大型自然通风冷却塔水风协同风量优化改造研究及工程应用

缪文彬 谢海东 顾珉

上海华电电力发展有限公司望亭发电分公司，中国 ·江苏 苏州 215155

摘要：针对大型双曲线逆流自然通风冷却塔普遍存在塔内配风不均、中心区域通风量不足、冷却能力受限的共性问题，以上海华电电力发展有限公司望亭发电分公司 3 号 660MW 机组冷却塔为研究对象，提出一套集低阻托架、内区大孔径整流装置、下沉式高效喷溅、池面负压引风装置、填料分区扩容布置于一体的水风协同超效换热改造技术方案。改造完成后委托第三方检测机构按照 DL/T 1027−2006 进行热力性能对比试验，结果表明：冷却塔出塔水温在设计工况条件下比改造前降低 1.33℃，冷却能力由 98.86% 提升至 115.41%，改造效果显著。经热力换算，机组供电煤耗可降低 0.665g/(kW・h)，年节约标准煤超 2578 t，兼具显著节能效益与降碳价值。该成套风量优化改造技术可有效均衡塔内竖向、径向流场，解决传统冷却塔内区换热短板，为同类型老旧自然通风冷却塔增效改造提供工程参考。

关键词：自然通风冷却塔；水风协同；风量优化；热力性能；节能改造

Research and Engineering Application on Air Volume Optimization Retrofit of Large Natural Draft Cooling Tower by Water−Air Synergy

Miao Wenbin, Xie Haidong, Gu Min

Wangting Power Branch, Huadian Electric Power Development Co., Ltd., Shanghai, China Jiangsu Suzhou 215155

Abstract: Aiming at the common problems prevailing in large-scale hyperbolic counter-flow natural draft cooling towers, including uneven air distribution inside the tower, insufficient air flow in the central zone and limited cooling capacity, this paper takes the cooling tower of Unit 3 (660 MW) at Wangting Power Branch of Shanghai Huadian Power Development Co., Ltd. as the research object. A comprehensive technical scheme for water-air coordinated ultra-high-efficiency heat transfer retrofitting is proposed, which integrates low-resistance brackets, large-aperture flow rectification devices for inner zones, submerged high-efficiency splash components, negative-pressure air-inducing devices at the pond surface, and partitioned expanded packing layout.After retrofitting, a third-party testing institution was commissioned to carry out comparative thermal performance tests in accordance with DL/T 1027-2006. The test results show that under design operating conditions, the outlet water temperature of the cooling tower decreases by 1.33 ℃ compared with that before retrofitting, and the cooling capacity increases from 98.86 % to 115.41 %, demonstrating remarkable retrofitting effects. Thermal calculation indicates that the net coal consumption for power supply of the unit can be reduced by 0.665 g/(kW·h), with an annual standard coal saving of over 2578 t, achieving prominent energy-saving and carbon-reduction benefits. This complete-set air-volume optimization retrofitting technology can effectively balance the vertical and radial flow fields inside the tower and overcome the heat-transfer bottleneck in the inner zone of conventional cooling towers. It provides engineering references for efficiency-improvement retrofitting of similar aging natural draft cooling towers.

Keywords: Natural draft cooling tower; Water-air coordination; Air-volume optimization; Thermal performance; Energy-saving retrofitting

0 引言

双曲线逆流自然通风冷却塔是火电机组循环水系统核心换热设备，依靠塔筒内外空气密度差形成的自然抽力驱动空气与下落热水逆向换热，冷却性能直接决定凝汽器真空与机组供电煤耗。国内大量 2000—2010 年投运的大型冷却塔经十余年长期运行，存在填料堵塞老化、塔内流场分

布失衡、中心区域风量匮乏等问题，冷却潜力无法充分释放。常规改造仅更换淋水填料，仅能小幅提升换热面积，无法从根本上解决“外围风量大、塔芯通风弱”的固有流场缺陷，冷却提效幅度有限。

1 项目背景

1.1 项目的提出

望亭电厂 3 号机组配套冷却塔为 2009 年投运大型双曲线自然通风逆流冷却塔，设计淋水面积 9000 m^2，实际有效淋水面积 8600 m^2，设计年均气象条件下出塔水温 22.7 ℃，设计进出水温差 9.53 ℃。2017 年该厂实施填料单一优化改造，改造后冷却能力提升至 109.77%，出塔水温降低 1.54 ℃，供电煤耗下降 0.7 g/(kW·h)，但仍存在进一步增效空间。为深度挖掘冷却塔换热潜力，电厂联合科研单位开展水风协同超效换热技术深化改造，通过流场优化配套硬件改造，均衡全塔断面风量，强化内区换热效率，同步委托第三方具备资质机构开展改造前后热力对比试验，验证改造技术实际效果。

1.2 机组与冷却塔基础参数

（1）主机设备：3 号机组为 660 MW 超超临界一次再热凝汽式汽轮机，额定排汽压力 0.0051 MPa；配套双背压凝汽器 N-38000，冷却面积 38000 m^2，设计循环水流量 20.3188 m^3/s。

（2）冷却塔本体：塔总高 149 m，喉部高度 115.064 m，喉部直径 62.602 m，塔顶出口直径 68.7 m，进风口高度 9.8 m，填料底部直径 107.09 m；集水池液面标高 -0.2 m，填料底面标高 9.8 m，雨区自由落水高度 10 m；设计循环水流量 70200 m^3/h，填料断面设计风速 1.24 m/s，理论喉部平均风速 3.63 m/s。

2 热力性能试验依据与测试系统

本次改造前后性能试验严格执行《工业冷却塔测试规程》DL/T 1027-2006[1]，同步参考 GB/T 7190 系列、GB/T 50102-2014、CTI ATC-105 冷却塔测试标准。测试仪器配置：DHM2 干湿表、罗斯蒙特绝对压力变送器、超声波流量计、E 型一级热电偶、CFD-D 型多点风速仪；在冷却塔上风侧 30 m 设置专用气象亭，连续采集环境干湿球温度、大气压、环境风速风向；填料层、除水器上方按等环面积径向布置风速、空气温湿度测点；循环水流量、机组负荷、真空、煤耗等参数同步采集机组 DCS 系统数据。试验有效判定标准：工况稳定时长≥ 1 h，各项运行参数波动在规范允许区间，热平衡误差绝对值≤ 7%。本次改造后试验热平衡误差 5.91%，满足试验有效性要求[2]。

3 水风协同风量优化成套改造技术方案

本次改造摒弃单一更换填料的传统模式[3]，基于三维水 - 气耦合数值模拟流场结果，采用五项协同优化措施，同步解决通风阻力高、内区风量不足、喷溅换热差、填料堵塞等多重问题。

3.1 低阻方管型填料托架改造

拆除原有工字型填料托架，更换方管结构托架。原工字型托架透风率 89%，新型方管托架透风率提升至 91%，在保证结构强度与稳定性的前提下，减小雨区底部气流阻挡面积，降低进风局部阻力，提升全塔总进风量。

3.2 内区大孔径蜂窝降阻整流装置

塔内 2250 m^3 中心低风速区域填料底部增设内切圆直径 70 mm、高度 280 mm 蜂窝整流器。一方面大孔径通道大幅降低内区空气流通阻力，疏导外围气流向塔芯补充；另一方面大孔径结构不易截留淤泥、藻类，延缓填料堵塞，延长填料使用寿命，长期稳定维持换热性能。

3.3 内区 GX 下沉式反射离心喷溅装置

改造后内区填料高度降低，配水管至填料顶面竖向距离增大，配套加装加压管形成下沉式喷头。加压管提升喷嘴进水压力，优化水滴溅散均匀度，缩小水滴粒径，增大水 - 气接触面积，强化蒸发换热效率。

3.4 集水池面负压引风装置（核心风量优化措施）

在集水池水面分区布置聚丙烯引风管道，管道内径 800 mm，进口扩径至 1200 mm 喇叭状降低入口阻力，管道出口上方加装圆锥形防雨帽，一方面防止雨区淋水直接进入引风管增加阻力，另一方面可在引风管内形成负压，增加抽力；全塔分为 4 个布置区间，每区间敷设 4 根引风管，依靠塔筒自然抽力形成管内负压通道，引导池面低温空气直接输送至填料内区，弥补塔芯风量短板，均衡全塔径向风速分布。针对引风管增设雨区附加阻力问题：管道配套防雨帽可承接上部下落水滴，大幅降低管道正上方淋水阻力，抵消构件绕流带来的附加压降，实现“减雨增风”综合效率。

3.5 填料分区扩容优化布置

原有 5625 m^3 填料拆除翻身清洗利旧，新增同等体积填料，总填料容积提升至 11250m^3，填料平均高度 1.3 m。依据数值模拟流场分区差异化布置填料，匹配引风装置带来的内区风量增量，最大化利用新增通风量提升总散热能力。

4 改造前后热力性能对比试验结果

第三方测试单位山西和瑞电力科学研究院分别开展改

造前、改造后稳态热力性能试验，测试工况与性能指标对比见表 1。

表 1 冷却塔改造前后核心试验数据对比

参数项目	单位	改造前工况	改造后工况	变化差值
机组试验负荷	MW	630	530	−100
循环水流量	t/h	51497	63192	+11695
环境干球温度	℃	18.95	31.80	+12.85
环境湿球温度	℃	13.04	27.51	+14.47
实测进出水温差	℃	9.53	8.20	−1.33
冷却幅高	℃	7.96	5.03	−2.93
冷却塔冷却能力	%	98.86	115.41	+13.51
气水比	/	1.57	1.08	−0.50
热平衡误差	%	−3.71	−5.91	—

4.1 冷却能力与换热效果分析

改造后试验工况环境温湿度远高于改造前，循环水流量提升 22.7%、机组负荷降低 100 MW，换热边界条件更为恶劣，但冷却塔综合性能大幅提升：

（1）冷却幅高降低 2.93 ℃，冷却幅高是衡量冷却塔换热极限的核心指标，幅高越低代表同等气象条件下出水温度越低，换热潜力越强；

（2）冷却能力由 98.86% 提升至 115.41%，提升幅度 16.74 个百分点，完成改造方案预设“冷却能力不低于 115%”的目标；

（3）尽管总淋水量大幅增加，依托内区引风、整流装置带来的风量均衡效果，冷却塔散热总量显著提升，有效抵消高环境温度带来的换热劣势。

4.2 塔内流场改善机理分析

传统自然通风冷却塔受塔筒结构与雨区水滴阻挡影响，径向风量分布极不均匀，塔中心区域气流流速仅为外围 60%~70%[4]，内区填料换热面积无法充分利用。本次成套改造从气流进塔、雨区流通、填料换热全流程优化：

低阻托架降低全域基础通风阻力，相同塔筒抽力下总通风量提升；

池面引风管构建独立通风通道，低温空气直达塔芯，解决内区风量匮乏问题；

大孔径整流装置消除内区气流涡流阻力，让补充空气均匀穿过填料层；多重措施协同实现全塔断面风速均衡化，填料整体利用率显著提高，最终体现为冷却能力大幅提升。

4.3 雨区阻力变化分析

采用国内电力行业通用雨区阻力计算模型[5]，改造前雨区仅土建人字柱、支撑梁等少量障碍物，雨区阻力 2.36 Pa；新增 DN800 引风管带来局部绕流附加阻力，但管道顶部防雨帽承接大量下落水滴，管道上方区域淋水阻力显著下降。全域综合测算表明：雨区总阻力仅小幅上升 0.3~0.8 Pa，阻力增量远小于风量均衡带来的换热增益，整体净收益为正向。

5 改造节能与经济性分析

5.1 机组煤耗换算与经济效益测算

冷却塔出塔水温直接决定凝汽器进水温度，进而影响机组真空与供电煤耗。结合望亭电厂 3 号 660 MW 超超临界机组热力特性，循环水出水温度每降低 1 ℃，机组真空提升 0.4KPa。该机组发电热耗值为 7404KJ/(kw・h), 基于 2025 年机组实际运行数据：年利用小时 7856h，平均发电负荷率 436MW。改造后冷却塔出塔水温下降 1.33℃，折算成机组供电煤耗下降 0.665g/(kW・h)，年节约标准煤 2578t，年总发电量 38.77 亿 KW・h，按标煤采购单价 900 元 /t 测算：年节约燃煤成本：2578×900 ≈ 232（万元）。

改造工程仅涉及托架、整流器、引风管、填料、喷溅装置更换，无大规模土建施工，改造工期短、一次性投资可控，投资回收期短，长期运行经济效益突出。

5.2 环保降碳效益

标煤碳排放系数取 2.6 t CO_2/tce，项目年减少二氧化碳排放：2578×2.6 ≈ 6703t ，同步减少二氧化硫、烟尘、氮氧化物等污染物排放，符合火电行业节能降碳、超低排放改造政策导向，具备显著环保价值。

5.3 长期稳定节能优势

常规填料改造运行 3~5 年后易出现填料堵塞、换热效率逐年衰减，节能效果持续下滑。本次配套大孔径蜂窝整流装置，可减少淤泥、藻类附着堵塞；池面引风装置全年均衡塔内风量，夏季高温、冬季低温工况均可稳定改善换热，冷却性能衰减速率大幅放缓，能够长期稳定维持节能收益。

6 运行维护建议

结合本次改造技术特点与第三方试验结论，提出长期运行管控措施：

严格执行循环水质标准化管控，控制悬浮物、藻类滋生，定期开展填料、整流器、引风管人工清理，避免堵塞影响通风换热；

每季度巡检池面引风管道、防雨帽、喇叭口导流结构，修复破损管道，防止气流短路；

每年夏季高温来临前开展冷却塔配水系统检查，保证下沉式喷溅装置无堵塞、喷溅均匀；

定期开展塔内风速分布简易测试，监测内区、外围风量均衡度，及时处理流场异常缺陷。

7 结语

针对大型自然通风冷却塔配风不均、内区换热不足问题，提出包含低阻托架、内区整流装置、下沉式高效喷头、池面负压引风装置、填料分区扩容的水风协同风量优化成套改造方案，技术路径完整可行；

第三方热力试验验证：在环境温湿度大幅偏高、循环水量提升的不利工况下，冷却塔出塔水温在设计工况条件下比改造前降低 1.33℃，冷却能力由 98.86% 提升至 115.5%，超额完成改造预设指标；

改造后机组真空提升 0.532KPa，发电煤耗降低 0.665g/(kW・h)，年节约标煤超 2578 t，同步实现万吨级二氧化碳减排，经济、环保效益显著；

池面引风管虽小幅增加雨区局部结构阻力，但通过防雨帽消除局部淋水阻力，全域通风均衡带来的换热增益完全覆盖阻力损失，综合性能正向提升；

该成套改造技术无需大规模土建改动，可直接应用于国内同类型投运 10 年以上双曲线自然通风冷却塔增效改造，具备广泛工程推广价值。

参考文献：

[1] DL/T 1027-2006 工业冷却塔测试规程[S]. 北京：中国电力出版社，2006.

[2] GB/T 50102-2014 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，2014.

[3] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京：中国水利水电出版社，2001.

[4] 纪利. 自然通风双曲线冷却塔空气动力计算方法[J]. 电力工程技术，1998 (02):12-16.

[5] 张磊，王浩. 大型自然通风冷却塔塔内流场分布优化研究[J]. 电站辅机，2022,43 (03):45-49.

[6] CTI ATC-105, Cooling Tower Performance Test Standard [S].USA: Cooling Technology Institute.

作者简介：缪文彬，大学本科，工程师，研究方向：从事汽轮机燃气轮机检修维护。