

# 水库工程坝体填筑压实度检测技术优化与精度控制研究

田丰

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6750

**[摘要]** 在新时代水利工程建设高质量发展的背景下,水库工程坝体填筑压实度的现场检测技术与精度控制水平,直接决定了坝体的结构安全、长期稳定与防洪效能。压实度作为衡量填筑坝体施工质量的核心指标,其检测技术的先进性与精度控制的可靠性是保障整个水库工程安全运行的基石。然而,当前传统的现场检测方法在效率、代表性及实时性方面存在局限,难以完全适应现代化高精度、快速施工的工程需求。因此,系统性地开展水库工程工地坝体填筑压实度现场检测技术的优化路径与精度控制体系的深化研究,对于提升工程质量检测的科技含量、实现施工过程的精细化管控、确保工程本质安全具有至关重要的理论价值与工程实践意义。

**[关键词]** 水库工程; 坝体填筑; 压实度; 现场检测

**中图分类号:** TV62 **文献标识码:** A

## Research on Optimization and Precision Control of Dam Compaction Degree Detection Technology in Reservoir Engineering

Feng Tian

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd.

**[Abstract]** In the context of high-quality development in water conservancy projects in the new era, the on-site detection technology and precision control level of dam compaction in reservoir engineering directly determine the structural safety, long-term stability, and flood control efficiency of the dam body. As a core indicator for evaluating construction quality, the advancement of compaction detection technology and the reliability of precision control serve as the foundation for ensuring the safe operation of the entire reservoir project. However, traditional on-site detection methods currently face limitations in efficiency, representativeness, and real-time performance, making them inadequate for modern engineering demands requiring high-precision and rapid construction. Therefore, systematic research on optimizing on-site compaction detection technology and refining precision control systems for dam compaction in reservoir construction sites holds critical theoretical and practical significance. This approach enhances the technological sophistication of quality inspection, enables refined construction process management, and ensures the inherent safety of engineering projects.

**[Key words]** Reservoir engineering; Dam filling; Compaction degree; On-site testing

### 引言

水库工程作为国家水资源调控与防洪减灾的关键基础设施,其坝体的安全稳定是工程发挥综合效益的根本前提。坝体填筑施工是土石坝建设的核心环节,而填筑材料的压实度则是评价该环节施工质量是否达标的决定性参数。压实度的高低直接关联到坝体的抗剪强度、变形模量、渗透性及抗渗稳定性等一系列关键工程特性。传统的压实度现场检测技术,如环刀法、灌砂法等,虽然技术成熟、标准明确,但在实际应用中普遍存在检测效率偏低、测点代表性受人为因素影响大、检测结果反馈滞后等突出问题,难以实现对大范围填筑施工面的快速、全面、实时

质量评价。本研究旨在紧密围绕坝体填筑压实度这一核心质量指标,深入探讨其现场检测技术的优化方向与关键集成路径,并系统研究从过程控制到结果评估的精度保障机制,为我国水库工程高质量建设提供坚实的技术支撑与方法论参考。

### 1 压实度检测技术现状与面临挑战分析

当前,水库工程坝体填筑压实度的现场检测主要依赖于基于取样的直接法(破坏性检测)和基于物理场响应的间接法(无损/快速检测)两大类。直接法以环刀法和灌砂法为典型代表,其基本原理是通过现场获取特定体积的压实填料试样,测定其湿密度与含水率,进而通过与室内标准击实试验获得的最大干

密度对比计算压实度。该方法结果直观、理论清晰,被各类规范列为基准方法。然而,其局限性亦十分显著:检测过程耗时费力,从选点、取样、封装、运输到室内试验,周期较长,无法及时指导下层填筑施工;检测结果为离散点信息,受测点位置选择的随机性与操作人员技术水平影响大,难以全面、连续反映整个碾压作业面的压实质量均匀性;取样过程对已碾压完成的坝面造成局部破坏,需进行修补,影响整体施工连续性。间接法则主要包括核子密度湿度仪法、压实计法(基于振动谐波分析)以及近年来兴起的连续压实控制技术、探地雷达技术等。这类方法通常具有快速、无损、可连续测量的优势<sup>[1]</sup>。例如,核子密度仪能在短时间内获得测点的密度与含水率数据,但存在放射性安全管理要求严格、测量深度有限、对均质材料效果较好但对级配复杂材料适用性受限等问题;连续压实控制技术通过监测振动压路机的轮体响应来反演填筑体刚度,可实现压实质量的面状连续评估,但其标定与相关性验证高度依赖于本地化模型与基准试验,普适性模型的建立尚在探索中。

## 2 现场检测技术优化路径研究

### 2.1 新型无损与快速检测技术的引入与适配性研究

积极引入并评估适用于坝体填筑材料特点的新型无损与快速检测技术是优化的首要路径。例如,基于电磁波传播特性的时域反射技术与介电常数传感器,能够快速测定土体的体积含水率与干密度,其对粘土质填料表现出较好潜力,但需针对粗粒土(如堆石料、砂砾料)的颗粒尺寸效应进行传感器设计与算法修正。三维激光扫描技术可通过监测碾压前后坝体表面的三维形变,间接评估压密沉降量,进而关联压实度变化,适用于表面平整度监测与体积变化估算,但需解决数据实时处理与压实度量反演的模型问题。高光谱遥感技术则探索利用填筑材料表面光谱特征与其物理力学性质(如密度、含水率)之间的相关性进行大范围面状快速筛查,该技术的现场实用化需克服大气、湿度及表面粗糙度等环境干扰<sup>[2]</sup>。

### 2.2 多源检测技术融合与信息集成方法

鉴于单一检测技术均存在局限性,发展多源检测技术融合与信息集成方法是提升检测系统综合性能的必然趋势。该路径旨在构建一个“点-线-面”相结合、直接与间接相印证的多层次检测体系。具体而言,可将高精度但离散的环刀法/灌砂法作为基准“点”标定;将快速但有一定局限性的核子密度仪、TDR等作为加密“点”或短“线”测量工具;将能够连续面状监测的连续压实控制技术、高频率的探地雷达剖面扫描作为“面”或“线”的宏观监控手段。优化水库工程坝体填筑压实度检测的关键在于研发有效的信息融合算法与集成平台。利用地理信息系统框架,将不同来源、不同尺度、不同精度的压实度相关数据(空间坐标、密度值、含水率、压实计值、碾压遍数、GPS轨迹等)进行时空配准与一体化管理。通过数据同化技术、机器学习算法建立多源特征参数与基准压实度之间的非线性映射模型,实现利用快速、连续的间接测量数据高精度地预测和生成整个作业面的压实度空间分布云图。

### 2.3 检测流程智能化与自动化升级

优化水库工程坝体填筑压实度现场检测的组织与执行流程,通过智能化与自动化手段减少人为干预,是保障检测精度与效率的基础环节。这包括研发自动定位与智能布点系统,根据碾压轨迹、填筑单元几何形状及历史检测数据,利用空间统计学方法(如克里金插值)优化确定最具代表性的下一轮检测点位,避免人为布点的随意性。开发集自动取样、现场即时密度与含水率测定(如采用微型贯入仪、微波含水率仪等)、数据无线传输于一体的移动智能检测终端或机器人,替代传统人工取样、送样、室内试验的分离流程,实现“现场取样-即时分析-数据上传”的一体化,极大缩短检测周期。同时,建立基于物联网的检测数据实时采集与传输网络,确保检测数据从现场到项目管理平台的即时、准确、不可篡改的流转,为动态质量控制和决策提供实时数据支撑。流程的智能化升级将检测人员从繁重的体力劳动和复杂的操作判断中解放出来,更多地专注于数据分析和质量判断,同时也显著降低了因人为操作失误引入的系统误差<sup>[3]</sup>。

## 3 检测精度影响因素分析与控制体系构建

### 3.1 全流程误差源识别与量化分析

水库工程坝体填筑压实度检测值的误差来源于从标准击实试验到现场检测的完整链条。首先,室内标准击实试验本身存在误差,包括击实功的标准性、土样代表性的保持、试验操作的规范性等,这决定了压实度计算分母(最大干密度)的精度。其次,现场检测误差是主要来源:对于直接法,包括取样点表层浮土清理不彻底造成的密度偏高、取样过程中对试样的扰动、样品运输与保存过程中的水分蒸发或增加、室内称重与含水率测定误差等;对于间接法(如核子密度仪),误差则源于仪器的标定状态、测量深度与填料层厚度的匹配性、材料化学成分(特别是氯含量)对中子散射的影响、仪器底面与测试面的耦合紧密程度等。此外,环境因素如温度、湿度变化对某些电子仪器读数的影响亦不可忽视。精度控制的首要任务是对这些已知的误差源进行系统地识别、分类(系统误差、随机误差),并通过实验设计与统计分析,尽可能量化其影响大小与变化规律,为制定针对性的控制措施提供依据。

### 3.2 标准化作业程序与仪器状态管控

建立并严格执行极端细化的标准化作业程序是控制操作误差的根本。针对水库工程坝体填筑压实度的每一种检测方法(尤其是作为基准的直接法),编制图文并茂、步骤清晰的现场作业指导书,对每一个操作环节(如测点准备、取样工具使用、试样封装、数据记录格式等)做出强制性规定。定期对检测人员进行标准化操作培训与考核认证,确保其技能水平满足要求。同时,实施严格的仪器设备全生命周期状态管理。所有检测仪器,包括环刀、天平、烘箱、核子密度仪、TDR等,必须按照法定计量检定周期进行检定或校准,并建立详细的设备档案。推行仪器使用前、后的例行检查与比对制度,例如每日工作前使用标准块对核子密度仪进行快速校验,定期使用已知密度的标准材料进行现场比对试验。对连续压实控制系统的振动传感器、GPS天线等关

键部件,亦需定期标定与维护<sup>[4]</sup>。通过SOP与严格的仪器管控,最大程度地压缩由于人为操作不规范和仪器状态失准带来的精度损失。

### 3.3 基于数理统计的动态精度评估与校正机制

水库工程坝体填筑压实度检测精度控制不应是静态的,而应是一个基于数据动态反馈的持续改进过程。需建立基于数理统计的精度评估与校正机制。在施工过程中,系统性地收集不同填料、不同碾压工艺、不同检测方法下的成对对比数据(如同一测点用灌砂法与核子密度仪法的结果)。运用统计过程控制方法,如绘制均值-极差控制图,监控检测过程的稳定性。通过相关性分析、回归分析、假设检验等统计方法,持续验证和修正间接法与直接法之间的相关关系模型。当发现某一批次检测数据的离散性异常增大,或某种间接方法的预测偏差超出允许范围时,该系统能自动预警,触发原因排查流程(如检查仪器、复核操作、增加基准检测频率等),并及时对预测模型进行校正。

## 4 集成应用与未来展望

### 4.1 智能化压实质量实时监控平台构建

集成应用的核心载体是构建一个“端-边-云”协同的智能化压实质量实时监控平台。“端”即部署在施工现场的各种智能感知终端,包括智能压实控制系统(安装在压路机上)、自动检测机器人、移动检测终端、环境传感器等。“边”指在工地现场部署的边缘计算网关,负责对海量、高频的原始感知数据进行初步清洗、融合和本地模型计算,实现压实状态的实时分析与异常初步判断。“云”即远程中央管理云平台,接收来自各边缘节点的处理结果与关键数据,利用更强大的计算资源运行全局优化算法和高级分析模型。该平台能够实时可视化展示整个填筑工作面的压实度分布、碾压遍数、压实轨迹、含水率状况等,自动生成检测报告与质量评价图表,当监测值低于设计阈值或出现不均匀区域时,自动向施工操作员和监理工程师发送预警信息,指导其进行补压或重点检测,真正实现水库工程坝体填筑施工过程的“测控一体化”与质量管控的“动态化、精细化”。

### 4.2 精度控制体系的标准化与制度化

为使研究成果具有广泛的推广价值,必须推动将经过实践验证的优化技术路径与精度控制要求,转化为行业或企业的技术标准、工法或管理制度。这包括修订和完善现行的水利水电工程施工质量检验与评定规程中关于压实度检测的条款,增加对新型无损检测方法应用条件与结果确认的规定。制定多源检测数据融合应用的指南性文件。在项目管理制度中,明确要求建立并运行覆盖压实度检测全过程的质量保证体系,将仪器设备管理、人员资质、标准化作业、数据管理、不确定度评估等精

度控制环节作为强制性审查内容。通过标准化与制度化,将先进的检测理念与控制方法固化为行业通用实践,从根本上提升整个行业的质量检测水平<sup>[5]</sup>。

### 4.3 技术发展趋势与前沿探索展望

展望未来,坝体填筑压实度检测技术将朝着更加智能化、集成化、无人化的方向深度演进。随着物联网、5G通信、人工智能和机器人技术的进一步发展,无人驾驶压路机与自动检测机器人协同作业将成为可能,实现从碾压到检测的全流程自动化闭环控制。基于数字孪生技术,在虚拟空间中构建与物理坝体完全同步的数字化模型,通过实时接入的检测与监控数据,动态仿真和预测坝体压实状态的发展演变,实现更深层次的“感知-分析-决策-控制”智能化。在检测机理层面,多物理场耦合传感技术(如声-电-热多参数融合)有望提供更丰富的材料内部状态信息。机器学习算法,特别是深度学习在图像识别(如通过填料表面纹理评估压实状态)、多源异构数据融合与异常诊断方面的应用将更加成熟。

## 5 结语

水库工程坝体填筑压实度的现场检测技术与精度控制研究,是一项关乎工程本质安全的基础性、关键性技术课题。面对传统方法在效率、代表性与实时性方面的不足,本研究系统探讨了通过引入新型无损快速技术、推动多源信息融合、实现检测流程智能化来优化现有技术体系的可行路径。未来,随着智能传感、数字孪生、人工智能等前沿技术的不断渗透,坝体压实质量检测必将向着更高层次的自动化、智能化与预见性方向发展,为我国乃至全球的水利工程建设质量与安全提供更为坚实和先进的技术保障。

### [参考文献]

- [1]陈时超.路俄水库砾石土心墙风化石料坝填筑强度和稳定性分析[J].海河水利,2025,(09):84-89.
- [2]刘进友.小型水库施工中的土石坝填筑施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(25):145-147.
- [3]葛道明.水利工程中面板堆石坝坝体填筑施工技术分析[J].科学技术创新,2025,(17):125-128.
- [4]刘翠.水库坝体填筑施工技术及其质量控制要点分析[J].中国水运,2024,24(18):96-98.
- [5]王涛,任国榕,张新标,等.大寨水库坝体填筑排水带料碾压试验成果分析[J].四川水利,2024,45(02):103-106.

### 作者简介:

田丰(1987-),男,汉族,甘肃省民勤县人,大学本科,水利工程师,研究方向:施工工地现场试验检测(岩土、混凝土)。