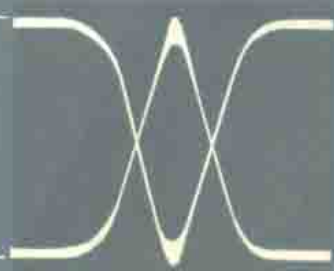


冲击与振动传感器的校准

王 明 著



冲击与振动传感器的校准

〔美〕 R.R.布歇

杜德昌 吴家驹 李雅君 译

王振河 校

计量出版社

1984·北京

内 容 提 要

本书较系统、全面地介绍了冲击振动传感器的工作原理、结构、性能及其校准。其中对传感器的校准方法的介绍及校准误差的分析尤为详尽。书末列出了参考文献和有关方面的参考书目366条。

本书可供从事冲击振动测量、冲击振动传感器校准的技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

Calibration of Shock and Vibration Measuring Transducers

Raymond R. Bouche

The Shock and Vibration Information Center

United States Department of Defense 1979

冲击与振动传感器的校准

(美) R. R. 布歇

杜德昌 吴家驹 李雅君 译

王振河 校

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 850 × 1168 1/32 印张 5 1/2

字数 142 千字 印数 1—10 000

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷

统一书号 15210·354

定价 1.10 元

序 言

五十年代初，当我们研制振动基准时，美国各地和其他国家的工程师们经常到美国标准局来访问我们。他们抱着一个共同的目的，就是想知道在校准加速度计和其他振动测量仪器时，如何达到适当的精度。一个共同存在的问题是，工程师和技术员们得到的校准结果很不一致，误差往往远大于10%。幸而，经过几年的努力，校准误差降低了一个多数量级。这是通过对振动基准进行绝对互易校准而实现的。在这之后，某些实验室的校准精度仍然不高。这不仅与所用校准仪器的某些缺点有关，而且与有关人员对于加速度计的性能及加速度计如何因校准振动台的不良运动而产生误差缺乏了解有关。

这种情况促进了人们对加速度计和振动仪表工作特性的了解。本专集的目的之一，就是为工程师提供校准振动仪表用的详细资料。然而，如果使用优质校准振动台和优质标准加速度计，就几乎没有什么熟悉加速度计特性的必要了。很幸运，经过国家标准局和许多高级校准实验室大约25年的努力之后，现在已能提供这些优质振动台和优质振动基准。

本书是振动仪表校准方面的一本极好的读物。尽管多数校准实验室已取得相当大的进步，但是对从事冲击、振动测量的实验室来说，仍有必要更好地了解振动仪表的特性和加速度计在做精密测量时的用法。因此，作者希望本书能够为振动仪表校准人员提供有关方面的较丰富的参考资料。

一部有价值的手稿的编写成功，往往在很大程度上依赖于别人的协助。现已退休的Barney Epstein，对本书的最后定稿给予了很大帮助。我衷心感谢他在完成编辑和图示说明方面给予的帮助。冲击振动情报中心做了必要的服务工作——请有关专家对书

稿进行评述。这些专家包括国家标准局的John Ramboz和海军实验室的Merv Oleson等人。他们对书稿所作的详细评述和建议是非常有益的。冲击振动情报中心编辑部在本书的编辑、出版过程中，做了十分出色的工作。

R. R. 布歇

1979年7月

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)

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 1 0000 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）。

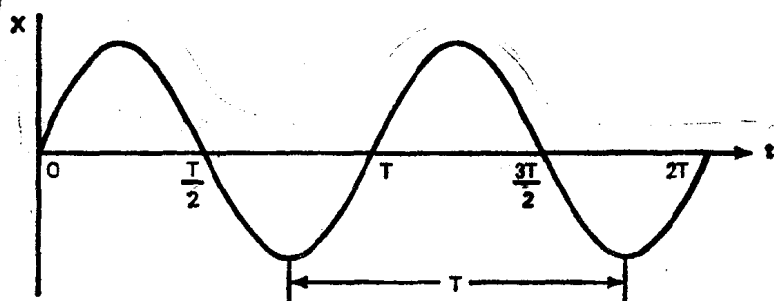


图1-1 随时间变化的正弦运动曲线

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，它显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。

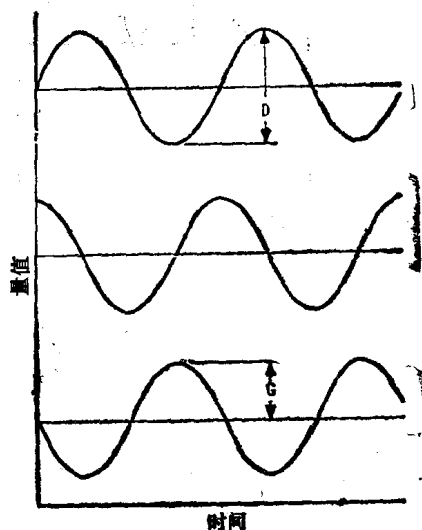


图1-2 物体作正弦运动时位移、速度和加速度之间的相位关系

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

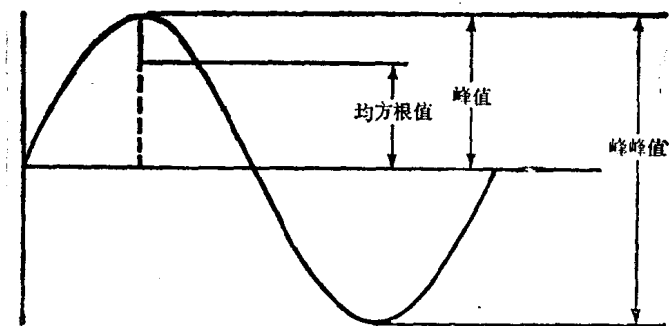


图1-3 正弦波的均方根值、峰值和峰峰值的相对大小

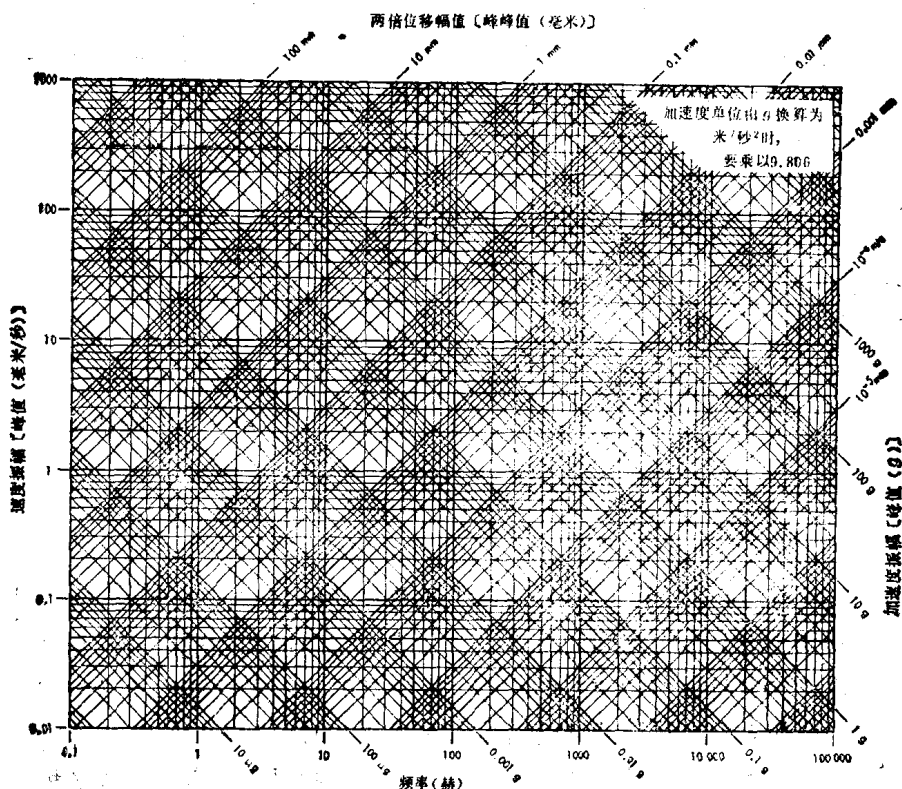


图1-4a 直线振动诺谟图 (采用公制单位)

合下，往往用位移倍幅来表示振动，峰值加速度和峰峰值位移之间的定量关系，可由式 (1-4) 中令正弦项为 1 来确定。有

$$G = 2.014 D f^2 \quad (D \text{ 的单位为米}) \quad (1-6)$$

$$G = 0.0511 D f^2 \quad (D \text{ 的单位为英寸})$$

式中 G 为峰值加速度〔单位为重力加速度 g ($1g = 9.807$ 米/秒²或386英寸/秒²)〕。

通常的做法是由加速度的测量值求位移倍幅，或者反过来。（用计算器根据式(1-6)来计算。）另外，位移、速度和加速度之间的关系可用图1-4中的诺谟图确定。直线运动时，用图1-4a和1-4b来确定；转动时，则用图1-4c来确定。

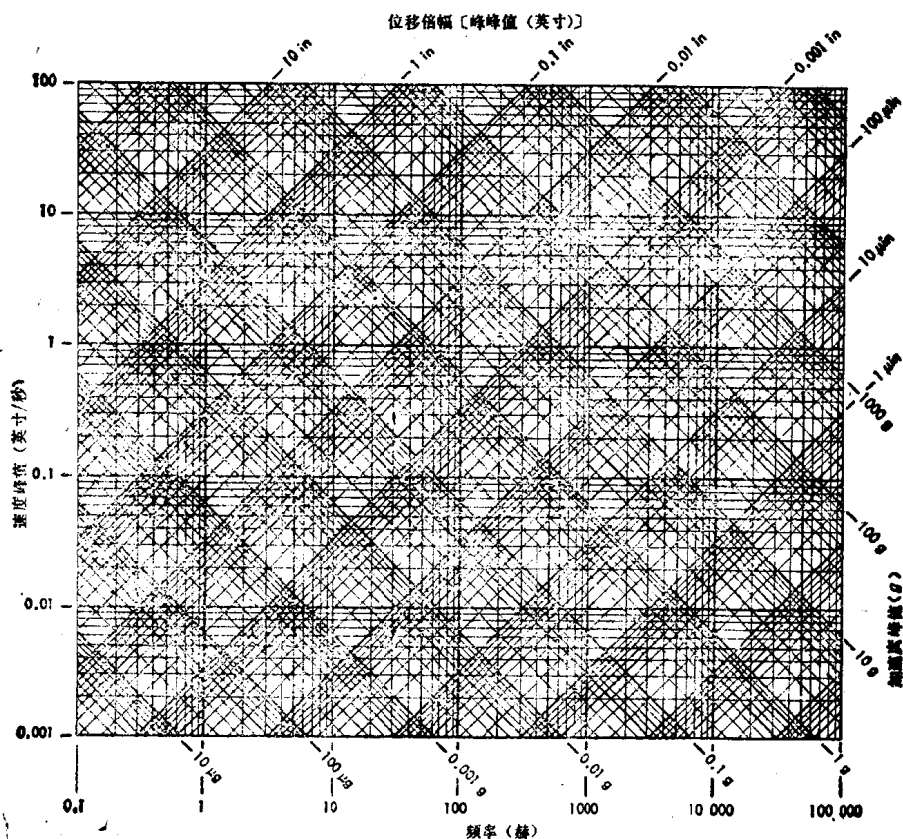


图1-4b 直线振动诺谟图 (采用英制单位)

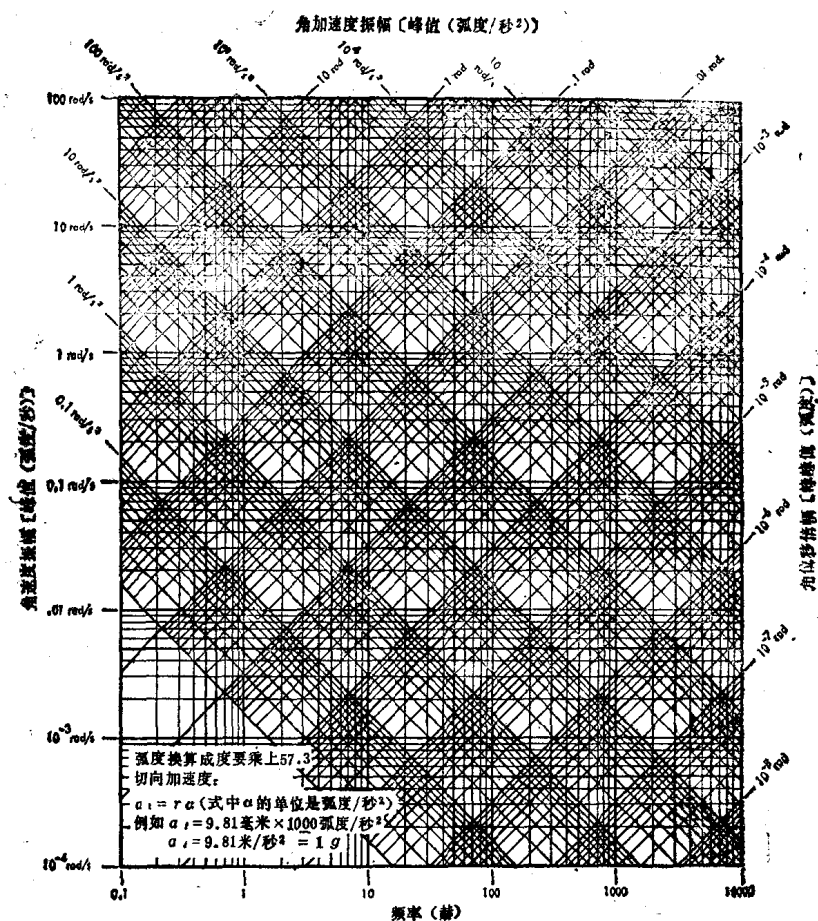


图1-4c 角振动诺谟图 (单位为弧度)

1.2 复合波形

谐波失真

用于测振仪校准的理想运动是正弦运动。这时加速度波形没有失真，但在某些条件下会出现谐波失真，这种失真典型地发生在等于激振频率奇数倍的频率上，并通常是由振动台激励信号里微弱的奇次谐波失真信号激励传感器或振动台的谐振频率造成

的。例如，图 1-5 是一个有三次谐波失真存在的例子^[2]，图中的复合波形是由同时受基波和三次谐波激励的振动台或其他物体的振动所产生的。若复合波形含有两个以上的频率成分，则可以通过周期运动的傅立叶分析来确定这些频率。如果正弦校准仪经过仔细挑选，就很少同时出现两个以上的频率成分。一般情况下，只出现激励频率的第三、五、七或九次谐波。对于优质振动台，只在频率高于被校振动仪的工作频率范围时，才会出现谐波失真。

随机振动

只是在判断所用的测振仪能否精确测量随机振动时，才做随机振动的校准。一个用正弦运动校准过的加速度计，能不能用来测量随机振动呢？只要简单复习一下随机振动的特性，就能回答这个问题。

随机振动的瞬时值，只能用规定时间间隔内落在规定范围内的概率来描述。一般说来，随机振动是非周期性的，而且不能通过傅立叶分析来求值。然而，使振动信号通过窄带带通滤波器，就可得到随机振动的频率分量。测振仪要选得合适，要使被测随机振动的幅值和频率不超出测振仪的工作范围。一个经过适当选择的加速度计，在整个所考虑的幅值和频率范围内将是线性的，灵敏度也不变；另外，它还具有线性的相位响应。可以用正弦校准来验证这些特性。因此，一个经过适当选择并作了正弦运动校准的测振仪，可以用来精确测量随机振动。

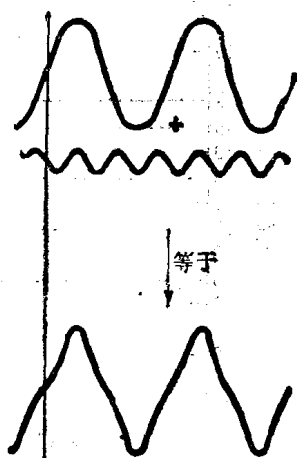


图1-5 由三次谐波和基波叠加产生的复杂运动

1.3 冲击运动

最准确的冲击运动校准是在能够产生接近半正弦波脉冲的机

器上进行的。脉冲持续时间应选择应与使用时间一致。产生 100 微秒至 1 毫秒的短时冲击脉冲是相当容易的；目前的冲击运动校准器不能产生持续时间长达 100 毫秒的脉冲（这种脉冲在某些应用中会遇到）。因此，测振仪在低频（对应于较长冲击脉冲的频率）情况下的特性要用正弦运动校准来验证。

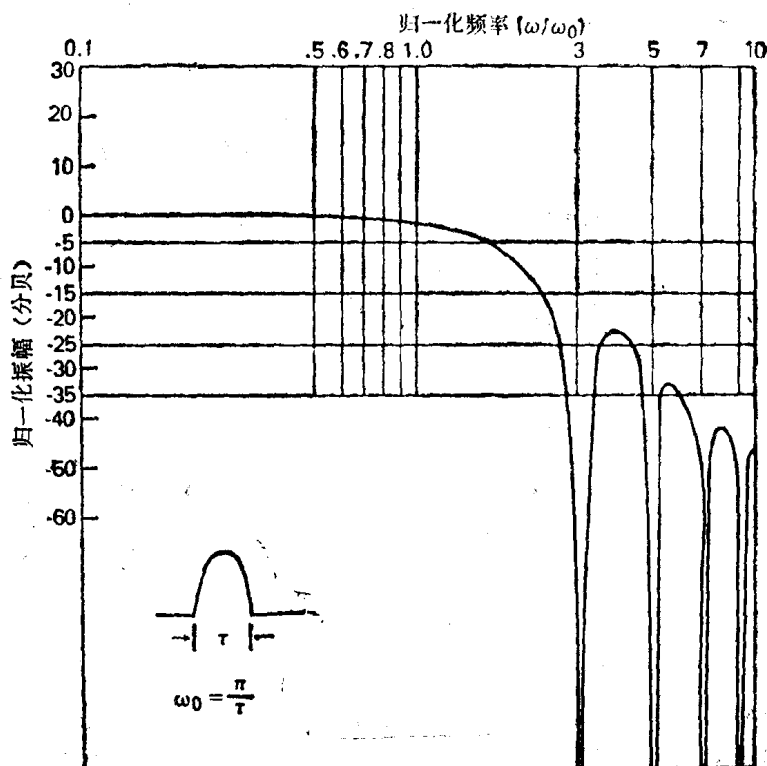


图1-6 半正弦脉冲的傅立叶谱

利用傅立叶分析可确定冲击脉冲的频率分量^[3]。图 1-6 示出了半正弦脉冲所含的各频率分量，其中 $\omega_0 = \pi/\tau$ ， τ 是脉冲时间。由这个频谱图可看出，该脉冲含有很多的正弦成分，且直到 $\omega/\omega_0 = 4$ ，或直到频率等于脉冲时间的倒数的两倍时，幅值都很大。因此在选择加速度计时，应使其工作频率范围，包括至少等

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]。

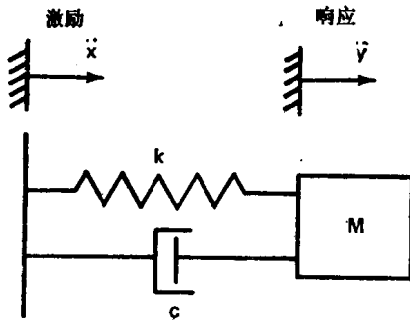


图1-7 一个简单的单自由度系统（图中 M 为重物， k 为弹簧， c 为阻尼器）

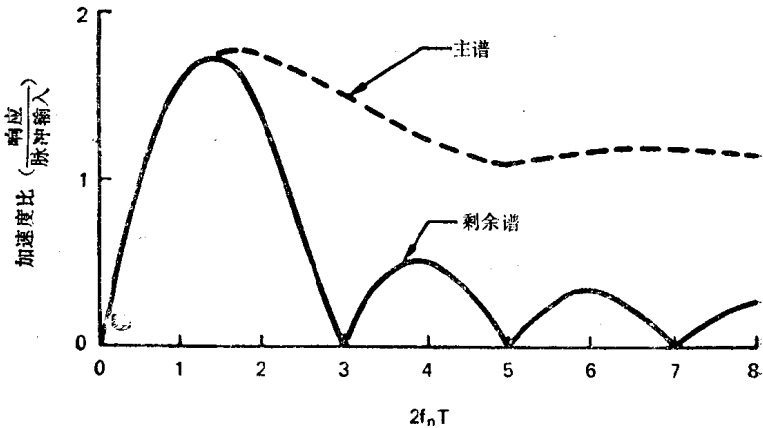


图1-8 半正弦脉冲冲击响应谱的主谱和剩余谱