

安全阀在线校验技术探讨

张志全

国营长虹机械厂 广西桂林 541002

摘要：安全阀在线校验技术是在不中断系统运行的前提下，对安全阀性能进行检测与评估的关键手段。本文系统探讨了在线校验的技术基础、核心原理与实施流程。分析了直接测量、间接推算及混合校验等主流方法的技术特点，阐述了高精度传感器、数据采集处理系统及优化算法等关键技术要素。研究旨在提升在线校验的准确性与可靠性，为工业压力系统安全运行提供有效保障，对推动该技术发展具有实际意义。

关键词：安全阀；在线校验；传感器技术；校验算法；数据采集

引言

工业压力系统运行中，安全阀对保障系统安全至关重要。传统离线校验需停机，影响生产且无法反映实际工况。在线校验技术可在系统运行中完成校验，但受压力波动、温度介质特性及安全性等因素制约，校验准确性与可靠性面临挑战。研究安全阀在线校验技术，优化校验方法与关键要素，对提升工业压力系统安全运行水平具有重要意义。

一、安全阀在线校验技术基础

（一）安全阀工作原理与分类

安全阀是工业压力系统的核心保护装置，通过自动启闭维持压力稳定。按结构划分，弹簧式安全阀利用弹簧压缩力控制阀瓣动作，结构简单且响应迅速，常见于蒸汽与气体系统。杠杆式安全阀通过杠杆机构放大作用力，适用于高压或大口径场景，但对安装精度要求较高。先导式安全阀采用主阀与导阀联动设计，导阀感知压力变化后驱动主阀启闭，多用于需要高精度调节的复杂工况。依据开启特性，安全阀分为全启式与微启式^[1]。全启式在达到整定压力时阀瓣完全开启，排放面积大，适合快速泄压需求；微启式开启高度较小，排放量有限，常用于对压力波动敏感的系统。关键参数直接影响安全阀性能。整定压力是阀门启动泄压的预设值，需根据系统设计精确设定。回座压力指阀门关闭时的系统压力，与整定压力的差值决定启闭特性。密封性通过泄漏率评估，要求关闭状态下介质泄漏量符合标准，确保系统长期可靠运行。

（二）在线校验的核心挑战

在线校验需在系统运行中完成，压力波动成为首要

干扰因素。设备启停或负荷变化引发的瞬态压力变化，可能导致校验数据偏离真实值，如何从动态信号中提取有效信息成为算法设计的难点。温度与介质特性对校验结果影响显著。高温环境下材料热膨胀可能改变阀瓣与阀座配合间隙，影响密封性能；介质黏度或腐蚀性变化会改变阀门动作阻力，导致开启压力与理论值偏差。校验设备需具备介质适应性，并通过温度补偿修正测量误差。校验安全性要求严格，误动作可能引发系统异常。测试期间需确保阀门可控，避免因校验激励导致非预期开启。这要求校验装置具备高精度压力控制能力，通过冗余设计防止信号干扰。

二、在线校验技术原理与方法

（一）直接测量法

直接测量法，通过实时获取安全阀动作参数并与整定值对比完成校验。动态压力信号采集是核心环节，需在阀门入口或系统关键节点布置高精度压力传感器，连续记录压力波动曲线。采集到的信号经滤波处理后，提取峰值压力与变化速率等特征量，作为校验分析的基础数据。阀瓣位移或力传感器技术，用于直接监测阀门动作状态。位移传感器通过非接触式或接触式方式测量阀瓣开启高度，适用于全启式与微启式安全阀的差异化校验需求。力传感器则安装在弹簧或杠杆机构上，实时感知介质压力对阀瓣的作用力变化。两种传感器数据结合，可精确判断阀门开启时刻与关闭条件，为整定压力验证提供直接依据。实时数据与整定值的对比算法，是直接测量法的关键。算法需考虑系统动态特性对测量结果的影响，通过滑动窗口技术截取稳定工况下的压力信号段，再与预设整定压力进行差值计算。当差值超过允许误差范围时，系统自动标记为校验异常，并触发进一步分析流程。

（二）间接推算法

间接推算法，通过系统运行参数关联分析间接评估安全阀性能。基于系统压力-流量模型的校验方法，利用流体动力学原理建立压力波动与介质流量的数学关系。当安全阀处于临界开启状态时，系统压力变化速率与流量突变存在特定对应关系，通过监测这一特征可推断阀门是否按设计要求动作。声发射或振动信号分析技术，通过捕捉阀门动作产生的机械波完成校验。安全阀开启时，阀瓣与阀座碰撞、介质高速喷射等过程会产生特定频率范围的声发射信号。布置在阀门附近的声学传感器可记录这些信号，经频谱分析后提取特征频率成分。若特征频率缺失或强度异常，则表明阀门可能存在密封失效或动作卡滞问题。热力学参数推导方法，利用温度与压力梯度关联性进行校验。在介质流动过程中，安全阀前后会形成温度差与压力差，二者变化趋势与阀门启闭状态密切相关^[2]。通过在阀门前后布置温度传感器，结合介质热物性参数，可建立温度-压力耦合模型。当模型输出与实测压力偏差超过阈值时，判定阀门性能存在异常。

（三）混合校验技术

混合校验技术，整合多源数据提升校验可靠性。多传感器数据融合，将压力、位移、声学信号进行时空对齐处理，通过加权平均或神经网络算法提取综合特征量。例如，压力突变与阀瓣位移同步变化且声学信号出现特征频率时，可确认阀门正常开启；若仅压力突变而无其他信号响应，则提示阀门可能存在动作阻滞。机器学习辅助校验，通过历史数据训练模型实现智能诊断。收集大量正常与故障工况下的传感器数据，构建包含压力波形、振动频谱、温度梯度等多维度特征的数据集。利用支持向量机或深度学习算法训练分类模型，对新采集的数据进行模式识别。模型可自动检测异常工况，并通过异常检测算法定位故障类型，为校验结果提供量化评估依据。

三、在线校验关键技术要素

（一）传感器技术

传感器技术是获取安全阀动作状态的基础。高精度压力传感器选型需综合考虑量程、精度与响应速度。量程需覆盖系统最大工作压力并保留安全余量，精度应满足整定压力误差要求，响应速度则需匹配压力波动频率。安装位置应避开湍流区域，通常选择在阀门入口直管段或系统压力稳定点，以减少流动干扰对测量结果的影响。非接触式位移测量技术通过激光或超声波实现阀瓣

开启高度监测。激光位移传感器利用三角测量原理，通过发射激光束并接收反射信号计算距离变化，具有测量精度高、响应快的优点，适用于微启式安全阀的微小位移检测。超声波位移传感器则通过发射超声波脉冲并测量回波时间差确定阀瓣位置，在高温或强腐蚀环境中表现稳定，但需注意介质对声波传播的影响。抗干扰设计是传感器可靠运行的关键。电磁兼容性需通过屏蔽层设计、滤波电路配置等措施抑制外部电磁干扰，确保传感器信号传输稳定性。环境适应性要求传感器具备耐高温、防腐蚀能力，例如采用不锈钢外壳与密封结构，适应蒸汽、化学介质等恶劣工况。此外，传感器防护等级需达到IP65以上，防止灰尘与水汽侵入导致性能下降。

（二）数据采集与处理系统

数据采集与处理系统需实现高速采样与实时传输。高速采样频率应不低于系统压力波动频率的10倍，以准确捕捉瞬态压力变化。实时传输通过工业以太网或无线通信技术实现，数据延迟需控制在毫秒级，确保校验系统能够及时响应压力异常。同步采集技术将压力、位移、温度等多参数时间戳对齐，为后续分析提供统一时间基准。噪声滤波与信号增强算法用于提升数据质量。小波变换算法可有效分离压力信号中的高频噪声与低频趋势，通过阈值处理保留有效特征。自适应滤波器根据信号特性动态调整滤波参数，在稳态与瞬态工况下均能保持良好性能。信号增强技术通过叠加多次采样数据或利用相关分析提取微弱信号，提升位移传感器在低信噪比环境下的测量可靠性。边缘计算与本地化决策能力减少对云端依赖。嵌入式处理器在数据采集终端完成初步分析，例如实时计算压力变化率、判断阀瓣位移是否达到开启阈值。本地化决策机制根据预设规则触发报警或调整采样策略，例如在检测到压力突升时自动提高采样频率，确保关键数据不丢失。

（三）校验算法优化

校验算法优化需解决动态阈值调整问题。传统固定阈值方法在稳态工况下有效，但在启停设备或负荷突变时易产生误判。动态阈值调整策略通过实时分析压力波动幅度与频率，自动调整开启压力判断阈值。例如，在压力波动较大的瞬态工况下，适当放宽阈值范围；在稳态运行时，则严格限定阈值以提高检测灵敏度。多工况适应性模型覆盖稳态与瞬态压力场景。稳态模型基于历史数据建立压力-流量-位移关联方程，通过最小二乘法拟合参数，适用于长期运行工况的校验需求。瞬态模型则引入时间序列分析，利用ARIMA或LSTM算法预测

压力变化趋势，提前判断安全阀是否会在未来时刻开启。两种模型通过加权融合实现优势互补，提升校验结果鲁棒性。误判风险控制机制通过双重验证降低错误概率。主验证模块基于压力与位移数据判断阀门状态，辅助验证模块则利用声学或振动信号进行交叉确认^[3]。当主辅模块结论不一致时，系统自动触发深度分析流程，例如调取更多历史数据或调整传感器采样参数，直至形成可靠判断。此外，误判记录功能会存储异常事件详情，为后续算法优化提供数据支持。

四、在线校验技术的实施流程

(一) 前期准备

系统状态评估是实施在线校验的基础。需对目标设备所处系统的压力稳定性进行全面分析，重点考察压力波动范围是否处于安全校验窗口内。若系统存在频繁压力突变或周期性振荡，需调整校验计划或增设稳压装置。介质兼容性评估同样关键，需确认传感器材料与工艺介质的化学稳定性，避免因腐蚀或反应导致测量失真。例如，高温蒸汽系统需选用耐温合金传感器，强腐蚀环境需采用陶瓷或聚四氟乙烯涂层探头。校验点选择需兼顾代表性覆盖与操作可行性。优先选取压力变化频繁、历史故障率高的区域作为主校验点，同时布置辅助监测点以捕捉局部异常。传感器布局应遵循流体力学原理，避免安装在涡流区或管道弯头处，确保测量值真实反映系统压力。对于空间受限设备，可采用微型化传感器或分布式布局方案，通过多节点数据融合提升监测精度。

(二) 校验过程设计

分阶段校验策略可有效控制风险。预校验阶段采用简化参数组，仅验证开启压力与回座压力核心指标，操作压力控制在额定值的80%以内。此阶段重点检测传感器信号稳定性与数据传输可靠性，若发现异常立即终止并排查原因。全参数验证阶段则展开完整校验，覆盖密封性、动作响应时间等全部指标，操作压力逐步升至额定值。两阶段间需进行系统状态复核，确认无参数漂移或设备劣化。实时监控体系需构建多层次预警机制。基础层设置压力阈值报警，当监测值接近整定压力时触发声光提示。进阶层引入趋势分析算法，通过压力变化速率预测潜在超压风险。顶层部署紧急停机控制，当校验过程出现不可控压力突升时，自动切断工艺介质并启动

泄压装置。所有控制指令需经双重逻辑验证，防止误动作导致系统瘫痪。

(三) 结果验证与修正

在线数据与离线基准的对比是验证核心。离线基准数据应源自近期同工况下的离线校验报告，或通过标准压力源模拟生成，确保数据源可靠性。对比时采用动态时间规整算法，消除在线监测与离线测试的时间尺度差异，提升分析精度。若偏差超过设备精度等级两倍，需排查传感器校准状态或系统泄漏点，定位问题根源^[4]。校验参数动态修正需建立反馈闭环，通过实时数据驱动模型优化。根据对比结果调整算法模型中的补偿系数，对温度漂移、介质密度变化等影响因素进行修正，增强适应性。对于频繁出现偏差的设备，可引入自适应学习机制，通过历史数据训练优化修正策略，提升自动化水平。修正后的参数需经过三次以上连续校验验证，确保调整效果稳定可靠，避免反复修正。所有修正记录应完整存档，作为设备健康档案的重要组成部分，支撑后续维护决策。

结束语

安全阀在线校验技术通过集成传感器监测、数据融合与智能算法，实现了在运安全阀的性能精准评估。该技术有效解决了传统离线校验的停机问题，提升了压力系统维护效率。随着传感器精度与算法可靠性的持续进步，在线校验技术的适应范围将进一步扩展。未来研究应聚焦于复杂工况下的模型优化与标准化建设，为工业安全提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 迟国安, 段秉红, 高守华, 等. 海上安全阀在线校验技术的应用探析[J]. 中国设备工程, 2021, (S1): 58-61.
- [2] 高琪, 王琪, 林宏伟, 等. 安全阀在线校验技术应用研究[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(04): 41-47.
- [3] 庄琦, 刘东, 王颖. 安全阀校验技术的应用及发展[J]. 石油化工设备, 2023, 52(04): 43-48.
- [4] 林燊. 安全阀在线校验误差影响因素分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(10): 99-101.