

# 《振动与机器动力学》

## 实验指导书

汕头大学工学院机电系摘录

2014.2

## 振动教学实验系统组成及基本测试仪器的使用

INV1601 型振动教学实验系统是一套集成化的振动测试实验系统，主要由三部分组成：

- 1、INV1601T 型振动教学实验台（以下简称 INV1601T 实验台）
- 2、INV1601B 型振动教学实验仪（以下简称 INV1601B 实验仪）及各种传感器
- 3、INV1601 型 DASP 振动教学实验软件（以下简称 INV1601 型 DASP 软件）

INV1601 型振动教学实验系统方框图如下所示：

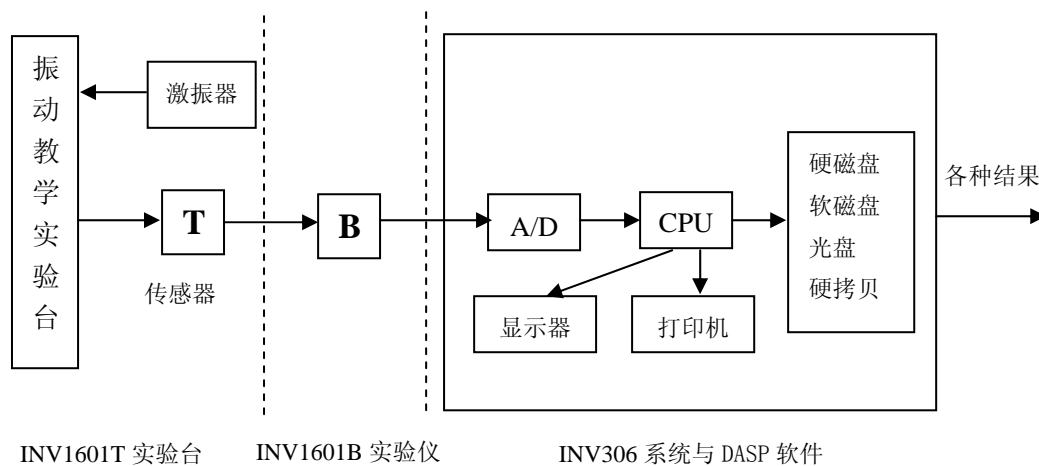


图 1 INV1601 型振动教学实验系统方框图

### 1. INV1601T 型振动教学实验台

该振动教学实验台主要由弹性体系统、激振系统、隔振系统、阻尼和动力吸振器组成。弹性体系统包括简支梁、悬臂梁、等强度梁、圆板以及用于组成单自由度、二自由度和多自由度系统模型的质量块和钢丝。激振系统包括偏心电机激振、接触式激振器、非接触式激振器。隔振系统采用空气阻尼器进行隔振。阻尼采用的是油阻尼器。动力吸振采用的是可拆卸式复式吸振器，同时可以减小四个共振频率。与采集仪组合使用，可完成振动与振动控制方面的三十多个教学实验。以下对实验台的一些主要部件作详细说明。

#### 1) 偏心电动机和调压器

单相交流串激整流式电动机带动偏心质量圆盘转动，偏心质量的离心惯性力产生振动。电动机采用 50Hz 单相电源供电，其转速随负载或电源电压的变化而变化。通过调压器改变电压的方法来调节电动机的转速，使电动机转速可在 0~4000 转/分的范围内调节。产生不同频率的激振力。

#### 2) JZ-1 型电磁式激振器

使用这种激振器时，是将它放置在相对于被测试物体静止的台面上，并将顶杆顶在被测试物体的激振处，顶杆端部与被测试物体之间要有一定的预压力，使顶杆处于限幅器中间。激振前顶杆应处于振动的平衡位置。这样激振器的可动部分和固定部分才不发生相应的碰撞。

与电磁式激振器配套使用的仪器有信号发生器、功率放大器和直流稳压电源。（磁场采用永久磁

铁产生时，激振器不需要直流电源。)

信号发生器是产生一定形式、一定频率范围和一定大小振动信号的设备，并向多功能形式发展，即同一信号发生器可产生多种振动信号，如正弦、脉冲、随机和瞬态随机等多种激振信号。

功率放大器是将信号发生器输出的电压信号进行放大，给激振器提供与电压信号成正比的电流，以使电磁式激振器产生符合要求的激振力。

电磁式激振器的优点是能获得较宽频带的激振力，即产生激振力的频率范围较宽。而可动部分质量较小，从而对被测物体的附加质量和附加刚度较小，使用也方便。因此，应用比较广泛，但这种激振器的缺点是不能产生太大的激振力。

①技术指标：激振动频率范围： 10Hz - 1000Hz

最大激振力： 200g

最大行程：  $\pm 1.5\text{mm}$

②使用方法：将激振器安装支架固定在实验台基座上，把激振器安装在支架上，并保证激振器顶杆对筒支梁有一定的预压力（不要露出激振杆上的红线标识），用专用连接线连接激振器和 INV1601B 型振动教学实验仪的功放输出接口。

### 3) INV 型磁电式非接触式激振器

对于轻型结构、刚度很弱（如薄板）的试件，以能激起试件振动为前提，采用非接触式激振器激振为好。非接触式激振器主要由磁铁和绕在铁心上的线圈组成。线圈有两个，一个叫励磁线圈，它通以直流电流，产生恒定的偏置磁场；另一个为驱动线圈，它由外部信号源供给激励信号，当驱动线圈通以交变电流时，磁铁对试件就产生交变的吸力，从而激起试件的振动。

①技术指标：激振力频率范围： 10Hz - 1000Hz

最大激振力： 100g

②使用方法：将激振器安装在磁力表座上，根据被激振件的刚度调节激振器与被激振件的间隙。在做实验时，还要根据被激振件的各阶固有频率随时调节激振器与被激振件的间隙。激振器连线接到 INV1601B 型振动教学实验放大仪的功放输出接口。

## 2. INV1601B 型振动教学实验仪性能及各种传感器

INV1601B 型振动教学实验仪由双通道多功能振动测试仪、扫频信号发生器、功率放大器组成，并集成了数据采集器，可连接压电式加速度传感器、磁电式速度传感器和电涡流传感器，对被测物体的振动加速度、速度和位移进行测量。可将每个通道所测振动信号转换成与之相对应的 0~5VAC 电压信号输出，供计算机使用。扫频信号发生器的输出频率在手动档时，可通过旋钮在 0.1~1000Hz 范围内连续调节；在自动档时，可从 10 到 1000Hz 自动变换，扫频时间可由电位器控制，3s~240s 连续可调，激振频率可由液晶显示器显示。功率放大器可直接与 JZ-1 型激振器或 JZF-1 非接触式激振器连接，对物体进行激振，其输出幅度可连续调节。

### 2.1 主要技术指标

#### 2.1.1 信号源：

频率范围：

手动：0.1~1kHz，连续可调；

自动：10~1kHz 连续扫频；  
输出幅度：0~0.5v（单峰值）；  
频率精度：±0.1%；  
频率分辨率：0.1Hz；  
自动扫频周期：3~240 秒任意设定。

### 2.1.2 功率放大器：

最大输出电流：>500mA  
电流精度：满量程的±5%

### 2.1.3 测量通道：

INV1601B 型振动教学实验仪包含两个相同的测量通道，可配接使用加速度传感器，速度传感器及涡流传感器，以对振动的加速度，速度及位移进行测量。

测量精度：≤±5%  
滤波器截止频率：2 kHz  
滤波器截止带衰减：-12dB

#### 使用加速度计：

使用加速度计可直接测量振动的加速度值，通过一次积分或二次积分可计算相应的速度及位移值。

测量加速度的话，通道增益： $G_1=10$   
传感器型号：YJ9A 加速度传感器  
加速度测量范围：0~100m/s<sup>2</sup>（峰值）  
速度测量范围：0~141.4mm/s（有效值）  
位移测量范围：0~1250 μ m（峰峰值）

#### 使用速度计：

使用速度计可直接测量振动的速度值，通过微分电路可获得振动的加速度值。通过积分电路可获得振动的位移值。

直接测量速度的话，通道增益： $G_1=1$ 。  
传感器型号：V300 型速度传感器  
速度测量范围：0~100mm/s（有效值）  
位移测量范围：0~1250 μ m（峰峰值）

#### 使用位移计：

通道增益： $G_1=0.5$ 。  
传感器型号：8500 系列电涡流传感器  
位移测量范围：0~1250 μ m（峰值）

### 2.1.4 显示部分：

数字表可分时显示内部信号源的频率(即激振频率 Hz)，功率放大器的输出电流及自动扫频周期(秒即 S)。

## 2.2 使用说明

### 2.2.1 “设置选择及参数选择”旋钮的意义及使用：

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“1 道”、“2 道”、“显示”、“方式”、“扫频”5 个设置状态的下一级子菜单。

“1 道”、“2 道”灯亮：表示参数选择进入对 1 通道或 2 通道的设置状态。此时，通过推压该旋钮可以选择加速度计，速度计或位移计测量。其中，选择加速度计及速度计测量时，通过内部的微积分电路又可分别选择测量加速度，速度或位移。推压该旋钮时，对应档的灯会点亮。

“显示”灯亮：推压该旋钮时，“Hz”、“mA”、“s”，灯循环点亮，分别表示显示窗内显示的为信号源（即功放）的频率，功放的负载电流或自动扫频时的扫频周期（秒），扫描周期可在 3~240 秒范围内连续可调。

“方式”灯亮：推压该旋钮时，可选择方式框内“恒压”、“恒流”两方式。实际上，通过“功率幅度调节”电位器，可随时调节输出功率的大小。“恒压”、“恒流”方式的意义是：当“功率幅度调节”电位器不动时，用手动或自动方式改变频率，使功率负载上的电流或电压保持恒定。当功放工作在恒压状态时，采用电压负反馈。这样，在振动信号的频率发生变化时，功率负载上的电压是恒定的。在恒流状态时，采用电流负反馈。当频率变化时，通过功率负载上的电流是恒定的。这一点很有意义。因为激振器上输出力的大小，是和流经激振器内线圈中的电流大小成正比的。也就是说，当频率变化时，只要驱动激振器的电流恒定，那么，激振力也恒定。根据  $f=ma$ ，当质量  $m$  不变时，只要激振力  $f$  保持恒定，那么，加速度也保持恒定。这样，就可实现恒加速度扫频。

“扫频”灯亮：推压该旋钮时，可选择扫频框内“手动”、“自动”两种方式。

### 2.2.2 “频率周期及步进”旋钮的意义及使用：

该旋钮也是一个复用钮，既能旋转也可推压。旋转该钮时，可以改变手动扫频时的频率或自动扫频时的扫频周期。

**注意：**这时，只有在“设置选择及参数选择”旋钮设置在“显示”状态时才可以在面板表头上看到变化的频率或周期值。推压该钮时，步进值会依次从个位变化到十位，再到百位。选中的数码管会不断闪动。步进值在哪个位闪动，频率或周期的变化从哪个位开始。

**注意：**该钮还有一个锁定功能。当持续按压该钮 3 秒钟，机内的蜂鸣器发出连续两声嘀嘀声，表示锁定功能有效。这时，“设置选择及参数选择”及“频率周期及步进”两旋钮被锁定。再持续按压该钮 3 秒钟，机内的蜂鸣器发出连续两声嘀嘀声，表示解锁成功。

### 2.2.3 “功率幅度调节”旋钮调整输出功率的大小

**注意：**

- 1.每次使用完毕，一定要将该旋钮拧到最小。下次使用时再慢慢拧大。否则，开机瞬间的巨大冲击，可能会损坏仪器或激振器。
- 2.该机的负载是专用的 JZ-1 型激振器，负载的动圈电阻约  $10\Omega$ 。
- 3.功率输出的两根线均是对地浮动的，不能将任意哪根线对地短路。

## 2.3 模拟输出电压转换成振动工程单位的方法

两个测量通道是相同的。可分别接入加速度传感器，速度传感器及涡流传感器。测量通道输出的是模拟电压信号，当需要获取振动的工程单位时，需要输入相应的传感器的灵敏度。当使用加速度传感器时，需要输入加速度计的电荷灵敏度，单位是： $\mu\text{c}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。当使用速度传感器时，需要输入速度计的电压灵敏度，单位是： $\text{V}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当使用涡流传感器时，需要输入涡流传感器的电压灵

灵敏度，单位是： $\text{mV}/\mu\text{m}$ 。下面举例说明具体的算法。

传感器灵敏度为 $K_{\text{CH}}$ （如果是电荷型传感器，其灵敏度单位为 $\text{PC}/\text{U}$ ，表示每个工程单位输出多少 $\text{PC}$ 的电荷，对于压电式力传感器，而且参数表中工程单位设为牛顿 $\text{N}$ ，则此处为 $\text{PC}/\text{N}$ ；如是加速度，而且参数表中工程单位设为 $\text{m}/\text{s}^2$ ，则此处为 $\text{PC}/\text{m}/\text{s}^2$ ；如果是速度传感器，其灵敏度一般表示为 $\text{mV}/\text{cm}/\text{s}$ ；位移传感器灵敏度一般表示为 $\text{mV}/\mu\text{m}$ ）

INV1601B型实验仪各档输出增益 $K_E$ 如下表：

	线性 $K_E$	一次积分 $K_E$	二次积分 $K_E$	一次微分 $K_E$
加速度 $\text{m}/\text{s}^2$	10 $\text{mV}/\text{pc}$	10000s (m/s)	1000000 $\text{s}^2$ (m)	--
速度 $\text{m}/\text{s}$	1	100s (m)	--	0.001 $\text{s}^{-1}$ ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
位移 $\mu\text{m}$	0.5	--	--	--

DASP 参数设置表中的标定值  $K$  为： $K = K_{\text{CH}} \times K_E (\text{mV} / \text{U})$

实测物理量 = 输出电压 (mV)  $\div$  标定值  $K$

### 2.3.1 使用加速度计

举例 1：

加速度档：模拟输出电压：467mV（单峰），电荷灵敏度：4.67  $\text{pc}/\text{m}/\text{s}^2$ 。

加速度值 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) = 输出电压 (mV, 单峰)  $\div$  加速度计的电荷灵敏度 ( $\text{pc} / \text{m}/\text{s}^2$ )  $\div$  加速度线性增益：

$$467 \div 4.67 \div 10 = 10 \text{ m}/\text{s}^2$$

举例 2：

速度档：模拟输出电压：928mV（单峰），电荷灵敏度：4.67  $\text{pc}/\text{m}/\text{s}^2$

速度值 ( $\text{m}/\text{s}$ ) = 输出电压 (mV, 单峰)  $\div$  加速度计的电荷灵敏度 ( $\text{pc} / \text{m}/\text{s}^2$ )  $\div$  加速度一次积分 $K_E$  (10000)：

$$928 \div 4.67 \div 10000 = 0.01987 \text{ m}/\text{s} = 19.87 \text{ mm}/\text{s}$$

举例 3：

位移档：模拟输出电压：184.4 mV（单峰），电荷灵敏度：4.67  $\text{pc}/\text{m}/\text{s}^2$

位移值 (m) = 输出电压 (mV, 单峰)  $\div$  加速度计的电荷灵敏度 ( $\text{pc} / \text{m}/\text{s}^2$ )  $\div$  加速度二次积分 $K_E$  (1000000)：

$$184.4 \div 4.67 \div 1000000 = 39.5 \times 10^{-6} \text{ m} = 39.5 \mu\text{m}$$

### 2.3.2 使用速度计

举例 1：

速度档，模拟输出电压：424.2mV（单峰），传感器电压灵敏度：300 $\text{mV}/\text{cm}/\text{s}$ （单峰）。

速度值 ( $\text{m}/\text{s}$ ) = 输出电压 (mV, 单峰)  $\div$  速度计的电压灵敏度 ( $\text{mV}/\text{m}/\text{s}$ , 单峰)  $\div$  速度线性增益：

$$424.2 \div 30000 \div 1 = 0.014 \text{ m}/\text{s} = 14 \text{ mm}/\text{s}$$

举例 2：

加速度档，模拟输出电压：213mV（单峰值），传感器灵敏度：300 $\text{mV}/\text{cm}/\text{s}$ （单峰）：

加速度值 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) = 输出电压 (mV, 单峰)  $\div$  速度计的电压灵敏度 ( $\text{mV}/\text{m}/\text{s}$ , 单峰)  $\div$  速度一次微分 $K_E$  (0.001)：

$$213 \div 30000 \div 0.001 = 7.1 \text{ m}/\text{s}^2$$

举例 3：

位移值 (m) = 输出电压 (mV, 单峰) ÷ 速度计的电压灵敏度 (mV/m/s, 单峰) ÷ 速度一次积分 $K_E$  (100):

模拟输出电压: 84.3mV (单峰), 传感器电压灵敏度: 300mV/cm/s (单峰):

$$84.3 \div 30000 \div 100 = 28.1 \times 10^{-6} \text{ m} = 28.1 \mu\text{m}$$

### 2.3.3 使用位移计

举例 1:

位移档, 模拟输出电压: 50mV (单峰值), 涡流传感器电压灵敏度: 4mV/ $\mu\text{m}$  (峰峰值) (注: 一般, 位移的工程单位用峰峰值表示), 计算的位移值是:

位移值 ( $\mu\text{m}$ ) = 输出电压 ÷ 位移计的电压灵敏度 (单峰值) ÷ 位移线性增益

$$50 \div (4/2) \div 0.5 = 50 \mu\text{m} \text{ (单峰值)}$$

**注:** 计算出的加速度, 速度及位移值均为单峰值。加速度输出增益为 10, 速度为 1, 位移为 0.5。注意灵敏度换算的工程单位。

## 2.4 涡流传感器的连接方法

涡流传感器由探头及前置器组成, 前置器有三个接线端子: -24V、地及信号输出端。该三个端子要分别连至仪器的三芯航空插座上。航空插头的三芯定义是:

- 1 脚: -24V (红)
- 2 脚: 信号输入 (兰)
- 3 脚: 地 (屏蔽层)

## 3、INV306U 信号采集仪和 INV1601 型 DASP 软件

INV306U 系列信号采集仪为 USB 接口的便携式采集仪, 适用于笔记本电脑、台式机、工控机等具有 USB 口的计算机。INV306U 采集仪安装在 INV1601B 型振动教学实验仪内, 使系统结构更紧凑, 体积更小, 重量轻, 便于携带。

### 3.1 INV1601 型系统硬件安装连接

通过系统配套数据连接线将计算机的 USB 口和 INV1601B 型振动教学实验仪后面板上的信号采集仪输出接口进行连接, 配套 DASP 软件系统即可组成一套高性能的振动测试系统。安装示意图如图 2:

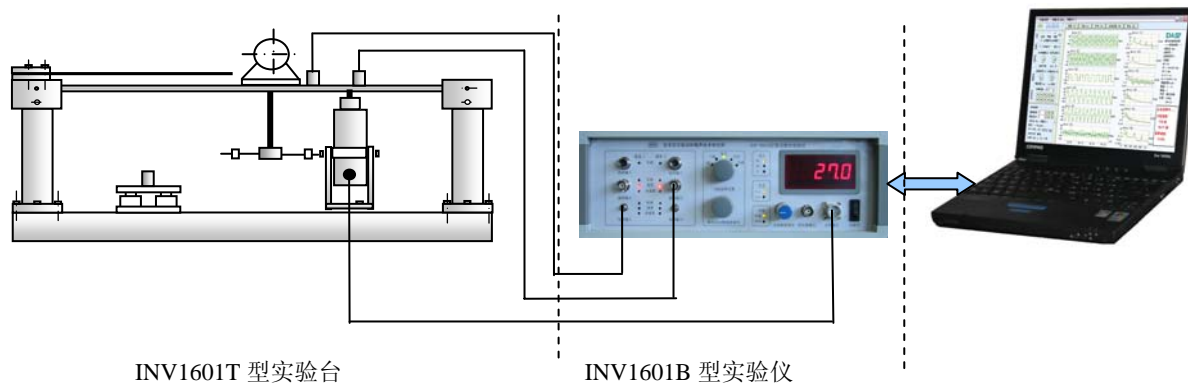


图 2 INV1601 振动教学系统连接示意图

## 3.2 INV1601 型 DASP 软件系统

### 3.2.1 软件简介

INV1601 型振动与控制教学实验系统（以下简称 INV1601 型）是用于振动力学和模态实验的教学实验软件系统，可运行在 Windows95/98/Me/NT/2000/XP 平台上，进行多通道信号采集和实时分析。

INV1601 型 DASP 软件主要包括 DASP 单通道、DASP 双通道、DASP 多通道和 DASP 模态教学四个基本部分，以及可以选择的扩展模块和工程测试模块。

INV1601 型 DASP 软件可以实现信号的实时分析，即可以连续不间断地进行信号的采样，并同时进行分析，实现了采样、分析和显示示波的同步进行。

在非实时采样下，一次采样点数从 1024 到 32K 可调，对应频谱分析的谱线数最大为 16384 条。

低频采样时，采用滑动连续采样方式，不仅实现信号的大容量连续不间断采样，而且避免低频采样造成的长时间屏幕停滞现象。

频谱分析有四种频谱形式可选，并有 7 种窗函数可选；

频谱结果可以选择线性平均或者指数平均方式，也可选择不平均。

利用频率计技术对 FFT 频谱结果进行快速实时校正，频率精度可达万分之一。

DASP 单通道软件可进行示波、采集、时域分析和频谱分析，自由切换波形图和频谱图，改变显示比例，设定谱峰数实时显示谱峰值及各种分析结果；可随时改变采样频率、工程单位、标定值、数据点数、程控倍数、分析方式、加窗函数、频谱类型和坐标形式，具有图形和数据的打印、存盘、复制及全自动报告输出功能，全新的界面令人耳目一新。所有功能操作方便快捷。

DASP 双通道软件在单通道的基础上还可进行时域、自谱、互谱、传函、奈奎斯特图、自相关、互相关、利萨如图分析等。互功率谱分析和传递函数分析包含多种结果显示方式：幅频曲线、相频曲线、相干谱、实频曲线、虚频曲线、自功率谱、奈奎斯特图、相干互谱（相干传函）等，可以随意选择同时显示一种或几种谱线。

DASP 多通道软件可以进行多路信号的时域分析和频谱分析，并进行时域数值统计和频谱峰值的自动收取和读数，多踪利萨如图分析可以同时显示多个利萨如图，各利萨如图可以随意设计。

INV1601 型 DASP 软件的扩展功能一直在不断地增加，目前已经具有倒谱分析和小波(包)分析。



图 3 INV1601 型软件主界面

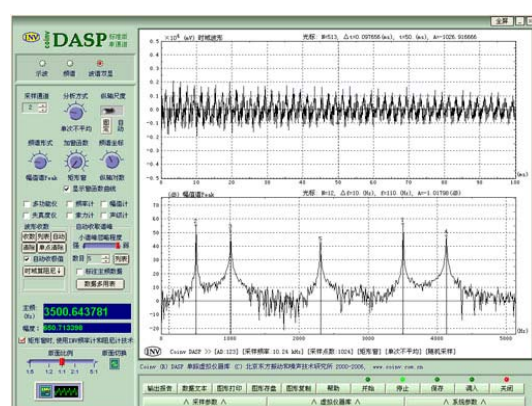


图 4 DASP 单通道软件界面



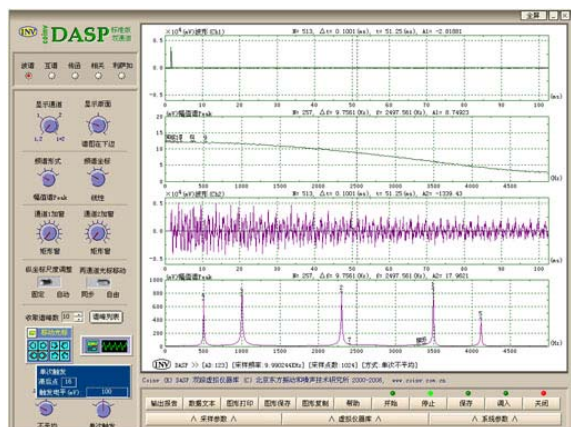


图 5 DASP 双通道软件界面

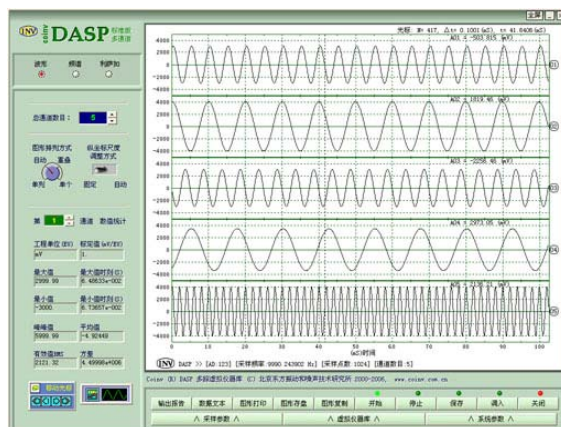


图 6 DASP 多通道软件界面

### 3.2.2 软件运行

打开计算机开关，进入 Windows 系统，打开光驱，放入软件安装光盘，安装 INV1601 型 DASP 软件（INV1601 型软件的安装和使用参见使用手册），软件序列号见光盘盒背面。软件安装成功后在桌面上可以看到一个图标如图 7 所示，把软件加密狗安装在 USB 口上。

鼠标双击图标即可运行程序，弹出图 3 所示的主界面，根据每个实验的要求选择相应的功能模块进行实验，按照实验步骤操作。

可在系统设置中设置界面的一些参数，在采样参数中设置采样频率、采样点数、程控倍数、标定值和工程单位等设置好后按  按钮。采样参数设置界面见图 8，系统设置界面见图 9。

对于当前界面下已采集的数据可用“保存”和“调入”按钮来保存和打开采集的数据。用以下按钮：     对当前界面下采集到的图形数据进行输出报告、数据文本保存、图形打印、图形存盘和图形复制等。

INV1601 型系统软件的具体操作说明详见说明书。



图 7 软件桌面图标



图 8 采样参数设置

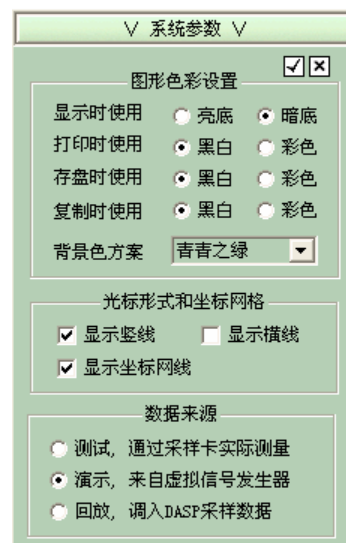


图 9 系统设置界面

## 4、振动测试注意事项

在工程实际振动测试中，应根据测试目的确定测试用的仪器、方法和手段，研究测点的布置和仪器的安装方法，对可能发生的问题和测试中的注意事项，事先应周密考虑，达到进行有意义的测试。对于建立测试方案，确定使用的测量系统和安排操作程序，步骤如下：

1. 估计需要测量的振动类型和振级，判别是周期性振动，随机振动还是冲击型或瞬变型振动。
2. 仔细确定安装测振传感器的位置，选定能代表被测对象特征的安装位置，并考虑是否会产生传感器附加质量荷载的影响。
3. 根据研究需要，确定测量参数和记录分析方式。
4. 考虑环境条件，如电磁场、温度、湿度和声场等各种因素，选择合适的振动换能器的类型和传感器种类。
5. 选择仪器的可测频率范围，注意频率的上限和下限。对传感器，放大器和记录装置的频率特性和相位特性进行认真地考虑和选择。
6. 考虑需测振级和仪器的动态范围，即：可测量程的上限和下限，了解仪器的最低可测振动量级。注意在可测频率范围内的量程是常数还是变数，(因为有的仪器量程随频率增加而增大，有的仪器量程随频率增加而减小)。注意避免使仪器在测试过程中过载和饱和。
7. 标定和检验，包括传感器，放大器和记录装置全套测试系统的特性标定，定出标定值。
8. 画出测量系统的工作方框图，以及仪器连接草图，标出所用仪器的型号和序号，以便于测试系统的安装和查校。
9. 在选定了振级，频率范围，解决了绝缘及接地回路等问题后，要确定测振传感器最合理的安装方法，以及安装固定件的结构及估计可能出现的寄生振动。
10. 在被测构件上做好测试前的准备，把测振仪器配套连线，传感器安装固定，并记下各个仪器控制旋钮的位置。
11. 对测试环境条件做详细记录，以便供数据处理时参考，并可以查对一些偶然因素。
12. 在测试过程中应经常检查测振系统的“背景噪声”(即“基底噪声”)。把测振传感器装在一个非振动体上，并测量这个装置的“视在”振级，在数据分析处理时，可去掉这部分误差因素。在实际振动测量中，为了获得适当的精度，“视在”振动最少应小于所测振动的  $1/3$ 。也就是说测量系统的基底噪声至少应低于所测振级 10 分贝。

## 实验一：振动系统固有频率的测试

### 1. 实验目的

- 1、学习振动系统固有频率的测试方法；
- 2、学习共振法测试振动固有频率的原理与方法；（幅值判别法和相位判别法）
- 3、学习锤击法测试振动系统固有频率的原理与方法；（传函判别法）
- 4、学习自由衰减振动波形自谱分析法测试振动系统固有频率的原理和方法。（自谱分析法）

### 2. 实验仪器及安装示意图

实验仪器：INV1601B 型振动教学实验仪、INV1601T 型振动教学实验台、加速度传感器、接触式激振器、MSC-1 力锤（橡胶头）。软件：INV1601 型 DASP 软件。

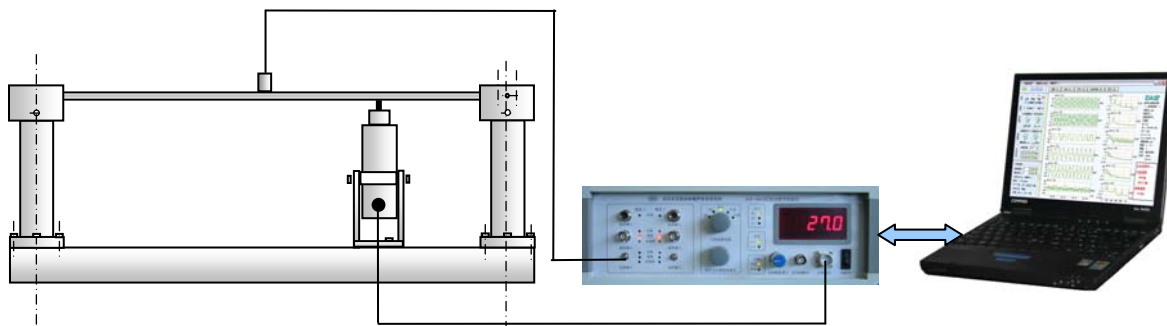


图1 幅值判别法和相位判别法仪器连接图

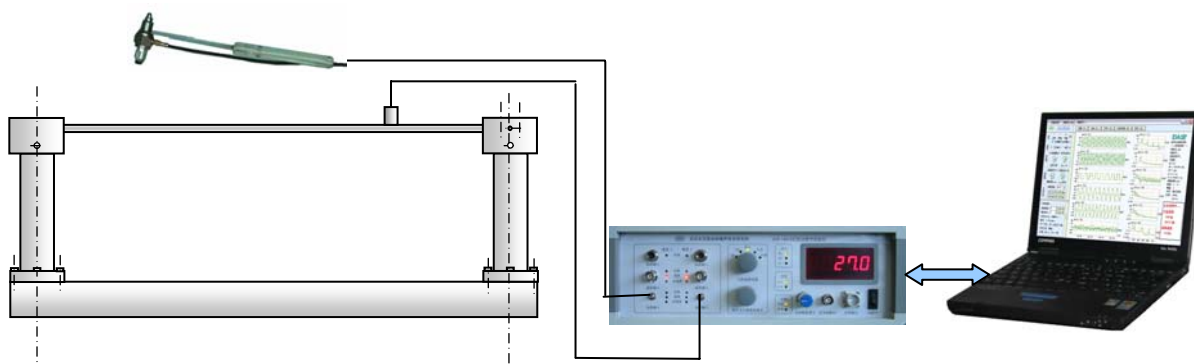


图2 传函判别法和自谱分析法仪器连接图

### 3. 实验原理

对于振动系统，经常要测定其固有频率，最常用的方法就是用简谐力激振，引起系统共振，从而找到系统的各阶固有频率。另一种方法是用锤击法，用冲击力激振，通过输入的力信号和输出的响应信号进行传函分析，得到各阶固有频率。

#### 1、简谐力激振

由简谐力作用下的强迫振动系统，其运动方程为：

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_0 \sin \omega_e t$$

方程式的解由  $x_1 + x_2$  这二部分组成:

$$x_1 = e^{-\delta t} (C_1 \cos \omega_D t + C_2 \sin \omega_D t)$$

式中  $\omega_D = \omega \sqrt{1 - D^2}$   $C_1$ 、 $C_2$  常数由初始条件决定

$$x_2 = A_1 \sin \omega_e t + A_2 \cos \omega_e t$$

其中 
$$A_1 = \frac{q(\omega^2 - \omega_e^2)}{(\omega^2 - \omega_e^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega_e^2}$$

$$A_2 = \frac{2q\omega_e \varepsilon}{(\omega^2 - \omega_e^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega_e^2}, \quad q = \frac{F_0}{m}$$

$x_1$  代表阻尼自由振动基,  $x_2$  代表阻尼强迫振动项。

自由振动项周期 
$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_D}$$

强迫振动项周期 
$$T_e = \frac{2\pi}{\omega_e}$$

由于阻尼的存在, 自由振动基随时间不断地衰减消失。最后, 只剩下后两项, 也就是通常讲的定常强迫, 只剩下强迫振动部分, 即

$$x = \frac{q(\omega^2 - \omega_e^2)}{(\omega^2 - \omega_e^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega_e^2} \cos \omega_e t + \frac{2q\omega_e \varepsilon}{(\omega^2 - \omega_e^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega_e^2} \sin \omega_e t$$

通过变换可写成

$$x = A \sin(\omega_e t - \varphi)$$

式中 
$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \frac{q/\omega^2}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2})^2 + \frac{4\varepsilon^2 \omega_e^2}{\omega^4}}}$$

$$\varphi = \arctg \frac{A_2}{A_1} = \arctg \left( \frac{2\omega_e \varepsilon}{\omega^2 - \omega_e^2} \right)$$

设频率比  $u = \frac{\omega_e}{\omega}$   $\varepsilon = D\omega$  代入上式

则振幅 
$$A = \frac{q/\omega^2}{\sqrt{(1 - u^2)^2 + 4u^2 D^2}}$$

滞后相位角 
$$\varphi = \arctg \frac{2Du}{1 - u^2}$$

因为  $q/\omega^2 = F_0/m / K/m = \frac{F_0}{K} = x_{st}$  为弹簧受干扰力峰值作用引起的静位移, 所以振幅  $A$  可写成

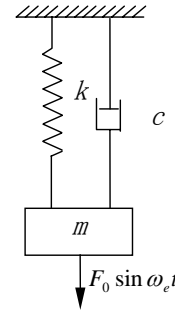


图3 阻尼强迫振动

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4u^2 D^2}} x_{st} = \beta x_{st}$$

其中

$$\beta \text{ 称为动力放大系数} = \frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4u^2 D^2}}$$

动力放大系数  $\beta$  是强迫振动时的动力系数即动幅值与静幅值之比。这个数值对拾振器和单自由度体系的振动的研究都是很重要的。

当  $u = 1$ ，即强迫振动频率和系统固有频率相等时，动力系数迅速增加，引起系统共振，由式

$$x = A \sin(\omega_e t - \varphi)$$

可知，共振时振幅和相位都有明显的变化，通过对这两个参数进行测量，我们可以判别系统是否达到共振点，从而确定出系统的各阶振动频率。

### 1) 幅值判别法

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，通过示波器，我们可以观察到在某一频率下，任一振动量（位移、速度、加速度）幅值迅速增加，这就是机械振动系统的某阶固有频率。这种方法简单易行，但在阻尼较大的情况下，不同的测量方法得出的共振频率稍有差别，不同类型的振动量对振幅变化敏感程度不一样，这样对应一种类型的传感器在某阶频率时表现不够敏感。

### 2) 相位判别法

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。

$$\text{激振信号为: } F = F_0 \sin \omega t \quad \text{位移信号为: } y = Y \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\text{速度信号为: } \dot{y} = \omega Y \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{加速度信号为: } \ddot{y} = -\omega^2 Y \sin(\omega t - \varphi)$$

#### (1) 位移判别共振

将由 INV1601B 实验仪的“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）的速度输入接头，位移传感器输出信号或通过 INV1601B 型实验仪积分档输出量为位移量的信号接入教学仪的第二通道（即 Y 轴）输入接头，此时两通道的信号分别为：

$$\text{激振信号为: } F = F_0 \sin \omega t$$

$$\text{位移信号为: } y = Y \sin(\omega t - \varphi)$$

共振时， $\omega = \omega_n$ ， $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ，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。

#### (2) 速度判别共振

将激振信号输入到 INV1601B 实验仪的第一通道（即 X 轴），速度传感器输出信号或通过 INV1601B 型实验仪积分档输出量为速度的信号输入到第二通道（即 Y 轴），此时两通道的信号分别为：

$$\text{激振信号为: } F = F_0 \sin \omega t$$

$$\text{速度信号为: } \dot{y} = \omega Y \cos(\omega t - \varphi)$$

共振时， $\omega = \omega_n$ ， $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ，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，屏幕上的图象应是一条直线。当  $\omega$  略大于  $\omega_n$  或略小于  $\omega_n$  时，图象都将由直线变为斜椭圆，其变化过

程如下图所示。因此图象由斜椭圆变为直线的频率就是振动体的固有频率。

(3) 加速度判别共振

将激振信号输入到采集仪的第一通道（即 X 轴），加速度传感器输出信号输入到第二通道（即 Y 轴），此时两通道的信号分别为：

激振信号为：
$$F = F_0 \sin \omega t$$

加速度信号为：
$$\ddot{y} = -\omega^2 Y \sin(\omega t - \varphi)$$

共振时， $\omega = \omega_n$ ， $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ，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，屏幕上的图象应是一个正椭圆。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。

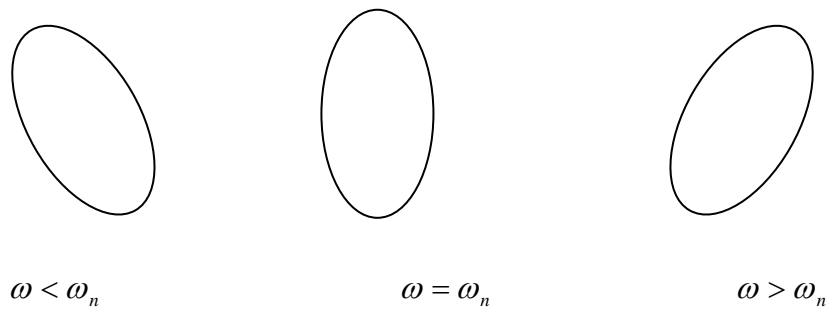


图 4 用位移判别共振的利萨如图形

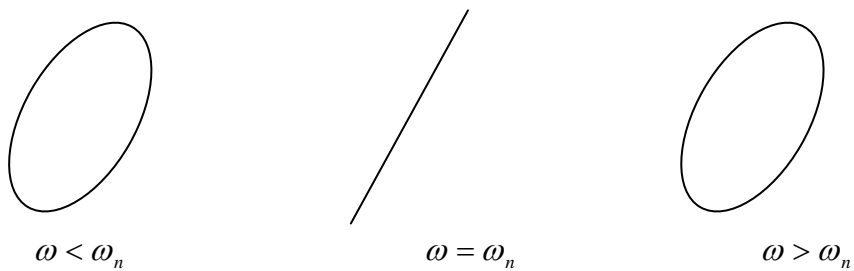


图 5 用速度判别共振的利萨如图形

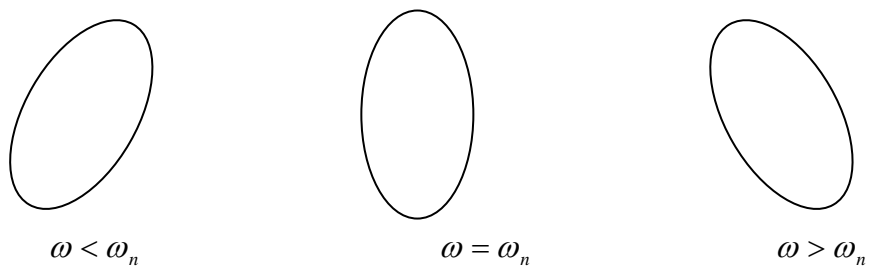


图 6 用加速度判别共振的利萨如图形

3) 传函判别法（频率响应函数判别法——动力放大系数判别法）

通常我们认为振动系统为线性系统，用一特定已知的激振力，以可控的方法来激励结构，同时测量输入和输出信号，通过传函分析，得到系统固有频率。

响应与激振力之间的关系可用导纳表示：

$$Y = \frac{X}{F} = \frac{1/k}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4D^2u^2}} e^{j\varphi} \quad \varphi = \text{tg}^{-1} \frac{-2Du}{1-u^2}$$

$Y$ 的意义就是幅值为 1 的激励力所产生的响应。研究  $Y$ 与激励力之间的关系,就可得到系统的响应特性曲线。在共振频率下的导纳值迅速增大,从而可以判别各阶共振频率。

#### 4) 自谱分析法

当系统受脉冲激励后做自由衰减振动时包括了各阶频率成分,时域波形反映了各阶频率下自由衰减波形的线性叠加,通过对时域波形做 FFT 转换就可以得到其频谱图,从而我们可以从频谱图中各峰值处得到系统的各阶固有频率。

## 4. 实验步骤

### 一、幅值判别法测量

#### 1、安装仪器

把激振器安装在支架上,将激振器和支架固定在实验台基座上,并保证激振器顶杆对简支梁有一定的预压力(不要露出激振杆上的红线标识),用专用连接线连接激振器和 INV1601B 型实验仪的功放输出接口(实验仪上的功率幅度调节按钮应调到最小)。

把带磁座的加速度传感器安放在简支梁上,输出信号接到 INV1601B 型实验仪的加速度传感器输入端,功能档位拨到“加速度”档的  $a$  加速度。

#### 2、开机

进入 INV1601 型 DASP 软件的主界面,选择单通道按钮。进入单通道示波状态进行波形示波。

#### 3、测量

打开 INV1601B 型实验仪的电源开关,调大功放输出按钮,注意不要过载,从 0 开始调节频率按钮,当简支梁产生振动,振动最大时,记录当前频率。继续增大频率可得到高阶振动频率。

### 二、相位判别法测量

1、将位于 INV1601B 实验仪前面板的激励“信号源输出”端,接入实验仪的第一通道的“速度输入”接头(X轴),加速度传感器输出信号接 INV1601B 型实验仪第二通道的“加速度输入”接头(Y轴)。加速度传感器放在距离梁端 1/3 处。

2、用 INV1601 型 DASP 软件“双通道”中的利萨如图示波,调节激振器的频率,观察图象的变化情况,分别用 INV1601B 型实验仪“加速度档”的加速度  $a$ 、速度  $v$ 、位移  $d$  进行测量,观察图象,根据共振时各物理量的判别法原理,来确定共振频率。

### 三、传函判别法和自谱判别法测量

#### 1、安装仪器

把实验模型力锤的力传感器输出线接到 INV1601B 型实验仪第一通道的加速度传感器输入端,档位拨到“加速度”档的  $a$ ;把带磁座的加速度传感器放在简支梁上,输出信号接到 INV1601B 型实验仪的第二通道加速度传感器输入端,档位拨到“加速度”档的  $a$  加速度。

#### 2、开机

进入 INV1601 型 DASP 软件的主界面,选择“双通道”按钮。进入“双通道”软件进行“传函”示波。在“自由选择”中选择传函幅频和相位项示波。

### 3、传函测量

用力锤敲击筒支梁中部，就可看到时域波形，采样方式选择为“单次触发”或“多次触发”，点击左侧操作面板的“传函”按钮，可得到频响曲线，第一个峰就是系统的第一阶固有频率，后面的几个峰是高频频率。移动传感器或用力锤敲击筒支梁的其它部位，再进行测试，记录下各阶固有频率。

### 4、自谱测量

选择“波谱”示波方式，从第二通道的频谱图中读取前三个谱峰即为系统的前三阶固有频率。

## 5. 实验数据和结果分析

机械振动系统固有频率测量结果

频率(Hz)		第一阶频率	第二阶频率	第三阶频率
测试方法				
幅值判别法				
相位判别法图像	位移 $d$			
	速度 $v$			
	加速度 $a$			
传函判别法				
自谱分析法				



## 实验二：单自由度系统自由衰减振动 及固有频率、阻尼比的测定

### 1. 实验目的

- 1、了解单自由度系统模型的自由衰减的振动的有关概念；
- 2、学习用频谱分析信号的频率。
- 3、学习测试单自由度系统模型阻尼比的方法。

### 2. 实验仪器及安装示意图

实验仪器：INV1601B 型振动教学实验仪、INV1601T 型振动教学实验台、加速度传感器、MSC-1 力锤（橡胶头）、调速电机或配重块。软件：INV1601 型 DASP 软件。

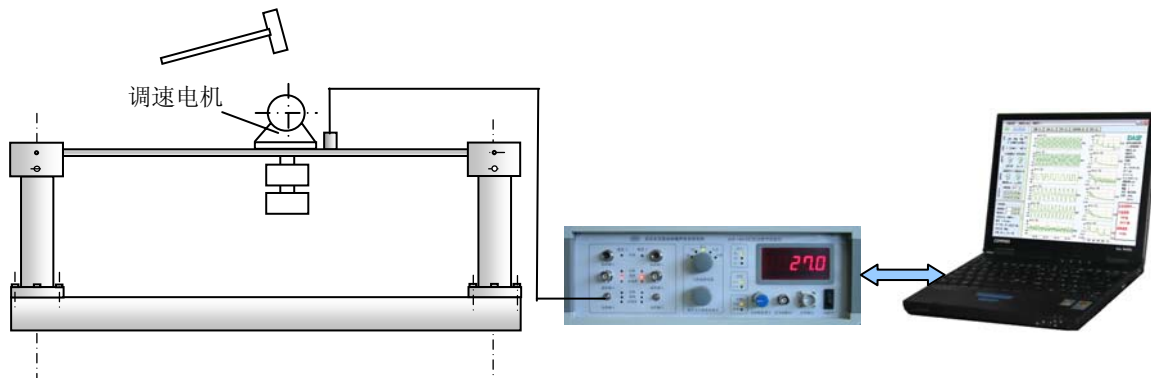


图 1 振动测试实验台的组成及连接示意图

### 3. 实验原理

单自由度系统的阻尼计算，在结构和测振仪器的分析中是很重要的。阻尼的计算常常通过衰减振动的过程曲线(波形)振幅的衰减比例来进行计算。衰减振动波形示于图 2。用衰减波形求阻尼可以通过半个周期的相邻两个振幅绝对值之比，或经过一个周期的两个同方向相邻振幅之比，这两种基准方式进行计算。通常以相隔半个周期的相邻两个振幅绝对值之比为基准来计算的较多。两个相邻振幅绝对值之比，称为波形衰减系数。

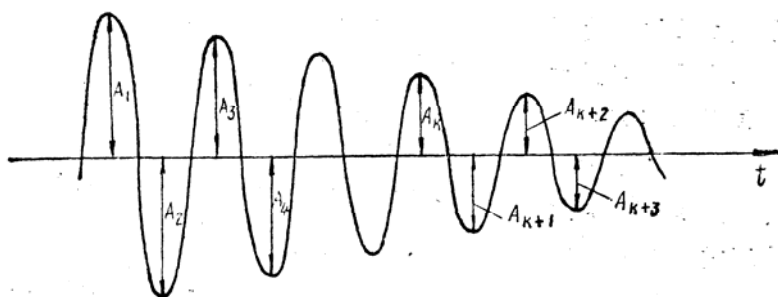


图 2 衰减振动波形

- 1、对经过半周期为基准的阻尼计算  
每经过半周期的振幅的比值为一常量，

$$\varphi = \frac{|A_K|}{|A_{K+1}|} = \frac{Ae^{-\varepsilon t}}{Ae^{-\varepsilon(t+\frac{TD}{2})}} = e^{\frac{1}{2}\varepsilon TD} = e^{\frac{\pi D}{\sqrt{1-D^2}}}$$

这个比例系数  $\varphi$  表示阻尼振动的振幅(最大位移)按几何级数递减。衰减系数  $\varphi$  常用来表示振幅的减小速率。

如果用衰减系数  $\varphi$  的自然对数来表示振幅的衰减则更加方便。

$$\delta = \ln \varphi = \ln \left| \frac{A_K}{A_{K+1}} \right| = \frac{1}{2} \varepsilon T_D = \frac{\pi D}{\sqrt{1-D^2}}$$

$\delta$  称为振动的对数衰减率。可以利用来求得阻尼比  $D$ 。

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{\pi^2 + \delta^2}}$$

引入常用对数

$$\delta_{10} = \lg \varphi = \delta \lg e = \ln \varphi \lg e$$

$$\lg e = 0.4343, \delta = \frac{\delta_{10}}{\lg e} = 2.303\delta_{10}$$

便得

$$D = \frac{0.733 \lg \varphi}{\sqrt{1 + (0.733 \lg \varphi)^2}} = \frac{\lg \varphi}{\sqrt{1.862 + (\lg \varphi)^2}}$$

阻尼比的通常求法就是用上式来进行计算。

2、在小阻尼时, 由于  $\varphi$  很小; 这样读数和计算误差较大, 所以一般地取相隔若干个波峰序号的振幅比来计算对数衰减率和阻尼比。

$$\varphi^n = \left| \frac{A_K}{A_{K+1}} \right| = e^{\frac{1}{2}n\varepsilon T_D}$$

所以

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \varphi = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{A_K}{A_{K+1}} \right|$$

在实际阻尼波形振幅读数时, 由于基线甚难处理, 阻尼较大时, 基线差一点,  $\varphi$  就相差很大, 所以往往读取相邻两个波形的峰峰值之比,

$$\frac{|A_K| + |A_{K+1}|}{|A_{K+1}| + |A_{K+2}|}$$

$$\text{在 } \frac{|A_K|}{|A_{K+1}|} = \frac{|A_{K+1}|}{|A_{K+2}|} \text{ 时, } \varphi = \frac{|A_K|}{|A_{K+1}|} = \frac{|A_K| + |A_{K+1}|}{|A_{K+1}| + |A_{K+2}|}$$

这样, 实际阻尼波形读取数值就大为方便, 求得阻尼比也更加正确。

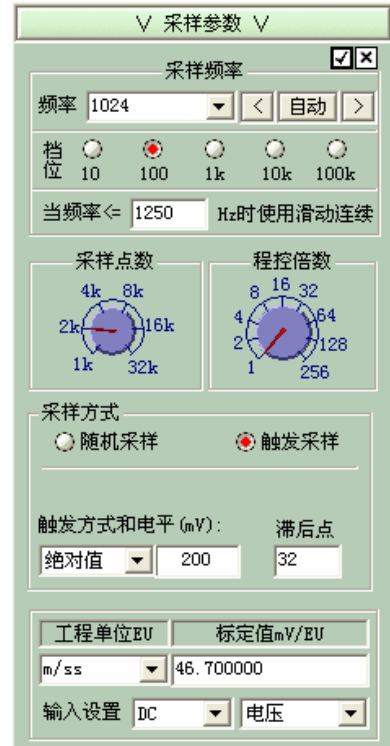
应该注意, 不同资料中的所谓对数衰减率的数值有不同定义, 有些书籍是采用半周期取值, 有的采用整周期取值, 所以计算结果不同。

## 4. 实验步骤

### 1、 仪器安装

参照仪器安装示意图安装好电机(或配重质量块, 注意事项参考前面实验)。加速度传感器接入 INV1601B 型实验仪的第一通道。加装电机(或配重)是为了增加集中质量, 使结构更接近单自由度模型。

- 2、 开机进入 INV1601 型 DASP 软件的主界面，选择**单通道**按钮。进入单通道示波状态进行波形和频谱同时示波。
- 3、 在**采样参数**中设置好采样频率 1024Hz、采样点数为 2K，标定值和工程单位等参数(按实际输入)，采样方式选择“触发采样”。
- 4、 调节**加窗函数**旋钮为指数窗。如果选中  **显示窗函数曲线**，在时域波形显示区域中就会出现一红色的指数曲线。
- 5、 用小锤或用手敲击筒支梁或电机，看到响应衰减信号，这时，按下鼠标左键读数。
- 6、 把采到的当前数据保存到硬盘上，设置好文件名、实验号、测点号和保存路径。
- 7、 移动光标收取波峰值和相邻的波峰值并记录，在频谱图中读取当前波形的频率值，如果波形较密，可以直接将波形拉开以便观察。
- 8、 重复上述步骤，收取不同位置的波峰值和相邻的波谷值。
- 9、 如果有感兴趣，移动光标收取峰值，记录峰值，利用原理中的公式手动计算。



## 5. 实验结果和分析

测得的单自由度系统的固有频率和阻尼比分别为：

实验次数	第一峰峰值			第二峰峰值			频率 (Hz)	阻尼 (%)
	波峰值	波谷值	峰峰值	波峰值	波谷值	峰峰值		
1								
2								
3								

## 实验三：多自由度系统固有频率测试

### 1. 实验目的

- 1、学习建立多自由度模型；
- 2、学习多自由度参数和振动型的计算与测试。

### 2. 实验仪器及安装示意图

实验仪器：INV1601B 型振动教学实验仪、INV1601T 型振动教学实验台、非接触式激振器、电涡流传感器、三自由度钢丝质量系统、配重块。软件：INV1601 型 DASP 软件。

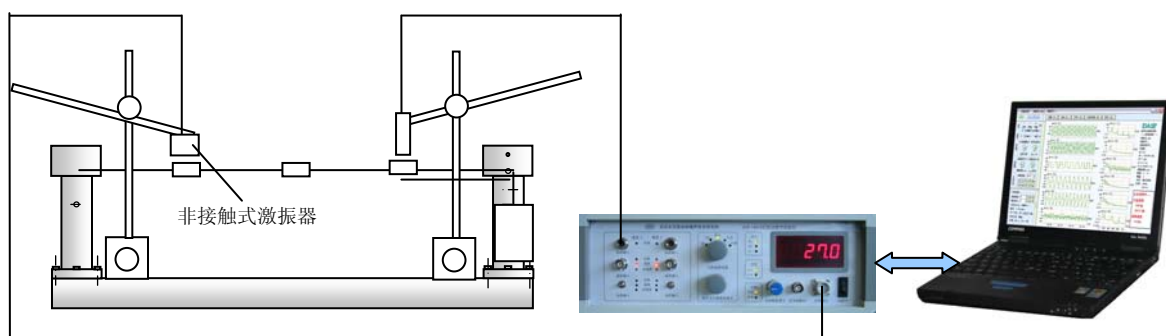


图 1 仪器连接示意图

### 3. 实验原理

通过两自由度模态的实验，大家对什么是自由度和模态已有一个比较清楚的认识，当系统的自由度是多个时，是否还存在上述的同步运动解？如果存在又如何求解。回答是肯定的。同样由特征行列所确定的方程确定了固有频率，只不过其固有频率不是两个，而是多个，模态向量相应的为多维向量。每一固有频率对应的模态向量  $\{u\}$  由下式确定：

$$([K] - \omega^2[M])\{u\} = 0$$

其中  $[K]$ 、 $[M]$  分别为系统的刚度矩阵、质量矩阵

下面以本次实验中的三自由度系统为例说明其求解过程。

如图所示的三自由度无阻尼系统,集中质量块  $m_A = m_B = m_C = m$ ,弦长度为  $L$ ,弦上拉力为  $T$ 。其运动的微分方程为:

$$[M]\{\ddot{Y}\} + [K]\{Y\} = \{0\}$$

其中

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} 8T/L & -4T/L & 0 \\ -4T/L & 8T/L & -4T/L \\ 0 & -4T/L & 8T/L \end{bmatrix}$$

其对应的特征行列式方程为：

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0$$

将行列式展开为：

$$(8T/L - \omega^2 m) \begin{vmatrix} 8T/L - \omega^2 m & -4T/L \\ -4T/L & 8T/L - \omega^2 m \end{vmatrix} + 4T/L \begin{vmatrix} -4T/L & -4T/L \\ 0 & 8T/L - \omega^2 m \end{vmatrix} = 0$$

$$(8T/L - \omega^2 m)[(8T/L - \omega^2 m)^2 - (4T/L)^2] + (4T/L)(-4T/L)(8T/L - \omega^2 m) = 0$$

解得：

$$\omega_1^2 = \frac{8T}{mL} - \frac{4\sqrt{2}T}{mL}, \quad \omega_2^2 = 8T/mL, \quad \omega_3^2 = \frac{8T}{mL} + \frac{4\sqrt{2}T}{mL}$$

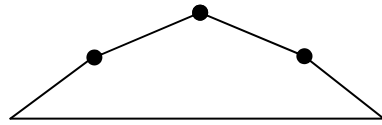
$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1.5307}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{mL}}$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{mL}}$$

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} = \frac{3.69552}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{mL}}$$

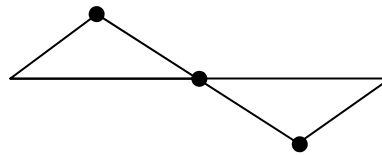
当  $\omega_1^2 = \frac{8T}{mL} - \frac{4\sqrt{2}T}{mL}$  时，解得其模态振型为：

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \end{Bmatrix},$$



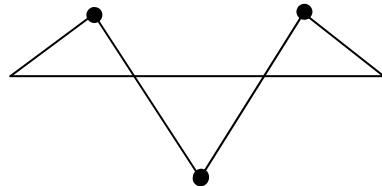
当  $\omega_2^2 = 8T/mL$  时，解得其模态振型为：

$$\phi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix}$$



当  $\omega_3^2 = \frac{8T}{mL} + \frac{4\sqrt{2}T}{mL}$  时，解得其模态振型为：

$$\phi_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -\sqrt{2} \\ 1 \end{Bmatrix},$$



## 4. 实验步骤

### 1、仪器安装

为了不对系统增加附加质量，采用了非接触式的电涡流传感器。电涡流传感器探头部分距离

测试表面约 4mm 以内。钢丝的配重为 2.5kg。非接触式激振器的输入线接到功放输出端。参考示意图连接好仪器和传感器。

三个小质量块（6g）分别固定在支承钢丝的 1/4 处、1/2 处和 3/4 处，非接触式激振器和电涡流传感器分别对着一个质量块，拧紧固定螺钉。

- 2、开机进入 INV1601 型 DASP 软件的主界面，按“多通道”进行波形和频谱同时示波。
- 3、在“采样参数”设置中推荐设置：采样频率为 500Hz，程控 1 倍、采样点数 2K、工程单位  $\mu m$ 。
- 4、打开“幅值计”按钮，调节 INV1601B 型实验仪前面板的频率调节旋钮，当质量块第一次振动幅度最大时，在左窗口中读取频率值并记录。
- 5、继续调节，当质量块第二次振动幅度最大时，在左窗口中读取频率值并记录。
- 6、继续调节，当质量块第三次振动幅度最大时，在左窗口中读取频率值并记录。

## 5. 实验结果和分析

实验次数		频率			配重拉力 ( $m(kg) \times 9.81 = N$ )	质量块 的质量 (g)	支承钢 丝长度 (m)
		一阶	二阶	三阶			
1	理论					6	0.68
	实测						
2	理论					6	0.68
	实测						
3	理论					6	0.68
	实测						
4	理论					6	0.68
	实测						

## 实验四：隔振减振实验

### 一、实验目的

- 1、学习隔振减振的基本知识；
- 2、学些隔振减振的基本原理；
- 3、了解隔振减振效果的测量；
- 4、判断系统隔振减振的有效工作频段；

### 二、实验仪器

- 1、ZJY-601T 型振动教学实验台、偏心电机、激振器。
- 2、空气阻尼器（图 1）、动力减振器（图 2）。



图 1 空气阻尼器



图 2 动力减振器

### 三、实验要求

利用实验室提供的减振隔振设备，设计一到两种隔振或减振方案（从被动隔振、主动隔振、阻尼减振、单式动力减振和复式动力减振中任选），测量所选择方案的隔振效果以及有效的工作频段。必须提供安装示意图，实验原理，详细的实验步骤以及数据记录和分析结果。