

## 《高阶工程认知与实践》

# 工业产品综合特性测试 (抗震测试) 实验指导书

浙江大学 工程师学院

2022. 9

# 实验目录

---

1.实验一：

共振法测单自由度体系固有频率(手动调频法)

2.实验二：

自振法测单自由度体系固有频率和阻尼比

3.实验三：

共振法测单自由度体系固有频率(扫频法)和阻尼比

4.实验四：

层间阻尼器减振实验

5.创新实验：

三层框架的减隔震探索与研究

6.附录一：

传感器连接教程

7.附录二：

数据采集系统使用说明

8.附录三：

实验报告（样本）

# 实验一 共振法测单自由度体系固有频率 (手动调频法)

## 一、实验目的

学习振动台及试验框架的使用方法；  
观察共振现象，了解结构固有频率的测试方法。

## 二、实验设备和仪器

电磁激振模型振动平台

## 三、实验原理

共振法又称为强迫振动法。当结构在受到与自振周期一致的周期荷载激励时，结构的响应较大，即产生共振现象。利用这种特点，通过调整激振器频率，使结构产生稳态的强迫简谐振动，通过测定其加速度或者位移，求得结构动力特性的基本参数。

## 四、实验方案

利用 3mm 厚立柱、安装底座、楼层梁、任意取一质量块组装一个双立柱单层模型。层高取 900mm（底座顶至楼层梁中）。

## 五、实验步骤



1. 仪器安装。参照左图，安装好实验模型。
2. 将功率放大器输出调节钮逆时针调至最小；开启控制电源；开启功率电源。
3. 打开波形发生器，选择正弦波，设置起始频率  $f=1\text{Hz}$ 。
4. 用旋钮一边慢慢加大正弦波频率（不超过  $10\text{Hz}$ ），一边控制功率放大器输出调节钮，找到一个适合的放大倍数：在所需频率范围内，既不会撞缸，也能使得振动肉眼可见。
5. 固定功率放大器输出调节钮，重新调节波形发生器输出频率，观察模型位移，找到结构发生共振的时刻（位移最大），此时的输出频率，即为结构的固有频率。

## 六、实验结果的整理、分析和试验报告

1. 各组轮流学习调试过程。
2. 本实验不需撰写实验报告。

## 实验二 自振法测单自由度体系固有频率和阻尼比

### 一、实验目的

1. 掌握动态信号采集仪的使用方法；
2. 了解加速度、位移测量的全过程；
3. 掌握用自振法测单自由度体系固有频率和阻尼比的定量计算方法。

### 二、实验设备和仪器

1. 电磁激振模型振动平台
2. 优泰 uT3408FRS-DY 动态数据采集器
3. IEPE 压电式加速度传感器

### 三、实验原理

采用突然加载、卸载、爆炸等方法使结构产生自由振动。通过记录自由振动曲线可以求出结构的基本频率和阻尼系数。

将结构物简化为单质点和连线构成的几何体系。在静止状态下，用橡胶锤敲击质点，并测量质点处的位移响应、加速度响应，根据采集仪得到的加位移时程曲线，利用公式计算得到结构体的自振频率  $f = 1/T$  阻尼比  $\zeta$ 。

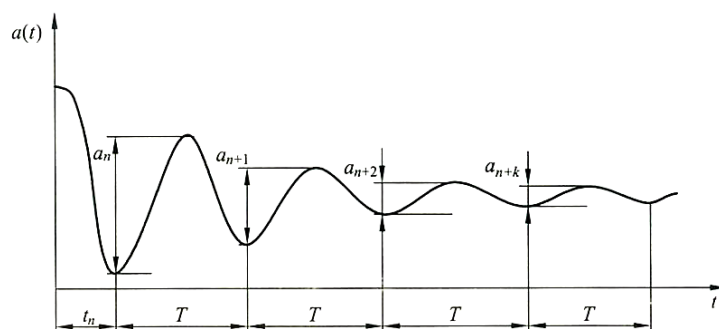


图 1 自由振动时间历程曲线

根据结构动力学知识，有阻尼自由振动的运动方程解为：

$$x(t) = Ae^{-\zeta \omega t} \sin(\omega' t + \varphi)$$

式中， $x(t)$  为振动位移； $Ae^{-\zeta \omega t}$  为振幅，令第  $n$  个幅值为  $a_n = Ae^{-\zeta \omega t}$ ； $\zeta$  为阻尼比； $\omega'$

为阻尼体系的自振圆频率， $\omega' = \omega \sqrt{1 - \zeta^2}$ ， $\omega = \sqrt{k/m}$ 。

图 1 中相邻两个峰值时间为一个周期  $T$ 。某一时刻  $t_n$  对应的振幅为  $a_n$ ；经过一个周期  $T$  后，在  $t_{n+1}$  ( $t_{n+1} = t_n + T$ ,  $T = 2\pi / \omega'$ ) 时刻的振幅记为  $a_{n+1}$ ，相邻两振幅比值为：

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{Ae^{-\zeta \omega t_n}}{Ae^{-\zeta \omega (t_n + T)}} = e^{\zeta \omega T}$$

两边取自然对数，则

$$\ln \frac{a_n}{a_{n+1}} = \zeta \omega T = \zeta \omega \frac{2\pi}{\omega'} = 2\pi \zeta$$

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a_n}{a_{n+1}}$$

一般舍弃开始的几个周期，并在衰减曲线上量取  $k$  个波形，求均值：

$$\zeta = \frac{1}{2k\pi} \ln \frac{a_n}{a_{n+k}}$$

## 四、实验方案

利用 3mm 厚立柱、安装底座、楼层梁、质量块组装一个双立柱单层模型。层高取 900mm（底座顶至楼层梁中）；质量块按下表选用。

实验组别	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
质点附加质量	0	0.5Kg	1kg	1.5kg	2kg

## 五、实验步骤



1. 仪器安装。参照左图，安装好实验模型。固定加速度传感器，并将传感器接入动态数据采集仪。按要求加装质量块。
2. 电脑开机，采集仪通电，打开数采软件，连接仪器。设置通道参数、传感器参数。在软件中设置采样频率为 512Hz，采集块数 128。
3. 进入示波状态。
4. 用橡胶小锤轻轻敲击实验模型质点位置，看到响应衰减信号。待信号稳定后，点击开始采样按钮，采样时间 20s 以上。
5. 把采样数据导出保存，设置好文件名、实验编号等。
6. 在软件中或利用其他数据处理工具读取计算所需的峰值、时间数据。
7. 利用公式手工计算（课后完成）。
8. 在示波窗口点击右键，将通道所有数据在 Ss 软件中打开，并生成频谱图，读取第一阶频率（具体方法参见附录二），与手工计算得到的频率进行对比。
9. \*有兴趣的同学可以利用 Sap2000 等有限元分析软件进行数值仿真，经模态分析后，得到固有频率。

## 六、实验结果的整理、分析和试验报告

工况	实测固有频率	实测阻尼比 $\zeta$	Ss 软件读取的固有频率
M=0 (M 为质量块质量)			
M=0.5Kg			
M=1Kg			
M=1.5Kg			
M=2Kg			

1. 各组完成所在组工况的数据采集和处理，并汇总到上表，学员根据全班汇总数据研究自振频率与质点质量的关系。
2. 完成实验报告（需含求解过程），并将本组负责工况的记录曲线附在实验报告内。

## 实验三 共振法测单自由度体系固有频率和阻尼比 (扫频法)

### 一、实验目的

- 1.掌握动态信号采集仪的使用方法；
- 2.巩固加速度、位移测量的全过程；
- 3.掌握用共振法测单自由度体系固有频率的模态分析方法；
- 4.掌握半功率带法求解阻尼比。

### 二、实验设备和仪器

- 1.电磁激振模型振动平台
- 2.优泰 uT3408FRS-DY 动态数据采集器
3. IEPE 压电式加速度传感器

### 三、实验原理

共振法又称为强迫振动法。当结构在受到与自振周期一致的周期荷载激励时，结构的响应较大，即产生共振现象。利用这种特点，通过调整激振器频率，使结构产生强迫简谐振动，通过测定其加速度或者位移，求得结构动力特性的基本参数。

### 四、实验方案

利用 3mm 厚立柱、安装底座、楼层梁、质量块组装一个双立柱单层模型。层高取 900mm（底座顶至楼层梁中）；质量块按下表选用。

实验组别	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
质点附加质量	0	0.5Kg	1kg	1.5kg	2kg

### 五、实验步骤



- 1.仪器安装。参照左图，安装好实验模型。固定加速度传感器，并将传感器接入动态数据采集仪。按要求加装质量块。
- 2.电脑开机，采集仪通电，打开数采软件，连接仪器。设置通道参数、传感器参数。在软件中设置采样频率为 512Hz，采集块数 128。
- 3.进入示波状态。
- 4.将功率放大器输出调节钮逆时针调至最小；开启控制电源；开启功率电源。
- 5.用旋钮一边慢慢加大正弦波频率，一边控制功率放大器输出调节钮，找到一个适合的放大倍数：在所需频率范围（1~5Hz）内，既不会撞缸，也能使得振动肉眼可见。
- 6.打开波形发生器，选择 sweep 模式，设置起始频率（ $\leq 1\text{Hz}$ ）和终止频率（5Hz），扫描时间 15s。开启扫频模式，打开“output”按钮，发送波形。
- 7.观察示波波形，待稳定后，采集 3 个以上扫频周期的数值。
- 8.在数据分析软件（Ss）中打开频谱曲线，获取结构的固有频率。
9. 在 Ss 软件中导出共振曲线 xls 文件（参见附录二），用半功率带法（参见 PPT）求解结

构阻尼比  $\zeta$ 。

## 六、实验结果的整理、分析和试验报告

工况	实测一阶频率	阻尼比 $\zeta$
<b>M=0</b> (M 为质量块质量)		
<b>M=0.5Kg</b>		
<b>M=1Kg</b>		
<b>M=1.5Kg</b>		
<b>M=2Kg</b>		

- 1.各组完成本组工况的数据采集和处理并汇总到上表。将结果与实验二进行比较。
- 2.完成实验报告（需含求解过程），并将本组负责工况的记录曲线附在实验报告内。

## 实验四：层间阻尼减振实验

### 一、实验目的

- 1.掌握动态信号采集仪的使用方法；
- 2.巩固位移测量的全过程；
- 3.巩固用共振法测单自由度体系阻尼的定量计算方法。
- 4.了解阻尼器的工作原理。

### 二、实验设备和仪器

- 1.电磁激振模型振动平台
- 2.优泰 uT3408FRS-DY 动态数据采集器
- 3.IL-600 激光位移传感器
- 4.黏滞阻尼器

### 三、实验原理

根据流体力学原理,当流体通过节流孔或在封闭空间中进行相对运动时与壁缸或壁筒产生相互作用,产生节流阻力,将流体运动产生的动能转化为热能,从而耗散地震输入的能量。依据这种原理制作的阻尼器,称为粘滞阻尼器。

### 四、实验方案

按照图 1,利用 2mm 厚立柱、安装底座、横梁组装一个双立柱三层模型。安装层间阻尼器。

实验组别	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
安装位置	最上层		中间层		不安装

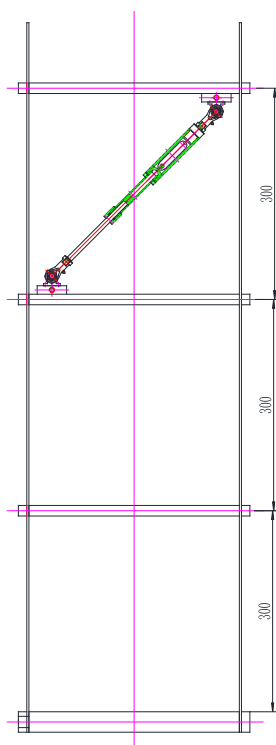


图 1 安装示意图



## 五、实验步骤

1. 仪器安装。参照图 1 安装示意图安装好实验模型。固定激光位移传感器，并将传感器接入动态数据采集仪。
2. 开机打开数采软件，连接仪器。设置通道参数、传感器参数。在软件中设置采样频率为 512Hz。
3. 进入示波功能。
4. 将功率放大器输出调节钮逆时针调至最小；开启控制电源；开启功率电源。
5. 打开波形发生器，选择正弦波，设置激振频率为 4Hz，并进行稳定激振，记录位移数据（20s 以上）。
6. 固定层间阻尼器并进行位移测量。
7. 对各工况进行频谱分析。
8. 各小组比较结果，讨论减振率与阻尼器安装位置之间的关系。

## 六、实验结果的整理、分析和试验报告

组别	阻尼器位置	顶层最大位移	减振率
第一组			
第二组			
第三组			
第四组			
第五组			

注:减振率=1-减振后的顶点最大位移/减振前的顶点最大位移

1. 各组完成本组工况的数据采集和处理并汇总到上表。
2. 完成实验报告，并将本组负责工况的记录曲线附在实验报告内。

# 创新实验：三层框架的减隔震探索与研究

## 一、实验目的

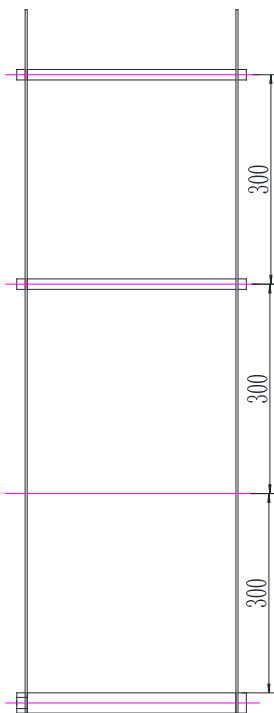
1. 巩固抗震测试的基本方法；
2. 探索减隔震装置的工作原理；
3. 锻炼从理论到实践的思维方法。

## 二、实验设备和仪器

1. 电磁激振模型振动平台
2. 优泰 uT3408FRS-DY 动态数据采集器
3. IL-600 激光位移传感器
4. 砝码、水箱、皮筋、橡胶支座等辅助材料。

## 三、任务背景

有一个因使用需要底部两层通高的三层单榀框架（如图所示，模型立柱厚度 2mm），经计算后发现在水平地震力（用激振频率 1.9Hz 模拟，由任课老师确定功率放大器的放大程度）作用下，水平刚度不能满足要求。根据相关规范要求，顶层位移不能超过总高度的 1/250。请在实验室利用现有的材料（砝码、水箱、皮筋、橡胶支座及一些连接辅材），为该框架增设一个阻尼装置，降低顶点位移，尽可能满足规范要求。



## 附录一：传感器连接教程

### 一、激光位移传感器

#### 1. 传感器介绍

品牌	KEYENCE 基恩斯	电压输出范围	0-5V
型号	IL-600	线性度	$\pm 0.25\%F.S.$
基准距离	600mm	重复精度	$300\ \mu m$
测量距离	200-1000mm	工作电压	10-30V

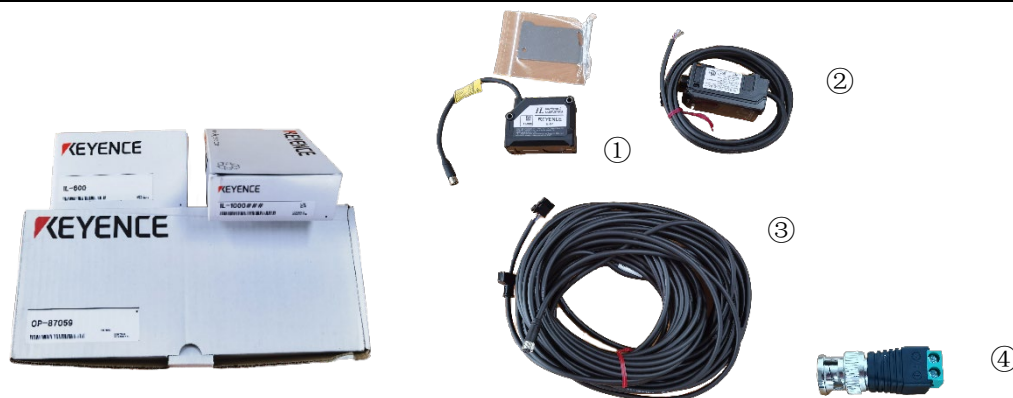
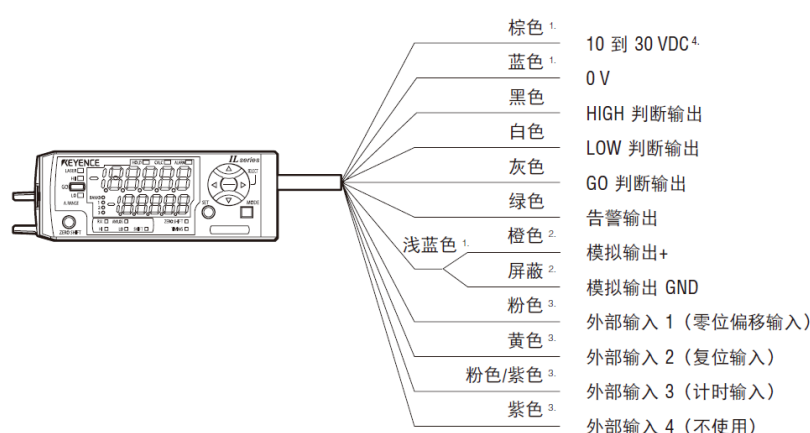


图 1 各部件外包装

图 2 ①激光头、②放大器、③线缆、④BNC 接口

#### 2. 连接方法

- (1) 安装激光头：用连接杆、M4 螺钉、磁性底座等零件固定激光头，使之与测点之间的距离大于 300mm。
- (2) 连接放大器。
- (3) 连接电源和模拟信号输出。



棕色接**稳压源**电源正（红色夹头），海蓝色接**稳压源**电源负（黑色夹头），天蓝色中的橘色接信号正（BNC 转接头正），天蓝色中的屏蔽线（裸线）接信号负（BNC 转接头负）。BNC 转接头接采集仪电压端口。

打开**稳压源**反面、正面的开关。

观察放大器显示，正常应显示跳动的数字，模式为 RV。如显示异常，请检查

测量距离是否超量程。（**重要！请确保电源正负极不短接，短路将导致传感器烧坏**）

（4）数据归零（ZERO SHIFT）。

（5）在采集仪中平衡通道（Ba）。

## 二、加速度传感器

### 1. 传感器介绍

产品名称	IEPE 压电式加速度传感器	
型 号	1A116E	1A212E
轴向灵敏度 (23±5°C)	约 100 mV/g	约 500 mV/g
量程	±50g	±10g
最大横向灵敏度	<5%	<5%
频率响应（±10%）	1~10000 Hz	0.2~5000Hz
分辨率	0.0004g	0.00002g
极性（加速度方向从 底部到传感器顶部）	正向	正向
敏感元件	陶瓷	
结构形式	剪切	
重 量	5.5g	约 172g
壳体材料	钛合金 TC4	不锈钢

### 2. 连接方法

底部安装螺孔与磁性底座相连，侧面输出插孔与数据线连接并拧紧。数据线另一头 BNC 接口与数据采集仪 **ICP** 接口相连。

固定线缆，减少导线重量对数据采集的影响。

### 3. 注意事项

请注意传感器的安装方向，确保极性方向与运动方向一致。

## 附录二：数据采集分析系统使用教程

### 一、设备简介

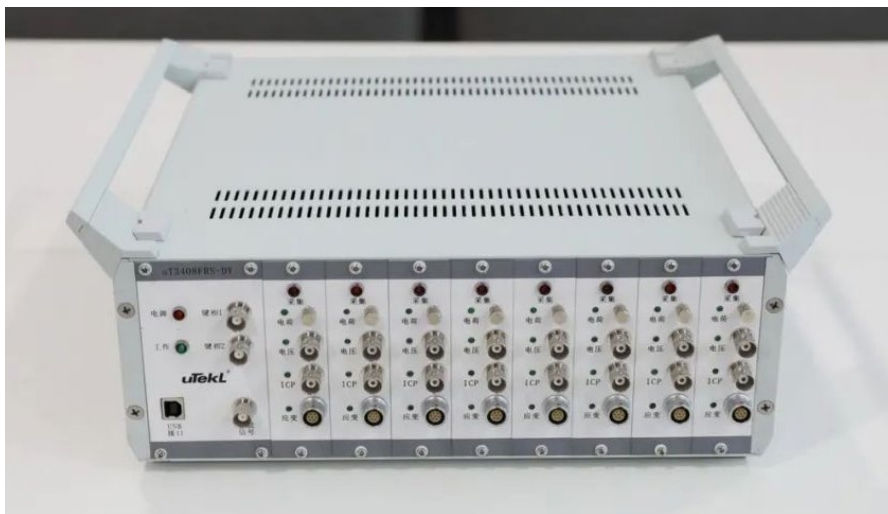


图 1 设备正面

优泰动态数据采集系统是一套集测量、处理、输出为一体的测试系统，可广泛应用于机械、能源、交通、冶金、建筑、爆破、兵器、航空航天、核工业等领域。

1. 振动、噪声、应变应力、压力、温度、实验模态等测试分析。
2. 声压、声强测试分析。
3. 旋转机械振动分析与故障诊断。
4. 内燃机燃烧时缸内压力变化曲线及数据分析。
5. 内燃机振动噪声分析、扭振、扭矩测试分析。
6. 结构动态过程应力应变分析。
7. 材料实验中记录剪切断裂动态过程应力应变分析；材料拉伸试验应变测试等
8. 坝动土岩土力学测量。
9. 气动力学研究风洞实验中多路数据采集分析。
10. 声测量脉冲回波应用。
11. 机械状态检测故障诊断。
12. 工程爆破中冲击波形记录频谱分析岩石破碎测量爆破监测。
13. 碰撞实验动态过程的捕捉分析加速度曲线获取。
14. 电量测量谐波分析局部放电过电压测试。
15. 半导体混合器件或电路信号测试故障诊断。
16. 地震监测。
17. 桥梁测试、铁路测试、风灾监测。

### 二、设备参数

设备型号	uT3408FRS-DY		
通道数	8	采样频率	0.128~128KHz
ICP 通道参数	3~6mA/24V 恒流源供电； $\pm 10VP$ 加速度信号输入；下限		

	频率 0.16Hz。
应变测量参数	应变测量范围：0~±100000 $\mu\epsilon$ ；误差≤±0.2%；额定输入电压：0~±100mV；独立增益：100、1000、10000；精度误差：0.01%。
电荷测量参数	输入电荷范围：±1×10 <sup>6</sup> PC（最大）；输出范围±10VP/5mA（最大）；直流失调±1mV；噪声：≤5 $\mu$ V；增益：分档 1、10、100mV/PC；
输入电压范围	±10V
动态范围	120dB

### 三、配套软件介绍

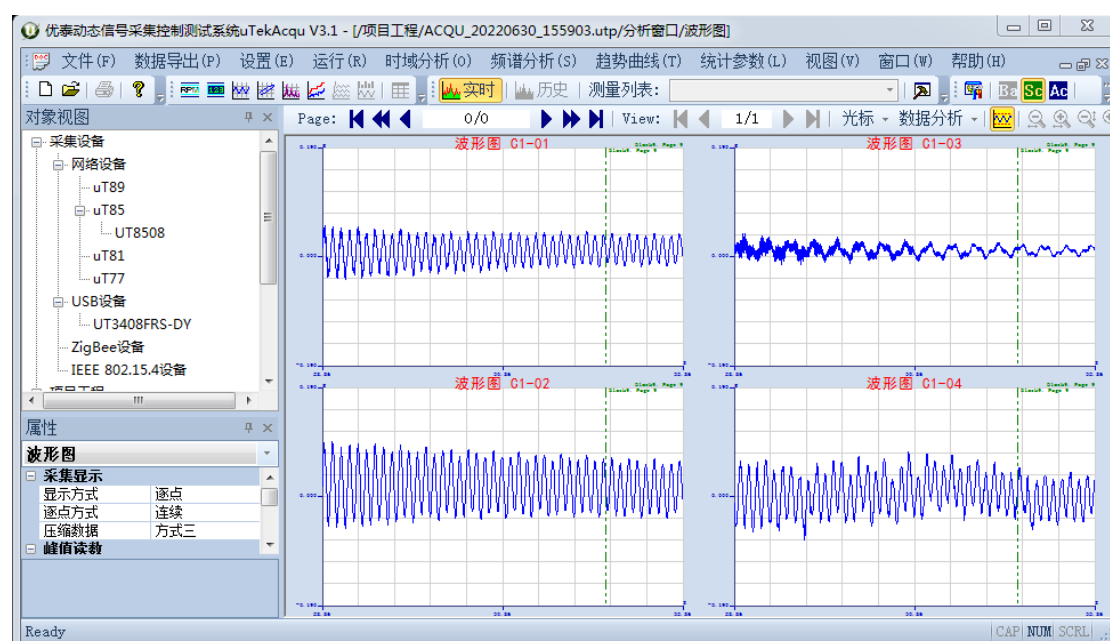


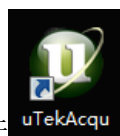
图 2 采集软件 uTekAcqu 界面

设备配套软件有数据采集与分析系统 uTekSs、动态信号采集控制测试系统 uTekAcqu 和结构与机械模态分析系统 uTekma V2004。

受篇幅限制，更多设备及软件信息可关注微信公众号“浙大匠心”获取。（设备查询—仪器类—防灾减灾模块第四条）

### 四、使用步骤

#### 1.新建工程



打开优泰配套采集软件 uTekAcqu。

打开软件自动新建工程，或菜单栏“文件”—“新建工程”，或点击快捷菜单里的按钮。

新建成功后，可在左侧“对象视图”一栏中看到如下左图树节点，USB 设备中出现机器型号，项目工程中出现项目名称，并弹出“新建工程”对话框（如图 1）。设置好工程名称和工程位置后即可下一步工作。如采集设备中未出现设备名

称，则可通过检查连线、重启软件或者重启设备等方法解决。注：插拔设备需在断电情况下进行！

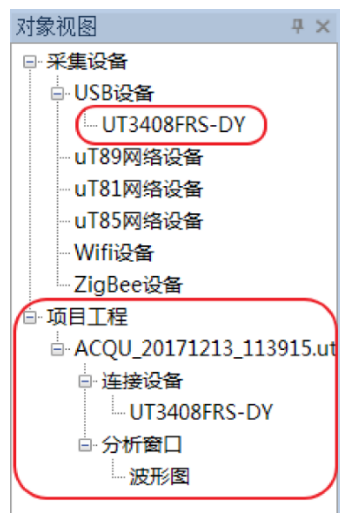


图3 对象视图

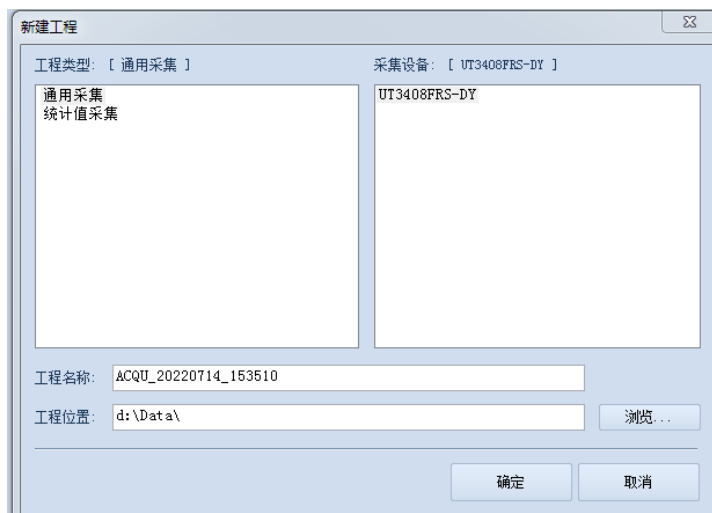


图4 新建工程

## 2. 参数设置

双击左侧“对象视图”一栏中的机器型号，或通过单击设备型号的右键菜单选择，或通过菜单栏“设置”——“参数设置”打开参数设置对话框。

(1) 通道参数：打勾选择需要使用的通道，设置采集类型。如加速度传感器选择 ICP 输入，激光位移传感器选择电压输入，并分别将其插入对应的接口。



图5 通道参数设置

(2) 采样频率



图 6 采样频率设置

### (3) 采集控制



图 7 采集控制设置

块数越多，采样时间越长，如在试验期间，软件采集会自动停止，可在此加大块数。

### (4) 传感器数据库



图 8 传感器数据库设置

“添加”按钮可以增加列表中没有的传感器。已有的传感器需要检查其设置是否正确。

灵敏度一般从传感器的标定证书或者出厂检验报告上获取。

**测得的物理量=灵敏度 x 传感器输出电压值**



工程单位为波形图上 Y 坐标的物理单位，如位移一般为 mm。

点击“应用”确认。

### (5) 传感器及前端



图 9 传感器及前端设置

前端与“通道参数”的通道相对应。通过“传感器”下拉菜单从数据库中选择已设置好的传感器，后三列参数会自动显示。

点击“应用”确认。

## 3. 示波采集



图 10 数据采集

Ba: 通道平衡/ Sc: 示波/ Ac: 采集/ S: 停止采集

接通传感器后，点击示波，观察信号从而判断传感器是否正常。

将激活的通道悉数展示在示波界面。主菜单“时域分析”可查看波形图。

根据需要，点击开始采集、停止采集。

## 4. 检查数据

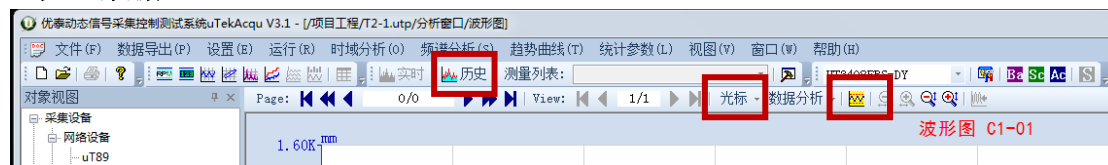


图 11 检查数据

点击“历史”按钮，查看实验数据。

双击波形图标题，可以平铺各窗口。

“光标”——“单光标”功能可以显示鼠标与曲线相交点处的坐标数据。“双光标”功能可以显示前后两处光标线处的坐标点的坐标值和坐标差。“最值光标”可以显示一条曲线的最大值与最小值。“光标读数”功能可以记录 10 个点的 XY 坐标值。

“自动量程”按钮 可以将 Y 轴数据在窗口中铺满显示。

## 5. 数据保存

菜单栏“数据导出”，选择需要导出的文件。

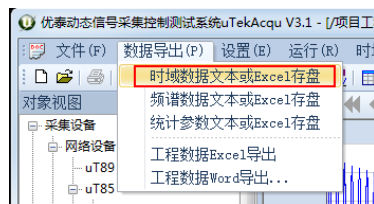


图 12 采集软件界面

## 6. 数据分析

在需要分析的数据窗口，右键单击，选择“通过 uTeKSs 分析”。选择该通道所有数据。系统将自动调用 uTeKSs 软件。如果软件没有正常打开，如出现闪退现象，请检查是否插了软件狗。

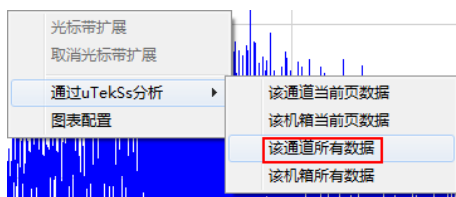


图 13 采集软件界面

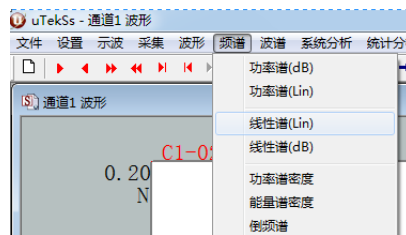


图 14 采集软件界面

选择工具栏“频谱”——“线性谱”。线性谱是通过 FFT（快速傅里叶变化）计算得出的频率分布曲线。

在右侧信息栏“采集参数”标签页最底端（空白处出现手型指针可上下拖动），找到“谱线数”设置。选择可选的最大谱线数。

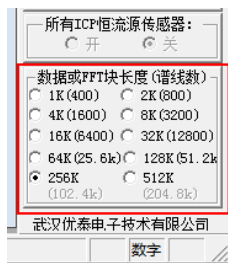
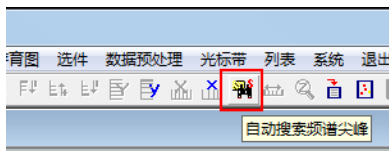


图 15 谱线数设置

打开数据表。



自动搜索谱尖峰。



得出固有频率。

图中 EU 是纵坐标物理量的统称，由测试时的通道设置决定（如测试位移，则 EU 的单位为 mm）。

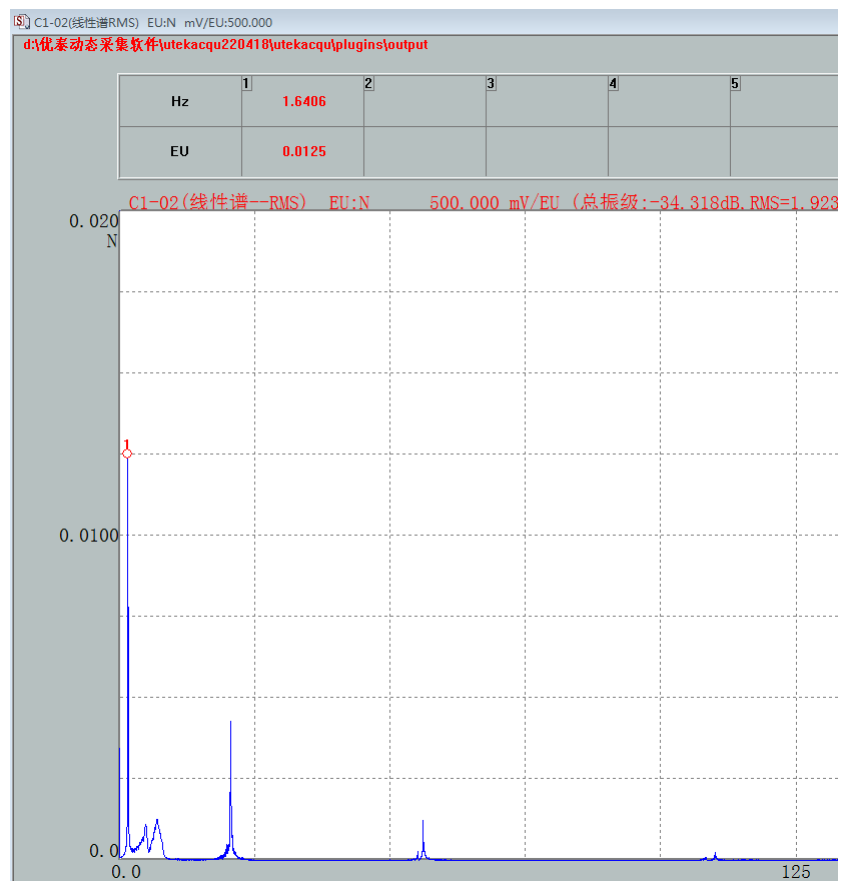


图 16 获取固有频率

浙江大学工程师学院

# 《高阶工程认知与实践》

## 工程测试（抗震测试）

# 实验报告

模板仅供参考

课程名称		实验时间	
实验名称			
专 业		姓 名	
学 号		组 别	

**一、实验概况**  
（主要介绍实验目标、试验方案的设计）

**二、实验数据**  
（表格请自行设计，尽可能保留目标原始数据及中间过程，并对实验数据的处理方法进行简要说明）

**三、实验小结**  
（得出什么结论，实验的不足之处及改进方法）

**四、参考文献**  
（实验过程中参考的书籍、文献、网络资料的出处）