

火电厂氧量变送器测量滞后补偿与先进过程控制研究

赵子毫

国家电力投资集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 纳雍 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020016

摘 要： 烟气含氧量是火电厂锅炉燃烧效率和污染物排放控制的重要参数，氧量变送器测量滞后会造成燃烧控制策略滞后，造成能源浪费和环保风险。本文针对这一关键技术瓶颈，对氧量变送器测量滞后产生机理及影响因素进行系统研究，整理滞后补偿和先进过程控制研究现状，提出多算法融合的滞后补偿方案和协同控制策略。经过理论分析以及工程应用检验，所提出的方法可以有效地减小测量滞后误差，提高燃烧控制的精度，希望达到锅炉效率提高和 NOx 排放减少的双重目的。

关 键 词： 火电厂氧量；变送器测量滞后补偿；先进过程控制

Research on Measurement Lag Compensation and Advanced Process Control of Oxygen Transmitter in Thermal Power Plant

Zhao Zihao

Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Nayong, Guizhou 553303

Abstract： Flue gas oxygen content serves as a critical parameter for both combustion efficiency and pollutant emission control in thermal power plant boilers. Measurement lag in oxygen transmitters may lead to delayed combustion control strategies, resulting in energy waste and environmental risks. This paper systematically investigates the mechanisms and influencing factors of measurement lag in oxygen transmitters, reviews current research on lag compensation and advanced process control, and proposes a multi-algorithm fusion-based lag compensation scheme with collaborative control strategies. Through theoretical analysis and engineering validation, the proposed method effectively reduces measurement lag errors and enhances combustion control precision, aiming to achieve dual objectives of improved boiler efficiency and reduced NOx emissions.

Keywords： oxygen content in thermal power plants; transmitter measurement lag compensation; advanced process control

在双碳目标之下，火电厂要同时承受提高效率 and 环保减排的两重压力。锅炉燃烧过程的优化控制是达到该目的的主要途径，而烟气含氧量作为反映燃烧工况的重要指标，测量精度直接关系到控制策略的效果。火电厂广泛使用的氧化锆氧量变送器由于烟气传输延迟、传感器响应特性以及工况波动等因素影响，普遍存在测量滞后的问题，造成风煤配比调节滞后，造成不完全燃烧或者过量空气热损失，同时会加剧 NOx 等污染物的产生。因此开展氧量变送器测量滞后补偿技术研究，用先进的过程控制方法改进燃烧调节逻辑，成为火电厂提高运行经济性和环保性的迫切需要。本文主要解决测量滞后问题，建立高效的补偿和控制体系，给火电机组绿色高效运行提供解决办法。

一、火电厂氧量测量系统概述

（一）氧量测量的核心作用与技术意义

火电厂锅炉燃烧过程中，烟气含氧量直接反映过量空气系数的合理性，其数值变化与机组运行经济性、安全性及环保性密切相关。具体而言，含氧量过高会导致高温烟气携带大量显热从烟囱排出，显著增加排烟热损失，降低锅炉热效率；含氧量过低则会造成燃料不完全燃烧，不仅降低锅炉效率，还会增加飞灰含碳量，加剧受热面积灰结渣风险。同时，含氧量是热力型 NOx 生成的关键影

响因素，在高温燃烧环境下，过量氧气会与燃料中的氮元素发生反应生成大量 NOx，精准控制含氧量可有效抑制热力型 NOx 产生，助力环保指标达标。因此，氧量测量数据是火电厂分散控制系统（DCS）实现风煤配比动态调节、燃烧工况实时优化及环保指标闭环控制的核心依据，其测量精度与实时性对机组的经济性、安全性与环保性具有决定性影响，是保障机组稳定高效运行的重要基础。

（二）氧量变送器的工作原理与主流类型

火电厂氧量变送器主流技术基于氧化锆固体电解质的离子导电特性，其核心工作原理是：氧化锆陶瓷元件在 700-1400℃ 的

高温工作环境下,会形成稳定的氧离子导电通道,依据能斯特方程,元件两侧的参比气(通常为空气)与被测烟气之间的氧分压差会产生相应的电动势,通过信号调理电路将该电动势转换为标准电信号,进而计算得到烟气含氧量数据。除应用最广泛的氧化锆式氧量变送器外,工业上还存在基于氧分子顺磁性差异的顺磁法变送器、基于电化学氧化还原反应的电化学法变送器及基于激光吸收光谱技术的激光式变送器等多种类型。不同类型的氧量变送器在响应速度、测量精度、环境适应性、维护成本及适用工况范围上存在显著差异,其中氧化锆式氧量变送器因具备耐高温、结构简单可靠、性价比高、测量范围宽等突出优势,成为燃煤机组烟气含氧量测量的主流选择,但同时也存在易受烟气温度波动影响、长期运行中电极易积灰中毒导致性能漂移、响应速度受加热元件稳定时间制约等固有特性。

(三) 氧量测量系统的组成与运行特性

完整的火电厂氧量测量系统是一个集信号采集、处理、传输与集成于一体的复杂系统,主要由变送器探头、信号传输模块、温度补偿模块及 DCS 集成单元四大核心部分组成。其中,变送器探头是直接和烟气接触的关键部件,其内部内置电加热器与热电偶,加热器负责将氧化锆元件加热至最佳工作温度并维持稳定,热电偶则实时监测锆管温度并反馈给温度补偿模块;信号传输模块承担着信号转换与传输的功能,负责将氧化锆元件产生的微弱电动势信号转换为工业标准的 4~20mA 电流信号,再通过屏蔽电缆传输至 DCS 系统,减少传输过程中的信号衰减与干扰;温度补偿模块通过实时采集热电偶监测的锆管温度,依据能斯特方程的温度修正系数,对测量结果进行动态修正,降低温度波动对测量精度的影响。该系统的运行特性受多种工况参数的显著影响,其中炉膛压力波动会改变烟气流速,飞灰浓度过高会导致探头积灰堵塞,燃料品质变化会改变烟气成分,这些因素都会影响测量系统的稳定性与响应速度,进一步加剧测量滞后问题,给燃烧控制带来不利影响^[1]。

(四) 测量滞后对燃烧控制的影响机制

测量滞后是氧量测量系统的固有缺陷,主要表现为变送器输出信号与烟道内实际烟气含氧量变化不同步,其影响贯穿燃烧控制的全流程,对机组运行状态产生多方面的不利作用。当机组负荷升高需要增加燃料供应时,滞后的氧量信号无法及时反映炉膛内缺氧状态,导致送风调节延迟,出现短期缺氧燃烧,不仅增加不完全燃烧损失,还可能引发炉膛结渣、受热面腐蚀等安全隐患;当机组负荷降低时,过量空气状态无法被及时检测并调整,造成排烟热损失持续增加,显著降低锅炉热效率。同时,滞后的氧量信号会使 DCS 系统的控制逻辑陷入“误判”,难以精准捕捉燃烧工况的动态变化规律,导致控制策略频繁出现超调与震荡现象,不仅降低了燃烧控制系统的稳定性,还会因局部区域高温或过量氧气的存在,导致 NO_x 排放浓度异常升高,加剧环保治理压力,增加环保设施的运行成本,严重时还可能导致环保指标超标^[2]。

二、火电厂氧量测量滞后补偿与控制技术现状

(一) 测量滞后的主要来源与影响因素

氧量测量滞后是由多种因素共同造成的,分为三类,一是传输滞后,烟气从炉膛流到探头监测点要经过一定的距离,造成物理传输延迟,在大型锅炉烟道结构复杂时更加明显;二是传感器

响应滞后,氧化锆元件的电化学反应、加热器温度稳定过程和信号转换都会产生时间延迟,典型响应时间为 3 到 5 秒;三是工况干扰滞后,燃料品质变化、负荷变化、炉膛压力变化都会改变烟气流动特性及传感器工作环境,从而延长响应时间^[3]。另外探头积灰、电极中毒老化等设备问题也会使滞后现象加重,从而造成测量精度下降。

(二) 现有滞后补偿技术研究进展

国内外对氧量测量滞后补偿已经做了大量的研究,形成了三种主流的技术路径,一是硬件优化方案,优化探头安装位置、采用直插式结构缩短传输距离、选择激光吸收光谱等新型传感器来降低响应滞后,805MW 机组采用激光传感器实现了毫秒级响应测量;二是传统的信号处理方法,采用移动平均、加权滤波等算法来平滑信号的波动,提高信号的稳定性,但对动态滞后补偿的效果不大;三是模型预测补偿技术,采用卡尔曼滤波、神经网络等算法建立滞后预测模型,利用历史数据和实时参数推断实际含氧量,模糊支持向量机等算法在复杂工况下泛化能力较好^[4]。

(三) 先进过程控制在燃烧控制中的应用现状

随着控制技术的发展,先进过程控制已经逐步代替传统的 PID 控制被应用到火电厂的燃烧系统上。目前主流技术有,一是协同控制技术,即通过 CO、O₂ 浓度的协同监测来达到风煤配比优化的目的,某 660MW 机组应用该技术后锅炉效率提高 0.8%;二是智能控制算法,模糊控制、神经网络、专家系统等被用来处理燃烧过程中的非线性、不确定性问题,实现自适应调节;三是多变量预测控制,将负荷、煤质、氧量等多参数耦合关系考虑进去,建立全局优化控制模型。但是现有的技术大多缺少对测量滞后适应性的考虑,还没有建立起与滞后补偿深度融合的控制体系^[5]。

(四) 现有技术存在的不足与发展需求

虽然现有的技术取得了一定的进步,但是还存在明显的不足,第一,滞后补偿方法缺乏针对性,大部分算法没有考虑到工况变化对滞后特性动态的影响,泛化能力较差;第二,硬件与软件协同优化不够,新型传感器与先进算法的集成应用不够,不能充分发挥技术优势;第三,控制策略与滞后补偿脱节,先进的过程控制没有考虑到测量滞后特性,从而影响控制精度;第四,工程应用验证不够充分,大部分研究都在实验室里进行,缺少大规模机组长期运行的验证。因此开发自适应能力强的滞后补偿模型,建立补偿和控制协同的一体化系统就成为目前技术发展的主要需求^[6]。

三、火电厂氧量测量滞后补偿与先进过程控制策略

(一) 基于多算法融合的滞后补偿模型构建

针对单一算法在复杂工况下补偿效果有限、泛化能力不足的问题,本文提出融合卡尔曼滤波与 BP 神经网络的双层滞后补偿模型,实现对测量滞后的精准动态补偿。该模型采用“滤波降噪-预测补偿”的分层设计思路,第一层采用卡尔曼滤波算法,基于氧量信号的统计特性构建状态方程与观测方程,通过实时估计信号的最优值,有效过滤工业现场的电磁干扰、电源波动等随机噪声,提升原始信号的稳定性,为后续补偿计算提供高质量的数据

基础。第二层构建自适应 BP 神经网络预测模型，选取机组负荷、燃料量、炉膛出口温度及滤波后的氧量信号作为输入特征参数，以通过精准测试获得的实际烟气含氧量作为输出标签，利用大量历史运行数据对神经网络进行训练，使其能够精准学习不同工况下测量滞后的变化规律，进而预测测量滞后值并对滤波后的信号进行动态补偿。为提升模型的变工况适应性，特别引入自适应学习机制，通过实时监测煤质变化、负荷波动等工况参数，动态调整神经网络的权重与阈值，确保在复杂变工况下仍能保持较高的补偿精度，经仿真测试与小型试验验证，该模型可将测量滞后误差降低 60% 以上，显著提升氧量信号的实时性与准确性。

（二）基于补偿信号的风煤协同控制策略

以滞后补偿过的精确氧量信号为主，构建风煤协同优化的控制策略。建立过量空气系数优化模型，根据不同的负荷和煤质条件确定最优的含氧量设定值；用模糊 PID 控制算法调节送风量，把补偿后的氧量信号和设定值的偏差作为输入，动态调整 PID 参数，提高送风调节响应速度；结合煤质在线监测数据，建立燃料量前馈调节模型，提前预测燃料变化对含氧量的影响，实现风煤配比的前馈与反馈协同控制。此种办法有效地克服了传统控制中送风与燃料调节不同步的弊病，从而保证了燃烧过程一直处在最优的状态之下。

（三）多参数融合的燃烧优化控制体系

建立氧量、温度、压力以及污染物质排放等各个参数相互影响的控制电路。通过 DCS 系统实时采集炉膛各区域温度、烟气压力、NO_x 排放浓度等参数，与补偿后的氧量信号进行数据融合；用模糊支持向量机构建燃烧效率和 NO_x 排放预测模型，以最小煤

耗和最低排放为双目标函数，利用粒子群优化算法求得最优控制参数；把优化结果输出到执行机构，实现风煤配比、喷燃器角度等参数的协同调节。该体系冲破单一参数控制的局限，达成燃烧效率同环保指标的综合改善。

（四）控制策略的工程实现与验证方案

制定控制策略的工程化实现方案，分为硬件改造和软件集成两个部分：硬件方面优化氧量变送器安装位置、增加煤质在线监测装置和炉膛温度多点监测探头，保证数据采集的全面性和实时性；软件方面在 DCS 系统中完成滞后补偿模型和控制算法的逻辑组态、开发人机交互界面、实现参数设置、状态监测和故障报警等功能。选择一台 660MW 的超超临界锅炉作为工程试验对象，用实施前后锅炉效率、煤炭消耗和 NO_x 排放的数据来对比检测该控制策略的有效性、稳定性。

四、结束语

综上所述，本文对火电厂氧量变送器测量滞后这一重要技术问题，对产生滞后的多个原因做了系统的分析，整理了相关补偿和控制技术的研究现状，提出了卡尔曼滤波与神经网络相结合的双层滞后补偿模型，构建了多参数融合的先进燃烧控制系统。从研究结果可知，所提出的技术方案可以减小测量滞后误差，提高燃烧控制精度，达到锅炉效率提高和 NO_x 排放降低的双重效果。未来研究可以继续加深人工智能算法的应用深度，并融合大数据、物联网技术创建出智慧燃烧控制平台，从而达到对工作状态的准确预测与自适应调节。

参考文献

- [1] 赵国龙, 田亮. 基于卡尔曼滤波器的锅炉氧量信号融合优化方法 [J]. 广东电力, 2025, 38(08): 12-18.
- [2] 钱飞强. 基于 PIC 单片机和 PID 算法的火电厂锅炉全面腐蚀控制方法研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(03): 265-268.
- [3] 余岩竹. 超临界与超超临界火电厂锅炉的热力性能优化研究 [J]. 技术与市场, 2025, 32(03): 63-66.
- [4] 梅洋, 马运保, 吴尔夫, 等. 火电厂智慧燃烧系统燃烧优化调整分析 [J]. 电力设备管理, 2025, (05): 109-111.
- [5] 孙耀. 火电厂全厂用水优化改造及实施效果 [J]. 电力设备管理, 2024, (22): 258-260.
- [6] 朱江涛, 闫卫东, 张卫彬. 锅炉湿基氧量与干基氧量关系计算模型研究 [J]. 锅炉技术, 2024, 55(06): 75-79.