

第四章 信号特征提取—— 信号分析技术

主讲：王林鸿教授、博士

机械与汽车工程学院

信号特征提取的必要性

- 由于机械设备中存在多个振动源，当它们混杂在一起被传感器转换成波形曲线时，呈显出杂乱无章的形态；
- 读懂信号的根本途径就是通过各种方法进行特征提取；
- 对信号分析结果的解释永远比信号分析的算法更重要。

设备运行状态信号

- **平稳定转速运转的机械设备，无论有多少个振动源，其产生的振动信号都是与转速相关的强迫振动信号，也是周期性信号。**
- **可以认定：凡是与转速相关的信号属于设备运转状态信号，与转速无关的信号属于工艺参数信号、结构参数信号、电气参数信号。**
- **结构参数信号、电气参数信号仍属于故障诊断范围，但不在机械故障诊断范围内。**

信号分析方法优劣判据

- 信号分析技术包含了许多种信号分析方法，有的很时髦，比如小波分析、神经网络等，各种分析方法都有其适应的范围。
- 评定信号分析方法是否适用于机械故障诊断，只有一个标准——简洁实用。

信号特征类型

- **时域特征：**
 - 反映设备总体状态，用于故障监测、趋势预报；
- **频域特征：**
 - 用于确诊故障类型、原因、部位；
- **时频域特征：**
 - 用于设备起、停过程分析；
- **诊断过程通常结合起来使用。**

4. 1 信号特征的时域提取方法

1. 平均值
2. 均方值、有效值
3. 峰值、峰值指标
4. 脉冲指标
5. 裕度指标
6. 歪度指标
7. 峭度指标

4. 1. 1 平均值

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t)$$

- 平均值描述信号的稳定分量，又称直流分量；
- 机械振动的平衡点位置；
- 是信号的一阶矩统计平均。

4. 1. 2 均方值、有效值

均方值

$$X_{rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2(t)$$

- 均方值与有效值均用于描述振动信号的能量，是信号的二阶矩统计平均。
- 有效值 X_{rms} 又称均方根值，是机械故障诊断系统中用于判别运转状态是否正常的重要指标。
- 速度有效值 V_{rms} (mm/s) ，称为振动烈度。

4. 1. 3 峰值、峰值指标

通常峰值 X_p 是指振动波形的单峰最大值。

在一个信号样本的总长中，找出绝对值最大的10个数，用这10个数的算术平均值作为峰值 X_p 。

峰值指标
$$I_p = \frac{X_p}{X_{rms}}$$

峰值指标 I_p 和脉冲指标 C_f 都是用来检测信号中是否存在冲击的统计指标。(无量纲相对值)

4. 1. 4 脉冲指标

$$C_f = \frac{X_p}{\bar{X}}$$

脉冲指标 C_f 和峰值指标 I_p 都是用来检测信号中是否存在冲击的统计指标。（无量纲相对值）

由于峰值 X_p 的稳定性不好，对冲击的敏感度也较差，因此在故障诊断系统中应用逐步减少，被峭度指标所取代。

4. 1. 5 裕 度 指 标

$$C_e = \frac{X_{rms}}{\overline{X}}$$

**裕度指标Ce用于检测机械设备的磨损情况。
(无量纲相对值)**

4. 1. 6 歪度指标

$$C_w = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|x_i| - \bar{x})^3}{X_{rms}^3}$$

- 是信号的三阶矩统计平均；（无量纲相对值）
- 歪度指标反映振动信号的非对称性；
- 如果某一方向存在着摩擦或碰撞，造成振动波性的不对称，歪度指标 C_w 增大。

4. 1. 7 峭度指标

$$C_q = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|x_i| - \bar{x})^4}{X_{rms}^4}$$

- 是信号的四阶矩平均；（无量纲相对值）
- 峭度指标 C_q 反映振动信号中的冲击特征。
- 峭度指标 C_q 对信号中的冲击特征很敏感，正常值在3左右，如果接近4或超过4，则说明机械的运动状况中存在冲击性振动。一般情况下是间隙过大、滑动副表面存在破碎等原因。

运用统计指标的注意事项

- **各种统计指标，不能孤立的看，需要相互映证。同时还要注意和历史数据进行比较，根据趋势曲线作出判别。**
- **往往有这样的情况，当发现设备的情况不好，某项或多项特征指标上升，但设备不能停产检修，只能让设备带病运行。当这些指标从峰值跌落时，往往预示某个零件已经损坏，若这些指标（含其它指标）再次上升，则预示大的设备故障将要发生。**

4. 2 信号特征的频域提取方法

- **时域统计特征指标只能反映机械设备的总体运转状态是否正常，因而在设备故障诊断系统中用于故障监测，趋势预报。**
- **要知道故障的部位、类型就需要进一步的做精密分析。频谱分析是一个重要的、最常用的分析方法。**

4. 2. 1 频域分析与时域信号的关系

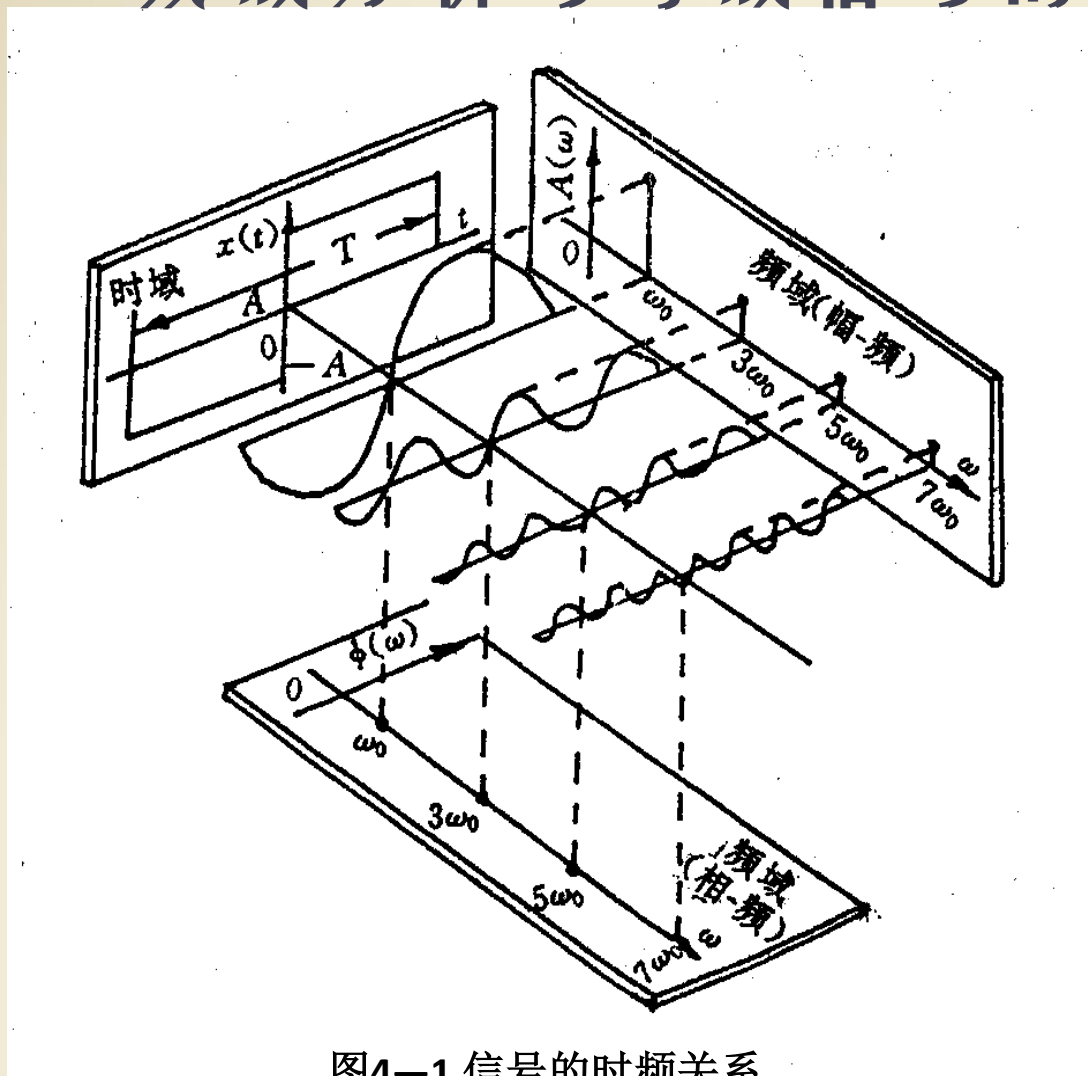


图4—1 信号的时频关系

傅里叶变换工具

- 傅里叶变换提供了从另一个角度观察信号的数学工具——把信号投影到横坐标轴是频率 f 的频域。在这个观察面上，我们可以看到信号由哪些正余弦波组成。
- 傅里叶变换的本质功能就是从总体中划分出成分。
- 该工具的作用：从杂乱中找出规律，从无序中提取有序；大事化小，小事化了，是解决复杂问题的好用工具。

频谱图的诊断作用

在频谱图中，主要关注哪些机械运行状态的振动成份（与基准频率——轴转频有固定的数学关系的频率成份： $N\times$ ， $1/N\times$ ），谁占主导作用，谁与过去相比，有较大幅值变化等等。

4. 2. 2 周期信号与非周期信号的频谱

- 周期信号，可展成傅里叶级数的形式：

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

- 它表明周期信号，均可以表述为一个常数分量 a_0 和一系列正弦分量之和的形式。
- 其中 $n=1$ 的那个正弦分量称为基波，对应的频率 ω_0 称为该周期信号的基频。其它正弦分量按 n 的数值，分别称为 n 次谐波。

(举例) 周期性方波信号的频谱

周期性方波可以在一个周期内表述为：

$$x(t) = \begin{cases} -A & -\frac{T}{2} < t < 0 \\ A & 0 < t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

可展成傅里叶级数：

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \sin(\omega_0 t) + \frac{4A}{3\pi} \sin(3\omega_0 t) + \frac{4A}{5\pi} \sin(5\omega_0 t) + \frac{4A}{7\pi} \sin(7\omega_0 t) \cdots$$

周期性方波信号与频谱图

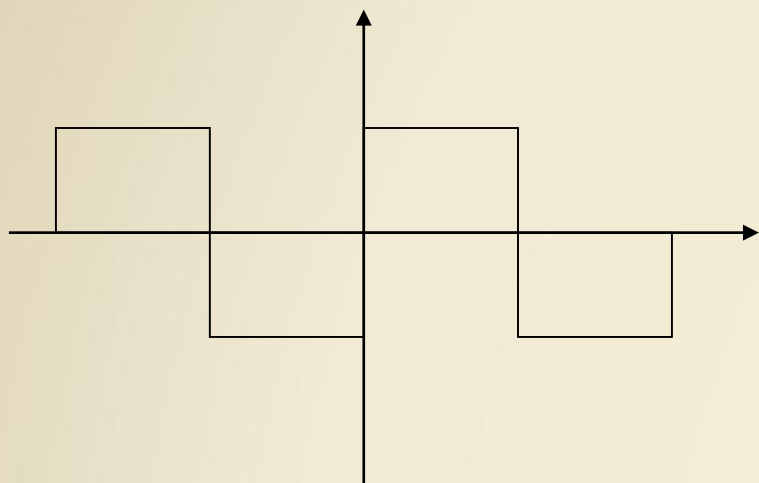


图4—2 周期性方波信号

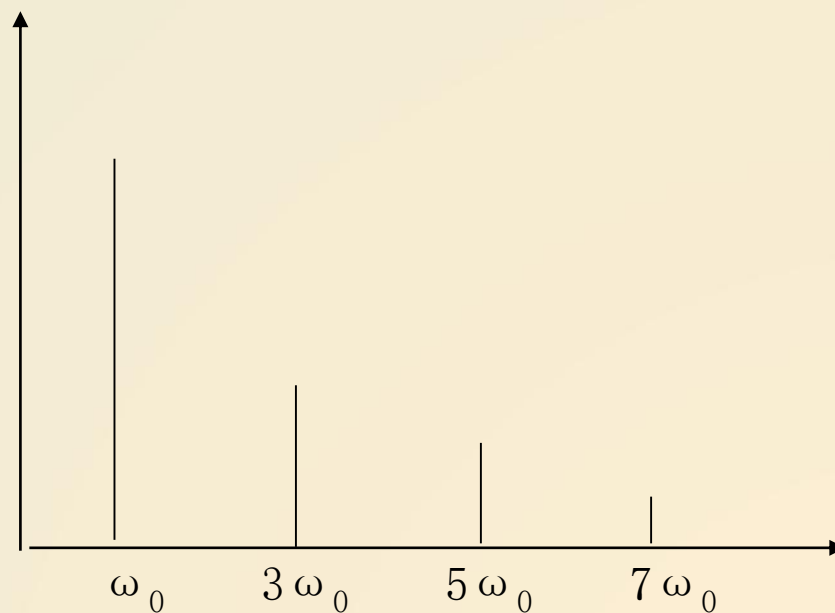


图4—3 方波的幅频谱图

周期信号的频谱特征：

1. 离散性 即周期信号的频谱图中的谱线是离散的。
2. 谐波性 即周期信号的谱线只发生在基频 ω_0 的整数倍频率上。
3. 收敛性 周期信号的高次谐波的幅值具有随谐波次数 n 增加而衰减的趋势。

非周期信号的频谱

- 非周期信号分为准周期信号和瞬变信号。
- 脉冲函数、阶跃函数、指数函数、矩形窗函数这些工程中常用的工具都是典型的瞬变信号。

(举例) 矩形窗函数

矩形窗函数的时域表达式为：

$$w(t) = \begin{cases} 1 & |t| < \frac{T}{2} \\ 0 & |t| > \frac{T}{2} \end{cases}$$

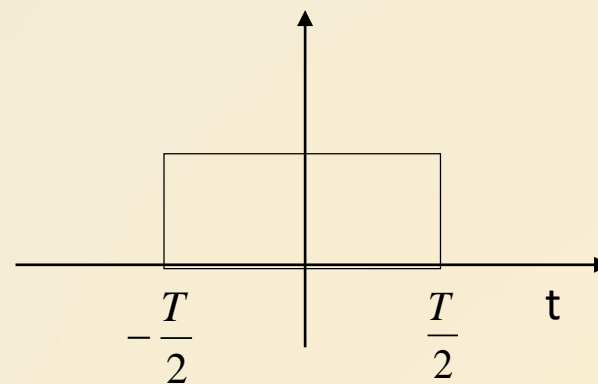
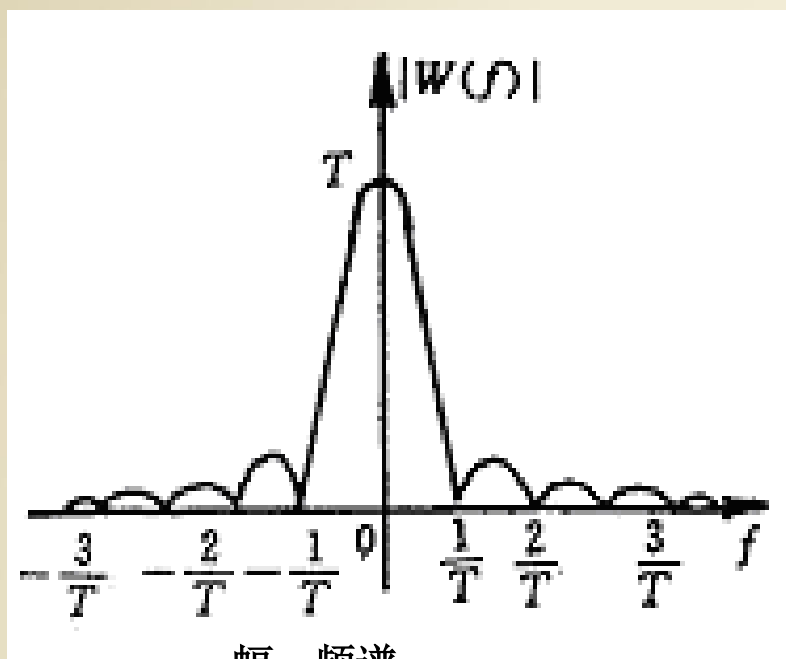
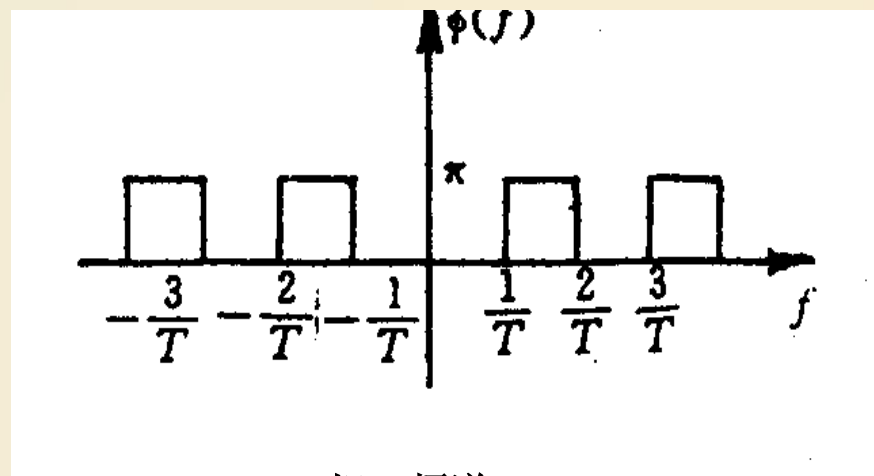


图4—4 矩形窗函数

矩形窗函数的频谱



幅—频谱



相—频谱

图4—5 矩形窗的频谱图

非周期信号的频谱特征：

1. 谱线是连续的，这是瞬变信号与周期信号在谱图上的显著区别。
2. 矩形窗的时间长度 T 愈长，幅频图中主瓣愈高而窄。意味着能量愈集中于主瓣，这在信号分析中是有重要意义的。

4. 2. 4 频混和采样定理

采样过程：

- 如果以 $x(t)$ 代表原始的连续时间信号，则采样信号 $x_c(t)$ 可以看成是 $x(t)$ 与脉冲序列 $\delta_0(t)$ 的乘积；
- 采样后得到间隔为 T 的等距脉冲序列，这个序列的包络线应与原始信号 $x(t)$ 一致；
- 采样后的信号应能恢复原信号，不发生失真，这主要取决采样间隔 T 。

采样过程示例

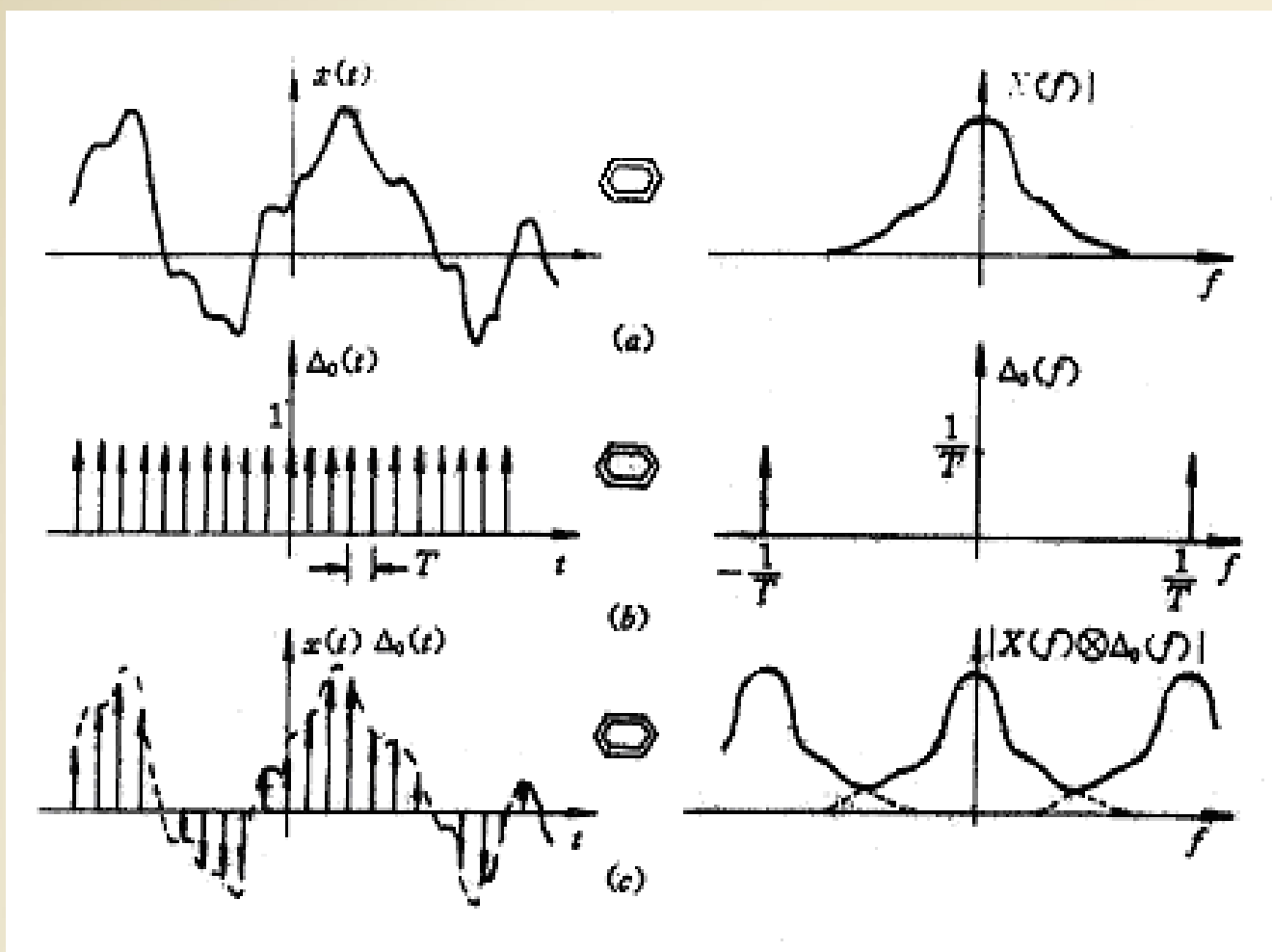


图4—9 采样过程

频混现象示例

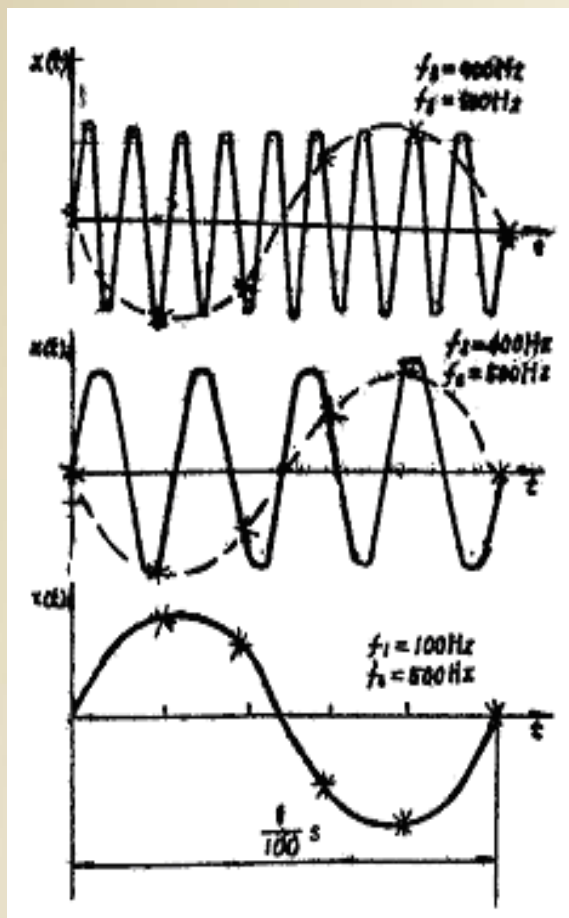


图4—10 采样序列及还原曲线

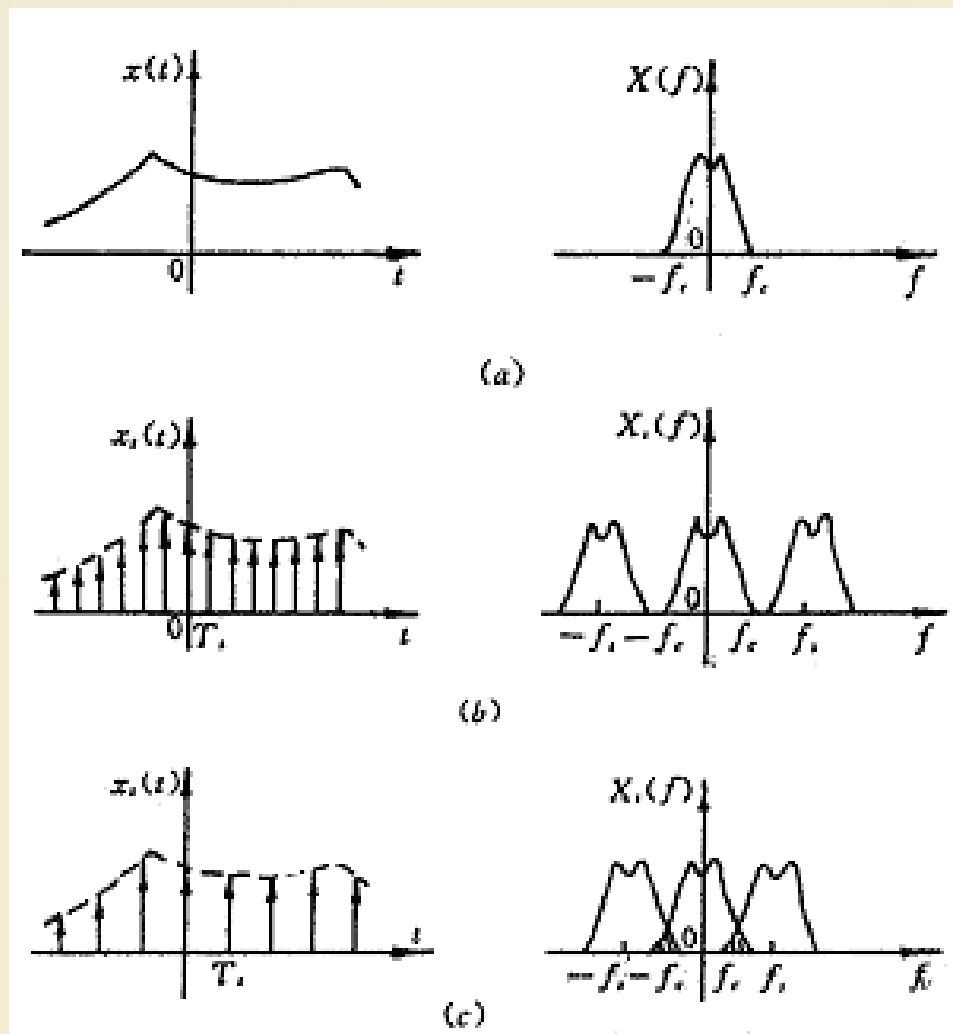


图4—11 采样信号的频混现象

采样定律

- 对信号 $x(t)$ 采样时，一定要有合适的采样频率。
- 设 $x(t)$ 所包含的各成份中最高频率为 f_x ，这要靠抗混低通滤波器来实现（截止频率稍高于 f_x ）。
- 快速富里叶变换（FFT）的最高分析频率 $f_c = (1.5 \sim 2) f_x$ ，采样频率 $f_s = 2f_c = (3 \sim 4)f_x$ 。

4. 3 信号特征的图像表示

- **信号特征的两种表示方法：**
 - **数值特征**
 - **几何特征**
- **几何特征比数值特征更直观生动。**

4. 3. 1 统计指标的图像表示

- **时域信号统计指标是用于判定：机械设备是否有故障（故障隐患）、程度如何、发展趋势怎样等这类维修指导性工作。**
- **机械故障诊断系统中时域信号特征的主要指标是：平均值、均方根值（有效值）、峰值指标、脉冲指标、裕度指标、歪度指标、峭度指标等七种。**
- **其中最主要的是均方根值，它是判定是否存在故障的重要指标。其它指标用于回答程度如何，这些指标的时间历程曲线用于回答发展趋势怎样。**

时域统计指标条形图

- 统计指标的名称——均方根值
- 统计指标的数值——12.7
- 数值的物理单位—— μm
- 报警限（又称一级报警限）——11.4
- 危险限（又称二级报警限）——15.6

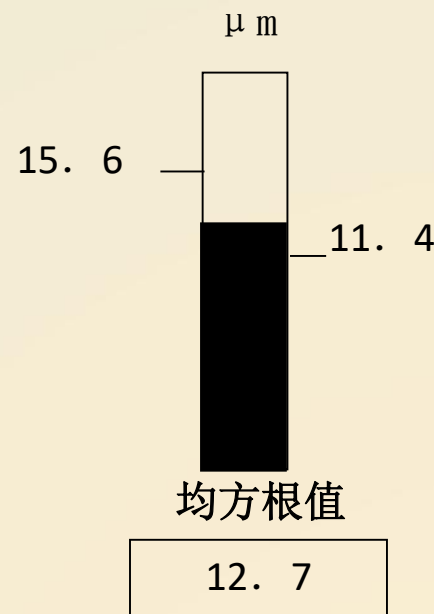


图4—12
统计指标条形图

4. 3. 2 频谱的图像表示

- 频谱图用于回答：故障的部位、类型、程度等问题，是分析振动参数的主要工具。
- 关注频率与振动幅值的变化。
- 要特别关注那些与基频存在比例关系的谱线。

频谱图示例

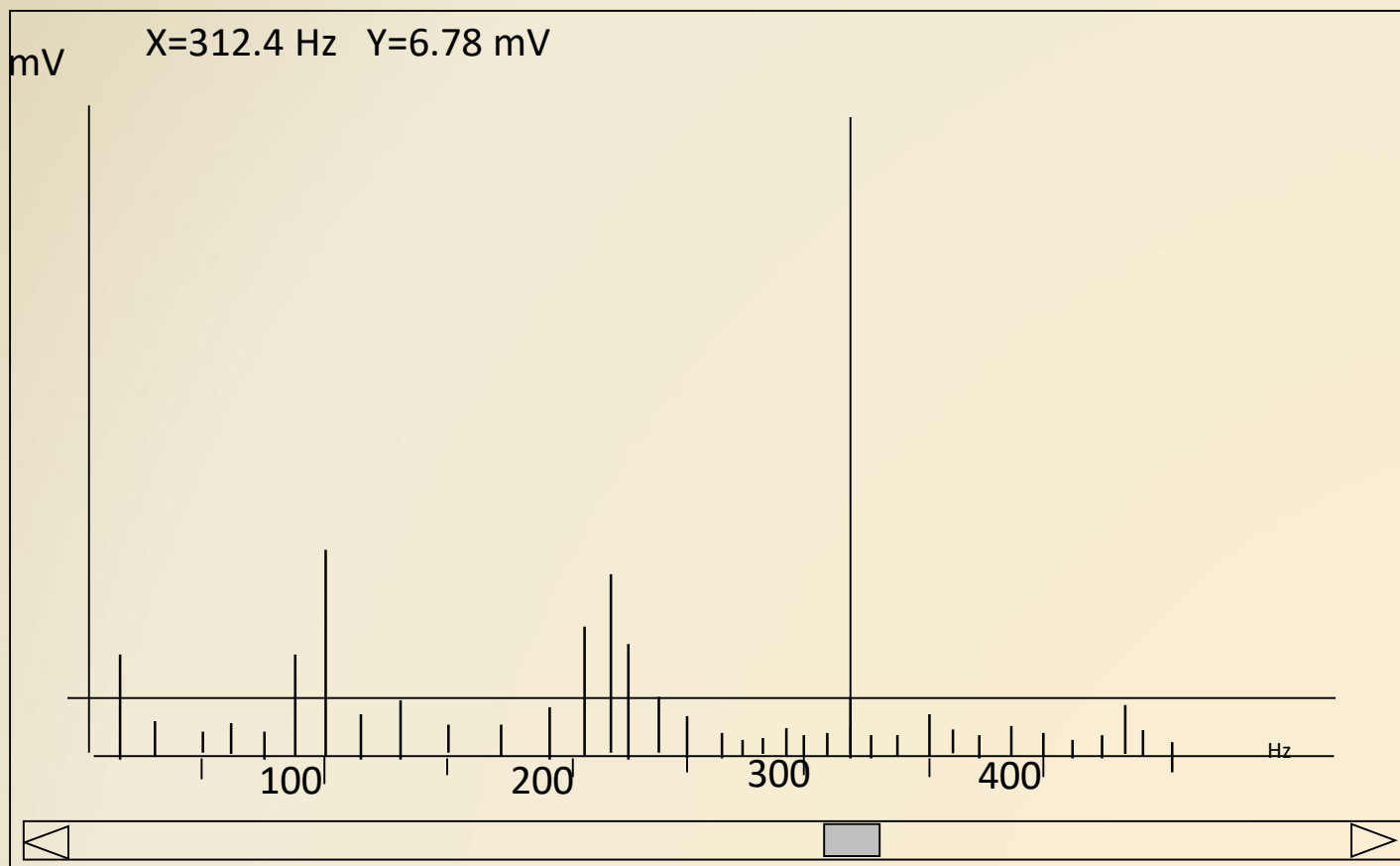


图4—13 幅值—频谱图示意

频谱图的类型

1. 线性幅值谱:

纵坐标有明确的物理量纲，是最常用的。

2. 对数幅值谱:

纵坐标单位是dB（分贝），那些振幅较低的成分相对于高振幅成分得以拉高，以便观察掩盖在低幅噪声中的周期信号；

3. 自功率谱:

先做自相关卷积，再做傅里叶变换，周期信号更加突出。

怎样看频谱图

- a) 观察那些幅值较大的谱线，这些谱线的频率所对应的运动零部件。**
- b) 注意那些幅值比过去有显著变化的谱线，它的频率对应哪一个部件的特征频率。**
- c) 注意与转频有固定比值关系的谱线，它们之中是否存在与过去相比发生了变化的谱线。**

时间历程的频谱图像表示——三维瀑布 (三维谱阵)

- 三维瀑布图是由多个频谱图按时间历程组合成的分析图像；
- 垂直坐标是振幅，横坐标是频率，纵坐标是时间，各时间历程的频谱图按时间序列等间距排列；
- 常用于起动、停机等非平稳过程等分析。

三维瀑布图示例

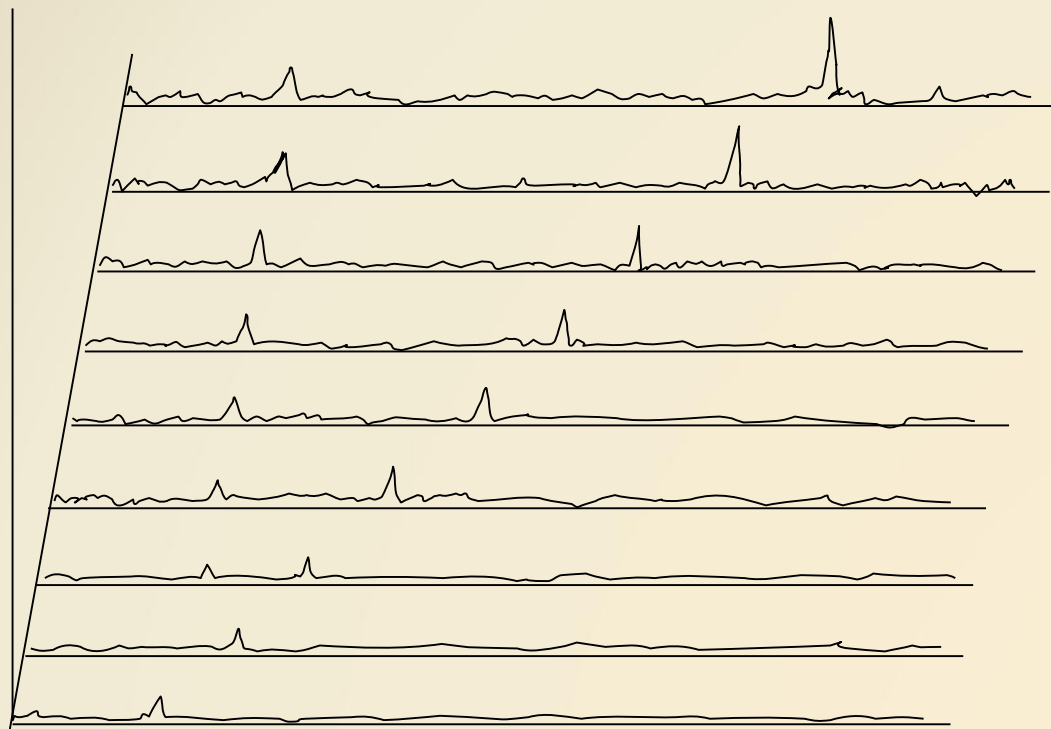


图4—14 三维瀑布图

怎样看三维瀑布图

- 关注各主要振动频率成份的振幅是否随转速变化。那些随转速升降而幅值也升降的频率成份一定是机械运动状态信息。
- 与转速无关的山脊有两种情况：
 1. 山脊在低速下没有，在某个转频之上才出现。它是与转子固有频率相联系的油膜振荡故障信息。
 2. 山脊一直存在，而振幅与转频无关。那它是结构振动信号。
- 还有一个用途——区分振动的原因是机械或电气。

4. 3. 4 轴心轨迹的图像表示

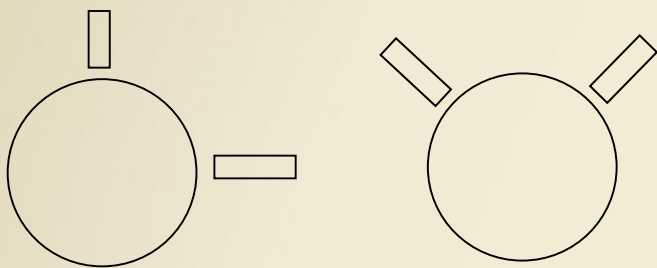


图4—15 涡流传感器的布置

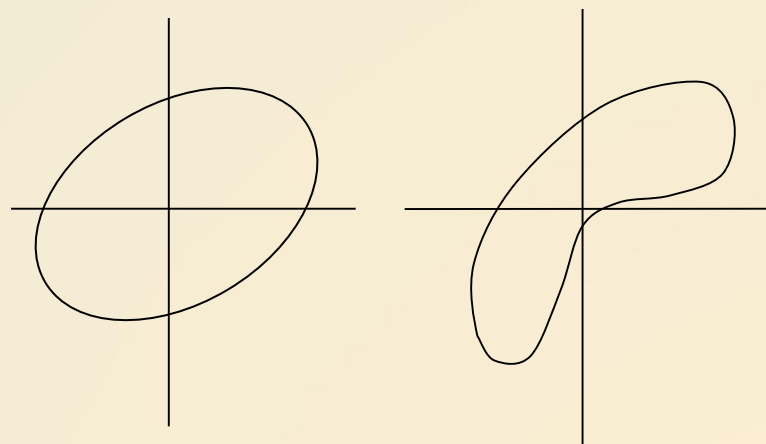


图4—16 轴心轨迹图

4. 3. 5 轴心轨迹的空间图像表示 (三维全息图)

沿着转轴的全长，将各个测量截面的轴心轨迹图上同一时点连接起来，就构成了轴心轨迹的空间图像（三维全息图）。

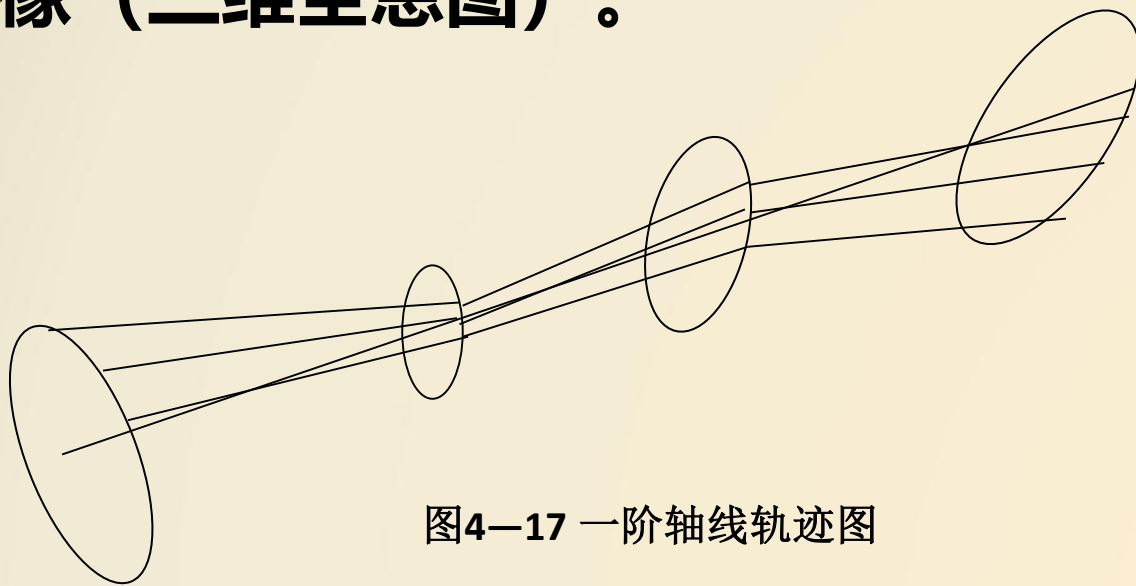


图4—17 一阶轴线轨迹图

本章习题：

- **4-1, 4-3, 4-4, 4-5, 4-10, 4-13.**

Thank you for your attention!

谢谢大家