

智能碾压系统在大坝填筑施工路径规划与协同控制中的应用

冯 斤

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]大坝填筑施工具有填筑量大、质量要求高、施工环境复杂等特点,碾压工序直接决定坝体的密实度与均匀性。传统人工驾驶碾压方式存在漏压、欠压率高、控制精度差等突出问题。文中系统阐述了智能碾压协同控制的关键技术,包括多机协同作业机制、碾压遍数与速度智能控制、重叠率自适应优化以及施工资源动态调度,并结合某抽水蓄能电站工程应用,详细介绍了系统部署、路径规划、过程监测及数据管理的实践成效。工程应用表明,智能碾压系统有力保障了坝体填筑质量。

[关键词]智能碾压;大坝填筑;路径规划;多机协同;质量控制

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19877

中图分类号: TV1

文献标识码: A

Application of Intelligent Rolling System in Path Planning and Collaborative Control of Dam Filling Construction

FENG Jin

PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: The construction of dam filling has the characteristics of large filling volume, high quality requirements, and complex construction environment. The compaction process directly determines the compactness and uniformity of the dam body. The traditional manual driving compaction method has prominent problems such as leakage, high under pressure rate, and poor control accuracy. The article systematically elaborates on the key technologies of intelligent rolling collaborative control, including multi machine collaborative operation mechanism, intelligent control of rolling passes and speed, adaptive optimization of overlap rate, and dynamic scheduling of construction resources. Combined with the application of a pumped storage power station project, it details the practical effects of system deployment, path planning, process monitoring, and data management. Engineering applications have shown that the intelligent compaction system effectively ensures the quality of dam filling.

Keywords: intelligent crushing; dam filling; path planning; multi machine collaboration; quality control

引言

随着抽水蓄能电站的建设规模不断扩大,大坝填筑质量的好坏直接影响到工程的安全性和使用寿命。传统的碾压施工依靠人工驾驶操作,存在视觉判断轨迹偏差、人工记忆遍数误差、人为控制速度不均等问题,干扰因素多,漏压、欠压率高,碾压合格率难以保证。近几年来,北斗高精度定位、物联网传感、自动控制等技术飞速发展,给智能碾压系统的发展打下了技术基础。智能碾压技术由原来的“事后抽检”变为现在的“全过程、全要素、实时化”监控,正在改变着大坝填筑施工管理模式。本文主要对智能碾压系统协同控制关键技术及工程应用进行研究,以供同类工程使用。

1 大坝填筑施工特点及质量控制要求

大坝填筑施工有明显的工程特点。第一,填筑工程量

大、施工周期长,上库主坝填筑量一般为百万立方米以上;第二,坝体分层填筑、逐层压实,每一层填筑厚度、压实遍数、行驶速度等参数都有严格的规范要求;第三,施工场地空间小、地形复杂,多台碾压设备同时作业时很容易互相干扰;第四,坝体不同分区(主堆石区、过渡区、垫层区)填料类型、压实标准各不相同,对碾压参数的精细控制要求更高。

混凝土面板堆石坝的安全和耐久性不是靠表面的混凝土面板来保证的,而是靠内部堆石体的密实度和均匀性来保证的。若堆石体质量不合格,在高压水压力的作用下,坝体容易出现不均匀沉降,造成面板开裂,渗漏严重,直接危及大坝的安全。因此碾压工序是大坝质量的“生命线”。以某混凝土面板堆石坝为例,在施工中要求碾压遍数为8遍、碾压速度不大于每小时3km、碾压振幅不大于强震低

频。该技术可以实现碾压参数的毫米级、秒级控制，碾压速度误差控制在 $\pm 0.2\text{km/h}$ 以内，碾压遍数误差不超过1遍，压实度检测精度达到 $\pm 0.5\%$ ，可以满足高坝建设的严格要求。因此传统的“人工操作+事后抽检”管理模式已经不能适应现代大坝施工质量的要求，必须采用智能化的控制手段。

2 智能碾压协同控制关键技术

2.1 多机协同作业机制与编队控制

多台碾压设备在同一工作面同时作业的时候，轨迹规划以及协同控制就成了保证高效、安全施工的重要因素。多机协同作业机制的关键之处在于创建起一个“感知-规划-控制”三者并重的控制系统。感知层依靠北斗高精度定位、毫米波雷达以及机器视觉这些多种模态的感知方式，及时得到各个碾压设备的自身空间位置及同周围障碍物

间的相对情况。规划层按照施工区域划分、碾压任务分派以及设备运转状况，自动给每一台设备制订最佳作业路线并产生协同调度方案。当多个压路机在同一个区域内同时进行压实时，各个压路机的轨迹规划以及协同控制就成为保证高效、安全压实的重要因素。就编队控制策略而言，目前的研究成果给出了“队列式”“交错式”“同进同退”等不同的协同控制模式。同进同退策略依靠改变多台碾压设备的启停时间来达到减少机群内碰撞的目的。调度系统依靠高精度地图自动生成电子围栏，超出电子围栏的范围就会发出停车报警信号，从而达成设备间的安全协同调度。多机协同作业可以依据施工进度对各台设备的作业区域、任务分工进行动态调整，当某个区域的碾压任务完成之后，系统就会自动把设备重新分配到没有达到要求的地方，从而防止出现资源浪费的情况。图1为该功能示意图。

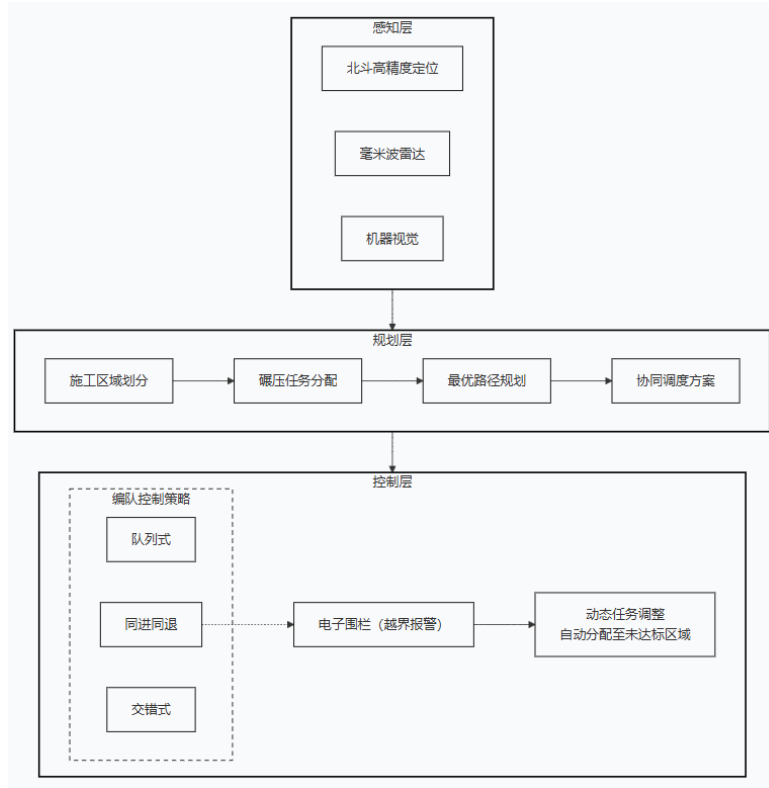


图1 多机协同感知-规划-控制架构与编队策略

2.2 碾压遍数与行驶速度智能控制

碾压遍数、行驶速度属于影响大坝压实质量的直接参数。该数字化智慧工地平台用厘米级的高精度定位设备可以实时远程监控压路机的轨迹、振动频率、碾压速度等参数，自动计算碾压遍数，生成碾压次数热力图，根据热力图计算各碾压遍数占比，施工过程中对漏碾、过碾等情况进行实时处理。系统根据碾压轨迹数据，用压轮宽度作为

轨迹宽度，通过分析同一个点在不同时刻被碾压的次数来统计每个网格点的碾压遍数，用不同的颜色标识出遍数达标、遍数不足和超压^[1]。行驶速度控制上，利用高精度北斗定位接收机自动计算、统计振动碾的行驶速度，在后台设置碾压平均速度配色方案，当振动碾行驶速度在 3km/h 每小时左右时，系统会用绿色标识，一旦行驶速度超过 3km/h ，系统就会立即发出报警信号^[2]。驾驶舱内平板终

端实时显示当前速度和偏差,系统超速时会发出预警短信给管理人员,从而达到过程主动干预的目的。表 1 为碾压速度、遍数分级控制参数。

表 1 碾压速度与遍数分级控制参数

分区类型	设计遍数	速度下限 (km/h)	速度上限 (km/h)	速度合格标识	遍数达标标识
主堆石区	8 遍	2.0	3.0	绿色	8 遍绿色
过渡区	6 遍	2.0	3.0	绿色	6 遍绿色
垫层区	4 遍	2.0	3.0	绿色	4 遍绿色
异常报警	—	<1.8 或>3.2	—	红色	<设计遍数

2.3 碾压重叠率自适应优化方法

重叠率是反映碾压作业均匀性的指标,重叠率过高会造成重复碾压区域超压、施工效率降低,重叠率过低会造成压实盲区、欠压隐患。碾压重叠率自适应优化法把高精度定位数据和压实质量实时反馈信息结合起来,动态调节碾压路径行进偏移量,保证相邻碾压带搭接宽度处在适宜范围之内。智能碾压系统可以对碾压参数进行实时的预警,即碾压遍数不够、速度过高、轨迹重叠率低等,从而产生碾压参数偏差分析报告,管理人员根据报告来调整碾压设备的操作参数或者作业路线,以防止出现压实盲区、过压或者欠压的情况。系统按碾压设备钢轮宽度计算最优行进偏移量,使相邻碾压带之间的重叠宽度一致。作业时系统实时检测实际重叠率同设定的阈值对比,出现某处重叠率超出限定范围的时候,立刻发出提醒信息给操作人员,提示其重新规划行进路线或者由系统自动修正。重叠率自适应优化还可以和碾压遍数控制联动起来,遍数达标区段自动调节行进路线防止超压,遍数不足区段增加作业轨迹保证全覆盖。

2.4 施工资源动态协同调度技术

施工资源动态协同调度技术就是对碾压设备群、运输车辆、辅助机械进行全局最优配置,解决传统施工中设备利用率低、任务分配滞后等问题。无人碾压系统将控制技术、物联网等技术融合起来,对传统的人工驾驶碾压实施智能化、自动化升级,实现碾压机群无人驾驶协同作业。本系统由感知、规划决策、轨迹控制三个部分组成,定时对碾压机械空间位置、振动力等技术参数进行检测记录,

并且可以对填筑料摊铺厚度、碾压机械运行轨迹等进行实时动态监控。调度系统实时获取各台碾压设备的运行情况、剩余的任务数量、故障情况等,按照施工进度计划来调配设备。当某台设备出现故障停机或者某个区域的碾压进度慢下来的时候,系统会自动调配其他相邻区域的空闲设备来帮忙^[3]。调度算法还要考虑能耗优化的目标,通过减少设备空驶、等待的时间来降低燃油消耗,根据工程实践可知机械调度优化可以将燃油消耗降低约 15%。动态协同调度可以按照坝料供应情况灵活改变碾压作业速度,防止因为坝料运输不及时造成设备窝工,从而实现坝料运输、摊铺、碾压三者之间的无缝对接。

3 智能碾压系统在某抽水蓄能电站中的应用

3.1 系统部署与多机协同实施流程

某抽水蓄能电站上水库主坝为混凝土面板堆石坝,坝高 80 多米,填筑总量约 219 万 m³,位于高海拔地区,霜冻、大雾较多,施工环境复杂。项目全面采用智能碾压系统,系统包含运输车辆监控、碾压质量实时监测、施工过程管理平台等,依靠北斗系统对施工设备的状态实行全过程、可视化监控,系统可以即时发出异常警报并动态显示压实遍数、压实度等重要数据。表 2 给出系统部署的设备清单以及各个阶段的任务。

按照硬件安装、系统配置、联调测试、试运行、正式施工五个阶段的顺序推进。每台碾压设备上装有北斗定位接收机、高精度传感器和车载平板终端,用 4G/5G 网络把采集到的轨迹、速度、遍数、压实度数据实时传送到数字大坝建管平台。多机协同工作时,系统统一规定各个设备的工作区域以及路线,使电子围栏和安全调度算法来保证多机同时作业时不会出现碰撞。

3.2 填筑路径规划与速度遍数控制实践

填筑路径规划属于智能碾压系统的主要功能之一。系统依据 BIM 模型导入的三维设计数据,自动生成碾压单元,用 BIM 轻量化引擎即时生成分仓数字模型并赋予唯一的编码,该模型可以进行几何信息量测。在每一个碾压单元里,系统按照碾压设备钢轮宽度、设计重叠率要求以及区域边界形状,自动生成全覆盖的“之”字形或者回字

表 2 系统部署设备清单及实施阶段任务

阶段	主要任务	设备/平台	功能说明
硬件安装	碾压设备改装与定位设备安装	北斗定位接收机、高精度传感器	厘米级定位与参数采集
系统配置	参数设定与电子围栏部署	车载平板终端、后台管理平台	速度/遍数阈值设置
联调测试	单机调试与通信测试	4G/5G 物联网通信模块	数据传输与指令下发
试运行	碾压试验与参数验证	全系统联调	确定最佳碾压参数
正式施工	全过程智能监控	数字大坝建管平台	实时监测与动态预警

形碾压路径,保证无遗漏、无重复。速度、遍数控制由系统控制所有的碾压设备。工程主堆石区碾压遍数8遍,速度2~3km/h,系统对每台设备的运行参数实时监测,与标准值比较。当某个区域的碾压遍数不够时,在可视化界面上用色斑图的形式突出显示出来,并且会向操作人员发出补压指令;当行驶速度超过一定值的时候,驾驶舱平板

终端就会发出语音报警。通过实时动态分析能够精准找到各区域碾压是否达标,是否还有需补碾的区域,进而引导操作人员科学管控碾压质量,防止单纯依靠抽检而出现的事后控制。实践表明该系统很好地保证了坝体碾压质量,给高强度连续施工提供了可靠的支持,如图2所示。

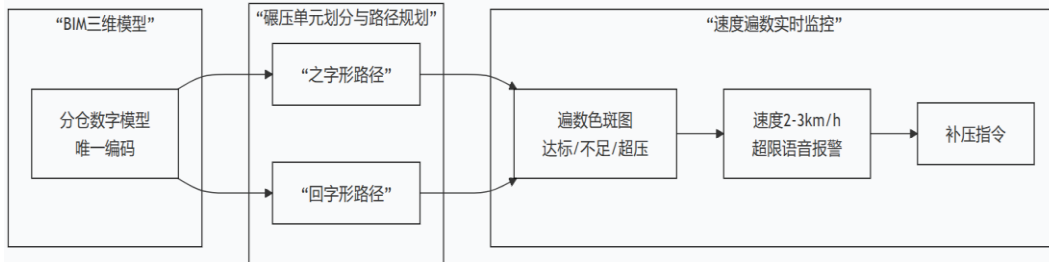


图2 填筑路径规划与速度遍数控制示意图

3.3 重叠率优化与实时监测预警应用

重叠率优化在该抽水蓄能电站工程中取得了很好的效果。系统按照各个分区的压实要求以及钢轮宽度来计算出最优的行进偏移量,使得相邻碾压带的重叠宽度保持在15~20cm这个合理的范围内。系统可以实时对比实际轨迹和规划路径,从而找到由于操作失误造成重叠率不正常的因素。当重叠率低于阈值时则改变行进路线,重叠率过高造成超压趋势时,就通过优化路径偏移量避开重复碾压。实时监测预警使用的是双预警机制,超速就会发出驾驶舱语音报警,持续超速就会向管理人员发送预警短信,从而达到过程主动干预的效果。另外系统对坝料运输车辆的行驶轨迹进行监测,防止出现违规行为,保证填料的质量。利用全时段、全方位的监控,监理人员可以随时随地对任何一点的施工进度进行查看^[4]。管理人员在智能碾压系统中打开碾压报告的时候,碾压机的工作状况一目了然,施工过程的可视化、可追溯性明显提高了质量管理的透明度和效率。

3.4 资源调度与数据管理决策支持

智能碾压系统的数据管理功能是贯穿整个施工过程的。系统实时采集碾压轨迹、速度、遍数、激振力、压实度等参数,自动生成分仓单元碾压成果报告,包括超速分析、合格遍数分析、平整度分析等内容,管理者可以在平台上一键生成统计分析报告。根据实时、准确、全面的施工数据,管理人员可以及时掌握施工进度和质量情况,从而改善资源调配,达到精益化管理的目的。资源调度时,系统会对各个碾压设备的工作状态进行全方位的监测,并根据各个碾压单元的施工进度来调节设备的分配情况。当某个区域的碾压任务快要结束的时候,系统就会把设备调到下一个要施工的区域,从而大大缩减了设备空驶以及等

待的时间。施工数据经过长时间的积累形成了大量的数据库,为后续工程建设的碾压参数优化、施工组织方案比选和成本控制等提供了可靠的决策依据。大坝填筑过程中,系统共存入数万个碾压施工记录,为工程质量的数字化追溯、智能化管理打下了良好的基础。

4 结语

智能碾压系统把北斗高精度定位、物联网传感、自动控制 and 大数据分析等先进技术有机地融合在一起,实现了大坝填筑碾压施工的数字化、智能化管理。根据多机协同作业机制、碾压遍数与速度智能控制、重叠率自适应优化、施工资源动态调度等关键技术,本文对智能碾压系统技术体系进行梳理,并通过某抽水蓄能电站工程应用检验该系统提高碾压质量、降低人为误差、提高施工效率的效果。随着人工智能、数字孪生等新技术不断融入,智能碾压系统必然要朝着更高的自主感知、智能决策、人机协同的方向发展,为水利水电工程高质量建设赋予更为有力的技术支撑。

【参考文献】

- [1]张伟,任占杰,王孝岐,等.丰宁抽水蓄能电站大坝填筑新技术应用和质量控制[J].西北水电,2021(3):71-78.
- [2]陈祖煜,赵宇飞,邹斌,等.大坝填筑碾压施工无人驾驶技术的研究与应用[J].水利水电技术,2019,50(8):1-7.
- [3]张显羽,黄文龙,邱伟,等.厦门抽水蓄能电站智能碾压监控系统研发与应用[J].新型工业化,2020,10(8):105-106.
- [4]雷雪.高面板堆石坝智能碾压技术与坝体稳定性分析[J].技术与市场,2025,32(8):95-99.

作者简介:冯斤(1991—),男,工程师,工学学士,现就职于中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,项目经理,长期从事水利水电、抽水蓄能工程数字化建设与项目设计管理工作。