

振动、噪声、冲击 的测量仪器与系统手册

[苏] B. B. 柯留耶夫 主编
郭富川 郭振芹 张荣祥 译
尤德斐 校

国防工业出版社 出版

(上册)

内 容 简 介

在本书上册中介绍了振动、噪声、冲击的基本参数、成套的振动测量系统、测量传感器、产生和测量传感器信号的装置、随机过程的频谱和特征量的分析仪、信号处理和显示装置、信号发生器、电源和其它辅助装置。

本手册可供从事振动测量仪器研究、设计、制造和使用的工程师、技术人员和工作人员，以及高等学校和中等专业学校学生使用。

Приборы и системы для измерения вибрации, шума
и удара (справочник)

В. В. Клюев

Машиностроение 1978

*

振动、噪声、冲击的测量 仪器与系统手册

(上 册)

[苏] В. В. 柯留耶夫 主编

郭营川、郭振芹、张荣祥 译

尤德斐 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张15 382千字

1983年10月第一版 1983年10月第一次印刷 印数：00,001—10,000册

统一书号：15034·2552 定价：1.85元

译者序

第二次世界大战以来,随着工业、特别是军事工业和科学技术的发展,动态测试突飞猛进。其中,振动、噪声、冲击的测量试验技术也越来越受到重视,除需要进行深入细致的理论分析以外,还要求对各种工程对象的振动、噪声、冲击参数和性能进行精确的测量和试验。为了保证测量和试验的准确、可靠,必须事先对其原理、特点、使用方法、精确度、校准方法、可能出现的问题及目前能得到的产品有个清楚的了解,只有这样才能做到心中有数,由测试结果作出正确的判断,达到预期的效果。

近十多年来,在各种新型器件不断试制成功、各种物理效应逐步在测试技术中得到应用的基础上,发展了许多种新型的振动、噪声、冲击测试仪器与方法。及时地了解这一切对我国在这一领域内的发展是十分必要的。本书全面、系统地介绍了振动、噪声、冲击测量仪器与系统,它从基本概念和需要测量的基本参数讲起,按照测量、试验信号的次序一步步地展开,对每一个有关的专题都进行了全面详细的讨论,并给出了目前各国仪器设备的详细技术指标,最后还列专章介绍了苏联的计量设备、方法及检定系统。从中我们不仅可了解到基础知识,而且可了解到世界各先进国家的发展现状和趋势。因此它既适合于刚刚开始从事这方面工作的工程技术人员阅读,又可作为高等院校师生和有关科技工作者参考。

本书中译本仍按原书分为上下两册出版,上册包括第一章至第八章,下册包括第九章至第十六章。上册中第一、二、三、八章由郭营川翻译;第四、六章由郭振芹翻译;第五、七章由张荣祥翻译,全书译文由尤德斐负责校对。

由于水平有限,不免有错误和不妥之处,请读者批评指正。

译者

1982年3月

序 言

振动、冲击和噪声参数的测量是现代科学技术的迫切问题之一。今天实际上举不出一一种控制对象或生产过程能不受振动、冲击或声音的影响，对振动过程的研究已引起国民经济各部门，如冶金、动力机械、火箭技术等极大关注。长期以来人们一直在研究克服振动、冲击和噪声对工程和自然界有害影响的方法，特别加强了对地震这种偶然性振动的研究，它是由地壳应力集中处弹性变形能量突然释放所造成的。对在不同方向上高速旋转或往复运动的大型结构和装置，如热电站或水电站的发电机组、舰船的螺旋桨、航空和火箭发动机等等进行了严密监控，因为它们产生强烈的周期性和非周期性振动过程的振源。

在谐振频率上弹性结构的振动将大大增强，这是特别危险的。

振动和冲击过程中所产生的惯性力能引起超过结构强度极限的应力，或使零件的相对位移超过允许极限。

在惯性力长时间的作用下会产生材料的疲劳破坏。美国发表的资料表明，航空工程中60~80%的断裂是由结构材料的疲劳破坏所引起的。振动大大地缩短了设备的使用寿命，降低了工作质量。例如，金属切削机床的振动使我们不可能获得高质量的零件加工表面，降低了加工精度。噪声是空气中的声振动，它也会对人体产生有害的影响。

但从另一方面来说，在国民经济中利用振动的有利一面也是人所共知的。在建筑工业中广泛地使用着振动式锻锤、振动捣固器和其它的类似机械。在苏联每年有两百多万人使用钻孔机、采掘机、电锯伐木机以及其它振动工具。也可把振动过程看作是对机

器和机械进行诊断的信号源，作为早期发现故障的手段。众所周知，声学仪器可用于无损探伤和无损地测定材料和零件的尺寸及物理机械性能。在医疗中可用振动和声音来诊断各种赘瘤与疾病。

近数十年来在苏联出版了一系列有关振动测量的书籍。这类书籍的大部分是关于基本理论与某些振动测量问题的实验研究的，但缺乏系统的有关所用技术装置的手册性材料。

本手册有助于填补振动测量书籍方面的空白。它反映了苏联一些有权威的专家在振动测量方面的经验，系统地介绍了有关振动测量仪器的计算、技术指标和工作状态的选择，并介绍了用仪器解决具体工程问题的方法。手册中阐述了有关构成振动测量技术综合装置的方法和有关振动、冲击及噪声测量仪器与系统的基本知识，着重地介绍了输入传感器，它们是振动测量装置中的主要元件。

为计算和设计振动、冲击与噪声测量仪的个别元件所必须的理论知识在本书中只给出了工程计算所必须的最低限度的内容。

同时还讨论了产生和测量输入传感器的信号的装置、随机过程频谱和特征量分析仪、信息处理和显示装置、信号发生器、振动、噪声和冲击复现装置、电源及其它辅助装置。

书中提供了有关实际研究振动、冲击和噪声的测量仪器与系统以及有关振动测量装置的计量保证的广泛知识。

对有发展前途的非接触式测量仪器，如利用光学、声学、电磁学、放射性以及其它监测方法做成的仪器，给予了极大的重视。书中给出了关于监控、报警与平衡仪、振动试验系统和冲击试验装置的材料，这些在当前都具有迫切的现实意义。手册中还补充了国外有关新的振动测量方法及其在测量技术中有意义的研究资料。

目 录

第一章 振动、噪声、冲击的参数和成套测量系统	1
§ 1 振动过程	1
§ 2 声学噪声	17
§ 3 冲击过程	20
§ 4 振动、冲击、噪声成套测量系统(АСИВ)	24
参考文献	33
第二章 振动、噪声、冲击测量传感器	35
§ 1 测量传感器的分类	35
§ 2 惯性传感器	38
§ 3 压电传感器	48
§ 4 感应式传感器	77
§ 5 电感传感器	79
§ 6 电阻传感器	88
§ 7 电容传感器	108
§ 8 测量传声器	117
§ 9 频率型振动传感器	144
§ 10 磁电效应传感器	150
§ 11 涡流传感器	163
§ 12 磁弹性传感器	168
§ 13 电子——机械式传感器	172
§ 14 测量振动参数的光学系统传感器与光源	182
§ 15 衍射测量传感器	194
§ 16 无线电波传感器	197
§ 17 γ 量子谐振吸收传感器	201
§ 18 机械阻抗传感器	205
§ 19 电化学传感器	206
§ 20 接触式极限传感器	207
参考文献	213

第三章 信号的标准化、放大、频率转换及时间转换装置215

§1 前置放大器	215
§2 测量放大器	218
§3 电子伏特计	229
§4 电滤波器	237
§5 电子计数频率计	251
§6 频率综合器	254
§7 时间间隔测量仪	257
§8 相位差测量仪	259
参考文献	260

第四章 产生激励信号的装置261

§1 激励信号产生装置的用途和分类	261
§2 周期振荡信号发生器	262
§3 脉冲信号发生器	276
§4 噪声信号发生器	281
§5 专用的激励信号发生器	284
§6 正弦激励信号发生器	285
§7 窄带随机和正弦激励信号发生器	290
§8 宽带随机激励信号发生器	293
§9 多用途激励信号发生器	295
参考文献	299

第五章 频谱分析仪和相关测量仪300

§1 用仪器作频谱分析	300
§2 前置外差式频谱分析仪	304
§3 信号时间压缩式频谱分析仪	305
§4 数字式频谱分析仪	310
§5 相关测量仪	316
参考文献	322

第六章 信息处理和显示装置323

§1 被测信息源与其处理装置的配接	324
§2 信息型式的转换器	329
§3 数字式、模拟式与数字-模拟式计算机和综合装置	342
§4 信息的操作显示装置	343
§5 测量信息的记忆装置及形成文件的设备	351
参考文献	375

第七章 辅助设备及供电电源	376
§ 1 电联接件	376
§ 2 电缆制品	382
§ 3 匹配装置、附件和工具	389
§ 4 供电电源	390
参考文献	411
第八章 测量振动、冲击、噪声参数的仪器	412
§ 1 振动位移的测量	412
§ 2 振动速度的测量	421
§ 3 振动加速度的测量	423
§ 4 周期振动若干参数的测量	426
§ 5 冲击参数的测量	437
§ 6 声学噪声的测量	452
§ 7 组合式仪器	463
参考文献	471

第一章 振动、噪声、冲击的参数 和成套测量系统

§1 振 动 过 程

随时间按正弦规律变化的简谐振动是物体最简单的振动形式(图 1-1 a)。实际中很少遇到这种形式的振动。频率连续变化的准简谐振动却是常见的(图1-1 b)。旋转机械起动或制动时就会产生类似于这种形式的振动。

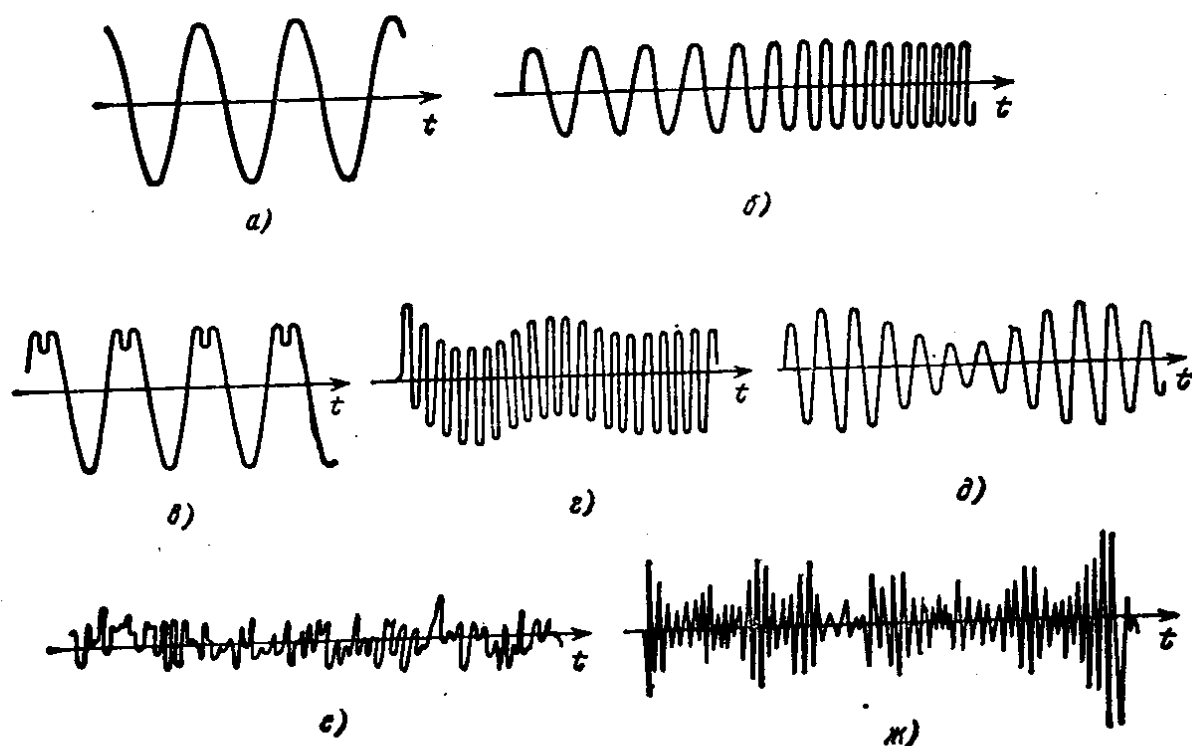


图1-1 各种形式的振动过程

实际中遇到的大多数振动是具有一定失真的正弦振动(图 1-1 e)，常用傅里叶变换法描述这种形式的振动，即任何周期函数都可看作频率相互有关的一系列简谐振动之和。系列中所取的谐波分量越多，则越接近于原函数。例如函数 $x(t)$ 可以展成傅

里叶级数, 即 $x(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + \dots$, 则 $A_1, \omega; A_2, 2\omega; \dots$ 称为相应谐波分量的幅值和频率 (一次, 二次等等), 而

$$K_f = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{A_1}$$

称为波形失真系数。谐波分量决定了振动频谱, 在频率坐标上表示为一组离散直线。

图 1-1 ν, ∂ 给出了按简谐规律变化的振动曲线在过渡过程中及在拍频时的情况。

图 1-1 e 给出了宽带随机振动的图形。这种形式的振动已在某种程度上理想化了, 所以实际上很少碰到。但在理论与实验研究上宽带随机振动比窄带随机振动 (图 1-1 κ) 更普遍, 实际中经常遇到。

表征物理现象的所有过程一般可分为确定性的和不确定性的两种。可以用高阶近似的数学关系式表述的过程称为确定性的。其时间历程不可预知, 且不能用数学解析式表示的过程称为不确定性的或随机的。

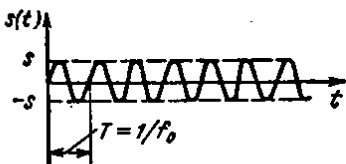
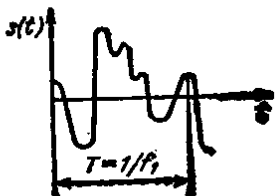
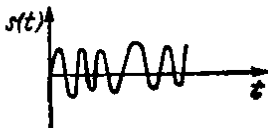
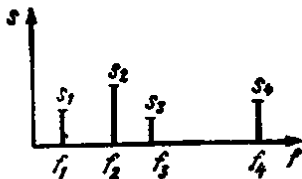
确定性过程可能是周期性的, 也可能是非周期性的 (表 1-1)。

每经过一定时间间隔 T , 其振动量的数值按同样规律重复的过程称为周期性振动。周期性振动可同时用几个振动量来表征。

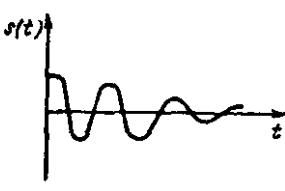
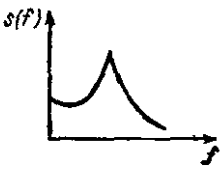
位移、速度、加速度、加加速度、力和功率是表征线性振动的参数; 表征角振动的参数为回转角、角速度、角加速度、角加加速度和力矩, 而相位、频率和非线性失真系数则是两种振动都用的参数。质点振动时, 其位置坐标的瞬时值称为位移, 用 $s(t)$ 表示。

位移对时间的一阶导数称为速度, $v = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s}$; 位移对时间的二阶导数称为加速度, $a = \frac{d^2s(t)}{dt^2} = \ddot{s}$; 而三阶导数称为加加速度 $u = \frac{d^3s(t)}{dt^3} = \ddot{\ddot{s}}$ 。

表1-1 周期性与非周期性振动过程

过程的形式	时间函数	振动曲线	频谱
简谐的	$s(t) = s \sin(\omega t + \varphi)$ $s(t) = s \sin 2\pi f_0 t$		
多谐的	$s(t) = \frac{a_0}{2}$ $+ \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_1 t + b_n \sin 2\pi n f_1 t)$ $a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T s(t) \cos 2\pi n f_1 t dt$ $n = 1, 2, 3 \dots$ $b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T s(t) \sin 2\pi n f_1 t dt$ $n = 1, 2, 3 \dots$ $s(t) = s_0$ $+ \sum_{n=1}^{\infty} s_n \cos(2\pi n f t - \varphi_n)$ $s_0 = \frac{a_0}{2}$ $s_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $n = 1, 2, 3 \dots$ $\varphi_n = \arctg(b_n/a_n)$ $n = 1, 2, 3 \dots$		
准周期的	$s(t)$ $= \sum_{n=1}^{\infty} s_n \sin(2\pi f_n t + \varphi)$		

(续)

过程的形式	时间函数	振动曲线	频 谱
过渡过程的	$s(t) = \begin{cases} Ae^{-at}\cos bt & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$ $s(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-2\pi f t} dt$		

符号:

$s(t)$ — t 时刻的位移值; s —幅值; $\omega = 2\pi f_0$ —圆频率; f_0 —振动频率; φ —振动的初相位(弧度); f —多谐过程的基频; a_n 、 b_n —傅里叶系数。

周期振动可分为简谐振动和多谐振动(见表 1-1)。简谐过程可以用时间函数描述,也可用表 1-1 中的频谱表示。简谐振动的频谱中只包含一个分量,由给定频率上的幅值表示。这种频谱称为离散谱或线状谱。在研究过程中简谐振动过程的形状和频率是保持不变的。速度超前位移及加速度超前速度的相位角均为 90° 。

在必须知道物体的相对移动或变形时,作为振动参数的位移才有意义。而在研究振动机械的效率及振动对人体组织的影响时,则应考虑振动速度,因为正是它决定了力的冲量和运动动能。加速度是经常需要测量的基本参数,但在某些情况下也要用到振动的加加速度。

周期振动的位移幅值 s_0 、速度幅值 v_0 和加速度幅值 a 通过下式联系起来,即 $a = \omega v_0 = \omega^2 s_0$ 。

有时取自落体的标准加速度值作为加速度的单位。此时加速度幅值由下式确定:

$$a \approx \frac{2s_0 f^2}{5 \cdot 10^5} g$$

式中 $2s_0$ ——振动的峰值(微米);

f ——振动频率(赫)。

值为 0.4 微米。如果已知物体在 100 赫时的位移量为 1 毫米，为求得速度与加速度值，可从 D 点（过 100 赫和 1 毫米点所引垂线的交点）向加速度和速度标度线引垂线，由垂足 F 点和 E 点可求得加速度值为 $25g$ ，速度值为 0.7 米/秒。

通常测量的是振动参数的瞬时值、峰值、有效值和平均值。

相对于选定的加速度零级值 $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ 米/秒²，可用下式求得的分贝数来表示所测得的加速度值：

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{3 \cdot 10^{-4}}$$

式中 L_a ——加速度级（分贝）；

a ——加速度值（米/秒²）。

相对于选定的速度零级值 $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ 米/秒，可按下式把速度换算为分贝表示：

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{5 \cdot 10^{-8}}$$

式中 L_v ——速度级（分贝）；

v ——速度值（米/秒）。

如果测量仪器用相对于速度 $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ 米/秒的分贝数刻度，则应将所测得的结果加上修正值 ΔL_v ：

$$\Delta L_v = 20 \lg \frac{v_1}{5 \cdot 10^{-8}} \quad \bullet$$

在测量振动位移时，相对于选定的位移零级值 $s_0 = 8 \cdot 10^{-11}$ 毫米，由下式求位移级：

$$L_s = 20 \lg \frac{s}{s_0}$$

式中 L_s ——位移级（分贝）；

s ——位移值（毫米）。

对于简谐振动来说，其位移级、速度级和加速度级具有下列

● 此式中 v_1 系该测量仪器的速度误差值。——译者

关系:

$$\begin{aligned}
 L_a &= L_v + 20 \lg f - 60 \text{ 分贝} \\
 L_a &= L_s + 40 \lg f - 120 \text{ 分贝} \\
 L_v &= L_s + 20 \lg f - 60 \text{ 分贝} \\
 L_v &= L_a - 20 \lg f + 60 \text{ 分贝} \\
 L_s &= L_a - 40 \lg f + 120 \text{ 分贝} \\
 L_s &= L_v - 20 \lg f + 60 \text{ 分贝}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

多谐过程是由恒定位移 x_0 和无穷多个幅值为 x_n , 初始相位为 φ 的正弦振动合成的。此时所有谐波的频率均为基频 f_1 的整数倍, 由不考虑初始相位的多谐过程的谱线也可看出这一点 (见表 1-1)。多谐过程可用表 1-1 中的时间函数描述。

在研究多谐振动时, 应用直接与振动能量有关的量是合适的。这时振动量的算术平均值、均方根值和峰值是最重要的。

所谓平均值是指在一个周期内, 振动量 $x(t)$ 的所有瞬时值的算术平均, 即:

$$x_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) dt$$

在一个周期内振动量的均方根值称为有效值:

$$x_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} [x(t)]^2 dt}$$

有效值与平均值之比称为振动量的波形因数, $K = \frac{x_n}{x_0}$, 而峰值

与有效值之比称为波峰因数, $l = \frac{x_{\text{пик}}}{x_n}$ 。

研究多谐振动时, 是在由下限频率 f_n 到上限频率 f_s 的全部频率的连续频段内测量上述各个量的。如果所研究问题的物理内容允许把被观察的频率分段, 则称这些段为分频段或频带。

带宽可以用频程表示, $f_s = 2f_n$ 的频程称为倍频程。

用倍频程表示时, 极限频率 f_n 和 f_s 满足下式:

$$N = \log_2 \frac{f_B}{f_H}$$

例如对于倍频程，上式为 $1 = \log_2 \frac{f_B}{f_H}$ ，或 $f_B = 2f_H$ ；对于1/3倍频程，上式为 $\frac{1}{3} = \log_2 \frac{f_B}{f_H}$ ，或 $f_B = f_H \sqrt[3]{2}$ 。

在用带通滤波器测量该频带内的振动时，其中心频率为 $f_0 = \sqrt{f_H f_B}$ 。

应由频带内所有谱分量的合成级 $L_{\text{о6м}}$ 表示该频带内的振动。可按下式求位移、速度和加速度的合成级：

$$L_{\text{о6м}} = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n l_i}}{l_0}$$

式中 l_i ——谱分量的级值；

l_0 ——零级值。

如果在所研究的频段内每个振动分量的级都是以分贝表示的，则可由下式求总的振动级：

$$L_{\text{о6м}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{l_i}{10}}$$

式中 $l_i = 1, 2, 3, \dots$ ——所测得的振动谱分量的级(分贝)。

非周期振动过程可以分为准周期过程和过渡过程两种。

准周期过程可用表 1-1 中的时间函数描述，但并不是式中的所有比值均为有理数。在两个或两个以上独立的简谐过程合成时，常会出现这种过程。表 1-1 给出了准周期过程的频谱，它与多谐过程频谱的根本区别在于诸谐波的频率是不可约的。

在准周期振动中所测量的量是振动参数的有效值和峰值，以及振动的曲线形状。

过渡的非周期过程是多种多样的。不能以离散频谱表示是它和前述各种过程的根本区别。但在大多数情况下可以用傅里叶积

分得到过渡的非周期过程的连续谱。

表 1-1 给出了过渡过程的振动曲线及相应的频谱。

其物理量随时间以随机形式变化的过程称为随机过程。可以用时间的随机函数 $x(t)$ 表示这种过程，可把它看作所谓采样函数的无穷集合或采样函数族 $\{x(t)\}$ ，而其中的每一个是随机函数可能的复现。在任意时刻都可用对采样函数族的概率特征值取平均的方法来描述随机过程。

随机过程的平均值是概率特征值之一。 t_1 时刻的平均值可由此时刻采样函数族 $\{x(t)\}$ 的每个采样函数 x_k 的瞬时值求和，再除以采样数 N 求得，即：

$$m_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1)$$

自相关函数 R_x 是另一个概率特征值，它表征了随机过程在两个不同时刻上的数值间的依赖关系。由采样函数族 $\{x(t)\}$ 的各采样函数在时刻 t_1 和 $t_1 + \tau$ 的瞬时值的乘积取平均可求得自相关函数，即：

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \bullet$$

式中 τ ——任意的时间间隔。

随机过程可分为非平稳的与平稳的两类。

其概率特征值是时间的函数，且与起始观察点有关的过程称为非平稳随机过程。一般情况下非平稳随机过程的概率特征值是时间的函数，且只能由对形成过程的采样函数族瞬时值取平均求得。实际上不可能获得如此之多的复现取样，足以用它们按采样函数族取平均来精确求得其特征值，这一点限制了非平稳随机过

● 原文中误写为

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau)。——译者$$