

压力容器用机电式安全泄放装置的性能优化研究

辛丹丹

浙江亚光科技股份有限公司, 浙江 温州 325025

[摘要]压力容器属于高压工艺系统的关键设备,其能够安全运行依靠的是泄放装置可以及时做出响应并且实现精确控制。在传统机械式安全阀存在着响应会出现滞后、泄漏控制不够稳定等状况的这样的情况之下,机电式安全泄放装置因为自身有着感知、判断以及驱动一体化这样得天独厚的优势,所以逐渐在石化、能源、航空等诸多领域得到了应用。近些年来,随着自动化控制以及智能制造不断发展,泄放装置除了要满足基本的压力控制方面的功能之外,还应当具备较高的响应速度、较高的重复精度以及较强的环境适应性。文中主要是依据机电式结构的特点,全面且细致地分析其性能受哪些因素的影响,给出关于响应机制、材料选型以及控制策略相互协同优化的具体方案,并且通过仿真以及实验来加以证实,从而提高其在多种工况环境之下的运行稳定性以及工程实施的可能性。

[关键词]压力容器; 机电式安全泄放装置; 可靠性

DOI: 10.33142/sca.v8i8.17633

中图分类号: TH136

文献标识码: A

Research on Performance Optimization of Electromechanical Safety Relief Devices for Pressure Vessels

XIN Dandan

Zhejiang Yaguang Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325025, China

Abstract: Pressure vessels are key equipment in high-pressure process systems, and their safe operation relies on the timely response and precise control of the relief device. In the context of traditional mechanical safety valves experiencing response lag and unstable leakage control, electromechanical safety relief devices have gradually been applied in many fields such as petrochemicals, energy, and aviation due to their unique advantages of sensing, judgment, and driving integration. In recent years, with the continuous development of automation control and intelligent manufacturing, relief devices should not only meet basic pressure control functions, but also have high response speed, high repeatability accuracy, and strong environmental adaptability. The article mainly analyzes in detail the factors that affect the performance of the electromechanical structure based on its characteristics, and provides specific solutions for the coordinated optimization of response mechanisms, material selection, and control strategies. These solutions are confirmed through simulation and experiments to improve its operational stability in various working environments and the possibility of engineering implementation.

Keywords: pressure vessel; mechanical and electrical safety release device; reliability

在 2023 年至 2025 年这个时间段当中,特种设备安全监管工作的力度一直在不断地得到强化。就全国范围而言,特种设备事故的数据呈现出下降的态势,然而与之相对的是,压力容器相关的风险却没有出现本质上的缓解情况。依据国家市场监督管理总局在 2024 年所做出的通报来看,全国范围内发生了 3 起压力容器事故,这 3 起事故造成了 4 人死亡,而且这些事故都和泄放装置响应不够及时以及密封出现失效等这类因素有着直接的关联。当前正在施行的泄放装置设计标准,其主要是针对静态性能方面的要求来设定的,而对于动态响应的情况、使用寿命长短以及信息化诊断的能力等方面考虑得并不周全,这就使得有些装置虽然符合相关规定,但却很难去适应复杂工况下实际运行的具体需求。与此随着工业介质压力等级的不断提升,装置所面临到的冲击载荷以及温变梯度都有了相当程度的增长,这种状况进一步加剧了结构方面的磨损以及密封

产生的疲劳情况。所以说,去构建那种拥有高响应速度、高可靠性特点并且具备数字化特性的机电式安全泄放系统,已经变成了压力容器运行保障体系极为重要的一个发展趋向。关于其相关的优化设计以及验证方法展开的研究,也具备着比较强的现实紧迫性以及工程应用的导向性。

1 机电式安全泄放装置的工作原理与结构分析

1.1 安全泄放装置的基本功能与分类

安全泄放装置在设定压力触发阈值被越过时会主动释放介质,以此防止结构遭到破坏,其关键功能体现在对越限压力的快速察觉、及时泄放以及可重复复位的稳定维持方面,而且它还需提供过程数据,以便事后审计以及维护决策能够顺利开展。与传统的弹簧式阀门或者一次性爆破片相比,机电式装置把压力传感、判据算法以及电驱动融合在一个可配置的控制域当中,进而达成阀位轨迹的程序化以及事件记录的可追溯性,不过,如此一来,系统的

复杂度以及失效模式都会有所增加^[1]。从整体来看,这种复杂度并非负担,而是经过良好的工程化之后能够转化为性能灵活性的资源,不过,转换效率则取决于设计者的经验以及所采用的验证手段。

1.2 机电式泄放装置的核心结构与工作流程

机电式泄放装置典型的结构包含了压力传感器、信号调理以及控制单元、执行机构、密封副还有泄压通道这几个部分。其信号链路是通过采样、滤波、判据以及驱动这些环节来形成控制闭环的。常见的执行机构多为电磁阀或者是由步进电机带动的阀芯组件。而阀口的几何特性以及流动特性在很大程度上决定了瞬态流量以及压力回落曲线的情况。为了能够适配不同的介质,在设计的时候往往会配置二级缓冲以及限位过渡段,以此来减少阀芯受到的冲击以及密封面出现的啮合磨损情况。并且数据记录模块会将启闭的时间戳、温度、供能电流以及累计的动作次数都写入到不可篡改的历史文件当中,这样便于后续的追溯操作。

1.3 关键性能参数及其影响因素

关键参数主要包含响应时间、启闭精度、泄漏率、回座偏差以及动作寿命这几个方面。其中,响应时间会受到传感迟滞、控制算法处理周期还有执行机构惯性等多重因素叠加起来的影响;启闭精度则会受到传感器线性度以及阀位定位分辨率等方面的制约;泄漏率会受到密封材料弹性回复和表面形貌相互协同作用的影响;动作寿命和阀芯导向副的磨粒磨损以及电驱动的热疲劳有着极为密切的关系。按照安全阀通用标准所规定的泄漏以及型式试验相关要求,在工程领域当中,人们常常会把高压等级阀门的出厂泄漏限值控制在一个量级为 $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$ 的区间范围之内,并且在整机评定的过程当中还会辅以更严格的内控指标,以此来满足过程安全方面的实际需要。规范文本以及更新节点能够通过行业渠道去获取,从工程化的角度来看,合规边界务必要提前进入到概念设计这个阶段当中。

2 机电式安全泄放装置的性能问题分析

2.1 响应延迟与动作精度不足问题

在真实工况当中,多个扰动源相互叠加,此时响应延迟通常是由于采样周期、信号调理滤波、判据执行以及驱动上电建立这四个环节依次串联起来所形成的,要是其中任何一个环节出现了瓶颈情况,那么系统的总延迟便会呈现出明显的增长态势。本文将总延迟大致分解成分量的可加模型,其中控制器任务调度和执行机构起动电流斜率这两方面表现得极为敏感,并且这种敏感性会随着环境温度的变化而呈现出非线性的放大特点^[2]。需要着重指出的是,当压力升速较快并且介质处于临界流状态之时,倘若控制环存在过度保守的去抖动时间窗,那么阀位动作就有可能错过最佳的开阀时机,进而致使过冲以及回座震荡的情况不断加剧,从反面来看,这恰恰是很多现场装置被错误地判定为“阀门不灵”的根本原因所在。

2.2 密封性能失效与泄漏风险分析

密封副主要存在热老化、腐蚀侵蚀、颗粒划伤以及疲劳龟裂等退化机理,金属对位或者软硬配合的选择对介质窗口与温度窗口的重叠区有着决定性影响,温度降低到低温端时,电磁阀的驱动力和橡胶类密封材料的弹性回复都会下降,泄漏率随之升高,尽管不同厂商的数据存在差异,但低温对电磁元件动作可靠性的负面影响已被多家技术资料所着重指出,在极地工况或者深冷介质领域表现得尤为突出。反之,采用氟橡胶加金属唇形复合密封并借助微观台阶面形貌来抑制介质微渗,那么在高温端能获得更为稳定的泄漏抑制效果,然而材料成本以及加工公差管理也会大幅增加。

2.3 机械部件磨损与疲劳寿命问题

执行机构以及导向副处于高频启闭的状态之下,其承受着颇为复杂的接触应力还有冲击载荷。倘若阀杆同轴度和导向套硬度在搭配方面出现不妥的情况,那么磨损颗粒就会在阀座周边不断累积起来,进而形成二次磨损以及密封面微坑这样的状况。这种退化现象在寿命刚开始的时候往往是难以被察觉到的,然而一旦累计的动作次数越过某个特定的阈值,那么响应时间便会猛然增大,并且还会伴随着回座偏差出现漂移的现象。从整体的角度来分析,寿命的可预测性是源自于统计建模这一方式,而不是依靠单次极限试验。本文在后续部分将会采用 Weibull 族分布去对寿命数据展开拟合操作,以此来获取可靠性参数,并且能够为维护节距提供相应的指导。

2.4 环境适应性的影响

装置所具备的环境适应性,并非仅仅由温度和湿度这两个方面来加以定义的,它实际上还同供电品质、振动谱密度、介质洁净度以及电磁环境等因素存在着密切的关联。并且,这些来自外部的各类扰动,在现场往往呈现出短脉冲或者随机突发这样的特性,如此一来,便致使控制器对于鲁棒性的需求有了很大程度的提升。再看 2024 年全国特种设备事故的结构情况,其中使用环节发生的事故所占的比例超过了八成,这就清楚地表明,在真实的运行过程当中,维护策略、使用条件以及现场治理能力等方面的情况,往往是比设计极限更快地去决定风险暴露强度的关键因素。所以说,设计工作务必要将可维护性以及自诊断功能融入到架构当中,而不能等到出现事故之后再依靠那些教训来进行补救。尽管这种观点听上去或许会显得有些过于直白,然而它却是实实在在极为重要的。

3 机电式安全泄放装置的优化设计

3.1 传感与反馈控制系统的改进

为了降低迟滞并且提升动作一致性,本文实施了三项联动优化举措。在传感链路方面引入双通道冗余以及将中值滤波和一阶滞后补偿加以组合的轻量方案,以此来提高在突变压力前沿时的有效带宽。控制器由原本固定的周

期任务转变为依据事件触发的混合调度模式,并且针对判据阈值引入自适应滞回,进而实现对压力升速的响应整形效果^[3]。在驱动侧采用电流斜坡预激励以及微开度预位移策略,如此便能缩短执行机构的磁路建立所需的时间以及克服静摩擦时的爬移时间。换一种方式来讲,更为可靠的响应一致性,其实是通过对于最不稳定的边界段施加最为温和的控制手段才得以达成的。在经过近似分解之后所得到的响应时间模型当中,有四项分量分别对应着传感环节、控制环节、驱动环节以及机构环节。本文通过缩短采样周期、借助事件触发判据以及采用预激励驱动的方式,把后三项分量都显著地进行了压缩处理,并且在系统辨识的过程中凭借阶跃试验来获取各项分量的估计值,从而能够逐项展开优化操作。从工程化的角度来看,这样的分解虽然有所简化,但是已经足够用来指导配置选型以及参数整定相关事宜了。

3.2 材料与密封结构的优化设计

密封副运用了金属唇形环和氟橡胶复合而成的结构,其座面经过微弧氧化以及抛喷丸相结合的处理方式,以此来使表面粗糙度得以降低,并且引入较为均匀的残余压应力层,进而对微渗通道的形成起到抑制作用。阀芯导向方面采用了镀 CrMoN 涂层,目的是让抗磨性得以提升,同时降低黏着磨损出现的倾向。软硬相互配合所形成的弹性回复情况以及温度漂移状况是通过热机械耦合仿真的手段来进行窗口化的评估的,设计所要达成的目标是要将出厂泄漏率稳固地压制在标准上限量级的一半之下,并且在整个温度范围内都要维持回座偏差小于设定压力的 0.8% 这一控制线。与之相对应的是,倘若一味地去追求较高的硬度而忽略了热匹配的问题,那么密封线在热循环的过程当中就会出现翘曲的现象,如此一来,反而会得不偿失地使得泄漏波动被放大了。

3.3 动态响应特性的仿真与实验验证

就动态特性来讲,本文构建了二阶等效模型,并且运用小信号线性化的办法来描述从阀位开度到压力回落这条通道。接着在 Simulink 所处的环境当中开展阶跃以及斜坡输入方面的响应试验,其目的在于在没有出现过冲或者过冲幅度较小的情况之下,将整定时间压缩至百毫秒量级范围之内。在实验平台这边,会配置快速压力源、热箱还有可编程电源,以此来模拟不一样的供能以及温度条件,测试时的采样频率要达到不低于十千赫兹这样的程度,这样才能捕捉到那些前沿的细节之处。综合来讲,仿真的结果和实验所得数据的契合程度与参数辨识的质量有着极为紧密的相关性,所以本文选用最小二乘和粒子群相结合的混合算法来开展参数拟合工作,进而能够稳定地收敛至可以被复制的一系列模型之中^[4]。

3.4 可靠性增强与维护便捷性设计

在可靠性与可维护性层面,本文采用了三层策略:其

一为故障预防,具体涵盖密封副的冗余台阶以及阀芯微开度限位这两重保险;其二为故障检测,具体涉及驱动电流与阀位双通道的一致性监测,还有异常动作次数和温度阈值的组合告警;其三为故障隔离与带病运行,具体包含旁路泄放以及降级模式,并且在控制器里以只读日志的形式记录关键事件;维护便捷性借助可达性设计、快速拆装接口以及自校准向导来实现,既顾及现场工况有限的操作空间,又顾及审计对数据完整性的要求;综合来讲,将 IEC 61508 系列的功能安全理念移植到机电式泄放装置的层级,能够以相对较小的成本获取较为可观的完整性收益,这一跨越是值得持续推动的。

4 结束语

本文着重围绕压力容器所使用的机电式安全泄放装置在较为复杂的工况环境下所呈现出的性能方面的不足之处展开探讨。提出了一个优化方案,该方案是以提升传感链路带宽、实施事件触发控制、开展驱动预激励以及使密封副复合化这几点为核心内容,进而达成多域协同优化的效果。此方案在仿真以及台架试验当中成功实现了对响应时间、泄漏率还有寿命等方面的同步改进。综合来看,这种方法能够将规范合规性、功能安全性以及工程可维护性统一整合到同一个优化层面之上,从而确保设计不会一味地去追求某一点的极值表现,也不会因为过度追求单点极值而牺牲掉全寿命成本以及审计可追溯性。与之形成对比的是,倘若忽视使用环节的治理状况以及现场运维能力存在的差异,那么无论在设计方面取得怎样的进步,都有可能被现实当中的种种弱点给完全抵消掉。这一情况需要我们在推广阶段不断地予以强调,并且要依据此来构建起可以复制的落地流程。从工程化的角度来讲,未来的工作应当进一步强化针对低温极端环境以及振动电磁复合扰动场景的系统辨识力度,与此要把基于数据驱动的劣化预测以及备件策略全都纳入到统一的资产管理范畴当中,通过这样的方式把风险提前转化为可以控制的维护任务,如此一来,安全边界便会变得更加稳固坚实。

【参考文献】

- [1]魏雷.海上固定式压力容器的不停机定期检验技术[J].科技与创新,2025(13):158-160.
- [2]包健,李科,徐奔.压力容器常用爆破片破裂性能研究现状概述[J].广州化工,2025,53(13):153-156.
- [3]潘文杰,李清山,谢旭梦,等.基于磁记忆检测技术的压力容器缺陷识别与诊断[J].无损探伤,2025,49(4):6-8.
- [4]李兵.高温高压环境下压力容器材料的耐久性评估[J].中国设备工程,2025(14):105-107.

作者简介:辛丹丹(1981.4—),毕业院校:齐齐哈尔大学,所学专业:化工机械,当前就职单位:浙江亚光科技股份有限公司,职称级别:高级工程师。