

Design and Energy Efficiency Analysis of Anti-freezing System for Cooling Towers in Thermal Power Plants in Severe Cold Regions

Man Li Huiqing Qi Qiang Han Yiming Xie Qian Shi

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

Abstract

In cold regions, the operation of cooling towers in thermal power plants is prone to issues such as ice blockage due to low temperatures and strong winds, making the design of anti-freezing systems and energy efficiency optimization crucial. This study focuses on the design and energy efficiency analysis of anti-freezing systems. At the design level, it clarifies the objectives of the anti-freezing system and establishes a correlation model with environmental thermal parameters, adopting an active-passive synergistic technical approach combined with intelligent PLC/DCS control systems. At the energy efficiency level, it constructs a direct and indirect evaluation index system, develops a calculation model for energy consumption of active technologies and energy-saving benefits of passive measures, and proposes strategies for multi-scheme optimization, dynamic adjustment, and waste heat cascade utilization. The research provides technical support for the safe operation and energy efficiency improvement of cooling towers in thermal power plants in cold regions, achieving a balance between anti-freezing safety and economic operation.

Keywords

Severe cold regions; Thermal power plants; Cooling tower antifreeze system; energy efficiency

严寒地区火电厂冷却塔防冻系统设计与能效分析

李满 齐慧卿 韩强 谢一鸣 石茜

山东电力工程咨询院有限公司, 中国·山东 济南 250013

摘要

严寒地区火电厂冷却塔运行易受低温、强风等气候影响, 出现结冰堵塞等问题, 防冻系统设计与能效优化至关重要。本文围绕防冻系统设计与能效分析展开研究, 设计层面明确防冻系统设计目标与环境热力参数关联模型, 采用主动与被动协同技术路线, 搭配PLC/DCS智能控制系统, 能效层面构建直接、间接评价指标体系, 建立主动技术能耗与被动措施节能效益计算模型, 提出多方案寻优、动态调节及余热梯级利用策略。研究为严寒地区火电厂冷却塔安全运行与能效提升提供技术支撑, 实现防冻安全与经济运行的平衡。

关键词

严寒地区; 火电厂; 冷却塔防冻系统; 能效

1 引言

冷却塔作为火电厂冷却系统的关键设备, 发挥着多重作用。我国北方地区, 特别是东北地区, 纬度较高, 冬季严寒而漫长, 冷却塔易因结冰严重而出现配水系统、淋水系统故障, 致使热力性能衰减, 甚至导致塔体结构受损, 严重影响机组运行^[1]。因此, 需做好冷却塔防冻系统设计, 并通过科学、精准的能效分析, 降低能耗成本。

【作者简介】李满(1982-), 男, 中国山东济南人, 教授级高工, 硕士, 从事发电项目水工及消防系统的咨询、设计、研究。

2 严寒地区火电厂冷却塔防冻系统设计

2.1 防冻设计目标与环境参数分析

冷却塔防冻系统的核心设计目标有三: 一是保障结构安全。避免淋水填料、除水器、管道及塔体构件因结冰膨胀造成开裂、变形或坍塌。二是保障热力性能。在极端低温工况下维持冷却塔额定散热能力, 确保循环水出水温度满足机组发电需求。三是保障能效最优。在实现防冻目标的前提下, 最小化防冻系统的能耗投入, 避免能源浪费。为实现上述目标, 需明确关键防冻阈值, 包括淋水密度下限、局部水温临界值及进塔空气温度预警值, 为系统运行提供明确依据。

防冻系统设计需以精准的参数分析为基础, 核心参数包括极端气候参数与冷却塔热力性能参数两大类。气候参数方面, 需重点收集当地极端最低气温、持续低温天数、平均

风速及最大风速、相对湿度及降雪量等数据,通过统计分析确定防冻极端工况、常规防冻工况的边界条件。

热力性能参数方面,需结合火电厂机组容量确定循环水流量、设计进出水温度及冷却塔额定冷却面积等核心参数,通过热力计算明确不同水温、水量条件下的散热需求。重点分析低温对热力性能的影响,并构建气候参数、热力性能与结冰风险的关联模型,为后续技术方案设计提供量化依据。

2.2 防冻系统核心技术方案

采用主动防冻技术、被动防冻措施相结合的技术方案,实现实现全工况防冻覆盖。主动防冻技术包括热水回流旁通设计、空气预热系统及分区配水与流量调节三类。热水回流旁通即将循环水系统中的高温回水部分引至冷却塔淋水填料区或进风口区域,通过提升局部水温与环境温度,抑制冰层形成。空气预热系统利用电厂余热加热进塔空气,通过预热器将进塔冷空气温度提升至零度以上,从源头减少结冰风险。

被动防冻措施包括塔体结构优化、填料与除水器选型及伴热与保温设计。塔体结构优化重点从进风口、塔体围护入手,采用变高度导流式进风口设计,引导冷空气从较高位置进入,减少与淋水区域直接接触。填料与除水器选用耐低温、抗冻融的专用产品,填料采用改性材质与斜波式结构,提升散热面积并便于冰层脱落。除水器采用V型倾斜式结构并做疏水涂层处理,减少水滴夹带与附着。伴热与保温设计针对不同部位采用差异化方案,大直径管道采用蒸汽伴热,小型构件采用电伴热,外部包裹适配保温材料,通过热损失计算确定参数,确保关键部位温度稳定。防冻卷帘作为关键被动防冻措施,适配冷却塔进风口区域安装。

2.3 控制系统设计

控制系统采用PLC与DCS集成设计,以PLC为现场控制核心,DCS为中央监控平台,实现全工况自动化控制。监测系统布设多类型传感器,在冷却塔进风口、淋水填料区、出风口设置温度传感器,实时监测空气与水温。在填料表面与塔体构件设置结冰探测器。在循环水管道与旁通管道设置流量、压力传感器,全面获取系统运行参数。

控制逻辑采用三级调控模式,一级调控为常规防冻,当进塔空气处于较高温度区间时,仅启动被动防冻措施。二级调控为强化防冻,当进塔空气温度降低或探测到薄冰层时,启动热水旁通系统与空气预热系统,按比例投入负荷。三级调控为紧急防冻,当冰层厚度超标或局部水温过低时,启动全系统防冻,提升旁通流量并降低循环水流量,若仍无法控制则触发停运预警联动机组降负荷。

将节能优化逻辑融入控制系统中,通过动态负荷调节及设备联动实现节能优化。根据环境温度变化实时调整防冻设备负荷,避免过度投入。将防冻系统与机组负荷联动,提前应对循环水流量变化带来的防冻风险。

3 严寒地区火电厂冷却塔防冻系统能效分析

3.1 严寒地区火电厂冷却塔防冻系统能效评价指标体系

能效评价指标是能效分析的依据,需从兼顾局部能效、整体影响的角度出发,构建包括直接指标、间接指标在内的双层评价体系,使能效分析的结果既能反映防冻系统自身能源利用效率,也能体现其对火电厂整体经济性的影响^[2]。

直接指标包括防冻能效比、热力性能保障率、单位防冻效果能耗三类,用于量化防冻系统能源投入与效果产出比。防冻能效比作为核心指标,为冷却塔防冻工况下的有效热力输出与防冻系统总能耗的比值,计算公式为 $\eta=Q/E$,其中Q为防冻系统保障的冷却塔额外散热增量,E为防冻系统各类技术的能耗总和。该指标数值越大,单位能耗的热力保障效果越好。热力性能保障率是评估防冻系统对冷却塔主要功能保障能力的指标,计算公式为 $K=\Delta t_{\text{防冻}}/\Delta t_{\text{设计}}\times 100\%$,其中 $\Delta t_{\text{防冻}}$ 为防冻工况下实际进出水温差, $\Delta t_{\text{设计}}$ 为额定工况下的设计温差。单位防冻效果能耗即实现单位防冻效果所需的能耗,主要用于对比不同防冻技术的能效差异,能够为技术选型提供依据。计算公式为 $e=E_{\text{单技术}}/\Delta Q_{\text{单技术}}$,其中 $E_{\text{单技术}}$ 为单一防冻技术的能耗, $\Delta Q_{\text{单技术}}$ 为该技术带来的散热增量。

间接能效指标从电厂整体运营维度评价经济性,主要指标包括单位发电量防冻附加煤耗与寿命周期成本分析两类。单位发电量防冻附加煤耗为因启用防冻系统导致的额外煤耗与对应发电量的比值,计算公式为 $b=(E\times\beta)/W$,其中 β 为电厂发电煤耗率,W为防冻工况下电厂的小时发电量,直接反映防冻系统对电厂煤耗的影响。寿命周期成本分析涵盖初始投资成本、运行维护成本、能耗成本及残值,计算公式为 $LCC=C_{\text{初}}+C_{\text{运}}+C_{\text{能}}-S$,其中 $C_{\text{初}}$ 为购置安装费用, $C_{\text{运}}$ 为检修更换费用, $C_{\text{能}}$ 为能耗费用,S为残值,可避免重初始投资轻运行成本的误区,体现长期经济性。

3.2 严寒地区火电厂冷却塔防冻系统能耗计算模型

能耗计算是能效分析的基础,需针对主动防冻技术与被动防冻措施分别建立量化模型,测算主动防冻技术的能耗投入以及被动防冻措施的节能效益。

主动防冻技术能耗计算按技术类型分别建模,热水旁通系统能耗主要为旁通水泵的电耗,计算公式为 $E_{\text{旁通}}=(\rho\times Q_{\text{旁通}}\times H\times t)/(3600\times\eta_{\text{泵}}\times\eta_{\text{电}})$,其中 ρ 为水的密度, $Q_{\text{旁通}}$ 为旁通流量,H为水泵扬程,t为运行时间, $\eta_{\text{泵}}$ 为水泵运行效率, $\eta_{\text{电}}$ 为电厂供电效率,该模型可精准核算旁通系统的能源消耗。空气预热系统能耗取决于热源类型,采用通用计算公式 $E_{\text{预热}}=Q_{\text{热}}/(\eta_{\text{换热}}\times\eta_{\text{热源}})$, $Q_{\text{热}}$ 为预热空气所需的总热量, $\eta_{\text{换热}}$ 为预热器换热效率, $\eta_{\text{热源}}$ 为热源利用效率。 $Q_{\text{热}}$ 的计算公式为 $\rho_{\text{气}}\times V_{\text{气}}\times c_{\text{气}}\times\Delta t_{\text{气}}$, $\rho_{\text{气}}$ 为空气密度, $V_{\text{气}}$ 为进塔空气量, $c_{\text{气}}$ 为空气比热容, $\Delta t_{\text{气}}$ 为预热温升。采用余热热源时,能

耗为机会成本，采用主动热源时，需计算热源消耗，通过模型可清晰对比不同热源的能耗差异。分区分水与流量调节能耗主要为阀门节流损失与分区水泵附加能耗，计算公式为 $E_{配水} = E_{节流} + E_{分区泵}$ ， $E_{节流}$ 按总循环水泵能耗的一定比例计算， $E_{分区泵}$ 采用与旁通水泵类似的电耗计算公式，其流量较低故能耗相对较小^[3]。

被动防冻措施节能效益通过有无对比法结合数值模拟量化。塔体结构优化节能效益采用 CFD 流场模拟，对比有无结构优化措施下的塔内流场与热损失差异，建立热损失减

少量与主动系统能耗降低的关联关系，量化结构优化带来的节能效果。保温与伴热系统节能效益为有无保温时的热损失差值，计算公式为 $\Delta Q_{保温} = K \times A \times \Delta t \times t$ ，其中 K 为保温层传热系数， A 为保温面积， Δt 为保温层内外温差， t 为运行时间，通过该模型可核算保温措施减少的伴热系统能耗。填料与除水器选型节能效益通过热力性能试验测定，量化高效填料提升散热效率后减少的主动防冻系统负荷投入，明确不同材料选型的能效优势。

表 1 防冻系统能效评价指标

指标类型	指标名称	指标定义	指标公式	指标意义
直接指标	防冻能效比 (η)	防冻工况下有效热力输出与防冻系统总能耗的比值	$\eta = Q/E$	数值越大，单位能耗的热力保障效果越优，是核心评价指标
	热力性能保障率 (K)	评价防冻系统对冷却塔核心功能的保障能力	$K = \Delta t_{防冻} / \Delta t_{设计} \times 100\%$	需与能效比结合使用，控制在合理区间，平衡热力保障能力与系统能耗
	单位防冻效果能耗 (e)	实现单位防冻效果所需的能耗，用于对比不同防冻技术能效差异	$e = E_{单技术} / \Delta Q_{单技术}$	为防冻技术选型提供直接依据，直观反映不同技术的能效优劣
间接指标	单位发电量防冻附加煤耗 (b)	启用防冻系统产生的额外煤耗与对应发电量的比值	$b = (E \times \beta) / W$	直接反映防冻系统对电厂煤耗的影响，体现运营阶段经济性
	寿命周期成本分析 (LCC)	涵盖初始投资、运行维护、能耗成本及残值的全周期成本核算	$LCC = C_{初} + C_{运} + C_{能} - S$	避免重初始投资轻运行成本的误区，全面体现防冻方案的长期经济性

3.3 严寒地区火电厂冷却塔防冻系统能效优化策略

基于能效评价指标与能耗计算模型，通过多方案寻优、动态调节、余热整合策略，提升防冻系统能效。

采用正交试验与遗传算法相结合的方式寻找最优方案。以热水旁通流量、空气预热温度、分区分水比例为关键因素，设置不同水平，构建正交试验，测定各组合的能效比与寿命周期成本，筛选关键因素及最优水平组合。在此基础上，采用遗传算法以能效比最大、寿命周期成本最小为双目标函数进行迭代寻优，进一步优化运行参数，提升系统能效。

基于预测控制算法，构建包括气象预测、负荷计算、参数调节的闭环控制逻辑。采集未来 24h 的气象预测数据，如气温、湿度、风速等，并输入能耗计算模型，预测不同工况下的防冻需求，根据预测结果，动态调整运行参数。当预测有气温下降或降雪、大风等恶劣天气时，预先强化关键区域防冻措施，当预测气温上升时，降低主动防冻设备负荷，从而实现不同工况下的能效最优。

整合火电厂低品位余热资源，通过构建梯级利用体系，实现余热利用最大化。余热利用分为三级，一级利用采用汽轮机排汽等高温余热加热进塔空气，满足空气预热系统主要热量需求，二级利用采用脱硫废水等中温余热加热旁通热水，提升旁通水初始温度，三级利用采用锅炉尾部烟气等低温余热预热伴热系统的热源。

4 结语

火电厂冷却塔的防冻性能直接决定机组运行的安全性与经济性。应结合严寒地区的气候特点，做好冷却塔防冻系统设计，并通过能效分析，探索提升能效的策略。

参考文献

- [1] 易瑞吉, 陆俊, 武颖利, 等. 火电厂冷却塔结构服役安全状况评估方法研究[J]. 工程质量, 2025, 43 (01): 33-38.
- [2] 柳桐. 冬季严寒地区湿式冷却塔防冻措施探究[J]. 应用能源技术, 2018 (11): 22-25.
- [3] 李昌明. 火电厂冷却塔存在的问题及优化策略研究[J]. 冶金丛刊, 2016 (04): 35-36.