

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.015

智慧水厂运行管理新模式实践探索

方文侃¹, 杨 澜¹, 祝嘉禄², 李 柱¹

(1. 上海城投水务集团有限公司 制水分公司, 上海 200082; 2. 上海城市水资源开发利用
国家工程中心有限公司, 上海 200082)

摘 要: 为顺应新时代发展需要,上海某传统制水厂正在积极推进数字化转型工作,并创新性提出了“1+2+1+N”运行管理新模式。从应用效果来看,该水厂初步实现了常规工况下的水量自主调度,水质调度对于原水水质的响应更为灵敏,设施设备全生命周期管理进一步加强,环境、健康、安全(EHS)管控能力进一步提升,部分生产区域实现无人巡检和无人作业,有力推动了智慧水厂朝着“管理精细化、生产智能化、运维高效化、决策科学化”的建设目标不断迈进。

关键词: 智慧水厂; 数字化转型; 运行管理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0095-06

Exploration of New Operation Management for Smart Water Plant

FANG Wenkan¹, YANG Lan¹, ZHU Jialu², LI Zhu¹

(1. Water Production Branch, Shanghai Chengtou Water Group Co. Ltd., Shanghai 200082, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co. Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: In order to meet the needs of the new era, a traditional water plant in Shanghai is actively promoting digital transformation construction. A new operation management mode of “1+2+1+N” has been innovatively proposed. Judging from the application effect, autonomous water dispatching under normal operating conditions has been initially achieved, and the water quality dispatching is more sensitive in response to the quality of raw water. Meanwhile, the full life cycle management of facilities and equipment have been further strengthened as well as the management capacity of environment, health, safety (EHS) has been further improved, and some production areas have achieved unmanned inspection and operation, which has effectively promoted the smart water plant to continuously move towards the construction goal of “refined management, intelligent production, efficient operation and maintenance, and scientific decision-making”.

Keywords: smart water plant; digital transformation; operation management

当前,数字化正逐渐成为经济社会发展的核心驱动力^[1]。水务作为事关经济社会、国计民生的最基本公共服务行业之一,亟待以智慧水务建设为抓手,积极推进数字化转型工作,实现“安全、便民、高

效、绿色、经济、智慧”的发展要求。

智慧水厂作为智慧水务的重要组成部分,近年来相关的研究与尝试层出不穷,也取得了一些成果。比如,吴江第一水厂通过建立智慧生产管控一体化

通信作者: 李柱 E-mail: lizhu@shanghaiwater.com

平台,依托智能生产模型和在线系统提高企业精细化管理水平^[2];田村山净水厂通过平台开发、数据互联和模型建立,促进了水厂全过程生产管理工作开展^[3];青衣水厂通过“两化”融合研发并应用智慧水务一体化管控平台,实现了生产运营全过程自动化及生产现场无人值守的“一键制水”^[4]。但行业内对于智慧水厂建设目标的理解不统一^[5],如何管理智

慧水厂的理念、方法也鲜有提及。

上海某传统制水厂在数字化转型建设过程中,结合实际归纳形成了“1+2+1+N”的智慧水厂运行管理模式。介绍该模式的基本概念及应用情况,可为行业内智慧水厂的运行管理提供思路和方法。

1 “1+2+1+N”管理模式

“1+2+1+N”运行管理模式如图1所示。



图1 “1+2+1+N”运行管理模式

Fig.1 “1+2+1+N” operation management mode

① 1个数字底座:基于建筑信息模型(BIM)和Unity 3D(Unity公司开发的实时3D互动内容创作及运营平台)技术搭建数字孪生与仿真平台^[6],1:1打造全数字化水厂,实现产线透明化。在虚拟水厂这一数字底座中可以模拟各种条件下的生产运行和设备维护情况,为实际生产管理提供科学化决策。

② 2个智慧大脑:即水量调度模型^[7]及水质调度模型。围绕水厂运行中最重要的水量调度和水质调度两项业务,运用大数据、人工智能等技术,将传统人工调度的经验凝练为数学模型,实现水厂智慧化运行。

③ 1个管控平台:引入精益思想等制造业先进管理理念,建立制水生产执行系统(MES)^[8],旨在围绕“人、机、料、法、环”等多种生产要素进行数据加工、信息传递、敏捷响应和协同处置,打通生产计划与生产现场的实时信息通道,提高水厂运行管理水平,实现精细化管理。

④ N 个机器辅助:采用智能机器人技术^[9]代替传统人工开展重复性高、危险性大的生产作业,实现生产现场少人化、无人化目标。

各板块之间的内在逻辑与相互关系见图2。虚拟水厂作为数字底座,不仅能够实时反映水厂的生产运行状况,其采集的数据还能为MES系统与数学模型提供支撑。水量与水质模型基于历史及实时

数据,通过自主运行和算法寻优,在虚拟水厂中实现各环节的仿真、预测及闭环联动控制,并在现实水厂中予以实时反馈。MES系统基于数据积累与分析,实现智能排产和流程再造,从管理层面实现与虚拟水厂和现实水厂的交互。而智能机器人将现实水厂中的作业情况以数据形式存储,并同步至虚拟水厂与管控平台,推动数字孪生与仿真平台及MES系统的迭代优化。“1+2+1+N”管理模式,就是将虚拟水厂、现实水厂、算法模型与管控平台有机融合,有效利用数据共享与业务协同“双轮”驱动,在提质、降本、增效、保安全等方面发挥优势作用,最终实现“管理精细化、生产智能化、运维高效化、决策科学化”的智慧水厂建设目标。

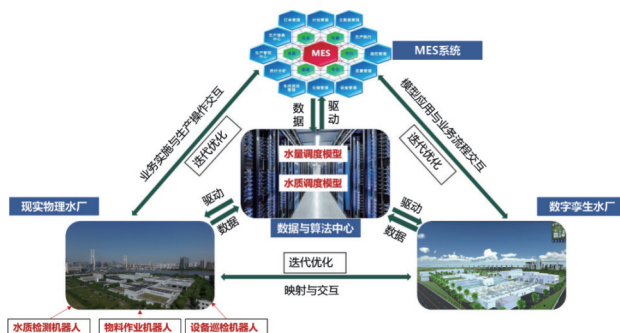


图2 “1+2+1+N”运行管理模式内在关联

Fig.2 Internal relation of “1+2+1+N” operation management mode

2 “1+2+1+N”管理模式应用情况

2.1 数字孪生与仿真平台

数字孪生与仿真平台结合自有功能和业务情况,打造了8大板块,具体见图3。



图3 数字孪生与仿真平台主界面

Fig.3 Main interface of digital twin and simulation platform

① 运行监视。实时监测全厂设施设备运行状态(含巡检机器人和物料作业机器人),设施设备基本情况与MES系统自动关联。

② 水质监控。实时监测全厂原水、过程水及出厂水水质情况,实现制水全流程水质管控,并借助水质评价指数(WQI)^[6]的变化规律为异常事件处置提供参考。

③ 生产保障。实时监测全厂原材料基本情况,包括进料时间、进料量、消耗量以及库存量、可用天数等,并联动MES系统实现物料全流程追溯。

④ 安全管控。将水厂安全风险分级管控四色图融入平台,并以电子围栏的形式将不同区域的安全风险等级予以呈现,深化了双重预防机制的数字化建设。同时建立人员定位系统,依托全厂400多个超宽带(UWB)基站和数十张人员定位卡,获得工作人员的实时定位。在此基础上还拥有分级管控、轨迹查询和探头联动功能,进一步加强人员管理和现场管控水平。

⑤ 调度仿真。即水量调度模型^[7],其有两种运行模式:在线模式,根据配水方案实时开展全厂水量调度;离线模式,用于员工培训、应急演练、模型调参等场景。

⑥ 检修仿真。可在平台中观察出水机泵的内部结构,并开展模拟故障排除和检修。

⑦ 预案仿真。可在平台中根据需要组建虚

拟场景,制定应急演练工作方案,利用平台内已有的仿真设施设备逐步开展应急响应、应急处置、应急恢复和演练评价等全过程,提升应急预案实战练兵效果。

⑧ 控制仿真。即水质调度模型,包含各工艺段的水质投药和预测模型。其有两种运行模式:在线模式,根据方案实时开展全厂水质预测和调度;离线模式,用于员工培训、应急演练和模型调参等场景。

2.2 水量与水质调度模型

2.2.1 水量调度模型

水量调度模型能够基于供水调度压力指令,自动分析水厂所需供水量,同时采用大数据分析及相关理论,对清水泵房泵组能效进行评估,进而对其进行优选,确保水厂泵组高效、优化、自动运行。在供水量分析基础上,充分考虑水库调蓄能力及各设施/设备生产能力,建立水厂稳态运行和水库高液位运行的水量分配模型,自动计算水厂所需总进水量,实现供水-制水之间的平衡,确保水厂安全供水。

水量调度模型上线后,在水厂供水服务区域内,采用无人调度形式实现“按需供应、动态调整”。目前水量调度模型已进入常态化运行,模型推送方案执行率为100%。所有指令均为系统自主下发,清水库水位由系统自主调节,无任何人为干预。从清水库液位48 h内变化情况可知,液位在3~5 m内波动,实现了常规工况下的全自动水量调度。此外,还实现了出厂水实际服务压力与调度压力指令之间的绝对波动值小于 ± 2 kPa,出水泵房运行效率从77%提升至83%。

2.2.2 水质调度模型

运用数理和机理模型对制水各主要工艺环节进行数学建模、计算模拟(见图4),为水厂实现全数字化生产、过程控制优化提供支撑,助力水厂实现高效决策分析,在水质稳定性提升的基础上精准调整药剂投加量,科学降低药耗。目前混凝加药模型及沉后水浊度预测模型已完成建设并投入运行,其余模型仍处于建模或离线测试阶段。

混凝加药模型能够根据不同的原水水质推荐合理的加药量。选取3座沉淀池A、B、C作为试验对象,A池采用混凝加药模型推荐的投加量,B、C池根据人工经验投加。图5为2023年11月18日—20日

原水浊度变化及3座沉淀池的混凝剂投加量,由于 B、C池加药量完全相同,故只有一条曲线。

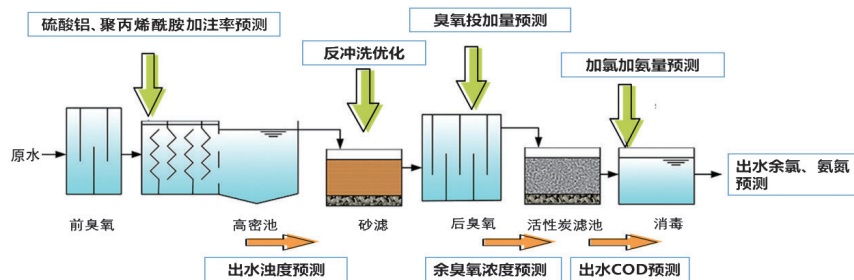


图4 制水全流程水质模型

Fig.4 Water quality model for the entire water production process

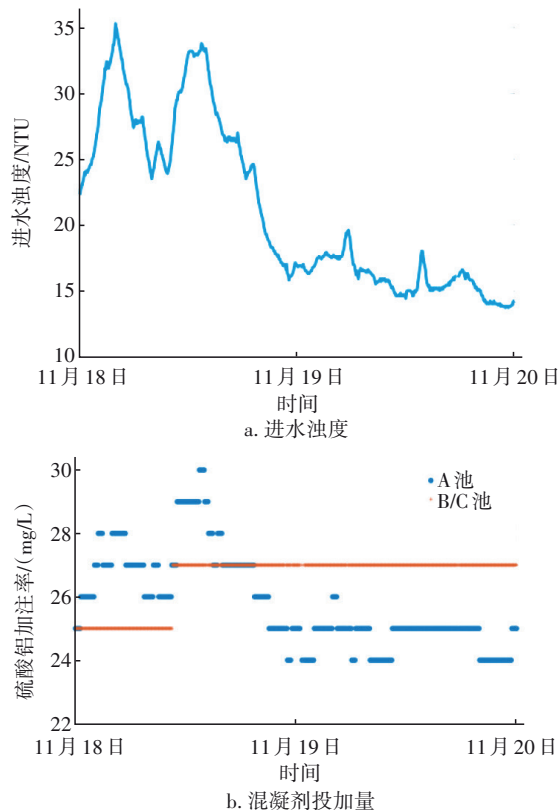


图5 进水浊度变化及各沉淀池混凝剂投加量对比

Fig.5 Fluctuation of influent turbidity and comparison of dosage of coagulant in each sedimentation tank

由图5可看出,11月18日原水浊度出现2次峰值,之后快速下降,模型控制的A池对2次峰值均有响应,且峰值过后快速降低加药量,而人工控制的B、C池仅对第2次峰值有响应,且峰值后无减药动作,这表明相较人工加药,加药模型对于进水水质变化响应更为灵敏。此外,无论依靠模型投加还是人工投加,3座沉淀池的沉后水浊度均在1 NTU以下(见图6),满足企业内控标准。在此基础上,还实现了以下3项成果:①混凝剂耗用量下降约6%,絮

凝剂耗用量下降约10%,实现无人工干预加药;②预测沉后水1 h后浊度,相对偏差低于10%;③出水水质稳定性有效提升。

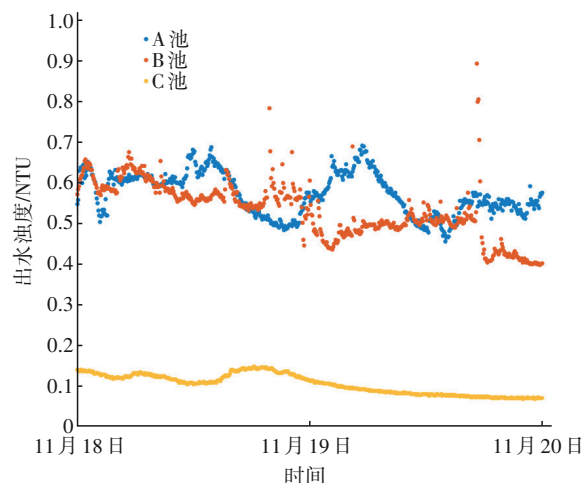


图6 各沉淀池出水浊度对比

Fig.6 Comparison of effluent turbidity from each sedimentation tank

2.3 制水MES系统

制水MES系统主要包括作业计划,运行监视,质量控制,设备管理,资源协同,环境、健康、安全(EHS)管控,员工绩效,平台互联,分析评价及系统维护10大功能模块^[8]。目前,该系统在设施设备管理方面的成效逐步显现,设备全生命周期管理得到进一步加强,具体表现在以下3个方面:①建立检/维修业务知识库。制定了统一的检/维修标准,并与电子工单进行联动,从而实现工单联动自动化和知识沉淀通用化。②巡检工单应用。通过派发巡检工单,可以现场扫码实时掌握设备状态并上报巡检情况。同时融入安全检查全时域理念^[9],增加日常安全检查的相关要求,进一步增强安全管理水平。③检/维修工单应用。主要围绕水厂检/维修工作开

展所依托的三类人(即运行工程师、项目负责人和检修负责人),利用计划-实施-检查-处理(PDCA)循环法对水厂各类设备检/维修流程进行不断优化与重塑,最终形成一套新的执行标准和流程。

通过应用MES系统,优化相关业务流程,在提高设备管理效能方面取得以下3项成果:①进一步提升水厂日常管理工作效率。通过对流程的优化与重塑,打破各级信息壁垒,职责清晰,任务明确,工作效率提升10%。②进一步提升水厂检/维修过程监管力度。通过对检/维修标准的梳理与统一,强化过程环节的可控性,提高过程执行的透明度,设备检/维修过程全追溯覆盖率达到90%。③进一步提升水厂业务数据有效利用。通过MES系统电子工单的记录、留档与统计,为更加精准地分析与研判设备的实际状态、检/维修质量及设备运维决策提供数据支撑,数据可视化率达到100%。

2.4 智能机器人

2.4.1 设备巡检机器人

在加氨间和35 kV总降站内的6 kV开关柜室分别配置1台轮式巡检机器人和1台挂轨式巡检机器人。它们集成最新的机电一体化和信息化技术,工业化设计,采用遥控方式,通过图像识别、红外感应、雷达扫描及气体检测等^[10],替代人对设施设备运行特性和运行环境自动检测,并通过集中监测平台对巡检数据进行对比和趋势分析,巡检情况同步联动数字孪生与仿真平台,及时发现设备运行的事故隐患和故障征兆。

智能巡检机器人相较于传统的人工巡检,主要有3大优势:①使用效益方面,智能巡检机器人使用简单方便、易操作、灵活度高,还可以实现例巡、特巡任务,实时快速地采集数据并上传系统,供管理人员进行分析对比;②经济效益方面,使用智能巡检机器人可以代替该区域的人工巡检,大大减少长期人工的投入;③安全效益方面,在一些漏氨等特殊环境下可以提前告知并在数字孪生与仿真平台上报警,降低人工巡检的安全风险。

2.4.2 物料作业机器人

秉持本质安全理念,依托物料作业机器人打造聚丙烯酰胺(PAM)无人车间。该车间以全自动设备替代人工传统搬运和投料,实现了粉包的自动识别、称重运输和入库储存,并运用机械臂实现粉包破袋,而后通过真空抽吸将PAM输送至后续的配制

设施,同时可联动MES系统,对PAM药包进行精细化物流存储管理。

PAM无人车间投运以来,取得以下3点收益:①采用智能物料作业机器人,化解了该区域人员的职业健康风险;②实现加药定时定量,精准投料,提高制水过程质量把控;③实现加药作业无人化和作业过程集中远程监控,在减少人力成本的同时提高系统管理效率和质量。

2.4.3 水质检测机器人

依托水质检测机器人打造自动化实验室。作为一个高度自动化、智能化的实验室,可对出厂水18项、原水18项中的13项常规理化指标和微生物指标进行全流程自动化检测,具有模块化、高复制性、高拓展性等优势。实验室可7×24 h运行,设计样品检测效率为150个/d,并可根据需求进行调整。主要检测流程:首先复合AGV机器人将样品送至分样系统进行分样,分样完成后,送至pH检测仪、滴定检测仪、高锰酸盐指数检测仪、分光检测仪、电感耦合等离子体光谱(ICP)检测仪及微生物检测仪等设备进行检测,检测完成后,整篮送至废液处理系统进行废液倾倒、收集,污染的样品杯放置在清洗架中,再送至清洗系统清洗、烘干。最后将干净的样品杯送回准备柜中,完成本次任务。

自动化实验室实现了水质检测工作的高效运行和数据管理,减少了人力成本和实验时间,提高了实验效率。同时,自动化检测系统和反馈机制的建立,能够对水质进行实时监控和调整,更最大限度地减少人为因素对水质的影响。

3 总结与展望

“1+2+1+N”运行管理模式通过整合贯通各类信息化、数字化技术,在水量水质调度、设施设备管理、EHS管控及无人巡检作业等方面取得明显成效,实现了数字技术与管理体系的双向适应,切实促进了水厂管理更加精细、生产更加智能、运维更加高效、决策更加科学。在未来的工作中,可从以下3个方面不断完善和优化,进一步提升智慧水厂运行管理水平:

① 加强系统整合。随着数字化转型的不断深入,越来越多的系统平台应运而生。应根据业务需要厘清各系统平台之间的关系,对于业务功能相同或相似的系统平台进行迭代或融合,对于业务功

能不同的系统平台明确边界范围和衔接方式,畅通业务流程和数据传递,避免诞生新的“信息孤岛”。

② 加强制度建设。将当前运行管理过程中取得的宝贵经验和实际成效提炼形成制度标准,明确各类定性和定量指标,进一步规范智慧水厂运行管理手势,并根据智慧水厂建设情况动态调整以适应实际需要。

③ 加强复制推广。智慧水厂的运行管理也要遵循建设过程“一家试点、复制推广”的基本思路,综合考虑企业下属水厂的实际情况,形成通用管理模板,并依托制度标准复制推广运行管理模式,降低试错成本的同时保障未来智慧水厂的平稳运行和高效管理。

参考文献:

- [1] 高嘉诚,刘钥,王伟. 数字建设与科技创新效率:基于2011—2021年中国宏观数据的经验分析[J]. 技术经济与管理研究, 2024(1):43-50.
GAO J C, LIU Y, WANG W. Digital construction and STI efficiency: an empirical analysis based on 2011 to 2021 macro data in China [J]. Journal of Technical Economics & Management, 2024 (1): 43-50 (in Chinese).
- [2] 徐伟忠,于红涛,宋鑫峰,等. 水厂生产管理智慧化建设实践[J]. 净水技术, 2019,38(增刊2):126-129.
XU W Z, YU H T, SONG X F, et al. Practice of intelligent construction and management in waterworks [J]. Water Purification Technology, 2019, 38 (S2): 126-129(in Chinese).
- [3] 孙凝,赵顺萍,解鹏,等. 智慧水厂管理平台的研究与实践[J]. 给水排水, 2022, 48(1):151-155.
SUN N, ZHAO S P, XIE P, et al. Research and practice of smart water plant management platform [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48 (1): 151-155(in Chinese).
- [4] 张曾. 青衣水厂“两化融合、一键制水”智慧水务的创新实践[J]. 四川水力发电, 2023, 42(6):43-46.
ZHANG Z. Innovative practice of smart water service of Tsing Yi water plant through “two industrialization integration, water production with one-button” [J]. Sichuan Hydropower, 2023, 42(6):43-46(in Chinese).
- [5] 李子梦. 水厂智慧化建设与发展研究[J]. 中国新通信, 2021, 23(8):59-61.
LI Z M. Research of intelligent construction and development of waterworks [J]. China New Telecommunications, 2021, 23(8):59-61(in Chinese).
- [6] 杨澜,李柱. 水质评价指数结合数字孪生平台在水厂中的应用实践[J]. 净水技术, 2023, 42(增刊1): 339-346.
YANG L, LI Z. Application of water quality evaluation index combined with digital twin platform in a WTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(S1):339-346 (in Chinese).
- [7] 李柱,杨澜,钱刚. 基于模型驱动实现水厂生产智能调度管理[J]. 中国给水排水, 2023, 39(24): 106-110.
LI Z, YANG L, QIAN G. Implementation of intelligent scheduling in waterworks based on model-driven [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(24):106-110(in Chinese).
- [8] 李柱. MES系统应用于水厂的管理实践[J]. 设备管理与维修, 2023(13):8-10.
LI Z. Management practice of MES system applied in water plant [J]. Plant Maintenance Engineering, 2023 (13):8-10(in Chinese).
- [9] 李柱,李东豪,王懋蕾. 一种配电室智能机器人巡检系统设计[J]. 中国科技信息, 2023(3):70-72.
LI Z, LI D H, WANG M L. Design of an intelligent robot inspection system for power distribution room [J]. China Science and Technology Information, 2023 (3): 70-72 (in Chinese).
- [10] 李柱,杨澜,孔超. 安全检查全时域在工厂安全管理中的应用实践[J]. 建筑安全, 2023, 38(7): 85-87,91.
LI Z, YANG L, KONG C. Application and practice of safety inspection full time domain in factory safety management [J]. Construction Safety, 2023, 38(7): 85-87,91(in Chinese).

作者简介:方文侃(1994—),男,上海人,硕士,工程师,研究方向为水厂运行管理和数字化转型。

E-mail:fangwenkan@shanghaiwater.com

收稿日期:2024-04-20

修回日期:2024-05-19

(编辑:衣春敏)