

机械加工中 动态测量

上海机械专科学校 胡廉

上海建筑材料工业专科学校 龚果荪 编 机械工业出版社

动态物理量的测量与静态几何量的测量有着根本不同。如果对动态信号在时域和频域的性质估计不足，或者对测量系统的频率特性不够了解，就会用错仪器，导致测量失败。也可能信号虽然测得，但无从分析，取不出有用的信息。为了让初次接触动态测量的同志，对于这些问题有一个初步的了解，我们编写了这本应用入门书。

本书在编写过程中，曾得到上海机床厂周勤之同志不少教益，并由上海交通大学洪迈生同志担任审稿，在此谨致谢意。

由于编者水平有限，书中难免有片面和错误的地方，敬请广大读者不吝指正。

作者于1984.5

量测技术在机械加工中的应用

前言

从事机械加工的工程技术人员，不仅面临着尺寸和形位等静态几何量的测量问题，随着科学技术的发展，为了保证产品质量、提高经济效益以及环境保护的需要，将不可避免地面临着许多随着时间变化的动态物理量的测量，诸如位移、速度、加速度、力、噪声和温度等的测量。

伴随着加工过程所产生的热、声、光、力和振动等物理现象包含着无数信息。这些信息往往同时存在，并且多半随着时间而变化。在测量的时候，必须使用合适的方法和手段，从客观存在的大量信息中取得正确的有用的信息，所取出的某一部分信息的综合称为信号，通过对信号的处理和分析掌握信息，就便于了解被测对象，进而谋求对被测对象的控制。

测量物理量的方法很多，有机械测量法、光测法和电测法等。对于动态测量用得最多的是电测法。其理由在于：大部分物理量都可以通过传感器转换成电量——电信号，一旦这些物理量变成电信号这一共同形式后，便可进行放大、滤波、多路传输、取样以及测量。很容易获得数字形式的测量结果，或者将测量结果转换成数字形式以供自动分析和自动记录，或者将数据送入伺服系统进行自动的过程控制。此外，在检测和放大微弱信号的能力上，以及对持续时间很短的现象进行测量的能力上，其它测量方法都远远不及电测法。

目 录

前言

第一章 信号的描述	1
§ 1-1 动态信号的分类	1
一、确定性信号	1
二、随机信号	3
§ 1-2 动态信号的时域描述	5
一、峰值	5
二、均值	5
三、均方值和有效值	6
四、方差	7
§ 1-3 动态信号的频域描述	8
一、周期信号的幅值谱和相位谱	8
二、瞬变信号的幅值谱密度	12
三、信号的频率分析法简介	17
第二章 测量装置的基本特性	21
§ 2-1 测量系统和测量装置的精度	21
一、测量系统	21
二、测量装置的精度	23
§ 2-2 测量装置的静态特性	24
一、线性度	24
二、灵敏度	25
三、回程误差	25
§ 2-3 测量装置的动态特性	25
一、理想的测量装置	26
二、频率响应函数	27

三、频率响应曲线	28
四、典型测量装置的频率响应	31
五、实现不失真测量的条件	38
第三章 机床主轴回转误差运动的测量	42
§ 3-1 基本知识	42
一、主轴回转误差运动	42
二、误差敏感方向	43
§ 3-2 圆图象	44
一、阴极射线示波管	44
二、正弦波显示	46
三、李沙育图象	47
四、圆图象	48
§ 3-3 主轴回转误差运动的测量	48
一、回转敏感方向机床的测量	48
二、固定敏感方向机床的测量	52
三、测量数据处理	56
§ 3-4 示波器	57
一、工作原理	58
二、ST16型示波器的使用	59
§ 3-5 电容式振动位移测量仪	64
一、电容式传感器原理	64
二、CW-6型振动位移测量仪	66
三、DWY-2型振动位移测量仪	70
第四章 机床部件移动均匀性的测量	75
§ 4-1 基本知识	75
一、移动不均匀性的评定指标	75
二、测量方法	77
§ 4-2 磁电式速度传感器及使用	77
一、磁电式速度传感器原理	78
二、测量方法	79

§ 4-3	光栅爬行测量仪及使用	79
一、	光栅传感器原理	80
二、	测量方法	82
§ 4-4	光线示波器	85
一、	工作原理	86
二、	SC16型光线示波器的使用	91
第五章	切削力的测量	95
§ 5-1	电阻应变式测力仪	95
一、	电阻丝应变片	96
二、	测量电桥	99
三、	弹性元件	102
§ 5-2	动态电阻应变仪	108
一、	工作原理	108
二、	Y6D-3A型动态电阻应变仪的使用	109
§ 5-3	压电式测力仪	113
一、	压电石英	114
二、	压电式测力仪	116
第六章	温度的测量	119
§ 6-1	基本知识	119
一、	温标	119
二、	测温方法	120
§ 6-2	热敏电阻测温	121
一、	热敏电阻	121
二、	95-A型半导体点温计	122
§ 6-3	热电偶测温	123
一、	热电势	124
二、	常用热电偶材料	127
三、	热电偶冷端的温度补偿	128
四、	自制热电偶	131
五、	热电势的测量	132

§ 6-4	机床温度场的测量	136
一、	测量布点	136
二、	测量方法	137
§ 6-5	切削温度的测量	138
第七章	噪声的测量	140
§ 7-1	基本知识	140
一、	噪声的物理度量	140
二、	噪声的主观评定	147
§ 7-2	声级计	149
一、	电容式传声器	149
二、	ND2型声级计	150
§ 7-3	频率分析	155
一、	使用机内滤波器	155
二、	使用外接带通滤波器	155
三、	使用频率分析仪	161
§ 7-4	机床噪声的测量	163
一、	声压级的测量	163
二、	声功率级的测量	166
第八章	机床振动的测量	167
§ 8-1	基本知识	167
一、	机床振动的类型	167
二、	单自由度系统的强迫振动	168
三、	多自由度系统的强迫振动	178
§ 8-2	激振器	180
一、	电动式激振器	180
二、	电磁激振器	183
§ 8-3	测振传感器	186
一、	惯性式测振传感器的动态特性	187
二、	速度传感器	189
三、	加速度传感器	192

§ 8-4 测量仪器	196
一、前置放大器	196
二、GZ2型测振仪	202
三、LZ3系列函数记录仪	206
§ 8-5 机床空运转试验	209
§ 8-6 机床激振试验	211
一、测量系统	212
二、动态特性参数的确定	217
三、振型测量	221
参考资料	223

第一章 信号的描述

在进行测量之前，必须对被测信号有所估计，才能正确选配仪器，才能对测量结果采取适当的分析处理方法。

按照信号随时间变化的情况，可以把信号分成两大类，即：

1. 静态信号 这是指不随时间变化或变化极缓慢的信号。在具体处理上，因为信号各瞬时取值稳定不变，因此只要了解了信号这一稳定不变的幅值，就算掌握了信号本身。

2. 动态信号 这类信号的瞬时取值是随时间变化的，它是一个时间历程。对于动态信号的测量，不但要求测量装置具有足够的响应速度，随着输入信号的变化而作不失真的输出，还要求用适当的分析方法，使得既能描述其总的面貌，又能把握其瞬时态势。

§ 1-1 动态信号的分类

按照动态信号瞬时取值的变化情况，动态信号又可分为确定性信号和随机信号两类。

一、确定性信号

确定性信号的特点是信号的波形有确定的复现性，一般都能用确切的数学式表达，并能预测其在任一时刻的取值。

1. 周期信号

周期信号的瞬时取值随时间作周期性重复的变化(图1-1 a)。它的数学表达式为：

$$x(t) = x(t \pm nT), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-1)$$

式中 $x(t)$ ——信号的瞬时取值。它可以是位移、力、温度……，或者其他物理量的瞬时值；

t ——时间，s；

T ——周期，s。

强迫振动的位移、速度和加速度，一般均属周期信号。在周期信号中最简单的是正弦信号〔图1-1b〕，或称为简谐信号。它的数学表达式为：

$$\begin{aligned} x(t) &= A_0 \sin(\omega_0 t - \varphi_0) \\ &= A_0 \sin(2\pi f_0 t - \varphi_0) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 A_0 ——幅值；

ω_0 ——角频率，rad/s，等于 $2\pi/T$ ；

f_0 ——频率，Hz，等于 $1/T$ ；

φ_0 ——初相角，rad。

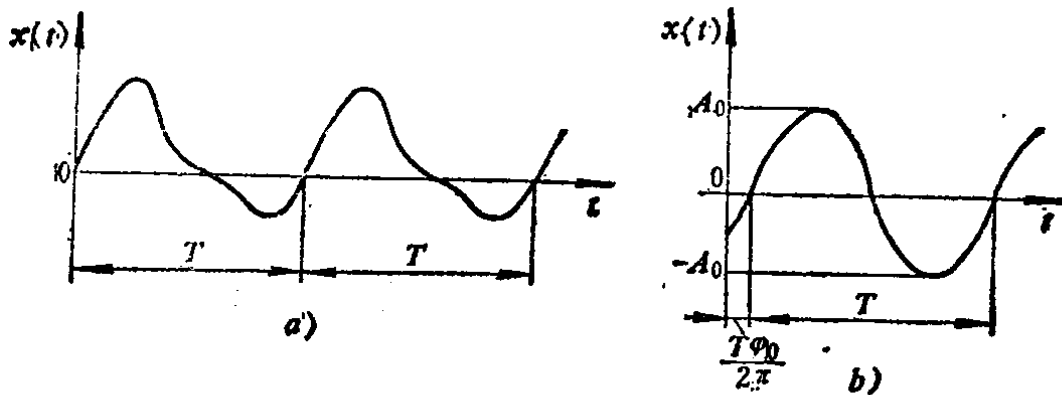


图1-1 周期信号

a) 一般周期信号 b) 正弦信号

2. 瞬变信号

瞬变信号是确定性非周期信号（图1-2）。它与周期信号相比，是非周期的。它与随机信号相比，却又是确定性的。诸如由碰撞、冲击、爆炸而来的信号，多半是瞬变信号。

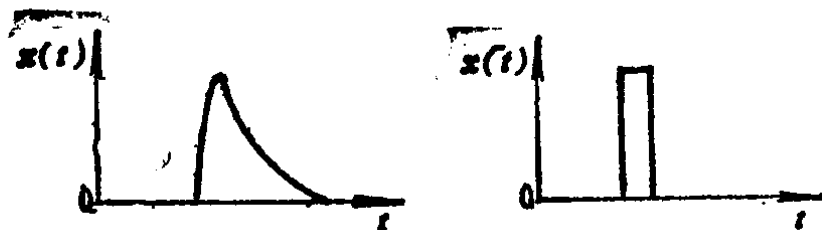


图1-2 瞬变信号

$x(t)$ —瞬变信号的瞬时取值 t —时间

二、随机信号

随机信号是非确定性信号。它随时间变化的规律无法采用数学式来表达，不可能预测其在任一瞬时的取值。例如，对于机床主轴的回转误差，包含了一部分在任一时刻其方向和大小都无法预测，而且在每一转中又不相同的部分。这部分回转误差就是随机的。

对于随机信号来说，虽然其瞬时取值没有规律性，但是这个随机信号的总体有着统计规律，其瞬时取值的范围和可能性是服从统计规律的。

1. 总体和样本

如图 1-3 所示，对于一个随机信号进行长时间观测，可以得到一个时间历程 $x_i(t)$, $i=1, 2, \dots$ 。这个时间历程（即测量一次），称为样本。当样本长度（每测量一次的时间） $T \rightarrow \infty$ ，样本数量（测量的次数） $N \rightarrow \infty$ 的情况下，得到所有样本的总和，称为总体。总体可以完全代表这个随机信号。

2. 平稳随机过程和各态历经过程

对于一个随机的时间历程，如果它的统计特性不随时间的变化而改变，即在时间间隔 t_1 到 t_2 的统计特性，与 $t_1 + \tau$ 到 $t_2 + \tau$ 的统计特性差别不大，称为平稳随机过程。

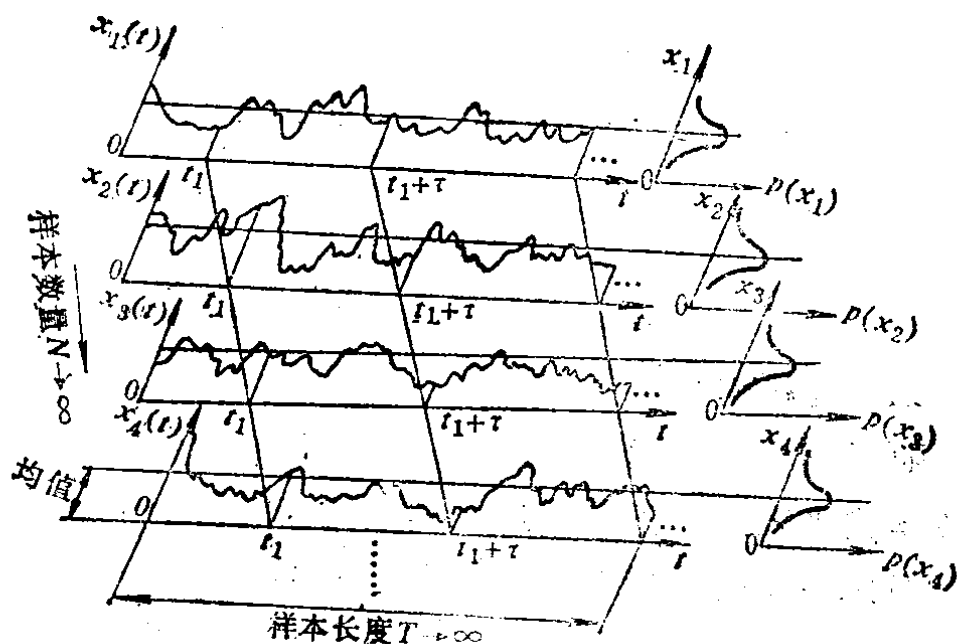


图1-3 随机信号的总体和样本

t —时间 $x_i(t)$ —样本瞬时取值 x_i —样本值 $p(x_i)$ — x_i 的概率密度
($i=1, 2, 3, \dots$)

表并

当一个平稳随机过程，其总体的统计特性，与任意一个样本的统计特性相同，可以用单个样本来描述这个随机过程，这种平稳随机过程称为各态历经过程。

工程技术上遇到的很多随机信号，只要工况稳定、环境稳定，大多数都可以看作是各态历经的。这对实际工作带来了不少方便，一般根据测量得到了各态历经信号的一个或数个样本，只要取样（测量）时间足够长，就可以借此推断总体。例如，机床厂生产的许多同型号、同规格的机床，在运转条件下构成了一个总体。其空运转时的温度场具有一定的随机性，但服从统计规律，可以通过对其中若干台符合出厂检定规范的，并且在正常运转情况下的机床，在足够长的时

间内进行测量，来推断和研究整个同型号、同规格机床的温度场。

这里需要指出，对于随机信号的描述，实际上不可能人工进行，必须由信号处理机得到。

§ 1-2 动态信号的时域描述

既然动态信号是一个时间历程，当然可以在时间坐标上，以时间 t 为自变量，以瞬时取值 $x(t)$ 为因变量进行描述和分析。通常是用阴极射线示波器观察动态信号的波形，使用光线示波器或者磁带记录器把它记录下来。

一、峰值

峰值 x_{max} 是指信号可能出现的最大瞬时取值。例如图 1-1b) 所示的正弦信号，其峰值等于 A_0 。

事先对被测信号的峰值有所估计，便可调整测量装置，使测量装置的动态范围与被测信号的变化范围相适应，不至将信号的峰顶削去而发生畸变，以便真实地反映被测信号的最大值。

测量装置的动态范围是指：测量装置的最大不失真输出 A_{max} （即输出上限），与对应于最小输入的所能辨别的输出 A_{min} （即输出下限）之比的分贝值，即：

$$\text{测量装置的动态范围} = 20 \lg \frac{A_{max}}{A_{min}} \text{ dB} \quad (1-3)$$

所谓不失真，是指被测信号的波形不因通过测量装置而发生畸变。

二、均值

均值 x_{av} 是动态信号在整个时域的积分平均。由于在实际工作中，不可能作无限长时间的观测，因此，可取 $x(t)$ 在

足够长的时间 T 内的积分平均，作为均值。即

$$x_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1-4)$$

均值描述了动态信号变化的中心趋势，可以看作是动态信号的稳定的直流分量。

取信号 $x(t)$ 的绝对值作积分平均，便得到绝对均值 $|x|_{av}$ (见图1-4)，为：

$$|x|_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (1-5)$$

绝对均值是信号强度的一种体现。

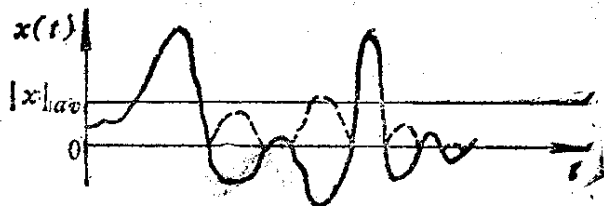


图1-4 信号的绝对均值 ($x_{av} = 0$)

三、均方值和有效值

由于绝对值运算不够方便，因此常用均方值 x_{av}^2 或有效值 x_{rms} 来描述信号的强度。它们分别为：

$$x_{av}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (1-6)$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1-7)$$

有效值又叫做均方根值。关于均方值和有效值与能量之间的关系，可以从电工学中得到理解。因为当电流强度为 $i = I \sin \omega t$ 的交流电流经单位电阻 ($R=1\Omega$) 时，经历时间 T ，其平均功率 P_{av} 是：

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 R dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt$$

尽管对于每一个具体的物理量 $x(t)$ 来说, x_{av} 并不一定具有能量的量纲, 但往往也有相应的物理意义。例如, 在振动测量中, 位移的有效值代表了振动系统的势能含量; 速度的有效值体现了动能含量; 而加速度有效值又是振动系统功率含量的反映。

在测量仪器中, 模拟被测物理量的电压信号, 经过相应的检波器后, 可以由电表直接指示出峰值、均值、均方值或有效值。在使用时不要搞错, 例如使用指示均值的电表来测量交流信号就没有意义了。

四、方差

方差 σ_x^2 是信号 $x(t)$ 相对于其均值变化的均方值, 即

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - x_{av}]^2 dt \quad (1-8)$$

方差描述了信号各瞬时取值相对于其中心趋势的波动程度。简单地说, 通过它可以估计信号的交流分量, 见图1-5。当信号的均值为零时, 方差就是它的均方值。从这个意义上看, 方差表示了信号波动分量的强度。

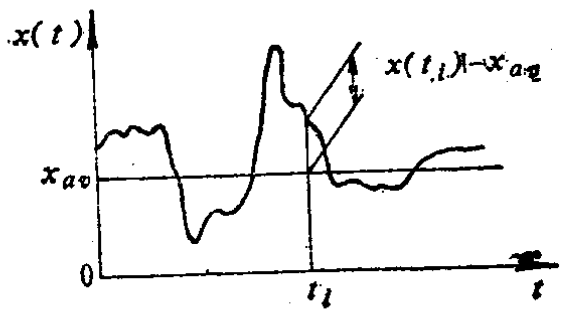


图1-5 动态信号的直流分量和交流分量

这里还需要说明的是, 对于随机信号来说, 应当样本长度 $T \rightarrow \infty$, 这在实际上是办不到的, 因此, 式 (1-4) ~ 式

(1-8) 是一个估计值。

§ 1-3 动态信号的频域描述

实践证明，在同样能量下，不同频率的光波对材料的透射能力是不一样的；峰值相同的、但频率不同的激振力对机床各部分的影响也不一样；声压级相同但频率不同的声音，人耳感觉的响度又往往不一样。特别在测量中，测量仪器都具有一定的滤波作用，也就是它对频率不同的输入信号可能有不同的响应。因此，对于动态信号不但要研究它的时域描述，更重要的要研究它的频域描述。

通常，在信号的频域描述中，以频率作为自变量，以组成信号的各个频率成分的幅值或相位作为因变量，这样的频率函数分别称为幅值谱或相位谱，它们分别表征信号的幅值或相位随着频率的分布情况。对于随机信号的频域描述，则经常使用功率谱，它是表征信号的能量随着频率的分布情况。当然，功率谱也可用于周期信号和瞬变信号的频域描述。

信号的频率分析计算是以傅里叶级数（傅氏级数）和傅里叶积分（傅氏积分）作基础的。1965年以后由于快速傅氏变换（FFT）的出现，使信号的频率分析进入了数字化和电子计算机化实施的年代，陆续出现了专用的、备有各种硬件和软件的信号处理机，使信号的频率分析更趋完善。

以下只是讨论幅值谱和相位谱的问题。

一、周期信号的幅值谱和相位谱

对于在时域用实函数 $x(t)$ 描述的周期信号，一般均可用傅氏级数分解成频率、幅值和初相角不等的许多正弦信号的叠加。即：

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1-9)$$

这里, a_0 、 a_n 和 b_n 为傅氏系数:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt & (a) \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos n\omega_0 t dt & (b) \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin n\omega_0 t dt & (c) \end{aligned} \right\} (1-10)$$

式中 T ——信号 $x(t)$ 的周期;

ω_0 ——基波角频率, 简称基频; $\omega_0 = 2\pi/T$ 。

将式(1-9)改变一个形式, 可写成:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (1-11)$$

式中 A_n ——幅值, 为角频率 $n\omega_0$ 的函数

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1-12)$$

φ_n ——初相角, 为角频率 $n\omega_0$ 的函数

$$\varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (1-13)$$

从以上分析可知: 一般周期信号均由一个直流分量、一个基波(正弦波)和无限个谐波(正弦波)所组成。其直流分量为 $a_0/2$, 各次谐波的频率是基波频率的整数倍。基波、各次谐波的幅值 A_n 和初相角 φ_n 是各不相同的。将 A_n 与 $n\omega_0$ 之间