

基于振动压实理论的堆石体压实参数智能优化与实时调控

惠红强

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]堆石体填筑质量直接影响到大坝安全,传统的碾压方法具有参数单一、压实效果不稳定等缺点。本论文在西南某一特大型水电站堆石坝为工程背景下,依据振动压实原理,对堆石体压实参数智能化优选以及动态控制技术进行了系统的分析探讨。提出了一个包含压实参数体系、智能优化模型及实时检测控制系统在内的综合性技术方案。发现利用此方法可以明显提高填筑质量及施工速度,可以作为高填高堆石坝智能化建设的保障。

[关键词]振动压实;堆石坝;压实参数;智能优化;实时调控

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19613

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

Intelligent Optimization and Real-time Control of Compaction Parameters for Rockfill Based on Vibration Compaction Theory

HUI Hongqiang

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The quality of rock filling directly affects the safety of dams, and traditional compaction methods have disadvantages such as single parameters and unstable compaction effects. This paper systematically analyzes and discusses the intelligent optimization of compaction parameters and dynamic control technology for a large hydroelectric dam in Southwest China, based on the principle of vibration compaction. A comprehensive technical solution was proposed, which includes a compaction parameter system, an intelligent optimization model, and a real-time detection and control system. It has been found that using this method can significantly improve the quality of filling and construction speed, and can serve as a technical guarantee for the intelligent construction of high fill and high rock fill dams.

Keywords: vibration compaction; rock-fill dam; compaction parameters; intelligent optimization; real time control

引言

堆石坝是水力发电工程的主要类型之一,在西南某大型水电站堆石坝中,最大坝高达到了 300m 左右,整个工程需要填筑量超过 4300 万 m^3 ,施工区域均海拔在 3000m 以上,大坝填筑体量巨大、工期长、工序复杂,使得压实的质量把控困难重重。压实质量是土石坝工程的核心指标,决定着水库工程的安全水平。目前土石坝已经从一般坝过渡到 300m 以上的高坝了,这就需要压实的质量要更为出色。如若压实不合格会引发堆石坝强度承载下降以及更严重的下沉、渗漏、体积改变等现象。传统碾压方法为人工用振平车进行碾压作业,凭目测掌握路线,靠个人记忆碾压遍数,靠人的主观意识控制压实速度,影响因素众多,存在漏压、欠压率高,压实合格率低、控制效果不好、质量难以保证、工作效率低等一系列问题。传统堆石坝碾压施工仍依靠人力经验,对于碾压的速度及

振动频率等碾压参数设置大多采用固定的数值,忽略了对填筑材料特性和机械性能变化之间的协调调整。本文以西南某大型水电站堆石坝为项目背景,从振动压实理论出发,全面探讨堆石体压实参数智能化优化与实时调节的新技术。

1 振动压实理论与参数影响机制分析

振动碾压是通过振动碾激振装置产生的周期性的激振力引起堆石料颗粒的被迫振动,在此振动过程中堆石料内颗粒重新组合、彼此咬合,使堆石料变得更为紧密的过程。振动碾压的效果受振动参数与堆石料的动力特性的契合度影响较大。堆石坝碾压中使用的最常见的压实设备就是振动碾,即振动加碾压两种方法并用的压实设备,该种设备能够对堆石料进行有效的挤压,并增加其被压实物的硬度。从动力响应来看,就是振动碾对堆石料的影响可以看成一种多自由度的动力耦合系统。经研究发现,随着碾

压遍数的增多,压实层的密度升高,堆石料的弹性模量随之增大,振动冲击力也越来越大。压实能量影响效果随着深度增大其衰减非常快,压实能量是以竖向为主传导。对于碾压试验深度内堆石体实际测量出的附加最大峰值应力值介于 0.3~1.4MPa 之间,而动应力的最大值为 0.22~0.82MPa 之间,在层次深的方向上呈指数型递减趋势。影响堆石体压实质量的主要因素有振动因素:振动频率、振幅、激振力;运动因素:行驶速度;工艺因素:碾压遍数与铺层厚度;材料特性:级配、含水率、块石强度等等。振动频率要尽可能地靠近堆石料的固有频率才能达到最佳的共振碾压的效果;振幅要依照石料粒径尺寸以及碾压的层厚来确定;而行驶的速度就要找到压实效果与压实质量之间的平衡了。

2 堆石体压实参数智能优化模型构建

2.1 压实参数体系构建

建立合理的压实工艺参数体系是进行智能优化的前提。压实工艺参数体系包括振实参数、运动参数、工艺参数以及材料性质参数四部分,每种参数的含义以及典型的数值范围还有它们之间的联系如表 1 所示。

2.2 数据采集与特征变量选取

数据采集是参数优化的基础工作。系统利用多种传感器收集整平过程中重要的数据信息:加速度传感器装设在振动碾碾轮中央区域,每秒钟可以以 500 次的采样频率来记录垂直方向上的振动力度,由此我们就可以获得相应的压实指标(如 CMV 值、CCV 值等等)。GNSS 接收器每秒钟采集碾压机械位置坐标以及运行速度等参数。基于碾压轮振动加速度信号进行计算得出的 CMV 值与 CCV 值相对比较容易得到并且方便快捷,因此目前已经成为对实时整平作业的质量控制方式^[1]。CMV 与堆石料相对密度间有着较强的联系,可以用来作为监测堆石料压实程度的

依据,碾压机振动频率以及车速对于 CMV 的影响较大,行驶方向对 CMV 的影响较小。选择特征变量时以相关性高、易测量、反应力大为标准,选择振动加速度幅值、振动频率响应、行驶速度、碾压遍数、铺层厚度等作为模型输入特征,选取压实度作为模型输出目标。

2.3 智能优化方法

智能优化手段就是为了得到最佳的压实工艺参数组合。系统采取多目标求解方式,用压实效果最好与耗能最少为目标函数,用振动频率、行驶速度、铺筑厚度等作为变量,形成优化模型。调整碾压参数来调节 CMV 是可以被接受的。优化分为离线式和在线式两种模式,离线的时候利用以往的施工经验作为基础进行参数的确定,然后在施工过程中根据实际检测的数据来进行不断地更新调整。针对高心墙堆石坝坝面崎岖不平而且差异性很大的问题,容易出现跟踪误差难以立即纠正情况的发生,所以系统使用智能运算的方法来实时地对控制参数做出调整。

2.4 压实参数优化模型建立

以上数据分析以及优化策略为基础,构建压实参数智能化优化模型;模型运用机器学习结构,其输入层接收特征因素(振动频率、振幅、行驶速度、铺层厚度、碾压遍数、料源参数等),通过多隐层网络的学习对特征进行抽取并对非线性变换,最后输出层给出压实质量估计值。在土石坝压实质量检测缺乏时效性、准确性较差、抗过拟合性能差、缺乏足够训练样本、受到外界干扰较大的情况下,提出了基于二进制多群体遗传算法的 BP 神经网络压实质量评估模型,克服了现场堆石料自动化碾压评价中的小样本学习问题。建立模型时使用基于多个变量相互关联的方法,把振动响应变量同碾压动作变量一起作为输入来提高模型预测准确度及泛化能力。

表 1 堆石体压实参数体系表

参数类别	参数名称	符号	单位	典型取值范围	主要影响因素
振动参数	振动频率	f	Hz	25~35	激振器转速、堆石料固有频率
振动参数	振幅	A	mm	1.5~2.5	偏心块力矩、压实层厚度
振动参数	激振力	F0	kN	200~400	振动轮质量、偏心距
运动参数	行驶速度	v	m/s	2~4	操作控制、路面平整度
运动参数	碾压轮迹搭接	b	cm	10~20	设备宽度、路径规划
工艺参数	铺层厚度	h	cm	60~100	填料粒径、压实能量
工艺参数	碾压遍数	n	次	6~10	压实标准、填料性质
材料参数	填料级配	P	—	连续级配	料源特性、破碎工艺
材料参数	堆石料密度	ρ	g/cm^3	1.8~2.2	岩性、含水率

2.5 模型精度验证与敏感性分析

模型精度校验依据现场碾压试验资料,在西南某大型水电站堆石坝工区选取代表性断面进行试验,设计不同的振动频率和行驶速度及铺层厚度等组合方案,将试坑取样实测的干密度值作为真实值与模型计算得到的压实质量偏差进行比较。结果发现,该模型所求得的压实质量预测平均相对误差小于5%,并且碾压次数增大使压实层密度上升,堆石料模量增大,振动峰值也相应增大^[2],敏感性分析可见,振动频率以及碾压遍数对于压实质量影响最大,行驶速度以及铺层厚度其后。这将作为接下来调节方案中优先级别确定的一个参考标准。

3 压实过程实时监测与调控系统设计

3.1 压实状态实时监测技术

压实状况实时监控是智能化的关键,设备使用基于振动轮加速度反应的压实质量在线监测技术,在振动轮上设置精密加速度传感器,并实时收集振动轮振动时产生的振动信号。压实质量的好坏是影响土石坝施工质量最主要的因素之一,压实质量在线监测技术实时了解当前压实的质量情况;而压实过程中的振动频率调整技术能进一步提升压实质量以及压实速率。信号预处理单元完成原始加速度数据的滤波、降噪、特征提取并得到CMV压实计值以及CCV连续压实值等相关数值。CMV大小与堆石料动态弹性模量呈正相关性,能很好地体现压实层刚度的变化情况。针对多台联合作业情况,在此基础上构建全仓面压实质量综合评估模型,从而得到全仓面的整体压实质量。

3.2 传感器布设与数据采集系统

传感器布置以及数据采集系统为感知层的重要组成部分,体系设计了分布式的采集方式,在每一台碾压机上设置采集装置,包含了加速度计、全向卫星定位单元、陀螺仪等以及通信单元等,在传感器布置方面:加速度计放置在振动轮的重心处,做到与之刚性连接;全向卫星定位天线安装在驾驶舱顶中部位置,可以保证接收到良好的卫星信号;陀螺仪设置在车辆质心中部,以10Hz采样率同时采集位置、速度、振动加速度等并进行无线发送到云端平台上。系统集成北斗高精度定位、传感器以及智能化算法,达到对碾压品质全生命周期数字化管理及追踪的目的。基于以北斗导航系统为主导的高精度空间定位技术和传感器技术,通过在设备端进行改造的方式,使碾压机能远程操控运行,依托5G技术可实时传输现场施工状况以及远程操控指标情况信息。

3.3 实时数据处理与反馈机制

实时数据分析及反馈机制是整个系统的决策中枢,边

缘计算单元先对接收到的数据进行初步处理如去除噪声点、数据去噪、特征选取等步骤,在此基础上将经初步分析的数据实时发送到云端平台,云端平台利用已经过训练的学习机压实质量预测模型,迅速得出当前碾压路段的压实情况,能够实现实时报警并在仪表盘上直观地显示出碾压路线以及碾压遍数、压实等级等重要指标,报警级别设置成三个层次分别为:第一层是对驾驶员进行即时提醒,在仪表盘处显示出轨迹线、碾压次数、压实状态色块图;第二级警报是在车辆行驶速度过大或者压实程度不足时做出警示;第三级是自动干预,在无人驾驶状态下自动修正运行速度及振动幅度^[3]。为了研究在高心墙堆石坝动态扰动情况下无人碾压轨迹跟踪的问题,应用蝴蝶优化算法实时调整PID控制参数,给出BOA-PID无人驾驶碾压轨迹跟踪策略,在复杂的高心墙堆石坝环境下成功使无人碾压实施精确轨迹跟踪控制,堆石料以及心墙料碾压的平均轨迹偏差都小于5cm。

3.4 压实参数动态调控策略

压实过程参数动态调节方法依据检测到的信息对后继的工作参数做出相应的改变。调节方法是在模型预测控制系统下设计了状态观测器、预测器以及控制器三个主要部分;状态观测器用于利用振动信息估算当前的压实程度;预测器则用来推算几遍之后的压实程度变化情况;控制器则求取最佳的控制参数序列。在进行碾压时,设备会根据所计算出的压实度变化速率来灵活改变行驶速度及振动频率,在压实度上升比较快的情况下可以加大行驶速度从而加快压实施工进度,在压实度上升放缓的时候就要稳定地保持现有的参数或者增加碾压遍次数。对多个机器共同工作的场合还需要解决机群之间的振动互相影响的问题,经过相位同步控制以及路径规划达到共同工作的均衡压实的目的。

3.5 系统集成与实现路径

系统集成是技术落地的重要步骤。系统运用了“端-边-云”的三层结构,传感器层对数据进行采集与边缘计算,传输层利用工业物联网网关将多个传感单元产生的数据集中起来,云端层负责数据保存以及对模型进行运算并作出显示。实现路径包括三个步骤:第一步是传感器部署、数据采集系统及通信网络搭建;第二步是对各类参数优化模型的训练及上线应用;最后一步是对实时调优方案的研发并调试好,形成闭合回路。自行研制集多种模式智能监控、智能调度决策、智能控制于一体的无人驾驶全自集成智能化无人碾压装置,在两河口水电站堆石区、过渡区及砾石土心墙区等地形复杂工况下进行试验性推广应用,并

在一次碾压合格率方面比传统的人工碾压方式提高了2.42%，效率提升了15.20%。

4 经营分析与经济效益评价

压实工艺自学习及自动调节技术应用产生巨大经济价值，在工程进度上，自学习降低平均碾压遍数、单层施工时长，加快工程进度；用人工智能、无人驾驶技术对传统土石坝工程进行加持赋能，解决了寒冷恶劣环境下精准定位难、智能感知难、自动控制难、精准跟随难的问题，实现了大型智能无人驾驶压路机集群化常态化运行，在国内国外的大型水利工程领域首次达到大规模智能化无人化操作，保障了施工质量，提升了施工进度，节约了施工投入，彻底改变了传统的土石坝工程施工作业与生产方式^[4]。在质量管理中，智能碾压系统大幅提升了碾压合格率、碾压均匀性和减少返工带来的经济损失。在节约能源与减排领域上无人驾驶集群智能碾压机械同时施工，节能减排效果明显，该项目已经成功地应用到了多个大型工程项目当中，取得很好的经济效益和社会效益，真正意义上实现了大型土石方工程精准化施工的重大突破，总体估算实施此技术创新可大大节约工程成本费用，取得可观的经济效益和社会效益。

5 结语

本文以西南某大型水电站堆石坝为工程实例，在振动压实理论的基础上全面探究堆石体压实参数智能化调整以及在线控制的相关技术。建立了完整的压实参数系统，

并构建起智能化的优化算法以及实时监控调节方案，从而形成了一个包括参数优化、过程检测、实时调控在内的完整体系。实验结果及实际应用证明该技术可以很好地解决传统碾压施工存在的人工凭经验、参数不变、质量问题等一系列问题，使工程项目的压实效果更好、加快施工进度节省资源开支，开创性地研发出大规模无人驾驶智能碾压机械队合作施工作业模式，是大坝工程建设从信息化到智能化的重大突破。将来还要加强对AI技术应用于压实质量在线监测的拓展研究，促进堆石坝筑坝工程智能化水平再上新台阶。

[参考文献]

- [1]张楠.路基压实度智能连续检测方法[J].交通世界,2025(22):60-62.
- [2]李佳文.智能压实中土体含水率的影响及振动轮动力响应研究[D].河北:石家庄铁道大学,2025.
- [3]王炎.压路机—路基耦合非线性振动分析及压实参数调节策略研究[D].河北:石家庄铁道大学,2025.
- [4]齐群.振动荷载下砂砾混合物的宏观动力响应与压实机理研究[D].湖南:中南大学,2024.

作者简介：惠红强（1982—），男，毕业于武汉科技大学/浙江大学，工程造价管理/工商企业管理专业，就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，公司二级专家，高级经济师。