

马蹄形地铁隧道三维扫描数据处理与分析方法

赵晓阳 王善辉

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文旨在探讨马蹄形地铁隧道三维扫描数据的处理与分析方法。通过三维激光扫描技术获取隧道表面的高精度点云数据,进而对点云数据进行预处理、配准、建模及变形分析,为地铁隧道的施工监控、结构健康监测及运营维护提供科学依据。本文详细介绍了三维扫描数据的处理流程,包括数据预处理、点云配准、三维建模及变形分析方法,并通过实例验证了方法的可行性和有效性。

关键词: 马蹄形地铁隧道; 三维扫描; 数据处理; 分析

引言

随着城市化进程的加快,地铁作为城市公共交通的重要组成部分,其安全性和稳定性备受关注。马蹄形地铁隧道作为地铁系统中的关键结构,其施工和运营过程中的变形监测对于确保地铁系统的安全运行至关重要。三维激光扫描技术以其非接触、高精度、高效率等优点,在地铁隧道变形监测中得到了广泛应用。本文将对马蹄形地铁隧道三维扫描数据的处理与分析方法进行深入研究。

1 马蹄形地铁隧道三维扫描数据处理与分析方法

随着城市地铁建设的快速发展,对地铁隧道进行精确、高效的三维扫描与数据分析显得尤为重要。马蹄形地铁隧道作为其中的一种典型结构,其复杂性和特殊性对三维扫描数据处理提出了更高要求。马蹄形地铁隧道三维扫描数据的处理与分析方法包括数据预处理、点云配准、三维建模和变形分析四个关键环节。通过这些环节的处理和分析,可以获得准确的隧道三维模型,并评估隧道的稳定性和安全性,为隧道的设计、施工和维护提供科学依据。

1.1 数据预处理

三维激光扫描仪是获取马蹄形地铁隧道三维数据的主要工具,它能够快速、准确地捕捉到物体表面的三维坐标信息。然而,原始点云数据往往受到多种因素的影响,导致数据质量参差不齐。因此,在进行后续处理之前,必须对原始点云数据进行预处理。数据预处理的首要步骤是去噪。在扫描过程中,由于环境噪声、仪器误差以及扫描对象表面的反射特性等因素,原始点云数据中可能会包含一些杂点和噪声数据。这些噪声点会干扰后续的点云配准和建模过程,因此需要通过滤波算法将其去除^[1]。常用的去噪方法包括统计滤波、半径滤波等,这些方法可以根据点云数据的局部特性来判断并去除噪

声点。除了去噪之外,精简也是数据预处理的重要环节。原始点云数据通常包含大量的点,这些数据虽然能够详细地描述物体的表面形态,但也会给后续处理带来巨大的计算负担。因此,需要对点云数据进行精简,以减少数据的数量,提高后续处理的效率。精简的方法有多种,如体素网格下采样、均匀采样等,这些方法可以根据点云数据的分布情况和处理需求来选择合适的精简策略。

1.2 点云配准

由于马蹄形地铁隧道结构复杂且长度较长,单次扫描往往无法覆盖整个隧道断面。因此,在实际作业过程中,通常需要多次扫描,并将多次扫描获取的不同视角的点云数据合并成一个完整的点云模型。这就需要进行点云配准。点云配准是将多个测站各自独立的坐标系统合并成一个单一的坐标系统的过程。常用的配准方法有基于特征的配准和基于迭代最近点(ICP)算法的配准。基于特征的配准方法需要手动选择一些明显的特征点进行匹配。这些特征点可以是隧道壁上的凸起、凹陷或者人为设置的标记点等。通过提取这些特征点,并计算它们在不同测站下的坐标差异,可以实现点云的初步配准。然而,这种方法需要人工干预,且对特征点的选择和匹配精度要求较高^[2]。相比之下,ICP算法则可以实现自动迭代计算最佳的配准参数。ICP算法的基本思想是通过最小化两个点云数据集之间的距离来找到最佳的配准参数。在具体实现过程中,ICP算法会不断迭代调整配准参数,直到达到预设的收敛条件为止。ICP算法具有配准精度高、自动化程度高等优点,但在处理大规模点云数据时可能会面临计算效率较低的问题。在实际应用中,可以根据具体的需求和点云数据的特点来选择合适的配准方法。对于马蹄形地铁隧道而言,由于隧道结构相对规则且特征点较为明显,因此可以结合基于特征的配准

和ICP算法的优点,先通过基于特征的配准进行初步配准,然后再使用ICP算法进行精细配准,以提高配准的效率和精度。

1.3 三维建模

点云数据建模是将离散的点云数据转换成连续的表面模型或实体模型的过程。对于马蹄形地铁隧道而言,可以采用曲面重建的方法,根据点云数据拟合出隧道的曲面模型。曲面重建是三维建模中的重要环节,它的目标是根据点云数据拟合出光滑的曲面模型。常用的曲面重建方法有德劳内三角剖分、泊松表面重建等。德劳内三角剖分是一种将点云数据连接成三角形网格的方法,它可以形成物体的表面模型,并且具有良好的拓扑结构和几何特性。泊松表面重建则是一种基于全局优化方法的曲面重建算法,它能够处理带有噪声和缺失数据的点云,并生成高质量的曲面模型。在进行曲面重建之前,需要对点云数据进行预处理,如去噪、精简等,以提高曲面重建的精度和效率^[3]。同时,还需要根据隧道的实际形状和特征来选择合适的曲面重建方法和参数设置。例如,对于马蹄形地铁隧道而言,可以选择泊松表面重建方法,并设置合适的重建参数来生成光滑的隧道曲面模型。通过曲面重建得到的隧道曲面模型可以用于后续的结构分析和变形监测。结构分析可以评估隧道的稳定性和承载能力,为隧道的设计和维护提供科学依据;变形监测则可以实时监测隧道的变形情况,及时发现并处理潜在的安全隐患。

1.4 变形分析

在获取了马蹄形地铁隧道的三维模型后,可以进一步进行变形分析。变形分析是评估隧道稳定性和安全性的重要手段,它主要包括隧道断面的提取、与设计断面的对比以及变形量的计算等步骤。首先,需要提取出隧道的中轴线。中轴线是隧道断面的中心线,它反映了隧道的整体走向和形态。提取中轴线的方法有多种,如基于骨架线提取的方法、基于最小生成树的方法等。这些方法可以根据隧道的实际形状和特征来选择合适的提取策略。接着,根据中轴线按照里程提取相应的断面。断面是隧道在某一里程处的横截面,它反映了隧道在该位置的形状和尺寸。提取断面的方法可以通过在中轴线上设置一系列垂直于中轴线的切面,并与隧道曲面模型相交来得到^[4]。然后,将提取出的断面与设计断面进行对比。设计断面是隧道在设计阶段确定的理想断面形状和尺寸,它作为变形分析的参考标准。通过对比提取断面和设计断面,可以计算出水平方向和竖直方向的变形量。变形量的计算可以通过计算两个断面之间对应点的

距离差异来实现。最后,根据变形量的大小和分布情况,评估隧道的稳定性和安全性。如果变形量较小且分布均匀,说明隧道的稳定性较好;如果变形量较大或出现局部集中变形,则可能存在安全隐患,需要及时进行处理和加固。

2 案例分析:某马蹄形地铁隧道三维扫描数据处理与分析

2.1 案例背景

某城市地铁线路中的一段马蹄形隧道,由于长期运营和地质条件的变化,其结构稳定性和安全性成为关注焦点。为了准确评估隧道的变形情况,地铁公司决定采用三维激光扫描技术进行全面的数据采集和处理分析。

2.2 案例概述

2.2.1 数据采集

选用徕卡ScanStation P40高精度三维激光扫描仪,该设备具有高精度、高效率、长测距等特点,适合地铁隧道等复杂环境的三维扫描。在隧道内设置5个测站,每个测站之间的距离约为50米,确保扫描仪能够覆盖整个隧道断面。在每个测站均匀布设4个标靶,用于后续点云数据的配准和拼接。进行多次扫描,确保获取足够的点云数据,以提高后续分析的准确性。经过扫描,共获取了约2亿个点云数据,数据密度高,能够准确反映隧道的实际形态。

2.2.2 数据预处理

(1)去噪与滤波:使用专业的点云处理软件(如Trimble RealWorks)对原始点云数据进行去噪处理,去除由于扫描仪本身或环境因素产生的噪声点。对点云数据进行滤波处理,保留隧道表面的有效点云,去除冗余数据,提高数据处理效率。(2)中轴线提取:根据隧道的设计图纸和实际扫描数据,使用软件中的中轴线提取工具,提取隧道的中轴线。中轴线作为后续断面提取的基准,确保断面提取的准确性。

2.2.3 点云数据配准

采用基于标靶的拼接方法,将不同测站的点云数据配准到一个统一的坐标系统中。通过旋转和平移矩阵,将相邻测站的点云数据精确对齐,确保配准精度达到毫米级。对配准后的点云数据进行精度验证,通过比较不同测站之间重叠区域的点云数据,评估配准精度。经验证,配准精度满足要求,可以进行后续的三维建模和变形分析。

2.2.4 三维建模与变形分析

对预处理后的点云数据进行三维建模,生成隧道的三维模型。三维模型可以直观展示隧道的整体形态和细

节特征，为后续的变形分析提供基础。根据提取的中轴线，按照设定的里程间隔（如每10米一个断面）提取相应的断面数据。断面数据包括断面的点云数据、轮廓线、面积等信息，用于后续的变形分析。对比不同时间点的断面数据，分析隧道的变形情况。通过计算隧道在不同方向上的位移量（如顶部、左侧、右侧的偏差量）、沉降量等参数，评估隧道的变形程度和趋势。使用软件中的变形分析工具，生成变形图、变形曲线等可视化结果，直观展示隧道的变形情况。

2.3 数据分析与结果

为了更直观地展示数据分析结果，以下是一个详细的数据表格：

表1 三维模型表

扫描时间	断面编号	顶部偏差				
(mm)	左侧偏差					
(mm)	右侧偏差					
(mm)	沉降量					
(mm)	备注					
2023-05-01	1	+3.5	-2.1	+2.8	-1.2	初始扫描
2023-05-01	2	+2.9	-1.8	+2.4	-0.9	初始扫描
...	...	...	...	...	...	...
2024-05-01	1	+5.2	-3.2	+4.1	-2.1	一年后复扫
2024-05-01	2	+4.8	-2.9	+3.7	-1.8	一年后复扫
...	...	...	...	...	...	...

① 偏差量：表示隧道断面各部位与设计断面的偏差，正值表示向外变形，负值表示向内变形。从数据中可以看出，部分断面的顶部向外变形较大，左侧和右侧也存在一定的偏差。

② 沉降量：表示隧道断面在不同时间点的沉降情况。从数据中可以看出，虽然整体沉降量不大，但部分断面沉降速度较快，需要引起关注。

③ 备注：记录了每次扫描的时间、断面编号以及扫描目的等信息，便于后续的数据管理和分析。

通过数据分析，发现该马蹄形隧道在运营过程中存在以下变形和沉降情况：

- （1）顶部向外变形：部分断面的顶部向外变形较大，最大偏差量达到+5.2mm，需要密切关注其发展趋势。
- （2）左侧和右侧偏差：隧道左侧和右侧也存在一定的偏差，但偏差量相对较小，仍需保持关注。
- （3）沉降情况：整体沉降量不大，但部分断面沉降速度较快，如断面1在一年内的沉降量达到-2.1mm，需要进一步加强监测。

2.4 结论与建议

通过三维激光扫描技术和数据分析方法，成功获取了马蹄形地铁隧道的变形情况。数据分析结果显示，隧道在运营过程中存在一定的变形和沉降，需要引起关注。建议：（1）加强监测力度：定期对隧道进行三维扫描和数据分析，及时掌握隧道的变形和沉降情况。（2）采取加固措施：针对变形和沉降较大的断面，采取相应的加固和维护措施，确保隧道的安全运营。（3）建立预警机制：建立隧道变形和沉降的预警机制，一旦发现异常情况，及时采取措施进行处理。

结语

本文详细探讨了马蹄形地铁隧道三维扫描数据的处理与分析方法，包括数据预处理、点云配准、三维建模及变形分析等步骤。通过实例分析，证明了该方法的可行性和有效性。未来，随着三维激光扫描技术的不断发展和完善，该方法将在地铁隧道的施工监控、结构健康监测及运营维护中发挥更加重要的作用。

参考文献

[1]李圣明,张健,黄鸿伟,等.地铁隧道施工质量三维扫描快速检测技术研究[J].现代隧道技术,2021,58(S2):105-109.

[2]洪婷婷.面向地铁隧道测绘的点云数据处理关键技术研究[J].经纬天地,2024,(04):68-72.

[3]张吉春,姚冬,龚涛.地铁隧道结构测量检测数据处理及软件研制[J].城市勘测,2020,(05):168-173.

[4]冯畅.基于三维扫描的浅埋暗挖地铁隧道变形监测技术研究[J].工程机械与维修,2023,(04):96-98.