

大型流域风光水互补清洁能源基地 重大技术问题研究与深地基础科学进展

雅砻江虚拟研究中心2018年度学术年会论文集

陈云华 主编



黄河水利出版社

大型流域风光水互补清洁能源基地 重大技术问题研究与深地基础科学进展

——雅砻江虚拟研究中心 2018 年度学术年会论文集

陈云华 主编

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

图书在版编目(CIP)数据

大型流域风光水互补清洁能源基地重大技术问题研究与深
地基础科学进展:雅砻江虚拟研究中心 2018 年度学术年会论文
集/陈云华主编. —郑州:黄河水利出版社, 2018. 10

ISBN 978 - 7 - 5509 - 2193 - 1

I. ①大… II. ①陈… III. ①无污染能源 - 学术会议 -
文集 IV. ①X382 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 245223 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66028025

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南瑞之光印刷股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:45

字数:1040 千字

版次:2018 年 10 月第 1 版

定价:158.00 元

印数:1—1 000

印次:2018 年 10 月第 1 次印刷



序 言

党的十九大报告提出“加快建设创新型国家。创新是引领发展的第一动力,是建设现代化经济体系的战略支撑”。近年来,雅砻江流域水电开发有限公司(简称雅砻江公司)继续加强科技创新力度,加大科研投入,围绕雅砻江流域大型风光水互补清洁能源基地重大技术问题和深地基础科学研究,积极开展产学研科技攻关和自主科技创新,促进科技成果转化和应用,多措并举,不断完善公司科技创新体系、提升科技创新能力和管理水平,取得了一系列重要的研究成果和进展,解决了一系列技术难题。

为总结近年来流域科技创新成果,展望未来研究需求与方向,雅砻江虚拟研究中心决定于2018年11月召开2018年度学术年会。本次学术年会的主题是“大型流域风光水互补清洁能源基地重大技术问题研究与深地基础科学进展”。在有关单位的专家、学者大力支持下,经过专家评审,筛选出91篇论文收录在此论文集中正式出版。论文集主要涉及以下几个方面:

(1)近年来各有关成员单位围绕雅砻江流域清洁能源开发开展的科研工作进展及研究成果。

(2)“流域智能开发和综合管理”“风光水互补清洁可再生能源开发”“水电站建设”“电站长期安全经济运行”“深地基础科学”“流域生态环境保护”等研究领域热点及最新研究进展。

(3)雅砻江流域清洁能源开发进展及科技创新情况。

(4)新科学技术问题及研究选题建议。

本次会议由雅砻江公司主办,同时得到了国家自然科学基金委员会、四川省科学技术厅以及雅砻江虚拟研究中心各成员单位、雅砻江联合基金(第二期)承担单位、雅砻江公司合作研究单位等的大力支持,在此一并表示感谢。随着雅砻江流域风光水互补清洁能源基地的建设,未来将面临一系列新的科学技术问题,涉及风光水互补清洁可再生能源开发、300 m级高土石坝建设、流域梯级电站的长期安全运行和调度优化、深地基础科学等领域,希望得到大家一如既往的关注、支持和帮助。

编 者

2018年11月于成都

目 录

流域智能开发和综合管理

高海拔地区特高土心墙堆石坝智能建设管理体系关键技术研究与实践	祁宁春(3)
雅砻江流域清洁能源开发重大科技创新及主要进展	吴世勇,杜成波,周济芳,等(16)
智能水电站的解决方案	张帅,周碧云,岳超(26)
智能水电站建设规划的思考	周律,申满斌,朱华林,等(32)
智能电厂规划与设想	李政,刘剑,刘正国(38)
水电站智能预警系统建设的探索与实践	刘正国,刘剑,李政(44)
关于智能水电站的建设构想	崔峻豪,刘娟莉(51)
流域水电开发企业应急能力建设关键问题探索	任江成,赵海峰,刁小康(56)
水电的困境与出路	姚雷,张鹏(61)
电力生产企业数字化转型升级中的几个重要研究课题	许明勇,周佳(68)
超前谋划 等待时机——对雅砻江上游水电开发的思考	潘令军(72)
基于电力体制改革背景下的雅砻江上游水电工程项目采购模式探索	马德君,吴智宇,曾景夫,等(78)

风光水互补清洁可再生能源开发

风光水多能系统短期优化运行研究	张鸿轩,胡伟,曾志(87)
风光捆绑容量配置评价指标体系研究	胡婧,李昱,丁伟,等(97)
基于云模型的风光发电功率预测不确定性分析方法	李莉,朱成涛,邹锡武,等(111)
基于 TSP - CVaR 风险规避的风光水互补运行优化调度研究	张蓓蓓,嵇灵(120)
基于多目标优化的风光水多能互补电源容量配比研究	卢迪,陈晓锋,赵岩(131)
风光水多能互补开发管理方式探讨	曹薇,周永,左幸(138)
雅砻江流域风光水互补特性及接入调度方式研究	王瑞,左幸,周永(143)
浅析光伏发电平价上网及其对雅砻江风光水互补清洁能源基地建设的影响	吴火兵,冷超勤(150)
新形势下雅砻江流域风光水互补试点项目光伏电站主要设备选型浅析	张贵龙,周洪波,陈星丞(154)
基于 BOT 方式发包的清洁能源项目风险分担浅析	汪彭生,胡志刚,邵欣,等(162)

水电站建设

粗粒土强度与变形特性的大型真三轴试验研究	程展林,潘家军,江洎洎,等(169)
----------------------------	--------------------

- 粉砂质板岩工程地质特性研究 吴章雷(180)
- 两河口水电站心墙堆石坝堆石分区及变形控制研究 姜媛媛,金伟,周正军,等(188)
- 两河口水电站采暖通风空调设计分析 兰茜(196)
- 砾石土粗粒含量对高土石坝稳定渗流的影响 常利营,叶发明,陈群(203)
- 高地应力砂板岩区大型地下厂房岩锚梁精细化开挖施工技术研究
..... 张东明,李宏璧,施召云,等(213)
- 大吨位、超长预应力锚索施工难点控制 黄辉,王晋明,黄驰,等(221)
- 两河口水电站泄洪系统进口 700 m 级特高边坡施工技术研究
..... 谭海涛,王力,杨明,等(226)
- 两河口水电站大坝心墙岸坡盖板混凝土施工技术 岳攀,张登平,王爱国,等(232)
- 柔性测斜仪在高土石坝沉降监测中的应用 方达里,刘健,谭海涛(238)
- 水工安全监测粗差定位技术的方法比较 刘健,方达里,谭海涛(243)
- 杨房沟水电站左岸坝肩边坡断层 f_{37} 变形机制及其加固设计
..... 殷亮,魏海宁,周勇,等(253)
- 杨房沟水电站地下厂房若干典型岩石力学问题与工程对策研究
..... 周勇,钟谷良,潘兵,等(264)
- 卡拉水电站地下厂房区域初始地应力场分析 吴家耀,褚卫江,徐全(276)
- 基于钢岔管水压试验中的声发射检测技术应用研究 李东风(284)
- 清水混凝土在雅砻江流域电站装修中的应用与展望 刘家艳,李俊(293)
- 大型地下洞室群开挖支护快速安全施工技术研究与实践 李俊,魏宝龙,焦凯(305)
- 钢纤维喷混凝土界面黏结强度研究 曲懋轩,者亚雷,李饶,等(316)
- 建管结合管理模式在桐子林水电站金属结构安装中的应用 陆明,杨骥(324)
- 桐子林水电站混凝土配合比设计优化 熊奔,吴乃文(329)
- 桐子林水电站工程软弱地基综合处理关键技术研究与应用 郑永胜,伍宇腾(345)
- 桐子林水电站机电设备安装工艺质量控制管理实践 李甜甜,杨骥(359)
- 桐子林水电站坝基帷幕灌浆施工效果分析 吴乃文,熊奔(363)
- 高原地区电气设备选型的探索与实践 马德君,曾景夫,吴智宇(372)
- 钢管混凝土劲性骨架施工技术研究及质量控制 范智强,刘云峰,戚翔宇(376)

电站长期安全经济运行

- 基于人工智能算法的水库调度决策系统技术框架 张迪,彭期冬,王东胜,等(385)
- 基于无人机影像的水面波动量测技术 吴修锋,阮哲伟(394)
- 滑坡堰塞形态研究 肖华波,杨静熙(401)
- 基于一体化平台的智能集控建设探讨 李文友(412)
- 雅砻江集控中心电力生产数据整合技术研究 洪林,李文友,魏鹏,等(418)
- 基于泄洪建筑物运行要求数值化的锦官电源组梯级水库防洪优化调度
..... 邵朋昊,缪益平,朱成涛,等(423)
- 雅砻江流域大坝安全监测管理对策研究 樊垚堤,李啸啸(431)

雅砻江流域化水库地震监测台网的构成与应用	柳存喜,陈锡鑫,樊垚堤(436)
高拱坝运行条件下坝肩软弱结构弱化规律研究及应用	杨宝全,郭绪元,李新,等(445)
锦屏一级拱坝蓄水初期工作性态分析	周钟,张敬,薛利军,等(455)
大型水电站厂用电系统设计思考	汪江昆,刘剑,徐晖(465)
基于实景三维模型的 1:1 000 地形图要素提取方法及应用检验	冯艺,罗浩,邵茂亮,等(470)
某国调水电站机组运行优化的策略研究	黄金山,王志,韩勇,等(478)
大泄量、窄河谷、深覆盖层闸坝设计与消能防冲运行安全研究	陆欣,刘晓宇(485)
锦屏二级水电站地下厂房设计与安全运行研究	万祥兵,陈祥荣(491)
高坝大库下游引水式电站取水防沙安全运行措施研究——以锦屏一、二级电站为例	杨立锋,王飞,徐达(496)
特大引水发电工程水力过渡过程仿真计算与运行灵活性研究	李高会,周天驰,陈祥荣(514)
锦屏二级水电站进水口运行初期泥沙冲淤分析	孙洪亮,陈祥荣(523)
多波束系统在锦屏水电工程水下检测中的应用分析	王军,徐金顺(532)
锦屏二级水库水位自动控制研究的现状与展望	雷立超,马银萍,高国(541)
基于锦屏二级水库的提高闸门操作精准度的优化控制	朱斌,张青伟,高国(545)
二滩拱坝抗震复核	薛利军,牟高翔,王进廷,等(550)
二滩水电站下导/推力油槽甩油治理	向欣欣,马振华(558)
水轮发电机组振摆故障浅析	邵建林,廖润,谢林(566)
多重约束条件下的若水电站安全调度风险及对策研究	唐杰阳,丁仁山,代小龙(577)
西南电网异步运行桐子林水电站调速器运行风险分析及预控	程文,宋训利(584)
复杂环境下混凝土坝 GNSS 观测数据质量与误差特征分析	陈锡鑫,李啸啸,柳存喜(589)
高山峡谷环境下北斗/GPS 融合定位混凝土坝变形监测能力验证	李小伟,冯永祥,陈锡鑫(596)
官地水电站 1 号水轮发电机组盘车异常原因分析及处理	商长松,李有春,蹇万祥,等(604)
离相封闭母线电流互感器等电位弹簧放电检查及处理	周浩,黄世超(609)
官地水电站 500 kV GIS 主变高压侧 T 区停电后电压过高原因分析及应对策略研究	王定立,毛成钢,杨永洪,等(613)
基于无线传输技术的泄洪警报系统设计与实施	樵斌贤,王亚华,刘凯(620)
水电站机组风闸制动系统常见故障原因分析及对策探讨	曹艳明,熊世川(627)

深地基础科学

CJPL-Ⅱ中铜和锆的宇生放射性核素的模拟研究	曾炜赫,曾志,马豪,等(635)
ICP-MS 测量电解铜中铀-238 活度	刘金京,曾志,马豪,等(639)

CDEX 实验组介绍	贾历平,岳骞(642)
PandaX-Ⅲ:高压气 ¹³⁶ Xe 时间投影室探测无中微子双贝塔衰变	林横,杜海燕,韩柯(649)
大塌方后隧洞挤压分析及应对策略	张传庆,王继敏,张春生,等(657)
考虑深部典型破坏模式差异的地应力水平评价	张传庆,周济芳,周辉,等(668)
中国锦屏地下实验室二期隧洞开挖响应分析	郑民总,李邵军,吴世勇,等(675)
特大引水发电工程超深埋大理岩时效渗透特性研究	刘宁,陈祥荣,褚卫江,等(681)
锦屏二级引水发电工程超深埋特大引水隧洞运行安全性评价	孙辅庭,陈祥荣,张洋,等(688)

流域生态环境保护

水电开发中的鱼类保护	李天才,许勇,邓龙君,等(701)
桐子林水电站工程环保水保工作管理与实践	段溪洛,商云笛(707)

流域智能开发和综合管理

高海拔地区特高土心墙堆石坝智能建设管理体系关键技术研究与实践

祁宁春

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘 要 两河口水电站大坝为 300 m 级特高土心墙堆石坝, 工程规模巨大, 坝址所处的高海拔寒冷地区复杂恶劣的自然环境给大坝工程建设带来了诸多方面的挑战。随着物联网、人工智能、大数据、云计算等先进技术的不断发展, 筑坝技术开始向智能化方向发展。为了减小自然环境及人为因素对大坝建设的不利影响, 雅砻江公司依托两河口大坝, 开展了涵盖设计、施工及运行等工程全寿命周期的高海拔地区特高土心墙堆石坝智能建设关键技术体系研究, 部分理论及技术已在两河口水电站高心墙堆石坝建设中成功应用。创新研发了 Hydro-BIM 设计优化平台、智能大坝施工监控系统、复杂土料场智能开采系统、土料冻融预测分析系统、智能灌浆系统、智能视频监控系统、质量验评信息系统、气象监测及预报系统、iDam 安全监测系统, 在大坝设计和施工中发挥了重要作用, 并实现了设计和施工期全信息收集, 为建成后工程的运行管理、检修维护提供支持。两河口大坝智能建设技术的研究与应用为类似工程建设提供了借鉴, 将推动高心墙堆石坝工程建设从信息化、数字化向智能化发展。

关键词 高海拔寒冷地区; 特高土心墙堆石坝; 智能建设; 智能碾压; 集成平台

1 引 言

随着中国水电工程的不断发展, 越来越多的土石坝工程建设在高海拔寒冷地区^[1]。目前, 我国已建设及在规划中的坝高达到 200 m 级的土石坝已不下数十座, 坝高达到 300 m 级的超高土石坝也有数座, 其中土心墙堆石坝(黏土或砾石土心墙)占较大比例^[2-3]。此类工程所处地区河谷狭窄、岸坡陡峻、高寒缺氧、干燥多风、全年降雨时段集中、昼夜温差大、筑坝条件复杂, 同时坝体填筑工程量巨大, 安全、质量、进度等施工组织管理要求高, 为设计、施工及运行管理带来极大挑战。

为解决高坝建设所面临的难题, 在 21 世纪之初, 土石坝筑坝技术与现代网络信息技术、实时监控技术充分结合, 由电算化阶段、信息化阶段向数字化施工阶段发展, 已在多项大型水利水电工程中进行了探索和应用^[4-7]。近几年来, 随着物联网、人工智能、大数据、云计算的不断发展, 筑坝技术开始向智能化建设发展, 图纸对施工的指导已经部分升级成为系统的认知学习、代码对机器的“动态控制”以及系统对于模型数据的动态反馈流程^[8], 利用人工智能技术将设计控制信息与施工中实时监控感知信息进行智能分析反馈

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1765205)。

作者简介:祁宁春(1964—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事水电工程建设管理和技术研究。

实现施工过程自动决策控制,同时建设期的设计、施工信息又作为后续运行期智能判断建筑物状态的数据基础,从而实现水电工程设计、施工及运行管理全生命周期中全部信息无缝衔接流转,可以极大提高大规模复杂工程的设计、施工及后期运行管理的工作效率和智能化水平。

当前锦屏一级、溪洛渡水电站工程在高拱坝智能化建设方面进行了有益的探索和尝试^[7],但在高海拔地区特高土石坝设计、施工中智能化建设方面尚无成熟经验。雅砻江公司结合正在建设的两河口水电站特高土石坝堆石坝,与相关科研单位合作,超前统筹开展了智能化建设管理基础理论与关键技术研究,构建了智能建设管理体系,在智能规划设计、智能碾压、智能加水、智能视频监控、料场开采管理、冻融土预测分析、智能灌浆、质量验评、气象监测预报及安全监测等方面取得了一定成果,为大坝工程设计、施工提供了强有力的技术手段,同时对设计和施工过程中的海量数据信息(含图片、影像信息等)进行有效的收集整理分析,为后续工程运行检查与维护检修提供智能支持。

2 两河口水电站大坝智能建设管理体系总体规划

两河口水电站为雅砻江中下游的“龙头”水库,坝址位于四川省甘孜藏族自治州雅江县境内。电站以发电为主,兼顾防洪,枢纽建筑物由砾石土心墙堆石坝、地下引水发电系统、泄水建筑物组成。砾石土心墙堆石坝包括心墙区、反滤层、过渡层和堆石区四大区,最大坝高 295 m,总填筑方量约 4 300 万 m^3 ,是川西高原寒冷地区特高土石坝堆石坝典型工程,具有挡水水头高(达 263 m)、工程规模大、质量要求严、土料场多且料性复杂、高原峡谷区地形地质差、施工场地和交通布置困难、受冬季冻土和雨季降水影响有效施工时间短等特点,综合建设规模及难度位居世界土石坝工程前列。

借鉴已有智能大坝、智慧大坝建设探索实践成果^[9-10],结合两河口特高土石坝堆石坝实际建设条件及雅砻江公司对未来智能建设的需求规划,两河口大坝智能建设管理体系定位为:在高原峡谷地区特定地形地质和环境气象条件下,通过对大坝设计、施工及运行全生命周期时空范围内的人员、设备、材料、工艺、外部环境等复杂对象及相应建设管理过程中产生的海量数据信息进行全面实时监测感知、智能分析、智能决策反馈与控制,实现以安全、质量、效益、进度等多目标综合最优为目的的大坝建设运行智能化管控。

鉴于高原地区特高土石坝堆石坝智能建设管理体系的复杂性和创新性,两河口大坝智能化建设管理体系构建遵守“全周期统筹规划、多系统共享融合,分阶段逐步实施、勤反馈持续提升”的基本原则,按照“大坝智能规划设计、大坝施工智能监控、大坝运行状态智能检查与判断”三个层次构建智能建设管理分系统,各分系统又视功能需求建设子系统,并将设计信息输入、施工过程监控感知、系统输入-反馈控制流程等系统运行中所产生的数据信息流贯穿其中,最终形成有机整体。两河口特高土石坝堆石坝智能建设管理体系总体规划如图 1 所示。

3 两河口水电站大坝智能建设管理体系关键技术研究

针对高海拔寒冷地区特高土石坝堆石坝建设特点,需要重点对土石坝建筑信息模型(BIM)、施工总布置智能仿真优化、施工过程中全部信息的监测感知收集、施工机械的智

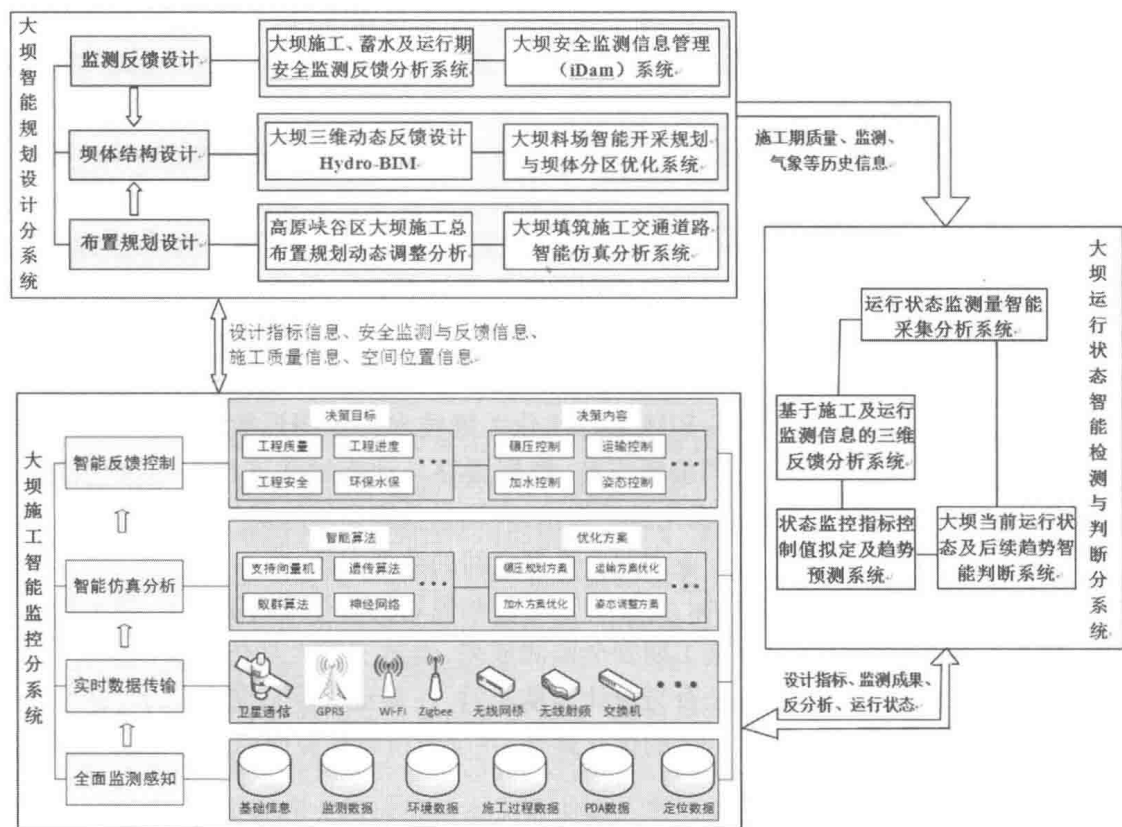


图1 两河口特高心墙土石坝智能建设管理体系总体规划

能反馈控制、特有的土料冻融监测与智能预测分析、坝体运行监测量智能采集及监测控制值的合理取值等方面进行深入研究,实现对大坝工程质量、进度、安全、环保水保等方面的精细化、智能化管控,确保高海拔寒冷地区特高土心墙堆石坝工程的安全、优质、高效建设和运行管理。

3.1 大坝智能规划设计

3.1.1 施工总体布置动态规划调整技术

两河口大坝工程所在地为川西高原峡谷地貌,施工场地狭小,大坝施工所需的机械设备停放检修厂、砾石土料掺拌场、大坝掺砾料和反滤料加工厂等施工临建设施和坝料开采填筑运输道路布置十分困难,而特高土石坝施工高强度、大填筑量的特点,决定了合理动态开展施工总布置规划对保证填筑质量、减小施工运距以节约投资、方便施工组织、保证施工进度具有决定性意义。

3.1.2 料场开采规划智能模拟技术

两河口大坝土料场包括坝下游1个土料场、坝上游库区4个土料场,共5个料场12个料区,上下游土料场相隔距离超过30 km,土料详细勘察成果表明,各土料场和料区土料成因不同、性质差异较大,土料开采方案复杂、土料料源质量检测与控制难度大。同时,大坝石料料源为砂板岩互层构造,且受卸荷和断层带影响,料源初期开采供料与大坝低高程填筑料源较高质量要求存在一定矛盾和差距。综合利用无人机高精度航拍技术、料源性能快速检测鉴定技术及料场三维地质建模技术,构建包括料源性能和空间位置等信息

在内的料场三维全信息模型,在此基础上模拟实际施工作业,研发料场开采智能模拟技术,实现料场智能分区开采预测,对优化开采方案、保证料源质量、节约工程投资具有较好的指导作用。

3.1.3 基于实际料源质量和安全监测反馈分析的水电工程建筑信息模型(Hydro-BIM)技术

水电工程建筑信息模型(Hydro-BIM)是建立智能化的水电工程建筑物信息模型(包括大坝、料场、公路、隧洞等),并将其物理和功能特性进行数字化共享,通过创建、整理和交换共享模型及其附属智能化、结构化数据,链接整个生命周期各阶段,从而实现全生命周期的相互协作^[11]。

针对大型水电工程的Hydro-BIM设计优化关键技术包括图形数据库技术(几何数据与空间索引支持、模型数据协同编辑支持、数据缓存与动态加载支持)、参数化建模技术、实体布尔运算技术、大数据可视化显示技术、大场景数据高效组织与渲染技术等,同时要基于一定数据标准,实现不同专业和业务模型之间的数据交换。

大坝智能规划设计的最终目标,是在合理布置和规划料场开采的基础上,随工程施工进展,根据料源实际质量情况及施工期安全监测成果,通过三维大坝仿真反馈分析,对比大坝实际变形、渗流和应力状态是否与设计预期相符,在保证大坝质量前提下,进一步动态优化大坝信息模型,开展坝体分区的优化调整,并反馈指导料源使用规划,减小弃料。

3.2 大坝施工智能监控

3.2.1 全面监测感知技术

全面监测感知技术是综合运用传感器技术、高精度卫星定位技术、射频识别技术、PDA技术等,实现对施工基本数据的自动实时采集;实时传输是通过建立的坝区无线输电台、Wi-Fi网络、GPRS、有线传输网络等,并利用路由器、交换机等网络设备和相应的数据网络接口,实现施工信息的自动、实时、稳定传输;智能仿真分析是采用支持向量机、粒子群算法、神经网络、遗传算法等智能算法,对碾压规划、加水方案、运输路径方案等进行智能分析和优化;智能反馈控制是按照优化的施工仿真方案,以人工智能控制现场设备施工,从而替代人工作业。

3.2.2 施工智能仿真技术

(1)仓面流水单元施工方案优选。建立多方案优化决策数学模型,对施工过程进行仿真分析,应用智能优化算法进行多目标迭代寻优,优选出不同高程的仓面施工单元最佳划分方案。

(2)仓面施工实时智能仿真。在施工仿真参数实时分析的基础上,动态更新仿真模型;应用动态更新的模型对仓面施工过程进行模拟,预测优化施工组织。

(3)路径智能规划。研究基于遍数控制模式的碾压机集群路径规划、智能转场路径导引、智能加油路径规划和碾压机集群动态路径分配。

(4)仓面施工三维可视化仿真。通过大坝和施工仓面动态三维建模,对仿真计算结果进行同步实时动态展示。

3.2.3 智能反馈控制技术

为了实现对现场施工设备的智能反馈控制,需要对原人工操作系统进行升级改造,使

施工设备在复杂环境下能够以自主的方式完成各种动作。通过智能化仿真成果提供的方案,将基础数据指令发送至机械设备,实现自动作业与反馈控制。同时,由于现场复杂的环境对施工机械的运行产生一定影响,需要对机械设备的动作状态进行实时自动纠偏,来确保反馈控制的精准性。

3.2.4 心墙土料冻融施工智能监测与预报技术

两河口大坝所处的川西高原地区属季节性冻土区,大坝心墙冬季施工面临着日循环浅层冻土问题,这对大坝施工组织、质量控制等带来一系列难题,在高砾石土心墙堆石坝建设中缺少成熟经验。经过冻融循环后,土料的物理、力学性质发生变化,对心墙填筑质量、进度造成不利影响。在物理性质方面,已有研究表明,冻融作用会使松散土密度增大,密实土密度降低;而无论密度如何变化,冻融作用均会使土的渗透性增大。此外,土的颗粒级配和界限含水量也会在冻融循环作用下发生改变。在力学性质方面,土体的应力应变关系、模量、强度等均会受到冻融作用的影响^[12-13]。为确保填筑满足要求,需要对黏土及砾石土的冻融规律开展深入研究,并根据冻融规律及外界条件变化预测冻融发生的时间及程度,据此及时采取适当的冻融防控措施,才能确保土质心墙冬季施工满足要求。

3.3 大坝运行状态智能监测与判断技术

大坝运行状态智能监测与判断的核心技术,是对运行期坝体变形、渗流和应力等关键监测量的快速、准确收集及合理分析,同时结合三维仿真反馈分析成果合理制定关键监测量的控制标准,从而判断大坝运行状态是否正常。当出现异常状况时,能够快速调取施工期历史信息(含影像资料),结合实际监测和反馈分析成果,对异常状态的原因进行分析,对后续发展趋势进行预测,并提出应对措施建议^[14]。

4 两河口水电站智能建设管理体系实施情况

两河口水电站作为川西高原地区首座 300 m 级特高砾石土心墙堆石坝,其工程设计、施工和运行均面临着一系列世界级挑战,为保证大坝工程安全、高质量建设及高效率运行管理,雅砻江公司在项目可研设计阶段启动了大坝工程智能化建设管理规划工作,并随工程建设不断推进而逐步完善,目前已研发了 Hydro-BIM 设计优化平台、智能大坝系统、冻融土预测分析系统、智能灌浆系统、智能视频监控系统、质量验评信息系统、气象监测及预测系统、iDam 安全监测系统、大坝监测反馈分析系统,启动了大坝运行期永久监测自动集成系统规划,基本覆盖大坝工程各重要环节,大坝智能建设管理体系已在大坝工程设计、施工建设中得到了较好的应用,对大坝工程质量、安全、进度和投资目标管控起到了重要作用。

4.1 大坝智能规划设计实施情况

两河口大坝智能规划设计工作在可研阶段即启动了研发工作,并将相关规划设计工作内容与要求纳入了招标施工图阶段专项科研协议和施工图阶段设计合同,同时随工程建设进展及对大坝智能建设管理体系构建认识深化,结合大坝施工中出现的 key 技术问题,以年度专项科研项目方式补充启动了料场智能开采系统研究工作。目前,设计院已建立了相应的研究组织机构,相关的测绘、地质、水工、施工、机电、交通等多专业协同参与。

4.1.1 施工总体布置动态规划调整系统实施情况

可研设计和招标施工图设计阶段,结合数字雅砻江平台和无人机航测技术,对坝区 30 km 范围内的地形地貌条件进行了勘察,并通过细化土石方开挖、坝体填筑、渣场弃渣和场地启用规划,从时间和空间多方面对施工场地进行了分区规划研究,确定了以渣场造地和多用库区料场的总体布置原则,取消了坝下游 2 个土料场和 1 个石料场、取消了库区 1 个土料场和 1 个石料场,减小坝下游临时征地 55 万 m^2 ,减小料场开采道路 10 km 和剥离料近 100 万 m^3 ,取得了较好的经济效益,并减小了建设征地移民难度。

与天津大学合作完成了大坝填筑交通道路仿真分析系统,对大坝开采和上坝施工各道路功能、运输强度、车流密度、运输距离等进行仿真分析,为合理确定各道路的建设标准、线路走向、建设时机等均提供了有力支持。

4.1.2 料场开采规划智能模拟技术研究进展

结合前期石料场勘察成果及开采进展揭示地质情况,基本完成了石料场三维地质构造模型,并随着收方测量成果和大坝填筑分区,实现了动态更新各坝区供料分区,并在保证坝体填筑质量的条件下,合理利用较差料源,减小弃料。

土料场智能开采系统结合库区瓜里料场 B 区地质勘察和地形测量成果,启动了土料场三维全信息模型建设和土料级配及含水快速检测技术研究工作,通过土料场三维全信息模型土料分类自动搜索技术,在瓜里 B1 区内新发现约 10 万 m^3 一类土,为大坝低高程采用一类土填筑以保证质量奠定了基础。

4.1.3 大坝施工及初期蓄水期安全监测反分析系统进展

完成了大坝反分析三维模型建设,完成了利用监测成果开展反分析计算的理论方法研究,并结合大坝已有的监测成果,提交了一期反馈分析成果报告。根据反馈分析成果,目前大坝应力、变形性状符合土石坝一般规律,坝体总体变形可控,说明坝体下游增设堆石Ⅲ区的优化设计总体合理,坝体填筑施工质量可控。

4.1.4 Hydro-BIM 设计优化平台

为保障 Hydro-BIM 设计优化工作顺利开展,现场成立了“两河口 BIM 技术中心”并组建数字交付项目部,通过制定标准、编制计划、定期考核、项目总结等措施,建立了一套完善的三维数字化工作流程,实现了按月更新以反映工程实际施工形象。已完成的三维数字化成果在三维地质分析、坝体进度分析、坝体结构分区优化设计、地质预测预报、边坡稳定分析、防渗系统空间分析、结构应力应变分析、施工仿真分析、料场开采与利用优化设计、工程计量、工程出图、现场技术交底等方面发挥了重要作用。

4.2 大坝施工期智能监控系统实施情况

4.2.1 智能大坝系统

1) 仓面智能碾压

(1) 仓面施工智能仿真与方案优化。

建立了仓面施工实时智能仿真模型,在施工仿真参数实时分析的基础上,应用基于边界过滤的贝叶斯施工参数动态更新方法动态更新仿真模型;应用动态更新的模型对仓面施工过程进行模拟,预测优化施工进度。在施工进行过程中仓面施工方案执行偏差超出允许范围或方案执行出现异常情况时,根据智能平台下存储的施工信息更新仿真模型,重

新对仓面施工进行施工方案优选分析。

(2)无人驾驶机群智能作业。

依据大坝碾压施工过程智能仿真成果,采用智能方法与技术对大坝碾压机群作业过程进行有效管控,以实现高标准碾压作业的目标。通过碾压机作业过程的智能感知、智能避障、智能寻迹与循迹,实现无人操作状态下的碾压机群协同作业与稳定运行,并结合碾压作业路径的动态规划,实现无人驾驶碾压机群作业过程的智能管控。碾压机集群协同作业控制方案示意图如图 2 所示。

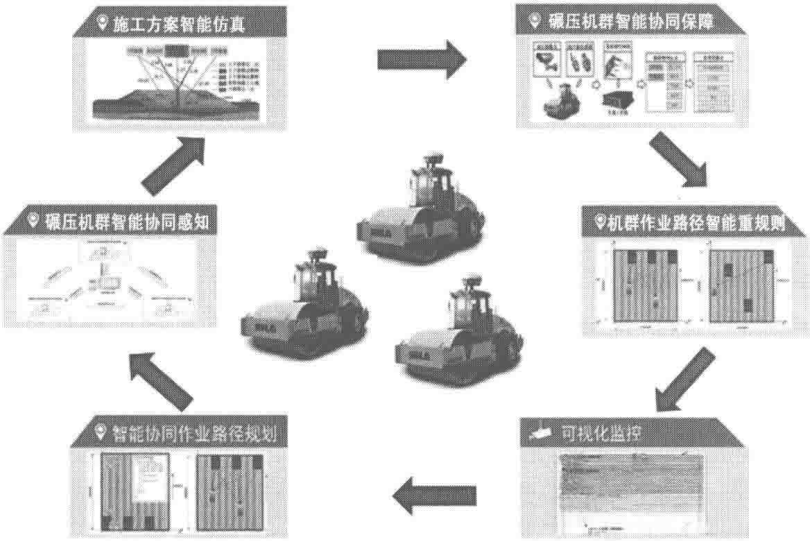


图 2 碾压机集群协同作业控制方案示意图

2) 坝料运输智能监控系统

(1) 车辆监测。

在上坝运输自卸车上安装自动定位设备(如 GPS 设备)及空满载操作设备,实现对自卸车从料源点到坝面的全过程定位与装、卸料监控。

对于非上坝车辆、非施工车辆,配发含有身份识别标志的卡片,在关键道路节点安装身份识别装置,区分上坝车辆、非上坝车辆、非施工车辆,分开进行车流量统计。在隧洞内则采用 zigbee 技术进行定位,兼具数据通信功能。

(2) 可视化监控。

在现场分控站和总控中心配置监控终端计算机,对车辆进行图形化监控,并对上坝强度、道路车流量进行分类统计。

(3) 报警反馈。

系统提供卸料偏差报警、实时路况提醒、施工车辆出厂提醒,以短信形式发送至施工管理人员的手持通信设备上。

3) 智能加水系统

为有效保证施工坝料运输车辆的加水量,避免人工操作的误差以及常规加水量监控的局限性,集成无线射频技术(RFID)、自动控制技术和 CDMA 无线技术,建设一套土石料运输车辆加水量全天候、远程、自动监控系统,以实现按车按量精细监控,确保加水量满足