

Analysis of Power Plant Operation Management and Safety Production Indicators

Wei Wu

Guoneng Ningxia Lingwu Power Generation Co., Ltd., Ningxia, Zhongning, 750400, China

Abstract

In the strategic context of the “dual carbon” goal and the construction of a new power system, the operational management efficiency and safety production level of power plants have become the core elements that constrain the stability, economy, and sustainability of power supply. This article takes thermal power plants as the research object, combines the development trend of intelligent technology, and proposes a three in one collaborative optimization strategy of “data-driven full life cycle personnel empowerment”. Through practical verification in a certain power plant, it provides theoretical support and practical paradigm for the power plant to achieve efficient, low-carbon and intrinsic safety collaborative development.

Keywords

power plant; Operation management; Safety production indicators

电厂运行管理与安全生产指标分析

王伟

国能宁夏灵武发电有限公司, 中国·宁夏 中宁 750400

摘要

在“双碳”目标与新型电力系统建设的战略背景下, 电厂运行管理效能与安全生产水平成为制约电力供应稳定性、经济性 & 可持续性的核心要素。本文以火电厂为研究对象, 结合智能化技术发展趋势, 提出“数据驱动-全生命周期-人员赋能”三位一体的协同优化策略, 经某电厂实践验证, 为电厂实现高效低碳与本质安全协同发展提供理论支撑与实践范式。

关键词

电厂; 运行管理; 安全生产指标

1 引言

当前, 我国火电厂仍承担着约 65% 的电力供应任务(国家能源局 2024 年数据), 但部分机组存在运行效率偏低、安全风险管控不足的问题。在此背景下, 系统分析电厂运行管理与安全生产指标的内在关联, 构建科学的指标体系并提出协同优化策略, 不仅可降低电厂能耗成本、提升设备可靠性, 更能为新型电力系统中“源网荷储”协同运行提供安全保障, 具有重要的理论价值与现实意义。

2 电厂运行管理指标体系构建与深度分析

2.1 发电量与负荷率指标

2.1.1 指标定义与计量规范

发电量是指电厂在一定周期内生产的电能总量, 单位为兆瓦时 (MWh), 行业计量采用“三日平均法”(取连

续三日发电量均值作为日均基准), 避免单日负荷波动导致的计量偏差。负荷率则反映机组实际出力与额定容量的匹配程度, 计算公式为:

$$\text{负荷率} = (\text{实际发电量} / \text{额定容量} \times \text{运行小时数}) \times 100\%$$

行业标准规定, 火电机组年负荷率应 $\geq 75\%$, 调峰机组日负荷率波动范围控制在 40%-100%^[1]。

2.1.2 关键影响因素机理分析

设备健康状态: 机组非计划停运率是核心影响因子。某 1000MW 超超临界机组数据显示, 非计划停运率每升 0.1%, 年发电量减少约 80GWh, 主要因锅炉管壁泄漏、汽轮机轴系振动超标等故障导致停机。电力市场需求: 峰谷负荷差对发电量调节提出要求。以华东电网为例, 夏季峰谷差达 45%, 机组需通过变负荷运行响应需求, 但若负荷率低于 50%, 会导致燃烧不充分, 反而增加能耗(负荷率每降 10%, 煤耗升 3-5gce/kWh)。燃料供应链: 燃煤热值稳定性直接影响发电效率。当燃煤热值从 24MJ/kg 降至 20MJ/kg 时, 若维持发电量不变, 需增加 16.7% 的燃煤消耗量, 同时导致锅炉结渣风险上升。

【作者简介】王伟(1982-), 男, 本科, 中国宁夏中宁人, 工程师, 从事运行管理, 节能降耗, 灰硫/化学, 锅炉/汽机等研究。

2.1.3 行业案例对比

国内典型机组发电量水平如下：某电厂300MW循环流化床机组，2023年日均发电量7200MWh，年负荷率78%；某沿海电厂1000MW超超临界机组，因承担基荷供电任务，年发电量达8200GWh，负荷率93.6%，处于行业领先水平。而某老旧200MW机组因设备老化，2023年非计划停运5次，年发电量仅380GWh，负荷率55%，远低于行业标准。

2.2 单位能耗指标

2.2.1 指标定义与计量规范

单位能耗是衡量电厂经济性的核心指标，火电厂以“克标准煤/千瓦时(gce/kWh)”计量，燃气机组以“立方米天然气/千瓦时(m³/kWh)”计量，其折算标准依据《综合能耗计算通则》(GB/T2589-2020)：1kg标准煤=29.307MJ，1m³天然气=35.5MJ(折算为1.21gce/kWh)^[2]。

2.2.2 影响因素量化分析

燃料特性：燃煤灰分每增加1%，煤耗升1.2-1.5gce/kWh。某电厂实测数据显示，当燃煤灰分从12%升至18%时，锅炉受热面沾污程度加剧，排烟温度升高8℃，煤耗上升9gce/kWh。设备技术水平：锅炉燃烧器类型影响燃烧效率，低氮燃烧器较传统燃烧器可降低煤耗3-4gce/kWh；汽轮机通流改造通过优化叶片型线，可使热耗率降低2%-3%，对应煤耗下降5-8gce/kWh。运行工况：机组经济负荷区间为70%-85%，此区间内锅炉热效率≥92%、汽轮机相对内效率≥88%。当负荷率低于60%时，锅炉排烟热损失增加2%-3%，汽轮机节流损失上升，导致煤耗显著升高。

2.3 设备运行效率指标

2.3.1 热效率(机组整体效率)

机组热效率是燃料化学能向电能转化的综合效率，计算公式为：

$$\text{热效率} = (\text{发电量} \times 3600\text{kJ/kWh}) / (\text{燃料消耗量} \times \text{燃料低位发热量}) \times 100\%$$

行业基准值：超超临界机组≥45%，超临界机组≥42%，亚临界机组≥38%，燃气联合循环机组≥55%。

影响热效率的关键因素：锅炉排烟温度：每降低10℃，热效率提升0.5%-0.8%。某600MW机组将排烟温度从135℃降至120℃，热效率提升1.2%，年节电120万kWh。汽轮机排汽背压：真空度每升高1kPa(背压降低1kPa)，热效率提升0.3%。某电厂通过优化凝汽器循环水系统，将背压从4.5kPa降至3.8kPa，热效率提升0.21%。

2.3.2 锅炉效率

锅炉效率是燃料热量向蒸汽热量转化的效率，采用反平衡法计算：

$$\text{锅炉效率} = 100\% - (\text{排烟热损失} + \text{化学不完全燃烧热损失} + \text{机械不完全燃烧热损失} + \text{散热损失} + \text{灰渣物理热损失})$$

行业合格值≥92%，先进值≥94%。

主要影响因素：空燃比：最佳空燃比为1.2-1.3，过高导致排烟热损失增加，过低则化学不完全燃烧热损失上升。某锅炉空燃比从1.4降至1.25，排烟热损失降低1.8%，锅炉效

率提升1.5%。受热面清洁度：定期吹灰可清除受热面积灰，每清除1mm厚积灰，锅炉效率提升0.5%-1%。某电厂实施声波+蒸汽联合吹灰后，锅炉效率从91.2%升至92.8%。

2.3.3 汽轮机效率

汽轮机效率分为相对内效率与绝对内效率，其中相对内效率反映蒸汽在汽轮机内的能量转换效率，计算公式为：

$$\text{相对内效率} = (\text{蒸汽理想焓降} - \text{损失焓降}) /$$

$$\text{蒸汽理想焓降} \times 100\%$$

行业标准：高压缸≥88%，中压缸≥90%，低压缸≥85%。

影响因素：汽封漏汽率：每降低0.5%，汽轮机效率提升0.2%。某机组通过更换蜂窝汽封，汽封漏汽率从1.8%降至0.9%，低压缸效率提升0.36%。通流部分磨损：叶片积垢或腐蚀会导致通流面积减小，效率下降。某老机组叶片积垢厚度达0.5mm，低压缸效率从84%降至80.5%，经化学清洗后恢复至83.2%。

3 电厂安全生产指标体系与风险关联分析

3.1 设备安全运行指标

3.1.1 设备完好率

设备完好率是衡量设备健康状态的核心指标，定义为“完好设备台数占总设备台数的百分比”，计算公式为：

$$\text{设备完好率} = (\text{完好设备台数} / \text{设备总台数}) \times 100\%$$

行业标准：一般设备≥95%，关键设备(锅炉、汽轮机、发电机)≥98%。

完好设备判定标准依据《发电设备检修规程》(DL/T838-2018)，需满足：①运行参数符合设计值；②无影响安全的缺陷；③保护装置投运率100%；④润滑、冷却系统正常。

提升路径：点检定修制：采用“五定”原则(定点、定法、定标、定期、定人)，某电厂实施后，设备故障检出率提升30%，设备完好率从96.2%升至98.1%。预防性试验：对高压设备(如发电机、变压器)每半年进行绝缘测试，对转动设备每季度进行振动监测，可提前发现潜在故障。某电厂通过振动监测，提前6个月发现汽轮机轴承磨损，避免非计划停运。

3.1.2 事故发生率

设备事故发生率采用“每千台时设备运行事故次数”计量，计算公式为：

$$\text{设备事故发生率} = (\text{事故次数} / \text{设备总运行千台时}) \times 1000$$

行业基准：重大事故(造成机组停运≥24小时)≤0.1起/年，一般事故(造成机组停运<24小时)≤1起/年。

风险关联因素：设备服役年限：服役超15年的设备故障风险显著上升，某集团数据显示，15年以上机组事故发生率是5年以内机组的3.2倍，主要因金属部件疲劳、绝缘老化等问题。备品备件质量：劣质备件会导致设备寿命缩短，某电厂使用非原厂阀门，导致阀门内漏率从0.5%升至3%，引发锅炉水位波动，增加事故风险。

3.1.3 安全巡检合格率

安全巡检合格率是“符合安全标准的巡检点(项)占总巡检点(项)的比例”，计算公式为：

安全巡检合格率 = (合格巡检点项数 / 总巡检点项数) × 100%
 行业要求 ≥ 99%，关键巡检点（如锅炉水位、汽轮机振动）合格率需 100%。

技术升级路径：智能化巡检：采用无人机巡检锅炉炉膛、红外热像仪检测电气设备温度，巡检覆盖率从 85% 升至 100%，缺陷检出时间从 2 小时缩短至 15 分钟。数据实时预警：将巡检数据接入 SCADA 系统，设置阈值预警（如轴承温度 ≥ 80℃ 报警），某电厂实施后，巡检异常处置及时率提升至 98%^[3]。

3.2 人员安全操作指标

3.2.1 安全操作合格率

安全操作合格率是“按规程完成操作的次数占总操作次数的百分比”，计算公式为：

$$\text{安全操作合格率} = (\text{规范操作次数} / \text{总操作次数}) \times 100\%$$

行业基准 ≥ 99.5%，涉及重大操作（如机组启停、系统切换）合格率需 100%。

核心影响因素：作业标准化：操作票执行率是关键，某电厂推行“操作票电子化 + 双人监护”，操作票执行正确率从 98.5% 升至 99.8%，安全操作合格率同步提升。人员技能：持证上岗率需 100%，新员工需经 3 个月岗前培训 + 6 个月跟班实习。某电厂因新员工操作不规范，导致 2 次阀门误操作，安全操作合格率降至 97.8%，经专项培训后恢复至 99.6%。

3.2.2 事故报告及时率

事故报告及时率是“事故发生后 1 小时内上报的次数占总事故次数的比例”，行业要求 100%，报告内容需符合《电力生产事故调查规程》（DL/T5234-2010），包括事故时间、地点、原因、损失、处置措施及责任人。

保障机制：分级上报流程：班组级事故 15 分钟内报车间，车间级 30 分钟内报厂安全监察部，厂级 1 小时内报集团。某电厂通过“移动端上报系统”，报告平均耗时从 45 分钟缩短至 20 分钟。信息要素规范：制定事故报告模板，明确 28 项必填要素，避免信息遗漏导致的处置延误。

3.2.3 安全培训覆盖率与考核合格率

该指标为运行安全的基础保障，行业标准：培训覆盖率 ≥ 100%（含新员工、转岗员工、外包人员），考核合格率 ≥ 95%。

培训体系构建：内容模块化：分为安全规程（占比 40%）、应急处置（30%）、风险辨识（20%）、案例分析（10%），采用 JSA（工作安全分析）方法识别作业风险。形式多样化：结合 VR 模拟（如锅炉爆管应急处置模拟）、现场实操培训，某电厂实施后，员工应急处置能力评分从 75 分升至 92 分，考核合格率从 93% 升至 98%。

4 电厂运行管理与安全生产协同优化策略

4.1 指标数据驱动的智能化管理系统构建

系统采用“云-边-端”三级架构：数据采集层（端）（如图 1）：部署传感器（振动、温度、压力）、智能仪表（煤耗在线监测仪）及 SCADA 系统，采集频率：运行参数 1 秒

/次，安全指标 5 分钟 / 次，实现数据全覆盖。数据处理层（边）：通过边缘计算节点对实时数据进行预处理（滤波、降噪），将异常数据（如温度超阈值）实时推送至预警模块，时延控制在 100ms 以内。应用层（云）：构建大数据平台（基于 Hadoop 架构），实现：① 指标关联分析（如煤耗异常与设备振动数据联动）；② AI 预警模型（采用 LSTM 神经网络，故障预测准确率 ≥ 92%）；③ 可视化展示（指标趋势图、设备健康状态看板）。



图 1 云边端三级架构示意图

4.2 设备全生命周期管理优化

构建“设备健康指数（EHI）”模型，将设备完好率、事故发生率、运行效率等指标量化为 0-100 分的健康指数： $EHI = 0.4 \times \text{设备完好率} + 0.3 \times (1 - \text{事故发生率}) + 0.3 \times \text{设备效率达标率}$ ；根据 EHI 分级制定维保策略：EHI ≥ 90 分：常规巡检（每月 1 次）；80 ≤ EHI < 90 分：加强巡检（每两周 1 次）+ 专项检测（如油液分析）；EHI < 80 分：停机检修（更换老化部件、精度校准）。某电厂应用该策略后，关键设备维保成本降低 25%，非计划停运率从 1.2% 降至 0.4%。

4.3 人员安全能力提升体系

培训场景设计：模拟常见故障（如锅炉水位异常、电气短路）及危险操作（如误拉隔离开关），采用 VR 设备还原现场环境，沉浸感达 95% 以上。考核机制优化：实行“理论 + 实操 + 应急处置”三维考核，其中实操考核占比 60%（如规范完成机组启动操作），应急处置考核采用“盲演”模式（随机设定故障场景），考核不合格者需重新培训。

5 结语

本研究主要聚焦火电厂，未涵盖新能源电厂（如光伏、风电）的运行与安全指标，未来可拓展至“源网荷储”一体化电厂，研究多能源协同下的指标体系；同时，可进一步优化 AI 预警模型，结合数字孪生技术实现设备全生命周期的虚拟仿真与优化，提升管控精度。

参考文献

- [1] 周金江. 乌江梯级远程集控深化运行管理实践[J]. 红水河, 2020, 39(02): 100-102.
- [2] 刘江. 电厂集控运行“零非停”目标实现对策[J]. 低碳世界, 2020, 10(04): 58+60.
- [3] 陈晓林. 一万日夜, 上犹江畔守平安——国电投上犹江水电厂安全生产侧记[J]. 中国电业, 2020, (04): 62-63.