

文章编号:1006-7329(2000)04-0056-05

# 水电站地下主厂房通风气流的优化设计

⑪  
56-60.75 龙天渝, 蔡增基, 董宏明  
(重庆建筑大学 城建学院, 重庆 400045)

**摘要:**用三维  $K-\epsilon$  紊流模型, 运用数值模拟方法, 对某大型水电站地下主厂房内的气流组织方式进行了优化设计。为了检验数值分析的正确性, 进行了模型实验, 实验值与计算值具有良好的 consistency。

**关键词:**室内气流; 数值分析; 优化设计  
**中图分类号:** TU834.3+1

水电站, 地下厂房  
**文献标识码:** A

我国的水电资源居世界前列, 随着我国水力事业的发展, 大中型水电站厂房不断兴建, 如何使厂房内通风气流组织合理, 一直是工程技术人员关心的问题。某大型水电站总装机容量为 135 万 kW, 厂房位于地下, 主厂房长 204 m、宽 24.5 m、高 21.5 m。因此, 保证该厂房内有良好的通风效果, 对于机组安全可靠的运行和工作人员的健康、舒适等都具有重要的意义。我们受某勘测设计研究院委托对该水电站主厂房进行了气流组织方式的优化设计工作。

该主厂房由九个机组段组成, 各机组段结构基本相同, 设计是在单侧进风、通过顶拱内矩形风管上的风口垂直送风、各段送风均匀的前提下进行的。为了使厂房内工作区中的回流区较小, 气流速度比较均匀, 且保持在 0.4~0.7 m/s 的范围内, 给厂房内的工作人员创造一个健康、舒适的气流环境, 我们从厂房的最小进风量、进风口的结构、位置、尺寸和风道型线等方面采用数值分析的方法对厂房内的气流组织方式进行了优化设计。在数值分析的基础上, 为了检验其正确性, 对所选设计方案进行了模型实验。

## 1 数学模型

### 1.1 基本方程

假定流体不可压, 厂房内的气流为三维等温、稳态的紊流流动, 选用  $K-\epsilon$  紊流模型进行求解。为计算上的方便, 将模型方程用无因次形式表示。

取进风口速度  $u_0$  为定性速度, 进风口直径  $d_0$  为定性长度, 有下列无因次形式的模型方程。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

2) 运动方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

3) 紊流能量传递方程 ( $K$  方程)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j K) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{k,eff} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \sigma_k \frac{K^2}{\nu_t} \tag{3}$$

• 收稿日期: 1999-09-20

作者简介: 龙天渝 (1960-), 女, 重庆人, 副教授, 博士, 主要从事流体力学及流变学领域的研究。

4) 紊流能量耗散方程( $\epsilon$ 方程)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{\epsilon,eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - \sigma_1 \sigma_\mu K \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \sigma_2 \frac{\epsilon''}{K} \quad (4)$$

其中

$$v_{eff} = \frac{1}{Re} + v_i \quad (5)$$

$$\Gamma_{K,eff} = \frac{1}{Re} + \frac{v_i}{\sigma_K} \quad (6)$$

$$\Gamma_{\epsilon,eff} = \frac{1}{Re} + \frac{v_i}{\sigma_\epsilon} \quad (7)$$

$$v_i = \frac{\sigma_\mu K^2}{\epsilon} \quad (8)$$

且

$$Re = \frac{u_0 d_0}{\nu} \quad (9)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_\mu, \sigma_K, \sigma_\epsilon$  为常数,按 B. E. Launder 和 D. B. Spalding 推荐的数值<sup>[1]</sup>,取:

$$\sigma_1 = 1.44, \quad \sigma_2 = 1.92, \quad \sigma_\mu = 0.09, \quad \sigma_K = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

方程(1)~(4)中无因次量的定义见表1。因不会造成混淆,无因次前后各量用相同的符号表示。

表1 模型方程中无因次量的定义

无因次量	$u_i$	$p$	$x_i$	$K$	$\epsilon$
表达式	$u_i/u_0$	$p/\rho u_0^2$	$x_i/d_0$	$K/u_0^2$	$\epsilon d/u_0^3$

### 1.2 边界条件

该水电站主厂房长 204 m、宽 24.5 m、高 21.5 m,由九个结构基本相同的机组段组成,每一机组段内,气流通过顶拱内两条对称排列的变截面的矩形风道上的六个风口垂直均匀进入厂房(见图1、图2),地面有一个吊物孔和一个楼梯口(见图3),吊物孔和楼梯口是气流的出口口。

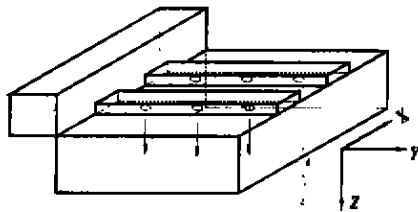


图1 主厂房各机组段外观示意图

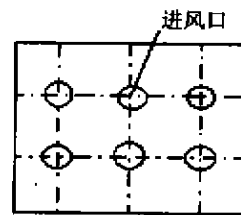


图2 主厂房各机组段顶部平面示意图

1) 固定边界的边界条件

$$u = 0 \quad v = 0 \quad w = 0 \quad K = 0 \quad \epsilon = 10^{-24}$$

2) 进口的边界条件<sup>[2,3]</sup>

$$u = 0 \quad v = 0 \quad w = 1 \quad K = 0.04 \quad \epsilon = 0.008$$

3) 出口的边界条件

$$u = 0 \quad v = 0 \quad \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0$$

对于出口处垂直方向的速度  $w$ ,用内点的速度分布来获取。以图4为例,假定出口截面上各点

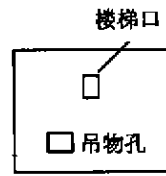


图3 主厂房各机组段地面平面示意图

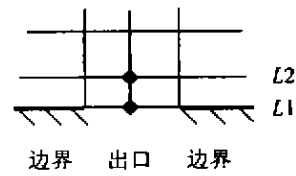


图4 出口速度边界示意

的法向速度的相对变化率为一常数,有:

$$\frac{w_{L_1,j} - w_{L_2,j}}{w_{L_2,j}} = \text{const} = A \tag{10}$$

由此得

$$w_{L_1,j} = (A + 1)w_{L_2,j} = fw_{L_2,j} \tag{11}$$

其中

$$f = A + 1$$

确定  $f$  因子的条件是  $w_{L_1,j}$  满足全域的质量守恒,于是有

$$\rho w_{L_1,j} A_j = \rho f w_{L_2,j} A_j = F_{in} \tag{12}$$

$F_{in}$  为入口质量流量,  $A_j$  为流动截面积。

因此

$$f = \frac{F_{in}}{\rho w_{L_2,j} A_j} \tag{13}$$

确定  $f$  以后,可按(11)式计算出口截面的法向速度。

## 2 数值计算方法

为了对方程(1)~(4)进行数值求解,首先必须将偏微分方程转化成离散方程。将方程(2)~(4)统一地表示成下列对流与扩散方程的形式:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_{\phi} \tag{14}$$

式中,  $\phi$  分别代表  $u_i$  ( $u, v, w$ )、 $K$ 、 $\epsilon$  等变量,  $\Gamma_{\phi}$  和  $S_{\phi}$  分别为  $\phi$  变量的扩散系数和源项,表2给出了相应的表达式。

表2 模型方程  $\phi$ 、 $\Gamma_{\phi}$ 、 $S_{\phi}$  的具体表达式

方 程	$\phi$	$\Gamma_{\phi}$	$S_{\phi}$
运动方程	$u_i$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right)$
$K$ 方程	$K$	$\Gamma_{K,eff}$	$v_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \sigma_{\mu} \frac{K^2}{v_i}$
$\epsilon$ 方程	$\epsilon$	$\Gamma_{\epsilon,eff}$	$\sigma_1 \sigma_{\mu} K \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \sigma_2 \frac{\epsilon^2}{K}$

我们选用控制容积法对方程(1)和(14)进行离散,用一维对流与扩散方程的解作为插值基函数计算通用变量  $\phi$  的总流量密度,然后从守恒角度推导出离散方程。使用控制容积法所得到的计算结果在任何一组控制容积内,当然也就是在整个计算域内,诸如质量、动量等一些物理量的积分守恒都可以精确地得到满足<sup>[4]</sup>。在得到离散方程后,采用 SIMPLER 法对离散方程进行求解<sup>[4]</sup>。求解的主要步骤为:

- 1) 假定  $u_i$ 、 $K$  和  $\epsilon$  的初值  $u_i^0$ 、 $K^0$  和  $\epsilon^0$ ;

- 2) 求解由连续性方程转变成的压力方程,得压力值  $p^*$ ;
  - 3) 求解运动方程,得速度值  $u_i^*$ ;
  - 4) 据  $u_i^*$  求解压力修正值  $p'$ ;
  - 5) 利用  $p'$  修正速度  $u_i^*$ ,得  $u_i$ ;
  - 6) 求解  $K$  方程和  $\epsilon$  方程,得  $K$  和  $\epsilon$ ;
  - 7) 如果收敛,结束。否则把求得的  $u_i$ 、 $K$  和  $\epsilon$  作为新的初值返回到第 2) 步。
- 在求解压力方程时,由于边界上的速度值已给定,故不需要压力边界条件<sup>[4,5]</sup>。

### 3 计算结果及分析

在不同的雷诺数下,我们对各种进风口位置、尺寸和进风量下的厂房内气流组织方式进行了数值模拟。在对模拟出的大量气流组织方式进行分析和比较以后,选出最佳方式作为设计方案。该方案厂房的最小进气量为  $41.51 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ,送风口直径 0.5 m,相邻进风口中心间的距离为长 7.3 m、宽 10 m。

由于主厂房内各机组段的结构基本相同,因而它们的气流组织状况极相似,故仅给出其中一机组段的计算结果。图 5 是机组段中一些典型断面的位置示意(其中断面  $K-K$  取在工作区);图 6 是所示断面上的速度矢量图;图 7 是工作区速度分布图。从图中可以看出,从进风口流入的气流,进入工作区后,大部分经出风口流出,向上逆流的很少,使工作区内回流区小,气流速度较为均匀,且气流速度保持在  $0.4 \sim 0.7 \text{ m/s}$  的范围内,从而保证了厂房内工作区的气流组织方式和质量都较好,使工作人员可在较为舒适与健康的环境下工作。

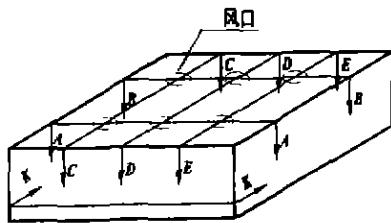


图 5 各机组段断面位置示意图

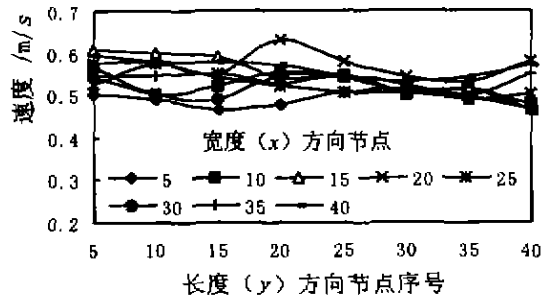


图 7 工作区速度分布

### 4 模型实验与计算结果比较

为检验数值模拟的正确性,我们对所选定的设计方案,采用 1:25 的比例尺进行了模型实验。本实验采用的是 QDF-2 型热球式风速计,实验前,风速计经过中国煤炭研究院重庆分院国家矿山计量站的标定。实验结果表明,计算值与实验值基本吻合。图 8 是速度值误差较大的两处的速度计算值与实验值的比较。

### 5 结 语

借助于计算机,我们用  $K-\epsilon$  紊流模型,对某大型水电站地下厂房的主厂房的气流组织方式进

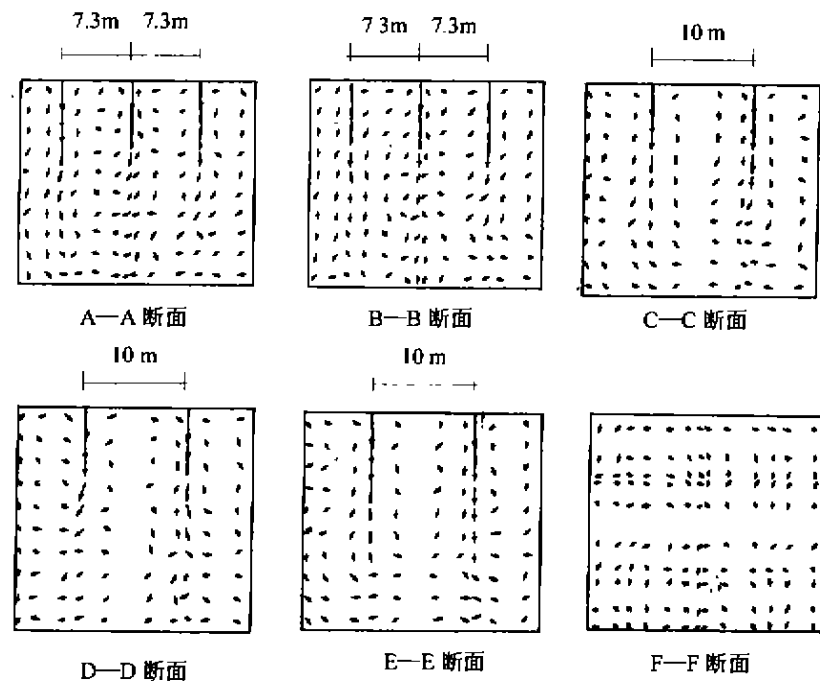


图6 断面速度矢量图

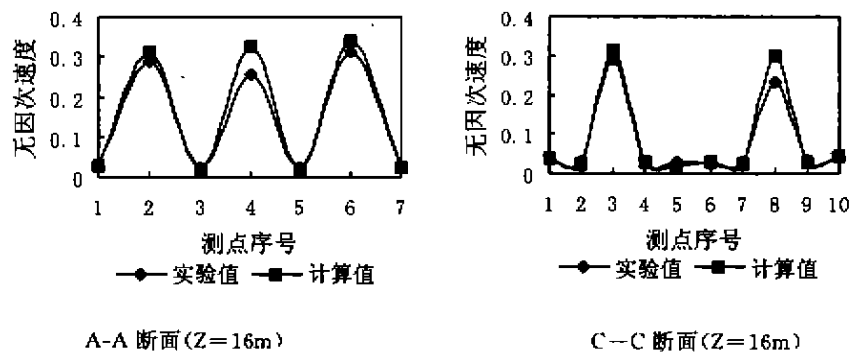


图8 计算值与实验值的比较

行了优化设计,所设计的方案具有工作区内回流区小,气流速度比较均匀和气流速度保持在  $0.4 \sim 0.7 \text{ m/s}$  的范围内等特点,从而使厂房内有较为理想的气流组织方式和较好的气流质量。为了检验计算机数值模拟的正确性,我们对所选定的设计方案进行了模型实验,结果表明,实验值和计算值基本吻合。这说明我们所采用的模型和运用的数值模拟方法是正确的。目前,本设计方案已在该电站的设计和施工中得到应用。

(下转第75页)

194

- [3] 李开禧,刘坚,等. 钢结构稳定计算理论的新探索[J]. 结构工程师. 上海:同济大学出版社,2000(总第53期增刊):572~591

## A New Method of Second—Order Analysis of Thin-wall Member

*LIU Jian, LI Kai-xi*

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** In this paper, based on the theory of the rotation of a cross section around a fixed axis, a new calculation method of second—order stress of space stability for thin wall member is applied. The example given in this paper shows that the conception of this new method of second order analysis is clear and the calculation procedure is concise.

**Keywords:** thin-wall member; theory of the rotation around a fixed axis; second-order analysis

---

(上接第60页)

### 参考文献:

- [1] Launder B E, Spalding D B. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering[J]. 1974,13(3):269~289
- [2] Murakami, S. and S. Kato. Numerical and experimental study on room airflow—3-D predictions using the  $K-\epsilon$  model[J]. Building and Environment, 1991, 24(1):85~97
- [3] Foluso Ladeinde, et al. CFD Applications in the HVAC&R Industry[J]. ASHRAE Journal, 1997, (1):44~48
- [4] 陈材侃. 计算流体力学[M]. 重庆:重庆出版社, 1992
- [5] O'Connor, L. Computational Fluid Dynamics; Giving a Boost to Engine Design[J]. Mechanical Engineering, 1992, 114(5):44~50

## The Optimization Design to Ventilation of Underground Main Workshop in a Hydropower Station

*LONG Tian-yu, CAI Zeng-ji, DONG Hong-ming*

(Faculty of Urban Construction, Chongqing Jianzhu University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Using three-dimensional  $K-\epsilon$  turbulent model, the optimal version of ventilation form of the underground main workshop in a hydropower station has been designed by means of numerical analysis. In order to verify the validity of numerical modeling, the model test has been done. The results of model test and numerical analysis are basically identical.

**Keywords:** indoor flow; numerical analysis; optimization design