

文章编号: 1671-6612 (2016) 01-072-06

白鹤滩水电站地下主厂房发电机层气流组织研究

熊健 刘勇 陈林乐

(重庆大学 重庆 400045)

【摘要】 通过对金沙江白鹤滩水电站地下主厂房按照 1:20 的相似比例建立物理模型, 按照相似模型律, 计算出实验模型的送风量和发热量, 进行热态气流组织实验。通过布置在发电层区的温度测点和速度测点来分析模型的温度场和速度场分布, 进而推算原型的温度场和速度场分布, 从而验证设计方案的可行性。实验安排了四种不同工况进行, 根据实验结果分析知, 发电机层拱顶送风的气流组织形式采用垂直下送, 双排风口均匀送风的方式能够使工作区的温度场和速度场分布均匀, 工作区水平方向温度分布规律为: 安装场段温度比较均匀, 机组段温度分布略为不均, 从安装场段到 3 号机组段温度逐渐升高, 但是整体温度场分布还比较均匀, 温差不是很大。同时工作区速度范围在 0.2~0.5m/s, 满足《规范》要求, 因此这种气流组织方案合理可行。

【关键词】 水电站; 气流组织; 发电机层; 拱顶送风

中图分类号 TU84 文献标识码 B

Dynamo Floor Airflow Research of BAIHETAN Main Underground Powerhouse

Xiong Jian Liu Yong Cheng Linle

(Chongqing University, Chongqing, 400045)

【Abstract】 Build a physical model of BAIHETAN main underground powerhouse in a similar ratio of 1:20, by the law in a similar model to calculate the amount of air and heat of experimental models, then make hot state airflow test. By arranging temperature measuring points and speed measuring points in the electric power generation layer zone to analyze temperature and velocity distribution of model, and then calculate the temperature field and velocity field of prototypes to verify the feasibility of the design. Experiments were arranged four different conditions, according to experimental results known, the generator layer dome air flow organizational forms in a manner of vertical bottom feed and double outlet uniform airflow that enables a uniform temperature field and velocity distribution of workplace. The horizontal temperature distribution of the work area is: the temperature of installation field is relatively uniform and the temperature distribution of unit segment is slightly uneven. Temperature gradually increasing from installation segment to Unit 3 segment, but the overall temperature distribution is still relatively uniform, the temperature difference is not great. At the same time the work zone speed range 0.2~0.5m/s, to meet the "standard" requirement, and therefore this air program is reasonable and practicable.

【Keywords】 powerhouse; airflow; Dynamo Floor; dome air flow

0 引言

水电站主厂房通风空调的任务主要是排除发电机及室内各种电气设备散向厂房的余热, 保持厂房内工作区的温、湿度及气流速度在规范规定的允许范围以内, 为厂房内的工作人员创造适宜的微环

境气候及保证各种生产设备的安全正常运行。地下厂房通风是否良好, 气流组织效果如何, 直接关系到工作人员的身体健康、精神状态、工作情绪以及工作效率等, 还会对一些机器设备的正常运行造成影响, 从而影响到整个电站的正常运行。因此合理

作者简介: 熊健 (1991.08-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: jakyxiong2014@163.com

通讯作者: 刘勇 (1977.05-), 男, 博士, 讲师, E-mail: guoliuyong@163.com

收稿日期: 2015-06-10

组织地下厂房内空气的流动与分布,确保其通风空调效果是十分重要的^[1,2]。白鹤滩水电站地下主副厂房深埋于地下,地下洞室纵横交错,内部热湿环境复杂多变。为了保证发电机组稳定高效地运行,必须使地下厂房的热湿环境控制在合理的范围之内,因此需要合理地设计气流组织形式和通风空调方案。由设计院提供的相关资料知,其主厂房发电机层气流组织采用成熟的拱顶送风方式,送风是通过设置在拱顶的四条主风管提供,主风管垂直向下连接有送风支管,由送风支管向下垂直送风,拱顶上部均匀布置两排风口。本文旨在通过对金沙江白鹤滩水电站地下主厂房按照 1:20 的相似比例建立物理模型,按照相似模型律计算出实验模型的送风量和发热量,进行热态气流组织实验,通过布置在发电机层工作区的温度测点和速度测点来分析模型的温度场和速度场分布,进而推算原型的温度场和速度场分布,从而验证设计方案的可行性。

1 工程概况

白鹤滩水电站位于云南省巧家县城下游约 42km 的金沙江峡谷河段上,地处我国西南,为金沙江下游河段梯级开发的第 2 级电站,上接乌东德水电站下邻溪洛渡水电站。白鹤滩水电站的开发任务以发电为主,兼顾防洪,并有拦沙、改善下游航运条件和发展库区通航等综合利用效益,是西电东送骨干电源点之一。设计总装机容量达 16000MW,仅次于三峡电站,分左右岸两个地下厂房布置,每个厂房装机 8000MW。工程主要由地下厂房洞室群(主要为主厂房洞、主变洞、尾水闸门洞以及与上述三洞相连接的母线洞、电缆洞和交通运输洞)、相关地下洞室群(进厂交通洞、进风洞、排风洞、尾调交通洞、水垫塘交通洞、灌浆廊道、排水廊道、上坝交通洞、尾闸交通洞、左右岸厂房连通交通洞等)、500kV 地面开关站及电缆竖井、引水和尾水建筑物、坝区建筑物以及其它地面建筑等组成。主厂房深埋于错综复杂的地下洞室群中,地下厂房规模世界第一。厂内电力设备设施系统复杂,对社会经济运行影响大,运行安全和可靠性要求高。通风空调及防排烟系统对保障地下电站的生产环境和运行安全十分关键。通过通风空调及防排烟系统的作用,将地下厂房不同部位的空气温度、湿度、速度控制在一定的范围,及时送入新鲜空气和排除污染空气、火灾烟气,才能保证电厂发电、变电设备

及其关联系统安全、可靠、高效、长寿命地运行,最大限度降低事故发生率,为工作人员提供健康舒适和安全的工作环境,并在事故时为人员扑救和逃生提供安全通道,将损失降至最低。

2 模型试验设计与测试方法简介

2.1 相似比例尺的确定

在进行模型试验时,首先要确定模型的几何比例尺 C_L 。一般认为 C_L 越大,越容易真实地模拟原型,但 C_L 越大,模型的造价越高,需要的实验场地越大,试验观察的难度,特别是全面观察的难度越大^[3]。在充分考虑了试验经费和试验场地的实际情况后,确定本次模型试验的几何比例尺为 $C_L=1:20$ 。本实验采用热量阿基米德模型律^[4], $Arq_m=Arq_n$, 即:

$$\frac{g_m l_m q_m}{C_{pm} \rho_{0m} (v_{0m})^3 T_{0m} F_m} = \frac{g_n l_n q_n}{C_{pn} \rho_{0n} (v_{0n})^3 T_{0n} F_n} \quad (1)$$

其中 $C_{pm} = C_{pn}$, $\frac{F_m}{F_n} = C_l^2$ 整理得:

$$\frac{C_g \cdot C_q}{C_{\rho_0} \cdot (C_{v_0})^3 \cdot C_l \cdot C_{T_0}} = 1 \quad (2)$$

送风量 $Q = \rho_0 \cdot V = \rho_0 \cdot v_0 \cdot F$, 得:

$$C_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = C_{\rho_0} \cdot C_{v_0} \cdot C_F \quad (3)$$

其中, ρ_0 为送风气流的密度, kg/m^3 ; V_0 为平均送风风速, m/s ; F 为送风口面积, m^2 。

由气体状态方程 $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$, 得:

$$C_{\rho_0} = \frac{\rho_{0m}}{\rho_{0n}} = \frac{B_m}{B_n} = C_B \quad (4)$$

其中,重力加速度可认为是常数, $C_g=1$ 。实验中控制模型和原型送风气流绝对温度相一致, $C_{T_0}=1$ 。取温差比例尺 $C_{\Delta T}=1$, 这样模型的温度场可以直接代表原型的温度场。模型试验地(重庆市)夏季大气压力值为 97320Pa, 冬季大气压力值为 99120Pa—《暖通空调规范》;设计院提供的原型地(白鹤滩电站)夏季大气压力值为 92100Pa, 冬季大气压力值为 92900Pa, 由于模型试验模拟的主要是夏季全厂通风空调,故大气压比例尺取夏季大气压, $C_B = \frac{97320}{92100} = 1:0.9464$ 。将上述数据代入式

(2)、(3)、(4), 得:

风速比例尺: $C_{v_0} = (C_l)^{1/2} = 1/4.4721$

热量比例尺:

风量比例尺:

$$C_q = C_l \cdot (C_{v_0})^3 \cdot C_\rho = C_B \cdot (C_l)^{5/2} = 1/1693$$

$$C_Q = C_B \cdot C_{v_0} \cdot C_F = C_B \cdot (C_l)^{5/2} = 1/1693$$

各比例尺汇总如表 1 所示。

表 1 相似比例尺

Table 1 Similar scale

几何比例尺	大气压比例尺	温度比例尺	温差比例尺	风速比例尺	风量比例尺	热量比例尺
1/20	1/0.9464	1/1	1/1	1/4.4721	1/1693	1/1693

2.2 测点的布置及测试方法

2.2.1 温度和风速测点的布置

为反映地下厂房温度场和速度场分布规律,模型试验台设计中需要根据厂房的结构和设备布置情况合理地布置温度、风速测点。一方面,合理的测点位置能准确、客观地反映出厂房内部空间的温度场和速度场;另一方面,也可以避免不必要的重复劳动、材料浪费,提高工作效率,节约试验费用。

(1) 温度测点布置方案

发电机层:共 73 个温度测点,安装场段 15 个测点,9 个位于工作区,6 个纵向两排布置,每排 3 个测点;1 号和 2 号机组段工作区 8 个测点,3 号机组段工作区 11 个测点,2 号机组段纵向又布置两层,每层有 8 个测点,每个机组段对应排风口处 3 个测点,每个楼梯间 2 个测点。测点编号的第 1 位数字表示不同机组段,0 表示安装场,1 表示 1 号机组段,2 表示 2 号机组段,3 表示 3 号机组段;第 2 位表示温度测点纵向位置,1 表示工作区,2 表示中间测点,3 表示上部测点;第 3 位表示同一水平面的测点编号。测点布置位置如图 1 所示。

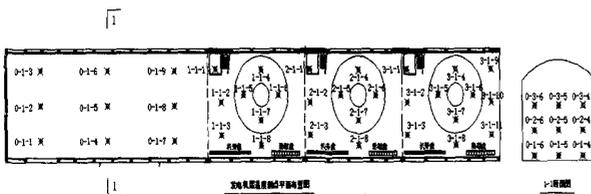


图 1 发电机层温度测点布置图

Fig.1 Dynamo Floor temperature measurement point layout

(2) 风速测点布置方案

发电机层共布置了 81 个测点,其中:安装场段测点分为上、中、下三层,每层 9 个测点,共 27 个测点;1 至 3 号机组段,每个机组段测点也分为上、中、下三层,每层 6 个测点,共 18 个测点。

测点编号的第 1 位数字表示不同机组段,0 表示安装场,1 表示 1 号机组段,2 表示 2 号机组段,3 表示 3 号机组段;第 2 位表示风速测点纵向位置,1 表示工作区,2 表示中间测点,3 表示上部测点;第 3 位表示同一水平面的测点编号。测点布置位置如图 2 所示。

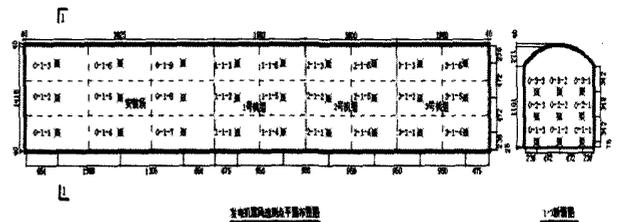


图 2 发电机层速度测点布置图

Fig.2 Dynamo Floor velocity measurement point layout

2.2.2 测试方法

测试各测点的温度及速度所采用的测定方法与仪器类型如下:

(1) 温度

对于模型内部空间的温度测点,采用 T 型热电偶(铜-康铜)作温度传感器,测温范围, $-200^{\circ}\text{C} \sim +350^{\circ}\text{C}$,利用 Agilent34980A 多功能开关/测量单元自动记录各温度测点的温度值。

(2) 风速

采用 testo425 精密型热敏风速仪测量各送、排风管道的风速。采用 testo480 多功能检测仪测量模型空间的风速。

testo425 精密型热敏风速仪:温度量程, $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$,精度, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($0 \sim +60^{\circ}\text{C}$),分辨率, 0.1°C ;风速量程, $0 \sim 20\text{m/s}$,精度 $\pm (0.03\text{m/s} + 5\% \text{测量值})$,分辨率, 0.01m/s 。

testo480 多功能检测仪:温度量程, $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$,精度, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,分辨率, 0.1°C ;风速量程,

0~20m/s, 精度±(0.03m/s+4%测量值), 分辨率, 0.01m/s。

3 实验测试

3.1 实验内容

本次实验的主要内容是通过对布置在发电机层内各温度及速度测点的测试, 得到发电机层的温度分布及速度分布, 进而分析发电机层的温度场及速度场是否均匀, 温度是否满足设计要求, 速度是

否满足《规范》要求, 以验证拱顶均匀送风气流组织的合理性。文献[4,5]中对水电站地下主厂房的气流组织形式做了一些研究, 有一定的指导意义。

3.2 实验的主要参数

白鹤滩水电站原型中, 拱顶设计送风量是 720000m³/h, 根据相似比计算出模型拱顶送风量为 159.48m³/h, 原型中送风管为矩形风管, 模型采用圆形 PVC 管代替, 风量和风口参数如表 2 所示, 拱顶送风空气流程图如图 3 所示。

表 2 拱顶送风风量及风口参数表

Table 2 Air volume and air datasheets of dome blowing

	原型	模型
总送风量 (m ³ /h)	720000	159.48
送风干管形式及尺寸 (mm)	矩形 4000×1600	PVC 管, DN200
送风支管	矩形 1000×500	PVC 管, DN40

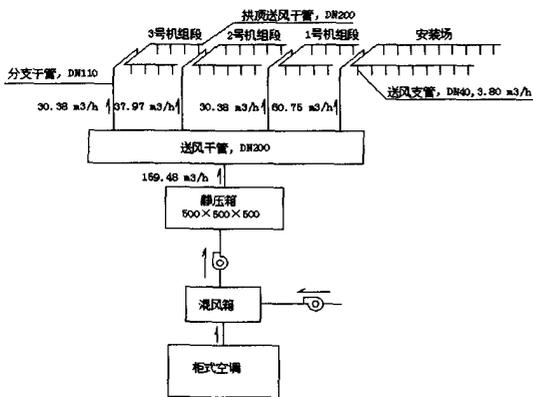


图 3 拱顶送风空气流程图

Fig.3 Dome blowing air flow chart

3.3 实验工况安排

为了有效的反映气流组织特性, 本次实验安排了四组工况来验证气流组织的合理性, 具体的工况安排如表 3。

4 实验结果及分析

4.1 温度测试结果及分析

在分析发电机层温度场分布时, 我们比较关心的是工作区的温度是否能满足要求, 这里着重对工作区的温度测试结果进行整理分析。前面已经介绍了工作区测点编号的规律, 具体可见下表 4。

表 3 模型试验工况安排表

Table 3 Model test conditions schedule

工况	发电机组运行情况	拱顶送风口开启情况	送风温度	送风风量
1	3 台机组全开	风口全开	22.1℃	159.48m ³ /h
2	3 台机组全开	风口全开	21℃	159.48m ³ /h
3	3 台机组全开	风口全开	20℃	159.48m ³ /h
4	3 台机组全开	风口全开	19℃	159.48m ³ /h

表 4 工作区温度测点编号

Table 4 Workspace temperature measurement point number

空间区域	测点编号
安装场	工作区 0-1-1 至 0-1-9
发电机层	1 号机组 工作区 1-1-1 至 1-1-8
	2 号机组 工作区 2-1-1 至 2-1-8
	3 号机组 工作区 3-1-1 至 3-1-11

在工况 1-工况 4 条件下,对工作区温度测试结果进行整理得图 4-图 7。

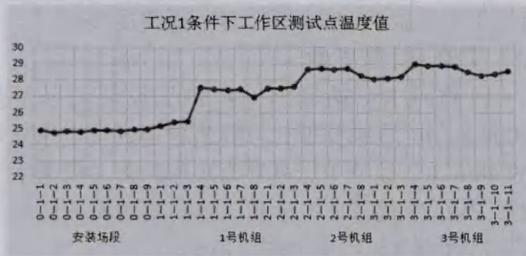


图 4 工况 1 条件下工作区温度测试结果

Fig.4 Temperature test results of workspace under the first condition

从图 4 分析知,发电机层工作区温度分布范围为 24.7-29.0℃。其中,安装场段工作区温度分布范围为 24.7-25.0℃;1 号机组段工作区温度分布范围为 25.1-27.5℃;2 号机组段工作区温度分布范围为 27.4-28.7℃;3 号机组段工作区温度分布范围为 28.0-29.0℃。工作区水平方向温度分布规律为:安装场段温度比较均匀,机组段温度分布不均匀,从安装场段到 3 号机组段温度逐渐升高。

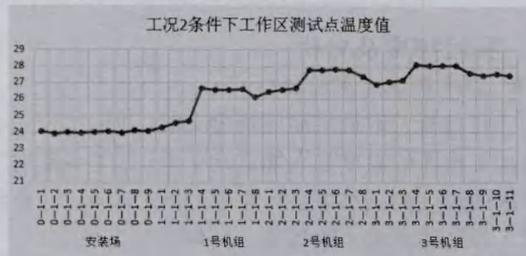


图 5 工况 2 条件下工作区温度测试结果

Fig.5 Temperature test results of workspace under the second condition

从图 5 分析知,发电机层工作区温度分布范围为 23.9-28.1℃。其中,安装场段工作区温度分布范围为 23.9-24.1℃;1 号机组段工作区温度分布范围为 24.2-26.7℃;2 号机组工作区温度分布范围为 26.4-27.9℃;3 号机组工作区温度分布范围为 26.9-28.1℃。工作区水平方向温度分布规律为:安装场段温度比较均匀,机组段温度分布不均匀,从安装场段到 3 号机组段温度逐渐升高。

从图 6 分析知,发电机层工作区温度分布范围为 22.8-27.3℃。其中,安装场段工作区温度分布范围为 22.8-23.1℃;1 号机组段工作区温度分布范围为 23.0-25.5℃;2 号机组段工作区温度分布范围为 25.6-27.1℃;3 号机组段工作区温度分布范围为

25.9-27.3℃。工作区水平方向温度分布规律为:安装场段温度比较均匀,机组段温度分布不均匀,从安装场段到 3 号机组段温度逐渐升高。

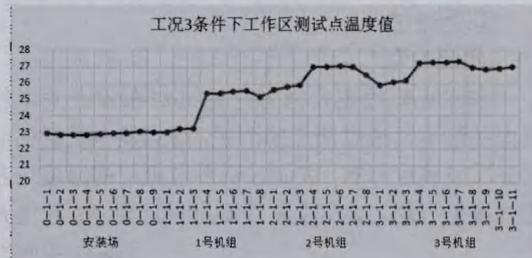


图 6 工况 3 条件下工作区温度测试结果

Fig.6 Temperature test results of workspace under the third condition

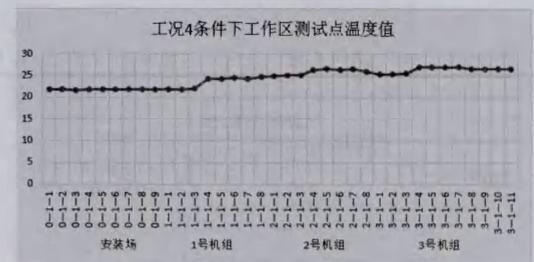


图 7 工况 4 条件下工作区温度测试结果

Fig.7 Temperature test results of workspace under the fourth condition

从图 7 分析知,发电机层工作区温度分布范围为 21.7-27.0℃。其中,安装场段工作区温度分布范围为 21.7-21.9℃;1 号机组段工作区温度分布范围为 21.8-24.6℃;2 号机组段工作区温度分布范围为 24.8-26.5℃;3 号机组段工作区温度分布范围为 25.3-27.0℃。工作区水平方向温度分布规律为:安装场段温度比较均匀,机组段温度分布不均匀,从安装场段到 3 号机组段温度逐渐升高。

结论:发电机层工作区水平方向温度分布规律为:安装场段温度比较均匀,而机组段温度分布略为不均,从安装场段到 3 号机组段温度有升高趋势,主要因为安装场段没有发热源,而机组段有集中热源,并且靠近机组的测点温度值会偏高,但是整体温度场分布还比较均匀,温差不是很大。同时,比较工况 1-4 可知,当送风温度降低时,温度场的均匀性提高。所以,采用拱顶垂直下送的气流组织形式能使工作区温度分布比较均匀。

4.2 速度测试结果及分析

由于发电机组全开时所有工况(工况 1-工况 4)拱顶送风的送风量和送风速度都一样,故只测

试了工况1的速度场分布情况,工况2-工况4的速度场分布规律和工况1一样。将工况1条件下工作区测点的速度测试结果进行整理得图8。

由图8可以看出:模型试验中,发电机层工作区风速测点环境风速分布范围为0.05~0.08m/s,速度场分布比较均匀。按照风速相似比例尺1/4.4721,原型发电机层工作区(距地面1.50m)环境风速分布范围为0.22~0.36m/s;工作区环境风速满足0.2~0.5m/s的设计要求。

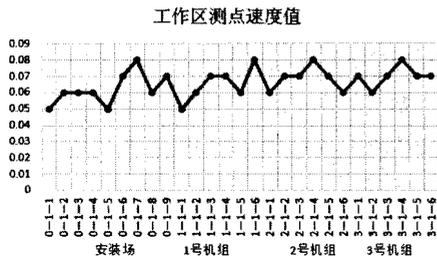


图8 工作区速度测试结果

Fig.8 Velocity test results of workspace

5 结论

发电机层拱顶送风气流组织形式采用垂直下送,双排风口均匀送风,能够使发电机层工作区的

速度场比较均匀,工作区速度范围在0.2~0.5m/s,满足《规范》要求;同时温度场的分布也比较均匀,发电机层工作区水平方向温度分布规律为:安装场段温度比较均匀,而机组段温度分布略为不均,从安装场段到3号机组段温度有升高趋势,主要因为安装场段没有发热源,而机组段有集中热源,并且靠近机组的测点温度值会偏高,但是整体温度场分布还比较均匀,温差不是很大。因此这种气流组织形式应用在白鹤滩水电站是合理可行的。

参考文献:

- [1] 何喆,何天祺.琅琊山水电站地下发电机层气流组织后续模型试验与研究[J].制冷与空调,2005,(3):1-4.
- [2] 田忠保.水电站地下厂房顶部送风气流组织试验[J].西北水电,1996,(1):47-51,39.
- [3] 周谟仁.流体力学泵与风机[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [4] 付祥钊.水电站地下主厂房顶送风研究[J].暖通空调,1996,26(2):59-62.
- [5] 付祥钊.地下水电站的送风方案模型实验研究[J].重庆建筑工程学院学报,1992,(4):102-109.
- [6] 倪龙,押淑芳,马最良,等.地下水地源热泵热源井设计方法研究[J].暖通空调,2010,40,(9):82-87.
- [7] 刘婷婷.冬冷夏热地区应用地表水源热泵系统供暖的优化方法[D].长沙:湖南大学,2005.
- [8] 杨卓.污水源热泵系统的热力分析及性能评价[D].大连:大连理工大学,2013.
- [9] 刘德彧.水源热泵系统的综合研究与工程应用[D].北京:北方工业大学,2003.
- [8] 李高建,胡玉叶,朱秀斌.地源热泵技术的研究与应用现状[J].制冷与空调,2007,(4):105-108.
- [9] 韩春阳,潘俊,康然然,等.沈阳城区水源热泵适宜性评价[J].地下水,2011,33(3):48-49.
- [10] 姜秋香,付强,王子龙.空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J].水土保持研究,2008,(1):250-253.
- [11] MNALEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958,84:70-72.

(上接第67页)