

基于物联网的工业锅炉智能节能系统研究

韩宝庚

中国石油化工股份有限公司济南分公司 山东省济南市 250101

摘 要: 随着工业生产规模的持续扩张,工业锅炉作为能源转换的核心设备,广泛应用于电力、化工、供暖等领域。本文针对工业锅炉能耗高、污染物排放超标及人工操作效率低等问题,研究基于物联网技术的工业锅炉智能节能系统,在此过程中,通过感知层传感器实时采集蒸汽参数、燃烧数据及污染物排放信息,同时利用 5G/NB-IoT 等通信技术传输至云平台进行数据融合分析,结合遗传算法、自适应 PID 控制等智能算法,实现对锅炉进风、给水系统的动态调控,确保蒸汽品质达标、氮氧化物与二氧化硫排放符合环保要求。

关键词: 物联网;工业锅炉;智能节能;排放控制;自适应 PID

1. 绪论

基于全球能源危机与环境污染问题日益严峻的大背景之下,“双碳”目标(碳达峰、碳中和)成为了我国经济社会发展的重要导向。而工业领域作为能源消耗和碳排放的主要领域,其中的节能减碳工作变得至关重要。因为工业锅炉是工业生产之中不可或缺的热能动力设备,其被广泛地应用于各个行业,所以它产生的能耗和排放水平会直接地影响到工业领域的碳减排目标。

2. 工业锅炉运行原理与节能需求分析

2.1 工业锅炉系统组成与运行机制

工业锅炉系统主要由燃烧系统、汽水系统、控制系统和辅助设备部分组成。而工业锅炉的运行机制是燃料在炉膛内燃烧,而产生的热量会通过受热面传递给汽水系统中的水,水吸收热量之后会蒸发成蒸汽或者加热成热水。因此在燃烧的过程中,需要合理地控制燃料的供应量、空气的供应量和燃烧时间,才能确保燃料得到了充分的燃烧,达到提高燃烧效率的目的。对于汽水系统而言,则需要控制好水位、压力、温度等参数,以确保蒸汽或者热水的品质符合运行的要求。同时还需要对于锅炉的排烟温度、污染物排放等进行监测和控制,目的是降低能源的消耗和环境的污染^[1]。

2.2 传统运行模式的问题

传统工业锅炉的运行模式主要依靠的是人工操作和经验控制,该模式存在着以下几个方面的问题:

1、参数调节滞后:人工操作往往无法及时且准确地感知锅炉运行参数的变化,因此调节动作会存在较大的滞后

性,进而导致锅炉运行参数波动较大,最终影响到了蒸汽品质和设备的安全运行。

2、能源浪费严重:由于人工调节的局限性,因此在运行时无法实现燃烧过程的优化控制,此时燃料的燃烧会不充分,且能源的利用率低,从而造成大量的能源浪费。同时汽水系统的运行参数也无法根据负荷变化进行实时地调整,便会导致锅炉在低负荷运行时的能耗过高。

3、排放不稳定:传统的燃烧控制方式难以精确地控制燃烧过程中的空气量和燃料量,致使污染物的排放不稳定,之后就容易出现超标现象,而该现象对于环境造成了较大的压力。

4、人工成本高:人工操作时一般都需要大量的人力投入,如此不仅增加了企业的人工成本,而且使得人工操作的可靠性和稳定性比较差,从而容易出现误操作等问题。

2.3 节能关键环节与需求

实际按当中的工业锅炉的节能关键环节,主要包括了燃烧优化、给水控制、热效率提升和污染物排放控制等方面。

1、燃烧优化:燃烧过程是工业锅炉能源消耗的主要环节,优化燃烧过程的目的是提高燃料的燃烧效率,进而减少能源的浪费。而燃烧优化的关键在于合理地控制燃料与空气的比例,以确保燃料能够充分地燃烧。

2、给水控制:给水系统的运行效率会直接影响到工业锅炉的能耗和蒸汽品质。因此需要合理地控制给水流量和温度,以确保锅筒水位的稳定,从而提高汽水系统的运行效率,且降低能耗。

3、热效率提升：目前提高工业锅炉的热效率是节能的重要途径之一。据此可通过减少锅炉的散热损失、排烟损失和机械不完全燃烧损失等，达到提高锅炉的热效率以及降低能源消耗的目的。

4、污染物排放控制：由于环保要求的不断提高，使得控制工业锅炉的污染物排放成为了节能改造的重要内容。当前通过优化燃烧过程、采用先进的脱硫脱硝技术等，即可减少氮氧化物、二氧化硫等污染物的排放，保证污染物能够满足环保的要求。

结合工业锅炉的节能关键环节来看，工业锅炉的节能需求将涵盖提高能源利用率、降低运行成本、满足环保要求与提高运行安全性和稳定性这几个方面。

3. 物联网技术在工业锅炉中的应用设计

3.1 系统架构设计

基于物联网的工业锅炉智能节能系统架构主要分为感知层、网络层、平台层和应用层四个层次。

3.1.1 感知层

感知层是物联网系统的基础，它由各种传感器和执行器组成。其中传感器用于实时地采集工业锅炉的运行参数。而执行器主要的任务书根据平台层的控制指令，来调节锅炉的进风、给水、燃料供应等系统，以实现对于锅炉运行过程的控制。

3.1.2 网络层

网络层主要负责的是将感知层采集的数据传输到平台层，同时将平台层的控制指令传输到感知层的执行器。

3.1.3 平台层

平台层是物联网系统的核心，此部分主要负责的是对感知层采集的数据进行存储、处理和分析，以及实现对于工业锅炉运行过程的智能控制和管理。目前平台层可以采用云计算技术，构建起工业锅炉的智能节能云平台。因为云平台具有强大的数据存储和处理能力，所以它可以对于大量的锅炉运行数据进行实时分析和挖掘，从而为锅炉的运行优化提供决策支持。

3.1.4 应用层

应用层即物联网系统与用户交互的界面，它可以为用户提供实时监测、远程控制、数据分析、报表生成等功能。在此用户可以通过手机、电脑等终端设备，随时随地地查看工业锅炉的运行状态，并进行远程的控制和管理。

3.2 核心功能模块

3.2.1 实时监测模块

工业锅炉智能节能系统的基础功能模块便是实时监测模块，此模块的关键在于实时地采集和显示锅炉的运行参数。即通过实时监测模块，用户可以实时地了解锅炉的运行状态，从而及时地发现异常情况。如燃烧系统传感器的应用：工作人员可以在炉膛内布置 s 型铂铑热电偶 (精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) 用于监测火焰的温度，并采用科氏质量流量计 (精度 $\pm 0.1\%$) 来测量燃料的供应量，同时通过热式气体质量流量计 (精度 $\pm 1.5\%$) 实时地监测一次风 / 二次风风量，以及在烟道入口安装氧化锆氧量分析仪 (分辨率 $0.1\% \text{ O}_2$) 用于检测烟气的含氧量；

3.2.2 数据管理模块

数据管理模块负责存储、管理和查询感知层采集的数据。一般情况下，数据存储应采用分布式数据库技术，该技术可确保数据的安全性和可靠性。而数据管理模块可以对数据进行分类、整理和归档，便于用户进行查询和分析历史的数据。就云端存储体系来说，相关人员需要先构建时序数据库集群 (InfluxDB+TimescaleDB)，且按“设备 ID+ 参数类型 + 时间戳”的三级索引来存储数据，此时单节点支持 10 万点 / 秒写入速度。另外还要设置冷热数据分层机制，将近 30 天内实时的数据存储于 SSD 缓存层，30 天以上的历史数据则迁移至 HDD 归档层，支持秒级响应历史曲线查询与任意时段数据统计^[2]。

3.2.3 智能控制模块

智能控制模块用于实时监测的数据和设定的控制目标，并通过智能控制算法动态的调控锅炉的进风、给水、燃料供应等系统，进而实现燃烧过程的优化和能源的高效利用。具体阐述如下：

首先是底层控制层，此处通常采用双闭环 PID 控制策略。其内环为燃料 - 空气比值控制环，再通过前馈补偿器 (传递函数 $G_{ff}(s) = K_{ff} \cdot s / (1 + T_{ff} \cdot s)$) 提前地调整送风流量。外环则为蒸汽压力主控制环，于此引入模糊 PID 控制器 (参数调整规则表包含 49 条模糊规则) 以应对负荷突变；

其次是中层优化层。该部分应基于遗传算法 (GA) 构建燃烧优化模型，即以热效率 η (目标函数 $\max \eta = Q_{\text{net}} \cdot (1 - q_s - q_q - q_h - q_c) / Q_{\text{input}}$) 和 NO_x 排放浓度 C (目标函数 $\min C$) 为双优化目标，并设置种群规模 50、

迭代次数 100、交叉概率 0.8、变异概率 0.05，优化变量为过量空气系数 α （范围 1.1~1.5）、一次风比例 β （范围 20%~40%）、炉膛温度 T （范围 850~1100℃）；

最后则是顶层协调层，于此要开发负荷预测模型（LSTM 神经网络，输入层 72 维历史负荷数据，隐藏层 3 层共 256 个神经元）。而操作前需要提前 4 小时预测蒸汽需求，再联动给水泵变频控制器（调节精度 0.1Hz）和燃料调节阀（开度分辨率 0.1%），才能实现“需求 - 供给”的动态匹配。

3.2.4 故障诊断模块

故障诊断模块当中会对工业锅炉的运行故障进行实时地诊断和预警。其核心在于通过实时地监测数据的分析和处理，来及时地发现锅炉运行过程中存在的故障隐患，并且向工作人员发出预警信号。

4. 智能节能算法与控制策略

4.1 数据处理与分析

在感知层所采集的数据当中，可能会存在噪声、缺失、异常等问题，因此需要进行数据的预处理，才能提高数据的质量和可靠性。据此相关人员可通过改进型 Savitzky-Golay 滤波、LSTM 插值、动态归一化等技术构建起三级预处理体系，并且利用 CNN 提取特征、Transformer 模型预测趋势。而节能优化算法则需采用遗传算法 - 自适应 PID 协同优化架构，再结合多目标算法对比选型，最后通过“预测 - 优化 - 控制”的闭环来实现热效率提升与污染物减排。

4.2 节能优化算法

就遗传算法而言，该算法是一种模拟生物进化过程的随机搜索算法，它具有全局搜索能力强、鲁棒性好等优点。其原理是模拟生物进化过程中的自然选择和遗传机制，旨在通过选择、交叉、变异等操作来对种群进行迭代优化。目前在工业锅炉的节能系统之中，遗传算法主要被用于优化自适应 PID 控制器的参数，以提高控制器对于复杂工况的适应能力。具体应用时，操作人员会将 PID 控制器的比例系数（ K_p ）、积分系数（ K_i ）和微分系数（ K_d ）作为遗传算法的优化变量，再以锅炉运行的热效率、蒸汽压力稳定性、污染物排放等指标构建起适应度函数。最后即可在设定的参数范围内进行全局搜索，从中寻找出最优的 PID 参数组合，使得控制器在面对负荷变化、燃料特性波动等情况时，依然能够快速且精准地调节锅炉运行的参数，促使系统的控制性能和节能效果得到提升^[3]。

4.3 手动 / 智能切换逻辑

为了确保工业锅炉智能节能系统在各种工况下都能安全、稳定运行，系统设计了完善的手动 / 智能切换逻辑。实践当中处于正常情况的系统，会处于智能控制模式，此时主要依靠物联网传感器实时地采集数据，再经云平台分析与处理后，由智能控制模块自动地调整锅炉的进风、给水、燃料供应等系统的运行参数，进而实现燃烧过程的优化和能源的高效利用。然而当系统出现以下异常情况时，操作人员就需要通过应用层的操作界面手动切换到手动控制模式。

1、传感器故障：一旦感知层当中的某个传感器（如热电偶、压力变送器）因元件老化、信号干扰或机械损伤出现故障，将会导致数据失真或中断。例如，炉膛温度传感器故障可能会使系统误判燃烧的状态，从而触发不必要的减负荷操作，甚至是引发停机事故。此时，操作人员就需立即通过现场仪表盘或者备用传感器获取真实的数据，并手动切换至“人工监测模式”。

2、执行器故障

执行器如果出现电动调节阀卡涩、变频器输出异常或鼓风机电机过载的情况时，智能控制模块的指令将无法有效地执行，那么就可能导致炉膛负压失控、给水流量骤降等风险出现。为避免上述风险，操作人员便要迅速地切换至就地手动操作模式。比如：面对电动调节阀时，操作人员可通过阀体上的手轮机构进行开度调节。

3、特殊工艺需求

尽管智能控制算法（如 PID 调节、模糊控制）能够满足大多数常规的工况，但在特殊的生产场景之下还是需要人工的干预。例如某些化工工艺要求锅炉在不同反应阶段提供非线性的热量输出（如升温阶段需快速提温，保温阶段需精准控温），而预设的控制模型则可能无法实时地响应工艺参数的动态变化。对此，操作人员就要根据工艺工程师的指令，手动地调整燃烧器功率、过热器阀门开度等参数，甚至是切换至定制化的控制策略。

结语

本文针对传统工业锅炉存在的能耗高、污染物排放超标及人工操作效率低等问题，研究并设计了基于物联网技术的工业锅炉智能节能系统。而通过在实际工业锅炉中的应用验证，表明该系统具有显著的节能效果和环境效益，同时还提高了锅炉运行的安全性、稳定性和管理效率。尽管基于物

联网的工业锅炉智能节能系统目前已经取得了一定的应用效果,但往后随着物联网技术、人工智能技术和大数据技术的不断发展,该系统仍有待进一步优化和提升的空间。

参考文献:

[1] 忻龙彪,孙勇,苏亚娟.基于智能控制的工业锅炉节能探讨[J].河北建筑工程学院学报,2009,27(03):35-38+50.

[2] 邹娜.物联网与云计算的工业锅炉智能监测系统实现[J].工业加热,2025,54(01):79-81+84.

[3] 张琦,史林军.工业锅炉温度控制系统设计与实现[J].自动化技术与应用,2020,39(08):25-28.

作者简介:韩宝庚(1990年3月4号),男,汉,山东章丘,技师,大学专科,锅炉运行技术