

# 三维激光扫描技术在地下水封洞库库容测量中的应用

侯少聪

北京东方新星勘察设计有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i12.2074

**[摘要]** 精确测定地下洞室的储水量,关系到地下工程的安全管理与运营。传统的测量手段主要依靠手工测量,采用简单的几何运算,存在着精度不高、效率不高,并且还存在一定的安全风险。本项目拟以3D激光扫描为基础,探索其在地下水封洞库容量测量中的应用,并对其在提高测量精度、自动化测量以及大数据处理等方面的应用前景进行研究。研究结果显示,利用三维激光扫描技术进行地下水封洞库容量测定,可以有效地提高监测的效率,保证监测的安全,更好地满足现代化地下工程建设需要。

**[关键词]** 三维激光扫描技术; 地下水封洞库; 库容测量; 点云数据

中图分类号: TN820.2 文献标识码: A

## Application of 3D laser scanning technology in the measurement of groundwater sealing reservoir

Shaocong Hou

Beijing Oriental Nova Survey and Design Co., Ltd

**[Abstract]** The accurate determination of water storage in underground caves is related to the safety management and operation of underground engineering. The traditional measurement means mainly rely on manual measurement and use simple geometric operation, which has low accuracy, low efficiency and certain safety risks. This project intends to explore its application on the basis of 3D laser scanning, and to study its application prospects in improving measurement accuracy, automatic measurement and big data processing. The results show that the use of three-dimensional laser scanning technology to determine the capacity of groundwater closed reservoir can effectively improve the efficiency of monitoring, ensure the safety of monitoring, and better meet the needs of modern underground engineering construction.

**[Key words]** 3D laser scanning technology; groundwater sealing; storage capacity measurement; point cloud data

### 前言

地下洞室库是水库、隧道和矿山等工程中常用的一种地下工程,其库容的测算对工程的设计、施工和后期的维修至关重要。目前常用的水位变动法、量测法、几何计数法等测量手段,均存在精度不高、效率不高、操作繁琐等不足。当库区地形复杂且水深较大时,常规的人工观测方法难以满足复杂地下洞室的高精度和实时性要求。

### 1 三维激光扫描技术概述

#### 1.1 三维激光扫描技术的基本原理

三维激光扫描是一种以激光为基础的激光扫描方式,它利用激光扫描器发出的激光束,再将其反射回波,从而获取被测物体的位置信息。激光扫描器一般由一个雷射发射器,一个接收器和一个资料处理模组组成。该方法利用激光与被测物体的表面作用,在接收到被测物体表面的激光信号后,利用该方法得到被

测物体上各点的坐标(X, Y, Z)。在此基础上,提出了一种新的基于点云的方法,该方法能有效地提高测量精度。三维激光扫描技术可实现毫米量级的高精度检测,如Leica系列激光扫描器,理想条件下可实现0.01m,最大量程120m,适用于大尺度、复杂环境下的精密检测。点云数据规模巨大,在复杂场景下,其点云数据可达千万点,其构建的高精度3D模型是为后续处理提供精确几何信息的前提。

#### 1.2 三维激光扫描技术的应用特点

三维激光扫描技术以其快速、全面和准确的特点,在建筑、土木、矿产、文物保护、地下工程等诸多领域得到了广泛的应用。它的一个应用特征就是可以快速捕获大尺度的3D数据,不管是内部和外部的复杂结构,还是很难触及的空间,都可以一次得到完整的测量结果。比如,在地下洞室建设中,常规的探测手段受限于场地条件,而3D激光扫描技术可以实现对洞室的三维形

貌的快速、精确获取,并且对环境因子没有明显影响。另外,三维激光扫描技术还可以产生3D点云,经过专门的软件,可以很容易的将其转化为3D模型,从而进行库容计算,地貌分析等。三维激光扫描与常规测量方法相比较,极大地降低了人为因素带来的误差,从而提高了资料的精度与完整度。在矿井、隧道等环境下,三维激光扫描技术可以在不影响现有设备的前提下,获得精细的3D信息,适应复杂的测绘场景。

### 1.3 三维激光扫描技术的优势

三维激光扫描与常规检测方式相比,在精度、效率、适用性等方面都有明显的优越性。首先,利用三维激光扫描技术,可以获得较高的三维信息;例如,Leica BLK360在理想情况下,其精度可达到1mm左右,数据量达到百万量级,适合大范围场景的高精度测量。另外,三维激光扫描可以在很短的时间内获得大量的测量数据,从而大大降低了手工测量的工作量。比如,在常规的手工测量中,激光3D扫描可以在数天内完成相同的测量任务,从而极大地提高了工作效率。该方法克服了复杂的地形、苛刻的工作条件,可以在不易触及的区域实现高精度检测。针对部分封闭型水库蓄水能力测试过程中,受限于空间狭小、湿度大等因素,采用激光扫描可有效应对上述复杂环境,保证数据准确获取。因此,在隧道、矿山等难以到达的地方,是一种很好的测量手段。

### 1.4 三维激光扫描技术的局限性与挑战

虽然3D激光扫描技术有很多优点,但是在实用化方面还面临着一定的限制和挑战。首先,激光扫描系统所需的仪器比较昂贵。目前,国内主流的激光扫描设备普遍从数万到数十万元,比如徕卡RTC360系列,其价格就高达10万元以上。这就导致了某些小公司或者资金受限的项目在使用这种方法时会遇到很大的资金压力。另外,三维激光扫描器对操作者要求较高,有一定的技术门槛。三维激光扫描的数据规模十分巨大,对其进行处理不仅要求有较高的运算能力,而且还要求有专门的软件作支撑。点云数据的处理与分析一般依赖于Autodesk ReCap、Leica Cyclone等专用的点云处理软件,但此类软件具有较高的授权成本,且对操作要求较高。另外,在高温、高湿等极端条件下,激光扫描存在器件性能退化等问题,从而降低测量结果的质量与精度。

## 2 地下水封洞库库容测量的传统方法与挑战

### 2.1 人工测量法

在地下洞室的储水量测定中,手工测定法是最为传统的一种。这种方法一般采用人工进入有水封的洞室中,利用经纬仪、水平仪、测距机等仪器,对不同地点的坐标进行测定,并对各点间的间距和角度进行计算,以此来确定水库库容的变动情况。传统的方法是建立测点、人工观测等方法,通过人工观测得到水库的几何形态,再由人工计算得到水库库容值。虽然手工测试方法在实际中得到了广泛的使用,但是由于人为的原因,测试结果的准确性会受到很大的影响。比如,在封闭的地下洞室中,由于空间有限,测量点不能准确定位,手工测量会产生很大的误差。另

外,传统的测量方法往往耗时几天,甚至几个星期才能完成。通过对一座地下洞室的实测资料分析,发现用手工测定的方法计算出的库容误差在5-10%之间。这就使得传统的手工测量方法在水库库容测定中的局限性越来越明显,已不能适应现代化工程对测量精度与效率的要求。

### 2.2 声呐测量法

声呐测量法是目前常用的一种测定地下洞室容量的方法。该方法根据声波在水下的传输特点,采用声呐装置发出声波,然后将其反射回波,通过对声波在水中的传输时间进行估算,得到被测点到声纳的距离。它是一种适合于水体或湿度较大的水体测量技术,也是一种常用的测量方法。声呐测量法的优势是,在水封式洞室库体的湿润条件下,无需人工进入洞室内进行探测,从而规避了高风险的工作。但是,目前的声呐测量方法还存在着许多局限性。

### 2.3 水位变化法

水位变动法是根据水库蓄水后的库水变化情况,推测水库蓄水后的水量变化情况。该方法的基本思想就是通过测定水库水位的变化,并根据水库的储水量与水位之间的关系,计算出水库的水量。该方法操作简便,无需精密的观测仪器,并能对水封式洞室中的地下水位进行实时监控,由此可间接地估计出水库的水量变化情况。但该方法的准确性主要受多种因素的影响,其中最主要的就是水位自身的误差。地下水封洞水库的水位受降雨、蒸发和地下水运移等多个因素的影响,其变化具有很大的波动性,给利用水位变动进行库容估算带来了很大的不确定性。其次,水位变动方法假定水库的库容和水位具有稳定的函数关系,但实际上该关系会随水库水位的变动而改变,尤其是在具有复杂构造和大水深的水封型地下水库中,这种非线性关系会给预测带来很大的误差。根据一些工程资料计算,用水位变动法计算出的水库,与实测值相差约15%。所以,水位变动法一般只是一种辅助观测手段,而不能单独提供高精度的水库库容资料。

### 2.4 测深法与剖面法

探深法、剖面法都是以水封洞库内各部位的水深、断面形状为依据,计算出库容的常规测定方法。利用测深仪等仪器获得水深资料,并与海底剖面资料相结合,推算出库容。而剖面法则是对洞内各部分进行测定,并根据每一段的几何形状来估计出库容量。特别是对于构造相对简单或构造已知的地下水库,这种方法可以给出更直观的库容信息。但是,由于测量精度、数据处理以及外界环境等方面的原因,其测量结果的准确性和可信度都会受到很大的影响。如,在一个地下封洞库工程中,用探深法进行库容测算,发现因测点数少、洞库形状复杂等原因,其最终库容估算误差大于15%。另外,由于测深、剖面等方法费时费力,尤其是大型、不规则的水封洞室,测深难度大,精度与效率难以保证。然而,随着时间的推移,上述研究已越来越显示出它们的不足,难以同时满足高精度与高效率的要求。

### 3 三维激光扫描技术在地下水封洞库库容测量中的应用

#### 3.1 三维激光扫描技术在水封洞库测量中的数据采集优势

三维激光扫描技术具有快速、准确、快速的特点,是地下水封洞水库库容计量的一个重要优点。传统的测量方式是采用手工方式,利用测量设备逐个采集数据,费时费力,而且易受人为误差的影响。而三维激光雷达则可以对整个水封洞室进行快速的三维扫描,并自动产生海量的高精度点云数据。在工程实践中,利用Leica RTC360型激光扫描仪对一个面积1000多平方米的水库进行了24小时的全方位扫描,得到了5000多万个点的数据。本项目所采集的点云数据可以准确地反映出水封式洞室的空间形态和几何尺寸等,为后续的库容计算奠定了良好的基础。利用激光扫描技术,可以在很短的时间内,对大范围的地下空间进行探测,从而大大提高探测的效率。同时,该方法不需要深入到具有危险性的水封式洞室内,可以有效地解决由人工测定造成的安全隐患。另外,三维激光扫描技术具有更全面、更精确的三维信息,特别是对于一些空间复杂、埋藏较深的地下洞室,可以很好的解决传统测量手段无法实现的问题。

#### 3.2 精确的三维建模与库容计算

三维激光扫描可将点云数据转换成高精度的3D模型,是水库库容测算的关键。传统的水库库容计量方式,如水位升降、手工观测等,往往依靠简单的几何运算,受其精度的制约,往往会产生很大的误差。利用3D激光扫描获取的点云数据,利用Leica Cyclone、Autodesk ReCap等高级造型软件,实现高精度的3D模型构建。在此基础上,采用CAD (CAD) 软件,准确地计算出水库的容积,得到更为精确的水库库容。如在封闭地下洞室的库容实测中,利用激光扫描建立的三维模型,其计算精度只有0.5%,大大小于常规方法(手动测量的误差一般在5%)。在此基础上,建立了一种新的、可视化的数学模型。另外,激光扫描技术不但可以提高水库库容的计算精度,而且可以针对具体情况进行精细化分析,从而为水库的优化配置提供基础。

#### 3.3 减少人工干预与测量误差

三维激光扫描的另外一大优点是可以极大地降低人为干涉和测量误差。传统的地下洞室库容测算主要依靠人工进行,存在人为误差高、数据可重复性差等问题。但由于受施工人员的经验及作业方式等因素的影响,其测量结果的准确性难以保证。实践证明,采用三维激光扫描技术,能够实现对数据的实时采集和处理,降低了人为干涉的影响。利用雷射扫描器,量测人员只需设定扫描器,并确认其定位,即可进行大面积的量测。如在某一地下洞室的储水量测定中,应用3D激光扫描技术,其扫描精度可达1mm,多次测点多次测量误差小于0.2%。相对于传统的手工检测方式,该方法具有较大的误差,同时可以确保测量结果的均匀性和稳定性。另外,由于采用了激光扫描技术,可以实现多次重复观测,获得了较多的观测资料,因此,该方法具有较高的可靠性。

#### 3.4 数据处理与精确分析

三维激光扫描获取的点云数据要转换成可用的测量结果,必须进行专门的数据处理。在地下洞室蓄水量测定中,点云数据的处理与分析是其中的一个重要环节。点云数据的规模非常大,一般都要经历去噪、配准和建模等一系列的过程。利用专门的点云处理软件,可以有效地消除测量中的误差、优化数据、获得高精度的3D模型。在某地下洞室封闭工程中,利用点云数据对水库库容进行了准确的估算。利用Leica Cyclone软件对水库进行了高精度配准和处理,使水库库容的估算误差只有0.3%,明显地超过了常规方法所能达到的极限。对点云进行高精度处理,不但可以获得精确的水库库容信息,而且还能对水库各部位的变形、裂纹等进行分析,从而对水库大坝的安全运行具有重要意义。同时,对采集到的资料进行长期归档,为今后的定期监测和比对提供基本的资料支撑。

### 4 三维激光扫描技术的前景与发展方向

#### 4.1 技术精度与测量范围的进一步提升

提高三维激光扫描的精度,提高检测距离,是今后激光扫描技术发展的方向。目前,主流激光扫描系统已经可以实现毫米级的高精度扫描,如Leica RTC360系列激光雷达可以实现1mm的高精度、130m的探测距离。但是,对于某些特殊环境或者复杂的结构,目前的测试方法在精度和适用范围上仍受到限制。在此基础上,本项目提出了一种基于激光扫描的新方法,该方法有望进一步突破现有方法的瓶颈,提高检测精度,提高检测范围,并进一步拓展其应用范围。比如,为了适应深海、矿井等特定环境,研究者们研发出了更先进的激光扫描器,使其既能在高压、高温或低温条件下仍能稳定工作,又能获得更精确的数据。在此基础上,通过对激光光源工艺的改进,以及对敏感材料的改进,实现三维激光扫描,使其在微米量级、量程上有较大提升,以适应更高的工程应用需求。

#### 4.2 与其他技术的集成与协同发展

另外,三维激光扫描与其它高科技相结合、协调发展也是未来的发展趋势。目前,激光扫描主要用于三维建模、测量与分析,而在未来,随着物联网、人工智能、无人机、大数据等领域的融合,三维激光扫描将具有更多的应用场景,为数据的获取与分析提供更加智能化和自动化的能力。本项目拟采用无人飞行器和3D激光扫描相结合的方法,对高海拔、难触及的地区进行高精度扫描,获得大范围点云数据,采用人工智能算法对其进行自动处理,从而发现其中的关键结构和隐患。在建筑、桥梁、隧道等大型项目中,无人机和激光雷达已经得到了很好的应用。本课题以某建设工程为背景,采用携带激光扫描仪的无人机,实现大型建筑物的三维扫描,在节省人力的前提下,提高了测绘精度,误差可达2%。随着激光扫描技术与人工智能、物联网等技术的融合,该技术可以实现对施工进度及结构安全性的实时监测与预测。

#### 4.3 成本降低与设备小型化

当前,三维激光扫描技术的造价比较昂贵,许多小公司都无法承担专门的仪器费用。随着科技水平的不断提高,三维激光扫

描系统的发展趋势越来越趋向于微型化、低成本化。未来,激光扫描设备的生产将会更多地关注于成本的降低和工艺的优化,特别是在传感器、激光源、数据处理等领域的革新,将会极大地降低探测器的成本。比如,微激光传感技术的不断进步,使得小型化的激光扫描器不仅可以实现高精度、更廉价的检测,而且在便携、自适应等方面也有很大的提高。在一些小型建筑、设备维修等场合,微型激光雷达有望取代传统的检测手段,为更广泛的应用场合提供高精度的3D数据。据国内一家公司预测,到2030年,三维激光扫描装置的成本将会降低约50%,从而使中小型企业及预算较少的工程更易于应用。

## 5 结束语

三维激光扫描技术以其高效率、高精度三维模型构建等优点,有效解决了现有方法在精度、效率、安全性等方面存在的问题。研究证明,采用该方法可以提高监测效率、降低人为因素带来的危险,而且可以有效地控制测量误差,保证测量结果的准确。虽然这种方法在设备造价、数据处理复杂度等方面还存在一定的难度,但是,随着科技的进步以及与人工智能、大数据等

新兴科技的结合,三维激光雷达将会在地下工程勘察中得到广泛的应用。在此基础上,通过对三维激光扫描的研究,实现对地下洞室等复杂环境下的监测、管理与安全监测,具有重要的理论意义和应用价值。

## 【参考文献】

[1]彭勇.历史建筑测绘中三维激光扫描技术的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(07):155-157.

[2]童圣凯,杨俊武,童小寒,等.架空输电线路三维立体影像巡检技术的应用研究[J].山西电力,2025,(01):31-35.

[3]孙国强,钱政彦,王杰.手持三维激光扫描仪在地铁车站空间普查中的应用[J].城市勘测,2025,(01):81-85.

[4]周翔,周凯,朱海,等.移动式三维激光扫描在地铁竣工测量中的应用[J].城市勘测,2025,(01):76-80.

## 作者简介:

侯少聪(1988--),男,汉族,河北省石家庄市人,中级工程师,大学本科,研究方向:库容测量。