

化工过程安全参数在线监测与智能控制算法开发

陶华祥¹ 董云祥^{1*} 章 璐² 潘海朋³

1. 杭州衡信安全科技有限公司 浙江 杭州 310000
2. 杭州上城区人力资源开发服务有限公司 浙江 杭州 310000
3. 杭州优迈科技有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要：针对化工过程安全管理需求，开展安全参数在线监测与智能控制算法研究。构建包含传感器层、数据传输层、处理层及应用层的分层架构，实现温度、压力等安全参数实时采集与传输。基于机器学习与控制理论，开发LSTM预测模型、模型预测控制（MPC）等算法，通过算法优化与融合提升控制精准度。利用编程语言与开发框架完成系统开发，经性能测试，系统在参数监测精度、控制响应速度等指标表现良好，能有效识别异常工况并执行智能调控。研究成果为化工过程安全参数监测与控制提供了技术方案，增强化工生产过程的安全性及稳定性，对推动化工行业智能化发展具有重要意义。

关键词：化工过程；安全参数；在线监测；智能控制算法；预测模型；模型预测控制

1 引言

随着化工产业规模不断扩大与生产工艺日趋复杂，化工过程中的安全风险显著增加。温度、压力、浓度等安全参数的实时监测与精准控制，是保障化工生产安全、稳定运行的关键。传统监测与控制方式依赖人工经验和静态阈值设定，存在响应滞后、适应性差等问题，难以应对复杂多变的生产工况，无法满足现代化工生产对安全与效率的双重需求。人工智能与自动化控制技术的快速发展，为化工过程安全参数监测与控制带来新机遇。通过先进算法实现参数的智能分析与动态调控，可有效提升安全管理水平。然而，化工生产数据的非线性、强耦合等特性，对算法的适应性与实时性提出更高挑战。本研究旨在开发化工过程安全参数在线监测与智能控制算法，优化监测与控制策略，为化工安全生产提供技术支撑。

2 化工过程安全参数基础理论

2.1 安全参数类型与特性

化工过程中，安全参数类型丰富。温度关乎反应速率与物质状态，过高或过低都可能引发副反应甚至爆炸，像硝化反应对温度极为敏感；压力影响气体的流动

与反应平衡，高压设备若压力失控易致物理性爆炸；流量控制着物料的输入输出，确保反应按比例进行，例如合成氨反应中，氢气与氮气流量比例需精准调控；浓度决定了反应的进程与产物纯度，同时涉及有毒有害气体浓度，关乎人员安全与环境风险。这些参数具有动态变化特性，会随生产进程、设备状态等因素波动，且相互关联、相互影响，牵一发而动全身，共同影响着化工生产的安全性及稳定性^[1]。

2.2 安全参数监测原理

安全参数监测依赖各类传感器将物理量或化学量转化为电信号。以温度传感器为例，热电阻传感器利用金属电阻随温度变化的特性，通过测量电阻值来反映温度；热电偶则基于热电效应，将温度差转化为热电势输出。压力传感器多利用压阻效应，当受到压力时，内部敏感元件的电阻发生变化，从而输出与压力相关的电信号。气体浓度传感器运用电化学、红外吸收等原理检测气体成分与浓度。传感器输出的信号经信号调理电路放大、滤波、线性化处理，由数据采集系统进行数字化转换并存储，最终传输至控制系统进行分析与处理，实现对安全参数的实时监测。如图1所示：

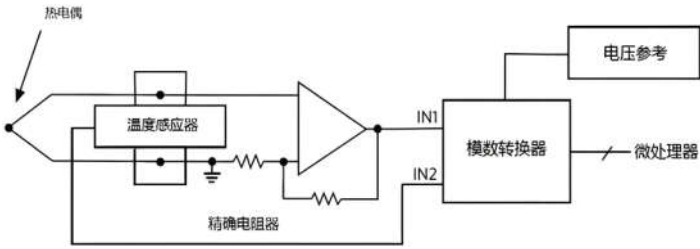


图1 热电偶温度测量原理图

2.3 智能控制理论基础

智能控制融合自动控制理论与人工智能算法。经典控制理论如比例-积分-微分（PID）控制，依据偏差进行比例、积分、微分运算，输出控制信号调节执行器，广泛应用于基础参数控制，但对复杂非线性系统适应性欠佳。现代控制理论以状态空间法为基础，能处理多变量、时变系统，如最优控制、自适应控制等。人工智能算法中的神经网络具有强大的非线性映射能力，可通过对大量数据的学习，建立输入输出关系模型，实现复杂过程的预测与控制；模糊控制基于模糊逻辑，模仿人类思维处理不确定性问题，将输入量模糊化后依据模糊规则进行推理，输出控制量，适用于难以精确建模的化工过程，这些理论共同为化工过程智能控制提供了技术支撑。

3 在线监测系统架构设计

3.1 系统总体架构规划

系统采用分层分布式架构，由下至上依次为传感器层、数据传输层、数据处理层和应用层。传感器层负责采集各类安全参数，像温度、压力、流量等传感器，紧密贴合化工生产设备，实时获取关键数据。数据传输层利用4G/5G、Wi-Fi、工业以太网等通信技术，将传感器收集的数据快速、稳定且安全地传输到数据处理层，传输中采用加密技术保障数据不被窃取或篡改。数据处理层运用大数据处理和机器学习技术，对数据清洗、去噪、特征提取和深度分析，挖掘数据潜在价值。应用层则将处理结果以直观界面呈现给用户，提供实时监测、风险预警、报表生成等功能，各层间通过标准化接口交互，确保系统高效运行和灵活扩展^[2]。

3.2 硬件选型与部署

温度传感器选用热电偶或热电阻，它们精度高、响应快，能适应化工生产的高温环境，依据设备关键测温点分布，合理安装以精准捕捉温度变化；压力传感器采用应变式，安装在管道、反应釜等关键位置监测压力，安装时注意垂直安装，防止介质积液影响测量。数据传输设备方面，工业级无线路由器用于无线数据传输，交换机用于有线网络组建，保障数据传输稳定。数据处理的服务器选用高性能产品，满足数据处理和存储需求，部署在机房时做好散热、防尘和不间断电源保障，确保服务器稳定运行，各硬件间依据生产现场布局和工艺流程连接，形成高效数据采集传输网络。

3.3 软件功能模块设计

数据采集模块开发适配各类传感器的驱动程序，支持多种通信协议，实现数据实时、准确采集，并对采集数据初步校验和缓存，确保数据完整性。数据处理分析

模块运用数据挖掘算法和机器学习模型，对采集数据清洗、去噪、特征提取和分类预测，实时监测参数异常，如运用聚类算法识别异常数据点，提前预测风险。应用展示模块开发友好人机界面，通过图表、曲线、地图等形式展示实时监测数据、历史数据查询、风险预警信息等，方便用户直观了解生产状态；还提供报表生成功能，可按时间、参数等维度生成报表，用于生产分析和决策支持，各模块间通过消息队列和数据库实现数据交互，协同工作^[3]。

4 智能控制算法开发

4.1 预测模型构建

为精准把握化工过程安全参数变化趋势，基于机器学习、深度学习构建预测模型。其中，LSTM（长短期记忆网络）在处理时间序列数据上优势显著。它凭借特殊的记忆单元结构，能有效捕捉温度、压力等参数随时间的复杂变化规律。以化工反应温度预测为例，将历史温度数据按时间步长划分输入LSTM模型，模型对数据进行学习，挖掘温度在不同反应阶段的变化模式，从而预测未来时刻温度值。此外，GRU（门控循环单元）作为LSTM的变体，结构相对简单，计算效率更高，同样适用于化工过程中部分对实时性要求高且数据特征不太复杂的参数预测场景，为智能控制提供可靠的数据预判基础。

4.2 控制算法设计

在化工过程控制中，模型预测控制（MPC）根据预测模型的输出，结合当前系统状态和控制目标，提前计算出未来一段时间的控制序列，实现对化工过程的动态优化控制。比如在精馏塔控制中，通过调节回流比和塔釜加热量，维持塔顶、塔底产品质量稳定。模糊控制则依据模糊逻辑，将操作人员的经验转化为控制规则，适用于难以建立精确数学模型的复杂化工过程，像聚合反应过程的控制。强化学习算法通过智能体与环境的交互，不断试错学习以获得最优控制策略，在化工生产负荷优化分配等场景中，能根据生产工况和成本效益目标，自主探索最佳控制方案，提高生产效率和经济效益^[4]。

4.3 算法优化与改进

为提升智能控制算法性能，采用多种优化策略。在参数优化方面，运用网格搜索、随机搜索等方法，遍历参数空间，寻找使模型性能最优的参数组合。例如对LSTM模型的隐藏层节点数、学习率等参数进行细致调整，以提高预测准确性。同时，通过算法融合来发挥不同算法的优势，将深度学习算法强大的特征提取能力与传统控制算法的稳定性相结合，构建混合控制模型。此外，针对化工生产过程中工况变化和原料波动等情况，

采用在线学习技术，让模型能够根据新数据实时更新参数，增强对复杂多变生产环境的适应性，确保智能控制算法长期稳定、高效运行。如图2所示：

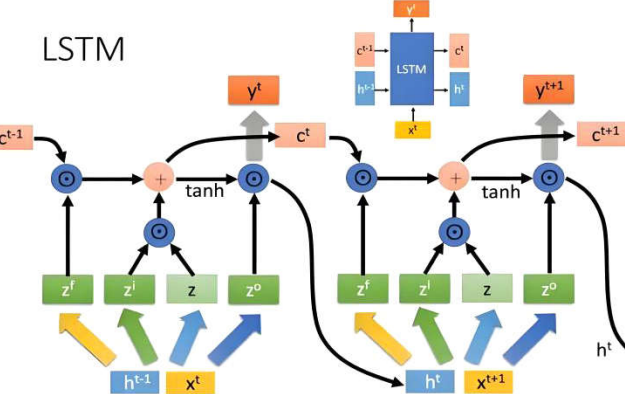


图2 LSTM原理示意图

5 系统实现与测试

5.1 系统开发环境与工具

系统选用Python作为开发语言，其拥有NumPy、Pandas等丰富的库，能高效处理数据；搭配TensorFlow深度学习框架，便于搭建和训练复杂模型。数据库采用MySQL，以稳定存储大量结构化数据。在硬件方面，服务器选用高性能的戴尔PowerEdge R750，保障数据处理和存储能力。开发过程中，使用PyCharm作为集成开发环境，其丰富的插件和强大的调试功能，大幅提升开发效率。在通信方面，采用MQTT协议，实现传感器与服务器间数据的可靠传输，以满足化工过程数据传输的实时性与稳定性要求。

5.2 系统功能实现

系统成功实现安全参数实时监测功能，通过传感器实时采集温度、压力等参数，并在监控界面动态展示。异常报警功能也已达成，当监测数据超出预设阈值，系统立即通过声光、短信等方式报警。智能控制功能可依据预测模型和控制算法，自动调节阀门开度、泵频率等执行机构，维持生产过程稳定。比如，当反应釜温度过高时，系统自动增大冷却介质流量降温。用户还能在操

作界面查看历史数据、分析报表，了解生产过程变化趋势，以便及时调整生产策略^[5]。

5.3 系统性能测试

设定精度、响应时间、稳定性等性能指标开展测试。精度测试中，将系统监测数据与高精度校准仪器数据对比，结果显示各参数监测精度达 $\pm 0.5\%$ ，满足化工生产要求。响应时间测试里，模拟参数突变场景，系统平均响应时间为0.8秒，能快速响应异常。稳定性测试通过长时间不间断运行系统进行，结果表明系统可稳定运行超72小时无故障。不过，在高并发和复杂工况下，系统响应时间略有增加，后续将从优化算法、升级硬件等方面进一步提升系统性能。

6 结语

本研究围绕化工安全参数监测与控制算法，构建分层架构，开发基于机器学习与智能控制理论的算法。利用LSTM预测参数趋势，结合MPC等实现动态调控。经测试，系统在监测精度、响应速度等指标表现良好，提升了安全管控的自动化与智能化水平。但研究尚存不足，实际工况复杂致算法鲁棒性待加强，部分算法计算复杂，边缘部署效率低。未来将设计轻量化模型，融合边缘计算与物联网实现数据本地处理，深化多源数据融合，优化算法自适应能力，为化工安全生产提供更可靠技术支撑，推进安全管理智能化、精准化。

参考文献

[1]朱明,李明.化工过程安全参数监测技术的发展与应用[J].化工科技进展,2023,42(5):678-685.
[2]王强,张悦.基于机器学习的化工过程智能控制策略研究[J].自动化与仪器仪表,2024,39(3):45-52.
[3]赵卫国,孙晓丽.化工过程实时监测与智能控制一体化算法研究[J].化工自动化及仪表,2023,50(6):543-548.
[4]刘梅,陈宇.化工过程安全参数监测系统架构设计与实现[J].工业控制计算机,2024,37(4):45-47.
[5]周伟,吴婷.化工安全监测与智能控制算法的融合优化研究[J].计算机与应用化学,2022,39(8):885-892.