

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 $10000 g$ 。

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)。

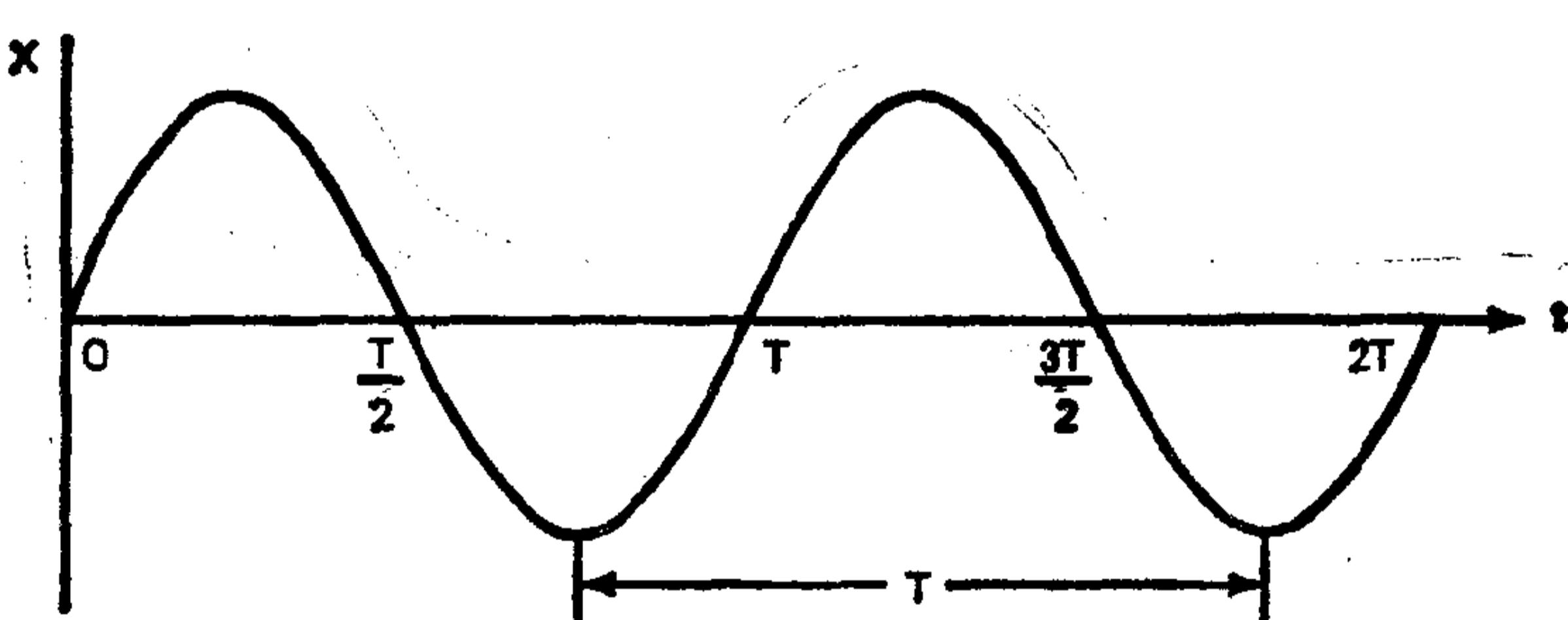


图1-1 随时间变化的正弦运动曲线

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。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

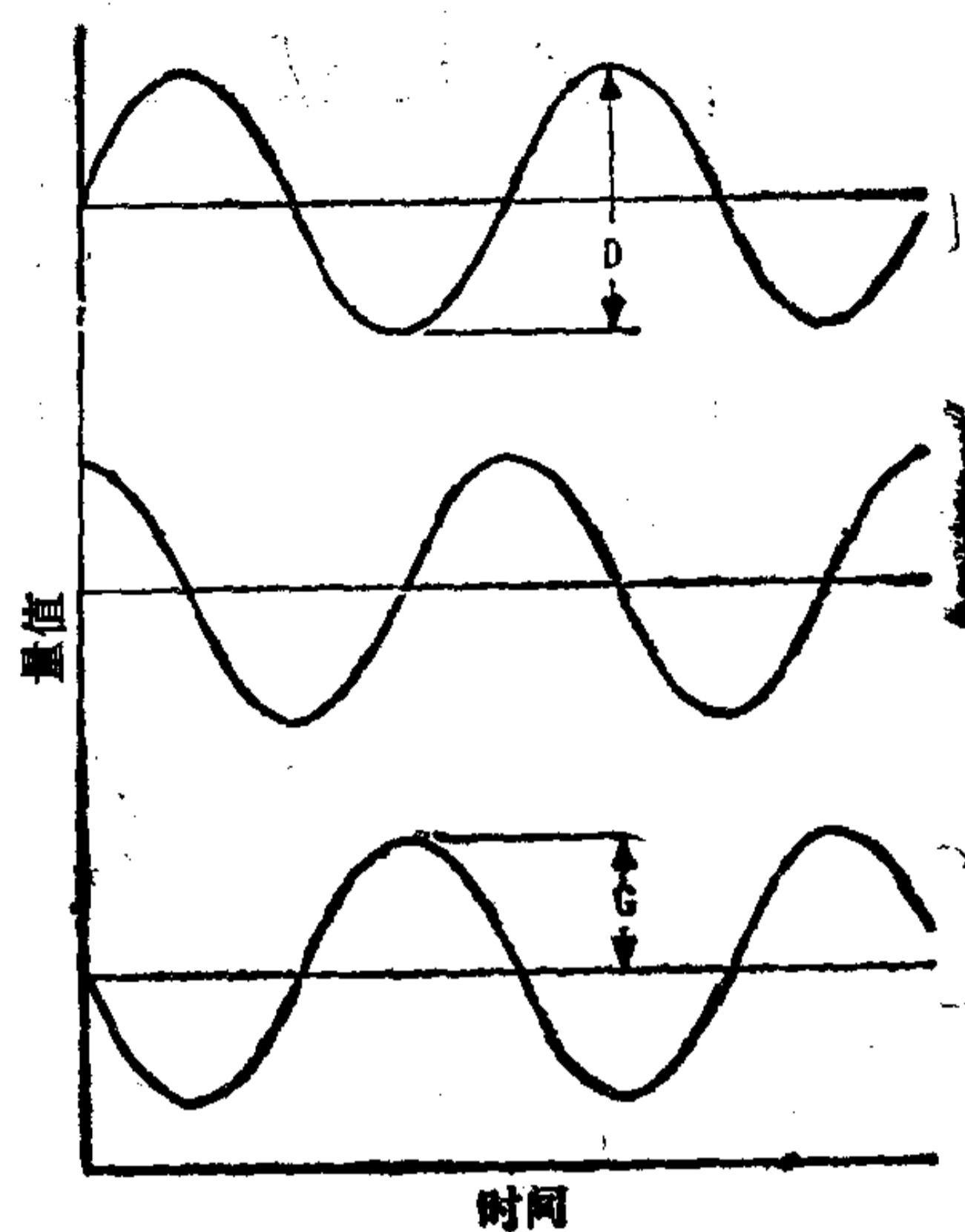


图 1-2 物体作正弦运动时位移、速度和加速度之间的相位关系

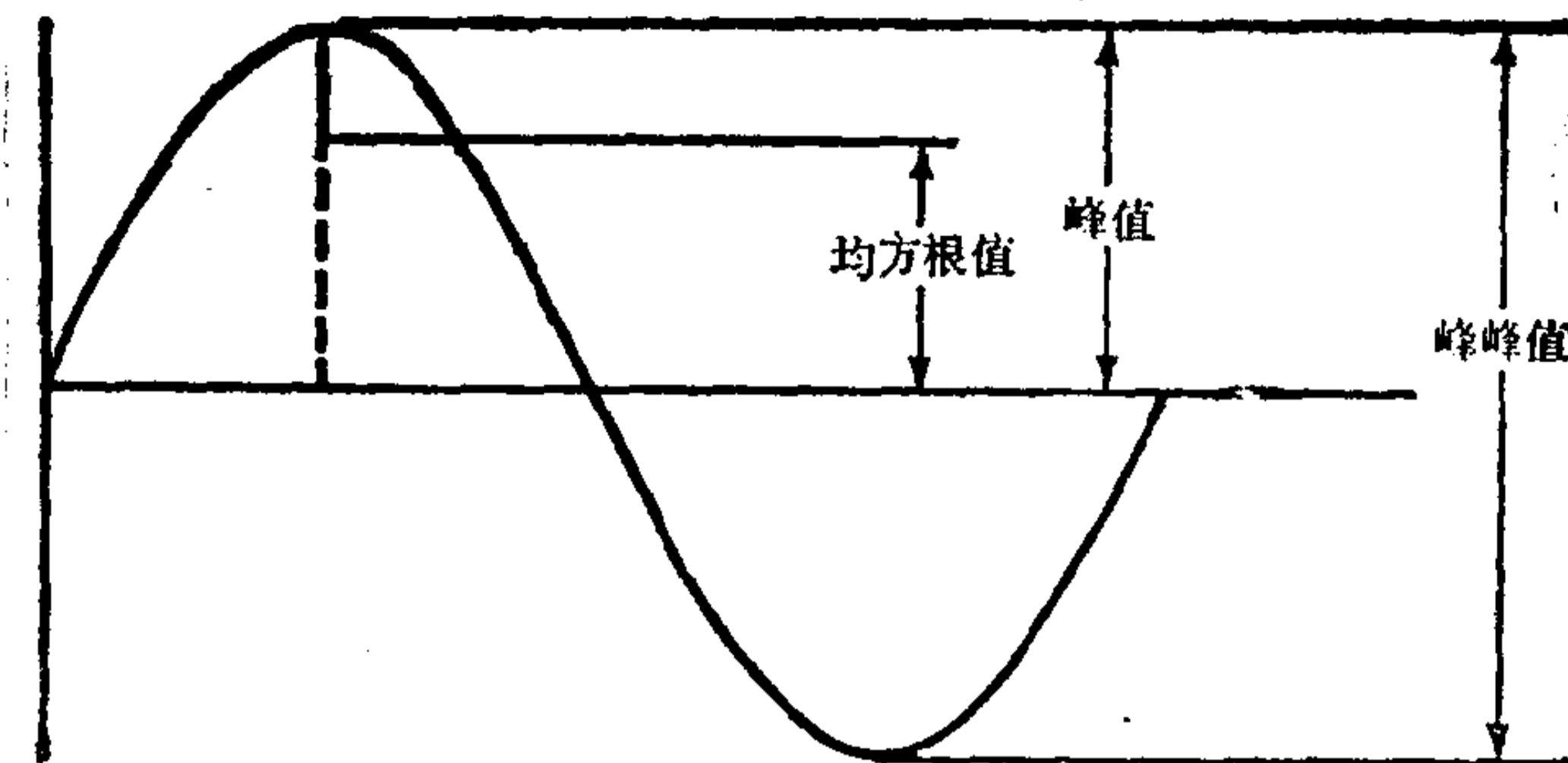


图1-3 正弦波的均方根值、峰值和峰峰值的相对大小

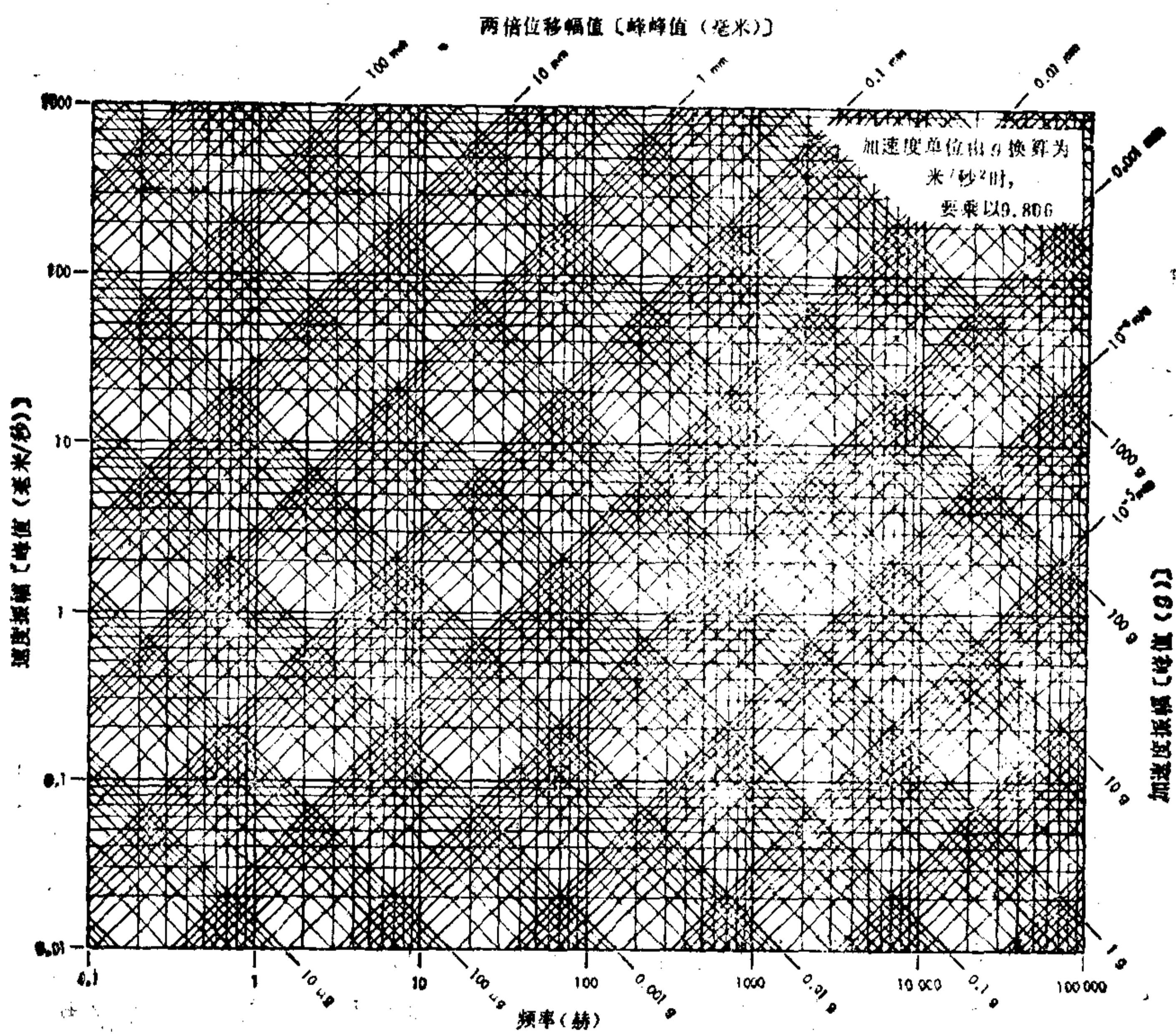


图1-4a 直线振动诺摸图（采用公制单位）

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

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

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

式中 G 为峰值加速度(单位为重力加速度 g ($1\ g = 9.807\ \text{米}/\text{秒}^2$ 或 $386\ \text{英寸}/\text{秒}^2$))。

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。

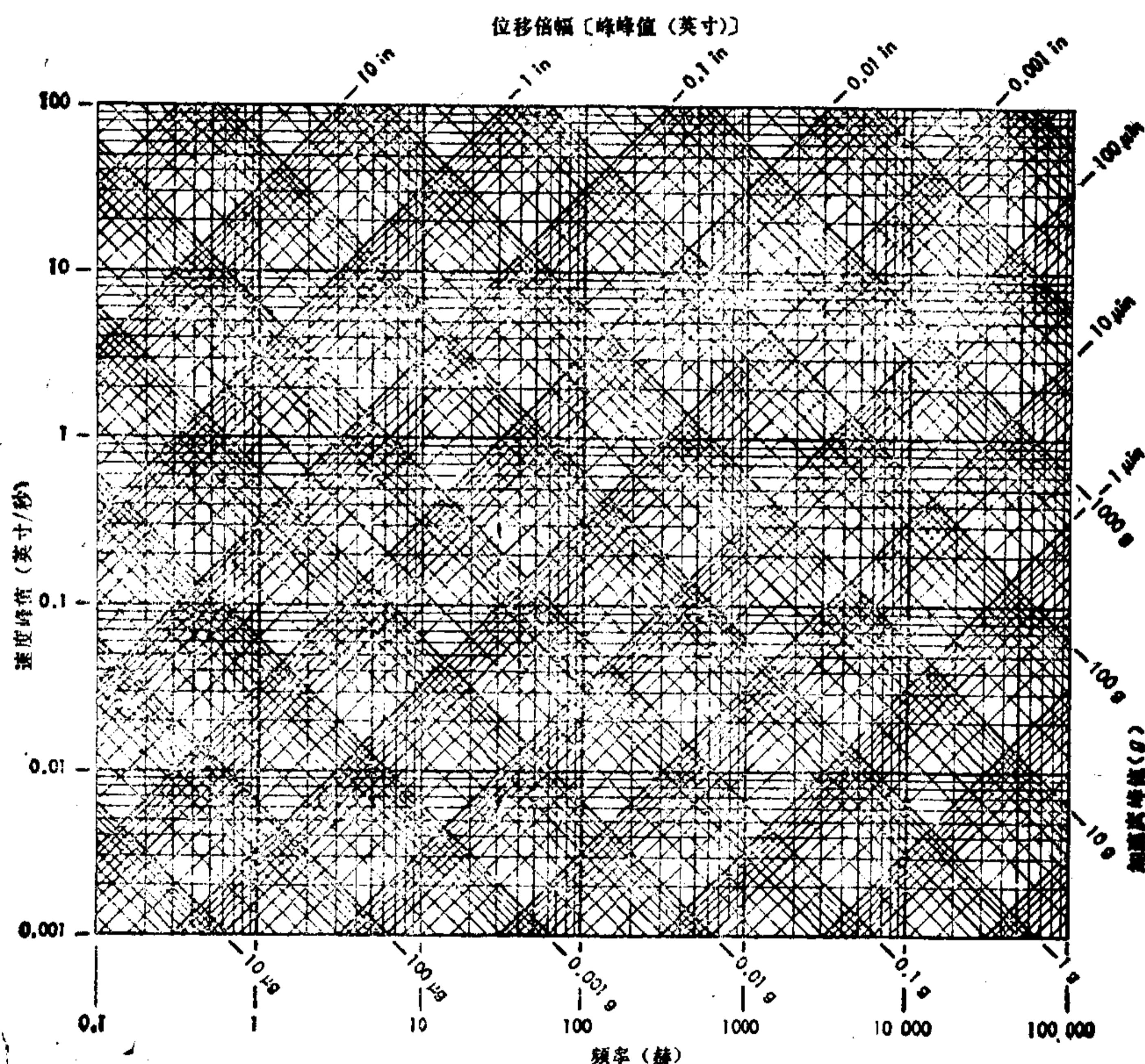


图-4b 直线振动诺谟图（采用英制单位）

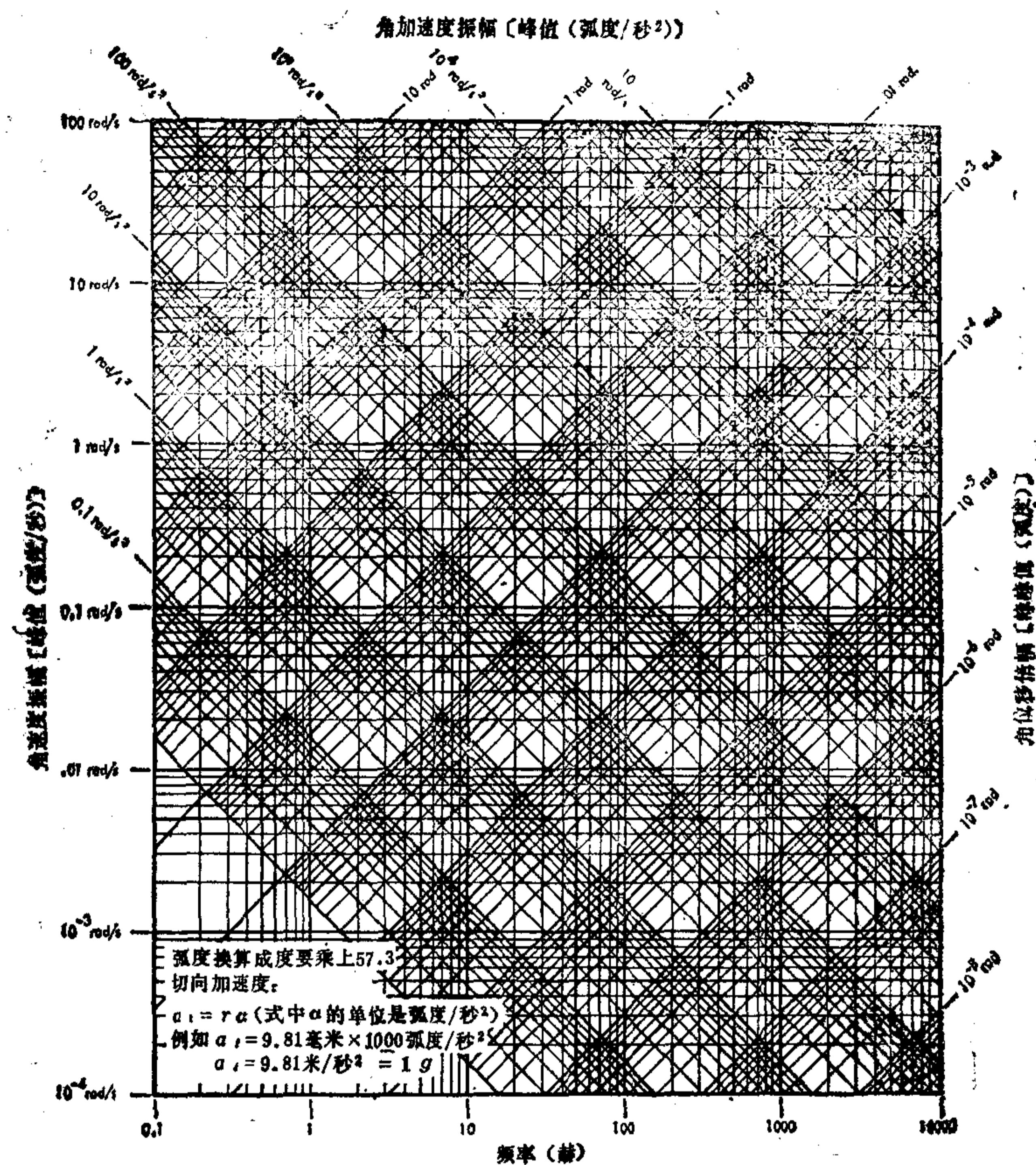


图1-4c 角振动诺模图 (单位为弧度)

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，只出现激振频率的第三、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。

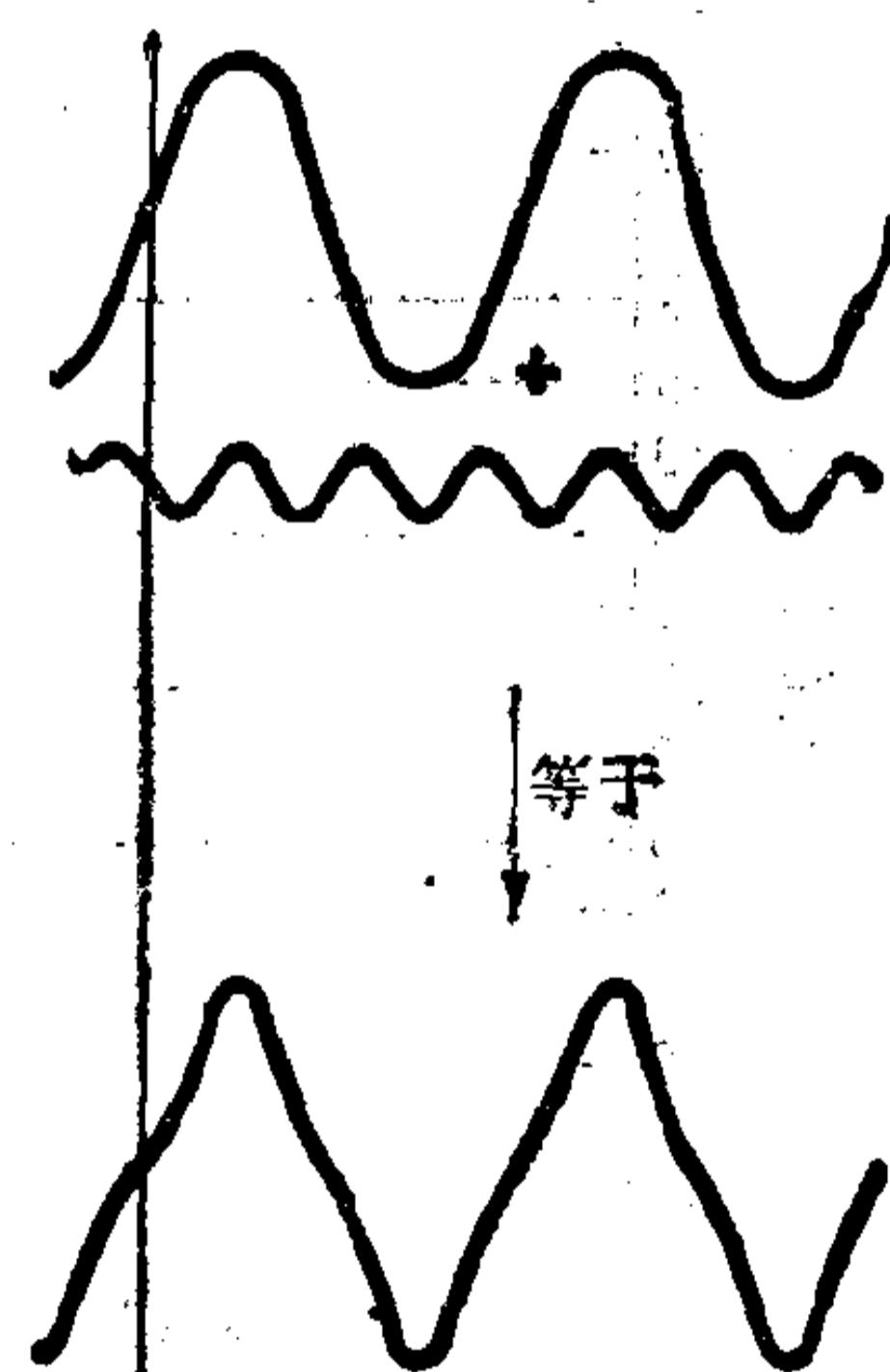


图1-5 由三次谐波和基波叠加产生的复杂运动

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。脉冲持续时间的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。

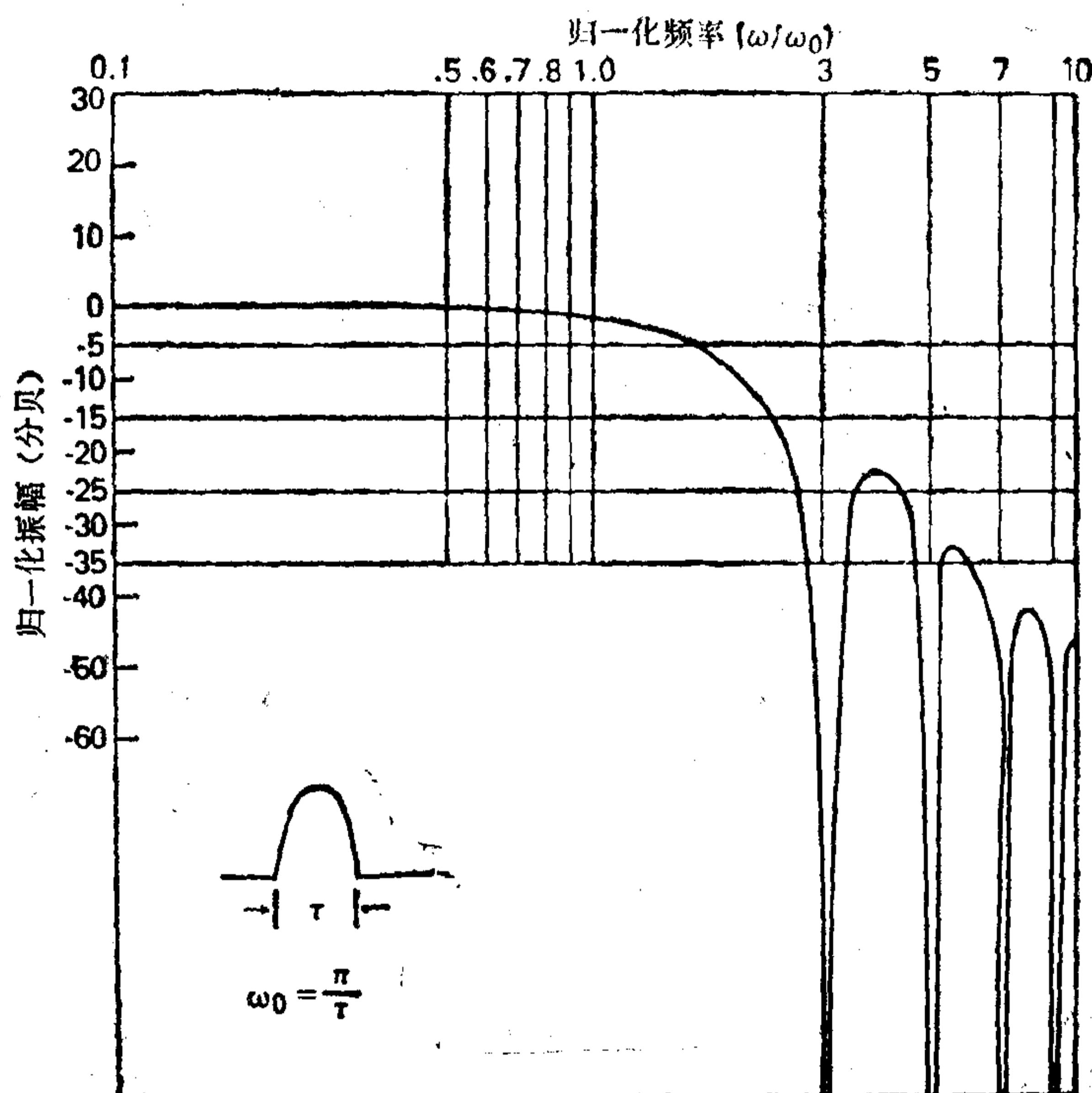


图1-6 半正弦脉冲的傅立叶谱

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⁾。

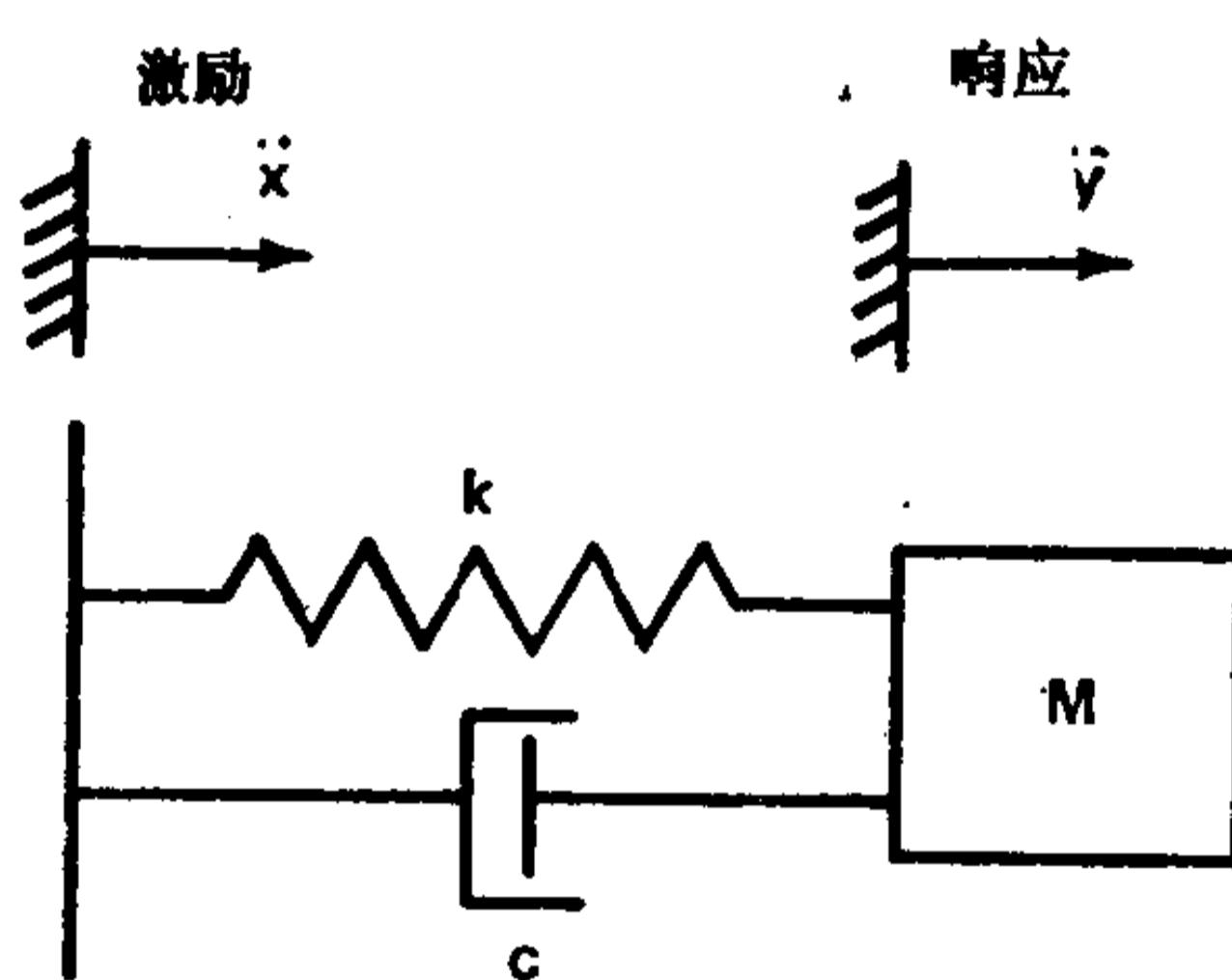


图1-7 一个简单的单自由度系统（图中
M为重物，k为弹簧，c为阻尼器）

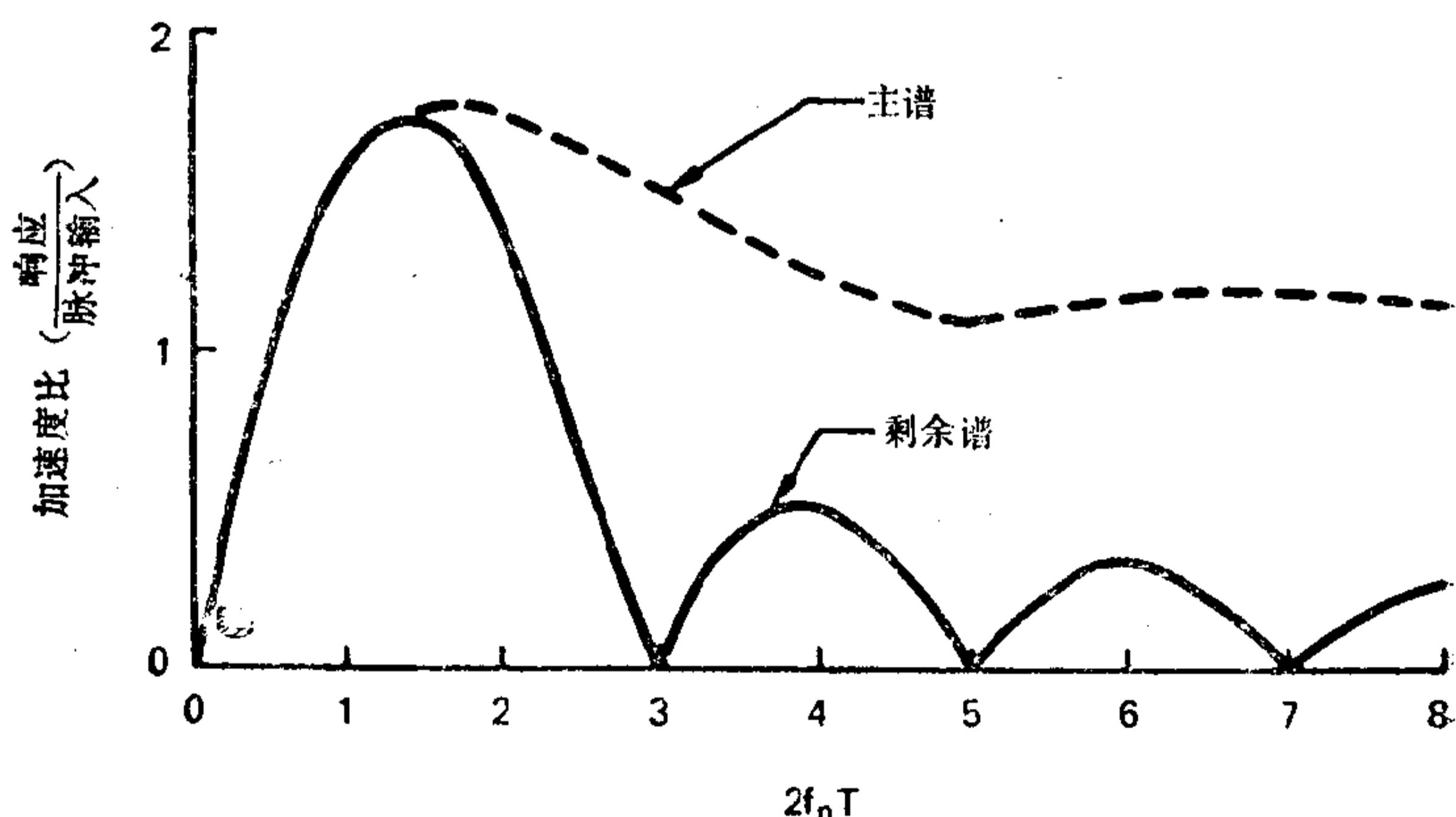


图1-8 半正弦脉冲冲回应谱的主谱和剩余谱

由图 1-8 的主冲击谱可看到，固有频率约等于脉冲时间倒数两倍的单自由度系统所产生的加速度，其幅值大约等于半正弦脉冲中峰值加速度的 1.7 倍⁽⁶⁾，此加速度值是在脉冲作用期间达到的。由图 1-8 的剩余谱可看出，在脉冲结束后，所达到的加速度幅值只比脉冲峰值加速度的一半稍大一些。

各种不同形状脉冲的冲击谱是很有意思的。但在进行冲击运动校准时，不需要考虑它们，而是要注意使冲击运动校准满足所考虑的各种不同形状脉冲的傅立叶谱所规定的要求。

速度和位移幅值

有必要熟悉一下冲击脉冲的速度变化和位移幅值。半正弦脉冲的峰值加速度由下式给出：

$$a = A_0 \sin \frac{\pi t}{\tau} \quad (0 \leq t \leq \tau) \quad (1-7)$$

对上式积分，得：

$$v = \int_0^\tau a dt \quad (1-8)$$

$$= \frac{A_0 \tau}{\pi} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{\tau} \right) \quad (1-9)$$

而 $x = \int_0^\tau v dt \quad (1-10)$

$$= \frac{A_0 \tau}{\pi} t - \frac{\tau}{\pi} \sin \frac{\pi t}{\tau} \quad (1-11)$$

式中 τ 为脉冲持续时间（秒）。

以上各式只适用于脉冲作用期间（时间由零到 τ ）中的任一时刻。我们特别感兴趣的是确定脉冲结束时的速度变化和位移。当 $t = \tau$ 时，

$$v_0 = \frac{2A_0 \tau}{\pi} \quad (1-12)$$

和 $d_0 = \frac{A_0 \tau^2}{\pi} \quad (1-13)$

式中 A_0 —— 峰值加速度 (米/秒²或英寸/秒²) ;

v_0 —— 速度变化 (米/秒或英寸/秒) ;

d_0 —— 位移幅值 (米或英寸) .

持续时间为 1 毫秒的典型半正弦加速度脉冲的瞬时速度和位移示于图 1-9.

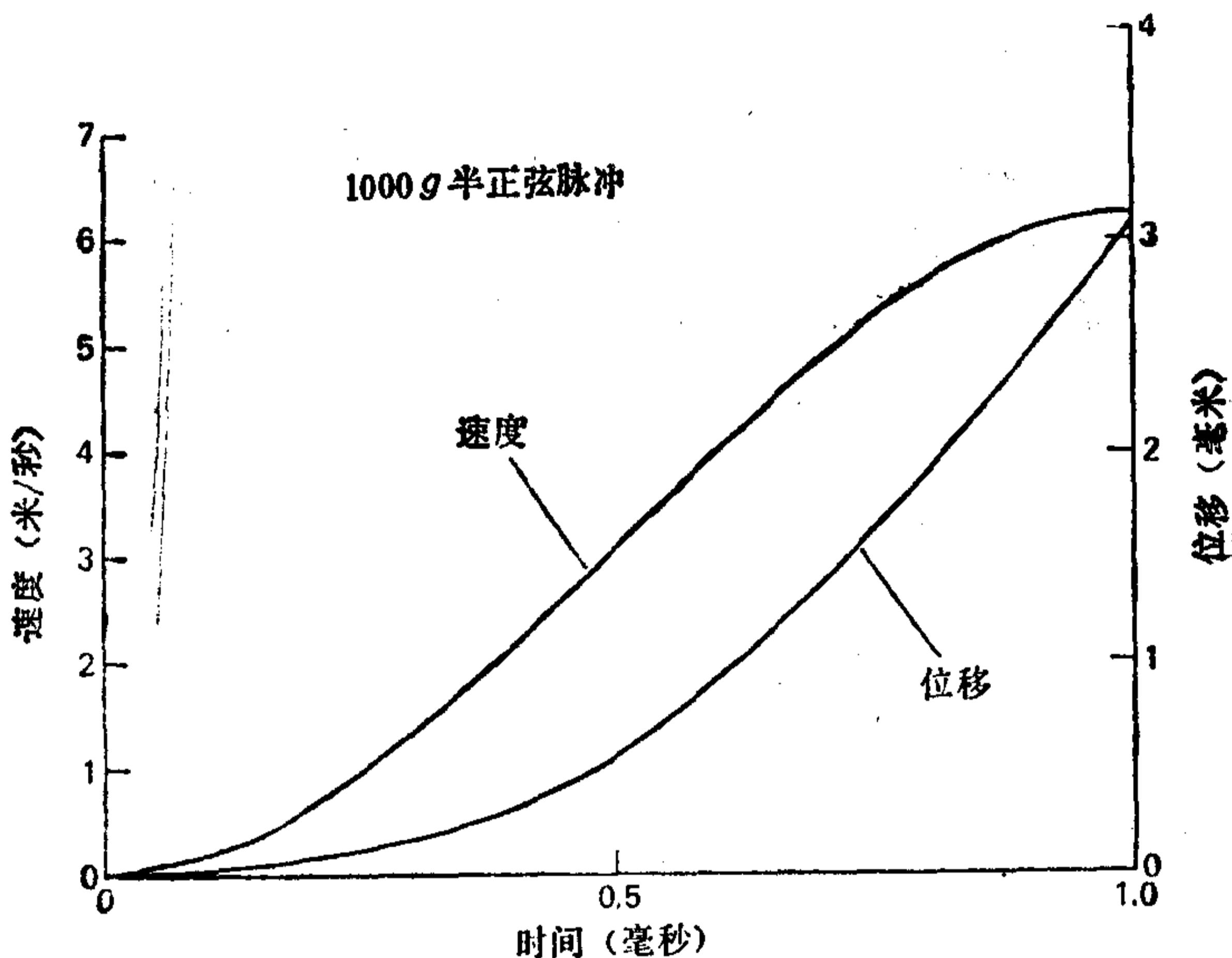


图1-9 持续时间为 1 毫秒的半正弦脉冲的速度和位移

1.4 单 位

在校准实验室里要求使用公制单位。校准测振仪时，最常用的单位是米、秒和米/秒²。在表示较大或较小的量时，建议使用因数为1000的倍数的词头，而不使用10的乘方的因数。例如，最好是用毫米而不是用10⁻³米来表示小的位移。

为便于进行单位换算，一般都给出对应的英制单位。

长度或位移最常用的公制单位是毫米。在校准冲击振动测量仪中出现的读数，其范围为 1 毫米 (0.039 37 英寸) 至大约 25.4 毫米 (1 英寸)。它们都是峰峰值，因为在校准和使用冲击振动

测量仪时一般习惯于使用位移倍幅。

速度用幅值来表示，单位为米/秒。

加速度用幅值来表示，单位为米/秒²，但在应用中一般习惯于以重力加速度为单位。重力加速度的标准值是 $1g = 9.806\ 65$ 米/秒²。由米/秒²换算成 g 时，要除以约等于10的数。例如，98米/秒²的加速度约等于 10 g。

时间的公制单位是秒。

质量的公制单位是千克；力的公制单位是牛顿。遵守这种区别是一种良好的习惯。

力、质量和加速度的关系由牛顿第二运动定律给出，其数学表达式为：

$$F = Ma \quad (1-14)$$

式中 F ——力（牛顿或磅·英寸/秒²）；

M ——质量（千克或磅）；

a ——加速度（米/秒²，英寸/秒²或 g ）。

频率的单位是赫（Hz）。

平面角的公制单位是弧度，但在弧度使用不便时允许用度。

温度的通用单位是摄氏度（°C），温度的公制单位是开尔文（K），此单位在工程上不常用。开氏温度的数值等于摄氏温度的数值加上273.15。例如，摄氏温度20°C等于293.15 K。

1.5 术 语

复习一下冲击振动常用的、特别是与校准有关的术语是有益的。其他术语及其定义，请读者查阅参考文献[7]和[8]。

加速度

加速度是速度对时间的变化率，它是一个矢量。

加速度导纳

加速度导纳是正弦激振时，加速度与力的复数比，其中包含着加速度和力之间的相位角。加速度导纳有时称为“惯量”。

加速度阻抗 (Z_a)

加速度阻抗是正弦激振时，力与加速度的复数比，其中包含着力和加速度之间的相位角。加速度阻抗有时称为“动态质量”或“视在质量”。

电荷变换器

电荷变换器是一个可提供与瞬时输入电荷成正比的瞬时输出电压的电子线路。

临界阻尼

临界阻尼是要使产生位移的系统回到原始位置而不发生振动所需的最小粘性阻尼。

循 环

一个循环是周期函数在一个周期内的所有数值序列。

有阻尼固有频率 (f_a)

有阻尼固有频率是有阻尼线性系统自由振动的频率。有阻尼系统的自由振动，尽管相邻周期的振幅逐步减小，但在零点（同向的）间的时间间隔保持不变的少数情况下，仍可看成是周期性的。振动频率是上述时间间隔的倒数（见“固有频率”和“无阻尼固有频率”）。

阻尼比 (ζ)

具有粘性阻尼的传感器，其阻尼比等于实际阻尼系数 c 与临界阻尼系数 c_0 之比。

分 贝 (dB)

分贝是用来表示一个量相对于某个规定的参考值的大小的一种单位，它用这两个量之比的以 10 为底的对数表示。

位 移

位移是一个矢量，它描述物体或质点的位置变化情况，并且通常由中间位置即静止位置开始计量。但是在实际计量中，位移的大小都是用峰峰值来表示的。

位移导纳

位移导纳是正弦激振时，位移与力的复数比，其中包含着位

移与力之间的相位角。位移导纳有时称为“动柔度”。

位移阻抗 (Z_d)

位移阻抗是正弦激振时，力与位移的复数比，其中包含着力与位移之间的相位角。位移阻抗有时称为“动刚度”。

失 真

失真是一种不需要的波形变化。噪声和某些需要的波形变化（诸如由调制和检波所产生的波形变化），通常不列入失真。

冲击脉冲的持续时间 (τ)

冲击脉冲的持续时间是冲击脉冲加速度从某一规定值（此值与最大幅值之比为一个规定的百分数）上升，然后下降到该值所需要的时间。

误差（不确定度）

误差是被测对象的指示值与真值之差。

激 励

激励是作用在传感器上并使之产生输出的外力或运动。

滤波器

滤波器是一种把波按照频率分开的装置。它使一个或多个频带内的波产生很小的损失，而其他频率的波产生很大的损失。

自由振动

自由振动是系统在没有强迫力作用的情况下发生的振动。

频 率 (f)

随时间作周期变化的函数，其频率等于周期的倒数。频率的单位是赫 (Hz)，它代表周/秒。

重力加速度 (g)

重力加速度用 g 来表示，它随观测点的纬度和高度而变化。按照国际规定，标准重力加速度的精确值取 $9.806\ 65$ 米/秒² (386.088 英寸/秒²)。

谐 波

谐波是一个正弦波，其频率等于相应的周期波的频率的整数倍。

线 性

线性用以表示校准曲线接近规定直线的程度。线性传感器在指定的幅值和频率范围内，灵敏度保持不变。

被测对象

被测对象指的是所要进行测量或探明的物理量、性质或情况。

固有频率

固有频率是系统作自由振动时的频率。对多自由度系统来说，固有频率指的是它的正则振型的频率。

噪 声

任何不需要的信号称为噪声。广而言之，噪声是有用频带内任何非所需的干扰。例如，传输通道或装置内不需要的电波。

峰峰值

振动量的峰峰值是该量两极值（极大与极小）之差。

周 期 (T)

周期函数的周期是使该函数自身重复所需的最长时间增量。

压电式传感器

压电式传感器是利用某种非对称晶体的特性来工作的传感器，这种晶体的材料在变形时会产生电荷。

压电现象

压电现象是某些非对称晶体材料受到适当方向的应变时，产生与应变成正比的电极化作用的现象；逆压电现象是某些非对称晶体材料受到外部电场作用时，产生与电场成正比的机械应变的现象。

压阻式传感器

压阻式传感器的工作原理基于半导体或其他晶体材料的电阻率随施加于其上的应力而变化这一特性。

相位角

一个正弦振动的相位角是该振动相对于某一作为参照的正弦

振动的相位超前（或滞后）。

脉冲上升时间

脉冲上升时间是脉冲前沿从一个较小的值（此值与最大值之比为一个规定的百分数）上升到一个较大的值（此值与最大值之比为另一个规定的百分数）所需要的时间。

品质因数（Q）

品质因数是度量单自由度机械或电谐振系统的谐振锐度或频率选择性好坏的一个量。机械系统的品质因数等于阻尼比倒数的一半。通常它只用于小阻尼系统，并大致等于下列各项：

1. 谐振时的传递率；
2. $\pi/\text{对数减量}$ ；
3. $2\pi W/\Delta W$, W 是每个周期所储存的能量， ΔW 是每个周期所耗散的能量；
4. $f_r/\Delta f$, f_r 是谐振频率， Δf 是半功率点带宽。

随机振动

随机振动是一种不能准确地确定它在任意规定时刻的瞬时量值的振动。其瞬时量值只能用概率分布函数来确定，概率分布函数给出量值（或某个量值序列）落在某一确定范围内的时间占总时间的比例。随机振动不包含周期性的或准周期性的成分。如果随机振动的瞬时量值按高斯分布，这种随机振动就称为高斯随机振动。

谐振频率

谐振频率是传感器灵敏度为最大值时的频率。谐振频率的定义只适用于阻尼比小于 $1/\sqrt{2}$ 的线性传感器。有时，特别是由冲击运动，会激起附加的谐振，这些谐振对应于在弹簧、壳体或连接接头上局部出现主位移的那些模态。

灵敏度（S）

灵敏度是传感器输出信号值与被测量量值之比。

振动台（振动发生器）

振动台是一种用来对传感器或其他物体施加可控制和可重现

的机械振动作用的装置。

冲 击

机械冲击是一种非周期性激励（例如基底的运动或作用力）。其特点是突然而又强烈，通常在机械系统中引起很大的相对位移。

冲击校准器

冲击校准器是一种用来对传感器施加可控制和可重现的机械冲击的装置。

冲击脉冲

冲击脉冲是一种相当大的扰动，其特点是加速度由某一恒定值上升，然后又下降至该恒定值所经历的时间很短。冲击脉冲一般用加速度随时间变化的曲线表示。

冲击谱

冲击谱是单自由度系统在冲击作用下产生的最大响应曲线。它随系统的固有频率而变化。描述响应的量可以是加速度、速度，或者是位移。

正弦运动

正弦运动是一种位移为时间的正弦函数的运动。它有时也称为“简谐运动”。

标准偏差

标准偏差是方差的平方根，即振动量相对于均值的偏差的均方根。

结构阻抗

结构阻抗是正弦激励时，力与运动的复数比，其中包含着力与运动之间的相位角。结构阻抗的单位要根据它所用的运动参数是位移、速度还是加速度来确定。

次谐波响应

次谐波响应是谐振频率为周期性激振频率分数倍的机械系统的响应。

超谐波响应

超谐波响应往往指的是在系统响应中占优势的一种特殊谐波

响应。它常发生在激振频率等于基频分數倍的时候。

传感器（拾振器）

传感器是一种把冲击或振动转换成与运动参数成正比的光、机械或（最普遍地是）电信号的装置。

无阻尼固有频率 (f_n)

传感器的无阻尼固有频率是在不考虑阻尼的情况下，质量元件的运动相位相对于传感器底座或壳体的运动相位滞后 90° 时正弦激励的频率（另见“固有频率”、“有阻尼固有频率”和“谐振频率”）。

横向灵敏度

横向灵敏度是传感器在垂直于其灵敏轴的平面内的运动的灵敏度。它通常用最大横向灵敏度与传感器灵敏度的百分比表示。

速 度

速度是位移对时间的变化率，它是一个矢量。

速度导纳

速度导纳是正弦激励时，速度与力的复数比，其中包含着速度与力之间的相位角。速度导纳常常称作“易动性”。

速度阻抗 (Z)

速度阻抗是正弦激励时，力与速度的复数比，其中包含着力与速度之间的相位角。速度阻抗常常称作“机械阻抗”。

振 动

振动是一种机械振荡，这种振荡的量值是确定机械系统运动状态的一个参数。

第二章 惯性传感器的原理

加速度计和速度传感器是用来测量机械冲击和振动的。通过其中的换能元件，机械运动可以转换成电输出信号。加速度计的电换能元件有：压电元件、压阻应变仪、电阻丝应变仪、差接变压器、变容元件、可变磁阻元件或变阻电位计元件等，大多数加速度计都是用这些电换能元件制成的；速度传感器的换能元件是电磁感应线圈。这些加速度计和速度传感器，都是按照惯性传感器的原理工作的。

2.1 基本方程

惯性传感器的主要元件示于图2-1。实际上所有加速度计和速度传感器都可用这种单自由度惯性传感器描述。某些常用的传感器的谐振频率相当低，这些传感器的有关元件很容易被识别出来。例如，速度传感器中的磁铁可能是质量元件(m)；加速度计中的电阻丝应变仪可能是弹簧元件(k)。这些谐振频率相当低的传感器可以看作是用无弹性的质量块和无质量的弹簧制成的。

大多数加速度计要稍微复杂一些。例如，压电式加速度计的谐振频率相当高。质量元件通常由一块重金属元件和压电陶瓷元件的一部分共同组成；弹簧元件可能由压电陶瓷元件和底座的一部分共同组成。这意味着，要根据材料的物理性质来计算这些元件的质量和刚度是困难的。

尽管惯性传感器的主要元件的性能难以确切地描述，但是研究一下这些传感器的理论响应还是很重要的。如果谐振频率已经确定（比如通过校准），就能用理论方程精确确定加速度计和速度传感器的频率响应和谐振特性。校准工作的目的之一就是要确定加速度计的特性与单自由度机械系统接近的程度。

上述各元件都具有极小的机械阻尼 (c)。压电陶瓷和应变仪的阻尼特别小，以致多数加速度计的阻尼接近于零。在某些加速度计中，装满了油（有一些加速度计则是充以气体或电），以获得较大的阻尼。

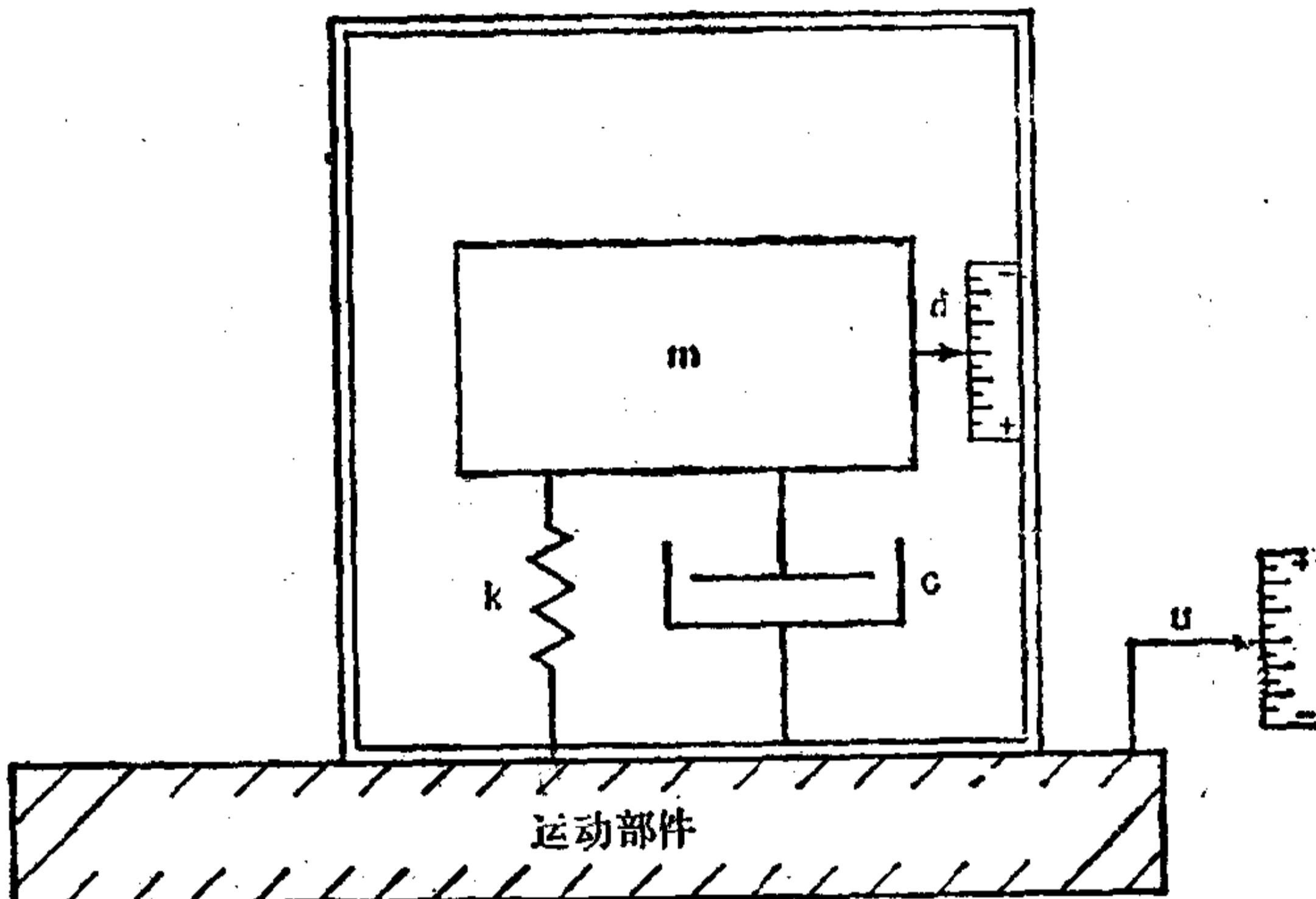


图2-1 单自由度惯性传感器[由支承在弹簧
(k) 上的质量元件组成, 带阻尼 (c)]的主要元件。

惯性传感器方程用来确定质量元件与运动部件（传感器固定在它上面）间的相对运动的大小和相位关系。它们适用于正弦运动，也适用于冲击运动，因为冲击脉冲可用一系列正弦波分量来表示。

质量元件的运动是正弦的，其频率与加速度计或速度传感器壳体的频率相同。无阻尼加速度计的质量元件相对于底座的运动是不变的，而且在它的整个工作频率范围内没有时间滞后（即相位角为零）；有阻尼加速度计的质量元件的运动是不变的，但是它相对于加速度计底座运动的滞后时间则随频率而改变。无阻尼或有阻尼速度传感器的特性与无阻尼或有阻尼加速度计的特性类似，只不过加速度计的工作频率范围低于它的谐振频率，而速度传感器的工作频率范围高于它的谐振频率。这两类传感器可用相同的方程描述。

质量元件相对于其底座的运动的幅值用下式计算：

$$\delta = \frac{u \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \quad (2-1)$$

式中 δ ——传感器质量元件相对于传感器壳体的位移幅值；
 u ——传感器壳体的位移幅值；
 ω ——传感器壳体或运动部件的角频率 ($\omega = 2\pi f$, f 的单位为赫)；
 ω_n ——传感器的无阻尼固有角频率 ($\omega_n = 2\pi f_n$)；
 c ——传感器的阻尼系数；
 c_o ——传感器的临界阻尼系数；
 $\zeta = c/c_o$ (ζ 为阻尼比)。

传感器的无阻尼固有角频率用下式计算：

$$\omega_n = \left(\frac{k}{m} \right)^{\frac{1}{2}} = 2\pi f_n \text{ (弧度/秒)} \quad (2-2)$$

式中 k ——传感器的有效刚度 (牛顿/米或磅力/英寸)；
 m ——传感器的质量 (千克或磅)。

重力加速度为 9.807 米/秒² 或 386 英寸/秒²。

传感器的临界阻尼系数用下式计算：

$$c_o = 2(km)^{\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

临界阻尼系数是划分正弦响应和非正弦响应的分界线。在质量元件突然移动之后，若 c 大于 c_o ，质量元件的运动就不是正弦的。加速度计和速度传感器是按 $c = 0$ 或 $c = 0.7 c_o$ 设计的。进行校准的理由之一，就是要发现阻尼值的重大变化。

传感器的相位角代表质量元件相对于壳体或运动部件的滞后时间。此相位角用下式计算：

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (2-4)$$

有趣的是，此式对加速度计和速度传感器都适用。无阻尼加速度计的工作频率范围在正常情况下选为 $\omega \leq 0.2\omega_n$ ，这是因为由谐振效应产生的灵敏度增量在 $0.2\omega_n$ 处的理论值只有 4.1%。而且，无阻尼加速度计的固有阻尼很小，数值约为 $c \leq 0.01c_0$ 。将这些数值代入式(2-4)可知，无阻尼加速度计在其工作频率范围内，相位角均为 0° 。速度传感器用于 $\omega \gg \omega_n$ 的频率上。将大的 ω 值代入式(2-4)可知，速度传感器的相位角等于 180° (π弧度)。

2.2 频 率 特 性

加速度计和速度传感器的理想频响特性可通过在所感兴趣的频率范围内，利用基本方程来确定。加速度计的设计要求是要使其使用频率远低于单自由度惯性系统的谐振频率。另一方面，通用的速度传感器用惯性系统在远高于其谐振频率的频率上的响应描述。理想加速度计和理想速度传感器在它们的频率范围内的响应由基本方程确定。然后，通过校准，确定加速度计和速度传感器的响应与理想响应接近的程度。

加速度计方程

加速度计换能元件产生的电输出正比于质量元件相对于加速度计底座或固定加速度计的运动部件的位移。加速度计和运动部件的运动通常是相同的。加速度计的灵敏度定义为加速度计的电输出与运动部件的加速度(在加速度计安装点或面上的)之比。加速度计的理想响应是由下式(由式(2-1)求得)确定的：

$$\frac{\delta}{u\omega^2} = \frac{\frac{1}{\omega_n^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2-5)$$

式中， δ 是质量元件相对于加速度计底座的运动； $u\omega^2$ 是加速度计底座的加速度。因此，上式左端代表加速度计的灵敏度，右端描述此灵敏度如何随频率变化。谐振频率 ω_n 的值对每个加速度计来说是唯一的。加速度计的频率响应通过将谐振频率和甚低频时的灵敏度都取为1而归一化。当频率大大低于谐振频率时，归一化的加速度灵敏度等于1；当频率等于谐振频率时，无阻尼加速度计的灵敏度为无穷大（见图2-2）。图2-2还给出了在阻尼值为 $\zeta = 0.7$ 和 $\zeta = 0.4$ 时，加速度计的加速度灵敏度值。

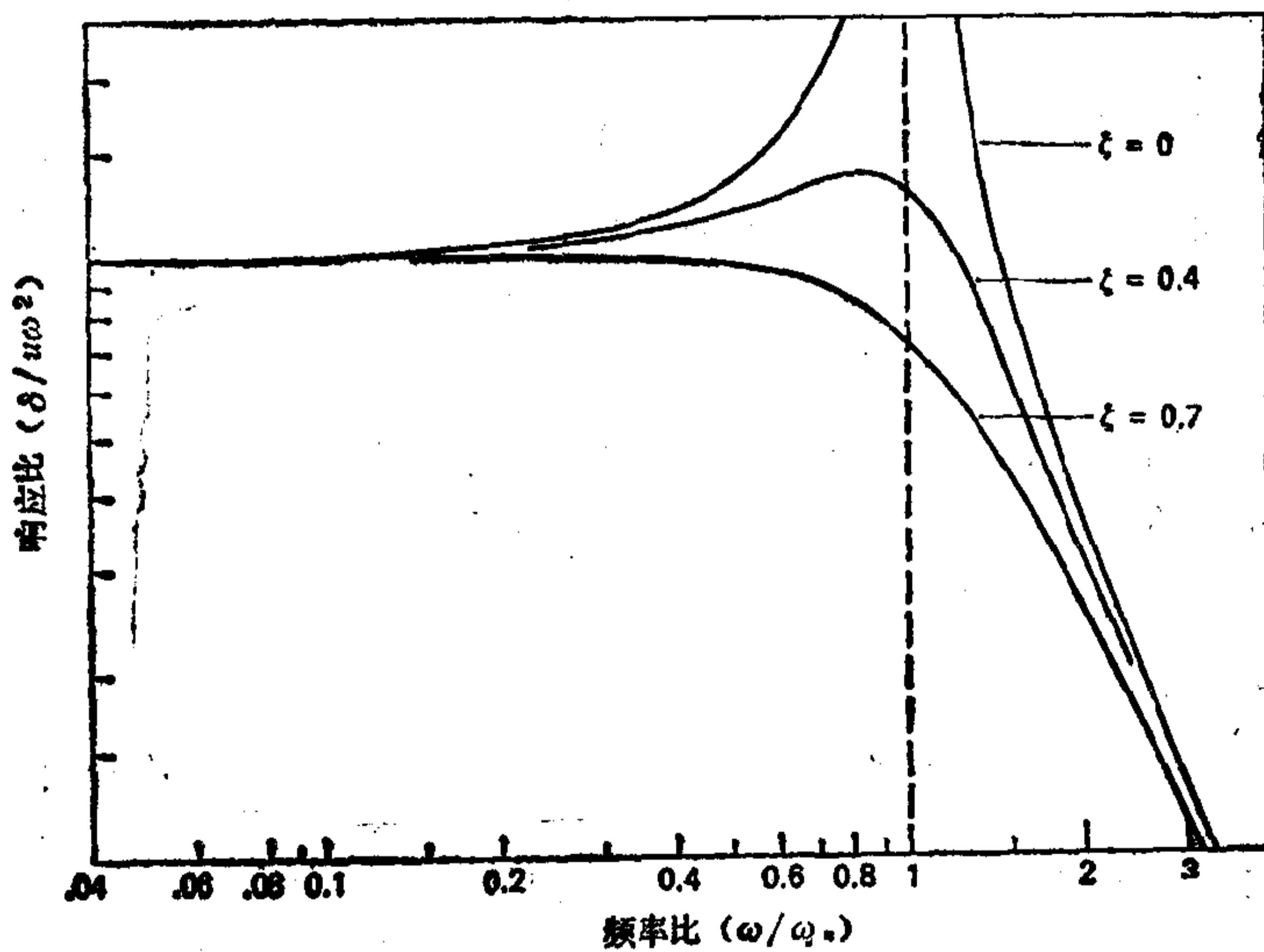


图2-2 加速度计的归一化响应

图2-2中的响应曲线表明：对于阻尼值接近或小于1/100临界阻尼的加速度计来说，其灵敏度在直到1/5倍谐振频率的频率范围内实际上保持不变；在频率等于1/5倍谐振频率时，理想无阻尼加速度计的灵敏度只增加4.1%。制造厂家和用户都把无阻尼加速度计的工作频率范围定为 $\omega \leq 0.2\omega_n$ ，误差为±5%。设计一个阻尼值接近零的加速度计是简单的。大部分加速度计在各种工作条件下（如不同的加速度幅值和工作温度）都具有上述的这

种理想的响应。

内阻尼大的加速度计具有更长的平直频响段。图 2-2 的响应曲线表明：如果小心地保持阻尼值 $\zeta = 0.7$ ，则在直到大约 $2/3$ 倍谐振频率的频率范围内，灵敏度都保持不变。加速度计的设计者和使用者都需要格外小心，要使这个阻尼值在所有幅值和温度条件下保持不变。

知道在谐振频率上的灵敏度值是重要的。由式 (2-5) 求最大值就可以得到这个灵敏度值。阻尼比等于或小于 0.7 时，加速度灵敏度的最大值为：

$$\left. \frac{\delta}{u\omega^2} \right|_{\max} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2-6)$$

ζ 值等于 0.01 的无阻尼加速度计，在谐振频率上，其灵敏度增加 50 倍，即 34 分贝； $\zeta = 0.7$ 的有阻尼加速度计，在谐振频率上，灵敏度增加 0.02%。最好是选用谐振频率远大于工作频率的无阻尼加速度计，这样可避免在谐振频率上的大的输出。在许多有较强的谐振激励存在的应用中，可使用低通滤波器。

有最大响应的频率是谐振频率。谐振频率与无阻尼固有频率之间的数学关系由下式给出：

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (2-7)$$

式中 f_r 为谐振频率。对于无阻尼加速度计，谐振频率等于无阻尼固有频率；对于有一定阻尼值的加速度计，谐振频率略低于固有频率。

加速度计的相位响应见图 2-3，它是把频率值（大部分低于谐振频率）代入式 (2-4) 得到的。图中的响应表明：无阻尼加速度计在低于谐振频率的工作频段上相位角均为 0° 。在加速度计的整个工作频段上， $\zeta = 0.7$ 的有阻尼加速度计的相位角随频率的变化几乎是线性的；然而，对于比较小的阻尼值，相位随频率的变化略呈非线性。因此，最好使阻尼值大于 0.4 倍临界阻尼值。由于阻尼值等于 0.7 倍临界阻尼值时能提供线性的相位响应，所

以人们设计时喜欢采用此阻尼值。

必须使用无阻尼加速度计或有线性相位响应的有阻尼加速度计，以避免在测量复杂振动或冲击运动时产生波形失真。当加速度计具有非线性的相位响应时，复杂振动或冲击运动的频率成分会产生一种随时间变化的不均匀漂移。这种漂移会产生波形失真。因此，复杂振动和冲击运动的精确测量要用无阻尼加速度计或阻尼值接近 0.7 倍临界阻尼值的有阻尼加速度计来进行。

速度传感器方程

通用的速度传感器是用电动线圈制成的。速度传感器里的线圈所产生的电输出信号正比于线圈对传感器壳体的相对速度 $\delta\omega$ 。速度传感器的理想响应可由式 (2-1) 求出：

$$\frac{\delta\omega}{u\omega} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\zeta^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2-8)$$

式 (2-8) 描述了速度传感器的理想响应，因为换能元件产生的电输出是正比于 $\delta\omega$ 的。式 (2-8) 左端在激振频率 ω 大于 ω_n 时具有恒定值。换句话说，速度传感器的灵敏度（速度传感器的电输出与传感器底座或运动部件的速度 $u\omega$ 之比）在整个工作频段

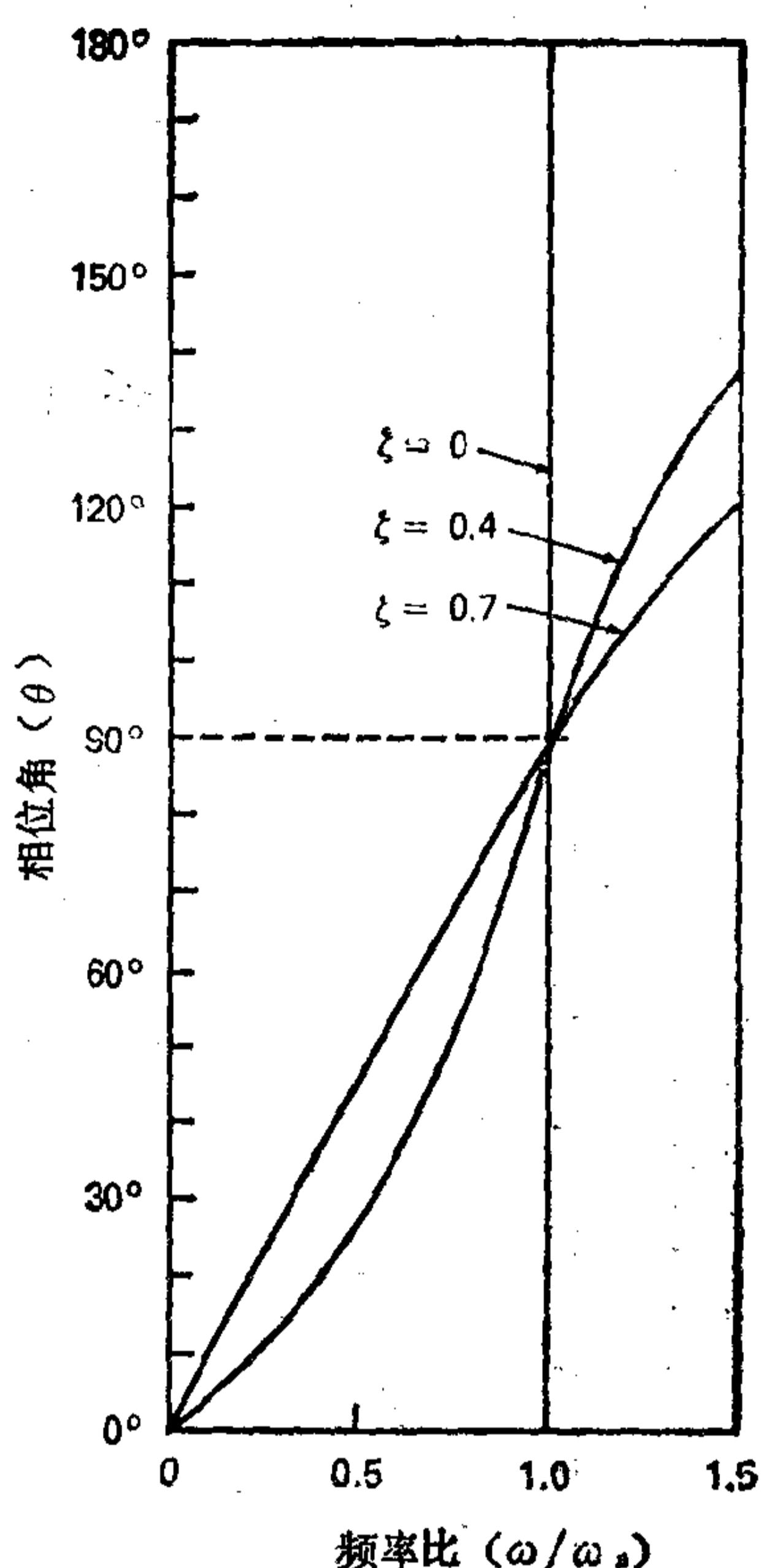


图 2-3 加速度计的相位响应

上保持不变。这种灵敏度恒定的情况出现在比谐振频率高的频率上。注意，式(2-8)左端的 ω 可以消去。如果消去 ω ，比值 δ/u 就表示位移传感器的灵敏度。位移传感器是用输出正比于 δ 的换能元件制成的。它的灵敏度在比谐振频率高的频率上是不变的。然而，这种类型的传感器未被普遍采用。

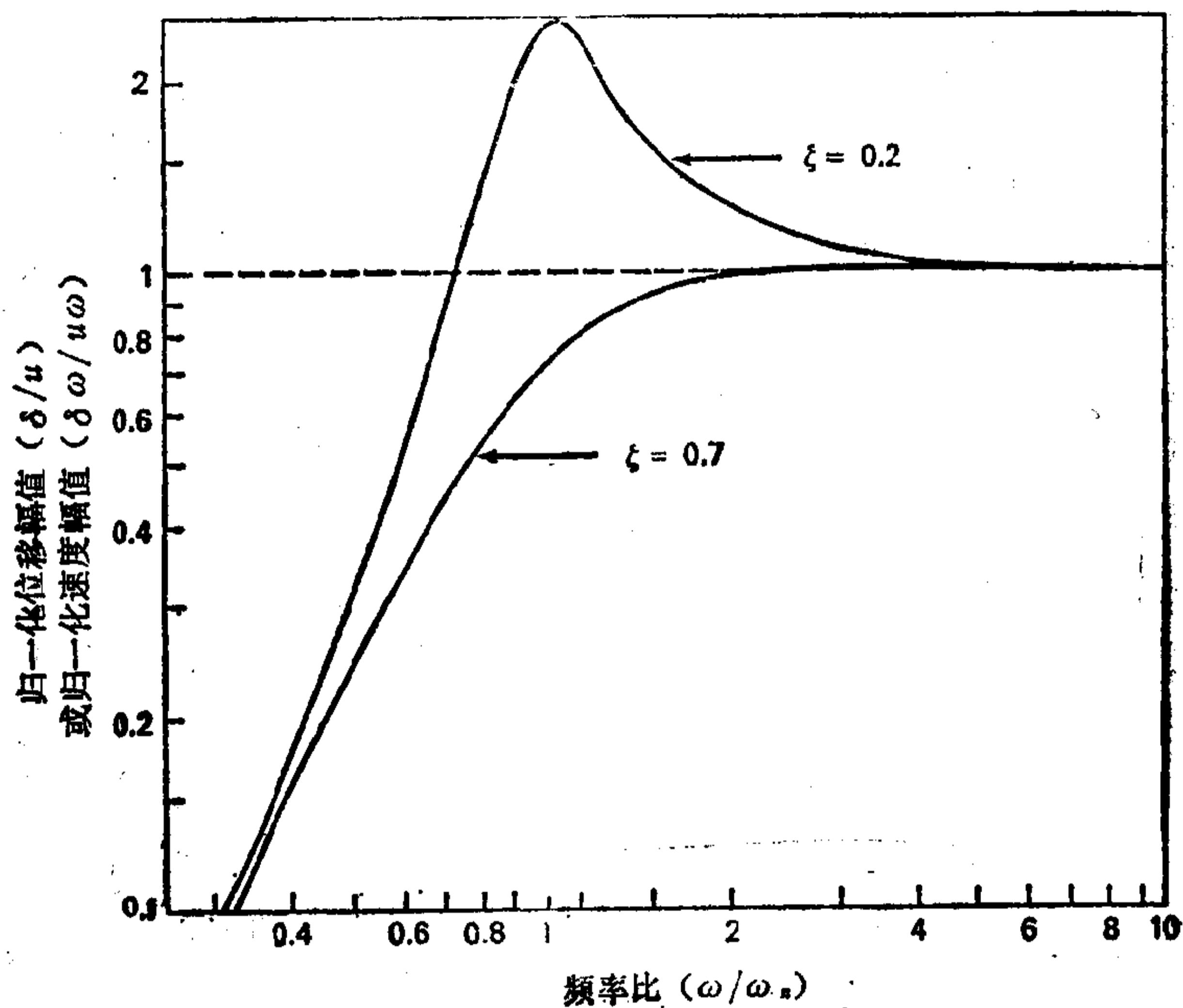


图2-4 速度传感器的归一化响应

阻尼比 $\zeta=0.2$ 和 $\zeta=0.7$ 时的归一化速度灵敏度的数值见图2-4。速度传感器一般都具有大的阻尼，以便能在接近谐振频率的相当低的频率上进行振动测量；如果阻尼不大，就会出现谐振激励，引起波形失真或使质量元件碰撞传感器壳体。速度传感器的灵敏度在频率大于三倍谐振频率时保持不变。

速度传感器的最大灵敏度用下式计算：

$$\left. \frac{\delta\omega}{u\omega} \right|_{\max} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2-9)$$

当速度传感器的阻尼值 $\zeta = 0.2$ 时, 在谐振频率上灵敏度增加 2.5 倍。

谐振频率方程为:

$$f_r = \frac{f_n}{\sqrt{1 - 2\zeta^2}} \quad (2-10)$$

此式适用于阻尼值小于 0.7 倍临界阻尼的情况。具有这样的阻尼值的速度传感器有一条归一化速度灵敏度大于 1 的谐振曲线, 因此有一个谐振频率。此谐振频率略高于固有频率。

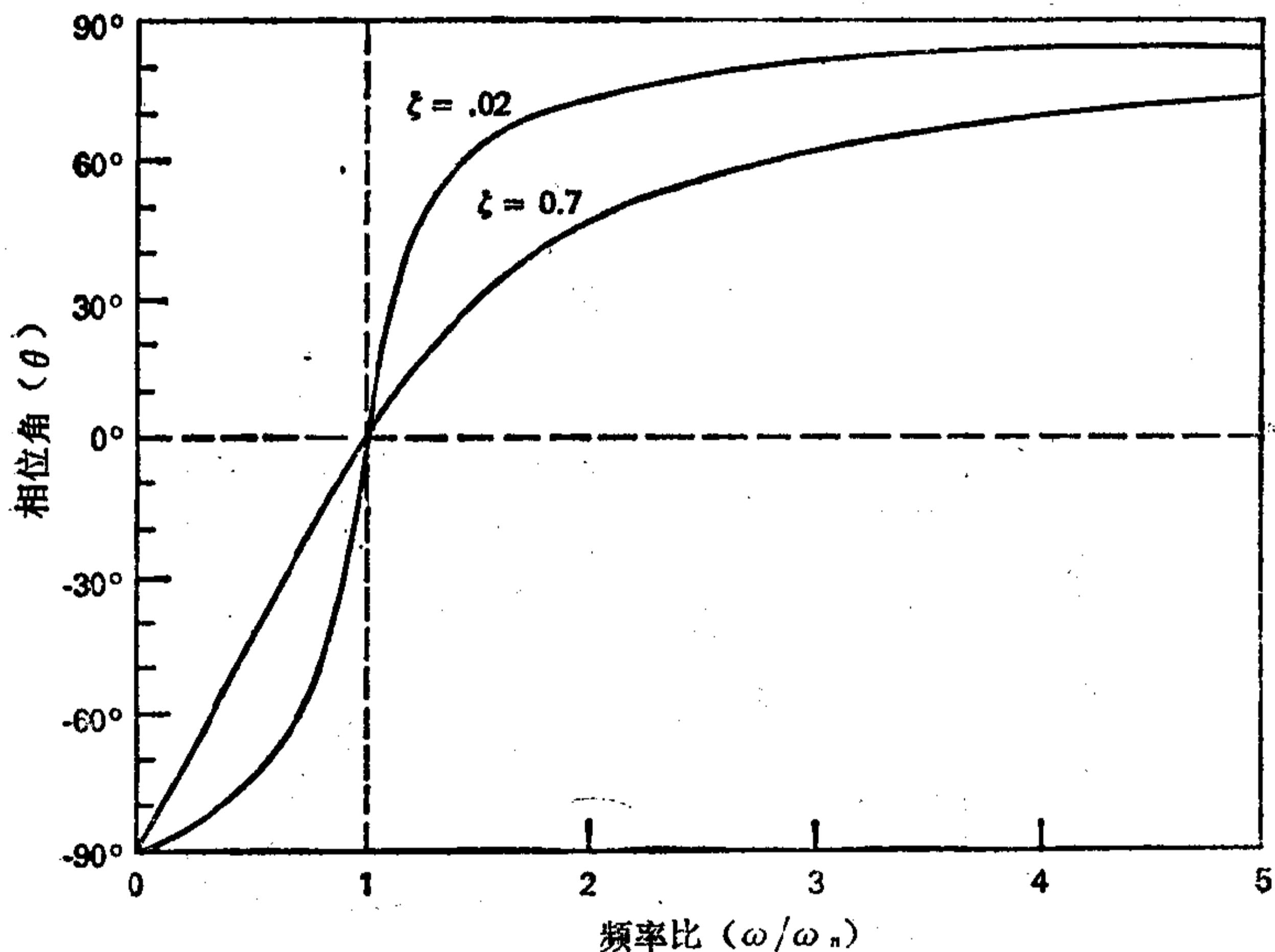


图 2-5 速度传感器的相位响应

速度传感器的相位响应见图 2-5。由图可看出: 当速度传感器在大于 f_n 的正常工作范围内使用时, 电输出或质量元件的运动比传感器壳体的运动滞后约 180° 。换句话说, 质量元件的运动沿负方向最大时, 速度传感器壳体的运动沿正方向达到最大值。除非要判断振动物体的运动方向, 否则这种特性对速度传感器的使用和校准没有什么重要性。可以把接线端钮标上符号, 使正的电

信号代表正速度（由速度传感器底座向上的运动定义为正速度）。

特种传感器

另外一些惯性传感器也能用来测量冲击和振动。这些特种传感器的使用并不普遍，这里只作简要的介绍。

速度传感器的换能元件所产生的电输出正比于质量元件相对于传感器底座的位移。这类传感器中有一种使用变磁阻式的换能元件。它在等于或靠近其固有频率的频率范围内使用。其理论响应可由式(2-1)求出：

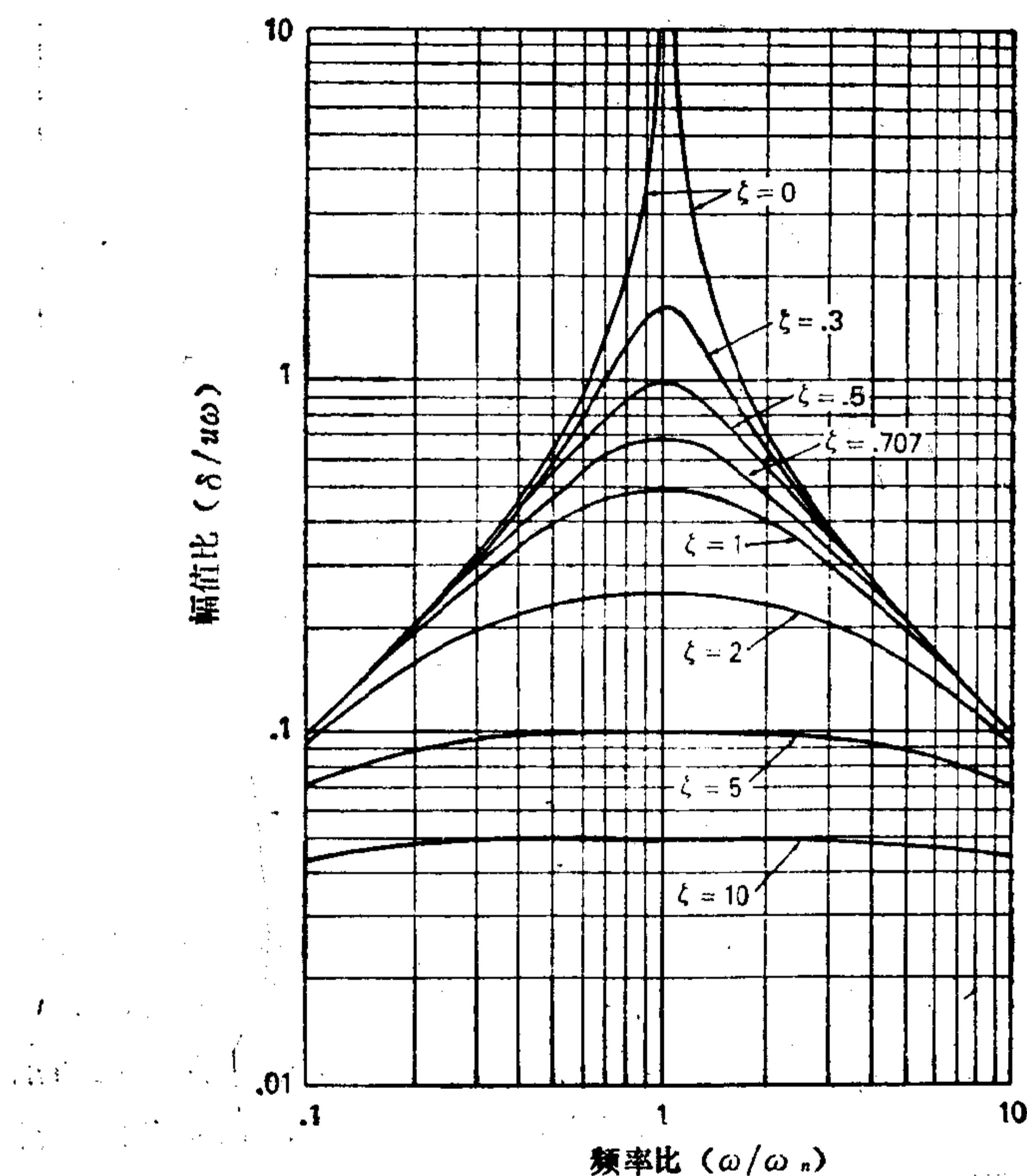


图2-6 速度传感器的归一化响应

$$\frac{\delta}{u\omega} = \frac{\frac{\omega}{\omega_n^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\zeta^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2-11)$$

图 2-6 给出了用这类换能元件制成的速度传感器的归一化灵敏度。这种速度传感器可在某个限定的频段上使用，若使用的阻尼，则工作频率范围至少可伸展到两倍于其固有频率处。

加速度变化率传感器可用电输出正比于质量元件相对于传感器底座的速度的换能元件制成。这种传感器的工作频率比谐振频率低得多，其理论响应由式 (2-5) 右端及图 2-2 给出，将式 (2-5) 左端的分子和分母同乘以 ω ，就可以用来描述加速度变化率传感器。这类传感器可用一个电动线圈作为换能元件。在直到至少 $1/5$ 倍谐振频率的频率上，它的灵敏度保持不变。

2.3 冲击运动响应

在进行冲击运动测量和校准时必须考虑几个因素，其中包括传感器的谐振频率响应，高频和低频频率响应。冲击脉冲的形状和持续时间决定了频率要求。加速度计的固有周期必须比脉冲持续时间短得多。其低频时间常数必须大于脉冲持续时间。这些特征是通过检查理论响应确定的。理论响应是指对冲击校准中用得最多的半正弦脉冲的响应。它与对实际发生的其他冲击脉冲（如三角形脉冲）的响应类似。

谐振频率响应

在冲击运动校准过程中，某个小幅值的分量可激起加速度计的谐振。在校准和使用加速度计时，最好使所用脉冲的持续时间远大于加速度计的固有周期。图 2-7 是加速度计对一个脉冲的响应，此脉冲的持续时间是为探明谐振频率激励而选定的。对于持续时间等于加速度计固有周期三倍的脉冲来说，谐振频率响应的峰值比脉冲峰值高 17%。但是，如果小心地将谐振频率响应曲线加以平滑，则实际校准误差很小。如果所选用的加速度计的固

有周期小于大约 $1/5$ 倍脉冲持续时间，或其内阻尼约等于 0.7 倍临界阻尼值，则谐振频率激励是不大的。

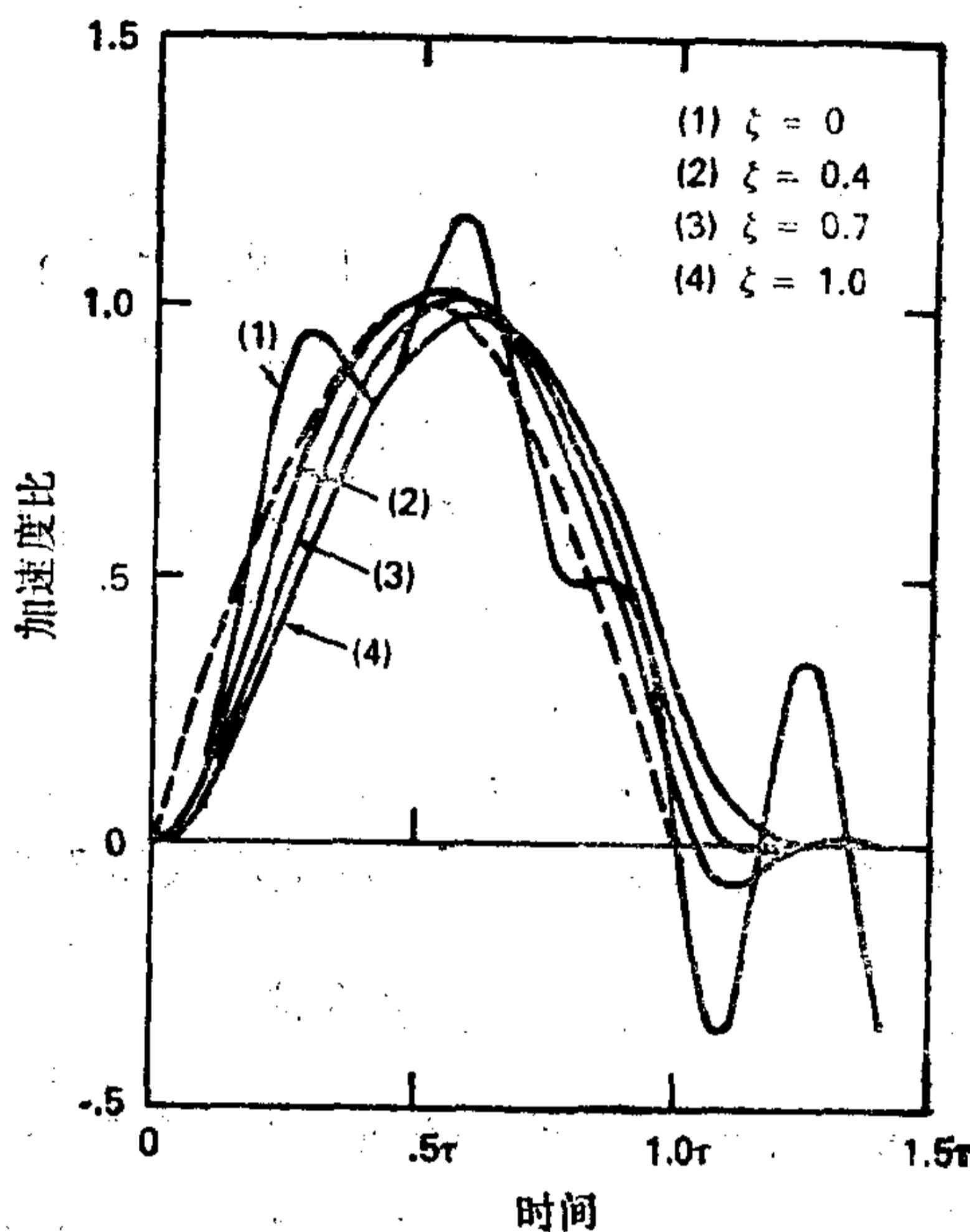


图2-7 加速度计对持续时间为固有周期三倍的半正弦脉冲的响应^[11]

高频响应

为了作精密的冲击测量，必须考虑冲击脉冲的傅立叶分量。因此，使用加速度计时必须注意，要保证在相应于脉冲的各频率分量的频率上，加速度计的灵敏度保持不变。如果所选用的无阻尼加速度计的谐振频率很高，其灵敏度就是不变的。

半正弦脉冲的傅立叶谱见图 1-6。频率等于脉冲持续时间倒数两倍的分量比甚低频上的频率分量小 23 分贝。因此，使用有阻尼加速度计时，有必要选用灵敏度在直到至少等于脉冲持续时间倒数的频段上保持不变的加速度计。所以必须对加速度计和速度传感器进行频率响应和谐振频率校准，使它在对应于冲击脉冲主要分量的频率上灵敏度不变。

低频响应

必须仔细地选择加速度计、放大器和信号调节器，以保证有足够的低频响应。如果加速度计灵敏度在很低频率上不是恒定的，就不能准确地测量冲击脉冲，而且在冲击脉冲结束后将出现负脉冲（见图 2-8）。由图 2-8 的响应可以知道，与压电加速度计一起使用的放大器，必须按试验的低频要求加以选择。这些放大器在低于 2 赫左右的频率上出现衰减。只有当使放大器输出下降 3 分贝的频率的倒数大于脉冲持续时间时，才能避免大的误差。当上述倒数等于两倍脉冲持续时间时，误差为 3%。

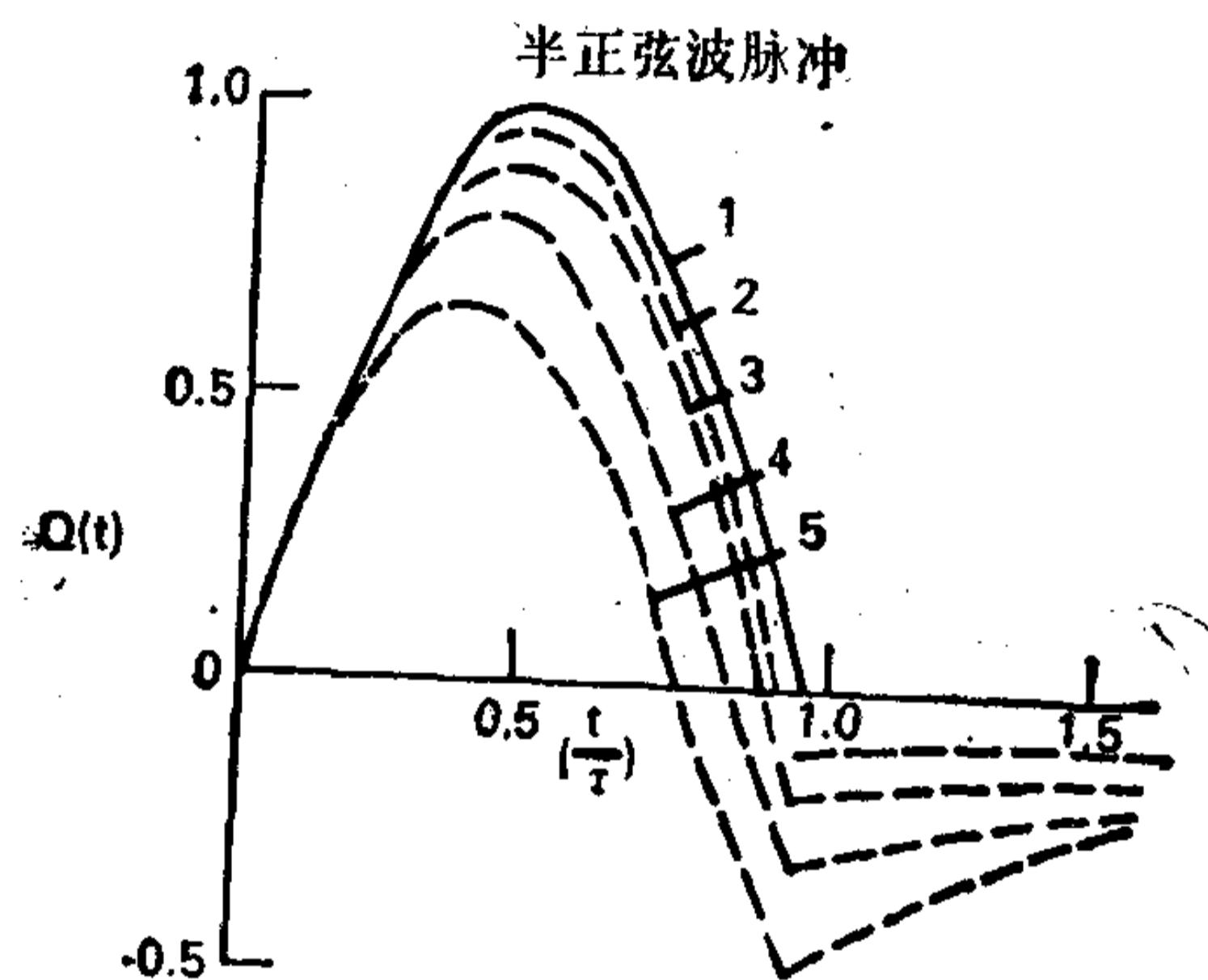


图 2-8 具有各种 RC 时间常数的加速度系统
对半正弦冲击脉冲的响应

- (1) 加速度输入脉冲
- (2) 响应 ($\lambda = 20$)
- (3) 响应 ($\lambda = 10$)
- (4) 响应 ($\lambda = 5$)
- (5) 响应 ($\lambda = 2$)

$$\lambda = \frac{\pi RC}{\tau}$$

$$Q(\tau) = \frac{\text{实测加速度}}{\text{脉冲最大加速度}}$$

对测量冲击用的速度传感器，也有类似的要求。谐振频率必须很低，以使灵敏度在足够低的频率上保持不变。在压阻式和电阻丝应变计式加速度计中，直到频率为零时灵敏度都不变，因此不会产生低频失真。

第三章 传感器和辅助仪器

测量振动和冲击运动的传感器是用压电陶瓷、压阻和电阻丝应变计、可变电容器、电感元件、机械记录装置及光学系统等机电元件制成的。因此，有必要了解这些元件的特性，以及测定各种环境对其特性的影响。有些传感器可测量低频振动（包括静态加速度）；另一些传感器则可测量从低频到极高频的振动。传感器的特性基本上决定了加速度计、速度传感器和位移测量仪等工作特性。

一些环境的因素会影响冲击和振动的测量精度。以下分别描述温度、横向和旋转运动、安装效应、应变及高强度噪声等因素对传感器的影响，以便深入理解传感器的工作特性。必须保证由环境引起的误差足够小。在校准实验室里，应把环境影响减至最小，并挑选优质激振器和冲击校准器，以消除不必要的校准误差。

在我们的导弹和空间技术发展规划中，为了准确地测量振动和冲击运动，许多方面都需要小型加速度计。压电式加速度计是一种高度发展了的仪器，它能满足很多精密测量的要求；压阻式和电阻丝应变计式加速度计能准确地测量长持续时间的冲击运动和低至零频的振动。压阻式加速度计灵敏度高，工作范围可扩展到较高频率。

电感式换能元件主要用于速度传感器。

所有的加速度计和速度传感器，不论使用什么灵敏元件，都是按惯性传感器的原理工作的。

3.1 压电式加速度计

当压电材料变形或受到机械压力作用时，就会产生电荷。希

腊语 piezein 的意思是挤或压。压电效应是在大约一百年前，由 Jacques 和 Pieere Curie 发现的。他们发现，象石英、罗谢尔盐和电石一类物质，会产生压电效应。现今的一些加速度计就是用石英制造的。它们的主要优点是在相当宽的温度范围内，性能不受温度的影响。

大多数加速度计是用压电陶瓷（如锆钛酸铅 及其它各种陶瓷）制造的。由陶瓷制造的加速度计的灵敏度很高。在恶劣环境中，比其它类型的加速度计不易出现差错。大部分加速度计几乎都能用于实际工作中的任何环境温度。对于需耐极高温〔超过 600°C (1112°F)〕的加速度计，可使用特殊的陶瓷。

压电材料的基本原理

在压电材料的晶胞内，由于正、负电荷的位置不同，形成了一个偶极子，如图 3-1⁽¹³⁾所示。由相同晶胞组成的晶体，在受到与其偶极矩平行方向的拉压时，将产生电荷。这些电荷出现在晶体的表面上。当晶体受到挤压时，产生正电荷；当晶体被延伸或晶体具有预压而预压力减少时，产生负电荷。

铁电材料可用来制造压电陶瓷。这种陶瓷是由许多经过强直流电场极化了的晶体组成的（强直流电场的作用是把晶体中大部分偶极子按平行于电场的方向排列起来）。在生产压电陶瓷的过程中，从加工制造，到为保证压电性能的长期稳定而进行的老化过程，都必须特别小心。实际上，只要避免过分的环境影响，压电性能就不会因时间而改变。如果周围的环境参数远远超过额定值，其性能就会发生变化，并且通常是破坏性的。由特殊类型的机械应力所产生的电荷数决定于材料的压电常数。压电式加速度计可按压、剪或弯曲等三种类型来设计。用张量符号来表示对应于压电常数的应力。

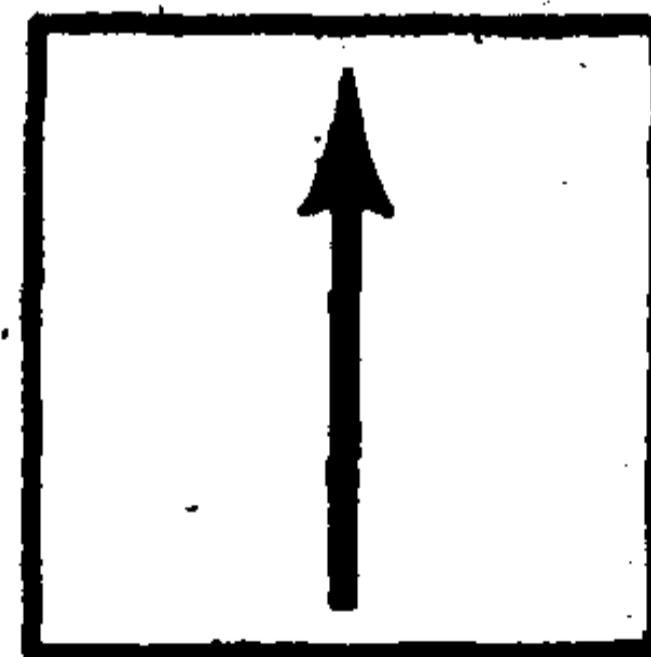
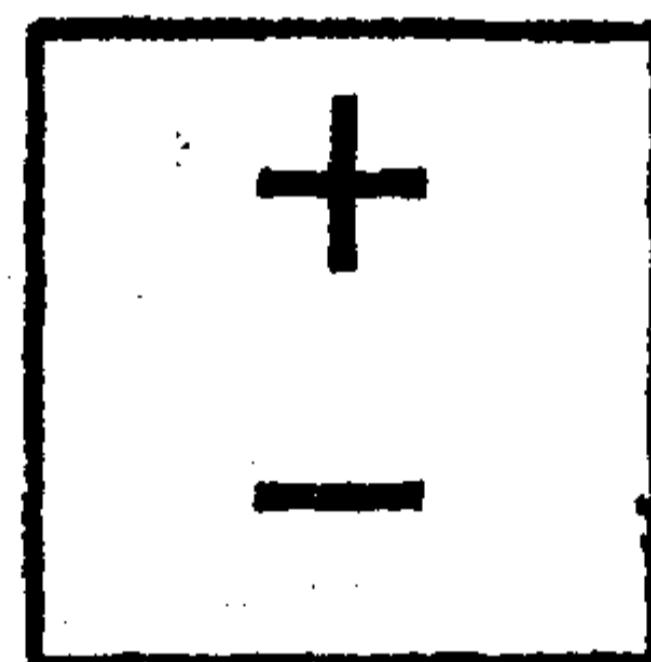


图3-1 压电晶体
材料里的晶胞

凡是用极化陶瓷制造的压电式加速度计，所采用的压电常数都是 d_{33} 。图3-2a示出了在陶瓷元件上的压缩应力作用方式。陶瓷被极化以后， z 方向上的两个电极，分别连接于如图3-2a所示的上、下表面上，当加上压应力 τ_{zz} 时，陶瓷中就会产生正电荷，且可由接到陶瓷元件上、下两表面的电子仪器测量出来。 τ_{zz} 表示加在 Z 方向上的力所产生的机械应力。这个力作用在 Z 为常数的截面上。在压缩型加速度计里，这个力是由置于陶瓷顶端上的质量元件的惯性负载产生的，包括陶瓷作用在自身上的惯性负载。

由石英晶体制造的压缩型加速度计，所用的压电常数是 d_{11} 。这是因为石英晶体采用了垂直于 x 轴的截割法的缘故。这种石英晶体的工作原理，与使用压电常数 d_{33} 的陶瓷一样。然而，由于压电常数不同，这两类加速度计的特性完全不同。

还有另外一种压缩型加速度计，它是通过给在 z 方向上极化了的陶瓷施加一个 τ_{xx} 应力来工作的。图3-2b举出了一个使用压电常数 d_{31} 的陶瓷元件，它的压应力是由在与 x 轴垂直的截面上，施加一个 x 方向的力而产生的。这个陶瓷元件是在 z 方向上被极化的，并且两个电极分别连接在垂直于 z 的上、下表面上，用以测量由 τ_{xx} 压力产生的电荷。

剪切型加速度计所用的压电常数是 d_{15} 。见图3-2，这种陶瓷元件可呈圆桶形或平板形，它是由在 z 向施加一个强直流电场极化而成的。两电极分别连接在垂直于 x 方向的两个表面上。当陶瓷元件受剪切应力 τ_{xz} 时，压电常数就是 d_{15} 。剪切应力由在垂直于 x 方向的面上，施加 z 方向（如图3-2c箭头所示）的力所产生。所产生的电荷可用连接在与 x 轴垂直的表面上适当的仪表测量出来。

大部分压电式加速度计，都是针对表3-1中所列一些材料⁽¹⁴⁾的某一压电常数设计的。（居里温度是陶瓷开始退极时的温度。）锆钛酸铅的压电常数，比钛酸钡和石英的相应的常数高得多，并在相当宽的温度范围内几乎保持不变。大部分加速度计

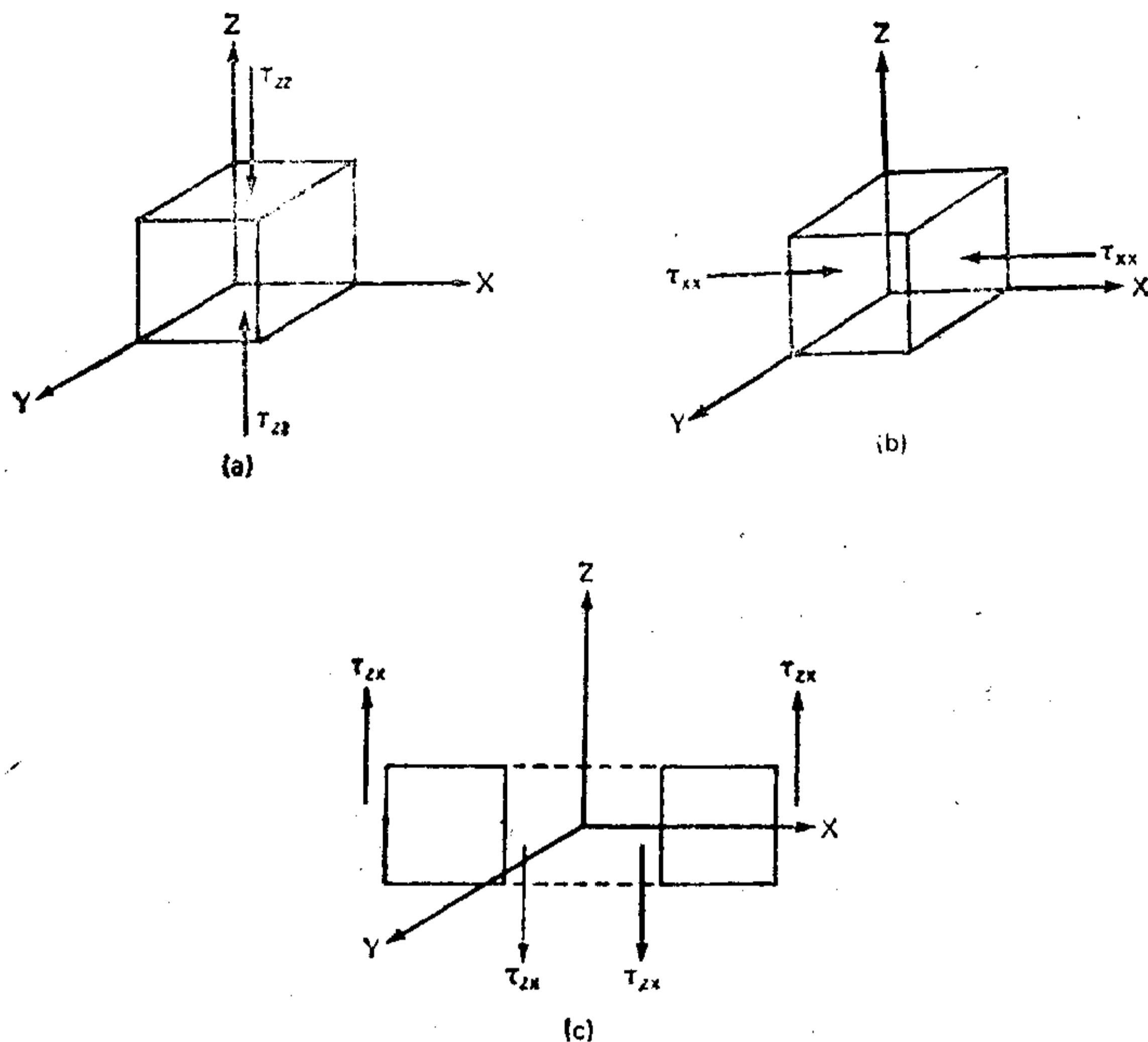


图3-2 在压电陶瓷上的应力作用方式

表3-1 压电常数的典型值⁽¹⁴⁾

材 料	d_{33} (皮库仑/牛顿)	d_{15} (皮库仑/牛顿)	居里温度(°C)
锆钛酸铅	260	460	370
Endevco P-10	18	22	480
Endevco P-15	6	68	1200
石英	2 ⁽¹⁾	—	570
钛酸钡	148	225	120

(1) 压电常数 d_{11} 。

是用锆钛酸铅或其它具有良好压电特性的专门陶瓷制造的。有些加速度计，尤其是那些打算供特殊使用的加速度计，则是用石英制造的。

温度变化对压电材料产生两种影响。温度的巨大变化，会引起压电常数的改变，从而引起加速度计灵敏度的改变。这些改变

是同时发生的，且对每个工作温度都是已知的。当温度返回到室温时，压电常数也跟着回到它原来的值。温度的第二种影响，是众所周知的热电效应。当晶体中发生温度瞬变时，就会产生电荷，这个电荷会叠加到由压电现象产生的电荷上。幸好，几乎在所有的应用中，温度都是逐渐变化的。因而，只要适当选择在很低频率上，具有合适的倾斜特性的信号调节器，热电影响实际上可以消除。

加速度计的结构

大部分加速度计是用做成圆桶、薄圆盘或平板等形状的压电材料制造的，并普遍采用压缩和剪切两种型式。也有些加速度计是用弯曲状的陶瓷元件制造的，它可在薄陶瓷元件的上、下两个端面上产生拉、压应力。

利用图 3-3a 和 3-3b 所示的压缩和剪切型的加速度计，能测量在它对称轴(与加速度计底座垂直)方向上的冲击和振动。当加速度计向上运动时，质量块就有向下的趋势，向着加速度计的底部移动；而加速度计壳体的向下运动，则引起质量块的向上移动。在剪切型加速度计里，这种向上、向下的运动，给粘接在质量元件 M 里面的压电陶瓷 k 施加了一个剪应力。质量元件和压电陶瓷均为圆柱形。借助粘合剂把陶瓷连接到中心支柱上。中心支柱构成加速度计底座的一部分。质量元件不接触外壳，在剪切型加速度计的结构中，加给晶体的应力是由上面所说的运动所产生的动态应力。

在压缩型加速度计中，有一个施加到压电陶瓷 k_2 上的静态预压负载。把连在支柱 k_1 顶端上的螺母上紧，就可把这个预载施加上去。支柱中的静拉伸预载与陶瓷中的静压缩预载是相等的。所选择的静态预载，要远远超过在加速度壳体受到冲击或振动时所产生的最大动态应力。壳体向上运动时，对质量元件产生一个惯性力，使陶瓷上的压缩应力增大；相反，壳体向下运动时，陶瓷上的压缩应力就减小。

图 3-3c 所示的加速度计，是在陶瓷元件 k_1 上，产生一个弯

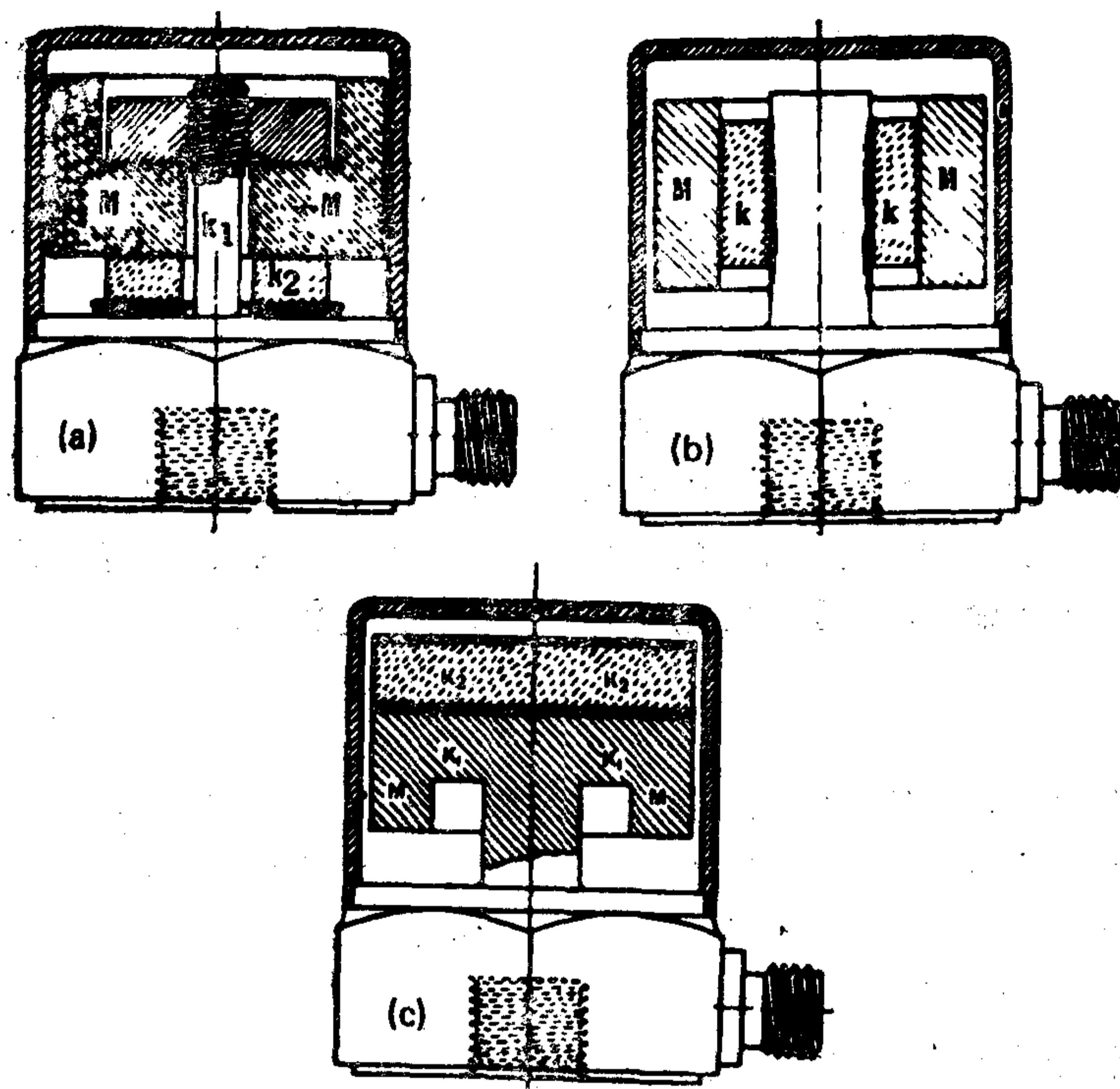


图3-3 典型的压电式加速度计的截面图 (a) 压缩型 (b) 剪切型 (c) 弯曲型

曲应力。这个压电陶瓷实质上起着附在环形金属结构上的应变仪的作用。当加速度计向上运动时，质量元件 M 有向下运动的趋势，在陶瓷内产生一个径向的张应力；在加速度计壳体向下运动时，质量元件有向上运动的趋势，在陶瓷内产生一个径向的压缩应力。这些径向应力使陶瓷内产生电荷。

所有的压电式加速度计工作时都不需要电激励。陶瓷内产生的电荷，由下面的式子给出：

$$Q = d\sigma A \text{ (库仑)} \quad (3-1)$$

式中 d ——晶体的压电常数；

A ——晶体上承受应力的面积；

σ ——晶体上的应力。

和 $Q = C_1 \delta C$ (3-2)

式中 C_1 ——由加速度计的设计和上述公式所确定的常数；

δ ——质量元件相对于加速度计底座的偏转角。

所应选用的压电常数 d 取决于加速度计的类型。剪切型加速度计用 d_{15} ；压缩型加速度计用 d_{33} 或 d_{11} 。数值的大小取决于压电材料。

很多加速度计的灵敏度，可根据陶瓷和质量元件的性能来准确估算。乘积 σA 等于作用在压电材料上的质量块的惯性力。它等于施加到加速度计上的加速度与有效质量 M 的乘积。加速度灵敏度为输出电荷 Q 与加速度（以 g 为单位）之比，即

$$S = \frac{Q}{g} = dM \quad (3-3)$$

例如，特殊锆钛酸铅陶瓷的 d_{33} 常数是 260 皮库仑/牛顿（1157 皮库仑/磅力），一个有效质量为 10 克，采用单个压电元件的压缩型加速度计，其加速度灵敏度就是 26 皮库仑/ g ，这里 g 是重力加速度 [9.8 米/秒² (386 英寸/秒²)]。

信号调节器

压电材料相当于一个电容器。其电容量由材料的介电常数决定。在低频时，压电式加速度计的阻抗非常大。因此，必须在信号调节器的输入处加上一适当的电路，以便在所感兴趣的最低频段上提供一个平直的频响。设计电荷放大器时，应使它在整个工作频带上能提供恒定的增益。有些实验室至今仍使用高输入阻抗的电压放大器。在特殊应用中，还使用诸如电源跟随器和阻抗变换器等特种信号调节器。

电荷放大器 电荷放大器是用来测量压电式加速度计在整个工作频率范围内的输出的。电荷放大器的原理图见图 3-4。

电荷放大器的输出由下式计算：

$$E_o = \frac{-S_g A}{(C_p + C_L) + (1 + A)C_f + 1/j\omega R_S} \quad (3-4)$$

式中 E_o ——电荷放大器一个 g 的输出；

S_q ——加速度计的加速度电荷灵敏度；
 A ——放大器增益；
 C_p ——压电材料的电容量；
 C_L ——电缆和连接件的电容量；
 C_f ——电荷放大器内使用的反馈电容的电容量；
 i ——虚数单位；
 ω ——角频率；
 R_s ——加速度计和电缆的分流电阻。

加速度计和电荷放大器的几个典型数值是：放大器增益为 1000；加速度计和电缆的电容为 1000 皮法；反馈电容为 1000 皮法；分流电阻为 10 兆欧。把这些值代入 (3-4) 式可知，输出电压大约等于电荷与反馈电容之比。所以式 (3-4) 可简化为：

$$E_0 = -\frac{S}{C_f} V/g \quad (3-5)$$

即使加速度计与电荷放大器间的电缆很长时，这个比值也几乎保持不变。

图 3-4 的时间常数由下式计算：

$$T = 1/2 \pi f_0 = R_s [C_p + C_L + (1 + A)C_f] \quad (3-6)$$

式中 f_0 为响应下降 3 分贝处的频率，其它各量与上式相同。式 (3-6) 表明，时间常数非常大，并且在比 1 赫低得多的那些频

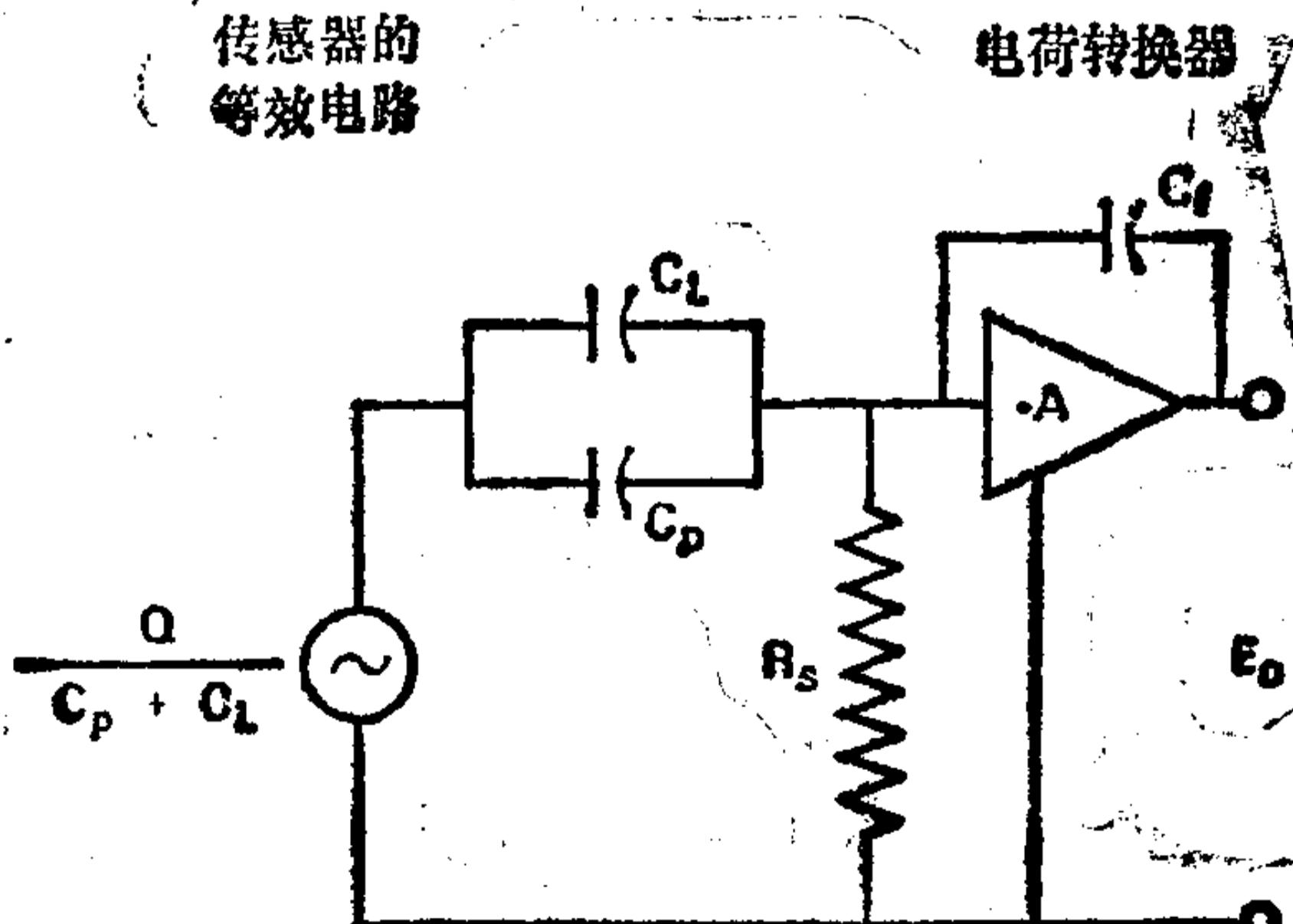


图 3-4 典型的压电式传感器与电荷转换器（放大器）联接的简图

率上，放大器响应应当是平直的。然而，还需要消除加速度计内由热电效应产生的准直流输出。对于大多数的冲击和振动测量的应用来说，只要求2赫以上频率的频响是平直的。在有些情况下，只要求5赫以上频率的频响是平直的就够了。电荷放大器的优点之一是可通过设计达到任何期望的低频响应。例如，反馈电阻 R_f 与反馈电容并联，就具有一个数值为 R_fC_f 的时间常数。如果要用于冲击运动的测量，这个时间常数应当比冲击脉冲持续时间长。

电压放大器 在过去，可与压电式加速度计一起使用的，只有电压放大器和阴极跟随器。使用这些仪器时，加速度计的电压灵敏度可用下式表示：

$$E_s = \frac{S_q}{C_p + C_L + C_a} \quad (3-7)$$

式中 E_s ——加速度计的电压灵敏度；

C_a ——电压测试仪器的输入电容。

在压电式加速度计与电压测试仪器连用时，难于达到足够的低频响应，这点在实际应用中必须予以考虑。

阴极跟随器的低频响应，取决于频率(赫)、阴极跟随器的输入电阻(欧)、加速度计及电缆的总电容(法)等项的乘积。只有当这个乘积(fRC)等于或大于1时，频响才是平直的；在这个乘积小于1的频率上，响应是减低的。例如，当 fRC 大约等于0.16时，响应下降3分贝。

当使用其它电压放大器时，也需要考虑这个乘积。然而，一般说来，这个乘积只在电压放大器自身的下限频率以下时才小于1。在此情况下，放大器的低频响应特性就是决定因素。很重要的一点就是，不论是由于电压放大器，还是乘积 fRC ，响应下降3分贝的频率要出现在足够低的频率上。譬如，在测量冲击运动中，下降3分贝的频率的倒数，就应当比冲击脉冲持续时间大得多。

当进行50赫以下的正弦或随机振动测量时，了解电压放大器

和阴极跟随器的低频特性是很重要的。当使用小电容加速度计时，阴极跟随器的响应在低频上陡直下降。除了要求有平直的频响特性外，还要求放大器的相移随频率的变化是线性的。这种对相移的要求，在低频响应较差的电压放大器中是不具备的。因此，在应用这样的放大器测量随机振动和冲击时，会造成加速度计的输出失真。

除了电压放大器与阴极跟随器的低频响应问题以外，还需确定由更换电缆所引起的灵敏度的变化。当与加速度计并联的电容增大时，输出就减少。如更换电缆，就需利用式(3-7)计算出新的灵敏度值或重校加速度计。

阻抗变换器 在加速度计壳体内，装有专门的集成电路元件，用以在输出端提供低值阻抗。为了供压电式传感器使用，把一个单板式集成电路放大器(图3-5)接入阻抗变换器里^[16]。把集成电路放大器、电源电阻器和与压电晶体元件并联的衰减电容器装进加速度计壳体内，如图3-6所示^[16]。用同轴电缆把压电式加速度计与电源电阻器和电源连接。正象通常把同轴电缆用于加速度计一样，允许用两个导线系统来连接它们。电路的工作原理与普通电压型压电系统相类似。由在压电元件上产生的电荷形成放大器输入端(由晶体、电极、晶体管并联而成)的电压。

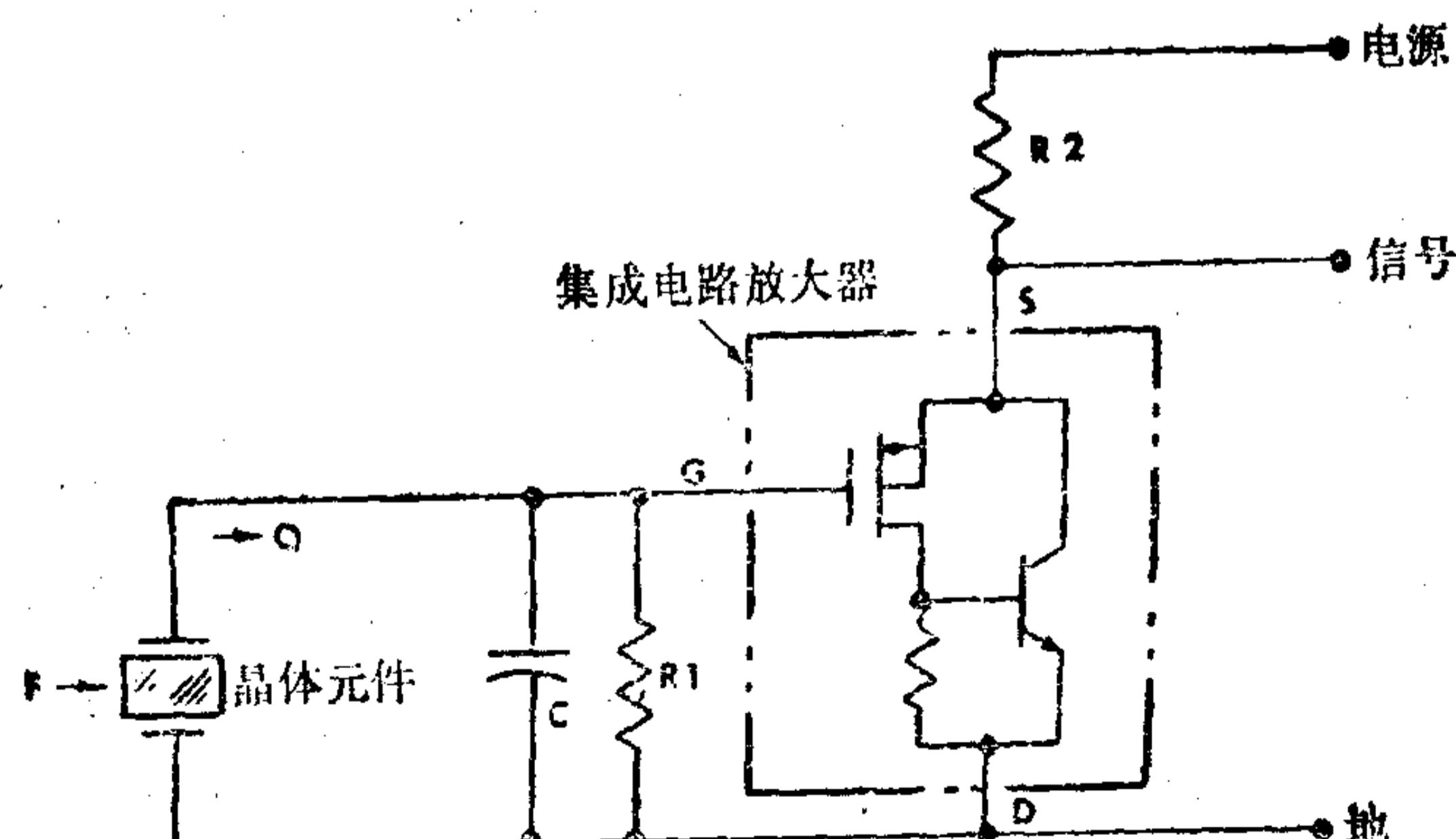


图3-5 带有内部集成电路放大器的典型压电式传感器的示意图

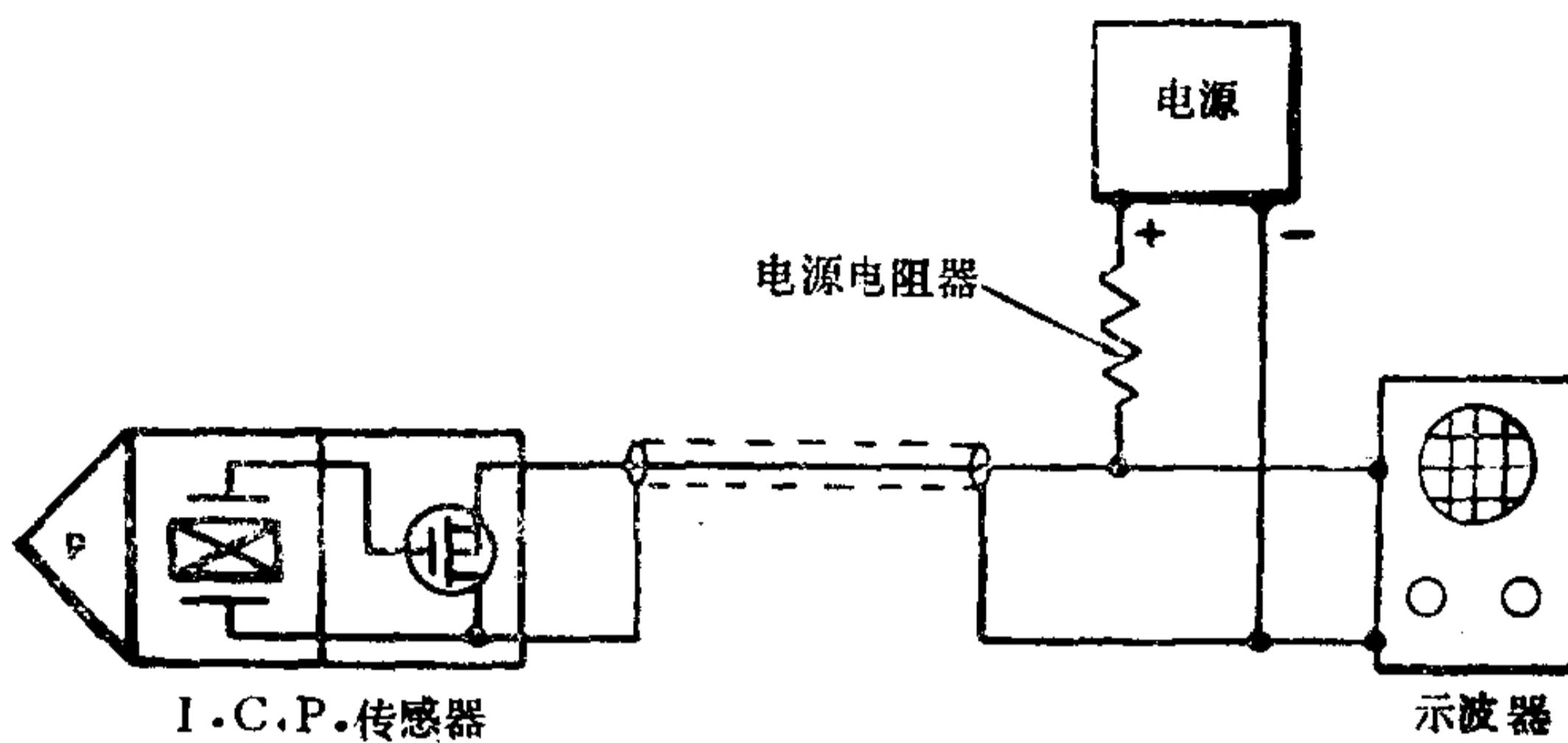


图3-6 压电式传感器与内部电子设备的典型连接方式^[16]

放大器把这个信号转换成幅值相等，极性相同的输出端电压变化。加速度计的幅值范围通常取决于与压电元件并联的衰减电容。

尽管这类专门的信号调节器在特定的使用中是合适的，但应当考虑到两点局限性。第一，因为靠改变放大器增益来得到适宜的加速度变化范围是困难的，所以减小了动态量程；第二，高响应受集成电路放大器的有限功率所局限。

工作特性

对压电式加速度计来说，不论使用电荷放大器或电压放大器，其特性都保持不变。这些特性是频率响应、谐振频率以及用石英和适当的陶瓷材料制造的加速度计的幅值线性等。对于使用电荷放大器和电压放大器这两种情况来说，用锆钛酸铅陶瓷制造的加速度计的频率响应及谐振频率稍有不同。除使用石英晶体制造的加速度计以外，绝大多数的加速度计在使用电荷放大器和电压放大器时，温度响应略有不同。

加速度灵敏度 表3-2列出了各类压电式加速度计的加速度灵敏度。为简便起见，加速度灵敏度都化成10的倍数。加速度灵敏度取决于加速度计本身的设计。只要在设计时选用各种不同的陶瓷和质量元件，就可制出具有不同灵敏度的加速度计。例如，使用锆钛酸铅陶瓷的剪切型加速度计的灵敏度大约为1皮库仑/g

至10皮库仑/g。通常，剪切型加速度计用一块或两块陶瓷元件制成；压缩型加速度计常常用几块电并联的陶瓷元件制成。此时，电荷灵敏度由陶瓷元件所产生的总电荷来决定。

用锆钛酸铅陶瓷制造的加速度计的加速度灵敏度最高。因此，它们有很多用处，其中包括测量较低的加速度。

石英加速度计具有可能达到的最低加速度灵敏度。用Endevco公司Piezite^①型陶瓷制造的加速度计，灵敏度介于上述的二种加速度计之间（见表3-2）。

频率响应 各种加速度计的典型频响特性示于图3-7。

用P-6和P-8^②陶瓷材料制造的加速度计，每当（频率）增加一倍频程，电荷灵敏度下降约1%。这是锆钛酸铅加速度计的典型数据。很巧，这些加速度计的电容具有相同的频率特性。因此，如果希望求得加速度计的电压灵敏度，把在电容测量频率上的电荷灵敏度，除以加速度计电容、电缆电容及其他连接加速度计的电容之和即可。使用电荷放大器时，就不必做这个计算。用P-10^③陶瓷材料和石英制造的加速度计与上述所说加速度计的频率特性不同，其电荷和电压灵敏度在直到谐振频率的大约五分之一的频率上都为常数。与所有加速度计一样，它的灵敏度在高频上的增加是由于谐振频率引起的。

表3-2 压电式加速度计灵敏度^[15]

晶 体 材 料	设 计 型 式	电 容(皮 法)	加速度灵敏度	
			电 荷 (皮库仑/g)	电 压 (毫伏/g)
锆钛酸铅	剪 切	1000	1—10	1—10
	压 缩	1000—10 000	10—100	10—100
石 英	压 缩	100	1	10
Endevco P-10	剪 切	100	0.1	1
	压 缩	1000	1—10	1—10

① Piezite 是美国加利福尼亚州 Endevco 公司的注册商标。

② P-6, P-8 和 P-10 是美国加利福尼亚州 Endevco 公司生产的专利材料。

应当指出，当加速度计与电压放大器之间的连接电容非常小时，所有加速度计的频率特性，与图 3-7 中 P-10 的特性相类似，即曲线都是平的。当加速度计具有小的外部电容时，它实际上处于开路状态。但是，如果外部电容，包括电缆电容，接近或大于加速度计电容的 3 倍时，加速度计实际上处于短路状态。因此，

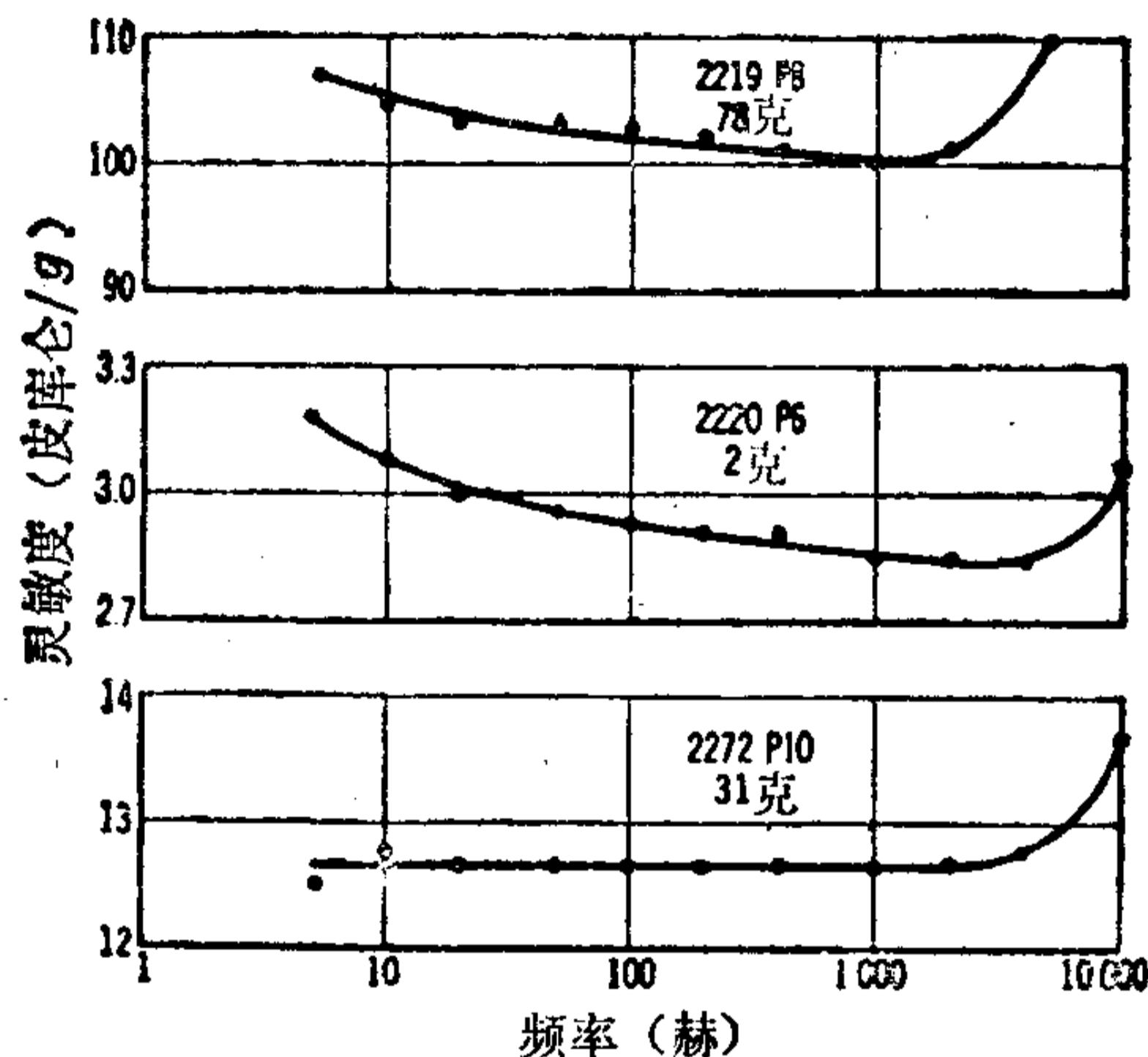


图 3-7 不同晶体材料的三种压电式加速度计的电荷频响特性

在外部电容大的情况下，不论使用电压放大器还是电荷放大器，所有加速度计的响应是一样的，且图 3-7 中的曲线都适用。如果外部电容的值在加速度计电容的 1—3 倍之间，那么，使用电压放大器的锆钛酸铅加速度计的响应曲线，在图 3-7 的两条较低曲线之间。这时，频率每增长一倍频程，灵敏度的减小在 1% 之内，数值的大小由外部的总电容决定。

电荷放大器可用于大多数的冲击和振动测量，并且这时可使用图 3-7 中的特性曲线。一般不做频响不平度的修正。通常的做法是先考虑要求和精度，然后选择加速度计的类型和谐振频率，以消除不必要的误差。

谐振频率 加速度计的谐振频率会随安装刚度而稍微改变。谐振频率的典型变化示于图 3-8。最大刚性安装和最高谐振频率，是通过使用带润滑表面的金属螺栓，或把加速度计胶接在合

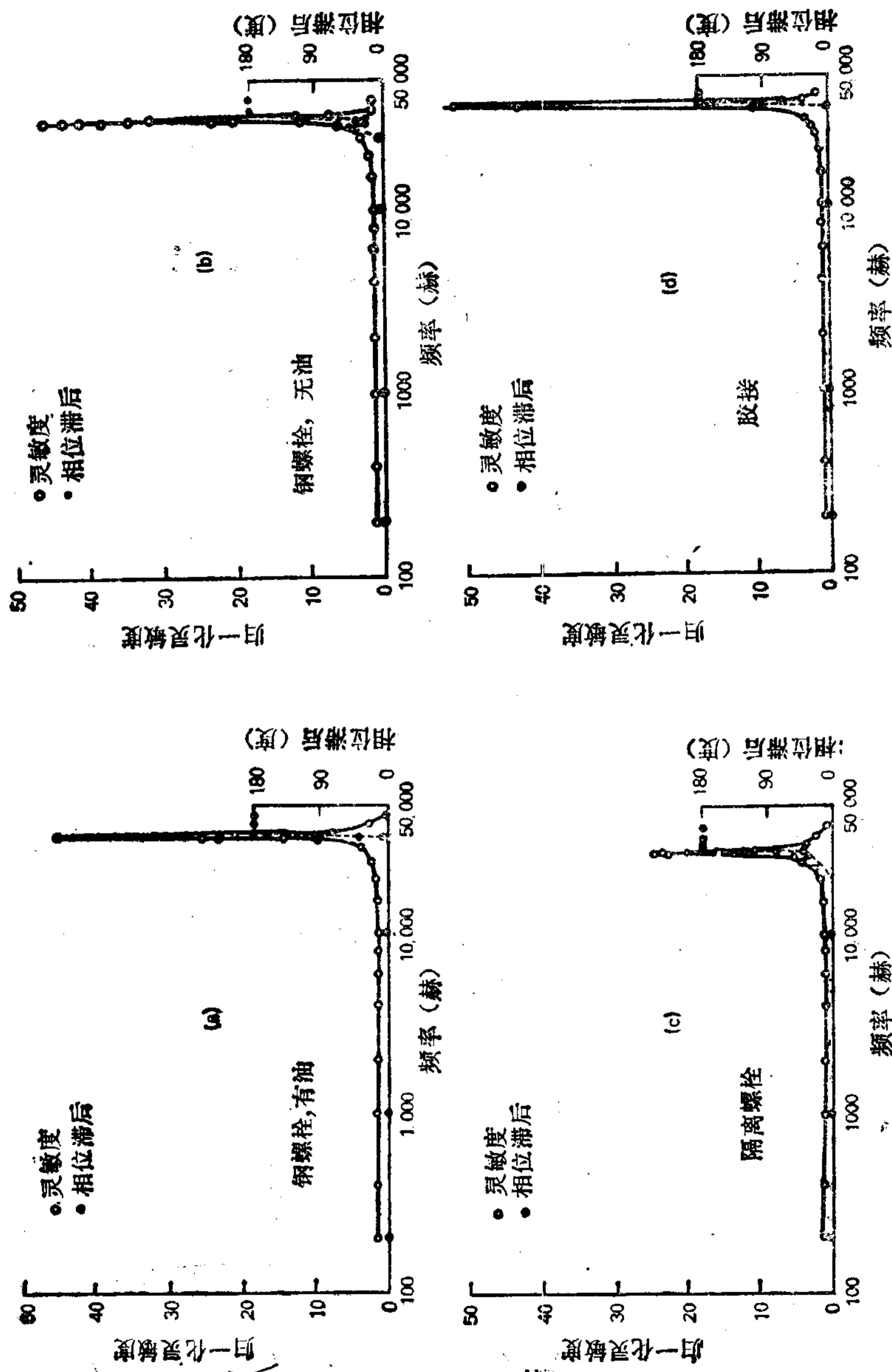


图3-8 不同安装情况下压电加速度计的谐振频率
 (a) 使用加有轻油薄膜的钢螺栓 (b) 使用安装面无油的钢螺栓 (c) 使用隔离安装螺栓 (d) 不用螺栓而用 Eastman 910胶粘接^[17]



使用电荷放大器还是使用电压放大器，加速度计中的阻尼将不变。

幅值线性 压电加速度计的灵敏度随加速度的增加而线性增加，如图 3-9 所示。所增加的数值既依赖于加速度计所用的压电材料，也依赖于加速度计的设计。在晶体上的动应力比较小的加速度计，在加速度高时灵敏度增长较小。在加速度计中使用小的质量元件就可以实现这一点。

当使用大的质量元件时，动态应力比较大，并且，对于某些加速度计，在高加速度时，灵敏度增长很明显。例如，锆钛酸铅加速度计的电荷灵敏度为 10 皮库仑/g，加速度每增加 250 g，其灵

表3-3 压电式加速度计使用电压、电荷放大器时的典型谐振频率特性

加速度计 类 型	晶体材料	谐 振 频 率			放 大 倍 数	
		开路电压 (千赫)	短路电荷 (千赫)	变化量 (%)	开路电压	短路电荷
压 缩	锆钛酸铅	30.84	29.65	-3.9	57	33
压 缩	◆	15.40	14.92	-3.1	70	62
剪 切	◆	34.2	33.0	-3.5	38	66
剪 切	◆	32.2	32.0	-0.6	35	35
压 缩	石 英	32.2	32.2	0.0	23	24
压 缩	Endevco P-10	29.6	29.6	0.0	45	47

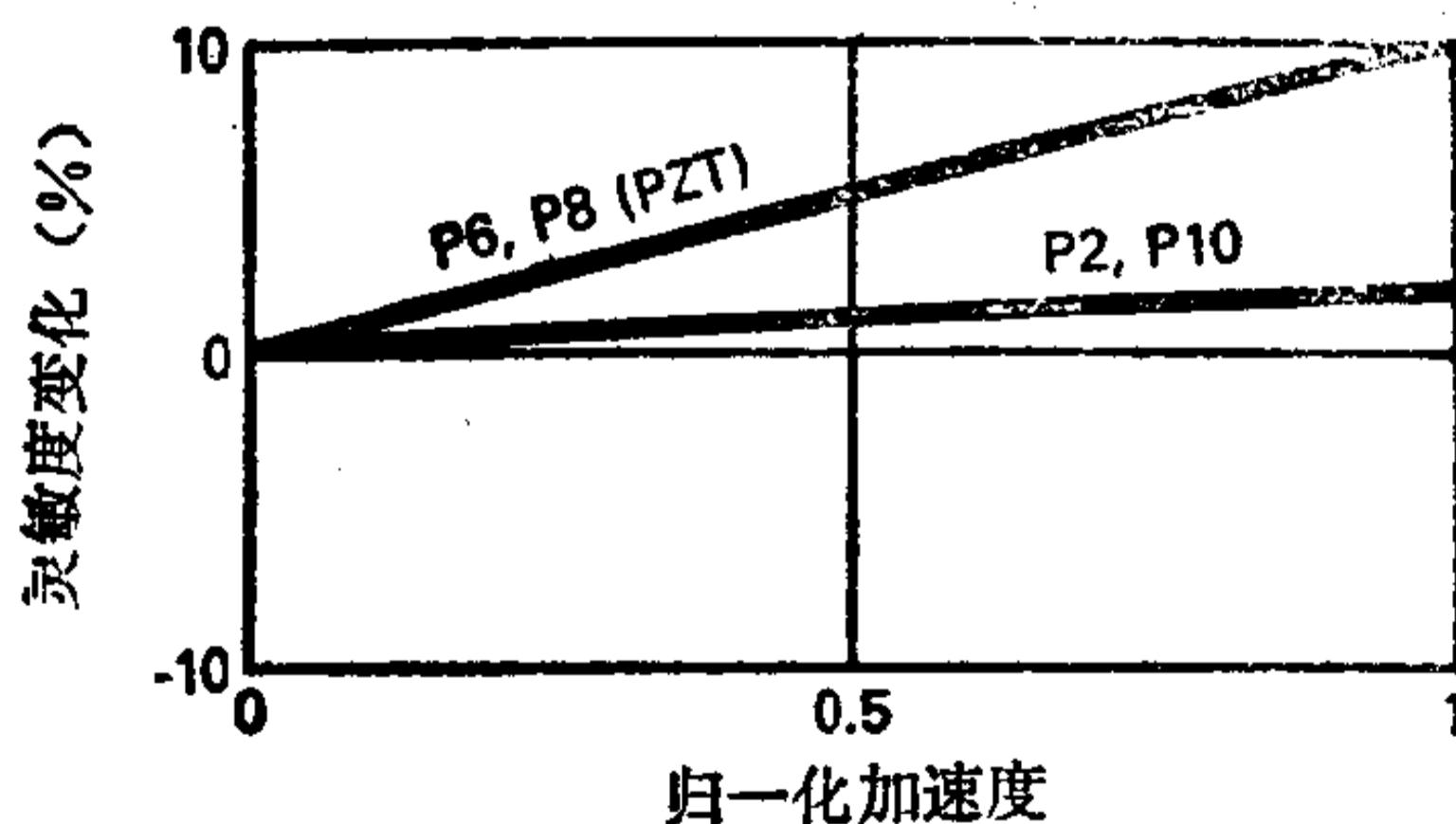


图3-9 压电式加速度计的灵敏度随加速度增加而增大的典型曲线^[15]

敏度增长1%；而一个具有较小质量元件的类似的加速度计的灵敏度为1皮库仑/g，其灵敏度每2500g仅增长1%。用P-10制成的加速度计，其灵敏度的增长很小，如图3-9所示。如在测量高加速度时，选用低灵敏度的加速度计，在冲击和振动测量中，线性误差就不显著。

温度响应 压电式加速度计的灵敏度随温度而变化。倘若在设计加速度计时非常注意，这种变化就只归因于晶体元件压电常数的改变。温度引起的典型的灵敏度变化示于图3-10。用P-10陶瓷或石英制造的加速度计的灵敏度变化十分小。用P-10陶瓷制成的加速度计的使用温度范围最宽。

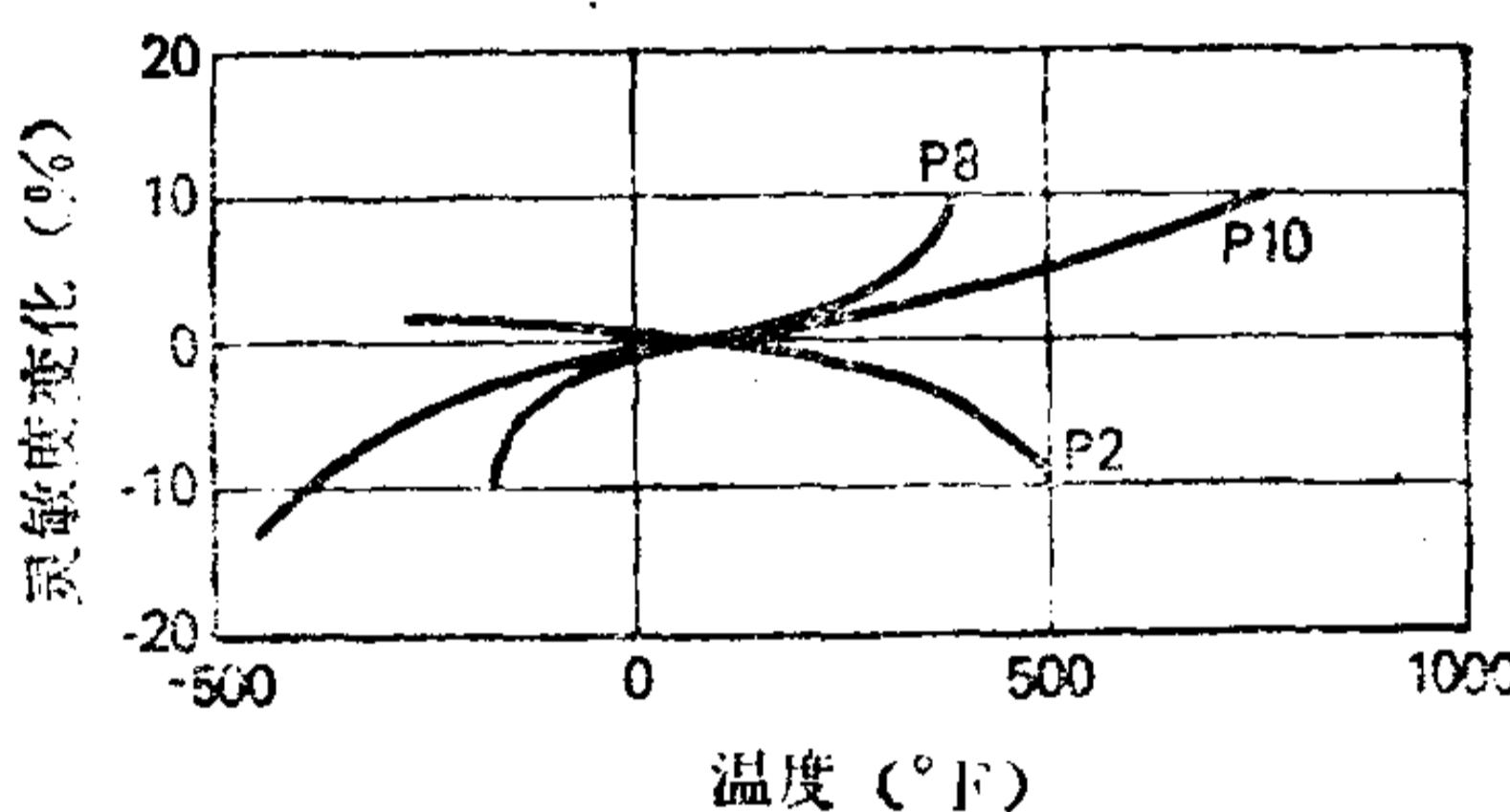


图3-10 典型的温度响应特性（不同晶体材料的压电式加速度计的电荷灵敏度的变化^[13]）

在整个使用温度范围内，加速度计材料的弹性模量和阻尼的变化比较小。因此，加速度计的谐振频率在使用温度范围内变化很小。由于加速度计的使用频率上限仅为谐振频率的五分之一，所以在整个使用温度范围内，它们的频响是常量。

通常，不需要对加速度计灵敏度因温度而变化的数据作修正。选用在所要求的温度范围内，灵敏度变化小到可以不必进行修正的加速度计，是一种切实可行的办法。但是，对于低于大约-184°C (-300°F) 和高于大约260°C (500°F) 的温度上的测量值可能例外，这时灵敏度变化已超过5%。

大多数压电式加速度计的电容都随温度变化。优质加速度计

电容随温度的变化大约是电荷灵敏度变化的两倍，而电压灵敏度等于电荷灵敏度与电容之比。因此，当使用电压放大器时，灵敏度随外部电容的改变而明显变化。这是对压电式加速度计人们喜欢配用电荷放大器的原因之一。

环境影响

环境影响与加速度计在其工作特性不发生永久性变化情况下所能经受的极端环境有关。当进行冲击和振动测量时，某些环境还会引起错误的加速度计输出信号。必须对下述环境影响特征加以鉴别，其理由之一，在于对由环境产生的错误数据进行修正一般是不现实的。但是，如果加速度计使用合理，那么环境误差是不大的。通过识别各种环境的影响和慎重使用加速度计，就可避免测量误差。

横向灵敏度 加速度计中晶体的灵敏轴会稍微偏离安装面的垂向。这是由于在制造陶瓷材料以及加工加速度计各种元件时，受到实际的限制造成的。另外，对于某些设计型式的加速度计，其晶体上有预应力，这些预应力导致晶体的极轴发生少许改变。在加速度计中这些影响累积在一起，使加速度计在受到沿加速度计安装面平行方向的激励时，产生一定的输出。

如图 3-11 所示，晶体的极轴用 XZ 平面内的一个矢量表示。加速度计的安装面位于 XY 平面上。一个作用在 XY 平面上的横向加速度 G 沿 X 轴的分量是 $G \cos \phi$ 。这个 X 轴上的分量沿晶体极轴又有一个分量 $G \cos \phi \sin \theta$ 。作用在垂直于安装面方向上的加速度 G 沿晶体极轴方向的分量是 $G \cos \theta$ 。加速度计的所谓横向灵敏度比是沿极轴方向的这两个分量之比：

$$\text{横向灵敏度比} = \tan \theta \cos \phi \times 100\% \quad (3-8)$$

对每个加速度计，假定晶体的极轴没有因环境影响而改变， $\tan \theta$ 就是一个固定的值。角 ϕ 取决于作用在安装面平面上的运动的方向。因此，当加速度计绕 Z 轴旋转时，横向灵敏度改变。横向灵敏度比随 ϕ 的余弦变化的曲线示于图 3-12。

一些实验工作者把这种变化的曲线绘制在极坐标纸上。通

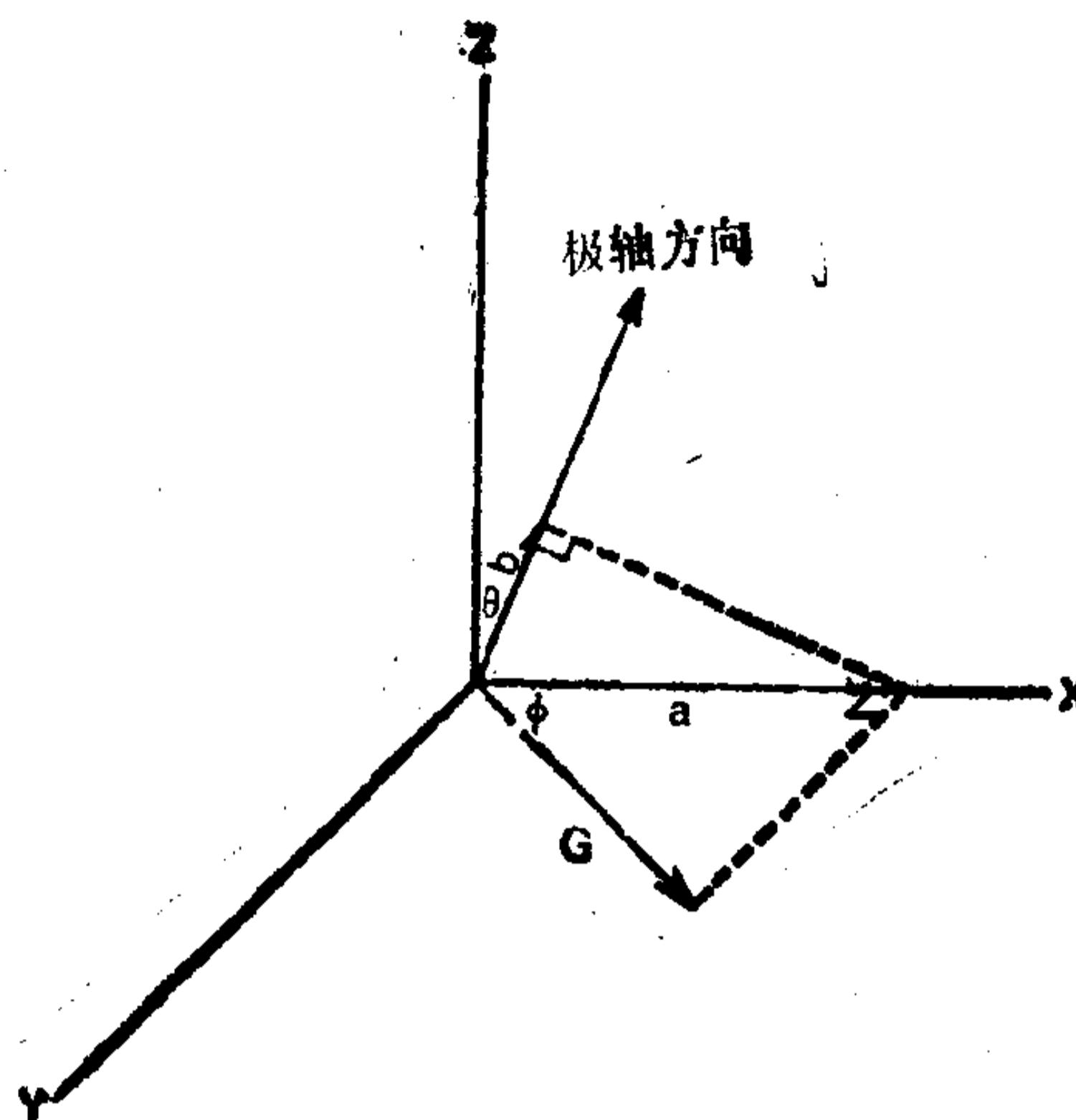


图3-11 横向加速度和轴向加速度沿加速度灵敏方向的输出^[15]

常，横向灵敏度很小，一般只考虑图3-12中的最大值。在实际应用中，总可这样地挑选加速度计，即使其最大横向灵敏度足够小，以致可把在大部分冲击、振动测试中产生的误差忽略不计。制造者提供的横向灵敏度数值是横向灵敏度的最大值。

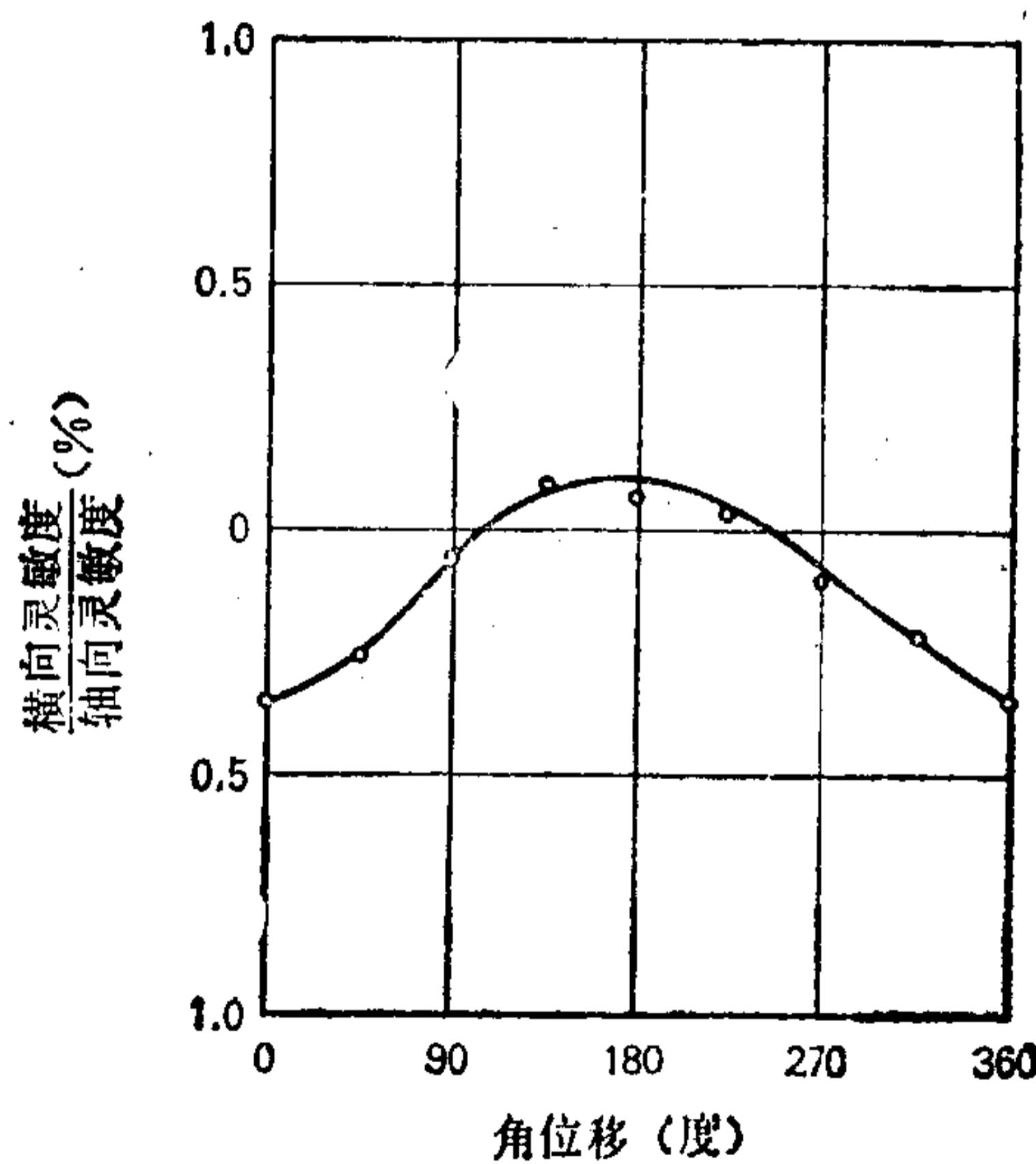
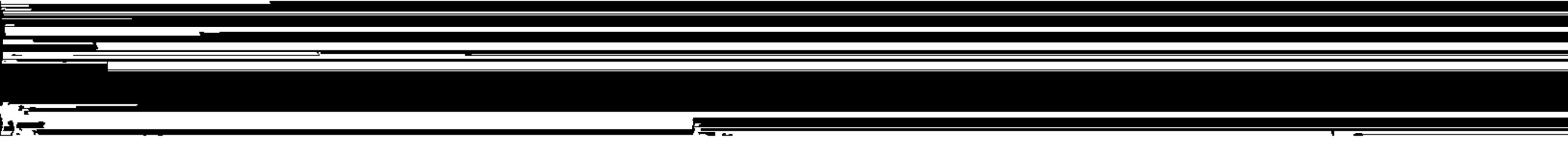


图3-12 压电加速度计绕其灵敏轴旋转时横向灵敏度比的变化^[16]



度计不产生第一类热电输出，并且温度变化对它的影响通常要比压缩型加速度计小，而压缩型加速度计一定产生第一类热电输出。

所有的陶瓷晶体都产生第二类热电输出，而石英只产生第三类热电输出。因此，如果放大器要在接近或低于 0.1 赫的频率上使用，宜选用石英加速度计。长脉冲（如持续时间为 100 毫秒的脉冲）冲击试验，就需要这样的放大器。在大部分冲击和振动测试应用中，都使用截止频率接近或大于 2 赫的放大器。这时不出现热电输出引起的误差。

辐射影响 在核反应如原子裂变中，会产生粒子的轰击。这些粒子与周围原子碰撞，伴随 γ 射线和中子的释放，同时产生热。大剂量的核辐射，会影响材料的性能；对于中等剂量的情况来说，加速度计除了会遇到在其他应用中的环境之外，还会遇到一个由核辐射形成的温度环境。

裂变反应可用铀 235 产生。当一个自由中子撞击重铀 235 的原子核时，原子核被打碎成两块，并释放出二至三个新的中子。飞出的碎块与周围的原子相碰撞，其动能转换成热。被释放出来的中子又使其它原子核引起新的裂变，如此产生链锁反应。每秒钟发生大约三百亿次裂变，并释放出一瓦特的能量。核反应堆的作用在于控制裂变反应，把核能转换成电能。

聚变是原子核释放能量的另一方式。然而，一个聚变反应需要几百万度的温度。在裂变反应中，能获得这样高的温度，所以可用它来引起聚变反应。氘和氚是氢的重同位素，它们的原子核的结合就形成氦核。聚变用来产生热核爆炸，这个爆炸要比纯裂变爆炸强得多。

在裂变过程中，释放出高速运动的中子，它们很难停下来。中子通过发射 γ 射线的形式被释放出来。 γ 射线携带着能量，其特性类似于 X 射线。中子和 γ 射线会被换能器中的材料所吸收。除了对材料性质的一般热影响外，足够大的辐射剂量能在材料内部引起永久性改变。中子数密度是每立方厘米的中子数目；中子通量密度是中子密度乘以粒子的平均速度，单位为个/厘米²·秒；时

间累积通量是通量密度乘以暴露时间，单位为个/厘米²；符号 R 表示伦琴当量单位，用它来量度 γ 射线，1 伦琴 当量是电离辐射的剂量，它在一克空气中产生 84 尔格的能量吸收(或在一克碳上产生 87 尔格的能量吸收)；另一使用的单位是拉德，它等于 100 尔格/克(碳) $[1 \times 10^{-5} \text{ 焦耳}/\text{克(碳)}]$ 。

只有相当大剂量的辐射，才能损坏加速度计内的材料。因而，在大部分核应用中，加速度计仅受由辐射场产生的热或测量误差的影响。用辐射硬化处理过的元件制成的加速度计，直接因辐射产生的永久性损坏即使有，也是很小的。

大剂量的辐射会引起压电材料的去极化。所以 X 射线一直用来修正频率特性（辐射可使晶体的谐振频率降低）。辐射对石英晶体的影响比对锆钛酸铅的影响小。中子累积通量接近 10^{20} 个/厘米² 时，晶体就要发生辐射损坏。然而，有关压电式加速度计在如此高强度辐射下的试验资料如今还没有。在高达 10^{18} 个/厘米² 的情况下，压电式加速度计中的压电晶体没有任何晶格变化。但这时要避免使用聚四氟乙烯之类的有机材料，因为这些有机材料会被核辐射损坏，其绝缘电阻会被击穿而失灵。大部分耐辐射加速度计都是压电型的。然而，在更恶劣的环境下，就需要按照厂家的建议，采用高温陶瓷制造的加速度计。

安装条件 加速度计会稍微改变安装它的结构或元件的运动，从而对不装加速度计时的运动测量产生一个微小的误差。这个误差通常是无关紧要的，只有在轻型柔性结构上进行测量时，才需要考虑。在进行这种测量时，需选用非常轻的加速度计。具体要求是加速度计的动态质量要小于安装处的结构的动态质量。加速度计动态质量的值，等于它的总重量，因为加速度计在整个使用频率范围上，表现为一个刚体。如果加速度计安装处的结构的横截面尺寸比加速度计的尺寸大，那么结构的动态质量就足够大。薄板、梁、蒙皮和电路板结构动态质量可能比较小，在谐振频率上尤其是这样。因为重量为几分之一克的压电加速度计现在都可以得到，所以即使在这些结构上，也能做精确测量。

在某些极端情况下，加速度计或结构安装面上的应力很高，加速度计外壳会产生严重变形。这些应力可能是由于机械载荷或受热不均匀产生的。使梁振动幅度达到曲率半径 1000 英寸（25.4 米）、弯曲形变 250 个微应变，就可以确定应变对加速度计的影响。有关试验的条件可在已出版的标准中查到。多数剪切型加速度计的应变灵敏度都很低，在大部分试验应用中，其安装应变可忽略不计；压缩型加速度计的应变灵敏度常常很高。高性能（例如谐振频率和额定加速度极高）的加速度计，由应变产生的输出误差往往比其它加速度计大。在结构表面的静或动应变接近或大于 250 微应变的情况下，最理想的方法是用隔离螺栓或刚性支架作为应变过滤器。而这只有在使用高性能加速度计，要求测量低加速度，而且预计有大的应变时才考虑使用。更好的办法是选用振动灵敏度高，因而应变灵敏度低的加速度计。

声灵敏度 尽管现代的加速度计在受到高声强声场作用时，信号误差可忽略不计，但是考察一下作用在加速度计外壳上的气体或流体的压力的情况是很有意思的。加速度计在声场中所受到的力与流体动压力的类型相同。

当压力作用在加速度计壳体上时，壳体变形，并由于加速度计内气体的压缩和膨胀，在晶体上产生一个压力。对典型压缩型加速度计的近似计算表明，加速度计的刚度足以使压力衰减 55 分贝左右，而且所产生的误差信号的数值大约为 $0.003 \text{ g}/(\text{磅力}/\text{英寸}^2)$ 。

加速度计外部的压力在加速度计底座中产生一个径向应变。很多压缩型加速度计的晶体都安装在底座内表面上，并且在这些加速度计中，晶体的径向应变相同。因此，陶瓷材料产生一个压电常数为 d_{31} 的输出。压缩型加速度计由于径向应变产生的典型误差大约是 $0.03 \text{ g}/(\text{磅力}/\text{英寸}^2)$ 。

对于剪切型加速度计，由内部气体压力和径向应变所产生的误差信号非常小，可认为等于零。

第三种影响存在于所有的加速度计里，它是由于外部压力改变了加速度计底座的高度而产生的。对于动应力，底座高度的这种

变化使加速度计晶体产生一个运动。底座上表面的等效加速度随频率增大而增大。对于典型加速度计，这种影响所产生的误差在10 000 赫时大约是 0.04 g/(磅力/英寸²)，在较低频率时则小得多。

当加速度计受到强声场作用时，所有这些误差都可以忽略不计。因为很难把上面提到的输出与声场加到加速度计安装面上的加速度的输出分开，因此所记录到的声灵敏度值是不真实的。换句话说，加速度计真正测量到的是它本身的加速度，尽管这个加速度是由声场作用到安装加速度计的结构上产生的。

3.2 电阻丝式加速度计和 压阻式加速度计

电阻丝应变计被广泛地应用于许多领域中。这种应变计是用一根极精细的金属丝制成的。当金属丝的长度由于与它相连的结构产生应变而发生改变时，其电阻也随之改变。按此原理工作的电阻丝应变计式加速度计，被应用于在有限频率范围内，对中等加速度进行冲击和振动测量中。它是用一个精细的金属丝应变元件来支撑一个质量元件，而质量元件与加速度计壳体连在一起。因为金属丝所用材料的应变系数限制在 2 左右，所以这种加速度计的加速度灵敏度较低。

近来，已研制出用应变系数很高的压阻材料制成的应变计。现在，压阻应变计元件被用于冲击和振动测量使用的各种加速度计中。由于应变系数高，压阻式加速度计比电阻丝应变式加速度计具有更高的灵敏度和更高的使用频率范围。

应变传感材料的应变系数，等于它的电阻的改变量与初始电阻之比除以它的长度的改变量与初始长度之比。压阻材料的应变系数由下式给出：

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = (1 + 2\mu + E\pi_1) \quad (3-9)$$

式中 K ——电阻元件的应变系数；
 ΔR ——阻值的改变量；
 R ——初始阻值；
 ΔL ——电阻元件长度的改变量；
 L ——电阻元件的初始长度；
 μ ——传感材料的泊松比；
 E ——传感材料的弹性模量；
 π_1 ——传感材料的压阻系数。

式中前两项之和 $1 + 2\mu$ ，大约为 2，这个数值恰好是通常电阻丝应变计的应变系数，因为对于电阻丝应变计说来， π_1 接近零。对于压阻材料，第三项 $E\pi_1$ ，可远远超过 100（约等于电阻丝应变计应变系数的 50 倍）。因此加速度计能够得到高的谐振频率和高的灵敏度。

压阻式应变计元件装入加速度计时，要使应变计长度的变化与加速度计中的质量元件对壳体的相对运动成正比。因此，上式中电阻的改变量可用下式表示：

$$\Delta R = C_2 \delta \quad (3-10)$$

式中 C_2 ——由加速度计的特定设计所决定的常数；
 δ ——质量元件相对于加速度计底座的扰度。

式 (3-10) 表明，压阻式加速度计将具有惯性加速度计理论响应那样的频响特性。很多压阻式加速度计的谐振频率接近或高于 30 000 赫，这很象压电式加速度计。在这些高频加速度计里，要想人为地加阻尼是困难的，所以使用零阻尼的理论曲线。因此，这些加速度计的正常使用范围可达到谐振频率的约五分之一处，在此频率处，灵敏度的增加低于 5%。压阻式加速度计的一个重要的特点是它们的灵敏度直到零频都是常数。因此，它被用来测量恒定加速度以及持续时间长的冲击运动。压阻式加速度计也有谐振频率远低于 5000 赫的。对于这些低频加速度计，可以人为地加入阻尼，并使用阻尼比为 0.7 的理论曲线。

压阻式加速度计的内部结构示于图 3-13^[14]。压阻应变计元件

用 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 表示。这些元件被固定于在圆柱形构件上加工出来的槽的每一边。当沿着灵敏轴的方向, 给加速度计的底部一个向上的运动作用时, 质量元件在圆柱体的那一部分就稍稍向底面弯曲, 同时引起 R_1 和 R_3 长度和电阻的增加, 而 R_2 和 R_4 的长度和电阻减少。象其它的电阻应变计一样, 把压阻元件接在一个惠斯顿电桥里。在电桥的输入端加一直流电压触发, 在作用到加速度计上的加速度随时间变化的同时, 电桥的输出电压也随时间变化。通常, 这个电压输出不需要放大, 就可通过适用于其它应变加速度计的仪器来测量。如果需要, 可使用别的仪器, 如直流电源、直流放大器(它们通常与应变计电路一起使用)等。

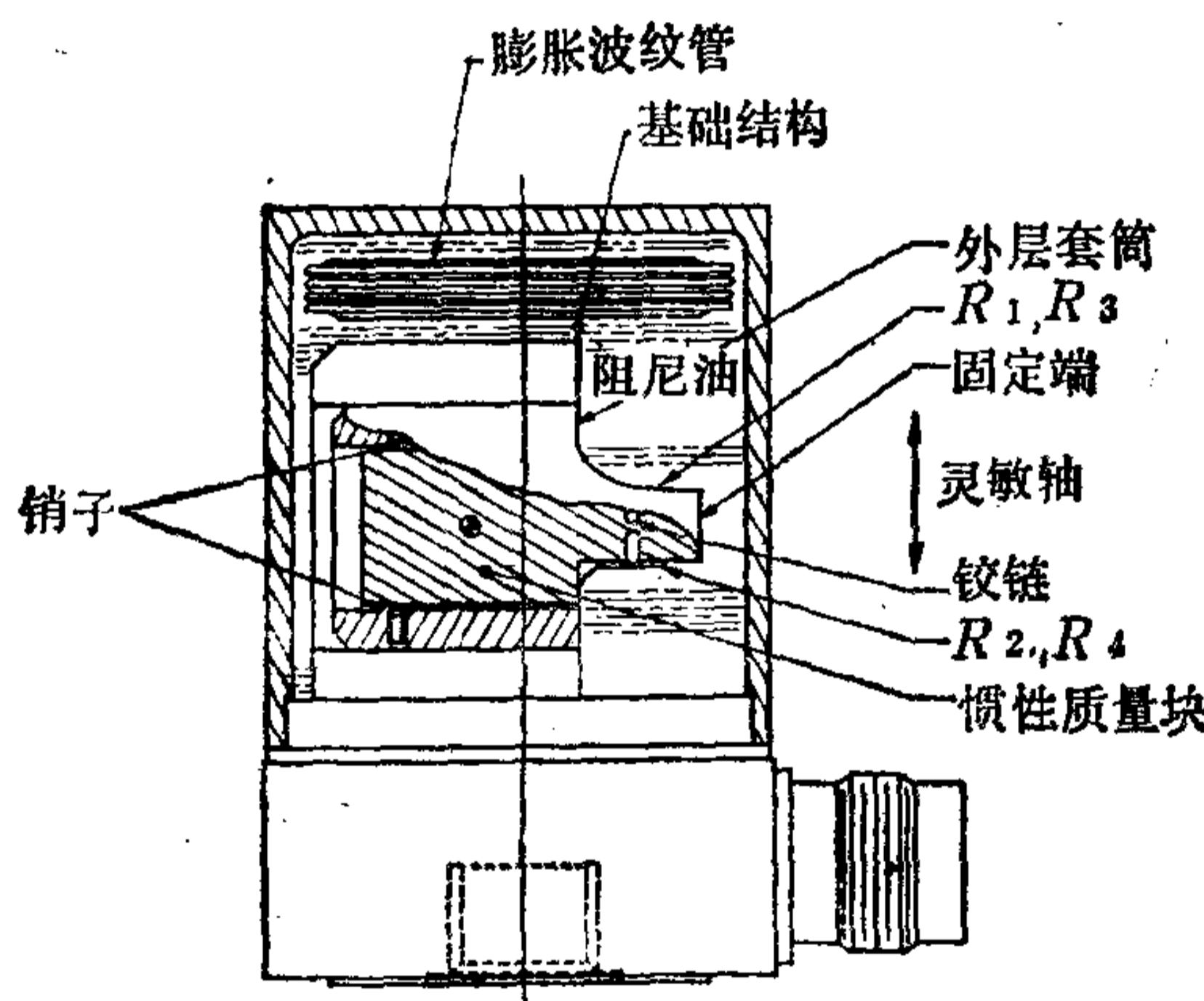


图3-13 压阻式加速度计的内部结构

特性 表3-4简要地给出了压阻式加速度计性能数据。

除具有表中所列加速度范围的加速度计以外, 加速度范围高于或低于2500g的其他压阻式加速度计也可得到。这些加速度计的灵敏度与它们的加速度范围有关。设计用来测量高强度冲击运动的加速度计, 具有低的灵敏度。高灵敏度(例如50毫伏/g)的加速度计, 用于上限为25 g的低加速度振动测量。表3-4中给出的灵敏度适用于在惠斯顿电桥的输入上加额定激励电压的情况。

对压阻式加速度计进行冲击和振动校准的结果示于图3-14

表3-4 压阻加速度计的典型性能^[15]数据

项 目	高 加 速 度 型	低 加 速 度 型
加速度范围 (g)	±2500	±25
灵敏度 (毫伏/ g)	0.1	50
激励电压 (直流, 伏)	10	24
谐振频率 (赫)	30 000	2700
阻尼比	0.03	0.4—0.7
频率范围 (赫)	0—6000	0—750 ^①
温度范围 (°C 或 °F)	-54 到 121 (-65 到 +250)	-7 到 93 (20 到 +200)
电阻 (欧姆)	500	1500
横向灵敏度比 (%)	<3	<3

①指在整个工作温度范围内可取的频率范围。

中。这些数据表明，灵敏度在整个加速度计工作范围内保持不变。冲击校准表明压阻式加速度计无零漂，零漂往往出现在用于高加速度测量的压电式加速度计中。由此，在需要对加速度计输出进行电路积分以确定冲击试验应用中的速度变化的情况下，使用压阻式加速度计更合适。

阻尼近似为零的压阻式加速度计的频响特性与压电式加速度计的频响特性相类似。有油阻尼的加速度计，谐振频率为2700赫。室温下，阻尼值在临界阻尼0.4—0.7倍范围内。具有这种阻尼值的加速度计，对于从0到750赫的频率范围内，灵敏度在整个工作温度范围内几乎是常数。使用油阻尼的压阻式加速度计可用

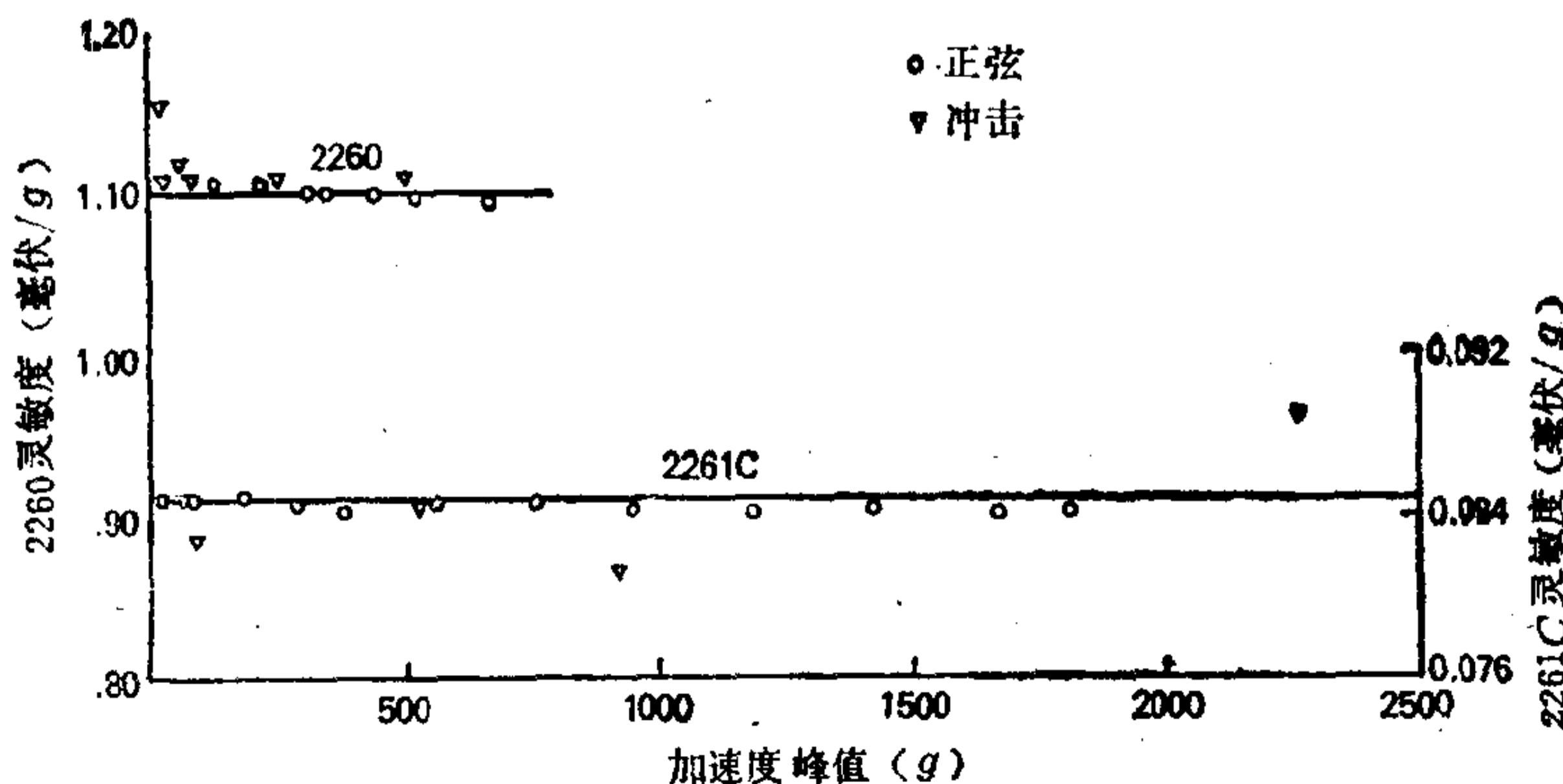


图3-14 典型的压阻式加速度计线性特性校准结果

于 -7°C 到 93°C ($20-200^{\circ}\text{F}$) 的温度范围。

在温度比较高时，油的粘性减小，阻尼变小；温度比较低时，油的粘性增大，阻尼变大。因此，频响特性随温度而变化，如图3-15a所示。

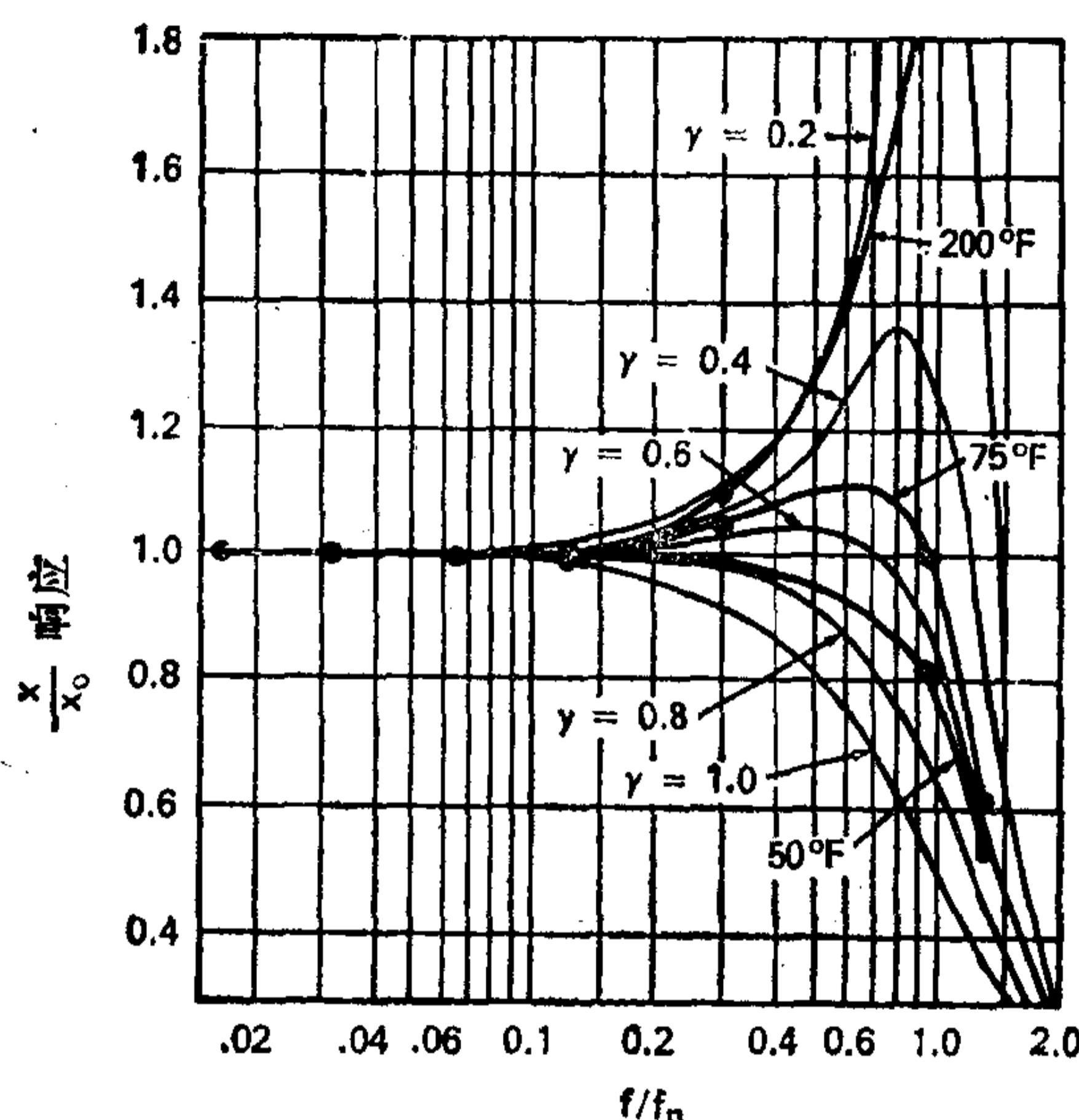


图3-15a 带有油阻尼的压阻式加速度计的典型频响

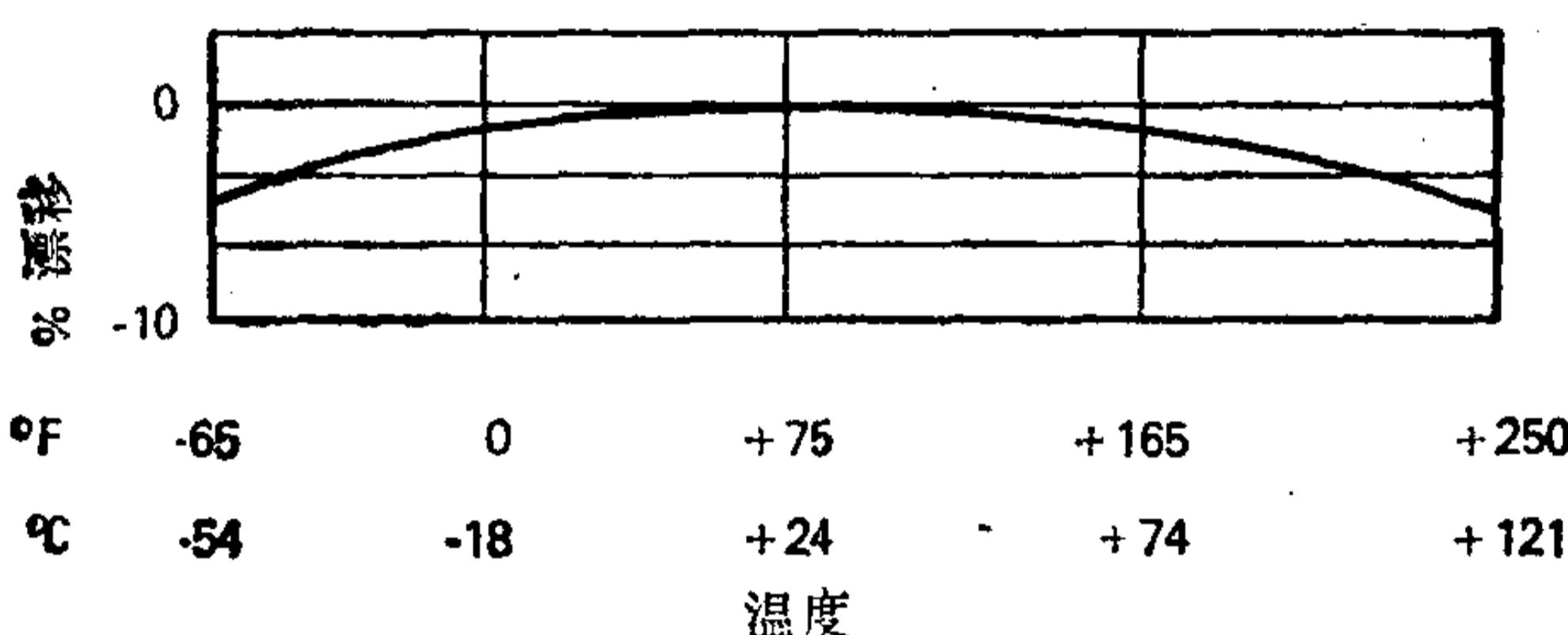


图3-15b 压阻式加速度计的典型温度响应^[15]

在温度为 93°C (200°F) 的情况下，阻尼值大约为临界阻尼的 1.2 倍；而温度为 10°C (50°F) 时，阻尼值大约为临界阻尼的 0.7 倍。对于油阻尼加速度计，如果它通常是在极端的温度下使用的，那么最好做整个工作温度范围上的频响校准。除了谐振频

率附近的频响随温度变化以外，灵敏度也随温度变化，如图 3-15b 所示。这与无阻尼的压阻式和压电式加速度计的情况类似。灵敏度的这个变化是由应变系数的变化引起的，并由弹性模量的温度特性，以及压阻灵敏元件的压阻系数所决定。在压阻式加速度计里的电桥上加补偿电阻，可把灵敏度漂移限制到最小（见图 3-15b）。

影响加速度计的一个决定性因素，是温度变化时，会导致桥路轻微的不平衡。这是由于灵敏元件的阻值随温度变化稍有不同造成的。电阻的变化使电桥输出的直流电压产生一微小变化。在压阻式加速度计的设计中，就应注意到使直流电压输出的变化，只占加速度计最大额定加速度输出的一小部分。

环境影响 在横向灵敏度的环境特性以及加速度计质量块对结构运动的影响方面，压阻式加速度计与压电式加速度计相类似。压阻式加速度计通常具有接近或低于 3% 的最大横向灵敏度典型值。正象对压电式加速度计一样，对压阻式加速度计也要加以挑选，以使其质量比安装处结构的质量（用其横截面的大小来描述）小得多。这样，加速度计就不会严重地改变结构的运动。这通常靠认真选择结构上的安装位置来满足。

压阻式加速度计能经受比它本身的额定加速度高很多的冲击和振动加速度。但是，所使用的压阻材料相当脆，因而需要限制所施加的应变量。在设计测量强冲击运动用的加速度计时，应使运动元件符合这种要求，即哪怕是遇到了在正常情况下最强的冲击运动，也能避免过大的应力。设计用于相当低的加速度测量的高灵敏度压阻式加速度计时，也需加以注意。这时可在内部设计些限制质量元件运动的止动器，以尽量减小其应力。这些止动器对加速度为额定加速度若干倍的扰动起约束作用。

在极其剧烈的冲击中使用压阻式加速度计时，必须特别小心，以免遭受损坏。例如，由水下爆炸引起的船体结构冲击运动会产生一个高频激励，这个高频激励会激起加速度计的谐振而造成破坏。为了克服这一点，可把加速度计安装在隔离机械冲击的

支架上，而这个支架固定在结构上。如图 3-16 所示。其中氨基甲酸乙脂圆盘具有足够的刚度，用以支撑加速度计和钢块，滤掉高频，以防遭到破坏。当然，这个冲击隔离系统的传递性对被测冲击运动的所有频率分量几乎是一致的。这种加速度计的安装方法，可用于类似的冲击测量上。

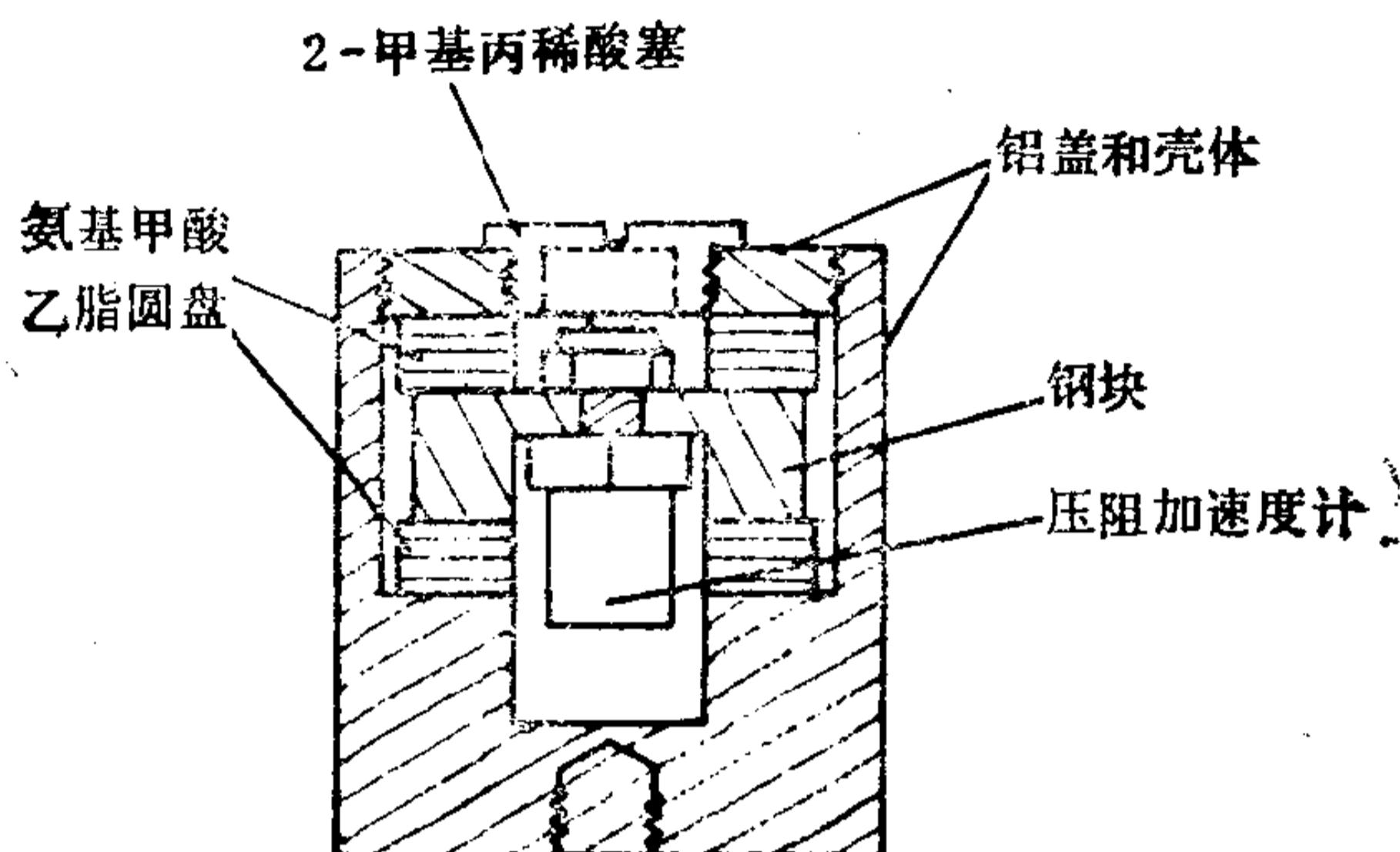


图3-16 减小加速度计谐振频率激励的机械冲击隔离支架^[20]

压阻式加速度计可用于核辐射环境中的试验。它耐受核辐射的能力不及压电式加速度计。中子的累积时间通量为 10^{13} — 10^{15} 个/厘米²及吸收剂量为 10^8 尔格/克(碳)的 γ 射线便会损坏用于压阻式加速度计*中的硅晶体。抗强核辐射的能力取决于所采用的半导体材料及其处理过程。例如，经过辐射淬火的压阻式加速度计，在瞬时核辐射环境中使用时，情况良好。

压阻式传感器中的灵敏元件具有高的温度电阻系数。应当避免使用旁路校准法，如应变计传感器中所使用的那样。因为这些元件都是有阻的，且由外部的直流电压或电流供给能量，它们会产生低电平、低频率的有阻元件典型噪声。

3.3 电容式加速度计

电容式加速度计具有惯性传感器的特点。电容器的一个极板是由引自加速度计壳体的弯曲机构的弹性来支承的。电容量的变

*此处原文误为压电式加速度计——译者注

化量是电容器极板相对于加速度计底座的位移的函数。图 3-17 示出了电容式加速度计的构造。作用于底座上单位加速度的电容变化量由下式给出：

$$\frac{\Delta C}{g} = \frac{K r^2}{d^2} f_0^2 \quad (3-11)$$

式中 ΔC —— 电容量的变化量；

K —— 由加速度计的设计所决定的常数；

r —— 电容器极板的半径；

d —— 极板的间距；

f_0 —— 加速度计的谐振频率。

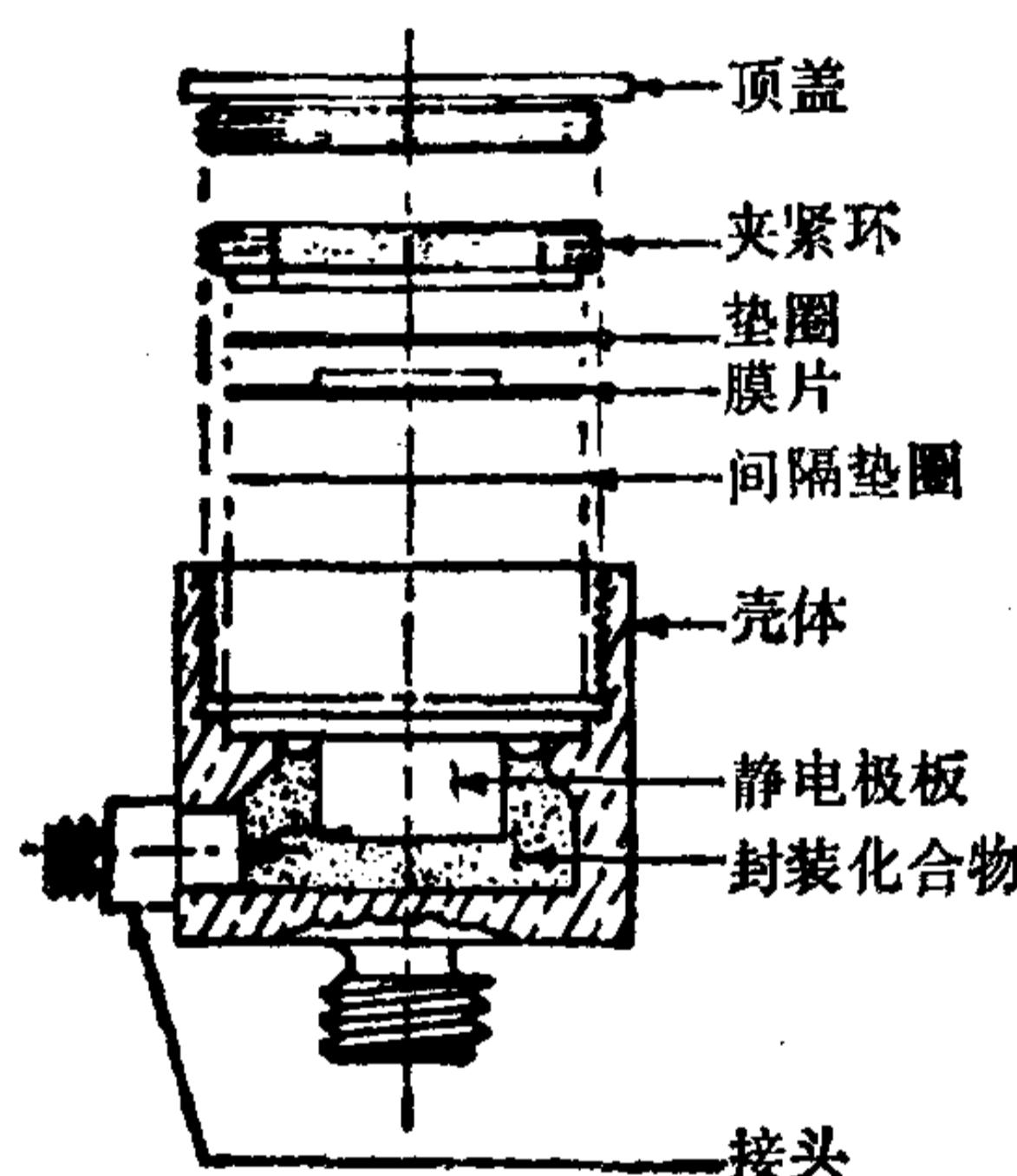


图3-17 试验室典型电容式加速度计的部件分解图

加速度计的加速度灵敏度与电容的变化量成正比。电容式加速度计是非线性的，因为电容的变化量与极板的间距的平方成反比。表 3-5 列出了一个电容式加速度计的冲击运动校准结果，它是这种非线性的一个例子。在高加速度时，灵敏度的变化超过 10%，因此，加速度计使用范围要受到限制。

图 3-18 是加速度计的频响校准曲线，它与惯性加速度

计的标称频响有明显的偏离。从校准结果可看到对其进行灵敏

表3-5 电容式加速度计的幅值线性校准结果

加速度 (g)	加速度灵敏度 (毫伏/g)
92	0.495
980	0.475
1650	0.450
2250	0.420

度、频响、谐振频率和冲击运动校准的重要性。

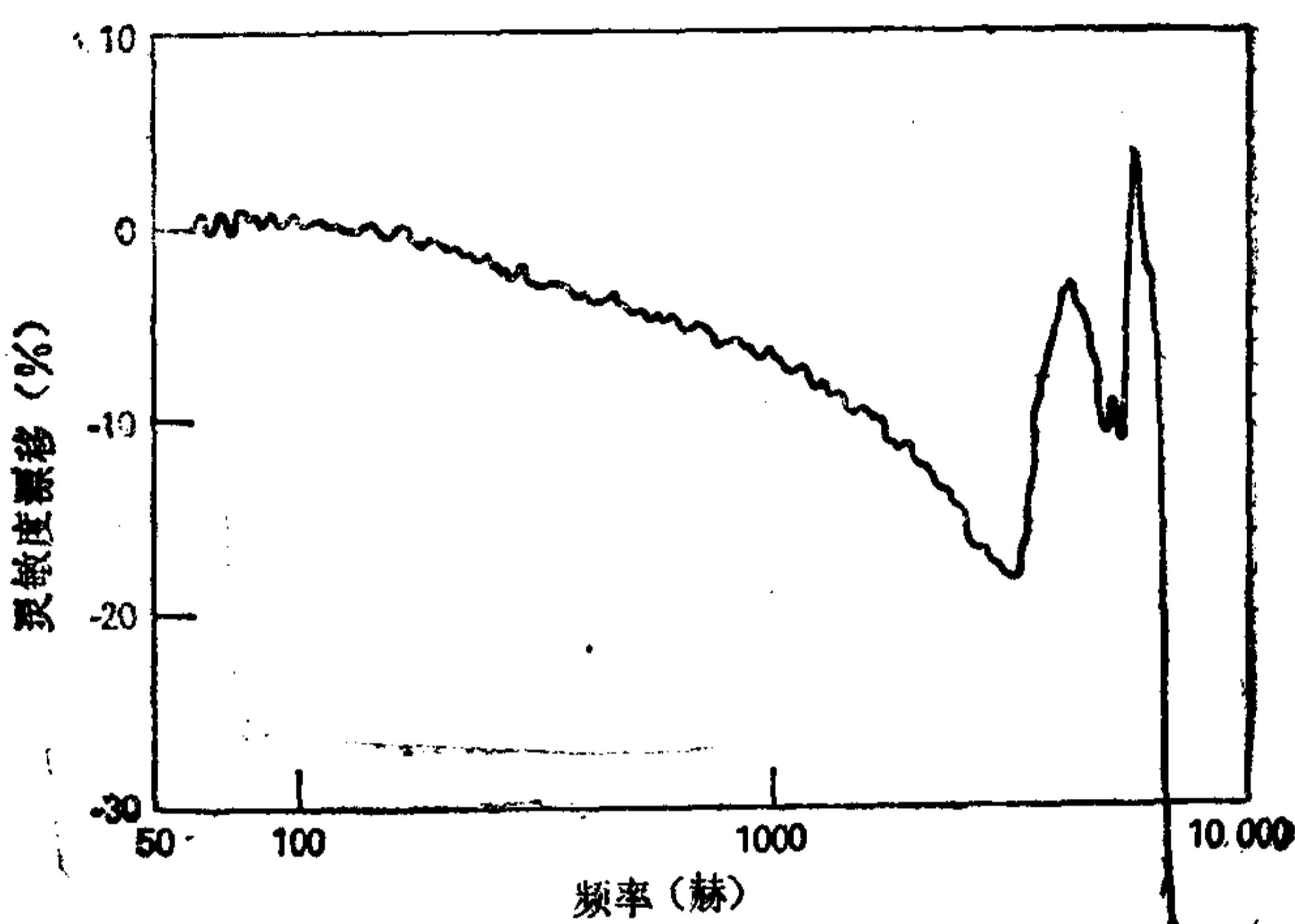


图3-18 电容式加速度计的频响校准

3.4 电感式传感器

有各式各样的电感应式传感器可用于测量振动和冲击运动。它们包括邻近式、可动铁芯式以及惯性传感器，见表3-6。邻近式拾拾器是固定在夹具上的，并使它与被测试的物体之间有一个小间隙（它不是机械地承载物体）；可动铁芯传感器的传感部分则应当接触振动物体（其它部分固定在刚性支架上）。

大部分通用的惯性感应传感器是电动式的。它的固有频率设计得很低，所以可作为速度传感器使用；差动变压器式和可变磁阻式惯性传感器可作为加速度计来使用。某些感应式传感器的使用是受限制的。必须对感应式传感器进行校准，以确定在其工作频率范围内的精度。当在小振动台上进行校准时，某些传感器显得相当大，所以需要特殊的支架。用得最广的感应式传感器是电动速度传感器和可变磁阻加速度计。有关于这些传感器及其他感应式传感器的说明和文献可供查阅。

表3-6 感应式冲击振动传感器的类型

所探测的振 动量	邻近式	可动铁芯式	惯性式	
			用于固有频率 之上	用于固有频率 之下
位 移	互感式	差动变压器式	—	—
位 移	—	可变磁阻式	—	—
速 度	电动式	电动式	电动式	—
加速度	—	—	涡流式	差动变压器式
加速度	—	—	—	可变磁阻式
加速度变化率	—	—	—	磁致伸缩式

电动式速度传感器

图 3-19 为典型的电动式速度传感器。传感器内的一个线圈构成了惯性质量的一部分，它被用弹簧支撑在圆柱体上。当速度传感器的壳体振动时，线圈就在圆柱体上做上、下滑动，其滑动频率比单自由度弹簧质量系统的固有频率高。当壳体振动时，线圈实际上是保持不动的。因此，磁体的磁力线在线圈周围上下振动。线圈的输出电压跟线圈与磁体间的相对速度成正比。在线圈内产生的开路电压为：

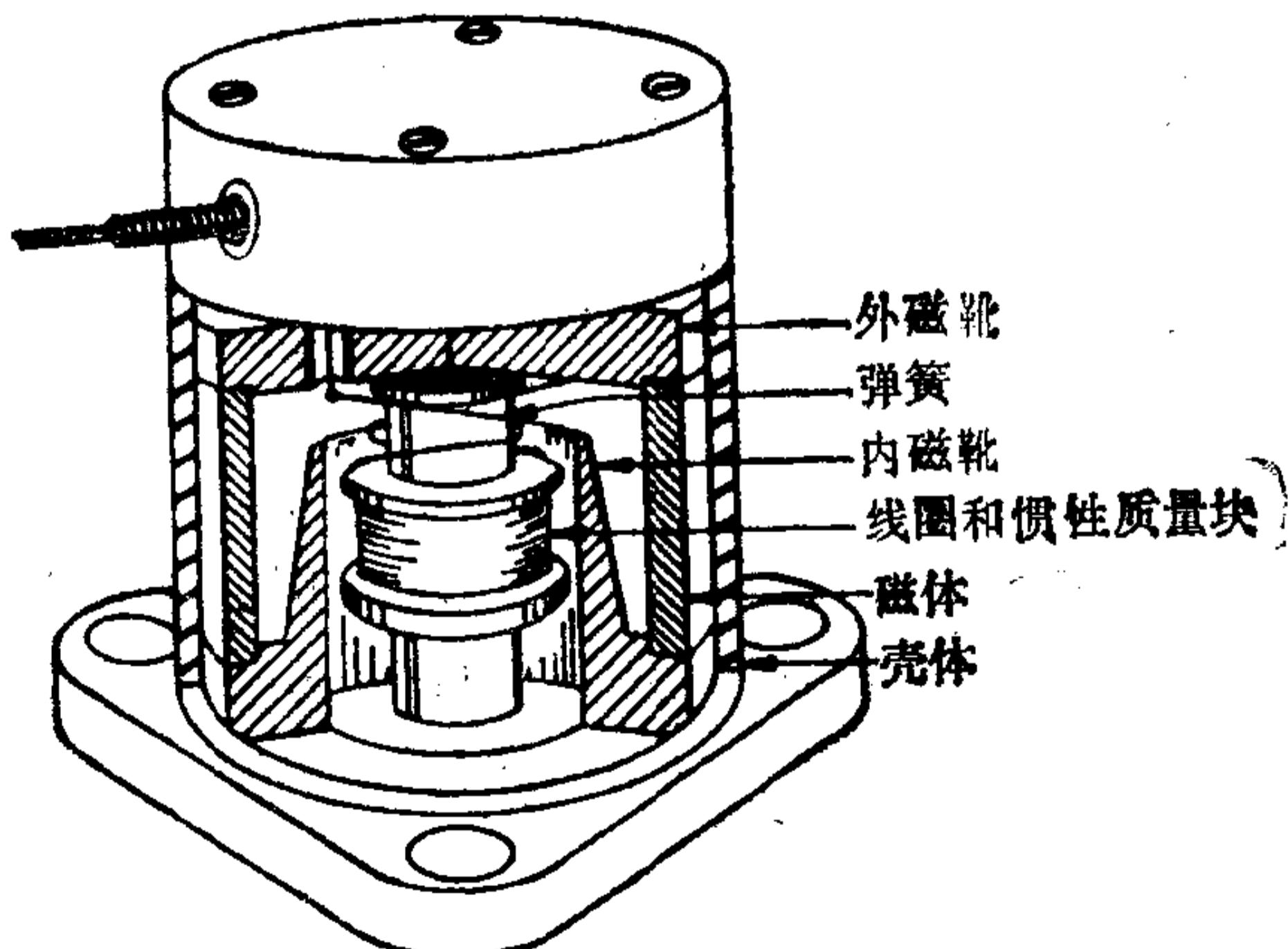


图3-19 电动速度传感器的结构^[22]

$$e = -Blv \quad (10^{-12}) \quad (3-12)$$

式中 e ——所产生的开路电压（伏）；

B ——磁通密度（特斯拉）；
 l ——线圈导线的总长度（厘米）；
 v ——线圈与磁体间的相对速度（厘米/秒）。

在速度传感器中，通常使用空气或油阻尼来限制线圈的过度运动。尤其当它受到接近固有频率的振动和冲击运动的作用时，更应如此。对速度传感器校准的典型结果见图 3-20。在谐振频率以下，灵敏度显著衰减，这符合在固有频率之上使用的惯性传感器的标定响应。在谐振频率以上，灵敏度的衰减是由于涡流耗损造成的。

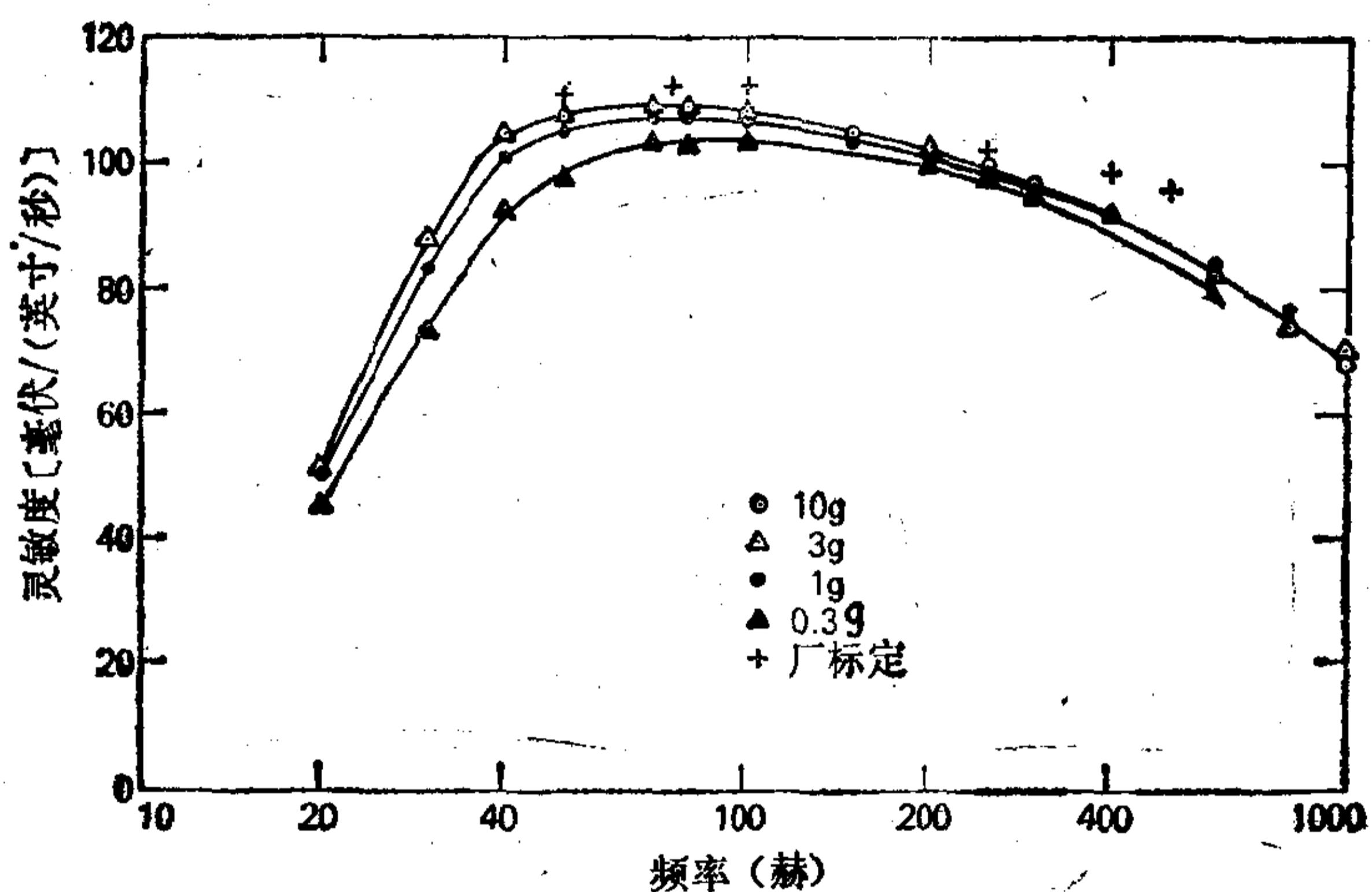


图3-20 速度传感器的频响^[22]

可变磁阻式加速度计

可变磁阻式加速度计的结构示于图 3-21。几乎所有的感应式传感器都十分大，而这个设计采用了微型元件，以使尺寸缩小。微型加速度计对与其接触的结构的冲击和振动影响较小。

由磁性材料组成质量元件用一个引自加速度计壳体的平螺旋弹簧悬着。加速度计工作于比谐振频率低的频率上。当壳体振动时，质量元件受到向上、向下的微小弯曲运动的作用。这个运动改变着质量元件和线圈之间的间隙（线圈是固定在加速度计

壳体上的)。这时,一个线圈的电感增加,而另一个线圈的电感减小。线圈的电感由下式近似地给出:

$$L = \frac{4\pi n^2 S (10^{-9})}{l} \quad (3-13)$$

式中 L —线圈的电感(亨利);
 n —线圈的总圈数;
 S —间隙的总面积(厘米²或英寸²);
 l —间隙的长度或厚度(厘米或英寸)。

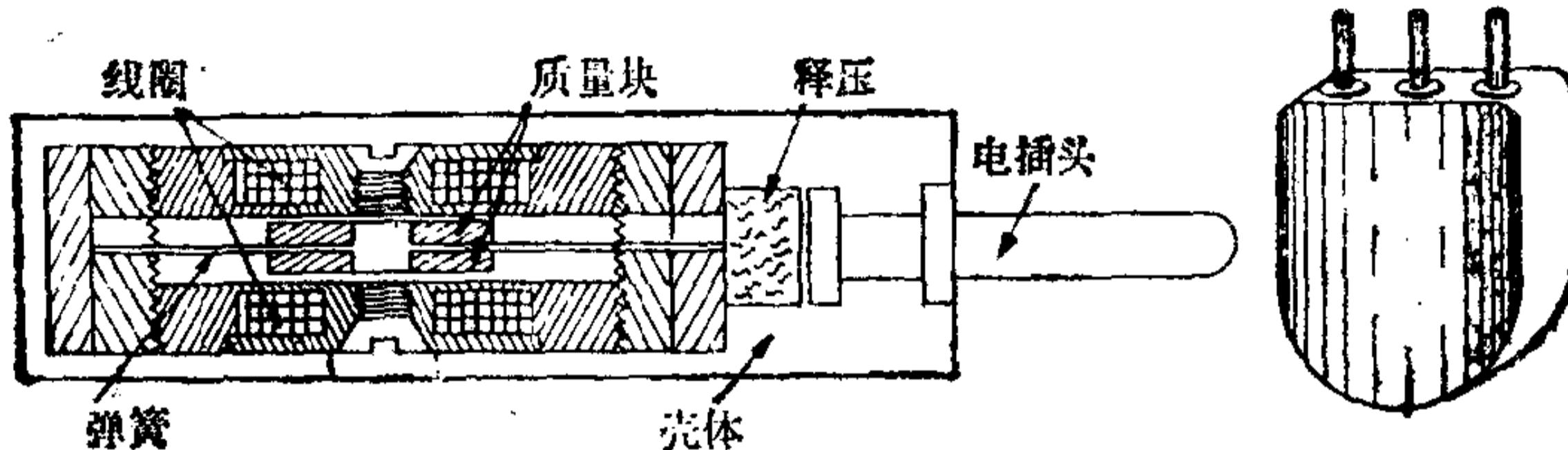


图3-21 微型可变磁阻式加速度计的结构^[23]

因为电感与间隙的长度成反比,所以加速度灵敏度是非线性的。可用幅值线性度校准来确定非线性度。典型的可变磁阻加速度计的谐振频率大约是200赫。使用油阻尼,以使工作频率范围延伸到大约谐振频率的三分之二。要进行温度校准,以便确定加速度计在使用中所遇到的各种温度下的灵敏度的变化。

3.5 伺服式加速度计

伺服式加速度计用来测量从零到几百赫频率范围上的低振幅振动。它在航空器和宇宙飞船上已作为控制设备使用;它也适用于测量小的加速度,如在建筑物里,由机械振动或地震所产生的加速度。伺服式加速度计的结构及工作主体示于图3-22。当受到振动的作用时,检测质量块相对于加速度计的底部产生一个偏移,并且由于阻尼间隙的改变,使发送器的电容发生变化,与此同时,伺服系统供给位于永久磁体间隙里的线圈以电流,由之产生的力又使线圈回复到它的平衡位置。对线圈电流测量即得输出

信号，它与所加的加速度成正比。

伺服式加速度计灵敏度高，频率范围宽。图3-22中所示加速度计的典型值是：灵敏度为250毫伏/g，工作频率范围为0—500赫。

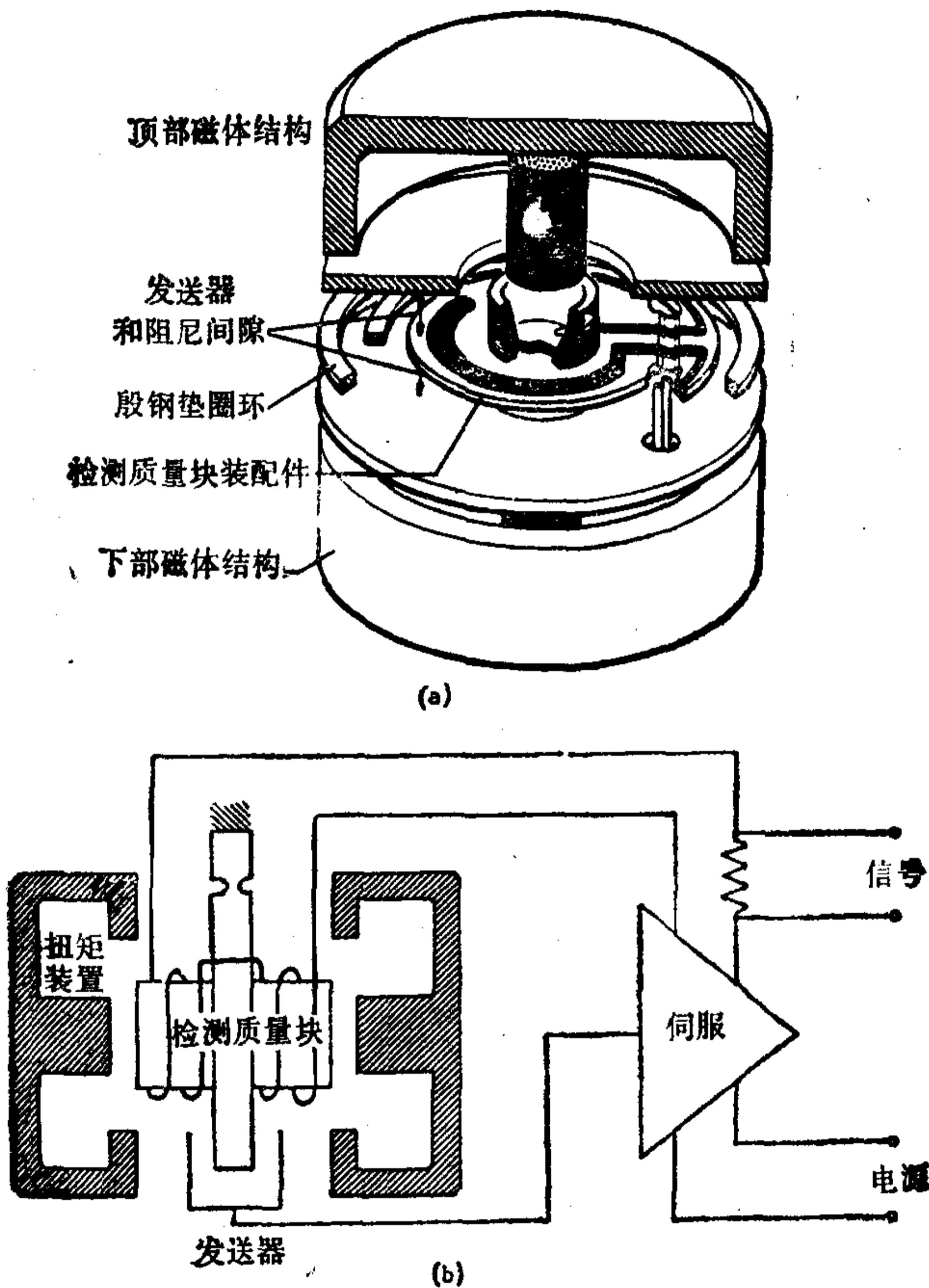


图3-22 伺服加速度计的结构和工作主体^[23]

3.6 机 内 记 录 仪

用来记录冲击和振动的机械仪器，可用于测量传输线的振动和铁路车辆引起的撞击，以及对爆炸撞击的研究。图3-23是一个



图3-23 冲击和振动峰值加速度读数记录仪

简单的峰值加速度读数记录仪。这个特殊的记录仪具有八个独立的簧片，可记录各种加速度值，最大能达到 10 000g。每个簧片在它的自由端有一个鑲钻石的针，用来在一块镀金的圆盘上刻下永久的记录。标定图给出每个簧片的谐振频率和加速度灵敏度。

冲击振动机内记录仪可用来测量冲击运动和车辆里的撞击。这种记录仪使用一个包含记录针的低频质量弹簧系统。针组件由一个 10:1 的放大杆组成。针的运动被记录在涂腊或塑性物的纸带上。三个机械装置被组装在一个仪器里，以记录三个互相垂直方向上的加速度。有些仪器使用活动纸带来记录频率和加速度计幅值数据。加速度计测量范围为 1—20 g。

用来测量高空避雷针的振动的机内记录仪在电力工业上也有应用。这个记录仪内有一个机械杠杆系统，它用来给记录针的记录提供一个五倍的放大。记录针把振动描在一个等速移动的纸带上，从而位移幅值和频率二者也就被记录了下来。

为得到精确数据，对冲击和振动机内记录仪都做校准是很重要的。记录仪移动部分容易坏，并在使用中有时会出毛病。

3.7 辅 助 仪 器

在冲击和振动测量中，使用的最简单的仪器是电压表和示波器。利用这些仪器，由与传感器一同使用的信号调节器的输出来读出振动幅值。示波器可用来观察振动或冲击运动的波形。双线示波器可同时测量两个输出以得到相位角。这些仪器是一个校准实验室起码应具备的。其它更多的专门仪器用于实验，有时也用于校准。

许多振动指示仪都有多种用途。一些仪器带积分电路，以便直接读出速度和位移的幅值；另一些基本的电压型仪器含有低通、高通和带通滤波器，以限制振动或冲击测量的频率范围。

近来测试更先进的方法是使用数字显示仪。用整流电路把从信号调节器过来的模拟输出转变成直流信号，使振动或冲击运动的幅值以数字显示。这类仪器中有些还配备有从冲击运动得来的

脉冲幅值和脉冲宽度的数字显示装置。

使用数字仪器进行振动校准，可缩短校准时间，减小人为的误差。所以，其应用日益广泛。然而，一般认为，在利用这种仪器做正弦校准时，会产生一个小的附加误差(小于1%)。这种误差在大部分校准实验室是允许的。在基准实验室中借助分压电路和电压表来消除这些误差。

在冲击运动校准中，使用数字仪器很重要。例如，当从示波器读出加速度峰值时，常常存在2%左右的冲击运动校准误差。使用数字式仪器测量时，这个误差便可消除。

系统校准常常是利用标准加速度计和标准信号调节器来完成的。这有个好处，即得出包括放大器增益的加速度灵敏度。然而，没有必要做加速度计、放大器与辅助仪器一起的系统的校准。辅助仪器用电校准来确定精度，使振动和冲击运动校准实验室可以放心使用。

3.8 位 移 测 量

位移测量可用感应式邻近传感器和包括激光器在内的各种光学仪器进行。当需要直接测量位移幅值，并且可以使用邻近传感器时，感应式传感器就很有用处。而在校准实验室，这种传感器是被限制使用的。直接观测式光学仪器和激光器，适用于某些类型的校准，包括高频段的绝对测量。

直接观测式光学仪器

最简单的光学振动测量借助于肉眼来完成。振动楔（如图3-24）对直观测量来说是实用且精度合适的装置。它是由精确地划出的线组成的，当物体振动时，这些线会出现交叉。如果是正弦振动，当位移为正或负的最大值时，速度为零。这使楔在最大位移的地方有一停顿。振动测量就是通过观测线的交叉，并读出楔端的刻度来完成的。

显微镜可用于直观振动测量中。反射带或其他的强光照在作正弦振动的物体上，就可在刻度盘上给出一个影像。

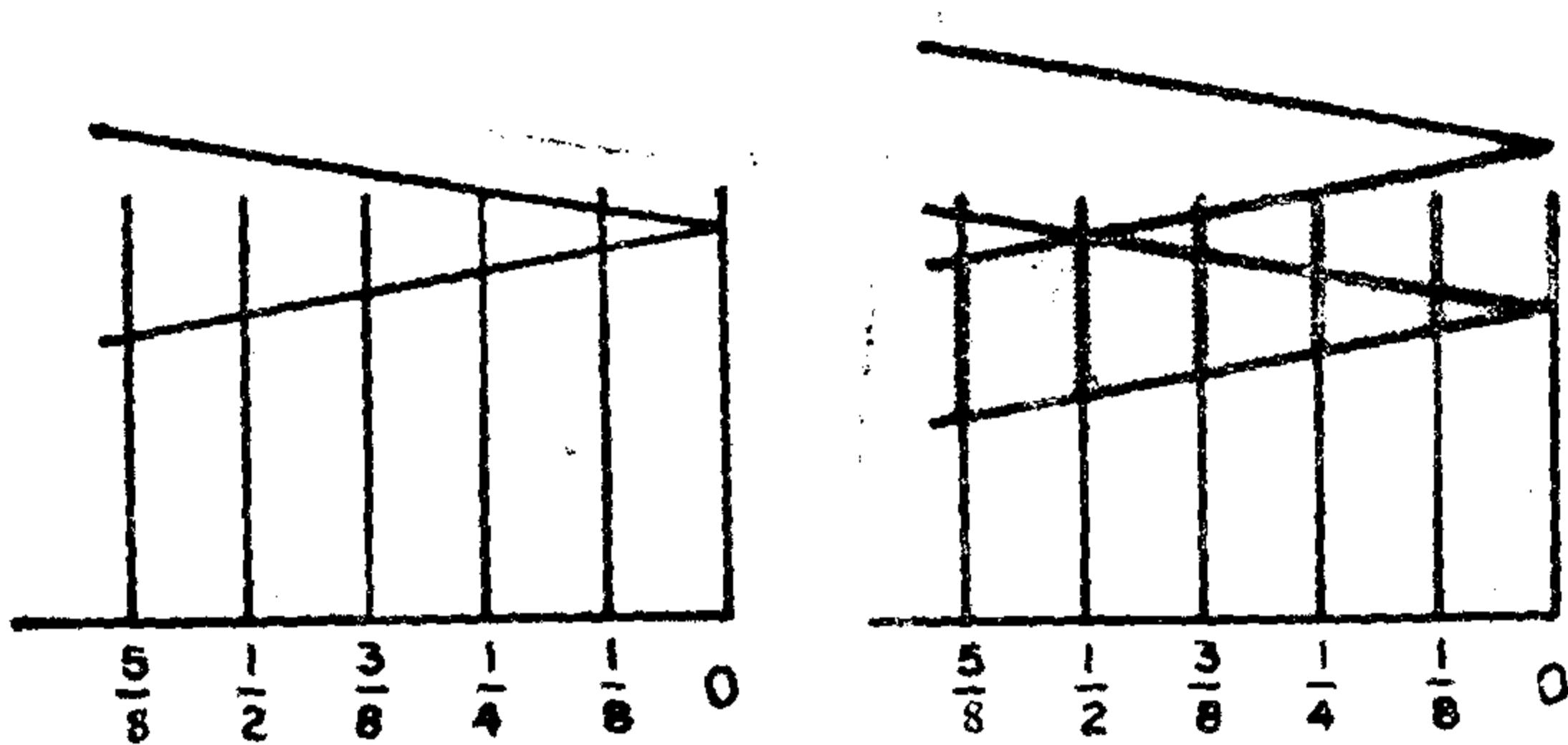


图3-24 振动楔显示峰—峰值移

在校准实验室中做频率接近或低于50赫的校准时，用振动楔和带显微镜的测量仪器比较合适。通常也采用其他更先进的技术。

激光和全息摄影

光学全息摄影和激光干涉测量是价值昂贵的检测手段，它在振动分析及其它应用上正取得重大进展。这些技术对于做超高频冲击和振动校准，以及鉴定校准振荡器或其它振动物体是很有用处的。

在全息摄影术中，利用激光来获得光干涉条纹，并把它记录在摄影底片上。底片经显影之后，照亮底片，就会显现出原被照物体的一个三维影像。之所以采用激光，是因为激光的相干性好。相干性包括空间相干性和时间相干性。空间相干性是指在光束横截面上波前的一致性。激光具有十分理想的空间相干性。由于光的散射，光的空间相干性不足，会对物体的某一部分在综合衍射图上产生本底干涉。这种干涉对于不透明物体来说，比透明物体更严重。

要使光在光束传播方向上的强度均匀一致，每个波与沿光束传播方向上的其它波的强度相同。对于完全单色光来说，其相干时间是无限长的。这时，不管物体尺寸以及参考光束如何，均能获得理想的干涉条纹。然而，如果激光在一个窄带上含大量的频率，这时相干时间是有限的。在与激光谐振腔长度奇数倍相对应

的距离上，光波的相位紊乱。因此，物体的深度域要比谐振腔长度小，因为在与这些长度相对应的距离上，干涉条纹将消失。全息摄影上使用的激光，相干长度大约是7英寸（180毫米），这也是对物体尺寸的限度。然而，激光的各个模，在即使是几倍于谐振腔的长度上，会出现同相。这意味着，现今的激光可用在程差高达若干公里的干涉测量上。

在振动测量中，全息照片是对振动物体作两次或多次干涉曝光得到的。如果能得到持续时间可控的相干激光，在振动物体上作复合运动的分析将成为可能。然而，目前的实验工作局限于正弦运动激励，在这种情况下，全息照片就好象是在位移达到极大极小值时作了两次曝光似的。

图3-25是一个用来研究声纳传感器振动的实验装置。全息摄影的复制照片示于图3-26。这些照片可给出传感器基模振动情况，干涉条纹的数目可给出物体各位置上的振动幅值的定量结果。对于较高的谐振模态，全息照片是一个条纹图形的更复杂的排列，它可用来识别基模之外的谐振模态。

传统的干涉测量不采用摄影的程序（即把拍照下的干涉条纹图形显影后再制成照片）。传统的干涉测量通常是用来检查一点的运动或尺寸，而在全息摄影中，所作的是整个表面的记录。

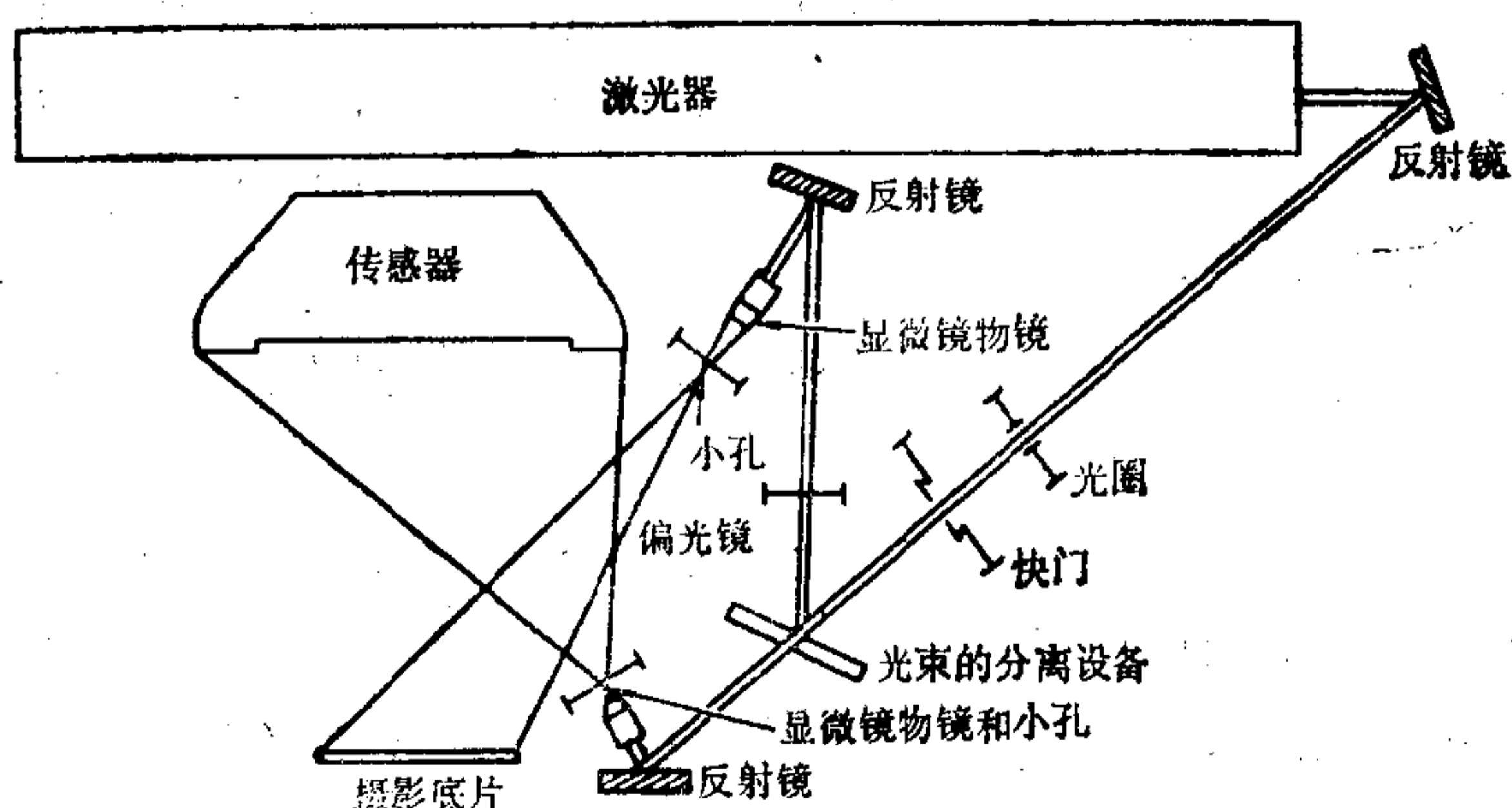


图3-25 用激光束测量声传感器振动的典型装置^[25]

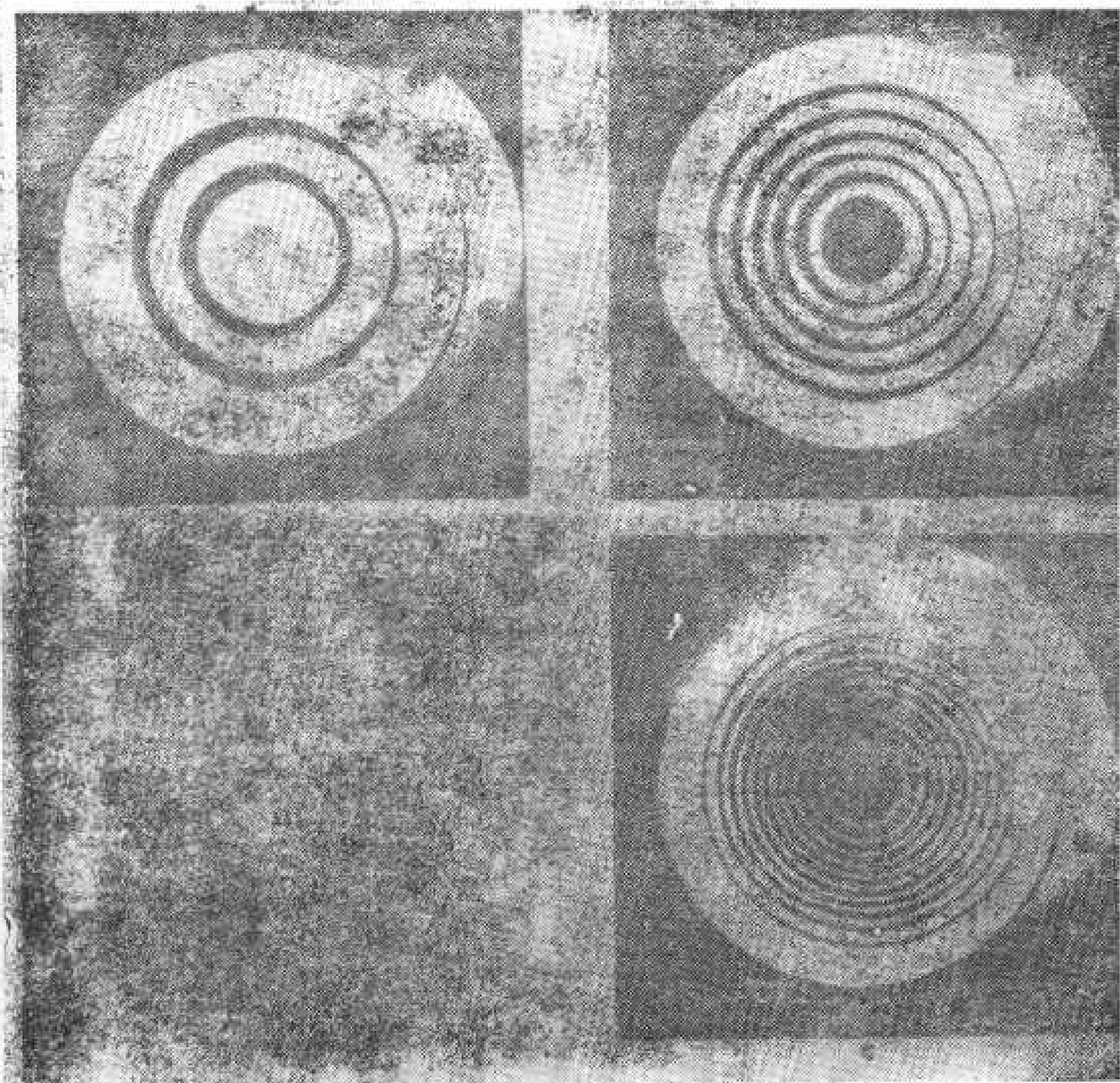


图3-26 用图3-25^[25]所示装置得到的全息摄影复制照片

第四章 校准用振动台

振动台（或振动发生器）是校准系统的心脏。几乎在任何振动台上都能实现非常精确的校准。当然，这只是在振动是线性的，而且没有横向运动和加速度波形失真的那些频率上才是这

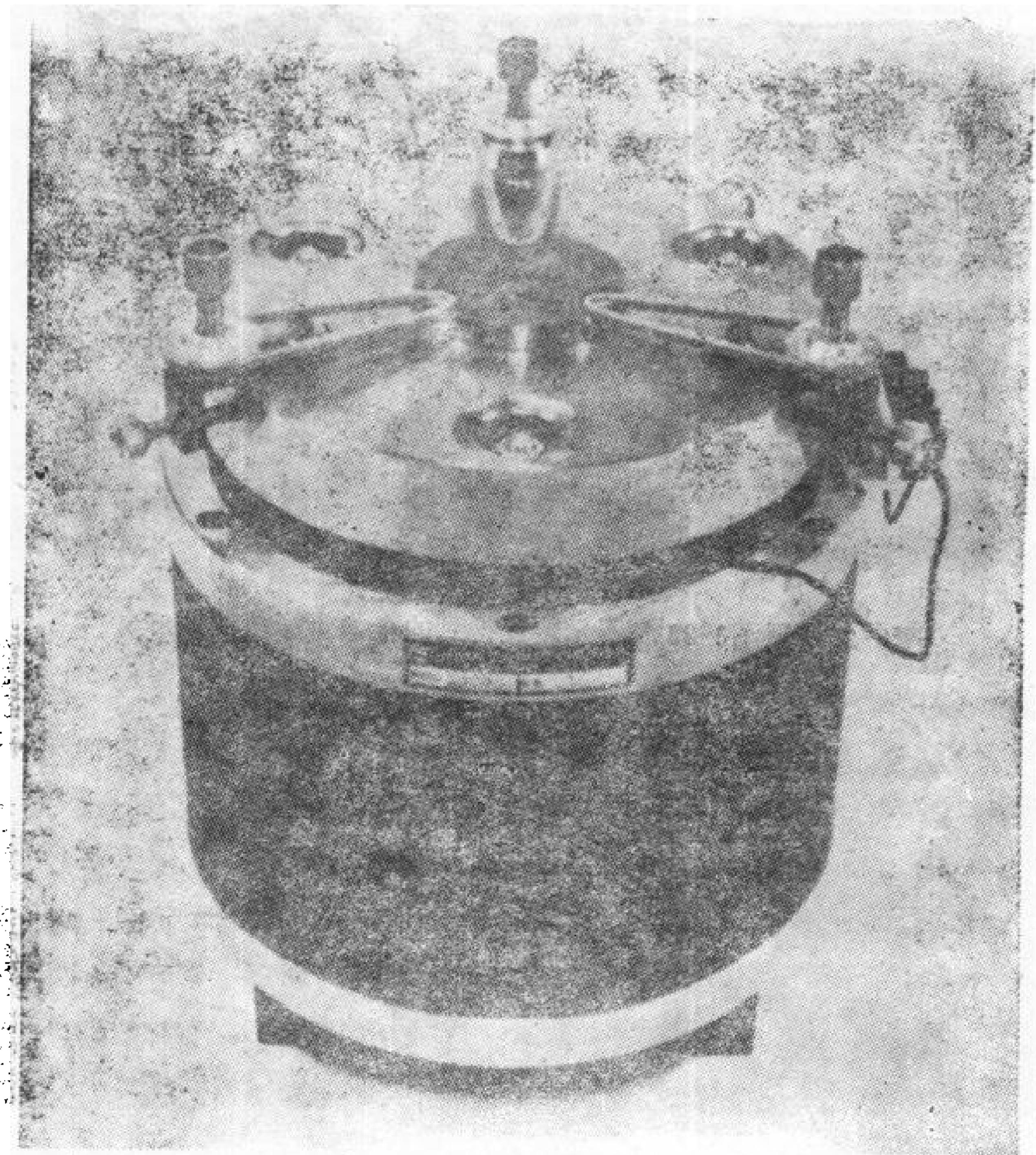


图4-1 为校准加速度计和其他振动传感器而设计的振动台(Bouche试验室)

样。在选择一个振动台作校准时，首先需要进行细心的估计，以便确定可以产生纯正弦运动的频率范围。最好选择那种在其整个工作范围内基本上没有横向运动和加速度计波形失真的振动台。校准用的优质振动台可以在市面上买到。图 4-1 是一个振动台的外形图。

4.1 电动式振动台

电动式振动台的工作原理与感应式速度传感器是相同的。只不过是在振动台中，感应线圈被用来产生振动而不是测量振动。线圈绕在动圈骨架上，成为振动台的移动部件；线圈装在强磁场的间隙之中。给线圈加一正弦变化的电流，它所产生的交变磁场与磁体的恒定磁场相互作用，产生正弦振动。

在设计和使用校准用的振动台时，应注意以下两个问题：

(1) 动圈骨架的尺寸和质量；(2) 用来在磁结构中支持动圈骨架的悬挂系统。动圈骨架应当很小，以便使它的谐振频率尽可能地高（应高于振动台工作频率）；振动台所用的悬挂系统应该尽可能软，使之基本上不存在由悬挂形成的谐振影响。在低频段，软悬挂系统不会产生加速度波形失真。采用气浮轴承式振动台，在低频就可无失真地工作，消除由悬挂所造成的谐振影响。在其他振动台中，由于用弹簧板支承，因此在某些频率范围内产生横向的谐振运动。

动圈骨架材料

在校准用的振动台中，移动部件材料的选择，是能否达到高谐振频率的关键。许多校准用的振动台，采用的是由单块材料做成的移动部件。谐振频率由该材料的机械性质确定。

通过对用铍合金、铝(硬质氧化铝)和镁合金制成的高频校准用的振动台样品的计算，给我们提供了有用的性能数据。这些材料的重要性能数据示于表 4-1。铍合金象铝一样有高的弹性模量，而镁合金的弹性模量较低。铝的缺点是它的密度大，约为铍合金和镁合金的两倍。由材料的弹性模量与密度之比的平方根看出：

对于设计相同的振动台动圈骨架，铍合金的谐振频率最高。由表 4-1 看到，铍合金振动台的谐振频率是镁合金的 2.5 倍，而铝振动台的谐振频率是镁合金的 1.9 倍*。

考虑采用镁合金的理由之一，是在一定条件下可得到高的内阻尼，而铍合金和铝的内阻尼比较小。阻尼高，在谐振时放大倍数就小，由激振所引起的运动的谐波失真也小。可是，仅当镁合金承受可观的机械应力时才能达到高阻尼。而在这些振动台样品中，没有迹象表明在谐振时产生高应力，这时，镁合金动圈骨架象用铍合金或者铝做成的动圈骨架一样，表现出高的放大倍数。因此，在这种情况下，使用镁合金作移动部件并无明显优点。镁合金动圈骨架的缺点是谐振频率很低；当振动台用于高频校准时，相对运动太大。

表4-1 振动台动圈骨架材料的性能^[26]

性 能	材 料		
	铍 合 金	铝	镁 合 金
弹性模量, E (10^9 牛顿/米 2 或 10^6 磅力/英寸 2)	290 (42)	345 (50)	45 (6.5)
密度, δ (10^{-3} 千克/厘米 3 或磅/英寸 3)	1.9 (0.067)	3.9 (0.14)	1.8 (0.065)
模量与密度之比的平方根(E/δ) $^{1/2}$ (10^3 厘米 $^{1/2}$ 或 10^3 英寸 $^{1/2}$)	40 (25)	30 (19)	16 (10)
归一化谐振频率(赫)	2.5	1.9	1
内阻尼, 对数减量	0.000 05	0.000 06	0.3 ^①

①仅当加于材料的机械应力达到或超过 500 磅力/英寸 2 时方可达到。

铝动圈骨架几乎具有和铍合金动圈骨架一样高的谐振频率。然而铝制移动部件的质量相当大，驱动起来需要更高的功率。铝制动圈骨架还有另一些缺点，如材料脆，操作时易损坏。很明显，铍合金是制造校准用振动台动圈骨架的最佳材料。

振动台性能

表 4-2 是用上述各种材料制成的振动台样品的一些性能特征

*原文有误，已改正——译者注

表4-2 振动台样品性能一览表^[26]

性 能	规 格			
	振动台 A	振动台 B	振动台 C	振动台 D
移动部件材料	铍 合 金	铍 合 金	铝	镁 合 金
移动部件质量 (千克或磅)	0.18 (0.4)	0.32 (0.7)	0.45 (1)	0.45 (1)
谐振频率 (千赫)	65	35	30	10
最高频率处的相对运动 (%)	2	4	5	10
灵敏度和频率响应校准 (赫)	5—10 000	5—10 000	5—10 000	5—5000
谐振频率校准 (赫)	5—50 000	...	...	...
加速度失真 (%)	2	2	3	5

一览表。振动台的谐振频率是用一个无电感的电阻器与驱动线圈串联在一起测得的。通过电阻器上的电流的幅值和相角与驱动线圈可认为是相同的。将一个高谐振频率的加速度计固定在振动台的移动部件上（加速度计的谐振频率远比振动台的高），当加速度计输出与线圈电流之比达到最大，而且这两个量之间的相角从0°经90°变化到180°时，振动台便达到了谐振，这时就可确定其谐振频率。如果在振动台的移动部件或者在所用的加速度计中存在局部谐振，那么在解释上述数据时要稍加注意。

表4-2给出了在四种振动台样品上测得的谐振频率。这些振动台的性能与表4-1所列的机械性质相吻合。用镁合金制成的振动台谐振频率最低，而铍合金的最高。材料的机械性质和振动台性能之间微小的差异是由于不同的振动台样品的移动部件有稍微不同的尺寸的缘故。

相对运动 将一个标准加速度计固定在校准用的振动台动圈骨架中，以测量动圈骨架台面的运动。利用标准加速度计的信号作为参考加速度，来对被试加速度计进行加速度校准。标准加速度计与固定其他加速度计的台面之间的运动称为相对运动。在高频段，相对运动是可观的，而且随固定在动圈骨架上的被试加速度计的质量大小而变化。

装入振动台动圈骨架中的标准加速度计与固定其他加速度计的台面之间的相对运动用一被试加速度计组件来确定。底座的质量即使大到100克时，组件的谐振频率也没有明显的变化。这说明，各种底座的分布刚度以及安装点的刚度要比加速度计中惯性系统的有效刚度大。由于具有这种底座的加速度计的谐振频率近于不变，所以装入振动台上标准加速度计的输出比值的变化直接反映出振动台的相对运动量的大小。

图4-2是对振动台样品A的计算结果。对于质量大（如100克）的加速度计来说，在加速度计底座的运动要比质量小（如20克）的加速度计的大。因此，质量大的加速度计的修正系数稍小于1.00。对于A型振动台，大多数加速度计的修正量在10 000赫处低于2%。其他振动台样品的相对运动和修正量见表4-2。（振动台的加速度失真通常是由驱动功率信号中的谐波失真引起的。）用镁合金做的振动台，相对运动非常大，所以对5000赫处或5000赫以上的校准数据进行修正是不现实的。

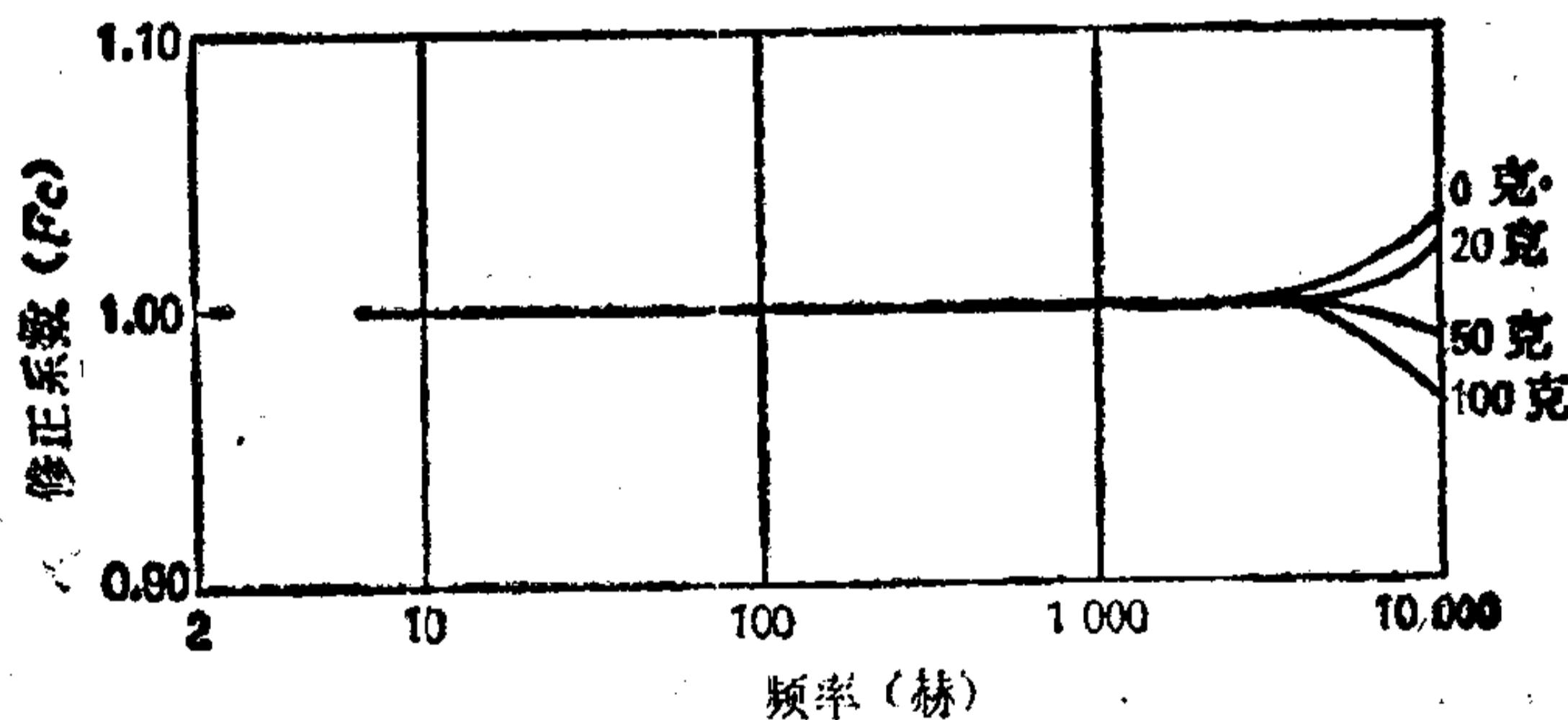


图4-2 一个振动台在动圈骨架上所加的质量块不同时
的频率响应修正系数^[26]

失真 在高频段，振动台加速度运动失真的主要来源是动圈骨架谐振频率的谐波激励。振动台所用的功率放大器主要在奇次谐波频率（即激励频率的3, 5, 7, 9倍）上产生谐波失真。因此，除了基频或者激励频率振动所产生的运动以外，振动台还作

奇次谐波频率的运动。由此可见，对于同一工作频率范围，轴向谐振频率较低的振动台有较大的失真。可用失真仪在固定于振动台上的加速度计的输出端测量各种不同的振动台的失真。

横向运动 振动台的横向运动会产生校准误差。这是因为当标准加速度计和被校加速度计在与振动台轴向运动垂直的方向上受到振动作用时，它们将产生少量的输出。这个输出是由于加速度计的横向灵敏度造成的。一般地说，标准加速度计的横向灵敏度比被校加速度计的要低，大部分误差来自后者。

对于一个加速度计来说，横向灵敏度指的是在垂直于加速度计灵敏轴的平面上的最大灵敏度（它出现于特定方向上）。当加速度计的振动方向位于与灵敏轴垂直的平面内，并且垂直于最大横向灵敏度方向时，加速度计的输出非常小。因为该方向上的横向灵敏度很小或为零。

如果动圈骨架的横向运动碰巧出现在加速度计的最大横向灵敏度的方向，那么误差可取为加速度计横向灵敏度比与动圈骨架横向运动的乘积。例如，假定横向运动是25%，加速度计横向灵敏度比是3%，那么最大误差就是0.75%。很显然，横向运动的方向与最大横向灵敏度的方向不见得一定重合。因此，横向运动引起的校准误差一般总是小于这个数值。

横向运动产生的另一个误差是由加速度计应变灵敏度引起的。当动圈骨架作横向运动时，在加速度计安装面产生了动态应变。这些应变会在高应变灵敏度的加速度计上产生可测量出来的输出。

如果使用横向运动足够小的振动台，就能免去对横向运动进行的大量校准。振动台的横向运动往往采用能在振动台的整个频率范围上测量的小型三轴向加速度计来测量。使振动台的频率在整个频率范围内缓慢地变化，在每一个显示重要横向运动的频率上进行测量，其结果由三轴向加速度计的X轴和Y轴的输出来指示。振动台的横向运动值用X轴的输出与Z轴的输出之比和Y轴的输出与Z轴的输出之比来计算。

表 4-2 所列的各种振动台，其最大的横向运动都低于 25%。这些横向运动出现在频率上限为 10 000 赫的工作范围内的一些频率上。由上述可知，它们的校准误差将是非常小的。

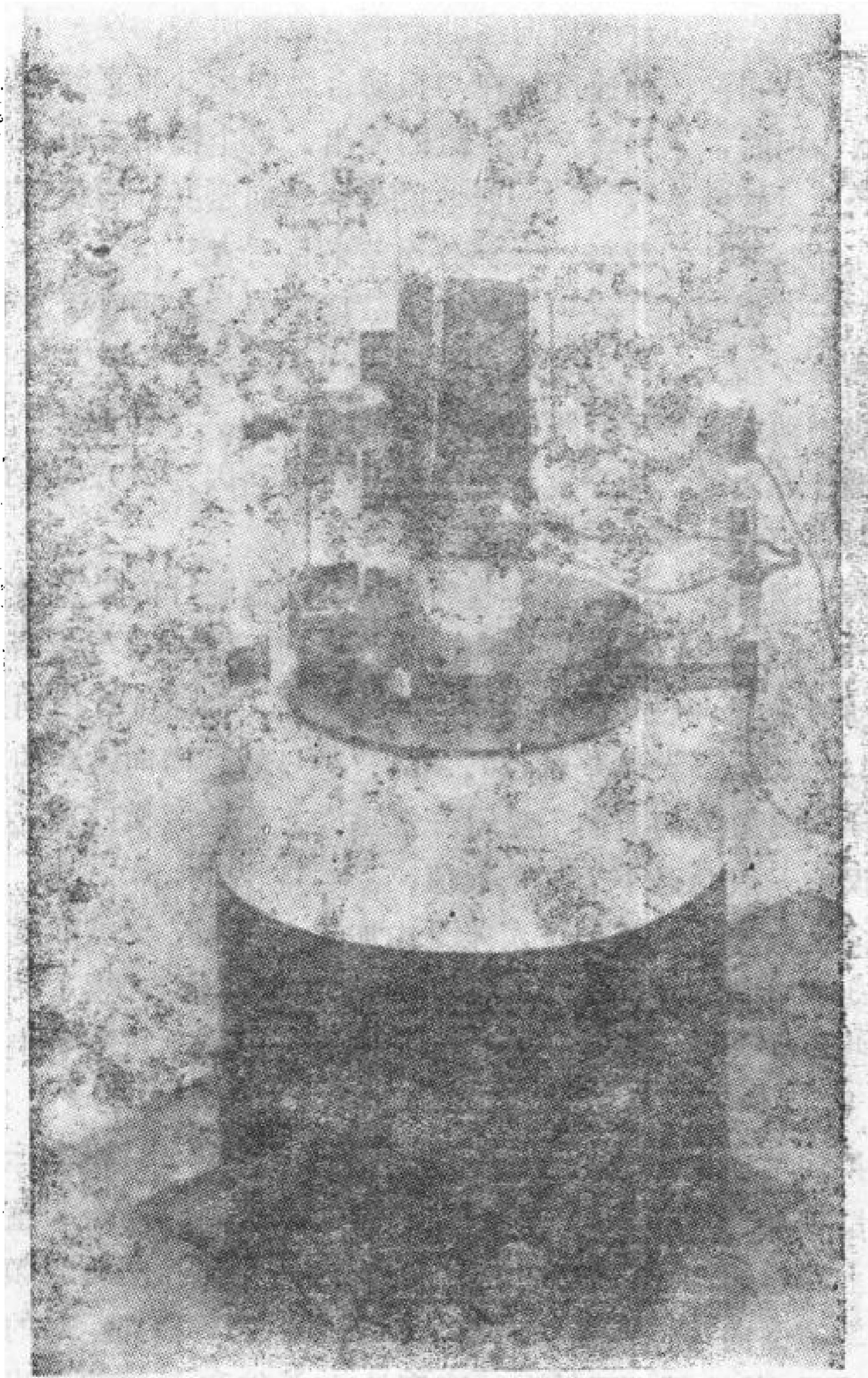


图4-3 可用于频率低于10赫的加速度计
校准的振动台（国家标准局）

低频振动台

大部分为校准而设计的市售振动台，低频限是 5—10 赫。这就需要设计专用夹具，使之能在低频中进行振动校准。图4-3所示的气浮式振动台用了一个延伸台面，供低频校准。第二个纵向气浮轴承面给移动部件导向，使之能作峰峰值振幅至少是 2.5 厘米的振动。采用弹性支承给第二个气浮轴承加一个小的扭矩，以便消除扭转动。弹性支承还能使动圈骨架驱动线圈在磁场中合理地定位。一个伺服加速度计被装在动圈骨架中，用它来作为校准参考标准。

由于一些加速度计和速度传感器含有磁性零件，因此在低频校准时，要注意磁场的不利影响，因为这时需要作大幅值位移的振动，以便在输出端维持合适的信噪比。在位移幅值大时，传感器通过振动台磁性结构激发出的一个非均匀杂散磁场。所以它在工作频率上产生一个和振动输出既不同相也不反相的误差信号。这个误差是不是存在，可通过将传感器固定在延伸杆上离磁性结构几英寸处重复做低频校准来确定。然后，把传感器移动几英寸，使它离磁性结构更远，在杂散磁场很弱的地方作振动。这时必须注意使位置更换后，仍能保持传感器的运动是正弦的。

4.2 压电式振动台

压电式振动台是为那些在高频下采用干涉仪校准的基准级实验室而制造的。压电式振动台由几个阻尼谐振圆柱形元件组成。振动台要具有多个谐振频率，以便在整个工作频率范围内都能提供正弦运动。这些振动台主要用来在上限频率为 100 千赫的选定频率上工作，而大多数干涉仪校准都是在大约 10 千赫以下的频率上进行的。

图 4-4 是压电式振动台的设计图。这种振动台由铝组件、压电盘和碳化钨元件组成，其间用薄的丁基橡胶层分开。图中振动台在 10 至 50 千赫的频率之间有数个阻尼谐振。

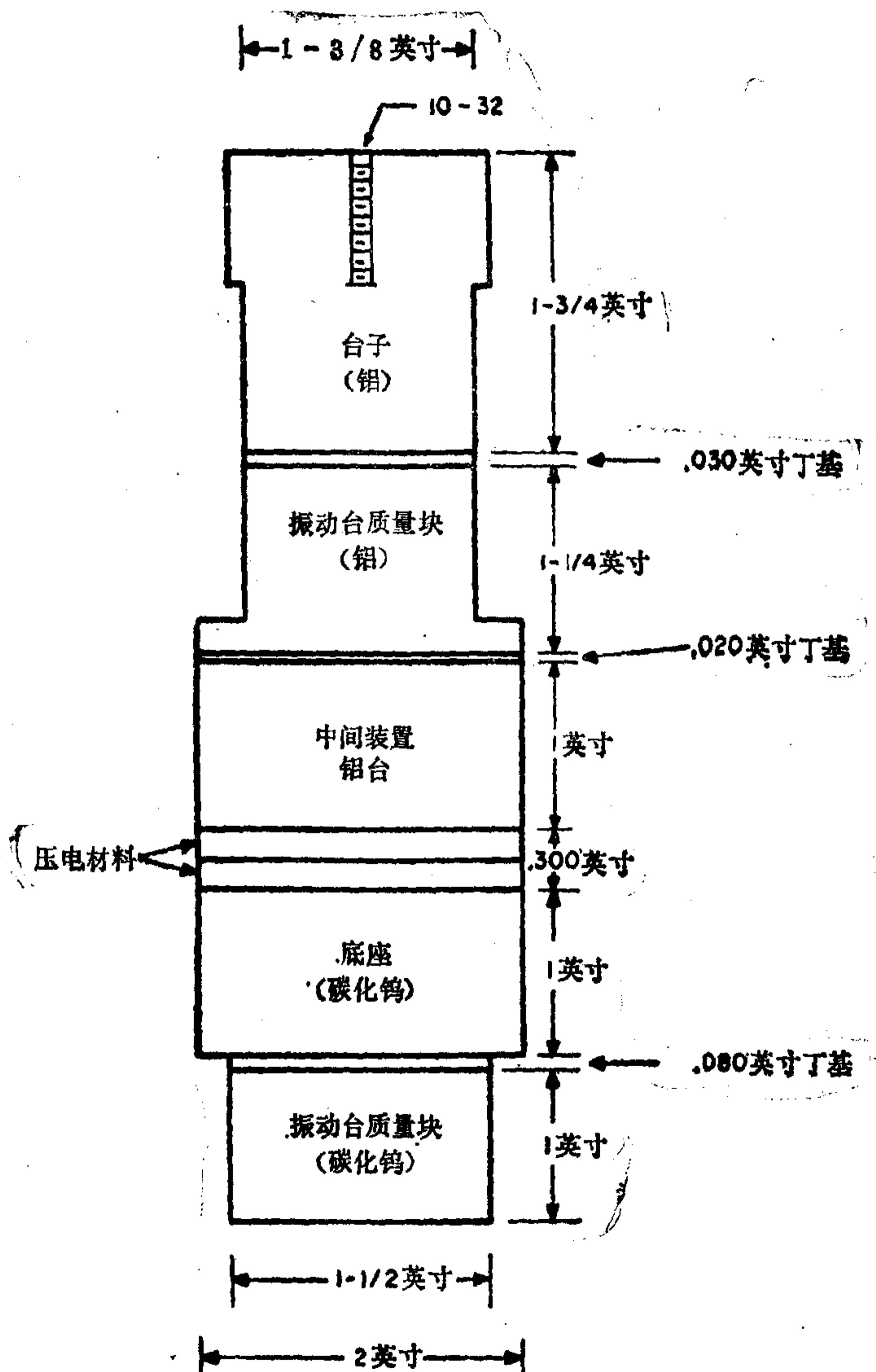


图4-4 一种压电式振动台的结构^[27]

4.3 机械式振动台

机械式振动台应当只限于用作横向运动的校准。机械式振动台所产生的正弦运动不可避免地存在着一定的加速度波形失真。然而，在一些特定的校准中（例如测量加速度计的横向灵敏度），失真的后果不太严重。之所以使用机械式振动台，是因为其操作简单，在进行低频校准时，一般不存在横向运动。

图 4-5 中的振动台采用一个滑销式机构产生准正弦运动。它实际上不产生横向运动，这是由于位移幅值大和用了导向装置加以防止的缘故。可这样来作横向灵敏度的校准：首先将一个加速度计连到振动台上，使其灵敏轴平行于振动台的运动方向，然后记录它的输出；将加速度计重新固定，使其灵敏轴垂直于振动台的运动方向。振动台中的机构允许加速度计围绕它的灵敏轴在 360° 的范围内转动。随着加速度计的转动，观察其输出。最大横向输出与灵敏轴方向的输出之比乘以100%便是横向灵敏度比。

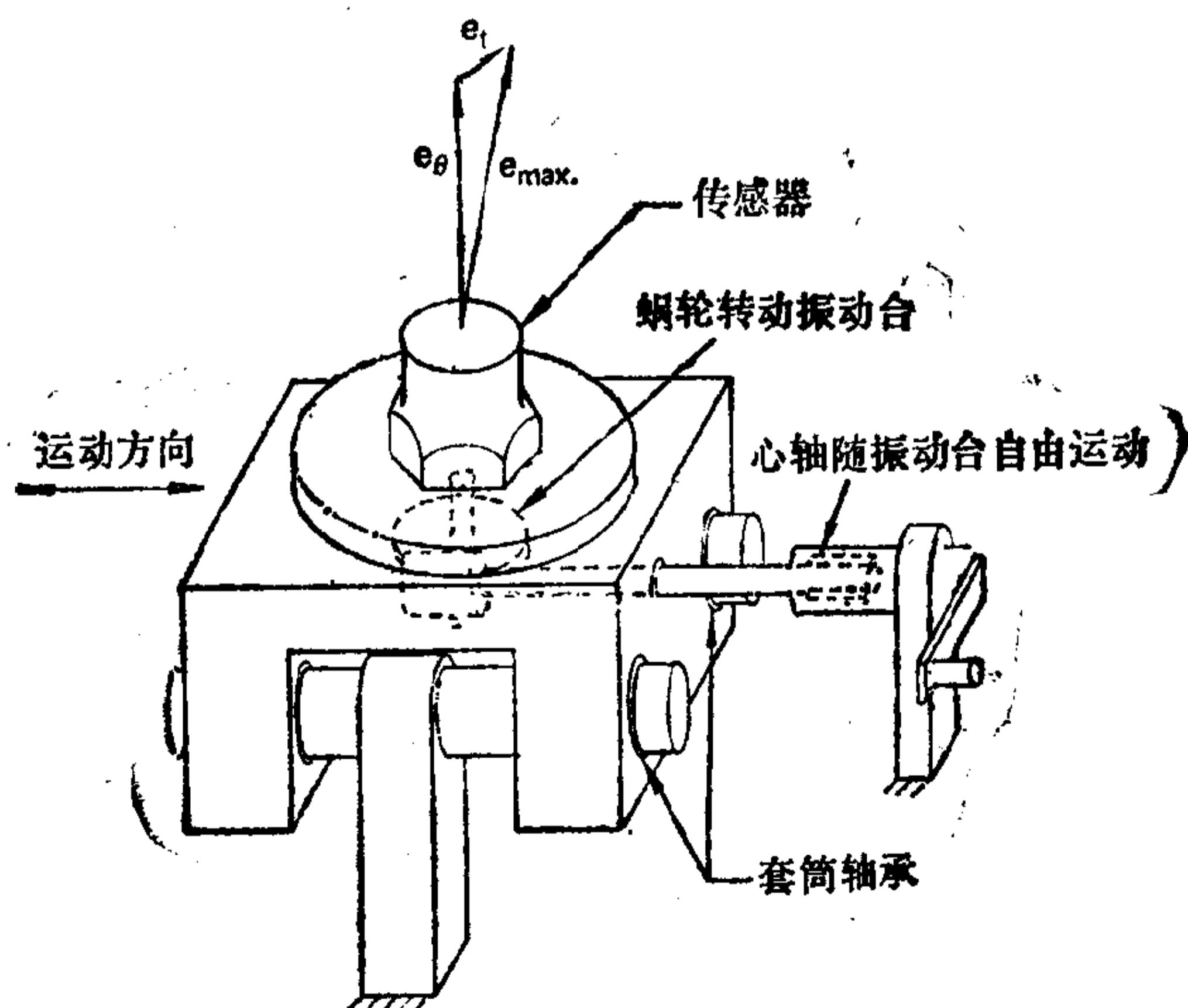


图4-5 用于测量加速度计横向运动的机
械式振动台

第五章 冲击与振动基准传感器

基准传感器是用绝对法来校准的。它的精度由两个因素确定。第一个是对基准传感器进行绝对校准时的测量不确定度；第二个是基准传感器的特性及其对校准结果的影响。它们都必须定量地确定。

冲击和振动标准传感器的绝对校准方法有互易校准、干涉仪校准、直观光学校准、离心校准和地球重力场校准等。互易法大量地用于基准级实验室，它最重要的优点是精度高和频率范围宽；干涉仪校准法的主要优点是可用于非常高的频率（至少到10 000 赫）的校准；地球重力场校准法对于校准有零频响应的传感器是非常有用的。对在绝对校准中的测量结果，要小心地加以评价，以识别和记录校准误差。

5.1 概述和特性

压电式加速度计和电动式速度传感器都可用作基准传感器。压电式加速度计的优点是既能作振动标准传感器，也能作冲击标准传感器。人们将它设计成一个标准传感器，并使它在作校准的振幅和频率范围具有近于恒定的灵敏度。电动式标准速度传感器有一个限定的频率范围。

压电式标准加速度计

图 5-1 为一个压电式标准加速度计。这个加速度计有一个与外壳电绝缘并连成整体的双头固定螺栓。加速度计的端部连接器也和外壳电绝缘，但是它有一个滚花螺帽，能拧进外壳或拧出外壳，以使加速度计输出端接地或者绝缘。一个惯性加速度计装在外壳里面，尽可能靠近安装端面。质量元件和压电晶体按非常高的谐振频率来设计。安装端面有一个螺纹孔，可连接螺纹适配器，适

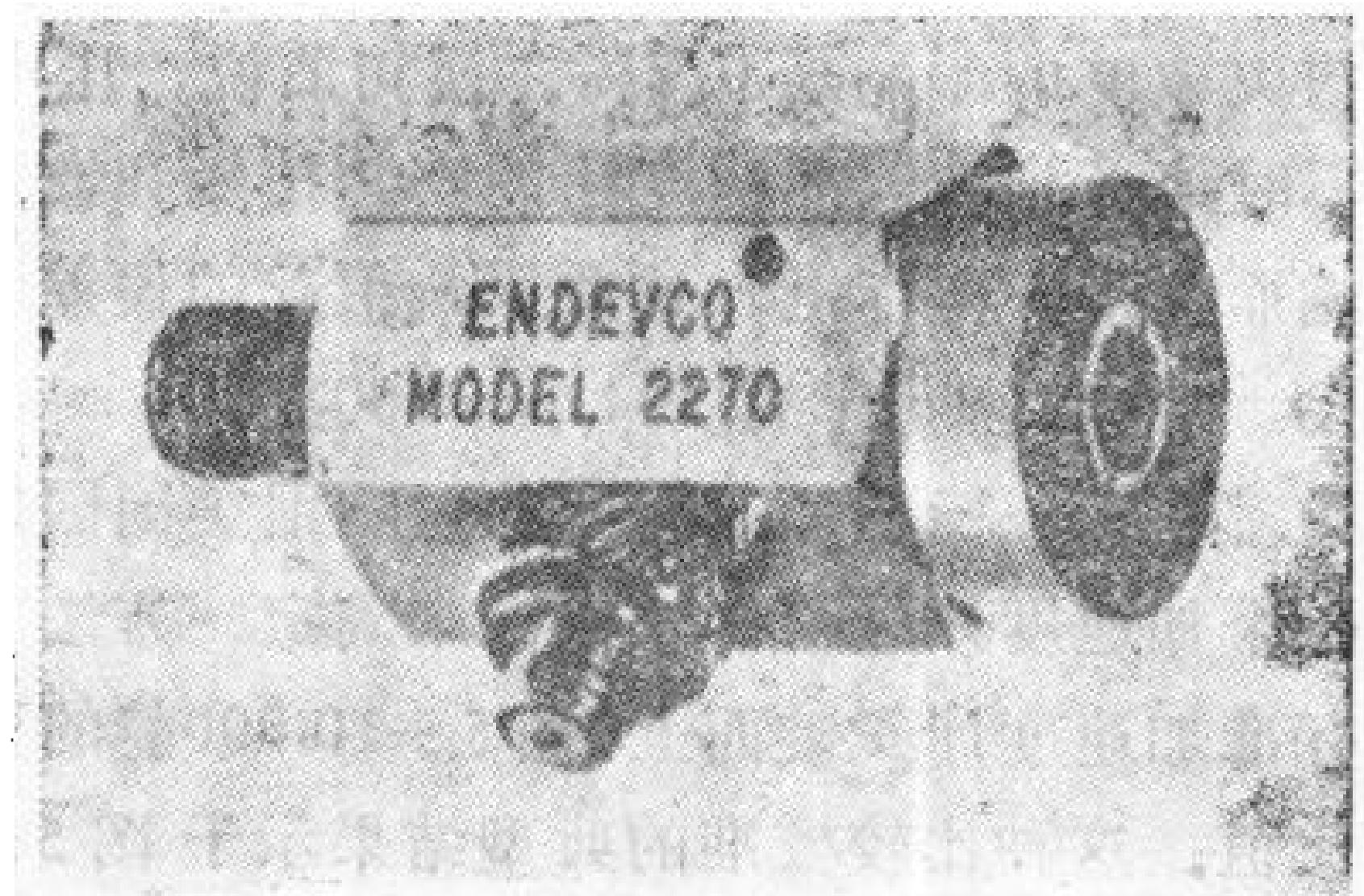


图5-1 压电式标准加速度计 (Endevco)

配器能提供适合于安装大部分加速度计的螺纹尺寸。要紧的是使这些加速度计的安装端面与标准加速度计的安装端面齐平（这能使高频校准时校准误差最小）。要避免采用夹具，以免将被校加速度计安装端面与标准加速度计安装端面分开。

表 5-1 列出了压电式标准冲击振动传感器的性能指标。它是用严格的鉴定试验确定的。

表5-1 冲击和振动标准传感器 (Endevco 2270型)⁽²⁸⁾
的性能指标

性 能	指 标
灵敏度误差	±0.5%
100 赫时的灵敏度稳定性	±0.5%/年
100 赫时质量对灵敏度的影响	±0.2%/100g
频率响应和相对运动灵敏度变化 (在5—5000 赫范围内, 最大质量为 100 克)	-2% ^①
灵敏度变化 (在 5—10 000 赫范围内, 最大质量为 50 克)	±4% ^①
振幅线性度变化	±0.1%/1000 g
横向灵敏度比	3%, 最大
温度响应电荷灵敏度	+0.3%/10°C
应变灵敏度	0.001 g/微应变

①根据名义响应为±1%的曲线估计的最大误差。

灵敏度 通过多次互易校准和小心地分析各种误差源, 可使灵敏度误差和稳定性达到0.5%. 在安装面上装上 100 克的质量块

时，质量块对灵敏度的影响是 0.2%。换句话说，压电式标准加速度计将因不时地受到被校加速度计的安装扭矩和惯性力产生的机械应力影响而变形。实际上，这些影响引起的误差大大地低于 0.2%，因为大多数加速度计的质量小于 100 克。

频响和相对运动 标准加速度计的频响用美国国家标准局预先校准好的一个加速度计进行比较校准来确定。方法是将这个加速度计连到标准加速度计安装面上，在 5—10 000 赫的频率上测量它们输出的比值。这种比较校准的典型结果示于图 5-2。由图可见，标准加速度计的灵敏度在 2000 赫以下是常数。随着频率的增加，灵敏度逐渐增加，在 10 000 赫时增加到 2% 左右。这个灵敏度为 1.02 毫伏/g 的加速度计可用来校准质量为 20 克的加速度计，这个质量就是美国国家标准局在上述比较校准中采用的加速度计的质量。

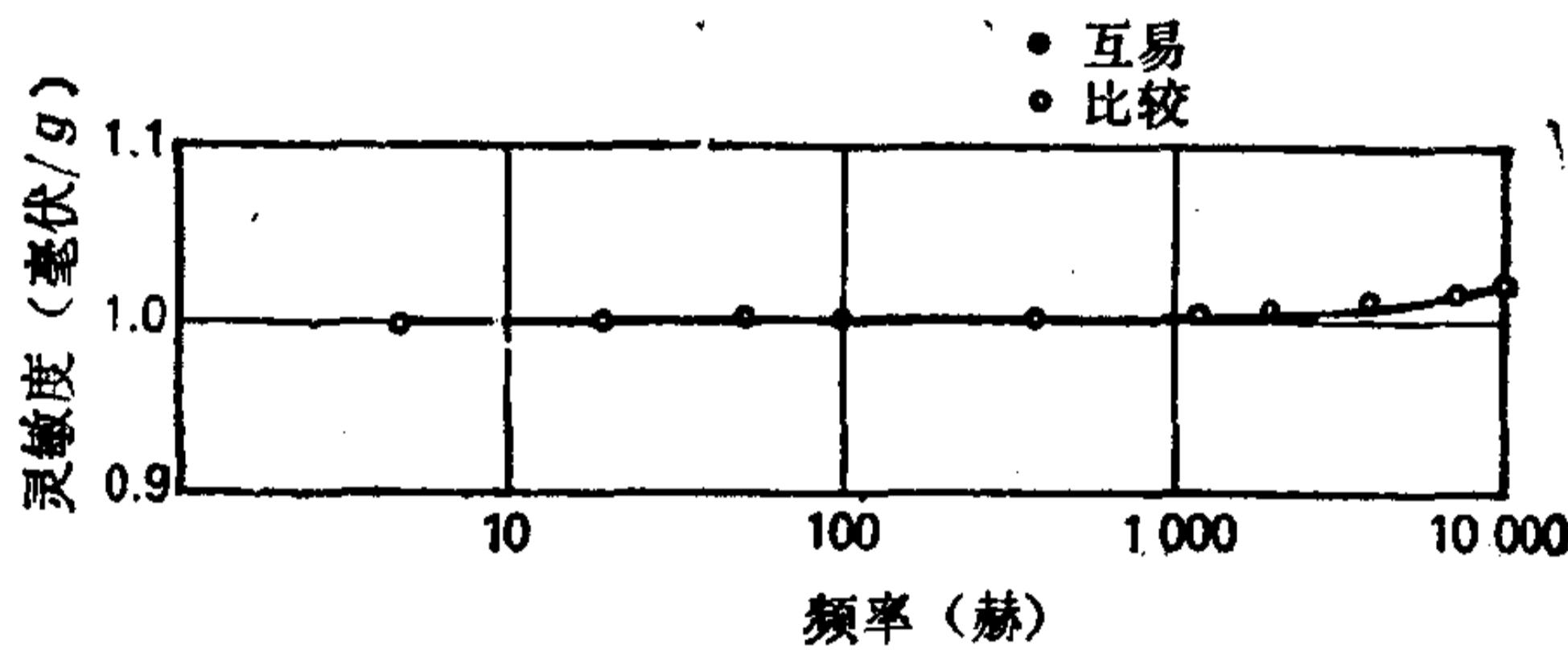


图 5-2 标准加速度计的校准结果（用美国国家标准局校准过的加速度计来进行^[29]）

对各种质量不同的被校加速度计适用的高频灵敏度，可通过附加比较校准来确定。这些校准是用几个频响特性已知、质量最大为 100 克的加速度计来进行的，而这些加速度计的频响可根据谐振频率校准来确定。然而，最好是有两种先在国家标准局分别用比较法和绝对法校准到 10 000 赫的加速度计。标准加速度计的高频灵敏度变化，由其校准结果确定。

一个质量为 15 克的被校加速度计的修正量为 +2%，50 克的修正量为 -2%。换句话说，在对相应质量（见图 5-3）的被校加速度计

进行比较校准时，标准加速度计的加速度灵敏度必须按这个量改变。灵敏度在高频段的变化是相对运动引起的（安装面的运动随其上面所加的质量块的质量而变化）。标准加速度计的灵敏度，被定义为其电输出与安装面的加速度运动之比。由于在高频段运动的变化取决于质量，所以灵敏度在高频段也要随质量而变化。

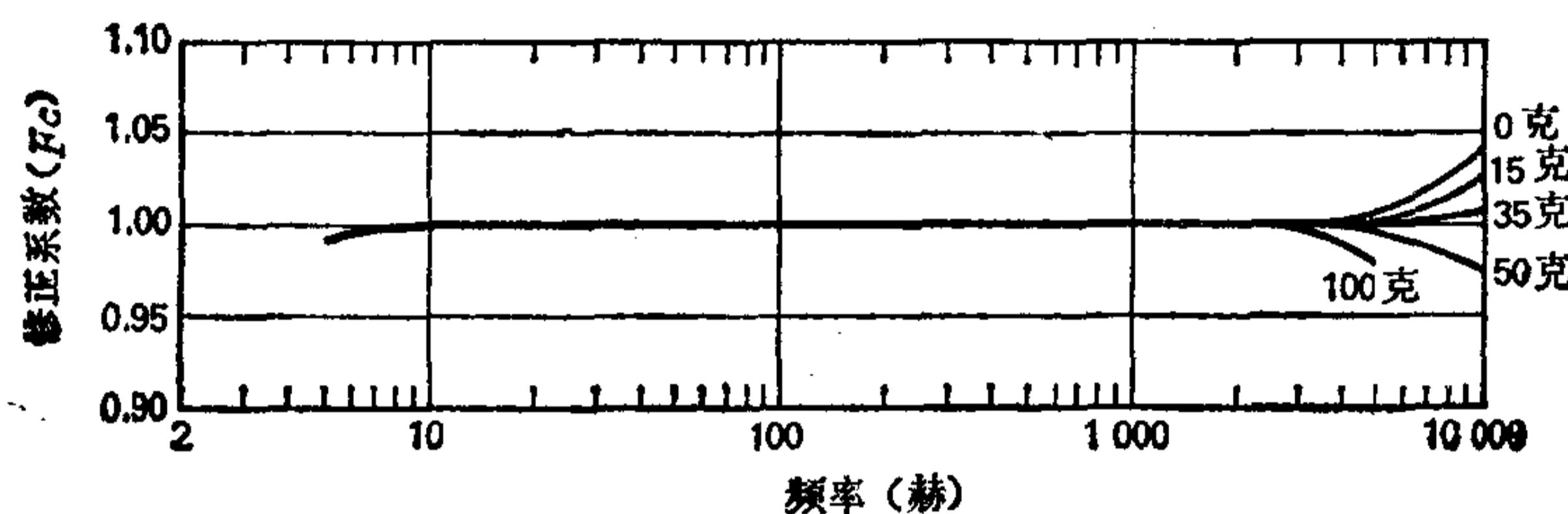


图5-3 用各种质量不同的加速度计对一个标准
加速度计的校准^[30]

在做各种加速度计的比较校准时，习惯上要考虑修正系数。如表 5-1 所示，这些修正系数是在 $\pm 1\%$ 的不确定度下确定的。

幅值线性 众所周知，压电式加速度计的灵敏度随所施加的加速度线性地增加。为了达到冲击运动标准中的常用精度，对于预期使用中的最大加速度，灵敏度的增加不应当超过百分之几。如果灵敏度的增加在整个工作加速度范围内小到 1%，那就更好。要用试验证明在上限为 10 000 g 的加速度范围内灵敏度增加只是 1% 将是困难的，因为冲击运动校准误差可能有 5% 那样大。为了证实冲击标准传感器的幅值线性度偏差低于 1%，那就需要在五倍于预期使用的加速度值时对标准传感器进行校准。例如，一个标准传感器在高达 50 000 g 的加速度下进行的冲击校准，误差为 5%，对于在 10 000 g 以下的加速度，这个标准传感器的线性度将是有把握的；类似地，如对标准传感器在高达 10 000 g 时进行了这样的冲击校准，其线性度仅在 2000 g 以下的加速度才是有把握的。

制作一个其质量组件的质量很大的专用标准加速度计，可实现等效加速度上限为 50 000 g 的校准。采用大质量组件在低加速度

时加给晶体的机械应力应该和采用小质量组件在高加速度时的相同。例如，假若大质量组件与小质量组件的质量之比是10，当加速度为2500g时，等效加速度将是25 000g；假若质量比为20，那么等效加速度将是50 000g；余类推。按这种方法作了比较校准的标准加速度计，其灵敏度对于使用范围内的各种振幅的情况都适用。

这些冲击运动比较校准的结果见图5-4。图中每个数据点系根据示波图得到的，大质量组件的输出与小质量组件输出之比由示波图测量出。根据全部数据点，利用最小二乘法确定描述幅值线性度的曲线。在50 000g, 10 000g, 1000g时灵敏度增加分别是5%, 1%, 0.1%。因此，用这个标准传感器在5000g进行冲击运动比较校准时修正量应为+0.5%。

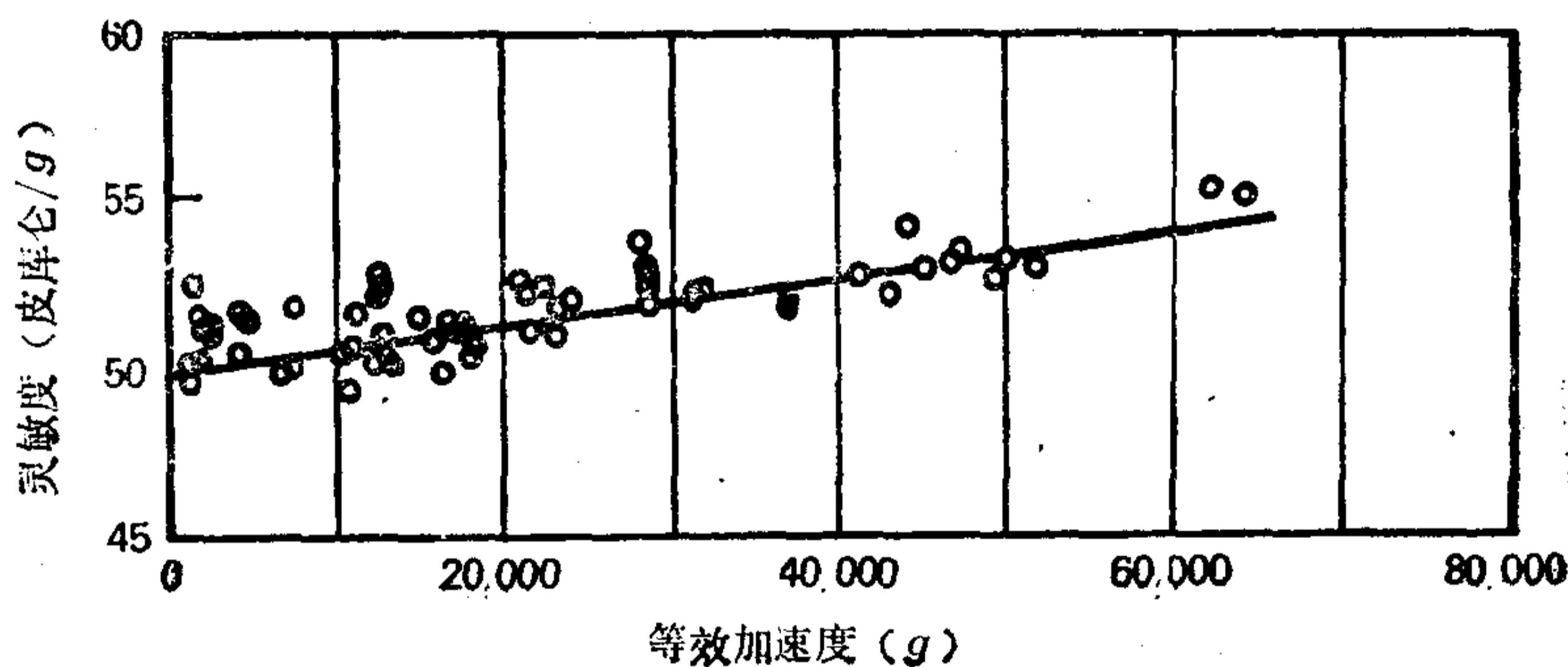


图5-4 为确定标准加速度计的振幅线性度所做的冲击运动校准^[18]

横向灵敏度 表5-1中标准加速度计的横向灵敏度比是±3%。因为高质量校准用的振动台的横向运动很小，如果适当注意选择和使用校准用的振动台，那么就可忽略由于标准传感器横向灵敏度引起的误差。

温度响应 可使标准加速度计在温箱中承受振动作用，以进行灵敏度校准。这些加速度灵敏度温度响应的校准是在大约20℃—30℃的温度范围内进行的。如果标准传感器要用作其他加速度计的温度响应标准，那么必须在预期使用的高温和低温下校准标

准传感器。表 5-1 中标准传感器的电荷加速度灵敏度每 10°C 增加 0.3%。对在校准试验内出现的小的温度改变，无须进行校正。

应变灵敏度 标准加速度计的应变灵敏度是在一根梁上确定的。这根梁将已知的弯曲应力加到正常情况下与校准用的振动台相连的安装面上。表 5-1 中标准传感器的最大应变灵敏度为 $0.001 \text{ g}/\mu\text{应变}$ 。这表明标准传感器的设计很好地隔离了弯曲应力。如果校准用的振动台在工作频率范围内具有产生横向运动的谐振，那么这些应力就要加到标准传感器上。

电动式标准速度传感器

电动式标准传感器由图 5-5 所示的速度灵敏线圈和永磁体所组成。这个标准传感器是电动式振动台的一部分。速度灵敏线圈、驱动线圈和安装台面接到一根空心轴上，形成振动台的移动部件。它是用薄片状弹簧悬挂起来的。供给励磁线圈以直流电，结

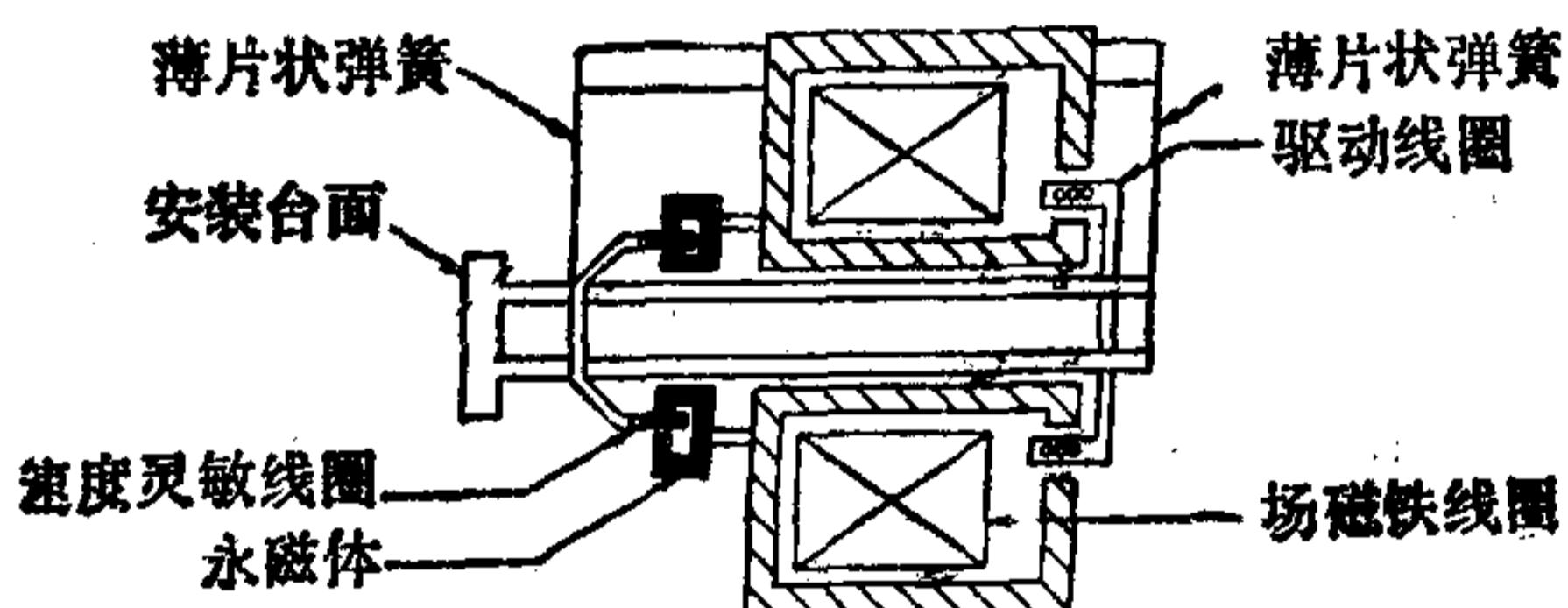


图 5-5 标准速度传感器的结构

果在驱动线圈周围形成了不变的磁场。交流电加到驱动线圈上以产生一个正弦变化的磁场，它与恒定磁场相互作用而产生一个沿着移动部件的对称轴的正弦振动。电动式标准传感器只限于在移动部件和薄片状弹簧的谐振所产生的横向运动以及加速度波形失真可以忽略的频率上使用。在工作频段内满足这种条件的频率是相当有限的。因此，电动式速度传感器很少使用。然而，为了熟悉绝对互易方法，详细地研究它们的性能还是有益的。

5.2 互易校准

互易校准是确定冲击与振动基准传感器灵敏度的一种绝对校

准法。此法要求使用互易传感器。所谓互易传感器，是在受到电激励时能产生运动，而承受机械冲击和振动时则能产生电输出的一种传感器。压电式加速度计和电动式速度传感器都是互易传感器。

如果加速度计用来测量冲击和振动，则设计时应考虑使它能产生大的电输出；相反，当它受到电激励时，就不能产生大的运动。因此，在互易较准时希望用另外的一些传感器。很凑巧，电动式振动台的驱动线圈适合于用来设计互易传感器。它可在互易校准过程的不同阶段分别产生振动以及测量振动。

电动式标准传感器的校准

在线性范围内工作的电动式基准传感器的机械量和电学量间的关系由下列方程给出^[31, 32]：

$$V_t = CF_t + AL_1 E_d \quad (5-1)$$

$$I_d = -AL_2 F_t + BL_1 E_d \quad (5-2)$$

$$E_s = HF_t + NL_1 E_d \quad (5-3)$$

其中 V_t 和 F_t 分别是安装台面的速度和作用于安装台面的力； I_d 和 E_d 分别是驱动线圈中的电流和所施加电压； E_s 是速度灵敏线圈中所产生的电压。当其他量[●]的单位取作英寸，磅，秒，安培，伏特时，常数 $L_1 = 2.249 \times 10^{-7}$, $L_2 = 2.540 \times 10^{-8}$. 常数 A, B, C, H 和 N 的值取决于基准传感器的结构。式中的物理量用复数表示，正如在交流电理论中通常所作的那样。

这个机电组合系统的互易关系是

$$\left. \frac{F_t}{L_1 I_d} \right|_{V_t=0} = - \left. \frac{E_d}{L_2 V_t} \right|_{I_d=0}$$

令 $V_t = 0$ 计算方程 (5-1)，令 $I_d = 0$ 计算方程 (5-2)，并解两对联立方程，便可确定这个关系。

为了推导可作为电动式标准振动传感器校准的方程，我们定

[●]最初建立这些方程是用英制单位进行的。在理论讨论及最初的数据测量中，仍保留这些单位。

义标准传感器的校准系数 $F = E_s/V_t$, 即速度灵敏线圈的电压与安装台面的速度之比。如果机械阻抗为 Z 的物体这样地被连到台面，使 F_t 是它的唯一反作用力，那么

$$F_t = -V_t Z \text{ 磅力 (牛顿)} \quad (5-4)$$

将方程 (5-4) 代入方程 (5-1) 和 (5-3), 消去 E_d , 由其结果我们可得到：

$$F = a + bZ \text{ (伏/(英寸/秒) 或伏/(米/秒))} \quad (5-5)$$

其中 a 和 b 是上面提及的常数的组合。

将方程 (5-4) 代入方程 (5-1), 并将结果代入方程式 (5-2) 和 (5-3), 可得线圈间传递导纳：

$$\frac{I_d}{E_s} = \frac{B + (BC + A^2 L_2)Z}{N + (NC - AH)Z} \quad (5-6)$$

现在考虑加在安装面上的加速度阻抗已知为 $Z_a = j\omega m = j\omega W/g$ 的质量块, 其中 m 为质量 (千克), W 为重量 (磅), ω 为角频率 (弧度/秒), j 为单位虚矢量, g 为重力加速度 (386 英寸/秒² 或 980 米/秒²)。利用方程 (5-6) 可写出如下关系：

$$\frac{W}{\frac{I_d}{E_s} \left|_w \right. - \frac{I_d}{E_s} \left|_0 \right.} = J + QW \quad (5-7)$$

其中 $\frac{I_d}{E_s} \left|_w \right.$ 和 $\frac{I_d}{E_s} \left|_0 \right.$ 分别是在给定的频率上, 安装台面上的质量

块重量为 W 磅以及不加质量块时的传递导纳值, J 和 Q 是 j, ω, g 和上面曾提及的常数的组合。注意, 如果测量了加已知重量的质量块 (至少两个) 以及不加质量块时的传递导纳, 方程 (5-7) 的截距 J 和斜率 Q 就能确定。

电压比的表达式为

$$R = \frac{E_s}{E_d} \Big|_{J_d=0}$$

它可通过令方程 (5-2) 中 $I_d = 0$, 并将结果代入方程 (5-3) 来得

到，即

$$R = \left. \frac{E_s}{E_d} \right|_{I_d=0} = \frac{-HBL_1 + ANL_1 L_2}{AL_2} \quad (5-8)$$

得到了这些结果后，再考虑各常数的关系，我们可得式(5-5)中的常数表达式为：

$$a = 0.01711 \sqrt{j\omega J \left. \frac{E_s}{E_d} \right|_{I_d=0}} \quad (5-9)$$

$$b = 6.601Q \sqrt{\frac{1}{j\omega J} \left. \frac{E_s}{E_d} \right|_{I_d=0}}$$

因此，通过测量电压比 R ，以及台面上加一系列不同重量的质量块和不加质量块时的传递导纳 G ，由之得出 J 和 Q ，就能算出电动式标准传感器在特定的频率 ω 上的校准系数。

电压比的测量 用第二振动台通过一个机械连结器驱动标准传感器，就可测量 $I_d = 0$ 时的电压比 E_s/E_d 。用电压驱动电路和高阻抗电压表测量电压比的量值。测量的精度只取决于电路中的组件的阻抗值的精度以及电压表读数的重复性。电压比的相角用相位或者根据电压多边形来计算。在驱动线圈两端并联一个简单电路，取其电压读数来构成电压多边形。相位角的确定受电压表的精度的影响。至于电路中元件的电阻抗，是处于这样的情况，即在所有频率下，驱动线圈等效于开路。在测量电压比时，要注意避开有横向运动的频率。

图 5-6 示出在一个电动式标准传感器上进行电压比测量的结果（即 $I_d = 0$ 时的 E_s/E_d ）。第一个轴向谐振出现在大约 1500 赫的频率。高于这个频率时，驱动线圈和速度灵敏线圈运动方向相反。靠近 4500 赫处有另一个谐振，这时相移则是另外的一个值。要在靠近谐振频率处实现精确的校准是困难的，因为频率的微小改变会引起电压比的可观改变，同时驱动线圈振幅也可能大到超出了它的线性范围。

在靠近谐振频率处，温度对电压比的影响也特别显著，这是

由于温度对弹性常数和连接点的紧固性的影响造成的。在远低于第一个轴向谐振的频率处，温度对标准传感器的电学机械性能的影响很小。

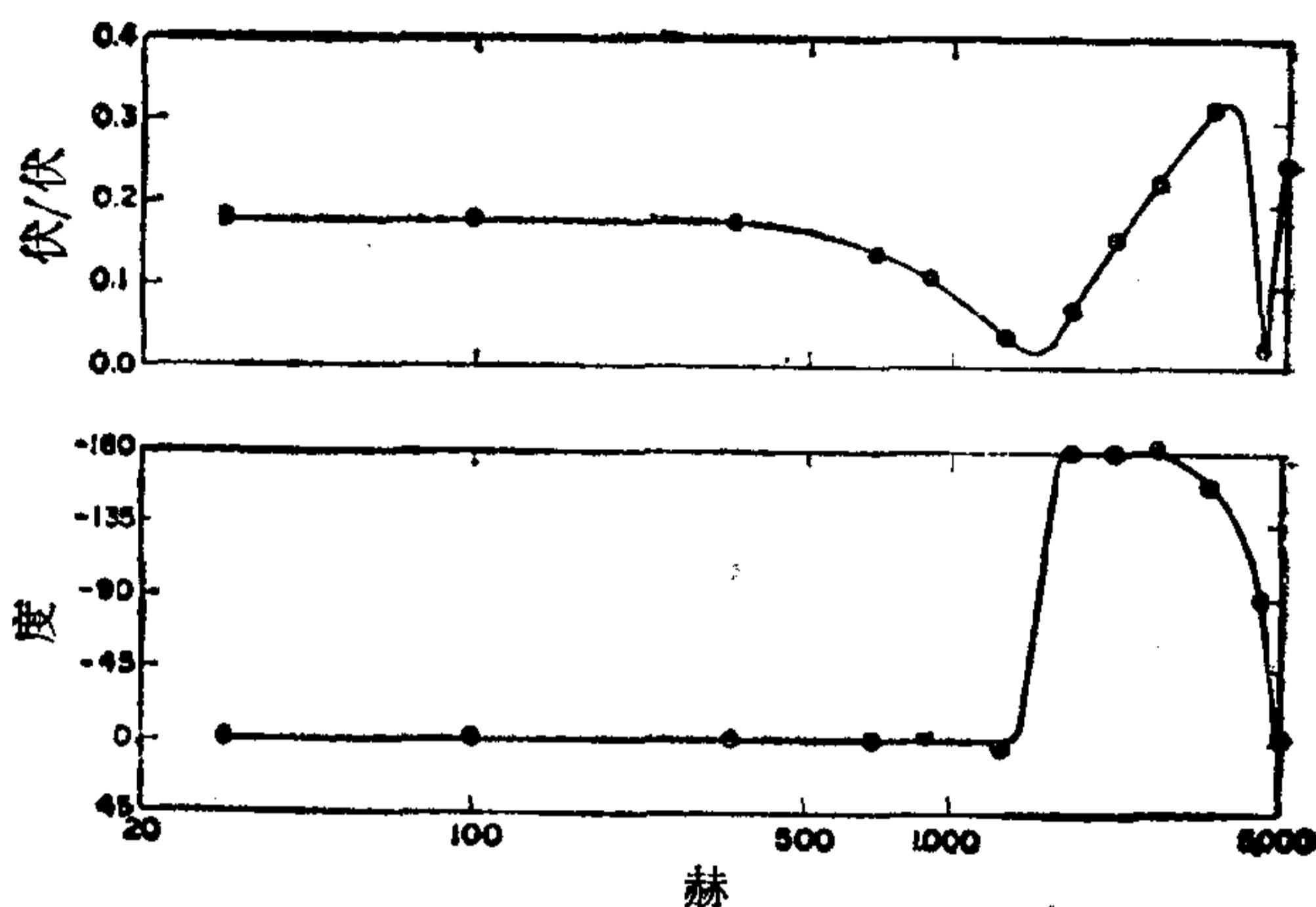


图5-6 电压比大小和相角的变化

传递导纳的测量 可将一个已知阻值的电阻器串联在驱动线圈上进行传递导纳测量。将测量电压比时所用的电路并联在这个电阻器上，便可测量传递导纳的数值和相位。

把一系列重量不同的质量块分别加在安装台面上，在测量电压比的每一频率上测量传递导纳（但要避免在接近谐振的频率上测量）。测量传递导纳和电压比要注意在相同温度下进行。把传递导纳值分成实部和虚部，并计算

$$\frac{W}{\left| \frac{I_d}{E_s} \right|_W - \left| \frac{I_d}{E_s} \right|_0} = \frac{W_n}{Y_{ew} - Y_{e0}}$$

用最小二乘法把数据点拟合成直线。图 5-7 示出频率为 900 赫和 5000 赫时的典型值。

加权最小二乘法 为了确定方程式(5-7)的截距 J 和斜率 Q ，需要用至少两个已知重量 W_n 的质量块分别加在安装台面上，以测量传递导纳 Y_{en} ；还有在不加质量块时，测量传递导纳 Y_{e0} 。在要

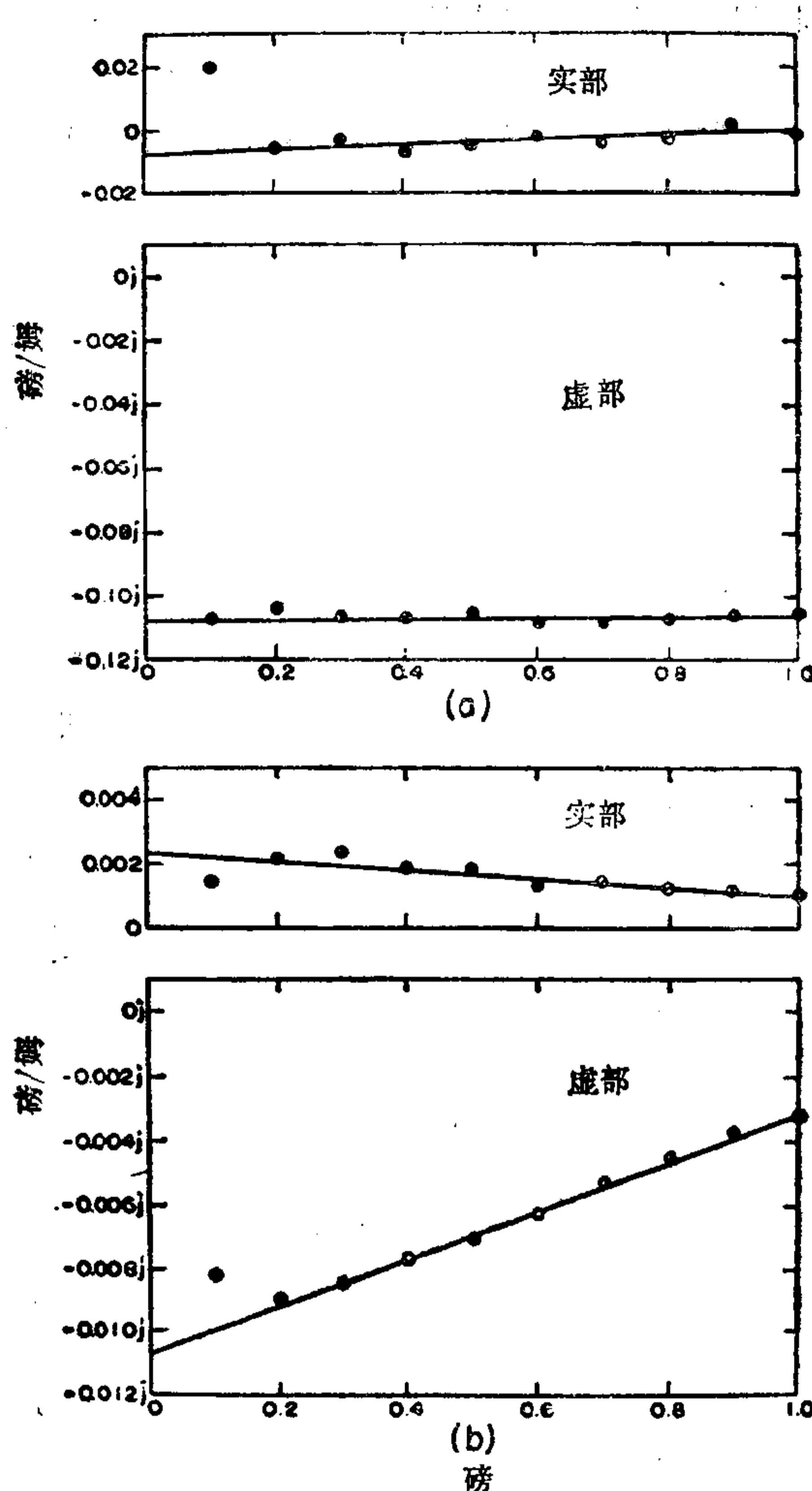


图5-7 传递导纳与质量的函数关系图

(a) 频率为900赫时 (b) 频率为5000赫时

求 J 和 Q 的每个频率上进行这些测量, 由 $W_n/(Y_{en} - Y_{e0})$ 的实部和虚部函数图可得出 J 和 Q 的实部和虚部, 如果用了两个以上的质量块, 测量了其相应的附加传递导纳, 那么 J 和 Q 将可以更精确地确定。通常使用几个质量块(5—10个, 个数多少取决于频率)来测

量。重量 W_n 这样来选择，使得 $W_n = n (\Delta W)$ ，即 $\Delta W = W_n - W_{n-1}$ ，其中 $n = 1, 2, 3, \dots$ ，当 $n=1$ 时， W_{n-1} 表示不加质量块。一般地我们有

$$\frac{W_n (Y_{enr} - Y_{e0r})}{(Y_{enr} - Y_{e0r})^2 + (Y_{ent} - Y_{e0t})^2} = J_r + Q_r W_n \quad (5-10)$$

$$\frac{W_n (Y_{ent} - Y_{e0t})}{(Y_{enr} - Y_{e0r})^2 + (Y_{ent} - Y_{e0t})^2} = -J_t - Q_t W_n \quad (5-11)$$

其中带有下标 r 和 t 的量分别表示相应量的实部和虚部。除了靠近某谐振频率时外， $(Y_{ent} - Y_{e0t}) \gg (Y_{enr} - Y_{e0r})$ 。研究方程

(5-11) 左端的近似值

$$\frac{W_n}{(Y_{ent} - Y_{e0t})} \quad (5-12)$$

设 δ_{ent} 和 δ_{e0t} 分别是 Y_{ent} 和 Y_{e0t} 的测量误差，这样，假设 W_n 的误差可忽略，式 (5-11) 左端即式 (5-12) 可变成（只要小误差量的表达式中可忽略掉一阶项）：

$$\frac{W_n}{(Y_{ent} - Y_{e0t}) + (\delta_{ent} - \delta_{e0t})} = \frac{W_n}{(Y_{ent} - Y_{e0t})} \times \\ \times \left(1 - \frac{\delta_{ent} - \delta_{e0t}}{Y_{ent} - Y_{e0t}} \right) \quad (5-13)$$

试验表明， $(Y_{ent} - Y_{e0t}) \approx n (\Delta Y_{et})$ ，其中 ΔY_{et} 是由于增量 ΔW 引起的传递导纳虚部的改变量。将这个近似式代入误差项，方程式 (5-13) 变成：

$$\frac{W_n}{(Y_{ent} - Y_{e0t}) + (\delta_{ent} - \delta_{e0t})} = \frac{W_n}{(Y_{ent} - Y_{e0t})} - \\ - \left[\frac{1}{n} \frac{\Delta W}{(\Delta Y_{et})^2} (\delta_{ent} - \delta_{e0t}) \right] \quad (5-14)$$

方括号内的值是由传递导纳测量的误差 $(\delta_{ent} - \delta_{e0t})$ 引起的式 (5-11) 左端的误差。如果假定 $(\delta_{ent} - \delta_{e0t})$ 对全部 n 值近于常数，

从(5-14)知误差正比于 $1/n$ 。例如， $n=10$ 时，式(5-11)左端中的误差是 $n=1$ 时的 $1/10$ 。同样，传递导纳的实部误差即式(5-10)的左端，也具有相同的结果。

用 y_{nr} 表示式(5-10)的左端，按一般的最小二乘法，是先写出：

$$\begin{aligned}r_1 &= y_{1r} - (Q_r W_1 + J_r) \\r_2 &= y_{2r} - (Q_r W_2 + J_r) \\&\dots \quad \dots \\r_n &= y_{nr} - (Q_r W_n + J_r)\end{aligned}$$

然而，在这里，剩余项或误差 r_n 正比于 $1/n$ 。为了合理地调整我们所用的最小二乘法，以满足数据的最佳拟合要求，把上式改写成：

$$\begin{aligned}r_1 &= y_{1r} - (Q_r W_1 + J_r) \\2r_2 &= 2y_{2r} - 2(Q_r W_2 + J_r) \\&\dots \quad \dots \\nr_n &= ny_{nr} - n(Q_r W_n + J_r)\end{aligned}$$

把这些等式平方，并对结果求和，我们发现，当

$$\begin{aligned}J_r \sum n^2 + Q_r \sum n^2 W_n &= \sum n^2 y_{nr} \\J_r \sum n^2 W_n + Q_r \sum n^2 W_n^2 &= \sum n^2 W_n y_{nr}\end{aligned}$$

时，剩余项的平方和达到最小。对于 $W_n = 0.2, 0.4, \dots, 2.0$ 磅， J 和 Q 的实部为：

$$J_r = 0.042\ 040\ 980\ 7 \sum n^2 y_{nr} - 0.025\ 100\ 401\ 6 \sum n^2 W_n y_{nr} \quad (5-15)$$

$$Q_r = -0.025\ 100\ 401\ 6 \sum n^2 y_{nr} + 0.015\ 972\ 982\ 8 \sum n^2 W_n y_{nr} \quad (5-16)$$

同样，对于同一组重量， J 和 Q 的虚部为：

$$J_t = -0.042\ 040\ 890\ 7 \sum n^2 y_{nt} + 0.025\ 100\ 401\ 6 \sum n^2 W_n y_{nt} \quad (5-17)$$

$$Q_t = 0.025\ 100\ 401\ 6 \sum n^2 y_{nt} - 0.015\ 972\ 982\ 8 \sum n^2 W_n y_{nt} \quad (5-18)$$

其中 y_{nt} 表示式(5-11)的左端。

纵轴截距 J 和斜率 Q 用上式确定。将 J 和 Q 的值，连同在它们相应的频率上测得的电压比一起代入式(5-9)，就可计算出 a 和 b 之值。

校准结果 对于每一个校准频率，将 a 和 b 值代入式(5-5)，便可得到电动式标准传感器的校准系数表示式。它是在安装台面上的振动传感器质量的函数。为了说明传感器质量对校准系数的影响，计算出质量为 0, 0.5 和 1.0 磅 (0.45 千克) 传感器的校准系数，其结果示于图 5-8。在 900 赫以内的频率上，校准系数的变化小于 1%。对于这个电动式标准振动传感器，传感器质量小于 1 磅 (0.45 千克) 时，在 900 赫以内的频率上，质量的影响是可忽略的；在 900 赫以上时，这个影响变得可观，在 5000 赫时最大。这是由速度灵敏线圈与安装台面间的相对运动所致。

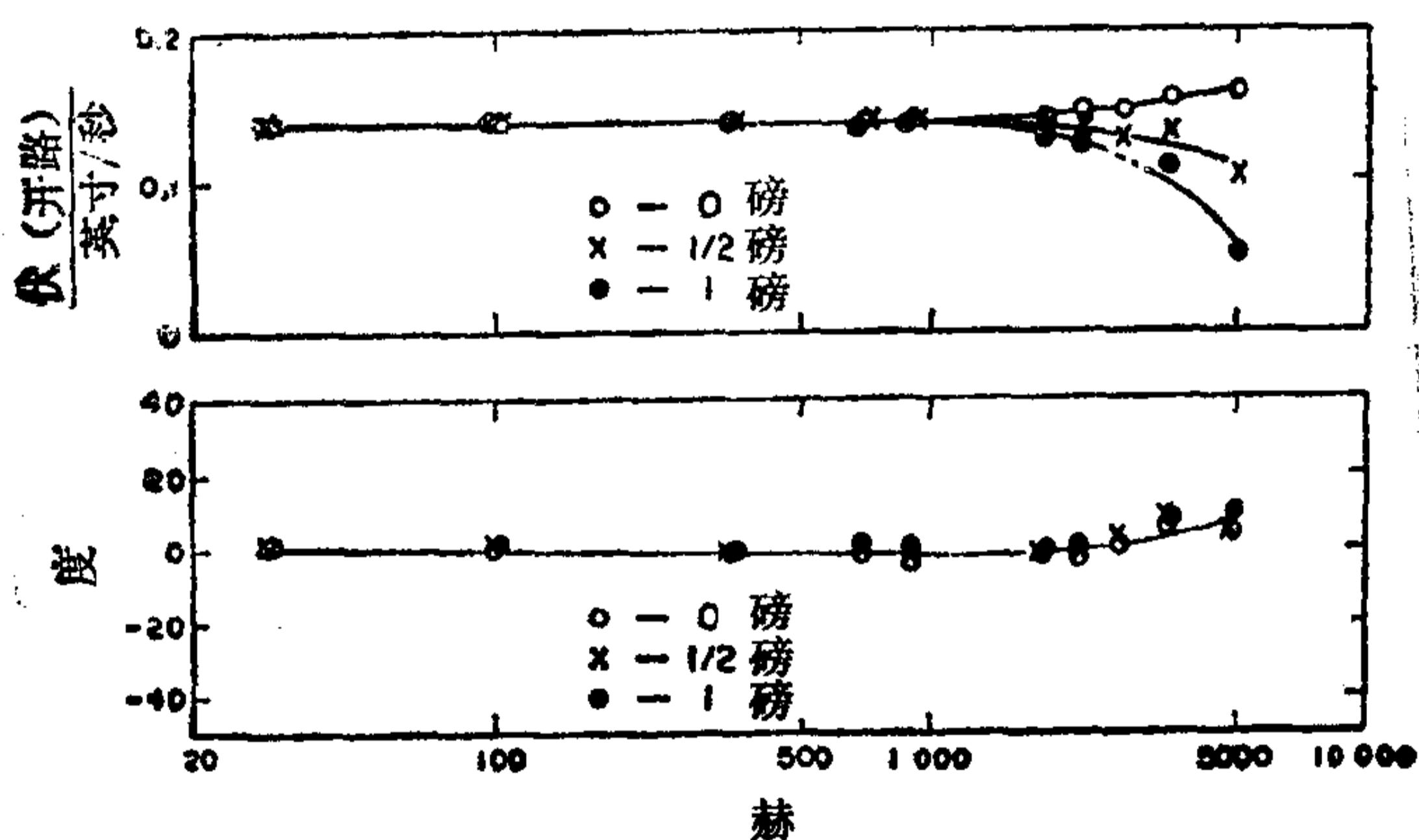


图 5-8 电动式标准振动台的校准系数的大小和相角的变化

压电式标准传感器的校准

压电式标准加速度计具有频带宽的优点。其加速度灵敏度一般在大约 10 赫到几乎 5000 赫的整个频率范围内是恒定的。在更高的频率上（高达 10 000 赫），灵敏度的小变异是根据国家标准局的比较校准来确定的。在灵敏度为常数的范围内的一个低频率上，基准传感器的精度可用绝对互易校准来提高。而所选择的特

定频率将取决于所选电动式振动台的特征。

在灵敏度为常数的频率范围内，标准传感器不存在相对运动，认识到这一点是重要的，它的正确性可由下面的事实看出：在传递导纳与质量的关系图中，斜率 Q 趋于零，由式 (5-9) 知式 (5-5) 中的 b 项可以忽略。上述的特定方程仅适用于速度传感器。为使它们对加速度传感器也适用，只需要用角频率 $j\omega = j2\pi f$ 除式 (5-9) 右端。由此，按互易校准的标准加速度计的灵敏度变成^[29]

$$S_s = 2635 \sqrt{JR/jf} \quad (5-19)$$

式中 S_s ——压电式标准加速度计的灵敏度（毫伏/g）；

J ——传递导纳截距〔重量对传递导纳比的曲线的截距，单位是磅/姆，其中传递导纳比 G 是驱动线圈电流与压电式加速度计电压输出之比，而重量就是上述的 10 个值 (0.1—1 磅)〕；

R ——电压比（即压电式标准加速度计的电压输出与驱动线圈的电压输出之比，此时振动台用次级线圈来驱动，初级线圈为开路）；

j ——虚数单位 (90° 矢量)；

f ——测量电压比时所用的频率（赫）。

传递导纳截距由下式给出：

$$J = 0.04204 \sum n^2 Y_{nr} - 0.0502 \sum n^2 W_n Y_{nr} \quad (5-20)$$

式中 n ——对应于重量 W_n 的从 1 到 10 的整数（见表 5-2）；

W_n ——重量，单位是磅（或牛顿），增量为 0.1 磅，在表 5-2 的校准中，它从 0.1 磅增加到 1.0 磅。

式 (5-20) 中的 Y_{nr} 项由下式计算：

$$Y_{nr} = W_n / (G_n - G_0) \quad (5-21)$$

式中 G_n ——传递导纳比〔定义与式 (5-19) 中的相同〕；

G_0 ——不加质量块时的传递导纳比。

对测定量的相位角进行研究可以进一步简化这些方程的计算（按互易校准选择的振动台，最好在远低于移动部件的轴向谐振

表5-2 PX-SP 46型第10号压电式标准振动台
的传递导纳测量结果^[29]

<i>n</i>	<i>W_n</i> (磅)	<i>G_n</i> (安/伏)	<i>Y_{nr}</i> (磅·伏/安)
—	0.0	24.84	—
1	.1	31.55	0.01492
2	.2	38.17	0.01500
3	.3	44.74	0.01508
4	.4	51.55	0.01498
5	.5	58.14	0.01502
6	.6	64.72	0.01505
7	.7	71.17	0.01511
8	.8	78.03	0.01504
9	.9	84.64	0.01505
10	1.0	91.32	0.01504
—	0	24.84	—

的频率上运转）。这就需要假设移动部件起着刚体作用，且在激振中的互易线圈和标准加速度计之间不存在相对运动。这时，由牛顿第二运动定律也可以得出结论，压电式标准加速度计的加速度运动与台面所施加的力同相，而且互易线圈的加速度运动与压电式标准传感器的加速度运动之间的相角为0°。

正弦运动的速度与加速度间的相角为90°。因此，电压比的相位角是90°，这样，消去了方程式(5-19)中的90°矢量*i*。此外，已知驱动线圈电流和压电式标准加速度计的输出之间的相角是0°。这个结论可由牛顿第二运动定律以及在线圈中所产生的力正比于电流这一事实导出。只要注意在低频时进行互易校准的情况，压电式标准加速度计和电动式振动台特性的物理解释就可证实。由此可见，没有必要在互易校准过程中测量相位角，这样就可避免由测量相位角所带来的误差。

互易校准法。图(5-9)是选来作压电式标准加速度计互易校准的振动台。振动台的移动部件装有两个驱动线圈，其中之一(1号线圈)作互易传感器用。靠近振动台中心的2号线圈只用来产生正弦运动，而第一个线圈用作校准过程中测量电压比时的速

度传感器。这个振动台移动部件的轴向谐振频率比互易校准频率高十倍。互易校准选用的频率是100赫，远低于轴向谐振频率，因而保证了互易线圈和加速度标准传感器之间不存在相对运动。

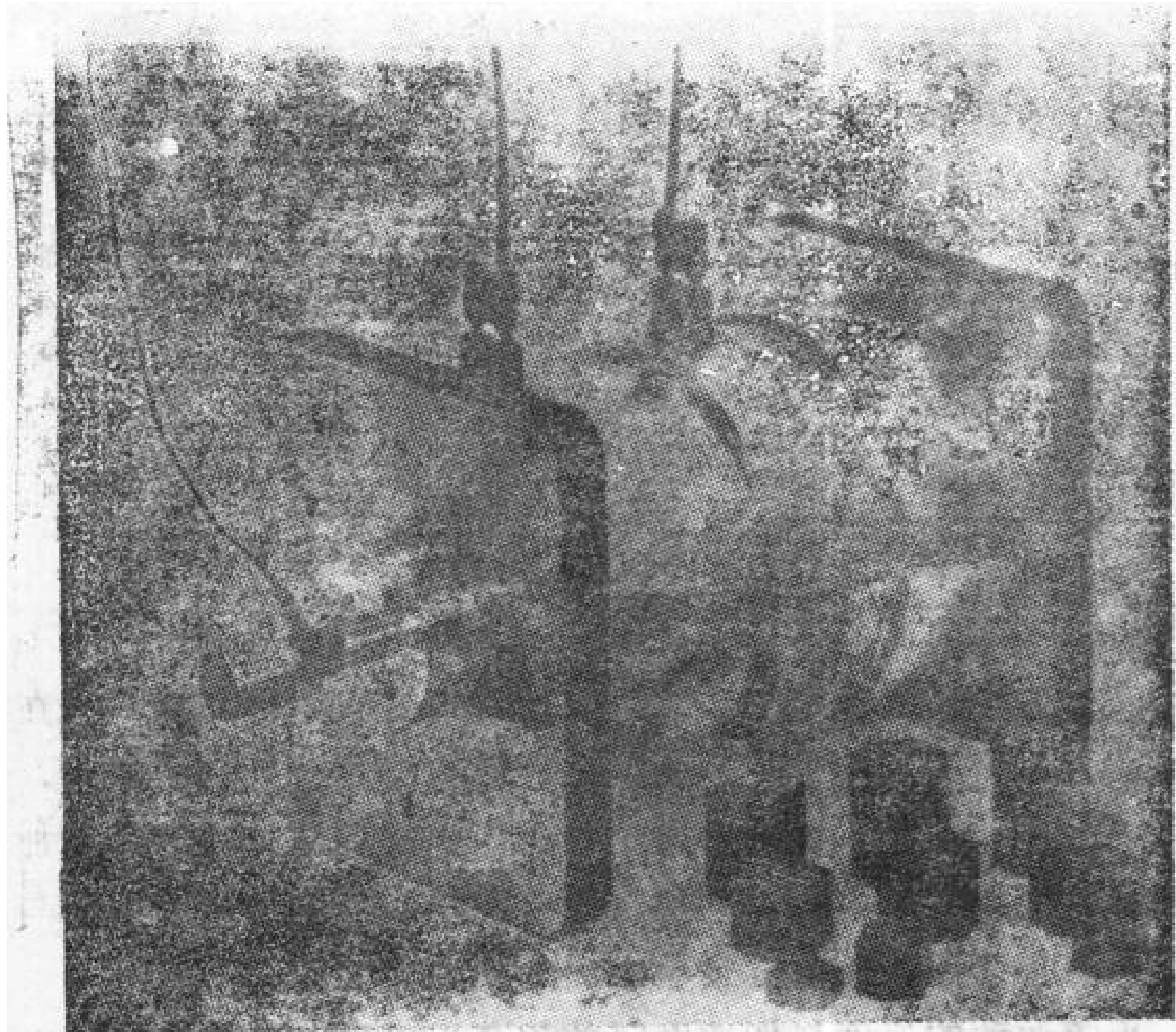


图5-9 传递导纳测量装置

互易校准法的步骤可归纳为：

1. 在一个比例平衡块上，对重量不同（以0.116为增量，从0.1到1.016）的10个情况作校准。
2. 确定在振动台上加质量块时，以及不加质量块时的传递导纳比 G 。这就要在每一步测量驱动线圈电流和压电加速度计电压输出，因为传递导纳比要用它们来计算。
3. 按式(5-20)和式(5-21)计算 J 值和传递导纳。
4. 测量电压比 R （振动台由第二个驱动线圈或激振驱动时，等于压电式标准传感器的输出与开路驱动线圈的输出之比）。
5. 用电子计数器测量第4步所用的频率。

6. 用分别从第3, 第4和第5步得出的 J , R , f 值, 由式(5-19)计算压电式标准加速度计的灵敏度。

传递导纳测量 现在介绍按照上述步骤的一个校准例子。首先讨论传递导纳测量, 其方框图如图5-10所示。虽然振动台里一直装有两个驱动线圈, 但是测量传递导纳时只用互易驱动器(1号线圈)。

振动台没有过量的横向运动, 它可产生失真低于1%的正弦运动, 而驱动线圈电流 I_d 和标准加速度计输出 E_0 间的相角为零。在整个适用的频率范围内(包括校准频率), 由示波器可看出振动台上述的这些特征。

将十个不同重量的质量块分别装到振动台上, 然后测量传递导纳(G_n), 它的定义为

$$G_n = 1/D_n = \frac{I_d}{E_0} \Big|_n \quad (5-22)$$

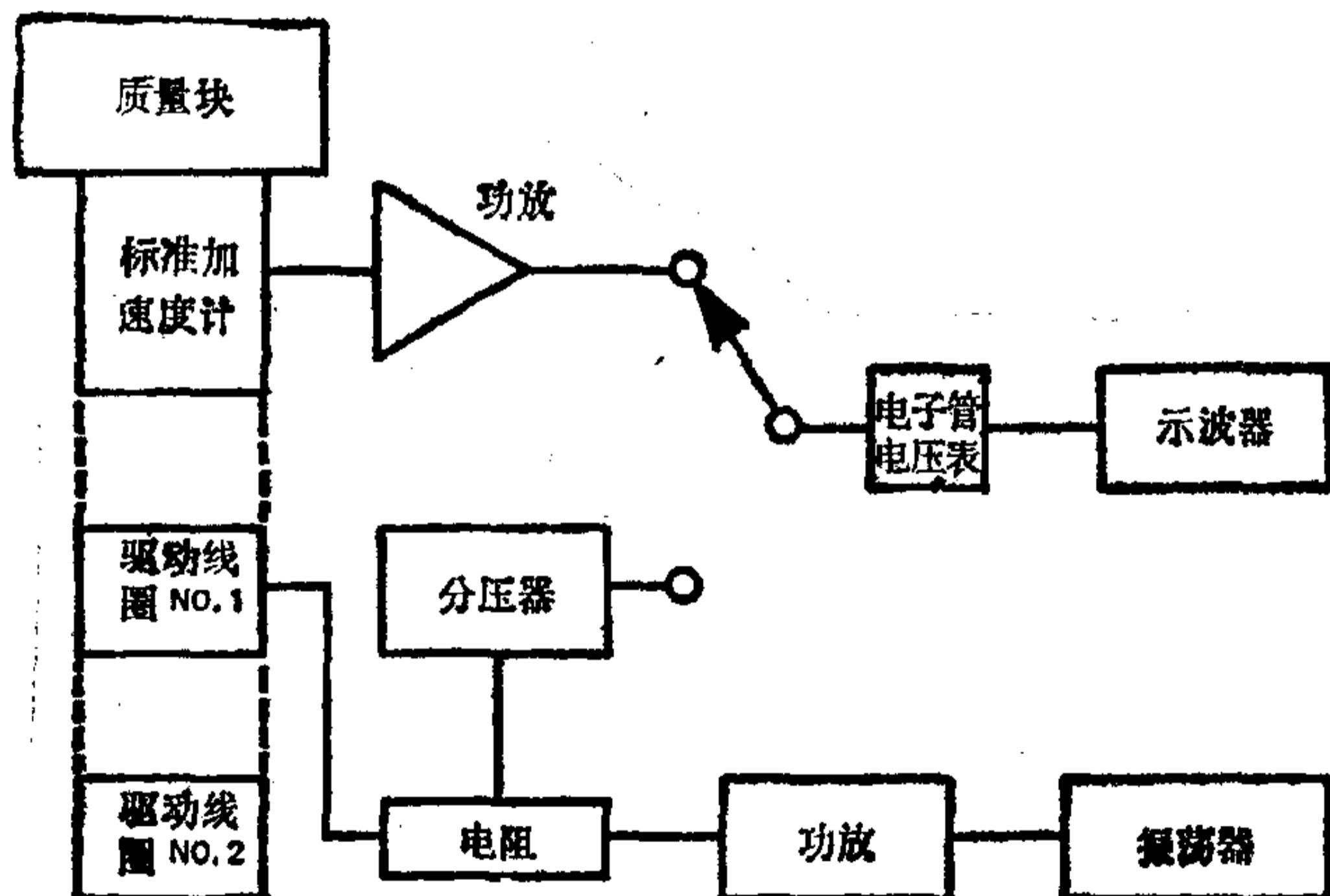


图5-10 传递导纳测量设备

其中 D_n 是分压器档位数, 这时分压器电压输出精确地等于压电式标准传感器的输出。分压器和电阻器(1欧精密型), 应当是无感的, 通常在标准实验室都能找到。

表5-2列出了按典型互易校准计算的 G_n 值和相应的 $Y_{n\sigma}$ 值。对

乘积 $n^2 Y_{nr}$ 以及 $n^2 W_n Y_{nr}$ 求和，并把它代入式(5-20)，计算得 J 为 0.015 03 磅/姆（由表5-2所列的测量结果）。

电压比的测量 图 5-11 示出电压比测量的方框图。所用设备除了质量块被拆除外，与图 5-10 相同。用第二个驱动线圈激励振动台。示波器或相位计指示出电压比的相角是 90° 。用电子计数器测出测量电压比时的频率。与上面一样，调整分压器的输出，使它等于压电式标准传感器的输出。此时电压比 R 是

$$R = D_r$$

其中 D_r 为分压器上的档位数。PX-SP 46 型第 10 号压电式标准传感器在频率 50 赫上的 R 值是 0.0479 伏/伏。

用上面得到的 J ， R 和 f 值，由式 (5-19) 进行计算，结果得第 10 号压电式标准加速度计的灵敏度是 10.00 毫伏/ g 。其值与以前在国家标准局计算的非常接近。后者是从 10 到 4000 赫范围内的 38 个点的平均值，灵敏度为 10.02 毫伏/ g ，标准偏差为 0.5%。

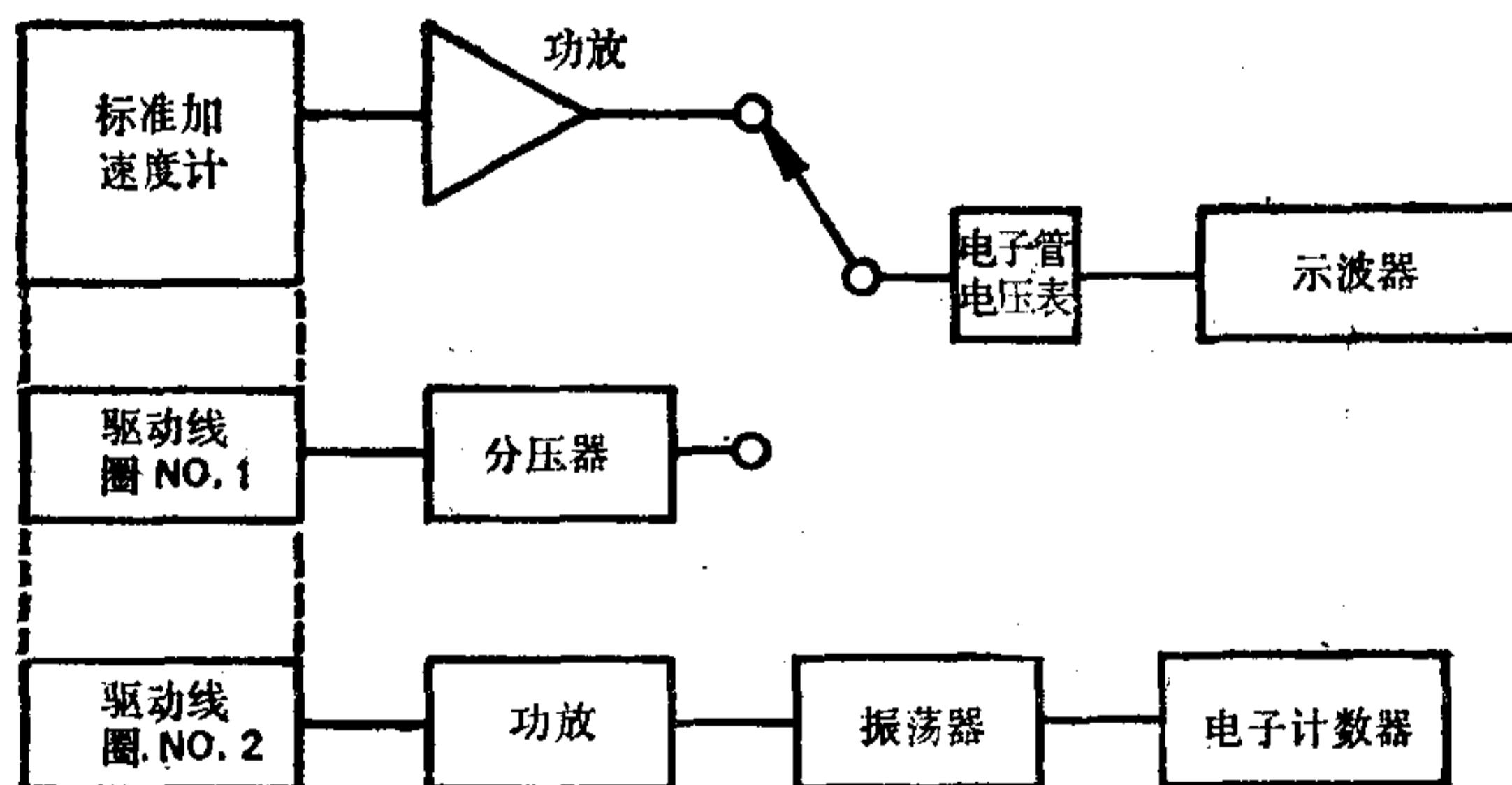


图 5-11 电压比测量设备^[29]

互易校准精度 表 5-3 包括了上述校准结果以及其他用互易方法校准标准振动传感器的结果。为使用简单起见，对所有标准传感器进行调整，使它们的灵敏度都是十的倍数。还有，除第一行是电动式传感器以外，其余全都是压电式传感器。表的最后一列所示的标准偏差表示为对在每一个传感器上所做的全部校准

的平均灵敏度的百分比。

在这些校准中使用的压电式加速度计都是特殊设计的。它因温度、应变和其他环境因素而产生的校准误差最小。对于这些加速度计，在表 5-3 的初次校准之前，通过插入电容或者调整图 5-9 和图 5-10 所示标准放大器的增益来调整灵敏度。对于电动式标准传感器，则在线圈中串联一个适当阻值的电阻，以得到所希望的灵敏度。

表5-3 基准振动传感器的互易校准结果一览表

型 号	校 准 日 期 (年)	互 易 校 准 数	平 均 灵 敏 度 ^①	标 准 偏 差 (%)
电动型 ^②	3	10	99.8	0.5
P 6 SP 31 1 ^③	1	4	100.2	.4
P 6 SP 31 2 ^③	1	2	99.9	.1
P 10 SP 46 3	6	10	10.00	.3
P 10 SP 46 4	6	8	9.97	.4
P 10 SP 31 5	6	8	100.8	.8
P 10 SP 46 10 ^④	3	3	10.01	.0
P 10 SP 46 11 ^④	2	2	10.05	.0
P 10 SP 46 12	4	3	10.04	.3
P 10 SP 46 14 ^④	2	3	9.97	.2
2270 NA 09 ^⑤	4	13	1001	.2
2270 NA 21 ^④	4	8	1000	.1
2270 PA 06 ^④	3	4	1003	.2

①单位为 pC/g 或者 mV/g, 对于电动式标准速度传感器来说, 单位仅适用于 50 赫时。

②由于这些标准传感器不再使用, 所以没有继续进行校准。

③第 10 号标准传感器也在(美国)国家标准局校准, 10.02 mV/g 是所报导的频率上限为 4 千赫的平均灵敏度, 其标准偏差为 0.5%。

④用电荷放大器在 1000 mV/g 的增益范围校准。

⑤NA 09 型标准传感器也在(美国)国家标准局校准, 其校准频率范围为 10—10 000 赫, 增益范围为 1000 mV/g, 全部校准点的平均值为 100.4 mV/g, 标准偏差为 0.9%。

表 5-4 给出了互易校准法的误差分析。表中列出了所存在的各种误差源的误差估计值。除了 100 赫以外, 互易校准误差还会加到 0°(相角) 导纳和 90°(相角) 电压比的频率上。计算出单个误差平方和的开方, 就可确定最后的估算误差。

表5-4 Endevco 2270型标准加速度计的灵敏度校准误差分析^[29]

互易校准 (100 赫)		比较校准 (5—10 000 赫)			
项	目	误 差 (%)	项	目	误 差 (%)
质量		0.5	光学校准 (5 赫)		1.0
传递导纳	相移	0.2 ^①	国家标准局校准 (10—900 赫)		1.0
电压比		0.2 ^①	国家标准局校准 (900—10 000 赫)		2.0
失真		0.1	失真		0.2
频率		0.05	加速度影响、横向灵敏度、应变等		0.2
加速度计影响、横向灵敏度、应变、温度等		0.2	放大器影响、频率响应等		0.1
放大器影响、增益稳定性、电源电容等		0.3	相对运动 (900—10 000 赫)		0.5
估算误差 (100 赫)		0.5 ^②	电压比		0.2
			估算误差 (5—900 赫)		1.1 ^③
			估算误差 (900—10 000 赫)		2.1 ^④

①假设测量到的传递导纳和电压比的相移分别为 0° 和 90° 。

②根据单项误差的平方和的平方根来确定。

表 5-4 所示的 0.5% 灵敏度误差很好地与表 5-3 所列的压电式标准加速度计的标准偏差一致。对电动式标准速度传感器作类似分析，可得 0.3% 的估算误差，它接近于表 5-3 的标准偏差。

除了要在低频对压电式标准加速度计进行互易校准以外，还需要得到在高频时加速度计的响应。这可以用一个在国家标准局校准过标准加速度计，在直至 10 000 赫的频率上进行比较校准来做到。比较校准的误差列于表 5-4。

5.3 干涉法校准

可在基准级试验室内用干涉仪进行高频绝对校准，作为互易校准的补充。互易校准误差在高频时增大，因为这时出现可观的相对运动。因此，在大约 2000 到 10 000 赫的范围内，存在着究竟选择互易校准还是干涉仪校准的问题。有时，干涉法校准在直至大约 40 000 赫的更高频率上采用。

图 5-12 是国家标准局以前所用的干涉仪校准设备的方框图。干涉仪为斐索型，所用的光由一个水银光源提供。光从一个直接接在加速度计底座上的未镀银的小平面镜上反射。镜子和加速度计振幅相同。圆孔使得只有来自牛顿环中心点的光才落在光电倍增器上。从光电倍增器出来的信号，在用电子管电压表测量之前，先送入被调到振动台驱动频率的窄带滤波器。

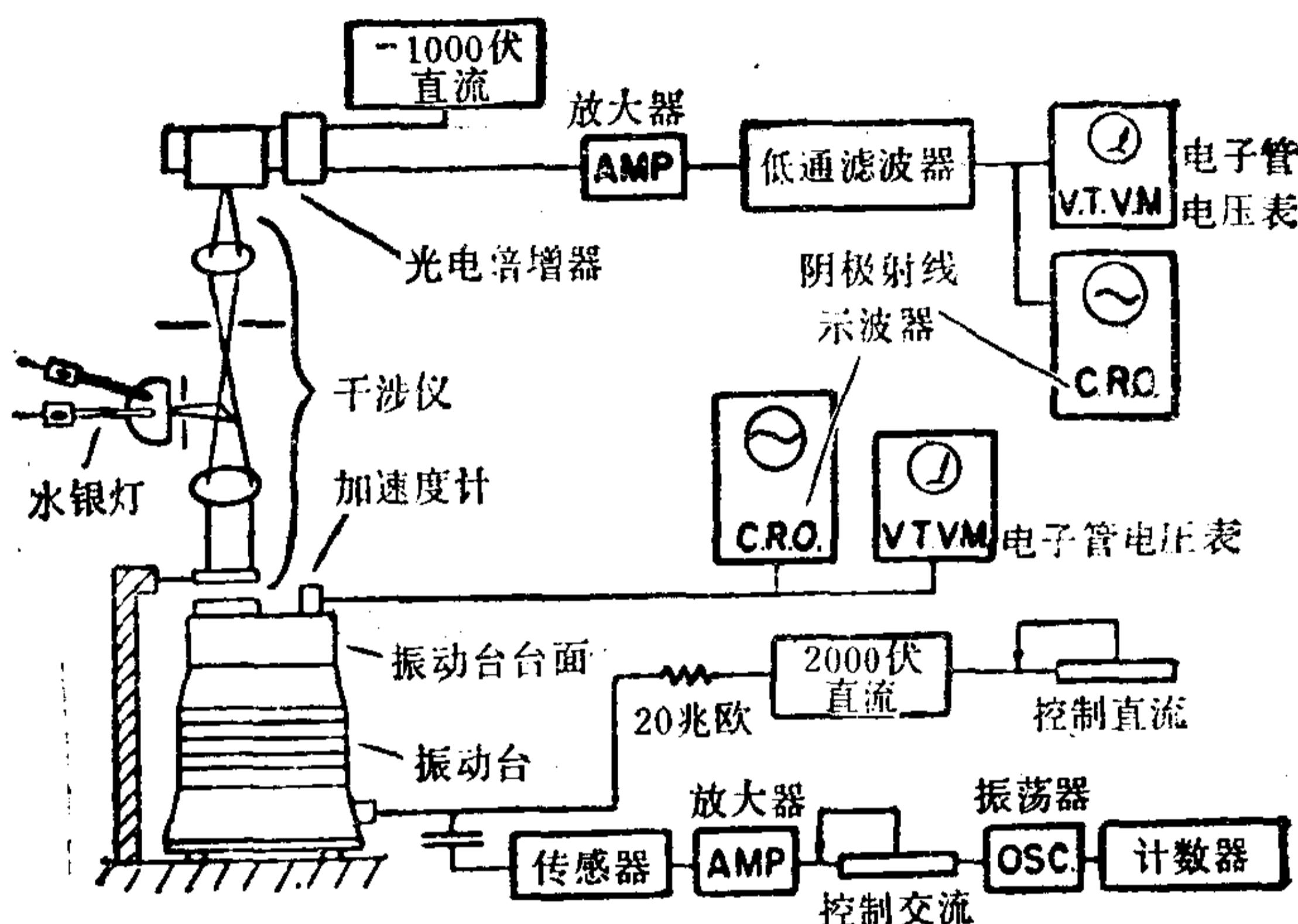


图5-12 (美国) 国家标准局以前所用的干涉仪校准设备

用一个隔震系统将干涉仪与建筑物振动隔开。

随着振幅由零逐渐增加，干涉条纹消失，而零值指示出振幅和干涉仪光波长的贝塞尔函数的零点。光电倍增管电流在这些点上变为零，如图 5-13 所示。干涉仪所用的是水银 5461 埃的光。第一个零位相当于 1045 埃的振幅。在国家标准局的光电零值检测中，振幅的不确定度为 0.5%。校准是通过测量加速度计的电输出以及频率（用之计算加速度）来完成。总的校准误差将包括由正弦波中的失真产生的误差以及电压和频率的测量误差。

可采用几种干涉仪校准装置来进行测量。某些试验室中用激光作为干涉仪中的光源。

干涉仪校准装置中的仪器通常是很精密的。校准误差比用互

易方法得到的要稍微大一些，特别在低频更是这样。

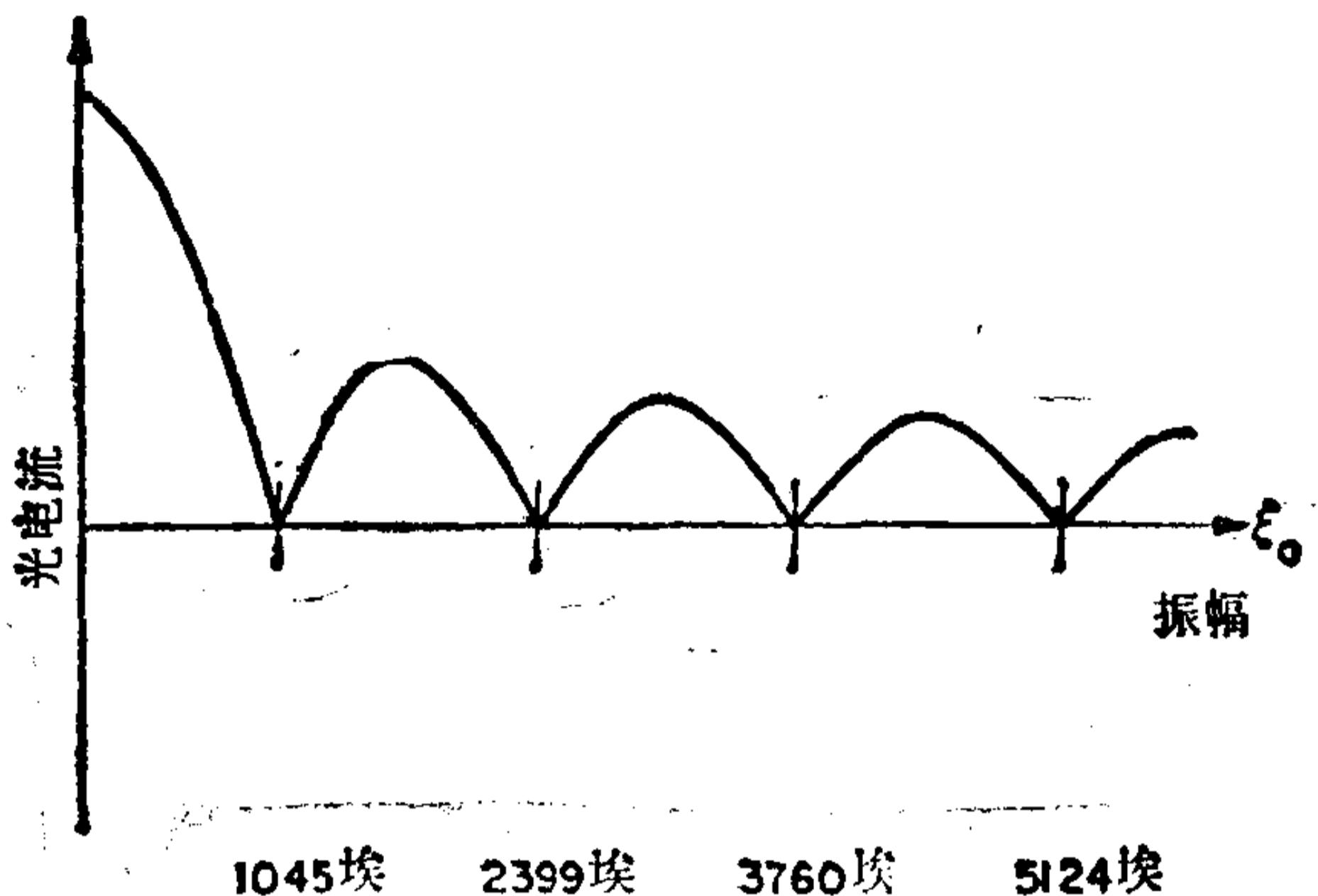


图5-13 光电倍增管电流随振幅的变化（表现出特征零值，
干涉仪采用5461埃的光）

5.4 零 频 校 准

地球重力场法是在零频校准加速度计的一个非常精确的方法。此法被用于为测量恒定加速度而设计的加速度计。当然，对于每一个加速度计来说，振动和冲击运动校准都应在整个工作频率范围和振幅范围内进行。

图 5-14 为用于零频校准的分度头。用一个精密水平尺调整分度头，使它上面的加速度计灵敏轴精确地平行于地球重力场方向。加速度计的输出用一个直流电压表来测量。分度头精确地转动 180° ，以改变所加的加速度，使之精确地等于 $+1 g$ 以及 $-1 g$ ，然后测量出加速度计的输出。加速度计灵敏度是两个输出的平均值。如调节倾斜支承，使加速度为 $1 g$ ，这时误差为 $\pm 0.003 g$ 。总的校准误差也将包括测量加速度计电压输出中的不确定度。

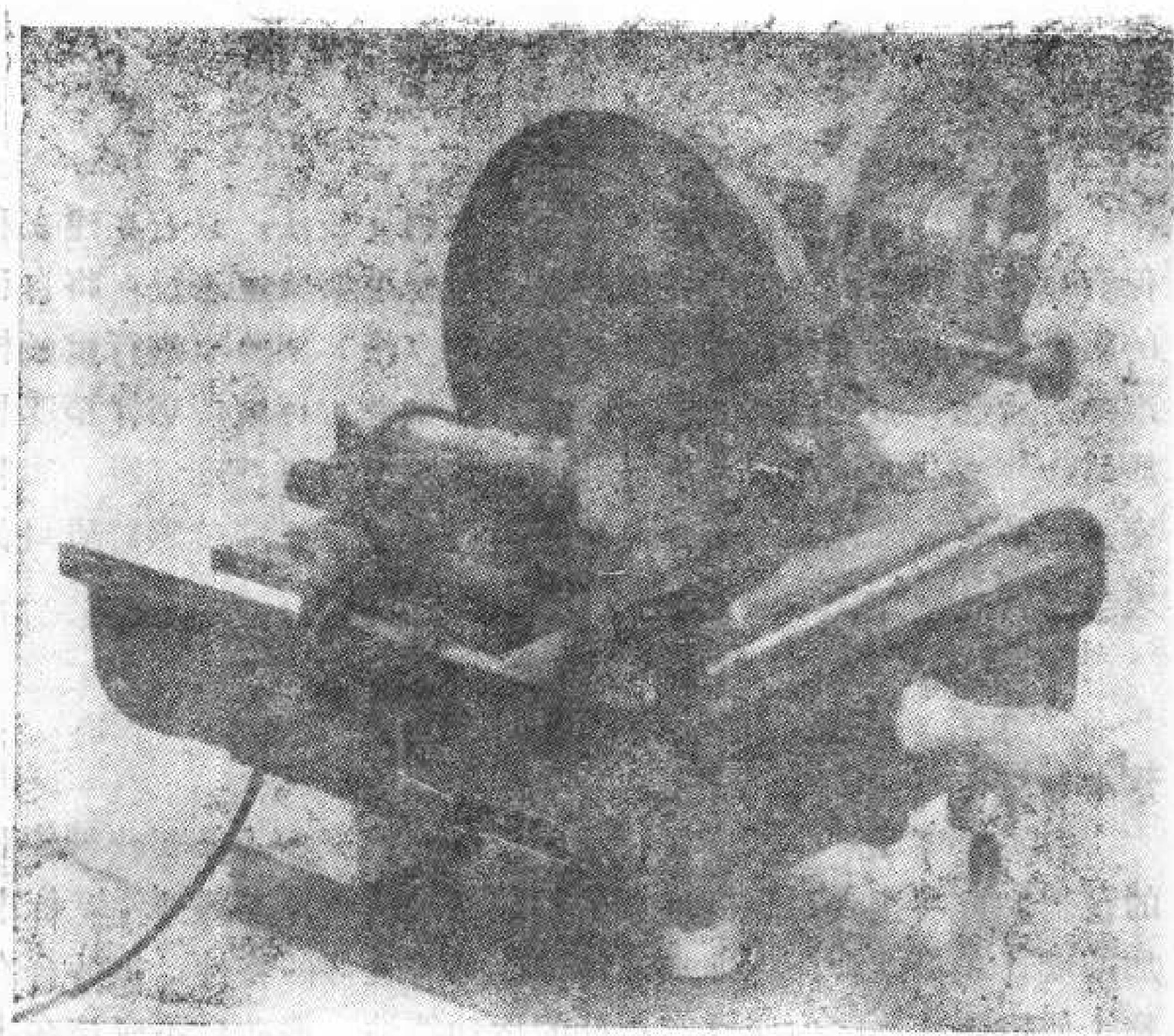


图5-14 进行零频校准的分度头^[34]

第六章 正弦比较校准

大多数冲击和振动校准实验室都采用比较法；只有在建立和保存基准传感器时才使用绝对校准。对校准实验室来说，将自己的振动和冲击标准传感器每年送往基准（级）实验室进行重新校准是合算的。根据这些重新的校准，能够确定标准传感器精度和质量逐年变化的情况。校准结果的变化不得超过基准（级）实验室规定的校准误差。若超过规定值，则表明该标准传感器质量低劣或已损坏。

6.1 灵敏度和频率响应

校准装置

对灵敏度和频率响应进行精确校准的第一步，是要获得优质的仪器，或者至少对现有仪器的性能做出估价。尤其要注意标准加速度计和振动台。标准加速度计应具有良好的特性；振动台在整个使用频率范围内应具有很好的运动特性。振动台不应该在出现过大横向运动或加速度严重失真的那些频率上使用。

一般来说，用一个简单的设备就能很容易地实现精确校准。为了始终取得准确的校准结果，注意下面介绍的实验步骤是十分重要的。使用精密自动系统，可减少人为的错误，缩短训练操作人员的时间和有助于记录及保留校准结果。

图 6-1 所示是一个简易校准装置。它包括一个振动台和一个与被校加速度计连在一起的标准加速度计。标准加速度计和被校加速度计各连接一个电荷放大器。分压器与标准加速度计的放大器相连，通过适当选取两个电荷放大器的增益量程可使标准加速度计的输出大于被校加速度计的输出。分压器是个精密的十进电阻仪，它能直接指示出被校加速度计输出与标准加速度计输出之

比，并精确到四位有效数字。为此，将电子管电压表的转换开关交替地打到上、下位置，并调节分压器，使电压表在这两个位置时的读数相同为止。用一个双线示波器监视两个加速度计的波形。用手动方法调节音频振荡器，在选定的频率上重复上述步骤。

当使用一个灵敏度为1000毫伏/ g ，100毫伏/ g 等的标准加速度计-放大器系统时，被校加速度计灵敏度的小数点位置由两放

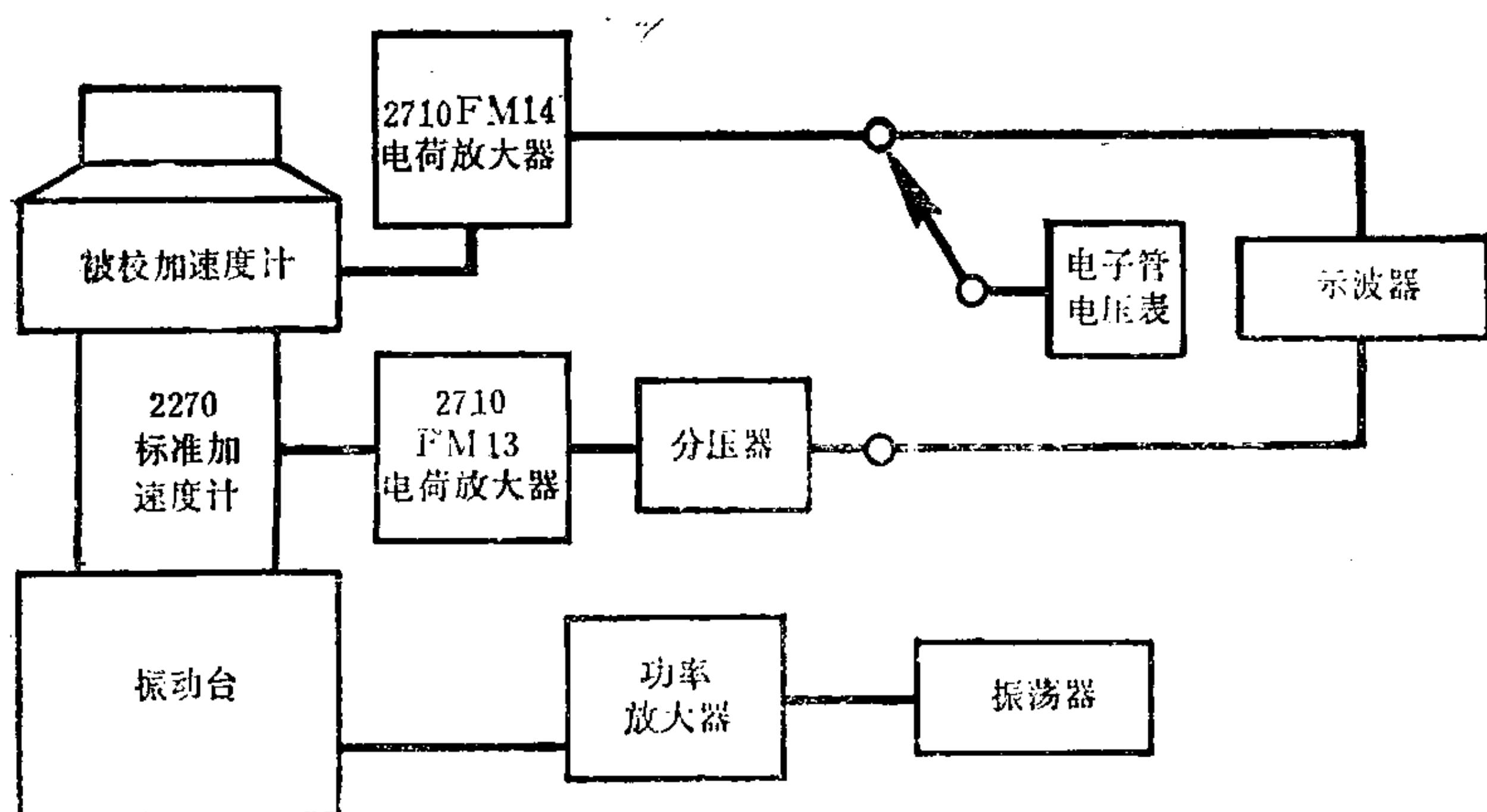
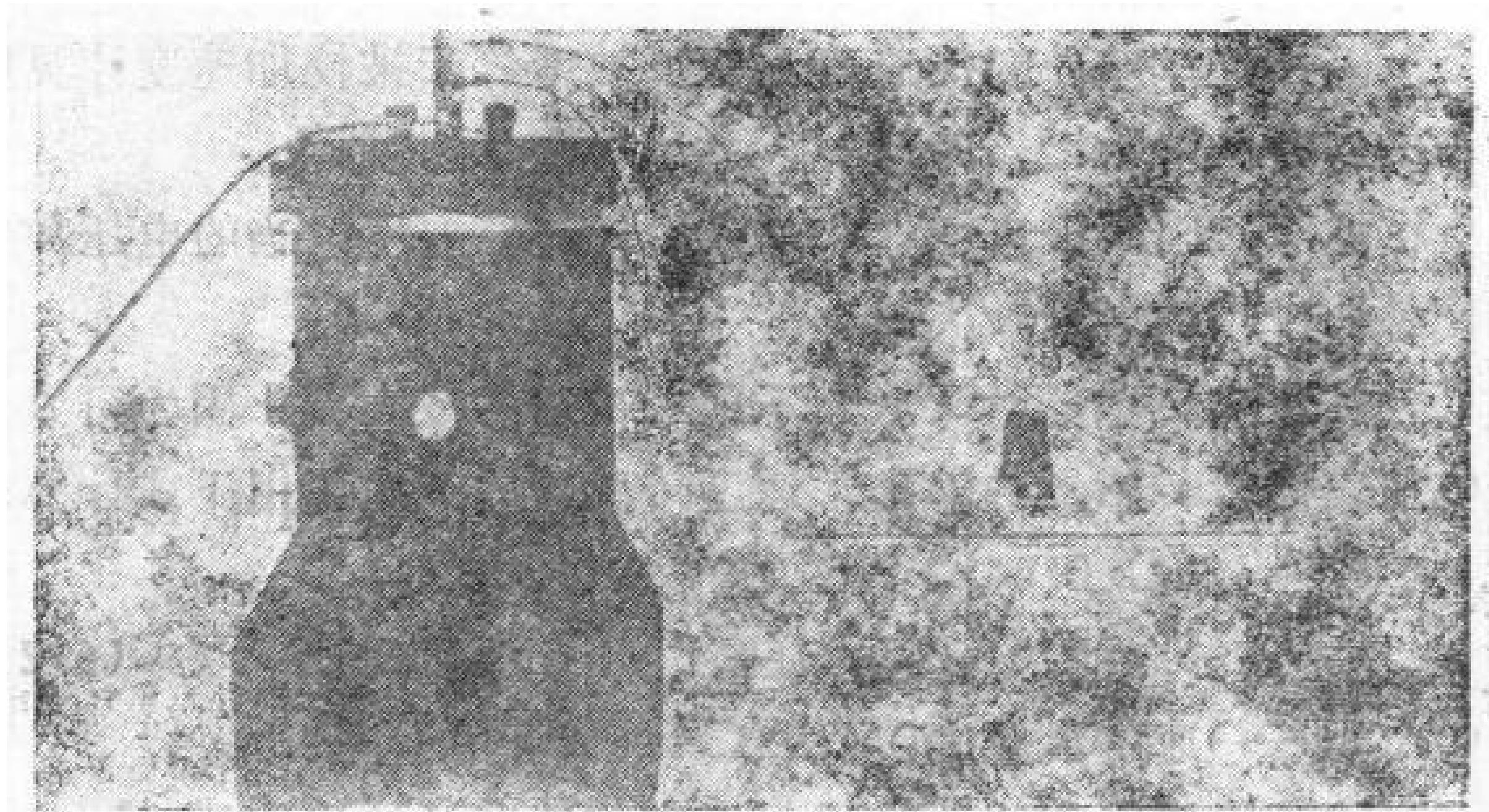


图6-1 正弦比较校准用的典型设备及方框图

大器所用量程之比确定。被校加速度计的灵敏度可表示为：

$$S_t = S_s R \frac{K_s}{K_t} \quad (6-1)$$

式中 S_t ——被校加速度计的灵敏度（毫伏/g）；

S_s ——标准加速度计的灵敏度（毫伏/g）；

R ——被校加速度计输出与标准加速度计输出之比；

K_s ——标准加速度计放大器的增益；

K_t ——被校加速度计放大器的增益。

压电式加速度计的加速度电荷灵敏度等于被校加速度计灵敏度除以它的电荷放大器的增益，单位为毫伏/皮库仑。

在校准压阻式或应变计式加速度计时，要用适当的电压放大器代替测试用的电荷放大器。

校准速度传感器时，一般不用测试用的放大器，因为可直接用电压表测量传感器的输出。速度传感器的灵敏度用下式计算：

$$S_v = 0.6417 S_s R f [\text{毫伏}/(\text{米}/\text{秒})],$$

$$S_v = 0.0163 S_s R f [\text{毫伏}/(\text{英寸}/\text{秒})], \quad (6-2)$$

式中 S_v ——速度灵敏度[毫伏/[米（或英寸）/秒]]；

R ——速度传感器输出与标准加速度计输出之比；

f ——频率（赫）。

典型的校准结果

三种具有代表性的压电式加速度计的校准结果见图6-2。每个加速度计的总质量在2至78克范围内，灵敏度在从大约3皮库仑/g至100皮库仑/g范围内。使用P6和P8陶瓷材料的加速度计的加速度灵敏度随频率逐渐减小——频率每增加一个倍频程，灵敏度的减小略少于1%；采用P10陶瓷材料的加速度计，在其工作频率范围内的大部分频率上，灵敏度实际上保持不变。在更高的频率上，这三种加速度计的灵敏度都增大。这是由于加速度计谐振造成的。

上述的（以及类似的）压电式加速度计的校准误差列在表6-1内。表中所列的每个误差都是在对所用标准加速度计、被校加

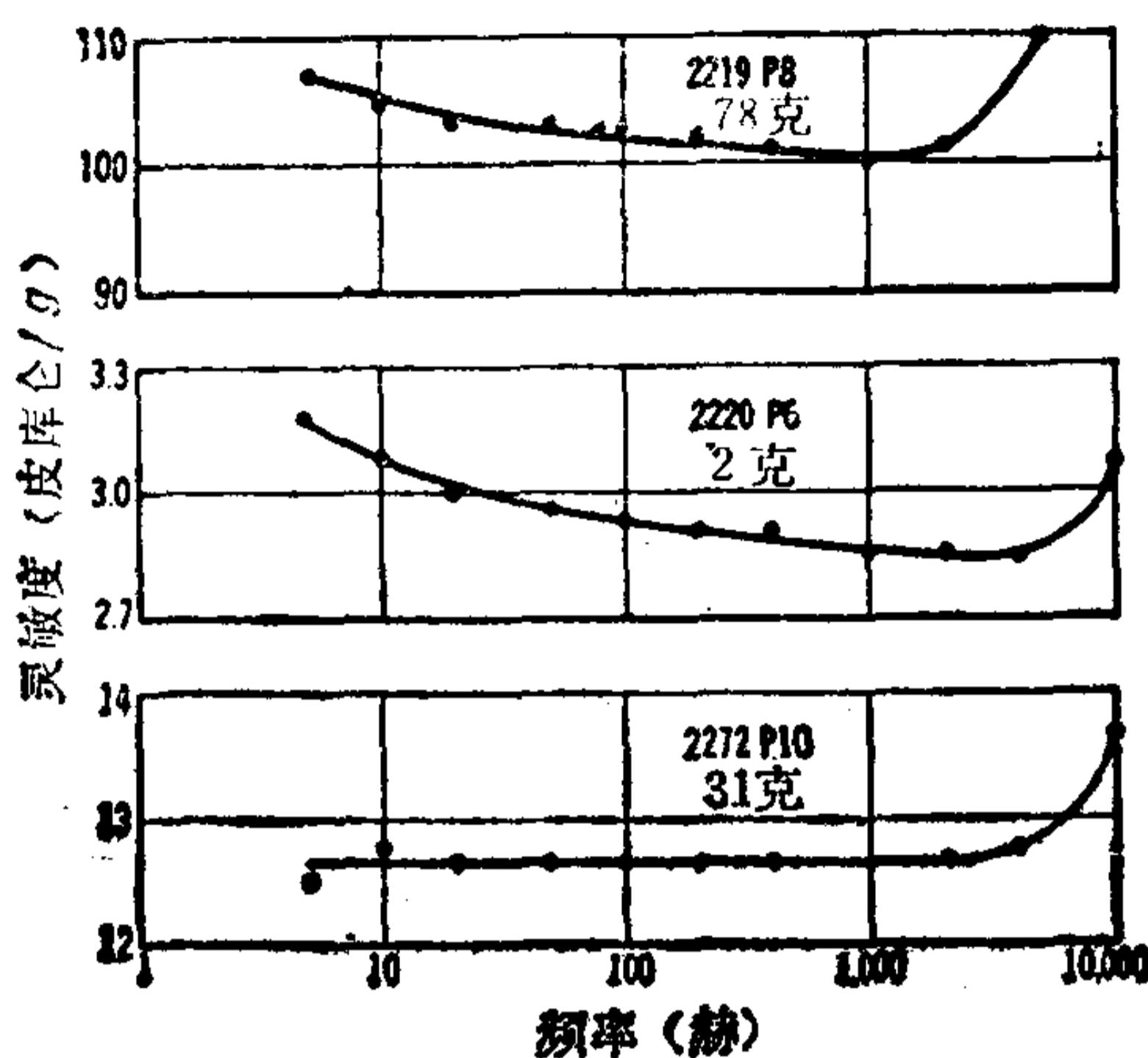


图6-2 三种压电式加速度计的校准结果^[2-9]

速度计、电荷放大器、振动台和其他仪器的性能进行认真研究之后确定的。在实验操作良好的一些实验室里，1%的估算误差是常有的。即使校准仪器、校准规程和实验室条件变化很小，同一个加速度计的校准结果出现小于2%的差别也是常有的事。在高达10 000赫的频率上，校准误差增加到2.5%。为了包含标准加速度计(曾在美国标准局校准过的)的误差，就必须规定这样大的误差。实际上，在较高频率上的这些比较大的校准误差，多半是由于环境影响和被校加速度计与标准加速度计之间的相对运动产生的。选用谐振频率很高(最好是接近或大于50 000赫)的标准加速度计和振动台，可以显著地降低由相对运动产生的误差。

速度传感器的校准结果见图6-3。在使用频率范围内，速度灵敏度变化很大。速度传感器的校准误差比加速度计的大。

不理想的校准结果

校准的目的通常是为了精确地确定传感器的灵敏度和使用频率范围。此外，还可能有其他目的，如确定传感器是否受到某种环境的不利影响或是否存在不需要的谐振。例如，对于品质低劣的压电式加速度计，需要做某些试验，以确定由不同安装力

表6-1 用比较法校准的被校加速度计灵敏度的误差分析^[35]

项 目	误差 (%)
标准加速度计的互易校准 (100 赫时)	0.5
标准加速度计的稳定性	0.5
标准加速度计频响的比较法校准 (5—1000 赫)	1.1
(1000—10 000 赫)	2.1
相对运动 (1000—10 000 赫 ^①)	1.0
失真	0.2
电压比	0.2
幅值线性 (0.2—100 g)	0.2
标准放大器换档 (1, 10 和 100 g/伏量程)	0.2
被校放大器换档	0.2
放大器的相对频率响应	0.1
放大器增益稳定性, 电源电容等	0.2
环境对加速度计的影响, 横向灵敏度, 应变和温度等	0.5 ^②
环境对放大器的影响, 残余噪声等	0.2 ^③
估算误差 (100 赫)	1.0 ^④
估算误差 (5—1000 赫)	1.5 ^④
估算误差 (1000—10 000 赫)	2.5 ^④

①对于总质量超过 35 克的被校加速度计, 最高频率是 5000 赫。

②对于实验室条件可控情况下使用的大多数加速度计, 此误差的范围为 0—0.5%。

③适用于实验室条件可控的情况。

④由有关的各项误差的平方和的平方根求出。

矩产生的应变所导致的灵敏度的变化, 因为灵敏度在整个工作频率范围内的变化是恒定的。由电缆效应产生的应变和惯性力所引起的误差, 只出现在有大位移产生的低频情况下。

许多加速度计可能有类似图 6-4 的响应。图 6-4a 中的不规则响应是由于该种加速度计的特性所造成的。在 7300 赫处的局部谐振可能是由于加速度计壳体谐振造成的。另一个加速度计 (图 6-4b) 在 8000 赫和 9400 赫之间有一个灵敏度特别高的局部谐振。

图 6-4c 示出的不稳定频响曲线往往出现在很小的加速度计中。

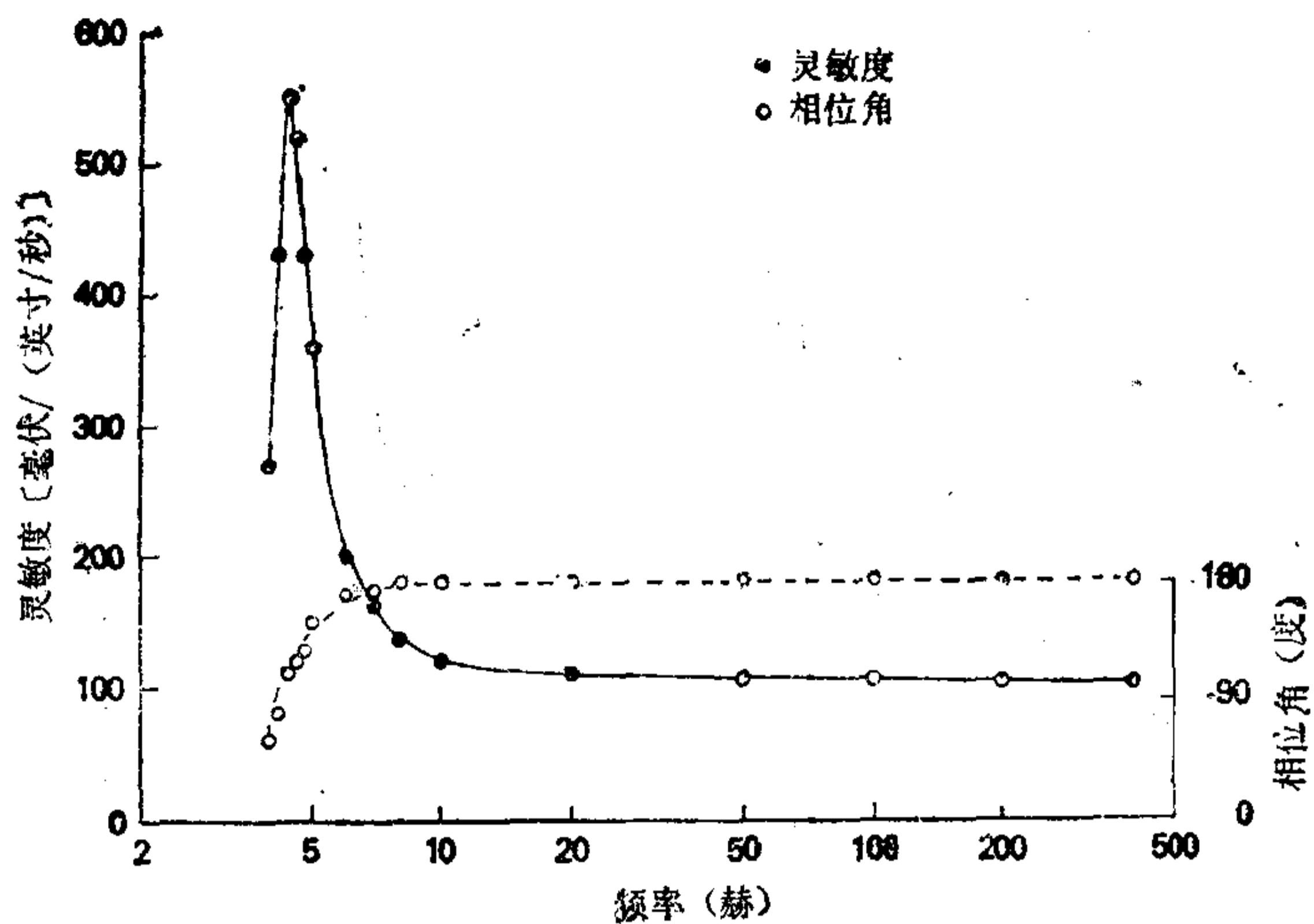


图 6-3 速度传感器的校准结果

一个安装螺纹损坏了的加速度计的频率响应示于图 6-4d。这些结果是些比较极端的情况，只发生在某些加速度计中。

知道在工作频率范围内的大部分（如果不是全部的话）频率上的响应是否正常是很重要的。如果校准振动台的横向运动和加速度失真过大，出现在窄频带内的大的灵敏度变化就可能看不出来，或错误地把它归咎于振动台的特性。在某些试验应用中，很重要的是停止使用象图 6-4 那样的频率响应不好的加速度计。如果定期进行频响校准，这样的加速度计就很容易被挑拣出来。加速度计频响不正常的原因可能是外部损伤、内部引线谐振、接插件谐振和加速度计壳体谐振等。

6.2 谐振频率校准

虽然对正确使用加速度计而言，灵敏度校准和频率响应校准才是必不可少的，但是谐振频率校准也是一种重要而有决定性作用的校准。谐振频率校准是评价加速度计基本特性和使用条件的最好方法。它能确定加速度计是否按单自由度机械系统工作。也许更重要的是，它能发现加速度计的内部损伤。谐振频率校准需

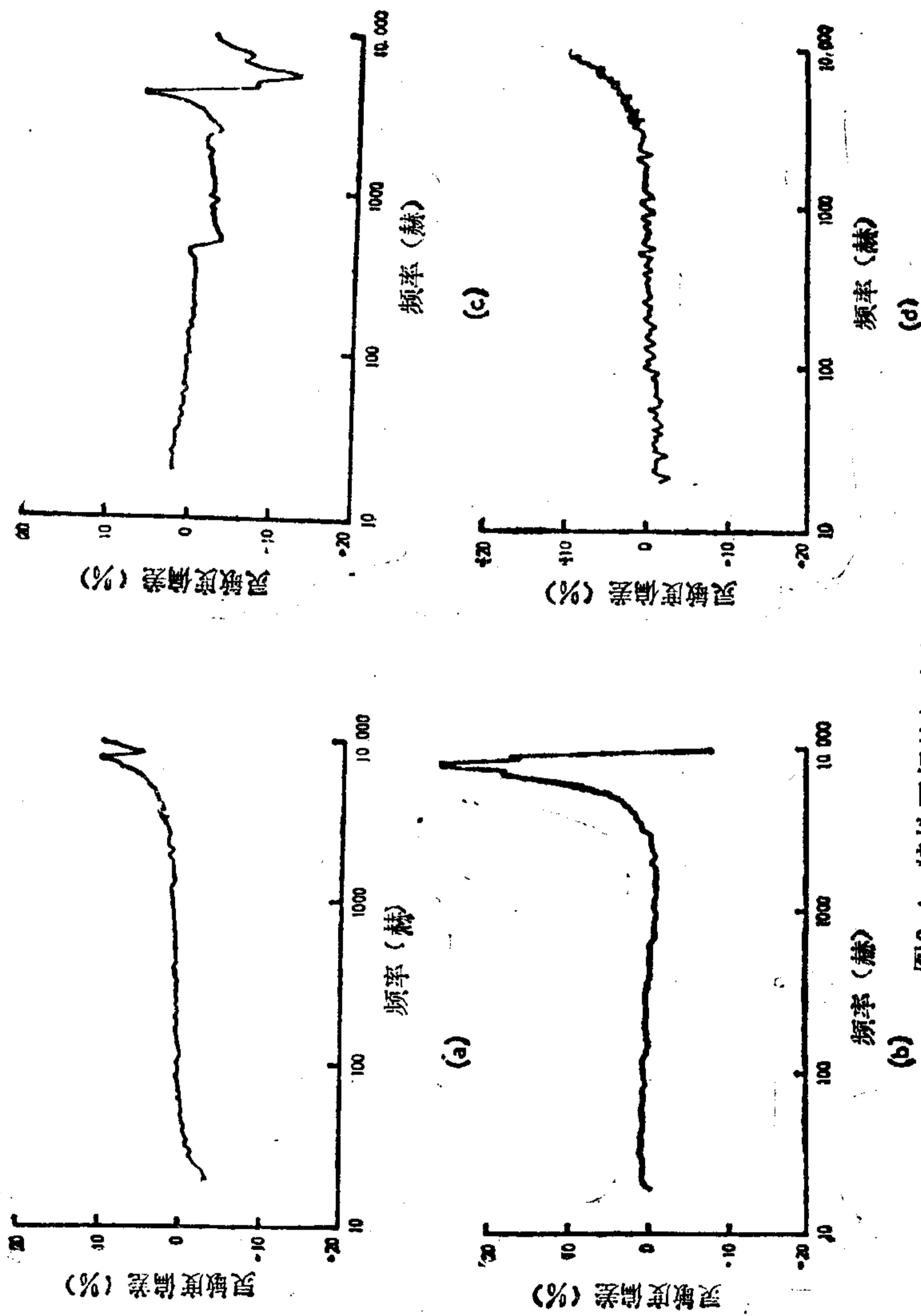


图6-4 特性不好的加速度计的校准结果[35]

要使用高频振动台（即动圈谐振频率高于被校加速度计谐振频率的振动台）。大多数加速度计的谐振频率低于50 000赫。但是测量冲击用的某些加速度计的谐振频率超过100 000赫，即使是这些加速度计，对它们进行频率直至50 000赫的谐振频率校准，也将有利于发现任何异常的低频特性。

理想的加速度计

现在使用的很多加速度计，其工作特性与图6-5所示的几乎理想的加速度计的工作特性很接近。它具有一个谐振和几个（如果

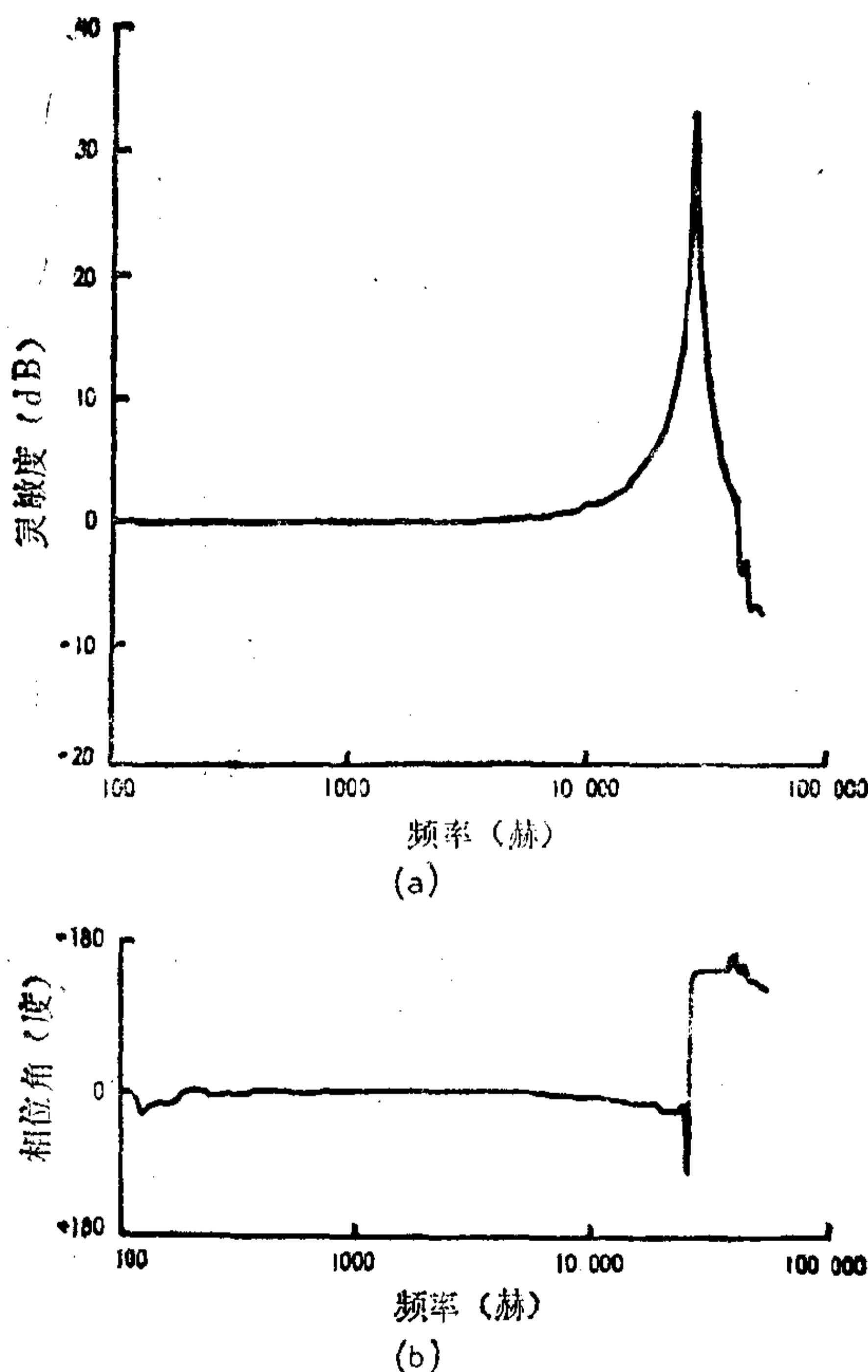


图6-5 具有接近理想特性的加速度计的校准^[35]

有的话)局部谐振,其响应与惯性加速度计的理论响应非常接近。

通常由用户对加速度计进行谐振频率校准,以便确定加速度计的性能并预见加速度计性能的未来变化。对应用于重要测量的所有加速度计都应当这样做。当有证据表明加速度计经受过恶劣的环境或粗心的装卸时,应重新做谐振频率校准。因为尽管加速度计也许没有外伤,但可能有内伤。

进行谐振频率校准的另一个目的是为了确定加速度计响应是否与理想加速度计的响应相似。当要求高精度和高可靠性时,最好采用只有一个谐振频率的加速度计(图6-5)。另一方面,有几个谐振频率的加速度计(图6-6)也有很多用途,可用它来满足其他要求(如尺寸或形状)。

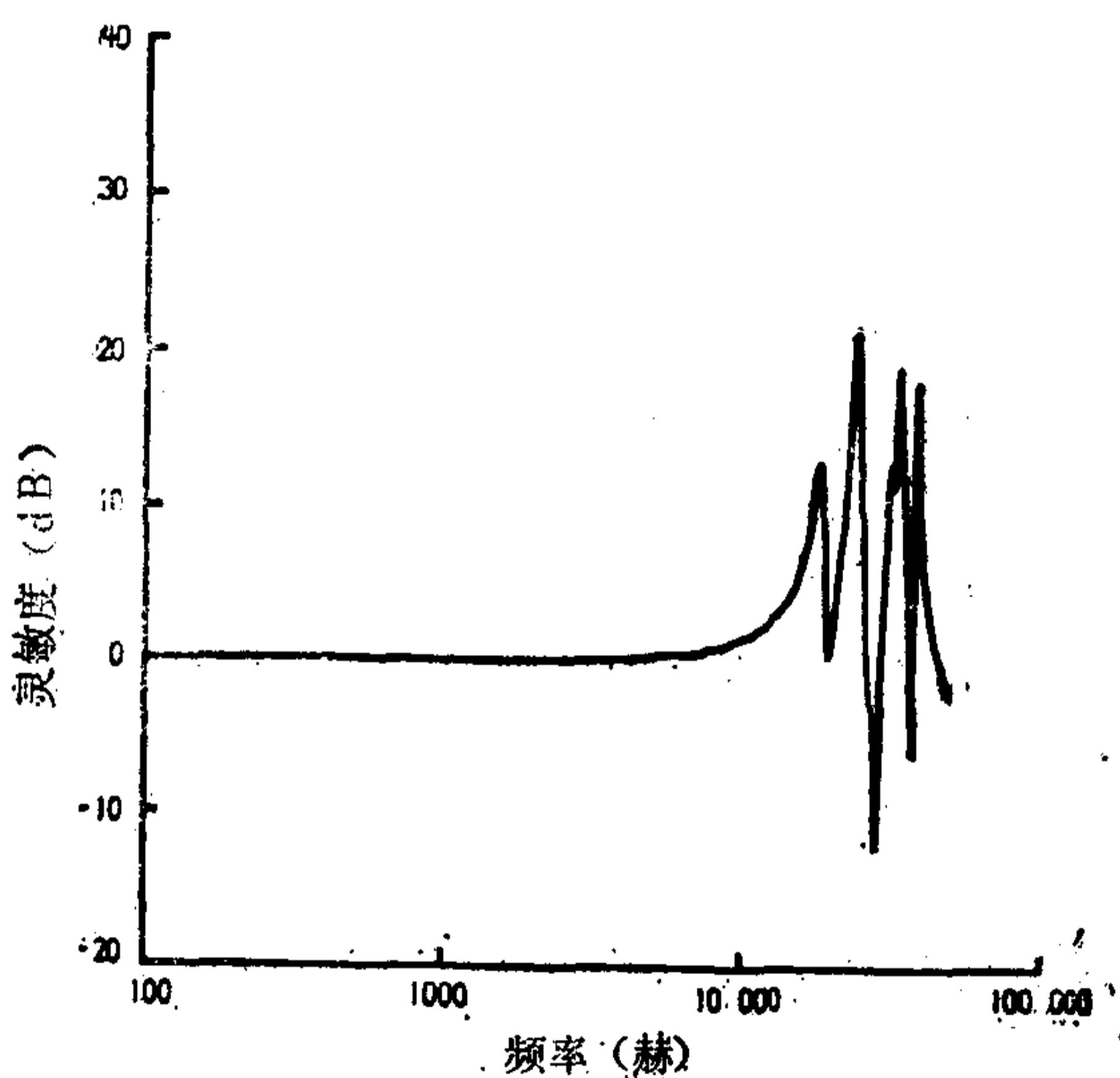
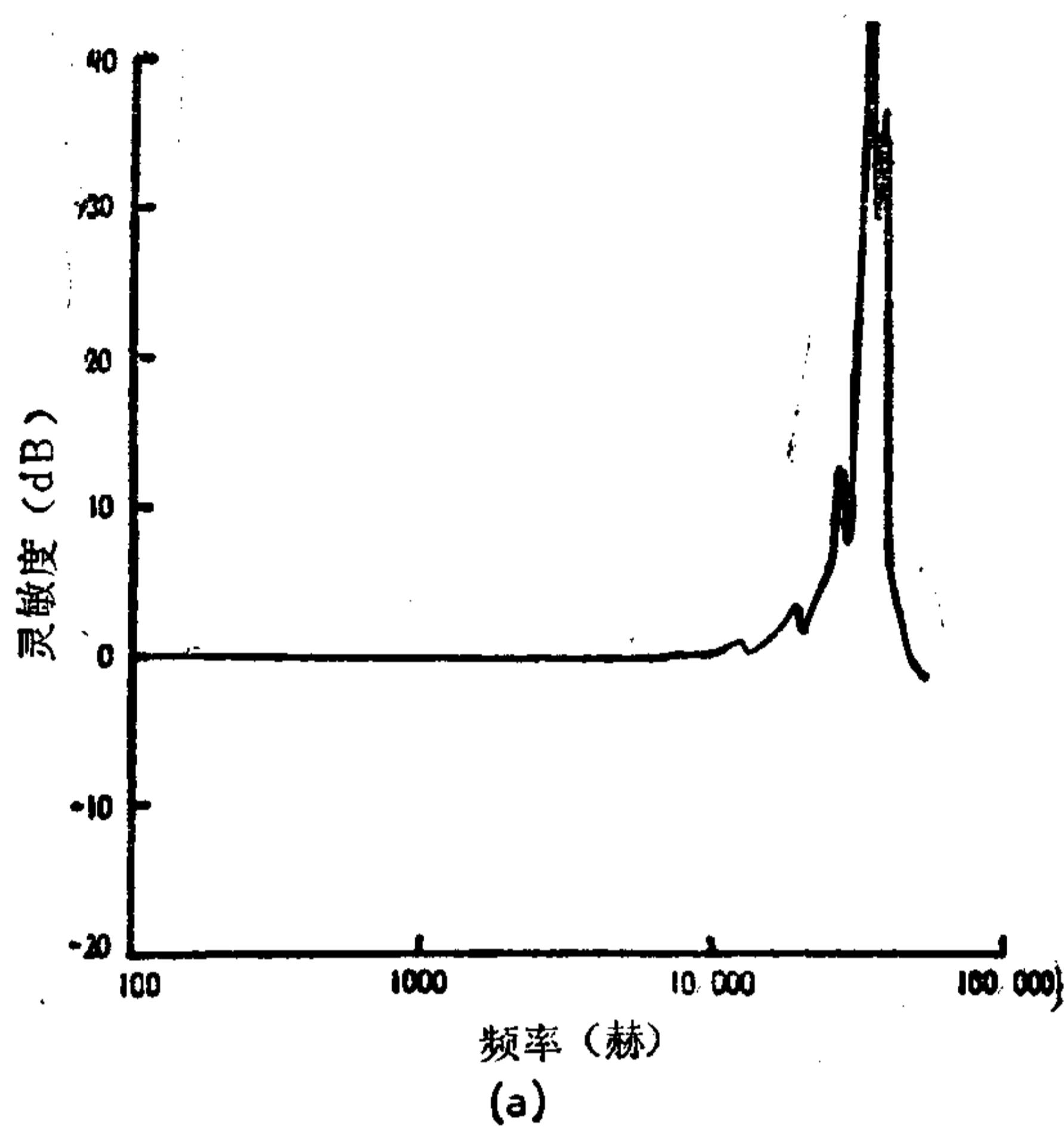


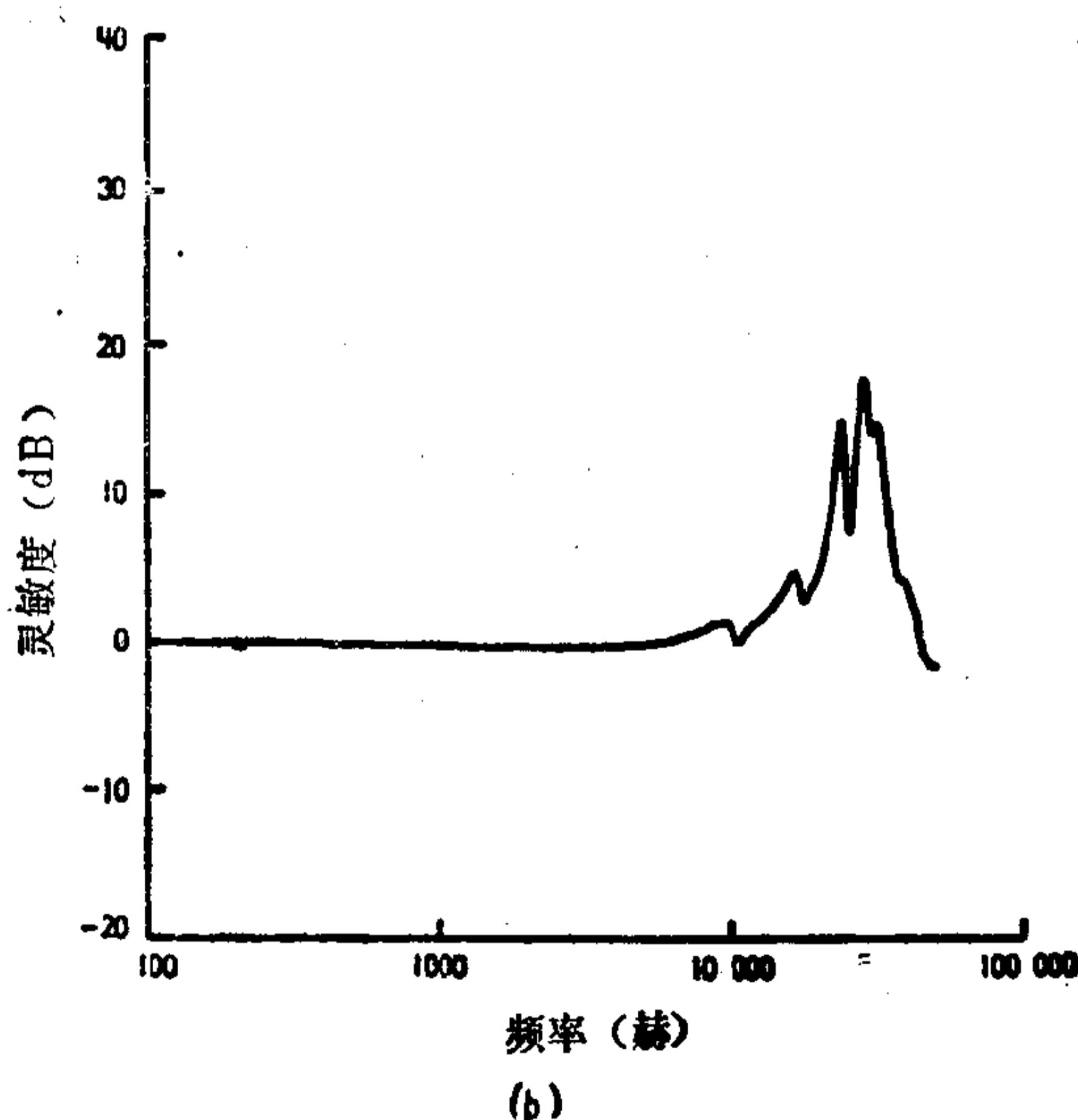
图6-6 具有两个谐振频率的加速度计的校准^[35]

加速度计损坏检查

尽管很多压电式加速度计很牢固,但是对于某些加速度计,由于设计的原因,它们在大大高于其额定极限值的冲击运动作用下也容易损坏。如装卸粗心,就会产生这种高强度的冲击运动。谐振频率校准是确定加速度计损伤的最精确方法。图6-7a和



(a)



(b)

图6-7 某加速度计的校准结果，损坏前谐振频率为32 000赫
(见a)，损坏后谐振频率为29 500赫^[35](见b)

图 6-7 b 分别表示出了加速度计在经受过度冲击运动前、后谐振频率的校准结果。加速度计的谐振频率由 32 000 赫降到 29 500 赫，在 9000 赫处还有一个局部谐振。谐振频率下降是内部出现损伤的明显标志。这个加速度计与图 6-4 b 频响校准使用的加速度计是一样的。只根据频响校准不可能发现 9000 赫处的局部谐振，因为该处的响应是满意的。但是，由图 6-7 b 的校准结果可断定：此加速度计已有损伤，大概已不能用于重要测试。

通过谐振频率校准来检查加速度计工作特性的变化是个好办法。大多数的加速度计一般都不会出现故障。图 6-8 所示的加速度计是个例外。图 6-8 a 所示的冲击运动校准结果很正常。在波形图中没有异常响应，而且冲击运动灵敏度与正弦校准的结果很接近。但是由常规谐振频率校准结果（图 6-8 b）可发现有多个谐振，其中一个谐振频率为 28 500 赫。这种加速度计的名义谐振频率为 35 000 赫。低的谐振频率表明内部有损坏。

已损坏的加速度计中出现的故障有：压电元件和环氧树脂胶接处出现裂缝，螺纹塑性变形，加速度计安装面损伤以及加速度计壳体变形等。

局部谐振

在频响校准时发现的局部谐振是引线、加速度计壳体等谐振的结果。在某些加速度计中，局部谐振出现在高于 10 000 赫（10 000 赫是多数频响校准使用的上限频率）的频率上。图 6-9 a 中的加速度计，在 37 000 赫处有一局部谐振。之所以知道它是个局部谐振，是因为相位角在谐振时突然变到 100 度，而且在大于谐振频率时又回到零度；还因为灵敏度只增加 20 分贝，这比谐振时小得多。这种加速度计用于冲击测量。局部谐振的存在对很多测试用途不会有太大影响。但是在选用加速度计时，尤其是要测量高频成分时，知道此局部谐振是有益的。图 6-10 的校准结果表示的是一个直到 50 000 赫都没有局部谐振的冲击加速度计的响应。

加速度计对装置的影响

利用加速度计的谐振频率数据，可研究加速度计对装置运动

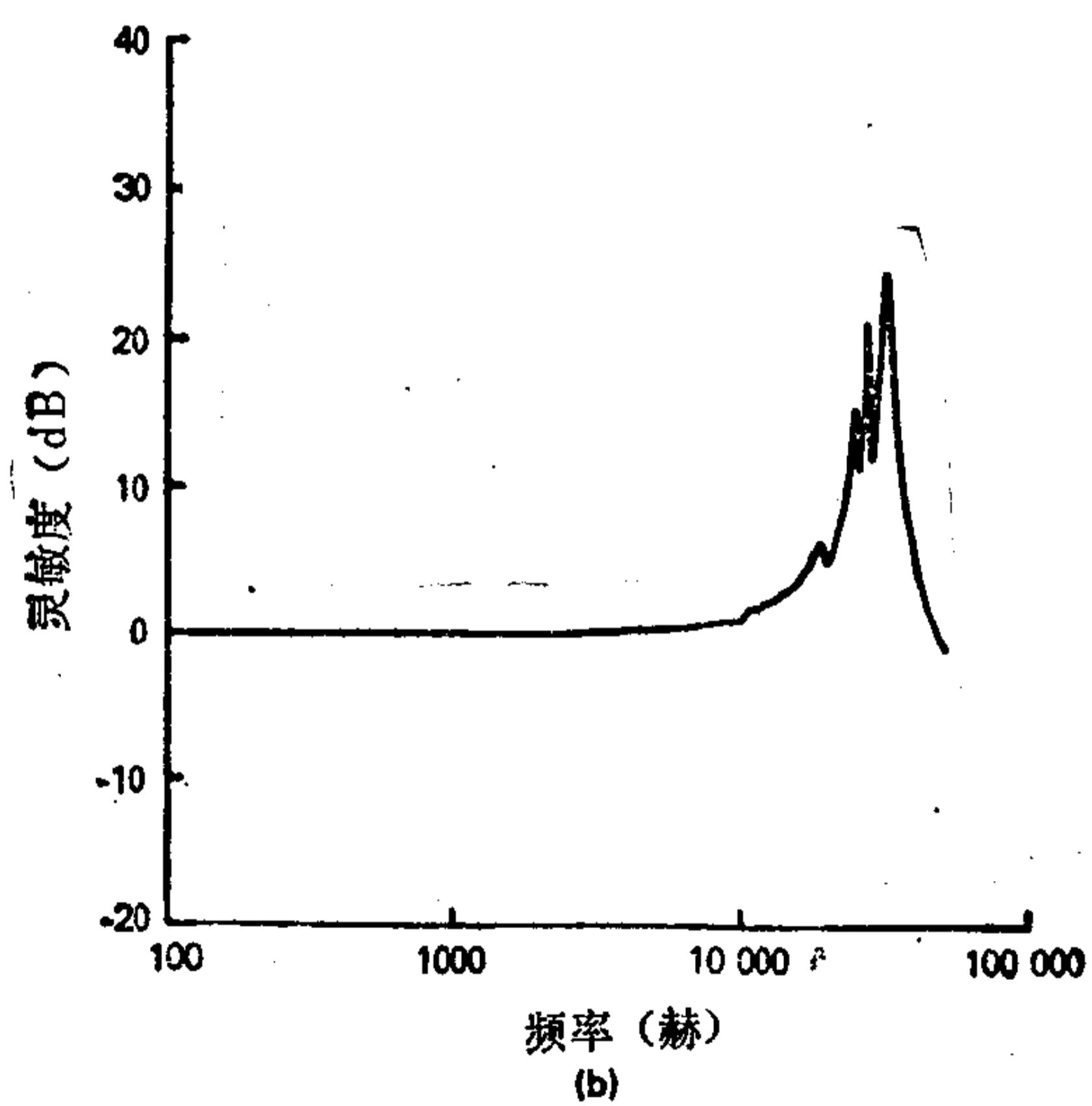
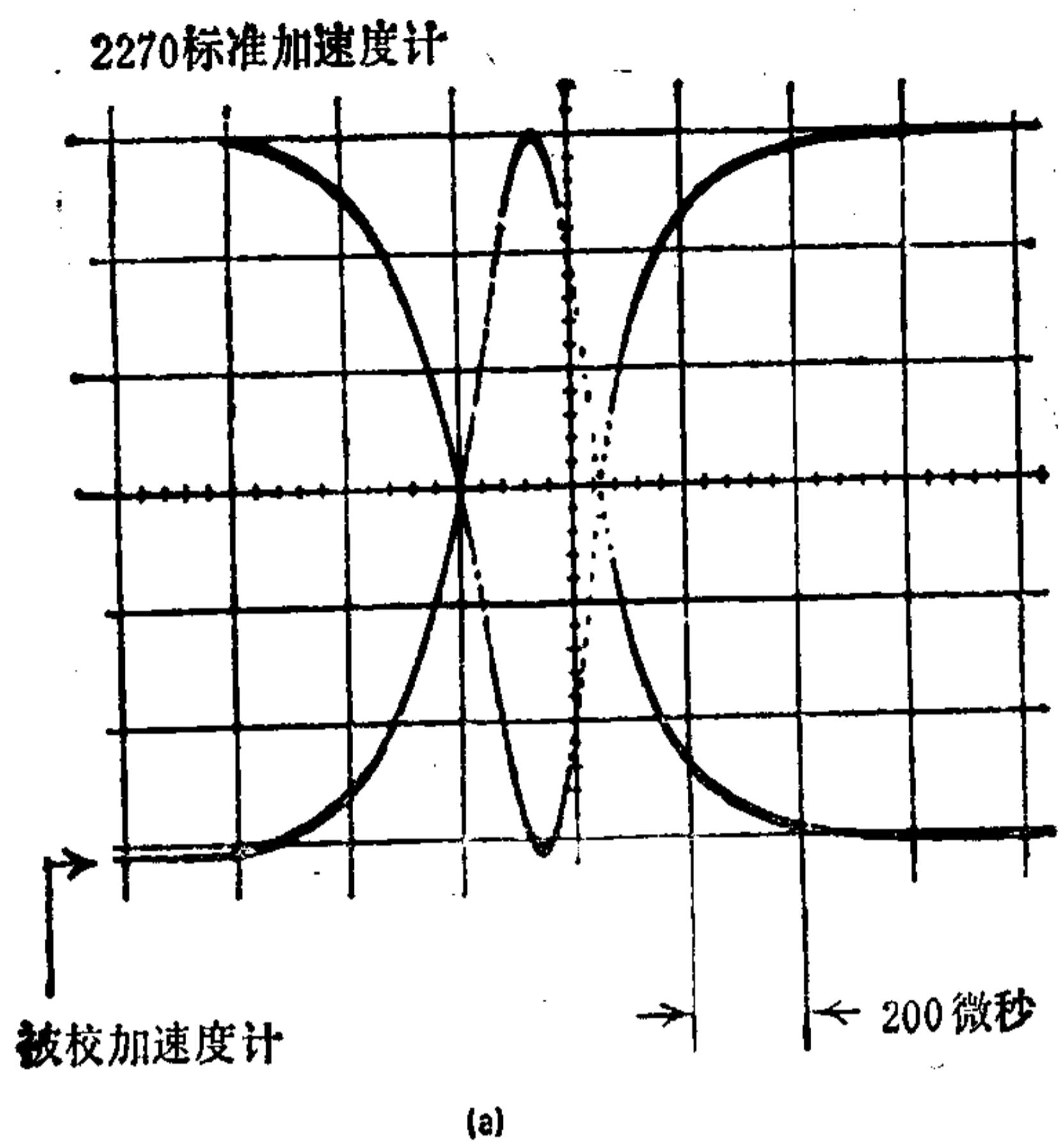
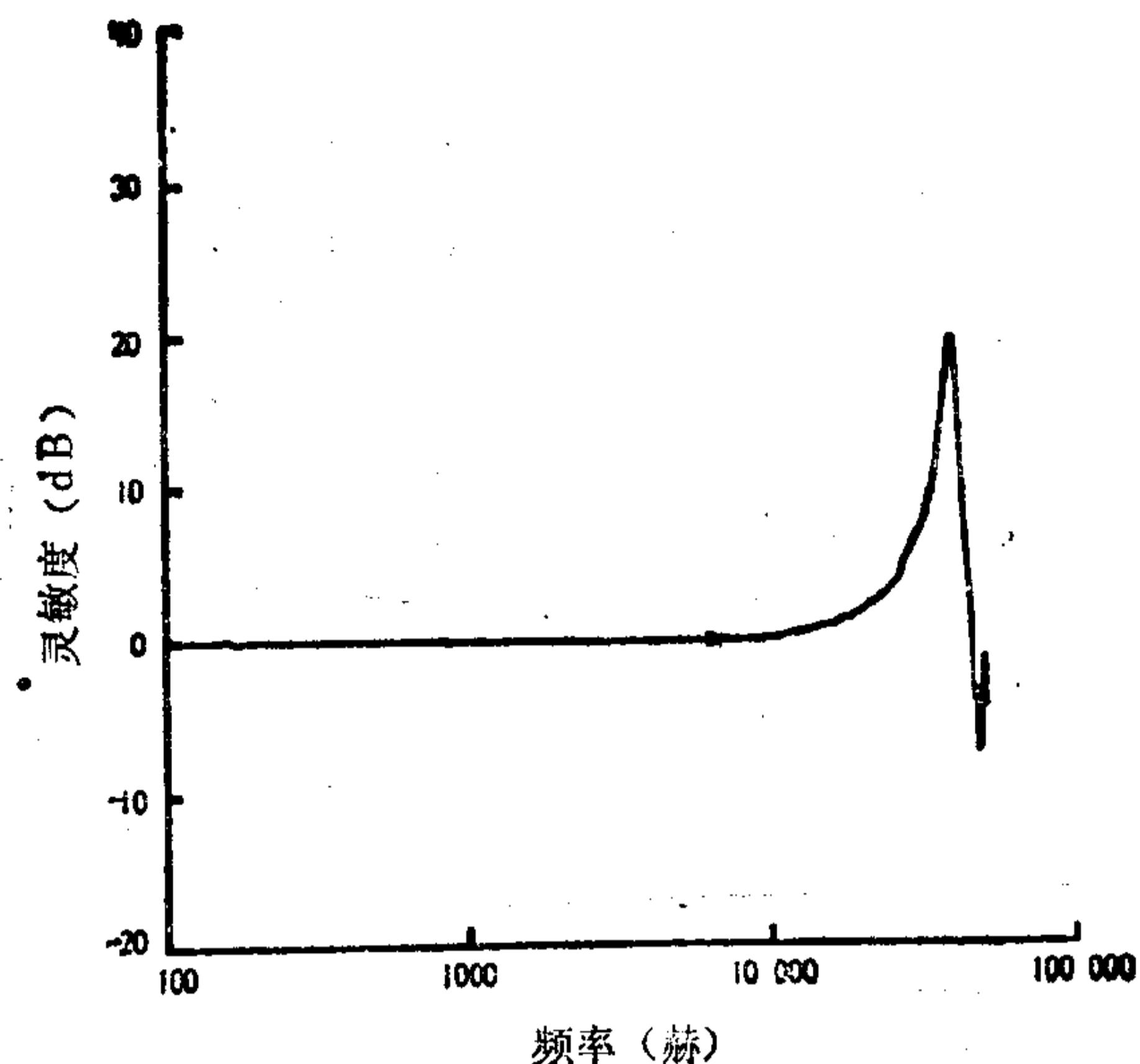
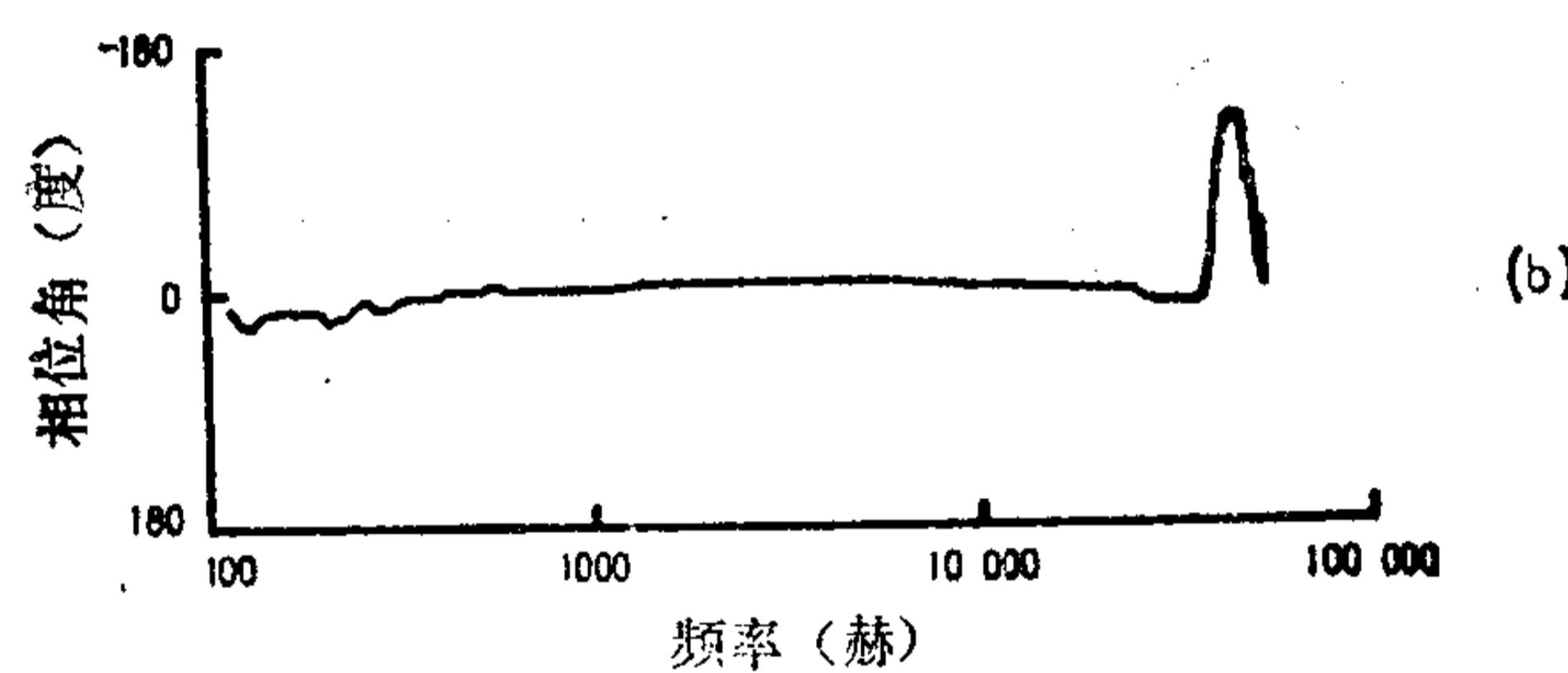


图6-8 一个冲击校准结果似乎正常的加速度计（见a），
谐振频率校准结果表明其内部有损伤^[35]（见b）



(a)



(b)

图6-9 有一个局部谐振的加速度计的校准^[34]

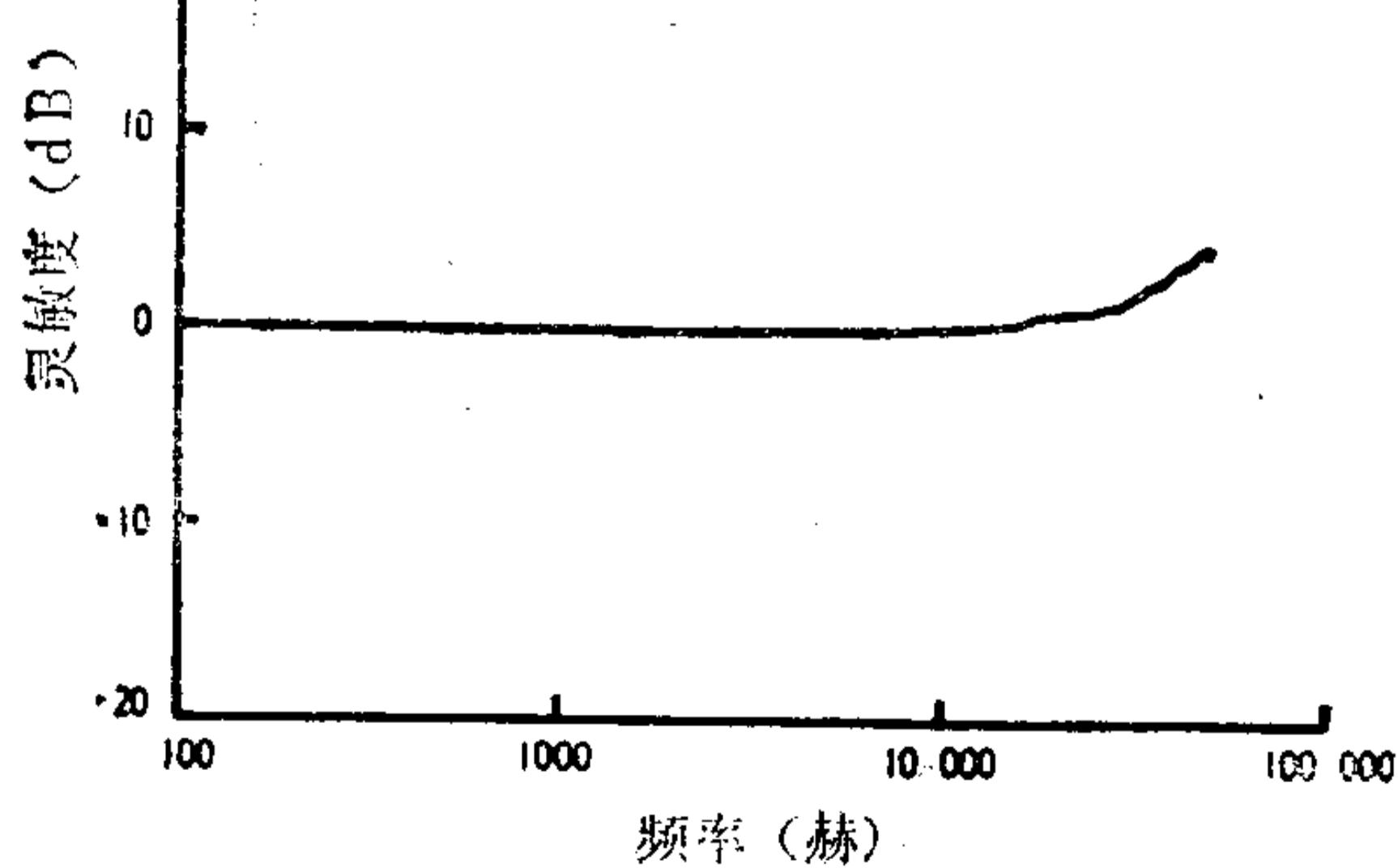


图6-10 一个在 50 000 赫以下无局部谐振的加速度计的校准^[35]

产生的影响。若忽略转动惯量的影响，则装有加速度计的装置的运动由下式给出：

$$A = \frac{A_0 M_s}{M_s + M_t} \quad (6-3)$$

式中 A ——装置在装有加速度计时的运动幅值；

A_0 ——装置在未装加速度计时的运动幅值；

M_s ——在加速度计安装部位处，装置沿加速度计灵敏轴方向的点动态质量；

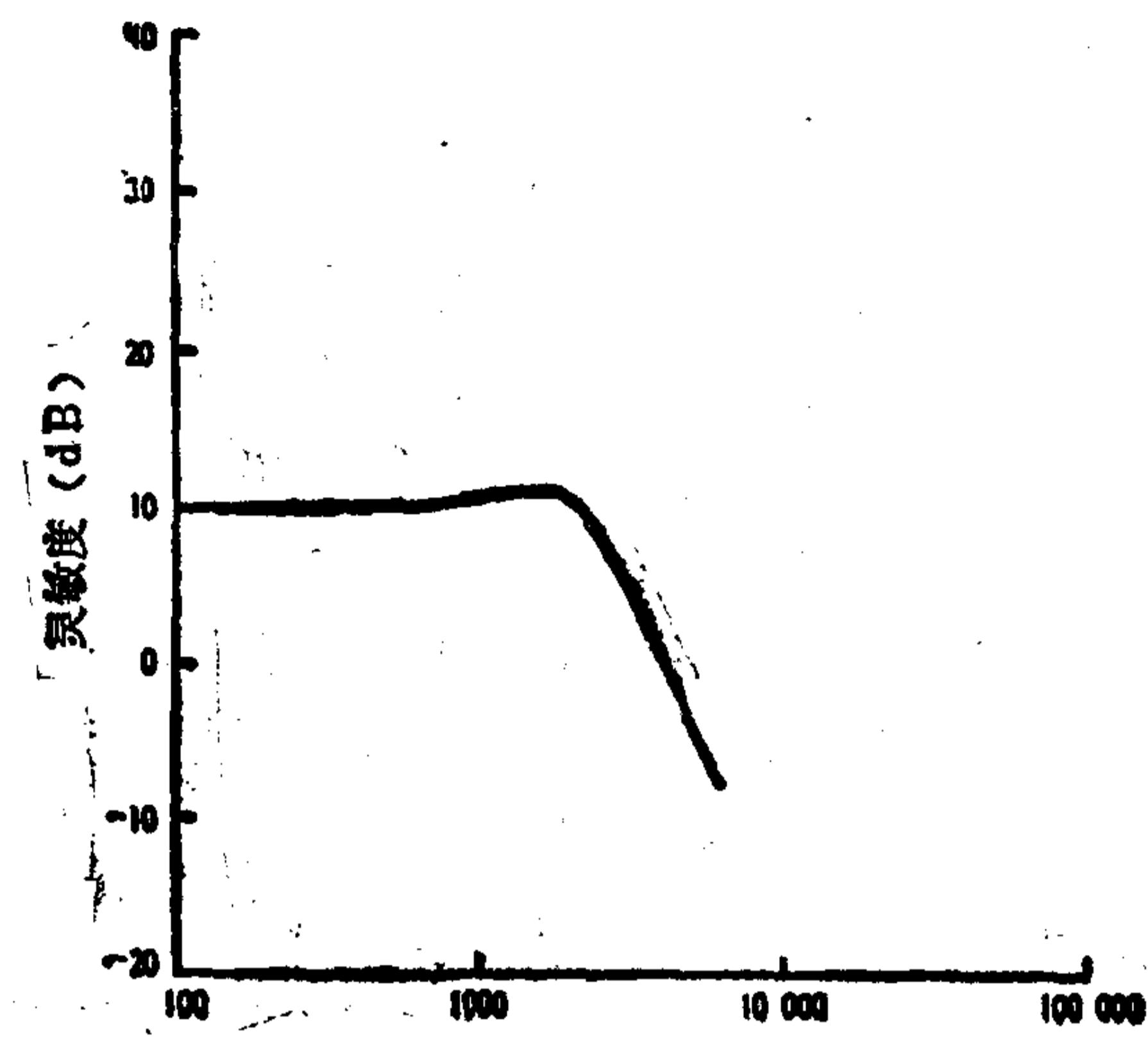
M_t ——加速度计沿其灵敏轴方向的动态质量。

加速度计在低于最低谐振频率时的动态质量等于在静态情况测得的加速度计总质量。但是可以预期，局部谐振时，尤其由于谐振响应，灵敏度变化大时，加速度计的动态质量变化很大。动态质量的最大变化发生在加速度计的谐振频率上。一般很难计算出由加速度计谐振产生的装置响应变化。但是如果已知加速度计的谐振频率和受试装置的特性，就可以用式(6-3)较好地预计这种响应。

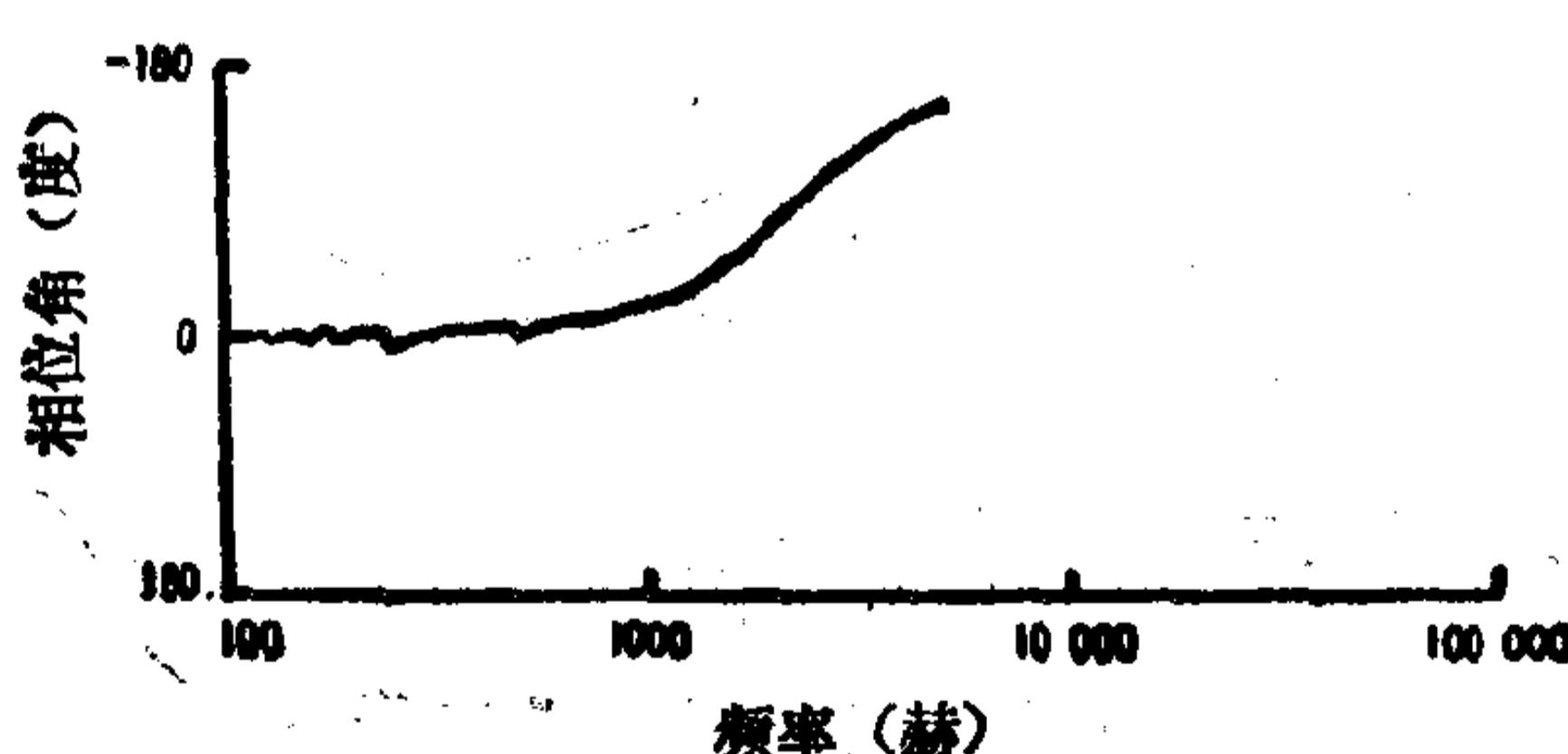
有阻尼的加速度计

图 6-11 是一个装有阻尼油的压阻式加速度计的谐振频率校准结果。制造加速度计时，在室温下将阻尼调到大约等于临界阻尼的 0.7 倍，以保证能精确测量复杂的振动和冲击运动。相位角随频率的变化必须是线性的，如图 (6-11b) 所示（注意图中频率的刻度是对数的），以避免加速度计输出失真。与无阻尼加速度计一样，加速度计的输出波形只有在相位响应具有线性特性或相角等于零度时，才与所测复合运动的波形相同。加速度计的选择原则，是在被测运动的所有重要频率成分上，保持这种线性的相位响应。一般要求在直到大约等于有阻尼加速度计固有频率 2/3 的频率上保持这种线性的相位响应。

当希望滤掉的频率接近和大于加速度计的固有频率或谐振频率时，最好选用有阻尼的加速度计。但是，若由于某种原因阻尼变化很大，阻尼值超出临界阻尼值的 0.5 到 0.85 倍时，输出会产生



(a)



(b)

图6-11 有阻尼压阻式加速度计的校准^[35]

生失真。油阻尼式加速度计在极端温度下，由于油的粘性改变，会产生大的阻尼变化（见图3-15 a）。更重要的是要避免出现因损坏或漏气而造成的大阻尼变化。定期进行谐振频率校准是有益的，因为可通过把所得到的响应与理想加速度计的响应进行比较，从而发现阻尼的变化情况。

6.3 横向灵敏度

横向灵敏度校准的目的，是确定传感器的最大横向灵敏度值（最大横向灵敏度出现在垂直于灵敏轴的某一特定方向上）。制造厂家必须亲自测定加速度计或速度传感器的横向灵敏度。某些传感器由于设计得好，最大横向灵敏度很低（横向灵敏度比小于1%）。压电式加速度计横向灵敏度的变化与几个设计因素有关。最好的加速度计的最大横向灵敏度值大大低于其灵敏度值的3%。

横向灵敏度校准一般是在加速度计的规定频率范围内的某个频率上进行。当加速度计在垂直于灵敏轴的平面内作直线振动时，压电加速度计的输出决定于振动方向的角位置（见图6-12）。当

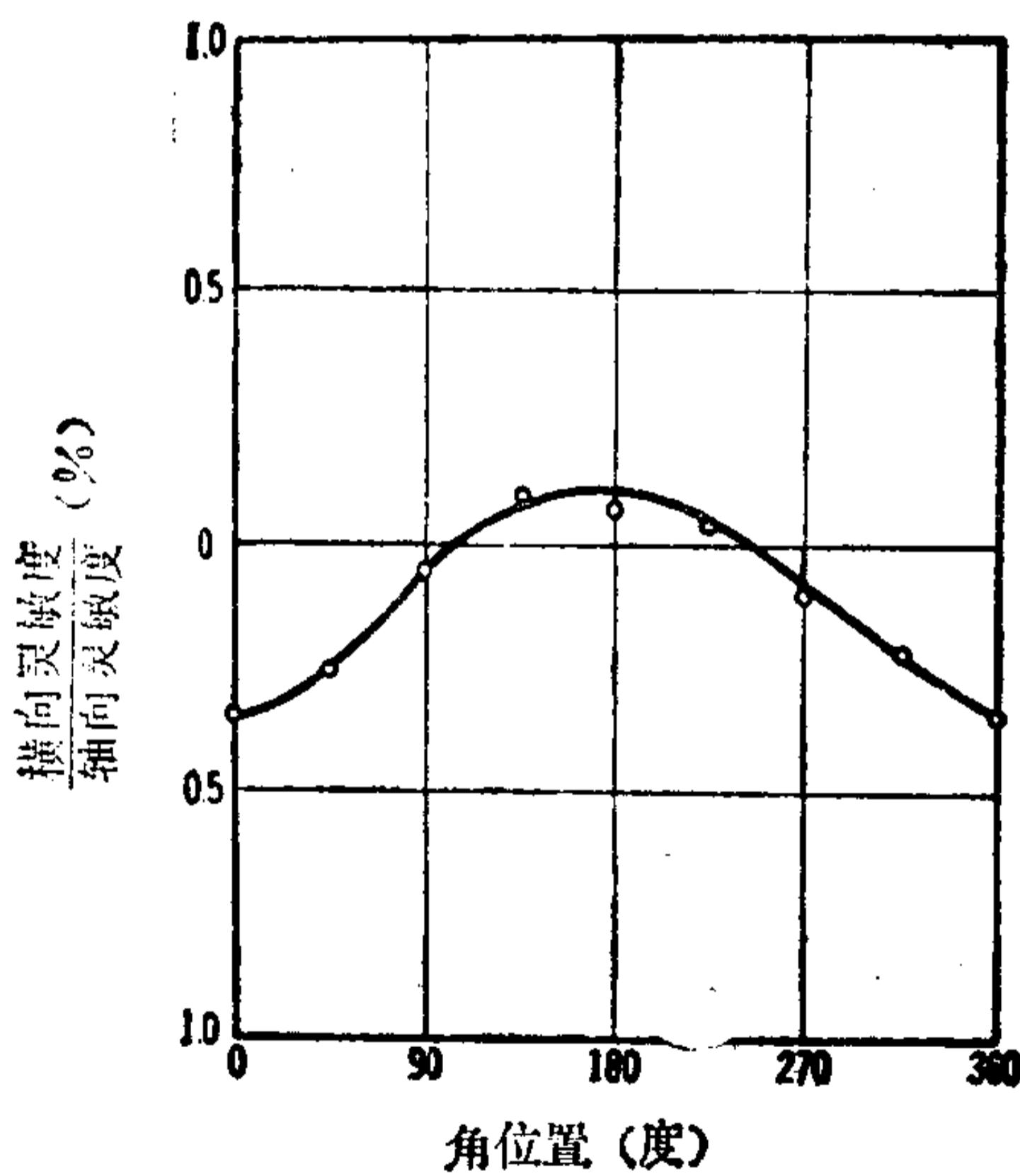


图6-12 横向灵敏度比随加速度计的角位置而改变

加速度计绕其灵敏轴转动时，横向灵敏度的变化呈正弦波形。此曲线的最大值就是最大横向灵敏度。

图6-12的加速度计，其横向灵敏度比小于0.5%。在鉴定

电动振动台时，可用此加速度计来确定振动台测量其他加速度计横向灵敏度的适用程度。图 6-13 a 是这种鉴定的结果。除了在靠近 500 赫和 100 赫（振动台的两个谐振频率）两处之外，振动台的横向运动都小于 1%。此振动台不能用于 3000 赫以上的频率，因为在 4500 赫处有大的谐振。

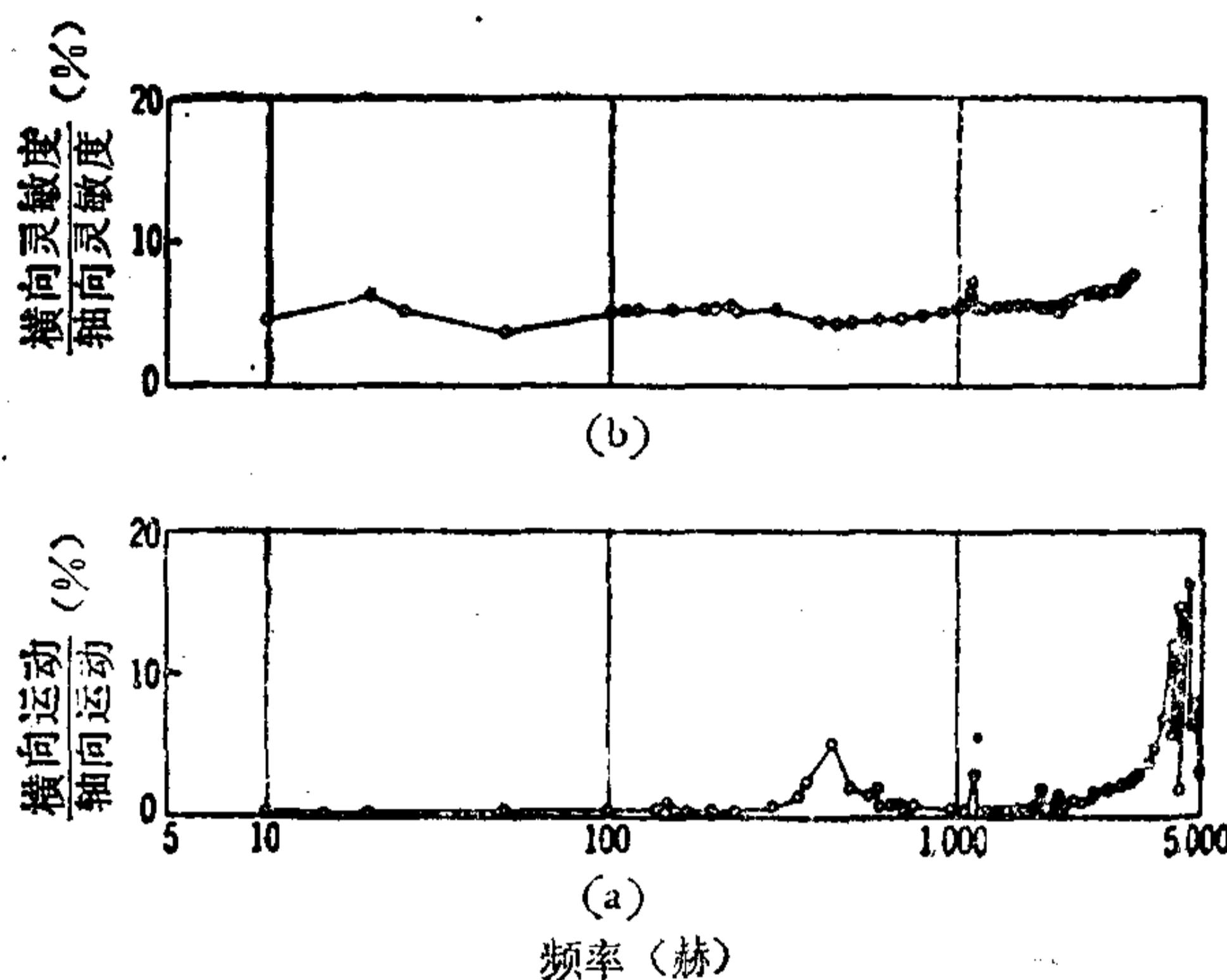


图 6-13 某振动台的横向运动校准

- (a) 使用横向灵敏度低的加速度计
- (b) 使用横向灵敏度高的加速度计

由图 6-13 a 也可看出，加速度计的横向灵敏度比（如图 6-12 所示，它小于 0.5%）在各个频率上保持不变。图 6-13 b 所示的另一加速度计的校准结果更清楚地说明了这一点。图中的这个高横向灵敏度的加速度计，对于用试验方法显示横向灵敏度不随频率改变的特性是有用的。加速度计的横向灵敏度比在振动台的使用频率范围内（3000 赫以下）保持不变，数值约为 5%。在振动台出现谐振响应的那些频率上（图 6-13 a），横向灵敏度曲线出现不规则的变化。

6.4 幅 值 线 性

加速度计本来是线性的，在规定的幅值范围内，灵敏度变化很小或者不变。对这些加速度计，尤其是在制造厂家已给出准确数据的情况下，几乎没有必要进行幅值线性校准。对于灵敏度有明显偏差的加速度计才有必要做幅值线性校准。但是，具有同样设计和同样特性的所有加速度计，它们的偏差几乎都一样。这就意味着，对每类加速度计，只需要做为数很少的幅值线性校准。

图 6-14 a 所示的是幅值线性校准器。把一根谐振梁固定在

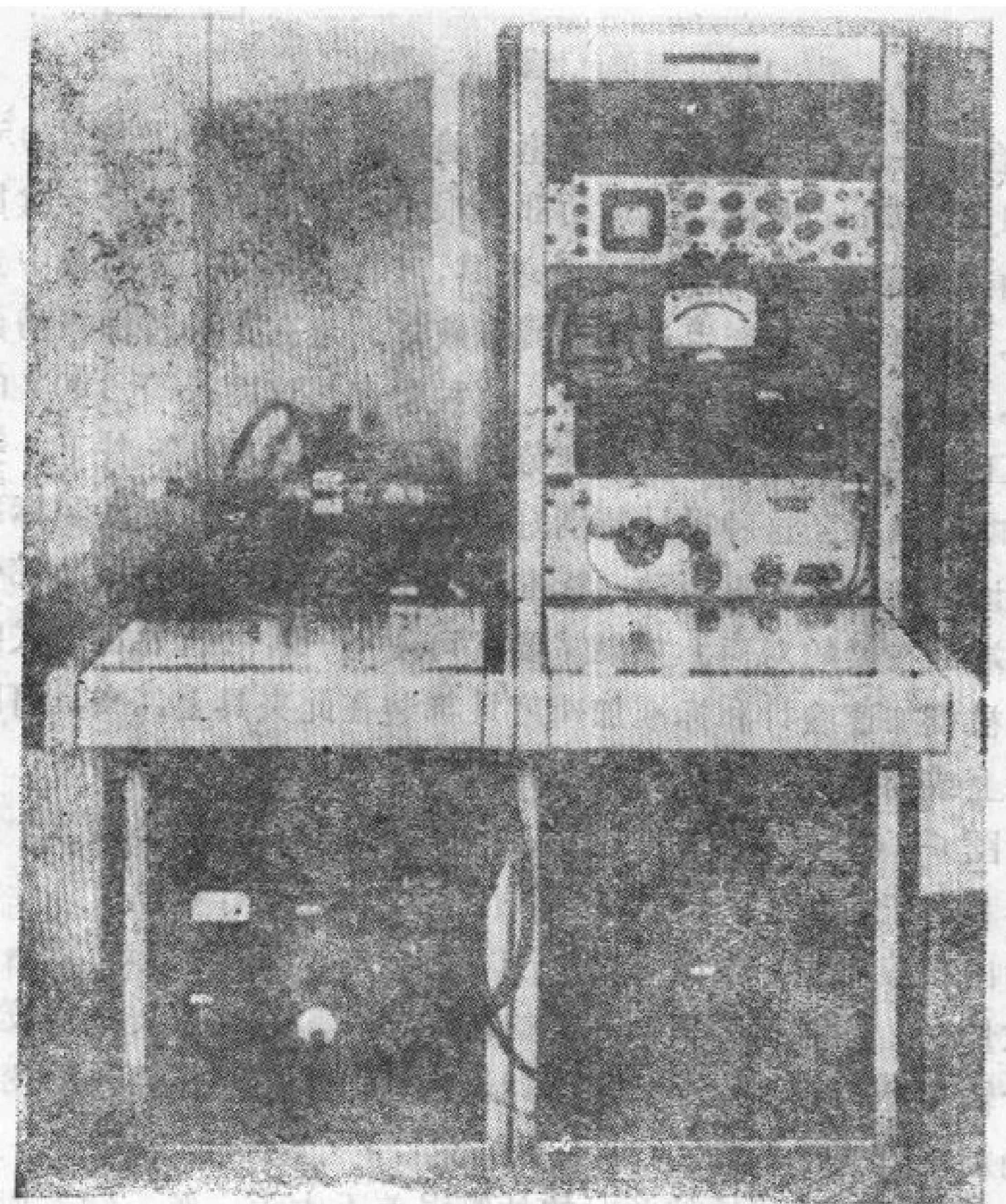


图6-14 a 使用谐振梁的幅值线性校准器^[36]

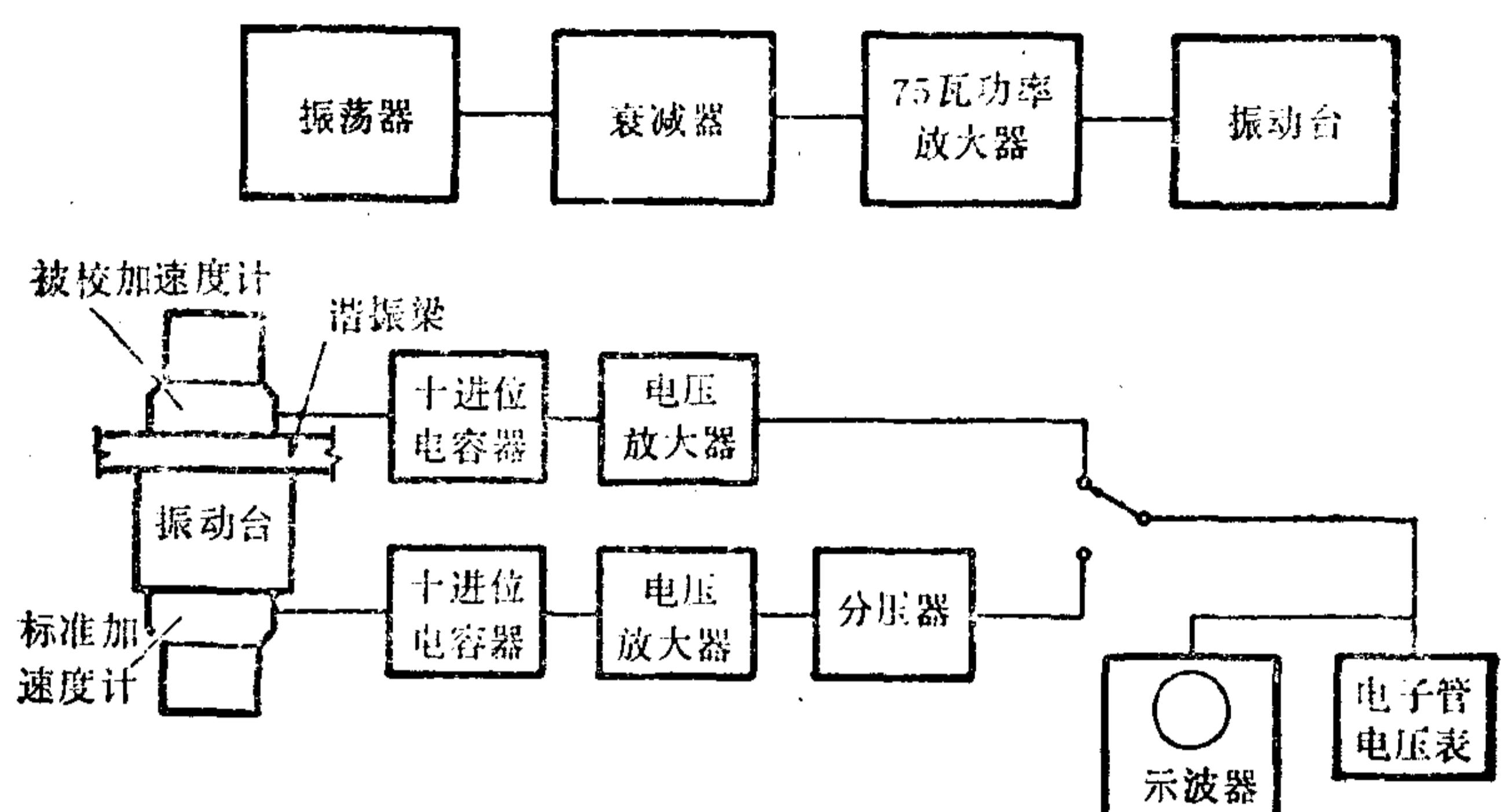


图 6-14 b 幅值线性测试设备的方框图^[36]

振动台上，这样可获得高的加速度。振动台的额定激振力为 50 牛顿（10 磅力）；振动台的运动部件很小，足以使梁按其一阶自由-自由模态谐振。梁上带有一个夹具，以使梁上的应力集中减到最小，从而避免梁产生过度的疲劳破坏。连在这种特种振动台上的梁，其谐振频率约为 220 赫。这种梁在加速度等于 $100 g$ 的条件下工作很多个小时才产生疲劳破坏；在 $200 g$ 的条件下，梁的寿命略有减少。这种设计特别好，因为在被校加速度计和标准加速度计之间没有相对运动。标准加速度计装在振动台运动部件的另一端，在梁的对面。如果需要，可使用一种“背靠背”式的夹具。被校加速度计和标准加速度计都装在此夹具上，夹具可固定在梁上或固定在振动台运动部件的另一端。

图 6-14 b 是 $100 g$ （加速度）校准器的方框图。调节十进电容器和分压器，直到在 $10 g$ 条件下被校加速度计和标准加速度计的输出相等为止。输出是用电压表显示的。然后把加速度增加到要求量级，同时把频率调到梁的谐振频率。将电压表由被校加速度计输出端转接到标准加速度计输出端，根据电压读数的变化值来确定幅值线性偏差。

在测量幅值线性偏差时的估算误差不大于 1%。标准加速度

计是用绝对校准法中的一种校准过的。在冲击校准器上，以较高的加速度进行校准，可以检验标准加速度计。

6.5 温度响应校准

图 6-15a 所示的温度响应校准器适用于从 -184°C 到 $+400^{\circ}\text{C}$ (-300°F 到 $+750^{\circ}\text{F}$) 的校准。温度响应校准一般是在单一频率上，采用比较校准法进行的。标准加速度计装在振动台运动部件中的与被校加速度计相对的一端。在温箱外，周围温度保持在室温。振动台沿垂向运动。一根陶瓷杆固定在振动台运动部件的顶部，并穿过温箱的壁。一个装有热电偶的钢夹具固定在陶瓷杆的顶部。温箱内的温度用热电偶的输出自动控制。

温度响应校准器的方框图示于图 6-15 b。振动台的振动加速度大约为 $3 g$ 。实际上，可以同时校准十个加速度计，在这种情况下要使用更大的夹具，而且每增加一个加速度计，要相应地增加一套放大器-电压表。监视标准加速度计，以保证在校准期间

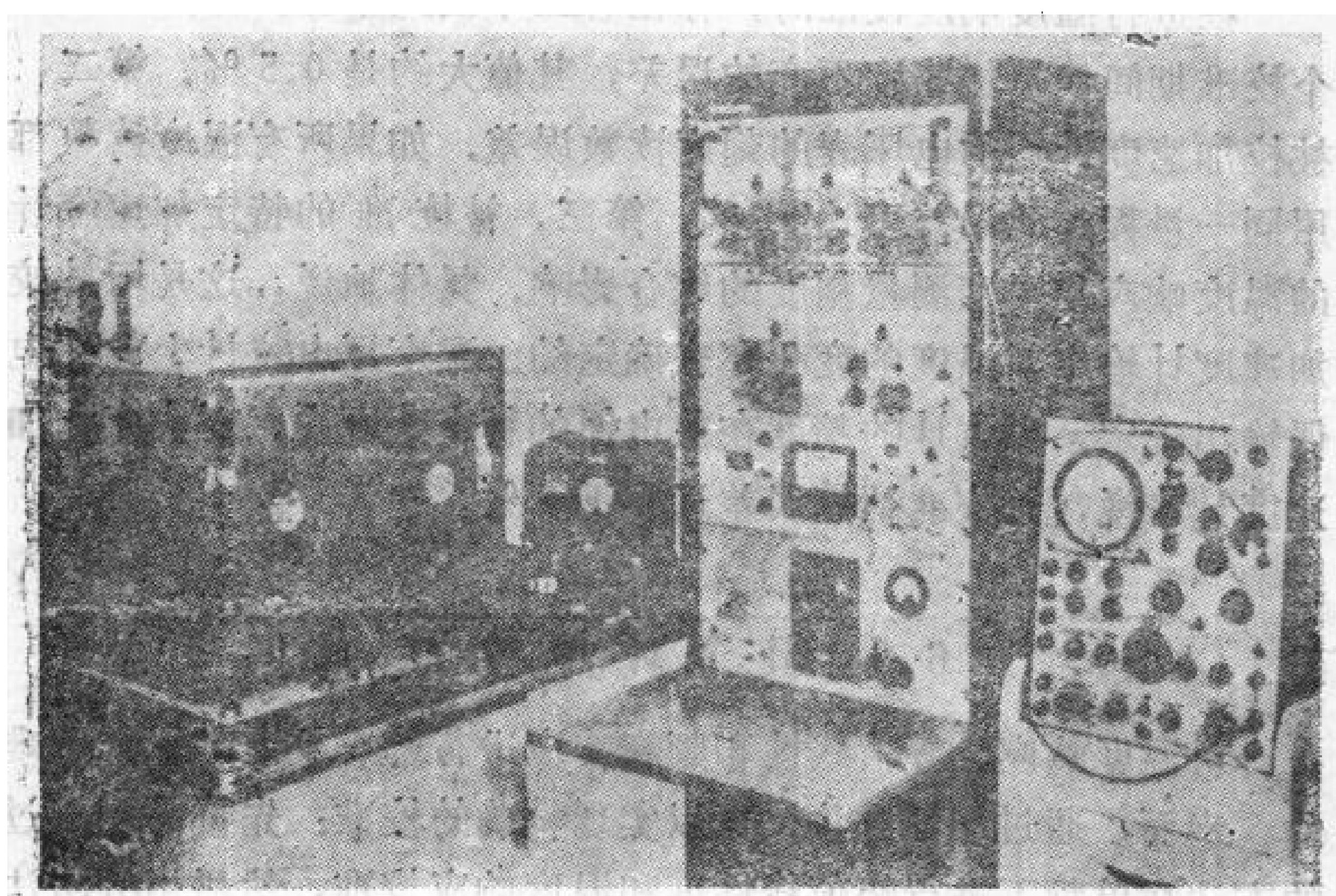


图 6-15 a 温度响应校准器^[36]

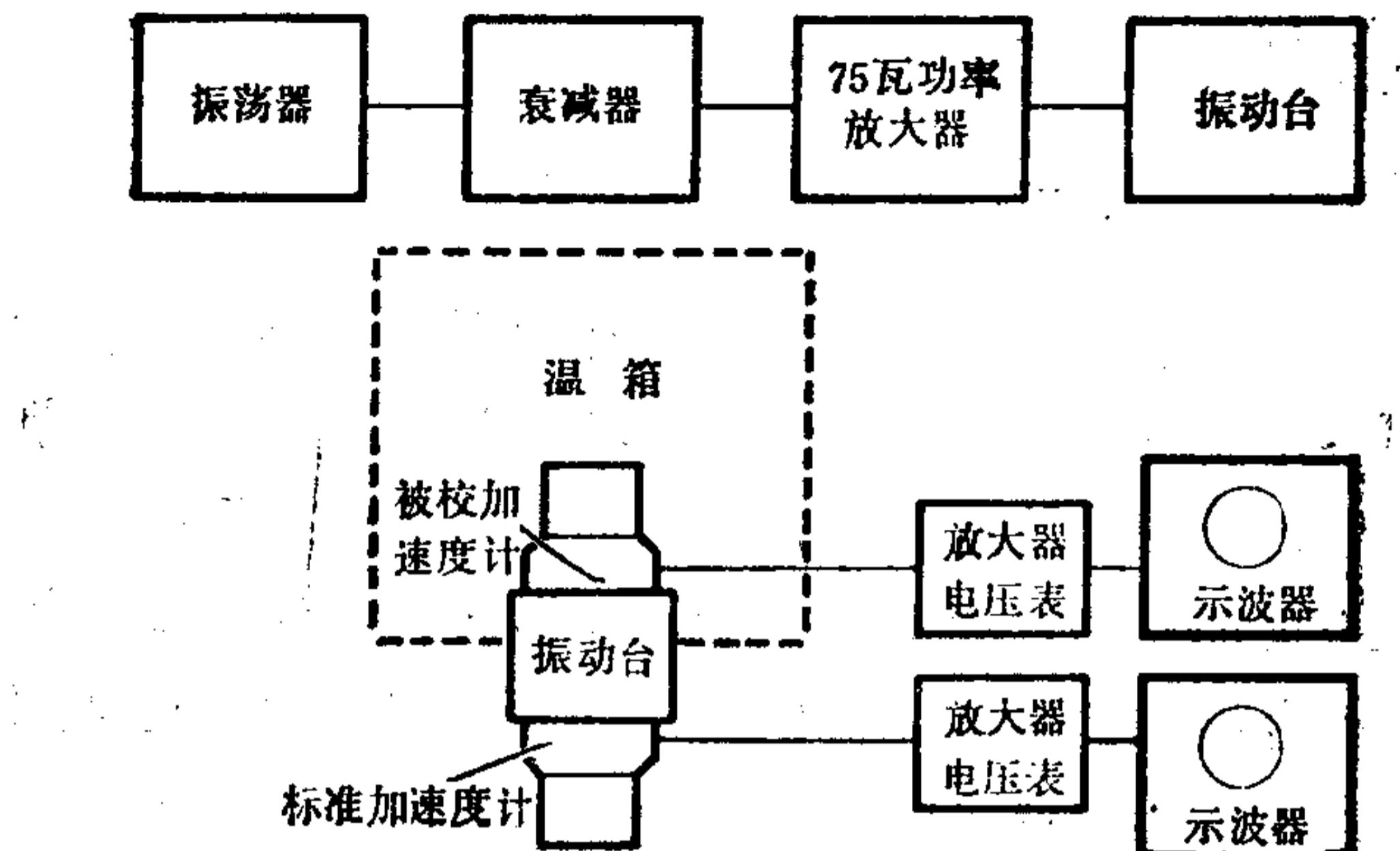


图6-15 b 温度响应校准器^[36]

加速度保持不变。由于标准加速度计位于振动台底部，所以它保持在室温条件下。对每个被校加速度计，在每一温度下的灵敏度偏差，都用电压表读数变化值表示。

在进行温度响应校准时，存在着三个误差来源。第一，在整个校准期间保持加速度不变的误差，其值大约是 0.5%。第二，被校加速度计用的电压表的刻度读数误差。如果所有温度读数都用同一量程，此误差可达 $\pm 2\%$ 。第三，被校准的特定加速度计的温度响应与温度测量精度的综合影响。具体地说，这是用被校加速度计输出对温度的变化率来确定的。温度用电位计上的热电偶输出确定，电位计的精度在热电偶的精度范围内。对大多数加速度计来说，总校准估算误差远小于 5%。

6.6 组合环境校准

对温度响应、幅值线性和频率响应进行综合校准是极其困难的。幸而，通过如下办法，可以实现精确的校准：先按前面讲过的方法在单频下进行幅值线性和温度响应校准，然后用分析法把所得的结果与灵敏度和频响的数据结合起来。对于不在谐振频

率附近使用的小阻尼加速度计，建议采用这个办法。这个方法对压电式加速度计特别适用，因为压电式加速度计的阻尼几乎为零，其使用频率一般都低于谐振频率的 $1/5$ 。尽管在极端温度的环境下，内部阻尼和谐振频率会发生少许变化，但是这些变化对频率低于加速度计谐振频率的 $1/5$ 的响应没有影响。

在谐振频率附近使用的振动传感器需要进行幅值线性度和温度响应的组合校准。幸运的是，需要进行组合环境校准的传感器一般只用于几百赫的频率，而且在温箱内不必使用特别的“背靠背”式的夹具。

在高温情况下压电式加速度计的内阻减少，这对和它相连的放大器(尤其是在低于50赫的频率上工作的电压放大器)的响应可能有影响。为此，往往需要在加速度计处于高温的情况下验证一下加速度计-放大器系统的低频响应。如果已测得加速度计的高温阻尼并已知加速度计的低频特性，高温低频组合校准则可以不做。

第七章 冲击运动校准

按惯例，冲击运动校准是在 $20-10\ 000g$ 的加速度范围内进行的。最精确的校准方法是与标准加速度计相比较的方法；冲击运动的绝对校准能在同样的加速度范围内进行，但是所产生的校准误差稍大于比较法可达到的误差。在加速度上限达 $100\ 000g$ 时，冲击运动的绝对校准要求用特殊的试验设备。

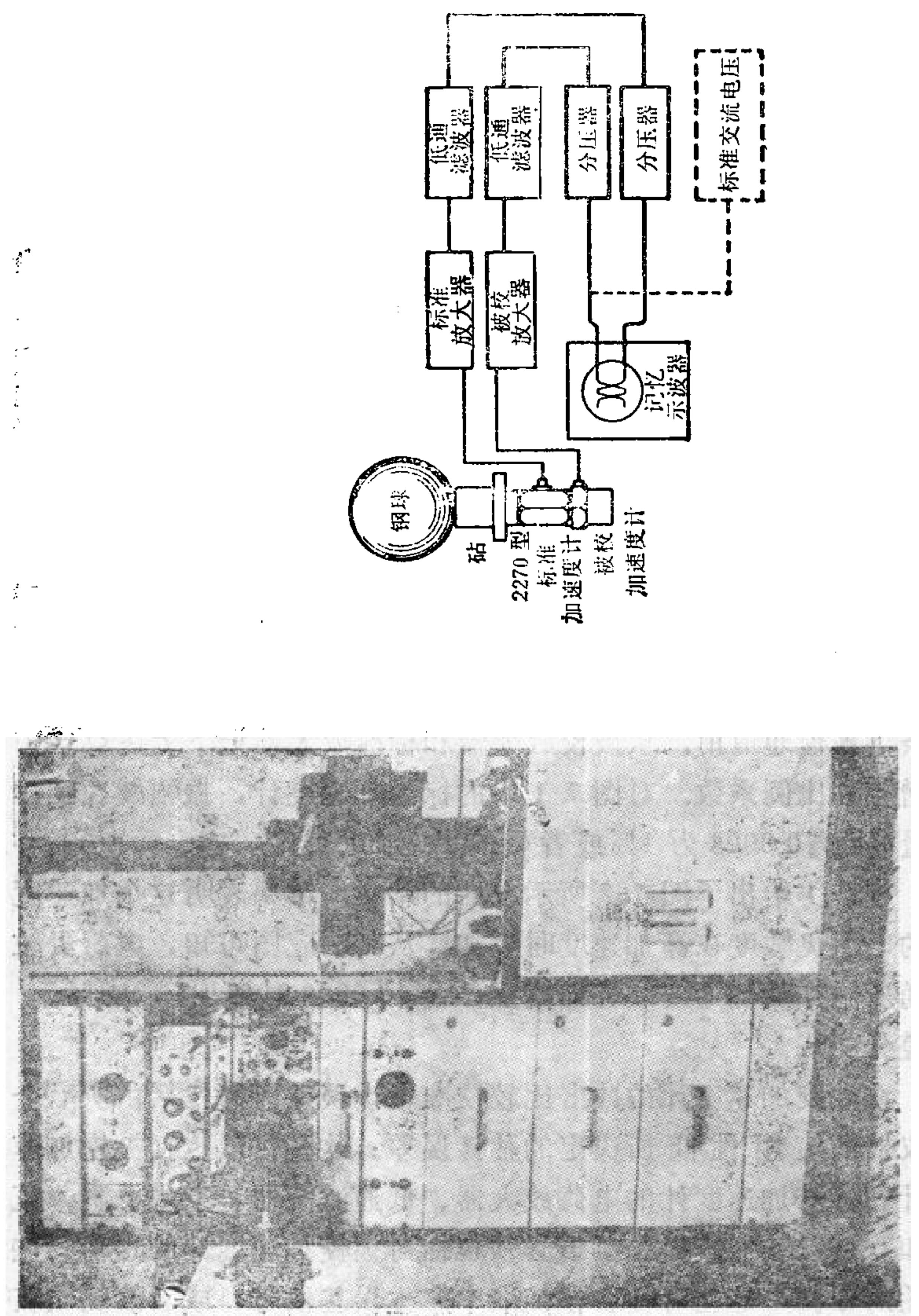
7.1 比较校准

冲击运动的比较校准，就是简单地使被校加速度计和标准加速度计经受相同脉冲的作用，然后测量它们的峰值加速度的输出比。先按互易法校准标准加速度计，定出其灵敏度，并将其作基准传感器使用。在直到 10 000 赫的频率上，对标准加速度计进行频率响应校准，使其在对应于冲击脉冲的各频率分量上的灵敏度一致；此外，对标准传感器作谐振频率的校准，弄清冲击运动校准期间可能激起的谐振；对标准传感器进行幅值线性的校准，求出在冲击运动校准期间，当峰值加速度出现并因而发生灵敏度变化时，所应选取的准确的修正系数。

校准方法

用图 7-1 所示的校准器和其他仪器进行冲击比较校准。标准加速度计和被校加速度计背对背地接到圆柱形砧上，用磁铁把砧固定在适当位置上。可让钢球落下来打击砧。

加速度计连到装有低通滤波器的放大器上，滤波器截止频率应该在 15 与 20 千赫之间。用分压器在记忆示波器输入端产生近似相等的信号，并使脉冲高度近似为 6 厘米。用一个双迹示波器同时记录两个加速度计的输出。随后将一个校准电压标准信号同时加到两个通道上，以校准示波器。



被校加速度计的灵敏度计算公式为：

$$Q_t = \frac{H_t}{H_s} \cdot \frac{D_s}{D_t} \cdot \frac{C_t}{C_s} \cdot \frac{K_s}{K_t} A_s \quad (7-1)$$

式中 Q_t ——被校加速度计的灵敏度（皮库仑/g）；

H_t ——被校加速度计的脉冲高度（厘米）；

H_s ——标准加速度计的脉冲高度（厘米）；

D_t ——被校加速度计的分压器档位数；

D_s ——标准加速度计的分压器档位数；

C_t ——被校通道上的校准信号（毫伏/厘米，毫伏/英寸）；

C_s ——标准通道上的校准信号（毫伏/厘米，毫伏/英寸）；

K_t ——被校放大器增益（毫伏/皮库仑）；

K_s ——标准放大器的比例系数（毫伏/g）；

A_s ——标准加速度计的振幅线性度修正系数。

图7-2列出了在冲击比较校准中得到的典型波形图。标准加速度计和被校加速度计的冲击脉冲输出互相颠倒，这样便于分开迹线。正弦迹线是供校准用的。上面的一条是供标准通道用；下面一条供被校通道用。从被校放大器和标准放大器记下上述算式中的增益和比例系数。对图7-1中的标准加速度计，振幅线性度修正量是每10 000g为1%或者每1000g为0.1%。

表7-1给出了图7-2所示校准的结果。结果表明这个加速度计的电荷灵敏度在高加速度时增加。从其响应图可知，电荷灵敏度随所施加的加速度线性地增加，在10 000g时增加到4.5%。

误差分析

在被校加速度计的冲击比较校准中，误差应当包括由所用全部仪器的使用性能所决定的估计误差。这些仪器包括被校加速度计和标准加速度计的电荷放大器、低通滤波器、十进电阻分压器和双迹示波器。^⑤误差分析必须包括对被校加速度计的这样一些特性的分析，这些特性会在校准中产生误差信号，或者改变被校加速度计的灵敏度。

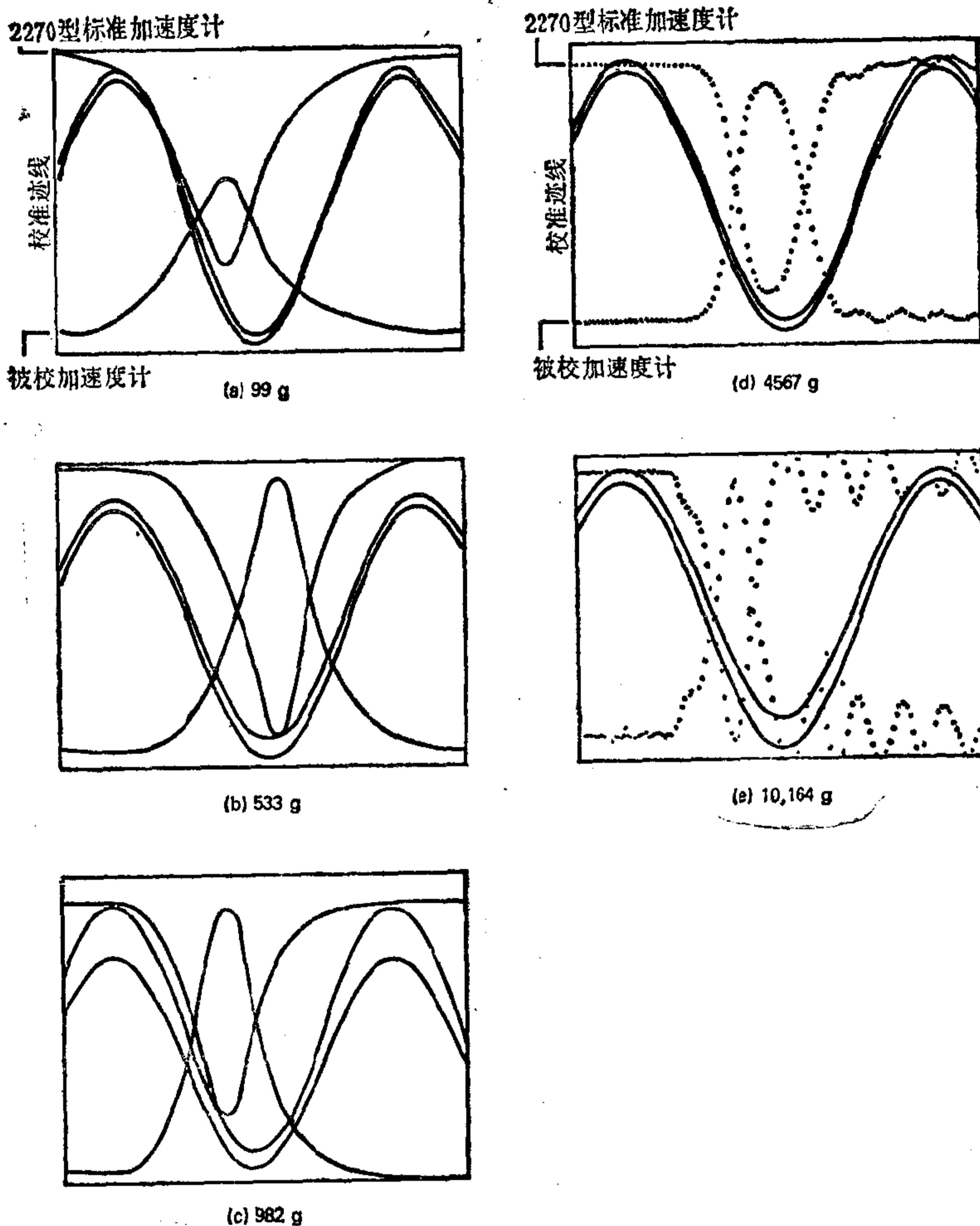


图7-2 由冲击校准器得到的示波图

误差分析采用通常的程序。由一定的特性所决定的实际误差通常小于仪器标定的误差最大值。这是理所当然的，因为仪器的名义性能指标通常低于制造期间所定的标准（通常根据这个标准决定是否接收仪器）。此外，在分析中的具体误差常常小于仪器

表7-1 Endevco 2225型加速度计的校准 (JC 62²⁸¹) 结果

所施加的 加速度 (g)	脉冲时间 (毫秒)	D_t	D_s	C_t (毫伏/厘米)	C_s (毫伏/厘米)	K_t (毫伏/皮库仑)	K_s (毫伏/g)	A_s	Q_t (皮库仑/g)
99	2.6	1.0	1.0	202	203	10	10	1.000	0.732
533	.85	.4	0.3	247	256	10	10	1.000	.729
982	.75	.2	1.0	236	201	10	10	1.001	.733
4567	.15	.8	0.6	510	507	1.0	1.0	1.005	.786
10 164	.10	.8	0.7	108	115	0.1	0.1	.010	.778

的名义误差。这是因为校准时的条件一般不是仪器的最恶劣的工作条件。因而，在给出误差时，分析中的名义误差不要超过极端条件下的最大可能误差的三分之二。

表 7-2 给出了误差分析结果。试验表明，标准传感器的互易校准误差一般低于 $\pm 0.5\%$ (见表 5-3)。所以，表 7-2 中给出的估算误差为 0.35% 。如果标准传感器打算只用作冲击运动校准的话，那么，宁可用比较法而不用绝对互易法来校准。然而，互易法足够精确，以致能用它来探明标准传感器的稳定程度。

表7-2 在 Endevco 28701型冲击运动校准器上校准的
被校加速度计灵敏度的误差分析^[28]

项	目	误 差 ($\pm \%$)
1 标准加速度计		
1.1 100 赫上的互易校准		0.35
1.2 灵敏度稳定性		0.35
1.3 100 赫处质量对灵敏度的影响		0.14
1.4 标准传感器的频率响应比较校准		2.1
1.5 上限为 10 000 赫的相对运动		1.0
1.6 上限为 10 000 g 的振幅线性度校正		0.5
2 电荷放大器		
2.1 标准放大器换档		0.7
2.2 被校放大器增益		0.35
2.3 被校放大器换档		0.2
2.4 相对频率响应		0.1
2.5 增益稳定性，源电容等		0.2
3 低通滤波器		
3.1 相对增益		1.0
3.2 到 10 000 赫的相对频率响应		1.0
3.3 相角线性度		1.0
4 电压比测量结果		
4.1 十进制分压器		0.05
4.2 标准脉冲高度		2.0
4.3 被校脉冲高度		2.0
4.4 示波器的校准		2.0
5 环境对放大器和加速度计的影响(包括横向灵敏度、应变、温度、失真等)		1.0
6 被校加速度计灵敏度的估计误差		4.8 ^①

①由单项误差的平方和的平方根确定。

在标准加速度计的别的可能误差中，标准传感器的频率响应校准误差是2.1%。表7-2中(2)的误差适用于优质电荷放大器。电荷放大器中的低通滤波器误差在表中单独列出。低通滤波器的校准结果示于图7-3。两个放大器中采用相同的滤波器，增益和频响的误差趋于相互抵消。因此表7-2中3.1和3.2栏的1%误差已经是高估的了。滤波器的相位角随频率线性地改变（图7-3），这是为避免冲击脉冲波发生失真所要求的。线性的相位响应一直到频率为10 000赫处。对冲击运动校准器所产生的频率分量来说，这个频率已经足够高了。因此，在估计滤波器相位角特性引起的误差时，可以认为其低于1%。

比较校准是通过同时记录下在双迹示波器上的标准加速度计

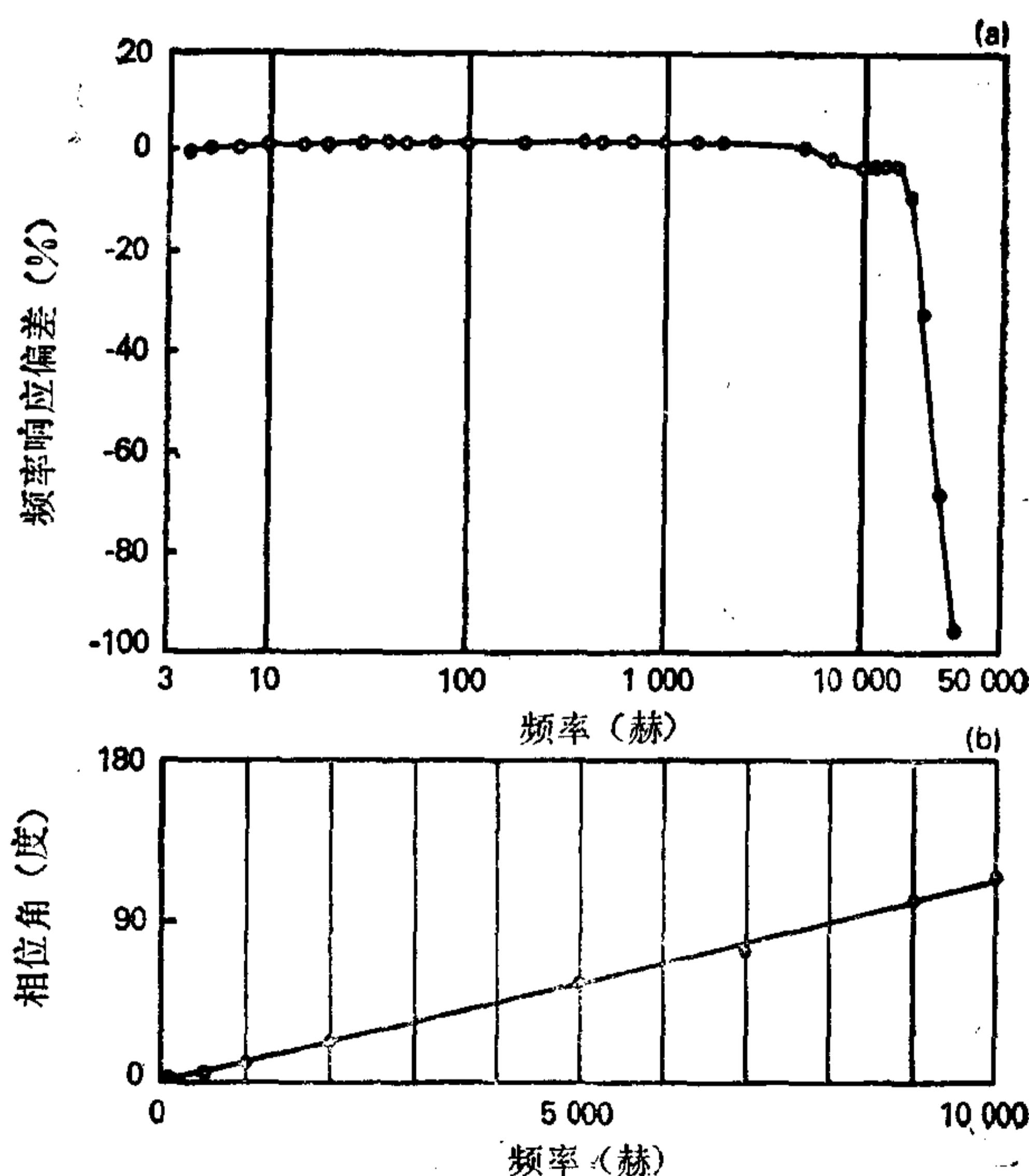


图7-3 用于冲击校准的低通滤波器的幅值和相位角响应

和被校加速度计的输出来完成的。校准时采用十进制分压器，示波器上冲击脉冲高度和正弦校准信号高度可以在5—8厘米的范围内调整。这时脉冲高度能以低于2%的误差测量出。考虑到各电压量程之间的差别，示波器也要作校准。这种校准误差在2%以下。

环境对标准传感器、被校传感器及放大器的影响所带来的误差是1%。这是由于横向灵敏度、应变、温度和失真等因素所引起的。为使失真误差最小，需要采用能产生持续时间至少是被校加速度计的固有周期五倍的脉冲的砧。这个要求通常能够满足，因为大多数具有低谐振频率的加速度计限于低加速使用，而低加速度砧产生长持续时间的脉冲。某些失真也由激起标准传感器外壳和底座的谐振所造成。这些误差趋于互相抵消，因为在被校件和标准件输出中它们同时出现。

计算表7-2所列的单项误差的平方和的平方根，就可得到被校加速度计灵敏度的估算误差，在冲击运动比较校准中，这一误差是4.8%。但对具有已知特性的加速度计，大多数冲击运动的校准结果表明，其误差通常是相当小的。如果运用某种特殊技术来准确地测量脉冲高度和正弦校准迹线，那么可使误差小于3%。

7.2 绝 对 校 准

冲击运动绝对校准是使被校加速度计承受机械脉冲的作用，然后测量所产生的速度变化来实现的。把加速度计的脉冲输出积分，以确定速度的改变量。加速度计的加速度灵敏度用所指示的速度与由绝对法测量的真实速度之比来确定。

工作原理

加速度计灵敏度的绝对校准是通过测量由冲击运动引起的砧的速度，并用它去除加速度计输出的积分来实现的。

当砧的顶端处于第二个与第三个光敏二极管（即图7-4中的传感器）之间时，它的速度 u_t 由下式给出：

$$u_t = (u_2^2 + 2gS)^{1/2} \quad (7-2)$$

式中 u_2 —— 砧在第二个光敏二极管处的速度 (米/秒或英寸/秒)；

g —— 重力加速度 (9.81 米/秒² 或 386 英寸/秒²)；

S —— 距离 (米或英寸)。

注意到 $u_t = dS/dt$, 那么由式 (7-2) 可以得到：

$$\int_0^\tau dt = \int_0^{S_2} \frac{dS}{(u_2^2 + 2gS)^{1/2}} \quad (7-3)$$

由式 (7-3) 可得：

$$u_2 = \frac{S_2}{\tau} - \frac{\tau g}{2} \quad (7-4)$$

式中 S_2 —— 第二个和第三个光敏二极管之间的距离；

τ —— 砧移动 S_2 距离所花的时间。

砧在冲击运动脉冲结束时的速度为

$$u_1 = (u_2^2 - 2gS_1)^{1/2} \quad (7-5)$$

其中 S_1 是砧在冲击运动脉冲结束以后，顶端达到中间光敏二极管时所移动的距离。根据以上的式子，由冲击脉冲引起的砧的速度改变为

$$u_1 = \left[\left(\frac{S_2}{\tau} - \frac{\tau g}{2} \right)^2 - 2gS_1 \right]^{1/2} \quad (7-6)$$

绝对校准是通过计算加速度计的灵敏度 S 来完成的。灵敏度的计算公式为

$$S = \frac{K_1 K_2 A}{u_1} \quad (7-7)$$

式中 K_1 —— 电压比例系数；

K_2 —— 时间比例系数；

A —— 加速度计的输出随时间变化脉冲曲线下的面积。

对示波器上的加速度输出图形照相，用透明坐标纸或者面积仪作输出的数字积分，就可精确地得到面积 A 。将坐标纸上每个区域

所代表的加速度计电压 K_1 和时间 K_2 (秒) , 面积 A 及 u_1 代入式 (7-7) , 其结果就是加速度计在冲击运动条件下的灵敏度。

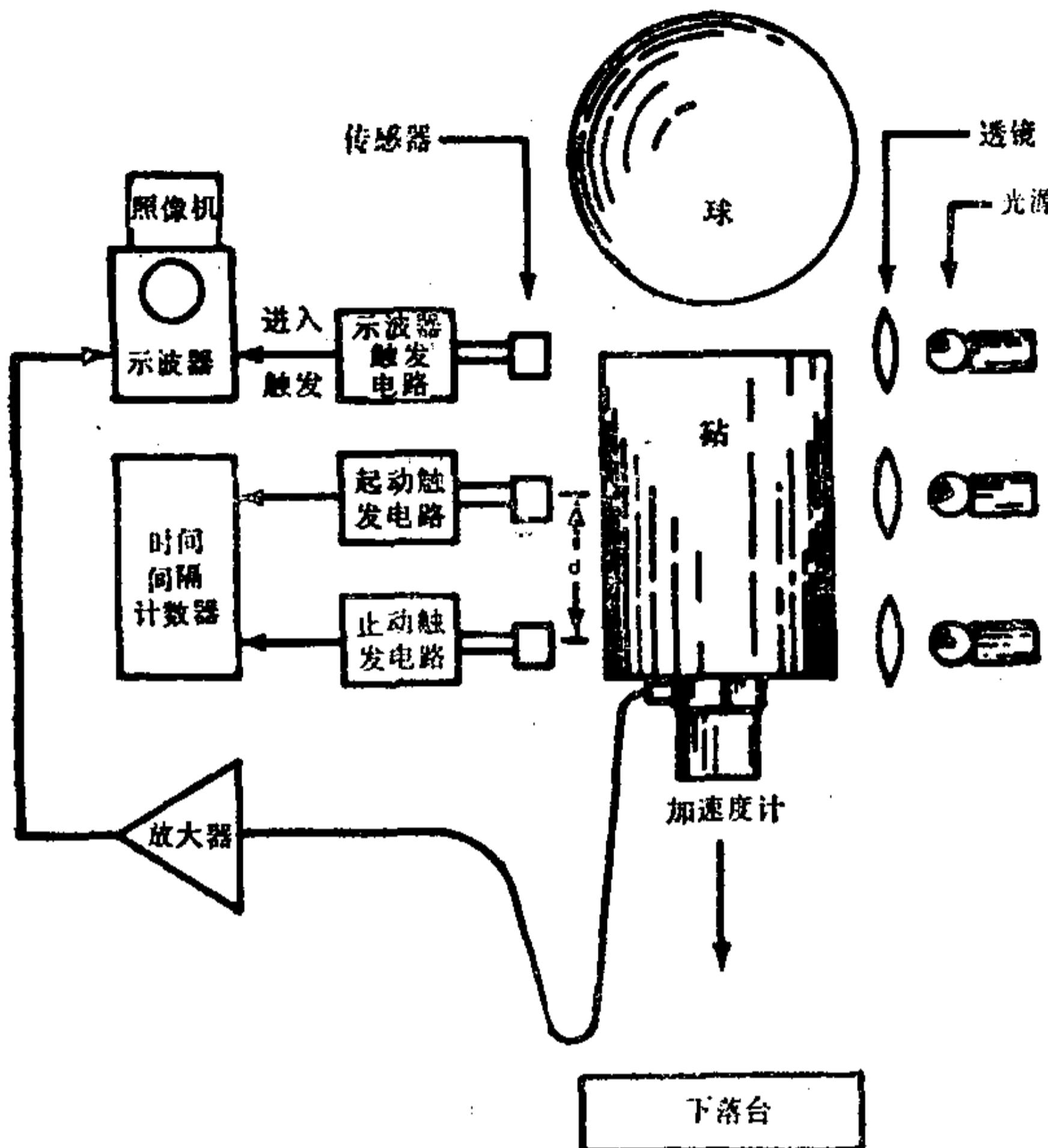


图 7-4 绝对冲击运动校准的设备⁷⁾

冲击校准器概述

用于绝对校准的冲击校准器和用于比较校准的相似。用一个附加电路来进行由冲击运动引起的速度改变的绝对测量。图 7-4 示出了用作灵敏度测量的设备。光敏二极管用作触发示波器和时间间隔计数器的传感器。要完成灵敏度测量, 需要精确测量中间的传感器与底部的传感器(用这两个传感器产生信号来启动和关闭计数器)之间的距离。测量这个距离的最好方法是把砧和加速度计从校准器移开, 然后使球从已知高度自由落下, 球通过中间和底部的传感器。传感器之间的距离可按下式计算:

$$S_2 = 4.43 \times 10^{-3} th^{1/2} + 4.90 \times 10^{-6} t^2 \quad (\text{米}) \quad (7-8)$$

$$S_2 = 0.0278 th^{1/2} + 0.193 \times 10^{-3} t^2 \quad (\text{英寸})$$

式中 S_2 —中间的传感器与底部的传感器之间的距离（米或英寸）；

t —球移动距离 S_2 所花的时间（毫秒）；

h —中间光束与释放前球端部之间的距离（米或英寸）。

在校准器中装入砧，使球落到砧上，以产生所希望的冲击脉冲，从而进行冲击运动校准。砧的端部放上橡胶衬垫，以控制所希望的脉冲持续时间。冲击脉冲的峰值加速度由砧的质量、球的质量和衬垫的材料来确定。

典型结果

图 7-5 是冲击运动绝对校准的一些典型结果。图中的三个设计不相同的压电式加速度计的校准结果表明绝对校准是切实可行的。对于 2221 型加速度计（图 7-5a），在 1250 g 处的加速度灵敏度比加速度低于 1250 g 时的结果有一些增加。这种灵敏度的增加对这种加速度计来说是典型的。2225 型加速度计在 7610 g 处灵敏度的稍微减少，这却不是典型的（图 7-5b）。可以预料，加速度灵敏度在这个高加速度处的稍微减少，是由校准误差造成的，因为灵敏度本来应当有少许的增加，而不是减少。2242 型加速度计（图 7-5c）具有近于常数的灵敏度，这结果对于这种特定加速度计是典型的。

校准误差

表 7-3 列出了冲击运动绝对校准的校准误差。在直到至少 1000 g 的加速度范围内，校准误差始终为 $\pm 4.3\%$ 。在较高的加速度的情况下，有时难以控制砧的轨道，以消除在速度测量期间的转动。当出现这种转动时，灵敏度测量的误差将稍大于表 7-3 所给的值。为鉴别出差的校准结果，需要具有相当多的冲击运动绝对校准的经验和熟悉所校准的加速度计的振幅线性度特征。因此，在 5000—10 000 g 范围内的冲击运动绝对校准，应当只在具备能解决上述问题的实验室中进行。需要对绝对校准做进一步的研究、改进，以减少比较冲击校准方法中的误差。可利用专门设

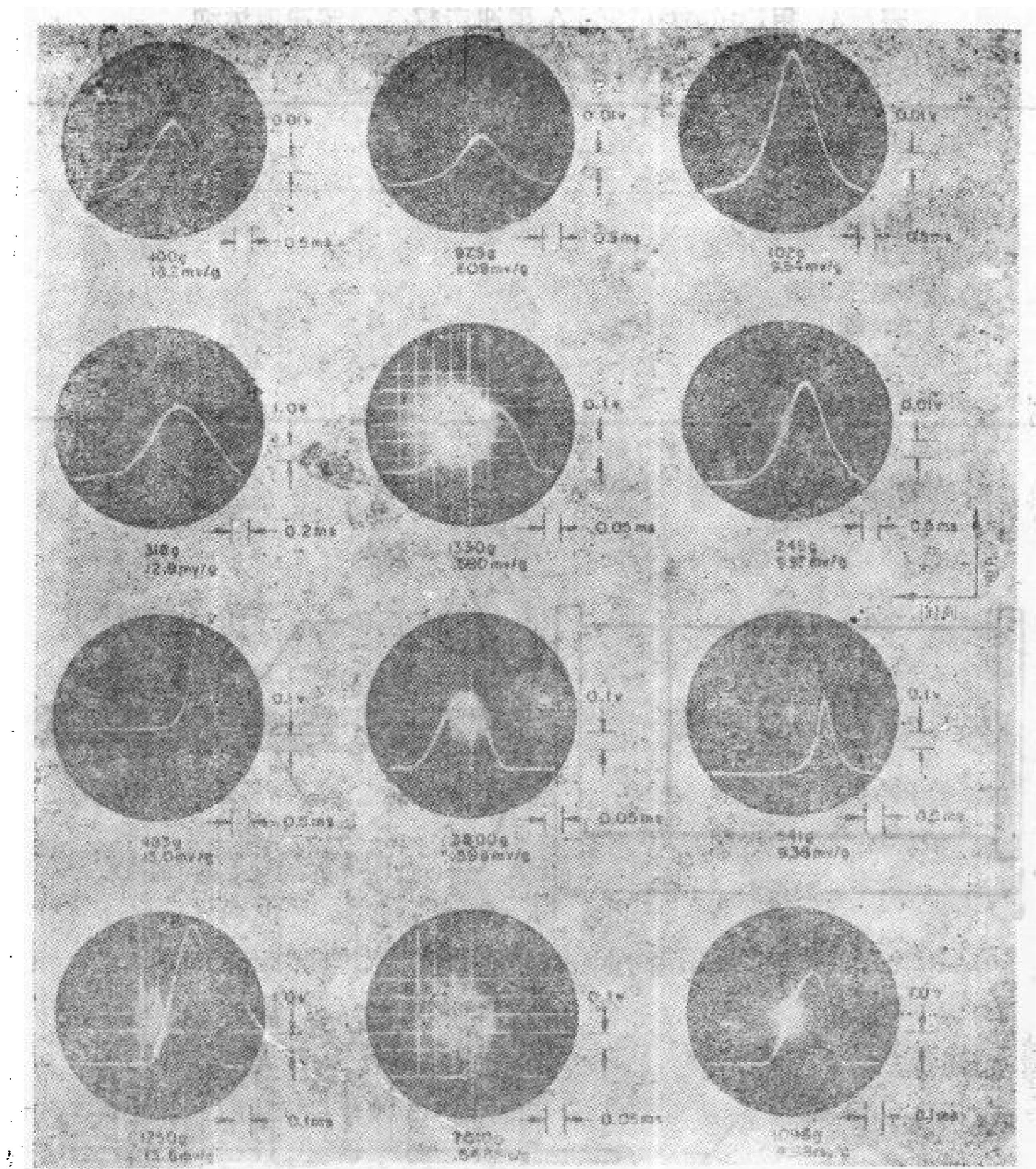


图7-5 三种压电式加速度计的冲击绝对校

准的典型结果^[17]

(a) 2221型

(b) 2225型

(c) 2242型

计的激光冲击校准器完成这种改进。

上限为 100 000g 的校准

在做 10 000—100 000g 范围内的冲击运动的校准，进行灵敏度的绝对测量时，可用气枪来施加脉冲。气枪示于图 7-6。容器内的压缩空气作用到撞头上，撞头沿枪筒加速并打击装了加速度

**表7-3 用Endevco 2965 A型冲击校准器做冲击运动
绝对校准的估计误差^①**

测 量 项 目	误 差 (±%)
1. 脉冲下的面积	3
2. 速度	2
3. 示波器电压比例	1.0
4. 示波器时间比例	.5
5. 比例系数	2
6. 加速度计灵敏度的估计误差	4.3 ^②

①由单项误差的平方和的平方根确定。

②资料来源：加利福尼亚州 Endevco 公司。

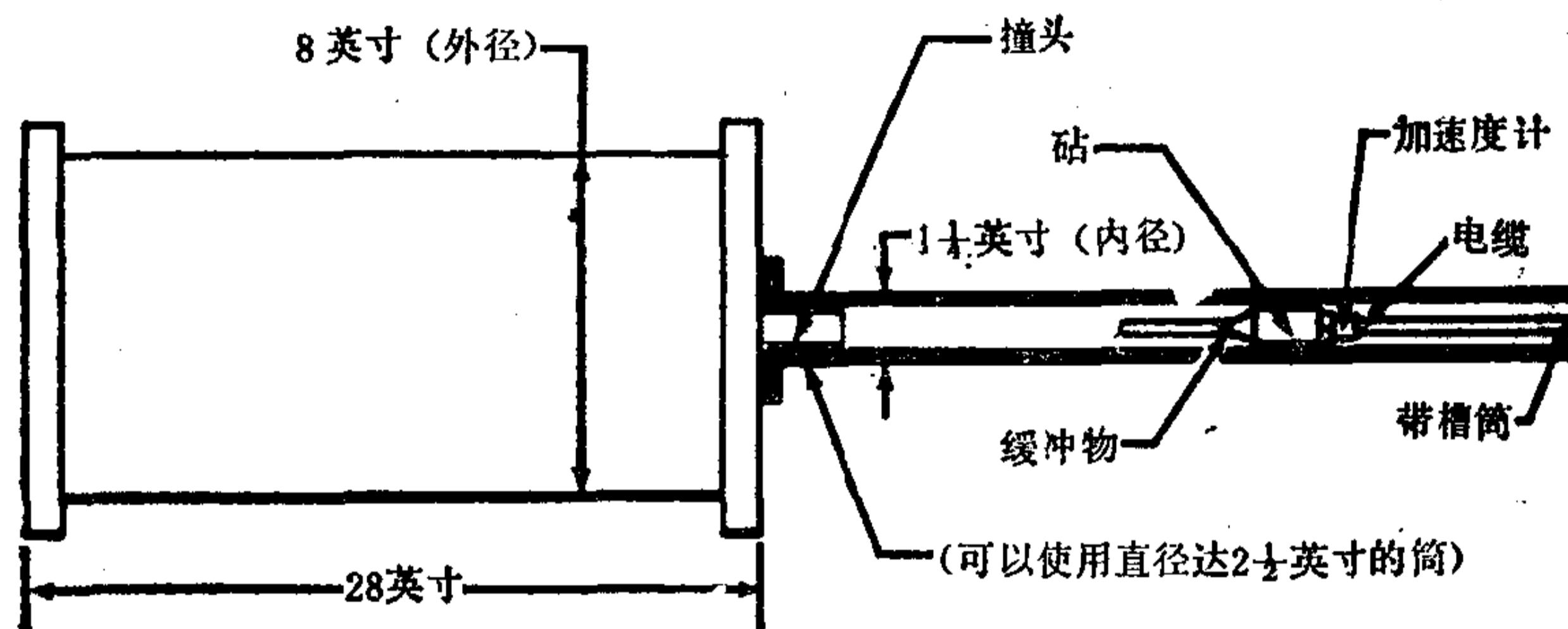


图7-6 用于冲击运动校准的气枪^[8]

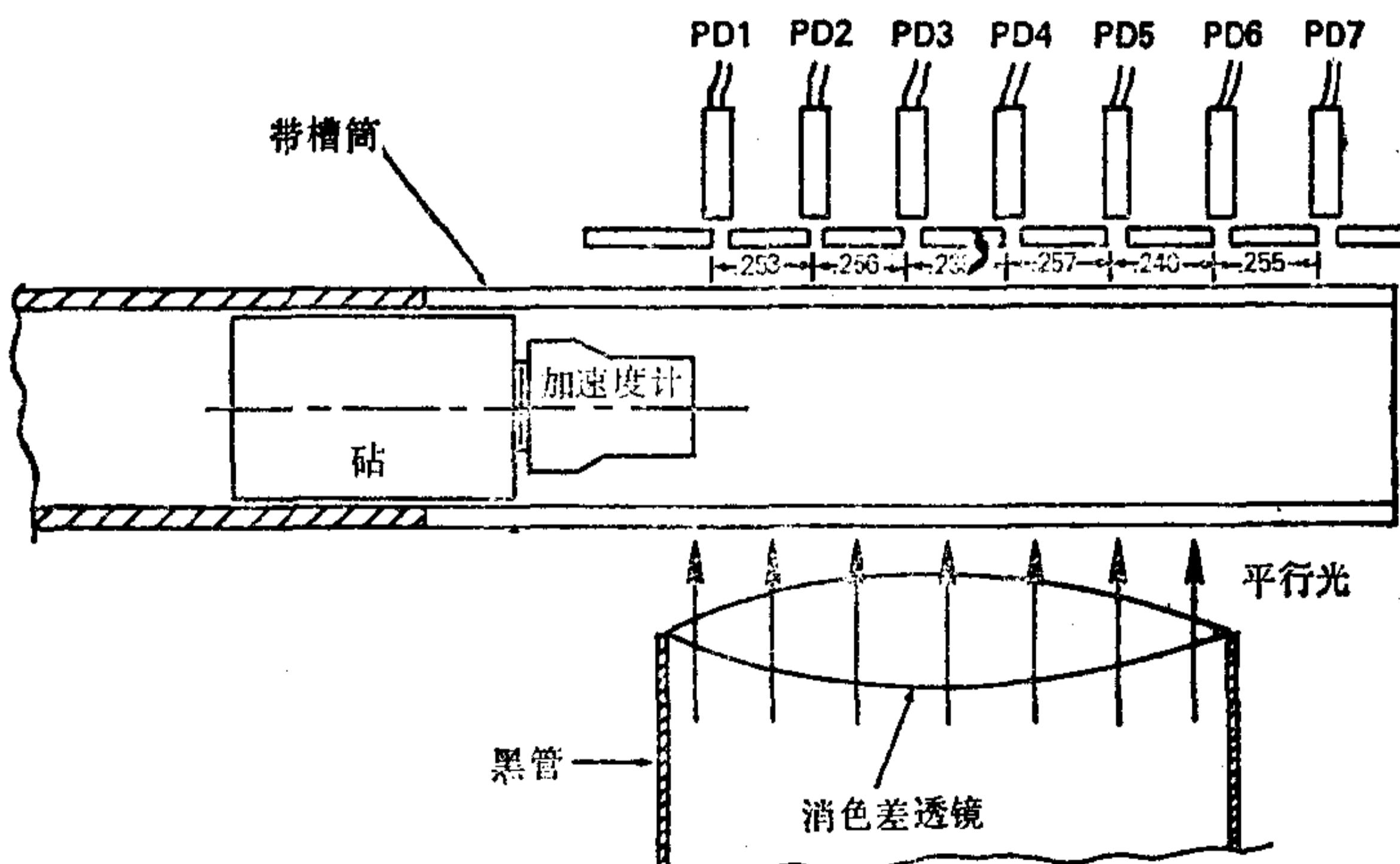


图7-7 在气枪中用光电二极管测量加速度计的速度^[33](图中尺寸单位为英寸)

计的砧体。所产生的冲击脉冲记录在示波器上。冲击脉冲所引起的速度灵敏度的改变，用装在筒体槽上的光电二极管来测量（图7-7所示）。对加速度脉冲输出积分，借助于所测量到的速度改变来计算灵敏度，从而完成校准。图7-8所示的典型结果指出，加速度灵敏度在100 000 g时增加47%。应当对用作冲击测量的加速度计的工作加速度加以限制，使其灵敏度增加不超过10%。为此，这个加速度计最高工作加速度应不超过20 000g。具有一定的振幅线性度偏差的加速度计，应能用来做加速度高于20 000g的测量。

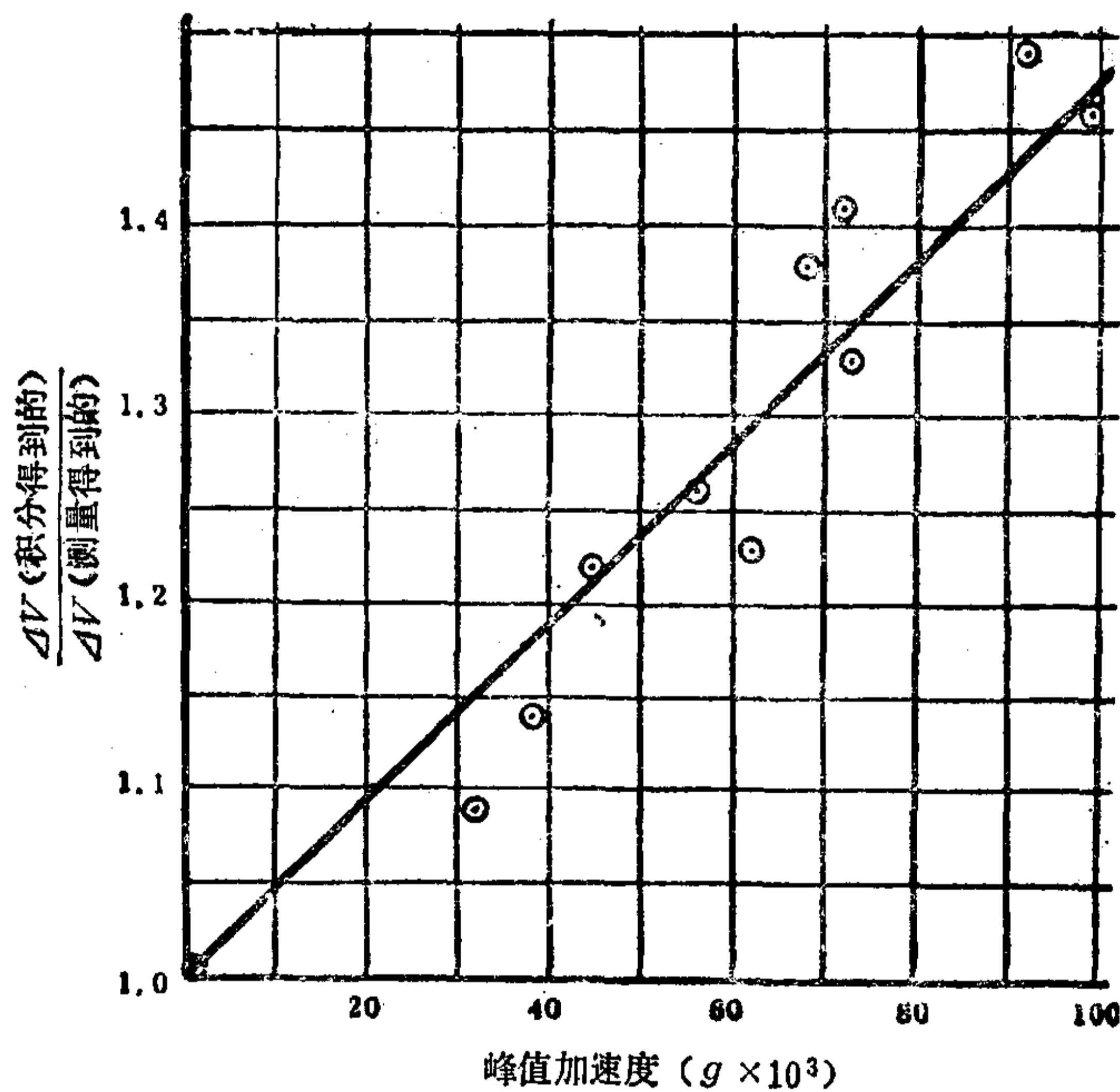


图7-8 用气枪作压电加速度计校准的典型结果
(灵敏度随所施加的加速度增加的情况) [15]

第八章 测力计和阻抗头

动态力测力计（传感器）是用压电陶瓷、压阻应变计或者电阻丝式应变仪换能元件制造的。测力计的基本结构类似于加速度计的结构。只是测力计有机械终端，测力计的顶部和底部安装面就是机械终端。在加速度计中，只有换能元件的一端连到加速度的壳体上。测力计有两个安装面，对外加应变那样的环境影响比较敏感。

对于冲击和振动测量来说，力和结构阻抗是非常重要的。同时，必须了解到在测量力和结构阻抗中，存在着大的误差。在校准和试验时，测力计的测量误差比加速度计的测量误差要大好几倍。但如能适当地加以注意，可以利用测力计进行非常有用的力量测量，并且能保持高精度。

阻抗头（传感器）由一个测力计和一个内装加速度计组成。阻抗头的内装加速度计与一个安装端相连结；而测力计则与两个安装端相连结。阻抗测量可以用单个的测力计和加速度计来完成。设计固定件时必须小心，以免测力计和加速度计之间出现相对运动。阻抗头最好用于在高频处的点阻抗测量。测量传递阻抗时，需要在结构上的一个点使用测力计，另一个点使用加速度计，以测出力与加速度之比。在使用这些传感器时，如果有把握地得到有用的数据，需要有适当的专门技术。但这也不难达到，只要精通测力计的某些设计和工作特性，以及具有在实验室中进行校准的经验即可。

8.1 概述和特性

图 8-1 为一种型式的阻抗头。这种阻抗头高 1 英寸（25.4 毫米），直径 2 英寸（50.8 毫米）。它包含三个压电式测力计和三

个压电式加速度计。三个加速度计装在阻抗头端面板的底座上，位置如图中三个黑圈所示；测力计也装在端面板上，其位置在三个加速度计之间。测力计的另一端连到底板上；和测力计一样，三个加速度计的电输出端在阻抗头内部相连。备有各加速度计和测力计的连接器，用以传递来自它们的输出。测量时，习惯于将阻抗头的端面连接到被试结构上（高频测量时尤其如此）；阻抗头的底面则连到振动台上。

图 8-1 的阻抗头用一个螺钉穿过中间的圆孔。这种结构使得阻抗头与结构的连接极牢固，这对于在高频率范围内（大约到 5000 赫）进行测量来说是非常重要的。校准时用的螺钉要与力或阻抗测量时所用的相同，这点也是重要的，因为力在螺钉和阻抗头之间的分配与它们的刚度成比例。例如，如果螺钉的刚度是阻抗头的刚度的十分之一，那么它将承受总载荷的十分之一。不同的刚性材料制成的螺钉将承受不同的载荷。测力计是用其单位作用力的输出来校准的。总作用力包括阻抗头和螺钉所承受的载荷。

图 8-2 和图 8-3 所示的阻抗头和测力计使用两个螺钉，一个连到顶安装面，另一个连到底安装面。所加的总载荷由测力计测量，所以安装螺钉不承受载荷。这些测力计的刚度比较低，不能用于非常高的频率。校准应当在要进行力或阻抗测量的频率范围上进行。

8.2 测力计的校准

测力计和阻抗头可用正弦运动，以大约从 5 到 50 牛顿（1—10 磅力）的振幅，在振动台上对整个工作频带作最精确的校准；



图 8-1 机械阻抗头 (Endevco)

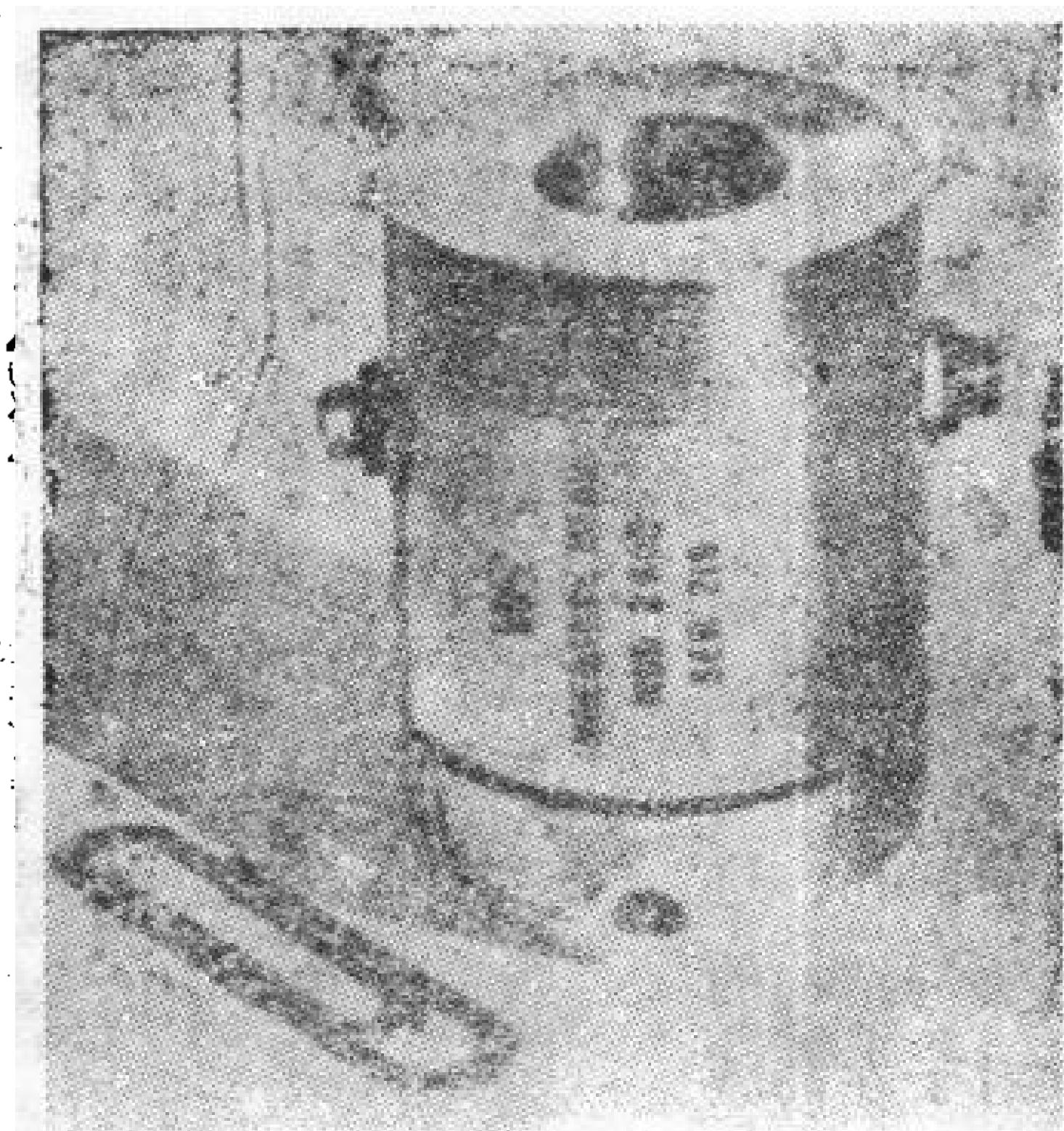


图8-2 机械阻抗头 (Wilcoxon Research)

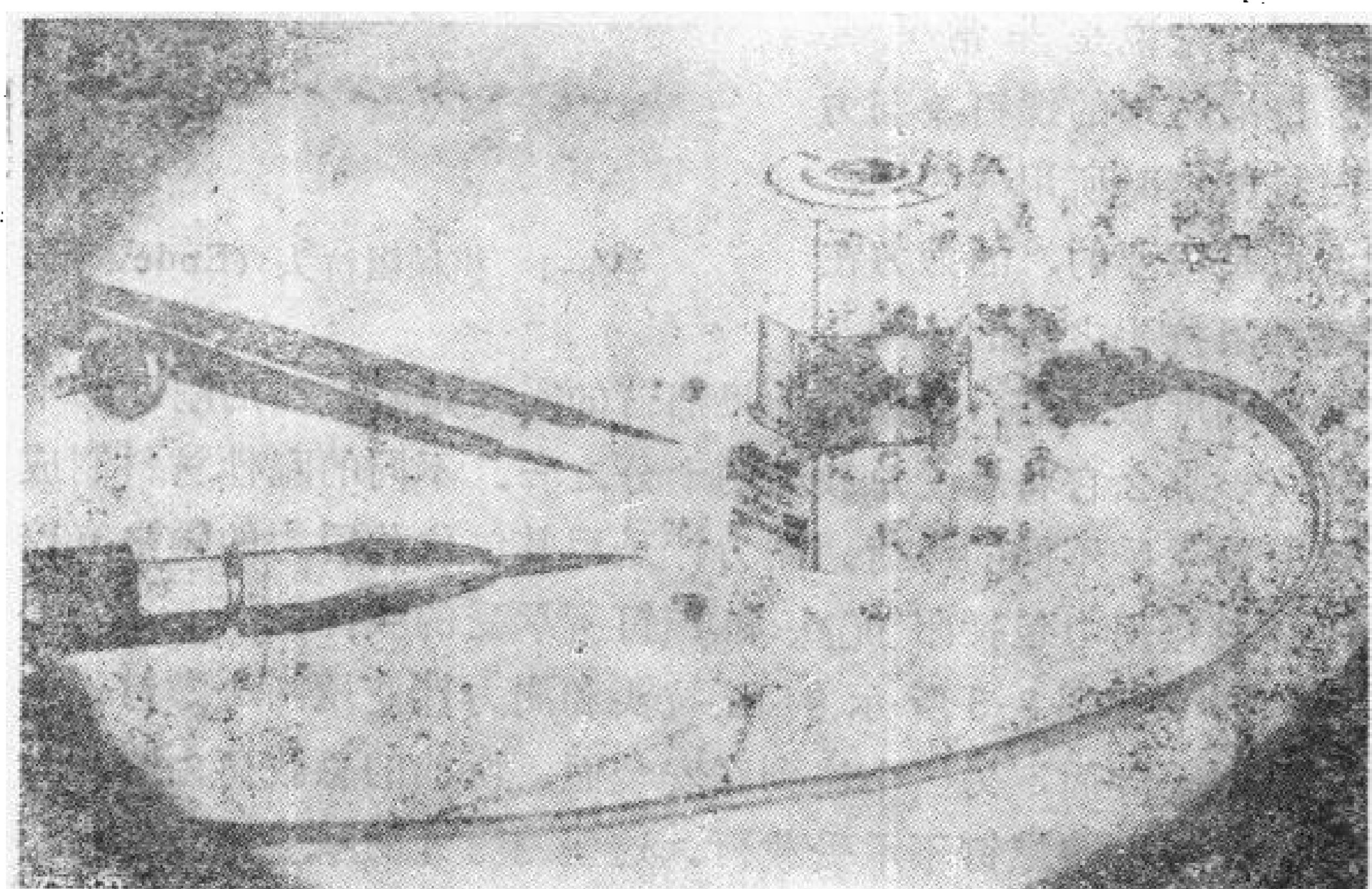


图8-3 测力计 (Endevco)

也可以进行冲击运动校准（特别是要确定幅值线性度的情况）。

阻抗头中的测力计和加速度计的灵敏度的校准，是在电动式振动台上，用图8-4的仪器来进行的。力灵敏元件的灵敏度是通过测量它在一个选定的加速度下的输出来确定的。阻抗头先不

外加质量块，用一个安装在阻抗头端部的标准加速度计测量测力计的输出；然后在阻抗头外加一个质量块，用加速度计再进行测量。力灵敏度是测力计前后输出的改变跟外加质量与所加的加速

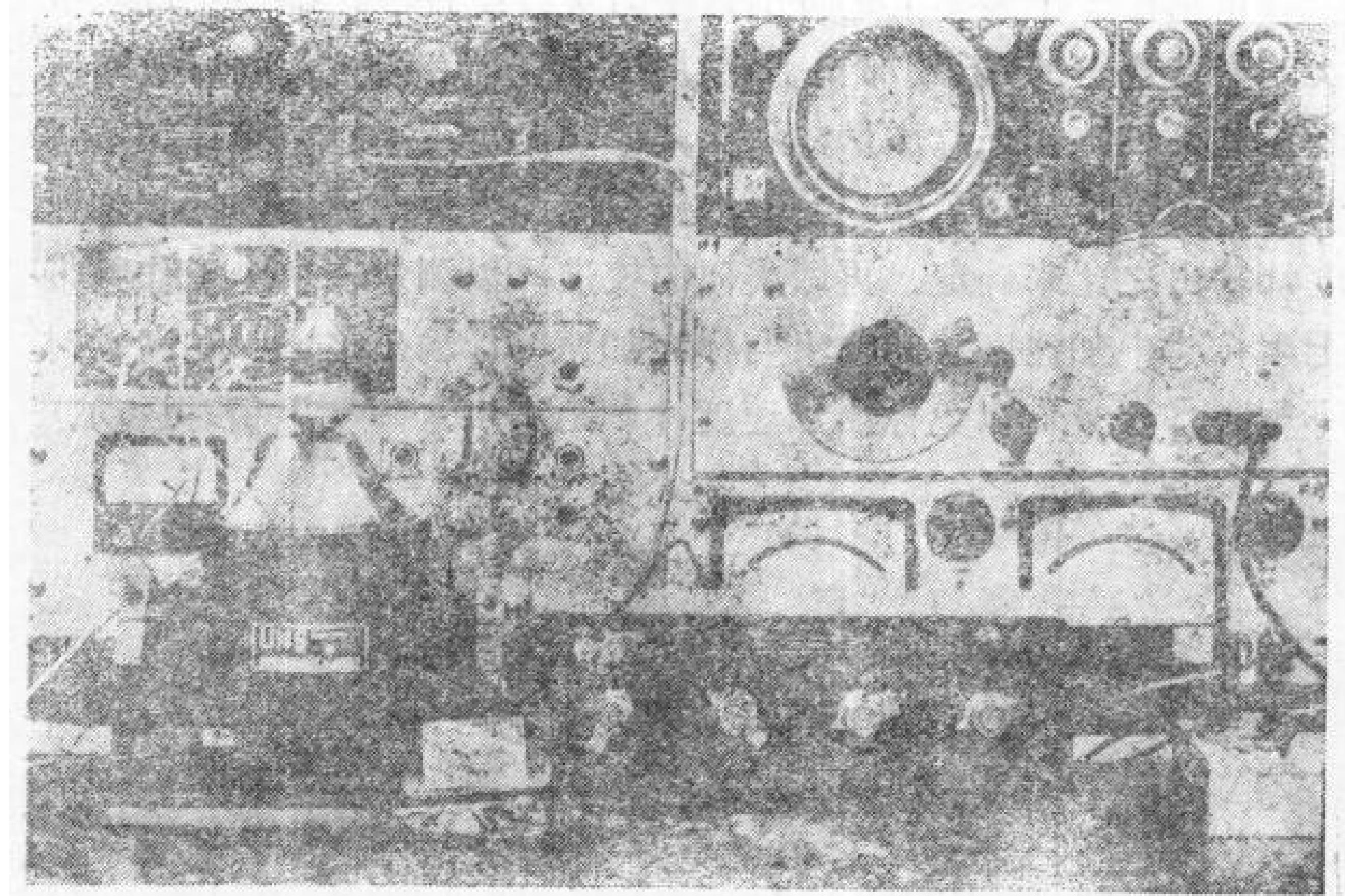


图8-4 校准阻抗头中的测力计和加速度计的装置^[39]

度的积之比：

$$S_f = \frac{Q_m - Q_0}{Ma} \quad (8-1)$$

式中 S_f ——灵敏度（毫伏/牛顿或毫伏/磅力）；

Q_m ——有外加质量时的电输出（毫伏）；

Q_0 ——没有外加质量时的电输出（毫伏）；

M ——外加质量的大小（千克或磅）；

a ——所施加的加速度 ($G \times 9.81$ 米/秒² 或 386 英寸/秒²)。

阻抗头和螺钉的有效端质量，可使用几个不同的外加质量，重复上述的力校准来确定。对于每一个外加质量，测量相应于1g

(加速度)的测力计输出。然后用其数据作图。数据线在横轴上的截距表示阻抗头的有效端质量，其值大约是0.316磅(0.14千克)。

根据在一个频率上进行的这个力灵敏度校准，确定穿过阻抗头的安装螺钉的有效部分(若用了螺钉)和阻抗头的有效端质量。如果已知这个总质量，那么频率响应可以通过在无外加质量情况下，测量从10至5000赫频率范围内测力计的输出与标准加速度计输出之比来确定。再做类似的校准，以测量在整个工作频带上阻抗头中加速度计的输出与标准加速度计输出之比。在高频时不用外加质量，以免标准加速度计和阻抗头之间发生相对运动。

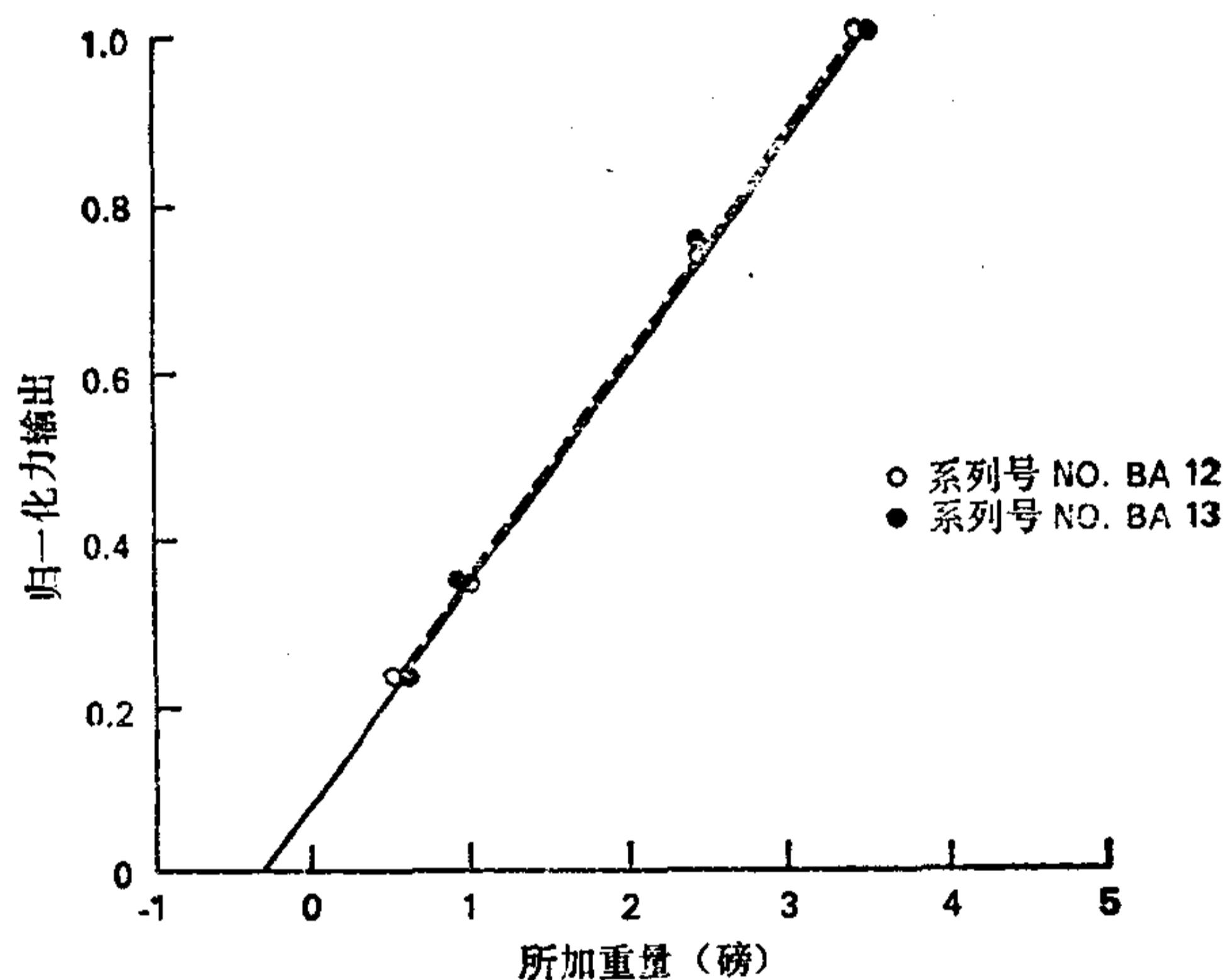


图8-5 阻抗头的有效端质量的确定^[39]

校准结果见图8-6。阻抗头中的加速度计的灵敏度在整个频带上近于常数，接近5000赫时稍微增高；在相同的频带上，测力计的灵敏度也接近常数。使用一个直径为1/2英寸(12.7毫米)的铝穿钉时，灵敏度是5.8毫伏/磅力(1.3毫伏/牛顿)；使用1/2英寸(12.7毫米)的钢穿钉时，灵敏度下降到5.1毫伏/磅力。灵敏度的这一改变是由于螺钉刚度的差别引起的。总力的一小部分加到螺钉上，剩下的力加到阻抗头上，但力灵敏度是电压输出与

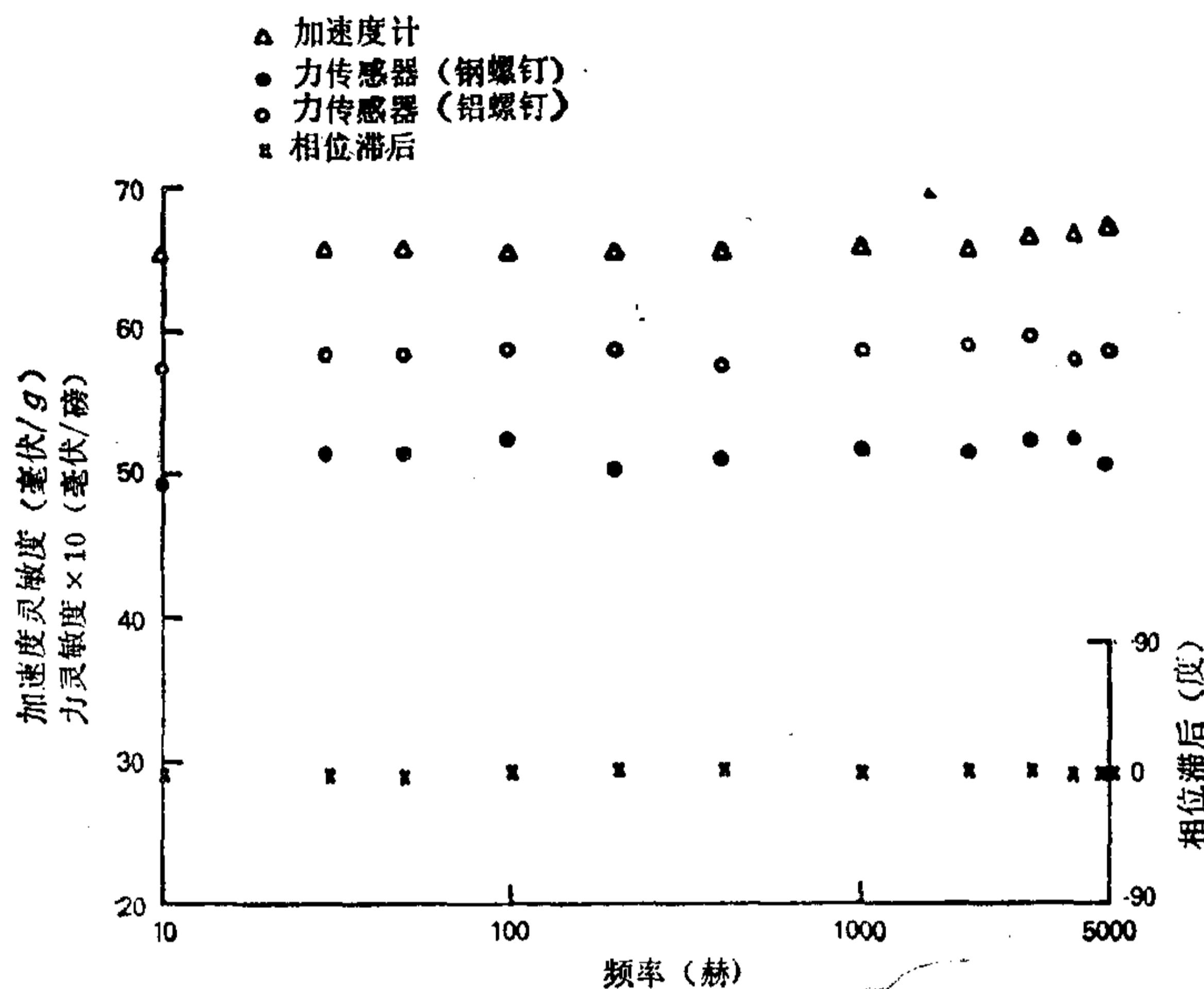


图8-6 机械阻抗头的校准^[39]

总力值之比。

力和加速度输出之间的相位角在整个频带上是 0° 。这说明加到结构上的力和加速度运动被阻抗头的输出信号如实地再现，从而无需对所测量的阻抗相角进行修正。

8.3 环境特性

设计测力计时必须十分小心，要使在输出中，由安装面机械应变所造成的误差最小。

仪器安装时，会加给测力计以静应变力，这会导致它的灵敏度的改变。测力计的静应变量取决于加到安装螺钉的力矩。因此，静应变量可以通过使用不同的安装力矩进行校准来估计。灵敏度随各种力矩的改变程度是测力元件质量好坏的度量。最好的办法是以预期使用的安装力矩进行最后的校准。

在冲击和振动激励期间存在着动态应变。应变引起的误差信

号通常出现在与强迫振动相同的频率上。因此，在外加力产生的输出上，应加上或减去由应变引起的误差信号（视两个信号的相角而定）。由于纠正这个误差是不切实际的，所以应当给出这一环境影响的估计。

测力计对在安装面上的应变的响应可用一根梁来估计，而测力计安装面的应变量可用应变计来测量，或者根据梁的理论来计算。图 8-7 给出了在用一根梁作试验时所得到的数据。此时，阻抗头被安装在相对于梁的弯曲方向为一个特定转动方位 (0°) 上。

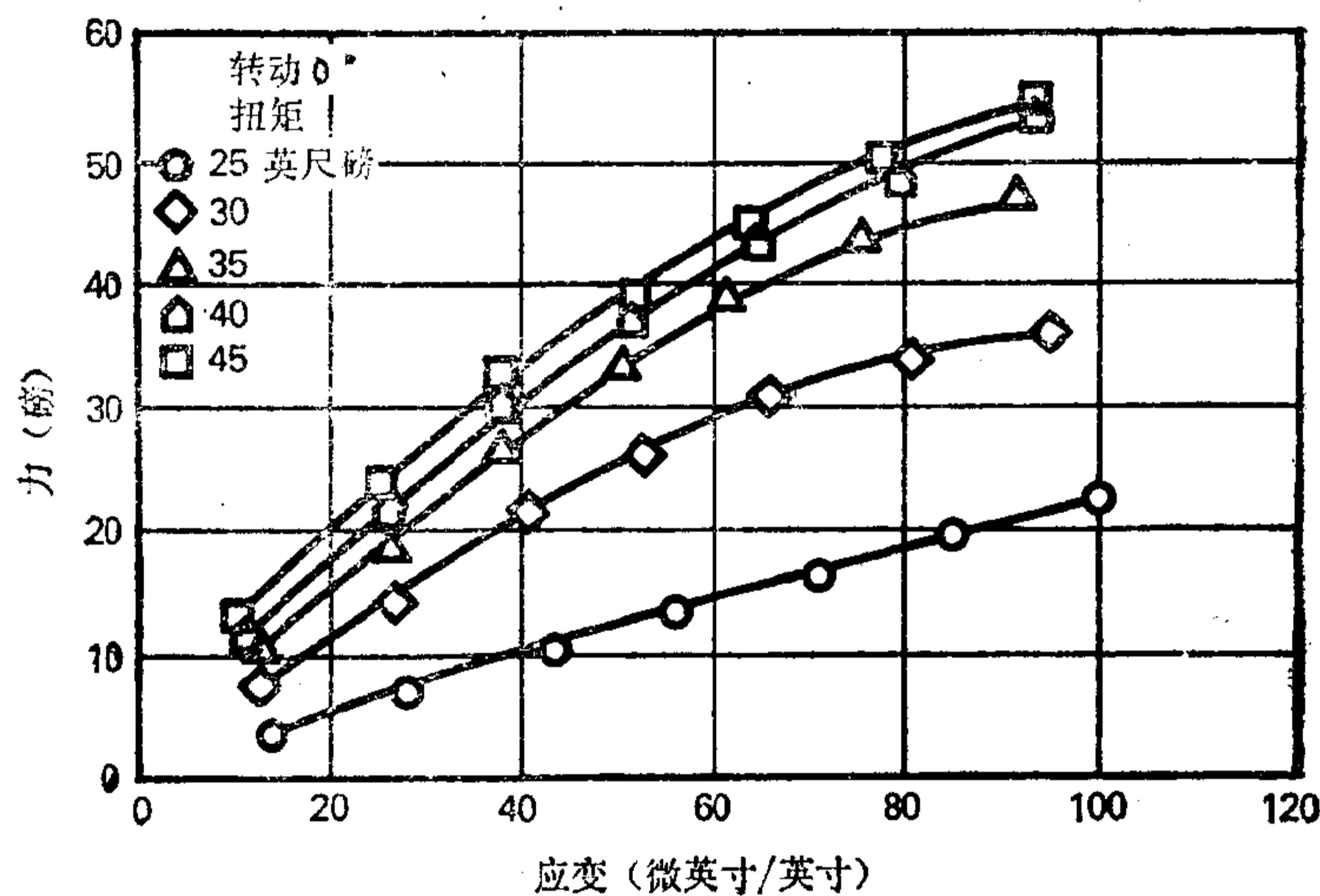


图 8-7 力传感器的应变灵敏度的校准^[40]
(转动 0° 时)

如果将阻抗头围绕它的灵敏轴转到不同的安装位置，那么结果将会稍微不同。例如，图 8-8 是转动 30° 时的结果。这时由应变所引起的力输出稍微小一些（比较图 8-7 和 8-8）。如果试验时已知弯曲应变的方向，那么最好在这个方位安装阻抗头。对于大多数安装力矩情况，表示为力的误差信号随所加应变增加。注意，在图 8-8 这种试验方案中，惯性力小于弯曲应变产生的误差。

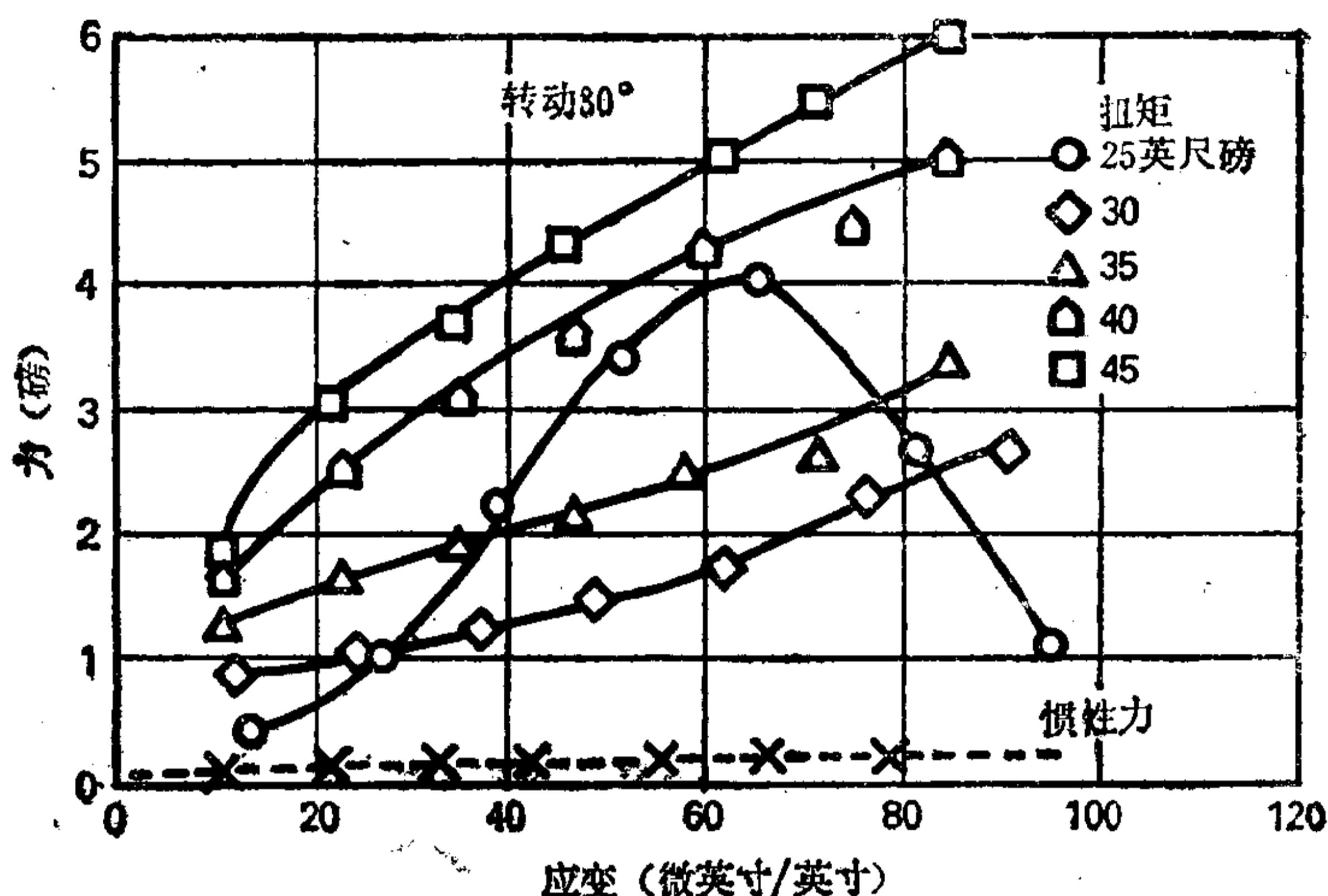


图8-8 力传感器的应变灵敏度的校准^[40]
(转动30°时)

信号。在小惯性力情况下，造成大弯曲应变正是试验方案的意图。试验结果表明，要选择在结构上的安装位置，以使动弯曲应变较小。

参 考 文 献

1. D. Pennington, "Basic Shock and Vibration Theory," *Environ. Quart.* (1965).
2. P. K. Stein, "Physical Quantities Which Characterize Vibration," *Meas. Eng.* 1, 346-356 (1964).
3. F. Palmisano, "A Mechanical Shock Pulse Survey," *Shock Vib. Bull.* 35 (6), 209-227 (Apr. 1966).
4. A. F. Lawrence, "Crystal Accelerometer Response to Mechanical Shock Impulses," *Shock Vib. Bull.* 24, 298-303 (Feb. 1957). Also Sandia Corp. Report 168-56-16.
5. J. W. Pendered, "The Shock Spectrum," *Environ. Eng.* 21:13-19 (June 1966).
6. R. Lowe, "Correlation of Shock Spectra and Pulse Shape With Shock Environment," *Environ. Eng.* 1 (1) (Feb. 1959).
7. International Standards Organization, "International Standard on Vibration and Shock Terminology," ISO 2041, 1975.
8. American Standards Association, "American Standard on Acoustical Terminology (Including Mechanical Shock and Vibration)," SI.I-1960, May 1960.
9. R. L. Butler and R. C. Dove, "The Selection and Evaluation of Shock Test Instrumentation," IES Tutorial Lecture Series, *Dynamics*, p. 115-141 (1966).
10. American National Standards Institute, "American Standard Methods for the Calibration of Shock and Vibration Pickups," S2.2-1959, 1959.
11. S. Levy and W. D. Kroll, "Response of Accelerometers to Transient Accelerations," *J. Res. N.B.S.* 45 (4), 303-310 (Oct. 1950).
12. M. E. Guttin, "The Effect of Accelerometer Low-Frequency Response on Transient Measurements," *Proc. Soc. Stress Anal.* 18 (1), 206-208 (June 1961).
13. B. Jaffe, "A Primer on Ferroelectricity and Piezoelectric Ceramics," Clevite Corp. TP217, Eng. Memo No. 60-14 (Dec. 1960).
14. R. L. Thomas, "Vibration Instrumentation for Nuclear Reactors," presented at International Symposium on Vibration Problems in Industry, Keswick, England, Apr. 1973.
15. R. R. Bouche, "Accelerometers for Shock and Vibration Measurements," *Vibration Testing-Instrumentation and Data Analysis*, American Society of Mechanical Engineers, AMD-Vol. 12, p. 25-59 (Sept. 1975).
16. R. W. Lally, "Application of Integrated Circuits to Piezoelectric Transducers," Instrument Society of America Preprint No. P4-2-PHYMMID-67, Sept. 1967.
17. R. R. Bouche, "High Frequency Response and Transient Motion Performance Characteristics of Piezoelectric Accelerometers," Instrument Society of America Paper No. 50-LA-61, 8 p., 1961.
18. R. R. Bouche, "Ensuring the Accuracy of Shock and Vibration Measurements," *Proc. Inst. Environ. Sci.* 409-415 (1965).
19. R. R. Bouche, "Accelerometer Characteristics Used in Transient Motion and Nuclear Applications," presented at AFSWC Symposium on Instrumentation for Nuclear Weapons Effects Simulation, Kirtland Air Force Base, Albuquerque, N.M., Mar. 1970.
20. H. C. Merchant, "A Mechanical Shock Filter," Instrument Society of America Preprint No. 17.13-4-65, Oct. 1965.
21. E. Rule, F. J. Suellentrop, and T. A. Perls, "Capacitive Accelerometers with Optimum Frequency Response Characteristics," *J. Acoust. Soc. Amer.* 33 (1), 33-35 (Jan. 1961).
22. T. A. Perls, "Performance Tests on Consolidated Engineering Corporation Velocity Pickup Type 4-118," N.B.S. Report No. 4154, June 1955.



参考书目

校准的基础知识

- 1-1. Anon., "Electrical Transducer Nomenclature and Terminology," Instrument Society of America, ISA-S 37.1 (July 1968).
- 1-2. Anon. "International System of Units Urged for Scientific Papers," *International EAR*, 8-11 (Apr. 1964).
- 1-3. R. A. Ackley, *Physical Measurements and the International (SI) System of Units*, Technical Publications, San Diego, Calif., 1970.
- 1-4. P. H. Adams, "Motion and Its Derivatives," *Research/Development*, 30-32 (June 1970).
- 1-5. C. E. Crede, "Specification of Shock Tests," *Electro-Technology* (May 1963).
- 1-6. C. M. Harris and C. E. Crede, *Shock & Vibration Handbook*, Vol. 1, McGraw-Hill Book Co., New York, 1961.
- 1-7. G. M. Heiber, W. Tustin, and Engineering Staff of Spectral Dynamics Corp., "Understanding and Measuring the Shock Response Spectrum," *Sound Vib.* 42-49 (Mar. 1974).
- 1-8. International Organization for Standardization, "SI Units and Recommendations for the Use of Their Multiples and of Certain Other Units," ISO 1000-1973 (E).
- 1-9. R. T. McGoldrick, "A Vibration Manual for Engineers," David Taylor Model Basin Report R-189 NS712-100, U.S. Department of the Navy, Dec. 1957.
- 1-10. C. T. Morrow, "The Shock Spectrum," *Elec. Manufacturing*, (Aug. 1959).
- 1-11. J. C. Riedel, "The Accurate Measurement of Shock Phenomena," *Proc. Inst. Environ. Sci.* (Apr. 1962).
- 1-12. J. Ritlow, "Using Fourier Analysis In Designing," *Elec. Manufacturing*, 87-102 (Feb. 1959).
- 1-13. R. J. Roathaug, "Practical Aspects of Shock Spectrum Testing," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, p. 303-308 (May 1972).
- 1-14. W. J. Sieger, "Waveform Effects In Shock Testing," Sandia Corp., Technical Memorandum SCTM 205-60 (12), 25 p. Aug. 1960.
- 1-15. R. Thomas, "Evaluation of the Distortion in Measurement of Half-Sine Shock Pulses Using PE and PR Accelerometers," Endevco Tech Paper 238 (not published).
- 1-16. H. M. Trent and B. Peterson, *Glossary of Terms Frequently Used in Acoustics*, American Institute of Physics, New York, Oct. 1960.
- 1-17. W. Tuštin, "Measurement and Analysis of Machinery," *Chem. Eng. Progr.* 67 (6), 62-70 (June 1971).
- 1-18. K. Unholtz, "Mass and Force," *Vibration Top.* 1 (1) (Aug. 1959).
- 1-19. I. Vigness, "The Fundamental Nature of Shock and Vibration," *Elec. Manufacturing*, 89-108 (June 1959).
- 1-20. P. Vigoureux, "The International System of Units (SI)," National Bureau of Standards Special Publication 330, Apr. 1972.
- 1-21. G. E. White, "The Meaning of "Natural Frequency," *Statham Instrum. Notes No. 12* (Nov.-Dec. 1949).
- 1-22. G. E. White, "A Relation Between Acceleration And Displacement Response," *Statham Instrum. Notes No. 19* (Jan.-Feb.-Mar. 1951).

惯性传感器的原理

- 2-1. Anon., "Accelerometer Survey," *Instrum. Contr. Syst.*, 41, 81-94 (Nov. 1968).
- 2-2. Anon., "Which Accelerometer Resonance?" *Instrum. Tech.*, 57 (Mar. 1970).
- 2-3. D. Arlide, "A Summary of Shock Test Instrumentation," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, p. 24-28 (Apr. 1959).
- 2-4. R. R. Bouche, "Understanding Accelerometers," *Electron. Eng.* 90-94 (Apr. 1967).
- 2-5. R. O. Brooks, "Distortions of Controlled Transients by Shock Monitoring Systems," *Instrument Society of America Preprint No. P13-5-PHYMMID-67* (Sept. 1967).
- 2-6. R. O. Brooks and F. H. Mathews, "Mechanical Shock Testing Techniques and Equipment," IES Tutorial Lecture Series, Dynamics, p. 69-113 (1966).
- 2-7. A. J. Buschman, "Omnidirectional Acceleration Sensor," *Shock Vib. Bull.* 35 (4), 55-60 (Apr. 1966).
- 2-8. R. I. Butler and M. McWhirter, "Transducers for Shock and Vibration Measurements," *Instrument Society of America Preprint No. 16.6-1-66* (Oct. 1966).
- 2-9. L. E. Dunbar, "Development of an Omnidirectional Accelerometer," *Shock Vib. Bull.* 34 (4), 41-44 (Feb. 1965).
- 2-10. V. F. DeVost and P. S. Hughes, "Bidirectional Shock and High-Impact Effects on Shock Transducers," *Shock Vib. Bull.* 37 (2), 29-42 (Jan. 1968).
- 2-11. R. C. Dove, "Instrumentation for Shock Motion Measurement," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, p. 277-284 (1963).
- 2-12. R. F. Gibson, "Optimum Damping for Accelerometers," *Instrum. Contr. Syst.* 87-88 (Sept. 1972).
- 2-13. E. V. Hardway, "Electrokinetic Transducers," *Instrum.* 26 (8), 1186-1188 (Aug. 1953).
- 2-14. D. R. Harting, "Digital Transient-Test Techniques," *Exp. Mech.*, 335-340 (July 1972).
- 2-15. J. S. Hernandez, *Introduction to Transducers for Instrumentation*, Statham Instruments, Inc., Los Angeles, 1959.
- 2-16. N. A. Leifer, "Random-Vibration-Induced Errors in a Missile Caused by Nonlinear Inertial Accelerometers," *Shock Vib. Bull.* 37 (2), 87-97 (Jan. 1968).
- 2-17. W. Mitchell, "Accelerometers—Displacement to Emission," *Shock Vib. Dig.* 5 (6), (June 1973).
- 2-18. J. T. Muller, "Transients in Mechanical Systems," *Bell Syst. Tech. J.* 27, 657-683 (Oct. 1948).
- 2-19. Y. Muranaka and E. Furukawa, "Responses of Seismic Pickups to Displacement Pulses," *Science and Engineering*, Chuo University, Tokyo, 1966.
- 2-20. M. W. Oleson and R. F. Blake, "Studies of Random Vibration," *Shock Vib. Bull.* 24, 133.
- 2-21. J. G. Parks, "An Accelerometer Design Using Ferrofluid Ultrasonic Interferometry," *Shock Vib. Bull.* 41 (3), 17-24 (Dec. 1970).
- 2-22. T. A. Perls, "Frequency Response of Second-Order Systems with Combined Coulomb and Viscous Damping," *J. Res. N. B. S.* 57, (1), Research Paper 2963 (July 1956).
- 2-23. M. A. Perry, "Flight Test Instrumentation," in *Proceedings of the First International Symposium*, Pergamon Press, New York, 1960.
- 2-24. G. N. Rosa, "Some Design Considerations for Liquid Rotor Angular Accelerometers," *Statham Laboratories Instrument Notes No. 26* (Jan. 1954).
- 2-25. F. Schloss, "Inherent Limitations of Accelerometers for High-Frequency Vibration Measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* 33 (4), 539 (Apr. 1961).
- 2-26. G. L. Schulz and W. E. Baker, "A Dynamic Data Compensation Technique for Seismic Transducers," *Shock Vib. Bull.* 40, (7), 123-132 (Dec. 1969).
- 2-27. J. M. Slater, "Which Accelerometers for Spacecraft Guidance?," *Space/Aeronautics*, 227-240 (Oct. 1960).

- 2-28. L. Stratham, "The Mass Effect in Fluid Damping," *Stratham Instrument Notes* No. 13 (Jan.-Feb. 1950).
- 2-29. L. Stratham, "Design Parameters for Linear Accelerometers," *Stratham Instrument Notes* No. 9 (Jan. 1952).
- 2-30. G. Von Vick, "Accelerometers," *Instrum. Contr. Syst.* 38, 86-87 (Nov. 1965).
- 2-31. I. Westin and A. Henningston, "Underwater Explosion Tests With the Swedish Full-Scale Submarine Test Section "Stalmyggan": Recording and Data Reduction System," *Shock Vib. Bull.* 43, (1), 31-41 (June 1973).

压电式加速度计

- 3-1. Anon., "Controls/Switches/Drivers Selection Checklist, Piezoelectric Accelerometers," *Electron. Prod. Mag.* (Apr. 1972).
- 3-2. Anon., "Guide for Specifications and Tests for Piezoelectric Acceleration Transducers for Aero-Space Testing," Instrument Society of America ISA-RP 37.2 (1964).
- 3-3. R. L. Allen and L. R. Flippin, "A Method of Embedding Accelerometers in Solid Propellant Rocket Motors," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 33, (3), 27-43 (Mar. 1964).
- 3-4. H. D. Arlowe, R. C. Dove, and B. W. Duggin, "Faithful Transmission of Piezoelectric Transducer Data," *ISA J.* 62-66 (Jan. 1966).
- 3-5. S. A. Basri, "A Method for the Dynamic Determination of the Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constant of Quartz," National Bureau of Standards Monograph 9 (June 1960).
- 3-6. D. Belincourt, "Domain Processes in Lead Titanate Zirconate and Barium Titanate Ceramics," *J. Appl. Phys.* 30 (11), 1803-1810 (1959).
- 3-7. C. A. Bowes, "Engine Vibration Monitoring on the Boeing 747 Aircraft," ISA Symposium on Instrumentation in the Aerospace Industry, Vol. 16, p. 195-205 (May 1970).
- 3-8. R. O. Brooks and J. A. Gusman, "Distortion of Controlled Transients by Shock Monitoring Systems," ISA Preprint P13-5-PHYMMID-67, 17 p. (1967).
- 3-9. W. G. Cady, *Piezoelectricity*, Dover Publications.
- 3-10. W. G. Cady, "Piezoelectricity and Ultrasonics," *Sound*, 2 (1), 46-52 (1963).
- 3-11. M. Carteus and R. Gopal, "Vibration Measurements in a PWR-Instrumentation," Westinghouse Nuclear Energy Systems, Pittsburgh, Pa.
- 3-12. D. B. David, "Investigation of Zero Shift in Piezoelectric Ceramic Accelerometers," *Proc. Instrum. Soc. Amer.*, Paper No. 71-631, Oct. 1971.
- 3-13. A. J. Dranetz, "Barium Titanate Applications," *Shock Vib. Bull.* 17, 122.
- 3-14. H. C. Epstein, "Development and Application of a 0.14 gm Piezoelectric Accelerometer," Instrument Society of America, *Test Measurement: Vibration*, Part 2C, Paper No. 72-619, Oct. 1972.
- 3-15. J. R. Fowler and W. S. Tierney, "Accelerometer Sensitivity to Dynamic Pressure Pulses," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 31 (3), 183-194 (Apr. 1963).
- 3-16. E. Furukawa, "An Investigation of Torsional Pickups of Low Natural Frequency," *Japan Soc. Prec. Eng. Bull.* 2 (6) (July 1968).
- 3-17. R. E. Harper, "Transverse Sensitivity of Piezoelectric Accelerometers," Presented at 5th Transducer Workshop IRIG, Pratt and Whitney Aircraft, East Hartford Conn., Oct. 1957.
- 3-18. R. A. Heising, "Quartz Crystal Theory, Fabrication and Performance Measurements," U. S. Army Tech. Manual TM 11-2540, U. S. Department of the Army, Dec. 1950.
- 3-19. B. Jaffe, Clevite Corp. Electronic Research Div., "Transducer Properties of Lead Titanate Zirconate Ceramics," *IRE National Convention Record*, Part 6 (1959).
- 3-20. C. Jako, "An Angular Accelerometer," ISA.

- 3-21. E. Jones, S. Edelman, and E. R. Smith, "Small Vibration Pickups," *Shock Vib. Bull.* 23, 234.
- 3-22. D. R. Kemper, "Measurement of Piezoelectric Accelerometer Capacitance," *J. Eng. Sci.* 10 (2), 34-40 (Apr. 1967).
- 3-23. R. J. Klingler, "A Method of Measuring Acoustic Sensitivity (of Accelerometers)," Sandia Corp. Tech Memo SC-TM 290-63(73) (Nov. 1973).
- 3-24. H. H. A. Krueger, "Effects of High Static Stress on the Piezoelectric Properties of Transducer Materials," *J. Acoust. Soc. Amer.* 33 (10), 1139-1344 Oct. 1961.
- 3-25. H. A. A. Krueger, "Stress Sensitivity of Piezoelectric Ceramics: Part 1, Sensitivity to Compressive Stress Parallel to the Polar Axis," *J. Acoust. Soc. Amer.* 42, (3), 636-645 (1967).
- 3-26. S. B. Lang and F. Steckel, "Method for the Measurement of the Pyroelectrical Coefficient, dc Dielectric Constant, and Volume Resistivity of a Polar Material," *Rev. Sci. Inst.* 36 (7), 929-932 (1965).
- 3-27. R. A. Larder, "Use of Crystal Accelerometers at High Acceleration and Temperatures," Instrument Society of America Preprint P7-4 PHYMMID-67, 1967.
- 3-28. R. C. Lewis, "The Design and Characteristics of a High Sensitivity Direct Current Operated Accelerometer," *J. Acoust. Soc. Amer.* 22 (3), 357-361 (May 1950).
- 3-29. T. H. Lin, "The Effect of Spring Mass on Contact-Accelerometer Responses," ASME Paper No. 56-APM-3 (June 1956).
- 3-30. B. Mangolds, "Effect of Mounting-Variables on Accelerometer Performance," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 33 (3) (Mar. 1964).
- 3-31. S. T. Marks, "A Barium Titanate Velocity Gauge for Use on Short Coaxial Cables," Ballistic Research Laboratories, Memorandum Report No. 758, Jan. 1954;
- 3-32. W. P. Mason *Physical Acoustics: Principles and Methods*, Academic Press, New York, 1964.
- 3-33. A. J. Mullen, "Temperature Variation of the Piezoelectric Constant of Quartz," *J. Appl. Phys.* 40 (4), 1693-1696 (Mar. 1969).
- 3-34. J. A. Nagy and C. E. Henley, Jr., "Influence of Fixture Stress Concentrations on Ring Accelerometers," *Shock Vib. Bull.* 37 (2), 43-50 (Jan. 1968).
- 3-35. W. E. Nelson and G. W. Brown, "An Impulse Accelerometer," UCRL 7766, *Instruments*, Vol. C-37, TID-4500 (30th ed.), Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, Calif., Mar. 1964.
- 3-36. N. Newman, "Considerations in Computing the Useful Frequency Range of Piezoelectric Accelerometers," NBS Tech. Note 487, 20 p. (July 1969).
- 3-37. M. W. Oleson, "Limitation of Instrumentation for Mechanical Shock Measurement," NRL Report 6342 U. S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., Dec. 1965.
- 3-38. A. W. Orlacchio, "New Advances in Vibration Measurement to Meet More Stringent Environmental Conditions," *Proc. Inst. Environ. Sci.* p. 13-17 (Apr. 1959).
- 3-39. R. D. Pennington, "Effects of Accelerometer Cross Axis Sensitivity on Measurement Accuracy," *Environ. Quart.* 10 (2) 34-35 (1964).
- 3-40. D. Pennington, "Piezoelectric Accelerometer Manual," Endevco, 119 p. 1965.
- 3-41. T. A. Perls, "A Simple, Objective, Test for Cable Noise Due to Shock, Vibration or Transient Pressures," N.B.S. Report No. 4094, May 1955.
- 3-42. T. A. Perls, "Primary Pyroelectricity in Barium Titanate Ceramics," *J. Appl. Phys.* 29 (9), 1297-1302 (Sept. 1958).
- 3-43. T. A. Perls, "Proceedings of Symposium on Barium Titanate Accelerometers," National Bureau of Standards Report No. 2654, Aug. 1963.
- 3-44. R. B. Peters, "A New Method of Evaluating the Acoustic Response of Piezoelectric Accelerometers," *Proc. Inst. Environ. Sci.* (1965).
- 3-45. F. P. Phelps, "Detuning Quartz Crystals," National Bureau of Standards Report No. 3326, May 1954.

- 3-46. R. H. Plumee, "Zero-Shift in Piezoelectric Accelerometers," Sandia Laboratories, Report SC-RR-70-755, Mar. 1971.
- 3-47. G. K. Rasanen, "Accelerometer Mounting and Data Integrity," *Shock Vib.* 8-15 (Nov. 1967).
- 3-48. B. Reznik, "Design and Evaluation of a Small, Compressed Crystal Type, High-Internal-Capacitance Accelerometer," *Shock Vib. Bull.* 24, 291.
- 3-49. J. E. Rhodes, "Piezoelectric Transducer Calibration Simulation Method Using Series Voltage Insertion," *Environ. Quart.* 30-47 (Apr. 1962).
- 3-50. D. W. Rockwell, "A Transverse Compensated Accelerometer," presented at Instrument Society of America, 19th National Instrumentation Symposium, May 1973.
- 3-51. P. E. Scarborough, Jr., "Zero Shift in Piezoelectric Transducers," Sandia Corp., Report SC 1004-B, Oct. 1959.
- 3-52. I. Smith, "Piezoelectric Accelerometer Instrumentation for Gas Guns," Harry Diamond Laboratories, Report TM-68-29, Oct. 1968.
- 3-53. L. Walther and G. Beister, "Lead-Metaniobate Piezoelectric Vibration Pickup," *Hochfrequency-Technik Electroakustik* 74 (5-6), 204-205 (1965).
- 3-54. J. Willis and B. D. Jimmerson, "A Piezoelectric Accelerometer," *Proc. IEEE* 52 (7), 971-872 (1964).
- 3-55. D. B. Wright, "Sensitivity of Various Accelerometers to Structural Bending of the Mounting Surface," Westinghouse Research Laboratories, Research Memo 407-3000-M3, Apr. 1961.

电阻丝式加速度计和压阻式加速度计

- 3-56. B. Anzalone, "Understanding and Applying Strain Gages," *Instrum. Contr. Syst.* 55-56 (Dec. 1972).
- 3-57. C. A. Bowes, "Variable Resistance Sensor Work Better With Constant Current Excitation," *Instrum. Technol.* (Oct. 1966).
- 3-58. W. F. Caplan, "Miniature Biaxial Accelerometer-Damped," ISA-ASI 72239, p. 217-221 (1972).
- 3-59. W. B. Dobie, *Electric Resistance Strain Gages*, The English Universities Press Limited, London, 1948.
- 3-60. R. J. Fyffe and A. Arobone, "Strain Gage Transducers," *Electron. Instrum. Dig.* 5 (5), 31-32 (May 1969).
- 3-61. M. Green, "Semiconductor Strain-Gage Transducers," *Electron. Instrum. Dig.* 5 (5), 31-32 (May 1969).
- 3-62. B. B. Helfand, "Calibration of Resistance Bridge Transducer Circuits Under Temperature Extremes," *Statham Laboratories Instrument Notes*, No. 14 (Mar.-Apr. 1950).
- 3-63. E. Hollander and G. L. Vick, "The Piezoresistive Effect and its Application," *Rev. Sci. Instrum.* 31 (3), 323-327 (Mar. 1960).
- 3-64. L. E. Hollander, Jr., "The Role of Solid State Materials in Transducers," *Solid-State Design* (Nov. 1962).
- 3-65. W. P. Mason, "Use of Piezoresistive Materials in the Measurement of Displacement, Force, and Torque," *J. Acoust. Soc. Amer.* 29 (10), 1096-1101 (Oct. 1957).
- 3-66. M. W. Oleson, "Calibration Study of (SFNSY) Floating Shock Platform," NRL Report 6069, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., Mar. 1964.
- 3-67. M. W. Oleson, "Components of a New Shock Measurement System," *NRL Progress*, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., Dec. 1967.
- 3-68. M. W. Oleson, "Shock Signal Integrator Description, Operation, and Schematics," NLR Memorandum Report 1903, U. S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., July 1968.
- 3-69. M. W. Oleson, "Advances in Shock and Vibration Measurements for Naval Applications," *Instrument Society of America*, Paper No. 71-638, Oct. 1971.

- 3-70. P. R. Petino, "Standardization of Bridge Transducers," *Statham Instruments Notes* No. 34 (May 1959).
- 3-71. J. C. Sanchez, "The Micro-Sensor, a New Tool for the Experimental Stress Analyst," Micro Systems, Inc., Jackson, Miss., Oct. 1960.
- 3-72. J. C. Sanchez, "Recent Advances in Flexible Semiconductor Strain Gages," Instrument Society of America, No. 46-LA61, Sept. 1961.
- 3-73. J. C. Sanchez, "Recent Developments in Flexible Silicon Strain Gages," Instrument Society of America, No. 37-SL61, Jan. 1961.
- 3-74. I. G. Scott, "The Determination of Temperature Coefficient of Resistance Strain Gauges," Instrument Society of America, No. 25 LA61, Sept. 1961.
- 3-75. N. Sion, "Bridge Networks in Transducers," *Instrum. Contr. Syst.* 41, 107-109 (Aug. 1968).
- 3-76. A. T. Snyder, "A New System for Monitoring the Over-All Transduction Ratio for Analog Recording Channels Employing Bridge Type Transducers," *Stratham Laboratories Instrument Notes* No. 28 (Oct. 1954).
- 3-77. P. K. Stein, "Some Properties of Input Conditioning Circuits for Wheatstone-Bridge-Based Transducers," Fifth Transducer Workshop Document 112-68, White Sands Missile Range, p. 243-256 (1967).
- 3-78. P. K. Stein, "How to Select a Strain Gage," *Strain Gage Readings*, II, (1) (Apr.-May 1959).
- 3-79. J. Tabata, "Study on the Miniature Type High Sensitivity Accelerometer Using Semiconductor Strain Gages," NAL TR-146, National Aerospace Laboratory, Tokyo, Japan, 1967.
- 3-80. A. N. Waldman, "Piezoresistive Accelerometers," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, p. 627-633 (Apr. 1961).
- 3-81. W. E. Wall, "Piezoresistive Strain Gage Accelerometers with Subcritical Damping and High Overload Capabilities," *12th Instrum. Soc. Amer. Aerosp. Symp.* p. 11 (May 1966).
- 3-82. W. E. Wall, "Applications of Piezoresistance to Externally Excited Transducers," *22d Instrum. Soc. Amer. Conf.*, p. 12 (Sept. 1967).
- 3-83. W. E. Wall, "Piezoresistive Strain Gage Accelerometers Increase Spectrum of Shock and Vibration Measurement Capability," *Shock Vib. Bull.* 35, (5) (1966).

电容式加速度计

- 3-84. Y. T. Li and S. Y. Lee, "Air Damped High-g Accelerometer and Wide Band Velocimeter for Shock Study in Free Mass Under Severe Air Blast," *Shock Vib. Bull.* (7), 133-139 (Dec. 1969).

电感式传感器

- 3-85. A. C. Diechmiller, "How to Select Electromagnetic Vibration Pickups," *Elec. Manufacturing* 59 (1) (Jan. 1957).
- 3-86. M. L. Greenough, "Oil Film Thickness Indicator for Journal Bearings," *AIEE Trans. Paper 48-96*, Jan. 1948.
- 3-87. D. Mori, "Measurement of Minute Acceleration by a Precision Accelerometer," Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo. (Paper presented at the Third CAS Symposium, Mar. 1970).
- 3-88. E. V. Sawyer, "Variable Permeance Transducers for Strain Measurement Applications," presented at Instrument Society of America Tenth Annual Instrument-Automation Conference, Sept. 1955.
- 3-89. F. E. Templeton, "Omnidirectional Electromagnetic Accelerometer," Air Force Cambridge Research Laboratories AFCRL-67-0470.
- 3-90. K. Unholtz, "MB Velocity Meters," *Shock Vib. Bull.* 8, 28.

- 3-91. M. J. Witt, "Development of a Velocity Transducer Evaluation System," Air Force Special Weapons Center, Technical Report No. AFSWC-TR-70-5, Vol. 4, p. 47-64 (Mar. 1970).

机内振动记录仪

- 3-92. R. E. Blake, "Peak-Reading Accelerometers," *Shock Vib. Bull.* 8, 45.
3-93. E. H. Schell, "Use of the Impact-O-Graph in the Determination of Field-Handling Conditions," *Shock Vib. Bull.* 25 (2), 103-109 (Dec. 1957).
3-94. J. Upham and A. Dranetz, "A Tape Recording Accelerometer for Laboratory Playback, Analysis and Simulation," *Shock Vib. Bull.* 23, 223.
3-95. I. Vigness, "Discussion of Some Peak Reading Instruments," *Shock Vib. Bull.* 16, 120.

辅助仪表

- 3-96. H. D. Arlowe, "Electrical Noise in Instrumentation Systems," *Proc. Inst. Environ. Sci. 1963 Ann. Tech. Meeting*, p. 341-347 (Apr. 1963).
3-97. H. D. Arlowe and R. C. Dove, "Circuitry for Conditioning the Transducer Output Signal," Instrument Society of America Preprint No. 16.6-3-66 (1966).
3-98. H. D. Arlowe and G. W. Holmes, "On-Board Signal Conditioning for Piezoelectric Accelerometers," Instrument Society of America Preprint No. P4-4-PHYMMID-67, Sept. 1967.
3-99. M. Bennett, "A Case for Low Impedance," *Proc. Inst. Environ. Sci. 14th Ann. Tech. Meeting*, p. 79-82 (Apr.-May 1968).
3-100. H. D. Cyphers and Frank J. Holley, "Automatic Calibration and Environmental Measurement System for Launch Phase Simulator," *Shock Vib. Bull.* 36 (6), 207-214 (Feb. 1967).
3-101. J. E. Jodd, "A New Differential Zero Drive*System for Direct Wideband Audio Data Transmission Over Standard Telephone Lines," Instrument Society of America Preprint No. P13-2-PHYMMID, 1967.
3-102. W. P. Kistler, "The Piezotron Concept as a Practical Approach to Vibration Measurement," *J. Inst. Environ. Sci.* 14 (2), 20-22 (Mar.-Apr. 1971).
3-103. R. Morrison, *Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation* John Wiley and Sons, Inc., New York, 144 p., July 1967.
3-104. R. Morrison, "Modern Filter Theory," Instrument Society of America Preprint No. P13-4-PHYMMID-67, Sept. 1967.
3-105. D. Pennington, "Charge Amplifier Applications," *Instrum. Contr. Syst.* (Jan. 1965).
3-106. S. Rogero, "Miniaturized Piezoelectric Transducer Electronics Versus Charge Amplifiers-A Comparison of the Two Systems in Vibration and Pressure Applications," ISA-ASI 72240, p. 223-230, 1972.
3-107. J. J. Smithwick, "Effects of Cable and Circuit Parameters on the Precision Calibration of a Charge Amplifier," NASA Tech. Note NASA TN D-4300, Feb. 1968.
3-108. D. J. Torpy, "A Field-Effect Transistor Amplifier for Improving Piezoelectric Gage Measurements," Naval Ordnance Laboratory, NOLTR 67-104, Oct. 1967.
3-109. R. W. Towle and T. A. Perls, "Low-Impedance Vibration Coupler for Missile Use," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 27 (3), 211-214 (June 1959).
3-110. T. Usher, Jr., "Signal Conditioner Characteristics for Shock Applications," *J. Environ. Sci.*, 31-34 (Oct. 1967).

位移测量

- 3-111. R. Aprahamian and D. A. Evensen, "Applications of Holography to High-Frequency Vibrations and Transient Response," *Shock Vib. Bull.* 40 (7), 33-34 (Dec. 1969).

- 3-112. C. F. Bruce, "Interference Accelerometer," *Rev. Sci. Instrum.* 38, (8), 1090-1093 (1967).
- 3-113. H. A. Deferrari and F. A. Andrews, "Laser-Interferometric Technique for Measuring Small-Order Vibration Displacements," *J. Acoust. Soc. Amer.* 39, (5), 1, 979-980 (1966).
- 3-114. H. A. Deferrari, R. A. Darby, and F. A. Andrews, "Vibrational Displacement and Mode-Shape Measurement by a Laser Interferometer," *J. Acoust. Soc. Amer.* 42 (5), 982-990 (1967).
- 3-115. S. Edelman, "A Stroboscopic Vibration Analyzer," *N.B.S. J. Res.* 63C (2), 97-104 (1959).
- 3-116. J. L. Goldberg, "Method of Measuring Vibratory Displacements in Terms of a Light Wavelength," *Shock Vib. Bull.* 37 (2), 13-16 (Jan. 1968).
- 3-117. G. A. Hotham, "Optical Displacement Follower Measures Vibration and Shock," *Test Eng.* 14-17 (Nov. 1959).
- 3-118. J. Johansson, "Accelerometer Calibration," *Instrum. Contr. Syst.* 79-81 (Dec. 1963).
- 3-119. C. D. Johnson and Gerald M. Mayer, "Hologram Interferometry as a Practical Vibration Measurement Technique," *Shock Vib. Bull.* 39 (2), 41-49 (Feb. 1969).
- 3-120. R. L. Johnson, R. Aprahamian and P. G. Bhuta, "Shock Loading and Holographic Interferometry in NDT," *Shock Vib. Bull.* 41 (3), 63-74 (Dec. 1970).
- 3-121. T. Kanazawa, "Trial Fabrication of a Displacement Vibrograph Suitable for Measurements of Horizontal Vibration of Ships," University of Tokyo, Faculty of Engineering.
- 3-122. J. W. Matthews, "Theory of Holography," California Institute of Technology Sci. Report No. 7, June 1967
- 3-123. J. Monahan and P. J. Nemergut, "Natural Frequencies and Mode Shapes of Plates with Interior Cut-Outs," *Shock Vib. Bull.* 41 (7), 37-49 (Dec. 1970).
- 3-124. W. J. Pastroius, "Vibration Analysis by Holography," *Mech. Eng.* 26-30 (June 1972).

校准振动台

- 4-1. A. J. Amico, "Determination of Frequency Response of Accelerometers at Low Frequencies," *Amer. Rocket Soc. American Rocket Society*, New York, Sept 1956.
- 4-2. Anon., "Characteristics of Electrodynamic Vibration Generators," ISO/TC108/WG4 (Secretariat-19) 42E, 20 pp.
- 4-3. Anon., "Dynamic Calibration of Accelerometers," *N.B.S. Tech. News Bull.* 226-227 (Oct. 1970).
- 4-4. Anon., "Extending Frequency Range of Calibration Vibrators," *Research/Development*, 30-31 (May 1967).
- 4-5. T. Dimoff, "Electrodynamic Vibration Standard with a Ceramic Moving Element," *J. Acoust. Soc. Amer.* 40 (3), 671-676 (Sept. 1966).
- 4-6. T. Dimoff and B. F. Payne, "Application of Air Bearings to an Electrodynamic Vibration Standard," *J. Res. N. B. S.* 67C (4), 327-222 (Oct.-Dec. 1963).
- 4-7. S. Edleman, "Some Developments in Vibration Measurements," *J. Acoust. Soc. Amer.* 27 (4), 728-734 (July 1955).
- 4-8. S. Edleman, E. Jones, and E. R. Smith, "Barium Titanate Vibrators," *Shock Vib. Bull.* 23, 175.
- 4-9. W. R. Elliott, "Measurement of Extraneous Motions in Commercial Linear Vibration Tables," Instrument Society of America Paper No. 55-21-1, Sept. 1955.
- 4-10. R. S. Jenkins, "Technique for Producing Low Level Quasi-static Accelerations," *Rev. Sci. Instrum.* 39 (8), 1212-1214 (1968).
- 4-11. E. Jones, W. Yelon, and S. Edleman, "Extending Range of Piezoelectric Shakers," *N. B. S. Tech. News Bull.* 32-33 (Feb. 1970).

- 4-12. A. B. Kaufman, "Measurement of Natural Frequency," *Instrum. Automation* 30, 2266-2269 (Dec. 1957).

4-13. L. Lemoine, "Table Vibrante A Bassee Frequence Pour L'E'talonnage Dynamic Des Accelerometers," *La Recherche Aeronautique* 69, 27-37 (1959), Office National d'Etudes et Recherches Aeronautiques, Chatillon-sur-Bagneux (Seine), France.

4-14. R. C. Lewis, "Electro-Dynamic Calibrators for Vibration Pickups," *Product Eng.* (Sept. 1951).

4-15. H. Moore, "Vibration Generators, Ancillary Equipment and Applications," *J. Brit. Inst. Radio Eng.* 7 p. (Dec. 1953).

4-16. N. Nezhni, "A Method for Minimizing Stray Magnetic Fields in the Electromagnetic Vibration Exciter," Jet Propulsion Laboratory, 32-709 (1965).

4-17. A. W. Orlacchio, "Self Calibrating Accelerometer," Instrument Society of America, May 1960.

4-18. L. A. Peterman, "Producing Motion with Magnetostrictive and Piezoelectric Transducers," *Elec. Manufacturing* (Dec. 1955).

4-19. D. L. Schaefer, "Vibration Calibrator," *Instrum. Automation* 30, 470-471 (Mar. 1957).

4-20. J. L. Sperazza and Charles W. Bell, "A New Vibration Transducer Calibration System," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, p. 480-485 (Apr. 1970).

4-21. R. C. Tauscher, "Air Bearings for Vibration Exciters," *Sound Vib.* 1 (1), 23-25 (1967).

4-22. K. Unholtz, *The Influence of Electrical and Motional Impedance on the Control and Performance of Some Vibration Machines*, MB Manufacturing Co., New Haven, Conn. p. 101-125, (1958).

4-23. I. E. Walenta, "A Sinusoidal Vibrator for Generating High Acceleration at High Frequencies," Jet Propulsion Laboratory Tech. Report No. 32-13, Jan. 1960.

4-24. W. A. Yates, "Wide-Range Calibrator for Vibration Pickups," *Electron.* (Sept. 1953).

· 感准

- 5-1.** R. A. Ackley and S. H. Logue, "A Laser Interferometer and Its Application to Vibration Amplitude Measurement," *Proc. Inst. Environ. Sci.* 1, 235-240 (Apr. 1967).

5-2. Anon., "Photoelectronic Measurement of Vibration Displacements," *Test Eng.* 12, 27 (July 1963).

5-3. Anon., "Moire-Fringe Measures Low Frequency Vibration," *Design News* (May 1960).

5-4. Anon., "Dynamic Calibration of Accelerometers," *N.B.S. Tech. News Bull.*, 226, 227 (Oct. 1970).

5-5. M. L. Aronow, "Steady-State Acceleration Test Equipment," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, 206-208 (Apr. 1959).

5-6. L. D. Ballard, W. S. Epstein, E. R. Smith, and S. Edelman, "Optical FM System for Measuring Mechanical Shock," *J. Res. N.B.S., C. Engineering and Instrumentation* 73C 3 (4), 75-78 (1969).

5-7. Y. Beers, *Introduction to the Theory of Errors*, Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Reading, Mass, 66 pp., 1957.

5-8. R. J. Bobber, "General Reciprocity Parameter," *J. Acoust. Soc. Amer.* 39 (4), 680-687 (1966). 6

5-9. C. F. Bruce, "Calibration of Sensitive Vibrometers by Interferometry," *Australian J. Appl. Sci.* 4 (1), 28-46 (1953).

5-10. K. Cieplak, "Reciprocity Calibration of Vibration Pickups," *Environ. Test Equip.* 13-18 (July 1968).

- 5-11. D. Cooke, "Moire Fringe Technique for Vibration Measurement," *J. Sci. Instrum.*, 39, 373-375 (1962).
- 5-12. H. A. Deferrari, "Laser Interferometric Technique for Measuring Small-Order Vibration Displacements," *J. Acoust. Soc. Amer.* 39 (5), Pt. 1, 979-980 (1966).
- 5-13. A. I. Dranetz and A. W. Orlacchio, "High-Frequency Calibration of Accelerometers," *Shock Vib. Bull.* 24 (Feb. 1957).
- 5-14. E. J. Feder and A. M. Gillen, "High-Frequency, High-G Calibration," *IRE Trans. Instrum.* I-6, (2) (June 1957).
- 5-15. P. W. Godt and H. S. Pyle, "The Application of a Laser Interferometer System for Calibrating Accelerometers and Dynamic Pressure Transducers," *J. Environ. Sci.*, 9-12 (Sept.-Oct. 1970).
- 5-16. J. L. Goldberg, "The Frequency Spectrum of the Photoelectric Signal From an Oscillating Interference Fringe Pattern," *Australian J. Appl. Sci.* 14, (3), 231-242 (Sept. 1963).
- 5-17. J. L. Goldberg, "A Non-Linear Control System for a Vibration Interferometer," *Mech. Chem. Eng. Trans. Inst. Eng. Australia* MC3 (2), 195-206 (Nov. 1967).
- 5-18. J. L. Goldberg, "A Method of Measuring Vibratory Displacements in Terms of a Light Wavelength," *J. Sci. Instrum. (J. Phys. E)* Series 2, 1 (1968).
- 5-19. J. S. Hilten, "Accelerometer Calibration with the Earth's Field Dynamic Calibrator," N.B.S. Tech. Note 517, Mar. 1970.
- 5-20. P. M. Honnell, "The Absolute Calibration of a Brush Accelerometer and its Response to Square Waves of Displacement and Velocity," *Trans. Amer. Geophys. Union* 31 (5), 690-695 (Oct. 1950).
- 5-21. E. Jones, S. Edelman, and K. S. Sizemore, "Calibration of Vibration Pickups at Large Amplitudes," *J. Acoust. Soc. Amer.* 33 (11), 1462-1466 (Nov. 1961).
- 5-22. W. Kissinger, "Determination of Sinusoidal Acceleration at Peak Levels Near that of Gravity by the "Chatter" Method" National Bureau of Standards Report No. 3339, Sept. 1954; Instrument Society of America Paper No. 54-40-L, Sept. 1954.
- 5-23. W. P. Kistler, "Precision Calibration of Accelerometers for Shock and Vibration," *Test Eng.* 16-22 (May 1966).
- 5-24. A. E. Kolesnikov, "Calibration of Vibration Pickups by the Reciprocity Method," *Measurement Tech. (USSR)* 11 960-963 (1963).
- 5-25. P. S. Lederer and J. S. Hilten, "Easily Made Device Calibrates Accelerometers," *Test Eng.* 15 (3), 11-15 (Mar. 1966).
- 5-26. L. Lemoine, "Vibration Table for Use in Calibrating Accelerometers," *La Recherche Aeronautique-Bulletin Bimestriel*, No. 69, p. 27-38, Mar.-Apr. 1959, Office National d'Etudes et Recherches Aeronautiques (ONERA), Chatillon-sur-Bagneux (Seine), France.
- 5-27. S. H. Logue, "A Laser Interferometer and its Application to Length, Displacement and Angle Measurement," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, 465-467 (Apr.-May 1968).
- 5-28. E. M. McMillan, "Violation of the Reciprocity Theorem in Linear Passive Electro-mechanical Systems," *J. Acoust. Soc. Amer.* 18 (2), 344-347 (Oct. 1946).
- 5-29. G. A. Massey and R. R. Carter, "Portable Laser Instrument for Vibration Analysis and Transducer Calibration," *Shock Vib. Bull.* 37 (2), 1-6 (Jan. 1968).
- 5-30. A. F. Niemoeller, "Reciprocity Calibration of Electro-acoustic Transducers in the Time Domain," *J. Acoust. Soc. Amer.* 33 (12), 1712-1719 (Dec. 1961).
- 5-31. B. F. Payne, "An Automated Precision Calibration System for Accelerometers," presented at Instrument Society of America, 17th National Aerospace Instrumentation Symposium, Las Vegas, Nev., May 1971.
- 5-32. B. F. Payne, "Absolute Calibration of Vibration Generators with Time-Sharing Computer as Integral Part of System," *Shock Vib. Bull.* 36 (6), 183-194 (Feb. 1967).

- 5-33. W. Ramberg, "Calibration of Shock and Vibration Pickups," *Noise Contr.* 3 (5), 23-33 (Sept. 1957).
- 5-34. B. Reznek, "One "G" (Peak) Indicator for Use in Accelerometer System Calibration," *Proc. Inst. Environ. Sci.* 433-442 (Apr. 1964).
- 5-35. E. Rule, F. J. Suellentrop, and T. A. Perls, "A Pick-Up to Read-Out Calibration for Vibration Channels," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 27 (3), 215-219 (June 1959).
- 5-36. V. A. Schmidt, S. Edelman, E. R. Smith, and E. T. Pierce, "Modulated Photoelectric Measurement of Vibration," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 34 (4), 455-458 (1962).
- 5-37. O. P. Sheeks, "Methods for the Practical Reciprocity Calibration of Piezoelectric Accelerometers," Instrument Society of America Paper No. 68-581, 7 p., 1968.
- 5-38. R. O. Smith, E. A. Willis, and J. S. Hiltun, "A Dual Centrifuge for Generating Low-Frequency Sinusoidal Accelerations," *J. Res. N.B.S.*, 66D (4), 357-362 (1962).
- 5-39. S. R. Spron, "Use of a Centrifuge for the Precision Measurement of Accelerometer Characteristics," *Trans Amer. Soc. Mech. Eng.*, Paper No. 60-WA-195 (Aug. 1960).
- 5-40. P. Stein, "Traceability—The Golden Calif," Arizona State University, College of Engineering Sciences, Publ. No. 7, (Apr. 1967).
- 5-41. E. J. Stowe, "A Comparison of the Reciprocity and Interferometer Methods of Calibrating Piezoelectric Accelerometers," David Taylor Model Basin Report No. 786, U.S. Department of the Navy, May 1954.
- 5-42. A. A. Zuehlke, "Instrument Error Band Concepts," *6th Nat. Flight Test Instrum. Sym.*, 5 p., May 1960.

正弦比较校准

- 6-1. American National Standards Institute, "American National Standard for the Selection of Calibrations and Tests for Electrical Transducers Used for Measuring Shock and Vibration," S2.11-1969, 19 p., 1969.
- 6-2. J. M. Blair, "Estimating Errors in Experimental Data," *Instrum. Contr. Syst.* 95-97 (May 1972).
- 6-3. R. S. Chernoff, "Comparison Calibration," *Measurement and Data*, 112-115 (Mar.-Apr. 1968).
- 6-4. E. W. Clements and M. G. Stone, "Techniques for the Rapid Estimation of Accelerometer Natural Frequencies, NRL Report 5681, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., Oct. 1961.
- 6-5. R. B. Lewis, "Piezo Accelerometer Calibration by Comparison Methods," *Environ. Eng.* 31, 9-10 (Mar. 1968).
- 6-6. T. D. Finley, "A Comparison Method to Measure Accelerometer Transverse Sensitivity," Instrument Society of America Paper No. 69-666, Oct. 1969.
- 6-7. B. R. Glen, "PROTECT—A Method of Optimizing Available Calibration Time in a Test Equipment Recall System," U.S. Naval Avionics Facility, AD 635 899, May 1966.
- 6-8. G. M. Hieber and B. Mangolds, "Automatic Accelerometer Check-Out Equipment," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 33 (3), 69-72 (Mar. 1964).
- 6-9. J. R. Houghton, "Voltage Ratio Detector for Millivolt Signals," N.B.S. Technical Note 266, 1965.
- 6-10. B. W. Jameson, "Error Considerations in an Accelerometer Calibration System," *Test Eng.* 22-39 (Sept. 1963).
- 6-11. E. Jones, D. Lee, and S. Edelman, "Improved Transfer Standard for Vibration Pickups," *J. Acoust. Soc. Amer.* 41, (2), 354-357 (1967).
- 6-12. J. E. Judd, "Lateral Motion Measurement in Vibration Testing," *Instrument-Automation Conference of the Instrument Society of America*: Pt. 1, p. 4-7, Pt. 2, p. 4-5 (1960).

- 6-13. R. W. Kelly, "Evaluation and Error Analysis of Vibration Calibration System," Sandia Laboratory Tech. Memorandum SC-TM-65-634, 32 p. Dec. 1965.
- 6-14. R. E. Kemp, "Accuracy for Engineers," *Instrum. Tech.* 41-46 (May 1967).
- 6-15. D. R. Kemper, "Measurement of Piezoelectric Accelerometer Capacitance," *J. Environ. Sci.*, 34-39 (Apr. 1967).
- 6-16. P. S. Lederer, "Resonant Frequencies of Piezoelectric Accelerometers and the Evaluation of an Electrical Technique for Their Determination," N.B.S. Report No. 7566, 13 p., July 1962.
- 6-17. W. B. Murfin, "Phase Measurement in Vibration Testing," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 31 (3), 127-133 (Apr. 1963).
- 6-18. W. C. Nieberding, "Modified Vibration Transducer Calibration System Which Directly Yields a Plot of Sensitivity Versus Frequency," NASA Tech. Note NASA TN D-4760, Aug. 1968.
- 6-19. K. M. O'Toole, "An Accelerometer Calibrator for the Low-Frequency Large-Displacement Range," *J. Sci. Instrum.*, I (Series 2), 672-673 (Feb. 1968).
- 6-20. B. F. Payne, "An Automated Precision Calibration System for Accelerometers," presented at Instrument Society of America, 17th National Aerospace Instrumentation Symposium Las Vegas, Nev., May 1971.
- 6-21. E. T. Pierce, O. W. Price, S. Edelman, and E. Jones, "Accelerometer Resonances Affect Vibration Measurement," *J. Environ. Sci.*, 17-21 (Dec. 1967).
- 6-22. J. D. Ramboz, "A Treatise Concerning the Measurement of Accelerometer Transverse Sensitivity Ratio," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, I, 297-305 (Apr. 1967).
- 6-23. J. D. Ramboz, "A Proposed Method for the Measurement of Vibration Transducer Transverse Sensitivity Ratio," Instrument Society of America Preprint No. M18-6-MESTIND-67, Sept. 1967.
- 6-24. G. K. Rasanen, "Determining the Resonant Frequency of an Accelerometer's Installation," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, 401-406 (Apr. 1970).
- 6-25. J. R. Reed, "System to Calibrate Vibration Transducers at Low Displacements," *Shock Vib. Bull.* 34 (4), 13-19 (Feb. 1965).
- 6-26. R. J. Ricci, "Vibration Test Instrumentation Calibration," I. E. S. Tutorial Lecture Series, p. 171-173 (Apr. 1967).
- 6-27. D. W. Rockwell and J. D. Ramboz, "Measurement of Accelerometer Transverse Sensitivity," *Shock Vib. Bull.* 35 (4), 73-97 (Feb. 1966).
- 6-28. W. R. Taylor and C. D. Robbins, "Calibration of Water Cooled High Temperature Accelerometers," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 33 (3), 19-25 (Mar. 1964).
- 6-29. P. L. Walter, "A Technique for the Evaluation of Seismic Velocity Gages Through Generation of Large Amplitude Sinusoidal Velocities," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, 21-24 (Apr. 1969).
- 6-30. M. H. Woodward, "Evaluation Report of Endevco Model 2958A Calibration Fixture," ER No. 4, SC-DC-65-1719, Mar. 1965, Sandia Corp., Albuquerque, N. Mex.
- 6-31. M. H. Woodward, "Automated Vibration Calibration Data Acquisition System," Instrument Society of America, *Test Measurement: Vibration*, Preprint 72-620, Oct. 1972.
- 6-32. D. R. Workman, "New Instrument For Accelerometer Calibration," *Shock Vib. Bull.* 34 (4), 31-39 (Feb. 1965).
- 6-33. D. R. Workman, "Calibration of Piezoelectric Accelerometer Reference Systems by Function Separation," *Proc. Inst. Environ. Sci.*, 386-395 (Apr. 1970).
- 6-34. W. J. Youden, "Uncertainties in Calibration," *IRE Trans. Instrum.*, Paper No. 31, p. 133-138, Dec. 1962.

冲击运动校准

- 7-1. Anon., "Mechanical Shock Measured Optoelectrically," *N.B.S. Tech. News Bull.*, 124-126.
- 7-2. Anon., "Sandia Corp. Standard Environmental Test Methods," Sandia Corp. Report SC-4452 D(M), June 1966.
- 7-3. Anon., "Transducer Evaluation," Sandia Corp. Progress Report RS 7342/15, April 1966.
- 7-4. W. E. Baker and R. C. Dove, "Transient Calibration of Piezoelectric Accelerometers," *J. Environ. Sci.* 5 20-21, 24 (Oct. 1962).
- 7-5. R. L. Bell, "Development of 100 000 g Test Facility," *Shock Vib. Bull.* 40 (2), 205-214 (Dec. 1969).
- 7-6. R. R. Bouche, "The Absolute Calibration of Pickups on a Drop-Ball Machine of the Ballistic Type," *Proc. Inst. Environ. Sci.* 115-121 (1961).
- 7-7. R. M. Brengelman and J. W. Grubbs, "Shock Calibration of Piezoelectric Accelerometers," Report ABL/B-24, Allegany Ballistics Laboratory, Cumberland, Md., Dec. 1962.
- 7-8. R. O. Brooks, "Generating Specified Shock Pulses," *J. Environ. Sci.* 10 (2), 28-33 (Apr. 1967).
- 7-9. J. E. Cannon, "Transient Method of Calibrating a Piezoelectric Accelerometer for the High g-Level Range," American Society of Mechanical Engineers Paper No. 71-Vibr-43 (May 1971).
- 7-10. A. J. Ciaponi, "Short Duration Shock Machine," *Proc. Inst. Environ. Sci.* 2, 335-340 (Apr. 1967).
- 7-11. G. W. Cohrs and J. D. Favour, "Use of a Linear Air Bearing Sled for Dynamic Calibration of Velocity Transducers," ISA-ASI 72229, p. 149-156, 1972.
- 7-12. R. W. Conrad and I. Vigness, "Calibration of Accelerometers by Impact Techniques," Instrument Society of America Paper No. 53-11-3, Sept. 1953.
- 7-13. V. F. DeVost, "Hand-Held Shock Tester WOX-6A," *Shock Vib. Bull.* 34 (3), 329-334 (Dec. 1964).
- 7-14. J. D. Favour, "Accelerometer Calibration by Impulse Excitation Techniques," Instrument Society of America Preprint No. P13-1-PHYMMID-67, Sept. 1967.
- 7-15. J. D. Favour, "Calibration of Accelerometers by Impulse Excitation and Fourier Integral Transform Techniques," *Shock Vib. Bull.* 37 (2), 17-27 (Jan. 1968).
- 7-16. M. Gertel, "A Peak Shock Velocity Recorder for Studying Transportation Hazards," *Shock Vib. Ass. Environ. Bull.* 33, 57-62 (Mar. 1964).
- 7-17. W. D. Godshall, "The FPL Linear Deadweight Accelerometer Calibrator," University of Wis., Forest Products Laboratory, Report No. 2239, Feb. 1962.
- 7-18. A. Goldberg, "Use of the JAN-S-44 Shock Test Machine as a Means of Transient Calibration for Barium-Titanate Accelerometers for an Acceleration Range up to 1000 G's," Frankford Arsenal Report No. S-4336, Mar. 1955.
- 7-19. P. M. Honnell, "Instrumentation for the Transient Testing of Accelerometers," Instrument Society of America Paper No. S2-16-2, Sept. 1952.
- 7-20. A. B. Kaufman, "Accelerometer Calibration by Ballistic Pendulum," *Instrum. Automation* 29 (7) (July 1956).
- 7-21. R. W. Kelley, "Calibration of Shock Accelerometers," Instrument Society of America Preprint M18-2-MESTIND-67, 1967.
- 7-22. R. W. Kelley, "Instrumentation for Accelerometer Shock Calibration," *Proc. Inst. Environ. Sci.* 2, 341-352 (Apr. 1967).
- 7-23. R. L. Lyon, "Impact-Force Source and Impact-Force Calibrator," *Exp. Mech.*, 257-264 (June 1973).
- 7-24. W. W. Mebane, "Some Practical Considerations in Measurement and Analysis of Shock Records," *Shock Vib. Dig.* 2 (7), 3-5 (July 1970).

- 7-25. K. Oishi, "Evaluation of the Endevco Drop-Ball Shock Calibrator," Sandia Laboratory Report SC-TM-65-1, 49 p., Jan. 1965.
- 7-26. D. F. Palmer, "An Accurate Shock Calibrator for Accelerometers," Sandia Corporation Tech. Memorandum SCTM 96-61 (73), 15 p., Apr. 1961.
- 7-27. D. F. Palmer, "Accelerometer Shock Calibration," Sandia Corporation Tech. Memorandum 99-63 (73), May 1963.
- 7-28. D. F. Palmer, "Accelerometer Shock Calibration," *J. Environ. Sci.*, 18-21 (Oct. 1963).
- 7-29. T. A. Perls and C. W. Kissinger, "High-Range Accelerometer Calibrations," N.B.S. Report 3299, 12 p. June 1954. Also Instrument Society of America Paper No. 54-40-2, Sept. 1954.
- 7-30. T. A. Perls, "High-g Accelerometer Calibrations by Impact Methods with Ballistic Pendulum, Air Gun and Inclined Trough," Instrument Society of America Paper No. 54-40-2, Sept. 1954.
- 7-31. T. A. Perls, "A Method for Steady-State Accelerometer Calibrations up to $\pm 4000 g$ and Test Results on Two Accelerometers, Model A314-T," N.B.S. Report 3924, Mar. 1955.
- 7-32. J. D. Ramboz, "Equipment Evaluation Report on Endevco 2965 Shock Calibrator," Metrology Engineering Center Report No. ESEE08, Nov. 1966.
- 7-33. M. H. Woodward, "Ballistic Pendulum Shock Calibrator," Sandia Laboratories Tech. Memorandum SC-TM-66-567 (N67-31473), Nov. 1966.
- 7-34. M. H. Woodward, "The Use of a Force Transducer as an Acceleration Standard for High Level Shock Calibration," Sandia Laboratories Tech. Memorandum SC-TM-67-493, July 1967.

测力计和阻抗头

- 8-1. R. O. Belsheim, "The Need for Precision in Measuring Mechanical Impedance," Instrument Society of America Preprint No. 51-LA-61, Sept. 1961.
- 8-2. R. R. Bouche, "Instrumentation for Shock and Vibration Measurements," presented at American Society of Mechanical Engineers Colloquium Experimental Techniques in Shock and Vibration, New York, Nov. 1962.
- 8-3. T. Dimoff and R. Koyanagi, "Performance of a Mechanical Impedance Head," N.B.S. Report 9526, June 1967.
- 8-4. D. J. Ewins and M. G. Sainsbury, "Mobility Measurements for the Vibration Analysis of Connected Structures," *Shock Vib. Bull.* 42 (1), 105-122 (Jan. 1972).
- 8-5. S. Levy, "Mechanical Impedance, The Language of Shock and Vibration," *Mag. Stand.* 35 (7), 1980201 (July 1964).
- 8-6. C. T. Morrow, "Instrumentation for Measurement of Vibratory Motion and Mechanical Impedance Within Assembled Aerospace Equipment," *Shock Vib. Bull.* 40 (7), 29-32 (Dec. 1969).
- 8-7. G. J. O'Hara, "Mechanical Impedance and Mobility Concepts," NRL Report 6406, 16 p., U.S. Naval Research Laboratory, Washington, D.C., July 1966.
- 8-8. G. W. Painter, "Use of Miniature Force Transducers in the Measurement of Shock and Vibration Environments," *Shock Vib. Bull.* 34 (4), 45-53 (Feb. 1965).
- 8-9. R. Plunkett, "Effect of Contact Area on Mechanical Impedance Measurements," University of Minn. Report on Contract No. Nobs-86783, Sept. 1963.
- 8-10. G. M. Remmers and R. O. Belsheim, "Effects of Technique on Reliability of Mechanical Impedance Measurement," *Shock Vib. Bull.* 34 (3), 37-58 (Dec. 1964).
- 8-11. J. P. Salter, "Impact and Mobility," *J. Environ. Sci.* XIV (3), 17-20 (May-June 1971).
- 8-12. F. Schloss, "Recent Advances in the Measurement of Structural Impedance," David Taylor Model Basin Report 1584, 40 p. U.S. Department of the Navy, Jan. 1963.

- 8-13. F. Schloss, "Recent Advances in Mechanical Impedance Instrumentation and Applications," *Shock Vib. Bull.* 34 (3), 3-14 (Dec. 1964).
- 8-14. F. Schloss, "Measurements of the Effect of Geometric Scale on Structural Impedance and Radiated Sound," *J. Acoust. Soc. Amer.* 41, 1193-1195 (May 1967).

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 冲击与振动传感器的校准

作者 = B E X P

页数 = 1 6 8

下载位置 = h t t p : / / w w w . m y e l i b . c o m / d i s k e q 0 1 / e
q 7 8 / 0 4 / ! 0 0 0 0 1 . p d g