

文章编号: 1671-6612 (2014) 01-090-05

水库水在地下式水电站厂房空调工程中的应用

盘晓红 肖益民

(重庆大学城市建设与环境工程学院 重庆 400045)

【摘 要】 水库深层低温水作为地下式水电站厂房空调系统的天然冷源, 可以显著减少通风空调系统能耗。对水库水温的计算方法进行了概述, 分析了不同水库条件下水温计算公式的合理选用问题; 同时结合水电站技术供水系统的特点及要求, 分析了地下式水电站厂房内的技术供水与空调系统冷却用水合用的可行性, 结果发现地下式水电站厂房内的技术供水在水温、水质、水量方面都满足空调系统冷却用水的要求, 二者合用将减少单独为空调系统设立取水系统带来的人力、物力以及财力的消耗。

【关键词】 水库深层低温水; 水电站; 空调系统; 技术供水

中图分类号 TV731.6/TU83 文献标识码 B

The Application of Reservoir Water in the Air Conditioning Engineering of the Underground Hydropower Plant

Pan Xiaohong Xiao Yimin

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045)

【Abstract】 The deep cold water in reservoir is an ideal nature cold source for the air conditioning system of the underground hydropower plant. It can reduce the energy consumption of the ventilation and air conditioning system. This paper summarized the calculation methods of the water temperature in reservoir and analyzed the applicability of the calculation methods of the water temperature in different reservoirs. By analyzing the features and requirements of the technical water supply system, this paper found that combining the cooling water of the air conditioning systems with technical water-supply system in underground hydropower plant is feasible, because the water temperature, water quality, water quantity of the technical water supply meet the requirements of the water of the air conditioning systems. The combining the water of the air conditioning systems with technical water supply system can reduce the human, material and financial resources consumption which is due to the individually setting of water intake for air conditioning systems.

【Keywords】 deep cold water in reservoir; hydropower; air conditioning system; technical water supply

0 引言

水库深层低温水常年温度波动较小, 水温较低, 可作为地下式水电站空调工程的天然冷源。如果对水库深层低温水进行合理利用, 可以显著减少地下式水电站通风空调系统的能耗。为确保通风空

调系统运行效果达到设计要求以及系统可靠运行, 水库水温计算的正确性就显得尤为重要。水库水温计算较实际值偏低, 会出现地下式水电站厂房的通风空调系统达不到设计要求, 厂房温度过高, 轻则影响人员舒适性要求, 重则影响厂房设备的安全运

基金项目: 国家自然科学基金资助 (项目号: 51178482);

中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目资助 (编号: CDZJR11210004)

作者简介: 盘晓红 (1990.11-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 597588288@qq.com

通讯作者: 肖益民 (1974.2-), 男, 副教授, 研究方向为流体输配、建筑节能、水电站环境控制

收稿日期: 2013-07-25

行;若水温计算值偏高,则会出现冷水输配系统初投资及运行能耗增大。同时地下式水电站厂房中主要用于对发电机空气冷却器、发电机推力轴承、水轮机导轴承油冷却器、主变压器油冷却器、调速系统集油槽冷却器等设备进行冷却,以及用于润滑和液压操作的技术供水系统,通常采用水作为直接或间接冷源,因此若能将地下式水电站厂房中的空调系统的冷却用水和技术供水系统相结合,将取得较好的效益,可以减少单独为空调系统设立取水系统带来的能源和经济消耗。

1 水库水温分析与计算

1.1 水库水温类别判定

按照水温分布特点可以分为稳定分层型、混合型 and 过渡型。稳定分层型水库垂向上从上到下分为库面温水层、温跃层和滞温层。库面温水层温度梯度较小,水温随气温变化较大;温跃层温度竖向梯度大,温度变化快;而滞温层水体温度竖向梯度变化小,常年温度波动较小,温度较低。混合型水库年内温度变化较大,上下层水体水温差不大,水温竖向梯度较小。混合过渡型水库介于二者之间。

判别水库水温结构模式的常用方法有^[1]:入流与库容比值法(又称 α 法)、密度弗诺得数法、水面宽深比法,以及蔡为武提出的水库水温分层类型应根据水库调节性能、年内泄水状况、泄水孔口相对位置三种因素来判断等。其中 α 法最为简单实用。目前国内判定水库是否分层一般用该方法进行判定,判定方法如下。

$$\alpha = \frac{Q_1}{Q}$$

$$\beta = \frac{Q_2}{Q}$$

式中, Q_1 为年入库总流量; Q 为总库容; Q_2 为一次洪水总流量。当 $\alpha < 10$ 时,水库为稳定的分层型; $\alpha > 20$,则为混合型水库。对于分层型水库,若遇洪水有可能使水库分层结构发生变化,此时,需要用 β 来进行判定。当 $\beta > 1$ 时水库水温结构会变为临时的混合型; $\beta < 0.5$ 时,一般认为对水库的水温结构没有显著影响; $0.5 < \beta < 1$ 时,认为是过渡型。

1.2 水库水温计算公式

到目前为止,国内提出了许多经验性水温估算方法,最具有代表性的几种经验性公式有长江流域

规划办公室、东北勘测设计院、朱伯芳提出的经验公式;中南勘测设计院和水利水电科学研究所提出的统计分析公式;以及西安理工大学李怀恩提出的幂函数公式。

(1) 长江流域规划办公室所整理的计算公式^[2]

$$t_{sw} = kh + b$$

式中, t_{sw} 为水库深水温度; k 为水库深水水温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$,可根据文献[2]给出的图8-30得出; h 为空气调节取水口距水库正常水位的深度, m ; b 为水温附加值, $^{\circ}\text{C}$,可根据水库调节性能、水库所在地理纬度及水库所在地多年平均气温从文献[2]给出的图8-31得到。

(2) 东勘院法^[3]

$$T_y = (T_0 - T_b) e^{-(y/x)^n} + T_b$$

$$x = \frac{40}{m} + \frac{m^2}{2.37 \times (1 + 0.1m)}$$

$$n = \frac{15}{m^2} + \frac{m^2}{35}$$

$$T_b = T_b' - K'N$$

式中, T_y 为任意水深 y 处的月均水温, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为水库表面月平均水温, $^{\circ}\text{C}$,可根据设计水库库区的气温并利用气候条件相似的同类水库的气温-库表水温关系求得,也可用已建水库库表水温与纬度的关系插补; T_b 为水库底部月平均水温, $^{\circ}\text{C}$,根据已给出的表查询 T_b' 、 K' 、 N 进行计算得出; m 为月份。

(3) 朱伯芳提出的经验公式^[4]

$$T(y, t) = T_m(y) + A(y) \cos \omega(t - t_0 - \varepsilon)$$

$$T_m(y) = c + (T_{\text{表}} - c) e^{-0.04y}$$

$$A(y) = A_0 e^{-0.018y}$$

$$\varepsilon = 2.15 - 1.30 e^{-0.085y}$$

$$c = (T_{\text{底}} - T_{\text{表}} e^{-0.04H}) / (1 - e^{-0.04H})$$

式中, $T(y, t)$ 为任意深度 y 和月份 t 的平均水温, $^{\circ}\text{C}$; $T_m(y)$ 为任意深度 y 处的年平均水温, $^{\circ}\text{C}$; $A(y)$ 为任意深度 y 处的水温年变幅, $^{\circ}\text{C}$; A_0 为水库表水温年变幅, $^{\circ}\text{C}$; ε 为任意深度 y 处水温与气温变化相位差; $T_{\text{底}}$ 为水库底部年平均水温, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{表}}$ 为水库表面年平均水温, $^{\circ}\text{C}$; H 为水库总深度, m ; ω 为温度变化频率, $\omega = 2\pi/P$, $P=12$; $t_0=6.5$ 。 $T_{\text{表}}$ 和 $T_{\text{底}}$ 可由气温推算。

(4) 统计法^[5]的计算公式是在朱伯芳提出的

经验公式的基础上,对实测水库水温数据利用最小二乘法原理进行曲线拟合,并对水库进行分类,求出各种类型水库的经验公式参数,具体计算方法如下。

$$T(y, t) = T_m(y) + A(y) \cos \omega(t - t_0 - \varepsilon)$$

$$T_m(y) = ce^{-\alpha y}$$

$$A(y) = A_0 e^{-\beta y}$$

$$\varepsilon = d + fy$$

$$c = 7.77 + 0.75 T_a$$

式中, $T(y, t)$ 为任意深度 y 和 t 月的平均水温, $^{\circ}\text{C}$; $T_m(y)$ 为任意深度 y 处的年平均水温, $^{\circ}\text{C}$; $A(y)$ 为任意深度 y 处的水温年变幅, $^{\circ}\text{C}$; A_0 为水库表水温年变幅, $^{\circ}\text{C}$; ε 为任意深度 y 处水温与气温相位差; T_a 为坝址多年年平均气温, $^{\circ}\text{C}$; ω 为温度变化频率, $\omega = 2\pi/P$, $P=12$; 对于纬度大于 30 度的地区 $t_0=6.5$, 对于纬度小于 30 度的地区 $t_0=6.7$; 具体参数取值可详见文献[5], y_0 为多年调节水库的变化温度层深度, 一般可取 $50\text{m}-60\text{m}$ 。

(5) 李怀恩公式^[6]是针对稳定分层型水库所提出来的计算公式, 计算方法如下。

$$T(z) = T_c + A \left| h - z \right|^{\frac{1}{B}} \text{Sign}(h - z)$$

$$\text{Sign}(h - z) = \begin{cases} 1 & (h > z) \\ 0 & (h = z) \\ -1 & (h < z) \end{cases}$$

式中: $T(z)$ 为水面下任意深度 z 处的水温, $^{\circ}\text{C}$; T_c 为温跃层中心点的温度, $^{\circ}\text{C}$; h 为温跃层中心点的水深, m ; A 、 B 为经验参数, 反映水库分层的强弱, 分层越强, A 值越大。

1.3 水库水温计算公式分析及选用

长江流域规划办公室整理的公式只能计算年平均水温分布, 不适用于计算月平均水温变化较大的情况。东勘院法计算简单、方便, 但计算精度不高, 它给出了在纬度为 $23-44^{\circ}$ 的地区水库深度为 60 米以内的水库底部水温计算方法。朱伯芳法计算所需资料少, 容易获得, 提出用气温计算水库表面温度和水库底部温度的估算方法。统计法考虑因素全面, 在变化温度层范围内 (一般 $50-60\text{m}$) 水温计算较精确。东勘院法、朱伯芳法、统计法的计算公式为指数函数形式, 长江流域规划办公室整理的公式水温为线性分布, 用于计算稳定分层性水库

的水温分布都有较大误差。李怀恩公式具有结构简单、参数少且容易确定, 能较好地反映三层式水温分布, 用于计算具有实测资料的水库或者能找到具有实测资料的相似水库时拟合度较高, 对于没有实测资料且找不到具有实测资料的相似水库时, 计算误差较大。此外, 上述所有水库水温计算公式都是只能计算出垂向水温分布, 实际上水库水温在整个三维空间上是变化的, 因此上述水温计算公式都有一定局限性。

水库水温计算经验公式较多, 选用适用的经验公式合理计算水库深层低温水水温, 对于地下式水电站厂房通风空调系统冷源形式、通风方案的确定有至关重要的作用。综合上述水库水温计算公式的适用条件, 对于水库深度小于 60 米的水库, 宜采用统计法对水库水温进行计算; 对于水库深度大于 60 米的水库可采用长江流域规划办公室所整理的公式、东勘院法及朱伯芳提出的公式计算深水层的平均水温作为近似值; 此外, 对于稳定分层型水库若有实测水文资料或者找到具有实测资料的相似水库时宜采用李怀恩公式进行计算。

2 空调系统冷却用水与技术供水合用的可行性分析

2.1 技术供水概述

地下式水电站厂房技术供水的主要作用是对设备进行冷却 (有时也用于润滑及水压操作), 保证水轮发电机组的稳定、安全运行。技术供水的主要对象是发电机空气冷却器、发电机推力轴承、水轮机导轴承油冷却器、主变压器油冷却器、调速系统集油槽冷却器等。

技术供水需满足用水设备所需的水量、水压、水质和水温的要求, 其基本原则是取水可靠、水压合适、水量充足、水温适宜、水质良好, 以保证机组安全运行, 在技术供水设计过程中需要结合水电站型式、机组布置情况、电站水头情况等综合考虑, 使整个供水系统管路简单且操作维护方便; 达到投资和运行费用最省^[7]。

为保证技术供水的可靠性, 技术供水系统除了主水源之外, 还应该有备用水源。技术供水系统的水源一般可取上游水库水、下游尾水、地下水和清水循环供水^[8], 其中从上游水库取水又可分为压力钢管取水和直接从坝前取水。

技术供水系统的供水方式可分为循环供水、一次供水和两种方案结合的混合供水^[9]。循环供水是当上游水库水或者下游尾水水质较差不能满足技术供水系统对水质的要求时,采用清水将机组和设备的热量带走,然后通过河道里的二次换热器将清水中的热量带走,清水进行循环使用。循环供水不需设置备用水源,只电站厂房当需要进行空调系统改造,由于空调系统用需设置备用水泵即可。一次供水是将吸热后温度升高的水直接排放到尾水中,不再进行循环使用。一次循环适用于上游库水或者下游尾水水质较好或者采用专门水质处理设备使得水质满足要求时采用该方式。一次供水又可分为自流直接供水(水头 20~35m)、自流减压供水(水头 50~120m)、尾水取水(水头低于 20m 或者高于 150m)。当一年中部分时段库水水质较差时可以采用循环供水和一次供水两种方案结合的混合供水方式。

2.2 空调系统冷却用水与技术供水合用的可行性

若将空调系统冷却用水与技术供水合用,可以避免单独为空调系统从上游取水设置取水口所带来的人力、物力和财力的消耗,还可以减少地下式水电站厂房内管路的复杂性,便于管理。此外某些情况下还可以实现对库水的梯级利用,达到节能减排的目的。下面从水温、水量、水质等方面探讨空调系统冷却用水与技术供水合用的可行性。

首先,地下式水电站厂房技术供水的水源采用上游水库水、下游尾水和地下水,该水源对于空调系统来说,其温度通常低于地下式水电站厂房各个洞室的设计温度及进风空气温度,即水温与气温存在温差,那么采用技术供水的源水作为空调系统冷却用水就有利用价值。同时根据文献[10]的测试,三峡水电站用于冷却主变压器油冷却器的技术供水的排水水温在 7-8 月份水温最高为 28.1℃,平均温度 27.0℃,且水温稳定,即使用该水作为制冷主机的冷却水,也小于常见制冷机组冷却水 30℃的进口温度,可以提高制冷机组的 COP。

表 1 部分水电站技术供水数据统计

Table 1 Technical water supply statistics of some hydropower stations			
水电站名	装机容量 (台×单机装机容量)	总技术供水量 (m³/h)	每 MW 技术供水量 (m³/(MWh))
三峡左岸电站	14 台×700MW	23632	2.41
构皮滩电站	5 台×600MW	12240	4.08
惠州抽水蓄能电站	8 台×300MW	约 11000	4.58
小浪底水电厂	6 台×300MW	约 9000	5
百色水利枢纽水站	4 台×135MW	3316	6.14
莲麓一级水电站	3 台×22MW	555	8.41
龙溪水电站	2 台×8MW	300	18.57
宝鸡峡林家村水站	2 台×3.2MW+1 台×1.6MW	180	22.5

表 2 部分地下式水电站发热量统计

Table 2 Heat statistics of some underground hydropower stations				
水电站名	装机容量 (台×单机装机容量)	全厂发热量 (kW)	每 MW 发热量 (kW/(MW))	冷却水温升 1℃时用量 (m³/MWh)
锦屏一级水电站	6 台×600MW	4824.42	1.34	1.15
锦屏二级水电站	6 台×600MW	5502.55	1.15	0.99
溪洛渡水电站	9 台×700MW	7474.2	1.19	1.02
白鹤滩水电站	8 台×1000MW	8581.54	1.07	0.92

其次,从水量上分析。表 1 是根据文献[11~16]整理的水电站厂房技术供水数据。从表 1 可以看出,随着水电站单机装机容量的增加,单位装机技

术供水量逐渐减小。表 2 为锦屏一级水电站^[17]、锦屏二级水电站、白鹤滩水电站^[19]和溪洛渡水电站^[18]厂房的全厂发热量统计,从表 2 可以看出对应单机

装机容量的为 600MW 和 1000MW 的水电站来说, 空调系统冷却用水量按照水温升 1°C 时计算, 也仅需水量 $1\text{m}^3/(\text{MWh})$, 远小于技术供水的用水量 $2.41\sim 4.08\text{m}^3/(\text{MWh})$, 但实际运行条件下, 空调系统冷却用水温升可取 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。文献[14]中提到惠州抽水蓄能电站 A 厂 (该电站分为 A 厂和 B 厂, 分别装有 4 台水轮发电机组) 空调设备冷却水从尾水取水, 冷却水用量为 $380\text{m}^3/\text{h}$, 由于 A、B 两厂安装水轮发电机台数和容量相同, 根据表 1, 若取 A 厂技术供水量为 $5500\text{m}^3/\text{h}$, 则冷却水用量仅占技术供水量的 6.9%。同时文献[11]提到百色水利枢纽水电站空调系统冷却水取自压力钢管, 用水量 $286.4\text{m}^3/\text{h}$, 仅占技术供水量的 8.6%。水电站技术供水设计中为了减轻磨损, 将技术供水流速设计为 $2\sim 3\text{m/s}$, 若某些水水量与技术供水量相比很小, 可以直接从技术供水管上接水, 对技术供水管流速影响不大。若空调系统所需冷却水量较多, 采用技术供水的排水作为空调主机的冷却水使用时, 根据表 1 和表 2 的对比来看, 水量也是充足的。

从水质来看, 水电站技术供水对水质要求较高, 要求水中力求不含有机物、水生物及微生物; 水中应不含油分; 不含悬浮物; 泥沙含量应尽量少; 为避免结垢, 冷却水应是软水; 为了防止腐蚀, 水的酸碱度值为中性 ($\text{PH}=7$) 等, 对比空调系统对水质的要求: PH 值 $6.5\sim 8.5$ 、硬度 $\leq 300\text{mg/L}$ 、有机磷 $\leq 0.5\text{mg/L}$ 等, 可以看出技术供水系统的水质明显优于空调系统对水质的要求。

综合上述分析发现技术供水在水温上对于空调系统有利用潜力、水量充足、水质要求比空调系统高, 因此, 空调系统冷却用水与技术供水合用是可行的。

3 结语

水库水温计算公式较多, 正确选择水库水温计算公式对于地下式水电站厂房空调工程具有重要的意义, 它不仅关系到通风空调系统送风参数, 还决定了通风空调系统的形式。此外, 经过分析, 在地下式水电站厂房中将技术供水与空调系统冷却用水合用是可行的, 这一结论为地下式水电站厂房内的流体输配系统、通风空调系统提供了新的设计思路。

参考文献:

- [1] 王煜, 戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施[J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2009, 31(6): 11-14.
- [2] 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册 (采暖通风与空调) [M]. 北京: 水力电力出版社, 1984.
- [3] SL278-2002, 水利水电工程水文计算规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [4] 朱伯芳. 库水温度估算[J]. 水利学报, 1985, (2): 12-21.
- [5] 岳耀真, 赵在望. 水库坝前水温统计分析[J]. 水利水电技术, 1997, 28(3): 2-7.
- [6] 李怀恩. 分层型水库垂向水温分布公式[J]. 水利学报, 1993, (2): 43-49.
- [7] 陈明晖, 金清江. 龙溪水电站技术供水改造[J]. 小水电, 2008, (4): 43-45.
- [8] 石少华. 莲麓一级水电站技术供水系统设计[J]. 甘肃水利水电技术, 2011, 47(6): 32-34.
- [9] 周雄. 水电站技术供水方案综述[J]. 四川水力发电, 2006, 25(4): 64-66.
- [10] 徐阳. 三峡电站中央空调系统节能方案研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [11] 陆锡斌. 百色水利枢纽水电站技术供水系统[J]. 广西水利水电, 2006, (4): 60-62.
- [12] 朱团兵. 宝鸡峡林家村水电站技术供水系统设计[J]. 西北水电, 2003, (3): 46-47.
- [13] 蔡扬. 构皮滩电站水轮发电机组技术供水方案选择[J]. 小水电, 2007, (6): 37-38.
- [14] 吴新平. 惠州抽水蓄能电站技术供水系统设计与研究[J]. 水库规划与设计, 2004, (4): 45-47.
- [15] 吴洪飞, 陶振卿, 银立新. 三峡左岸电站技术供水系统运行风险分析及对策[J]. 水电自动化与大坝监测, 2007, 31(3): 42-44.
- [16] 陈伟, 李鹏, 李小明. 小浪底水电厂技术供水系统的介绍及应用[J]. 水力发电, 2004, 30(9): 7-9.
- [17] 石敬贤. 天然冷源在锦屏一级水电站通风空调系统中的应用[J]. 水电站设计, 2008, 24(1): 10-13.
- [18] 钟持政. 溪洛渡水电站通风空调系统的特点[J]. 水电站设计, 2007, 23(4): 17-21.
- [19] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙金白鹤滩水电站可行性研究地下厂房通风空调系统设计报告[R]. 2012.