

预测地下水电站坝体廊道温降的通道单元数学模型及其应用*

西安建筑科技大学 王易军[☆] 李安桂[△]

国家电力公司昆明勘测设计研究院 钟 洋 张 辉

摘要 在通风网络的基础上,提出了简化的通道单元数学模型,与数值模拟方法的计算结果进行了对比,并以景洪水电站坝体廊道为例进行了分析,验证了该模型的有效性。

关键词 水电站 坝体廊道 温降 通风网络

Unit-basis mathematical model for predicting temperature drop in dam tunnel of underground hydropower stations and its application

By Wang Yijun[★], Li Angui, Zhong Yang and Zhang Hui

Abstract Based on the ventilation network theory, presents a simplified unit-basis mathematical model. Compares the result by the model with that by a numerical simulation method. With dam tunnel of Jinghong Hydropower Station as an example, analyses and proves validity of the model.

Keywords hydropower station, dam tunnel, temperature drop, ventilation network

★ Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

①

0 引言

我国的地下水电站无论是数量还是规模均为世界第一,主要分布在黄河水系和长江水系。水电站坝体廊道及地下隧道错综复杂,作为天然冷热源有很好的节能及环保意义,因而也受到了广泛的关注,国内外对等截面直线地下廊道的换热效果进行了大量研究^[1-4]。但是,地下水电站坝体廊道十分复杂,以景洪水电站为例,其坝体各类廊道纵横交错,帷幕灌浆、排水、检查、交通和观测廊道分别在不同的高程,每层之间专门设计了通风竖井相连接,造成各廊道通风换热的相互影响。前人进行了不同角度的研究,各文献提出的方法既有各自的优点,但也存在着一定的局限性。文献[5]的计算方法是按主要廊道的平均风量及平均廊道长度来计

算廊道通风的温降,这种方法未考虑廊道结构的影响,且无法确定各廊道空气温度分布。由于坝体廊道结构复杂、体积庞大,若采用直接数值模拟的方法,模型的建立较复杂,对计算机的要求也非常高。

本文在通风网络的基础上,提出了简化的通道单元数学模型,即先计算各廊道风量,用等效廊道长度的方法将通风网络和廊道通风温降的理论公式结合起来逐段计算各廊道温降,获得廊道群网络的温度分布。这种方法既考虑了廊道网络结构对通风温降的影响,同时计算模型大为简化,为水电站通风空调设计方案及地下隧道温降风的利用提

①☆ 王易军,男,1978年7月生,硕士研究生

△ 710055 西安市雁塔路13号西安建筑科技大学环境与市政工程学院

(029) 82202507

E-mail: liag@xauat.edu.cn

收稿日期:2006-12-04

一次修回:2007-03-23

二次修回:2008-01-24

* 高等学校博士点基金(教技发中心函[2004]196号)和教育部新世纪优秀人才支持计划基金项目(编号:XCEI-04-0970)资助

供参考。

1 坝体廊道温降的理论计算方法及数值模拟方法

1.1 理论计算方法

空气流经坝体廊道的过程中与各个不同的等温面进行换热,是一个十分复杂的不稳定换热过程。坝体廊道的温降计算可以应用地道风降温公式^[6]:

$$t_{x,\tau} = t_T + (t_0 - t_T) \exp\left(-\frac{KF}{c\rho G}\right) \quad (1)$$

其中

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{1.13 \sqrt{a_w \tau}}{\beta \lambda_w}} \quad (2)$$

$$h = 0.045 \frac{\lambda_t}{d_e} Re^{0.8} \quad (3)$$

$$\beta = 1 + 0.76 \frac{\pi}{U} \sqrt{a_w \tau} \quad (4)$$

式(1)~(4)中 $t_{x,\tau}$ 为廊道进深 x 处空气温度,℃; t_T 为坝体廊道壁体的原始温度,22℃(此为景洪水电站参数); t_0 为坝体廊道进口处空气温度,30.4℃(此为景洪水电站参数); K 为某一时刻的壁面热流强度即总传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; F 为换热面积, m^2 , $F=Ux$, 其中 U 为坝体廊道截面周边长度, m ; c 为干空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ 为干空气密度, $1.165 \text{ kg}/\text{m}^3$; G 为廊道的总通风量, m^3/h ; h 为表面传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; a_w 为墙体材料的热扩散率, $0.00277 \text{ m}^2/\text{h}$; λ_w 为墙体材料导热系数, $5.57 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; τ 为通风时间, h ; β 为形状修正系数; λ_t 为干空气导热系数, $0.09612 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; d_e 为坝体廊道截面的当量直径, m , $d_e = \frac{4A}{U}$, 其中 A 为坝体廊道截面面积, m^2 ; $Re = \frac{w d_e}{\nu}$, 其中 w 为廊道内的空气流速, m/s ; ν 为干空气的运动黏度, $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$ 。

1.2 数值模拟方法、理论计算方法计算结果与实测数据的对比

文献[5]中的漫湾水电站坝体廊道截面为 $2.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (见图1, 图为对称截面的 $1/2$ 个截面, 廊道截面 $1.25 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 壁厚 4 m), 建立长度 $l=500 \text{ m}$ (漫湾水电站坝体各主要廊道的平均长度为 500 m)的直线廊道模型, 入口风速 $4.07 \text{ m}/\text{s}$ (设计平均风速), $t_0=30^\circ\text{C}$ (夏季通风室外计算温度), $t_T=19$

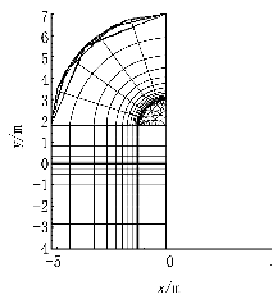


图1 廊道截面网格划分图

℃, 其他参数取值见1.1节符号说明。使用 Fluent 软件求解廊道的出风口空气温度, 与理论计算结果的对比见图2, 漫湾水电站坝体廊道出风口的实测温度见表1。

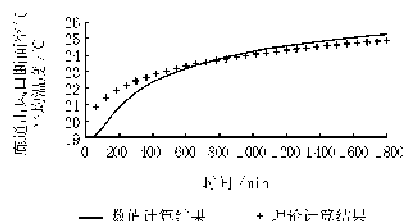


图2 $l=500 \text{ m}$ 坝体廊道数值模拟与理论计算结果的对比

表1 漫湾水电站坝体廊道通风实测数据^[5]

	5月	6月	7月	8月
室外气温/℃	34.6	25.6	30.5	31.5
坝体廊道出风口温度/℃	23.6	22.8	22.6	23.0
通风量/($10^5 \text{ m}^3/\text{h}$)	4	4	4	4

从图2可见, 通风一定时间后数值模拟和理论计算结果趋于一致, 且出风口温度趋于稳定($\tau=20 \text{ h}$ 时, 出风口温度随时间变化小于 $0.1^\circ\text{C}/\text{h}$); 从表1可看出, 室外温度尽管变化很大, 一旦经过庞大复杂的坝体廊道网络降温处理, 温度都降到 $22\sim 23^\circ\text{C}$ 左右, 同时与数值模拟及理论计算结果相比较发现, 实测值都低于 $\tau=20 \text{ h}$ 时的数值模拟及理论计算值。

2 基于通风网络的廊道温降计算(简化通道单元数学模型)

2.1 通风网络模型

建立一个简单坝体廊道的通风网络模型, 廊道截面积 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 结构简化为如图3所示的网络拓扑图, 廊道称为分支(如 $e_1 \sim e_{10}$), 廊道交汇点称为节点(如 $v_1 \sim v_7$)。

2.1.1 节点流量平衡方程组

在稳定流动过程中, 流入与流出某个节点的质量流量的代数和为零。如果通风网络图的节点数

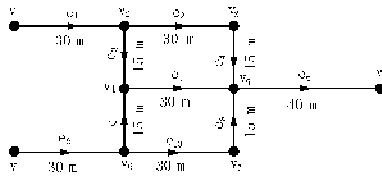


图3 简单廊道通风网络示意图

为 J , 分支数为 N , J 个节点流量平衡方程中的任意 $J-1$ 个方程相互独立。节点流量平衡方程组的矩阵形式为

$$B_k Q = 0 \quad (5)$$

式中 B_k 为通风网络图基本关联矩阵, 为 $(J-1) \times N$ 阶矩阵, 由关联矩阵 B 删除任意一行得到^[4], 被删除行对应的节点称为参考点; Q 为 N 阶分支质量流量矩阵。

矩阵 B 的元素为

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 为分支 } j \text{ 的起始节点} \\ -1, & \text{节点 } i \text{ 为分支 } j \text{ 的末节点} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 与分支 } j \text{ 不相关联} \end{cases}$$

2.1.2 回路压力平衡方程组

对于 N 个分支、 J 个节点的通风网络任意回路, 沿回路方向空气流动动力与阻力的代数和为零。回路压力平衡方程组的矩阵形式为

$$C_L(\Delta p - H) = 0 \quad (6)$$

式中 C_L 为通风网络图独立回路矩阵, 为 $(N-J+1) \times N$ 阶矩阵; Δp 为分支空气流动阻力矩阵, N 阶列阵; H 为分支风机的全压矩阵, $H = [H_1, H_2, \dots, H_N]^T$ 。

C_L 的元素为

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{分支 } j \text{ 在第 } i \text{ 个独立回路中且与之同向} \\ -1, & \text{分支 } j \text{ 在第 } i \text{ 个独立回路中且与之异向} \\ 0, & \text{分支 } j \text{ 不在第 } i \text{ 个独立回路中} \end{cases}$$

通风网络图独立回路矩阵的算法见文献[7]。

2.1.3 分支阻力定律

空气流经每个分支的流动阻力可以用通用公式表示, 即

$$\Delta p_j = S_j Q_j^2, j = 1 \sim N \quad (7)$$

式中 Δp_j 为分支 j 的流动阻力, Pa; S_j 为分支 j 的阻抗, $(\text{kg} \cdot \text{m})^{-1}$; Q_j 为分支 j 的质量流量, kg/s。

本文应用通风网络理论, 采用牛顿法求解各廊道通风量^[7-9]。根据风量的正负值调整网络示意图中分支方向即关联矩阵的元素值, 使分支方向与空

气流动方向一致。

2.2 坝体廊道通风网络的温降计算过程

在廊道通风换热过程中, 不同于文献[10-12]的自然通风网络热耦合模型, 而是一个机械通风且非稳态的传热过程。由式(1)知, 廊道某一断面的空气温度只受上风向空气参数的影响, 而与下风向的换热过程无关。而且由于各条廊道间的水平距离一般都在 20 m 以上, 经计算坝体进深 10 m 处温度变化 0.1°C 至少需 2 310 h^[13]。这意味着对 20 m 厚的无限大平壁(也就是本文情况), 在所研究的时间范围内完全可以忽略相邻壁面导热的相互影响, 由此造成的误差不超过 1%。

2.2.1 温降计算方法

廊道通风网络中的中间任一分支廊道 e_j 的起点温度是随时间变化的。根据 e_j 起点温度, 假设分支廊道 e_j 起点以前为一条廊道长度为 l_{dj} 的等效廊道, 等效廊道的其他参数同 e_j , 则分支廊道 e_j 空气的起点温度和终点温度的关系可由式(1)得出。

$$l_{dj} = \frac{c\rho G_j}{KU} \ln \frac{z_0 - z_T}{z_{dj} - z_T} \quad (8)$$

$$z_{dj} = z_T + (z_0 - z_T) \exp\left[-\frac{KU(l_{dj} + l_j)}{c\rho G_j}\right] \quad (9)$$

式(8), (9)中 l_{dj} 为根据分支 e_j 的起点温度计算所得的分支 e_j 之前的等效长度, m; G_j 为分支 e_j 的通风量, m^3/h ; z_0 为分支 e_j 空气的起点温度, $^\circ\text{C}$, 等于分支 e_j 的起点所对应的节点温度; z_{dj} 为分支 e_j 空气的终点温度, $^\circ\text{C}$; l_j 为分支 e_j 的长度, m。

若所有以节点 v_i 为终端节点的分支的终点温度 z_{ij} 已知, 则节点 v_i 的节点温度 z_{di} 为

$$z_{di} = \frac{\sum_j Q_{i,j} z_{ij}}{\sum_j Q_{i,j}} \quad (10)$$

式中 $Q_{i,j}$ 为以节点 v_i 为终点的分支 e_j 的空气流量, kg/s。

2.2.2 温降计算过程

首先进行通风网络计算, 求解各廊道分支空气质量流量及方向, 然后确定室外节点 v_1 的节点温度取室外温度 z_0 , 从已知节点温度沿气流方向逐廊道求解。

可见, 通过上述计算可以获得每个节点的温度, 而每条廊道分支的风量已知, 就可以根据式(8), (9)求解廊道任意断面的温度。这样就获得了

整个廊道网络的空气温度分布。

2.3 网络法和数值模拟方法计算结果的对比

廊道通风入口风速为 $v=2\text{ m/s}$ 和 $v=4\text{ m/s}$ 时,各个时刻廊道出风口空气温度的网络法计算结果与数值模拟求解结果的对比如图 4 所示。

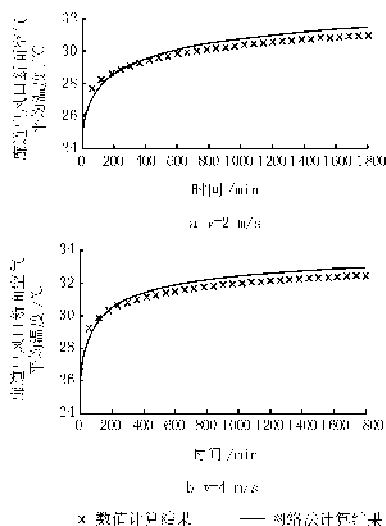


图 4 网络法与数值模拟方法计算结果的对比

从图 4 可见,网络法和数值模拟法的计算结果比较一致。从而证明,将廊道网络等效为直线廊道,基于通风网络法计算廊道通风温度分布是可行的。

3 简化通道单元数学模型应用举例

以景洪水电站坝体廊道(如图 5 所示)为模型,利用简化通道单元数学模型计算了廊道出风口空气温度,并与文献[5]计算方法(按水电站各主要廊道的平均风量及平均廊道长度根据式(1)来计算廊道通风的温降)的计算结果进行了对比,结果见图 6。从图 6 可见,景洪水电站坝体廊道网络的通风温降过程与平均廊道长度为 700 m 的直线廊道相近,通风温度低于平均廊道长度为 600 m 的直线廊道的理论计算值。从文献[5]漫湾水电站实测数

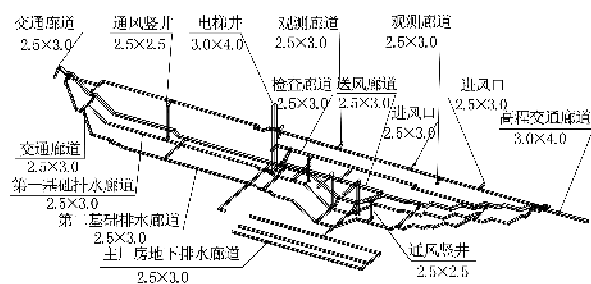


图 5 景洪水电站坝体廊道三维示意图

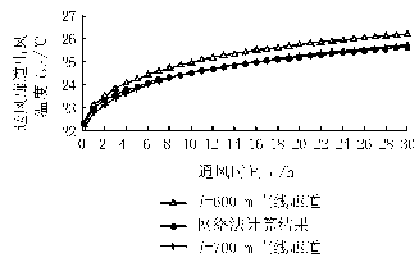


图 6 简化通道单元数学模型与文献[5]方法计算结果的对比

据可看出,漫湾水电站坝体廊道出风口空气温度实测值也比理论计算值约低 $0.5\sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因为景洪水电站和漫湾水电站的气候条件及物性参数都比较接近,通过与理论计算值的对比可见,简化通道单元数学模型的计算结果是合理的,是可以应用于工程设计的。

4 结论

本文提出了简化的通道单元数学模型,通过理论分析、实际算例证明了该方法的可行性。简化通道单元数学模型的实质是通过采用等效廊道长度的方法将通风网络和廊道温降理论计算公式结合起来计算坝体廊道网络机械通风换热效果,简化了数学模型,不但计算量比数值模拟方法大大减小,而且也可以获得廊道任意断面的温度。为坝体廊道和地下隧道温降风的利用提供了一种简化且具有较高精度的计算方法,为地下水电站的通风空调设计方案及隧道温降风的利用提供了有益参考。

参考文献:

- [1] Sharan G, Jadhav R. Performance of single pass earth-tube heat exchanger; an experimental study [R]. No 2003-01-07, IIMA Working Papers from Indian Institute of Management Ahmedabad, Research and Publication Department, 2003
- [2] Kartri M, Kreider J F. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel [J]. Energy Convers Mgmt, 1996, 37(2):1561-1574
- [3] Pfafferoth J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency [J]. Energy and Buildings, 2003, 35 (4):971-983
- [4] Mihalakakou G. On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques [J]. Renewable Energy, 2003, 28(6):917-927

(下转第 32 页)