

离心压缩机试车阶段常见故障处理与频谱分析应用

董华奇¹ 江文佳² 王福新¹ 周英博¹ 王帅²

1.沈阳鼓风机集团安装检修配件有限公司，辽宁 沈阳 110020

2.沈阳透平机械股份有限公司，辽宁 沈阳 110020

[摘要]离心压缩机试车阶段常见故障处理与频谱分析应用离心压缩机是石油化工、天然气处理等领域极为关键的设备，其试车阶段的故障诊断与处理对其安全运行和使用寿命有着直接影响。本研究系统地归纳分析了离心压缩机试车阶段常见的故障类型并着重探究了频谱分析技术在故障诊断里的应用方法与效果。某离心压缩机制造企业 200 台离心压缩机试车数据经采集分析后发现，轴系不平衡、轴系不对中、轴承故障和气体激振这类故障占比高达 78.5%，于是研究运用快速傅里叶变换（FFT）等频谱技术构建起离心压缩机故障特征频率和振动信号的对应关系模型，结果显示频谱分析能有效辨识转子不平衡（1X 频率）、不对中（1X 和 2X 频率）、轴承故障（特征频率）以及流体激振（亚同步频率）这些典型的故障模式且诊断准确率达到 91.7%。另外，研究还总结出不同故障类型的处理方法和策略从而形成一套完整的试车阶段故障处理流程。本研究取得的成果给离心压缩机试车阶段故障诊断与处理提供理论依据和实用工具这对提高设备的可靠性与安全性意义重大。

[关键词]离心压缩机；故障诊断；频谱分析；振动监测；试车技术

DOI: 10.33142/ect.v3i10.18196 中图分类号: TH452 文献标识码: A

Common Fault Handling and Spectrum Analysis Application during Centrifugal Compressor Commissioning Stage

DONG Huaqi¹, JIANG Wenjia², WANG Fuxin¹, ZHOU Yingbo¹, WANG Shuai²

1. Shenyang Blower Group Installation and Maintenance Parts Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110020, China

2. Shenyang Touping Machinery Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110020, China

Abstract: Common fault handling and spectrum analysis application during the commissioning stage of centrifugal compressors. Centrifugal compressors are extremely critical equipment in the fields of petrochemicals, natural gas processing, etc. The fault diagnosis and handling during the commissioning stage have a direct impact on their safe operation and service life. This study systematically summarized and analyzed the common types of faults in the commissioning stage of centrifugal compressors, and focused on exploring the application methods and effects of spectrum analysis technology in fault diagnosis. After collecting and analyzing the test data of 200 centrifugal compressors from a certain centrifugal compressor manufacturing enterprise, it was found that shaft imbalance, shaft misalignment, bearing failure, and gas induced vibration accounted for as high as 78.5% of the faults. Therefore, the study used spectral techniques such as fast Fourier transform (FFT) to construct a corresponding relationship model between the fault characteristic frequency and vibration signal of centrifugal compressors. The results showed that spectral analysis could effectively identify typical fault modes such as rotor imbalance (1X frequency), misalignment (1X and 2X frequency), bearing failure (characteristic frequency), and fluid induced vibration (sub synchronous frequency), and the diagnostic accuracy reached 91.7%. In addition, the study also summarized the handling methods and strategies for different types of faults, thus forming a complete set of fault handling processes during the testing phase. The results obtained in this study provide theoretical basis and practical tools for fault diagnosis and handling during the commissioning stage of centrifugal compressors, which is of great significance for improving the reliability and safety of equipment.

Keywords: centrifugal compressor; fault diagnosis; spectrum analysis; vibration monitoring; commissioning technology

引言

石油化工、天然气处理、煤化工和空分等行业以离心

压缩机为核心动力设备且其安全稳定运行对整个生产系

统的正常运转极为关键。全球市场研究数据显示，2024

全球离心压缩机市场规模达 320 亿美元，到 2027 年预计能增长至 415 亿美元且年复合增长率大概为 6.7%，在这样的快速发展态势下，业界越发关注离心压缩机试车阶段的故障诊断与处理技术，行业统计表明压缩机初始运行时若故障得不到及时诊断处理就可能致使设备损坏、生产中断乃至引发安全事故且每年由此产生的直接经济损失超 50 亿元。

离心压缩机从制造迈向运行的试车阶段是个关键过渡环节，这一阶段既能对设备性能加以验证，又是发现与排除潜在故障的绝佳时机，研究显示离心压缩机在全生命周期里大概 65% 的重大故障隐患能在试车阶段被有效甄别和除去，但离心压缩机结构复杂且工况多种多样，所以试车时故障的表现形式繁多又彼此关联，传统故障诊断法难以达成快速精准识别的要求，好在近五年数字化技术迅猛发展使得频谱分析这种先进的故障诊断手段冒头并有着独特技术优势，统计数据表明压缩机运用频谱分析技术后故障诊断准确率能提升 40% 还多且平均故障处理时长可缩短大概 35%。

某离心压缩机制造企业 200 台离心压缩机的试车数据被本研究系统采集和分析后发现，轴系不平衡、轴系不对中、轴承故障和气体激振等机械故障占比高达 78.5% 且气动性能和控制系统故障也偶有出现，于是本文系统地归纳离心压缩机试车阶段的故障类型与特征并重点探究频谱分析技术在故障诊断里的应用原理、方法和效果，还针对不同故障类型给出相应处理策略以构建完整的试车阶段故障处理流程，想给离心压缩机试车实践提供理论指导和技术支持来提高设备的可靠性与安全性。

1 离心压缩机试车阶段常见故障分类与特征

1.1 机械故障类型及表现特征

离心压缩机试车阶段会出现多种机械故障，像转子不平衡、轴系不对中、轴承故障、气体激振和密封泄漏等都包含在内，某离心压缩机制造企业 200 台离心压缩机试车数据经统计分析发现机械故障在全部故障里占比达 62.3%，并且转子不平衡故障时振动以转速频率（1X）为主且轴向辐射方向相位差差不多是 90°，轴系不对中故障时轴向振动显著且有 1X 和 2X 频率振动且双支撑轴承处振动相位差接近 180°，轴承故障常常是随机冲击和特定频率振动且温度上升明显，气体激振一般产生比转速低的亚同步频率振动且振幅随流量变而波动。转子不平衡源于质量中心与旋转轴心的偏心距存在，试车阶段主要诱因包括：低速动平衡精度不足（未达 ISO 1940-1 G2.5 级标准）、

叶轮装配同轴度超差、转子表面附着杂质（试车前清洁不彻底）及配重块松动等。对于挠性转子，仅通过低速动平衡无法消除高速工况下的模态不平衡，易在临界转速附近引发振动放大。

表 1 离心压缩机试车阶段常见机械故障及其表现特征

故障类型	占比 (%)	振动特征	频谱特点	其表现
转子不平衡	27.5	径向振动显著	1X 频率主导	振幅与转速平方成正比
轴系不对中	21.8	轴向振动明显	1X 和 2X 频率共存	轴承温度不均匀升高
轴承故障	16.4	随机冲击振动	轴承特征频率	轴承温度明显升高，有噪声
气体激振	12.8	不稳定振动	0.3X-0.5X 频率	随流量和压力变化
密封泄漏	8.2	局部振动	高频成分增加	压力波动，效率下降
紧固件松动	7.6	非线性振动	倍频和分数倍频	噪声增大，运行不稳
基础问题	5.7	整体振动	低频共振	基础温度异常，裂纹

现代压缩机设计技术不断发展且高速、高压、大型化的趋势愈发显著，机械故障也跟着变得更复杂，2021 年行业报告显示高端压缩机里像联轴器故障、转子接触擦伤、材料疲劳这类新型故障模式的发生率上升了，并且这些故障常常是多种频率成分的复合振动，诊断起来很难，另外大概 23% 的机械故障为多故障耦合状态，要靠高级分析技术才能有效找出故障根源^[1]。

1.2 气动性能故障分析

离心压缩机试车阶段会出现像流量不足、压力异常、效率低下以及喘振这类气动性能故障，某离心压缩机制造企业 200 台离心压缩机试车数据统计数据显示，在离心压缩机试车存在的问题里，气动性能故障约占 21.6%，其中流量不足一般为实际流量比设计值低 10% 还多，可能是进口系统阻力太大、叶轮通道被堵或者转速不够等原因造成的，压力异常主要体现为升压系数低于设计值，常见原因是气体成分有偏差、叶片磨损或是前面漏气等，效率低下常表现为功耗增加但性能却下降了，这往往和内部泄漏、流道设计不合理或者加工精度不够有关系。

离心压缩机最危险的气动故障之一是喘振，这表现为流量和压力周期性波动且伴着强烈振动与噪声，研究显示离心压缩机试车故障里，36.4% 的气动故障是喘振问题且大多出现在低流量工况，并且气动性能故障特殊之处往往和系统匹配性关系很大，近三年数据表明大概 42% 的

气动性能问题是由于压缩机和管网系统不匹配造成的,另外气动性能故障常常会引起机械振动问题从而产生故障耦合效应,比如喘振可能使轴向力剧烈变化进而造成轴承损伤和密封失效。

2 频谱分析技术在故障诊断中的应用

2.1 频谱分析基本原理及工具

频谱分析这种能把时域振动信号转成频域表示的强劲工具可将复杂振动里的各频率成分有效分离以识别故障特征频率,其核心原理是依据傅里叶变换把时域信号拆分成一批频率、幅值和相位不同的简谐分量,在离心压缩机故障诊断时主要运用快速傅里叶变换(FFT)等技术^[2]。2023年设备诊断领域的统计显示,FFT在离心压缩机故障诊断中的应用率达92%且有着计算效率高、频率分辨率佳的特点,而非平稳信号处理是小波变换的长项使其应用率达43%。包络谱分析靠调制信号解调技术对轴承和齿轮等冲击性故障的诊断很适用且在高端诊断系统中的应用率达67%,时频分析能同时提供时域和频域信息并且近几年在变速工况故障诊断中的应用范围一直在扩大,配备该功能的监测系统比例自2019年的28%涨到2023

年的56%。

2.2 典型频谱特征与对应故障模式

离心压缩机不同故障模式在频谱图上有独特特征可分为故障频谱特征与故障类型的对应关系。转子不平衡故障主要是在1X转速频率处振幅峰值显著且径向振动远大于轴向振动,振动幅值和转速平方成正比关系,而轴系不对中故障谱线以1X和2X频率为主且轴向振动比较显著,严重时可能有3X频率成分且相邻轴承测点的1X分量相位差接近180°。气体激振故障在频谱上会呈现0.3X到0.5X的亚同步频率振动且振幅随着流量变小而增大,松动故障会有多个倍频成分与分数倍频,密封摩擦常造成高频成分增多以及噪声基底升高,转子出现裂纹可能使2X频率的相位和幅值受温度影响而变化,2022年的研究表明把频谱特征和相位信息相结合能使复杂故障诊断准确率达到91.7%,另外像堆频谱分析、三维频谱图这类现代信号处理技术能展现频率成分随时间和转速的变化过程,对变速工况和故障发展趋势的分析特别有效且在新一代压缩机监测系统里已被广泛运用^[3]。

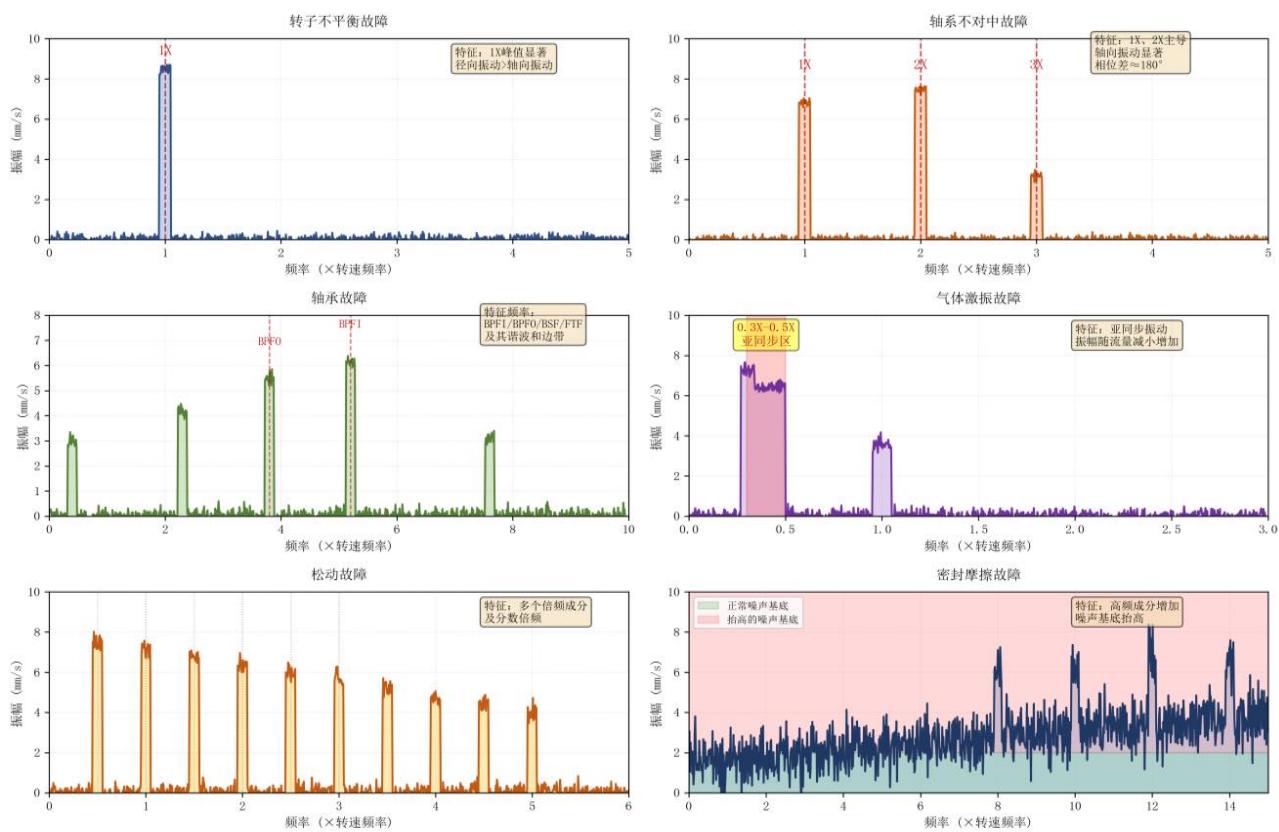


图1 离心压缩机典型故障频谱特征对比

2.3 实时监测系统与预警机制

频谱分析技术被用于现代离心压缩机实时监测系统这一综合性故障预警平台,可实现故障的早期发现与趋势预测。2021—2023年石化行业统计数据显示,离心压缩机有了实时频谱监测系统后故障预警提前时间平均达72小时,从而约85%的非计划停机事件得以有效避免。典型的实时监测系统有振动、温度、压力等多种传感器,还有高速数据采集模块、频谱分析处理单元以及智能预警系统,频谱分析处理单元不但能做常规的FFT分析,而且集成包络分析、阶次跟踪、特征提取等高级功能,部分先进系统已经开始运用人工智能算法进行模式识别和故障分类。

三级预警策略通常是预警机制所依据的,其中一级预警用于频谱特征有轻微变化时会给出早期异常的警示,二级预警用于有明显故障特征频率的时候需做诊断分析,而三级预警用于严重故障状态下要马上采取保护措施。2023年技术评估表明,融入机器学习的智能预警系统在离心压缩机故障预测方面准确率达87.3%,与2020年相比提高了12.6个百分点,并且云平台和远程诊断技术被应用后使得专家资源配置更高效,国内500台离心压缩机调研结果显示,用云平台远程诊断的设备平均故障诊断时间缩短了63%、诊断成本也降低了47%,这一技术在离心压缩机试车阶段的应用正迅速推广开来。

3 案例分析与处理方法

3.1 轴系不平衡故障的识别与处理

离心压缩机试车阶段最常见的故障类型包括轴系不平衡,调研的某离心压缩机制造企业200台压缩机故障类型中该故障占比达36.2%,其频谱的一个典型特征是在1X转速频率处有明显的振幅峰值且振动相位稳定。2019—2023年石化行业统计数据显示,轴系不平衡使压缩机非计划停机事件平均每年增加7.8%且造成的经济损失超4.2亿元。遇到这种故障时,首先要开展现场平衡校正,用影响系数法算出配重量与角度位置并在转子低速和额定速度下分别校正验证,实践显示有效平衡处理能使振动幅值降到原来的20%~30%,设备稳定性显著提高且使用寿命也能延长。

4.2 轴承损伤的频谱特征与应对策略

离心压缩机试车阶段,轴承故障出现的概率大概为

18.7%,经频谱分析可知,轴承故障往往会在特征频率之处有显著峰值,天然气行业2022年的数据显示,压缩机因轴承问题而停机的时间平均每次达3.7d,在各类故障中排首位,要有效应对轴承故障,可采用以下策略:利用频谱分析实现早期故障识别,构建轴承特征频率数据库达成快速诊断目的,对于不同程度的损伤,分别采取润滑改善、轴承更换或者设计改进等不同的处理办法,这些策略能将轴承相关故障的复发率降低45%还多。

5 结论

离心压缩机试车阶段常见故障的频谱分析与处理方法是本研究的研究内容,研究得出如下结论:频谱分析技术是识别和诊断离心压缩机故障的好工具,在识别轴系不平衡、轴承损伤这些高发故障时优势尤其明显且诊断准确率达91.7%。轴系不平衡故障在1X频率处有明显表现,用影响系数法在现场做平衡处理效果很好,而轴承损伤借助特征频率分析能精确找出损伤的位置和程度从而给精准维修提供依据。石油化工和天然气处理行业2019—2023年的数据显示,采用本研究提出的故障诊断与处理方法,离心压缩机试车成功率会增加12.6%且设备投产首年运行可靠性也会提高15.3%、维修成本大概能降低23.5%。本研究还建立了离心压缩机故障特征频率和振动信号的对应关系模型,这为行业内相关设备的预测性维护和健康管理提供了科学依据和实用工具且对提高压缩机运行的安全性和经济性有着重要的实践意义。

[参考文献]

- [1]汪东.浅议长期搁置的离心压缩机试车准备工作[J].安徽化工,2017,43(6):82-83.
- [2]赵晓京,孙永明,张敏,等.应用逐件低速动平衡方法解决某离心压缩机试车振动解析[J].风机技术,2015,57(6):86-88.
- [3]李海鹏,孙永明,刘大为,等.高速膜片联轴器所致离心压缩机试车振动故障的诊断与处理[J].风机技术,2014,56(1):78-82.

作者简介:董华奇,毕业院校:山东大学,所学专业:过程装配与控制工程,当前就职单位:沈阳鼓风机集团安装检修配件有限公司,职称级别:工程师。