

极端工况下球阀控制单元抗振防护结构设计研究

杨 遥

华都阀门集团有限公司 浙江 温州 325025

【摘要】：球阀控制单元在极端振动工况下易发生功能失效，直接影响流体输送系统的安全性与可靠性。本文针对强冲击与宽频随机振动环境中控制单元的抗振防护问题开展研究，在分析典型失效模式与振动响应特性的基础上，探讨了隔振系统设计的基本原理与参数匹配方法，研究了关键部件的局部加固与阻尼处理技术，提出了基于多级防护的结构设计框架。文章还讨论了防护结构的可靠性验证途径与性能评价指标。研究表明，通过合理设计隔振元件、优化结构刚度和引入阻尼耗能机制，能够有效抑制振动能量传递，确保控制单元在极端工况下的稳定运行，为高可靠性阀门执行系统的自主开发提供了理论支撑。

【关键词】：球阀；控制单元；抗振防护；隔振设计；结构加固

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.073

引言

在现代流体输送与过程控制领域中，球阀作为一种重要的截断与控制设备，广泛应用于石油、化工、能源等工业部门。随着工程装备向高参数化方向发展，球阀的服役环境日益苛刻，球阀控制单元作为执行机构的指令核心，包含电磁元件、控制电路及精密传动部件，其对振动环境的敏感性远高于阀体本体，一旦发生故障将直接导致阀门误动作或拒动作，进而引发系统级安全事故。

长期以来针对阀门系统的研究多集中于密封性能和流通能力的提升，对于控制单元在振动环境下的生存能力关注相对不足。传统的防护措施往往采取增加壁厚、加大连接螺栓规格等粗放式加强手段，这种思路不仅增加了结构重量和成本，而且由于缺乏对振动传递规律的深入理解，防护效果往往难以达到预期。更为关键的是极端振动工况往往具有宽频带、高能量、非平稳的特征，单一形式的防护措施难以覆盖全频段的激励，这就要求设计者必须从系统层面统筹考虑隔振、阻尼耗散等多种机制的协同作用。本文从极端振动环境的特征分析入手，研究控制单元的振动响应机理，探讨隔振系统的参数设计方法，分析关键部件的局部加固策略，形成一套完整的抗振防护结构设计理论框架。

1 极端振动环境特征与控制单元失效机理

1.1 极端振动环境的主要特征

极端工况下的振动来源复杂多样，主要包括管道系统的流体脉动激励、相邻设备的运行扰动以及偶然性的机械冲击。这些振动的频率范围通常较为宽泛，从数赫兹的低频扰动到数千赫兹的高频成分均可能存在。低频振动往往能量较大容易激发控制单元的整体刚体模态，高频振动虽然位移幅值较小但加速度水平可能很高，对内部精密元件构成威胁。冲击载荷则具有瞬态高能的特点，能够在极短时间内使结构产生剧烈响应。

1.2 控制单元的典型失效模式

控制单元在振动环境下的失效模式主要表现为结构性失

效和功能性失效两大类。结构性失效包括安装支架疲劳断裂、焊点脱落、接线端子松动等，这类失效通常与结构的应力集中和疲劳强度有关。功能性失效则更为隐蔽，表现为振动导致传感器输出异常、电磁阀误动作、控制信号受干扰等现象，这类失效往往不伴随可见的结构损伤但造成的后果同样严重。从物理机理来看振动对控制单元的影响主要通过两种途径：一是通过基础激励使整体结构产生加速度响应，当加速度超过一定阈值时活动部件发生相对位移；二是通过结构传递的振动能量使内部元件产生谐振，当谐振频率与激励频率吻合时响应幅值被急剧放大。

1.3 控制单元内部敏感部件的振动响应问题

深入分析控制单元的结构特点可以发现其内部包含多种对振动敏感的子部件，印刷电路板作为典型的板状结构，其固有频率往往落在常见激励频段内容易发生弯曲共振，导致焊点承受交变应力而疲劳开裂。电磁继电器的触点系统在振动作用下可能发生瞬间断开或误闭合，尤其是在激励频率与触点系统固有频率接近时这种误动作的概率显著增加。接线端子和连接器在持续振动下可能出现微动磨损，导致接触电阻增大或信号中断。

2 抗振防护设计的理论基础与总体思路

从理论上实现振动防护主要有三条途径：一是隔振即在振源与受保护对象之间插入隔振元件减小振动能量的传递；二是吸振即附加动力吸振器将振动能量转移到辅助系统上耗散掉；三是阻尼即通过阻尼材料将振动能量转化为热能消耗掉。对于球阀控制单元而言通常需要综合运用多种机制才能达到理想的防护效果。

根据隔振理论，当激励频率与系统固有频率之比大于根号2时隔振系统才开始发挥作用。这意味着要获得良好隔振效果要么降低系统固有频率要么提高激励频率，在工程实践中激励频率通常不可控，因此降低固有频率成为主要设计方向。降低固有频率可以通过减小支承刚度和增加质量两种方式实现，但

减小刚度过大会导致系统静变形过大，增加质量又会带来重量和成本问题，这需要在设计中权衡。

阻尼处理的机理在于消耗振动能量抑制共振峰的幅值，对于控制单元而言阻尼处理特别适用于解决共振问题，当激励频率无法避开结构固有频率时通过引入阻尼可以显著降低共振放大因子。阻尼材料通常具有粘弹性特性，其耗能能力随温度和频率变化，这需要在设计时考虑实际工作环境的温度范围和主要激励频段。基于上述认识，控制单元抗振防护的总体设计思路可以概括为“源头隔离-路径耗散-局部加固”的多级防护策略，在振动传入路径上设置隔振系统阻挡大部分能量，对于剩余能量通过阻尼进行耗散，对于关键部件采取局部加固提高其自身抗振能力。

3 隔振系统设计及参数优化方法

3.1 常用隔振元件的类型与特性

隔振系统的设计是抗振防护的核心环节，控制单元通常通过安装支架与阀体或管道连接，这些连接路径成为振动传入的主要通道。隔振设计的目标是在这些通道上插入合适的隔振元件，改变振动传递的特性。常用的隔振元件包括橡胶隔振器、金属弹簧隔振器和钢丝绳隔振器等，不同类型的隔振器具有不同的刚度特性和阻尼特性，适用于不同的工况要求。

橡胶隔振器因其结构紧凑、成本较低且具有一定阻尼而被广泛采用，橡胶材料同时提供弹性和阻尼，能够在较宽频带内发挥隔振作用。但橡胶的力学性能受温度影响较大，在极端温度环境下可能硬化或软化，导致隔振效果下降。金属弹簧隔振器刚度线性度好、耐高低温性能优异，但其自身阻尼很小，往往需要并联阻尼器使用。钢丝绳隔振器利用钢丝之间的摩擦提供刚度和阻尼，具有非线性刚度和良好的抗冲击性能，特别适用于同时存在稳态振动和偶然冲击的场合。

3.2 隔振系统的核心参数设计

隔振系统的参数设计需要确定隔振器的刚度、阻尼以及安装布局。在确定总刚度时，通常以满足静承载要求和实现目标固有频率为基本原则。系统固有频率应根据主要激励频段合理选择，一般应低于最低激励频率的1/根号2倍，以确保在全频段内都处于隔振区。阻尼参数的选择则需要在隔振效果和共振抑制之间权衡：阻尼过大会削弱高频隔振效果，阻尼过小则会使共振峰值过高。安装布局方面，应尽量使隔振器的支承点位于控制单元质心所在平面，避免耦合振动模态的产生。当无法实现对称布局时，需要考虑解耦设计，减小各方向振动之间的相互影响。

3.3 冲击载荷下的隔振设计要求

对于存在冲击载荷的工况，隔振系统的设计还需要考虑冲击隔离的要求，与稳态隔振不同，冲击隔离关注的是在瞬态激励下系统响应的峰值。理论上对于单自由度系统，当冲击脉冲

持续时间远小于系统固有周期时，冲击隔离主要依靠系统的惯性来实现。这意味着降低系统固有频率同样有利于冲击隔离，但需要防止系统在冲击后产生过大的残余振动。非线性隔振器在这一方面具有优势，其在微振动时刚度较小以保证隔振效果，在大位移时刚度逐渐增大以限制行程，这种变刚度特性能够兼顾稳态隔振和冲击隔离的需求。

4 关键部件局部加固与阻尼处理技术

隔振系统虽然能够阻挡大部分振动能量，但对于某些特定频率的振动或高频成分，仍可能有部分能量传递到控制单元内部。此时需要针对内部的敏感部件采取局部加固和阻尼处理措施，提高其自身的抗振能力。

印刷电路板的抗振加固是其中的重点内容，电路板通过插针或连接器固定在控制单元壳体上，形成类似悬臂板或周边支承板的结构形式。当振动激励频率接近电路板的固有频率时，板上各点的振幅被放大，导致元件焊点承受较大的交变应力。提高电路板抗振能力的主要途径包括：增加支承点以缩短跨距、采用加强筋或金属框架提高整体刚度、在元件与板之间填充灌封材料增加阻尼。

电磁元件如继电器、接触器等对振动较为敏感，其内部的可动部分在振动作用下可能发生误动作。针对这类元件的防护措施主要包括：选择专门设计的抗振型元件、改变安装方向使可动部分的敏感轴向与主振动方向垂直、在安装界面增加减振垫圈、对衔铁等可动部件施加适当的预压力等。需要注意的是，预压力的施加必须在保证元件正常工作的前提下进行，避免影响其电气性能。

接线端子和连接器的抗振问题同样不容忽视，持续的微振动会使端子与导线之间产生相对微动，导致接触表面氧化磨损，最终引起接触电阻升高或信号中断。防护措施包括：采用带有锁紧机构的连接器、在接线后灌封固定、增加应力释放夹以减小振动向端子根部的传递、选用多股软导线替代单股硬导线等。对于内部走线，应采用扎带或线夹固定在结构件上，避免导线在振动中自由摆动。

阻尼处理技术在局部加固中发挥着独特作用，在电路板表面粘贴粘弹性阻尼层，或者采用约束阻尼层结构，能够在板件弯曲变形时产生剪切应变耗散能量，显著降低共振峰值。在壳体结构内壁喷涂阻尼涂料，能够抑制壳体的振动并向外部辐射噪声。在安装界面加入薄层阻尼材料，能够增加连接阻尼，减小振动传递。阻尼处理的效果与阻尼材料的损耗因子、使用温度范围以及敷设位置密切相关，需要根据实际工况进行优化设计。

5 防护结构的可靠性验证与评价体系

5.1 多维度的可靠性验证方法

抗振防护设计的有效性最终需要通过验证来确认，由于极

端工况的复杂性和不可完全模拟性,验证工作通常采用理论分析、仿真计算和试验测试相结合的方法进行。

理论分析阶段主要运用动力学理论建立防护系统的力学模型,通过解析计算或数值仿真预测系统的响应特性。对于隔振系统,可以计算其固有频率、模态振型以及振动传递率曲线,评估其在主要激励频段的隔振效果。对于局部加固结构,可以通过有限元分析确定其应力分布和危险部位,指导结构改进。仿真分析的准确性依赖于建模精度和边界条件的合理设定,通常需要经过试验修正才能用于定量评价。

振动试验是验证防护效果最直接的手段,按照相关标准规定,控制单元需要经过扫频振动试验、随机振动试验和冲击试验的考核。试验中需要监测关键点的响应加速度、关键部件的应变以及控制单元的功能状态,判断是否出现性能下降或功能失效。对于隔振系统,可以通过对比安装隔振器前后控制单元本体的响应,计算隔振效率。对于局部加固措施,可以通过应变测试评估应力水平的降低程度。试验条件应尽可能模拟实际工况的振动量级和频谱特征,同时考虑温度等环境因素的耦合影响。

5.2 抗振防护性能的核心评价指标

抗振防护性能的评价指标应当全面反映防护效果,振动传递率是最基本的评价指标,定义为安装隔振器后设备响应与基础激励之比,该值越小表示隔振效果越好。动刚度指标反映结

构抵抗变形的能力,在特定频率下动刚度越高表示结构越稳定。疲劳寿命指标用于评估结构在长期振动作用下的耐久性,通常通过累积损伤理论结合试验数据进行预测。功能完好性指标则是最终的判断依据,要求控制单元在经历规定的振动环境后仍能保持所有功能正常。多指标综合评价能够避免单一指标的片面性,更准确地反映防护设计的优劣。

6 结语

本文围绕极端工况下球阀控制单元的抗振防护结构设计问题进行了较为系统的理论探讨。从振动环境特征与控制单元失效机理的关联分析入手,明确了振动防护的物理基础与基本途径。在隔振系统设计层面阐述了隔振元件选型、参数确定以及布局优化的理论方法,在局部加固层面探讨了电路板、电磁元件及连接器等敏感部件的抗振增强措施和阻尼处理技术,最后从验证方法和评价体系的角度论述了防护结构可靠性的确认途径。研究所形成的多级防护设计思想将隔振、阻尼与局部加固有机结合,为提升球阀控制单元在极端振动环境下的生存能力提供了理论指导。

随着工业装备向更加极端工况的延伸对阀门控制系统的环境适应性要求将持续提高。未来研究可以进一步探索智能减振技术在控制单元中的应用,通过主动或半主动控制实时调节系统参数以适应变化的振动环境,也可以研究新型阻尼材料和复合结构的应用,在更宽温度范围内保持稳定的耗能能力。

参考文献:

- [1] 钟若溪,王锐,杨亨,等.基于小波包分解的阀门振动状态监测与泄漏故障诊断[J].阀门,2026,(01):107-114.
- [2] 周芸萌.基于磁流变阻尼器的转子及管道振动控制实验研究[D].北京化工大学,2017.
- [3] 陈国平,张旭,史尧臣,等.橡胶隔振器隔振性能的仿真预测研究[J].机械强度,2025,47(10):80-85.
- [4] 王志超.振动环境下考虑器件特征误差源的输出姿态分析与补偿[D].天津工业大学,2024.