

基于压力变送器的锅炉给水系统前馈 ——反馈复合控制优化

叶虎

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.2026020015

摘 要 : 锅炉给水系统是工业锅炉运行的辅助系统, 控制精度的好坏直接影响锅炉运行效率、安全性和经济性。目前传统的反馈控制方式对于给水压力波动、负荷突变等扰动的响应存在滞后性, 造成水位控制精度不够。本文提出基于压力变送器的前馈、反馈复合控制方案, 用压力变送器实时采集给水管道的压力、汽包压力等关键参数, 建立前馈控制通道提前补偿扰动影响, 采用反馈控制修正控制偏差。希望进一步提高控制响应速度, 给锅炉稳定高效运行提供可靠的保证。

关 键 词 : 压力变送器; 锅炉给水系统; 前馈-反馈复合; 控制优化策略

Optimization of Feedforward — Feedback Composite Control of Boiler Feedwater System Based on Pressure Transmitter

Ye Hu

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

Abstract : The boiler feedwater system serves as a critical auxiliary system for industrial boilers, where control precision directly impacts operational efficiency, safety, and economic performance. Conventional feedback control methods exhibit inherent delays in responding to disturbances such as feedwater pressure fluctuations and load variations, resulting in suboptimal water level control accuracy. This study proposes a hybrid feedforward-feedback control scheme utilizing pressure transmitters. By real-time monitoring of key parameters including feedwater pipeline pressure and steam drum pressure, the system establishes a feedforward control channel to preemptively compensate for disturbances, while employing feedback control to correct deviations. This approach aims to enhance control responsiveness, thereby ensuring stable and efficient boiler operation.

Keywords : pressure transmitter; boiler feedwater system; feedforward-feedback composite; control optimization strategy

工业锅炉被广泛地应用在电力、化工、冶金等国民经济的重要领域, 工业锅炉运行是否稳定, 直接影响到生产过程能否连续、安全地进行。给水系统是锅炉的“血液输送系统”, 负责给锅炉提供符合要求的水质、水量, 控制质量好坏直接影响锅炉汽包水位的稳定。传统的锅炉给水控制大多采用单回路反馈控制, 该种方式虽然结构简单、容易实现, 但是由于受到给水压力波动、蒸汽负荷突变、燃料量变化等多种扰动因素的影响, 存在明显的控制滞后, 容易造成汽包水位大幅波动, 严重时还会引发满水、缺水等安全事故。压力变送器属于精准采集压力参数的关键传感设备, 可以随时获取给水系统扰动信号。因此本文提出了前馈和反馈复合控制方法, 用压力变送器来实时采集数据来建立前馈补偿环节, 利用反馈控制的偏差修正功能, 实现对锅炉给水系统的精确控制, 对提高锅炉运行的安全性和经济性有很重要的现实意义。

一、锅炉给水系统及控制技术概述

(一) 锅炉给水系统的组成与工作原理

锅炉给水系统是保证锅炉正常工作的辅助系统, 主要由给水泵、给水管、阀门、汽包、省煤器、各种检测和控制装置等组成。其核心工作原理就是将经过处理的软化水, 经给水泵提高压

力后, 送至汽包通过省煤器预热, 然后送入锅炉进行燃烧反应, 同时保证汽包水位在设定的范围内。给水系统在运行过程中要根据锅炉蒸汽负荷的变化来调节给水量, 保证汽包水位稳定, 防止水位过高造成蒸汽品质下降, 或者水位过低造成锅炉受热面干烧损坏。其中给水泵是给水系统动力中心, 提供足够的给水压力; 阀门用来调节给水量和水流方向; 省煤器利用锅炉尾部烟气的余热

作者简介: 叶虎 (1996.04-), 男, 彝族, 贵州省水城县人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热控自动装置。

预热给水，提高能源利用率；检测设备实时采集水位、压力、流量等参数，给控制决策提供数据支撑^[1]。

（二）传统锅炉给水控制技术的类型与特点

传统的锅炉给水控制技术主要有单回路反馈控制、双冲量控制、三冲量控制这三种。单回路反馈控制只以汽包水位为唯一控制变量，依靠检测水位偏差来调节给水泵转速或者给水阀门开度，结构简单、成本低廉、调试方便，但是控制精度低，对于负荷变化、压力波动等扰动的适应性差，只适合于小型低参数锅炉。双冲量控制是在单回路控制的基础上，增加了蒸汽流量作为辅助控制变量，利用蒸汽流量的变化来预测给水量的需求，一定程度上补偿了负荷扰动的影响，控制性能比单回路控制有所提高，但是没有考虑给水压力波动对控制效果的影响。三冲量控制则同时引入汽包水位、蒸汽流量和给水流量三个控制变量，通过综合分析三个变量的偏差来实现控制调节，进一步提高控制精度和抗扰动能力，但该方式仍然属于反馈控制，对扰动的响应存在滞后，并且控制算法相对复杂，参数整定难度较大^[2]。

（三）前馈 - 反馈复合控制的基本原理

前馈和反馈复合控制就是将前馈控制和反馈控制结合起来的控制策略，既具有前馈控制提前补偿扰动的特点，又具有反馈控制修正误差的能力。基本原理就是前馈环节实时检测影响控制对象的主要扰动因素，根据扰动信号和控制对象的数学模型，提前计算出补偿控制量，作用于执行机构，提前抑制扰动，反馈环节检测控制对象的输出参数（汽包水位），计算输出参数与设定值的偏差，利用反馈控制算法对偏差进行修正，提高控制效果^[3]。与单一的前馈控制或者反馈控制相比，复合控制可以有效地解决前馈控制对数学模型的依赖性大、不能完全补偿所有扰动的问题，也可以弥补反馈控制对扰动响应滞后的缺陷。在锅炉给水系统中加入压力变送器采集给水压力、汽包压力等扰动信号作为前馈输入，结合汽包水位的反馈偏差进行复合控制，可以明显提高系统的抗扰动能力和控制精度。

二、基于压力变送器的前馈 - 反馈复合控制优化意义

（一）提升锅炉给水控制精度，保障汽包水位稳定

汽包水位是锅炉运行中最重要的一个控制参数，其控制精度决定着锅炉的运行是否稳定，蒸汽品质的好坏。传统的反馈控制由于对扰动响应滞后，在给水压力波动、负荷突变的时候，容易造成汽包水位出现超调或者振荡，不能快速恢复到设定值。基于压力变送器的前馈、反馈复合控制可以实现实时检测给水压力的变化等扰动信号，在之前做出前馈补偿，依靠反馈环节纠正水位偏差，大大提高了控制精度。该优化方案可以保证汽包水位始终在设定的范围内，避免由于水位波动造成的蒸汽带水、受热面干烧等问题，保证锅炉输出蒸汽的质量满足生产的要求，为后续生产流程的稳定运行打下基础。

（二）增强系统抗扰动能力，适应复杂运行工况

工业锅炉运行工况复杂多变，受蒸汽负荷变化、燃料量调整、给水压力波动、管网压力变化等多种扰动因素的影响，传统

的控制方式很难快速适应工况的变化，容易造成控制系统失稳。压力变送器具有快速响应的特点，可以实时采集各种扰动有关压力参数，给前馈控制提供及时、准确的扰动信号。根据这些信号构建的前馈补偿环节，可以在扰动对汽包水位产生影响之前，提前调整给水量来抑制扰动的传播；反馈环节可以对没有被前馈补偿的残余扰动引起的水位偏差进行修正。系统依靠前馈和反馈的作用提高了它对于扰动的适应性，在复杂的工况中可以稳定运行，降低由于工况变化所造成的控制失效的风险^[4]。

（三）降低能源消耗，提升锅炉运行经济性

锅炉给水系统运行能耗在锅炉总能耗中所占比例较大，传统控制方式由于控制精度不够，容易造成给水泵过度运行或者运行不足。给水量过大时，会增加给水泵的电耗，多余的给水通过排污管道排出，造成水资源和热能的浪费；给水量不足时，会使锅炉燃烧效率降低，增加燃料消耗。根据压力变送器的前馈、反馈复合控制可以实现给水量的精准调节，按照锅炉实际负荷和扰动情况来实时调节给水泵转速或者阀门开度，使给水量与蒸汽产热量精确匹配。不仅可以降低给水泵的电耗，减少水资源和热能的浪费，还可以提高锅炉燃烧效率，减少燃料消耗，大幅度提高锅炉运行的经济性，为企业降低生产成本。

（四）保障锅炉运行安全，降低故障发生概率

锅炉属于承压类特种设备，其运行安全非常重要。汽包水位的大幅波动是造成锅炉安全事故的主要原因之一，水位过高时会造成蒸汽带水，使蒸汽管道发生水击，损坏阀门和管道；水位过低会使锅炉受热面失去水的冷却，导致管壁过热、鼓包甚至爆管，造成严重的安全事故。根据压力变送器的前馈 - 反馈复合控制可以有效抑制汽包水位受各种干扰的影响，保证水位在安全范围之内。同时压力变送器可以对给水压力、汽包压力等进行实时监测，当出现异常时及时反馈给控制系统，触发报警或者紧急停机，防止事故扩大。可以减少给水系统中阀门、泵等设备频繁开关、过度调节，减少设备磨损和故障率，延长设备使用寿命，保证锅炉系统安全、稳定运行。

三、基于压力变送器的前馈 - 反馈复合控制优化策略

（一）复合控制结构设计与压力变送器选型配置

复合控制结构设计是实现优化控制的前提，要根据锅炉给水系统的特性来搭建合理的控制框架。本文所设计的前馈与反馈复合控制结构包括前馈控制模块、反馈控制模块、控制决策模块以及执行机构这四个部分。前馈控制模块用压力变送器采集的给水压力、汽包压力信号为输入，建立扰动与给水量的数学模型，得到前馈补偿量；反馈控制模块用汽包水位为输入，通过PID算法得到反馈控制量；控制决策模块对前馈补偿量和反馈控制量进行加权融合，得到最终控制指令；执行机构通过调节给水泵转速或者给水阀门开度来实现给水量的控制。压力变送器选型要满足系统测量精度和环境适应性要求，给水压力测量选用0~10MPa量程、精度等级0.1级的扩散硅压力变送器，汽包压力测量选用0~25MPa量程、精度等级0.1级的耐高温压力变送器。安装位置

上, 给水压力变送器安装在给水泵出口管道上, 汽包压力变送器安装在汽包顶部, 保证采集信号的真实性和及时性。

（二）前馈控制通道的构建与参数整定

前馈控制通道的核心就是建立扰动信号与前馈补偿量之间的映射关系, 需要机理分析和实验建模相结合的方式来确定数学模型。首先, 分析给水压力波动、汽包压力变化对给水量和汽包水位的影响机理, 初步建立线性化数学模型; 然后, 通过现场实验, 采集不同的扰动工况下压力信号和对应的最优给水量调整数据, 用最小二乘法对模型参数进行辨识和优化, 得到准确的前馈模型。参数整定, 前馈控制的重要参数有比例系数和滞后时间, 采用试凑法进行整定, 先固定滞后时间为压力变送器的响应时间, 调节比例系数, 使扰动发生时汽包水位的波动幅度最小, 再微调滞后时间, 进一步改善前馈补偿效果。参数整定保证前馈控制模块对扰动信号做出快速准确的响应, 提前补偿扰动的影响。

（三）反馈控制算法的改进与优化

反馈控制模块使用改进的 PID 算法来解决传统 PID 算法在非线性和大滞后系统中控制精度低、容易超调的问题。本文使用模糊 PID 算法, 利用模糊控制器根据汽包水位偏差和偏差变化率来实时调节 PID 控制器的比例系数、积分系数、微分系数。模糊控制器设计包括模糊化、模糊推理和清晰化三个过程, 水位偏差 e 和偏差变化率 ec 被划分成负大、负中、负小、零、正小、正中、正大这七个模糊等级, 建立模糊规则库, 根据工程经验确定不同的 e 和 ec 组合下 PID 参数的调整策略, 采用重心法将模糊推理结果清晰化, 得到实时调整后的 PID 参数。利用模糊 PID 算法改进反馈控制模块, 使反馈控制模块根据系统运行状态来调节控制参数, 提高水位偏差修正的准确性, 提高系统的鲁棒性^[5]。

（四）复合控制的协同协调机制与稳定性验证

复合控制的协同协调机制, 即怎样才能保证前馈和反馈控制

的有效配合, 必须建立合理的控制量融合策略以及切换机制。控制量融合采用加权系数法, 扰动信号强度和水位偏差大小来调节前馈补偿量和反馈控制量的权重, 扰动信号较强 (压力变化幅度超过设定阈值) 时增大前馈补偿量的权重, 突出前馈控制的扰动抑制作用, 水位偏差较大时增大反馈控制量的权重, 突出反馈控制的偏差修正作用。切换方式为平滑切换, 不会因为权重突然变化造成控制量剧烈波动, 保证系统稳定运行。稳定性验证采用仿真和现场试验两种方式, 用 MATLAB/Simulink 建立锅炉给水系统仿真模型, 对不同的扰动工况下系统运行状态进行仿真, 验证复合控制策略的稳定性, 在工业锅炉现场进行一个月的试运行, 采集运行数据, 分析汽包水位波动幅度、控制响应时间等指标, 验证系统在实际运行中是否稳定可靠^[6]。

四、结束语

综上所述, 本文以基于压力变送器的锅炉给水系统前馈-反馈复合控制优化为研究对象, 从锅炉给水系统及控制技术的概述入手, 指出了传统控制方式的不足; 结合压力变送器的特点, 论述了复合控制优化的重要意义; 提出了包含结构设计、参数整定、算法改进、协同机制的完整优化策略。经过研究得知, 本优化方案用压力变送器实时检测的优点来创建前馈环节, 使用改进后的反馈控制算法, 可以明显提升锅炉给水系统抗扰动能力、控制精度, 保证汽包水位稳定, 减少能源消耗, 提高运行安全性与经济性。也可以研究人工智能算法在复合控制中的运用, 提高控制模型的自适应性; 也可以用工业互联网技术来实施锅炉给水系统远程监控和智能运维, 推进锅炉控制系统的智能化升级。

参考文献

- [1] 张华, 王涛. 火电厂锅炉给水系统金属材料腐蚀缺陷自动检测 [J]. 自动化应用, 2024, 65(19): 150-153.
- [2] 张文祥, 孙志军, 陶丁, 等. 基于 ML-PCA 的锅炉给水系统模式划分 [J]. 能源研究与利用, 2024, (03): 40-46.
- [3] 雷斐, 赵有为. 超超临界锅炉省煤器给水旁路复合热水再循环提高 SCR 入口烟温的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (01): 131-134.
- [4] 陈雷, 高小春, 张建杰, 等. 锅炉给水自动加氨系统改造与应用研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (22): 109-111.
- [5] 刘佳, 李扬, 尤建华. 基于 TIA 博途软件的小型直流锅炉给水控制系统的设计 [J]. 热能动力工程, 2023, 38(10): 176-180.
- [6] 高新虎, 陈治坤, 王民君, 等. 水泥余热发电系统节能降耗的技术改造 [J]. 水泥, 2023, (08): 45-46.