

基于 CFD 的电力工程仿真设计研究

王海涛¹, 王海军², 顾红芳², 宋江文³, 杨轶³

(1. 西安交通大学 高端制造装备协同创新中心, 西安 710049; 2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049; 3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075)

摘要: 为了研究当前电力工程设计中复杂的流动、传热问题, 采用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)技术分别针对火电机组小机排汽、直接空冷以及烟道等三个系统进行了研究, 详细阐述了计算目的、计算域和边界条件的设置, 得到了各系统内部流场的流动特性。从各方面的应用可以看出, CFD 仿真技术在电力工程设计领域存在着广阔的应用前景。

关键词: 计算流体力学; 电力工程设计; 小机排汽; 直接空冷

中图分类号: TM402

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0038-06

Study on Power Engineering Simulation Design Based on CFD

WANG Haitao¹, WANG Haijun², GU Hongfang², SONG Jiangwen³, YANG Yi³

(1. Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to study the complex flow and heat transfer in power engineering design, computational fluid dynamics (CFD) technology was used to study exhaust steam system of steam feed pump, direct air cooling system and flue system. The calculation purpose, calculation domain and boundary conditions are described in detail, and the internal flow characteristics of each system is obtained. From all aspects of the application, CFD technology has a wide application prospect in power engineering design field.

Key words: computational fluid dynamics; power engineering design; exhaust steam system of steam feed pump; direct air cooling; flue

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是通过计算机进行数值模拟, 分析流动和传热等物理现象的技术, 是近代流体力学、数值数学、计算机科学结合的产物。从上世纪 90 年代, 随着计算机技术和流体动力学的迅速发展, CFD 技术获得了质的飞跃, 走出实验室和研究所, 真正应用于航空航天、能源动力、石油化工、汽车工业等领域。目前, CFD 模拟已成为与理论分析、实验测量并列的三种研究流体流动问题的方法之一, 因其

迅速、廉价、越来越高的准确性, 以及可在非常广泛的参数范围内对流场总体和细节进行定量分析等优势, 得到越来越广泛的应用^[1]。

近些年来, CFD 技术在指导电力工程设计, 优化发电设备结构, 分析系统运行及改善发电设备的安全性和可靠性等方面的应用日益普及。顾红芳、石磊、吕太、刘学、曹蓉秀等人^[2-6]分别采用了 CFD 软件对火电机组直接空冷系统排汽管道的流动特性进行模拟计算, 并提出了均衡支管流量, 降低管系压降的优化措施。张遐龄、段会申、周兰欣、何辉等人^[7-10]采用数值模拟的方法通过 CFD 软件分析了影响直接空冷凝汽器换热的因素, 分别提出了增加边缘风机的功率, 增加空冷平台挡风墙高度, 增大空冷平台间距, 空冷岛加装导流装置等经济、高效的措施以提升空冷机组的换热性能。俞

收稿日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11675128)

作者简介: 王海涛(1981), 男, 山东临沂人, 工程师, 硕士, 主要从事多相流动、传热和复杂机电系统热特性研究(e-mail) wanghaitao@xjtu.edu.cn。

逾、赵建忠、李德波、杨松、张彦军等人^[11-15]分别采用 CFD 软件 Fluent 对火电机组 SCR 烟气脱硝系统进行了流场数值模拟计算, 分析了反应器及烟道中导流装置对流场分布的影响, 均不同程度优化了导流装置, 改善了烟道内的气流分布, 提高了系统的工作效率。

本文结合实际工程, 利用计算流体力学软件 Fluent 分别针对火电机组小机排汽、直接空冷以及烟道等三个系统进行数值模拟和分析研究, 结果可为电力工程设计提供理论和实际应用参考。

1 CFD 仿真

CFD 问题的求解过程如图 1 所示。火电机组小机排汽、直接空冷以及烟道等三个系统内部的流动均为三维湍流问题, 需借助适当湍流模型, 本文采用应用较广泛的标准 $k-\varepsilon$ 模型。

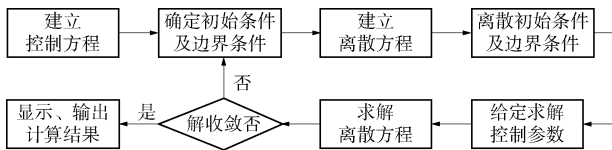


图 1 CFD 求解流程

Fig. 1 Processing flow of CFD

1.1 计算模型

1.1.1 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

1.1.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: ρ 为介质密度; u 为流速, $i, j=1, 2, 3$; p 为压力; τ_{ij} 为应力张量, δ_{ij} 为克罗内克算子 (Kronecker delta); ρg_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力 (如离散相相互作用产生的升力), F_i 包含了其它的模型相关源项, 如多孔介质和自定义源项。

1.1.3 $k-\varepsilon$ 方程

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_{\varepsilon 1}}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; μ 为介质的动力粘性系数, μ_t 为湍流粘性系数; 系数 c_μ 取 0.09, $c_{\varepsilon 1}$ 取 1.44, $c_{\varepsilon 2}$ 取 1.92, σ_k 取 1.0, σ_ε 取 1.3。

1.2 网格划分及网格独立解

数值计算所选取的结构模型为实际工程结构, 采用非结构化网格技术对其进行网格划分, 网格划分采用了分区划分网格技术, 不同区域采用不同的网格类型和间距进行划分, 对特征模块、局部阻力件、流向转变及流道变化处等进行网格加密。在实际计算过程中应进行网格独立解的验证, 保证数值计算都在工程考核指标基本与网格无关的网格下进行^[16]。以小机排汽管道为例, 如图 2 所示, 网格数大于 14 万个以后, 加密网格系统阻力计算结果变化幅度很小 ($<1\%$), 网格独立。数值计算采用的网格数约 19 万个。

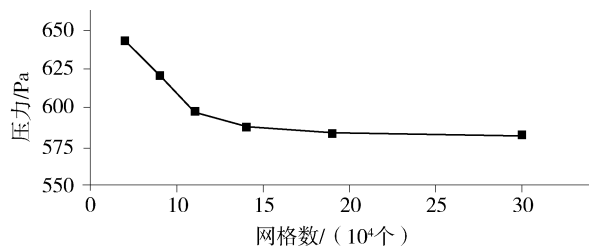


图 2 网格独立性验证

Fig. 2 Grid independence verification

2 CFD 应用举例

2.1 小机排汽管道的流动模拟

2.1.1 计算目的

对某 300 MW 工程的 $\Phi 2120 \times 12$ 小机排汽管道进行数值模拟, 拟得到:

- 1) 小机排汽管道内蒸汽的流场分布。
- 2) 得到整个管道系统的总压降。
- 3) 得到各管件的局部压降。

2.1.2 计算参数的设置

1) 入口边界

选择质量入口条件, 入口温度为入口处压力对应的饱和温度, 紊流强度 $I = 10\%$, 紊流黏性比取

10, 介质为饱和水蒸汽。

2) 出口边界

出口都选 outflow 作为边界条件。

3) 其他边界

四周壁面都选择墙壁面边界条件, 选择无滑移边界条件, 并与外界保持绝热。

阀门按多孔跳跃模型给定, 局部阻力取 $\zeta = 8\lambda$ 。

2.1.3 计算结果分析

图 3 为小机排汽管道三维模型图, 图 4 为小机排汽管道网格划分示意图, 图 5 为 $P = 3.166 \text{ kPa}$, $G = 4.17 \text{ kg/s}$ 工况下小机排汽管道流场压力分布云图, 图 6 为 $P = 3.166 \text{ kPa}$, $G = 4.17 \text{ kg/s}$ 工况下小机排汽管道流场速度矢量图。由图 5 和图 6 可以看到整个小机排汽管道内流场分布情况, 同时可以根据流场计算结果得到弯头、三通等管件的局部阻力。

表 1 为计算结果分析后各工况对应的总压降。

表 1 各工况对应的总压降

Tab. 1 Total pressure drop of exhaust steam duct of steam feed pump at different conditions

压力/kPa	流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	总压降/Pa
3.166	4.17	193
6	9.849	584
12.3	11.6	412



图 3 小机排汽管道三维模型图

Fig. 3 3D Model of exhaust steam duct of steam feed pump

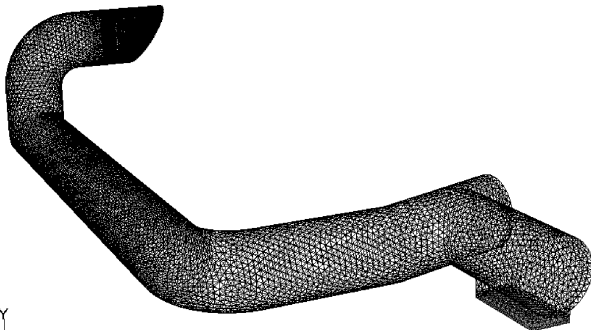


图 4 小机排汽管道网格划分示意图

Fig. 4 Grid partition diagram of exhaust steam duct of steam feed pump

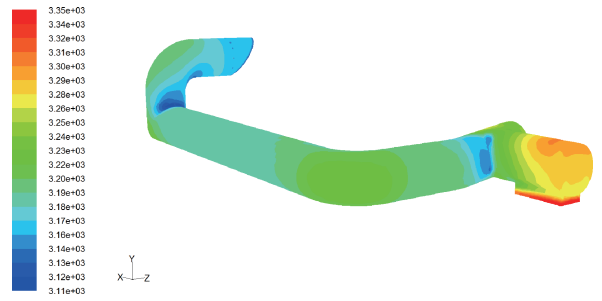


图 5 小机排汽管道流场压力分布云图 ($P=3.166 \text{ kPa}$, $G=4.17 \text{ kg/s}$)

Fig. 5 Pressure contour of exhaust steam duct of steam feed pump ($P=3.166 \text{ kPa}$, $G=4.17 \text{ kg/s}$)

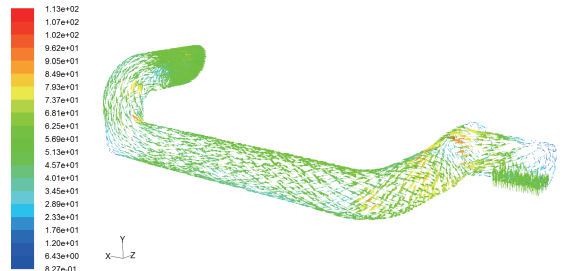


图 6 小机排汽管道流场速度矢量图 ($P=3.166 \text{ kPa}$, $G=4.17 \text{ kg/s}$)

Fig. 6 Vector diagram of exhaust steam duct of steam feed pump ($P=3.166 \text{ kPa}$, $G=4.17 \text{ kg/s}$)

2.2 直接空冷机组系统性能的模拟

2.2.1 计算目的

对某 600 MW 工程的直接空冷系统性能进行数值模拟。该直接空冷系统总散热面积约为 150 万 m^2 , 包含 56 个散热单元, 按 8 列布置, 每列 7 个单元。通过对直接空冷系统性能的数值模拟, 拟实现:

1) 提供各风向、风速、气温的不同组合时, 得到气象环境对空冷系统的影响程度, 如换热效率下降幅度、热风回流量、受影响风机的进口温升值及影响区域(或风机台数)。

2) 对空冷机组的规划布置给出建议; 给出环境风对空冷系统影响的有利风向区域、较有利风向区域、不受影响风向区域、不利风向区域、较不利风向区域。

3) 对空冷平台高度, 风机风量和挡风墙高度及布置方式提出建议。

4) 得到各风向、风速、气温的不同组合时空冷平台的散热效率。

2.2.2 计算参数的设置

1) 选取整个电厂为模型区域, 厂区中的重要建

筑物如锅炉房、汽机房、烟囱, 周围山峦等都在模型中体现, 如图 7 所示。

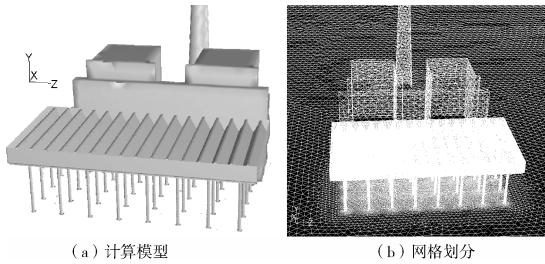


图 7 直接空冷系统计算模型和网格划分示意图

Fig. 7 Structure model and grid partition of direct air cooling power plant

2) 空冷凝汽器分成与风机对应的传热单元, 考虑到空冷凝汽器的结构及其换热的复杂性, 对其进行适当的简化, 在保持空冷单元宏观阻力和传热特性不变的前提下拟有条件采用 Fluent 中的散热器模型 (heat exchanger) 和多孔介质模型 (porous) 进行模拟。

3) 风机在模型中采用排气扇模型 (fan)。

4) 环境风向、风速、气温等气象参数以及汽轮机低压缸排汽背压作为边界条件输入模型。

2.2.3 计算结果分析

图 8 为直接空冷平台横剖面温度云图, 图 9 为直接空冷平台纵剖面温度云图, 图 10 为风机入口的温升分布, 图 11 为散热器单元效率分布。由图 8~图 11 可以看出环境风向、风速、温度对空冷平台散热能力的影响。

2.3 烟道的流动模拟

2.3.1 计算目的

对某 1000 MW 火电机组烟道内气体动力特性

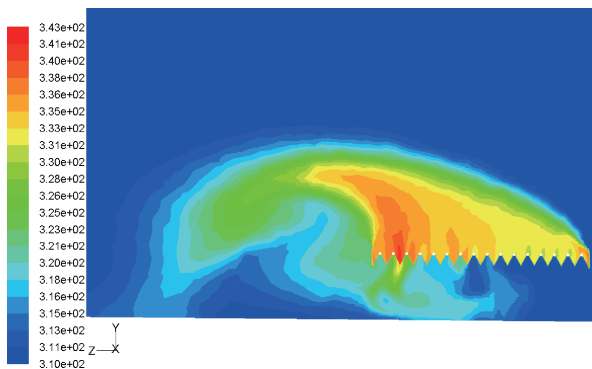


图 8 直接空冷平台横剖面温度云图

Fig. 8 Temperature contour of the cross section of direct air cooling platform

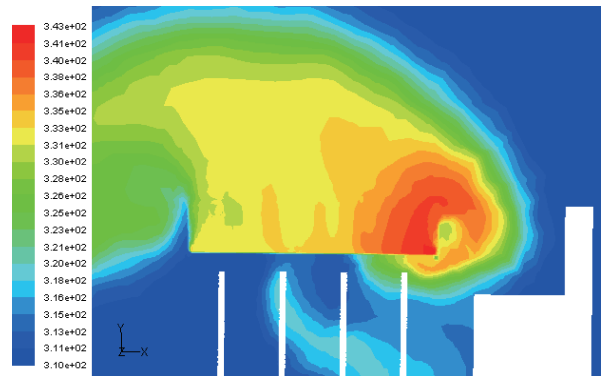


图 9 直接空冷平台纵剖面温度云图

Fig. 9 Temperature contour of the longitudinal section of direct air cooling platform

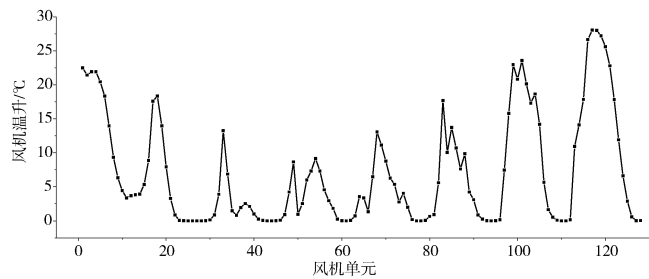


图 10 风机入口的温升分布

Fig. 10 Temperature rise distribution of fans inlet

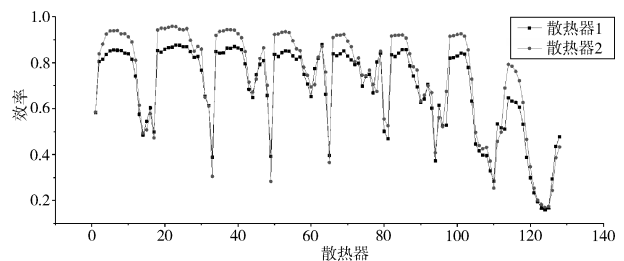


图 11 散热器单元效率分布

Fig. 11 Efficiency distribution of air-cooled condenser units

进行数值模拟, 拟得到:

- 1) 烟道内部烟气的流场分布。
- 2) 烟道系统的流量分配。
- 3) 烟道系统的总压降及局部阻力件的压降。

2.3.2 计算参数的设置

1) 入口段烟道截面尺寸 $3\text{ m} \times 14\text{ m}$, 出口段烟道截面尺寸 $7.5\text{ m} \times 6.5\text{ m}$, 其中除尘器入口烟道截面尺寸 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$, 引风机入口烟道截面尺寸 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$, 除尘器入口烟道压力 -6.38 kPa/g , 温度 $120\text{ }^\circ\text{C}$, 风机入口烟道压力 -6.96 kPa/g , 温度 $115\text{ }^\circ\text{C}$, 烟气流速约为 13.6 m/s 。

2) 根据燃烧采用的煤种得到烟气中各成分的物

性，并利用混合物物性的计算方法得出烟气物性，建立 UDF 程序来实现除尘器前后的烟气物性的变化。

3) 入口边界条件采用速度入口边界条件 (velocity-inlet)。将由给定的进口参数确定，由进入烟道的体积流量计算获得。

4) 出口边界条件选用压力出口边界条件 (pressure-outlet)，给定流动出口边界上的静压。由烟囱的几何高度、锥度计算出烟囱的抽力，进而推算出模拟计算所需的出口参数。

5) 风机在模型中采用排气扇模型 (fan)，排气扇边界类型允许输入控制排气扇扬程 (压升) 和流动速率 (速度) 之间关系的经验曲线。此关系可由风机的性能曲线得到。

6) 除尘器在模型中采用 Fluent 中的多孔介质模型 (porous)。

2.3.3 计算结果的分析

图 12 为除尘器编号示意图，图 13 为烟道计算模型图，图 14 为除尘器进出口横剖面速度场云图，图 15 为除尘器进出口横剖面静压场云图。由图 14 和图 15 可以看到烟道内流场分布。

表 2 为除尘器流量分布偏差，表 3 为烟道阻力分布。根据表 2 和表 3 的计算结果可以定量地分析出烟道系统的流量分配及阻力特性，表 3 对 Fluent 软件的阻力计算值与《火力发电厂烟风煤粉管道设计技术规程》(DL/T 5121—2000) 设计值进行了对比，可以看出计算值小于规程设计值，二者总阻力数值相近，相对偏差约为 3.5%，这主要是因为采用 Fluent 软件针对特定工程，计算值更贴近烟道内部的实际流动，而规程设计值依据大量相似工程的运行数据或者实验测试数据，偏于保守。Fluent 数值模拟结果预测烟道系统内部流动特性的方法具有

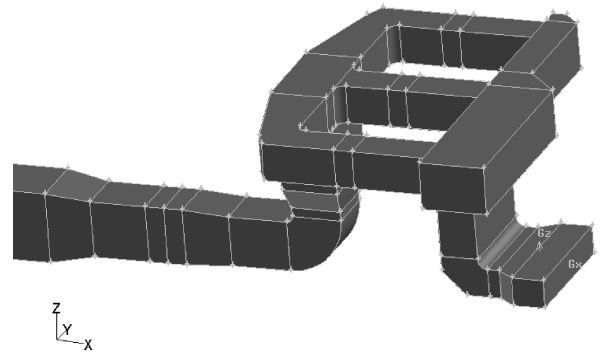


图 13 烟道计算模型

Fig. 13 Simulation model of the flue system

较高的精度，能够很好的应用与工程实践当中。

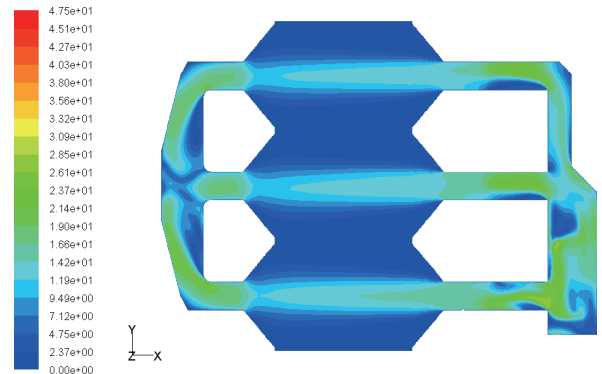


图 14 除尘器进出口横剖面速度场云图

Fig. 14 Velocity contour of the cross section of electrostatic precipitators

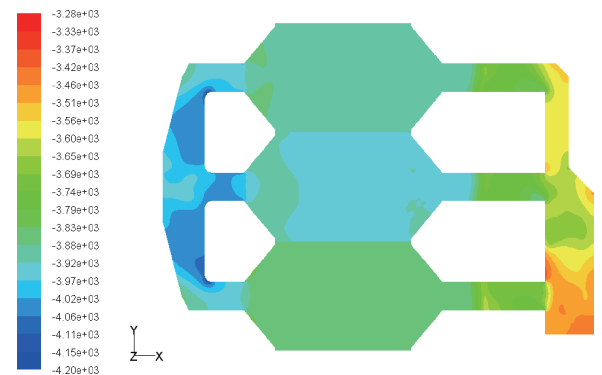


图 15 除尘器进出口横剖面静压场云图

Fig. 15 Static pressure contour of the cross section of electrostatic precipitators

表 2 除尘器流量分布偏差

Tab. 2 Flow distribution deviation of electrostatic precipitators

名称	除尘器 1	除尘器 2	除尘器 3
流量偏差	0.045	0.012	-0.057

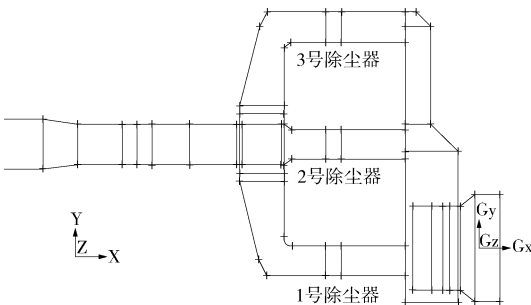


图 12 除尘器编号示意图 (流动方向为 -X 向)

Fig. 12 Number schematic diagram of electrostatic precipitators (flow direction is -X direction)

表3 烟道阻力分布

Tab. 3 Flue resistance distribution

结构名称	Fluent 软件阻力 计算值/Pa	DL/T 5121—2000 设计值/Pa	
进口段	12		
渐缩段 1	18	84	
弯头	74		
除尘器进口分流段	1 号除尘器 2 号除尘器 3 号除尘器	193 297 286	213
除尘器	1 号除尘器 2 号除尘器 3 号除尘器	228 196 172	250 (技术协议保证值)
除尘器出口汇流段	1 号除尘器 2 号除尘器 3 号除尘器	229 157 192	215
渐缩段 2	35		
渐扩段	39	105	
出口段	9		
总阻力	837	867	

3 结论

通过介绍 CFD 技术在小机排汽管道、直接空冷系统以及烟道系统上的相关应用, 可以看出 CFD 技术具有良好的实用价值: 研究成本低, 周期短, 无实验仪器干扰, 能获得完整的数据, 能将计算情况进行可视化再现。因此 CFD 技术在电力工程设计领域有着良好的应用前景。作为一种先进的设计分析手段, 它的应用应该着眼于电力工程设计的精细化、国际化, 深入广泛地开展特殊、复杂结构和国外工程的计算仿真, 一方面可以解决以前没有认识清楚的问题, 提高设计水平; 另一方面对国外工程而言, 数值模拟结果还可以获得更高的认可度。

参考文献:

[1] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1-23.
WANG F J. Computational fluid dynamics analysis -CFD software principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1-23.

[2] 顾红芳, 王海军, 张喆, 等. 1 000 MW 机组直接空冷系统排汽管道流动特性 [J]. 热力发电, 2016, 45(5): 21-26.
GU H F, WANG H J, ZHANG Z, et al. Flow characteristics of exhaust pipes in a 1 000 MW direct air-cooled unit [J]. Ther-

mal Power Generation, 2016, 45(5): 21-26.

[3] 石磊, 刘学, 李星, 等. 600 MW 机组直接空冷排汽管道系统内流场的数值模拟 [J]. 热力发电, 2007, 36(11): 25-27.
SHI L, LIU X, LI X, et al. Numerical simulation of flow field in steam exhausting pipeline system for direct air cooling 600 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(11): 25-27.

[4] 吕太, 王宏博. 1 000 MW 机组高位布置排汽管道内湿蒸汽的数值模拟 [J]. 长春理工大学学报, 2014, (2): 114-116.
LÜ T, WANG H B. Numerical stimulation of wet steam in high-type exhaust pipe of the 1 000 MW power unit [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2014, (2): 114-116.

[5] 刘学, 王忠会, 石磊, 等. 超临界直接空冷机组排汽管道系统优化设计 [J]. 电力建设, 2008, 29(10): 45-47.
LIU X, WANG Z H, SHI L, et al. Optimization design of exhaust steam pipe system of direct air-cooling supercritical units [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(10): 45-47.

[6] 曹蓉秀. 2 种典型直接空冷排汽管道布置的数值比较 [J]. 能源研究与管理, 2015(2): 55-58.
CAO R X. Numerical comparison of two typical direct air cooling exhaust duct layout [J]. Journal of Research and Management, 2015(2): 55-58.

[7] 张遐龄, 杨旭, 李向群, 等. 火电厂空冷平台换热的数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2005, 20(Supp. 1): 874-880.
ZHANG X L, YANG X, LI X Q, et al. Numerical simulation to heat exchange of direct air-cooled condenser in power plants [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: A Series, 2005, 20(Supp. 1): 874-880.

[8] 段会申, 刘沛清, 赵万里. 电厂直接空冷系统热风回流的数值模拟 [J]. 动力工程学报, 2008, 28(3): 395-399.
DUAN H S, LIU P Q, ZHAO W L. Numerical research of the hot wind recirculation of the Direct-air-cooled system in a power plant [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3): 395-399.

[9] 周兰欣, 崔皓程, 魏春枝. 空冷平台间距对空冷凝汽器换热效率的影响 [J]. 动力工程学报, 2009, 29(8): 765-768.
ZHOU L X, CUI H C, WEI C Z. Effects of platform pitch on heat exchange efficiency of air-cooled condenser [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(8): 765-768.

[10] 何辉. 特大风环境下直冷数模及导流技术应用研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(Supp. 1): 111-114.
HE Hui. Application Research on the numerical simulation of the air cooled condenser system and the windshield board on especially environment wind [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 111-114.

4 经济性分析

根据目前几大厂商的报价,蛇形管高加比U形管高加每台机(即4个高加及2个高加蒸汽冷却器)价格高约10%~50%,考虑到技术引进因素,其价格是合理的。

5 结论

单列新型高加即蛇形管高加在1 000 MW超超临界二次再热机组中是可行的,主要原因如下:

1)蛇形管高加具有热适应性好,可靠性高,且适应未来更高参数超超临界机组技术发展方向。

2)蛇形管高加国内已有三家具备加工制造能力,具备了推广应用条件,尽早在高参数机组上进行运用及积累经验,对于推动我国制造业高端化以及研发更高参数超超临界机组辅机技术具有较大的意义。

3)尽管蛇形管高加在二次再热机组上首次应用可能因引进技术或管束进口等原因价格高,首次应用可能还具备一些技术风险,但对于引进消化技术再创新的技术目标来说是完全值得的。

参考文献:

- [1] 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司. 二次再热机组高压加热器配置选型专题研究报告[R]. 广州:中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2015.
- [2] 周锐. 1 000 MW超超临界机组高压加热器选型探讨[J]. 热机技术, 2007(1): 1-5.

ZHOU R. The selection of high pressure heater for 1 000 MW ultra supercritical unit [J]. Heat Power Technology, 2017(1): 1-5.

- [3] 凌峰. 蛇形管式高压加热器在大型火电机组中的应用[J]. 电站辅机, 2014, 35(3): 5-7.
- LING F. Application of Snake-tube Type HP in Units of Large-scale Fossil Power Plants [J]. Power Station Auxiliary Equipment 2014, 35(3): 5-7.
- [4] 东方电气集团东方锅炉股份有限公司. 蛇形管式高压加热器技术交流讨论稿[R]. 上海: 东方电气集团, 2015.
- [5] 杭州忠泽机械工程有限公司. 集箱式高压加热器介绍[R]. 杭州: 杭州忠泽机械工程有限公司, 2015.
- [6] 马永杰. 1 000 MW机组回热系统高压加热器选型分析[J]. 电力安全技术, 2016(11): 62-64.
- MA Y J. Selection of high pressure heater for 1 000 MW fossil fired unit with double reheat cycles [J]. Electric Safety Technology, 2016(11): 62-64.
- [7] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册(第四卷 电站系统与辅机)[M]. 北京: 机械工业出版社 2002.
- [8] 上海电气集团股份有限公司. 蛇形管式高压加热器—产品介绍[R]. 上海: 上海电气集团股份有限公司, 2015.
- [9] 东方锅炉(集团)股份有限公司. 1 000 MW二次再热单列高压加热器可行性分析[R]. 东方锅炉(集团)股份有限公司, 2015.
- [10] 杨根盛. 700 °C先进超超临界发电技术的开发与进展[J]. 锅炉制造, 2013(4): 1-4 +7.
- YANG G S. 700 °C advanced ultra-supercritical power generation technology development and progress [J]. Boiler Manufacturing, 2013(4): 1-4 +7.
- [11] 中国电力企业联合会. 大中型火力发电厂设计规范: GB 50660—2011[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011.

(责任编辑 高春萌)

(上接第43页 Continued from Page 43)

- [11] 俞逾, 杨晨, 范莉. 电厂SCR烟气脱硝系统流场的数值模拟[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 222-225.
- YU Y, YANG C, FAN L. Numerical simulation of flow field for selective catalytic reduction system [J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 222-225.
- [12] 赵建忠, 李宝, 赵勇东, 等. SCR脱硝反应塔流场数值模拟研究[J]. 应用能源技术, 2014(4): 32-35.
- ZHAO J Z, LI B, ZHAO Y D, et al. SCR denitration reaction tower numerical simulation of flow field [J]. Applied Energy Technology, 2014(4): 32-35.
- [13] 李德波, 徐齐胜, 廖永进, 等. SCR脱硝系统导流板优化数值模拟[J]. 广东电力, 2014(7): 1-5.
- LI D B, XU Q S, LIAO Y J, et al. Numerical simulation on guide plate optimization for SCR denitration system [J]. Guangdong Electric Power, 2014(7): 1-5.

- [14] 杨松, 丁皓姝, 黄越. SCR脱硝系统流场数值模拟及优化[J]. 热力发电, 2014(9): 71-75.
- YANG S, DING H S, HUANG Y. Numerical simulation and optimization of flow field in an SCR system [J]. Thermal Power Generation, 2014(9): 71-75.
- [15] 张彦军, 高翔, 骆仲泱, 等. SCR脱硝系统入口烟道设计模拟研究[J]. 热力发电, 2007, 36(1): 15-17.
- ZHANG Y J, GAO X, LUO Z Y, et al. Simulation study on design of inlet flue duct for SCR denitration system [J]. Thermal Power Generation. 2007, 36(1): 15-17.
- [16] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 28-51.
- TAO W Q. Numerical heat transfer (Second Edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 28-51.

(责任编辑 黄肇和)