

电站空冷技术:研究现状及建议

师进文¹, 高凡翔¹, 邹洋², 薛杨波¹, 赵强强¹, 王子豪¹, 王永杰³, 王跃社¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安热工研究院有限公司, 710043, 西安; 3. 山东网源电力工程有限公司, 250118, 济南)

摘要: 空冷技术能够在电站冷端利用空气完成换热冷却, 相比湿冷技术在节水、降耗、减排及降本方面具有独特优势。从系统设计与运行优化的角度出发, 综述了直接空冷和间接空冷两大类空冷技术的研究进展。设计优化方面, 换热器(凝汽器和散热器)的流动换热特性已获得广泛研究, 相关优化一般从几何结构、位置布局等角度开展, 然而目前凝汽器研究对象多局限于翅片管, 针对管束整体的优化研究比较缺乏, 散热器研究则需更全面地考虑几何参数的影响等; 另外, 由于风机(群)直接决定凝汽器的进气流量, 其气动特性和集群效应研究成为重点, 目前已形成多种分区方法和运行控制策略实施调优, 但优化方案的经济性分析研究还有待深入。运行优化方面, 为了削弱环境效应对空冷系统的负面影响, 可以通过加装导流板等改善流场以扩展风的正向效应、开发控制预测模型进行防冻调控或设计防冻装置优化传热、设计开发各类清洗系统进行除垢等。当前研究在换热器设计优化的精度、广度和各类环境效应作用机理方面仍有进步空间, 未来研究方向还包括新能源电站应用空冷的适应性分析, 运用人工智能技术进行换热器设计、性能预测等。

关键词: 空冷技术; 直接空冷; 间接空冷; 换热器设计; 优化研究

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202307003 **文章编号:** 0253-987X(2023)07-0020-18

Air Cooling Technology for Power Stations: Research Progress and Perspectives

SHI Jinwen¹, GAO Fanxiang¹, ZOU Yang², XUE Yangbo¹, ZHAO Qiangqiang¹,
WANG Zihao¹, WANG Yongjie³, WANG Yueshe¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

3. Shandong Netsource Electric Power Engineering Co., Ltd., Jinan 250118, China)

Abstract: Air cooling technology, which uses air at the cold end of the power station to complete heat exchanger cooling, has unique advantages in water saving, consumption reduction, emission reduction and cost reduction compared with wet cooling technology. From the perspective of system design and operation optimization, the research progress of two types of air cooling technologies, direct and indirect air cooling, is reviewed. In terms of design optimization, the flow heat transfer characteristics of heat exchangers (condensers and radiators) have been extensively studied, and the relevant optimizations are generally carried out from the perspectives of geometric

收稿日期: 2022-11-25。 作者简介: 师进文(1981—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1505403); 陕西省油气田特种增产技术重点实验室开放基金资助项目(KFJJ-YZ-2022-2)。

网络出版时间: 2023-03-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230323.1040.006.html>

structure, position layout, etc., but at present, the research objects of condensers are mostly limited to finned tubes, and there is a lack of optimization research on the overall tube bundle, and research on the radiators needs to consider the influence of geometric parameters more comprehensively. In addition, since the fan (group) directly determines the inlet flow rate of the condenser, its aerodynamic characteristics and cluster effect have become the focus of research, and a variety of zoning methods and operation control strategies have been formed to implement tuning, but the economic analysis and research of the optimization scheme needs to be further carried out. In terms of operation optimization, in order to weaken the negative impact of environmental effects on the air cooling system, the flow field can be improved by installing deflectors to expand the positive effect of wind, developing control prediction models for antifreeze control or designing antifreeze devices to optimize heat transfer, and designing and developing various cleaning systems for descaling. At present, there is still room for improvement in research on the accuracy and breadth of heat exchanger design optimization and the mechanism of various environmental effects, and future research directions include the adaptability analysis of air cooling in the application of new energy power stations, and the use of artificial intelligence technology for heat exchanger design and performance prediction.

Keywords: air cooling technology; direct air cooling; indirect air cooling; heat exchanger design; optimization study

为有效控制碳排放量,使全球温度稳定在国际社会力争达到的目标水平,诸多国家提出了各自的“碳中和”计划,可再生能源借此发展态势迅猛。基于我国独有的“富煤、贫油、少气”能源资源禀赋,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出稳妥有序、安全降碳的原则,以推进能源低碳转型平稳过渡,这意味着当前在我国能源结构中占主要地位的火电机组,在缓减可再生能源并网带来的出力波动和通过调峰保障电网运营安全性方面仍有可取之处^[1]。水在火力发电中除担负能量传递媒介外,还在冷却和清洁等方面发挥作用。我国水资源匮乏,虽然河川年径流量位居世界前列,但人均水资源占有量却仅为世界人均水平的1/4,因此我国被联合国列入13个贫水国家之一^[2]。此外,我国疆域辽阔,不同地区气候环境迥异,这也导致我国水资源空间分布的不均匀程度比较显著,从东南到西北水资源量明显降低,西北、华北和东北地区极度缺水。可以预见,节水型空冷系统应用在“富煤缺水”的北方地区火电厂极有必要。另一方面,随着我国逐步推进构建新型电力系统,新能源电站建设步伐进一步加快,光热电站、拟建的若干内陆核电等单从水资源需求来看,必然面临着与地方生活和工业用水的争水问题。因此,作为火电厂重要节水措施的空冷技术在解决新能源电站建设地尤其是缺水地用水问题方面也具有关键作用。

空冷技术主要分为直接空冷和间接空冷两种类型,间接空冷技术按照系统中凝汽器类型又可分为冷凝式和表凝式。截至21世纪初,各类空冷技术的工程应用案例已非常丰富,但全球不同地区间发展不平衡,且空冷技术在理论研究和系统优化运行方面仍有大量课题需要解决^[3]。此外,进入21世纪,更多地区面临的水资源危机促使发展空冷成为新世纪能源建设的必由之路。为此,在21世纪初,一些研究者对以往空冷技术的发展做出了回顾与总结。2005年付玉玲等较详细地阐述了各类空冷机组的特点、性能和发展现状,认为将单排管凝汽器与自然通风结合是火电空冷史的新篇章^[4]。2010年,陈立军等评估了直接空冷和间接空冷的整体经济性,得出间接空冷在初投资费用、年运行费用及总费用方面更具优势^[5]。2012年,陈立军等就电站空冷发展再次发表较全面的见解,认为空冷电站初投资和运行费用将不断降低,多种空冷型式会更完善,总体向大容量、高参数发展^[6]。上述报道较好地概括了空冷技术当时的进展,也为该技术的宏观发展提供了一定的方向指引,然而其中关于空冷技术具体的研究对象、内容及方法所述甚少,对各细分领域研究者的参考价值有限。卜永东等^[7]虽然于2013年从直接空冷和间接空冷的换热器管束、系统性能与环境效应等方面进行了综述,但近十年来电站空冷技术在翅片管束热力性能、轴流风机群优化等方面取得

了进一步发展,而作者未关注的空冷防冻降噪等技术及新能源电站空冷技术也有必要进行梳理。更重要的是,在当前实现“双碳”目标的进程中,已有相关实践表明人工智能技术赋能空冷将进一步助力火电行业实现降碳减排。

1 机械通风直接空冷技术

1.1 凝汽器

直接空冷系统使用的换热元件大致分为 3 类,即单排波纹翅片扁管、双排椭圆管套矩形翅片管和 3 排椭圆管绕椭圆翅片管,如图 1 所示,为强化管束的流动换热能力,众多研究者从典型的 3 类翅片管出发,或开发出多种衍生类型,或在管束表面增加各种翼型,并通过模拟及实验对应用于直冷系统的翅片管展开了大量研究工作。

基于典型的 3 类翅片管,一些研究者通过改善翅片管几何结构的设计或安装布置获得冷却性能的提升。单排波纹形翅片管因制造简单而极具吸引力,Goldstein 和 Sparrow^[8]较早地研究了波纹壁通道中层流、过渡流和湍流的平均传热特性,发现湍流 Re 下传热速率是直通道的 3 倍。随后,Rush 等^[9]对周期性可变通道或波纹形通道实施了更多的实验研究。还有其他几项与可变截面通道流动阻力特性相关的问题^[10],均得到了类似结论,即波纹形通道在高 Re 下对传热增强更明显。上述研究只考虑了可变截面通道,为了进一步了解波纹形翅片管传热与流阻特性,应将基本管考虑在内,然而,目前对带有波纹翅片的基本管的研究特别是实验结果还较少。Li 等^[11]研究了带有不同类型翅片的扁管的流动换热特性,发现与平面翅片和连续平翅片相比,使用波纹形翅片后 Nu 增加了 32%。实际应用中也经常使用多排或不规则间距的翅片管。Shi 等^[12]对双排矩形翅片椭圆管展开研究,得到了不同风速下管外流动传热特性,此外,作者还通过仿真实验确定了流阻和传热系数与正面风速间的关联式。段芮等^[13]通过实验获得了不规则间距的矩形翅片椭圆管的阻力和传热关联式。冯丽丽等^[14]尝试通过矩形翅片管偏置改善流动传热特性,发现向前偏置可提高空气侧的总表面传热系数,向后偏置虽然总传热量会增大,但低速尾流区局部换热将被恶化且压损会增大。在 3 排椭圆翅片管的研究方面,王从飞等^[15]通过 CFD 模拟开展了相关工作,他们所得到的压降与传热特性关联式为 3 排椭圆翅片管的设计优化提供了一定参考。

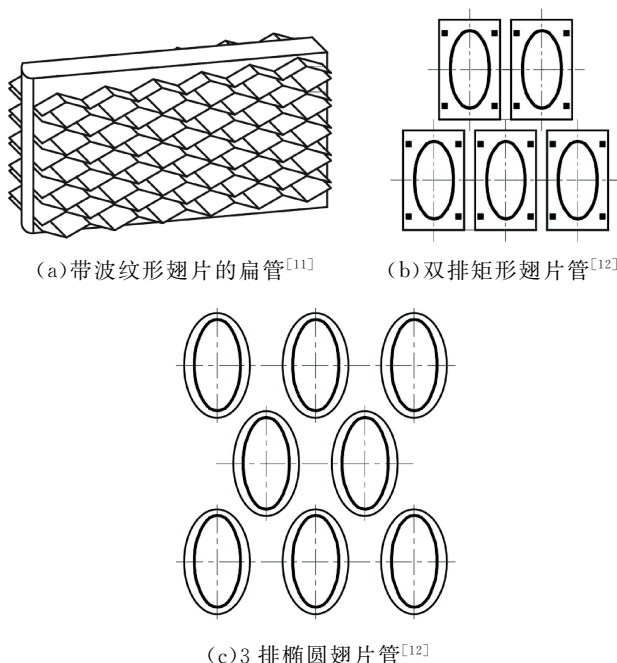
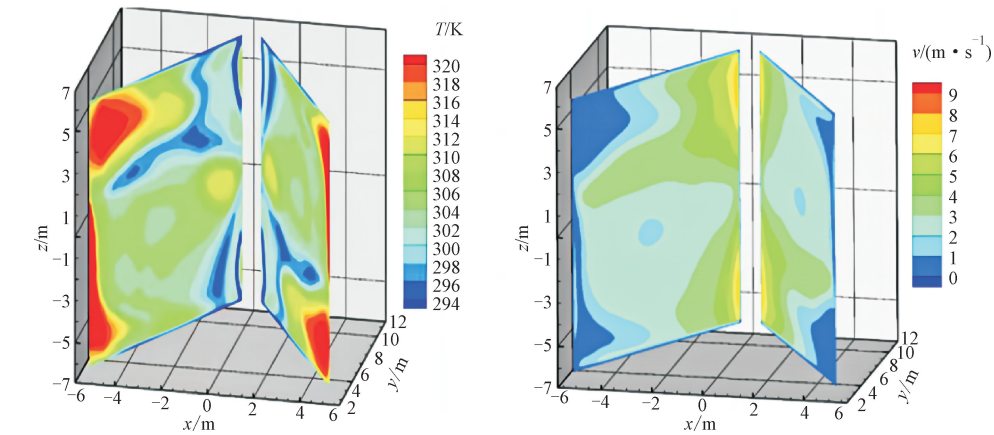


图 1 直接空冷凝汽器翅片管束结构示意图

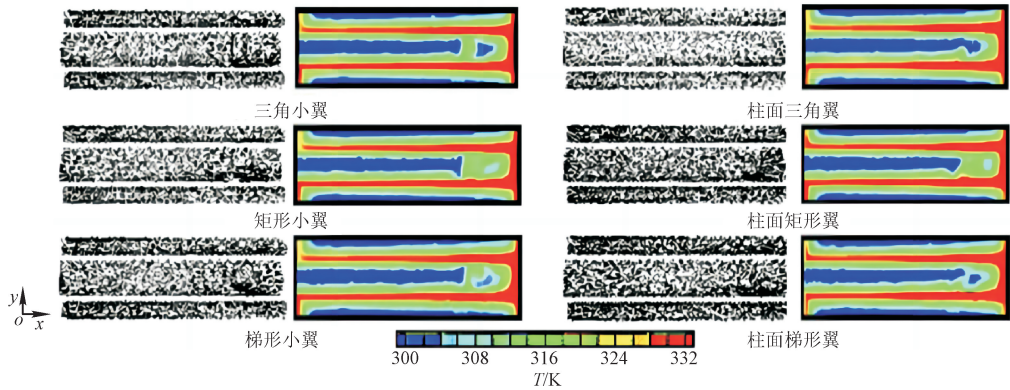
Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the finned tube bundle of the direct air cooling condenser

与翅片管自身结构设计和安装布置相比,增设附加结构譬如涡流发生器将有助于削弱风效应或羽流再循环导致的不利影响,近年来也吸引了较多研究者的关注。Prabhakar 等^[16]在椭圆管表面放置了矩形翼和三角翼来强化传热,比较后得出椭圆管和三角翼对的组合更有利于提升传热性能。叶秋玲等^[17]通过实验研究了矩形通道中的柱面梯形翼相比矩形和三角形小翼在强化传热方面的优势。另一些研究者探究了涡流发生器在强化空气侧换热方面的效果。周国兵和杨来顺^[18]通过数值模拟探究了矩形小翼、三角小翼、梯形小翼、柱面梯形翼、柱面三角翼和柱面矩形翼这 6 种涡流发生器对单排翅片扁管换热和压降性能的影响。Du 等^[19]采用数值模拟和实验验证的方式探讨了三角翼、矩形翼、三角小翼和矩形小翼这 4 种涡流发生器对波纹形翅片扁管空气侧传热的强化效果,发现三角翼具有最佳的空气侧传热性能,且在翅片中部穿孔更利于强化传热。

本文总结了部分研究者对直接空冷系统凝汽器翅片管束流动换热特性的研究结果,如图 2 所示。从上述工作中发现,由于空气侧热阻是热环节的主要热阻,国内外学者更多地从单个翅片管自身或附加的几何结构和进口迎面风对凝汽器的影响两个角度开展优化研究,且研究对象往往为简化后的一小段,由此获得的特定尺寸和限定条件下的结论或关



(a)单排波纹翅片扁管管束凝汽器出口温度(左)和速度分布(右)



(b)安装不同类型涡流发生器的单排蛇形翅片扁管的速度矢量分布和温度分布

图 2 直接空冷系统凝汽器翅片管束流动换热特性研究^[18,20]

Fig. 2 Study on flow heat transfer characteristics of condenser finned tube bundle in direct air cooling system^[18,20]

联式对指导其他直冷系统凝汽器的设计运行意义不明显。考虑到凝汽器通常被布置于轴流风机上部,而风机轴与翅片管束通道的位置偏差极易导致气流和压力损失,因此探究整个管束的流动换热特性对指导空冷单元的设计优化将更有利。调研发现近年来极少有学者对此展开研究,仅发现 Jin 等^[20]于 2018 年设计了一种新型波纹(斜)翅片扁管管束结构,通过模拟结合实验的方式探讨了不同倾斜角的影响,崔超等^[21]于 2019 年采用相同方法获得了单排波纹翅片扁管束流动换热特性和风速、进风角的关系。因此在管束的热流特性分析、管束与轴流风机的位置布局等方面的工作还有待加强。

1.2 轴流风机

轴流风机采用机械通风的方式推动空气冷凝排汽,其运行状态将直接影响凝汽器和直接空冷系统的设计与运行。鉴于直接空冷系统往往采取数十台风机作为动力装置,除了要考虑单台风机的叶轮直径、结构型式等可能改变风机传动性能和效率的因素外,风机彼此间的位置布局、集群运行策略等也是研究重点。

针对环境风对风机动力学特性的影响,Wilkinson 等^[22]借助 CFD 软件对一种 M-风机进行模拟,并针对缩小尺寸的风机设计了性能验证实验,获得了叶尖间隙、叶片角和轮毂配置对风机性能的影响情况。Heinemann 等^[23]通过风洞探究了均匀流场对单个前向倾斜风机和直叶片风机入口与出口的影响情况,发现增大垂直交叉流速率会对风机性能产生不利影响,但直叶片风机敏感性更低,安装圆柱形或锥形入口防护罩可削弱该不利影响,其中锥形护罩的增益效果更好。针对传统 A 型框架布局的空冷凝汽器流场变形大带来的弊端,Zhao 等^[24]通过增加风机转速和在风机出口增设导叶的方式实施改善,Chen 等^[25]则提出一种将 V 型凝汽器单元和诱导轴流风机相结合的新型空冷凝汽器布局,两者均可有效改善热流性能。除风机的空气动力学特性外,风机集群运行的特点也是开发先进空冷岛必须了解的重点。Meyer 和 Kröger^[26]提出了风机激盘模型用于预测不同流量和叶片设置下轴流风扇的性能表现,通过与实验数据比较验证了该模型的可靠性,但也发现数值模拟确定的功耗略低。杨立军等^[27]基

于 2×600 MW 直接空冷电站引入集总参数风机模型,研究了无风和有风条件下风机阵列的集群效应,得到了不同情况下集群因子的分布规律,为空冷系统的设计与优化提供了参考。张辉等^[28]探究了进口空气流对风机集群运行的影响,发现风机抢风会优化风机进口近壁区的速度分布,此外还提出了位置系数用于评估风机进口的流动性能。孔新博等^[29]依托露天风机阵列实验台探究了环境风扰动下的空冷阵列运行特性,指出环境风影响下迎风侧首列风机的体积流量明显降低,背风侧体积流量则较大,还发现风向仅影响流量低谷的位置,对平均流量影响不大。

风机集群效应下,不同区域的风机在面临多变气象条件时运行状况存在较大差别,通过各类预测模型和“分区调节”等方法来优化风机群的抗风能力得到越来越多的关注,直接空冷系统轴流风机(群)调控方法见表 1。黄鹤和赵廷进^[30]研究了风机群按排调节对某直冷机组出口空气流量和温度分布的影响,并建立了净收益计算模型开展运行优化研究,最终确定了各排风机转速的最佳值。Huang 等^[31]基于某 2×660 MW 电站探究了轴流风机阵列的优化运行策略,发现提高迎风区转速有助于降低进风温

度,风向 0° 时将前两排与其余排视作不同区域,在保持总功耗一定的条件下将前两排转速调至额定转速的 110% (110-case2),可获得最佳的涡轮机背压和散热效果的分区调节方案。Huang 等^[32]还针对 2×300 MW 直冷机组提出了两种轴流风机调节方案,并借助宏观换热器模型预测空冷凝汽器在不同风向下的性能,得出使用两种策略可使进风温度显著降低。上述研究者的最终方案均为针对“排”的调节,而白焰等^[33]在获得直冷机组风机阵列运行时的温度场和速度场后,通过聚类分析法将相似性能表现的风机聚合以完成分区,并探究了分区调压的最佳策略,发现与单独降低某排风机转速相比,按聚类分区法进行转速调节将更有利于机组调压。在开面向控制的模型研究方面,Luo 等^[34]建立了等比例缩小实验台,基于集群因子分布结果提出一种改进的直接空冷凝汽器控制导向模型,在将其应用于某工业案例后发现,与原有策略相比,风机总功耗降低了 14.7% 。Luo 和 Yao^[35]建立了以控制为导向的直接空冷凝汽器模型,分析了风机容积效率和羽流再循环对背压的影响,并提出一种基于多模型的预测控制策略对风机阵列进行分区调节,发现应用该策略有助于提高系统的性能。

表 1 直接空冷系统轴流风机(群)调控方法
Table 1 Direct air cooling system axial fan (group) control methods

研究对象	研究方法	改善措施	效果
某 330 MW 直冷机组 ^[30]	CFD+Fluent 模拟	将 30 个风机分为 5 排,每排转速区别调节	通过机组净收益计算模型可得到各排最佳转速
某 2×660 MW 电站 ^[31]	CFD 模拟	调整不同区块中风机的转速	提高迎风区转速有助于降低进风温度,风向 0° 时最佳策略为 110-case 2
某 2×300 MW 电站 ^[32]	数学建模	策略 1 为粗略按排调整风机转速 策略 2 为微调每个风机转速	通过不同风向向下比较分析发现,策略 1 性能更好,策略 2 功耗更低
某 600 MW 直冷凝汽器 ^[33]	CFD 模拟	根据聚类分析法划分区域并调节转速	该策略能较好地降低机组背压,且效果优于按排调节
等比例缩小风机阵列试验台 ^[34]	仿真与实验	采用 MPC-PID 级联控制实现分级调控	风机功耗下降 14.7% ,能有效控制风速扰动
某 300 MW 电厂 ^[35]	数学建模	提出一种基于多模型的预测控制策略进行分区调整	应用该控制策略可提高系统的性能

综上所述,各研究者普遍认为环境风会造成流动变形进而降低系统换热性能。通过建模或搭建等比例缩小的试验台,发现无风或有风时均会存在集群效应,往往会构建集群因子或位置系数来进行更细致的研究,这也为分区提供了一定的依据。目前,利用“分区调节”开展优化研究已取得一些成效,聚

类分区优于机械地按机群排数进行分区,如若建立预测模型进行局部调节则更加精准,但总体而言分区的差异化设计还不够。最关键的是,对轴流风机群的合理调配根本目的在于提高经济性,然而很少有研究者在优化后仍关注机组净收益或节能状况,以后的研究工作有待加强。

1.3 环境效应及改善措施

1.3.1 防风

环境风是直接空冷系统设计和运行优化必须考虑的因素之一,较高的风速会扰乱空冷系统周边的空气流动,使冷空气流量减小,不利的环境风向则易引发大风压制、热风回流等现象,这些都会对空冷系统的流动换热能力带来严重损害。多位研究者致力于揭示环境风作用下直冷系统的流动换热特性,为后续优化提供了丰富的理论指导。2007 年,Gu 等^[36]利用风洞模拟并结合实验探究了各种条件下大型发电厂扩建空冷凝汽器平台的再循环特性,指出风速、风向和凝汽器平台的高度对再循环有很大影响,而新建空冷凝汽器平台和原始建筑间的距离对再循环影响较小。Gao 等^[37]于 2013 年通过数值模拟探究了环境风对某 2×300 MW 直接空冷机组冷端换热性能的影响,发现不同风向下空冷岛的最差换热区域不同,在主导风向的上游建立空冷岛更合适。Wang 等^[38]在 2019 年基于某 2×600 MW 直冷机组研究了环境风对凝汽器热流性能的影响,发现增大环境风速会促进热空气羽流的产生,导致传热效率下降,凝汽器附近也随之出现更多旋涡。2021 年,刘学等^[39]采用数值模拟方法研究了某小规模直冷系统的环境风作用规律和机理,分析表明迎风侧凝汽器受环境风不利影响更大,且风速越高受影响程度越大,不同风向角对空冷岛的流动换热性能影响不同,应尽力避免建筑物的扰流作用。

针对环境风下空冷系统热力性能受到不利影响的问题,众多学者提出多种改善措施。丁常富等^[40]提出在凝汽器挡风墙下游安装防风网,研究证明该方法可强化凝汽器传热,其布置和组合方式应结合实际进行考量。杨建国等^[41]提出在凝汽器下游加装能兼顾导流板和防风网双重作用的导流网,发现安装导流网后可有效降低迎风侧风机入口的背压,增大进气量,同时也避免了加装部件对下游风机的影响。Huang 等^[42]研究了在迎风风机下游安装不同几何参数导流板削弱风力影响的效果,并提出了合理的安装建议。同时也发现,无风条件下安装导流板或许会恶化凝汽器的热流性能。Huang 等^[43]提出在凝汽器平台下游安装 3 种横向双层导流板弱化横风影响,模拟结果表明导流板可有效降低风机进风温度和压力,垂直倾斜导流板在各种情况下表现均最好。

1.3.2 防冻

直接空冷机组冬季运行时,在机组启动过程、不凝结气体未抽出而聚集或凝结水过冷处易发生冻结现象,造成管束堵塞,严重时会使管子变形甚至冻

裂,对机组安全稳定运行造成较大危害。因此,直接空冷机组冬季防冻措施的开发是极其重要的。

一些研究者着重关注防冻控制策略对可能发生冻伤的情境进行预警或操作。Bai 等^[44]基于某 2×300 MW 直接空冷电厂提出一种全自动防冻控制方案,通过监测冷凝水温度、抽真空的空气温度和环境温度等判断是否进入防冻保护模式,若操作异常还可发出指令提醒。陈磊等^[45]基于某 2×300 MW 直接空冷机组提出防冻高效运行控制逻辑,依次确定了风机满转时最高临界环境温度、风机停转时最低临界环境温度和风机转速调节实现最低功耗,使得机组在满足防冻要求下能够实现高效运行。另一些研究者通过设计防冻装置来满足直接空冷机组冬季安全运行。白逢^[46]设计了一种防冻卷帘,通过测试发现该卷帘可有效消除凝汽器高度差产生的虹吸效应,不仅能够快速解冻,也避免了帆布封堵入口的弊端。范景利等^[47]设计了一种挡风防冻装置,该装置通过正反转电机控制封堵面积可实现冬季防冻,通过双电机驱动的三维旋转连接装置也可在夏季实现对不利风的遮挡。上述防冻装置针对传统的风机入口封堵面临高空作业风险、帆布封堵缓慢等问题做出了一定优化,但封闭风机入口不足以完全摆脱冻结风险。因此,师进文等^[48]基于某 660 MW 空冷机组提出在空冷岛顶部蒸汽分配管间布置防冻百叶窗,通过建模计算发现,该装置全关闭时可将总散热量降低 52.7%,与封堵入口配合可进一步改善空冷岛过度散热,此外也验证了该装置并不会在夏季削弱空冷岛散热性能。

1.3.3 降噪

直接空冷系统一般采用机械通风,而轴流风机(群)的启停运转往往会带来额外的噪声,有研究表明其噪声频谱主要分为涡流噪声和旋转噪声两种。风机的涡流噪声产生原因复杂,多数与边界层脱落涡与通道涡的形成发展有关,旋转噪声则是由动叶片旋转时与周围流场的耦合作用导致的。大量学者针对两类噪声及其细分种类作了详细研究。涡流噪声方面,Gonzalez 等^[49]研究了叶顶间隙噪声,发现在叶顶区通常会形成以叶尖涡为主的 3 种涡流流动结构,叶尖涡也是影响叶顶间隙噪声的主要因素。李林凌等^[50]研究了紊流不均匀噪声,认为采用非对称进气的方式或可改善气动性能进而实现降噪。罗柏华等^[51]、刘碧龙等^[52]对湍流边界层噪声的研究结果均显示,发生于湍流边界层内的大、小尺寸旋涡是主要噪声源,其受到涡运动和边界层压力波动的影响。唐俊等^[53]对尾迹脱落噪声问题进行了深入探讨,认为

涡脱落是涡流噪声的主要产生源,选择合适的尾缘结构有助于抑制脱落噪声;旋转噪声方面,Gérard 等^[54]的研究结果揭示了动叶片与气流的周期性作用形成的周期性变化流场是引发单转子旋转噪声的原因。李春曦等^[55]对动静干涉噪声展开了研究,发现噪声声压会随动、静叶片间的距离变化而变化,其中动叶安装角和静叶倾角将对该过程产生影响。

噪声对人体身体健康和周围环境均有不利影响,对风机群引起的噪声控制是目前业内关心的重要问题。本文总结了几种常见的轴流风机降噪方法,见表 2。

表 2 轴流风机降噪方法

Table 2 Noise reduction measures for axial fans

分类		相关研究结论
主动降噪	叶片仿生设计	仿生非光滑风机叶片可抑制尾涡脱落,还具有导流作用,最大降噪率约为 2.61% ^[56]
	叶片穿孔	可抑制叶片后缘涡流分离,降噪效果受穿孔位置及形状等影响 ^[57]
	弯掠叶片	加弯叶型可降低噪声,但也受叶片弯角、掠角等参数和运行工况的影响 ^[58]
被动降噪	消声器、吸声材料、隔声罩等	各消声材料的选用和设计应考虑不同频段的噪声特征进行针对性优化 ^[59]

1.3.4 除垢

采用大型直接空冷机组的电厂通常位于水资源匮乏地区,恶劣的风沙天气或较差的空气质量容易使翅片管表面形成灰垢,影响凝汽器的换热效率,进而危害机组的安全稳定运行。

目前关于凝汽器翅片管换热能力的提升已形成大量成果,然而,对翅片管表面的灰垢清洗研究仍然较少。2004 年,杨善让等^[60]研究了流速对凝汽器翅片清洗过程的影响机理,认为流速的作用体现于垢层剪切应力和强度变化上。2014 年,王升龙等^[61]通过数值模拟进一步研究了流体流速、固相颗粒直径和固相分数等因素对凝汽器翅片清洗效果的影响,并提出一定的建议。基于此,2015 年,王升龙等^[62]综合考虑节水节能和清洗效果实施了进一步优化。此外,王建江等^[63]通过数值模拟研究了清洗过程中垢层厚度、压力和剪切力对清洗时间的影响。赵波等^[64]基于某 600 MW 直冷机组进行了多次干式吹扫实验,并分析了灰垢对机组换热效果和背压的影响规律。这些研究可为空冷凝汽器的工业清洗提供理论依据。

工业实践方面,国内外最常见的空冷凝汽器清洗技术是高压射流除盐水清洗,工作方式可分为管束式

和矩阵式。水式清洗在除垢效果方面表现良好,但对压力范围要求严格,且用水量大,与空冷这种节水型冷却技术的初衷相违背。为此一些学者提出了干式吹扫的概念,即利用压缩空气替代除盐水实施清洗。近年来,一些研究者通过引入电动机、传感器、红外热成像仪等对清洗系统进行设计优化,清洗系统也由手工清洗发展为半自动清洗和全自动清洗^[65]。

综上所述,对于环境风的不利影响,目前通过模拟或实验已形成丰富的理论基础,但在优化设计方面还有许多欠缺。研究普遍建议加装导流板、挡风墙等装置改善流场,一定条件下可取得良好效果,这在高沛和张学镭^[66]综述所得结论中也有所体现,但多数学者的研究仅停留在几个凝汽器单元模型上,提出的建议或许并不适合实地改装,且欠缺优化后系统整体效果评估;而对环境温度变化可能引起的翅片管束冻结问题,相关的机理分析还比较欠缺,更多的研究集中于运行控制和防冻措施上,理论研究还有待进一步加强;此外,尽管已经对蒸汽凝结过程动力学建模进行了大量研究,但目前关于机组整体冷端系统的研究极少,例如 Zhang 等^[67]于 2019 年建立了直接空冷发电机组面向控制的机械动态冷端系统模型,但该控制模型由机理模型简化而来,因此探索更先进的直接空冷机组背压控制系统策略是未来需要进行的工作之一。

轴流风机作为直接空冷系统的气动力装置,其噪声特性和相关降噪措施已进行大量研究,然而多数研究主要针对单级轴流风机,且动叶可调轴流风机与气流耦合作用下的噪声特性及其随安装角工况的变化情况尚未获得充分关注,双级动叶片的噪声特性及背后的影响机制、演变规律等的研究有待深入。除垢方面,研究者主要通过数值模拟探究湿式清洗过程中操作因素或垢层参数对清洗效果的影响,干式吹扫的研究报道极少,且模拟模型往往忽略了热量传递和相变,所得规律与实际存在较大偏差,未来在建模时可考虑更多因素,例如温度、汽化等以提升模型的准确性,相关实验研究也有待加强。

2 自然通风间接空冷技术

2.1 散热器

翅片管束是间冷系统散热器最常采用的结构,主要分为钢制椭圆管和铝制圆管翅片管,椭圆管型翅片管又包括椭圆管套矩形翅片和椭圆管绕椭圆翅片两种,圆管型翅片管目前主要有第五代福哥型(6 排管)和第六代福哥型(4 排管)。图 3 给出了 4 种

空冷散热器的典型结构。

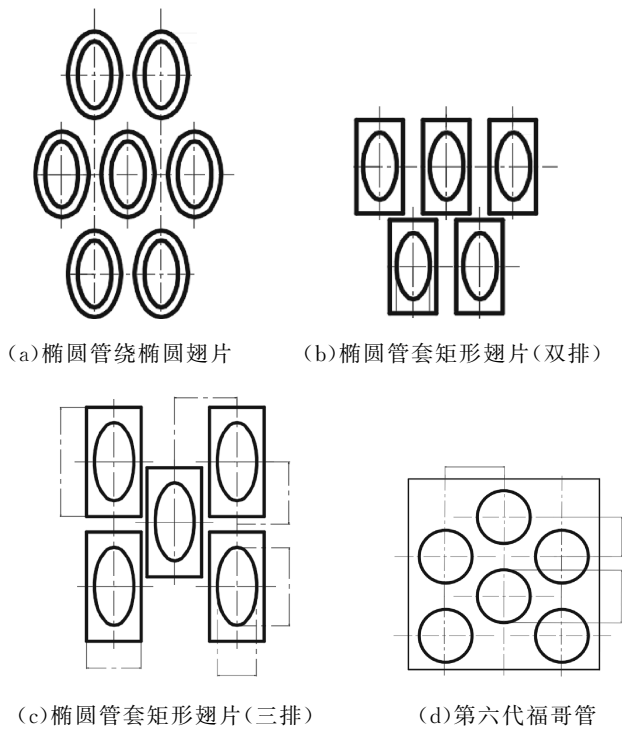


图 3 间接空冷系统散热器翅片管束结构示意图^[4,7]

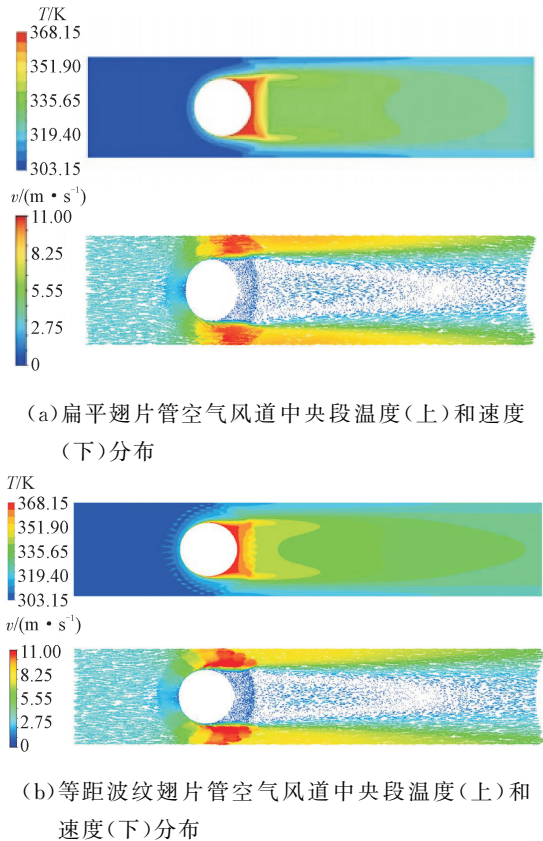
Fig. 3 Schematic diagram of radiator fin tube bundle structure of indirect air cooling system^[4,7]

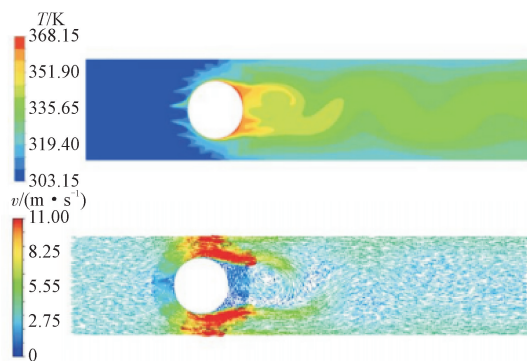
圆管广泛应用于翅片管散热器,研究人员已经进行了大量工作来提升圆形翅片管的性能。Okbaz 等^[68]通过实验研究了使用波纹形翅片来强化传热。波纹形翅片中,波纹角、密度、管径和翅片间距等参数对流动传热特性有很大影响。Ouyang 等^[69]通过数值模拟方法研究了波纹翅片几何参数对散热器性能的影响,为圆管波纹翅片管的设计制造提供了参考。已有研究证明椭圆管可以更有效地提高翅片侧传热性能。Han 等^[70]研究了 1 种椭圆管和 2 种圆管的几何结构对翅片管流动换热特性的影响,3 种管分别采用波纹型翅片和百叶窗翅片,指出椭圆形管对提高翅片效率更有利,一般采用波纹型翅片可获得的鳍效率更高。Zhukova 等^[71]在广泛的 Re 范围内研究了椭圆形管的空气动力学和传热特性,并与圆管进行了比较,发现椭圆形管总阻力更低。Haque 等^[72]基于对圆形和椭圆形翅片管组的强制对流换热特性的数值研究结果,建议在高 Re 下选用较低纵横比的椭圆管。此外,还有一些关于不同翅片模式下的传热流动摩擦性能的研究^[73]。

针对某种类型翅片管束的流动传热研究已非常丰富,但上述研究仅考察了该翅片自身特性而未与

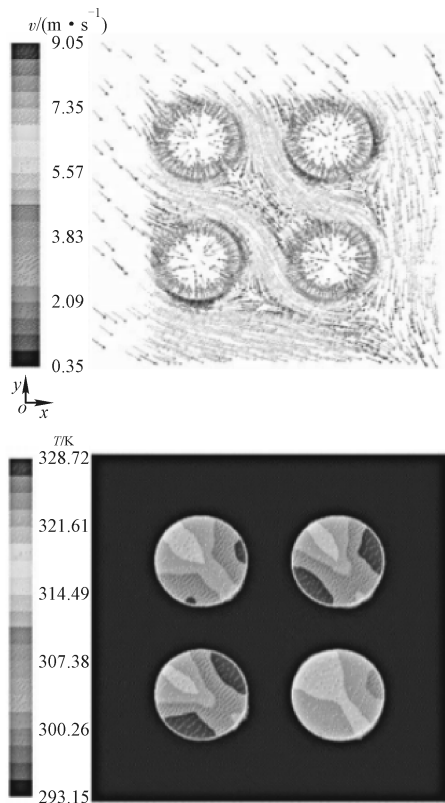
冷却系统的设计或优化结合。针对间冷散热器采用的翅片管束展开特定分析还比较少见,杨立军等^[74]基于某 $6\times 1\,000\text{ MW}$ 间冷电厂通过 CFD 模拟获得了机组热负荷、环境温度、环境风对散热器进口气流的影响。此后,杨立军等^[75]对椭圆形基管和圆管基管翅片管束间冷散热器的流动传热特性进行了模拟研究,得到了相关的特征数关联式。Du 等^[76]测试了间接空冷塔中平片椭圆管和波纹翅片扁管换热器在 4 种不同进气角下的传热和热阻特性,发现椭圆管和波纹扁管分别在进气角为 45° 和 30° 时达到最佳性能。

间接空冷系统散热器翅片管束流动换热特性研究结果如图 4 所示。由上述分析可以看出,现阶段多数关于某类散热器热力性能的研究在应用对象上还比较分散,虽已有部分学者的研究对象取自间冷系统,但大多集中在探究翅片间距、管间距和进气角等因素的影响,其他几何参数则很少被分析,而换热器传热面的高效设计要求对复杂通道的气流有清晰认识。间冷散热器设计优化的下一步工作可以关注诸如翅片厚度、翅片倾斜角、管外径等几何参数的影响,对各参数的相对重要性进行定量评估或获得最优值对于指导散热器设计具有重要价值。





(c) 交错波纹翅片管空气风道中央段温度(上)和速度(下)分布



(d) 空冷散热器中间断面的流场(上)和温度场(下)

图 4 间接空冷系统散热器翅片管束流动换热特性研究^[69,74]

Fig. 4 Study on flow heat transfer characteristics of radiator finned tube bundle in indirect air cooling system^[69,74]

上述学者更多地讨论了稳态工况下散热器的热流性能,然而由于多变的自然条件,工质参数经常处于动态变化中,研究散热器的动态响应特性也极有必要。Mishra 等^[77]利用有限差分法研究了温度和流量扰动引起的双流体(未混合)错流式热交换器瞬态响应行为,给出了冷流体流速和热流体入口温度的变化工况。Mishra 等^[78]研究了以阶跃、斜坡、指数和正弦函数形式扰动的热流体入口温度下三流体

换热器(未混合)的瞬态温度响应,并比较了 4 种布置方式下换热器的动态行为。与管束热流性能研究状况类似,对动态特性的研究多局限于考察某种类型的散热器,而应用于电站间冷系统的翅片管散热器在该方面的研究还比较欠缺,调研发现近年来仅有文献^[79]建立了水侧、空气侧和管壁的热平衡偏微分方程以求解迎面风速、循环水流量和入口温度变化时电站间冷散热器的动态响应特性。

2.2 环境效应及改善措施

2.2.1 防风

间接空冷系统采用空气作为二次冷却介质,环境空气的干球温度决定着循环水的冷却极限,环境参数的变化或将打破冷端系统自平衡,进而降低系统的冷却效率。国内外学者通过数值模拟、模型实验等对环境效应开展研究以削弱这种波动影响,并揭示了风速、湿度等因素的作用机理。Yang 等^[80]基于某 4×600 MW 间接空冷电站研究了不同环境风下散热器空气侧温度、速度场的变化情况,发现低风速下系统的热流性能会随风速的增加而恶化,高风速下性能有所改善,此外,换热器正面翅片管束的热流性能高于其他部位。Yang 等^[81]又探究了风对整个系统中各种冷却三角翼和扇区热工水力性能的影响,得出任何风速下上风冷却扇区和三角翼的性能优于后部,后部又优于侧面,故存在临界风速点使冷却系统性能最差。Wu 等^[82]探究了某间接空冷系统在有风和无风条件下分别采用径向和矩形 A 型架分布的散热器热性能表现,发现迎风侧 A 型架的空气动力学特性和传热受环境风影响而恶化,顺风侧 A 型架的表现则与之相反。除散热器外,一些学者也关注了整个空冷塔在环境风作用下的表现。Lu 等^[83]采用 $1:12.5$ 比例的冷却塔缩小模型研究了侧风对一个 15 m 高的圆柱形空冷塔的影响,得到了由自然对流项和强制对流项组合构成的空冷塔总传热系数随风速的变化曲线。王海涛等^[84]基于内陆某核电厂,采用 CFD 方法研究了环境侧风和大气逆温作用下常规岛间冷塔热流特性的影响,得到了间冷塔散热量与通风量、机组背压随两个因素的变化规律。

与直接空冷系统类似,众多学者通过增设挡风墙、导流板和百叶窗等防风结构以削弱环境风的不利影响,保证间冷系统的冷却效率。Gu 等^[85]研究了在 1 000 MW 间接空冷塔使用横墙、防风墙、交叉线屏和百叶窗 4 种防风结构的效果,发现 4 种结构均能有效改善传热性能,但百叶窗是最佳选择,且存

在开合角 k 使空冷塔面对任一风速都有最好表现。Zhou等^[86]提出在塔进风高度的水平横截面上设置一种新型环状防风布,并研究了防风布尺寸对塔热流性能的影响,得出增大防风布尺寸可增加通风阻力,但尺寸超过临界点也会导致气流入侵。Yan等^[87]研究了在不同风向角(0° 、 45° 和 90°)下使用外部防风衣改善双塔间接空冷系统环境效应的效果,认为加防风衣后各风向角下塔架侧向段性能明显提高,但后部段却表现乏力, 0° 是最佳角度。Wu等^[88]建议在空冷塔周围布置弧形弯曲导流板,并探究了冷却塔在 $0\sim 20$ m/s风速范围内的性能表现,发现有风时使用导流板可扩展自然风的正向效应,而无风时使用导流板也几乎不会带来负面影响,此外风向的影响可以忽略。

2.2.2 防冻

高纬度地区冬季的极端气温可达 -30°C ,冷空气由此获得极强冷却能力,使得间冷塔散热器的换热量骤升,易导致管束出口循环水发生内部冻结,严重时或使管束胀裂,为解决环境风冻结管束的危害,国内外学者开展了广泛研究。Chen等^[89]通过建模研究了通过百叶窗开合度进行气流控制来实现防冻的效果,发现一般而言百叶窗开度随环境温度的降低而降低,但各温度下前部、背风扇区的百叶窗开度可随着风速的变化进行调整。Wang等^[90]开发了冷却空气与循环水的流动换热模型,研究了按序关闭不同扇区来调节表面积而实现空冷换热器抗冻的方式,同时进行了能效分析,认为关闭前端扇区不仅可以实现防冻,而且将是最节能的操作。Wei等^[91]提出一种间冷塔水流分配的全局控制防冻方法,然后以运行成本为目标结合综合耗散分析进行优化。将其应用于某600 MW超临界燃煤发电机组后发现,增加风速将提升冷却水分配的节能潜力,优化后该机组运行成本最多可节省 $1.11\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。部分研究者还致力于防冻预测模型的开发,例如王伟佳等^[92]通过Matlab平台搭建了间冷换热器管束静态热力系统模型,分别研究了交叉顺流、交叉逆流、交叉流四排管和交叉流六排管4种散热器管束的临界防冻特性,并针对各类型管束防冻提出了一定的建议。

综上所述,环境风对单间冷塔带来的恶劣影响已进行仔细研究,而双塔或群塔机组的详细研究还比较欠缺。因此,荆涛等在文献^[93]中通过Fluent平台进行二次开发,基于北方某双间冷塔分析了环境风对其换热性能的影响情况,并探究了散热器潜在的冻结风险。康卫东等^[94]基于宁夏某电厂双间

冷塔系统,在Fluent中使用UDF对环境风温-冷却水温进行实时耦合计算,为研究双塔冬季大风下的冻结风险提供了参考。

2.2.3 除垢

间冷塔在干燥地区运行时也会不可避免地遇到风沙、扬尘等引起的散热器翅片积灰结垢问题,为保证散热器换热性能,设置清洗系统是极有必要的。

间接空冷电站清洗系统可分为塔内和塔外两种。德国GEA公司率先提出塔外管束回转式清洗系统,通过固定于可移动框架的转动集管进行表面清洗,但喷嘴与清洗面间距较大($1\,500\sim 3\,000\text{ mm}$),实际效果欠佳。马洪发等对间冷散热器清洗系统进行了一系列研究,2012年,马洪发等^[95]提出一种自动伸缩式清洗系统,特制喷嘴可执行三维动作,清洗更接近散热器表面(200 mm)。2016年,马洪发等^[96]提出一种塔内仿形可换位式清洗系统,通过翻转与散热器外部形状相仿的清洗框架,使射流保持在最佳靶距之间($150\sim 300\text{ mm}$)。2021年,唐贵富等^[97]针对大型空冷机组散热器优化了垂直导向机构和翻转机构,实现对冷却面的全覆盖,提升了清洗效率。

综上,就防风而言,研究者从管束排列、加装防风布或导流板等方式入手改善流场,扩展风的正向效应,但设计的防风墙或导流板往往只能在一个风向下有效工作,这可能是对本体流场关注不全面造成的,王卫良等^[98]在综述中提出的通过对冷却塔入口换热区、塔内主体区等4个区域的流场进行系统研究,或可在提升冷却性能方面进一步发挥作用。另外,本文也注意到很少有研究考虑散热器与冷却塔的耦合;就防冻而言,自2016年以后相关基础研究被逐渐关注,多数研究通过优化传热效率实现防冻,由此导致泵功率的增加通常被忽略,缺乏全局最优防冻方法。因此,无论防风还是防冻,系统的全局优化应该是下一步研究的重点,随着冷却塔的布置形式由单塔向双塔或群塔发展,双塔的深入研究也应着力开展。同时也注意到,动态开发可再生能源使得火电厂未来需补偿电力需求与可再生能源发电间的差距,火电厂动态特性的研究变得尤为重要。Wang等^[99]建立了闭式冷端系统的若干动力学模型,并以此分析了冷端系统的动态特性,计算了不同工况下切换循环泵时总电耗的最佳工作点和其余状态点总电耗的差异,为优化瞬态过程中的操作提供了一定的参考。目前间冷电站冷端动态特性研究还较少,优化方向的规律尚不明确,研究需进一步展开。此外,对于间接空冷除垢技术,公开报道多倾向

于清洗系统的设计开发,但目前国内外尚未出现达成统一共识的成熟产品,且相关的理论研究非常欠缺,有必要针对间冷散热器灰垢形成及其影响等展开深入研究,同时也可在对间冷塔的优化中结合对灰垢等腐蚀情况的监测或清洗效果提供更合理的方案。

3 新时代电站的空冷技术

3.1 新能源电站的空冷技术

以太阳能、核能等为代表的新能源是未来能源发展方向之一,目前火电空冷的主要关键问题基本已经解决,但新能源发电同样需要采用空冷技术,传统火电空冷技术应用于新能源电站是否可行或需要进行哪些方面的改变值得探讨。

对光热电站而言,其热电转换环节与传统火电基本相同,应用空冷是光资源丰富地区解决缺水问题的必然选择。将火电空冷应用于光热电站面临几个问题:太阳辐照度带来的附加加热负荷对凝汽器的影响、光照间歇性与不稳定性带来的负荷波动等。徐玫等^[100]基于某 50 MW 光热电站建立凝汽器模型,分析了其在发电过程中的运行特点,从轴流风机功耗和凝汽器压力角度给出了一定建议,但相关研究缺乏后续改善工业应用实例的报道,其他学者对光热电站凝汽器运行特性的探讨也极少,因此规律适用性有待进一步验证。另一方面,当前国内外已有一批光热电站采用了空冷技术,但关于光热电站空冷系统的研究文献少之又少,已呈现出理论研究落后于工程实践的趋势。此外,配置空冷设施对投资成本和用电的影响也缺乏系统性报道。综上,这意味着空冷技术研究向光热电站倾斜将大有可为,尤其是在凝汽器运行特性、背压敏感性分析及优化和技术经济性分析等方面。

对湿冷核电站而言,鉴于其耗水量通常为同容量火电机组的 2 倍,在内陆水资源匮乏地区建设核电站时,空冷技术将发挥关键作用。一些小型核电机组如德国 Schmenhausan 核电厂、俄罗斯 Bilibino 核电厂、匈牙利中心物理研究院核电厂等应用的空冷系统型式均为表凝式间接空冷系统,但国内外千瓦级核电机组对空冷系统的应用目前还是空白,相关研究仍停留在前期调研、方案研究阶段。新型能源体系下建设内陆核电站已是大势所趋,但将火电机组成熟的空冷技术应用于核电还有诸如凝汽器与反应堆寿命匹配、核辐射安全性保障和深入的适应性分析等问题有待解决。

新能源电站的空冷系统除了参照火电机组成熟的设计外,也因地制宜地发展出少数创新型空冷系统。例如,EGS(工程地热系统)利用低渗透岩石中的大量地热发电,由于其往往处于干旱地区,最热的季节恰是发电高峰期,因此需要更大的散热系统,而传统的直冷系统风扇附加能耗过高,间冷系统效率相对较低,因此 Zou 等^[101]提出一种在自然通风冷却塔中耦合太阳能集热器的增强型冷却塔,集热器可增强塔内空气浮力,使换热器获得更高的空气流速,从而提升系统冷却性能。虽然提出的这类增强型空冷系统是以地热电站为例,但其概念对现有火电厂、光热电厂等具有极大的参考价值。

3.2 大数据时代的空冷技术研究

在大数据与人工智能(AI)技术快速崛起的时代背景下,机器学习(ML)已成为基于历史数据分析电力系统的一种新方法,并有望应用于空冷系统的评估与优化。ML 是 AI 的特定应用,比较流行的 ML 方法有人工神经网络(ANN)、随机森林(RF)、支持向量机(SVM)等。

近年来,ML 已被许多研究者用于换热器的优化设计和性能预测。Khan 等^[102]研究了迎角、附着角和涡流发生器对板翅换热器热流性能的影响,并使用进化算法来优化涡流发生器的最佳布置。Lemouedda 等^[103]使用 CFD 并结合遗传算法和响应面法对带三角翼的翅片管换热器进行了优化。Damavandi 等^[104]使用基于 ANN 的多目标遗传算法进一步研究了三角翼对平翅片和波纹翅片管换热器传热的影响。上述文献说明 ML 已较广泛地应用于换热器相关研究,但目前空冷换热器对 ML 的应用仍显不足。Bai 等^[105]通过现场收集某直冷系统的运行数据,提出一种基于 BP 神经网络的空冷凝汽器出口风温预测模型,为开发动态参数监测技术提供了依据。Chen 等^[106]从某燃煤电厂收集了一年的原始数据,使用 ANN 和 RF 法建立了可用于预测和优化空冷凝汽器性能的模式。

除换热器设计优化外,也可借助 ML 完成各种空冷系统所需的运行优化研究。徐松泉等^[107]基于电厂分布式控制系统储存的运行大数据,通过简化的空冷系统性能评价方法指出了相关空冷机组在运行时存在的关键问题。针对具体的机组运行优化策略,聂椿明等^[108]对某 2×600 MW 超临界直接空冷燃煤历史运动数据库进行筛选,建立历史最佳数据库,通过反向传播神经网络对数据进行建模和拟合,提出最佳背压优化思路,并在机组负荷 360~570 MW 和环

境温度 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时取得较好的优化效果。彭维珂等^[109]也借助大数据分析,结合某 600 MW 空冷机组的历史运行数据库,对比分析了基于 BP 神经网络和随机森林算法的机组负荷预测模型,并指出后者的预测性能更加优越。

随着人工智能技术的发展,大数据及机器学习在空冷技术研究领域已逐步得到开发应用,然而已有研究所使用的数据量相对较少,在一些细分领域的应用还有待深入和完善。预计这些不足将成为未来空冷技术研究的热点。

4 结 论

空冷机组采用空气冷却汽轮机低压缸的排汽,与湿冷机组相比节水与环保效益显著,但其冷却能力会受到环境条件的严重制约,对选址和水质等要求较高,投运成本并没有优势。基于此,各国研究者采用理论分析、数值模拟和实验验证等方法,针对直接空冷和间接空冷两种技术类型在翅片管束优化设计、环境效应及其改善措施、动态特性分析等方面不断深入,经过几十年经验积累和技术水平的发展,在电站空冷系统的先进设计运行和应对干扰措施等研究上已取得长足进步,为改善火电厂发电缺水、提高经济和环境效益做出了突出贡献。

目前,针对电站空冷系统的相关研究尚有较为薄弱的环节,未来的研究可从以下几个方面开展。

(1)提升换热器(凝汽器、散热器)设计优化的精度、广度。一方面要强化对换热器复杂流道的认识,研究对象应由翅片管某一段或一个扩展至管束及包含基本管的整体,并进一步强化参数化设计、多目标优化;另一方面要加强换热器与冷却系统其余部件的关联研究,如对凝汽器可围绕风机轴与管束通道间的位置布局展开优化研究。

(2)深入开展空冷系统环境效应机理研究。虽然目前对于空冷系统在不同气候和环境条件下产生的性能波动、部件冻结、管束结垢等问题已有大量的工程实践解决方案,但在翅片管冻结机理、垢层演化及其对传热过程的影响等理论研究方面还存在不足,未来需进一步加强。

(3)加快人工智能技术在空冷技术领域的开发运用。通过更广泛、系统地收集更丰富的实地运行数据或历史研究数据,将大数据与 ML 应用于解决空冷换热器设计优化、空冷机组背压计算与优化、性能预测等问题上,从而提高结果的针对性和准确性。

参考文献:

- [1] 朱自伟,黄彪,裘昕月,等. 基于平抑风光出力波动的主动配电网优化调度 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 90-97.
ZHU Ziwei, HUANG Biao, QIU Xinyue, et al. Optimal dispatching of active distribution network based on suppressing wind and photovoltaic power fluctuation [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(5): 90-97.
- [2] 王瑗,盛连喜,李科,等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 10-14.
WANG Yuan, SHENG Lianxi, LI Ke, et al. Analysis of present situation of water resources and counter-measures for sustainable development in China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(3): 10-14.
- [3] 陈立军,杨赵辉,邹晓旭,等. 我国电站空冷技术的发展 [J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(6): 38-42.
CHEN Lijun, YANG Zhaohui, ZOU Xiaoxu, et al. The development of air-cooled power plant technology in China [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(6): 38-42.
- [4] 付玉玲,胡三高,徐鸿. 空冷系统发展及展望 [J]. 山东电力技术, 2005(1): 14-16.
FU Yuling, HU Sangao, XU Hong. Development and prospect of air cooling in power generation [J]. Shandong Electric Power, 2005(1): 14-16.
- [5] 陈立军,米利俊,徐超,等. 新形势下直接空冷和间接空冷的发展分析 [J]. 电站系统工程, 2010, 26(6): 5-6, 9.
CHEN Lijun, MI Lijun, XU Chao, et al. Development and analysis of direct and indirect air cooling under new situation [J]. Power System Engineering, 2010, 26(6): 5-6, 9.
- [6] 陈立军,杨赵辉,邹晓旭,等. 我国电站空冷技术的发展 [J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(6): 38-42.
CHEN Lijun, YANG Zhaohui, ZOU Xiaoxu, et al. The development of air-cooled power plant technology in China [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(6): 38-42.
- [7] 卜永东,杨立军,杜小泽,等. 电站空冷技术 [J]. 现代电力, 2013, 30(3): 69-79.
BU Yongdong, YANG Lijun, DU Xiaoze, et al. Review of dry cooling technologies in power plants [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(3): 69-79.
- [8] GOLDSTEIN J L, SPARROW E M. Heat/mass transfer characteristics for flow in a corrugated wall channel [J]. Journal of Heat Transfer, 1977, 99(2): 187-195.

- [9] RUSH T A, NEWELL T A, JACOBI A M. An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passages [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(9): 1541-1553.
- [10] ISLAMOGLU Y, PARMAKSIZOGLU C. Numerical investigation of convective heat transfer and pressure drop in a corrugated heat exchanger channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(1): 141-147.
- [11] LI Li, DU Xiaoze, YANG Lijun, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer of fin structure in air-cooled heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 59(1/2): 77-86.
- [12] SHI Lei, WANG Jin, YAN Ping, et al. Numerical investigation on air flow and heat transfer performance outside double row elliptical tube with rectangular steel-plate fins [C]//2009 International Conference on Energy and Environment Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 745-748.
- [13] 段芮, 徐之平, 马虎根, 等. 椭圆管散热器传热及阻力性能试验研究 [J]. *能源研究与信息*, 2007, 23(2): 105-110.
DUAN Rui, XU Zhiping, MA Hugan, et al. An experimental study on the heat transfer performance and resistance characteristics of the oval-tube heat exchanger [J]. *Energy Research and Information*, 2007, 23(2): 105-110.
- [14] 冯丽丽, 杜小泽, 杨勇平, 等. 椭圆管矩形翅片间空气流动的扰流特征 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(1): 119-122.
FENG Lili, DU Xiaoze, YANG Yongping, et al. Characteristics of air flow around elliptical tubes with rectangular fins [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(1): 119-122.
- [15] 王从飞, 刘斌, 范薇, 等. 直接空冷系统椭圆翅片管束传热与流动性能的数值分析 [J]. *制冷*, 2012, 31(2): 17-21.
WANG Congfei, LIU Bin, FAN Wei, et al. Numerical stimulation of the heat transfer and flowing property of triple row tube bundle [J]. *Refrigeration*, 2012, 31(2): 17-21.
- [16] PRABHAKAR V, BISWAS G, ESWARAN V. Numerical prediction of heat transfer in a channel with a built-in oval tube and two different shaped vortex generators [J]. *Numerical Heat Transfer: Part A Applications*, 2002, 41(3): 307-329.
- [17] 叶秋玲, 周国兵, 程金明, 等. 矩形通道中不同涡流发生器对换热和压降的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(11): 86-91.
YE Qiuling, ZHOU Guobing, CHENG Jinming, et al. Influence of different vortex generators on heat transfer enhancement and pressure drop characteristics in a rectangular channel [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(11): 86-91.
- [18] 周国兵, 杨来顺. 涡流发生器对直接空冷凝汽器换热的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(5): 1-8.
ZHOU Guobing, YANG Laishun. Influence of different vortex generators on heat transfer in direct air-cooled condensers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(5): 1-8.
- [19] DU Xiaoze, FENG Lili, LI Li, et al. Heat transfer enhancement of wavy finned flat tube by punched longitudinal vortex generators [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 368-380.
- [20] JIN Ruonan, YANG Xiaoru, YANG Lijun, et al. Thermo-flow performances of air-cooled condenser cell with oblique finned tube bundles [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 135: 478-492.
- [21] 崔超, 赵允涛, 刘文英, 等. 进风角度对电站空冷凝汽器翅片管束流动传热性能的影响 [J]. *电站系统工程*, 2019, 35(2): 18-22.
CUI Chao, ZHAO Yuntao, LIU Wenying, et al. Influence of inlet angle on flow and heat transfer performances of finned tube bundles of air-cooled condenser in power plants [J]. *Power System Engineering*, 2019, 35(2): 18-22.
- [22] WILKINSON M B, VAN DER SPUIJ S J, VON BACKSTRÖM T W. Performance testing of an axial flow fan designed for air-cooled heat exchanger applications [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, 141(5): 051007.
- [23] HEINEMANN T, BECKER S. Axial fan performance under the influence of a uniform ambient flow field [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2018, 2018: 6718750.
- [24] ZHAO Wanli, QU Qiulin, LI Qiuyan. Numerical investigation on the flow field of an axial flow fan in a direct air-cooled condenser for a large power plant [J]. *Heat Transfer: Asian Research*, 2013, 42(1): 60-72.
- [25] CHEN Lei, YANG Lijun, DU Xiaoze, et al. Novel air-cooled condenser with V-frame cells and induced axial flow fans [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117: 167-182.
- [26] MEYER C J, KRÖGER D G. Numerical simulation of the flow field in the vicinity of an axial flow fan [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2001, 36(8): 947-969.
- [27] 杨立军, 杜小泽, 张辉, 等. 电站空冷凝汽器轴流风

- 机阵列集群效应的数值研究[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1232-1239.
- YANG Lijun, DU Xiaoze, ZHANG Hui, et al. Numerical investigation on the cluster effect of an array of axial flow fans for air-cooled condensers in a power plant [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1232-1239.
- [28] 张辉, 耿学良, 郭牧, 等. 直接空冷风机进口空气流动特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 46-53, 前插 7.
- ZHANG Hui, GENG Xueliang, GUO Mu, et al. Inlet flow characteristics of fans in direct dry cooling systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 46-53, 前插 7.
- [29] 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 Xinbo, LUO Zhiling, FENG Pengyuan, et al. Experimental study on inlet air flow characteristics of direct air-cooling fan arrays under the action of ambient wind [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(2): 152-159, 172.
- [30] 黄鹤, 赵廷进. 环境风影响下空冷风机群的分区调节[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(6): 50-55.
- HUANG He, ZHAO Tingjin. Divisional regulation of fan cluster for direct air-cooled units in wind environment [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(6): 50-55.
- [31] HUANG Wenhui, CHEN Lei, WANG Weijia, et al. Cooling performance optimization of direct dry cooling system based on partition adjustment of axial flow fans [J]. Energies, 2020, 13(12): 3179.
- [32] HUANG Wenhui, CHEN Lei, YANG Lijun, et al. Energy-saving strategies of axial flow fans for direct dry cooling system [J]. Energies, 2021, 14(11): 3176.
- [33] 白焰, 李健, 张超, 等. 基于聚类分析的直接空冷机组数值模拟分区研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(2): 91-102.
- BAI Yan, LI Jian, ZHANG Chao, et al. Numerical simulation divisional study of direct air-cooled units based on cluster analysis [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(2): 91-102.
- [34] LUO Zhiling, LIU Jizhen, HUUSOM J K. Energy-efficient operation of a direct air-cooled condenser based on divisional regulation [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 132: 233-242.
- [35] LUO Zhiling, YAO Qi. Multi-model-based predictive control for divisional regulation in the direct air-cooling condenser [J]. Energies, 2022, 15(13): 4803.
- [36] GU Zhifu, CHEN X, LUBITZ W, et al. Wind tunnel simulation of exhaust recirculation in an air-cooling system at a large power plant [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(3): 308-317.
- [37] GAO Pei, ZHANG Xuelei, YU Xinwei. The effects of environment wind on heat transfer performance of direct air cooled island and its improvements [J]. Advanced Materials Research, 2013, 753-755: 2752-2756.
- [38] WANG Zhi, LIU Yali, YAN Ruiming. The ambient wind impact on eddy current distribution in air cooling island [J]. AIP Advances, 2019, 9(12): 125148.
- [39] 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 Guodong, ZHANG Ruiying, et al. Analysis of flow and heat transfer performances of small-scale direct dry cooling system under ambient wind [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(6): 106-112.
- [40] 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, 2009, 29(10): 956-959, 965.
- DING Changfu, DING Zhenyu, HOU Naiming, et al. Numerical simulation of a direct air-cooled condenser installed with windshield [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(10): 956-959, 965.
- [41] 杨建国, 刘达, 张兆营, 等. 加装导流网以改善横向风对直接空冷凝汽器的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(2): 1-8.
- YANG Jianguo, LIU Da, ZHANG Zhaoying, et al. Effects of using wind guiding nets to improve prevailing ambient wind on direct air-cooled condensers [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 1-8.
- [42] HUANG Xianwei, CHEN Lin, KONG Yanqiang, et al. Effects of geometric structures of air deflectors on thermo-flow performances of air-cooled condenser [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 1022-1039.
- [43] HUANG Wenhui, HUANG Xianwei, YANG Lijun, et al. Influences of lateral double-layered deflectors on cooling performance of air-cooled condenser [J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(6): 2164-2177.
- [44] BAI Jianyun, SHAO Jiaxiao. 300MW CFB direct air cooled system frostproof control strategy optimization [C]//2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 372-

- 376.
- [45] 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]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4896-4906.
- CHEN Lei, HOU Yichen, WANG Weijia, et al. Controlling logic and numerical simulation of energy-efficient anti-freezing operation for direct dry cooling system in power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4896-4906.
- [46] 白逢. 直接空冷凝汽器防冻卷帘的设计 [J]. 内蒙古电力技术, 2018, 36(3): 63-66.
- BAI Feng. Design of direct air-cooled condenser anti-freeze curtains [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2018, 36(3): 63-66.
- [47] 范景利, 姚坤, 万杰, 等. 极寒地区大型供热机组直接空冷凝汽器挡风防冻装置的优化设计 [J]. 电站系统工程, 2020, 36(5): 39-42.
- FAN Jingli, YAO Kun, WAN Jie, et al. Wind-shield and anti-freeze device's optimal design of direct air-cooling condenser for large heating units in extreme cold region [J]. Power System Engineering, 2020, 36(5): 39-42.
- [48] 师进文, 王子豪, 李高潮, 等. 火电机组直接空冷岛顶部防冻百叶窗仿真计算 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 180-187.
- SHI Jinwen, WANG Zihao, LI Gaochao, et al. Simulation calculation of antifreeze shutter on top of direct air-cooled island of thermal power unit [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 180-187.
- [49] GONZALEZ A V, MEANA-FERNÁNDEZ A, FERNÁNDEZ J M. Stator-rotor interaction in the tip leakage flow of an inlet vaned low-speed axial fan [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2020, 30(10): 4425-4452.
- [50] 李林凌, 黄其柏, 乔宇锋. 轴流风机叶片紊流噪声模型及其特性研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(10): 1056-1059.
- LI Linling, HUANG Qibai, QIAO Yufeng. Research on model of the vortex noise of axial fan blade and its characteristics [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(10): 1056-1059.
- [51] 罗柏华, 刘宇陆. 湍流边界层流场与噪声实验研究 [J]. 实验力学, 2001, 16(4): 378-386.
- LUO Baihua, LIU Yulu. An experimental study on the turbulent boundary layer flow field and its noise [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4): 378-386.
- [52] 刘碧龙, 常道庆. 湍流边界层引起的结构响应和噪声辐射研究 [J]. 科技资讯, 2016, 14(30): 185.
- LIU Bilong, CHANG Daoqing. The vibration and noise radiation of the plate induced by the turbulent boundary layer [J]. Science & Technology Information, 2016, 14(30): 185.
- [53] 唐俊, 王军, 雋智辉, 等. 正弦锯齿尾缘对轴流风机尾迹及气动性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(10): 2145-2150.
- TANG Jun, WANG Jun, JUAN Zhihui, et al. The influence of sinusoidal serrated trailing edge on the wake and aerodynamic performance of axial fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(10): 2145-2150.
- [54] GÉRARD A, MOREAU S, BERRY A, et al. Design of multi-modal obstruction to control tonal fan noise using modulation principles [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 356: 34-47.
- [55] 李春曦, 林卿, 叶学民. 单动叶安装角异常时轴流风机的噪声特性 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1183-1192.
- LI Chunxi, LIN Qing, YE Xuemin. Acoustic characteristics of an axial flow fan with abnormal installation angle of single blade [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1183-1192.
- [56] 吕建民, 徐成宇, 于洪文. 基于鸮翼羽表面结构的风机叶片仿生降噪研究 [J]. 机械研究与应用, 2017, 30(6): 96-99.
- LÜ Jianmin, XU Chengyu, YU Hongwen. Study on bionic drag reduction of fan blade based on long-eared owl wing plume structure [J]. Mechanical Research & Application, 2017, 30(6): 96-99.
- [57] 杨冰冰, 李超宇, 王松岩. 对旋轴流风机叶片穿孔的气动噪声研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(8): 243-245.
- YANG Bingbing, LI Chaoyu, WANG Songyan. Study on aerodynamic noise of counter-rotating axial fan with holes in blade [J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 243-245.
- [58] 朱芳勇, 吴俊鸿, 高旭, 等. 空调低压轴流弯掠叶片参数化优化设计与实验研究 [J]. 制冷技术, 2019, 39(3): 17-21.
- ZHU Fangyong, WU Junhong, GAO Xu, et al. Parametric optimization design and experimental research on skewed-swept blade of low pressure axial fan of air conditioner [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(3): 17-21.
- [59] LIU Naitong, JIANG Changyong, HUANG Lixi, et al. Effect of porous casing on small axial-flow fan noise [J]. Applied Acoustics, 2021, 175: 107808.
- [60] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2004: 83-86.
- [61] 王升龙, 陈东伟, 王建江, 等. 空冷凝汽器翅片管流

- 态化清洗的数值模拟 [J]. 化工机械, 2014, 41(4): 510-513.
- WANG Shenglong, CHEN Dongwei, WANG Jianjiang, et al. Numerical simulation of fluidized cleaning of air-cooled condenser finned tube [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2014, 41(4): 510-513.
- [62] 王升龙, 王建江, 陈东伟, 等. 椭圆管矩形翅片清洗影响因素的数值分析与优化 [J]. 汽轮机技术, 2015, 57(1): 53-56.
- WANG Shenglong, WANG Jianjiang, CHEN Dongwei, et al. Numerical analysis and optimization of factors affecting rectangular Fins elliptical tube cleaning [J]. Turbine Technology, 2015, 57(1): 53-56.
- [63] 王建江, 李涛, 景雪晖, 等. 直接空冷凝汽器翅片管污垢层清洗的数值研究 [J]. 化工进展, 2016, 35(z2): 99-102.
- WANG Jianjiang, LI Tao, JING Xuehui, et al. Numerical investigation on fouling cleaning of direct air cooled condenser finned tube [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(z2): 99-102.
- [64] 赵波, 杨善让, 张纲, 等. 空冷凝汽器积灰干式吹扫系统现场实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(35): 28-35.
- ZHAO Bo, YANG Shanrang, ZHANG Gang, et al. A site simulation test on compressed air blowers for ash fouling of air cooled condensers [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(35): 28-35.
- [65] 王润全, 呼浩. 直接空冷岛清洗装置的结构分析与优化 [J]. 中国高科技, 2021(4): 159-160.
- WANG Runquan, HU Hao. Structural analysis and optimization of direct air cooling island cleaning device [J]. China High and New Technology, 2021(4): 159-160.
- [66] 高沛, 张学镭. 环境风影响直接空冷凝汽器换热的研究综述 [J]. 电力建设, 2013, 34(7): 81-84.
- GAO Pei, ZHANG Xuelei. Research review of environmental wind influence on heat transfer of direct air-cooled condenser [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 81-84.
- [67] ZHANG Yi, ZHANG Fan, SHEN Jiong. On the dynamic modeling and control of the cold-end system in a direct air-cooling generating unit [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 151: 373-384.
- [68] OKBAZ A, PINARBAŞI A, OLCAY A B. Experimental investigation of effect of different tube row-numbers, fin pitches and operating conditions on thermal and hydraulic performances of louvered and wavy finned heat exchangers [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 151: 106256.
- [69] OUYANG Xinping, HU Huihui. Simulation study on optimal structure of circular corrugated finned tube [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 179: 107622.
- [70] HAN Hui, HE Yaling, LI Yinshi, et al. A numerical study on compact enhanced fin-and-tube heat exchangers with oval and circular tube configurations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65: 686-695.
- [71] ZHUKOVA Y V, TEREKH A M, ISAEV S A. Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different Reynolds numbers [J]. Heat Transfer Research, 2020, 51(15): 1383-1397.
- [72] HAQUE M R, RAHMAN A. Numerical investigation of convective heat transfer characteristics of circular and oval tube banks with vortex generators [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(1): 457-467.
- [73] TANG Linghong, DU Xueping, PAN Jie, et al. Air inlet angle influence on the air-side heat transfer and flow friction characteristics of a finned oval tube heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 145: 118702.
- [74] 杨立军, 杜小泽, 杨勇平. 间接空冷系统空冷散热器运行特性的数值模拟 [J]. 动力工程, 2008, 28(4): 594-599.
- YANG Lijun, DU Xiaoze, YANG Yongping. Numerical simulation of operation characteristics for air-cooled radiator in indirect air cooling system [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(4): 594-599.
- [75] 杨立军, 贾思宁, 卜永东, 等. 电站间冷系统空冷散热器翅片管束流动传热性能的数值研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 50-57.
- YANG Lijun, JIA Sining, BU Yongdong, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of finned tube bundles for air-cooled heat exchangers of indirect dry cooling systems in power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(32): 50-57.
- [76] DU Xueping, YIN Yantao, ZENG Min, et al. An experimental investigation on air-side performances of finned tube heat exchangers for indirect air-cooling tower [J]. Thermal Science, 2014, 18(3): 863-874.
- [77] MISHRA M, DAS P K, SARANGI S. Transient behaviour of crossflow heat exchangers due to perturbations in temperature and flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(5/6): 1083-1089.
- [78] MISHRA M, DAS P K, SARANGI S. Dynamic behavior of three-fluid crossflow heat exchangers [J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(1): 011801.

- [79] 闫景波, 杨立军. 电站空冷散热器动态传热特性研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 89-94.
- YAN Jingbo, YANG Lijun. Study on dynamic heat transfer characteristics of air-cooled heat exchanger in power plants [J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2020, 47(2): 89-94.
- [80] YANG Lijun, CHEN Lei, DU Xiaoze, et al. Effects of ambient winds on the thermo-flow performances of indirect dry cooling system in a power plant [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 64: 178-187.
- [81] YANG Lijun, WU Xiaodan, DU Xiaoze, et al. Dimensional characteristics of wind effects on the performance of indirect dry cooling system with vertically arranged heat exchanger bundles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 853-866.
- [82] WU Xiaodan, YANG Lijun, DU Xiaoze, et al. Flow and heat transfer characteristics of indirect dry cooling system with horizontal heat exchanger A-frames at ambient winds [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 79: 161-175.
- [83] LU Yuanshen, GUAN Zhiqiang, GURGENCI H, et al. Experimental study of crosswind effects on the performance of small cylindrical natural draft dry cooling towers [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 91: 238-248.
- [84] 王海涛, 梅雪松, 王海军, 等. 环境侧风及大气逆温作用下的 AP1000 核电机组间接空冷系统热力特性的数值研究 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1097-1104.
- WANG Haitao, MEI Xuesong, WANG Haijun, et al. Numerical study on thermodynamic characteristics of indirect dry cooling system for AP1000 nuclear power plant under environmental crosswind and temperature inversion [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1097-1104.
- [85] GU Hongfang, WANG Haijun, GU Yuqian, et al. A numerical study on the mechanism and optimization of wind-break structures for indirect air-cooling towers [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 108: 43-49.
- [86] ZHOU Jianxin, MA Huan, SI Fengqi, et al. To broaden safe operation range of the indirect dry cooling system with internal annular windbreak cloth in extremely cold days [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 420-429.
- [87] YAN Jingbo, WANG Weijia, CHEN Lei, et al. Enhancement of thermo-flow performances by windbreakers for two-tower indirect dry cooling system [J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(3): 676-686.
- [88] WU Tao, GE Zhihua, YANG Lijun, et al. Flow deflectors to release the negative defect of natural wind on large scale dry cooling Tower [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 248-269.
- [89] CHEN Lei, YANG Lijun, DU Xiaoze, et al. Anti-freezing of air-cooled heat exchanger by air flow control of louvers in power plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 537-550.
- [90] WANG Weijia, KONG Yanqiang, HUANG Xianwei, et al. Anti-freezing of air-cooled heat exchanger by switching off sectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 327-339.
- [91] WEI Huimin, YANG Xiaoru, GE Zhihua, et al. Anti-freezing of natural draft dry cooling system of power generation by water re-distribution during winter [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119194.
- [92] 王伟佳, 孔艳强, 温新宇, 等. 电站间接空冷散热器管束防冻预测模型及数值验证和实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6357-6367.
- WANG Weijia, KONG Yanqiang, WEN Xinyu, et al. Anti-freezing predicting models, numerical verification and experimental research for air-cooled heat exchanger tube bundles of natural draft dry cooling system in power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6357-6367.
- [93] 荆涛, 徐志强, 韩立, 等. 寒冷气候下环境风速对电厂双间接空冷塔性能影响的模拟研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(5): 160-169, 184.
- JING Tao, XU Zhiqiang, HAN Li, et al. Simulation study on influence of environmental wind speed on double indirect air-cooling towers performance in cold climate [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2022, 40(5): 160-169, 184.
- [94] 康卫东, 李高潮, 王子豪, 等. 基于环境风温-冷却水温耦合计算的间接空冷塔冬季运行及防冻研究 [J/OL]. 华东理工大学学报(自然科学版)[2022-11-25]. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220601001>.
- KANG Weidong, LI Gaochao, WANG Zihao, et al. Research on winter operation and frost protection of indirect air-cooled Tower based on coupling calculation of ambient air temperature and cooling water temperature [J/OL]. Journal of East China University of Science and Technology [2022-11-25]. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220601001>.

- [95] 马洪发, 曾艳丽, 刘光恒, 等. 电站间接空冷机组专用自动伸缩式清洗系统 [J]. 清洗世界, 2012, 28(10): 33-39.
- MA Hongfa, ZENG Yanli, LIU Guangheng, et al. Power station indirect air-cooled units special automatic telescopic cleaning system [J]. Cleaning World, 2012, 28(10): 33-39.
- [96] 马洪发, 张振洲, 刘锋, 等. 电站空冷机组专用塔内仿形可换位式清洗装置 [J]. 清洗世界, 2016, 32(2): 42-48.
- MA Hongfa, ZHANG Zhenzhou, LIU Feng, et al. Imitation plant air cooling unit with Tower can be transposed type cleaning device [J]. Cleaning World, 2016, 32(2): 42-48.
- [97] 唐贵富, 吕艳, 马洪发, 等. 大型空冷散热器高效全自动清洗技术及装备 [J]. 管道技术与设备, 2021(6): 38-40.
- TANG Guifu, LÜ Yan, MA Hongfa, et al. Efficient full-automatic cleaning technology and equipment for large air-cooled radiators [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2021(6): 38-40.
- [98] 王卫良, 倪维斗, 王哲, 等. 间接空冷塔受侧风影响研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 882-890.
- WANG Weiliang, NI Weidou, WANG Zhe, et al. A review on the research of a dry cooling tower affected by cross wind [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 882-890.
- [99] WANG Chaoyang, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Dynamic modeling and operation optimization for the cold end system of thermal power plants during transient processes [J]. Energy, 2018, 145: 734-746.
- [100] 徐玫, 肖斌, 周治, 等. 塔式太阳能热发电站中空冷凝汽器运行特性的研究 [J]. 太阳能, 2020(9): 69-75.
- XU Mei, XIAO Bin, ZHOU Zhi, et al. Study on operation characteristics of air-cooled condenser of tower CSP station [J]. Solar Energy, 2020(9): 69-75.
- [101] ZOU Zheng, GUAN Zhiqiang, GURGENCI H, et al. Solar enhanced natural draft dry cooling tower for geothermal power applications [J]. Solar Energy, 2012, 86(9): 2686-2694.
- [102] KHAN T A, LI Wei. Optimal configuration of vortex generator for heat transfer enhancement in a plate-fin channel [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2018, 10(2): 021013.
- [103] LEMOUEDDA A, BREUER M, FRANZ E, et al. Optimization of the angle of attack of delta-winglet vortex generators in a plate-fin-and-tube heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23/24): 5386-5399.
- [104] DAMAVANDI M D, FOROUZANMEHR M, SAFIKHANI H. Modeling and Pareto based multi-objective optimization of wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers using CFD and NSGA-II algorithm [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 325-339.
- [105] BAI Jianyun, MENG Xinyu, QU Yan, et al. Prediction of outlet air temperature of direct air condenser based on BP neural network [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1303(1): 012014.
- [106] CHEN Heng, PENG Weike, NIE Chunming, et al. Performance prediction and optimization of the air-cooled condenser in a large-scale power plant using machine learning [J]. Energy Technology, 2021, 9(7): 2100045.
- [107] 徐松泉, 杨博, 文珏, 等. 基于弗留格尔公式和大数据的空冷机组关键问题探讨 [J]. 发电设备, 2020, 34(2): 144-148.
- XU Songquan, YANG Bo, WEN Jue, et al. Discussion on key problems in air-cooling units based on Fluegel formula and big data [J]. Power Equipment, 2020, 34(2): 144-148.
- [108] 聂椿明, 安留明, 徐钢, 等. 基于大数据的燃煤电站空冷岛运行实时优化策略 [J]. 动力工程学报, 2021, 41(9): 713-720, 728.
- NIE Chunming, AN Liuming, XU Gang, et al. Real time optimization strategy for air cooling island operation of coal fired power station based on big data [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(9): 713-720, 728.
- [109] 彭维珂, 聂椿明, 陈衡, 等. 基于智能算法的空冷火电机组负荷预测研究 [J]. 华电技术, 2021, 43(3): 57-64.
- PENG Weike, NIE Chunming, CHEN Heng, et al. Study on load forecasting for air cooling thermal power units based on intelligent algorithm [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 57-64.

(编辑 武红江)