

随机振动试验应用技术

胡志强 法庆衍 洪宝林
张 越 徐 殷 编著



中国计量出版社

224
184

96-10/1

随机振动试验应用技术

胡志强 法庆衍 洪宝林

编著

张 越

徐 殷



中国计量出版社

4016104

图书在版编目(CIP)数据

随机振动试验应用技术/胡志强等编著. —北京:中国计量出版社, 1996. 12

ISBN 7-5026-0868-0/TB·489

I. 随… II. 胡… III. 随机振动 - 试验 - 应用 - 技术 IV. 0324-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 03503 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 17 字数 410 千字

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

*

印数 1—3000 定价: 25.00 元

前 言

振动是工程技术领域中经常碰到的问题,通常将振动分为确定性振动和随机振动两大类。但随着航空航天器飞行速度的提高,战车及水、陆交通运输设备技术的发展,高层建筑和水工、土木结构抗风、抗地震研究的深入,随机振动已成为振动环境工程和结构动力学研究中最重要课题。近十几年来,国内介绍随机振动的专著不少,但多偏重于理论分析,系统地介绍随机振动试验及分析的专著尚属罕见。而在实际工程中,为判断产品的抗振功能和耐振强度,必须进行以随机振动为主的试验考核。另一方面,为提高电子、电工及机电一体化产品的可靠性指标,正在推行高效环境应力筛选及多因素的综合环境试验,在这些可靠性环境试验中也是以随机振动作为最基本的试验手段。为此,我们几位多年来一直从事随机振动试验技术研究的同仁,本着紧密结合工程实际应用的原则,共同编写了这本随机振动试验应用技术的专著。为随机振动工程技术的应用和发展起一点推波助澜的作用。

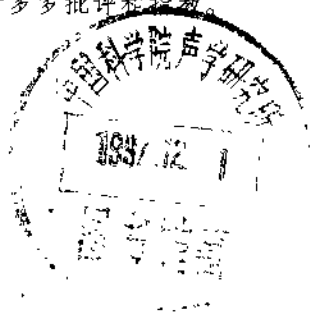
全书共分五章:第一章介绍随机振动基础理论,为后续各章节中所需要的一些概念和理论分析作好铺垫。第二章为振动试验通用设备,详细论述了振动试验中所使用的振动台(以电动振动台为主)、水平滑台、振动试验夹具的基本结构、原理、特性及使用中应注意的问题。第三章介绍随机振动试验控制技术,对数字式随机振动控制系统的工作原理、技术指标及检定等作了全面的论述。第四章的内容是随机振动试验方法,着重于如何在试验室内利用随机振动系统进行随机振动试验,包括试验前的准备,试验中的故障处理,试验后的结果分析。第五章全面介绍动态信号分析仪,为随机振动的测试和分析提供一种有效的手段。上述各章,彼此衔接、前后呼应、共为一体,期望读者在读过此书之后对随机振动试验能有一个全面的了解,并能帮助读者更有效、更正确地进行随机振动试验。

本书五章的内容分别由胡志强、徐殷、张越、法庆衍、洪宝林同志编著,最后由胡志强研究员统稿。

书中错误和不妥之处,祈望读者多多批评和指教。

编著者

1996.6. 北京



4016104

目 录

第一章 随机振动基础理论	(1)
1.1 振动信号	(1)
1.1.1 振动信号的种类	(1)
1.1.2 确定性振动的特征参数	(1)
1.1.3 随机振动特征描述	(5)
1.1.4 振动系统响应特性描述	(16)
1.2 随机振动信号采集	(19)
1.2.1 采样与混淆	(19)
1.2.2 量化及其误差	(20)
1.2.3 泄漏与加窗	(21)
1.3 随机振动数据分析	(25)
1.3.1 分析的内容	(25)
1.3.2 数据预处理	(25)
1.3.3 数据检验	(26)
1.4 快速傅里叶变换 (FFT)	(28)
1.4.1 有限离散傅里叶变换 (DFT)	(29)
1.4.2 快速傅里叶变换 (FFT)	(29)
1.4.3 FFT 细化 (ZOOM) 技术	(31)
1.5 平稳随机振动统计特性参量的数字分析	(32)
1.5.1 均值、均方值、方差	(32)
1.5.2 概率密度函数	(33)
1.5.3 自相关函数、互相关函数	(34)
1.5.4 自谱密度函数、互谱密度函数	(34)
1.5.5 相干函数 (凝聚函数)	(39)
1.5.6 频率响应函数	(39)
第二章 振动试验通用设备	(40)
2.1 振动试验系统的分类	(40)
2.1.1 正弦振动试验系统	(40)
2.1.2 随机振动试验系统	(42)
2.2 振动试验台	(50)
2.2.1 机械振动台	(51)
2.2.2 电动振动台	(53)
2.2.3 电液振动台	(83)
2.2.4 振动台的选择及使用	(92)

2.3 激振器	(93)
2.3.1 激振器的分类与原理	(93)
2.3.2 激振器的安装与使用	(97)
2.3.3 激励函数的类型	(98)
2.4 振动台的辅助设备——水平滑台	(99)
2.4.1 水平滑台的基本工作原理与结构	(100)
2.4.2 水平滑台与振动台的联接	(104)
2.4.3 水平滑台的重要技术问题	(106)
2.4.4 水平滑台的特性参数及其检测	(107)
2.5 振动试验夹具	(108)
2.5.1 夹具的分类	(108)
2.5.2 夹具的设计原则	(112)
第三章 随机振动试验控制	(118)
3.1 数字式随机振动控制系统的基本组成	(118)
3.2 数字式随机振动控制系统的基本原理	(119)
3.2.1 时域—频域转换	(119)
3.2.2 频谱均衡	(120)
3.3 数字式随机振控系统的主要技术参数	(122)
3.4 随机信号的产生	(125)
3.4.1 伪随机信号	(125)
3.4.2 真随机信号	(126)
3.5 信号量化技术	(129)
3.5.1 程控高分辨力小信号放大器	(129)
3.5.2 抗混滤波器	(130)
3.5.3 平滑滤波器	(130)
3.6 随机振动控制的实时性	(131)
3.6.1 随机振动实时控制的必要性	(131)
3.6.2 衡量“实时性”的技术指标	(131)
3.7 随机振动控制精度	(132)
3.8 数字式随机振动控制系统的结构类型	(135)
3.9 数字式随机振动控制系统的检定	(136)
3.9.1 检定用的主要仪器	(136)
3.9.2 随机振动试验系统的检定方法	(137)
3.10 数字式正弦振动试验系统的检定方法	(146)
3.11 冲击试验控制	(149)
第四章 随机振动试验方法	(157)
4.1 振动试验分类	(158)
4.1.1 分类	(158)
4.1.2 应力筛选试验	(159)

4.2 振动试验的依据——试验条件	(161)
4.2.1 振动试验条件与试验方法	(161)
4.2.2 振动试验条件的内容	(161)
4.2.3 振动试验条件的制定	(163)
4.3 振动试验设备及测试仪器的选用	(163)
4.3.1 激振设备	(164)
4.3.2 振动控制设备	(166)
4.3.3 测量和记录仪器	(170)
4.3.4 数据处理设备	(173)
4.4 振动试验方法	(174)
4.4.1 正弦振动试验	(174)
4.4.2 随机振动试验	(184)
4.4.3 振动试验的控制方式	(194)
4.5 振动试验夹具的设计与制造	(195)
4.5.1 振动试验夹具的用途	(195)
4.5.2 对振动试验夹具的要求	(196)
4.5.3 振动试验夹具的种类	(197)
4.5.4 振动试验夹具的制作方法	(198)
4.5.5 振动试验夹具的设计	(200)
4.6 振动试验中的保护措施	(201)
4.6.1 人身的保护	(201)
4.6.2 振动试验设备的保护	(201)
4.6.3 试件的保护	(201)
4.7 典型振动试验介绍	(202)
4.7.1 小型导弹全弹振动试验	(202)
4.7.2 某试验火箭振动特性试验	(203)
第五章 动态信号分析仪	(209)
5.1 模拟滤波式动态信号分析仪	(209)
5.1.1 顺序滤波式分析仪	(210)
5.1.2 扫描滤波式分析仪	(210)
5.1.3 外差滤波式分析仪	(210)
5.1.4 跟踪滤波式频谱分析仪	(211)
5.1.5 时间压缩式频谱分析仪	(213)
5.2 数字滤波式动态信号分析仪	(213)
5.2.1 数字滤波器的分类	(214)
5.2.2 数字滤波器的基本工作原理	(215)
5.2.3 数字滤波器的硬件、软件实现	(217)
5.2.4 典型数字滤波式动态信号分析仪	(217)
5.3 相关式频率响应分析仪	(218)

5.3.1 对有噪声干扰的测量	(220)
5.3.2 对非线性系统的测量	(221)
5.3.3 典型频率响应分析仪介绍	(221)
5.4 数字式 FFT 动态信号分析仪	(222)
5.4.1 抗混淆滤波器	(223)
5.4.2 采样、保持、模数转换器	(224)
5.4.3 FFT 处理器	(225)
5.4.4 细化技术 (ZOOM)	(225)
5.4.5 加权技术与窗函数	(228)
5.4.6 平均处理	(233)
5.4.7 测量参数	(236)
5.4.8 激励函数	(240)
5.4.9 接口	(241)
5.4.10 典型动态信号分析仪介绍	(241)
5.5 现代谱分析方法	(242)
5.5.1 熵及高斯过程的熵量	(242)
5.5.2 AR 模型	(243)
5.5.3 最大熵	(244)
5.5.4 最大熵谱估计方法	(245)
5.5.5 最大熵谱的特点	(245)
5.6 动态信号分析仪在计量检定技术中的应用	(245)
5.6.1 FFT 随机振动校准系统的组成及基本工作原理	(245)
5.6.2 振动传感器 FFT 随机振动校准的误差分析	(248)
5.6.3 振动传感器 FFT 随机振动校准的实验研究	(251)
5.7 动态信号分析仪的检定方法	(252)
5.7.1 频率示值和频率分辨力误差的检定	(252)
5.7.2 分析仪频谱幅值误差的检定	(253)
5.7.3 动态范围的检定	(254)
5.7.4 通道一致性的检定	(255)
5.7.5 功率谱密度示值误差的检定	(255)
5.7.6 自相关函数的检定	(256)
5.7.7 幅值线性误差的检定	(256)
5.7.8 窗函数误差的检定	(257)
5.7.9 概率密度和概率分布函数的检定	(258)
5.7.10 分析仪其它功能的检定	(258)
参考文献	(260)

第一章 随机振动基础理论

1.1 振动信号

1.1.1 振动信号的种类

振动是物体围绕平衡位置（或平均位置）往复运动的一种形式，通常用一些物理参量（如位移、速度、加速度等）随时间变化的函数式来表征振动的时间历程。

根据物体运动的不同规律，振动可分为：



表 1.1 对各种振动信号的特点，时域及频域的波形等进行了详细的描述。

1.1.2 确定性振动的特征参数

确定性振动的共同特点是其时间历程都可以用一个以时间为自变量的确定性函数来描述，这也就是说，物体在未来任一时刻的状态参量都可以精确计算得到，而且是一个确定的数值。一个确定性振动描述函数中的有关特征参数有：

(1) 振动幅值

运动质点离开平衡位置的距离称为振动幅值。其最大值称为最大振幅，对于周期性振动 $x(t)$ 的振动幅值有以下几种描述方法（见表 1.2）。

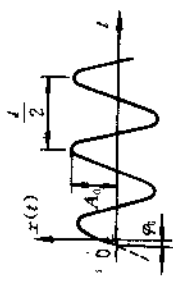
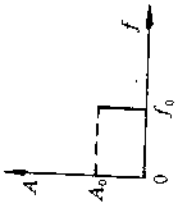
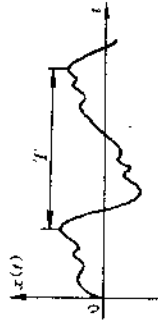
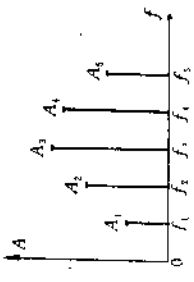
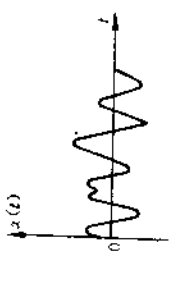
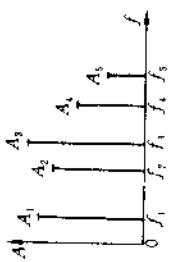
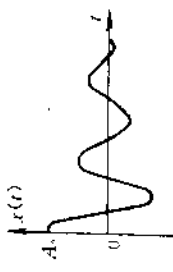
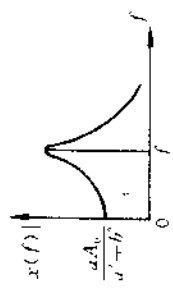
(2) 振动频谱

1) 周期性振动的频谱。根据傅里叶级数的基本理论，任何一个具有确定周期的振动波形都可以展开成傅里叶级数，即可以将该振动信号分解为许多不同频率的谐波分量。显然，周期性振动的频谱是离散型的（见表 1.1 中的图形）。

设振动信号 $x(t)$ 的周期为 T ，则

$$x(t) = x_0 + x_{01}\sin(\omega t + \phi_1) + x_{02}\sin(2\omega t + \phi_2) + \cdots + x_{0n}\sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.1)$$

表 1.1 振动信号分类

振动信号类型	数学表达式	时域波形	频域波形	特 征
简谐振动	$x(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)$			最大振幅 A_0 振动频率(T_0 振动周期) $f_0 = 1/T_0$ 振动初相角 φ_0
复杂周期 振动	$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$ $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$			振幅 A_n 基波及谐波频率 f_n 组成复杂周期振动的各次谐波频率 f_n 与基波频率 f_1 之比(n)为有理 正整数
准周期振动	$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$			只要其中有一个 n 值是无理数时 其合成运动就不出现周期性,称为 准周期振动
瞬态非周期 振动 (如衰减振 动)	$x(t) = \begin{cases} A_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$			频域波形呈连续性,其频谱是一个 确定函数。对于衰减振动,其频域 波形有峰值,峰值出现的频率与衰 减振动的频率有关

续表

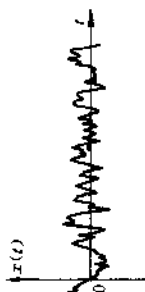
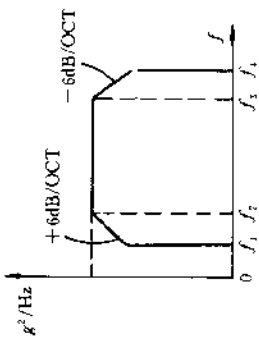
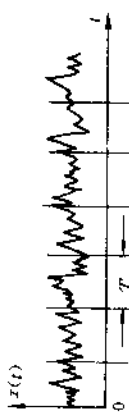
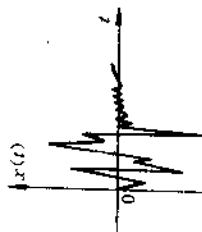
振动信号类型	数学表达式	时域波形	频域波形	特征
各态历经 随机振动	$\mu_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt$ $R_{xx}(t, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) \cdot x_k(t + \tau) dt$			任何一个足够长的样本函数 $ x_s(t) $ 的均值 $\mu_x(k)$ 与母体的均值 $\mu_x(t)$ 相等, 任何一个样本函数的自相关函数 $R_{xx}(t, \tau)$ 均相同, 频谱是连续的非确定性函数, 其特性参数有统计规律性
非平稳 随机振动	均值 $\mu_x(t)$ 及自相关函数 $R_{xx}(t, \tau)$ 的数学表达式与上面相同			$\mu_x(k) \neq \mu_x(t)$, 每一样本函数的 $R_{xx}(t, \tau)$ 均不一样
瞬态随机 振动				无统计规律可言

表 1.2 周期振动 $x(t)$ 幅值的描述

名 称	符 号	物 理 意 义	幅 值 比 (对简谐振动)	图 形
峰值	x_p	$x(t)$ 的最大值	1	
峰-峰值	x_{p-p}	$x(t)$ 的最大值与最小值之差	2	
平均绝对值	$ \bar{x} $	$\frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$	0.636	
均方值	x_{ms}	$\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$	/	
均方根值 (有效值)	x_{rms}	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$ 或 $x_{rms} = \sqrt{x_{ms}}$	0.707	

或:

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} x_{0n} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.2)$$

上式也可表示为:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1.3)$$

式中:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$x_{0n} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\phi_n = \arctg\left(\frac{-b_n}{a_n}\right)$$

这里, a_n 、 b_n 是 $x(t)$ 的傅里叶系数, a_0 是 $x(t)$ 的平均值, 即振动信号的直流分量, ω_0 是基波频率 (即 $n=1$), 对应 $n=2, 3, \dots, n$ 是该振动信号的二阶、三阶, $\dots, n$ 阶谐波的频率。

2) 非周期性振动的频谱。对于非周期性振动, 其频谱是一条连续的曲线 (连续谱), 可以用傅里叶变换得到, 即:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.4)$$

反之

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1.5)$$

后面的讨论中会涉及到有些振动信号不满足傅里叶变换的条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty$$

时，需要改变被变换信号的形式，使之满足傅里叶变换的条件后再进行变换。

3) 相位。相位是将自变量的某一值作为参考值时所测得的正弦量超前（或滞后）的角度。公式 (1.1) 中的 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ 就是各次谐波相对于周期性振动波形起始点的相位值。

4) 阻尼。对于周期性强迫振动，非周期性的衰减振动，阻尼是一个很重要的参数，例如在有阻尼自由衰减振动中（图 1.1），振动幅值包络线为

$$x(t) = \pm Ae^{-\xi\omega_n t} \quad (1.6)$$

衰减振动的频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 - \xi^2} \omega_n \quad (1.7)$$

式中， $\xi = c/c_c$ 是该振动系统的阻尼； c 为阻尼系数； c_c 为临界阻尼系数； ω_n 为无阻尼振动系统的固有频率。

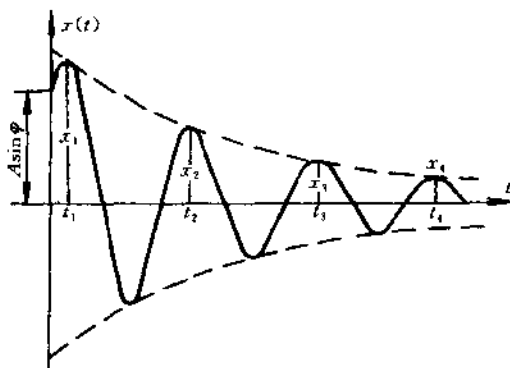


图 1.1 有阻尼自由衰减振动轨迹图

工程实际中存在着多种阻尼，各种阻尼的性质不同，对振动系统的影响也不一样，表 1.3 列出了不同类型阻尼的特性比较表。

表 1.3 不同类型阻尼特性比较表

类 型	阻尼系数	每周期内耗散能量	阻尼力表达式	原 因
粘性阻尼	ζ	$E = c\omega\pi x^2$	$F_d = c\dot{x}$	振动物体沿润滑表面滑动，或在流体中低速运动时所遇到的阻尼
速度平方阻尼	a	$E = \frac{8}{3}a\omega^2 x^3$	$F_d = a\dot{x}^2$	振动物体在流体介质中高速运动时所遇到的阻尼
库仑阻尼	k	$E = 4xF_d$	$F_d = k$ (k 为常数)	是一种干摩擦阻力，其摩擦力大小与相对运动的速度无关
结构阻尼 (固体阻尼)	α	$E = \alpha\epsilon^2$ 此处 ϵ 是材料应变的幅值	/	这是一种材料的内阻，金属材料（如钢、铝等）在承受交变载荷时，材料内部有能量耗散引起的阻尼

1.1.3 随机振动特征描述

随机振动是一种非确定性振动。当物体作随机振动时，我们预先不可能确定物体上某监测点在未来某个时刻运动参量的瞬时值。因此随机振动和确定性振动有本质的不同，是不能用时间的确定性函数来描述的一种振动现象。但是从总体来看，这种振动现象存在着一定的统计规律性，能用该现象的统计特性进行描述。

随机振动又分为平稳随机振动和非平稳随机振动。所谓平稳随机振动是指其统计特性不随时间而变化。为了研究方便，对那些具有统计特性为“任何一次采样函数所求得的时间平均统计参数都对应相等，并且等于该系统由整体平均所求得的统计参数”的平稳随机振

动, 它的每个子样显然包含了整体系统各种状态所经历过的特征。因此, 可以用一个子样的特性来表征整体平均的特性, 这种平稳随机振动称为各态历经的随机振动。严格地说, 实际工程问题中不存在平稳的各态历经的随机振动, 但是从“近似”的角度出发, 不少工程问题是符合这种“假设”的。而且从另一方面说, 在工程实际中也不可能获取无限长时间的样本记录。因此, 最简单和比较近似的办法是假定工程中所研究的随机振动是平稳的各态历经(遍历)的随机振动, 除非有足够的证据否定上述假设。诚然, 随着科技的进步与发展, 对非平稳随机振动规律性的研究和认识也将逐步深入并逐渐应用于工程实践中。

上述解释说明各态历经的随机振动一定是平稳随机振动, 但平稳随机振动则不一定是各态历经的随机振动。这正如随机振动是一种复杂的振动, 但复杂振动却不一定是随机振动, 本书以下讨论的随机振动均局限于各态历经的随机振动。

一个各态历经的随机振动过程可以从时域、幅值域、时差域、频率域等不同的角度进行描述。

(1) 时域描述。从时域描述随机振动是采用样本函数。随机振动过程是时间的函数, 但它在某个给定时刻的函数值却不是一个确定的数, 而是一个随机变量。因此从理论上应使用无限长时间记录来描述一个随机振动的过程, 但在工程实践中常常只能得到一个有限长时间的记录或数据。对于各态历经的随机振动而言, 这个有限长的记录(子样)中包含有整个随机振动过程(母体)中的全部统计信息, 因此将这个有限长的记录称为“样本”或“样本函数”, 有时也称为“帧”。显然选取样本函数时必须注意该样本函数的代表性。必须首先确定该随机振动为各态历经的随机振动, 才能选取有一定时间长度的记录作为样本函数, 并以其统计特性去表征整个随机振动过程的统计特性。

(2) 幅值域描述

1) 概率分布函数与概率密度函数。随机振动的幅值是一种随机变量, 随机变量分离散型和连续型。对于连续型随机变量 $x(t)$, 例如随机振动的振幅值, 定义 $x(t)$ 的取值小于某一实数 X_0 的概率为概率分布函数。

$$P(x) = \text{prob}(X < X_0) \quad (1.8)$$

对于任意两个实数 X_1, X_2 , 若 $X_1 < X_2$, 则

$$\begin{aligned} \text{prob}(X_1 \leq X \leq X_2) &= \text{prob}(X \leq X_2) - \text{prob}(X \leq X_1) \\ &= P(X_2) - P(X_1) \end{aligned} \quad (1.9)$$

显然, 概率分布函数有如下特性

① $P(\infty) = 1, P(0) = 0$

即: $0 < P(x) < 1$

② $P(x)$ 为非降函数

即: 若 $X_2 > X_1$, 则 $P(X_2) > P(X_1)$

③ 若随机变量 $x(t)$ 是连续的, 则 $P(x)$ 必然连续, 用图形表示 $P(x)$ 的特性如图 1.2 所示。

若图 (1.2) 中 $P(x)$ 连续可微, 则

$$\frac{dP(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x + \Delta x) - P(x)}{\Delta x} = p(x) \quad (1.10)$$

或

$$dP(x) = p(x) dx \quad (1.11)$$

称 $p(x)$ 为概率密度函数, 公式 (1.10)、(1.11) 表示了概率分布函数与概率密度函数的

关系。随机振动的幅值作为一种随机变量，其幅值的概率分布函数 $P(x)$ 的斜率（即导数）就是幅值概率密度函数 $p(x)$ ，而幅值概率密度函数曲线（图 1.3）下从 x 到 $(x + dx)$ 之间的面积（阴影部分）就是随机变量落在 x 与 $(x + dx)$ 之间的概率。

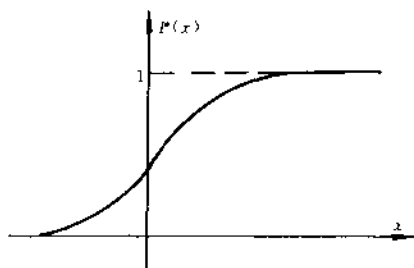


图 1.2 典型的概率分布函数图

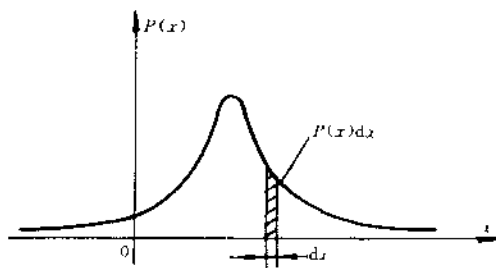


图 1.3 典型的一维概率密度函数曲线图

概率密度函数有如下特性：

① $p(x) > 0$

② $\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1$

③ 对于 $a < x < b$ ，则

$$\int_a^b p(x) dx = P(b) - P(a) = \text{prob}(a \leq x \leq b)$$

上面的讨论针对一个随机变量 $x(t)$ ，与此相对应称为一维概率密度函数，若有两个随机变量 $x_1(t)$ ， $x_2(t)$ ，则对应存在二维概率分布函数与二维概率密度函数。

不同样本的时间历程记录有不同的概率分布和概率密度函数，随机振动中碰到的几种概率分布函数类型见表 1.4。不同种类时间历程所对应的概率密度曲线见表 1.5。

表 1.4 概率分布函数类型表

概率分布类型	概率密度函数图形	概率密度函数表达式
δ 分布		$\delta(x - a)$
正态分布		$\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} \right\}$

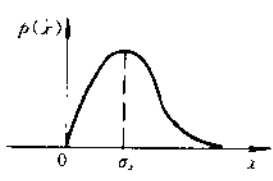
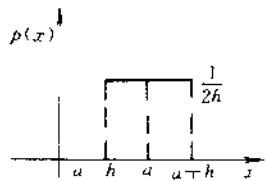
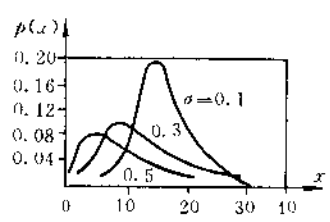
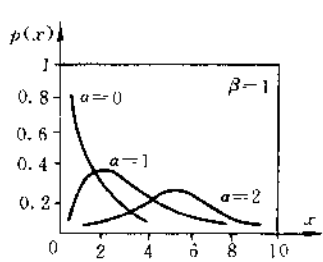
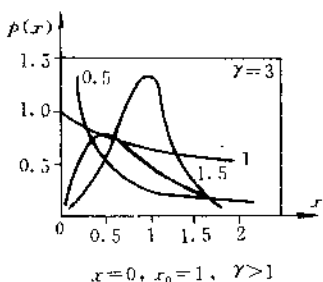
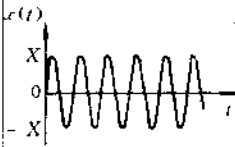
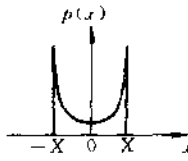
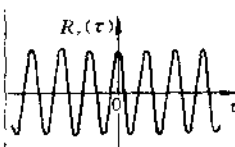
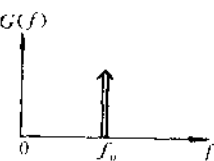
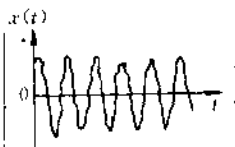
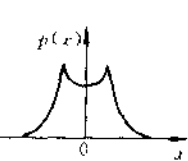
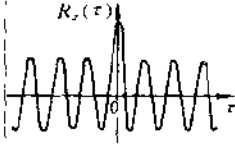
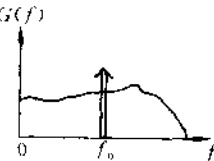
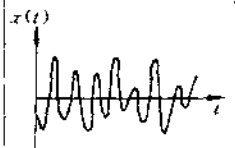
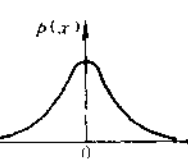
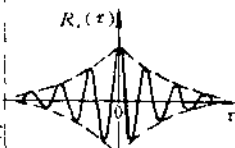
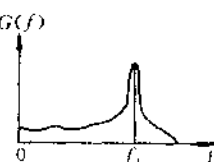
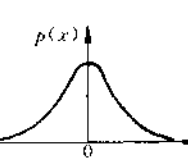
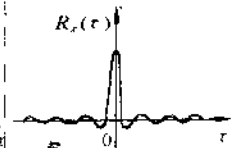
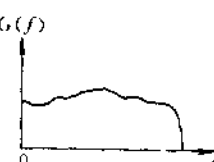
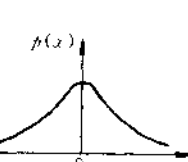
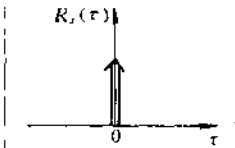
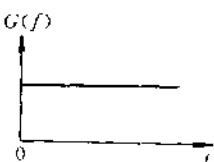
概率分布 类 型	概率密度函数图形	概率密度函数表达式
瑞利分布		$\begin{cases} \frac{x}{\sigma_x^2} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma_x^2} \right\} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
均匀分布		$\begin{cases} \frac{1}{2h} & (a-h) \leq x \leq (a+h) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$
对数正 态分布		$\frac{1}{\sigma \lg x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\lg x - \lg \mu_x)^2}{2\sigma^2 \lg^2 x} \right\}$
伽玛 分布		$\begin{cases} \frac{1}{\beta \Gamma(a+1)} \left(\frac{x}{\beta} \right)^a \exp \left\{ -\frac{x}{\beta} \right\} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ 式中 $a > -1, \quad \beta > 0$ $\Gamma(a+1) = \int_0^\infty e^{-t} t^a dt$ $a = \left(\frac{\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 1 \quad \beta = \sigma_x^2 / \mu_x$
威伯尔 分布		$\frac{\gamma}{x_0} (x - x_a)^{\gamma-1} \cdot \exp \left\{ - (x - x_a)^\gamma / x_0 \right\}$ 式中 x_0, x_a, γ 为自由参数

表 1.5 各类振动信号的概率密度、自相关、自功率谱图

名称	时间历程图	概率密度图	自相关图	自功率谱图
(1) 初相角随机变化的正弦信号				
(2) 正弦波加随机噪声信号				
(3) 窄带随机信号				
(4) 宽带随机信号				
(5) 白噪声信号				

工程中大多数随机振动的幅值都近似地服从高斯分布（也称正态分布），其概率密度函数如表（1.4）中所列。

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.12)$$

按公式（1.11）可得概率分布函数 $P(x)$

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1.13)$$

式中， μ 为随机振动 $x(t)$ 的平均值， σ 为标准差，当 $\mu=0$ ， $\sigma=1$ 时的正态分布称为标准正态分布，此时有：