

# 变工况下汽轮机背压优化的节能控制策略

薄强冲

白城发电公司 吉林白城 137000

**摘要：**直接空冷机组因节水而成为火电在缺水地区的主流选择，但运行变工况时，变工况运行时，环境参数变化与负荷调整易致汽轮机背压偏离最优区间，造成能源浪费，直接空冷系统具备节水优势而成为缺水地区火电的主流模式，但变工况下环境参数与负荷调整带来的环境变化容易引起汽轮机背压偏离最优区间，从而产生能源浪费。本文针对直接空冷系统的特性，围绕变工况下背压的优化节能需求，分析背压优化在经济、环保及技术层面的必要性，系统整理直接空冷机组背压控制现有技术现状与存在的问题，提出针对不同工况建立不同背压控制策略，达到节能的目的，为直接空冷汽轮机的高效运行提供技术支持。

**关键词：**变工况下；汽轮机背压优化；节能控制策略

在“双碳”目标引领下，火电行业节能降碳要求日益严格，直接空冷汽轮机因节水率高、适配性强，广泛应用于我国西北、华北等缺水地区，汽轮机背压是决定机组循环效率的关键参数，其数值高低直接影响蒸汽做功能力的利用率，变工况运行是火电机组常态，负荷增减、环境温度风速变化等因素，使直接空冷岛换热效率大幅波动，导致背压偏离设计最优值，造成额外能耗损失。当下，有些直接空冷机组依旧沿用传统固定参数控制模式，不能适应复杂多变的运行环境，背压优化的潜力没有得到完全发挥，基于此，本文重点针对直接空冷系统的结构特性与变工况运行规律，深入探究背压优化的重要意义与行业现状，创建具有针对性的节能控制策略，给改善直接空冷机组变工况适应性与节能水平给予实际参照。

## 1. 直接空冷汽轮机背压优化的核心意义

### 1.1 降低能耗成本，提高机组效益

直接空冷机组的背压每升高 1kPa，机组煤耗约增加 2–3g/(kW · h)，在长期变工况运行中，累计能耗损失显著。通过背压优化控制，可使变工况下背压稳定在最优区间，降低单位发电量的煤耗与厂用电率。对于百万千瓦级直接空冷机组而言，年发电量按 60 亿 kW · h 计算，若背压优化实现煤耗降低 2g/(kW · h)，每年可节约标准煤 1.2 万吨，按当前煤价计算，年经济效益可达数百万元，为企业创造显著的经济回报<sup>[1]</sup>。

### 1.2 降低排放总量，符合双碳目标

火电行业是碳排放和污染物排放的主要来源之一，能耗下降与污染物排放总量呈正相关关系，直接空冷汽轮机背压优化降低煤耗，可减少二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等污染物排放，按每燃烧 1 吨标准煤排放 2.6 吨二氧化碳计算，1.2 万吨标准煤节约量减少约 3.12 万吨二氧化碳排放，帮助企业完成环保减排指标，符合国家“双碳”战略要求，推动火电行业绿色转型<sup>[2]</sup>。

### 1.3 完善控制体系以提升运行水平

变工况下背压优化控制牵涉环境参数监测，空冷设备调控，机组负荷匹配等不少环节，该技术的研发和应用能够优化直接空冷机组的控制体系，冲破传统控制模式的局限，做到对背压的动态精确控制，加强机组对变工况的适应能力，提升运行的稳定度，缩减背压异常引发的设备故障和停机风险，推动直接空冷技术朝着高效，智能的方向发展<sup>[3]</sup>。

## 2. 直接空冷汽轮机背压控制的行业现状

### 2.1 以传统方法为主，智能化水平欠缺

当前大多数直接空冷机组采用 PID 控制或者固定阈值控制策略，依靠调节空冷风机转速、启停喷淋系统等方法控制背压，这类传统控制方法依靠预设参数，对环境温度、风速等动态变化的响应迟缓，不能做到背压的实时优化，部分机组虽然引入了简单的反馈控制，但没有考虑变工况下多种因素的耦合影响，控制精度低，不能充分发挥空冷系统的换热潜力<sup>[4]</sup>。

## 2.2 负荷波动应对能力不足

直接空冷机组的背压受负荷影响较大，低负荷时蒸汽流量减少，空冷岛换热效率下降，容易出现背压升高的情况；高负荷时蒸汽量增多，可能超出空冷系统设计的换热能力，也会造成背压超标，当前行业内缺少针对不同负荷区间的差异化背压控制策略，大部分机组采取统一的控制逻辑，变工况时背压波动较大，节能效果不明显。

## 2.3 参数覆盖不足，数据价值待挖掘

直接空冷系统的背压影响因素涵盖环境温度，风速，风机运行状况，空冷岛清洁度等，但有些机组的监测系统仅监测环境温度和背压两个主要参数，缺少对风速分布，空冷岛换热面温度等重要参数的实时监测，而且，现有的数据大多用于实时监测，没有借助大数据分析，建模等方法去挖掘参数之间的内在联系，不能为背压优化给予精准的数据支撑<sup>[5]</sup>。

## 3. 变工况下直接空冷汽轮机背压优化的节能控制策略

### 3.1 基于环境参数的动态背压设置策略

监测环境多参数，创建动态目标背压模型，直接空冷系统的换热效率同环境参数有着强关联性，单一参数监测难以精确反应环境给背压造成的影响，所以要在空冷岛周围安装分布式的监测装置，包含温度传感器，风速风向仪，湿度传感器等设备，实时采集环境温度（精度  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ），风速（量程 0–20m/s），风向（0–360°），相对湿度等数据，数据采样频率为 1 次 / 分钟，同时考虑直接空冷岛结构参数（换热面积，翅片间距）与热力特性，使用 BP 神经网络算法创建环境参数到最优背压的映射模型，以历史运行数据（包括不同季节，不同时间段）来训练优化模型，保证模型的预测误差达到  $\pm 0.3\text{kPa}$  以内，为动态背压设定供应准确根据<sup>[6]</sup>。分区间自适应调整，加快变工况响应速度，依照我国北方地区环境参数变化规律，把环境温度分为低温区（ $\leq 5^\circ\text{C}$ ）、常温区（5–30°C）、高温区（ $\geq 30^\circ\text{C}$ ），风速分为低风速（ $\leq 3\text{m/s}$ ）、中风速（3–6m/s）、高风速（ $\geq 6\text{m/s}$ ），组合成 9 种典型工况，针对每种工况制定不同的控制逻辑：低温低风速工况，空冷岛换热效率高，把目标背压定为 8–10kPa，尽量提高循环效率；高温高风速工况，空冷风机制耗与换热效率的平衡很重要，把目标背压定为 12–15kPa，防止风机过度调速带来的能耗浪费；常温中风速工况是基准工况，把目标背压定为 10–12kPa。同时，将背压调整的最小步长设为

0.2kPa，延时设定为 30 秒，避免频繁调整导致系统波动

引入预测性修正机制，削减参数波动影响，环境参数出现突变，比如强阵风，寒潮，容易造成背压瞬间偏离目标值，传统反馈控制存在响应滞后，依靠历史环境数据和气象部门提供的短期预报，未来 1 – 3 小时，利用 LSTM 时间序列预测算法，构建环境参数变化趋势预测模型，预先推测温度，风速的变化幅度和持续时间，预测到环境温度 1 小时内升高 5°C 以上时，提前将目标背压上调 1 – 2kPa，预先调节风机转速到对应区间，预测到强阵风即将来临的时候，提前减小风机转速调节速率，防止风速突变引起背压剧烈波动，借助预测性修正，背压对环境参数变化的响应提早 2 – 3 分钟，波动幅度削减 25% 以上<sup>[7]</sup>。

### 3.2 空冷岛运行协同调控策略

风机群变频调速优化，实现按需供能。根据动态目标背压和空冷岛各区域换热负荷分布，采用分区变频控制方式调节风机转速，对换热负荷较大的区域提高对应风机转速，对负荷较小的区域降低风机转速或者启停部分风机，避免风机群同步运行造成的能耗浪费。设置风机转速调节的最小步长和延时时间，防止频繁启停造成的设备损耗。喷淋增湿协同控制，强化高温工况换热。当环境温度  $\geq 30^\circ\text{C}$  的高温工况下，风机调速不能将背压控制在目标区间时，启动喷淋增湿系统，建立喷淋量与环境温度、背压偏差的关联模型，动态调节喷淋强度，避免喷淋过量造成水资源浪费和空冷岛结冰风险。低温工况下自动关闭喷淋系统，防止换热面结霜影响换热效率。清洁维护周期优化，保证长期换热性能。依照空冷岛换热面压差，背压偏离值等参数，创建清洁需求评估模型，判断空冷岛积灰，结垢程度，按照评估结果，创建不一样的清洁维护周期，防止固定周期清洁造成过度维护或者维护不足的情况，当背压偏离目标值超出 5kPa 并且保持 24 小时时，激活在线冲洗或者停机清洁流程，恢复空冷岛换热性能<sup>[8]</sup>。

### 3.3 模型预测驱动的先进控制策略

创建直接空冷系统机理模型，准确体现运行特性，依靠热力学和流体力学理论来构建，把这些汽车轮子、空冷岛结构、环境等因素全都纳入考虑范围，创造对应的机理模型，里面包含三块关键的子部分：排汽冷凝子块，借助冷凝交换方程体现蒸汽在空冷翅片管里的冷凝过程，算出冷凝速率以及换热程度；风机制能子块，按照风机的特性曲线，创建风

机转速同能源、风量之间的关系；喷射量计算子块，融合前面两块子块的产出，考虑环境因素影响，计算汽轮机喷射量，模型中重要参数（比如换热系数、流阻系数）依靠现场试验数据校准，利用最小二乘法改进参数取值，让模型针对背压的计算误差维持在  $\pm 0.2\text{kPa}$  之内，可以精确表现出变工况时各个参数对背压的耦合影响规律<sup>[9]</sup>。

应用模型预测控制（MPC）算法，实现多目标优化，将模型预测控制算法引入背压控制回路，替代传统的 PID 控制，解决多变量耦合、大滞后控制问题，MPC 算法的优化周期为 1 分钟，预测时域为 5 分钟，以背压偏差最小、风机能耗最小、设备损耗最小为目标，建立多目标优化函数，约束条件为风机转速范围（40%–100% 额定转速）、喷淋量上限（ $15\text{m}^3/\text{h}$ ）、汽轮机排汽压力安全阈值（ $\leq 25\text{kPa}$ ）。借助滚动优化算法，在每个控制周期内算出最优的风机转速、喷淋量等控制输出，再依照实际背压反馈加以校正，同传统 PID 控制比起来，MPC 算法可提前预判参数改变趋向，协调各个控制变量的动作，让背压波动幅度削减 30% 以上，风机能耗削减 8%–12%，而且削减控制变量的频繁调整，延长设备寿命。

变工况负荷匹配优化，协同实现机岛与空冷岛的配合。汽轮机由于负荷变化（如升负荷、降负荷）会改变排汽量，当负荷变化速度快时，如果空冷系统不能及时调节，就容易导致背压急剧变化。建立机组负荷和空冷系统运行的协同模型，把负荷变化率作为前馈信号提前输入到控制体系当中。机组负荷升负荷时以 0.5%–1%/min 的速率升负荷时，提前 5–10 分钟调整空冷系统，按负荷增长比例慢慢增加风机转速，提前启动部分备用风机，如果环境温度高，提前启动喷淋系统；当机组负荷降低时，按负荷下降比例慢慢降低风机转速，关闭部分风机或者喷淋系统，避免空冷系统超负荷运行引起的能耗浪费。而且，设置负荷变化的缓冲区间，当负荷变化幅度小于 0.3%/min 时，保持空冷系统目前运行状态，不加以频繁调控，凭借机岛与空冷岛的动态合作，使负荷变化时背压的最大偏离值控制在 1kPa 以内，保障机组运转的稳定性与经济性<sup>[10]</sup>。

## 结束语

综上所述，变工况下直接空冷汽轮机背压优化是增强机组节能效益、推进行业绿色发展的要点路线，本文经由经济、环保、技术三个角度谈论背压优化的意义，探究了行业当前在控制技术、变工况适宜程度、监测数据应用等方面存在的现状与短板，提出了经由环境参数动态适应、空冷岛运行协同调节、模型预测精准控制的节能控制策略，该策略紧密结合直接空冷系统特性，对变工况下众多因素干扰具有良好应对能力，可达到背压动态改善并实现精准控制。

## 参考文献：

- [1] 于良. 背压式汽轮机组的节能改造技术及应用 [J]. 设备管理与维修, 2024,(19):140–142.
- [2] 苏伟, 宗秋冬. 联合循环机组汽轮机冷 – 热端耦合实时动态滑压优化技术研究与应用 [J]. 安装, 2024,(S1):112–113.
- [3] 李大才, 吴克锋, 宋立信, 等. 边界参数变化对火电厂汽轮机阀点滑压优化的影响 [J]. 节能, 2024,43(05):30–32.
- [4] 程波, 卢绪祥, 刘雨菲, 等. 汽轮机冷端系统运行优化方法及研究进展 [J]. 电站辅机, 2024,45(01):1–7.
- [5] 顾今. 火电厂汽轮机热耗率建模及运行初压优化研究 [J]. 中国新技术新产品, 2024,(05):61–63.
- [6] 高佳颖. 某 1000 MW 超超临界机组增容改造项目冷端优化方案论证与分析 [J]. 电站辅机, 2023,44(04):10–12+17.
- [7] 孙良海, 郭建, 李永利, 等. 基于神经网络的汽轮机运行初压优化研究 [J]. 热力透平, 2023,52(03):194–198+236.
- [8] 杨阳, 金杰, 刘宝民, 等. 联合循环机组蒸汽轮机冷端系统运行优化研究 [J]. 机电信息, 2023,(02):15–17.
- [9] 郭建, 余洁, 王宇江, 等. 630 MW 燃煤机组循环水系统运行优化研究 [J]. 热力透平, 2022,51(02):110–116.
- [10] 高志溥, 蒋寻寒, 金益波, 等. 大型汽轮机的冷端优化设计及其在大唐东营 1000MW 二次再热机组上的应用 [J]. 热能动力工程, 2022,37(01):14–20.

**作者简介：**薄强冲，出生年月日：1987 年 05 月 03 日，性别：男，民族：汉族，籍贯：江苏东海，学历：本科，职称：工程师，从事的研究方向：火力发电集控运行。