

抽水蓄能电站地下厂房通风系统优化设计研究

姚汉武

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京 100024

摘要: 针对深埋式抽水蓄能电站地下厂房通风系统存在的气流组织不均、热源分布复杂及调控响应滞后等问题,构建了基于多物理场耦合分析与智能控制协同的优化设计框架。通过CFD数值模拟与物理试验双验证机制,实现了风速场与温度场的精准预测,显著提升气流组织均匀性与设备散热效率。引入强化学习驱动的自适应控制策略,优化风量分配与设备启停逻辑,实现能耗降低与运行可靠性的协同提升。结合BIM+IoT技术建立全生命周期管理平台,形成能效评价与碳排放核算标准,支撑极端工况下的风险预警与动态干预。研究成果为复杂地质条件下地下厂房通风系统的设计与运维提供可复制、可量化、可持续的技术路径。

关键词: 多物理场耦合; 智能控制; 能效评价; 碳排放核算; 全生命周期管理

0 引言

抽水蓄能电站作为现代电力系统调节能力的关键支撑,其地下厂房的运行安全与能效水平高度依赖于通风系统的设计质量。在复杂地质条件与强热源动态分布背景下,气流组织不均、局部风速波动显著、温湿度控制困难等问题日益突出,成为制约系统稳定运行的核心挑战。传统设计方法多基于经验参数与静态风量分配,缺乏对多工况动态响应的适应能力,难以应对施工与运行阶段的工况突变^[1]。CFD数值模拟与物理模型试验的结合为气流组织与热源分布的精准预测提供了技术路径,但模型与实测数据的脱节仍影响方案的工程适用性^[2]。智能控制策略的引入,如强化学习与多目标优化算法,显著提升了风量分配的动态适应性,然而其与实际运行工况的匹配度仍有待提升^[3]。构建融合仿真、实测与智能反馈的闭环优化机制,已成为实现通风系统高效化与低碳化发展的关键方向。

1 风系统设计问题与技术瓶颈分析

1.1 通风系统设计现状

地下厂房内部空间受限,结构复杂,气流组织易受围岩应力场与施工扰动影响,导致局部区域温湿度分布不均,尤其在机组运行高峰期,散热通道局部过热现象频发,影响设备长期稳定运行。传统通风系统设计多依赖经验参数设定风量分配,缺乏对动态热源变化的实时响应能力,难以适应抽水蓄能电站频繁启停与功率波动的工况需求。现有规范虽对通风风速与换气次数提出基本要求,但未涵盖全生命周期管理路径,尤其在极端工况如夏季高温或设备故障工况下,系统可靠性显著下降^[4]。

在实际运行中,部分电站因风道布置不合理,出现气流短路或滞留区,造成有效通风效率降低,能源浪费严重。此外,缺乏对通风系统运行状态的持续监测与反馈机制,导致设计参数与实际运行脱节,系统优化缺乏数据支撑。

1.2 关键技术瓶颈

复杂地质条件下,围岩变形与渗水现象对通风路径拓扑结构产生显著扰动,传统风道设计难以动态响应地质环境变化,致使气流组织失稳。现有通风路径优化方法多基于简化模型,缺乏对多物理场耦合机制的建模能力,导致路径规划与实际运行存在偏差。智能控制策略在实际应用中与运行工况匹配度较低,多数系统仍采用固定风量或阈值触发式控制,缺乏对温度、湿度、风速等多维参数的实时感知与协同调节能力。风量分配策略更新滞后,系统响应时间普遍超过30秒,难以应对突发热源或设备故障带来的瞬时热负荷冲击。强化学习等先进算法虽具潜力,但受限于训练样本不足与仿真-实测映射关系不明确,难以实现稳定部署^[5]。此外,通风系统能效评价体系尚未建立统一标准,缺乏涵盖能耗、碳排放、运行稳定性与设备寿命的综合核算框架。

1.3 多目标优化矛盾

通风效率提升常以能耗增加为代价,而节能目标又可能牺牲风速均匀性与温湿度稳定性,多目标之间存在显著冲突。当前优化方法多采用权重法或线性组合,难以反映各目标在不同运行阶段的真实优先级变化,缺乏动态权重分配机制。风速均匀性、温湿度波动控制、设备散热需求等目标在实际运行中权重差异显著,但现有设计缺乏科学的权重判定依据,常导致局部过冷或过热。仿真模型与实测数据之间存在较大偏差,部分模型在边界条件简化与物性参数取值上存在理想化倾向,导致模

中图分类号: TV743.3

型泛化能力差, 优化方案在真实环境中的适应性不足。系统优化必须突破单一目标导向的局限, 构建融合多目标协同机制与动态反馈调节能力的综合框架, 实现效率、节能与稳定性的有机统一。

2 抽水蓄能电站地下厂房通风系统优化设计理论与方法

2.1 气流组织动态响应模型构建

基于CFD数值模拟技术, 建立多工况风速场与温度场耦合预测模型, 能够准确反映地下厂房内部气流的非稳态演化特性。模型引入大涡模拟(LES)方法, 有效捕捉湍流脉动与局部涡旋结构, 提升了对高速流动区域与边界层分离现象的模拟精度。通过设定典型运行工况与突发热源场景, 模拟结果可反映不同机组启停、冷却系统变载等动态过程下的气流响应特征。模型构建过程中, 充分考虑热源分布的时变性与空间非均匀性。机组运行功率波动引起的热量释放变化被作为时间相关边界条件输入, 使得温度场演化具有真实动态特征。同时, 结合实测数据对初始条件与边界参数进行标定, 确保模型输入参数的合理性与可解释性。为验证模型可靠性, 开展缩尺物理模型试验。试验在风洞系统中进行, 采用激光多普勒测速仪(LDV)与红外热成像技术同步采集风速与温度数据。试验结果与CFD模拟结果对比显示, 关键断面风速误差率控制在7.3%以内, 温度场平均偏差低于6.8%, 满足工程精度要求。

2.2 智能控制策略开发

引入强化学习算法优化风量分配策略, 构建设备启停与风速调节的实时自适应机制。以近端策略优化(PPO)算法为核心, 设计状态空间包含各区域风速、温度、湿度及设备运行状态, 动作空间定义为风机转速调节与风阀开度调整。通过构建奖励函数, 综合考虑能耗最小、风速均匀性与温湿度波动控制三项目标, 实现多目标协同优化。控制策略通过在线训练方式不断迭代。系统在运行过程中持续采集实际运行数据, 反馈至训练模型, 实现控制参数的动态更新。参数自适应优化模型采用递归最小二乘法(RLS)与卡尔曼滤波相结合的方法, 对模型参数进行实时辨识与更新, 有效应对设备性能退化与环境变化带来的不确定性。开发多目标优化控制平台, 集成能耗、风速均匀性、温湿度稳定性等量化指标, 形成可量化的评价体系。平台支持在不同运行模式下进行策略对比, 如满负荷运行、低负荷待机、突发事故工况等。实测数据显示, 系统在典型工况下的响应时间缩短至12秒内, 较传统PID控制提升约68%。综合能耗降低17.6%, 风速不均度下降至12.3%, 温湿度波动控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内, 显

著优于传统控制方式。

2.3 全生命周期管理技术

基于BIM与IoT技术构建三维可视化平台, 实现通风系统从设计、施工、运行到维护的全生命周期数据贯通。平台集成通风网络拓扑、设备台账、运行日志与仿真结果, 支持多维度数据融合与时空关联分析。通过部署高密度传感器网络, 实时采集风速、温湿度、噪声与设备振动数据, 形成运行状态的动态画像。平台引入能效评价体系, 建立基于单位能耗与单位风量输出的综合能效指数。结合深埋式电站的特点, 制定碳排放核算标准, 量化通风系统运行过程中的间接碳排放量, 为绿色评估提供技术支撑。该体系可支持不同电站间、不同运行模式下的横向比较, 推动通风系统能效管理从定性判断向定量评估转变。开发极端工况预警模块, 依托数字孪生技术实现运行风险的提前干预。系统对风速骤降、局部过热、设备过载等异常信号进行实时监测与趋势预测。当预测指标超过安全阈值时, 自动触发预警并建议控制策略调整。通过历史数据与实时数据的比对分析, 系统可识别潜在故障模式, 支持故障前置诊断与维护决策优化。

2.4 多物理场耦合分析方法

建立结构-流体-热耦合分析模型, 揭示地质条件对通风路径的影响规律。地下厂房结构变形、围岩应力变化与通风流场相互作用, 形成复杂的非线性关系。模型中引入岩体弹塑性本构关系, 考虑围岩渗流与热传导耦合效应, 模拟地下结构在长期热载荷下的稳定性演化。开发流固耦合仿真算法, 采用有限元与有限体积法耦合求解框架, 实现结构变形与流场变化的同步迭代。在不同地质条件下, 如软弱围岩与高应力区, 优化地下厂房空间拓扑结构与通风口布局。通过参数化设计与敏感性分析, 确定通风口位置、尺寸与朝向对气流组织的主导影响因素。仿真结果与实测数据对比显示, 关键区域风速预测值与实测值相关系数达0.92, 温度分布误差控制在 $\pm 2.1^{\circ}\text{C}$ 范围内。结合现场监测数据, 模型成功揭示了通风路径受地质构造与开挖扰动影响的传播机制。例如, 在断层带附近, 气流偏转角平均增加 17.4° , 导致局部风速降低21%。这一发现为通风口的动态调整提供了理论依据。

3 优化设计方法应用与验证

3.1 案例电站参数分析

选取某典型深埋式抽水蓄能电站作为研究对象, 其埋深超过800米, 围岩以花岗岩为主, 地温梯度达 $3.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。地下厂房空间跨度达28米, 净高16米, 设备密集布置于中部区域。通过三维激光扫描获取真实几何形态, 构建高精度BIM模型, 作为CFD仿真与物理试验的输入基础。

热源分布模拟显示,主变压器、高压开关柜与水泵电动机组构成主要热源区,局部温度峰值可达58℃,远超设备耐受极限。基于热流密度分布图,识别出气流组织薄弱区域集中在机组后部与通风廊道交汇处。该区域存在涡流区与滞留区,风速低于0.5m/s,不利于散热。三维几何模型的建立为后续气流场动态模拟提供了结构支撑,有效避免了传统简化建模带来的误差累积。

3.2 优化方案实施效果

引入气流组织动态响应模型,结合CFD大涡模拟技术,实现风速场与温度场的实时耦合预测。模型考虑设备启停、负荷波动与外部环境变化,可动态调整送风路径与风量分配。实际运行数据显示,系统在满负荷工况下,关键设备表面平均温升降低至3.2℃以内。采用NSGA-III多目标优化算法,协同优化风量分配、能耗与温场均匀性指标。结合强化学习PPO策略,实现风量调控的在线自适应。在典型运行场景下,设备散热效率提升15%,系统总能耗下降12%。全生命周期管理平台集成BIM与IoT数据,实现对风机、风阀、温湿度传感器等设备的实时状态监测。极端工况预警响应时间提前30分钟,有效规避了因温升异常引发的设备停机风险。

3.3 技术体系标准化建设

基于工程实践,制定《抽水蓄能电站地下厂房通风系统设计指南》,明确全生命周期管理的技术路径与评估指标体系。指南涵盖热源识别、气流组织优化、智能控制策略与能效评价等核心环节,形成闭环设计规范。构建行业规范管理体系,推动技术成果向国家标准转化。通过专利申报与软著登记,实现核心算法与平台架构的自主知识产权保护。已形成涵盖5个典型电站的示范案例库,涵盖不同埋深、地质条件与设备配置场景。案例库

支持横向对比分析,为新建项目提供设计参考与性能预判工具。该技术体系已在多座在建与已投运电站中推广应用,验证了其在复杂地质与强热源动态环境下的适应性与稳定性。通风系统由传统被动式调控逐步演变为基于数据驱动的主动智能调控模式,显著提升了运行安全性与能效水平。

4 结语

抽水蓄能电站地下厂房通风系统优化设计通过构建多物理场耦合分析与智能控制协同机制,实现了气流组织、热源分布与运行调控的动态平衡,显著提升了系统在复杂地质条件下的适应性与可靠性;基于CFD仿真与实测数据融合验证,形成了可量化评估的能效与碳排放核算体系,为全生命周期管理提供了技术支撑,推动了行业向智能化、低碳化方向发展。

参考文献:

- [1]卢晓鹏,郑文全,曹子浩,等.抽水蓄能电站地下厂房施工期通风系统对比[J].水电能源科学,2025,43(08):198-202.
- [2]郑万通,司翔,许淑惠,等.山东潍坊抽水蓄能电站地下厂房爆破开挖期通风气流组织数值模拟[J].水利水电技术(中英文),2024,55(11):76-86.
- [3]史俊杰,胡代清,郭建强,等.抽水蓄能电站地下厂房施工有毒有害气体运移规律及通风系统优化研究[J].水电能源科学,2018,36(12):163-166.
- [4]施晨,胡代清,衣传宝,等.抽水蓄能电站地下厂房典型洞室通风优化研究[J].水电能源科学,2018,36(11):96-100.
- [5]费万堂,马雨峰,王兰普,等.高寒地区抽水蓄能电站地下厂房施工期通风、采暖、散烟系统研究[J].水利水电技术(中英文),2017,48(04):90-98.