

自动化超纯阀门执行机构设计与动态性能分析

宿翔¹ 王蕾² 孙科¹ 郭喜顺¹ 关元昊¹

1. 大连华邦化学有限公司 辽宁 大连 116000

2. 大连福华机械有限公司 辽宁 大连 116000

摘要: 自动化超纯阀门是高端制造业流体控制系统的核心装备, 执行机构的动态品质直接决定阀门的服役性能。本文面向超纯工况对执行机构快速性与精确性的双重约束, 提出一种气电协同驱动的新型执行机构方案。围绕结构拓扑、控制架构与动态特性展开系统研究, 构建了从设计到验证的完整技术链条。测试结果表明, 该执行机构全程响应时间控制在0.5秒以内, 定位偏差不超过 ± 0.08 毫米, 能够很好满足超纯介质输送场景下的自动化控制需求。

关键词: 超纯阀门; 执行机构; 协同驱动; 动态特性; 定位精度

引言: 半导体制造、生物制药及高纯化学品制备等领域的快速发展, 对流体控制系统提出了前所未有的严格要求。自动化超纯阀门作为介质输送的关键执行单元, 其动作响应与控制精度直接影响工艺稳定性和产品良率。现有执行机构中, 气动方案虽然动作迅捷但止位精度不足, 电动方案定位准确却响应迟缓, 两者均难以独立应对超纯工况下快速响应与精确定位的双重挑战。本文从驱动原理创新入手, 设计一种气电协同的执行机构, 系统探索其动态行为规律, 为高端阀门自主研制提供技术积累。

1 执行机构设计约束与技术定位

1.1 超纯服役环境对执行机构的性能约束

超纯阀门服役环境对执行机构形成多重约束。洁净度方面, 运动副不得使用油脂润滑剂, 摩擦副需具备自润滑特性, 防止污染工艺介质。响应时效方面, 全行程启闭通常要求控制在1秒以内, 精密配气环节甚至要求0.3秒。定位品质方面, 输出位移与目标值的偏离应控制在 ± 0.1 毫米以内。耐久性方面, 执行机构应能承受不低于10万次往复动作, 性能衰减需平缓可预测。此外, 执行机构在气源或供电故障时应能自动归位至安全状态。上述约束相互交织, 对驱动方式、传动形式和控制策略提出了综合性要求。

1.2 常规执行机构的技术短板

工业阀门配套的执行机构主要有气动和电动两类, 各自存在技术短板。气动执行机构动作干脆、爆发力强, 但输出位移与气压之间存在非线性关系, 定位精度通常仅达毫米量级, 排气噪音在洁净厂房中也是问题。电动执行机构定位精度可达微米级, 控制灵活, 但电机启动加速需要时间, 全行程响应时间往往超过1秒, 运行温升也可能对超纯介质产生不利影响。两种常规方案各

有所长, 单独使用均无法全面满足超纯阀门的综合性能要求^[1]。

1.3 执行机构设计的核心命题

面向超纯工况的执行机构设计面临若干关键技术命题。驱动方式选择应兼具气动的高速特性和电动的精确特质, 探索协同驱动路径。动力传递链应力求简短直接, 减少中间环节带来的间隙、摩擦和变形。位置感知需选用非接触式传感元件, 保证精度且避免污染。控制策略需针对大行程追求速度、接近目标追求精度的分段特征差异化设计。执行机构与阀门本体的接口需标准化, 这些命题相互关联, 需在总体方案层面统筹解决, 而非零散修补。

2 气电协同执行机构拓扑设计

2.1 复合驱动架构与工作原理

本文提出的执行机构采用气电协同驱动架构, 将气动单元的高速特性与电动单元的精确定位能力有机融合。整体方案中, 气动单元承担粗定位阶段的快速行程任务, 电动单元负责精定位阶段的微量调节。两种驱动模式通过智能切换逻辑协同工作, 互不干扰。正常动作流程如下: 控制系统接收到动作指令后, 首先启动气动单元, 电磁阀全开使压缩空气快速充入气缸, 推动活塞带动阀杆高速运动。位移传感器实时监测当前位置, 当阀杆接近目标窗口时, 控制系统向气动单元发出停止信号, 同时激活电动单元。步进电机在微步驱动模式下输出精确的角位移, 经丝杠转换为阀杆的微量直线运动, 直至位置误差收敛至允许范围。两种驱动单元的动力切换由嵌入式控制器自动完成, 无需人工干预。这种架构既保留了气动的高速优势, 又发挥了电动的精确特长, 且两者在时间上错开、空间上并行, 不存在动力干涉问题。

2.2 关键机械子系统的参数化设计

气动子系统采用双作用无油气缸，内径依据阀门启闭力矩确定，额定工作压力0.5兆帕。活塞材料为铝合金，表面硬质阳极氧化，活塞环采用填充聚四氟乙烯，与不锈钢气缸壁形成低摩擦自润滑副。气缸两端配置可调式缓冲装置，吸收末端动能，减少冲击反弹。电子子系统选用两相混合式步进电机，保持转矩1.2牛米，配套行星减速器（减速比10:1）。电机采用256微步细分驱动，理论步距角0.007度，经丝杠转换后直线分辨率优于0.005毫米。滚珠丝杠副导程4毫米，动态负载能力800牛，传动效率高于90%。气动与电动单元的动力切换由电磁离合器执行：正常工况离合器脱开，气动单元独立驱动；气源失效时离合器自动接合，由电机带动阀杆复位。各子系统参数经多目标优化确定，兼顾速度、精度和可靠性。

2.3 位置感知与密封隔离方案

位置感知选用磁致伸缩直线位移传感器，由波导丝、位置磁环和信号处理电路组成。位置磁环与阀杆刚性连接，随阀杆同步运动。传感器向波导丝发射电流脉冲产生环形磁场，与位置磁环的磁场相互作用产生扭转波，通过测量时间差确定磁环位置。该方式为非接触测量，无磨损、无滞后，分辨率0.005毫米，重复精度优于0.01毫米，对灰尘油污不敏感。传感器输出RS485数字信号，直接与控制器通信，避免模拟信号传输干扰。密封隔离方面，执行机构与超纯介质之间采用焊接式金属波纹管实现动静密封。波纹管选用316L不锈钢，双层结构，设计疲劳寿命12万次。外侧设置辅助填料密封作为备用。壳体采用密闭设计，内部保持微正压氮气保护，进一步隔离外部污染物^[2]。

2.4 结构集成与热管理

执行机构将气动气缸、步进电机、减速器、滚珠丝杠和位移传感器集成于同一壳体内，壳体采用整体铸造铝合金，兼具轻量化和刚性。气动与电气接口分别布置于壳体两端，避免管线干涉。与阀门本体的连接采用法兰接口，符合ISO标准，互换性良好。热管理方面，步进电机长时间通电会产生焦耳热，可能影响超纯介质温度稳定性。为此，在电机与丝杠之间设置隔热垫片，壳体上设计散热筋增加对流散热面积。控制策略中加入待机电流自动降低功能，电机静止时保持电流降至额定值的30%，显著减少发热。实测表明，执行机构连续运行2小时后，壳体表面温升不超过15摄氏度，对介质温度的影响可忽略不计。

3 控制系统与动态性能建模

3.1 分层递阶控制架构

控制系统采用分层递阶结构，自上而下依次为任务规划层、运动控制层和驱动执行层。任务规划层部署于上位机或PLC，负责解析工艺指令、生成运动轨迹、监控运行状态。运动控制层以高性能ARM微控制器为核心，运行实时操作系统，周期执行控制算法。该层接收来自任务规划层的位置指令，结合传感器反馈的实际位置，按照预定的控制律计算控制输出。驱动执行层包括电磁阀驱动电路和步进电机驱动电路，将控制信号转换为气路通断和电机电流。各层之间通过现场总线通信，通信周期与控制周期同步。这种分层架构将决策、计算和执行的职责分离，降低了各模块的耦合度，便于调试和维护。微控制器选型时特别关注了浮点运算能力，确保模糊PID等高级控制算法能够在毫秒级周期内完成计算。控制软件采用状态机设计模式，明确定义了待机、粗定位、精定位、故障处理等工作状态及其转换条件，逻辑清晰可靠。

3.2 分段复合控制策略

针对执行机构不同运动阶段对控制性能的差异化需求，设计了分段复合控制策略。整个动作过程划分为三个阶段。第一阶段为快速趋近阶段，此时阀杆当前位置与目标位置差距较大，控制目标是在保证稳定的前提下尽可能缩短运动时间。该阶段由气动单元单独驱动，电磁阀全开，压缩空气以最大流量进入气缸，推动活塞高速运动。此阶段控制器仅监测位置变化，不进行闭环调节。第二阶段为减速接近阶段，当阀杆进入目标位置附近的减速窗口时，控制系统切断气动动力，同时启动电动单元。该阶段采用比例-积分-微分控制算法，使阀杆平稳减速，避免过冲^[3]。第三阶段为精确定位阶段，阀杆已十分接近目标位置，此时控制器切换至模糊比例-积分-微分算法，根据误差和误差变化率实时调整控制参数，消除静差和极限环振荡。三个阶段的切换阈值根据阀门行程和允许误差通过实验标定。这种分段策略使执行机构在全行程范围内始终保持合适的动态行为，大行程时追求速度，小偏差时追求精度。

3.3 非线性动态建模与仿真

为预测执行机构的动态行为并指导控制参数整定，建立了包含气动、电动和机械传动环节的非线性数学模型。气动模型描述了压缩空气在管路和气缸内的充放气过程，考虑了节流口的流量特性、气缸容积变化和活塞运动对压力的耦合影响。电动模型描述了步进电机的电磁转矩特性和驱动电路的电流控制响应。机械模型将活塞、丝杠螺母副、阀杆等运动部件等效为集中质量-弹簧-阻尼系统，包含了摩擦力、波纹管弹性力和流体不平衡

力等负载项。各子模型通过力平衡方程和运动学约束耦合,构成完整的系统模型。利用MATLAB/Simulink平台搭建了仿真环境,对阶跃响应、正弦跟踪和抗扰动能力进行了仿真分析。仿真结果显示,在额定负载条件下,全行程阶跃响应的上升时间为0.26秒,调节时间为0.44秒,稳态误差小于 ± 0.015 毫米。正弦信号跟踪的幅值衰减和相位滞后均在可接受范围内。仿真结果为硬件参数优化和控制算法设计提供了定量依据。

4 实验验证与性能评价

4.1 综合测试平台搭建

为验证执行机构的设计效果,搭建了综合性能测试平台。平台由执行机构样机、气源供给单元、电气控制柜、位移测量系统和数据采集记录系统构成。样机按照前述设计方案完成零件加工和装配,关键尺寸经三坐标测量机检验合格。气源供给单元包括空压机、储气罐、冷冻干燥机和精密过滤装置,为执行机构提供干燥洁净的压缩空气,供气压力可在0.3至0.7兆帕范围内调节。电气控制柜集成了开关电源、电机驱动器、电磁阀继电器和嵌入式控制器。位移测量采用激光位移传感器作为基准,其分辨率为0.001毫米,精度高于被测对象一个数量级,确保测量结果的可靠性。数据采集使用多通道同步采集卡,采样频率设定为2000赫兹,能够捕捉毫秒级的动态过程。上位机软件基于LabVIEW开发,集成了指令发送、波形显示、数据存储和离线分析功能。测试按照先静态后动态、先空载后满载的顺序进行,每组工况重复测试10次以消除随机误差。

4.2 测试结果与对比分析

静态性能测试结果表明,执行机构的单向定位精度为 ± 0.06 毫米,双向重复定位精度为 ± 0.04 毫米,回程间隙0.07毫米,各项指标均优于设计目标。与纯电动执行机构相比,静态精度处于同一水平,说明气电协同方案没有因引入气动单元而损失定位品质。动态性能测试中,全行程阶跃响应的上升时间为0.29秒,调节时间为0.48秒,最大超调量为2.3%。与纯气动执行机构相比,响应速度略有降低但差异不大,而定位精度显著提升。与纯电动执行机构相比,响应时间缩短了约60%,速度优势明显。正弦跟踪测试中,在1赫兹频率、10毫米幅值输入下,跟

踪误差的均方根值为0.06毫米,相位滞后约10度。频率响应测试得到执行机构的-3分贝截止频率为4.5赫兹,能够覆盖常规工艺过程的调节需求。抗扰动测试中,施加相当于额定负载20%的阶跃扰动后,位置最大偏离0.11毫米,恢复时间为0.32秒,表现出良好的扰动抑制能力。对比数据表明,气电协同方案成功融合了两种驱动模式的优点^[4]。

4.3 服役表现与优化方向

研制的执行机构样机已在一家半导体材料生产企业的超纯化学品输送系统中进行了试运行,累计动作超过3万次。现场反馈显示,执行机构动作可靠,定位稳定,未出现卡滞或漂移现象。洁净度检测未发现可检出的颗粒物增加,密封隔离效果良好。在试运行过程中也发现了一些有待改进之处。低温启动工况下,气动单元的响应略有延迟,分析认为与密封件低温硬化有关,可通过选用耐低温密封材料解决。长期运行后,滚珠丝杠副的预紧力出现轻微衰减,影响了重复定位精度的稳定性,后续拟采用双螺母预紧结构加以改进。

结束语

本文面向超纯阀门对执行机构快速响应与精确定位的双重需求,提出了气电协同驱动的新型执行机构方案。围绕结构设计、控制策略和动态性能开展了系统研究,完成了样机研制和试验验证。研究成果为超纯阀门执行机构的自主设计提供了可行路径,对提升国产高端阀门的技术水平具有促进作用。后续将进一步探索智能控制算法在其中的深度应用,推动执行机构向自适应、自诊断方向发展。

参考文献

- [1]孙志兴.晶粒度对半导体行业中超高纯气体阀门的影响[J].阀门,2024(1):83-87.
- [2]李桂阳,贾悦,毕诗新,等.浅析汽轮机进气阀门执行机构改造[J].中国设备工程,2025(15):95-97.
- [3]戚晓宁.深水液压控制阀门执行机构失效分析[J].石油工程建设,2022,48(2):12-16.
- [4]王恒伟.浅谈石油化工装置仪表阀门执行机构防火罩[J].广东化工,2022,49(7):168-169.