

《机械振动学》实验指导书



上海交通大学
机械与动力工程学院
基础与实验教学中心

2025 年 2 月

目 录

实验安全注意事项	1
实验预备知识	2
实验一、(1) 单自由度系统自由衰减振动的测量	6
实验一、(2) 单自由度系统强迫振动特性的测量	10
实验二、(3) 消极隔振实验	14
实验二、(4) 动力吸振器吸振实验	17
实验三、(5) 三自由度系统各阶固有频率及主振型的测量	21
实验三、(6) 锤击法简单边界梁模态测试	24
实验四、(7) 转轴的临界转速测量（自主实验）	27
实验四、(8) 影响系数法进行单面转子动平衡（探索实验）	32
附录：实验报告封面	40

实验安全注意事项

本实验系统尽管在设计、加工和安装时已充分考虑了安全方面的问题，但强烈建议学生使用时注意如下事项：

一、通电前仔细检查各活动机械部分，如激振器、偏心电机等的连接紧固情况，确保所有螺栓、卡扣等紧固无误，避免激振或旋转。

二、查看传感器、信号源、激振器等连线正确无误，确保各仪器正常工作。

三、检查各仪器电源线是否插紧插好，各仪器是否可靠接地，以防触电。

四、调压器应放置于桌面宽敞处，尽可能远离其它仪器，并且在使用时只有经检查无误后才能通电，通电前须仔细检查电机偏心轮是否紧固、调压器与电机连线、接地是否可靠，使用完毕应立即断电。

五、激振器和偏心电机工作时，禁止手或是其它物品碰到激振器顶杆和电机偏心轮，以免受伤或物品飞落。

六、所有仪器设备工作过程中发现异常应立即断电，并请专业人员检查维修。

实验预备知识

DHVTTC 振动测试与控制实验系统组成与使用方法

一、 DHVTTC 振动测试与控制学生实验系统的组成

如图 1-1 所示，本系统由“振动测试与控制实验台”、“激振与测振系统”、“动态采集分析系统”组成。

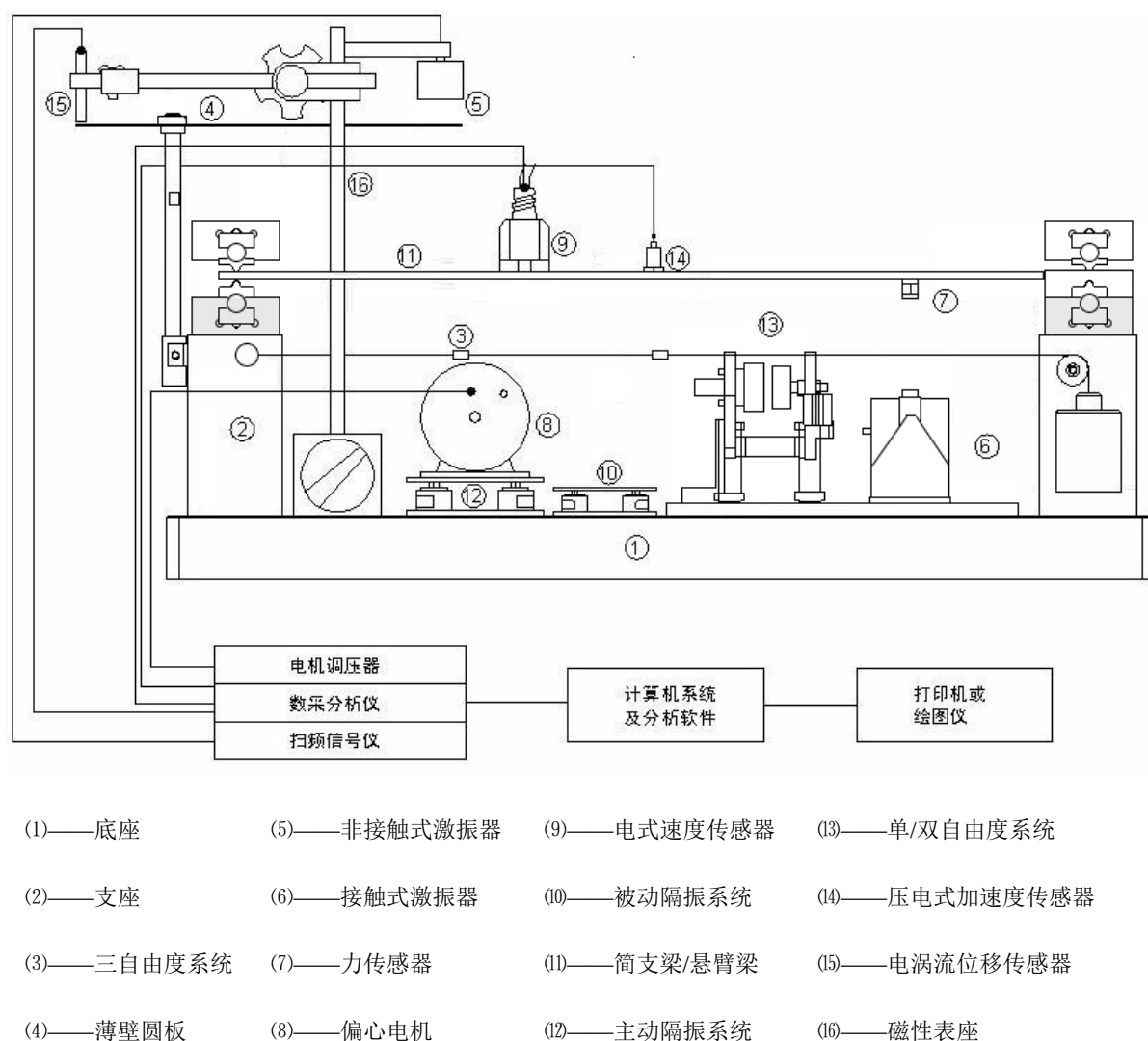


图 1-1 DHVTTC 振动测试与控制学生实验系统示意图

1.1 振动与控制实验台

振动测试与控制实验台由弹性体系统（包括简支梁、悬臂梁、单双自由度系统、三自由度系统模型）组成，配以主动隔振、被动隔振用的空气阻尼减震器、动力吸振器等，可完成振动与振动控制等 20 多个实验项目。

1.2 激振系统与测振系统

1.2.1 激振系统包括：

- DH1301 扫频信号发生器；
- DH40020 型接触式激振器；
- JZF-1 型非接触式激振器；
- 偏心电机、调压器；
- 力锤。

1.2.2 测振系统包括：

- DH620 磁电式速度传感器；
- DH187ICP 加速度传感器；
- DH902 电涡流位移传感器；
- 力传感器。

1.3 动态采集分析系统

- 信号适调器；
- 数据采集分析仪；
- 计算机系统（或笔记本电脑）；
- 控制与基本分析软件；
- 模态分析软件。

二、 DHVTC 仪器的使用方法

2.1 激振系统的使用方法

2.1.1 DH1301 扫频信号发生器

DH1301 扫频信号发生器是配有功率放大后的正弦激振信号源，可推动 DH40020 型接触式激振器或 JZF-1 型非接触式激振器。

2.1.1.1 技术指标：

- 频率范围：0.1Hz~9999.9Hz；
- 谐波失真：<1%；
- 最大输出功率：60W；
- 输出电流：0A~5.5A；
- 功耗：20W。

2.1.1.2 使用方法

先将 DH1301 信号源接通电源，并处于关闭状态，用激振器信号输入线把激振器与 DH1301 后端的功率输出接线柱相连，打开电源开关，设置一个自定义的正弦定频信号，仪器进入正常工作状态。

2.1.2 DH40020 型电动型接触式激振器的使用方法

2.1.2.1 技术指标：

- 激振频率范围：10Hz~5000Hz；
- 最大激振力：2000g；
- 最大行程：±4mm。

2.1.2.2 使用方法

激振器与被测物体可靠连接。按图 1-1 接好配置仪器，启动激振器信号源，设定相应的激振频率，即可实现对试件的激振。

2.1.3 JZF-1 型磁电型非接触式激振器的使用方法

2.1.3.1 技术指标：

- 最大激振频率范围：10Hz~1000Hz；
- 最大激振力：50g；

——安装间隙：1mm～10mm。

2.1.3.2 使用方法

将非接触式激振器安装在磁性表座上，根据被测激振件的刚度大小调节激振器与被测激振件的初始间隙。在做试验时，还应根据各阶固有频率的高低随时调节激振器与被测激振件的间隙，使互相不会发生碰撞。启动激振信号源，即可实现对试件的激振。

2.1.4 偏心电动机和调压器的使用方法

2.1.4.1 由偏心电动机和调压器组成的激振设备。

2.1.4.2 单相串激整流子电动机适用单相直流电源供电，其转速随负载或电源电压的变动而变化。我们用改变电源电压的办法来调节电动机的转速，使电动机转速可在 0～8000 转/分的范围内调节。转速的改变使电机偏心质量的离心惯性力的大小和频率发生改变，利用偏心质量的离心惯性力，即可实现对试件的激振。

2.2 动态数据采集分析仪的使用方法

仪器与传感器通过适调器或连接线连接，接上电源，启动仪器，安装 1394 驱动（若为以太网口，则跳过），打开软件进行信号采样等操作。

实验一、（1）单自由度系统自由衰减振动的测量

一、实验目的

- 1、了解单自由度自由衰减振动的有关概念。
- 2、学会用分析仪记录单自由度系统自由衰减振动的波形。
- 3、学会根据自由衰减振动波形确定系统的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。
- 4、比较不同阻尼单自由度系统衰减振动特性区别。

二、实验装置框图

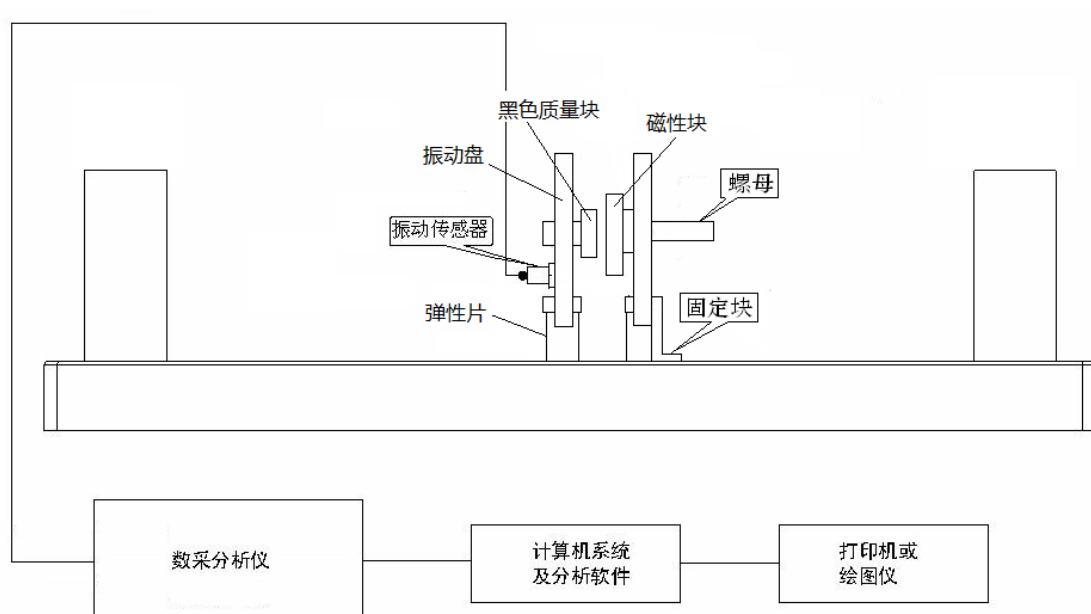


图 1-1 实验装置框图

三、实验原理

单自由度系统的力学模型如图 1-2 所示。给系统(质量 m)一初始扰动，系统作自由衰减振动，其运动微分方程式为：

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= 0 \\ \ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x &= 0 \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中： ω_n ——固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

ζ ——阻尼比 $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

小阻尼 ($\zeta < 1$) 时, 方程(1-1)的解为:

$$x = X e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (1-2)$$

式中: X —— 振动振幅

φ —— 初相位

ω_d —— 有阻尼固有频率, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

设初始条件: $t = 0$ 时, $x = x_0$, $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$, 则

$$X = \sqrt{x_0^2 + \frac{(\dot{x}_0 + \zeta \omega_n x_0)^2}{\omega_d^2}} \quad (1-3)$$

$$\varphi = a \tan \frac{\omega_d x_0}{\dot{x}_0 + \zeta \omega_n x_0} \quad (1-4)$$

式(1-2)的图形如图 1-3 所示。

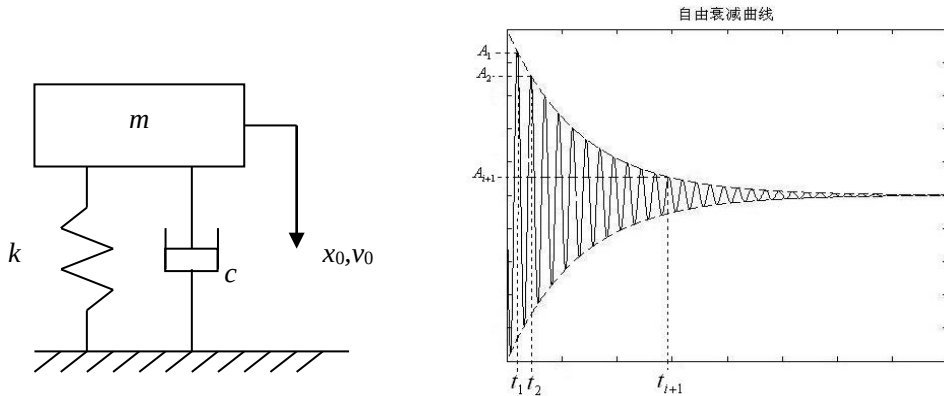


图 1-2 单自由度振动系统自由振动力学模型图 1-3 自由衰减曲线

此波形有如下特点:

- 1) 有阻尼自由振动周期 T_d 大于无阻尼自由振动周期 T_n , 即 $T_d > T_n$ 。

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (1-5)$$

- 2) 振幅按几何级数衰减

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{A_i}{A_{i+1}} = e^{\zeta \omega_n T_d} \quad (1-6)$$

$$\text{对数衰减率} \quad \delta = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} = \zeta \omega_n T_d \quad (1-7)$$

对数减幅系数也可以用相隔 i 个周期的两个振幅之比来计算：

$$\delta = \frac{1}{i} \ln \frac{A_1}{A_2} \frac{A_2}{A_3} \cdots \frac{A_i}{A_{i+1}} = \frac{1}{i} \ln \frac{A_1}{A_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1-8)$$

小阻尼 ($\zeta < 0.3$) 情况下, 可得阻尼比:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (1-9)$$

四、实验方法

1 将系统安装成单自由度小阻尼系统

使磁性定位块远离单自由度系统质量盘 (解除磁性阻尼作用);

将加速度传感器布置在测量平面上, 加速度传感器信号接到采集仪的振动测试通道。

2 仪器设置

打开仪器电源, 进入控制分析软件, 新建一个项目 (文件名自定), 在“设置”/“模拟通道”页面设置相应通道 (如 AI1-1) 的工程单位 (如 g)、灵敏度 (如 50mV/g)、量程范围 (如 10g) 和输入方式 (如 IEPE) 以及系统采样频率 (如 500Hz) 等参数。在静止状态下进行通道平衡清零。

鼠标点击“测量”进入数据采集页面, 激活“记录仪”窗口, 选择相应通道 (如 AI1-1), 鼠标点击“示波”, 数据同步采集并显示在图形窗口内。

注: 采样频率一般设置为采集信号的 10 倍~20 倍, 保证采集的信号没有幅值失真。量程范围一般设置为采集信号的 1.5 倍, 保证较高的信噪比。工程单位根据实际物理量设置, 传感器灵敏度根据传感器铭牌设置。

3 数据采集

鼠标点击“采集”, 开始数据采集。用手指拨动单自由度系统质量盘, 使其产生自由衰减振动, 重复三次, 记录单自由度小阻尼系统自由衰减振动波形。

设定 i , 利用双光标读出 i 个波经历的时间 Δt , $T_d = \Delta t / i$; 读出相距 i 个周期的两

振幅的峰峰值 $2A_1$ 、 $2A_{i+1}$ 之值，按公式 1-9 计算出阻尼比 ζ ，再按公式 1-5 计算出固有频率 ω_n 。

说明：峰峰值 $2A_i = A_i - A_{i.5}$ ($A_{i.5}$ 为 A_1 与 A_2 之间的谷值) 这样选取，可以减少零点误差。

4 数据处理

鼠标点击“分析”，选择需要输出数据的曲线，再进入“输出”页面。选择输出的类型，如图形、excel、matlab 等类型数据。

5 将系统安装成单自由度大阻尼系统

将黑色磁性块靠近单自由度系统质量盘以增加系统阻尼，即可实现大、小阻尼两种状态切换，重复以上步骤。

五、实验结果与分析

1 绘出两次单自由度自由衰减振动波形图（一个小阻尼，一个大阻尼），并进行比较。

2 根据实验数据按公式计算出阻尼比和固有频率，计算结果填入表 1-1。

表 1-1 数据分析表格

选项 类型	i	时间 t	周期 T	$2A_1$	$2A_{i+1}$	阻尼比 ζ	固有频率 ω_n
小阻尼							
大阻尼							

3 实验操作心得以及对实验结果的评价。

实验一、（2）单自由度系统强迫振动特性的测量

一、实验目的

- 1、掌握测量单自由度系统强迫振动幅频特性曲线的方法。
- 2、了解掌握实验设备的安装和使用操作方法。

二、实验装置框图

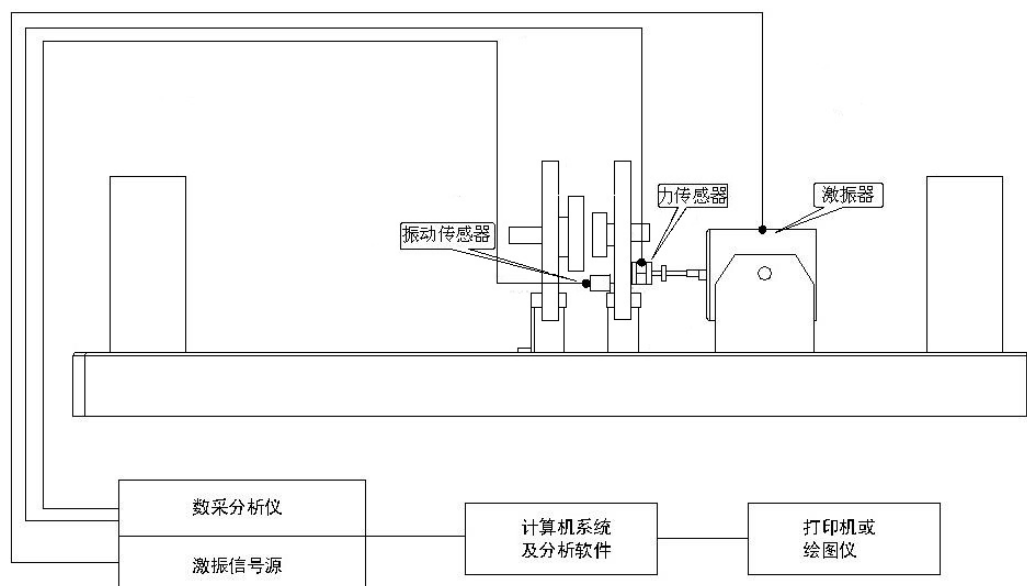


图 2-1 实验装置框图

三、实验原理

单自由度系统的力学模型如图 2-2 所示。在正弦激振力的作用下系统作简谐强迫振动，设激振力 F 的幅值 F_0 、激励频率 ω rad/s ($f=\omega/2\pi$, Hz)，系统的运动微分方程式为：

$$\begin{aligned}
 & m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \\
 \text{或} \quad & \ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

式中： ω_n ——固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$

ζ ——阻尼比 $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

方程(2-1)的特解，即强迫振动的稳态解为：

$$x = X \sin(\omega t - \varphi) = X \sin(2\pi ft - \varphi) \tag{2-2}$$

式中： X ——稳态振动振幅

φ ——相位

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{F_0}{k\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

$$H = \frac{X}{F_0} = \frac{1}{k\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2-3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta r}{1 - r^2} \quad (2-4)$$

式中：频率比 $r = \frac{\omega}{\omega_n}$

式(2-3)称为系统的幅频特性。将式(2-3)所表示的振动幅值与激振频率的关系用图形表示，称为幅频特性曲线(如图 2-3 所示)：

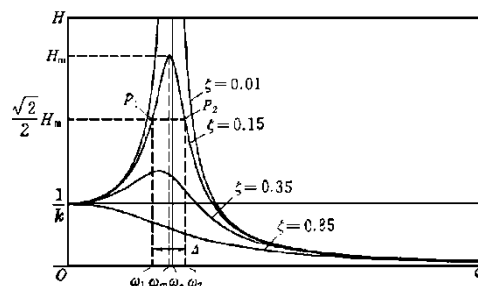
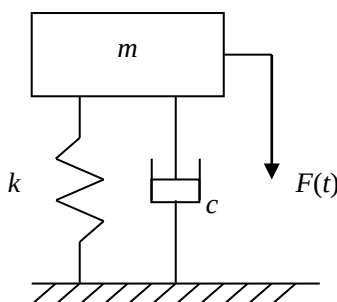


图 2-2 单自由度系统强迫振动力学模型

图 2-3 单自由度系统稳态振动幅频特性曲线

图 2-3 中， ω_n 为系统固有频率； ω_m 为系统最大幅值对应的频率， H_m 为系统最大振幅； ω_1 、 ω_2 为半功率点频率，对应的幅值为 $0.707H_m$ 。

振幅为 H_m 时的频率叫共振频率 ω_m 。在有阻尼的情况下，共振频率为：

$$\omega_m = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (2-5)$$

当阻尼较小时 $\omega_m = \omega_n$ ，故以固有频率 ω_n 作为共振频率 ω_m 。在小阻尼情况下可得：

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_m} \quad (2-6)$$

四、实验操作方法和步骤

1 设备连接

将激振器调整到水平，用顶杆连接激振器与被测的单自由度系统，专用连接线连接激振器和 DH1301 功率输出接口。加速度传感器固定在单自由度振动盘上，加速度信号通过数据线连接数据采集仪的 1 通道。

力传感器串接在被测单自由度系统和顶杆之间。力传感器测得的激振力可通过信号连接线输入数据采集仪的 3 通道。

硬件连接完毕，打开数据采集仪的电源开关。

2 采集分析软件设置

- 1) 设置采样频率(如 512Hz);
- 2) 在“通道设置”页面分别设置 1 和 3 通道：测量量、灵敏度、量程等;
- 3) 在静止状态下进行通道平衡清零。
- 4) 进入“信号处理”，选择“频响分析”弹出窗口输入如下：
 - “平均方式”选择“峰值保持”;
 - 设置频率分辨率(如 0.125Hz);
 - 在“输入”表中，鼠标左键点击“未分配”2 次，输入信号为 3 通道“激振力”，“窗函数”选择“汉窗”;
 - 在“输出”表中，鼠标左键点击“未分配”2 次，输出信号为 1 通道“加速度”，“窗函数”选择“汉窗”。
- 5) 点击窗口上方“测量”，弹出窗口输入如下：
 - 选择“2D 布局”，点击右侧的“频响分析”，出现“频响组”;
 - 点击“频响组”，选择弹出的第三项“频响”，所对应的是下面的一个窗口，显示频响。上面记录仪窗口显示的是时域信号;
 - 鼠标右击曲线右上方的色块，可修改窗口中曲线的颜色。

3 扫频信号发生器调节及数据采集

按 DH1301 扫频信号发生器的“类型”键，选择“线性扫频”。红色指示灯跳到该位置。

- 按“设置”键，分别设置扫频的起始和终止频率，扫频的范围 1~50Hz。

设定好初始频率 1Hz 后，按“确认”键。然后再次按“设置”键，显示屏上的指示灯跳到“止频”位置，设定 50Hz，再次按“确认”。第三次按设置键，指示灯跳到线性扫频间隔“扫速”，设置为 1Hz/s，按“确定”键完成设定。按“开始”键，开始线性扫频，扫频从 1Hz 至 50Hz 循环进行。

- 按信号发生器左侧面板电压调节的“▲”键 3 秒，电压值自动上升，当电压值上升至 250mV 附近时，即可按电压调节的“▼”键将电压固定。设置的激振能量达到 250mV 左右即可。
- 实验采集频响窗口的第一波峰。可以观察到当扫频频率达到单自由度系统的固有频率时，加速度传感器信号达到峰值，单自由度系统振动剧烈。
- 鼠标点击左上角的“采集”，开始采集一个完整扫频循环的数据。采集循环即将结束时，鼠标点击左上角的“停止”。
- 按信号发生器上的“停止”键结束扫频。

4 数据处理

鼠标点击软件窗口上部的“分析”。此时，如果要输出上面窗口的图，就用鼠标点击上图将其激活，然后点击上面的“输出”，保存图形、excel、matlab 等类型数据，以便对实验数据进行分析。重新点击“分析”，鼠标选中下图，激活频响窗口，即可进入“输出”模块进行频响数据的保存。

5 改变系统阻尼

将黑色磁性块靠近单自由度系统质量盘以增加系统阻尼，即可实现大、小阻尼两种状态切换，重复以上步骤。

五、实验结果与分析

- 1 根据实验中测得的数据绘制不同阻尼下系统强迫振动的幅频特性曲线。
- 2 计算系统阻尼比 ζ 和固有频率 ω_n 。
- 3 将实验获得的幅频特性曲线与图 2-4 进行比较。
- 4 比较时域法计算阻尼和半功率带宽法计算阻尼的异同。

实验二、（3）消极隔振实验

一、实验目的

- 1、建立消极隔振的概念。
- 2、掌握消极隔振的基本方法。
- 3、学会测量、计算消极隔振振动传递率和隔振效率。

二、实验装置框图

本实验中，用电动式激振器激励下振动的简单边界梁来模拟基础，用质量块 m 模拟被隔振的仪器设备，实验装置与测试仪器框图如图 3-1 所示。

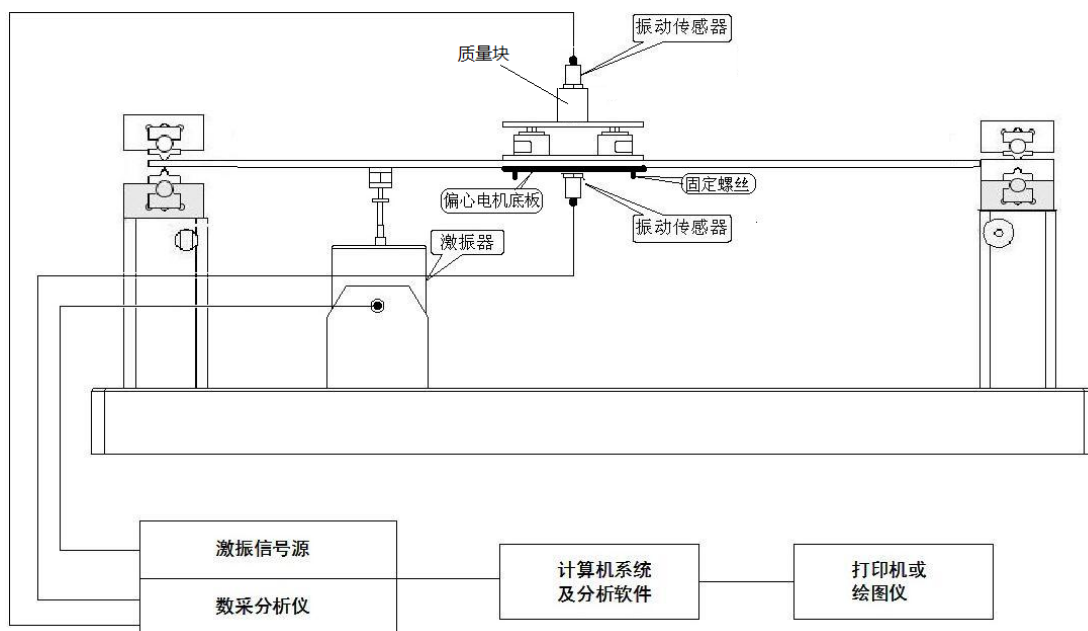


图 3-1 实验装置框图

三、实验原理

根据隔振目的的不同，通常将隔振分为积极隔振和消极隔振两类。降低设备的扰动对周围环境的影响，同时使设备自身的振动减小，称为积极隔振。减少设备地基的振动对设备的影响，使设备的振动小于地基的振动，达到保护设备的目的，称为消极隔振。以单自由度系统为例，消极隔振振动传递率等于基座传递到物体的振动与基座的振动之比，可用位移、振动速度或振动加速度的比值表示。

$$\text{隔振效率: } \varepsilon = (1 - T) \times 100\% \quad (3-1)$$

$$\text{振动传递率 } T: T = \frac{X_1}{X_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3-2)$$

式中: ζ ——阻尼比;

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \text{——激振频率和固有频率的频率比;}$$

X_1 和 X_2 ——单自由度系统质量块 m 和底座的振动位移;

A_1 和 A_2 ——单自由度系统质量块 m 和底座的振动加速度。

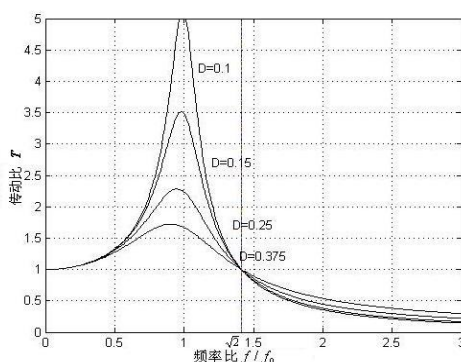


图 3-2 频响函数曲线

振动传递率随频率比 r 变化的曲线如图 3-2 所示。

四、实验步骤

1 隔振器安装

将隔振器和质量块组成的弹簧质量系统用偏心电机底板和螺丝固定在梁中部。在隔振器上方的质量块上安装加速度传感器 1, 在偏心电机底板表面上安装加速度传感器 2。加速度传感器 1、2 的输出信号分别接到数据采集分析仪的 1、2 通道。

2 激振器安装

将激振器固定在实验台基座上, 并在简单边界梁上安装力传感器, 通过顶杆将激振器与力传感器相连, 并用螺母固紧, 用专用连接线连接激振器和 H1301 扫频信号源功率输出接口。

3 仪器参数设置

首先打开采集仪器的电源开关，开机进入 DHDAS 数据采集分析软件的主界面，设置采样频率、加速度传感器量程范围，灵敏度等参数。通道平衡清零。

进入“信号处理”，选择“频响分析”，设置频率分辨率（如 0.25Hz），平均方式“峰值保持”，选择输入通道、输出通道以及各自的窗函数。

进入“测量”模块，打开三个曲线窗口，分别显示二个加速度信号的时间波形信号和频响函数。

4 数据采集

设置扫频信号源，设定起始频率 1Hz，结束频率 50Hz，扫频速度 1Hz/s，输出电压 800-900mV。鼠标点击左上角的“采集”，开始采集一个完整扫频循环的数据。

5 数据处理

鼠标点击软件窗口上部的“分析”，鼠标激活频响窗口，即可进入“输出”模块进行频响数据的输出。

五、实验结果与分析

- 1 阻尼隔振器消极隔振测试结果与分析。
- 2 请给出一个你生活中见到的消极隔振的实例。
- 3 实验操作心得以及对实验结果的评价。

实验二、（4）动力吸振器吸振实验

一、实验目的

- 1、了解动力吸振器的结构，掌握其安装、调整方法。
- 2、调整动力吸振器的固有频率，比较吸振效果，验证动力吸振器的理论。
- 3、了解吸振器的特点及适用场合。

二、实验装置框图

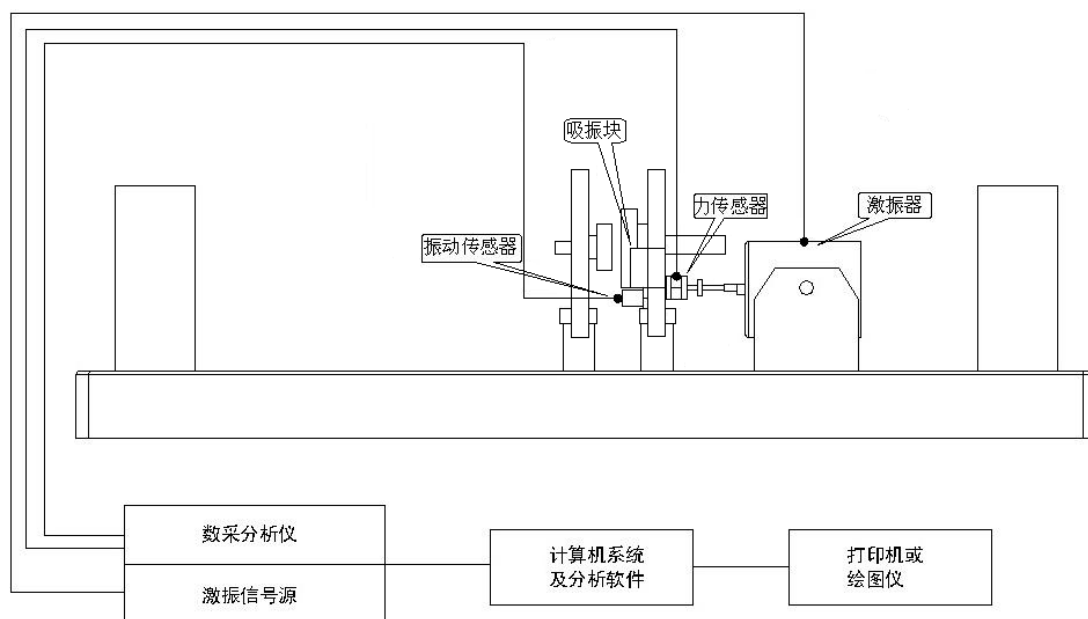


图4-1实验装置框图

三、实验原理

动力吸振是在振动主系统上附加特殊的子系统，将主系统的振动能量转移到附加的减振器系统上，转移或消耗主系统的振动能量，从而抑制主系统的振动，实现减少主系统振动的目的。当减振器的固有频率与激振力的频率相等时，就可以减弱甚至消除主系统的振动。这就是“反共振”现象。

如图 4-1 所示为一单自由度系统，其中主振动系统的质量为 m_1 ， k_1 为其刚度。其激励力频率为 ω ，水平方向的振动位移为 $x_1(t)$ 。此系统的固有频率为 $\omega_1 = \sqrt{k_1 / m_1}$ 。当激励力的频率 ω 接近系统的固有频率 ω_1 时，产生强烈共振。为了减少振动，可采用消除振源的办法，或改变系统的 m_1 和 k_1 ，从而调整其固

有频率，避开激励力的频率 ω 。

本实验中采用附加减振装置的方法。在原系统上另外加一个质量为 m_2 ，刚度为 k_2 的无阻尼“弹簧-质量”子振动系统，与原系统构成一个两自由度系统，通过选择适当的参数 m_2 和 k_2 ，可将主振动系统的振动转移到子振动系统，从而使主振动系统 m_1 的振幅减弱甚至降为零。附加系统的固有频率为 $\omega_a = \sqrt{k_2/m_2}$ 。该两自由度系统的运动方程为：

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = F_0 \sin \omega t \quad (4-1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (4-2)$$

方程的稳态解为

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_1 \sin \omega t \\ X_2 \sin \omega t \end{Bmatrix} \quad (4-3)$$

式中

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2) F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2}$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2}$$

上述 X_1 、 X_2 均为实数。由上式可见，当 $\omega_a = \omega$ 时，有：

$$X_1 = 0, \quad X_2 = -\frac{F_0}{k_2}$$

相应地有：

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{F_0}{k_2} \sin \omega t \end{Bmatrix} \quad (4-4)$$

此时主系统静止不动，而吸振器以 $x_2(t) = -\frac{F_0}{k_2} \sin \omega t$ 规律运动，事实上，此

时吸振器对主系统的作用力为 $k_2 X_2 = -F_0 \sin \omega t$ ，与主系统上作用的激振力正好

大小相等，方向相反，即主系统上所受的合力为零。由此可见，只要该吸振器的固有频率与激振力的频率 ω 相等，就可以使主系统的振动完全消除。这就是“反共振”现象。

四、实验操作步骤及方法

1 设备连接

将激振器调整到水平，用顶杆连接激振器与被测的单自由度系统，专用连接线连接激振器和 DH1301 功率输出接口。加速度传感器固定在单自由度振动盘上，加速度信号通过数据线连接数据采集仪的 1 通道。

力传感器串接在被测单自由度系统和顶杆之间。力传感器测得的激振力可通过信号连接线输入数据采集仪的 3 通道。

硬件连接完毕，打开数据采集仪的电源开关。

2 仪器参数设置

开机进入 DHDAS 数据采集分析软件的主界面，在“设置”/“模拟通道”页面设置采样频率、加速度传感器和力传感器的量程范围，灵敏度等参数。通道平衡清零。

进入“信号处理”界面，选择“频谱分析”模块，选择通道，设置频率分辨率。在采集界面，“记录仪”窗口显示振动信号的时间波形，“FFT”窗口显示振动信号的频谱。

3 数据采集

设置 DH1301 扫频信号发生器类型“正弦定频”模式，调整激振频率约在 18-22Hz 之间，并将激振电压调整为 250mV 左右，使单自由度系统产生较大的振动。点击“采集”记录加速度传感器和力传感器的信号，在窗口中分别读取当前振动的幅值、频率值。

调节吸振器上的调节螺母，转动质量块，观察波形，使其幅值达到最小时，停止调节，记录其幅值及频率。

4 数据处理

鼠标点击软件窗口上部的“分析”，鼠标激活频响窗口，即可进入“输出”模

块进行频谱数据的输出。

五、实验结果与分析

1 实验结果及分析

表 4-1 数据分析表格

	调节前	调节后
频率	$f_1=(\quad)\text{Hz}$	$f_2=(\quad)\text{Hz}$
幅值	$A_1=(\quad)\text{g}$	$A_2=(\quad)\text{g}$

2 动力吸振器有什么局限性，有什么解决方案吗？

3 比较动力吸振器和阻尼隔振器的异同。

4 请谈谈你对独立完成动力吸振实验的体会和实验操作心得。

实验三、（5）三自由度系统各阶固有频率及主振型的测量

一、实验目的

- 1、学会用共振法确定三自由度系统的各阶固有频率。
- 2、观察三自由度系统的各阶振型。
- 3、将实验所测得的各阶固有频率、振型与理论计算值比较。

二、实验装置框图

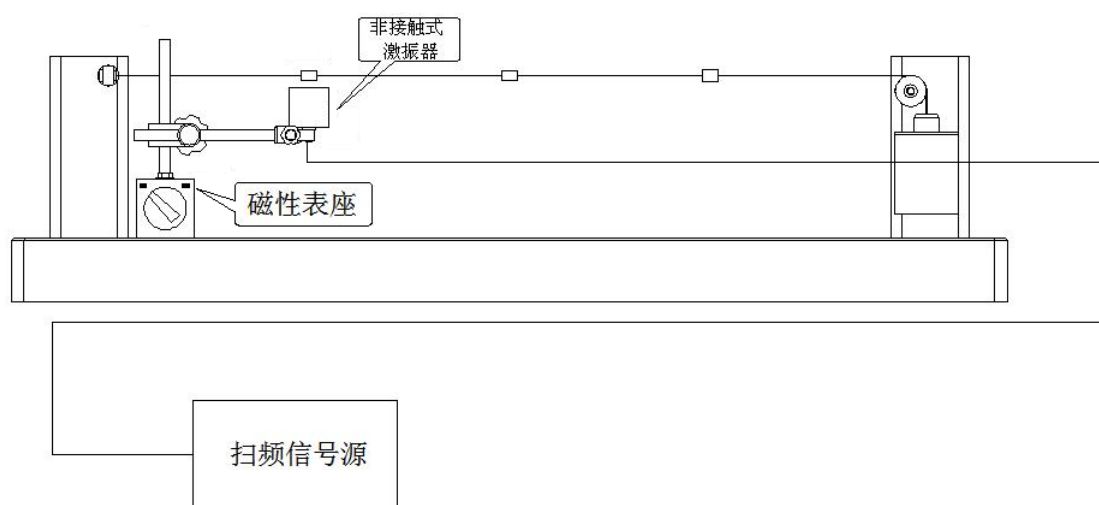


图 5-1 实验装置框图

三、实验原理

把三个钢质量块 m_A 、 m_B 、 m_C (集中质量 $m_A = m_B = m_C = m$) 固定在钢丝绳上，钢丝绳张力 T 用不同重量的重锤来调节。在平面横振动的条件下，忽略钢丝绳的质量，将一无限自由度系统简化为三自由度系统。由多自由度系统振动理论可知，三个集中质量的运动可用下面的方程来描述：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (5-1)$$

式中，质量矩阵 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}$

$$\text{刚度矩阵 } \mathbf{K} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} 8 & -4 & 0 \\ -4 & 8 & -4 \\ 0 & -4 & 8 \end{bmatrix}$$

$$\text{位移矩阵 } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

系统的各阶固有频率为：

$$\text{一阶固有频率 } \omega_1^2 = 2.343 \frac{T}{mL} \quad f_1 = \frac{1.531}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{mL}} \quad (5-2)$$

$$\text{二阶固有频率 } \omega_2^2 = 8 \frac{T}{mL} \quad f_2 = \frac{2.828}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{mL}} \quad (5-3)$$

$$\text{三阶固有频率 } \omega_3^2 = 13.656 \frac{T}{mL} \quad f_3 = \frac{3.695}{2\pi} \sqrt{\frac{T}{mL}} \quad (5-4)$$

式中：弦上集中质量 $m=0.0045 \text{ kg}$

弦丝张力 T ，单位：N (吊挂质量近似按 1kg 计，即 $T=1\text{kgf}=9.8\text{N}$)

弦丝长度 $L=0.625$ ，单位：m

固有频率 f ，单位：Hz

进一步可计算出各阶主振型 A_i ($i=1,2,3$):

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\sqrt{2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

各阶主振型如图 5-2 所示。

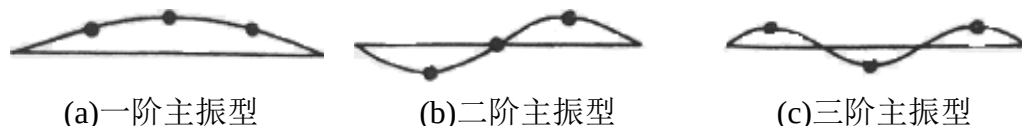


图 5-2 三自由度系统的主振型

对于三自由度系统，有三个固有频率，系统在任意初始条件下的响应是三个主振型的迭加。当激振频率等于某一阶固有频率时，系统的振动突出为主振动，系统的振型由该阶主振型决定，其它阶的主振型可忽略不计。主振型与固

有频率一样只取决于系统本身的物理性质，而与初始条件无关。测定系统的固有频率时，只要连续调整激振频率，使系统出现某阶振型且振幅达到最大，此时的激振频率即是该阶固有频率。

四、实验方法

1 安装激振器

把非接触激振器安装在磁性表座上，将激振器和磁性表座固定在实验台基座上，并保证非接触激振器与钢丝质量块距离在 10mm 左右（如图 5-1 所示），使振动时激振器不碰撞质量块。用专用连接线连接非接触激振器和 DH1301 输出接口。

2 设置信号发生器并观察现象

开启 DH1301 的电源开关，选择“正弦定频”模式，设置信号发生器的频率比一阶固有频率的理论值小 2~3Hz，按面板上“开始”键，调节 DH1301 扫频信号源的激振电压到 900-1000mV，调节激振频率由低到高逐渐增加（建议 0.1Hz 间隔），当观察到系统出现如图 5-2 所示的第一阶振型且振幅最大时，激振信号源显示的频率就是系统的一阶固有频率测量值 f_1 。依此下去，可得到如图 5-2 所示的第二、三阶振型和二、三阶固有频率 f_2 、 f_3 。

五、实验结果与分析

1 各阶固有频率的理论计算值与实测值分析。

表 5-1 数据分析表格

弦 丝 张 力	T=1×9.8 (N)		
固 有 频 率	f_1	f_2	f_3
理 论 值	()Hz	()Hz	()Hz
实 测 值	()Hz	()Hz	/

2 将理论计算出的各阶固有频率、理论振型与实测固有频率、实测振型相比较，是否一致？产生误差的原因在哪里？

3 为什么三阶振型比较难测得？是什么原因造成的？如何改善实验效果？

实验三、（6）锤击法简单边界梁模态测试

一、实验目的

- 1、熟悉模态分析原理和测试方法。
- 2、学习简单边界梁模态测试数据的分析处理方法。

二、实验仪器安装示意图

试验装置如图 6-1 所示。通过调整夹具，简单边界梁可以安装为悬臂梁或简支梁。

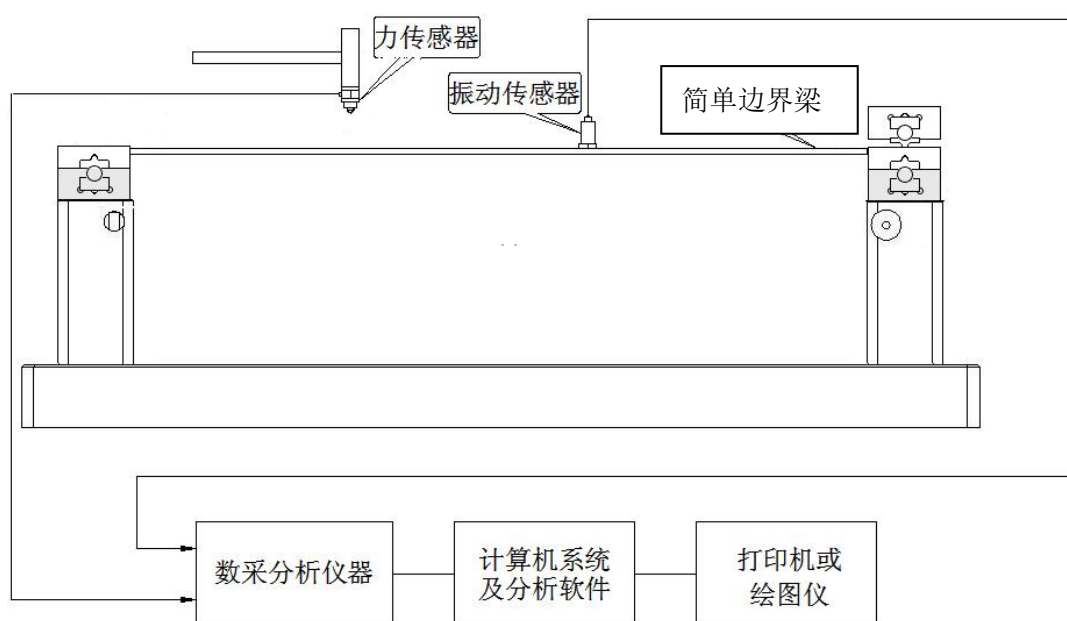


图 6-1 实验装置框图

三、实验原理

模态测试通过振动测试来确定系统的固有频率、阻尼比和模态形状（振型）。模态分析的目的在于建立结构振动响应的预测模型，以便对结构进行控制或优化设计。模态分析分两步进行：第一步为通过试验获得结构的频响函数曲线；第二步为通过曲线拟合求出模态参数，称为参数辨识。

本实验采用单点激励，多点拾振的方法进行测试分析。实验装置如图 6-1 所示。将简支梁均分为 4 等分，梁上的 3 个均分点作为测点。加速度传感器在这 3 个测点移动，锤击点始终在第 3 测点位置。

四、实验步骤

1 硬件连接

观察简单边界梁，在梁上标记出 3 个测点。加速度传感器安装在简单边界梁上 1 号测点，通过信号线连接到采集系统的 1 通道。力锤上的力传感器通过信号线连接到采集系统的 3 通道。

2 仪器参数设置及数据采集

1) 进入**参数设置**页面，设置采样频率，加速度传感器和力传感器的测量量、灵敏度、量程等。采集前进行平衡清零。

2) 进入**信号处理**页面： 选择**频响分析**

设置**触发**采集，触发通道 3(力通道)，触发量级 10%，负延时 300 点数（预采集一段空数据，然后采集锤击信号），频率分辨率：0.5Hz， 平均次数：4 次，选择：手动确认滤除；

输入：3 通道（锤击力），测点号：3，方向：+Z

输出：1 通道（加速度），测点号：1，（2，3 依次对应每次锤击），方向：+Z

3) 进入**测量**页面：添加 4 个 2D 图谱，平铺

将 4 个 2D 图谱依次对应右侧的**频响组**里的前 4 个选项。

第一个窗口：加速度

第二个窗口：力

第三个窗口：频响函数

第四个窗口：相干性

4) **采集**：点击“采集”按钮，等待触发信号，锤击 3 号测点，取 4 次有效数据，点击“停止”按钮。

5) 将加速度传感器移动到 2 号测点

再进入**信号处理/频响分析**，修改输出通道测点号 2，然后进入测量页面，重新“采集”4 次锤击产生的信号。

6) 将加速度传感器移动到 3 号测点

再进入信号处理，修改输出通道测点号 3，然后进入测量页面，重新“采集”4次锤击产生的信号。

3 模态辨识

1) 进入到模态界面

建立模型，选择矩形，长度 4 等分，宽度 1 等分，确定显示测点和节点号。

点击矩形模型，在右边设置节点与测点的对应。保存。

2) 进入模态\数据界面

选择：√测力法和√单点激励；

添加：三批数据；保存。

3) 进入参数识别界面，选择二根垂线光标和一根水平光标，将三个峰值曲线框在其中。然后点击：稳态图计算，鼠标点选带有 s 标记的峰值，取：振幅值归一化选项，点击保存。

4) 进入“模态\振型”界面

动画显示 1 阶、2 阶和 3 阶振型。选择模态动画显示的合适时机点击窗口停止按钮，将静态图保存。

五、实验结果与分析

1 记录模态参数。

表 6-1 数据分析表格

模态参数	第一阶	第二阶	第三阶
频率			
阻尼比			

2 打印出各阶模态振型图。

3 请对比“三自由度系统各阶固有频率及主振型的测量”的结果，谈一下你的理解。

4 实验操作心得及实验结果分析与思考。

实验四、（7）转轴的临界转速测量（自主实验）

在完成了上述六组实验后，同学们已经了解测试系统组成、掌握实验步骤，并能够独立分析实验数据，获得准确可靠的实验结果。为了提高同学们的实验能力，在此基础之上开设本实验，供大家选修。同学们可以参考实验指导书，提前预习，自主完成本实验，实验课老师将现场提供辅助指导和答疑解惑。

一、实验目的

- 1、理解转子在不平衡质量激励下瞬态过程中的动态特性。
- 2、深刻理解转子临界转速的概念，以及转子在临界转速的动力特征。
- 3、掌握波特图、阶次谱等分析手段在旋转机械故障诊断中的应用。

二、实验装置框图

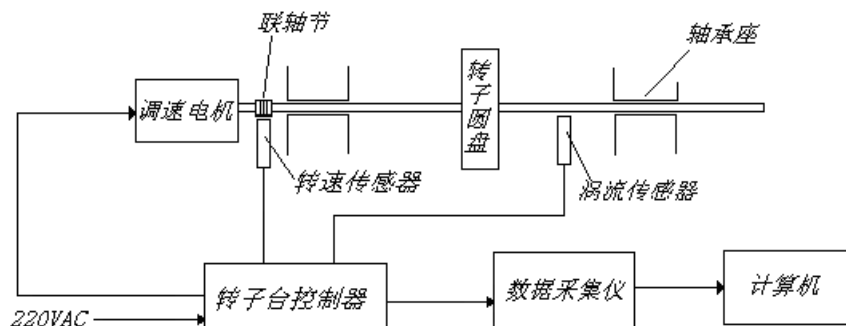


图 7-1 转子测试系统组成图

三、实验原理

转子不平衡激励下的动态响应公式：

$$|a| = \frac{me\omega^2}{m\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega\omega_n)^2}} = \frac{er^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (7-1)$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (7-2)$$

式中， $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ ——激励频率与固有频率之比。

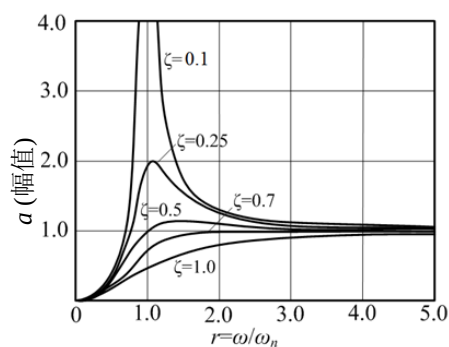


图 7-2 转子在不平衡激励下的幅频特性

图 7-2 显示在不同阻尼比下，转子在不平衡质量激励下的动态响应。由于阻尼的存在，转子的不平衡响应在 $\omega = \omega_n$ 不是无穷大而是有限值，而且不是最大值，最大值发生在 ω_n 附近。对于实际的转子系统，往往用测量响应的办法来确定转子的临界转速。因为在转子升速或降速过程中测响应得最大值比较容易，常常把出现峰值的转速作为临界转速，测量得到的临界转速在升速时略大于前面定义的临界转速 ω_n ，而在降速时则略小于 ω_n 。

由于阻尼的存在，响应和激励的相位差不再是 0 或者 π ，说明圆盘中心（即圆盘与转轴的结合点）、质心和固定点（转轴两端轴承中心连线与圆盘的交点）不在同一直线上，但是当转速远大于临界转速时，相位差接近 π ，质心趋近于固定点，圆盘中心偏离固定点的值趋近于偏心距，称为“自动对心”效应。

四、实验步骤

1 转子台及电涡流传感器的安装

转子横截面 X 和 Y 两个方向分别安装了一个电涡流位移传感器，接到信号采集系统的 1、2 通道。电机输出端安装了光电传感器测量转子的转速，接到信号采集系统的转速通道。

2 转子台控制器设置

接通转子台调速器电源，打开面板上的“电源”开关。开始设置转子台控制器，主要是设置转子台的最高转速，使设置的最高转速高于临界转速，转子台临界转速在 3000rpm 附近。转子台控制器如图 7-3 所示。

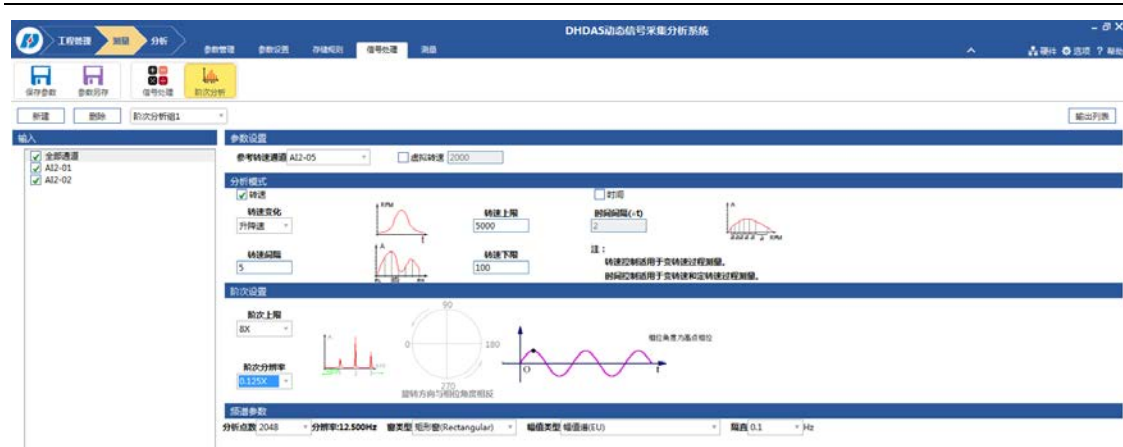


图 7-6 阶次分析参数设置

4 数据采集

点击“测量”窗口下“图形区设计”，建立 3 个“2D 图谱”窗口，分别选择为相应电涡流通道的阶次图、重采样时域图、Bode 图，建立 1 个“x-y 记录仪”窗口，用于记录转子轴心轨，采集界面如图 7-7 所示。

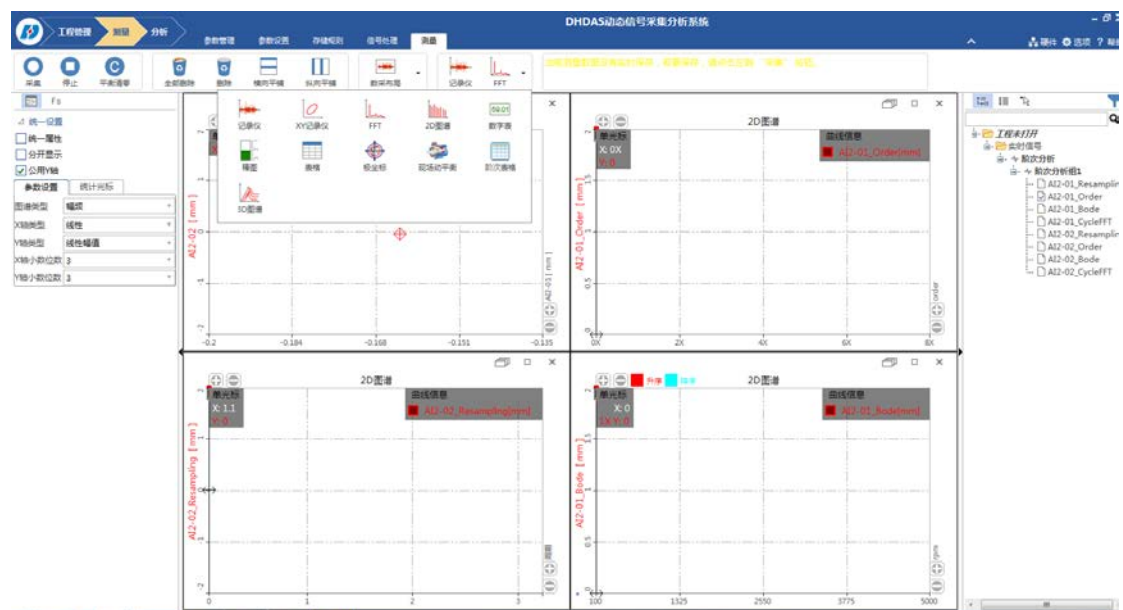


图 7-7 采集界面

点击“采集”按钮开始采集。

按下转子台控制器上的“启动/停止”红色按钮，使转子转动起来，待转速稳定，“稳速”指示灯亮后可按“升速”键，逐渐升速直到最高转速。“稳速”指示灯亮后可按“降速”键，转子逐渐降速直到停止。

点击“停止”完成数据采集。转子台控制器面板上“启动/停止”红色按钮上面的灯亮起时，关闭电源开关。

5 数据分析

观察阶次图、轴心轨迹、Bode 图曲线随转速的变化。点击“光标类型”下“单光标”，找出幅频图中的共振峰值，该峰值对应的转速即为临界转速。如图 7-8 所示。分别输出升速和降速过程 Bode 图曲线的图片文件。



注意：在临界转速附近，使转子快速通过临界转速，禁止使转子台在临界转速附近长期停留，以免振动过大，损坏转子试验台。

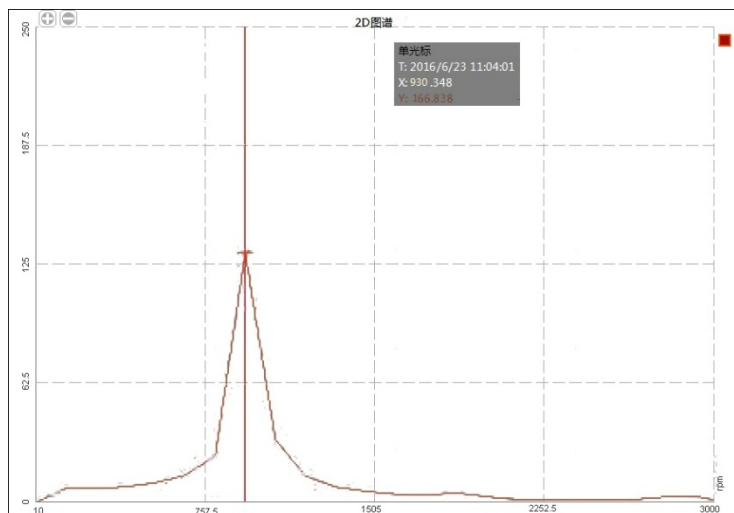


图 7-8 临界转速值

五、实验结果与分析

- 1 分别画出升速和降速的 Bode 图，计算出临界转速。
- 2 请谈谈你对转轴的临界转速测量的体会和实验操作心得。

实验四、(8) 影响系数法进行单面转子动平衡（探索实验）

各类重要机械装备的发展趋势是在高温、高压、高速等极端环境中工作，机械振动测试方法也会随着发展趋势而不断改进。为了激发同学们从实践中学习的兴趣，提高从事探索性研究的能力，开设本实验。

本实验为开放性实验，不限定实验参数和条件，同学们可以参考实验指导书，提前预习，考虑实验方案，自主完成本实验。希望同学能在实验中分析影响实验结果的参数和因素，从实验中总结出内在特性和特征。实验课老师将提供现场辅助指导和答疑解惑。

一、实验目的

- 1、理解影响系数法的含义。
- 2、了解单面转子动平衡的实现方法和操作步骤。
- 3、学会用影响系数法来进行单面转子动平衡的实验。

二、实验装置框图

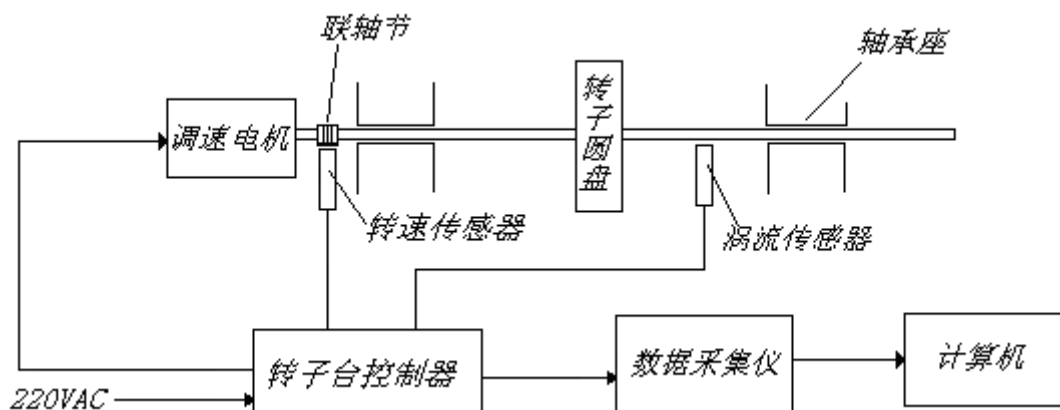


图 8-1 测试系统组成图

三、实验原理

影响系数法是转子动平衡的主要方法之一。其基本思想是：转子与转轴组成的振动系统是一个线性系统，因此轴承处的振动响应是各平衡面的不平衡量独自引起的振动响应的线性叠加。而各平衡面上单位不平衡量在各轴承处引起的振动响应称为影响系数。在现场动平衡的做法就是通过确定各个影响系数来

求出应该在平衡面上加（减）的平衡校正量。

不论是单面动平衡还是双面动平衡的计算，首先都要选择试加重量，试加重量是否合适，不但关系到转子平衡工作的顺利与否，而且还关系到转子平衡效果。通常，当转子在机器本体上进行平衡时，每一个加重平衡面上的试加重量由下式求得：

$$P = A_0 \frac{Gg}{r\omega^{2S}} \quad (8-1)$$

式中：P——转子某一侧端面上的试加重量；

A_0 ——转子某一侧轴承的原始振幅；

r ——加重半径；

ω ——平衡时转子角速度；

G——转子质量；

g——重力加速度；

S——灵敏度系数。

用影响系数法进行单平面平衡适用于转子较短、转盘又较薄的平盘类转子，因此在一个平面加重或去重就基本可以消除不平衡力。

具体步骤为：

- （1）转子不加重，第一次启动至额定的转速或选定的转速（如 1000RPM），测取平衡转子的轴承原始振幅和相位，以矢量 A_0 表示。
- （2）以上面的公式求取试加重量，并加到转子上。
- （3）第二次启动到与第一次相同的转速时，测取轴承振动的幅值和相位，以矢量 A_{01} 表示。
- （4）转子上应加平衡重量由下式求得：

$$Q = \frac{A_0}{A_{01} - A_0} P \quad (8-2)$$

式中： $A_{01}-A_0$ 表示转子上加了试加重量 P 所产生的振动矢量，一般称为加重效应。

令 $A_1=A_{01}-A_0$ ，则上面的公式可改写为

$$Q = \frac{PA_0}{A_1} \quad (8-3)$$

式中： P/A_1 的倒数称为影响系数，一般用 α 表示，它是矢量，表示在转子上加单位（kg）重量、加在零度方向、半径为 1m 处或固定半径处，在某一个振动测点上所呈现的振动矢量。它表示了某一台机组在指定的轴承上、在一定的转速下、使用一台固定的测振仪器，测量获得的轴承振幅、相位与转子上加重大小、方向之间的一个关系常数，利用这个关系常数，可以列出转子平衡方程式，即 $\alpha Q + A_0 = 0$ ，式中 α 、 A_0 均为已知，求解该方程式即可求得转子上应加平衡重量 Q ，这种平衡方法称为影响系数法。

四、实验步骤

1 转子台及电涡流传感器的安装

转子横截面 X 和 Y 两个方向分别安装了一个电涡流位移传感器，接到信号采集系统的 1、2 通道。电机输出端安装了光电传感器测量转子的转速，接到信号采集系统的转速通道。

2 转子控制器设置

接通转子台调速器电源，打开面板上的“电源”开关。设置转子台控制器参数，主要是设置转子台的设定转速 1500rpm 作为做动平衡的转速。

3 系统参数设置

接通信号采集仪器电源，并打开电源开关，连接仪器，参考实验（7）设置模拟通道参数和转速通道参数，对通道进行平衡清零操作；

单击“测量”界面下的“现场动平衡”按钮，进入动平衡界面。

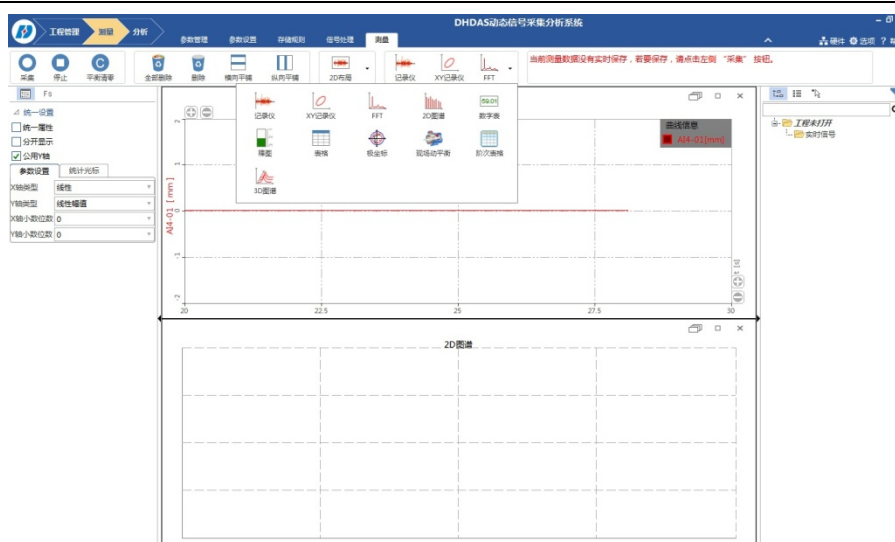


图 8-2 进入现场动平衡模块

根据现场实验情况设置实验面数、转子质量、安装半径、平衡精度等参数，选择参考转速通道和振动通道，具体参数可参考图 8-3，设置完毕后点击“开始”按钮进行现场动平衡。



图 8-3 现场动平衡主界面

4 数据采集

按下转子台控制器上的“启动/停止”红色按钮，使转子转动起来，待转速稳定，“稳速”指示灯亮后可按“升速”键，待转子逐渐升速到设定转速。

点击“开始”后首先进入“初始振动测量”的界面，点击右上方的“测量”按钮，下方将以数字的形式显示转子设备的转速值、初始振动幅值和相位，同

时能够显示对应的冲采样波形和阶次图，采集完成后点击“停止”按钮，完成采集，如图 8-4。

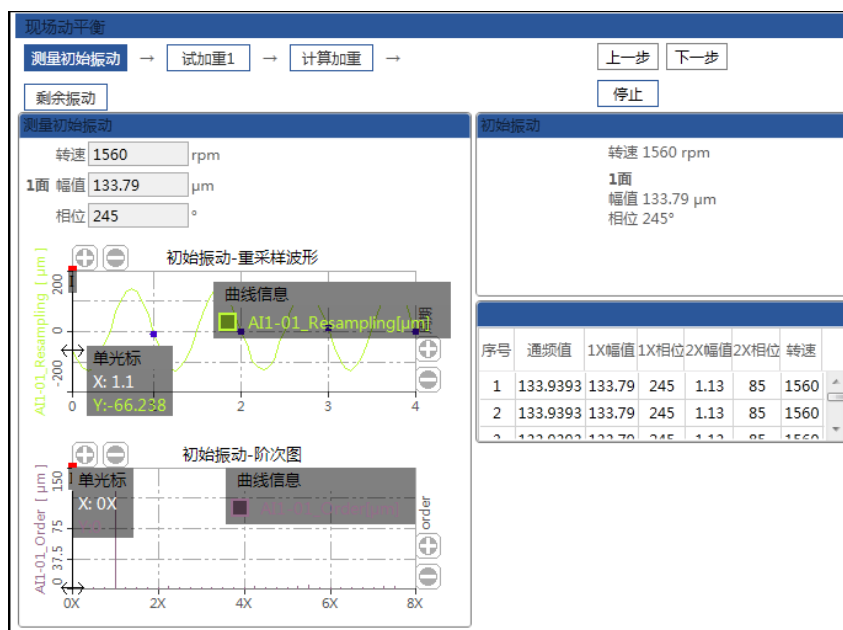


图 8-4 测量初始振动

按下转子台控制器上的“降速”按钮，使转子停止转动。

在未知影响系数的情况下，点击“下一步”按钮将进入“试加重”界面，输入所加试重质量和位置，选择“保留”或者“去除”试重。此处“保留”是指将试加重的质量保留在单面转子上；“去除”是指将试加重的质量从单面转子上移除。

按“升速”键，待转子逐渐升速直到设定转速。

点击“测量”按钮，采集加上试重后的振动幅值和相位，采集完成后点击“停止”按钮，完成采集，点击“下一步”按钮进入“计算加重”的界面，影响系数将根据试加重自动计算，并显示在“计算加重”界面内（对于多面动平衡，需要进行多次试加重过程，其操作步骤不变），如图 8-5。

现场动平衡

测量初始振动 → 试加重1 → 计算加重 →

剩余振动

试加重1

试重估计 2 g --- 4 g

试重质量 3 g 试重位置 90

测试完毕试重 ☐ 保留 ☒ 去除

1面转速 1560 rpm

相位 120°

幅值 156.8 μm

幅值变化 17.2 %

90 180 270 0

旋转方向与相位角度相反

初始振动

转速 1560 rpm

1面

幅值 133.79 μm

相位 245°

序号	通频值	1X幅值	1X相位	2X幅值	2X相位	转速
1	133.9393	133.79	245	1.13	85	1560
2	133.9393	133.79	245	1.13	85	1560
3	133.9393	133.79	245	1.13	85	1560

图 8-5 试加重

在已知影响系数的情况下，可跳过“试加重”的过程，直接从“测量初始振动”界面进入“计算加重”的界面，通过手动的方式输入影响系数值，点击“计算”按钮，软件将根据影响系数和初始振动计算出加重质量和位置，当在计算出的位置安装质量比较困难时，可通过下方的“矢量分解”功能对最终结果进行分解，方便安装，如图 8-5。

按下转子台控制器上的“降速”按钮，使转子停止转动。根据计算出的加重质量和相位信息，安装配重。如果上面步骤选择“保留”，则之前试加重的质量保留在单面转子上；如果选择“去除”，则将之前试加重的质量从单面转子上移除。

按“升速”键，待转子逐渐升速直到设定转速。

现场动平衡

测量初始振动 → 试加重1 → 计算加重 → 上一步 下一步

剩余振动

计算加重

影响系数

A点对1面 79 g 2 °

平衡重量 计算

A点 1.7 g 62.6 °

矢量分解

0 ° 0.0 g

0 ° 0.0 g

90

0 180

270

旋转方向与相位角度相反

初始振动

转速 1560 rpm

1面

幅值 133.79 μm

相位 245°

序号	通频值	1X幅值	1X相位	2X幅值	2X相位	转速
1	133.9393	133.79	245	1.13	85	1560
2	133.9393	133.79	245	1.13	85	1560

图 8-6 计算加重

点击“下一步”按钮，进入“平衡效验”界面，点击“测量”按钮，采集剩余振动幅值和相位，右侧可显示加重完毕后的幅值变化情况，如果振动下降率满足需求则完成实验。采集完成后，点击“停止”按钮；试验完成后，点击“完成”按钮可保存此次试验数据，如图 8-7。

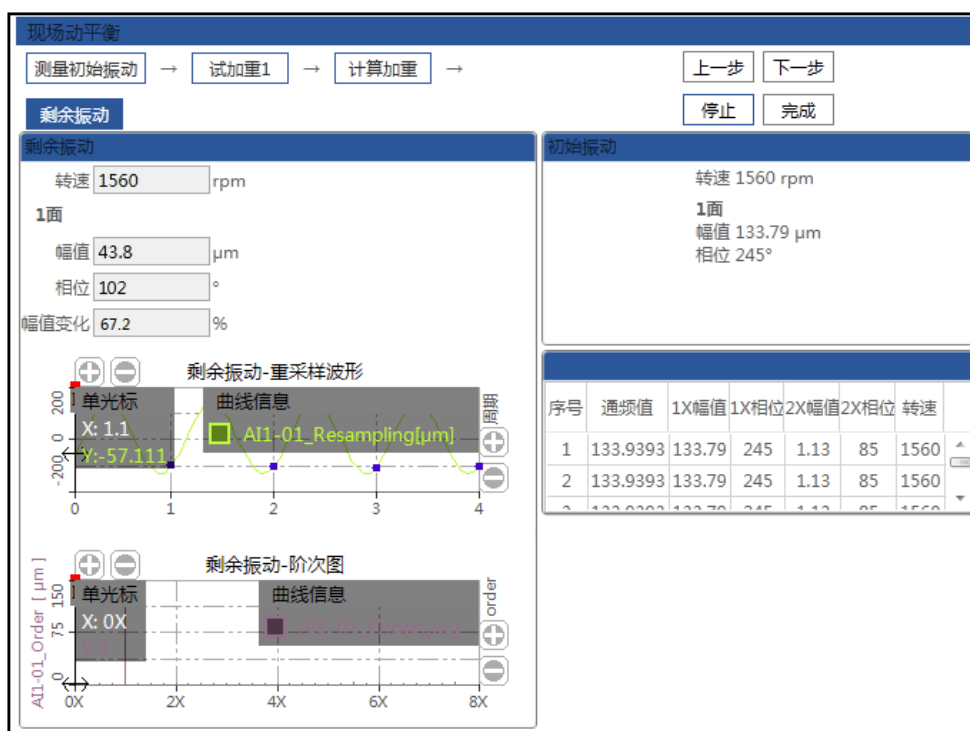


图 8-7 平衡效验

5 数据分析

点击左侧参数栏中的“重新开始”按钮将清空本次实验数据重新开始实验，点击“读取数据”按钮，可打开已保存的动平衡数据，点击“输出报告”按钮，将本次实验结果以报告的形式输出成 word 文档。

如通过一次平衡不能达到理想效果，可重复以上平衡过程，以达到平衡目标精度。

实验完成后，先停止采样，关闭软件后，停止转子台，再关掉仪器电源等，将实验台收拾干净后离开。

五、实验结果和分析

- 1 实验数据分析。
- 2 实验操作心得与思考。

附录：实验报告封面

机械振动学实验报告

第 次实验



姓名 _____

学号 _____

班级 _____

任课教师 _____

实验指导教师 _____

实验台编号 _____

实验日期 _____