

# 三维激光扫描技术在铁路隧道限界检测中的应用

文 / 赵伟 中铁第四勘察设计院集团有限公司

**摘要:** 三维激光扫描技术因其高精度、快速获取三维点云数据的能力,已成为铁路隧道限界检测中的重要手段。本文探讨了该技术在铁路隧道限界检测中的应用,通过引入移动式三维激光扫描系统,结合工程项目案例,对隧道点云断面拟合与限界检测的精度进行了评估。结果表明,三维激光扫描技术能够有效获取隧道的几何信息,采用最小二乘法结合随机采样一致性算法拟合断面,检测精度优于常规手段,整体限界检测结果满足铁路安全运营要求。该研究为铁路隧道工程提供了可靠的检测方法与数据支持,并为相关领域的进一步研究提供了参考。

**关键词:** 三维激光扫描技术; 铁路隧道; 限界检测; 点云数据

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.03.051

## 引言

随着铁路交通的快速发展,隧道限界检测成为保障列车安全运营的关键环节。传统的断面测量检测方法由于效率低、成本高,已无法满足现代铁路隧道大规模检测的需求。三维激光扫描技术以其高精度、快速数据获取能力和全覆盖性,在铁路隧道限界检测中展现出显著的优势。

该技术通过发射激光束并接收其在隧道壁表面的反射信号,能够在非接触的情况下,快速生成隧道的三维点云模型。近年来,随着移动式三维激光扫描系统的应用推广,该技术逐渐从理论研究走向工程实践<sup>[1]</sup>。在武汉地铁工程,三维激光扫描技术已成功应用于隧道病害整治、限界检测,并通过高精度数据处理实现了对复杂隧道环境的三维建模。随着传感器技术的发展与数据处理算法的不断优化,三维激光扫描技术在铁路隧道工程中的应用前景愈加广阔,不仅能够满足现有工程需求,还为未来的自动化检测与智能分析奠定了坚实基础。

通过结合移动式三维激光扫描系统,本文以某铁路工程隧道为例,探讨了该技术在实际应用中的检测精度与可靠性。研究结果验证了三维激光扫描技术在铁路隧道限界检测中的可行性,同时也为未来在类似工程中的推广应用提供了重要依据。

## 一、测量方法与数据采集

### (一) 移动式三维激光扫描仪

移动式三维激光扫描仪是一种先进的三维地形测量设备,可用于高速、高精度的铁路隧道和轨道环境测量。该设备能够进行动态扫描,实现连续的数据采集和实时点云生成。该系统利用激光测距技术,发射激光脉冲并接收从隧道壁反射回来的信号,快速计算出隧道壁的位置和形状。这种方法不仅提高了数据采集的效率,还显著提升了测量结果的精度和可靠性。

由于其非接触性质,三维激光扫描仪能够基于轨道小车进行扫描工作,极大地降低了传统测量所需的人工和时间成本。移动式三维激光扫描仪通常配备高分辨率的传感器和复杂的数据处理软件,可以处理大量的点云数据。通过这些高精度的点云数据,能够对隧道的几何结构进行详细分析,包括隧道断面的准确测量、限界的

评估以及可能存在的结构缺陷的识别。数据采集到处理再到最终的分析和报告的所有步骤都可以实现高度自动化和集成化,为铁路隧道的维护和管理提供了强有力的技术支持。



图 1.1 轨道移动三维激光测量系统

### (二) 多源传感器融合

为了进一步提升三维激光扫描数据采集的精度,多源传感器融合技术逐渐成为一种重要的策略。通过集成不同类型的传感器,激光扫描仪、全站仪、GNSS/IMU等,可以获得更加丰富和多维度的数据。在隧道检测中,激光扫描仪能够提供高分辨率的几何数据,而GNSS/IMU系统则可以提供精确的位置信息<sup>[2]</sup>。将两者的数据进行融合后,既保证了几何测量的精度,又增强了位置定位的准确性。

数据融合过程中,通常采用卡尔曼滤波算法,对多源数据进行加权平均和误差校正,以获得最优的检测结果。通过多源传感器的融合,断面检测的精度可以得到有效提升,满足工程的高精度要求。多源传感器融合不仅可以提升检测的精度,还为智能化和自动化检测技术的发展提供了新的路径。

### (三) 作业流程

作业流程涵盖数据采集、数据预处理及点云数据的拟合过程,是实现高效精确隧道限界检测的核心步骤。

(1) 数据采集阶段,轨道小车激光扫描仪在轨道小车行驶过程中连续发射激光脉冲,通过接收反射回的激光信号,动态生成隧道的三维点云模型。这些点云数据包含了隧道内部的细节信息,如隧道壁的形状和结构特征。

(2) 数据预处理是数据采集后的关键步骤，主要包括噪声剔除、数据滤波和点云密度的均一化处理。通过这些预处理步骤，可以有效地提高数据的质量和后续分析的准确性。噪声剔除主要去除非隧道结构的误差点，例如由于设备震动或外部环境因素引起的异常数据点。

(3) 拟合过程则利用最小二乘法结合随机采样一致性算法，对预处理后的点云数据进行几何形状的精确拟合。这一步骤关键在于从大量散乱的点云中提取出有意义的几何信息，如隧道的确切断面。

这一整套流程的实施，确保了铁路隧道检测的高效性和精确性，大幅提升了检测作业的自动化和智能化水平。

## 二、测量原理

### (一) 三维激光扫描的工作原理

三维激光扫描技术基于激光测距的原理，利用高频率发射的激光束照射目标物体表面，并通过接收反射回来的光信号来计算激光发射点与物体表面的距离。该技术采用的扫描仪器能够在极短时间内采集大量的点位数据，形成密集的点云数据集。每个点位的坐标信息通过三维坐标系（X、Y、Z）进行记录，点云的三维结构能够全面、精确地反映隧道的几何形态和表面特征。

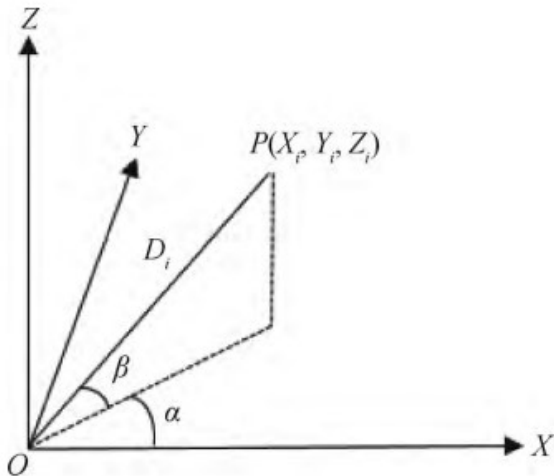


图 2.1 三维激光扫描坐标示意图

### (二) 点云数据处理与断面拟合

点云数据预处理首先通过滤波处理降噪，去除噪声点并保留了主要的几何特征，然后采用随机采样一致性算法（RANSAC），剔除极端异常的点云数据。

RANSAC 是一种鲁棒的统计技术，用于识别一组数据中的模型参数。该算法通过迭代选择数据集的随机子集来估计模型，并计算模型与整个数据集的一致性，选择最佳拟合模型。它要求保证在一定的置信概率下 [0.95, 0.99]，基本子集最小抽样数 N 与至少取得一个良性取样子集的概率 P (p>e) 满足如下关系：

$$P=1-(1-(1-e)^s)^N$$

其中，e 为局外点的比例，s 为计算模型参数需要的最小数据量。

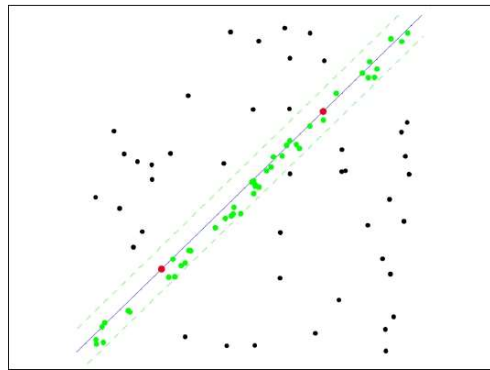


图 2.2 RANSAC 拟合最佳模型

在预处理完成后，最小二乘法（Least Square Method, LSM）用于实现隧道点云断面的精确拟合。在隧道限界检测中，该方法用于建立数学模型，对隧道的标准断面进行逼近和计算，确保测量的精度和可靠性。

对于椭圆断面的隧道结构，数学模型以椭圆的方程形式表达，椭圆参数通过对采集的点云数据进行最小二乘拟合得到<sup>[3]</sup>。点云中每个采样点的坐标被代入到方程中，误差方程通过累积计算各采样点与拟合结果之间的偏差而形成，最终求得的拟合结果即为断面的最优解。实际应用中，该方法能够处理大规模的点云数据，同时具有良好的抗噪性和稳定性。在隧道限界检测项目中，这种算法的应用确保了断面拟合的精度和一致性，能够精确识别隧道内任何可能影响列车安全运行的几何形变。通过对多个实际隧道检测项目的验证，采用该方法进行隧道断面拟合，其结果的精度稳定在毫米级别，为工程的安全评估提供了可靠的数据基础。

## 三、工程案例分析

### (一) 隧道扫描建模

本研究选取某铁路隧道限界检测项目中，采用移动式三维激光扫描系统进行了全面的数据采集工作。该项目涉及对隧道内部的全断面进行高精度扫描，旨在获得隧道几何形态的详细数据，为后续的限界评估提供基础。

激光扫描设备在轨道上沿隧道方向连续移动，以 10 毫米的间隔采集点云数据，覆盖整个隧道断面的所有关键区域。每次扫描后，系统自动生成密集的点云数据，点云密度达到每平方米 1000 点以上，从而确保了对隧道表面特征的精确捕捉。在数据采集过程中，考虑了隧道内的复杂环境因素，如光线不足、湿度高等，通过调整扫描仪器的参数，如激光强度和扫描角度，进一步提升了数据采集的质量。部分隧道点云灰度图及三维模型如下：



图 3.1 部分隧道点云模型图

### (二) 数据噪声误差的处理

激光扫描过程中，由于设备的固有噪声、外部环境的干扰以及测量过程中的偶然误差，采集到的点云数据往往包含大量噪声。这些噪声不仅降低了数据质量，还可能导致断面拟合的偏差，影响整体检测的准确性<sup>[4]</sup>。在本项目应用中，通过高斯滤波和均值滤波技术，平滑数据曲线，减少噪声对测量结果的干扰。

利用CloudCompare点云处理软件首先对原始数据降噪处理去除点云数据中的冗余和噪声，确保数据的纯净度。该项目中选取某段隧道进行实验，原始采集的点云数量达到150000个左右，通过滤波处理后，降噪后的点云数量减少到140000个左右，有效去除了噪声点并保留了主要的几何特征。然后采用RANSAC（随机采样一致性）算法，剔除了极端异常的点云数据，使得拟合误差更加精确。

### (三) 拟合断面限界判别

对预处理后的点云进行断面拟合，采用最小二乘法构建隧道断面的数学模型，针对隧道的断面进行拟合计算<sup>[5]</sup>。通过对每个点云坐标的误差分析，优化拟合结果，最终得到隧道断面的精准几何参数。

判别某个位置是否存在物体侵线，基于扫描的点云模型基础上加载车辆框架结构，隧道限界标准是一个封闭的曲线，可以将判断是否侵限抽象为“点是否在多边形内”。

将车辆轮廓线加载到断面模型中，判别是否存在侵限情况，列出侵限的位置，高程信息，并备注侵界的物体属性。图3.2为隧道单个断面限界图，图中左侧为地铁车辆模型，右侧为三维激光点云拟合断面图，通过对比车辆模型，可以看出该位置线路右侧，存在物体侵界，距离线路中心0.091m，高度为1.45m，结合实地调查，可以判别为该处存放临时设备侵入限界内。

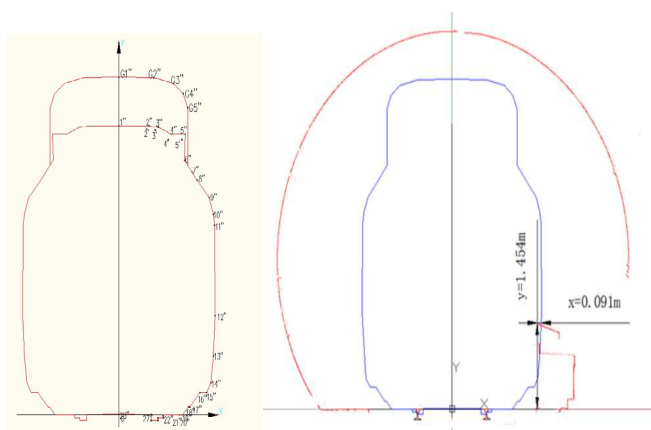


图 3.2 隧道限界测量断面图

### (四) 结果核验对比

为了评估三维激光扫描限界测量断面拟合的精度，抽样拟合断面与TS60全站仪现场断面测量的结果进行了比较。大多数断面拟合的残差值在2毫米到5毫米之间，其中95%的断面拟合精度优于5毫米。以下是本项目中的部分数据分析结果：

表 3.1 隧道断面拟合与测量误差统计表

检测断面编号	原始点云数量 (个)	降噪后点云数量 (个)	拟合圆心坐标 X (mm)	拟合圆心坐标 Y (mm)	拟合残差 (mm)	全站仪对比误差 (mm)
1	150532	140007	3.256	2.897	3.05	2.85
2	149801	139950	3.162	2.921	1.98	3.10
3	151233	140154	3.290	2.874	2.15	2.95
4	149750	139806	3.305	2.905	3.08	2.00
5	150154	140027	3.276	2.899	2.03	4.88

这些结果表明，三维激光扫描技术在隧道限界检测中能够提供高度可靠的数据支持。

### 结语

三维激光扫描技术在铁路隧道限界检测中的成功应用，展示了其显著的技术优势和广阔的应用前景。铁路隧道的结构复杂多样，传统检测方法难以高效覆盖，而三维激光扫描技术通过非接触式快速扫描，能够精确捕捉隧道的全断面数据，极大提高了检测效率与精度。随着设备成本的逐渐下降和技术的成熟，推广应用的可行性逐步提升。

三维激光扫描技术在铁路隧道限界检测中的应用展示了其在精度、效率以及可靠性方面的显著优势。通过结合先进的数据处理方法和多源传感器融合技术，进一步提升了检测的精度与适应性，为复杂环境中的隧道限界检测提供了切实可行的解决方案。随着技术的不断成熟和推广，三维激光扫描技术不仅在检测效率上大幅领先传统方法，而且在操作的自动化和智能化方面也具备了较高的发展潜力<sup>[6]</sup>。标准化应用的推进，将有助于建立统一的技术规范，确保不同项目间检测结果的一致性和可靠性。与其他检测技术的集成应用，拓宽了三维激光扫描技术的应用范围，使其在更广泛的工程项目中发挥更大作用。

### 参考文献

[1] 赵韦皓. 三维激光扫描技术在铁路隧道施工中的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2024, (09): 125-127.

[2] 陆宽. 三维激光扫描技术在隧道断面检测中的应用研究[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(08): 55-58.

[3] 赵韦皓. 浅谈将铁路隧道断面质量检测纳入工序管理[J]. 工程建设与设计, 2024, (07): 261-263.

[4] 闫晓楠, 宋洪英, 徐奇, 等. 三维激光扫描技术在隧道限界中的应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(02): 146-148.

[5] 安哲立, 马伟斌, 袁振宇, 等. 基于激光扫描技术的铁路隧道限界检测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S2): 874-883.

[6] 王勇, 安哲立, 马伟斌, 等. 中日韩运营铁路隧道检测技术现状及发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(07): 1135-1145.

作者简介: 赵伟(1994.03-), 男, 汉族, 河南洛阳, 硕士, 工程师, 工作单位: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 研究方向为: 工程测量。