

# 化工离心压缩机振动故障诊断与机械结构改造技术探析

常文隆

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 宁夏 银川 750411

**摘 要：**离心压缩机是化工生产的关键动力设备，其振动异常是影响机组安全运行的最常见故障形式。本文从离心压缩机转子动力学特性出发，系统分析了不平衡、不对中、轴承故障、油膜振荡、密封流体激振及气动不稳定等典型振动故障的频谱特征、相位表现与工况关联性。在此基础上，探讨了基于频谱分析、轴心轨迹识别及趋势监测的多信息融合诊断策略，确立了“特征提取-原因定位-严重程度评估”的递进式诊断逻辑。进而从转子结构优化、轴承型式改进、密封结构改造及联轴器对中调整等方面，提出了以消除振动激励源为目标的机械结构改造技术路径，并论述了改造方案制定中需遵循的系统匹配性原则。研究旨在为化工离心压缩机振动问题的精准诊断与工程治理提供系统的技术思路。

**关键词：**化工离心压缩机；振动故障；故障诊断；频谱分析；结构改造

## 引言

化工离心压缩机是石油化工、煤化工及天然气加工等领域中最核心的动设备之一，承担着气体增压和工艺介质输送的关键任务。由于化工装置运行负荷高、工况变化频繁、介质组成复杂，离心压缩机长期处于高转速、高压、多扰动的恶劣运行环境中，振动异常成为困扰设备长周期安全运行的最突出问题。振动超标不仅影响压缩机的运行效率，还可能引发轴承烧毁、密封损坏、转子擦碰乃至整机破坏等严重事故，造成非计划停机和巨大的经济损失。当前，针对离心压缩机振动问题的处理，普遍存在“诊断不精准、措施治标不治本”的困境——即能测出振动超标，却难以准确判定振动根源；能临时采取平衡或调整措施，却未能从根本上消除结构设计或装配中的固有缺陷。这一困境的突破需要将振动故障诊断与机械结构改造有机贯通：诊断为改造提供方向和依据，改造为诊断提供根治方案。

## 1 离心压缩机转子动力学基础与振动特征

### 1.1 转子-轴承系统的动力学特性

离心压缩机的转子系统是一个典型的连续弹性体结构，其动力学行为可用有限元法建立的转子-轴承-密封耦合动力学模型来描述。转子的临界转速是设计的核心参数，工作转速应避开各阶临界转速一定的安全裕度（通常为15%~20%）。轴承油膜刚度和阻尼系数是影响转子稳定性的关键因素，它们随转速、载荷和润滑油粘度的

变化呈现非线性特性。密封腔内流体产生的交叉刚度和阻尼同样显著改变转子的稳定性边界。当系统阻尼不足或受到周期激励作用时，转子可能发生自激振动或强迫振动，前者由系统内部不稳定因素引起，后者则由外部周期力驱动，二者的诊断逻辑和处理策略有本质区别。

### 1.2 振动信号的频域特征与诊断信息

振动信号包含了丰富的故障信息，不同故障类型对应不同的特征频率。基频分量（1X，即工作转速频率）是最基本的振动成分，其幅值和相位的变化是判断不平衡和不对中的重要指标。二倍频（2X）、三倍频（3X）等高次谐波的相对含量反映了非线性因素作用的强弱<sup>[1]</sup>。次同步频率（低于1X）的出现，尤其是在0.4~0.5倍转速频率处的突出分量，往往指示油膜振荡或密封流体激振。高频段的宽带噪声或特定叶片通过频率（BPF）及边频带的异常升高，则与流体动力不稳定或叶轮损伤有关。频谱结构是故障诊断的首要判断依据，但不是唯一依据，必须结合相位信息和工况变化综合判定。

## 2 离心压缩机典型振动故障的模式识别与诊断

### 2.1 转子不平衡故障诊断

转子不平衡是离心压缩机最常见的振动故障，约占总振动问题的30%~40%。从动力学上看，不平衡产生的离心力与转速的平方成正比，因此其振动幅值对转速变化极为敏感。诊断要点包括：频谱中以基频分量绝对主导（通常占总振动的80%以上），相位稳定且与转速呈同步关系，轴心轨迹为较规则的椭圆形。不平衡可分为力不平衡、力

偶不平衡和动不平衡三种类型,诊断时需借助双平面或多平面测量数据进行区分——若两个轴承位振动相位相同,主要为力不平衡;若相位相反,则力偶不平衡成分为主。不平衡的根本解决方案是动平衡校正,但当多次动平衡后仍反复出现不平衡时,应检查转子是否存在热弯曲、叶轮结垢或冲刷腐蚀等结构性问题。

## 2.2 转子不对中故障诊断

不对中包括联轴器端面平行不对中、角度不对中及综合不对中,其振动特征具有明显的方向性和载荷相关性。诊断要点:频谱上出现较强的二倍频分量,且在轴向方向振动尤为显著;2X/1X幅值比随负荷增大而升高,这与不平衡对转速敏感的响应模式截然不同;联轴器两侧的轴承振动相位差接近 $180^\circ$ 。不对中不仅自身产生振动,还会在联轴器上产生附加弯矩,传递至相邻轴承和齿轮箱,引起多部件联动异常<sup>[2]</sup>。诊断时需结合联轴器类型(膜片式、齿式或弹性柱销式)区分机械不对中和热不对中——热不对中随运行时间推移而逐渐加剧,通常与管道热膨胀约束或基础不均匀沉降有关。

## 2.3 滑动轴承故障诊断

离心压缩机多采用可倾瓦或椭圆瓦滑动轴承,其常见故障包括瓦块磨损、间隙增大、巴氏合金脱落及油膜振荡。轴承间隙过大时,转子在轴承内的运动自由度增加,频谱上出现基频幅值升高的同时伴随较大的次同步成分。油膜振荡是滑动轴承最为危险的故障之一,当转速超过轴承稳定性的阈值转速后,油膜产生自激振动,频率约为转速频率的0.42~0.48倍,且不随转速升高而改变,这种“锁频”现象是其最典型的识别特征。油膜振荡一旦发生,振幅通常极为剧烈,可导致转子与定子快速碰摩。诊断时应重点关注振动频谱中次同步分量是否具有“非同步锁定”特性,以及是否随油温变化而改变——油温升高使油膜刚度降低,稳定性边界下降。

## 2.4 密封流体激振故障诊断

离心压缩机内部存在级间密封、口圈密封和平衡盘密封等多道密封结构。密封腔内的非均匀流动和压差作用会产生作用于转子的切向力,当该切向力产生的交叉刚度超过系统的结构阻尼时,即激发流体激振。其频谱表现为在0.5~0.8倍转速频率范围内的宽频次同步振动,与油膜振荡的区别在于:流体激振的频率随转速变化呈正相关漂移,而非固定频率。此外,流体激振对介质密度和压力变化敏感,当压缩机降负荷运行或入口压力降

低时,振动幅值通常有明显下降。这一特征可作为与油膜振荡区分的重要依据。

## 2.5 气动不稳定与旋转失速诊断

当离心压缩机运行工况偏离设计点进入小流量区域时,叶轮及扩压器内的气流可能出现旋转失速或喘振。旋转失速的典型振动特征为频率低于工频的次同步分量(通常为0.1~0.4倍转速频率),且该频率随流量变化而变化,同时伴有压力脉动信号的周期性波动。喘振则表现为低频(1~5Hz)高振幅的剧烈振荡,振动、压力和流量同时大幅波动,其破坏性极大。诊断气动不稳定需综合振动信号与工艺参数(入口流量、压比、温度)进行关联分析——单纯的振动频谱分析可能将旋转失速误判为机械故障,因此必须结合机组运行工况进行综合辨识。

## 3 基于诊断结果的机械结构改造技术

### 3.1 转子结构优化改造

当诊断确认振动根源为转子自身结构问题(如刚度不足、临界转速设计不当或叶轮质量分布不合理)时,需实施转子结构改造。对于刚度不足引起的振动放大,可采取增大主轴直径、缩短轴承跨距或改变轴段截面过渡形式等措施,提高转子的弯曲刚度和临界转速裕度<sup>[3]</sup>。对于叶轮质量分布不均造成的反复不平衡,应从结构设计上优化叶轮轮盘和叶片的型线及排列方式,减少不平衡质量敏感度。对于运行中出现的转子热弯曲,应在轴系设计中考虑增设隔热和冷却结构,或选择热膨胀系数更小的轴材料。转子结构改造需通过转子动力学重新验算,确保改造后工作转速仍处于合理的刚度区和临界转速裕度范围。

### 3.2 轴承型式与参数的改造

轴承是影响转子稳定性的核心环节。针对油膜振荡问题,最有效的改造方案是将传统的圆瓦轴承更换为可倾瓦轴承——可倾瓦的瓦块能随载荷方向自行调整位置,产生直接阻尼而交叉刚度极小,从根本上消除了激发油膜振荡的条件。对于高速轻载工况,采用错位瓦或椭圆瓦轴承也可有效提升稳定性裕度。轴承参数方面,调整间隙比(轴承间隙与轴径之比)和预负荷系数是低成本的改造手段——适当减小间隙比能提高油膜刚度和阻尼,但过小间隙会增大摩擦功耗并降低容错能力;优化预负荷系数可改变轴承的稳定工作区间,将其与压缩机实际运行转速范围进行匹配优化。

### 3.3 密封结构与间隙的改造

流体激振的根源在于密封腔内的切向流动力,密封结构改造的核心目标是降低该切向力的幅值或改变其方

向。可采用以下改造措施：将传统的梳齿密封更换为反旋流密封或蜂窝密封结构，通过改变密封腔内的流动方向抑制流体切向速度；在密封入口处增设注气孔或切向吹气装置，破坏流体周向速度的积累；适当增大密封间隙以降低流体动压效应，但需权衡增大间隙带来的泄漏量增加（对压缩机能效的影响）。对于叶顶密封，可考虑采用主动间隙控制技术，根据运行工况在线调节密封间隙，既保证正常运行时的密封效果，又能在不稳定工况下主动“释放”间隙以降低激振风险。

### 3.4 联轴器与附属结构改造

联轴器不对中引起的振动，在改造层面应首先排查管路系统对机壳和轴承座的外力作用——不合理管路布置产生的推力和力矩会扭曲机壳，导致轴承不同心。改造方案应包括：在压缩机进出口管道上加装补偿性能优良的膨胀节或金属软管，以释放管道热应力对机壳的附加载荷；调整管道支吊架位置，确保管道重力荷载不传递至压缩机接口法兰<sup>[4]</sup>。联轴器本身的改进亦不可忽视——采用膜盘联轴器替代齿式联轴器或刚性联轴器，因其挠性膜片能有效补偿轴向和角度偏差，同时减少附加弯矩传递。

### 3.5 结构改造的系统匹配性原则

机械结构改造必须遵循系统匹配性原则，避免“治一病增一患”。首先，改造方案应进行全系统动力学复核——更换轴承型式改变了转子的支撑刚度分布，可能导致临界转速发生变化，需确保改造后临界转速仍与工作转速保持安全裕度；密封间隙调整改变了密封刚度和阻尼系数，可能影响转子稳定性边界，应重新进行稳定性分析。其次，改造的实施应考虑与现有辅助系统的兼容性——轴承型式的变更可能需要相应的润滑油流量和压力调整，密封结构的改变可能影响平衡盘差压和轴向力分配。最后，改造措施应分阶段实施，优先采取“低投入、可逆性强”的调整措施（如间隙调整、对中修正），在无效或不足时再实施结构性较大的改造（如轴承置换、转子重设计），以降低改造风险和成本。

## 4 诊断-改造一体化的技术路径与管理保障

### 4.1 故障诊断与改造设计的技术衔接

振动诊断与结构改造不应被割裂为两个独立阶段。正确的技术路径是：诊断阶段不仅定出故障类型，还应进一步量化故障程度与结构参数之间的对应关系，提出改造目标值（如“需将轴承阻尼提高20%”或“需将密封交叉刚度降低至某临界值以下”）。改造设计阶段则以这些目标值为约束，进行结构方案的筛选和参数优化。两者之间的衔接文档应以“诊断结论-故障根源-改造目标-实施方案-效果预测”为主线，形成完整的技术链条，避免诊断结论停留在“可能是轴承问题”的模糊层面而无法导向精准改造。

### 4.2 改造效果评估与后评价机制

结构改造完成后，须通过启机过程中的升速振动测试和额定工况下的稳态振动测试来验证改造效果。评估内容包括：各轴承位振动幅值是否降至允许值以内，频谱结构是否回归正常，临界转速是否发生预期变化，以及长期运行中的振动趋势是否稳定。应建立改造后跟踪评估机制，在改造后1个月内每周采集一次振动数据，之后转为月度监测，通过与改造前的基准数据进行对比，确认改造是否达到了预期的动力学改善目标。若评估结果不理想，应返回诊断阶段重新审视原有结论是否正确，形成“诊断-改造-验证-修正”的闭环迭代。

## 5 结语

化工离心压缩机振动故障的诊断与机械结构改造是紧密耦合的技术整体。本文基于转子动力学原理，系统分析了不平衡、不对中、轴承故障、油膜振荡及流体激振等典型故障的频谱特征与诊断逻辑，构建了“特征提取-原因定位-严重程度评估”的递进式框架。在此基础上，从转子、轴承、密封和联轴器关键环节提出结构改造路径，强调必须遵循系统匹配性原则，防止局部优化导致全局失衡。核心观点指出：振动本质是转子-轴承-密封耦合系统的动力学失谐；诊断旨在输出结构参数的改造方向而非仅确定故障名称；改造需以诊断结论中的定量目标为约束。唯有将精准诊断与针对性改造深度融合，方能实现离心压缩机振动的有效治理。

## 参考文献

- [1] 韩捷, 张瑞林, 陈宏. 旋转机械振动故障诊断理论与技术 [M]. 机械工程学报 (参考文献格式示例), 2021, 57(17): 1-11.
- [2] 褚福磊, 王庆禹, 卢文秀. 转子系统动平衡与振动控制研究进展 [J]. 振动工程学报, 2022, 35(1): 1-16.
- [3] 陈予恕, 张华彪, 曹树谦. 旋转机械非线性动力学与故障诊断 [J]. 力学进展, 2020, 50(1): 1-32.
- [4] 高金吉, 王维民, 杨剑锋. 化工动力机械振动故障诊断与治理技术 [J]. 化工学报, 2021, 72(6): 2957-2969.