

二、项目简介

项目简介（限1000字）

地铁已成为我国大型城市民众主要交通出行方式，地铁的安全运营离不开健康的隧道结构。由于隧道深处地下，地质条件复杂、维护环境苛刻，只有高效快速的识别出隧道中的病害信息，采取有效的应对措施，才能保证隧道健康以满足地铁的安全运营。项目组研究了基于三维激光点云的地铁隧道病害识别特征以及高效快速的识别技术，建立了隧道病害智能识别系统，并通过信息化的手段实现地铁隧道病害数据的结构化管理。该技术有效提升了地铁隧道病害识别效率和准确度，相比传统方式降低了病害识别成本，为地铁隧道的安全运营提供了及时预警，并为地铁隧道结构状态评价提供了基础数据。主要科技创新如下：

创新点一：发明了地铁隧道等设施结构形面变化状态智能识别方法，研发了基于三维激光灰度影像病害智能分析、识别系列软件。突破复杂环境下点云位置精度增强、结构形面精细表征和典型病害智能识别关键技术，形面变化检测精度高、病害识别率优越、内业效率多倍提升，攻克了限界检测、管片椭圆度和错台分析、衬砌脱落、渗水和裂缝等病害精准提取关键技术。被国际知名同行赞誉为国际学术前沿。

创新点二：研究了地铁隧道复杂环境下三维激光点云灰度影像处理方法，基于三维激光点云的地铁结构形面测量大数据管理软件系列，攻克了海量点云数据到灰度影像转化的关键技术，实现了三维激光点云高精度、高量级、高效率的向灰度影像转化。地铁安全运营需要及时获取隧道结构病害信息，以采取相应维护措施。因地铁运营监测获取的三维激光点云具有数据量巨大、成线性分布、点云噪声多且不易分离等特点，对病害检测成果的快速提取产生了巨大挑战。针对我国城市地铁结构安全监测数据处理的重大的需求，创新性研发了基于三维激光点云的地铁隧道病害智能识别系统并对其中的关键技术进行深入研究。

本项目在经济效益、应用技术与社会效益上找到了着力点，并展现了丰富价值，蕴含着巨大潜力。项目单位近三年在全国范围内新增收入1.4亿余元，实现了巨大的经济效益。在应用技术方面，为地铁安全运营提供了技术保障，有效提高地铁运营监测技术水平，促进轨道交通运输领域新技术应用。为社会凝练了一个产学研紧密结合、具有国际化竞争力的精密三维监测数据内业处理技术研究和产业化团队，形成了良好的产、学、研、用共赢发展模式。改善了地铁常规运营监测的数据获取不准、不快、不全等缺点，提升行业精密三维监测数据处理与病害识别技术的国内外竞争力。

三、科技创新

科技创新（限5000字）

1、立项背景

地铁已成为我国大型城市民众主要交通出行方式，地铁的安全运营离不开健康的隧道结构。地铁运营隧道病害的治理及时与否，是行车安全与隧道能否长期健康运营的先要条件。在国外，Yichang Tsai采用图像滤波法、最小路径自动检测对隧道裂缝进行病害识别，Priya等利用改进的CANNY算子、深度学习理论对渗漏水边缘进行提取。在国内，吴昌睿等利用三维激光扫描对渗漏水进行识别，王平让等利用几何形状因子可实现自动检测隧道裂缝。武汉大学、深圳大学、中科院等高校院所也使用三维激光扫描识别地铁病害。目前多数研究仅处理于实验室阶段，科研成果转化和工业化生产尚未产生明显经济效益。隧道形变所引起典型病害如：环片椭圆度变化、环片裂缝、渗漏水、环片错台、衬砌脱落等，虽然业内已经实现快速的外业隧道表观数据采集、针对单类隧道病害实现了较高的识别率，但检测方法较为单一，无法适应实际隧道结构安全需求；目前在隧道结构形面变化状态智能识别算法，海量数据智能识别方面显现出不足；基于三维激光点云的地铁运营监测数据具有数据量巨大、成线性分布、点云噪声多且不易分离等特点，对病害检测成果的快速提取产生了巨大挑战。

针对目前存在的问题，并根据生产实际中的应用需求，项目组研究了基于三维激光点云的地铁隧道病害识别特征以及高效快速的识别技术，攻克了限界检测、管片椭圆度和错台分析、衬砌脱落、渗水和裂缝等病害精准提取、海量点云数据到灰度影像转化的关键技术，实现了三维激光点云高精度、高量级、高效率的向灰度影像转化。该技术有效提升了地铁隧道病害识别效率和准确度，相比传统方式降低了病害识别成本，为地铁隧道的安全运营提供了及时预警，同时也为地铁隧道结构状态评价提供了基础数据。

2、科技含量

(1) 总体思路

在地铁隧道结构安全监测中，能够及时的发现隧道中的病害是本项目的研究重点，着力于及时、快速、高效的通过隧道病害智能识别系统诊断出隧道中现存问题，以采取相应的应对方案。

本项目对隧道中关键病害进行了智能分析识别，在理论研究的基础上进行理论创新，研发了地铁结构形面测量大数据管理及智能分析、智能化地铁结构病害检测系列软件，解决了地铁隧道结构病害识别中“难识别”，“识别慢”，“效率低”等突出问题，同时缩减了地铁病害巡检开支，提升地铁行车安全指数。

(2) 技术方案与创新成果

本项目在深入研究了地铁隧道病害识别基础理论、全域场景和局部微观特征的结构形面变化检测与状态判方法、海量测量数据结构形面精确提取等理论的基础上，运用激光雷达外业采集的高精度、高密度的真实隧道场景三维点云数据，构建隧道结构形面三维模型，并在此基础上采用数据融合、图像处理、多维特征描述、用基于几何基元的多尺度分割和深度学习等多项技术研发隧道病害智能识别模型；通过对隧道病

害智能识别模型进行代码开发最终研发出智能分析系列软件，为隧道病害的养护提供基础数据。

研究内容一：运用三维点云数据构建隧道结构形面模型

使用激光雷达进行复杂的地铁隧道场景高精度、高密度隧道全断面三维点云数据的外业采集，并对采集到的数据进行去噪、结果拼接等预处理；在此基础上将点云数据构建不规则三角网，并通过参数调优、最终实现隧道结构形面三维模型构建。

研究内容二：研发隧道病害智能识别模型

研究采用数据融合技术，实现外业采集的位置、姿态数据和地铁隧道目标空间几何信息数据融合处理；研究图像处理技术，实现地铁隧道多种噪声的有效抑制和隧道表面病害细节信息的显著增强；研究多维特征描述和用基于几何基元的多尺度分割，实现对地铁隧道椭圆度变大、裂缝、错台、渗漏水、侵界、限界等典型病害进行特征分析、选取几何形态关键特征值。研究深度学习技术，实现多种学习模型下病害准确识别，通过调参测评，最终实现地铁隧道病害的智能识别提取。

研究内容三：将算法模型代码实现

研发智能分析系列软件，实现包括了地铁隧道结构形面毫米级形变参数精确计算和最终模型构建，地铁隧道椭圆度变大、裂缝、错台、渗漏水、侵界、限界等典型病害的提取等功能。系统可用于地铁隧道多期次监测数据管理和分析对比，为运营公司隧道病害的养护工作提供基础数据。

经过科学实践、项目应用、社会推广，在经济、技术、社会效益上贡献突出。期间共发表优秀论文5篇，其中SCI检索4篇；发明专利5项；软件著作权5项；国际奖项1个；出版专著1本，其他相关应用成果证明文件（2专家意见+4应用证明+3合同）9项，详见附件。

（3）实施效果

技术实施效果

通过本项目的实施，发明了地铁隧道等设施结构形面变化状态智能识别方法，突破复杂环境下点云位置精度增强、结构形面精细表征和典型病害智能识别关键技术，形面变化检测精度达毫米级、病害识别率达95%、病害识别效率提高5-10倍。

在识别精度方面。发明了基于视觉精度增强的IMU、影像和点云耦合高精度定位定姿与联合解算方法，解决了受限或封闭环境下位置精确动态测量难题，将系统测量精度从分米级提高到毫米级。

在识别复杂度方面。针对地铁隧道结构形面尺度差异大、病害形状复杂以及局部结构数据缺失或相互遮蔽等问题，提出了面向结构形面识别的“关键点·重要线·语义面·对象体”多尺度病害特征智能精准提取方法，结构形面三维病害提取正确率提升15%，突破了地铁隧道形面尺度自适应和三维空间病害智能精准提取两大难题，实现结构病害的高效识别。目前该技术已经完全3实验室阶段推广到实际项目生产，并在武汉、苏州、长春、哈尔滨、青岛等10余个城市，通过专题项目和轨道交通运营监测项目累计完成基于三维激光点云的监测数据处理和病害的智能识别建设期线路1000多公里和运营期线路2000多公里；

经济、社会效益

本项目的推广与应用，在经济效益、应用技术与社会效益上找到了着力点。项目单位近三年在全国范围内新增直接产值1.4亿余元，实现了巨大的经济效益。

同时在应用技术方面，为地铁隧道结构安全提供了技术保障，有效提高我国地铁运营技术水准，促进轨道交通工程跨领域渗透应用。以高校基础理论研究为支点，以企业项目为落脚点，实现了产业结构优化升级和实现行业技术跨越的促进作用。为社会凝练了一个产学研紧密结合、形成了良好的产、学、研、用共赢发展模式。

3、创新点：

创新点一：发明了地铁隧道等设施结构形面变化状态智能识别方法，突破复杂环境下点云位置精度增强、结构形面精细表征和典型病害智能识别关键技术。

(1) 提出了智能化地铁结构病害检测方法。实现限界检测、管片椭圆度和错台分析，以及衬砌脱落、渗水和裂缝等病害自动识别。

(在申请专利2项：一种马蹄形截面隧道表面图像获取与病害检测方法；一种矩形截面隧道表面图像获取与病害检测方法；授权发明专利1项：一种融合多尺度特征的激光扫描数据物理平面自动化提取方法，)

发明了基于三维激光扫描技术的地铁隧道智能病害识别系统，攻克了限界检测、管片椭圆度和错台分析精准检测技术，彻底改变了传统人工手电筒笔记本巡检的落后检测方式；发展了基于病害知识库，不断积累地铁隧道病害智能识别大数据，实现衬砌脱落、渗水和裂缝等病害精准提取，病害识别率达95%、内业效率提高5-10倍。

(2) 提出了基于结构特征和三维精细模型的结构形面智能分割和自动三维提取方法，实现结构形面三维精细表征。(论文2篇：《Absolute Positioning and Orientation of MLSS in a Subway Tunnel Based on Sparse Point-Assisted DR》、《复杂环境下基于移动测量技术的城市数字地表数据的获取》；专利：一种动态环境下轨道检测平台的三维定位定姿方法及系统)。针对结构形面尺度差异大、形状复杂以及局部结构数据缺失或相互遮蔽等问题，提出了面向结构形面识别的“关键点·重要线·语义面·对象体”多尺度结构特征智能精准提取方法，建立了基于几何基元(线状/面状/圆柱状/球状)的多尺度超级体素三维分割模型，发展了基于先验知识的结构形面与点簇空间形态的关联映射方法，结构形面三维提取正确率提升15%，突破了结构形面尺度自适应和三维空间结构智能精准提取两大难题，实现结构形面三维精细表征，被 IEEE Fellow Juha 教授赞誉为“国际学术研究的前沿”，具有普适性强、速度快、抗噪好等优点。

(3) 发明了基于三维精细表征的地铁隧道典型病害智能识别方法，实现了结构形面毫米级形变参数精确计算。(专利1项：一种适用于多视角自动化配准多站地面激光点云数据的方法；优秀论文1篇：《A rigorous fastener inspection approach》)在无GNSS信号的地下复杂空间环境下，激光雷达测量数据可靠性和精度难以保证；获取的点云数据具有非结构化、密度不均、存在遮挡和重叠等特点，给地铁结构形面三维精细表征与病害智能识别带来巨大挑战。

创新点二：研制了地铁结构形面测量大数据管理及智能分析系列软件，攻克了地

铁限界检测、管片椭圆度和错台分析，以及衬砌脱落、渗水和裂缝等病害精准提取等关键技术，应用到武汉、苏州、长春、哈尔滨、青岛等10余个城市，累计完成基于三维激光点云的监测数据处理：建设期1000多公里和运营期2000多公里。解决了地铁结构形面“测全、测准、测快”的难题。（软件著作权5项：1、基于三维激光的城市轨道交通运营监测数据管理平台 2、城市轨道交通监测数据三维管理平台 3、基于LBS的地铁隧道移动巡检和数据管理系统 4、软著：基于三维表征结构的地铁隧道典型病害智能识别系统 5、基于三维激光点云数据的地铁隧道结构形变精准检测系统；应用证明4项；出版书籍1本：《移动三维激光测量技术及其在轨道交通隧道结构监测上的应用》）。针对我国城市地铁隧道病害识别的特点，以及病害智能、快速识别的巨大需求，本项目创新的研发了基于三维激光点云的地铁隧道病害智能识别系统，并对智能识别过程中的隧道限界、环片错台、环片椭圆度、衬砌脱落、渗漏水、裂缝等关键技术进行了深入研究。最终实现了高效管理，低成本识别，快速识别病害的目的，创造了巨大的经济、技术、社会效益。

4、保密方面：暂不需要保密

5、国际比较：

国内外虽然已经实现快速的外业隧道表观数据采集、针对单类隧道病害实现了较高的识别率，但检测方法较为单一，无法适应实际隧道结构安全需求，并且目前在隧道结构形面变化状态智能识别算法、海量数据智能识别方面显现出不足。本项目针对全域场景和局部微观特征的结构形面变化检测与状态判别难题，以结构形面三维模型为基础，经大量实践数据检验证明：形面变化检测精度达毫米级、病害识别率达95%，结构形面三维病害提取正确率提升15%；与传统传统的隧道病害识别方式相比，隧道病害智能识别技术效率提高5到10倍，突破了地铁隧道形面尺度自适应和三维空间病害智能精准提取两大难题，实现结构病害的高效识别。

团队成果《A Sensor Fusion Drivable Region and Lane Detection System for Autonomous Vehicle Navigation in Challenging Road Scenarios》被国际知名同行IEEE Fellow Juha引用，并给予积极评价和认可。团队发表论文《Automatic pavement defect detection using 3D laser profiling technology》获得年度唯一的美国摄影测量与遥感协会塔尔伯特·艾布拉姆斯奖和ESRI地理信息最佳论文奖。

本项目对地铁隧道中的运营限界、管片椭圆度、环片错台、衬砌脱落、渗漏水、裂缝等病害的智能识别关键技术进行了深入研究，并且积累了大量的业务数据。但各项数据之间的耦合关系以及隧道结构状态的整体评价尚未做过定量化研究，需要更高效的运用大数据分析、机器学习等手段深入研究各项交叉数据耦合关系以及形态分布，加强各项业务病害数据的综合分析能力。

四、推广应用情况

1、推广、应用情况及社会评价（限 2000字）

一、推广目的

轨道交通的不断发展，从一定程度上代表了我国基础建设的水平与国家实力。地铁也成为人们的主要公共出行方式。为了保障地铁的高效安全运营，地铁隧道结构中出现的病害问题需要及时发现并予以解决。基于三维激光点云的地铁隧道病害智能识别关键技术研究 and 系统开发，能够快速识别隧道病害，相比传统识别方式工作效率提升5-

10倍，解决了传统病害识别速度慢、效率低、信息化程度不足的问题，为地铁百年运营打下坚实基础。

二、应用领域

通过对基于三维激光点云的地铁隧道病害智能识别关键技术研究 and 系统开发，在轨道交通行业隧道结构安全以及病害识别业务内得到了业界的认可。

对地铁隧道椭圆度、裂缝、错台、渗漏水、侵界、限界等17类病害进行特征分析、选取关键特征值，选取多种学习模型进行调参测评，最终实现地铁隧道病害的智能提取并对隧道进行安全健康评估。

同时地铁隧道椭圆度、裂缝、错台、渗漏水、侵界、限界、轨道扣件变形、轨道结构变形（轨道超高、轨距、轨道坡度、轨向）、道床机构变形（道床裂缝、道床掉块、道床错位）、空洞、接触网、第三轨共17类病害进行特征分析、选取关键特征值，形成隧道病害训练集。由于病害类型较多，我们构建的特征集合需要非常丰富，能够满足每一类病害的提取。

三、关键创新

在识别精度方面。提出了基于滑动最小二乘配置的移动测量系统POS高程精度改善方法，解决了POS输出的WGS84椭球高转换至当地正常高后不能满足实际工程精度要求的难题，将移动三维激光测量系统的高程测量精度提高到毫米级；发明了基于视觉精度增强的IMU、影像和点云耦合高精度定位定姿与联合解算方法，解决了受限或封闭环境下位置精确动态测量难题，将系统测量精度从分米级提高到毫米级。

在识别复杂度方面。针对地铁隧道结构形面尺度差异大、病害形状复杂以及局部结构数据缺失或相互遮蔽等问题，提出了面向结构形面识别的“关键点-重要线-语义面-对象体”多尺度病害特征智能精准提取方法，建立了基于几何基元（线状/面状/圆柱状/球状）的多尺度超级体素三维分割模型，发展了基于先验知识的结构形面与点簇空间形态的关联映射方法，结构形面三维病害提取正确率提升 15%，突破了地铁隧道形面尺度自适应和三维空间病害智能精准提取两大难题，实现结构病害的高效识别。针对全域场景和局部微观特征的地铁隧道结构形面变化检测与隧道病害状态判别难题，以地铁隧道结构形面三维模型为基础，发明了基于精细三维几何模型驱动的结构形面精细变化检测方法和基于病害知识库的病害特征自动化识别方法，实现了隧道横断面形变、轨道不平顺度测量、轨道间隙检测等跨尺度地铁结构形面状态参数的毫米级精确测量，为地铁结构形面服役安全状态“测准”提供核心支撑。

发明了地铁隧道等设施结构形面变化状态智能识别方法，突破复杂环境下点云位置精度增强、结构形面精细表征和典型病害智能识别关键技术，形面变化检测精度达毫米级、病害识别率达95%、病害识别效率提高5-10倍。

四、应用效益

本项目的推广与与应用，在经济效益、应用技术与社会效益上找到了着力点。项目单位近三年在全国范围内新增直接营业收入1.4亿余元，实现了巨大的经济效益。

同时在应用技术方面，为地铁安全运营提供了技术和装备保障，有效提高我国精密工程测量技术水平，促进交通运输工程跨领域渗透应用。

为社会凝练了一个产学研紧密结合、具有国际化竞争力的精密三维测量技术研究和产业化团队，形成了良好的产、学、研、用共赢发展模式。改善了地铁安全测量长期依赖国外产品的局面，提升我国高端精密三维测量装备国际竞争力。