

表 -2 小堆排烟方案对比

方案名称	方案一（固定式机械排烟）	方案二（“移固结合式”机械排烟）
方案内容	为所有需排烟房间（含主控室）设置固定式机械排烟系统，并提供排烟补风。	为主控室设置固定式机械排烟系统，为其他排烟房间配置“移固结合式”机械排烟，均提供排烟补风。
优点	1. 满足支持安全停堆、人员疏散、消防救援等排烟需求； 2. 排烟能够做到精准控制，自动化程度高； 3. 完全符合国内规范要求及国内当前核动力厂防排烟设计方向要求和实践。	1. 精细化匹配排烟需求，系统得到较大的简化； 2. 排烟管道及阀门数量减少，提高了经济性（据初步测算，节约成本不少于 50 万元）； 3. 基本解决排烟管道布置困难问题，核岛走廊空间得以缓解。
不足	1. 排烟管道和阀门（排烟阀、补风管道防火阀）数量众多，成本较高； 2. 核岛厂房走廊区域空间紧张，管道布置难题需要克服。	1. 在 GB 55036-2022 ^[9] 和 GB 55037-2022（简称“消防通规”）发布后，消防设计要求趋于严格，“移固结合式”排烟方案在消防审评方面存在风险； 2. 国内核动力厂对于移动式排烟的应用和实践较少，在移动式排烟软管的设计、消防救援的实施过程以及排烟效果等方面还需研究。

5 结论

①小堆核岛排烟选择固定式机械排烟方案，即为所有排烟房间设置固定式机械排烟系统，并提供排烟补风。

②“移固结合式”排烟方案涉及的移动式排烟软管及接口设计、消防救援实施过程及排烟效果等方面，需关注后续研究和实践，待技术成熟后可作为备选方案。

③排烟需求对于排烟方案的制定至关重要，在实际工作中需结合火灾危害性分析进行确定。

④国内目前缺乏小堆专门的设计规范，项目设计中需结合实际探索更加合理的方案，并保持开放严谨的态度，推动技术的合理应用。

参考文献

- [1] HAD 102/11-2019,核动力厂防火与防爆设计[S].北京:国家核安全局,2019.
- [2] GB/T 22158-2021,核电厂防火设计规范[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [3] NB/T 20095-2012,压水堆核电厂安全壳外供暖、通风、空调系统设计准则[S].北京:原子能出版社,2012.
- [4] GB 55037-2022,建筑防火通用规范[S].北京:中国计划出版社,2023.
- [5] GB 55036-2022,消防设施通用规范[S].北京:中国计划出版社,2023.

Vibration analysis and control technology of rotating equipment in chemical machinery

Jiahao Liu

Hunan Petrochemical Co., Ltd. Caprolactam Department, Yueyang, Hunan, 414000, China

Abstract

As a core component of chemical machinery, rotating equipment's operational status directly impacts the stability and safety of entire production systems. During actual operation, various factors including structural design, manufacturing precision, installation errors, and external environmental influences often lead to varying degrees of vibration issues in rotating equipment. These vibrations not only affect equipment performance but may also trigger severe malfunctions or even safety incidents. Therefore, in-depth research on the vibration characteristics of rotating equipment, understanding their vibration mechanisms, and implementing effective control measures hold significant importance. This paper discusses vibration analysis methods for rotating equipment, focusing on key technologies such as vibration signal acquisition and processing, feature extraction, and modal analysis. It further explores the vibration mechanisms and coupled response behaviors of rotating equipment. Subsequently, multiple vibration control methods are systematically introduced, illustrated through practical application cases of pumps and fans. The study demonstrates that through scientifically sound vibration analysis and control strategies, the operational reliability and service life of rotating equipment can be significantly enhanced.

Keywords

rotating equipment; vibration analysis; vibration mechanism; vibration control; chemical machinery

化工机械中旋转设备振动分析与控制技术探究

刘嘉豪

湖南石油化工有限公司己内酰胺部, 中国·湖南 岳阳 414000

摘 要

旋转设备作为化工机械中的核心组成部分, 其运行状态直接影响整个生产系统的稳定性与安全性。在实际运行过程中, 由于结构设计、制造精度、安装误差以及外部环境等多种因素的影响, 旋转设备常常会产生不同程度的振动问题。这些振动不仅影响设备性能, 还可能引发严重故障甚至安全事故。因此, 深入研究旋转设备的振动特性, 掌握其振动机理, 并采取有效的控制措施具有重要意义。本文围绕旋转设备的振动分析方法展开讨论, 重点阐述了振动信号采集与处理、特征提取与模态分析等关键技术; 进一步探讨了旋转设备的振动机理及其耦合响应行为; 随后系统介绍了多种振动控制手段, 并结合泵类和风机类设备的实际应用案例进行说明。研究表明, 通过科学合理的振动分析与控制策略, 可以显著提升旋转设备的运行可靠性与使用寿命。

关键词

旋转设备; 振动分析; 振动机理; 振动控制; 化工机械

1 振动分析方法

1.1 振动信号采集与处理技术

振动信号的采集是开展设备状态评估与故障诊断的基础工作。在化工机械领域, 通常采用加速度传感器、位移传感器或激光测振仪等装置对旋转设备的振动情况进行实时监测。传感器布置位置的选择至关重要, 应充分考虑设备结构特点及常见故障部位, 确保采集数据具有代表性。例如, 在泵类设备中, 常将传感器安装于轴承座、进出口法兰附近;

而在风机类设备中, 则优先关注叶轮与主轴连接区域^[1]。

采集到的原始振动信号往往包含噪声干扰, 需要通过滤波、降噪等预处理手段提高信噪比。常用的信号处理方法包括时域滤波、频域 FFT 变换、小波去噪等。其中, 快速傅里叶变换 (FFT) 可将时域信号转换为频域图谱, 便于识别主要频率成分及其能量分布情况; 而小波变换则适用于非平稳信号的局部化分析, 尤其在突变信号处理方面表现出良好适应性。此外, 现代数据分析平台还可集成机器学习算法, 对海量振动数据进行自动分类与异常检测, 从而提升分析效率与准确性。

1.2 振动信号特征提取与分析方法

在完成信号采集与初步处理后, 下一步是对振动信号

【作者简介】刘嘉豪 (1998-), 男, 中国湖南岳阳人, 本科, 助理工程师, 从事化工机械研究。

进行特征提取,以获取能够反映设备运行状态的关键信息。常见的特征参数包括均方根值(RMS)、峰峰值(Peak-to-Peak)、峭度系数(Kurtosis)以及频谱能量分布等。这些参数可用于描述振动强度、冲击程度以及频率成分的变化趋势。

在具体分析中,时频分析方法如短时傅里叶变换(STFT)和希尔伯特-黄变换(HHT)被广泛应用。STFT适用于非平稳信号的局部频谱分析,而HHT则能更精确地捕捉信号的瞬时频率变化,特别适合处理含有调幅/调频成分的复杂振动信号。此外,近年来基于深度学习的特征提取方法逐渐兴起,利用卷积神经网络(CNN)或循环神经网络(RNN)对原始信号进行端到端学习,可有效挖掘潜在的故障模式。

1.3 振动模态分析技术

模态分析是研究旋转设备动力学特性的重要手段,旨在揭示设备在不同频率激励下的固有振动模态及其响应规律。该方法通过实验测试或有限元仿真获取设备的模态参数,包括固有频率、阻尼比、振型等,进而构建其动态响应模型。

在实验模态分析中,通常采用激振器对设备施加可控激励,并通过多通道传感器同步采集响应信号。随后,利用频响函数(FRF)矩阵进行模态参数识别,借助Prony算法、ITD法或随机子空间法等提取模态信息。对于复杂结构的旋转设备,有限元仿真方法更具优势,可在设计阶段预测设备的振动特性,提前发现潜在共振风险点^[2]。

模态分析结果可用于优化设备结构设计、调整支撑刚度以及指导减振措施的实施。例如,在泵类设备中,合理配置轴承间距与壳体刚度可有效避开低阶固有频率,避免因转速匹配不当引发共振;而在风机系统中,通过模态叠加法可准确预测叶片弯曲与扭转模态对整体振动的影响,从而为动态平衡提供理论依据。

2 旋转设备振动机理

2.1 旋转机械振动源头分析

旋转设备的振动来源复杂多样,主要包括质量不平衡、不对中、轴承缺陷、齿轮啮合不良、流体激励等因素。其中,质量不平衡是最常见的振动诱因之一,通常是由于制造误差、装配偏差或部件磨损导致旋转体的质量中心偏离几何中心。这种偏心效应在高速旋转状态下会引发周期性离心力,进而激发设备振动。

除了机械因素外,流体动力激励也是不可忽视的振动源。例如,在离心泵中,叶轮流道内的压力波动可能引起水力脉动,形成周期性激振力;在风机中,气流分离与涡旋脱落现象同样会导致结构振动。此外,电磁激励在电机驱动系统中也可能引发振动,尤其是在异步电机中,定子与转子之间的磁拉力不对称会导致径向振动加剧。

针对不同类型的振动源头,需采用相应的检测手段与分析模型进行识别。例如,通过相位分析可判断是否为质量不平衡引起的振动;利用频谱分析可识别齿轮啮合频率或轴承故障特征频率;而对于流体激励,则需结合CFD仿真与试验测试进行综合评估。

2.2 旋转设备振动传递与响应机理

旋转设备产生的振动不只是局限在局部区域,而是会通过结构件、轴承、基础等路径进行传播,最终呈现为整机的振动响应,振动的传递路径主要有刚性连接、柔性支承、基础振动反馈等,不同路径对振动的放大或衰减作用存在差异,所以理解振动的传递机制对制定有效控制策略十分关键。在振动响应分析时,通常运用多自由度系统模型来描述设备的动力学行为,通过建立质量-弹簧-阻尼系统,能够模拟设备在受迫振动下的位移、速度与加速度响应,同时还需要考虑外部激励的频率特性和设备固有频率之间的关系,防止发生共振现象,比如当激励频率接近某阶固有频率时,系统会出现剧烈振动,这时需要通过调整转速、改变结构刚度或增加阻尼等方式进行抑制。

2.3 振动与结构耦合分析

旋转设备的振动不光受自身结构方面的影响,还会和它所处的系统结构产生耦合作用,进而形成复杂的动态相互作用,就像在泵机组当中,泵体与管道系统的刚度差异有可能导致振动能量在两者之间反复传递,在风机系统里面,叶轮与壳体之间的气动弹性耦合或许会引发自激振动。耦合振动的分析涉及多个物理场的协同作用,一般需要借助多体动力学仿真工具来进行建模,通过引入接触、约束与边界条件,能够模拟设备与周围结构之间的相互作用关系,比如在轴系动力学分析时,需要考虑联轴器的刚度特性对振动传递产生的影响,在流固耦合分析时,则要结合CFD与FEA技术,研究流体激励对结构振动的反馈作用。

3 旋转设备振动控制方法

3.1 活塞动平衡技术

活塞动平衡技术主要用在旋转机械设备存在偏心质量的场合,通过调整配重块的位置和质量让旋转体质心靠近旋转轴线,以此降低因不平衡而引起的离心力,该技术广泛应用于往复式压缩机和内燃机等设备当中,动平衡可分为静态平衡与动态平衡这两种形式,静态平衡适用于单平面质量分布均匀的情况,而动态平衡适用于多平面分布不均的复杂转子系统,现代动平衡技术已发展出现场动平衡方法,也就是在设备不停机的情况下通过测量振动信号反推不平衡量,然后计算出最佳配重方案,该方法具有高效便捷的特点且已在石化和电力等行业广泛应用。此外,智能动平衡系统结合在线监测与自动调节功能,能够在设备运行过程中实时修正不平衡状态,大幅减少停机维护时间。此类系统通常配备高精度传感器与控制模块,能够根据振动反馈自动调整配重,实