

气动元件智能化技术应用研究

江 杰

建德市新安江气动元件有限公司 浙江杭州 311699

摘 要: 伴随着工业自动化程度不断加深,气动元件的智能化改造便成了提升制造业高质量发展的重要手段。本文对气动元件智能化的基础原理、关键技术、应用场景进行了系统的论述,重点对智能传感系统、先进控制算法、工业通信网络在气动系统中的融合应用机制进行了分析。研究表明,经过集成状态感知、智能决策、精准执行三者能力之后,智能化气动元件的系统响应能力得到了很大的提高,控制精度也得到了有效的提升,运行稳定性也得到了持续的改善,给现代智能制造体系提供更加高效可靠的执行方案。同时本文根据技术发展走向,预测了气动智能化技术在工业物联网、智能机器人等新领域里的应用情况,给相关领域的技术研发和工程实践提供系统的理论指导以及实践借鉴。

关键词: 气动元件;智能化技术;工业自动化;智能控制

气动元件因为结构简单、成本低、可靠性高被广泛的应用于工业自动化当中,它是各种自动化设备中不可缺少的基本执行件。但是传统的气动系统在控制精度、自适应能力、信息交互等各方面存在着明显的不足,不能满足智能制造对高精度、高效率、高可靠性要求。近些年来,由于传感器技术、嵌入式系统以及人工智能等技术的发展,气动元件的智能化改造变得可能,集成感知、计算、通信能力之后可以使其具备状态监测、智能决策、远程控制等功能,从而提高系统整体性能。本文主要对气动元件智能化技术的基本原理、关键技术体系以及典型的应用场景进行梳理,对气动元件智能化技术未来的发展趋势进行预测,为气动元件智能化技术的研究与应用提供一定的理论基础和实践参考。

一、智能化气动元件的基本理论与技术架构

(一) 智能化气动系统的核心特征

智能化气动元件是把先进的传感装置、智能处理单元、通信接口等集成起来,从而实现了传统执行机构向智能控制节点的转变。转变的关键之处在于给气动元件赋予了状态感知、数据分析以及自主决策的功能,使之可以依照实时工况来动态地调节自身的运行参数。智能化气动系统有三个特点:第一,具有实时数据采集与处

理能力,可以准确地捕捉到系统状态的变化;第二,采用先进的控制策略,可以实现对非线性、时变系统的精确控制;第三,支持开放的通信协议,可以实现设备之间的高效协同^[1]。这些特点使智能化气动系统在复杂的工业环境下有很好的适应性、灵活性。

(二) 智能化系统的层级架构设计

智能化气动系统是由感知层、控制层、执行层这三个主要层次组成的分层体系结构。感知层是由各种高精度传感器组成,用来采集压力、流量、位移等重要的参数,控制层是嵌入式处理器和智能算法模块,执行数据分析和决策运算,执行层是由气动执行元件构成,准确地执行控制指令。各个层级之间用标准的通信接口实现数据的交换和指令的传送,构成了完整的闭环控制系统。这样的架构设计既可以保证系统有良好的实时响应性,又可以给系统的扩展、升级带来方便,可以根据不同的应用场景灵活地配置各个功能模块。

二、智能传感与信息处理技术

(一) 多参数集成传感技术

现代智能气动系统大多采用多参数集成传感方式,在一个模块里同时集成了压力、温度、流量等各方面的传感器。集成化设计不但减小了传感器体积,提高了安装灵活性,而且可以同时采集、分析多种参数。压力传感单元采用微机电系统技术,可以准确地探测气压的微小变化,流量检测使用热传导原理,可以准确地测量气体流量,位移感知采用磁致伸缩或者激光测距技术,可以提供高精度的位置反馈。多源传感器数据深度融合

作者简介: 江杰(1986.12-),男,汉族,浙江杭州建德市人,大学本科学历,现目前的职称是中级工程师,研究方向为硫化机热工集成阀组结构优化与性能提升研究和气动元件智能化技术应用研究。

处理, 给系统实现实时状态评价、早期故障诊断打下了完整的数据基础, 极大地提高了监测系统的全面性、准确性。

(二) 信号处理与特征提取

智能化气动系统利用先进的信号处理技术, 把原始的传感器信号转换成有效的控制信息。系统使用数字信号处理算法, 对采集到的数据进行滤波降噪、信号放大、格式转换等处理, 有效地消除了环境干扰, 提取出了有用特征。特征提取算法可以识别出正常工作状态、异常振动特征、潜在泄漏信号等各种运行状态模式。利用时频分析、模式识别技术, 可以对重要参数的变化趋势进行跟踪, 达到早期发现故障的目的。采用多种智能信号处理的方法, 大大提高系统测量精度和运行可靠性, 也给预测性维护打下了良好的技术基础, 使气动系统的智能化水平得到了显著的提高。

三、智能控制算法与技术实现

(一) 自适应控制方法应用

自适应控制技术在智能化气动系统控制架构中占有很重要的位置。该技术可以按照系统的实时变化自动调节控制参数, 可以很好地应对由于负载波动、环境变化等不确定性因素所造成的各种问题。模型参考自适应控制就是通过建立理想参考模型来对比实际输出和期望输出的差别, 然后在线调整控制参数。同时自校正控制系统使用在线辨识算法实时识别系统动态特性, 然后据此优化控制策略。该自适应调节机制大大增强了系统对抗干扰的抗性, 保证在各种工作条件下系统都有较好的控制性能。尤其在负载经常变化的工业环境中, 自适应控制具有很好的鲁棒性以及适应性。

(二) 智能决策算法部署

智能化气动系统使用各种智能决策算法提高控制品质。模糊逻辑控制把专家的经验转化为数学规则库, 可以很好地处理系统非线性特性以及不确定性因素^[2]。神经网络控制依靠学习系统输入输出数据来创建准确的数学模型, 从而达到对复杂动态过程精确映射的目的。近几年来, 深度强化学习技术的应用使系统具备了自学习的能力, 在与环境的交互过程中不断改善控制策略。运用智能算法可以大大提升气动系统在复杂工业环境中做决策的能力, 帮助气动系统做出更加合理的选择来完成控制的决策工作, 从而提高整个气动系统的性能。

(三) 混合控制策略设计

为了充分发挥各种控制方法的优势, 现代气动系统一般采用混合控制的方法。将传统的PID控制和模糊逻辑

结合在一起, 既可达到稳态精度的保持目的, 又能提高系统的非线性适应能力。神经网络与自适应控制相结合, 系统可以学习系统特性, 也可以实时调节控制参数。分层控制架构将不同时间的控制任务分开来用, 底层负责快速反应的控制, 高层做优化决策。把模型预测控制与强化学习结合起来, 可以让系统预见当下的动态发展态势来改善所用的控制方案。混合控制方案把多种算法的优点综合起来, 给气动系统提供更加完善可靠的控制方案。

四、通信网络与系统集成技术

(一) 高速工业网络协议实现

现代智能化气动系统大多采用以太网类工业协议实现高速数据交换。Profinet、EtherCAT等协议有纳秒级的时钟同步精度、微秒级的数据传输周期, 可以保证多轴运动控制的时间确定性。OPCUA协议创建起统一的信息模型框架, 达成不同平台设备之间语义上的互操作。TSN技术就是在标准以太网的基础上增加了时间感知调度机制, 保证控制数据的确定性以及低延迟传输。采用标准协议可以大大降低系统集成的难度, 使得不同的厂家生产的气动设备可以在同一个网络中互相配合使用, 从而提高整个系统的可靠性及可维护性。

(二) 边缘-云协同计算架构

以工业物联网架构为基础的智能化气动系统, 就形成了三层计算架构体系。终端设备层做基本数据的采集和控制指令的执行, 边缘计算层做实时数据处理、本地决策、异常检测, 云端平台层做大数据分析、深度模型训练。边缘节点部署可以降低数据的传输延时, 满足实时控制的需求同时也可以减轻云端服务器运算的负担。云端平台依靠多设备的数据来训练优化算法模型, 然后把更新后的控制策略下达到边缘节点。5G技术的应用加强了边缘和云端的协同能力, 给远程诊断以及预测性维护提供高速通道。

(三) 网络安全与可靠性保障

由于气动系统网络化程度的提高, 信息安全成了系统设计时需要考虑的重要因素。工业防火墙以及访问控制机制可以防止控制网络被外部的攻击。OPCUA内置的安全机制可以给端到端的数据加密以及身份认证。系统使用冗余网络拓扑, 在主网络出现故障的时候会自动切换到备用通道。时间敏感网络流量整形以及优先级调度机制, 可以保证重要的控制数据的传输可靠。设备状态监控系统可以对网络异常和安全威胁做实时检测, 并及时发出警告。这些安全措施一起形成了一个可靠的网络

环境，给气动系统的稳定运行提供安全保障。

五、智能化气动系统的工程应用

(一) 精密制造中的高精度控制

精密制造领域智能化气动系统有很好的控制性能。本系统采用多种传感器对压力、位移、力信号等进行实时监测，并使用先进的控制算法对执行过程进行控制^[3]。微电子制造里智能气动执行器做微米级精确定位，保证半导体元件准确装配。光学仪器生产中系统使用振动抑制技术和压力精密控制，提高了镜片表面的加工质量。不仅可以提高制造精度，而且可以大大减少人工干预的需求，使制造业朝着更高的自动化水平发展。

(二) 柔性生产线的动态适配

现代制造业对于灵活性的要求之下，智能化气动系统就表现出很强的适应性。模块化设计以及可编程控制，使系统可以很快地适应不同的产品生产需求。在汽车制造中，智能夹具系统可以自动识别车型来调节夹持参数，可以进行混线生产。气动机械手加上视觉技术就可以对异形产品做准确的处理。系统具有自学习能力，可以利用生产数据来改善控制策略，从而提高生产效率。这会使得企业的快速调整应对市场的波动，并且减少企业改变生产线所需要的成本。

(三) 特殊工况下的可靠运行

在恶劣的工业环境里，智能化气动系统有着很强的适应性。采用特殊的材料以及密封技术，该种系统即使在恶劣的气候条件下也能够保持正常工作。智能执行器可以在高温环境里可靠地完成物料搬运任务。化工领域防爆型气动系统保证危险环境下安全生产。系统集成环境监测功能，可以对工况进行实时感知并且可以自动调节工作模式。利用远程监控系统可以随时掌握设备情况，防止出现故障。由于有以上特点，智能化气动系统是特殊工业环境下最理想的气动系统。

六、技术发展面临的现实挑战

(一) 现阶段技术应用瓶颈

在实际应用中，智能气动技术还存在着许多要解决的问题。传感器在极端工业环境下长期稳定性和精确度问题还没有完全解决，测量数据的准确性、一致性还会受环境影响。算法运行效率同系统实时响应要求之间的平衡问题明显，怎样在保证控制精度的同时缩减计算复杂度，这是亟待继续研究的方面。不同的设备供应商的协议不相容，标准水平低造成系统整合的技术难度大、投资大。产业化推广过程中前期投资大、投资回收期长的问题，也影响着技术普及的速度。

(二) 关键技术演进方向

当前技术发展有三个明显的发展趋向。微型化和集成化趋势比较明显，新一代气动元件正在朝体积小、功耗低、集成度高的方向发展。软硬件协同优化成为重点，用算法和硬件深度融合的方式来提高系统整体性能和能效比。标准化工作加快推进，行业正在形成统一的数据接口、通信协议标准，为设备互联互通打下了基础。材料科学的发展给气动元件性能的提高提供了新的可能，新型复合材料以及表面处理技术正在提高元件的耐久性以及环境适应性。这些技术发展方向将会使气动元件朝着更高的性能、更低的成本、更方便集成的发展方向迈进。

七、结论与展望

(一) 结论

本文对气动元件的智能化技术核心原理、关键技术体系及其在工业自动化、机器人等领域的应用进行了系统的研究。研究表明，用高精度传感器、智能控制算法、通信网络技术相结合的方式，可以实现智能化气动元件的状态感知、智能决策、远程控制，大大提高系统的响应速度、控制精度、运行可靠性。智能化改造使传统气动系统有了自适应调节、故障预警、远程维护的功能，在提高生产效率、降低能耗、减少维护费用等方面有明显的优势，给现代工业自动化提供了一个更加高效、灵活、可靠的方案。

(二) 展望

气动元件智能化技术未来会在现有的基础上，向更高层次的发展。技术融合将会成为一种趋势，气动技术同电动、液压技术的深度融合会产生出更为灵活、高效的混合驱动系统。系统级智能化水平将会进一步提高，由单机智能向产线级、工厂级的协同智能发展。智能化气动技术将会往航空航天、新能源汽车、高端装备制造等高端行业拓展。同时伴随着工业互联网、5G等新基建的发展，智能化气动系统将会实现更大的范围的互联互通，在远程监控、智能维护、预测性服务等各方面起到更大的作用。

参考文献

- [1] 林祥玉, 吴姹紫. 奉化锻造中国气动产业新引擎[J]. 经贸实践, 2025, (10): 18-19.
- [2] 李华贵, 罗建康, 项良海, 等. 超高压大口径气动快速截止阀的研制[J]. 阀门, 2025, (07): 713-719.
- [3] 宋维业, 仪维. 基于OBE理念的气动技术实践教学模式探索[J]. 实验室科学, 2025, 28(02): 106-110+114.