

化学离心泵柔性设计中振动控制及管道应力减缓技术研究

魏国超

惠生工程(中国)有限公司, 中国(上海)自由贸易试验区, 200120;

摘要: 化学离心泵与配套管道构成的系统在温度波动与流体扰动共同作用下易产生耦合振动与附加应力, 若柔度配置与路径引导不当, 泵口载荷与节点名义应力将逼近限制区间, 诱发密封失稳与疲劳损伤。面向多源激励与多约束边界的工程现实, 本文提出以源控与路控并举的思路, 从激励抑制、路径重构、阻尼注入与观测校准四个维度建立柔性设计方法, 形成从规划到运维的闭环。研究给出振动与应力的协同指标、支承与补偿的协调布置、以及变更控制与复盘机制, 强调分层建模与参数可追溯, 使方案在安全、效率与维护成本之间取得稳定平衡。

关键词: 化学离心泵; 振动控制; 管道应力; 柔性设计; 补偿布置

DOI: 10.69979/3060-8767.25.06.076

引言

化工装置往往在启停频繁与热平台切换的状态下运行, 泵体与管道作为连续体在非均匀温场与支承摩擦约束中传递变形与内力。若仅从单一构件视角配置补偿与支承, 容易产生局部刚性过强或柔度不足的矛盾, 导致振动能量无序聚集与应力峰值迁移。工程需要一种系统化框架, 将振动源头的幅值控制与路径层面的柔度分配统一起来, 并将可观测的指标纳入约束, 使设计、施工与运维各阶段信息贯通。本文围绕机理表征、目标分解、策略组合与治理机制展开论述, 在不依赖具体案例与数据的前提下, 给出可复用的原则与步骤, 力求兼顾可实施性与长期稳定性。研究对象定位于常见工作温度与压力范围内的化学介质输送系统, 重点讨论振动控制与应力减缓的通用方法, 不涉及特定装置与材料参数。方法遵循建模先行与观测校准并重的原则, 将通道图与统一编码贯穿全流程, 使不同阶段的假设与决策具备可追溯与可复现的特性。

1 理论框架与耦合机理

1.1 振动源与柔度耦合路径

离心泵的转子不平衡、液力脉动与基础刚度不匹配共同构成主要激励, 激励能量经壳体传入接口, 再通过弯头与直段传播到支承与构件转角。当局部刚度过高而下游柔度不足时, 位移受阻会转化为较大的反力, 泵口与近端法兰成为承载峰值位置, 振动与应力在空间上形成同位区^[1]。若支承摩擦达到启滑门槛后发生状态切换, 系统会在不同路径间跳转, 导致观测信号出现滞后与回线。柔性设计以引导为主, 先识别低阻路径, 再配置必

要的限位与导向, 让位移沿可控通道释放并在非关键区消散。对于温差造成的伸长, 应在轴向建立可连续的释放序列, 避免把全部伸长压缩到单一弯头。对于流致脉动引起的局部高频成分, 可在边缘节点引入阻尼与质量分流, 使能量在进入设备之前被耗散。在拓扑层面, 折线与回转等自然补偿提供基础柔度, 构件补偿负责集中位移, 二者需按区域分工并以支承自由度加以配合。当结构尺度接近特征波长时, 需要避开几何与边界形成的共振窗口, 通过改变段长与转角微调固有频率, 从而把工作频带移离高响应区。对于低频成分, 可通过基础与管架的刚度配比塑形, 把系统固有频率布置在远离工作频带的区间。对于中高频成分, 可在节点间引入耗能衬垫与黏滞联结, 提升等效阻尼并削减峰值幅值。在支承网络中应避免连续短节与过密布置, 因为短节在热位移受限时会形成弯矩放大, 振动能量也更难扩散。对安装偏差与几何公差需建立容差吸收机制, 在邻近区设置细小自由度, 使装配误差不至于直接推高设备载荷。当泵组与管道存在相位耦合时, 可通过微调段长与支承间距改变相位关系, 从根本上削弱叠加效应。当难以完全避开共振时, 可在非关键区布置局部耗能单元, 使响应峰值得到压低。相关措施需纳入统一通道图并以同一口径记录, 便于协同。

1.2 管道应力路径与边界表征

管道的名义应力来源于内压、重力与位移不协调, 内压控制环向与纵向, 重力决定挠度基线, 位移不协调由温差与约束共同触发。在边界层面, 设备接口呈现有限刚度, 支承具有摩擦与间隙特性, 补偿构件体现定向柔度与有限位移。要获得可解释的分配规律, 需要把直

管、弯头与补偿元件抽象为柔度网络，并以串并联方式构造通道图，随后在关键节点设置观测点与校准参数^[2]。对导向与限位应明确自由度分配，一侧导向另一侧限位，防止同一自由度被重复约束。对跨越变形缝与设备基础缝的管段，应预留位移裕度与防撞距离，并通过可调支承在调试阶段细化分配。当温度梯度显著时，可将长段划分若干区，并在区间交界处布置折线或构件补偿，以削弱伸长差造成的二次弯曲。在评价口径上，需要同时跟踪位移与反力两类目标，前者用于保护阀门与计量元件的密封与对中，后者用于保护设备接口与薄弱截面，二者以权重方式在方案比选中统筹权衡。为了使网络表征具有工程可操作性，可为每个节点分配统一编码与位置基准，所有参数与调节记录均绑定到该编码，实现跨阶段的可追溯。柔度网络需要考虑非线性因素，例如摩擦启滑与间隙闭合，在模型中以状态机方式表达，并在观测中寻找门槛变化的证据。当状态频繁切换时，应通过冗余通道与阻尼提升稳定性。支承与补偿两侧的自由度应形成互补关系，一侧负责引导，另一侧承担限位，避免双向同时限制造成卡死。对薄壁与小半径弯头应提高权重并限制负荷，必要时以旁路分流。在设计评审中，可采用位移与反力的双表展示，把关键节点的目标区间与当前预测并列呈现，便于发现失衡与过度集中的倾向。当空间紧张无法完全满足通道理想形态时，应记录让步项并配套监测点，以动态验证风险是否已被控制在可接受范围。

2 控制目标与评估准则

2.1 振动控制策略与协同指标

振动控制以源控、路控与端控三线并举。源控针对不平衡与脉动幅值，依靠转动部件质量分配与流动平稳化降低激励强度。路控通过柔度分配与阻尼注入改变能量传播条件，在非关键区让位移充分释放并被耗散^[3]。端控在设备接口与法兰节点设置保护窗口，将允许载荷与允许位移转化为硬阈值与软约束两层约定，避免跨越安全门槛。指标体系需要兼顾可观测与可执行两项要求，建议以位移幅值、速度均方根、支承反力与节点名义应力四类量构成协同指标，并辅以频带占比与峰值比值描述谱特征。在目标分解时，可先设定泵口载荷的上限，再以最小化传递函数峰值为优化方向，同时保持关键截面的名义应力处于合理区间。为避免局部过拟合，应设置路径冗余与变更窗口，使方案在参数扰动下仍保持性能稳定。为了使指标可直观解释，可将四类量映射到可

视化看板，分别呈现时域幅值、频域峰值、路径分配与安全裕度，运维人员据此进行优先级决策。源控与路控之间存在边际替代关系，源控到达一定程度后继续压降的成本会迅速上升，此时应转向路控与端控的组合，以更低成本获得整体收益。对多台泵并联的情形，指标应包含跨支路的一致性度量，若相位或幅值偏离过大，说明路径分配或安装状态存在差异，需要统一调节。在调试阶段可采用小步扫频记录响应与状态切换点，确认共振窗口并据此安排调节顺序。在端控层面，可为关键节点设置保护窗口，将允许区与警戒区通过颜色与数值同时呈现，减少误解。当出现多指标冲突时，以泵口载荷为硬边界，以节点名义应力与速度均方根为软边界，按优先级进行折中。

2.2 应力减缓与柔性分配方法

应力减缓的主线是路径重构与柔度分层。路径重构通过改变折线边数与段长让热位移沿预设通道释放，并在非关键区完成转向与消能。柔度分层将自然补偿与构件补偿按区域分工，上游以自然补偿为主保护设备，下游在空间允许处设置构件补偿并配合导向与限位^[4]。为了获得平衡解，可对关键参数实施灵敏度扫描，识别对泵口载荷与节点应力影响更大的变量，例如支承间距、限位间隙与补偿初始长度，并据此确定优先调节顺序。当温差较大时，可在冷态实施预拉或预压，使运行位移分配更加均匀。在细节层面，应控制法兰对中与垫片压紧量的协同窗口，避免位移释放过程中出现密封失稳与局部夹持。在长周期服役中，还需考虑支承磨损与间隙增长的趋势，将裕度设计为可恢复的区间，通过定期复位保持路径一致性。为了便于落地，可将柔度分配转化为若干标准片段，每个片段包含折线形态、支承组合与限位参数，并给出适用边界与禁用情形。在长直段中设置构件补偿时，应配合导向约束以抑制横向漂移，同时保持足够的轴向释放距离，避免在温差突变时发生冲撞。在高温与高腐蚀环境中应优先采用自然补偿并减少复杂活动件，以降低维护负担，在可达性良好的区域再引入构件补偿以提升可控性。为控制法兰密封的风险，可在邻近区设置位移标尺与压紧标识，检修后对照基线复原状态，防止长期漂移累积到危险区间。对需要穿越建筑变形缝的管段，可设置分级限位与可复位挡块，既保证极端情形下的行程，又便于检修后恢复基线。

3 实施路径与全寿命治理

3.1 设计施工阶段的路径优化

设计阶段应以统一编码与通道图为基础,完成设备、支承与补偿构件的映射关系,并在模型中设置可调参数以便调试与校准。图纸需明确安装长度、姿态与限位间隙,避免现场临时变更引入意外刚度。施工阶段通过样段试装与基准点复测控制焊口收缩与标高偏差,支承安装遵循先主后次与先定位后导向的顺序,防止在定位完成前锁死自由度。补偿构件按标尺控制初始位移与姿态,确保投运后具有对称释放能力。投运前开展冷态与热态两轮观测,在关键点记录温度、位移与反力变化,形成基线与回归数据,用于校正模型参数并固化调节值。对跨越通道与检修通道的布置,应预留检修窗口与旁路,以便在不停机条件下实施更换与复验。为提升可验证性,可在样段设置位移标尺与可拆换参考块,记录冷态与热态的差值,形成长期对照。对焊接收缩的评估可采用对称布置与反向序列减少残余变形,并通过测点闭合差判断是否需要返修。在设备检修窗口有限的场地,优先选择无需整体解体的更换路径,将构件拆装点前移至可达位置,减少停机影响。对跨专业接口需设置联合评审,围绕编号一致性、参数来源与测试用例进行逐项核对,确保接口与责任边界清晰。对容易引起刚度突变的构造如短支座与厚板过渡,应在图纸层面给出缓和结构,避免由细节设计造成路径中断。样段试装应引入位移与反力临测,利用简化加载模拟热位移与自重组合,验证导向与限位是否按设想分工工作。在现场变更难以避免时,应以最小影响面原则实施,先通过参数调节尝试恢复,再考虑拓扑微调,所有变更均需形成记录并回填模型。施工完成后的整体验收应包含姿态复核、间隙测量与阻尼构件状态确认,并以照片与测点表归档,便于后续追溯。

3.2 运行监测与迭代优化机制

运行阶段的核心是观测、评估与修正的闭环。观测以位移、速度与支承反力为主,并结合温度与启停节律构建时序画像。评估以协同指标为载体,通过峰值比值与频带占比识别路径变化与共振接近,再与历史基线对比确定风险等级。修正依据灵敏度排序选择最有效的调节点,优先调整导向位置与限位间隙,再校正补偿初始长度与段长比例,必要时进行拓扑微调以移开共振窗口。为降低人为差异,应将调节动作固化为操作卡与验收清单,并在每次变更后完成复测与复盘。通过积累跨装置

的参数与效果,可形成标准片段与经验曲线,提升后续项目的设计效率与稳定性。当运行策略发生改变,例如启停节律与温度平台切换,应按包络原则重新核验关键指标,并对观测阈值与响应流程同步更新。观测系统应建立统一编码与时钟基准,保证跨设备数据的可比性与对齐能力,必要时配置边缘缓存以应对网络波动。在数据分析环节,可采用滑动窗口与异常分数结合的方法,识别趋势漂移与突发异常,并将结果映射为直观的等级告警。为避免过度反应,可设置验证步骤与观察期,对短时扰动给予缓冲,对持续偏移执行分层处置,以降低不必要的调整频率。经验库应以片段与参数对的形式沉淀,将操作动作与效果区间绑定,形成可搜索的知识卡,支持快速复用与推广。对低频大幅波动与高频小幅噪声应分开处理,前者以路径调整为主,后者以阻尼注入与质量分流为主。在长期统计中可引入季节因子与负荷因子,避免把环境变化误判为结构退化。当策略或设备升级引入新参数时,应先在沙箱区运行并对照基线完成比对,再逐步推广到全域,减少一次性大改带来的不确定。

4 结语

柔性设计中的振动控制与应力减缓并非两条独立路径,而是同一目标的不同侧面。以源控与路控协同的策略,可以让能量在进入设备与薄弱节点之前被有效分流与耗散。以自然补偿与构件补偿分层的布局,可以在空间受限与维护便利之间取得稳态平衡。借助统一模型与观测校准,将设计、施工与运行纳入同一口径的闭环管理,系统将在全寿命周期内保持可验证与可迭代的状态,为装置的安全与连续运行提供支撑。

参考文献

- [1] 耿云飞,姜黎明,丁春春. 浅谈离心泵管道的柔性设计和应力分析[J]. 中国石油和化工, 2016, (S1): 78.
- [2] 李建宏,温鸿浦,王志远. 柔性物缠绕对双吸式离心泵压力脉动特性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021, (11): 136-140+148.
- [3] 侯俊霞,戴子威,温财长,等. 离心泵入口管道应力分析及优化设计[J]. 技术与市场, 2024, 31(11): 36-40.
- [4] 程广伟. 离心泵振动超标原因分析与对策[J]. 乙烯工业, 2022, 34(02): 20-24+69.