

二、项目简介

项目简介（限1000字）

一、立项背景

盾构隧道是地铁的主要结构型式，其衬砌在动载、周边施工等因素影响下，不可避免地发生变形、裂缝、渗漏水等病害，严重时危及营运安全。上海700+km的地铁中，隧道单线长度大于800km、70万环。传统全站仪测量、1点/每5环作业方式，效率、覆盖率不能满足需求。

本课题基于迫切需求及扫描技术的研究成果，先后开展架站移动、车载移动扫描、服务平台研究，完成了适用于轨道交通盾构隧道结构病害检测的成套技术研发；是上海张江国家自主创新示范区创新2015年重点资助项目，于2017年6月完成研究，2018年与2019年大量验证、推广，取得了良好的经济效应。

二、主要技术内容

本项目以提高检测精度和效率、共享数据解算和管理服务为目标，取得了数据采集、数据处理、数据挖掘、云平台SAAS服务模式等方面创新成果，具体包括：

- 1、国内首次完成高稳定性隧道移动激光扫描综合检测装备集成，实现了自动化采集、检测全覆盖，作业效率提升10倍以上。
- 2、研发了结合隧道结构特性的自适应解算方法，兼容多类型扫描仪器数据格式、统一了数据处理接口，研究了6种类型隧道的自适应算法。
- 3、基于平台海量数据，开展了病害检测提取等深度挖掘研究，同步生成断面变形、隧道内壁影像等高质量成果。
- 4、平台采用高效率的并行计算架构，基于公用云部署，实现了海量数据SAAS模式的解算和存储、管理。

三、技术经济指标

获发明专利6项、实用新型4项、软著3项。

1、技术指标

- (1) 形成了1套自主研发的检测装备、1套数据处理算法和处理软件，实现数据采集、处理加工的全流程标准化，打破国外技术垄断；
- (2) 基于云平台，实现了数据处理和成果托管的SAAS服务模式，为行业客户提供一站式“IT设备、处理软件、专业技术人员、成果分发”的服务；
- (3) 把隧道检测从传统的“抽样式”检测提升到“高精度+高效率+全覆盖”，提升了行业水平。

2、经济指标

- (1) 自主研发的隧道三维激光扫描检测装备打破国外垄断，相比昂贵的进口检测设备，节约大量成本，经济效益明显。
- (2) 与传统检测方法相比，效率提高10倍以上，显著提高了工效，降低作业成本，企业经济效益显著。

四、应用推广

已应用于上海、南京、佛山等近10个城市的长期收敛、竣工验收、保护区结构调查，

累计超1000km，效益达7000余万。

制定的相关技术标准与导则，提升行业技术水平与服务能级，社会效益明显。

地理信息科技进步奖

三、科技创新

科技创新（限5000字）

本项目聚焦隧道移动激光扫描技术，通过自主研发移动检测装备、开发数据解算关键算法、编制核心数据处理软件，并基于软件即服务（SAAS）的理念，将隧道扫描的数据处理和成果托管等软件服务部署于云平台。形成了1套自主研发的检测车辆装备、1套数据处理算法和处理软件、1套云托管信息平台。通过服务平台，降低了专业软件的采购门槛、工作站和存储设备投入和升级维护难度，为用户提供了“零门槛、无限升级、按量付费”的一体化信息服务，实现了核心技术、产品模式、管理和服务模式等方面的集成创新，推动地铁隧道维护技术水平进一步提升。

项目主要创新成果包括：

1、集成研制了国内首套高稳定性隧道移动激光扫描综合检测装备：

(1) 自主设计研制了一款隧道移动扫描检测车：检测车由移动载体、激光扫描仪、精密里程定位传感器、角度传感器等组成，该设备采用电力匀速驱动，匀速控制误差小于 $\pm 0.01\text{m/s}$ ，具有良好的车辆减震和环境安全性设计，结合数据处理算法实现了高精度里程定位与扫描仪姿态精确定位。该检测装备适用于单圆、双圆、矿山法等多种隧道结构形式；

(2) 开发了最终质量控制现场化的数据采集软件：结合轨道交通结构特点，实现了无线同步控制，记录并现场显示设备工作状态，实时传输并解算扫描数据成果，实现质量现场控制，提高病害风险的感知时效。

2、自主研发了一套隧道移动扫描数据病害综合检测软件：

(1) 开发了一套数据流程多内核算法的数据处理软件，综合兼容不同厂商、不同型号扫描仪器，建立统一检测数据文件格式，统一技术服务流程，统一作业标准，内核解算算法微服务化架构集成，提高了用户体验，降低了推广难度。

(2) 实现了多种衬砌形式隧道的数据解算算法，可解算水平直径收敛、全断面综合变形、三维轴线、高分辨率正射影像等多种隧道检测成果。

(3) 数据解算模型稳定性高、解算精度高、效率高：在前期大量轨道交通隧道病害检测的实际工程试应用的检测，多次优化迭代升级数据解算模型，其稳定性、解算精度都达到或超越现有检测手段：收敛测量的内符合精度可达到 $\pm 0.6\text{mm}$ ，与全站仪外符合测量精度可达到 $\pm 2.2\text{mm}$ ，影像分辨率最高 3mm ，作业效率提升10倍以上；

(4) 专业性的病害提取和统计分析工具：依托既有行业技术标准规范，开发病害的参数解算、标准化符号、病害判读工具、录入交互界面等，开发基于多期扫描数据的病害动态分析算法，实现了病害成果的多指标、动态组合查询；

3、首次建立了“轨道交通隧道结构扫描检测专业技术服务平台”，实现了Tb级海量扫描数据的在线解算、存储与管理服务：

(1) 存储的高可用性和备份安全：基于公用云存储平台，将海量的扫描数据和中间成果分散至不同的云端，突破单一存储的网络传输和存储能力的瓶颈，提高了系统的可靠性，保证了数据安全；

(2) 高扩展性的动态负载均衡的并行计算架构：移动扫描的数据按文件大小可自主设

定，通过IO高效协同和CPU并行处理，可实现扫描数据的快速解算，满足大用户基数的并发数据处理需求；

(3) 实现了Tb级激光扫描检测成果的Web服务与浏览器端可视化：按矢量数据与影像信息分开存储，制定病害矢量数据存储表结构及约束规则，实现了大规模影像的WMS标准服务；

(4) 统一的用户授权验证服务：服务平台用户授权及数据安全性验证管理模块提供了系统的登陆界面、授权管理、数据隔离和安全备份等管理功能；

4、基于平台海量扫描数据，开展病害检测大数据分析和工程应用：

(1) 根据病害检测成果数据和病害发展状态，分析隧道管片的承载性能，实现了隧道管片构件安全状态的评价，为隧道维护方案的决策提供了有效依据。

(2) 基于时间维度的多次历史数据分析，研究总结隧道变形和病害发展规律，识别关键影响因素，预测隧道服役性能劣化趋势和风险。

本项目技术创新成果获国家授权及受理专利13项，其中4项实用新型专利、6项发明专利；获计算机软件著作权3项：隧道移动三维激光扫描采集程序软件（2016SR252596）、隧道移动三维激光扫描数据解算程序软件（2017SR086648）、隧道激光扫描检测成果管理信息系统（2017SR581078）；获上海市优秀发明选拔赛优秀发明银奖、上海市优秀工程勘察设计二等奖、“城市轨道交通技术创新推广项目”、“上海市测绘地理信息科技进步奖”等奖项。

与国内外同类技术的对比情况如下：

1、国内外技术发展现状

应用三维激光扫描技术可以对隧道结构表面进行能快速获取点云及灰度影像，利用点云的几何信息（三维坐标）和影像信息结合隧道结构特点进行分析，评估结构几何变形状况。该技术应用于隧道结构的无损检测需要解决数据采集、处理算法和精度评定等关键的问题。

(1) 采集技术研究方面：近年来，国内外学者就静态三维激光扫描应用于隧道结构安全评估方面，进行了大量研究。国外，Lindenbergh 等（2005）研究了多种扫描位置和分辨率的不同组合，提出了地下隧道静态激光扫描的数据采集和处理方案；国内，托雷等（2013）提出了一种可应用于变形监测的基于三维激光点云的隧道断面连续截取方法，该方法分为点云拼接、中轴线提取和断面截取；谢雄耀等（2014）研究了基于地面三维激光扫描技术测量隧道全断面变形，通过几何分析方法对关键的扫描参数进行优化，提出基于点云的隧道三维建模与变形可视化；

上述研究主要基于静态激光扫描数据，受限于隧道狭长形结构和靶球拼接效率瓶颈，仍存在作业效率低、测量精度随距离衰减、影像分辨率不均匀等问题，且缺乏与大量成熟变形测量数据进行精度对比验证，以及扫描测量投入工程实践的案例。

(2) 采集设备集成方面：国外已有部分采用移动激光扫描的设备，如瑞士Amberg公司的GRP5000系统、德国Technet Rail公司的siRail产品、日本Pacific建设的一体化移动测量车等不同产品。GRP5000系统能够以3-

5km/h的速度获取的隧道断面图、激光雷达正射影像等成果，该系统已由申通地铁等

单位引进试用，但实际作业过程中由于软硬件的技术参数无法满足国内地铁检测和维护保障的标准，导致设备利用率较低、成果无法投入实用。siRail系统能够以15-30km/h的速度获取轨道、触网及断面的几何参数，虽然测试速度较快，但尚无法获取高精度的隧道结构检测成果。上海工程技术大学开发了基于移动激光扫描技术的铁路隧道建筑空间数据采集与处理系统，主要用于限界检测、维护保障管理数据库、数字空间地图以及规划发展等，采集设备尚无明确的技术指标，且无法获取隧道结构高精度的变形数据。

(3) 处理算法和精度评定方面：相关研究主要是采用不同的拟合模型和粗差剔除算法来提高断面直径提取的精度，如基于稳健估计的直接最小二乘椭圆拟合（许正文等，2008）、圆柱面拟合与椭圆拟合法（谢雄耀等，2013）等。但是上述算法和精度评定主要应用于静态激光扫描，目前尚无针对移动扫描的研究成果。

(4) 综合处理效率方面：受制于激光扫描数据量大（100万点/秒）、解算模型不成熟、以及普通计算机能力瓶颈，数据处理的周期往往非常长，成果的时效性不够。如GRP5000系统处理1km数据需要3天左右。对于地铁维护保障单位的实际需求而言，不仅需要提高检测数据的采集效率，更希望能够在扫描作业的同步完成数据的处理和现场报警，以便能够真正指导日常的运营维护保障。

(5) 检测装备的产品化方面：国外大型检测装备需要配备专用的大型车辆和大量的专业技术人员，无法适应我国隧道分段作业的灵活调度，且成套检测设备的采购成本、人员成本和操作要求非常高，限制了检测装备的大规模投入生产应用。

综上所述，尽管世界发达国家已有部分先进的移动隧道激光扫描检测设备，但受制于核心技术封锁、设备价格高昂、检测算法适用性差、数据处理周期长等原因，导致成套检测设备无法投入我国地铁的日常维护保障应用中。国内相关单位开展的静态三维激光扫描技术，无法同时满足地铁管理单位提出的“高效、高精度”的检测要求。从静态三维激光扫描至移动三维激光扫描，在采集设备及数据处理方法存在明显的差异，需要深化研究。

2、与国内外同类产品或技术的竞争力分析，成果产业化前景分析

由于国外发达国家建设地铁时间较早，通过一定时期的发展，地铁隧道检测与评估技术相对领先。但同时存在设备价格高昂、检测算法适用性差、数据处理周期长等问题。本项目立足上海巨大的市场需求和人才资源，通过引进、集成、吸收及二次创新，自主研发了自动化、智能化的检测技术与装备，极大地提高了检测效率；开发了轨道交通结构激光检测技术服务平台，实现数据处理的全流程云端处理和成果托管，借助多台服务器的弹性计算提高了系统并发处理能力，降低了系统构建的门槛和费用成本；提出了科学合理的评价方法对其结构安全进行评价，从而准确把握地铁隧道的结构安全状况。项目成果获国家授权和受理专利22项，软件著作权3项。项目整体技术达到国内领先水平。

四、推广应用情况

1、推广、应用情况及社会评价（限 2000字）

自本项目成功立项以来，在隧道长期收敛与隧道竣工验收、地铁保护区监护项目中得到实际应用，效益达7000余万。目前已完成的和已签订的直接生产典型项目包括《南京地铁全线网盾构隧道收敛监测项目》、《上海地铁2017年度长期收敛监测项目》、《上海地铁2018年度长期收敛监测项目》、《上海地铁2019年度长期收敛监测项目》、《广佛线二期魁奇-新城东区间竣工验收测量项目》、《南京地铁盾构隧道收敛监测项目》等6项。激光扫描技术已为各类地铁监护监测项目提供隧道结构调查服务，已累计完成近200km的扫描生产，服务于上海地铁前滩地块6、8、11号线监护、上海地铁14号线穿越杨浦大桥、上海地铁徐家汇中心项目11号线监测、上海地铁10号线三门路立交项目、杭州地铁萧政储出38号地块监测项目、南京地铁华新AB地块项目等10余项地铁监测项目。上勘院2016年以来新增各类地铁安全监测项目合同额近6000万元，借助隧道激光扫描技术等先进技术增值服务，进一步提高了企业的市场竞争力。