

化工机械振动问题的根源分类与系统性抑制策略框架设计

赵国平 蒋培丰 张婷婷
伊泰伊犁能源有限公司 新疆 伊犁 835300

摘要：化工机械在长期运行过程中普遍面临振动问题，其不仅影响设备的使用寿命，更对生产安全构成直接威胁。本文系统分析了化工机械振动问题的根源，将其划分为设计制造缺陷、安装维护失当、运行工况异常和部件老化失效四大类别，并深入探讨了每类根源的形成机理与作用路径。在此基础上，本文构建了一个包含预防层、监测层、诊断层、控制层和管理层的五级系统性抑制策略框架，各层级之间形成闭环反馈机制，旨在实现振动的全生命周期管理。该框架强调从单点治理转向系统防控，从被动响应转向主动预测，为化工企业提升设备可靠性提供了理论依据与实践路径。

关键词：化工机械；振动根源；分类体系；抑制策略；框架设计

引言

化工机械是化工生产的核心资产，其运行状态直接关系到产品质量、生产效率与人员安全。振动作为机械运行过程中的普遍现象，在化工环境中具有特殊的危险性。一方面，化工机械长期处于高温、高压、腐蚀性介质等恶劣工况下，振动会加速结构损伤和疲劳破坏；另一方面，振动引发的密封失效、连接松动等问题，可能导致易燃易爆、有毒有害介质的泄漏，酿成严重安全事故。当前，化工企业在处理机械振动问题时，往往采取“头痛医头、脚痛医脚”的局部治理方式，缺乏对振动根源的系统性认知和全流程管控。这种碎片化的应对策略，导致振动问题反复出现，治理成本居高不下。因此，从根源出发对化工机械振动进行分类研究，并在此基础上构建系统性的抑制策略框架，具有重要的理论价值和现实意义。

1 化工机械振动问题的根源分类

化工机械振动问题的成因复杂多样，根源往往隐藏于设备生命周期的不同阶段。本文按照时间维度和因果逻辑，将振动根源划分为四大类别：设计制造缺陷、安装维护失当、运行工况异常和部件老化失效。需要指出的是，实际工程中的振动问题往往是多类根源叠加作用的结果，分类研究的目的是为精准诊断和靶向治理提供基础。

1.1 设计制造缺陷

属先天性根源，形成于设备投用前，却长期影响服役性能。主要包括结构刚度不足致工作转速落入共振区、叶轮或叶片设计不当诱发流体激振、转子动平衡精

度不足产生同频离心力、临界转速计算偏差使设备意外运行于共振状态。材料选择不当则表现为阻尼或热膨胀特性不匹配，难以耗散振动能量。加工装配误差如尺寸公差失控、轴承过盈量不足、联轴器对中偏差等，均会转化为周期性激振力。此类缺陷虽非不可补救，但改造成本高、实施难度大。

1.2 安装维护失当

属后天人为因素。安装阶段若基础刚度不足、地脚螺栓预紧不均或二次灌浆不密实，会导致支撑变形，改变对中状态；转子对中存在平行或角度偏差，将在联轴器处产生附加弯矩，激发以二倍频为主的振动。滑动轴承间隙调整不当易引发油膜振荡^[1]。维护方面，润滑管理失误（如油品错误、加注过量或不足、换油超期）导致摩擦副处于边界或干摩擦状态，伴随温升与磨损；紧固件松动降低系统刚度，放大振动响应；不规范维修（如装配损伤、异物混入、密封错装）亦埋下隐患。

1.3 运行工况异常

具动态性与突发性。工艺参数波动（流量、压力、温度）改变内部流场：压缩机入口流量低于喘振线将引发剧烈轴向气流振荡；泵长期偏离最佳效率点运行，径向力增大，轴挠曲加剧；空化效应产生高频冲击波，形成宽带振动。介质性质变化（如密度、黏度改变，或含固体颗粒）增加流动扰动；聚合反应中物料相变导致流变特性非线性演变，可能诱发自激振动。操作不当（如阀门快开快关、频繁启停）引入瞬态冲击载荷，超越常规设计应力。

1.4 部件老化失效

呈渐进性退化。磨损（轴承疲劳、齿轮磨粒磨损、轴瓦滑动磨损）导致配合间隙超差，转子运动由稳定涡动转为不规则摆动。化工腐蚀造成截面减薄、蚀坑或沿晶裂纹；应力腐蚀与腐蚀疲劳在交变应力与介质协同下加速裂纹扩展。高温工况下，蠕变引起缓慢塑性变形，热疲劳因温度循环产生交变热应力。此外，橡胶密封圈硬化、金属波纹管断裂、膜片联轴器微裂纹等弹性元件老化，亦改变系统约束与传力特性，引入异常振动分量。

2 系统性抑制策略框架设计

基于上述根源分类，传统的单点治理模式显然难以从根本上解决化工机械的振动问题。本节提出一个五级系统性抑制策略框架，分别为预防层、监测层、诊断层、控制层和管理层。五级之间形成“前馈—反馈”的双向信息流，共同构成一个覆盖设备全生命周期的闭环控制系统。

2.1 框架总体结构

五级框架的结构逻辑遵循从源头到末端、从被动到主动、从技术到管理的递进关系。预防层位于最前端，聚焦于振动问题的源头规避，涉及设计优化、制造质量控制和选型规范。监测层负责振动数据的实时采集与状态感知，是诊断和控制的信息基础。诊断层对监测数据进行特征提取和模式识别，完成振动原因的精确定位。控制层执行具体的减振措施，包括主动控制技术和被动控制技术。管理层则贯穿始终，通过制度建设和人员能力建设，保障前四层措施的有效落地和持续改进^[2]。各层级之间不是孤立的串联关系，而是形成多重反馈回路。监测层的数据输入诊断层，诊断结果反馈至控制层执行操作，同时将长期统计信息反馈至预防层，用于优化下一批次设备的设计和选型。管理层对四个技术层进行监督和考核，确保各项措施按照规定的流程和标准执行。

2.2 预防层：源头设计优化与质量保障

预防层的核心任务是最大限度地将振动问题消除在设备投运之前。在设备选型阶段，应充分评估工艺条件与设备动力特性的匹配程度，避免选用临界转速过于接近工作转速或激振频率与系统固有频率重合的设备配置。对于存在宽频激励或变速运行的场合，应优先考虑具有阻尼增强设计或隔振措施的结构方案。设计优化方面，转子系统的动力学分析应当采用高保真度的计算模型，考虑轴承油膜刚度、密封间隙流固耦合、基础弹性等实际边界条件的综合影响。对于大型或高速机组，建议开展基于有限元方法的转子动力学验算，明确各阶临界转速的数值及其对应的振型。结构设计中应避免悬臂质量过大、轴承跨距过长等刚度薄弱环节，必要时通过

增加辅助支撑或改变轴承布局来提升系统刚性。制造和装配质量控制是预防层的另一支柱。转子动平衡精度应按照相关标准并结合设备实际转速和运行要求确定，对于高速机械宜采用高于通用标准的平衡等级。配合公差的设计应在保证装配可行性的前提下尽可能减小间隙，降低因配合松动导致的附加振动。对于关键的安装工序，应制定标准作业程序并配备专用工装，避免现场随意操作带来的对中误差和预紧力偏差。

2.3 监测层：多维感知与实时状态追踪

监测层提供振动抑制所需的数据基础，其设计原则是全面性、实时性和冗余性。全面性要求监测参数不仅包括振动幅值，还应涵盖转速、流量、压力、温度、润滑状态等关联参数，因为单一振动数据往往无法区分不同的根源类别。测点的布置应覆盖轴承部位、机壳、管道连接处等振动敏感位置，并在水平和垂直两个方向上分别采集。实时性决定了监测系统能够捕捉瞬态过程和早期征兆。对于高速旋转机械，连续在线监测的采样频率应足以分辨工频及其倍频分量，通常采用不低于转子每转32个点的采样策略^[3]。对于可能诱发喘振或失速的设备，应设置转速变化率和流量变化率的监测通道，实现保护动作的快速触发。冗余性是指关键测点采用多传感器配置或不同物理原理的传感技术，当一个通道失效时系统仍能维持基本监测功能，同时通过多源数据的交叉验证提高测量可信度。状态追踪强调振动数据的趋势化管理而非孤立的阈值判断。通过建立设备正常运行期间的振动基线，将当前测量值与历史基线进行对比，可以有效识别振动的渐进式恶化，为预测性维护提供依据。振动特征的变化速率，如每月的幅值增量，比绝对幅值更能反映部件老化失效的进展程度。

2.4 诊断层：信号处理与根源辨识

诊断层承担着从海量监测数据中提取有效信息并完成根源分类的任务。这一层级的技术核心是信号处理方法和推理机制。时域分析主要关注振动波形的峰值、均方根值和峭度指标，对于冲击类激励较为敏感。频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换到频率轴，不同根源类别对应特定的频谱特征：不平衡表现为工频分量占主导，不对中伴随明显的二倍频成分，松动则产生丰富的倍频和高频调制边带。时频联合分析方法，如短时傅里叶变换和小波变换，适用于处理非平稳振动信号。机组启停过程中的波德图和奈奎斯特图，能够清晰揭示转子系统通过临界转速时的幅值放大效应，是诊断转子弯曲或支撑刚度异常的有效工具。对于复杂的多源耦合振动，可采用盲源分离技术将不同激振源产生的振动分量

进行解耦,分别评估各自的贡献度。在根源辨识的推理层面,应建立振动特征与根源类别之间的映射关系知识库。该知识库涵盖本文第二部分所述的四大类根源及其细分类别,每条映射规则包含充分条件和必要条件。例如,“工频振动占主导且振动幅值随转速平方增长”是不平衡类缺陷的充分条件;“振动对负荷变化敏感且伴随工艺参数脉动”则是工况异常类根源的重要提示。对于诊断结论不明确的模糊案例,可采用基于贝叶斯网络的不确定性推理,输出各可能根源的概率分布。

2.5 控制层:主动干预与被动隔离

控制层是振动抑制策略的执行端,分为主动与被动两类。被动控制不依赖外部能源,通过改变系统刚度、质量或阻尼特性实现减振,典型方法包括:提升结构刚度以避免激振频率、加装动力吸振器产生反相振动、使用隔振器切断传递路径,以及采用高阻尼材料加速能量耗散。其优势在于结构简单、可靠性高,但减振频带窄且参数不可调^[4]。主动控制则基于传感器—控制器—执行器闭环系统,实时生成幅值相等、相位相反的控制力抵消振动,常用执行器有压电陶瓷、磁致伸缩和电磁作动器,响应快、适应性强,尤其适用于低频及宽频振动场景,如变速机械。但其面临控制算法鲁棒性不足及执行器在恶劣工况(如化工环境)中长期可靠性差等挑战。工程实践中,应优先从源头治理振动:对不平衡问题实施现场动平衡,不对中问题进行激光对中校正,松动问题紧固连接件并检查配合面。仅当直接措施难以实施或效果有限时,才考虑引入附加的隔振或吸振装置作为补充手段。

2.6 管理层:制度保障与持续改进

管理层需确保前四个层级的技术措施持续、规范运行,而非在一次检修后便归于沉寂。该层级建设涵盖三大核心:振动管理制度、人员培训体系和知识管理机制。首先,振动管理制度应系统规定监测周期、巡检路线、数据记录标准及异常处置流程;关键设备须建立“一机一档”历史档案,完整记录历次检修前后振动数据、治理措施及效果,形成闭环可追溯体系。报警与停机阈值不应“一刀切”,而应结合设备类型、服役年限及历史振动水平进行个性化设定,提升预警精准性。其

次,人员培训是能力建设的软支撑,内容应包括振动基础理论、监测设备操作、频谱图识读、典型故障模式识别及现场动平衡等实用技能;尤其要培养既懂机械动力学又熟悉化工工艺的复合型振动分析工程师,使其能将振动现象与工艺参数关联分析。最后,知识管理机制旨在从个案中提炼普适规律,每次成功治理都应复盘总结,形成包含诊断逻辑、关键证据、处置方案与验证结果的标准化案例文档。长期积累可构建企业级振动故障库与智能诊断规则集,推动振动管理由依赖个体经验向依靠制度、规则与数据驱动的现代化模式转型,从而实现设备可靠性和运行安全性的系统性提升。

3 结语

化工机械振动问题的治理是一项贯穿设备全生命周期的系统工程。本文通过对振动根源的系统梳理,将其归纳为设计制造缺陷、安装维护失当、运行工况异常和部件老化失效四大类别,揭示了每类根源的形成机理与作用特征。在此基础上,构建了包含预防层、监测层、诊断层、控制层和管理层的五级系统性抑制策略框架。该框架的核心价值在于实现了三个转变:从局部治理向全生命周期管理转变,从被动响应向主动预测转变,从个人经验向制度化、数据化运作转变。预防层着眼于设计源头,监测层提供数据基础,诊断层完成模式识别,控制层执行干预动作,管理层保障持续改进,五者协同形成一个闭环系统。化工企业在实施该框架时,可根据自身的设备特点和管理基础,分阶段推进各层级的建设,优先解决最突出、最迫切的振动问题,逐步向系统化、精细化的振动管理模式演进。

参考文献

- [1] 韦泽达.化工机械设备振动控制技术及其应用研究[J].建材与装饰,2020,(19):230-231.
- [2] 何玉君.解析化工机械设备振动控制技术及其应用[J].现代盐化工,2020,47(6):80-81.
- [3] 黄智.浅析化工机械设备的振动控制措施[J].设备管理与维修,2020,(10):69-70.
- [4] 苏晓丹.探究化工机械设备振动控制技术及其应用[J].内燃机与配件,2020,(8):171-172.