

侧风条件下带消能导流装置的直接空冷岛 冬季冻结风险模拟研究

陈鹏¹, 李高潮², 吕国东³, 师进文⁴

(1. 国网能源哈密煤电有限公司, 新疆 哈密 839099; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 国家电投集团山西铝业有限公司, 山西 忻州 034100; 4. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:哈密某电厂在其空冷岛中使用了一种新型消能导流装置来抵抗侧风影响、稳定机组背压。然而,该电厂冬季空冷单元散热管束冻结的情况依然存在。为了探究该装置对空冷岛冬季防冻的影响,利用 Fluent 软件对该电厂冬季大风时空冷岛的流动传热特性及各空冷单元的冻结风险进行了模拟研究。研究表明:空冷岛“消能导流装置”整体上空冷单元的防冻起负面作用;在冬季大风条件下该装置迎风侧空冷单元的散热量平均超出警戒值27%以上,最高达到50%;消能导流装置主要通过提升轴流风机空气流速来增加对应空冷单元的换热量,该装置迎风侧空冷单元轴流风机的轴向空气流速甚至能达到与环境侧风相同的水平,这导致对应空冷单元换热量激增,更容易出现冻结事故;大风条件下该装置在空冷岛下方形成的高压区域分布并不均匀,临近主厂房与相邻空冷岛一侧的高压区域压力更高、面积更大,这些区域空冷单元的冻结风险更高。

关键词:空冷岛;消能导流装置;流动传热特性;冬季冻结风险;模拟研究

中图分类号:TK121

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.06.015

[引用本文格式]陈鹏,李高潮,吕国东,等.侧风条件下带消能导流装置的直接空冷岛冬季冻结风险模拟研究[J].热能动力工程,2022,37(6):105-113. CHEN Peng, Li Gao-chao, LYU Guo-dong, et al. Simulation study on winter freezing risk of direct air-cooling island with energy dissipation diversion device under crosswind condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6):105-113.

Simulation Study on Winter Freezing Risk of Direct Air-cooling Island with Energy Dissipation Diversion Device under Crosswind Condition

CHEN Peng¹, LI Gao-chao², LYU Guo-dong³, SHI Jin-wen⁴

(1. State Grid Energy Hami Coal Power Co., Ltd, Hami, China, Post Code: 839099; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an, China, Post Code: 710054; 3. SPIC Shanxi Aluminium Co., Ltd, Xinzhou, China, Post Code: 034100; 4. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: Hami power plant used a new type of "energy dissipation diversion device" in its air-cooling island to resist the crosswind influence and stabilize unit back pressure. However, the cooling tube bundle in the air-cooling unit of the power plant still froze in winter. In order to explore the effect of the device on the anti-freezing of the air-cooling island in winter, the simulation research on the flow and heat transfer characteristics of air-cooling island and the freezing risk of each air-cooling unit under the winter gale condition was carried out by using the Fluent software. The research result shows that the "energy dissipation diversion device" of air-cooling island has a negative effect on anti-freezing of air-cooling unit inte-

收稿日期:2021-12-22; 修订日期:2022-01-01

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1505403)

Fund-supported Project: National Key Research and Development Program of China(2019YFB1505403)

作者简介:陈鹏(1976-),男,辽宁葫芦岛人,神华国能哈密电厂总工程师。

通讯作者:师进文(1981-),男,四川南充人,西安交通大学副教授。

grally. Under the winter gale condition, the heat dissipation of the air-cooling units on the windward side of the device is about 27% higher than the warning value on average, with the maximum value of more than 50%. The "energy dissipation diversion device" mainly increases the heat transfer of the corresponding air-cooling unit by increasing the air velocity of the axial flow fan. The axial air velocity of the axial flow fan in the air-cooling units at the windward side of the device can even reach to the same level as the ambient crosswind, which leads to a surge of the heat exchange of corresponding air-cooling units, and makes it easier to be frozen. Under the strong wind conditions, the high-pressure area formed by the device under the air-cooling island is not evenly distributed. The high-pressure area near the main plant and adjacent air-cooling island has higher pressure and larger area, and the air-cooling units in these areas have higher freezing risk.

Key words: air-cooling island, energy dissipation diversion device, flow and heat transfer characteristics, winter freezing risk, simulation research

引 言

直接空冷系统是目前北方火电机组使用最广泛的冷端系统之一,相对于南方普遍使用的水冷系统,直接空冷系统具有节约水资源、系统结构简单及成本较低等优势^[1-2]。然而北方冬季气温极低,且北方的火电机组在冬季需要承担供热任务,并参与电网的深度调峰^[3-4]。极低的气温加上较低的乏汽出口流量,导致这些机组的直接空冷系统极易出现散热管束冻结事故。所以,为了评估和改善北方火电机组冬季运行的安全性与稳定性,需要对直接空冷系统的流动传热特性与冬季防冻情况进行研究。

直接空冷系统的主要散热设备是由大量空冷单元组成的直接空冷岛(以下简称“空冷岛”)^[5]。由于空冷岛及其中的散热管束直接暴露在大气中,所以环境侧风对空冷岛有较大的影响。环境侧风主要对空冷岛内部轴流风机的工作状况产生干扰,进而影响空冷岛整体的换热性能^[6-8]。所以,国内外学者通过在空冷岛及其轴流风机附近增加挡风墙、防风网和导流板等装置来削弱环境侧风对空冷岛的不利影响^[9-13]。在低温大风天气时,直接空冷系统的稳定性会大大降低,凝结水冻结的风险时刻存在。目前,国内外学者已经针对典型空冷岛的冬季运行情况进行了相关研究^[14-15],一些行之有效的防冻措施也被用于缓解空冷岛散热管束的冻结情况。如增加机组启动阶段蒸汽流量^[16]、降低机组运行背压^[17]和调整防冻运行逻辑^[18]等。

在此背景下,哈密某电厂在典型带挡风墙的空冷岛的基础上,将一种“消能导流装置”安装在空冷岛下方,用于抵抗侧风影响,稳定机组背压^[19]。然而,该电厂冬季空冷岛散热管束的冻结情况依然存在。本文对哈密某电厂带有“消能导流装置”的空冷岛进行模拟研究,分析冬季侧风条件下该装置存在时空冷岛附近的流场、风机运行以及不同空冷单元的冻结风险情况。

1 数值模型与网格

1.1 目标系统与几何模型

哈密某电厂每台机组主汽轮机采用直接空冷凝汽器,汽轮机末级排出的蒸汽被直接送入空冷岛各冷却单元的散热管束中。在此过程中,散热管束内部的蒸汽与外侧的空气直接进行换热,不需要间接冷却,十分节省水资源;并且由于蒸汽凝结时温度不变,换热时可以保持较大的温差^[20]。

由于实际空冷岛的结构较为复杂,所以在数值计算之前需要进行一定的简化:(1)将散热管束简化为无厚度面,其参数用阻力系数与传热系数表示,然后使用 Fluent 中的散热器(Radiator)模型来模拟散热管束;(2)将轴流风机简化为无厚度面,其参数用风机工作静压来表示,然后使用 Fluent 中的风扇(Fan)模型来模拟每个空冷单元下方的轴流风机;(3)将空冷岛下方十字交叉的消能导流装置简化为长方形薄板,其参数为阻力系数,然后使用 Fluent 中的多孔介质(Porous Zone)模型来模拟消能导流装置。简化后的空冷岛模型如图 1 所示。

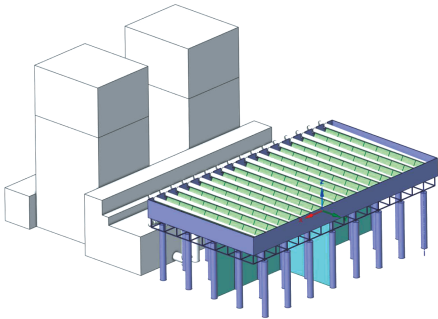


图 1 空冷岛模型
Fig.1 Model of air-cooling island

1.2 网格划分

计算区域尺寸为 1 km×1 km×0.6 km(东风)、1 km×0.6 km×0.6 km(北风),并使用 Fluent Meshing 软件进行网格划分,如图 2 所示。由于计算区域较大,并且可以预见在空冷岛附近的流动传热特性波动最大,所以对计算区域使用非均匀非结构化网格进行划分,即越靠近计算域边界的网格越稀疏、越靠近空冷塔的网格越密集。网格无关性验证结果如表 1 所示。可以看到,在网格数目达到 800 万之后,空冷岛的总换热量趋于平稳,所以 800 万的网格数目是比较合理的。最终划分完成的计算区域网格数为 800 万。

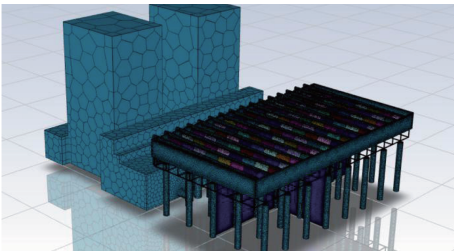


图 2 空冷岛网格
Fig.2 Mesh of air-cooling island

表 1 网格无关性验证结果

Tab.1 Results of mesh independence verification

网格数目/万	总换热量/W
100	1.573×10^9
146	1.591×10^9
275	1.523×10^9
530	1.498×10^9
800	1.492×10^9
900	1.492×10^9

1.3 数值模型

对于空气流动传热过程,需要进行求解计算的方程有质量方程、动量方程与能量方程,其一般形式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \vec{U}) = \text{div}(\mu \text{grad}(u_i)) + S_{u_i} \\ \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \vec{U}) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad}(T)\right) + S_T \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ —密度, kg/m³; t —时间, s; $\vec{U}$ —速度向量; u_i —速度分量, m/s; μ —动力粘度, Pa·s; T —温度, K; λ —导热系数, W/(m·K); c_p —定压比热容, J/(kg·K); S_{u_i} —不同方程对应的动量源项; S_T —能量方程中的源项。

空冷岛换热过程为稳态过程。在计算中散热器的换热过程用 Fluent 中的散热器模型(Radiator)来模拟,轴流风机用风扇(Fan)边界条件来模拟,消能导流装置用多孔介质(Porous Zone)模型来模拟。

求解上述方程所使用的方法是基于有限体积法的 SIMPLEC(压力-速度耦合)方法。其中动量、能量方程的离散方法均采用二阶迎风离散方法。对于空冷岛中的空气湍流流动,选用 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型进行描述。

1.4 边界条件

分别计算环境侧风风向为东风与北风时空冷岛的运行情况。当风向为东风时,边界条件如图 3 所示;当风向为北风时,边界条件如图 4 所示。北风条件下采用对称边界是因为目标电厂有两个空冷岛,沿东西方向相邻布置。在北风条件下,两个空冷岛的流场会互相影响,所以需要设置对称边界条件来模拟其流场的相互作用;而在东风条件下,其中一个空冷岛在另一个空冷岛的下风向,很难对处于上风向的空冷岛的流场产生影响,且处在上风向的空冷岛具有更高的冻结风险,此时只需考虑单个空冷岛的流场、温度场分布。

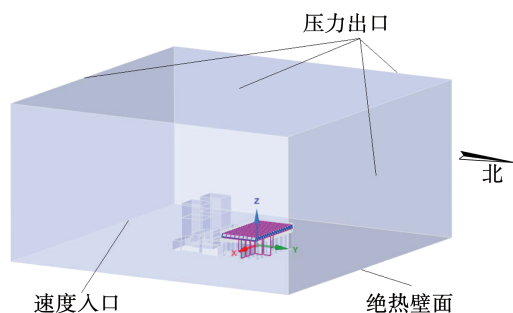


图3 东风情况下的边界条件

Fig. 3 Boundary condition under east wind

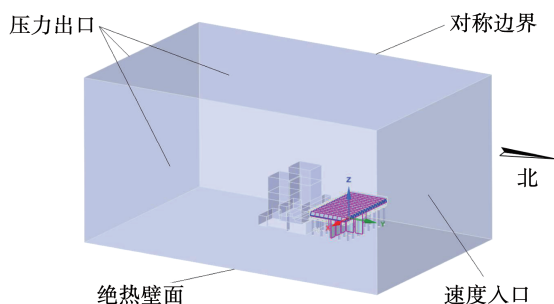


图4 北风情况下的边界条件

Fig. 4 Boundary condition under north wind

速度入口边界条件采用大气边界层函数式的形式,来模拟地面摩擦导致的竖直方向上的空气流速分布状态:

$$u = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\Delta \quad (2)$$

式中: z —高度,m; u — z m 高度处的空气流速,m/s; u_{10} —10 m 高度处的空气流速,m/s; Δ —地面粗糙度,取值 0.2^[21]。

1.5 等效模型

在建立空冷岛几何模型的过程中,为减少实际空冷岛的几何细节使进一步的模拟计算成为可能,空冷岛中的散热管束、轴流风机已经简化为无厚度面,消能导流装置已经简化为一系列长方形薄板。将这些部件的参数输入 Fluent 软件对应的模型中,完成将实际部件转化为等效模型的过程。

首先,用散热器模型来模拟空冷岛各空冷单元的散热管束。Fluent 中的散热器模型需要输入阻力系数、传热系数与传热温度这 3 个参数。散热管束参数由电厂提供的相关设计文件给出。阻力系数 k_L 的表达式为:

$$\begin{cases} k_L = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \\ k_L = \sum_{i=1}^n a_i v^{i-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_L —阻力系数; Δp —散热管束空气进出口压差,Pa; ρ —空气密度,kg/m³; v —空气流速,m/s; a_i —不同速度幂次项的常数系数。

传热系数 h 的表达式为:

$$\begin{cases} h = \frac{q}{(T_{\text{radi}} - T_{\text{air}})} \\ h = \sum_{j=1}^n b_j v^{j-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: h —传热系数,W/(m²·K); q —散热管模型的热流密度,W/m²; T_{radi} —散热器模型的平均换热温度,K; T_{air} —空气温度,K; b_j —不同速度幂次项的常数系数。

其次,使用风扇边界条件来模拟空冷岛各空冷单元下方安装的轴流风机。Fluent 软件中风扇边界需要输入风机的工作静压,其表达式如式 5 所示,式中各项的系数根据电厂提供的数据计算得出。

$$\Delta p_{\text{fan}} = \sum_{k=1}^n c_k v^{k-1} \quad (5)$$

式中: Δp_{fan} —风机工作静压,即风机运转时在风机平面处所产生的压力阶跃,Pa; v —通过风机平面的空气速度,m/s; c_k —不同速度幂次项的常数系数。

最后,使用 Porous Zone 多孔介质模型来模拟消能导流装置:

$$S_{u_i} = - \left(\frac{1}{\alpha_{u_i}} \mu v_{u_i} + C_{u_i} \frac{\rho |v| v_{u_i}}{2} \right) \quad (6)$$

式中: $\frac{1}{\alpha_{u_i}}$ —3 个速度分量方向上的粘性阻力系数,m⁻¹; μ —空气动力粘度,Pa·s; v_{u_i} —3 个方向的速度分量,m/s; C_{u_i} —3 个速度分量方向上的惯性阻力系数; ρ —空气密度,kg/m³; $|v|$ —总速度的绝对值,m/s。

消能导流装置的百叶窗都由金属波浪孔板制成,其几何特征将被转化为与 Porous Zone 区域表面法向的粘性与惯性阻力系数。模型中另外两个方向上的阻力系数设置为法向阻力系数的 1 000 倍,来模拟空气穿过“消能导流装置”时的方向变化。消能导流装置的百叶窗处于全闭状态,其相关参数由电

厂技术文件给出。

1.6 模型验证

为了验证上述模型的准确性,使用目标机组TMCR工况(汽轮机连续最大出力工况)的标准参数进行模拟计算,得到了空冷岛的总换热量。然后与机组设计文件中给出的TMCR工况标准总换热量进行对比。如表2所示,模拟结果与TMCR工况下的标准参数的相对误差仅为0.4%。说明本模型具有一定的准确性,模型验证成功。

表2 TMCR 工况总换热量标准值与计算结果对比
Tab.2 Comparison between standard value and calculated result of total heat transfer under TMCR condition

标准值/W	计算结果/W	误差/%
1.486×10^9	1.492×10^9	0.4

2 计算结果与分析

计算冬季大风条件下带有消能导流装置的空冷岛的流动传热特性以及各空冷单元的冻结风险。输入模型的边界参数如表3所示。其中,输入空冷岛的蒸汽压力(即汽轮机工作背压)为13 kPa,由该电厂提供的热力系统图确定。空冷单元散热器模型的平均换热温度为51℃,即13 kPa下水蒸气的饱和温度。目标电厂全年主导风向为东风,且空冷岛的南方为主厂房,可以对南风起到一定的阻挡作用。所以选择东风与北风条件进行计算。风向以及空冷岛各空冷单元的编号如图5所示。

表3 输入模型的边界参数
Tab.3 Boundary parameters input to the model

气温/℃	环境风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	换热温度/℃
-10	20	51

2.1 流动传热特性分析

2.1.1 东风条件

当风向为东风时,第3行空冷单元处的竖直剖面温度云图如图6所示。空冷岛第8~16列的空冷单元换热情况正常,而第3~7列空冷单元上方的空气温度过低。这是因为环境侧风撞击“消能导流装置”,在第3~7列空冷单元的下方形成一个高压区域,如图7所示。这相当于间接增加了该区域轴流风机的工作静压,进而导致通过轴流风机的空气流

速上升、流量增加,如图8所示。

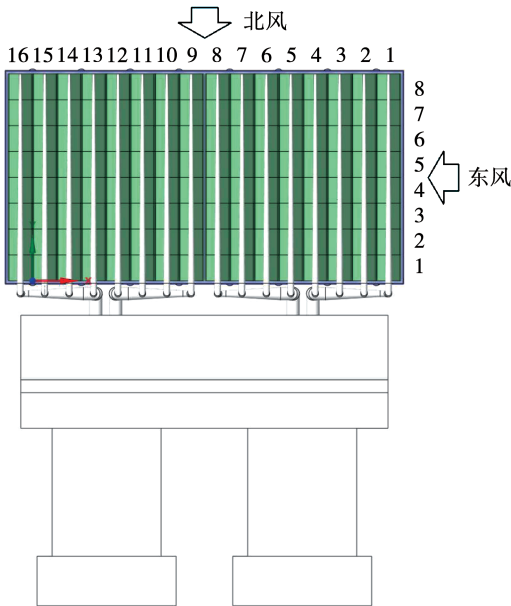


图5 风向及空冷单元编号
Fig.5 Wind direction and air-cooling unit number

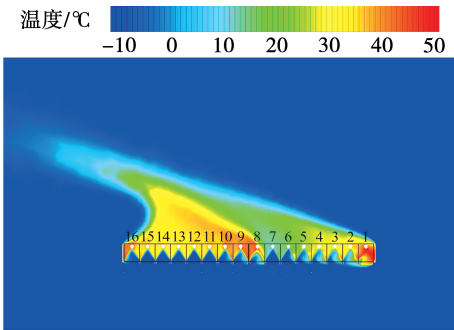


图6 第3行空冷单元竖直剖面温度云图
Fig.6 Vertical profile temperature contour at the 3rd line of air-cooling units

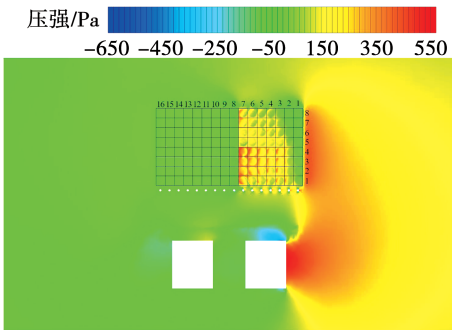


图7 空冷岛下方1.5 m处的压力云图
Fig.7 Pressure contour at 1.5 m below air-cooling island

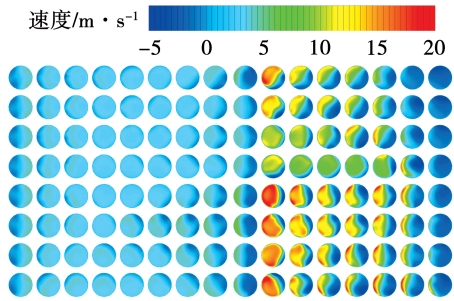


图 8 各空冷单元轴流风机竖直方向空气流速云图
Fig.8 Vertical air velocity contour of axial fan
in each air-cooling unit

在图 8 中可以看到,第 3 ~ 7 列空冷单元的轴流风机的空气流速最高达到了 20 m/s 左右,远远超出其正常工作时的空气流速。同时,在第 3 ~ 7 列空冷单元中,靠近主厂房一侧空冷单元的轴流风机空气流速更高。这是因为消能导流装置呈十字交叉状布置在空冷岛下方,东南侧的“消能导流装置”与主厂房同时对环境风起阻挡作用,进而在该区域形成了压力更高的区域,其上方轴流风机的空气流速也变得更高。

图 9 为各冷却单元散热管束附近的空气温度分布。可以看到,第 1 列散热单元附近空气温度非常高,这是空冷岛挡风墙影响的结果。同时,第 3 ~ 7 列空冷单元的散热管束附近出现了空气温度极低的区域,这与图 8 中轴流风机空气流速增加的区域相吻合。这说明消能导流装置在环境侧风下会使其迎风侧空冷单元的轴流风机空气流量增加,进而更加迅速地带走相应空冷单元内水蒸气的热量。

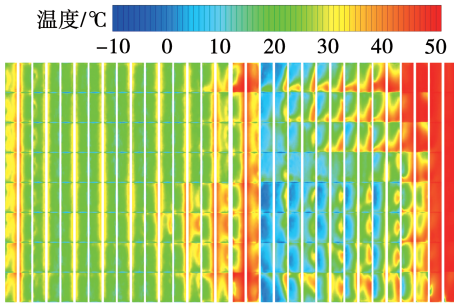


图 9 各冷却单元散热管束附近的空气温度分布云图
Fig.9 Contour of air temperature distribution near the
heat dissipation tube bundle of each air-cooling unit

2.1.2 北风条件

当风向为北风时,其竖直剖面上温度云图分布特点与风向为东风时大致相同,第 5 ~ 7 行空冷单元上方的空气温度相较于其余区域低了很多,如图 10 所示。由图 11 和图 12 可知,该低温区域出现的原因也是环境侧风撞击在迎风侧消能导流装置上,并在空冷岛第 5,6,7 行空冷单元下方形成了一个高压区域。可以看到,高压区域上方轴流风机的空气流速最高也已经达到了 20 m/s。

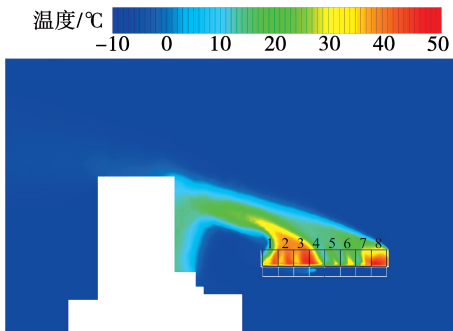


图 10 第 5 列空冷单元处竖直剖面温度云图
Fig.10 Vertical profile temperature contour
at the 5th line of air-cooling units

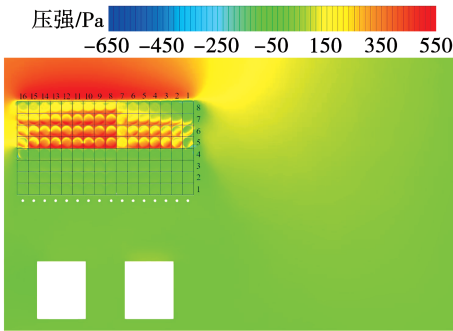


图 11 空冷岛下方 1.5 m 处的压力云图
Fig.11 Pressure contour at 1.5 m below
air-cooling island

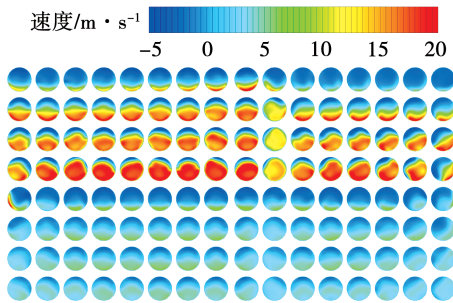


图 12 各空冷单元轴流风机竖直方向空气流速云图
Fig.12 Vertical air velocity contour of axial fan
in each air-cooling unit

图 13 中各空冷单元散热管束附近的低温空气区域也基本与轴流风机空气流速增大的区域重合,这进一步证明了消能导流装置在环境侧风下是通过增加轴流风机空气流量来影响空冷单元的换热过程。

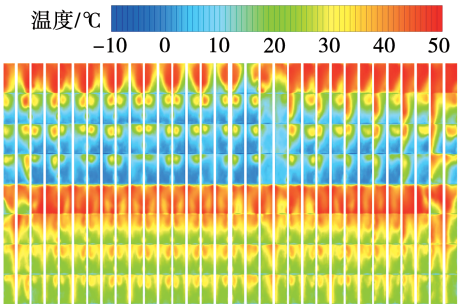


图 13 各冷却单元散热管束附近空气温度分布云图
Fig. 13 Contour of air temperature distribution near the heat dissipation tube bundle of each air-cooling unit

综上所述,在冬季大风天气下消能导流装置可以让该装置背风侧的空冷单元换热过程保持稳定。但是对于该装置迎风侧的空冷单元,越靠近消能导流装置,该空冷单元轴流风机的空气流量越大,进而导致其散热管束内蒸汽被加速冷却,这对于空冷单元的冬季防冻是十分不利的。同时,从两种风向条件下的压力云图中可以看到,消能导流装置迎风侧空冷单元下方的高压区域并不是均匀分布的,而是被十字交叉布置的消能导流装置分成了两块强弱程度不同的高压区域。这是因为,在东风时主厂房也会起到阻挡空气流动的作用,北风时相邻的空冷岛同时会阻挡空气的流动。这就表现为靠近主厂房以及相邻空冷岛的高压区域压力更高、范围更大。

2.2 冻结风险

由于北方火电机组冬季需要承担供热任务,所以按照机组电负荷为 50% 来进行冻结风险的计算。将各空冷单元散热量超出警戒线的百分比定义冻结风险 P_{ct} :

$$P_{ct} = \left(\frac{Q_{unit}}{\dot{m}_v (0.5\gamma + c_p (T_{sat} - T'))} - 1 \right) \times 100\%$$

(7)

式中: P_{ct} —散热量超出警戒线的百分比,%; Q_{unit} —

空冷单元散热量,W; $\dot{m}$ —空冷单元蒸汽流量,kg/s; γ —水的汽化潜热,J/kg; c_p —水的比定压热容,J/(kg·K); T_{sat} —水蒸气的凝结温度,K; T' —凝结水回水温度警戒值,K。

表 4 和表 5 是东风和北风条件下各空冷单元的冻结风险。依据电厂相关技术文档,当空冷岛凝结水回水温度低于 30℃,即认为有空冷单元冻结的风险。因此,式(7)中的凝结水回水温度警戒值设置为 $T' = 303.15$ K。结果表明,越靠近消能导流装置的空冷单元冻结风险越高,且主厂房与相邻空冷岛附近的空冷单元有着更高的冻结风险。在东风 20 m/s 风速条件下,临近消能导流装置迎风侧的空冷单元散热量最高,平均超出警戒值 27% 左右,最高达到了 41%;而北风时临近消能导流装置迎风侧的空冷单元散热量更高,平均超出警戒值 37% 左右,最高甚至达到了 50%。

总的来说,消能导流装置整体上不利于冬季空冷单元的防冻。虽然可以减轻该装置背风侧空冷单元受环境风的影响,但是在冬季大风条件下,该装置迎风侧空冷单元冻结的风险极高。建议在冬季大风条件下不要将消能导流装置的百叶窗完全关闭,应该合理调节其开度,防止空冷岛下方出现压力过高的区域,进而减少空冷单元因轴流风机空气流量过高导致的过度散热情况,降低其散热管束出现恶性冻结事故的几率。

表 4 东风条件下空冷单元冻结风险(%)
Tab.4 Freezing risk of air-cooling unit under east wind condition(%)

行	列				
	3	7	6	5	4
8	24	—	—	—	—
7	20	—	—	—	—
6	17	6.7	—	—	—
5	7.3	4.7	—	—	—
4	38	20	9.3	—	2.7
3	38	26	12	0.5	—
2	41	19	—	—	—
1	29	—	—	—	—

表 5 北风条件下空冷单元冻结风险(%)

Tab.5 Freezing risk of air cooling unit under north wind condition(%)

行	列														
	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
7	-	-	2.6	2.2	6.4	7.5	7.0	13	13	15					
6	8.7	9.2	24	17	22	26	23	32	26	26	6.4	12	13	10	7.3
5	14	33	46	40	45	43	42	50	44	34	28	41	40	33	29

3 结 论

(1) 空冷岛消能导流装置对空冷单元冬季防冻有着不利的影响,该装置迎风侧的空冷单元有着更高的冻结风险。在机组电负荷为 50%、环境温度 - 10 ℃ 及环境风速 20 m/s 的条件下,以散热量超出警戒线的百分比来衡量冻结风险,其迎风侧的冷却单元散热量平均超出警戒值 27% ~ 37%,最高甚至达到了 40% ~ 50%。

(2) 在冬季大风条件下,消能导流装置主要通过提升轴流风机的空气流速来增加空冷单元的散热量。在环境风速为 20 m/s 时,该装置迎风侧的空冷单元轴流风机的轴向空气流速最高也能够达到 20 m/s,这将使对应空冷单元的散热量激增,进而更容易出现冻结事故。

(3) 消能导流装置迎风侧的空冷单元的冻结风险分布并不均匀,由于附近的主厂房以及相邻空冷岛同时也会起到阻挡空气流动的作用,与其相邻的空冷单元有着更高的冻结风险。

参考文献:

[1] 刘 学,李国栋,张瑞颖,等. 环境风作用下小规模直接空冷系统流动传热性能分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021,48(6) :106 - 112.

LIU Xue,LI Guo-dong,ZHANG Rui-ying, et al. Analysis of flow and heat transfer performance of small-scale direct air-cooling system under ambient wind[J]. Journal of Chinese Society North China Electric Power University (Natural Science Edition),2021,48 (6) :106 - 112.

[2] 孔新博,罗智凌,冯鹏远,等. 环境风影响下直接空冷阵列入口空气流量特性实验研究[J]. 动力工程学报,2021,41(2) :

152 - 159,172.

KONG Xin-bo,LUO Zhi-ling,FENG Peng-yuan,et al. Experimental study on inlet air flow characteristics of direct air-cooling array under ambient wind[J]. Journal of Power Engineering,2021,41 (2) :152 - 159,172.

[3] 孙玉庆. 灵活性切缸供热空冷系统抽真空管道改造设计[J]. 电力勘测设计,2021(2) :41 - 45.

SUN Yu-qing. Retrofit design of vacuum pumping pipeline for flexible cylinder cutting heating and air-cooling system[J]. Electric Power Survey and Design,2021(2) :41 - 45.

[4] 陈 忠. 考虑电网深度调峰热电联产的直接空冷机组供热改造方案研究[J]. 真空科学与技术学报,2020,40(5) :490 - 494.

CHEN Zhong. Research on heating retrofitting scheme of direct air-cooling unit considering deep peak-modulating cogeneration of power grid[J]. Journal of Vacuum Science and Technology,2020,40(5) :490 - 494.

[5] 赵 旭. 空冷换热器中空气流量不均对流动和散热性能影响的研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.

ZHAO Xu. Effect of uneven air flow rate on flow and heat dissipation performance of air-cooling heat exchanger[D]. Beijing: North China Electric Power University,2016.

[6] OWEN M. A numerical investigation of air-cooled steam condenser performance under windy conditions[D]. Stellenbosch,South Africa: Stellenbosch University,2010.

[7] 高 沛,张学镭. 环境风对直接空冷凝汽器性能的影响及主导因素分析[J]. 中国电力,2013,46(11) :113 - 123.

GAO Pei,ZHANG Xue-lei. Influence of ambient wind on performance of direct air-cooling condenser and analysis of its leading factors[J]. China Electric Power,2013,46(11) :113 - 123.

[8] 张学镭,王梅梅,张耀祖,等. 直接空冷凝汽器加装导流叶栅的性能分析[J]. 电力科学与工程,2017,33(6) :60 - 66.

ZHANG Xue-lei,WANG Mei-mei,ZHANG Yao-zu,et al. Performance analysis of direct air-cooling condenser with guide cascade

- [J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33 (6): 60-66.
- [9] 丁常富,丁振宇,侯乃明,等. 直接空冷凝汽器加装防风网的数值模拟[J]. 动力工程学报,2009,29(10):956-966.
- DING Chang-fu, DING Zhen-yu, HOU Nai-ming, et al. Numerical simulation of installing windproof net in direct air-cooling condenser[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(10): 956-966.
- [10] ZHAO Wan-li, QU Qiu-lin, LI Qiu-yan. Numerical investigation on the flow field of an axial flow fan in a direct air-cooling condenser for a large power plant[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2013, 42(1): 60-72.
- [11] 高 沛,张学镭. 防风网改善环境风影响直接空冷凝汽器换热的数值研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(4):64-68.
- GAO Pei, ZHANG Xue-lei. Numerical study on heat transfer of direct air-cooling condenser under the influence of ambient wind[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(4):64-68.
- [12] 吴耀鹏,白国良. 直接空冷体系挡风墙体型系数研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(6):805-809.
- WU Yao-peng, BAI Guo-liang. Study on the shape coefficient of the direct air-cooling system[J]. Journal of Xi'an Architecture and Technology University (Natural Science Edition), 2014, 46(6): 805-809.
- [13] 田永兴. 1 000 MW 超超临界直接空冷机组防风网可行性研究[D]. 保定:华北电力大学, 2015.
- TIAN Yong-xing. Feasibility study on windproof network of 1 000 MW ultra-supercritical direct air-cooling unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [14] YANG Li-jun, ZHAO Xiao-li, DU Xiao-ze, et al. Heat load capability matching principle and its applications to anti-freezing of air-cooling condenser[J]. Applied Energy, 2014, 127(127): 34-43.
- [15] 侯 萱. 直接空冷机组防冻特性研究[D]. 北京:中国石油大学, 2019.
- HOU Xuan. Research on anti-freezing characteristics of direct air-cooling unit[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [16] 蒋晓明,张来平,陈全明. 直接空冷岛启动阶段冬季防冻措施优化[J]. 电力勘测设计, 2018(6):28-32.
- JIANG Xiao-ming, ZHANG Lai-ping, CHEN Quan-ming. Optimization of winter anti-freezing measures in start-up stage of direct air-cooling island[J]. Electric Power Survey and Design, 2018(6):28-32.
- [17] 石红晖,马庆中,曹蓉秀,等. 直接空冷机组超低背压运行技术[J]. 热能动力工程, 2020, 35(11):21-25.
- SHI Hong-hui, MA Qing-zhong, CAO Rong-xiu, et al. Ultra-low back pressure operation technology of direct air-cooling unit[J]. Journal of Thermal Energy and Power Engineering, 2020, 35(11): 21-25.
- [18] 陈 磊,侯一晨,王伟佳,等. 电站直接空冷系统防冻高效运行控制逻辑及数值模拟[J/OL]. 中国电机工程学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210920.0827.008.html>.
- CHEN Lei, HOU Yi-chen, WANG Wei-jia, et al. Control logic and numerical simulation of anti-freezing efficient operation of direct air-cooling system in power station[J]. Proceedings of the CSEE, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210920.0827.008.html>.
- [19] 杨金凤. 消能导流装置在空冷岛的应用[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(7):68-72.
- YANG Jin-feng. Application of energy dissipation diversion device in air-cooling island[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(7):68-72.
- [20] 张海丰,李天鹏,于 军. 空冷岛的热态冲洗及防冻措施[J]. 电站辅机, 2017, 38(3):29-31.
- ZHANG Hai-feng, LI Tian-peng, YU Jun. Thermal flushing and anti-freezing measures of air-cooling island[J]. Power Plant Auxiliary Machinery, 2017, 38(3):29-31.
- [21] 李 涛. 适应环境风场空冷单元导流装置结构优化的数值研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
- LI Tao. Numerical study on structural optimization of air-cooling unit diversion device adapted to environmental wind field[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

(丛 敏 编辑)