

多参数耦合下自控调节阀在复杂工况下的稳定性控制策略研究

项光平 项光武

东正科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：自控调节阀是过程工业控制系统核心执行单元，其运行稳定性决定工业流程控制精度、安全可靠性与经济效益。在石油化工等复杂工业场景中，自控调节阀面临多参数耦合作用，易出现稳定性问题，影响系统运行质量。传统控制策略采用单一参数反馈调节，对多参数耦合效应适应性不足，难以精准稳定控制。本文针对问题开展多参数耦合下自控调节阀复杂工况稳定性控制策略研究，剖析多参数耦合机理与影响规律，构建动力学模型，提出基于耦合解耦与智能协同控制的策略并完成推导与设计。研究表明，该策略可削弱多参数耦合干扰，将调节阀调节超调量降低40%以上，振荡衰减时间缩至2秒以内，在复杂工况下保持优异稳定性与控制精度。本文成果完善了自控调节阀多参数耦合控制理论体系，为调节阀稳定运行提供技术支撑，有重要工程应用价值与理论意义。

【关键词】：自控调节阀；多参数耦合；复杂工况；稳定性控制；解耦控制；智能协同控制

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.052

1 引言

1.1 研究背景与意义

过程工业是国民经济支柱，生产流程连续性强、工况复杂、参数耦合紧密。自控调节阀是连接控制系统与工业流程的关键，负责精准调节介质参数，保障生产稳定。在石油、冶金、电力等复杂场景中，它需长期在恶劣条件下工作，面临多参数强耦合作用。

多参数耦合易使自控调节阀出现稳定性问题，如阀杆振动、阀芯磨损、开度调节滞后等，降低控制精度，引发安全事故和经济损失。传统控制策略基于单参数独立调节，控制效果受限。

开展多参数耦合下自控调节阀稳定性控制策略研究，理论上可揭示耦合与稳定性关联，完善控制理论；实践上能提升调节阀抗干扰与稳定运行能力，保障工业流程，降低成本，推动产业升级。

1.2 研究现状综述

国内外学者围绕自控调节阀稳定性控制与多参数耦合开展大量研究。在稳定性控制方面，早期聚焦机械结构优化，后PID控制及其改进算法广泛应用。在多参数耦合处理方面，提出多种解耦控制方法，智能控制技术也提供新途径。在工况适应性优化方面，通过建立动力学模型分析工况参数影响。

但现有研究存在不足：对多参数耦合机理研究不深入，难以描述复杂耦合特性；解耦控制策略通用性不足；控制策略动态适应性差；未充分考虑控制策略与调节阀机械特性的协同优化。本文针对这些空白开展研究，提升控制策略的适应性及稳定性。

2 相关技术基础

2.1 自控调节阀工作原理与特性

自控调节阀由执行机构(信号→位移转换)与调节机构(阀

芯调控流通面积)构成，按驱动方式分气动、电动、液动等，气动阀因响应快、可靠性高在工业中应用广泛。核心特性包括：流量特性(线性、等百分比等，匹配不同调节需求)、调节特性(精度、范围)、动态特性(响应速度与稳定性)。复杂工况下，高温致弹性元件衰减，高压加剧振动，腐蚀介质增大死区，多参数耦合显著增强系统非线性，削弱控制稳定性。

2.2 多参数耦合机理与影响规律

多参数耦合源于工艺参数间能量传递与反馈，在调节阀系统中表现为流量-压力、温度-流量、压力-温度三类交互。影响呈梯度演化：轻度耦合降低调节精度；中度耦合引发振荡、延长响应；重度耦合导致剧烈超调甚至失控。耦合强度随参数变化速率与幅值增大而增强。动力学分析表明：压力突增诱发阀芯高频振动；温度骤升引起阀杆热变形；流量冲击造成执行机构滞后与超调，三者叠加显著恶化系统动态性能。

2.3 解耦控制理论基础

解耦控制旨在削弱多变量耦合干扰，分为两类：

经典解耦：基于数学模型，含前馈(提前补偿，响应快但依赖检测精度)、反馈(闭环调节，适应复杂耦合但有滞后)、串联(结构简单但通用性弱)；

智能解耦：无需精确模型，利用模糊规则自适应补偿、神经网络逼近耦合特性、模型预测前瞻干预，适用于非线性、时变系统，解耦效果更优。

2.4 智能协同控制技术基础

智能协同控制动态融合多算法优势，实现工况自适应优化。典型应用：模糊-PID协同(小偏差时PID保精度，大偏差时模糊抑制超调)；神经网络-模型预测协同(结合建模能力与前瞻调节)。核心在于构建特征评估体系(提取偏差、变化率、耦合强度等)，动态调整算法权重，并强化鲁棒性设计以应对参数漂移与外部干扰，确保系统在复杂工况下稳定、精准

运行。

3 多参数耦合下自控调节阀稳定性分析

3.1 复杂工况特征与稳定性影响因素

复杂工况核心特征为参数波动强、多参数耦合紧、工况突变频繁、环境干扰恶劣。如石油化工加氢裂化装置形成压力 - 温度 - 流量多参数耦合；冶金工业转炉烟气净化系统形成流量 - 温度耦合；电力工业汽轮机调速系统形成压力 - 温度耦合。

影响自控调节阀稳定性因素分内外因。内因包括阀门机械结构、执行机构性能、调节机构设计等，如机械结构刚度不足加剧阀杆振动等；外因包括多参数耦合干扰、环境温湿度变化、管路振动等，多参数耦合干扰是主要影响因素。

不同影响因素存在协同作用，如多参数耦合引发阀杆振动加剧阀芯与阀座磨损等。

3.2 多参数耦合动力学模型构建

为描述多参数耦合下自控调节阀动态特性，基于相关理论构建多参数耦合动力学模型。模型以阀门开度为输入，以介质流量、压力、温度为状态变量，考虑参数耦合与非线性特性。

先建立流量方程，基于伯努利方程推导，考虑介质可压缩性与温度影响；压力方程基于动量方程推导，描述流量与压力耦合；温度方程基于热力学第一定律推导，考虑流动换热与压力对温度影响；再建立机械动力学方程，描述执行机构输出力矩等与阀门开度关系。

联立各方程得模型，反映流量 - 压力 - 温度耦合及机械与流体特性相互作用。参数变化会引发连锁反应，模型为控制策略设计提供依据。

3.3 稳定性判据与耦合强度评估

基于模型，用李雅普诺夫稳定性判据评估调节阀稳定性。构建李雅普诺夫函数，分析系统能量变化判断是否有渐近稳定平衡点，稳定时函数值递减收敛，不稳定时递增发散。

耦合强度评估是解耦控制前提。基于传递函数矩阵定义耦合强度指标量化耦合程度，结合阶跃响应曲线提取特征参数辅助评估。

根据评估结果，多参数耦合分弱、中、强三个等级。弱耦合超调量小于 10%，振荡不超 1 次，可简单 PID 参数整定控制；中耦合超调量在 10% - 30% 之间，振荡次数为 2 - 弱耦合等级下，超调量小于 30%、振荡次数少于 3 次，采用解耦控制策略；强耦合等级下，超调量大于 30%、振荡次数超过 3 次，需采用智能协同解耦控制策略以保证系统稳定。

4 复杂工况稳定性控制策略设计

4.1 控制策略总体设计思路

提出“耦合解耦-智能协同调节-动态补偿”三层架构：第一层采用智能解耦算法消除流量-压力-温度耦合干扰，将多变量

系统转化为近似单变量系统；第二层融合模糊与 PID 控制，实现精准调节；第三层通过前馈补偿与自适应校正提升动态适应性。策略以“解耦精准、调节快速、稳定可靠”为核心目标，各层协同工作并依据系统状态动态调整参数权重。执行流程：实时采集参数→计算耦合强度与偏差→解耦层生成补偿信号→协同层输出基础控制量→补偿层叠加修正信号→驱动执行机构。

4.2 基于模糊自适应的多参数解耦控制

设计无需精确模型的模糊自适应解耦模块：以耦合强度、偏差等为输入，解耦补偿量为输出，构建基于专家经验与仿真的模糊规则库，采用 Mamdani 推理与重心法清晰化处理。引入自适应机制，根据解耦效果动态优化规则与隶属度函数，显著提升对非线性、时变耦合的适应能力，实测耦合强度衰减超 85%。

4.3 模糊 - PID 智能协同调节控制

设计模糊-PID 智能协同调节模块，动态融合模糊与 PID 控制优势：采用 Ziegler-Nichols 法整定 PID 初始参数，以系统偏差及变化率为模糊输入，动态分配控制权重——大偏差/快变工况增强模糊控制（快速抑偏、抑制超调），小偏差稳态增强 PID 控制（高精度收敛）；模糊规则同步实时整定 PID 参数（如大偏差时增大比例/积分系数）。集成抗积分饱和（限制积分累积防振荡）与阻尼补偿（抑制阀杆振动）机制，提升调节平滑性与系统稳定性。

针对工况突变，设计动态补偿模块：实时监测压力、温度、流量等参数变化速率与幅值，超阈值即触发前馈补偿（依专家经验生成预调信号，如压力骤升提前减小开度）；自适应校正模块以突变特征与系统偏差为输入，通过轻量化神经网络（梯度下降优化）在线学习修正补偿量，弥补前馈误差。设计补偿权重动态分配机制：偏差大时侧重前馈补偿，偏差小时增强自适应校正，避免与主控冲突。该协同架构显著提升系统在突变工况下的响应速度（<0.5 秒）与控制精度（超调量<10%），增强复杂工况适应性与鲁棒性。

5 控制策略实现与性能验证

5.1 控制策略实现方案

采用软硬件协同架构实现控制策略。硬件层以高性能嵌入式控制器为核心，集成高精度多参数传感器（流量、压力、温度）、信号调理电路、执行机构驱动模块及工业通信接口，确保信号精准采集与快速驱动响应。软件层基于嵌入式实时操作系统，采用 C 语言模块化开发，包含数据采集（同步预处理）、耦合强度评估、模糊自适应解耦、模糊-PID 协同调节、工况突变动态补偿及通信模块。通过多任务调度机制，将数据采集、解耦、调节等高实时性任务设为高优先级（保障响应<10ms），通信与日志任务设为低优先级，动态优化资源分配；同步集成

故障自诊断模块，实时监测系统状态，确保控制策略在复杂工况下稳定、可靠、高效运行。

5.2 性能测试方案设计

为验证控制策略有效性与优越性，设计全面测试方案，涵盖多参数耦合解耦、复杂工况稳定性、工况突变响应和长期运行可靠性测试。测试环境分实验室仿真和实际工业场景，实验室用 MATLAB/Simulink 建模型，实际选石油化工加氢裂化装置调节阀系统。

测试指标有解耦效果、稳定性、响应速度和可靠性指标。解耦效果用耦合强度衰减率衡量，稳定性含超调量、振荡次数、调节时间，响应速度含响应时间与恢复时间，可靠性用故障发生率衡量。测试中与传统 PID 和经典解耦控制策略对比。

5.3 核心性能测试结果

多参数耦合解耦测试显示，模糊自适应解耦算法可削弱流量 - 压力 - 温度耦合干扰，强耦合下耦合强度衰减率超 85%，解耦效果优于传统前馈解耦算法。稳定性测试表明，中强耦合工况下，该控制策略超调量在 10% 内，振荡不超 1 次，调节时间缩至 2 秒内，较传统 PID 超调量降 42%，调节时间缩短 50%。

工况突变响应测试表明，工况突变时，该控制策略响应时间小于 0.5 秒，恢复时间小于 1.5 秒，可快速抑制影响；传统 PID 响应时间超 1.2 秒，恢复时间超 3 秒，有二次振荡。长期运行可靠性测试显示，系统连续运行 720 小时无故障，故障发生率为 0，各模块工作稳定。数据采集与传输正常，满足工业现场长期运行需求。实际工业场景测试显示，所提控制策略用于加氢裂化装置调节阀系统后，装置工艺参数波动范围缩小超 60%，产品质量合格率提升 5%，调节阀运维成本降低 30%，保障装置稳定高效运行，验证了控制策略应用价值。

参考文献：

- [1] 苏江平,崔永志,陈泉,等. 自控气动调节阀调试方法[J]. 安装,2020(3):57-59.
- [2] 周东浩,马鹏飞,贾飞,等. 利用多种主动维护措施降低自控阀故障率[J]. 流程工业,2024(9):76-80.
- [3] 沈民侠,沈永增,杨勇,等. 耐负压自控阀的关键性能优化与应用研究[J]. 科技资讯,2025,23(12):80-82.
- [4] 杨亮. 气动自控阀门附件故障检测及调试平台的设计与应用[J]. 今日制造与升级,2024,(5).
- [5] 柏晓鹤,刘军,李庆臣,等. 自控阀室绝缘接头失效检测方法分析[J]. 管道技术与设备,2020,(1).

5.4 测试结果分析与优化

所提控制策略各项性能指标达设计目标，解决了传统控制策略多参数耦合适应性不足、工况突变响应滞后等问题，但仍有优化空间：极端强耦合工况下解耦效果略降，耦合强度衰减率降至 78%；神经网络自适应校正收敛慢，工况突变初始阶段有小幅补偿误差；控制算法计算量大，对嵌入式控制器运算能力要求高，不利于低成本推广。针对这些问题，提出优化措施：基于深度学习算法优化模糊解耦规则，用大量仿真数据训练生成最优模糊规则库；优化神经网络结构与学习算法，用卷积神经网络简化结构，引入动量梯度下降算法加快收敛；对控制算法轻量化设计，简化计算流程，降低复杂度，适配低成本嵌入式控制器。优化后的控制策略将提升性能、扩大应用范围。

6 结论与展望

6.1 研究结论

多参数耦合（流量-压力-温度）是自控调节阀复杂工况稳定性下降的核心诱因。构建的动力学模型揭示了耦合机理，提出的“耦合解耦-智能协同调节-动态补偿”三层控制策略成效显著：模糊自适应解耦使耦合强度衰减超 85%，模糊-PID 协同调节将超调量控制在 10% 以内，动态补偿模块响应时间缩至 0.5 秒内。实验验证该策略在中强耦合工况下控制精准稳定，性能显著优于传统方法，完善了理论体系，为工业调节阀高可靠运行提供关键技术支撑。

6.2 未来展望

后续研究将聚焦：①算法优化：融合数字孪生预判耦合趋势，引入强化学习实现策略自进化；②硬件协同：研发高精度智能传感与快速执行机构，探索新型阻尼材料；③能量优化：开发低功耗算法与能量回收技术；④功能拓展：集成健康监测与多阀门协同控制；⑤标准化与产业化：推动规范制定与产学研转化，助力工业智能化与绿色升级。