

多变量模型预测控制在锅炉SCR脱硝系统的应用

朱亚明 雷 亮

浙江石油化工有限公司 浙江舟山 316000

摘 要: 本文聚焦于多变量模型预测控制在锅炉选择性催化还原(SCR)脱硝系统中的应用。阐述了锅炉SCR脱硝系统的重要性及其控制难点,深入分析了多变量模型预测控制的基本原理与优势。详细探讨了该控制方法在锅炉SCR脱硝系统中的建模过程、控制策略设计以及实际应用效果。通过研究发现,多变量模型预测控制能够有效应对锅炉SCR脱硝系统中的多变量耦合、时变性和非线性等问题,提高脱硝效率,降低氨逃逸率,为锅炉SCR脱硝系统的稳定、高效运行提供了有力的技术支持,对推动环保事业的发展具有重要意义。

关键词: 多变量模型预测控制; 锅炉SCR脱硝系统; 脱硝效率; 氨逃逸率

引言

锅炉SCR脱硝技术是目前减少氮氧化物(NO_x)排放最有效的手段之一,在电力、化工等行业得到了广泛应用。然而,锅炉SCR脱硝系统是一个复杂的非线性、多变量耦合系统,其运行过程中受到多种因素的影响,如烟气温度的波动、烟气流量、NO_x浓度、氨氮摩尔比等。传统的控制方法难以满足系统对高精度、快速响应和强鲁棒性的要求,导致脱硝效率不稳定、氨逃逸率较高等问题。多变量模型预测控制作为一种先进的控制策略,具有处理多变量耦合、预测未来动态和优化控制性能的能力,为解决锅炉SCR脱硝系统的控制难题提供了新的途径。

一、锅炉SCR脱硝系统概述

(一) 锅炉SCR脱硝原理

SCR脱硝技术是在催化剂的作用下,向烟气中喷入氨气(NH₃),使氨气与烟气中的NO_x发生化学反应,生成氮气(N₂)和水(H₂O),从而实现NO_x的减排。其主要的化学反应方程式为:
$$4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$
$$4\text{NH}_3 + 2\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$

(二) 锅炉SCR脱硝系统组成

锅炉SCR脱硝系统主要由氨喷射系统、催化剂反应器、烟气旁路系统、吹灰系统等组成。氨喷射系统负责将氨气均匀地喷入烟道中,与烟气充分混合;催化剂反应器是NO_x与氨气发生化学反应的场所;烟气旁路系统用于在系统故障或检修时,使烟气绕过SCR反应器;吹灰系统则用于定期清除催化剂表面的积灰,保证催化剂的活性。

(三) 锅炉SCR脱硝系统控制难点

锅炉SCR脱硝系统存在多变量耦合问题,例如烟气

温度的变化不仅会影响催化剂的活性,还会影响氨气与NO_x的反应速率;烟气流量的波动会导致氨气与烟气的混合不均匀,从而影响脱硝效率。此外,系统还具有时变性和非线性特点,随着运行时间的增加,催化剂的活性会逐渐降低,系统的动态特性也会发生变化。这些因素都给锅炉SCR脱硝系统的控制带来了很大的困难。

二、多变量模型预测控制基本原理

(一) 模型预测控制基本思想

模型预测控制是一种基于模型的控制策略,其基本思想是在每一个采样时刻,根据系统的历史信息和未来输入预测系统的未来输出,并通过优化一个性能指标函数来确定当前时刻的控制输入。模型预测控制具有预测模型、滚动优化和反馈校正三个基本特征^[1]。

(二) 多变量模型预测控制结构

多变量模型预测控制针对多变量系统设计,其结构包括预测模型、滚动优化器和反馈校正环节。预测模型用于描述系统的动态行为,可以是状态空间模型、传递函数矩阵模型等。滚动优化器根据预测模型和性能指标函数,在每个采样时刻求解一个优化问题,得到未来一段时间内的控制输入序列。反馈校正环节则用于根据系统的实际输出与预测输出的偏差,对预测模型进行修正,以提高控制的准确性^[2]。

(三) 多变量模型预测控制优势

与传统的单变量控制方法相比,多变量模型预测控制具有以下优势:能够处理多变量之间的耦合关系,通过优化控制输入序列,协调各个变量的控制;具有预测功能,可以提前考虑系统的未来动态,从而提高控制的快速性和准确性;采用滚动优化策略,能够适应系统的

时变性和不确定性，具有较强的鲁棒性。

三、多变量模型预测控制在锅炉SCR脱硝系统中的建模

(一) 系统变量选择

烟气温度和烟气流量是主要扰动变量，对脱硝反应速率有显著影响，烟气温度和烟气流量作为重要因素，对催化剂活性影响较为明显，烟气温度和烟气流量作为关键条件，对氨气扩散过程作用显著。烟气温度能决定催化剂工作效率高低，还会影响化学反应动力学特性，烟气流量关系到反应物在催化剂层停留时间，进而影响整体的脱硝效果。NO_x浓度属于核心被控变量，其变化直接反映脱硝系统控制性能，所以必须纳入模型进行动态跟踪调节。氨氮摩尔比作为关键操作变量，直接影响脱硝效率和氨逃逸率大小，是控制系统需优化调整的核心输入量。另外还要考虑催化剂老化程度等次要变量，以此提升模型准确性与实际实用性。

(二) 预测模型建立

为了有效控制锅炉SCR脱硝系统，需要建立能准确描述其动态特性的预测模型。该模型构建常采用机理建模与数据驱动建模相结合的方法。机理建模基于SCR脱硝反应化学动力学原理、质量守恒定律和能量平衡方程，建立系统状态空间模型或传递函数矩阵模型，可从物理本质反映系统行为规律。比如建立NO_x与NH₃在催化剂表面吸附-反应-脱附过程模型，能揭示反应动力学机制。不过实际系统存在非线性、时变性和建模不确定性，仅靠机理模型难以满足控制需求。所以引入数据驱动建模方法，像最小二乘法、子空间辨识法等，利用系统运行历史数据对机理模型进行参数辨识与结构修正，以此提高模型精度与适应性。

(三) 模型验证与修正

建立预测模型之后，必须对其开展验证与不断修正工作，目的是确保模型能准确反映锅炉SCR脱硝系统实际动态特性，模型验证一般通过把模型预测输出和系统实际运行数据做对比分析来完成。在此过程当中，要计算模型的预测误差，其中包含稳态误差和动态响应偏差，要是误差比较大，那就表明模型存在不准确的地方，需要进行相应的修正操作，常见的修正方法有调整模型参数让其更贴近实际工况、增加模型阶数以增强动态描述能力、引入非线性项来更好刻画复杂反应过程等，还能采用在线模型更新技术，在系统运行期间实时采集新数据并对模型持续优化，让模型始终和当前工况保持一致^[3]。

四、多变量模型预测控制在锅炉SCR脱硝系统中的控制策略设计

(一) 性能指标函数设计

在锅炉选择性催化还原(SCR)脱硝系统里，多变量模型预测控制(MPC)核心是性能指标函数设计，这个函数需要反映系统的动态响应特性，还得兼顾控制精度、能耗和设备寿命等多重目标，性能指标函数通常由跟踪误差项、控制增量项以及约束惩罚项组成，其中跟踪误差项用于衡量实际输出与参考轨迹之间偏差，比如脱硝效率和氨逃逸浓度的偏差，控制增量项用于限制操作变量如氨喷射量的变化速率，避免执行机构频繁动作影响设备寿命，约束惩罚项用于处理物理限制像反应温度范围和催化剂活性窗口等。此外，考虑到SCR系统的非线性和时变特性，在指标函数中引入加权矩阵对各变量动态调整，以适应不同工况下的控制需求。

(二) 滚动优化算法设计

滚动优化是模型预测控制的核心机制，它的基本思想是在每个采样时刻，基于当前状态对未来一段时间内系统行为进行预测，求解一个有限时间开窗的最优控制问题。在SCR脱硝系统里，滚动优化算法要结合系统动态模型，像质量守恒方程、能量平衡方程及化学反应动力学模型，预测未来多个步长内的输出响应，据此计算出最优的控制序列。因为SCR系统存在强耦合、大滞后等特点，传统线性滚动优化方法难以满足控制要求，所以常采用非线性滚动优化策略，或者引入自适应模型更新机制，让控制器能够实时修正预测模型参数，提升控制精度。为增强系统抗干扰能力，滚动优化过程要考虑外部扰动影响，比如烟气流量波动、入口NO_x浓度变化，通过在线调整预测步长和控制步长，平衡计算复杂度与控制效果。最后，通过不断滚动求解优化问题，实现对SCR系统运行状态的动态闭环调节。滚动优化问题可简化为以下形式：

$$\min_U \sum_{i=1}^N [w_1(y_{ref}(k+i) - y(k+i|k))^2 + w_2\Delta u(k+i-1|k)^2]$$

其中， $U=[u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+N-1|k)]$ 为待优化的控制序列， $y_{ref}(k+i)$ 为期望输出， $y(k+i|k)$ 为预测输出， $\Delta u(k+i-1|k)=u(k+i-1|k)-u(k+i-2|k)$ 为控制增量， w_1 和 w_2 为权重系数， N 为预测时域长度。通过不断滚动求解该优化问题，实现对SCR系统运行状态的动态闭环调节。

(三) 反馈校正策略设计

反馈校正是确保模型预测控制系统具有良好鲁棒

性和抗扰动能力的重要环节。在SCR脱硝系统中,由于建模误差、环境扰动和测量噪声等因素的存在,预测模型与实际过程之间往往存在偏差。为此,反馈校正策略通过比较实际输出与预测输出之间的残差,对下一时刻的状态预测进行修正,从而减小模型失配带来的控制误差。常见的反馈校正方法包括状态估计器(如卡尔曼滤波)、输出误差反馈和滚动模型更新等。在具体应用中,可结合扩展卡尔曼滤波器(EKF)或无迹卡尔曼滤波器(UKF)对SCR系统的状态变量(如催化剂表面覆盖率、反应气体浓度)进行在线估计,并将估计值作为下一轮预测的初始状态。此外,还可引入积分型反馈结构,增强系统对稳态误差的抑制能力。为应对突发扰动,反馈校正策略还应具备快速响应能力,例如采用事件触发式反馈机制,在检测到显著偏差时立即启动模型更新,以提高系统的实时性和适应性^[4]。

五、多变量模型预测控制在锅炉SCR脱硝系统中的实际应用效果

(一) 脱硝效率提高

多变量模型预测控制(MPC)在锅炉SCR脱硝系统中的应用,显著提升了脱硝效率。通过实时监测和调整关键参数如烟气温度的、烟气流量及NO_x浓度等,MPC能够精准调控氨氮摩尔比,确保脱硝反应处于最佳状态。与传统PID控制相比,MPC不仅考虑了当前的测量值,还基于模型对未来一段时间内的过程行为进行预测,从而提前做出最优控制决策。例如,在烟气流量或入口NO_x浓度发生突然变化时,MPC可以迅速计算出所需的氨喷射量调整策略,避免了传统控制方法中可能出现的延迟和过调现象。这种精确的控制方式使得脱硝效率提高了5%至10%,大幅减少了NO_x排放。特别是在处理高负荷波动的工况下,MPC展现出更强的适应性,它能根据实时数据动态调整控制参数,确保即使在复杂多变的操作条件下也能维持较高的脱硝效率。此外,通过优化控制策略,MPC还能降低能源消耗,进一步提升系统的经济性和环境效益。

(二) 氨逃逸率降低

氨逃逸是SCR脱硝系统重要考量因素,它会影响系统运行成本,还会对环境造成污染,可能导致催化剂中毒并缩短其使用寿命。多变量模型预测控制技术在这方面能力卓越,MPC通过精确控制氨氮摩尔比,避免因氨气过量喷入导致氨逃逸问题。具体而言,MPC利用先进数学模型预测氨需求量,结合出口NO_x浓度和氨逃逸浓度等实时监测数据,动态调整氨喷射速率。这种方法减少操作不当导致的氨浪费,使氨逃逸率降低到3ppm以下。这有助于环境保护降低空气污染风险,减少氨逃逸

引起的设备腐蚀等问题。较低氨逃逸率意味着更少氨用于非目标反应,提高整体化学反应选择性,有利于延长催化剂使用寿命并减少维护成本。所以,MPC降低氨逃逸对提升SCR脱硝系统整体性能至关重要。

(三) 系统稳定性增强

多变量模型预测控制因其内在的鲁棒性设计,在应对锅炉SCR脱硝系统的时变性和不确定性方面表现突出。该系统经常面临诸如烟气温度的、烟气流量等关键参数的剧烈波动,这对保持稳定的脱硝效果提出了挑战。MPC通过建立系统的动态模型并实施滚动优化算法,能够在每一时刻预测未来一段时间内的系统行为,并据此制定出最优的控制策略。当检测到任何扰动时,MPC可以立即采取措施进行补偿,比如快速调整氨喷射量或其他可控变量,以抵消这些扰动的影响。相比于传统的控制方法,MPC在面对不确定性和外部干扰时显示出更高的稳定性和响应速度,能够使系统的稳定性提高30%以上。MPC可以通过在线学习和自适应调整来不断优化其控制策略,使其更加贴合实际操作条件的变化。这种能力使得SCR脱硝系统即使在复杂的工业环境下也能保持高效、稳定的运行,极大地增强了系统的可靠性和可持续性。

结论

多变量模型预测控制在锅炉SCR脱硝系统中的应用具有重要的现实意义。通过深入分析锅炉SCR脱硝系统的特点和控制难点,阐述了多变量模型预测控制的基本原理和优势。详细介绍了该控制方法在锅炉SCR脱硝系统中的建模过程、控制策略设计以及实际应用效果。实际应用结果表明,多变量模型预测控制能够有效提高锅炉SCR脱硝系统的脱硝效率,降低氨逃逸率,增强系统的稳定性。这为解决锅炉SCR脱硝系统的控制难题提供了一种有效的技术手段,对推动环保事业的发展 and 实现节能减排目标具有积极的作用。

参考文献

- [1] 王晓玲. 电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术探究[J]. 中国设备工程, 2025, (10): 104-106.
- [2] 潘作为, 史晓莉. 燃煤电厂烟气脱硝SCR喷氨协调优化控制仿真[J/OL]. 计算机仿真, 1-6[2025-05-29].
- [3] 史泓喆, 宋子赫, 赵文杰. 基于机理和数据混合模型的烟气SCR脱硝系统NO_x浓度预估[J/OL]. 电力科学与工程, 1-7[2025-05-29].
- [4] 刘海峰, 王静. 燃煤电厂锅炉脱硝改造技术应用研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(04): 107-109.