

理论力学实验

指导书

合肥工业大学土木与水利工程学院工程力学系

二〇一九年

学生实验守则

- 1、学生应按照课程教学计划，准时上实验课，不得迟到早退。
- 2、实验前应认真阅读实验指导书，明确实验目的、步骤、原理，预习有关的理论知识，并接受实验教师的提问和检查。
- 3、进入实验室必须遵守实验的规章制度。不得高声喧哗和打闹，不准抽烟、随地吐痰和乱丢纸屑杂物。有净化要求的实验室，进室必须换拖鞋。
- 4、做实验时必须严格遵守仪器设备的操作规程，爱护仪器设备，节约使用材料，服从实验教师和技术人员的指导。未经许可不得动用与本实验无关的仪器设备及其物品。
- 5、实验中要细心观察，认真记录各种试验数据。不准敷衍，不准抄袭别组数据，不得擅自离开操作岗位。
- 6、实验时必须注意安全，防止人身和设备事故的发生。若出现事故，应立即切断电源，及时向指导教师报告，并保护现场，不得自行处理。
- 7、实验完毕，应清理实验现场。经指导教师检查仪器设备、工具、材料和实验记录后方可离开。
- 8、实验后要认真完成实验报告，包括分析结果、处理数据、绘制曲线及图表。在规定的时间内交指导教师批改。
- 9、在实验过程中，由于不慎造成仪器设备、器皿工具损坏者，应写出损坏情况报告，并接受检查，由领导根据情况进行处理。
- 10、凡违反操作规程、擅自动用与本实验无关的仪器设备、私自拆卸仪器而造成事故和损失的，肇事者必须写出书面检查，视情节轻重和认识程度，按章予以赔偿。

合肥工业大学

二〇一九年修订

前言

工程振动是涉及机械、土木建筑、航空、交通、能源、电力、冶金、化工、环境等国民经济众多领域的交叉学科，理论研究极为活跃，工程应用前景广阔。工程振动已是当今工科大学生和工程技术人员重要的知识构成。振动实验是理论力学课程的实践性教学环节。学生于课堂教学之后走入实验室，进行具体的实验操作，不仅验证理论的结果，加深对理论的理解，同时通过实验了解工程上进行振动实验和测试的仪器设备、测试方法，从而开阔眼界，提高运用所学理论解决工程实际问题的能力，因而也是进行素质教育的重要方法。

本实验在传统振动实验的基础上，利用计算机技术辅助振动实验，将振动物体的振动信号，通过传感器拾取，经放大器放大，然后送入计算机，在动态分析软件的帮助下，显示振动波形，进行振动数据处理，再通过打印机打印、记录波形。可在时间过程中观察分析振动信号（即时域分析），又可观察分析振动信号随频率变化的情况（即频域分析）。

本实验指导书中，简要列出了实验内容、实验目的、实验装置与原理、实验方法与步骤以及实验数据处理等部分。学生在实验前要认真阅读，做到心中有数，以取得好的实验效果。

目录

实验一加速度传感器灵敏度标定	5
实验二单自由度系统自由振动	10
实验三单自由度系统受迫振动	13
实验四被动隔振	17
实验五悬臂钢尺振动实验	21
实验六动力消振实验	23
附录 1 振动传感器机械接收原理	25
附录 2 压电式加速度传感器的机电变换原理及灵敏度	28
附录 3 振动测试系统标定	33

实验一加速度传感器灵敏度标定

一、实验目的

1. 了解振动传感器原理
2. 掌握加速度传感器灵敏度标定的相对方法
3. 掌握加速度传感器灵敏度标定的绝对方法
4. 了解振动测试系统硬件和软件的使用方法
5. 了解振动系统标定方法

二、实验对象、实验仪器和实验原理框图

1. 实验对象：加速度传感器
2. 实验仪器连接框图

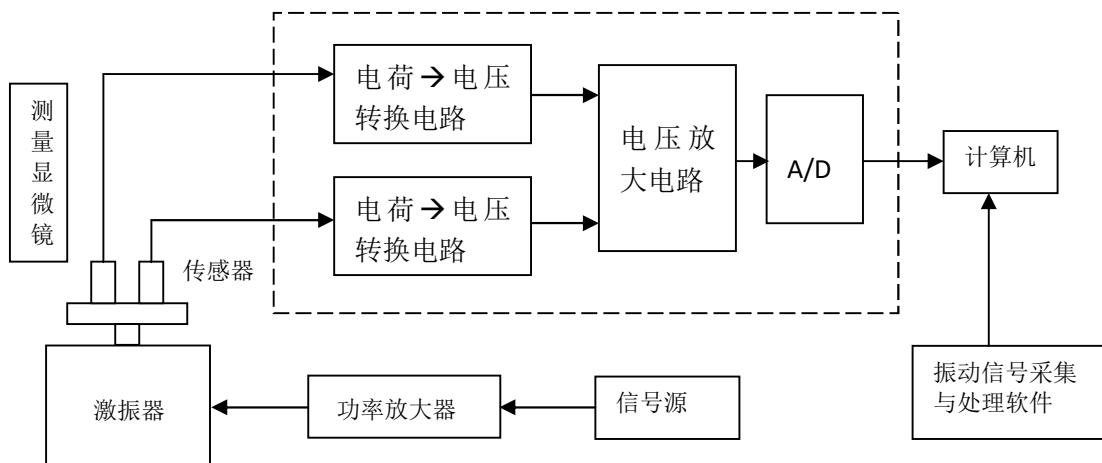


图 1 标定实验框图

3. 实验仪器

- (1) 激振设备：信号源、功率放大器和激振器；
- (2) 加速度传感器：标准加速度传感器（已知道灵敏度）和待标定加速度传感器（灵敏度未知）；
- (3) 动态信号采集箱、计算机、打印机和动态信号采集与分析处理软件；
- (4) 台灯和测量显微镜。

三、振动传感器原理和振动测试系统标定方法

参阅：附录 1 振动传感器机械接收原理；

附录 2 压电式加速度传感器的机电变换原理及灵敏度；

附录 3 振动测试系统标定。

四、实验步骤

1. 加速度传感器灵敏度标定的相对法

- (1) 在老师的指导下，按照实验原理框图连接实验仪器。
- (2) 将标准传感器和待标定传感器并排或背靠背安装在振动台的台面上，使它们经受相同的振动。
- (3) 仔细检查各仪器的连接导线有无短路、松动，功率放大器、信号源的输出控制旋钮是否在最小位置。确认无误后执行下步操作。
- (4) 依次打开信号源、功率放大器、计算机和采集箱的电源开关。
- (5) 启动动态信号采集软件，在软件界面上设置采样频率、电压范围、传感器灵敏度等参数，选择工程单位为加速度单位，即 m/s^2 。
- (6) 按照数据记录表 1 给定的频率设置信号源频率，调整信号源输出信号幅值和功率放大器输出信号幅值使振动台振动加速度为合适数值，比如使标准传感器的输出加速度峰值为 $10m/s^2$ 。
- (7) 假设待标定传感器的电荷灵敏度为 S_{wq} ，标准传感器测量得到的加速度有效值为 a_{srms} ，待标定传感器测量得到的加速度有效值为 a_{wrms} 。根据标准传感器的灵敏度（已知）和假设的待标定传感器灵敏度 S_{wq} （该值可以设置为 1 或者其它的数据），在软件界面上设置相应测量通道的传感器灵敏度，由两个传感器的测量加速度值，根据 (1) 式计算待标定传感器的实际灵敏度 S_q 。

$$S_q = S_{wq} \frac{a_{wrms}}{a_{srms}} \quad (1)$$

2. 相对法标定灵敏度准确性验证

采用相对标定方法获得了待标定加速度传感器的灵敏度，该灵敏度数值是否准确，需要用实验进行检验。如果标定的灵敏度数据是准确的，则标准传感器和待标定两个传感器测量得到的加速度数据应该是相同或者是非常接近的。

- (1) 在软件界面上，将连接待标定传感器通道的传感器灵敏度修改为根据 (1) 式得到的数值，在数据记录表 2 中记录标准传感器和待标定传感器测量得到的加速度值。
- (2) 根据两个传感器测量得到的加速度数据判定相对标定法获得的待标定传感器的灵敏度值是否准确。

3. 加速度传感器灵敏度标定的绝对法

相对标定法是通过标准加速度传感器获得待标定传感器安装位置的实际加速度，而绝对标定法则是通过测量待标定传感器安装位置的振动位移和振动信号频率，通过计算方法获得待标定传感器的实际加速度值。

- (1) 在激振器台面侧边粘贴细砂纸片；

- (2) 按照数据记录表 3 指定的频率设置信号源频率，设置功率放大器输出旋钮使激振器处于合适的振动幅值；
- (3) 假设待标定传感器的电荷灵敏度为 S_{wq} ，待标定传感器测量得到的加速度有效值为 a_{rms} 。根据假设的待标定传感器灵敏度 S_{wq} （该值可以设置为 1 或者其它的数据），在软件界面上设置待标定测量通道的传感器灵敏度；
- (4) 打开台灯照亮砂纸片；
- (5) 将测量显微镜物镜对准砂纸片，调整显微镜目镜焦距直到目镜中出现清晰的由离散砂粒形成的一条条的亮线为止；
- (6) 任选目镜中的一条亮线，用显微镜测量出该条亮线的长度，该条亮线长度的一半就是待标定传感器安装位置振动位移的峰值 A_0 mm；
- (7) 由信号源数码管读取振动信号频率 f_0 Hz；
- (8) 根据 (2) 式计算待标定传感器的实际加速度值，

$$a_{rms} = \frac{A_0 \times (2\pi f_0)^2}{1000\sqrt{2}} \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

- (9) 由信号源数码管读取振动信号频率 f_0 Hz；
- (10) 在测量软件界面上读取待标定传感器的测量加速度数值 a_{rms} m/s²，根据 (3) 式计算绝对标定法的传感器灵敏度值，

$$S_q = S_{wq} \frac{a_{rms}}{a_{rms}} \text{ pc/ms}^{-2} \quad (3)$$

4. 绝对法标定灵敏度准确性验证

采用绝对标定方法获得了待标定加速度传感器的灵敏度，该灵敏度数值是否准确，需要用实验进行检验。如果标定的灵敏度数据是准确的，则标准传感器和待标定两个传感器测量得到的加速度数据应该是相同或者是非常接近的。

- (1) 在软件界面上，将连接待标定传感器通道的传感器灵敏度修改为根据 (3) 式得到的数值，在数据记录表 4 中记录标准传感器和待标定传感器测量得到的加速度值。
- (2) 根据两个传感器测量得到的加速度数据判定绝对标定法获得的待标定传感器的灵敏度值是否准确。

五、实验数据

1. 传感器信息

标准传感器编号：；标准传感器灵敏度：pc/ms⁻²。

待标定传感器编号：。

2. 实验数据记录表

表 1 相对校准法实验数据记录表

振动频率 (Hz)	标准传感器加速度值 (m/s ²)	待标定传感器加速度值 (m/s ²)	标定传感器通道设置灵敏度 (pc/m s ⁻²)	待标定传感器计算灵敏度 (pc/m s ⁻²)
30				
50				
90				
160				

表 2 相对校准法验证实验数据记录表

振动频率 (Hz)	标准传感器加速度值 (m/s ²)	待标定传感器加速度值 (m/s ²)	标定传感器通道设置灵敏 (pc/m s ⁻²)
30			
50			
90			
160			

表 3 绝对校准法实验数据记录表

振动频率 (Hz)	振动位移峰值 (mm)	振动加速度值计算值 (m/s ²)	标定传感器通道设置灵敏度 (pc/m s ⁻²)	待标定传感器加速度值 (m/s ²)	待标定传感器计算灵敏度 (pc/m s ⁻²)
30					
50					
90					

表 4 绝对校准法验证实验数据记录表

振动频率 (Hz)	标准传感器加速度值 (m/s ²)	待标定传感器加速度值 (m/s ²)	标定传感器通道设置灵敏 (pc/m s ⁻²)
30			
50			
90			

六、实验小结

1. 根据实验数据，总结绝对标定法和相对标定法的优缺点。
2. 分析相对标定法中标准传感器和待标定传感器的不同安装方法对实验结果的影响，结合运动学知识进行理论分析。

实验二单自由度系统自由振动

一、实验目的

1. 记录小阻尼下单自由度系统自由衰减振动的加速度—时间曲线，了解阻尼对自由振动的影响；
2. 根据加速度—时间曲线计算单自由度系统的对数减缩率 δ 、阻尼系数 n 、阻尼比 ζ 和系统的固有频率；
3. 进一步熟悉振动实验仪器和动态信号采集与分析软件的使用方法。

二、实验对象、实验仪器和仪器连接框图

1. 实验对象：钢尺、传感器和质量块构成的实验模型；
2. 实验仪器连接框图

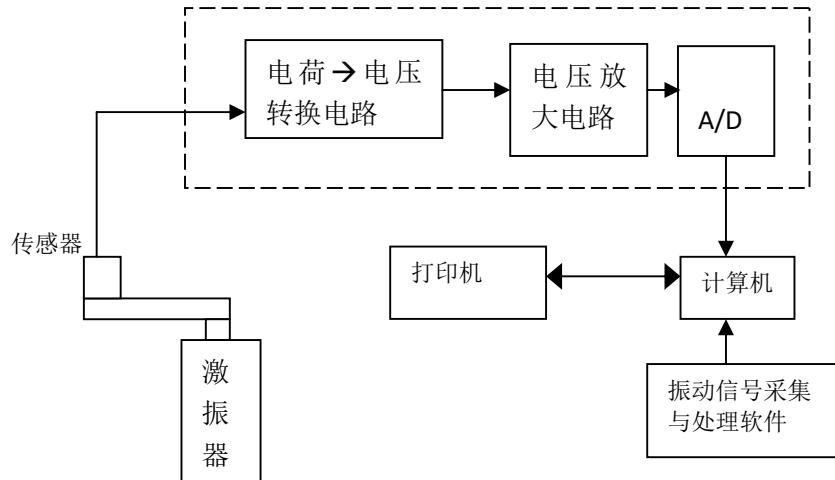


图1 自由衰减振动仪器连接图

3. 实验仪器

- (1) 加速度传感器；
- (2) 动态信号采集箱、计算机、打印机和动态信号采集与分析处理软件；

三、实验原理

如图1所示，把质量块、传感器和钢尺组成的系统等效为一个有阻尼单自由度系统，图2。根据振动理论，对该单自由度系统施加一个初始的位移扰动，然后使之产生自由衰减振动，振动信号由加速度传感器提取后再送到后续的电荷电压转换电路、A/D 转换电路和计算机后，由动态信号处理软件进行波形显示和数据存储，加速度波形由打印机打印。

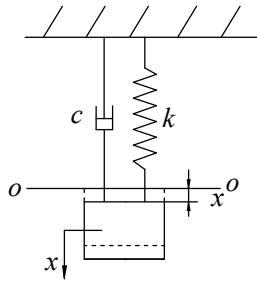


图 2 单自由度振动系统模型

单自由度自由衰减振动位移为

$$x(t) = e^{-nt} A \sin(\omega_d t + \phi) \quad (1)$$

与式 (1) 对应的加速度为

$$a = -A\omega_d^2 e^{-nt} \sin(\omega_d t + \beta) \quad (2)$$

与式 (2) 对应的加速度曲线如图 3 所示。

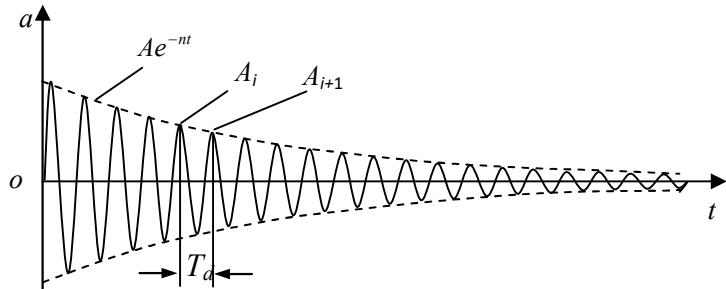


图 3 自由衰减振动加速度曲线

根据加速度曲线，可以计算对数减缩率 δ 、阻尼系数 n 、阻尼比 ζ 和固有频率 ω_0 。

对数减缩率为

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \text{ 或 } \delta = \frac{1}{m} \ln \frac{A_i}{A_{i+m}} \quad (3)$$

式 (3) 中前一个表达式取一个周期中的两个加速度峰值，后一个表达式取 m 个周期中的两个加速度峰值。

阻尼系数

$$n = \frac{\delta}{T_d} = \delta f_d = \frac{\delta \omega_d}{2\pi} \quad (4)$$

式 (4) 中 T_d 为有阻尼自由振动的周期， f_d 为有阻尼振动的频率。

系统的固有频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_d^2 + \delta^2} \quad (5)$$

四、实验步骤

- (1) 在老师的指导下，按照实验原理框图连接实验仪器。
- (2) 仔细检查各仪器的连接导线有无短路、松动，功率放大器、信号源的输出控制旋钮是否在最小位置。确认无误后执行下步操作。
- (3) 依次打开信号源、功率放大器、计算机和采集箱的电源开关。
- (4) 启动动态信号采集软件，在软件界面上设置采样频率、电压范围、传感器灵敏度等参数，选择工程单位为加速度单位，即 m/s^2 。
- (5) 使激振器处于静止状态（信号源无信号输出，功率放大器无输出）；
- (6) 在软件界面上设置采样模式为触发负延时模式，然后启动数据采集。
- (7) 给实验模型一个初始的位移扰动，然后使实验模型进入自由衰减振动状态；
- (8) 完成触发数据采集，保存数据。
- (9) 打印自由衰减振动曲线。

五、实验数据及数据处理

1. 传感器信息

加速度传感器编号：；加速度传感器灵敏度： pc/ms^{-2} 。

2. 记录数据

实验二需要用打印机打印自由衰减振动曲线，在书写实验报告时，该曲线需要粘贴在实验报告上。利用从自由衰减振动曲线上获得的数据，计算表 1 中相关参数的值和系统固有频率。

表 1 自由衰减振动数据处理记录表

周期数(m)	a_i (m/s^2)	a_{i+m} (m/s^2)	$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{a_{i+m}}{a_i}$	周期 (T_d) 单位：秒	$n = \delta f_d$	$\zeta = \frac{\delta}{2\pi}$

系统固有频率 $f_0=Hz$ 。

实验三单自由度系统受迫振动

一、实验目的

1. 了解干扰力频率对振动系统振幅的影响，观察共振现象，记录共振曲线；
2. 掌握单自由度受迫振动系统幅—频响应曲线的测量方法及利用幅—频响应曲线计算系统阻尼、判读系统固有频率的方法；
3. 进一步熟悉振动实验仪器和动态信号采集与分析软件的使用方法。

二、实验对象、实验仪器和仪器连接框图

1. 实验对象：钢尺、传感器和质量块构成的实验模型；
2. 实验仪器连接框图

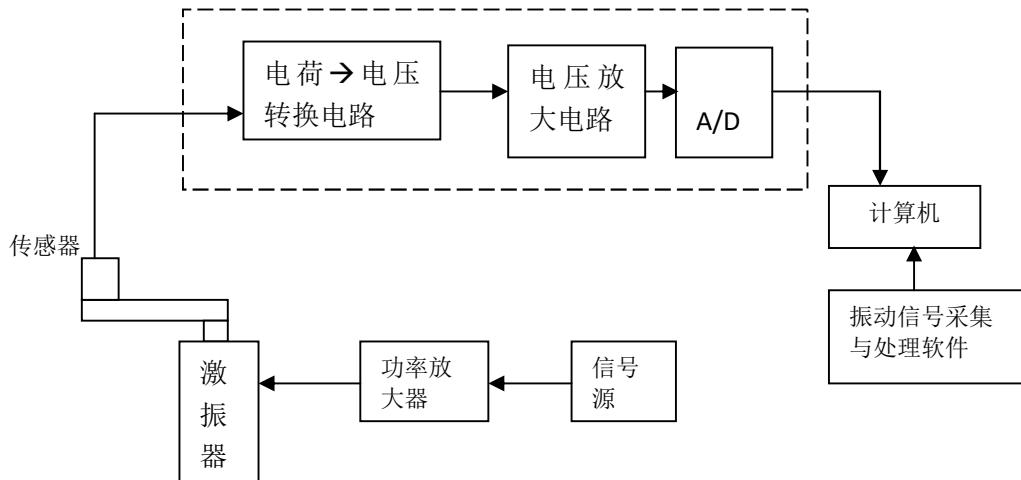


图 1 受迫振动仪器连接图

3. 实验仪器

- (1) 加速度传感器；
- (2) 激振设备：信号源、功率放大器和激振器
- (3) 动态信号采集箱、计算机和动态信号采集与分析处理软件；
- (4) 实验模型：钢尺、质量块和传感器组成的单自由度系统。

三、实验原理

1. 单自由度系统受振动力学模型

如图 1 所示，把质量块、传感器和钢尺组成的系统等效为一个有阻尼单自由度系统，图 2。根据振动理论，对该系统施加简谐形式的位移干扰，使之产生受迫振动，其运动微分方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = kx_s + c\dot{x}_s \quad (1)$$

方程 (1) 的稳态解为

$$x = B \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

应用位移与加速度之间的关系，质量块的加速度为

$$\ddot{x} = B_x \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

其中

$$B_x = \frac{A_x \sqrt{\omega_n^4 + (2n\omega)^2}}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} = \frac{A_x \sqrt{1 + (2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (4)$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\zeta\lambda^3}{1 - \lambda^2 + 4\zeta^2\lambda^2} \right) \quad (5)$$

将式 (4)、式 (5) 绘成曲线即为单自由度系统加速度幅—频曲线和相—频曲线。

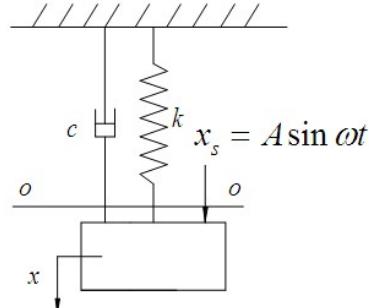


图 2 单自由度振动系统模型

2. 系统阻尼计算的半功率点法

在结构振动中，由于阻尼耗散的能量与振幅的平方成正比，在结构振动的幅—频响应曲线上，幅值等于 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 的最大幅值的两点，阻尼耗散的功率等于阻尼耗散最大功率的一半，这两点称为半功率点。

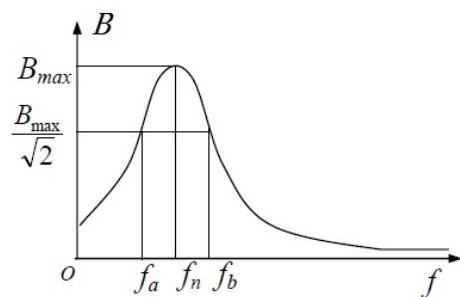


图 3 单自由度系统的幅—频响应曲线

在小阻尼的情况下，即 $\zeta \ll 1$ 时，阻尼比可以用半功率点法计算

$$\zeta = \frac{f_b - f_a}{2f_n} \quad (6)$$

其中 f_n 为系统的固有频率。

在小阻尼的情况下，也可以利用半功率点法用速度幅—频曲线和加速度幅—频曲线计算阻尼比。

四、实验步骤

1. 测量幅—频曲线

- (1) 在老师的指导下，按照实验原理框图连接实验仪器。
- (2) 仔细检查各仪器的连接导线有无短路、松动，功率放大器、信号源的输出控制旋钮是否在最小位置。确认无误后执行下步操作。
- (3) 依次打开信号源、功率放大器、计算机和采集箱的电源开关。
- (4) 启动动态信号采集软件，在软件界面上设置采样频率、电压范围、传感器灵敏度等参数，选择工程单位为加速度单位，即 m/s^2 。
- (5) 调节信号源输出旋钮和功率放大器输出旋钮，使激振器输出合适的振动幅值；
- (6) 按照表 1 指定的数值，依次改变信号源频率，同时在对应的频率下记录传感器测量数据。
- (7) 根据表 1 测量数据绘制单自由度系统受迫振动的幅—频响应曲线；
- (8) 由幅—频响应曲线，用半功率点法计算阻尼比。

表 1 幅—频曲线实验数据记录表

频 率 (Hz)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
加速度 (m/s ²)											

2. 测量共振曲线

- (1) 在老师的指导下，按照实验原理框图连接实验仪器。
- (2) 仔细检查各仪器的连接导线有无短路、松动，功率放大器、信号源的输出控制旋钮是否在最小位置。确认无误后执行下步操作。
- (3) 依次打开信号源、功率放大器、计算机和采集箱的电源开关。
- (4) 启动动态信号采集软件，在软件界面上设置采样频率、电压范围、传感器灵敏度等参数，选择工程单位为加速度单位，即 m/s^2 。
- (5) 调节信号源输出旋钮和功率放大器输出旋钮，使激振器输出合适的振动幅值；
- (6) 从 10Hz 开始，缓慢增加信号源输出频率，同时观察实验模型的振动，当振动模

型振幅达到最大值时，停止改动信号源频率，此时的振动模型处于共振状态。

利用传感器的测量值，也可以判定模型的共振状态，加速度值达到最大。

(7) 记录共振波形，存储波形数据，打印共振波形数据以备书写实验报告用。

五、实验数据及数据处理

1. 传感器信息

加速度传感器编号：； 加速度传感器灵敏度： pc/ms^2 。

3. 实验模型参数

振动系统固有频率的理论值由下式确定

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \omega_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}}$$

式中：

$$\delta_{st} = \frac{mgL^3}{3EJ}, \quad J = \frac{1}{12}bh^3$$

$$m = g, \quad E =$$

$$b =, \quad h =$$

$$L =, \quad J =$$

$$f_n = \text{Hz}$$

3. 测量数据

(1) 记录幅—频响应曲线的测量数据（表 1），利用这些数据绘制实验模型的幅—频响应曲线，由幅—频曲线获得模型固有频率，用半功率点法计算阻尼系数；

(2) 打印实验模型共振曲线，用此曲线计算模型共振频率。

六、问题讨论

将实验模型固有频率理论计算值与实际测量值对比，请分析两者产生误差的原因。

实验四 被动隔振

一、实验目的

1. 验证隔振理论；
2. 观察隔振效果，掌握隔振效果测试方法；
3. 了解隔振设计方法。

二、实验对象、实验仪器和仪器连接框图

1. 实验对象：弹簧、质量块构成的实验模型；
2. 实验仪器连接框图

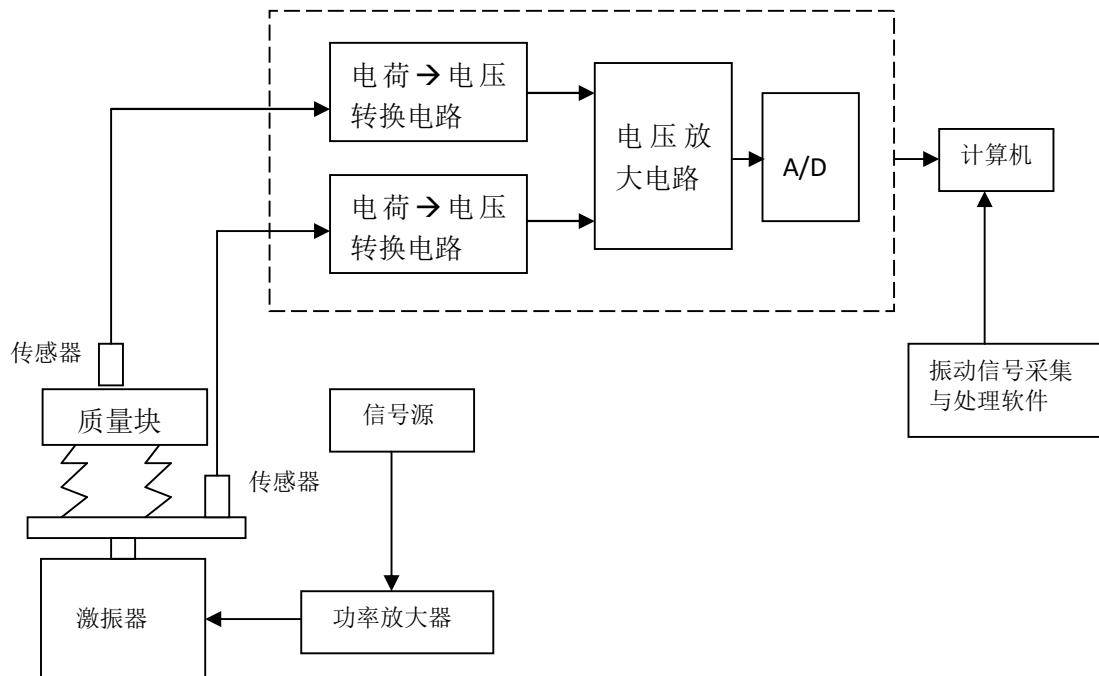


图 1 被动隔振实验仪器连接框图

4. 实验仪器

- (1) 加速度传感器；
- (2) 激振设备：信号源、功率放大器和激振器
- (3) 动态信号采集箱、计算机和动态信号采集与分析处理软件；
- (4) 实验模型：弹簧、质量块构成的实验模型。

三、实验原理

1. 隔振概念

把机械设备或仪器等安装在合适的弹性装置上以隔离振动的措施称为隔振。根据激振源的不同，隔振可分为两类：(1) 对于本身是振源的设备，为了减少它对周围机器、仪器和建筑物的影响，将它与基础隔离开称为主动隔振；(2) 基础本身为振源，需要隔振的对象是机器、仪器或其它形式的系统，为了减少基础对这些隔振对象的影响，需要把它们安装在一个隔振的台座上，使之与基础隔离，这类隔振方式称为被动隔振。

2. 单自由度被动隔振力学模型

根据振动理论，对图 1 的实验模型简化后可得图 2 的力学模型，设设备相对静止参考体的位移用 x 表示，基础相对静止参考体的位移用 x_s 表示相对，则设备的运动微分方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Ak \sin \omega t + A \cos \omega t \quad (1)$$

方程 (1) 的稳态解为

$$\begin{aligned} x &= A \cdot \frac{\sqrt{1+(2\zeta\lambda)^2}}{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2} \sin(\omega t - \phi) = B \sin(\omega t - \phi) \\ B &= A \cdot \frac{\sqrt{1+(2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

令

$$\eta = \frac{B}{A} \quad (3)$$

η 称位被动隔振的位移传递率。对主动隔振，有类似的关系。将 η 与 λ 的关系用绘成曲线，即可得到被动隔振曲线，图 3。

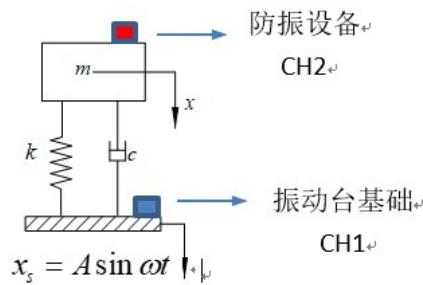


图 2 单自由度被动隔振模型

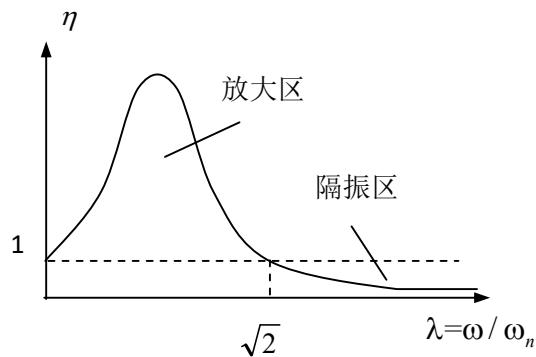


图 3 被动隔振位移传递曲线

由图 3 可知，被动隔振位移传递曲线存在两个区，即放大区和隔振区，并且在隔振区的远端，曲线变得平坦。由此可知，针对具体的隔振对象，如果采取措施不当，有可能达不到隔振效果，或者是隔振措施过度，花费的代价过大。

四、实验步骤

- (1) 在老师的指导下，按照实验原理框图连接实验仪器。
- (2) 仔细检查各仪器的连接导线有无短路、松动，功率放大器、信号源的输出控制旋钮是否在最小位置。确认无误后执行下步操作。
- (3) 依次打开信号源、功率放大器、计算机和采集箱的电源开关。
- (4) 启动动态信号采集软件，在软件界面上设置采样频率、电压范围、传感器灵敏度等参数，选择工程单位为加速度单位，即 m/s^2 。
- (5) 调节信号源输出旋钮和功率放大器输出旋钮，使激振器输出合适的振动幅值；
- (6) 按照表 1 指定的数值，依次改变信号源频率，同时在对应的频率下记录两个传感器的测量数据。
- (7) 根据表 1 计算传递率，再绘制隔振曲线，即 $\eta - \lambda$ 曲线。

表 1 被动隔振数据记录表

激振频率 (Hz)	基础振动 A(CH1) (m/s^2)	仪器振动 B(CH2) (m/s^2)	频率比($\frac{f}{f_n}$)	传递率 ($\eta = \frac{B}{A}$)
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				

五、实验数据及数据处理

1. 传感器信息

1CH 加速度传感编号：； 传感器灵敏度： pc/ms^{-2} ；

2CH 加速度传感编号：； 传感器灵敏度： pc/ms^{-2} ；

2. 实验模型参数

实验模型的固有频率 $f_n = \text{Hz}$ 。

3. 实验数据

隔振实验需要记录不同激励频率下基础和仪器振动的加速值，见表 1，根据这些值计算传递率数据并绘制隔振曲线，利用此曲线判定隔振效果。

六、思考题

针对一个具体的被动隔振对象，如何选择隔振系统参数（弹簧参数、阻尼参数等），请给出你能够采取的措施。

实验五悬臂钢尺振动实验

一、实验目的

1. 通过实验观察多自由度系统共振特点与振型，扩展思维；
2. 了解多自由度系统固有频率和振型测量的基本方法；
3. 用实验方法实测多自由度系统一阶至三阶振型及其对应的固有频率、节点位置。

二、实验对象、实验仪器和仪器连接框图

1. 实验对象：悬臂钢尺；
2. 实验仪器连接框图
3. 实验仪器
 - (1) 激振设备：信号源、功率放大器和激振器；
 - (2) 实验模型。

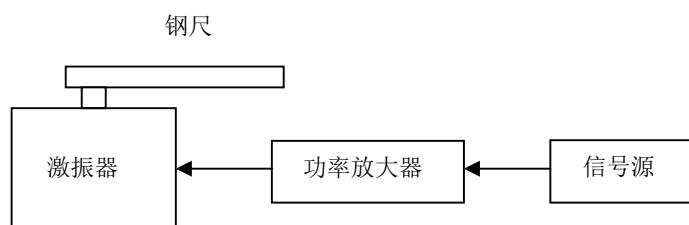


图1 钢尺振动实验仪器连接图

三、实验原理

对图1中的连续钢尺，它是一个连续体，理论上有无穷多个自由度、无穷多个固有频率和无穷多阶的固有振型，但要用实验的方法获取钢尺的高阶固有频率和振型就需要足够大的激励能量，实际上这是不可能的，因为激励设备能够提供的能量总是有限的。实验五中，通过目测能够明显观察到的钢尺固有振型的阶数为一阶到三阶，图2。

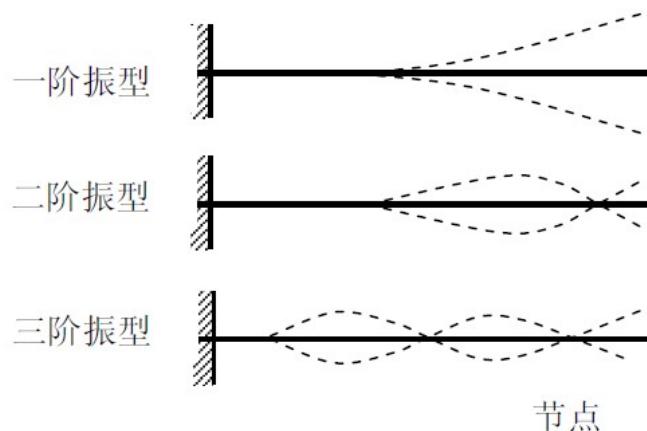


图2 悬臂梁的低三阶振型

四、实验步骤

- (1) 在老师的指导下，按照实验原理框图连接实验仪器。
- (2) 仔细检查各仪器的连接导线有无短路、松动，功率放大器、信号源的输出控制旋钮是否在最小位置。确认无误后执行下步操作。
- (3) 依次打开信号源、功率放大器的电源开关。
- (4) 将信号源输出频率设置为 10Hz，调节信号源输出旋钮和功率放大器输出旋钮，使激振器输出合适的振动幅值。
- (5) 缓慢增加信号源频率，当观察到一阶振型时，停止改变激振频率，在表 1 中记录一阶固有频率值和节点位置；
- (6) 继续缓慢增加信号源频率，当观察到二阶振型时，停止改变激振频率，在表 1 中记录二阶固有频率值和节点位置；
- (7) 继续缓慢增加信号源频率，当观察到三阶振型时，停止改变激振频率，在表 1 中记录三阶固有频率值和节点位置。

表 1 钢尺实验数据记录表

振型阶数	固有频率 (Hz)	节点位置			
		1	2	3	4
1					
2					
3					

五、思考题

从钢尺侧边观察，钢尺振型为曲线，如果把钢尺换成板和空间结构体，那么这些连续体，其固有振型是什么样的形状？

实验六动力消振实验

一、实验目的

- 1、了解动力消振原理，通过实验观察动力消振现象；
- 2、了解动力消振的条件。

二、实验对象、实验仪器和仪器连接框图

1. 实验对象：悬臂梁与偏心电机构成的实验模型；
2. 实验仪器连接框图

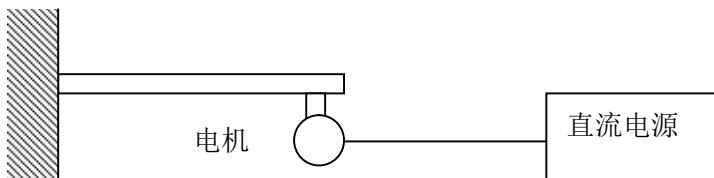


图 1 仪器连接框图

3. 实验仪器

- (1) 直流电源、直流电机；
- (2) 实验模型，钢尺、质量块。

三、实验原理

图 1 中的悬臂梁与偏心电机构成一个主振动系统，在某个激励频率下，其振动值很大。为了减少主振动系统的振动值，可以采取相关的措施。本实验中，主振动系统抽象为一个单自由度系统模型，用一个钢尺和一个质量块构成一个单自由度的子系统，将主振动系统和子振动系统组合构成一个二自由度系统。针对特定的激励力频率，如果子振动系统的固有频率合适，则主振动系统的振动值可以明显减小。

本实验中主振动系统和子振动系统构成的二自由度系统的力学模型可等效为图 2 的形式，其中 m_1 、 k_1 为主振动系统参数， m_2 、 k_2 为子振动系统参数。根据振动理论，图 2 系统的动力学微分方程为

$$\begin{aligned}m_1 \ddot{x}_1 &= -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) + H \sin \omega t \\m_2 \ddot{x}_2 &= -k_2 (x_2 - x_1)\end{aligned}$$

其解为：

$$x_1 = A \sin \omega t, x_2 = B \sin \omega t$$

$$A = \frac{c - \omega^2}{d}, B = \frac{hc}{d}$$

式中， $d = (a - \omega)(c - \omega) - bc$

$$a = \frac{k_1 + k_2}{m_1}, b = \frac{k_2}{m_1}, c = \frac{k_2}{m_2}, h = \frac{H}{m_1}$$

可见当 $\omega^2 = c = \frac{k_2}{m_2}$ 时，即当激振力的频率等于子系统的固有频率时，主系统的振幅

$A=0$ ，主系统的振动被消除了。

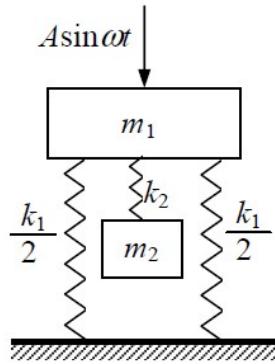


图 2 动力消振力学模型

四、实验步骤

- (1) 在老师的指导下，按实验仪器接线图将电机导线与电源连接；
- (2) 将直流电源电压输出旋钮旋转到最小位置；
- (3) 打开直流电源电源开关；
- (4) 缓慢旋转直流电源电压输出旋钮使直流电源电压缓慢增加，偏心电机转速缓慢增加，同时观察悬臂梁的振动；
- (5) 当悬臂梁振动幅值达到最大时，保持电源电压不变；
- (6) 将钢尺与质量块构成的子系统固定到主系统上，调节钢尺在主系统上的固定长度为合适值，可以观察到主振动系统的振动幅度大幅度减小，而子系统的振动幅值反而较大。从而达到了动力消振的效果。

五、思考题

动力消振有实际的工程应用，请给出动力消振在工程上的应用实例。

附录 1 振动传感器机械接收原理

振动传感器的作用是实现机电转换，其根本目的是进行振动的测量。测量振动时，测点要测量的机械量是作为振动传感器的输入量由机械部分接收，再由机电变换部分将其变换为电量。下面简要介绍传感器的工作原理。

1.1 相对式机械接收原理

相对式机械测振仪的工作原理如图 1.1 所示。在测量时，把仪器固定在不动的支架上，使触杆与被测物体的振动方向一致，并借弹簧的弹性力与被测物体表面相接触，当物体振动时，触杆跟随它一起运动，并推动记录笔杆在移动的纸带上描绘出振动物体的位移随时间的变化曲线，根据这个记录曲线可以计算出位移的大小及频率等参数。

由此可知，相对式机械接受部分所测得的结果是被测物体相对于参考体的相对振动，只有参考体绝对不动时，才能测得物体的绝对振动。这样就发生一个问题，当需要测量绝对振动，但又找不到不动的参考点时，这类仪器就无用武之地。例如，在行驶的机车上测量机车的振动，在地震时测量地面的振动及楼房的振动等等，都不存在一个不动的参考点。在这种情况下，必须用基于另外一种测量原理的测振仪进行绝对振动测量，即利用惯性式测振仪测量绝对振动。

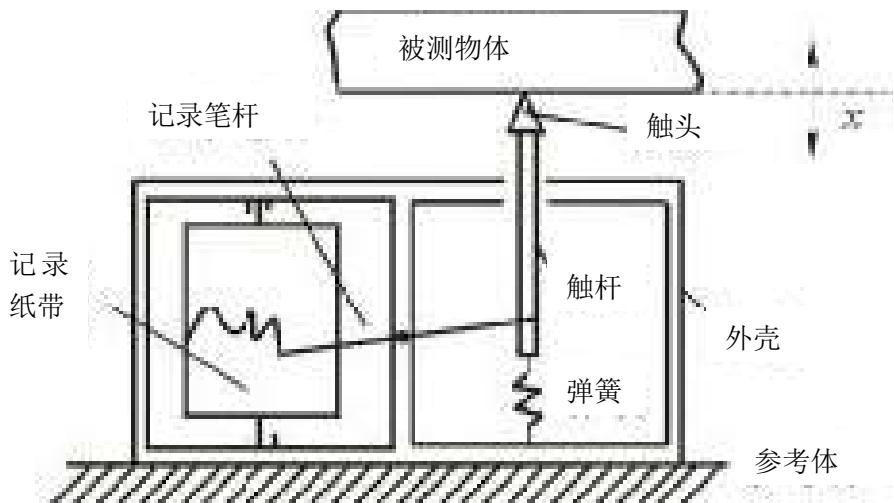


图 1.1 相对式机械接收原理示意图

1.2 惯性式机械接收原理

惯性式机械接收原理如图 1.2 所示。惯性式机械测振仪测振时，是将测振仪直接固定在被测振动的物体上，当传感器外壳随被测物体振动时，由弹性支承的惯性质量块将与外壳发生相对运动，则装在质量块上的记录笔就可以记录下质量元件与外壳的相对振动位移幅值，然后利用惯性质量块与外壳的相对振动位移的关系式即可求出被测物体的绝对振动位移。

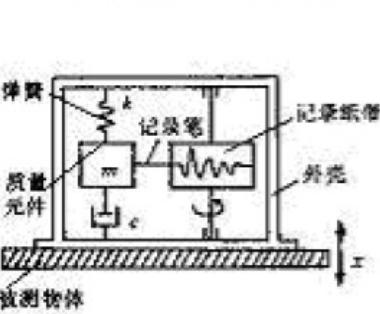


图 1.2 惯性式机械接收原理示意图

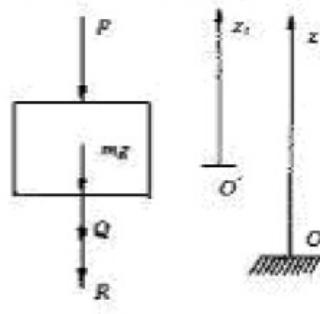


图 1.3 惯性质量块受力图

1.2.1 惯性式测振仪动力分析

为研究惯性质量块与外壳的相对运动规律, 取惯性质量块为研究对象, 惯性质量块受力图如图 1.3 所示。设被测物体振动的位移为 x (相对静止坐标系), 惯性质量块相对外壳的振动位移为 x_r , 动坐标系固结在外壳上, 静坐标系与静止地面固结, x 为牵连运动位移, 则质量块的运动微分方程为

$$m \ddot{x}_r + c \dot{x}_r + k x_r = -m \ddot{x} \quad (1.1)$$

设 $2n = c/m$, $\omega_n = \sqrt{k/m}$, 其中 n 为衰减系数, ω_n 为弹簧与质量块构成的振动系统的固有频率。将这些参数代入式(1.1)并整理后得

$$\ddot{x}_r + 2n \dot{x}_r + \omega_n^2 x_r = -\ddot{x} \quad (1.2)$$

如果被测物体做简谐振动, 即

$$x = x_m \sin \omega t \quad (1.3)$$

则式 (1.2)的稳态解为

$$x_r = x_{rm} \sin(\omega t - \phi) \quad (1.4)$$

其中:

$$x_{rm} = \frac{\lambda^2 x_m}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4\zeta^2\lambda^2}}, \quad \phi = \arctg \frac{2\lambda\zeta}{1-\lambda^2} \quad (1.5)$$

式(1.5)中的 $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ 为无量纲频率比, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ 为无量纲衰减系数, 也称阻尼比, ω 为振动信号频率。

1.2.2 惯性式加速度传感器原理

利用加速度和位移之间的关系, 由式 (1.3) 可得被测量物体的加速度

$$\ddot{x} = x_m \omega^2 \sin(\omega t + \pi) = \ddot{x}_m \sin(\omega t + \pi) \quad (1.6)$$

式中, $\ddot{x}_m = x_m \omega^2$ 加速度峰值。比较式 (1.3) 和式 (1.6) 可知, 加速度的相位角超前于位移 180° 。将式 (1.6) 改写为

$$\frac{x_{rm}}{\ddot{x}_m} \omega_n^2 = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + 4\zeta^2\lambda^2}} \quad (1.7)$$

以 λ 为横坐标, $x_{rm}\omega_n^2/\ddot{x}_m$ 为纵坐标, 将式 (1.7) 绘成曲线, 则得到传感器的相对振动幅值和被测量绝对加速度幅值之比之间的关系, 如图 1.4 所示。

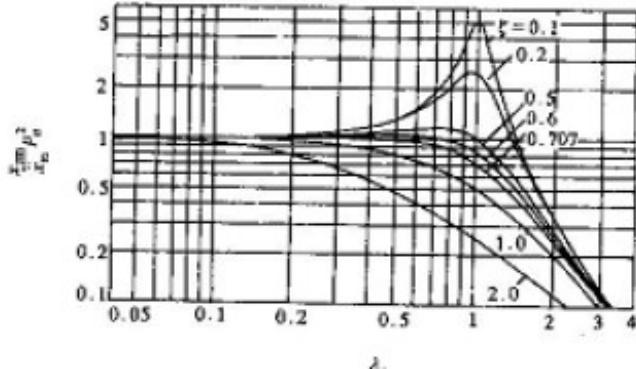


图 1.4 惯性式加速度传感器幅频响应曲线

由图 1.4 可以看出, 当 $\lambda \ll 1$, $\zeta < 1$ 时, $x_{rm}\omega_n^2/\ddot{x}_m \rightarrow 1$, 于是, 式 (1.4) 可以表示为

$$x_r = \frac{\ddot{x}_m}{\omega_n^2} \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.8)$$

比较式 (1.4) 和式 (1.8) 可以发现, 传感器相对振动的位移表达式和被测物体的加速度表达式是非常相似的, 仅仅存在两点差异: ①传感器的相对振幅是被测加速度振幅的 $1/\omega_n^2$ 倍, 当传感器确定后, ω_n 是一个常数; ②在相位上, 相对振动位移的时间历程落后于被测加速度时间历程的相位差为 $\varphi_a = \varphi + \pi$ 。由此可知, 如果加速度传感器的输出信号与相对振幅成正比, 那么在测量系统中, 记录到的振动波形将与被测物体的加速度波形成正比, 这样就构成了一个加速度传感器。

附录 2 压电式加速度传感器的机电变换原理及灵敏度

某些晶体(如人工极化陶瓷、压电石英晶体等)在一定方向的外力作用下或承受变形时,它的晶体表面或极化面上将有电荷产生。这种从机械能到电能的变换称为正压电效应,而从电能到机械能的变换称为逆压电效应。

人工极化陶瓷,在外电场作用下,会使自发极化方向顺着电场方向,如图 2.1。当外电场取消后,其自发极化方向会有部分改变,但最后在原电场方向将表现出剩余极化强度。

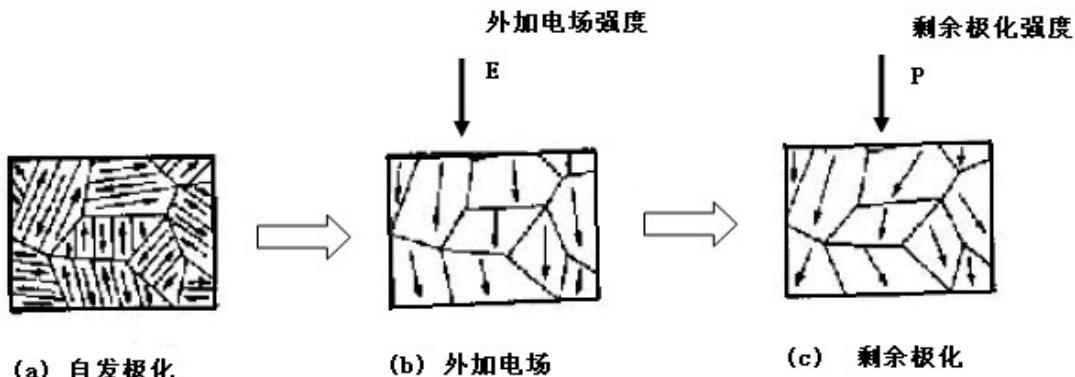


图 2.1 压电陶瓷晶体的极化过程

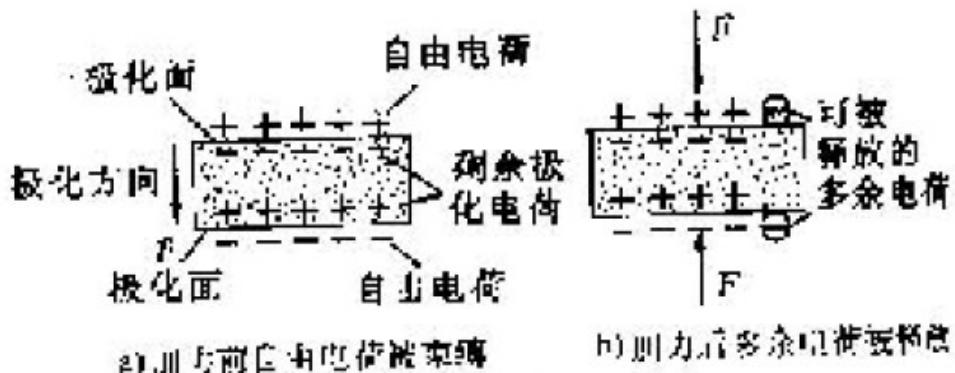


图 2.2 正压电效应

经过外加电场的极化处理后,陶瓷材料具有了剩余极化强度,但这不能从极化表面测量出任何电荷,因为在极化面上的自由电荷被极化电荷所束缚,它们不能离开极化面,如图 2.2(a)所示,因此,不能量得其极化强度。当有外力作用时,如图 2.2 (b) 所示,晶体出现变形,使得原极化方向上的极化强度减弱,这样被束缚在电极面上的自由电荷就有部分被释放,这就是所说的压电效应。设 q 为释放的电荷, F 为作用力, A 为电极化面面积,则以下关系成立

$$\frac{q}{A} = d_x \frac{F}{A} \text{ 或 } q = d_x F \quad (2.1)$$

式 (2.1) 中, d_x 为压电系数,单位为 C/N(库伦/牛顿)。

理论与实验表明,对于压电晶体,若受力方向不同,产生电荷的大小也不同。在压电晶

体弹性变形范围内，电荷密度与作用力之间的关系是线性的。利用压电晶体的压电效应，可以制成测力传感器。在振动测量中，由于 $F = ma$ ，所以压电式传感器是加速度传感器。

压电式加速度传感器最常见的类型有三种：中心压缩式、剪切式和三角剪切式。以下以中心压缩式压电加速度传感器为例，对压电式加速度传感器的结构和工作原理加以介绍。

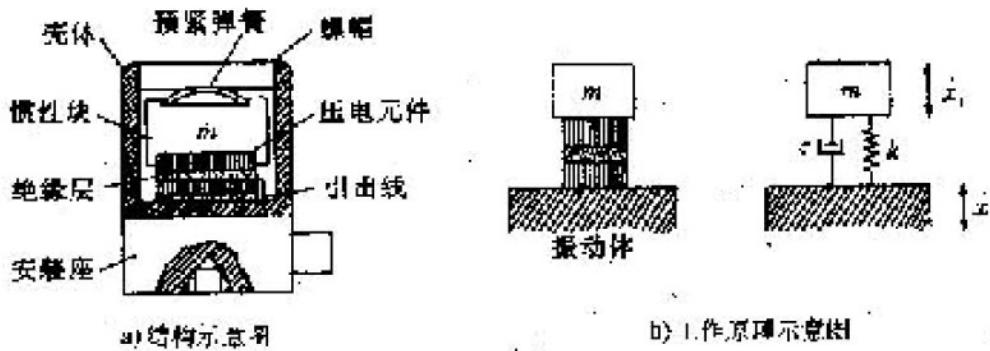


图 2.3 压电式加速度传感器结构

在图 2.3 (a) 中，中心压缩型压电加速度传感器的敏感元件由两个压电片构成，其上放有一重金属制成的惯性质量块，用一预紧硬弹簧板将惯性质量块和压电元件片压紧在基座上，

整个组件就构成了一个惯性式传感器。加速度传感器的固有频率 $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ ， k 为弹簧板

刚度， m 为质量块质量。

根据前面介绍的惯性式加速度传感器工作原理，为保证测量精度，被测振动的频率 f 应该远远低于加速度传感器的固有频率 f_n ，即 $f \ll f_n$ 。很明显，由于惯性质量块和基座之间的相对运动，压电元件就受到与之相应的交变压力的作用，如图 2.3 (b) 所示，所以加速度传感器就能输出与被测振动加速度成比例的电荷。这就是压电式加速度传感器的工作原理。

应用压电式传感器必须注意以下几个问题。

2.1 压电式加速度传感器灵敏度

压电加速度传感器的灵敏度有两种表示方：一个是电压灵敏度 S_v ，另一个是电荷灵敏度 S_q 。传感器的电学特性等效电路如图 2.4 所示。

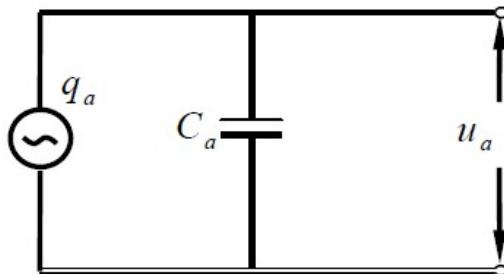


图 2.4 压电式加速度传感器电学等效电路

如前所述，压电片上承受的压力 $F = ma$ ，由公式 (2.1) 可知，在压电片的工作面上产

生的电荷 q_a 与被测振动的加速度 a 成正比，即

$$q_a = S_q a \quad (2.2)$$

其中比例系数 S_q 就是压电式加速度传感器的电荷灵敏度，量纲为 $\text{PC}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

由图 2.4 可知，传感器的开路电压 $u_a = q_a / C_a$ ，式中 C_a 为传感器的内部电容。对一个特定的传感器来说， C_a 为一个确定值，所以

$$u_a = \frac{S_a}{C_a} a \text{ 即 } u_a = S_V a \quad (2.3)$$

也就是说，加速度传感器的开路电压 u_a 也与被测加速度 a 成正比，比例系数 S_V 就是压电式加速度传感器的电压灵敏度，量纲是 $\text{mv}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2.2 压电加速度传感器的频率特性

典型的压电加速度传感器的频率特性曲线如图 2.5 所示。该曲线的横坐标是对数刻度的频率值，而纵坐标则是相对电压灵敏度，就是被标定的加速度传感器的电压灵敏度和一个标准加速度传感器的电压灵敏度之比。从图中可以看出，压电式传感器的工作频率范围很宽，只有在加速度传感器的固有频率 f_n 附近灵敏度才发生急剧变化。因此，就传感器本身而言，固有频率 f_n 是其主要参数。通常情况下，一般几何尺寸较小的加速度传感器有较高的固有频率，但灵敏度低。权衡传感器的灵敏度和可以使用频率范围这一对矛盾，到底如何选择传感器，这取决于测量要求。但就一项精确的测量而言，宁肯选取较小灵敏度的加速度传感器也要保证有足够的有效频率范围。

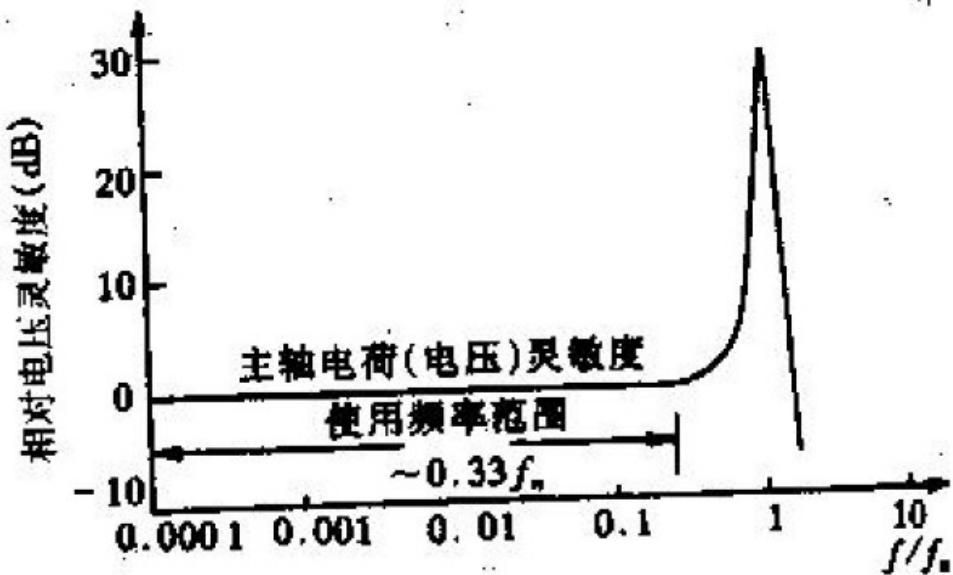


图 2.5 压电式加速度传感器的频率特性曲线

2.3 几何尺寸和重量

几何尺寸和重量最主要取决于被测物体对传感器的要求,因为较大的传感器对被测物体有较大的附加质量,对刚度较小的被测物体来说是不适宜的。总的来说,压电式加速度传感器的尺寸和重量都是比较小的。一般情况下,其影响可以忽略不计。

2.4 传感器的横向灵敏度

横向灵敏度也称为横向效应,它是压电式加速度传感器的一个重要性能指标。由于横向灵敏度的存在,传感器的输出不仅仅是其主轴方向的振动,而且与其主轴相垂直方向的振动也反映在输出之中。这将导致所测量方向上的振动量值和相位产生误差。

横向灵敏度主要是由于最大灵敏度轴 Oz' 与传感器的几何轴线 Oz 不重合而引起的,如图 2.6 所示。这是由于传感器加工、安装上的间隙误差及极化条件所造成的。最大灵敏度轴线与几何轴线间的夹角为 θ ,最大的横向灵敏度表示为

$$S_t = \frac{S_{qt}}{S_{qz}} = \tan \theta \quad (2.4)$$

对于每个加速度传感器来说,横向灵敏度是通过单独校准确定的,它的数值为 1% ~ 4% 不等。

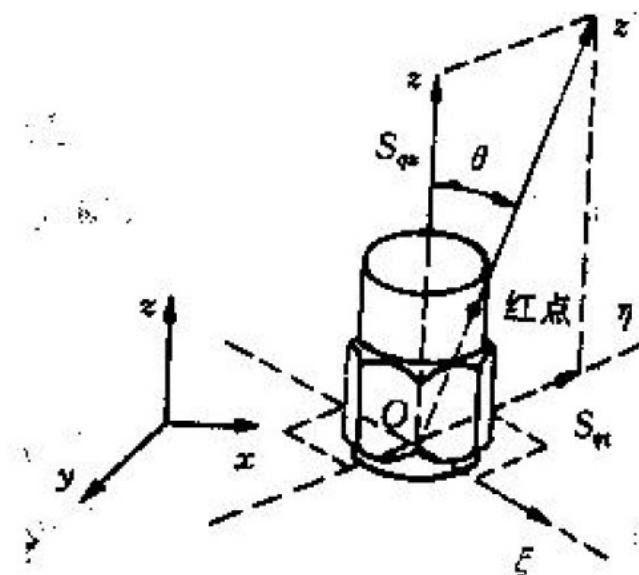


图 2.6 横向灵敏度

2.5 环境影响

环境温度直接影响加速度传感器的灵敏度。因为标定灵敏度是在室温 20°C 的条件下测定的,根据使用环境温度的不同,可按每个传感器出厂时给出的温度修正曲线修正其灵敏度。使用加速度传感器时,不允许超过许用温度,否则会造成压电元件的损坏。另外,温度瞬变也会使测量数据漂移造成误差。电缆噪声和基座应变都会造成虚假数据。其它如核辐射、强磁场、湿度、腐蚀与强声场噪声等也会影响测量结果。

2.6 加速度传感器的安装

图 2.7 和表 2.1 列举了传感器的几种安装方法及其相应的测量频率上限。但要注意,用

螺栓连接时，螺栓不能紧压加速度传感器的底部，否则会造成基座变形而改变其灵敏度。

安装加速度传感器时，应将加速度传感器作绝缘安装或把电荷放大器浮地绝缘，以防止形成接地回路交流声。

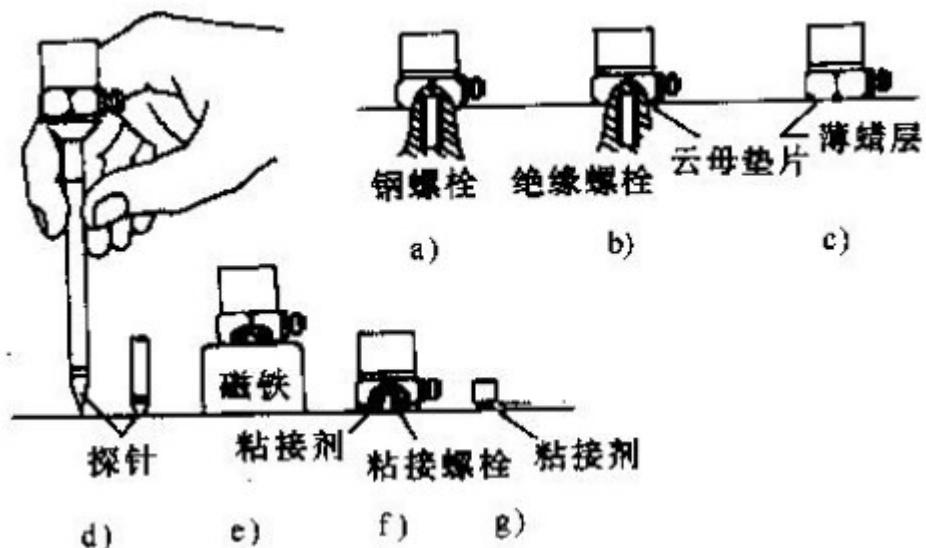


图 2.7 加速度传感器的安装方法

表 2.1 加速度传感器的安装方式、许用温度及频响范围

安装方式	许用温度 (°C)	频响范围 (kHz)
螺栓连接，结合面涂薄层硅脂	> 250	10
绝缘螺双连接，结合面涂薄层硅脂	250	8
蜂腊粘合	40	7
磁座吸合	150	1.5
触杆手持	不限	0.4

附录 3 振动测试系统标定

为了保证振动测量的可靠性和精度，必须对振动传感器和测量仪器进行标定。振动测试仪器标定的主要内容如下：

- 1) 灵敏度，即输出量与被测振动量之间的比值；
- 2) 频率特性，即在所使用频率范围内灵敏度随频率的变化关系，包括幅频特性和相频特性；
- 3) 幅值线性范围，即灵敏度随幅值的变化为线性的范围；
- 4) 横向灵敏度和环境灵敏度等。

对于一般使用单位，通常只需对传感器的主要参数，如灵敏度和频率特性进行标定，并且只有在下述两种情况下才进行标定：传感器或测试系统每年一次的定期标定；传感器或测试系统出厂前或维修后进行的标定。

一般来说，标定部门分为两级：国家级和地方级。国家级标定部门，一般采用绝对标定法对标准传感器及测试系统进行标定，标定的精度很高，一般可达 $0.5\% \sim 2.0\%$ 。地方级标定部门以标准传感器作为标准，用相对标定法对工作传感器进行标定，精度一般可达 5% 。

3.1 分部标定与系统标定

3.1.1 测试仪器的标定

分部标定法是把测振传感器、放大器和记录设备放在全套仪器测量系统中，分别测定各段的灵敏度，然后把它们组合起来，求得测振仪最初输入量与最后输出量的关系——标定值。分部标定主要分三级别：第一级是传感器的标定，即标定外界输入振动量与传感器输出物理量之间的关系；第二级是放大器的标定，标定输入物理量与放大器输出电压、电流之间的关系；第三级是记录仪器的标定，标定输入电压、电流与转化成记录纸上的波形之间的关系。分部标定原理如图 3.1 所示。

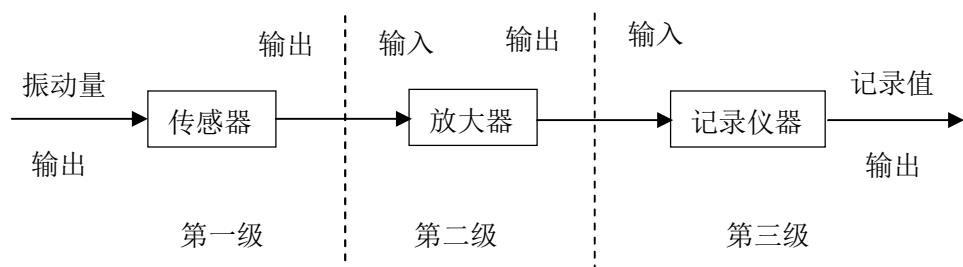


图 3.1 分部标定方框图

分部标定的优点在于它比较灵活，例如，只要遵循匹配关系，就可以方便地用备用仪器去更换测量系统中失效的传感器或放大器，而不必重新进行标定工作。本方法的缺点是对每一环节的标定要求相对要高些。

3.1.2 测振仪器的系统标定

对整个测量系统进行标定，直接确定输出记录量与输入机械量之间的关系，其示意图如图 3.2 所示。系统标定的步骤较简单，使用也较方便，但因测量系统是配死的，所以，如果要重新配套或者更换某一环节（如更换传感器或放大器），则必须重新进行标定。

具体使用中也可采用介于上述两者之间的标定方法,即把测量系统分成传感器与后续仪器两部分分别加以标定,图 2.3 所示。此外,放大器中配有一幅度恒定的标定电信号,称为“模拟传感器”,它可随时用来检验和标定放大器及记录仪器,在测试现场使用十分方便。

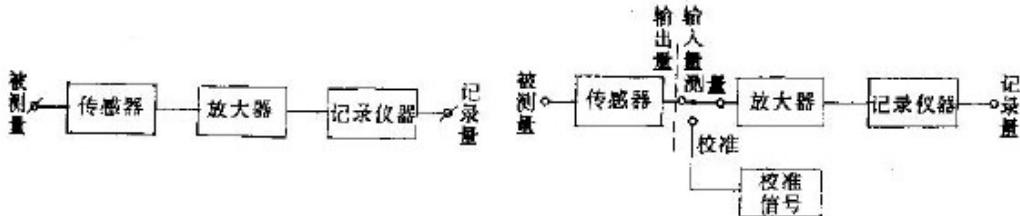
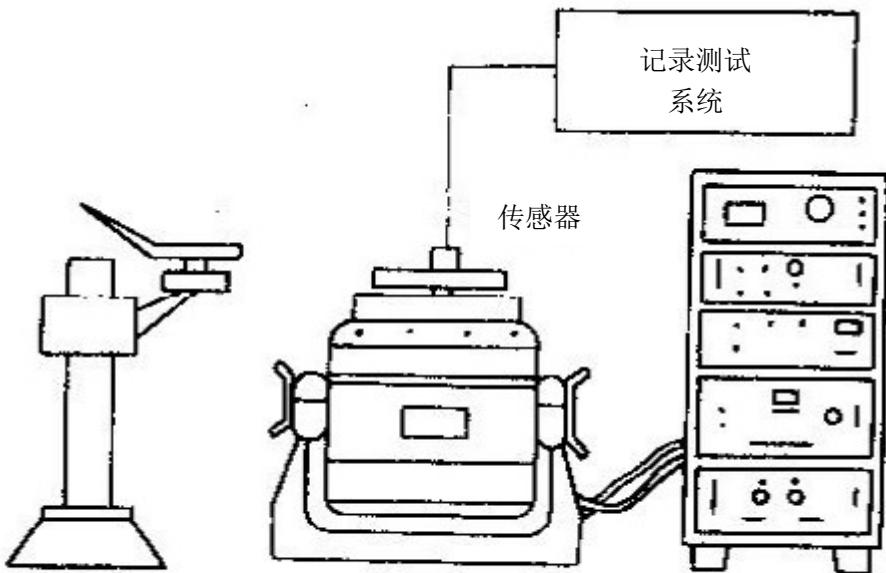


图 4.2 系统标定示意图图 4.3 用模拟传感器标定测量系统

3.2 绝对标定法

绝对标定法用于位移的测量时,是用精度较高的读数显微镜或激光测振仪测出振幅,用频率计测出振动频率。若用读数显微镜在低于 50Hz 测量位移时,精度可达 $\pm 0.5\% \sim \pm 1\%$ 。若用激光测振仪测位移时,标定测试频率范围可以扩大,精度也可以提高。绝对标定法示意如图 3.4 所示。



读数显微镜或激光测振仪

图 3.4 绝对标定法示意图

当标定位移型传感器灵敏度时,先把振动台调到某一个固定频率,再调节振幅于某一个固定数值,利用读数显微镜或激光测振仪读出振幅值,并测出被标定的传感器的输出量,由此就可算出灵敏度,即得到单位位移传感器的输出量。

当标定速度传感器和加速度传感器时,则调节振动台位移幅值 A ,使得振动速度或加速

度为某一固定值，如 $v=1\text{cm/s}$ 或 $a=9.8\text{m/s}^2$ 时，测得这时传感器的输出量，即可求得它们的真实灵敏度。

作频响曲线标定时，固定振动台各参量的幅值，改变频率，然后测出对应的各个输出数据，即可绘出它们的频响曲线。

当标定它们的线性度时，可使振动台频率不变，而改变振幅值，并测出对应的输出量，绘制成曲线，即可求出它们的线性度曲线。

3.3 相对标定法

3.3.1 相对标定法的原理和方法

相对标定法是将两个传感器(或测振系统)进行比较而确定被标定传感器(或测振系统)性能的标定方法。两个传感器中，一个是被标定的传感器，称为工作传感器，另外一个是作为参考基准的传感器，称为参考传感器或标准传感器，它是经过绝对标定法或高一级精度的相对标定法标定的。

图3.5为用相对标定法确定传感器灵敏度的示意图。被标定的工作传感器与标准的传感器都安装在振动台上经受相同的振动。设标准传感器的输出值为 u_0 ，被标定的传感器的输出值为 u 、临时设置的灵敏度为 S_0 ，则工作传感器的灵敏度 $S = S_0 \cdot u / u_0$ 。改变振动台的频率并重复上述实验，即可求得传感器的幅频特性。如测量两个传感器输出的相位差，再根据标准传感器的相频特性，就可求出被标定的工作传感器的相频特性。

以上改变频率的实验也可采用频率扫描的办法来进行。

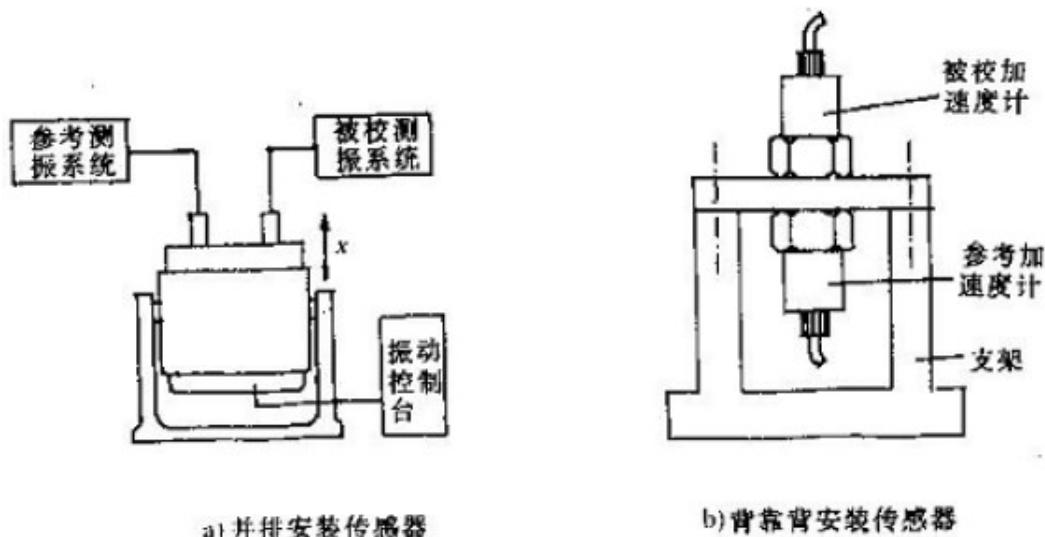


图3.5 相对标定法基本原理示意图

相对标定法中关键的一点是两个传感器必须感受相同的振动。对于图中两个传感器并排安装的形式，必须十分注意振动台振动的单向性和台面各点振动的均匀性，安装时还应注意使两个传感器的共同重心落在台面的中心线上。若将两个传感器的安装位置互换，如果他们的输出电压之比不变，就表明它们感受到的振动确实相同。一种所谓“背靠背”的安装方式，

能较好地保证两个传感器感受到相同的振动激励，标定时应优先加以采用。

2.3.2 速度传感器横向灵敏度的测定

加速度传感器横向灵敏度通常也采用相对方法来测定。为此要用一个特殊的夹具把被测加速度传感器的灵敏度轴方向安装得与振动台振动方向严格垂直，如图 3.6 所示。通过与参考传感器的比较，就可测定被测传感器的横向灵敏度。由于横向灵敏度是有方向的，所以在测量时必须用特制转台把被测加速度传感器绕其灵敏度轴转一系列角度值作重复测定，最后就得到各个方向的横向灵敏度。

测量横向灵敏度的最大困难在于必须把振动台台面的横向运动控制在轴向振动的百分之几以下，否则测量就会失去标定的意义。

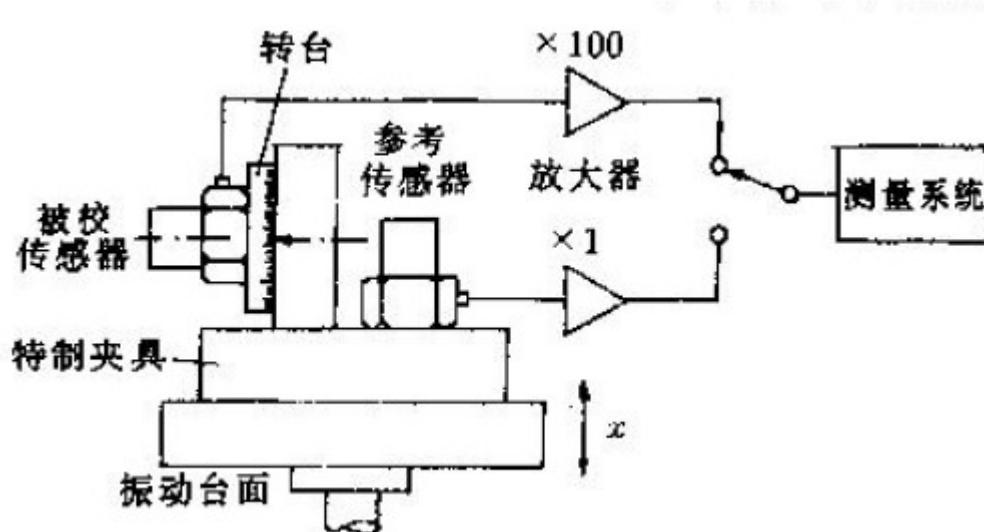


图 3.6 横向灵敏度的标定