

# 移动激光扫描技术在地铁大圆隧道收敛监测中的应用

## Application of Mobile Laser Scanning Technology in Convergence Monitoring of Metro Large Circular Tunnel

周帆

Fan Zhou

上海勘察设计院(集团)有限公司 中国·上海 200438

SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200438, China

**摘要:** 随着城市地铁开通的线路不断增多,地铁的安全运营也越来越被关注。在地铁大圆隧道收敛监测中使用移动激光扫描技术,这种新型收敛监测方法是一种快速有效的隧道收敛监测方法。论文阐述了移动激光扫描小车外业采集和内业处理的作业流程,并以南京地铁某区间大圆隧道扫描实践举例,对扫描解算出的收敛监测成果进行分析,实践证明该方法精度满足要求,成果可靠,适用于地铁大圆隧道收敛监测,显著提高了作业效率,符合地铁精细化运维的发展需要。

**Abstract:** With the increasing number of urban subway lines, the safe operation of subway has attracted more and more attention. Mobile laser scanning technology is used in the convergence monitoring of metro large circular tunnel. This new convergence monitoring method is a fast and effective tunnel convergence monitoring method. This paper expounds the operation process of field acquisition and indoor processing of mobile laser scanning car, and analyzes the convergence monitoring results calculated by the scanning solution by taking the scanning practice of a large circular tunnel in Nanjing Metro as an example. The practice shows that the accuracy of this method meets the requirements and the results are reliable. It is suitable for the convergence monitoring of metro large circular tunnel and significantly improves the operation efficiency, it meets the development needs of subway fine operation and maintenance.

**关键词:** 移动激光扫描;大圆隧道;收敛监测;精度评定

**Keywords:** mobile laser scanning; large circle tunnel; convergence monitoring; accuracy evaluation

**DOI:** 10.12346/se.v3i4.6351

### 1 引言

伴随中国城市化进程的快速发展,城市的规模越来越大,大城市的数量剧增,为了响应国家建设高效、节能型城市,各大城市均开展建设了多条城市地铁,城市地铁是城市生命线,是市民出行首选的交通,提升了出行便捷度。进入 21 世纪后,城市地铁开通的线路不断增多,地铁的安全运营也越来越被关注。由于城市地质条件较为复杂,地铁隧道跨越地质单元多,沿线的土质结构变化大,许多城市的建设经验表明,地铁隧道在运营管理过程中,由于受到地面、周边建筑负载或周边施工、列车运行振动等综合影响,容易造成隧道变形。除了依据相关的政策、法规及技术标准、施工要求

对地铁安全保护区内的建筑工程实行监测外,还需要通过先进的收敛监测手段,对地铁隧道的直径进行全面检查<sup>[1-3]</sup>。

目前,地铁过江大圆隧道收敛监测数据的获取主要依靠人工测量和巡查,耗时耗力。由于地铁停运时间较短,晚上检测的窗口期仅有 2~3h,而且过江大圆隧道直径比一般盾构隧道要大,隧道结构情况更为复杂,因此传统的测量较难满足地铁实际运营检测的要求。至 2022 年,南京地铁拥有 11 条线,里程达到 427km,地铁过江大圆隧道后期将增加到 5 条。

论文阐述了移动三维激光扫描匀速小车在地铁过江大圆隧道收敛监测的应用,通过快速移动的扫描监测技术,快速

【作者简介】周帆(1991-),男,中国江苏溧阳人,工程师,从事隧道结构设施变形监测及分析研究。

获取大圆隧道全断面的结构信息，通过云数据实时处理，实现收敛监测实时分析。该方法突破了传统测量的基本流程，可以全角度、精准地获取测量目标的三维坐标及影像数据，具有测量效率高（100 万点 / 秒）、测量信息丰富（坐标 + 激光反射率）、测量精度高（mm 级）等优势，满足地铁大圆隧道收敛监测的行业需求。

## 2 移动激光扫描数据外业采集和内业处理

移动激光扫描是 21 世纪以来新开展的一种检测技术，是一种非接触式主动测量系统<sup>[4]</sup>。移动三维扫描技术的优势在于可以快速获取高分辨率空间点位坐标、纹理色彩以及回波反射强度的信息，通过一定数学模型的计算处理，可获得隧道收敛的数据、隧道的内壁影像等信息，比较适用于运营隧道内作业的时间短、光线条件较差、测量内容较多等特殊工况条件<sup>[2-3]</sup>。

### 2.1 移动激光扫描数据外业采集

为了开展地铁大圆隧道移动激光扫描的测量作业，专门制造了一辆在标准轨距上行驶的轻型电动车辆，由多名测量人员操作隧道移动测量采集系统，并由测量车携带仪器设备在轨道上匀速采集激光扫描数据和同步里程环号定位信息。在移动扫描测量过程中需尽量避免轨行区内行人、设备等因素造成的遮挡，并需在隧道内壁用粉笔标注扫描时间、区间、环号、里程等信息，以便测量内业数据处理时进行复核确认。

移动激光扫描测量现场数据采集操作图如图 1 所示。

移动激光扫描外业数据采集的基本流程如下：

#### ①作业准备。

整车放置在项目部仓库中，车载电池按要求完成充电，检查电机和必要的工具是否齐备。

#### ②车辆运输。

车体、可分解部件、仪器台及仪器设备分别从仓库中取

出，稳固地安置在运输车辆上。

#### ③车站搬运。

两人将车体从运输车辆上搬运到地铁车站站台上，其他可拆卸部件和附件可另行搬运。

#### ④车站组装。

将可拆卸部件在车站现场进行组装，要求 3 人协作能够在 5min 内完成组装。

#### ⑤现场测量。

先将车体安置在轨道上，再将仪器台和仪器设备安置在车体上。检查确认车辆各部件是否正常工作，设置速度档位和仪器参数，确保扫描断面与隧道中轴线垂直，开始进行轨道上的移动。轨道移动作业期间，车辆前方设置 1 人作为引导员以提前发现不利作业因素，1 人跟车操作以便监控车辆作业及紧急暂停车辆，另设 1 人作为作业组长处理其他事务。

#### ⑥应急处理。

在轨道上作业时遇到特殊情况时，车辆可利用推手进行人工推行，也可 2 人将车辆抬起进行短距离的搬动。若需要反向行驶，可以车辆抬起后重新反向安置在轨道上也可直接使用前驱工作模式。

#### ⑦分解运输。

完成轨道作业回到车站后，需要将车体、可拆卸部件和仪器设备等进行分解，检查各部件是否全部带出轨行区域。

#### ⑧完成作业。

完成销点后，将车体及附件从地铁车站搬运到运输车辆上，安全返回到仓库。将扫描期间的各类数据下载到工作电脑，电池重新充电，确认全部工作流程已完成。

#### ⑨重复作业。

重复步骤 1~8 开始新的作业。定期检查车辆的绝缘性、轮子润滑、电机工作状态、连接件是否稳固等，确保车辆能够连续无故障地运行。



图 1 移动激光扫描测量现场数据采集操作图

## 2.2 移动激光扫描数据内业处理

内业数据处理使用的是移动激光扫描平台，对三维激光扫描技术获取的海量大圆隧道点云数据进行云端处理，通过扫描平台新建扫描项目，选择扫描项目，上传扫描文件，新建工单，进行初始影像定位，再检查成果，最后下载成果。

大圆盾构隧道采用通用双面楔形环错缝拼装，管片宽度为2m，管片标准内径为10.2m，每环由8块管片构成，分为1个小封顶块、2个邻接块、5个标准块，隧道径向设置中隔墙，分隔上下行线，中隔墙厚度0.3m，一般仅在旁通道可通视。

由于上下行线无法通视，因此上下行线扫描分别独立进行。对于上行线断面，利用圆的拟合方程，对断面的圆弧段进行拟合，得到圆弧C的圆心O(x,y)与半径R。断面的隔墙段进行直线拟合，得到直线L的斜率k与截距b。过圆弧圆心，画一条水平直线，分别与圆弧C和直线L相交于点A、B。点A、B的距离D<sub>s</sub>为上行线的水平直径。同理，可求出下行线水平直径D<sub>x</sub>，水平直径解算示意图如图2所示。

则该断面水平直径为： $D=D_x+D_s+0.3m$ ，直径计算的取位精确至0.1mm。

## 2.3 重复测量精度评定

为保证多期移动激光扫描断面收敛测量的重复测量精度，在试验区段内进行3次独立重复扫描，统计逐环收敛测量的误差分布、所占样本总数的百分比等，参照下表1执行。试验区段内的重复测量精度满足±5mm，说明三维激光扫描精度满足要求。

表1 地铁某区间逐环扫描两次水平直径收敛测量差值统计表

范围	样本环数(环)	百分比
≤±1mm	807	77.45%
±1mm~±2mm	178	17.08%
±2mm~±3mm	57	5.47%
>±3mm	0	0.00%
总样本数	1042	100.00%

## 3 应用案例

### 3.1 项目概况

本项目位于南京地铁某线路某区间过江段大圆盾构隧道，穿越隧道埋深最深43m，单区间总长达到3600m，共计1800环大圆盾构环片，环片设计内径为10.2m。采用移动激光扫描技术对该区间进行收敛扫描监测，仅用2h便完成了该区间全部环片数据采集，数据成果利用云端处理，自动解算大圆盾构隧道环片收敛值，一键处理，成果可靠，精度满足要求。

### 3.2 应用成果分析

大圆隧道环片收敛直径的最大最小值反映了隧道目前的极限状态，经过逐环扫描测量，并对收敛直径成果进行统计分析，得到该区间的最大最小直径值及所在的里程和环号，该区间大圆隧道收敛直径86%的环片直径与大圆隧道设计值(标准大圆直径10.2m)较差在-20~60mm，区间直径与设计值较差曲线图如图3所示。

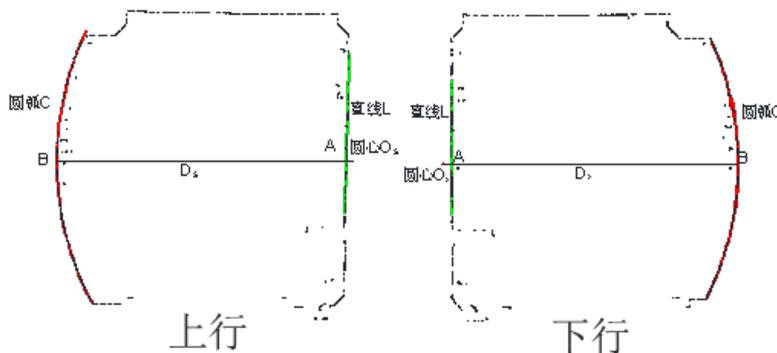


图2 大圆水平直径解算示意图

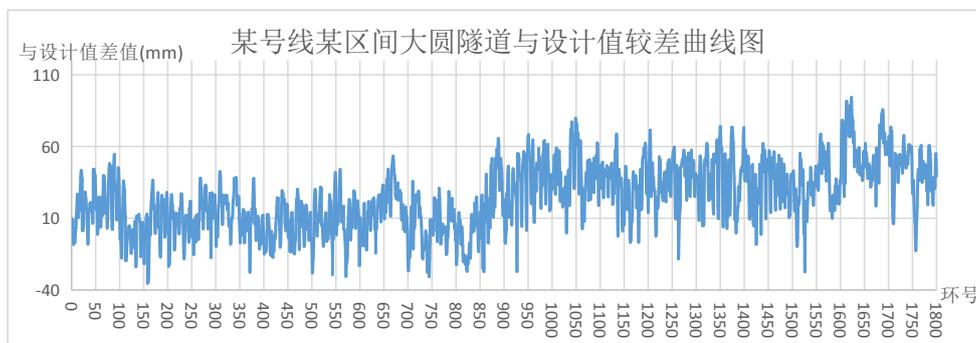


图3 区间直径与设计值较差曲线图

根据测绘产品质量检查验收规范要求,我们对所测总断面进行抽检自查。为确保移动三维激光扫描精度满足要求,采用全站仪结构监测技术进行水平直径数据采集,并以全站仪数据为基准,验证三维激光扫描技术获取的水平直径的可靠性。

全站仪在隧道内壁水平直径处(特征点 A、B),布设反射片,全站仪获取特征点 A、B 的三维坐标,盘左、盘右一个测回,计算水平直径长度。本次检核管片环数为 850 环,实际有效环数为 847 环。每环均采用全站仪与扫描仪进行水平直径采集。将扫描仪获取的水平直径减去全站仪获取的水平直径,对差值结果按数值大小、分区间统计结果见图 4。从图中可看出 76.7% 断面的差值小于  $\pm 3\text{mm}$ , 93.6% 断面的差值小于  $\pm 4\text{mm}$ , 100% 断面的差值小于  $\pm 5\text{mm}$ 。

从整体上看,一方面,扫描仪获取的水平直径比全站仪获取的水平直径大 1.5mm,说明扫描仪与全站仪这两种不同类型的测量仪器、不同原理的计算方法之间,存在的常数

差在可控范围。另一方面,全站仪实测的水平直径位置与扫描仪拟合的水平直径位置不是完全相同,也是造成数据离散性的主要原因之一。

#### 4 结语

利用移动激光扫描收敛测量技术快速高效地完成了大圆隧道收敛监测,测量成果精度优于预期的  $\pm 5\text{mm}$  的要求,测量成果可靠。移动激光扫描收敛测量方法具有作业效率高、成果可靠、产品丰富的特点,可以作为今后的主要收敛测量方法<sup>[5]</sup>。地铁线路附近的施工日益增多,引起隧道变形的因素较为复杂,定期采用移动激光扫描收敛技术对过江大圆盾构隧道直径进行收敛普查,掌握最新地铁隧道健康状况,在很短的时间内获取区间隧道的全覆盖测量和影像数据,提供全方位的隧道现状信息,为隧道应急抢险决策提供可靠的信息资料,同时为编制抢险方案提供详细的基础数据,为今后地铁运营保驾护航<sup>[6,7]</sup>。

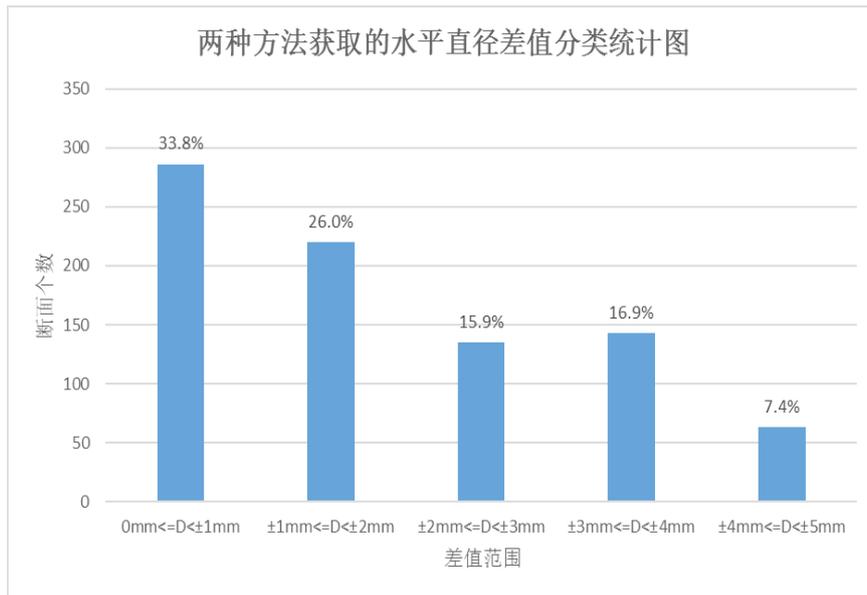


图 4 两种方法获取的水平直径差值分类统计图

#### 参考文献

- [1] 郭玲.移动扫描技术在地铁隧道监测中的应用[J].矿山测量,2020,48(1):76-79.
- [2] 樊廷立,唐超,王柄强.移动三维激光扫描技术在盾构隧道收敛监测中的应用[J].测绘通报,2020(9):50-53.
- [3] 丁孝兵,杨坤,陆庆虾.移动三维激光扫描技术在地铁隧道断面检测中的应用[J].城市勘测,2021(2):157-160.
- [4] 王令文,程效军,万程辉.基于三维激光扫描技术的隧道检测技术研究[J].工程勘察,2013(7):53-57.
- [5] 高洪,李凯,马全明,等.移动三维激光测量系统在地铁运营隧道病害监测中的应用研究[J].测绘通报,2019(8):96-101.
- [6] 褚平进.基于三维激光扫描数据的单圆盾构隧道内壁影像生成算法[J].浙江水利水电学院学报,2016,28(1):58-62.
- [7] 卢其栋,魏贤坤,魏鹏琳.三维激光扫描技术在隧道结构零状态普查中的应用[J].城市勘测,2021(6):107-110.