

城市排水泵站智能化运维管理分析

曾丽珊

(惠州市惠州大堤北堤管理中心, 广东 惠州 516000)

摘要 城市排水泵站作为城市雨污分流系统中的关键基础设施, 其主要功能在于应对强降雨天气条件下的内涝风险, 保障城市排水系统的高效运行与城市居民的生命财产安全。随着城市化进程的不断加快以及极端天气事件频发, 传统泵站运维模式已难以满足现代城市对高效、智能、可持续排涝系统的需求, 因此智能化运维管理技术应运而生, 逐步成为提升城市排涝系统韧性的重要手段。本文系统分析了城市排水泵站的基本原理与构成, 重点探讨了面对超大暴雨情形下泵站在预警系统、自动化管理与应急预案方面的智能化建设需求, 并进一步对能效优化与运维管理等关键技术路径进行了深入剖析, 旨在为城市排水系统的智能化升级提供有益参考。

关键词 超大暴雨; 城市泵站; 排涝管理

中图分类号: TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.030

0 引言

在传统排水系统中, 泵站运行高度依赖人工干预, 存在信息感知滞后、数据传输不畅、设备协同不足以及运维管理效率低下等问题, 难以实现对暴雨等极端水文事件的快速响应与精准调控, 导致泵站系统整体运行韧性与资源利用效率不足。信息技术的迅猛发展推动了城市基础设施管理模式的深层次变革, 基于物联网感知、边缘计算、人工智能算法及大数据分析等多维度融合的智能化运维理念逐步嵌入城市排水系统的构建与管理实践中, 使得泵站设备运行状态实现了全过程感知、全生命周期诊断与动态优化控制。

1 城市泵站的基本原理

城市泵站作为城市防洪和排涝的核心设施, 其基本原理是通过机械设备的运作, 迅速有效地将城市积水抽送到指定地点或自然水体中, 以防止雨水积聚导致的内涝。泵站主要由进水系统、泵装置和排水系统三部分构成。进水系统负责收集来自城市地表、排水管网以及雨水管道的积水, 经过初步的过滤和沉淀处理后, 将水输送到泵装置。泵装置是泵站的“心脏”, 根据水流量的需求启动相应数量和类型的泵, 通过电机驱动泵轮转动, 利用离心力将水抽吸并推送到出水管道。排水系统则负责将泵送出的水流引导到河流、湖泊或其他预定的排水区域, 确保水流顺畅排出, 避免回流现象^[1]。

泵站的设计需考虑多种因素, 包括地理位置、地形地貌、常见降雨量以及极端气候情况的应对能力。此外, 现代城市泵站还融入了高度的自动化和智能化

技术, 如使用远程监控系统实时监测水位变化, 以及采用先进的控制系统自动调节泵的开启和关闭, 确保在不同的天气条件和使用需求下, 泵站能够高效、节能地运行。在泵站设计与运行中, 还需考虑到能效优化, 例如选择高效能电机和泵, 使用变频技术等, 以减少能源消耗并降低运营成本。

2 超大暴雨下的城市泵站排涝管理

2.1 预警系统与数据监控

在超大暴雨情况下, 城市泵站的排涝管理技术尤为关键, 其中预警系统与数据监控的应用成为提升泵站应急响应能力的重要手段, 这不仅涉及高精度的水文监测设备, 还包括先进的数据处理和分析技术。预警系统的基本功能是通过安装在关键地点的水位传感器实时监测各主要排水渠道和积水区的水位情况, 传感器收集的数据被传输到中央监控系统, 在此基础上, 利用地理信息系统(GIS)和水文模型对收集到的数据进行分析, 预测可能的洪水发展趋势和潜在风险区域, 实现对泵站运行的实时调控^[2]。数据监控系统则依托于强大的计算平台, 综合考虑气象预报、历史数据和实时数据, 对泵站的运行状态进行全面分析, 确保在暴雨期间泵站可以根据水位变化自动调整运行策略, 比如自动启停泵机、调节泵速以及开闭闸门等操作, 以适应不断变化的排涝需求。此外, 数据监控还包括对泵站机械设备的健康状态进行监控, 确保所有关键设备能够在高负荷条件下稳定运行, 及时发现并处理故障, 减少因设备故障造成的排涝效率下降或停机等严重后果。为了进一步提高系统的智能化水平, 部分

城市已开始引入人工智能算法与深度学习模型,对多源异构数据进行融合处理,从而实现更高精度的风险识别与趋势预测。通过构建动态神经网络模型,系统不仅能够快速响应短时强降雨带来的突发水位变化,还可依据历史运行规律优化泵站的启停逻辑与功率分配策略,提升整体运行效率与能耗控制水平。同时,预警系统还集成了移动端信息推送功能,一旦监测到异常水位或设备运行异常,可第一时间向运维人员和相关部门发送预警通知,确保人力资源能够迅速调度至重点区域开展巡查与干预作业。此外,系统平台还支持与城市应急指挥系统的数据对接,形成联动响应机制,实现从感知—分析—响应—反馈的闭环管理体系,在应对极端暴雨引发的城市内涝过程中发挥出精准、高效的技术支撑作用,为城市排水系统的智能化升级与韧性提升提供关键保障。

2.2 泵站的自动化与智能化管理

在超大暴雨情况下,城市泵站的自动化与智能化管理显得尤为重要,因为这能显著提高泵站应对突发水文事件的能力。自动化系统依托于先进的传感技术和控制算法,确保泵站能在无人干预的情况下,根据实时数据自动调整运行状态。智能化管理则通过集成的信息处理平台,实现数据的实时分析和决策支持。引入的算法,如反馈控制算法(Feedback Control Algorithm),是实现这一过程中的核心^[3]。

考虑到实时水位调控,反馈控制算法可以表示为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 是控制输入,即泵速调整; $e(t)$ 是误差项,表示实时水位与设定水位的差值; K_p 和 K_i 分别是比例和积分控制增益,用于调整控制力度和响应速度。通过调整这些参数,系统能够动态地适应不同的排水需求,减少泵站运行的能耗同时提高排涝效率。

为了优化泵站能效,可以引入能效优化公式,计算最佳泵速以降低能耗:

$$E_{\min} = \min \left(\sum_{t=0}^T P(t) \cdot u(t) \right) \quad (2)$$

其中, E_{\min} 代表最小化的能耗目标, $P(t)$ 是在时间 t 的单位时间泵运行功耗, T 是考虑的总时间。该公式帮助确定在保持排涝效率的同时,如何调节泵站的运行策略以最小化能源消耗。这两个公式在城市泵站的自动化与智能化管理中具有关键应用:第一个公式确保泵站能根据实时水位变化自动调整泵的运行状态,优化排涝效果;第二个公式则用于优化泵站的能效,确保在达到排涝要求的同时,尽可能减少能源消耗。

通过这种方式,泵站不仅可以应对超大暴雨带来的极端条件,还可以实现经济运行,符合现代城市可持续发展的要求^[4]。

2.3 应急预案的制定

应急预案的目的在于确保在极端天气事件发生时,泵站能够快速、有效地响应,最大程度地减轻或避免因内涝引起的损害。在预案制定过程中,首先需进行风险评估,包括识别关键资产、评估潜在威胁、确定脆弱点以及预计可能的影响,这一评估为后续的预案制定提供科学依据。接着,设计应急响应措施,这些措施包括但不限于泵站设备的快速启动、紧急增加泵机运行数量、调整泵站运行策略以应对突增的水流量。同时,预案还需包括人员的紧急动员与培训,确保所有操作人员熟悉应急操作程序和安全措施,以及与本地应急管理部的协调机制,确保在需要时能够获得额外的支持与资源。另外,应急预案还应包括通信策略,以保证在应急情况下信息能够及时准确地传达给所有相关方。为确保应急预案的有效性,还必须定期进行预案的测试与演练,通过模拟超大暴雨情景检验泵站及相关人员的响应效率和处理能力,根据测试结果对预案进行必要的调整与完善。进一步而言,应急预案的动态修正机制至关重要,应建立常态化的预案评估和优化体系,将每次实战或演练中的问题与经验系统化归纳,纳入预案的修订依据。特别是在应对极端天气频发的新形势下,应急预案不应是静态文档,而需具备高度适应性与灵活性。例如:在暴雨强度超出既有预案设定上限时,应有备用方案可以迅速切换实施,如临时调度高功率移动泵站、部署临时蓄水区或快速封堵系统等。此外,预案中应引入智能化调度模块,结合实时数据与历史案例自动推荐最佳响应路径,提高调度效率和准确性。在跨区域协同层面,应急预案还应纳入周边泵站或水系的联动机制,通过共享信息平台实现资源统筹与互补,增强整体区域排涝能力。为提升公众安全防护意识,应急预案还可涵盖面向居民的风险提示、疏散路线图和避险指引,通过社区广播、移动端推送等手段广泛传播,有效减少人员伤亡和财产损失,形成政府主导、部门协作、群众参与的全方位应急管理格局。

3 优化泵站排涝效率的关键技术

3.1 能效优化技术

能效优化主要通过高效的泵选型、优化的系统设计、变频技术应用以及智能控制系统的整合来实现,

其中高效泵的选型要基于泵站的具体运行条件和水动力特性进行,确保在各种运行点上泵都能保持最佳效率;系统设计优化包括合理的管网布局和减少系统中的水力损失,通过减少管道弯头和调节阀的数量、使用高效的管材来降低摩擦损失;变频技术的应用则允许泵根据实际排水需求自动调整运行速度,有效避免在低负荷时过度消耗能源,同时也减轻了泵的启动冲击,延长设备寿命;智能控制系统通过集成传感器数据和运行反馈,对泵站进行实时监控和自动调节,以适应不断变化的排涝需求,系统可以分析泵站的能效数据和操作状态,自动识别能效优化的潜在点,例如调整泵的运行数量或顺序来匹配实时流量需求,确保系统在保证排涝需求的同时,最大程度地降低能源消耗。此外,周期性的维护和系统升级也是确保能效优化持续性的重要措施,通过定期检查和维护泵站设备,及时更换低效部件,更新系统软件和硬件,可以持续提升泵站的能效表现^[5]。在此基础上,还应引入能效评估与管理机制,构建泵站运行全过程的能效监测模型,实现从能源输入到输出效率的全流程量化评估。通过引入能源绩效指标(EnPI)和单位流量能耗指标,可以对不同工况下的能效水平进行实时对比与优化调整。同时,应采用数字孪生技术构建泵站虚拟运行模型,对不同运行参数组合下的能耗进行仿真分析,提前预判能效最优策略并反馈到实际控制系统中,以提升调度科学性和响应速度。在能源回收方面,对于具备地势高差条件的泵站,可设计势能回收装置,将水流势能转化为电能,进一步提升系统整体能源利用率。此外,应强化运维人员的能效管理培训,提升其对运行数据的识读和分析能力,确保技术系统与人工操作的协同优化。最后,通过构建泵站能效数据库,归集各运行阶段的能效数据,为后续的系统优化、运行管理和技术改造提供科学依据,实现泵站从传统高耗能模式向绿色、低碳、高效运行模式的根本转变,为城市排涝系统的可持续运行提供坚实支撑。

3.2 运维管理技术

运维管理技术的核心在于实施系统的维护策略和采用先进的监控技术,确保每一部分设备都能发挥最大效能,运维团队通过定期的设备检查和即时的故障修复,维护泵站的运行效率,避免因设备故障导致的排涝能力下降;此外,通过应用物联网技术,运维管理可以实现设备的实时监控和遥控操作,监控系统能够实时收集泵站的运行数据,包括流量、压力、电力消耗等关键指标,利用这些数据,运维团队能进行深

入的性能分析,及时调整运行参数,优化排涝策略。进一步地,智能诊断系统的引入为运维管理带来了革新,该系统通过分析历史和实时数据,预测潜在的故障和性能退化,提前采取预防措施,减少意外停机的风险,这种预测性维护策略显著提高了泵站的可靠性和安全性。运维管理还包括对泵站人员的培训和技能提升,确保操作人员能够熟练掌握现代泵站的自动化系统和智能化设备,从而在紧急情况下做出快速有效的响应。为了进一步提升泵站运维的系统化与精细化水平,应构建数字化运维平台,将各类监测数据、维护记录、设备履历以及预警信息集成到统一的信息管理系统中,实现对运维全过程的可视化、可追溯和智能决策支持。该平台通过建立多维度数据模型,不仅能够实现设备运行状态的实时评估,还可依据大数据分析技术对运行趋势进行建模预测,识别长期运行中的能效损耗趋势和系统薄弱环节,制定针对性的维保计划与改进策略。同时,应实施标准化作业流程和规范化管理制度,如设置关键部件更换周期、制定应急处置操作指引、实施绩效考核机制等,以提升运维工作的专业化程度和执行效率。

4 结束语

在现代智慧城市建设不断推进的背景下,全面推动排水泵站运维管理体系的数字化、网络化与智能化转型,已成为提升城市排水系统精细化管理水平、增强城市综合防涝能力的重要技术路径,同时也是构建高韧性城市基础设施系统的关键支撑。其研究不仅具有显著的现实工程应用价值,也在优化城市公共安全体系与促进可持续城市发展方面发挥着重要的作用。

参考文献:

- [1] 林晶晶,张朦,黄小龙,等.城市通江泵站排水对长江干流水质的影响:以武汉市江南泵站为例[J].长江流域资源与环境,2024,33(07):1550-1562.
- [2] 朱洁,应费,季敏捷,等.基于SMART原则的超大型城市排水泵站调研评估与分析[J].净水技术,2023,42(09):142-147.
- [3] 孙毅,邵知宇,束长宝,等.城市排涝泵站远程集控智能化改造研究[J].江苏水利,2023(11):60-63.
- [4] 顾雨涵,李佳钰.新规范城市下穿隧道排水泵站的设计[J].城市道桥与防洪,2023(02):130-133.
- [5] 王彤,任雪璐,关得天,等.北京城市副中心水系景观工程对水质的影响分析[J].水污染及处理,2024,12(04):77-86.