

# 冷却塔空气涡流导引装置的数值模拟

徐士倩<sup>1</sup> 王一伟<sup>2</sup> 闫大强<sup>3,†</sup>

1. 山东电力工程咨询院, 济南 250013; 2. 中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190;  
3. 北京大学工学院湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: daqiang.yan@gmail.com

**摘要** 使用 FLUENT 软件, 对水冷火电厂的水冷却塔换热进行了数值模拟, 解决了物模实验难以模拟热力因素的困难。同时还对采用“空气涡流导引装置技术”的水冷却塔和传统水冷却塔, 在不同环境风影响下的换热效率进行了对比。结果表明, 采用“空气涡流导引装置技术”的水冷却塔换热效果优于传统水冷却塔, 抵抗大风的能力更强。

**关键词** 冷却塔; 空气涡流导引装置; 导流板

中图分类号 X123

## Numerical Simulation of the Air Flow Spiral Inducing in Cooling Tower

XU Shiqian<sup>1</sup>, WANG Yiwei<sup>2</sup>, YAN Daqiang<sup>3,†</sup>

1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Company, Jinan 250013; 2. Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 3. State Key Laboratory of Turbulence and Complex Systems, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871;

† Corresponding author, E-mail: daqiang.yan@gmail.com

**Abstract** FLUENT was used to simulate the heat exchange in water cooling tower of the power plants to overcome the difficult of heat transfer simulation in physical experiments. The traditional cooling tower and the tower employing the “flow spiral making technique”, were studied under different environment wind velocities. The operations of the two kinds of towers were compared. The results indicate that the tower employing the “flow spiral making technique” owns more ability to resist environment wind and is more efficient than the traditional one.

**Key words** cooling tower; spiral making; flow conduct board

当前全国电力供应形势紧张, 矛盾突出, 形成日益严重的电荒。摆在发电行业工作者面前的重要任务之一是提高发电效率。另一方面, 节能环保也已在世界范围内成为共识。对火电站的评估已不仅仅局限于其发电能力, 火电站的设计应更注重挖掘和开发节能降耗技术<sup>[1-2]</sup>。2008年, 我国 6000 kW 及以上电厂供电标准煤耗为 349 g/kWh, 与 2000 年相比, 供电煤耗降低了 43 g/kWh, 节能方面取得了显著成就。尽管目前我国火电站煤耗都在下降, 但与国际水平相比还有不少差距, 德国煤耗在上世纪 90 年代已经达到 309 g/kWh<sup>[3]</sup>。

水冷是火电站的一种重要冷却形式。火电站水

冷塔的冷却效果直接关系到整个电厂的运行能力: 冷却塔冷却效果越好, 汽轮机背压就会越低, 火电厂的煤耗也就随之降低; 但是在环境风速较高的夏季, 水冷却塔抽吸环境空气的能力下降, 整体换热效果降低, 冷却效果变差, 电厂煤耗随之增加。面对这一问题, 国内在建造冷却塔时, 更加注重增加余量, 建塔更高更大, 配套设备性能更强, 因此成本和花费也就提高<sup>[4-5]</sup>。如果从空气动力学角度考虑, 对水冷却塔进风方式加以优化, 投资可以减少, 但是国内在这一方面研究还很少。

白俄罗斯国家科学院传热传质研究所的科学家们综合利用朗肯循环理论和空气动力学、传热学等学

科理论,发明引导气流旋转的新技术<sup>[6]</sup>。电站利用空气涡流导引装置技术对传统空气冷却塔进行改造,可以降低循环冷却水的温度,提高冷却塔的工作效率,增加汽轮机做功的势差,从而使得汽轮机的输出功率增加,单位煤耗降低。该技术现已广泛应用于白俄罗斯和俄罗斯各热电站冷却塔改造,效果显著。

冷却塔空气涡流导引装置技术是白俄罗斯国家科学院拥有的专利技术,其核心技术已获得白俄罗斯 5 项技术专利和俄罗斯一项专利。俄罗斯核电站和白俄罗斯 60% 以上的热电站都已采用了该项技术。然而在我国,该项技术还未得到重视和应用。本文根据水冷塔内蒸汽都呈饱和状态这一事实设计了一个简化的单相气流的数值模拟算法,对不同环境风速下采用该项技术的水冷塔的效果进行评估。

### 1 原理

空气涡流导引装置技术的核心思想是避免塔内气流偏心集中从而使部分水冷换热层面积失去作用,避免由此而产生冷塔整体换热效率的降低,以使汽轮机保持高效运作。

火力发电厂热力系统是基于朗肯循环理论建立,简单的火力发电厂热力系统图和朗肯循环如图 1 和 2 所示。

如图 1 所示,锅炉首先将水加热成高温高压蒸汽 6; 高压蒸汽被输送到汽轮机后驱动汽轮机做功使发电机发电。蒸汽 1 经汽轮机做功后成乏汽 2 排入凝汽器,与冷却水进行热交换后,凝结成水 3,再用水泵打回锅炉循环使用。

对应于  $T-S$  图,冷却系统采用水冷式的朗肯循环即 1—2—3—4—5—6—1,由于水泵功耗远小于汽轮机所做出的功,所以  $T-S$  图上 3 和 4 几乎重合。

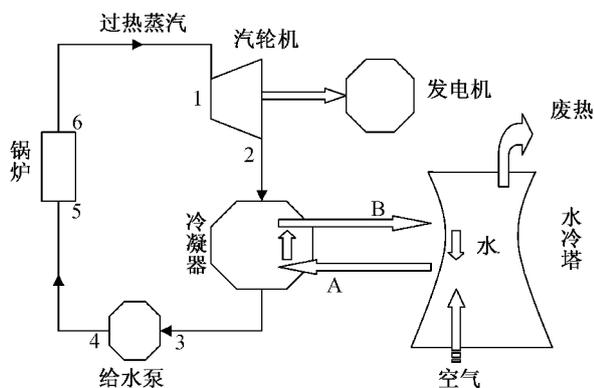


图 1 火电厂水循环与热力系统示意图  
Fig. 1 Hydrologic cycle and thermo-system in power plants

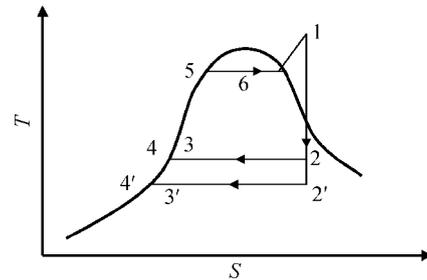


图 2 朗肯循环 ( $T-S$ ) 示意图  
Fig. 2 Rankine cycle ( $T-S$ )

1 和 2 的高度差,代表蒸汽的做功能力和汽轮机的发电能力。采用空气涡流导引装置技术后,朗肯循环曲线改为 1—2'—3'—4'—5—6—1。这一新技术使冷凝水温度由 3 降低到 3',热机做功能力由 1—2 提高到 1—2'。

在这一热力循环过程中,乏汽的废热在凝汽器中传给了冷却水 A,使 A 温度升高,成为挟带废热的高温水 B。B 在冷却塔中与冷空气进行蒸发和对流换热,携带废热的空气从塔顶出口排入大气。在冷却塔内经过冷却水为低温冷却水 A,它由水泵送回凝汽器,循环使用,继续冷却乏汽。冷却塔内水被蒸发,占了火电厂耗水量中很高的比例。显然,冷却水 A 的温度越低,其冷却乏汽 2 的能力越强,相应冷凝水 3 的温度也就越低。空气涡流导引装置技术正是改进了水冷塔的冷却能力,使得空气能带走冷却水较多热量,由此降低了冷却水 A 的温度,因而达到了提高发电能力,节约能源的目的。

由冷却塔的工作原理和运行机理可知,塔内各种装置工作性能的好坏,固然影响到冷却塔的换热效率,但冷空气由于受外界影响在塔内形成滚动涡甚至在换热层产生倒流,也是影响换热效率的一个重要因素。冷却塔内蒸发冷却和对流换热效力取决于多种因素:被吸入冷却塔内的冷空气质量流量、冷凝式汽轮机的凝器中流出的循环热水、环境温度、周围空气的相对湿度、风速沿冷却塔高度方向上的分布和冷却塔的高度等<sup>[7]</sup>。

采用空气涡流导引装置技术可以减免冷空气形成滚动涡甚至在换热层产生倒流,使冷空气在填料换热层面上尽量均匀地穿透,使换热层处处都能起换热作用。

本文描述的数值实验是针对一座具体的冷却塔,假定来流气温一定,考虑侧风吹来所起的影响以及涡流导流板的作用。计算时考虑了大气边界层。

## 2 冷却塔的典型模型和运作参数

需要冷却的高温水 B, 由淋水系统喷洒到填料层中, 以提高水与空气有效接触面积<sup>[8]</sup>。由于一般从塔底进入的环境空气湿度并不饱和, 它除了吸热以外尚能汽化部分冷却水成为空气水分而在塔内随气流上升从塔顶溢出<sup>[9]</sup>, 如图 3 所示。

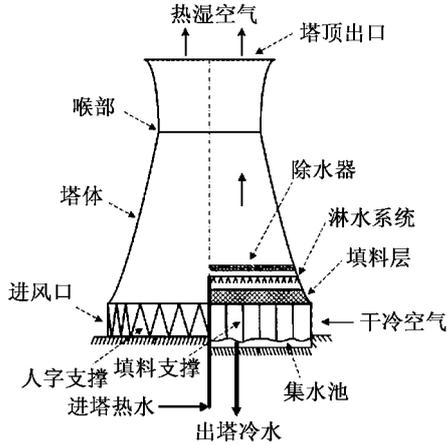


图 3 冷却塔示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 3 Structure of cooling tower<sup>[10]</sup>

数值模拟试验中采用的冷却塔高度为 123 m, 进风口高度 8.13 m, 塔顶半径 27.084 m, 喉部半径 25.244 m, 填料中部半径 41.841 m, 进风口中部半径 43.304 m, 底部半径 44.628 m, 塔筒有效高度 116.402 m, 冷却水量 36594.246 t/h, 标准状况下进出塔水温差 10°左右, 外来空气相对湿度为 0.73。这一工况和环境数据选自某电厂<sup>①</sup>。

## 3 数值模拟

### 3.1 试算方法和假定

仿真计算的工况针对容易出现“险情”的夏季选择。环境温度为 301.55 K, 环境风速分别设为 1, 3 和 5 m/s, 进塔高温水 B 的温度为 313.5 K。

计算采用 FLUENT CFD 通用软件, 不可压缩流动  $k-\varepsilon$  湍流模式, Boussinesq 热对流假定。Fluent 有计算换热的专用模块, 它将填料层设置成有阻力的多孔介质, 我们将其简化为 4 个薄层: 3 层填料层和 1 层漏水回收层, 如图 4 所示。

同时做如下假定: 由于水的蒸发量小于 5%, 在传热计算中假定水流量不变, 水中传出的热量由以下公式<sup>[11]</sup>决定:

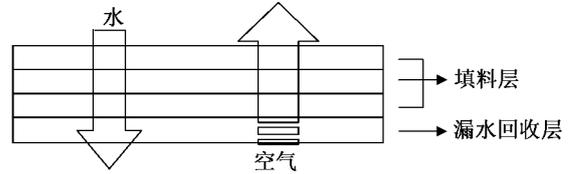


图 4 填料层简化示意图

Fig. 4 Diagram of stuffing layer

$$dQ_w = (\alpha^* (T_w - T_a) + \frac{\alpha^*}{C_{pma}} (\zeta_s - \zeta_a) \Delta h_{ev} (T_w)) dV.$$

水分在填料层内的蒸发潜热部分可以热源形式加入, 为

$$\frac{\alpha^*}{C_{pma}} (\zeta_s - \zeta_a) \Delta h_{ev} (T_w).$$

应用这一模块时其中的阻力系数和转热系数必须根据换热层中所用的具体组件来定, 它们可由组件生产商提供, 也可以单独做试验来测定。在此根据工程中的设计参数<sup>①</sup>反演, 即要求选定的系数算出的冷塔空气流量和冷却水排热量在无风时与设计参数相同, 然后利用这一对系数来计算有侧风的工况。

### 3.2 控制方程

控制方程分别为连续性方程、动量方程和能量方程。采用  $k-\varepsilon$  湍流模式使方程封闭, 同时采用 Boussinesq 假定计算浮力。控制方程如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \sigma_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho - \rho_0) g, \quad (2)$$

其中  $u_i$  为速度,  $\rho$  为当地气体密度,  $\rho_0$  为环境气体密度,  $p$  为静压,  $g$  为重力加速度,  $\sigma_{ij}$  为应力张量<sup>[12]</sup>。

填料层以外的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \sigma_{ij} u_j \right). \quad (3)$$

在填料层内, 由于填料层很薄, 可以假定每一层内的水是等温的。根据假定, 将此薄层内能量方程中增加源项

$$q = \frac{\alpha^*}{C_{pma}} (\zeta_s - \zeta_a) \Delta h_{ev} (T_w).$$

因此, 填料层内能量方程为

① 山东电力工程咨询院为河津发电机组冷却塔所做的设计参数。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [ u_i (\rho E + p) ] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} + \sigma_{ij} u_j \right) + \frac{\alpha^*}{c_{pma}} (\zeta_s - \zeta_a) \Delta h_{ev} (T_w), \quad (4)$$

其中  $T$  为绝对温度,  $\lambda$  为热传导系数,  $\alpha^*$  为单位体积内热传导系数,  $C_{pma}$  为湿空气的定压比热,  $\zeta_s$  为特定温度下空气的饱和湿度,  $\zeta_a$  为空气湿度,  $\Delta h_{ev}$  为蒸发潜热<sup>[11]</sup>,

$$E = C_p T + u^2 / 2, \quad (5)$$

其中  $C_p$  为定压比热。

求解方程组时,浮力项采用 Boussinesq 假定:

$$(\rho - \rho_0) g = -\rho_0 \beta (T - T_0) g, \quad (6)$$

其中  $\beta$  为热膨胀系数<sup>[13]</sup>。

### 3.3 边界条件

速度进口采用大气边界层剖面分布公式。大气边界层剖面分布公式为

$$\frac{u_i}{u_\infty} = \left( \frac{Z_i}{Z_\infty} \right)^\alpha, \quad (7)$$

其中  $Z_\infty$  为气流达到均匀流时的高度,  $Z_i$  为计算点的高度,  $u_\infty$  为  $Z_\infty$  处均匀来流速度, 在本实验中环境风速指的就是  $u_\infty$  的大小,  $\alpha$  为地面粗糙度。

### 3.4 网格

采用空气涡流导流装置技术的模型中,增加的导流板叶片数目为 40,形状为长方形,高度与进风口高度持平,宽度为 5 m,均布于进风口周边。导流板安装与塔筒半径成 30°。模型如图 5 所示,全结构化网格、六面体单元,局部加密,单元数量总计 29 万。

## 4 试算结果与分析

### 4.1 数值模拟试验的结果

计算结果表明,导流板的安装,使得相同工况下,冷却塔内的空气流量显著增加,从而使得换热更多,冷却效果更佳。表 1 给出了改善前后冷却塔出水温度。从表 1 可以看到,导流板安装后,不同工况下出水温度降低了 0.03°~2.54°。从表 1 还可以看到一个规律:改善前,随着环境风速的提高,冷却塔效能降低,出水温度逐渐增加;改善后,环境风速为 5 m/s 时的出水温度低于 3 m/s 时的情况。这说明改善后冷却塔的效能受来流风速的影响相对减小。

表 2 给出了不同工况下,塔内空气质量流量的对比。从表 2 可以看到,除了无风情况下,改善后的空气流量略有降低外,其他工况下,冷却塔内通风量改善后都有显著提升。可以说,塔内空气流量的增加,是冷却塔提高换热效率,出水温度降低的直接原因。

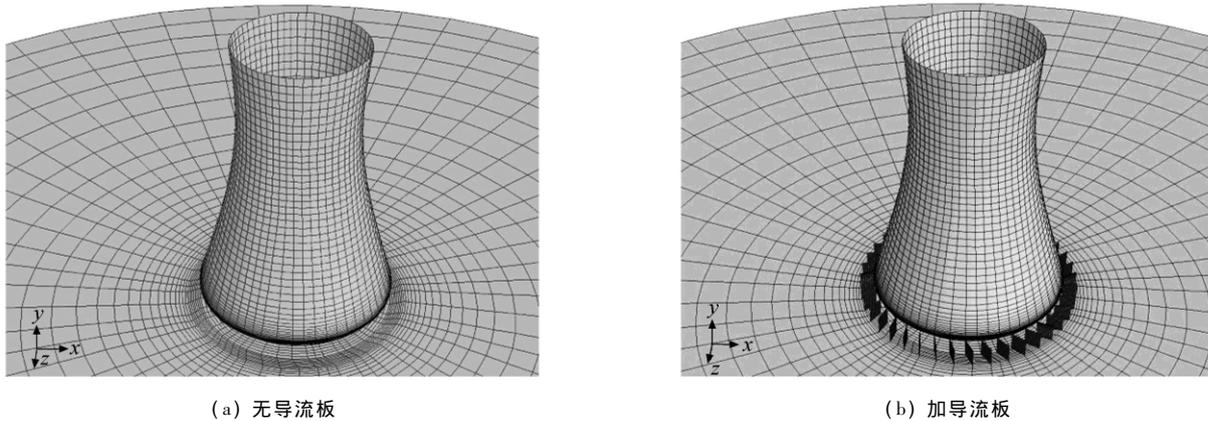


图 5 加导流板前后的模型

Fig. 5 Cooling tower without and with flow conduct boards

表 1 不同工况下,改善前后冷却塔出水温度对比  
Table 1 Comparison of hydrologic temperature between before and after improving conditions

改善前后	冷却后水的温度/K			
	无风	来流风速 1 m/s	来流风速 3 m/s	来流风速 5 m/s
改善前	304.43	306.38	307.83	308.86
改善后	304.40	305.71	307.53	306.32
改善后降温	0.03	0.67	0.30	2.54

表 2 不同工况下,改善前后冷却塔顶空气流量对比  
Table 2 Comparison of mass flow rate in tower top between before and after improving conditions

改善前后	冷却塔通风量/(kg·s <sup>-1</sup> )			
	无风	来流风速 1 m/s	来流风速 3 m/s	来流风速 5 m/s
改善前	4962.29	3809.76	2327.55	1218.29
改善后	4905.06	4058.39	2626.33	2726.53

## 4.2 结果分析

空气流量和填料层内垂向速度提升的最根本原因是冷却塔安装涡流导引装置后,在冷却塔内部形成了稳定的旋转上升气流,见流线图(图6)。图6为改善前后,环境风速为5 m/s时,冷却塔底,距填料层底部2 m处的流线图。未加导流板时,迎风侧是塔内进风量的主要来源。而安装导流板之后,冷却塔背对来流的一侧,也有很大一部分气流进入冷却塔底部,增加了进气量。对应于表2,就是流量提高的原因。

从图6还可以看到,改造加装导流板后,气流在填料层底部不再是改造前的平行流动,导流板改变了气流的流向,产生空气流的正切扭转。

涡流导引装置安装后,空气流较为均匀地穿透填料层,扩大了空气流与冷却水作用的途径,增加空气流与喷雾冷却水接触的时间,降低了空气流的不

均匀分配,减少了停滞和倒流的区域。取与来流方向平行并通过冷却塔轴线的平面作流线图(图7),图7中来流方向从左至右,从图中可以看到,来流风速为5 m/s时,改造前填料层上方有明显的大区域滞留涡,横向气流较多;经改造后,滞留区明显减少,横向气流减少,而上升气流所占据的区域增加,大大改善了换热环境。从图6(b)可以看到,正是由于导流板将下游的一部分流体从水冷塔被风侧卷入,从而使得滞留涡区向上游移动,从而减少了滞留涡区。

在水冷塔内部,取沿来流方向,通过水冷塔轴线的平面。在此平面内作出温度等值线和垂向速度等值线图,如图8和9,图中来流方向从右至左。导流板的安装使得温度和速度分布更加均匀,而且塔内温度更高。说明填料层各个部分得到充分利用,因而换热更加有效。

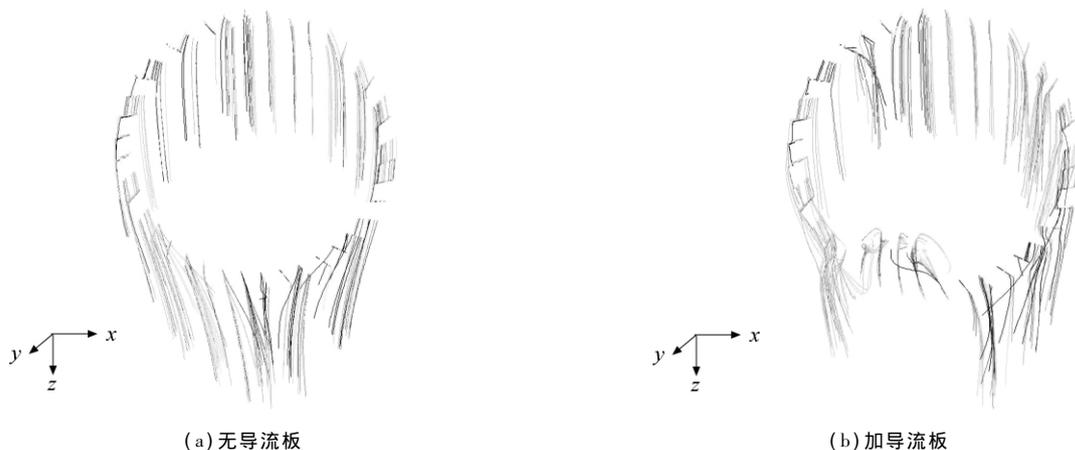


图6 导流板安装前后填料层底部的流线

Fig. 6 Streamline under stuffing layer for the condition without and with flow conduct boards

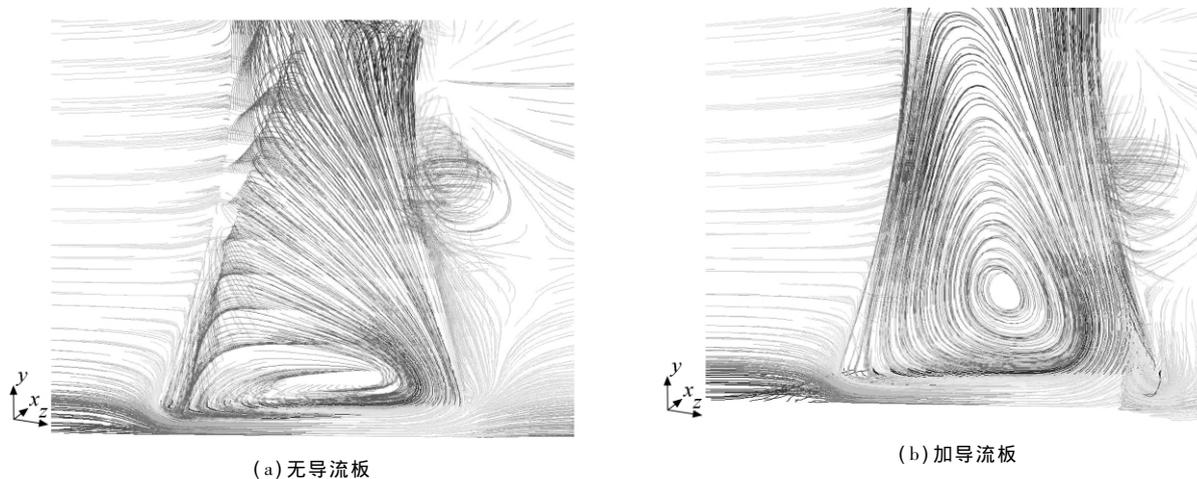


图7 导流板安装前后塔内的流线

Fig. 7 Streamline in tower for the condition without and with flow conduct boards

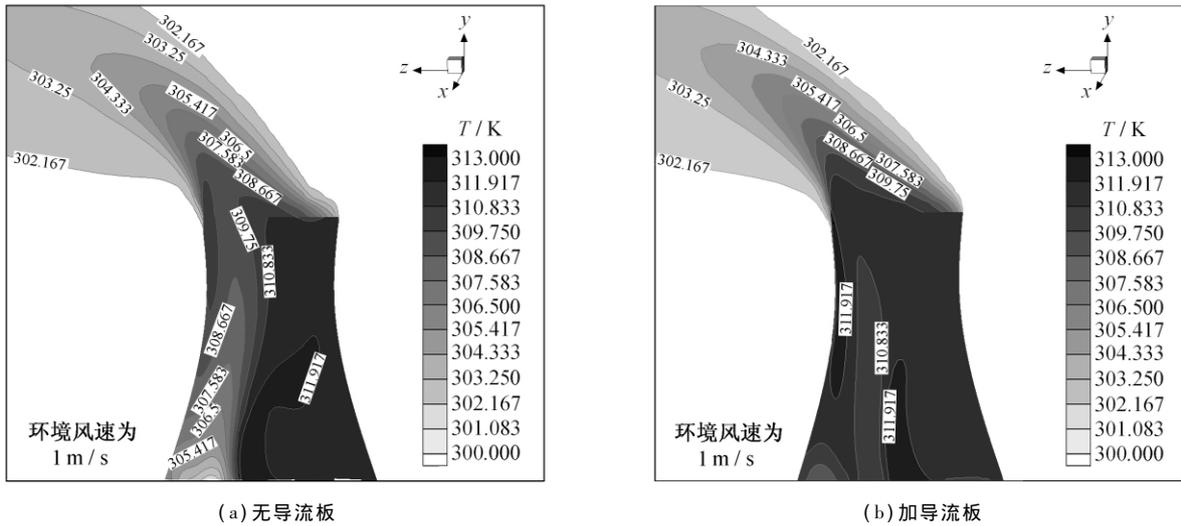


图 8 导流板安装前后塔内温度等值线

Fig. 8 Temperature contour in tower for the condition without and with flow conduct boards

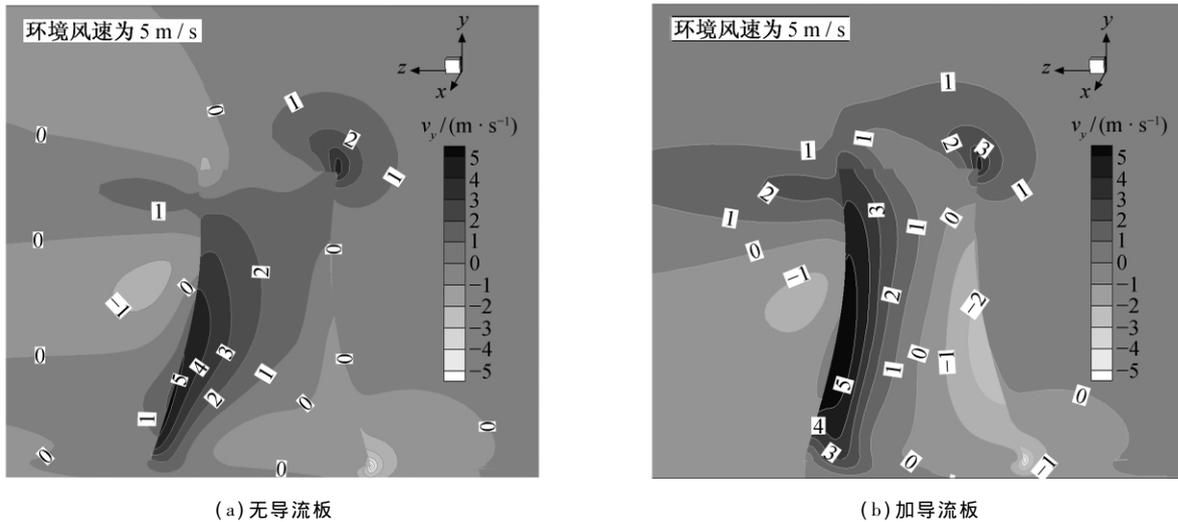


图 9 导流板安装前后塔内垂向速度等值线

Fig. 9 Velocity in y direction contour in tower for the condition without and with flow conduct boards

从图 9 可见,改造后冷却塔内垂向高速流动所占区域更多,因而换热效率更高。由以上流线图和温度等势图,可以看到环境侧风会使冷却塔内上升气流分布不均匀,这对热交换层的利用率降低,导流板的作用正是在于消除这种不利因素。

1) 加装导流板后,塔外冷空气在导流板的作用下,更多气流从下游涌入塔内,减小了滞留涡区,使得塔内通风条件变好,气流量增加。

2) 填料层上空气的温度和速度分布不均匀现象得到改善,塔内换热更均匀。

3) 在环境风速较大的情况下,导流板使更多的气流垂直向上运动,保证了换热的有效性。

因而,导流板对加强换热和降低冷却水温度,起到了积极的作用。

## 5 结论

加装涡流导流装置后,导流板所形成的旋转剪切流增加了水气之间的对流换热,出塔水温有比较明显的下降,不同的工况的降温幅度从 $0.03^{\circ}\text{C}$ 至 $2.5^{\circ}\text{C}$ 以上。总体来讲,涡流导流装置起到了正面的作用,冷却塔的换热效率得到了提高。

冷却塔空气涡流导流装置,具有投资少,见效快,节能效果明显的特点。实践表明,安装冷却塔空气涡流导流装置的周期约为 6 个月,期间无需电站

停产,投资回收期约为 3~4 个季度。

本文研究对象包含水汽两相以及其间相变的复杂流体热传导问题。文中根据冷却塔内蒸汽含量总是饱和这一实测结果进行简化,使计算可按单相流动进行。简化计算与复杂的全面计算所得结论是相同的,而计算工作量却可减少一半。这里需要指出,在此次算例中,风速为 3 m/s 时的增效反不如 1 m/s。这可能与局部脉动的周期与导流板数之间耦合有关,这尚需专门研究,但对降温仍然有效是事实。

总之,空气涡流导流装置可使发电机组运行发电功率明显地提高,值得进行推广。

致谢 对模型选取、换热模块采用以及结果的校核等各方面得到陈耀松、詹杰民以及樊春诸位师长的指导,在此表示感谢。

#### 参考文献

- [1] 李晓芸,张华,席兵. 火电厂用水与节水技术. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- [2] 万文军,周克毅,胥建群. 火电厂优化技术发展趋势. 中国电力, 2003, 36(7): 44-47
- [3] 郝艳红. 火电厂环境保护. 北京: 中国电力出版社, 2008
- [4] 刘乃玲,陈伟,邵东岳,等. 闭式冷却塔的结构优化. 工业用水与废水, 2007, 38(4): 114-117
- [5] 董庆辉. 火电厂冷却塔结构缺陷与优化设计. 河北电力技术, 1997, 16(4): 35-39
- [6] 赵康雄. 自然通风冷却塔的空气动力涡流调节装置: 中国, F28F25/00. 2007-07-25
- [7] Kröger D G. Air-cooled heat exchangers and cooling towers: thermal-flow performance evaluation and design. Tulsa: Penn Well Corporation, 2004
- [8] 毕庆生,郭鹏,曲志强. 火电厂冷却塔存在的问题及主要对策. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2003, 4(1): 50-52
- [9] 火(核)电站冷却塔空气动力涡流技术 [EB/OL]. (2006-09-11) [2008-11-10]. <http://www.eptchina.cn/html/tech/2006-9/11/0691215540674517.html>
- [10] Al-Waked R, Behnia M. CFD simulation of wet cooling towers. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4): 382-395
- [11] Milosavljevic N. A comprehensive approach to cooling tower design. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(9): 899-915
- [12] Wilcox D C. Turbulence modeling for CFD. La Canada: DCW Industries, 2000
- [13] 陶文铨. 传热学. 西安: 西北工业大学出版社, 2006