

阀门电装控制系统故障分析与智能维护策略研究

汪裕后

温州天裕阀门科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：阀门电装控制系统作为工业流体输送、能源调控等领域的核心执行单元，其运行稳定性直接决定工业生产的安全性、连续性与经济性。随着工业自动化、智能化水平的提升，阀门电装控制系统朝着集成化、精密化方向发展，但在复杂工况（高温、高压、强腐蚀）长期运行下，各类故障频发，不仅导致生产中断，还可能引发安全隐患与经济损失。本文通过梳理阀门电装控制系统的结构组成与工作原理，结合工业现场实测数据，系统分析了电气故障、机械故障、控制逻辑故障的类型、表现及成因，构建了基于故障树分析（FTA）的故障诊断模型，提出了涵盖状态监测、智能诊断、预测维护、全生命周期管理的一体化智能维护策略，并通过实例验证了策略的有效性。研究表明，所提出的智能维护策略可将阀门电装控制系统故障发生率降低 68% 以上，故障维修时间缩短 52%，显著提升系统运行可靠性与运维效率，为工业领域阀门电装控制系统的安全稳定运行提供理论支撑与实践参考。

【关键词】：阀门电装；控制系统；故障分析；智能维护；故障树分析；状态监测

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.044

引言

在石油化工、电力能源、市政给排水、冶金建材等工业领域，阀门电装控制系统承担着流体介质的通断、流量调节、压力控制等关键功能，是连接工业控制系统与现场执行机构的核心枢纽。据工业运维数据统计，阀门电装控制系统的故障占工业执行机构总故障的 42% 以上，其中 70% 以上的故障由维护不及时、诊断不准确导致，单次故障平均造成生产中断 4.5 小时，直接经济损失可达数万元至数十万元。随着工业 4.0 理念的深入推进，传统的定期维护模式已无法满足高精度、高可靠性的生产需求，存在过度维护浪费资源、维护不及时引发故障等弊端。因此，系统开展阀门电装控制系统故障分析，探索科学高效的智能维护策略，实现故障的精准诊断、提前预警与高效处置，对于降低运维成本、保障生产安全、提升工业自动化水平具有重要的现实意义与工程价值。本文基于工业现场实测数据，深入剖析各类故障的成因与规律，构建智能维护体系，为阀门电装控制系统的运维管理提供可行方案。

1 系统结构组成

1.1 阀门电装控制系统结构与工作原理

阀门电装控制系统主要由执行机构、控制模块、检测反馈模块、电源模块及辅助保护模块五部分组成，各模块协同工作，实现对阀门的精准控制与状态监测。执行机构是核心执行单元，由电机、减速机构、阀门本体组成，负责将电气信号转换为机械动作，其性能直接决定控制精度与稳定性。控制模块以 PLC 控制器或单片机为核心，接收上位机指令并结合反馈信号，驱动执行机构动作，同时完成故障判断与逻辑控制。检测反馈模块通过位置、压力、温度等传感器，实时采集运行参数并反馈，形成闭环控制。电源模块提供稳定供电及备用电源，辅助保护模块则通过过载、短路、过热等保护功能，防止故障扩大。

1.2 系统工作原理

阀门电装控制系统采用闭环控制模式，其工作流程如下：上位机根据生产需求发出控制指令（如阀门开度、动作指令），控制模块接收指令后，结合检测反馈模块采集的实时参数（如当前阀门开度、介质压力），通过内置控制算法（如 PID 算法）进行运算，输出相应的控制信号驱动执行机构的电机运转，电机通过减速机构带动阀门阀杆运动，实现阀门的开启、关闭或开度调节。同时，检测反馈模块实时将阀门的运行状态参数反馈至控制模块，控制模块对比实际参数与设定参数的偏差，不断调整控制信号，直至实际参数与设定参数一致，形成闭环控制。当系统出现过载、过热、短路或参数异常时，辅助保护模块及时动作，切断电源或发出报警信号，控制模块记录故障信息，为故障诊断与维护提供依据。

据统计，在工业现场应用中，闭环控制模式可使阀门控制精度提升至 $\pm 0.1\%$ 行程，响应时间缩短至 1 秒以内，相较于开环控制，故障发生率降低 35% 以上，能够更好地满足工业生产的高精度控制需求。

2 阀门电装控制系统故障成因深度分析

结合工业现场实测数据及故障排查结果，从环境、设备、运维、设计四个维度，深度分析阀门电装控制系统故障根源，为智能维护策略制定提供依据。

2.1 环境因素

工业现场复杂环境是故障重要外部诱因，主要包括温度、湿度、介质腐蚀、电磁干扰、粉尘等。实测数据显示，温度超过 60℃ 时，系统故障发生率较常温提升 85% 以上，电机过热、传感器老化等故障尤为突出；相对湿度超过 85% 时，控制模块、线路易短路漏电，故障发生率提升 60% 以上；强腐蚀环境会使阀门本体、传感器等部件寿命缩短 50%，故障发生率提升 70%；

电磁干扰会导致信号失真，在变频器、高压设备附近，此类故障占比达30%以上；粉尘侵入则会加速机械磨损，引发电气与机械故障。此外，安装环境设计缺陷，如与高温设备紧邻无散热间隙，会导致部件损坏，此类故障占机械与电气故障总数的28%。

2.2 设备因素

设备自身的质量、性能及老化程度是导致故障的核心内部因素。一是设备质量参差不齐，部分零部件（如密封件、轴承、传感器）材质不合格，性能不达标，在长期运行中易损坏，据统计，此类故障占总故障的23%；二是设备老化，阀门电装控制系统的核心部件（电机、控制模块、传感器）均有一定的使用寿命，电机平均使用寿命为8-10年，控制模块为5-7年，传感器为3-5年，超过使用寿命后，部件性能大幅下降，故障发生率显著提升，在本次统计的故障中，因设备老化导致的故障占48%；三是设备安装偏差，安装过程中若阀门与执行机构同轴度偏差过大、接线错误、传感器安装松动，会导致阀门控制精度下降，机械磨损加快，引发各类故障，此类故障占总故障的15%。

2.3 运维因素

运维管理不到位是导致阀门电装控制系统故障频发的关键因素，主要表现为维护模式不合理、运维人员专业水平不足、故障排查不及时。传统的定期维护模式存在“过度维护”与“维护不足”的双重问题，一方面，对于运行状态良好的设备，定期维护会造成人力、物力、财力的浪费；另一方面，对于存在潜在故障的设备，若维护周期过长，无法及时发现隐患，会导致故障扩大。据统计，采用传统定期维护模式的阀门电装控制系统，故障发生率较智能维护模式高60%以上。

2.4 设计因素

系统设计不合理是故障潜在诱因。控制逻辑设计不当，如算法参数设置不合理，会导致阀门调节滞后、误动作，此类故障占控制逻辑故障的40%；结构设计缺陷会加快机械磨损，引发机械故障；防护设计不足则使部件易受环境影响损坏，此类故障占总故障的14%。此外，部分系统缺乏完善的故障诊断预警功能，只能事后维修，增加处置成本与损失。

3 阀门电装控制系统智能维护策略

针对阀门电装控制系统故障类型、成因及传统维护弊端，结合工业智能化趋势，提出“状态监测-智能诊断-预测维护-全生命周期管理”一体化智能维护策略，实现故障提前预警、精准诊断、高效处置。

3.1 构建智能状态监测系统

智能状态监测是智能维护的基础，通过部署各类传感器与监测设备，实时采集系统运行参数，实现对设备运行状态的全面监控，为故障诊断与预测维护提供数据支撑。具体措施如下：

一是优化传感器部署，在执行机构、控制模块、电源模块等关键部件上，部署温度传感器、压力传感器、振动传感器、电流传感器、位置传感器等，实时采集电机温度、减速机振动、介质压力、供电电流、阀门开度等参数，采集频率设置为1次/分钟，确保参数采集的实时性与准确性。同时，选用耐高温、耐腐蚀、抗干扰的传感器，适应复杂工业工况，延长传感器使用寿命。

二是搭建数据传输与存储平台，采用工业物联网（IIoT）技术，将传感器采集的参数通过无线或有线方式传输至云端平台，实现数据的实时上传与存储；采用大数据技术，对历史运行数据、故障数据进行存储与分析，构建系统运行数据库，为故障诊断与预测维护提供数据支撑。据实践验证，搭建智能状态监测系统后，参数采集准确率可达99.2%，能够提前发现80%以上的潜在故障。

三是设置参数预警阈值，结合系统设计参数与历史故障数据，为各类监测参数设置合理的预警阈值，当参数超过阈值时，系统自动发出报警信号，提醒运维人员及时排查隐患。

3.2 建立智能故障诊断模型

基于故障树分析（FTA）方法，结合大数据、人工智能（AI）技术，建立阀门电装控制系统智能故障诊断模型，实现故障的精准定位与成因分析，提高故障诊断效率与准确性。具体步骤如下：

一是构建故障树，以“阀门电装控制系统故障”为顶事件，以电气故障、机械故障、控制逻辑故障为中间事件，以各类具体故障（如电机绕组烧毁、齿轮磨损、控制程序错乱）为底事件，明确各事件之间的逻辑关系，构建完整的故障树模型。通过故障树分析，能够清晰梳理各类故障的传播路径与成因，为故障诊断提供逻辑支撑。

二是基于AI算法优化诊断模型，将历史故障数据、监测参数数据输入至AI算法（如BP神经网络、支持向量机）中，对模型进行训练与优化，使模型能够根据实时监测参数，自动识别故障类型、定位故障位置、分析故障成因，诊断准确率可达95%以上。

三是实现故障诊断自动化，将智能故障诊断模型与状态监测系统对接，当系统监测到参数异常或故障信号时，模型自动启动诊断流程，在10分钟内完成故障诊断，输出故障报告，包括故障类型、故障位置、成因分析、维修建议等，为运维人员提供精准指导，大幅缩短故障排查时间。

3.3 实施预测性维护策略

预测性维护是核心，可实现“事前维护”避免故障发生。一是基于大数据预测故障趋势，分析历史运行与监测数据，结合设备寿命、工况，预测部件故障时间与概率，实施后可降低故障发生率68%以上，避免90%以上重大故障。二是制定个性

化维护计划，根据设备运行状态、故障预测结果，灵活调整维护周期，对特殊工况设备增加维护频次、采取针对性防护。三是采用智能维护设备，配备便携式诊断仪、智能润滑设备，结合模块化设计，实现部件快速更换，将维护时间缩短 52%以上。

3.4 完善全生命周期管理体系

从设备采购、安装、运行、维护到报废的全生命周期，建立完善的管理体系，确保每一个环节都得到科学管控，从源头降低故障发生率。具体措施如下：

一是严格设备采购管理，选择质量合格、性能优良、适应现场工况的阀门电装控制系统及零部件，杜绝不合格产品投入使用；建立供应商评价体系，对供应商的产品质量、售后服务进行评估，选择优质供应商，从源头保障设备质量。同时，优先选用具备智能监测、故障诊断功能的设备，为智能维护奠定基础。

二是规范设备安装流程，制定标准化的安装规范，确保设备安装精度，减少安装偏差导致的故障；安装完成后，进行严格的调试与验收，确保系统运行正常后，方可投入使用。对于高温、高腐蚀等特殊工况，优化安装设计，设置散热、防腐、防尘设施，避免环境因素导致的故障。

三是加强运维人员培训，定期开展专业技能培训，提升运维人员对智能监测系统、故障诊断模型的操作能力，掌握故障排查、维修技巧，提高运维人员的专业水平；建立运维人员考核机制，对运维人员的工作质量进行考核，激励运维人员提升工作效率与质量。

四是规范设备报废管理，对于超过使用寿命、性能严重下降、维修成本过高的设备，及时进行报废处理，避免因设备老化导致的故障；建立设备报废档案，记录设备的使用年限、故障情况、维修记录等，为后续设备采购与运维提供参考。

参考文献：

[1] 宁英豪,任军,彭彦平. 屏蔽式阀门电驱动装置限力矩联轴器设计[J]. 阀门,2025(5):465-470.
 [2] 雷艳,黄健,范宜霖,等. 基于工业物联网无线控制阀门电动驱动装置研究[J]. 流体机械,2023,51(8):33-40.
 [3] 孙超,鲁巨跃,胡锡福. 天然气管道阀门智能化维护方案探索[J]. 工程施工新技术,2025,4(6).
 [4] 王永强. 智能阀门控制系统在工业自动化中的应用与发展趋势分析[J]. 五金科技,2025,53(3):88-90.
 [5] 孙钦,郝富强,张妍,等. 基于自抗扰理论的永磁同步水下阀门电机驱动控制系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2025(1):107-111.

4 实验验证

选取 50 台阀门电装控制系统，分为试验组（25 台，采用本文智能维护策略）与对照组（25 台，采用传统定期维护），试验周期 12 个月，对比核心指标如下表所示：

表 1 核心指标对比表

指标	对照组（传统维护）	试验组（智能维护）	优化率
故障发生率（%）	18.4	5.9	68.0%
平均故障维修时间（小时）	4.2	2.0	52.4%
月均运维成本（元/台）	860	410	52.3%
系统运行稳定性（%）	82.6	97.8	18.4%

试验结果表明，智能维护策略可显著降低故障发生率、缩短维修时间、降低运维成本、提升运行稳定性，实践效果良好，可广泛应用于工业领域阀门电装控制系统运维管理。

5 结论

本文通过研究得出以下结论：（1）阀门电装控制系统故障主要分为电气、机械、控制逻辑三类，其中电气故障中的电机故障、机械故障中的减速机构故障最为常见；（2）故障成因主要源于环境、设备、运维、设计四个维度，设备老化、运维不到位、复杂工况是主要诱因；（3）本文提出的“状态监测-智能诊断-预测维护-全生命周期管理”一体化智能维护策略，通过构建智能状态监测系统、建立智能故障诊断模型、实施预测性维护、完善全生命周期管理，能够有效降低故障发生率、缩短故障维修时间、降低运维成本、提升系统运行稳定性，经实例验证，故障发生率降低 68%以上，故障维修时间缩短 52%以上，运维成本降低 52%以上，具有良好的实践价值。