

目 录

第一章 校准的基础知识	(1)
1.1 正弦运动	(1)
1.2 复合波形	(6)
谐波失真	(6)
随机振动	(7)
1.3 冲击运动	(7)
冲击谱	(9)
速度和位移幅值	(10)
1.4 单位	(11)
1.5 术语	(12)
第二章 惯性传感器的原理	(19)
2.1 基本方程	(19)
2.2 频率特性	(22)
加速度计方程	(22)
速度传感器方程	(25)
特种传感器	(28)
2.3 冲击运动响应	(29)
谐振频率响应	(29)
高频响应	(30)
低频响应	(31)
第三章 传感器和辅助仪器	(32)
3.1 压电式加速度计	(32)
压电材料的基本原理	(33)
加速度计的结构	(36)
信号调节器	(38)
工作特性	(42)
环境影响	(49)
3.2 电阻丝式加速度计和压阻式加速度计	(55)

3.3 电容式加速度计	(61)
3.4 电感式传感器	(63)
电动式速度传感器	(64)
可变磁阻式加速度计	(65)
3.5 伺服式加速度计	(66)
3.6 机内记录仪	(67)
3.7 辅助仪器	(69)
3.8 位移测量	(70)
直接观测式光学仪器	(70)
激光和全息摄影	(71)
第四章 校准用振动台	(74)
4.1 电动式振动台	(75)
动圈骨架材料	(75)
振动台性能	(76)
低频振动台	(81)
4.2 压电式振动台	(81)
4.3 机械式振动台	(83)
第五章 冲击与振动基准传感器	(84)
5.1 概述和特性	(84)
压电式标准加速度计	(84)
电动式标准速度传感器	(89)
5.2 互易校准	(89)
电动式标准传感器的校准	(90)
压电式标准传感器的校准	(97)
5.3 干涉法校准	(104)
5.4 零频校准	(106)
第六章 正弦比较校准	(108)
6.1 灵敏度和频率响应	(108)
校准装置	(108)
典型的校准结果	(110)
不理想的校准结果	(111)
6.2 谐振频率校准	(113)
理想的加速度计	(115)

加速度计损坏检查	(116)
局部谐振	(118)
加速度计对装置的影响	(118)
有阻尼的加速度计	(121)
6.3 横向灵敏度	(123)
6.4 幅值线性	(125)
6.5 温度响应校准	(127)
6.6 组合环境校准	(128)
第七章 冲击运动校准	(130)
7.1 比较校准	(130)
校准方法	(130)
误差分析	(132)
7.2 绝对校准	(137)
工作原理	(137)
冲击校准器概述	(139)
典型结果	(140)
校准误差	(140)
上限为100 000 g 的校准	(141)
第八章 测力计和阻抗头	(144)
8.1 概述和特性	(144)
8.2 测力计的校准	(145)
8.3 环境特性	(149)
参考文献	(152)
参考书目	(154)
校准的基础知识	(154)
惯性传感器的原理	(155)
压电式加速度计	(156)
电阻丝式加速度计和压阻式加速度计	(158)
电容式加速度计	(159)
电感式传感器	(159)
机内振动记录仪	(160)
辅助仪表	(160)
位移测量	(160)

校准振动台	(161)
基准	(162)
正弦比较校准	(164)
冲击运动校准	(166)
测力计和阻抗头	(167)

第一章 校准的基础知识

为了掌握冲击振动仪表的校准知识，应该首先复习一下正弦运动、随机振动和冲击运动的基本特性的知识。冲击和振动大都使用加速度计进行测量，只有在特殊情况下才使用速度传感器和位移测量装置。在这些传感器的校准中，都可采用正弦激励。在幅值上限为 10 g 的情况下，正弦运动校准是容易完成的。通过冲击运动校准来测定加速度计的幅值线性特性是理想的办法。冲击运动校准是在比较高的加速度下进行的，加速度值可达到大约 10 000 g。

本书采用公制 (SI) 单位，而同时给出对应的英制单位。

1.1 正 弦 运 动

正弦运动见图 1-1。这种运动是周期性的^[1]，是单频稳态振动。校准时，可在所关心的频段上用手动或自动的方法改变频率。振动频率由下式给出：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (1-1)$$

式中 f ——频率 (赫)；

ω ——角频率 (弧度/秒)；

T ——振动周期 (秒)。

正弦振动的位移、速度、加速度和加速度变化率诸量随时间的变化严格地遵守图 1-2 所示的曲线。这些量的大小分别由下列诸式给出：

$$x = \frac{D}{2} \sin(2\pi ft) \quad (1-2)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f \frac{D}{2} \cos(2\pi ft) \quad (1-3)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -(2\pi f)^2 \frac{D}{2} \sin(2\pi ft) \quad (1-4)$$

$$K = \frac{d^3x}{dt^3} = -(2\pi f)^3 \frac{D}{2} \cos(2\pi ft) \quad (1-5)$$

式中 x ——在任意时刻 t 的位移瞬时值 (米或英寸) ;
 D ——两倍位移振幅值 (米或英寸) ;
 v ——在任意时刻 t 的速度瞬时值 (米/秒或英寸/秒) ;
 a ——在任意时刻 t 的加速度瞬时值 (米/秒²或英寸/秒²) ;
 K ——在任意时刻 t 的加速度变化率瞬时值 (米/秒³或英寸/秒³) ;
 f ——频率 (赫) ;
 t ——时间 (秒) .

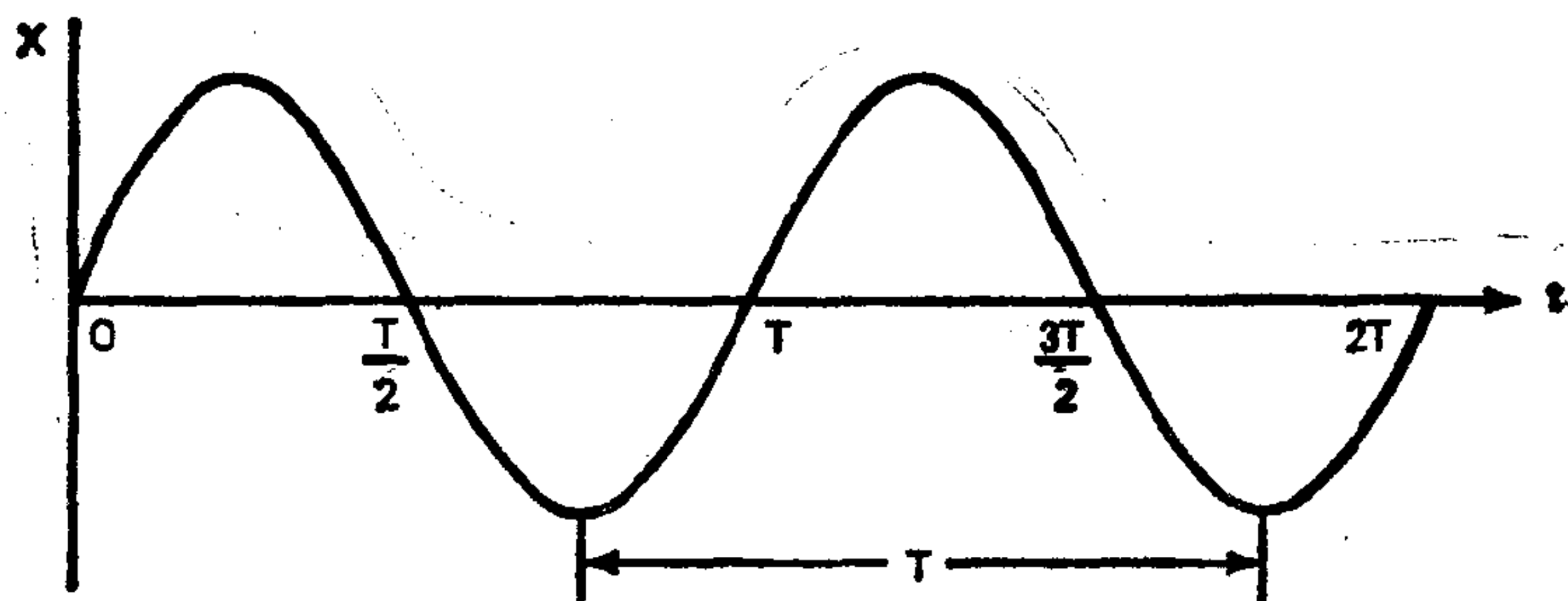


图1-1 随时间变化的正弦运动曲线

一般习惯于用如图1-2和1-3所示的峰峰值表示位移测量值,这是因为通常测振仪上的位移标度值就是峰峰值。这些测振仪包括振动标、显微镜和刻度盘。另一方面,加速度一般习惯于用峰值来表示。因此,加速度计用峰值电输出与峰值加速度之比值来校准。同样,速度传感器用峰值电输出与峰值速度之比值来校准。

指示仪（诸如电压表）可用均方根值进行校准。均方根指示仪和加速度计或速度传感器一起使用时，它指示出加速度或速度的均方根值。正弦振动的均方根值等于峰值的0.707倍。测量结果最好是用峰值电输出与峰值振动量之比，或均方根电输出与均方根振动量之比来表示；有时，测量结果也用均方根电输出与峰值振动量之比来表示。例如，加速度计的灵敏度可表示为均方根电输出（毫伏）与峰值加速度（单位为g）之比，但不应鼓励均方根值和峰值混合使用。

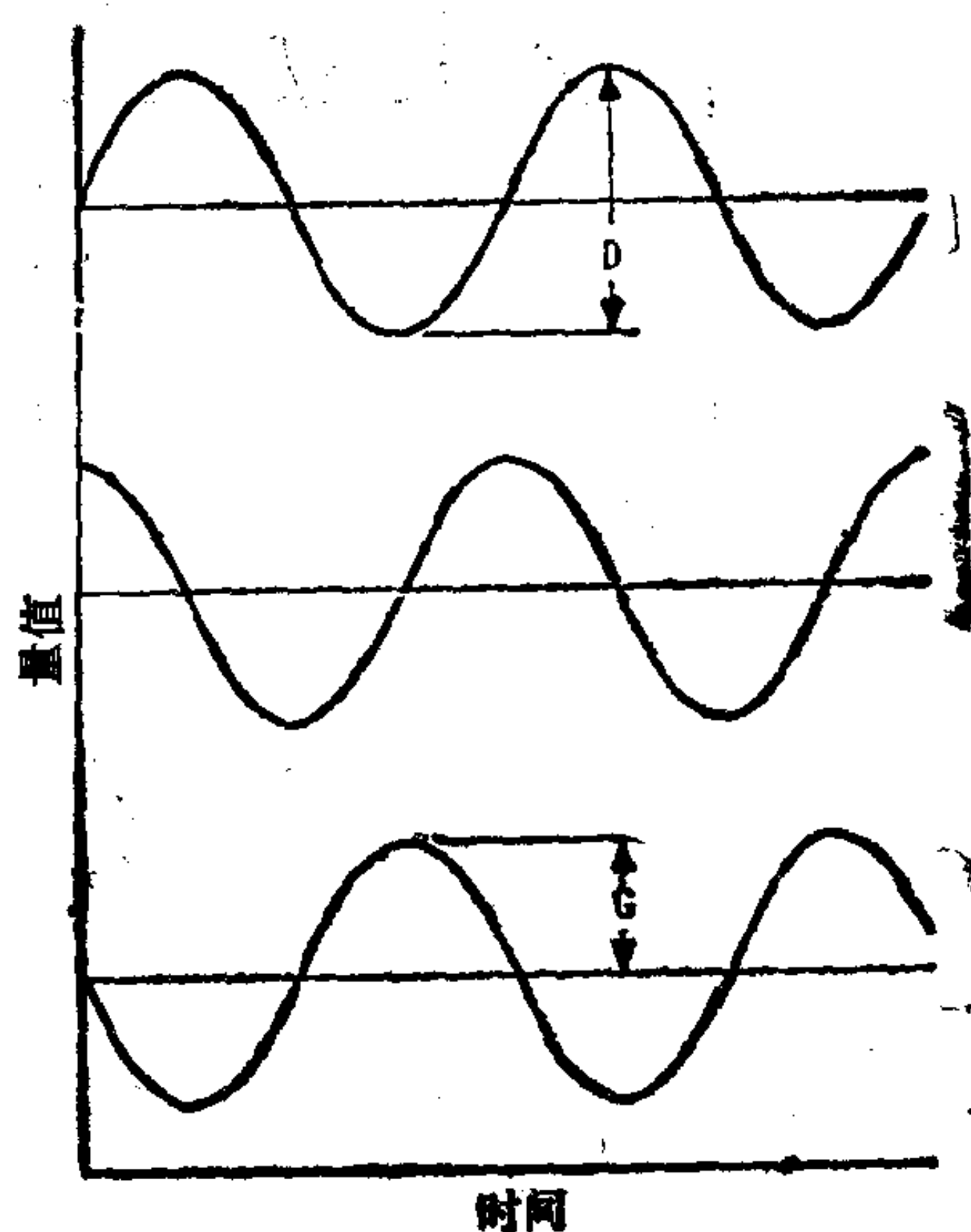


图1-2 物体作正弦运动时位移、速度和加速度之间的相位关系

用。加速度灵敏度最好用毫伏/g表示（注意： $\frac{\text{毫伏}}{g} = \frac{\text{峰值毫伏}}{\text{峰值 } g}$ ）

$$= \frac{\text{均方根值毫伏}}{\text{均方根值 } g} = \frac{1.41 \text{ 均方根值毫伏}}{\text{峰值 } g}$$

式（1-2）至（1-5）给出了正弦振动的位移、速度、加速度和加速度变化率之间的关系，负号表示加速度和加速度变化率的相位分别与位移和速度的相位相差180°。只是在研究少数情况（例如人们在运载器减速时感觉不舒服）时，加速度变化率才有意义。另外，测量加速度变化率的传感器和对加速度变化率的校准也不常用。

振动测量绝大多数是用加速度计完成的，其结果通常用峰值加速度来表示。在低频（大多数测量是在50赫以下进行的）的场

的。例如，图 1-5 是一个有三次谐波失真存在的例子<

器上进行的。脉冲持续时间应选择应与使用时间一致。产生

于最短使用脉冲时间倒数两倍的那些频率。对于在冲击运动应用中遇到的其他形状的脉冲，也有同样的要求。

冲击谱

冲击试验常根据冲击谱来规定〔4〕。冲击谱对于作脆性估计具有一定意义。在设计工作中，要考虑到由规定的冲击运动产生的最大惯性载荷，并希望求出受冲击激励时，在机械系统中所产生的最大位移幅值或加速度幅值。可用冲击谱计算任一简单单自由度系统（图 1-7）的这些幅值〔5〕。

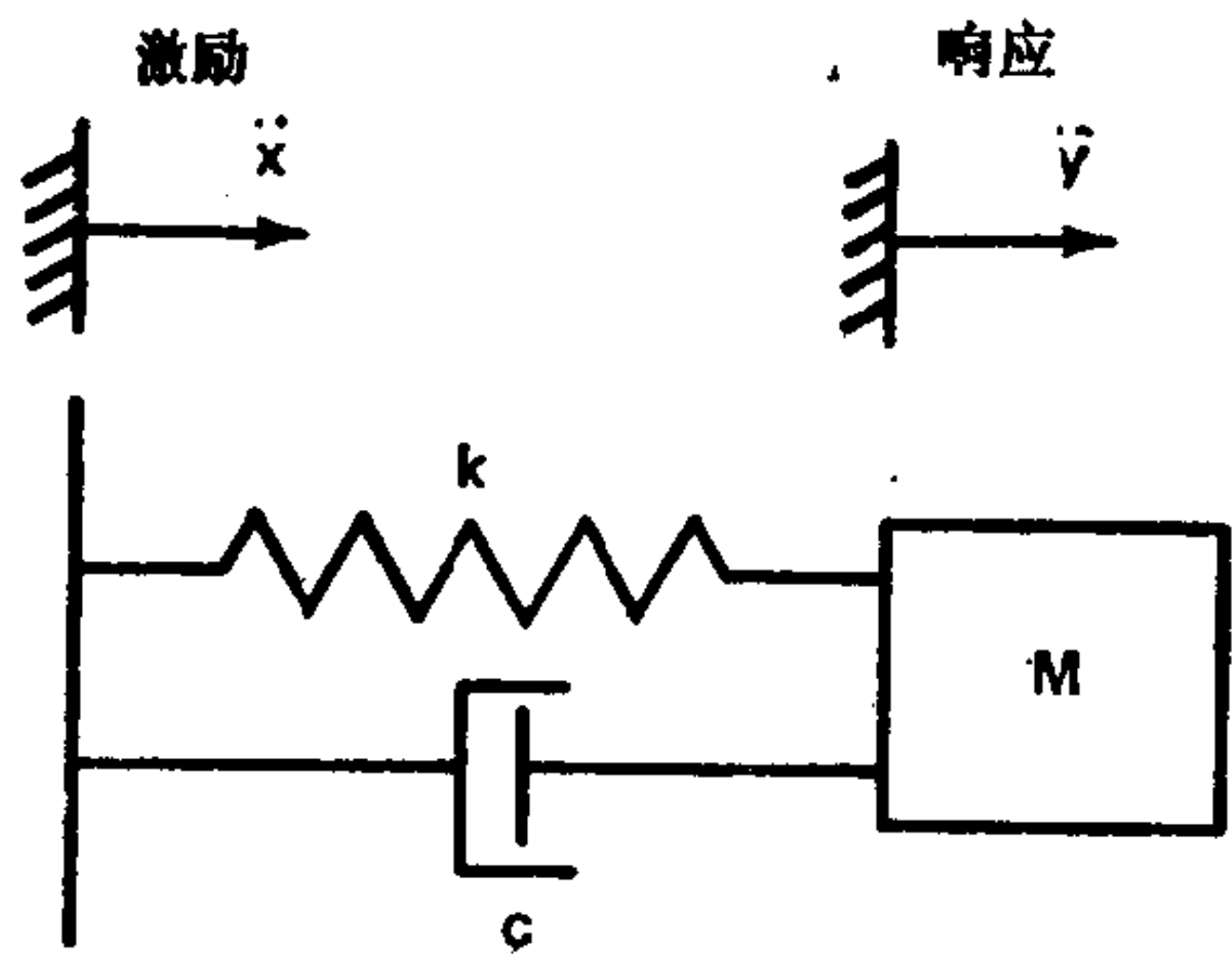


图1-7 一个简单的单自由度系统（图中 M 为重物， k 为弹簧， c 为阻尼器）

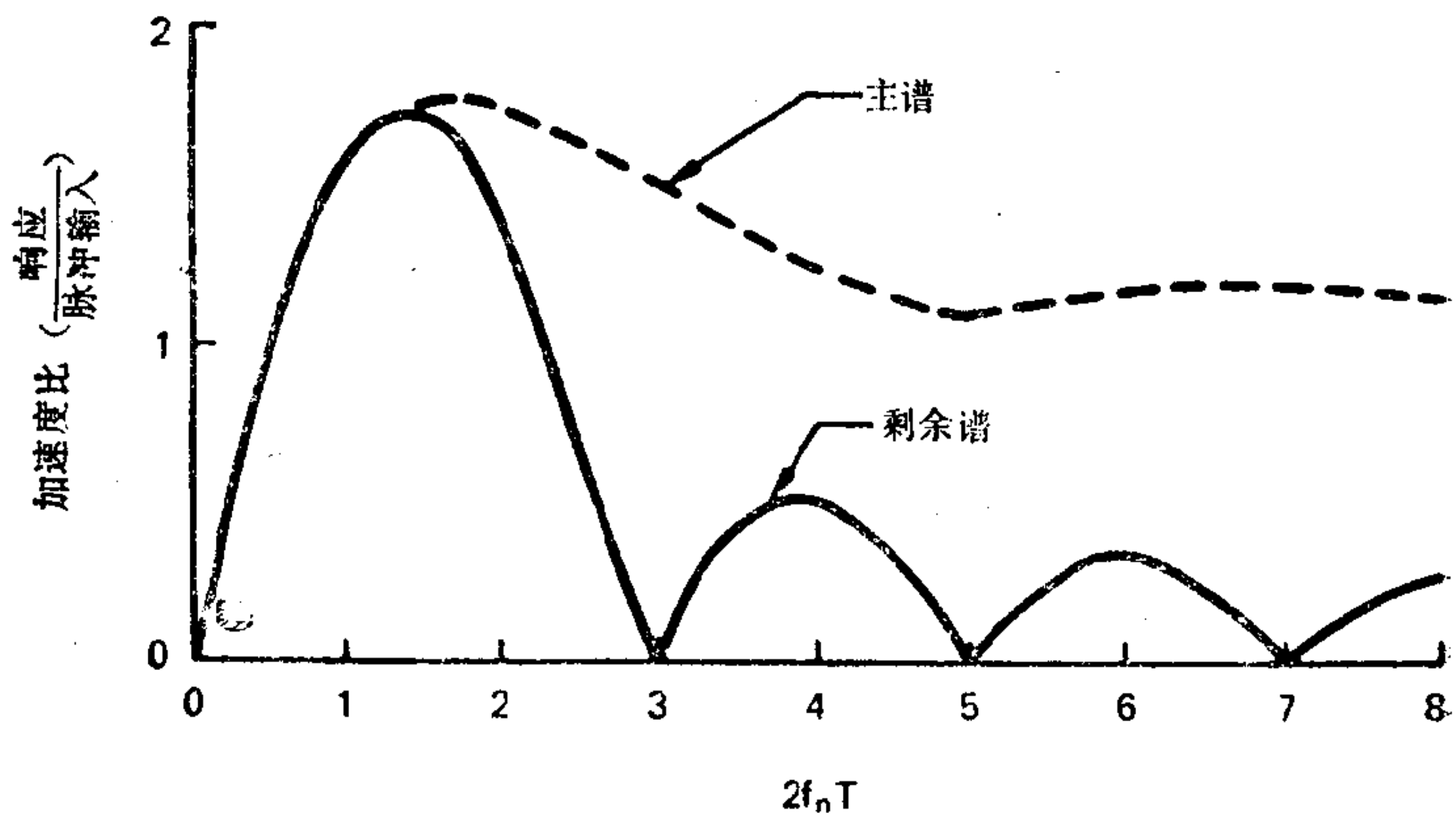


图1-8 半正弦脉冲冲击响应谱的主谱和剩余谱

由图 1-8 的主冲击谱可看到，固有

式中 A_0 ——峰值

测量仪时一般习惯于使用位移倍幅。

</

加速度阻抗

移与力之间的相位角。位移导纳有时称为“

线

振动的相位超前

的机械振动作用的

响应。它常发生在激振频率等于基

上述各元件都具有极

质量元件相对于其底座的运动的幅

上保持不变。这种灵敏度

当速度

