

Analysis on the Performance of the Auxiliary Cooling Tower in the Horizontal Arrangement from the Environmental Wind

Hongfang Gu¹, Zhe Zhang¹, Hong Du², Haijun Wang¹, Qi Chen¹

¹State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an

²Xi'an Hengrui Engineering Fluid Equipment Co. Ltd., Xi'an

Email: ghf@mail.xjtu.edu.cn

Received: Jul. 5th, 2014; revised: Jul. 28th, 2014; accepted: Aug. 3rd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

For the 2 × 600 MW air cooling system, the influence on the performance of auxiliary cooling system is studied when the factors in the environmental wind change. The result shows: the effect of the wind direction on the auxiliary cooling tower is less than the direct air-cooling tower. But the degree of sensitivity on the wind speed from the air cooling system is very big. With the wind speed increasing, the heat dissipation capability reduces, and the back pressure increases, so the changes of the wind speed have a direct influence on the operation effect of the auxiliary cooling tower. Especially the combination of the different wind speed and temperature also has a more sensitive effect on the air cooling system. With the increase of the wind speed and temperature, the heat dissipation capability reduces. So the analysis of the environmental wind has an important significance.

Keywords

Wind Speed, Wind Direction, Wind Temperature, Auxiliary Cooling Tower, Horizontal Arrangement

水平布置间冷塔环境风影响的性能研究

顾红芳¹, 张喆¹, 杜弘², 王海军¹, 陈琦¹

¹西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安

²西安恒瑞工程流体设备有限公司, 西安
Email: ghf@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2014年7月5日; 修回日期: 2014年7月28日; 录用日期: 2014年8月3日

摘要

本文针对 2×600 MW核电机组空冷系统, 研究其在环境风的各项因素变化时对间接空冷系统性能的影响。结果表明: 虽然风向对间冷塔的影响相对直冷要减弱很多, 但空冷系统对风速的敏感程度很大, 风速增加散热能力降低, 背压增加, 风速的变化对间冷运行效果的影响非常直接, 尤其空冷系统受不同风温和不同风速组合的影响更为敏感, 风速风温增加散热性能降低相对更多, 因此对于空冷系统来说, 对环境风的影响进行分析研究具有重要的意义。

关键词

风速, 风向, 风温, 间冷塔, 水平布置

1. 引言

现有阶段国内外已有大量空冷机组在运行之中。对空冷系统技术的研究, 主要关注的是空冷系统的安全性和运行效率。由于间冷空冷系统是由自然循环的空气将汽轮机排放乏汽的热量散至周围环境的中, 因此环境风变化会影响间冷塔的有效工作, 特别是高温大风的极端条件下, 间接空冷系统散热能力迅速恶化, 导致没有足够冷却介质冷却, 可能会导致背压在瞬间升高至“掉闸”[1]。从而导致空冷系统的安全性和运行效率降低。其中在环境风的影响主要表现在风速、风温和风向的影响[2]。

杜向东[3]通过风洞实验方法研究了侧风对空冷塔不利影响的机理, 并且针对风不利影响的不同因素, 给出了一些空气动力措施对空冷塔加以改进, 用以提高空冷塔的抗风能力。A. F. du Preez 和 D. G. Kriiger [4]指出, 侧风对空冷塔的影响很复杂, 并且受很多不同因素的影响, 如风速、进风口的形状、塔高、热量损失等。M. Goodarzi 和 R. Ramezanpour [5]对横风下的间冷塔进行了数值模拟, 提出使用椭圆型的横切面的间冷塔可以减少大风对间冷塔散热的影响。赵振国[6]等人提出海勒系统的空冷塔, 在大风作用下其散热能力明显降低, 并对山西大同电厂一台 200 MW 的空冷机组进行研究, 得出对比湿冷机组的煤耗, 仅大风影响一项(除去气温 5°C 以下的风影响), 年平均约增加了 $3\sim 4$ g/kw·h。

本文采用数值模拟计算[7]的方法, 对 2×600 MW 空冷机组水平布置的间接空冷系统在风速、风温、风向变化时, 其性能发生的相应变化进行了系列研究, 最终为工程设计选择空冷系统方案提供技术研究支持。

2. 水平布置间接空冷系统的结构

2×600 MW 机组一机一塔水平布置空冷塔结构见表 1, 建立的几何模型和计算区域见图 1。计算边界为 $1500 \times 1500 \times 1000$ m(高度)。

为了方便分析, 把一周平均分为 10 个扇段, 即每 36° 设立一个扇段。如图 2 所示, 以右侧逆时针命名为扇段 1, 扇段 2、扇段 3、……、扇段 10。

3. 水平布置间冷塔研究的分析方法

在本课题中采用 FLUENT[8]软件对典型 2×600 MW 机组工程空冷系统进行数值模拟计算。由于建筑

Table 1. The structure of the auxiliary cooling tower and the layout of the radiator
表 1. 间冷塔的基本结构和散热器布置

冷却三角散热器	水平布置
型式	钢管钢翅片
冷却三角尺寸 LXB m	16.5 × 3
布置型式	水平
冷却塔	
底部直径 m	~165 (散热器外侧)
塔总高 m	175
进风口高度 m	~27.5

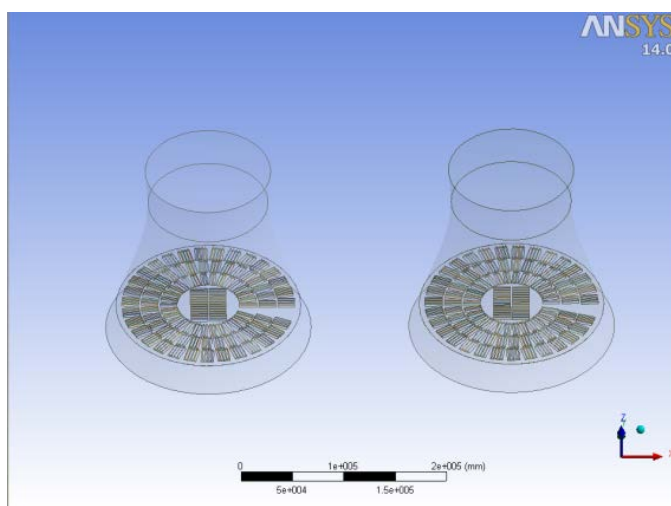


Figure 1. The geometric model of the auxiliary cooling system in the horizontal arrangement

图 1. 水平间接空冷系统几何模型

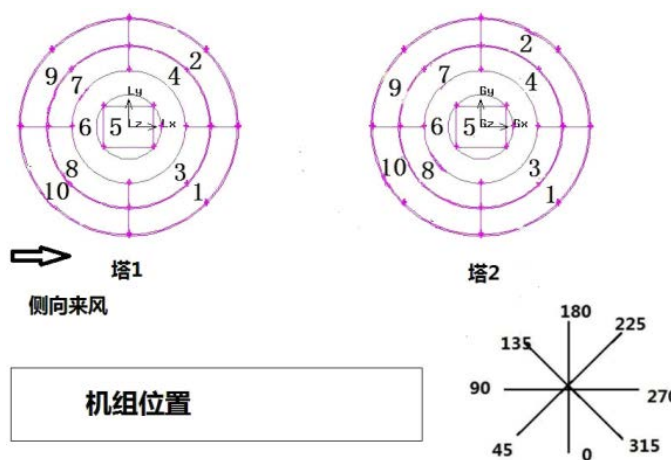


Figure 2. The fan section of the auxiliary cooling tower

图 2. 水平间接冷塔扇段命名图

物通常是钝体，钝体的绕流伴随着流动的分流、再附以及尾迹区的非定常涡脱落等复杂特征。本文对于

建筑物造成的流场变化的模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, RNG $k-\varepsilon$ 模型是基于重整化群(Renormalization Group)技术的一种湍流模型。从上世纪 70 年代后期开始,人们把 RNG 方法引入到湍流研究领域, Yakhot 和 Orszag [9]于 1986 年应用 RNG 方法建立了第一个湍流模型,并显示出它较之传统湍流建模方法的若干显著的优点。自基于 RNG 方法的湍流模型提出以后,许多学者应用该模型分别求解了绕后台阶湍流分离流动和三维叶栅通道内湍流流场,获得与实验数据符合较好的结果。王远成、吴文权[10]将 RNG $k-\varepsilon$ 模型应用于方柱和圆柱绕流流场的数值模拟得到了较好的结果,说明 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型能够较好地反映钝体绕流流场的复杂特性。采用能量守恒,质量守恒以及动量守恒方程,加之 RNG 湍流动能方程以及湍流耗散率方程组成封闭的流动方程组建立求解的数学模型。

电厂周围环境空气风场可以看成是不可压缩的,外流场应满足的三维控制方程为:

连续方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$
动量方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial x_i}$
本构关系	$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$
	$s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$

式中, ρ 为空气密度, u 为速度, $i, j, k = 1, 2, 3$, p 为压力, μ 为流体动力粘性系数, τ_{ij} 应力张量, s_{ij} 应变率张量。

RNG $k-\varepsilon$ 模型的湍流动能方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t (P + C_{\varepsilon 3} P_B) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]$$

湍流耗散率方程:

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t (P + C_{\varepsilon 3} P_B) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

式中, k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, μ_t 为湍流粘性系数, $\eta \equiv S \kappa / \varepsilon$; $S \equiv (2s_{ij}s_{ij})^{1/2}$ 。

其中翅片管散热器在模型中采用 FLUENT 中的散热器来模拟,设定散热器阻力系数和换热系数。入口边界条件[11]采用速度入口边界条件,在本文中采用大气边界函数出口边界条件;选用压力出口边界条件(Pressure-outlet),根据大气压与海波高度的关系给定流动出口边界上的静压;其他边界包括地面,建筑物表面都采用壁面边界条件(Wall),且不考虑其散热或吸热,只对流动产生影响。

假定外流场为不可压缩,基本控制方程中的连续方程和动量方程必须采取耦合方式将压力和密度联立,因此采用 SIMPLE 方法求解控制方程。

4. 环境风对水平布置间冷塔的影响

4.1. 风向对水平布置间冷塔性能的影响

环境温度 15℃,设计背压 11 kPa,10 m 高度环境风速选取 4.5 m/s,风向为 45°间隔。

图 3 和图 4 是各个扇段在不同的风向下的出水温度,从图中可以看出,受风向影响最大的是外周的

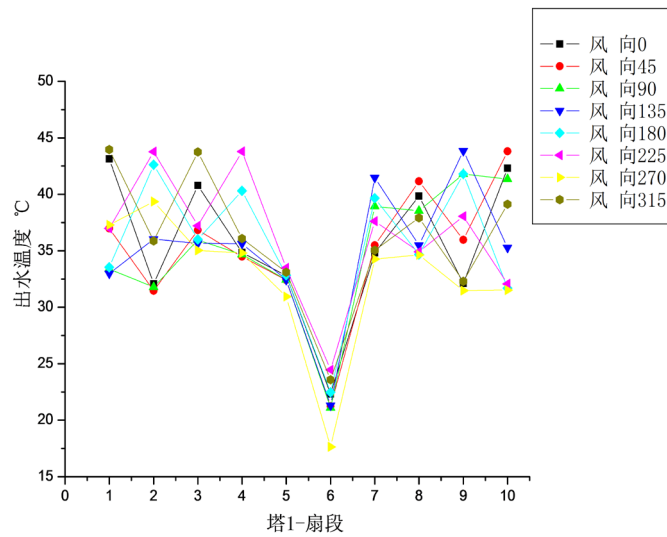


Figure 3. Distribution of the outlet temperature of the sectors of unit 1 in different wind directions

图 3. 各个风向下塔 1 各扇段的出水温度分布比较

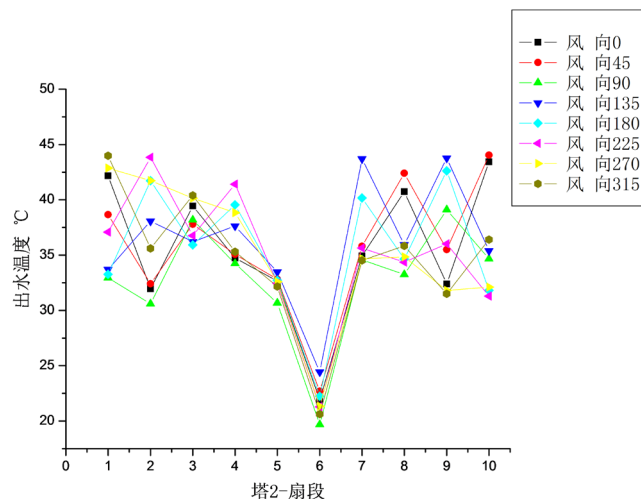


Figure 4. Distribution of the outlet temperature of the sectors of unit 2 in different wind directions

图 4. 各个风向下塔 2 各扇段的出水温度分布比较

散热扇段，内层的扇段受影响较小，出水温度高的是迎风扇段，出水温度低的是下游扇段，因此对于水平间冷塔迎风扇段的冷却能力最低。可以看出侧向来风时塔 1 的出水温度为 34.99℃，塔 2 为 32.79℃。且从塔的平均出水温度看，最佳的风向是侧向来风，各个风向下扇段出水温度最大的差异相近，侧向风时各个扇段的出水温度相对较小，因此建议采用侧向来风作为主导风向。

4.2. 风速对水平布置间冷塔性能的影响

环境温度 15℃，设计背压 11 kPa，10 m 高度风速选取静风 0~20 m/s，2 m/s 为一个间隔。侧向来风与法线方向为 90°，塔 1 在来风的迎风端。

从计算结果看，在侧向来风时，受影响的是上游扇段，而且随着风速的提高影响的扇段向下游推进，在风速小于 2 m/s 时，水平间冷塔的散热能力几乎不受风速的影响，风速增加到 6 m/s 之后随着风速的提

高，影响的扇段增加较多，下游扇段 1, 2, 3, 4 随风速的增加并没有快速的降低散热能力，而是缓慢升高，因此风速的影响主要发生在上游扇段，而最大的影响发生在 6 m/s 以上的高风速。迎风扇段对风速更敏感，在风速增加时，出水温度持续增高，上游塔的出水温度随风速的变化剧烈程度高于下游塔。以下图 5 和图 6 是各个扇段在不同的风速下的出水温度。由图可以看出 6 m/s 时塔 1 的平均出水温度为 36.32℃，塔 2 为 33.69℃。

4.3. 风温对水平布置间冷塔性能的影响

设计背压 11 kPa，10 m 高度风速 4.5 m/s，正面来风与法线方向为 180°，环境温度为极端低温到极端高温分布。

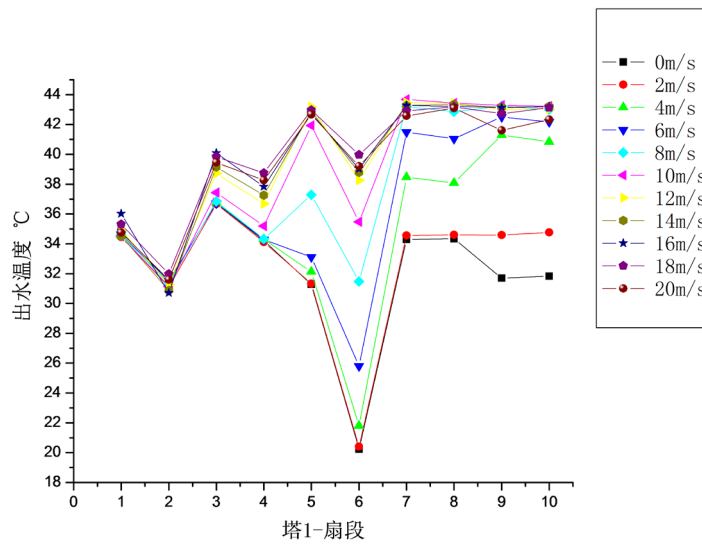


Figure 5. Distribution of the outlet temperature of the sectors of unit 1
图 5. 塔 1 各扇段的出水温度

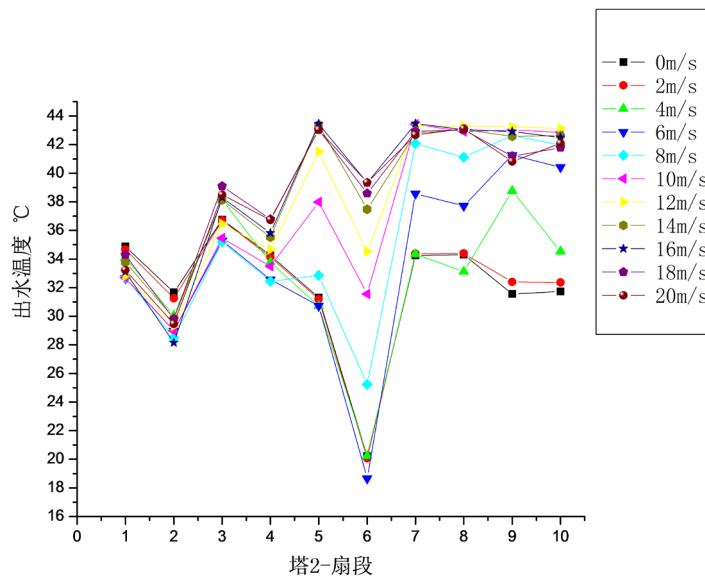


Figure 6. Distribution of the outlet temperature of the sectors of unit 2
图 6. 塔 2 各扇段的出水温度

从计算结果看，环境温度降低，扇段的出水温度降低，在极低温度下，扇段的最大温度差可以达到 20℃，水平布置的各个扇段的出水温度差异较大，而且低温下的扇段最低出水温度更低。在设计条件相同的条件下，水平布置受风温大的影响较敏感。即使在静风的条件下各个扇段的出水温度差异也比较大。所以在冬季水平间冷塔的防冻更有必要选择扇段进行。以下图 7 和图 8 是各个扇段在不同的风温下的出水温度。由图可以看出在低温-21.7℃的条件下塔 1 的平均出水温度为 12.51℃，塔 2 为 12.57℃；而在高温 31℃的条件下塔 1 的平均出水温度为 48.89℃，塔 2 为 48.91℃。

5. 结论

- 1) 受风向影响最大的是外周的散热扇段，出水温度高的是迎风扇段，从塔的平均出水温度看，最佳的风向是侧向来风。
- 2) 在侧向来风时，风速主要的影响发生在上游扇段，而最大的影响发生在 6 m/s 以上的高风速。
- 3) 水平布置受风温的影响较敏感，即使在静风的条件下各个扇段的出水温度差异也比较大。

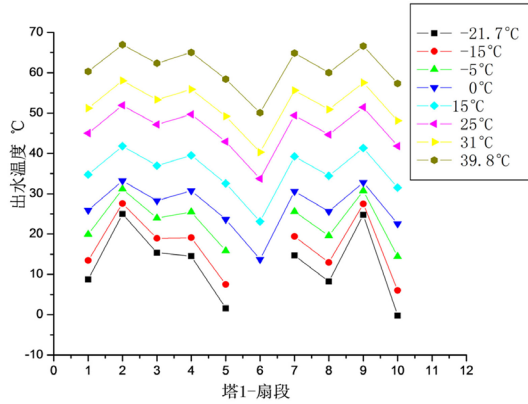


Figure 7. Distribution of the outlet temperature of the sectors of unit 1
图 7. 塔 1 各扇段出水温度

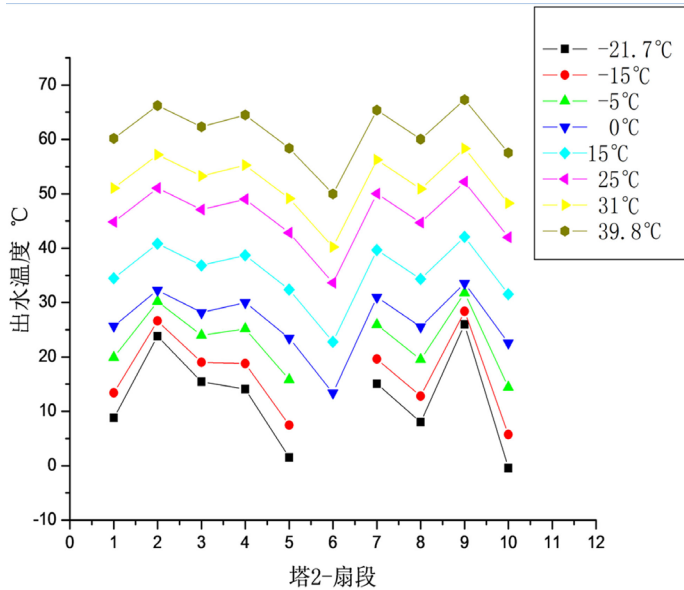


Figure 8. Distribution of the outlet temperature of the sectors of unit 2
图 8. 塔 2 各扇段出水温度

4) 因间冷塔塔型较大, 实验所得的模拟结果很难进行实地验证, 下一步的研究主要看重模拟数据和实测数据的比较。

参考文献 (References)

- [1] Gu, H.F., Qiu, F.Q. and Wang, H.J. (2011) Structure optimization on air-cooling system platform of large power plant. *Heat Transfer Engineering*, **32**, 1069-1074.
- [2] Chen, G.Y., Gu, H.F., Wang, H.J. and Qin, Y.B. (2013) Optimization research on the structure of horizontally-arranged indirect air-cooling tower under strong wind condition. *The 7th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion*, **1547**, 454-462.
- [3] 杜向东 (1996) 干式冷却塔风影响实验研究. 北京人学硕士学位论文.
- [4] Du Preez, A.F. (1992) The influence of cross-wind on the performance of natural draft dry-cooling towers. University of Stellenbosch, Stellenbosch.
- [5] Goodarzi, M. and Ramezanpour, R. (2014) Alternative geometry for cylindrical natural draft cooling tower with higher cooling efficiency under crosswind condition. *Energy Conversion and Management*, **77**, 243-249.
- [6] 赵振国, 石金玲, 魏庆鼎, 张伯寅 (1998) 自然风对空冷塔的不利影响及其改善措施. *应用科学学报*, **16**, 112-120.
- [7] 陶文铨 (2004) 数值传热学. 第二版, 西安交通大学出版社, 西安, 207-231.
- [8] 王福军 (2004) 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用. 清华大学出版社, 北京.
- [9] Yakhot, C. and Orszag, S.A. (1992) Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*, **4**, 1510-1515.
- [10] 王远成, 吴文权 (2004) 基于 RNG 湍流模型钝体绕流的数值模拟. *上海理工大学学报*, **26**, 519-523.
- [11] 王辉, 陈永福等 (2006) 建筑物风场模拟计算的边界处理. *科技通报*, **22**, 661-665.