

机械振动实验指导书



上海交通大学
机械与动力工程学院
基础与实验教学中心

2020.03.8

目 录

安全注意事项·····	1
实验预备知识 DHVTC 振动测试与控制实验系统组成与使用方法·····	2
第一次实验	
实验一 振动系统固有频率的测量·····	6
实验二 三自由度系统固有频率及主振型的测量·····	11
实验三 转轴的临界转速测量·····	15
第二次实验	
实验四 无阻尼单自由度系统强迫振动特性的 <u>测量</u> ·····	19
实验五 有、无阻尼单自由度系统振动自由衰减的测量·····	24
实验六 拍振实验·····	27
第三次实验	
实验七 简支梁模态测试·····	31
实验八 动力吸振器吸振实验·····	34
实验九 被动隔振实验·····	37
附录：实验报告封面	

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。

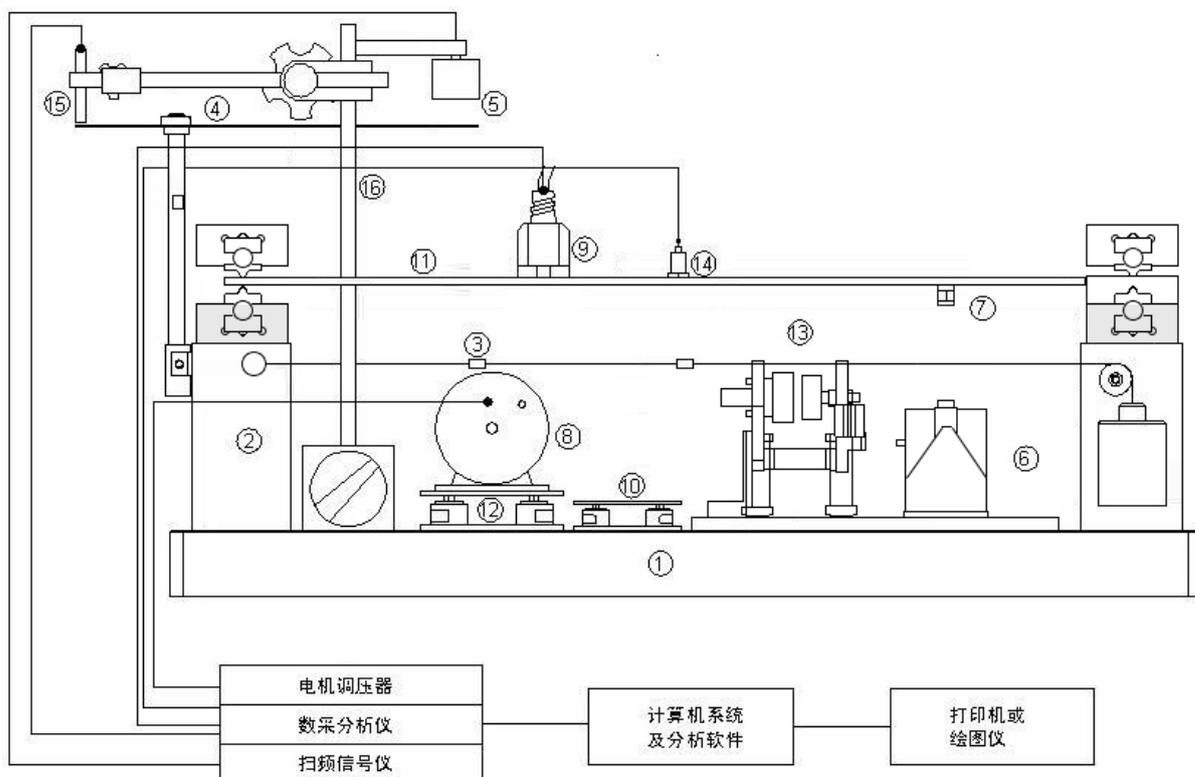
六、所有仪器设备工作过程中发现异常应立即断电，并请专业人员检查维修。

实验预备知识：

DHVTc 振动测试与控制实验系统组成与使用方法

一、 DHVTc 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。



- | | | | |
|-------------|--------------|---------------|-----------------|
| (1)——底座 | (5)——非接触式激振器 | (9)——电式速度传感器 | (13)——单/双自由度系统 |
| (2)——支座 | (6)——接触式激振器 | (10)——被动隔振系统 | (14)——压电式加速度传感器 |
| (3)——三自由度系统 | (7)——力传感器 | (11)——简支梁/悬臂梁 | (15)——电涡流位移传感器 |
| (4)——薄壁圆板 | (8)——偏心电机 | (12)——主动隔振系统 | (16)——磁性表座 |

图 1-1 DHVTc 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、薄壁圆板、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 振动系统固有频率的测量

一、实验目的

- 1、了解实验原理
- 2、掌握实验仪器设备的正确安装和使用操作方法；
- 3、学习锤击法测试振动系统固有频率的方法。

二、实验装置框图

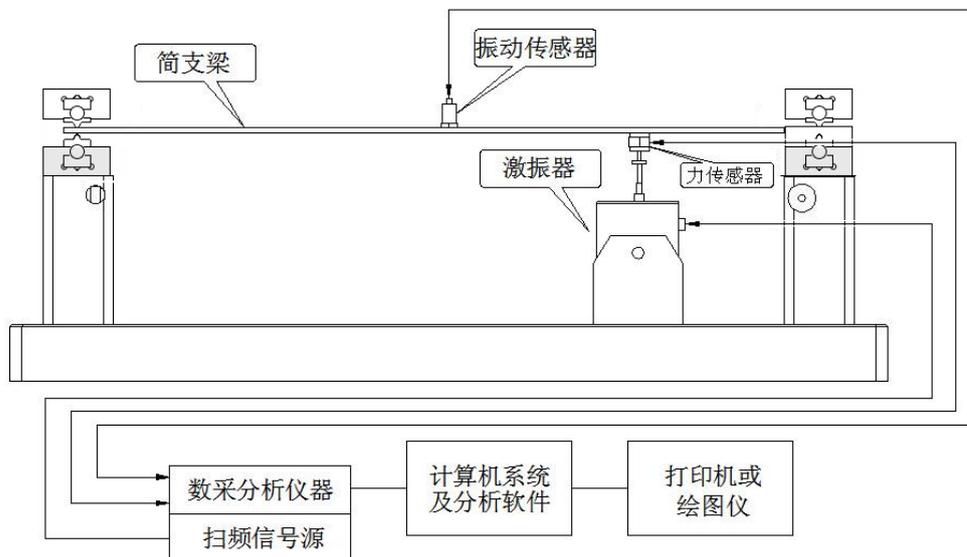


图 1-1 实验装置框图

三、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。

四、实验方法

本实验采用锤击法测试简支梁的固有频率。把加速度传感器安放在简支梁

上。打开仪器电源，进入 DHDAS 数据采集分析软件，在“设置”/“模拟通道”设置采样频率，输入传感器灵敏度，设置量程范围，在打开的记录仪选择接入加速度传感器信号的测量通道。清零后开始采集锤击频谱数据。用力锤击筒支梁，就可看到时域波形以及相应的频谱曲线，频谱曲线的第一个峰就是系统的一阶固有频率。后面的几个峰是系统的高阶频率。移动传感器或用力锤敲筒支梁的不同部位，再进行测试，记录下梁的各阶固有频率。

1、实验数据采集与软件的设置步骤

1) 新建一个工程名，存放在桌面，实验中的数据都存放在该目录下；

2) 进入“测量”页面进行设置。首先进行通道设置，用鼠标在“通道设置”上点击，在弹出来的页面中对加速度传感器进行设置：

- “测量量”-对应的“电压”改选成“加速度”；
- “工程单位”有二种选择单位， m/s^2 ，g；以g为单位，
- 查一下加速度传感器资料的参数页面，灵敏度值，填“48.0 mv/g”（假设）；
- “量程”设置选择 10g 左右的这一档即可；
- “输入方式”选择“IEPE”

设置完成后，“确定”退出页面。

3) 测量的加速度量初始值需要清零，点击“平衡清零”

4) 点击“存储规则”，给目前做的实验测试设定文件名，记录方式选择“连续记录”。

5) 点击“信号处理”，对于固有频率测试实验，需要采集时域信号，还要做频谱分析，所以选择点击“频谱分析”，“频谱分析”的小图标出现在窗口，用鼠标右键点击小图标，选择“设置”。

在弹出的窗口中，

- 先确定加速度传感器所在的通道，点击出现√。
- 本实验用多次锤击法取平均，然后用频谱分析得到频率，所以点击“平均值”按钮。

11) 点击进入“分析”模块，鼠标点击“记录仪”窗口，该窗口就处于激活状态，选择“输出”，就可以把“记录仪”窗口的时域信号曲线显示输出。请分别选择 MATLAB 数据输出和√选输出曲线图，取文件名保存。

12) 重新回到上方菜单条的“分析”选择（注意是小字体的“分析”），将鼠标点击下图“2D 图谱”，激活。再点击窗口上方的“输出”，即可显示频谱曲线，然后输出 MATLAB 数据和图形。

五、实验结果与分析

- 5.1 实验过程中各个参数如采样频率、分辨率等如何设置？
- 5.2 根据测试得到的数据绘制系统时域曲线及频域曲线。
- 5.3 根据实验测试结果及理论计算（梁的参数见实验一 PPT）结果填写下表，分析影响实验结果的原因，提出改善实验精度的方法。

表 1

	第一阶频率	第二阶频率	第三阶频率
实验测试结果			
理论计算结果			
误差			

- 5.4 为何加速度传感器放置在某些特定位置，对实验测得的频谱响应特性曲线会有明显影响？
- 5.5 实验老师提及的实验过程中的注意事项主要有哪些？

实验二 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

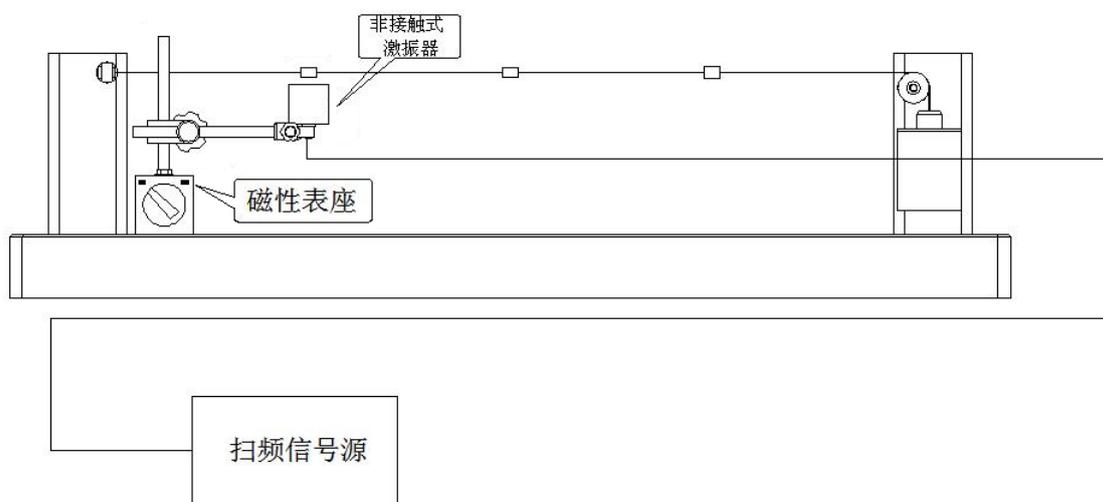


图 2-1 实验装置框图

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。由振动理知，三个集中质量的运动可用下面的方程来描述：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + KX = 0 \quad (2-1)$$

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

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

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

系统的各阶固有频率为：

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

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

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

式中：弦上集中质量 $m=0.0045$ 千克

弦丝张力 $T=(\quad)$ 牛顿，(吊挂质量近似按 1kg 计，即 $T=1\text{kg}$ 力)

弦丝长度 $L=0.625$ 米

固有频率 $f=(\quad)$ 赫兹

进一步可计算出各阶主振型 $A(i)$, ($i=1, 2, 3$):

$$A(1) = \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad A(2) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad A(3) = \begin{bmatrix} 1 \\ -\sqrt{2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

各阶主振型如图 2-2 所示：

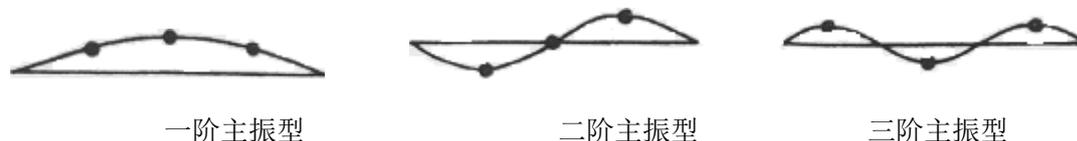


图 2-2 三自由度系统的主振型

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

有频率一样只决定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

4.1 激振器安装

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 2-1 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。

4.2 开启 DH1301 的电源开关，调节 DH1301 扫频信号源的激振电压 900-1000mv，输出频率调整到比理论计算值低 2-3Hz，激振频率由低到高逐渐增加，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 f_1 。依此下去，可得到如图 2-2 所示的第二、三阶振型和二、三阶固有频率 f_2 、 f_3 。由于第三阶振型难以观察到，因此三阶固有频率就不测量了。

五、实验结果与分析

5.1 不同张力下各阶固有频率的理论计算值与实测值。

表 2-1

弦丝张力	T=1×9.8 (N)		
固有频率	f_1	f_2	f_3
理论值			
实测值			

5.2 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？

5.3 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 转轴的临界转速测量

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、极坐标图、三维谱图、阶次谱等分析手段在旋转机械故障诊断中的应用。

二、实验原理

在实验一中已经得出了在不平衡激励下的，动态响应公式：

$$|A| = \frac{e \left(\frac{\Omega}{\omega_n} \right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left(2\xi \frac{\Omega}{\omega_n} \right)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2\xi \left(\frac{\Omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_n} \right)^2}$$

令 $\lambda = \frac{\Omega}{\omega_n}$

$$|A| = \frac{e \lambda^2}{\sqrt{\left[1 - \lambda^2 \right]^2 + \left(2\xi \lambda \right)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2\xi \lambda}{1 - \lambda^2}$$

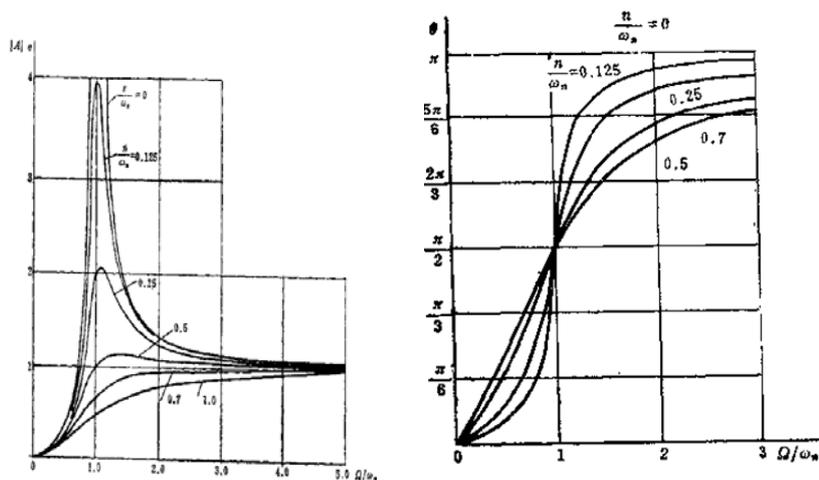


图 3-1 转子在不平衡激励下的幅频相频性

图 3-1 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、重心和固定点不在同一直线上，但是当转速远大于临界转速时，相位差接近 π ，仍可认为三点在同一直线上，而且仍然有“自动对心”。

三、实验步骤

1、转子台及涡流传感器的安装

按照说明书第一章的说明，将传感器、转子台控制器、信号采集仪、计算机连接成完整的测试系统如图 3-2 所示。

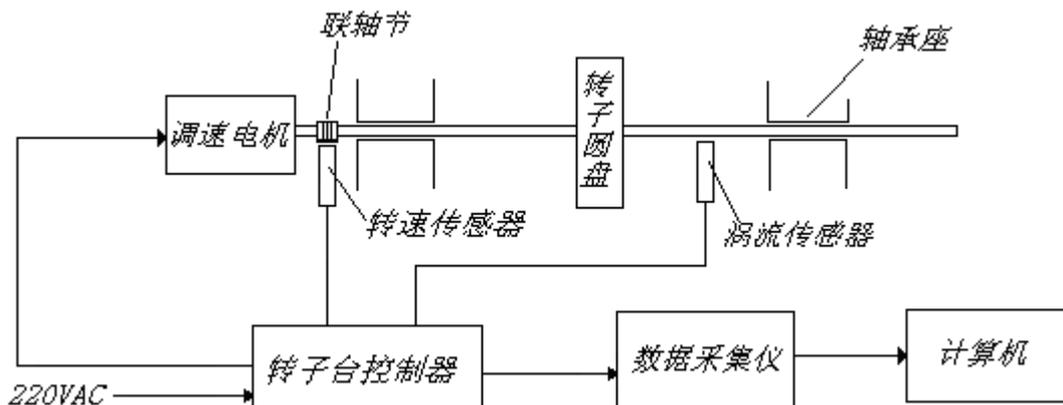


图 3-2 测试系统组成图

2、控制器设置

按照说明书第二章的说明，设置好转子台控制器，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。

3、软件准备工作

接通信号采集仪器电源，并打开电源开关，连接仪器，参考实验一设置模

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”下“信号处理”界面内的“阶次分析”按钮，进入“阶次分析”设置界面，选择电涡流信号通道为输入通道，参数设置可参考图 3-3：

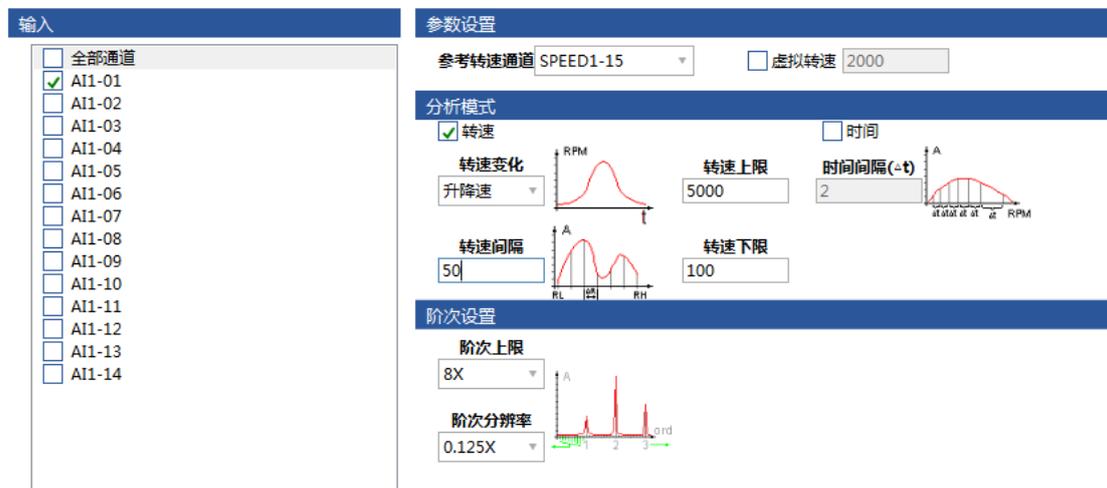


图 3-3 阶次分析参数设置参考

4、实验

4.1 点击“测量”窗口下“图形区设计”，选择“2D 图谱”，建立 2 个“2D 图谱”窗口，分别选择为相应电涡流通道的 Bode（幅频曲线）、Bode（相频曲线），在 Bode 图中，通过参数设置中“图谱类型”，可选择波特图的显示种类；选择“记录仪”，建立 1 个“记录仪”窗口，选择电涡流传感器采集到的信号的时域波形；

4.2 接通转子台调速器电源，打开调速器开关，调节调速旋钮，使转子台转动起来，并逐渐升速。观察原始振动信号、幅频曲线、相频曲线随转速上升的变化。

⚠️ 注意：在临界转速附近，一定要调节转子台控制器调速旋钮，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。

4.3 升速过程完成后，停止采样，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 3-4 所示：

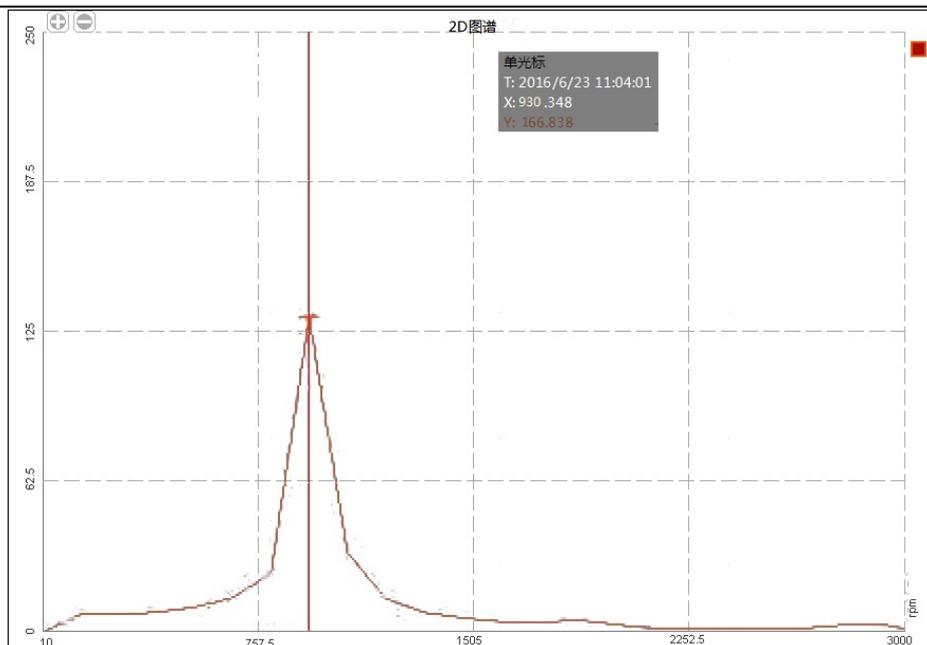


图 3-4 临界转速值

4.4 对保存的数据，进行三维谱图，极坐标图等分析，尝试用别的分析方法找出固有频率。

四、完成实验

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

实验四 无阻尼单自由度系统强迫振动特性的测量

本实验是测试无阻尼单自由度系统在激振力作用下的强迫振动幅频响应特性。通过调节信号发生器，使激振器产生一定频率和能量的激振力。记录线性扫频过程中的幅频特性。

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。

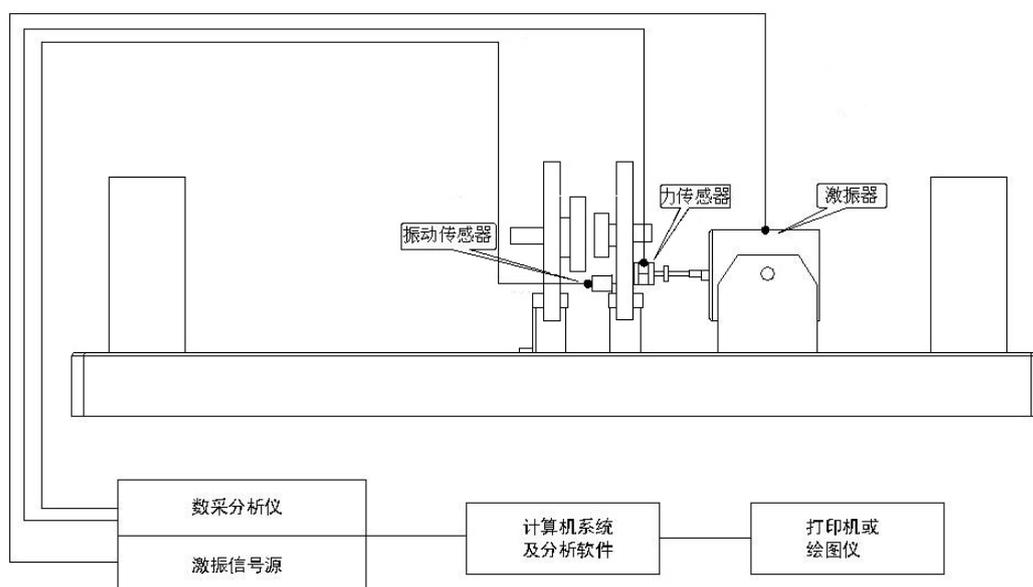


图 4-1 实验装置框图

二、实验装置框图

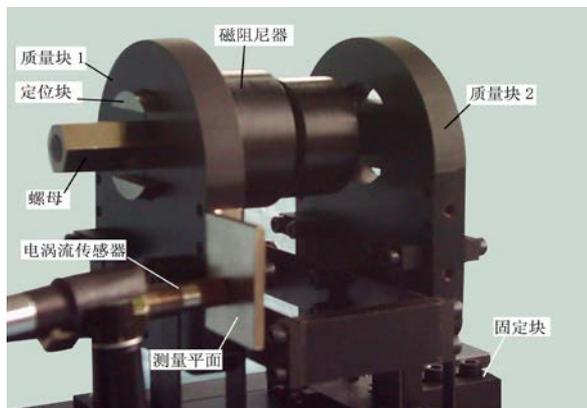


图 4-2 单双自由度系统分解

三、实验原理

单自由度系统的力学模型如图 4-3 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 B 、圆频率 ω_0 (频率 $f = \omega / 2\pi$)，系统的运动微分方程式为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F$$

或

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = F/m \quad (4-1)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi \omega \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = F/m$$

式中： ω ——系统固有圆频率 $\omega = \sqrt{k/m}$

n ——衰减系数 $2n = c/m$

ξ ——阻尼比 $\xi = n/\omega$

F ——激振力 $F = B \sin \omega_0 t = B \sin(2\pi f t)$

方程 4-1 的特解，即强迫振动为：

$$x = A \sin(\omega_0 t - \varphi) = A \sin(2\pi f t - \varphi) \quad (4-2)$$

式中： A ——强迫振动振幅； φ ——初相位

$$A = \frac{B/m}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4n^2 \omega_0^2} \quad (4-3)$$

式(4-3)叫做系统的幅频特性。将式(4-3)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 4-4 所示)：

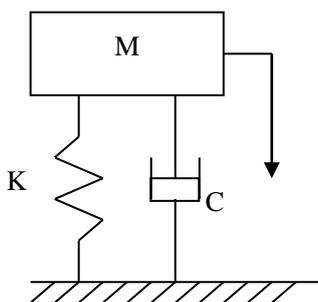


图 4-3 单自由度系统力学模型

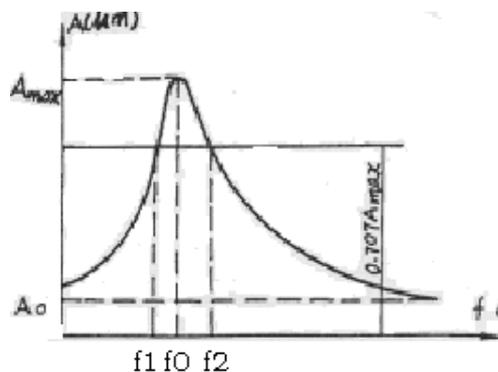


图 4-4 单自由度系统振动的幅频特性曲线

图 4-3 中, A_{\max} 为系统共振时的振幅; f_0 为系统固有频率, f_1 、 f_2 为半功率点频率。

振幅为 A_{\max} 时的频率叫共振频率 f_0 。在有阻尼的情况下, 共振频率为:

$$f_a = f_0 \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (4-4)$$

当阻尼较小时, $f_a = f_0$, 故以固有频率 f_0 作为共振频率 f_a 。在小阻尼情况下可得:

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (4-5)$$

四、实验操作方法和步骤

1、设备连接

将激振器水平安装在实验台基座上固定安装的支架上, 并保证激振器顶杆对单自由系统有一定的预压力, 用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。

力传感器一端连接激振器, 另一端连接单自由度振动盘。力传感器测得的激振力的大小和激振频率可通过信号连接线输入数据采集仪的 2 通道。

硬件连接完毕, 打开数据采集仪的电源开关 (在仪器背面)。

2、数据分析软件设置

- 1) 设定工程名;
- 2) 在页面对 1 通道 (加速度传感器) 进行设置:
 - 测量量: “加速度”, 单位: “ m/s^2 ”,
 - 灵敏确认度: 根据各实验台用的加速度传感器附带资料上的数值换算。提供的灵敏度数据换算结果大概 4.9 m/s^2 左右。
 - 量程: 选择 200 左右。输入方式: 选 “IEPE”。
 - 确定, 退出输入。
- 3) 窗口上方选择 “信号处理”, 弹出窗口输入如下:
 - 鼠标点击选择 “频响分析”, 弹出窗口中, “平均方式” 选择 “峰值保持”;
 - 在 “输入” 表中, 鼠标左键点击 “未分配” 2 次, 输入信号为 2 通道 “激振力”。
 - 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”。
- 4) 点击窗口上方下一选项 “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值。

- 点击左边的“fs”，选择“采样频率”，1k。
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正确设置。
- 进行“平衡清零”。
- 可修改窗口中曲线的颜色。点击窗口的右上方色块，选择合适的颜色。

3、扫频信号发生器调节及操作

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5~70Hz。设定好初始频率值后，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70Hz，再次“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，按确定键完成设定。
- 按信号发生器“电压调节”的上升键3秒，电压值自动上升，当电压值上升至800mv时，即可按“电压调节”的下降键将电压固定。设置的激振能量达到800~900mv左右即可。
- 按“开始”键，开始线性扫频，扫频从5至70Hz循环进行，实验只要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。
- 鼠标点击左上角的“采集”，即可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”。
- 随后可对二个窗口的曲线进行保存操作。
- 按信号发生器上的“停止”键结束扫频。

4、数据采集与处理

鼠标点击数据采集软件窗口上部的“分析”选项。此时，如果要输出上面窗口的图，就用鼠标点击上图激活，然后点击上面的“输出”功能选项，保存图形文件和MATLAB数据，以便对实验数据进行分析。重新返回“分析”选项，可以，鼠标点击下图，激活频响窗口，即可用“输出”功能进行频响图的保存。

五、实验结果与分析

- 5.1 根据实验中测得的数据绘制系统强迫振动的幅频特性曲线。
- 5.2 确定系统固有频率 f_0
- 5.3 确定阻尼比 ξ 。按图4-4所示计算 $0.707A_{max}$ ，然后在幅频特性曲线上确定 f_1 、 f_2 利用式(4-5)计算出阻尼比。
- 5.4 实验操作过程中有哪些比较关键的注意事项？
- 5.5 实验心得与思考。

实验五 有、无阻尼单自由度系统自由衰减的测量

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 f_0 和阻尼比。
- 4、比较有无阻尼对单自由度系统衰减振动特性区别。

二、实验装置框图

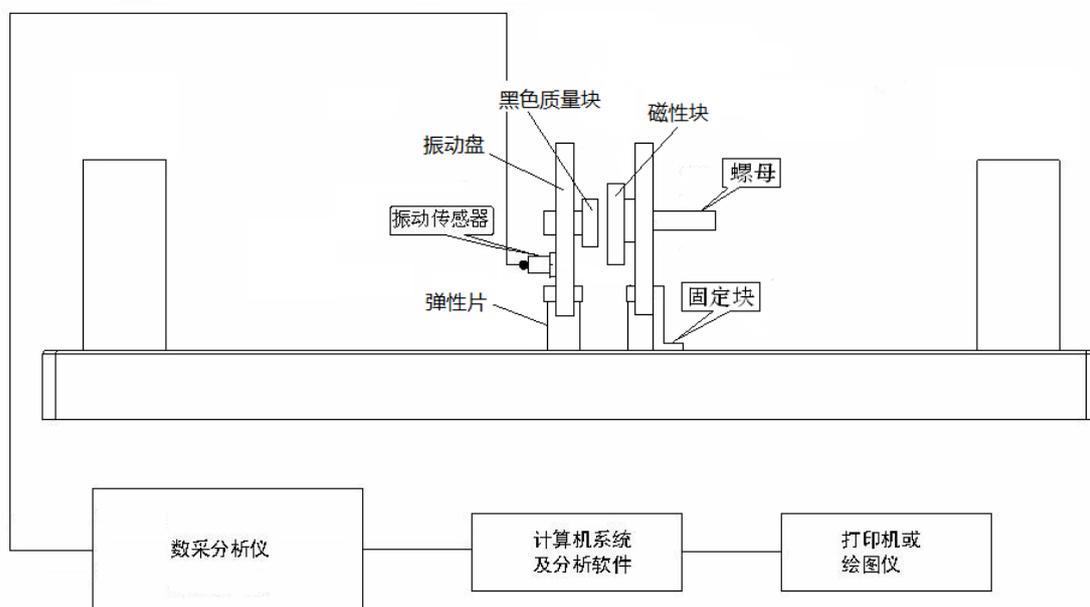


图 5-1 实验装置框图

三、实验原理

单自由度系统的力学模型如图 5-2 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：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2n \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0 \quad (5-1)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi\omega \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0$$

式中： ω ——系统固有角频率 $\omega^2 = k / m$

n —— 阻尼系数 $2n = c / m$

ξ —— 阻尼比 $\xi = n / \omega$

小阻尼 ($\xi < 1$) 时, 方程(5-1)的解为:

$$x = Ae^{-nt} \sin(\omega_1 t + \varphi) \quad (5-2)$$

式中: A —— 振动振幅

φ —— 初相位

ω_1 —— 衰减振动圆频率, $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - n^2} = \omega\sqrt{1 - \xi^2}$

设初始条件: $t=0$ 时, $x=x_0$, $\frac{dx}{dt} = v_0$, 则

$$A = \sqrt{x^2 + \frac{(v_0 + nx_0)^2}{\omega^2 - n^2}} \quad (5-3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_0 \sqrt{\omega^2 - n^2}}{(v_0 + nx_0)^2} \quad (5-4)$$

式(5-2)的图形如图 5-3 所示。

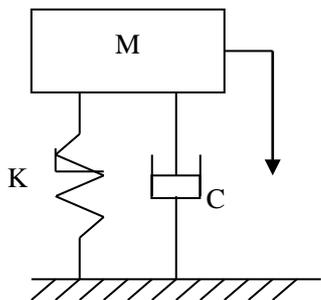


图 5-2 单自由度振动系统力学模型

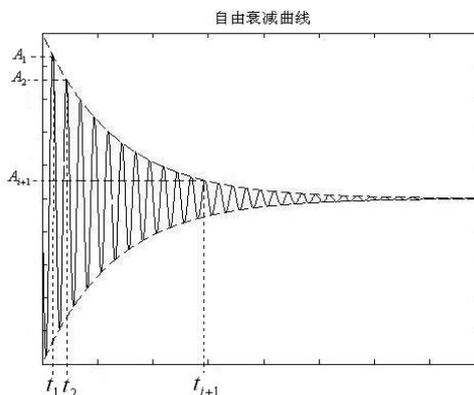


图 5-3 自由衰减曲线

此波形有如下特点:

1) 振动周期 T_1 , 大于无阻尼自由振动周期 T , 即 $T_1 > T_0$ 。

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - n^2}} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{T}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

$$\text{固有频率} \quad f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 \sqrt{1-\xi^2}} \quad (5-5)$$

2) 振幅按几何级数衰减

$$\text{减幅系数} \quad \eta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_i}{A_{i+1}} = e^{nT_1} \quad (5-6)$$

$$\text{对数减幅系数} \quad \delta = \ln \eta = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} = nT_1 \quad (5-7)$$

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:

$$\delta = \frac{1}{i} \ln \frac{A_1}{A_2} \frac{A_2}{A_3} \dots \frac{A_i}{A_{i+1}} = \frac{1}{i} \ln \frac{A_1}{A_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (5-8)$$

从而可得:

$$n = \frac{\delta}{T_1}; \quad C = 2n * m; \quad \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{2\pi i} \ln \frac{A_1}{A_{i+1}}$$

$$\xi = \frac{\ln \frac{A_1}{A_{i+1}}}{\sqrt{4\pi^2 i^2 + (\ln \frac{A_1}{A_{i+1}})^2}} \quad (5-9)$$

四、实验方法

4.1 将系统安装成单自由度无阻尼系统

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。

4.2 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”设置采样频率、量程范围、工程单位和灵敏度等参数，激活“记录仪”窗口，选择相应通道 AI1-1，开始采集数据，数据同步采集显示在图形窗口内。

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正确设置。

4.3 测试和处理

用手指扣动单自由度系统质量盘，使其产生自由衰减振动。记录单自由度系统自由衰减振动波形，然后设定 i ，利用双光标读出 i 个波经历的时间 Δt ， $T_1 = \Delta t$ ；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 5-9 计算出阻尼比 ξ ，再按公式 5-5 计算出固有频率 f_0 。

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。

4.4 将系统安装成单自由度有阻尼系统

将黑色磁性块靠近单自由度系统质量盘，旋转定位块，将螺母反过来拧紧，即可实现加与不加阻尼两种状态，重复以上步骤。

五、实验结果与分析

5.1 绘出两次单自由度自由衰减振动波形图（一个无阻尼，一个有阻尼），并进行比较。

5.2 根据实验数据按公式计算出固有频率和阻尼比，计算结果填入表 5-1。

表 5-1

选项 类型	i	时间 t	周期 T_1	$2A_1$	$2A_{i+1}$	阻尼比 ξ	固有频率 f_0
无阻尼							
有阻尼							

5.3 上述方法为时域法算阻尼，一般较简单的是半功率带宽法测算阻尼，思考如何用半功率带宽法计算阻尼比？将结果与时域法比较。

5.4 实验操作心得以及对实验结果的评价。

实验六 拍振实验

一、实验目的

- 1、 观察拍振现象，建立拍振的概念；
- 2、 了解如何消除或减弱拍振的现象；
- 3、 掌握实验操作方法。

二、实验装置框图

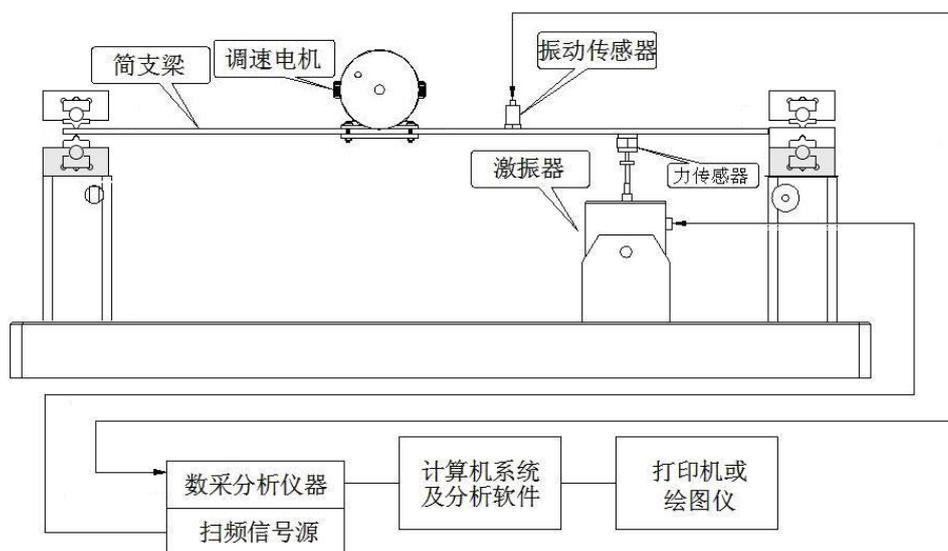


图 6-1 实验装置框图

三、实验原理

当结构振动时，有时会产生所谓拍的现象。什么叫拍？如对简支梁系统施加两个频率接近、振幅不等的激振力，使系统产生振动，用分析仪测得系统的振动波形如图 6-2 所示，其振幅是周期地变化，这种现象就叫做拍。总的来讲，两个频率接近、振幅不等的振动迭加就能形成拍。

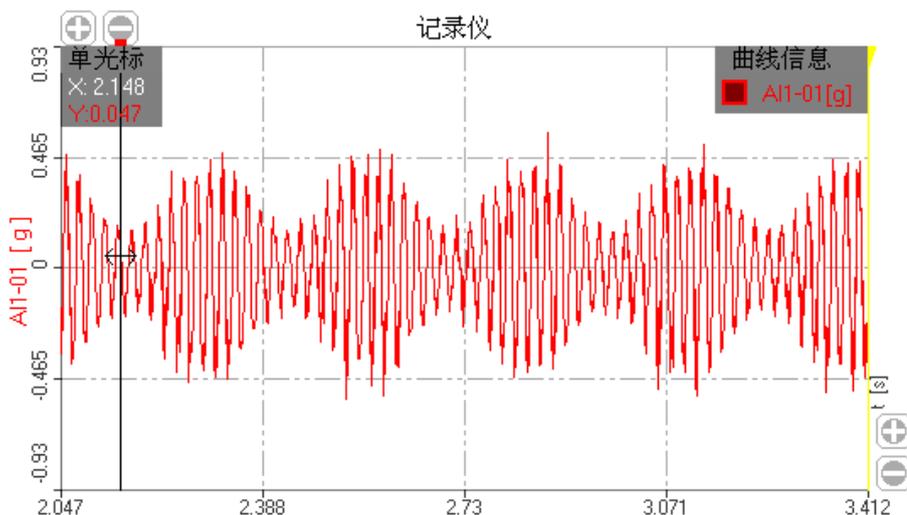


图 6-2 拍振（现象）时域图

根据拍振理论，设两个频率接近、振幅不等的振动为：

$$\begin{aligned} y_1 &= A_1 \sin(\omega_1 t) \\ y_2 &= A_2 \sin(\omega_2 t) \end{aligned} \quad (6-1)$$

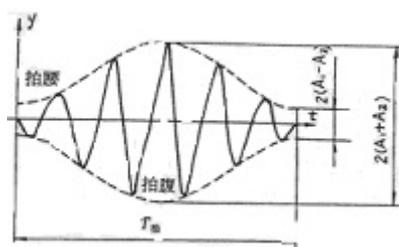


图 6-3

合振动

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) \\ y &= A \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t + \varphi\right) \end{aligned} \quad (6-2)$$

式中： A--- 合振动振幅

φ --- 初相角

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\omega_2 - \omega_1)t} \quad (6-3)$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \text{tg} \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) \quad (6-4)$$

分振动 y_1 、 y_2 与合振动 y 的波形如图 6-2 所示，合振动的频率及周期为：

$$f_{\text{合}} = \frac{f_2 + f_1}{2} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{4\pi} \quad (6-5)$$

$$T_{\text{合}} = \frac{1}{f_{\text{合}}} = \frac{4\pi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (6-6)$$

合振动的振幅随时间在最大振幅 A_{max} 与最小振幅 A_{min} 间作周期变化，就形成了拍，如图 6-2 虚线所示，其中：最大振幅 $A_{\text{max}} = A_1 + A_2$ ，最小振幅

$$A_{\text{min}} = A_1 - A_2。$$

在拍振图形上，有最大振幅的一段叫拍的腹，有最小振幅的一段叫拍的腰，腰和腹总是间隔地出现的。在单位时间内腰或腹出现的次数叫拍的频率 $f_{\text{拍}}$ ，振幅大小改变一次的时间叫拍的周期 $T_{\text{拍}}$ 。

$$f_{\text{拍}} = f_2 - f_1 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} \quad (6-7)$$

$$T_{\text{拍}} = \frac{1}{f_{\text{拍}}} = \frac{2\pi}{\omega_2 - \omega_1} \quad (6-8)$$

从(6-8)式可知，两个分振动的频率相差越小，拍振动的周期就越大。

四、实验方法

4.1 安装偏心电机

偏心电机的电源线接到调压器的输出端，调压器电源线接到调压器的输入端（双色为地线），一定要小心防止接错，要注意调压器的输入和输出端，防止接反。把调速电机安装在简支梁中部，对简支梁产生一个未知的激振力，电机转速（强迫振动频率）可用调压器来改变。

4.2 激振器安装

将激振器固定在实验台基座上，激振器螺杆与简支梁螺纹孔相连，并用螺母固紧，用专用连接线连接激振器和 DH1301 功率输出接口。

4.3 设置加速度传感器参数

将加速度传感器布置在偏心电机和激振器的中间位置，传感器测得的信号接到采集仪的 1-1 通道。加速度传感器通过磁力吸在简支梁的中部。加速度传感器数据线连接到数据采集仪的 1-1 通道，设置加速度传感器对应的通道参数。

数采分析软件设置步骤：

- (1) 定义工程名，保存；
- (2) 设置加速度传感器参数；
- (3) “平衡清零”；

(4) 确定电机转速。

- 点击窗口上端的“信号处理”，在弹出窗口添加“频谱分析”，用来检测电机转速。
- 在窗口“频谱分析”图标上点鼠标右键，设置对应的数据采集通道。
- 进入“测量”页面，选择“2D 图谱”。

上面的图形是加速度传感器的时域值，下面的频谱图可得到电机的转速。频谱曲线左边垂线与纵坐标之间用鼠标点击，可以观察到频谱曲线，曲线波峰对应的频率就是电机的转速，电机转速调整到 40~50Hz。

点击鼠标左键，将光标条移至波峰位置，显示出电机转速值。

根据电机转速值，可以作为随后设置激振器频率的依据。

4.5 调节电机的转速

缓慢顺时针旋转调速变压器旋钮到 75V 档位后，略回转少许，约在 70V 的位置，对应的电机转速约为 45~50 转/秒。

4.6 设置信号发生器

选择“正弦定频”：逐步手动调节信号发生器的输出频率，当激振频率接近电机转速时，出现拍振现象。

设置激振器频率步骤：

- 将信号发生器的信号类型设置为“正弦定频”。
- 按“设置”按钮，然后将频率设置成接近电机转速的某个值。按“确认”按钮。
- 按“开始”按钮开始激振，同时将激振能量增加到 800~900mv。
- 手动微调激振频率，观察激振现象。

4.7 记录数据结果

- 拍振现象调整到比较明显状态后，点击“采集”，并记录电机转速和激振频率；
- 采集一定的拍振周期后结束，鼠标点击“停止”；
- 关闭电机转速调节器旋钮；
- 按信号发生器“停止”按钮，激振器停止；
- 进入“分析”，对采集的图形进行存储输出。

五、实验结果与分析

5.1 实验数据

表 6-1

	分振动 y_1	分振动 y_2
频 率	$f_1 = (\quad) \text{Hz}$	$f_2 = (\quad) \text{Hz}$
幅 值	$A_1 = (\quad) \text{g}$	$A_2 = (\quad) \text{g}$

5.2 绘出分析仪上观察到的拍振波形。

5.3 根据表 6-1 数据计算 A_{\max} 、 A_{\min} 、 $f_{\text{合}}$ 、 $f_{\text{拍}}$ 、 $T_{\text{拍}}$ 。

5.4 对结构来讲，拍是不利的现象，如果拍的最大振幅大于允许值，则必须消除或减弱拍的现象。你用什么方法来改变拍的现象呢？

5.5 当两个激振频率相差越来越小时会有什么情况发生？

5.6 实验操作过程中有哪些比较关键的注意事项？

实验七 简支梁模态测试

一、实验目的

1. 熟悉模态分析原理和测试方法；
2. 学习简支梁模态测试数据的分析处理方法。

二、实验仪器安装示意图

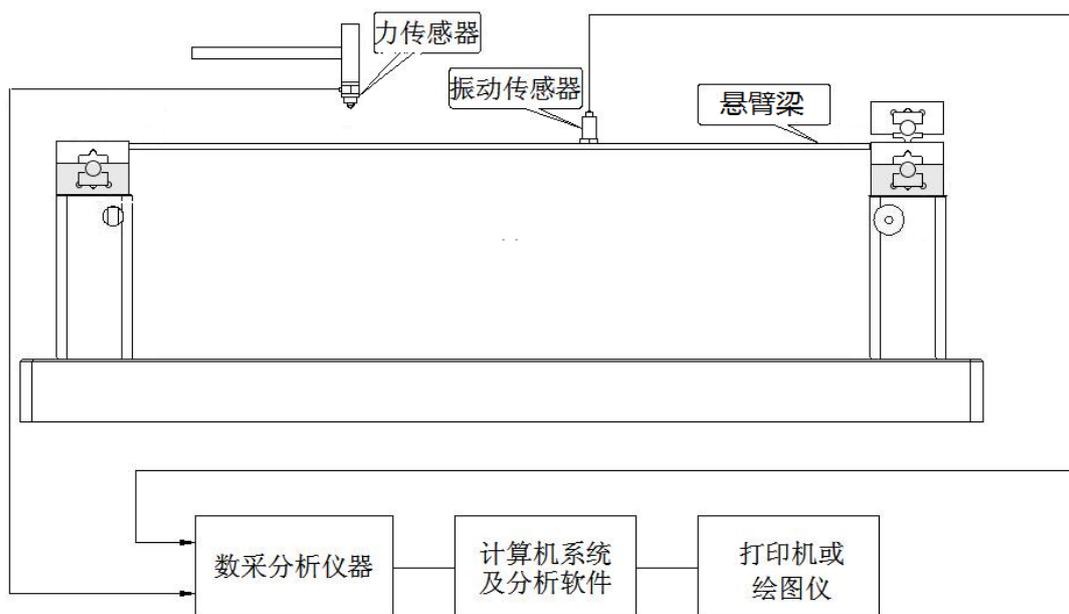


图 7-1 实验装置框图

三、实验原理

本实验采用单点激励，多点拾振的方法进行测试分析。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) 进入**参数设置**页面，设置 1 通道-加速度传感器参数
设置 2 通道-力传感器参数
- 2) 进入**存储规则**页面，测试数据名：第一批
- 3) 进入**信号处理**页面：选择 **频响分析**
设置 触发 采集，触发通道 2 (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）
分辨率：0.488Hz，平均次数：4 次，选择：手动确认滤除；

输入：

2 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

4) 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

点击 Fs 设置采样频率：2k，采集前进行平衡清零，

采集： 加速度传感器在 1 号测点位置，锤击 3 号测点，取 4 次有效数据，停止。

5) 将加速度传感器移动到 2 号测点

修改存储规则，测试数据名：第二批，

再进入**信号处理**，修改输出通道测点号2，然后进入测量页面，重新“采集”3 次锤击信号。停止。

6) 将加速度传感器移动到 3 号测点

按步骤 5)，修改数据名：第三批，

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”3 次锤击信号。停止。

7) 切换到**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。

8) 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。

9) 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。

10) 进入“模态\振型”界面

动画显示 1 阶和 2 阶振型。

五、实验结果与分析

1、记录模态参数

表 7-1

模态参数	第一阶	第二阶	第三阶
频率			
阻尼			

2、打印出各阶模态振型图（如下图所示）

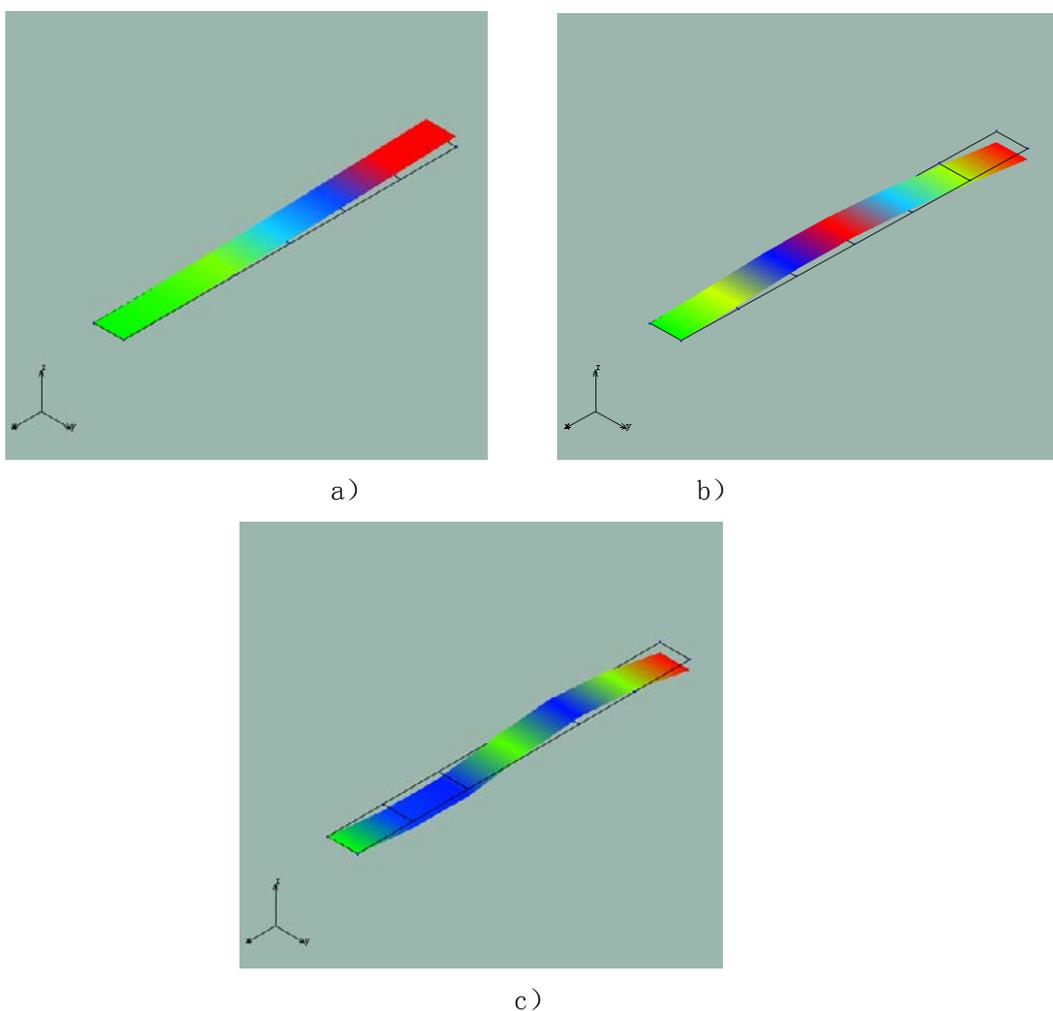


图 7-2 悬臂梁前三阶振型图

3、本实验中，第三阶模态较难获取，有什么方法能让我们在现有条件下获取更多模态信息？

4、实验操作心得及实验结果分析及思考。

5、对比实验 5 的结果，请你谈一下你的理解。

实验八 动力吸振器吸振实验

一、实验目的

- 1.1 了解动力吸振器的结构，掌握其安装、调整方法。
- 1.2 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。
- 1.3 吸振器的特点及适用场合。

二、实验装置框图

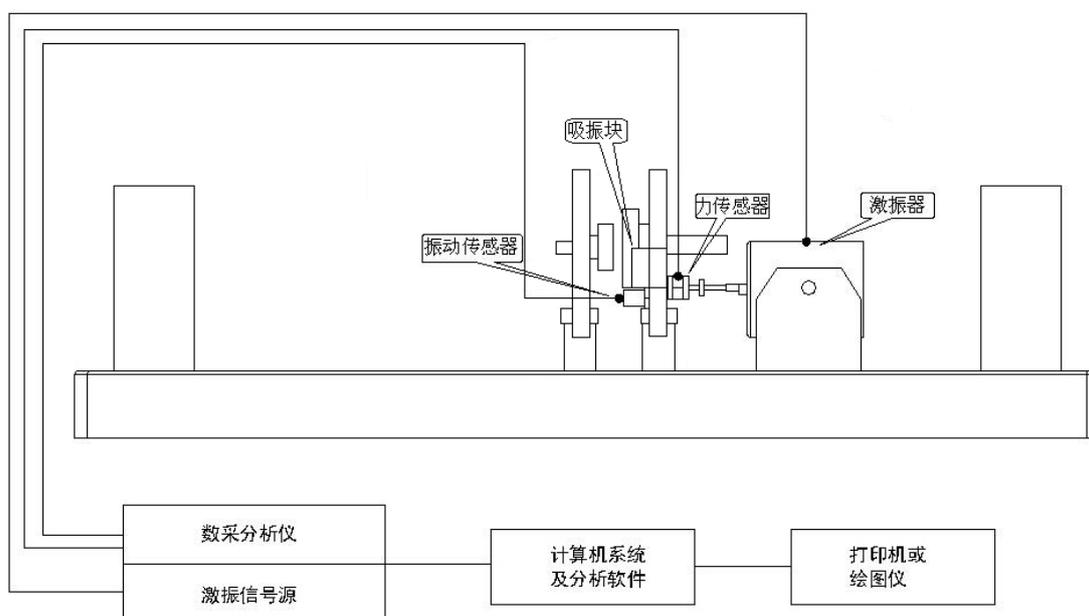


图 8-1 实验装置框图

三、实验原理

动力减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。

如图所示一单自由度系统，其中 m_1 为质量， k_1 为其刚度。其激励力频率为 ω ，垂直方向的振动位移为 $x_1(t)$ 。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_n 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 。如果实际条件限制，可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“弹簧-质量”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 ，可使 m_1 的振幅降为零。该两自由度系统的运动方程为：

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1(t) + (k_1 + k_2)x_2(t) - k_2 x_2(t) &= F_1 \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2(t) + k_2 x_2(t) - k_2 x_1(t) &= 0 \end{aligned}$$

方程的稳态解为

$$\begin{aligned} x_1(t) &= X_1 \sin \omega t \\ x_2(t) &= X_2 \sin \omega t \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{(k_2 - \omega^2 m_2) F_1}{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2} \\ X_2 &= \frac{k_2 F_1}{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2} \end{aligned}$$

这里 F_1 、 X_1 、 X_2 均为实数。为简化分析引入下列符号：

$x_{st} = F_1/k_1$ 为主系统的静变形；

$\omega_n = \sqrt{k_1/m_1}$ 为主系统的固有频率；

$\omega_a = \sqrt{k_2/m_2}$ 为减振器的固有频率；

$\mu = m_2/m_1$ 为减振器质量与主系统质量之比。

则：

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{|1 - (\omega/\omega_a)^2| x_{st}}{[1 + \mu(\omega_a/\omega_n)^2 - (\omega/\omega_a)^2][1 - (\omega/\omega_a)^2] - \mu(\omega_a/\omega_n)^2} \\ X_2 &= \frac{x_{st}}{[1 + \mu(\omega_a/\omega_n)^2 - (\omega/\omega_a)^2][1 - (\omega/\omega_a)^2] - \mu(\omega_a/\omega_n)^2} \end{aligned}$$

由上式可见，当 $\omega_a = \sqrt{k_2/m_2} = \omega$ 时，有

$$X_1 = 0, X_2 - \left(\frac{\omega_n}{\omega_a}\right)^2 \frac{x_{st}}{\mu} = \frac{F_1}{k_2}$$

相应地有：

$$X_1(t) = 0, X_2(t) = -\frac{F_1}{k_2} \sin \omega t$$

此时主系统静止不动，而减振器以 $X_2(t) = -F_1/k_2 \sin \omega t$ 规律运动，事实上，此时减振器对主系统的作用力为 $k_2 X_2(t) = -F_1 \sin \omega t$ ，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，只要该减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

4.1 安装激振器

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单自由度系统有一定的预压力，用专用连接线连接激振器和 DH1301 扫频信号源功率输出接口。

4.2 连接仪器和传感器

把加速度传感器安装到单自由度系统中部的测量平面上，输出信号接到数据采集分析仪的振动测试通道；吸振块安装在弹片上，并固定。

4.3 仪器参数设置

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，在“设置”/“模拟通道”设置采样率、量程范围，输入加速度传感器的灵敏度。“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。

4.4 采集并显示数据

调节扫频信号源的输出频率，使单自由度系统产生较大的振动。在窗口中分别读取当前振动的幅值、频率值。

4.5 安装吸振块

将弹片固定在单自由度系统上，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。

实验方法提示：

- 1) 调节信号发生器激振频率，并将激振电压调整为 200~220mV 之间。测量无减振块情况下，单自由度系统振幅达到最大时的激振频率和加速度幅值（提示：可用正弦定频方式调整激振频率，观察信号处理软件记录仪窗口，最大值约在 30-40Hz 之间）。
- 2) 在不改变激振电压和激振频率的情况下，将减振块固定在支架上的某个位置，调节减振块位置，观察记录仪窗口波形，当加速度值最小时，记录加速度幅值。

五、实验结果与分析

5.1 实验结果

表 8-1

	调节前	调节后
频率		
幅值		

5.2 动力吸振器有什么局限性，如何突破？

5.3 请谈谈你对动力吸振器的认识和实验操作心得。

实验九 被动隔振实验

一、实验目的

1. 建立被动隔振的概念。
2. 掌握被动隔振的基本方法。
3. 学会测量、计算被动隔振系数和隔振效率。

二、实验装置框图

本实验用在电动式激振器激励下振动的简支梁模拟地基，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 9-1 所示。

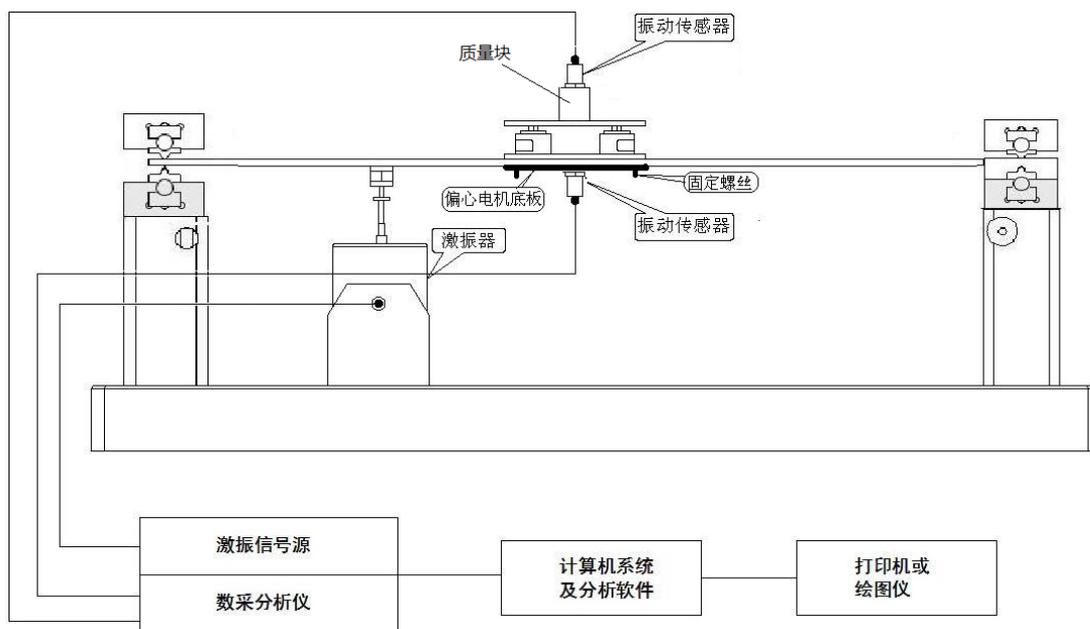


图 9-1 实验装置框图

三、实验原理

防止地基的振动通过支座传至需保护的精密仪器或仪器仪表，以减少运动的传递，称为被动隔振。被动隔振振动传递率等于底座传递到物体的振动与底座的振动之比，可用位移、振动速度或振动加速度的比值表示。

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

$$T = \frac{\sqrt{1 + D^2 u^2}}{\sqrt{(1 - u^2)^2 + D^2 u^2}}$$

振动传递率 T:

式中 D 为阻尼比, $u = \frac{f}{f_0}$ 为激振频率和共振频率的比。

被动隔振的隔振原理和隔振效果与主动隔振相似。具体原理见主动隔振实验。

四、实验步骤

4.1 隔振器安装

把小的空气阻尼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。在阻尼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。

4.2 安装激振器

将激振器固定在实验台基座上, 并在简支梁上安装力传感器, 通过螺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 DH1301 扫频信号源功率输出接口。

4.3 连接仪器和传感器

把加速度传感器 1 输出信号接到数据采集分析仪的测试 1 通道;

把加速度传感器 2 输出信号接到数据采集分析仪的测试 2 通道。

4.4 仪器参数设置

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 500Hz、分析点数 128, 量程范围, 输入加速度传感器、速度传感器的灵敏度。

4.5 打开三个窗口, 分别显示二个通道的时间波形信号、二通道频谱信号和响应函数。

4.6 采集并显示数据

调节扫频信号源的输出频率, 使隔振器产生共振。在各窗口中分别读取当前振动的最大值、频率值 f_0 、振幅以及第一通道的峰值 A_1 和第二通道的峰值 A_2 。

4.7 根据所测幅值计算传动比和隔振效果

$$\text{隔振传递率: } T = \frac{A_1}{A_2}$$

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

4.8 调节扫频信号源, 设定起始频率 1, 结束频率 200, 扫频速度 1。设置 DHDAS 软件平均方式为峰值保持, 启动扫频信号源, 同时开始采集, 直到扫频结束, 可得到频响函数曲线如图 9-2 所示, 将所得图形与图 9-2 相比较, 并由图确定隔振器固有频率。

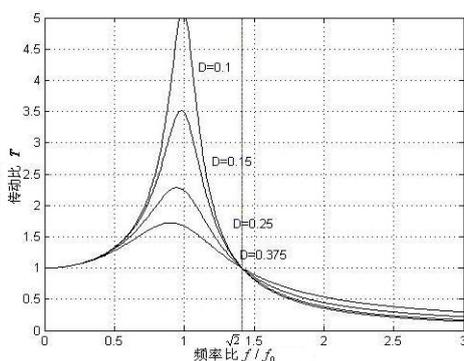


图 9-2

提示:

- 1、设置 1000mV 的线性扫频电压, 扫频范围: 0-200Hz;
- 2、记录二个加速度传感器的加速度变化及传递率曲线;
- 3、分析阻尼器起阻尼作用的区间;
- 4、改变激振能量到 1500mv, 记录阻尼的影响;
- 5、改变阻尼器的阻尼, 再次记录二个加速度传感器的扫频变化曲线, 分析阻尼变化的影响。

五、实验结果与分析

1. 空气阻尼器隔振器被动隔振测试结果与分析。
2. 实验操作要点及思考。
3. 请给出一个你生活中见到的被动隔振的实例。

实验十 转子不平衡的故障机理研究与诊断

一、实验目的

转子不平衡是由于转子部件质量偏心或转子部件出现缺损造成的故障，它是旋转机械最常见的故障。据统计，旋转机械约有一半以上的故障与转子不平衡有关。因此，对不平衡故障的研究与诊断也最有实际意义。

- 1、了解转子不平衡的种类及造成不平衡的故障原因。
- 2、通过试验，掌握转子不平衡故障的主要振动特征。
- 3、了解转子不平衡故障的诊断方法及治理措施。

二、转子不平衡的种类

造成转子不平衡的具体原因很多，按发生不平衡的过程可分为原始不平衡、渐发性不平衡和突发性不平衡等几种情况。

原始不平衡是由于转子制造误差、装配误差以及材质不均匀等原因造成的，如出厂时动平衡没有达到平衡精度要求，在投用之初，便会产生较大的振动。

渐发性不平衡是由于转子上不均匀结垢，介质中粉尘的不均匀沉积，介质中颗粒对叶片及叶轮的不均匀磨损以及工作介质对转子的磨蚀等因素造成的。其表现为振值随运行时间的延长而逐渐增大。

突发性不平衡是由于转子上零部件脱落或叶轮流道有异物附着、卡塞造成，机组振值突然显著增大后稳定在一定水平上。

不平衡按其机理又可分为静失衡、力偶失衡、准静失衡、动失衡等四类。

三、不平衡故障机理

设转子的质量为 M ，偏心质量为 m ，偏心距为 e ，如果转子的质心到两轴承连心线的垂直距离不为零，具有挠度为 a ，如图 10.1 所示。

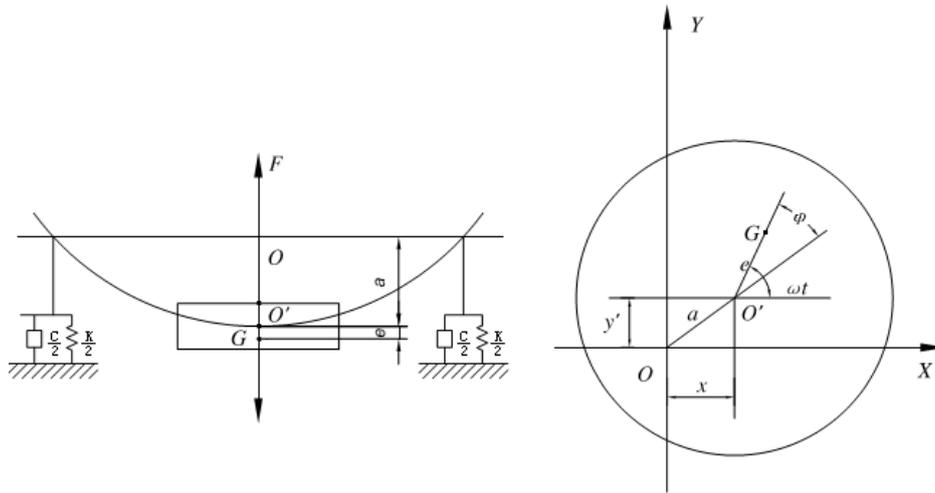


图 10.1 转子力学模型

由于有偏心质量 m 和偏心距 e 的存在，当转子转动时将产生离心力、离心力矩或两者兼而有之。离心力的大小与偏心质量 m 、偏心距 e 及旋转角度 ω 有关，即 $F=me\omega^2$ 。众所周知，交变的力(方向、大小均周期性变化)会引起振动，这就是不平衡引起振动的原因。

四、不平衡故障的特征

实际工程中，由于轴的各个方向上刚度有差别，特别是由于支承刚度各向不同，因而转子对平衡质量的响应在 x 、 y 方向不仅振幅不同，而且相位差也不是 90° ，因此转子的轴心轨迹不是圆而是椭圆，如图 10.2 所示。

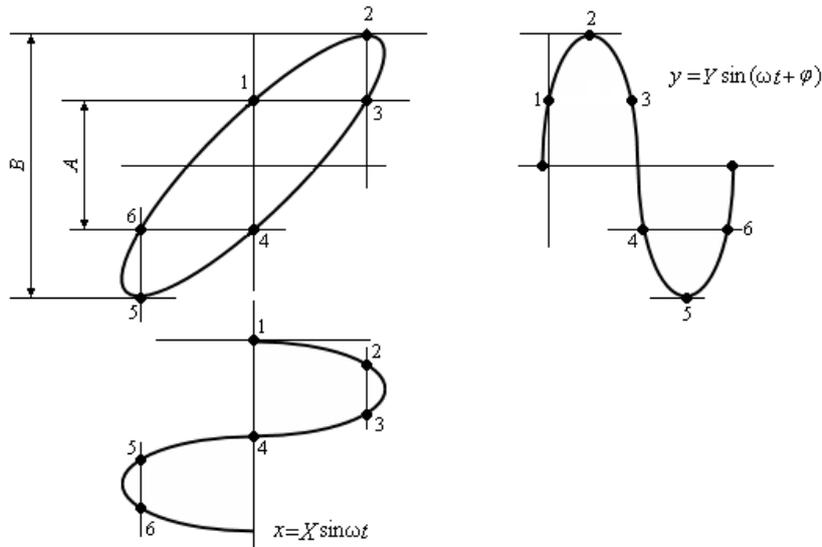


图 10.2 转子不平衡的轴心轨迹

由上述分析知，转子不平衡故障的主要振动特征如下。

- (1) 振动的时域波形近似为正弦波(图 10.2)。
- (2) 频谱图中，谐波能量集中于基频。并且会出现较小的高次谐波，使整个频谱呈所谓“枞树形”，如图 10.3 所示。

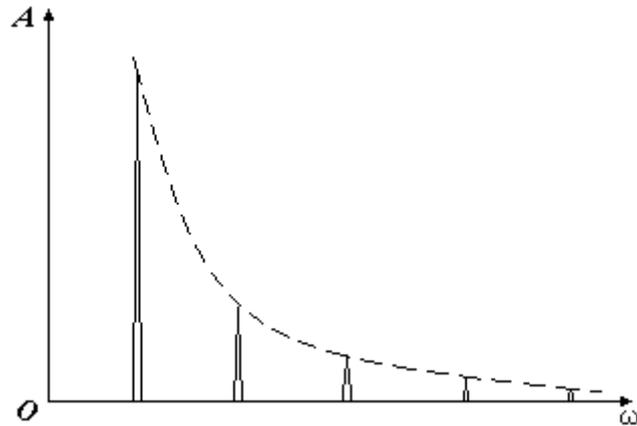


图 10.3 转子不平衡故障谱图

- (3) 当 $\omega < \omega_n$ 时，即在临界转速以下，振幅随着转速的增加而增大；当 $\omega > \omega_n$ 后，即临界转速以上，转速增加时振幅趋于一个较小的稳定值；当 ω 接近 ω_n 时，即转速接近临界转速时，发生共振，振幅具有最大峰值。振动幅值对转速的变化很敏感，如图 10.4 所示。

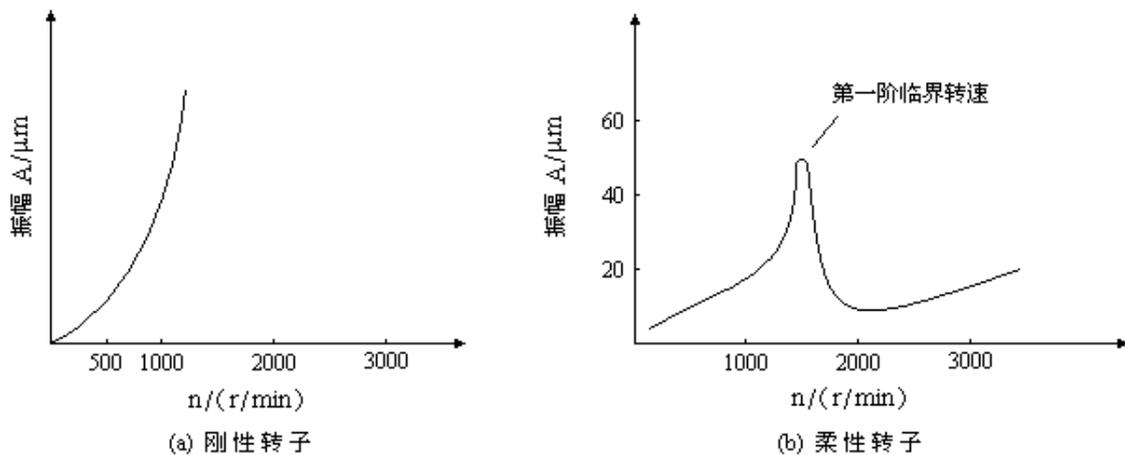


图 10.4 转子不平衡的主要特性

- (4) 当工作转速一定时，相位稳定。
- (5) 转子的轴心轨迹为椭圆。

(6) 从轴心轨迹观察其进动特征为同步正进动。

五、实验步骤

1、转子台及涡流传感器的安装

按照说明书将传感器、转子台控制器、信号采集仪、计算机连接成完整的测试系统如图 10.5 所示。

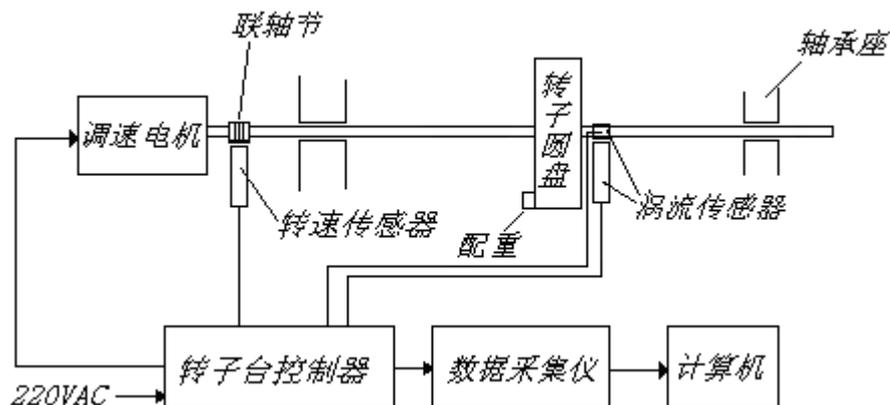


图 10.5 不平衡实验示意图

在转子圆盘的某个角度位置集中加上配重，使整个单跨转子台系统产生明显的不平衡状态。调整涡流传感器的位置，将其安装在转子圆盘附近，用来测量由于转子不平衡造成的振动。

2、控制器设置

按照说明书第二章的说明，设置好转子台控制器，主要是设置转子台的最高转速。

3、软件准备工作

接通信号采集仪器电源，并打开电源开关，连接仪器，参考实验一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”下“信号处理”界面内的“阶次分析”按钮，进入“阶次分析”设置界面，选择电涡流信号通道为输入通道，参数设置可参考图 10.6：



图 10.6 阶次分析参数设置参考

4、试验

1)、接通转子台控制器电源，打开控制器开关，启动控制器，使转子台转动起来，（操作见说明书第二部分转子台控制器操作说明），使转子台稳定在某一转速。

2)、点击“测量”窗口下“图形区设计”，选择“2D 图谱”，建立 2 个“2D 图谱”窗口，分别选择为相应电涡流通道的 Resampling(整周期重采样波形)、Order (阶次谱)；选择“记录仪”，建立 1 个“记录仪”窗口，选择电涡流传感器采集到的信号的时域波形，建立 1 个“XY 记录仪”窗口，选择两个电涡流传感器信号通道作为 X 轴、Y 轴，此“XY 记录仪”窗口显示两个通道合成的轴心轨迹图，通道平衡、清零后，启动采样。

3)、此时可在时域分析波形中观察到由电涡流传感器得到的位移信号曲线，改变转速(升高或降低转速)，观察曲线的变化情况。在降低转速后，位移信号曲线位移值会逐渐变小；在转速升高后，位移信号曲线幅值会不断增大。且时域波形接近正弦波。如下图 10.7 所示。

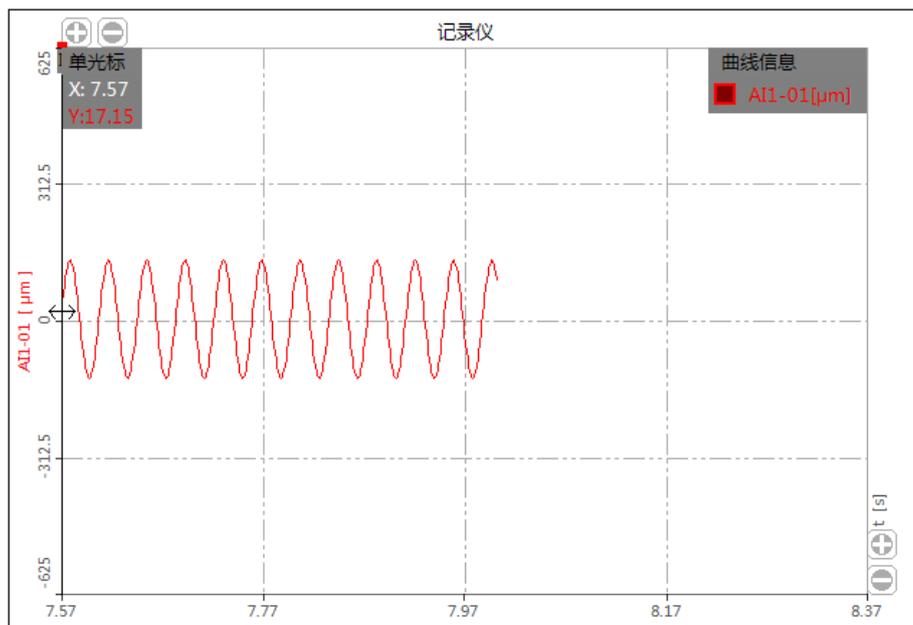


图 10.7 位移信号时域曲线

4)、选择阶次谱图，观察对应电涡流传感器所在位移信号曲线的阶次谱图。在谱图中，其主要特征频率为 1 倍频(基频)，常伴有较小的高次谐波频率成分。如下图 10.8 所示。

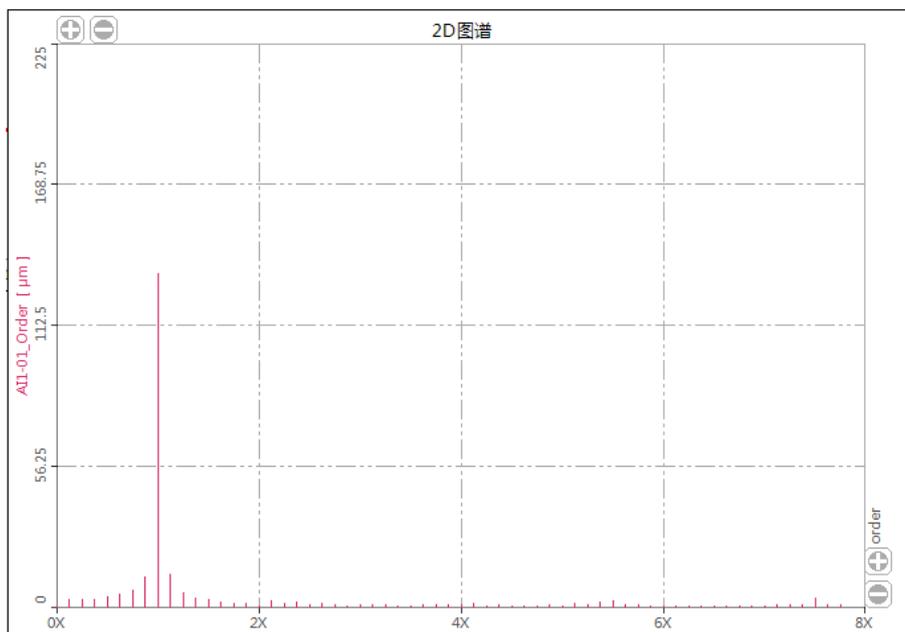


图 10.8 位移信号阶次谱特征频率

5)、选择轴心轨迹图，观察水平位置和垂直位置所在电涡流传感器得到的位移信号所合成的轴心轨迹图。合成的轴心轨迹曲线呈椭圆形。如下图 10.9 所示。

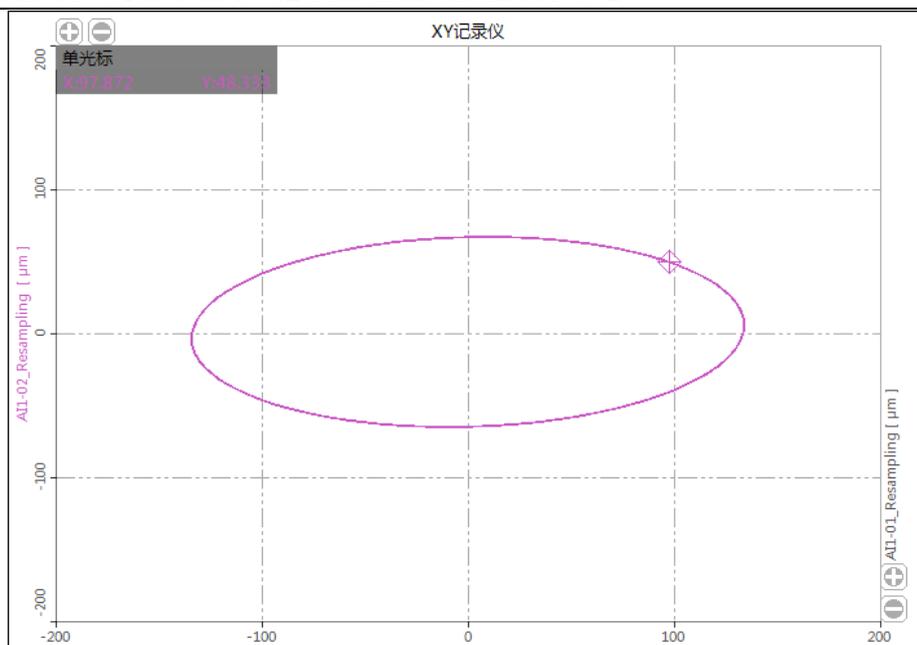


图 10.9 不平衡轴心轨迹图

6)、改变转子上不平衡质量的位置和重量，重新观察位移信号曲线、阶次谱和轴心轨迹曲线的变化情况，并结合不平衡故障的特征进行分析和故障判断。

六、转子不平衡故障的诊断方法

转子不平衡的诊断依据主要见表 10.1 和表 10.2。

表 10.1 转子不平衡的振动特征

序号	特征参量	故障特征		
		原始不平衡	渐变不平衡	突发不平衡
1	时域波形	正弦波	正弦波	正弦波
2	特征频率	1×	1×	1×
3	常伴频率	较小的高次谐波	较小的高次谐波	较小的高次谐波
4	振动稳定性	稳定	逐渐增大	突发性增大后稳定
5	振动方向	径向	径向	径向
6	相位特征	稳定	渐变	突变后稳定
7	轴心轨迹	椭圆	椭圆	椭圆
8	进动方向	正进动	正进动	正进动
9	矢量区域	不变	渐变	突变后稳定

表 10.2 转子不平衡的振动敏感参数

序号	敏感参数	随敏感参数变化情况		
		原始不平衡	渐变不平衡	突发不平衡
1	振动随转速变化	明显	明显	明显
2	振动随油温变化	不变	不变	不变
3	振动随介质温度变化	不变	不变	不变
4	振动随压力变化	不变	不变	不变
5	振动随流量变化	不明显	不明显	不明显
6	振动随负荷变化	不明显	不明显	不明显
7	其他识别方法	低速时振幅趋于零，运行初期振动值就处于较高的水平	随着运行时间的推移，振动逐步增大	振幅突然增加，然后稳定

对于原始不平衡、渐变不平衡和突发性不平衡这三种形式，其共同点较多，但可以从以下两个方面对其进行甄别。

(1)、振动趋势不同

原始不平衡：在运行初期机组的振动就处于较高的水平，见图 10.10 (a)；

渐变不平衡：运行初期机组振动较低，随着时间的推移，振值逐步升高，见图 10.10 (b)；

突发不平衡：振动值突然升高，然后稳定在一个较高的水平，见图 4.66 (c)。

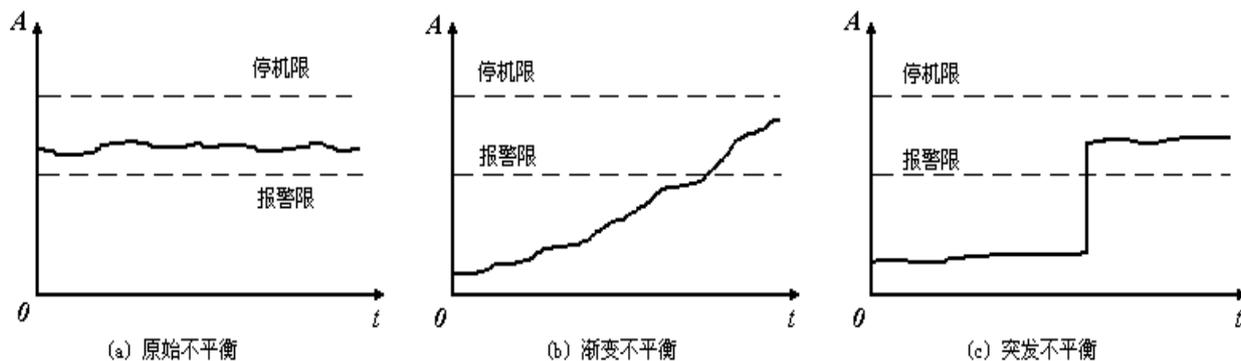


图 10.10 几种不同性质的不平衡的振幅变化趋势

(2) 矢量域变化不同

原始不平衡：矢量域稳定于某一允许的范围，见图 10.11 (a)；

渐变不平衡：矢量域逐渐变化，见图 10.11 (b)；

突发不平衡：矢量域某一时刻发生突变，见图 10.11 (c)，然后稳定。

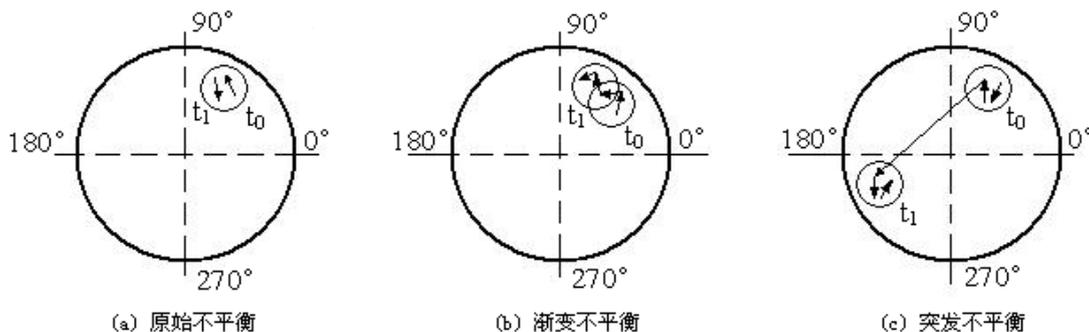


图 10.11 不平衡的矢量域

七、转子不平衡故障原因分析及治理措施

上述三类转子不平衡的故障原因分析及相应治理措施见表 10.3。

表 10.3 转子不平衡故障原因分析与治理措施

序号	原因分类	主要原因		
		初始不平衡	渐变不平衡	突发不平衡
1	设计原因	① 结构不合理	①结构不合理，易结垢 ②材质不合理，易腐蚀	①结构不合理，应力集中 ②系统设计不合理，造成异物进入流道
2	制造原因	①制造误差大 ②材质不均匀 ③动平衡精度低	①材质用错 ②光洁度不够，易结垢 ③表面处理不好，易腐蚀	①热处理不良，有应力 ②入口滤网制造缺陷
3	安装维修	①转子上零部件安装错误 ②零件漏装	①转子未除垢	①转子有较大预负荷
4	操作运行		①介质带液，造成腐蚀 ②介质脏，造成结垢	①超速、超负荷运行 ②入口阻力大，导致部件损坏，进入流道 ③介质带液，导致腐蚀断裂
5	状态劣化	①转子上配合零件松动	①转子回转体结垢 ②转子腐蚀	①疲劳，腐蚀 ②超期服役
6	治理措施	①按技术要求对转子进行动平衡 ②按要求对位安装转子上的零部件 ③消除转子上松动的部件	①转子除垢，进行修复 ②定期检修 ③保证介质清洁，不带液，防止结垢和腐蚀	①停机检修，更换损坏的转子 ②停机清理流道异物 ③消除应力，防止转子损坏

八、完成实验

实验完成后，关闭软件，停止转子台工作状态，再关掉仪器电源等，将实验台收拾干净后离开。

附录：实验报告封面

机械振动实验报告

第×次实验



学生姓名 _____

学生学号 _____

学生班级 _____

任课教师 _____

实验指导教师 _____

实验台编号 _____

实验日期 _____