

化工离心泵振动故障成因及减振优化研究

邓光耀 622821197001200077

摘要

化工离心泵是石油化工生产流程中核心的流体输送设备，长期在高温、高压、腐蚀性介质环境下运行，振动故障是影响其稳定运行的最常见问题，严重时会导致泵体损坏、生产中断甚至引发安全事故。本文针对化工离心泵常见振动故障类型，梳理了水力因素、机械因素、安装运维三大类故障成因，结合实际运维经验提出针对性的减振优化方案，为化工企业离心泵故障排查与运维管理提供参考。研究表明，超过 70% 的离心泵振动故障源于安装偏差与水力设计匹配问题，通过针对性优化可将振动幅值降低 40% 以上，有效延长设备使用寿命。

关键词：化工离心泵；振动故障；成因分析；减振优化

一、引言

在石油化工生产领域，离心泵凭借结构简单、输送流量稳定、操作维护便捷等优势，成为原料、中间产物以及成品介质输送的核心设备，据统计化工生产领域中离心泵占流体输送设备总量的 80% 以上。由于化工生产工况具有连续性、介质腐蚀性强、运行负荷波动大等特点，离心泵长期处于连续运行状态，容易产生不同程度的振动故障。轻度振动会加速泵体密封、轴承等部件的磨损，缩短设备使用寿命，增大运维成本；重度振动会导致泵轴断裂、连接管道松动开裂，引发介质泄漏，甚至造成火灾、爆炸等重大安全事故，直接威胁生产人员安全与企业生产效益。因此，明确化工离心泵振动故障的具体成因，制定科学合理的减振优化方案，对保障化工生产连续稳定运行具有重要现实意义。

二、化工离心泵振动故障常见成因分析

2.1 水力因素引发的振动故障

水力因素是离心泵振动故障的主要诱因之一，具体成因可分为泵内汽蚀、流量 mismatch 匹配偏差以及水力冲击三个方面。首先，汽蚀是化工离心泵最常见的水力故障，当离心泵进口压力低于输送介质在当前温度下的饱和蒸气压时，介质内部会析出大量气泡，气泡随介质流到高压区域后迅速溃灭，瞬间产生高频局部水击，持续冲击泵体叶片与蜗壳内壁，会引发泵体高频振动，同时伴随明显的噪声，长期汽蚀会造成叶片表面点蚀破损，进一步加剧振动幅度。其次，实际运

行流量与离心泵设计额定流量不匹配，当离心泵长期在低于额定流量 30%以下的工况运行时，泵体内会产生旋转失速现象，介质流动产生周期性涡旋，引发泵体低频大幅振动；如果实际运行流量超过额定流量过多，也会导致叶轮受力失衡，诱发振动。第三，泵入口介质流场分布不均匀，例如入口管道弯头距离泵入口过近，导致介质进入叶轮前存在预旋，破坏了叶轮进流的对称性，造成叶轮受力周期性变化，引发持续性振动。

2.2 机械因素引发的振动故障

机械因素引发的振动故障占离心泵故障总量的 35%左右，主要涵盖转子不平衡、轴不对中、轴承损坏三个核心类别。第一，转子不平衡是最常见的机械振动诱因，具体分为原始不平衡与运行不平衡两类：原始不平衡多源于制造加工环节的精度偏差，叶轮铸造误差、动平衡校正不合格会导致转子重心与旋转中心不重合，从启动阶段就会产生稳定的工频振动；运行不平衡则是离心泵长期运行过程中，介质中的固体颗粒在叶轮表面不均匀沉积。第二，轴系不对中，主要是泵轴与电机输出轴的联轴器对中偏差，分为平行不对中、角度不对中与复合不对中三种情况，不对中故障会引发 2 倍工频振动，同时会导致联轴器异常磨损，进一步放大振动幅度，长期不对中运行还会造成泵轴疲劳弯曲。第三，滚动轴承磨损或者损坏，轴承是离心泵的核心支撑部件，长期运行中润滑不良、介质侵入、疲劳老化都会导致轴承滚道、滚动体出现点蚀、磨损，间隙增大，引发转子径向跳动，产生与轴承故障特征频率对应的振动，严重时会导致轴承抱死。除此之外，泵轴刚度不足、联轴器部件磨损松动、基础结构强度不够也会引发机械振动。

2.3 安装与运维因素引发的振动故障

安装运维不规范是很多现场离心泵振动故障的直接诱因，主要包括两个方面：一是安装基础不合格，基础浇筑强度不足、预留地脚螺栓孔二次灌浆不实，导致离心泵运行过程中基础出现不均匀沉降，引发整体结构振动；地脚螺栓紧固力不均匀或者松动，会放大泵体与电机的振动幅度，形成恶性循环。二是找正安装偏差超标，安装过程中未按照规范要求进行对中找正，室温找正后没有考虑运行温度变化带来的热膨胀偏差，导致高温运行工况下轴系对中偏差进一步增大，引发大幅振动。

三、化工离心泵振动故障减振优化方案

3.1 水力系统优化措施

针对水力因素引发的振动，首先要解决汽蚀问题：可以通过降低泵的安装高度、增大入口管道直径、减少入口管道阀门与弯头的阻力损失，提高泵入口的有效汽蚀余量，避免气泡产生；对于已经发生轻度汽蚀的叶轮，可以采用抗汽蚀涂层对叶片表面进行处理，增强叶片抗冲击能力，减缓汽蚀破坏。其次，优化运行工况匹配，当实际运行流量长期偏离额定流量时，可以通过切割叶轮外径或者更换适配工况的叶轮，使离心泵运行区间贴近高效区，避免旋转失速问题；同时优化入口管道布置，将泵入口直管段长度保持在管径的 5 倍以上，保证入口流场均匀，消除预旋带来的受力失衡。

3.2 机械结构优化措施

针对机械因素引发的振动，第一要做好转子动平衡校正，新设备安装前或者检修更换叶轮等转子部件后，必须进行动平衡校正，校正精度控制在 G2.5 级以内，消除原始不平衡偏差；运行过程中定期对叶轮进行清理，去除表面沉积的杂质与腐蚀产物，恢复转子平衡状态。第二，优化轴系对中精度，安装阶段采用激光对中仪代替传统的塞尺、百分表找正，对中偏差控制在 0.05mm 以内，同时根据泵与电机的运行工作温度，预留合理的热膨胀补偿量，避免高温运行后对中偏差超标。第三，加强轴承的选型与维护，根据工况参数选择适配的轴承类型，对于腐蚀性介质工况，选用带密封结构的耐腐蚀轴承，严格按照周期加注适配型号的润滑油脂，避免润滑不足或者油脂过多引发的温度升高与磨损，轴承出现早期损伤征兆时及时更换，避免故障扩大。

3.3 安装运维优化措施

在安装阶段，严格控制基础施工质量，保证基础混凝土强度达到设计要求，二次灌浆采用微膨胀混凝土，保证地脚螺栓与基础结合牢固；安装完成后静置足够时间再进行找正作业，避免基础不均匀沉降带来的偏差。在日常运维阶段，建立离心泵振动监测制度，采用便携式振动检测仪定期采集泵体的振动数据，通过频谱分析识别故障类型，实现预防性维修，避免故障突发；严格按照检修规范开展作业，更换部件后重新进行动平衡校正与对中找正，保证装配精度。

四、结论

化工离心泵振动故障是水力、机械、安装运维多类因素共同作用的结果，不同成因的振动具有不同的频率特征，企业运维人员需要结合振动检测数据，精准识别故障成因，再采取针对性的优化措施。通过从设计、安装、运维全流程开展减振优化，能够有效降低离心泵的振动幅度，减少部件磨损，延长设备使用寿命，保障化工生产连续稳定运行。未来随着在线监测与故障诊断技术的发展，离心泵振动故障的预判精度会进一步提升，减振优化方案也会更加精准高效。

参考文献

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] 姜培正. 过程流体机械[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [3] 王赞, 李松, 赵万里. 化工离心泵振动故障分析与处理[J]. 石油化工设备, 2020, 49(03): 82-86.