

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-649-06

某水电站地下厂房热湿环境测试与分析

陈极¹ 罗禄堂¹ 张文波¹ 朱海鹏² 李斌³ 肖益民²

(1. 贵州乌江水电开发有限责任公司东风发电厂 贵阳 550000;

2. 重庆大学 重庆 400000;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 长沙 410014)

【摘要】 地下水电站厂房内的热湿环境对工作人员身体健康及设备安全运行有着重要影响。针对贵州某水电站进行了全年4个典型季节的地下厂房内热湿环境现场测试,发现该水电站地下厂房主要洞室全年干球温度10.2~26.7℃、相对湿度44.0~94.5%;热湿环境状况总体较好,但部分季节、部分洞室存在空气相对湿度偏高,部分低温设备及管道壁面存在不同程度“结露”现象。通过对地下厂房热湿环境存在问题的理论分析,提出了针对性的通风除湿改进方案,可以为类似水电站地下厂房的热湿环境调控提供一定的工程参考。

【关键词】 水电站地下厂房; 热湿环境; 现场测试; 结露; 除湿

中图分类号 TV73 文献标志码 A

Analysis for the Thermal Environment of the Underground Powerhouse in a Hydropower Station

Chen Ji¹ Luo Lutang¹ Zhang Wenbo¹ Zhu Haipeng² Li Bin³ Xiao Yimin²

(1. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd, Dongfeng Power Plant, Guiyang, 550000;

2. Chongqing University, Chongqing, 400000;

3. Zhongnan Engineering Co., Ltd, Powerchina, Changsha, 410014)

【Abstract】 The thermal environment of the underground powerhouse in hydropower station has a significant impact on the health of the staffs and the operation of the equipments. This paper presents on-site tests of thermal environment for four typical seasons throughout the year at a hydropower station in Guizhou. The results show the yearly air temperature is 10.2~26.7℃ and the relative humidity is 44.0~94.5% for the main plants, which indicates the integral thermal environment is in good condition. However, some plants have the problem of high relative humidity in part seasons. Another problem is the dewing phenomenon on the low temperature equipments and pipes. The paper presents the improved plan for the ventilation based on the theoretical analysis of the thermal environment problems mentioned above. The conclusions can provide references for the thermal environment similar to the underground powerhouse in hydropower station.

【Keywords】 Underground powerhouse of hydropower station; Thermal environment; On-site testing; Dewing; Dehumidification

0 引言

地下水电站的发电厂房往往深埋于地下,且厂房结构复杂、内部设备众多。为了保证厂内人员健

康及设备安全、可靠运行,地下水电站的厂房热湿环境调控至关重要^[1]。通常,对于新建设水电站,其地下厂房均设计有通风、空调系统,两者结合运

作者简介: 陈极 (1992.09-), 男, 工学学士, 工程师, E-mail: 1506390069@qq.com

通讯作者: 肖益民 (1974.02-), 男, 工学博士, 教授, E-mail: xiaoyimin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-25

行，实现对厂房热湿环境的有效调控^[2,3]。对于贵州某电站而言，由于建设时间相对比较久远（截止目前已建成运行近 30 年），地下厂房环境调控仅设计通风系统，厂房热湿环境全年仅依靠厂内外送、排风加以实现。在实际运行中，该电站工作人员反映地下厂房存在部分季节、部分洞室比较潮湿的问题。

目前，针对水电站地下厂房热湿环境的相关研究主要集中在设置有空调系统的地下厂房，主要研究通风空调应用条件下地下厂房内的温度场、湿度场、速度场分布及空气品质等^[4-6]。对于全年仅设置通风系统的电站地下厂房，目前针对其热湿环境状况、形成规律等的相关研究还比较少。为此，迫切需要对该电站地下厂房全年通风系统及热湿环境状况进行现场测试、分析，找到“潮湿”的原因并加以解决，为其他类似水电站设计、改造及相关研究提供基础数据。

1 工程概况

本次测试水电站位于贵州省境内，水电站原装机容量为 $51 \times 10^4 \text{kW}$ （单台机组装机容量 $17 \times 10^4 \text{kW}$ ，共 3 台）；实施增容工程后，机组装机容量增至 $57 \times 10^4 \text{kW}$ （单台装机容量增至 $19 \times 10^4 \text{kW}$ ）；扩机工程后，又增加 1 台机组（装机容量为 $12.5 \times 10^4 \text{kW}$ ）。

水电站地下厂房热湿环境调控主要以机械通

风方式加以实现，由进厂交通洞进风，分别进入主厂房（发电机层、母线层、水轮机层、蜗壳层、尾水廊道层）、主变洞（主变室、GIS 室、电缆层），然后由主厂房排风机、主变排风机排入总排风洞，最后由总排风机排出地下厂房。其中，主厂房夏季设计通风量 $393500 \text{m}^3/\text{h}$ ，冬季设计风量 $193500 \text{m}^3/\text{h}$ ；主变洞夏季、冬季设计通风量均为 $240000 \text{m}^3/\text{h}$ 。

2 地下厂房热湿环境测试

2.1 主要测试内容及测试仪器

地下水电站厂房结构复杂，功能区域比较多。本次测试主要针对地下厂房主要功能区域的热湿环境参数进行测试：

（1）进厂交通洞（通风系统进风洞）不同断面空气温度、相对湿度、岩壁温度；

（2）主副厂房主要区域（包括：主厂房发电机层、母线层、水轮机层、蜗壳层、尾水廊道层、副厂房中控室等）空气温度、相对湿度、设备管道壁温；

（3）母线洞空气温度、相对湿度；

（4）主变洞主要区域（包括：主变室、主变廊道、电缆层、GIS 室）空气温度、相对湿度。

根据测试目的及测试参数要求，本次测试采用主要仪器设备汇总如表 1 所示，所有设备测试前均经过严格标定。

表 1 主要仪器设备表

Table 1 List of major instruments and equipment

序号	仪器名称	型号规格	量程范围	精度
1	多功能测试仪	Testo 480	温度：-200~+1370℃； 相对湿度：0~100%RH 差压：-100~+100hPa； 绝对压力：700~1100hPa；	温度：±(0.3℃+0.1%测量值)； 相对湿度：±(1.8%RH+0.7%测量值)； 差压：±(0.02hPa+0.1%)； 绝对压力：±3hPa
2	TSL 手持风速仪	VELOCICALC 9515	风速：0~20.00m/s； 温度：-18.0~93.0℃；	风速：±0.025m/s； 温度：±0.3℃；
3	温湿度自记仪	Testo 174H	温度：-20~+70℃； 相对湿度：0~100%RH	温度：±0.5℃； 相对湿度：±3%RH；
4	红外测温仪	Testo 830-T2	-50~+500℃	±0.5℃或+0.5%测量值

2.2 测点布置

为了保证测试数据的代表性与准确性，分别对通风路径多个断面、地下厂房主要洞室工作区多个位置进行测试^[7,8]，其中：进厂交通洞（进风洞）

布置 6 个进风测试断面（见图 1），每个测试断面根据断面形状及几何尺寸采用“等面积法”布置多个测点（具体布置见图 2）；母线洞进排风口、主变室进风口等测试断面同样采用“等面积法”布置

测点 (以母线洞排风口为例, 测点布置见图 3); 厂房主要洞室工作区环境参数测点布置, 结合各洞室空间结构、设备布局, 按照每个洞室 3 个测点原则进行布置 (以主厂房发电机层为例, 测点布置见图 4), 测点距地面高度均为 1.5m。

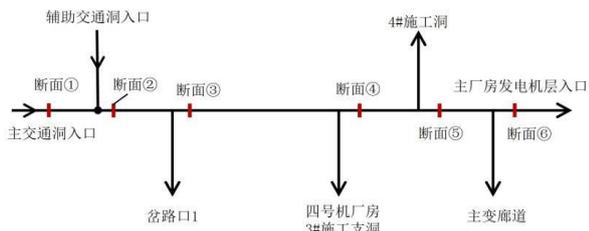


图 1 进风洞 (进厂交通洞) 测试断面布置示意图

Fig.1 Schematic layout of the test in the air intake tunnel

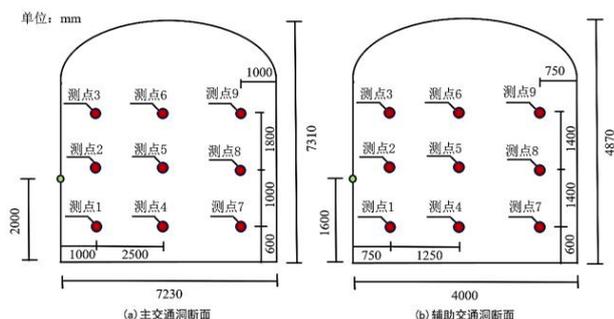


图 2 进风洞 (进厂交通洞) 断面测点布置示意图

Fig.2 Schematic layout of measurement points in the air intake tunnel (traffic tunnel into the plant)

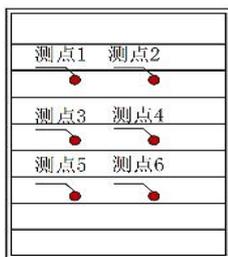


图 3 母线洞排风口测点布置示意图

Fig.3 Measurement points for the main air outlet in the Busbar layer

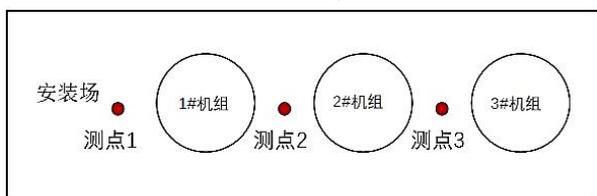


图 4 主厂房发电机层参数测点布置示意图

Fig.4 Measurement points for the generator space in the main powerhouse

2.3 测试时间

现场测试为期近一年, 分别于 2022 年 7 月、2022 年 10 月、2023 年 1 月和 2023 年 3 月 (分别对应春、夏、秋、冬 4 个工况季) 开展, 每次连续测试时间至少 48h。

3 测试结果及分析

3.1 进风洞对进风空气的热质交换作用结果分析

由电站地下厂房的通风路径测试结果可知, 地下主厂房、主变洞全年均通过进厂交通洞进风。由测试数据可以发现, 由于不同季节室外进风空气与进风洞岩壁之间会存在一定温湿度差异, 从而导致进风空气流经进风洞过程中与岩壁之间总存在一定热质交换, 表 2 和图 5 为测试得到的全年不同季节进风空气沿进风洞热质交换作用后不同断面的参数测试结果。

表 2 进风洞 (进厂交通洞) 不同断面的空气参数表

Table 2 Air parameters for different cross-sections of the air inlet tunnel (traffic tunnel into the plant)

测试季节	进风参数	断面②	断面③	断面④	断面⑤
夏季	干球温度 (°C)	28.1	26.31	26.02	23.82
	焓值 (kJ/kg)	70.7	67.9	67.7	63.8
	含湿量 (g/kg)	16.8	16.33	16.33	15.68
秋季	干球温度 (°C)	17.41	17.37	18.1	18.68
	焓值 (kJ/kg)	47.2	38.1	40.5	45.7
	含湿量 (g/kg)	11.74	7.79	8.81	10.65
冬季	干球温度 (°C)	6.33	6.4	8.11	8.92
	焓值 (kJ/kg)	21.2	21.3	24.9	26.8
	含湿量 (g/kg)	5.86	5.9	6.63	7.01
春季	干球温度 (°C)	12.8	12.8	12.8	13.02
	焓值 (kJ/kg)	30.3	30.2	30.5	30.8
	含湿量 (g/kg)	6.91	6.88	7	7.03

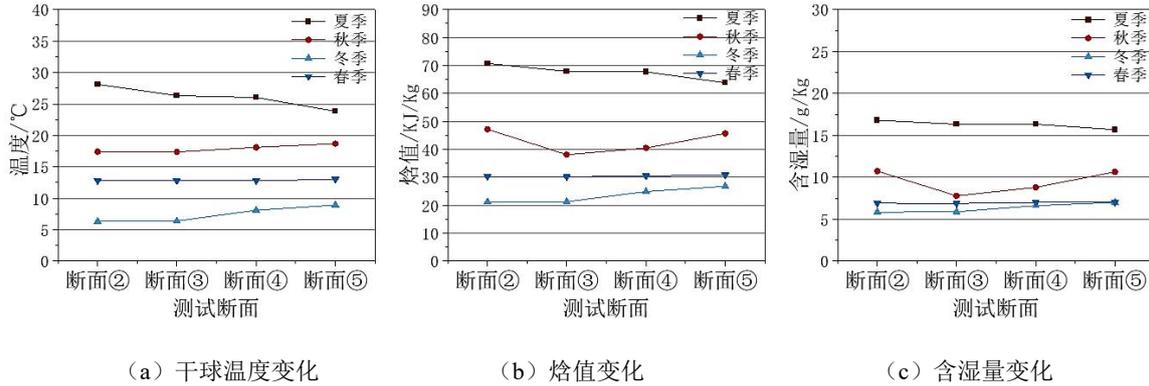


图 5 室外进风沿进风洞（进厂交通洞）的空气参数变化

Fig.5 Parameter variation of air inlet along the air intake tunnel (traffic tunnel into the plant)

由于夏、冬季室外进风空气与进风洞岩壁温度差异比较大，导致夏、冬季进风空气与进风洞岩壁之间的热质交换作用相对比较明显，具体表现为：夏季，进风空气沿进风洞形成明显“降温、减焓”效应，从洞口至洞尾空气干球温度降低了 4.3℃、焓值降低了 6.9kJ/kg、绝对含湿量基本未变，说明夏季进风洞对进风空气具有明显“等湿冷却”作用；冬季，进风空气沿进风洞存在较为明显的“加热、增焓”作用，从洞口至洞尾空气干球温度上升了 2.6℃、焓值增加了 5.6kJ/kg、含湿量增加了 1.15g/kg，说明冬季进风洞对进风空气有一定的“加热增湿”作用。过渡季节，由于进风空气与进风洞岩壁之间的温度差异相对较小且随机性差异较大，因此进风空气与进风洞岩壁之间的热作用过程不明显。

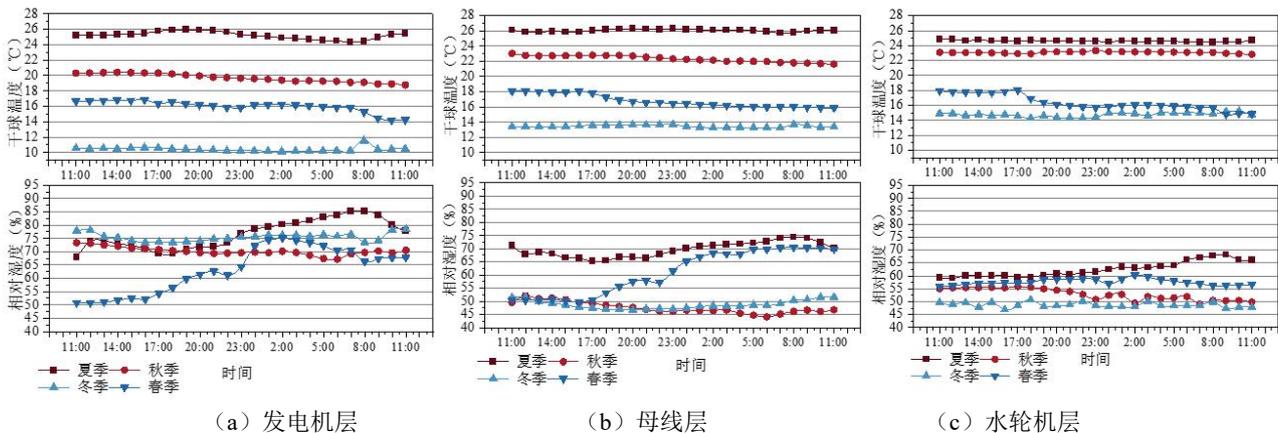
地下水电站进风洞对进风空气的“夏季降温、冬季加热”作用对室外进风空气起到了较明显的“预处理”作用，对夏、冬季地下厂房热湿环境控制是有利的，可以有效降低地下厂房夏、冬季通风

系统的运行风量，降低系统运行能耗，实现地下厂房通风系统运行节能，这在水电站地下厂房通风空调系统节能设计中，应得到足够重视。

3.2 主要洞室热湿环境测试结果

3.2.1 主厂房

主厂房全年不同季节的热湿环境参数测试结果如图 6 所示。由图中测试结果，可以看出：主厂房各主要洞室工作区的全年空气干球温度范围为 10.2~26.7℃，均完全满足《水力发电厂供暖通风与空气调节设计规范(NBT 35040-2014)》(简称《规范》)“夏季，发电机层、母线层、水轮机层≤30℃，蜗壳层≤33℃；冬季，发电机层≥10℃，母线层、蜗壳层≥5℃，水轮机层≥8℃”的要求；但是，发电机层全年相对湿度偏高(其中，夏、冬季平均相对湿度分别达到 76.64%、75.54%，不满足《规范》“夏季相对湿度小于 75%”要求)，蜗壳层全年相对湿度最高(全年相对湿度平均值 80.35%，其中夏季最高达到 94.45%)。



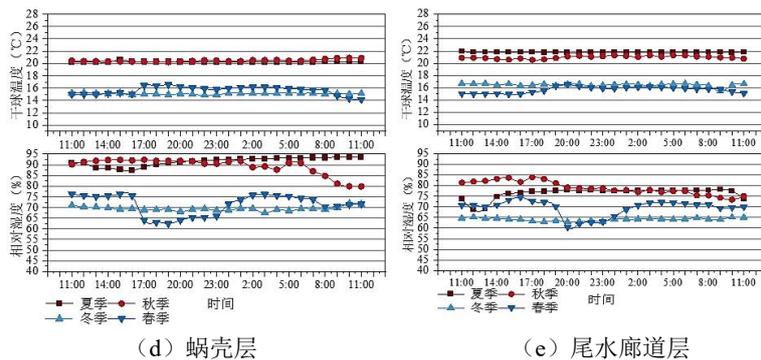


图 6 主厂房主要洞室全年不同季节的温湿度测试结果

Fig.6 Temperature and humidity test results of the main cavern of the main plant in different seasons throughout the year

同时, 测试中还发现: 夏季, 水轮机层、蜗壳层、尾水廊道层低温供水管道、设备壁面不同程度

“结露”问题, 其中蜗壳层结露较为严重, 图 7 为夏季测试得到的部分技术供水管道壁面结露情况。



图 7 主厂房管道结露示意图

Fig.7 Schematic diagram of piping junction in the main factory building

结合水轮机层、蜗壳层、尾水廊道层全年不同季节的空气参数、设备管道壁面温度测试结果 (见表 3) 对比分析, 可以发现: 出现“结露”现象的设备、管道壁面温度均低于空气露点温度, 而且设备表面温度越低结露越严重。由此说明, 水轮机层、蜗壳层、尾水廊道层夏、秋季设备管道表面“结露”主要是这些区域设备、管道壁面温度低于空气露点温度所造成的。

表 3 结露位置空气露点温度、设备管道壁面温度测试结果

location		夏季	秋季	冬季	春季
水轮机层	空气露点温度 (°C)	18.3	11.9	4.6	10.1
	壁面最低温度 (°C)	17.5	18.7	11.2	10.6
蜗壳层	空气露点温度 (°C)	19.4	18.2	10.0	10.7
	壁面最低温度 (°C)	17.8	17.9	11.5	10.8
尾水廊道层	空气露点温度 (°C)	17.8	16.5	10.0	9.3
	壁面最低温度 (°C)	17.5	17.5	13.9	10.9

3.2.2 母线洞

母线洞全年不同季节的热湿环境参数测试结果如图 8 所示。由图中测试数据, 可以看出: 母线洞工作区全年干球温度 14.0~27.7°C, 完全满足《规范》“排风温度低于 40°C”要求; 相对湿度 50.3~74.3% (夏季、春季相对湿度略偏高), 基本满足《规范》要求。

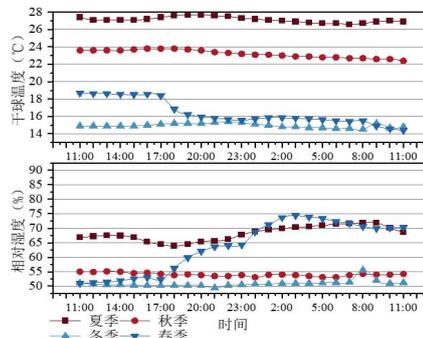


图 8 母线洞全年温湿度测试结果

Fig.8 Test results of temperature and humidity for bus-hole throughout the year

3.2.3 主变洞

本次测试重点对主变室温度、相对湿度进行了全年测试, 电缆层和 GIS 室仅就夏季(全年最不利工况季)工况进行测试, 测试结果如表 4 所示。由测试结果来看, 主变洞各主要洞室工作区全年干球温度 18.9~27.4℃、相对湿度 46.0~71.8%, 完全满足《规范》要求。

表 4 主变洞部分洞室温湿度测试结果

Table 4 Test results of temperature and humidity for the part of main transformer hole

测试 季节	主变室		电缆层		GIS 室	
	干球温 度/℃	相对湿度 /RH%	干球温 度/℃	相对湿度 /RH%	干球温 度/℃	相对湿度 /RH%
夏季	27.4	65.3	27.0	69.9	26.1	71.8
秋季	24.1	52.8	—	—	—	—
冬季	18.9	46.2	—	—	—	—
春季	20.2	46.0	—	—	—	—

3 地下厂房热湿环境存在主要问题及改善方案

从电站地下厂房热湿环境全年测试结果可以发现, 该电站地下厂房热湿环境主要存在以下问题:

(1) 全厂各主要洞室工作区空气干球温度全年较好、均符合《规范》要求, 但存在普遍偏低的问题(导致部分区域相对湿度偏高);

(2) 发电机层夏季、冬季平均相对湿度不满足《规范》要求, 蜗壳层全年相对湿度均相对较高;

(3) 水轮机层、蜗壳层及尾水廊道层部分低温技术供水管道、设备壁面存在夏、秋季不同程度“结露”现象。

深入分析造成该电站地下厂房空气温度普遍偏低的原因, 主要有:

(1) 电站发电负荷低、设备散热量小(测试期间, 电站发电负荷仅为设计满发的 20~40%);

(2) 通风量大(测试期间, 主厂房实际通风量 180131~239174m³/h, 约为主厂房设计通风量 45.0~59.8%)、实际进风温度低(夏季, 由于进厂交通洞的“降温”作用, 地下厂房实际进风温度为 25.7℃, 相比设计工况的厂房进风温度低约 1℃)。

在不改变电站正常发电运行调度的条件下, 可以通过适当减少运行通风量的方式, 在满足各洞室空气干球温度限值要求的前提下, 适当提高室内空气干球温度、降低空气相对湿度。尤其发电机层, 通过该途径可以很好解决该层夏、冬季相对湿度相对偏高不满足《规范》的问题。

关于水轮机层、蜗壳层和尾水廊道层部分技术供水管道设备壁面的“结露”问题, 主要是由电站低温发电尾水造成技术供水管道、设备表面温度低于空气露点温度所造成的。一种有效的解决方案是: 通过“冷冻除湿”方式, 降低空气露点温度, 使其低于管道、设备壁面温度, 从而有效避免“结露”现象的发生。这一措施不仅可以解决结露问题, 也可以降低室内相对湿度。

蜗壳层全年相对湿度高主要是由于该层围护结构壁面散湿较大、低温供水设备及管道较多导致该层空气温度较低所造成的, 可以通过除湿措施降低该区域空气湿度。

4 结论

本文通过贵州某水电站地下厂房热湿环境的全年现场实测、分析, 揭示了该水电站地下厂房热湿环境及通风系统运行中存在问题, 提出了针对性优化改善方案。得到主要结论如下:

(1) 在全年仅通风运行调控条件下, 该水电站地下厂房热湿环境总体比较好, 大部分时段、大部分区域均满足《规范》要求; 但也存在部分问题, 如: 发电机层全年相对湿度偏高(其中, 夏、冬季平均相对湿度不满足《规范》要求), 蜗壳层全年相对湿度均相对较高, 水轮机层、蜗壳层、尾水廊道层部分低温技术供水管道设备壁面夏、秋季不同程度“结露”等。

(2) 针对地下厂房“干球温度低、相对湿度高”的问题, 建议采用适当减小运行通风量的方式加以解决, 既可以使厂房干球温度满足《规范》要求, 也可有效降低空气相对湿度, 同时也有利于降低通风系统运行能耗; 针对部分低温管道、设备表面“结露”问题, 建议采用“冷冻除湿”方式降低空气露点温度, 使其低于管道、设备壁面温度。

论文测试相关数据以及所提改善方案、措施, 可以为类似水电站通风系统设计、改造提供一定的基础数据和技术参考。(下转第 714 页)

表5 改造前后空调用电量对比表

Table 5 Comparison table of air conditioning electricity consumption before and after renovation

用电时间段	改造前用电量		改造后用电量		空调末端用电减少/kWh	节电率
	IT 设备用电量 /kWh	空调末端用电量 /kWh	IT 设备用电量 /kWh	空调末端用电量 /kWh		
1~24h	5851.89	1062.08	5978.77	88.55	973.53	92%
24~48h	5871.95	1057.83	6028.36	82.02	975.81	92%
48~72h	5878.55	1058.40	6024.87	79.90	978.50	92%
72~96h	5840.98	1041.33	5933.84	86.94	954.39	92%
96~120h	5800.72	991.65	5970.23	76.54	915.10	92%
120~144h	5868.47	968.53	5946.23	88.37	880.16	91%
平均	5852.09	1029.97	5980.38	83.72	946.25	92%

6 结论

通过顶置式热管空调+封闭冷通道的方案，对既有数据中心机房进行改造可明显提高制冷效果，大幅提升节电率，如数据中心全部使用该方案进行改造，PUE将降低0.1以上，对绿色低碳发展起到重要推动作用。同时本方案有较强的通用性和灵活性，可确保机房在线改造，可为既有数据中心机房节能改造提供参考。

参考文献：

[1] 杨超,黄赞,丁聪.采用CFD仿真优化数据中心气流组织

[J].电信工程技术与标准化,2018,31(9):89-92.

[2] 胡超,杜贤开,王超.基于CFD 6Sigma的数据机房能耗优化与研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2021,37(1):33-36.

[3] 房电伟,邢哲理,李宗新,等.某数据机房地板送风+封闭冷通道方案研究[J].制冷与空调,2023,37(2):292-296.

[4] 徐志立.基于CFD仿真的上送风数据中心气流组织优化与节能潜力分析[D].广州:华南理工大学,2021.

[5] 石健宇.中小型数据机房气流组织模拟及冷却技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2021.

(上接第 654 页)

参考文献：

[1] 龚胜强,刘勇,谢东,等.某大型地下水电站厂房通风空调系统气流组织数值模拟分析[J].暖通空调,2017,47(11):112-117.

[2] 边之豪,李超顺,丁嘉奇.水电站地下建筑通风系统数值模拟及节能研究[J].能源与节能,2021,(12):2-8.

[3] 丁嘉奇,李超顺,边之豪.水电站地下厂房热湿环境分布规律的数值模拟研究[J].中国农村水利水电,2023,(7):292-298.

[4] 莫凡,李超顺,何葵东,等.基于CFD的水电站地下厂房热湿环境模拟研究[J].水力发电,2022,48(7):44-51.

[5] Gao X, Zhang Z, Xiao Y. Modelling and thermo-hygrometric performance study of an underground chamber with a long vertical earth-air heat exchanger system[J]. Applied Thermal Engineering, 2020,180:115773.

[6] Yu Y, Cao L, Li X, et al. Modeling of heat and mass transfer of tunnel ventilation in hydropower station[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,90:45-53.

[7] 俞洲,肖益民.地下水电站交通进风洞热湿环境测试与分析[J].制冷与空调,2011,25,(B10):222-226.

[8] 田国栋,肖益民.某抽水蓄能电站地下厂房热湿环境测试分析[J].制冷与空调,2013,13(9):72-77.