

水利水电工程通风系统智能化控制技术研究

文 / 牛凯波 中国水利水电第三工程局有限公司

李东丽 中国水利水电第三工程局有限公司

摘要：随着全球工业化和城市化进程的加快，水利水电工程作为基础设施建设的重中之重，其建设规模和管理复杂程度与日俱增，通风系统作为水利水电工程不可缺少的一部分，直接关系到内部环境的舒适性、设备运行的稳定性和人员操作的安全性。因此，通风系统智能化控制技术的研究和应用显得尤为迫切和重要，本文全面审视了当前水利水电工程通风系统智能化控制技术的发展趋势，深入分析了关键技术要素，列举了典型应用案例，并对未来发展趋势进行了前瞻性探讨，通过本研究，旨在为提升水利水电工程通风系统的智能化水平提供理论依据和实践指导。

关键词：水利水电工程；通风系统；智能化控制技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.067

引言

水利水电工程通风系统的主要作用是保持工程内部的空气流通，防止设备过热，保证人员工作环境的安全和舒适，传统通风系统往往依赖人工操作，缺乏灵活性和实时性，难以满足现代水利水电工程高效、安全、智能运行的需求，通风系统智能化控制技术的研究和应用尤为重要。

一、水利水电工程隧洞通风系统智能化控制技术现状

（一）技术集成与创新的深度探索

随着物联网技术的广泛应用，通风系统不再是孤立的设备集合，而是高度互联、数据驱动的智能网络，物联网传感器分布在项目的各个角落，实时捕捉温度、湿度、空气质量等关键环境参数，并通过无线网络传输到中央控制系统，这种转化不仅提高了数据的准确性和时效性，也为后续的数据分析和智能决策提供了坚实的基础。大数据技术的引入，赋予了通风系统前所未有的“智慧”，通过对海量历史数据的挖掘和分析，系统可以识别通风需求的季节性变化、设备运行的效率瓶颈和安全隐患，这些数据驱动见解为优化通风策略、预测维护需求和提高整体能效提供了科学依据。^[1]云计算平台的建设进一步增强了通风系统的灵活性和可扩展性，借助云端强大的计算能力和存储资源，系统可以处理更复杂的数据分析任务，支持远程监控和智能调度，使管理者无论身处何地，都能实时掌握通风系统的运行状态，快速应对突发事件。

（二）通风系统智能控制的优化实践

近年来，基于模型预测控制 (MPC) 和自适应控制 (AC) 的先进算法已广泛应用于隧道通风系统的智能控制，MPC 算法能够凭借其建立精确数学模型的能力预测系统未来的运行状态，并据此制定最优控制策略，从而有效避免传统控制方法中常见的滞后和超调问题，AC 算法根据系统实际运行的实时反馈，灵活调整控制参数，保证隧道通风系统始终保持在最佳运行状态。如图 1 所示，人工

智能算法，尤其是深度学习和强化学习，在优化隧道通风系统控制策略方面也显示出巨大潜力，通过深度学习模型的训练，系统可以自动识别和适应多样化的操作场景，实现更加精细化的控制，而强化学习则通过模拟系统在不同控制策略下的响应，不断优化控制策略，以求长期效益最大化。



图 1：隧道通风系统智能控制优化技术概览图

（三）深化系统集成和协同管理在隧道通风中的应用

过去，隧道通风系统往往孤立运行，缺乏统一的管理和调度机制，导致资源利用效率低、运维成本高等问题，随着智能技术的快速发展，隧道通风系统逐渐融入到更广泛的工程管理系统中，形成了集环境监测、设备控制、能源管理、安全预警等功能于一体的综合管理系统。此次改造不仅显著提高了隧道通风系统的自动化水平，还促进了其与照明系统、消防系统等其他工程系统的协调运行，实现了资源的优化配置和高效利用。在系统集成层面，采用统一的数据标准和通信协议，保证不同系统之间的无缝对接和信息共享，通过搭建中央控制平台，管理人员可以对所有通风设备进行集中监控和管理，大大提高了运维效率，同时引入智能调度算法，系统可以

根据实际需求自动调整设备的运行模式和优先级，在保证安全的前提下实现能耗最小化。

二、水利水电工程通风系统智能化控制技术面临的挑战

（一）数据安全和隐私保护的复杂性

在水利水电工程通风系统智能化控制技术的推广中，数据安全和隐私保护问题尤为突出，随着智能系统对数据的依赖性越来越强，数据的采集、存储、处理和分析成为潜在的安全风险。通风系统采集的数据不仅包含设备运行参数、环境监测指标等基本信息，还可能包含工程结构、人员活动规律等敏感内容，这些数据一旦泄露或被恶意利用，将对水利水电工程的安全运行构成直接威胁，甚至可能引发更广泛的社会安全问题。数据安全挑战的复杂性首先体现在技术层面，通风系统需要采用先进的数据加密技术来保障数据传输的安全性，同时需要建立严格的数据访问控制机制，确保只有经过授权的人员才能访问敏感数据，随着黑客攻击的升级，现有的安全措施可能很快就会过时或失效。此外，数据备份和恢复策略也是数据安全的重要组成部分，但在实践中，如何保证备份数据的完整性和可用性，以及如何在灾难发生时快速恢复系统都是极具挑战性的任务。在隐私保护方面，通风系统需要遵循严格的隐私保护法律和标准，确保个人信息的收集、使用和处理符合法律法规的要求，在实践中，如何平衡通风系统的智能化需求和个人隐私保护之间的关系是一个有争议的问题。例如，为了优化通风策略，系统可能需要收集人的活动信息和位置数据，但这些数据的收集和使用很容易触及个人隐私的底线。

（二）技术更新迭代的速度和成本

一方面，技术的快速迭代意味着通风系统需要不断更新，以满足新的技术标准和市场需求；另一方面，技术更新的迭代往往伴随着高昂的成本和时间消耗，这对于资源有限的水利水电工程来说，无疑是一个巨大的负担。如图2所示，技术更新迭代的速度和成本挑战首先体现在硬件设备的升级上，随着物联网、传感器、控制器等硬件技术的不断进步，通风系统需要不断更新硬件设备，提高性能和效率，但是升级硬件设备往往意味着投入大量资金购买新设备，同时需要考虑旧设备的兼容性和复用性，这不仅增加了智能化改造的难度和成本，还可能引发一系列技术兼容和运维管理问题。软件系统的重构和优化也是技术更新迭代的一个重要方面，随着人工智能、机器学习等技术的快速发展，通风系统的软件系统需要不断更新，以适应新的算法和模型，软件系统的重构和优化往往需要对现有系统进行全面评估和测试，以确保新系统的稳定性和可靠性，这不仅需要大量的时间和精力，还可能导致一系列的技术风险和安全隐患。^[2]



图2：技术迭代速度与成本对水利水电工程通风系统更新

（三）隧道通风系统兼容性和互操作性的挑战

受历史传统和技术标准差异的影响，目前隧道通风系统广泛采用各种通信协议、数据格式和控制逻辑，严重阻碍了系统间的信息共享和协同工作，系统兼容性和互操作性的问题主要体现在通信协议和数据格式的多样性上，不同的隧道通风系统可能遵循不同的通信标准和数据表示方法，这使得信息互操作性成为问题。为了搭建系统间的互操作桥梁，需要投入大量资源进行技术研发和标准制定，但由于技术标准的复杂性和多样性以及厂商间的利益纷争，这一过程尤为艰难和有争议。此外，控制逻辑的不统一也是系统兼容互操作道路上的绊脚石，隧道通风系统之间控制策略和算法的差异使得协同控制变得复杂，需要对现有系统进行综合评估和改造，使其遵循统一的标准和控制逻辑，但这无疑增加了智能化改造的难度和成本，也可能导致技术集成和运维管理等一系列棘手问题。

（四）隧道通风智能控制策略的实际应用及效果验证

智能控制策略的制定和实施构成了智能隧道通风系统的关键环节，在实际部署中，智能控制策略往往会遇到许多挑战，其中最困难的是场景适应性和长期效益之间的平衡，智能控制策略的场景适应性测试主要体现在不同应用场景下控制效果的差异。鉴于水利水电工程隧洞通风系统的复杂性和多样性，很难找到一种普遍适用的智能控制策略来适应所有情况，隧道特定的工程环境、气候条件和人员活动方式可能对控制策略的有效性产生深远的影响。因此，在制定智能控制策略时，必须深入考虑不同场景下的实际需求和环境变化，以保证控制策略的稳定性和可靠性。长期利益的平衡是实施智能控制策略的另一个主要挑战，智能控制策略的研究和实施往往需要投入巨大的资源和长时间的研究和试验，在实际应用场景中，由于多重因素的影响，控制策略可能难以达到预期的效果，这时候就需要调整优化策略，实现长期利益最大化。但是，战略的调整和优化也需要大量的资源和时间投入，这对于拥有宝贵资源的水利水电工程

来说,无疑构成了沉重的负担,在制定和实施智能控制策略时,必须充分考虑其长期效益和可持续性,以确保隧道通风系统的智能化改造能够带来实质性的效果和推广。

三、水利水电工程通风系统智能化控制技术的优化策略

(一) 引入超图网络构建智能通风系统

超图网络的引入是一种创新而高效的优化策略,该策略的核心是利用超图网络建立通风系统的模型,通过卷积神经网络的有向超图聚合方法,将实时监测数据转化为通风系统所需的风量。以中国水利水电第十四工程局申请的专利“基于超图网络的地下洞室智能通风方法及系统”为例,该系统既提高了通风系统的微调精度,又保证了不同工况下的动态调节能力。如在具体实现上,系统采用“端-边-云”架构设计,涵盖通风监控系统、网络分析系统和控制优化系统,这种多层次的系统架构可以实现智能通风系统的动态调节闭环,保证通风效果和能量利用的最优化,比如在地下水电站建设中,系统可以根据洞内温度、湿度、气体浓度等实时监测数据,自动调节风机转速和风阀开度,使洞内空气质量始终保持在最佳状态。此外,系统还提出了一种基于深度确定性策略梯度强化学习算法的控制策略,结合各节点计算数据与目标控制数据的偏差,形成风机、风阀、风门的有效耦合控制指令,这种灵活性使通风系统能够适应多变的井下环境要求,提高了安全性和效率。

(二) 融合物联网和大数据技术,提高智能决策能力

物联网和大数据技术的集成应用,为水利水电工程通风系统的智能化控制提供了强大的数据支持和决策能力,通过物联网技术,可以将通风系统的所有部件连接到互联网上,实现信息共享和协同控制,同时,大数据技术可以对通风系统运行过程中产生的大量数据进行挖掘和分析,为智能决策提供科学依据。A大型水利水电工程为例,该项目在通风系统中集成了物联网传感器和大数据分析工具,传感器实时监测通风系统运行状态和室内外环境质量参数,如温度、湿度、CO₂浓度等,并将数据传输至大数据平台进行分析,大数据平台通过先进的算法模型对监测数据进行深度挖掘和智能分析,预测通风系统的运行趋势和潜在故障。基于大数据平台的分析结果,管理者可以及时调整通风系统的控制策略,优化通风效果,降低能耗,大数据平台还可以提供故障预警和智能诊断功能,帮助管理者及时发现和处理通风系统中的异常情况,保证系统的稳定运行。

(三) 应用人工智能算法优化通风控制

人工智能算法在水利水电工程通风系统智能化控制中的应用,可以进一步提高通风系统的性能和效率,

通过人工智能算法的应用,可以对通风系统的运行数据进行深度学习和智能分析,从而制定更加准确的通风控制策略。以B水利工程为例,将人工智能算法引入通风系统进行智能化控制,该算法通过对历史数据和实时监测数据的分析,学习通风系统的运行规律和特性,并根据学习结果自动调整通风系统的控制参数,这种智能化控制策略不仅提高了通风系统的响应速度和调节精度,而且降低了能耗和运行成本。此外,人工智能算法还可以应用于通风系统的故障诊断和预测性维护,该算法通过对通风系统运行数据的深度挖掘和分析,预测潜在故障的发生概率和时间节点,为管理者提供及时的维护和更换建议,避免故障对通风系统的影响和损失。

(四) 加强隧道通风智能监控和远程控制系统建设

隧道通风智能监控远程控制系统的建设,可以跟踪通风系统的运行状态和环境质量指标,为管理者提供准确的数据支持,远程控制系统使管理人员能够远程控制和调节通风系统,大大提高了管理的便利性和效率。以D水利隧道工程为例,该工程部署了一套智能监控和远程控制系统,对隧道通风进行综合管理,在精密传感器的帮助下,智能监控系统持续监测通风系统的核心参数,包括风机转速、风门开闭状态、隧道内外温差等关键数据,并将这些实时信息传输到中央监控室进行深入分析和处理,远程控制系统根据监测数据的分析结果灵活控制通风系统,包括调节风机转速、开闭风门等。^[3]该智能监控与远程控制系统的建立不仅显著提高了隧道通风系统的运行效率和安全性,还有效减轻了管理人员的工作量,通过持续的实时监控和详细的数据分析,管理人员可以快速识别和处理通风系统中的任何异常情况,保证系统的连续稳定运行,进而保证整个水利隧道工程的安全运行。

结语

为了克服传统水利水电工程通风系统在实际应用中存在的缺点,将智能化技术融入通风系统建设迫在眉睫。智能化通风技术在水利水电工程的广泛应用,有利于提高水利水电工程的安全性。尽管智能通风系统占有一定的优势,但在实际运行中还存在相应的技术问题,需要进行不断优化,从而更好地保障水利水电工程的整体通风效果,有效降低事故发生率。

参考文献

- [1] 王国法,杜毅博,陈晓晶,等.从水利水电工程机械化到自动化和智能化的发展与创新实践——纪念《工矿自动化》创刊50周年[J].工矿自动化,2023,49(6):1-18.
- [2] 王国法.煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J].煤炭科学技术,2022,50(1):1-27.
- [3] 邢永亮,曹金龙.煤矿智能化通风安全管控研究[J].工矿自动化,2021,47(S2):52-55.