

动调轴流风机智能监控和节能运行的实现

龚程¹, 种西虎¹, 邢岳², 彭鹏², 周倜¹

(1. 中电华创(苏州)电力技术研究有限公司, 江苏 苏州 215125; 2. 安徽淮南平圩发电有限责任公司, 安徽 淮南 232000)

摘要: 动调轴流风机作为燃煤机组的重要辅机之一, 超低排改造后, 由于烟气侧系统阻力增加, 引风机失速等故障率较高, 在实际燃煤电站运行生产中, 生产人员无法直观判断引风机运行工况点在性能曲线图中的位置, 不能直观掌握风机工作状态, 失速现象的产生不能提前预警。同时, 3 大风机厂用电率较高, 缺乏有效的节能手段。因此, 实现引风机的智能监控和不同工况下送引、风机的节能运行具有重要意义。实验证明, 通过建立智能监控模型, 为技术人员提供实时可视化监控画面, 实现引风机进行实时监控和失速预警, 保障机组安全运行; 通过建立送、引风机节能运行模型, 为技术人员提供最优氧量调节区间, 能够降低风机的厂用电率, 提升机组运行的经济性。

关键词: 调轴流风机; 风机失速; 智能监控; 节能运行

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2024)S2-0678-06

Implementation of intelligent monitoring and energy-saving operation of axial induced draft fan

GONG Cheng¹, CHONG Xihu¹, XING Yue², PENG Peng², ZHOU Ti¹

(1. China Power Hua Chuang Electricity Technology Research Co., Ltd., Suzhou 215125, China;

2. Anhui Huainan Pingwei Power Generation Co., Ltd., Huainan 232000, China)

Abstract: As one of the important auxiliary machines of coal-fired power units, the dynamic axial flow fan has a high failure rate due to the increased resistance of the flue gas side system and the stall of the induced draft fan after ultra-low emission transformation, the production personnel cannot intuitively judge the position of the induced draft fan operating conditions in the performance curve, cannot intuitively grasp the working state of the fan, and the stall phenomenon cannot be warned in advance. At the same time, the three major fan plants have a high electricity consumption rate. Therefore, it is of great significance to realize the intelligent monitoring of induced draft fans and the energy-saving operation of feeding and directing fans under different working conditions. Experiments show that by establishing an operation monitoring model, the induced draft fan can be monitored in real time and stalled early warning, providing real-time pictures for operators to ensure the safe operation of the unit. By establishing an energy-saving operation model of the supply fan and induced draft fan, the optimal oxygen adjustment interval is provided for the operator, which can reduce the factory power consumption rate of the fan and improve the economy of the unit operation.

Key words: Dynamically-regulated axial draft fan; Unit load; Intelligent monitoring; Energy-efficient operation

0 引言

动叶可调轴流式风机作为燃煤机组的重要辅机之一, 直接影响锅炉的可靠运行和电站运行经济性^[1]。在实际生产中, 技术人员无法直观判断引风机运行工况点在性能曲线图中的位置, 不能直观掌握风机工作状态, 失速现象的产生不能提前预警。此外, 送风机和引风机厂用电率较高, 技术人员缺乏

节能运行参数调节的指导。因此, 如何实现引风机的智能监控和节能运行是电站风机领域的重要研究方向^[2-6]。

大量学者进行了深入研究^[7-11], 杨威等^[12]结合现场测试试验及改造前引风机性能曲线, 提出了深度调峰背景下, 通过对引风机叶片进行改型, 能够有效提高中低负荷时引风机工作效率, 可以产生较好的经济性。李昊燃等^[13]通过对动叶可调轴流式风

收稿日期: 2023-07-27; 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.23072702

作者简介: 龚程(1990—), 男, 安徽六安人, 工程师, 硕士。E-mail: 88151219@qq.com

引用格式: 龚程, 种西虎, 邢岳, 等. 动调轴流风机智能监控和节能运行的实现[J]. 洁净煤技术, 2024, 31(S2): 678-683.

GONG Cheng, CHONG Xihu, XING Yue, et al. Implementation of intelligent monitoring and energy-saving operation of axial induced draft fan[J]. Clean Coal Technology, 2024, 31(S2): 678-683.

机的研究,提出了叶片调节加变频器调速联合调节的智能化运行方法,实现节能效益最大化。李凯伦等^[14]对轴流风机失速及喘振故障的发生原因及现象进行对比分析,对电厂轴流风机失速、喘振等故障的基本表现形式及解决措施进行总结。

以动叶可调轴流式风机性能曲线特征作为研究对象,建立引风机智能监控模型,利用火电厂智能计算平台,实现了引风机运行工况点的可视化监控和失速预警。同时,对送、引风机运行的历史数据进行分析,建立节能运行模型,为运行人员提供最优锅炉燃烧氧量调节区间,降低送风机、引风机厂用电率,提高电厂运行生产经济性。

1 锅炉本体情况

某电厂 3 期 1 000 MW 超超临界燃煤锅炉为北京 B&W 公司生产的超超陆界参数、螺旋炉膛、一次再热、平衡通风、因态排渣。锅炉采用中速磨煤机冷

一次风机直吹式制粉系统,前后墙对冲燃烧方式。锅炉尾部烟道布置有脱硝装置、三分仓容克式空气预热器和电除尘器。每台锅炉配置两台 HU27648-AA 型动叶调节轴流式引风机及两台轴流式送风机。

2 智能监控模型的设计

如图 1 所示,风机性能曲线图。包括引风机运行工况点、效率曲线和失速区,流量 $v(\text{m}^3/\text{s})$ 和比压能 $(\text{N} \cdot \text{m})/\text{kg}$ 2 个指标分别对应横纵坐标。将风机性能曲线转换为实时监控模型其核心是获取流量和比压能的实时值,进而获得两台风机的工作区域,让技术员清楚的掌控机组的运行工况点,并通过效率曲线判断风机运行是否高效。此外,通过失速曲线建立失速预警模型避免机组进入不安全区域,有效避免失速现象的发生。风机智能监控模型设计的具体步骤如下。

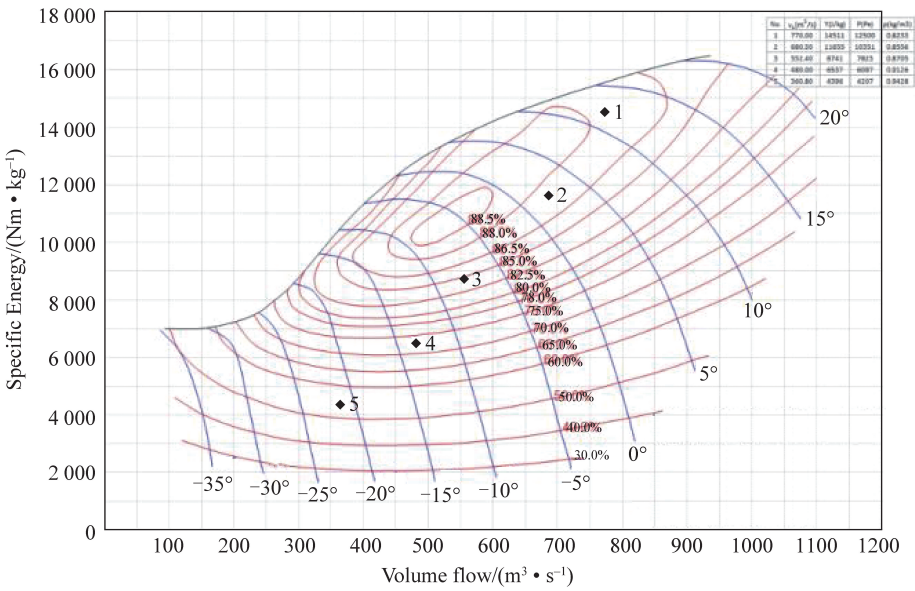


图 1 轴流式引风机性能曲线图

2.1 静态性能曲线图的绘制

静态曲线性能图是建立引风机的智能监控模型的基础,利用 CAD 图形工具将性能曲线图中的线逐一描点,统一量化后将数据存入关系型数据库,并采用 FineReport 获取数据库的数据,仿真静态曲线性能图。

2.2 相关计算公式

实时数据信息均通过 Edos 实时系统和现场实验中获取,如表 1 相关参数所示。智能监控模型中包括了流量值、比压能值、效率值的计算。由于生产中流量测点数据与真实流量值偏差较大,不能直接获取,因此,采用湿烟气体积流量计算公式计算实时

流量值 $V_{v,w}$ 。

2.2.1 湿烟气体积流量计算公式

湿烟气体积流量 $V_{v,w}$, 可表示为:

$$Q_{v,w} = q_{m,w} b / 3.6 \rho_{lg,w}, \tag{1}$$

式中, $V_{v,w}$ 为湿烟气体积流量, m^3/s ; b 为单位时间燃料量, kg/s ; $\rho_{lg,w}$ 为湿烟气密度, kg/m^3 ; $q_{m,w}$ 为单位质量燃料燃烧产生的湿烟气量, kg/kg , 可表示为:

$$q_{m,w} = q_{m,d} + q_{m,\text{H}_2\text{O}}, \tag{2}$$

式中, $q_{m,\text{H}_2\text{O}}$ 为单位质量燃料燃烧产生的水蒸气量, kg/kg ; $q_{m,d}$ 为单位质量燃料燃烧产生的干烟气量, kg/kg , 可表示为:

表 1 相关参数

序号	参数名称	单位
1	机组负荷 (Unit Load, UL)	MW
2	机组总燃料量 (Total Fuel Volume Of The Unit, TFVU)	T/H
3	机组单侧引风机有功功率 (The active power of the single-side induced draft fan of the unit, AIDFAP)	W
4	机组单侧引风机机电流 (Unit single-side induced draft fan motor current, SIDFC)	A
5	机组单侧引风机叶片开度 (Single-sided induced draft fan blade opening of the unit, SIDFB)	%
6	机组单侧引风机出口压力 (Unit single-sided induced draft fan outlet pressure, SIDFOP)	KPA
7	机组单侧引风机进口压力 (Unit single-side induced draft fan inlet pressure, SIDFEP)	KPA
8	机组单侧引风机出口温度 (Unit single-sided induced draft fan outlet temperature, SIDFOT)	℃
9	机组单侧引风机进口温度 (Unit single-sided induced draft fan inlet temperature, SIDFIT)	℃
10	锅炉单侧空预器进口烟气含氧量 (Oxygen content of flue gas inlet of boiler unilateral air preheater, SIDFEO)	%
11	锅炉单侧空预器出口烟气含氧量 (Oxygen content of flue gas at the outlet of the boiler single-sided air preheater, SIDFOO)	%

$$q_{m,d} = \frac{44.01\phi_{CO_2} + 32.00\phi_{O_2} + 28.02\phi_{N_2} + 28.01\phi_{CO}}{\phi_{CO_2} + \phi_{CO}} \times \left(C_b + \frac{12.01S}{32.07} \right), \quad (3)$$

式中, ϕ_{CO_2} 为烟气中 CO_2 体积分数; ϕ_{O_2} 为烟气中 O_2 体积分数; ϕ_{N_2} 为烟气中 N_2 体积分数; ϕ_{CO} 为烟气中 CO 体积分数; S 为入炉煤 S 元素含量; C_b 为入炉煤中燃尽的碳含量, 可表示为:

$$C_b = C - C_{rs} \left(\frac{A}{100 - C_{rs}} \right), \quad (4)$$

式中, C 为入炉煤中的碳含量; C_{rs} 为灰渣平均含碳量; A 为入炉煤中的灰分; 公式 (1) ~ (4) 中体积分数和含量的单位均为 (%)。

式 (1) 中的湿烟气密度 $\rho_{fg,w}$ 可表示为:

$$\rho_{fg,w} = \frac{1.33 \times 273 \times (101\,325 + (SIDFEP \times 1\,000))}{((SIDFOT + SIDFIT) / 2 + 273) \times 101\,325}, \quad (5)$$

2.2.2 单侧比压能计算公式

单侧比压能的值 (Single Actual Pressure Energy, SAPE,) 可表示为:

$$SAPE = (SIDFOP - SIDFEP) / \rho_{fg,w}, \quad (6)$$

2.2.3 引风机全压效率计算公式

引风机全压效率 η , 可表示为:

$$\eta = \frac{P_e}{P_{sh}}, \quad (7)$$

式中, P_{sh} 为引风机的轴功率 (kW), 可通过 DCS 数据采集获取; P_e 为引风机的有效功率 (kW), 可表示为:

$$P_e = Q_{v,w} \rho_{v,w} \left(\frac{\Delta P_{in,out}}{\rho_{aver}} + \frac{v_{out}^2 + v_{in}^2}{2} \right) / 1\,000, \quad (8)$$

式中, $\Delta P_{in,out}$ 为引风机进出口差压 (kPa); ρ_{aver} 为引风机的进出口平均密度 (m^3/kg); v_{in} 为风机的进口工质流速 (m/s); v_{out} 为风机的出口工质流速 (m/s)。

2.3 失速预警模型的设计

图 1 左侧向上的边界曲线为风机的失速曲线, 通过最小二乘法拟合, 构造失速公式, 可表示为:

$$F(x) = \alpha_1 f_1(x)^9 + \alpha_2 f_2(x)^8 + \cdots + \alpha_9 f_9(x) + \alpha_{10}, \quad (9)$$

$$f_k(x) = (Q_{v,w})^k, Q_{v,w} \in [0, 1\,000]. \quad (10)$$

式 (9) 中 $F(x)$ 表示临界比压能 (CSPE, Critical Specific Pressure Energy), $f_1(x), f_2(x), \cdots, f_n(x)$ 为 1 组线性无关的函数, α_n 为系数 ($n = 1, 2, \cdots, m, m < n$), 通过 9 阶多项式拟合得到的结果如下: $\alpha_1 = -2.23e^{-21}, \alpha_2 = 9.92e^{-18}, \alpha_3 = -1.84e^{-16}, \alpha_4 = 1.83e^{-11}, \alpha_5 = -0.04e^{-8}, \alpha_6 = 3.79e^{-6}, \alpha_7 = -7.44e^{-3}, \alpha_8 = -0.04e^{-2}, \alpha_9 = -2.23e^{-1}, \alpha_{10} = -7.44$ 。当实际比压能的值超过临界比压能的值, 且差值超过 100 并持续时间为 10 min 后, 平台产生预警消息并告知现场技术人员, 防止失速现象发生, 有效的保障了机组安全运行。

2.4 智能监控模型

通过火电生产智能计算平台, 实现引风机静态性能曲线图与理论数据模型相互结合的引风机智能监控模型。图 2 引风机智能监控模型效果图, 从图中可以看出, 机组的当前负荷, 绿色和黄色 2 个实时点代表 A 和 B 两台引风机的运动轨迹, 红色曲线表示引风机运行的失速曲线。此外, 图右侧提供了 2 台引风机的各个参数值。引风机智能监控模型不仅

辅助技术人员清晰的掌握引风机的运行工况点的位置,而且当引风机进入不安全区域后,通过短信的方式告知运行人员,保证机组安全运行。

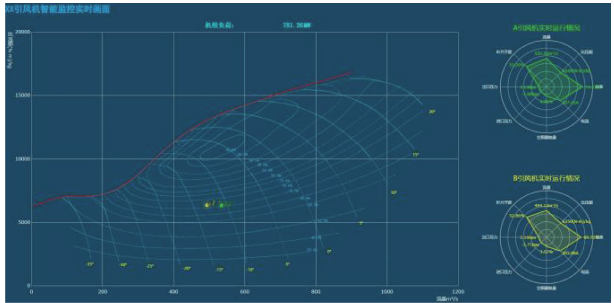


图2 引风机智能监控模型效果图

3 节能运行模型的研究

在辅机电耗中,风机厂用电率占比较大,通过引风机的工作原理可知,引风机的电动机功率代表引风机的有功功率。从炉膛至引风机之间包含脱硝装置、空预器、电除尘器等设备,沿程都存在阻力,从而造成引风机压差不同,导致引风机的功率不断变化。将炉膛出口压力、引风机入口压力 2 者的差值定义为沿程阻力 (Resistance along the way, RAW)。此外,运行中炉膛的氧量为调节量,氧量的变化直接影响风机的有功功率。因此,节能运行模型即通过机

组运行的历史数据,针对不同负荷和沿程阻力,挖掘送、引风机最低的有功功率值条件下的最优氧量调节值,辅助技术人员运行调节。

从 120 万条机组运行的历史数据取 12 万条作为样本数据。其中,机组负荷、引风机有功功率、沿程阻力均为连续型变量。从图 3 可以看出,负荷的平方与有功功率满足线性关系,沿程阻力的平方与有功功率满足线性关系。通过计算 3 者之间的相关系数可知,负荷的平方和有功功率的相关系数为 0.976 5,负荷的平方和沿程阻力的相关系数为 0.974 8,沿程阻力的平方和有功功率的相关系数为 0.995。因此,3 个变量具有强相关性,机组负荷和沿程阻力是影响引风机有功功率的两个直接变量[15-20]。挖掘不同负荷、沿程阻力条件下的最小有功功率值,能够更加准确的找到预测目标。通过线性回归算法,建立引风机有功功率与、组负荷、沿程阻力回归函数如下:

$$F(x,y)=\lambda_1X+\lambda_2X^2+\lambda_3XY+\lambda_4Y+\lambda_5Y^2+\lambda_0,$$

(11)

式中, X 为机组负荷; Y 为沿程阻力; $F(X,Y)$ 为有功功率; $\lambda_{1...5}$ 为相关系数。式 (12) 中利用平均绝对误差 MAE 检验模型预测的值与实际值差距。MAE 值越大,证明能够节省电量的越多。

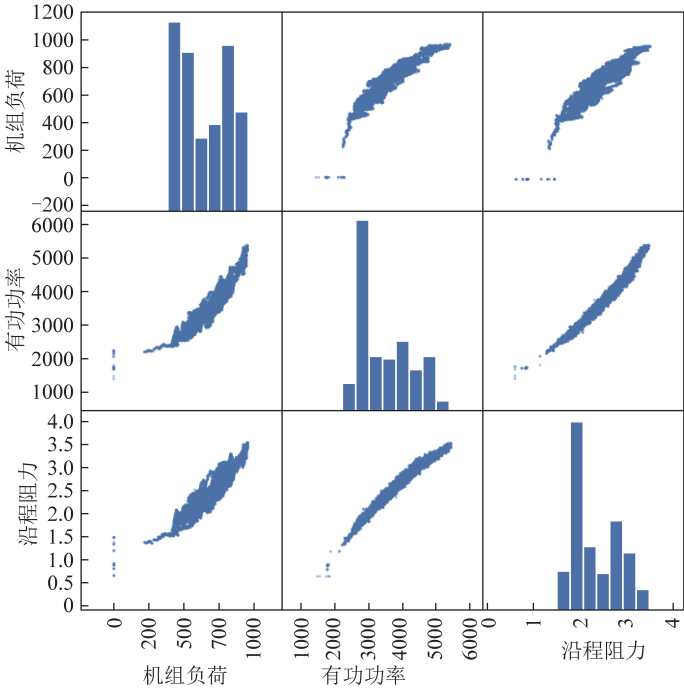


图3 有功功率、机组负荷、沿程阻力关系图

$$MAE(y,\hat{y})=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m(|y_i-f(x_i)|), \quad (12)$$

从 120 万条历史数据选取 80 万条数据作为训练数据集,40 万条数据作为测试集,实验结果如下,

$\lambda_1=3\ 330.68$, $\lambda_2=-414.08$, $\lambda_3=2.42\times 10^{-3}$, $\lambda_4=-0.65$, $\lambda_5=-22.55$, MAE 的值为 236.2, 预测准确率 0.996。此外,生产中存在启停机的状况且每次停机会对设备进行优化,为了保证获取的调节量与

生产环境更为准确,通过动态更新历史数据集,对模型进行动态学习,保证数据的实效性。

4 结果与分析

通过风机能耗及锅炉性能试验,验证节能运行模型对生产运行的效果,选取 950 MW、750 MW 两个试验负荷,进行习惯性运行条件下及节能运行模型给定条件下对比试验,试验期间,每个工况时间 2 小时,试验内容见表 2。

表 2 试验内容负荷

试验工况			取样数据
900 MW	习惯运行方式	辅助运行方式	送、引风机耗电量,
750 MW	习惯运行方式	辅助运行方式	飞灰、大渣含碳量等

表 3 风机电量试验结果

负荷		950 MW			750 MW		
工况	调前	调后	节省	调前	调后	节省	
炉膛氧量/%	1.6~1.8	0.9~1.1	-	3.2~3.4	2.6~2.8	-	
A 送风机电量/kWh	791	720	71	731	636	95	
B 送风机电量/kWh	783	727	56	720	614	106	
A 引风机电量/kWh	4 220	3 900	320	3 730	3 360	370	
B 引风机电量/kWh	4 230	3 990	240	3 820	3 410	410	
共计节省电量/kWh	-	-	687	-	-	981	

为了验证炉膛运行氧量降低是否对锅炉产生燃烧影响,进行 2 种工况下锅炉热效率试验,验证锅炉效率是否受到配风调整影响。锅炉效率试验结果如表 4 所示。950 MW 负荷习惯运行工况,飞灰可燃物含量为 0.70%,排烟氧量为 2.30%,修正后锅炉效率为 94.41%。950 MW 负荷系统优化后工况,飞灰可燃物含量为 0.51%,排烟氧量为 1.40%,修正后锅炉效率为 94.75%。750 MW 负荷习惯运行工况下,飞灰可燃物含量为 0.38%,排烟氧量为 7.18%,修正后锅炉效率为 94.72%。750 MW 负荷系统优化后工况,飞灰可燃物含量为 0.36%,排烟氧量为 6.08%,修正后锅炉效率为 94.66%。由以上试验结果可知,采用节能运行模型提供的氧量区间,飞灰含碳量未变化,排烟氧量降低,锅炉效率未受影响,单位时间燃料耗量未增加,送风机、引风机耗电率降低,节能效果明显。

表 4 锅炉效率试验结果

负荷	950 MW		750 MW	
	调前	调后	调前	调后
燃料量/(t·h ⁻¹)	376.89	376.80	301.911	300.56
空预热器出口烟温/℃	127.35	127.97	115.01	116.01
空预热器进口烟温/℃	329.96	332.96	313.70	313.08

试验负荷下,进行送、引风机能耗测试试验,通过记录辅助优化系统投运前后送、引风机耗电量来验证不同负荷段风机辅助优化系统的节能效果,试验结果见表 3。从表 3 可以看出,负荷为 950 MW 炉膛氧量在 1.6~1.8 内,送、引风机消耗厂电量为 10 024 kWh,通过调节炉膛氧量至 0.9~1.1 后,送、引风机消耗厂用电量为 9 337 kWh,节省 687 kWh;负荷为 750 MW 炉膛氧量在 3.2~3.4 内,送、引风机消耗厂电量为 9 001 kWh,通过调节炉膛氧量至 2.6~2.8 后,送、引风机消耗厂用电量为 8 020 kWh,节省 981 kWh。保守估计,按照节能模型给出的氧量调节值范围,1 000 MW 机组每年可节省电量 430 000 kWh,节省电费 150.5 万元。

续表

负荷	950 MW		750 MW	
	调前	调后	调前	调后
修正后排烟温度/℃	118.00	118.61	108.97	110.00
飞灰含碳量/%	0.70	0.51	0.38	0.36
炉渣含碳量/%	0.18	0.22	0.27	0.36
空预器出口烟气氧量/%	2.30	1.40	7.18	6.08
空预器入口烟气氧量/%	1.30	0.93	3.39	2.79
干烟气热损失/%	3.99	3.74	3.99	4.06
燃料中水热损失/%	0.06	0.06	0.05	0.06
氢燃烧生成水引起热损失/%	0.28	0.28	0.24	0.24
灰渣中可燃物的热损失/%	0.26	0.19	0.15	0.15
空气中水蒸气热损失/%	0.10	0.09	0.12	0.13
生成一氧化碳引起热损失/%	0.20	0.19	0.00	0.00
辐射热损失/%	0.20	0.20	0.21	0.21
未测量的热损失/%	0.50	0.50	0.50	0.50
总计/%	5.59	5.25	5.28	5.34
修正后锅炉效率/%	94.41	94.75	94.72	94.66

5 结 论

1) 针对动叶可调轴流式风机性能特点、耗电量进行综合分析,分别提出了引风机智能监控模型和风机节能运行模型,借助火电厂智能计算平台,实现了对引风机运行工况点进行可视化监控和失速预警。

2) 通过节能运行模型,挖掘最优锅炉运行氧量配风调节区间,辅助技术人员运行调节。在机组安全运行的前提下,降低送风机、引风机厂用电率,提高生产运行经济性。该风机节能运行模型可供 300 MW 以上机组参考。

参考文献:

[1] 耿建渝. 1000MW 超超临界机组引风机优化配置[J]. 电站系统工程, 2011, 27(2): 27-29.

[2] 闫桂林. 600MW 超临界机组联合引风机选型分析[J]. 华电技术, 2010, 32(8): 15-17.

[3] 蒋建林,成伟倪,金春,王艺伟.基于节能监测的风机流量测量方法研究[J]. 工业计量. 2023,33(01)

[4] Energy-Saving Performance of Flap-Adjustment-Based Centrifugal Fan. Genglin Chen;; Wei Xu;; Jinyun Zhao;; Haipeng Zhang.Energies,2018

[5] 李大江. 国内主要行业风机能耗现状以及节能措施的分析研究[J]. 风机技术, 2019, 61(S1): 1-6.

[6] 林俐,邹兰青,周鹏,等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.

[7] 王贺岑,邹文华,马淮军,等. 风机变频改造节能技术在火电厂的应用研究[J]. 中国电力, 2002, 35(2): 70-74.

[8] 张广才,周科,鲁芬,等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热

力发电, 2017, 46(9): 17-23.

[9] 李春宏. 轴流风机失速与喘振分析及其处理[J]. 热力发电, 2008, 37(3): 76-78.

[10] 张磊,王松岭,胡晨星. 叶轮机械旋转失速研究进展[J]. 热力发电, 2014, 43(1): 1-5, 25.

[11] 种西虎,李广伟,靳军. 1000MW 机组超低排放改造后引风机失速原因分析及预防措施[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 67-70.

[12] 杨威, 琚敏, 陈勤根, 等. 深度调峰下电站锅炉动调轴流引风机节能改造技术研究[J]. 风机技术, 2021, 63(3): 94-100.

[13] 李昊燃, 郑金, 董康田, 等. 动调轴流风机全工况智能化节能运行研究[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 34-39.

[14] 李凯伦, 高国栋, 丹慧杰, 等. 动调轴流风机叶顶间隙对风机性能及失速特性的影响研究[J]. 流体机械, 2018, 46(10): 11-14.

[15] W. G. Warren, Correlation or regression; bias or precision. Applied Statistic 20(1971):148-164

[16] Dallal G E. Correlation coefficient[J].Encyclopedia of Clinical Neuropsychology, 2003,1184:710-713.

[17] VAN LOCO J, ELSKENS M, CROUX C, et al. Linearity of calibration curves; use and misuse of the correlation coefficient[J]. Accreditation and Quality Assurance, 2002, 7(7): 281-285.

[18] MACTAGGART D, FARWELL S O. Analytical use of linear regression. part I: regression procedures for calibration and quantitation[J]. Journal of AOAC International, 1992, 75: 594-608.

[19] SU Y, CHEN X J, WANG X, et al. Real-time modular dynamic modeling for compression system of altitude ground test facilities[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(5): 202-211.

[20] ZHUM Y, WANG X, PEI X T, et al. Modified robust optimal adaptive control for flight environment simulation system with heat transfer uncertainty[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 420-431.