水分则是影响作物光合作用的主要因素^[22]。作物的光合作用对干旱胁迫的反应十分敏感,多数情况下,干旱胁迫程度越高,作物光合速率越低。

不同作物对干旱的反应不尽相同。受干旱胁迫影响,小麦的胚乳淀粉组分及粒度分布发生改变,致使胚乳总淀粉、直链淀粉以及支链淀粉含量降低^[23-25],同时有学者研究认为这是导致小麦粒重降低的主要因素^[26]。小麦在生育期内遇干旱胁迫,叶片的生理性状所受影响最大^[19],在干旱胁迫影响下,小麦主要通过调节气孔的密度、分布和导度等方式来调控水分的流失,随着胁迫程度的加剧,叶片的光合作用受到明显抑制,主要抑制小麦叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度^[27-29]。不同程度的干旱胁迫对小麦光合作用的影响是从气孔限制因素转变到非气孔限制因素的过程,气孔限制因素限制主要是轻度干旱胁迫下小麦叶片的气孔导度下降,致使外界 CO₂ 供应受阻,从而降低净光合速率;非气孔限制因素限制主要是重度干旱胁迫下小麦叶片的叶肉细胞间隙逐渐增大、CO₂ 扩散受阻^[30,31]。随干旱胁迫程度加剧小麦苗期的叶片光合生理指标降低,在孕穗期、抽穗期、灌浆期轻、中度干旱胁迫对光合速率影响不大,而在重度干旱胁迫下叶片的光合速率明显降低,在开花期轻度干旱胁迫有利于提高叶片的光合速率,促使籽粒灌浆从而获得高产^[19,27,28]。总体来说,轻、中度干旱处理对小麦叶片的光合生理影响较小,重度干旱胁迫下叶片光合速率明显降低^[19]。也有学者研究认为,在华北地区,短期干旱胁迫促使冬小麦灌浆后期至成熟期的净光合速率和气孔导度有所上升,胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率有所下降,其原因可能是冬小麦在整个生育期内对干旱产生了一定的适应能力,适度的干旱胁迫增加了冬小麦的光合性能^[32],但这种现象只出现在小部分地区,对于大多数地区,受干旱胁迫的影响,作物的光合作用都呈降低的趋势。

玉米生育期内的各种生理生化过程与其体内的水分有着密切的关系,在干旱胁迫影响下,光合作用降低,叶片光合速率、蒸腾速率都呈下降趋势^[33],且相较于叶片的蒸腾速率,光合速率对干旱胁迫的反应更加敏感^[34]。从玉米整个生育期来看,受干旱胁迫影响,玉米叶片的光合速率在大喇叭口期和开花期受影响程度明显高于拔节期,叶片的气孔导度在开花期受影响程度明显高于灌浆期和拔节期^[34,35]。在玉米拔节-吐丝期,干旱胁迫主要影响叶片光合速率和蒸腾速率;吐丝-乳熟期,主要影响叶片气孔导度,水分利用效率受影响最少;乳熟-成熟期主要影响玉米叶片的水分利用效率^[34-36]。不同程度的干旱胁迫对玉米光合生理的影响也存在很大的差

异,玉米叶片的光合速率随胁迫程度加大而明显下降,中度和重度干旱胁迫下,玉米叶片蒸腾速率和气孔导度的降幅最明显。在干旱胁迫的影响下,玉米的水分利用效率会有所提高,这是作物为适应生长环境的一种反应,可抵御干旱对作物生长机理的损伤^[37,38]。

1.2 干旱对作物形态的影响

干旱条件下,作物的生长发育、干物质积累等随干旱胁迫程度的加剧、持续时间的延长,所受的影响越来越重。根系作为作物生长发育的主要器官,能够直接反应其生长的好坏,根系发达有利于提高作物对水分和营养的吸收,从而降低水分散失。当发生干旱胁迫时,根系自身形态结构发生变化,地上部干物质积累速度降低,并影响产量的形成^[20,39,40]。

小麦后期的生长情况受其种子发芽率及幼苗生长状况的直接影响。有研究表明,干旱胁迫明显抑制小麦幼苗、根系及牙长的生长,降低小麦幼苗干物质积累,而耐旱性强的作物根系受干旱胁迫的影响相对较小,能够表现出对干旱胁迫的适应性^[8,41-43]。Xian 等通过分析非水力根信号与水分胁迫下的渗透调节关系认为干旱胁迫下非水力根信号 (non-hydraulic root signal, nHRS) 和渗透调节 (osmotic adjustment, OA) 阈值范围之间的合作关系有利于改善春小麦品种的种子形成^[44]。由于小麦种子的呼吸作用及营养物质的转移对幼苗萌发期的物质累积起决定性作用,因此降低种子的呼吸消耗、增加种子营养物质的转移可提高小麦种子和幼苗的抗旱能力^[8]。在小麦生长发育期遇轻度干旱胁迫,小麦能够维持较高的根系活力,保证地上部植株的正常生长,严重干旱胁迫下,根系活力逐渐降低,明显抑制了地上部植株的生长^[10]。不同水分胁迫处理下,冬小麦返青期地上部和地下部的干物质积累速度随胁迫程度增大呈下降趋势,轻度胁迫下,相对于地下部干物质积累而言,地上部干物质积累受影响程度更大,同时有研究指出,小麦在返青期、拔节期及孕穗期受干旱胁迫影响株高明显下降^[45,46]。

受干旱胁迫影响,玉米根部细胞排列更加紧密,这在一定程度上可提高根系的导水率。水分充足条件下玉米幼苗细根比例大于中等根和粗根,且细根的根长长势最好;干旱条件下,细根所受影响程度大于中等根和粗根,因此中等根和粗根的根长、根表面积所占比例上升。但关于干旱对作物细根生长的影响,诸多文献报道并不一致,这可能与供试的作物品种、试验条件等有一定的关系^[47-49]。白莉萍等研究

表明,在玉米大喇叭口期之前进行干旱胁迫处理,轻度干旱胁迫对玉米的株高无明显影响,重度干旱胁迫下玉米株高的长势变弱。在大喇叭口期之后到抽雄和灌浆期,玉米株高会因持续的轻度干旱受到较大影响。拔节期到灌浆期,严重干旱将显著抑制株高的生长,致使穗粒数、百粒重等减少,造成玉米减产^[50]。干旱胁迫明显减少玉米的叶面积指数,在拔节期夏玉米的叶面积指数较低,拔节后期逐渐增大,吐丝期达到最大,之后叶面积指数呈下降趋势^[15,51,52]。

1.3 干旱对作物产量的影响

干物质作为光合作用的直接产物,是作物产量的基础,而作物产量的高低不仅取决于光合作用产量还取决于地上生物量的分配^[53,54]。在小麦整个生长发育期,受干旱胁迫影响最严重的是孕穗期和抽穗期,在抽穗期,任何程度的干旱胁迫都降低小麦的每穗粒数、千粒重等产量构成因素,致使小麦减产;拔节期和灌浆期受干旱胁迫的影响相对较小,拔节期轻度干旱对产量影响不大,但遇中度干旱,小麦的穗数和穗粒数明显下降,对后期产量形成产生较大影响^[55,56]。也有学者研究认为,干旱胁迫下,若小麦仍能保持较高效率的光合作用,可使产量维持在相对稳定的水平^[19],且在分蘖期和拔节期进行轻度干旱胁迫处理可增加小麦成穗数及花后物质积累,使小麦维持较高的产量,也可使蜡熟期小麦增产。因此就小麦而言,即使生育前期进行适当的干旱胁迫,但只要保证生育后期水分供应充足,也可使其产量维持在一定的水平上,表现出一定的补偿效应^[57-59]。

不同程度的干旱胁迫,对玉米产量的形成都有明显的抑制作用,并且随胁迫时间的延长抑制程度更趋明显^[16]。在玉米生长发育的中后期,产量降低的主要原因是干旱胁迫抑制了玉米生物量的积累,并且降低了经济系数。干旱胁迫对玉米各个生育期产量的影响存在差异,玉米苗期遇干旱胁迫,有利根系发育,但严重或持续时间较长的干旱会阻碍玉米正常生长,影响玉米的产量和质量;若干旱胁迫发生在拔节前,玉米穗行数及行粒数会因此减少;抽雄吐丝期遇干旱胁迫,会延缓玉米的生育期致使产量大幅下降;开花期前后遇干旱,主要降低了玉米的穗粒数和有效穗数等产量形成因素,延缓了生育进程,致使玉米严重减产;灌浆期干旱胁迫使玉米的营养器官发育受阻,抑制产量的增加,减产程度低于开花期^[9,60-64]。葛达体等研究发现,玉米全生育期遇干

旱胁迫,会延缓玉米的生育进程,推迟玉米成熟期,致使收获期含水量偏高,从而降低玉米的品质^[34],使我国玉米在出口贸易中占不利地位,因此必须对提高我国玉米的抗旱性,培育高品质作物提出新的要求。也有研究认为在旱地使用塑料膜覆盖,可使5月的土壤温度升高,对提高高海拔半干旱农田玉米产量具有重要意义^[65]。在河套地区,当黄河水资源充足时,建议用玉米100%作物需水量充分灌溉以获得最大的产量,当水资源有限时,建议采用70%~80%的作物需水量灌溉,以最高的水分利用效率为目标,尽管这种覆盖灌溉可能会使产量下降4%~8%^[66]。

2 作物的抗旱现状及提高抗旱的途径

作物对干旱的适应性可分为3种:耐旱、御旱和避旱,其中耐旱和御旱统称为抗旱性,是一种主动抗旱机制。作物的抗旱性是一个复杂的性状,一般是指在水分亏缺下作物依旧能维持较高的产量^[67-70]。近些年关于作物抗旱性的研究已经成为热点内容,分别在作物根系、叶片形态、光合生理指标、氧化酶活性、渗透调节和干旱诱导蛋白等方面进行研究。作物种子的吸水能力与其抗旱性有很好的相关性,即在干旱胁迫下吸水能力强的种子能够保持较高的发芽率,而吸水能力弱的种子则相反^[71]。小麦发芽率的高低及胚芽鞘的长短可用于鉴定其抗旱性,胚芽鞘生长的越快小麦的抗旱性越强,也有学者认为在水分缺乏的半干旱、干旱地区,胚根数越少越有利于作物抵御干旱的影响,因此鉴别抗旱性要因因地制宜^[72,73]。在干旱条件下玉米苗期的初生根数较多,根系发达、根冠比大的品种抗旱性强,叶片茸毛的密集程度及叶片越厚的品种抗旱性高。因此对玉米来说,在苗期适度干旱有利于根系生长,生育后期轻度干旱胁迫对后期叶面积的形成影响较小,这样有利于提高玉米的抗旱性^[21,74]。干旱胁迫下作物的生理性状随之发生变化,有学者研究认为作物体内所含的渗透调节物质(如:脯氨酸、半乳糖)、抗氧化保护剂(如:超氧化物歧化酶)、干旱诱导蛋白(如:LEA蛋白)等因素,可在抵御干旱时发挥重要作用,但脯氨酸含量作为抗旱的生理指标一直存在争议,由此可见,遗传学的研究内容复杂、范围广泛、受外界因素影响大,制约了作物抗旱性的研究,而分子标记的出现为作物抗旱性研究创造了新的有力条件,为未来作物抗旱性的研究创造了更大的空间^[75-77]。

各学者从不同方面对提高作物的抗旱途径进行了大量分析。干旱胁迫下,相对于保绿性差的作物而言,保绿性好的作物通常抗旱性更强^[74]。在干旱和半干旱地区,抑制农业生产的主要因素是土壤肥力不足和水分亏缺,对于这样水分缺乏的地区,最有效、最显著的抗旱方法是节水灌溉^[14],也有学者研究认为合理施肥可有利于提高作物的抗旱能力^[78,79]。小麦可以通过深翻深松、合理施肥、使用保水剂、抗旱剂等措施提高小麦的抗旱性,玉米通过选育抗旱品种、抢墒播种、保墒播种、兴修水力设施等提高玉米的抗旱性。提高作物的抗旱研究方法通常可以分为以下两种:(1)根据作物的不同生长环境分为:温室法、人工气候室法、田间测定法;(2)根据不同作物对干旱的不同处理方法又可分为:土壤干旱法、大气干旱法、高渗溶液法。

3 总结与展望

干旱胁迫对小麦的影响主要表现为抑制叶片的光合生理,降低小麦胚乳淀粉含量,且随着胁迫程度加大抑制作用更加明显。各个生育期小麦的光合作用受干旱胁迫的影响大致相同,均随胁迫程度加大而下降。轻度干旱胁迫可促进小麦根系生长,地上部干物质积累速度明显低于地下部干物质;重度干旱胁迫明显抑制地上部及地下部植株生长。小麦产量受干旱胁迫影响最严重的是孕穗期和抽穗期,拔节期和灌浆期受干旱胁迫的影响次之,也有研究表明小麦在生育前期适度干旱,后期保证供水充足,可提高作物产量。从玉米整个生育期来看,受干旱胁迫的影响,玉米叶片光合生理指标均呈下降的变化趋势,总体表现为拔节-吐丝期,叶片光合速率和蒸腾速率下降明显;吐丝-乳熟期,叶片气孔导度下降最明显;乳熟-成熟期,叶片的水分利用效率下降最明显。不同生育期干旱胁迫对玉米产量形成的影响程度略有不同,其中开花期和灌浆期遇干旱可导致玉米严重减产。

综上所述目前关于干旱胁迫对小麦、玉米等农作物的生理和生长发育方面的影响研究较为丰富,但还需继续深入研究,且作物的生长环境较为复杂,限制因素较多,因而当前研究中仍存在一些问题:

(1) 各学者关于干旱胁迫对作物光合生理影响的研究十分广泛,但干旱对作物叶片光合生理的哪个部位抑制程度更明显等还需进一步深入研究。干旱条件下玉米根系的变化机理尚待进一步研究,且

干旱对作物细根生长的影响,诸多报道并不一致,这可能与供试的作物品种、试验条件等有一定的关系。研究干旱对作物产量形成的影响多局限于从个体水平上进行研究,而在大田条件下的作物群体对干旱胁迫的反应还需进一步分析讨论;

(2) 作物的抗旱性较为复杂,且因作物品种不同抗旱性也存在差异。用作物的形态、不同生育期、生理指标等某一指标鉴定作物的抗旱性只局限于单一品种的作物,不能作为抗旱性鉴定的统一指标,因此还需继续深入研究作物的抗旱性。通过生物工程研究作物的抗旱性在育种工作中的应用也相对较少,需进一步进行分析;

(3) 由于盆栽试验的可控性、可操作性强,所以多数研究都是基于盆栽为主,对于大田试验较为缺乏,且一般情况下盆栽试验结果与大田试验存在一定的差异,但可为研究大田作物受干旱的影响提供一定的参考。

本文主要综述干旱对作物生长发育和光合生理的影响,作物的抗旱现状及提高作物抗旱途径等方面的研究成果,以期今后的研究工作提供借鉴和参考。同时期望在以后的研究工作中,加深对以下几个方面的研究:

(1) 分析各个生理指标对干旱胁迫的反应,从分子水平和生理代谢等方面更全面的分析干旱胁迫对作物产量形成的影响。对于水分缺乏的华北地区,为适应干旱的影响可种植小穗型的作物、减少灌溉次数等,从而提高作物产量;

(2) 基于作物抗旱性研究的复杂性,应当进行分子遗传、作物抗氧化酶系统等研究,结合作物的生理性状、生物工程、干旱诱导蛋白等加强作物抗旱性的研究,对提高作物的抗旱性有着重要的研究意义;

(3) 应适当增加大田试验及多年多站点试验研究,通过多年试验的比较可为今后提高作物产量和实现农业节水提供理论化依据。

参考文献:

- [1] Esfahanian E, Nejadhashemi A P, Abouali M, *et al.* Development and evaluation of a comprehensive drought index[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017 (185): 31-34.
- [2] Lobell D B, Roberts M J, Schlenker W. Greater Sensitivity to Drought Accompanies Maize Yield Increase in the U.S. Midwest[J]. *SCIENCE*, 2014, 344: 516-519.
- [3] LI M X, MA Z G. Soil moisture drought detection and

- multi-temporal variability across China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(10): 1798–1813.
- [4] Qi H X, Zhi X F, Bai Y Q. Interdecadal variation and trend analysis of the drought occurrence frequency in China [J]. *Trans Atmos Sci*, 2006, 34, 447–455.
- [5] WU Y Z, HUANG M B, Warrington D N. Black Locust Transpiration Responses to Soil Water Availability as Affected by Meteorological Factors and Soil Texture [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(1): 57–71.
- [6] Zhou L M, Zhang F, Liu C A. Improved yield by harvesting water with ridges and subgrooves using buried and surface plastic mulchs in a semiarid area of China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015(150): 21–29.
- [7] IPCC. *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Cambridge & New York: Cambridge university Press, 2014.
- [8] 施成晓, 陈婷, 王昌江, 等. 干旱胁迫对不同抗旱性小麦种子萌发及幼苗根芽生物量分配的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(4): 483–490.
- [9] 李叶蓓, 陶洪斌, 王若男, 等. 干旱对玉米穗发育及产量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(4): 383–391.
- [10] 张伟杨, 钱希昉, 李银银, 等. 土壤干旱对小麦生理性状和产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(4): 491–500.
- [11] Law B E, Falge E, Gu L, *et al.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 97–120.
- [12] 陈昕钰, 杨阳, 盛洁悦, 等. 干旱胁迫对小麦颖果发育的影响 [J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 38(1): 81–88.
- [13] Sadras V O, Milroy S P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review [J]. *Field crops research*, 1996(47): 253–266.
- [14] 刘明, 吕爱锋, 武建军, 等. 干旱对农业生态系统影响研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(32): 165–171.
- [15] 周双玲, 敬小剑. 干旱对粮食作物生产的影响分析 [J]. *现代农业科技*, 2013(10): 243, 249.
- [16] 梁哲军, 齐宏立, 王玉香, 等. 水分亏缺对玉米籽粒形成的影响 [J]. *山西农业科学*, 2012, 40(10): 1035–1039.
- [17] Cakir R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn [J]. *Field Crops Research*, 2004, 89(1): 1–16.
- [18] Donald R O, Stephen P L. Limits on Yields in the Corn Belt [J]. *SCIENCE*, 2014(344): 484–485.
- [19] 詹海仙, 畅志坚, 魏爱丽, 等. 干旱胁迫对小麦生理指标的影响 [J]. *山西农业科学*, 2011, 39(10): 1049–1051.
- [20] 张启成, 刘雪平, 杜莹路. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响 [J]. *农业与技术*, 2017, 37(2): 9.
- [21] 谭艳, 彭尽晖. 植物抗旱机理及抗旱性鉴定方法研究进展 [J]. *广西农业科学*, 2010, 41(5): 423–426.
- [22] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. *Annals of Botany*, 2009, 103: 551–560.
- [23] Zhang T, Wang Z, Yin Y, *et al.* Starch content and granule size distribution in grains of wheat in relation to post-anthesis water deficits [J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 196: 1–8.
- [24] 宋霄君, 张敏, 武雪萍, 等. 干旱胁迫对小麦不同品种胚乳淀粉结构和理化特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 260–271.
- [25] 胡阳阳, 卢红芳, 刘卫星, 等. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响 [J]. *作物学报*, 2018, 44(4): 591–600.
- [26] Lu H F, Wang C Y, Guo T C, *et al.* Starch composition and its granules distribution in wheat grains in relation to post anthesis high temperature and drought stress treatment [J]. *Starch/Starke*, 2014, 66: 419–428.
- [27] 李思, 张莉, 姚雅琴. 干旱对冬小麦叶片气孔、活性氧和光合作用的影响 [J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(5): 487–493.
- [28] 袁蕊, 李萍, 胡晓雪, 等. 干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响 [J]. *山西农业科学*, 2016, 44(10): 1446–1449.
- [29] Lafitte H R, Guan Y S, Shi Y, *et al.* Whole plant responses, key processes, and adaptation to drought stress: The case of rice [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(2): 169–175.
- [30] 史吉平, 董永华. 水分胁迫对小麦光合作用的影响 [J]. *国外农学: 麦类作物*, 1995, (5): 49–51.
- [31] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317–345.
- [32] 李传华, 李清林, 谭秀山, 等. 不同土壤水分条件下小麦光合特性的研究 [J]. *河北农业科学*, 2013, 17(6): 10–12, 21.
- [33] Araus J L, Slafer G A, Reynolds M P, *et al.* Plant breeding and drought in C₃ cereals: What should we breed for [J]. *Annals of Botany*, 2002, 89: 925–940.

- [34] 葛体达,隋方功,白莉萍,等.不同土壤水分对玉米光合特性和产量的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2005,23(2):143-147.
- [35] 宋凤斌,许世昌,戴俊英,等.水分胁迫对玉米光合作用的影响[J].玉米科学,1994,2(3):066-070.
- [36] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):2902-2909.
- [37] 常敬礼,杨德光,谭巍巍,等.水分胁迫对玉米叶片光合作用的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(11):1-5.
- [38] 刘帆,申双和,李永秀,等.不同生育期水分胁迫对玉米光合特性的影响[J].气象科学,2013,33(4):378-383.
- [39] Fitter A. Characteristics and functions of root systems [C] // Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. *Plant Roots, the Hidden Half*. New York: Marcel Dekker Inc., 2002: 15-32.
- [40] Fitter A H. Roots as dynamic systems: the developmental ecology of roots and root systems [C] // Press M C, Scholes J D, Barker M G. *Plant Physiological Ecology*. London: Blackwell Scientific, 1999: 115-131.
- [41] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):724-730.
- [42] 龚璞,李宗震,岳慧芳,等.不同小麦抗旱品种种子萌发的根系特征及其与主要激素含量的关系[J].河北农业大学学报,2018,52(1):16-21.
- [43] Omami E N, Haigh A M, Medd R W, *et al.* Changes in germinability, dormancy and viability of amaranthus retroflexus as affected by depth and duration of burial [J]. *Weed Research*, 1999, 39:345-354.
- [44] Xian W F, Feng M L, You C X, *et al.* The cooperative relation between non-hydraulic root signals and osmotic adjustment under water stress improves grain formation for spring wheat varieties [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 132:283-292.
- [45] 岳文俊,张富仓,李志军,等.返青期水分胁迫、复水和施肥对冬小麦生长及产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(2):57-63,78.
- [46] 张蓓蓓,张辉,甘卓亭,等.干旱高温胁迫对小麦生长及木聚糖含量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):186-192.
- [47] 李博,王刚卫,田晓莉,等.不同干旱方式和干旱程度对玉米苗期根系生长的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):148-152.
- [48] 王智威.水分胁迫下玉米苗期的生长及生理响应[D].陕西:西北农林科技大学,2013,1-47.
- [49] Zobel R W. Sensitivity analysis of computer-based diameter measurement from digital images [J]. *Crop Science*, 2003, 43: 583-591.
- [50] 白莉萍,隋方功,孙朝晖,等.土壤水分胁迫对玉米形态发育及产量的影响[J].生态学报,2004,24(7):1556-1560.
- [51] 齐健,宋凤斌,刘胜群.苗期玉米根叶对干旱胁迫的生理响应[J].生态环境,2006,15(6):1264-1268.
- [52] 林忠辉,项月琴,莫兴国,等.夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J].中国生态农业学报,2003,11(4):69-72.
- [53] 丁端锋,蔡焕杰,王健,等.玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):64-67.
- [54] Chaves M M, Oliveira M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: Prospects for water-saving agriculture [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004,55(407): 2365-2384.
- [55] 黄正金.拔节及抽穗期水分胁迫对扬麦20生理特性及产量与品质的影响[D].扬州:扬州大学,2016,1-80.
- [56] 王敏,张从宇,姚维传,等.不同生育期干旱胁迫对小麦产量的影响[J].安徽农业科学,2001,29(5):605-607,610.
- [57] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等.阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响[J].生态学杂志,2012,31(11):2797-2803.
- [58] 崔亚坤.分蘖和拔节期土壤干旱对小麦产量形成的影响及其生理机理[D].南京:南京农业大学,2015,1-135.
- [59] Turner N C. Plant water relations and irrigation management [J]. *Agricultural Water Management*, 1990,17: 59-73.
- [60] 徐世昌,戴俊英,沈秀瑛,等.水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,1995,21(3):356-363.
- [61] Bolanos J, Edmeades G O. The importance of the anthesis silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize [J]. *Field Crops Research*, 1996,48(1): 65-80.
- [62] Zinselmeier C, Jeong B R, Boyer J S. Starch and the control of kernel number in maize at low water potentials [J]. *Plant Physiology*, 1999, 121(1):25-35.
- [63] Setter T L, Flannigan B A, Melkonian J. Loss of kernel set due to water deficit and shade in maize: carbohydrate supplies, abscisic acid, and cytokinins [J]. *Crop Science*, 2001, 41(5): 1530-1540.

- [64] Bolanos J, Edmeades G O. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behavior [J]. *Field Crops Research*, 1993, 31(3/4): 253-268.
- [65] Liu C A, Kadambot H. M. Siddique. Does Plastic Mulch Improve Crop Yield in Semiarid Farmland at High Altitude[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(5): 1724-1732.
- [66] Liu H J, Wang X M, Zhang X, *et al.* Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017(97): 144-157.
- [67] 罗利军, 张启发. 栽培稻抗旱性研究的现状与策略[J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(3): 209-214.
- [68] 郑盛华, 严昌荣. 水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1138-1143.
- [69] 赵天宏, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响[J]. *杂粮作物*, 2003, 23(1): 33-35.
- [70] Turner N C. Further progress in crop water relations [D]. *Advances in Agronomy*, 1997, 58: 293-339.
- [71] 姚维传, 熊际友. 水分胁迫下皖麦品种种子萌发及幼苗生长差异性研究[J]. *安徽农业科学*, 2000, 28(5): 607-609, 617.
- [72] 邹琦, 王玮. 冬小麦抗旱性鉴定的新方法—低水势下胚芽鞘长度法[J]. *中国农学通报*, 2000, 16(5): 23-25, 28.
- [73] 刘源霞, 兰进好, 林琪. 利用胚芽鞘长度法鉴定冬小麦抗旱性的研究[J]. *中国农业通报*, 2009, 25(2): 51-54.
- [74] 王士谦. 玉米抗旱性的研究进展[J]. *河北科技师范学院学报*, 2005, 19(3): 76-80.
- [75] Chandva B R, Safiullah P M, Blum A, *et al.* Comparison of measurement methods of osmotic adjustment in rice cultivars [J]. *Crop Science*, 1999, 39: 150-158.
- [76] Schneider K A, Brothers M E, Kelly J D. Marker-assisted selection to improve drought resistance in common Bean [J]. *Crop Science*, 1997, 37: 51-60.
- [77] 王德信, 杨晓莹. 玉米幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(4): 26-29.
- [78] 吕金岭, 吴儒刚, 范业泉, 等. 干旱条件下施肥与作物抗旱性的关系[J]. *江西农业学报*, 2012, 24(2): 6-10.
- [79] Lobell D B, Roberts M J, Schlenker W. Greater Sensitivity to Drought Accompanies Maize Yield Increase in the U.S. Midwest[J]. *SCIENCE*, 2014, 344: 516-519.

锯齿形微通道结构参数对布朗粒子分离的影响研究

蔡玳菁, 余宛真, 韩鹏*

(华南师范大学 物理与电信工程学院, 广州 510006)

摘要:微通道粒子分离技术通过设计特殊的微通道结构对布朗粒子构成特定的熵势阱,同时施加一定的外力影响,从而实现粒子分离。本文研究了恒定外力和熵势的共同作用下,锯齿型微通道结构参数对微通道中不同粒径大小的粒子分离特性的影响。分析了不同粒径粒子的速度差,两种粒径大小不同粒子大小以及改变左壁斜率大小的情况下,对粒子的分离效果的影响,并得出相应的最优分离方案。这些研究结果有利于促进微通道粒子分离技术的进一步发展。

关键词:粒子分离;锯齿形微通道;布朗运动

中图分类号:O572.2

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0016-06

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.003

Effect of Serrated Micro-channel Structure Parameters on Brownian Particles Separation

Cai Daijing, Yu Wanzhen, Han Peng*

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The micro-channel particle separation technique is to design special structural micro-channel to form specific entropy potential well for the Brownian particles, and to apply a proper external force to regulate the speed and the direction of the particles movement so that the particles in the micro-channel can be separated. The method has the advantages of no damage, high separation efficiency, strong applicability and so on. It has caught more and more attention in recent years. In this paper, we studied the separation characteristics of particles with different size in serrated micro-channels under the combined action of constant external force and entropy potential. The influence of the micro-channel structure parameters on particle separation characteristics is analyzed in detail. It is found that the entropy potential and the external force take different effects on the different particles in the micro-channel. The external force take larger effects on the small particles and the entropy potential take larger effects on the large particles. To adjust the relationship between external force and entropy potential, we can make particles of different size moved in the opposite direction to separate the particles. By analyzing the velocity difference between two different particles, it is found that the particles with larger size different are easier separated. When fixing one particle size, it is found that the larger the particle size ratio of the two particles, the greater their average velocity difference and the wider the slope of the two particles in the opposite direction. When the size of the two particles is close to each other, it is

收稿日期:2018-07-25

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61371176)资助的课题。

*通信作者:韩鹏, E-mail: hanpeng@ m.scnu.edu.cn

easier to separate two particles in large size than those in small size. And we can adjust the strength of the external force to increase the effect of particle separation. In addition, by changing the slope of the left wall, we found that under some proper amplitude of oscillatory force, the best ratio of the slope of the left wall and that of the right wall are 4 to 8 times for particle separation. These results are valuable in the design of serrated micro-channel structure and will promote the further development of micro-channel particle separation technology.

Keywords: particles separation; serrated micro-channel; brownian motion

粒子分离技术是粒子纯化的重要手段,可实现不同粒子的物理分离,广泛应用于生物^[1],化学^[2],物理等领域。目前,粒子分离技术主要包括场流分级法,介电泳法,梯度离心法,膜分离法等方法^[3]。通过这些方法,不同尺寸的粒子因运动速度不同或受力大小不同从而相互分离。

1966年,Giddings首次运用场流分级法^[4]。这是一种利用包含纳米粒子的溶液在扁平形状隧道内流动,在系统中施加一定方向的某种力场,如电势场、液压场、热力场等,通过力场的作用实现不同粒子的分离,适用于对纳米粒子尺寸范围较大的粒子进行分离。用微通道进行粒子分离是场流分级法分离粒子方法之一,利用微通道对粒子进行分离是近年来发展起来的一种方法,因其具有无破坏、分离效率高、适用性强等优点,得到了人们的广泛重视。其工作原理是在复合的静态力^[5]和熵校正的共同作用下在微通道或微流体中使大小粒子往相反方向运动来分离半径相似的粒子,因此,不同形状及不同粗糙程度^[6]的微通道对粒子的影响不同。

2011年,Zitserman等人模拟了粒子布朗运动在周期型的锥形管中的漂移^[7],通过施加振荡力,分析力的大小和周期以及通道孔径对粒子运动的影响,并建立三维布朗运动动力学模拟系统。由于三维模型的复杂性,国内外研究学者们利用 Fick-Jacobs 方程将三维的模型近似简化为二维的模型。2012年,Reguera等人模拟了粒子布朗运动在不对称锯齿形微通道中的运动情况^[8],通过施加方波振荡力和恒力,实现了粒径大小不同的粒子往相反的方向运动。通过建立二维模型模拟粒子布朗运动在微通道中的运动情况,研究粒子布朗运动受到哪些因素的影响,可以在精度有保证的情况下简化模型,为进一步实验提供理论支持。

本文主要分析了锯齿形微通道中粒子的布朗运动情况,研究了其在振荡力和恒力作用下,微通道结构中锯齿形通道的斜率和粒子粒径不同时该系统粒子分离效果的优劣,期望该研究可促进锯齿形微通

道粒子分离技术的发展。

1 原理与设计

1.1 锯齿形微通道模型

不对称锯齿形微通道结构是目前最为常见的用于粒子分离的微通道结构。在不考虑量纲且系统绝热的情况下,典型的不对称锯齿形微通道模型如图1所示^[8]。

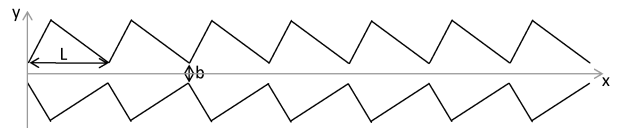


图1 锯齿形微通道模型

Fig.1 The model of serrated micro-channel

图1中,上半部分锯齿通道的形状函数关系为:

$$y(x) = \begin{cases} b + m_1 \bar{x}, & \bar{x} < c \\ b + m_2(L - \bar{x}), & \bar{x} \geq c \end{cases} \quad (1)$$

下半部分的通道与上半部分镜面对称。其中, b 为锯齿结构的孔径的 $1/2$, L 为每个通道元的长度, b 和 L 满足 $b/L=0.1$, m_1 为锯齿形通道的左边斜率, m_2 为锯齿形通道右边斜率, $\bar{x}=x(\text{mod}L)$ 形成通道周期结构, $c=Lm_2/(m_1+m_2)$,表示通道元中最宽的位置对应的 x 轴上的值。在该系统中,通道中的粒子受到一个恒力 $F=-1$ 和一个方波振荡力 $f(t)=f_0 \text{sgn} \left[\sin \left(\frac{\pi}{10} t \right) \right]$ 的作用, f_0 为方波振荡力的振幅。在模型中的粒子半径与锯齿结构的孔径大小成比例,最大的粒子的半径为 $r=0.9b$,最小粒子的半径为 $r=0.1b$ 。在这个模型中,规定水平向右方向为正方向。

1.2 微通道中粒子的运动

在锯齿形微通道中,粒子不仅受到了力的作用,也受到了通道结构的局限,模拟粒子为刚性的小圆球,粒子在受到通道结构局限影响后运动的轨迹满足的方程^[8]为:

$$w(x) = \begin{cases} -\sqrt{r^2 - \bar{x}^2} + b, & 0 \leq \bar{x} < o_p \\ b + m_1 \bar{x} - r\sqrt{1 + m_2^2}, & o_p \leq \bar{x} < c_p \\ b + m_2(L - \bar{x}) - r\sqrt{1 + m_1^2}, & c_p \leq \bar{x} < L_p \\ -\sqrt{r^2 - (\bar{x} - L)^2} + b, & L_p \leq \bar{x} < L \end{cases}$$

其中, $o_p = rm_1/\sqrt{(1+m_1^2)}$, $L_p = L - rm_2/\sqrt{(1+m_2^2)}$, $c_p = c+r[\sqrt{(1+m_1^2)} - \sqrt{(1+m_2^2)}]/(m_1+m_2)$, 这3个点为通道中的拐角。由上下通道壁形状的对称性可知, 粒子在下半部分的通道中运动的轨迹为 $w'(x) = -w(x)$ 。所以粒子在系统中受到结构限制为 $w(x) - w'(x) = 2w(x)$ 。由于熵的变化与通道的结构有关, 则在该系统中, 熵势为 $TS(x) = \ln[2w(x)]$, 系统中总势能为 $V(x) = U - TS(x) = [F + f(t)]x - \ln[2w(x)]$ 。同时, 通道的限制以及粒子的大小影响系统中的扩散系数的大小, 在这个系统中, 扩散系数为 $D(x) = b/\{r[1+w'(x)^2]^{1/3}\}$ 。

在二维的锯齿形微通道中, 粒子布朗运动在受到恒力 F 和方波振荡力 $f(t)$ 的作用下, 其所受到的局限作用下, 其所满足的朗之万方程为:

$$\gamma \frac{d\vec{r}}{dt} = -[f + F(t)]\vec{e}_x + \sqrt{\gamma k_B T} \vec{\xi}(t) \quad (2)$$

其中 \vec{r} 表示颗粒的位置, \vec{e}_x 是沿 x 轴方向上的单位矢量, $\vec{\xi}(t)$ 为系统中的高斯白噪声。

在绝热的环境下, (2)式可化简为^[8]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = -(f_0 + F_0 \text{sgn}[\sin(\Omega t)])\vec{e}_x + \sqrt{b/r} \vec{\xi}(t) \quad (3)$$

粒子布朗运动在受到熵势和外力的共同作用下的运动, 结合 Fick-Jacobs 方程, 得到 Fick-Jacobs 的修正方程^[8-10]为:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(x) \left(\frac{\partial P}{\partial x} + V'(x) P \right) \right\} \quad (4)$$

在绝热的环境中, 根据 stratonovich 积分, 粒子的流速^[8, 11, 12]为:

$$J(f_0) = \frac{1 - e^{-(F_0+f_0)r/b}}{\int_{x_0}^{x_0+1} dz \frac{1}{D(z)} e^{V(z)} \int_{z-1}^z dx e^{-V(x)}} \quad (5)$$

因为粒子所受到的方波振荡力的影响, 所以粒子运动的平均速度为:

$$\langle v \rangle = \frac{J(f_0) + J(-f_0)}{2} \quad (6)$$

选择合适的微通道结构参数与外力等外部条件, 可调控粒子的平均运动速度与方向。在相同的

外力条件下, 如果不同粒径的粒子运动方向相反, 就可以实现粒子的分离。寻找合适的结构参数与外力大小是目前该领域的研究热点。

2 微通道结构对粒子运动的影响

论文^[8]中, 发现在施加恒力为 $F = -1$, 微通道左壁斜率为 $m_1 = 2.0$, 右壁斜率为 $m_2 = 0.4$ 时, 随着方波振荡力振幅的增大, 粒径大小不同的粒子可以实现向不同方向运动, 使大小粒子分离。本文采用了论文^[8]的数据, 通过改变左壁斜率 m_1 的大小, 讨论微通道熵势改变对粒子分离的影响。

2.1 粒子粒径大小不同时, 受到外力和熵势影响不同

图2为计算得到的两种不同振幅的方波振荡力 f_0 作用下, 粒径 r 分别为 $0.1b$ 到 $0.9b$ 的粒子的平均运动速度随左壁斜率 m_1 的变化, 其中图2(a)为 $f_0 = 50$ 时的情况, 图2(b)为 $f_0 = 0.5$ 时的情况。由图可知, 方波振荡力为 $f_0 = 0.5$, 在 m_1 取 $0.5 \sim 3.0$ 时, 大小粒子均向左运动, 且大小粒子平均速度变化量都很小; 而在方波振荡力为 $f_0 = 50$ 时, 随着斜率 m_1 变大, 大粒子平均速度变化量与 $f_0 = 0.5$ 时平均速度变化量相差小, 小粒子平均速度变化量与 $f_0 = 0.5$ 时平均速度变化量相差大, 在左壁斜率为 $m_1 = 0.5$ 时, 小粒子与大粒子速度方向均为向左, 并且小粒子平均运动速度为大粒子平均运动速度的10倍, 而当 $m_1 = 3.0$ 时, 大粒子与小粒子均向右运动, 且小粒子平均运动速度大于大粒子。即在 $f_0 = 50$ 时, 小粒子平均速度会渐渐减少至大粒子的平均速度, 最后平均速度比大粒子快。可见, 大粒子的运动主要受到熵势的影响, 小粒子的运动主要受到系统中外力的影响。在本实验中, 大粒子实现速度方向反转的左壁斜率随着粒子粒径的增大而减小。综上所述可得, 大粒子在微通道中受到熵势的影响较大, 而小粒子在微通道中受到系统中外力的作用影响较大。通过选取不对称的锯齿形微通道结构, 可以使大粒子受到熵势的作用大于受到外力作用, 小粒子受到外力作用大于受到熵势的作用, 从而实现粒子的分离。

2.2 粒径比对粒子分离的影响

由以上分析可知, 在左斜率逐渐增大的过程中, 大粒子实现了运动方向反转的斜率大于小粒子实现运动方向反转的斜率。图3给出了当两种粒子粒径比不同时, 施加3种不同的方波振荡力, 粒子平均运动速度差与左壁斜率 m_1 的变化关系。

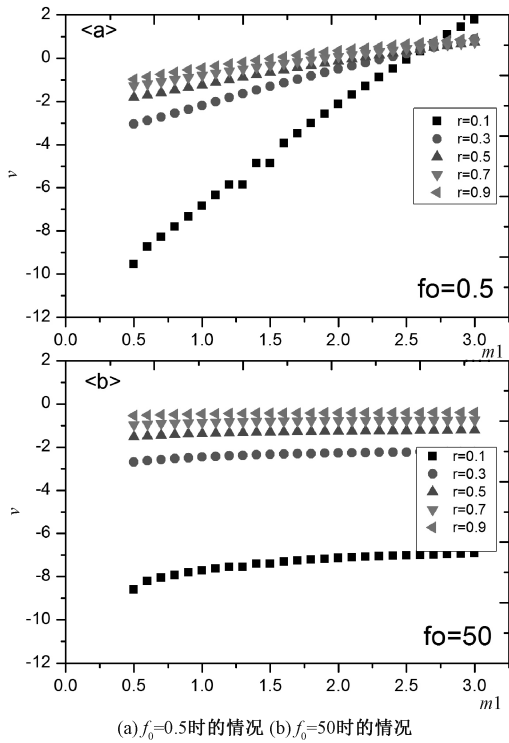


图 2 两种不同振幅的方波振荡力 f_0 作用下, 粒径 r 分别为 0.1 b 到 0.9 b 的粒子的平均运动速度随左壁斜率 m_1 的变化

Fig.2 Average velocity of different particles ranging from 0.1 b to 0.9 b changes with the left-wall slopes m_1 of the serrated micro-channels under the square wave oscillation force

其中,图 3(a)~(d)在小粒子粒径为 $r=0.1$ b 时,大粒子粒径分别为 0.9 b、0.7 b、0.5 b、0.3 b 时粒子平均运动速度差与左壁斜率的变化关系。图中的虚线是 2 种粒子出现速度方向相反的斜率值区域。由图 3 知,两种粒子粒径比 r_1/r_2 越大,2 种粒子运动方向相反的区域范围越大,且在小粒子粒径不变的前提下,大粒子粒径与其比值越大,2 种粒子的平均速度差值越大。图 3 中还可以看出,当 $f_0=0.5$ 时,2 种粒子没有出现运动速度相反的情况(无虚线),而当 $f_0=25$ 和 $f_0=50$ 时,出现了 2 种粒子运动速度相反的区域(两条虚线范围内), $f_0=25$ 时的区域范围大于 $f_0=50$ 时的区域。

图 4 为当 2 种粒子粒径相近时,在振幅不同的方波振荡力作用下,2 种粒子平均速度差与左壁斜率 m_1 的关系。图 4 是粒径分别为 $r_1/r_2=0.3b/0.1b$, $r_1/r_2=0.5b/0.3b$, $r_1/r_2=0.7b/0.5b$, $r_1/r_2=0.9b/0.7b$ 时的情况,虚线范围仍是 2 种粒子运动方向相反的区域。由图 4 可知,当 2 种粒子粒径相近时,在 2 种粒子均是小粒子的情况下(图 4(a)),2 种粒子的平均速度差更大,但此时 2 种粒子运动方向相反的左斜率范围较小(虚线范围),此时应让 2 种粒子向左运动进行分离,由于 2 种粒子速度差较大,利用粒子到达通道口时间不同这一特点进行分离,但分离时间不宜过长;当 2 种粒子均是大

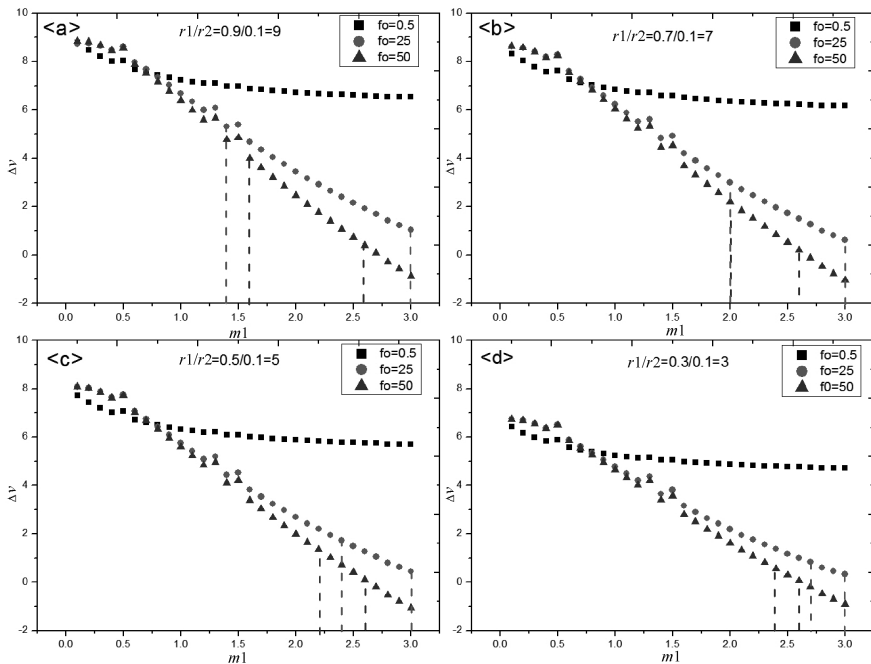


图 3 2 种粒子粒径比不同时,3 种方波振荡力 ($f_0=0.5, 25, 50$) 作用下,粒子运动平均速度差与左壁斜率 m_1 的变化关系

Fig.3 The relationship between the average velocity difference of two particles and the slope of the left wall under the square wave force $f_0=0.5, 25, 50$

粒子的情况下(图4(d)),2种粒子的平均速度差小,但这2种粒子的运动方向相反的左斜率范围较大(虚线范围),应让2种粒子沿相反的方向运动进行分离。

在每种情况中,不同振幅的方波振荡力的影响也不同。图4中可见,不论2种粒子的粒径取何值,在 $f_0 = 25$ 时,2种粒子出现平均运动速度相反的左斜率范围总是大于当 $f_0 = 50$ 时的情况。但在 $f_0 = 0.5$ 时,未出现2种粒子平均运动速度相反的情况。所以,对于粒径相近的粒子进行分离时,需选择合适的外力。

2.3 左壁斜率大小对粒子分离的影响

由图3还可知,在方波振荡力很小,如只有 $f_0 = 0.5$ 时,左壁斜率大小的变化对2种粒子的平均速度差影响不大,此时2种粒子的平均运动速度差较大,且保持稳定,但此时粒子都向左运动。方波振荡力变大后,随着左壁斜率的变大,大小粒子平均速度差变小,但此时粒径不同的粒子均向左运动,所以,如果在左壁斜率小时进行粒子分离实验,可以利用大小粒子平均速度差大这个特点对粒子进行分离,但由于粒子运动速度方向相同,分离得到的粒子纯度低。当方波振荡力的振幅一定时,随着左壁斜率的增大,大粒子与小粒子的平均运动速度差逐渐减

小,在大小粒子运动速度相反范围内,粒子分离效果较好。而当大小粒子速度方向都反转后,大小粒子都向右运动,随着左壁斜率的增大,大小粒子的平均速度差逐渐增大,粒子分离速度变大,又有利于粒子的分离。要使2种粒子运动方向相反,粒子分离效果较好,结合图3和图4,当左壁斜率与右壁斜率为4~8倍时,粒子分离效果较好。

3 结论

1)受到恒力和振荡力作用下的锯齿形微通道中,大粒子受到熵势的影响较大,小粒子受到力的作用影响较大;

2)2种粒子粒径比越大,它们的平均速度差越大,并且出现两种粒子方向相反的斜率范围越大,越易实现分离;

3)2种粒子粒径接近时,当两种都为小粒子时,它们平均速度差大,但速度方向相反的斜率范围小,所以应让2种粒子向同一方向运动进行分离,但分离时间不宜过长;2种粒子都为大粒子时,平均速度差较小,速度方向相反的斜率范围比小粒子情况大,应采用让2种粒子向相反方向运动的方式进行分离;

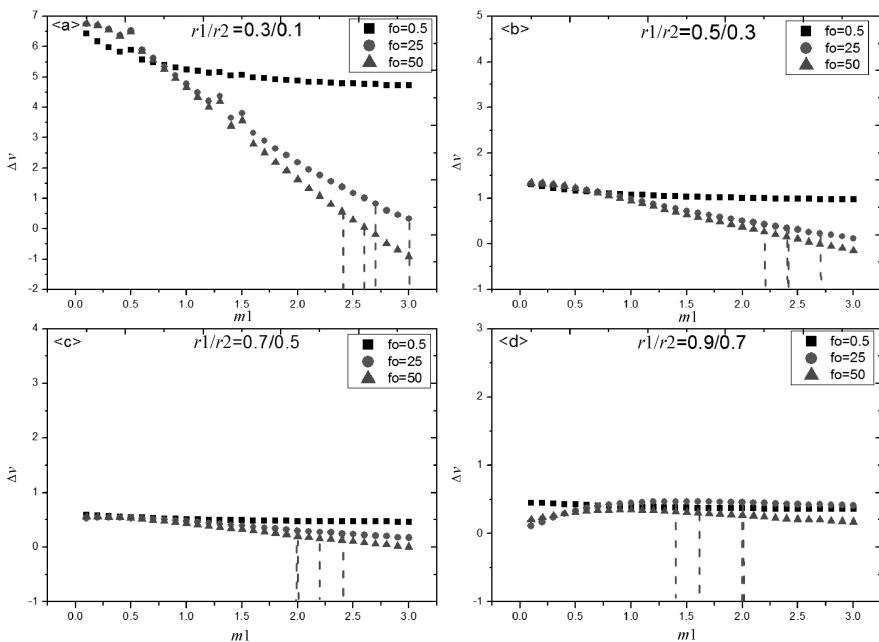


图4 2种粒子粒径相近时,不同振幅的方波振荡力作用下,2种粒子平均速度差与左壁斜率的关系

Fig.4 When the size of the two particles is similar, the relationship between the average velocity difference of two particles and the slope of the left wall under different square wave oscillation force

基于蒙特卡罗方法的薄膜表面粗糙度的数值模拟

贾莹,张怡南,姜昊辰,鲁韶菲,陈瀛,邹斌

(中央民族大学理学院,北京 100081)

摘要:薄膜的表面粗糙度直接影响薄膜的最终性能。本文构建了薄膜的三维生长动力学模型,并采用蒙特卡罗方法实现了薄膜生长的数值模拟,得到了沉积速率、基底温度和原子覆盖度等因素对薄膜表面粗糙度的影响。模拟结果表明:随着沉积速率的增大、基底温度的降低和覆盖度的增大,薄膜的表面粗糙度增大;并且在沉积速率较小时,薄膜的表面粗糙度随沉积速率增加迅速,而沉积速率较大时,薄膜的表面粗糙度随沉积速率增加缓慢。

关键词:薄膜生长;粗糙度;蒙特卡罗方法

中图分类号:O411.3

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0021-05

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.004

Simulation of the Surface Roughness of Thin Film by Monte Carlo Method

Jia Ying, Zhang Yinan, Jiang Haochen, Lu Shaofei, Chen Ying, Zou Bin

(College of Science, Mizu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: The performance of thin film is influenced by the surface roughness of thin film. A three dimensional model to describe the growth of thin film is proposed, and the surface roughness of thin film is simulated by using Monte Carlo method. The effects of the deposition rate, the substrate temperature and the coverage on the surface roughness of thin film have been studied in details in this paper. The simulation results show that with the deposition rate increasing, the substrate temperature decreasing and the coverage increasing, the surface roughness of thin film increases. When the deposition rate is lower, the increasing rate of the surface roughness is larger, and when the deposition rate is higher, the increasing rate of the surface roughness is smaller.

Keywords: film growth; roughness; Monte Carlo simulation

随着现代信息技术的发展,电子器件正朝着微型化、薄膜化和集成化的方向发展,这极大地促进了薄膜制备技术的发展,同时对薄膜器件的制造工艺也提出了更高的要求。研究表明^[1]:薄膜的表面粗糙度直接影响薄膜的最终性能。因此,对薄膜生长

过程以及表面粗糙度的影响因素的研究,对于研制性能优良的薄膜器件有着重要的理论意义和应用价值。实验上,倪晋尚研究了沉积时间对汽车 PbS 薄膜表面粗糙度的影响^[2],孙林等人研究了脉冲电流密度和占空比对薄膜镀金层的粗糙度的影响^[3],胡

收稿日期:2018-10-05

基金项目:国家自然科学基金青年项目(项目号 11604394);北京市基础教育阶段创新人才培养项目委托项目(项目号 2017QTLX10);中央民族大学青年基金(项目号 2019QNPY72);大学生创新创业训练计划项目(项目号 U RTP2019110054, GCCX2019110026)。

作者简介:贾莹(1980-),女,河南省新郑人,博士研究生,副教授,研究方向为纳米功能材料的数值模拟。

E-mail: jiaying317@muc.edu.cn。

现伟等人研究了温度对 ErAlN 薄膜表面粗糙度的影响^[4],朱丽娜等人研究了温度对 AlCrN 薄膜表面粗糙度的影响^[5]。由于目前的实验技术还不能够完全跟踪薄膜的生长过程,因此借助于计算机技术,在原子水平上全面地模拟薄膜的生长过程,寻找影响薄膜表面粗糙度的影响因素,将对改进薄膜的生长工艺,提高薄膜的最终性能有很大的参考价值^[6-10]。

在薄膜生长的数值模拟研究中,蒙特卡罗方法作为一种随机方法,由于其计算量小,可模拟的时间尺度和空间尺度大,因此被研究者广泛应用^[9-11]。目前对薄膜生长的数值模拟研究中,主要采用薄膜的二维生长模型,这在一定程度上可以得到薄膜形貌、覆盖度等性能参量,但是对于表面粗糙度这一影响薄膜性能的重要参量却无法体现出来。薄膜的实际生长过程是一个三维过程,而薄膜表面粗糙度这一重要参量也只有考虑了薄膜三维生长过程时才能够计算出来。因此本文尝试构建了薄膜的三维生长动力学模型,并采用蒙特卡罗方法实现了薄膜生长的数值模拟,得到了薄膜表面粗糙度这一重要参量随沉积速率、基底温度和原子覆盖度等因素的变化规律。

1 薄膜生长的三维物理模型及编程实现

1.1 薄膜生长的三维物理模型

薄膜的生长过程是沉积在基底上的原子不断扩散迁移的过程。无论是薄膜生长早期的形核阶段还是后期的长大阶段,微观原子的扩散过程都起着重要的作用,正是这些复杂的扩散过程决定了薄膜生长的最终形貌和质量。

与二维模型不同的是,在考虑原子的扩散过程时,我们不仅考虑了原子沿同一层面的扩散,还考虑了原子在不同层间的转移。沉积原子沿同一层面的扩散决定了薄膜在水平方向上的均匀性,而原子的层间转移则决定了薄膜在垂直方向的均匀性。在原子的扩散过程中,原子从初始位置 i 跃迁到新的位置 j 的几率可由 Arrhenis 公式给出,即

$$W_{ij} = \frac{1}{k} \exp\left(-\frac{E_j - E_i}{k_B T}\right) \quad (1)$$

其中 k_B 是 Boltzmann 常数, T 是基底的温度, k 是归一化因子, E_i 和 E_j 分别是 i 位置和 j 位置原子的迁移激活能。当原子发生层间转移时,需要克服

一个额外的能量势垒,即 Ehrlich-Schwoebel 势垒^[12], Ehrlich-Schwoebel 势垒的大小直接影响着层间的原子传输。

我们建立与 Cu 的 fcc 晶格相对应的三维格点,原子被假定为只存在于格点处,并且原子只能在格点之间跳跃扩散。对经典的薄膜生长 DLA 模型进行改进,考虑了衬底上同时出现多个种子粒子的情况,并引入沉积速率参量 Dv 以表示单位时间沉积的原子个数。沉积速率越快,同时沉积的原子个数越多,这样同时在衬底上行走的原子数目就越多。在模拟的过程中,原子在基底上的扩散采用周期性边界条件,即左出右进,右出左进,上出下进,下出上进。原子按一定的速率随机地沉积在衬底的某个位置,其在基底上的扩散能力(即原子能在衬底上扩散的总步数)与基底的温度 Dt 有关,基底温度越高,扩散能力越大。给每个原子设置一个计数器,计数器的初始值为 0,原子每扩散一步,计数器加 1,当步数大于扩散能力或者原子遇到其它原子和原子团时,原子将停止扩散。对于原子不同层间跃迁需要克服的 Ehrlich-Schwoebel 势垒,参考李佳阳等人^[12]对 Cu 原子在表面台阶扩散的 Ehrlich-Schwoebel 势垒的计算结果。

在具体模拟吸附原子的扩散过程时,我们建立了基于蒙特卡罗方法的晶格动力学三维模型,具体计算步骤如下:

(1)由 Arrhenis 公式计算出原子向各个方向的可能跳跃几率,并用 P_m^k 表示第 m 个原子向 k 方向的可能跳跃几率;

(2)产生随机数 $\xi \in (0,1)$, 决定 m 原子的跳跃方向,即当满足 $\sum_{k=1}^p P_m^k < \xi \leq \sum_{k=1}^{p+1} P_m^k$ 时,认为 m 原子将向 p 方向跳跃;

(3)完成跳跃过程,更新周围受影响的原子的跳跃几率,同时更新时钟 $t = t + \Delta t$ 。

(4)重复(1)~(3)过程。

1.2 薄膜三维生长的编程实现

我们采用 24×24 的格点模型做基底,每个原子只能落在晶格点的格点上,首先让一个原子随机地沉积到基底上,并在基底上移动,同时另一个原子继续下落。每个原子的扩散能力用参数 Dt (即原子总共能在衬底上扩散的步数)表示, Dt 也间接地反应了基底温度的高低,基底温度越高,原子在基底上的扩散能力越强, Dt 越大,反之 Dt 越小。每个原子有一个扩散步数的计数器 S ,刚沉积到基底上时 S 置

为0,每扩散一步,计数器加1,当沉积到基底上的原子在扩散过程中相遇,则形成原子团,原则上不允许已经成团的原子脱离原子团。考虑衬底上同时出现多个种子原子的情况,引入了沉积速率参量 Dv (即每隔多少步有一个原子沉积到衬底上),沉积速率越快,衬底同时出现的吸附原子数目就越多。

对于多个原子同时行走的情况,为了节省计算机运行时间,我们采取了以下的运算技巧。首先对所有原子进行编号,并按编号将原子分为不同的区。所有的原子将被分为3个区,即原子编号在 $[a, b]$ 区间的是当前处于扩散状态的原子,原子编号小于 a 的是已停止扩散的原子,原子编号大于 b 的是还未释放到衬底上的原子。这3个区间的范围并不是固定不变的,而是随着时间的演化而改变。例如每隔一定的时间间隔,第 $b+1$ 个原子释放到衬底上并开始扩散,此时处于扩散状态的原子区间 $[a, b]$ 的右边界 b 将被赋值为 $b+1$ 。在这3个区间中,区间 $[a, b]$ 作为循环区间,每经过1个时间步长,原子编号在 $[a, b]$ 间的原子将根据蒙特卡罗方法判断1次行走方向。因为这种分区法将循环区间只局限于 $[a, b]$,而非所有释放在衬底上的原子数,因此大大减少了循环次数,提高了计算效率。

为了充分利用 Matlab 对于矩阵运算的优势,我们对衬底进行了网格矩阵化处理,这样不仅降低了判断衬底各点处有无原子的识别难度,同时大大减少了循环运算的次数。具体做法如下:

(1) 建立基底矩阵,用1个 (24×24) 的零矩阵表示衬底网格,矩阵的1个元素代表网格中的1个节点;

(2) 建立标记矩阵,记录基底矩阵每1个位置的属性,当矩阵元素为0时,表示此位置没有原子,当矩阵元素为1或2时,表示此位置有1层原子(1表示原子还可以继续扩散,2表示原子已吸附到原子团上,处于静止状态),当矩阵元素为11或22时,表示此位置有2层原子(11表示原子还可以继续扩散,22表示原子已吸附到原子团上,处于静止状态),依此类推;

(3) 建立跟踪矩阵,将原子序数作为循环的控制变量,对于第 i 个原子的每1次循环中,用跟踪矩阵的第 i 行记录该原子的位置、走停状态等信息。

1.3 几个重要物理量的计算

(1) 薄膜表面粗糙度

薄膜表面粗糙度的计算公式为:

$$R = \frac{S'}{S} \quad (2)$$

其中 S' 表示薄膜的实际表面积, S 表示理想平整的薄膜表面积。

在计算薄膜表面积时,我们采用以直代曲的方法,将每个原子所占据的空间看做小立方体。编程时采用遍历矩阵的方法,即定义横向遍历矩阵为

$$s_1 = \sum_{i=1}^{200} \sum_{j=1}^{200} |z_{i(j+1)} - z_{ij}| \quad (3)$$

纵向遍历矩阵为

$$s_2 = \sum_{j=1}^{200} \sum_{i=1}^{200} |z_{(i+1)j} - z_{ij}| \quad (4)$$

其中 $|z_{i(j+1)} - z_{ij}|$ 表示第 i 行处与 y 轴平行的切面上相邻 j 位置的高度差, $|z_{(i+1)j} - z_{ij}|$ 表示第 j 列处与 x 轴平行的切面上相邻 i 位置的高度差。这样薄膜的表面积可表示为

$$s = s_1 + s_2 + s_{\text{基底}} \quad (5)$$

(2) 薄膜表面覆盖度

薄膜表面覆盖度可由下式计算,

$$C = \frac{m}{n \times n} \quad (6)$$

其中 m 表示被原子占据的格点数, $n \times n$ 表示基底的总格点数。

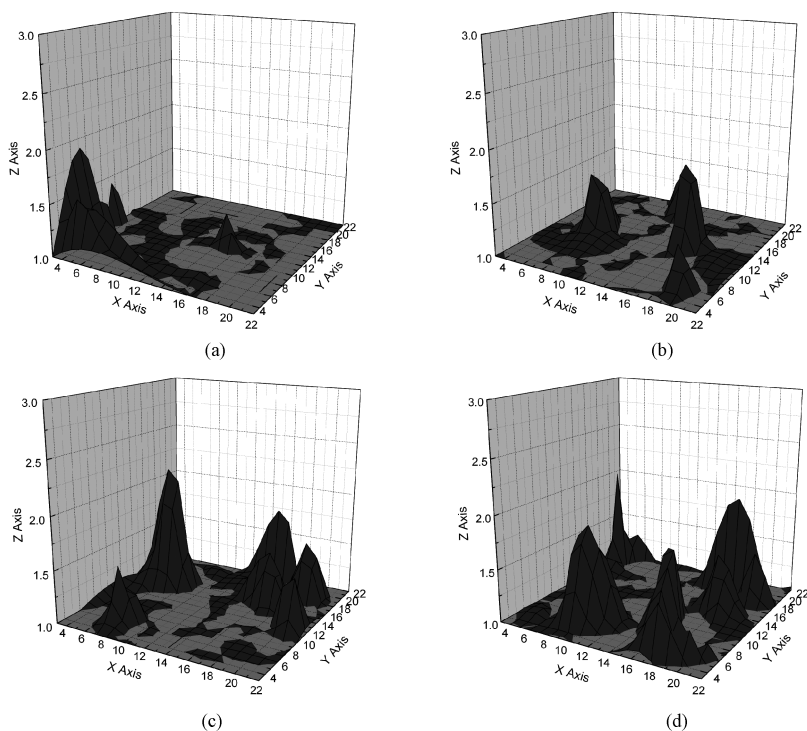
2 模拟结果和分析

2.1 沉积速率对薄膜表面粗糙度的影响

图1是沉积速率分别为0.01, 0.1, 30和80时的薄膜表面形貌图,图2是薄膜表面粗糙度随沉积速率参数的变化规律。由图1和图2可以看出,随着沉积速率的增加,薄膜的表面粗糙度增大。这是因为沉积速率越大,同时沉积的原子个数就越多,沉积原子还来不及充分扩散,就被新到达的原子所覆盖,更容易形成岛状生长。此结论与文献中的实验结果相符合^[3]。由图2还可以看出,表面粗糙度随沉积速率的增大而增加。在沉积速率较小时,表面粗糙度随沉积速率的增大迅速增加,而沉积速率较大时,表面粗糙度随沉积速率的增大呈缓慢增加趋势。

2.2 薄膜表面粗糙度随基底温度的变化规律

图3是一定温度范围内不同基底温度时的薄膜表面形貌图。由图3可以看出,随着基底温度升高,岛的数目减少,岛的尺寸变大同时岛的高度变矮。图4是薄膜表面粗糙度随基底温度的变化规律。由



(a) $Dv=0.01$, (b) $Dv=0.1$, (c) $Dv=30$, (d) $Dv=80$

图 1 不同沉积速率下薄膜的三维形貌图

Fig.1 The three dimensional morphology of films at different deposition rates

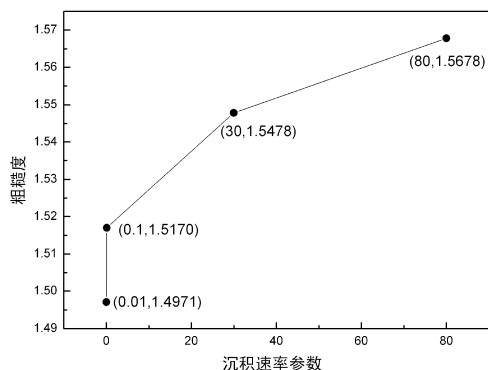


图 2 薄膜表面粗糙度随沉积速率参数的变化规律

Fig.2 The influence of the deposition rates on the surface roughness of films

图 4 可以看出,薄膜的表面粗糙度随基底温度的升高而迅速减小。这是因为温度升高时,原子的扩散能力增强,这有利于原子的层间传输,更多的原子能够从上层跳到下层,填充下层的空位或薄膜中的微孔洞,从而得到粗糙度较低的薄膜。此结论与文献中的实验结果相符合^[4]。

2.3 薄膜表面粗糙度随覆盖度的变化规律

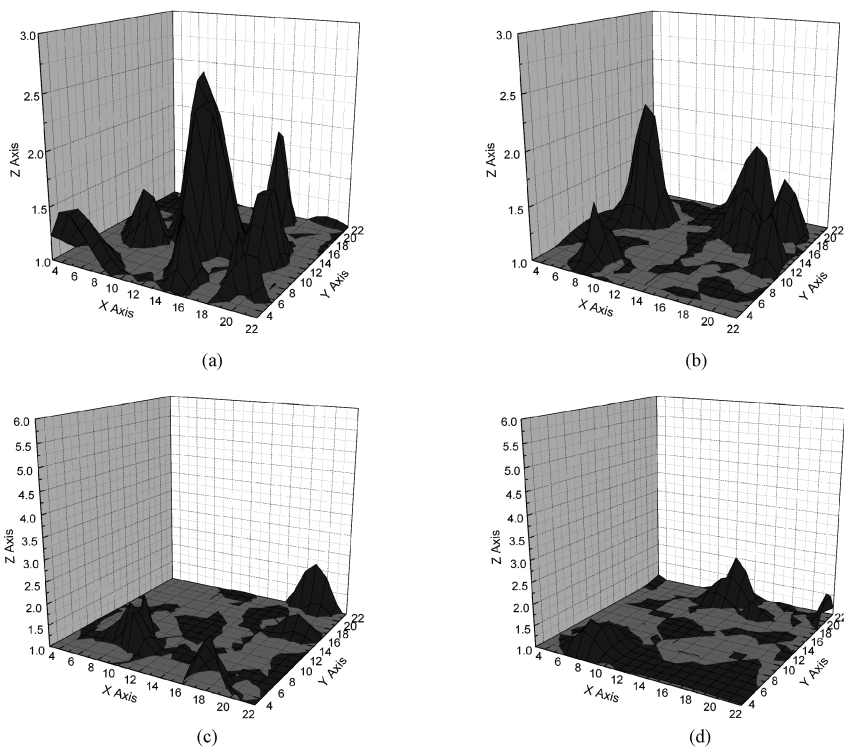
图 5 是薄膜表面粗糙度随覆盖度的变化规律。由图 5 可以看出,薄膜的表面粗糙度随覆盖度的增加而增加,此结论与文献中报道的实验结果相符合^[2,3]。

3 结论

本文采用蒙特卡罗方法模拟了薄膜的三维生长过程,并讨论了沉积速率、基底温度以及原子覆盖度对薄膜表面粗糙度的影响。结果表明:薄膜表面粗糙度随着沉积速率的增加而增大,并且在沉积速率较小时,粗糙度随沉积速率增加迅速,沉积速率较大时,粗糙度随沉积速率增加缓慢;薄膜表面粗糙度随着基底温度的升高而减小;在基底温度、原子沉积速率等条件不变的情况下,薄膜表面粗糙度随覆盖的增加而增加。

参考文献:

- [1] 吴自勤,王兵. 薄膜生长[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 1-30.
- [2] 倪晋尚. 沉积时间对汽车 PbS 薄膜结构和光学特性的影响[J]. 化工新型材料, 2018, 46(10): 75-78.
- [3] 孙林,谢新根,程凯等. 脉冲电镀参数对薄膜电路镀金层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(13): 566-569.
- [4] 胡现伟,泰智微,杨成韬. 温度对 ErAlN 薄膜晶体结构和电学性能的影响[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 262-264.



(a) $Dt=10$, (b) $Dt=30$, (c) $Dt=50$, (d) $Dt=100$

图 3 不同基底温度下薄膜的三维形貌图

Fig.3 The three dimensional morphology of films at different temperatures

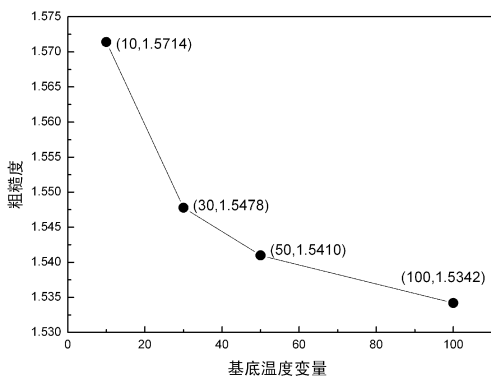


图 4 薄膜粗糙度随基底温度的变化规律

Fig.4 The influence of the temperatures on the surface roughness of films

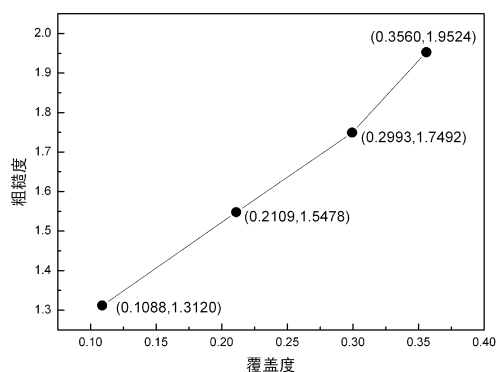


图 5 薄膜粗糙度随覆盖度的变化规律

Fig.5 The influence of the coverage on the surface roughness of films

[5] 朱丽娜,王淑庆,岳文等. 温度对多弧离子镀 AlCrN 薄膜组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(3): 125-130.

[6] 李国栋, 陈文彬, 胡琛等. 有机气相沉积中薄膜生长的模拟研究[J]. 功能材料, 2012, 43(1): 21-23.

[7] 王冠, 翁燕华, 吴平平. 相场法模拟 GaAs 衬底上 InGaAs 异质结表面形貌[J]. 材料导报, 2018, 32: 547-552.

[8] 胡琛, 杨刚, 陈文彬. 真空热沉积过程中有机薄膜生长的模拟研究[J]. 功能材料, 2010, 56(3): 185-190.

[9] 郭源, 谢国锋, 唐明华. 蒙特卡罗方法研究沉积原子动能对 BaTiO₃ 薄膜三维生长的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(4): 4043-4046.

[10] 谭天亚, 李春梅, 苏宇, 等. 超薄膜生长的 Monte Carlo 模拟研究[J]. 原子与分子物理学报, 2008, 25: 47-52.

[11] 陈书汉. Ag 超薄膜生长的动力学蒙特卡罗模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(6): 625-630.

[12] 李佳阳, 李融武, 刘绍军. Cu 原子在表面台阶扩散的 Ehrlich-Schwoebel 势垒的计算[J]; 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(5): 484-487.

塔河沙48井区常规纵波与三分量识别裂缝能力对比

李宗杰¹, 杨宇勇², 李海英¹

(1. 中国石油化工股份有限公司西北分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830001;

2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: 裂缝发育程度是塔河油田碳酸盐岩缝洞型储层评价的关键要素之一。为了评价常规纵波与三分量数据对于裂缝预测的能力,以塔河油田沙48井区常规三维纵波地震数据与三分量多波地震数据为例,运用常规纵波曲率与相干、转换横波分裂分析技术对该井区的裂缝发育情况进行了预测和对比分析。结果表明,相比于纵波的曲率和相干分析等裂缝预测方法而言,对于碳酸盐岩储层,基于三分量数据的横波分裂分析是一种更有效的裂缝预测方法;多分量地震不仅可以预测裂缝发育有利区带,还能预测发育的方位,而且裂缝预测结果精度更高,值得开展进一步的应用研究。

关键词: 裂缝;碳酸盐岩储层;纵波;三分量;横波分裂

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)01-0026-06

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.005

Comparison of Fractures Detecting with Conventional P Wave and Three-component in Sha48 Well of Tahe Oilfield

Li Zongjie¹, Yang Yuyong², Li Haiying¹

(1. Northwest Branch of Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec,

Urumqi 830001, China; 2. School of Geophysics and Information technology,

China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Fracture development is one of the key factors for the evaluation of fractured carbonate reservoir in Tahe oilfield. In order to evaluate capabilities of fracture prediction with conventional P wave and three components seismic data in Tahe oilfield, we took conventional 3D P wave and three components seismic data from well Sha 48 area as a case. The parameters of fractures in this area are predicted and compared by using curvature and coherence of the conventional P-wave and the converted S-wave splitting analysis technique. The results show that the shear wave splitting analysis based on the three components data is a more effective method for the prediction of the carbonate reservoir, compared with the method of curvature and coherence analysis based on the P wave. Multi component seismic data can predict not only the favorable zone of fracture development, but also the orientation, and the accuracy of fracture prediction is higher. Therefore, it is worthy of further applying research.

Keywords: fractured carbonate reservoir; P wave; three components; shear wave splitting

收稿日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41604119、41425017、41374131、41574126、41504107); 中石化和国家十三五重大专项(2016ZX05002005-003-002)。

作者简介: 李宗杰(1968-), 男, 河北深州人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 地震储层预测。

裂缝的准确定量预测对于塔河油田缝洞型油气藏的勘探开发具有重要意义,也是勘探开发过程中的难点。现有的基于地震数据进行裂缝预测方法主要分为两类:一类是利用常规纵波数据进行裂缝预测,一类是根据横波双折射现象进行裂缝预测。基于常规纵波资料进行裂缝预测方法已有几十年历史,Bahorich 和 Farmer 提出相干算法^[1],Haskell 和 Nissen 将该技术成功运用到了美国墨西哥湾的南部沼泽岛区域的裂缝识别与描述^[2];Mary 等研究了裂缝介质中不同方位角的 AVO 响应特征^[3];Gray 等通过在 Manderson 油田进行裂缝预测的实例阐述了如何利用三维地震数据的 AVAZ 分析来确定裂缝位置和密度^[4];Al-Dossary 研究了利用曲率方法在裂缝预测中的应用^[5];龚洪林等证实了利用相干体、应变分析法和数值模拟技术综合预测塔中地区碳酸盐岩裂缝发育带具有一定效果^[6]。其中,曲率、相干体技术适用于对整体区域性的裂缝发育程度的预测,一定程度上描述了区域构造特征,但是对于局部裂隙的刻画精度不足。通过不同方位的纵波响应特征,来进行各向异性特征的提取,可以准确反应裂缝方位和发育程度,但是其适用于上覆地层为各向同性或者弱各向异性。否则上覆地层的各向异性特征会干扰目的层的裂缝预测。

利用横波双折射现象进行裂缝预测首次由 Crampin 提出^[7]。Crampin 证实了各向异性介质中横波分裂现象的存在,而且快横波偏振方向与裂缝走向一致^[8,9]。在此基础上,Alford 提出了旋转法,利用该方法旋转使得非对角元素能量最弱,从而确定快慢横波^[10];Li XY 推导了利用二维和三维转换波资料进行横波分裂分析求取快、慢横波的旋转公式^[11];基于 Alford 旋转,一类是时间域方法,角度扫描技术广泛应用于横波分裂分析中,形成了旋转相关法、比值法^[12]、最小能量法^[13]以及协方差矩阵法等;另一类是频率域方法,如 Zhang JL 等提出了从多分量地震数据中提取频率域各向异性参数的新算法^[14]。当地下发育不同角度的裂缝层时,转换横波会发生多次分裂,Winterstein 等首次提出层剥离技术思想,并成功应用于实际 VSP 资料处理^[15,16]。通过横波分裂现象来识别裂缝虽然精度有所提高^[17],也可以通过层剥离来消除上覆地层的影响,但是转换波与纵波相比信噪比较低、能量弱,受采集资料的质量影响较大。

虽然多分量数据拥有比传统纵波更加丰富的信息,在裂缝预测方面也都有各自比较成熟的商业技

术、成功的应用实例。但是,裂缝参数的预测前者是否一定优于后者,目前尚未有定论。塔河油田在2006年底,沙48井区采集了高密度(小面元)三维常规纵波模拟检波器的地震数据和一束单点高密度三分量数字检波器的地震数据,拟针对碳酸盐岩缝洞型储层展开常规三维纵波地震数据与单点三分量多波地震数据预测精度的对比,以提高沟通不同岩溶单元裂缝预测的可靠性。塔河沙48井区的勘探开发实践表明,目前的储层研究重点是小规模缝洞体的识别,尤其是溶蚀洞间的连通性;综合对比分析常规纵波与多波在小规模缝洞体识别能力上的差异,关键是对裂缝系统的预测。

1 碳酸盐岩裂缝预测方法

1.1 碳酸盐岩裂缝成因

裂缝形成与发育的控制因素较多,包括岩性、岩层厚度、断裂作用、构造应力场特征、局部构造、地层负荷变化及岩溶作用等。按照成因的不同,碳酸盐岩中的裂缝可以分为构造裂缝和非构造裂缝。碳酸盐岩构造裂缝指岩石受超过其弹性限度的构造应力作用而破裂形成的裂缝,其形成和发育受岩性结构、构造运动等因素控制,可进一步按构造力学性质分为压性裂缝、张性裂缝、压扭性裂缝和张扭性裂缝。碳酸盐岩构造裂缝常发育在应力集中的部位,如断裂控制的残丘高点、地层的褶曲部位。碳酸盐岩非构造裂缝分为成岩裂缝、压溶裂缝和溶蚀裂缝等。塔河油田的主体为奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏,储层储集空间主要为构造裂缝,及溶蚀孔、洞、缝系统^[18,19],构造裂缝具有边缘平直、延伸较远的特征,并具有一定方向性和组系特征。

1.2 利用常规纵波进行裂缝预测

本次研究由于缺乏全方位资料,基于常规纵波主要采用了曲率属性及三维相干体技术进行裂缝预测。曲率属性是一种间接识别裂缝发育位置的方法。当地层受到两侧挤压应力时,形成背斜,使得顶部呈现拉张受力状态,底部为压缩应力状态,往往导致裂缝的发育,也使得地层曲率发生变化,因此,曲率可以间接、定性地描述裂缝发育情况。在实际提取裂缝属性过程中,通常要利用已知的裂缝信息与曲率属性进行标定,从而得到裂缝特征和分布规律。^[20-22]三维相干技术经历了三代算法的发展,改进的第三代相干算法抗干扰能力强,横向分辨率高,对断层尤其对小断层及裂缝具有较高的检测

能力^[23]。

1.3 利用横波分裂进行裂缝预测

利用横波分裂技术研究碳酸盐岩裂缝地层的各向异性是地球物理技术近年来的一项新进展。根据横波在各向异性固体介质中的传播规律,横波偏振方向与裂缝走向一致时,横波速度最快,偏振方向与裂缝方向垂直时传播速度最慢。因此,当横波在含裂缝介质中传播,偏振方向与裂缝方向斜交时,会分裂为偏振方向沿裂缝方向的快横波,以及偏振方向垂直于裂缝方向的慢横波^[14]。三分量勘探中,入射纵波反射时一部分能量转换为沿射线平面偏振的转换横波,因测线往往与裂缝方向斜交,使得转换横波偏振方向与裂缝方向斜交,从而导致横波分裂现象的发生。

目前应用比较广泛的有三种双扫描横波分裂算法:切向能量法、旋转相关法和协方差矩阵法。研究表明,当炮检方位与裂缝发育方位间隔一定角度时均能得到准确的结果。对多层裂缝的转换波记录反演横波分裂,需要基于层剥离思想,从浅到深逐层进行,以消除上层各向异性对下层转换波的影响。有研究提出一种综合层剥离的策略,即将目的层上覆地层作为综合层,对其反演得到综合分裂参数,然后采用综合分裂参数对目的层做方位各向异性补偿,一次性剥离目的层上方所有地层的综合方位各向异性,再对目的层反演横波分裂,可以得到目的层的裂缝发育方位。塔河沙 48 井区的裂缝预测研究利用横波分裂原理,采用综合层剥离方法实现了目的层裂缝发育优势方位的预测。

2 沙 48 井区裂缝预测

2.1 纵波方法裂缝预测

近几年随着高精度(高分辨率)地震采集技术、相干数据体解释技术、三维可视化技术和谱分解、曲率分析等技术相继出现、广泛应用和不断提高,使得地震资料解释的识别能力和解释精度得到了很大提高。特别是在老油田滚动扩边和开发调整过程中,油田内部小断层和裂缝已成为精细构造解释的重点内容之一。近年来,适应油田开发的需要,许多技术与手段用于对小断层及裂缝的识别和解释。目前国内用于对小断层及裂缝识别与解释的技术主要有:地震属性剖面解释、相干数据体解释技术、沿层切片解释技术、倾角、方位角及断棱边缘综合检测技术、蚂蚁体技术以及多种解释技术结合的断层综合解释

技术。我们使用基于纵波振幅属性描述裂缝的两种常规方法——相干体法和曲率体法,对目的层的裂缝发育趋势进行预测,并与横波分裂法的反演结果进行对比。

2.1.1 利用相干体进行裂缝预测

通过参数的试验,沙 48 井区的三维地震相干分析选取 T74 向下 30 ms 时窗、4 ms 最大搜索角度、垂直主测线方向 2 道相关作为最佳相干参数,取得较好的效果,如图 1 与图 2 所示,暗色或紫色表明断层发育区,黄色及绿色表示裂缝不发育。在相干体的地震剖面上,常规纵波与三分量纵波两种数据表现出了很高一致性,且识别效果都非常好;而高密度数据能量更集中,裂缝识别清晰度更高,边界更清楚。

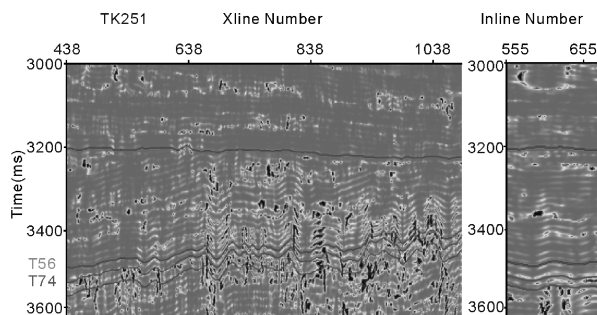


图 1 高密度过 TK251 井相干体剖面
(左:inline剖面,右:xline剖面)

Fig.1 Coherent cube section of well TK251
with high density data

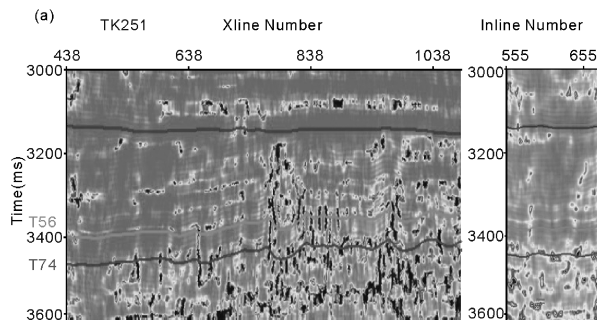


图 2 三分量纵波过 TK251 井相干体剖面
(左:inline剖面,右:xline剖面)

Fig.2 Coherent cube section of well TK251 with
P wave data in three components

通过对 T74 反射面向下开取 30 ms 时窗,提取相干体均方根振幅值,完成了工区奥陶系灰岩裂缝发育带平面预测,如图 3 所示,紫色及黄色表示裂缝发育的区域,深绿色表示裂缝不发育的区域。从常规纵波和三分量纵波的平面特征对比看出,裂缝发育的形态基本一致,主要以东西向裂缝为主,夹杂南

北向裂缝,与构造方向一致。

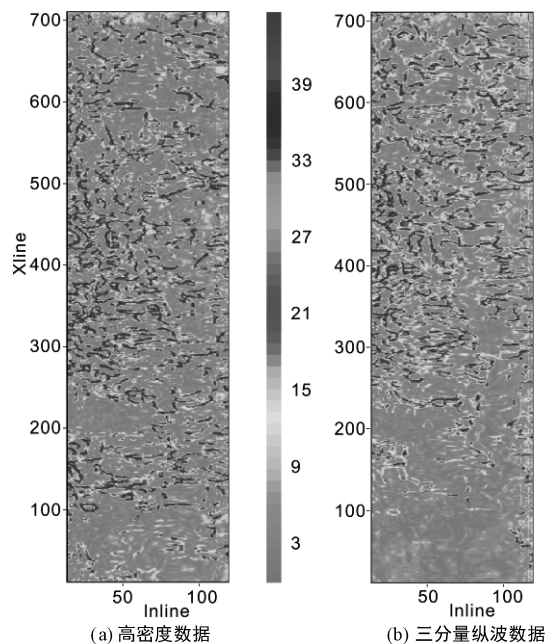


图 3 T74 以下 30 ms 相干体平面图

Fig.3 Coherent cubeplan of 30 ms under T74

2.1.2 利用曲率体进行裂缝预测

在相干体的基础上,计算了曲率体,如图 4 所示,蓝色表示裂缝不发育的区域,红色表示裂缝发育区域,裂缝的发育特征与相干体识别结果在总体上具有一致性;断层与裂缝以东西向为主,相干体识别更精细,曲率体呈现相对粗框架的构造格局;但曲率体对于南北向断层与裂缝的识别规律性更明显,而相干体则显示得不连续。

在实际应用中,相干体和曲率体都是沿三维地震资料上追踪的层面计算,一般大尺度裂缝发育带具有低相干、高曲率的地震响应特征。图 3 展示了目的层 T74 纵波相干体时间切片,图 4 展示了目的层的纵波曲率体时间切片。可以看到,根据低相干、高曲率特征预测的裂缝发育方位以 E-W 向为主,曲率体也刻画了部分 N-S 向分布的裂缝,而在工区南部没有刻画出发育方位明确的裂缝或断裂。

2.2 横波分裂裂缝预测

采用层剥离对塔河油田的转换波资料进行横波分裂反演。反演得到目的层的分裂参数如图 5 所示。其中,“Inline”为检波器排列向前滚动的方向,“Cross line”为横向移动的方向,检波器排列(测线)为南北向布置,十字星标注了 TK426 井的位置。快波方位表示裂缝方位与 N-S 向的夹角,正值表示顺时针方向,负值表示逆时针方向;快波方位绝对值越大,表示裂缝发育方位越靠近 E-W 向。可以看到:

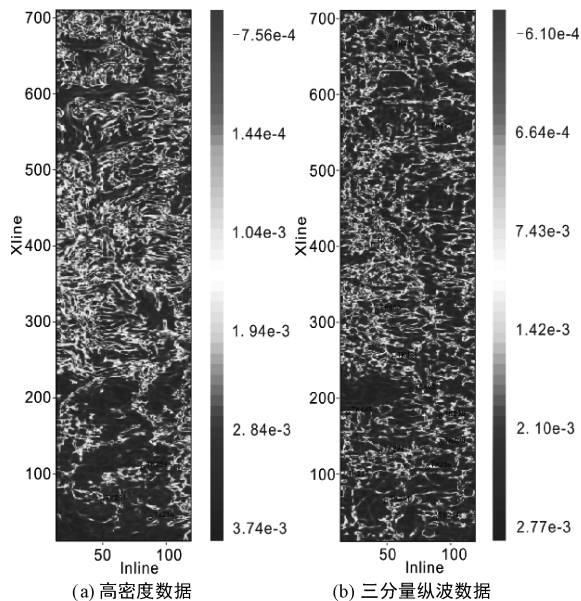


图 4 T74 以下 30 ms 曲率平面图

Fig.4 Curvatureplan of 30 ms under T74

目的层的裂缝方位分布比较复杂,以 E-W 向和 NE-SW 向为主;而在工区南部分布有 N-S 向的裂缝,这可能是由岩溶作用不均匀或工区存在不同的岩溶单元导致的。

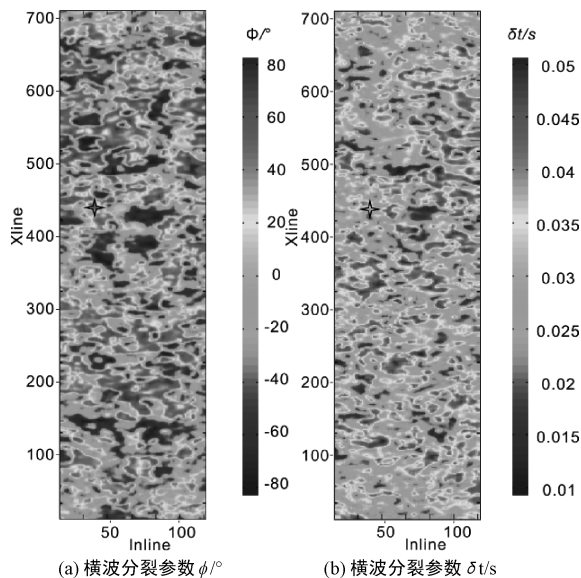


图 5 目的层的横波分裂参数

Fig.5 Shear wave splitting parameters of the target layer

横波测井是检测横波分裂反演结果是否准确的有效手段之一。选取工区内 TK426 井的横波资料进行对比,该测井得到的从浅到深的快横波方位如图 6 所示。可以看到,目的层位的快波偏振方向位于 NE-SW 向和 E-W 向之间,在图 5 上对应 TK426 井的位置(十字星),可知井位处的快波方位呈 E-W

向,与横波测井结果基本一致;井位处的分裂时差约为 25 ms,与横波测井得到的时延也基本一致,表明反演结果是准确的。

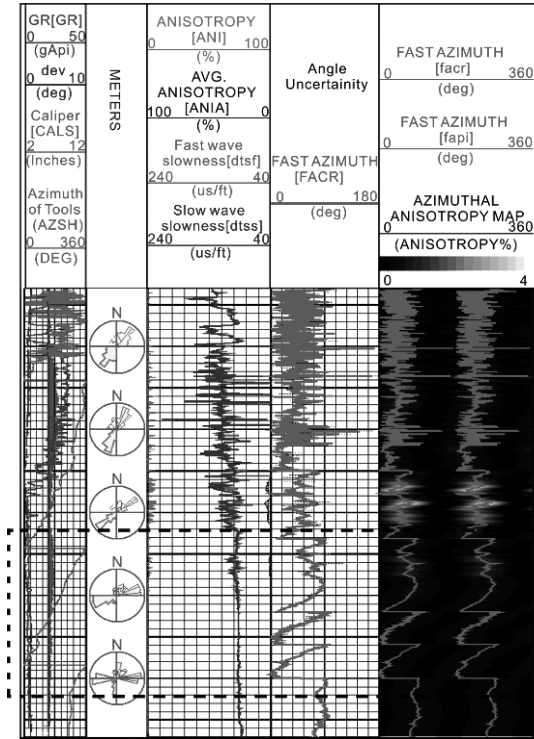


图6 TK426井测得的快横波方位(从浅到深,虚线框标注了目的层位)

Fig.6 Fast shear wave azimuth measured from well TK426(From the shallow to the deep, the dotted line is marked as the target layer.)

使用反演得到的横波分裂参数对目的层进行方位各向异性补偿,并对比补偿前后切向分量上目的层位的均方根振幅,结果如图7所示。可以看到,经补偿后切向分量振幅显著减弱,说明转换波主要能量已经补偿回径向,方位各向异性得到了较好的校正。

整体上,利用相干体和曲率体预测的裂缝发育方位与横波分裂预测的裂缝方位是一致的。但是,横波分裂不仅能够反演裂缝发育方位,也能够定性获得裂缝发育密度,这是相干体法和曲率体法无法做到的。

3 结论与讨论

我们将纵波相干体、曲率体属性的方法应用于塔河油田的裂缝预测,并且与塔河油田一束三维测线转换波数据的横波分裂反演结果以及横波测井结果对比,得到以下结论

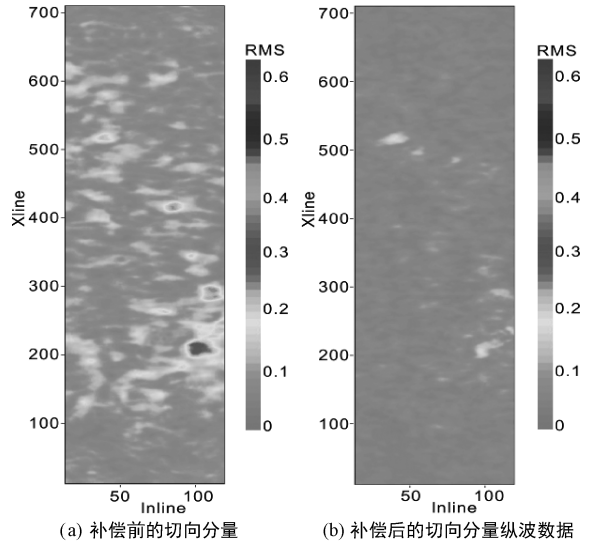


图7 方位各向异性补偿前后切向分量上目的层位的均方根振幅分布

Fig.7 The root mean square amplitude distribution of the target layer on the tangential component before and after azimuthal anisotropy compensation

(1)横波分裂得到的裂缝发育方位与其他方法是一致的,表明了横波分裂双扫描法用于碳酸盐岩储层裂缝预测的有效性,同时也突出了横波分裂反演的优势,即不仅能够反演裂缝方位,也能够定性获得裂缝发育密度。需要指出的是,由于测线布置方位比较靠近裂缝发育方位,本次的裂缝预测结果存在较大误差,具体表现为分裂参数预测结果的不连续分布。尽管如此,本次研究仍然表明,即使对于缝、洞充分发育且复杂分布的碳酸盐岩储层,横波分裂也是一种很有效的裂缝预测方法,值得开展进一步的研究。

(2)对于小尺度的裂缝而言,相似相干体、曲率体及横波分裂都是识别裂缝较为有效的手段,而利用多波进行横波分裂不仅可以预测裂缝发育有利区带,还能预测发育的方位;①基于纵波的相干体、曲率方法都是识别小尺度断层的有效方法,对裂缝的发育也能定性的指示;②通过与成像测井的对比,基于横波分裂的裂缝预测结果精度更高,且可以定量地预测裂缝的主排列方向、半定量地指示裂缝的发育强度;③对于常规纵波与三分量纵波,通过相干体、曲率体识别小断层与裂缝结果的对比发现,裂缝的总体分布规律是一致的,说明三分量中的纵波处理满足储层非均质预测的要求;④研究区碳酸盐岩储层裂缝的发育以东西为主,局部发育南北向裂缝,与成像测井结果及构造成图结果一致。

(3)碳酸盐岩缝洞储层的横向非均质性较强,同时又存在一定的随机性,所以预测起来比较困难;需要综合利用钻井、测井、地震信息,以点-线-面相结合的方式进行综合预测,同时要结合洞及裂缝的预测结果,综合评定洞的连通性及含流体性,才能准确进行开发部署调整。但由于研究区块只有1束线的窄方位三维三分量地震数据,考虑到地震偏移成像处理的边界效应,实际用于多波解释反演的数据方位更窄,制约了三分量地震技术进一步发生效用;建议以后类似地区采用宽方位的三分量地震勘探。

致谢:在塔河沙48井区三分量地震数据处理和裂缝预测方面得到了中国地质大学(北京)王贇教授、芦俊副教授、张建利博士,中石化西北分公司勘探开发研究院地球物理所王建斌老师的指导和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Bahorich M, and Farmer S. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube [J]. *The Leading Edge*, 1995, 14(10): 1053-1058.
- [2] Haskell N L, Nissen S E, Lopez J. A, *et al.* 3-D seismic coherency and the imaging of sedimentological features[C]. Norwegian Petroleum Society Conference. 1995: 93-113.
- [3] Mary L K, William R, and NafiToksöz M. Sensitivity analysis of amplitude variation with offset (AVO) in fractured media[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998: 201-203.
- [4] Gray D, Head K. Fracture detection in the Manderson Field: A 3D AVAZ case history [J]. *Leading Edge*, 2000, 19(11): 1214-1221.
- [5] Al-Dossary S and Marfurt K J. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation. *Geophysics*, 2006, 71(5): 41-51.
- [6] 龚洪林, 潘建国, 王宏斌, 等. 塔中地区碳酸盐岩裂缝综合预测技术及其应用[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 6: 841-846.
- [7] Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media[J]. *Wave motion*, 1981, 3(4): 343-391.
- [8] Crampin S. An introduction to wave propagation in anisotropic media[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1984, 76(1): 17-28.
- [9] 唐建侯, 邓富求. 四川碳酸盐岩区地震横波分裂与各向异性[J]. *石油物探*, 1993, 32(2): 56-61.
- [10] Alford R M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy [C]. 56thSEG Annual Meeting, Texas: Dilley. 1986, 476-479.
- [11] Li X Y, Project E A, Relativa T, *et al.* Processing PP and PS waves in multicomponent sea-floor data for azimuthal anisotropy: Theory and overview [C]. 8th International Workshop on Seismic Anisotropy, 1988, 53(5): 607-620.
- [12] 罗省贤, 李录明. 基于横波分裂的地层裂缝预测方法与应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 1: 52-59.
- [13] Wang Lifeng, Li Xiangyang. Analysis of converted-wave splitting in volcanic rocks: a case study from northeast China[C]. EAGE 68th Conference & Exhibition, 2006: 12-15.
- [14] Zhang J L, Wang Y, and Lu J. A new algorithm for frequency-dependent shear-wave splitting parameters extraction[J], *Journal of Geophysics and Engineering*, 2013, 10(5): 05505.
- [15] Winterstein D and Meadows M A. Changes in shear-wave polarization azimuth with depth in Cymric and Railroad Gap oil fields[J]. *Geophysics*, 1991, 56(9): 1349-1364.
- [16] Winterstein D and Meadows M A. Shear-wave polarizations and subsurface stress directions at Lost Hills field[J]. *Geophysics*, 1991, 56(9): 1331-1348.
- [17] 杨克明, 张虹. 地震三维三分量技术在致密砂岩裂缝预测中的应用——以川西新场气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 5: 683-689.
- [18] 杨子川. 塔河油田碳酸盐岩储层预测技术与应用[J]. *勘探地球物理进展*, 2004, 27(6): 432-439.
- [19] 杨子川, 李宗杰, 窦慧媛. 储层的地震识别模式分析及定量预测技术初探——以塔河油田碳酸盐岩储层为例[J]. *石油物探*, 2007, 46(4): 370-377.
- [20] Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons[J]. *First Break*, 2001, 19(2): 85-100.
- [21] 王雷, 陈海清, 陈国文, 等. 应用曲率属性预测裂缝发育带及其产状[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(6): 885-889.
- [22] 孔选林, 唐建明, 徐天吉. 曲率属性在川西新场地区裂缝检测中的应用[J]. *石油物探*, 2011, 50(5): 517-520.
- [23] 王振卿, 王宏斌, 龚洪林. 地震相干技术的发展及在碳酸盐岩裂缝型储层预测中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6): 977-981.

F 区块长 2_2^2 小层井间砂体连通性分析及应用

刘妍¹, 司志伟², 廖磊¹, 曲畅³

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国华油集团公司 银川分公司, 宁夏 银川 750000; 3. 中油科新化工有限责任公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: F 区块长 2_2^2 小层为辫状河三角洲平原亚相沉积, 发育厚层砂体, 为低孔低渗岩性油藏, 其储层地质研究薄弱。通过密井网测井资料和生产动态资料, 对井间砂体连通性进行了详细研究, 并以水井井组为单位, 对静态的研究成果进行验证和应用。研究表明: F 区块长 2_2^2 小层砂体发育, 类型以心滩砂体和河道砂体为主, 顺物源方向砂体规模大、延续性好; 连通性可划分为 3 个级别: I 级连通、II 级连通和 III 级连通, I 级连通的井位于同一单砂体内, II 级连通的井位于不同微相类型的单砂体内, III 级连通的井位于相互孤立的单砂体内; 砂体间的连通关系主要受沉积作用控制, 其次为隔夹层和隐性界面; 在此基础上, 以 F18-6 水井井组为例, 进行连通性和注采响应分析, 同时验证了静态分析成果的可靠性, 最后综合动静态资料, 对全区油水井间连通性进行了判别, 为该区动态分析和措施调整提供地质基础。

关键词: 鄂尔多斯; 长 2_2^2 小层; 砂体连通性; 连通级别

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)01-0032-06

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.006

Interwell Sandbody Connectivity Analysis and Application of Chang 2_2^2 Small Layer in Block F, Ordos Basin

Liu Yan¹, Si Zhiwei², Liao Lei¹, Qu Chang³

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;
2. Yinchuan Branch of China Huayou (Group) Corporation, Yinchuan Ningxia 750000, China;
3. Sino Oil King Shine Chemical Co., Ltd, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The Chang 2_2^2 small layer of block F is a deposition of braided river delta plain with thick sandbodies, which is low-porosity and low-permeability lithologic reservoir, and its reservoir geology are weakly studied. Using well logging data and production dynamic data together, the inter-well sandbody connectivity was studied in detail, and the static research results were verified and applied with the injection well group as a unit. The study shows that the sand body in this area is well developed and mainly composed of channel bar and channel sand bodies. The sand bodies in the direction of the source material is large in scale and has good continuity. The reservoir connectivity can be divided into three levels: Level I, Level II and Level III connectivity. Wells with Level I connectivity are in the same sand body, Wells with Level II connectivity are in different sedimentary sand bodies, Wells with Level III connectivity are in isolated sand bodies. The connectivity between sand bodies is mainly controlled by sedimentation, followed by interlayers and implicit interfaces. Based on this, taking the F18-6 injection

收稿日期: 2018-04-27

作者简介: 刘妍(1991-), 女, 陕西省榆林人, 博士在读, 研究方向: 储层地质、油气地球化学,

E-mail: liuyan_mm@cugb.edu.cn.

well group as an example, the analysis of connectivity and injection-production efficiency was conducted, meanwhile, the reliability of the static analysis results was verified. Finally, the comprehensive dynamic and static data were used together to distinguish the inter-well connectivity between the production and injection well in the whole region, which provided a geological foundation for further dynamic analysis and adjustment of measures in the area.

Keywords: Ordos Basin; $C2_2^2$ small layer; sand body connectivity; connectivity level

砂体连通性一般是指各成因砂体在垂向上与侧向上相互接触连通的方式和程度,是油田开发和综合调整的基础,通常包括静态和动态两个方面^[1]。静态连通性取决储层本身,主要与沉积环境及构造特征有关;动态连通性主要是随着油藏开发工作的进行,由地下流体及渗透特征的变化来反映的,可通过动态分析来表征。目前国内外研究连通性的方法主要有井、震结合法,定量建模法等^[2-4],和井间示踪剂测试,地球化学方法,数值模拟方法,动态数据反演方法等^[5-7]。测井资料和生产动态相结合分析法,动静结合,相互印证,且成本低,易于操作。

F 区块长 2 油层组为一套河流-三角相沉积,长 2_2^2 小层是主要的开发层系,在已有的单砂体精细刻画的基础上,综合利用密井网测井资料和生产动态资料,对比井间砂体,建立不同的砂体连通级别,分析连通性影响因素,利用静态研究成果,结合生产动态资料,对油水井生产井段连通状况进行分析。

1 地质概况和开发现状

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,三叠系延长组是重要的含油气层段。F 区块在陕西省定边县境内,面积 5.2 km^2 ,构造上位于鄂尔多斯盆地天环坳陷东部边缘,东与陕北斜坡相连。三叠系延长组长 2 油层组发育一套河流三角洲相砂体,地层构造平缓,整体呈一西倾的单斜,目的层为延长组长 2

油层组的长 2_2^2 小层,厚度约 28 m,划分 6 个单砂层,长 2_2^{2-1} ~长 2_2^{2-4} 主力生产层段为研究目的层,主要发育浅灰绿色、浅灰色的长石砂岩、岩屑长石砂岩夹薄层砂质泥岩。

F 区块长 2 油藏 2002 年开始勘探,所钻井相继发现油层,获得良好的油气显示和试油效果。建产以来,动用含油面积及地质储量不断增加,油田规模持续扩大。目前共有 93 口井,生产井有 36 口(29 口采油井和 7 口注水井)。于 2010 年采用正方形反九点法同步注水开发,截至 2016 年底(图 1),平均地层压力 11.9 MPa,区块综合含水 12.1%,年自然递减 12.81%,累计注采比为 0.41。投产产量递减快,低产现象和含水上升趋势明显,亟待开展以砂体连通性研究为基础的注水优化和调整。

2 连通性分析

2.1 井间对比

井间砂体连通图可以直观反映各油水井及之间的砂体分布状况,在单砂层划分和沉积微相研究的基础上,进行井间砂体对比。对比过程中,使用层拉平技术将砂体顶面拉平,使地下河流形态得到复原,通过“米”字剖面宏观对比和井组精细对比交互进行,综合应用测井二次解释和生产动态资料进行动态验证,从而更准确地揭示砂体垂向和侧向上的连通特征。

图 2 为 F18-36 井组砂体剖面连通图,F18-36

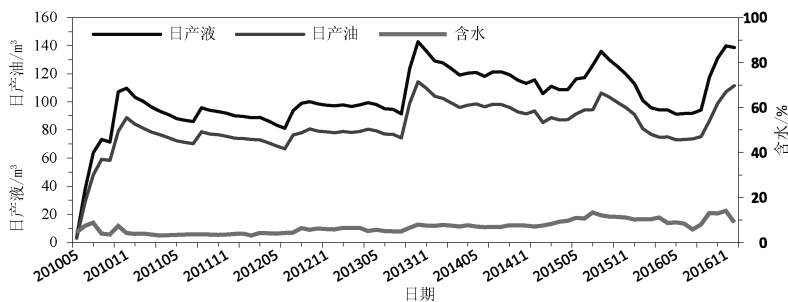


图 1 F 区块综合生产曲线图

Fig.1 Comprehensive production curve, block F

为注水井,其余8口为采油井。研究区物源来自北面,砂体沉积微相主要为辫状河道和心滩。通过三维连井剖面图可以看出,主力产层长 2_2^{2-1} ~长 2_2^{2-4} 各层均有砂体发育,以心滩砂体为主,厚度较大,约3.4~6.2 m。顺物源方向砂体连续性较好,砂体可延伸2~4个井距,垂直物源方向相变和砂体尖灭现象明显,不同微相类型砂体常呈渐变、相互切接接触。垂向上,由于河道的迁移摆动,后期沉积砂体会对前期沉积砂体进行冲刷,上下两期砂体相互叠置,受水动力及物源供应等影响,叠置程度有差异,砂体间的叠置使垂向上的连通性变差。

2.2 连通级别

在对全区砂体连通图分析的基础上,根据井间砂体所处位置、沉积微相类型及砂体间接触关系,对砂体连通级别进行划分(表1): I级连通, II级连通和 III级连通。

(1) I级连通

生产井和注水井位于同期单一砂体内,具有相同的沉积微相类型。垂向上两个单砂体叠切,连为一体,上下两个单砂体具有相同或不同的沉积微相类型,但二者物性特征相似,之间未形成渗流屏障。侧向上砂体规模较大,延伸较远,一般大于600 m,整体储层物性好。I类连通通常分布于顺河道方向或规模较大的分流河道和心滩内部。

(2) II级连通

II级连通根据相互接触或叠切的两个单砂体的

成因类型是否相同,将其分为 II_1 和 II_2 两个连通级别。

II_1 :同期切切的两个单砂体或不同期叠切的两个单砂体具有相同的成因类型,单砂体间具有一定的接触面积或叠切面积,物性相似且差异小,连通性较好,通常分布于分流河道相交位置;

II_2 :同期切切的两个单砂体或不同期叠切的两个单砂体具有不同的成因类型,单砂体间具有一定的接触面积或叠切面积,但由于沉积、成岩等差异,单砂体间物性和孔渗性不同,差异大,连通性较差,常位于同一河道内的不同沉积微相中;

(3) III级连通

这种级别的单砂体之间互不连通。不同期的单砂体垂向上被洪泛期泥质沉积隔开,呈孤立状态;同期单砂体分别为不同河道成因,且被河间泥质沉积或泛滥平原泥所隔,砂体在空间上互不接触,或一口井的砂体发育于河道边缘,在井间尖灭,另一口井没有砂体发育。

为了更好地将砂体连通性与生产动态分析相结合,根据连通图和连通级别划分方案,以注水井井组为单位,对4个主力单砂层内的7个注水井组的油水井间砂体连通关系进行定量判别(表2),得出各单砂层内不同砂体连通类型分布比例。经过对比可以发现,I类连通所占比例相对较大,河道宽度大、厚度大、延伸远及砂体连片性好的井区砂体连通性好。

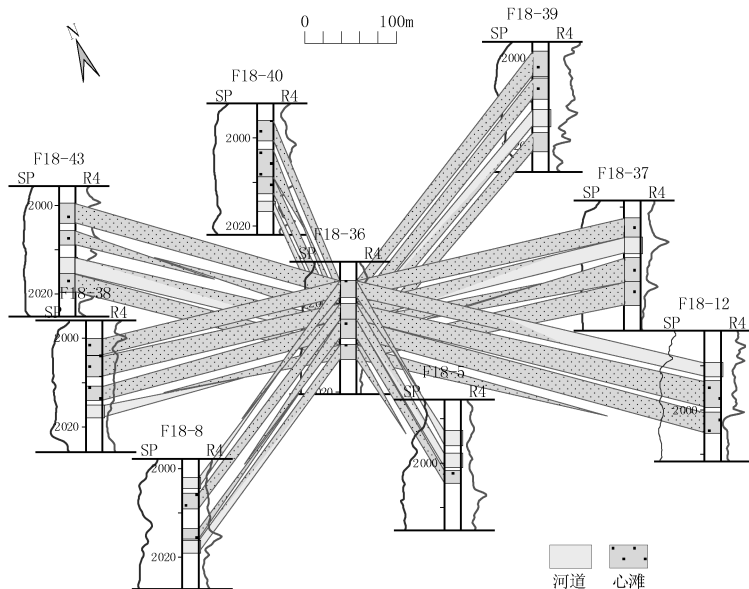


图2 F18-36井组井间砂体剖面图

Fig.2 Interwell sandbody profile of F18-36 well group

表 1 砂体连通类别

Table 1 Sandbody connectivity category

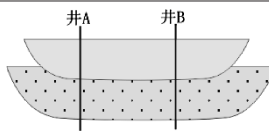
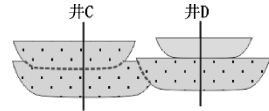
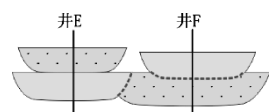
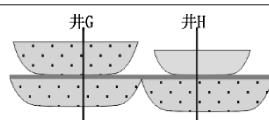
连通级别	模式图	砂体接触方式	分布位置	连通性
I 类连通		侧向同一砂体 垂向叠切	同一分流河道 或心滩	好
II 类连通	II ₁ 	侧向切接 或垂向叠切	同期或不同期相互 接触的分流河道	较好
	II ₂ 	侧向切接 或垂向叠切	同期或不同期的 不同微相类型	较差
III 类连通		孤立式	同期或不同期 孤立的河道	不连通

表 2 长 2_2^{2-1} ~ 长 2_2^{2-4} 单砂层砂体连通类型统计表Table 2 Statistical table of connected types of sand body, $C2_2^{2-1} \sim C2_2^{2-4}$

单砂层	I 级连通		II 级连通		不连通	
	数目	比例/%	数目	比例/%	数目	比例/%
长 2_2^{2-1}	26	66.67	7	17.95	6	15.38
长 2_2^{2-2}	13	33.33	15	38.46	11	28.21
长 2_2^{2-3}	7	17.95	19	48.72	13	33.33
长 2_2^{2-4}	20	51.28	10	25.64	9	23.08

2.3 影响因素分析

(1) 沉积特征

研究区为辫状河三角洲平原沉积, 辫状河道的分叉、摆动与迁移, 使得砂体形态多样, 砂体的连通性主要受控于河流沉积作用。对于不同沉积微相的砂体, 砂体的厚度、物性及延伸性等不同。心滩相沉积砂体物性好, 厚度大, 侧向连续好, 在平面上常复合连片。辫状分流河道砂体由于受到水流的冲刷作用, 厚度薄, 物性较差, 发育规模较小。泛滥平原泥质沉积对砂体产生遮挡, 可形成孤立式砂体。在发生相变或沉积砂体发生尖灭的地方, 砂体连通性变化大。

(2) 储层非均质性

研究区隔夹层发育, 在平面上分布相对稳定, 将砂体分割成不连通或半连通的单元, 对砂体的垂向连通性产生重要的影响, 并影响储层内流体的渗流方向和地层能量的传输。主要岩性类型为泥质隔夹层和物性隔夹层, 在测井曲线上易于识别。

(3) 其他因素

受河道冲刷及沉积作用的影响, 不同的单砂体之间, 如垂向上相互叠切的砂体或侧向上对接的砂

体, 砂体接触的两侧由于岩性、物性的差异, 有时可形成渗流屏障, 这类界面在测井曲线上响应不明显或无响应, 是一种隐性界面, 主要存在于叠切型砂体叠切面(图 3 井 A 所示) 和对接型或切接型砂体接触面(图 3 井 B 和 C 所示), 对流体的垂向和侧向运移均产生一定的影响。单个河道砂体在垂向通常为“下粗上细”的正旋回沉积, 但由于上部河道的冲刷作用, 上下两期河道在测井曲线上没有明显特征变化, 这种界面不易识别, 仅在岩心上可观察到。



图 3 隐性界面示意图

Fig.3 Hidden interface diagram

2.4 验证及应用

根据静态的连通性分析成果, 利用生产动态资料, 对前期的砂体连通性成果认识进行多次“验证和修正”, 使结果更合理, 提高砂体连通性的准确度, 同时, 将连通性成果用于油水井间注采响应分析, 为注采调整及注采完善提供更为准确的地质

依据。

F 区块为反九点法规则井网,井排近似垂直水流方向。F18-6 水井井组位于研究区中部,对应油井 7 口。油井 F18-3 和 F18-4 在 2008 年 5 月投产,其余五口油井在 2010 年 6 月~8 月投产。F18-6 井于 2011 年 12 月投注,日配注 20 m^3 ,该井注水前期较稳,2015 年下半年起注水量下降且幅度较大,累积注水 $2.79\times 10^4\text{ m}^3$,目前注水压力 17 MPa 。

南北向上,F18-5 油井生产层位为 2 单砂层,F18-6 井注水层段为 3 单砂层,其注采层段砂体静态上不连通,注水应不受效。根据生产动态数据可以看出 F18-5 井初期产量较高,但最近产量持续下降,分析认为 F18-5 初期生产能量为地层能量,随着地层能量递减,生产状况变差。F18-4 生产井与 F18-6 井在 2 单砂层砂体静态上连通,但 F18-4 井自投产以来一直低产低液,二次压裂增油不明显,间抽维持生产,分析发现 F18-4 井物性差,导致 F18-6 井对其注水不进。

东西向上,F18-6 生产井与 F18-3 水井注采层

段均位于 2 单砂层,该层砂体静态上 I 类连通,F18-3 生产井实际生产中产量前期较低,后期二次压裂后保持高产稳定,注水效果明显。F18-6 井与 F18-11 井注采层段砂体不连通。

北西-南东方向上,F18-6 井和生产井 F18-8、F18-14 注采层位不对应,注采层段砂体静态不连通,分别为不同期次单砂体。F18-8 井和 F18-14 井投产后产量递减大,判断 F18-6 井注水不见效,但 F18-8 井具有一定的产液能力,认为在其他方向有注水井对其注水见效,通过对 F18-8 井对应的其他两口水井分析,发现 F18-36 对其注水见效。

北东方向上,F18-6 井与 F18-12 井注采层位均位于 2 单砂层,静态上砂体连通,F18-12 井初期高产稳产,后期递减大,对应的另一口水井注水效果不明显。根据静态成果,认为其储层堵塞,对该井压裂改造后,增油效果明显,由此验证了砂体连通性研究结果的可靠性。

用同样的方法和思路,对其他水井井组进行了同样的分析,综合动静态资料,最终得到不同采油井与注水井之间射孔层位的连通情况(图 4),其中 I

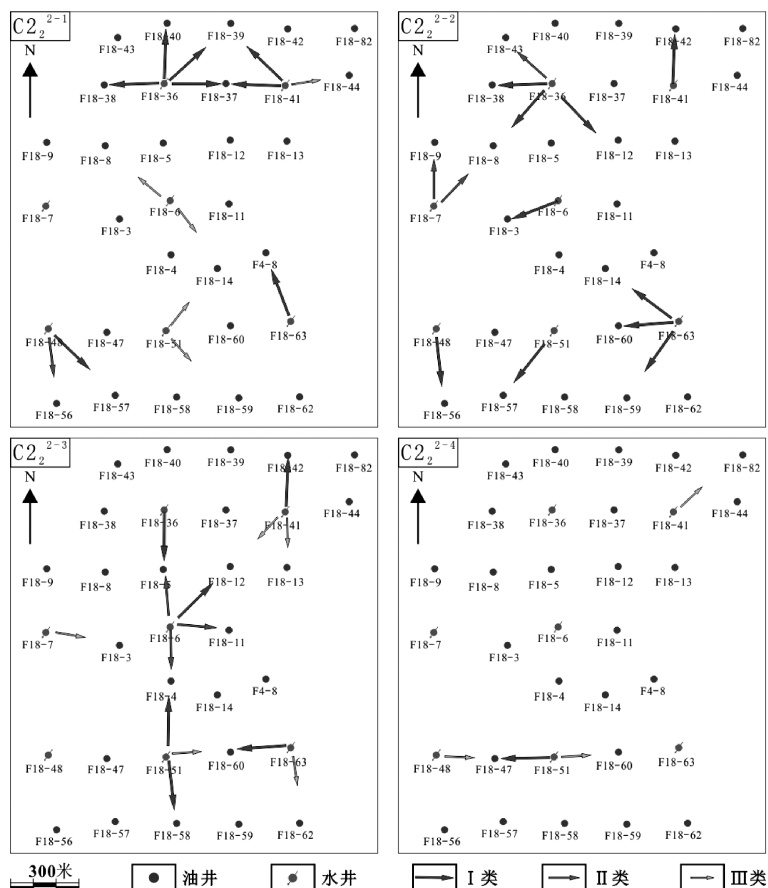


图 4 注采井不同层位生产井段连通情况

Fig.4 Connection of production wells in different layers between injection-production wells

类为静态 I 级连通,动态响应好; II 类为静态 II 级连通,动态响应较好,或静态 I 级连通,动态响应较差; III 类为不连通。

3 结论

1) 研究区井间砂体连通性划分为 3 个级别, I 级连通注采井位于同一个单砂体内,连通性好; II 级连通注采井位于相互切接的单砂体内,连通性较好; III 级连通注采井分别位于孤立的单砂体,不连通。以 I 级连通为主,约 43%。

2) 研究区砂体连通性主要受沉积作用控制,如位于同一沉积砂体的井相互连通,位于不同沉积砂体的井即使微相类型相同,也可能不连通;其次是隔夹层和微观的隐性界面,对连通性也有一定的影响,会形成渗流屏障,影响流体渗流。

3) 以 F18-16 井组为例的连通性分析,根据分析结果对生产状况较差的井进行措施改善,增油效果明显,表明连通性分析的重要性和可靠性;综合动静态资料,对全区油水井间生产层段的连通关系进行了判别,为下一步的生产开发提供基础。

(上接第 20 页)

4) 对于粒径相近的粒子的分离,通过选择合适的外力大小可以提高分离的纯度;

5) 当左壁斜率小时,2 种粒子平均速度差较大,但此时 2 种粒子均向左运动,不利于粒子分离;当左壁斜率较大时,两种粒子运动速度相反,可以实现粒子分离,且分离效果明显;当左壁斜率进一步增大后,2 种粒子均向右运动,平均运动速度随着斜率增大而增大,但仍不利于粒子分离。这些研究结果有利于锯齿型微通道结构的设计优化,促进微通道粒子分离技术的进一步发展。

参考文献:

- [1] 李兴飞. 大豆乳清蛋白与多糖的复合作用以及蛋白质组分的选择性提取[D]. 江南大学, 2017.
- [2] 郜帮信, 刘代俊, 陈建钧. 板式微通道的液-液两相分离作用研究[J]. 现代化工, 2015, 35(11): 90-94.
- [3] 苗琳, 纪经纬, 王荷芳. 纳米粒子分离方法的研究进展[J]. 色谱, 2017, 35(03): 245-251.

参考文献:

- [1] 吴天江, 刘显, 杨海恩, 等. 低渗透油藏注采动态连通性评价方法[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 79-82.
- [2] Soroush M, Kaviani D, Jensen J L. Interwell connectivity evaluation in cases of changing skin and frequent production interruptions [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2014, 122: 616-630.
- [3] Siddiqui N A, Rahman A H A, Sum C W, et al. Generic hierarchy of sandstone facies quality and static connectivity: an example from the Middle-Late Miocene Miri Formation, Sarawak Basin, Borneo [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(11): 237.
- [4] 李文龙. 密井网区井震结合储层描述方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(04): 137-142.
- [5] 陈坤, 何文祥, 魏君. 井间示踪剂在油藏连通性分析中的应用——以马厂油田为例[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(8): 70-73, 77.
- [6] 张京思, 揣媛媛, 边立恩. 正演模拟技术在渤海油田 X 井区砂体连通性研究中的应用[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 127-132.
- [7] Yousef A A, Jensen J L, Lake L W. Integrated Interpretation of Interwell Connectivity Using Injection and Production Fluctuations [J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41(1): 81-102.
- [4] Giddings J C, Yang F J, Myers M N, Science [J], 1976, 193(4259): 1244
- [5] 张程宾, 陈永平, 施明恒, 等. 表面粗糙度的分形特征及其对微通道内层流流动的影响 [J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7050-7056.
- [6] 李冰, 王慧, 林娜, 等. 锥形离心分离机中粒子运动的解与实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(11): 2864-2869.
- [7] V. Yu. Zitserman, A. M. Berezhkovskii, A. E. Antipov, et al. J. Chem. Phys. 2011, 135 121102.
- [8] D. Reguera, A. Luque, P. S. Burada, et al. Phys. Rev. Lett. 2012, 108 020604.
- [9] D. Reguera, J. M. Rubi. Phys. Rev. E 2001, 64 061106
- [10] D. Reguera, G. Schmid, P. S. Burada, et al. Phys. Rev. Lett. 2006, 96 130603.
- [11] P. Hanggi, P. Talkner, M. Borkovec. Rev. Mod. Phys. 1990, 62, 251.
- [12] P. Reimann, C. Van den Broeck, H. Linke, et al. Phys. Rev. Lett. 2001, 87 010602.

“6.30”罕见冷涡型冰雹天气过程的环境场特征和成因分析

钱卓蕾¹, 江丽俐¹, 周弘媛², 季丹丹²

(1.绍兴市气象台,浙江绍兴312000;2.柯桥区气象局,浙江绍兴312030)

摘要:2017年6月30日浙江绍兴发生了一次罕见的冰雹天气过程,通过分析表明,冰雹天气是由冷性低涡前10个纬距的暖区中对流不稳定能量释放导致;高层干冷空气的侵入,中低层的增温回暖导致了大气层结不稳定;700 hPa的西南急流提供了充足的水汽条件;地面上中尺度切变线和低涡的发展为强对流提供了动力条件;干空气侵入对于此次强对流有激发和加强作用,干侵入对应高层湿位涡的下传。K指数、CAPE、850 hPa与500 hPa温差等参数极大值出现在降雹时,而BLI、SI指数、0℃层高度在降雹时达到极小值,0~6 km垂直风切变需达到中等强度以上才有利于冰雹发生。同时还对此期间的多普勒雷达产品进行了分析,TBSS和VIL ≥ 60 kg/m²对于冰雹的出现有重要的指示意义,多普勒雷达产品的综合比较分析可以有效的对冰雹过程做出预测预警。

关键词:冰雹;低涡;中尺度切变线;干侵入;TBSS

中图分类号:P458.1⁺21.2

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0038-10

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.007

Analysis of Environmental Field Characteristics and Causes of “6.30” Rare Cold Vortex Hail Weather Process

Qian Zhuolei¹, Jian Lili¹, Zhou Hongyuan², Ji Dandan²

(1. Shaoxing Meteorological Office, Shaoxing Zhejiang 312000, China;

2. Keqiao Meteorological Office, Shaoxing Zhejiang 312030, China)

Abstract: By analyzing the rare hail weather occurred in Apr 8, 2008 in Shaoxing, it is found that the hail was caused by the release of convective instability in the warmer areas which led by the cold vortex from 10-wai distance behind; The invasion of dry and cold air in the upper layer and the warming of the middle and lower layers resulted in unstable atmosphere. The Southwest jet of 700 hPa provided sufficient moisture conditions; The development of mesoscale shear lines and low vortices provided dynamic conditions for strong convection. The dry air intrusion could stimulate and strengthen the strong convection, and the dry intrusion corresponded to the underpass of the wet potential vortex. The maximum values of parameters such as K index, CAPE, 850hPa and 500hPa temperature difference appeared during the hail, while BLI, SI index, and 0° C layer height reached a minimum value during the hail, and 0~6km vertical wind shear needed to reach medium strength above which could conducive to hail occurrence. At the same time, TBSS and VIL ≥ 60 Kg/M2 are very important to the appearance of hail. The comprehensive comparative analysis of Doppler radar can effectively predict and forewarn the hail

收稿日期:2018-05-30

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-031)。

作者简介:钱卓蕾(1985-),女,硕士,副高级工程师,天气预报和气候研究。E-mail:qianzl@mail.iap.ac.cn。

process.

Keywords: hail; low vortex; mesoscale shear line; dry intrusion; TBSS

冰雹是一种中小尺度系统,具有很强的局地性,是在一定的环流背景下,在不稳定层结、触发机制和云物理机制等有利的条件下产生,预报难度较大。近年来,由于我国新一代天气雷达站网建设的逐步完善,探测、数值模拟等技术手段的提高及相关理论不断完善,对冰雹天气过程的预测水平有了比较明显的提高,同时对冰雹过程的生消机制以及预警技术也开展了较多的研究。

多年来,国内外许多专家致力于冰雹预报方法的研究,通过寻找降雹的种种相关因素,建立天气形势预报、物理量参数和统计预报等方法。范玉芬^[1]对钱塘江北岸一次罕见的冰雹强对流天气的研究表明冰雹产生在中低层对流不稳定高能湿舌和低空急流轴附近;通过对多个冰雹个例的分析,丁建芳等^[2]发现冰雹的形成除有利的天气形势背景条件外,还必须具备低层水汽辐合、大气不稳定层结、触发机制 3 个基本条件;路亚奇等^[3]认为切变线是产生陇东地区短时强降水和冰雹的主要低层影响系统;衣孟松等^[4]检索出数值预报产品有物理意义的预报因子,采取判别分析法和指标叠套法制作广西冰雹的潜势预报;于芳健等^[5]尝试用 Bayes 判别分析法和指标叠套法 2 种方法选出预报因子,并分别建立了冰雹天气潜势预报方程。天气雷达的应用为冰雹天气的研究提供了更好的探测手段,研究发现从常规的高空、地面环流形势中寻找特殊的异常信息,结合卫星云图、多普勒雷达资料可以提高冰雹天气预报的时效性^[6];探测到维持较长时间中气旋的超级单体必定产生冰雹^[7,8];TBSS 可以作为强冰雹的有效预警指标^[9,10]。

浙江省降雹区主要有两片,一片在杭、嘉、湖地区的湖州、嘉兴等地,另一片在金衢盆地的兰溪、武义、开化等河谷地带^[6],绍兴相比较以上两片区域降雹次数少了很多。2017 年 6 月 30 日傍晚到夜里,绍兴多个乡镇出现了直径 2~3 cm 的冰雹,同时还伴有 8~10 级雷雨大风,受灾乡镇农作物损失惨重,屋顶瓦片被打落,汽车顶部被砸凹陷。所以本文使用 NCEP1°×1°再分析资料分析造成此次冰雹强对流天气的环流背景、物理量场,并采用欧洲中心 0.25°×0.25°细网格资料研究强对流指数的特性,结合多普勒雷达资料等天气实况分析,分析冰雹的预报着眼点,寻找冰雹与一般强对流天气的差异,为制

作冰雹客观预报提供实时个例分析依据,以期为以后类似的冰雹天气预测预警提供有益的参考。

1 实况描述

2017 年 6 月 30 日 18~22 时绍兴自西南向东北遭受了一次冰雹、大风、强雷电和短时暴雨强对流天气的袭击,强对流中心主要经过嵊州的西部、诸暨、柯桥、越城和上虞等地。降雹范围较大,嵊州、诸暨、柯桥、越城都有雹区,降雹时间为十几分钟,冰雹直径 2~3 cm;冰雹出现的区域或附近地区还出现了短时暴雨,1 h 内降水量达 30 mm 以上,最大为诸暨和平 44 mm;并伴有 8~10 级偏南雷雨大风,最大为诸暨东和乡 11 级。这样以冰雹为主的强对流天气是绍兴比较罕见的。由于强冰雹出现的概率小、造成的灾害损失巨大,欧洲细网格和 GFS 预报强对流出现时段均在 14~17 时,只有日本 JMA 模式考虑了夜间的降水,雨量在 5 mm 左右,各个物理量场预报因子前期反映不明显。

2 环流背景分析

2.1 高空环流形势分析

6 月 30 日 08 时(图 1a),500 hPa 长江中游地区为一个低涡控制,低涡范围很广,西起川东,东至苏北,低涡南界在 30°N 附近,闭合低涡中心较深厚,从 850~500 hPa;此时西太平洋副高中心强度在 592 gpm 以上,位置较稳定,阻挡上游低涡的东移,使得其移速较慢。低涡底部盛行偏西气流,与副高西北侧的西南气流在 30°N 附近形成一范围较广的气流汇合区。浙江上空处于大低涡的右前方暖区内,距离低涡中心 10 个纬距,雹区出现在冷涡的东南象限。从 700~200 hPa,120°E、30°N 附近及上游地区都是西南气流,暖区强并发展深厚,中低层 31°~33°N、110°~120°E 形成一条东南~西南风的切变线,切变线的南侧有一条不断加强的中低层暖湿气流输送带。700 百帕的西南急流中心最大风速达 20 m/s,为对流发生提供了水汽条件。在低涡前部广阔范围内,盛行辐合上升气流,中低层暖湿气流输送带加暖式切变,遇中高层的干冷空气和正涡度平流的触发,导致冰雹强对流天气。从 24 h 变温情况也

可以看到,500 hPa 上浙江西部为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 负变温区,表明有冷空气正从高层侵入;850 hPa 上浙江处于 $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正变温区(图略),表明中低层已经开始回温;这样形成了高层降温,低层增温,上冷下暖的不稳定配置,非常有利于强对流的发生。30日20时(图1b),对流正在发生,高空低涡、低层切变线和急流的位置和强度维持,24小时变温场上500 hPa 浙北和浙西都为 -1 度的负变温,850 hPa 浙江地区的正变温达到 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,高层继续变冷变干,低层进一步增暖增湿,不稳定层结使得对流继续发展加强。

2.2 地面形势分析

冰雹过程属于小尺度的系统,一般通过 Micaps 常规资料很难发现其存在,本文运用自动站资料来分析地面形势的变化情况。

6月30日18时,自动站风场资料显示在嵊州境内,自贵门到禹溪村之间建立了一条切变线(图2a),切变线西侧是北到东北风,东侧是偏南风,在切变线上存在中小尺度涡旋,一个较明显的涡旋在贵门附近,另一个涡旋在崇仁附近,表明强对流发生的中尺度动力条件已经具备,而此时切变线附近站点的气温达到了 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,近地面的热力条件也已经具备,当对流云团移入该地区时,就有可能发展加强,实况在一小时内贵门和崇仁附近均出现了 $2\sim 3\text{ cm}$ 冰雹、大风和短时强降水。19时(图2b),诸暨西南部陈察、斯宅、开化附近出现涡旋,北上的云团进入诸暨境内后,在诸暨西南部地区造成了大范围的 $8\sim 10$ 级雷雨大风;20时,从云图上看(图略),强对流云团分成东西两个,西侧的云团移到诸暨西部陶朱街道附近,遇到该地区(图2c)上空的中尺度涡旋,强烈发展,出现降雹;而东部的强对

流云团继续北上,移入柯桥西部地区,从齐贤至福全一带有一条切变线形成,切变线两侧是偏北风与偏东风的转变,切变线附近站点的气温在 28° 左右,有较大的不稳定能量,配合中尺度切变线上的扰动,在20时40分以后,福全到齐贤一带出现了冰雹、大风和短时强降水。

高空和地面形势分析可知:此次冰雹过程中,高空低涡后的西北气流呈干冷空气侵入,中、低层的西南气流导致低层增温回暖,700 hPa 的西南急流使得浙江上空有充足的水汽供应,这为强对流天气的发生提供了不稳定条件和水汽条件;而地面上中尺度切变线和涡旋的出现,则为此次冰雹的发生提供了动力条件和触发机制。

3 干侵入特征分析

3.1 干侵入动力特征

本地冰雹天气的发生发展过程中,高层的干侵入起了至关重要的作用。干侵入具有低相对湿度的特征。定义相对湿度小于60%的区域为干区。图3给出了500 hPa 上不同时刻相对湿度和风场叠加分布。30日08时(图3a),在 $100^{\circ}\text{E}\sim 113^{\circ}\text{E}, 30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 区域内有一股干空气存在,位势高度场上表现为低涡底部后部的西偏北气流;30日14时(图3b),随着低涡的缓慢东移,干冷空气前沿已经到达 115°E ,向东呈楔状伸入,与南侧西南气流交汇;30日17时(图3c),楔状干冷空气前部有小股干空气渗透至 117°E ,对浙江地区的对流起了触发作用;到了30日20时(图3d),小块干空气范围扩大,干侵入作用增强,对流继续发展;直至30日23时,西南暖湿气流

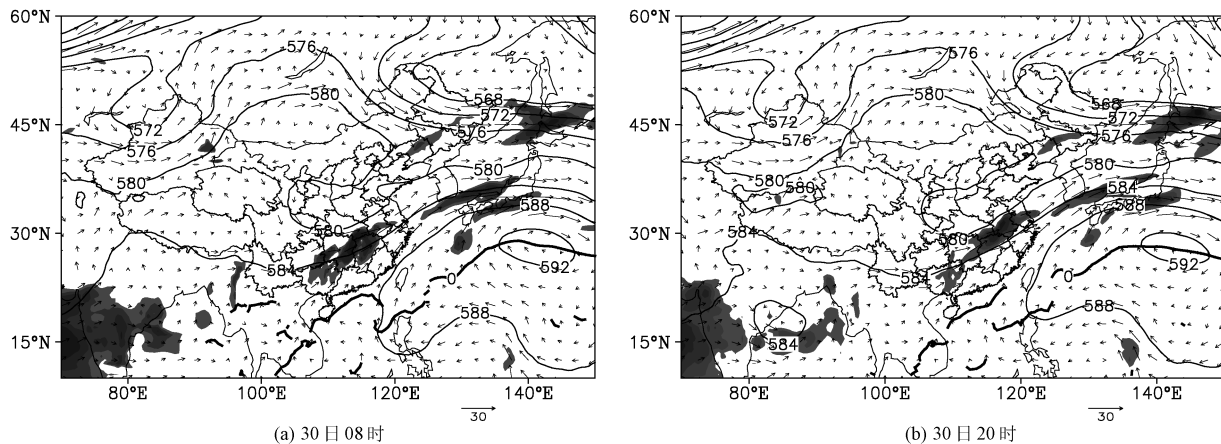
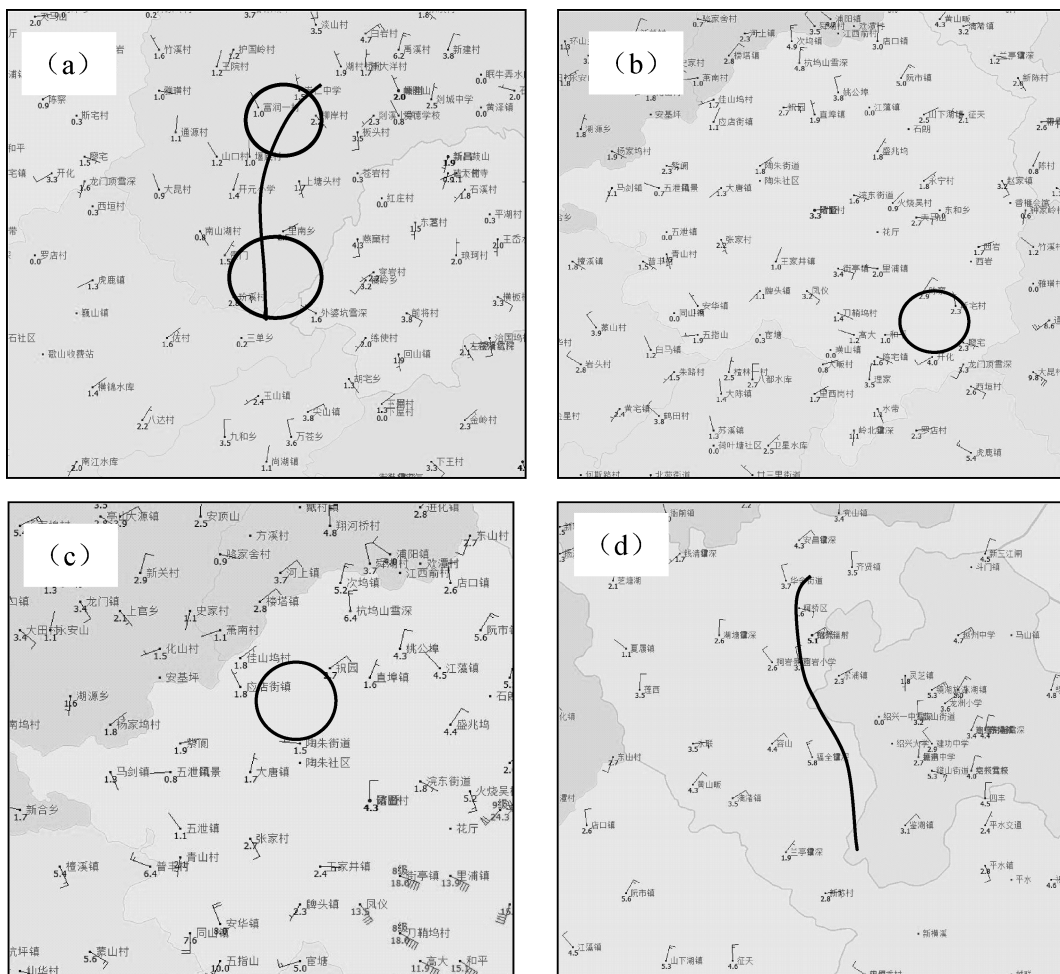


图1 500 hPa 和 850 hPa 影响系统配置

Fig.1 Affecting system configuration on 500 hPa and 850 hPa



(a): 30 日 18 时, (b): 30 日 19 时, (c)、(d): 30 日 20 时

图 2 6 月 30 日 18 时~20 时自动站风场

Fig.2 Automatic station wind field of 18:00~20:00 On June 30

北抬,干侵入作用显著减弱,对流逐渐减弱消失。

3.2 干侵入热力特征

干空气的侵入对强对流的触发和加强起着重要的动力作用,除此之外,它还能够产生热力效应。根据假相当位温 θ_{se} 的定义可知,干空气具有较低的 θ_{se} 。图 4 给出了假相当位温 (θ_{se}) 的高度-时间剖面图,自 30 日 14 时起,对流层中层存在 θ_{se} 低值中心,特别是在 30 日 20 时前后,600 hPa 附近的 θ_{se} 低至 334 K,表明对流层中层存在干冷空气活动,850 hPa 以下是 θ_{se} 高值区,这种高层干冷,低层暖湿的层结配置有利于激发强对流。从近地面到 600 hPa, θ_{se} 随高度递减,特别是在 850 hPa 以下, θ_{se} 随高度迅速减小,有强的对流不稳定。

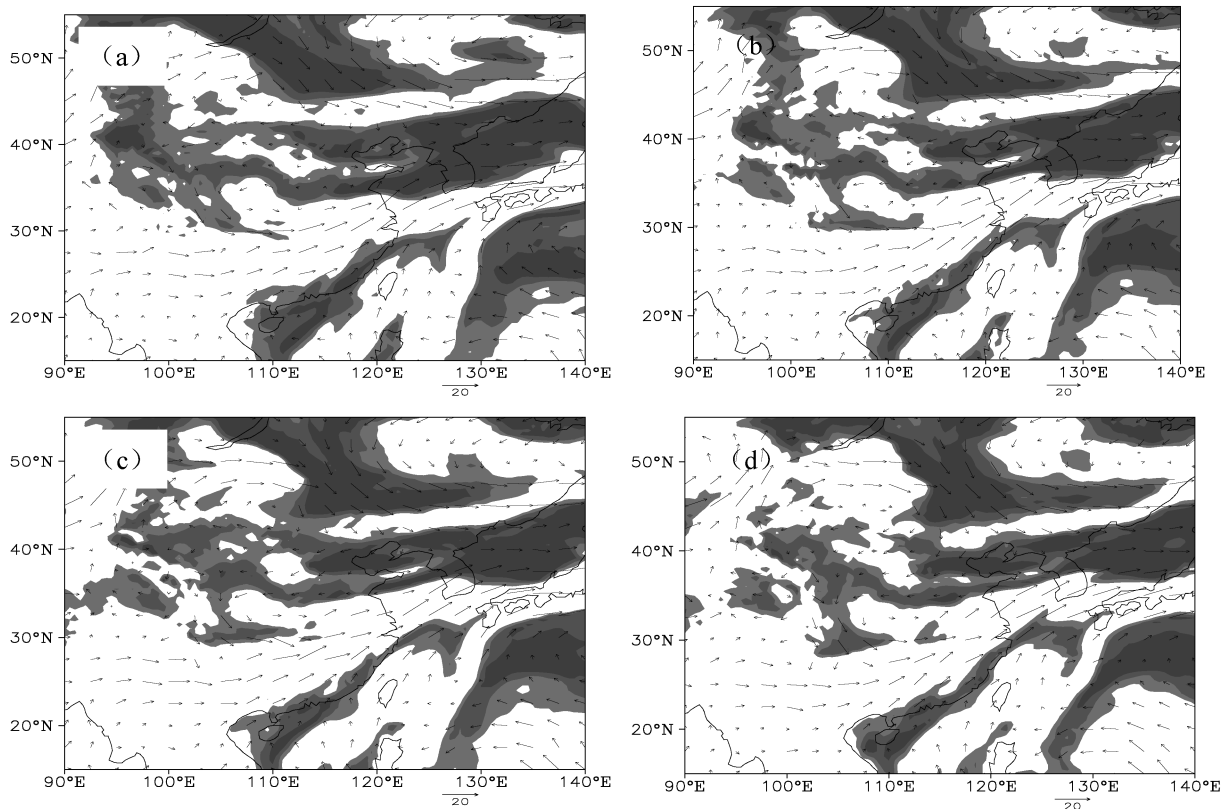
从不同时次 θ_{se} 纬度-高度剖面图(图 5a) 可以看出,在 30°N~33°N 之间从高层有一 θ_{se} 低值带呈漏斗状插入到低层,从低层有一 θ_{se} 高值带呈反漏斗状上凸,340 K 的等 θ_{se} 线上下贯通,这有利于浙江

北部边缘锋区前沿干空气下滑至对流层低层。在 33°N 以北有 θ_{se} 的密集区,320 K 的低值中心在 35°N 附近,对应冷涡中心所在的位置。在 30°N 上空也存在一个中心值为 336 K 的 θ_{se} 低值区,20 时(图 5b)降低至 334 K,表明中层有干冷空气入侵,28°N~33°N 低层是 θ_{se} 的高值中心,为高能区所在,低层的 θ_{se} 强梯度代表低层强的对流不稳定层结。

3.3 干侵入的湿位涡分析

干侵入的另一个显著特征是高位涡。湿位涡是同时表征大气动力、热力及水汽性质的一个综合物理量,干侵入的机制实际上是高位涡的侵入和下传过程。

寿绍文等^[19]研究表明,对流层高层高位涡向下伸展时,在对流层中层和低层分裂出小的相对高位涡扰动,促使中低层气旋涡度发展,从而导致强降水的发生发展。图 5 给出了不同时刻湿位涡的纬度-高度剖面图,30 日 14 时(图 6a),对流发生前,



(a) 30日08时; (b)30日14时; (c)30日17时; (d)30日20时

图3 相对湿度场(%,阴影)和 wind 场(矢量)(单位:m/s)

Fig.3 Relative humidity (% ,shaded) and wind field (vector) (unit:m/s)

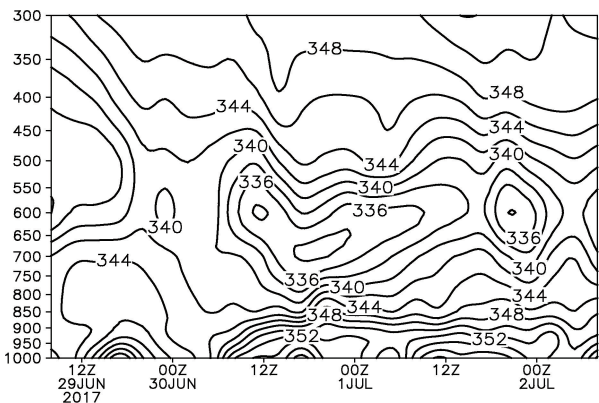


图4 暴雨发生前后(119°E~121°E,29°N~31°N)范围内平均假相当位温(单位:K)的高度-时间剖面图

Fig.4 The height-time cross section for θ_{se} (unit: K) averaged over(119°~121°E,29°~31°N)

30°N附近上空,4PVU的高位涡带呈现漏斗状向下伸展至300 hPa,同时分裂出4 PVU的小扰动下传至400~600 hPa之间,表明此时高层的高位涡已经开始下传;北侧300 hPa高度上的高位涡带位于35°N以北,其向对流层中层延伸的舌状前沿一直南伸至33°N附近,说明北侧高层的高位涡也有向下和向南传的趋势,此时中高层存在明显的干侵入,对强

对流的发生十分有利;30日20时(图6b),强对流正在发生,35°N以北的高位涡柱北缩,但30°N附近300 hPa以上的高位涡带仍有4 PVU的小扰动下传,在湿度场上表现为干区一直向下伸至700 hPa,说明强对流发生期间,中高层仍有干侵入作用,维持对流的进一步发展加强。

4 稳定性参数分析

将格点定位于(120.25°E,29.75°N)的诸暨陶朱街道附近,其中6月30日20时该点的实况资料默认为降雹时最接近的实况资料。20时降雹中心及强对流中心正好位于陶朱街道附近,能反应降雹时各项物理特性。表1列出了2017年6月30日冰雹过程中各个时次的指数值。反映温湿和能量条件的指数为K指数、CAPE、BLI和SI指数,整个过程K指数都在33以上,说明冰雹天气发生在高温高能区,在降雹前,K指数随时间增长,20时,出现冰雹,K指数达到极大值37,冰雹过程结束后,K指数降为33,CAPE的变化与K指数基本一致,都是在降雹前开始增大,降雹时达到极大值,降雹后,CAPE值迅

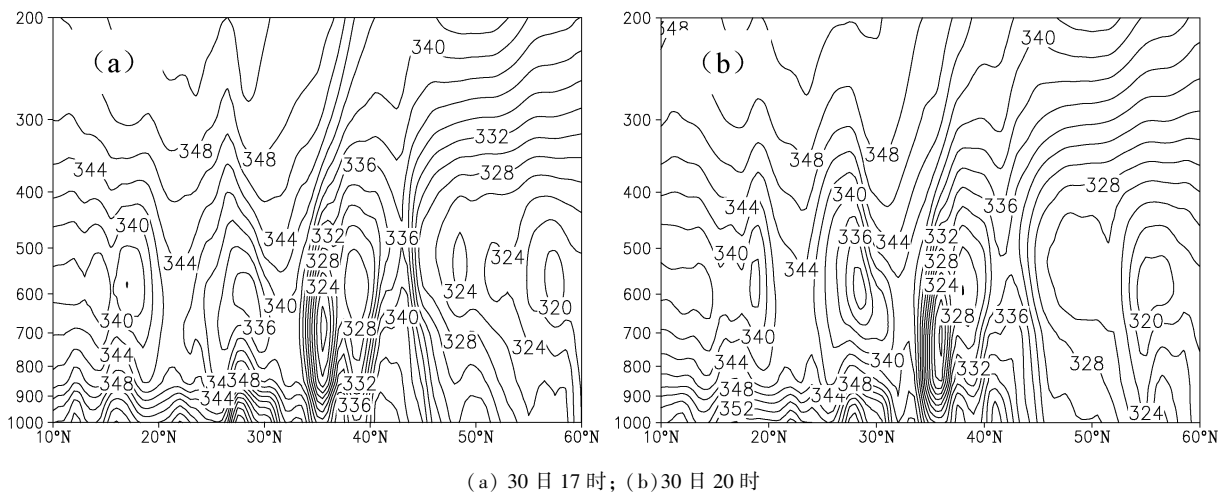


图 5 119°E~121°E 范围内平均假相当位温纬度-高度剖面图(单位: K)

Fig.5 The latitude-height cross sections of θ_{se} (unit: K) averaged over(119°~121°E):

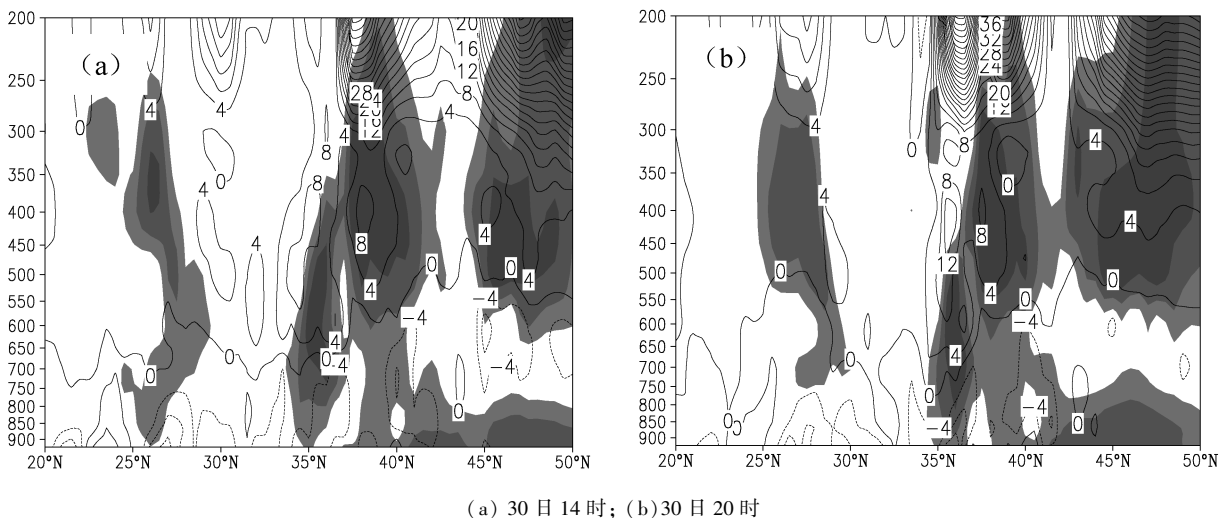


图 6 119°E~121°E 范围内平均湿位涡和相对湿度(%, 阴影)纬度-高度剖面图(单位: PVU)

Fig.6 The latitude-height cross sections of moisture potential vorticity(unit: PVU) and relative humidity(%, shaded) averaged over(119°E~121°E)

速降低,因此 K 指数和 $CAPE$ 的极大值都出现在降雹时。BLI 的变化趋势为降雹前迅速降低,从 -3.4 降低至 -4 ,降雹时为极小值 -4.6 ,降雹后迅速升高至 -2.4 ; SI 指数在 30 日 08 时仍为正值,降雹前由正转负,20 时降雹,迅速降低至 -1.29 ,降雹结束后又迅速回升至 1.16 ,整个过程中 SI 指数变化非常敏感。冰雹通常出现在中等强度垂直风切变环境下,相关统计也表明,0~6 km 垂直风切变达到 $15\sim 20$ m/s 为中等强度垂直风切变,这是超级单体形成的必要条件之一,整个过程中,0~6 km 垂直风切变始终维持在 17 m/s 以上,有利于形成超级单体,而且不仅 0~6 km 垂直风切变较大,低层 0~3 km 垂直风切变也比较大,基本在 15 m/s 以上,同时我们还可以发现,0~3 km 垂直风切变在降雹前是逐渐增大

的,降雹时切变最大,降雹后,又逐渐减小,但 0~6 km 垂直风切变没有这种变化规律,自 30 日 08 时到 1 日 02 时,切变值是随时间递减的。较大的垂直减温率是有利于冰雹天气的重要环境条件,此次过程 850 hPa 与 500 hPa 的温差都在 25 度以上,垂直减温率大,上冷下暖的层结较明显,且上下层温差是在降雹前随时间逐渐增大,20 时降雹,达到极大值 26 度,02 时过程结束,仍然维持在 26 度,到了 08 时,才开始降低。850 hPa 与 500 hPa 假相当位温差值变化类似于温度差值的变化,在降雹前温差就开始增大,降雹前一时次和降雹时达到极大,降雹后迅速降低。适合降雹的 0°C 层高度一般在 4 km 上下,该过程中, 0°C 层高度在 4.6~4.8 km,略偏高,但也基本在有利于发生冰雹的范围内,且在降雹前, 0°C 层

表 1 2017 年 6 月 30 日冰雹过程指数
Table 1 Index of hail process on June 30, 2017

	<i>K</i>	<i>CPAE</i>	<i>BLI</i>	<i>SI</i>	<i>SRH3</i>	<i>SRH6</i>	$T_{850-500}$	$THSE_{850-500}$	0 °C 层高度
6 月 30 日 08 时	35	1137.	-3.4	0.18	15.4	18.6	25.1	7.5	4720
6 月 30 日 14 时	36	1369	-4	-0.86	15.9	17.7	25.4	8	4714
6 月 30 日 20 时	37	1481	-4.6	-1.29	16.1	17.4	26	8	4663
7 月 1 日 02 时	33	385	-2.4	1.16	15.4	17.2	26	0.8	4799
7 月 1 日 08 时	36	836	-3	0.43	15	17.6	25.5	3.5	4876

高度随时间降低,降雹时最低达 4663 m,降雹后又升高。

5 对流风暴演变和结构特征

5.1 基本反射率演变过程

通过同屏显示同一时刻不同仰角的基本反射率,可以判断风暴的位置、结构以及可能的天气现象。这里分析冰雹过程中 2.4°,1.5°,0.5°多普勒基本反射率演变情况。

从反射率因子图上可知,17:58,有风暴在金华东阳强烈发展并向东偏北方向移动;18:15,风暴移动至嵊州与东阳交界,距离雷达 122 km,方位 227°,从低层到高层,反射率因子核心值均超过 60 dBz,高层的高值区向低层入流一侧倾斜,表明存在明显的有界弱回波区和悬垂回波结构,类似于超级单体的结构,2.4°仰角上 60 dBz 的回波中心达 6.5 km 高度,在 0 度层高度以上,对冰雹的出现有利;18:21,单体移动至嵊州西南角(227.2°,124.7 km),1.5°和 2.4°仰角回波中心强度依然在 60 dBz 以上,有界弱回波区维持,2.4°仰角出现了三体散射(TBSS)特征,但钉状回波长度较短,表明此时对流风暴中已经有冰雹形成,随后嵊州贵门附近出现冰雹;18:26(图 7a),2.4 度仰角上回波中心强度进一步加强,超过了 65 dBz,此时 TBSS 特征更加明显,钉状回波长度变长;10:32 分, TBSS 特征仍维持,表明仍有冰雹出现,但 2.4°仰角反射率中心值减弱为 60 dBz,表明单体开始呈现减弱趋势;18:37, TBSS 特征消失,回波中心值降低为 55 dBz,回波减弱,对流风暴减弱,降雹结束;到了 18:43,对流风暴移动至嵊州西部(234.1°,105.3 km),获得二次加强,中心强度再次超过 60 dBz;18:48,中心数值达到 65 dBz 以上,2.4°仰角再次出现 TBSS 特征,观测到嵊州崇仁、富润出现了大冰雹, TBSS 特征一直持续到 19:10,回波再一次减弱,降雹基本结束。

此后位于东阳的另一狭长回波带向下游移动,

北侧的强单体进入诸暨境内,并加强,19:49,单体中心位于(240.4°,119.0 km)的方位上,回波中心值大于 60 dBz,并有明显的有界弱回波区和回波悬垂结构,60 dBz 以上的回波超过 6 km 高度;19:55,强回波中心分裂,西边的小块回波西北上发展,至 20:17 其中心强度超过 60 dBz;20:23,西边的单体移动至诸暨西部(254.0°,134.4 km),回波中心值超过 65 dBz,并出现 TBSS 特征;20:25,诸暨陶朱街道出现冰雹, TBSS 特征持续时间短,两个体扫后, TBSS 特征就不明显了,回波强度明显减弱,因而降雹时间短。东部的强回波单体在东北上过程中进入柯桥,20:39(图 7b),单体移动至福全附近(260.6°,95.3 km),2.4°仰角 TBSS 特征出现,与降水回波混合在一起,不十分清楚,回波中心值超过 65 dBz,20:40 以后,福全镇、绍兴城西地区出现冰雹,持续时间十几分钟,此后单体继续北上, TBSS 特征持续到 21:01 左右,城北、齐贤镇相继出现冰雹。

5.2 平均径向速度

一般可以利用平均径向速度产品来识别风场的辐散辐合特征。这里选取 3.4°,2.4°,1.5°,0.5°仰角平均径向速度产品来对此次降雹过程做分析。

18:15,0.5°和 1.5°仰角上嵊州与东阳交界有一气旋性辐合,2.4°和 3.4°仰角上对应有辐散;18:26(图 8a),0.5°仰角上气旋性辐合更加明显,沿着雷达方向,左侧入流中心风速达到 20 m/s,反映在对流风暴中层有气旋结构形成,但入流和出流中心距离又比中气旋直径大,2.4°和 3.4°仰角上仍然对应辐散区;18:32,0.5°仰角上入流中心风速进一步加大,出现速度模糊,速度值为 30 m/s 左右,气旋性辐合进一步发展,1.5°仰角入流中心也出现速度模糊;18:39,低层气旋式辐合减弱;18:48,0.5°仰角出流中心范围开始扩大;10:54,0.5°入流中心又一次出现速度模糊,入流速度达到 30 m/s,低层气旋式辐合再一次发展。

从东阳北上的另一块回波 19:33 开始进入诸暨,速度场结构表现为 0.5°和 1.5°仰角上有较大范

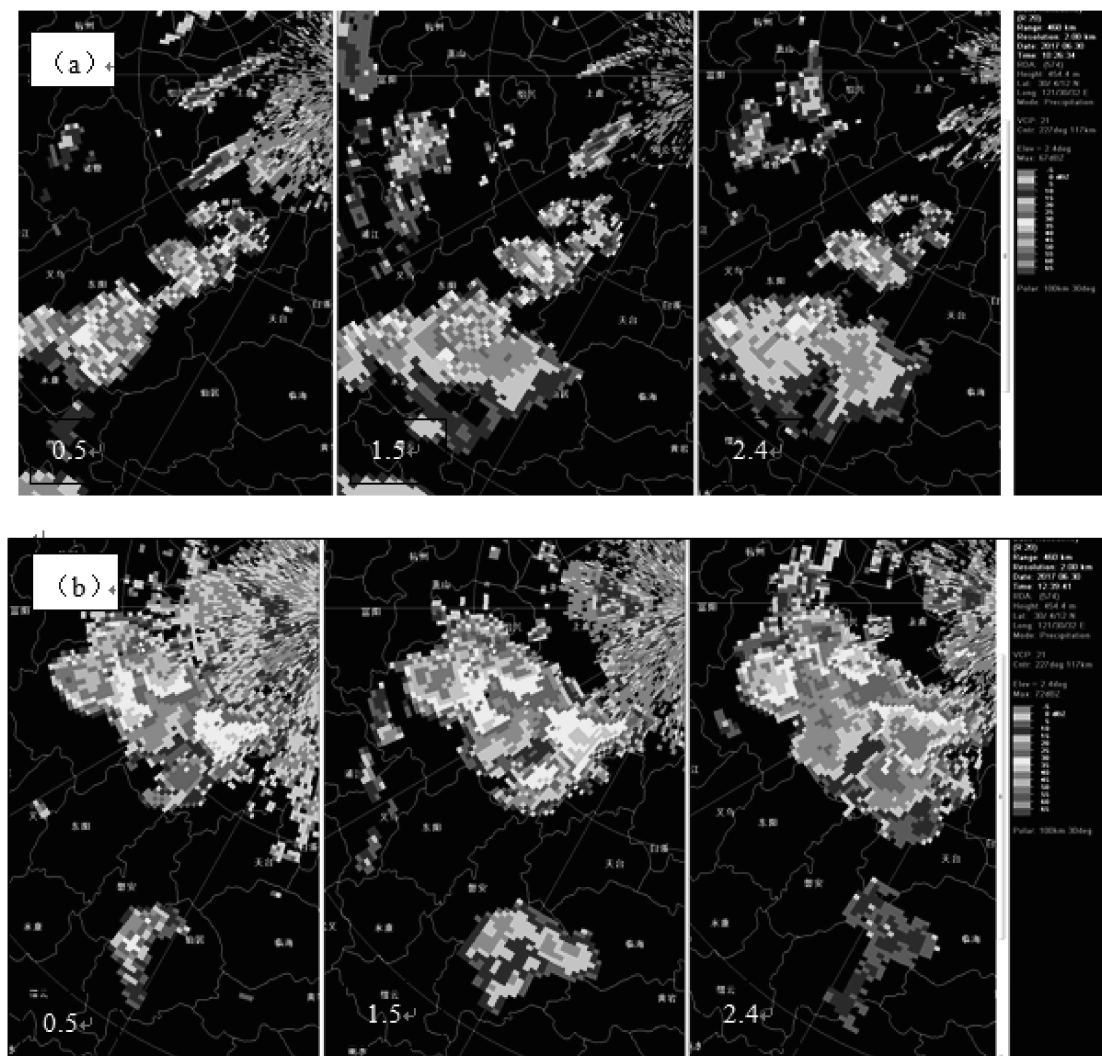


图 7 6 月 30 日 18:26(a), 20:39(b) 0.5°, 1.5°, 2.4° 风暴基本反射率因子 (单位: dBz)

Fig.7 Base reflectivity at 0.5°, 1.5°, 2.4° elevation angle at 18:26(a), 20:39(b) on June 30 (unit: dBz)

围正速度逆风区的存在, 有较强的辐合, 2.4 和 3.4° 也有逆风区, 范围随高度减小, 并有辐散结构; 随后强单体分裂, 西侧单体运动至诸暨西部, 20:23 (图 8b), 0.5° 仰角上出现中气旋, 入流中心速度值达到 -25 m/s, 流出中心速度值为 7 m/s; 1.5° 仰角上也有类似于中气旋的结构, 表明这是一个强烈发展的超级单体; 东侧的强回波速度场上继续出现逆风区, 且在单体北上过程中逆风区范围扩大, 低层辐合进一步加强; 20:39, 低层辐合继续存在, 2.4 和 3.4° 仰角的辐散加强, 风暴发展; 这种低层强辐合、高层强辐散的特征一直持续到 21:01, 自 21:07 起, 低层辐合和高层辐散特征逐渐减弱消失, 风暴也逐渐减弱。

5.3 垂直积分液态含水量 (VIL)

垂直积分液态含水量值的大小可以判断大冰雹出现的可能性^[7], 同时它的突增还对冰雹天气具有一定的识别能力。

分析这次冰雹过程中 VIL 的变化情况发现, 17:58, 风暴在东阳出现强烈发展, 对应于反射率因子中心值的增大, VIL 中心值超过 70 kg/m², 降冰雹的潜势很大; 18:15 (图 9a), 中心 70 kg/m² 的 VIL 大值区开始进入嵊州境内, 四个体扫过后; 18:39, VIL 中心值降低至 55 kg/m², VIL 值超过 60 kg/m² 的阶段正好对应在嵊州贵门地区造成冰雹的时间段。由反射率因子分析可知, 该单体继续北上后, 在嵊州中部地区二次加强, 18:48, VIL 中心值再次超过 70 kg/m², 下个体扫降至 kg/m², VIL 中心经过的崇仁、富润降冰雹。

上游地区东阳的另一强风暴进入诸暨分裂后, 西侧单体北上至诸暨西部, 12:23, 在诸暨陶朱街道附近 VIL 值增大, 中心值超过 65 kg/m², 该地区出现冰雹。东侧的强单体虽然移动至诸暨西南部时 VIL 值也超过了 60 kg/m², 但未观测到冰雹, 只出现了

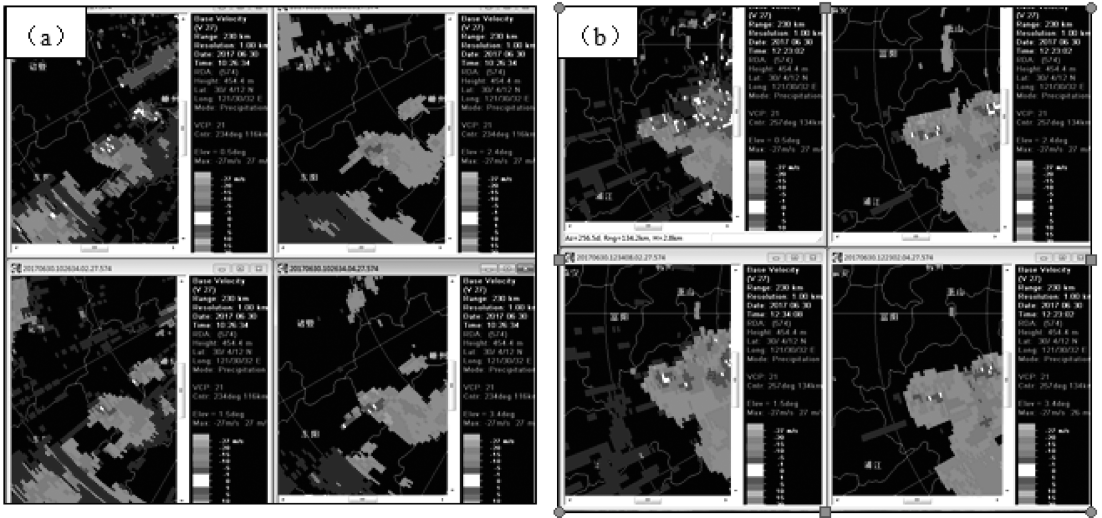


图 8 6月30日 18:26(a), 20:23(b) 0.5°, 1.5°, 2.4°, 3.4° 风暴相对平均径向速度 (单位: m/s)

Fig.8 Radial velocity at 0.5°, 1.5°, 2.4°, 3.4° elevation angle at 18:26(a), 20:23(b) on June 30(unit: m/s)

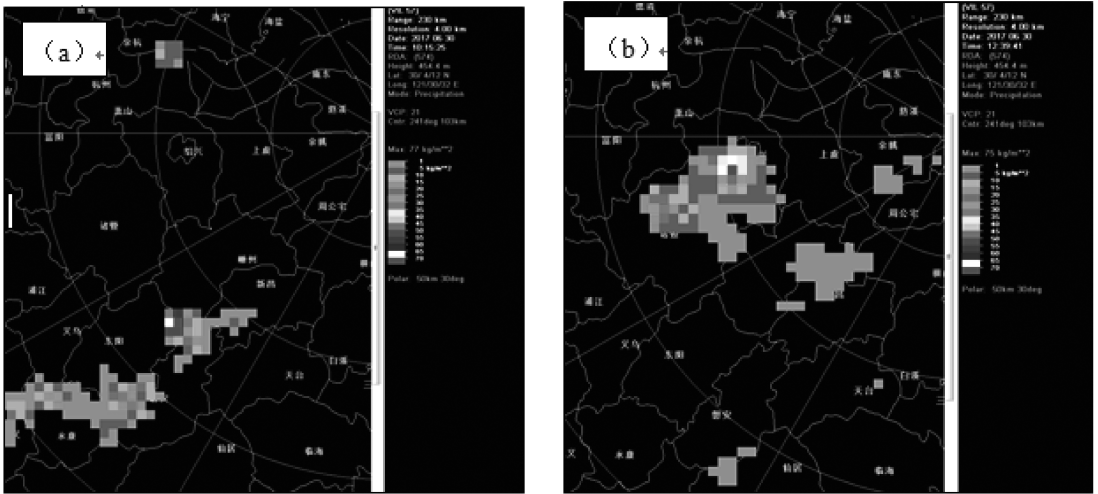


图 9 6月30日 18:15(a), 20:39(b) 垂直累积液态水含量 (VIL) (单位: kg/m²)

Fig.9 Vertical integrated liquid water content at 18:15(a), 20:39(b) on June 30(unit: Kg/M²)

大范围的 9~10 级大风;到了 20:39(图 9b), 该强单体移动至福全境内, VIL 中心值迅速增大至 70 kg/m², 福全降冰雹;下个体扫, 20:45, 减弱为 55 kg/m²; 20:50, VIL 中心值再次增大至 60 kg/m², 到了齐贤, 中心值超过 65 kg/m², 造成了该地区的降雹。同时结合基本反射率的变化过程, 发现 VIL 随时间的变化和基本反射率的变化基本一致, 且是指示大冰雹的较好指标。

综合基本反射率、平均径向速度以及垂直积分液态含水量的分析发现: 基本反射率可以有效的分析对流风暴的结构变化, 结合分析平均径向速度则可以判断对流风暴的强度变化, 而垂直积分液态含水量 (VIL) 对降雹有很好的指示意义。

6 结论

本文通过美国 NCEP1° * 1°和欧洲中心 0.25° * 0.25°的再分析资料对“6.30”绍兴冰雹天气过程的环流背景、物理量场和对流指数进行了分析, 并研究多普勒雷达产品, 分析雷达回波特征, 得到以下结论:

(1) 此次冰雹天气是由高空弱的干冷空气渗透而触发低涡前部约 10 个纬距处的强暖区和低空急流湿舌中的强对流云团而产生冰雹, 配合中低层的切变线东移。高层冷空气的侵入, 中低层增温回暖导致了大气层结不稳定, 为冰雹发生提供了不稳定

条件;700 hPa 的西南急流提供了充足的水汽条件;地面上的中尺度切变线和涡旋的存在,为冰雹的发生提供了一定的动力条件;

(2)上干下湿,上冷下暖的层结配置有利于激发和维持强对流,因而干侵入对于对流的发展有重要作用。整个对流过程中高层以干冷气流为主,而中低层为高能区,对流不稳定性很强。高位涡带的下传和侵入与强对流的发生发展有很好的对应关系。

(3) K 指数、 $CAPE$ 、850 hPa 与 500 hPa 温差和假相当位温差、0~3 km 垂直风切变在降雹前均随时间增长,降雹时达到极大值,降雹后又减小, BLI 、 SI 指数、0 °C 层高度均在降雹前减小,降雹时达到极小值,降雹后增大。0~6 km 垂直风切变需达到中等强度以上才有利于冰雹发生。0 °C 层高度在 4~5 km 之间,比较适合降雹。

(4)从多普勒雷达产品特征分析发现此次冰雹过程中出现了超级单体;多普勒雷达基本反射率、平均径向速度以及垂直累积液态水含量产品的结合分析可以有效的对冰雹做出预警,尤其是 $TBSS$ 和 $VIL \geq 60 \text{ kg/m}^2$ 对冰雹的出现有很好的指示作用。

参考文献:

[1] 范玉芬,潘士雄,张瑞萍.2008年春季钱塘江北岸罕

见冰雹天气诊断分析.中国气象学会2008年年会论文集,2008,1559-1565.

- [2] 丁建芳,杨敏,刘磊.河南省冰雹短期预报方法研究[J].气象与环境科学,2017,40(1):47-53.
- [3] 路亚奇,焦美龄,李祥科,等.陇东短时强降水与冰雹天气对比分析及预报方法研究[J].干旱区地理,2016,39(2):317-326.
- [4] 农孟松,祁丽燕,黄明策,等.基于环流分型的广西冰雹潜势预报研究[J].气象,2008,34(6):46-52.
- [5] 于芳健,于跃,郭佰汇,等.辽宁省朝阳市冰雹天气潜势预报研究[J].农业灾害研究,2016,6(1):34-35.
- [6] 张晓红,柴化全,黄春生,等.一次超级单体风暴的天气学成因及多普勒雷达回波特征研究[J].气象科学,2006,26(4):392-399.
- [7] 朱君鉴,王令,黄秀韶,等. CINRAD/SA 中气旋产品与强对流天气[J].气象,31(2):38-42.
- [8] 李文娟,郑国光,朱君鉴,等.一次中气旋冰雹天气过程的诊断分析.气象科技[J],2006,34(3):291-295.
- [9] 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等.雷达的三体散射与强冰雹预警.中国气象学会2006年年会“气象雷达及其应用”分会场论文集[C]:416-427.
- [10] 何丽萍.4.29 浙中局部冰雹过程的雷达产品分析.第二届浙中西部科技论坛论文集:42-44.
- [11] 余小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,2006:87-305.

地基微波辐射计与无人机探空观测对比分析

许皓皓¹,张雪芬²,黄思源¹,傅伟忠¹

(1 宁波市气象网络与装备保障中心,宁波 浙江 315012; 2 中国气象局气象探测中心,北京 100081)

摘要:在地基微波辐射计观测站利用小型无人飞机搭载无线电探空仪,对垂直大气的温度和湿度进行实测,并与微波辐射计同步遥感探测反演得到的温度、湿度数据对比分析。这种同步观测比以往用气球探空资料作为对比观测减少了数据空间上的偏差,对微波辐射计的反演结果偏差的评价更加客观。经对比表明:微波辐射计地基遥感反演的温度与探空观测温度相关系数为 0.977,平均偏高 1.4 °C,数据相关性较好,但对温度的细节变化,特别是对逆温层的表现能力有待提高;反演的相对湿度与探空观测数据偏差较大,相关系数为 0.153,平均偏低 20%。其中 1500 m 以下相对湿度相关系数值为 0.650,相关性尚可,而 1500~2550 m 高度上受云底在 1800 m 附近的大范围的层积云影响,正、负偏差均存在且较大,平均偏差和均方差也很大,甚至出现相关系数为-0.920 的负相关,主要因素是较厚的云层以及丰富的云中水滴对微波辐射计的探测和湿度反演方法等有较大影响,需要进一步分析误差来源,从方法上着手提高探测和反演能力。

关键词:地基微波辐射计;无人飞机;探空;对比分析

中图分类号:P414

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0048-06

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.008

Comparative Analysis of Observation Data Between Ground-based Microwave Radiometer and UAV Attached Radiosonde

Xu Haohao¹, Zhang Xuefen², Huang Siyuan¹, Fu Weizhong¹

(1 Ningbo Meteorological Network and Equipment Support Center, Ningbo Zhejiang 315012, China;

2 Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: By using mini-type unmanned aerial vehicle (UAV) with attached radiosonde flying around ground-based microwave radiometer (MWR) observation post to observe temperature and relative humidity of vertical atmospheric, a comparative analysis of temperature and relative humidity profiles data inversed from microwave radiometer and drone attached radiosonde has been conducted. This simultaneous observation method has significant advantages compare to use general radiosonde observations (RAOBs) as comparative data, since it decrease spatial deviation, the result is more objective to evaluate data inversion of microwave radiometer. The comparison results show that temperature of MWR measurements is 1.4 °C higher than RAOBs on average, correlation coefficient between the two is 0.977, data correlation is fairly positive, but minor temperature variation and inversion layer temperature inverse ability of MWR still need to be improved; relative humidity of MWR measurements is 20% lower than RAOBs on average, correlation coefficient between the two is only 0.153, data deviation is quite negative. The correlation coefficient of relative humidity observation below

收稿日期:2018-10-31

基金项目:国家自然科学基金委员会科研项目(41675110)资助,浙江省气象科技计划项目(2018YB17)。

作者简介:许皓皓(1984-),男,学士,高工,从事气象探测和信息化等工作,E-mail:ekinbox@gmail.com。

1500 m is 0.650, yet observation from 1500 m to 2550 m reduce to -0.920 , meanwhile the root mean square error and mean absolute error also significant increased, positive and minus deviation both exist and quite significant, mainly reason is because thick cloud layers and rich cloud droplets have great impact on MWR temperature and relative humidity inverse methods, further analysis still needed to identify deviation source, and improve MWR inverse capabilities accordingly.

Keywords: ground-based microwave radiometer; unmanned drone; air sounding; comparative analysis

地基微波辐射计是对垂直大气进行遥感探测的一种新型观测设备。通过被动接收大气中一定波段的微波辐射,用来探测反演大气温度、相对湿度、云液态水的垂直分布廓线。与无线电探空仪等传统大气高空探测相比,具有操作方便,可全天候无人值守连续工作,观测时空分辨率和探测数据精度高等优点。近年来微波辐射计在灾害天气监测预报、数值预报资料同化、大气环流分析、人工影响天气等业务和科研领域得到了较广泛的应用^[1-9]。

任何探测设备在观测中都会产生一定的误差,微波辐射计也不例外。但是由于遥感探测的特殊性,除了本身设备性能和反演算法所引起的误差以外,作为对比观测的基准实测方法也至关重要。目前对地基微波辐射计探测误差分析和探测能力的评估,主要是利用气球探空获取的高空资料作为基准进行对比分析。如张文刚等^[10]利用加密探空资料,采用2种不同方法与同址的MP-3000 A型地基微波辐射计资料进行对比分析,讨论了地基微波辐射计探测精度的变化特征。结果表明,微波辐射计对温度及水汽密度探测精度较高,但仍然存在一定的探测偏差,温度的探测偏差大值区出现在午后,相对湿度及水汽密度的探测偏差大值区则在凌晨;温度及相对湿度探测误差的时间序列表现为起伏较大,而水汽密度则相对平稳,降水对微波辐射计遥感探测有一定影响。此外通过对降水条件下微波辐射计天顶与斜天顶观测的廓线发现,斜天顶观测能够有效减小降水对观测的影响。还有利用数值模式预报模拟进行辅助分析。如侯叶叶等^[11]以探空水汽廓线为标准,对北京南郊观测站的微波辐射计水汽廓线与WRF(Weather Research & Forecasting Model)模拟的水汽廓线进行精度分析。结果表明,整体上WRF水汽密度接近探空,但在近地面处微波辐射计的更接近探空;水汽密度偏差在夏季较大冬季较小;微波辐射计的水汽密度在3 km左右偏大。卢会国等^[12]以阳江第8届国际探空对比试验资料为基础,对比分析了GPS/MET与4种探空仪和微波辐射计获取的水汽资料,结果表明微波辐射

计在天气较好时,测量精度较高,但微波辐射计在雨天受罩子上的雨水影响,误差较大,与GPS/MET的测量值不相关。

由于探空气球在上升过程中受风场的影响产生水平漂移,随着气球升空高度的增加在水平方向上漂移就更大,与高空风的大小。李伟等^[13]对北京一次探空计算了探空气球漂移的水平投影距离达到169.69 km。气球的漂移会对两者之间的观测对比带来一定的系统误差^[14-16]。为了消除这种空间高度上由于水平观测位置差异产生的误差,我们采用小型无人飞机搭载无线电探空仪替代气球探测。无人飞机在微波辐射计观测点上空做螺旋式盘旋上升,观测水平范围控制在几百米以内,可有效规避空间漂移带来的观测误差。与微波辐射计开展同期同址的对比观测,对微波辐射计反演的温湿度廓线产品进行误差的定量分析,以期可以更深入的了解该设备的探测精度和误差特征,为该设备的探测精度改善和探测资料业务应用提供依据。

1 观测环境和设备

1.1 观测环境和时间

本次对比观测地点在浙江省宁波市象山县国家气象站(经度 $121^{\circ}55'24''$,纬度 $29^{\circ}23'00''$),观测场面积为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$,海拔高度4.5 m,观测场四周空旷,东侧距离东海不足1 km,周围无高大植物及建筑,净空环境良好,完全符合《气象探测环境和设施保护办法》要求。观测时间为2016年5月19日北京时间14:43~15:30,天气多云转阴。开始观测时地面气温 $23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度71%,气压1012.2 hPa,风向 277° ,风速 1.1 m/s ;观测结束时气温 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度77%,气压1012.3 hPa,风向 335° ,风速 0.4 m/s ;观测期间受弱冷空气影响,气温逐渐下降,相对湿度上升。当天的最高气温 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温 $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 观测设备

微波辐射计采用国产QFW-6000型多通道微

波辐射计。该设备直接测量大气辐射亮温,通过基于BP神经网络算法反演输出高精度高分辨率的温度廓线、湿度廓线、大气水汽密度廓线和折射率廓线等数据。辐射计主要包含8个K波段(22~32 GHz)和8个V波段(51~59 GHz)共16个探测通道,亮温测量量程为0~500 K,辐射亮温灵敏度 $\Delta T_{\min} \leq 0.2$ K,积分时间 $\tau \geq 0.1$ s,亮温精度0.8 K,红外工作波长8~14 μm ,主要指标和美国MP-3000、德国RPG-HATPRO这两款国际主流多通道微波辐射计相当。具备全天候无人值守工作能力,雨雪条件下仍可进行有效探测。

无人遥控飞机是小型固定翼测绘用遥控飞机,机翼展宽1.8 m,自重4.8 kg,负重能力6.8 kg。

高空观测设备选用国产HT-GTS(U)2-1型北斗/GPS探空系统。该设备温度测量最大误差 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度测量最大误差 $\pm 3\%$,气压测量最大误差 ± 1 hPa,垂直定位误差 ≤ 15 m,探空仪重量200 g。该探空系统由北斗/GPS探空仪和地面接收系统组成。利用气球或无人遥控飞机携带探空对垂直大气进行测量,地面接收系统对数据进行接收和处理,生成高空气象探测各种信息。

2 观测方法和数据对比

2.1 观测方法和数据处理

微波辐射计架设在观测场附近地面上,无人遥控飞机搭载北斗/GPS探空仪,以观测场为中心点,在半径1 km左右范围内垂直盘旋上升进行观测。14:43开始同步观测,飞机从地面上升到2530 m,耗时18 min;然后飞机在2550 m左右盘旋5 min后开始下降,历时20 min降落地面。微波辐射计和探空系统同步完成一个上升和下降过程的观测,共计43 min。

本次探空采样为每秒一次,采集有效数据2820份,其中上升期间数据样本1312份,下降期间1508份。微波辐射计每秒采样6次,在2000 m以下间隔100 m高度采样1组数据,2000 m以上每隔250 m采样1组数据,到达2550 m高度共计52层。将每

秒6组观测数据进行算术平均作为该分钟的观测记录,得到2444组记录。以探空资料达到微波辐射计的观测层高度的时间为标准,挑选微波辐射计该高度层上对应时间的观测数据。对2种观测数据进行高度和时间的同步匹配,组成对比分析数据序列。

本文针对2种观测方法获取的温度、相对湿度进行对比分析,计算微波辐射计的反演结果相对无人机探空数据的相关系数、平均偏差及均方差,得到前者在不同高度上的探测精度偏差。

2.2 温度廓线对比

按照上述处理方法,对微波辐射计反演结果和无人机探空数据计算相关系数,进行偏差分析。从表1中可看出温度的相关系数在无人机上升期间为0.988,大于下降期间的0.969,总的相关系数达到0.977,均能通过0.001的相关显著性检验,说明两组观测数据具有非常高的一致性。平均偏差在上升期间1.26 $^{\circ}\text{C}$,小于下降期间的1.64 $^{\circ}\text{C}$ 。总的平均偏差为1.40 $^{\circ}\text{C}$,偏差最大绝对值4.50 $^{\circ}\text{C}$,均方差0.74 $^{\circ}\text{C}$ 。从以上分析可见微波辐射计对温度的探测具有较高的准确性,反演结果与探空比较一致,这与张文刚等^[10]的分析结论一致。图1a无人机探空曲线在600 m和1500 m高度上出现2个逆温层,图1b无人机探空曲线上则有4个逆温层,但是在微波辐射计的廓线上没有明显的反应。最大偏差都出现在逆温层底部,说明微波辐射计对温度的反演结果总体良好,但对温度的细节变化,特别是逆温层的表现能力有待提高。

2.3 湿度廓线对比

表2给出了相对湿度的相关系数和偏差统计值。总体相关系数只有0.153,未能通过0.1的相关显著性检验,平均偏差-20.2%,偏差最大绝对值68.5%,均方差为27.5%。从这些数据看微波辐射计对于高空湿度探测偏差大,在反演方法上可能还需要改进。当天上午多云天气,下午云系增多转为阴天。在无人机上升期间,天空布满云层,从高度上看有两层云。较低的为碎积云(云底在300~500 m之间),上面是大范围的层积云(云底高度在1800 m左右)。在无人机下降期间,云系逐渐增多,云层增

表1 微波辐射计反演与无人机探空观测温度偏差

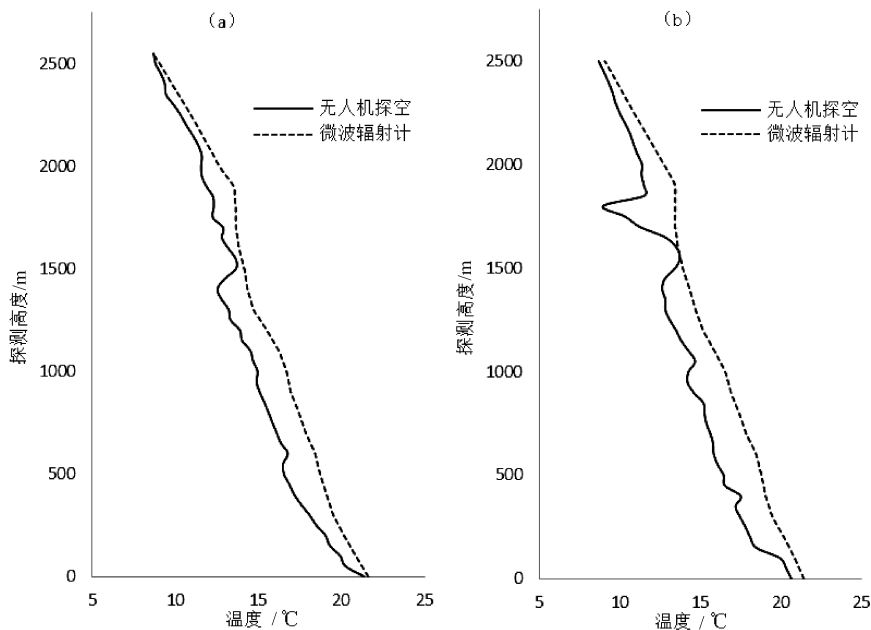
Table 1 The comparison biases of temperature between microwave radiometer and UAV attached radiosonde

统计时段	相关系数	平均值/ $^{\circ}\text{C}$	最大绝对值/ $^{\circ}\text{C}$	均方差/ $^{\circ}\text{C}$	样本数
飞机上升	0.988	1.26	2.18(500 m高)	0.61	52
飞机下降	0.969	1.64	4.50(1800 m高)	0.83	51
总体	0.977	1.40	4.50(1800 m高)	0.74	103

表 2 微波辐射计反演与无人机探空观测相对湿度偏差

Table 2 The comparison biases of relative humidity between microwave radiometer and UAV attached radiosonde

统计时段	相关系数	平均值/%	最大绝对值/%	均方差/%	样本数
飞机上升	0.072	-16.2	65.8(2550 m 高)	27.8	52
飞机下降	0.220	-24.4	68.5(2350 m 高)	26.7	51
总体	0.153	-20.2	68.5	27.5	103



(a) 无人机上升期间探空廓线, (b) 无人机下降期间探空廓线

图 1 微波辐射计反演与无人机探空的观测温度廓线对比

Fig.1 The comparison results of microwave radiometer and UAV sounding temperature profiles

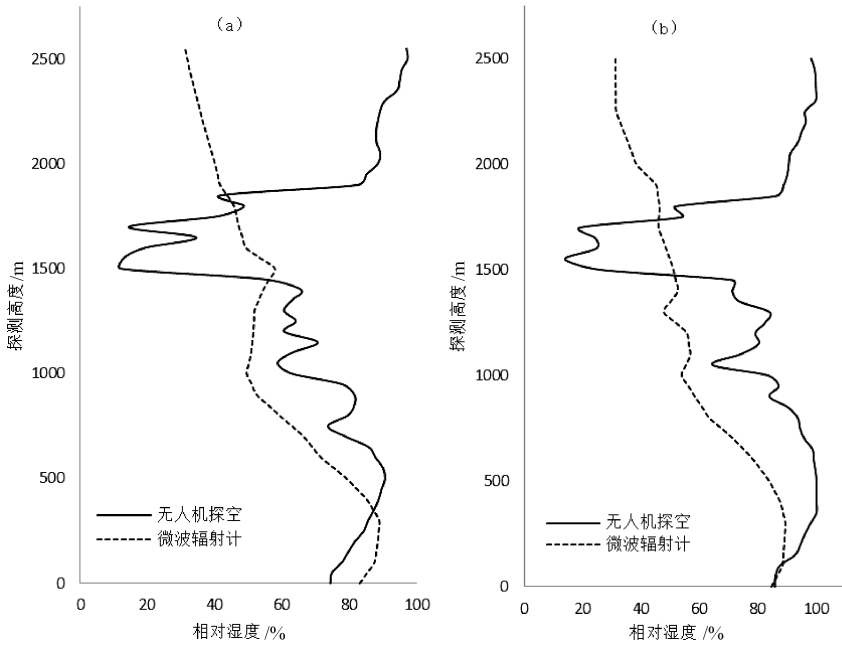
厚。从图 2 无人机探空实测的湿度廓线上可以看出相对湿度在 90% 以上的有两层, 对应就是云层的分布高度。从图 3 可以看出, 300~500 m 之间的碎积云对微波辐射计反演的相对湿度和温度影响均较小, 与无人机探空实测值基本一致; 而微波辐射计对 1800 m 高度以上层积云区域反演结果则与与无人机探空实测值正、负偏离都存在且偏差较大, 可见较厚的云层以及丰富的云中水滴对相对湿度的反演影响非常大。图 2a 从地面往上两根曲线第一次交叉点出现在 350 m 高度, 这个高度与低云所在的高度相一致, 随后相对湿度随高度逐渐变小。1400~1800 m 高度上为无云区(飞机探空实测最小相对湿度低于 20%), 但是微波辐射计探测的相对湿度变化不大, 偏差达到 45.8%。在 1800 m 高度以上相对湿度继续变小, 与实测的相对湿度变化趋势相反, 在 2550 m 处相对湿度偏低 65.8%。据计算在 1400 m 高度以下相关系数为 0.706。但在这一高度上发生了完全相反的变化, 1500~2550 m 之间甚至出现负相关, 相关系数为 -0.920, 可见微波辐射计对湿度探测受云层的影响出现不稳定, 或是反演方法没有

充分考虑云层影响的处理, 有待改进和提高。

2.4 综合分析

整个对比观测期间无人机经历了上升和下降两个过程, 历时 40 多分钟, 从地面自动观测站记录来看, 气温下降 1.2 °C, 相对湿度上升 6%, 气压上升 0.1 hPa, 风向从偏西转为西北, 风速下降 0.7 m/s。总体来看气象要素变化不大, 天空状况为阴天, 两层云的分布没有变化, 云层加厚, 天空明亮度下降。从无人机探空温度和湿度曲线上来看, 上升和下降两个过程与地面变化趋势是一致的。

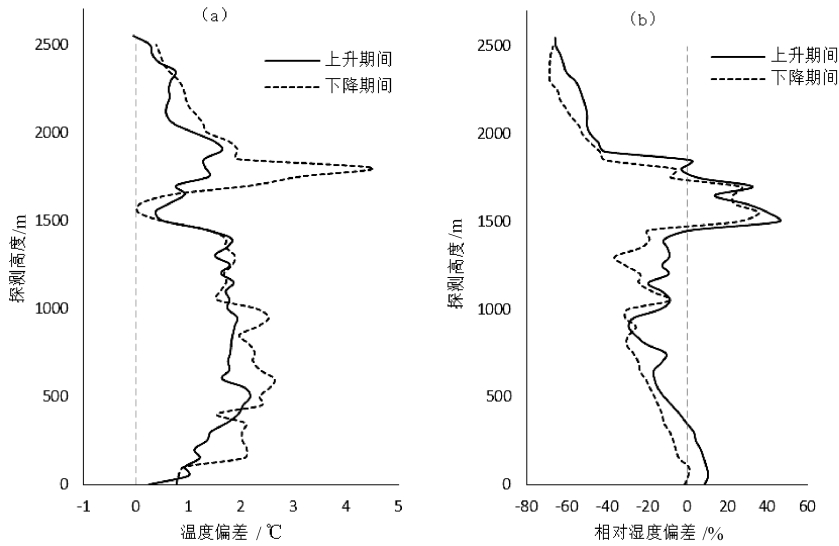
图 3 给出了不同高度上温度和相对湿度的偏差曲线。温度除了最高位置是负偏差, 其他均为正偏差, 由此可见温度探测除了个别特殊点以外, 总体偏差较小, 探测数据可信度比较高, 而且偏差基本上为正值, 易于订正。相对湿度的偏差有正有负, 在无云区域为正偏差, 有云的两个区域为负偏差, 平均偏差 -20.2%, 均方差 27.5%。对于相对湿度来说, 在 500 m 以下的无云区偏差较小, 1500 m 往上先后出现较大的正、负偏差, 属于随机性误差, 订正难度大, 需要进一步分析误差来源, 从方法上着手提高反演



(a) 无人机上升期间探空廓线, (b) 无人机下降期间探空廓线

图 2 无人机探空反演与微波辐射计观测的相对湿度廓线对比

Fig.2 The comparison results of microwave radiometer and UAV sounding relative humidity profiles



(a) 温度偏差廓线, (b) 相对湿度偏差廓线

图 3 微波辐射计反演与无人机探空观测偏差廓线

Fig.3 Deviation line chart of microwave radiometer and sounding

能力。

这主要因为地基微波辐射计自身配置的红外辐射仪组件仅能获取天空红外辐射亮温^[17],其测云能力非常有限,导致有云时微波吸收系数的分布存在很大不确定性^[18]。针对这一问题车云飞等^[19]采用 MonoRTM 辐射传输模型作为正演亮温模型, BP (back propagation) 神经网络作为反演工具,将毫米波云雷达所测的云底高度和云厚度运用于反演过

程,建立新的反演模型。结果表明添加云信息之后多数高度层的均方差均有不同程度减小,而在有云以上高度层表现尤为明显。因此,用单一的微波辐射计在有云的情况探测湿度廓线可用性并不高。

3 结论与思考

利用无人机搭载探空仪开展固定地点的垂直高

空探测,与同一地点的地基微波辐射计进行对比观测做出了有益的尝试。经数据处理和分析可得到以下结论:

(1)微波辐射计对温度廓线观测和反演精度较高。反演结果与探空实测数据的相关系数为0.977,平均偏差1.40℃,均方差0.74℃。在各个探测高度上两者保持了较好的一致性。微波辐射计对温度的反演结果总体良好,但对温度的细节变化,特别是逆温层的表现能力有待提高。

(2)微波辐射计对相对湿度廓线观测或反演能力较差。反演结果与探空实测数据的相关系数为0.153,平均偏差为-20.2%,均方差为27.5%,最大偏差超过65%。云层的分布对微波辐射计产生较大影响,特别是1500~2550m高度上受云底高度在1800m附近的大范围的层积云影响,微波辐射计对湿度廓线反演能力大幅下降,正、负偏差均存在且较大,平均偏差和均方差均大幅增加,甚至出现负相关,负相关系数达到-0.920,主要因素是较厚的云层以及丰富的云中水滴对微波辐射计的探测和湿度反演方法等有较大影响。

微波辐射计在穿云情况下比无云情况下湿度廓线反演准确度大幅下降,除了云层厚度、云滴谱分布等物理特性对微波辐射计探测影响因素以外,可能与该型微波辐射计湿度反演模型也存在一定关系,通过改进和优化反演模型,并将毫米波雷达、激光雷达等设备测量的云底高度和云厚度等信息运用于反演过程,可有效提高模型反演精度,改进有云或降水条件下微波辐射计的大气湿度廓线探测能力。

无人机探空实测温湿度廓线能获取微波辐射计上空垂直大气的真实状况,克服了传统的气球探空在水平方向上的漂移问题,有效减少高空气流对探空仪位移所产生的系统误差。由于本次对比观测在沿海地区阴天条件下开展,探空高度有限,没有覆盖该型号微波辐射计整个探测范围内的探测能力,因此有待不同天气条件下开展更多的对比观测和研究。

参考文献:

- [1] 鲍艳松,钱程,闵锦忠,等.利用地基微波辐射计资料反演0~10km大气温湿廓线试验研究[J].热带气象学报,2016,32(02):163-171.
- [2] 卢建平,黄建平,郭学良,等.探测大气温湿廓线的35

通道微波辐射计设计原理与特点[J].气象科技,2014,42(02):193-197.

- [3] 王周翔,王旗,于翠红,等.微波辐射计的应用及研究进展[J].现代农业科技,2017(09):223-224+226.
- [4] 赵金霞,范苏丹,朱晓晶.微波辐射计资料在大雾预报预警中的应用[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(03):31-35.
- [5] 李军霞,李培仁,晋立军,等.地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用[J].干旱气象,2017,35(05):767-775.
- [6] 许志丽,史金丽.基于微波辐射计对呼和浩特市一次冰雹天气过程的观测分析[J].内蒙古气象,2017(05):15-19.
- [7] 张秋晨,龚佃利,王俊,等.基于地基微波辐射计反演的济南地区水汽及云液态水特征[J].气象与环境学报,2017,33(05):35-43.
- [8] 李聪,姜有山,姜迪,等.一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J].气象,2017,43(09):1084-1094.
- [9] 史金丽.基于微波辐射计测量呼和浩特地区水汽特征的初步分析[J].内蒙古气象,2017(04):17-23.
- [10] 张文刚,徐桂荣,廖可文,等.地基微波辐射计探测精度的变化特征分析[J].暴雨灾害,2017,36(04):373-381.
- [11] 侯叶叶,刘红燕,鲍艳松.地基微波辐射计反演水汽密度廓线精度分析[J].气象科技,2016,44(05):702-709+721.
- [12] 卢会国,李国平,蒋娟萍.阳江国际探空试验的GPS、探空、微波辐射计水汽资料对比分析[J].气象科技,2014,42(01):158-163.
- [13] 李伟,王志文,谢庄等.高空探测资料气球漂移的计算方法[J].应用气象学报,2005,16(06):835-840.
- [14] 刘建忠,何晖,张蕾.不同时次地基微波辐射计反演产品评估[J].气象科技,2012,40(03):332-339.
- [15] 张文刚,徐桂荣,廖可文,等.降水对地基微波辐射计反演误差的影响[J].暴雨灾害,2013,32(01):70-76.
- [16] 姚作新,吕鸣,贺晓东,等.MP-3000A型地基微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究[J].沙漠与绿洲气象,2011,5(01):38-43.
- [17] 胡树贞,马舒庆,陶法.地基双波段测云系统及其对比实验.应用气象学报,2012,23(4):441-450.
- [18] 刘红燕.三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析.气象学报,2011,69(4):719-728.
- [19] 车云飞,马舒庆,杨玲,等.云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响[J].应用气象学报,2015,26(02):193-202.

基于塑性损伤模型的 UHTCC 构件有限元分析

周航凯, 张逸风, 王振宇*, 李庆华, 李政达

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘要:为了准确模拟超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)的非线性力学行为,本文基于混凝土塑性损伤本构模型,建立了UHTCC受压、受拉本构关系及损伤模型参数确定方法,采用该本构模型对UHTCC立方体试块受压、UHTCC薄板直接拉伸、UHTCC/混凝土复合梁受弯试验进行数值模拟;有限元计算得到的应力应变关系、位移荷载关系曲线和开裂形态与试验结果吻合,验证了本文UHTCC塑性损伤本构模型的合理性;数值模拟展示了UHTCC和混凝土不同的损伤和开裂发展过程,结合试验结果说明了UHTCC使裂缝无害化分散、控制裂缝扩展的特点。

关键词:UHTCC; 塑性损伤本构; 复合梁; 受弯试验; 裂缝

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)01-0054-06

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.009

Finite Element Analysis of UHTCC Members Based on Plastic Damage Model

Zhou Hangkai, Zhang Yifeng, Wang Zhenyu*, Li Qinghua, Li Zhengda

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Based on the theory of Concrete Damaged Plasticity model, the compressive and tensile stress-strain relationship of UHTCC was determined and other parameters were reasonably selected in order to analyze the nonlinear mechanical properties of UHTCC. The model was adopted to simulate the mechanical properties of UHTCC specimens under uniaxial compression and tensile load. The model of UHTCC/concrete composite beam was established to analyze the flexural properties. The numerical results, including stress-strain relationship, load-span deflection relationship and failure modes were in good agreement with those obtained from tests and literature, which verified the Concrete Damaged Plasticity model of UHTCC was reliable. The simulation results of composite beam showed the damage and crack development of UHTCC and concrete. According to the simulation results combining with test result, the damage evolution indicated that UHTCC have the ability of dispersing crack into harmlessly ones and restraining the growth of cracks under flexural loading.

Keywords: UHTCC; plastic damage; composite beam; flexural test; crack

混凝土材料抗拉强度低、韧性差,传统的混凝土结构开裂后耐久性和寿命显著降低。为了克服传统混凝土抗拉性能弱的不足,1992年 Victor Li^[1]基于细观力学和断裂力学提出了一种具有拉伸应变硬化

性能和多缝开裂特征的纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)。此后,徐世烺^[2]提出了一种极限拉伸应变可达3%以上且具有良好的耐久性的超高韧性水泥基复合材料,简称

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助(No.51579221, No.51779224)。

* 通信作者: 王振宇(1976-), 博士, 教授, 从事水工结构研究, E-mail: wzyu@zju.edu.cn。

UHTCC。由于 UHTCC 优异的力学性能,将其作为加固材料应用于混凝土结构中,将会使原有构件的承载力、抗裂性能和耐久性得到显著提升。

为了评价加固后结构的力学性能,采用有限元计算是一种行之有效的方法。在对混凝土结构进行计算分析时,材料本构是决定模拟结果准确性的关键。传统混凝土常用的非线性本构主要有非线性弹性模型、弹塑性模型、断裂力学模型、损伤力学模型等。混凝土塑性损伤模型(简称 CDP 模型)引入损伤因子,考虑刚度折减来表示材料的非弹性行为,能够较为准确地模拟混凝土及其他脆性材料在循环荷载下的损伤退化^[3]。近年来,国内外相继开展有关数值模拟的研究。聂建国^[4]等采用混凝土塑性损伤模型和弥散开裂模型分别对混凝土构件进行数值模拟,指出了分析实际结构时不同混凝土材料本构模型的适用性。Krahl^[5]等通过循环加载试验确定 UHPC 受拉、受压的损伤演化,建立了 UHPC 的塑性损伤本构关系,并通过试验和损伤对比验证了该本构关系。李艳^[6]等运用塑性损伤模型建立了型钢 HPFRCC 剪力墙的非线性有限元模型,通过数值模拟方法分析了型钢 HPFRCC 剪力墙和高性能混凝土剪力墙的变形能力差异。A Tambusay^[7]等采用 CDP 本构模拟 ECC 材料性能,其受压本构参照普通混凝土的本构确定方法,受拉本构采用三折线形式定义,建立以 ECC 为节点连接材料的板-柱模型并分析了节点连接性能。Gencturk^[8]等提出了循环荷载下 ECC 的本构模型,并采用该本构模型分析了 ECC 框架柱在循环荷载下的变形特征。徐世焯、陈超等^[9]采用 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型对 UHTCC 冲击压缩试验和层裂试验进行数值模拟,分析了该材料的动态力学行为,并开展试验验证了本构模型的有效性。

由于 UHTCC 与传统混凝土的受力性能不同,在使用塑性损伤模型时,需要对本构模型和部分参数加以修正,目前运用塑性损伤模型模拟 UHTCC 结构的研究相对较少,仍需要进一步地开展试验验证和计算研究。本文开展 UHTCC 受压及受弯试件试验,并确定 UHTCC 的塑性损伤本构模型参数,数值计算和试验结果进行对比,以验证该本构模型用于 UHTCC 结构分析的合理性。

1 试验方案

开展了 UHTCC 立方体试块抗压试验,立方体

试块的尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,采用万能试验机进行抗压加载。UHTCC 拉伸试验数据依据参考文献[10],UHTCC 薄板试件尺寸为 350 mm×50 mm×15 mm,试件直接拉伸试验得到的材料初裂强度为 2.35 MPa,初裂应变为 0.016%,极限抗拉强度 2.75 MPa,极限拉伸应变为 2.6%。

混凝土梁的长 2200 mm,宽 500 mm,高 400 mm,混凝土的设计强度标号为 C25。在混凝土梁高的中部配有单层 $\Phi 20@100$ 双向钢筋,钢筋的型号为 HRB335,根据钢筋抗拉试验测得钢筋的屈服强度为 460 MPa,弹性模量为 200 GPa。在混凝土梁的受拉区浇筑厚度为 50 mm 的 UHTCC,形成 UHTCC/混凝土复合梁。

对 UHTCC/混凝土复合梁采用四点弯曲加载,加载速率为 0.5 mm/min,支座间距离为 2000 mm,加载点距离支座距离 600 mm,采用 DIC 技术记录复合梁在加载中开裂过程,加载示意如图 1 所示。

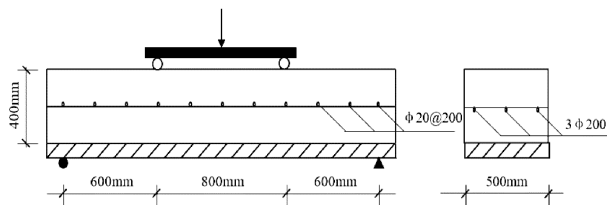


图 1 复合梁尺寸及加载示意图

Fig.1 Size of composite beam and loading schematic diagram

2 材料本构模型

混凝土塑性损伤模型 (concrete damaged plasticity, CDP) 最早由 Lubliner^[11]等提出,并由 Lee 和 Fenves 等^[12]进行了改进和发展,根据弹性损伤、拉压塑性理论发展而来,可以较为准确地反映材料的损伤刚度变化,适合用于模拟混凝土、砂浆等脆性材料在循环荷载、动力荷载、静荷载下的力学行为。

ABAQUS 提供的混凝土塑性损伤模型考虑了混凝土材料拉、压作用下的力学性能区别,并且引入损伤因子这一参数,通过损伤因子反映材料卸载后刚度退化的特征^[3]。混凝土单轴拉伸、压缩的加载、卸载响应图如图 2、3 所示。

混凝土单轴加载下应力应变和损伤因子的关系如式(1)所示:

$$\begin{cases} \sigma_c = (1-d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \\ \sigma_t = (1-d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \end{cases} \quad (1)$$

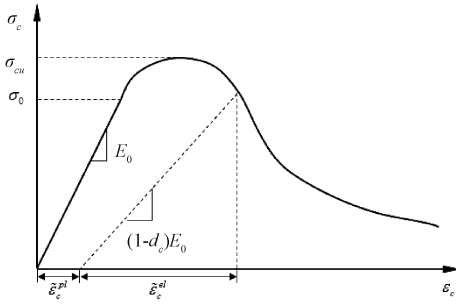


图2 混凝土单轴受压的应力应变关系
Fig.2 Stress-strain curve of concrete under uniaxial compression

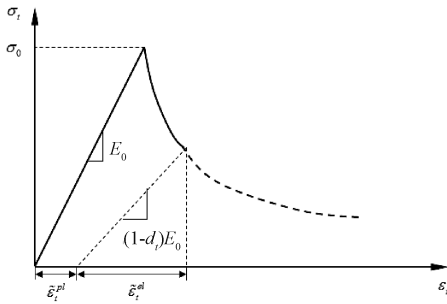


图3 混凝土单轴拉伸的应力应变关系
Fig.3 Stress-strain curve of concrete under uniaxial tension

其中 d_c 是材料的抗压损伤因子, d_t 是材料的抗拉损伤因子, $\bar{\epsilon}_c^{pl}$ 和 $\bar{\epsilon}_t^{pl}$ 分别为材料的等效塑性压应变和等效塑性拉应变。

在单轴循环荷载下,荷载改变方向后,弹性刚度将得到部分恢复。在混凝土塑性损伤模型中,假定弹性模量的缩减按照一个标量退化 d 来表示,称 d 为损伤因子:

$$E_D = (1-d) E_0 \quad (2)$$

其中, E_0 为初始未损伤的材料弹性模量, E_D 为材料损伤后弹性模量。

损伤因子的确定方法采用 Sidiroff 的能量等价原理,根据该能量等价原理,应力作用在受损材料上时,产生的弹性余能与作用在无损材料产生的弹性余能在形式上相同^[13]。

无损伤材料的弹性余能:

$$W_0^e = \frac{\sigma^2}{2E_0} \quad (3)$$

有损伤材料的弹性余能:

$$W_D^e = \frac{\bar{\sigma}^2}{2E_0} = \frac{\sigma^2}{2E_D} \quad (4)$$

其中, $\bar{\sigma}$ 为有效应力,联立式(1)(3)(4)可得:

$$D_k = 1 - \sqrt{1-d_k} \quad (k = c, t) \quad (5)$$

将式(5)代入 UHTCC 的应力应变曲线方程可以得到:

$$D_k = 0 \quad (k = c, t) \quad x \leq 1 \quad (6)$$

$$D_k = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_k}{E_0 \epsilon_k}} \quad (k = c, t) \quad x \geq 1 \quad (7)$$

其中, D_k 为塑性损伤模型中的损伤因子参数。

在本文分析中,混凝土的单轴受压、受拉应变关系采用清华大学的过-张模型进行定义^[14],采用能量等效原理确定损伤因子。混凝土的受压、受拉应力应变关系及损伤因子如图4、5所示。

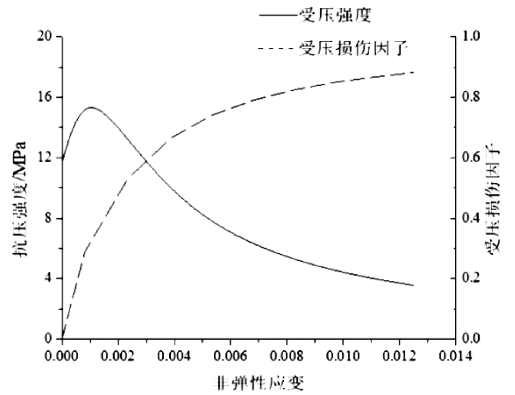


图4 混凝土单轴受压非弹性应变及损伤因子
Fig.4 Stress-inelastic strain relationship and damage parameter of concrete under uniaxial compression

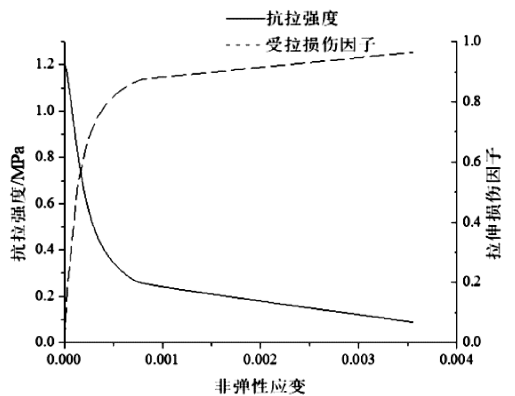


图5 混凝土单轴受拉非弹性应变及损伤因子
Fig.5 Stress-inelastic strain relationship and damage parameter of concrete under uniaxial tension

UHTCC 的单轴受压应力应变关系通过抗压试验获得,单轴受拉应力应变关系采用文献建议的双直线模型^[15],开裂应力应变和极限应力应变取值为参考文献[10]中拉伸试验结果值,采用能量等效原理确定损伤因子。UHTCC 的受压、受拉应力应变关系及损伤因子如图6、7所示。

参考相关文献[16,17],UHTCC 和混凝土的塑

表 1 混凝土和 UHTCC 材料参数取值

Table 1 Parameters of concrete and UHTCC

	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	膨胀角	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	粘性系数
UHTCC	1700	15	0.18	30	0.1	1.16	0.6667	0.0005
混凝土	2400	28	0.2	30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

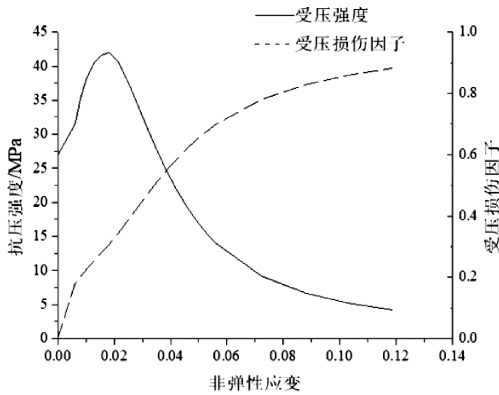


图 6 UHTCC 单轴受压非线性应变及损伤因子

Fig.6 Stress-inelastic strain relationship and damage parameter of UHTCC under uniaxial compression

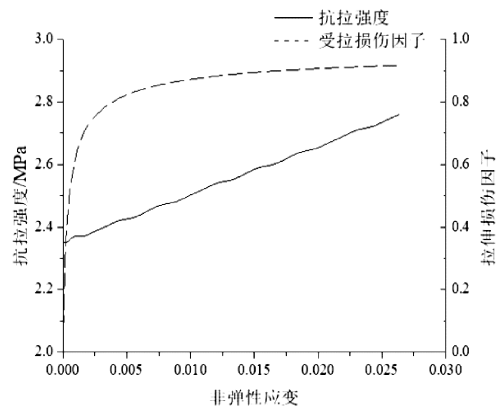


图 7 UHTCC 单轴受拉非线性应变及损伤因子

Fig.7 Stress-inelastic strain relationship and damage parameter of UHTCC under uniaxial tension

性损伤模型的其他参数如表 1 所示,包括材料的膨胀角、偏心率、双轴抗压强度和单轴抗压强度之比 f_{b0}/f_{c0} ,不变量应力比 K ,粘性系数等。

3 有限元计算与结果分析

3.1 UHTCC 试块受压模拟

建立 UHTCC 立方体试块受压的二维模型,单元类型为 CPS4R,采用位移控制加载方式。通过有限元计算得到的 UHTCC 试块受压过程的应力应变曲线如图 8 所示,图 9 为有限元计算的压缩应变为 0.02 时和 0.04 时,试块的损伤分布。有限元模拟

结果表明,在弹性阶段内,试块的变形随荷载呈线性增长,在达到材料屈服荷载后,混凝土受压损伤首先在试块角部附近出现,并沿一定方向向中部发展。图 10 为压缩试验过程中试块形态。在受压试验过程中,首先在靠近侧面处出现纵向裂缝,且在试块一半高度处的开裂变形较大,随着变形继续增大,试块表面裂缝宽度增大,裂缝逐渐延伸至角部,由于纤维的约束作用,试块在达到峰值荷载后仍较完整,未发生块体剥落现象。

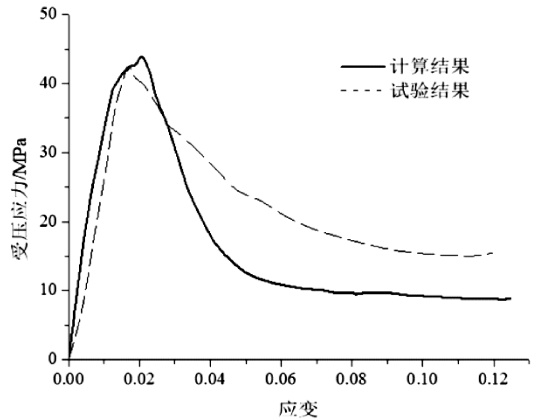


图 8 UHTCC 试块压应力应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve of UHTCC block for compression test

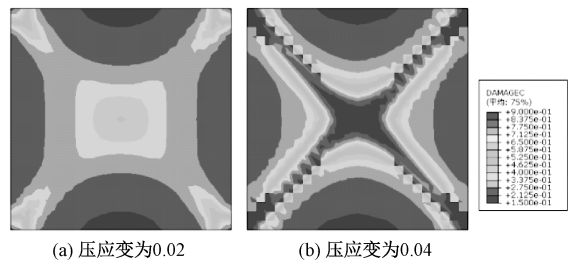


图 9 UHTCC 试块受压损伤分布

Fig.9 The compressive damage distribution of UHTCC block

3.2 UHTCC 试件受拉模拟

建立 UHTCC 薄板试件受拉的二维模型,单元类型为 CPS4R,采用位移控制加载方式。通过有限元计算得到的 UHTCC 薄板试件直接拉伸的应力应变曲线如图 11 所示,模拟值与试验值较吻合。根据数值模拟结果可知,在弹性阶段内,试件未出现明显的损伤,随着试件变形的增大,UHTCC 材料达到开裂应变,试件开始出现损伤,且损伤值逐渐增大。图



图 10 UHTCC 试块受压破坏模式

Fig.10 The cracking mode of UHTCC block in compression

12 为有限元计算的拉伸应变为 0.6% 和 1.4% 时,试件的受拉损伤分布。从受拉试件的损伤分布可以看出,UHTCC 开裂后损伤分布较为均匀,这与试验中 UHTCC 多缝开裂且裂缝分布较为均匀的现象吻合。

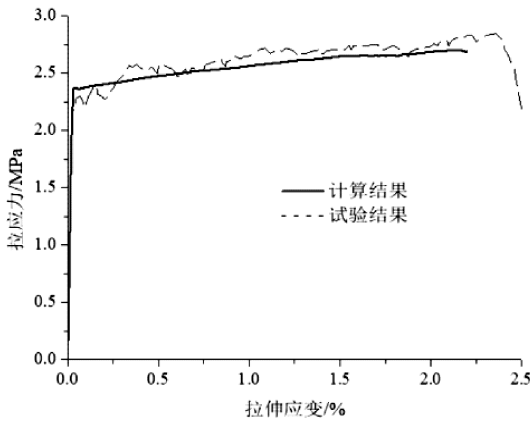
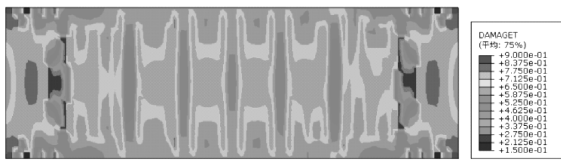
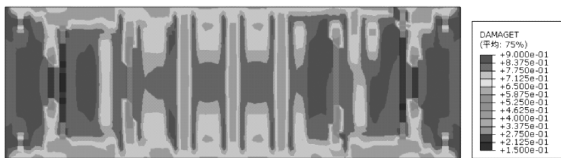


图 11 UHTCC 薄板拉伸应力应变曲线

Fig.11 Stress-strain curve of UHTCC specimen for tensile test



(a) 拉应变为 0.6%



(b) 拉应变为 1.4%

图 12 UHTCC 薄板受拉损伤分布

Fig.12 The tensile damage distribution of UHTCC specimen

3.3 复合梁受弯试验模拟

采用上述混凝土、UHTCC 的塑性损伤本构模型分别模拟复合梁的混凝土部分和 UHTCC 部分,混凝土和 UHTCC 的单元类型为 C3D8R。梁内置钢筋

采用理想弹塑性模型进行模拟,钢筋单元类型为 T3D2 桁架单元,钢筋和混凝土的相互作用关系定义为内置区域,不考虑两者之间的粘结滑移作用。采用简支梁的约束条件作为模型的边界条件,对模型施加位移控制荷载。

通过有限元计算得到 UHTCC/混凝土复合梁的跨中位移—荷载曲线如图 13 所示。曲线可分为两阶段,第一阶段为弹性阶段,在该阶段内 UHTCC 和混凝土均处于弹性阶段,位移荷载呈直线上升,达到开裂阶段后,荷载发生略微下降随即进入塑性阶段,混凝土、UHTCC 和钢筋开始进入屈服,曲线上升的斜率逐渐变小,直至达到极限荷载。表 2 为有限元计算结果与试验结果的对比,将混凝土出现损伤时的荷载视为复合梁的开裂荷载,塑性阶段的荷载最大值作为极限荷载。对比结果表明,复合梁承载力计算结果和试验结果的偏差在 10% 以内。

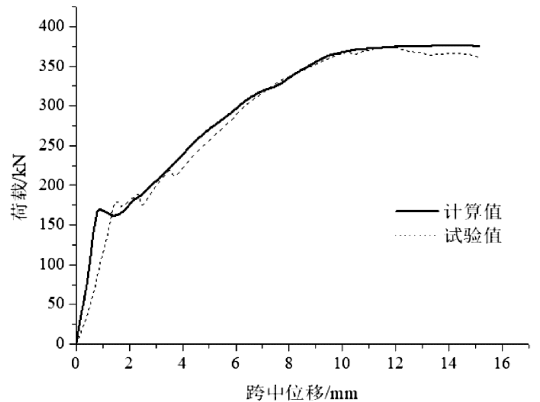


图 13 受弯复合梁位移荷载曲线

Fig.13 Load-displacement curves of composite beams under flexural load

表 2 有限元计算结果与试验结果对比

Table 2 Comparison of experimental and simulated results

	试验结果	计算结果
开裂荷载/kN	178.94	170.69
开裂位移/mm	1.38	0.91
极限荷载/kN	364.1	378.1
极限位移/mm	13.76	13.56

图 14 是荷载 P 为 170、196、296、367 kN 时复合梁的损伤图。根据计算结果,在复合梁达到开裂荷载之前,此时混凝土和 UHTCC 的应变均未达到各自的开裂应变,复合梁未出现损伤;当荷载达到 170 kN 时,在纯弯段混凝土的底部首先出现受拉损伤区,此时混凝土的应变达到其开裂应变 0.004%,而 UHTCC 尚未达到其开裂应变 0.016%,随着荷载继续增大,在纯弯段的 UHTCC 层也开始出现损伤。

当荷载达到 196 kN 时,纯弯段混凝土的损伤已从受拉区底部沿竖向扩展至约 0.75 倍梁高处,且损伤较为集中,在弯剪段有斜向损伤出现,从中部高度位置向加载处发展;此时 UHTCC 的损伤部位分布在纯弯段,未出现明显的损伤集中现象,纯弯段 UHTCC 的应变在 0.2%~0.4% 之间,处于应变硬化状态。当荷载达到 367 kN 时,混凝土损伤区域的高度基本维持不变,但不断有新的损伤从底部出现并沿竖向延伸,且由于在中部高度位置设置有双向钢筋,混凝土损伤区域沿钢筋逐渐向两边延伸;UHTCC 的损伤区域随荷载增大沿水平向扩展,且损伤值也逐渐增大,UHTCC 的应变在 0.8%~1.1% 之间,仍未超过 UHTCC 的极限拉伸应变。图 15 为采用 DIC 技术记录的当荷载为 367 kN 时复合梁局部的开裂情况,不同的颜色代表了裂缝宽度的大小。从图中可看出,混凝土裂缝的高度与模拟的损伤高度较为接近,UHTCC 层中的裂缝宽度小于混凝土中的裂缝宽度,说明当混凝土开裂后,UHTCC 层能够将混凝土的宽裂缝调控为无害的细小裂缝,这也与数值模拟结果较为一致。

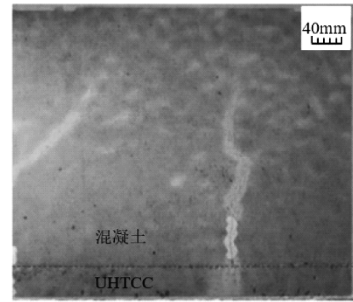


图 15 DIC 记录的复合梁开裂情况

Fig.15 The crack of composite beam recorded by DIC method

力应变关系,确定了 UHTCC 塑性损伤本构模型参数。

(2)采用塑性损伤本构模拟 UHTCC 试块受压和 UHTCC 薄板直接拉伸试验,模拟结果与试验结果较为吻合,验证了该本构能够较为准确地描述 UHTCC 的非线性力学性能。

(3)计算模拟得到的复合梁荷载-跨中挠度曲线与试验结果较为吻合,说明采用塑性损伤模型能够较为准确地计算 UHTCC/混凝土复合结构的承载性能,准确地预测了构件的开裂荷载。通过模拟得到了 UHTCC/混凝土复合梁在受弯作用下的损伤发展过程,UHTCC 可以将混凝土中的宽裂缝调控为细小裂缝,从而提高复合梁的抗裂能力。

参考文献:

[1] Victor C. Li. From micromechanics to structural engineering the design of cementitious composites for civil engineering application [J]. JSCE Journal of Mechanics and Earthquake Engineering, 1993, 10 (2) : 37-48

[2] 徐世焯,李贺东.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45-60

[3] ABAQUS Inc. Abaqus Analysis User ' s Manual [M].2010

[4] 聂建国,王宇航.ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J].工程力学,2013,30(4):59-67

[5] Pablo A K, Ricardo C, Mounir K E D. Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation [J]. Engineering Structures, 2018,170:63-77 [6] 刘泽军,孟海平,李艳.型钢高性能纤维增强水泥基复合材料剪力墙非线性有限元分析[J].工业建筑,2015,45(8):175-179

(下转第 80 页)

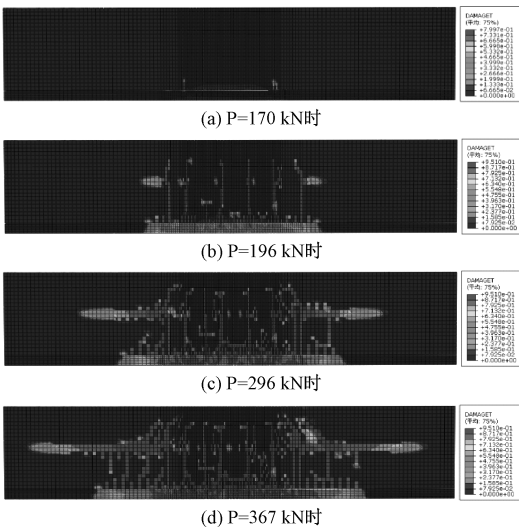


图 14 不同荷载下复合梁的损伤分布图

Fig.14 The damage distribution of composite beam under different load

4 结论

为了掌握 UHTCC 材料的非线性力学行为,开展 UHTCC 受压以及 UHTCC/混凝土复合梁受弯试验,并进行数值模拟方法研究,得到以下结论:

(1)基于混凝土塑性损伤模型的基本理论,并根据试验和相关文献确定了 UHTCC 受压、受拉应

基于神经网络的人体动态行为智能识别方法

贾双成, 杨凤萍

(1. 阿里巴巴网络技术有限公司, 北京 100102; 2. 江南大学 物联网学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:针对传统方法的人体动态行为智能识别方法存在识别率较低等问题, 提出基于神经网络的人体动态行为智能识别方法。对人体动态行为数据预处理, 并构建人工神经网络模型, 实现人工神经网络训练以及特征提取; 将视频的光流图像放置于卷积神经网络模型中, 获取图像的时域特征; 融合人工神经网络特征与时域特征, 并将其放入 SVM 中进行类别划分, 实现基于神经网络的人体动态行为智能识别。仿真实验研究结果表明, 所提方法能够有效提升人体动态行为识别准确率, 并且整个方法的综合性能较好。

关键词:神经网络; 人体动态行为; 智能识别方法

中图分类号: TP183

文献标识码: 文献标识: A

文章编号: 1001-7119(2020)01-0060-04

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.010

Human Body Dynamic Behavior Intelligent Recognition Method Based on Neural Network

Jia Shuangcheng, Yang Fengping

(1. Alibaba Network Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China;

2. College of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the problems of low recognition rate of human body dynamic behavior intelligent recognition method based on traditional methods, a neural network based intelligent recognition method for human body dynamic behavior is proposed. Preprocessing human dynamic behavior data and constructing artificial neural network model to realize artificial neural network training and feature extraction. The optical flow image of the video is placed in a convolutional neural network model to acquire the temporal characteristics of the image. Combining the characteristics of artificial neural network and time domain features, and putting them into SVM for class division, realize intelligent identification of human body dynamic behavior based on neural network. The simulation experiment results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of human body dynamic behavior recognition, and the overall performance of the whole method is better.

Keywords: neural network; human body dynamic behavior; intelligent recognition method

针对人体姿态信息的识别以及处理是一种适用于多个不同领域不可缺少的测试技术。在人机交互的领域中, 能够根据确定人体的头部、手部、身体等不同的姿态, 将以上的姿态实时识别出来, 实现人和

虚拟环境之间的交互。在体育训练领域中, 对人体运动的姿态进行识别, 能够有效提升运动员的测试成绩^[1]; 在军事领域中, 通过人体姿态识别系统能够实现军人的体能考核, 对军人的身体素质进行

收稿日期: 2019-06-14

作者简介: 贾双成(1980-), 男, 山东莱芜人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 数据挖掘和人工智能。

合理的测试以及评判,从而提升整个考核过程的权威性以及公正性;在电子医疗领域中,能够对病人的状态进行实时进攻以及分析^[2,3],针对人体的不同姿态及时作出相应的处理,提升整个医疗团队的工作效率。

随着计算机视觉领域的不断提升,国内的研究机构以及团队在人体行为识别方法活了较为显著的研究成果,但是人体行为视频数据存在维度较高、类别较多等特性,它给识别以及检测任务都带来了较大的挑战以及困难。在实际应用的过程中现有的人体行为识别技术无法满足现阶段的发展需求,为了更好的满足现阶段的社会发展需求,提出基于神经网络的人体动态行为智能识别方法。最终的研究结果表明,所提方法能够有效提升识别率,降低识别时间。

1 方法

1.1 人体行为数据预处理

人体动态行为数据的采集是通过微软 Kinect 相机以及惯性传感器进行数据采集,整个数据采集的过程成本较低,且操作过程十分方便。

在上述的数据集中选用部分有效数据样本进行统一标准化处理,形成最终的目标数据集。

以上详细描述了数据的采集过程,以下给出在 t 时刻加速度传感器的传感相对位置坐标 ($acc - x, acc - y, acc - z$), 则合成加速度的计算式为:

$$acc = \sqrt{acc - x^2 + acc - y^2 + acc - z^2} \quad (1)$$

格拉姆角场 (GAF) 是一种较为常用的数据预处理方法,这项技术被广泛应用于时序图像转化为数据的过程,以下给出具体的转换过程:

$$\begin{cases} x_{-1} = \frac{(x_i - \max(X)) + (x_i - \min X)}{\max(X) - \min X} \\ x_0 = \frac{x_i - \min X}{\max(X) - \min X} \end{cases} \quad (2)$$

以下继续形成的值为角余弦,设定时间戳的编码为半径,在极坐标中代表重新缩放后的时间序列,具体的计算式如下:

$$\begin{cases} \varphi = \arccos x_{-1}, -1 \leq (\tilde{x}_i) \leq 1, \tilde{x}_i \in X \\ r = \frac{t_i}{N}, t_i \in N \end{cases} \quad (3)$$

上式中, t_i 代表 x_i 相对应的的时间戳; N 代表归

一化因子; φ 代表经过编码后的角余弦; r 代表编码后的半径长度。

以下具体给出各个时间的相关性计算式:

$$GASF = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_1 + \varphi_n) \\ \cos(\varphi_2 + \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_2 + \varphi_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\varphi_n + \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_n + \varphi_n) \end{pmatrix} = X' \cdot X - \sqrt{I - X^2}' \cdot \sqrt{I - X^2} \quad (4)$$

$$GADF = \begin{pmatrix} \sin(\varphi_1 - \varphi_1) & \cdots & \sin(\varphi_1 - \varphi_n) \\ \sin(\varphi_2 - \varphi_1) & \cdots & \sin(\varphi_2 - \varphi_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\varphi_n - \varphi_1) & \cdots & \sin(\varphi_n - \varphi_n) \end{pmatrix} = X \cdot \sqrt{I - X^2}' \cdot X' \cdot \sqrt{I - X^2} \quad (5)$$

设定 x, y 代表极坐标中 2 个不同的时间点, x, y 时间序列之间的一维度量空间的计算式如下:

$$GASF: \langle x, y \rangle = x \cdot y - \sqrt{1 - x^2} \sqrt{1 - y^2} \quad (6)$$

$$GADF: \langle x, y \rangle = y \cdot \sqrt{1 - x^2} - x \cdot \sqrt{1 - y^2} \quad (7)$$

其中:

$$GASF = \begin{pmatrix} \langle \tilde{x}_1, \tilde{x}_1 \rangle & \cdots & \langle \tilde{x}_1, \tilde{x}_n \rangle \\ \langle \tilde{x}_2, \tilde{x}_1 \rangle & \cdots & \langle \tilde{x}_2, \tilde{x}_n \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle \tilde{x}_n, \tilde{x}_1 \rangle & \cdots & \langle \tilde{x}_n, \tilde{x}_n \rangle \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$GADF = \begin{pmatrix} \langle \hat{x}_1, \hat{x}_1 \rangle & \cdots & \langle \hat{x}_1, \hat{x}_n \rangle \\ \langle \hat{x}_2, \hat{x}_1 \rangle & \cdots & \langle \hat{x}_2, \hat{x}_n \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle \hat{x}_n, \hat{x}_1 \rangle & \cdots & \langle \hat{x}_n, \hat{x}_n \rangle \end{pmatrix} \quad (9)$$

由此,获得处理后的人体行为数据。

2 人工神经网络的组建

人工神经网络是自然神经网络的转变,也是对自然神经网络的抽象。自然神经网络的突触抽象就是人工神经网络的输入,将自然神经网络所接收的不同信号强度抽象为不同的权重^[4],自然神经网络依赖于任意门限进行输出的操作现象为一个函数,主要应用于人工神经元的输出。人工神经网络 ANN 将以上的人工神经元融合在一起用于人体行为的信息处理,利用下图给出 ANN 的具体组成过程:

图 1 中, x_1, x_2, \dots, x_n 代表输入数据,中间的圆就为神经元; w_1, w_2, \dots, w_n 代表输入的权重值; b 代

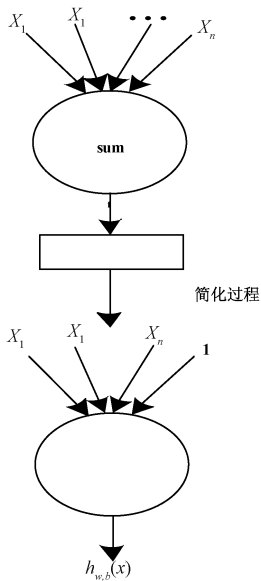


图1 人工神经网络结构

Fig.1 Artificial neural network structure

表偏置; f 代表激活函数, 一般情况下为非线性函数。 $h_{w,b}(x)$ 代表神经元的输出值^[5-7], 通常通过 f 计算获取。利用多个神经元组建人工神经网络, 具体如图2所示:

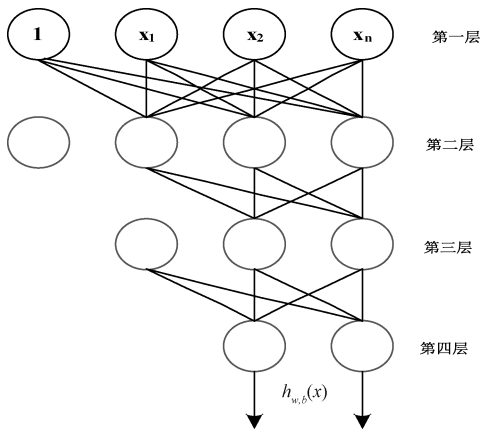


图2 多层神经网络

Fig.2 Multilayer neural network

图2为多层神经网络, 其中第一层代表输入层; 第二层、第三层、第四层全部是用来计算 $h_{w,b}(x)$, 其中网络中的每一层输入都代表上一层的输出。神经网络一般情况下是由输入层、隐藏层、输出等组成, 输入层和输出层只有一个, 隐藏层能够有一到多个, 隐藏层的设计以及各层之间参数的设计是整个网络设计的重点。在网络层数较少时, 获得的就是浅层神经网络; 在网络层数较多时, 能够得到就是深层神经网络。在实际的应用过程中, 通过大量的数据对数学模型进行训练, 再通过以上的数学模型来获取

最新的样本。

在权值共享的状态下, 能够组建人工神经网络模型:

$$\sigma = \left(b + \sum_{l=0}^4 \sum_{m=0}^4 w_{l,m} a_{j+l,k+m} \right) \quad (10)$$

上式中, a 代表不同图像的输入区域; w 代表权重取值。

3 基于神经网络的人体动态行为智能识别

本文选用了 VGG16 网络模型^[8]。该模型主要具有以下几方面特点: (1) 尺寸核的尺寸较小; (2) 下采样窗口较小等。

在网络经过训练以后, 采用上述的人工神经网络模型进行特征提取以及进一步分析, 具体过程如下:

(1) 为了得到更加精准的网络神经特征, 需要将关于人体动态行为的视频进行划分, 将其划分成多个不同的视频片段, 并且不同的视频片段包含不同的重叠帧通过设定的标注组建标签文件, 设定具体的文件格式、存储名称等。

(2) 为了准确识别各个视频中的不同特征, 需要构建相应的标签文件, 将不同形式的文件放置在相同的视频片段中, 并且设定文件进行存储的路径以及文件的具体名称。

(3) 通过人工神经网络层分别得到不同形式的标签文件, 将视频通过相应的标签文件内容发送至数据库中, 计算上述模型的权值并且提取视频中相应的人体动态行为特征。

(4) 将不同视频段的特征进行平均后, 能够获取视频描述符, 方便后续的特征分类。

通过以上步骤, 能够得到网络视频描述符, 将描述符与其它特征相结合用于人体动态行为分类。

将时域人工神经网络提取 CNN 特征的过程表示为函数 $get-flow(\cdot)$, 将人体动态行为识别的视频样本 $input = \{video_n | n \in [1, 2, \dots, N]\}$ 设定为函数 $get-flow(\cdot)$ 的输入, 利用 $get-flow(\cdot)$ 能够获取 N 个 $m \times k$ 维的特征向量, 将其利用 $f_{m \times k}$ 表示, 则有:

$$f_{m \times k} = get-flow(video_n) \quad (11)$$

如果设定视频的总帧数为 Num , 则各个视频提取的特征数 m , 具体的计算式如下:

$$m_n = (Num - 16) / 16 + 1 \quad (12)$$

以下给出所提取的时域神经网络特征大小:

$$W = \sum_{n=1}^{13320} m_n \times 4096 \quad (13)$$

上述的网络特征代表连续多帧视频图像提取的特征,将 VGG 网络特征设定为每 10 幅图形提取一个特征,则有:

$$\begin{cases} w_1 + w_2 = 1 \\ \frac{w_1}{w_2} = \frac{16}{10} \end{cases} \quad (14)$$

针对不同模型形成的融合特征进行分类,选用 SVM 分类方法,以下将需要进行训练的数据以及需要测试的数据通过 SVM 描述文件进行预处理,形成相应的 SVM 描述文件。

SVM 训练主要是利用组合多个分类器来完成多分类器的组建,以下选用一对一的方法组建分类器。

训练 SVM 分类器,将测试数据放入经过训练的分类器中,分别采用不同的分类器针对不同类型的测试数据进行分类。将分类结果与事先标记的标签进行比较,假设两者类别一致,则说明分类结果正确;反之,则表明分类结果错误,以下具体给出分类准确率的计算式:

$$Accuracy = \frac{correctly \cdot predicted \cdot date}{total \cdot testing \cdot data} \quad (15)$$

综上,完成了基于神经网络的人体动态行为智能识别。

4 仿真实验

为了验证所提基于神经网络的人体动态行为智能识别方法的综合有效性,需要进行仿真实验测试。实验选用 6 输入 6 输出以及函数是利用 newrbe() 所组建的神经网络。设定隐层神经元的数量为 120,输出节点的数量为 2 个。以下分别针对所采集到的走、跑、跳等多个样本进行训练,获取整体的训练误差的仿真实验图:

通过分析上述可知,通过不断的训练促使样本的取值逐渐接近目标值,由此可见所提方法的整体误差已经达到所设定的标准,充分表明所提方法的识别率有了明显的上升。

为了进一步验证所方法的优越性,以下对比不同识别方法识别不同人体动态行为所用的时间,具体的对比结果如表 1 所示。

分析上表可知,相比其它 2 种方法,所提方法

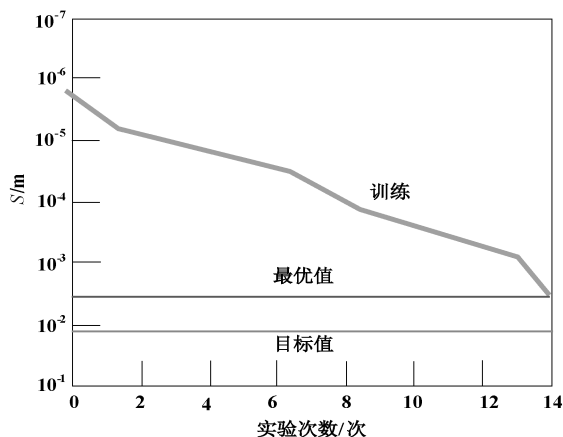


图 3 整体误差图

Fig.3 Overall error map

表 1 不同人体动态行为的识别时间

Table 1 Method for different human dynamic behaviors

本文方法		文献[3]		文献[4]	
不同人体动态行为	识别时间/ms	不同人体动态行为	识别时间/ms	不同人体动态行为	识别时间/ms
走路	0.14	走路	0.25	走路	0.27
跑步	0.15	跑步	0.36	跑步	0.25
跳高	0.12	跳高	0.24	跳高	0.26
上楼梯	0.16	上楼梯	0.27	上楼梯	0.30
下楼梯	0.10	下楼梯	0.30	下楼梯	0.34

能够更快的识别不同的人体动态行为。

参考文献:

- [1] 朱煜, 赵江坤, 王逸宁, 等. 基于深度学习的人体行为识别算法综述[J]. 自动化学报, 2016, 42(6):848-857.
- [2] 张沛男, 郑坚, 曾泽斌, 等. 基于神经网络的动态规划检测前跟踪算法[J]. 现代雷达, 2017, 39(11):34-38.
- [3] 黄斌, 卢金金, 王建华, 等. 基于深度卷积神经网络的物体识别算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(12):3333-3340.
- [4] 马浚诚, 杜克明, 郑飞翔, 等. 基于卷积神经网络的温室黄瓜病害识别系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12):186-192.
- [5] 陈波, 余秋婷, 陈铁明. 基于传感器人体行为识别深度学习模型的研究[J]. 浙江工业大学学报, 2018, v.46;No.194(4):25-31.
- [6] 刘智, 黄江涛, 冯欣. 构建多尺度深度卷积神经网络行为识别模型[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3):799-805.
- [7] 张玉燕, 梅雪, 成立, 等. 基于隐动态条件神经域的在线行为识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(6):1632-1635.
- [8] 许全盛, 李世明, 季淑梅. 基于表面肌电信号的膝关节动态力矩的 BP 神经网络估计[J]. 中国体育科技, 2018, 54(1):105-114.

钻杆运动轨迹测量

沈嘉彬,王金怡,叶开,谢奇勋,李青*

(中国计量大学 机电工程学院,杭州 310018)

摘要:我国对矿产资源的需求量日益增加,而煤矿等矿产储量却趋于枯竭,使开采深度越来越深,开采难度越来越大。而钻杆深入地下后,其三维姿态便不可知,前进方向更是不能确定,这给矿山开采带来了巨大的困难与危险。本文以钻杆为研究对象,开发了一套钻杆运动轨迹测量系统。利用三维姿态传感器获取钻杆钻入地下后的姿态信息,并由无线模块发送至计算机处理,可实时显示钻杆三维姿态与运动轨迹,结合数据库存储,为矿山钻探施工提供了便利。

关键词:三维姿态;运动轨迹;矿山钻探

中图分类号:TP368

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0064-06

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.011

Trajectory Measurement of Drill Pipe

Shen Jiabin, Wang Jinyi, Ye Kai, Xie Qixun, Li Qing*

(Institute of mechanical and electrical engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: China's demand for mineral resources is increasing, while the reserves of minerals such as coal mines tend to be exhausted, making the mining deeper and more difficult. When the drill pipe goes deep into the ground, its three-dimensional attitude is unknown, and the direction of its advance is uncertain, which brings great difficulties and dangers to the mining. This article takes the drill pipe as the research object, developed a set of drill pipe motion trajectory measurement system. The three-dimensional attitude sensor is used to obtain the posture information of the drill pipe after being drilled into the ground, and is sent by the wireless module to the computer for processing, it can display the three-dimensional attitude and movement track of the drill pipe in real time, and combines with database to provide convenience for mine drilling construction.

Keywords: three-dimensional attitude; motion trajectory; mine drilling

矿产开采行业是我国国民经济的重要组成部分,我国矿产产量处于世界前列,然而,我国钻探设备信息化水平还不够高,钻探工作量计算和钻探轨迹的测量方式十分原始,给井下安全埋下了重大安全隐患,造成了井下安全生产事故频发。因此,需要对矿山钻探技术进行信息化升级,通过可视化的方

式提高矿井钻探精确度,从而减少井下安全事故发生率,保证矿井财产与工作人员的生命安全,促进产业长久发展。

本作品结合了9轴姿态检测传感器 MPU9250 (内部集成了陀螺仪、加速度计、电子罗盘)与 STM32 微处理器,获取钻杆三维姿态数据,并将数

收稿日期:2018-11-01

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划(201710356019);浙江省重点研发计划项目(2018C03040)。

作者简介:沈嘉彬(1997-),男,浙江嘉兴。Email: 754052112@qq.com。

* 通信作者:李青(1955-),男,教授。

据发送给上位机。上位机将数据通过计算后,以 DirectX9.0 呈现钻杆当前姿态,以图表显示钻杆运动轨迹,并将重要数据存储至 SQL Server 数据库中。

本系统设计的意义在于,研究设计了一套矿山钻探轨迹测量系统,能够实现钻探轨迹测量,并且将其实时显示在屏幕上。可以避免因人工计算、操作出现的错误和恶意瞒报工程量等问题;在施工过程中,通过测量钻杆三维姿态数据结合钻杆数量,计算出矿山钻探轨迹,辅助施工者对钻探地层地质状况进行精准探测。

1 系统总体技术方案

1.1 系统简介

本文所研究的系统主要为钻杆三维姿态测量装置。三维姿态监测装置主要包括:测量部分与显示部分。测量部分由三维姿态传感器、微处理芯片、发送模块构成,三维姿态传感器获取钻杆姿态后将数据进行交由微处理芯片进行校正、处理、筛选等工作,并保留重要数据。在钻杆旋转时,由于各向加速度非常大,测量模块无法准确测斜,故丢弃该部分数据;当微处理器发现钻杆停止滚动时,对当前一组数据进行存储,并在指定时刻将数据通过发送模块发送给计算机。显示部分通过 C#语言编写窗口应用程序,接收模块接收到数据并经过一定的计算,通过 DirectX9.0 三维动画引擎,显示物体姿态三维图像,便于使用人员对钻杆三维姿态测量有形象认识;通过图表控件可以分别展示钻杆在 X-Y、X-Z、Y-Z 平面上的运动轨迹;利用 SQL Server 数据库存储钻杆轨迹信息,以便日后查询。

1.1 系统工作原理

钻探工程开始前,应先对三维姿态传感器进行校正,以便其能够获得准确的地磁正北方向,所谓校正就是将 MPU9250 三维姿态传感器在各个方向进行旋转。在校正完毕后,传感器便开始获取钻杆当前的各轴分量信息,并将它们传输至 STM32 微处理器,STM32 在接收到数据后,计算出钻杆的翻滚角、方位角以及俯仰角,并将它们整合为一组数据。在钻杆钻入过程中,由于钻杆自身旋转,其各向加速度非常大,测量模块无法准确测斜,故丢弃该部分数据;而每当钻机向地下钻入一节钻杆时便会停止旋转,等待施工人员接上新的钻杆。此时钻杆的翻滚角为静止状态,而 STM32 微处理器发现钻杆停止翻

滚时,会将此时三维姿态传感器所传回的数据进行存储,并在指定时刻将数据通过发送模块发送给计算机。上位机在收到数据后将通过 DirectX 引擎呈现出钻杆当前三维姿态,并由此姿态通过一定的数学计算获得钻杆的运动轨迹,并将姿态与轨迹保存于 SQL Server 数据库中以便查阅。

2 硬件设计

为了实现矿山钻探轨迹的测量,本文设计了一种钻杆三维姿态检测装置,其设计主要包括两大部分:三维姿态读取模块、通信模块。

2.1 三维姿态读取模块

三维姿态读取模块由 MCU、三维姿态传感器组成。由于 STM32 是基于 32 位 ARM 内核的处理器,其控制芯片的内核为高性能 Cortex-M3 32 位 RISC 内核,能够达到 72 MHz 的工作频率^[1],同时包括了 SPI、I2C 等通信接口,可以满足作品设计需求,因此选用 STM32 单片机作为主控芯片。MPU9250 是应美盛公司生产的第二代 9 轴传感器,内部集成有 3 轴陀螺仪、3 轴加速度计、3 轴电子罗盘,输出信号都是 16 位的数字量^[2];可以通过集成电路总线(IIC)接口和单片机进行数据交互。陀螺仪的角速度测量范围最高达 ± 2000 度/s,具有良好的动态响应特性。加速度计的测量范围最大为 ± 16 g(g为重力加速度),静态测量精度高。电子罗盘采用高灵敏度霍尔型传感器进行数据采集,磁感应强度测量范围为 $\pm 4800\mu\text{T}$,可用于对偏航角的辅助测量。

2.2 通信模块

由于钻杆需要钻入地下较深的位置,使用有线通信的方式显得不切实际,因此选用使用了 SI4463 芯片的 AS50-T20 模块作为无线通信模块。该模块采用循环交织卷积编码方式,能够有效提高数据纠错能力,对于地下远距离大干扰的环境,具有较强的适应能力。若首节钻杆钻入地下深度过深,则可以在某一节钻杆上再安装一块 AS50-T20 模块作为信号中继,以保证数据能够完整传输回地面。

3 算法设计

MPU9250 传回的数据分别是角速度、加速度、磁感应强度,要获取钻杆的三维姿态需要将数据换算成钻杆的角度,即方位角、俯仰角以及翻滚角。令地磁正北与坐标系的 X 轴相对应,Z 轴垂直地面向

上,则钻杆在 XoY 平面上的投影与 X 轴的夹角即为方位角;钻杆与 XoY 平面的夹角为俯仰角;钻杆自身旋转的角度为翻滚角^[3]。

加速度计所测量的 X、Y、Z 三轴分量分别为 a_x 、 a_y 、 a_z , 则可以通过三角函数关系计算得到钻杆姿态角度信息^[4], 俯仰角 p 与翻滚角 φ 分别为:

$$\begin{cases} p = \arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \\ \varphi = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \end{cases}$$

电子罗盘所测量的 X、Y、Z 三轴分量分别为 h_x 、 h_y 、 h_z , 也就是 3 个轴的磁感应强度, 其中 h_x 、 h_y 两个分量合成后总是指向地磁北极方向, 因此可以通过测量敏感轴与地磁北极的夹角测得方位角, 换算关系如下:

$$h = \arctan\left(\frac{h_y}{h_x}\right)$$

由于每一节短杆的长度都均为 1 m, 在获得方位角与俯仰角的情况下足以计算出钻杆的三维姿态, 而将每一节钻杆的三维姿态数据进行累加, 就可以得到钻杆钻探轨迹。设每节钻杆在南北方向、东西方向和上下方向的位移为: x_{sn} 、 x_{ew} 、 x_{ud} , 钻杆长度为 l 。具体算法如下:

$$\begin{cases} x_{sn} = l \cdot \cos p \cdot \cosh \\ x_{ew} = l \cdot \sin p \cdot \cosh \\ x_{ud} = l \cdot \sin p \end{cases}$$

则单根钻杆的三维姿态示意图如下:

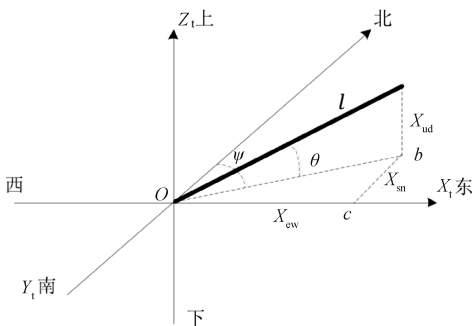


图 1 单根钻杆姿态图

Fig.1 Single drill pipe attitude figure

在获取每节钻杆的姿态数据后, 可以对各节钻杆的 x_{sn} 、 x_{ew} 、 x_{ud} 进行累加, 即可得到初始钻探点与钻头当前位置之间的偏移量, 也就可以得到钻杆运动轨迹。运动轨迹的计算公式如下:

$$\begin{cases} x_{sn} = \sum_{i=1}^n l \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\varphi_i \\ x_{ew} = \sum_{i=1}^n l \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_i \\ x_{ud} = \sum_{i=1}^n l \cdot \sin\theta_i \end{cases}$$

钻杆运动轨迹示意图如下:

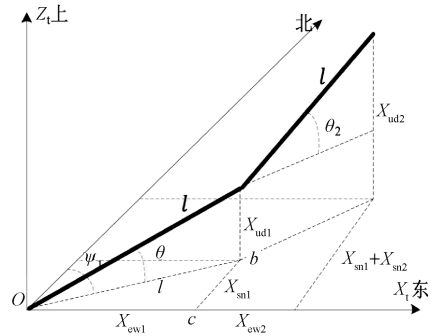


图 2 多根钻杆姿态图

Fig.2 Multiple drill pipe attitude figure

4 软件设计

钻杆运动轨迹测量软件主要实现认证登录信息、获取钻杆姿态信息、绘制钻杆三维姿态、绘制钻杆运动轨迹、存储并显示钻杆历史数据等功能。

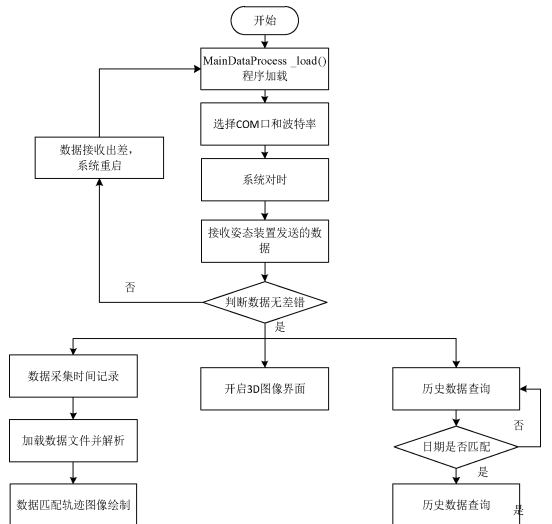


图 3 显示软件程序流程图

Fig.3 Display software program flow chart

钻杆姿态显示程序主要由 C# 语言结合 DirectX9.0 三维动态图像处理引擎设计, DirectX9.0 已经成为目前 3D 图形计算软件中使用最为广泛的标准规范^[5]。显示程序基于 Visual Studio 2013 开发环境, 通过设计窗体应用程序, 处理钻杆三维姿态

数据、显示钻杆运动轨迹、查询钻杆历史信息;通过 3D 图像显示窗体显示钻杆当前三维姿态^[6]。

程序在登录时会首先连接数据库,需要输入正确的数据库用户名以及密码,否则无法成功登陆。

在登录成功后,程序会自动扫描当前计算机中插入的串口设备,并将可用的串口号显示在“串口选择”所指示的选项框中。用户根据实际情况选择合适的串口以及波特率后,点击“打开”按钮,程序将通过无线模块开始接收单片机发送回来的钻杆三维姿态数据。

单击“三维姿态显示”按钮后,由于翻滚角被忽略,程序右侧界面将显示钻杆当前状态下的方位角以及俯仰角。

单击“运动轨迹显示”按钮后,程序右侧界面将显示钻杆运动轨迹。令 X 轴正方向指向正东,Y 轴正方向指向正北,Z 轴正方向垂直地面向下,则可分 X-Y、X-Z、Y-Z 3 图分别查看钻杆在坐标轴切面上的运动轨迹。

单击“历史数据查询”按钮后,程序右侧界面将显示钻杆姿态、轨迹的历史数据。可通过右侧的“选择查询日期”选择所需要查询的时间段;通过“导出”按钮将目前钻杆数据导出存储,并新建一张数据表。

5 实验分析

5.1 MPU9250 校正

在获取钻杆三维姿态之前,需要对 MPU9250 传

感器进行校正,以使其能够获得准确的重力方向、地磁正北方向,为接下来所提供的钻杆三维姿态信息的准确度提供保障。

采用拟合椭球的方式,去掉粗大误差,可得到椭球表面公式。在不同的时间,不同的地点获取多组数据,并观察是非每次得到的椭球表面公式都是相似的。若相似,则可采用固态校正的方法;不相似则每次开机后均需进行校正。

可视化校正过程:使用 Matlab 软件求出椭球的中心点坐标,经过平移,使中心点位于坐标原点,再将其拉伸为球。

椭球曲面的标准表达式:

$$\frac{(x - x_0)^2}{A^2} + \frac{(y - y_0)^2}{B^2} + \frac{(z - z_0)^2}{C^2} = R^2$$

一般形式为:

$$x^2 + ay^2 + bz^2 + cxy + dxz + eyz + f = 0$$

用最小二乘法进行模型参数估计,先拟合参数 a、b、c、d、e、f,然后间接得到参数 x₀、y₀、z₀、A、B、C。

校正方式如下:

第一步:先进行滤波,去掉突兀的点以及(0,0,0)点;经过多组数据观察,可知正常点的 x 轴坐标应在-150~150 之间,y 轴坐标应在-250~250 之间,z 轴坐标应在-150~150 之间,设定阈值重新实验观察,滤波方法可行。

第二步:将椭球化成球半径为 100 的球;

第三步:将地磁向量投影至参考系;

第四步:求正北与参考系 x 轴的夹角。

第一组数据图像如图 5。

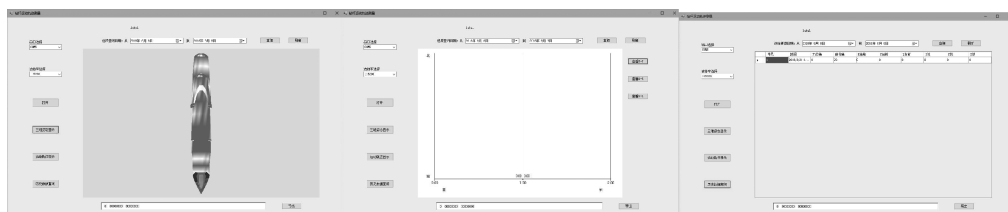


图 4 显示部分软件界面

Fig.4 Display part of the software interface

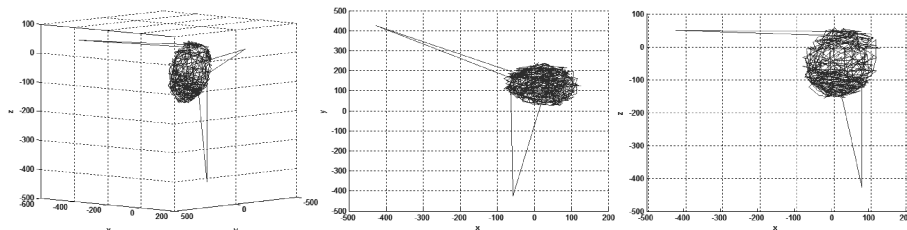


图 5 第一组数据图像

Fig.5 Image of the first set of data

拟合结果:

$$a = 0.675651, b = 0.677356, c = -41.142404$$

$$d = -178.030203, e = 56.928483,$$

$$f = 5156.548244$$

$$x00 = 20.571202, y00 = 131.747144,$$

$$z00 = -42.022601$$

$$AA = 90.500016, BB = 110.100025,$$

$$CC = 109.961414$$

其中, $X00, Y00, Z00$ 分别表示椭球的球心在 x, y, z 轴上的坐标。 AA, BB, CC 分别表示 x, y, z 方向上的轴半径。

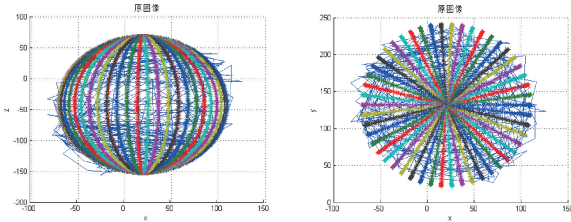


图 6 第一组拟合

Fig.6 First set of fits

第二组数据图像如图 7。

拟合结果:

$$a = 0.647123, b = 0.718464, c = -33.661436$$

$$d = -164.768872, e = 68.216906,$$

$$f = 4412.072530$$

$$x00 = 16.830718, y00 = 127.308829,$$

$$z00 = -47.474115$$

$$AA = 89.323767, BB = 111.038530,$$

$$CC = 105.381520$$

其中, $X00, Y00, Z00$ 分别表示椭球的球心在 x, y, z 轴上的坐标。 AA, BB, CC 分别表示 x, y, z 方向上的轴半径。

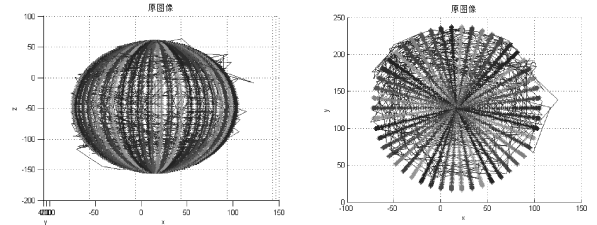


图 8 第二组拟合

Fig.8 Second set of fits

第三组数据图像如图 9。

拟合结果:

$$a = 0.708226, b = 0.614090, c = -52.023503$$

$$d = -177.119115, e = 47.536210,$$

$$f = 4489.930864$$

$$x00 = 26.011752, y00 = 125.044174,$$

$$z00 = -38.704574$$

$$AA = 90.445959, BB = 107.473942,$$

$$CC = 115.417865$$

其中, $X00, Y00, Z00$ 分别表示椭球的球心在 x, y, z 轴上的坐标。 AA, BB, CC 分别表示 x, y, z 方向上的轴半径。

由此可见,在不同时间、不同地点,所获取的原

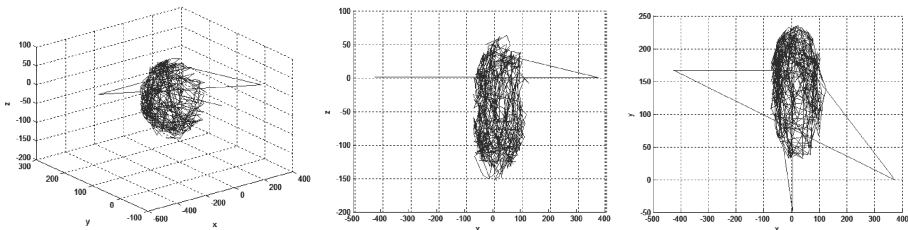


图 7 第二组数据图像

Fig.7 Image of the second set of data

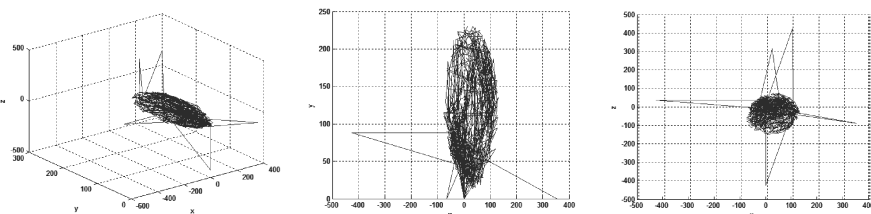


图 9 第三组数据图像

Fig.9 Image of the third set of data

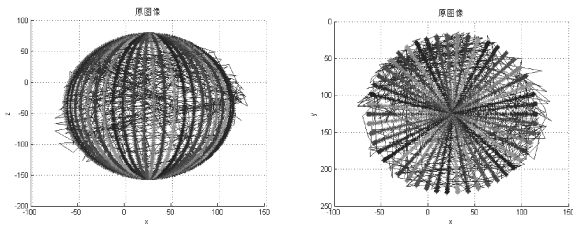


图 10 第三组拟合

Fig.10 Third set of fits

始数据的中心点位置差别虽然不大,但都不相同,得到的表面点表达式也各不相同。因此需要在每次开机后均进行校正。

5.2 作品测试

将钻杆运动轨迹测量装置固定于一根形状与钻杆相似的木棒上,然后手持木棒,在某楼梯上行走一段距离。在行走的过程中,始终使手中的木棒保持旋转,模拟钻杆正在打入地下的过程,而每行走一段距离时,停止转动钻杆,表示一节长度为 1 米的钻杆已经完全打入,此时施工人员需要安装另一节钻杆。

以下是部分实验数据:

序号	时间	方位角	俯仰角	X当前	Y当前	Z当前	X总	Y总	Z总
1	2018/6/9 19:20	90	0	0	0	0	0	0	0
2	2018/6/9 20:42	36.523	62.6946	0.07675062	0.09118603	0.07675062	0.1023257	0.19918603	0.19918603
3	2018/6/9 20:43	45.6751	76.4238	0.1679293	0.1440179	0.9720586	0.2437099	0.2363436	1.963919
4	2018/6/9 20:45	72.6167	56.5132	0.9271175	0.1400018	0.834013	0.7700274	0.4293453	2.789932
5	2018/6/9 20:46	86.3922	41.9564	0.7357665	-0.1080214	0.6895649	1.506694	0.3213239	3.46497
6	2018/6/9 20:47	135.7268	32.0217	0.6918657	-0.6070751	0.5305404	2.09642	-0.2857612	3.996737
7	2018/6/9 20:48	179.4538	27.8426	0.0289909	-0.863912	0.4479442	2.122319	-1.169963	4.463782
8	2018/6/9 20:49	204.7362	28.4877	0.3407652	-0.7591187	0.5962439	1.761536	-1.903982	5.344829
9	2018/6/9 20:50	247.1827	41.2096	-0.6867462	-0.5699125	0.6078476	1.064201	-2.198294	5.711073
10	2018/6/9 20:50	269.8463	55.4303	-0.5665987	-0.1005311	0.824657	0.5053143	-0.198875	6.535131
11	2018/6/9 20:51	294.5217	63.3764	-0.4077224	0.1869992	0.8939619	0.1005919	-0.1012829	7.429992

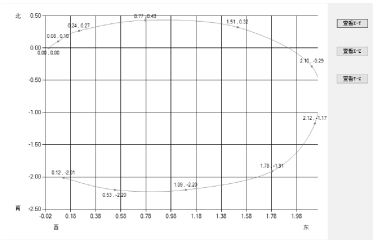
图 11 钻杆姿态及轨迹历史数据

Fig.11 Historical data of drill pipe attitude and trajectory

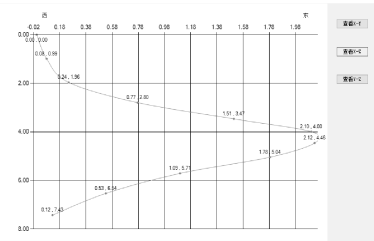
6 结论

通过实验可以发现,上位机绘制的钻杆运动轨迹图与钻杆实际移动轨迹相近,表现为在各个平面上的轨迹数据均能较好地还原实际情况。此套钻杆运动轨迹测量系统能够较为准确地描述钻杆的实时姿态以及其运动轨迹。

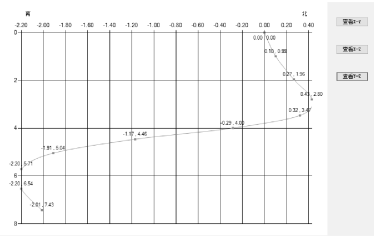
本文设计和开发的钻杆运动轨迹测量系统,使用三维姿态传感器测量钻杆俯仰角与方位角换算钻杆钻探轨迹,并显示首节钻杆实时运动姿态。通过实验与误差补偿,本系统可以较为精确地测量钻杆地下钻探轨迹。该系统提高了矿山钻探管信息化程度和钻探精度,为采矿探测提供了可靠的技术保障,



(a)



(b)



(c)

图 12 各平面轨迹曲线

Fig.12 Trajectory curve on each plane

提高了勘探后续工作的安全性,节约大量人力物力,为矿山钻探智能化提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 张贵杰.基于 STM32 的医用控温毯控制系统的设计[D].大连理工大学,2015.
- [2] 汪波涛,张珣.基于多点传感融合算法的人体跌倒监测系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2015,15(11):62-65.
- [3] 王海波,张汉武,张萍萍等.一种适用于高纬度船舶导航的横向地球坐标系[J].海洋测绘,2016,36(3):25-28.
- [4] 刘春阳,徐军领,程洪涛等.MPU9250 传感器的姿态检测与数据融合[J].河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(4):14-17,22.
- [5] 张继超,马洋洋,董塞漠等.基于 C#和 DirectX 的三维虚拟校园构建探讨[J].测绘工程,2015,(1):44-47.
- [6] 文竹,舒田,童倩倩等.基于 C#的冬小麦虚拟生长可视化系统实现[J].河南农业科学,2016,45(6):147-152.

变电站辅助设施智能运维管控系统的研发与应用

王家宝,傅浩,孙琼,徐爱文,潘尧

(国网安徽供电公司,合肥 230001)

摘要:在我国社会经济及科学技术不断发展背景下,促使现代变电站朝着信息化方向发展。现代变电站和网络技术、计算机技术、通信技术相互结合,从而提高智能化水平。随着变电站技术的不断发展,变电站与互联网结合重要性主要展现出来。但是,在变电站实际使用的过程中,因为工作人员误入带电间隔,从而导致无法实施告警。另外,在变电站不断增加的过程中,照明、空调及风机等设备要到远方变电站查看运行状态,实现开关控制,型号接口数量不断增加,不方便控制。以此本文就分析变电站辅助设备智能运维管控系统的研发,使工作效率得到提高,以此保证变电站运行可靠及稳定。

关键词:变电站;辅助设备;智能运维管控系统

中图分类号:TP273+.5

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0070-04

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.012

Research and Application of Intelligent Operation and Maintenance Control System for Substation Auxiliary Facilities

Wang Jiabao, Fu Hao, Sun Qiong, Xu Aiwen, Pan Yao

(State Grid Anhui Power Supply Company, Hefei 230001, China)

Abstract: With the development of social economy and science and technology in our country, modern substation is developing towards informationization. Modern substation and network technology, computer technology, communication technology are combined to improve the level of intelligence. With the development of substation technology, the importance of the combination of substation and Internet is presented. However, during the actual operation of the substation, the alarm cannot be carried out because the staff misplaced the charging interval. In addition, in the process of increasing the number of substations, lighting, air conditioning, fan and other equipment to check the operation status of remote substations, switch control, model number of interfaces Increasing, inconvenient control. In this paper, the research and development of intelligent operation and maintenance control system for substation auxiliary equipment is analyzed, so as to improve the working efficiency and ensure the reliability and stability of substation operation.

Keywords: substation; auxiliary equipment; intelligent operation and maintenance control system

目前,变电站五防系统被广泛应用到变电站中,其能够使倒闸操作正确性得到提高。另外,还在部分变电站中使用了自动化智能设备,比如变电站智能巡视系统、解锁钥匙管理机、智能钥匙通系统及临

时接地线管理系统,这些设备对于变电站运维管理都具有一定的帮助,使工作质量得到提高^[1]。基于此,对变电站辅助设施智能运维管控系统的研发进行研究具有重要的现实意义。

收稿日期:2019-10-20

作者简介:王家宝(1981-),男,安徽肥西,汉族,本科,工程师,主要研究方向:检修公司变电运维室,变电运维。

1 智能变电站运维系统的分析

智能变电站运维管控系统主要包括变电站建设、工程验收、施工周期、日常维护和设备检验等工程管理,其主要创新思想就是使用专业化、规范化的管理及控制,不仅能够实现过程控制,还能够安排工作。控制客观因素,基于管理规范、规章制度的完善,实现有据可依、有章可循。

远程控制指的是管理人员通过计算机网络中的异地、双方拨号等方式和计算机相互连接,通过计算机对其的远程运维维护及管理行为。远程控制的主要原理就是启动运行程序,使其具备与客户端相同的权限。以此,只要使服务端程序开启,就能够利用客户端对服务器进行控制,其实客户端和超级用户相似。为了对智能变电站远程维护过程中的可靠性进行保证,就要对数据传输过程中的可靠性进行保证。在变电站维护系统运行过程中,要将维护操作作为基础保障,从而为其提供一定安全系数^[2]。

2 变电站辅助设施智能运维管控系统的研发

2.1 系统需求分析

在实现坚强智能电网宏伟目标创建的过程中,智能变电站属于能源实现控制盒转换主要核心,辅助系统也是变电站智能化的主要展现,根据智能变电站运行的特点,智能辅助运维管控系统能够对内部资源进行优化,并且实现变电站数据集成收集,还能够有效监控变电站各区域,以此提高电力系统运行管理和控制水平,提高电网安全性和可靠性。为了使以上问题得到解决,变电站辅助设施智能运维管控系统要充分考虑图像监视、火灾报警、安全警卫、门禁系统等整合优化,并且利用各个系统的广泛联动实现功能共享,提高系统性能^[3]。

基于互联网,变电站辅助设备运维管控系统的总体架构详见图1。

2.2 系统的软件构成

2.2.1 倒闸操作模块

倒闸操作模块是基于防误闭锁系统实现的,结合地线管理和二次保护防误管理,将应急解锁钥匙进行去除。通过现代五防系统使用情况进行分析,要使保护压板及地线投退结合防误操作管理。在变电站具有大型工作的时候,此站所配置的地线数量

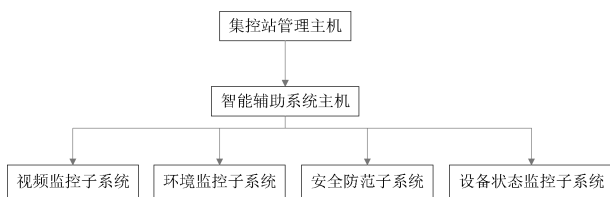


图1 变电站辅助设备运维管控系统的总体架构

Fig.1 Overall architecture of substation auxiliary equipment operation and maintenance management and control system

无法满足实际工作需求,就要通过其他变电站实现一定数量接地线的调用,此为道闸操作带来了安全隐患,如果运行人员出现疏忽,就会导致带地线送电出现误操作事故。另外,通过现代运行操作实际情况分析,在进行操作的过程中,二次压板是否能够正常的投运及再适当时间中正确投运,对道闸操作正确性具有一定的影响。比如,分段断路器充电保护在进行充电的过程中,充电结束之后退出,假如没有退出,就要在后边操作过程中受到电流冲击从而跳闸,以此导致倒闸操作错误。

解锁钥匙指的是在开锁检查及非正常操作等应急情况中,防误操作系统具有应急解锁工具,通过现代实际情况进行分析并不理想,具有普遍的随便使用情况,以此影响了道闸操作的安全性。在使用解锁钥匙管理机变电站的时候,解锁钥匙使用良好,并且解锁钥匙管理系统中的检修钥匙能够使机械解锁钥匙走错房间的问题进行解决^[4]。

2.2.2 巡视模块

巡视模块是基于智能巡视系统创建的,其不仅能够管理变电站中的全部钥匙,还能够实现智能化的巡视。变电站除了设备需要上锁,其他的锁具也都比较多。比如安全工具室、继电保护室、高压室、办公室等都有锁,此锁的形式都各有不同,钥匙管理较为原始,100 kV 及以下变电站的钥匙经常丢失或者找不到。一钥通能够解决此问题,规范化的管理变电站中的钥匙,和防误锁具结合,创建变电站所有锁具管理的系统。

巡视功能能够在利用巡视作业指导书中进行巡视,从而能够有效避免巡视出现漏点、漏项及巡视标准不同的问题。另外,和状态检修缺陷库实现缺陷记录的生成,在结束巡视之后利用链接导入,实现MIS的生成,对缺陷上报内容和方式进行规范^[5]。

2.2.3 实时监测模块

实时监测的数据来源较为广泛,其中主要包括多个子系统传感器所收集的数据。比如SF6和氧气浓度、站内外温度和湿度数据等,软件系统通过各辅

助控制子系统作为单元充分展现检测数据。视频监控子系统能够对各个探索画面进行监控,可以选择多画面或者单画面。SF6 泄露检测模块能够将不同探测器数据充分的展现出来,空调监控模块能够将空调的实时工况、温度进行展现,按下按钮就能够跳出温度曲线;灯光控制模块能够将灯光的实时工况进行展现;水泵检测模块能够将水泵的工况及水位进行展现。图2为实时监测模块的构成,图3为加热器的实时监测。

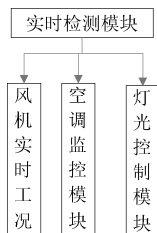


图2 实时监测模块的构成

Fig.2 The composition of the real-time monitoring module

输出描述 (编号: 名称)	实时状态 (分: ●合: ○)
第01路: 1~4#	●
第02路: 5~8#	●
第03路: 9~12#	●
第04路: 13~16#	●

图3 加热器的实时监测

Fig.3 Real-time monitoring of the heater

2.2.4 远程控制模块

在变电站智能辅助系统正常运行时,根据各自子系统实现自动暂停启动,之间联动要求软件系统能够提供相应联动机制,另外,特殊情况中要求实现子系统的人为控制。视频监控子系统能够控制球机的方向,手动录像按钮和门禁系统相互联动,将变电站大门开启时实现自动录像,大门关闭的时候就会停止录像。SF6 泄露监测模块能够实现风机联动,能够实现风机的手动启动和关闭。空调监控模块能够实现空调的手动开启和关闭。其他模块一样。周界防范报警模块能够实现手动布防和撤防^[6]。图4为水泵的控制界面。

2.2.5 检修辅助安全措施

使用大量的虚回路光缆连接,能够使原本看得见的二次回路隐藏成为黑匣子,隔离检修设备和运行设备,要求根据二次检修辅助安全措施实现。将

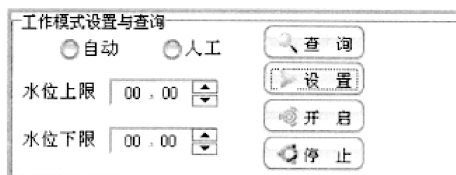


图4 水泵的控制界面

Fig.4 Control interface of the water pump

二次虚回路图为基础,根据相应的检修安措规范创建安措规则,从而能够实现可视化的安措自动生成。在生成安措票之后,以设备目前的情况实现设备异常检修状态的判别,并且还能够在给出异常原因和影响的范围,在实现安措模拟的过程中,以模拟操作对安措状态进行更新,以此能够为二次回路操作提供操作顺序和操作结果告警、校核。

在执行安措之前,以生成按错票的逻辑预演,能够及时发现操作票中的逻辑问题,从而能够避免安全操作逻辑错误导致的保护误动及闭锁事故的发生。在每次完成按错检修之后,诊断装置能够利用得到相应保护设备检修压板状态、SV 压板状态、GOOSE 压板状态等信息,对比标准化的安全措施,将是否实施检修安措到位进行检查,如果不到位,诊断装置中就会出现明显告警及标识。二次检修辅助安全措施中还要具有操作过程和结果的记录、回访,以此能够寻找事故或者查找问题。

2.2.6 查询模块

要想得出系统运行过程中某时间的参数变化情况,对某控制设备工作情况进行分析。查询模块能够方便在某时间段中某设备系统参数信息及运行情况的监测,通过曲线方式及表格方式进行展现,用户能够对比不同时间段的数据,将其作为决策判断根据。

视频监控子系统能够对录像以时间实现筛选,并且对其调阅。SF6 在线监测模块能够存储历史数据,将装置报警过程中的数据进行筛查,和风机工作情况相互对应。采暖通风模块能够对一段时间中的湿度、温度等进行调阅,弹出界面将最低值、最高值和产生的时间进行展现,还能够将湿度、温度的曲线充分展现出来,存储历史数据,筛选装置报警过程中的数据,和空调、风机的工作情况相互对应。消防报警模块能够存储报警时间、探头的位置和编号等数据,将装置报警过程中的数据进行删选。水泵监控模块能够存储水位数据、水泵关闭和启动时候的数据,将装置报警数据进行筛选。门禁子系统能够对遥控器和门卡对应使用人,存储大门关闭和开启时

候的数据。设备运行状态检测子系统能够实现一定时间中设备运行温度检测模块温度的调用和阅读,将界面中最高、最低的温度和产生时间进行弹出^[7]。

2.2.7 文件配置管理

实现 SCD 文件深层解析,得到各个子网模型、IED 输出输出和报文类型、IED 模型、各个 IED 的相互连接,对于 SCD 没有明确或者不规范的地方要能够进行人工干预,实现各个对象的相互连接,创建二次设备模型。配置文件管理功能主要为:

其一,实现 CRC 计算模型的支持,利用装置过程层虚端自配置 CRC 和全站 SCD 中的 CRC 实现在线对比,保证全站 SCD 文件配置和 IED 装置的下载结果相同。

其二,数据管理单元利用历史版本和 SCD 变更提示相互对比,实现 SCD 变更所产生的影响范围进行界定,影响范围能够到 IED 装置中定位。另外,使用可视化技术将 SCD 变更影响范围进行展现,GOOSE 变更范围能够到 DA 级实现定位,SV 变更范围能够到 DO 级进行定位,并且通过报告和图形的方式实现展现。

2.3 系统的使用

在 2017 年 5 月份,某智能变电站在首检过程中实现试用,在 220 kV 母线差动保护推论定检及新闻隔测试过程中具有良好的管控效果。在检修之前的准备阶段时通过专业人员以检修的需求和标准化二次工作安全措施专家库实现二次工作安全措施票的生成,通过专业负责人实现审核,通过系统记录检修之前的正常运行压板状态。在开始检修之前,通过系统锁定防控软压板,假如锁定状态软压板具有非预期操作变位,系统就会发出预警信号,实现自动执行压板遥控措施的自动执行,避免误动事故。在完成检修之后,对全部压板是否恢复到检修之前的状态进行自动检查。系统的使用效果良好,能够满足预期需求^[8]。图 5 为系统的功能实施流程。

3 结束语

在无人值班智能变电研究不断增加的过程中,变电站智能辅助系统设计及研究也越来越重要。本文对变电站辅助智能运维管控系统的设计进行了分析,基于传统变电站,使用通信信息技术实现新型变

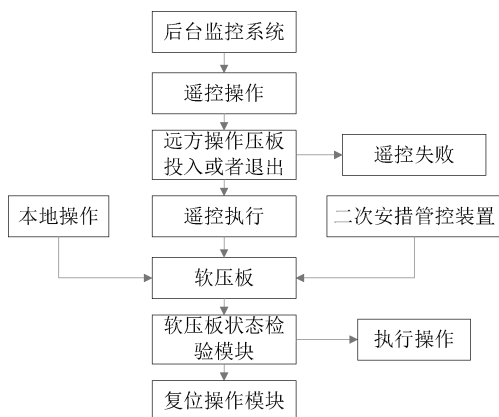


图 5 系统的功能实施流程

Fig.5 System function implementation process

电站智能辅助系统的简单设计和使用,此系统能够使智能变电站继电保护及安全自动装置校验效率得到提高,还能够使作业人员误操作风险得到降低,减低工作人员在工作过程中的压力,使变电站智能化水平得到提高。另外,也希望能够对我国智能变电站辅助系统建设模式具有一定的参考。

参考文献:

- [1] 师钦利,王鹏.智能变电站二次相关操作管控系统的开发和应用[J].山西电力,2018(01):13-16.
- [2] 金镇山,关紫嫣,姜鹏,等.智能变电站配置文件可视化及管控系统研究[J].黑龙江电力,2017,39(06):486-491.
- [3] 连晓磊,苏盛.变电站 10kV 高压开关柜的电气磨合多线程自动控制方法[J].科技通报,2017,33(07):117-120.
- [4] 郑向阳,魏华南.变电站三维可视化监控系统——以焦作市修武变电站为例[J].科技通报,2014,30(01):166-169.
- [5] 王晓旭,郭亚昌,段晓晨,等.新一代智能变电站辅助系统建设思路深化研究[J].山西科技,2016,31(06):147-150.
- [6] 张路,侯俊,杨文俊,等.智能变电站信息安全防护体系的构建[J].电力信息与通信技术,2016,14(09):38-41.
- [7] 王冬霞,纪陵,檀庭方,等.智能变电站二次虚回路运行维护管理系统的设计与实现[J].华电技术,2016,38(08):19-24+77.
- [8] 许勇刚,冯扬,汪爽.智能变电站信息安全防护体系研究[J].电子测量技术,2014,37(10):9-15+28.

复合节流式静压气体轴承设计与实验研究

李运堂,张方方*

(中国计量大学 机电工程学院,杭州 310018)

摘要:采用孔式节流和多孔材料节流,提出了复合节流式静压气体轴承,充分发挥两种节流方式各自的优点,使轴承具有更好的静态性能。利用 Fluent 计算轴承内流场参数并分析流场特性,将复合节流式静压气体轴承的稳定性、承载能力和刚度与传统节流形式轴承作对比,并通过实验验证计算结果。结果表明:在相同的几何参数下,复合节流式轴承稳定性优于单一孔式节流;在一定气膜厚度范围内,复合节流式静压气体轴承承载能力和刚度明显高于多孔材料节流和孔式节流;实验结果与计算仿真结果基本一致。

关键词:复合式节流;静压气体轴承;Fluent 仿真;承载力;刚度

中图分类号:TH122

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0074-07

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.013

Structure Design and Experimental Study of Aerostatic Thrust Bearing with Compound Restrictors

Li Yuntang, Zhang Fangfang*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An aerostatic bearing with compound restrictors was proposed. It is restricted by orifice and porous restrictors and fully exploited the advantages of orifice restrictor and porous restrictor, which enabled the bearing to have better static performance. The flow field characteristics inside the bearing are obtained by using computational fluid dynamic. Furthermore, the stability, load carrying capacity and stiffness of the aerostatic thrust bearing with compound restrictors are compared with the bearings with traditional restrictors, and the calculation results are verified by experiments. The results show that the stability of the bearing with compound restrictors is better than that of the bearing only restricted by orifice, and the load carrying capacity and stiffness are much larger than that of the bearing restricted only by orifice or porous if film thickness is within a certain range and geometrical parameters are same. Moreover, the experimental results are basically consistent with the calculated simulation results.

Keywords: compound restrictors; aerostatic thrust bearing; fluent simulation; load carrying capacity; stiffness

静压气体轴承具有高速、精密、无摩擦等优点,广泛应用于超精密加工与测量设备^[1,2]。随着相关

技术的快速发展,对气体轴承性能的要求越来越高,节流方式作为影响静压气体轴承的关键因素,国内

收稿日期:2018-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51675498);浙江省自然科学基金项目(LY15E050014);机械系统与振动国家重点实验室开放课题(MSV201516)。

作者简介:李运堂(1976-),男,山东费县人,工学博士,硕士生导师,教授,主要从事精密驱动与运动控制方向的研究。

*通信作者:张方方(1991-),女,河南漯河人,主要研究方向为静压气体轴承性能。E-mail:15088664769@163.com。

外学者开展了大量的理论和实验研究^[3-5]。孙昂, 马文琦^[6]等研究了狭缝节流式静压气体轴承, 指出增大狭缝的宽度和减小狭缝的深度可以轴承的承载力。Gao^[7]等分析了气腔形状简单孔式节流超高速静压气浮主轴性能的影响。Li^[8]等利用大涡模拟 (LES) 研究了带气腔的孔式节流静压气体止推轴承的稳定性。结果表明, 减小孔式节流器直径和气腔的深度可以抑制轴承的微振动。吴定柱和陶继忠^[9]提出了多孔材料节流式静压气体轴承, 并通过实验验证了多孔材料渗透系数对静压气体轴承静态特性的影响。Schenk^[10]等对比了孔式节流和多孔材料节流气体轴承的静态性能, 指出多孔材料节流承载能力和稳定性优于孔式节流, 但其刚度低于后者。Hosokawa^[11]等研究了局部多孔材料节流对静压止推轴承静态特性的影响, 实验表明与传统的多孔材料节流方式相比, 其刚度增大而承载能力降低。

单一节流方式存在一定的优点和不足, 简单孔式节流易产生气锤, 不稳定; 环面节流虽然稳定, 但刚度低; 狭缝节流刚度较大, 稳定性好, 但加工困难; 多孔材料节流结构相对简单, 承载能力大、刚度高, 稳定性好, 但加工过程影响多孔材料渗透率。张雯, 尹健龙^[12]等利用小孔节流和环面节流, 提出了多微通道式气体静压轴承, 实验验证了该节流方式能显著提高轴承承载能力。Huang^[13]等将多孔材料和沟槽结合提出了复合式静压气体轴承, 研究了沟槽深度和多孔材料的孔隙度对承载能力的影响。

本文结合孔式节流结构简单、不易堵塞和多孔材料节流承载能力大、刚度高、稳定性好等优点, 提出了复合节流式静压气体轴承。利用 Fluent 分析轴承内流场特性, 计算了承载面压力波动情况及轴承静态性能, 并通过实验验证了复合节流式静压气体

轴承承载力和刚度的计算结果, 为复合节流式静压气体轴承设计应用提供参考。

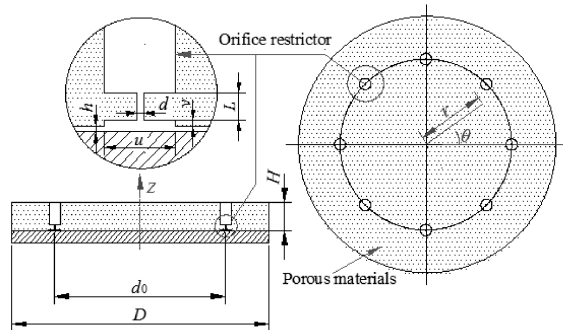
1 复合节流式静压气体轴承结构

复合节流式静压气体轴承如图 1 所示, 节流器由孔式节流器和多孔材料节流器组成, 孔式节流器均匀分布在直径为 D 的多孔材料节流器内。润滑气体流分别在多孔材料和节流孔出口处形成压降, 产生静压节流效应, 在轴承体和止推面之间微小间隙内形成厚为 h 具有支撑作用的压力气膜。其参数含义如下: d , 节流孔直径; L , 节流孔深度; d_0 , 孔式节流器分布位置; u , 气腔直径; v , 气腔深度; ψ , 多孔材料渗透系数; H , 多孔材料厚度。

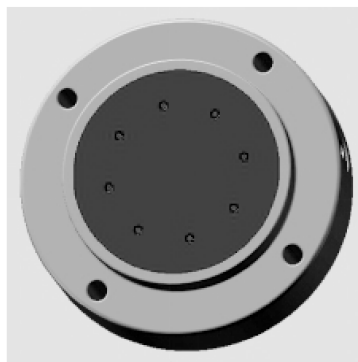
2 复合节流式静压气体轴承内流场分析

2.1 Gambit 建模及网格划分

为提高网格质量要求和计算速度, 取整体结构的 $1/8$ 进行建模和网格划分 (多孔材料内设置 8 个节流孔)。图 2 为 Gambit 三维模型建立及网格化分结果。轴承设计参数列于表 1。图 2 中绿色部分代表孔式节流区域, 紫色部分为多孔材料节流区域, 蓝色部分代表气膜区域。网格化分时, 气膜厚度区域尺寸比轴承其他区域尺寸小 3 至 4 个数量级, 采用整体划分法易造成网格扭曲率增大和最小体积为负的情况, 因此, 分别对 3 个区域进行网格划分: 气膜厚度方向网格划分节点数为 10, 多孔材料区域和孔式节流区域均设置 interval size 为 0.15, 因四面体单



(a)二维结构图



(b)三维结构图

图 1 复合节流式静压气体轴承

Fig.1 Aerostatic thrust bearing with compound restrictors

元(Tet/Hybrid)划分网格质量过差,不能满足模型计算要求,经过反复尝试比较,最终采用六面体单元(Hex/Wedge)划分网格,同时对孔式节流器气腔内进行局部网格加密,最终划分体网格单元数为404179。检查网格质量,网格歪斜度(EquiSize Skew)在0~0.4之间的网格单元数量占网格总数的99.74%,相邻网格单元尺寸比(Size Change)小于2的网格单元数量占网格总数的99.77%,满足计算精度要求。图3为轴承边界条件设置:多孔材料压力入口和孔式节流压力入口、压力出口、周期面,其它面均为壁面。

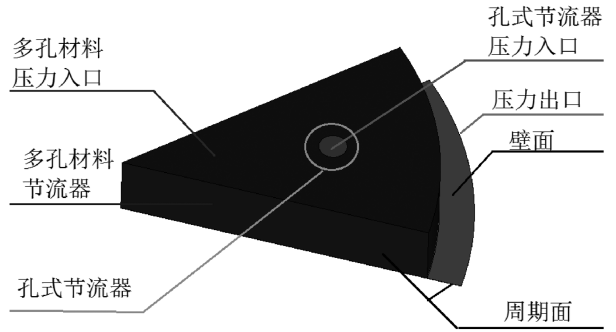


图3 轴承边界条件设置

Fig.3 Bearing boundary conditions

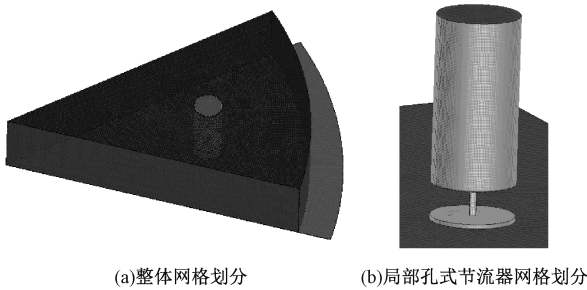


图2 轴承网格划分

Fig.2 Bearing meshing

表1 复合节流式静压气体轴承参数

Table 1 Bearing parameters with compound restrictors			
参数	数值	参数	数值
d/mm	0.2	d_0/mm	30
L/mm	0.8	n/mm	8
u/mm	2	D/mm	45
v/mm	0.1	H/mm	5
ψ/m^2	7.62×10^{-15}	$h/\mu m$	20

2.2 Fluent 仿真计算与结果分析

求解气膜内流场参数时,采用基于压力三维双精度分离求解器,润滑气体为空气,参考压力101325 Pa。多孔材料为各向同性多孔石墨,渗透系

数 $\psi = 7.62 \times 10^{-15} m^2$,孔隙率为0.18,孔式节流处选用湍流模型,多孔材料节流处选用层流模型。供气压力为0.5 MPa,出口压力为0.1 MPa,壁面为铝材料,根据收敛情况调节亚松弛因子,残差设为 10^{-5} ,初始化计算域。图4和图5为分别轴承外部和内部的压力云图分布。

从图4、5中可以看出:气体在复合节流式静压气体轴承中运动时压强均匀分布,且沿运动方向压强递减,最后降至大气压。气膜内的压强分布由中间向四周呈放射环状渐变趋势,在多孔材料出口和

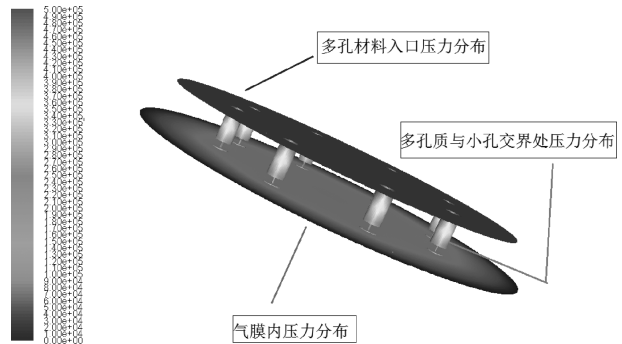
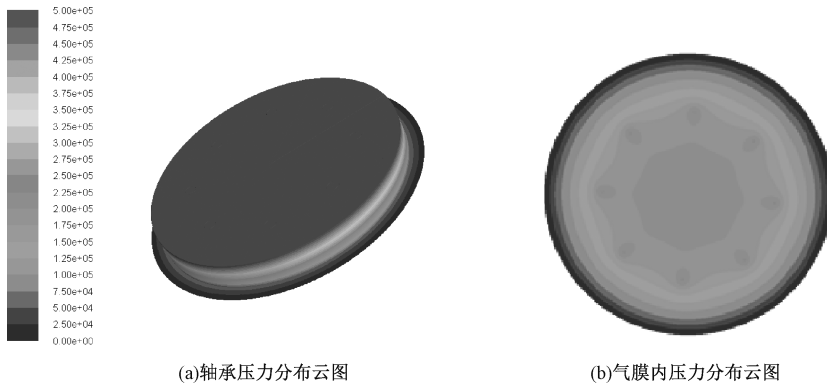


图5 多孔质和气膜内部压力分布云图

Fig.5 Pressure distribution in porous media and gas film



(a)轴承压力分布云图

(b)气膜内压力分布云图

图4 压力云图分布

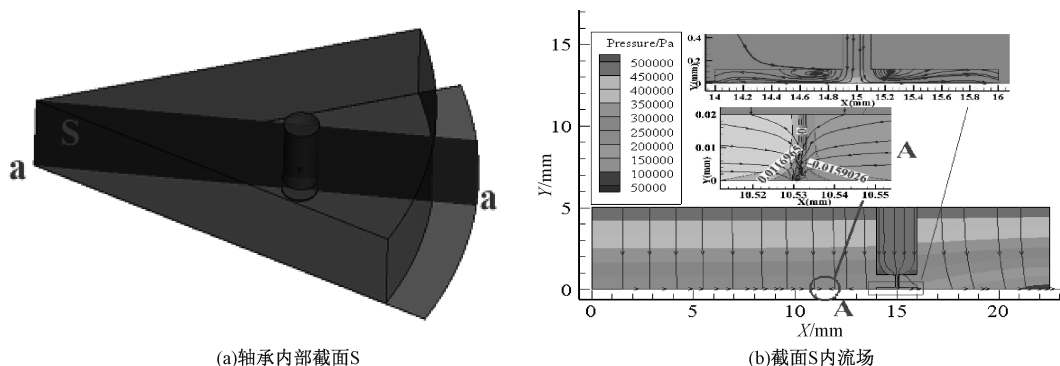
Fig.4 Pressure distribution

孔式节流器出口处压力较大,环状渐变且有叠加效应,且沿径向方向,高压区附近存在次高压现象。

图 6 为通过节流孔轴线和轴承中心的截面 S 内气体压力分布图和流线图,从图中可以看出:(1)气膜内部沿直线 a-a(径向)距轴承中心 10.53 mm 处(A 处)气体流动速度为 0,其原因在于:经孔式节流器向轴承中心流动的气体(图中蓝色部分)与经多孔材料向轴承边界流动的气体(图中黄色部分),在 A 处相遇并各自改变了流向,最后沿圆周流向轴承边界。(2)气体在距节流孔中心 0.1 mm 处的气腔内出现了漩涡。

漩涡的存在会导致轴承承载面产生压力波动,进而引起轴承产生微幅自激振动,严重影响轴承的

稳定性。为分析复合节流式静压气体轴承的稳定性,本文采用大涡模拟计算其承载面的压力波动,并将复合节流式轴承的稳定性与传统的孔式节流和多孔材料节流轴承进行比较。轴承参数分别设置如下,孔式: $d = 0.2 \text{ mm}$, $L = 0.8 \text{ mm}$, $u = 2 \text{ mm}$, $v = 0.1 \text{ mm}$, $d_0 = 30 \text{ mm}$, $n = 8$;多孔材料: $D = 45 \text{ mm}$, $H = 5 \text{ mm}$, $\psi = 7.62 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;复合节流式轴承参数设置如表 1。工况条件:供气压力 0.5 MPa,环境压力 0.1 MPa,环境温度 293 K。3 种节流形式的轴承承载面上压力波动(瞬时压力减去平均压力)分别如图 7 (a)~(c)所示:复合节流式承载面压力波动幅值为 0.803 Pa,多孔材料节流为 $1.3642 \times 10^{-9} \text{ Pa}$,而孔式节流为 1026.81 Pa,波动幅值最大。因此,多孔材料

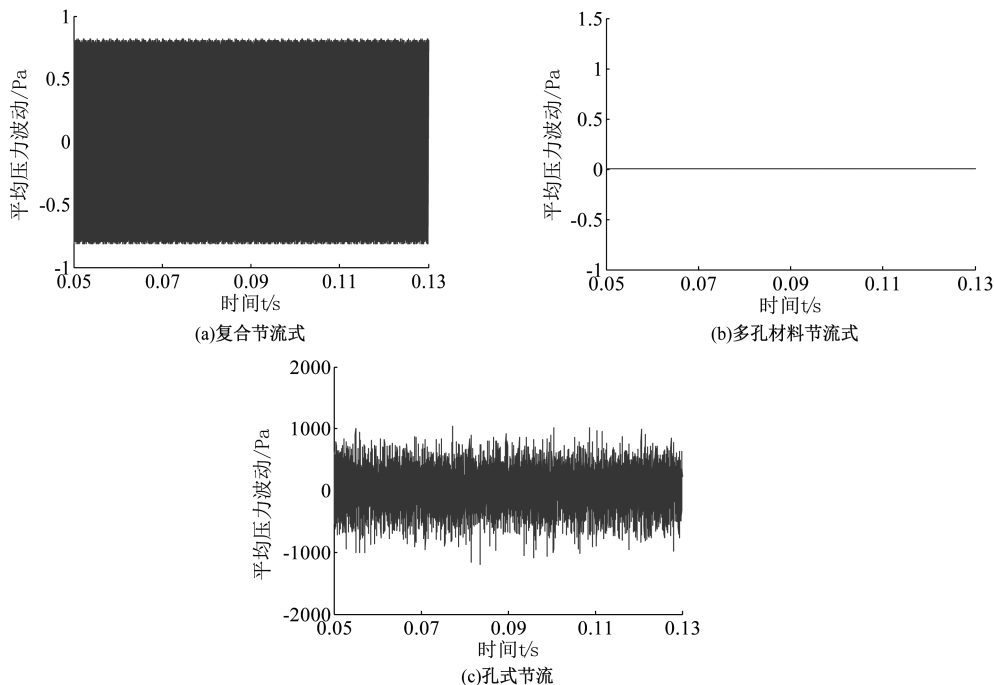


(a)轴承内部截面S

(b)截面S内流场

图 6 截面 S 内气体压力分布图和流线图

Fig.6 Gas pressure distribution and streamline diagram in section S



(a)复合节流式

(b)多孔材料节流式

(c)孔式节流

图 7 轴承承载面压力波动

Fig.7 Pressure fluctuation on bearing surface of bearing

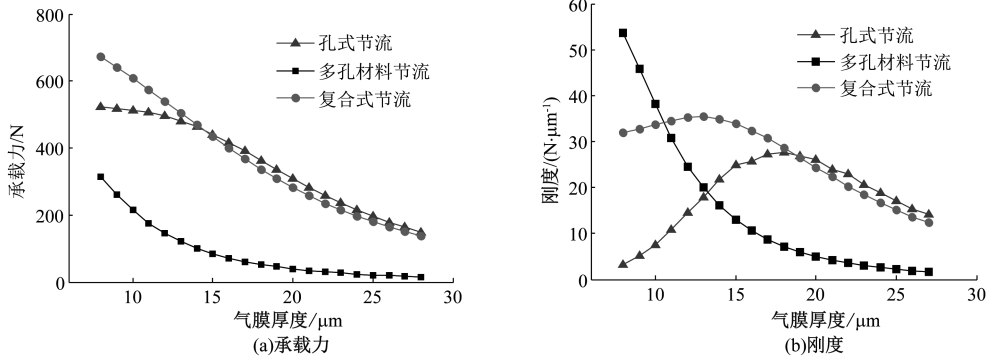


图 8 3 种节流形式的静压气体轴承静态性能

Fig.8 Static performance of three aerostatic bearings

节流稳定性最好,复合节流稳定性略低于多孔材料节流,但远优于孔式节流。

用承载力和静态刚度来表征复合节流式静压气体轴承的静态性能,基于 Fluent 计算复合节流式静压气体轴承的静态性能,并将其与孔式节流和多孔材料节流轴承的静态性能作对比。轴承参数分别设置如下:孔式: $d=0.2\text{ mm}$, $L=0.8\text{ mm}$, $u=2\text{ mm}$, $v=0.1\text{ mm}$, $d_0=30\text{ mm}$, $n=8$;多孔材料: $D=45\text{ mm}$, $H=5\text{ mm}$, $\psi=7.62\times 10^{-15}\text{ m}^2$;复合节流式轴承参数设置如表 1。工况条件:供气压力 0.5 MPa,环境压力 0.1 MPa,环境温度 293 K。3 种节流形式轴承的承载力和刚度分别如图 8(a)和 8(b)所示:(1)复合节流式静压气体轴承的承载能力随着气膜厚度的增大而减小,刚度呈现先增大后减小的趋势,且在气膜厚度为 14 μm 时达到最大。因此,复合节流式静压气体轴承刚度在一定的气膜厚度下有极限值,且在较小气膜厚度下可承受较大承载力。(2)当气膜厚度小于 11 μm 时,复合节流式轴承具有最大承载力,其刚度虽低于多孔材料节流,但却远高于孔式节流。此外,当膜厚度为 11~15 μm 时,复合节流式轴承的承载力和刚度均高于多孔材料节流和孔式节流轴承。因此,复合节流式静压气体轴承具有更好的静态性能。

3 复合节流式静压气体轴承实验

图 9 和图 10 分别为复合节流式静压气体轴承的实物图和检测装置。轴承的静态性能测试主要是测量不同气膜厚度下轴承承载力和气膜内的压力分布,进而求出轴承刚度。大气环境下轴承静态性能检测装置主要包括轴承的压力加载单元、气膜压力检测单元、轴承供气单元和信号输出单元。轴承供

气一定时间后,高压气体经节流器流出,负载和轴承在气压的作用下上移,产生的垂直位移即为要检测的气膜厚度。通过增减砝码,求出不同气膜厚度下轴承的承载力。图 11 和图 12 分别为不同负载时对轴承气膜厚度的实验检测。

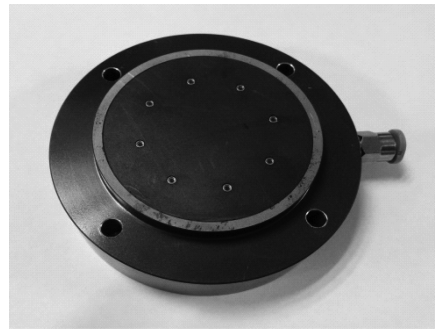


图 9 复合节流式静压气体轴承实物图

Fig.9 Aerostatic bearings with compound restrictors



图 10 轴承静态性能检测装置

Fig.10 Static performance testing device

在供气压力为 0.5 MPa,环境压力为 0.1 MPa,环境温度为 293 K 条件下,将通过仿真计算和实验测量 2 种方法得到的轴承承载力和刚度进行对比。对比结果如图 13 和图 14 所示:(1)轴承承载力和刚度的计算结果与实验结果的变化趋势基本保持一致,证实了仿真计算结果的准确性。(2)实验值和



图 11 负载 50 N 轴承气膜厚度检测

Fig.11 Gas film thickness measurement for loaded 50 N



图 12 负载 100 N 轴承气膜厚度检测

Fig.12 Gas film thickness measurement for loaded 100 N

计算值之间存在一定的误差,且误差在气膜厚度较小时比较大,最大误差小于 10%。(3)实验结果普遍小于数值计算结果。

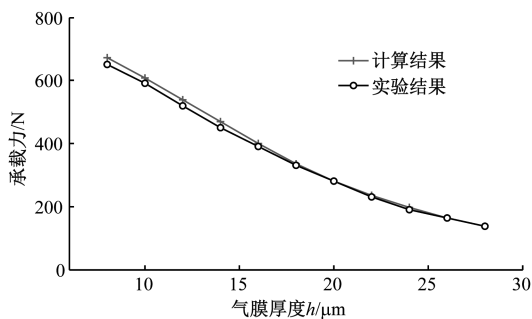


图 13 承载力结果对比

Fig.13 Comparison of bearing capacity

4 实验误差分析

由图 13 和图 14 可知,气膜厚度较小时,轴承承载力和刚度的实验测量值低于计算结果。造成这种现象的主要原因在于:

(1)仿真计算时,工作平面设定为理想平面,而在实际加工过程中,加工平面存在一定的粗糙度,即在无供气条件下,轴承与止推平台之间已经存在一定的膜厚度,导致实验测量值比实际中的气膜厚

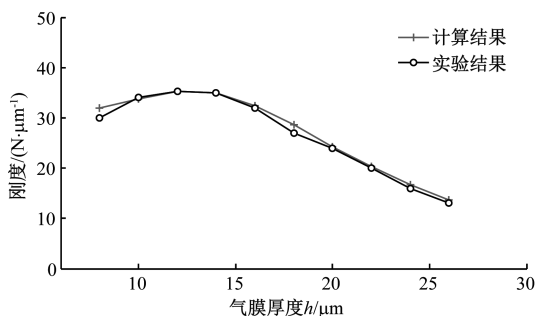


图 14 刚度结果对比

Fig.14 Comparison of stiffness

度小,且在低气膜厚度下,轴承测量不稳定。

(2)复合节流式静压气体轴承加工过程中易造成多孔石墨材料孔隙的堵塞,降低了多孔材的渗透性,轴承的承载力和刚度也随之减小。

(3)不同负载下的气膜厚度的检测都需要移动砝码,频繁的更换砝码会造成一定的人为误差。

5 小结

本文主要介绍了复合节流式静压气体轴承的结构设计、轴承内部流场特性以及实验研究。并将仿真结果与实验结果进行了对比,得出以下结论:

(1)将孔式节流器与多孔材料节流器相结合形成的复合节流式静压气轴承,在一定气膜厚度下实现了承载力大、刚度、稳定性强的性能。

(2)利用大涡模拟分析了复合节流式静压气体轴承的稳定性,并证明了其稳定性略低于多孔材料节流轴承的稳定性,但却远高于孔式节流轴承的稳定性。

(3)通过实验验证了 Fluent 仿真计算结果的正确性,为复合节流式静压气体轴承动态性能的研究提供了有利条件。

参考文献:

- [1] HUANG P, LEE W B, CHAN C Y. Investigation on the position drift of the axis average line of the aerostatic bearing spindle in ultra-precision diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 108: 44-51.
- [2] YOSHIMURA T, HANAFUSA T, KITAGAWA T, et al. Clarifications of the mechanism of nano-fluctuation of aerostatic thrust bearing with surface restriction[J]. Tribology International, 2012, 48(2012): 29-34.
- [3] 程志勇, 张燕平, 张再峰, 等. 小孔节流静压气体轴

- 承载力分析[J]. 润滑与密封, 2017, 42(05): 24-29+112.
- [4] Chen X, Chen H, Zhu J, *et al.* Vortex suppression and nano-vibration reduction of aerostatic bearings by arrayed microhole restrictors [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23(5): 842-852.
- [5] Belforte G, Raparelli T, Trivella A, *et al.* CFD analysis of a simple orifice-type feeding system for aerostatic bearings[J]. *Tribology Letters*, 2015, 58(2): 1-8.
- [6] 孙昂, 马文琦, 刘慧贞. 小间隙下狭缝节流静压气体止推轴承静态性能的研究[J]. *机床与液压*, 2017, 45(13): 48-51.
- [7] GAO S Y, CHENG K, CHEN S J, *et al.* CFD based investigation on influence of orifice chamber shapes for the design of aerostatic thrust bearings at ultra-high speed spindles[J]. *Tribology International*, 2015, 92: 211-221.
- [8] LI Y T, ZHAO J Y, ZHU H X. Numerical analysis and experimental study on the micro vibration of an aerostatic thrust bearing with a pocketed orifice-type restrictor. *Proc IMechE, Part J: J Engineering Tribology* 2014; 229: 609-623.
- [9] 吴定柱, 陶继忠. 全多孔材料石墨静压气体止推轴承静态性能分析[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(19): 2296-2301.
- [10] SCHENK C, BUSCHMANN S, RISSE S, *et al.* Comparison between flat aerostatic gas-bearing pads with orifice and porous feedings at high-vacuum conditions [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(4): 319-328.
- [11] HOSOKAWA T, SOMAYA K, MIYATAKE M, *et al.* Static Characteristics of aerostatic Thrust bearings With Multiple Porous Inlet Ports [J]. *Journal of Tribology*, 2015, 137(2): 3698-3703.
- [12] 张雯, 尹健龙, 张玉冰, 等. 多微通道式静压气体节流器承载力研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(20): 138-144.
- [13] HUANG T Y, WANG B Z, LIN S C, *et al.* A Study on Characteristics and Geometric Parameters of the Flat Porous aerostatic bearing [J]. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2013, 7(7): 1480-1486.

(上接第59页)

- [7] Tambusay A, Suprobo P, Faimun, Amiruddin A. Finite element analysis on the behavior of slab-column connections using PVA-ECC material [J]. *Journal Teknologi*, 79(5): 23-32
- [8] Gencturk B, Elnashai A S. Numerical modeling and analysis of ECC structures[J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(4): 663-682
- [9] 陈超. 超高韧性水泥基复合材料动态力学[D]. 浙江大学, 2018
- [10] 张逸风. 喷射超高韧性水泥基复合材料加固既有混凝土结构试验研究[D]. 浙江大学, 2018
- [11] Lubliner J, Oliver J, Oller S, *et al.* A Plastic-Damage Model for Concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25: 299-329
- [12] Lee J, Fenves G L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 1998, 124(8): 892-900
- [13] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [14] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982, 01: 1-12
- [15] Tetsushi K, Zhong Lin, Victor C. Li. Tensile stress-strain modeling of pseudostrain hardening cementitious composites[J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, 2000, 12(2): 147-156
- [16] 李艳, 刘泽军. 高韧性 PVA-FRCC 单轴受压力学行为及本构关系[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(4): 606-612
- [17] 李伟琛. 基于试验的 ABAQUS 混凝土塑性损伤参数取值方法[J]. *结构工程师*, 2016, 32(2): 64-69

软土地区超深基坑群深开挖围护结构特性研究

刘念武^{1,2,3}, 薛增光³, 黄栩¹, 俞济涛¹, 龚晓南², 朱祖华¹

(1 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2 浙江大学 滨海与城市岩土工程中心, 杭州 310058; 3 浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要:随着地下空间开发的不断深入,软土地区超深基坑群的共建案例不断增多,对超深基坑群承载能力及变形特性相互影响进行研究具有重要现实意义。结合杭州火车东站进行有限元模拟分析研究发现:对于超深地铁站围护结构,随着基坑开挖深度的增大,围护墙桩身侧向位移及弯矩呈不断增大的趋势,地下四层逆作板的施工显著限制了侧向位移及墙身弯矩的发展。A、B区地连墙在33.0 m深度处侧向位移值达到最大值,在50.0 m深度处墙身弯矩达到最大值,最大弯矩达8871 kN·m。由于受到土体加固、土体宽度、邻近土体卸荷等多种因素影响,A、B区块外侧及A、B区块之间的土压力较为接近。A区块基坑开挖引起的H区块围护桩最大侧向位移值及最大沉降值分别为86.9 mm和25.9 mm,A区块基坑开挖引起围护桩桩身弯矩值为H区块开挖时围护桩最大弯矩值的1.17倍。

关键词:深基坑;软土;变形;土压力;墙身弯矩

中图分类号:TU 473

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0081-07

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.014

Study on the Working Characteristics of Retaining Structure of Ultra-deep Excavation Group in Soft Soil

Liu Nianwu^{1,2,3}, Xue Zengguang³, Huang Yu¹, Yu Jitao¹, Gong Xiaonan², Zhu Zuhua¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group CO. Ltd, Chengdu 610031, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the deepening of the development of underground space, the co-construction cases of ultra-deep excavation in soft soil areas are increasing, and it is of great practical significance to study the interaction between the bearing capacity and deformation characteristics of ultra-deep excavation. Combined with Hangzhou East Railway Station for finite element simulation analysis, it is found that for the ultra-deep metro station retaining structure, with the increase of excavation depth, the lateral displacement and bending moment of the retaining wall tend to increase. The construction of the four-layer underground reversed board significantly limits the development of lateral displacement and wall bending moment. The lateral displacement of the retaining wall of excavation A and B areas reaches the maximum at the depth of 33.0m. The bending moment of the wall reaches the maximum at the depth of 50.0m, and the maximum bending moment reaches 8871kN·m. Due to various factors such as soil reinforcement, soil width and adjacent soil unloading, the earth pressure between the outer side of excavation A and B

收稿日期:2018-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51608485),浙江省“151人才工程”。

作者简介:刘念武(1987-),男,山东枣庄人,博士,讲师,主要从事基坑和隧道工程方面研究,E-mail: zjulnw@163.com。

and the inner of excavation A and B is relatively close. The maximum lateral displacement value and maximum settlement value of the H block retaining pile caused by excavation of the A block are 86.9mm and 25.9mm, respectively. The bending moment of the retaining pile caused by excavation in the A area is 1.17 times the bending moment when H block is excavated.

Keywords: deep excavation; soft soil; displacement; lateral soil pressure; bending moment of retaining wall

随着我国地下空间开发的不断深入,作为地下空间开发重点的城市轨道交通建设方兴未艾。据统计,目前我国已有60余座城市的城轨线网获得了审批,规划线路达7000 km,杭州作为2022年亚运会举办城市,城市轨道交通更是发展迅速,到亚运前,杭州将开通10条地铁线路且地铁里程达到400 km以上。作为轨道交通重点的地铁车站深基坑工程遇到越来越多的工程难题并受到学者们的关注,主要体现在:(1)部分地铁换乘点达到3条甚至4条线路同时汇集,因此地铁车站基坑开挖深度不断增大,30 m以上深度的地铁车站深基坑工程不断涌现;(2)地铁车站往往设置在城市繁华地带,城市密集区各种设施鳞次栉比,深基坑变形引起的既有设施的变形问题越来越凸显。杭州位于华东地区,分布有深厚软弱土层,具有天然含水量大、孔隙比大、压缩系数高、强度低,以及蠕变性、触变性等特殊的工程地质性质。由于软土独有的以上特性,使得软土地区的基坑工程设计及变形控制尤为困难。

对于有限宽度的土条主动土压力的计算直接采用传统的朗肯、库仑土压力等计算方法已经不合适,该问题已经引起了广大岩土工作者的注意。目前,工程师及相关学者关于有限宽度土条对支挡结构产生的主动土压力这一问题已经做了大量的讨论与研究。国外学者对于基坑开挖引起的环境影响进行了大量的分析,通过工程实例与模型试验研究了基坑开挖对于周围环境的变形与建筑影响^[1,2]。国内的研究人员也开展了一定的研究与分析,马平等^[3]、王洪亮等^[4]、王贤能等^[5]利用刚体极限平衡方法分析坡面竖直的紧邻既有建筑的有限宽度土条的主动土压力,得到了该情况下土条的破坏形式和土压力计算公式。金亚兵等^[6]利用基于库仑土压力理论的叠加法计算出垂直坡和斜坡的主动土压力。总体来说,计算方法都是针对边坡邻近现有地下建(构)筑物的情形,即有限土条的边界一侧固定,另一侧会产生微小变形的情况下,应用刚体的极限平衡法—即假定有限土体是一个刚体,失稳时破坏面是一条穿过坡脚的直线,利用力和力矩的平衡推导出主动

土压力的计算公式。大量学者对基坑开挖引起的周边土体位移场规律进行了研究,如 Peck^[7]、Blackburn 和 Finno^[8]、Wang 等^[9]、Ou 等^[10]、Moon 等^[11]对基坑周边土体移动机理以及规律进行了研究。郑刚等^[12]、Schuster 等^[13]在前人研究基础上对不同侧移分布模式条件下基坑外地表和深层土体的竖向及水平位移场规律进行了对比研究。木林隆^[14]基于有限元方法,采用考虑土体小应变特性的 HS-Small 模型并利用芝加哥地区的基坑工程实测资料进行反分析,提出了基坑开挖引起的周边土体三维位移场计算公式,并对其进行了验证。

在城市密集区同时修建数个超深基坑极为罕见,对基坑设计提出了很高的要求。常规基坑设计主要基于平面弹性地基梁法,最主要设计参数是水土压力及地基土的抗力系数。超深基坑的土压力分布模式及地基土的抗力系数是否与常规基坑相同值得探讨,同时群坑同时施工,对基坑变形及围护结构内力部分规律均产生影响,因此,超深群坑设计理论急需进一步研究。基于以上分析,城市密集区超深群坑开挖相互影响问题的研究具有必要性及紧迫性。因此,本次研究以杭州火车东站工程为依托,对以下问题进行深入研究:(1)超深基坑受力变形特点;(2)超深基坑群相互影响及围护结构受力变形规律;(3)超深基坑开挖对邻近支护结构影响分析。

1 工程概况

杭州火车东站新建地铁车站分别为杭州地铁6号线二期火车东站站(A区)和机场快线火车东站站(B区),均为地下四层岛式车站,采用双柱三跨箱型框架结构,火车东站A区和B区车站全长分别约166.8、146.8 m,标准段宽约22.5 m,A区和B区标准段挖深分别达到31 m和33 m。新建车站与邻近设施位置关系如图1所示。A区基坑围护结构采用2道混凝土支撑和9道钢支撑,地下3层板逆作施工;B区基坑围护结构采用2道混凝土支撑和9道钢支撑,地下4层板逆作施工。A、B区地连墙均

采用 C35 混凝土进行成墙,成墙过程采用泥浆护壁的方式以避免地连墙塌孔,混凝土浇筑采用水下浇筑的方式。逆作板采用 600 mm 厚混凝土板进行施工,施工配筋按照永久结构要求的配筋量进行配筋,混凝土为 C35 型号混凝土。钢支撑主要有 609 mm 直径和 800 mm 直径 2 种类型支撑,上部 3 层钢支撑采用 609 mm 直径钢支撑,下部支撑采用 800 mm 直径钢支撑。

支护结构剖面图如图 2 所示,图 1 中上侧为图 2 中的西侧,下侧对应图 2 中的东侧,火车东站 A 区及火车东站 B 区与图 1 中的 A、B 区对应。拟建地铁车站周边环境与新建工程相互影响很大,在同一剖面上有距离较近的 4 个基坑,火车东站 B 区一侧

靠近已建火车东广场,火车东站 A 区一侧靠近 H 地块在建地下室,同时,火车东站 A 区与火车东站 B 区地下室较为接近,距离约 14.5 m,B 区距离东广场围护结构为 10.0 m,A 区距离 H 地块围护桩最近为 5.0 m。其中火车东站 A 区及 B 区基坑挖深较大,A 区挖深为 31.0 m,地连墙长度为 58.0 m,地连墙厚度为 1.2 m;B 区挖深为 33.0 m,地连墙长度为 61.0 m,地连墙厚度为 1.2 m;已建成的火车东广场东广场开挖深度为 13.0 m,支护结构等效厚度为 0.6 m;在建地下室 H 地块开挖深度为 10.0 m,支护结构等效厚度为 0.6 m。

基坑周边的环境情况决定了基坑的变形控制要求,《上海市基坑工程技术规范》(DG/TJ08-61-

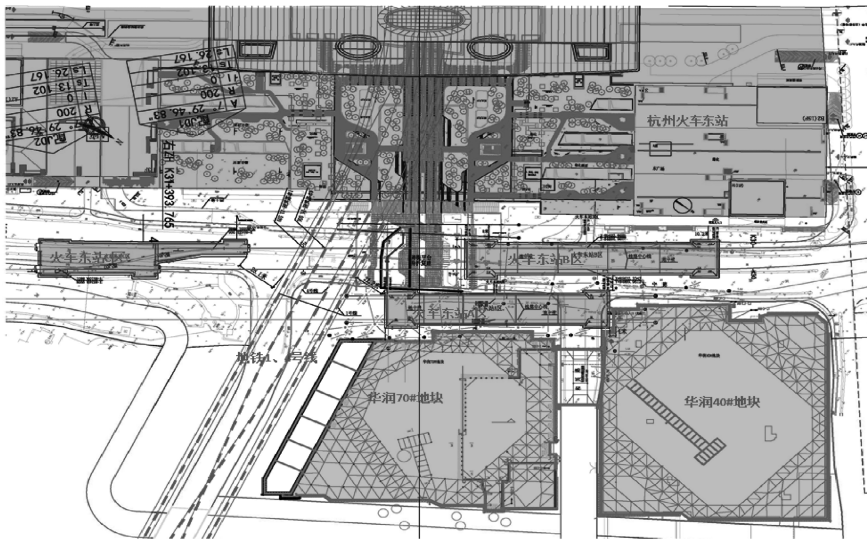


图 1 火车东站深基坑群及邻近设施平面布置图

Fig.1 Floor plan of deep foundation group and adjacent facilities at East Railway Station

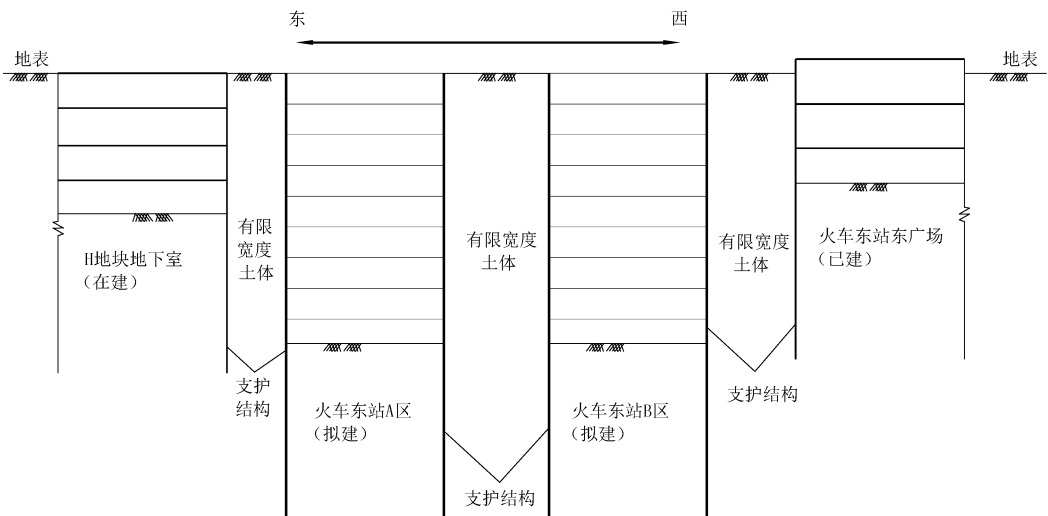


图 2 火车东站超深基坑群剖面示意图

Fig.2 Cross section sketch of deep foundation group in East Railway Station

2010)和浙江省《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T1096-2014)均提出了不同的基坑环境保护等级对应的基坑变形控制指标,然而基坑环境保护等级应根据周边环境对附加变形的承受能力来确定,受周边建构筑物的结构类型、建构筑物与基坑距离及基坑开挖深度等多方面复杂因素影响。为了保证深基坑开挖过程中周边环境安全,超深基坑施工变形控制标准及对周边环境的保护对策值得进一步研究。

2 模型的建立

2.1 模型输入参数

本次数值模拟采用有限元软件 Plaxis 2D 进行分析,土体参数的取值结合杭州火车东站项目的软土特点进行取值,同时部分参数选取参考了上海地区软土的参数取值,主要输入参数主要如表 1 所示。通过有限元对基坑群土体开挖时围护结构及邻近土体变形特性进行分析。

2.2 有限元分析过程

有限元建模分析过程:① 围护结构施工;⇒② 东广场车站围护结构施工及土体开挖;⇒③ H 地块围护结构施工;⇒④ H 地块土体开挖;⇒⑤ A、B 区地连墙施工及土体加固;⇒⑥ A、B 区内支撑施工;⇒⑦ A、B 区块土体分步开挖,其中 A 区开挖早于 B

区,早开挖深度为 4.0 m;⇒⑧ 施工完成。

3 结果分析

3.1 A 区护墙侧向位移、墙身弯矩与开挖深度的关系

从图 4 可以看出,地连墙侧向位移值随着基坑开挖深度的增加呈不断增大的趋势,开挖深度为 6.0 m 时,地连续侧向位移值较小。从图 4 可以看出,地连墙侧向位移值呈“弓形”变形型式,由于桩端嵌固至岩层中,桩端侧向位移值接近于 0。在基坑开挖至 23.0、28.5、31.0 m 时,围护结构最大侧向位移值分别为 107、125、130 mm,最大侧向位移值位于开挖底附近。随着基坑开挖深度的增大,围护墙侧向位移增加值较小,主要是由于在 24.0 m 深度处施工了地下 2 层逆作板,逆作板的施工限制了围护墙侧向位移值的增加。

从图 5 可以看出,地连墙墙身弯矩值呈现出 2 个反弯点,开挖深度超过 23.0 m 时,地连墙弯矩反弯点点处于 25.0 m 和 45.0 m 深度附近处。随着开挖深度的增大,最大地连墙弯矩值呈不断增大的趋势,在开挖至 28.5 m 以上时,地连墙弯矩值随开挖深度的增加变化较小。对应开挖深度为 23.0、28.5、31.0 m 时,最大负弯矩值分别为 4630、6440、

表 1 模拟土体输入参数

Table 1 The model parameters of soil

土层名称	底部深度/m	$\gamma_{\text{sat}}/$ kPa	$c/$ kPa	$\varphi/$ °	$E_{50}^{\text{ref}}/$ (kN/m ²)	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/$ (kN/m ²)	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ (kN/m ²)	$G_0^{\text{ref}}/$ (kN/m ²)	$\gamma_{0.7}$
杂填土	1.9	18.0	15.0	18.0	3000	3000	18e ³	30e ³	1.5e ⁻³
砂质粉土	6.0	18.0	7.0	26.0	10000	10000	50e ³	80e ³	1.5e ⁻³
粉砂夹粉土	14.1	19.8	5.0	29.0	11000	11000	55e ³	90e ³	1.5e ⁻³
淤泥质黏土	28.5	17.8	15.0	10.3	4000	3000	20e ³	45e ³	1.5e ⁻³
黏土	41.7	17.8	21.2	10.1	4500	3500	25e ³	55e ³	1.5e ⁻³
圆砾	50.7	22.0	3.0	35.0	25000	25000	85e ³	125e ³	1.5e ⁻³
强风化凝灰岩	55.3	24.0	-	-	-	-	-	-	-
中风化凝灰岩	70.0	24.0	-	-	-	-	-	-	-

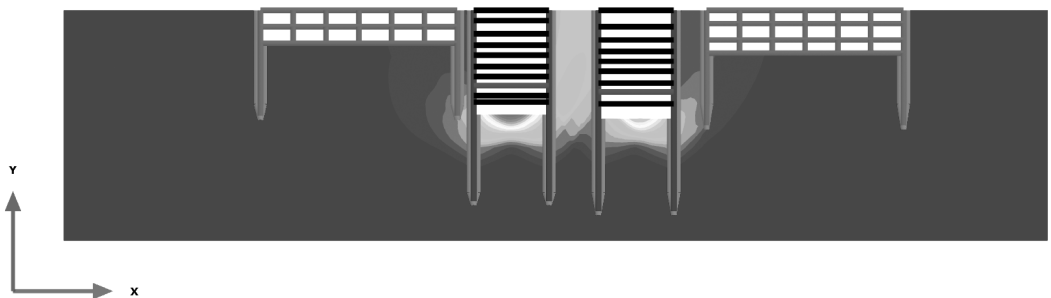


图 3 Plaxis 2D 建模示意图

Fig.3 Sketch map of Plaxis 2D finite element modeling

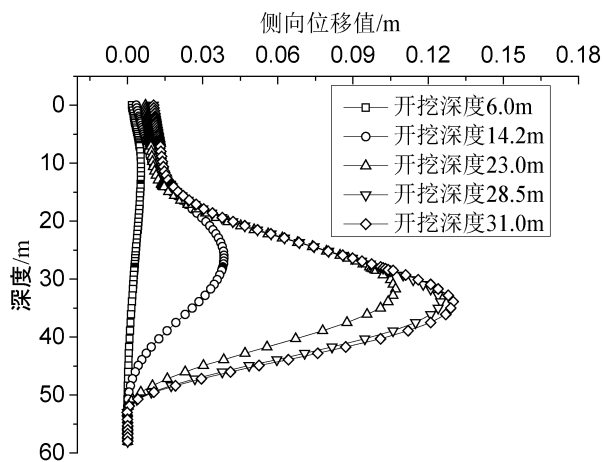


图 4 A 区东侧地连墙侧向位移随深度变化

Fig.4 Lateral displacement of retaining wall corresponding to different excavation depth of the excavation A zone

7050 kNm, 最大正弯矩值分别为 3180、7140、8200 kNm。可见, 对于超深基坑, 地连墙在开挖底以上承受较大的墙身弯矩, 且同时出现正负弯矩值。对于该地连墙, 在 50.0 m 深度附近达到最大弯矩值, 主要是由于桩端可以看作嵌固端, 在嵌固端附近易达到弯矩极值, 因此, 需要对地连墙下部的桩身配筋及地连墙质量进行有效控制。

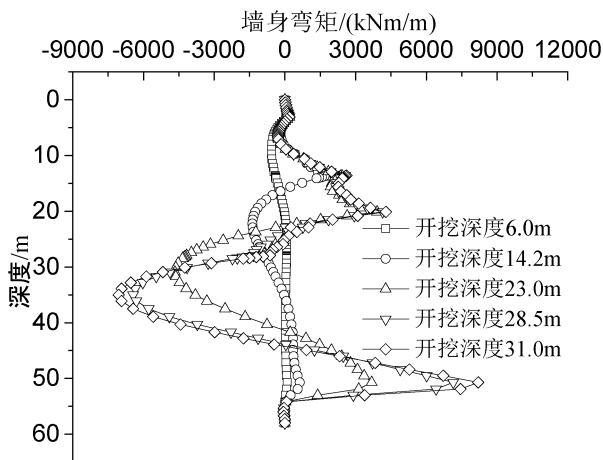


图 5 A 区东侧地连墙墙身弯矩值随深度变化

Fig.5 Bending moment of retaining wall corresponding to different excavation depth of the excavation A zone

3.2 A、B 区墙身侧向位移值、墙身弯矩值对比

从图 6 可以看出, 在开挖至基坑底时, A 区东侧、西侧以及 B 区西侧的侧向位移值变化较为接近, 在 33.0 m 深度附近处侧向位移值达到最大值, 最大位移值分别为 129、116、125 mm, B 区东侧围护墙最大侧向位移值为 73 mm, 明显小于其余位置处

围护墙最大侧向位移值。综合分析可以看出, A 区西侧侧向位移值小于东侧侧向位移值, B 区东侧侧向位移值小于 B 区西侧侧向位移值, 主要是由于 AB 区之间土体为有限宽度土体, 侧向土压力小于常规土压力, 因此, 围护结构侧向位移值偏小。同时, A 区开挖进度早于 B 区开挖进度, 导致 B 区东侧围护结构侧向位移值向 A 区位置处移动, 在 18.5 m 深度处, 侧向位移值达 18.4 mm。

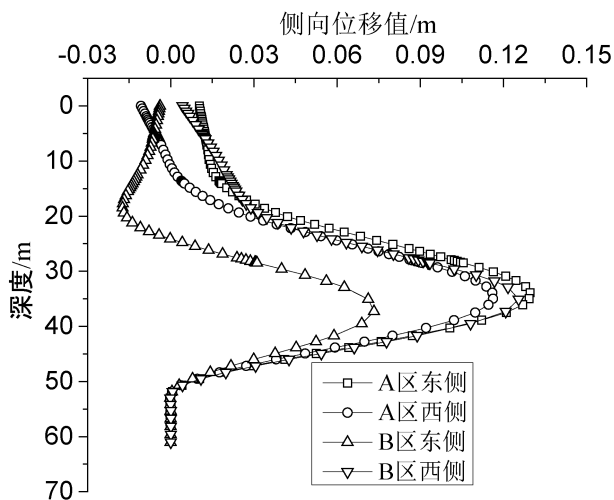


图 6 A 区及 B 区侧向位移值对比

Fig.6 Comparison of lateral displacement values in excavation area A and B

从图 7 可以看出, 对于超深基坑 A 区及 B 区地连墙弯矩值变化较为接近, 在地表以下 22.0、36.0、51.0 m 深度附近处达到极值, A 区及 B 区地连墙弯矩值最大值均发生在地表以下约 51.0 m 深度附近处, A 区东侧、西侧、B 区东侧、西侧最大弯矩值分别为 8871、8203、6546、9263 kNm, 结合地质资料发现, 在卵石层及强风化凝灰岩交界附近处地连墙达到最大弯矩值, 随着深度的增大, 墙身弯矩值减小至 0。同时, 对比墙身最大弯矩值可以发现, A 区西侧墙身弯矩值小于 A 区东侧墙身弯矩值, B 区东侧弯矩值小于 B 区西侧墙身弯矩值, 由于 A、B 区墙身间土体为有效宽度土体, 其土压力的大小限制了连续墙墙身弯矩的发展。同时, 可以看出, 虽然 B 区开挖深度为 33.0 m, A 区开挖深度为 31.0 m, 但是 B 区东侧地连墙墙身弯矩值明显小于 A 区西侧地连墙墙身弯矩值, 主要是由于 A 区基坑开挖进度早于 B 区基坑开挖进度, 土体向 A 区开挖位置处移动导致 B 区地连墙墙身弯矩的减小。因此, 对于共建超深基坑群, 需要充分考虑共建时土体应力历史以及围护结构变形及受力的相互影响, 进而更加科学的判定

围护基坑的变形及受力稳定,确保深基坑开挖安全。

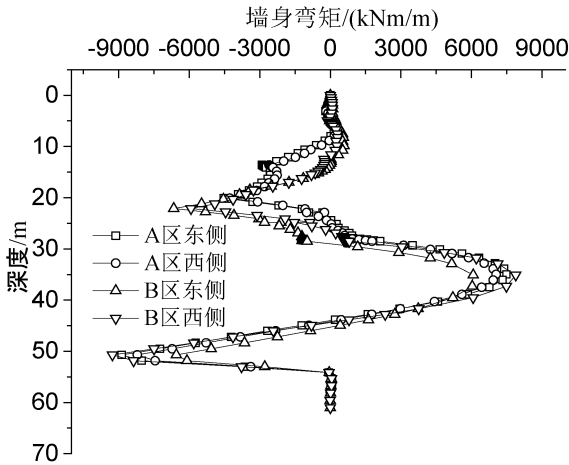


图 7 A、B 区地连墙墙身弯矩对比

Fig.7 Comparison of the retaining wall bending moment values in excavation area A and B

3.3 A、B 区基坑开挖至基底时土压力对比

图 8 给出了不同位置处侧向土压力的对比分析,对于邻近深基坑群,土压力大小受土体特性、土条宽度、邻近土体开挖卸荷等多种因素影响,从图 8 可以看出,对于超深基坑群,由于涉及到围护墙间土体加固、邻近基坑开挖卸荷等多种因素影响,A 区及 B 区超深基坑邻近土体水平向应力 σ_{xx} 随深度变化趋势较为接近,在 20~30 m 深度范围内,A、B 区之间土压力值略小于 A 区及 B 区邻近土压力值,主要是由于该位置处围护墙侧向位移值较大导致主动区土压力减小;在深度 50~55 m 深度处,围护墙所受水平向土压力较小,主要是由于该深度位于软土与下部基岩交汇处,下部基岩限制了侧向土压力的发挥。对于超深基坑群,土压力的大小受到多种因素影响,对于土条宽度、上部土体开挖卸荷、土体搅拌桩加固、施工顺序等因素对土压力的影响还需进一步深入分析,为超深基坑群有限土体土压力计算模型提供科学依据。

3.4 A 区基坑开挖对邻近 H 地块围护桩变形及弯矩影响

从图 9 可以看出,随着 A 区基坑的开挖,会引起邻近 H 地块基坑围护结构的侧向变形,侧向变形向 A 区方向为正向。可以看出,随着开挖深度的增大,H 地块基坑支护结构向 A 区开挖方向移动,开挖深度为 14.2 m 时,侧向位移值较小,当开挖深度大于 23.0 m 时,侧向位移值变化较大,最大侧向位移值位于桩端,主要是由于围护桩桩长为 32.0 m,邻近基坑开挖深度为 31.0 m,基坑在开挖至基底

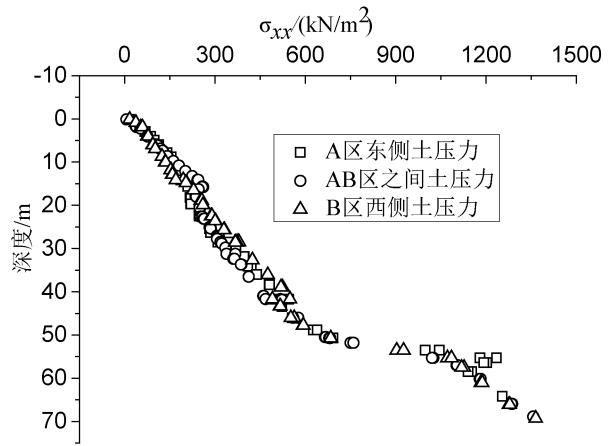


图 8 不同位置处土压力对比

Fig.8 Comparison of the lateral soil pressure values corresponding to different locations

时,往往在基底附近处达到最大侧向位移值。不同开挖深度下邻近围护桩最大侧向位移值及竖向位移如表 2 所示。

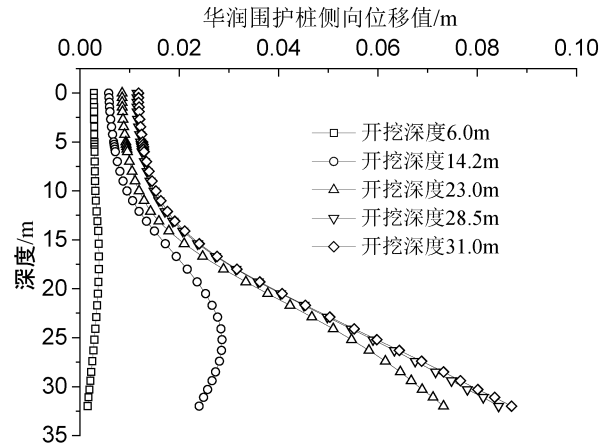


图 9 A 区开挖引起的 H 地块围护结构侧向位移

Fig.9 Lateral displacement of the retaining pile in H area caused by excavation in A area

表 2 车站 A 不同开挖深度下邻近围护桩侧向位移及竖向位移值

Table 2 Lateral displacement and vertical displacement of adjacent retaining piles under different excavation depths in A area

A 区开挖深度/m	最大侧向位移值/mm	最大竖向位移值/mm
6.0	3.8	1.4
14.2	28.6	5.2
23.0	73.2	19.7
28.5	84.3	24.5
31.0	86.9	25.9

从表 2 可以看出,随着开挖深度的增大,邻近围护桩的最大侧向位移值及最大竖向位移值均呈不断

增大的趋势,当开挖深度大于 28.5 m 时,竖向及侧向位移值变化幅度较小。可以看出,围护桩主要受基坑开挖引起的水平位移影响较大,对于邻近基坑支护结构,土体侧向位移值会造成邻近内支撑与支护结构间产生拉力,因此对于无法提供拉力的钢支撑应禁止使用,同时,需要对混凝土内支撑的抗拉性能进行安全性验算。

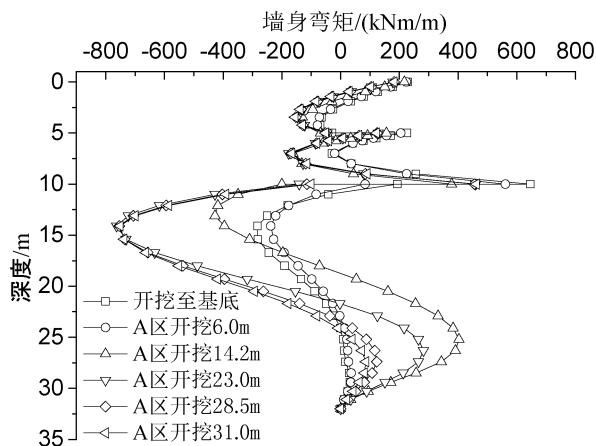


图 10 A 区基坑开挖时邻近支护结构弯矩变化

Fig.10 Bending moment of the retaining pile in H area caused by excavation in A area

从图 10 可以看出,H 地块开挖深度为 10.0 m,基坑开挖至基底时,围护桩最大弯矩值为 646 kNm,对应深度为 10.0 m。随着火车东站 A 区块基坑开挖的进行,桩身所受弯矩在底边以下 10.0 m 深度范围内变化较小,在 10.0 m 深度范围以下围护桩所受弯矩随开挖深度增大呈不断增大的趋势,最大弯矩值呈现“反转”的变化趋势。当 A 区基坑开挖至 31.0 m 深度时,H 区块围护桩最大弯矩值位于 14.1 m 深度附近处,最大弯矩值为 754 kNm。可见,A 区基坑开挖引起围护桩桩身弯矩值要大于 H 区块土体开挖引起的围护桩弯矩值,邻近基坑开挖引起的最大弯矩值为 H 区块围护桩最大弯矩值的 1.17 倍,可见,对于基坑群的围护结构安全性验算,要充分考虑邻近基坑开挖对围护结构受力及变形的影响。

4 结论

通过结合杭州火车东站超深基坑群变形及受力特性的数值分析发现:

(1)随着基坑开挖深度的增大,围护墙桩身侧向位移及弯矩呈不断增大的趋势,地下四层逆作板

的施工限制了侧向位移及墙身弯矩的发展。

(2)A、B 区地连墙在 33.0 m 深度处侧向位移值达到最大值,在 50.0 m 深度处墙身弯矩达到最大值,最大弯矩达 8871 kNm。有限土体两侧墙身弯矩略小于其余侧墙身弯矩。

(3)由于受到土体加固、土体宽度、邻近土体卸荷等多种因素影响,A、B 区块邻近及 A、B 区块之间的土压力较为接近。

(4)A 区块基坑开挖对邻近 H 区块的围护桩侧向位移及弯矩产生较大影响,A 区块基坑开挖引起的 H 区块围护桩最大侧向位移值及最大沉降值分别为 86.9 mm 和 25.9 mm,A 区基坑开挖引起围护桩桩身弯矩值为 H 区块开挖时围护桩最大弯矩值的 1.17 倍。

参考文献:

- [1] GOH K H, MAIR R J. Building damage assessment for deep excavations in Singapore and the influence of building stiffness[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2011, 42(3):1-12.
- [2] LEUNG C F, ONG D E L, CHOWY K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: Collapsed wall [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1):45-53.
- [3] 马平,秦四清,钱海涛.有限土体主动土压力计算[J].岩石力学与工程学报,2007,27(增刊1):3070-3074.
- [4] 王洪亮,宋二祥,宋福渊.紧邻既有建筑基坑有限土体主动土压力计算方法[J].工程力学,2014,31(4):76-81.
- [5] 王贤能,邹辉,初振环.土条状抗壁土压力计算方法及应用分析[J].工程勘察,2007,11:18-22.
- [6] 金亚兵,刘吉波.相邻基坑土条土压力计算方法探讨[J].岩土力学,2009,30(12):3759-3764.
- [7] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]. Proc 7th ICSMFE, Mexico, 1969: 225-290.
- [8] Blackburn J T, Finno R J. Three-Dimensional responses observed in an internally braced excavation in soft clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(11): 1364-1373.
- [9] Wang J H, Xu Z H, Wang W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985-994.
- [10] Ou C Y, Liao J T, Cheng W L. Building response and ground movements induced by a deep excavation. Geotechnique, 2000, 50(3): 209-220.

汽车电动转向器动力学建模和控制参数整定

王超, 贾军涛, 冯子亮

(邢台职业技术学院, 河北 邢台 054035)

摘要:为提高汽车电动转向器在助力转向过程中的响应带宽和响应精度,针对电动转向器中机械传动环节中存在的固有误差,提出一种基于控制器参数整定的前馈补偿控制方法,能够快速准确的补偿系统固有误差,有效提高转向系统的动态响应。首先针对电动转向系统中的方向盘、车轮转向和电子控制子系统分别进行数学建模,确定驾驶员输入的转矩指令与电机助力特性及输出转向位移角度等的数学关系;其次,利用经典控制理论定量分析电动转向系统中输入转矩与输出位移间的代数关系;再次,针对系统固有误差提出一种基于参数整定的前馈控制器补偿策略,并研究补偿方法的收敛速度和收敛精度;最后本文利用 Matlab/Simulink 仿真分析验证所提算法的收敛特性,并通过系统仿真模型研究了所提方法的正确性和有效性。仿真结果表明,所提控制参数整定策略能够有效补偿电动转向系统固有误差,且补偿策略收敛特性良好,为补偿电动转向系统固有误差提供解决方案。

关键词: 电动转向器; 动力学模型; 参数整定

中图分类号: TP278

文献标识码: A

文章编号: 1001-7119(2020)01-0088-05

DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.015

Dynamic Modeling and Control Parameter Tuning of Automotive Electric Power Steering

Wang Chao, Jia Juntao, Feng Ziliang

(Xingtai Polytechnic College, Xingtai Hebei 054035, China)

Abstract: In order to improve the dynamic accuracy of automotive electric power steering, a feedforward compensation control method based on tuning of controller parameters was proposed. Aiming at inherent error existing in mechanical transmission part of electric steering gear, the inherent error of the system can be compensated quickly and accurately, and the dynamic response of the steering system can be effectively improved. Firstly, different dynamic models of the electric power steering system were established respectively. Secondly, quantitative analysis of algebraic relationship between input torque and output displacement in electric steering system by classical control theory. Afterwards, based on the feedforward controller compensation, a strategy of parameter tuning was proposed. The convergence speed and convergence accuracy of the compensation method were studied. Finally, the convergence characteristics of the proposed algorithm were verified by Matlab/Simulink simulation analysis, and the correctness and effectiveness of the proposed method were studied through the system simulation model. The simulation results showed that the proposed control parameter tuning strategy could effectively compensate the inherent error of the electric steering system, which provides a solution for the compensation of the inherent error of the electric steering system.

Keywords: electric power steering; dynamic model; parameter tuning

收稿日期: 2019-02-11

作者简介: 王超(1988-),男,河北邢台人,讲师,硕士学位,主要研究方向为汽车电动助力转向技术。

E-mail: 398341506@qq.com。

电动转向器(electric power steering, EPS)能够实现精确的电子转向控制,提高汽车燃油性价比,减轻驾驶员操作机械转向装置的负担,使驾驶员获取较好的驾驶体验。与此同时,EPS通过电子助力系统实现汽车转向,增加对驾驶员扭矩指令输入的响应带宽和响应速度,且可以根据路面情况自动调整助力曲线,实现快速准确的转向控制^[1, 2]。

电动转向器主要包括方向盘、车轮转向和电子控制系统,电动转向器系统工作时,首先电子控制系统需要获取方向盘传感器和当前车辆运行状态的监控数据;再利用内部中央处理单元对监控数据进行计算处理;然后通过车辆转向子系统控制车辆实现转向,同时将车轮转向过程中扭矩阻力传感器等信息传递给电子控制系统,最终实现闭环电动转向控制过程^[3-7]。然而,在此控制过程中,由于在转向盘子系统 and 车轮转向子系统中存在机械传动环节,如方向盘子系统中转向过程中的弹簧阻尼系统和车轮转向子系统中的齿轮齿条传动环节,使系统中存在机械间隙和非线性,致使电动转向系统带宽、控制精度及稳定性受到影响。

为此,目前国内外学者针对此问题进行了广泛深入的研究。施淑洪等针对汽车电动转向系统,将方向盘和车轮转向子系统近似为线性系统并建立数学模型,研究分析了控制器参数对系统跟踪精度和快速性的影响^[8]。施国标等研究了不同车型动力学条件下,电动助力转向系统与电机助力特性及扭矩传感器的匹配问题^[9]。唐新蓬等根据经典电动转向系统动力学模型,建立系统的传递函数模型,利用仿真软件分析系统在阶跃输入下的时域响应并探究了系统的频率特性^[10]。何仁等对电动转向系统的稳定性约束条件进行研究,提出了基于稳定控制器的电动助力转向系统设计方案^[11]。Liao等综合考虑EPS模型、转向模型和主动悬架系统模型,建立了整车的数学模型,进行了系统集成层面的定量分析^[12]。Parmar等提出了一种主动阻尼与回正控制相结合的控制算法,算法能够提高方向盘的回正速度和精度^[13]。综上所述,国内外学者针对汽车电动转向系统的动力学模型和传递函数进行分析,从不同角度对系统进行定量分析,对系统的动力学特性有准确的把握。然而针对系统中机械传动环节存在的固有误差分析考虑较少,并未从控制器设计角度研究机械传动误差对电动转向系统控制精度的影响。

因此,为了准确有效研究电动转向系统中机械

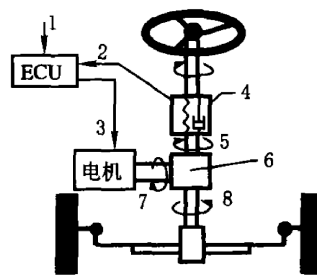
传动环节中固有误差对电动转向系统动态跟踪精度的影响,本文首先建立了车辆转向系统的动力学模型,并推导其传递函数;其次,提出一种基于前馈补偿控制器补偿系统固有误差的控制策略,阐述前馈控制器补偿策略的机理,并分析所提算法的收敛速度和收敛精度;最后,利用Matlab/Simulink软件仿真验证所提方法的收敛性和对系统内部误差的补偿能力。

1 车辆转向系统动力学建模

图1为典型的电动转向系统原理控制结构,电子控制单元(electric control unit, ECU)接收当前横摆速信号1和转向信号2,通过内部中央处理单元计算得到助力电流,驱动电机带动齿轮齿条实现差速器的转向功能。针对图1所示典型电动转向系统中的方向盘及进行受力分析,根据牛顿第二定律可以得到

$$J_h \ddot{\theta}_h = T_d - K_s \left(\theta_h - \frac{x_r}{R_s} \right) - b_h \dot{\theta}_h + f_h \quad (1)$$

式中 J_h 和 θ_h 分别为方向盘转轴的转动惯量和转角, T_d 为方向盘扭矩, K_s 为转向轴的抗扭刚度, R_s 为主动驱动轮的小齿轮半径, b_h 为转向轴的抗扭阻尼系数, x_r 和 f_h 分别为齿轮齿条的位移和系统非线性扭矩阻力。



1、横摆速信号; 2、转向信号; 3、助力电流; 4、扭矩传感器; 5、转向扭矩; 6、齿轮齿条; 7、助力扭矩; 8、反作用扭矩

图1 电动转向器原理框图

Fig.1 Principle block diagram of EPS

电动转向系统中齿轮齿条的机械传动环节,其将助力电机输出的转动转化为直线位移运动,驱动差速器实现转向功能,针对齿轮齿条进行受力分析

$$m \ddot{x} = \frac{K_s}{R_s} \left(\theta_h - \frac{x_r}{R_s} \right) - b_r \dot{x}_r - F_{ir} + \frac{K_m}{R_s} \left(\theta_m - \frac{x_r}{R_s} \right) \quad (2)$$

式中 m 为转向横拉杆的质量, x 为转向横拉杆

的位移, b_r 为齿轮齿条机械传动过程中的阻尼系数, F_r 为转向横拉杆驱动力, K_m 助力电机扭矩刚度, G 为助力电机传动比, x_r 为齿轮齿条的位移。

电动转向系统中电机用于驱动齿轮转动, 电机输入为电流信号, 通过电磁感应原理最终产生输出转矩, 带动负载实现转动。

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - T_a - b_m \dot{\theta}_m + f_m \quad (3)$$

式中 J_h 和 θ_h 分别为助力电机转动惯量和助力电机的转动角度, T_m 为电机在指定电流条件下输出转矩, T_a 为电机转轴阻力转矩, b_m 和 f_m 分别为助力电机转动轴在转动过程中的阻尼系数和非线性环节产生的转动阻力矩。

2 EPS 的传递函数及整定策略

为便于分析上述系统, 利用经典理论中的拉普拉斯变换, 将上述微分方程转化为代数方程。首先对典型的电动机等效电路进行变换后有^[8]

$$\begin{cases} i_a(s) = \frac{V_a - K_e \dot{\theta}_m}{R + Ls} \\ T_m(s) = K_a i_a(s) \end{cases} \quad (4)$$

式中 V_a 为电动机电枢电压, K_a 为电机转矩系数, R 为电动机电枢绕组阻值, L 为电动机电枢绕组电感, i_a 为电动机电枢电流, T_m 为电机输出扭矩。联立式 (1) ~ (4) 可以得到被控系统的传递函数模型。

$$G(s) = \frac{x_r(s)}{\theta_h(s)} = \frac{J_m K_s s^2 + b_m K_s s + \frac{K_a + 1}{R_s} K_m K_s}{J_m m s^4 + (J_m b_r + b_m m) s^3 + a s^2 + b s + c} \quad (5)$$

其中

$$a = J_m K_T + K_m m + b_m b_r + J_m K_s + K_m J_m G^2 / R_s^2$$

$$b = K_m b_r + K_T b_m + \frac{b_m K_s + b_m K_m G^2}{R_s^2}$$

$$c = K_m K_T + \frac{(1 + K_a) K_m K_s + K_m K_s}{R_s^2}$$

图 2 为 EPS 控制系统框图, 其中 P 为被控对象, 其传递函数为 $G(s)$, C 为典型 PID 控制器, F 为前馈控制器。

本文采用基于轨迹信息的前馈控制器, 其定义式 (6), 此种前馈控制器无极点存在, 因此若前馈控

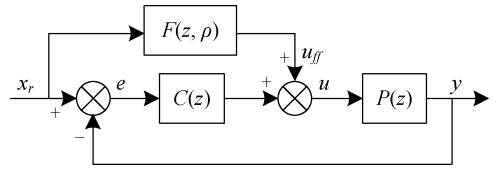


图 2 EPS 控制系统框图

Fig.2 Control Scheme of the EPS

制器参数向量有界时, 前馈控制器输出有界, 能保证系统的稳定性。

$$\Gamma(z) = [1, 1 - z^{-1}, (1 - z^{-1})^2, (1 - z^{-1})^3, \dots]^T \quad (6)$$

根据图 2 可知, 系统控制精度取决于误差项, 因此如何设计有效的前馈补偿机制, 减小控制过程中的误差项, 即有效提高系统动态精度。

$$e_i(\rho) = r_i(\rho) - y_i(\rho) \quad (7)$$

式中 $r(\rho)$ 为指令输入, $y(\rho)$ 为系统输出。根据控制系统中的误差定义可以构建式 (8) 的目标函数。

$$J_i(\rho) = e_i(\rho)^T \lambda_1 e_i(\rho) \quad (8)$$

再根据数值分析中的经典牛顿迭代算法, 针对式 (8) 凸函数, 可以得到其控制向量参数的迭代更新率。

$$\rho_i^{k+1} = \rho_i^k - \gamma (\nabla^2 J(\rho_i^k))^{-1} \nabla J(\rho_i^k) \quad (9)$$

其中

$$\nabla^2 J_i(\rho^k) = 2 \begin{bmatrix} \frac{\partial e_i(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(1)} \lambda \frac{\partial e(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(1)} & \dots & \frac{\partial e_i(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(1)} \lambda \frac{\partial e_i(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(s_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(s_1)} \lambda \frac{\partial e(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(1)} & \dots & \frac{\partial e(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(s_1)} \lambda \frac{\partial e(\rho_i^k)}{\partial \rho_i^k(s_1)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 参数整定算法及收敛性分析

当迭代计算过程中目标函数满足凸函数定义, 且迭代步长满足 $0 < \gamma < 2$, 目标函数可收敛至全局最优点 ρ_0 , 且当迭代步长 γ 为 1 时, 前馈控制器参数向量理论上仅需迭代一次即可收敛至全局最优。

证明: 由于目标函数 $J(\rho)$ 为前馈控制器参数向量 ρ 的凸函数, 假设最优前馈控制向量为 ρ_0 , 将目标函数 $J(\rho)$ 在 ρ_0 处进行泰勒展开

$$J(\rho) = J(\rho_0) + \nabla J^T(\rho_0) \tilde{\alpha} + \frac{1}{2} \tilde{\alpha}^T \nabla^2 J^T(\rho_0) \tilde{\alpha} + O(\|\tilde{\alpha}\|^3) \quad (13)$$

其中 α 代表高阶残余向量。根据式 (14) 可知系统跟踪误差对前馈控制参数向量的梯度为零, 故目标函数高阶残余向量为零。此外由于目标函数满足

$$\nabla J(\rho_o) = 0 \tag{14}$$

对式 (14) 求梯度整理可得

$$\nabla J(\rho) = \nabla^2 J^T(\rho_o) \tilde{\alpha} \tag{15}$$

因此, 结合参数更新率, 第 $k+1$ 次残余向量可表示为

$$\tilde{\alpha}^{k+1} = \rho^k - \gamma (\nabla^2 J^T(\rho_o))^{-1} \nabla J(\rho^k) - \rho_o \tag{16}$$

结合式 (16), 可进一步得到

$$\tilde{\alpha}^{k+1} = \rho^k - \gamma \tilde{\alpha}^k - \rho_o = (1 - \gamma) \tilde{\alpha}^k \tag{17}$$

对式 (17) 两边取二范数有

$$\|\tilde{\alpha}^{k+1}\|_2 / \|\tilde{\alpha}^k\|_2 < 1 \tag{18}$$

即基于牛顿算法的参数更新率可使参数化前馈控制器不断向最优控制器参数向量收敛, 并且当迭代步长 γ 为 1 时, 理论上通过一次迭代即可确定最优神经网络控制器的参数。

4 仿真分析

针对本文所提出的前馈补偿算法和算法收敛性分析, 本小节将利用 Matlab/Simulink 对典型的电动转向系统进行仿真分析。电动转向系统中的方向盘系统、车轮转向子系统和电子控制子系统中的模型参数如表 1。

表 1 电动转向系统仿真参数

Table 1 Simulation Parameters of Electric Power Steering			
参数	数值	参数	数值
J_h	0.046 kg·m ²	L	0.00015 H
b_h	0.36 m·s/rad	R	0.15 Ω
K_s	115 N/m	K_e	0.04 N·m·s/A
J_m	0.00047 g·m ²	K_b	0.02 V·s/rad
b_m	0.0034 N·m·s/rad	G	7.225
K_m	125 N/m	R_s	0.0078 m
m	32 kg	K_T	90000 N/m
b_r	653 N·m·s/rad		

其中, 前馈控制器结构和参数向量采用式 (8), 图 3 为迭代计算过程中目标函数随迭代次数增加的变化情况, 目标函数通过一次迭代基本能够实现收敛, 且收敛精度较高。

为进一步对比迭代次数与收敛精度的关系, 图 4 为首次迭代计算与第 20 次迭代计算后的动态跟踪误差, 通过对比可以发现, 两者的 RMSE 数量级相差不大, 收敛精度和收敛速度均良好。

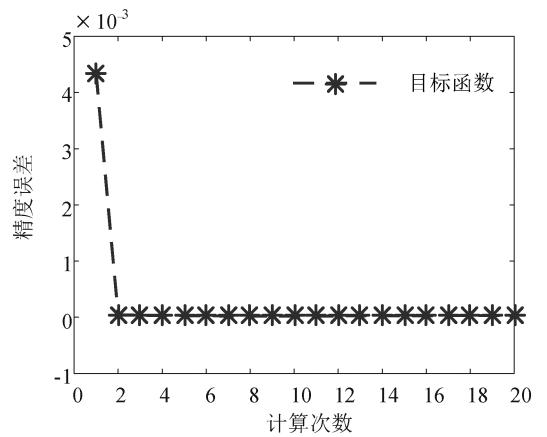


图 3 算法收敛性分析

Fig.3 The Compensation Algorithm Convergence Analysis

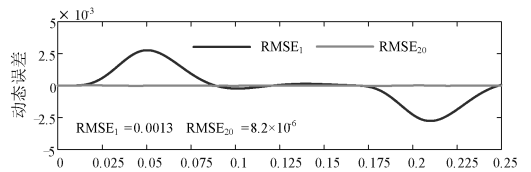


图 4 迭代计算过程收敛精度分析

Fig.4 Convergence Precision Analysis of Iterative Algorithm

基于本文所提出的前馈补偿控制器, 在仿真过程中的路面干扰处加入噪声为 10, 方差为 1 的噪声信号, 输入指令为正弦信号如图 5 (a) 所示, 在无前馈补偿控制作用和含有前馈补偿控制作用的控制过程中, 对比分析了两者的对系统跟踪精度的影响。无前馈补偿控制时, 系统的扭矩跟踪误差的 RMSE 为 24.8 N·m, 如图 5 (c) 所示在含有前馈补偿环节时,

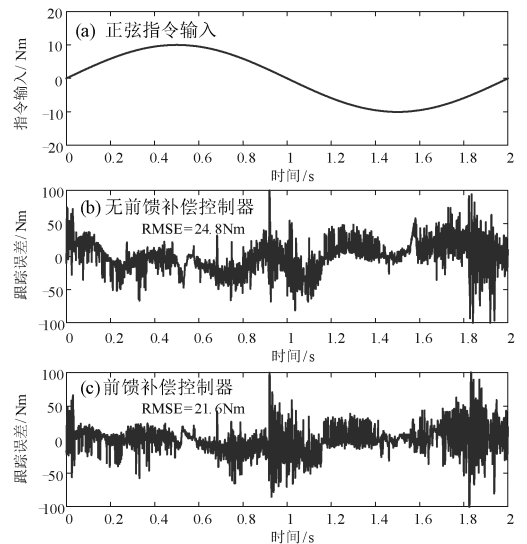


图 5 基于前馈补偿环节的跟踪精度比较

Fig.5 Dynamic Accuracy Comparison based on the Feedforward Compensation Algorithm

系统的扭矩跟踪误差 RMSE 为 $21.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。综上所述,利用本文所设计的前馈补偿环节,能够有效补偿系统误差,提高系统在转向控制过程中的跟踪精度,为精确高效的电动转向控制提供有力保障。

5 结论

本文针对电动转向器中机械传动环节中存在的固有误差,提出一种基于控制器参数整定的前馈补偿控制方法,能够快速准确的补偿系统固有误差,有效提高转向系统的动态响应。本文利用仿真软件分析验证了所提算法的收敛特性,并通过系统仿真模型研究了所提方法的正确性和有效性。仿真结果表明,所提控制参数整定策略能够有效补偿电动转向系统固有误差,且补偿策略收敛特性良好,为补偿电动转向系统固有误差提供解决方案。

参考文献:

- [1] 程林志,赵燕.使用电动转向器的汽车操纵稳定性研究[J].湖北工业大学学报.2005,20(3):120-122.
- [2] 赵燕,周斌.汽车转向系统的技术发展趋势[J].汽车研究与开发.2003(2):22-24.
- [3] Yasuhisa HAYAKAWA, Ryan WHITE, *et al.* Drive Oriented Path Following in ITS (Wide Speed-Range Steering Control by Multiple Look-ahead Distance)[A]. 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic, 2003: 558-563.
- [4] M. Segawa. A Study of Reactive Torque Control for Steer

by Wire with Mechanical Fail-safe Device [J]. KOYO Engineering Journal. 2002, 162: 17-24.

- [5] Paul Yih, J. Christian Gerdes. Modification of Vehicle Handling Characteristics via Steer-by-Wire [J]. IEEE Transaction Control Systems Technology. 2005, 13(6): 965-976.
- [6] S. Bolognani, D. Ciscato, M. Tomasini, *et al.* Virtual Mechanical Load Setup for Steer-by-Wire a Case Study [A]. IEEE ISIE 2005, Dubrovnik, Croatia, 2005, 6: 1795-1800.
- [7] Y. Hayakawa, Ryan White, Takeshi Kimura, *et al.* Driver-Compatible Steering System for Wide Speed-Range Path Following [A]. IEEE/ASME Transaction Mechatronics. 2004, 9(3): 544-552.
- [8] 施淑洪,郑荣良.电动助力转向系统及系统模型分析[J].江苏大学学报(自然科学版).2002,9:57-60.
- [9] 施国标,林逸.电机助力转向系统匹配设计的研究[J].公路交通科技.2003,10:125-128.
- [10] 唐新蓬,杨树.电动助力转向系统对汽车角输入响应影响的仿真[J].汽车工程.2004,3:314-318.
- [11] 何仁,徐建平.电动助力转向系统稳定性分析[J].江苏大学学报(自然科学版).2004,7:294-297.
- [12] Liao Y G, Du H I. Cosimulation of Multi-body-based Vehicle Dynamics and an Electric Power Steering Control System [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K, Journal of Multi-body Dynamics, 2001, 215(3): 141-151.
- [13] Manu Parmar. Modeling and Sensorless Optimal Control Design for an Electric Power Assis Steering System[A]. IEEE 2002: 1784-1789.

(上接第87页)

- [11] Moon S, Hashash Y M A. From direct simple shear test to soil model development and supported excavation simulation: integrated computational-experimental soil behavior characterization framework [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 04015050.
- [12] 郑刚,邓旭,刘畅,等.不同围护结构变形模式对坑外深层土体位移场影响的对比分析[J].岩土工程学报,2014,36(2):273-284.

- [13] Schuster M, Kung G T C, Juang C H, *et al.* Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835
- [14] 木林隆,黄茂松.基于不应变特征的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法[J].岩土工程学报,2014,36(S2):304-310.

隧洞移动机器人里程计激光雷达融合定位

谢 勇, 刘晓日, 汪晓波, 王斌锐*

(中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018)

摘 要:在隧洞局部湿滑、不平整环境中,使用GPS对机器人进行定位会不准确甚至失效,仅使用里程计定位长时间累积误差会比较大。为了尽量减小机器人在这种环境中的定位误差,设计了一种定位方法,即先使用UMBmark算法离线校核机器人系统关键参数,且校核前机器人系统误差为0.3719 m,校核之后机器人的系统误差为0.2915 m,根据该算法定位精度评判依据,得出里程计定位精度提高了28%。然后利用扩展卡尔曼滤波算法,融合激光雷达和里程计进行SLAM, MATLAB仿真实验结果表明,融合前机器人 x 轴平均误差为2.047 m, y 轴平均误差为1.245 m,航向平均误差为0.196 rad;在用EKF-SLAM融合激光雷达之后,机器人 x 轴平均误差为0.093 m, y 轴平均误差为0.014 m,航向平均误差为0.003 rad。机器人平均位姿误差至少减小了一个数量级。仿真和实验结果证明了本文设计的提高隧洞局部环境定位精度方法的有效性。

关键词:移动机器人;定位;系统误差;非系统误差;扩展卡尔曼滤波

中图分类号:TP242.6

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0093-07

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.016

Mobile Robot Localization with Odometry and Lidar Fusion in Tunnel

Xie Yong, Liu Xiaori, Wang Xiaobo, Wang Binrui*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the local wet and slippery environment of the tunnel, using GPS for localization of the robot will be inaccurate or even invalid. The long-term cumulative error is relatively large only using the odometry. In order to minimize the localization error of the robot in this environment, designing a localization method, firstly using UMBmark algorithm to correct key parameters of the robot, the systematic error before correction is 0.3719 m, that is 0.2915 m after correction, and according to the localization accuracy evaluation of the algorithm. The localization accuracy has been improved by 28%. Then using the extended Kalman filter (EKF) algorithm, the lidar and odometry are fused to perform SLAM. Before fusion, average error of x axis is 2.047 m, y axis is 1.245 m, heading is 0.196 rad. And after fusion, average error of x axis is 0.093 m, y axis is 0.014 m, heading is 0.003 rad. The simulation results of MATLAB show that the average pose error of the robot is reduced at least by an order of magnitude after fusion. The simulation and experimental results prove the effectiveness of the proposed method for improving the local environmental localization accuracy of the tunnel.

Keywords: mobile robot; localization; systematic error; non-systematic error; EKF

收稿日期:2018-12-12

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0804609)。

作者简介:谢勇(1994-),男,江苏南通人,硕士研究生。研究领域:移动机器人定位与导航。

*通信作者:王斌锐, E-mail: wangbrpaper@163.com。

针对隧洞局部湿滑、不平整环境,为了提高机器人在环境中定位精度,需要同时从解决里程计系统误差和非系统误差两方面着手。从减小里程计系统误差角度考虑,国内外相关学者提出了很多算法及改进方法,其中经典的方法是密歇根大学机器人实验室 Borenstein 和 Feng 提出的 UMBmark 算法^[1],该方法认为里程计系统误差主要由不相等的驱动轮直径和轮距的不确定两方面因素造成,且不相等的驱动轮直径只会对直线运动产生影响,轮距的不确定只会对旋转运动造成影响。且该方法实现较为简单,是目前校核里程计系统误差的常用方法。文献[2]中,认为不相等的轮直径和不确定的轮距所造成的误差具有耦合效应,不应该分开考虑。文献[3,4]中,都认为应该综合考虑不相等的轮直径、轮距的不确定和车轮平均直径和名义直径不相等三种因素对里程计系统误差的影响。与 UMBmark 校核方法相比,文献[2-4]的改进算法虽然能够使机器人系统误差降低到更小,但是实现过程复杂度提高。从减小里程计非系统误差角度考虑,目前主流的做法是利用激光雷达或者视觉等外部传感器融合里程计或者 IMU(惯性测量单元)进行 SLAM(即时定位和成图),文献[5,6]是融合视觉和 IMU 进行定位导航,也是近些年来研究热点,但是在隧洞这种没有光源和弱纹理的环境下,视觉方法效果和精度比较差。文献[7]是基于 RBPF 算法融合激光雷达和里程计建立高精度地图并且定位,但是这种方法依赖里程计数据,存在粒子退化问题,计算复杂度高。文献[8]运用 EKF 算法将激光雷达融合里程计进行 SLAM,这种方法能够估计地图全后验概率,可以估计出最可能的机器人位姿和地图,且适用于局部环境。

根据上述研究中方法的优缺点,结合隧洞局部实际环境,设计了一种先运用 UMBmark 算法离线校核机器人系统误差,然后用 EKF-SLAM 融合激光雷达和里程计主要减小机器人的非系统误差的定位方法。并且在移动机器人平台上开展了系统误差校核实验,然后用 MATLAB 对 EKF-SLAM 算法进行了仿真实验验证。

1 里程计运动模型参数校核

1.1 里程计运动模型

本研究的实验平台由两个后轮独立驱动,差速转向。设驱动轮左轮直径为 d_L , 右轮直径为 d_R , 轮

距为 b , 驱动系统的传动比为 η , 编码器分辨率为 P 线每转,且编码器为 4 倍频,在一个采样周期内编码器的脉冲数为 N ,则左右驱动轮的移动距离 ΔD_L 和 ΔD_R 分别为:

$$\Delta D_L = \frac{\pi d_L N}{4P\eta} \quad (1)$$

$$\Delta D_R = \frac{\pi d_R N}{4P\eta} \quad (2)$$

里程计运动模型如图 1:

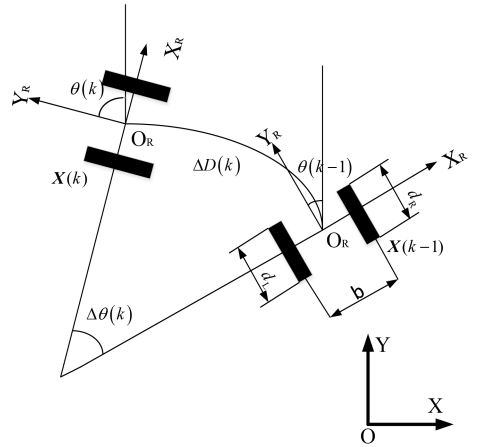


图 1 里程计运动模型

Fig.1 Motion model of odometry

图 1 中,移动机器人从采样时刻 $k-1$ 的位姿 $X(k-1) = [x_{k-1} \ y_{k-1} \ \theta_{k-1}]^T$ 变化到采样时刻 k 的位姿 $X(k) = [x_k \ y_k \ \theta_k]^T$, 则机器人从 $k-1$ 时刻到 k 时刻移动距离和航向角的变化量分别为:

$$\Delta D(k) = (\Delta D_L + \Delta D_R) / 2 \quad (3)$$

$$\Delta \theta(k) = (\Delta D_R - \Delta D_L) / b \quad (4)$$

里程计运动模型为:

$$X(k | k-1) = f(X(k-1), u(k)) + w(k) \quad (5)$$

式中, $u(k) = (\Delta D(k), \Delta \theta(k))$, $w(k)$ 为系统噪声。

里程计运动模型主要分为直线模型和圆弧模型 2 种。圆弧模型同时考虑了机器人在运动过程中距离和航向角的变化。由于实际运行时采样频率比较高,在一个采样周期内机器人运行的轨迹可以近似看作直线,则里程计运动模型具体形式如下:

$$X(k | k-1) = \begin{bmatrix} x_{k-1} + \Delta D(k) \sin \theta_k \\ y_{k-1} + \Delta D(k) \cos \theta_k \\ \theta_{k-1} + \Delta \theta(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

为了校核里程计的系统误差,需要对里程计运动模型中的 d_L 、 d_R 和 b 3 个参数进行校核。

1.2 UMBmark 系统误差校核算法

Borenstein 和 Feng 认为,里程计的系统误差主要是由差速驱动轮直径不相等和驱动轮轮距不确定两方面造成的。

由驱动轮直径不相等所导致的相对误差用 E_d 表示:

$$E_d = \frac{d_R}{d_L} \quad (7)$$

驱动轮轮距不确定导致相对误差用 E_b 表示:

$$E_b = \frac{b_{act}}{b_{nom}} \quad (8)$$

式中, b_{act} 为机器人的实际轮距, b_{nom} 为名义轮距。

为了避免单向正方形回路中 E_d 和 E_b 所导致的误差相互补偿, Borenstein 和 Feng 引入了双向正方形路径实验, 即 UMBmark 实验: 让机器人沿着边长为 4 m 的正方形路径顺时针和逆时针方向各运行 5 圈, 并且在正方形的 4 个拐角处让机器人原地旋转 90° , 同时要注意控制机器人缓慢移动, 以免发生打滑。

为了分析实验中导致的位置误差, Borenstein 和 Feng 定义了 α 和 β 两类方向误差。其中 α 误差指的是机器人在正方形路径上旋转角度总量增加(或者减少)的方向误差。 β 误差指的是机器人在正方形路径上顺时针或者逆时针运动时, 旋转角度总量在一个方向上增加(减少), 在另一个方向上减少(增加)的方向误差。其中机器人沿顺时针方向运动时的 α 误差和 β 误差如图 2(逆时针方向相同):

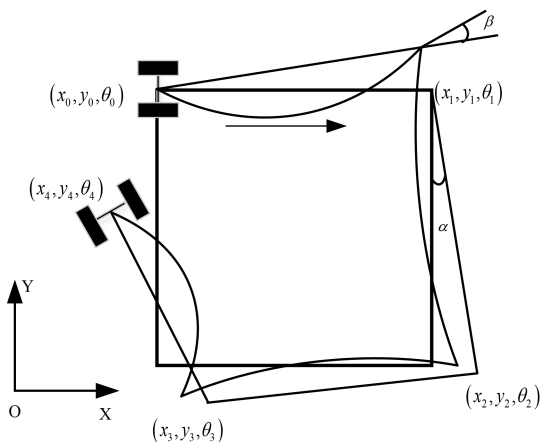


图 2 顺时针方向 α 和 β 误差

Fig.2 α and β errors in clockwise direction

基于 α 和 β 误差, 里程计系统误差分析如下:

(1) E_d 和 E_b 是里程计系统误差的主要来源。

(2) E_d 只对机器人的直线运动有影响, 而对旋转运动没有影响。

(3) E_b 只对机器人旋转运动有影响, 而对机器人直线运动没有影响。

(4) E_d 只会产生 β 误差, 而不会产生 α 误差。

(5) E_b 只会产生 α 误差, 而不会产生 β 误差。

根据上述分析以及文献[1]中公式, 计算出机器人的系统校核参数: 即左驱动轮的实际直径 d_L , 右驱动轮的实际直径 d_R , 实际驱动轮轮距 b_{act} , 计算公式如下:

$$\mathcal{E}x_{i,cw}/x_{i,ccw} = x_{abs} - x_{odo} \quad (9)$$

$$\mathcal{E}y_{i,cw}/y_{i,ccw} = y_{abs} - y_{odo} \quad (10)$$

$$x_{c.g,cw}/x_{c.g,ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{E}x_{i,cw}/x_{i,ccw} \quad (11)$$

$$y_{c.g,cw}/y_{c.g,ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{E}y_{i,cw}/y_{i,ccw} \quad (12)$$

$$a = \frac{x_{c.g,cw} + x_{c.g,ccw}}{-4L} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{x_{c.g,cw} - x_{c.g,ccw}}{-4L} \quad (14)$$

$$E_d = \frac{\frac{L/2}{\sin(\beta/2)} + \frac{b_{act}}{2}}{\frac{L/2}{\sin(\beta/2)} - \frac{b_{act}}{2}} \quad (15)$$

$$b_{act} = \frac{\pi/2}{\pi/2 - \alpha} \cdot b_{nom} \quad (16)$$

$$d_L = \frac{2}{E_d + 1} \cdot d_n \quad (17)$$

$$d_R = \frac{2}{(1/E_d) + 1} \cdot d_n \quad (18)$$

式中, $x_{c.g,cw}$ 、 $y_{c.g,cw}$ 为实验中机器人顺时针方向运动时的位置误差重心的横纵坐标, $x_{c.g,ccw}$ 、 $y_{c.g,ccw}$ 是逆时针方向运动时的位置误差重心的横纵坐标, x_{abs} 、 y_{abs} 为机器人终点在全局坐标系下绝对位置横纵坐标, x_{odo} 、 y_{odo} 为根据里程计模型计算得出的机器人终点在全局坐标下的位置横纵坐标, n 为机器人顺时针或者逆时针方向移动的次数, L 为运动的正方形路径的边长, d_n 为驱动轮名义直径的平均值。

2 里程计激光雷达融合算法

2.1 二维激光雷达测距模型

二维激光雷达是平面移动机器人定位和导航常

用的测距传感器。RPLIDAR A2 激光雷达利用激光三角测距原理,在每次扫描测距过程中,主动发射激光束信号,在遇到目标物体之后产生的反射信号将被 RPLIDAR 视觉采集系统接收,然后通过嵌入在 RPLIDAR 内部的处理器实时解算,计算出激光雷达到目标物体之间的距离。

本研究中使用的是 RPLIDAR A2 激光雷达,其扫描范围为 360° ,分辨率为 0.9° ,扫描一周可以得到 401 个采样点,测距范围为 0.15 m 到 12 m,测量输出以极坐标形式表示:

$$Z_i = (\rho_i, \alpha_i)^T \quad i = 1, \dots, n \quad (19)$$

2.2 EKF-SLAM 融合算法

移动机器人在隧洞局部环境中的 SLAM 问题是一个非线性问题,且机器人存在系统噪声和测量噪声,在噪声满足高斯分布的情况下,可以用 EKF 算法实现对系统状态的最优估计。EKF-SLAM 融合算法详细流程如图 3。

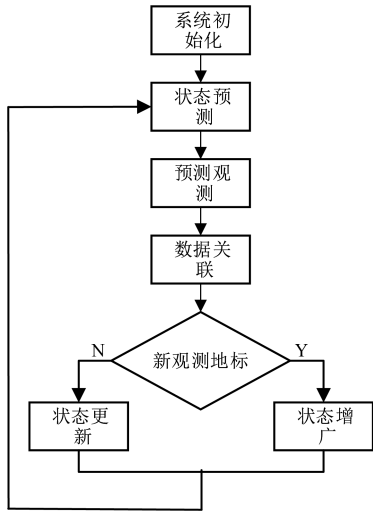


图 3 EKF-SLAM 融合算法流程图

Fig.3 EKF-SLAM fusion algorithm flow

2.2.1 状态预测

把机器人的位姿以及观测到的隧洞局部环境中的地标位置作为整个系统的状态变量,假设隧洞中地标总数为 N ,地标的状态变量用 m 表示,则系统的状态变量可以表示为:

$$X = [x \quad y \quad \theta \quad m_{1,x} \quad m_{1,y} \quad \dots \quad m_{N,x} \quad m_{N,y}]^T \quad (20)$$

根据系统的里程计运动模型和地标位置,系统的状态预测方程如下:

$$X(k | k - 1) = \begin{bmatrix} x_{k-1} + \Delta D(k) \sin \theta_k \\ y_{k-1} + \Delta D(k) \cos \theta_k \\ \theta_{k-1} + \Delta \theta(k) \\ m_{1,x} \\ m_{1,y} \\ \vdots \\ m_{N,x} \\ m_{N,y} \end{bmatrix} \quad (21)$$

系统的协方差预测方程如下:

$$P(k | k - 1) = F(k) P(k - 1 | k - 1) F(k)^T + Q(k) \quad (22)$$

式中, P 为系统状态协方差矩阵, F 为系统状态方程对系统状态变量求导得到的雅克比矩阵, Q 为系统噪声的协方差矩阵。

系统的协方差矩阵形式如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_{rr} & P_{rm} \\ P_{mr} & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, p_{rr} 表示机器人位姿的协方差矩阵,用来表示机器人位姿估计的准确性, p_{rm} 和 p_{mr} 表示机器人位姿和地标的关系, p_{mm} 是地标的协方差矩阵,表示地标估计的准确性。

2.2.2 状态更新

假定在隧洞局部环境中,激光雷达能探测到的地标看成点地标,并且根据激光雷达测得的距离和方向可以得到系统的观测方程:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \sqrt{(m_{i,x} - x)^2 + (m_{i,y} - y)^2} \\ \arctan((m_{i,y} - y) / (m_{i,x} - x) - \theta_k) \end{bmatrix} + v(k) \quad (24)$$

式中, $m_{i,x}$, $m_{i,y}$ 是观测到的第 i 个地标的横纵坐标, $v(k)$ 是激光雷达的测量噪声。

运用数据关联算法分析每个地标的观测值,确认其是否在已经观测到的地标的集合中,如果确认是已经观测到的地标,则作为观测量对系统状态进行更新,更新方程如下:

$$V(k) = Z(k) - H(k) X(k | k - 1) \quad (25)$$

$$S(k) = H(k) P(k | k - 1) H(k)^T + R(k) \quad (26)$$

$$K(k) = P(k | k - 1) H(k)^T / S(k) \quad (27)$$

$$X(k | k) = X(k | k - 1) + K(k) V(k) \quad (28)$$

$$P(k | k) = (I - K(k) H(k)) P(k | k - 1) \quad (29)$$

式中, V 为残差, H 为观测方程对系统状态变量求导得到的雅克比矩阵, S 为残差方差矩阵, R 为测量噪声的协方差矩阵, K 为卡尔曼增益。

2.2.3 状态增广

当观测值不能与地标集合中已经存在的地标相关联时,就认为系统观测到了新地标,根据系统的观测方程可得到新地标的位置,并且将新地标的位置加入到系统状态变量中。新地标的位置如下:

$$\begin{bmatrix} m_{new,x} \\ m_{new,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + \rho \cos(\theta + \alpha) \\ y + \rho \sin(\theta + \alpha) \end{bmatrix} \quad (30)$$

另外,状态增广还包括系统协方差矩阵的增广。利用上式对机器人位姿求导得到的雅克比矩阵 G_R , 和对测量值求导得到的雅克比矩阵 G_Z , 再结合式 (23) 和测量噪声的协方差矩阵,得到增广的协方差矩阵如下:

$$P_{nn} = G_R P_{rr} G_R^T + G_Z R G_Z^T \quad (31)$$

$$P_{nX} = G_R [P_{rr} P_{rm}] \quad (32)$$

$$P_{Xn} = P_{nX}^T \quad (33)$$

将上式中的 3 个协方差矩阵加入原系统协方差矩阵中,就得到增广后的系统协方差矩阵。

3 仿真和实验分析

3.1 UMBmark 算法校核实验

利用图 4 所示的差速移动机器人平台进行 UMBmark 实验,由于实验室空间的限制,让机器人沿着边长为 1.2 m 的正方形路径顺时针和逆时针分别运行 5 圈,机器人每沿着正方形路径运动一圈,就计算出机器人在终点处的绝对位置与里程计推算位置间差值。

校核后的系统参数为:

$$d_L = 0.0717, d_R = 0.0711, b_{act} = 0.376$$

本文采用文献[1]中定义的 $E_{max, syst}$ 来表示里程计的定位精度 $E_{max, syst} = \max(r_{c.g, cw}; r_{c.g, ccw})$, $r_{c.g, cw}$ 和 $r_{c.g, ccw}$ 分别为顺时针和逆时针方向运动时位置误差重心与原点之间的距离。移动机器人校核前后的定位精度以及校核后定位精度提高的百分比如表 1。

表 1 校核前后实验结果

类别	$r_{c.g, cw}/m$	$r_{c.g, ccw}/m$	$E_{max, syst}/m$	提升率/%
校核前	0.3483	0.3719	0.3719	/
UMBmark	0.1253	0.2915	0.2915	28

由上表结果分析可知,机器人校核之前系统误差为 0.3719 m,用 UMBmark 方法校核之后的系统误差为 0.2915 m,定位精度提高了 28%。

3.2 EKF-SLAM 算法仿真

根据上述给出的里程计运动模型和激光雷达测

距模型,利用 MATLAB 对机器人在隧洞局部环境中的 EKF-SLAM 问题进行仿真,具体的仿真条件如下所述:

(1) 假设在隧洞两边和前方有固定的点地标,不需要进行地标的抽取。

(2) 激光雷达的扫描半径 12 m,扫描范围为 360°。

(3) 机器人线速度噪声为 0.1 m/s,角速度噪声为 0.5°/s。(大的噪声模拟非系统误差)

(4) 激光雷达距离测量误差为 0.01 m,角度误差为 0.9°。

为了验证 EKF-SLAM 算法在隧洞局部环境中的有效性,针对如下情况进行仿真分析:

在相同环境中,将仅根据里程计运动模型得到的机器人运动轨迹和位姿误差曲线,与融合激光雷达之后得到的机器人的轨迹和位姿误差曲线进行对比。

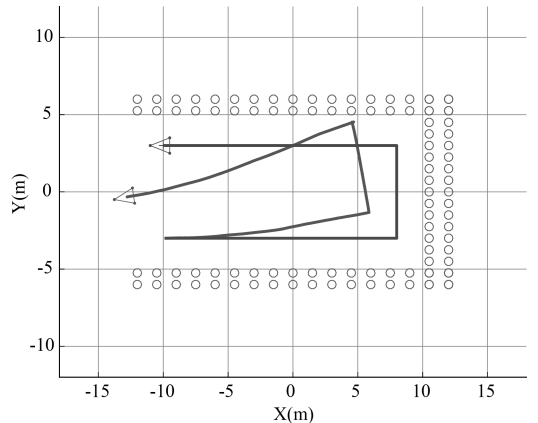


图 5 仅使用里程计机器人轨迹

Fig.5 Robot trajectory only using odometry

图 5 中红色圆圈表示地标的真实位置,红色曲线表示机器人的真实轨迹,蓝色曲线表示机器人的估计轨迹。红色三角形表示真实的机器人,蓝色三角形表示估计的机器人(图 7 中红色圆圈旁的蓝色加号表示估计的地标位置,其余各标记的含义与图 5 相同)。

仿真结果分析:在仅使用里程计运动模型估计机器人位姿时,机器人 x 轴平均误差为 2.047 m, y 轴平均误差为 1.245 m,航向平均误差为 0.196 rad;在用 EKF-SLAM 融合激光雷达之后,机器人 x 轴平均误差为 0.093 m, y 轴平均误差为 0.014 m,航向平均误差为 0.003 rad。机器人平均位姿误差至少减小了一个数量级。

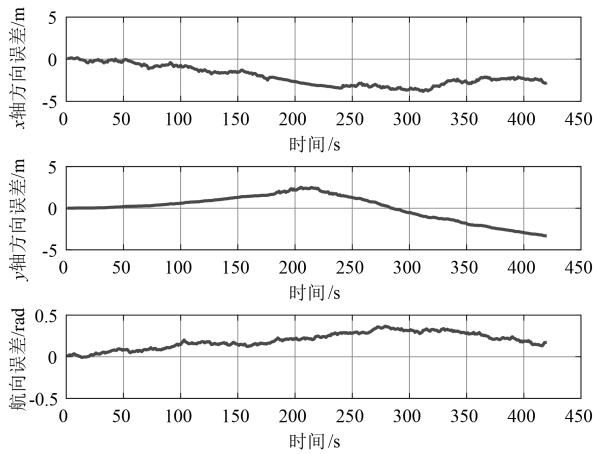


图6 仅使用里程计位姿误差曲线

Fig.6 Pose error curve only using odometry

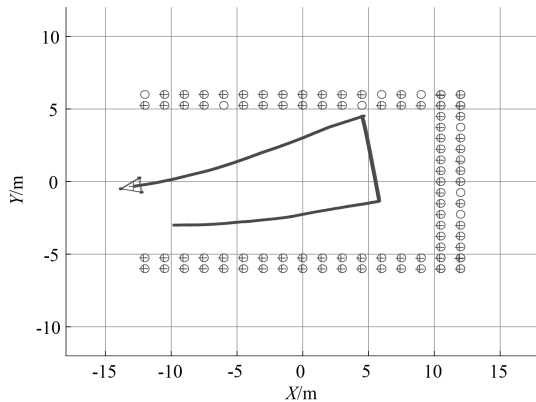


图7 融合后机器人轨迹

Fig.7 Robot trajectory after fusion

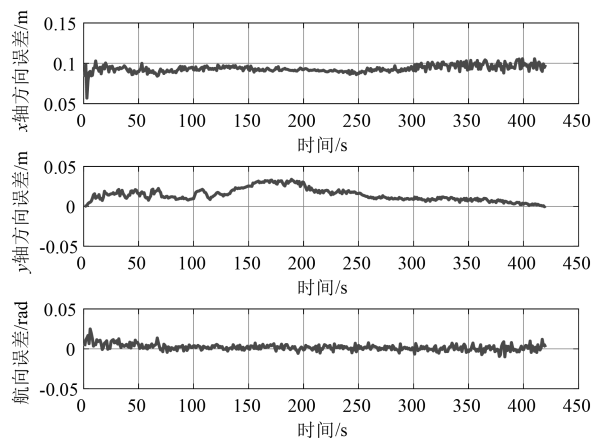


图8 融合后位姿误差曲线

Fig.8 Pose error curve after fusion

误差校核实验,然后利用 MATLAB 对机器人在隧洞局部环境中的 EKF-SLAM 问题进行仿真。实验和仿真表明:

(1) UMBmark 校核前机器人的系统误差为 0.3719 m,校核之后机器人的系统误差为 0.2915 m,定位精度提高了 28%。

(2) 用基于 EKF-SLAM 方法融合激光雷达和里程计比仅使用里程计的情况下,可以使机器人的平均位姿误差至少减小了一个数量级,证明了该方法对提高机器人在隧洞局部环境中定位精度的有效性。

在下一步工作中,改变现有移动机器人系统误差校核路径的形状和尺寸,进一步降低机器人系统误差,提高定位精度;随着地标数量的增加,EKF-SLAM 算法内存需求和计算量呈平方倍上升,影响系统状态更新的实时性,下一步改进 EKF-SLAM 算法,降低算法在地标增多情况下的内存消耗和计算量,提高系统的实时性。

参考文献:

- [1] Borenstein J, Feng L, Borenstein C J. Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots[J]. Robotics & Automation IEEE Transactions on, 1996, 12(6):869-880.
- [2] Lee K, Jung C, Chung W. Accurate calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2011, 25(6):1603-1611.
- [3] 贝旭颖,平雪良,高文研.轮式移动机器人里程计系统误差校核[J].计算机应用研究,2018,35(09):2696-2699+2703.
- [4] 张铁,陈伟华,邹焱飏.移动机器人里程计系统误差的校正方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014(9):7-11.
- [5] Bloesch M, Burri M, Omari S, et al. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback [J]. International Journal of Robotics Research, 2017, 36(10):1053-1072.
- [6] Lin Y, Gao F, Qin T. Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 35(4).
- [7] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W. Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1):34-46.

4 结论

本文先用 UMBmark 算法开展了机器人的系统

(下转第 104 页)

三阶高通滤波时刻鉴别法

周国清^{1,3}, 黄伟^{1,2}, 周祥^{1,2,3*}, 陈金龙^{1,2}, 魏建东^{1,2}

(1. 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 天津大学 微电子学院, 天津 300072)

摘要:针对脉冲激光雷达回波信号处理中传统时刻鉴别法误差大的问题,提出三阶高通滤波时刻鉴别法。该方法利用三阶高通电路对激光回波信号进行微分操作,使回波信号到达时刻定时点在时域上向回波信号上升沿起始点逼近。仿真结果表明,在1:5000的动态范围内,三阶高通滤波法能有效将脉宽为2~10 ns回波信号的时刻鉴别误差压缩在35 ps内,最小误差达28.542 ps。相较于传统一阶高通滤波法,该方法使时刻鉴别精度提高了48.105%,利用微分电路特性来动态反映不同滤波阶数情况下的定时误差,为高精度时刻鉴别电路的设计和实现提供直接参考。

关键词:激光雷达;时刻鉴别;三阶高通滤波;漂移误差

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0099-06

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.017

Timing Discrimination with Third-order High-pass Filtering

Zhou Guoqing^{1,3}, Huang Wei^{1,2}, Zhou Xiang^{1,2,3*}, Chen Jinlong^{1,2}, Wei Jiandong^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Department of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China; 3. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To reduce the error in the processing of pulsed lidar receiving signal by conventional timing discrimination, a timing discrimination method with third-order high-pass filtering is proposed. In this method, the third-order high-pass circuit is used to differentiate the receiving signal. The timing point of the arrival time approaches the starting of the rising edge of the receiving signal in the time domain. The experimental results show that the third-order high-pass filtering timing discrimination can effectively compress the timing error of the receiving signal with 2~10 ns pulse width within 35 ps, and the minimum error reaches 28.542 ps in a dynamic range of 1:5000. Compared with the conventional timing discrimination, the method improves the timing discrimination accuracy by 48.105%. The characteristics of differentiating circuits is used to dynamically reflect the timing error under different filtering orders, and also provides a direct reference for the design and implementation of a high-precision timing

收稿日期:2018-04-22

基金项目:广西创新驱动发展专项(科技重大专项)(桂科AA18118038);国家自然科学基金重点项目(41431179);国家重点研发计划项目(2016YFB0502500);广西自然科学基金(2015GXNSFDA139032)。

作者简介:周国清(1965-),男,江西湖口县人,博士,教授,博士生导师,研究方向:摄影测量与遥感、激光雷达, E-mail:gzhou@glut.edu.cn。

*通信作者:周祥(1987-),男,博士研究生,研究方向:激光雷达成像研究, E-mail:zqx0711@glut.edu.cn。

discrimination circuit.

Keywords: lidar; timing discrimination; third-order high-pass filtering; walk error

激光雷达作为一种主动探测传感器,已被广泛应用到众多领域^[1]。随着信号处理技术和硬件的不断发展,脉冲激光雷达测距精度不断被提高。相关的研究包括误差分析^[2]、时刻鉴别^[3]和时间间隔测量^[4]等方面。在设计和评价激光雷达接收系统的性能时,准确识别和确定回波信号到来时刻是主要的依据之一。常见的时刻鉴别方法主要有前沿定时法^[5]、恒比定时法^[6]和高通滤波法^[7]。前沿定时法使用固定阈值来探测回波信号的到来时刻,电路简单,但漏检概率高;恒比定时法能有效降低漏检概率,但对信号延迟和衰减的同步要求很高;高通滤波法依赖于回波信号的峰值点,在消除一阶高通滤波法的较大漂移误差方面有所欠缺。

本文在传统一阶高通滤波法的基础上提出基于三阶高通滤波时刻鉴别法。首先在理论上讨论了三阶高通滤波法的原理,然后在 Multisim 软件中设计仿真,结合滤波次数对时刻鉴别漂移误差的影响进行评估。最后,通过仿真结果和数据评估验证了该方法的有效性,为脉冲激光雷达高精度测距系统的实现提供技术基础。

1 理论

1.1 一阶高通滤波时刻鉴别法

如图1所示,传统的一阶高通滤波时刻鉴别法是通过微分电路对激光回波信号提取斜率特征,将单极性信号转换成双极性信号,信号的峰值点变为过零点,从而根据过零点对回波信号的到来时刻做出判定^[8,9]。

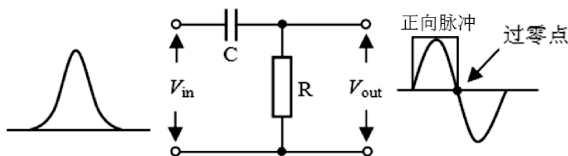


图1 高通滤波时刻鉴别法

Fig.1 High-pass filtering timing discrimination

1.2 三阶高通滤波时刻鉴别法

如图2所示,回波脉冲信号的波峰经过一阶高通滤波处理转变为过零点,单极性信号变换为双极性信号。接着进行下两个单元的高通滤波操作,每次信号处理中输入信号的第一峰值点都输出为相应

的过零点,而上升沿某个最大斜率点变成变换为新的峰值点。当完成三阶高通滤波处理后,输出信号上升沿接近垂直,滤波输出信号进入高速比较器进行回波信号到来时刻的定时点判定。

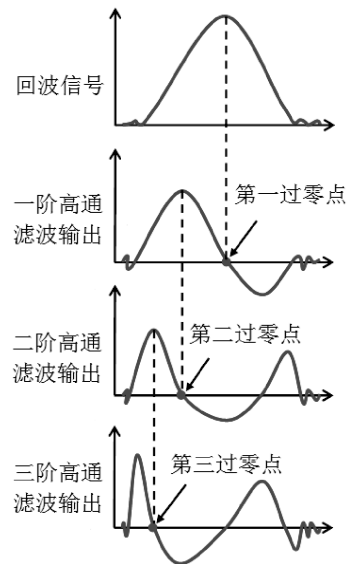


图2 回波信号的三阶高通滤波输出波形

Fig.2 Third-order high-pass filtering output waveform of received signal

1.2.1 三阶高通滤波法的确立

根据 Skolnik^[10],时刻鉴别中的漂移误差^[7](ΔT)可表示为:

$$\Delta T = \frac{c}{BW \cdot \sqrt{SNR}} \quad (1)$$

式(1)中: BW 为接收带宽, SNR 为接收信噪比。假设 BW 与激光脉冲速度匹配^[7],则:

$$BW \approx 0.35/t_r \quad (2)$$

$$\Delta T \approx \frac{c \cdot t_r}{0.35 \sqrt{SNR}} \quad (3)$$

式(2)中: t_r 为回波信号的上升沿时间。由于光速和 SNR 相对于上升沿时间是固定参数,根据式(3)知漂移误差主要由回波脉冲上升沿时间决定。在高通滤波电路中,回波信号最小幅度与接收机通道的等效时间常数 RC 成比例地延迟,同时较大信号的延迟接近零。因此,定时输出信号的上升沿时间大小受 RC 阶数的影响,即 RC 阶数越高,输出信号上升沿时间越短,从而过零点越接近上升沿起始点。激光雷达接收通道中通常包含噪声,当高阶微

出信号上升沿时间,同理可计算得到当 $R_2=1\ \Omega$, C_2 约为 $10\ \text{pF}$; 当 $R_3=1\ \Omega$, C_3 约为 $1\ \text{pF}$ 。根据具有朗伯型目标的雷达方程^[7],在接收透镜处的光功率为

$$P_r(R) = \frac{P_T \tau_T \rho A_R}{\pi R^2}$$

式中, P_T 是激光二极管的峰值脉冲输出功率, ρ 为物体的反射系数, τ_T 为透射率, A_R 为接收透镜的面积, R 为目标距离。因此探测器输出信号电流可估算为 $i_{\text{signal}}(R) = P_r(R) \cdot R_0$, 式中, R_0 是光电探测器的响应度。仿真实验基于已有的实际电路实验中激光器采用 LS9-220-8-S10-00 型号以及 APD 采用 AD500-9 型号^[12], 相关参数设置为 $P_T=220\ \text{W}$, $\tau_T=0.5$, $\rho=0.12$, $A_R=21.16\ \text{cm}^2$, $R=10\sim 750\ \text{m}$, $R_0=60\ \text{A/W}$, 则探测器输出信号电流计算为 $0.948\ \mu\text{A}\sim 5.334\ \text{mA}$, 所以本文输入电流信号设置在 $1\ \mu\text{A}\sim 5\ \text{mA}$ ($1:5000$) 的合适范围。

3 试验结果与分析

3.1 仿真与结果

仿真实验是在 Multisim 12 环境下进行的。仿真参数设定如下:接收脉宽为 $2\sim 10\ \text{ns}$, 前置跨阻 $R_f=10\ \text{k}\Omega$, 目标距离 $10\sim 750\ \text{m}$ 。为简化分析, 设定接收激光回波信号电流为 $1\ \mu\text{A}\sim 5\ \text{mA}$ 。针对回波脉

冲宽度变化对定时点的影响, 实验测量了脉冲半高宽度(FWHM)分别为 $6.64\ \text{ns}$ 和 $3.32\ \text{ns}$ 时的输入信号来做对比分析。图 4 为输入信号为 $1\ \mu\text{A}$ 时(通道_A), FWHM 分别为 $6.64\ \text{ns}$ (图 4(a)) 和 $3.32\ \text{ns}$ (图 4(b)), 以及输入信号为 $5\ \text{mA}$ 时(通道_A), FWHM 分别为 $6.64\ \text{ns}$ (图 4(c)) 和 $3.32\ \text{ns}$ (图 4(d)) 的情况($R_f=10\ \text{k}\Omega$, 对应 $0.01\ \text{V}$ 和 $50\ \text{V}$)。时间分辨率统一为 $100\ \text{ps/Div}$, 通道_A 至通道_D 的幅值刻度分别标识在图中。由图 4 可知, 一阶高通滤波输出信号(通道_B)的过零点对应于回波信号(通道_A)的峰值点时刻, 二阶高通滤波输出信号(通道_C)的过零点对应于一阶输出的峰值点时刻, 三阶高通滤波输出信号(通道_D)的过零点对应于二阶输出的峰值点时刻。当输入 $1\ \mu\text{A}$ 时, 相对于回波信号上升沿起始点来说, 三阶过零点相应的时刻分别为 $35\ \text{ps}$ (FWHM = $6.64\ \text{ns}$)、 $32.966\ \text{ps}$ (FWHM = $3.32\ \text{ns}$)。当输入 $5\ \text{mA}$ 时, 三阶过零点相应的时刻分别为 $33.559\ \text{ps}$ (FWHM = $6.64\ \text{ns}$)、 $28.542\ \text{ps}$ (FWHM = $3.32\ \text{ns}$)。输入信号在 $1\ \mu\text{A}\sim 5\ \text{mA}$ 范围时, 不同幅度信号在不同滤波阶数时测量的漂移误差如表 2 所示。

3.2 漂移误差的评估分析

根据表 2, 假设接收通道噪声保持在理想水平,

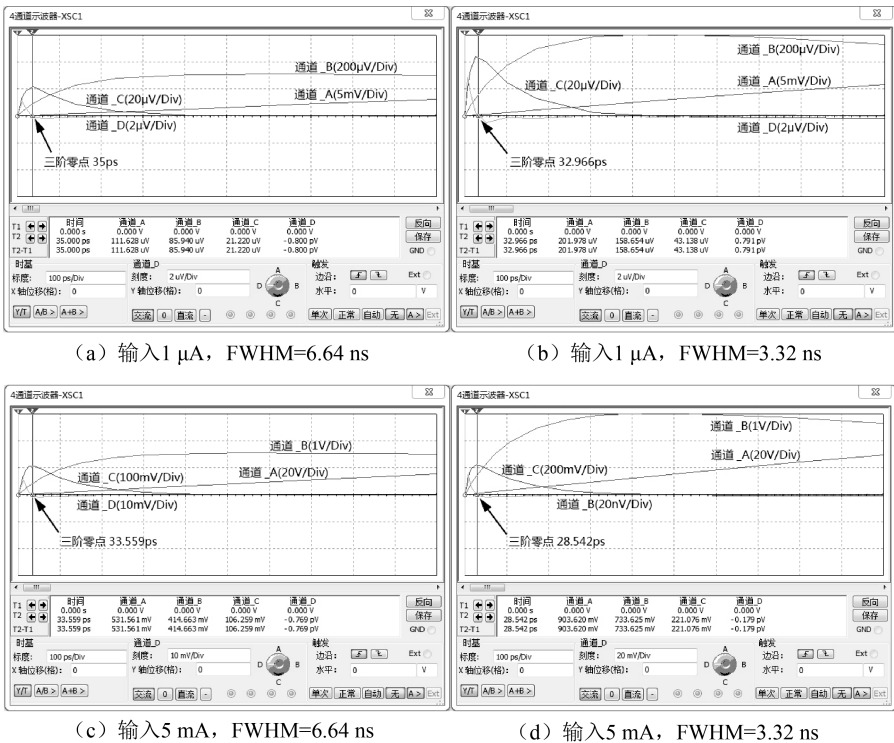


图 4 三阶高通滤波定时仿真波形

Fig.4 Timing simulation waveform in third-order high-pass filtering

表 2 不同能量回波信号的定时点漂移误差

Table 2 The timing walk error of received signal with different energy

接收信号/mA	漂移误差/ps (FWHM=6.64 ns/3.32 ns)		
	一阶零点	二阶零点	三阶零点
0.001	5110/2610	572.881/453.390	35.000/32.966
0.01	5110/2610	571.186/470.339	32.119/29.085
0.1	5110/2610	533.898/467.797	32.034/28.983
0.2	5110/2610	582.203/450.000	32.034/28.576
0.5	5110/2610	543.22/463.559	33.475/28.542
1	5110/2610	572.034/472.034	33.559/28.542
2	5110/2610	588.136/466.949	33.559/28.542
3	5110/2610	583.051/463.559	33.559/28.542
4	5110/2610	576.271/466.949	33.559/28.542
5	5110/2614	586.441/466.949	33.559/28.542

当输入信号的振幅在 $1 \mu\text{A} \sim 5 \text{ mA}$ ($R_f = 10 \text{ k}\Omega$), 不同脉宽信号在不同滤波阶数时漂移误差为 $32.034 \sim 5110 \text{ ps}$ ($\text{FWHM} = 6.64 \text{ ns}$) 和 $28.542 \sim 2614 \text{ ps}$ ($\text{FWHM} = 3.32 \text{ ns}$)。每一阶平均漂移误差分别计算为 $5110, 573.85, 33.335 \text{ ps}$ ($\text{FWHM} = 6.64 \text{ ns}$) 和 $2610.357, 465.073, 28.931 \text{ ps}$ ($\text{FWHM} = 3.32 \text{ ns}$)。由以上可得, 不同能量的回波信号高通滤波输出的定时点漂移误差随滤波阶数的提高而减小 (如图 5 所示)。三阶漂移误差相较于一阶漂移误差的改善如图 6 所示。通过比较不同阶数的高通滤波法漂移误差 (如表 3 所示), 三阶高通滤波法明显优于传统一阶高通法。

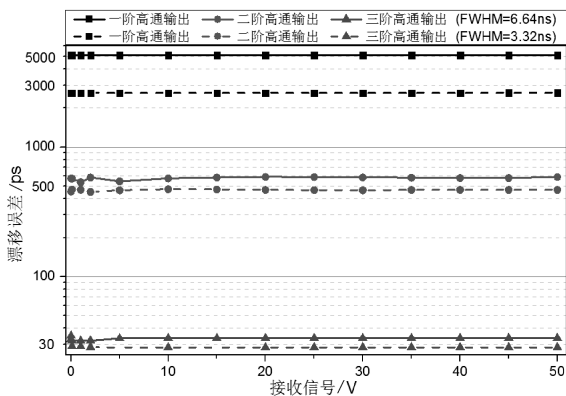


图 5 不同能量回波信号的高通滤波漂移误差

Fig.5 The walk error of high-pass filtering in received signals with different energy

表 3 几种高通滤波定时法的试验精度比较

Table 3 Comparison of experimental accuracy of several high-pass filtering timing methods

方法	滤波阶数	动态范围	最小漂移误差/ps
Jiang ^[8]	1	-	223
Pehkonen ^[9]	1	1 : 2500	165
Kurtti ^[7]	1	1 : 2750	55
三阶高通法	3	1 : 5000	28.542

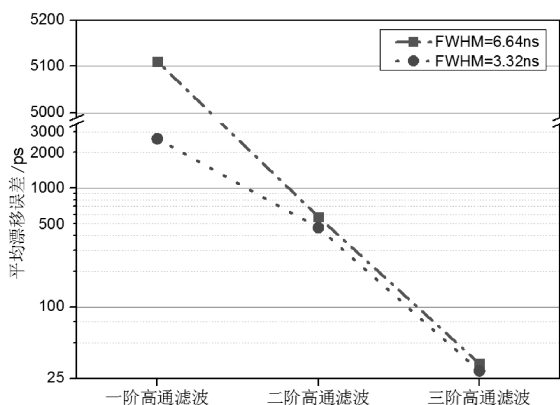


图 6 不同阶数高通滤波平均漂移误差的评估

Fig.6 Variation of the average walk error in high-pass filtering with different level

4 结论

基于三阶高通滤波法时刻鉴别原理, 结合仿真实验表明其能有效将 $2 \sim 10 \text{ ns}$ 回波脉冲信号的时刻鉴别误差减小到 35 ps 范围以内 (动态范围 $1 : 5000$), 且最小误差达到 28.542 ps , 相比于传统一阶高通滤波法, 定时点漂移误差被压缩了 48.105% , 验证了三阶高通滤波法的有效性和可行性。另外, 通过仿真环境提供了一种与实际电路紧密结合的定时误差分析方法, 为脉冲激光雷达测距系统中高精度时刻鉴别电路的设计提供直接参考。实验结果是基于理想回波信号进行测试的, 在实际中电路的实现和应用还需要考虑接收噪声和电路噪声等因素的影响。

参考文献:

[1] 张小红编著. 机载激光雷达测量技术理论与方法 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.

[2] 赵娜, 赵娟, 朱亚晓, 等. 激光三角法测距的误差因素分析 [J]. 科技通报, 2018, 34 (2) : 183-187.

[3] G. Zhou, W. Huang, X. Zhou, *et al.* Improvement on Timing Accuracy of LIDAR for Remote Sensing [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-3: 2495-2498.

[4] 周国清, 周祥, 张烈平, 等. 面阵激光雷达多通道时间间隔测量系统研制 [J]. 电子器件, 2015, 38 (1) : 166-173.

[5] Z. Deng, Y. Liu, Z. Wu, *et al.* Maximum likelihood solution of arrival time for the event pulse modeled by filtered inhomogeneous poisson process in PET detectors

- [J]. Journal of Nuclear Medicine, 2015, 56(3): 1842–1842.
- [6] R. Zheng. Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser rangefinding [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2012, 5(2): 182–186.
- [7] S. Kurtti, J. Kostamovaara. Laser Radar Receiver Channel with Timing Detector Based on Front End Unipolar-to-Bipolar Pulse Shaping [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(3): 835–847.
- [8] Y. Jiang, R. Liu, J. Zhu. Integrated multi-channel receiver for a pulsed time-of-flight laser radar [C]. The Proceedings of the International Society for Optics and Photonics, 2015: 95220C.
- [9] J. Pehkonen, J. Kostamovaara. A CMOS front end for a laser rangefinder with resonance-based timing discrimination [C]. The Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design, IEEE, 2009: 233–236.
- [10] M. Skolnik. Radar Handbook, Third Edition [M]. American: McGraw-Hill Education, 2008.
- [11] Palojärvi Pasi. Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time-of-flight laser rangefinding [D]. University of Oulu, 2003.
- [12] G. Zhou, X. Zhou, J. Yang, *et al.* Flash Lidar Sensor Using Fiber-Coupled APDs [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4758–4768.

(上接第98页)

- [8] Jung C, Moon C B, Jung D, *et al.* Design of test track for accurate calibration of two wheel differential mobile robots [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2014, 15(1): 53–61.
- [9] Delmerico J, Scaramuzza D. A Benchmark Comparison of Monocular Visual-Inertial Odometry Algorithms for Flying Robots [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2018.
- [10] 周波, 钱堃, 马旭东, 等. 基于集员估计的室内移动机器人多传感器融合定位 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(4): 541–550.
- [11] 周俊, 胡晨. 密植果园作业机器人行间定位方法 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 22–28.
- [12] Cicco M D, Corte B D, Grisetti G. Unsupervised calibration of wheeled mobile platforms [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2016.
- [13] Luca C, Vito M, Federico T, *et al.* Quaternion-based EKF-SLAM from relative pose measurements: observability analysis and applications [J]. Robotica, 2015, 33(6): 31.
- [14] Zhang T, Wu K, Song J, *et al.* Convergence and Consistency Analysis for A 3D Invariant-EKF SLAM [J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(2): 733–740.
- [15] Daobin W, Huawei L, Hui Z, *et al.* EKF-SLAM Algorithm Based on Differential Model of Vehicle Motion [J]. Information and Control, 2014.

地铁车站深基坑周边建筑物沉降规律研究

俞钦钦¹,王立峰¹,陈巧红¹,冯利坡²

(1.浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023; 2.金华市轨道交通投资建设有限公司,浙江 金华 321000)

摘要:在某城市地铁深基坑工程实测数据的基础上,对地铁深基坑周边建筑物的沉降进行了分析,研究了周边建筑物沉降的影响和变化规律。研究表明:随着建筑物监测点离基坑边距离增加,深基础和浅基础建筑物最大沉降值均减小。深基础建筑物的沉降平均值为9.0 mm,为0.6‰H;浅基础建筑物的沉降平均值为16.0 mm,为1‰H,浅基础建筑物沉降平均值为深基础建筑物沉降平均值的1.7倍。纵向相对沉降均值为0.16‰,主要分布在0.049‰~0.28‰之间,占测点总数的82.7%;横向相对沉降均值为0.29‰,主要分布在0.014‰~0.57‰之间,占测点总数的83.3%。横向相对沉降均值为纵向相对沉降均值的1.8倍。本文的研究成果对于基坑设计、施工和对周围的建(构)筑物的保护具有一定的参考价值。

关键词:基坑;周边建筑物;现场监测;沉降

中图分类号:TU433

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0105-04

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.018

Study on Settlement of Buildings Around Deep Foundation Pit of Subway Station

Yu Qinqin¹, Wang Lifeng¹, Chen Qiaohong¹, Feng Lipo²

(1. Architectural Engineering Institute, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Jinhua Rail Transit Investment and Construction Co., Ltd., Jinhua Zhejiang 321000, China)

Abstract: On the basis of the measured data of the deep foundation pit of a city subway, the settlement of the surrounding buildings in the deep foundation pit is analyzed, and the influence and change law of the surrounding buildings' settlement are studied. The results show that the maximum settlement value of the deep foundation and shallow foundation buildings decreases with the increase of the distance from the monitoring points to the foundation pit. The average settlement of deep foundation buildings is 9.0mm, 0.6‰H, the average settlement of shallow foundation buildings is 16.0mm, 1‰H, and the mean value of shallow foundation buildings is 1.7 times that of deep foundation building. The mean value of vertical relative settlement is 0.16‰, mainly between 0.049‰ ~ 0.28‰, accounting for 82.7% of the total number of measured points, and the mean value of horizontal relative settlement is 0.29‰, which is mainly distributed between 0.014‰ ~ 0.57‰, accounting for 83.3% of the total number of measured points. The mean transverse relative settlement is 1.8 times the mean value of vertical relative settlement. The research results in this paper have some reference value for foundation pit design, construction and protection for surrounding structures.

Keywords: foundation pit; surrounding buildings; field monitoring; settlement

收稿日期:2018-07-20

基金项目:2018年浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(基金号:2018R415032)。

作者简介:俞钦钦,E-mail:1179151940@qq.com。

近年来,我国地铁车站深基坑工程数目与规模日益增大,对基坑周边的环境保护越来越突出,当基坑开挖深度较深时,基坑开挖对邻近建筑物的影响较大,进而有可能引起邻近建筑物的破坏,所以开展深基坑开挖对邻近建筑物的影响研究是必要的。

1956年,Mac Donald^[1]总结了大量的工程实践项目,主要研究了基坑周边不同地表沉降曲线形态对邻近建筑物的影响,基坑在开挖过程中对邻近建筑物的影响与建筑物本身的建筑倾斜角度关系不大,但与建筑物的基础结构型式有关。1999年,Boone^[2]主要研究了基坑开挖过程中的周边地表沉降,对由地表沉降引起的邻近建筑物的结构破坏进行了分析,提出了建筑物破坏的控制标准以及预防破坏的措施。王利民^[3]和杨敏^[4]主要研究了上海地区的基坑工程的监测结果,对基坑本身的变形进行分析,研究了距基坑边不同距离的建筑物沉降和水平位移的规律,提出了地面沉降预测方法。2006年,吴胜发^[5]通过模型试验研究基坑开挖对邻近四层钢结构建筑的影响,分析了建筑基础的不均匀沉降、上部结构的水平位移以及结构内力变化规律。2010年,王震宇^[6]应用有限元建立数值模型,主要研究在基坑开挖过程中砌体上部结构和地基基础的变形规律。2011年,陈明^[7]利用有限元对昆明地区的典型基坑进行数值模拟研究并采用变参数法分析基坑周边地表沉降规律,结果表明增大围护结构刚度和锚杆预应力可以有效控制地表沉降值,进而也可减小基坑开挖对邻近建筑物的影响。2012年,郑刚应用Plaxis 3D^[8-10]软件分析了基坑开挖对近邻不同楼层建筑物的影响,提出了基坑周边建筑物层数不同时,应进行最不利楼层数的判定,并加以针对性保护;同时分析考虑建筑物位置与基坑存在夹角时,建筑物的扭曲变形与开挖基坑边角度的关系;并指出对与基坑边存在夹角的建筑物,当其跨越坑外沉降槽最低点或沉降曲线上凸区域时,建筑物所产生的扭转变形最为显著。

本文结合某城市车站基坑工程的现场实测,对地铁深基坑周边建筑物的沉降进行了分析,研究了周边建筑物沉降的影响和变化规律,为其他地铁车站深基坑的设计与施工提供依据和参考。

1 监测数据分析

为避免基坑变形影响因素过于复杂,本次统计的基坑长度在200 m左右,宽度20 m左右,开挖深度在15~18 m之间,基坑形状均为矩形,主体围护结构采用地下连续墙,均采用钢筋混凝土支撑与钢支撑联合支撑系统。

据统计分析,开挖范围内土质概况不同,其中两个车站基坑主体结构所在地形土层自上而下主要为杂填土、素填土、砂质粉土、粉砂,底板位于粉砂层,其余车站基坑主体结构所在地形土层自上而下主要为杂填土、粘质粉土、粉质粘土、粉土及砂土地层中,底板位于粉砂层。

监测点最大沉降范围值个数统计见表1所示:最大沉降值主要分布在0~30 mm区间,占测点总数90.7%。

1.1 距离对建筑物沉降的影响

建筑物测点最大沉降值与建筑物测点离基坑边距离的关系统计如图1,2所示。

由图1可知,深基础建筑物沉降最大值主要集中在距离基坑20~50 m之间,浅基础建筑物沉降最大值主要集中在距离基坑10~25 m之间,随着建筑物监测点离基坑边的距离增加,深基础和浅基础建筑物最大沉降值均减小。

深基础和浅基础建筑物最大沉降值分布分别如图3,4所示,横坐标为深(浅)建筑物最大沉降值,纵坐标为位于沉降值区间段内基坑测点数。由图3,4可知,深基础建筑物的沉降平均值为9.0 mm,最大沉降值主要分布在5.8~12.6 mm之间,占测点总数的89%;浅基础建筑物的沉降平均值为16.0 mm,最大沉降值主要分布在4.2~33.2 mm之间,占测点总数的88.3%。浅基础建筑物沉降平均值为深基础建筑物沉降平均值的1.7倍。

深基础和浅基础建筑物最大沉降值S与基坑开挖深度H的比值分布分别如图5,6所示。由图可知,深基础建筑物的S/H平均值为0.6‰,S/H值主要分布在0.3‰~0.8‰之间,占测点总数的93%;浅基础建筑物的S/H平均值为1‰,S/H值主要分布

表1 监测点最大沉降范围值统计表

监测沉降值/mm	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35	35~50
监测点数	23	60	31	8	11	3	8	6
所占百分比	15.3	40.0	20.7	5.3	7.3	2.0	5.3	4.0

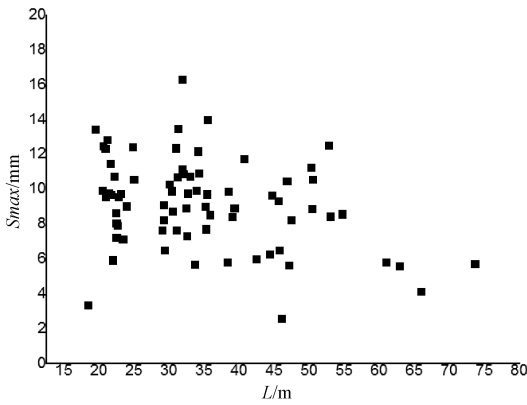


图 1 深基础建筑物最大沉降值与建筑物监测点离基坑边距离关系图

Fig.1 The relationship between the maximum settlement value of deep foundation building and the distance of building monitoring points from the foundation pit

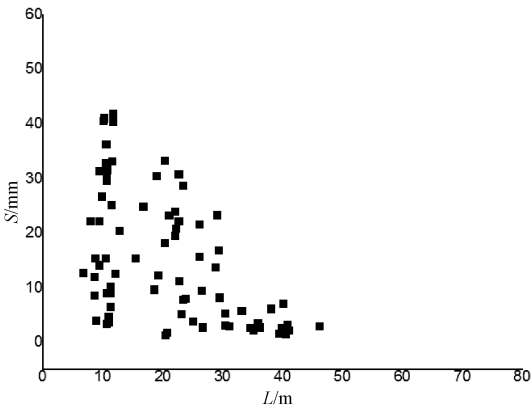


图 2 浅基础建筑物最大沉降值与建筑物监测点离基坑边距离关系图

Fig.2 The relationship between the maximum settlement value of shallow foundation buildings and the distance of building monitoring points from the foundation pit

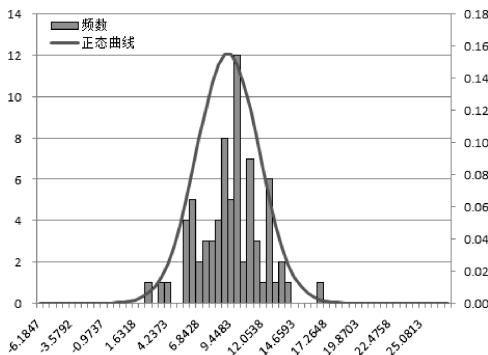


图 3 深基础建筑物监测点最大沉降值分布

Fig.3 Distribution curve of maximum settlement value of monitoring points in deep foundation buildings

在 0.1‰~2.3‰之间,占测点总数的 93.5%。浅基

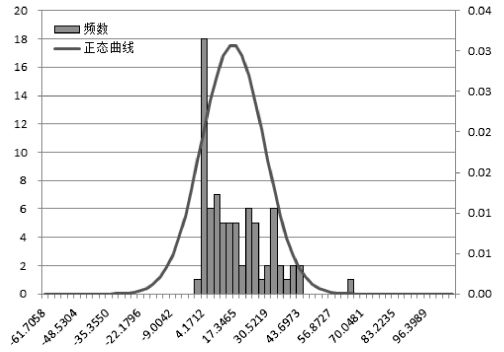


图 4 浅基础建筑物监测点最大沉降值分布

Fig.4 Distribution curve of maximum settlement value of monitoring points for shallow foundation buildings

础建筑物的 S/H 平均值为深基础建筑物的 S/H 平均值的 1.7 倍。

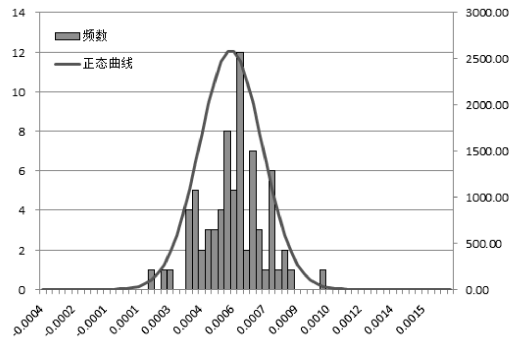


图 5 深基础建筑物 S/H 分布曲线图

Fig.5 S/H distribution curve of deep foundation building

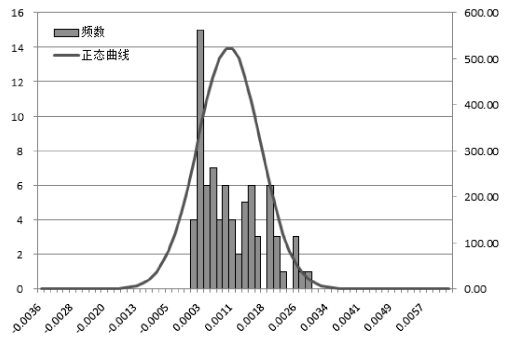


图 6 浅基础建筑物 S/H 分布曲线图

Fig.6 S/H distribution curve of shallow foundation building

2.2 建筑物的差异沉降分析

建筑物基础不同位置处的沉降值大小存在差异,若差异沉降太大就会引起基础结构破坏,最终可能危害到建筑结构的安全,所以研究基础差异沉降就显得尤为重要^[11]。

图 7 为某一建筑物示意图,建筑物 A₁、A₂ 2 点的沉降差值为纵向差异沉降, L₁ 为 2 点间距离;建筑

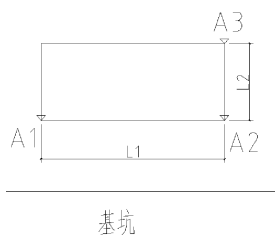


图 7 建筑物示意图

Fig.7 Schematic diagram of a building

物 A_2 、 A_3 两点的沉降差值为横向差异沉降, L_2 为 2 点间距离。

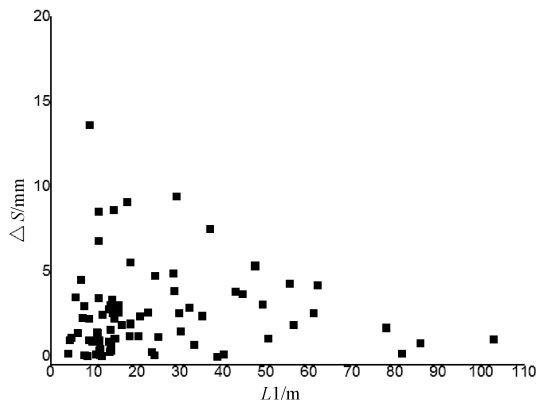


图 8 纵向差异沉降与两点间距离关系散点图

Fig.8 Scatter plot of distance difference between longitudinal differential and two points

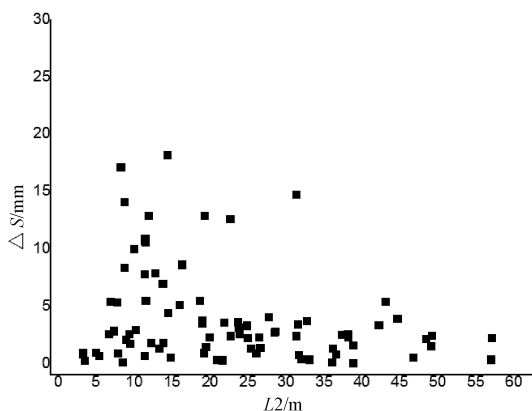


图 10 横向差异沉降与两点间距离关系散点图

Fig.10 Scatter diagram of horizontal differential settlement and distance between two points

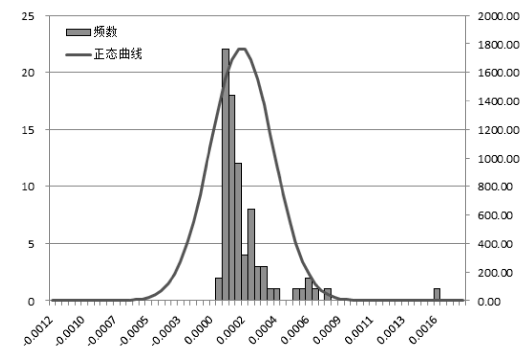


图 9 纵向差异沉降分布曲线图

Fig.9 Vertical differential settlement distribution curve

由图 8 和图 10 可知,纵向差异沉降值大多分布在 0~5 mm, 占比总数的 94%, 横向差异沉降值处于 0~5 mm 占比总数的 80%。

纵向差异沉降与两点间长度的比值 ($\Delta S_1/L_1$) 和横向差异沉降与两点间长度的比值 ($\Delta S_2/L_2$) 分布曲线分别如图 9 和图 11 所示。其中,纵向差异沉降与两点间长度的比值 ($\Delta S_1/L_1$) 的平均值为 0.16‰, 纵向差异沉降主要分布在 0.049‰~0.28‰

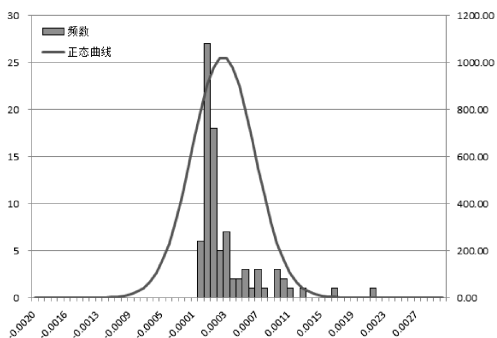


图 11 横向差异沉降分布曲线图

Fig.11 Transverse differential settlement distribution curve

之间, 占测点总数的 82.7%; 横向差异沉降与两点间长度的比值 ($\Delta S_2/L_2$) 的平均值为 0.29‰, 横向差异沉降主要分布在 0.014‰~0.57‰之间, 占测点总数的 83.3%。 $\Delta S_2/L_2$ 的平均值为 $\Delta S_1/L_1$ 平均值的 1.8 倍。

3 结论

深基础建筑物的沉降平均值为 9.0 mm, 为 0.6‰H; 浅基础建筑物的沉降平均值为 16.0 mm, 为 1‰H; 浅基础建筑物的沉降平均值为深基础建筑物的沉降平均值的 1.7 倍。

差异沉降大多分布在 0~5 mm 之间。纵向相对沉降均值为 0.16‰, 主要分布在 0.049‰~0.28‰之间, 占测点总数的 82.7%; 横向相对沉降均值为 0.29‰, 主要分布在 0.014‰~0.57‰之间, 占测点总数的 83.3%。横向相对沉降均值为纵向相对沉降均值的 1.8 倍。

(下转第 118 页)

跑步机不同坡度下人体颈部动力学响应建模分析

梁昊,张 伟*

(空军军医大学 空军卫勤训练基地军事体育教研室,西安 710032)

摘要:跑步机的不同坡度会直接造成使用者颈部压力,但是采用传统方法进行人体颈部动力学响应建模,对各个力学参数解析的准确性较低,参数辨识性能不好,提出基于力学驱动传感探测技术的跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模方法。采用力学驱动传感探测技术进行力学参数采集,构建跑步机不同坡度人体颈部的运动学模型;结合不同坡度下跑步机人体的动力学模型进行驱动应力学分析,建立不同载荷和不同坡度下的人体颈部动力学响应模型;根据跑步机不同坡度人体颈部力学参数辨识结果进行柔性空间的动力学响应建模;通过跑步机不同坡度人体的关节力矩和触觉传感信息进行参数融合,实现人体颈部动力学响应建模优化。仿真结果表明,采用该方法进行人体颈部动力学响应建模对各个力学参数解析的准确性较高,参数辨识性能较好,可以根据不同坡度进行跑步机的自适应调节,提高了人机交互能力。

关键词:跑步机;不同坡度;人体颈部;动力学;响应建模

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0109-05

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.019

Modeling and Analysis of Dynamic Response of Human Neck Under Different Slope of Treadmill

Liang Hao, Zhang Wei*

(Military Sports Teaching and Research Office of Air Force Medical Service Training Base,
The Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Different gradients of the treadmill will directly cause the neck pressure of the users, but the traditional method is used to model the dynamic response of the human neck. The accuracy of the analysis of various mechanical parameters is low, and the performance of parameter identification is not good. A dynamic response modeling method of the human neck of the treadmill with different gradients based on mechanical driving sensing detection technology is proposed. The mechanical parameters of the treadmill are collected by means of mechanical driving sensing technology, and the kinematic model of the neck of the treadmill with different slopes is constructed, and the dynamic model of the treadmill under different gradients is used to analyze the driving stress of the treadmill. The dynamic response model of human neck under different loads and different gradients is established, and the dynamic response model of flexible space is built according to the identification results of human neck mechanical parameters in different slope of treadmill. Through the parameter fusion of the joint torque and tactile sensing information of the human body on different slopes of the treadmill, the modeling and optimization of human neck

收稿日期:2019-07-03

作者简介:梁昊(1982-),男,山东淄博人,硕士,高教初级,研究方向:体育教育与训练。

*通信作者:张伟(1967-),男,陕西大荔人,高教高级,研究方向:体育教育与训练。

dynamic response is realized. The simulation results show that the method of modeling the dynamic response of human neck is more accurate for the analysis of various mechanical parameters, and the parameter identification performance is better. It can adjust the treadmill adaptively according to different slopes and improve the human-computer interaction ability.

Keywords: treadmill; different slope; human neck; dynamics; response modeling

智能跑步机能够满足人们对不同运动模式下的个人锻炼需求。在进行跑步机的智能化设计过程中,需要根据跑步机的不同坡度进行人体的力学适应度调节。通过构建人机交互环境下跑步机智能化控制系统,分析不同坡度下人体的颈部力学模型,实现跑步机的智能调节与人体的智能互动。研究跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模方法,分析跑步机在不同模式下的人体驱动力学模型,深入研究跑步机不同坡度人体颈部动力学参数,以提高人体锻炼效果,相关的跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模研究受到人们的极大关注^[1]。目前对跑步机不同坡度人体结构参数调节和控制的方法主要有模糊控制方法、模糊 PID 控制方法和蚁群进化的结构力学动态调节的参数控制方法等^[2,3],但上述方法进行跑步机不同坡度人体结构参数调节和运动学分析过程中容易受到驱动力学扰动以及外界扰动等,导致跑步机不同坡度人体颈部的力学控制能力不好。

针对上述问题,本文提出基于力学驱动传感探测技术的跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模方法,并通过仿真实验,对本文方法进行验证。

1 跑步机不同坡度人体的动力学模型和参数分析

1.1 人体的动力学模型

为了实现跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模,根据跑步机不同坡度下人体变化特征,进行跑步机不同坡度人体的结构参数优化调节,首先构建跑步机不同坡度人体的动力学模型,采用姿态传感器进行跑步机不同坡度人体的运动姿态参数采集,结合嵌入式逻辑控制方法进行上位机通信控制和自适应参数调节^[4]。采用力学驱动传感探测技术进行力学参数采集^[5],构建跑步机不同坡度人体颈部的运动学模型,在跑步机不同坡度的力学坐标系 $Oxyz$ 中,设定空间坐标系为 $(x_a, 0)$,不同坡度人体颈部的质心 $G_i(x_i, z_i)$,得到驱

动力学模型为:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_a + a \\ x_1 &= x_a + a_1 \sin q_1 \\ x_2 &= x_a + l_1 \sin q_1 + a_2 \sin q_2 \\ x_3 &= x_a + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_2 + a_3 \sin q_3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} z_0 &= 0 \\ z_1 &= a_1 \cos q_1 \\ z_2 &= l_1 \cos q_1 + a_2 \cos q_2 \\ z_3 &= l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_2 + a_3 \cos q_3 \end{aligned} \quad (2)$$

上式表示为联立的动量增量方程组,利用关节力矩和触觉传感信息进行动力学建模,根据该动力学模型模拟跑步机坡度变化时,人体颈部位置的角度变化,如图1所示。

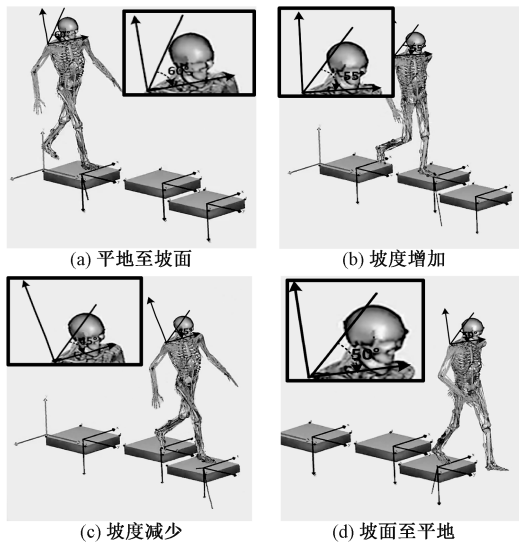


图1 坡度变化时人体颈部位置的角度变化

Fig.1 Angle change of the neck position of the human body when the slope changes

1.2 人体颈部动力学参数分析

将姿态传感器和力学传感器作为敏感元件,构建跑步机不同坡度人体力学参数分析的参量采集模型,得到跑步机不同坡度人体的柔性空间自由振动系统方程为:

$$A = \begin{bmatrix} f_{x_1} & f_{x_2} \\ g_{x_1} & g_{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \left(1 - \frac{2x_1}{N_1} - \frac{\sigma_1 x_2}{N_2} \right) & -\frac{r_1 \sigma_1 x_1}{N_2} \\ -\frac{r_2 \sigma_2 x_2}{N_1} & r_2 \left(1 - \frac{\sigma_2 x_1}{N_1} - \frac{2x_2}{N_2} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式中, f_{x_1} 、 f_{x_2} 分别代表跑步机不同坡度参数, g_{x_1} 、 g_{x_2} 分别表示柔性空间自由振动参数, r_1 、 r_2 分别代表不同跑步机的人体柔性系数, σ_1 、 σ_2 分别描述了跑步机不同坡度下人体与跑步机的夹角, x_1 、 x_2 为人体自由振动向量, N_1 、 N_2 代表不同的柔性空间。

假设跑步机不同坡度人体的末端位姿运动是一个纵向的线性运动模型, 根据不同载荷质量以及跑步机的坡度, 得到动力学爆发能为:

$$O = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^6 [I_i \dot{q}_i^2 + m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{z}_i^2)] \quad (4)$$

上式中, I_i 为跑步机不同坡度人体肢体绕质心的转动惯量, q_i 代表载荷质量, m_i 为人体动能参数, x_i 、 z_i 分别为上、下肢助力运动势能。结合下肢助力运动势能分析方法, 进行跑步机不同坡度的颈部力学分析^[6], 得到总的输出力矩为:

$$P = \sum_{i=0}^6 m_i g z_i \quad (5)$$

上式中, g 为力矩输出损耗系数。根据末端质量的动能构建 Lagrange 函数为:

$$L = \frac{K - P}{A} \quad (6)$$

从而得到跑步机不同坡度人体颈部耦合系数为:

$$T_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i}, (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (7)$$

上式中, T_i 为动力学方程式约束下的作用力矩, d 为人体颈部动力参数, t 为减损系数, ∂ 颈部应力校正系数, T 跑步机运动距离。用 M 表示人体在跑步机上的下惯性力矩, 用向量 K 表示重力矢量, 得到末端载荷质量参数为:

$$M(q) \ddot{q} + K(q, \dot{q}) + H(q) = T \quad (8)$$

上式中, q 为初始荷载质量, \dot{q} 代表极限荷载质量, \ddot{q} 分别代表末端荷载质量, H 为人体质量。采用力学驱动传感探测技术进行力学参数采集, 构建跑步机不同坡度人体颈部的运动学模型, 结合不同坡度下跑步机人体的动力学模型进行驱动应力学分

析, 用 θ_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 表示不同坡度人体颈部的运动倾斜角, 从而有:

$$\begin{cases} \theta_1 = q_1 \\ \theta_2 = q_1 - q_2 \\ \theta_3 = q_2 - q_3 \end{cases} \quad (9)$$

根据上述, 用 D 表示下肢质量矩阵, 用向量 G 表示重力矢量, 结合纵向运动、侧向运动两组动力学方程, 得到联合拉格朗日方程为:

$$\tau = D(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (10)$$

式中, C 为人体动力学矩阵, θ 为初始运动向量, $\dot{\theta}$ 为纵向运动向量, $\ddot{\theta}$ 代表侧向运动向量, $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_5]$, 其中, τ_1 、 τ_2 和 τ_3 分别为跑步机不同坡度人体的结构力学特征系数和动力作用力矩; τ_4 和 τ_5 分别是摆动腿和踝关节处的驱动力作用力矩。根据上述分析, 构建人体颈部动力学参数分析模型, 如图 2 所示。

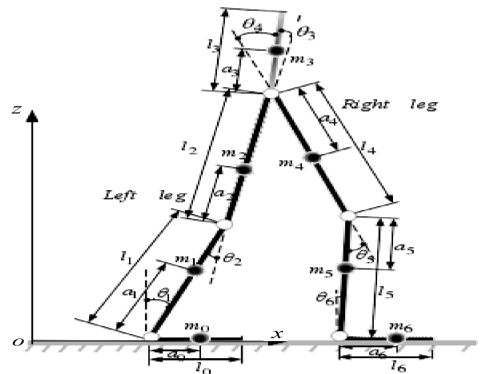


图 2 人体颈部动力学参数分析模型

Fig.2 Human neck dynamics parameter analysis model

2 跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模优化

采用反运动学变换, 得到跑步机不同坡度人体的反馈调节模型参数的关系为:

$$q_1 = w_1, q_2 = w_1 - w_2, q_3 = w_1 - w_2 + w_3 \quad (11)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 分别为跑步机倾斜角。根据跑步机不同坡度人体颈部力学参数辨识结果进行柔性空间的动力学响应建模, 得到颈部的总体力学参数响应表达式为:

$$P = \sum_{i=0}^2 (m_i g z_i) + m_{l3} g z_3 \quad (12)$$

跑步机不同坡度人体结构参数调节的误差,得到优化的 Lagrange 动力学方程为:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i, i = 1, 2, 3, L = \frac{K - P}{A} \quad (13)$$

根据多自由度运动规划模型进行跑步机不同坡度人体颈部运动学模型构建,选取 Lyapunov 函数构造跑步机不同坡度人体颈部运动规划模型为:

$$V_k = x^T(k)Ex(k) + \sum_{i=k-\tau_k}^{k-1} x^T(i)K^TCKx(i) \quad (14)$$

其中, E, C 为正定的实对称矩阵, x^T 代表人体颈部变化函数, K^T 为跑步机坡度变动方程,不同坡度下跑步机人体的动力学参数辨识的 Lyapunov 函数 V_k 沿输出力矩方向的特征值为:

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= Vx(k + 1) - Vx(k) \\ &= x^T(k + 1)Px(k + 1) - x^T(k)(P \\ &\quad - K^TRK)x(k) - x^T(k - \tau_k)C^TCKx(k - \tau_k) \end{aligned} \quad (15)$$

当 $w(k) = 0$ 时

$$\Delta V_k = \Phi_1 \Pi_1 \Phi_1^T < 0 \quad (16)$$

式中, Φ 代表姿态误差限定。在限定姿态误差的条件下,跑步机不同坡度人体颈部的位形调节空间运动规划参数矩阵为:

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} \bar{A}^T P \bar{A} - P + K^T R K & \bar{A}^T P \bar{B} \\ \bar{B}^T P \bar{A} & \bar{B}^T P \bar{B} - R \end{bmatrix} \quad (17)$$

上式中, \bar{B}^T, \bar{B} 分别代表不同姿态误差限定下位形调节空间运动规划方程, \bar{A}, \bar{A}^T 分别代表不同姿态误差限定下跑步机不同坡度人体的柔性空间自由振动方程。在七自由度下系统参数的辨识模型等价于:

$$\Pi_2 = \begin{bmatrix} \bar{A}^T P \bar{A} - P + K^T R K & \bar{A}^T P \bar{B} & \bar{A}^T P F_1 \\ \bar{B}^T P \bar{A} & \bar{B}^T P \bar{B} - R & \bar{B}^T P F_1 \\ F_1^T P \bar{A} & F_1^T P \bar{B} & F_1^T P F_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据上式,结合 Lyapunov 稳定性原理,得到设计的模型是收敛的,可以通过自适应调节,将连续系统的方程式经离散化处理,降低输出稳态误差,提高了人体颈部动力学响应输出性能。

3 仿真实验与结果分析

为了测试该方法在实现跑步机不同坡度人体颈部动力学响应分析中的应用性能,进行实验分析。人体的质量为 65 kg,采用 MTi-300 系列运动测量传感器进行人体的步态参数以及颈部力学参数采集,跑步机的最高处高度 0.35 m,最低处高度为 -0.13 m,测试不同坡度下人体颈部动力学响应的稳定裕度,建模图像如图 3 所示,测试结果如图 4 所示。

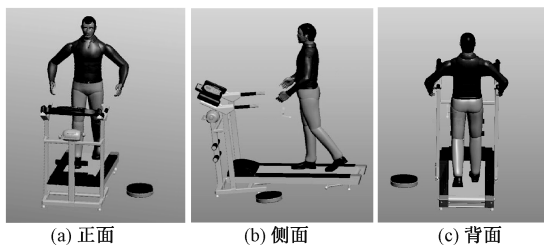


图 3 仿真建模图像

Fig.3 Simulation modeling image

分析图 4 得知,随着时间的推移,在不同坡度下,人体颈部动力响应的输出稳定性较好,测试跑步机不同坡度人体颈部动力学响应的输出力矩,得到测试结果如图 5 所示。

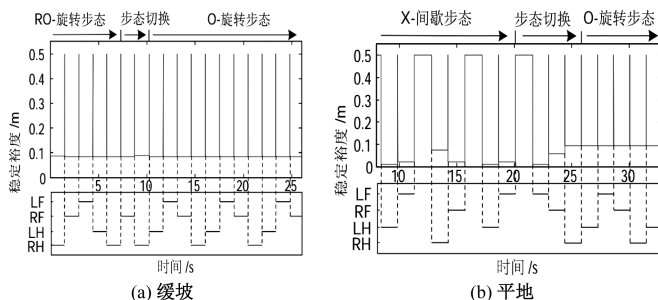


图 4 不同坡度下颈部动力响应稳定裕度测试

Fig.4 Neck dynamic response stability margin test under different slopes

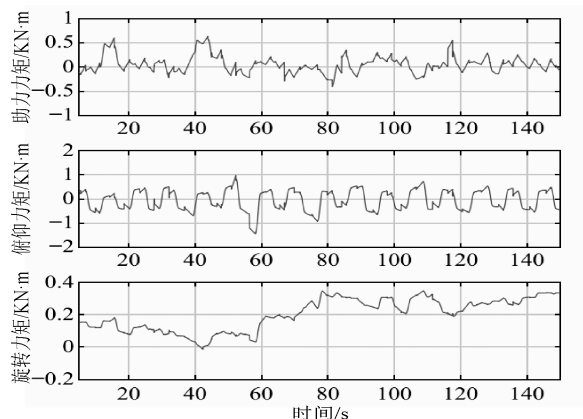


图 5 人体颈部动力学响应输出力矩测试

Fig.5 Human neck dynamics response output torque test

分析图 5 得知,在不同坡度下,人体的颈部动力学响应随步态出现周期性的波动,通过稳定性建模,提高了跑步机的坡度与人体的耦合性。

测试不同方法进行力学参数分析的精度,得到对比结果见表 1。

表 1 参数性能测试分析

Table 1 Parameter performance test analysis

迭代步数	本文方法	PID	BP
100	0.934	0.875	0.883
200	0.967	0.890	0.904
300	0.979	0.913	0.931
400	0.998	0.915	0.945

分析得知,该方法进行力学相应建模的参数辨识性能较好,可以根据不同坡度进行跑步机的自适应调节,提高了人机交互能力。

4 结语

本文提出基于力学驱动传感探测技术的跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模方法,利用关节力矩和触觉传感信息进行动力学建模,结合下肢助力运动势能分析方法,进行跑步机不同坡度的颈部力学分析,根据跑步机不同坡度人体颈部力学参数辨识结果进行柔性空间的动力学响应建模,实现跑步机不同坡度人体颈部动力学响应建模。研究得知,该模型的可靠性较好,力学参数识别的准确度较高,提高了跑步机的坡度与人体的耦合性和准确性。

参考文献:

- [1] 黄晶, 谭瞻, 胡林. 基于反馈控制的人体颈部肌肉主动力建模[J]. 汽车工程, 2017, 39(09):58-67.
- [2] 李科华, 姚永杰, 王庆敏, 等. 挂锁着舰过程中飞行员头颈部动态响应机制研究[J]. 中华航空航天医学杂志, 2017, 28(01):5-10.
- [3] 任启超, 李志利, 梁国星, 等. 健康人体在跑步机上主、被动运动的差异性研究[J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(3):185-190.
- [4] 李鸣皋, 柳松杨, 韩雅慧, 等. 拦阻着舰过程中的人体心肺动力学响应仿真研究[J]. 中华航空航天医学杂志, 2018, 29(1):28-32.
- [5] 朱松峰, 杨秀萍, 栾义超, 等. 振动载荷下腰椎间盘力学响应的仿真分析[J]. 天津理工大学学报, 2018, 34(05):59-63.
- [6] 朱前坤, 陈凯, 杜永峰, 等. 基于实测数据的行人上下楼梯人体动力学模型[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4):233-239.

基于 BIM 技术的输变电工程施工质量管控模型研究

梁杰¹,姚灏²,刘鹏³

(1.广州越秀供电局,广州 510600;2.广州电力设计院,广州 510610;

3.华南理工大学,广州 510600)

摘要:为了解决传统输变电工程施工质量管控模型存在的协同效率低、管控效果差问题,引入 BIM 技术对输变电工程施工质量管控模型进行构建。为了加强输变电工程施工质量管控的效果,对质量管控组织结构进行搭建,以此为基础,根据施工顺序对质量管控工作流程进行制定,以制定的质量管控工作流程为基础,采用聚类算法对质量管控因素进行提取,并对其进行处理使其参数化,以质量管控数据为依据,以 BIM 技术为支撑,对输变电工程施工质量管控模型进行构建,并对其进行相应的求解,得到质量管控系数,以此为依据,对质量管控效果进行判定,实现了输变电工程施工质量的管控。通过测试得到,与传统输变电工程施工质量管控模型相比较,构建的输变电工程施工质量管控模型极大的提升了协同效率与管控效果,充分说明构建的输变电工程施工质量管控模型具备更好的质量管控效果。

关键词: BIM 技术;输变电工程;施工质量;管控;信息

中图分类号:TU57

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2020)01-0114-05

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.01.020

Research on Construction Quality Management and Control Model of Power Transmission and Distribution Project Based on BIM Technology

Liang Jie¹, Yao Hao², Liu Peng³

(1.Guangzhou Yuexiu Power Supply Bureau, Guangzhou 510600, China; 2.Guangzhou Electric

Power Design Institute, Guangzhou 510610, China; 3.South China University of Technology,

Guangzhou 510600, China)

Abstract: In order to solve the problems of low collaborative efficiency and poor management and control effect existing in the traditional construction quality control model of power transmission and transformation engineering, BIM technology is introduced to construct the construction quality control model of power transmission and transformation engineering. In order to strengthen the effect of construction quality control in power transmission and transformation projects, the organizational structure of quality control is established. On this basis, the work flow of quality control is formulated according to the construction sequence. On the basis of the work flow of quality control, the clustering algorithm is used to extract the factors of quality control and to deal with them. Based on the quality control data and BIM technology, the construction quality control model of power transmission and transformation project is constructed and solved to obtain the quality control coefficient. On this basis, the effect of quality control is judged, and the construction quality control of power transmission and transformation project is realized. Through testing, compared with the traditional construction quality management and control

收稿日期:2019-07-05

作者简介:梁杰(1972-),男,广东湛江人,高级工程师,研究方向:变电一次设计、运行。

model of transmission and transformation engineering, the construction quality management and control model of transmission and transformation engineering greatly improves the synergistic efficiency and control effect, fully demonstrating that the construction quality management and control model of transmission and transformation engineering has better quality control effect.

Keywords: BIM technology; transmission and transformation engineering; construction quality; management and control; informatio

电力系统是国家重要的基础设施,是电能优化配置的平台,相关的工程建设规模相对也是较大的,对社会发展具有比较大的影响。近几年,随着电网建设规模的不断增加,相对应的输变电工程也随之增加,而工程施工过程中的质量问题也逐渐的凸显出来,工程施工质量与电网的发展前景有着至关重要的作用,影响着电网的经济效益。因此,需要对输变电工程施工质量进行相应的管控,构建绿色、经济、和谐的现代电网体系是经济社会发展的需要^[1]。提升输变电工程施工质量是保障电网正常、安全运行的关键保障。目前,如何对输变电工程施工质量进行管控已经成为国家重点研究课题之一。

就现有的研究来看,国外主要采用 IMPAC 模块化质量管控模型对输变电工程施工质量进行相应的管控,其主要是根据构建的数据库系统,通过互联网对数据进行实时共享,以此为基础,对施工质量数据进行实时监控与管理。而国内对该方面的研究较晚,但也取得了可观的成果,国内对输变电工程质量的管控主要侧重在施工阶段,忽视了其它建设阶段的质量管控,其输变电工程施工质量管控体系不完整,无法对输变电工程提供有力的保障。

上述传统输变电工程施工质量管控模型均存在着协同效率低、管控效果差的缺陷,无法适应现今社会对其的需求,为此引入 BIM 技术对输变电工程施工质量管控模型进行构建。BIM 技术是于 2002 年 Autodesk 公司提出,现今已被多个领域广泛应用,其可以实现工程信息的集成,还可以协同工程各个部门进行工作,具有提高工作效率、降低成本、节省资源的优势。通过 BIM 技术的引用,可以解决传统输变电工程施工质量管控模型的难题,为电网发展提供更加有力的保障^[2]。

1 输变电工程施工质量管控模型构建

输变电工程需要满足国家制定的工程施工质量管控目标与管控原则,这样才能保障电网的顺利运行。

根据国家电网公司质量总体要求,对输变电工程施工质量管控目标进行制定,主要包括:图纸设计准确,合格率需要 100%;生产设施配置需要纳入统一的基建管理库中,实现完全管理;设备缺陷率为 0;实行异地交叉施工验收工程;杜绝由于基建技术、生产差异导致的质量缺陷^[3]。

输变电工程施工质量管控原则主要包括五个方面,分别为领导原则、可控在控原则、多方把关原则、关键优先原则与及时消缺原则。坚守上述五个原则,在进行输变电工程施工质量管控中有的放矢,通过有限资源的合理应用,对工程施工质量管控目标进行实现。具体的输变电工程施工质量管控模型构建的过程如下所示。

1.1 质量管控组织结构搭建

为了简化输变电工程施工质量管控的过程,将工程施工信息进行整合,形成一个完整的信息库,为施工质量管控提供数据支撑。采用 BIM 技术与信息库进行直接连接,对施工信息进行整体管理,其中信息主要包括工程图纸、施工规则、材料、设备、人员管理等^[4]。则 BIM 质量管控数据关系如图 1 所示。

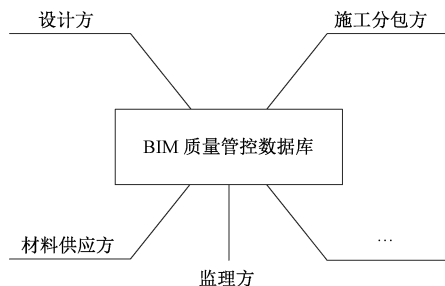


图 1 BIM 质量管控数据关系示意图

Fig.1 Schematic Diagram Of Bim Quality Control Data Relationship

输变电工程规模较大、设计专业较多、参与单位较多,因此,需要一个正规的组织结构对其进行相应的管理,统一协调的对施工质量进行整体管控。为了实现输变电工程施工质量的管控,对其管控组织结构进行搭建。这样可以使每个单位、部门明确自身的定位以及工程特点,快速、高效的完成自身的任

务,形成一个自上而下的组织结构,具体情况如图2所示。

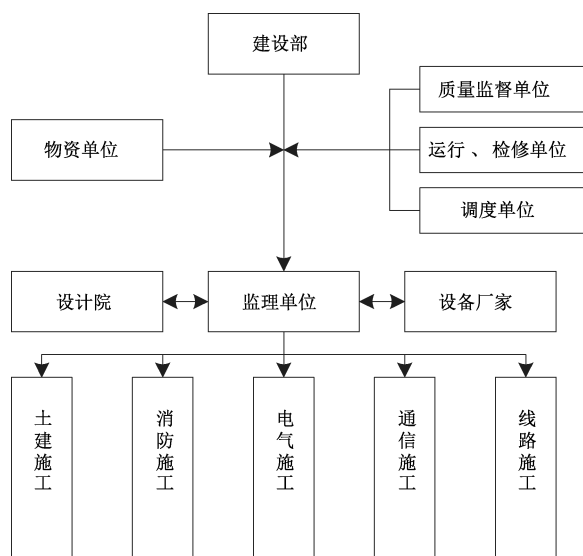


图2 施工质​​量管控组织结构示意图

Fig.2 Schematic Diagram Of Construction Quality Control Organization Structure

通过上述过程完成了质​​量管控组织结构的搭建,为输变电工程施工质​​量管控提供主体支撑。

1.2 质​​量管控工作流程设计

以上述搭建的质​​量管控组织结构为基础,采用BIM技术对质​​量管控工作流程进行相应的设计。质​​量管控工作流程指的是输变电工程施工质​​量管控过程中的内部关系流程,一般情况下,从发起部门开始,经过相关部门与单位,通过共同合作或者条件判定,共同完成该工程。质​​量管控工作流程可以较清晰的显示工作流程的先后顺序以及逻辑关系,可以直观的展示工作流向,可以简化质​​量管控的过程,突出其中的关键部分,实现输变电工程施工质​​量的精益化管控^[5]。

输变电工程施工质​​量管控工作流程主要包括四个阶段,分别为设计策划、设备生产、建设施工与工程验收,在多方面对质​​量进行管控,可以为电网建设提供实时的工程信息,消除管理中延时的问题,提升输变电工程的整体管控水平,质​​量管控工作流程如图3所示。

分析上图可知,质​​量管控首先对工程进行设计,降低工程设计上的缺陷,结合生成差异需求,确定技术图纸,进行缺陷整改,设计施工图纸,设备落地验收后,检验十分合格,不合格重新进行缺陷整改;合格则进行过程管控,进行施工调试及自检等,验收后,判断是否消缺,未消缺则进行缺陷整改,消缺则

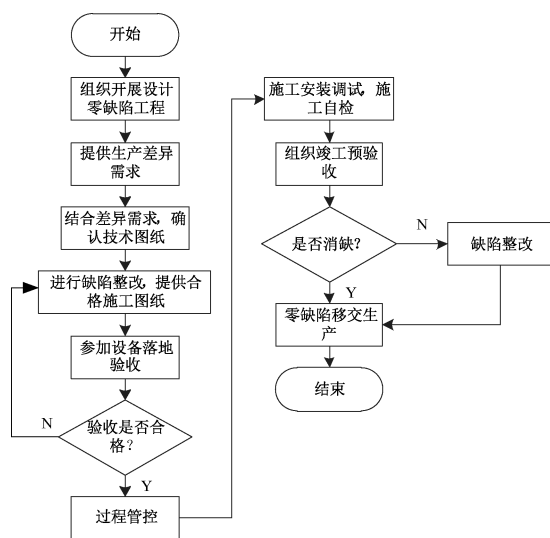


图3 质​​量管控工作流程图

Fig.3 Flow Chart Of Quality Control Work

进行生产。通过上述过程完成了质​​量管控工作流程的设计,为质​​量管控的实现做准备。

1.3 质​​量管控因素参数化处理

以上述制定的质​​量管控工作流程为基础,采用聚类算法对其中的质​​量管控因素进行提取,并根据一定的规则对其进行处理,使其参数化,为最终质​​量管控提供数据支撑^[6]。

输变电工程施工过程中主要包含工程图纸、施工规则、材料、设备、人员管理等信息,而为了简化质​​量管控的过程,将质​​量管控信息简化为工程图纸、施工状况、材料与设备,分别采用 T, Q, C, S 进行表示,则质​​量管控信息集合表示为

$$X = \{T, Q, C, S\} \quad (1)$$

在信息采集的过程中,由于施工环境、施工异常状况的影响,信息中存在着大量的无效信息,会对质​​量管控效果产生极大的不利影响,因此,采用中值滤波算法对其中无效信息进行相应的滤除,滤除过程表示为:

$$X' = \frac{\alpha * \sum_{i=1}^n X_i}{r \pm \omega} \quad (2)$$

其中, α 表示的是滤除因子; X_i 表示的是第 i 个质​​量管控信息; r, ω 表示的是协助因子^[7]。

将处理后的质​​量管控信息通过参数转换方法对其进行处理,将其转换为数据形式^[8],方便后续质​​量管控系数的求取,转换过程为

$$K = \prod_n \frac{X'^2}{\sqrt{\lambda^3}} * \lambda_i \quad (3)$$

其中, λ 表示的是质量管控信息转换参数。

通过上述过程完成了质量管控因素的参数化, 为下述质量管控系数的求取提供数据支撑。

1.4 质量管控系数求解

以上述得到的质量管控信息为依据, 以 BIM 技术为支撑, 对输变电工程施工质量管控模型进行构建, 并对其进行相应的求解, 得到质量管控系数, 在此基础上对质量管控效果进行判定^[9]。

根据得到的质量管控信息, 构建输变电工程施工质量管控模型, 该模型表示为:

$$\tilde{E} = \iint_n \frac{\xi \times \sum_{i=1}^n K}{\beta} \quad (4)$$

其中, \tilde{E} 表示的是质量管控效果; ξ 表示的是质量管控系数; β 表示的是质量管控协助参数。

由公式(4)可以看出, 质量管控协助参数是通过反复试验以及实际情况对其进行设置的, 其为定值, 范围为 [1, 99], 质量管控效果完全由质量管控系数来决定, 因此, 需要对质量管控系数进行相应的求取, 以此为基础, 对输变电工程施工质量管控效果进行相应的判定^[10]。其求解公式为:

$$\xi = \prod_n K^3 * \iint \partial X' \quad (5)$$

根据质量管控系数对质量管控效果进行判定, 判定规则为

$$\begin{cases} \xi \geq 1 & \text{质量管控效果合格} \\ \xi < 1 & \text{质量管控效果未合格} \end{cases} \quad (6)$$

通过上述过程实现了输变电工程施工质量的管控, 为电网的安全、稳定运行提供有效的保障。

2 实验结果与分析

上述过程实现了输变电工程施工质量管控模型的构建, 但是对其是否可以解决传统模型存在的难题还无法确定, 因此, 设计仿真对比实验对构建模型性能进行验证与分析。

在仿真对比实验中, 主要采用传统输变电工程施工质量管控模型与构建输变电工程施工质量管控模型进行对比实验, 为了保障实验结论的精准性, 对实验外部环境参数进行统一设置, 通过协同效率与管控效果对模型性能进行验证与分析。

2.1 协同效率对比分析

协同效率指的是构建模型与输变电工程项目共同合作的效率, 该指标越高, 则表示构建模型性能越

好。通过实验得到协同效率对比情况如表 1 所示。

表 1 协同效率对比情况表

实验次数	构建模型/%	传统模型/%
10	88	55
20	78	54
30	76	63
40	69	51
50	89	49
60	92	38
70	94	33
80	65	46
90	66	51
100	79	61

如表 1 所示, 构建模型与传统模型协同效率数值差异明显, 构建模型协同效率远远的高于传统模型, 其最大值可以达到 94%。

2.2 管控效果对比分析

管控效果主要是由质量管控系数来决定, 质量管控系数越大, 则表示质量管控效果越好。通过实验得到质量管控系数对比情况如图 4 所示。

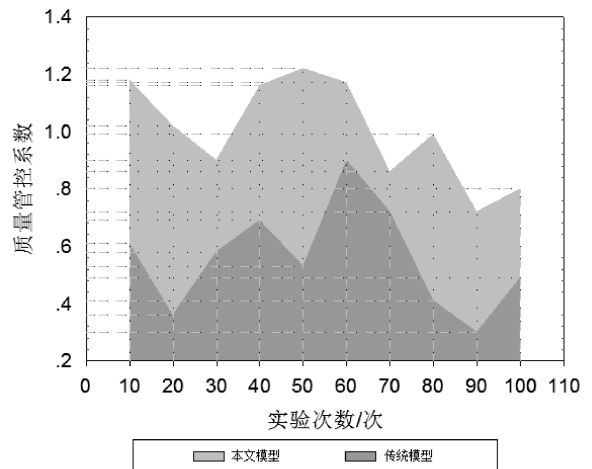


图 4 质量管控系数对比情况图

Fig.4 Comparison Of Quality Control Coefficients

分析图 4 可知, 本文构建模型的质量管控系数明显高于传统方法, 实验次数为 10 次时, 本文的质量管控系数为 1.18, 传统方法的质量管控系数为 0.61, 高出 0.57; 当实验次数为 50 次时, 本文的质量管控系数最高为 1.22, 而传统方法的质量管控系数仅为 0.53, 说明本文方法对质量管控效果极佳。

通过实验结果可知, 构建的输变电工程施工质量管控模型极大的提升了协同效率与管控效果, 充分说明构建的输变电工程施工质量管控模型具备更好的质量管控效果。

3 结束语

为了加强输变电工程施工质量管控的效果,构建输变电工程施工质量管控模型。通过实验验证所设计模型的施工质量管控效果。实验结果表明,构建的输变电工程施工质量管控模型极大的提升了协同效率与管控效果,可以为电网的安全、稳定运行提供有效的保障。

由于实验参数的设置,导致实验结果与实际结果具有一定的偏差,但不影响实验结论,为了得到更加精准的实验结果,需要对构建的输变电工程施工质量管控模型进行进一步的研究与优化。

参考文献:

- [1] 王晓波,钱展佳,李峰,等. 基于 BIM 技术的输变电工程管控模型研究与信息系统实现[J]. 电力与能源, 2018, 12(3): 305-309.
- [2] 刘志忠,彭霞锋. 基于 BIM 技术的数字化施工管理平台研究[J]. 建材与装饰, 2018, No.542(33): 301.

- [3] 朱云翔,夏华丽,劳咏昶. BIM 技术在输变电工程的应用成熟度评价研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 87-92.
- [4] 任志涛,雷瑞波,刘颖. 基于 BIM 技术的施工成本控制研究[J]. 施工技术, 2018, 47(21): 118-122.
- [5] 聂春龙,汪萍萍,刘雪洋. 基于 BIM 技术的工程精细化管理实例研究[J]. 项目管理技术, 2019, 17(2): 83-87.
- [6] 梁淑刚. 基于 BIM 技术的建筑施工管理应用研究[J]. 工程建设与设计, 2017, 29(23): 222-224.
- [7] 聂亚莉. 基于 BIM 技术的工程验交资料交付标准探讨[J]. 智能建筑与智慧城市, 2018, No.258(5): 73-74+86.
- [8] 穆好新. 基于 BIM 技术的业主方工程项目质量管理研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(26): 247-248.
- [9] 刘磊,范天江,周阳. BIM 技术在建设工程质量管控中的研究与应用[J]. 重庆建筑, 2019, 18(01): 40-42.
- [10] 赵洽超,谢一玲. 基于 BIM 技术施工进度计划管理应用研究[J]. 广西水利水电, 2018, No.183(3): 71-74.

(上接第 108 页)

参考文献:

- [1] Mac Donald D H. The allowable settlements of building [J]. Institution of Civil Engineer, 1956, 13(5): 19~32.
- [2] Boone S J, Westlan D J, Nusin k R. Comparative Evaluation of Building Responses to an adjacent braced excavation[J]. A djacent Braced Excavation, Canadian Geotech, 1999, 16(4): 210-223.
- [3] 王利民,曾马荪,陈耀光. 深基坑工程周围建筑及围护结构的监测分析[J]. 建筑科学, 2000, 16(2): 15-24.
- [4] 杨敏,卢俊义. 上海地区深基坑周围地面沉降特点及其预测[J]. 同济大学学报, 38(2): 194-199.
- [5] 吴胜发. 建筑结构基础不均匀沉降及控制研究[M]. 广州大学, 2006.

- [6] 王震宇. 某砌体结构房屋破坏原因分析[D]. 中南大学, 2010.
- [7] 陈明. 城市深基坑对周边环境影响的研究[D]. 昆明理工大学, 2011.
- [8] 郑刚,李志伟. 不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J]. 岩土工程学报, 2012, (06): 969-977.
- [9] 郑刚,李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2012, (04): 615-624.
- [10] 郑刚,李志伟. 基坑开挖对邻近不同楼层建筑物影响的有限元分析[J]. 天津大学学报, 2012, (09): 829-837.
- [11] 李昌宝. 深基坑开挖施工及对邻近建筑物的影响分析[D]. 南京工业大学, 2013.