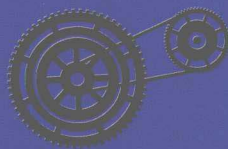


力学实验



LI XUE SHI YAN ZHI DAO SHU

指导书

张大志 郁世刚 主编
王 翀 王心弘

M e c h a n i c s



东北大学出版社
Northeastern University Press

力学实验指导书

张大志 郁世刚 主 编
王 翀 王心弘

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

序

理论力学、材料力学、工程力学是机械工程类与部分非机械工程类学生的必修课程。上述课程的论述对学生力学素质的培养与提升均起到重要作用。对上述课程的力学实验的设计、操作与总结有助于对相关力学的基本概念、基本理论、基本知识的理解、消化及应用，同时也有助于培养学生的动手能力、分析问题与解决问题的能力，为学生树立创新意识提供相关条件。

理论力学、材料力学、工程力学虽然有部分概念相互渗透，但所研究的问题各不相同，力学模型与力学方法各有所异，实验课分设理所当然。这里之所以将几门课程的实验部分放在一起，形成新的实验课程构架，是因为实验课程与工程问题更接近，学生未来所面对的工程问题的综合性，要求学生必须具有较强的综合实践能力才能胜任。如工程问题中力学模型的建立与简化，外力与内力分析计算，运动状态的模拟与动力分析，结构的强度、刚度与稳定性分析和计算等。力学实验是解决上述问题的基础与依据，也就是说，力学实验的授课必须面对未来工程实践中综合力学问题。这就是本校将上述课程的实验部分综合起来的基本出发点。

为完成上述改革，多年来，我校的力学老师致力于对力学实验的自主开发和设计，先后开发了“复合梁实验”“复合材料力学性能分析”“开口界面梁的弯曲中心测定”等实验项目；同时，我校在实验教学特别是实验教师的任务分配上，也作了有针对性的调整，确保学生从“力学实验”开始逐步体验“工程问题”的综合性及力学知识综合应用的重要性，扩大视野，着眼未来。同时，也使同学们认识到在学校使用的力学实验教材将会成为从实践入手解决工程问题的必要参考资料。

东北大学 王铁光教授

2011 年 10 月

前 言

力学实验是力学课程必不可少的重要组成部分，学生通过实验证明和推导理论知识，又用理论知识解释、分析实验结果，以达到巩固理论知识和学会实验方法的目的。本书的编写旨在让学生掌握力学实验的基本知识、技能和方法，培养学生的动手能力和分析、解决问题的能力，增强学生开拓创新的意识。

本书根据东北大学“理论力学”和“材料力学”实验教学大纲内容，在运用现有的仪器设备的基础上，结合原有的《振动实验指导书》、《工程力学、材料力学实验指导书》等自编教材修改编写而成。内容包括振动实验 6 项，材料力学及工程力学实验 17 项，完成全部实验大约需要 26 学时。其中，力学类专业学生要完成振动实验 6~8 学时，材料力学实验 16 学时；机械、土木等专业完成振动实验 4 学时，材料力学实验 16 学时；工程力学课程所涉及的其他专业完成实验 6~10 学时。

在这 23 个实验项目中，大部分是完全自主开发或部分自主开发的实验项目。这些实验项目凝聚了五十多年来历任力学教师的心血和教学成果。正是一代一代力学教师的严谨的教学作风、丰富的教学经验才积累了这些教学财富，这里向他们表示深深的敬意。

本书由东北大学理学院力学实验中心组织编写。在编写本书的过程中，得到了东北大学应用力学研究所、力学实验中心的领导和老师们的大力支持，特别是王铁光教授提出了大量的宝贵意见和编写方案，在这里一并向他们表示感谢！

由于编者的水平有限，难免有不足之处，恳请各位老师、同行及同学们批评指正。

编 者

2011 年 10 月

学生实验细则

1. 学生必须按照网上选课（或课表）指定时间到实验室上课，并由指导教师负责考勤。迟到 5 分钟以上者，不许参加本次实验。
2. 学生应对实验内容做充分预习，完成预习报告，并在上课前交给指导教师。无预习报告者不准参加此次实验。
3. 学生要认真完成实验内容，遵守实验室的规章制度和仪器设备的操作规程，不许做与本次实验无关的事情。
4. 在实验过程中，不听从指导教师安排，不按照仪器操作规程操作而造成仪器设备损坏者，将按照学校有关仪器设备管理规定处理。
5. 实验过程中，每人要记录一份原始数据，由实验指导教师签字后方可生效，并作为原始数据记录纸附在实验报告中。无原始记录或原始记录无指导教师签字，实验报告无效。
6. 学生必须认真完成实验报告，若发现抄袭者，双方实验成绩均以 0 分计。每次实验课前要完成上次的实验报告。
7. 要注意保持实验室卫生，不许乱涂乱画、随地吐痰、乱扔杂物等。实验结束整理好现场后，方可离开实验室。

目 录

第一章 理论力学振动实验	1
§ 1-1 简谐振动的的基本参数测量及振动传感器的标定	1
§ 1-2 单自由度系统固有频率及阻尼系数的测定	4
§ 1-3 简支梁振动特性的研究	9
§ 1-4 单圆盘转子临界转速的测量实验	13
§ 1-5* 刚性转子现场动平衡实验	19
§ 1-6 振型研究实验	23
第二章 工程力学、材料力学实验	25
§ 2-1 拉伸实验	25
§ 2-2 压缩实验	29
§ 2-3 扭转实验	32
§ 2-4* 电阻应变测量基本原理	36
§ 2-5 弹性模量 E 及泊松比 μ 的测定	39
§ 2-6 梁弯曲正应力测定	41
§ 2-7 复合梁实验	44
§ 2-8 薄壁圆筒在弯扭组合变形下的应力测定	47
§ 2-9 静定和静不定组合变形梁实验	51
§ 2-10 薄壁开口梁弯曲中心测定	58
§ 2-11 功的互等定理实验	61
§ 2-12 压杆稳定实验	64
§ 2-13 动荷框架实验	67
§ 2-14 等强度梁冲击动应力及动荷系数测试实验	69
§ 2-15 复合材料力学性能分析实验	71
§ 2-16 硬度实验	75
§ 2-17 冲击实验	78
第三章 力学实验报告	81
参考文献	122

第一章 理论力学振动实验

§ 1 - 1 简谐振动的基本参数测量及振动传感器的标定

一、实验目的

1. 掌握简谐振动基本参数(频率、振幅、速度、加速度等)的测试方法;
2. 学习常用测振传感器及其配套仪器的一般操作;
3. 了解加速度传感器的标定方法。

二、实验装置

1. 实验装置图

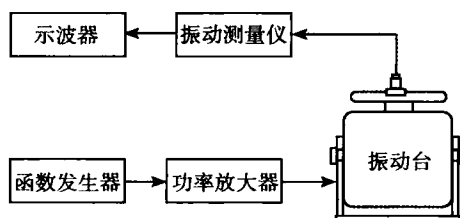


图 1 - 1 - 1 实验装置图

2. 主要实验设备

信号发生器、功率放大器、激振器、压电式加速度传感器、测振仪、传感器校准仪。

三、实验原理

1. 传感器标定

YE5502A 传感器校准仪(如图 1 - 1 - 2 所示)由激振器、功率放大器、电荷放大器、A/D 转换器、标准加速度传感器和数字显示器等组成,采用内置标准加速度传感器和外测传感器背对背安装,通过比较法进行测试。内部信号源产生 160Hz 的标准正弦信号,功率放大器推动激振器使被测传感器处于一定的振动量;而被测传感器的输出量再经由仪器内置的放大器、检波器等在表头显示出来。电荷输出型(Q)加速度传感器在 $10.0\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的激励下传感器的输出量就是加速度传感器在 $1.0g$ 激励下的 PC 值。

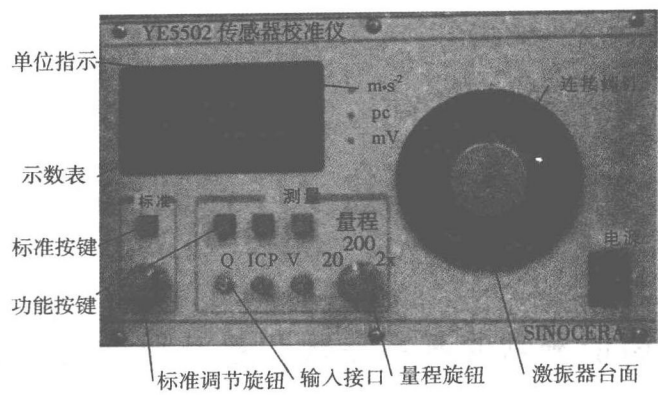


图 1-1-2 传感器校准仪

2. 位移、速度、加速度的测量

在用压电式加速度传感器分别测出位移 $x(t)$ 、速度 $v(t)$ 、加速度 $a(t)$ 的值 X, V, A 的基础上，分别对这些数据乘、除 $2\pi f$ 或 $(2\pi f)^2$ ，求得相应幅值的计算值，并与实际测量值进行误差分析。

四、实验步骤

第一部分 传感器的标定

1. 将未知灵敏度的传感器用 M5 螺钉牢固地安装在传感器校准仪面板的激振器台面上，并用 L 5 电缆线将传感器输出口连接到“测试”框内的 Q 接口。
2. 打开传感器校准仪电源开关，按下“标准”按钮，并调节“标准调节旋钮”，使 LTD 显示为 “ $10\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ”。
3. 按下“测量”框内 Q 上方按钮，表头显示的数值为传感器在 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的激振下的电荷灵敏度。
4. 重复第 2, 3 步骤，测三次传感器灵敏度，取平均值。

第二部分 基本参数测量

1. 检查所有仪器设备连接线、电源线是否连接正确，电源开关是否处于“关”的位置。经指导教师检查后，方可打开仪器电源开关预热。
2. 按下函数信号发生器的功能开关(FUNCTION)中的“正弦波形”键，同时按下频率选择档位开关中的“100”按钮，并调节频率调解旋钮，使函数信号发生器产生 50Hz 的正弦信号，调节相应的 OUT PUT(输出)旋钮，使其有一定的输出电压。
3. 将功率放大器(YE5872)电流输出旋钮置于 9A 左右，调节增益旋钮，此时激振器应能正常工作。

注意：调节功率放大器的输出电流不宜过大；否则，容易烧毁仪器。

4. 把振动测量仪的“传感器灵敏度”调至上述测量值，“上限频率”键置于“100”，功能键分别置于“加速度”、“速度”、“位移”档，调节振动计的“增益”量程到适当的位置，使其显示表指针指到一个合适的位置，分别读出振动的加速度、速度和位移。
5. 读数结束后，将所有仪器输出旋钮置于 0；关闭所有仪器开关，结束实验。

五、实验要求

- 1. 计算传感器的灵敏度。
- 2. 根据测得的位移、速度、加速度的值，分别乘、除 $2\pi f$ 或 $(2\pi f)^2$ ，求得相应幅值的计算值。

六、思考题

- 1. 传感器的标定有什么实际意义？
- 2. 请写出两种传感器标定方法。
- 3. 振动的基本参数之间存在什么样的相互关系？

七、原始数据

1. 传感器标定

测量次数	一	二	三	平均
灵敏度 $/(pc/m \cdot s^{-2})$				

2. 振动基本参数测量值：

振动频率 $f =$
振幅 $X =$
速度 $V =$
加速度 $a =$

八、实验报告要求

- 1. 实验目的
- 2. 主要实验设备
- 3. 实验步骤
- 4. 实验分析
 - (1) 传感器标定
 - (2) 振动基本参数测量

振动频率 f/Hz		
$X(t)$ 振动幅值 $/\mu m$	实测 x	
	$V/2\pi f$	
	$a/(2\pi f)^2$	
$V(t)$ 振动速度 $/(m/s)$	实测 V	
	$X \cdot 2\pi f$	
	$a/2\pi f$	
$a(t)$ 振动加速度 $/(m/s^2)$	实测 a	
	$X \cdot (2\pi f)^2$	
	$V \cdot 2\pi f$	

5. 思考题

§ 1 - 2 单自由度系统固有频率及阻尼系数的测定

一、实验目的

- 1. 掌握单自由度系统固有频率和阻尼系数的测试方法及相关测振设备的正确使用；
- 2. 学习计算机对振动信号的采集、检测、分析技术；
- 3. 掌握用李萨育图形法测量振动频率。

二、实验装置

1. 实验装置图

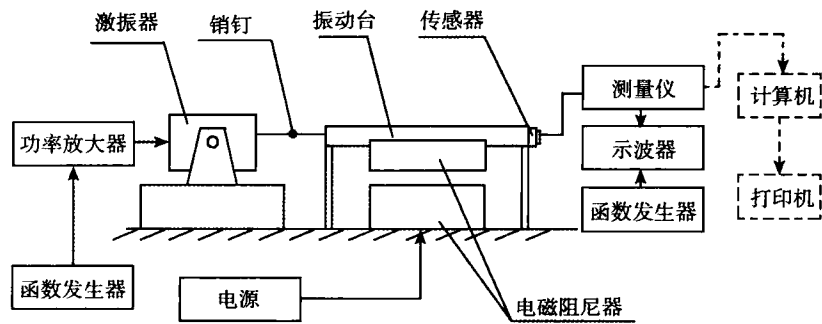


图 1 - 2 - 1 实验装置图

2. 主要实验设备

- (1) 激振部分：函数信号发生器、功率放大器、激振器；
- (2) 测试对象：水平振动台、电磁阻尼器；
- (3) 测振部分：加速度传感器、振动测量仪、示波器、计算机。

各设备的工作原理见 § 1 - 2 附录，计算机数据采集见“振动实验”计算机教学软件。

三、实验原理

1. 衰减振动的测量

衰减振动的测量是根据小阻尼自由振动理论开设的实验。由小阻尼自由振动理论可知：一个具有线性小阻尼振动的系统的振体的位移按照下面的规律变化，即

$$x = Ae^{-nt} \sin(\sqrt{\omega^2 - n^2} t + \theta)$$

振幅值在 $\pm Ae^{-nt}$ 两条曲线之间变化，如图 1 - 2 - 2 所示。

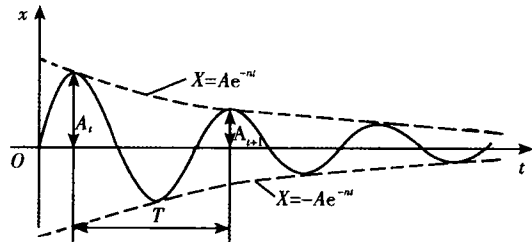


图 1 - 2 - 2

其减幅系数和对数减幅系数分别为

$$d = \frac{A_i}{A_{i+1}}, \quad \delta = \ln d$$

阻尼系数为

$$n = \frac{\delta}{T} = \frac{\ln d}{T} = -\frac{\ln \frac{A_i}{A_{i+1}}}{T}$$

为了实现线性阻尼条件, 本实验采用带有电磁阻尼器的水平振动实验台, 如图 1-2-1 所示。其力学模型如图 1-2-3 所示。该系统的线性阻尼就是靠阻尼器电磁力(也包括系统本身的阻尼)来实现的。如果给系统一个初始位移, 使系统振动, 即可通过传感器、振动测量仪、计算机将该系统的衰减振动曲线记录下来。再根据测得的衰减振动曲线的振幅和周期, 用上面的公式可算出阻尼系数。

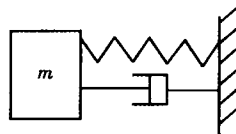


图 1-2-3 振动系统模型

2. 固有频率的测量

根据信号发生器和振动测量仪的数据, 利用描点法绘制出幅频特性曲线(如图 1-2-4 所示), 使振幅最大的激振频率即为系统的固有频率(ω_n)。

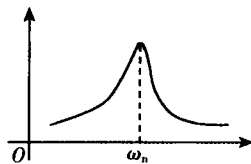


图 1-2-4 幅频特性曲线

3. 用李萨育图形法测量非共振状态下的强迫振动频率

其原理可由数学方法表示。在示波器的 x 轴及 y 轴同时输入两个信号:

$$y = Y_m \sin(\omega_y t)$$

$$x = X_m \sin(\omega_x t + \phi)$$

式中, y ——被测系统振幅信号;

x ——测量系统的信号发生器产生的信号。

这两个信号在示波器屏幕上形成的图像, 实际上是由这两个参数方程所形成的运动轨迹。当 $\omega_x = \omega_y$ 时, 消去参量 t , 即可得到椭圆方程

$$\frac{x^2}{X_m^2} + \frac{y^2}{Y_m^2} - \frac{2xy}{X_m Y_m} \cos \phi = \sin^2 \phi$$

该式是一斜椭圆。当 $\phi = \pi/2$ 时, 该式变成一个正椭圆方程

$$\frac{x^2}{X_m^2} + \frac{y^2}{Y_m^2} = 1$$

总之, 当调节测量系统中的信号发生器的频率使示波器上显示出一椭圆时, 该信号发生器的输出信号频率就是振动台的振动频率。

四、实验步骤

第一部分 阻尼系数的测量

1. 检查所有仪器设备连接线、电源线是否连接正确, 电源开关是否处于“关”的位

置。经指导教师检查后，方可进行实验。

- 2. 卸下激振器顶杆与振动台面连接销钉；调节 SD1469 振动测量仪，使传感器的灵敏度与加速度传感器相适应，工作选择开关置于位移档。
- 3. 启动计算机，按照本实验计算机教学软件的步骤和要求完成衰减振动的测量。
- 4. 关闭计算机。

第二部分 固有频率的测量

- 1. 安上激振器顶杆与振动台面连接销钉。
- 2. 函数信号发生器选择“正弦波形”，频率档位开关选择“10”，并调节频率调解旋钮，使函数信号发生器产生 5Hz 的正弦信号。
- 3. 调节功率放大器输出旋钮，使输出电流表指示在 0.1 ~ 0.3 A，此时激振器应能正常工作。
- 4. 调节 SD1469 振动测量仪量程旋钮，使表针能够在表盘上指示数据为宜，此数据即为振动台体的振动幅值(读数方法见 § 1-2 附录)。
- 5. 按照表 1-2-1 的格式，调节函数信号发生器的输出频率(激振频率)，把相应的振幅值记录下来。

表 1-2-1

频率/Hz											
振幅/mm											

第三部分 振动频率的验证

- 1. 任意设置一激振频率(f) (不能设置为共振频率)；同时按下示波器的“EXT，INT”和“NORM，X-Y”键，使示波器上显示李萨育图形。
- 2. 调节 EM1643 函数发生器的频率调节旋钮，使示波器显示的李萨育图形为一稳定的椭圆，记录下此时该函数发生器的频率($f_{测}$)。
- 3. SD1469 振动测量仪量程旋钮置于 0，并关闭所有仪器开关，结束实验。

五、实验要求

- 1. 根据打印纸上的衰减振动曲线，按照要求计算出两种状态下的阻尼系数；
- 2. 根据记录数据绘制幅频特性曲线，指出固有频率；
- 3. 计算频率测量误差

$$\Delta = \left| \frac{f - f_{测}}{f} \right| \times 100\%$$

六、思考题

- 1. 李萨育图形是怎样产生的？
- 2. 李萨育图形是椭圆表明什么含义？
- 3. 本实验是如何确定固有频率的？
- 4. 阻尼是如何产生的？

- 5. 阻尼的效果体现在哪里？
- 6. 什么是衰减振动？
- 7. 怎样测定阻尼系数？

七、实验数据

1. 固有频率的测量

频率/Hz											
振幅/mm											

2. 频率测量

$f =$ $f_{测} =$

3. 衰减振动曲线

(另见计算机输出结果)

八、实验报告

- 1. 实验目的
- 2. 主要实验设备
- 3. 实验步骤
- 4. 实验数据分析

(1) 阻尼系数的计算

① $A_i =$ $A_{i+1} =$ $T =$

$\delta =$ $n =$

② $A_i =$ $A_{i+1} =$ $T =$

$\delta =$ $n =$

(2) 幅频特性曲线

固有频率 $\omega_n =$

(3) 频率测量

$f =$ $f_{测} =$ 误差 $\Delta =$

5. 思考题

附录 主要实验设备工作原理

1. 激振器

它是一种电动变换器，即将电能转变为机械能，对试件提供激振力的一种装置。其基本结构如图 1-2-5 所示，它是由永久磁铁、弹簧片及与顶杆固连在一起的动圈组成的。当在动圈内通入交变电流时，动圈在磁场内即会受到相应的交变力作用，使其驱动顶杆作往复运动，推动振动台振动。

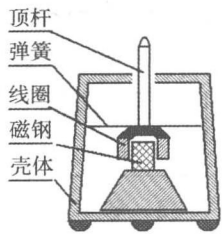


图 1-2-5 激振器

2. 水平振动台

水平振动台是自行设计的由水平振动台面和上端与其连接、下端固定的四个弹簧片组成的单自由度振动系统，是本实验的测试对象。

3. 电磁阻尼器

电磁阻尼器是一种电磁转换装置，它由直流电源及电磁器组成。在本实验中，此装置安装在如图 1-2-6 所示的实验系统中。当改变直流电源的输出电流，使电磁铁中的磁力发生变化，引起整个实验台系统的阻尼发生变化，从而改变实验台中弹簧质量系统的阻尼系数。

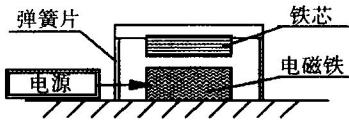


图 1-2-6 电磁阻尼器

4. SD1469 振动测量仪

SD1469 振动测量仪将压电加速度传感器输送来的电信号直接转换成振动的位移、速度和加速度数值来读取。

使用方法：

- (1) 传感器灵敏度的设置应与所连接传感器的灵敏度一致；
- (2) 根据具体测试要求，设置位移、速度、加速度功能旋钮；本实验选择位移档位，单位为 mm；
- (3) 直接读取表头示数，不需要换算；
- (4) 低通滤波应根据被测信号而定。本实验选择 30Hz。

§ 1-3 简支梁振动特性的研究

一、实验目的

- 1. 了解简支梁的振动特性，以及振动的力、位移、速度、加速度之间的幅值和相位的关系；
- 2. 掌握系统的固有频率的测试方法和系统共振的特点；
- 3. 了解常用传感器和配套设备的使用方法，掌握信号采集、分析、处理的方法。

二、实验装置

1. 实验装置图

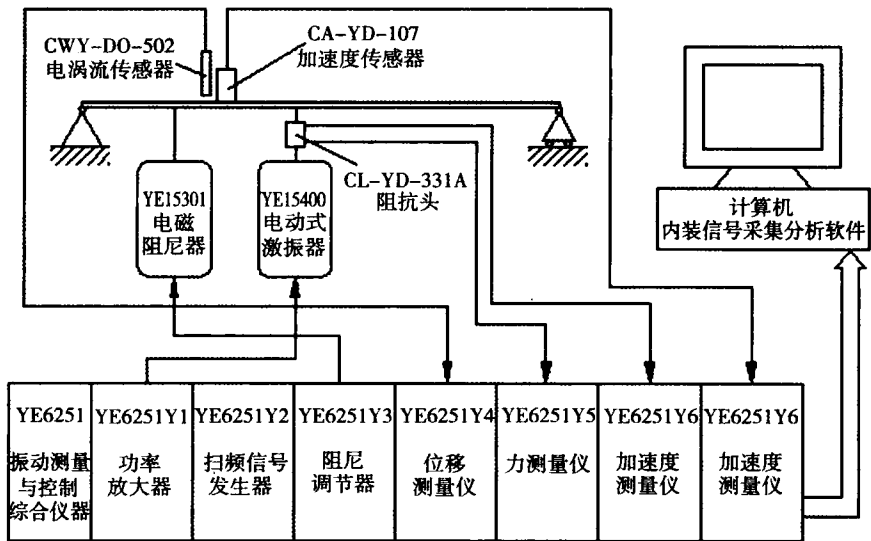


图 1-3-1 实验装置

2. 主要实验设备

振动力学实验台、激振器、电涡流传感器、加速度传感器、力传感器、振动测量与控制综合仪器、计算机。

三、实验原理

强迫振动激振力、位移、速度、加速度响应分别为

$$\begin{aligned} F &= F_0 \sin \omega t \\ x(t) &= B \sin(\omega t - \phi) \\ \dot{x}(t) &= \omega B \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ \ddot{x}(t) &= \omega^2 B \sin(\omega t - \phi + \pi) \end{aligned}$$

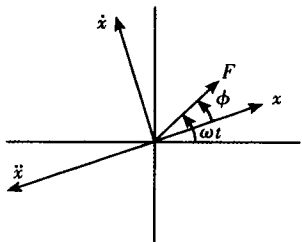


图 1-3-2 相位关系图

它们之间的相位关系为：位移滞后力 ϕ 角，速度超前位移 $\frac{\pi}{2}$ ，加速度超前位移 π ，用旋转矢量表示如图 1-3-2 所示。

四、软件操作

图 1-3-3 为实验软件的主界面，可根据以下介绍掌握其各部分的功能。



图 1-3-3 软件主界面

1. 登录输入

运行实验软件后，系统弹出登录窗口，如图 1-3-4 所示，需要输入个人信息。

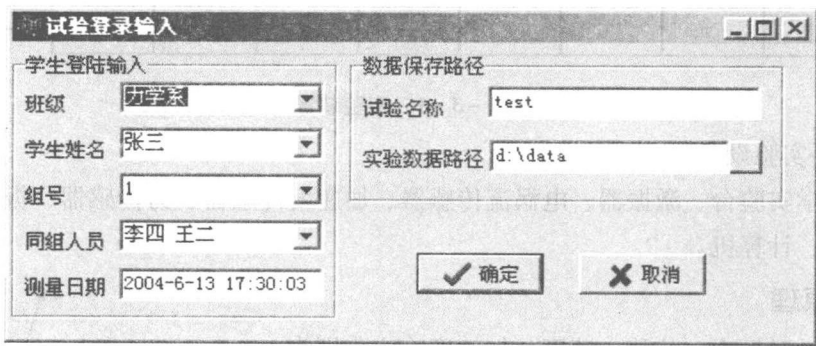


图 1-3-4 登录窗口

2. 试验项目选择(包括系统名称、试验项目名称)

在登录窗口按“确定”按钮，系统进入主界面，参见图 1-3-3；首先要进行实验项目的选择。本实验选择“简支梁系统”，分别选择其中的 1, 2, 6 三个实验项目，如图 1-3-5 所示。选择试验项目后，同学们可参考右侧实验向导中的实验步骤提示进行相应

的实验。

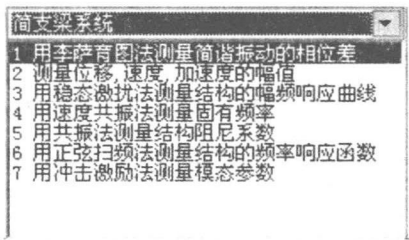


图 1-3-5 实验项目的选择

3. 通道参数设置

当选择一个实验项目时，系统已经给出一个默认的通道设置，通道参数包括测点号设置、通道是否测量设置、工程单位设置和满量程设置(即通道增益选择)，如图 1-3-6 所示。根据实际情况，可以对通道参数进行修改。

通道号	测点号	测量选择	工程单位	增益	通道极性
1	1	×	mA	1	+
2	2	×	mV	1	+
3	3	×	mA	1	+
4	4	√	mm	1	+
5	5	√	N	10	+
6	6	√	m/s ²	10	-
7	7	√	m/s ²	10	-

图 1-3-6 通道参数设置

4. 系统参数设置

包括采样频率、采样方式等，本实验选择系统默认设置，参见图 1-3-3 左上侧选项。

5. 视窗设置

选择视窗右上方工具栏的“时间波形”按钮，可以创建时间波形视图，参见图 1-3-3 中间显示窗口。也可以设置其他类型的分析视图，如 FFT 分析、传递函数分析、统计分析等视图，参见图 1-3-3 右上侧选项。

6. 数据采集

数据采集部分包括  联机按钮和  采集按钮。

采集前，一般先选择“示波”进行试调，如果显示异常，可以通过改变采集参数进行调节。调试正常后，再使用指定的方式采集所需要的数据。

7. 数据分析和处理

根据采集的数据，可选择下拉菜单、快捷按钮或在数据视窗点击鼠标右键选择不同的处理方式来获得实验所需数据。

五、实验步骤

1. 检查各仪器的连接线是否连接正确，激振器、传感器的连接件是否安装牢固；功率放大器输出旋钮应置为最小。