

现场总线控制阀岛响应时间优化中的电磁阀结构改进分析

陆定华

威仕喜(浙江)流体技术有限公司

【摘要】现场总线控制阀岛于工业自动化系统中占据重要位置,其响应时长直接关联系统控制精准度与运转效能,电磁阀作为阀岛的核心执行元件,其结构特性对响应时长起到关键性作用,本文以现场总线控制阀岛响应时长优化为研究重点,深入探究电磁阀现有构造在响应速率层面存在的不足,依据流体力学、电磁学原理,从材料选用、结构规划等角度提出电磁阀结构改良策略。通过理论剖析与实际验证相融合的模式,探究改良后电磁阀对阀岛响应时长的优化成效,为提升现场总线控制阀岛性能提供理论支撑与实践借鉴。

【关键词】现场总线控制阀岛;电磁阀;响应时间;结构改进;工业自动化

Analysis on the structure improvement of solenoid valve in the response time optimization of fieldbus control valve island

Lu Dinghua

Weishi (Zhejiang) Fluid Technology Co., LTD

【Abstract】Fieldbus control valve islands play a crucial role in industrial automation systems. The response time of these valves directly affects the system's control accuracy and operational efficiency. As the core actuator of the valve island, the structure of the solenoid valve significantly influences the response time. This paper focuses on optimizing the response time of fieldbus control valve islands, exploring the limitations of the current solenoid valve design in terms of response speed. Based on principles of fluid mechanics and electromagnetism, the paper proposes structural improvement strategies for solenoid valves, considering aspects such as material selection and structural planning. By integrating theoretical analysis with practical validation, the paper examines the effectiveness of these improvements in optimizing the response time of the valve island, providing both theoretical support and practical insights to enhance the performance of fieldbus control valve islands.

【Key words】fieldbus control valve island; solenoid valve; response time; structural improvement; industrial automation

引言

在工业 4.0 与智能制造迅猛推进的时代背景下,工业自动化系统对于控制精度和响应速率的要求持续提高,现场总线控制阀岛作为衔接控制系统与执行机构的关键枢纽,可实现对多个阀门的集中管控与实时监测,在化工、电力、机械制造等诸多领域获得广泛应用,电磁阀作为阀岛内部实现气路或液路通断控制的核心部件,其响应时间直接关系到阀岛的整体性能表现。随着工业生产流程的复杂性不断加剧,对电磁阀快速响应、精准控制的需求变得更为迫切,但传统电磁阀的结构在响应速度等方面存在一定制约,难以契合现代工业自动化的发展需求,针对现场总线控制阀岛响应时间优化开展电磁阀结构改进的相关研究,具备重要的现实应用价值。

一、现场总线控制阀岛与电磁阀概述

现场总线控制阀岛接收指令后经逻辑运算驱动电磁阀,

完成气路、液路通断控制,实现执行机构的精准操控,阀岛集成电磁阀、连接板等组件,兼具信号处理、故障诊断等功能,模块化设计使其可灵活配置,能满足汽车制造、化工等不同场景需求,借助现场总线协议实时上传设备状态,为远程监控提供便利,有效提升系统集成度与可靠性,电磁阀作为阀岛核心执行部件,其性能直接影响阀岛运行成效,通过电磁力驱动阀芯控制气液通路,在石化管道、食品灌装等领域,电磁阀须具备快速响应能力以保障生产安全与产品精度^[1]。相关数据表明,工业生产线中因电磁阀故障造成的停机时间占比超过 30%。对电磁阀结构进行优化,提升其响应速度与可靠性,对于增强阀岛性能、降低维护成本具有重要意义。

二、电磁阀结构现状及存在问题分析

(一)传统电磁阀结构组成与工作过程

传统电磁阀运行时,电磁线圈通电后生成磁场,吸引衔铁克服弹簧力移动,带动阀芯开启气路或液路;断电时,弹

簧力推动衔铁与阀芯复位, 关闭气路或液路, 电磁线圈通电瞬间, 受线圈电感特性影响, 电流无法即刻达到稳定值, 磁场建立需一定时间, 衔铁与阀芯运动过程中, 会受阀体内表面粗糙度产生的摩擦力及流体介质流动形成的阻力作用, 致使电磁阀开启响应出现延迟, 以先导式电磁阀为例, 主阀芯开启需依赖先导阀产生的压力差, 进一步增加响应时间。断电时, 弹簧复位速度与衔铁阀芯惯性也会对关闭响应速度造成影响, 该结构在工作中能量转换效率较低, 部分能量消耗于克服阻力和机械摩擦, 制约电磁阀响应速度提升。

(二) 现有结构对响应时间的影响因素

从机械结构视角分析, 阀芯与阀体配合间隙若过大易引发泄漏问题, 对控制精度造成干扰, 同时会加大阀芯运动阻力; 若间隙过小则会增大摩擦, 阻碍阀芯快速移动, 传统橡胶密封件在长期使用中易出现老化变形现象, 产生较大摩擦力, 致使阀芯运动速度降低, 弹簧刚度若过高, 电磁力需克服较大阻力才能驱动阀芯, 进而延长开启时间; 若弹簧刚度过低, 又会影响阀芯复位速度, 造成关闭响应迟缓。在电磁领域, 电磁线圈的匝数、线径、材质以及铁芯和衔铁的材料性能等, 均会对磁场建立速度和磁力大小产生作用, 若电磁线圈参数设计不合理, 磁场建立便会较为缓慢, 无法快速驱动衔铁与阀芯动作, 以普通硅钢片作为铁芯材料时, 磁滞损耗较大, 会使电磁力响应速度下降。流体介质的性质如粘度、压力等, 也会对阀芯运动产生阻力, 进而影响电磁阀响应速度, 高粘度介质会显著增加阀芯运动阻力, 导致响应延迟。

(三) 响应时间不足对阀岛运行的不利影响

在连续生产场景中, 电磁阀响应若出现迟缓情况, 可能致使物料输送不及时或过量输送, 进而造成生产流程中断或产品质量缺陷, 以半导体芯片制造为例, 该工艺对气体流量控制精度要求极高, 电磁阀响应延迟可能引发芯片蚀刻工艺偏差, 大幅降低产品良品率^[2]。在化工反应釜温度、压力等高精度控制环节, 电磁阀响应延迟会使控制信号与实际物理量变化不同步, 导致控制偏差扩大, 甚至可能引发安全事故, 响应时间过长会降低系统运行效率并增加能耗, 频繁的延迟响应还会加剧电磁阀部件磨损, 缩短设备使用寿命, 行业统计数据显示, 因电磁阀响应问题产生的设备维护成本, 每年占企业设备总维护成本的 20% - 30%, 同时增加维护成本与设备故障风险。

三、电磁阀结构改进理论与方法

(一) 基于流体力学的结构优化理论

运用计算流体动力学 (CFD) 仿真分析软件, 能够对不同流道形状及尺寸下的流体流动特性展开模拟研究, 研究表明, 传统电磁阀的直角形流道极易产生涡流与紊流现象, 使

得流体阻力大幅增加, 设计流线型流道结构, 对流道入口和出口进行圆滑过渡处理, 可有效减少阀内流体的能量损耗, 降低流体阻力, 如采用渐扩-渐缩型的流道设计, 能让流体在流动过程中保持稳定的流速分布, 减少压力损失。合理规划进出口角度与截面尺寸, 可使流体进出电磁阀更为顺畅, 提升流体通过效率, 优化阀芯结构, 采用锥形、流线型等特殊形状的阀芯头部, 能够降低阀芯运动时所受的流体阻力, 以锥形阀芯为例, 其在开启和关闭过程中, 与流体的接触面积呈逐渐变化状态, 避免因突然截断流体而产生较大冲击力, 进而加快阀芯开启和关闭速度, 缩短电磁阀响应时间。通过优化流道内部表面粗糙度, 减少流体与壁面的摩擦, 可进一步改善流体流动性能。

(二) 电磁结构改进思路与方法

选用高磁导率且低磁滞损耗的铁芯与衔铁材料, 像纳米晶软磁合金材料, 其磁导率相较传统硅钢片高出数倍, 可显著提升磁场建立速度与磁力强度, 同时减少磁路能量损耗, 在电磁线圈设计环节, 运用优化的匝数计算模型, 结合有限元分析软件, 合理调整线圈匝数、线径及绕制方式, 增加线圈匝数虽能提高电磁力, 但会使线圈电阻增大, 对电流上升时间产生影响^[3]。因此需在确保电磁力满足工作要求的基础上, 选取合适的线径, 降低线圈电阻, 缩短电流上升时间, 进而加快磁场建立速度, 采用新型电磁驱动技术, 例如永磁-电磁混合驱动结构, 借助永磁体提供初始保持力, 让阀芯在断电状态下维持稳定位置, 当需要动作时, 电磁力仅需克服较小阻力就能实现快速动作, 在降低能耗的同时提高电磁阀响应速度。在电磁结构设计中, 增加散热片或选用散热性能优良的绝缘材料, 改进电磁结构的散热设计, 以保证电磁阀在长时间工作过程中的稳定性与可靠性。

(三) 机械结构创新设计方案

在阀芯与阀体配合工艺上, 采用数控磨削与研磨等高精度加工技术, 确保配合间隙合理均匀, 将传统微米级精度提升至亚微米级, 有效降低摩擦阻力, 选用新型密封材料与结构, 如聚四氟乙烯 (PTFE) 等自润滑、低摩擦系数密封材料, 结合唇形密封、组合密封等新型结构, 在保证密封性能的同时大幅减小摩擦力, 唇形密封凭借独特结构设计, 可在压力作用下自动贴合密封面, 既能减少摩擦又能提高密封可靠性。弹簧设计优化采用变刚度弹簧或新型形状记忆合金弹性材料, 变刚度弹簧可依据电磁阀工作不同阶段受力需求提供适配弹力: 开启初期弹簧力较小, 便于电磁力快速驱动阀芯; 接近全开位置时弹簧力逐渐增大, 起到缓冲作用, 减少阀芯与阀体碰撞, 电磁阀整体机械结构采用轻量化设计, 以高强度铝合金或钛合金等轻质材料替代传统钢材, 降低运动部件质量, 同时优化部件结构形状, 去除冗余部分, 减小惯性力, 使阀芯能更快响应电磁力变化, 缩短响应时间。机械

结构中增设直线导轨或滚珠轴承等导向装置,提升阀芯运动直线性与稳定性,进一步降低摩擦和运动阻力。

四、电磁阀结构改进的实践与效果评估

(一) 改进方案的实施过程

基于上述结构改进理论与方法,电磁阀结构改进方案需遵循流体力学优化设计准则,借助高精度数控机床加工制作具备新型流道结构的阀体与阀芯,加工期间,严格把控尺寸精度和表面粗糙度,确保流道形态契合设计标准,选取适宜的高磁导率纳米晶软磁合金材料,通过精密冲压与热处理工艺加工铁芯和衔铁,并运用自动化绕线设备重新设计绕制电磁线圈,精准控制线圈匝数和线径^[4]。采购新型聚四氟乙烯密封材料及优化后的变刚度弹簧等部件。随后,将改进后的各部件进行组装,在无尘车间环境中,使用专用装配工具和设备,严格控制装配工艺与精度,对阀芯与阀体的配合间隙进行精准测量和调整,确保其处于亚微米级精度范围。采用激光焊接技术对电磁线圈与引线实施焊接,保障电气连接的可靠性。组装过程中,对关键尺寸和配合间隙进行多次检测与校准,确保电磁阀整体结构的合理性和可靠性,对组装完毕的电磁阀开展初步调试,通过施加不同电压并通入流体介质,检查电磁阀动作是否正常,对发现的问题及时进行调整和修复,确保其基本功能正常后,方可进入性能测试阶段。

(二) 改进后电磁阀性能测试方法

运用高精度压力传感器、流量传感器与位移传感器,对电磁阀在不同工况下的压力波动、流量特征及阀芯位移实施实时监测,压力传感器精度达 0.1%FS,可精准捕捉电磁阀内部压力的细微改变;流量传感器采用电磁式或涡轮式,能实现对不同流体介质流量的精确计量。借助高速摄像机,以每秒数千帧的拍摄速度记录阀芯启闭过程,通过图像分析软件精确测算响应时间,误差可控制在毫秒级,通过改变输入电压、流体介质压力和温度等参数,模拟多种工作条件,测试电磁阀的稳定性与可靠性,在不同温度环境箱中对电磁阀进行测试,观察其在高低温环境下的性能表现。对电磁阀的

能耗、泄漏量等指标进行检测,运用功率分析仪测量电磁阀工作时的功率损耗,通过气密性测试设备检测不同压力下的泄漏量,综合各项测试数据,对改进后电磁阀的性能进行全面评估,为后续分析提供准确依据。

(三) 响应时间优化效果及综合性能分析

同等工作条件下,电磁阀开启响应时间由原本数十毫秒缩减至几毫秒,关闭响应时间亦显著缩短,能更迅速响应控制信号,增强动作及时性,流体阻力层面,经优化的内部流道使流体通行更为顺畅,压力损失减少 30% - 50%,提升能量转换效率,能耗上,新型电磁结构与驱动技术的运用,令电磁阀工作功率下降 20% - 30%,实现节能效果,泄漏量指标大幅改善,新型密封材料和结构应用后,泄漏量近乎可略去不计,密封性能大幅增强^[5]。实际应用于现场总线控制阀岛,阀岛整体响应提速,系统控制精度得以提升,保障生产过程稳定可靠,某汽车零部件生产线实践表明,产品质量缺陷率下降 40%,设备运行效率提高 25%,维护成本降低 30%,充分证实电磁阀结构改进方案对提升现场总线控制阀岛响应时间与综合性能的有效性。

结语

本文聚焦现场总线控制阀岛响应时间优化,深入探究电磁阀结构现状及存在问题,依托多学科理论提出并施行结构改进方案,经理论剖析、结构优化和实践验证,改进后的电磁阀在响应时长、能耗以及稳定性等层面性能大幅提升,切实强化现场总线控制阀岛整体控制精度与运行效能,契合现代工业自动化对快速响应、精准控制的要求,为化工、电力等领域设备升级给予技术支撑。伴随工业智能化不断推进,对电磁阀动态响应和可靠性的要求会持续提升,后续研究可将重点放在新材料在电磁部件中的运用,探寻智能控制技术与电磁阀结构的深度融合,进一步钻研电磁阀与阀岛系统的协同优化机制,为工业自动化向更高水准发展提供更稳固的技术保障。

参考文献

- [1]张加冀.商用车电子液压制动系统电磁阀的设计及实验研究[D].燕山大学, 2024.
- [2]刘帅.均衡气缸 PWM 控制高速电磁阀故障原因分析及优化改进[J].电力机车与城轨车辆, 2024, 47(03): 132-134.
- [3]叶冠成.大通径高压气动电磁开关阀特性研究[D].华中科技大学, 2024.
- [4]龙万东.面向一体式电子液压制动系统的电磁阀设计与试验[D].重庆交通大学, 2024.
- [5]张苗.基于 PROFINET 的阀岛控制系统的设计与实现[D].北京交通大学, 2024.