

阀门气动执行机构与高平台球阀集成控制研究

汪裕后

温州天裕阀门科技有限公司 浙江温州 325000

【摘要】高平台球阀作为工业管路系统中的关键执行单元，广泛应用于石油化工、天然气输送、电力生产等高危、高压工况，其运行稳定性与控制精度直接决定工业流程的安全性和经济性。阀门气动执行机构凭借结构简单、响应迅速、抗恶劣环境能力强的优势，成为高平台球阀的主流驱动方式，但二者集成过程中存在控制精度不足、动态响应滞后、协同性差及故障预警不及时等问题，严重制约了工业管路系统的智能化运行。本文以阀门气动执行机构与高平台球阀集成控制为研究对象，采用理论分析、仿真模拟与实验测试相结合的方法，梳理集成控制的核心技术要点，优化集成控制策略，设计基于模糊PID算法的集成控制系统，通过搭建实验平台开展测试验证。实验数据表明，优化后的集成控制系统可将阀门控制精度提升至 $\pm 0.5\%$ ，动态响应时间缩短至0.3s，故障识别准确率达到98%以上，有效解决了传统集成控制中的痛点问题。研究成果为阀门气动执行机构与高平台球阀的高效集成、精准控制提供了理论支撑和工程实践参考，对推动工业阀门集成控制技术的智能化升级具有重要意义。

【关键词】气动执行机构；高平台球阀；集成控制；模糊PID；控制精度；故障诊断

Research on Integrated Control of Valve Pneumatic Actuators and High-Platform Ball Valves

Wang Yuhou

Wenzhou Tianyu Valve Technology Co., Ltd., Wenzhou City, Zhejiang Province 325000

【Abstract】As a critical actuator unit in industrial pipeline systems, high-platform ball valves are widely used in high-risk, high-pressure applications such as petrochemical processing, natural gas transmission, and power generation. Their operational stability and control accuracy directly determine the safety and economic efficiency of industrial processes. Pneumatic actuators, with their advantages of simple structure, rapid response, and strong environmental resistance, have become the mainstream driving solution for high-platform ball valves. However, integration challenges including insufficient control precision, delayed dynamic response, poor coordination, and untimely fault detection severely limit intelligent operation of industrial pipelines. This study focuses on integrated control between valve pneumatic actuators and high-platform ball valves. Through combining theoretical analysis, simulation modeling, and experimental testing, we identify core technical requirements, optimize control strategies, and develop an integrated control system based on fuzzy PID algorithms. Experimental validation on a test platform demonstrates that the optimized system achieves $\pm 0.5\%$ valve control accuracy, 0.3-second dynamic response time reduction, and over 98% fault recognition accuracy, effectively addressing pain points in traditional integration methods. The findings provide theoretical foundations and practical references for efficient integration and precision control of valve actuators and ball valves, significantly advancing intelligent upgrades in industrial valve integration control technologies.

【Key words】pneumatic actuator; high-platform ball valve; integrated control; fuzzy PID; control accuracy; fault diagnosis

引言

在工业自动化进程不断加快的背景下，高平台球阀凭借操作便捷、密封性能优良、适应高压高温工况等优势，逐步替代传统球阀，而作为其核心驱动部件的阀门气动执行机构，依靠压缩空气提供动力，具有结构紧凑、无电火花、维护成本低、抗干扰能力强等优点，二者集成应用已成为工业管路控制的主流模式，但当前集成控制仍存在诸多技术瓶颈，传统开关量控制缺乏对执行机构动态特性与球阀密封性能的协同考虑，控制精度较低，难以满足精密工业流程调节需求，因此开展阀门气动执行机构与高平台球阀集成控制研究，优化控制策略、提升系统控制精度与运行可靠性、解决协同性与故障预警问题，具有重要的工程应用价值和理论研究意义，本文基于上述背景结合工业实际需求开展集成控制技术的研究，旨在为工业领域阀门集成控制优化升级提供可行方案。

1 相关理论与技术基础

1.1 高平台球阀结构与工作原理

高平台球阀属于单回转 90° 开关阀门，其核心结构与传统球阀相比，增加了高平台支架设计，使执行机构与阀体的连接更加稳固，同时便于安装、维护与检修，尤其适用于高空、高危工况。高平台球阀主要由阀体、阀芯、阀座、阀杆、高平台支架及密封装置组成，其中阀芯采用球体结构，通过阀杆带动球体旋转 90° ，实现流体介质的开启与关闭，其密封性能直接决定管路系统的泄漏率。

1.2 阀门气动执行机构工作特性

阀门气动执行机构是一种以压缩空气为动力源，将气压能转化为机械能，驱动阀门完成启闭或调节动作的执行部件，主要分为单作用式和双作用式两种类型，二者在工业应用中各有侧重。双作用气动执行机构依靠压缩空气的双向作

用力驱动活塞运动,实现阀门的开启与关闭,无弹簧复位功能,适用于对阀门位置无特殊复位要求的工况;单作用气动执行机构则通过压缩空气驱动活塞,依靠弹簧复位实现阀门的反向动作,在失气、失电等故障工况下,可自动将阀门复位至预设的安全位置,有效避免安全事故,广泛应用于石油、天然气等高危领域。

1.3 集成控制核心技术

阀门气动执行机构与高平台球阀的集成控制,核心是实现执行机构与球阀的协同动作,通过控制策略优化,提升系统的控制精度、动态响应速度及运行可靠性。集成控制的核心技术主要包括控制算法、状态监测技术及故障诊断技术三个方面。

控制算法是集成控制的核心,传统集成控制多采用PID控制算法,其结构简单、易于实现,但存在参数整定困难、抗干扰能力弱等问题,难以适应气动系统的非线性特性;模糊控制算法具有较强的非线性适应能力,无需建立精确的数学模型,可根据操作人员的经验实现自适应控制,但存在控制精度不足的缺陷;模糊PID控制算法结合了PID控制的高精度优势与模糊控制的非线性适应能力,通过模糊推理对PID参数进行实时整定,能够有效解决气动系统的非线性问题,提升集成系统的控制性能。

状态监测技术主要用于实时采集集成系统的运行参数,包括气动执行机构的气源压力、输出扭矩、活塞位移,以及高平台球阀的阀位、密封压力、泄漏率等,为控制策略优化与故障诊断提供数据支撑。故障诊断技术则通过对监测数据的分析处理,识别执行机构漏气、球阀卡涩、密封失效等故障,及时发出预警信号,避免故障扩大,保障系统的安全稳定运行。

2 阀门气动执行机构与高平台球阀集成控制系统设计

2.1 集成控制系统总体方案

结合高平台球阀与气动执行机构的工作特性,本文设计的集成控制系统采用分层结构,分为感知层、控制层、执行层及监控层,各层协同工作,实现集成系统的精准控制、状态监测与故障预警。总体方案设计如下:

感知层:主要由各类传感器组成,包括气源压力传感器、扭矩传感器、位移传感器、阀位传感器、密封压力传感器及泄漏传感器,用于实时采集集成系统的运行参数,其中气源压力传感器的测量范围为0-1.6MPa,精度为 ± 0.01 MPa;扭矩传感器的测量范围为0-200N·m,精度为 $\pm 0.5\%$ FS;阀位传感器采用绝对值编码器,测量精度为 $\pm 0.1^\circ$,确保采集数据的准确性。

控制层:作为集成控制系统的核心,采用PLC(可编程逻辑控制器)作为主控制器,搭载模糊PID控制算法,接收感知层采集的运行参数,通过算法运算输出控制信号,控制执行层动作。同时,控制层集成数据处理模块,对采集的运行参数进行滤波、降噪处理,为故障诊断提供可靠数据;集成通信模块,实现与监控层的数据交互,上传系统运行状态数据,接收监控层的控制指令。

执行层:由阀门气动执行机构、高平台球阀及辅助执行部件组成,接收控制层输出的控制信号,完成高平台球阀的启闭与调节动作。其中,气动执行机构采用单作用式,额定

输出扭矩为80N·m,气源压力设定为0.6MPa;高平台球阀采用DN80规格,额定压力为16MPa,密封形式为硬密封,确保适用于高压工况。

监控层:采用工业触摸屏作为监控终端,实时显示集成系统的运行参数、阀位状态、故障信息等,支持手动控制与自动控制模式切换,操作人员可通过监控终端设置控制参数、查看运行记录、处理故障预警,实现对集成系统的远程监控与操作。

2.2 模糊PID控制算法设计

针对传统PID控制算法难以适应气动系统非线性特性的问题,本文设计模糊PID控制算法,用于集成系统的控制策略优化,通过模糊推理对PID参数(比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d)进行实时整定,提升系统的控制精度与动态响应性能。

模糊PID控制算法的核心是模糊控制器的设计,模糊控制器采用二维输入、三维输出的结构,输入量为阀位偏差 e (设定阀位与实际阀位的差值)及偏差变化率 ec ,输出量为PID参数的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。根据集成系统的运行特性,将输入量 e 的模糊论域设定为 $[-5, 5]$,模糊语言变量分为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)7个等级;偏差变化率 ec 的模糊论域设定为 $[-3, 3]$,模糊语言变量同样分为7个等级;输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊论域分别设定为 $[-2, 2]$ 、 $[-0.5, 0.5]$ 、 $[-0.5, 0.5]$,模糊语言变量分为7个等级。

根据工业现场操作人员的经验,制定模糊控制规则,通过模糊推理规则,对输入量进行模糊化、模糊推理及解模糊处理,得到PID参数的修正量,实现PID参数的实时整定。

3 实验测试与结果分析

3.1 实验平台搭建

为验证阀门气动执行机构与高平台球阀集成控制系统的性能,搭建实验平台,实验平台主要由高平台球阀、阀门气动执行机构、PLC控制器、传感器组、工业触摸屏、气源装置及数据采集系统组成。实验平台的主要参数如下:高平台球阀规格为DN80,额定压力16MPa,操作扭矩35-80N·m;气动执行机构为单作用式,额定输出扭矩80N·m,气源压力范围0.3-0.8MPa;PLC控制器采用西门子S7-1200系列,模糊PID控制算法通过PLC编程实现;传感器组包括气源压力传感器、扭矩传感器、阀位传感器等,确保运行参数的精准采集;数据采集系统采用LabVIEW软件,实时采集并记录实验数据,用于结果分析。

实验分为两组,对照组采用传统PID控制算法的集成系统,实验组采用本文设计的模糊PID控制算法的集成系统,两组实验的实验条件保持一致,包括气源压力0.6MPa、设定阀位0-90°、环境温度25℃、介质压力10MPa,通过对比两组实验的控制精度、动态响应时间、故障识别准确率等指标,验证优化后集成控制系统的性能优势。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 控制精度测试结果

控制精度是集成控制系统的核心性能指标,实验中分别设定阀位为30°、60°、90°,分别测试对照组与实验组

的实际阀位值，计算控制误差，测试结果如下表所示。

表1 不同控制算法下集成系统控制精度对比表

设定阀位 (°)	对照组实际阀位 (°)	对照组控制误差 (°)	实验组实际阀位 (°)	实验组控制误差 (°)
30	29.72	0.28	29.98	0.02
60	60.35	0.35	60.03	0.03
90	89.68	0.32	89.97	0.03
平均误差	-	0.32	-	0.03

由测试结果可知，对照组采用传统PID控制算法，控制误差在0.28-0.35°之间，平均控制误差为0.32°，控制精度为±0.32°；实验组采用模糊PID控制算法，控制误差在0.02-0.03°之间，平均控制误差为0.03°，控制精度提升至±0.03°，远优于对照组。这表明，模糊PID控制算法能够有效解决气动系统的非线性问题，提升集成系统的控制精度，满足精密工业流程的调节需求。

表2 不同控制算法下集成系统动态响应性能对比表

系统类型	上升时间 (s)	调节时间 (s)	超调量 (%)	动态响应时间 (s)
对照组 (传统PID)	0.45	1.12	8.5	1.12
实验组 (模糊PID)	0.18	0.30	1.2	0.30

由测试结果及相应的动态响应曲线可知，对照组的上升时间为0.45s，调节时间为1.12s，超调量为8.5%，动态响应时间较长，且存在明显的超调现象；实验组的上升时间为0.18s，调节时间为0.30s，超调量仅为1.2%，动态响应时间缩短至0.3s，且无明显超调，动态响应性能显著优于对照组。这是因为模糊PID控制算法能够通过实时整定PID参数，快速适应气动系统的非线性特性，减少系统的超调与振荡，

表3 不同控制算法下集成系统故障识别性能对比表

故障类型	测试次数	对照组识别正确次数	对照组识别准确率 (%)	实验组识别正确次数	实验组识别准确率 (%)
执行机构漏气	20	15	75	19	95
气源压力不足	20	16	80	20	100
球阀卡涩	20	14	70	19	95
密封失效	20	15	75	20	100
平均准确率	80	60	75	78	98

由测试结果可知，对照组的平均故障识别准确率为75%，无法有效识别部分轻微故障；实验组的平均故障识别准确率达到98%，能够快速、准确识别各类常见故障，且对轻微故障的识别效果良好。

4 结论

本文围绕阀门气动执行机构与高平台球阀集成控制展开研究，通过理论分析、系统设计与实验测试，解决了传统集成控制中控制精度不足、动态响应滞后、故障识别准确率低等问题，得出以下结论：

1. 梳理了高平台球阀与阀门气动执行机构的工作特性及集成控制的核心技术，明确了气动系统的非线性特性是影

3.2.2 动态响应性能测试结果

动态响应时间是指集成系统从接收控制指令到实际阀位达到设定阀位的时间，实验中设定阀位从0°切换至90°，测试对照组与实验组的动态响应时间，包括上升时间、调节时间及超调量，测试结果如下表所示，同时绘制动态响应曲线，直观展示两组系统的响应性能。

提升动态响应速度。

3.2.3 故障识别性能测试结果

故障识别性能测试中，模拟集成系统的常见故障，包括气动执行机构漏气、气源压力不足、球阀卡涩、密封失效4种故障，分别测试对照组与实验组的故障识别准确率，测试结果如下表所示。

响集成控制性能的关键因素，传统PID控制算法难以适应该特性，无法满足工业实际需求。

2. 设计了基于模糊PID控制算法的集成控制系统，采用分层结构，整合感知层、控制层、执行层及监控层，实现了集成系统的精准控制、状态监测与故障预警，优化后的模糊PID控制算法能够实时整定PID参数，有效解决气动系统的非线性问题。

3. 实验测试结果表明，优化后的集成控制系统与传统PID控制的集成系统相比，控制精度从±0.32°提升至±0.03°，动态响应时间从1.12s缩短至0.3s，故障识别准确率从75%提升至98%，各项性能指标均得到显著提升，能够满足石油、化工等领域的高压、精密控制需求。

参考文献

[1] 偶国富, 李志豪, 金浩哲, 等. 高压氢球阀内部流动特性及阀杆柔性石墨密封结构研究[J]. 流体机械, 2025, 53(5): 30-39.
 [2] 徐学渊. 工业机器人设计制造与工业控制系统的集成研究[C]//2025 工程技术与材料应用学术交流会论文集. 2025: 1-3.
 [3] 李楠, 王铭昌, 王兆明, 等. 核电厂化学和容积控制系统阀门气动杆断裂原因探究[J]. 阀门, 2024(8): 1022-1026.
 [4] 吴金龙. 阀门气动装置的设计计算[J]. 机电工程技术, 2019, 48(11): 191-193.