

变频技术在阀门电气控制系统中的应用

吴开华

宁夏银星吴忠仪表流体控制股份有限公司, 宁夏 吴忠 751100

DOI:10.61369/EPTSM.2026060014

摘 要：变频技术通过改变电机定子供电频率实现转速无级调节，将其引入阀门电气控制系统，能够显著提升阀门开度控制的精度与能效。本文系统阐述了变频控制的基本原理及其与阀门执行器的匹配方法，分析了信号采集反馈、开度调节、转速线性化及位置闭环补偿等核心控制功能。进一步探讨了变频技术在提升系统动态响应、减少机械冲击方面的优势，并针对过载保护、谐波抑制及故障诊断等关键保护机制进行说明。研究表明，合理的变频集成方案可有效优化阀门控制性能，降低能耗并延长设备寿命。

关 键 词：变频技术；阀门电气控制；开度调节；位置闭环；节能保护

Application of Frequency Conversion Technology in Valve Electrical Control Systems

Wu Kaihua

Ningxia Yinxing Wuzhong Instrument and Fluid Control Co., Ltd. Wuzhong, Ningxia 751100

Abstract：Frequency conversion technology enables stepless speed regulation by adjusting the power supply frequency of the motor stator. Its integration into valve electrical control systems significantly enhances both the accuracy of valve opening control and energy efficiency. This paper systematically elucidates the fundamental principles of frequency conversion control and its compatibility with valve actuators, while analyzing key control functions including signal acquisition and feedback, opening adjustment, speed linearization, and position closed-loop compensation. It further examines the advantages of frequency conversion technology in improving system dynamic response and reducing mechanical shock, and elaborates on critical protection mechanisms such as overload protection, harmonic suppression, and fault diagnosis. The study demonstrates that a well-designed frequency conversion integration scheme can effectively optimize valve control performance, reduce energy consumption, and extend equipment lifespan.

Keywords：frequency conversion technology; valve electrical control; opening adjustment; position closed-loop control; energy-saving protection

引言

传统阀门电气控制系统大多采用工频直接启动或者简单的星三角降压启动方式，电机以恒速运行，阀门开度依靠机械限位或者时间估算来进行控制，存在调节精度低、冲击电流大、机械磨损严重等固有问题。变频技术发展起来以后，给阀门控制带来了新的技术途径：通过改变电机供电频率来调节执行机构转速，从而实现阀门位置的连续精准控制。然而，变频器与阀门执行器的适配性、信号采集的可靠性、控制算法的合理性以及电磁兼容性问题，仍需系统探究^[1]。本文从变频控制的基本原理出发，遵循“系统集成—核心功能—性能提升—保护设计”的逻辑框架，全面剖析变频技术在阀门电气控制系统中的应用要点，为工程实践提供理论支撑。

一、变频控制基础

（一）变频技术基本原理

变频技术的核心在于改变交流电机定子的供电频率，从而调节电机的同步转速。根据异步电机转速公式 $n=60f(1-s)/p$ 可知，转速 n 与频率 f 成正比关系。变频器通过整流单元将工频交流电转

换为直流电，再借助逆变电路采用正弦脉宽调制（SPWM）技术输出频率可变的交流电。在变频过程中需维持电压频率比（ V/f ）恒定，以保证电机磁通稳定，避免出现磁路饱和或转矩下降^[2]。现代变频器融合了矢量控制或直接转矩控制算法，可分别调节励磁分量和转矩分量，实现类似直流电机的调速性能，这为阀门执行器的精准控制奠定了物理基础。

作者简介：吴开华（1975.05-），男，汉族，四川蓬溪县人，本科，中级工程师，研究方向：阀门执行器研发与应用。

（二）阀门电气控制系统构成

阀门电气控制系统由控制指令单元、驱动执行单元、阀门本体和反馈检测单元四大部分组成。控制指令单元包括 PLC、DCS 或专用控制器，负责发出阀门开度目标值及运行逻辑指令。驱动执行单元的核心是电机及其驱动装置：传统方案利用接触器实施通断控制；采用变频方案时，则由变频器作为调速中间环节。阀门本体按类型可分为截止阀、球阀、蝶阀等，执行器通过减速机构将电机的旋转运动转换为阀杆的线性或角度位移。反馈检测单元通常包括位置传感器、限位开关及电流检测模块，用于实时监测阀门状态并反馈给控制器，形成完整的闭环控制回路。

（三）变频引入阀门控制的需求

传统阀门控制中，电机恒速运转，阀门从全关到全开的动作时间固定且不可调，在需要精细调节流量的工况下难以满足工艺要求。频繁启停会产生巨大的启动冲击电流，既干扰电网，又加速接触器触点及电机绕组的磨损；若阀门触及机械限位后未及时断电，还会引发剧烈撞击，损坏阀座密封面或导致阀杆弯曲。此外，许多应用场景要求阀门变速运行（例如在接近全关时采用低速缓行以防产生水锤效应）。变频技术可灵活调节电机转速，实现软启动与平滑停车，并能依托位置反馈使阀门停留在任意期望位置，从根本上解决了上述问题。

二、系统结构与集成

（一）变频器与阀门执行器匹配

选择变频器时，首先需确认阀门执行器电机的额定功率、额定电流及极数，变频器的额定输出电流至少应为电机额定电流的 1.1 倍。考虑到阀门卡涩或异物堵塞等极端工况可能导致短时过载，建议按电机功率的 1.2 ~ 1.5 倍选型。若阀门需频繁调节，应选用具备恒转矩特性的变频器，并设置适当的转矩提升参数以补偿低频转矩不足。减速机构的减速比同样影响适配效果：减速比越大，折算到电机侧的阀门惯量越小，但响应速度会变慢^[9]。变频器与电机间的电缆长度不宜超过 50 米，过长时需加装输出电抗器以抑制反射波过电压。

（二）信号采集与反馈机制

阀门位置反馈通常采用电位计式或霍尔式角位移传感器，将 4 ~ 20 mA 电流信号或 0 ~ 10 V 电压信号送入变频器的模拟量输入端。为解决现场电磁干扰问题，反馈信号应采用屏蔽双绞线，且屏蔽层需单端接地。对精度要求较高的场合，可配置双通道冗余传感器，两路信号互为校验，偏差超限即报警。变频器自身也会采集电机电流、电压及温度等数据，结合阀门开度反馈即可判断执行器是否处于正常运行区间。特殊工况下如需非接触测量，可选用磁致伸缩或激光测距类传感器，但需注意安装空间与防护等级的匹配。

（三）控制线路与接口设计

变频器与上位控制器之间的线路分为数字量 I/O 与模拟量 I/O 两类。数字量信号负责传输启停指令、故障复位及限位开关状态，应通过继电器隔离以防共模干扰侵入。模拟量信号涉及开度设定与反馈传输，推荐采用 4 ~ 20 mA 电流型信号（抗干扰性优于电压型）。控制线路应遵循强弱电分离布线原则，变频器动力电缆与信号电缆间距至少 300 mm，交叉时需垂直穿越^[10]。变频器内

部关键参数（如加减速时间、转矩限制值、停机方式等）须根据阀门动作特性设定，并确保接口逻辑与上位控制程序完全对应。

三、核心控制功能

（一）阀门开度调节原理

变频控制下的阀门开度调节，本质上是位置随动系统的实现过程。控制器将用户设定的目标开度与反馈的实际开度进行比较，得到偏差值，经 PID（比例 - 积分 - 微分）运算后输出变频器的频率指令。当偏差较大时，变频器输出较高频率，驱动电机快速逼近目标位置；当阀门接近目标位置时，变频器自动降低输出频率，电机转为低速蠕动，直至偏差进入死区范围后停止。死区大小需兼顾调节精度与执行器动作频率，通常设为满量程的 0.5% ~ 1%。这种变频调速方式有效避免了传统开关控制常见的反复振荡现象。

（二）转速与流量线性化控制

大多数阀门的流量特性是非线性的：等百分比特性阀门的开度与流量呈指数关系；快开特性阀门在小开度区间流量变化剧烈。若电机转速与阀门开度变化率保持恒定，则小开度区域的流量调节会过于灵敏。变频技术可通过设定非线性加减速曲线来补偿这种非线性：在流量敏感区自动降低电机转速，在其他区域适当提速，使全行程范围内的流量变化率趋于均匀^[9]。具体实现方式是利用变频器的多段速功能或内部可编程逻辑，根据当前阀门开度查表选取适宜的运行频率，从而获得近似线性的流量调节效果。

（三）位置闭环与精度补偿

阀门运行中，机械间隙、齿条磨损及传感器漂移等因素会导致实际开度与反馈值产生偏差。变频控制系统可采用定期自整定方法来消除精度误差：当阀门触碰机械限位时，将当前反馈值强制校准为全关或全开状态，消除累积偏差。若配备绝对编码器，变频器可直接读取绝对位置值，无需每次上电归零。当检测到位置偏差持续超限时，系统自动执行一次往复动作以排除机械卡阻或异物干扰。对于热胀冷缩显著的工艺管道，还需根据介质温度修正阀杆伸长量，确保不同工况下的定位准确性。

（四）多策略控制模式切换

针对不同工艺阶段对阀门动作的差异化要求，变频控制系统可预设多种控制策略并实现无扰切换。例如，在正常调节工况下采用 PID 闭环模式以保证稳态精度；在快速开关阀位切换时切换为开环速度模式，以最短时间完成动作；在紧急停车工况下则立即切换为全速关断模式并叠加转矩限制。通过变频器内部可编程功能块，根据上位指令或外部触发信号自动选取适配的控制策略与加减速曲线，既满足日常调节的平滑性，又保留了应急工况的快速响应能力。这种多策略融合设计显著增强了阀门控制系统对复杂工艺流程的适应性。

（五）单片机控制的电动机变频启停技术

单片机控制的电动机变频启停技术是实现智能化变频阀门的核心支撑。系统以 STM32 等微控制器为核心，通过内部 PWM 模块产生驱动信号，经驱动电路放大后控制逆变器功率开关的通断时序，从而实现对电机供电频率的精确调节。单片机实时采集电位计反馈的阀门位置信号，依据预设算法动态调整 PWM 占空比，精准控制电机的加速、恒速与减速过程。配合软件编写的 S

型加减速曲线，单片机能够有效抑制启停瞬间的电流冲击与机械抖动，实现阀门的软启动与软停车，提升了系统在变频工况下的控制细腻度与可靠性。

四、性能提升

（一）节能与效率分析

变频调速的节能效益主要来自两方面。其一，在阀门非全流量输出工况下，传统方案通过阀门节流产生压降损耗，能耗较高；变频方案则降低电机转速以减少泵/风机输出量。根据相似定律，轴功率与转速的立方成正比，转速降低 20%，功率约下降 48.8%。其二，变频器实现了电机软启动，启动电流不超过额定电流的 1.5 倍，远小于直接启动时 6 ~ 8 倍的冲击电流，大幅降低了线路损耗。对于频繁调节的阀门，当年运行时长超过 4000 小时，变频改造的投资回收期通常为 1 ~ 2 年。

（二）动态响应与平稳性

变频控制兼顾了快速响应与平稳运行的需求。传统控制中，电机从静止瞬间加速至额定转速，虽冲击大但调节速度不可分级。变频器通过可编程 S 型加减速曲线，使电机转矩平缓上升，避免力矩突变引发阀门颤动。在紧急切断等需快速响应的场合，变频器可短时超频运行以提高转速，同时依托转矩限制功能防止过载^[7]。对于大口径阀门，可设置为先低速开启以平衡两侧压差，待压差稳定后再加速，这种分段控制有效避免了高压流体对阀芯的瞬时冲击。

（三）减少机械冲击与磨损

阀门的机械磨损主要源于阀杆与填料的持续摩擦，以及阀芯与阀座的撞击。变频控制实现了对阀门全运动过程的速度管控：在即将关闭时，变频器自动将电机转速降至额定转速的 1/10 ~ 1/5，使阀芯轻柔贴合阀座，大幅降低撞击能量。同时，阀杆匀速转动避免了填料因受力不均产生局部沟槽。对于需频繁调节开度的阀门，传统接触器控制每日动作次数受限，而变频控制可实现无限制微调。实测表明，采用变频装置后，阀门检修间隔可延长一倍以上。

五、系统保护与抗干扰

（一）过载与欠压保护

变频器内置电子热过载保护功能，通过监测输出电流有效值并与电机热容量曲线比对，在绕组温度达到危险值前触发保护。相

比传统热继电器，电子热保护对重复性短时过载的判断更精准，避免不必要的跳闸。当电网电压下跌时，变频器直流母线电压随之降低，可能导致转矩输出不足甚至电机堵转^[8]。变频器设有欠压减载功能：电压暂降时自动降低输出频率以维持转矩；若欠压持续时间超过设定值，则启动保护性停机。对需连续运行的关键部位，可配置直流支撑（DC-Bank）模块或动态电压恢复器（DVR）。

（二）谐波抑制与 EMC 设计

变频器整流环节会向电网注入大量谐波电流，总谐波畸变率（THD）常达 30% ~ 50%。在进线侧加装交流电抗器可将 THD 降至 30% 以下；若要求更高，则需采用 12 脉冲整流或有源前端（AFE）技术。谐波不仅影响同母线其他设备正常运行，还会增加变压器与电缆发热损耗。在电磁兼容（EMC）设计中，变频器与电机间应采用对称屏蔽电缆，屏蔽层两端可靠接地以形成法拉第笼效应；变频器柜体需为金属材质，并在缝隙处加装导电密封条；进出线电缆穿装铁氧体磁环以进一步抑制高频共模干扰，确保符合 IEC 61800-3 标准要求^[9]。

（三）故障诊断与冗余控制

现代变频器具备完善的故障自诊断能力，可识别过流、过压、过热、接地故障及电机缺相等异常，并通过故障代码精准定位问题。结合阀门位置反馈信号，系统可区分是变频器自身故障，还是阀门机械卡涩导致的过载。对于关键工艺阀门，可采用“一用一备”的变频器冗余配置，主变频器故障时备用变频器自动投切，切换时间控制在 3 秒以内。变频器内部记录最近 10 次故障前后各 1 分钟的运行数据（含输出电压、电流、频率及直流母线电压等），为事后分析提供依据。远程诊断功能还可将故障波形通过工业以太网上传至维修中心。

六、结语

变频技术在阀门电气控制系统中的应用，实现了从传统开关型控制到连续调节型控制的重大跨越。本文阐述了变频控制的基本原理，系统分析了变频器与阀门执行器的适配方法、信号采集及控制接口的设计要点，并详细说明了开度调节、流量线性化及位置闭环补偿等核心控制功能的实现机理。研究表明，变频技术不仅能取得显著的节能效果，还能大幅提升系统动态响应品质，减少机械振动并延长阀门使用寿命。完善的保护与抗干扰设计确保了系统在复杂工业环境中的稳定运行^[10]。未来，随着智能变频器与工业物联网技术的深度融合，阀门控制系统将向预测性维护、自适应控制及能效优化方向发展，在流程工业中发挥更为关键的作用。

参考文献

- [1] 尹明胜, 郭晓晨. 变频智能仪表融合赋能冶金风机节能 [J]. 冶金与材料, 2026, 46(04): 16-18.
- [2] 王月琪. 变频调速技术在工业自动控制中的应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2026, 16(02): 160-162.
- [3] 郭达. 变频技术对空压机系统性能影响试验研究 [J]. 压缩机技术, 2025, (06): 30-36+24.
- [4] 康宗现, 卢磊, 张丽敏. PLC 变频节能技术在电气自动化设备中的应用 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025 年第八届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集. 河南中孚高精铝材有限公司, 2025: 285-286.
- [5] 代响林. 机电一体化中的电机控制与保护设计 [J]. 流体测量与控制, 2023, 4(04): 86-90+101.
- [6] 张晖. PLC 变频节能技术在自动化系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (05): 188-189.
- [7] 李春江. 变频技术在机电设备自动化控制中的应用 [J]. 中国机械, 2024, (02): 79-82.
- [8] 尉蓉. 电气自动化控制中变频调速技术的运用 [J]. 光源与照明, 2021, (11): 132-134.
- [9] 王翠玉. 变频调速技术及其在工业电气自动化控制中的运用 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2021, (10): 121-123.
- [10] 郝红. 电气自动化控制中变频调速技术的运用 [J]. 湖北农机化, 2020, (15): 138-139.