

火电机组能耗指标体系构建与经济性诊断研究

王亚欧¹, 陈有福¹, 牟柯昱², 任少君²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要:数据挖掘技术已广泛应用于传统火电行业的节能优化运行与管理,但目前基于数据挖掘的机组运行优化方法往往缺乏普遍性和实操性,针对少量典型工况挖掘得到的参数目标值,无法给予实际运行机组全面的指导。本文在分析锅炉和汽轮机等主要子系统性能指标影响因素的前提下,建立基于层次划分的火电机组能耗指标体系,提出了数据挖掘与火电机组能耗机理分析耦合的经济性诊断模型,有效提高了输出的鲁棒性。以供电煤耗为例,基于历史数据挖掘的火电机组经济性诊断模型和流程,准确分析出能耗水平高于报警阈70%是由于实时排烟氧量偏离基准值造成的,并给出符合实际工况的调节建议。

关键词:火电机组;数据挖掘;能耗指标体系;经济性诊断

中图分类号:TM621

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.08.022

[引用本文格式]王亚欧,陈有福,牟柯昱,等.火电机组能耗指标体系构建与经济性诊断研究[J].热能动力工程,2022,37(8):175-185. WANG Ya-ou, CHEN You-fu, MOU Ke-yu, et al. Study on index system construction of energy consumption and economic diagnosis of thermal power unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 175-185.

Study on Index System Construction of Energy Consumption and Economic Diagnosis of Thermal Power Unit

WANG Ya-ou¹, CHEN You-fu¹, MOU Ke-yu², REN Shao-jun²

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211102;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

Abstract: Data mining technology has been widely used in the energy-saving optimization operation and management of traditional thermal power industry, but the current unit operation optimization methods based on data mining often lack universality and practical operation. The parameter target values mined for a small number of typical working conditions cannot give comprehensive guidance to the actual operation of units. On the premise of analyzing the factors affecting the performance indexes of main subsystems such as boiler and steam turbine, this paper establishes the energy consumption index system of thermal power units based on hierarchical division, and puts forward the coupled economic diagnosis model of data mining and energy consumption mechanism analysis of thermal power unit, which effectively improves the robustness of output. Taking the coal consumption of power supply as an example, through the economic diagnosis model and process of thermal power units based on historical data mining, it is accurately analyzed that the reason why the energy consumption level is 70% higher than the alarm threshold is due to the deviation of real-time exhaust oxygen content from reference value, and the practical improvement scheme is put forward.

Key words: thermal power unit, data mining, energy consumption index system, economic diagnosis

引 言

火电机组运行经济性诊断以节能降耗为导向判断并分析系统运行效率降低的原因。火电机组经济性诊断的任务是在能效监测与评价的基础之上,定位出当前运行经济性不佳的热力系统和子设备,分析造成性能指标偏差的主要运行参数,最终给出能够提升运行经济性的操作方案。

常见的经济性诊断方法有机理分析法和数据挖掘法。在机理分析的基础上,结合现代化仿真平台搭建机组能耗特性模型的方法已被广泛研究。JEON 等人^[1]通过搭建汽轮机各系统的仿真模型,对变工况特性和变负荷特性展开了研究,然而计算结果精度受经验方程误差的制约。Piva 等人^[2]基于热力学第一定律构建了工业汽轮机各设备的模块化仿真库并对各仿真模块进行封装,组成了火电厂仿真模型。由于实际工业过程中复杂系统的多变性,仅仅依靠数学方法来描述这种变化存在一定的困难,所以机理模型的计算结果往往与实际运行数据存在较大偏差,这在一定程度上降低了机理模型的可靠性。董云先等人^[3]对比分析了基于数据挖掘算法的不同凝汽器真空预测模型,有效地指导了机组凝汽器真空经济运行和凝汽器故障诊断。付忠广等人^[4]引入模糊粗糙集属性约简方法,对影响机组能耗的主要特征参数进行属性约简,并利用支持向量机建立了机组能耗敏感性分析模型。蔡雨^[5]提出了一种基于广义神经网络与平均影响值相结合的智能算法,对影响机组能耗因素进行分类并建立了大型燃煤机组能耗特征及分布诊断模型。LI 等人^[6]应用关联规则对电站不同设备的运行参数进行了关联分析,得到变工况条件下各性能指标的目标值。洪军等人^[7]和叶灵芝等人^[8]基于聚类算法对工况进行了划分,并确定了对应的优化目标值。朱宇^[9]通过模糊算法、灰色关联分析方法提取出目标工况下机组能效指标的目标值,对于运行优化有一定参考价值。

机组经济性诊断的关键在于对机组能效状态的监测与能效偏离的识别,而机组能效状态需要由反映运行性能的能效指标来体现。为了全面了解机组

运行的能效情况,首先必须构建科学可靠的性能评估标准,计算出各热力系统性能指标在历史最优情况下的能耗状态作为参考,从而确定优化节能的潜力和方向。因此,有必要对各系统设备的运行机理和相互间的制约关系进行梳理,研究常见的影响运行经济性的因素在生产流程中的变化与传递规律,最终定位导致系统经济性下降的关键因素。

本文建立基于层次划分的火电机组能耗指标体系,对锅炉侧和汽轮机侧等主要子系統性能指标的影响因素进行分析,在经济性诊断理论分析的基础上,提出具体的诊断模型和流程,以明确后续数据挖掘寻优的具体参数对象。

1 系统介绍

以内蒙古某亚临界直接空冷机组为研究对象,其主要技术规范如表 1 所示,生产过程如图 1 所示。按照发电过程将火电机组的热力系统进行层次划分,如图 2 所示。

表 1 某亚临界直接空冷机组主要技术参数
Tab. 1 Main technical parameters for a subcritical direct air cooling unit

参数	数值
额定功率/MW	600
最大连续功率/MW	634.88
额定工况蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 848.76
主汽门前蒸汽额定压力/MPa	16.67
主汽门前蒸汽额定温度/℃	538
再热汽门前蒸汽额定温度/℃	538
额定背压/kPa	15
夏季工况背压/kPa	30
额定工况给水温度/℃	276.0
高压加热器级数	3
除氧器	1
低压加热器级数	3

考虑到实际运行中能耗监测与诊断操作的可行性,不同的设备及系统都需要建立相应的指标参数以表征其运行的经济性。上级系统可以将能耗指标作为描述性变量对当前系统的运行水平进行评价,下级系统以运行参数作为解释性变量,作为性能诊断和优化调节的参照^[10]。基于火电机组系统结构建立火电机组能耗指标参数体系,如图 3 所示。

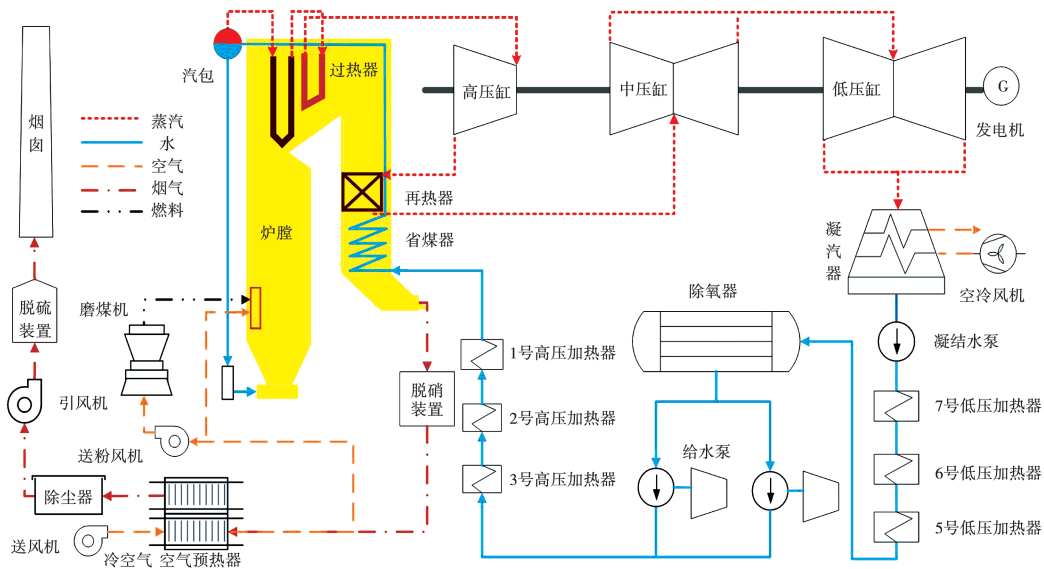


图 1 火电机组生产过程示意图

Fig. 1 Diagram of production process of thermal power unit

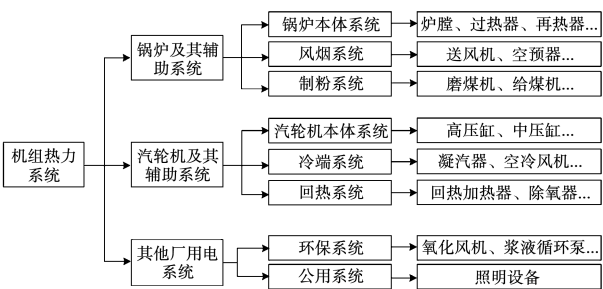


图 2 火电机组热力系统及设备划分

Fig. 2 Thermal system of thermal power unit and division of equipment

该能耗指标参数体系自上而下共分为 4 层^[11]：

(1) 运行参数层：反映底层设备能耗特性的主要参数，是判断设备运行状态是否发生偏离的依据。

(2) 设备性能指标层：表达单个或多个功能相联系的设备组的能效状态，本层性能指标可由下级运行参数进行表征。

(3) 子系统性能指标层：描述由多个相关联设备构成的热力系统单元的能效状态。

(4) 机组性能指标层：反映机组整体运行水平的指标，通常为机组供电煤耗。

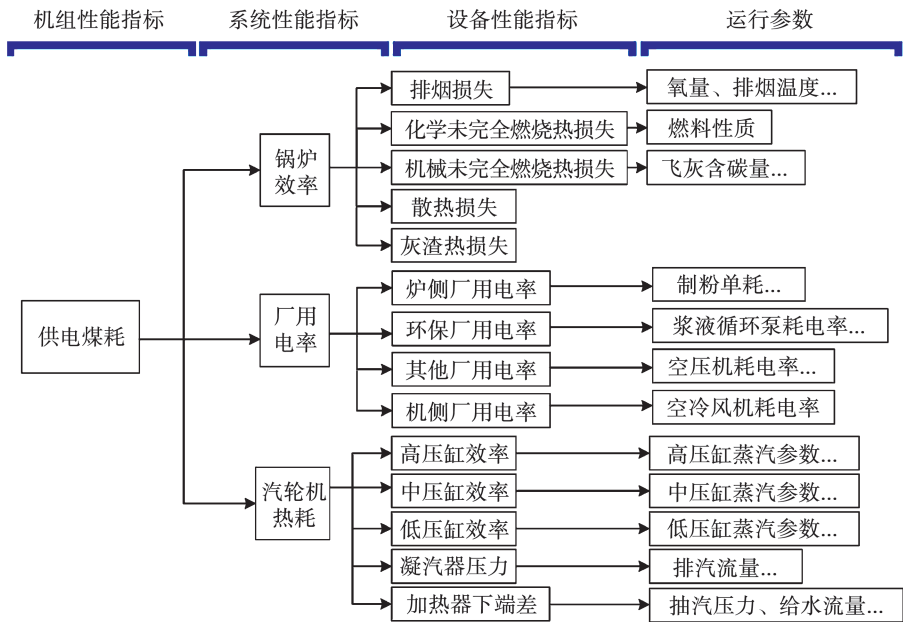


图 3 火电机组能耗指标参数体系

Fig. 3 Index parameter system of energy consumption in thermal power unit

2 机组关键能耗指标及其影响因素分析

火电机组是规模庞大的热力系统,设备间耦合关系虽然复杂,但分工相对明确独立。因此在划分系统的同时还需考虑热力系统的参数解耦,以明确系统能耗变化的方向及规律。

2.1 锅炉及其辅机侧关键能耗指标

2.1.1 制粉单耗

制粉单耗,即制粉系统磨制单位质量煤粉消耗的电量,是反映制粉系统运行能耗的重要指标^[12]:

$$D_{zf} = \frac{P_m + P_g + P_{other}}{B} \tag{1}$$

式中: P_m —磨煤机功率,kW; P_g —一次风机功率,kW; P_{other} —排粉机、给煤机等其它制粉系统设备的总功率,kW; B —机组总给煤量,t/h。

对于以母管风压调节一次风机动叶的机组,控制量来源于锅炉主控指令,一次风母管压力和一次风机功率与机组负荷呈线性关系^[13]。磨煤机功率及其影响因素可表示为:

$$P_m = f(B, HGI, M_{ad}, p_{oil}, D, t_1, \Delta p) \tag{2}$$

式中:HGI—哈式可磨性系数; M_{ad} —煤空气干燥基水分; p_{oil} —磨煤机加载油压; D —一次风量; t_1 —磨煤机入口温度; Δp —磨煤机进出口压差。

图4为案例机组的实际制粉单耗特性图。同种运行方式下随着负荷的增加磨煤机单耗减小。当总煤量需求相同时,投运磨煤机台数越少,单台磨煤机给煤量越大,整体制粉单耗越低。

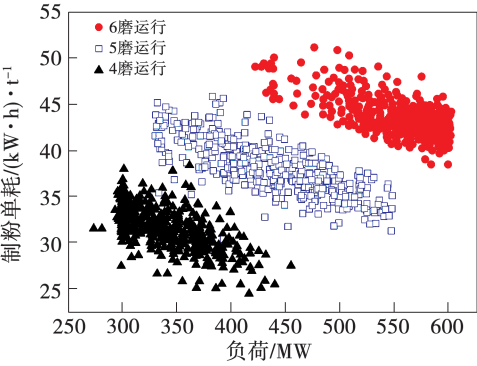


图4 制粉单耗特性

Fig.4 Performance diagram of pulverizing unit consumption

2.1.2 排烟热损失

排烟热损失 q_2 是由于空气预热器出口烟气余热无法充分利用,排至大气而导致的热量损失:

$$q_2 = \frac{V_{H_2O} c_{p, H_2O} (t_{py} - t_0) + V_{gy} c_{p, gy} (t_{py} - t_0)}{Q_{dw}} \tag{3}$$

式中: Q_{dw} —燃料的收到基低位发热量,kJ/kg; V_{gy} —燃料燃烧生成的干烟气体积,m³/kg; V_{H_2O} —燃料燃烧生成的水蒸汽体积,m³/kg; t_{py} —排烟温度,℃; t_0 —环境温度,℃; $c_{p, gy}$, c_{p, H_2O} —干烟气、水蒸气温度从 t_0 到 t_{py} 的平均比定压热容,kJ/(kg·K)。

图5给出了案例机组的不同磨煤机运行方式下,排烟温度升高值与一次风率的关系。一次风率相同的前提下,磨煤机投运台数越少,排烟温度升高幅度越大。图6给出了案例机组不同排烟氧量下,排烟温度对 q_2 的影响。

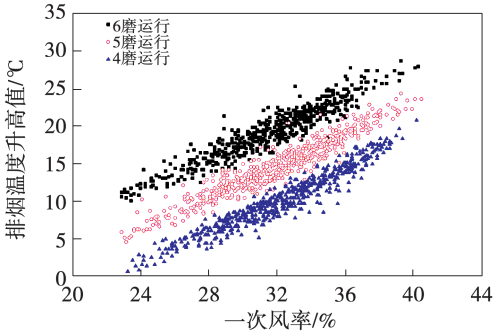


图5 运行不同数量磨煤机时排烟温度温升与一次风率关系

Fig.5 Relationship between exhaust temperature rise and primary air rate when running different numbers of coal mills

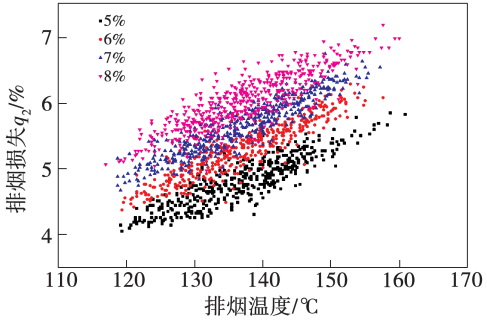


图6 不同排烟氧量下排烟温度对排烟损失的影响

Fig.6 Influence of exhaust temperature on exhaust loss under different exhaust oxygen

烟气含氧量主要反映排烟体积的变化,在排烟温度变化不大的前提下,排烟氧量越高,烟气体积越大,排烟热损失越高。

2.1.3 机械未完全燃烧热损失

机械未完全燃烧热损失 q_4 是指锅炉灰渣可燃物造成的热量损失:

$$q_4 = \frac{337.27A_{ar}}{Q_{dw}}\alpha_{fh}\frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} + \frac{337.27A_{ar}}{Q_{dw}}\alpha_{lz}\frac{C_{lz}}{100 - C_{lz}} \quad (4)$$

式中: A_{ar} —燃料收到基灰分含量,%; α_{lz} —炉渣占燃煤总灰量的质量百分比,%; α_{fh} —飞灰量占燃煤总灰量的质量百分比,%; C_{lz} —炉渣中碳的质量百分比,%; C_{fh} —飞灰中碳的质量百分比,%。

图 7 为案例机组燃烧不同灰分煤种时飞灰含碳量与 q_4 的关系。在飞灰含碳量相同的情况下, q_4 随燃煤灰分的增加而增加。对机械未完全燃烧热损失进行监测时,需关注的相关参数主要有飞灰含碳量、省煤器出口氧量、二次风出口压力和一二次风比。

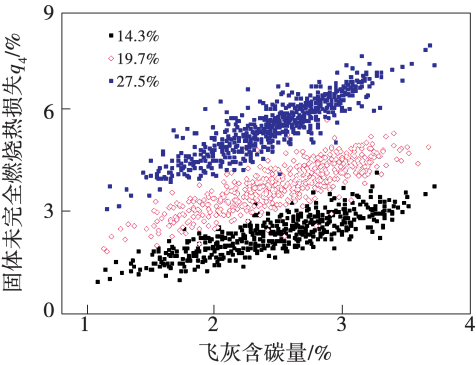


图 7 燃烧不同煤种时飞灰含碳量与 q_4 关系
Fig. 7 Relationship between carbon content and q_4 in fly ash from different kinds of coals

2.2 汽机及其辅机侧关键能耗指标

2.2.1 缸效率

缸效率 η_{ri} 反映汽轮机通流部分空气动力学的完善程度,计算式为:

$$\eta_{ri} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \quad (5)$$

式中: h_0, h_2 —入口和出口蒸汽焓, kJ/kg; h_1 —进汽参数对应的出口等熵膨胀焓, kJ/kg。

由式(5)分析,影响各缸效率的制约参数主要

有入口蒸汽参数和凝汽器真空。图 8 为案例机组的汽轮机内效率曲线,图 9 为高压缸效率与高压调门的关系曲线^[14],因此不同的配汽方式同样也影响汽机缸效率的变化规律。对各缸效率进行监测时,需关注的相关参数主要有出口蒸汽参数和轴封漏汽量。

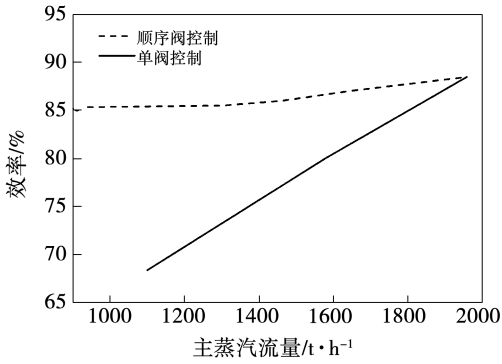


图 8 汽轮机内效率曲线
Fig. 8 Turbine internal efficiency curve

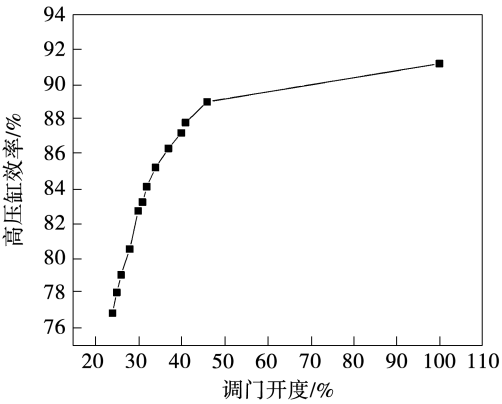


图 9 高压缸效率与高压调门开度的关系^[14]
Fig. 9 Relationship between high pressure cylinder efficiency and the opening of high pressure damper^[14]

2.2.2 凝汽器压力

凝汽器压力 p_b 和冷端系统耗电率 e_{ld} 是冷端系统的性能评价指标, p_b 和 e_{ld} 的计算式为:

$$p_b = f(Q_r, D_{lf}, t_{lf}) \quad (6)$$

$$e_{ld} = \frac{P_{nj} + P_{klfj} + P_{zk}}{N} \quad (7)$$

式中: Q_r —排汽热负荷; D_{lf} —冷却工质流量; t_{lf} —冷却工质入口温度; P_{nj}, P_{klfj}, P_{zk} —凝结水泵、空冷风机和真空泵的功率, kW; N —机组负荷, kW。

由式(6)、式(7)分析可知,影响直接空冷机组

凝汽器压力的参数主要有环境参数、排汽热负荷、环境风速及风向和冷却工质流量。图 10 为不同环境温度下凝汽器背压与负荷的关系^[15]。当环境温度升高,空气的冷却能力变差,凝汽器的冷凝温度升高,凝汽器压力也随之升高。图 11 为不同环境风速下凝汽器背压与负荷的关系^[15]。当环境风速改变时,凝汽器压力受到影响较大。

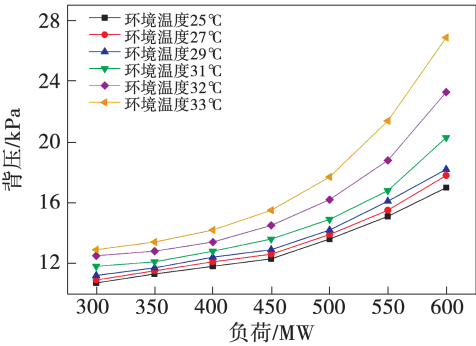


图 10 不同环境温度下背压与负荷的关系^[15]

Fig. 10 Relationship between back pressure and load at different ambient temperatures^[15]

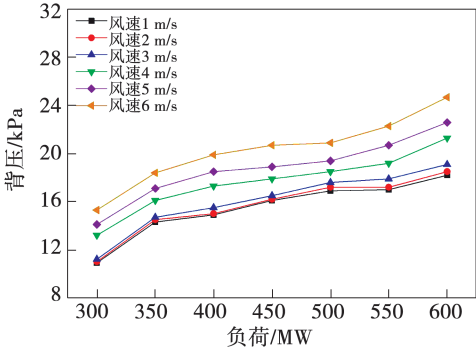


图 11 不同环境风速下背压与负荷的关系^[15]

Fig. 11 Relationship between back pressure and load at different ambient wind speeds^[15]

对凝汽器压力进行监测时,需关注的相关参数主要有凝结水过冷度、凝汽器端差、风机转速、轴封供汽压力和凝汽器热井水位。

2.2.3 加热器下端差

反映加热器出口疏水温度与进口给水温度差值的下端差是评价加热器换热性能的重要指标,下端差 Δt_{xd} 的计算式为:

$$\Delta t_{xd} = t_{ss} - t_{js} \tag{8}$$

式中: t_{ss} —加热器疏水温度,℃; t_{js} —加热器入口给

水温度,℃。

由式(8)分析,影响加热器下端差的制约参数主要有入口给水流量、抽汽压力、给水温度和上级疏水温度。图 12 为案例机组 2 号高加下端差与给水流量历史散点图。当给水流量增加,管侧换热增强、总体换热系数提高、凝结段换热量增加、壳侧单位工质放热量减少且下端差增大。

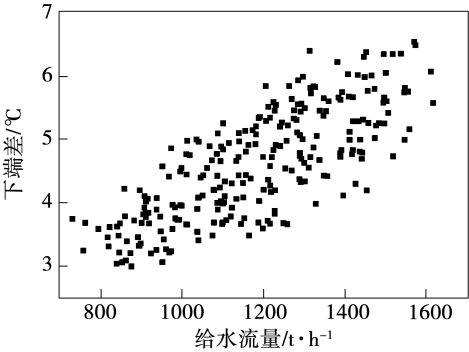


图 12 下端差与给水流量关系

Fig. 12 Relationship between lower end difference and feed water flow

图 13 为基于案例机组历史数据的 2 号高压加热器下端差与 2 号段抽汽压力的关系。当抽汽压力升高,其对应的饱和温度也升高,高压加热器疏水入口温度上升,疏水流量与抽汽流量同时增加,单位疏水放热量减少,导致下端差增加。对加热器下端差进行监测时,主要需关注加热器水位和给水温升。

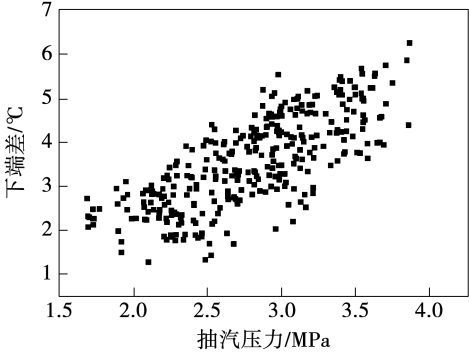


图 13 下端差与抽汽压力关系

Fig. 13 Relationship between lower end difference and suction pressure

3 火电机组经济性诊断方法

3.1 经济性诊断的参数分类

依据参数的可控性和影响机制的差别,机组主

要运行参数可分为运行可控参数、维修可控参数和不可控边界参数 3 类^[16]。

(1) 运行可控参数

运行可控参数通常是指能够调整机组运行、直接加以控制的运行参数,主要由现场运行人员的操作水平和控制系统品质决定。

(2) 维修可控参数

维修可控参数通常是指当系统异常变化时可通过维修优化的参数。

(3) 不可控边界参数

不可控边界参数通常是指反映机组运行的外部客观条件,无法由电厂自身控制的参数。由于外部环境和负荷指令无法变更且设备检修的间隔周期通常很长,机组实时运行优化的重点应集中于可控损失的减小^[16]。

3.2 经济性诊断模型

机组经济性诊断的任务是检测系统能耗是否发生重大偏离,判明致使运行偏离基准状态的具体设

备,在必要时提出相应的维护与改进措施。火电机组经济性诊断方法流程如图 14 所示。对于大多数火电机组经济性诊断主要包括:

(1) 能量损耗检测

由监控管理系统对机组运行状态进行持续监测,实时计算机组供电煤耗,并与设定的预警阈值相比较,以此判断机组整体目前是否发生运行偏离或性能恶化。

以供电煤耗为判断指标,选取相同工况下的煤耗历史数据拟合正态分布,计算当前供电煤耗在历史概率分布中的累积分布函数值 P_{ip} ,并与设定的累积概率阈值 E_{ip} 进行比较。当 $P_{ip} \leq E_{ip}$,表示机组运行状态正常,无需报警;当 $P_{ip} > E_{ip}$ 且机组工况稳定,表示机组当前运行状态已发生偏离,需要报警提示运行人员,对下级系统、设备和参数进行逐一排查,确定影响能量损耗的大小和主要位置。

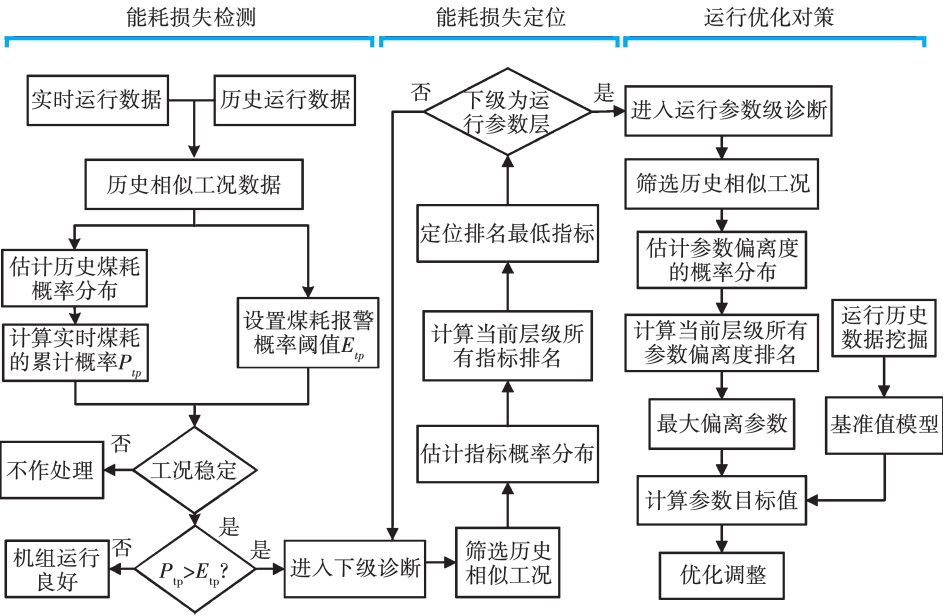


图 14 火电机组经济性诊断流程

Fig. 14 Economic diagnosis process of thermal power unit

(2) 能量损耗定位

在准确捕捉经济性异常事件的前提下,需由上级性能指标出发,向下分层逐级推理,以查明运行偏差的最终影响因素,即明确上级性能指标的异常偏

差是由热力过程中的哪些环节、哪些子设备、以及哪些运行参数所引起的,具体方法为:

当下级诊断对象为子系统层指标和设备层指标时,增加边界条件限制,筛选相同工况下各指标的历

史运行数据拟合正态分布,计算所有下级指标当前值在优化方向上的累积分布函数。某指标的累积概率值越高,该指标对应热力过程发生能效偏离的程度越大,以累积概率值较高的指标作为下一级诊断的对象。由于性能指标的优化通常具有单向性,计算累积概率值时应按照性能由高到低的方向进行。

(3) 运行优化对策

在明确能量损耗产生的具体设备及原因后,根据异常设备的运行特性,确定偏离参数的运行目标值并进行调整,以确保系统恢复正常运行或改善至最佳的运行水平,具体方法为:

定义相同工况下,运行参数实际值 X_{real} 与基准值 X_{aim} 的差值为偏差度 ΔX ,如式(9)所示。与步骤2类似,筛选相同工况下历史数据计算各运行参数的偏差度并拟合正态分布,按式(10)计算下层各运行参数偏差度的累积分布函数值 $P_{\Delta X}$,以概率值较高的运行参数作为优化调整的对象。最终,以运行参数的基准值指导机组开展优化调节,以性能指标的基准值作为调节后机组能效改善的参考。

$$\Delta X = X_{\text{real}} - X_{\text{aim}} \tag{9}$$

$$P_{\Delta X} = P(|\Delta X| \leq x) = \int_{-x}^x f_{\Delta X}(t) dt \tag{10}$$

式中: $f_{\Delta X}(t)$ —连续型变量 t (参数偏离度 ΔX) 的正态分布概率密度函数。

图15为案例机组在某工况下供电煤耗分布。以负荷、环境温度为边界条件,在历史数据中筛选与实时工况边界条件相近的一系列样本。由于机组运行状态和调节方式的不同,同一工况下的供电煤耗分布情况不同,不同参数组合下的机组供电煤耗可认为近似满足正态分布,连续型变量供电煤耗 t 的正态分布概率密度函数 $f_X(t)$ 和累积分布函数 $F_X(x)$ 可表示为:

$$f_X(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{11}$$

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt \tag{12}$$

式中: $P(X \leq x)$ —均值 μ ,标准差 σ 的正态分布的观测值落入 $(-\infty, x]$ 区间的概率。

若设定累积概率阈值为70%,计算当前供电煤

耗317.5 g/(kW·h)对应的累积概率为93%,则说明此时煤耗值已高于相同边界条件下93%的运行工况,超过了报警阈值,应进入下级指标的诊断。

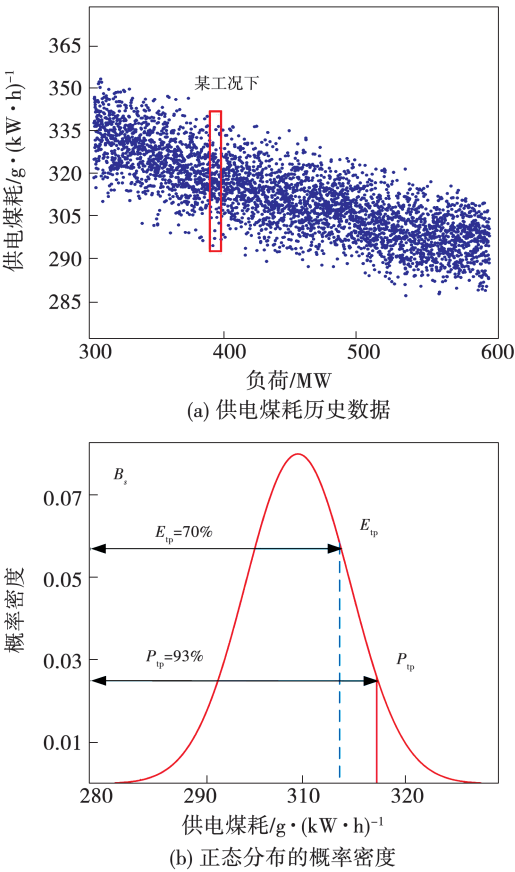


图 15 某工况下机组供电煤耗分布

Fig. 15 Coal consumption distribution of unit power supply under a certain working condition

图16为某工况下氧量参数偏离度的分布。当下级诊断对象为运行参数时,运行参数的优化方向并不具有单向性,无法直接由运行参数拟合正态分布,由外部制约参数为边界条件筛选历史数据,可认为历史工况内各条样本的参数偏差度应近似满足正态分布。

4 经济性诊断案例

案例机组取全年稳态数据为历史工况搜索的样本空间,拟合不同工况边界下各类参数的正态分布。设置供电煤耗报警的概率阈值 E_{ip} 为70%,某时刻机组各层级指标的诊断结果如表2~表4所示,仅列举各层级偏离程度最大的指标参数的诊断

结果。

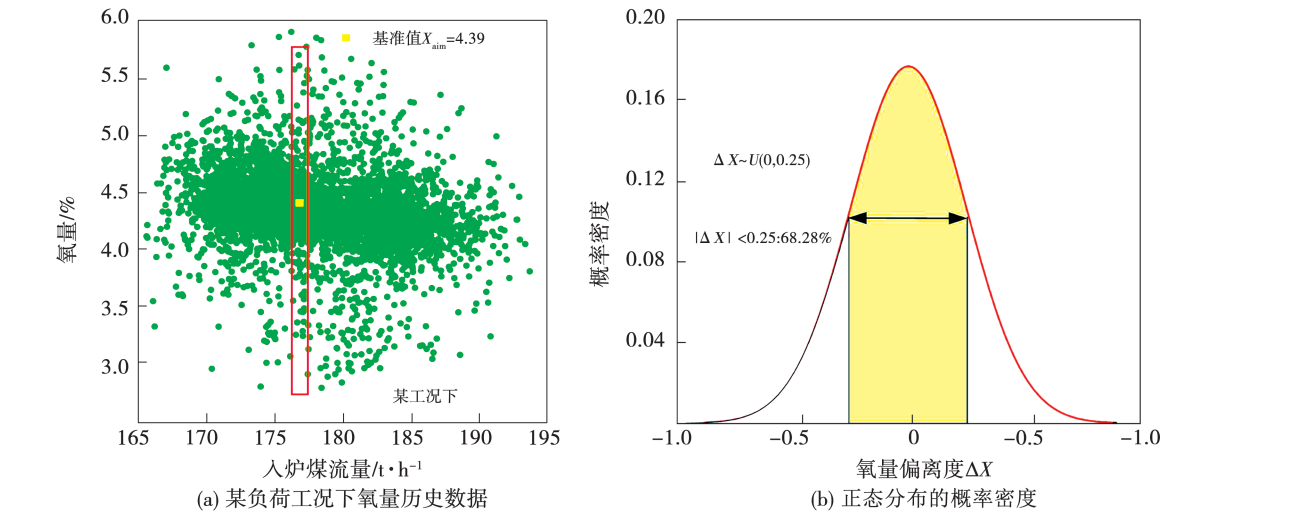


图 16 某工况下氧量偏离度分布

Fig. 16 Distribution of deviation degree of oxygen content under a certain working condition

表 2 机组层指标和子系统层指标的诊断结果

Tab.2 Diagnosis results of unit layer index and subsystem layer index						
参数	类型	累积概率/%	是否报警	实时值	同工况最优值	同工况平均值
机组负荷/MW	边界条件	—	—	313.6	—	—
环境温度/℃	边界条件	—	—	6.8	—	—
供电煤耗/g·(kW·h) ⁻¹	机组层指标	78.8	1	351.6	329.9	346.1
锅炉效率/%	子系统层指标	70.1	1	92.03	93.58	92.74
厂用电率/%	子系统层指标	45.9	0	7.62	6.51	7.64
汽轮机热耗/kJ·(kW·h) ⁻¹	子系统层指标	53.6	0	8 667.7	8 371.0	8 598.2

表 3 某 600 MW 机组设备层指标的诊断结果

Tab.3 Diagnostic results of equipment layer index of a 600 MW unit						
参数	类型	累积概率/%	是否报警	实时值	同工况最优值	同工况平均值
入炉煤量/t·h ⁻¹	新增边界条件	—	—	171.11	—	—
煤种折算水分/%	新增边界条件	—	—	21.00	—	—
煤种折算灰分/%	新增边界条件	—	—	19.74	—	—
煤种低位热值/kJ·kg ⁻¹	新增边界条件	—	—	18130	—	—
给水温度/℃	新增边界条件	—	—	243.9	—	—
排烟热损失/%	设备层指标	72.8	1	5.87	4.91	5.78
化学未完全燃烧热损失/%	设备层指标	34.4	0	0.046	0.041	0.047
机械未完全燃烧热损失/%	设备层指标	47.9	0	0.53	0.53	0.55
散热损失/%	设备层指标	33.56	0	0.36	0.32	0.36
灰渣热损失/%	设备层指标	38.68	0	0.85	0.80	0.87

表 4 某 600 MW 机组运行参数的诊断结果

Tab. 4 Diagnosis results of operation parameters of a 600 MW unit

参数	类型	累计概率/%	是否报警	实时值	同工况最优值	基准值
排烟温度/℃	运行参数	54.33	0	119.90	106.17	110.48
排烟氧量/%	运行参数	78.87	1	7.12	6.21	6.23
空预器漏风率/%	运行参数	37.73	0	4.20	4.14	4.16
一次风率	运行参数	45.94	0	0.311	0.268	0.274

由表 2 和表 3 可知,由当前机组供电煤耗计算的累积概率值为 78.8%,代表当前能耗水平已高于 78.8%的历史运行状态,超越报警阈值 70%。对子系统层和设备层进行诊断,分析可知,导致当前机组运行经济性偏离的最主要原因为锅炉侧排烟热损失偏高。由表 4 可知,排烟热损失异常主要是由排烟氧量偏离造成的,而空气预热器漏风率并无明显异常,需对炉膛、制粉系统的漏风系数和配风方式进行检查,根据一次风率的基准值进行风量调节,从而降低氧量,改善排烟热损失并最终降低机组的供电煤耗。

5 结 论

提出了一种基于历史数据的火电机组经济性诊断模型,构建了机组经济性诊断的分层能效指标体系,通过机理研究和实际数据趋势分析了锅炉侧和汽机侧关键能耗指标的变化特性。基于火电机组运行能量损耗的理论分析,给出了经济性诊断相应的模型和流程。以某 600 MW 机组为对象进行了验证,结果表明,对于历史数据充足、运行工况较为平稳的机组,该模型能够有效地定位能量损耗。

所提的经济性诊断模型是基于数据挖掘方法,拟合历史工况中参数的概率分布以评价当前运行状态的优劣程度,其概率分布的拟合精度取决于历史数据的质量和数量。在历史工况数量不足的情况下,分布的拟合可能会出现较大偏差,随着机组运行时间的推移,积累历史样本的数量不断增加,该诊断模型将取得较为理想的结果。此外,所提诊断模型在火电机组深度调峰的大背景下,及时评估设备经济性,具有更加重要的应用前景。

参考文献:

[1] SHIN J Y, JEON Y J. Analysis of the dynamic characteristics of a combined-cycle power plant[J]. Energy, 2002, 27: 1085 – 1098.

[2] MORINI G L, PIVA S. The simulation of transients in thermal plant, part I: mathematical model[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11 – 12): 2138 – 2144.

[3] 董云先,王承亮,宋 岩,等. 火电厂凝汽器真空实时寻优数据挖掘算法研究及测试[J]. 科技创新导报, 2019(16): 78 – 82.

DONG Yun-xian, WANG Cheng-liang, SONG Yan, et al. Research and test of data mining algorithm for vacuum real-time optimization of condenser in thermal power plant[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019 (16): 78 – 82.

[4] 付忠广,刘炳含,王鹏凯,等. 基于数据挖掘的燃煤机组能耗敏感性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 15 – 21.

FU Zhong-guang, LIU Bing-han, WANG Peng-kai, et al. Energy consumption sensitivity analysis of coal-fired power units based on big data mining[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 15 – 21.

[5] 蔡 雨. 基于大数据挖掘的火电机组能耗特性分析及诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

CAI Yu. Theoretical research on data mining based on energy saving and consumption diagnosis for thermal power units[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[6] LI Jian-qiang, NIU Cheng-lin, LIU Ji-zhen, et al. Research and application of data mining in power plant process control and optimization[C]. Berlin: Advances in Machine Learning and Cybernetics, 2006.

[7] 洪 军,崔彦锋,毕小龙,等. 机组在线运行优化系统及实时目标工况的确定[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 86 – 90.

HONG Jun, CUI Yan-feng, BI Xiao-long, et al. A unit on-line operation optimization system and determination of real-time optimum operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 86 – 90.

[8] 叶灵芝,贾 立,宋鸣程. 基于工况划分的火电机组运行多目标优化[J]. 自动化仪表, 2019, 40(5): 25 – 30.

YE Ling-zhi, JIA Li, SONG Ming-cheng. Multi-objective optimization based on division of working conditions for operation of thermal power unit[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(5): 25 – 30.

[9] 朱 宇. 汽轮机组能效优化策略的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

ZHU Yu. Study on energy efficiency optimization strategy of steam turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[10] 徐 婧. 煤电机组能效状态评价与诊断系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

XU Jing. Research on energy efficiency condition evaluation and diagnosis system for coal-fired power units [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[11] 付 鹏. 基于降耗时空效应的大型火电机组节能诊断方法 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

FU Peng. Diagnosis methods based on tempospatial energy-saving effect in large scale coal-fired power plants [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[12] 尉 君. 大型燃煤电厂制粉系统的能耗分布与节能优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

WEI Jun. Research on energy-consumption distribution and energy-saving optimization of pulverizing system in large coal-fired power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[13] 田书耘. 基于大数据的厂用电系统分析与模型研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.

TIAN Shu-yun. Plant power system analysis and model research based on big data [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[14] 黄喜军, 胥建群, 于忠平, 等. 节流配汽超超临界汽轮机调门特性与经济运行 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (22): 168 – 176.

HUANG Xi-jun, XU Jian-qun, YU Zhong-ping, et al. Valve characteristics and economic operation for steam distribution mode of ultra-supercritical steam turbine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 168 – 176.

[15] 徐 汉. 大型空冷机组冷端系统能耗基准状态的诊断与优化 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

XU Han. Energy consumption benchmark status diagnosis and optimization of large air cooling power unit cold end system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[16] 王宁玲, 杨勇平, 杨志平. 多变边界条件下火电机组能耗基准状态诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(26): 1 – 6.

WANG Ning-ling, YANG Yong-ping, YANG Zhi-ping. Energy-consumption benchmark diagnosis of thermal power units under varying operation boundary [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(26): 1 – 6.

(丛 敏 编辑)