

频谱分析法在齿轮箱故障诊断中的应用

雷 宇

中国人民解放军91592部队 广东 广州 510000

摘 要：频谱分析法作为一种有效的振动分析工具，在齿轮箱故障诊断领域发挥着至关重要的作用。通过转换齿轮箱的振动信号从时域到频域，频谱分析能够揭示出齿轮箱内部运动组件的健康状况。本文详细探讨了频谱分析法的理论基础、实施步骤以及在实际工业应用中的诊断过程。首先，介绍了频谱分析的基本原理和数据处理流程，包括传感器的选择和测点的布置。其次，通过具体的工业案例，展示了如何通过识别特征频率和分析频谱图来确定齿轮箱的具体故障类型。案例分析表明，频谱分析不仅能提高故障诊断的准确性，还能为维护决策提供科学依据，从而减少非计划的停机时间并延长设备寿命。最后，讨论了频谱分析在现代工业维护中的应用前景，并指出了未来技术发展的可能方向。

关键词：频谱分析；齿轮箱故障诊断；振动分析；特征频率；工业维护；故障分析

前言

齿轮箱作为现代工业设备中关键的动力传递和速度变换机构，其结构的紧凑性、传动效率的高效性以及运行的稳定性使其在多种机械设备中得到了广泛应用。尤其在重型机械和连续生产线中，齿轮箱的可靠运行直接影响到整个生产系统的安全、稳定与经济效益。然而，齿轮箱在长期负荷运行的环境下，易受到各种磨损和故障的威胁，如何有效进行故障预测与诊断，保证其持续稳定的运行，是工业维护领域面临的重要挑战。

据统计，齿轮箱因齿轮故障导致的停机和维修成本占总运维成本的显著比例。齿轮箱的常见故障形式包括齿面磨损、齿轮断裂、轴承损坏及润滑系统故障等，这些故障多数会在齿轮箱的振动信号中留下可识别的特征。传统的故障诊断方法如视觉检查、温度监测等虽然直观，但往往缺乏早期预警能力，无法满足现代工业对设备可靠性与安全性的标准要求。

频谱分析技术，作为一种高效的振动信号分析方法，通过对设备振动信号的频率成分进行解析，为故障诊断提供了一种有效的技术途径。与其他故障诊断技术相比，频谱分析具有无需直接接触设备、可以远程监测、对设备状态变化反应灵敏等优点。在实际应用中，通过对齿轮箱振动信号的频谱分析，可以准确地识别出由齿轮损伤、轴承故障或润滑不良等问题引起的特定频率成分。

具体而言，频谱分析能够揭示振动信号中各个频率成分的幅度，通过分析这些频率成分的变化，可以诊断出齿轮箱中齿轮的磨损程度、轴承的运行状态以及润滑条件等。例如，齿轮的故障往往导致其特征频率的幅度

增大或出现新的频率成分，而这些变化可以通过频谱分析清晰地展现出来。此外，与时域分析方法相比，频谱分析在处理周期性和非周期性振动信号方面更为有效，特别是在分析复杂机械系统如齿轮箱的多源振动信号时，频谱分析显示出其独特的优势。

1 频谱分析基础

1.1 频谱分析的工作原理

频谱分析，作为机械故障诊断中的关键技术，通过将时域信号转换为频域信号来识别和分析振动特征，特别是在诊断齿轮箱等旋转机械的故障时显示出其独特的优势。傅里叶分析提供了这种转换的数学基础，使得可以从复杂的时域信号中提取出频率成分，进而分析其振动特性。

在进行频谱分析时，我们通常首先获得一个时间序列的振动数据，记为 $x(t)$ ，其中 t 表示时间。这个时域信号可以通过傅里叶变换转换为频域信号，这一过程可以用下列公式描述：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

其中， $x(t)$ 是时域信号， f 是频率， $e^{-j2\pi ft}$ 是复指数函数，用于将时间域信号转换到频域。

对于周期性信号，傅里叶级数提供了将信号分解为一系列正弦和余弦波的方法，这是频谱分析的基础。一个周期为 T 的函数 $x(t)$ 可以展开为：

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$$

其中， $f_0 = \frac{1}{T}$ 是基本频率， a_n 和 b_n 是傅里叶系数，通过以下公式计算：

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

功率谱密度 (PSD) 描述了信号在各个频率上的功率分布, 对于振动分析尤其有用。PSD 可以从自相关函数通过傅里叶变换得到:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

这里, $R_{xx}(\tau)$ 是自相关函数, 定义为200年1月19日1月1日

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)]$$

其中 $E[\cdot]$ 表示期望值。

在频谱图中, 每一个峰值对应于系统的一个自然频率, 其幅值反映了该频率下振动的强度。故障诊断时, 特定类型的故障如轴承损伤或齿轮缺陷通常会在特定的频率处引起频谱的显著变化。

通过对比健康状态下的振动频谱与当前状态的频谱, 可以识别出由故障引起的频谱变化, 如频率的偏移、新的频率成分的出现或既有频率成分的幅值变化等。这些信息是确定机械设备是否存在故障以及故障类型的重要依据。

频谱分析因其能够提供直观且量化的数据分析而在机械故障诊断领域得到了广泛应用。通过深入理解信号的频谱特性, 工程师可以更有效地监测和维护复杂的机械系统, 确保其长期稳定运行。

1.2 频谱分析在机械故障诊断中的角色

频谱分析在机械故障诊断中的应用至关重要, 它通过精确分析设备振动信号的频率组成, 为维护人员提供了一种强有力的工具, 用以监测和诊断各类机械设备的运行状况。这一技术的核心价值在于其能够揭示机械设备中隐含的、肉眼不可见的问题和异常, 从而使得维护工作能够在故障发展到严重阶段之前介入, 有效防止机械故障带来的生产停滞和经济损失。

首先, 频谱分析能够识别出设备振动信号中的各个频率成分及其幅值, 这对于了解机械的动态行为极为关键。在机械系统中, 每个旋转或往复部件如轴承、齿轮、电机等, 都会在其特定的操作频率下产生振动。这些频率在频谱图上表现为明显的峰值, 正常情况下, 这些峰值是预期内的且具有一定的规律性。然而, 一旦设备出现故障, 如轴承磨损、齿轮损伤或润滑不足等, 相应的频率峰值会出现异常变化, 如幅值增大、新的频率成分出现或现有频率成分消失等。通过分析这些变化, 维护工程师可以迅速定位故障部件和故障性质, 从而采取相应的维护措施。

其次, 频谱分析不仅限于幅值谱的分析。相位谱同样是一种重要的诊断工具, 尤其是在处理如不平衡、错位等故障时。相位谱通过显示各频率成分的相位关系, 帮助工程师理解各部件间的动态交互作用。例如, 在旋转机械不平衡的情况下, 相位谱可以帮助识别不平衡的位置, 指导平衡校正。在复杂的机械系统中, 相位谱分析提供了一种理解和解决由多源振动和复杂动力链相互作用引起的问题的方法。

此外, 频谱分析在预测性维护策略中扮演着核心角色。通过定期监测机械设备的频谱图, 并与历史数据进行对比, 可以早期发现问题的征兆, 从而实施预防性维修, 避免设备突然故障所导致的重大停机。这种方法不仅提高了设备的可靠性, 也显著降低了维护成本。

2 执行频谱分析的方法和步骤

2.1 数据采集与处理流程

在进行频谱分析之前, 必须通过精确的数据采集和处理流程来确保所得数据的质量和可靠性。这一过程通常包括选择合适的传感器、确定最佳的测点位置以及按照技术规范进行数据采集。以下详述了这一过程的关键步骤:

2.1.1 选择适当的传感器与测点位置

选择合适的传感器和测点位置是进行有效频谱分析的首要步骤。传感器的选择应基于所需监测的振动类型 (如加速度、速度或位移) 以及振动的频率范围。例如, 对于高频振动分析, 加速度计是最合适的, 因为它能捕捉到微小且快速的振动变化。而对于低频应用, 如整体机器的不平衡测量, 速度传感器或位移传感器可能更为适用。

确定测点位置时, 应考虑到振动信号的传播路径和故障部件的位置。测点应尽可能靠近疑似故障源, 以最大限度地捕获相关的振动信号。同时, 测点的位置还应避免受到外界干扰的影响, 如电磁干扰或其他机械噪声源的直接影响。通常, 测点的选定还需要结合机械的结构特性和维修经验来优化。

2.1.2 数据采集技术规范

数据采集是频谱分析中的一个关键步骤, 需要严格按照技术规范进行。首先, 必须设置适当的采样频率, 这一参数直接影响到频谱分析的分辨率和可靠性。根据奈奎斯特采样定理, 采样频率应至少是信号中最高频率成分的两倍, 以避免混叠现象的发生。

其次, 数据采集系统的动态范围应能覆盖振动信号的幅度范围, 以确保信号不会因为超出传感器或数据采集卡的量程而产生削顶或其他失真。此外, 为了提高信

号的信噪比，可能需要采用一定形式的信号调理，如滤波、放大等，以便更清晰地分辨出故障特征频率。

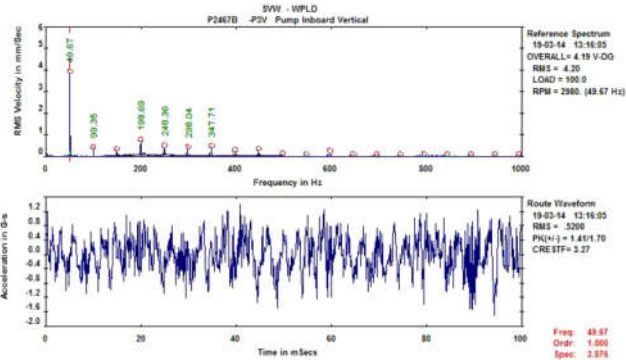
最后，采集到的数据通常需要进行适当的预处理，如去除直流偏置、窗函数处理和时间同步等，以优化分析结果。数据一旦采集完毕，应立即进行存储和传输，确保数据的完整性和安全性。

2.2 频谱分析实施细节

2.2.1 频谱图的生成和解析

在机械故障诊断中，频谱分析的核心在于准确地生成和解析频谱图。这一过程开始于将采集到的时域振动数据转换成频域数据，通常通过快速傅里叶变换（FFT）实现。该转换揭示了振动信号中的所有频率成分，并将其表示为频谱图上的不同幅值。

生成频谱图后，解析步骤涉及详细查看这些频谱图，以识别出显著的峰值和异常模式。每个峰值都代表一个特定的振动频率，其幅度表明该频率的振动强度。这一信息对于确定机械部件的健康状况至关重要。频谱图的样本插图请见下方：



2.2.2 特征频率的识别与对比

特征频率的识别是通过比较频谱图中的实测数据与已知的健康状态或故障状态的标准频谱来进行的。对比分析揭示了关键的频率变化，这些变化可能指示机械部件的特定故障。下表展示了一个典型的频谱分析数据对比，其中列出了正常与异常状态下的频率及其对应幅值：

频率 (Hz)	正常状态幅值 (mm/s)	故障状态幅值 (mm/s)	备注
50	0.5	1.2	显著增高，可能为不平衡
150	0.3	0.8	轴承损伤初期迹象
300	0.2	0.25	轻微增高，需观察

2.2.3 故障类型的判断依据

确定故障类型通常依赖于特征频率的显著变化和模式。以下是几种典型故障及其在频谱图上的表现：

不平衡：在旋转机械的运转频率处出现单一而显著的峰值。

对中不良：在基频及其高次谐波上显著的幅值增加。

轴承缺陷：特定的轴承故障频率（如BPFO，BPF1）处的峰值显著增加。

齿轮损伤：齿轮啮合频率和其倍频上的异常峰值。

通过结合这些故障特征与实际的振动数据，维护工程师可以准确判断设备的具体故障类型，并采取相应的维护措施。以下频谱图示例显示了一个轴承故障前后的频谱对比：



图2 断齿图

3 实际应用案例

3.1 案例描述：齿轮箱故障诊断

本案例涉及一家大型工业设施的关键齿轮箱，该设备是生产线上的核心组件。近期，操作员报告该齿轮箱在运行中出现了异常振动，引发了对可能导致生产中断的严重担忧。由于齿轮箱的故障可能造成显著的经济损失，因此决定利用频谱分析技术进行详细诊断。

3.2 应用步骤详述

3.2.1 测点布置与实测数据

在齿轮箱的关键位置部署了高精度振动传感器以采集振动数据。选择传感器和测点的位置时，考虑到能最大限度地捕获可能的故障信号，特别关注那些历史数据显示曾有问题的区域。具体测点配置如下：

测点1：安装在输入轴近端，使用加速度计，主要监测轴向振动。

测点2：位于输出轴中点，配置速度计，监测径向振动。

测点3：紧邻主齿轮侧面，使用加速度计，检测可能的高频冲击。

3.2.2 故障分析与诊断结果

通过频谱分析发现，特定频率的振动幅值显著增加，尤其是在50Hz的基频上以及150Hz与300Hz的倍频上，出现了非常规的高幅值谐波，这通常指示齿轮损

伤。对比历史和标准频谱数据后确认,这些异常频率与齿轮损伤特征一致。

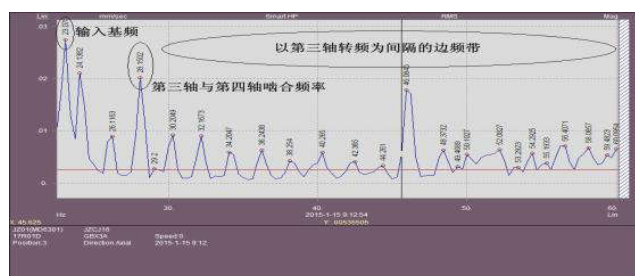


图3 频谱图

此外,对齿轮箱的时域信号进行深入分析,也观察到与这些频率成分相对应的周期性冲击模式,进一步证实了初步诊断。

3.3 故障处理与后续监测

维修团队对齿轮箱进行了停机检查,检查中发现齿轮磨损严重,特别是在预测的故障齿轮上。立即更换了受损齿轮,并对齿轮箱进行了重新调整和润滑。维修完成后,再次进行振动测试,确认所有异常振动已消除,频谱图恢复到正常水平。

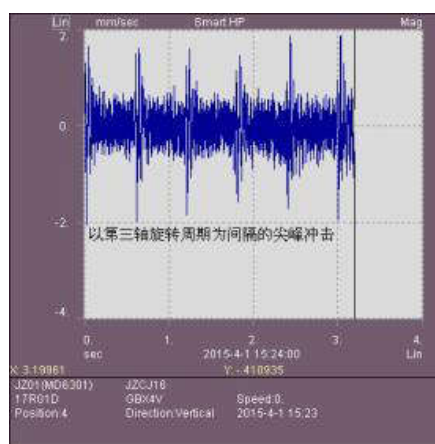


图4 时域波形图

为了防止未来的故障,制定了一项定期监测计划,确保通过持续的频谱分析监控齿轮箱的状态,及时发现任何初始的异常信号。

这一案例成功地展示了频谱分析在机械故障诊断中的实际应用价值,通过科学的数据分析确保了生产的连续性和设备的可靠性,同时优化了维护计划,减少了潜在的经济损失。

4 结束语

频谱分析作为一种先进的故障诊断技术,能够通过

分析设备的振动数据,精确地识别出故障的性质和位置。这种技术不仅提供了一种非侵入式的检测方法,还允许维护团队在不中断生产的情况下评估设备的健康状态。实际应用案例清楚地证明了通过频谱分析实施的定向维护策略能有效预防故障的发生,减少非计划停机时间,从而保证了生产的连续性和设备的高效运行。

然而,尽管频谱分析具有显著优势,实际应用中仍然面临一些挑战。首先,对于频谱分析的准确实施需要依赖于高质量的数据采集和处理。这要求有适当的传感器安装和精确的数据采集系统,同时还需要操作人员具备足够的技术知识和经验。其次,频谱分析的结果需要与其他类型的诊断技术相结合,如热成像、润滑油分析等,以获得更全面的设备健康状况评估。

展望未来,随着物联网(IoT)和人工智能(AI)技术的发展,集成这些技术的智能诊断系统将为频谱分析带来新的应用前景。这些系统能够实时监测设备状态,自动分析大量数据,更快地识别潜在故障,从而进一步优化维护策略和提升设备管理的智能化水平。

参考文献

- [1]张金,张耀辉,黄漫国.倒频谱分析法及其在齿轮箱故障诊断中的应用[J].机械工程师,2005(008):000.
- [2]冯志鹏,赵镭镭,褚福磊.行星齿轮箱故障诊断的幅值解调分析方法[J].中国电机工程学报,2013,033(008):107-111,前插16.
- [3]任爽.基于振动特征分析的风电齿轮箱故障诊断技术研究[D].河北工业大学,2015.DOI:10.7666/d.D820318.
- [4]关宁.风力发电机组齿轮箱振动故障分析方法研究[D].华北电力大学,2016.
- [5]王郁仁,许硕群.振动讯号分析法与预警应用於天车卷筒齿轮箱之损坏诊断研究[J].三联技术,2019(112):8-14.
- [6]朱海琴,刘铁岭.频谱分析技术在齿轮箱上的成功应用[C]//2011年河北省炼铁技术暨学术年会.0[2024-09-19].
- [7]陈换过,易永余,陈培,et al.一种基于eemd和广义s变换的风电齿轮箱故障诊断方法 A wind turbine gearbox fault diagnosis method eemd and generalized s transform:CN 201610169043[P][2024-09-19].
- [8]朱晓岭,王细洋.倒频谱法在齿轮箱故障诊断中的应用[J].失效分析与预防,2009(2):6.DOI:10.3969/j.issn. 1673-6214.2009.02.004.