

江垭水电站地下厂房通风系统优化研究与实践

——以中控室与计算机室恒温恒湿环境保障为例

李明理 钟广宇

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司 湖南 长沙 410000

【摘要】：江垭水电站地下厂房核心功能区（如中控室、计算机室）对室内温湿度环境具有严苛要求，其环境保障是通风系统设计的难点。针对江垭水电站地下厂房中控室与计算机室因原精密空调系统报废、被迫使用普通空调导致的温湿度失控、设备高温故障频发等突出问题，通过深入现场问题诊断与需求分析，提出了基于风冷与风冷水冷混合技术的精密空调更新方案，并进行了综合比选。最终选定并实施了风冷水冷混合型精密空调系统方案。优化实践后的测试数据表明：核心区域温度波动范围显著收窄，高温热点消除，湿度控制精度满足规范要求，因超温导致的设备故障完全消除，系统运行可靠性大幅提升。本案例研究表明，针对地下厂房特定环境，采用风冷水冷混合冷却的精密空调技术是一种解决高发热、严要求功能区恒温恒湿环境保障难题的有效途径。

【关键词】：水电站；地下厂房；通风优化；精密空调；恒温恒湿；风冷水冷混合；环境控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.062

1 引言

江垭水电站地下厂房中控室、计算机室等区域装有大量精密电气设备，对环境温湿度、洁净度和气流组织均有严格要求，通常需维持在 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $50\%\pm 10\%\text{RH}$ 的水平^[1]。区域内原精密空调系统因长期运行、压缩机老化已停用多年，使用普通空调（难以满足高精度环境控制需求^[2]）后出现温湿度超标、设备过热及故障频发等问题，存在显著安全隐患。本文立足水电站地下厂房密闭性强、散热条件复杂的特殊环境，通过现场问题诊断与需求解析，探索适配的精密空调系统改造路径，旨在为解决同类高要求功能区的环境保障难题提供技术思路与实践参照。

2 工程概况与问题分析

2.1 工程概况

江垭水电站位于湖南省澧水流域溇水河支流，装机容量 $3\times 100\text{MW}$ 。其地下厂房为大型洞室群，布置于右坝端山体内部，主副厂房尺寸 $107.9\text{m}\times 19\text{m}\times 46\text{m}$ 。厂房整体采用机械通风，冷源为天然冷源，常年温度 $10\text{-}30^{\circ}\text{C}$ ，能满足常规区域要求。中控室与计算机室位于地下厂房内，作为核心精密电气设备区，原设计依赖 2 台 55kW 海洛斯(HIROSS)恒温恒湿精密空调保障严苛的温湿度环境。

2.2 存在问题及诊断分析

原精密空调系统已停运多年，经诊断存在以下核心问题：

(1) 设备严重老化失效：2 台海洛斯 U55A 精密空调运行超过 16 年，4 台压缩机全部损坏且维修无效，系统彻底报废。

(2) 替代方案失效：被迫使用的普通空调完全无法满足机房环境标准：

①温湿度失控：温度长期居高不下引发普通空调超温停机故障；湿度波动大，无法维持稳定。

②环境质量恶化：洁净度不足导致潜在有潮湿、缺氧风险。

综上，核心矛盾体现为：精密空调系统报废后缺乏有效替代方案，叠加地下密闭环境固有的通风散热瓶颈，导致中控室与计算机室温湿度环境严重失控，设备运行安全受到直接威胁，因此亟需升级符合精密环境标准的空调系统，并同步优化其散热保障机制。

3 通风空调设计方案

3.1 两种精密空调设计

针对地下厂房环境特点，提出风冷型精密空调和风冷水冷混合型精密空调两种方案。

风冷型精密空调：室内空气经蒸发器冷却除湿后送回房间，热量通过制冷剂循环至室外风冷冷凝器，由风扇排入大气（见图 1）。

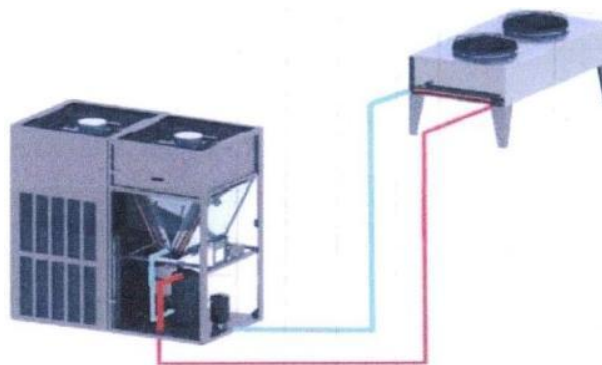


图 1 风冷型示意图

风冷水冷混合型精密空调：在风冷系统基础上，增加一套

水冷换热系统（见图2）。制冷剂热量可选择通过风冷冷凝器或水冷冷凝器（板式换热器）散出。水冷系统利用电站便利的尾水或水库深层水（水温常年稳定在约10℃左右）作为冷源。

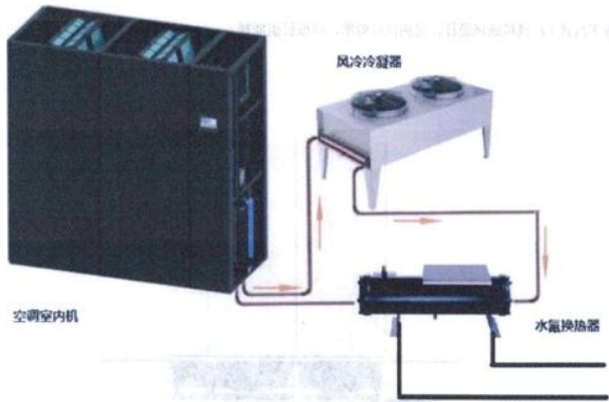


图2 风冷水冷混合型示意图

3.2 方案比选与确定

风冷型：优点：系统构成简单，安装运维便捷，初期投资低。缺点：制冷依赖室外空气散热，受洞外温度影响大；夏季高温或通风不畅时，冷凝器效率下降，易致制冷能力衰减，可靠性受影响，且对室外机通风要求高。

风冷水冷混合型：优点：高效节能，优先利用10℃低温水冷却，可降低冷凝温度，提升制冷量，夏季优势显著；双系统互为备份，故障时自动切换，保障调控不间断；适应性强，能克服外部散热不足，性能稳定。缺点：系统较复杂，需增设水循环组件（水泵、管路、水处理装置），初期投资及运维要求略高，需注重水质管理。

基于江垭电站地下厂房的具体条件（洞外散热空间有限且易受高温影响、取水方便且水温低稳定）以及核心功能区对温湿度保障的高可靠性、高效率的刚性需求，对两方案进行综合比选：风冷水冷混合型精密空调方案在能效、可靠性、环境适应性方面均显著优于单纯风冷方案，更契合江垭水电站中控室与计算机室的高标准要求及地下环境特点^[3]。因此，确定选用风冷水冷混合型精密空调作为优化实施方案。

4 实践与效果测试

4.1 效果测试方案

彻底移除已报废的海洛斯精密空调及配套的普通空调，安装风冷水冷混合型精密空调内外机系统。

为科学评估优化效果，在设备投入稳定运行后（选择夏季典型高温月），组织进行效果测试：

测试方法：采用与优化前同类故障时期可比的方法，在相同位置布点监测。

测点布置：在机房关键设备区域、回风口、送风口及人员主要活动区域设置温湿度传感器（经校准）。

测试参数：连续监测并记录室内空气干球温度、相对湿度。

对比工况：记录优化前（使用普通空调期间）同期的典型高温故障时段温湿度数据作为基准。记录优化后新系统运行下的温湿度数据。

其他观察：记录设备运行状态（特别是原超温停机设备）、空调系统自身运行状况（压缩机启停、模式切换等）、维护情况。

4.2 测试结果与分析

优化前后的主要环境参数对比结果如下表（以代表性高温日数据为例）：

表1 环境参数对比

指标	优化前（普通空调）	优化后（混合精密空调）	改善效果	达标情况
温度范围（℃）	28.0-36.5（局部>40）	22.5±0.8	显著降低，波动极小	满足 ≤23.5±1℃
高温热点	多处存在，>40℃	完全消除	解决局部过热	达标
湿度范围（%RH）	45-85（波动剧烈）	50.0±3.5	显著稳定，波动控制在要求内	满足 50±5%RH
设备超温故障	频发（如压缩机停机）	零发生	彻底根除	达标
系统运行状态	普通空调频繁启停故障	混合空调运行平稳，模式切换正常	可靠性飞跃提升	优异

优化前后计算机房核心区域典型日温度变化曲线对比图

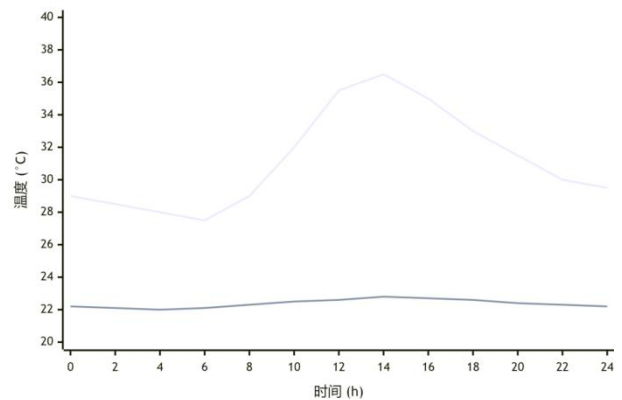


图3 优化前后典型日机房核心区域温度变化曲线对比图（显示优化后温度稳定在设定值附近小幅波动，优化前温度大幅波动且严重超标）。

"优化后计算机房温度场分布云图 (示意)"



图4 优化后机房温度场分布云图(显示温度分布均匀,无高温热点)

结果分析:

温湿度控制: 新系统实现了精确的恒温恒湿控制, 温度波动范围远小于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (实际达 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$), 湿度波动控制在 $\pm 3.5\% \text{RH}$ 内, 完全满足甚至优于设计标准和设备要求。彻底解决了优化前温度失控、湿度波动大的核心问题。

过热问题根除: 优化后温度场分布均匀, 局部高温热点完全消除, 因环境超温导致的设备(如压缩机)停机故障自投运以来零发生, 设备运行安全性得到根本保障。

系统可靠性: 混合精密空调运行稳定, 其风冷水冷双重冷凝系统的设计在测试期间表现可靠。监控系统运行正常, 有效提升了运维管理效率。

环境改善: 高换气率、正压维持等功能得到有效保障, 配合精密空调的过滤系统, 机房空气洁净度显著改善。

参考文献:

- [1] GB50174-2008 电子信息系统机房设计规范[S].
- [2] GB/T 19413-2010 计算机和数据处理机房用单元式空气调节机
- [3] 石茸,李运江.某地下发电厂房除湿改造实践[J].建筑热能通风空调,2018,37(9):88-91.
- [4] 刘文祥,黄少华.江垭水利枢纽工程地下厂房通风空调设计[J].人民长江,2000,31(4):17-18,31.

结论: 优化实践成功解决了江垭水电站地下厂房中控室与计算机室长期存在的温湿度环境失控问题, 各项指标均达到或超过预期目标, 设备运行安全性和系统可靠性实现质的飞跃。

5 讨论与结语

本研究针对江垭水电站地下厂房计算机房与中控室因精密空调报废导致的温湿度失控问题, 开展了从问题诊断、方案比选到工程实践的全流程优化研究。优化后系统运行稳定, 温湿度控制精度($22.5\pm 0.8^{\circ}\text{C}, 50.0\pm 3.5\% \text{RH}$)远超普通空调, 彻底消除了局部高温热点与设备超温故障, 实现了质的飞跃。

本优化实践成功的关键在于技术选型的精准性与系统设计的高可靠性。分析表明, 所采用的风冷水冷混合型精密空调方案是解决该地下空间环境控制难题的最优解。其成功得益于两大核心优势: 一是充分利用电站丰富的低温水源, 大幅提升了系统能效(COP)与制冷能力, 尤其在高负荷夏季工况下表现卓越; 二是“风冷+水冷”双冷凝系统的冗余备份设计, 完美克服了地下厂房洞外散热条件受限的瓶颈, 确保了核心功能区环境保障的万无一失, 实现了极高的运行可靠性。这为解决类似散热条件受限空间的恒温恒湿环境控制难题提供了新的思路和经过验证的有效途径。

本研究成果表明, 对于水电站地下厂房等高发热、严要求的功能区, 摒弃“打补丁”式的临时替代方案, 转而采用与环境特征高度适配的定制化、高可靠性精密环境控制系统, 是保障其长期安全、稳定运行的根本举措。所选用的风水冷混合技术方案, 对于拥有类似低温水源(如江河湖海水、电厂循环水)的各类地下建筑或密闭空间中的数据中心、控制中心等, 具有较强的借鉴与推广价值^[4]。

本研究的主要局限性在于对长期运行能效的精确数据跟踪有待持续进行。未来的研究可聚焦于混合系统在不同季节模式下的能效精准测评与经济性分析, 进一步量化其全生命周期的综合效益。