

## 实验一 测试系统的组成

### 一、实验目的

1. 通过振动测试实验系统，了解一般测试系统的基本组成及测试工作各环节的内容。
2. 学会用磁电速度传感器测量简谐振动速度、位移值。
3. 了解虚拟测试仪器的概念及特点。

### 二、实验组成

一般测试系统的基本组成如图 1-1 所示：

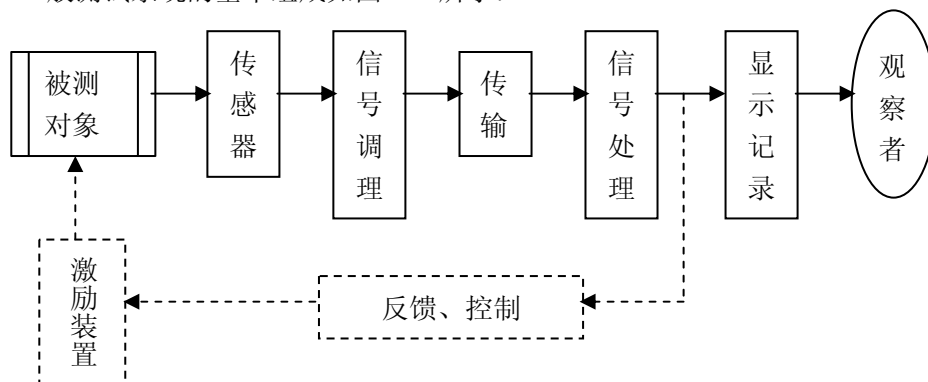


图 1-1

在实际测试中，并非所有测试系统都具备图 1-1 中的所有环节，尤其是虚线连接的环节和传输环节。

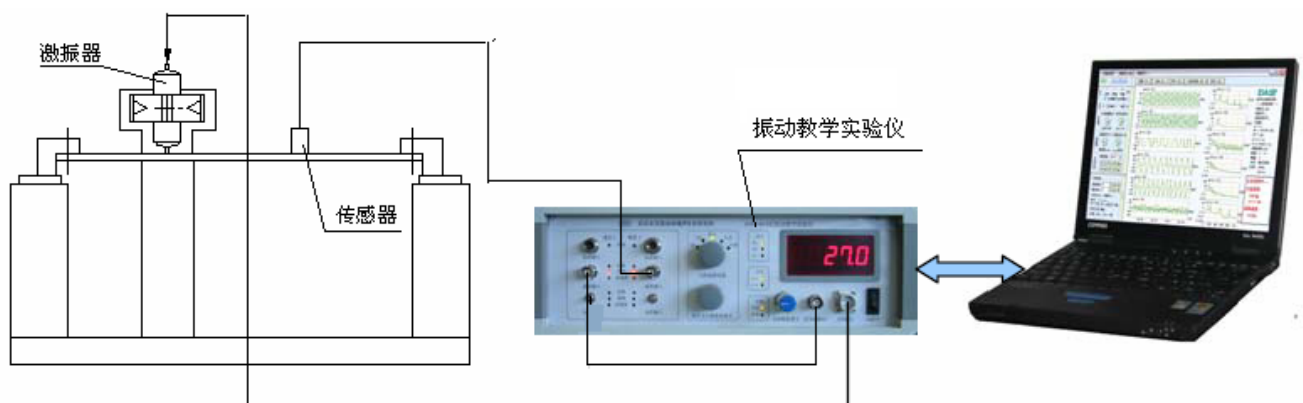
本实验系统为振动测试系统，即对被测对象的振动信号进行测量及分析处理。由激振部分、测振部分和虚拟式测试分析仪器三大部分组成：

激振部分：对被测对象结构施加正弦激励，使其产生振动。

测振部分：对振动信号进行测量，包括振动位移、速度、加速度的测量。

虚拟式测试分析仪器：对振动信号经 A/D 采集后进行波形显示、数据记录，时域及频域分析。

实验装置组成如下图所示：



### 三、简谐振动幅值的表示

简谐振动信号基本参数包括：频率、幅值、和初始相位，幅值的测试主要有三个物理量：位移、速度和加速度。在振动测量中，有时不需要测量振动信号的时间历程曲线，而只需要测量振动信号的幅值。

根据简谐振动方程，设振动位移、速度、加速度分别为  $x$ 、 $v$ 、 $a$ ，其幅值分别为  $X$ 、 $V$ 、 $A$ ：

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

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega B \cos(\omega t - \varphi)$$

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 B \sin(\omega t - \varphi)$$

式中： $B$ ——位移振幅       $\omega$ ——振动角频率       $\varphi$ ——初相位  
故有：

$$X = B$$

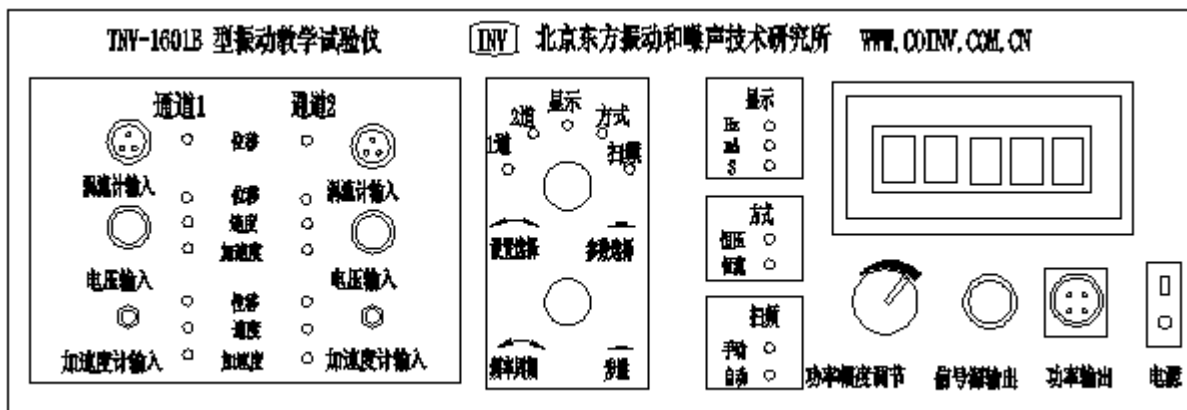
$$V = \omega B = 2\pi f B$$

$$A = \omega^2 B = (2\pi f)^2 B$$

振动信号的幅值可根据上式中位移、速度、加速度的关系，分别用位移传感器、速度传感器或加速度传感器来测量，也可利用测振仪中的微分、积分功能来测量。

## 五、实验过程

- 1、熟悉测试系统搭建各环节，搞清信息流向（实验仪及软件的具体操作请参阅桌面“测试实验仪器使用说明”）：



- 1) 硬件接线关系：实验仪面板图如上所示。激振信号源“功率输出”接电动式激振器，对被测对象施加交变正弦激振力，使系统产生振动；同时“信号源输出”接测振仪通道 1 的“电压输入”。速度传感器的输出端接测振仪通道 2 的“电压输入”，以测量对象的振动值。虚拟分析仪通过 USB 接口接收到信号源（通道 1）与测振仪输出（通道 2）的两路信号并实时显示。
- 2) 开启“振动教学实验仪”电源开关，信号发生器设置：信号频率取 40Hz 左右，输出电流调节至 100mA。双通道测振仪的测量设置：通道 1 选择速度档，通道 2 也选择速度档。  
（“设置选择及参数选择”旋钮：该旋钮是一个复用钮，既能旋转也可推压。当左右旋转时，上方的 5 个指示灯依次点亮。分别进入“1 道”、“2 道”、“显示”、“方式”、“扫频”等 5 个设置状态。使用推压功能时，则分别进入这 5 个设置状态的下一级子菜单。）
- 3) 运行桌面“INV1601 振动教学系统”软件，在“分析模块选项”窗口，双击“双通道”，进入主分析窗口，可观察 1、2 两输入通道波形显示均为正弦波（采样参数中两通道单位都取 mV）。  
**注意：虚拟分析仪的通道 1、2 与实验仪通道 1、2 相对应。**

4) 结合实验装置组成图搞清硬件接线及信息流向,熟悉相关仪器使用;对照组成框图了解本系统被测对象是谁?搭建怎样的测试框架?如何获取被测信号并进行测量?并画出系统组成框图。

## 2、测量通道 2 信号振动速度值:

在进行振动测量时,传感器通过换能器把加速度、速度、位移信号转换成电信号,经过放大器放大,再通过硬件 AD 模块将模拟量转换成数字信号,采集到的数字信号为电压变化量,通过软件在计算机上显示出来,这时读取的数值为电压值,通过标定值进行换算,就可计算出振动量的大小。

关系式为: **实测物理量=输出电压(mV)÷标定值K。**

其中标定值 K 在 DASP 软件参数设置表中定义为:

$$K = K_{CH} \times K_E$$

$K_{CH}$  ——传感器灵敏度;  $K_E$  ——实验仪各档输出增益。

本测试装置使用的磁电式速度传感器灵敏度为 280 mV/cm/s,速度档线性输出增益为 1,将通道 2 的测量单位设为速度单位,观察显示的速度信号波形,并用幅值计读出速度值 V。

## 3、测量通道 2 信号的振动位移值:

请依据实验条件,规划测量方案,用分析仪的幅值计读出位移值 X(激励条件不变)。

# 六、思考题

1、实验数据: 测量条件 频率 f= Hz, 输出电流 I= mA

|            | 实测值 | 公式计算值 |
|------------|-----|-------|
| 速度值 (cm/s) |     |       |
| 位移值 (μm)   |     |       |

根据测量的速度、位移值,分别按公式计算位移、速度值,并填入上表。实测值与计算值有无差别?若有试分析原因?

2、请列举测试、测控系统实例各一个,并以框图形式介绍其系统构成。

## 实验二 信号分析实验

### 一、实验目的

1. 掌握正弦信号频谱分析的特点。
2. 理解计算机信号采集过程、掌握采样定理。
3. 通过对声音信息采集分析理解频谱分析的应用。

### 二、实验原理

信号分析就是研究信号本身的特征。对信号进行分析处理,可用模拟信号处理系统和数字信号处理系统来实现。利用计算机的数字信号处理技术由于其稳定、快速、灵活、处理信息量大等优越性,已逐渐取代使用电路的模拟信号处理方式。

#### 1、频谱分析:

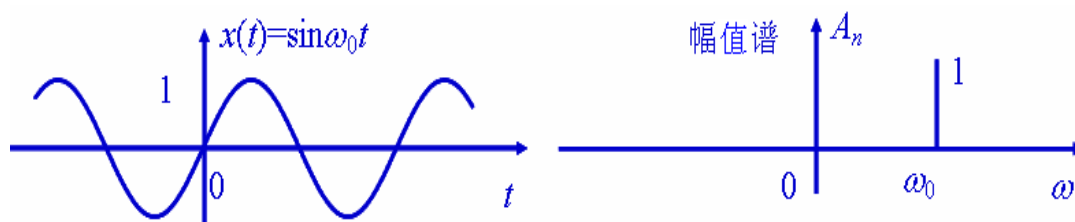
为解决不同的问题,往往需要揭示信号不同方面的特征,可采取不同的描述方式。通常以三个变量域来描述信号,即时域描述、幅值域描述和频率域描述。在相应的变量域中对信号进行分析即是时域分析、幅值域分析和频域分析。

频谱分析是信号频域分析的一种。傅立叶变换是信号频谱分析中常用的一个工具,它把一些复杂的信号分解为无穷多个相互之间具有一定关系的正弦信号之和,并通过对各个正弦信号的研究来了解复杂信号的频率成分和幅值。对信号作频谱分析的设备主要是频谱分析仪或软件,其工作方式有模拟式和数字式二种。模拟式频谱分析仪以模拟滤波器为基础,从信号中选出各个频率成分的量值;数字式频谱分析仪以数字滤波器或快速傅立叶变换(FFT)为基础,实现信号的时-频关系转换分析。受算法的限制,FFT对数据个数要求为2的幂乘,工程上常取的点数有512、1024等。

频谱是构成信号的各频率分量的集合,它完整地表示了信号的频率结构,即信号由哪些谐波组成,各谐波分量的幅值大小及初始相位,从而揭示了信号的频率信息。

工程上习惯将计算结果用图形方式——频谱图表示:以频率为横坐标的幅值、相位变化图,即:幅值谱——幅值-频率图,相位谱——相位-频率图。又常以幅值谱作为频谱分析的主要手段。

下图为一角频率为 $\omega_0$ 的正弦信号时域波形图及幅值谱图。



#### 2、采样定理:

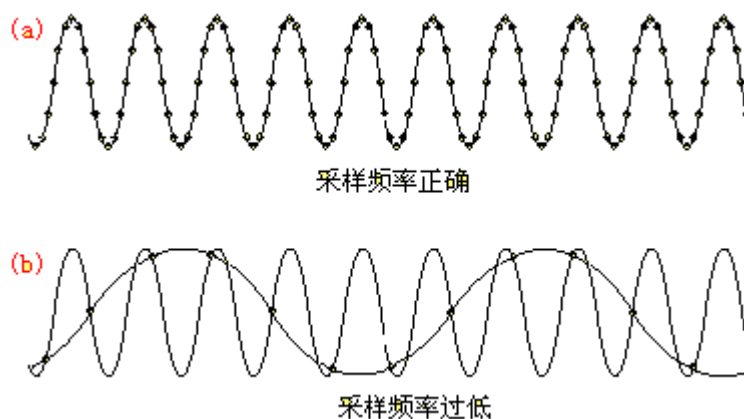
数字信号是由模拟信号离散化后得到的,包括对时间的离散化——采样和对信号大小的离散化——幅值量化,这个过程即为A/D转换。采样是从固定的时间间隔( $\Delta t$ )依次抽取连续信号不同时刻瞬时幅值的过程,称 $\Delta t$ 为采样间隔, $f_s = 1/\Delta t$ 为采样频率。信号的采样频率 $f_s$ 与信号的截止频率 $f_c$ 之间应满足采样定理: $f_s \geq 2f_c$ 。

采样定理提出了一个问题,即当对时域模拟信号采样时,应以多大的采样周期(或称采样时间间隔)

采样，方不致丢失原始信号的信息？或者说，可由采样信号无失真地恢复出原始信号？

- 采样间隔太小（频率过高）——对定长的时间记录来说，数字序列很长，计算工作量迅速增大，则可处理的时间历程缩短，会产生较大的误差；
- 采样间隔过大（频率过低）——丢掉有用信息。

当采样信号的频率低于被采样信号的最高频率时，采样所得的信号中混入了虚假的低频分量，这种现象叫做频率混叠。下面从时域信号波形来看这种情况。(a)是频率正确的情况，以及其复原信号；(b)是采样频率过低的情况，复原的是一个虚假的低频信号。



为了保证采样后的信号能真实地保留原始模拟信号的信息，采样信号的频率必须至少为原信号中最高频率成分的2倍。这是采样的基本法则，称为采样定理。需要注意的是，在对信号进行采样时，满足了采样定理，只能保证不发生频率混叠，对信号的频谱作逆傅立叶变换时，可以完全变换为原时域采样信号，而不能保证此时的采样信号能真实地反映原信号。工程实际中采样频率通常大于信号中最高频率成分的5到10倍。

### 3、数字处理器作频谱分析的步骤：

对一个确定性连续信号  $x(t)$  作 FFT，一般按以下步骤进行：

- (1) 估计  $x(t)$  的截止频率  $f_c$  或按所需的最高频率对  $x(t)$  作低通滤波。
- (2) 确定采样间隔  $\Delta t$  或采样频率  $f_s$ 。通常选用采样频率大于信号截止频率 5~10 倍。
- (3) 确定  $x(t)$  的一个样本的最小采样长度  $N_{min}$ ，并按 2 的整数次幂圆整采样点数  $N$ 。
- (4) 用快速傅立叶变换 (FFT) 计算：

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (k=0,1,2,\dots,N-1) \quad \text{得到确定性信号的傅立叶谱。}$$

$$\text{其对应的离散频率值为} \quad f_k = \frac{f_s}{N} \cdot k$$

## 三、实验装置

DASP 分析软件、声音分析软件及麦克风一套。

## 四、实验过程

1. 对已知正弦信号以不同的采样条件进行频谱分析：

由 DASP 软件系统提供的信号发生器取一 200 Hz 正弦信号（幅值取 4000mV）。

采样点数  $N=1K$  保持不变，分别取以下两种采样频率：(1)  $f_s=2560\text{Hz}$ ；(2)  $f_s=256\text{Hz}$ 。计算出两种情况下的总采样时间  $T$ 、频率分辨率  $\Delta f$ 、最大分析频率  $F_{\max}$ ，填入下表：

|                        |      |     |
|------------------------|------|-----|
| 采样频率 $F_s$ (Hz)        | 2560 | 256 |
| 采样点数 $N$ (个)           | 1K   | 1K  |
| 采样间隔 $\Delta t$ (ms)   |      |     |
| 采样总时间 $T$ (s)          |      |     |
| 采到点数/信号周期 (个)          |      |     |
| 频率分辨率 $\Delta f$ (Hz)  |      |     |
| 最大分析频率 $F_{\max}$ (Hz) |      |     |

按如下步骤进行采集与分析（软件具体操作见桌面文档“测试实验仪器使用说明”）：

- 1) 运行桌面“INV1601 振动教学系统”软件，在软件提供的信号发生器中选“通道 1”生成 200Hz、4000mV 的正弦信号。
- 2) 在“分析模块选项”窗口，双击“单通道”，进入主分析窗口。
- 3) 功能操作区选“采样参数”设置好采样频率、采样点数；选“开始”进行采集，等待片刻点“停止”结束采样。
- 4) 观察信号时域波形特点和频谱分析结果。

与计算结果对照，观察两种采样参数获取到的时域波形有何特点，频谱分析结果是否均为 200Hz？思考不同采样参数对频谱分析的影响。

## 2. 声音信号的频谱分析：

人们听到的声音（音乐）有高低之分，是因为声音具有不同的“频率”。其中人耳能听到的频率范围大致 20HZ——20KHZ 之间；一般音乐的频率范围大致 40HZ——15KHZ 之间；人说话的频率范围大致 100HZ——8KHZ 之间。

人耳对声音听觉有三要素：音调、音量、音色。而它们分别是由声音的基频、响度、频谱分布所决定。

- 音调的产生，是由声波振动的频率决定
- 音量由声波振动的振幅决定
- 音色的不同，是由声波的频谱特性决定

**自然界中存在的很少是纯音，绝大部分都是复合音。在复合音波中频率最低的成分称基波，频率与基波成整倍数的分波称谐波，2 倍或 3 倍基波的分波分别称二次或三次谐波。复合波之振幅是由基波的振幅和各组谐波的振幅重叠而成。**

声音的频谱一般分为三个频段：低频段（500Hz 以下）；中频段（500 Hz~7 kHz）；高频段（7 kHz 以上）。

- 声音的**低频成分**适中，则声音丰满、浑厚、坚实、有力
- 声音的**中频成分**多，则声音有力、清晰、透亮
- 声音的**高频成分**多，则声音明亮、锐利

实验步骤:

双击桌面“MI”软件,窗口下方点“Continue”进入“示波器”(上)、“频谱分析仪”(下)界面。“示波器”设置:触发模式—“自动”;采样频率—“4KHZ”;采样通道—“A”;滚动点—“自动”。

对准耳麦话筒发声,待采集完,点工具条第二行最左侧“启停”功能钮,使采样暂停。记录几条主要谱线的频率和谱值。操作方法:鼠标放置于某峰尖位置点左键,波形上方即可显示该点所在点数(N)、频率值(F)和谱值(VA)。通过“频谱分析仪”了解你自己声音频率构成特点:声音基频和谐波的主要分布范围以及最高峰值所在频率点。

## 五、实验结果分析

1. 画出测试声音信号的系统框图?
2. 若要计算机分析人说话的声音,信号的采样参数应如何确定?
3. 依据你的声音谱图结果综合评估自己音色特点。

## 实验三 系统特性的测量

### 一、实验目的

1. 掌握测量单自由度系统强迫振动的固有频率的原理及方法。
2. 学会用压电加速度传感器测量简谐振动位移值。
3. 学会用位移判别共振法测量系统的固有频率。

### 二、实验原理

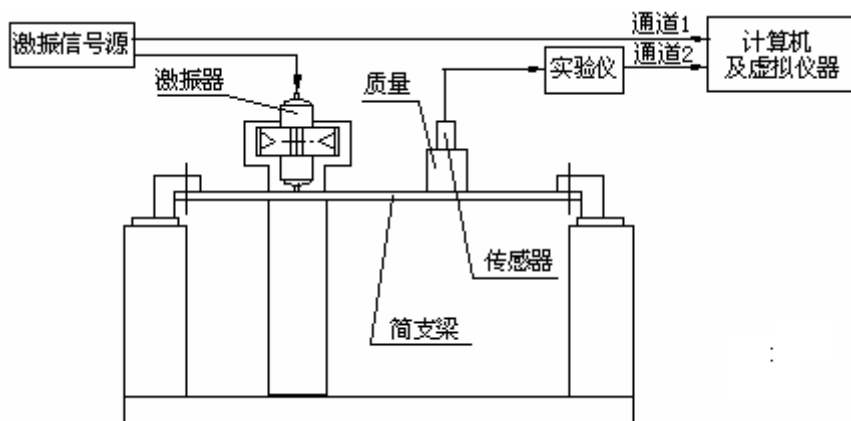


图 3-1

本实验系统组成如图 3-1，在简支梁上安装一个集中质量，将一无限多自由度的梁简化为一个单自由度系统。在正弦激振力作用下系统作简谐强迫运动，简化力学模型所图 3-2 所示。

设激振力  $F$  的幅值为  $B$ 、圆频率为  $\omega$ （频率  $f = \omega/2\pi$ ），则激振力

$$F = B \sin \omega t = B \sin(2\pi f t) \quad (3-1)$$

系统的运动微分方程为：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = F$$

或

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{F}{M} \quad (3-2)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi \omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{F}{M}$$

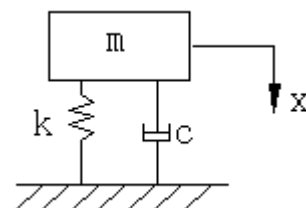


图 3-2

式中： $\omega_n$  ——系统固有圆频率  $\omega_n^2 = K/M$   
 $n$  ——阻尼系数  $2n = C/M$   
 $\xi$  ——阻尼比  $\xi = n/\omega_n$

此方程的特解，即强迫振动为：

$$x = A \sin(\omega t - \phi) = A \sin(2\pi f t - \phi) \quad (3-3)$$

式中： $A$  ——强迫振动振幅

$\phi$  ——初相位

$$A = \frac{B / M}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega)^2 + 4n^2 \omega_n^2}}$$

可以看出，系统响应也为简谐振动，其振动频率与正弦激振力的频率相同。由二阶系统幅频、相频特性：当  $\omega \approx \omega_n$  时，系统将发生共振，共振时振幅达到最大；强迫振动的位移总滞后于激振力，在共振点处相位差为  $\pi/2$ ，共振点前后位移会出现相位突变。因此用简谐力激振，造成系统共振，以寻找系统的固有频率是一种常用的方法。

#### 1、用位移幅值法判别共振\*

这种方法是根据位移幅值共振来判定共振频率。在激振功率输出不变的情况下，由低到高调节激振器的激振频率，通过幅值读取，可以观察到在某一频率下，位移幅值迅速增加至最大，这就是该振动系统的固有频率。这种方法简单易行，但在阻尼较大的情况下，用幅值变化来判定共振频率有时不够敏感。

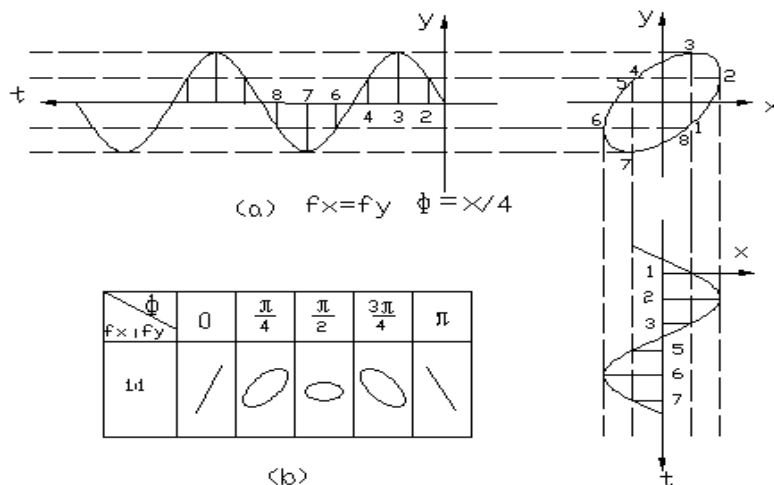
#### 2、用位移相位法判别共振\*

相位判别法是根据共振时特殊的相位值以及共振前后相位变化规律所提出来的一种共振判别法。在简谐力激振的情况下，用相位法来判定共振是一种较为敏感的方法，而且共振时的频率就是系统的无阻尼固有频率，可以排除阻尼因素的影响。

(1) 李萨如图形法原理：

互相垂直、频率不同的两振动的合成，其合成振动波形较复杂，在一般情况下，图形是不稳定的。但当两个振动的频率比为整数时，即可合成稳定的图形，称为李萨如图形。

李萨如图形的原理可以直观地用图解法来证明。由下图(a)可以看出：当  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \pi/4$  时，示波器上的图形是一斜椭圆；当  $\varphi$  由 0 变到  $\pi/2$  时，图形则由一根斜直线经斜椭圆变为正椭圆；当  $\varphi$  继续增加，则又变为斜椭圆，但椭圆的长轴所在象限由 I、III 象限变为 II、IV 象限；当  $\varphi$  增至  $\pi$  时，图形又变为斜直线。当  $\varphi$  再增加时，则又变为斜椭圆。这一变化过程如下图(b)所示。



(2) 相位法判别共振方法：

由式 (3-1)、(3-3)

激振信号  $F = B_1 \sin \omega t$

振动体位移信号  $x = A_1 \sin(\omega t - \phi)$

将由 INV1601B 实验仪“信号源输出”的激振信号输入到 INV1601B 型实验仪的第一通道（即 X 轴）的电压输入接头（速度档），加速度传感器信号（积分档输出位移量）接入教学仪的第二通道（即 Y 轴）输入接头。共振时， $\omega = \omega_n$ ， $\Phi = \pi/2$ ，X 轴信号和 Y 轴信号的相位差为  $\pi/2$ ，根据利萨如图原理可知，屏幕上的图象将是一个正椭圆。当  $\omega$  略大于  $\omega_n$  或略小于  $\omega_n$  时，图象都将由正椭圆变为斜椭圆，其变化过程如下图所示。因此图象由斜椭圆变为正椭圆的频率就是振动体的固有频率。

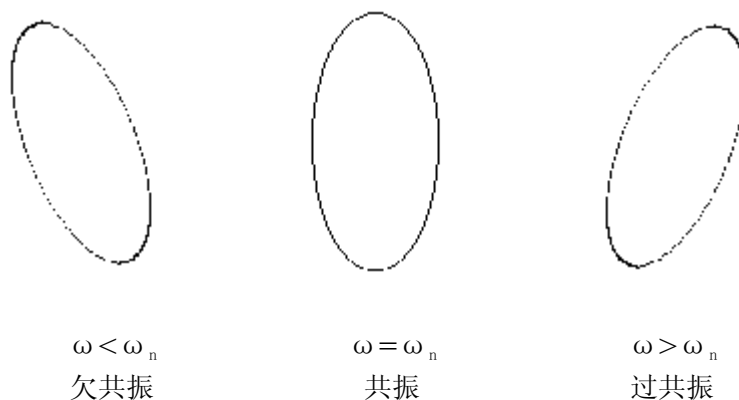


图 3-3

### 三、实验过程

- 1、电动式激振器接入实验仪信号源“功率输出”端，用激振器对简支梁激振。“信号源输出”端接测振通道 1“电压输入”端，功能档位选“速度”位置。
- 2、把带磁座的压电加速度传感器置于简支梁的质量块上，其输出端接到实验仪通道 2“加速度计输入”端，功能档位选在“位移”位置，用以测量简支梁的振动位移幅值。
- 3、开启激振信号源的电源开关，对系统施加交变的正弦激振力，使系统产生振动，调整信号源的“功率幅度调节”旋钮使输出电流在 100—150 mA 范围（恒压方式），测量过程该力应保持不变。
- 4、压电加速度传感器测量振动位移值：
  - 1) 压电式加速度传感器信号输出为电荷量，后续调理环节需进行电荷——>电压转换，并且需经过两次积分运算以获取振动位移信息。每个实验台所用的传感器灵敏度数值均有所不同。思考如何确定标定值 K。
  - 2) 运行桌面“INV1601 振动教学系统”软件，在“分析模块选项”窗口，双击“双通道”，进入主分析窗口。“采样参数”设置：采样频率 4096 Hz，采样点数 1K；通道 1 单位为 mV，标定值为 1mV/EU；通道 2 单位为  $\mu\text{m}$ ，依据实验台提供的传感器灵敏度及位移档输出增益  $K_E$  计算标定值 K 并设置好，这样通道 2 测得的波形就是加速度传感器获得的位移量信息。
- 5、位移幅值法测固有频率：激振频率由低到高逐渐增加（从 10Hz 起记录），最高取至 60 Hz 左右。软件波形显示形式点“波谱”，由高精度频率计或幅值计读取数值；将各频率点及对应的位移幅值填入表 3-1，其中最大振幅对应的频率值即为位移幅值法测到的共振频率  $f_1$ 。在振幅变化较大的共振点附近，频率调节应以 0.1 Hz 为增益慢慢增加观察变化（在共振点附近记录 10 组数据）。
 

**注意测量时，每次调节好信号源频率，一定要等通道 2 的示数相对稳定后再读取幅值。**
- 6、位移相位法测固有频率：分析软件“波形显示形式”点“利萨如”，“坐标尺度调整方式”开关拨至

“自动”。将激振频率由低到高逐渐增加，观察李萨如图形，当为正椭圆时，记录此时激振频率值，该值就是相位法测得的固有频率  $f_2$ 。

## 五、实验结果与分析

## 1、实验数据

表 3-1

[illegible]

测试结果：幅值法测量固有频率  $f_1 = ?$  （绘制幅频曲线）

相位法测量固有频率  $f_2 = ?$

依据幅频和相频特性曲线理论上  $f_1$ 、 $f_2$  的关系对结果加以说明。

2、画出用加速度传感器测量振动位移值的测试系统框图。

3、请举例说明测量二阶系统的固有频率 $\omega_n$ 有何实际意义?

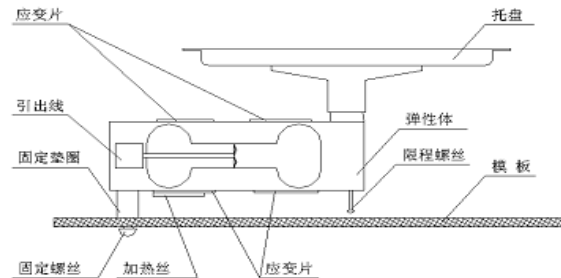
## 实验四 电子称实验（综合）

### 一、实验目的：

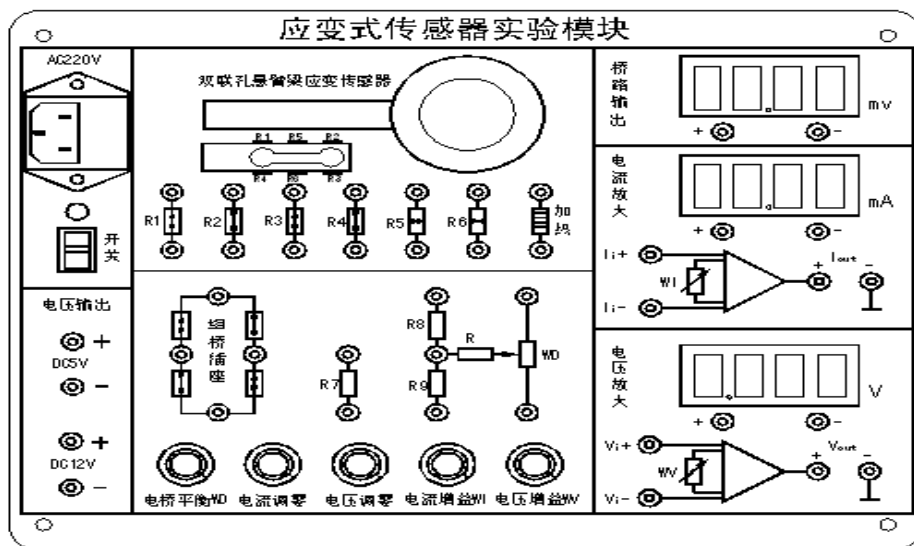
- 1、了解称重系统的静态标定方法；
- 2、掌握测试系统静态特性中灵敏度和线性度的计算方法。

### 二、实验装置：

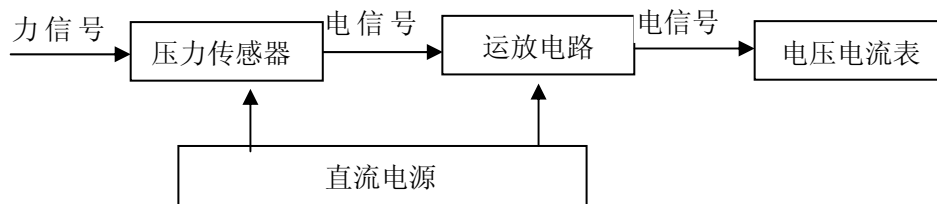
应变传感器称重装置示意图：



应变传感器接口实验箱由应变式双孔悬臂梁载荷传感器（称重传感器）、称重托盘、加热器、交流电源输入、直流电源输出端口、应变片测量电路、差动电流放大器和电压放大器、数显仪表等部分组成。



实验模板中的 R1、R2、R3、R4 为称重传感器上的应变片输出点；没有文字标记的 4 个电阻符号（空的无实体）环绕构成的桥路插座是为电路初学者组成电桥接线方便而设；R7、R8、R9 均为  $350\Omega$  固定电阻，是为应变片组成单臂电桥、双臂电桥（半桥）而设的其它桥臂电阻；WD、R 与模块下方“电桥平衡 WD”旋钮组成电桥调平衡网络；电压、电流放大环节均配有“调零”、“增益”电位器旋钮。（加热丝电阻及开关与 R5、R6 一起做应变片温度影响实验时用。）该装置构成一个完整的应力测试系统：



直流电源——为应变电桥、运放电路提供激励电源；

压力传感器——应变直流电桥电路，将获取的重量信号输出为毫伏级电压信号；

运放电路——信号放大到计算机采集设备要求的标准电压 0-5V 或电流 4-20mA 范围；

电压电流表——12 位数字显示表。

本称重传感器的测量范围：0-2000g；测量精度：0.1%。为达到测量系统所提出的精度和灵敏度的要求，电源、传感器、放大电路三个组成环节的设计均需考虑如何保证技术性能。

### 三、实验原理：

#### 1、称重测量电路

本实验选用的是标准商用双孔悬臂梁式称重传感器，灵敏度高，性能稳定，四个特性相同的应变片贴在如面板图中所示位置，弹性体的结构决定了  $R_1$  和  $R_3$ 、 $R_2$  和  $R_4$  的受力方向分别相同，将它们串接成差动形式（即邻臂受力方向相反，对臂受力方向相同），并由此构成全桥测量电路。为满足后续信号处理器精确测量的需要，采用运放电路将桥路微弱的毫伏级电压信号转换为 0-5V 的标准电压输出。本实验通过对电路的标定，确定电路输出电压值与重量值的对应关系，电压量纲（V）改为重量量纲（g）即成为一台原始电子秤。

#### 2、称重系统标定

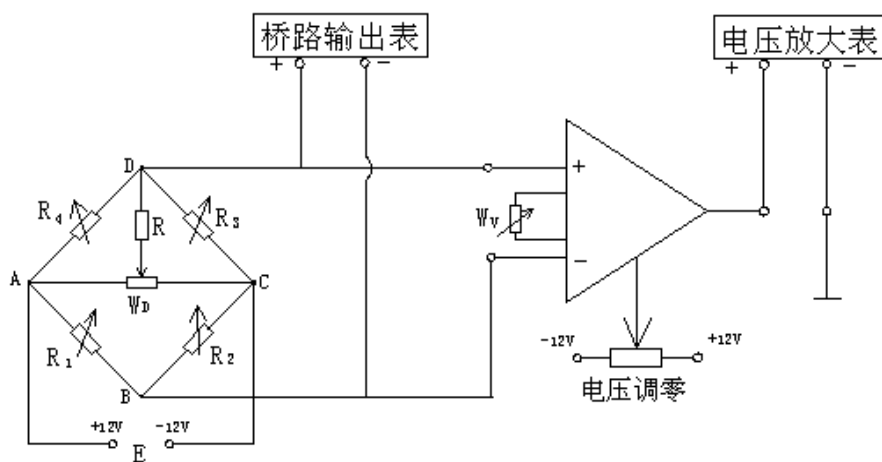
通过实验确定称重系统的输入量和输出量之间的关系，进而得到系统灵敏度、精确度等性能指标。

传感器及测试系统静态标定步骤：

- 1) 传感器输入量程分成若干等距点；
- 2) 由小到大、逐点递增输入标准量值，并记录对应输出值；
- 3) 由大到小、逐点递减，并记录对应输出值；
- 4) 按 2、3 过程，正反行程往复循环多次测试，将得到的输出-输入测试数据用表格列出绘制曲线。
- 5) 对测试数据处理，获得校正曲线，确定灵敏度、线性度等指标。

### 四、实验步骤

#### 1. 称重系统硬件接线：



将传感器（全桥电路）、桥路输出数显、电压放大、电压数显等部分按上图连接成测试系统。接线期间应确保实验箱电源关闭。

#### 2、桥路输出调零及运放输出调零、调满：

- 1) 检查接线无误后，合上主机箱电源开关。预热 10 分钟后，调节实验模板上的“电桥平衡 WD”电位器，使桥路输出电压表显示为 0.00mV；
- 2) 调节“电压调零”电位器，使电压数显表显示为 0.000V。
- 3) 将 2000g 砝码置于传感器的托盘上，调节“电压增益 Wv”，使电压数显表显示为 5.000V。
- 4) 拿去托盘上的所有砝码，等待 10 秒左右，调节“电压调零”使电压数显表显示为 0.000V。

5) 重复 3)、4) 步骤的标定过程 (至少三次), 以消除传感器的滞后, 改善其线性。

### 3. 传感器及系统的标定测量

在压力传感器的量程范围内, 按顺序向托盘中增加砝码的数量 (每次增加 200g) 至 2000g, 测放大输出电压  $v$  (V);

按顺序减去托盘中砝码的数量 (每次减去 200g) 至 0g, 测放大输出电压  $v$  (V)。

如此重复三次, 求出各级标定重量  $G$  所对应的平均输出值  $\bar{v}_i$  作为标定数据, 将测量数据记录到表格中。

| 重量 $G(g)$         | 0 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
|-------------------|---|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| 放大输出 $v$ (V)      |   |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| 输出电压差值 $\Delta v$ |   |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |

### 4. 实验数据处理

1) 计算称重系统的灵敏度

\*计算相邻两压力之间的灵敏度

在相邻两压力之间的灵敏度  $s_i$  由以下公式求得:

$$s_i = \frac{\Delta v_i}{\Delta g_i}$$

其中:  $\Delta v_i$ —标定相邻两压力对应的输出电压的差值;  $\Delta g_i$ —标定时相邻压力的差值。

\*称重系统的灵敏度  $\bar{s}$  可由以下公式求得:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} s_i}{n-1} \quad \text{其中: } n \text{—标定时测量的点数。}$$

2) 绘制称重系统的校准曲线

以标定时所记录的输入重量  $G$  和放大输出电压  $v$  分别为横坐标和纵坐标绘制称重系统的校准曲线。

3) 计算非线性误差 (选做)

按端点法进行曲线拟合, 计算非线性误差  $\delta$ :

$$\text{非线性误差 } \delta = \frac{\Delta_{L\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\%$$

其中:  $\Delta_{L\max}$ —校准曲线于拟合直线的最大偏差;  $y_{\max} - y_{\min}$ —输出范围。

5、根据所计算的系统灵敏度, 将压力测量时所记录的电压值转化为压力值。放上笔、钥匙之类的小东西称一下重量。

6、实验完毕, 关闭电源, 收拾好导线。