

Research on Soft Measurement Technology and Application of Thermal Parameters in Smart Power Plants

Qing Yang

China Electric International New Energy Hainan Co., Ltd., Haikou, Hainan, 571900, China

Abstract

Accurate monitoring of thermal parameters serves as the fundamental basis for ensuring safe and stable operation of units in smart power plants, as well as for energy conservation and emission reduction. However, direct online measurement of certain critical thermal parameters remains challenging due to harsh detection environments and limitations in hardware sensors. Soft measurement technology, which integrates data-driven approaches with mechanism modeling, enables indirect yet precise estimation of hard-to-measure thermal parameters, making it a vital technical solution for parameter monitoring in smart power plants. This study combines operational characteristics of smart power plants with thermal parameter monitoring requirements to analyze the application value of soft measurement technology. It explores methods for constructing thermal parameter soft measurement models, investigates specific implementation scenarios and optimization strategies in smart power plants, and aims to provide technical references for enhancing thermal parameter monitoring accuracy and achieving intelligent unit management in smart power plants.

Keywords

smart power plant; thermal parameters; soft sensing technology; modeling methods; parameter monitoring

智能电厂热工参数软测量技术与应用研究

杨清

中电国际新能源海南有限公司, 中国·海南海口 571900

摘要

热工参数的精准监测是智能电厂机组安全稳定运行、节能降耗的核心基础,部分关键热工参数因检测环境恶劣、硬件传感器受限等难以实现直接在线测量。软测量技术依托数据驱动与机理建模融合的方式,实现难测热工参数的间接精准预估,成为智能电厂参数监测的重要技术手段。本文结合智能电厂的运行特点与热工参数监测需求,分析软测量技术的应用价值,探讨热工参数软测量模型的构建方法,研究其在智能电厂中的具体应用场景及优化策略,旨在为智能电厂提升热工参数监测精度、实现机组智能化管控提供技术参考。

关键词

智能电厂; 热工参数; 软测量技术; 建模方法; 参数监测

1 引言

智能电厂依托数字化、智能化技术实现发电机组全流程精准管控,热工参数的监测精度直接影响机组运行的安全性、经济性与环保性。部分热工参数因检测环境恶劣、硬件传感器受限等原因,无法直接在线测量,形成机组管控的监测盲区。传统间接估算方法精度低、适应性差,难以适配机组变工况的运行需求。软测量技术通过选取相关辅助变量,结合机理分析与数据挖掘构建数学模型,能精准预估难测热工参数,弥补硬件检测短板。研究该技术的应用与优化,对推动智能电厂参数精准监测和机组智能化运行具有重要现实意义。

2 智能电厂热工参数软测量技术的应用价值

智能电厂热工参数软测量技术具备多重核心应用价值,能有效破解电厂参数监测与运行管控中的诸多难题。该技术突破硬件传感器的检测与安装限制,对炉膛出口烟温等难测参数实现连续在线监测,填补传统监测盲区,达成热工参数全维度精准监测。其依托海量数据与动态建模,可实时捕捉机组变工况特征并调整模型参数,大幅提升监测的适应性与可靠性^[1]。同时该技术依托现有DCS系统,大幅降低硬件采购与安装成本,且无需现场维护,减少人力、物力投入。此外,其提供的精准数据还为机组燃烧优化、脱硝脱硫控制等智能化管控提供可靠依据,助力电厂实现节能降耗与杜绝污染物超低排放,达到提升发电机组运行的经济性与环保性。

【作者简介】杨清(1982-),男,中国河南南阳人,本科,高级工程师,从事热工自动化研究。

3 智能电厂热工参数软测量模型的构建方法

热工参数软测量模型的构建是技术应用的核心，需结合电厂热工系统的机理特性与运行数据特征，遵循“辅助变量选择—数据预处理—模型构建—模型验证与优化”的系统化流程，保证模型的精度与泛化能力。

3.1 辅助变量的科学选择

辅助变量是软测量模型的输入基础，需遵循相关性、灵敏性、易测性、鲁棒性原则，选择与难测热工参数高度相关、能快速反映其变化、且可通过现有硬件直接精准测量的参数。结合电厂热工系统的机理分析，如构建炉膛出口烟温软测量模型时，可选择炉膛入口风量、燃料量、水冷壁壁温等为辅助变量；构建汽包焓值软测量模型时，可选择汽包压力、水位、给水温度、蒸汽流量等为辅助变量，同时通过相关性分析与主成分分析，剔除冗余变量，提升模型的建模效率与精度^[2]。

3.2 运行数据的预处理

智能电厂 DCS 系统积累的运行数据存在缺失、异常、冗余等问题，直接建模会导致模型精度下降，需进行系统化预处理。针对数据缺失，根据数据变化特征采用插值法、趋势拟合法进行补充；针对异常数据，通过拉依达准则、箱型图法等识别并剔除，同时结合电厂机组运行工况，判断异常数据是否为变工况下的合理数据，避免误删；针对数据冗余，通过归一化、标准化处理，消除量纲差异对模型的影响，提

升数据的一致性与可比性，为建模提供高质量的数据基础。

3.3 软测量模型的构建

结合智能电厂热工系统的特点，采用机理建模与数据驱动建模融合的方法构建软测量模型，兼顾模型的物理解释性与预测精度。机理建模基于热工系统的能量守恒、质量守恒、动量守恒等基本定律，推导难测参数与辅助变量之间的数学关系，构建机理模型，保证模型的合理性与鲁棒性；数据驱动建模依托电厂海量运行数据，采用机器学习、深度学习算法，并结合 AI 技术，如偏最小二乘法、支持向量机、BP 神经网络、LSTM 神经网络等，挖掘数据间的潜在非线性关系，构建数据驱动模型。针对复杂热工系统，将机理模型的约束条件融入数据驱动建模过程，构建机理与数据融合的混合模型，提升模型在不同工况下的适应能力与预测精度。

3.4 模型的验证与优化

模型构建完成后，需采用训练集与测试集数据进行验证，通过平均绝对误差、均方根误差、决定系数等评价指标，检验模型的预测精度与泛化能力。若模型精度未达到要求，需从辅助变量选择、数据预处理、模型算法等方面进行优化，如补充更具相关性的辅助变量、优化数据预处理方法、调整算法参数或更换更适配的建模算法。同时，考虑到电厂机组的老化、改造等因素，建立模型的在线更新机制，实时融入新的运行数据，动态调整模型参数，保证模型长期运行的精度与可靠性。

表 1 热工参数软测量模型验证指标及合格标准表

评价指标	指标缩写	核心合格标准	最优控制标准	适用评价维度
平均绝对误差	MAE	≤ 2.5	≤ 1.0	模型整体预测偏差
均方根误差	RMSE	≤ 3.0	≤ 1.2	模型预测离散程度
决定系数	R ²	≥ 0.95	≥ 0.99	模型数据拟合程度
模型在线更新周期	—	$\leq 72\text{h}$	$\leq 24\text{h}$	模型动态适配性
单参数预测最大偏差	—	$\leq 4.0\%$	$\leq 1.5\%$	单指标精准度

4 软测量技术在智能电厂热工参数监测中的具体应用

4.1 锅炉系统热工参数监测

锅炉是电厂的核心设备，其炉膛出口烟温、炉内燃烧效率、受热面壁温等参数难以通过硬件直接精准测量。软测量技术可依托锅炉运行的 DCS 数据，构建炉膛出口烟温软测量模型，实现烟温的连续在线监测，为锅炉汽温调节提供依据，避免受热面超温爆管；通过构建炉内燃烧效率软测量模型，实时预估燃烧效率，指导操作人员调整风燃料比，实现锅炉的高效燃烧，降低生活垃圾消耗；针对锅炉受热面壁温，构建软测量模型实现高温区域壁温的间接监测，及时预警壁温异常，保障锅炉受热面的安全运行。

4.2 汽轮机组热工参数监测

汽轮机组的汽包工质焓值、凝汽器端差、汽轮机内效

率等参数是反映机组热力性能的关键，受检测条件限制难以直接测量。软测量技术可结合汽轮机组的热力系统机理，构建汽包工质焓值软测量模型，精准预估焓值变化，为机组的热力系统优化提供数据支撑；通过构建凝汽器端差软测量模型，实时监测端差变化，及时发现凝汽器结垢、漏真空等问题，指导维护人员及时处理，提升凝汽器的换热效率；构建汽轮机内效率软测量模型，实时预估机组内效率，为机组负荷调整、汽压汽温优化提供依据，提升汽轮机组的运行经济性。

4.3 烟气处理系统参数监测

电厂烟气处理系统中，NO_x、SO₂ 浓度及脱硝催化剂活性等参数受检测环境和硬件限制，难以精准实时监测。软测量技术依托系统运行数据，可构建污染物浓度软测量模型，实现连续精准监测，为脱硝脱硫系统精准控制提供依据，保障污染物超低排放^[3]；同时搭建催化剂活性模型，实时预

估活性变化，提前预判更换时间，避免脱硝效率下降，降低运行成本。

5 智能电厂热工参数软测量技术的优化策略

5.1 融合工业互联网与大数据技术，提升数据质量

依托智能电厂的工业互联网平台与 AI 技术，实现各系统、各设备运行数据的互联互通与高效整合，打破数据孤岛，为软测量模型构建提供海量、全面的运行数据。同时运用大数据分析技术，对电厂多源异构数据进行深度挖掘与处理，

精准识别数据特征与工况变化规律，提升数据预处理的效率与质量，为软测量模型的优化提供更优质的数据支撑。

5.2 引入轻量化智能算法，实现模型在线实时运算

针对智能电厂机组运行的实时性要求，引入轻量化的机器学习与深度学习算法，对软测量模型进行简化与优化，降低模型的运算复杂度，提升模型的运算速度，实现难测热工参数的在线实时预估。同时结合边缘计算技术，将软测量模型部署在电厂现场边缘节点，减少数据传输延迟，保证模型对机组工况变化的快速响应。

表 2 轻量化算法与边缘部署性能控制参数表

性能指标类型	核心指标	优化后数值标准	工况响应要求
模型运算性能	单参数运算耗时	$\leq 50\text{ms}$	满足机组实时调控需求
	模型运算复杂度	$\leq 10^6 \text{ FLOPs}$	轻量化部署无卡顿
数据传输性能	边缘节点数据延迟	$\leq 20\text{ms}$	无数据丢包、延迟波动
	数据传输速率	$\geq 100\text{Mbps}$	适配多参数同时监测
工况响应性能	模型参数调整耗时	$\leq 100\text{ms}$	随机组工况动态适配
	多参数并行运算耗时	$\leq 200\text{ms}$	全维度热工参数同步输出

5.3 构建模型全生命周期管理体系，保障模型长期可靠性

建立软测量模型的全生命周期管理体系，涵盖模型的构建、验证、部署、运行、更新、优化等各个环节。通过在线监测模型的运行状态与预测精度，及时发现模型漂移问题^[4]，建立模型的定期校核与更新机制，结合电厂机组的工况变化、设备改造、燃料品质变化等因素，融入新的运行数据对模型进行重新训练与优化，保障模型长期运行的精度与可靠性。

5.4 与机组智能控制系统深度融合，实现闭环管控

将软测量技术与智能电厂的机组 DCS 系统、优化控制系统深度融合，将软测量模型预估的难测热工参数直接传输至控制系统，作为机组优化控制的输入依据，实现“参数精准监测—运行状态判断—控制策略调整”的闭环管控。通过软测量技术为智能控制系统提供完整、精准的热工参数数据，提升机组智能化管控的水平，实现机组的安全、高效、环保运行。

6 结语

软测量技术是智能电厂热工参数监测的重要技术手段，有效弥补了硬件传感器在难测参数监测中的短板，可在机组

变工况下实现热工参数的连续、精准、在线预估，为机组智能化管控提供可靠数据支撑，在锅炉、汽轮机组、烟气处理系统等场景中具备广泛应用价值。该技术的核心是融合热工系统机理与数据驱动算法，构建高精度、强泛化能力的软测量模型，并建立在线更新与优化机制，保障模型长期可靠性。在智能电厂发展背景下，该技术需与工业互联网、大数据、人工智能等新技术深度融合，持续优化建模方法，推动其与机组智能控制系统闭环融合，实现参数监测到优化控制的一体化应用。未来，随着智能电厂数字化水平提升与 AI 技术的发展，软测量技术将成为推动电厂安全高效运行、节能降耗的关键支撑，助力电力行业数字化、智能化转型。

参考文献

- [1] 孟宪鹏. 火电厂热工参数软测量技术的应用研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(19): 164-166+172.
- [2] 高增兰. 火电厂热工参数软测量技术的发展研究[J]. 电气技术与经济, 2022, (03): 32-34.
- [3] 薛辉, 陆晔. 火电厂热工参数软测量技术的应用价值分析[J]. 科学技术创新, 2019, (26): 20-21.
- [4] 乐鹰, 康瑞庭. 火电厂热工参数软测量技术研究[J]. 中国设备工程, 2018, (23): 82-83.