

核电厂汽轮机房通风系统精细化设计方法

孙文龙

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 核电厂常规岛汽轮机房通风设计一般采用的计算方法无法确定汽机房内的温度和速度分布, 而采用 Computational Fluid Dynamics(简称 CFD) 软件对其室内热环境进行模拟、分析和评价, 可以直观地看到汽轮机房各区域温度的情况。同时, CFD 方法可以方便地对方案进行反复调整分析以使厂房各点的温度达到设计要求。CFD 精细的预测结果, 能够为热车间的通风设计提供切实可行的设计策略和方案修正手段。采用 CFD 的设计方法能够挖掘通风系统的设计亮点, 提供了可靠的设计手段。

关键词: 核电厂; 汽轮机房; 通风系统; CFD

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0057-06

Fine Design for Turbine Room Ventilation System of NPP

SUN Wenlong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Conventional ventilation calculation methods and design scheme of nuclear power plant turbine room can not determine the distribution of temperature and velocity in turbine room. The distribution of temperature and velocity could be visually seen by the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) software to simulate, analysis and evaluate turbine room indoor thermal environment. What's more, design scheme could be easily adjusted and analyzed to meet the temperature design requirements by CFD method. Fine predictions of CFD could provide practical design strategies and scheme correction means for the ventilation design of hot workshop. Design using CFD method could tap the highlights of the ventilation system, providing a reliable design tools.

Key words: nuclear power plant; turbine room; ventilation system; CFD

我国核电站主要分布在南方沿海地区, 这些地区夏季普遍炎热, 而核电站汽轮机厂房属于体积高大的湿热车间, 一般采用机械通风的方式来排除室内大量的余热余湿, 以满足生产运行的要求。但由于厂房内管路复杂、设备多、热源分散, 使用传统的方法难以对厂房内的气流组织、热湿环境进行有效的评估。

为了更好地了解厂房内的热湿环境, 笔者在某南方核电站汽轮机厂房通风设计方案中, 采用 CFD (computational fluid dynamics) 软件对其室内热环境进行模拟、分析和评价^[1], 并结合当地气候特点, 在设计策略和节能措施方面进一步研究探索, 为我

国核电站汽轮机厂房通风方案设计提出了新思路。

1 工程概况

该核电站位于广东省珠江三角洲, 光照充足, 气候温和, 属亚热带海洋性季风气候。作为全球最大的核电机组, 其汽轮机厂房占地面积 7 342 m², 地下 2 层, 地上 2 层, 长约 114 m, 宽约 68 m, 高约 60 m。汽轮机厂房内, 地下 2 层主要布置给水泵、凝结水泵、疏水泵、化水加药间和取样间等; 地下 1 层主要布置高压加热器、凝汽器、疏水箱等; ∇ 0 m 层布置了各类水箱; ∇ 2.30 m 层以上为低压加热器、高中压缸、发电机、除氧器等主要设备及系统热力管道。其中主要设备及其附属连接设备系统则是贯穿了整个建筑, 共 5 层, 即 ∇ -13.7 m、∇ -7.5 m、∇ 0 m、∇ 2.3 m 和 ∇ 10.9 m 层, 详见图 1。

收稿日期: 2016-09-18

作者简介: 孙文龙(1957), 男, 上海市人, 教授级高工, 学士, 主要从事电厂暖通设计研究工作(e-mail) sunwenlong@gedi.com.cn。

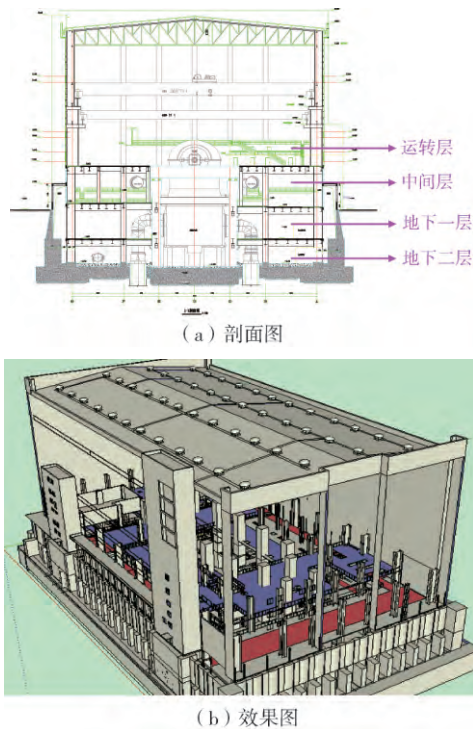


图1 核电厂汽轮机房示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nuclear power plant turbine room

2 通风系统概况

2.1 设计方案简介

该核电厂汽轮机房初步设计采用自然进风、机械排风的通风方式。由土建竖井自然进风，屋顶风机机械排风，地下1层设对地下2层的转送风机，设计总风量 $350\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。中间层的机械排风设备位于地下1层 $\nabla -7.5\text{ m}$ 楼板上，将地下2层的热空气排至上部空间，再由屋顶机械排风排出，屋顶风机位于汽轮机房屋面。

汽轮机房标高 $\nabla 0\text{ m}$ 处沿厂房长度方向的两列土建外墙上，开有百叶通风口，作为汽轮机房的自然进风口。汽轮机房地下2层、地下1层沿厂房长度方向的两排柱子间均有开敞部分，可引导地上的自然风进入汽轮机房地下层。

2.2 常规岛汽轮机厂房设计工况

室外气象参数：夏季通风室外计算干球温度 $30.5\text{ }^\circ\text{C}$ ；夏季通风室外计算相对湿度 76.6% 。

汽轮机房室内设计计算参数：运转层以下温度 $\leq 35\text{ }^\circ\text{C}$ ；排风温度 $\leq 40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3 机组发热量

汽轮机房的主要功用就是安放汽轮机及其相关

配套辅助设备。对于核电站来说，大致可将其分为主机部分、配套设备、管路三个部分。

单台机组总发热量为 $2\,274.15\text{ kW}$ ，见表1。该值比暖通设计手册中的数据要小一些，通过与厂家沟通，主要原因是其设备的保温性能较好，外表面温度较低。

表1 设备发热量数据表

Tab. 1 Equipment heat data sheet

设备名称	发热量/kW
主机部分	351.00
配套设备	1 300.40
管路部分	622.75
合计	2 274.15

注：主机部分(主要包括汽轮机、高压缸、中压缸、低压缸、MSR系统、凝汽器等)，数据由设备供货商提供。

按常规焓差方式^[2]计算汽轮机房的通风量为：

$$L = \frac{3.6 \times 10^6 Q'_{re}}{h'_{ex} - h'_{in}} \quad (1)$$

式中： L 为汽轮机房通风量， kg/h ； Q'_{re} 为汽轮机房设备发热量， MW ； h'_{ex} 为汽轮机房排风空气的比焓， kJ/kg ； h'_{in} 为汽轮机房进风空气的比焓， kJ/kg 。

常规计算只能反映汽机房的进排风温度，无法判断汽轮机房内各局部区域的温度分布情况，更无法进行通风方案的优化设计计算。为此，本工程采用CFD软件对该汽轮机房的室内热环境进行模拟计算。

3 模拟计算工况及结果

模拟工况按6种方案设计，详细说明见表2，设备发热量分布见图2。

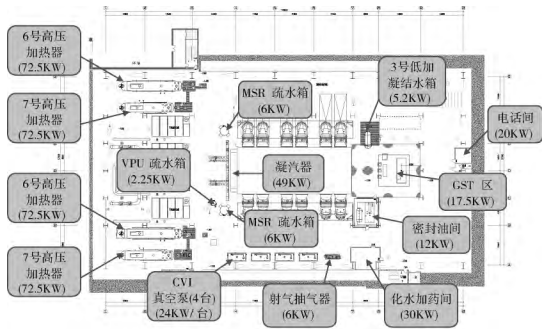
表2 模拟计算工况描述

Tab. 2 Description of simulation conditions

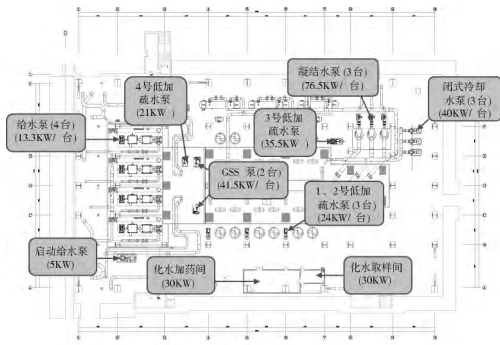
项目	工况描述
工况1	汽机房地下一层沿汽机房长度方向的两排柱子间全部开敞，位于地下一层 $\nabla -7.5\text{ m}$ 高度楼板上，安装有7台轴流风机，设计总风量 $3.5 \times 10^5\text{ m}^3/\text{h}$ 。屋顶设机械排风系统，安装有48台轴流风机，每台风机设计风量 $5.0 \times 10^4\text{ m}^3/\text{h}$ 。排风总风量 $2.4 \times 10^6\text{ m}^3/\text{h}$ 。
工况2	汽机房地下一层沿汽机房长度方向的两排柱子间沿高度方向，上半部分封闭，下半部分开敞。通风机安装同工况1。排风总风量 $2.4 \times 10^6\text{ m}^3/\text{h}$ 。
工况3	汽机房地下一层沿汽机房长度方向的两排柱子间全部开敞，每台风机风量 $4.7 \times 10^4\text{ m}^3/\text{h}$ ，共48台，通风机安装同工况1。屋顶排风系统总风量 $2.256 \times 10^6\text{ m}^3/\text{h}$ 。

续表2 模拟计算工况描述

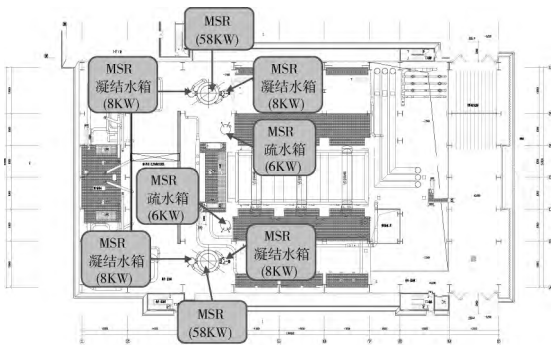
项目	工况描述
工况4	汽机房地下一层沿汽机房长度方向的两排柱子间全部開啟, 每台风机风量 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 共48台, 通风机安裝同工况1。屋顶排风系統总风量 $1.92 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$
工况5	汽机房地下一层沿汽机房长度方向的两排柱子间全部開啟, 每台风机风量 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$, 共48台, 通风机安裝同工况1。屋顶排风系統总风量 $1.68 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$
工况6	汽机房地下一层沿汽机房长度方向的两排柱子间全部開啟, 每台风机风量 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 共48台, 通风机安裝同工况1。屋顶排风系統总风量 $1.44 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$



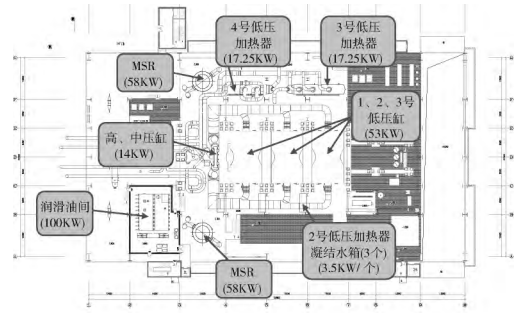
(a) 地下2层标高▽-13.7m处主要热源



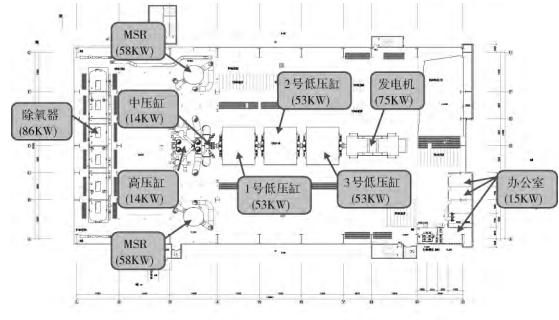
(b) 地下1层标高▽-7.5m处主要发热设备



(c) 地上1层标高▽0m处主要发热设备



(d) 地上1层标高▽2.3m处主要发热设备

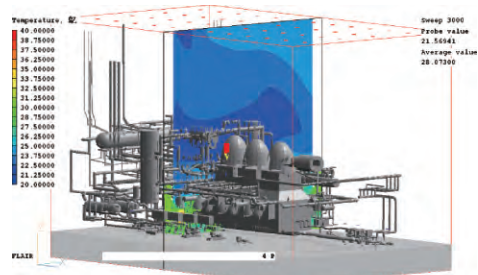


(e) 地上2层标高▽10.9m处主要发热设备

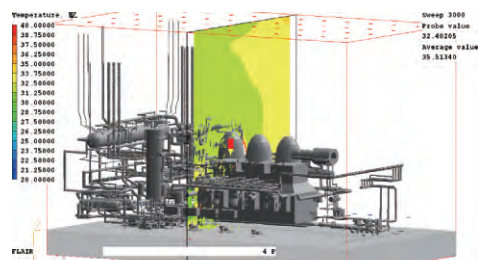
图2 主要发热设备

Fig. 2 Main heat source

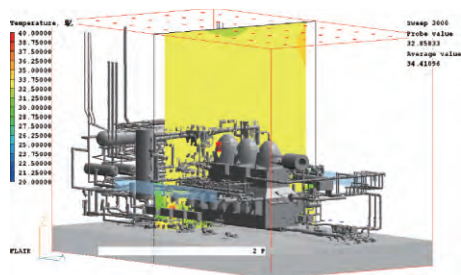
上述工况沿常规岛宽度方向竖直面温度分布的模拟结果见图3。



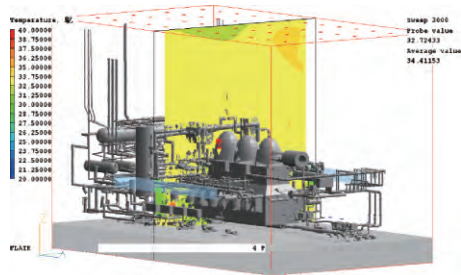
(a) 工况1竖直面温度



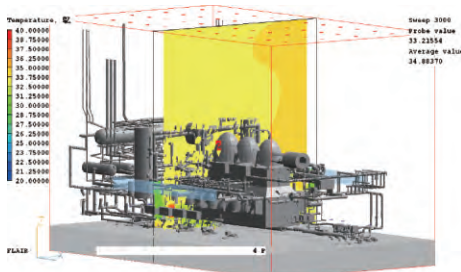
(b) 工况2竖直面温度



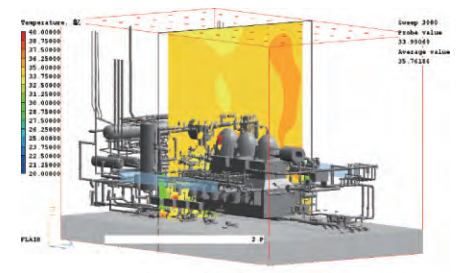
(c) 工况3竖直断面温度



(d) 工况4竖直断面温度



(e) 工况5竖直断面温度



(f) 工况6竖直断面温度

图 3 六种工况竖直断面温度云图

Fig. 3 Vertical section temperature of six conditions

从图 3 可以看出，工况 1 的汽轮机房内的温度场最低，效果最好。但即使采用工况 6 温度较高，也能满足排风温度 ≤ 40 °C 的要求。

4 模拟结果分析及优化

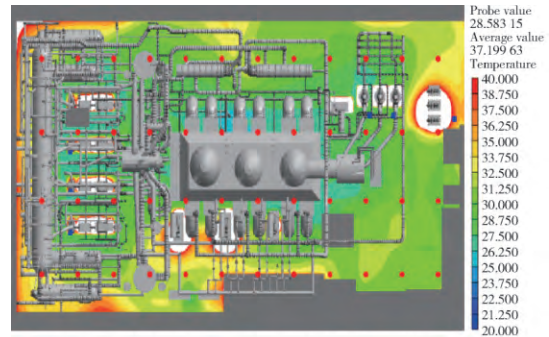
4.1 初步方案模拟结果

采用 CFD 软件对其室内热环境进行不同设计

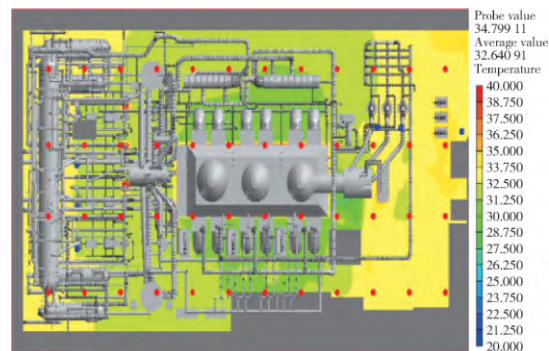
方案、不同通风量下的模拟、分析和评价，对 CFD 预测结果和能耗模拟结果的分析评价发现：

1) 汽轮机房地下 1 层沿厂房长度方向的两排柱子间全部开敞的工况(工况 1)，相比地下 1 层沿厂房长度方向的两排柱子间沿高度方向，上半部分封闭，下半部分开敞的工况而言(工况 2)，标高▽ 0 m 以上的空间，通风情况较好，▽ 0 m 以下的空间，通风情况较差，室内温度整体较高。但在地下 2 层一些发热量大、体量又相对小的设备附近，温度仍然较高，如闭式冷却水泵、凝结水泵、给水泵、1~3 号低压加热器疏水泵附近，很明显，汽轮机房采用工况 1 的设计方案比工况 2 好很多。

2) 对 5 种不同通风量的工况进行对比，工况 1 可以使汽轮机房室内大部分地区的温度达到设计要求，但在地下 2 层一些发热量大、体量又相对小的设备(如闭式冷却水泵、凝结水泵、给水泵 1~3 号低压加热器疏水泵)附近温度仍然较高。见图 4。



(a) 工况1标高▽-13.7 m处水平断面温度剖面图



(b) 工况1标高▽-7.5 m处水平断面温度剖面图

图 4 工况 1 不同标高水平断面温度剖面图

Fig. 4 Different horizontal section temperature of condition 1

4.2 方案优化

针对上述问题，需要进行方案优化。在核电厂汽轮机房地下 2 层▽ -5.50 m 处，沿外进风道靠给

水泵侧布置 8 台诱导风机, 每台诱导风机送风量 6 000 m³/h。沿纵向靠封闭式冷却水泵侧送新风; 同时在靠封闭式冷却水泵侧增加 4 台新风机, 每台新风机送风 20 000 m³/h。新风管从标高▽ 0 m 处向下延伸到地下 2 层后在新风管侧壁开出风口, 出风口离地 1.5 m, 总新风量 80 000 m³/h。

优化设计方案在地下 2 层的辅助送风平面如图 5 所示。

优化方案后, 各水平面上的温度分布(按方案 1 的不同层高)如图 6(a)~(e)所示。

对比图 4 和图 5(a)~(b)可知: 优化方案使得地下 2 层温度分布超标的区域大大减少, 热环境改善效果显著; 地下 1 层以及地上 1、2 层热环境也明显改善。工况 1 与优化设计方案比较, 汽轮机房内的平均温度和温度超过 40 °C 的网格点占总网格数的百分比进行统计, 如表 3 所示。

表 3 厂房内热环境参数对比

Tab. 3 Heat environment parameter comparison in workshop

设计方案比较	平均温度/°C	温度超过 40 °C 的网格点所占的百分比/%
工况 1	33.5	10
优化设计方案	32.0	2

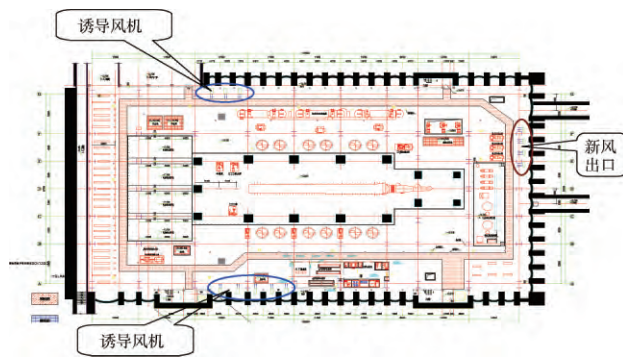
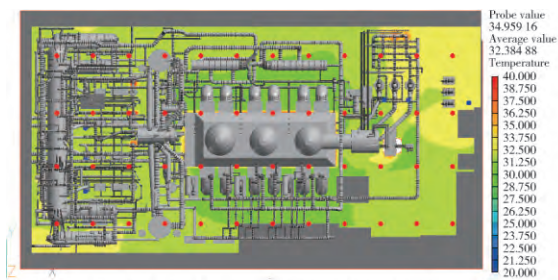
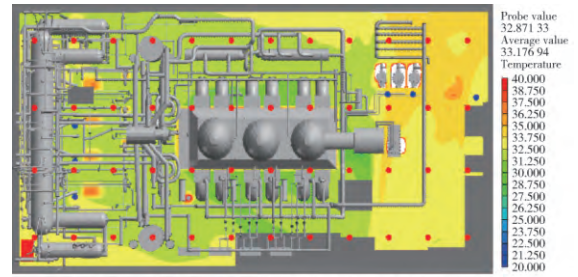


图 5 优化方案在地下 2 层的辅助送风示意

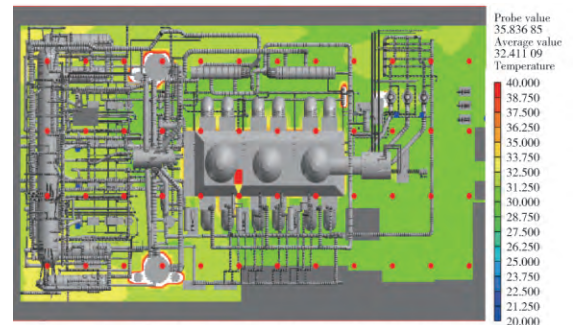
Fig. 5 Auxiliary air flow schematic of optimized scheme in 2rd floor underground



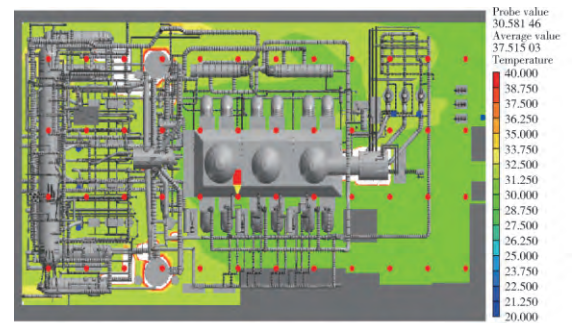
(a) 标高▽-13.7 m水平断面温度(优化方案)



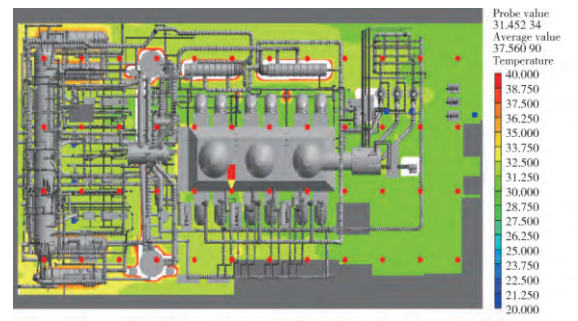
(b) 标高▽-7.5 m水平断面温度(优化方案)



(c) 标高▽0 m水平断面温度(优化方案)



(d) 标高▽2.3 m水平断面温度(优化方案)



(e) 标高10.9 m高处水平断面温度(优化方案)

图 6 不同标高水平断面温度(优化方案)

Fig. 6 Different horizontal section temperature of optimized condition

工况 1 与优化设计方案比较, 对汽轮机房地下 2 层几个泵周边的温度进行对比, 见表 4。

表4 地下二层泵周边的温度对比
Tab. 4 Temperature comparison around pump °C

设计方案比较	给水泵周边1 m范围内	闭式冷却水泵周边1 m范围内	1~2号低加疏水泵周边1 m范围内	3号低加疏水泵周边1 m范围内	凝结水泵周边1 m范围内
工况1	54	49.5	46.3	31.4	40.8
优化设计方案	35.8	34.1	31.7	30.5	36.7

由表4可见,优化设计方案使得汽轮机房地下2层的泵周边1 m范围内的温度大大降低,满足设备运行要求。

5 结论

本文采用CFD软件对核电厂常规岛汽轮机房室内热环境进行了模拟、分析和评价。CFD精细的预测结果,能够为热车间的通风设计提供切实可行的设计策略和方案修正手段,采用CFD的设计方法能够挖掘通风系统的设计亮点,提供了可靠的设计手段,结论如下:

1) 采用CFD软件对其室内热环境进行模拟计算,比常规的通风计算更直观,且能看清汽轮机房内各区域的温度分布情况,对方案的修改具有指导意义。

通过计算,核电厂汽轮机房通风设计方案最终采用的方案为:汽轮机房地下1层沿厂房长度方向的两排柱子间全部开敞的工况,在地下2层离地2 m高处,沿横向G轴和A轴靠给水泵侧设置8台诱导风机,每台诱导风机送风量6 000 m³/h,沿纵向10轴靠闭式冷却水泵侧设置4台新风机,新风

管从标高0 m处向下延伸到地下2层后在新风管侧壁开出风口,每台新风机送风20 000 m³/h。即汽轮机房通风采用工况1修改后的优化设计方案。地下-7.5 m层设置7台50 000 m³/h的辅助通风机和屋面层设置48台50 000 m³/h,经CFD软件模拟计算,该通风方案是可行的,能够较好地满足设备运行环境的要求。

2) 汽轮机房通风优化方案理论上温度超过40 °C的网格点所占的百分比为2%,比例很小,而大部分区域的温度都在35 °C以下,可以满足温度场的要求。

3) 采用了CFD软件对其室内热环境进行模拟分析,可以直观地显示热车间各点的环境温度,对原设计方案的修正能够做到随心所欲,其精细化程度是常规设计无法比拟的。

4) 汽轮机房设备及管道的发热量数据应该由供货商分别提供,其数据和建模的准确性是CFD热环境能耗模拟是否准确的关键因素。

5) 本文研究成果仅为数值模型阶段,拟在该核电厂建成之后,对常规岛汽轮机房内的热环境进行现场测试,通过现场测试验证数值模型方法的正确性,从而为今后核电厂汽轮机房通风方式积累科学的设计依据。

参考文献:

- [1] 龚光彩. CFD技术在暖通空调制冷工程中的应用[J]. 暖通空调, 1999, 26(6): 25-27.
- [2] 李善化, 康慧, 孙相军. 火力发电厂及变电所供暖通风空调设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 40.

(责任编辑 高春萌)

(下接第65页 Continued from Page 65)

- [2] 李波, 黄艳君. 核电站中常规岛消防设计特点[J]. 机电工程技术, 2007, 36(12): 103-104.
LI B, HUANG Y J. Design of Conventional Island Fire Protection of Nuclear Power Station [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2007, 36(12): 103-104.
- [3] GB 50745—2012, 核电厂常规岛设计防火规范[S].
GB 50745—2012, Code for design of fire protection for conventional island in nuclear power plants [S].

- [4] GB 50974—2014, 消防给水及消火栓系统技术规范[S].
GB 50974—2014, Technical code for fire protection water supply and hydrant systems [S].
- [5] 杜建英. 大亚湾核电站常规岛消防系统[J]. 电力安全技术, 2006, 8(4): 53-54.
- [6] GB 50261—2005, 自动喷水灭火系统施工及验收规范[S].
GB 50261—2005, Code for installation and commissioning of sprinkler systems [S].

(责任编辑 高春萌)