

# 火电厂脱硫 CEMS 核心部件寿命预测与更换周期优化研究

曾燕娥

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350000；

**摘要：**火电厂脱硫 CEMS 系统是排放监测“神经中枢”，担负数据采集、状态识别、智能决策等多种功能。文章从系统结构分析入手，将灰色预测和深度学习算法相融合，构建多维寿命模型来描述零件退化动态轨迹，利用经济性约束对维护策略进行优化匹配。研究表明，所建模型能够实现复杂运行条件下高精度预测和自主调控，从而为火电厂绿色转型和数字化监管提供了一种可复制技术范式。

**关键词：**脱硫 CEMS 系统；寿命预测；部件退化；优化维护

**DOI：**10.64216/3080-1508.25.12.044

## 引言

能源清洁化转型和环境治理双重压力倒逼传统火电机组对运行方式和监测体系进行彻底改革。CEMS 系统是污染物连续监测的核心，其准确性和稳定性是脱硫装置能否达到‘超低排放’目标的关键因素。长时间的高温、高湿和高尘环境使得核心部件经常发生劣化现象，手工维修不仅费用高，而且容易造成系统停机和数据中断。为了打破这一困局，从寿命预测和维护优化两个视角切入，搭建了融合数据智能和机理分析于一体的研究框架以实现由被动检修向主动管理转变。

## 1 火电厂脱硫 CEMS 系统研究背景与总体设计思路

### 1.1 研究背景与研究意义

随着我国生态文明建设和“双碳”战略目标的深入推进，火电行业在污染物排放控制方面面临更严格的标准。 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  及颗粒物作为大气污染的主要来源，对区域空气质量和生态环境造成显著影响。为了达到污染减排、超低排放的目的，火电厂一般都采用湿法脱硫工艺进行脱硫，但是脱硫装置的运行中还需要对烟气排放成分进行连续的监测。传统的手工样本采集和周期性检测方法已经不能满足实时和准确的需求，构建一个高精度、稳健和可靠的连续排放监测系统（CEMS）已经成为该行业的发展趋势。CEMS 结合在线分析仪及自动控制系统对污染物浓度及排放量进行连续监控，从而为环保监管，设备运行优化及能效评估等提供数据基础<sup>[1]</sup>。文章针对火电厂脱硫 CEMS，目的是通过系统结构分析，关键部件性能研究和寿命预测建模等手段，使监测系统智能

化和高可靠性地运行，对工程实践价值和环境保护有重要意义。

### 1.2 CEMS 系统在火电厂脱硫中的应用现状

当前 CEMS 系统已经被国内外火电厂广泛使用，它的基本功能主要有烟气采样、稀释、气体分析以及数据的收集和传输。在国外，代表性的设备如赛默飞（Thermo Fisher）运用了化学发光法、紫外荧光法以及非分散红外法等多个分析技术，能够准确地测定  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  等多种化学参数。我国的一些系统经过长时间的运行后仍然存在着取样稳定性较差，数据漂移严重，维护繁杂等诸多问题。如探头滤芯容易因粉尘而阻塞造成流量不正常；稀释系统中的文丘里管的磨损将导致稀释比的改变；分析仪光源衰减引起的信号偏差。大部分电厂仍然依靠人工巡检和定期维护的方式，造成维护成本较高，系统可靠性较低等问题。随着工业物联网和数据分析技术的不断进步，CEMS 正在从传统的监测工具向智能化的诊断系统方向发展。新型系统具有自动校准，状态监控及寿命预测算法等功能，能够预先检测出故障并做到按需维修，是火电厂脱硫监测工作的主要发展方向<sup>[2]</sup>。

### 1.3 研究内容与技术路线

该研究旨在增强 CEMS 系统的运行稳定性和智能维护能力，重点从系统构成，寿命预测和更换优化等方面进行了系统的研究。主要研究内容包括四个方面，从系统工程角度分析 CEMS 的结构组成与工作原理，重点探讨采样、稀释与分析模块的关键技术特性；根据长期运

行数据和工况监测结果确定影响核心部件使用寿命的关键因子并提取典型运行特征；在此基础上构建了部件寿命预测模型并将灰色模型和LSTM深度网络相结合实现了滤芯、泵膜及其他易损件寿命预测及退化规律分析；根据模型的输出结果提出了最优更换策略和经济性分析方法并构建了“寿命预测—维修决策—经济评估”的闭环。该技术路线主要由数据采集，特征提取，模型训练和优化决策四个阶段组成，通过实验验证和工程仿真等手段最终形成了一套有推广价值的CEMS智能维护管理方案，对火电厂的绿色运行和精细化管理，提供了理论和实践依据<sup>[3]</sup>。

## 2 CEMS系统构成与核心部件分析



图1 CEMS系统组成图

### 2.1 采样与稀释系统结构及工作原理

CEMS系统中的采样和稀释环节是烟气进入分析过程的核心路径，其设计方式会直接决定数据的代表性和准确度。该系统利用加热取样探头与文丘里稀释装置组合，从烟道中抽取具有代表性比例的烟气样本。探头内设有加热滤芯和吹扫气的通道，避免了高湿环境下烟气凝结或者颗粒堵塞<sup>[4]</sup>。文丘里管稀释原理是根据压缩空气流速差产生的负压吸附效应将样气和稀释气按一定比例混合以达到将气体浓度降低到分析仪的安全测试范围内。为了维持稀释比不变，该系统配置了真空度传感器和气体流量调节阀，PLC控制自动调节并输出稳定。探头的加热温度保持在145°C左右，以保证气体进入分析仪之前不会凝结。本模块兼具自动吹扫功能并利用0.4 MPa压缩空气对探头表面积尘进行定时清理，有效地提高了采样精度和长时间可靠性。

稀释法CEMS气态污染物子系统组成

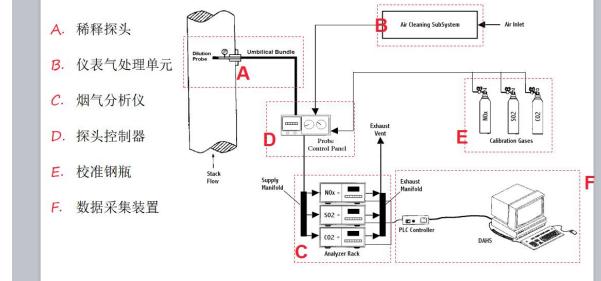


图2 稀释法CEMS气态污染物子系统组成图

### 2.2 分析系统主要仪器及关键性能指标

分析系统构成了CEMS的关键部分，直接影响到烟气成分检测的精确度和反应迅速性。赛默飞i系列分析仪在火电厂脱硫系统有着广泛的应用，42i是NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>的检测仪器，该仪器使用化学发光法进行测试，测试限在0.4ppb范围内，线性误差在±1%以内；43i是根据紫外荧光原理测量SO<sub>2</sub>的，其响应时间为40秒左右；48i在CO监测中的应用是非分散红外吸收法；410i在CO<sub>2</sub>测定中的高稳定性和自动校准。该系统由DAS采集模块进行多通道的同步采样，实现了数据的实时显示，报警和保存在上位机的数据库。每台仪器都装有自检程序及状态指示系统以支持远程诊断和参数调整。软件部分由组态监控界面，项目备份和公式管理等功能组成，能够实现折算浓度，氧量修正和数据报表的生成等功能。系统总体结构紧凑、维护方便、能够在复杂的工况中长期稳定工作，对脱硫装置的排放监测具有高精度的支持作用<sup>[5]</sup>。

### 2.3 校准与维护模块的运行特征

为确保CEMS能够长时间稳定运行，校准和维护模块起到了关键的保障作用。该系统对零气和量程气通路采用内置电磁阀进行控制，以达到零点和跨度的自动标定。校准气体的流量通常设置在1 L/min左右，稳定时间在6分钟左右。每一次的校准流程都涵盖了“校零—校跨—校正”这三个关键步骤，以确保分析仪的读数精度始终处于规定的标准之内。维护模块主要由定期吹扫，温度控制，备件更换等模块组成。根据资料，采样探头滤芯更换周期约为三个月，SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>去除器半年更换一次，分析仪泵膜一年更换一次。在系统的运行过程中，巡查人员需要定期检查真空度（大于13 inHg）、气压

(0.4 MPa) 和探头的加热温度 (140~150° C)，并利用组态软件记录仪器的报警信息。健全的校准和维护机制既可以有效地减小漂移误差，又可以延长设备寿命和增加系统可用率。通过对维护记录和数据的比较，可以进一步为后续的寿命预测和优化策略的研究提供支持。

### 3 核心部件寿命预测模型研究

#### 3.1 寿命影响因素分析与运行数据特征提取

CEMS 系统核心部件长期处于高温、高湿、含有酸性气体和粉尘等工作条件下，性能退化受多种因素的耦合作用影响。采样探头长时间接触烟气流，在温度冲击、粉尘沉积及化学腐蚀等因素的综合影响下，容易造成滤芯堵塞和取样流量的减小；稀释喷嘴与管路之间孔径发生变化将导致稀释比不平衡，从而影响分析精度；分析仪泵膜会在不断的振动和压力波动作用下发生疲劳老化和流量的逐渐衰减。系统运行的环境温度，气源压力的稳定性，湿度的控制和维护频率等因素都会对系统的寿命造成直接影响。为揭示各种因素对部件寿命的影响规律，文章研究了一种以实际发电厂 CEMS 操作数据为基础，收集包括稀释气压力、真空调度、加热温度、信号强度、噪声比和仪器漂移量在内的变量构建寿命数据库的方法。利用多维相关分析和主成分分析 (PCA) 技术，提取了与寿命退化紧密相关的特征集合，并采用时间序列平滑和归一化技术来减少数据的波动性。发现滤芯压差和真空调度的变化呈现强烈的负相关，而泵膜振动频率和流量稳定性之间存在明显的线性关系。特征提取结果是后续寿命建模的优质输入变量，由经验判断到数据驱动科学预测。

#### 3.2 寿命预测模型的建立与验证

面对 CEMS 核心组件退化机制的复杂性和退化速度的非线性特点，本项研究选择了“数据驱动加机理修正等”的综合建模方法。该模型结构由退化趋势层，特征映射层，寿命推断层组成。退化趋势层通过灰色 GM(1, 1) 模型构建初始退化曲线，以捕捉长期趋势；特征映射层是以 LSTM 神经网络为基础，通过时序特征来学习零件的性能动态变化规律；并在寿命推断层中引入温湿度和气压波动等外生变量为修正因子以增强模型在各种工况下的适应性。模型的训练利用了系统两年的运行数据，

并通过五折交叉验证来确定最佳的参数组合。根据预测数据，这一模型在预测采样探头的使用寿命时，R<sup>2</sup> 达到了 0.96，其平均绝对误差不超过 5%，与传统的回归模型相比，精确度提高了大约 30%。进一步对不同运行条件进行验证，结果表明该模型能够提前 20~30 天对部件性能衰减趋势进行精确预警。

#### 3.3 典型工况下部件退化规律分析

在典型脱硫工况下，CEMS 关键部件的劣化过程表现出显著的阶段性与非线性特征。研究显示采样探头性能退化可以分为三个阶段，分别是前期稳定阶段，中期加速阶段和后期失效阶段。初期阶段劣化速度较慢，这主要是粉尘沉积和温度应力的影响；中期阶段滤芯表面微孔堵塞和文丘里喷嘴的磨损使流量和稀释比逐步偏离标准值；泵膜在后期出现疲劳，密封老化等现象，流量波动增大，系统信号漂移显著。经过对真空调度变化率和信号稳定性的综合分析，发现真空调度的下降速度与泵膜的退化率有着密切的关系。当真空调度下降的幅度超出 15% 时，泵膜的使用寿命剩余不到 20%。在各种不同的运行环境中，高湿度（12%）和频繁的启停操作都会导致老化速度加快，从而使使用寿命减少 10%~25%。退化的曲线总体上展现出“S 型”的衰减模式，这与预测模型的输出数据高度一致。

### 4 部件更换周期优化与经济性分析

#### 4.1 基于寿命预测的更换策略优化

传统上，CEMS 的维护大多依赖于经验或定期的更换，导致“过度维护”或“延迟更换”的情况，这不仅浪费了资源，还增加了停机的风险。针对这一问题，研究在寿命预测模型的基础上构建了一种动态更换策略。系统通过实时计算健康指数 (HI)，当 HI 值下降至设定阈值（通常为 0.3）时自动发出维护预警，并根据部件退化速率动态调整更换计划。该优化模型以系统可靠性最大化和维护费用最小化为目标函数，同时考虑备件的费用，停机损失和失效风险等因素，采用多目标优化算法对最优更换周期进行了求解。采样探头滤芯最佳更换周期是 90 天；SO<sub>2</sub> 去除器更换时间在半年左右；分析仪泵膜的最佳更换周期约为 11 个月。相较于传统的技术手段，这一策略能够将非预期的停机时间减少大约 15%，

同时也能将系统的平均无故障运行时间（MTBF）延长大约 12%。该优化策略变“预测驱动维修”，使得系统维护变得更科学，更经济，更可控。

#### 4.2 维护成本与停机损失的综合评估

为定量分析不同维护策略对经济的影响，文章基于系统全生命周期视角构建了成本效益模型。直接成本由备件采购、人工检修、校准耗材等构成；间接损失则主要源于停机过程中排放监测的中断，发电损失和环保考核风险等。将寿命预测结果与经济参数耦合，构建综合成本函数，在可靠性约束下计算最优更换点。研究结果显示，在实施基于寿命预测的策略之后，CEMS 的年度运营和维护总成本下降了大约 18%，其中备件的费用减少了 9%，停机造成的损失降低了 12%，而运营维护的强度也下降了大约 20%。经过长时间的运行，系统的稳定性得到了明显的增强，数据的连续性也得到了提升，同时分析仪的漂移率减少了大约 15%。经济评估结果证明智能预测维护具有现实价值，对电厂确保监测准确性前提下降本增效提供数据支持。

#### 4.3 更换周期优化方案与应用建议

通过预测模型和经济分析结果相结合，可以形成一个可以推广应用的优化应用方案。搭建了数据采集及远程诊断统一平台，实现了采样、稀释、分析及校准模块运行数据在云端的实时上传，方便了模型对寿命状态及替换建议的计算。引入自学习算法使得模型能够根据历史维护记录不断修改参数以提高预测精度。建立分级维护机制并在优先预防维护清单中增加关键部件的数量，落实次要部件的条件监测以降低不必要的替换；对突发故障配置了冗余测量通道及自动校准系统以确保数据

的可靠性。在实际操作中，这种优化方法能够使系统的使用寿命增加大约 20%，同时年均的故障停机时间也减少了大约 30 小时，从而明显地增强了 CEMS 的运行稳定性和经济效果，为火电厂的智能化，数字化运行维护提供了一条切实可行的技术途径。

### 5 结论

研究采用结构解析，数据建模及策略优化等方法系统地揭示脱硫 CEMS 核心部件的退化机理和寿命演化规律。该混合预测模型动态量化健康状态，多目标优化算法在可靠性和经济性之间有效兼顾，显著延长了设备使用寿命，降低了运行成本。实践验证证明，所提方法能够保持复杂工况下的高稳定性和自适应性，对火电厂建立智能化、低碳化监测体系具有坚实的理论支撑和工程指导作用。

### 参考文献

- [1] 王锋涛, 陈伟雄, 刘继平, 等. 火电厂脱硫废水氯离子在线检测装置研究及应用 [J]. 科技和产业, 2025, 25(16): 64-69.
- [2] 张磊, 袁博, 黄守文, 等. 基于节能减排的火电厂锅炉烟气脱硫脱硝协同控制技术研究 [J/OL]. 清洗世界, 1-6[2025-10-21].
- [3] 王玉勇. 企业经济环保设计中火电厂烟气脱硫技术应用研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(07): 136-138.
- [4] 魏巍, 任淑鹏. 火电厂脱硫废水零排放技术发展现状及展望 [J]. 硫酸工业, 2025, (03): 1-4.
- [5] 刘海峰, 路亭伟, 庄绪增, 等. 火电厂锅炉烟气脱硫脱硝协同控制技术探析 [J]. 清洗世界, 2025, 41(08): 92-94.