



# 基于人工智能的公路病害“感-诊-治”成套技术与装备研发及应用

汇报人：詹伟 博士/正高

浙江省道桥检测与养护技术研究重点实验室

新一代人工智能技术交通运输行业研发中心



浙江省交通运输科学研究院

ZHEJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF TRANSPORT



# CONTENTS 目录

一 研发背景

二 公路典型病害快速感知装备

三 公路典型病害精准诊断技术

四 公路典型病害高效处治技术

五 工程应用典型案例

## 交通基础设施高质量发展

党的二十大报告提出，“加快建设交通强国”，这是统筹推进交通强国建设的战略升级，为今后我国交通运输事业的发展提供了根本遵循，将推动我国交通运输实现更可持续、更高质量发展。



《交通强国建设纲要》



## 提升养护管理数字化水平

推进设施数字化、养护专业化、管理现代化、运行高效化、服务优质化，全面提升公路养护管理水平。加快公路技术状况检测监测及养护装备研发，重点是公路桥隧、交安设施等自动化快速检测装备、无人化养护施工装备研发。



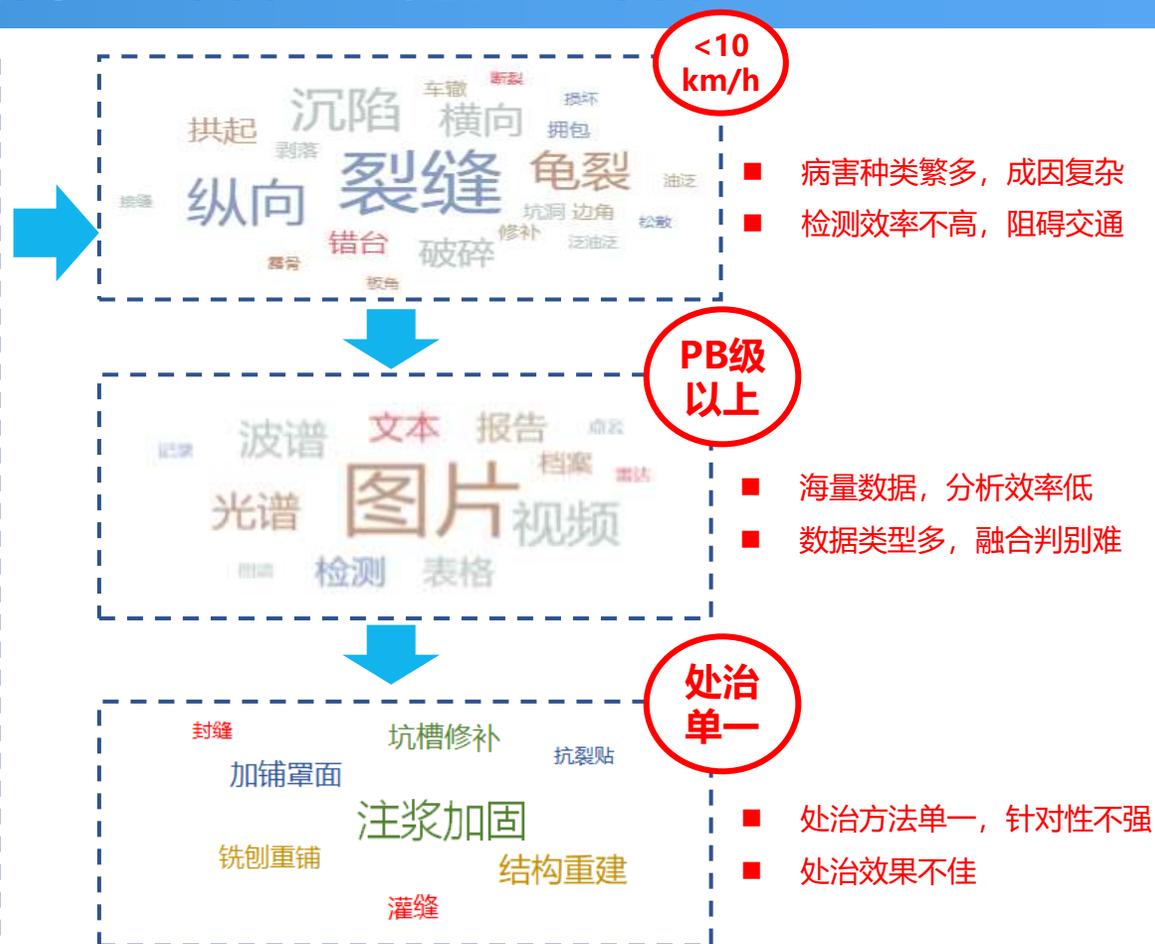
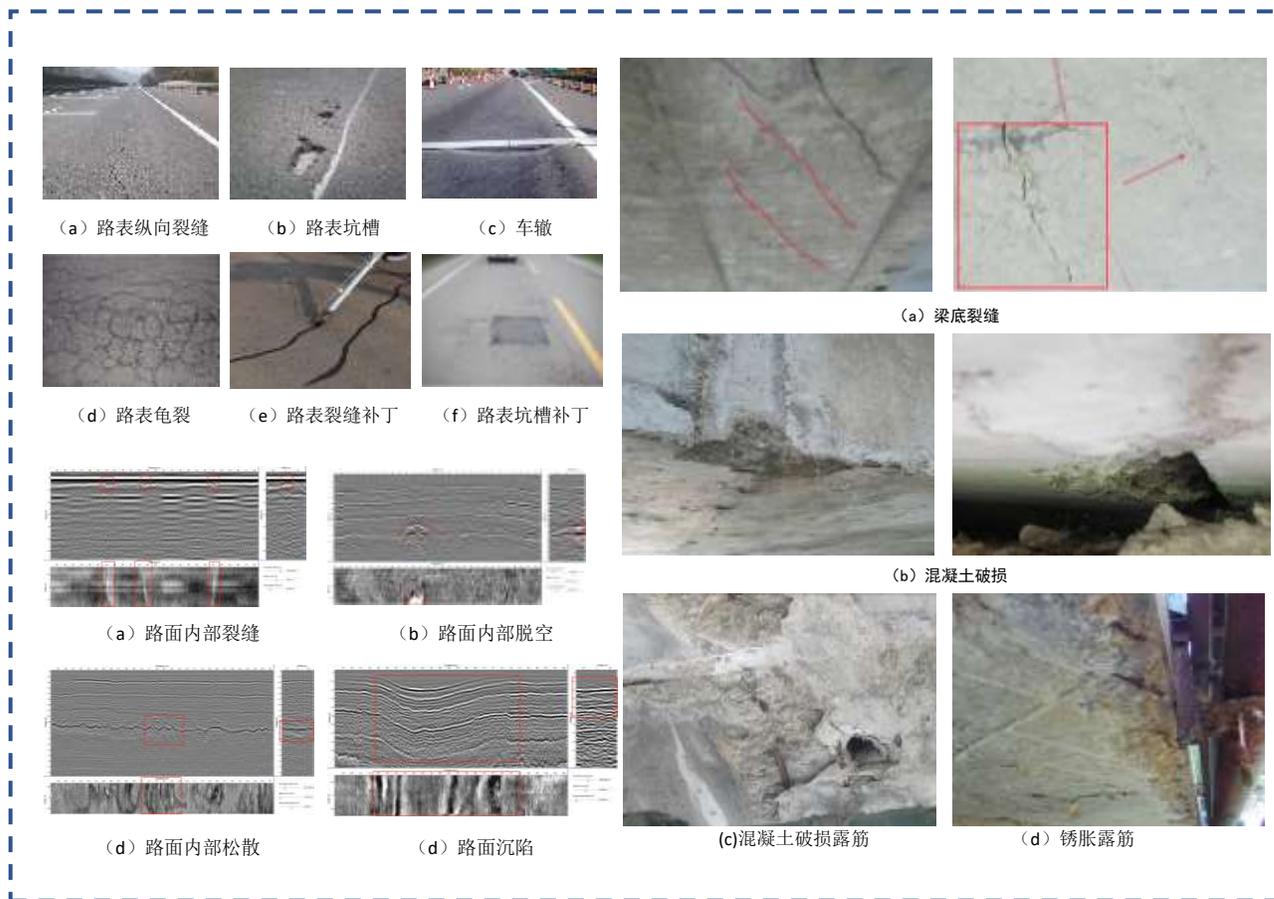
《“十四五”公路养护管理发展纲要》

公路基础设施高质量发展

+

公路养护管理提质升级

浙江省公路里程12万公里以上，桥梁数全国第三、隧道数全国第一



亟需构建公路病害“快速感知、精准诊断、高效处治”全过程技术体系



浙江省交通运输科学研究院

ZHEJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF TRANSPORT

# 感知装备

## 沥青路面全结构病害智能检测车



高精定位器 (RTK)



数据采集操控平台

三维探地雷达



距离编码器



三维激光点云



电气控制箱

将三维激光点云扫描仪、三维探地雷达、全球导航卫星系统 (GNSS)、高精定位器 (RTK)，集成封装形成沥青路面全结构病害无损检测装备，实现路表和路面内部病害同步检测。

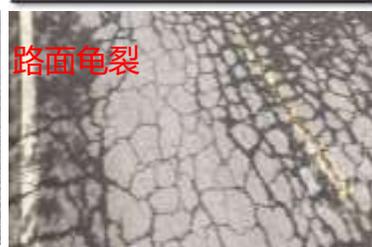
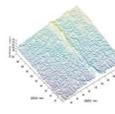
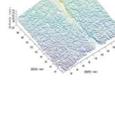
# 二 公路典型病害快速感知装备-道路



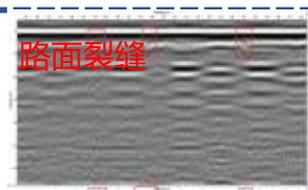
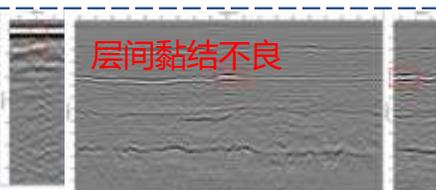
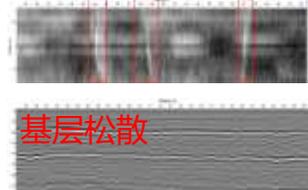
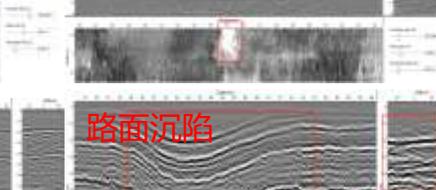
浙江省交通运输科学研究院  
ZHEJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF TRANSPORT

## 检测车集成研发

路表病害检测

|   |   |  |      |            |
|---|---|--|------|------------|
|  |  |  | 距离传感 | 毫米级        |
|  |  |  | 高精定位 | 厘米级        |
|   |   |  | 激光点云 | 毫米级        |
|   |   |  | 测量速度 | 小于 100km/h |

路面内部病害检测

|  |  |  |      |             |
|--|--|--|------|-------------|
|   |   |    | 空耦天线 | 40-60km/h   |
|  |  |   | 地耦天线 | 小于 30km/h   |
|  |  |  | 高精定位 | 厘米级         |
|  |  |  | 图谱特征 | 取芯验证 大于 90% |

功能简介:

- ◆ 支持路表和路面内部病害**同步检测**;
- ◆ 支持路况指标PCI、RQI、RDI、路面厚度等参数**模块化采集、自动化导出**功能;
- ◆ 路表病害检测精度可达**毫米级**;
- ◆ 内部病害识别准确率**大于90%**;
- ◆ 支持病害定位精度达**厘米级**;
- ◆ 实现路表与内部病害分布图自动导出;

适用条件:

- ◆ 路表与内部同步采集最高支持**60km/h**;
- ◆ 同步采集支持夜间作业模式, 不受光照影响 (不可雨天作业) ;
- ◆ 探测深度可达1.5m (覆盖路面结构) ;



VS  
功能对比



- ◆ 支持路表和路面内部数据同步采集；
- ◆ 作业时间不受限（支持夜间作业）；
- ◆ 路表病害检测精度高（激光点云测量）；
- ◆ 横断面车辙采样点数大于2800；
- ◆ 支持病害分布图CAD导出；
- ◆ 病害定位精度厘米级；
- ◆ 支持路面厚度检测
- ◆ 支持路内1.5m范围病害探测

- ◆ 支持路表数据采集；
- ◆ 支持日间作业，光照需良好；
- ◆ 路表病害以图像为主；
- ◆ 横断面车辙采样点数小于20；
- ◆ 不支持导出病害CAD分布图；
- ◆ 普通GPS定位；
- ◆ 不具备路面厚度检测功能
- ◆ 不具备内部病害检测功能



## 公路隧道智能快速检测车

升降台

机器视觉模块

监控相机



操作仓

驾驶舱

RTK天线

多通道雷达

机械臂



车轮编码器

移动激光扫描系统

将机器视觉模块、多通道雷达模块、移动三维激光扫描模块、RTK天线、机械臂等集成为隧道快速检测车，实现了隧道表观病害、隐蔽面病害与异常变形病害的快速检测。

# 二 公路典型病害快速感知装备-隧道



## 表观病害检测



工业相机  
照明系统  
定位系统  
FRN-Unet 算法

速度  
检测速度  
60~80km/h

精度  
裂缝宽度  
0.2mm

数据储存  
传输  
每秒数据量超  
过8.1GB

## 空间变形检测



三维激光  
点云抽稀  
点云智能  
分类  
同名点搜  
索等

精度  
变形误差  
2mm内

范围  
变形监测  
全覆盖

## 隐蔽区检测



双频雷达  
空气耦合  
多自由度  
检测机构  
BBP 算法

速度  
检测速度  
30km/h

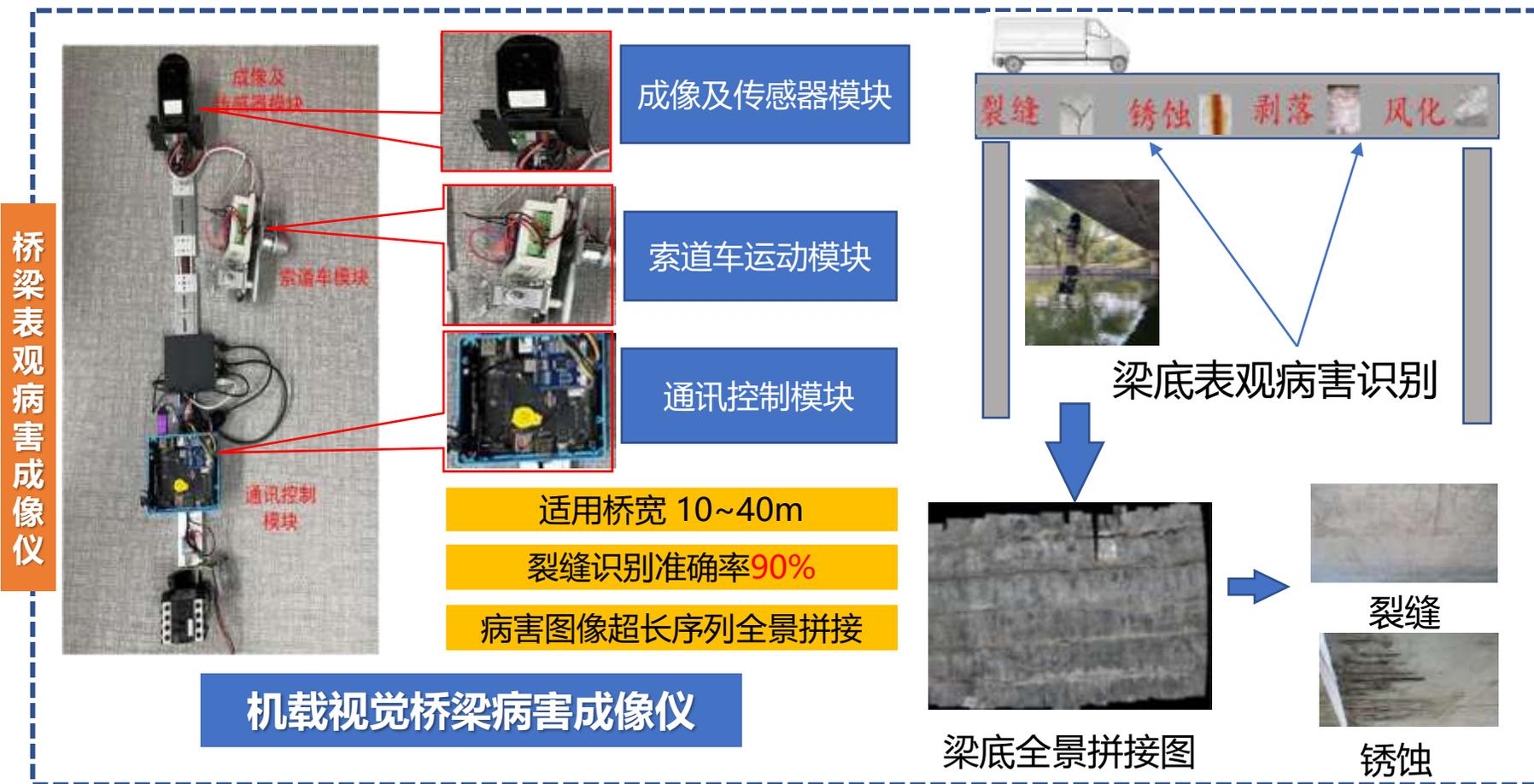
精度  
隐蔽面精度  
厘米级

角度  
垂直抬升  
90度  
水平旋转  
180度



- ✓ 不中断交通，全天候作业
- ✓ 检测过程安全可靠
- ✓ 检测速度快
- ✓ 数据全流程智能化分析
- ✓ 适应多场景、多类型隧道检测

## 机载视觉桥梁病害成像仪



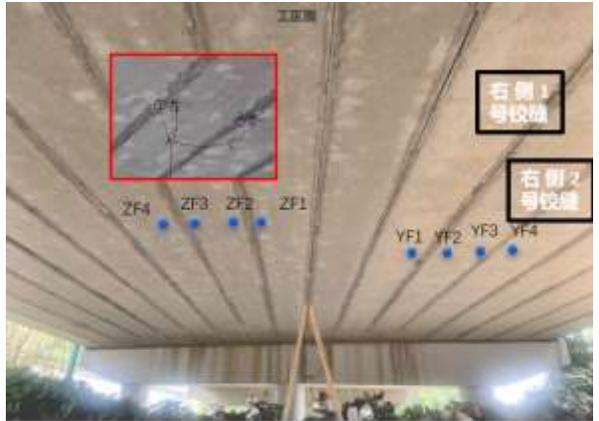
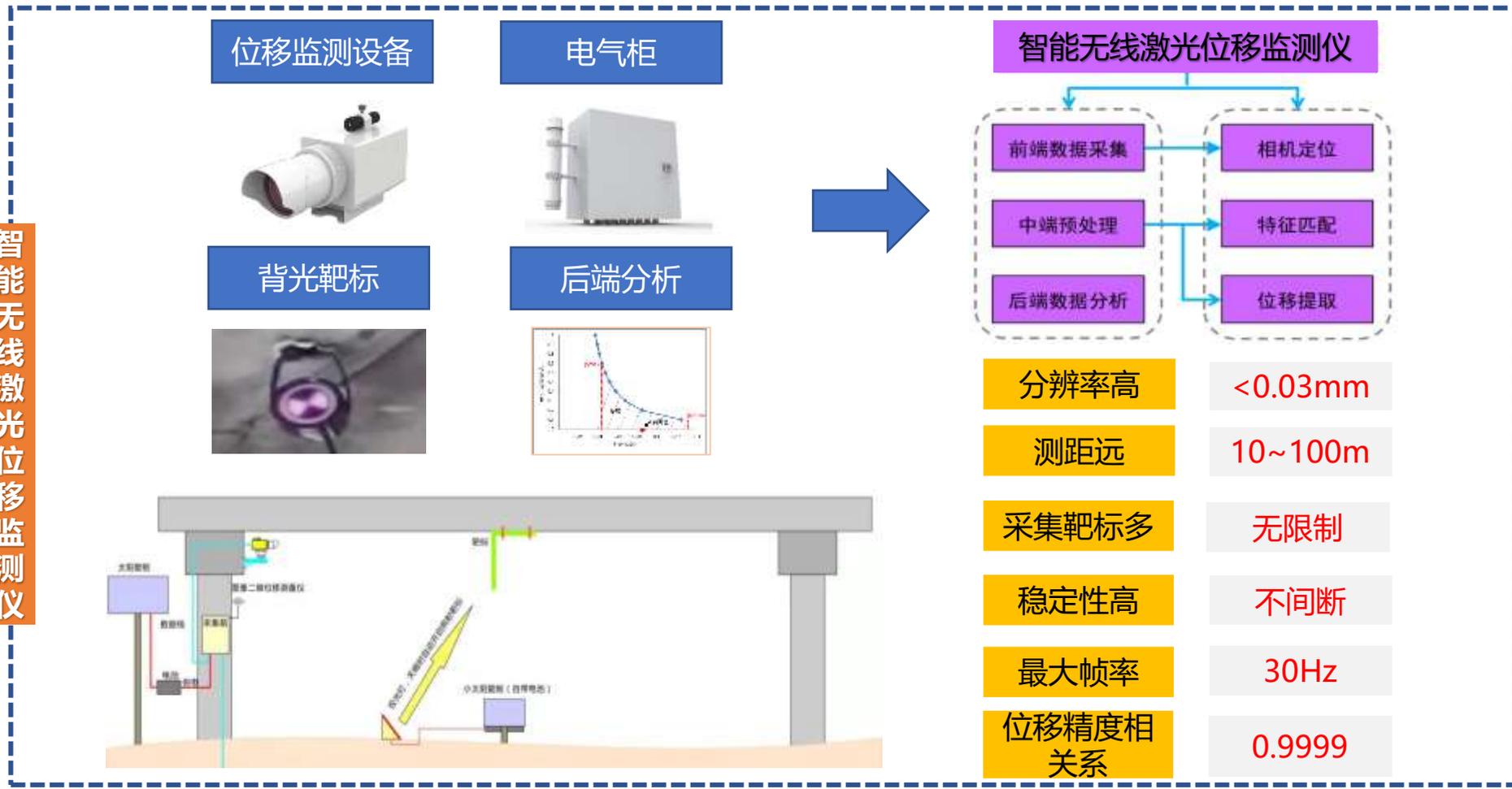
设备功能特点:

- ◆ 适用于宽度40m以下梁底表观病害快速检测
- ◆ 实现标准化、数字化病害监测
- ◆ 自动变焦、标准化成像
- ◆ 设备组装灵活, 重量较轻
- ◆ 续航能力强
- ◆ 场景适应能力强

设备由成像及传感器模块（成像）、运动模块（运动）、通讯控制模块（传输）三部分组成。

## 智能无线激光位移监测仪

智能无线激光位移监测仪



- 设备功能特点:
- ◆ 适用于梁体挠度和空心板铰缝损伤快速识别
  - ◆ 采集靶标数量多;
  - ◆ 分辨率高
  - ◆ 通讯灵活便捷、功耗低

设备由前端采集（相机、靶标）、中端处理（采集仪）、后端分析三部分组成。



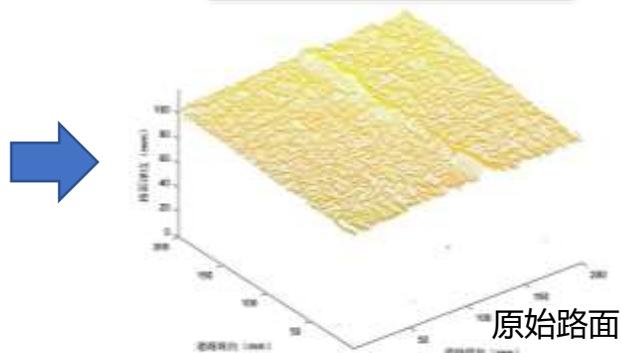
# 诊断技术

## 路表病害检测算法

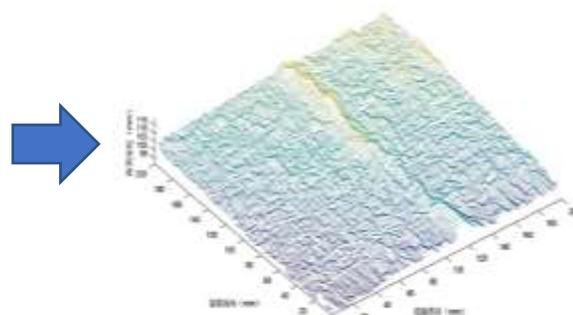
### 点云数据采集



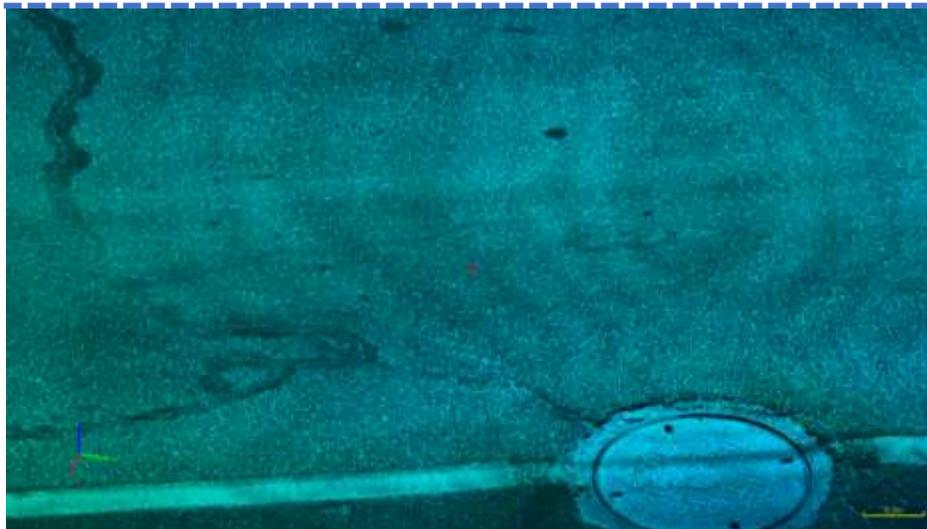
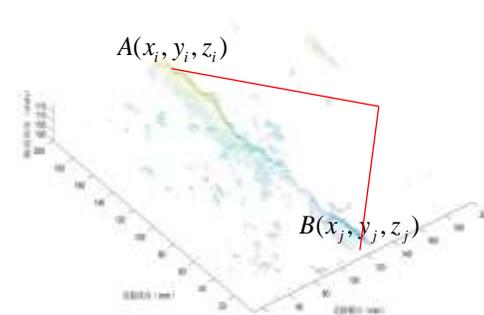
### 路面形态重构



### 点云数据去噪



### 裂缝信息提取

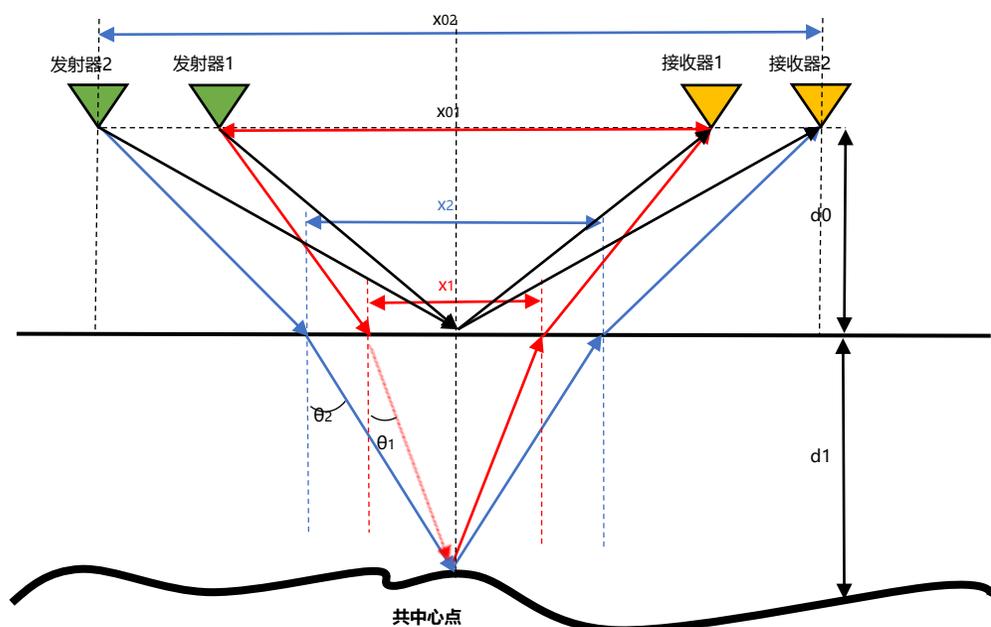
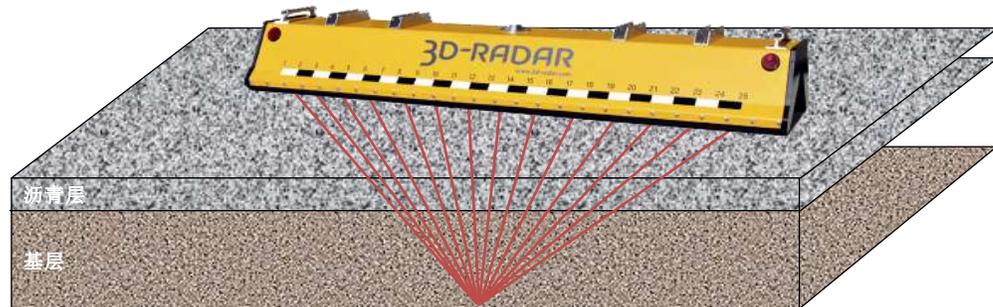


### 路表病害点数据采集

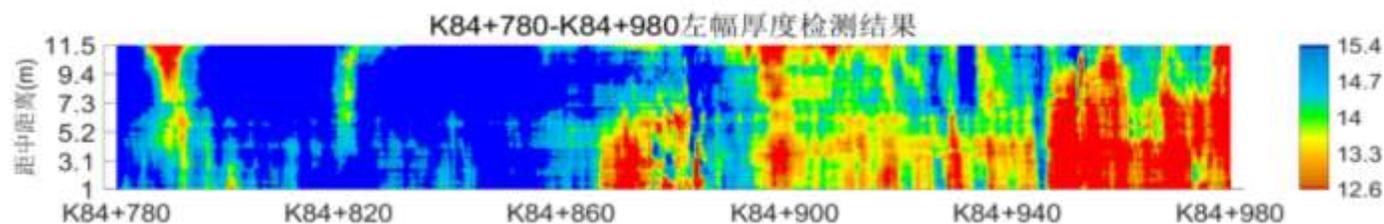
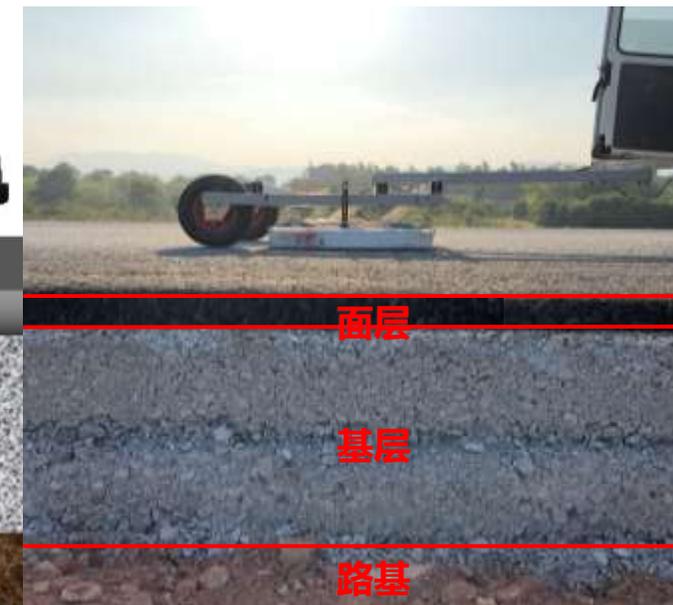
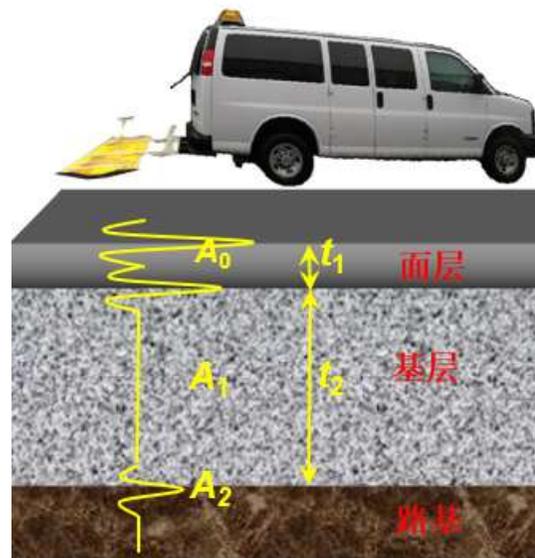
### 技术特点:

- ✓ 覆盖面积广——单测道扫描覆盖宽度**大于4m**;
- ✓ 识别精度高——裂缝提取精度达**毫米级**;
- ✓ 测量场景多——支持**夜间测量**;
- ✓ 测量速度快——最高可达**100km/h**, 不阻碍交通;

## 路面厚度均匀性检测技术



共中心点法



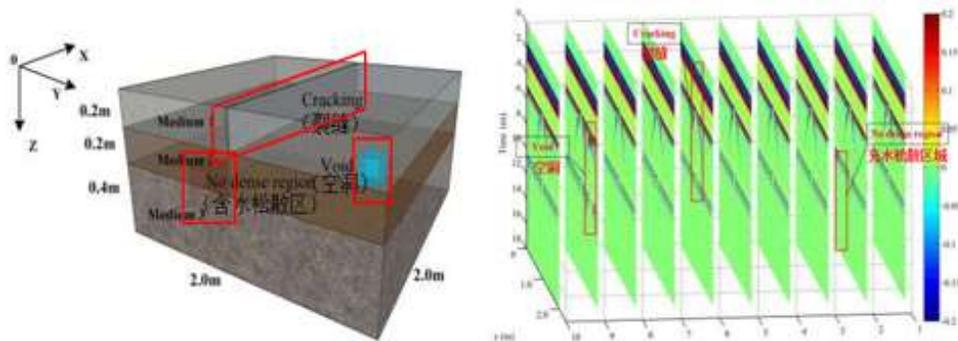
路面厚度分布云图

技术特点:

- ✓ 无需取芯
- ✓ 覆盖整车道
- ✓ 测量误差在5%以内

## 路面内部病害无损检测技术

### 仿真计算



道路结构典型病害：裂缝、空洞、土基高含水

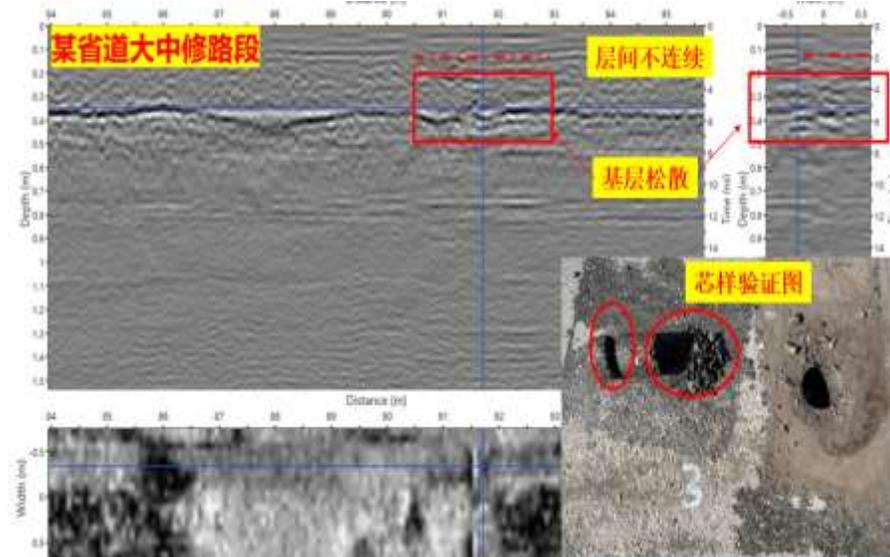
### 足尺模型试验



典型病害三维探地雷达图谱特征

### 技术特点：

- ✓ 病害探测深度可达1.5m；
- ✓ 病害定位精度可达厘米级；
- ✓ 病害取芯验证准确率大于90%；

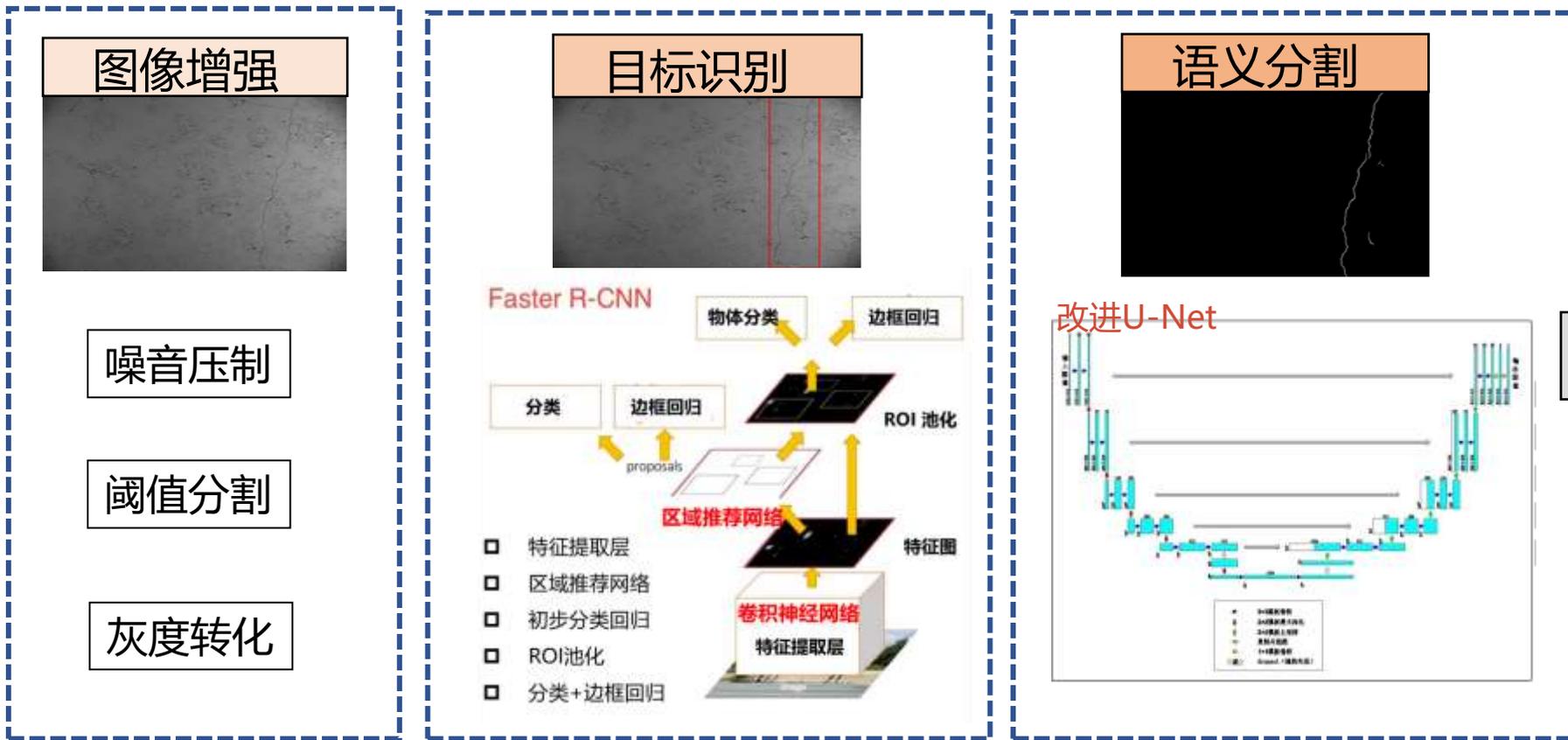


理论研究

现场验证

## 隧道表观病害智能识别技术

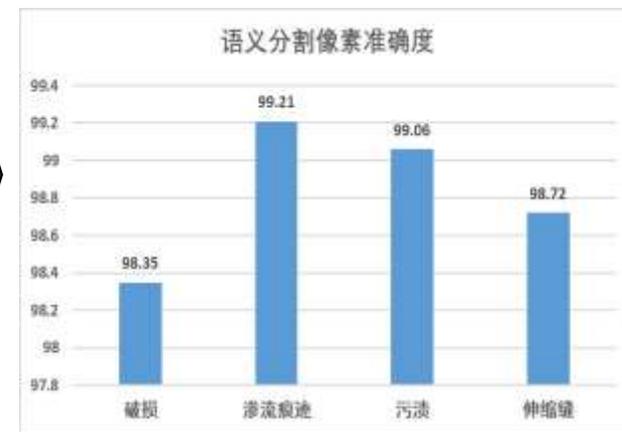
融合深度学习算法抗干扰能力强与特征分割算法边缘分割精度高的优势



高清裂缝影像

精确裂缝区域

裂缝像素点集



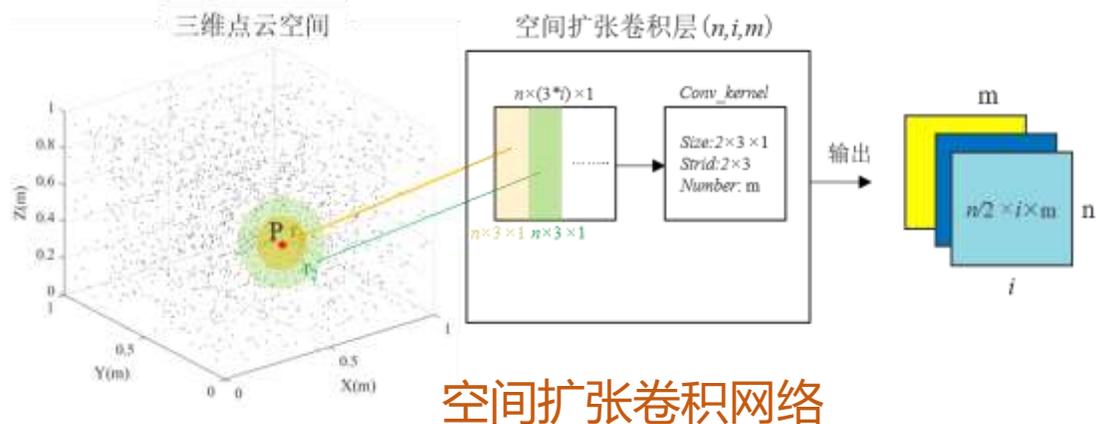
✓ 识别准确度  $\geq 98\%$

✓ 识别速度 0.15s/张

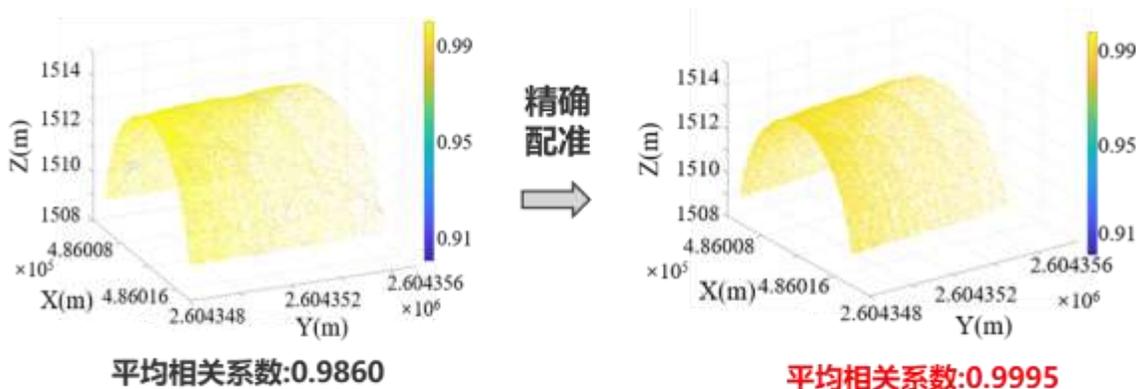
✓ 精度 0.2mm 裂缝

## 隧道全空间变形快速诊断技术

点云降噪

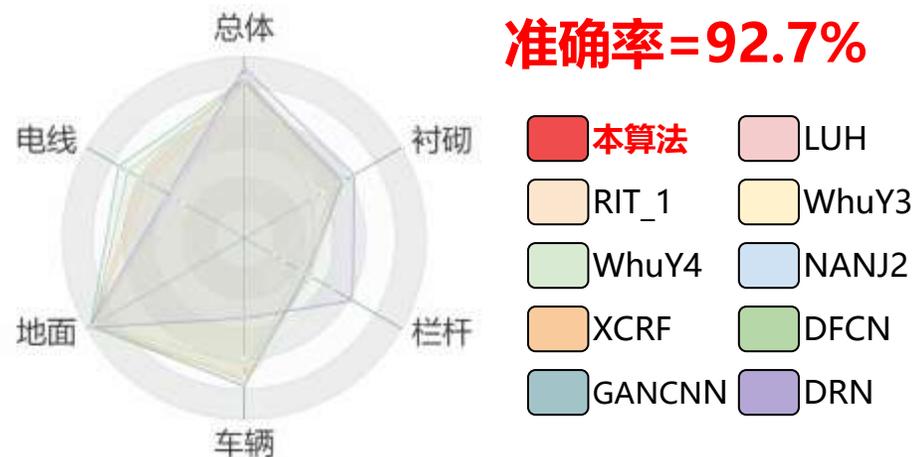


点云变形计算

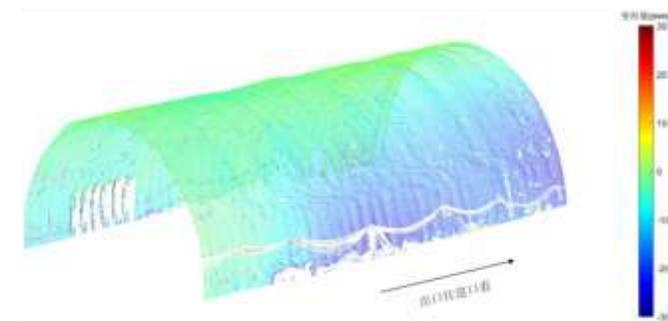


多尺度空间特征相关性

点云分类的精度评价



三维变形云图及沉降曲线

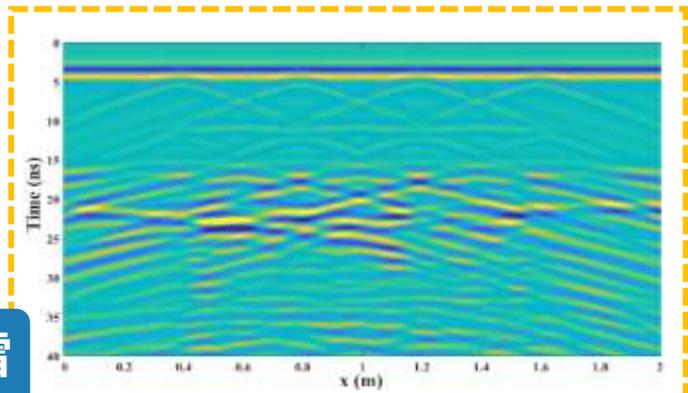


- ✓ 实现点云**精准降噪**
- ✓ 变形监测**全覆盖**
- ✓ 实现断面**变形计算**
- ✓ 变形**误差毫米级**

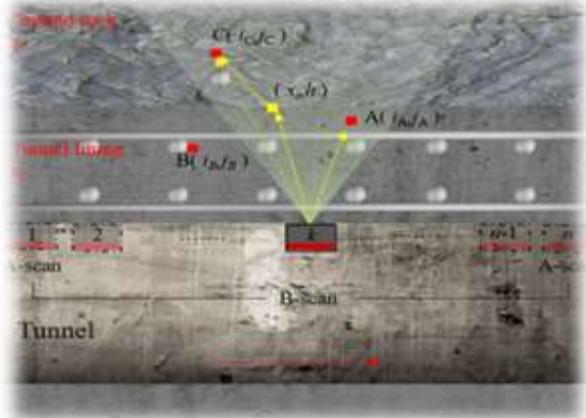


## 隧道隐蔽面病害快速诊断技术

雷达信号成像

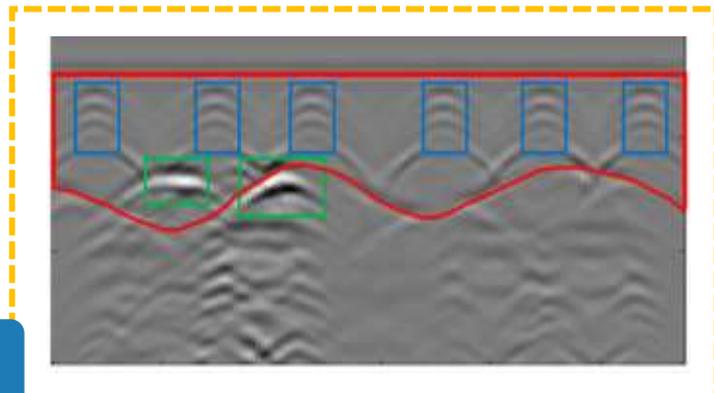


双频向后投影算法  
400MHz+900MHz

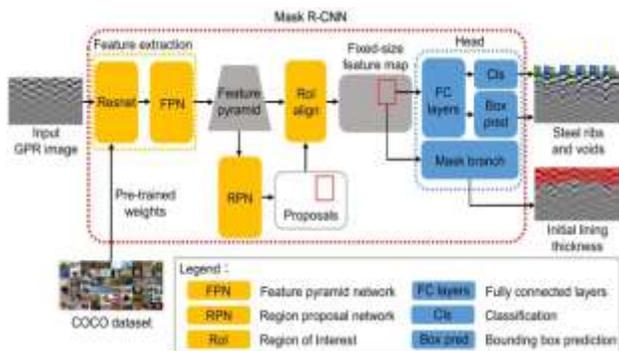


低噪雷达剖面

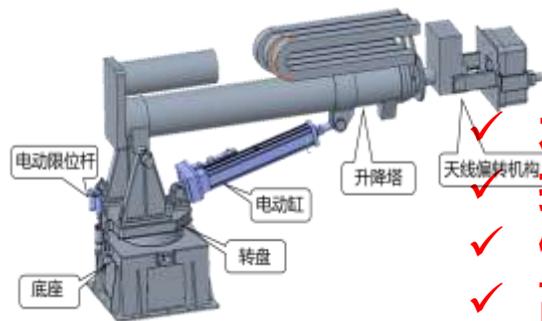
智能识别



多深度特征金字塔

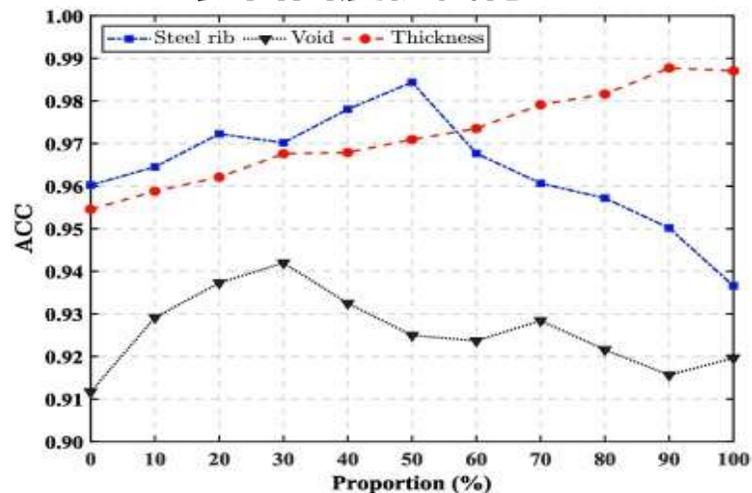


隧道衬砌结构元素



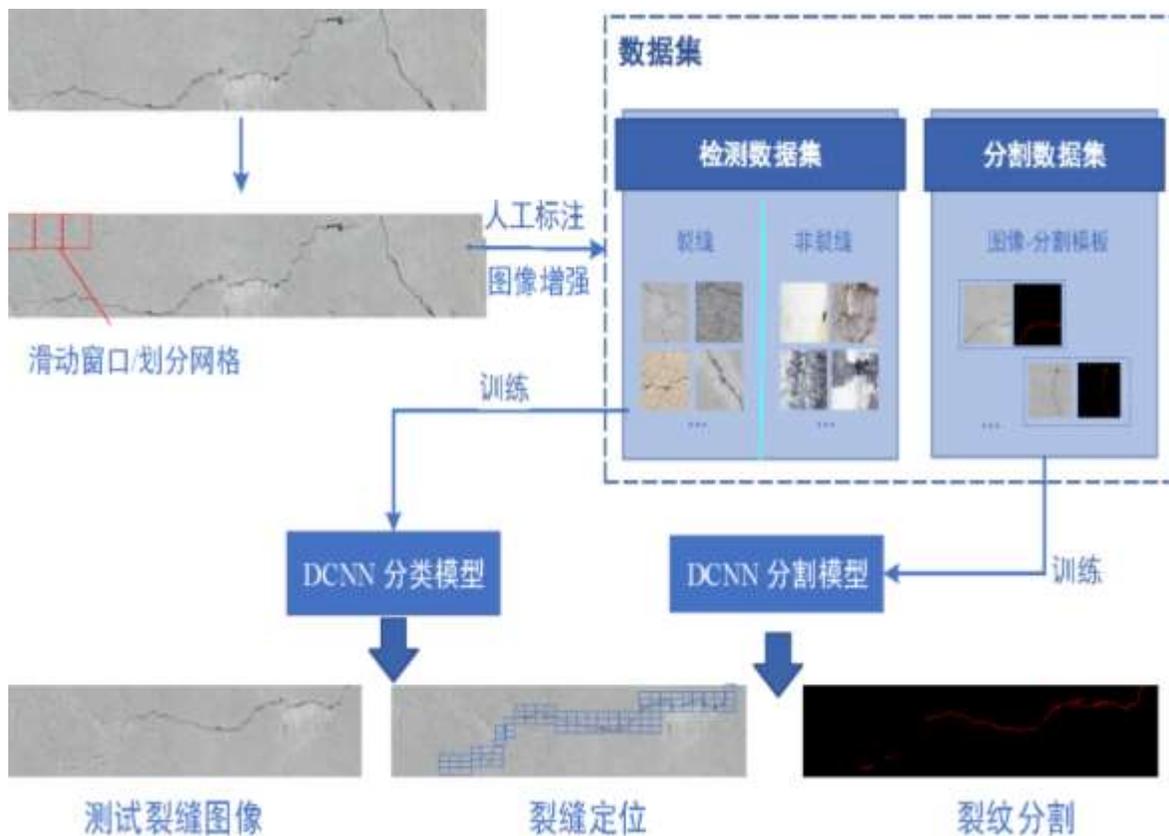
- ✓ 水平: -90 ~ 90°
- ✓ 抬升: 0 ~ 90°
- ✓ 俯仰: -40 ~ 40°
- ✓ 高度: 8.317m

多自由度机械臂



- ✓ 融合双频率特征
- ✓ 抑制多次波干扰
- ✓ 成像鲁棒性强
- ✓ 识别准确率91%

## 级联式病害检测流程



## 混凝土桥梁外观病害图像数据集制作



## 算法识别精度

裂缝识别准确率达89.6%

风化剥落的识别精度为86.3%

露筋的识别精度为84.7%

修补病害的识别精度为96.35%

## 病害图像识别—图像分类模型预检、语义分割模型精检



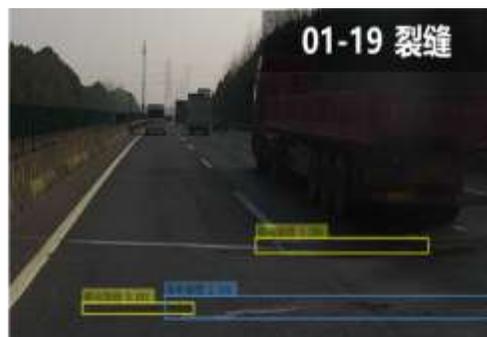
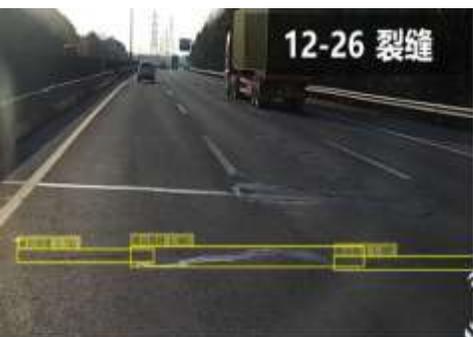


浙江省交通运输科学研究院

ZHEJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF TRANSPORT

# 处治技术

## 公路病害成因分析与处治



沥青路面病害诊断与识别

桥梁病害识别诊断

隧道病害识别诊断



封缝

加铺罩面

铣刨重铺

坑槽修补

注浆加固

灌缝

抗裂贴

结构重建

高频巡检



病害时序数据库



精准诊断算法



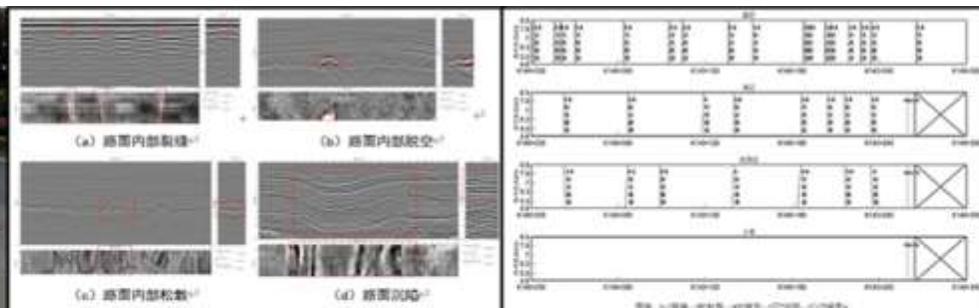
处治方法

## 路面隐性病害发育规律及注浆处治技术

隐性病害检测

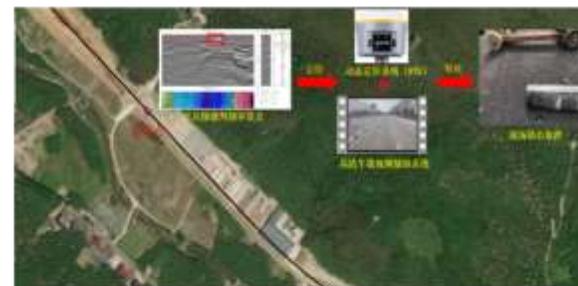


工程检测



病害判别

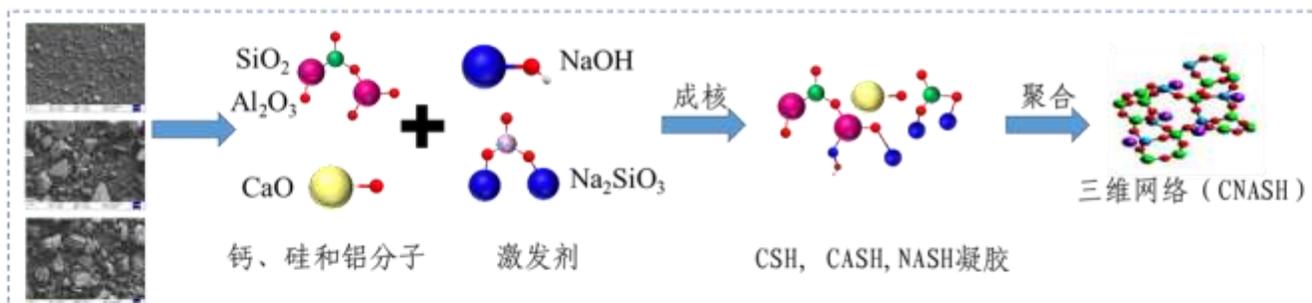
形成层位分布平面图



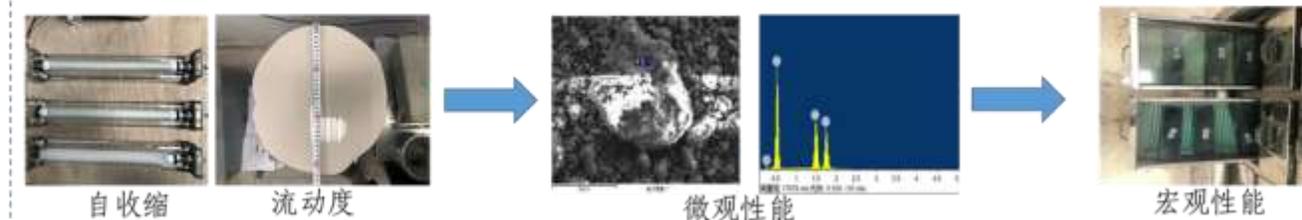
高精定位

注浆材料研发

制备机理

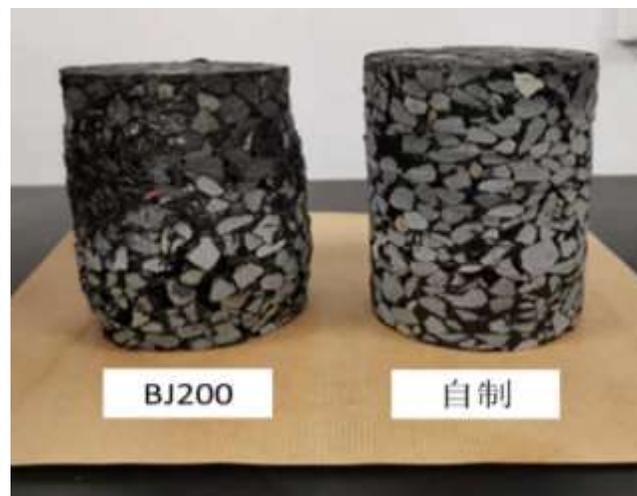
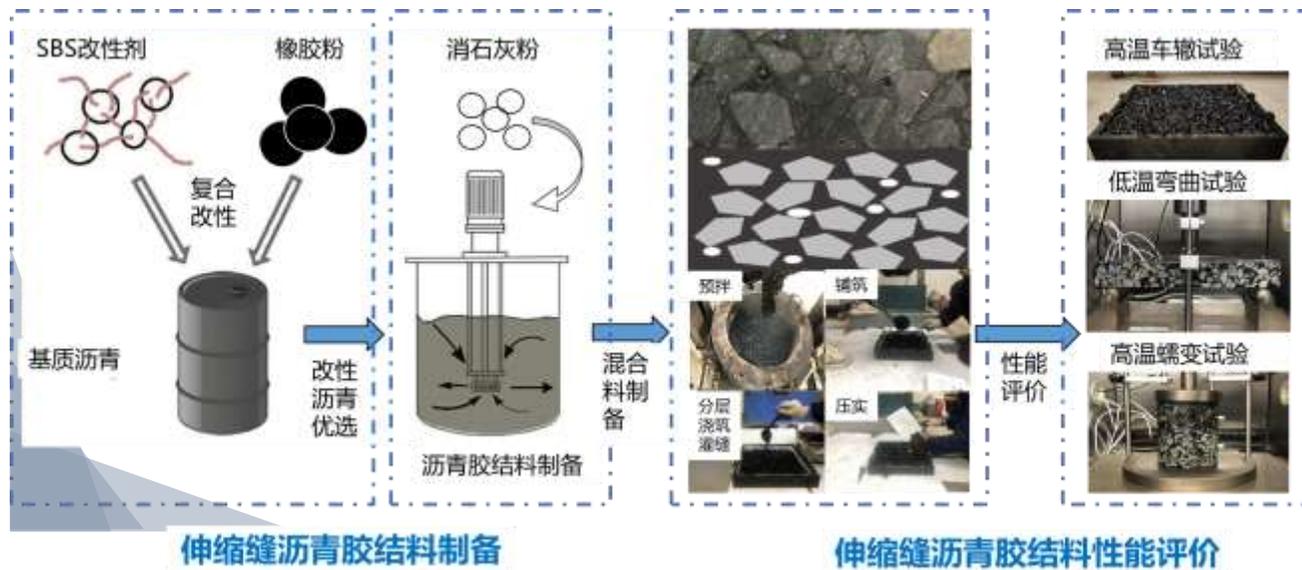


性能评价



注浆工艺

## 桥面伸缩缝病害发育规律及处治材料



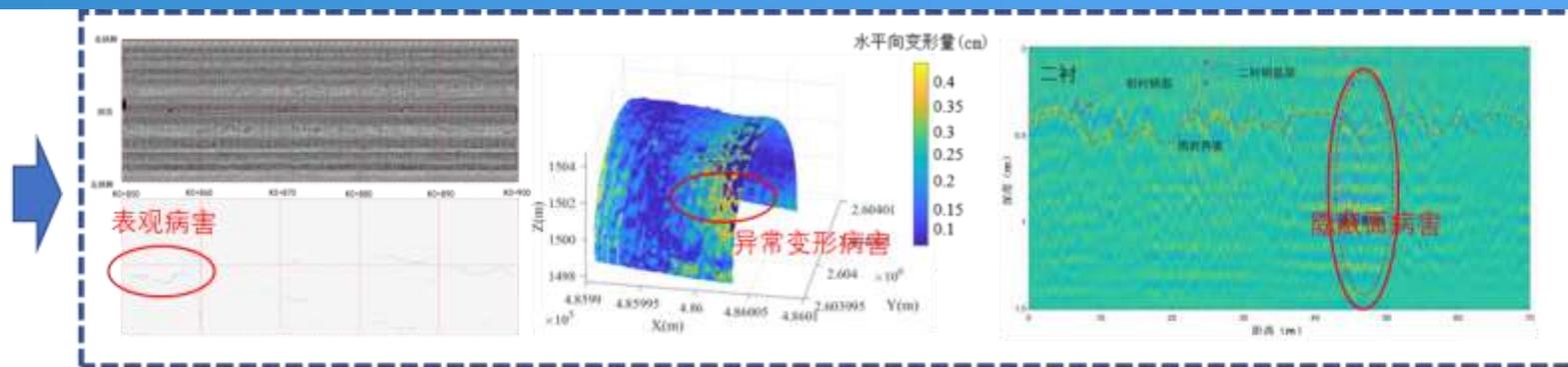
高温和疲劳稳定性优良

- 自制沥青混合料具有更小的变形量，在加载到25000次时仍处于稳定期，累积应变量为1%，累积变形量为1.5mm
- BJ200沥青混合料当加载次数达到17500次时，进入破坏期

## 隧道典型病害高效处治技术

隧道  
典型  
病害  
检测

工程检测



病害识别与定位

隧道  
典型  
病害  
处治

形成《浙江省公路隧道典型病害维修加固手册》

裂缝病害处治

- 表面封闭法处治
- 注射法处治



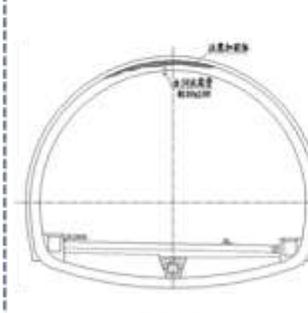
表面封闭法



注射法

壁后空洞病害处治

- 水泥砂浆注浆处治



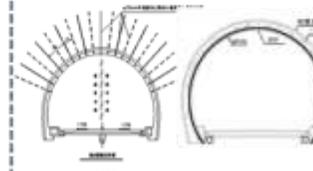
壁后注浆

异常变形病害处治

- 粘贴纤维复合材料
- 喷射混凝土
- 嵌入钢架
- 锚杆
- 套拱



纤维复合材料粘贴



锚杆

套拱

病害处置策略

## 预应力连续箱梁（刚构）底板崩裂防治技术

### 崩裂病害分类



底板的纵向开裂



箱梁底板撕裂破坏

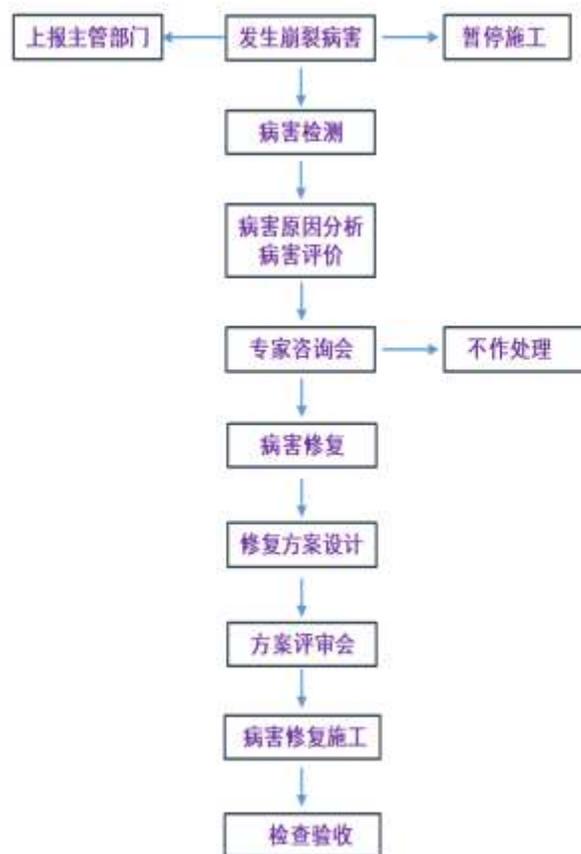


底板的局部崩裂破坏



倒角开裂

### 修复方案



### 崩裂预防措施

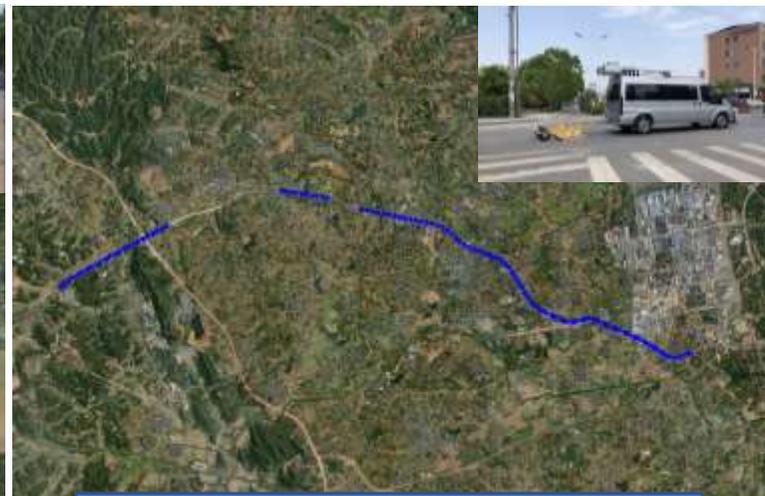




乐清湾大桥及接线工程路面内部  
病害无损检测项目



海宁G104国省道长周期养护  
项目



龙游G320国道会泽里至下  
章段改建工程项目



西垵门大桥桥面铺装病害无  
损检测项目



桐庐S302省道路面大中修项目



嘉兴市东进路大中修工程内  
部病害无损检测

# 五 工程应用典型案例-道路

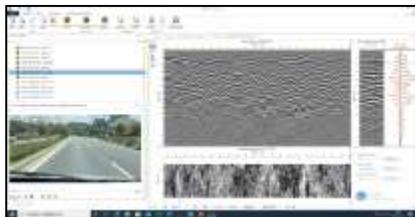


浙江省交通运输科学研究院  
ZHEJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF TRANSPORT

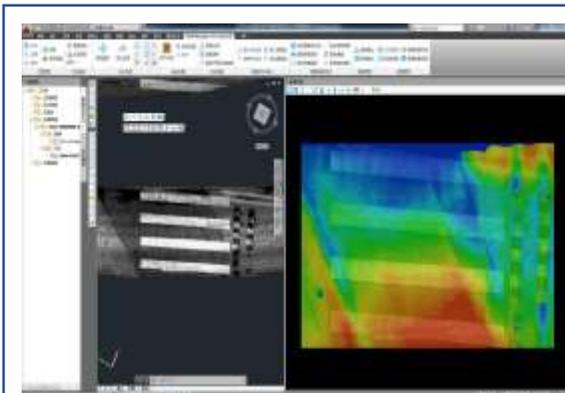
## 应用工程:桐庐S302省道大中修养护检测

### 成果输出形式

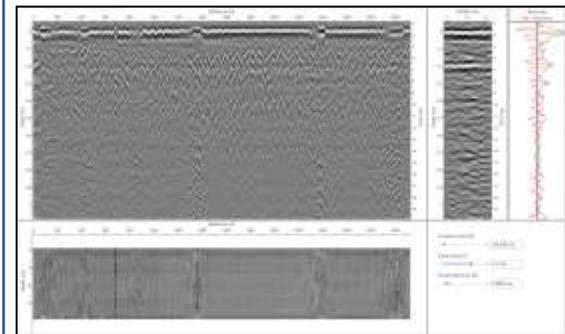
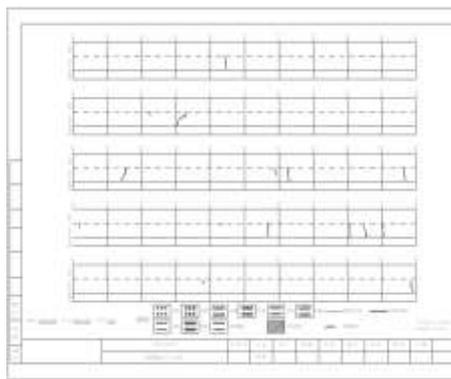
杭州市桐庐县S302省道起终点为K27+000-K62+000, 双向4车道, 总检测里程140km。



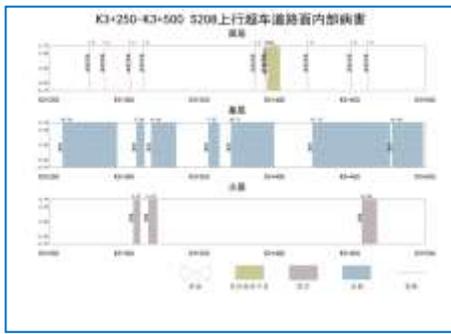
### 现场测量



| 桩号        | 里程      | 病害类型 | 病害长度 (m) | 病害深度 (m) | 病害面积  |
|-----------|---------|------|----------|----------|-------|
| K2728+315 | 2728315 | 横向裂缝 | 0.139    | -        | -     |
| K2728+315 | 2728315 | 横向裂缝 | 0.413    | -        | -     |
| K2728+315 | 2728315 | 横向裂缝 | 0.386    | -        | -     |
| K2729+156 | 2729156 | 横向裂缝 | 0.227    | -        | -     |
| K2729+156 | 2729156 | 横向裂缝 | 0.315    | -        | -     |
| K2729+502 | 2729502 | 横向裂缝 | 0.389    | -        | -     |
| K2729+599 | 2729599 | 横向裂缝 | 0.65     | -        | -     |
| K2732+366 | 2732366 | 横向裂缝 | 0.748    | -        | -     |
| K2733+481 | 2733481 | 横向裂缝 | 0.54     | -        | -     |
| K2733+898 | 2733898 | 横向裂缝 | 0.255    | -        | -     |
| K2733+898 | 2733898 | 横向裂缝 | 0.259    | -        | -     |
| K2735+306 | 2735306 | 横向裂缝 | 0.246    | -        | -     |
| K2735+307 | 2735307 | 横向裂缝 | 0.75     | -        | -     |
| K2737+887 | 2737887 | 横向裂缝 | 0.86     | -        | -     |
| K2719+561 | 2719561 | 坑槽   | -        | 0.012    | 0.088 |
| K2725+510 | 2725510 | 坑槽   | -        | 0.02     | 1.9   |
| K2725+637 | 2725637 | 坑槽   | -        | 0.016    | 0.903 |
| K2725+736 | 2725736 | 坑槽   | -        | 0.031    | 2.423 |



| 桩号       | 病害类型   | 所在层位 | 长度/m | 深度/cm |
|----------|--------|------|------|-------|
| K004+410 | 横向裂缝   | 面层   | 1.1  | /     |
| K004+386 | 横向裂缝   | 面层   | 1.4  | /     |
| K004+356 | 层间粘结不良 | 基层   | 7.1  | 20-30 |
| K004+328 | 横向裂缝   | 基层   | 1.2  | /     |
| K004+325 | 横向裂缝   | 基层   | 1    | /     |
| K004+250 | 松散     | 基层   | 4.6  | 20-30 |
| K004+234 | 横向裂缝   | 面层   | 1.5  | /     |
| K004+200 | 横向裂缝   | 面层   | 1.5  | /     |
| K004+186 | 松散     | 基层   | 2.2  | 20-30 |
| K004+162 | 松散     | 基层   | 1.9  | 20-30 |
| K004+160 | 横向裂缝   | 基层   | 1.1  | /     |



### 路面评价结果:

- ◆ 通过三维激光点云检测, 路面技术状况指标 (RQI、RDI和PCI) 均处于**良好水平**;
- ◆ 经过三维探地雷达精细探测, **路面内部病害数量较少, 分布密度较低**, 路面内部主要以**横向裂缝**为主, 伴随少量的**层间粘结不良**和**松散**病害。

### 应用效果:

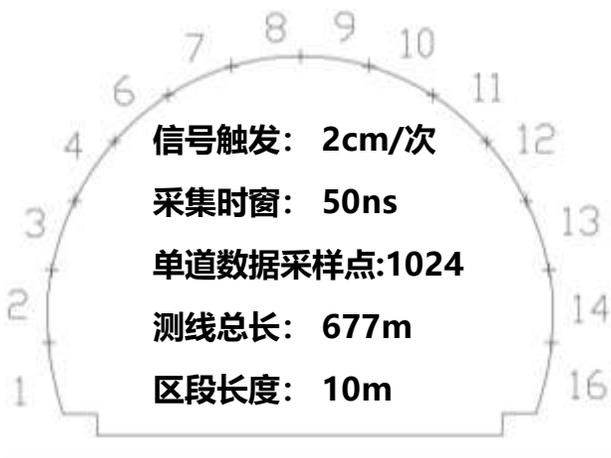
- **检测效率高**: 路表和路面内部同步检测
- **定位精度高**: 病害可实现厘米级定位
- **病害提取准**: 路表病害能实现毫米级提取

# 五 工程应用典型案例-隧道



## 杭徽高速柳山隧道（长550米）隐蔽性病害检测

① 测点位置



② 参数设置



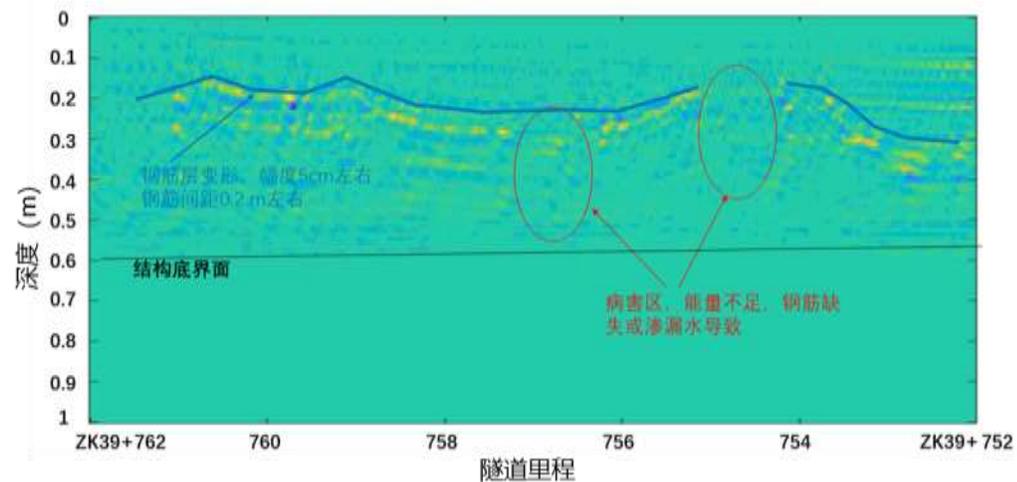
③ 测臂展开



④ 检测过程



- ZK39+757和755处可见反射能量明显衰减，推断该位置水分含量相对较高，经检测为局部的渗漏水。
- ZK39+754~755可见钢筋剧烈变形，钢筋骨架以ZK39+754.5为中心向隧道内侧突出，符合结构受力破坏特征。经检测此处发生局部破裂。

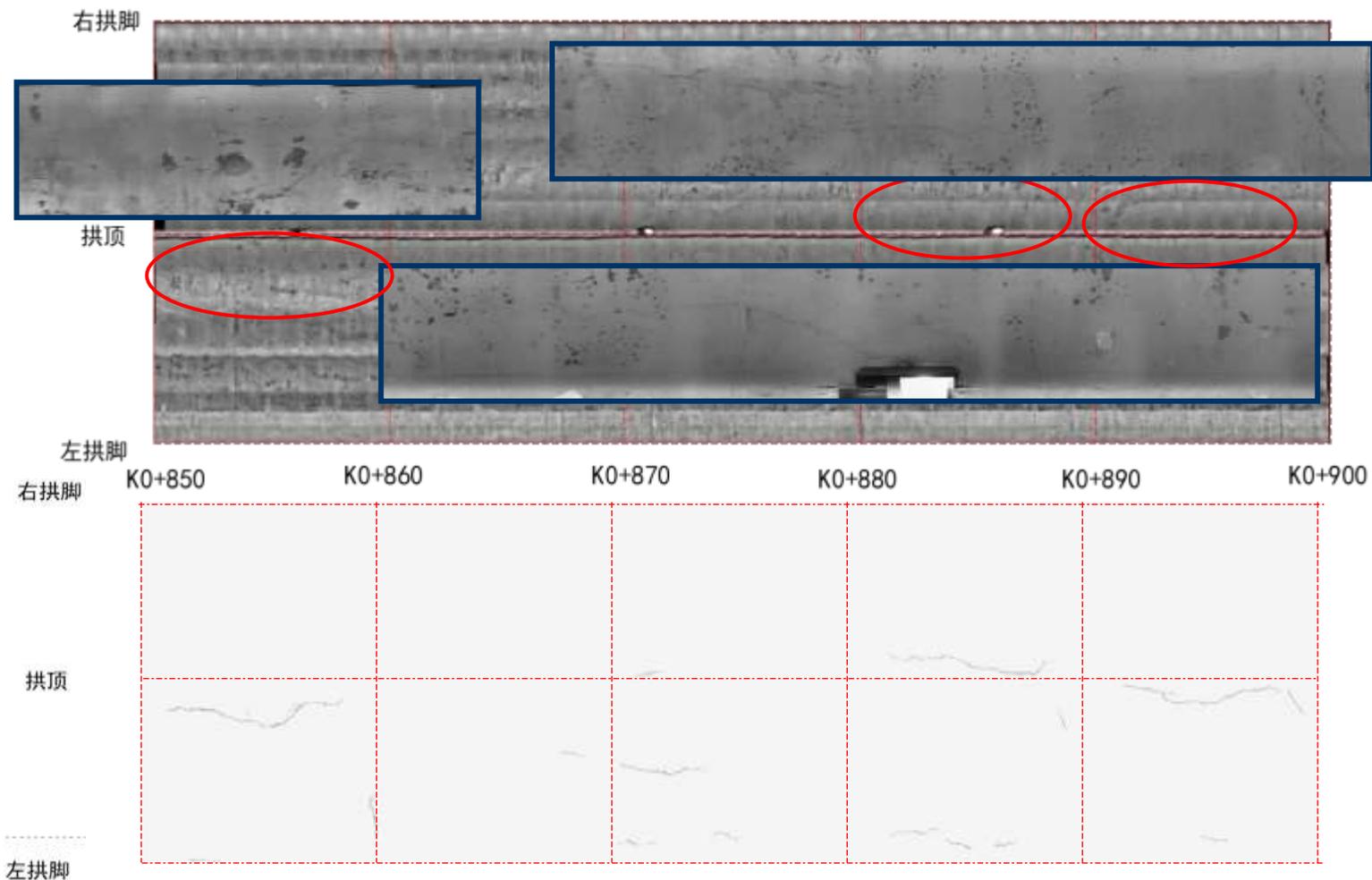


## 遂昌县G528飞石岭隧道（1435米）表观病害检测

采集参数计算表

|     |     |       |      |     |       |
|-----|-----|-------|------|-----|-------|
| 相机1 | 倍率值 | 49.64 | 相机8  | 倍率值 | 38.8  |
|     | 焦距值 | 35.84 |      | 焦距值 | 34.87 |
|     | 光圈值 | 40    |      | 光圈值 | 25    |
| 相机2 | 倍率值 | 49.86 | 相机9  | 倍率值 | 35.1  |
|     | 焦距值 | 50    |      | 焦距值 | 35.19 |
|     | 光圈值 | 35    |      | 光圈值 | 35    |
| 相机3 | 倍率值 | 49.17 | 相机10 | 倍率值 | 29.64 |
|     | 焦距值 | 60    |      | 焦距值 | 35.58 |
|     | 光圈值 | 30    |      | 光圈值 | 50    |
| 相机4 | 倍率值 | 47.54 | 相机11 | 倍率值 | 21.63 |
|     | 焦距值 | 60    |      | 焦距值 | 36.27 |
|     | 光圈值 | 10    |      | 光圈值 | 45    |
| 相机5 | 倍率值 | 43.91 | 相机12 | 倍率值 | 10.48 |
|     | 焦距值 | 34.36 |      | 焦距值 | 0     |
|     | 光圈值 | 20    |      | 光圈值 | 35    |
| 相机6 | 倍率值 | 43.91 | 相机13 | 倍率值 | 0     |
|     | 焦距值 | 50    |      | 焦距值 | 43.54 |
|     | 光圈值 | 15    |      | 光圈值 | 40    |
| 相机7 | 倍率值 | 41.25 |      |     |       |
|     | 焦距值 | 60    |      |     |       |
|     | 光圈值 | 15    |      |     |       |

K108+639—K108+689里程内的650张隧道衬砌图像进行裂缝目标识别，识别出包含裂缝的区域58张。



# 五 工程应用典型案例-桥梁



浙江省交通运输科学研究院  
ZHEJIANG SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF TRANSPORT

## 机载视觉桥梁病害成像仪

嘉善  
西木桥



上海  
映霞桥



杭州  
江东大桥



以江东大桥为例，采集467520张照片，其中混凝土梁底病害图像3896张，涵盖裂缝、剥落、风化、露筋等各类病害，病害识别率90%以上。



### 应用效果:

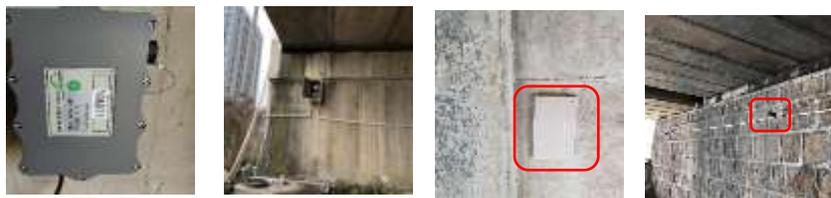
- 流程**标准化**
- 检测**成本低**
- 病害识别**准确率高**
- 系统**稳定性高**

## 智能无线激光位移监测仪

### 应用项目

以白水塘桥、茜泾塘桥为例，重载车辆过桥抓拍率达**100%**，挠度识别精度达**0.03mm**。

### 重载挠度监测（嘉善白水塘桥）

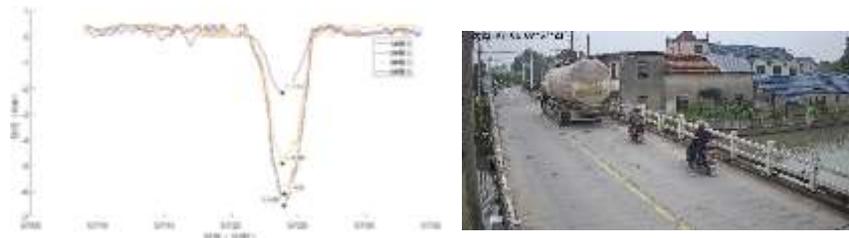
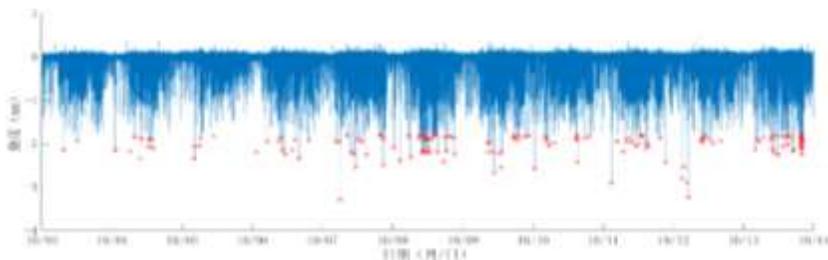


网关

配电箱

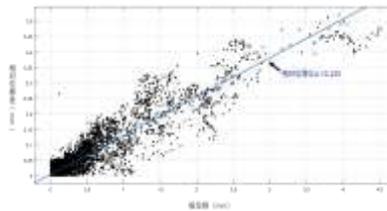
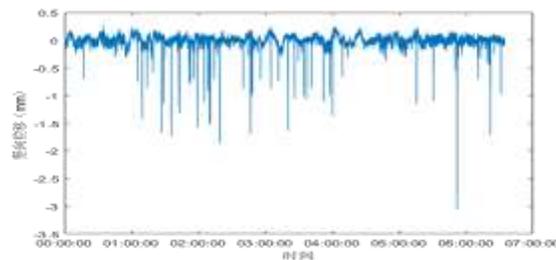
微棱镜反  
光板

激光位移  
监测设备



重载车辆过桥抓拍

### 铰缝损伤监测（茜泾塘桥）



### 应用效果:

- 对监测桥梁结构损伤进行常态化**智能监控**;
- 为**区域路网桥梁管养、路网规划、交通导流**等提供技术支持;
- 提高桥梁安全, 降低重载风险, 提升桥梁管养**经济性**。

| 序号 | 桥梁名称       |
|----|------------|
| 1  | 杨庙南龙大桥     |
| 2  | 南星桥        |
| 3  | 张家浜桥       |
| 4  | 殷家桥        |
| 5  | 天凝市河桥      |
| 6  | 新景港桥       |
| 7  | 红旗塘大桥 (老桥) |
| 8  | 红旗塘大桥 (新桥) |
| 9  | 塘港大桥       |
| 10 | 大石港桥       |
| 11 | 李家港桥       |
| 12 | 嘉善大桥       |
| 13 | 天凝市河桥      |
| 14 | 东栅塘桥       |
| 15 | 清凉大桥       |
| 16 | 俞家木桥       |
| 17 | 关杨庙桥       |
| 18 | 杨庙三店塘大桥    |
| 19 | 茜泾塘桥       |
| 20 | 惠民长桥       |
| 21 | 清凉塘大桥      |



**感谢聆听， 恳请指正！**

**公路典型病害“感-诊-治”全过程关键技术与装备**

**推广联系：浙江省交通运输科学研究院 詹伟 13656682806**

