

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.025

污水处理厂设备检修方案数字化平台研发及应用

钟 炜¹, 马晋超¹, 朱小六²

(1. 天津理工大学 管理学院, 天津 300384; 2. 中建六局华南建设有限公司, 广东 深圳 518101)

摘 要: 为解决当前污水处理厂设备检修决策效率低的问题,提高设备检修方案智能化决策水平,研发了设备检修方案数字化平台。介绍了平台功能设计流程及应用流程,探索设备检修方案智能决策新模式。实际工程应用结果表明,平台提供设备检修信息集成与交互平台,管理人员可在平台中实时查看设备运行状态,对运行状况不良的设备,平台通过可视化方式预警,并将相关信息及时传递给管理人员,对于需检修的设备,系统会自动生成最优检修顺序及路径,提高设备检修决策的科学性与合理性,助力设备数字化管控。

关键词: 污水处理厂; 建筑信息模型; 设备检修; 信息集成; 智能决策

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0134-05

Development and Application of Digital Platform for WWTP Facility Maintenance Scheme

ZHONG Wei¹, MA Jin-chao¹, ZHU Xiao-liu²

(1. School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. China Construction Sixth Bureau South China Construction Co. Ltd., Shenzhen 518101, China)

Abstract: In order to resolve the low efficiency in decision-making of wastewater treatment plant (WWTP) facility maintenance and improve its intelligent level, a digital platform of facility maintenance scheme is developed. The function design and application workflow are illustrated, aiming to explore a new intelligent decision-making way of facility maintenance scheme. The application result of an actual project shows the platform can provide integrated and inter active information for facility maintenance, so that managers can check the operation condition of facilities in real time and are automatically warned through visualization if facilities are in poor condition, then optimal maintenance schedule and work path will be automatically generated. The proposed platform can provide scientific and rational scheme in facility maintenance decision-making and improve its intelligent management level.

Key words: wastewater treatment plant; building information modeling; facility maintenance; integrated information; intelligent decision-making

污水处理厂包含大量污水处理仪器设备,而设备使用 50 年后维护成本约占总成本的 26%^[1],如果污水处理设备不能得到很好的检修和维护,会导

致污水处理效率降低并且增加污水处理厂的后运营成本。设备维护管理(Facility Maintenance Management,简称 FMM)旨在通过科学决策方法解

基金项目: 教育部人文社科规划基金项目(20YJAZH141); 天津市研究生科研创新项目(2020YJSZXB13); 天津市智能制造专项资金项目(20201195)

通信作者: 钟炜 E-mail: zhongwei@tjut.edu.cn

决建筑物在运行和维护期间所产生的问题^[2],一些商用信息系统软件如 ARCHIBUS、IBM Maximo 和 EcoDomus 等已经应用于污水厂设备管理中^[3],上述软件可为管理者提供信息集成和管理平台,实时查看设备状态信息和设备检修信息等,但针对方案决策管理者仍以经验决策为主^[4],忽略了对所收集的信息进行分析处理从而辅助决策。现阶段信息化软件并不能通过自动挖掘数据中的规律为设备管理者与检修人员提供检修方案的决策依据,而 BIM (Building Information Modeling) 技术源于建设工程领域,因其具备可视化、模拟仿真等特点已被越来越多地应用于给水排水专业。针对目前设备管理中存在的数据可视化水平低以及对数据分析和挖掘程度低等问题,应用 BIM 技术搭建设备检修方案数字化管理平台,自动关联三维模型及设备管理信息,为污水厂设备管理各方人员提供数据可视化平台,同时对平台中的数据进行分析和挖掘,将数据转变为知识,以提高设备检修过程中决策的科学性与合理性。

1 BIM 在污水厂设备检修中的价值分析

设备维修管理旨在应用科学方法为设备制定保养和维修方案以减少设备在服役期间出现的功能性衰退,合理提高设备运行使用年限,降低设备损耗和自然淘汰率,用最小的经济消耗获取最大的维修综合效益^[5]。现阶段污水厂设备维修以事后维修为主^[6],该检修策略是在设备发生故障后对设备进行的维修行为,其目标是恢复设备正常运行,但由于机械损伤设备往往不能恢复到最初的运行水平;并且污水处理设备以定制化为主,使得维修周期较长,导致污水处理设备在一段时间内不能投入工作,降低了污水厂的处理效率,可见事后维修策略应用于污水厂设备检修存在决策不科学等问题,但该策略仍被大量采用,主要原因如下:①污水厂的设备维修策略一般由管理人员、现场工作人员和检修人员制定和实施,三者由于分工不同彼此间存在信息不对称、信息传递效率较低等情况;②现阶段,对于污水厂设备运行状态的评估仍以管理人员的主观经验为主,因此管理者专业水平的差异也将导致检修决策时方案与效果的不同;③在设备检修过程中,不同工作人员由于技能和工作习惯的差异,使得污水厂设备检修方案并不能总以最优方案实施^[7]。BIM 作为可支持数字化运维的关键技术可有效填补以上空白^[8],BIM 模型天然集成了设备维护的基础数据,可为污

水厂设备检修中的参与者提供数据集成与交互平台,避免跨部门的数据收集以及调用,同时通过对 BIM 模型中数据进行分析 and 挖掘,可为决策者提供以事前检修为主的污水厂设备检修决策方案。

2 基于 BIM 的设备检修方案智能决策平台

本课题组研发的设备检修方案数字化平台可对设备运行状况进行实时监测,通过人工智能算法实时反馈设备运行状态,为检修人员提供最优的检修决策方案。平台架构原理如图 1 所示。

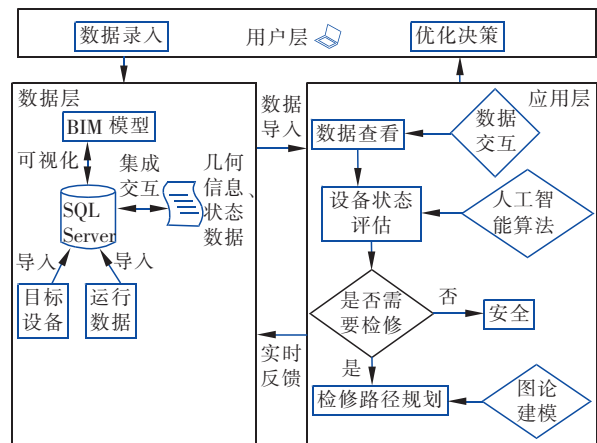


图 1 平台搭建框架

Fig. 1 Framework of platform

在数据层中,将与污水厂设备运行状态相关的多源数据集成于 BIM 模型,为后续污水厂设备检修方案制定提供数据支撑;应用层主要实现污水厂设备状态数据可视化、设备运行状态评估以及检修路径智能规划,其中:①在数据查看模块,平台通过数据库交互技术使得参与污水厂设备检修决策的不同工作人员可对设备运行状态信息进行实时查看,便于工作人员对设备运行状态进行动态评估;②在设备可视化预警功能模块,通过人工智能算法对设备运行状态进行预测和评估,对运行状况不良的设备通过三维可视化方式预警;③在检修路径智能规划模块,平台自动记录需检修设备的相关信息,应用算法为检修人员推荐最优的检修顺序及路径。

2.1 数据查看功能模块

污水厂设备检修所需要的信息分为三大类:①设备几何信息以及属性信息,包括目标设备的尺寸信息、材质信息、型号信息和位置信息等;②设备运行状态数据,在设备运行过程中可反映设备运行效率的数据,如泵房水处理设备中的温度、湿度、流速和压强等数据,这类数据存储于不同格式的文档中,

需要通过数据交互的方式集成于 BIM 模型;③设备检修报告,包括工作人员对污水厂设备进行的周期性检查报告,以及对损坏设备进行维修或零件更换的历史数据。设备几何信息在设备 BIM 模型建立完成后会自动集成于 BIM 模型,可直接从 BIM 模型中调用,设备运行状态数据以及设备检修相关信息数据需通过信息扩展方式集成到 BIM 模型中。笔者通过数据库交互的方式将上述两类信息集成于设备 BIM 模型。

2.2 设备可视化预警功能模块

设备运行状态预警的关键在于设定合理的运行状态阈值,在设备出现故障前发出预警,督促相关人员进行设备检修。应用 SVM (Support Vector Machine) 人工智能算法将污水厂设备运行状态评估转化为机器学习算法中的分类问题,科学评估设备运行状态^[9]。

将检修历史数据中的设备状态数据作为算法的特征变量,状态评估数据作为标签,对数据集进行清洗和量化,通过样本数据集的分割拟合并优化状态评估模型,将现实场景中设备运行状态数据输入模型,模型会对设备运行状态进行预测,输出相应的状态分类,即运行状态良好(4~5)、一般(2~4)与较差(0~2),管理人员可在设备运行状态一般时设定阈值,平台会自动对超出阈值的设备进行定位并记录相关信息。

2.3 检修路径规划功能模块

污水泵房中包含了水泵机组和电力设备,用于将污水抽送至不同的工艺处理池,是所有污水处理工艺得以运行的前提,一旦该区域设备发生故障,将大大降低污水处理效率。现阶段对于设备检修顺序及路径的确定,以检修人员的经验为主,不同检修人员都有不同的检修习惯,因此并不能保证每名检修人员都采纳最优检修路径方案,以最短时间完成对泵房中存在问题设备的检修。该功能模块为解决污水泵房中检修路径最优问题,通过数学建模的方式将路径规划问题抽象为对应的数学问题,选取合适的数学模型进行表达,编写相应的算法解决该数据问题,为检修人员自动制定最优的检修方案,从而以最短时间完成设备检修。

数学建模的具体步骤如下:

① 现实问题描述。检修路径规划问题定义为检修人员在收到平台反馈后,对需要检修的设备逐

个进行检查和维修,检修只发生一次,目标为检修人员完成对问题设备检修后所经历的总路程最短。

② 确定模型。在路径规划问题中有两个关键信息需要表达,一是研究对象包括检修的起始点以及检修设备;二是检修的起始点与检修设备之间的距离,通过图论对实际问题场景进行建模^[10],以图论中的无向带权图对路径问题进行建模,记为 $G(V, E)$,其中 V 表示顶点,即所有需检修设备的集合, E 表示检修设备之间路径距离的集合,因此需解决的数学问题是在无向带权图中,从起始顶点出发遍历图中每个顶点一次,寻找边上权重之和最小的路径。

③ 求解模型。 A^* 算法是一种启发式算法,可在考虑障碍物情况下计算两点之间的最短距离^[11],首先通过 A^* 算法计算出任意两个顶点之间的距离作为有权图中边的权重,然后通过动态规划算法,将最短路径问题不断拆分为子问题,在子问题中遍历有权图上每个顶点,穷举出每种可能的路径方案,计算不同路径边距离权重之和,将权重之和最小的路径输出为最优路径,动态规划算法基本方程如下:

$$f_k(S_k) = \min_{x_k \in D_k(S_k)} [\sum_{x_k}^k d + f_{k-1}(S_{k-1})] \quad (1)$$

$$f_0(S_1) = 0, k = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中: k 为子问题所处的阶段数; f_k 为从初始点开始到目标点总路径最短距离; $D_k(S_k)$ 为选择不同顶点的路径决策集合; d 为 S_k 与 x_k 之间路径距离之和。

3 工程实例

山东省某污水处理厂占地 5.85 hm^2 , 污水处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该厂通过预臭氧、管道混合器混合、折板絮凝和平流沉淀、A/O 等工艺对污水进行处理,包含取水泵房、鼓风机房、脱水机房等多种污水处理构筑物和设备,总造价约 2.837 亿元。以泵房为例来验证所开发的设备检修数字化平台。

3.1 数据查看功能模块

数据查看功能模块可为设备检修中不同工作人员提供统一的数据可视化集成平台,避免由于信息不对称和迟滞而降低沟通效率,工作人员可查看污水厂不同设备的状态运行数据,并且平台提供数据可视化功能,设备检修人员可更加直观地了解设备运行状态。

3.2 可视化预警功能模块

污水厂设备管理者对于设备检修策略(包含检

修时间以及方式)多依据经验或事后检修,笔者所开发的可视化预警功能模块通过后台的人工智能算法对设备运行状态进行实时预测,并在 BIM 模型中自动标定超出设定阈值的设备,降低管理人员反馈检修问题的效率,提高信息表达的准确性,将设备应用事前检修策略的状态衰退曲线与基于预警机制的事后检修策略效果进行对比,如图 2 所示。事后检修时管理者多在设备发生故障之后(t_2 时刻)进行维修,需要较长的维修周期,并且在后续使用周期中也会发生运行故障,但预警功能会提醒管理者在 t_1 时刻对设备进行日常保养和维护,使得设备运行状况一直保持在一般及以上运行状态,有效杜绝故障发生。

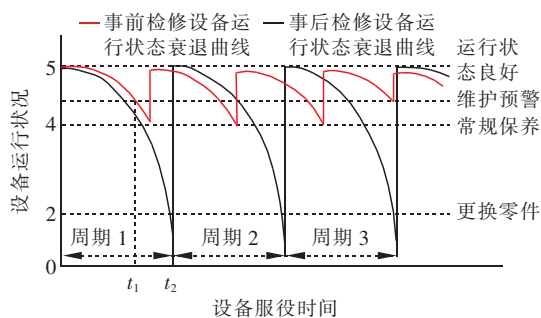


图 2 事后维修与事前维修对比

Fig. 2 Comparison between post-maintenance and pre-maintenance

3.3 检修路径规划功能模块

在设备泵房将超过设定阈值的设备标定为需要检修的设备,一共需对 5 个设备进行检修,分别记为 B、C、D、E 和 F,其中 A 表示检修人员进入泵房的入口,需检修的设备 B、C、D、E 和 F 分别记为终点,应用 A* 算法可计算出由 A 到需检修的各个设备之间的最短距离以及需检修设备间的最短距离,结果如表 1 所示。

表 1 距离矩阵

Tab. 1 Distance matrix

顶点	A	B	C	D	E	F
A	0	23 700	13 400	31 800	11 700	22 600
B	23 700	0	35 420	21 100	23 300	46 300
C	13 400	35 420	0	46 900	21 300	16 300
D	31 800	21 100	46 900	0	23 400	49 400
E	11 700	23 300	21 300	23 400	0	38 580
F	22 600	46 300	16 300	49 400	38 580	0

将该距离作为图数据结构中的边,需检修设备(见图 3)以及入口作为顶点,可将整个应用场景转换为无向带权图,如图 4 所示。

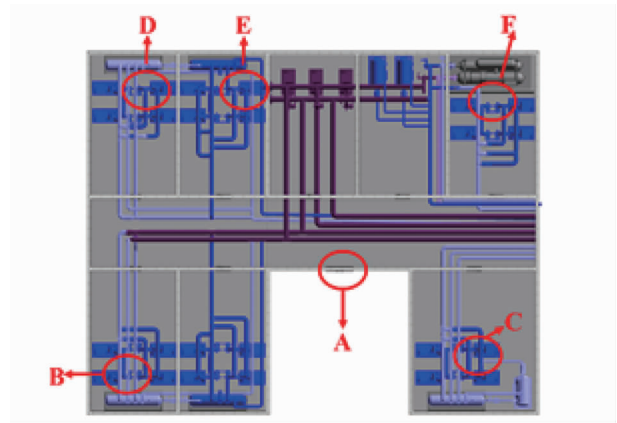


图 3 需检修的设备编号

Fig. 3 Number of equipment to be overhauled

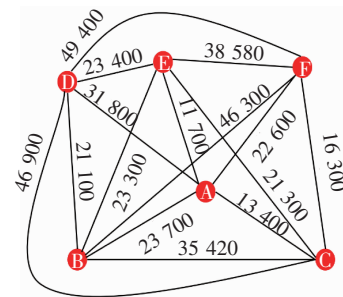


图 4 图数学模型

Fig. 4 Graph mathematical model

通过激活路径规划功能面板,后台程序会自动为检修人员规划出最优的检修路径以及顺序。计算结果表明,对于该应用场景最优的检修顺序是 A - B - C - D - E - F,最短检修路径为 116.7 m,相较于随机挑选的检修路径 A - F - D - C - B - E (177.62 m),笔者所提出的最优算法可减少 34.3% 的检修路径,验证了该决策方法的科学性与合理性。

4 结论

为解决当前水处理厂污水排放设备检修数字化应用程度低、检修方案决策效率低等问题,应用 BIM 技术研发了设备检修数字化平台。平台具备以下核心功能:①数据查看功能,避免传统的跨部门信息调取方式;②可视化预警功能,以可视化的方式将需检修设备信息传递给相关工作人员;③检修路径规划功能,通过在 BIM 模型中调用需检修设备的位置信息,平台自动为检修人员规划最优检修顺序及路径,提高设备检修方案决策的科学性、合理性。通过山东某污水处理厂水泵房的案例,验证了平台各功能模块的适用性,表明该平台具有较好的实用性与适用性,在设备检修决策过程中可为决策者提供信息

集成与交互平台,有效降低了设备检修过程中因信息缺失而增加的沟通、交流成本;基于人工智能算法的设备状态预测与数学建模方法的应用有效保证了设备检修中决策的科学性与合理性,提高了设备检修方案决策的效率。

参考文献:

- [1] MA Z L, REN Y, XIANG X L, *et al.* Data-driven decision-making for equipment maintenance [J]. *Automation in Construction*, 2020, 112(2): 103103.
- [2] CHEN W W, CHEN K Y, CHENG J C P, *et al.* BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders [J]. *Automation in Construction*, 2018, 91: 15–30.
- [3] 张坤杰. 基于 BIM 技术的商业地产项目的运维管理应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
ZHANG Kunjie. Application Research on Operation and Maintenance Management of Commercial Real Estate Projects Based on BIM Technology [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [4] 孙秋兰. 基于 BIM 的建筑设备维修决策系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
SUN Qiulan. Research on BIM-based Construction Equipment Maintenance Decision-making System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).
- [5] 王廷魁, 孙秋兰, 郑小晴. 基于 BIM 的建筑物维修管理系统研究[J]. *建筑经济*, 2014(1): 107–110.
WANG Tingkui, SUN Qiulan, ZHENG Xiaoqing. Research on building maintenance management system based on BIM [J]. *Construction Economy*, 2014(1): 107–110 (in Chinese).
- [6] 张旭东. 基于 RCM/TPM 的城市污水处理厂设备维修模式研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
ZHANG Xudong. Research on Equipment Maintenance Mode of Municipal Sewage Treatment Plant Based on RCM/TPM [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [7] 王广朋. 污水处理厂的设备运行管理及维护措施探析[J]. *中国设备工程*, 2018(20): 26–27.
WANG Guangpeng. Analysis of equipment operation management and maintenance measures in sewage treatment plant [J]. *China Plant Engineering*, 2018(20): 26–27 (in Chinese).
- [8] 胡振中, 彭阳, 田佩龙. 基于 BIM 的运维管理研究与应用综述[J]. *图学学报*, 2015, 36(5): 802–810.
HU Zhenzhong, PENG Yang, TIAN Peilong. A review for researches and applications of BIM-based operation and maintenance management [J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(5): 802–810 (in Chinese).
- [9] 许璟琳, 高尚, 余芳强. 基于图论的建筑机电设备逻辑关系自动提取方法[J]. *图学学报*, 2020, 41(2): 313–318.
XU Jinglin, GAO Shang, YU Fangqiang. Automatic extraction method of logic relationship of electromechanical device based on graph theory [J]. *Journal of Graphics*, 2020, 41(2): 313–318 (in Chinese).
- [10] TAN Y, SONG Y Z, LIU X, *et al.* A BIM-based framework for lift planning in topsides disassembly of offshore oil and gas platforms [J]. *Automation in Construction*, 2017, 79: 19–30.
- [11] CHENG J C P, CHEN W W, CHEN K Y, *et al.* Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms [J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103087.

作者简介: 钟伟(1977–), 男, 天津人, 博士, 教授, 副院长, 主要研究方向为 BIM、工程系统优化、三维信息仿真。

E-mail: zhongwei@tjut.edu.cn

收稿日期: 2021–02–01

修回日期: 2021–03–21

(编辑: 衣春敏)