

中华人民共和国国家标准

GB/T 19873.2—2009/ISO 13373-2:2005

机器状态监测与诊断 振动状态监测 第2部分:振动数据处理、分析与描述

Condition monitoring and diagnostics of machines—
Vibration condition monitoring—
Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data

(ISO 13373-2:2005, IDT)

2009-04-24 发布

2009-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 信号调理	1
3.1 总则	1
3.2 模拟系统和数字系统	3
3.3 信号调理器	4
3.4 滤波	5
4 数据处理和分析	6
4.1 总则	6
4.2 时域分析	6
4.3 频域分析	14
4.4 运行变化的结果显示	20
4.5 实时分析和实时带宽	24
4.6 阶比跟踪(模拟和数字)	25
4.7 倍频程和分数倍频程分析	25
4.8 倒频谱分析	25
5 其他技术	26
参考文献	28

前 言

GB/T 19873《机器状态监测与诊断 振动状态监测》由以下部分组成：

- 第1部分：总则；
- 第2部分：振动数据处理、分析与描述；
- 第3部分：诊断基本技术。

本部分是 GB/T 19873 的第2部分。

本部分等同采用 ISO 13373-2:2005《机器状态监测与诊断 振动状态监测 第2部分：振动数据的处理、分析与描述》(英文版)。

本部分等同翻译 ISO 13373-2:2005。

为了便于使用，本部分做了下列编辑性修改：

- 用“本部分”代替“ISO 13373 的本部分”；
- 删除了国际标准前言，重新编写了本部分的前言；
- 对 ISO 13373-2:2005 引用的其他国际标准，有被等同采用为我国标准的，用我国标准代替对应的国际标准，未被等同采用为我国标准的直接引用国际标准。

本部分由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC 53)提出并归口。

本部分起草单位：郑州机械研究所、西安热工研究院有限公司、东南大学、中国石油化工股份有限公司九江分公司。

本部分主要起草人：韩国明、张学延、傅行军、李海英、张刚、王义翠。

引 言

本部分涵盖机器振动状态监测领域,其目的是为得到监测机器的动态性能,对安装在选定位置上的振动传感器获得信号和数据,进行处理和分析时提供推荐的方法和程序。

宽带振动测量提供机器振动烈度的概况,当机器出现反常时能被观察到并预警使用机器的用户。按照本部分规定的程序进一步处理和分析振动信号,为用户提供诊断机器问题的一个或多个原因的途径,它可用于更集中的连续的状态监测。

这一监测程序的优点是:不但使机器操作人员认识到机器在某一时刻可能失效,并能在失效之前安排维修计划,而且提供关于如何安排维修计划和执行的有价值的信息。振动是诸如不对中、不平衡、磨损加速、流体和润滑等问题的现象或症状。

GB/T 19873.1 包含了机器振动状态监测的指南。本部分包含了对测得的振动数据处理、分析和描述的指南,这些采集的数据可以用于诊断确定问题内在原因或根本原因。

用于振动状态监测的信号处理、分析与诊断程序可能会随着监测的过程、期望的准确度和可用资源等而变化。一个完善而有效的状态监测程序应考虑多种因素,如系统的过程优先次序、关键性和复杂性、成本效益、各种失效机理的可能性和初期失效指示的识别。

一个正确的过程分析需要指定用于监测机器状态期望的数据类型。

振动分析师需要积累尽可能多的关于被监测机器的相关信息。比如,从设计和分析的信息中得知共振频率和激振频率,将提供有关预期振动频率和随后的被监测的频率范围。同样,了解机器的初始状态、机器的运行历史和运行状态也能为分析师提供其他附加的信息。

这种预试验计划过程的其他优点是:能够就选择需要什么类型的传感器、最优的安装位置、需要哪种信号调理设备、可能最适宜的分析类型和相关的准则提供指南。

更多的关于机器状态监测与诊断的标准正在起草中。这些标准旨在通过包括振动、油纯度、热成像和性能参数等要素的监测,为机器“健康”的综合监测提供指南。一些基础的诊断技术将在GB/T 19873的其余部分描述,这些标准目前正在制定中。

机器状态监测与诊断 振动状态监测

第2部分:振动数据处理、分析与描述

1 范围

GB/T 19873 的本部分为正确监测旋转机械振动状态和实施诊断,推荐了处理和描述振动数据以及分析振动信号的方法。描述了不同应用场合的不同技术。包括研究个别机器动态现象的信号增强技术和分析方法。这些技术中的许多方法也可以应用到其他的机器类型,包括往复式机器。本部分提供了为评价和诊断机器状态绘制的通用参数的格式。

当分析振动信号时,本部分主要分为两个基本方法:时域法和频域法。本部分也包含了通过改变运行工况细化诊断结果的一些方法。

本部分仅包括了用于机器振动状态监测、分析和诊断的最通用的技术。有许多其他技术用深入的振动分析和诊断研究来确定机器的状态,这些技术超出了机器状态正常的连续监测范围。这些技术详细的描述不属于本部分的范围。但是这些更加先进的用于特定目的的技术在第5章作为补充信息列出。

对于特定的机器类型和尺寸,GB/T 11348 和 GB/T 6075 系列标准为应用宽带振动幅值进行状态监测提供了指南。其他的文件,如 VDI 3839 和 VDI 3841,提供了指导振动诊断时能被探测到的有关具体机器的问题的附加信息。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 19873 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

ISO 1683 声学 声级的首选参考量

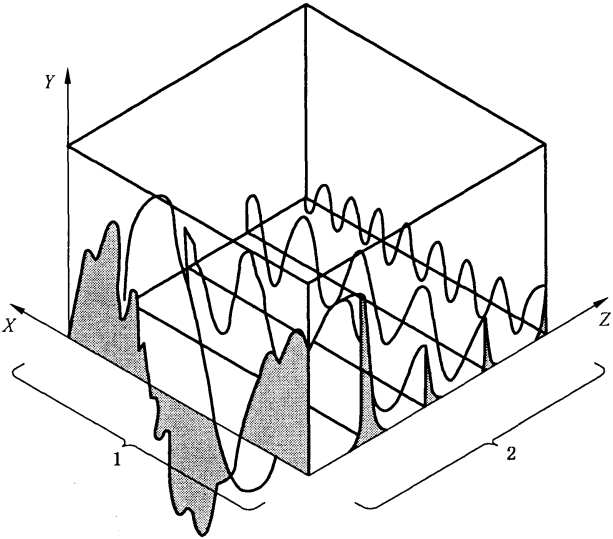
3 信号调理

3.1 总则

所有的振动测量都是通过测量传感器产生一个与振动加速度、速度和位移的瞬时值成比例的模拟电信号得到的。这个信号可以被记录在动态分析仪上,供后来分析或显示,比如在示波器上显示。为了得到实际的振动幅值,输出电压乘上一个校准系数,它由传感器的灵敏度以及放大器和记录仪的增益决定。大部分振动分析在频域进行,但也有一些包括振动时间历程的有用的工具。

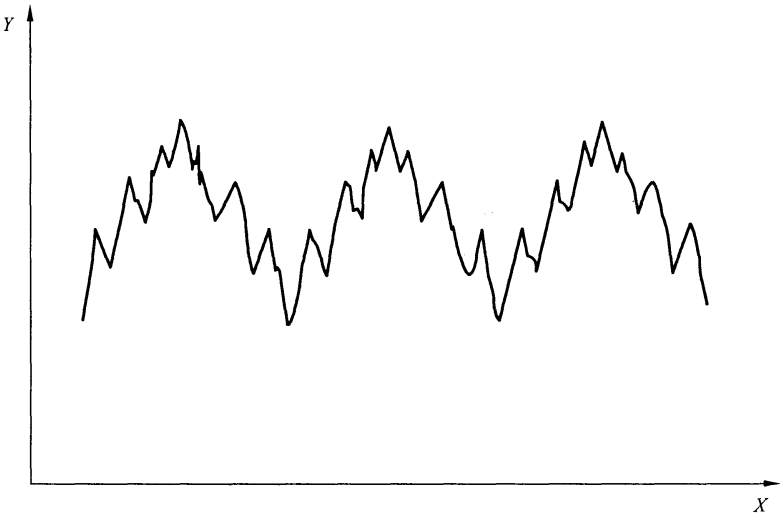
图1表示了时域和频域中振动信号之间的关系。在图中,四个重叠的信号组合成了分析仪显示器中显示的复合轨迹(黑色轨迹)。通过傅里叶处理,分析仪将这个合成信号转换为四个离散的频率分量。

图2是在分析仪屏幕上看到的单一的传感器信号的复合轨迹的简单的示例。在这个例子中,仅有三个重叠的信号,如图3所示,它的离散的频率示于图4中。



X——时间；
Y——振幅/幅度；
Z——频率；
1——时域振动图；
2——频域频谱。

图 1 时域和频域



X——时间；
Y——幅值。

图 2 基本的谱线合成信号

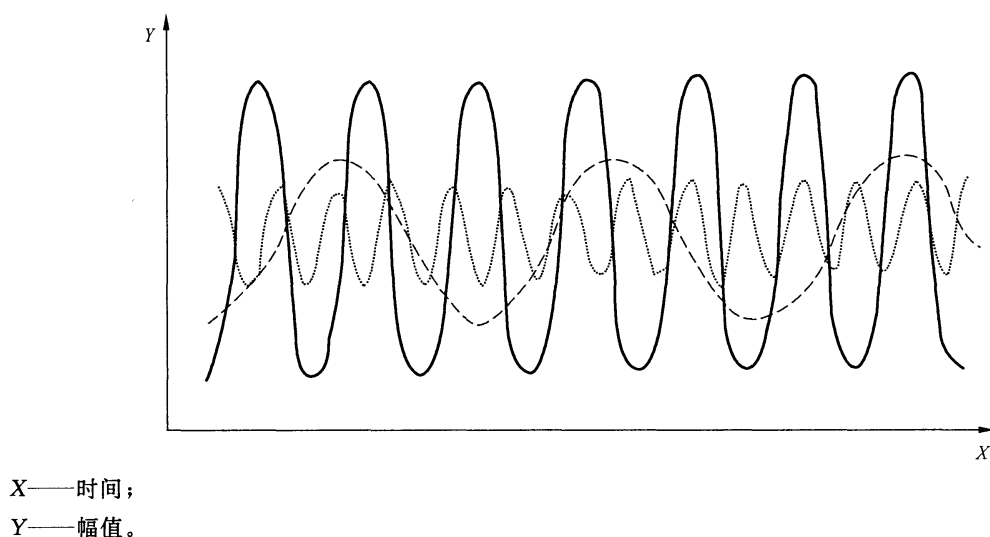


图3 重叠信号

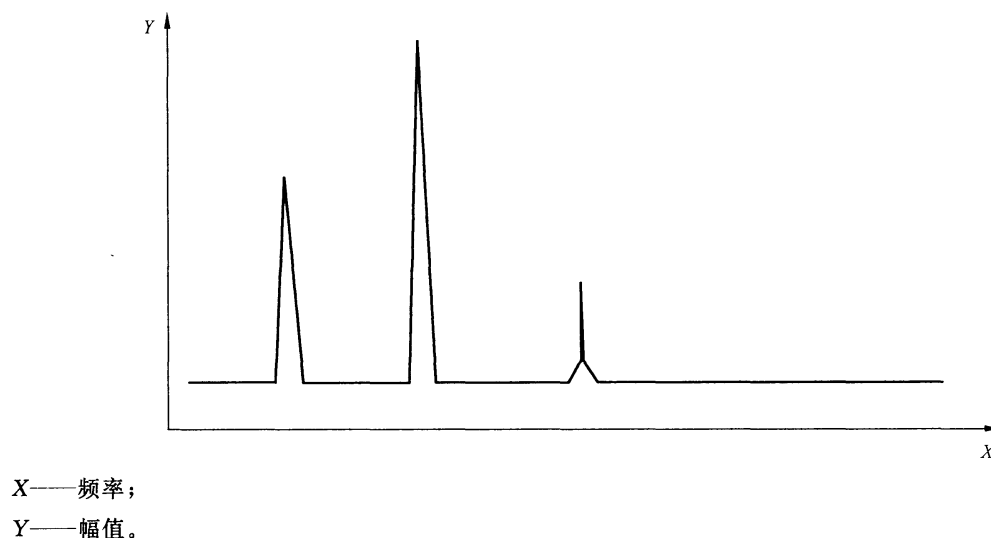


图4 离散的频率

对许多研究而言,结构上不同点处的振动或不同振动方向之间的关系与单独的振动数据本身一样重要。基于这个原因,带内置两通道分析特征的多通道信号分析仪是适用的。当用这一技术检查信号时,振动信号的幅值和相位关系都很重要。

3.2 模拟系统和数字系统

3.2.1 总则

来自传感器的模拟信号可以用模拟或数字系统处理。传统上,模拟系统包括滤波器、放大器、记录仪、积分器和其他可以改进但不改变模拟特性的元件。最近,数字化信号的优点越来越明显。一个模数转换器重复地采集模拟信号并将之转换为数值序列。计算机的数学程序可以用来滤波、积分、求频谱(见4.3.2)、建直方图或任何要求的工作。当然,数字化的信号也可以被描绘成时间的函数。在正确选择采样频率的前提下,模拟信号和数字信号包含有相同的信息。

当使用模拟方法或数字方法时,知道被测信号的灵敏度是很重要的。灵敏度是信号实际输出电压值与实际测量的参数大小的比率。为了得到足够的精确度,所关注的信号应该显著地大于环境噪声,但不能大到使信号失真(如致使信号峰值被削平)。

3.2.2 数字化技术

在数字化处理中最重要的参数是采样率和分辨率。确保分析的频率不大于采样率的一半是很重要的

的。否则,时间历程将失真,或者快速傅里叶变换(FFT)出现实际并不存在的迭混成分(关于迭混的更多的信息见 4.3.7)。采样率取决于将要完成的分析类型和期望的信号频率范围。如果需要振动时域图,建议采样率应是关注的信号中最高频率的 10 倍左右。然而,如果要求频谱,FFT 计算要求采样率要大于被测量的关注的信号的最高频率的 2 倍。抗混滤波器用于去除任何高频噪声或其他超过 1/2 采样率的高频成分。数字化时,每一个样本的长度应当满足要求的精度。

3.3 信号调理器

3.3.1 总则

为了得到适合记录的电压等级或去除噪声或其他不需要的分量,来自传感器的振动信号一般在记录前要进行某种信号调理。信号调理设备包括传感器电源、前置放大器、放大器、积分器和多种滤波器等。滤波器将在 3.4 中进一步讨论。

3.3.2 积分和微分

振动记录数据可以是位移、速度或加速度。通常由关注的频率范围(当用位移时,低频信号比较敏感,用加速度时,高频信号比较敏感)或适用准则选用这些参数之一。振动信号可以通过积分或微分转换为不同量。加速度对时间积分转换为速度,速度对时间积分转换为位移,加速度两次积分直接转换为位移。微分是积分的逆运算。

对简谐运动,数学上有如下的关系式:

位移 $x = \int v dt = \iint (a dt) dt = -\frac{1}{\omega^2} a$ (1)

速度 $v = \frac{dx}{dt} = \int a dt$ (2)

加速度 $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$ (3)

式中:

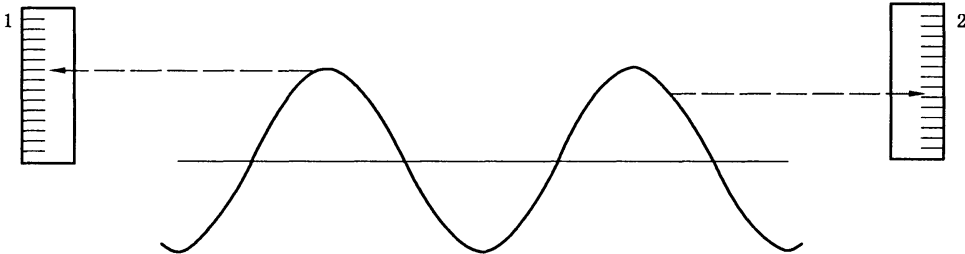
ω ——简谐振动的角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

注: 见 4.3.12。

一般的振动传感器是加速度计,所以积分比微分更加常用。因为信号的微分比积分困难得多,但在低频时积分应特别小心。在积分前,宜用高通滤波器去除比关注的频率低的频率信号。

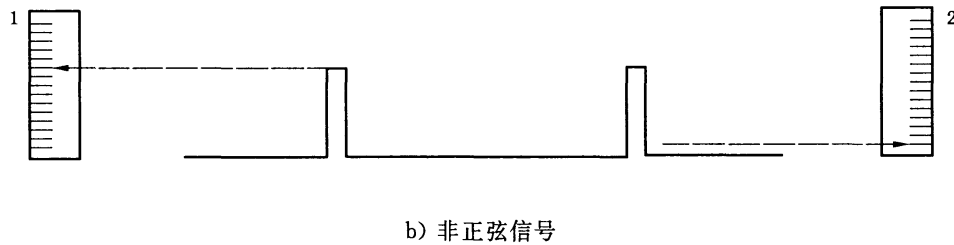
3.3.3 均方根振动值

振动信号的均方根值(r. m. s.)通常用于振动评价标准中。准则通常应用在一定频率范围内的均方根值。这是在给定的时间周期内使用最多的振动量。当有许多频率分量或有调制情况时,振动信号的其他测量可能会造成混乱。可是均方根值是什么信号都可以建立的数学量,而且大部分仪器都可测量该量(见图 5)。也可以用频谱分析仪在关注的高低频段内积分得到均方根值。



a) 正弦信号的均方根值等于峰值的 0.707 倍

图 5 均方根值



- 1——峰值；
2——均方根值。

图 5 (续)

如果在一个短周期内,读数变化不显著的话,振动信号可以按照要求滤波并显示在均方根值标尺上。如果读数变化明显,则应取某一较长时间周期内的平均值。这时,可能需要用有较长时间常数的仪器。

3.3.4 动态范围

动态范围是分析仪能容纳的最大信号和最小信号的比。信号的大小与传感器的输出电压成比例,通常是毫伏级。

模拟系统中的动态范围通常受电噪声限制。一般关注的不是传感器本身,而是滤波器、放大器、记录仪等的动态范围。所有这些均会增加噪声级别,并且结果可能会高得惊人。

数字系统的动态范围依赖于采样精度,采样率相对关注的信号频率应该足够高。用于采集模拟信号的位数 N 和动态范围 D (如果用位数表示符号) 的关系如下:

$$6(N-1) = D(\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

因此,有 16 位分辨率的动态信号分析仪(DSA)将有 90 dB 的动态范围,但任何不准确性将减小动态范围。

3.3.5 校准

在参考文献(例如 ISO 16063-21)中包含有单个传感器的校准,一般在现场应用之前在实验室内进行传感器的校准。推荐在任何现场安装时都要进行现场校准检验。现场校准检验不包括传感器的校准,但包括其他的测量和记录系统,如放大器、积分器、记录仪等。最常用的方法是将一个已知信号输入到系统中测量输出结果。根据测量的类型,这个信号可以是直流阶跃信号、正弦信号或随机噪声。

有些传感器,如位移传感器、接近式探头等是提前安装的,校准应在现场与被测量的表面一起进行。因为接近式探头对转轴材料和表面状态比较敏感,这些探头的校准应在距轴毫米级的地方进行,并且注意每个输出。

当在现场校准惯性式传感器时,需要一个振动台。

应变计在现场安装后通常也需要校准。最理想的校准是用一个已知的载荷施加在被测部件上。如果这样做不实际,可以做并联校准。把一个校准电阻与应变计平行连接,这样,用一个已知量改变应变计的视在电阻,该量等于用应变计因子确定的某个应变变量。

3.4 滤波

有三种基本的滤波用于信号调理与分析:

- 低通;
- 高通;
- 带通。

低通滤波器,顾名思义是只对信号中的低频成分是导通的,而阻断高于滤波器限制频率(截止频率)的高频成分。一个应用实例是抗混滤波器(见 4.3.7)或某些特殊研究时排除不希望的高频分量(如动平衡时齿轮的啮合频率分量)的滤波器。

高通滤波器主要用于去除传感器的低频噪声(如热噪声),或在分析之前一些来自信号的多余的频率成分。这一点可能很重要,尽管不关心这些成分,但它会显著地减少测量设备的有用的动态范围。

带通滤波器,用于隔离特定的频带。比较通用的带通滤波器有倍频程滤波器和 $1/n$ 倍频程滤波器,专用于与噪声测量有关的振动测量。

分析大动态范围的信号时滤波器特别重要。如果在一个频谱中,高幅度和低幅度的频率分量同时存在,由于分析仪的动态范围的限制,通常不能在同一精度等级分析。这时可能有必要滤掉高幅度的频率分量,以便更精密地检测低幅度分量。

滤波器对分离信号与干扰(如电子噪声在高频段,地震波在一个非常低频率段)特别重要。

用滤波器隔离特定的频率分量来分析波形时,应注意确保滤波器足以排除关注的频率以外的任何频率分量。简单的滤波器(模拟和数字的)特性很差。

例如:一个特定的滤波器每倍频程斜率为 24 dB,将通过 2 倍频率分量的大约 15%,1.5 倍截止频率分量的大约 45%。为了提高滤波器的抑制特性,几个简单的滤波器可以叠加,或者用高阶滤波器代替。

4 数据处理和分析

4.1 总则

数据处理包括原始数据采集、滤除噪声或其他无关的信号,按进一步诊断需要格式化测量的信号是有效诊断的重要步骤。采集装置在幅值和时间上应有足够的分辨率。如果使用数字化数据采集,幅值分辨率应满足应用需要。分辨率较高的数据提供更高精度和灵敏度,但需要更加昂贵的硬件和更强的处理能力。

一旦信号被采集,下一步就是处理,并用各种有用的格式输出,以便使用户诊断更加方便。这些格式有奈奎斯特(Nyquist)图、极坐标图、坎贝尔图、级联图、瀑布图、幅度衰减图。这一章主要介绍这些不同的表示方法,更好的确定机器的状态。

4.2 时域分析

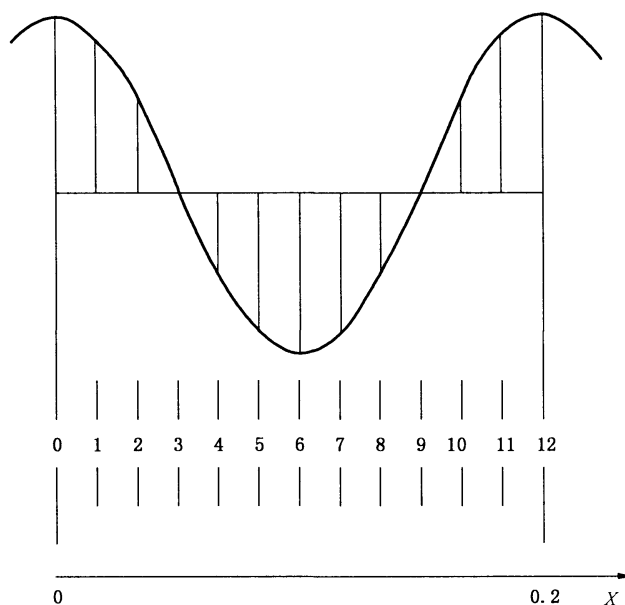
4.2.1 时域波形

波形分析是振动分析的基本方法。一个瞬时振动时域波形或通常用示波器绘图分析,并记录宽带峰值。使用这些宽带技术时,一些基本技术是有帮助的。比如,通过观察位移传感器的波形数据,可以发现划伤的轴颈,带有削顶或削底的波形显示有摩擦、机械松动等现象。

尽管这些时域波形可以提供机器振动现象的基本信息,但 4.3 中更深入的频率分析技术也是必需的。

波形分析基于任何周期性的记录可以表示成正弦信号的叠加的原理,这些正弦信号的频率是波形频率的整数倍。图 6~图 9 显示了波形的几个例子。

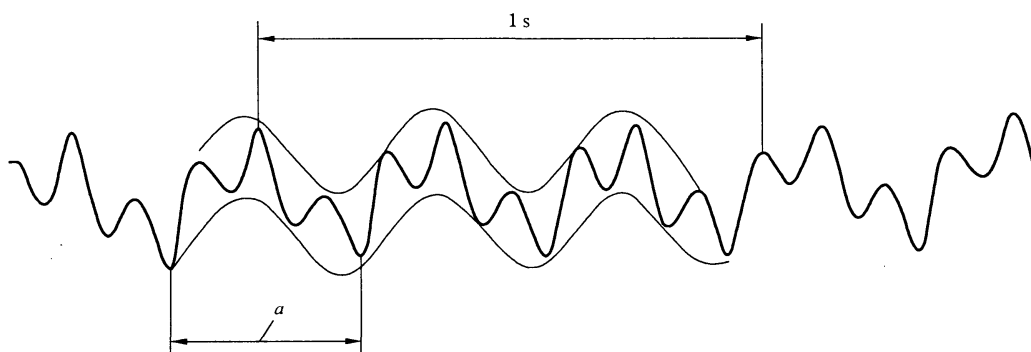
图 6 基本上是恒定幅值的一个循环的正弦波。振动的峰峰值可以通过测量波形的峰峰值与系统的灵敏度相乘得到,系统的灵敏度在校准时给出。频率可以在已知时间周期内通过计算循环数确定。示波器上的时间通过一个时间基线显示或简单地通过纸速知道。对显示的轨迹,每秒钟有 60 条记时线。12 条线显示一个基本周期 T 是 0.2 s,因此频率 $f=1/T$ 是 5 Hz,若使用一较长的记录段内的循环数,则可以提高精度。



X——时间,单位为秒(s)。

图 6 波形特性

图 7 所示是两个正弦波的叠加,这两个信号有最低频率的三个循环。这些分量可以通过所示的所有波峰和波谷的正弦包络线分离出来。低频分量的幅值和频率就是合成包络线的幅值和频率。包络线的垂直距离表示高频成分的峰峰值,高频频率一般可以数出。在这个例子中,能发现高低频相差 3 倍。当两个叠加正弦波的频率比较高时,它们可以如图所示被分离开。在其他情况下,傅里叶分析更有用。



a ——循环。

图 7 叠加波

4.2.2 拍

信号经常有如图 8 所示的轨迹,包络线不规则,形成凸凹不平的波形。这样的信号是由两个频率和幅值都比较接近的分量构成的,这称之为拍,它是叠加的特殊情况。拍的一个实例是双桨驱动船只的两个叶轮频率相叠加的结果。两个信号的峰值交替地相加和相减。拍的其他特征还有拍的长度大致相同,在腹部的峰值之间的距离不同于在腰部的距离。在腹部和腰部的包络线的距离分别代表了两个成分的峰峰值的和与差。另一个例子是由异步电机驱动的两个耦合(压缩机或其他)机器产生的振动。

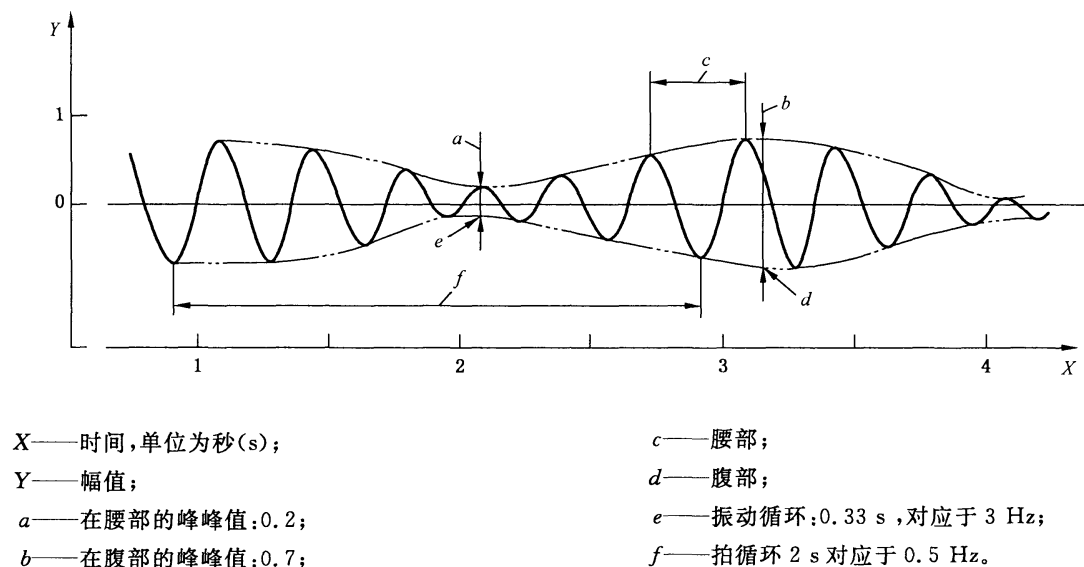


图 8 拍的示例

例:若 X_m 表示分量幅值的较大值, X_n 表示较小值,测量显示 $X_m + X_n = 0.7$, 并且 $X_m - X_n = 0.2$, 解是 $X_m = 0.45$, $X_n = 0.25$ 。这些记录的幅值必须乘上系统的灵敏度才能得到实际的幅值。主分量的频率可以通过前面描述的计算峰值数的方法得到(在图 8 中是 3 Hz)。这个频率也是拍频的整数倍,在本例中是 6 倍。次分量的频率是比拍频大(7 倍)或小(5 倍)的频率。在腰部的峰值间距显示出分量中的一个,因为它反映了主分量。在图 8 中,间距比较窄,因而主分量有比较高的频率。在图 8 中,拍频是 0.5 Hz,次分量的频率是拍频的 5 倍,即 2.5 Hz。

应注意,拍频是两个分量之间的频率差,但是平均峰值频率等于两者和的一半。计算频率的一个简单的规则是:

$$f_b = f_m - f_n \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

f_b ——拍频;

f_m ——主分量的频率;

f_n ——次分量的频率。

在图 8 的例子中,数波峰,在 2 s 内有 6 个峰,即 $f_m = 3$ Hz。拍循环是指在相同时间周期(即 2 s)内的一个循环。意思是拍频 $f_b = 1/2 = 0.5$ Hz。倒置式(5),变为 $f_n = f_m - f_b$, 得到次分量的频率 $f_n = 3 - 0.5 = 2.5$ Hz。

4.2.3 调制

图 9 示出了一个被调制的振动信号的轨迹。它看起来与拍相似,事实上它只有一个分量,其幅值随时间变化(调制)。与拍明显不同的是峰的间距在腹部和腰部是相同的。但腹部的长度可能不同。齿轮故障经常会导致在齿轮转动频率上调制齿轮的啮合频率。

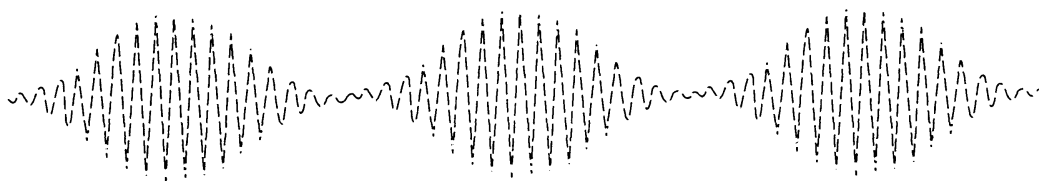


图 9 调制

通常振动记录包含两个以上的分量,并且可能涉及到调制,也可能还有拍。这样的记录特别难以分析。但分析者可以找到一个记录段,在这个段里,一个分量暂时性地占主导地位,并可得到在那样一段内该分量的频率和幅值。

4.2.4 包络分析

包络分析是在一个窄频带内低量级分量的解调过程,此时低量级分量被高量级的宽带振动(脉冲激励的自由振动、齿轮啮合振动和其他)遮蔽。包络检测为更早并可靠地认知缺陷提供了手段。它的最普遍的应用是齿轮和滚动轴承的分析,在这里一个低频、一般是低幅值的重复事件(如一个有缺陷的齿进入啮合,一个剥落的球或滚柱与保持架碰撞)就会激发高频共振,结果高频被缺陷频率调制。一个包络轨迹的例子在图 10 中显示出来。

应注意被调制的成分需要用窄带滤波器预先分离出来。



图 10 包络分析

4.2.5 窄带频谱包络的监测

监测窄带频谱包络可以发现围绕参考频谱的任何包络突破点通常都是报警界限。恒定带宽的包络一般用于恒定转速的机器,它的频率差在高、低频段谱线是相同的。

恒定百分比带宽的包络与被监测分量之间的频率差(偏移)的增加正比于频率的增加。这种方法有优势,因为所有的谐波分量在小的速度变化范围内将保持相同的频带。

单个频率分量的幅值限有两种类型。恒定百分比偏置是最通用的,因为它计算最简单,只需要一个单参考谱。

一个比较有代表性的方法是为包络线上每一段计算一个统计平均值,然后设定报警限在平均值之上 2.5~2.8 标准偏差。统计计算需要 4 或 5 个高分辨率谱,并自动计算通常观察得到的机器谱线幅值变化的正常差。

4.2.6 轴心轨迹

在同一径向位置上相隔 90° 安装了两个位移传感器的任何机器都可以进行轴心轨迹分析。对于带有套筒轴承的大型旋转机器,用轴心轨迹分析确定轴在轴承间隙空间内的运动是适用的。但是,应确保轴心轨迹不能因轴机械的或电气的偏摆而引起不必要的失真。正确的解读轨迹可以判断施加力的性质。确定转轴的正向(旋转方向)或反向(逆旋转方向)涡动也是有可能的。轴心轨迹可以是未滤波的或是已滤过波的。典型的宽带(未滤波的)和单一频率(已滤波的)轴心轨迹图示于图 11 中。

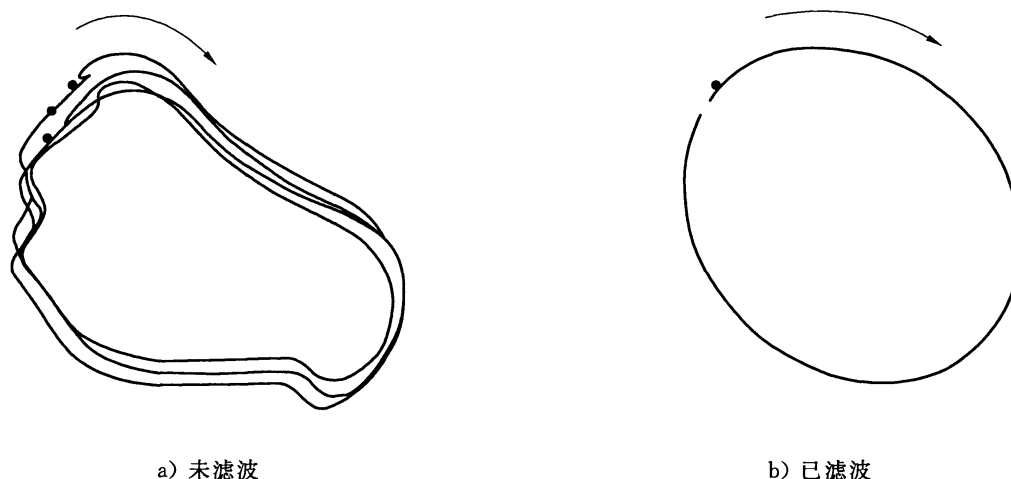


图 11 轴心轨迹

滤波后的同步分量(1X)显示是通用的;然而,为了更深入的描述和解决问题,其他谐波或次同步频率也可显示在轨迹图上。轨迹图上提供的轴键相信号(如每转一次的信号)标记(点或亮点等)给出了关于振动频率和旋转频率关系的信息。

轴心轨迹图代表了在测量平面上旋转轴中心的动态运动。有时称轴心轨迹图为李沙育(Lissajous)图。用于轴心轨迹测量的传感器应该是同一类型并且正交安装(相隔 90°)。如果传感器未正交安装,轨迹图就会歪斜。在轴心轨迹有切口的情况下,惯例是采用“空白一亮”表示。空白指示切口开始,亮指示切口结束。因此,在图 11 中,涡动方向是顺时针的。

轴旋转的方向是顺时针或逆时针取决于视图方向。如果涡动方向与旋转方向相同,就认为是正向涡动,反向涡动就是指涡动方向与旋转方向相反。在图 11 中,由于旋转方向和涡动方向都是顺时针的,是正向涡动。

4.2.7 轴心平均位置

为了确定轴心平均位置,位移传感器经常用偏心率表示套筒轴承的相对载荷。由测量信号的直流部分(即间隙)测出的轴颈在轴承中的姿态在监测大型机器时是非常有用的。轴心平均位置可以确定合适的轴承抬高量以及正确的轴位置。但是,需要注意的是,应避免由于长时间的直流信号的漂移造成的误描述。

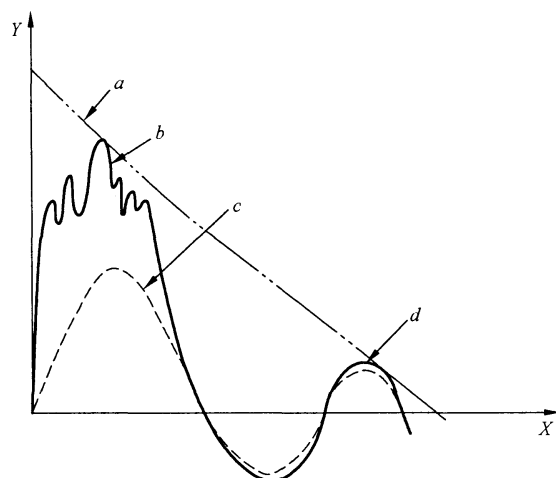
4.2.8 瞬态振动

变速瞬态振动通常是描述机组在开机和停机期间得到的振动信息。振动数据通常显示成如级联图(瀑布图)、波德图、极坐标图(奈奎斯特图)、坎贝尔图等格式。

结构的瞬态振动发生在被一瞬时力激励(该力可能是单个脉冲或一个短时振荡激励),当激励停止时,结构趋向于它的固有频率振动,系统中的阻尼导致它按指数衰减。

因此,在激励力停止后结构响应的时间历程是一衰减的正弦波集合。图 12 给出一个衰减正弦波示例。由于系统的固有模态叠加的复合波形是被瞬时强迫力同时激起的,一般而言,比较高的频率分量衰减较迅速,较高的频率的模态很快被衰减掉,合成波形逐渐地退化为一最低频率模态的有阻尼正弦响应。

滚动轴承的故障通常可以检测到由于球或轴承圈的缺陷引起的重复的高频瞬态响应。



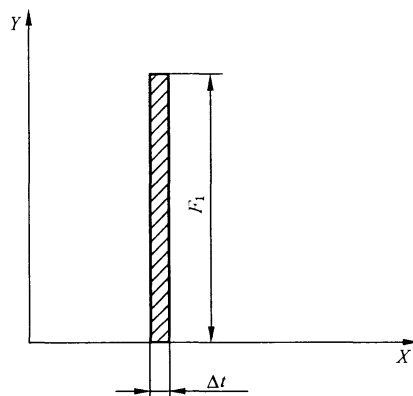
- X ——时间；
 Y ——振幅；
 a ——峰值振幅包络的指数衰减；
 b ——复合波形；
 c ——最低频模态的波形；
 d ——退化的波形。

图 12 结构瞬态振动

4.2.9 脉冲

脉冲响应是机械系统对一冲量的振动响应的时间历程,此冲量可以表示为 $F_1 \cdot dt$ 从 t 到 $(t+\Delta t)$ 内的积分,力 F_1 作用在一个非常短的时间周期 Δt 内,见图 13。

在许多情况下,脉冲响应用于识别固定结构的共振频率。

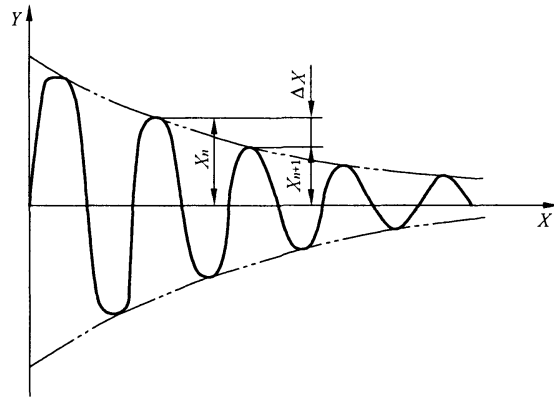


- X ——时间；
 Y ——力。

图 13 脉冲激励

4.2.10 阻尼

阻尼是指通过它振动运动被转化为其他形式的能量(通常是热),导致振动的幅值衰减的作用。阻尼的大小 c ,一般与振动速度成比例,即使不是这样的关系,为了数学分析方便,它常被假设为这样的关系。系统有一个临界阻尼 c_c ,它是系统不振荡地恢复到它的平衡位置所要求有的最小的阻尼。如果系统的阻尼小于临界阻尼,系统将作衰减振荡(见图 14 和 ISO 2041)。对多自由度系统,一些模态可能小于临界阻尼,也有些可能大于临界阻尼。



X——时间；
Y——振幅。

图 14 有阻尼的衰减振幅

如果一个特定模态的衰减振动的幅值 X , 对时间作图, 对数衰减率 d 可以表示为:

$$d = 1/n \cdot \ln(X_1/X_{n+1}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

n ——振幅由 X_1 衰减到 X_{n+1} 的循环数。

损耗因数是系统相对阻尼的普通量度。对数衰减率 d 与损耗因数 h 有关, 即 $h = d/\pi$ 。

注 1: 典型地, 以前表示损耗因数的符号有 h, z, η 。这样表示的对数衰减率包括 α 和 Λ 。

损耗因数也可通过衰减率 X' (每秒分贝) 求出如下:

$$h = X'/(27.3 f_n) \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

f_n ——固有频率, 单位为赫兹(Hz)。

系统中阻尼的大小 c 可以用 Q 表示, Q 值是在无阻尼固有频率时的品质因数。品质因数是频率的函数, 是系统动态位移幅值与系统的静态位移 (假如系统被施加一相同量值的恒定的力时) 幅值的比。假如在模态之间没有明显的相互作用, 对于一个特定模态, Q 可以由下式得到:

$$Q = 1/(2c/c_c) \quad \dots\dots\dots(8)$$

从测量的响应曲线, 在每一个曲线的两侧, 对一个特定的模态 Q 值可能接近于共振频率 f_r 与半功率点 (0.707 倍最大幅值) 两处的频率差的比值。

$$Q = f_r/\Delta f \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:

f_r ——共振频率;

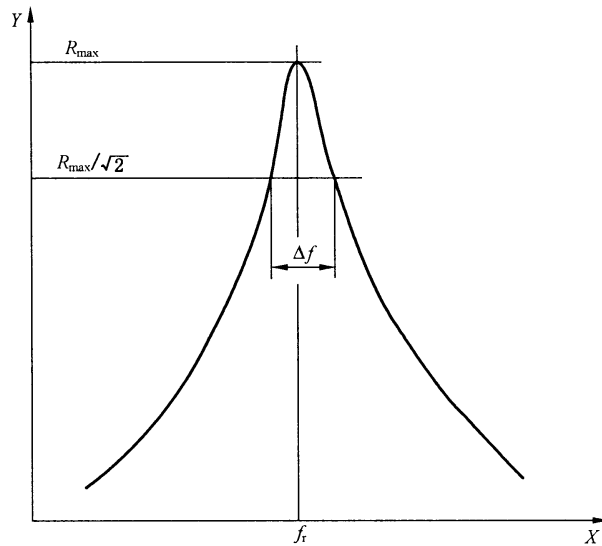
$\Delta f = f_2 - f_1$ —— f_1 和 f_2 是半功率点处的频率。

品质因数与对数衰减率是通过以下近似关系联系在一起的。

$$Q \approx \pi/d \quad \dots\dots\dots(10)$$

注 2: 如果阻尼很小, $Q = 1/h$ 。

作为例子, 图 15 显示了一个从波德图推导 Q 因数的典型的表示方法。相似的结果可以通过极坐标图得到。



X——频率；
Y——响应。

图 15 Q 因数

研究旋转机械振动的原因和影响时,阻尼是一个有用的量。一个接近工作转速的模态要有足够的阻尼,因此不产生较大的响应时才可以被接受。同样,阻尼非常小的模态可能非常灵敏,以致机器响应剧烈,或者甚至不能通过共振转速。

4.2.11 时域平均

每一个信号都包含有与被监测的机器或设备的过程或运动同步的分量,也有非同步的分量(有独立于被观测系统之外的来源)。这些分量可以通过频率分析被分离出来(见 4.3)。另外一个通用的适用于识别这些事件的技术称为时域平均。在这个过程中,通过一个参考脉冲或一个触发使每一个数据样本与不同的旋转成分同步。这个平均可以是几个样本到 200 多个样本在时域中计算,并且一个谱可以仅基于合成的平均时间波形得到。那些与参考信号非同步的时间信号相互之间会逐步渐进地抵消。平均越多越好,平均次数依赖于应用的需要。

在时域平均时,每一个记录对应的样本实际是代数相加,然后除以记录个数。其结果是所要求的重复的波形保存完整,而所有其他的平均趋于 0(包括其他的重复波形)。它们衰减的速率等于平均次数的平方根。

注: 100 次(个记录)平均将减少 9/10 多余的信号;10 000 次(个记录)平均将减少 99/100 多余的信号。

时域平均可用来识别多转子机器中引起振动的转子。还可以用来检测各种故障,如造纸机械中失效的齿轮、叶片和滚轮等。

示例 1: 一个好的例子是一个用不同转轴齿轮驱动的涡轮泵。在每一个转轴上,都有一个每周一次的同步触发信号。来自安装在齿轮箱上的加速度计的信号可以用时间平均法分析。对每一个同步触发信号重复这一过程。用涡轮轴触发,信号归并为一正弦波形,显示出涡轮的不平衡程度。用泵轴触发,信号归并为以叶片通过频率的周期图型,它显示泵轴在轴承座内的一个固定的径向偏移。

示例 2: 将应变测量电桥安装在两个大的水轮机叶片上,通过遥测取信号。每转一次的触发器用来使时域平均同步。经过几次平均以减小流体噪声,一个不规则的图型可能出现,它对每一个叶片是等同的,偏移恰好是叶片转角的偏移。诊断结论是一个不规则的流动通过系列的水闸门,进入水轮机中。随后重新调整这个闸门使水流平缓而降低了叶片上的动应力。

时域平均虽然非常有效,但不能显示异步事件,如滑动轴承故障。

频率谱的平均法一般要求稳态的振动状态。如果有一个非稳态的激励频率或变化的转速,简单的

时域平均不再适用。取而代之的是,信号需要在激励过程的恒定的间隔内采样(如等转角间距或其他位置,这可以通过编码器来做)。频率变换的结果是阶比谱代替了频率谱。对脉冲响应信号,平均法可以在时域通过事件触发来执行,如被激励脉冲调节的触发器。

触发源限于旋转设备。其他的应用如造纸机带、传送带等。另外,信号源不限于振动。它可以是一个与有问题的机器相关的过程信号,能用于识别故障或过程参数,这个参数必须被用于监测故障进展。一个频率乘法器也可以用来代替不同转轴的触发,如齿轮箱有多个转轴时。

4.3 频域分析

4.3.1 总则

大部分的振动分析是在频域完成的,因为多种振源通常能被振动产生的频率隔离开。在频域内单通道分析给出大量的信息,但是更重要的经常是与第二个通道有关的相位或幅值参考,或者两者都有。

4.3.2 傅里叶变换

应用傅里叶变换把一个宽带时间图形转换为离散频率或频带的基本技术,是识别构成总体振动信号的正弦分量的一种数学方法,这些正弦信号包含任何可能出现的机械或电噪声。这些分析可借助计算机和信号处理软件,通过特殊的设备(它们通常称为傅里叶分析仪)或硬件微芯片(DSP)来实现。

振动信号的时间波形转换为明显的正弦分量,这些作为频率函数的分量通过 FFT 得到,如图 16 所示。当用 FFT 分析仪将时间波形转换为一个有意义的频率谱时,需要考虑几个重要的基本因素。在频谱线(或段)带宽、频率范围和时间记录的长度之间有一定关系。在图 16 中,带宽是 2 Hz,在 0 至 200 Hz 之间有 100 条频谱线。应小心选择这些参数,以优化关注的频率范围。

由于迭混的影响(见 4.3.7),高频分量可能会被认为是低频分量。应用抗混滤波器来避免这种可能性。

傅里叶变换的结果是一个复数谱,可以描述每一个频率分量的:

- 幅值和相位;
- 实部和虚部。

从实用的观点出发,幅值谱有更多的信息;而相位谱大多被忽略。

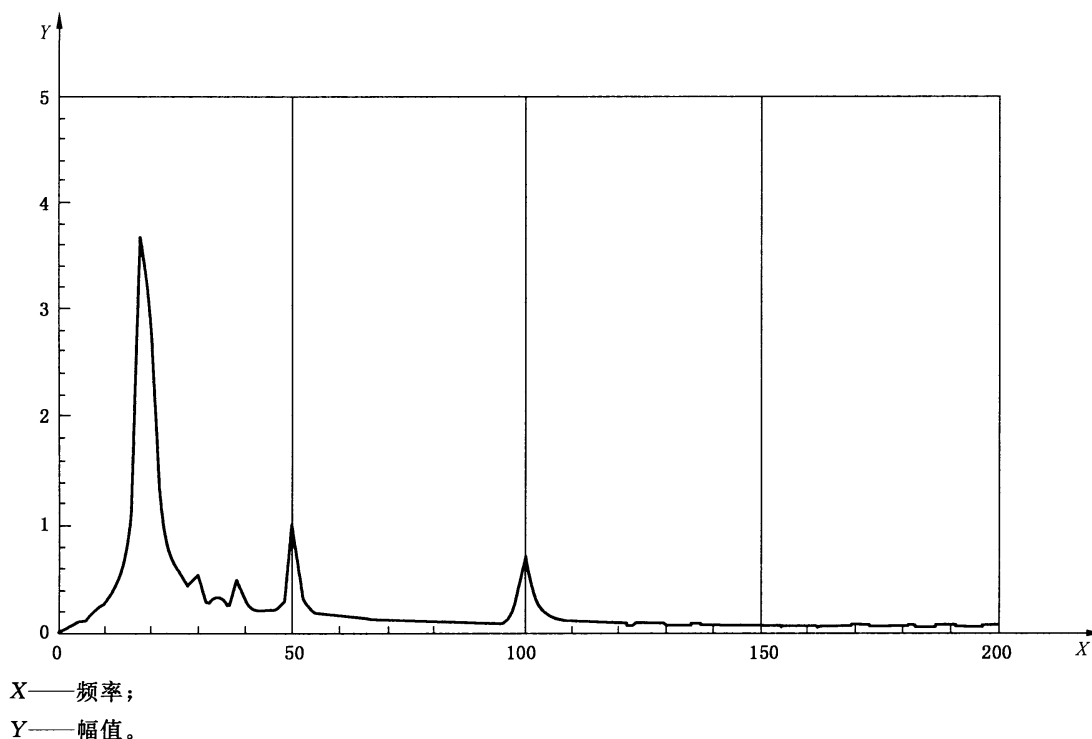


图 16 幅值谱

4.3.3 泄漏和加窗

如果采样包含了非整数周期,分析时就会发生泄漏。由于样本不能精确地表示原始波形,使得频率域峰值模糊。窗函数能减小泄漏误差。最通用的汉宁(Hanning)窗对周期或非周期信号都能做到可接受的效果。还有其他类型的窗可用来增强某类信号。

对于瞬态过程,矩形窗可产生较好的结果。海明(Hamming)窗可给出比汉宁窗更窄的频谱峰,进一步降低边带的宽度。布兰克曼(Blackman)窗以及衍生出的 Blackman Exact 和 Blackman Harris 窗给出一个比汉宁窗宽的峰,但使边带降低。平顶窗牺牲了强信号附近的小信号,但比汉宁窗提高了幅值精度。它的峰最宽,边带与汉宁窗相当,峰的顶部对随频率变化的电平读数是最平坦的。通过修改采样偏置,窗可以改善异步波形图,如频谱图、级联图、瀑布图。平顶窗也可以用于校准。

注:傅里叶变换的时域窗在 ISO 18431-2 中描述。

4.3.4 频率分辨率

数学上 FFT 要求关注的频率范围应被分成为有限的段,并且在每一个段内振动的幅值显示为垂线,有时称之为“基带”谱。段数称之为分辨率线数(LOR) N_{LOR} 。在单一的 LOR 段中的频率,可能不止一个频率成分,分析包含了所有这些总能量,并以段的中心频率作为单线显示。

使用足够的谱线(分辨率)数来分辨相距很近的频率分量,并使频率范围包含所有关注的频率是很重要的。通常至少需要使用 400 条谱线(分辨率),但是很多仪器都要求更高的分辨率。频率分辨率适用下面的关系式:

$$N_{\text{LOR}} = f_{\text{max}}/B \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

N_{LOR} ——分辨率线数;

f_{max} ——关注的最高频率;

B ——带宽(线量程)。

如上式所示,对于相同的关注的频率范围,分辨率越精细,带宽越小(谱线数越多,频率分辨率越小)。

4.3.5 记录长度

简单实现傅里叶变换只需要一个短的记录长度,对快速傅里叶变换而言,要求的记录长度依赖于带宽(频率分辨率) B :

$$T = 1/B \quad \dots\dots\dots(12)$$

记录的可用长度可以限制分辨率。如假设一个谱有 100 Hz 的频率范围,400 线的分辨率,带宽将是 1/4 Hz,记录长度至少是 4 s。对同一分辨率,如果量程按某一因子增加,记录长度以同样的因子减小,带宽将会以相同的因子变宽。

如果在试验时机器轻微地改变转速,重要的是要有足够宽频段,以便在单一信号段中包含关注的每一频率分量。在机器转速变化大的情况下,要在恒定的角度间隔处采集信号,并且需要处理后续的阶比谱(见 4.2.11 和 4.3.8)。

4.3.6 幅值调制(边带)

在时间域中看到的幅值调制如 4.2.3 中所示。调制正弦波的 FFT 在频率任意边显示其频率和边带,边带和正弦波频率的距离等于调制频率。如果调制波自身是正弦波,边带将是清晰的并且在主频率的每一侧只有一个出现。当齿轮之一有偏心或磨损,将出现一个齿轮啮合频率。如果调制是周期的(如每转一次)但又不是正弦的,将会有几个清晰的边带。如果调制不是周期的,边带将模糊不清。

边带的出现在借助测量分贝降低值探测大型感应电机的转子断条事故时可能非常有用。分贝降低值 L_D 等于 20 倍的转子断条故障时边带峰值对线频率幅值的比的对数值。数学上,这个关系式是:

$$L_D = 20\lg(l_1/l_{\text{ref}})\text{dB} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

l_1 ——边带幅值;

l_{ref} ——线频率的幅值(50 Hz 或 60 Hz)。

如图 17 中所示,正常的电机的谱图由线频率处的清晰的峰和两侧间距相等的边带组成。边带的量值可能比线频率的量值降低大约 60 dB。

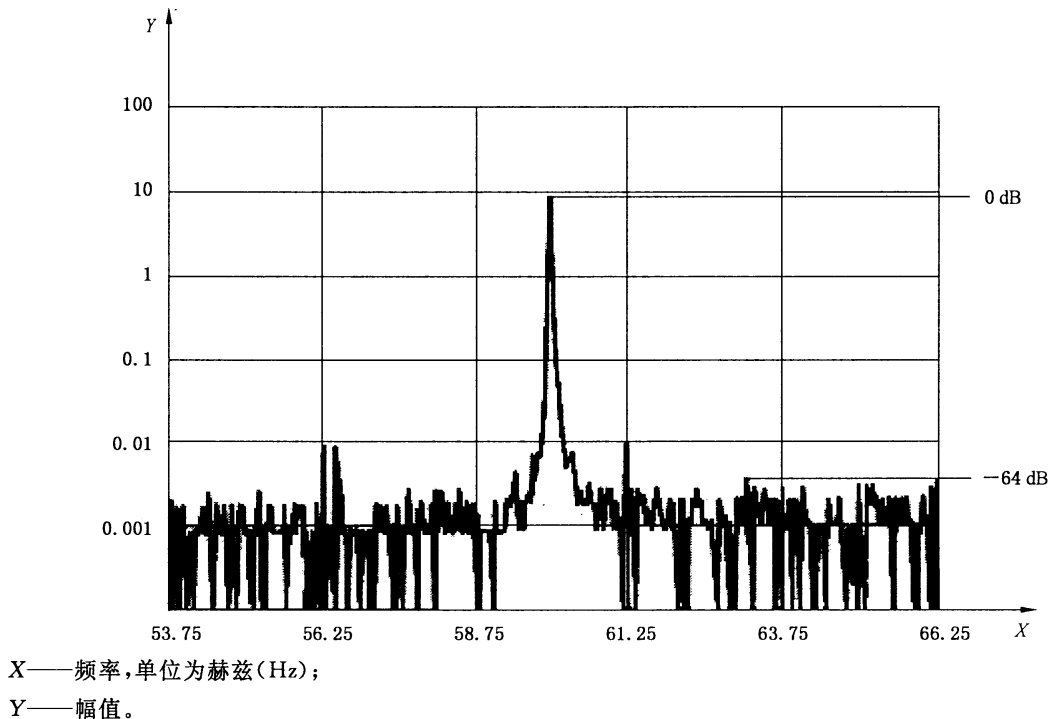


图 17 无故障电机

图 18 是一个有故障的电机的谱图。在线频率处有一个显著的峰并且在转子断条故障频率处,边带被提升了。

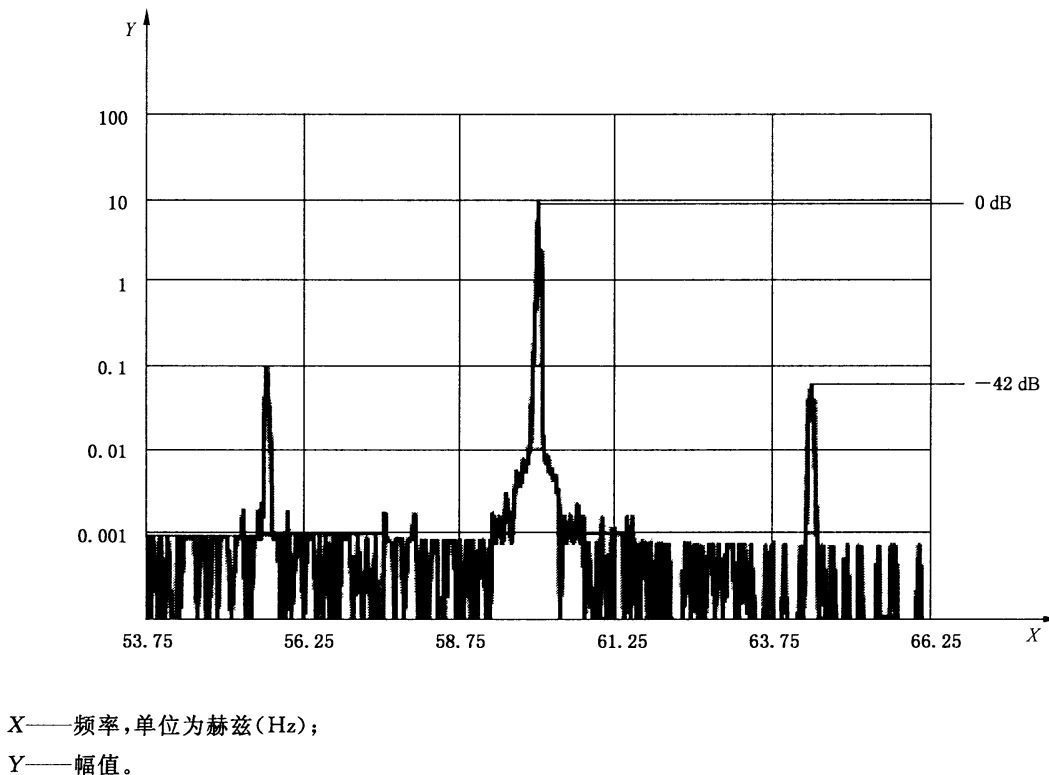
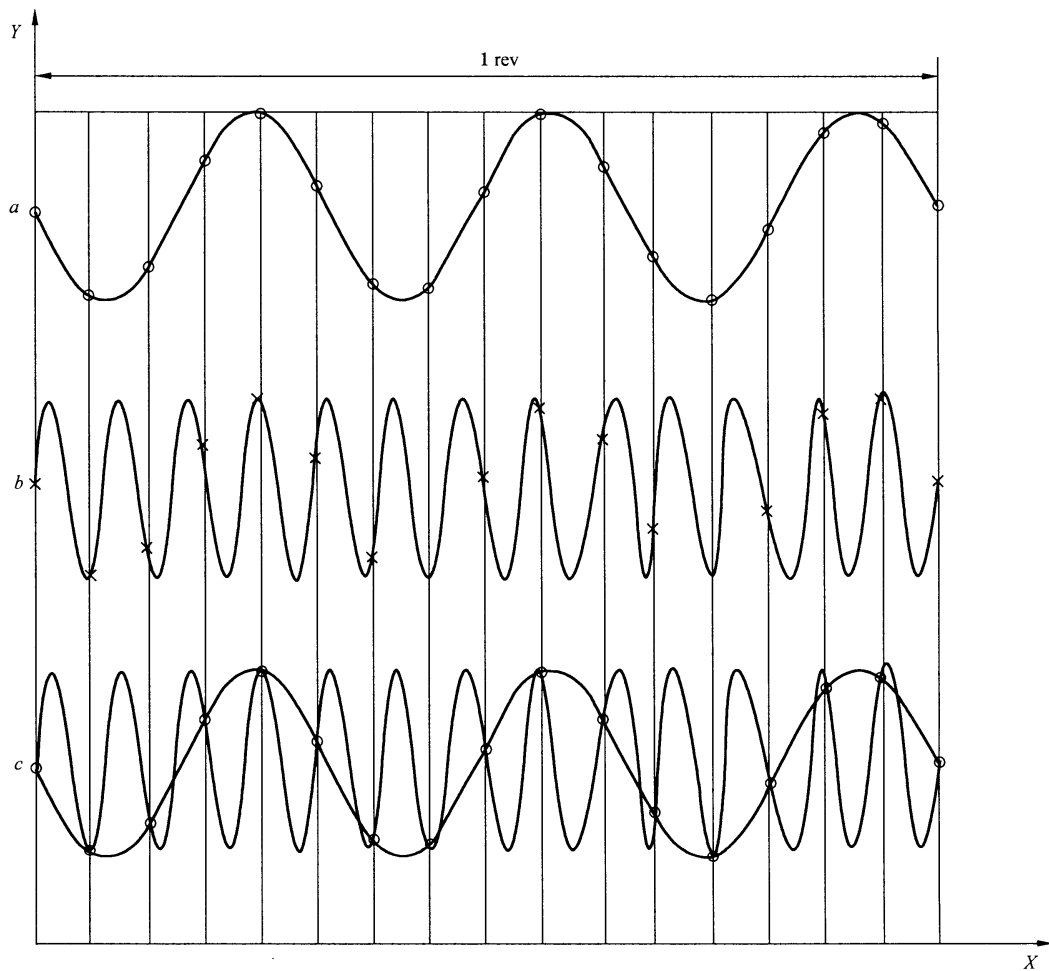


图 18 故障电机

注意,在频域中的边带结构与时域中的包络线有相同的信息。

4.3.7 迭混

迭混是指当数字式分析仪的采样频率太低以至于无法充分描述频率时而导致的频率的错误表示。这与当频闪探头的采样频率与圆盘的转动频率完全重合时,在圆盘上会出现一个固定点一样。然而,如果这个频率不是正好同步,圆盘将慢慢转动。同样,如果对正弦波采样太慢,它将呈现一个比较低的频率。采样前通过低通滤波器除去高频信号,以确保其不含有超过采样频率一半以上的频率成分。这在图 19 中有清晰的描述。通过比较高频正弦波的频率与采样间隔的频率,可以看到采样频率比信号频率的一半要低。因此,被分析的是加点的低频信号,它作为迭混信号替代了被测量信号。这就是为什么采样的幅值(在两条曲线中被标示出的交点)与被测量的高频信号以及低频的迭混信号相对应的原因。当采样频率正好是信号最大的预期频率的两倍时,这就是所熟知的奈奎斯特(Nyquist)频率。实际上,考虑到低通滤波器无陡峭的截断,大多数的采样频率被设定在最高频率的两倍以上(大约 2.56 倍)。



- X——时间;
 Y——激励;
 a——3 次/转激励;
 b——13 次/转激励;
 c——3 次/转和 13 次/转激励。

图 19 迭混

目前的数字式分析仪使用抗混滤波器,在被采集的时间数据转换为数字数据之前,滤掉了高于采样频率 40% 的所有频率。因此,对于大多数的数字式分析仪,迭混不再是问题。但是,在分析数据之前,分析者应予以确认。

4.3.8 同步采样

除了关于时间的固定频率的采样之外,很多分析仪都可以用外部信号控制采样频率。一般,采样频率将几倍于外部信号的频率。同步采样通常用于旋转机器,机器上的一个旋转标记被用来确定采样频率。采样频率要大于关注的最高阶振动频率的两倍。这个方法有四个主要优点:

- a) 如果机器转速改变,大多数与旋转频率有关的频率成分(叶片、导叶轮、齿啮合等)将保持在相同的频率段中,而不将能量扩散到两个以上的段中。
- b) 振动的所有阶次均在频率段的中心,此处它的幅值测量更准确。
- c) 平均数字化后的测量信号序列时不用考虑转速的变化。
- d) 振动的所有阶次将与外部信号保持相同的相角。这意味着谱可以矢量平均,以加强振动的相关阶次,降低与转速无关的其他信号,包括大多数噪声,平均为 0。

同步采样信号的傅里叶变换结果是阶比谱 $X(n)$, $n=1$ 的阶与转子每转一圈的周期相对应。

注意,数字阶比跟踪是一个实用的方法(见 4.6)。

在执行同步平均时,应注意避免平均掉任何明显的非谐波信号(例如轴承失稳)。

4.3.9 谱平均

依据信号的频率分量,单一的 FFT 仅需记录几分之一秒或几秒。而调制信号可能需要较长的时间来建立稳定的平均幅值。因此,逐次平均是 FFT 分析仪一个非常重要的功能。如果仅一个通道可用,在每一段中的绝对幅值平均不考虑相位。完全谱(实部和虚部)的平均要借助采样过程的触发信号使每一个连续谱同步。

还有其他可以使用的平均技术,如频域平均法。但这非常的复杂,因而只用在特殊的场合。

很多的分析仪是作指数平均的,即用一个指数增加的函数给 FFT 加权,从而加大近期记录的数据信号的权。这个方法经常用来研究瞬态振动,瞬态振动的幅值是指指数减小的。

分析仪中另一种类型的平均法是峰值平均法。它能够在每一个频率段所有的 FFT 中给定的时间周期内找到最大的幅值,并显示出它们的峰值。注意,每一个峰值是在它自己的时间记录内的平均幅值。

4.3.10 对数谱(以 dB 标注)

在振动记录中,通常有很多幅值变化很大的频率分量。许多小幅值分量是很重要的,但是在线性坐标中却几乎看不到。对数谱压缩了大的分量,增强了小的分量,显示出了所有显著的分量,以及出现的噪声的水平。振幅 X 转换成 L 级(按分贝)如下式:

$$L = 20 \lg(X/X_{\text{ref}}) \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

X_{ref} ——参考值。

有时,为了更好的识别或分离出低频分量,频率轴也以对数坐标显示。在横坐标中,不用分贝,而用对数或倍频程(见 4.7)。

分贝差与比例等值,示例于表 1。

表 1 分贝差和等同比值

分贝差/dB	比值
0	1
6	2
20	10
26	20
40	100
60	1 000

小于 1 的比值用负分贝值表示,例如 1/2 对应 -6 dB。

除了位移外,对数的参考值在 ISO 1683 中有规定。对于振动分析,在表 2 中的给定的参考值是可以用的。

表 2 对数参考值

物理量	参考值
加速度	10^{-6} m/s^2
速度	10^{-9} m/s
位移	10^{-12} m
功率	10^{-12} W

4.3.11 细化分析

频率分量距离太近以至于正常的 FFT 无法分辨,尽管它们是存在的,FFT 一般地由 400 条线组成(基带);虽然有些分析仪有更高的分辨率,但是谱线细化技术经常被用于得到更好的分辨率。细化分析用一个频率刻度产生一个频谱,这个频率刻度不是从 0 开始,而是从其他自由的合适的谱线开始,以便所选的线数在关注的频率范围内扩展。虽然带宽相应地变窄,但是记录的长度仍将与带宽有关。使用细化谱线时的一个问题是频率必须很稳定,因为带宽较窄。

使用细化谱线的另一个例子是齿轮故障分析。应用时,故障导致齿轮啮合频率的边带,边带的跨距将指示有故障的齿轮。一个相似的细化方法对识别滚动轴承的故障也是有用的。图 20 显示出做细化分析的优越性。注意,在原始的被细化的谱中不可见的频率分量现在可以看到。

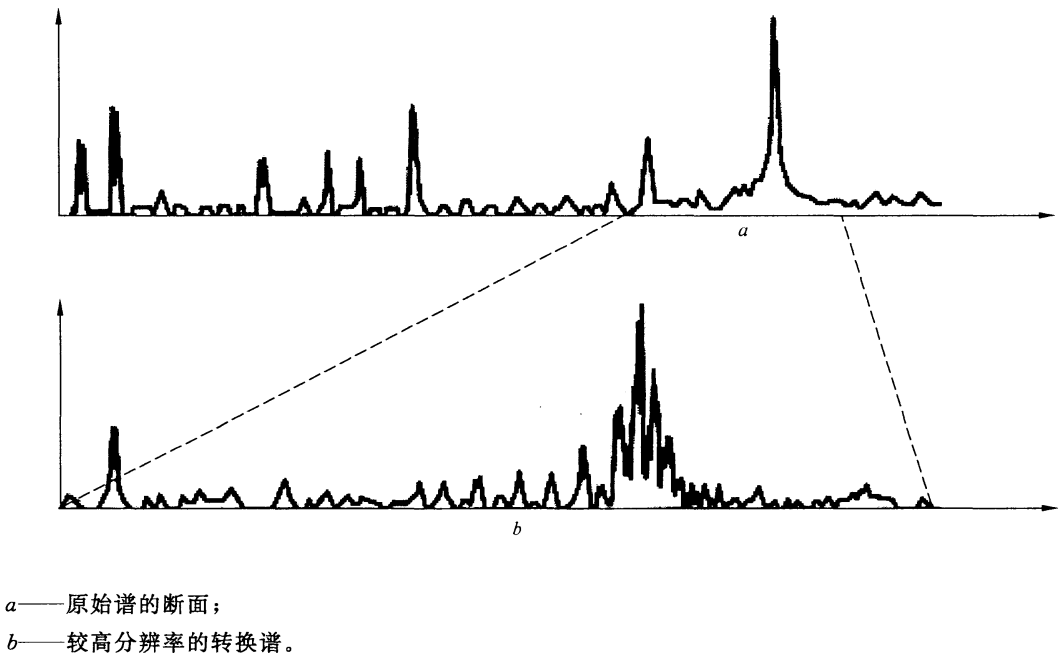


图 20 细化分析

4.3.12 微分和积分

当信号需要在位移、速度和加速度之间转换时,微分和积分在振动分析中是重要的。对旋转机械,通常同步分量主导振动信号,因而可能是简谐运动。时域中采取如下的公式:

位移 $x = \hat{x} \cdot \sin\omega t$ (15)

速度 $v = \omega \hat{x} \cdot \cos\omega t = \hat{v} \cdot \cos\omega t$ (16)

加速度 $a = -\omega^2 \hat{x} \cdot \sin\omega t = -\omega \hat{v} \cdot \sin\omega t = -\hat{a} \cdot \sin\omega t$ (17)

并且:

$$\text{加速度} \quad a = \hat{a} \cdot \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{速度} \quad v = -\frac{\hat{a}}{\omega} \cdot \cos \omega t = -\hat{v} \cdot \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\text{位移} \quad x = -\frac{\hat{a}}{\omega^2} \cdot \sin \omega t = -\frac{\hat{v}}{\omega} \cdot \sin \omega t = -\hat{x} \cdot \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (20)$$

位移滞后速度 90° , 速度滞后加速度 90° 。在频域中转换各量, 用每一个分量的角频率分别除或乘, 就可完成微分和积分。大多数分析仪在频域中包含这些功能。

应强调的是, 为了正确地使用积分和微分公式, 振动信号必须是同步分量占主导。需要检查确定 1X 分量是否大于未滤波的 90%, 或者就是同步分量。另外, 每个谱的频率应单独地被转换。

4.4 运行变化的结果显示

4.4.1 幅值和相位(波德图)

简谐振动信号以振幅和相位表示时, 需要一个信号作为参考相位。它可以是一转轴上的旋转标记、不同的位置或方向上的振动、被测的力或其他合适的参考。参考相位信号的频率应与关注的频率相关。如一个转轴的旋转标记可以作为旋转频率或谐波较高的旋转频率的相位参考。

相位可以在 0° 至 360° 或 $\pm 180^\circ$ 之间表示。

当两个信号代表不同的量时(如力、速度、加速度), 应注意正确地解释其物理意义。注意, 对于任何正弦波形, 位移滞后速度 90° , 速度滞后加速度 90° 。非常普遍地, 信号调理设备会改变信号的相位, 不同通道之间的相位差应给予补偿。

正弦波形的幅值与相位可以被绘制成时间的函数。然而, 当机器振动的振幅和相位对机器的转速作图时, 就是波德图, 如图 21 所示。

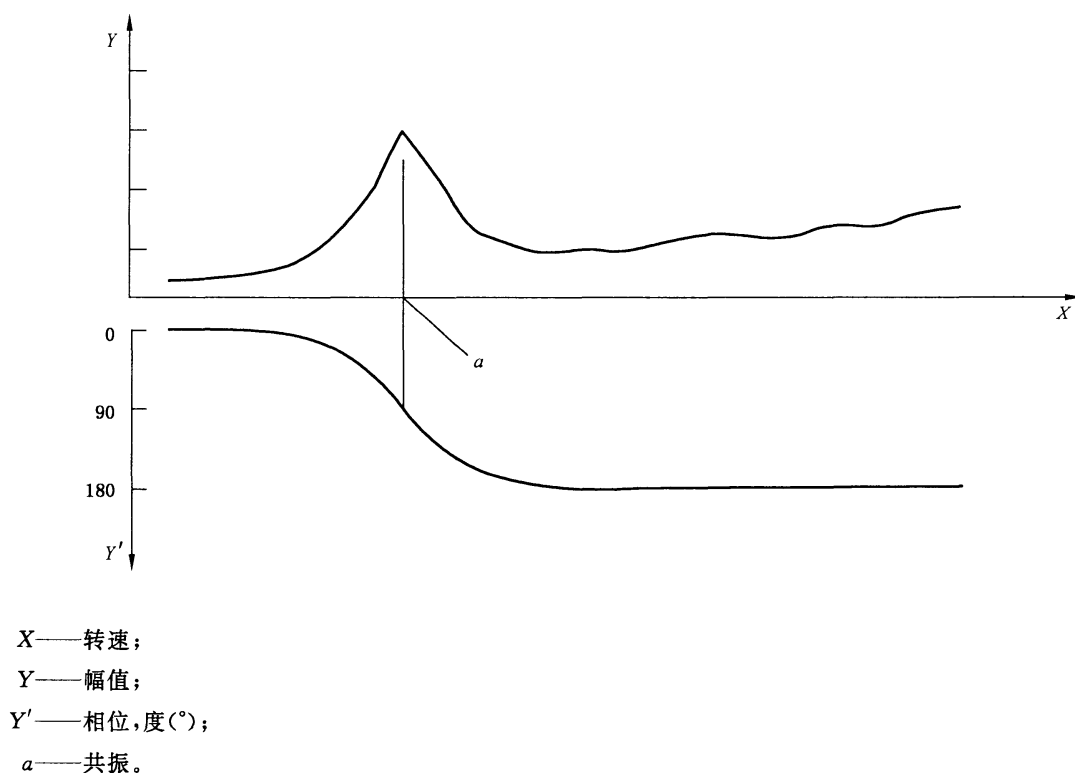
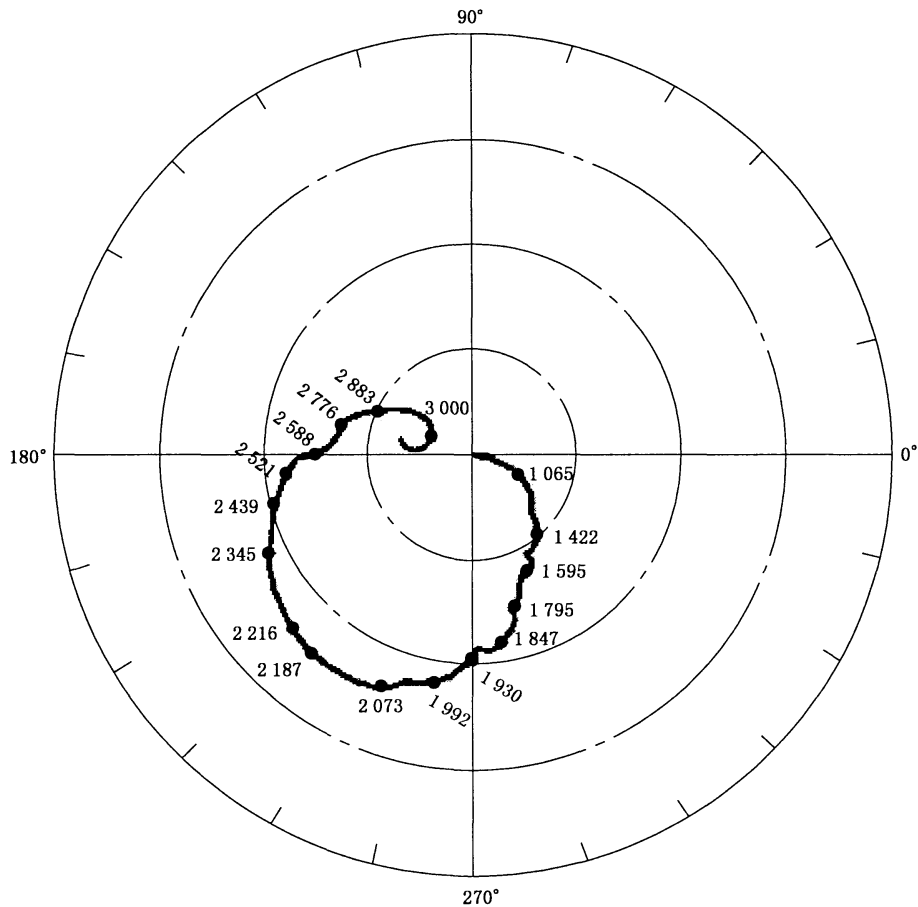


图 21 幅值和相位(波德图)

4.4.2 极坐标图(Nyquist 图)

极坐标图中, 每一个点(对如图 22 中所示的离散的频率)代表一个幅值/相位矢量。该图包含不同旋转频率的矢量或其他参数, 如果仅显示它们顶点之间的连线, 就是著名的奈奎斯特(Nyquist)图。

极坐标图有一个相位参考,如转轴上指示转轴每转 360° 的旋转标记。极坐标图(或/和波德图)用来精确地识别转子、轴承、支撑系统的任何共振点(转速)。



注: 参数是转速(r/min)。

图 22 极坐标图(Nyquist 图)

4.4.3 级联图(瀑布图)

级联图或瀑布图提供若干个频率分析的简单比较。它是谱线显示的三维形式,清楚地显示出振动信号相对于另一个参数(如转速、载荷、温度、时间)的变化,此参数被用作为特定的参数值,如时间。

图 23 中的样本级联谱是机器在开机和停机区间的许多振动谱线的一个总图。正常情况下,级联谱图提供的是频率(Hz 或阶比)与机器转速和离散频率分量的振动幅值的关系。在某些情况下,机器的转速可以被其他参量(如时间、载荷)代替,在此情况下,它被称为瀑布图。当用机器转速显示时,记录转子转速和相位参考信号是必要的。

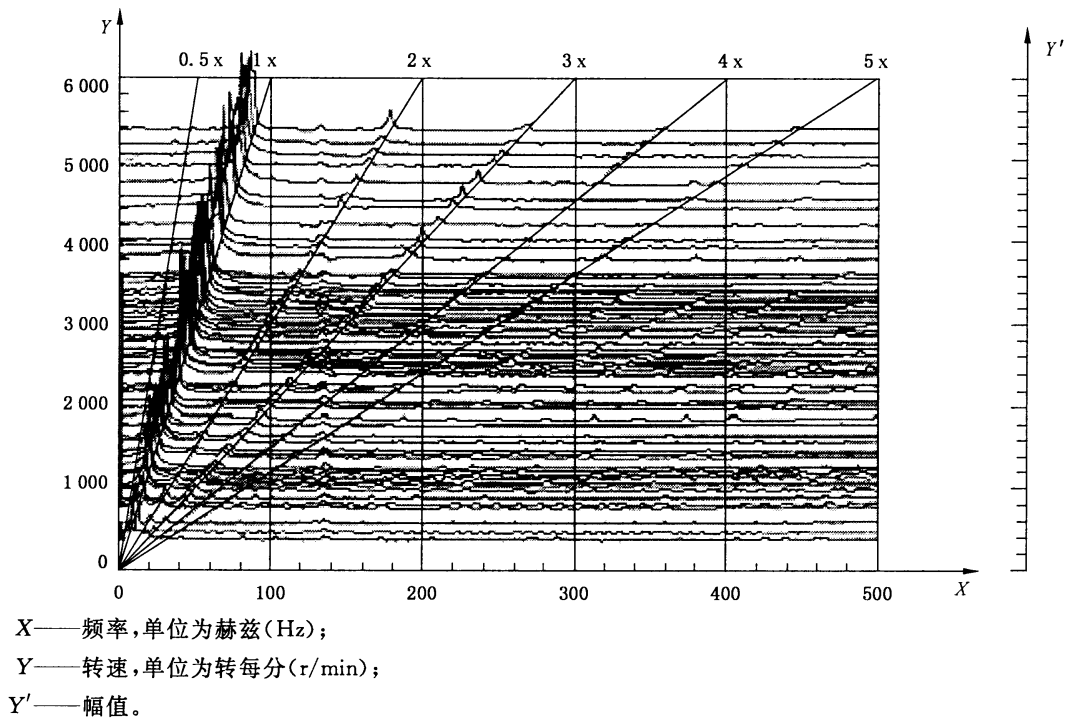


图 23 瀑布图(级联图)

图 24 的级联谱显示了基本转速(1×)和其他的明显的谐波。如果在瞬时转速范围内,它也显示出了转子临界转速的出现。

图的形状将依机器的类型和工况而变化。如图 24 是一台 3 000 r/min(50 Hz)的汽轮机在开机和停机过程中的级联图。

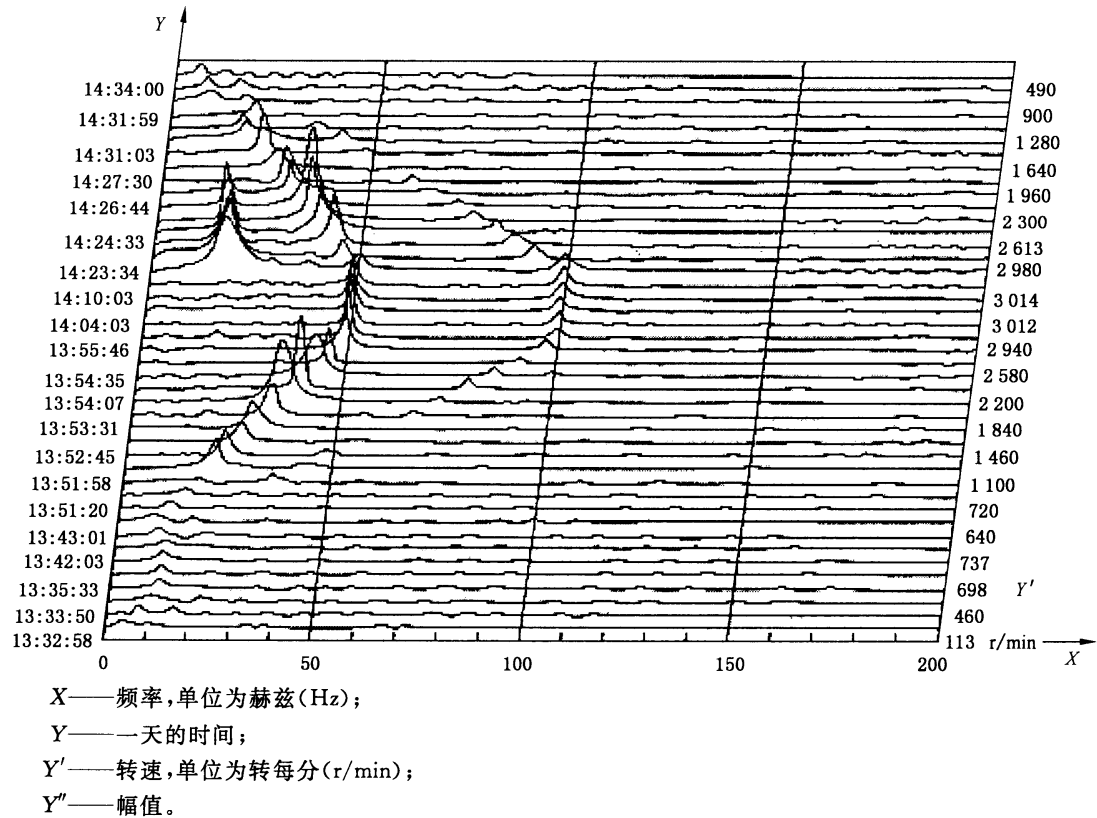
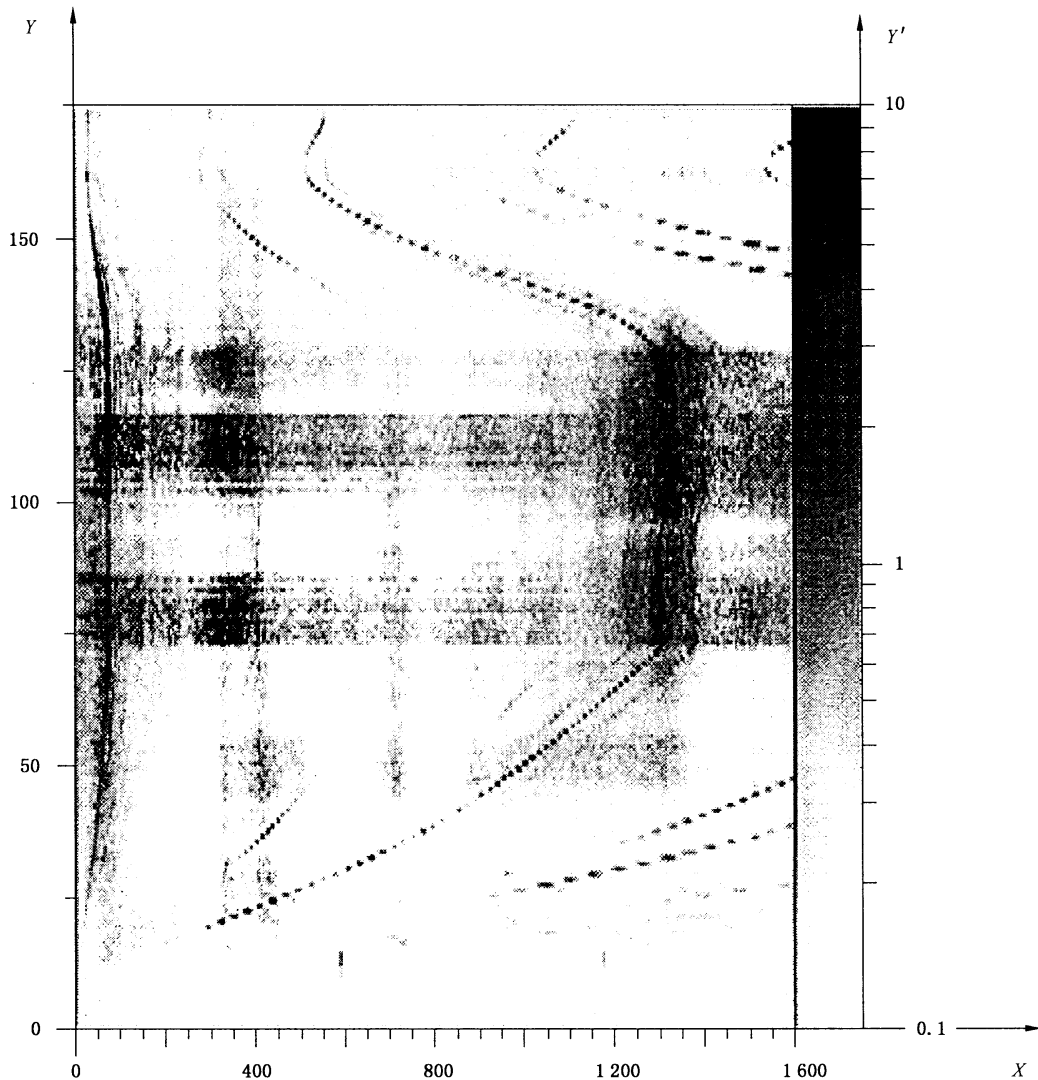


图 24 涡轮机级联图

对于与时间有关的谱,一个可替换的表示方式是用谱图,它是级联图的二维表示,它显示的是速度对时间的变化,幅值大小是由不同的颜色或灰度明暗度来显示(见图 25)。

注:图 25 中显示的另外一台机器,不是图 23 和图 24 中的机器。



X ——频率,单位为赫兹(Hz);

Y ——时间,单位为秒(s);

Y' ——幅值,单位为米每秒方(m/s^2)(用灰度表示)。

图 25 二维谱图

4.4.4 坎贝尔图

坎贝尔图(见图 26)是一种特殊类型的级联图。它联系的是各个频率分量(如叶片、导叶、齿轮啮合频率)的实际频率与转速的关系。振动的幅值可以在第三个坐标中绘制,这样它可以由相应的棒的高度表示。坎贝尔图在识别自激振动时特别有用。

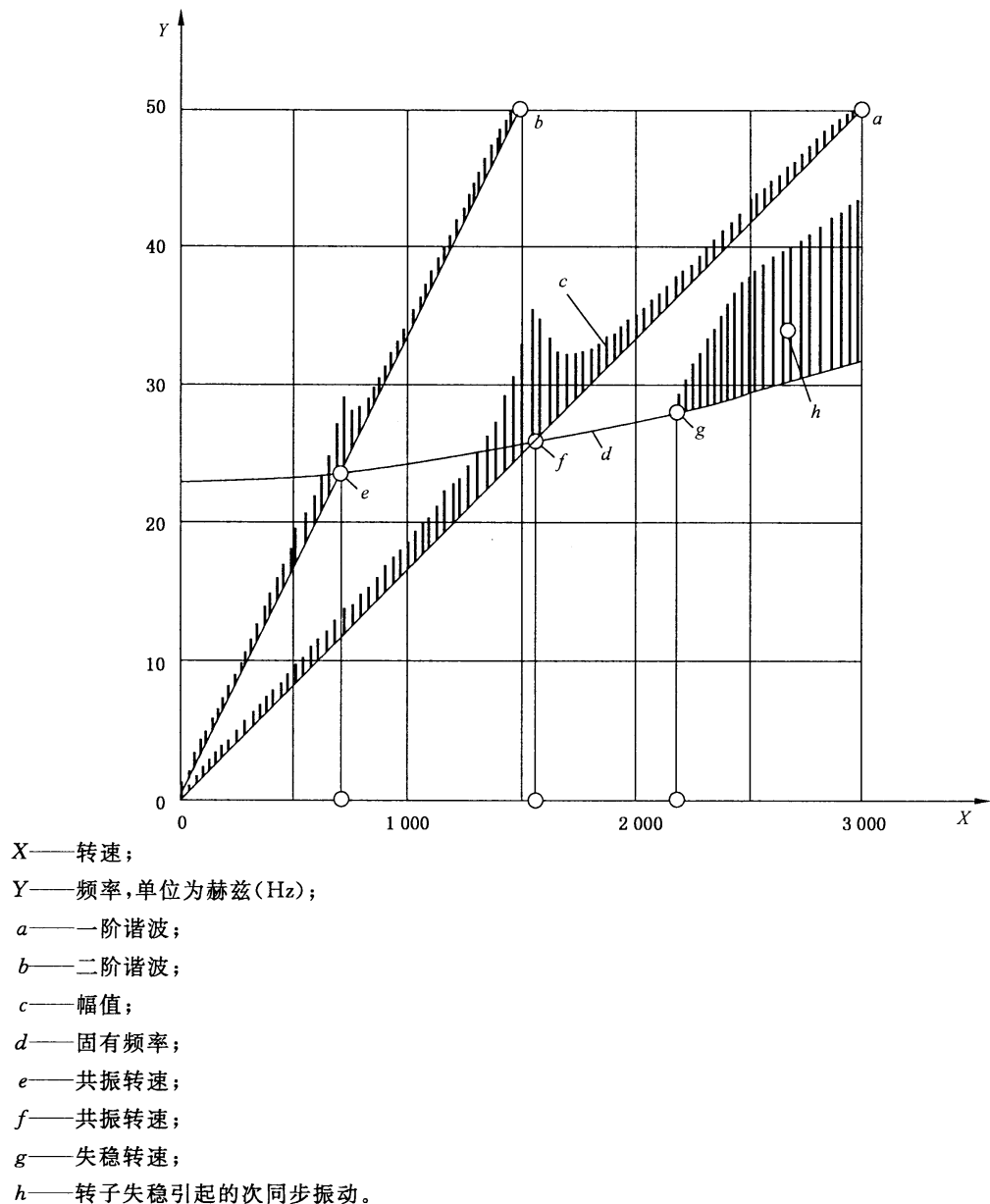


图 26 坎贝尔图

4.5 实时分析和实时带宽

实时分析是指在测量的同时就显示分析结果的一种分析方法。通常简单地认为,数据在记录时被显示给试验工程师观察。然而,在本节中,相对于数据处理的数据采集时间来说,如果处理数据块比采集它花费更长的时间,就是当数据被采集的过程中,不能处理完所有的数据,这就不是实时分析。先记录数据随后回放数据可能是必要的,为了分析它,有时还要重复地播放。换句话说,采集的数据超过处理数据的数量时,多余的数据会被跳过(即不处理)。

在模拟系统中,一种普通类型的实时分析仪包含一个滤波器阵列,它可以同时显示所有输出。早期的倍频程或 1/3 倍频程分析仪就是这种类型。

在数字系统中,振动信号被采样以获得逐次的时间记录,每个记录通过处理得到谱或其他特性。在记录开始处理之前,时间记录的采样应该完整。但是,一个记录的采样与前一个记录的处理可以同时做。如果采样的时间比处理的时间长,则所有的信号都被分析了,并且认为分析是实时的。如果处理时间比采样时间长,部分信号将被丢失,则认为分析不是实时的。不同的分析仪处理数据的速度不同,数据被实时处理的最大的频率范围是实时带宽。

对于大多数定转速机器,实时分析不是必需的。但是,对于瞬态事件,包括开机和停机,实时带宽太窄可能会导致丢失相关数据。避免发生此情况的最通用的技术是记录整个事件,并以一个较低的速度回放来分析它。

4.6 阶比跟踪(模拟和数字)

当从机器上获得频率谱时,如果机器转速变化,得到有意义的平均是困难的,因为来自于特定阶次的能量可能反映到一个以上的频率段中,并且如果速度恒定,其能级较低。根据机器的转速,借助外部采样(见 4.3.8)控制采样的速率,振动的特定阶次的所有能量将刚好被反映在一个频率段中。用每转一次的信号输入到动态信号分析仪来完成这一过程,称之为阶比跟踪。

阶比跟踪首先应有一个跟踪滤波器用于选混保护和将转速信号变换为采样频率(关注的最高频率的 2.56 倍)的比率合成器。与对转速改变率的限制一样,噪声和精度将决定计算的阶比跟踪级数,并将该过程数字化。

计算阶比跟踪时,振动信号和转速信号都将以固定的采样频率数字化。转速信号为每一转建立采样频率,振动信号被插值和重采样在合适的时间间隔为了阶次分析去建立振动信号内插计算并为阶比分析以合适的间隔重采样,对每一转建立步进改变的单独的采样频率,或者通过多项式内插的方法,一个连续变化的采样频率也可以生成。

如 4.3.8 所示,这个过程比以基于时间的采样有两个额外的好处。每一阶的所有能量都在每个段的窗的中间,排除了由于不在中间引起的误差,这些误差能达到 15%。

另一个好处是:有可能得到旋转角度的“时间轴”的平均记录,也有在非稳态的旋转频率的情况下,为仅是转/分(r/min)的阶的振动处理阶比谱。如果使用向量平均,其他频率的振动将对 r/min 没有一个恒定的相位,并平均为零。阶比谱可以没有任何分量模糊地被平均。

4.7 倍频程和分数倍频程分析

倍频程是另外一个相关的术语,用来表示二倍频率或二等分频率,取决于频率是增加或是减少。如 100 Hz 上面的一个倍频程是 200 Hz,或者,100 Hz 下面的一个倍频程是 50 Hz。因此,分贝是用于表示幅值比的一个方便的单位,倍频程是表示频率比的一个方便的方式。为了改善分辨率,倍频程用于表示幅值比率可以用对数分成分数倍频程(如三分之一倍频程)。

4.8 倒频谱分析

倒频谱分析技术是在时域中测量振动数据的功率谱取对数后进行逆傅里叶变换得到的。一个倒频谱可以被显示为谱线格式,即幅值在垂直轴上,被称为“倒频率”的伪时间在水平轴上。倒频谱是一个频谱的频谱。基波和它的谐波序列因此被简化为单一的分量。

倒频谱理想地适于包含多个谐波序列的复杂信号的分析,如由齿轮箱或滚动轴承产生的信号。由于具备分离和加强周期函数的能力,所以它们的关系可以被识别出来,这是倒频谱的一个重要的优点。表 3 中可以看到倒频谱分析进展的一步一步的过程。

表 3 倒频谱处理

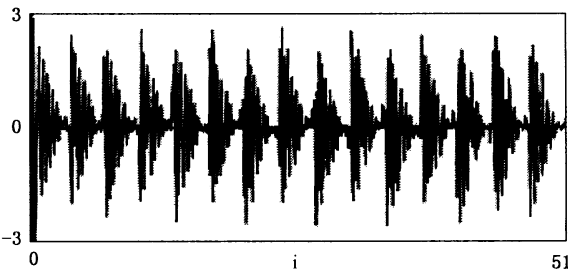
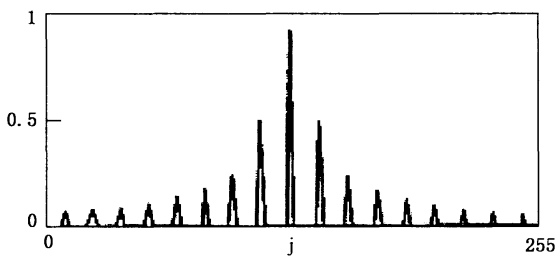
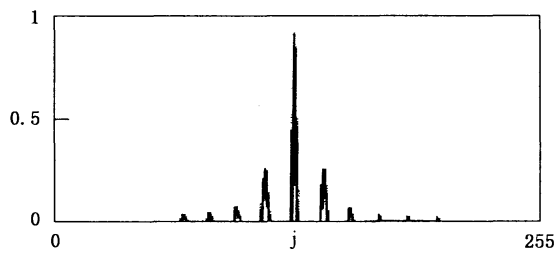
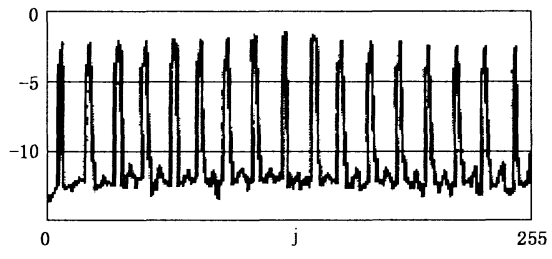
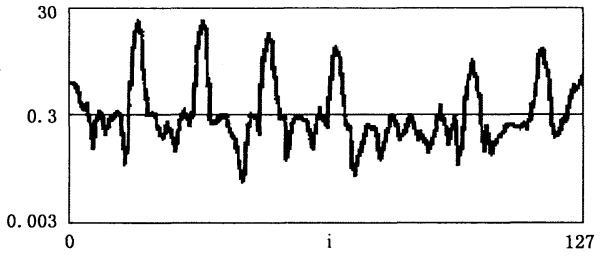
操 作	结 果
时间历程测量	数字化信号 $x(i)$ 

表 3 (续)

操 作	结 果
数字信号的 FFT	幅值谱 $X(f)$ 
幅值谱分量的值的平方	功率谱 $S_{xx}(f) = X^2(f)$ 
功率谱的对数乘 10	$10\lg S_{xx}(f)$ dB 
$10\lg S_{xx}(f)$ 的逆 FFT	功率倒频谱 $C_{xx}(t)$ 

5 其他技术

本部分介绍了进行窄带振动状态监测与振动诊断时最通用的技术。但是,有一些其他的方法,当应用于特殊情况时解决特殊问题也非常有用。这样一些先进的技术作为信息列出如下:

- 波峰因数;
- 时间历程;
- 自相关函数;
- 互相关函数;

- 峭度；
- 复合谱或全谱；
- 逆傅里叶变换；
- 高频检测；
- 强度法；
- 多趋势分析(r. m. s. 值, 频率分量、小时、日程历时间、高转速)；
- 峰视图分析；
- 冲击脉冲测量；
- 小波；
- 向量分析；
- 尖峰能量。

参 考 文 献

- [1] ISO 2041 Vibration and shock—Vocabulary(GB/T 2298,MOD).
 - [2] ISO 2954 Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery—Requirements for instruments for measuring vibration severity(GB/T 13824, MOD).
 - [3] ISO 5348 Mechanical vibration and shock—Mechanical mounting of accelerometers (GB/T 14412, IDT).
 - [4] ISO 7919(all parts) Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts(GB/T 11348,MOD).
 - [5] ISO 10816(all parts) Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts(GB/T 6075, IDT).
 - [6] ISO 10817-1 Rotating shaft vibration measuring systems—Part1:Relative and absolute sensing of radial vibration(GB/T 21487.1, IDT).
 - [7] ISO 13372 Condition monitoring and diagnostics of machines—Vocabulary(GB/T 20921, IDT).
 - [8] ISO 13373-1 Condition monitoring and diagnostics of machines—Vibration condition monitoring—Part 1:General Procedures(GB/T 19873.1, IDT),
 - [9] ISO 16063.21 Methods for the calibration of vibration and shock transducers—Part 21: vibration calibration by comparison to a reference transducer(GB/T 20485.21, IDT).
 - [10] ISO 18431(all parts) Mechanical vibration and shock-signal processing.
 - [11] VDI 3839 Blatt 1, Hinweise zur Messung und Interpretation der Schwingungen von Maschinen—Allgemeine Grundlagen(Instructions on measuring and interpreting the vibrations of machine—General principles)(Bilingual edition).
 - [12] VDI 3841, Schwingungsüberwachung von Maschinen—Erforderliche Messungen(Vibration monitoring of machinery—Necessary measurements)(Bilingual edition).
 - [13] MITCHELL, J. S. An introduction to machinery analysis and monitoring. Pennwell Publishing, 1993.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
机器状态监测与诊断 振动状态监测
第2部分:振动数据处理、分析与描述
GB/T 19873.2—2009/ISO 13373-2:2005

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

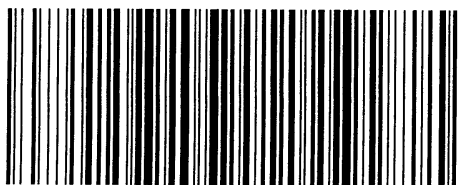
*

开本 880×1230 1/16 印张 2.25 字数 59 千字
2009年7月第一版 2009年7月第一次印刷

*

书号:155066·1-38064 定价 33.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533



GB/T 19873.2-2009