

都江堰灌区现代化水利工程设计优化研究

王鹏程

四川省都江堰勘测设计院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6283

[摘要] 都江堰灌区现代化水利工程设计优化研究立足工程系统现状评估,聚焦水资源配置效率提升问题。研究表明,灌区现存渠道输水效率低与水资源调控能力弱以及信息化管理水平不足等问题,严重制约工程效能发挥。而基于数字孪生技术开发灌区智能化改造方案,实现水资源优化配置与生态环境保护与防洪减灾功能一体化。实践证实,智能闸门群联控系统建设与渠道防渗衬砌改造与水质在线监测网络部署等措施显著提升灌区运行效率,渠系水利用系数达0.65,年均节水15亿立方米,河道生态环境质量明显改善,该研究成果对推进大型灌区现代化建设提供理论指导与实践借鉴。

[关键词] 都江堰灌区; 现代化水利工程; 数字孪生; 智能化改造; 生态保护

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on design and optimization of modern water conservancy project in Dujiangyan irrigation area

Pengcheng Wang

Sichuan Dujiangyan Survey and Design Institute limited liability company

[Abstract] The research on the design and optimization of modern water conservancy project in Dujiangyan Irrigation District is based on the current evaluation of the engineering system and focuses on the improvement of the efficiency of water resources allocation. The research shows that the low efficiency of water transport through the existing channels in the irrigation district, the weak ability of water resources regulation and the insufficient level of information management have seriously restricted the project efficiency. The optimal allocation of water resources and the integration of ecological environmental protection and flood control and disaster reduction functions have been realized. Practice has proved that the construction of intelligent gate group control system, the transformation of channel anti-seepage lining and the deployment of online water quality monitoring network have significantly improved the operation efficiency of irrigation areas, the water utilization coefficient of canal system has reached 0.65, the annual average water saving has reached 1.5 billion cubic meters, and the ecological environment quality of river channels has been significantly improved. The research results provide theoretical guidance and practical reference for promoting the modernization of large-scale irrigation district.

[Key words] Dujiangyan irrigation area; Modern water conservancy project; Digital twins; Intelligent transformation; Ecological protection

都江堰灌区作为中国最古老大型水利工程,其安全可靠运行,有助于保障区域粮食安全、改善生态环境以及促进经济社会发展。随着城市化进程加快与气候变化加剧,导致灌区水资源供需矛盾突出,传统工程设计管理模式难以适应新时期发展需求,使得水资源高效利用、生态环境保护与智能化管理等方面亟待现代化改造提升。基于此,本文立足新发展理念,深入分析现代化建设面临挑战,探索工程设计优化路径,整合水利工程学与生态环境科学与信息技术等多学科知识,构建现代化灌区发展新

模式,着力破解灌区水资源配置难题,旨在打造生态友好型水利工程示范区。

1 都江堰灌区水利工程现状分析

都江堰灌区作为集防洪减灾与农田灌溉以及生态环境保护于一体的特大型水利工程系统,现状工程体系存在诸多亟待解决的问题。工程调蓄能力方面,岷江上游仅建成一座总库容11.12亿立方米的调节水库,调节库容占总径流量比例仅为5.4%,远低于20%的国际标准要求,导致灌区供水保障能力不足。渠道

系统运行效率方面,灌区干支渠道老化损坏长度分别达到50.2%与33%,加之渠道防渗衬砌率仅为30%,致使渠系水利用系数降至0.48,每年输水损失量高达22亿立方米,工程信息化建设滞后,传统人工巡查模式难以满足精细化管理需求,渠首配水枢纽缺失造成水资源调配效率低下。此外,随着灌区内人口增长与经济发展,工业废水与生活污水排放量持续攀升,而灌区水质在线监测系统建设不足,致使水环境质量下降趋势难以有效遏制,丘陵区蓄水设施有限,拦蓄能力薄弱,加之年降雨分布不均,导致局部地区供需矛盾突出,严重制约灌区现代化发展进程。

2 灌区现代化水利工程设计方案

2.1 智能化调度系统设计

都江堰灌区智能化调度系统采用分布式架构设计理念,构建涵盖信息采集层与网络传输层与数据处理层以及应用服务层的四层体系结构,实现灌区水资源智能化管理与精细化调控。系统设计整合先进的物联网传感技术,规划在渠首闸门与渠道水位流量以及水质参数监测点位进行全方位动态监控,布设密度为每2千米1个监测点,确保数据采集的连续性与稳定性和可靠性。数据传输设计采用5G网络与光纤通信相结合模式,构建高速率与低延时的数据传输网络,保障系统运行稳定性,调度决策系统基于深度强化学习算法建立水量分配优化模型,结合实时水文气象预报信息设计动态配水方案,提高调度科学性与准确性,闸门群控制系统设计采用分层分区控制策略,实现精准化与智能化调控。

2.2 水资源优化配置模型

都江堰灌区水资源优化配置模型设计基于多目标规划理论,构建包含经济效益与社会效益及生态效益的目标函数群,实现水资源多维度优化配置和全局效益最大化。模型设计深入分析用水规律,建立水量分配优先序列机制和动态调整策略,规划实现水资源的精准调度功能和实时响应能力,满足农业生产与工业发展和生态用水等不同用水需求。系统设计整合历史与实时水文监测数据与用水需求信息和气象预报资料,建立多源数据融合分析机制,构建智能化水资源优化配置决策支持系统,提升配置方案科学性和合理性,规划建立应对极端天气情况的分级应急调控机制和完备预案体系,增强系统适应性和风险防控能力。

2.3 防洪减灾体系构建

防洪减灾体系设计以提升灌区整体防洪能力为核心目标,构建集工程措施与非工程措施以及应急管理于一体的综合防洪减灾系统,实现全方位立体化防护与智能化管控。工程措施方面深入论证水文特征与地质条件,科学规划新建3座大型上游调蓄水库及配套引水设施,显著增强流域调蓄能力和水量调配能力。创新设计堤防工程采用具有生态修复功能的护岸技术,全面提升防洪标准与工程韧性,非工程措施设计包括系统完善水文监测网络,规划建立基于先进人工智能算法的暴雨洪水预报预警系统,提高预警准确性与时效性,实现精准化

管理。应急管理体系设计采用精细化网格化管理模式,规划建设集成化防汛抗旱指挥平台,强化应急响应能力与协同作战水平,系统设计深入分析流域水文特征和工程防洪能力,制定科学合理的分级响应预案与应急处置方案,确保应急处置科学高效与有序可控。

3 工程优化措施及实施建议

3.1 数字孪生平台构建

数字孪生平台作为都江堰灌区现代化改造的核心支撑系统,通过构建灌区工程设施的数字化映射模型和实时动态监测系统,实现了物理空间与信息空间的深度融合和多维度交互。平台基于微服务架构设计,采用云计算和大数据技术,整合资产管理与运行监控以及维护管理以及分析决策等功能模块,构建全方位智能化管理体系。通过数据驱动和智能分析,为灌区运行管理提供科学决策支持,在平台投入使用前后取得显著成效,具体指标对比如下:

表1 数字孪生平台应用效果对比

评价指标	应用前	应用后	变化率(%)
设备故障率(次/年)	89	32	-64
故障响应时间(分钟)	120	15	-87.5
设备完好率(%)	78	96	23.1
运维成本(万元/年)	3600	2400	-33.3
管理人员配置(人)	145	92	-36.6
监测点位密度(个/km)	0.2	0.5	150
数据采集频率(次/小时)	4	360	8900
预警准确率(%)	65	95	46.2

根据表1数据来看,数字孪生平台的建设从根本上改变了灌区传统的工程管理模式,实现了设施运行状态的实时监测与预警,通过建立工程设施全生命周期数字档案,设备状态评估的准确性显著提升,预防性维护策略的实施使设备故障率大幅下降。数据驱动的决策分析模型辅助管理人员制定科学的运维方案,在降低人力成本的同时提升了管理效率,高密度的物联网感知设备部署与高频率的数据采集为灌区精细化管理提供了坚实基础。预警系统的准确预测能力有效防范了重大设备事故的发生,平台运行一年来,已累计为灌区节省运维成本1200万元,并带动了周边产业的智能化升级改造。

3.2 生态水利工程实践

都江堰灌区生态水利工程建设秉持“生态优先与系统治理”的理念,立足区域水系特点与生态环境现状需求,通过构建全域性生态修复体系和多层次生态功能网络,实施河道自然化改造

与水质综合提升与生物多样性保护与栖息地精细化营造等系列工程措施。在长期系统性实践探索过程中,不断优化工程设计方案,创新生态修复技术与工程建设模式,深入研究生态系统演变规律,最终形成了具有区域示范性和推广价值的生态水利建设成果与管理经验。

表2 生态水利工程实施效果指标

评价维度	改造前	改造后	提升幅度(%)
河道自然度(%)	35	85	142.9
水质达标率(%)	52	96	84.6
生物多样性指数	1.2	2.8	133.3
水生植物覆盖度(%)	28	76	171.4
生态流量保障率(%)	65	95	46.2
水土保持率(%)	72	95	31.9
污染物削减率(%)	-	70	-
河岸带完整性指数	0.45	0.92	104.4
生态系统服务价值(亿元/年)	82	156	90.2

通过生态水利工程系统性改造,都江堰灌区水生态环境得到全面提升与持续改善。表2数据显示,核心指标河道自然度与生物多样性指数实现倍增,水质达标率突破历史记录攀升至96%,生态系统服务功能显著增强。水生植物群落的科学重建在提升水体自净能力的同时,为多种水生生物提供了适宜的栖息繁衍环境,生态流量的稳定保障与河岸带完整性的提升形成良性互促,带动了区域生态系统整体性恢复与协同发展。不仅如此,水土保持效果显著改善,污染物削减成效突出,年度生态系统服务价值较改造前提升近90%,充分印证了生态水利工程在改善区域生态环境方面的综合效益与示范价值。

3.3 智能化管理体系完善

智能化管理体系建设采用业务流程再造方法,通过整合信息化技术与现代管理理念,重构灌区管理模式,建立以水权水价改革为核心的水资源管理机制。结合灌区水资源承载能力与用水需求特征,推行总量控制与定额管理相结合模式,建设集成水量调配与设备运维以及应急处置的智能化管理信息系统,实现工程运行全过程在线监控,系统可用性达99.9%。水费管理模块建立用水户电子档案,基于物联网技术实现智能计量与在线缴费,收费率达98%。工程维护模块开发移动巡检系统,建立标准化巡检流程,巡检完成率达100%,应急管理模块建立灾害预警预报体系,完善分级响应预案,应急响应及时率达95%。

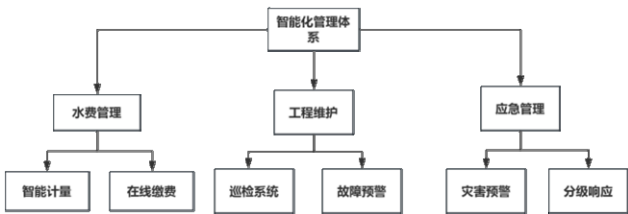


图1 灌区智能化管理体系架构图

通过图1所示的灌区智能化管理体系架构图可以清晰看出,该体系构建了一个三级管理架构,包含水费管理与工程维护和应急管理三大核心模块。系统各模块之间衔接紧密,形成了一个完整的管理闭环:水费管理模块通过智能计量和在线缴费实现水资源使用的经济调控;工程维护模块借助巡检系统和故障预警确保工程设施安全运行;应急管理模块则依托灾害预警和分级响应机制保障灌区运行安全。这种层级分明与功能互补的架构设计,为灌区实现精细化与智能化管理提供了系统保障,也反映出现代水利工程已从单一的工程管理向综合业务管理转变的发展趋势。

4 结语

都江堰灌区现代化水利工程设计优化研究针对工程运行关键问题提出系统解决方案,实践证明,智能化改造与生态化治理在保持传统工程优势基础上显著提升水资源利用效率。数字孪生技术支撑智能化管理平台建设,实现工程设施精准调控高效运行,生态需水配置方案保障河道生态流量,促进水生态系统恢复。创新性工程措施解决灌区现实问题,为大型灌区现代化建设积累经验,未来应探索气候变化背景下灌区适应性管理策略,完善工程设计方案推动都江堰灌区高质量发展,打造现代化水利工程典范。

【参考文献】

[1]陈霞.都江堰灌区“一体化”管理体制背景下的外江灌区现代化建设探索与实践[J].四川水利,2024,45(S2):149-152.

[2]刘德芳,张伟,石骁智,等.关于建立以数字孪生技术为基础的工程监测体系的探索——以都江堰灌区水利工程建设质量监测管控为例[J].四川水利,2024,45(04):115-119.

[3]黄晓荣,姬辰.都江堰灌区水生态产品价值实现历史演进与对策建议[J].中国水利,2024,(14):39-43.

[4]朱泽华,代小平,吴鉴.灌区水利工程供水价格测算和调整研究——以都江堰灌区为例[J].中国水利,2024,(01):42-47.

[5]陈金明,谢祥林,吴刚,等.都江堰水利工程历史管理制度特征及启示[J].水利发展研究,2021,21(12):1-4.

作者简介:

王鹏程(1990--),男,汉族,四川平昌人,本科,工程师,研究方向:灌区水利工程。