



水电站无压尾水洞 引风技术及应用



余延顺 李先庭 石文星 王 政◎著



科学出版社
www.sciencep.com

水电站无压尾水洞 引风技术及应用

余延顺 李先庭 石文星 王 政 著

70
TV731
Y7T8

科学出版社

北 京

内 容 简 介

利用无压尾水洞引风对电站厂房进行通风空调是水电工程中一种特有的天然冷源利用方式,具有节能、环保和可再生的优点。本书结合当前无压尾水洞引风技术的研究与应用现状,对无压尾水洞引风技术的理论进行了系统、全面的阐述。全书共分 10 章,分别介绍了水库水温分布的预测方法、无压尾水洞引风热湿交换特性的现场测试及模拟试验、无压尾水洞引风热湿交换过程的理论模型及其热湿交换特性、长无压尾水洞引风过程的简化模型及其热工计算方法、有限长度无压尾水洞引风过程的改进模型、热工计算方法及引风参数二次喷淋控制技术,最后在理论研究基础上对无压尾水洞引风技术的工程应用进行了介绍。

本书可供广大从事水电暖通空调专业相关技术人员参考,也可供从事建筑环境与设备工程专业研究生与本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水电站无压尾水洞引风技术及应用/余延顺等著. —北京:科学出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-03-026516-6

I. ①水… II. ①余… III. ①水电站厂房-空气调节 IV. ①TV731

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 015606 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

西 燕 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 2 月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—2 000 字数:219 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,人们对电力的需求越来越大。火力发电使用了不可再生的化石燃料,且在发电过程中会向大气排放大量的二氧化碳、氮氧化物、悬浮颗粒物等,而核能发电目前在安全性等方面还未完全得以保障,因此世界各国对水力发电的开发越来越重视。

我国水电资源非常丰富,从“十五”开始国家加大了水电的开发力度,目前正处于我国水电站建设的黄金时期。作为水电站内设备运行环境的安全保障和站内工作人员健康舒适的提供者,通风空调系统在水电站中具有重要的作用。

传统的通风空调系统通常采用交通洞或安装制冷系统进行新风冷却,前者性能能不能保障,而后者投资和运行费用较高。利用水电站无压尾水洞进行新风的处理,可在夏季对新风进行降温 and 除湿,在冬季对新风进行加热和加湿,是一个大容量的天然“空调机”。该方案不仅节省初投资,也可大大节约运行费用,具有节能、环保和可再生的优点。

尽管无压尾水洞处理新风的方案已有工程案例,但人们对无压尾水洞的热湿传递规律掌握不是很透彻,也缺乏可靠的设计计算方法。本书通过实验测试和理论分析,对无压尾水洞引风系统的热湿传递机理和特性及其热工计算方法等相关理论进行了系统深入的研究,为水电站无压尾水洞引风技术的应用提供了理论基础。

本书由南京理工大学动力工程学院余延顺副教授、清华大学建筑技术科学系李先庭教授和石文星教授、国家电力公司成都勘测设计研究院王政高级工程师联合撰写,并得到江苏省自然科学基金创新人才启动项目(BK2007595)资助。在本书撰写过程中,南京理工大学动力工程学院的研究生牛艳青、林元同、施冠羽、马娟、李敏同学和清华大学建筑技术科学系的韩林俊、邵晓亮、王嘉、熊双、张晓灵、赵伟、周德海、朱奋飞、邵义军、彭军等同学帮助整理了大量资料,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者给予批评指正。

作 者

2009 年 10 月 8 日于南京

主要符号表

符 号	符号意义	单 位	符 号	符号意义	单 位
A	1) 年变幅 2) 空气流通面积	$^{\circ}\text{C}$ m^2	R	1) 水库宽深比 2) 气体常数	
a	导热系数	m^2/s	r	汽化潜热	kJ/kg
a_k, b_k, c_k	拟合系数		T, t	温度	$^{\circ}\text{C}$
B	1) 水库水面的平均宽度 2) 大气压力	m Pa	U	湿周	m
C	流量系数		u	速度	m/s
c, d, e, f	系数		V	体积	m^3
c_{pa}	空气比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$	V_c	水库总库容	m^3
D, D_{diff}	质扩散系数	m^2/s		1) 多年平均年入库径流量	m^3
d	空气含湿量	kg/kg	W	2) 湿交换量	kg/s
d_m	粒径	μm		3) 喷水量	kg/s
d_o	直径	mm	W_h	一次洪水总流量	m^3
E_l	传热效率	$\%$	w	湿交换率	kg/s
E_g	热交换效率	$\%$	X	喷淋段长度	m
F_n	喷嘴喉部面积	m^2	X_{eff}	有效作用长度	m
Fr	弗劳德数			1) x 轴坐标	m
G	质量流量	kg/s	x	2) 系数	
g	重力加速度	m/s^2		3) 长度	m
H	1) 喷淋段高度 2) 水库深度	m m	Y	尾水洞长度	m
i	焓值	kJ/kg		1) y 轴坐标	m
k	温度梯度	$^{\circ}\text{C}/\text{m}$	y	2) 系数	
L	1) 长度 2) 宽度	m m		3) 深度	m
M	湿交换量	kg/s	z	z 轴坐标	m
	1) 质量流量	kg/s	θ	圆周角	rad
m	2) 月份 3) 质量	kg	α	对流换热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
m_1, m_2	系数		β	判别系数	
N_d	液滴密度	$\text{个}/\text{m}^3$	β_d	以含湿量差为推动力的质传递系数	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
n	1) 液滴数 2) 系数	个	β_p	以水蒸气分压力差为推动力的质传递系数	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
P	压力	bar 或 Pa	γ	系数	
Q	热交换量	kW	ρ	密度	kg/m^3
q	1) 热交换率 2) 热流密度	W W/m^2	ξ	系数	
			φ	相对湿度	$\%$
			τ	时间	月
			ω	圆频率	rad/h
			ϵ	相位差	月

续表

符 号	符号意义	单 位	符 号	符号意义	单 位
Δ	差		loc	当地	
λ	导热系数	$W/(m \cdot ^\circ C)$	m	平均	
δ	远边界层厚度	m	max	最大	
ν	运动黏滞系数	m^2/s	n	喷嘴	
无量纲准则数			o	1) 初始 2) 参考	
Bi	毕渥数		out	出口	
Le	刘易斯数		p	压力	
NTU	传热单元数		s	湿球	
Re	雷诺数		sat	饱和	
Sc	施密特数		sr	表面	
Sh	舍伍德数		std	标准	
下角标			t	1) 温度 2) 总的	
a	大气		u	流速	
b	壁面		v	水蒸气	
bt	底部		w	水	
e	当量		wb	湿球	
f	净值		x	显热	
g	岩层				
in, inlet	入口				

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 水电站厂房的通风与空调	2
1.3 无压尾水洞引风技术原理	7
1.4 无压尾水洞引风技术中亟待解决的关键问题	9
本章小结	10
参考文献	10
第 2 章 水库水温分布的预测	12
2.1 概述	12
2.2 水库水温的影响因素分析	12
2.3 水库水温的分布类型	14
2.4 水库水温分布的预测模型	16
2.5 预测模型的应用分析	20
本章小结	24
参考文献	24
第 3 章 无压尾水洞引风热湿交换特性的现场测试与模拟试验	26
3.1 概述	26
3.2 无压尾水洞引风热湿交换特性的现场测试	26
3.3 无压尾水洞引风热湿交换特性的模拟试验	34
本章小结	52
第 4 章 无压尾水洞引风热湿交换过程的理论模型	54
4.1 概述	54
4.2 无压尾水洞引风热湿交换过程的热力分析	54
4.3 无压尾水洞引风热湿交换过程的理论模型	55
4.4 理论模型的求解	59

4.5 理论模型的验证	64
本章小结	67
参考文献	67
第5章 无压尾水洞引风过程的热湿交换特性	69
5.1 概述	69
5.2 岩层热参数对引风特性的影响	69
5.3 引风风速对引风特性的影响	75
5.4 尾水流速对引风特性的影响	81
5.5 尾水温度对引风特性的影响	87
本章小结	94
第6章 长无压尾水洞引风热湿交换过程的简化模型	95
6.1 概述	95
6.2 长无压尾水洞引风热湿交换过程的简化分析	95
6.3 长无压尾水洞引风热湿交换过程的简化模型	96
6.4 简化模型的验证	98
6.5 简化模型与数值模型比较	102
本章小结	105
参考文献	106
第7章 长无压尾水洞引风过程的热工计算方法	107
7.1 概述	107
7.2 长无压尾水洞引风参数的计算	107
7.3 长无压尾水洞引风过程的热交换量计算	108
7.4 长无压尾水洞引风过程的湿交换量计算	109
7.5 无压尾水洞引风有效作用长度的计算	110
7.6 热工计算方法的应用步骤	112
本章小结	112
参考文献	113
第8章 有限长度无压尾水洞引风技术	114
8.1 概述	114
8.2 有限长度无压尾水洞引风过程的改进模型	114
8.3 改进模型的验证	117

8.4 有限长度无压尾水洞引风过程的热工计算方法	121
8.5 无压尾水洞引风有效作用长度分析	123
本章小结	126
参考文献	127
第9章 无压尾水洞引风参数二次处理技术	128
9.1 概述	128
9.2 引风参数二次处理技术	128
9.3 低温尾水喷淋过程的热湿交换模型	129
9.4 对喷式空气喷淋过程的实验验证	137
9.5 二次喷淋串联处理过程的引风参数计算	143
9.6 无压尾水洞引风与二次喷淋串联系统的运行特性	144
本章小结	149
参考文献	149
第10章 无压尾水洞引风技术的工程应用	151
10.1 概述	151
10.2 瀑布沟水电站概况	151
10.3 瀑布沟水电站无压尾水洞引风特性	154
10.4 瀑布沟水电站地下厂房通风空调	168
本章小结	172
参考文献	173

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

我国是水电资源丰富的国家,有长江、黄河、珠江、澜沧江、雅鲁藏布江、怒江等大江大河丰富的水能资源,水电资源理论蕴藏量为 676GW,技术可开发量为 4.93GW,经济可开发量为 378GW,年可发电能为 1920TW·h。其中我国东部地区占 7%,开发率大于 50%,西部地区占 3/4,开发率仅 8%^[1]。然而与发达国家相比,我国的水电资源开发率还很低,目前实际利用水能资源仅占技术可开发量的 16%^[2],远远低于发达国家 50%~70%的开发利用水平,在一段时间内我国的水力资源开发潜力巨大。“十五”期间国家加大水电开发力度,积极开发西部水电资源,以实现“西电东送”,重点开发黄河上游、长江中上游及其干支流、红水河、澜沧江中下游和乌江等流域,实行流域梯级滚动开发,力争 2015 年左右使中国电源结构中水电比重达到 30%^[3]。因此,在未来的一段时间内,无论是水电行业还是水电设备生产企业,必将迎来新的增速高峰,我国将会进入水电开发建设的“风光”时代。2006 年《中华人民共和国可再生能源法》的施行,标志着我国从立法层面开始对可再生能源发展给予高度重视,也预示着可再生能源将会得到更快发展。

伴随着水电行业的高速发展,目前规划、设计、建设的水电站数量越来越多,规模和容量也越来越大。因此,如何有效控制电站厂房内的温湿度水平,充分利用水电站现有的自然冷源及实现电站厂房通风空调系统的节能运行也成为大家关注的焦点。而作为水电站排放水轮机发电尾水的无压尾水洞则是一种良好的天然冷源,利用无压尾水洞引风对电站厂房进行通风空调是一种天然冷源应用形式,一方面可减小电站地下洞室的开挖工程量(对于地下厂房而言)和通风空调设备机房的占地面积,减小厂房的基建投资;另一方面利用无压尾水洞引风进行通风空调,与传统电制冷空调技术相比可减免耗资、耗电量大的空调冷冻设备,极大减小通风空调系统的初投资及运行费用,具有显著的经济效益和社会效益。因此,对于水电站通风空调系统而言,无压尾水洞是一个巨型的天然“空调机”,具有节能、环保和可再生的优点,符合能源的可持续发展要求,是一个既节能又节省投资的不可多得的天然冷源。

然而,目前对无压尾水洞引风技术的应用尚停留于探索与现场测试数据应用阶段,缺乏充足的理论依据与可靠的设计计算方法,严重制约了无压尾水洞引风技

术的科学应用与发展。本书主要围绕水电站无压尾水洞天然冷源应用为主题,针对工程应用中存在的科学问题,对长直无压尾水洞及长度有限无压尾水洞引风系统的热湿传递机理、热湿交换特性、引风应用技术及其热工计算方法等相关理论进行系统、深入的研究,以期水电站无压尾水洞引风技术的应用提供理论基础与技术指导,并推动无压尾水洞引风技术在水电站通风空调工程中的科学应用,以促进水电暖通行业的可持续发展。

1.2 水电站厂房的通风与空调

新中国成立以来,我国水电事业有了很大的发展,在已建和在建水电站中,电站厂房的形式有多种,如地面式、地下式、坝后半封闭式、坝内式和地面半封闭式等,但从暖通空调技术角度而言,各种类型水电站厂房一般均具有如下几个方面的特点^[4]:

(1) 厂房内热湿区分明,即厂内布置电气设备部位的发热量大、产湿量小,而布置水处理设备的部位及厂房的水下部位产湿量较大,且在电站厂房的各部位,其内部参数的控制要求也大不相同,如表 1-1 所示^[5]。

表 1-1 电站厂房主要功能区设计参数^[5]

部 位	夏 季		冬 季	
	温度/℃	相对湿度/%	温度/℃	相对湿度/%
发电机层	≤27	≤75	≥13	≤70
电气夹层	≤27	≤70	≥13	≤70
水轮机层、蜗壳层	≤26	≤75	≥12	≤70
副厂房一般房间	≤26	≤70	≥13	≤70
中控室、通讯室	24±2	50±10	20±2	50±10
计算机室	24±2	50±10	20±2	50±10
母线道	≤35	不规定	≥15	不规定
主变室	≤35	不规定	≥15	不规定
其他电气设备房间	≤33	≤70	≥13	≤70

(2) 水电站一般可根据实际情况合理利用水库深层冷水、坝体廊道风、地道风及无压尾水洞等天然冷源进行厂房的降温。

(3) 主厂房发电机层空间大而实际工作区空间小。厂房大、功能分区多,而运行管理人员却很少,且均集中在中控室、电算室、通讯室及单元控制室等部位。

(4) 建设施工周期长,通常需要解决同时发电与施工时的通风与防潮问题。

因此,在水电站厂房中应综合考虑厂房的负荷及结构特点进行电站厂房通风空调方案及系统的设计,这也是区别于工民建行业暖通空调系统的显著特征。

1.2.1 我国水电暖通空调技术的发展历史

我国的水电暖通空调行业是在建国后发展起来,大致可分为以下四个发展阶段^[6]:

第一阶段:起步学习阶段(1949年~20世纪60年代初)。

从20世纪50年代到60年代初,我国自行设计了一批大中型水电站。在设计过程中,各设计院完善配置了各专业设计人员,但因当时我国暖通空调专业人才培养短缺,各设计院暖通专业多由水力机械专业设计人员兼任。这个时期电站厂房的通风设计基本照搬前苏联模式,即空气调节设计效仿我国解放初期纺织行业的喷淋装置;地面式电站厂房的自然通风均效仿一般高温车间的自然通风计算方法设计。因当时的暖通设计人员缺少实践经验,没有认识到我国水电站厂房的特点,该时期设计的不少水电站厂房建成投产运行后,均较闷热、潮湿,尤其是采用自然通风的地面式厂房,问题更为严重,有的电站发电机层夏季温度甚至高达40℃以上;水下部位一般均较潮湿,产生机械设备锈蚀,电器设备绝缘能力降低、漏电、击穿等问题,严重影响机电设备的运行及运行人员的身体健康。

第二阶段:调查、总结和实践阶段(20世纪60年代初~1978年)。

在20世纪60年代初,各水电设计院吸收了一批高等院校的暖通空调专业毕业生,充实了该专业的技术力量,成为推动技术发展的主力军。为改变水电暖通空调专业的落后面貌,1963年、1964年和1966年原水电部水利水电总局组织部署各设计院对已建水电站厂房的暖通空调工程的运行效果进行了多次调研、总结,特别是在1966年为编写《水电站厂房暖通空调设计规定》进行了大规模的调研活动,几乎调查遍了国内已建成的大中型水电站。通过调查,基本找出了以往水电站厂房暖通空调设计中存在的问题,并在调查总结经验的基础上设计出一批基本符合我国水电站特点、运行效果较好的电站暖通空调系统。

第三阶段:科研、基础工作与开拓阶段(1978年~20世纪80年代末)。

1978年经水利部水利水电规划设计总院批准,水利水电系统成立了“全国水电暖通空调技术情报网”,为以后积极开展水电系统暖通空调专业的科研和科技情报交流做好了组织准备。1979年全国水电暖通空调情报网编写了18大项,含38个子课题的十年科学研究规划,并在水利部、电力部、水利水电规划设计总院的领导与经费支持下,由全国水电暖通空调情报网组织实施,发动全国各设计院暖通专业人员广泛开展科研工作,经过十余年的努力,均基本完成各项科研任务。同时在对水电站大规模调查、测试、总结及科研基础上,全国水电暖通专业于1981年完成了《水力发电厂厂房采暖、通风、空气调节设计技术规定》,1983年编写了《水电站厂房通风、空调和采暖》,1985年出版了《水电站厂房采暖通风空调图集》和《小型水电站暖通空调设计手册》,1987年出版了《水电站设计手册——采暖通风与空

调》等。这些技术基础工作的完成,为水电系统暖通空调设计提供了适合我国国情的规范依据和理论基础,使我国水电暖通空调设计水平提高到一个新的高度。随着国内外暖通空调技术的飞速发展,我国水电暖通设计也进入新的开拓阶段。

第四阶段:高科技发展阶段(20 世纪 80 年代末至今)。

自 20 世纪 80 年代末开始,世界暖通空调技术突飞猛进,我国也在水电暖通空调领域得到了显著的发展,特别是在电站通风空调系统的设计理论、设计技术、节能技术、自动控制技术及防火防排烟技术等方面。这些技术的发展与应用,对我国水电暖通空调技术的科学、规范发展具有积极的推动作用。

1.2.2 水电站厂房的通风空调方式

水电站厂房的通风方式可归结为三种类型:全自然通风;机械送风、机械(或自然)排风;机械排风、自然进风(全排风)^[6~11]。

1. 全自然通风方式

自然通风的空气流动动力来源于风压及厂内外空气容重差产生的热压,是一种经济的通风方式。自然通风可适用于地面式厂房和地下式厂房,在地面式厂房中,自然通风主要应用于发电机层,在风压和热压的驱动下利用厂房下部的天窗和外门进风,上部的外窗或侧窗排风,以排除电站厂房的余热、余湿负荷。例如福建的古田四级水电站、江西永修的柘林水电站及浙江的富春江水电站厂房均采用了自然通风的方式。地下式水电站的自然通风则主要是依靠比较长的交通洞对洞外的新风降温除湿、厂内余热对空气加热,使得厂内外空气产生容重差,再利用有一定高度的排风竖井产生足够的自然压头(热压)进行循环通风,其进、排风道是厂房对外联系的廊道,如交通、排水、通风、出线洞等。例如云南以礼河盐水沟以礼河三级引水式地下电站、澜沧江干流的小湾水电站地下厂房、云南丽江黑白水三级电站地下厂房^[12]等采用了自然通风的方式。

2. 机械送风、机械(或自然)排风方式

在机械送风、机械(或自然)排风方式中,厂外的新鲜空气经由交通洞或送风廊道内的风机汇入主风道或拱顶静压箱,直接将空气送到需要的部位,吸收厂内的余热、余湿后的空气经出线洞、运输洞或其他通道“自然”排至厂外。当厂内空气的余压不足以克服排风道的空气阻力时,则设置排风机用机械排风。该通风方式的优点在于对厂房内气流组织的控制和温湿度的处理都较为主动。因此,在大、中型电站或通风系统网络比较复杂的情况下广为采用,我国已建的电站通风系统多采用这种通风方式。例如,上犹江、渔子溪、刘家峡、回龙山、白山、二滩、十三陵等地下水电站均采用机械送风、机械(或自然)排风的通风方式。

3. 机械排风、自然进风(全排风)方式

机械排风、自然进风方式,也称为“全排风”方式,它是利用通往厂房拱顶、发电机层、水轮机层的竖井、通道、出线洞等作为排风道,在排风道内设置排风机,从厂房抽风排到厂外。在排风机负压的作用下,厂外空气经交通洞补充到主厂房的发电机层。空气进入发电机层后,在工作带形成风速较大的穿堂风(风速在 1m/s 左右),然后分成上、下两部分排风。由拱顶排风道排出发电机层上部空间的余热,升温后的空气进入水轮机层等部位,经出线洞等排风道排至厂外。

这种通风方式的显著优点在于厂外新鲜空气经交通洞降温后直接送入发电机层,充分地利用了交通洞的热工特性来调节厂房的送风温度,无需其他空调手段。特别是在夏季,厂外温度较高的空气经交通洞降温后进入发电机层往往能满足厂内的降温要求。经过发电机层加热后的空气再进入水轮机层等较潮湿的部位,又可收到较好的排湿效果。“全排风”方式是利用机械排风来组织厂内的速度场,由于排风口数量少,排风口汇流的空气速度场作用半径较小,将造成较大风速的穿堂风。因此,“全排风”通风方式的通风量比较大,有的电站发电机层的通风换气次数甚至高达 35 次,但因其直接利用大断面排风道排风,风速低、阻力小,对风机能耗的影响不大。

在“全排风”通风方式中不能对进风进行人工调节处理,因此它需要一个足够长且具有良好热工性能的地下隧洞作进风道。“全排风”目前多用于机组少、布置简单的南方地区水电站,最典型的是广东的流溪河水电站,另外在南水、潭岭、长湖等地下水电站中也得到了应用,并取得了良好的通风效果。

纵观水电站厂房的各种通风方式,电站的厂房布置、结构及工艺条件、电站所在地区的气象与水文条件各异,因此对于特定条件的水电站,其通风空调方式应根据具体条件进行技术经济分析后确定,以有效排出厂房内部的余热、余湿,实现电站厂房内部热湿环境的合理控制;但从节能的角度来考虑,在条件许可条件下应尽可能地采用自然通风方式,以降低电站通风空调系统的运行能耗。

1.2.3 水电站天然冷源应用现状

因水电工程的结构、工艺条件及其所处地理位置的特殊性,在水电站通风空调系统中可利用的天然冷源有多种形式,如无压尾水洞、坝体廊道、地下厂房的交通洞及其他廊道、洞室、水库深层低温水等。应用上述各种天然冷源对送入电站厂房的空气进行热湿处理,以消除厂内的余热、余湿负荷,实现对电站厂房内部热湿环境的有效控制,可极大地降低电站厂房通风空调系统的能耗及运行费用,具有显著的节能效果与经济效益。

随着我国水电工程建设的快速发展及水电站暖通空调技术的逐步提高,水电

站各种天然低温冷源对空气的降温除湿效果也逐步得到认识,并在水电站厂房通风空调系统中逐步得到应用和发展,取得了良好的运行效果与节能效益。

1. 无压尾水洞引风技术的应用

在水电工程中,对电站通风空调系统而言,无压尾水洞是一种良好的天然冷源,从洞外引入的空气在流经无压尾水洞时与低温尾水表面及洞壁面直接接触并进行热湿交换,从而实现对引入空气的热湿处理。利用无压尾水洞处理后的空气对电站厂房进行通风空调能起到良好的降温除湿效果,同时也可显著减小电站厂房通风空调系统的运行成本及基建投资,具有良好的经济效益与社会效益。

映秀湾水电站是我国第一个成功实施应用无压尾水洞引风对电站厂房进行通风空调改造的工程实例,该水电站位于四川省阿坝州汶川县境内,电站为地下式厂房,具有一条长 380m 的无压尾水洞。电站厂房通风空调系统采用无压尾水洞引风、进厂交通洞自然进风的方式,无压尾水洞引风量为 $12.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,多年来运行效果良好。作者在 2005 年夏季对该电站无压尾水洞引风系统的热湿交换特性进行了现场测试^[13],结果表明,无压尾水洞对引入空气具有良好的热湿处理效果,处理后的空气接近对应尾水温度的饱和状态。目前已建采用无压尾水洞引风对电站厂房进行通风空调的水电站还有黄河小浪底水电站、甘肃刘家峡水电站等^[14,15]。多年运行结果表明,夏季无压尾水洞对空气具有良好的降温除湿效果,利用无压尾水洞引风进行通风空调,厂内通风状况良好,未出现结露、雾化现象^[6]。目前,正在建设中的四川大渡河瀑布沟大型水电站地下厂房的通风空调系统也拟采用无压尾水洞引风技术^[16,17],该电站总装机容量为 3600MW,为地下式厂房,厂房总设计负荷为 5438kW,电站建有两条无压尾水洞,长分别为 1137.7m 和 1075.3m,设计通风空调方案采用无压尾水洞引风直流式系统,两条无压尾水洞总引风量为 $120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[18]。

2. 廊道、交通洞天然冷源的应用

在水电工程中,某些厂房因地理条件和工程建设的需要而建造在地下,它们通过交通洞,各种廊道,进、排风洞等与地面相通,形成复杂的地下洞室群。因这些廊道、交通洞深埋地下,有的甚至与深层水库低温水接触,洞体岩层及壁面温度通常较低,当空气流经各类地下廊道、交通洞时,在温差与水蒸气分压力差的作用下,空气与洞壁面之间进行热湿交换,夏季使流经空气的温度、湿度降低,从而实现对电站厂房的降温除湿,其降温除湿效果已通过实际工程应用和现场测试得到了证实^[19]。利用各种廊道、交通洞处理空气对电站厂房进行通风空调是大多数水电站厂房所采用的通风空调方式,特别是地下式厂房的水电站。映秀湾水电站除了利用无压尾水洞引风进行通风空调外,还利用一条长 270m 的进厂交通洞从洞外自

然引风至发电机层,引风量为 $11.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。运行及现场测试结果表明,室内外空气温度相差越大,交通洞对引入空气的热湿处理效果越好;在过渡季节,交通洞对引入空气的处理效果较差^[18]。应用坝体廊道进行通风空调的电站有万安水电站,该电站位于江西赣江中游,为坝后式厂房,电站装机容量 $50 \times 10^4 \text{ kW}$ 。为减小能耗及降低夏季发电机层温度,该电站发电机层采用了大坝廊道通风方案^[6],即从室外抽取新风流经坝内灌浆廊道,在空气流经坝体廊道时与廊道壁面进行热湿交换,从而实现对电站厂房送风的热湿处理。习亚华于1991年7月对丹江口水电站进行了测试,测试数据表明在室外气温 34°C 时,坝体廊道取风温度仅为 22°C ^[20];1995年对云南漫湾电站进行测试,在坝外气温 32.4°C 、相对湿度 35% 时,坝体廊道取风温度为 23.4°C 、相对湿度 67% 。上述测试结果表明,坝体廊道对引入空气的降温效果良好。利用各种廊道、交通洞进行通风空调的水电站还有黄河小浪底水电站、葛洲坝大江水电站、乌江渡电站,以及陕西安康、福建水口等水电站^[21]。

3. 深层水库低温水的利用

一般大型、多年性调节的水库,在上游水库水深 30m 以下的水温通常在 $15\sim 18^\circ\text{C}$ 之间^[6]。因此,对电站厂房通风空调系统而言,深层水库低温水是一种良好的天然冷源,采用水库深层低温水对空气进行喷淋处理能起到良好的降温除湿效果,应用喷淋处理后的空气对电站厂房进行通风空调,可有效控制电站厂房内的温湿度水平;同时也极大降低电站厂房通风空调系统的运行费用,具有显著的节能效果。丹江口水电站是采用水库深层低温水处理空气对电站厂房进行通风空调的成功案例之一,该电站位于湖北省丹江口市,电站为全封闭式厂房,总装机容量为 $90 \times 10^4 \text{ kW}$ 。空气经空调室低温库水喷淋处理后,通过主风道,分别由设在主厂房发电机层上游墙下部的低速风口横向流经发电机层,以及上部墙上的高速风口,射向下游工作区。两股气流吸收发电机层余热后,从下游侧楼梯口及楼板上的通风格栅向下流至水轮机层,在上游空调机房风机的抽吸下,再反向流经水轮机层、上游技术供水层,最后回至空调机房再处理。经实测表明,发电机层工作区温度在 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 之间,相对湿度在 $55\%\sim 75\%$ 之间,水轮机层及技术供水层去湿效果明显,值班人员感觉良好^[6,22]。又如云南漫湾电站,采用 19.5°C 的库水对空气进行喷淋处理,设有大型组合式金属空调机组 15 套,喷淋水量达到 2000t/h ,喷淋处理后的空气完全满足电站通风空调系统的降温除湿要求,节省一次投资 200 万元,夏季可节约用电 $20 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,节能效果显著^[20]。在长江流域采用此深层水库低温水处理空气的还有黄龙滩、乌江渡、上犹江、凤滩等水电站^[6]。

1.3 无压尾水洞引风技术原理

在许多已建和拟建造的水电工程中,通常建造有无压尾水洞。无压尾水洞是

水电工程中排放水轮机发电尾水的地下隧洞,尾水洞内水流为非满液重力流系统,水流速较小,尾水洞壁不承受洞内水压力,故称之为无压尾水洞,结构如图 1-1 所示。

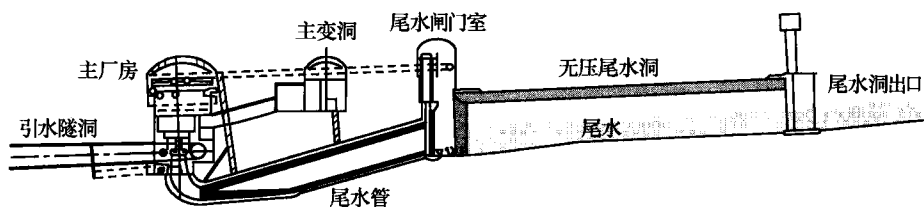


图 1-1 水电站无压尾水洞结构示意图

在水电站正常运行条件下,无压尾水洞为非满液状态,尾水洞内通常具有较大的空气流通空间,这为无压尾水洞的引风提供了基础条件。同时由于无压尾水洞一般深埋于山体内,洞体岩层常年温度稳定,且接近当地年平均大气温度;而洞内通过水轮机发电后的尾水也通常为上游深层水库低温水,在水库深度达到 40m 以上的分层型水库中,深层库区水温常年也较稳定。在我国的大部分地区,特别是西南、西北及长江流域的水电站,深层库区水温基本在 $15\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。因此,无压尾水洞内常年均维持在一个温度较低的环境,对空气处理系统而言则是一个良好的低温冷源。无压尾水洞引风则是利用洞内常年低温且稳定的环境条件,夏季,从洞外引入温度与湿度较高的空气在无压尾水洞沿程流动时在温差与水蒸气分压力差的作用下与低温尾水表面及洞壁面之间进行热湿交换,实现对引入空气的降温除湿处理;冬季,无压尾水洞则对洞外引入的温度与湿度较低的空气进行加热加湿处理。当然,空气在流经无压尾水洞过程中具体热湿交换过程需取决于引入空气状态与无压尾水洞内温度之间关系。

根据水-空气热湿交换理论,在无压尾水洞长度足够长或空气与无压尾水洞接触时间无限大的条件下,经无压尾水洞处理后的空气参数应为对应尾水温度的饱和状态,这也是无压尾水洞对引入空气热湿处理的极限状态。当然,在实际的水电工程中,因无压尾水洞长度有限,空气与尾水表面及洞壁面之间的接触时间有限,无压尾水洞往往难以将引入空气处理到理想的极限状态。

在水电站厂房内,由于其发热设备较多且发热量大(发热设备主要为发电机组、变压器、整流器、电缆及其他电气设备等),电站厂房内通常具有全年较为稳定的余热负荷,特别是对于深埋于地下的电站地下厂房。因此,利用无压尾水洞处理后的空气对电站厂房进行通风空调来排出厂内的余热、余湿,是一种良好天然冷源的应用形式。一方面可减小电站地下洞室的开挖工程量(对于地下厂房而言)或通风空调设备机房的占地面积,减小厂房的基建投资;另一方面利用无压尾水洞引风进行通风空调,与传统的电制冷技术相比可减免耗资、耗电量大的空调冷冻设备,