

KUANGSHAN KAICAI CHENXIAN JIANCE JI YUCE XINJISHU



矿山开采沉陷监测及 预测新技术

吴侃 汪云甲 王岁权 等著

中国环境科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

矿山开采沉陷监测及预测新技术

吴侃 汪云甲 王岁权 蔡来良 著
陈冉丽 陈国良 李亮 敖建锋

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山开采沉陷监测及预测新技术/吴侃等著. —北京: 中国环境科学出版社, 2012.12

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-5111-1072-5

I. ①矿… II. ①吴… III. ①矿山开采—沉陷性—监测
IV. ①TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 164879 号

责任编辑 丁莞歆

责任校对 唐丽虹

封面设计 金 喆

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 12 月第 1 版
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 17.75
字 数 410 千字
定 价 45.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》

编委会

顾 问：吴晓青

组 长：赵英民

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

总 序

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，“十一五”环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略，建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项启动实施，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；发布了502项新标准，现行国家标准达1263项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境

科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构,支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动,“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署,环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题,立足环境管理中的科技需求,积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间,环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项,涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域,共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与,逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前,专项取得了重要研究成果,提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案,形成一批环境监测预警和监督管理技术体系,研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术,提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议,为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果,及时总结项目组织管理经验,环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果,具有较强的学术性和实用性,可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版,在科技管理上也是一次很好的尝试,我们希望通过这一尝试,能够进一步活跃环保科技的学术氛围,促进科技成果的转化与应用,为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

前 言

作为世界上煤炭资源生产和消费最多的国家，在未来的几十年乃至上百年中，我国一次性能源中煤炭资源的主体地位不会发生改变。随着国民经济持续健康发展的需求，煤炭资源的产量也在稳步提高。2010 年中国煤炭产量接近 32 亿 t，每年增量保持在 2 亿 t 左右，“十二五”末需求量至少为 40 亿 t。其中，93%以上的煤炭产量来自于井工开采。

煤炭资源的高强度、大规模开采在为国民经济发展和社会进步作出巨大贡献的同时，也给矿区带来严重的环境地质灾害问题，如导致地表沉陷、农田及建筑物破坏、矸石堆积、瓦斯等有害气体排放、土地沙漠化、有害物质渗入地下水等。在我国不少矿区，煤炭不合理开发已危及矿区生态环境安全。如大规模、高强度、大面积开采已使山西省的生存支持系统、环境支持系统等多项指标都排在全国倒数第一或第二。

煤炭开发活动对生态系统的影响源头在于地下采煤引起的地表沉陷。如矿区的地表积水、耕地破坏、民房开裂、山体滑坡、植被破坏和铁路、公路等公共设施的破坏都与地表沉陷有直接关系。因此，做好煤炭井工开采地表沉陷的监测及预测工作对矿井开采规划及矿区生态环境保护及恢复具有重要的现实意义。

获取准确的开采沉陷盆地形态是实现开采沉陷预测的基础性工作，传统的开采沉陷变形监测只能获取沉陷盆地主断面上少数几个监测点的变形，用监测点的变形反演整个沉陷盆地的变形情况，这种以点概面的方法具有较大的局限性，引进新的沉陷监测技术势在必行。应用三维激光扫描技术进行开采沉陷监测可以获取监测区域内密集的点云数据，反映沉陷盆地的真实形态，适用于快速获取开采沉陷预测参数；应用 InSAR 技术可以获取大范围矿区沉陷信息。

煤炭开采地表沉陷预测研究是一个由来已久的话题，国内外建立的预测方法有概率积分法、剖面函数法、威布尔预计法、负指数幂法、典型曲线法、双曲线法、数值模拟计算等方法。在这些方法中，大部分方法由于参数体系复杂且难以获取、模型自

身存在一定的缺陷、推广应用性差等问题未能得到广泛的应用,而概率积分法由于其参数体系简单、预计结果相对可靠等优点在我国各大矿区得到了广泛应用。但是概率积分法由于其自身模型的限制,对平原地区适应性较好,对山区适应性较差,对缓倾斜煤层开采沉陷适应性较好,对大倾角煤层开采适应性较差。而我国目前煤炭资源开发的重点转向山西、新疆、内蒙古等西部矿区,这些矿区典型的特点为地形起伏较大,煤层倾角较大,如何解决西部区域煤炭资源开采地表沉陷预测问题,对保证全国煤炭资源开发总体规划、保护西部脆弱生态环境显得重要而急迫。

在前人卓有成效的工作基础上,通过大量的理论分析、实验室模拟计算和对实测资料的整理分析,以求建立起一个参数体系简单、可适用于地形起伏和煤层倾角变化的一体化开采沉陷预测模型(广适应开采沉陷预测模型),并形成界面友好、操作简便的完整的软件系统。

本书是“煤炭井工开采的地表沉陷监测预测及生态环境损害累计效应研究”(项目编号:200809128)课题组成员在长期合作研究基础上的成果总结。

本书第一部分由吴侃负责,主要参加研究和编写工作的有:敖建锋博士、周大伟博士、张舒硕士、黄承亮硕士、赵鑫硕士等。本书第二部分由汪云甲负责,主要参加研究和编写工作的有:陈国良博士、王行风博士、盛耀斌博士、闫建伟硕士、乔浩然硕士、张俊硕士及研究生魏长倩、鲍金杰等。本书第三部分由吴侃、王岁权负责,主要参加研究和编写工作的有:蔡来良博士、陈冉丽硕士、李亮博士,郑汝育、李儒、谢艾伶、于启升、刘虎、王响雷、郝刚、徐亚楠、唐瑞林硕士等。

书中有关的应用实践涉及各个知名企业,包括:中煤国际工程集团北京华宇工程有限公司、冀中能源峰峰集团有限公司、兖州煤业股份有限公司、煤炭工业太原设计研究院和中煤科工集团南京设计研究院。在此,对以上各大企业的大力支持表示衷心感谢!

作 者

2012 年 11 月

目 录

第一部分 地面三维激光扫描在开采沉陷观测中的应用

第一章 三维激光扫描观测站理论基础	3
第一节 三维激光扫描仪简介	3
第二节 三维激光扫描应用于矿山开采沉陷观测的基本原理	8
第三节 三维激光扫描观测站精度研究	17
第四节 小结	35
第二章 观测数据处理方法	36
第一节 点云滤波去噪方法研究	36
第二节 点云重采样方法研究	47
第三节 三维激光扫描数据处理软件	49
第三章 地面三维激光扫描观测站布设方法及实例研究	62
第一节 观测站布设	62
第二节 实例一：峰峰矿区羊渠河矿里 8256 工作面观测	63
第三节 实例二：峰峰矿区万年矿 13266 工作面观测	68
第四节 实例三：兖州矿区 5305（2）工作面观测	74

第二部分 InSAR 矿区监测

第四章 InSAR 技术发展现状	83
第五章 主流雷达遥感卫星及影像简介	86
第一节 ENVISAT ASAR	86
第二节 ALOS PALSAR	89
第三节 RADARSAT1/2	92
第四节 TerraSAR-X	95
第五节 DEM 数据	96
第六章 差分雷达干涉技术原理与方法	97
第一节 差分雷达干涉技术原理	97
第二节 差分雷达干涉数据处理流程	105
第三节 差分雷达干涉处理方法	106

第四节 差分雷达干涉技术局限性	109
第七章 InSAR 新技术形变监测方法	111
第一节 永久散射体干涉技术	111
第二节 基于 PS 自适应估计的改进 PS-InSAR 技术	113
第三节 其他 InSAR 新技术	120
第八章 矿区沉陷形变的 InSAR 监测实例	124
第一节 皖北钱营孜矿及淮南矿区沉陷形变监测	124
第二节 大同云岗矿沉陷形变监测	142
第三节 澳大利亚 Westcliff 和 Appin 矿沉陷形变监测	145

第三部分 广适应开采沉陷预测模型

第九章 相似材料模型原理及模型设计	155
第一节 相似材料模型原理	155
第二节 模型设计	156
第十章 相似材料模型监测系统	162
第一节 相似材料模型观测手段	162
第二节 三维光学测量系统简介	165
第三节 系统应用及观测精度分析	170
第十一章 相似材料模型实验数据分析	188
第一节 煤层倾角对下沉曲线的影响规律	188
第二节 煤层倾角对水平移动曲线的影响规律	195
第三节 煤层倾角对岩体内部运动的影响规律	197
第四节 小结	201
第十二章 适宜任意倾角的开采沉陷预计模型的建立	202
第一节 预计方法建立的理论基础	202
第二节 一种基于任意煤层倾角的开采沉陷计算新方法	205
第三节 预计模型优化	215
第四节 小结	219
第十三章 耦合 DEM 的开采沉陷预计模型研究	220
第一节 考虑坡度变化的开采沉陷预计方法	220
第二节 DEM 数据的获得及格式读取	222
第三节 DEM 与开采沉陷预测模型的耦合研究	227
第十四章 广适应开采沉陷预测软件开发	233
第一节 概述	233
第二节 开采沉陷预计模型简介	234
第三节 总体设计	236
参考文献	246
彩图	253

第一部分

地面三维激光扫描在开采沉陷观测中的应用

第一章 三维激光扫描观测站理论基础

第一节 三维激光扫描仪简介

三维激光扫描技术是随着当代地球空间信息科学发展而产生的一项高新技术,随着三维激光扫描仪在工程领域的广泛应用,这种技术已经引起了广大科研人员的广泛关注。三维激光扫描系统由三维激光扫描仪、数码相机、扫描仪旋转平台、软件控制平台、数据处理平台及电源和其他附件设备共同构成。它克服了传统测量方法条件限制多、采集效率低下等劣势,可以深入到任何复杂的现场环境及空间中进行扫描操作,并可以直接实现各种大型的、复杂的、不规则的、标准或非标准的实体或实景三维数据完整的采集,进而快速重构出实体目标的三维模型及线、面、体、空间等各种制图数据^[1]。

一、三维激光仪分类

三维激光扫描技术在近几年得到了飞速的发展,成为多领域、多用途的一门应用技术。应用于不同领域的三维激光扫描仪的诞生代表了三维激光扫描技术的发展水平,目前应用的三维激光扫描系统种类繁多,类型、工作领域不尽相同。按照不同的研究角度、工作原理等可进行多种分类。

三维激光扫描系统从操作的空间位置可以划分为如下4类:

①机载型激光扫描系统:这类系统在小型飞机或直升机上搭载,由激光扫描仪(LS)、成像装置(UI)、定位系统(GPS)、飞行惯导系统(INS)、计算机及数据采集器、记录器、处理软件和电源构成,如图1-1所示。它可以在很短时间内取得大范围的三维地物数据,如图1-2所示。

②地面型激光扫描系统:此种系统是一种利用激光脉冲对被测物体进行扫描,可以大面积、快速度、高精度、大密度地取得地物的三维形态及坐标的一种测量设备。根据测量方式还可划分为两类:一类是移动式激光扫描系统;另一类是固定式激光扫描系统。

所谓移动式激光扫描系统,是基于车载平台,由全球定位系统(GPS)、惯性导航系统(IMU)结合地面三维激光扫描系统组成,如图1-3所示。

固定式激光扫描系统,类似传统测量中的全站仪。系统由激光扫描仪及控制系统、内置数码相机、后期处理软件等组成。与全站仪不同之处在于固定式激光扫描仪采集的不是离散的单点三维坐标,而是一系列的“点云”数据。其特点为扫描范围大、速度快、精度高、具有良好的野外操作性能,如图1-4所示。

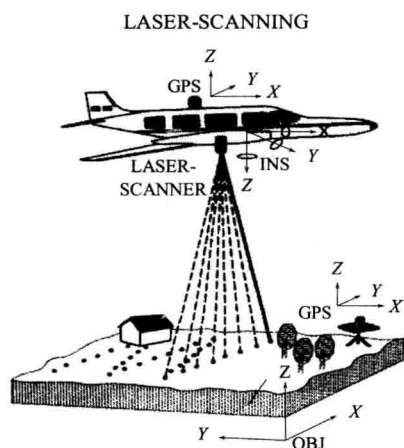


图 1-1 机载型扫描示意图

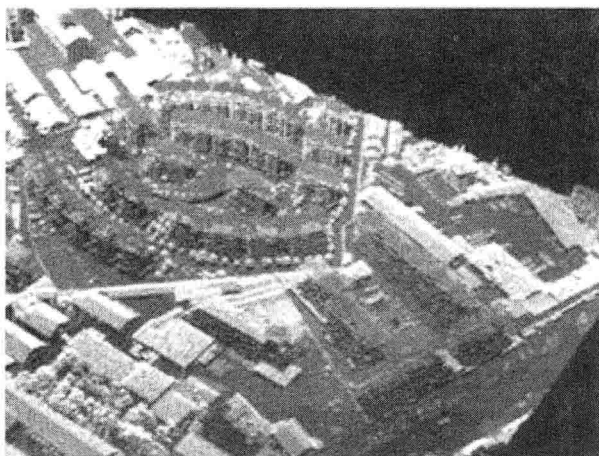


图 1-2 三维成果图



图 1-3 车载型激光扫描系统

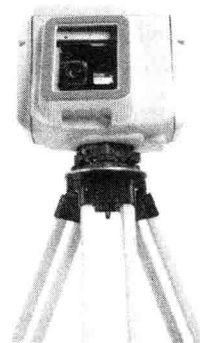


图 1-4 GX200 固定式激光扫描系统

③手持型激光扫描仪：此类设备多用于采集小型物体的三维数据，一般配以柔性机械臂使用。优点是快速、简洁、精确。适用于机械制造与开发、产品误差检测、影视动画制作与医学等众多领域，如图 1-5、图 1-6 所示。

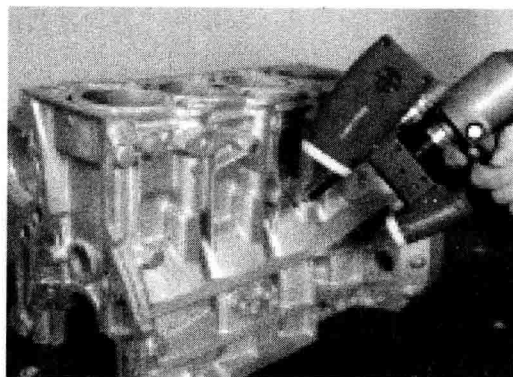


图 1-5 Model Maker 激光扫描仪

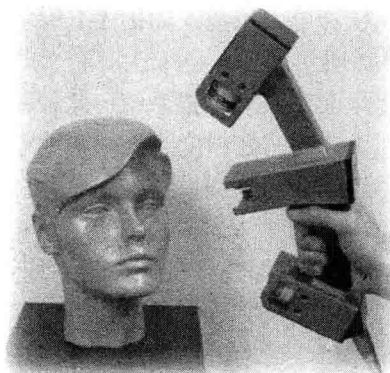


图 1-6 Fast Scan 激光扫描仪

④特殊场合应用的激光扫描仪，如洞穴中应用的激光扫描仪：在特定非常危险或难以到达的环境中，如地下矿山隧道、溶洞洞穴、人工开凿的隧道等狭小、细长型空间范围内，三维激光扫描技术也可以进行三维扫描。

在三维激光扫描系统中，还可以进行更加详细的分类，根据不同的分类角度可有不同的分类结果：

仪器的扫描方式——例如水平 360° 扫描、瞬时视场的大小、扫描断面；

仪器的偏差系统——仪器的轴系旋转或镜面旋转方式；

结合使用的方式——内置或外置数码相机，GPS 接收机等。

另外，还可以做如下分类^[7]：

按照激光光束的发射方式划分：灯泡式扫描仪，如图 1-7 (a) 所示；三角法扫描仪，如图 1-7 (b) 所示；扇形扫描仪，如图 1-7 (c) 所示。

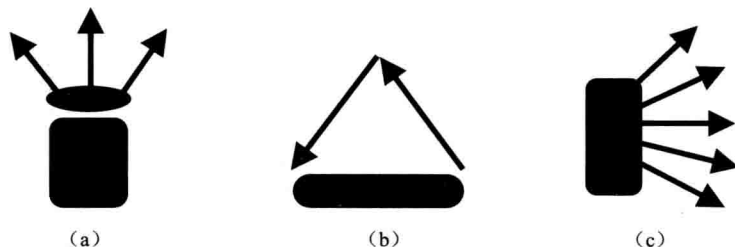


图 1-7 激光光束发射方式分类

按照扫描仪的扫描成像方式划分：

①摄影扫描式。此类型的扫描仪扫描瞬时视场有限，它与摄影相机类似。适用于室外物体扫描，尤其是对于长距离的扫描很有优势，见图 1-8 (a)。

②全景扫描式。此类型的扫描仪视场局限于仪器的自身如三脚架，它适用于室内宽视角扫描，见图 1-8 (b)。

③混合型扫描式。它集成了上述两种类型的优点，水平方向的轴系旋转不受任何的限制，而垂直的方向上的旋转受镜面的局限，见图 1-8 (c)。

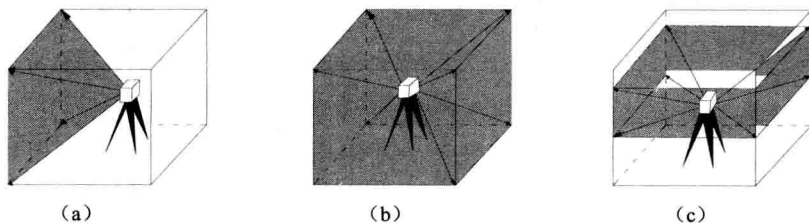


图 1-8 扫描成像方式分类

三维激光扫描仪按测距方式划分为 3 种：脉冲式、相位式和三角测距式。

①脉冲式：大多数的扫描仪测距都是采用这种原理，其测距范围可达到数百米，甚至上千米。而且不受环境光线影响，但扫描频率较低，单点定位精度稍差，适用于大型工程和室外使用。

②相位式：扫描范围一般在 100 m 内，与脉冲式相比，它的扫描频率和精度较高，但

是在一定程度上受环境光线影响, 不适宜晴天时在室外进行大于 20 m 的工作。

③三角测距式: 这种方式的测量距离有限, 一般在几米到几十米, 受环境光线影响较大, 但扫描频率快、精度高, 适用于室内且对精度要求很高的情况, 主要应用于逆向建模等工程中。

二、三维激光扫描仪工作原理

三维激光扫描系统由三维激光扫描仪、数码相机、扫描仪旋转平台、软件控制平台、数据处理平台及电源和其他附件设备共同构成, 是一种集成了多种高新技术的新型空间信息数据获取手段^[8]。脉冲式三维激光扫描系统的工作原理如图 1-9 所示, 首先由激光脉冲二极管发射出激光脉冲信号, 经过旋转棱镜, 射向目标, 通过探测器, 接收反射回来的激光脉冲信号, 并由记录器记录每个激光脉冲从出发到被测物表面再返回仪器所经过的时间来计算距离, 同时编码器测量每个脉冲的角度, 可以得到被测物体的三维真实坐标。

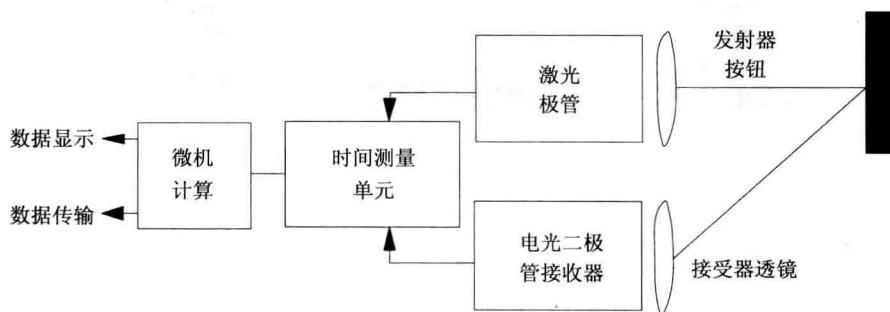


图 1-9 脉冲式三维激光扫描原理

原始观测数据主要是: 精密时钟控制编码器同步测量得到的每个激光脉冲横向扫描角度观测值 α 和纵向扫描角度观测值 ξ , 通过脉冲激光传播的时间计算得到的仪器扫描点的距离值 S , 扫描点的反射强度等。三维激光扫描测量一般使用仪器内部坐标系, X 轴在横向扫描面内, Y 轴在纵向扫描面内与 X 轴垂直, Z 轴与横向扫描面垂直, 根据公式 (1.1) 可得到点坐标的计算公式^[1]:

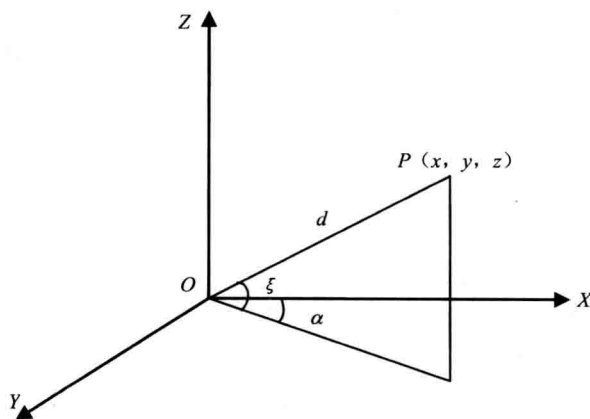


图 1-10 三维坐标计算原理

$$\begin{cases} x = d \cos \xi \cos \alpha \\ y = d \cos \xi \sin \alpha \\ z = d \sin \xi \end{cases} \quad (1.1)$$

三、三维激光扫描仪的主要特点

三维激光扫描仪的单点定位精度一般在亚厘米级,其模型精度还要高于单点定位的精度。三维激光扫描仪能提供视场内的、有效测程内的、基于一定采样间距的采样点三维坐标,并具有较高的测量精度和很高的数据采集效率。与基于全站仪或 GPS 的变形监测相比,其数据采集效率较高,且采样点数要多得多,形成了一个基于三维数据点的离散三维模型数据场,这能有效避免以往基于变形监测点数据的应力应变分析结果中所带有的局部性和片面性(即以点代面的分析方法的局限性);与基于近景摄影测量的变形监测相比,尽管它无法像近景摄影那样能形成基于光线的连续三维模型数据场,但它比近景摄影具有更高的工作效率,并且其后续数据处理也更为容易,能快速准确地生成监测对象的三维数据模型。这些技术优势决定了三维激光影像扫描技术在变形监测领域将有着广阔的应用前景。

三维激光扫描技术可以大范围,快速全面,高精度,高分辨率地获取被测物体的平面和高程坐标,并可以方便地建立可以量测的三维模型。综合起来,激光测量具有以下特点:

①快速性。激光扫描测量能够快速获取大面积目标空间信息。应用激光扫描技术进行目标空间数据采集,可以及时地测定实体表面立体信息,应用于自动监控行业。

②非接触性。地面三维激光扫描系统采用完全非接触的方式对目标进行扫描测量,获取实体的矢量化三维坐标数据,从目标实体到三维点云数据一次完成,做到真正的快速原形重构。可以解决危险领域的测量、柔性目标的测量、需要保护对象的测量以及人员不可到达位置的测量等工作。

③激光的穿透性。激光的穿透特性使得地面三维激光扫描系统获取的采样点能描述目标表面的不同层面的几何信息。

④实时、动态、主动性。地面三维激光扫描系统为主动式扫描系统,通过探测自身发射的激光脉冲回射信号来描述目标信息,使得系统扫描测量不受时间和空间的约束。系统发射的激光束是准平行光,避免了常规光学照相测量中固有的光学变形误差,拓宽了纵深信息的立体采集。这对实景及实体的空间形态及结构属性描述更加完整,采集的三维数据更加具有实效性和准确性。

⑤高密度、高精度特性。激光扫描能够以高密度、高精度的方式获取目标表面特征。在精密的传感工艺支持下,对目标实体的立体结构及表面结构的三维集群数据作自动立体采集。采集的点云由点的位置坐标数据构成,减少了传统手段中人工计算或推导所带来的不确定性。利用庞大的点阵和一定浓密度的格网来描述实体信息,采样点的点距间隔可以选择设置,获取的点云具有较均匀的分布。

⑥数字化、自动化。系统扫描直接获取数字距离信号,具有全数字特征,易于自动化显示输出,可靠性好。扫描系统数据采集和管理软件通过相应的驱动程序及 TCP/IP 或并行连线接口控制扫描仪进行数据的采集,处理软件对目标初始点/终点进行选择,具有很好