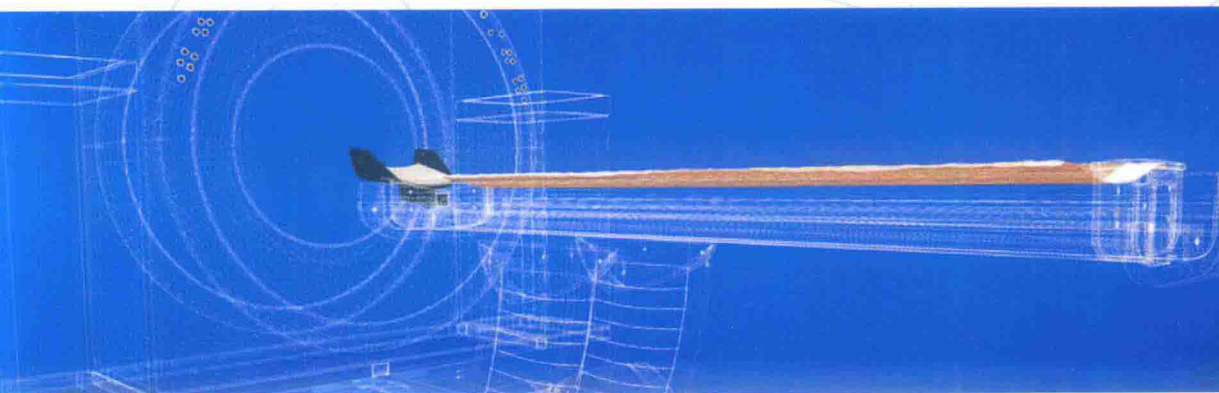


隧道激光扫描形变检测技术及仿真系统

3D Laser Scanning Deformation Monitoring Technology and
Simulation System in Tunnel Projects



丁涛 向巍 马瑞 张辛 李志鹏 著



科学出版社

隧道激光扫描形变检测技术 及仿真系统

3D Laser Scanning Deformation
Monitoring Technology and Simulation
System in Tunnel Projects

丁 涛 向 巍 马 瑞 张 辛 李志鹏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书研究并提出了三维激光扫描检测技术和三维仿真系统构建技术。书中详细介绍了三维激光扫描外业控制、点云数据采集、点云数据预处理、曲面重建、模型后处理等工作流程；对隧道形变检测的数学模型设计进行了探讨，研发了“隧道形变监测系统”软件；介绍了基于激光点云的三维建模方法，根据隧洞安全监测可视化表达需求，搭建了隧洞安全监测三维可视化管理平台，重点论述了包括数学模型的构建、形变比较算法的理论、形变算法的具体实现等重难点技术。通过工程实例验证了隧道激光扫描形变检测理论技术，实现了三维可视化技术与安全监测专业应用的有效集成，优化了传统的水利安全监测的工作方式。

本书可供三维激光扫描技术、形变检测技术、三维数字实景模型技术，以及安全监测技术等相关专业的技术人员及工程人员、高校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

隧道激光扫描形变检测技术及仿真系统/丁涛等著. —北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-044119-5

I. ①隧… II. ①丁… III. ①隧道工程-激光扫描-变形观测-仿真系统 IV. ①U451

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 034896 号

责任编辑: 闫 悦 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 207 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着我国基础建设的大力发展,各种大规模的水利隧道、铁路隧道、城市地铁隧道等工程大量兴建。隧道工程往往地质情况复杂、施工难度大、隐蔽性强、造价昂贵,因而对隧道建设期间的施工质量以及竣工后的安全运营提出了很高的要求。隧道工程在建设和运营期间,围岩载荷的改变、渗漏以及其他应力变化等均会导致隧道产生一定程度的形变。为保障安全,形变检测已经成为隧道建设、管理及运营阶段的一项重要任务。随着技术的发展,形变检测工作向着多学科交叉方向发展,所涉及的传感器技术、形变检测技术、数据处理与分析建模的理论和方法很多,目前也是工程测量、遥感和工程地质等学科研究的难点。

南水北调工程是我国的战略性工程,其中的穿黄隧洞工程是中线总干渠穿越黄河的关键性工程。穿黄工程双洞平行布置,采用盾构法施工,双层衬砌结构型式,结构创新、工艺复杂。隧洞下穿黄河段地质条件复杂,通水前后会发生应力变化,隧洞内水外渗以及隧洞上部黄河河床变化也会造成压力变化,若上述变化带来隧洞的较大形变,将会对供水安全造成严重影响。因此,对穿黄隧洞进行形变监测与可视化管理具有重要意义。基于此,项目组受委托开展了穿黄工程三维数字实景模型与应用研究,将三维激光扫描等先进的测绘技术运用于重要的工程项目实践中。提出了高精度激光数据采集方案,并研发了“隧道形变监测系统”软件,完成了封闭曲面扫描数据精化模型和多期比较算法,解决了隧洞曲面海量数据的自动对比。此外,项目组还采用了以隧洞实体的变化趋势为约束的三维建模数据轻量化技术,实现了海量激光点云自适应高精度三维重建,并进一步在三维可视化系统平台中建立了隧洞安全监测属性信息专题库,实现了隧洞多维环境数据的整合表达。

“3DGIS-Ark”三维地理信息可视化平台的推出,实现了海量基础地理信息数据的管理,不仅能融合高精度三维地质模型、三维物探模型及BIM等精细模型,并且能集成水文、水资源、水土保持、水生态环境等大区域多源涉水专业信息,还能作为水利水电勘测、规划和设计各专业的空间数据共享平台,实现多专业成果的汇集和三维展示。

隧道激光扫描形变检测技术及仿真系统研究成果能够为边坡形变监测、公路及地铁隧道等封闭曲面的形变检测,乃至工程自动化检测及监测技术的长远发展提供重要的技术支撑,能够为工程的安全性论证提供重要的基础资料,能够为工程的安全稳定运行及远程管理提供保障。

本书采用合著的方式完成，除主要作者外，长江空间信息技术工程有限公司(武汉)张力、南水北调工程设计管理中心钟慧荣参与了撰写工作。长江空间信息技术工程有限公司(武汉)的多位领导及技术人员参与了相关项目的实施，付出了艰辛的劳动，在此一并表示感谢。由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 11 月

目 录

前言

第 1 章	隧道形变检测方法概述	1
1.1	接触式检测	1
1.1.1	收敛计量测法	1
1.1.2	巴塞特收敛系统测量	2
1.1.3	光纤传感器测量	2
1.1.4	静力水准测量	3
1.2	非接触式检测	3
1.2.1	全站仪测量	3
1.2.2	测量机器人测量	4
1.2.3	近景摄影测量	4
1.2.4	数字图像处理	5
1.2.5	三维激光扫描测量	6
1.3	检测方法的比较与分析	9
1.3.1	接触式检测特点及局限性	9
1.3.2	非接触式检测特点及适用性	9
1.3.3	三维激光扫描检测技术发展方向	10
	参考文献	11
第 2 章	三维激光扫描原理	13
2.1	点云数据采集	13
2.1.1	平面控制基准	13
2.1.2	高程控制基准	14
2.1.3	数据采集	15
2.2	点云数据预处理	18
2.2.1	点云配准	18
2.2.2	点云去噪	19
2.2.3	点云精简	20
2.2.4	点云分割	21

2.3	点云数据处理	22
2.3.1	曲面重建	22
2.3.2	模型后处理	22
	参考文献	23
第3章	隧道形变检测主要数学模型设计	24
3.1	隧道形变检测	24
3.2	数学模型	24
3.2.1	曲线、曲面的表达	24
3.2.2	线性模型	28
3.2.3	非线性模型	29
3.3	形变比较方法基础理论	32
3.3.1	插值	33
3.3.2	拟合	33
3.3.3	最优化问题	37
3.3.4	算法的稳健性	44
3.4	形变算法的实现	49
	参考文献	54
第4章	形变监测系统软件的研发	57
4.1	软件的研发工具	57
4.1.1	基础平台	57
4.1.2	编程语言	58
4.1.3	开发框架	58
4.2	软件的主要功能	59
4.3	软件的总体架构	60
4.3.1	点云交互模块	60
4.3.2	轴线分析模块	61
4.3.3	断面处理模块	61
4.4	软件的处理流程	62
4.4.1	点云数据读取	62
4.4.2	中轴线导入	63
4.4.3	中心线生成	65
4.4.4	横断面生成	66
4.4.5	中心线对比	67

4.4.6 横断面对比	68
4.4.7 批量自动操作	71
4.4.8 隧道净空分析	72
4.5 小结	75
参考文献	75
第 5 章 隧道三维数字实景模型	76
5.1 传统三维数字建模方法	76
5.1.1 模拟建模	76
5.1.2 依图而建的三维建模方法	77
5.1.3 基于摄影测量方法的三维建模	78
5.1.4 各类建模方法比较	80
5.2 基于激光点云的三维建模技术流程	81
5.2.1 点云数据获取	81
5.2.2 点云数据预处理	83
5.2.3 隧道点云提取	84
5.2.4 隧道模型的生产方法	87
第 6 章 隧道安全监测三维可视化管理平台	92
6.1 国内外安全监测可视化技术的发展	92
6.1.1 三维可视化技术发展现状	92
6.1.2 三维可视化实现方法	93
6.1.3 国内外安全监测三维可视化技术应用实例	94
6.1.4 安全监测三维可视化发展需要解决的问题	95
6.2 安全监测可视化的应用需求分析	96
6.2.1 正确表达一维、二维对象	96
6.2.2 三维空间数据库的有效管理	96
6.2.3 三维空间分析	96
6.3 安全监测可视化系统的设计	96
6.3.1 可视化系统建设目标	96
6.3.2 系统设计原则	96
6.3.3 系统框架设计	97
6.4 安全监测可视化系统的底层建立	99
6.4.1 基础可视化平台的研发	99
6.4.2 系统服务接口	100

6.5	隧道安全监测三维可视化管理平台开发	100
6.5.1	数据库连接	100
6.5.2	三维地形地貌集成与展示	101
6.5.3	三维模型的集成与展示	103
6.5.4	地形模型与建筑物模型的无缝镶嵌	104
6.5.5	分级遮挡剔除	104
6.5.6	基于分页数据库的动态 LOD 调度	105
6.5.7	实时碰撞检测开发	106
6.5.8	监测仪器管理与查询	106
6.5.9	辅助管理开发	110
第 7 章	工程应用实例	114
7.1	南水北调穿黄隧洞形变检测	114
7.1.1	工程概况	114
7.1.2	基础控制体系的建立	116
7.1.3	三维激光扫描数据采集	120
7.1.4	三维激光扫描数据处理	122
7.1.5	穿黄隧洞形变检测与分析	125
7.2	武汉地铁隧道形变检测	131
7.2.1	工程概况	131
7.2.2	基础控制体系的建立	132
7.2.3	三维激光扫描系统 ScanStation P40 及配件汇总表	133
7.2.4	三维激光扫描系统 ScanStation P40 外业数据采集	133
7.2.5	三维激光扫描系统 ScanStation P40 内业处理基本步骤说明	135
7.2.6	隧道形变监测系统隧道数据处理	139
7.2.7	隧洞整体分析	144
7.3	穿黄隧洞三维数字实景可视化研究	147
7.3.1	系统设计	147
7.3.2	总体数据流程	148
7.3.3	功能模块划分	149
7.3.4	数据库建立及主要监测项目	149
7.3.5	关键技术	151
7.3.6	系统实现	152

第 1 章 隧道形变检测方法概述

形变检测是利用专用测量仪器和方法对形变体的形变现象进行监视、观测并量化的工作。其任务是确定在各种荷载和外力作用下,形变体的形状、大小及位置变化的空间状态和时间特征^[1,2]。形变体的形变在一定范围内被认为是安全的,否则可能引发灾害。

对隧道的形变检测,就是通过采集不同时期的隧道结构数据,比较隧道中相同位置上的形变量,以反映隧道局部或某一区段内的收敛变形情况。形变检测方法主要可分为接触式检测和非接触式检测两种类型。

1.1 接触式检测

接触式检测是需要与被测物体直接接触的检测方法的统称。接触式检测方法主要有收敛计量测法、巴塞特收敛系统测量、光纤传感器测量、静力水准测量等。

1.1.1 收敛计量测法

收敛计量测法是使用收敛计对形变体的长度收敛进行量测的形变检测方法。其中,收敛计是专门用来测定隧道、巷道、洞室及其他工程围岩壁面上任意两点间的距离变化(收敛值)的量测仪器。通过在洞壁表面预埋的埋点或挂钩,并记录初始阶段各埋点之间的距离,然后在隧道施工或运营期间不断地采集距离数据,整理形变曲线,统计各点之间的形变量,从而分析判断围岩的形变情况与稳定性。但收敛计量测法所量测的收敛值是相对的,不能真实反映出工程具体的形变情况。目前,美国 Sinco 公司,法国 TELEMAT 公司,瑞士 Kern 公司,加拿大 Geokon 公司,英国 SOIL、ROCK 公司以及澳、德 INTERFELS 公司等先后研制出了各种收敛计,并占据一定的市场。国内自主研发的产品有 SWJ-78、QJ-85、SLJ-80 等收敛计^[3]。

接触式检测获取的隧道形变信息主要包括隧道拱顶下沉、隧道净空收敛、围岩内部相对位移等。其监测点一般应布置在仰拱中点、拱顶、拱端、拱腰、侧墙中部等处。其中,拱顶下沉一般应监测 4 个断面,每个断面至少 3 个监测点,可利用钢卷尺配合水准仪进行测量。隧道净空收敛也需监测 4 个断面,每个断面水平斜向共布设 9 条测线,可利用收敛计进行测量。而围岩内部相对位移一般应监测 8 个断面,每个断面测两个点,可利用多点位移计和百分表进行检测^[4]。

此外,收敛计误差的主要来源是温度变化引起伸缩误差、量测时收敛计自重引起的误差、人为操作引起的误差。为了提高收敛计的量测精度,国内外的学者进行了不少研究。王英学、颜景淦等^[5,6]发现了拉力和风流对量测精度的影响,并提出控制拉力大小和避免风流的方法;Simeoni等^[7]介绍了使用收敛计对意大利南部的铁路隧道进行收敛监测;宋冶、李玉宝等^[8,9]论证了收敛计在隧道收敛检测中的精度,将收敛计应用于隧道形变检测。

总体上,收敛计形变检测的精度较高,但是该方法的实施易受环境条件的影响,人工操作要求高,需耗费大量的时间和人力。因此,该方法在隧道形变检测中已经较少使用,且应用研究方面趋于停滞状态。

1.1.2 巴塞特收敛系统测量

巴塞特收敛系统是一种多杆件单元组成的隧道横断面收敛自动监测系统,它是由多个首尾互相连接的长短杆件监测单元安装在待监测的隧道剖面上,形成的一个闭合监测环,每一个监测单元都由一长一短的杆件组成,当隧道断面产生形变时,各监测单元可以协调地在断面内转动,这时长短杆件间的角度就会发生变化,每件杆件上的角度传感器会自动测量出角度变化的大小。系统根据倾角变化和各相应长、短臂的长度计算出各固定点的位移,再参照各固定点原始位置的坐标,就可得到各固定点在变化后的实际位置,计算出各固定点的位移,从而得到断面轮廓的形变量^[10]。

巴塞特收敛系统是一个高精度、自动化的监测系统,其测量效果比较直观,而且整个系统从数据采集到运算结果显示都可以完全实现计算机自动化,能提高测量效率。但巴塞特收敛系统在隧道形变监测中需要布置足够的固定点才能很好地反映出隧道剖面的形变情况,并且该方法所用的仪器设备昂贵,监测信息少,因此在实际隧道形变监测工程中使用频率不高,一般只应用于净空狭小的隧道,以及隧道和地下洞室的危险断面。

1.1.3 光纤传感器测量

光纤传感器测量是利用安装在被检测物体上的光纤传感器,对形变对象的信息进行收集的技术方法。国际上光纤传感器的研发起源于20世纪70年代,几乎与光纤通信技术发展同步;而国内从20世纪80年代才开始研发光纤传感器。

国内外工程结构检测领域主要的光纤传感器包括光纤 Bragg 光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器、Brillouin 光时域反射计(Brillouin optical time-domain reflectometer, BOTDR)、Fabry-Perot 空腔传感器(Fabry-Perot interferometer, FPI)及 SOFO 点式光纤传感器等^[11]。相比而言,FBG 的检测分辨率较高,应用也相对较多。FBG 传感器方法是利用紫外线曝光将入射光的相干场图形写入纤芯,使纤芯的折射率发生周

周期性变化,并使其产生周期性调制,从而在单模光纤的纤芯内形成永久性空间相位光栅。其基本原理是当光栅受到拉伸、挤压及热形变时,检测光栅反射信号的变化。

Inaudi^[12]曾将光纤传感器测量技术应用于桥梁、水坝、隧道、发电站等不同类型的工程项目中,用于检测工程对象的结构应力、应变、振动、损伤和裂缝等,或者进行大型结构的健康监测。国内的崔天麟、何涛、孙新民等^[13-15]将FBG传感器应用于隧道形变检测,均取得了良好的成果和精度,充分体现了FBG传感器的精度高、速度快等优点。进一步地,赵星光等^[16]提出了FBG传感器在隧道内的铺设方案及温度补偿技术,结果表明FBG传感器可准确地测出隧道的应变分布,将其应用于隧道形变检测中是可行和有效的。张桂生等^[17]提出一种将气吹敷设传感光纤法和真空灌浆固定传感光纤法相结合的预埋式光纤传感器的铺设方法,以减小光纤光栅传感器的安装误差。

通过上述分析,利用光纤传感器进行隧道形变检测的方法能获得良好的精度,能长期监测,满足工程要求。然而,光纤传感器价格昂贵且容易损坏,一旦损坏就难以修复,往往不适用于形变情况过于复杂的岩土工程,这也是影响该技术发展与推广的最主要原因。

1.1.4 静力水准测量

静力水准仪是一种高精密液位测量系统,该系统适用于测量多点的相对沉降。它的原理是利用相连的容器中,液体总是寻求具有相同势能的水平原理,测量和监测参考点彼此之间的垂直高度的差异和变化量。影响静力水准仪测量精度的因素主要包括仪器内部空气压强的变化、地面的震动等。

在隧道形变检测中,静力水准仪只用于检测隧道的沉降变化。由于其检测精度易受温度变化、震动、系统管路长短等影响,且检测信息少、造价高等,所以在隧道形变检测中较少使用。

1.2 非接触式检测

非接触式检测方法不需要与被测物体进行直接接触就可以获得对象的形变信息。非接触式检测方法主要包括全站仪测量、测量机器人测量、近景摄影测量、数字图像处理及三维激光扫描测量。

1.2.1 全站仪测量

全站仪测量法是使用全站仪进行形变检测的方法。全站仪是全站型电子速测仪

的简称,它集电子经纬仪、光电测距仪和微处理器于一体,具有速度快、精度高、使用方便等特点。

利用全站仪对隧道断面按一定模式进行扫描,主要有等距、等角和人工(任意角度)三种模式,再利用这些扫描点坐标拟合出隧道断面的圆心坐标,通过圆心至扫描点之间的距离变化得到隧道断面的结构形变。

这种方法原理简单、观测方便、精度高、但它要求隧道衬砌结构裸露、整体通视、中间不能有遮挡。该方法在常规的隧道与隧道形变检测中应用较多,也比较成熟。

1.2.2 测量机器人测量

测量机器人也称为自动全站仪,是一种能自动搜索、识别、跟踪和精确照准目标并且获取坐标信息的智能型电子全站仪。它具有目标自动寻找、识别和精确照准功能,可在短时间内对多个目标点作持续和重复观测。测量机器人在隧道形变检测中的主要研究目的是实现高精度、自动化、实时快速监控隧道形变情况,以确保隧道安全。由于测量机器人采用自动照准模式、智能式测量,所以不存在人为照准、操作误差,使得测量机器人的测距和测角精度远远优于一般的全站仪。因此,研究测量机器人在隧道形变监测工作中的主要内容是如何实现数据采集、处理、分析、传输、显示以及发布的一体化系统。

国内的杨松林、曹庆磊等^[18,19]使用测量机器人在隧道形变检测方面进行过研究,其研究内容包括基准点位稳定性判别与改正、粗差检核与剔除、数据处理模式、数据传输、自动测量控制、数据显示、数据发布以及监测成果精度等。他们在铁路隧道的检测过程中,将特制的仪器墩安装在界标外,测量机器人通过基座强制对中固定在仪器墩上,并用玻璃钢罩加以保护。然后在隧道结构上安装反射棱镜,每个监测站安装5~10个,分布在拱顶、竖直墙、轨道排水沟、铁轨扣件旁等位置。最后设定好观测程序,测量机器人自动采集各点坐标,并用数据线将数据传输至控制服务器,从而完成整个检测过程。

测量机器人在隧道形变检测中具有速度快、精度高、自动化程度高、方便易用等特点。但是,测量机器人价格昂贵,体积庞大,不便于推广使用,一般只应用于个别有特殊要求的重要工程。

1.2.3 近景摄影测量

近景摄影测量是以摄影测量为手段,确定地形以外各类目标的形状、大小、几何位置和运动状态的一种技术。它采用数码相机摄取有关隧道断面的图像,经过图像处理获取隧道形变量等相关数据。近景摄影测量在国际上已经有五六十年的历史,因有设备简单、图像数据获取快捷、图像处理自动化程度高、测量质量高等

突出优点,成为国内外学术界研究的热点,并且该技术在隧道形变方面的应用也较为广泛。

国外的 Satoru 等^[20]应用近景摄影测量方法对隧道围岩形变进行检测,在地铁隧道内得到监测点的三维坐标精度已达到了全站仪监测方法的精度水平,标志着近景摄影测量在隧道形变检测研究中取得了巨大进步。但该方法使用时需要在整个监测区域内埋设大量的辅助点,并且照片数量庞大。

国内的刘大刚^[21]提出了标定摄像法,可以手持相机对隧道断面进行摄影,具有更大的方便性和灵活性,并在理论推导中首次考虑了相机镜头畸变的影响,使形变检测的精度有所提升。但由于仍需布设控制点,并且试验环境过于理想,使其研究成果推广应用较为困难。

王国辉等^[22]研究出一种无固定控制点,手持非量测相机的近景摄影测量监测隧道形变方法。该方法是手持相机,不设固定测站,不设控制点,但需要在预测断面上挂基准杆和定长杆,并进行拍照输入。该实验方法能较为全面地获取隧道洞室的三维形变信息,较适合在施工隧道中进行推广。

上海交通大学的田胜利^[23]研究了应用近景摄影测量技术观测结构形变的方法。该方法使用了小波变换及神经网络等人工智能手段对观测结果进行处理,在云南小湾电站的大型洞室内进行现场试验,量测结果达到了较高的精度。但由于施工现场的环境影响,其观测精度与全站仪相比尚有一定差距。

同济大学的桑中顺^[24]研究了非量测相机进行隧道形变检测的技术方法。该方法使用红外摄影获取高清图像,提出一种简易同名点匹配方法,但该方法不适合复杂目标。并且,他研究了无固定控制点时,物方坐标的精确计算方法和形变量的精确测量方法,并在江西省武吉高速公路的九岭山隧道进行现场试验,取得了较高的精度。

总体上,国内外的学者对近景摄影测量技术在隧道形变检测方面进行了深入的研究,并取得了一系列显著的研究成果。但该技术方法仍存在对测量环境要求高、数据后处理复杂且慢、专业性强、操作不方便等缺点,有待进一步研究解决。

1.2.4 数字图像处理

数字图像处理技术起源于 20 世纪 20 年代,是指将图像信号转换成数字信号并利用计算机对其进行处理的过程。该技术目前已在科学研究、工农业、航空航天、军事、工业产品检测、司法公安、机器人视觉、军事应用、文化艺术等方面得到了应用,发挥着越来越大的作用。

将数字图像处理技术应用于隧道形变检测工程,是通过对隧道内定点放置的目标光源进行拍摄,并对所得到的图像进行预处理;再对目标光源轮廓进行提取;然

后通过图像二值化提取边界;最后通过计算目标光源圆心的位置变化得到隧道纵向的形变量。数字图像处理技术工程应用的关键问题是获取噪声低、成像质量高的图像,并快速准确地测量图像目标点的像素坐标值^[23]。因此,对图像进行预处理、并对目标点的像素坐标值进行精确量测的研究,成为数字图像处理技术应用的先决条件。

Wang 等^[25]利用数字图像处理技术监测隧道洞室形变,试验表明 3mm 甚至更微小的形变量都能被准确识别,同时量测的速度是传统方式的 6 倍左右。

周奇才等^[26]提出了利用数字图像处理技术对地铁隧道形变进行测量的方案。该方案通过固定图像传感器拍摄隧道内定点放置的目标光源,并对数字图像进行平滑、锐化、腐蚀、膨胀、去噪等预处理,进而计算光源位置变化,获取像素坐标,从而得出地铁隧道纵向的形变量。试验结果表明,该方法得到的隧道形变量比较精确可靠。

罗洪斌^[27]探讨了物空间坐标系与像素坐标系之间的对应关系,解得隧道的形变量,并证明该方法可靠、稳定。廖凯通过测量激光成像中心的位置,从而获得监测点的位移变化量,其误差达到 0.5mm。

夏珂等^[28]对隧道内裂缝进行了实时视频监控,先对图像信号进行去噪预处理,再提取图像的边缘特征,最后利用基于空间关系的图像检索技术对图像边缘的相对位置进行监测,计算出裂缝的存在和实时动态,有效地实现了隧道的安全监控。

谭志坚^[29]提出一种基于数码相机和电子经纬仪连接装置的非接触式隧道形变监测方法,先标定数码相机,再解算出目标点的参考坐标,最后计算出目标点的形变量。试验证明,该方法是有效的。

此外,丛林^[30]利用高速立体影像单元,采用分布式智能图像传感器监测隧道形变,研究了图像传感器选择与设计的方案。李金蕾^[31]通过数字图像处理方法实现对地铁隧道内管壁位移的监测,在 200m 范围内位移测量精度达到 1mm 以内。

综上所述,利用数字图像处理技术进行隧道形变检测的研究取得了大量的阶段性试验成果,验证了该技术在隧道形变监测中具有高精度、可行性、操作简便性及经济性。但是,数字图像处理技术只能检测隧道单方向上的位移变化量,无法全面检测其位移变化量,并且对形变检测成果可靠性和精度稳定性的研究还存在不足。

1.2.5 三维激光扫描测量

三维激光扫描测量是一种全自动高精度立体扫描测量技术,它通过高速激光扫描测量的方法,以被测对象的采样点集合(点云)的形式获取物体或地形表面的三维

坐标数据, 直接对测量对象快捷地进行三维数据采集及模型重构, 从而完整、快速、高精度地获取对象的原始测量数据。

1. 测量原理

三维激光扫描技术从测量原理上主要分为测距、测角、扫描、定向四个方面。

(1) 测距原理。测距方法主要分为三角法、脉冲法、相位法。其中, 三角法是借助三角形几何关系, 求得扫描中心到扫描对象的距离; 脉冲法是通过测量发射和接收激光脉冲信号的时间差来间接获得被测目标的距离; 相位法是用无线电波段的频率对激光束进行幅度调制, 通过测定调制光信号在被测距离上往返传播所产生的相位差间接测定往返时间, 并进一步计算出被测距离。

(2) 测角原理。测角方法分为角位移测量和线位移测量。其中, 角位移测量是激光扫描仪通过改变激光光路获得扫描角度; 线位移测量是通过记录激光束形成的线性扫描区域的线位移量获得扫描角度值。

(3) 扫描原理。三维激光扫描仪通过内置伺服驱动马达系统精密控制多面扫描棱镜的转动, 决定激光束出射方向, 从而使脉冲激光束沿横轴方向和纵轴方向快速扫描。

(4) 定向原理。三维激光扫描仪扫描的点云数据都在其自定义的扫描坐标系中, 需要按数据后处理的要求转换到大地坐标系下, 这个过程就称为三维激光扫描仪的定向。

2. 测量设备

三维激光扫描测量设备按测距原理可分为基于三角测量、基于脉冲、基于相位差三种类型。基于三角测量的扫描仪是利用立体结构化光源, 通过获得两条光线建立立体投影关系进行测量, 扫描距离一般为几米到几十米, 主要用于工业测量。脉冲式三维激光扫描测量仪是从固定中心沿视线测量距离, 其扫描速度较慢, 测距范围一般为几百米至几千米, 扫描精度受光线影响较小, 适用于室外的地形地貌测量等。基于相位差的扫描测量仪利用光学干涉原理进行测量, 其扫描速度较快, 测距范围一般为几十米至几百米, 扫描精度受光线影响较大, 主要用于工业测量及科研考古等。

从系统运行平台来划分, 三维激光扫描测量可分为机载型、手持型和地面型三种类型。地面型三维激光扫描测量系统按照测量方式不同还可以细分为固定式和移动式。各种类型的三维激光扫描设备如图 1.1 所示。目前国内外主流的三维激光扫描仪品牌包括美国的 Trimble、FARO、Surphaser, 瑞士的 Leica, 德国的 Z+F, 奥地利的 RiegI, 加拿大的 Optech, 以及中国的中海达、华测等品牌。



图 1.1 三维激光扫描测量系统

3. 应用现状

三维激光扫描技术从 20 世纪 90 年代中期开始兴起, 它从最初的文物保护、逆向工程应用逐渐发展到城市建设、工业制造、矿产采集、道路桥梁建设, 并涉及地形测量、形变检测等工程应用。

国内学者马立广、张毅、齐建伟等^[32-34]对如何提高三维激光扫描技术在工程应用的精度方面进行了较为深入的研究。其中, 马立广对系统的定位定向、坐标系统的转换、数据误差来源、误差对点云精度的影响、数据处理和点云处理算法等问题进行了研究。张毅等利用空间坐标转换的方法整体解算了系统误差模型, 以减小误差的影响。齐建伟等提出了基于激光空间分布拓扑关系的方法来评价高程精度和平面精度。

具体到三维激光扫描技术在隧道形变检测的应用方面, 简骁等^[35]提出了一种基于三次多项式插值曲面拟合的隧道整体形变检测方法, 它能通过对多个拟合曲面之间的高程比较, 获取地铁隧道顶部由于其上方大型建筑施工而对其产生的影响。李健等^[36]运用基于向量差异的点云分割算法对点云数据进行抽稀并构建地铁隧道模型, 用以进行隧道整体形变分析, 同时通过与光纤位移计结果对比, 形变检测精度能够满足