

基础结构 动态诊断

汪风泉 主编
江苏科学技术出版社

基础结构 动态诊断

前 言

桩结构是工程建设中重要的基础形式，它在高层建筑、重型厂房、桥梁基础、海上平台、水利设施和核电站等工程中得到了广泛的应用。据不完全统计，目前我国年均用桩量约为 80 万根，占工程总投资的 $1/4$ 以上。由于我国基础施工条件的限制，缺陷桩的比例较大，对整体工程质量的影响严重，因此桩身质量的诊断技术愈来愈受到重视。

传统的桩身质量检验方法主要有取芯法、超声法和射线法等。随着波动理论、振动工程、信号分析技术、电子技术和计算机技术的不断提高，振动法和波动法动态诊断技术取得了迅速的发展和广泛的应用。

这些动态诊断技术既适用于打入桩，也适用于灌注桩。一般能够诊断桩几何尺寸（如有效桩长）、断面质量（如缩颈、扩颈、裂缝）和建筑材料质量（如弹性模量、强度和均质）偏差或波速、机械阻抗与动刚度等力学参数的变化，并为承载力估计提供了必要的检测手段。

我国铁路分布幅员辽阔，沿线数千座铁路桥的健康状况直接关系到我国铁路交通的安全。因此，铁路桥梁基础的状态监测与病害诊断是一项面广量大且具有重大国民经济意义的工作。

近代，桥墩病害诊断的主要方法有：振动诊断法、超声探伤及回声诊断法、钻孔取样法、孔内注水法和墩顶沉降量检测法等。实践表明，桥墩病害诊断的振动法和声学法具有提取信号方便，分析处理准确迅速，以及便于现场使用且不影响铁路的正常运行等优点，从而成为国内外研究的重点。日本自 40 年代以来就开始了这方面的研究，通过对大量实际桥墩病害的诊断与分析，于 1964 年制定了评价桥墩健全度的标准草案。70 年代以来，冈田胜也

(Katsuya Okada)等根据日本铁路桥墩常见病害情况,着重研究了埋深不足的影响,同时,日本对桥墩安全度的振动与冲击试验方法也进行了长期深入的研究,这些研究为桥墩诊断技术的发展奠定了基础。我国自70年代初开始对桥墩病害诊断技术进行研究,其中哈尔滨铁路局最早搜集并研究了我国铁路桥墩的病害特征。铁道部铁道科学研究院自70年代末期以来进行了桥墩病害诊断的理论与技术的系统研究。

从结构动力学、试验动力学和故障诊断技术的角度来看,桩和桥墩等基础结构完整性的无损动态诊断具有很大的难度。这些“灰色结构”部分或全部埋置于地下,具有复杂的非均质系统和边界条件,分散的土力学参数和严重的非线性特性,严酷的检测环境和较高的定量水平,这些都对动态诊断技术提出了许多严格的要求。

本书以这些要求为背景,结合近年来我们在这一领域内的有关研究成果,系统介绍基础结构完整性动态诊断技术及其有关的振动、冲击与应力波理论和动态测试分析方法。其主要内容为,振动、冲击的信号和系统分析理论、结构动态测试与分析技术、桩的纵向振动与弹性波理论、桥墩振动基础、桩的动态诊断技术——振动导纳法和反射波法诊断技术以及凯斯法和CAPWAP法动测技术、桥墩技术状态检测与病害动态诊断技术等。

本书由汪凤泉教授主编,韩晓林、童楚生、许秀芝、吴慧新、唐新鸣等同志编著。

由于时间和水平的限制,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1992年9月

目 录

第一章 振动与冲击基础	1
1.1 简谐振动及其表示	1
1.2 周期振动·谐波分析	4
1.3 振动量的峰值、有效值和平均值	10
1.4 冲击与瞬态振动·频谱分析	13
1.5 随机振动信号的描述	16
1.6 单自由度系统的自由振动·特征方程	24
1.7 系统对谐波激励的响应·频率响应函数	27
1.8 系统对脉冲激励的响应·脉冲响应函数	33
第二章 桩的纵向振动与弹性波	37
2.1 杆的纵向振动方程与解	37
2.2 各种边界条件下杆的固有频率和振型	39
2.3 桩的振动方程·土阻抗的影响	43
2.4 波动基础	49
2.5 弹性波在杆内的传播	59
2.6 弹性波在不同介质面上的反射和透射	61
第三章 桥墩振动基础	66
3.1 悬臂梁的弯曲振动	66
3.2 附加质量与弹性支承的影响	72
3.3 桥墩基频的近似计算	75
3.4 “有限元—模态参数法”识别墩基边界条件	77
3.5 桥墩复合振动的基频计算	81
第四章 基础结构的动态测试技术	83
4.1 结构动态测试参数及其表示	83

4.2	检测传感器	85
4.3	信号适调器	103
4.4	采样/保持与模/数转换	106
4.5	动态信号谱分析	116
4.6	动态信号分析系统	133
4.7	动态诊断系统的振动与冲击标定	137
第五章	桩完整性的振动导纳法诊断技术	160
5.1	正弦导纳法诊断原理	160
5.2	正弦导纳法激振控制	167
5.3	正弦导纳法诊断与分析	175
5.4	瞬态导纳法激振技术	180
5.5	瞬态导纳法诊断	185
第六章	桩的波动法动测诊断技术	195
6.1	反射波法诊断原理	195
6.2	反射波法诊断的信号拟合技术	200
6.3	反射波法诊断系统	207
6.4	反射波法诊断与可靠性分析	209
6.5	反射波法与振动导纳法的比较	222
6.6	声波衰减与时变增益放大	224
6.7	凯斯波动法	228
6.8	CAPWAP C 法	259
第七章	桥墩状态检测与病害诊断技术	271
7.1	波速测试·桥墩强度检验	272
7.2	桥墩结构状态的波动法检测	279
7.3	桥墩病害的冲击振动法诊断	283
7.4	桥墩病害诊断的振动综合评判法	294
7.5	识别墩基约束刚度的试验特征值法	304
参考文献		310

第一章 振动与冲击基础

振动是物体的一种运动形式，它常常是工程中被限制的对象。而本书却是介绍如何利用振动和冲击现象来诊断和分析结构的不完整性。

根据振动系统的运动学微分方程的数学形式，振动可分为线性振动和非线性振动。严格说来，桩土或墩土系统是一个非线性系统，但在进行工程检测时，可近似简化为一个线性系统来研究。

根据描述振动运动所必须的独立自由度数，振动可按照单自由度、多自由度和弹性体（无限多自由度）系统进行研究。实际的工程桩和桥墩结构都是无限多自由度系统，但在分析中，有时也将它简化为多自由度、甚至单自由度系统来加以研究。

根据振动系统的运动特征，振动可分为周期振动、简谐振动、非周期振动（包括冲击和瞬态振动）和随机振动。它们是稳态和瞬态振动诊断的基础。

根据产生和维持振动的原因，振动又可分为自由振动和强迫振动。前者是由冲击力或初始位移引起的振动，各种脉冲激振或锤击所引起的桩、墩体瞬态自由衰减振动都属于这种；后者是由外界的持续激振力维持的振动，各种稳态激励的桩、墩体强迫振动都属于这一类。

作为振动基础知识，本章着重介绍振动与冲击信号的特征和单自由系统的振动规律。

1.1 简谐振动及其表示

简谐振动是周期振动中最简单的一种，它可以用正弦函数表示

为如下形式

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

式中 A 为振幅, ω 为圆频率, φ 为初相位. 圆频率 ω 又称角频率, 它与频率 f 、周期 T 的关系为

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T \quad (1.2)$$

ω 、 f 及 T 的单位分别是 rad/s 、 Hz 及 s . 为了方便, 也将 ω 称为频率.

对于简谐振动, 知道振幅、频率及初相位就确定了一个振动. 因此通常把振幅、频率和初相位称为简谐振动的三要素. 式 (1.1) 的简谐振动图象如图 1.1 所示.

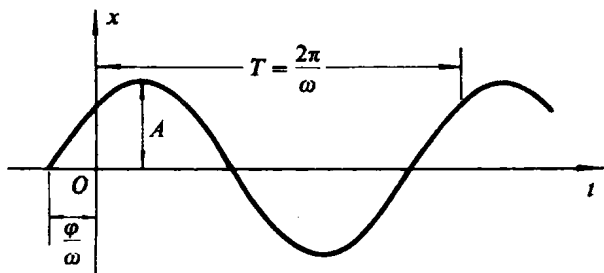


图 1.1 简谐振动波形

如果视 x 为振动位移, 式 (1.1) 对时间 t 求导, 便得到振动速度及加速度

$$\dot{x} = A\omega \cos(\omega t + \varphi) = A\omega \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (1.3)$$

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi + \pi) \quad (1.4)$$

由式 (1.3)、(1.4) 可见, 在简谐振动中, 速度的振幅为 ωA , 是位移振幅的 ω 倍, 而加速度幅值是 $\omega^2 A$, 是位移幅值的 ω^2 倍; 速度的相位超前位移 $\frac{\pi}{2}$, 而加速度的相位又超前速度 $\frac{\pi}{2}$, 或与位移相差 π 角.

简谐振动可以用平面上的旋转矢量表示。图 1.2(a) 中 OM 是一个长为 A ，自 φ 角开始且以等角速度 ω 逆时针绕原点旋转的矢量。任一瞬时 OM 在纵轴上的投影 ON 即为式 (1.1) 所描述的简谐振动 $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ ，通常将这个旋转矢量画成图 1.2(b)。利用旋转矢量还能直观形象地表示出振动位移、速度及加速度之间的关系，如图 1.2(c) 所示。

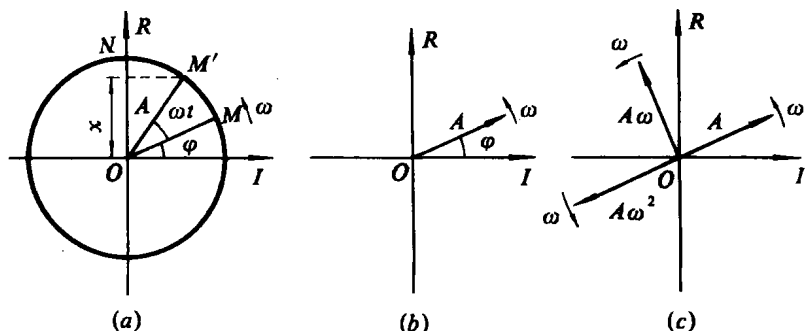


图 1.2 简谐振动的矢量表示

简谐振动也可以用复数表示。记 $j = \sqrt{-1}$ ，复数

$$z = A e^{j(\omega t + \varphi)} = A \cos(\omega t + \varphi) + j A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.5)$$

上式表示了复平面上模为 A 、从 φ 角开始以等角速度 ω 逆时针绕原点旋转的一个矢量。它在虚轴上的投影，即虚部表示了式 (1.1) 的简谐振动。因此，位移 x 与它的复数表示 z 的关系可写为

$$x = I_m(z) \quad (1.6)$$

式中 $I_m(z)$ 为 z 的虚部。由于

$$j = e^{j\frac{\pi}{2}}, \quad -1 = e^{j\pi} \quad (1.7)$$

复数表示的速度及加速度为

$$\begin{aligned} \dot{z} &= j \omega A e^{j(\omega t + \varphi)} \\ &= \omega A e^{j(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned}\ddot{z} &= -\omega^2 A e^{j(\omega t + \varphi)} \\ &= \omega^2 e^{j(\omega t + \varphi + \pi)}\end{aligned}\quad (1.9)$$

将以上两式与式 (1.3)、(1.4) 比较可得

$$\dot{x} = I_m(\dot{z}), \quad \ddot{x} = I_m(\ddot{z}) \quad (1.10)$$

简谐振动的复数表示方法便于分析, 在解运动微分方程时常要用到复数法。

1.2 周期振动 · 谐波分析

周期振动是指每经过相同的时间间隔, 且振动量重复出现的振动。显然, 简谐振动是最简单的周期振动。周期振动的一般数学表达式为

$$x(t) = x(t \pm nT) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.11)$$

其中, T 是周期振动 $x(t)$ 的周期, 图 1.3 是周期振动的图示。

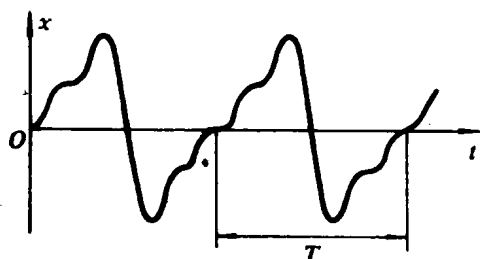


图 1.3 周期振动波形

如果 $x(t)$ 在 $[0, T]$ 内是分段单调连续的, 则可以通过傅里叶级数展开为

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1.12)$$

式中

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} x(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} x(t) \cos n\omega_1 t dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} x(t) \sin n\omega_1 t dt \end{cases} \quad (1.13)$$

式中

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (1.14)$$

称为基频, τ 为任一时刻。记

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \varphi_n = \operatorname{tg}^{-1} \frac{a_n}{b_n} \quad (1.15)$$

式 (1.12) 又可以写为

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (1.16)$$

上式中, $\frac{a_0}{2}$ 表示周期振动 $x(t)$ 的平均值, 级数的其余各项都是简谐振动。可见, 通过傅里叶级数展开, 周期振动被表示成一系列频率为基频整数倍的简谐振动 (或称谐波) 的叠加, c_n 及 φ_n 是频率为 $n\omega_1$ 的简谐振动分量的振幅及相位角。因此, 又将傅里叶展开称为谐波分析。

记 $\omega = n\omega_1$, 由式 (1.15) 及 (1.13) 看出, 如果以频率 ω 作为自变量, 幅值 c_n 及相位角 φ_n 都是 ω 的函数。 c_n 与 ω 以及 φ_n 与 ω 的函数关系可以用图 1.4 表示, 前者称为振幅频谱图, 或简称频谱图, 后者称为相位频谱图。由于 n 取正整数, 两张频谱图中的图形都是离散的垂直线, 称为谱线, 各离散谱线之间的间隔为 ω_1 (基波频率)。这种分析振动的方法称为频谱分析, 它将时域中的时

间历程信号以“幅值-频率”关系来表示。

虽然周期振动的谐波分析以无穷级数出现，但一般可以用前几项近似表示周期振动。图 1.5 所示振动信号可分解为两个简谐振动信号之和。图 1.6 在时间域上表示这种分解，其中周期为 T_1 的谐波称为基波；周期为 $T_2 = T_1 / 2$ 的谐波称为二次谐波。这个信

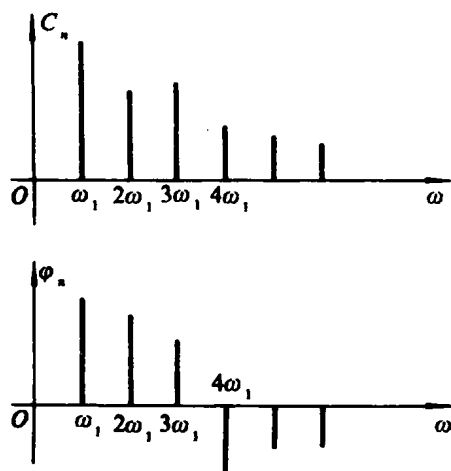


图 1.4 周期信号的谐波分析

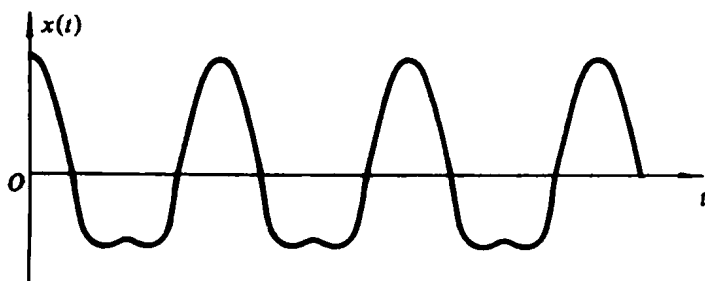


图 1.5 周期振动信号

号中只包含这两种频率成分。图 1.7 为该信号的频谱。下面以图

1.8 中矩形波为例，说明周期振动谐波分析的原理。

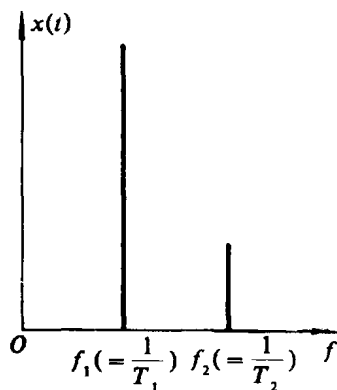
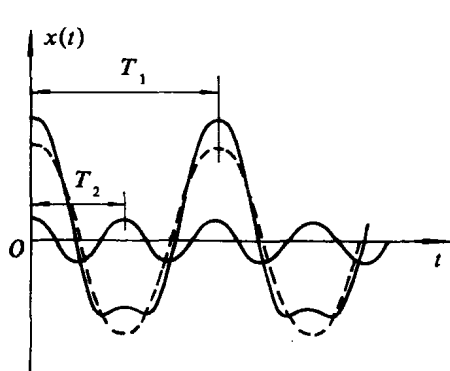


图 1.6 周期信号在时域的分解 图 1.7 周期信号在频域的分解

一个周期内，矩形波 $f(t)$ 可以表示为

$$f(t) = \begin{cases} P_0 & 0 < t < \frac{T}{2} \\ -P_0 & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (1.17)$$

由式 (1.13)，因一周内总面积为零，故

$$a_0 = 0$$

当 n 取偶数时，

$$b_n = 0 \quad n = 2, 4, 6, \dots$$

当 n 取奇数时则有

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_1 t dt \\ &= \frac{8}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} P_0 \sin n\omega_1 t dt \\ &= \frac{4P_0}{n\pi} \quad n = 1, 3, 5, \dots \end{aligned}$$

于是，周期性方波的傅里叶级数为

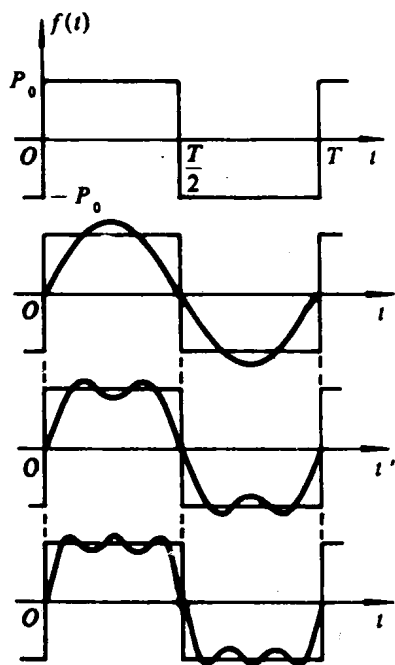


图 1.8 谐波合成

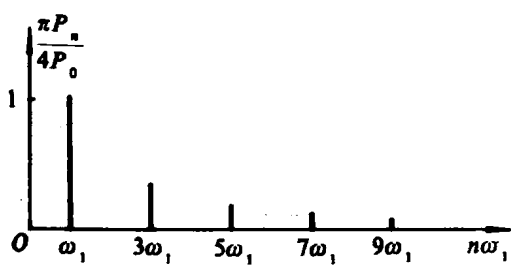


图 1.9 方波的振幅频谱图

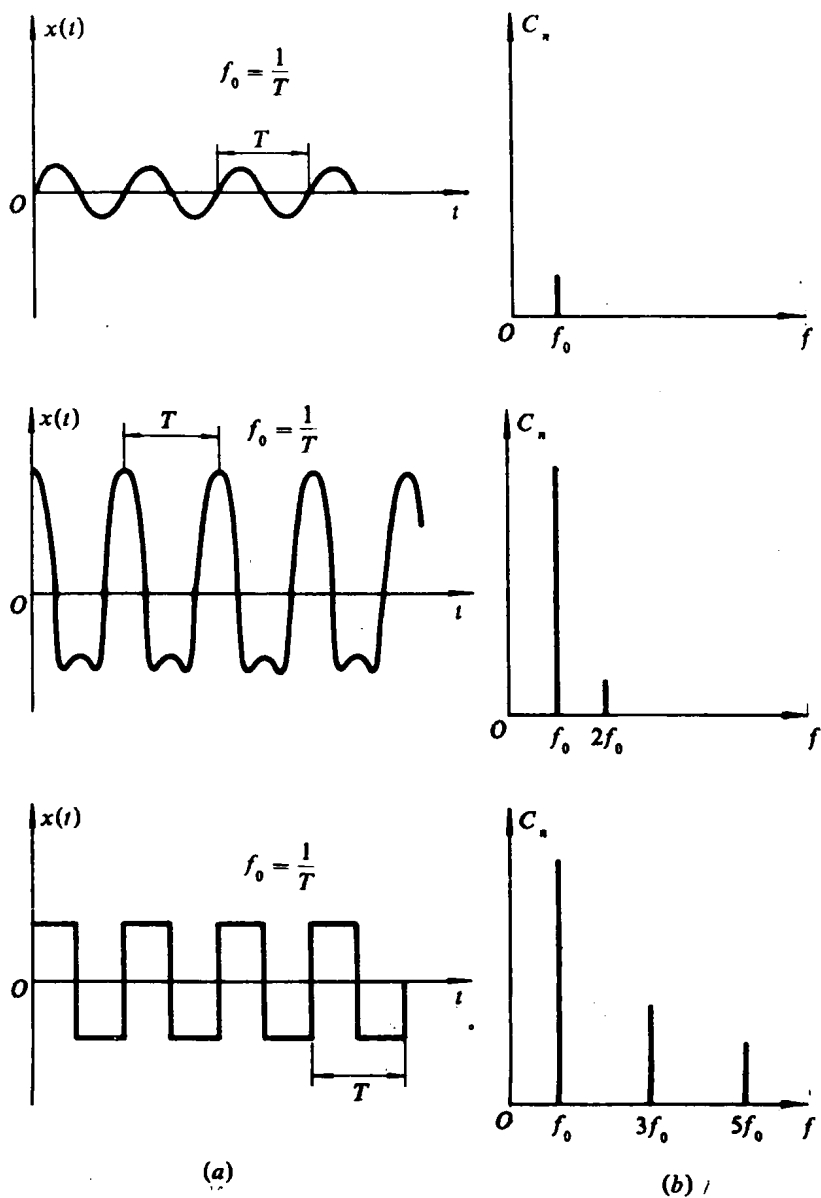


图 1.10 三种周期信号及其频谱比较

$$\begin{aligned}
 f(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t \\
 &= \frac{4P_0}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega_1 t \\
 &= \frac{4P_0}{\pi} (\sin\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots)
 \end{aligned}$$

式中 $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ 。图1.8表示了傅里叶级数的前面三项对方波的贡献。

如果记 $P_n = \frac{4P_0}{n\pi}$ (n 为奇数), 则周期性方波的振幅频谱图如图1.9所示。

图1.9所示。

图1.10为所讨论的三种周期信号及其频谱的比较。

1.3 振动量的峰值、有效值和平均值

振动大小通常用峰值、有效值以及平均值来度量。

1.3.1 峰值

峰值是指波形上与零线的最大偏离值, 可用 X_{peak} 或 X_p 来

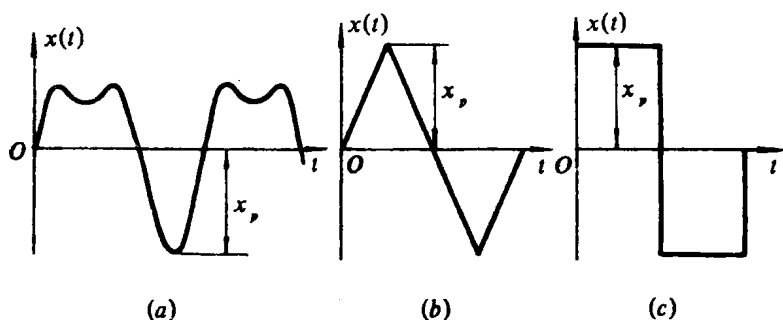


图 1.11 三种周期振动的峰值

表示。对于正弦振动， $X_p = A$ ， A 或 X_m 为正弦振动的振幅，也就是它的峰值。在稳态周期振动中，峰值是反复周期出现的，并且是恒定的。图 1.11 为三种周期振动的峰值。由图可见，峰值相同的波，其波形却可能差别很大。

峰值在实用中有它的价值。例如，结构的强度性破坏，就直接与峰值有关。

1.3.2 有效值

一个任意振动函数 $x(t)$ ，它的有效值定义为

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

如果是周期振动， $x(t) = x(t + T)$ ，则其有效值为

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1.18)$$

式中， T 为振动周期。

简谐振动， $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ ，它的有效值则为

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt} = A / \sqrt{2} \quad (1.19)$$

用有效值衡量振动量的大小是一种比较好的方法，它计及了振动时间变化过程，不像峰值那样根本不涉及整个时间波形；更重要的是，有效值作为振动的一种度量它直接关系到振动能量，例如，位移的有效值直接与位能有关，而速度的有效值则与动能有关。

1.3.3 平均绝对值

振动函数 $x(t)$ ，其平均绝对值由下式定义

$$X_{\text{av}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$