

# 《机械工程实验 II》

## 实验 补充 教材

浙江大学机械工程实验教学示范中心

2017年3月

# 目 录

## 机械原理实验部份

实验一	凸轮运动精密测量实验 .....	2
实验二	渐开线齿轮范成原理实验.....	24
实验三	机械系统动力学飞轮调速实验.....	28
实验四	空间机构运动方案设计实验 .....	42
实验五	轮系方案创意搭接实验.....	52
实验六	计算机软件虚拟装配实验说明.....	58

## 机械设计实验部份

实验七	螺栓组及单螺栓联接综合实验.....	59
-----	--------------------	----

# 实验一 凸轮运动精密测量实验

## 一、实验问题的提出

凸轮机构广泛应用于自动机械和自动控制装置中，只需设计出适当的凸轮轮廓，便可使从动件得到各种预期的运动规律，响应快速，机构简单紧凑。凸轮机构的运动和动力特性优劣虽然与设计时所选用的从动件运动规律及凸轮机构的基本尺寸等因素有关，但这是预期的工作性能。机构实际工作性能还取决于凸轮轮廓的加工质量。凸轮轮廓经机械加工及必要的热处理、表面处理，轮廓曲线上各点的几何尺寸是否符合设计要求必须经过测量，且对测得的数据进行分析处理才能评定。

凸轮机构工作性能的反求，是对有关设备剖析的工作任务之一。如引进机械设备中的凸轮配置备件。在未掌握有关设计资料和加工图纸时，就用原始凸轮作靠模直接复制。但是，复制结果往往不能达到原始的工作性能。由于原始凸轮的轮廓曲线也必然包含一定的加工误差，所以盲目地复制则很可能导致凸轮备件的工作性能偏离原始的设计性能指标。通过对原始凸轮轮廓和机构的基本尺寸的检测和分析计算，分离其内含的加工误差因素，反求从动件的位移、角速度和角加速度的数值函数变化规律，使复制的凸轮备件的实际工作性能达到甚至优于原设计指标。

因此，凸轮廓线检测有其实际的工程应用意义。

## 二、实验目的

1、利用实验台凸轮廓线的手动测试和自动测试功能，通过实验了解凸轮廓线的测试方法；

2、通过计算机对凸轮机构从动件（摆动和直动）的运动参数进行采集、处理，做出实测的从动件运动规律实测曲线，深入了解不同规律的盘形凸轮和圆柱凸轮机构的运动特点。

3、通过凸轮机构运动参数曲线实测结果和理论仿真曲线的对比，比较两者之间的差异，分析误差原因。

4、利用实验台凸轮机构从动件的运动规律反求功能，了解根据凸轮轮廓的检测数据和测量获得的机构基本尺寸，反求从动件的位移、角速度和角加速度的数值函数变化规律的方法

## 三、实验设备及工具

### （一）实验系统组成

本实验的实验系统框图如图 1 所示，它由以下设备组成：

- 1、多种凸轮实验机构 1 套。
- 2、凸轮轴角位移传感器、角度盘，各 1 个，测量凸轮回转轴角位移。
- 3、直动从动件位移传感器、百分表，各 1 个，测量直动从动件位移。
- 4、摆动从动件角位移传感器 1 个，测量摆动从动件摆动角位移。
- 5、凸轮机构运动精密测量系统（单片机系统）。
- 6、计算机
- 7、打印机

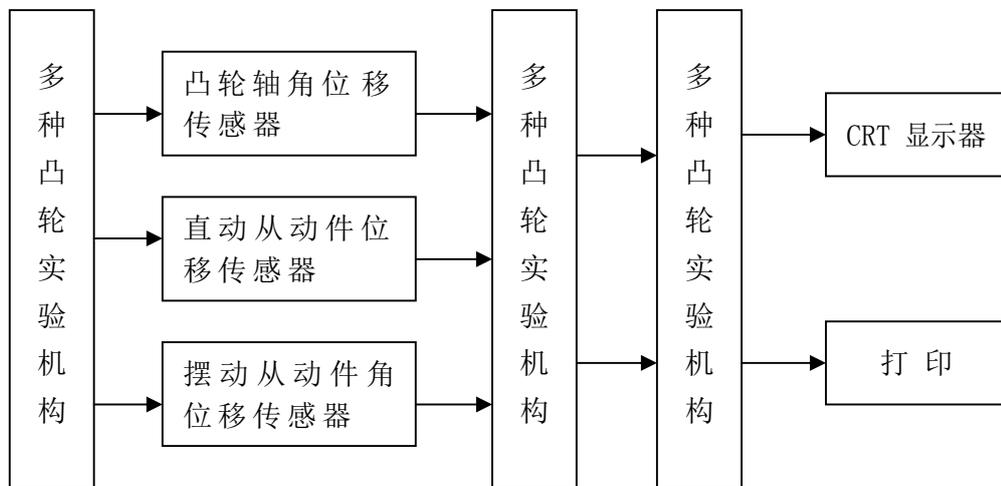


图 1 实验系统框图

## （二）实验台结构、功能与特点

如图 2 所示，凸轮运动精密测量实验台主要由蜗轮蜗杆减速器 1、编码器 2、电机 3、实验台底柜 4、指针 5、盘形凸轮 6、刻度盘 7、从动件测量头 8(可分为尖顶、平底、滚子形式，根据实验要求替换)、从动件升降滑块 9、从动件升降支架座 10、光栅尺 11、光栅直线传感器座 12、手轮 13、百分表 14 等组成。

凸轮实验台凸轮轮廓曲线、凸轮机构从动件的运动规律检测，具有手动测试和自动测试功能。手动测试实现静态测量，手动转动手轮 11，凸轮回转一定角度，使用刻度盘 7 及百分表 10 测量并显示凸轮回转角度及相对应的凸轮轮廓线测量推杆（或凸轮机构从动件）位移。自动测试实现测量推杆、凸轮机构从动件的运动规律检测动态测试，如图 2，光电编码器 2 输出脉冲信号对应凸轮回转角度，凸轮轮廓线极径变化由直线位移传感器 12 测出。启动电机 3，对应凸轮回转角度，利用计算机对光电编码器及直线位移传感器输出信号进行采集、处理，输出测量推杆（或凸轮机构从动件）位移、速度、加速度运动规律曲线，所

有采样数据及对应的各特征值参数。

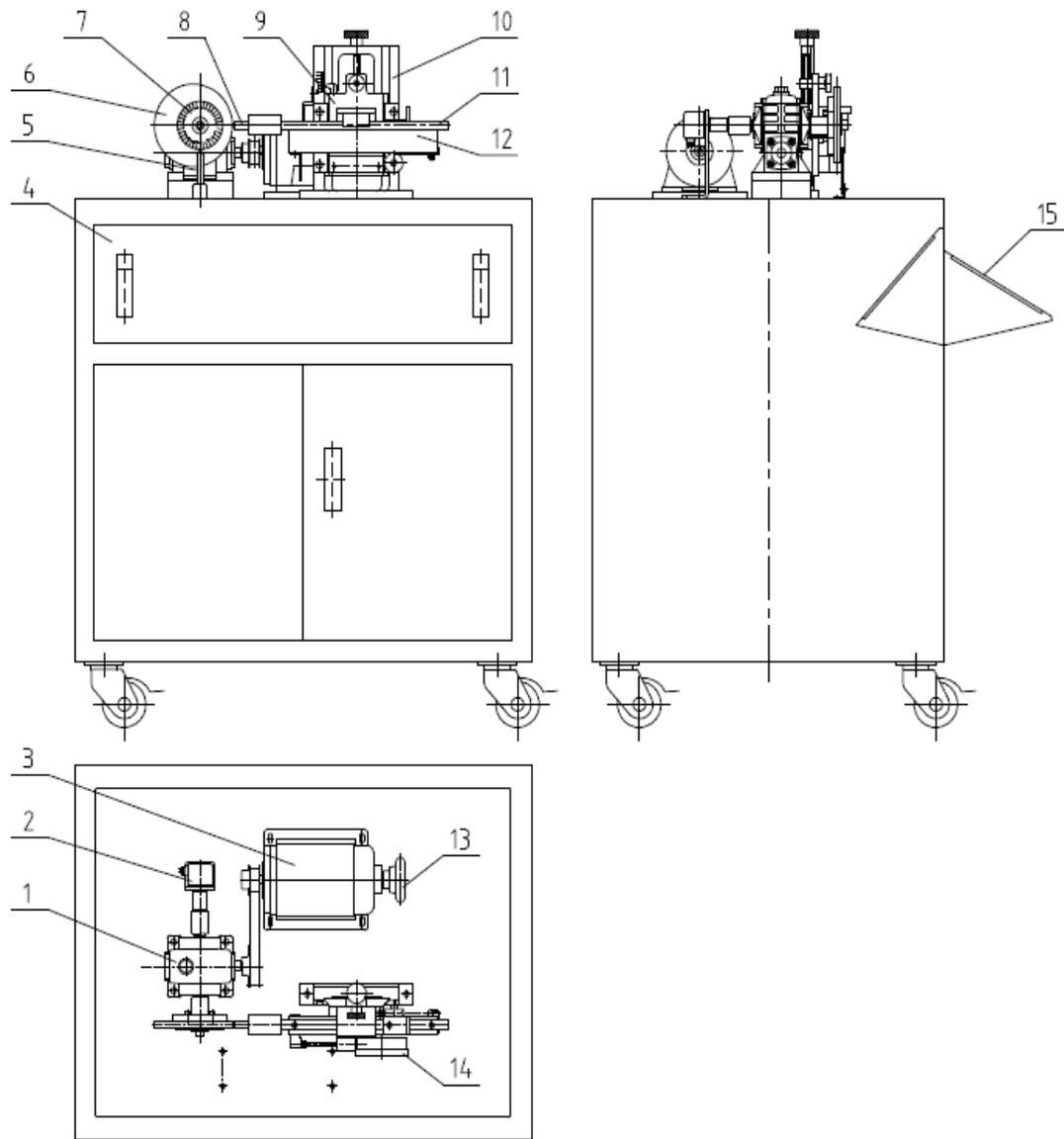


图2 实验台机械结构示意图

- |             |          |             |
|-------------|----------|-------------|
| 1、蜗轮蜗杆减速器   | 2、编码器    | 3、电机        |
| 4、实验台底柜     | 5、指针     | 6、盘形凸轮      |
| 7、刻度盘       | 8、从动件测量头 | 9、从动件升降滑块   |
| 10、从动件升降支架座 | 11、光栅尺   | 12、光栅直线传感器座 |
| 13、手轮       | 14、百分表   | 15、翻盖式操作台   |

### (三) 凸轮机构运动测量系统及系统连接

实验台采用操作台与电脑桌连体设计，凸轮机构运动精密测量系统由单片机最小系统组成，设置在实验台底柜仪表箱中。电器控制箱采用内置翻盖结构，操作台操作面外型结构如图 3 (a) 所示。操作面 4 位 LED 数码显示器, 可实时显示凸轮机构运动时凸轮轴的转速。复位键是用来对仪器进行复位的，如果发现仪器工作不正常或者与计算机的通讯有问题，可以通过按复位键来消除。

图 3 (b) 为操作台背面结构，主轴编码器五芯口用与联接实验台凸轮主轴光电编码器，摆动编码器五芯口用与联接实验台摆动从动件摆动轴光电编码器，串行口外接 PC 机，可与 P C 机进行异步串行通讯。



图 3 (a) 凸轮实验台操作台操作面

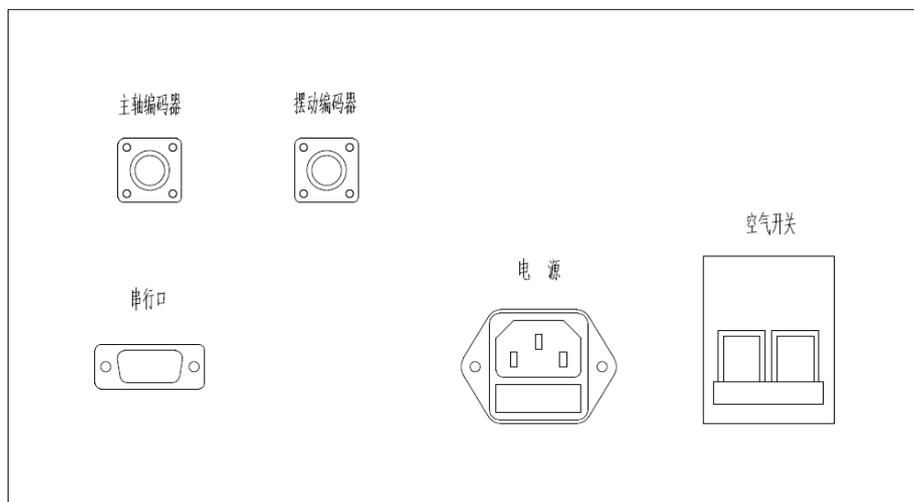


图 3 (b) 凸轮实验台操作台背面结构

### (四) 主要技术参数

- 1、盘形凸轮 8 个可更换(8 种典型运动规律); 基圆半径 50mm 凸轮廓线升程 20mm;
- 2、圆柱凸轮 1 个 (2 种运动规律);
- 3、凸轮从动件形式:

尖顶直动从动件 1 套

- 平底直动从动件 1 套
- 滚子直动、摆动从动件 各 1 套

从动件可以根据实验要求替换, 偏距调整范围可在 $-10\sim 20\text{mm}$ ;

4、光栅角位移传感器:

脉冲数 360P、1000P 输出电压 5V 各 1 个

5、光栅尺: 量程  $0\sim 120\text{mm}$  分辨率  $0.001\text{mm}$  1 支

6、直流电机功率 80W; 调速范围:  $0\sim 1500\text{r/min}$ ;

7、电源: 220V 交流/50HZ

### 四、测试系统软件概述



图 4. 凸轮实验平台软件主界面

凸轮实验平台软件主界面图 4 所示. 主要有工具栏、图形显示、数据显示及操作区等组成, 其中工具栏由文件, 串口设置, 实验项目, 初始设置, 复位, 学生信息, 帮助组成.

1、文件

打开—可打开之前保存的数据文件; 保存数据—保存当前实验采集的数据; 另存为—同保存数据; 打印—打印当前的图片, 相关数据, 及系统的一些参数; Exit—退出系统.



图 5 凸轮实验平台文件界面

## 2、串口设置

串口通讯：可以选择 COM1 口、COM2 口、COM3 口、COM4 口。波特率默认为 9600，界面如下图 6。



图 6 串口设置界面

## 3、实验项目

本系统支持三种实验类型，可根据机械结构选择相应的实验类型。界面如下图。



图 7 实验项目选择界面

#### 4、初始设置

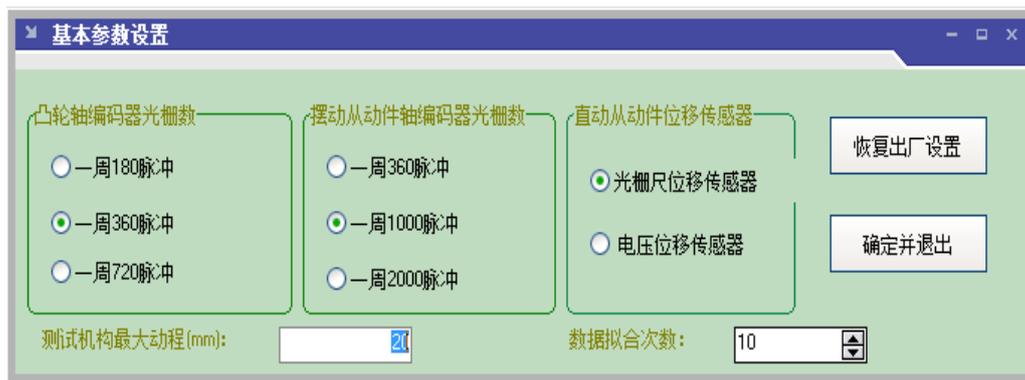


图 8 初始设置界面

用于设置系统的基本参数，主要包挂凸轮主轴编码器参数，摆动从动件编码器参数、直动从动件位移传感器以及位移传感器检测最大动程。用户可以修改其中参数值，按“确定并退出”可保存修改配置。按“恢复出厂设置”按钮可以还原出厂设置。

TLY-III 型凸轮运动精密测量实验台，直动从动件位移传感器使用光栅尺位移传感器，光栅尺位移传感器分辨率 0.001mm。

#### 5、复位

点击此功能会初始化当前实验的所有数据。但不包挂注册信息。



图9 复位界面

## 6、轮廓曲线及反求

点击此功能进入轮廓曲线及反求，此功能可以显示实测凸轮轮廓曲线或理论凸轮轮廓曲线及数据，并根据数据反求各类型从动件运动规律，如下图所示。

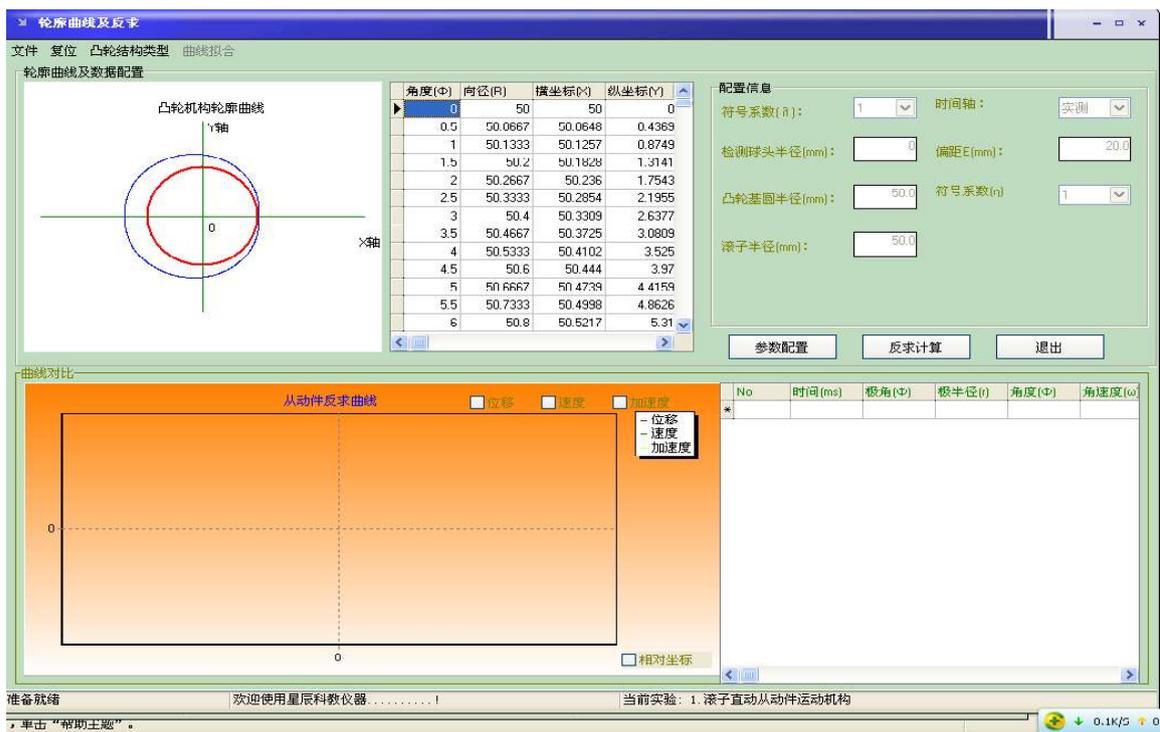


图10 凸轮轮廓曲线及反求主界面

## 7、理论曲线

理论曲线提供了8种不同类型的凸轮轮廓理论计算数据。用户可以选择相应的凸轮轮廓类型进行轮廓曲线及反求理论计算。



图 11 凸轮轮廓曲线类型选择界面

#### 8、学生信息

可以通过点击“学生信息”来注册做实验学生的个人信息。

#### 9、帮助

此功能可以获取本系统的帮助文件以及本软件版本信息。

### 五、实验内容及方法

TLY-III 型凸轮实验台总共支持三类实验类型: 凸轮轮廓曲线检测实验; 凸轮机构从动件运动规律测试实验; 凸轮轮廓曲线及反求计算实验。

#### (一) 凸轮轮廓曲线检测实验

对凸轮轮廓进行检测的方式分为两类。一类是将检测装置构造成与凸轮机构相同的结构形式, 直接测出从动件的运动规律(静态)参数, 并与期望的运动规律进行比较, 对成品的优劣进行鉴别。这种检测方式通常是在生产线上对批量化生产的凸轮进行加工质量检验时应用, 例如内燃机中的配气凸轮的检验常用这种方法。另一类是通用的检测方式, 利用检测设备测量凸轮轮廓坐标数据, 同时也利用常规的测量方法测得机构的基本尺寸。无论使用何种测量设备, 都是要取得一组反映轮廓曲线形状的角度和长度数据。

**实验操作步骤如下:**

##### (1) 手动检测实验操作

凸轮实验平台凸轮轮廓曲线手动测试检测机构结构如图 2,手动测试实现静态测量,手动转动凸轮回转一定角度,使用百分表测量并显示凸轮廓线测量推杆(对心尖顶直动从动杆)位移。再测出凸轮基园半径,即可绘制凸轮廓线极坐标图。

操作步骤:

1. 安装凸轮 6、角度盘 7,使凸轮、角度盘轴线与凸轮主轴轴线重合。
2. 装上百分表头 10,并调整测量推杆 8 与凸轮主轴轴线偏距为零(对心尖顶直动从动杆)。转动手轮,找到凸轮廓线测量起始位置(在凸轮廓线上的刚开始有位移点的极径处,对应于从动杆起始位置),百分表置零,并测出基园半径。
3. 转动手轮 11,使凸轮 6 每隔一定角度测一次百分表读数并记录。这样百分表读数直接指示测量推杆的位移变化值,将其与凸轮转角变化一一对应起来,即可绘制出凸轮廓线极坐标图。

## (2) 自动检测操作步骤

自动测试实现测量推杆自动动态测试,如图 2。光电编码器 2 输出脉冲信号对应凸轮回转角度,凸轮廓线极径变化由直线位移传感器 12 测出。利用计算机对光电编码器及直线位移传感器输出信号进行采集、处理,输出测量推杆位移、速度、加速度运动规律曲线、所有采样数据及对应的各特征值参数。从采样数据取出测试测量推杆的位移变化值,将其与凸轮转角变化一一对应起来,再测出凸轮基园半径,即可绘制凸轮廓线极坐标图。

操作步骤:

1. 安装凸轮、使凸轮轴线与凸轮主轴轴线重合。
2. 调整测量推杆与凸轮主轴轴线偏距为零(对心尖顶直动从动件)。转动手轮找到凸轮廓线测量起始位置(在凸轮廓线上的刚开始有位移点的极径处,对应于测量推杆起始位置),并测量出基园半径。

### 3. 系统联接、实验软件启动

打开测量仪和计算机电源,点击测试系统软件图标  进入测试系统主界面如图 14,在菜单栏的“串口通讯”中打开连接的串口号。

仪器控制面板上复位键是用来对仪器进行复位的。如果发现仪器工作不正常或者与计算机的通讯有问题,可以通过按复位键来消除。

### 4. 选择实验项目

点击实验项目,选择凸轮轮廓曲线检测实验。



图 12 凸轮轮廓曲线检测实验主界面

## 5. 基本参数设定

用户可以根据实际使用的传感器来重新修改相关参数。测试机构最大动程是为直动从动件提供的设置接口，设置实际检测时凸轮直动从动件位移最大动程，用户可以根据实际情况设定（一般不建议随便修改这里的参数，因为本系统出厂时设置）。

## 6. 数据采集

启动试验台电机，机构运转正常后，点击“开始采样”，控制系统数据采集卡进行数据采集，凸轮轴每转动 1 度，光电编码器送出 1 角度脉冲，采集卡 直线位移传感器输出信号进行数据采集，获取一次测量推杆位移变化数，并发送实时采集数据到 PC 机，同时系统软件进入数据接收和处理状态。采样进度条显示软件采样状态。采样结束后，在 PC 机终端显示器上显示测量推杆（对心尖顶直动从动件）运动规律曲线、所有采样数据及对应的各特征值，如主界面图 13 所示。

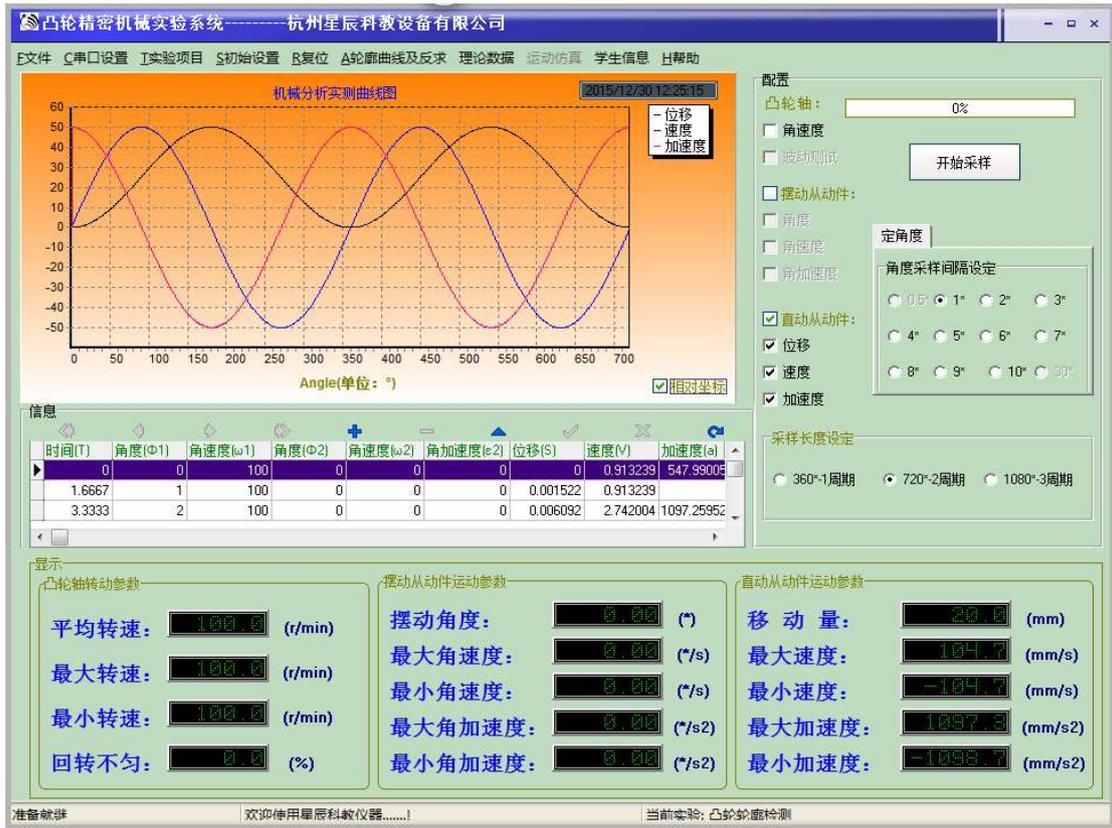


图 13 数据采集界面

7. 输入学生信息

8. 数据保存

数据保存分为数据库数据保存和数据库数据导出两种。

数据库数据保存：采样所得的实时数据保存在系统默认的临时数据库中，要想移动数据到指定文件夹或其他 PC 机上查看数据特性，需要把临时数据库中的数据保存起来。点击“文件”→“保存数据”，系统将当前采样数据自动保存到“学生信息注册”所指定的文件夹中。文件夹以注册信息“班级”名称命名，文件名即为所注册的学生“姓名—学号”。如图 19 所示。



图 14 数据保存界面

数据库数据导出：当需要对已保存的实验采样数据进行进一步分析和处理时，可从数据库中导出所需的“数据库文件”。在菜单栏点击“文件”→“打开”→并选中所需“数据库文件”如图 20。打开“数据库文件”，即可得到该数据中所保存的实验采样数据，及分析处理结果曲线，图 15 所示。



图 15 数据库数据导出界面

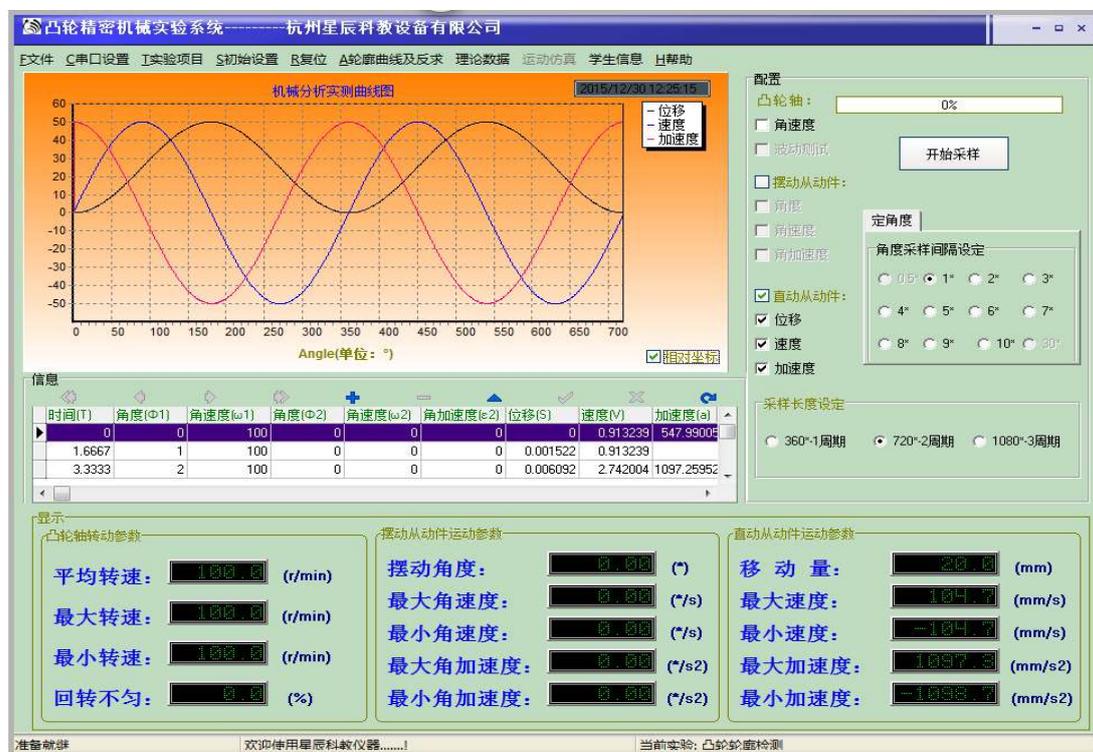


图 16 从动件运动规律检测实验

## (二) 凸轮机构从动件运动规律检测实验

### 实验方法及操作如下：

(1) 安装凸轮、使凸轮轴线与凸轮主轴轴线重合。

(2) 选择从动件结构类型，安装并调整从动件与凸轮主轴轴线偏距。转动手轮找到凸轮廓线测量起始位置（在凸轮廓线上的刚开始有位移点的极径处，对应于测量推杆起始位置），并测量出基园半径。

(3) 联接系统联接，启动实验软件

操作方法和轮廓曲线自动检测实验一致。

(4) 选择实验项目

从动件运动规律检测的软件界面和轮廓曲线检测界面基本一致，只需要在实验类型中选择“从动件运动规律检测”实验类型即可。如下图所示。

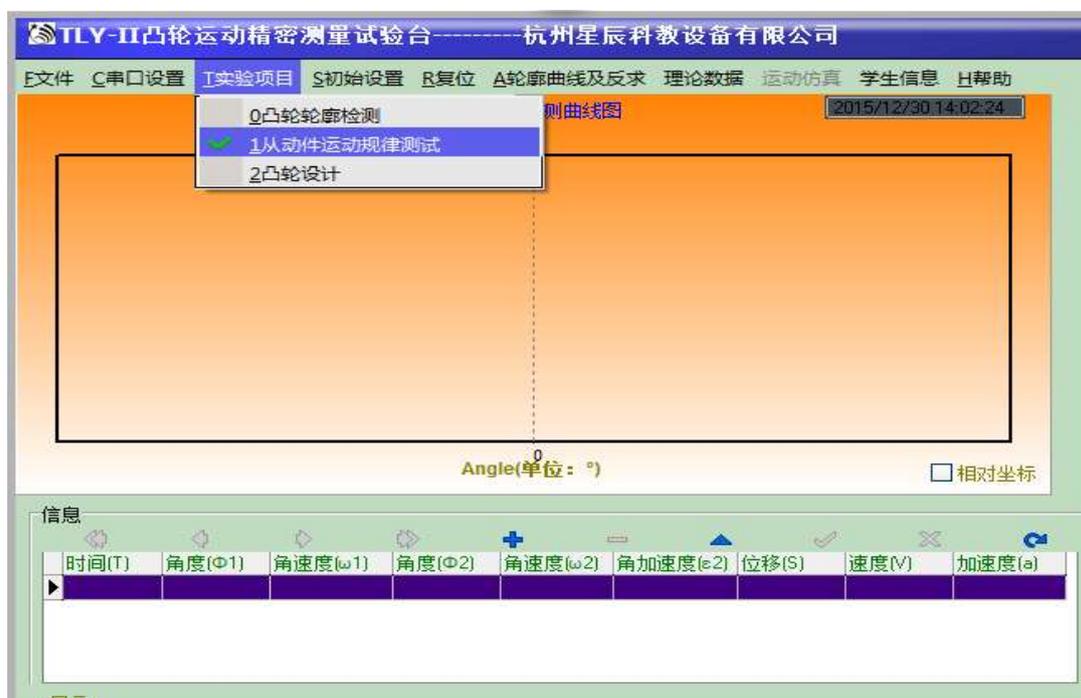


图 17 实验项目选择

(5) 基本参数设定

参数设置方法和轮廓曲线自动检测实验一致

(6) 数据采集

操作方法和轮廓曲线自动检测实验一致，可以同时采集摆动从动件和直动从动件的数据。

采样结束后，在 PC 机终端显示器上显示被测凸轮机构从动件运动规律曲线、所有采样数据及对应的各特征值，如主界面图 18 所示

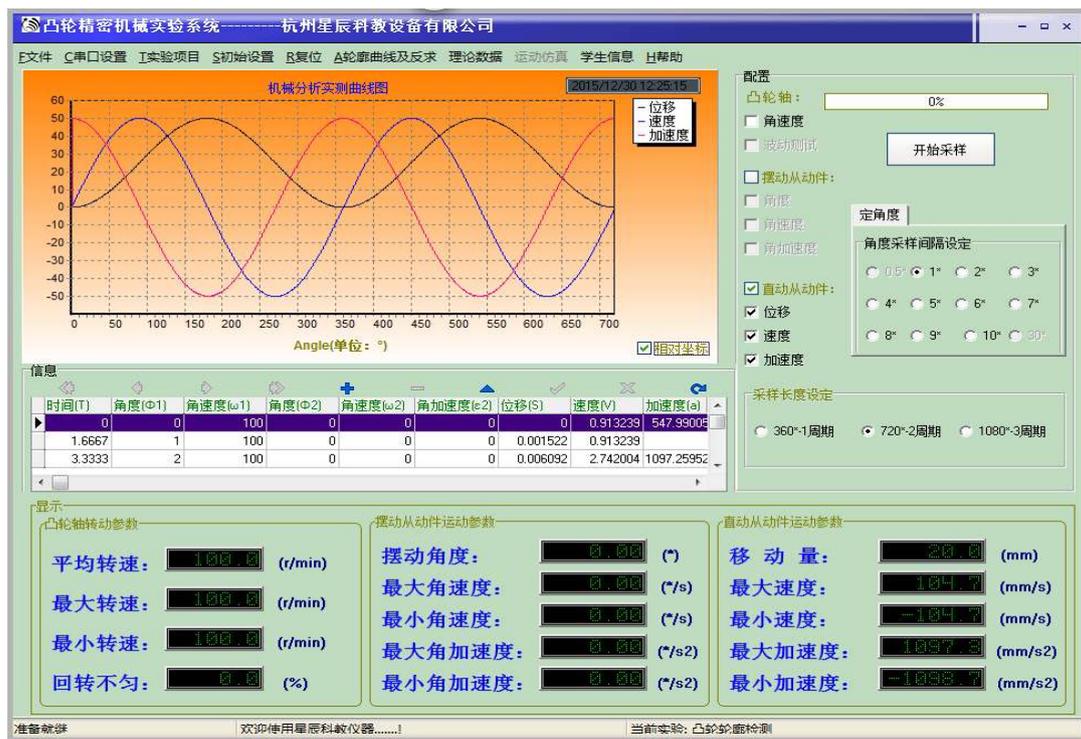


图 18 从动件运动规律检测实验

(7) 输入学生信息

操作方法和轮廓曲线自动检测实验一致

(8) 数据保存

操作方法和轮廓曲线自动检测实验一致

(9) 数据库数据导出

当需要对已保存的实验采样数据进行进一步分析和处理时，可从数据库中导出所需的“数据库文件”。操作方法和轮廓曲线检测实验一致。

### (三) 轮廓曲线及反求实验

**实验方法及操作如下：**

(1) 安装凸轮、使凸轮轴线与凸轮主轴轴线重合。

(2) 选择从动件结构类型，安装并调整从动件与凸轮主轴轴线偏距。转动手轮找到轮廓线测量起始位置（在凸轮廓线上的刚开始有位移点的极径处，对应于测量推杆起始位置），并测量出基园半径。

(3) 系统联接，启动实验软件

操作方法和轮廓曲线自动检测实验一致

(4) 凸轮轮廓曲线检测

操作方法和轮廓曲线自动检测实验一致

(5) 选择实验项目

根据实验要求选择轮廓曲线及反求实验，如图 19。

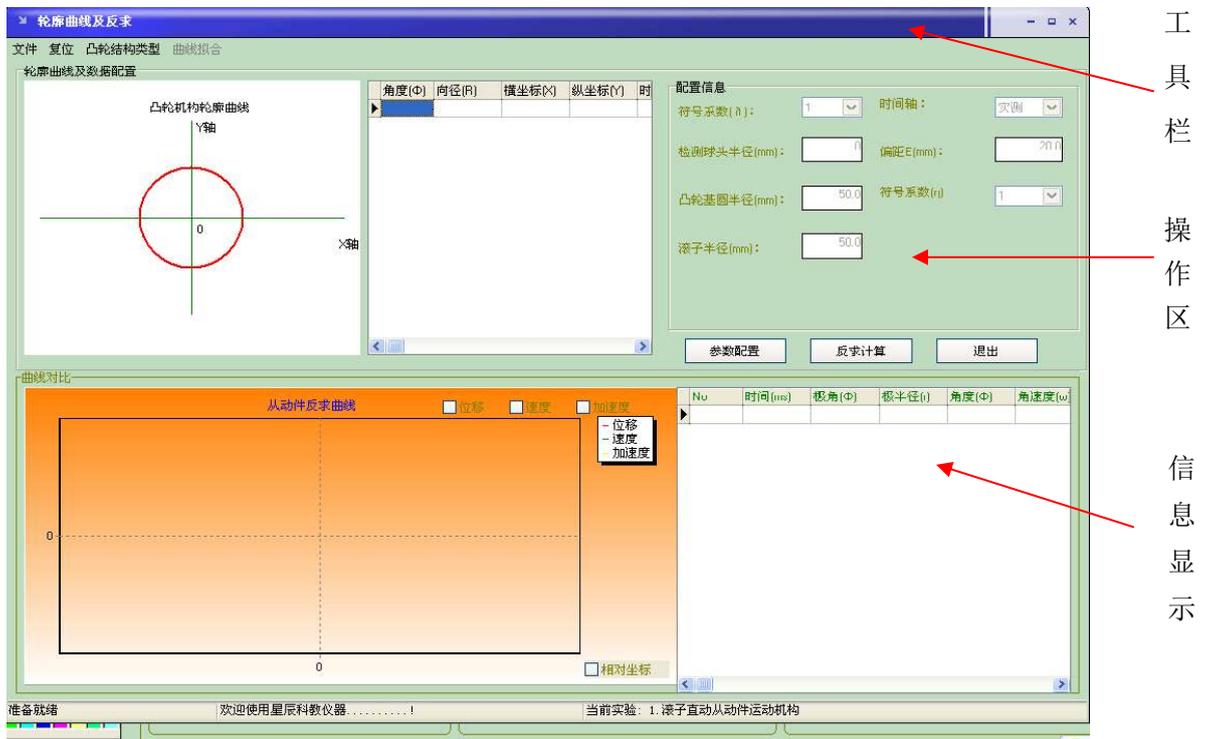


图 19 反求实验主界面

(6) 选择凸轮结构类型

实验台反求实验提供：平面凸轮滚子直动从动件、平面凸轮平底直动从动件、平面凸轮滚子摆动从动件、平面凸轮平底摆动从动件四种实验类型。根据当前实验所选凸轮结构类型，点击相应凸轮结构类型菜单。



图 20 凸轮结构类型选择

(7) 参数配置

在反求计算前还需要输入被测凸轮机构的基本结构参数（如偏距  $E$ 、从动件滚子半径  $R_r$  等），即要对反求实验的凸轮机构进行参数配置，可以通过点击“参数配置”按钮来实

现。

如图 21 在配置信息中区，点击“参数配置”键，置入当前被测凸轮机构相关结构参数，按“保存参数”键保存置入参数。

配置信息

符号系数( $\bar{n}$ ):	1	时间轴:	实测
检测球头半径(mm):	0	偏距E(mm):	20.0
凸轮基圆半径(mm):	50.0	符号系数(n)	1
滚子半径(mm):	50.0		

参数配置      反求计算      退出

图 21(1)

配置信息

符号系数( $\bar{n}$ ):	1	时间轴:	实测
检测球头半径(mm):	0	偏距E(mm):	20.0
凸轮基圆半径(mm):	50.0	符号系数(n)	1
滚子半径(mm):	50.0		

保存参数      反求计算      退出

图 21(2)

配置信息

符号系数( $\bar{n}$ ):	1	时间轴:	实测
检测球头半径(mm):	0	偏距E(mm):	20.0
凸轮基圆半径(mm):	50.0	符号系数(n)	1
滚子半径(mm):	50.0		

参数配置      反求计算      退出

图 21(3)

注：配置信息区中各参数定义见附录一：凸轮结构参数配置信息定义表

### (8) 反求计算

点击“反求计算”，软件会根据所配置的信息及轮廓数据进行计算，并将反求计算结果数据及曲线显示在如下界面，图 22 所示

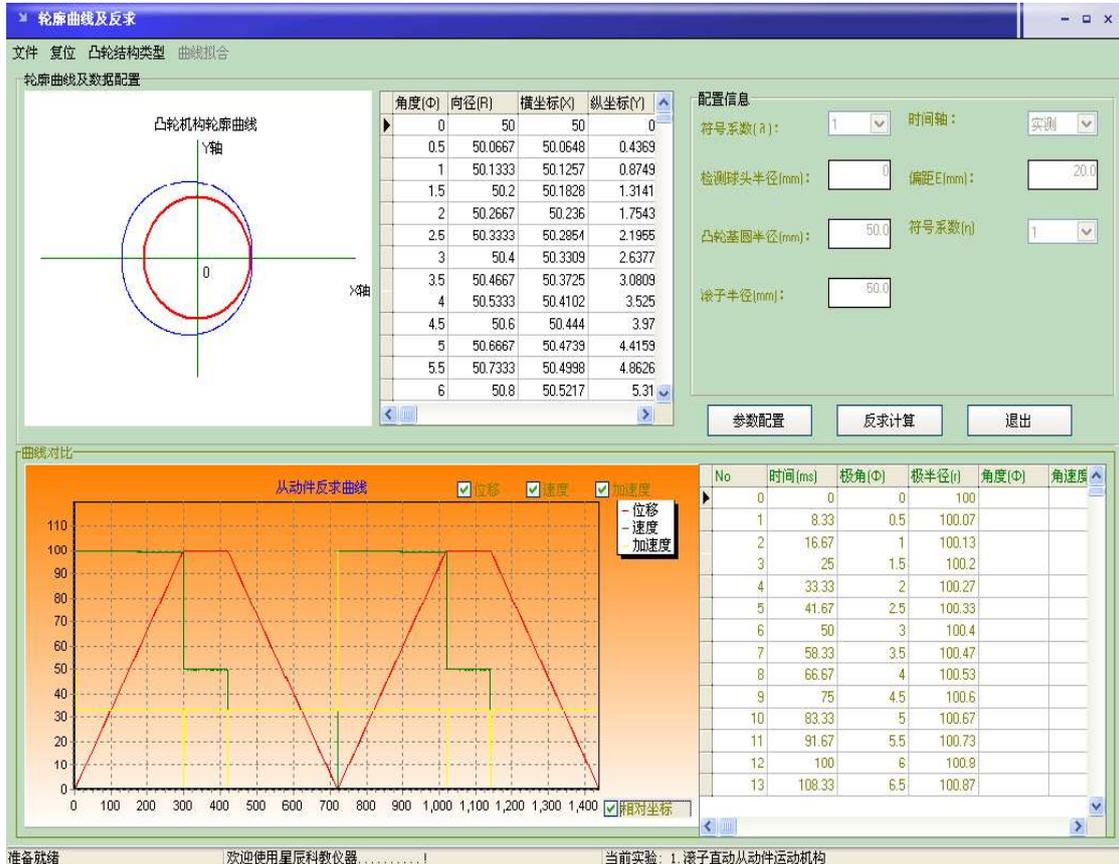


图 22 反求计算主界面

### (9) 数据保存

数据保存分为数据库数据保存和数据库数据导出两种。

数据库数据保存：采样所得的实时数据保存在系统默认的临时数据库中，要想移动数据到指定文件夹或其他 PC 机上查看数据特性，需要把临时数据库中的数据保存起来。点击“文件操作”→“导出轮廓数据”，系统将当前采样数据自动保存到“学生信息注册”所指定的文件夹中。文件夹以注册信息“班级”名称命名，文件名即为所注册的学生“姓名—学号”。如图 23 所示。

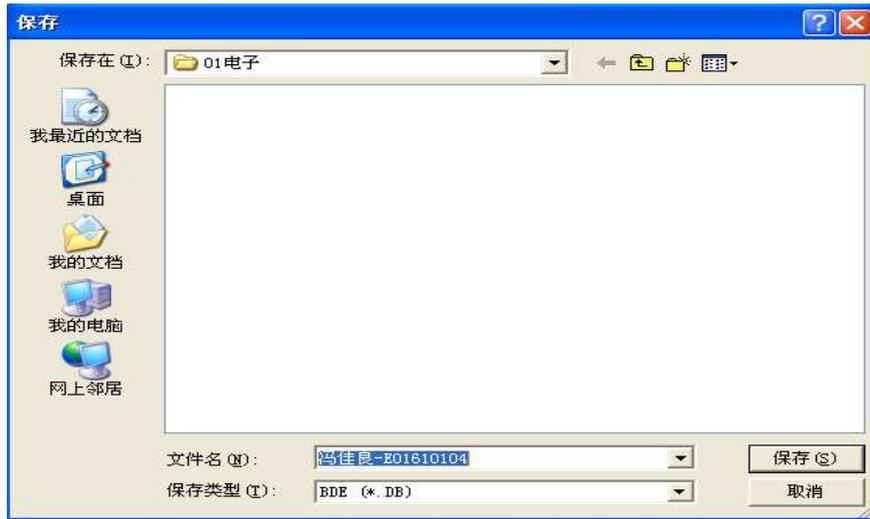


图 23 数据保存界面

数据库数据导出：当需要对已保存的实验采样数据进行进一步分析和处理时，可从数据库中导出所需的“数据库文件”。在菜单栏点击“文件操作”→“导出轮廓数据”→并选中所需“数据库文件”如图 4-6。打开“数据库文件”，即可得到该数据中所保存的实验采样数据，及分析处理结果曲线，图 24 所示。



图 24 数据导出界面(1)

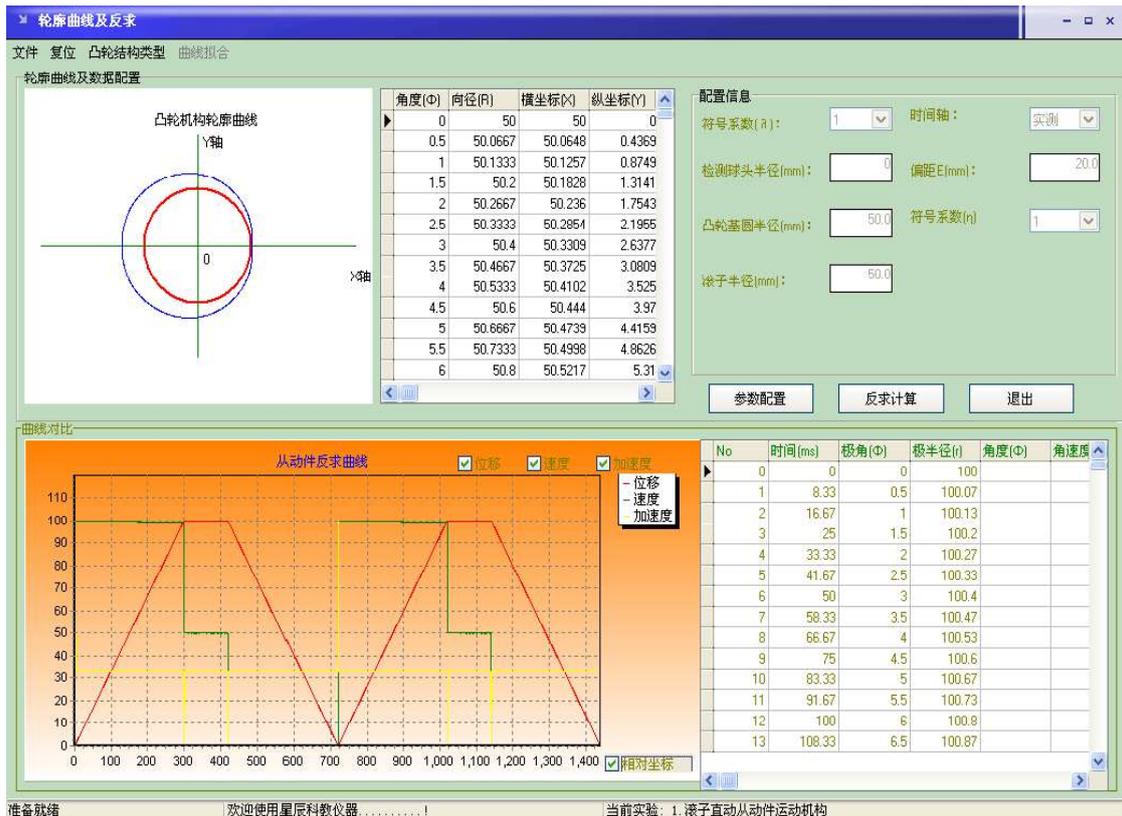


图 25 数据导出界面(2)

(10) 复位

点击此功能会初始化当前实验的所有数据。但不包括注册信息。

六、 注意事项

- 1、实验前应详细了解实验设备提供的零部件，传感器测试仪及测试软件。
- 2、本实验台通过 RS232 标准串行通讯线与 PC 机连接，连接操作必须在测试仪和 PC 机都断电的状态下进行。待连接完成后再接通测试仪和 PC 机电源，并且在通电状态下不能插拔 RS232 串口通讯线。
- 3、正确按装凸轮机构后应首先手动运行保证机构正常灵活无卡死现象，才能启动电机。
- 4、启动电机后，实验人员不要过于靠近运动零件，不得伸手触摸运动零件。

七、 实验结果

## 1、数据记录

凸轮基圆半径(mm):      偏距(mm):      从动件类型及参数:

凸轮转角	直动从动件位移(mm)			直动从动件位移(mm)	
0°			180°		
10°			190°		
20°			200°		
30°			210°		
40°			220°		
50°			230°		
60°			240°		
70°			250°		
80°			260°		
90°			270°		
100°			280°		
110°			290°		
120°			300°		
130°			310°		
140°			320°		
150°			330°		
160°			340°		
170°			350°		

## 2、根据所测数据绘制位移图，并绘出凸轮图

### 3、选做题 (A 或 B):

A. 观察摆动从件的安装位置，检测并打印摆动从动件的运动规律，作示意图描述如何通过该结果求出凸轮轮廓曲线。

B. 观察圆柱凸轮实验台的安装结构，检测并打印圆柱凸轮的直动从动杆的运动规律，通过作图法绘制其展开轮廓曲线（示意图）。

## 八、思考题

- 1、凸轮轮廓检测方式分为几类，有什么不同？
- 2、说明实验中所采用的从动件类型与偏置程度对凸轮机构性能的影响。

## 实验二 渐开线齿轮范成原理实验

### 一、实验问题的提出

齿轮加工方法有铸造、模锻、冷轧、热轧、切削加工等，其中切削加工是最常用的。从加工原理来看，切削法可分为仿形法和范成法（也称展成法）。范成法是齿轮加工中最常用的一种方法，如插齿、滚齿、磨齿等都属于这种方法。范成法可以用一把刀具加工出模数、压力角相同而齿数不同的标准和各种变位齿轮齿廓，且加工精度较高。

用范成法加工齿轮时，刀具的顶部有时会过多地切入轮齿的根部，将齿根的渐开线部分切去一部分，产生根切现象。齿轮的根切，会降低抗弯强度，引起重合度下降，降低承载能力，因此工程上应力求避免根切。

本实验模拟齿轮范成法加工过程，用图纸作轮坯，用铅笔作刀具，能清楚地看到齿廓形成的过程。

### 二、实验目的

1. 掌握用范成法制造渐开线齿轮的基本原理，观察齿廓渐开线部分及过渡曲线部分的形成过程；
2. 了解齿轮产生根切现象的原因和避免根切的方法；
3. 分析比较标准齿轮和变位齿轮的异同点。

### 三、实验设备和工具

#### 1、齿轮范成仪

① 第一项：适用模数： $m=20\text{mm}$ ；齿数： $z=10$

第二项：适用模数： $m=10\text{mm}$ ；齿数： $z=20$

② 常规参数：压力角  $\alpha=20^\circ$ ；齿顶高系数  $ha^*=1$ ；顶隙系数  $c^*=0.25$ 。

#### 2、同学自备

① 一张剪好的圆形图纸，将其画成三等分并分别画出分度圆，以及标准齿轮。正负变位齿轮的齿顶圆，齿根圆，如图 2-1 所示。

② 削尖 H 铅笔二支，橡皮。

#### 3、范成仪的结构及工作原理

图 2-2 为齿轮范成仪简图，圆盘 1 代表被加工齿轮的轮坯，安装在机架 4 上，并可绕 O 轴转动。代表切齿刀具的齿条 2 安装在溜板 3 上，当移动溜板时，圆盘 1 与溜板 3 作纯滚动。因圆盘的直径为 200mm，故圆盘和溜板的滚动即相当于一分度圆直径为 200mm 的齿轮和齿条的滚动。齿条 2 可以安装在相对于圆盘 1 的各个不同位置，如把齿条中线安装在与圆盘 1 的分度圆相切的位置时，则可以绘出标准齿轮的齿廓。当齿条 2 的中线与圆盘 1 的分度圆间有距离时（其移距值  $xm$  可以在溜板 3 的刻度上直接读出来），则可按移距的大

小和方向绘制出各种正变位或负变位的齿轮。

范成法是应用齿轮的啮合原理来制造齿轮的一种方法。制造齿轮的刀具具有齿轮（或齿条）的外形，它和被切削齿轮轮坯的相对运动正和一对齿轮的啮合一样。这样，使具有渐开线齿形的刀具（或具有  $\alpha = 20^\circ$  的齿条刀具）在对轮坯的切削过程中切出了它的包络线，也就是被切齿轮的渐开线齿廓。

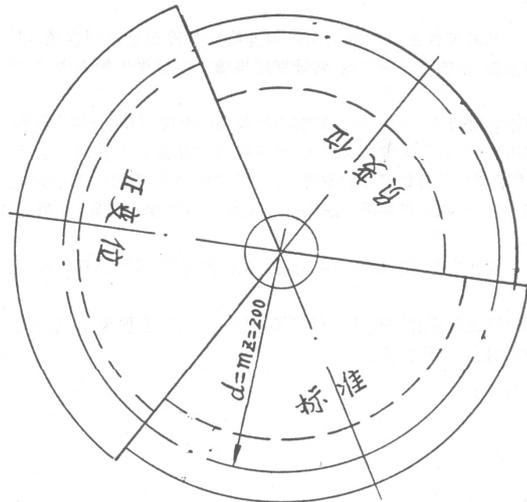


图 2-1

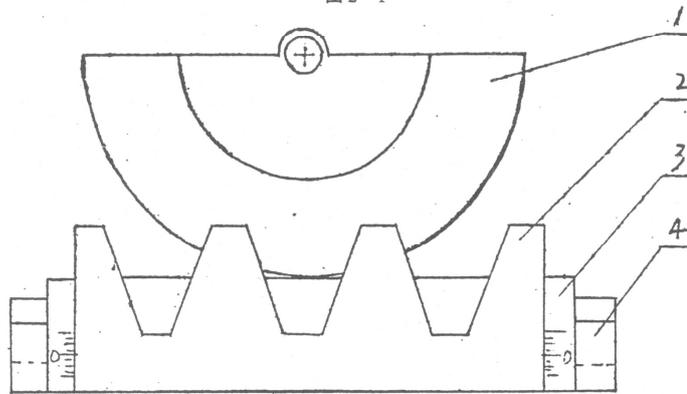


图 2-2

#### 四、实验内容及步骤

用范成仪在圆形图纸上（预先画好分度圆、顶圆、根圆，并画成三等分）依次用铅笔画出齿条刀具相对于轮坯在各个位置的包络线，就形成被切削齿轮的渐开线齿廓。分别在每一部分内画出标准齿轮，正变位和负变位齿轮，以作分析比较。操作步骤如下：

- 1、根据齿条刀具的模数  $m$  和被加工齿轮的齿数  $z$ ，计算出分度圆直径，以及标准齿轮正负变位齿轮的基圆，根圆及顶圆直径，将计算结果填在实验报告的表中，并按上述尺寸画好图纸。

- 2、将圆纸固定在圆盘上，对准中心，调节中线与轮坯分度圆相切，制作标准齿轮。
- 3、开始切制齿轮时，将刀具推到最左边，然后每当把溜板向右推动一小距离时，在代表轮坯的图纸上，用铅笔描下刀具刀刃的位置，直到形成2~3个完整的齿形为止。
- 4、使刀具离开轮坯中心，正移距 $+x_m(\text{mm})$  ( $x > x_{\min}$ )再绘出齿廓，观察齿廓形状，看齿顶有无变尖现象。
- 5、使刀具接近轮坯中心，负移距 $-x_m(\text{mm})$ ，又绘出齿廓，观察齿廓形状，看有无根切现象。
- 6、比较所得的标准齿轮和变位齿轮的齿厚、齿间、周节、齿顶齿厚、基圆齿厚、根圆、顶圆、分度圆和基圆的相对变化特点。

## 五、实验数据和齿廓图

### 1、刀具参数

$M =$              $\alpha =$              $ha^* =$              $c^* =$

### 2、齿轮尺寸计算比较表（见后页）

被加工齿轮齿数       $Z =$

正变位系数             $X =$

负变位系数             $X =$

名称	计算公式	计算结果			结果比较	
		标准齿轮	正变位 齿轮	负变位 齿轮	正变位 齿轮	负变位 齿轮
分度圆直径	$d=mZ$					
基圆直径	$d_b=mZ\cos\alpha$					
顶圆直径	$d_a=(z+2ha^*+2x)m$					
根圆直径	$d_f=(z-2ha^*-2c^*+2x)m$					
分度圆周节	$P=\pi m$					
分度圆齿厚	$S=(\frac{\pi}{2}+2xtg\alpha)m$					
分度圆齿间	$e=p-S$					
齿顶厚	$S_a=S(\frac{d_a}{d})-d_a(inv\alpha_a-inv\alpha)$					
基圆齿厚	$S_b=S\cos\alpha+db\,inv\alpha$					
全齿高	$h=(2ha^*+c^*)m$					
齿根高	$h_f=(ha^*+c^*-x)m$					
齿顶高	$h_a=(ha^*+x)m$					

3、附上所描绘的齿廓图，并注明尺寸

## 六、思考题

- 1、齿轮与齿条啮合时，若中心距改变，则齿轮的节圆有何变化？为什么？
- 2、影响根切的因素有哪些，在加工齿轮时如何避免根切现象？
- 3、比较标准齿轮与正变位齿轮的齿形有什么不同，并分析其原因。

## 实验三 机械系统动力学飞轮调速实验（一）

### 一、实验问题的提出

机械在运转过程中，受各构件的质量、转动惯量和作用于其上的驱动力、阻抗力等因素的影响，机器运动和动力输入轴（主轴）角速度会产生波动，增加了运动副中的动压力，使机器产生振动和噪声，影响了机器的寿命、效率和工作质量，然而这种波动大多又是不可避免的。因此应在设计中采取较经济的措施将过大的波动予以调节，这在工程上有重要的意义。

机械速度波动有周期性和非周期性两类，工程实际中的大多数机械如：内燃机、冲床、刨床等，其稳定运转过程中都存在着周期性速度波动。过大的速度波动会影响机器的正常工作，也会在运动副中产生附加动压力，引起某些构件的弹性振动等，影响机械性能。

为了减少速度波动和减小原动件的额定功率，在工程中常在机械中安装飞轮装置，利用飞轮实现对机械系统速度波动的控制。装置飞轮的实质就是增加机械的转动惯量，减少周期性速度波动的程度。飞轮设计是机械动力设计中重要内容之一，为了能最佳地控制系统的速度波动，需要准确地了解机械运转过程中的各动力学参数值，以便更好地设计飞轮。

机械系统动力学是研究机械系统在各种外力作用下的运动，它不仅要研究机械的稳定运动状态，还要研究机械运动的过渡过程，例如起动过程和制动过程。

实验台采用小型冲床的结构，设计成冲压力、飞轮惯量可调、机组工作阻力模式可变换的组合实验台，使实验测试对象可根据工作阻力模式进行变换。通过测量飞轮平稳运动规律以及起动、制动特性来分析和研究机械系统动力学问题。

### 二、实验目的

1. 理解机组稳定运转时速度出现周期性速度波动的原因；
2. 理解飞轮的调速原理；
3. 掌握机器周期性速度波动的调节方法和设计指标；
4. 利用实验数据计算飞轮的等效转动惯量，与实际的飞轮做比较；
5. 观察机组起止运动的过程和飞轮对其的影响。

### 三、实验台结构及工作原理

实验台采用工程应用中典型的飞轮调速的小型冲床结构为实验对象，在实验手段中引进传感器及计算机技术，通过测试获得机械运转过程中的动力学各项参数值，根据参数设计飞轮。首先通过对系统主轴转速、机组工作阻力变化及电机驱动力矩的精确测试，获得飞轮轴转速波动、机组工作阻力和电机驱动力矩等动力学基础参数。根据测试数据由计算机运算得到机组的回转不匀率、等效工作阻力矩、系统机械能及最大盈亏功等。然后，根据机组回转不匀率允许值计算出飞轮转动惯量，设计制作飞轮或更换不同飞轮，安装到实验台上进行试验和验证，直到回转不匀率在允许范围。

该实验系统可为速度周期性波动的机械提供先进的测试方法及飞轮设计需要的可靠数据。

实验台结构如图1所示：电动机经带轮传动带动主轴运转，由主轴上的偏心轮（即曲柄）转动，带动下方的冲杆作上下运动，通过冲头下方冲击力传感器、电机驱动力矩传感器和主轴上的光电编码传感器将机械运动过程的相关参数由采集卡输入计算机，经软件分析计算输出必要的参数。

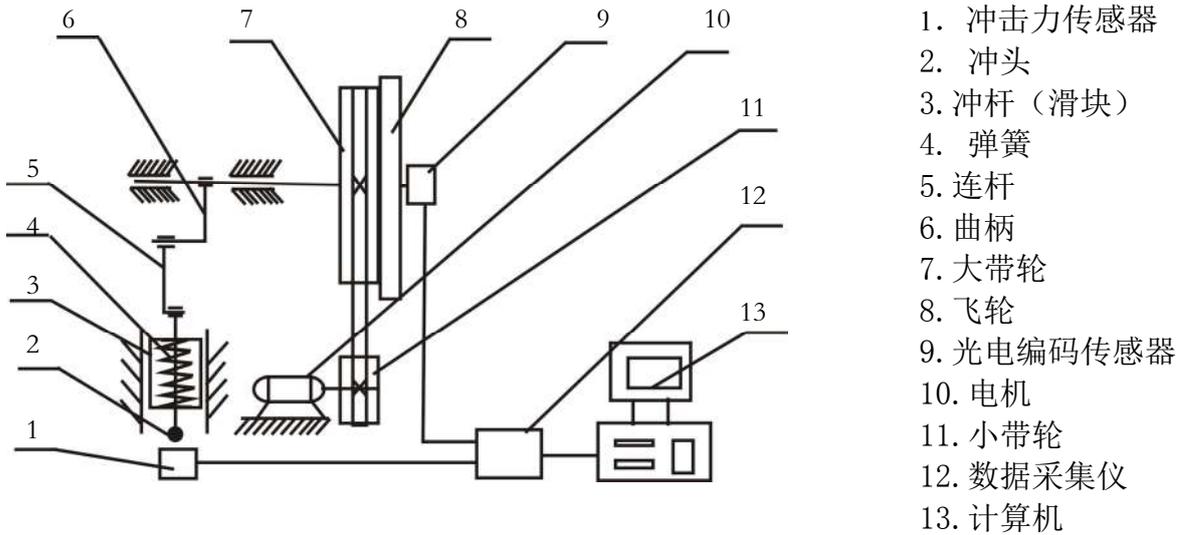


图 1 实验台结构简图

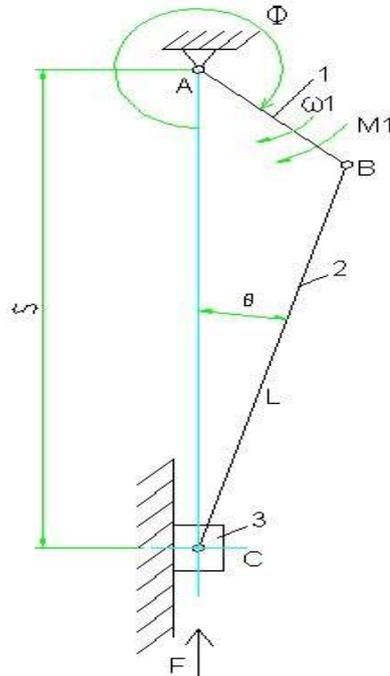


图 2 实验台等效机构简图

#### 四、实验原理及基本参数计算

作用在机械中的力一般作用于不同的构件上。在飞轮实验台中，可以等效其机构简图如上，这是一个曲柄、滑块机构，电动机的驱动力矩通过带、卡环片(图中未画出)加到曲

柄 1 上，而工作阻力  $F$  则作用于滑块 3。在研究外力作用下各构件的运动时，因要列出和求解联立方程组，那是很麻烦的。为了便于研究，使用等效力（或等效力矩）的概念，即用一个外力（或力矩）来代替所有的外力，使其与所有外力在作功方面等效。为了简便起见，通常选取只作直线移动或绕定轴转动的工具作为等效构件。在本实验台等效机构中选择曲柄 1 为等效构件。在单自由度机械系统中，作用于各构件上所有外力及外力矩在某瞬时的功率的总和与等效力（或等效力矩）在同一瞬时的功率相等。

#### 4.1 等效阻力矩

设等效力为  $F_v$ ，它作用点的速度为  $v$ ，通常为了简化计算，总是取  $F_v$  的方向线和  $v$  的方向线重合，即  $F_v$  和  $v$  方向相同或相反；又设等效力矩为  $M_v$ ，则根据功率相等的概念可得：

$$F_v v = \sum_{i=1}^n F_i v_i \cos \alpha_i + \sum_{j=1}^m \pm M_j \omega_j \quad (\text{式 3-1})$$

$$M_v \omega = \sum_{i=1}^n F_i v_i \cos \alpha_i + \sum_{j=1}^m \pm M_j \omega_j \quad (\text{式 3-2})$$

上式也可改成如下：

$$F_v = \sum_{i=1}^n F_i \frac{v_i \cos \alpha_i}{v} + \sum_{j=1}^m \pm M_j \frac{\omega_j}{v} \quad (\text{式 3-3})$$

$$M_v = \sum_{i=1}^n F_i \frac{v_i \cos \alpha_i}{\omega} + \sum_{j=1}^m \pm M_j \frac{\omega_j}{\omega} \quad (\text{式 3-4})$$

式中  $F_i$  和  $M_j$  分别为作用在平面机构上的外力和外力矩； $F_i$  的作用点速度为  $v_i$ ；力  $F_i$  的方向和  $v_i$  的方向间夹角  $\alpha_i$ ；受力矩  $M_j$  作用的构件  $j$  的角速度为  $\omega_j$

若计算出的  $F_v$  为正，则表示  $F_v$  与  $v$  的方向一致，否则，方向相反。同样，若计算出来的  $M_v$  为正，则表示  $M_v$  和  $\omega$  方向一致，否则相反。

如上机构图所示，曲柄 1 的角速度为  $\omega_1$ ，滑块的位移  $s$  (向下为正) 为

$$s = r \cos \phi + \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \phi}$$

$$\text{滑块的速度 (也是向下为正)} \quad v = \frac{ds}{dt} = -\omega_1 r \left[ \sin \phi + \frac{r \sin 2\phi}{2\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \phi}} \right]$$

$$\text{速比:} \quad \frac{v}{\omega_1} = -r \left[ \sin \phi + \frac{r \sin 2\phi}{2\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \phi}} \right]$$

可以看到速比完全由机构位置  $\phi$  及尺寸  $r, l$  决定。由（式 3-4）求得等效力矩  $M_v$

$$M_v = F \frac{v \cos \alpha}{\omega_1} + M_1 \frac{\omega_1}{\omega_1} \quad (\text{式 3-5})$$

式中  $\alpha$  为  $F$  和  $v$  方向间夹角。今  $F$  向上（如图 2 所示），故  $\alpha=180^\circ$ 。 $M_1$  和  $\omega_1$  同方向，故取正号，代入后得到

$$M_v = M_1 + Fr\left[\sin\phi + \frac{r\sin 2\phi}{2\sqrt{l^2 - r^2\sin^2\phi}}\right] \quad (\text{式 3-6})$$

上式中  $M_1$  为外力矩，在本实验台机构中为电机的驱动力矩，可知式中的后半部为等效阻力距  $M_o$ ，即

$$M_o = Fr\left[\sin\phi + \frac{r\sin 2\phi}{2\sqrt{l^2 - r^2\sin^2\phi}}\right] \quad (\text{式 3-7})$$

对于本实验台机构，其中  $r = 15 \text{ mm}$ ， $l=80\text{mm}$ ，同时由于  $r^2\sin^2\phi$  的值很小，为了简化计算，可以忽略。简化后的等效阻力距  $M_o$  计算公式为

$$M_o = 0.015 * F * (\sin\phi + 0.1 * \sin 2\phi) \quad (\text{式 3-8})$$

#### 4.2 机械能

图 3 给出了飞轮机构在一个稳定运动周期内机械能  $W$  的变化情况，这里机械能表示的是输入功和总耗功的差值。图 A 给出的是等效驱动力矩和等效阻力距与  $\phi$  的关系；图 B 表示的是机械能与  $\phi$  的关系。在  $ab$  区间， $M_o > M_1$ ，故若以  $a$  点为基准（即  $W=0$ ），则在  $ab$  段  $W$  下降；过  $b$  点后  $M_1 > M_o$ ， $W$  逐渐增加；同样，过  $c$  点后  $W$  又开始下降，过  $d$  点后  $W$  增加。当  $W$  增加，机械就加速，动能增加，反之，当  $W$  减少，机械就减速，动能减少。 $W-\phi$  曲线亦为机械的动能增量关系曲线，它们有如下关系：

$$W = \int_0^\phi (M_1 - M_o) d\phi \quad (\text{式 3-9})$$

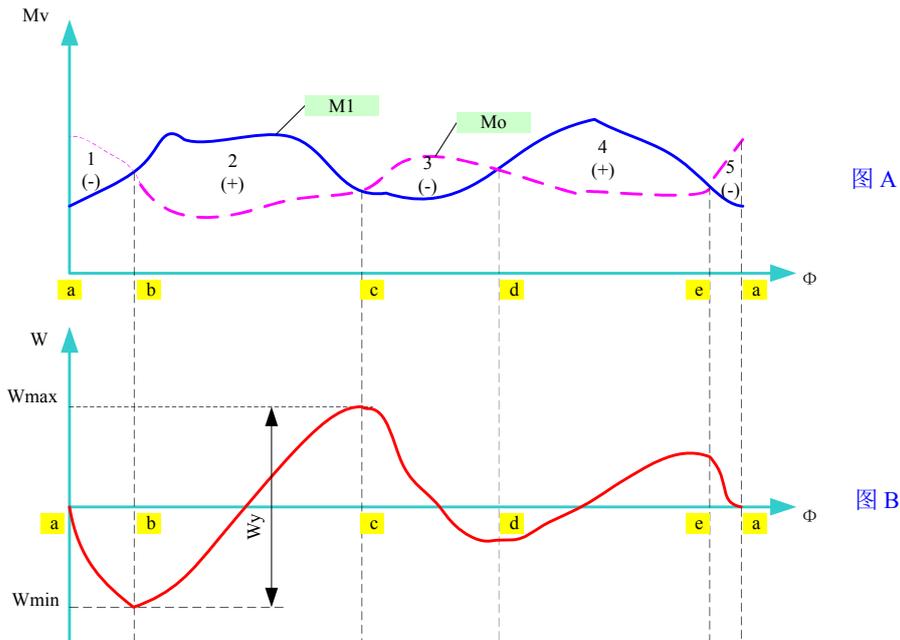


图 3 机械能曲线图

#### 4.3 盈亏功

如上图 B 中所标明的  $W_y$  即最大机械能与最小机械能的差值 称为盈亏功。 即

$$W_y = W_{\max} - W_{\min} \quad (\text{式 3-10})$$

#### 4.4 回转不匀率

$$\delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_m \quad (\text{式 3-12})$$

式中： $\omega_{\max}$  ——最大角速度；  
 $\omega_{\min}$  ——最小角速度；  
 $\omega_m$  ——平均角速度。

为了使所设计的机械系统在运转过程中的速度波动在允许的范围內，设计时保证  $\delta \leq [\delta]$ ， $[\delta]$  为许用值。

#### 4.5 转动惯量

飞轮的转动惯量与盈亏功以及角速度之间有如下关系：

$$J_F = \frac{W_y}{\omega^2 * \delta} \quad (\text{式 3-11})$$

其中： $J_F$  —— 转动惯量，单位： $kg * m^2$

$W_y$  —— 盈亏功，单位：焦耳 J

$\omega$  -- 曲柄角速度，单位：rad/s

$\delta$  -- 许可运转不均匀系数

飞轮设计的关键是根据机械的平均角速度和允许的速度波动系数 [  $\delta$  ] 来确定飞轮的转动惯量。

## 五、实验操作步骤

本实验台主要进行两项实验，一是**稳定运动速度波动实验**，这个实验的目的是观察电机在稳定运动时，开启实验冲头，观测飞轮对电机速度波动的影响；同时在这个过程中还测得电机的输出扭矩、实验台的阻力距以及其中的机械能变化情况。第二项实验是**起止动速度波动实验**，该实验的目的是观察飞轮对电机起动和制动时的影响。通过该实验台可以测量得到电机在起动时所需要的时间以及起动到平稳运动时所转过的角度和制动所发的时间以及从平稳运动到电机停止时所转过的角度。

### 5.1 稳定运动速度波动实验

#### 5.1.1 系统非工作状态稳定运动速度波动实验

- 1、正确联接实验台和计算机电源及通讯线。
- 2、打开实验台总电源和计算机电源。

3、双击计算机桌面 “” 标志，进入实验软件主界面，如图 4 所示。

4、在实验台电机不运转状态并空载的情况下，点击操作软件主界面上“清零”键，“清零”实验台上电机转矩传感器及冲压力传感器。

5、开启实验台电机电源，飞轮作空运转。

稳定运动速度波动实验

6、点击“稳定运动速度波动实验”按钮，图 4. 操作指示区

7、系统开始采集实验数据，大概在 5~8s 时间内会完成数据采集，并将数据上传到实验台软件界面上。

8、记录相关实验数据，完成系统非工作状态稳定运动速度波动实验。

#### 5.1.2 系统工作状态稳定运动速度波动实验

1、1~5 操作步骤同上节

2、当飞轮处于平稳空运转时，闭合实验台冲压工作电源开关，电磁离合器吸合。飞轮轴通过曲柄滑块机构（如图 1 所示）带动冲头（滑块）作冲压运动。

稳定运动速度波动实验

3、点击“稳定运动速度波动实验”按钮，图 4. 操作指示区

4、系统开始采集实验数据，大概在 5~8s 时间内会完成数据采集，并将数据上传到实验台软件界面上来。

5、记录并计算相关实验数据，打印实验曲线图，完成系统工作状态稳定运动速度波动实验。

### 5.2 起、止动速度波动实验

1、联接好实验台和计算机电源线及通讯线

2、双击计算机桌面 “” 标志，进入实验系统软件主界面。

起止动速度波动实验

- 3、点击“起止动速度波动实验”按钮，图 4. 操作指示区  
系统进入测试等待状态。
- 4、开启实验台电机，保证电机至少转过 5 个周期（即 5 转）后关闭电机。
- 5、系统软件进行采样数据处理，大概在 5~8s 时间内实验台完成数据采集，并将实验结果数据上传到实验台软件界面上。
- 6、记录相关实验数据，完成起、止动速度波动实验。

5.3 卸下飞轮环，重复实验 5.1 和 5.2。

## 六、实验台系统软件

### 6.1 主窗体

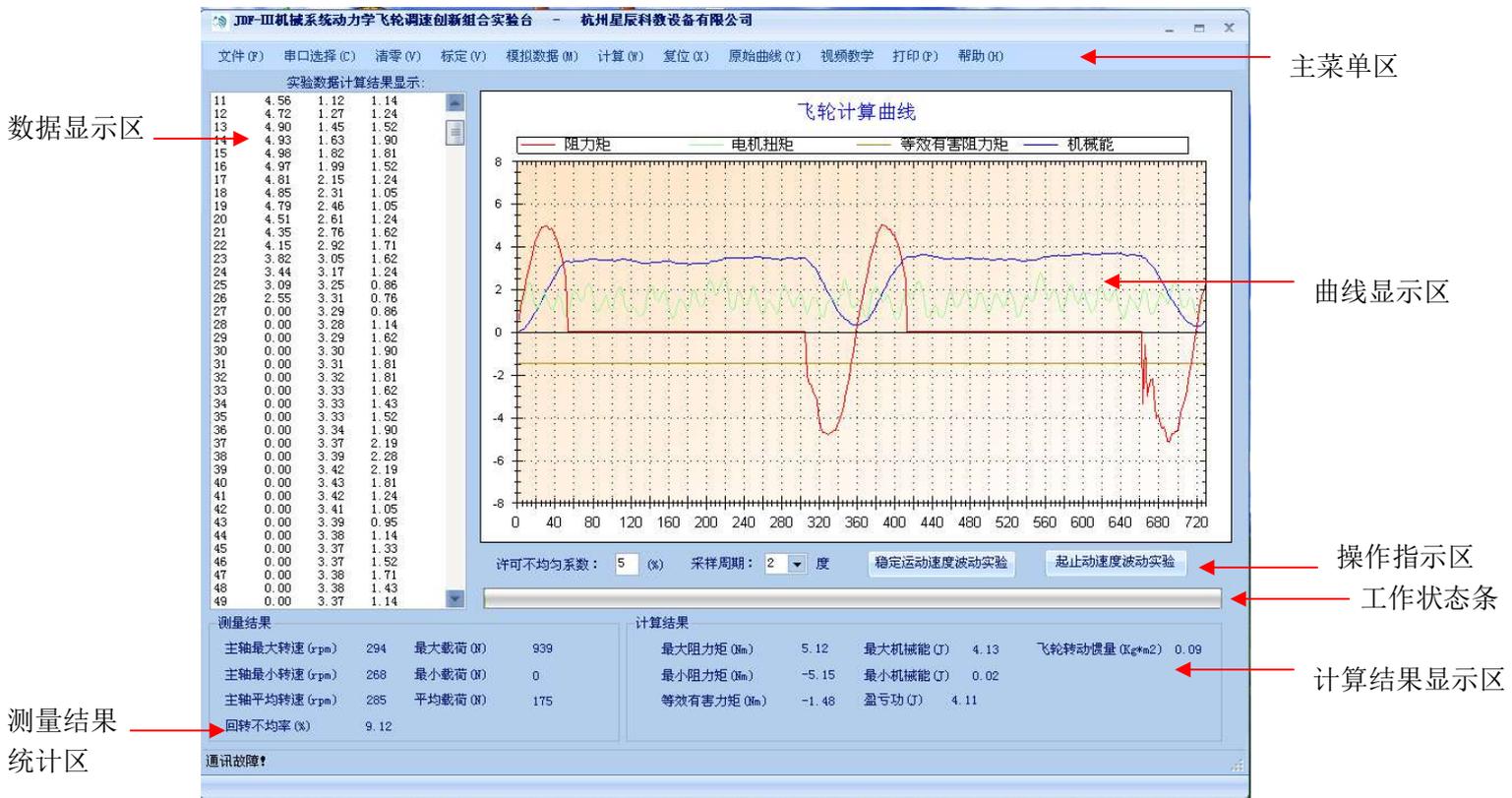


图 4 实验系统软件主窗体

主窗体由 7 个部分组成，它们分别是：

- 主菜单区：**可在此选择各种功能菜单
- 数据显示区：**实验采集得到的数据都在此区域显示
- 曲线显示区：**对采集的实验数据通过坐标图形方式显示在该区域中。
- 操作指示区：**这块区域有 4 项内容，它们是 1). 设置实验台的许可不均匀系数 2). 设置实验采样周期，2 度 表示飞轮每转过 2 度角采集一个数据 3). [稳定运动速度波动实验] 按钮，点击此按钮开始进行的是 飞轮稳定运动速度波动实验；[起止动速度波动实验] 按钮，点击此按钮开始进行的是 飞轮起止动速度波动实验；4). 进度条，当点击 3.) 中两项实验的任何一项，实验台开始工作，当完成实验台控制板完成数据采集并开始上传数据时，该进度条指示数据传送进度。
- 测量结果统计区：**统计采集的实验数据，如界面中所示，此区域提取出采集数据中的最

大/最小值，平均值等。

- F. **计算结果显示区**：通过选择主菜单中的【计算】项，可以对采集的实验数据进行分析计算，并将计算结果显示在此区域中。
- G. **工作状态条**：显示当前的工作状态

## 6.2 主要功能菜单

### 6.2.1 模拟数据



【模拟数据】提供两个数据项：**稳定运动速度波动实验** 和 **起止动速度波动实验**；它们是将采集的实验数据预存入软件中，方便在没有试验台的情况下可以通过这些实验数据来熟悉和了解飞轮台的工作情况。

### 6.2.2 计算与原始曲线



【计算】当完成实验数据采集后点击该菜单项，即对实验数据进行分析计算，同时可以看到数据显示区和曲线显示区的内容也相应地变成了计算后的结果数据。



【原始曲线】是要将数据显示区和曲线显示区的内容，由计算后的结果数据与曲线，恢复显示为采集得到的数据与曲线内容。

### 6.2.3 清零

在试验过程中，因各种原因实验系统会产生一定的“零点”偏移。为提高实验系统的实验准确度和稳定性，以及方便实验操作。本实验台具有“自动校零”功能，能清除系统的零点漂移而带来的实验误差。



操作步骤为：

- 1、打开实验台电源，设置电机转速为零，且冲击力传感器载荷力为零。
- 2、点击系统软件主窗体中“清零”菜单，系统进入自动校零采样操作，校零结束后系统将自动保存清零结果。

## 七、数据及曲线

### 1、实验数据记录表

#### (a) 稳定运动速度波动实验

	最大载荷	平均载荷	主轴平均转速 (r/min)	主轴最大转速 (r/min)	主轴最小转速 (r/min)	回转不均率 (%)	转动惯量 (kg*m <sup>2</sup> )
不装飞轮环	无载荷						
装飞轮环	无载荷						

附：实验结果曲线（小组各打印一份有飞轮和无飞轮的曲线图）

(b) 起、止动速度波动实验

飞轮环	主轴平均转速 (r/min)	主轴最大转速 (r/min)	主轴最小转速 (r/min)	起动角范围	止动角范围	起动时间 (s)	止动时间 (s)
有							
无							

## 八、思考题

1. 实验台在没有载荷的稳定运转时，为什么会有周期性速度波动？简述原因。
2. 加飞轮环与不加飞轮环相比，速度波动有什么变化？起动过程和制动过程有什么不同？简述其原因。
3. 取一组实验数据计算飞轮的转动惯量，与实验系统中的计算结果相比较。
4. 测量飞轮环的尺寸与重量，计算实际飞轮的转动惯量，与实验数据相比较，并作简要说明。

## 实验三 机械系统动力学飞轮调速实验（二）

### 一、实验目的（同调速实验一）

### 二、实验台结构及工作原理

#### 1. 基本参数

被测机构为曲柄滑块机构，如图 18 所示：

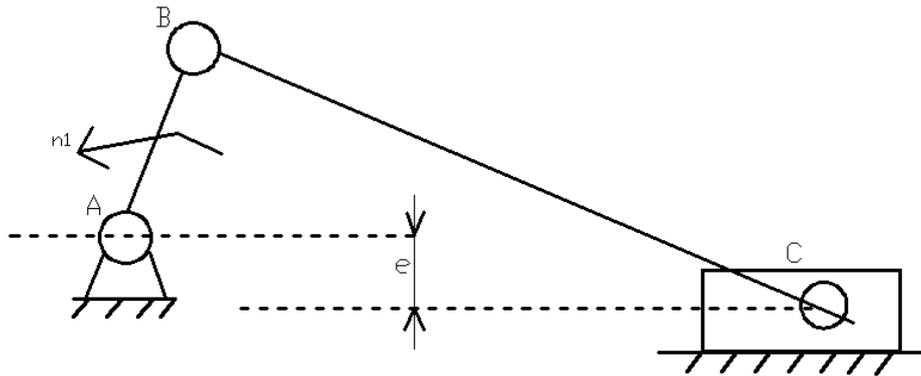


图 18 曲柄滑块机构

各杆长度

曲柄  $l_{AB}=50\text{mm}$ ； 连杆  $l_{BC}=180\text{mm}$ ； 电机转速  $n_1=1500\text{r/min}$ ；

已知生产阻力为拉伸弹簧，其拉伸阻力为：

拉伸长度  $L=5\text{mm}$ ， $F=0\text{kg}$ ；  $L=10\text{mm}$ ， $F=5\text{Kg}$ ；  $L=15\text{mm}$ ， $F=15\text{Kg}$ ；

#### 2. 实验内容

1) 曲柄的真实运动仿真：通过数模计算得出的真实运动规律，作出角速度线图；进行速度波动调节计算，分析飞轮转动惯量的影响。

2) 曲柄真实运动的实测：通过曲柄上的角位移传感器和 A/D 转换器进行采集，转换和处理，并输入计算机显示出实测的曲柄角速度线图；与理论角速度线图分析比较，使学生了解机构结构对曲柄的速度波动的影响。

3) 将大飞轮装在曲柄轴上，观察系统运转的速度不均匀性；

4) 将小飞轮装在曲柄轴上，观察系统运转的不均匀性；

5) 不装飞轮，观察系统运转的不均匀性，前后比较。

#### 3. 原理和方法

作用在机械上的驱动力矩和阻抗力矩是主动件转角  $\varphi$  的周期性函数且在等效驱动力矩和等效阻力矩及等效转动惯量变化的公共周期内（这里均为  $360^\circ$ ），驱动功=阻抗功时，在稳定运转期间主动件的速度（角速度）波动亦按周期性波动，其运转不均匀程度，用运转速度不均匀系数  $\delta$  表示，大小为：

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m}$$

$\omega_{\max}$  ——周期中最大角速度

$\omega_{\min}$  ——周期中最小角速度

$\omega_m$  ——平均角速度， $\omega_m = (\omega_{\max} + \omega_{\min})/2$

所谓机器运转周期性速度波动的调节，其目的就在于减小速度波动使其达到机器工作所允许的程度；或者说，减小机器运转速度不均匀系数  $\delta$ ，使其不超过许用值  $[\delta]$ 。

周期性速度波动的调节方法，是在机器中安装一个具有很大转动惯量的构件即所谓飞轮，其调速原理简述如下：

在一个周期中最大动能  $E_{\max}$  与最小动能  $E_{\min}$  之差称为最大盈亏功，以  $[W]$  示之，即

$$[W] = E_{\max} - E_{\min} = \frac{1}{2}(J_0 + J_F)(\omega_{\min}^2 - \omega_{\max}^2)$$

$J_0$  ——忽略等效转动中的变量部分机械的等效转动惯量

$$J_F \text{ ——飞轮等效转动惯量 } \delta = \frac{[W]}{\omega_m^2 (J_0 + J_F)}$$

当机器的等效力矩已给的情况下，最大盈亏功是一个确定值，由上式可知欲减小  $\omega_{\max} - \omega_{\min}$  值，可增大等效转动惯量  $J_0$  或增大  $\omega_m$ ，机器作好后  $J_0$  是一个确定值，故在机器中外加一个转动惯量为  $J_F$  的飞轮即可减小  $\omega_{\max} - \omega_{\min}$  达到调速的目的。

#### 4. 实验步骤

(1) 打开计算机，单击“**速度波动调节**”图标，进入**速度波动调节**实验台软件系统的封面。单击左键，进入曲柄滑块机构**速度波动调节**界面。

(2) 启动实验台的电动机，待曲柄滑块机构运转平稳后，测定电动机的功率，填入**速度波动调节**界面的对应参数框内。

(3) 根据曲柄轴上安装飞轮情况：无飞轮、小飞轮、大飞轮，在“实验序号”数据框内分别填入 0、1、2。

(4) 单击“速度实测”键，进行数据采集和传输，显示曲柄实测的角速度曲线图。

(5) 单击“速度仿真”键，动态显示曲柄动态的角速度曲线图。

(6) 在曲柄轴上加上大飞轮进行测试；

(7) 将大飞轮卸下加上小飞轮；

(8) 不加飞轮测试；

(9) 如果实验结束，单击“退出”，返回 Windows 界面。

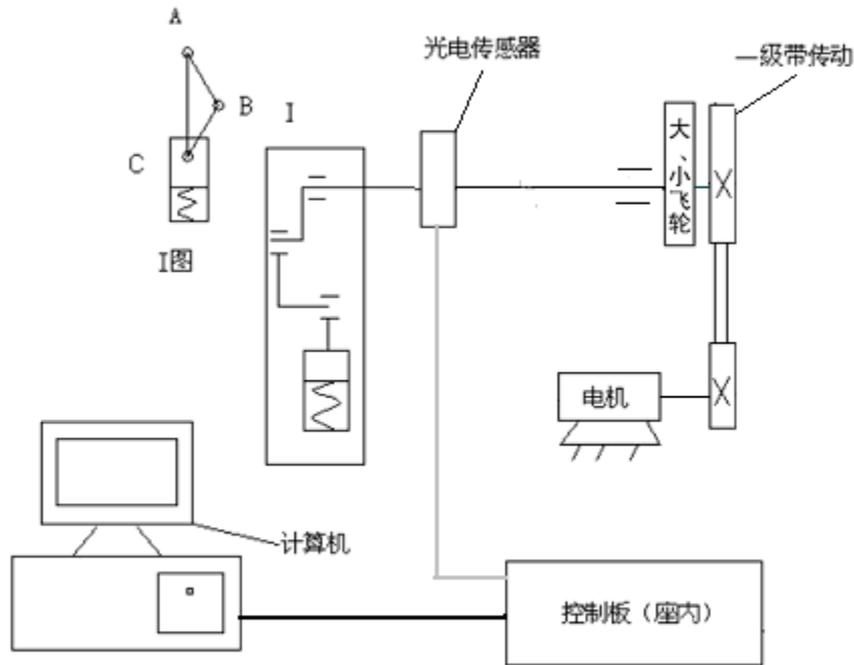


图 19 机械系统动力学调速测试实验原理图

## 5. 软件操作说明

曲柄滑块机构参数说明：

### A. 曲柄原始参数：

曲柄 AB 的长度  $L_{AB}=0.05\text{m}$

曲柄质心  $S_1$  到 A 点的距离  $L_{AS_1}=0.025\text{m}$ 。

平衡块的转动惯量  $J_p=0.00674\text{ kg m}^2$ 。

飞轮 1 的转动惯量  $J_F=0.00657\text{ kg m}^2$ 。（未加飞轮）

飞轮 2 的转动惯量  $J_F=0.01426\text{ kg m}^2$ 。（加小飞轮）

飞轮 3 的转动惯量  $J_F=0.02582\text{ kg m}^2$ 。（加大飞轮）

曲柄 AB 的质量（不包括  $M_{P1}$ ） $M_1=0.253\text{ kg}$ 。

曲柄 AB 的绕质心  $S_1$  的转动惯量（不包括  $M_{P1}$ ） $J_{S_1}=0.000142\text{ kg m}^2$ 。

### B. 连杆原始参数：

连杆 BC 的长度  $L_{BC}=0.18\text{m}$ 。

连杆质心  $S_2$  到 B 点的距离  $L_{BS_2}=0.045\text{m}$ 。

连杆 BC 的质量  $M_2=0.579\text{ kg}$ 。

连杆绕质心  $S_2$  的转动惯量  $J_{S_2}=0.00081\text{ kg m}^2$ 。

### C. 滑块原始参数：

滑块质量  $M_3=0.335\text{ kg}$ 。

偏距值（上为正） $e=-0.02\text{m}$ 。

D. 弹簧原始参数：

弹簧刚度  $k=1100\text{N/m}$ 。

弹簧初压量  $L=0.01\text{m}$ 。

E. 动力原始参数：

电动机（曲柄）的功率  $P$ ：可调  $0\sim 90\text{w}$ 。

电动机（曲柄）的特性系数  $G=9.724\text{rpm/Nm}$ 。

许用速度不均匀系数  $\delta$ ：按机械要求选取。

### 三、实验内容：

- 1) 曲柄的真实运动仿真：通过数模计算得出的真实运动规律，作出角速度线图；进行速度波动调节计算，分析飞轮转动惯量的影响。
- 2) 曲柄真实运动的实测：通过曲柄上的角位移传感受器和 A/D 转换器进行采集，转换和处理，并输入计算机显示出实测的曲柄角速度线图；与理论角速度线图分析比较，使学生了解机构结构对曲柄的速度波动的影响。

### 四、实验步骤：

- 1) 打开计算机，单击“**速度波动调节**”图标，进入**速度波动调节**实验台软件系统的封面。单击左键，进入曲柄滑块机构**速度波动调节**界面。
- 2) 启动实验台的电动机，待曲柄滑块机构运转平稳后，测定电动机的功率，填入**速度波动调节**界面的对应参数框内。
- 3) 根据曲柄轴上安装飞轮情况：无飞轮、小飞轮、大飞轮，在“实验序号”数据框内分别填入 0、1、2。
- 4) 单击“速度实测”键，进行数据采集和传输，显示曲柄实测的角速度曲线图。
- 5) 单击“速度仿真”键，动态显示曲柄动态的角速度曲线图。
- 6) 如果要打印仿真角速度曲线图和实测的角速度曲线图，在单击“打印”键，打印机自动打印。
- 7) 如果要查询实测数据，在“查询角度”填入查询角度（ $14.4^0\times n$ ），单击“实测角速度查询”文字框即可。
- 8) 如果要查询仿真数据，在“查询角度”填入查询角度（ $14.4^0\times n$ ），单击“仿真角速度查询”文字框即可。
- 9) 如果实验结束，单击“退出”，返回 Windows 界面。

### 五、功能键说明：

**[速度仿真]:** 单击此键动态显示曲柄滑块机构即时位置和曲柄动态的角速度曲线图。

**[速度实测]:** 单击此键可以看到实测时的曲柄运动规律曲线及实测结果。

**[打印]:** 单击此键，弹出打印对话框，将曲柄真实运动仿真曲线图和实测曲线图打印出来或保存为文件。

**[实验说明]:** 单击此键，弹出速度波动调节实验说明界面。

**[原始参数]:** 单击此键，弹出曲柄滑块机构参数输说明界面。

**[返回]:** 单击此键，返回曲柄滑块机构原始参数输入界面。

**[退出]:** 单击此键，结束程序的运行，返回 WINDOWS 界面。

## 六、问题讨论

- ① 分析大飞轮与小飞轮调速后传动平稳性的影响？哪一种好？为什么？
- ② 飞轮调速的方法适用于那类机械？
- ③ 平均转速提高后，速度不均匀系数怎样变化？

## 七、实验操作注意事项

(1) 开机前的准备：

初次使用时，需仔细参阅本产品的说明书，特别是注意事项。

- a. 拆下有机玻璃保护罩用清洁抹布将实验台，特别是机构各运动构件清理干净，加少量 N68~48 机油至各运动构件滑动轴承处。
- b. 面板上调速旋钮逆时针旋到底（转速最低）
- c. 用于转动曲柄盘 1~2 周，检查各运动构件的运行状况，各螺母紧固件应无松动，各运动构件应无卡死现象。

一切正常后，方可开始运行按实验指导书的要求操作。

(2) 开机后注意事项：

- a. 开机后，人不要太靠近实验台，更不能用手触摸运动构件。
- b. 调速稳定后才能用软件测试。测试过程中不能调速，不然测曲线混乱，不能反映周期性。
- c. 测试时，转速不能太快或太慢。因传感器量程，软件采集不到数据，将自动退出系统或死机。

## 实验四 空间机构运动方案设计实验

### 一、实验问题的提出

机构中至少有一构件不在相互平行的平面上运动或至少有一构件能在三维空间中运动的机构，称为空间机构。

空间机构中的各构件不都在同一平面或平行平面内运动，其运动多样、结构紧凑，且灵活可靠，许多用平面机构根本无法实现的运动规律和空间轨迹曲线，可以通过空间机构来实现，因而空间机构在各种工作机构中广泛应用。

在机械系统设计中，执行机构要完成的功能和运动形式是各种各样的，而能实现同一功能或运动特性要求的机构又可以有多种类型，机构创新设计就是要搜索或构思各种能满足要求的机构或其组合，然后在按照运动性能、动力性能、工作性能以及经济性等多方面的指标进行评价、比较和选择，最终创造出最优方案。空间机构无疑是创新设计者机构搜索的重要领域。

### 二、实验目的

- 1、典型空间机构的拼装实训实验(虚拟拼装及实物拼装两次训练)
- 2、典型空间机构的运动特点分析及对比分析。

3、通过典型空间机构的拼装实训实验、运动特点分析及对比分析，构思新的空间机构。并进行实物拼装，运动仿真，运动观察，使学生经过实物拼装训练，对空间机构的组成、运动特点及结构等问题有直观、深入的理解，培养学生的创新能力、综合设计能力和实践动手能力。

### 三、实验原理

1、空间机构种类较多，实验台提供的圆锥齿轮传动、螺旋齿轮传动、蜗杆蜗轮传动、单（双）十字轴万向联轴器、圆柱凸轮间歇运动机构等空间机构，教材中均有系统介绍，也是教学计划中必学内容，本书不再赘述。实验台提供的（18）萨勒特（SARRUT）机构（3R—3R 空间六杆机构）、（19）RSSR 空间曲柄摇杆机构、（20）RCCR 联轴器、（21）RCRC 揉面机构、（24）RRSC 机构、（29）RRRCRR 机构均属空间连杆机构，先将其结构分析相关知识予以简介。

组成空间连杆机构的运动副有转动副 R、移动副（棱柱副）P、螺旋副 H，以上三种运动副为 V 类副，有 1 个自由度，5 个约束度；球销副 S'，圆柱副 C、平面高副（滚滑副），以上三种运动副为 IV 类副，有 2 个自由度，4 个约束度；球面副 S、平面副 E，以上两种运动副

为III类副，有 3 个自由度，3 个约束度。空间线高副为 II 类级副，有 4 个自由度，2 个约束度；空间点高副为 I 级副，有 5 个自由度，1 个约束度。

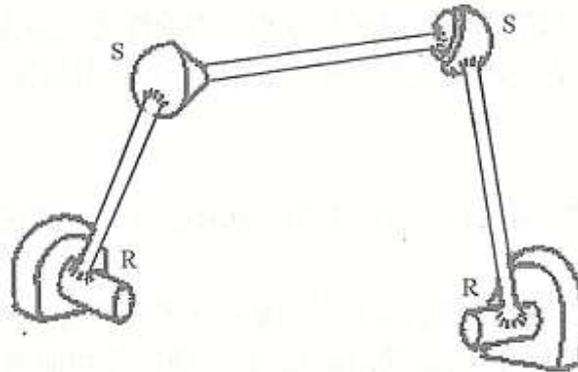


图 1 RSSR 空间曲柄摇杆机构

空间连杆机构的命名，常将所用运动副依次用符号相连为代表，如图 1 示空间曲柄摇杆机构，两连架杆均与运动副与机架相连，并均与球面副与连杆相连，故为 RSSR 空间机构。

空间机构自由度计算公式为：

$$F=6n-(5P_5+4P_4+3P_3+2P_2+P_1)$$

式中  $n$  为活动构件数； $P_1 \sim P_5$  分别为 I~V 级副数目。

计算空间机构自由度时，与平面机构相类似，要考虑局部自由度、复合铰链、虚约束及公共约束情况。如图示 RSSR 机构自由度计算值为：

$$F=6n-(5P_5+4P_4+3P_3+2P_2+P_1)$$

$$=6 \times 3 - (5 \times 2 + 3 \times 2)$$

$$=2$$

机构中连杆 2 绕自身轴线回转自由度为局部自由度，应除去，所以 RSSR 机构自由度为 1。

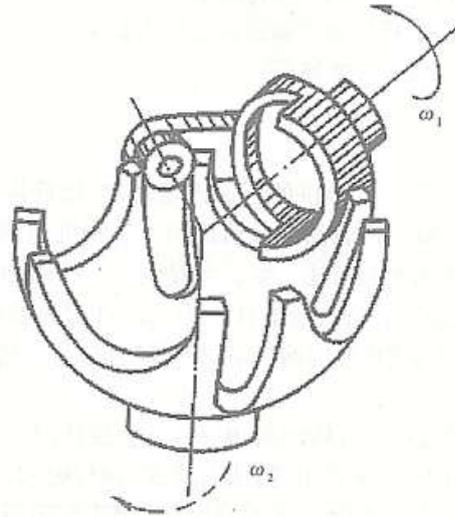


图 2 球面槽轮机构

2. 球面槽轮机构（图 2 示）用于两相交轴之间的间歇转动，其从动槽轮呈半球形，主动拨轮的轴线及拨销的轴线均应通过球心。主动拨轮上的拨销通常只有一个，槽轮的动、停时间相等。如果在主动拨轮上对称安装两个拨销，槽轮将继续变速运动。

#### 四、实验设备及工具

该实验台含机架一个，旋转机电一台（90W，220V，输出转速 10r/min）、V 带传动装置及各种运动副（转动副、移动副、球面副、圆柱副等）组件、球面槽轮、平面槽轮、蜗杆蜗轮、各类齿轮、联接件等。可以拼装出 30 种以上空间机构：

- 1、圆锥齿轮传动机构
- 2、螺旋齿轮传动机构
- 3、蜗杆蜗轮传动机构
- 4、单万向联轴节传动机构
- 5、双万向联轴节传动机构
- 6、球面槽轮机构
- 7、圆锥齿轮—螺旋齿轮组合传动机构
- 8、圆锥齿轮—蜗杆蜗轮组合传动机构
- 9、圆锥齿轮—单万向联轴节组合传动机构
- 10、圆锥齿轮—双万向联轴节组合传动机构

- 11、螺旋齿轮—圆锥齿轮组合传动机构
- 12、螺旋齿轮—蜗杆蜗轮组合传动机构
- 13、螺旋齿轮—单万向联轴节组合传动机构
- 14、螺旋齿轮—双万向联轴节组合传动机构
- 15、圆锥齿轮—平面槽轮机构组合传动机构
- 16、螺旋齿轮—平面槽轮机构组合传动机构
- 17、圆锥齿轮—单万向联轴节—蜗杆蜗轮组合传动机构
- 18、螺旋齿轮—单万向联轴节—蜗杆蜗轮组合传动机构
- 19、螺旋齿轮—双万向联轴节—蜗杆蜗轮组合传动机构
- 20、圆锥齿轮—双万向联轴节—蜗杆蜗轮组合传动机构
- 21、圆锥齿轮—单万向联轴节—棘轮机构组合传动机构
- 22、螺旋齿轮—单万向联轴节—棘轮机构组合传动机构
- 23、圆锥齿轮—双万向联轴节—棘轮机构组合传动机构
- 24、螺旋齿轮—双万向联轴节—棘轮机构组合传动机构
- 25、萨勒特（SARRUT）机构（3R-3R 空间六杆机构）
- 26、RSSR 空间曲柄摇杆机构
- 27、RCRC 揉面机构
- 28、叠加机构(摇头电扇机构)
- 29、RRSC 机构
- 30、圆柱凸轮往复运动机

## 五、实验步骤

- 1、构思所要拼装的空间机构，画出机构运动示意图。建议在实验台提供的 30 种机构中选择。
- 2、在实验台零件箱内选出所需零部件。
- 3、在机架上装配出所构思的机构，并联接电机，带传动。

4、手动运转无误后启动电机，观察机构运转情况。

## 六、注意事项

1、在进行实验前，应认真分析需搭接机构方案的目的性、合理性。

2、机构搭接好后，先手动转动各传动轴，应保证传动灵活、无卡死的现象。

3、启动电机前，必须清理实验台面，保证无任何工具等杂物。实验人员应与实验台保持适当距离，启动电机后不要过于靠近运动零件，不得伸手触摸运动零件。

4、同一小组中指定一个负责电机开关，遇紧急情况时立即停车。

## 七、思考题

1. 比较圆锥齿轮、螺旋齿轮传动、蜗杆蜗轮传动及万向联轴器按不同组合方案（方案 8 与 12； 9 与 13； 10 与 14； 11 与 15； 16 与 17； 18 与 19）组合的对应空间机构的性能特点。

2. 比较空间连杆机构与平面连杆机构的性能特点。

3. 比较平面槽轮机构与球面槽轮机构的性能特点。

4. 任意选择一种空间机构分析其性能特点。

## 八、附录

附录：空间机构运动方案设计实验台组件清单

序号	名称	型号及规格	数量	备注
1	十字接头		1	安装编码器时使用
2	φ6 垫圈	φ6	6	
3	φ10 垫圈	φ10	6	
4	拨盘总成		1	含 4.1、4.2
5	槽轮总成	四槽	1	
6	双十字节轴	全长 140	1	
7	三角带轮	外圆 φ68	3	其中一只作张紧轮用
8	螺旋齿轮轴 1	全长 152 有 φ6 轴头	1	
9	螺旋齿轮轴 2	全长 116 有 φ6 轴头	1	
10	螺旋齿轮轴 3	全长 125	1	
11	张紧带轮轴	全长 104	1	
12	360 脉冲编码器支架		2	
13	1000 脉冲编码器支架		1	
14	编码器支撑杆（一）	L1=135 L2=155	各 1 共 2	
15	十字接头 2		1	
16	编码器支撑杆（二）	全长 180	1	
17	φ16 挡圈	φ16	5	
18	φ18 挡圈	φ18	5	
19	带轮轴	全长 126 有 φ6 轴头	2	
20	圆锥小齿轮	Z=30 M=2	1	
21	圆锥大齿轮	Z=40 M=2	1	
22	螺旋齿轮	Z=30 M=2	2	
23	大蜗轮总成	Z=30 M=4	1	
24	蜗杆轴	全长 260	1	
25	T 型座组件 1	φ18×全长 110	3	
26	T 型座组件 2	φ18×全长 124	2	
27	编码器 T 型座	扁丝方向不同	各 2 共 4	
28	编码器支撑杆（三）	L1=110 L2=165	各 1 共 2	
29	双十字联轴节总成	全长 102	1	
30	特殊垫圈		4	

31	蜗轮轴 1	全长 115 有 $\phi 6$ 轴头	1	
32	蜗轮轴 2	全长 128 有 $\phi 6$ 轴头	1	
33	单十字联轴节总成	全长 80	2	
34	锥齿轮-十字节轴	全长 138 有 $\phi 6$ 轴头	1	
35	十字节轴	全长 100 有 $\phi 6$ 轴头	1	
36	T 型连接器支撑轴	全长 95	1	
37	大涡轮内圈	属 0023	1	
38	螺旋齿轮轴 4	全长 126 有 $\phi 6$ 轴头	1	
39	圆锥-螺旋齿轮轴	全长 260	1	
40	螺旋齿、锥齿轮轴	全长 216	1	
41	大锥齿轮轴	全长 96 有 $\phi 6$ 轴头	1	
42	$\phi 12$ 挡圈	$\phi 12$	4	
43	拨盘轴	全长 105	1	
44	T 型座组件 3	$\phi 12 \times$ 全长 122	2	
45	槽轮轴	全长 88 有 $\phi 6$ 轴头	1	
46	拨盘轴 2	全长 94	1	
47	带轮轴 2	全长 166 有 $\phi 6$ 轴头	1	
48	过渡接头总成		2	
49	槽轮从动轴	全长 88 有 $\phi 6$ 轴头	1	
50	$\phi 12.5$ 加大垫圈	$\phi 12.5$	5	
51	球碗支撑轴	全长 102	1	
52	球碗总成		1	
53	揉面杆		1	
54	偏心轮 1	$\phi 85$	1	
55	揉面杆销	$\phi 26 \times 50$	1	
56	$\phi 17$ 垫圈	$\phi 17$	1	
57	支撑轴 1	全长 102	1	
58	揉面杆支架总成		1	
59	支撑轴 2	全长 188	1	
60	小锥齿轮轴	全长 210	1	
61	导向轴	全长 356	1	
62	T 型座组件 4	$\phi 16 \times$ 全长 152 无衬套	2	
63	带轮轴 3	全长 118	1	

64	主动扁轴	全长 78, 一端有 M8 螺纹	1	
65	定位螺钉 1	M6	1	
66	被动扁轴	全长 50, 一端有 M8 螺纹	1	
67	直线轴承套总成		1	
68	圆柱凸轮	$\phi 70 \times 72$	1	
69	圆柱凸轮轴	全长 222	1	
70	连杆定位销	$\phi 16 \times 29$	2	
71	直线传感器连接板		1	
72	滑动块		1	
73	滑动轴	$\phi 11 \times 46$	1	
74	连杆 1	全长 190	1	
75	摆杆 1	全长 100	1	
76	连杆-关节轴承	M8 $\times$ 102	1	
77	偏心轮 2	$\phi 85$ (M8)	1	
78	T 型座组件 5	$\phi 12 \times$ 全长 174 无衬套	1	
79	摆杆支撑轴 1	全长 94	1	
80	定位螺钉 2	M6 $\times$ 18	1	
81	球面槽轮	六槽	1	
82	槽轮支撑轴	全长 116	1	
83	槽轮主动轴	全长 125	1	
84	拨转销滚子	$\phi 12 \times 17$	1	
85	槽轮拨转销	$\phi 16 \times 40$	1	
86	拨板销		1	
87	槽轮锁止器		1	
88	偏心轮 3	$\phi 90$	1	
89	定位螺钉 3	全长 26	3	
90	T 型座组件 6	$\phi 12 \times$ 全长 150	1	
91	轴端垫圈	$\phi 6 \times \phi 18 \times 3$	1	
92	棘轮轴	全长 100	1	
93	棘轮	Z=24	1	
94	偏心轮轴	全长 98	1	
95	摆杆 2	全长 188	1	
96	连杆 2	全长 220	1	

97	棘爪		1	
98	带垫片螺栓	M=6	3	
99	摆杆支撑轴 2	全长 100, 一端有 M12 螺纹	1	
100	电机支撑座		1	
101	蜗杆轴支撑座 1		1	
102	小蜗杆轴	m=1.5 全长 266	1	
103	摆杆 3	全长 305	1	
104	蜗杆轴支撑座 2		1	
105	长连杆	全长 220	1	
106	传动副轴	$\phi 18 \times 20$	1	
107	短连杆	全长 60	1	
108	压紧螺栓	M=6	2	
109	小蜗轮	m=1.5 z=40	1	
110	铜衬套	$\phi 15 \times \phi 20 \times 15$	1	
111	蜗轮轴	全长 45.5	1	
112	扁头轴	全长 64.5, 一端有 M12 螺纹	1	
113	$\phi 12$ 挡圈	$\phi 12$	2	
114	后曲柄支撑轴	全长 202	1	
115	后曲柄	全长 89	1	
116	摆杆 4	全长 104	2	
117	中间平板		1	
118	定位销	$\phi 10 \phi 12$	各 2 共 4	
119	前曲柄	全长 74	1	
120	前曲柄轴	全长 94	1	
121	机架总成		1	动立柱 6 根, 在机架平面沿左右方向移动
122	滑块总成		12	已与立柱相连
123	锁紧滑块方螺母	M6	12	已与滑块相连
124	T 型螺母		4	卡在机架的长槽内, 可轻松用螺栓固定电机座
		标 准 件		

1	球头杆端关节轴承	SQ8C	3	
2	直线运动球轴承	LBP202830	1	
3	孔用弹性挡圈	28	5	
4	轴用弹性挡圈	8、12、15、17	各 5	
5	开口销	2 X 20	4	
6	螺栓	M10 X 20	5	
7	开槽平端紧定螺钉	M4 X 10	4	
8	薄螺母	M8	4	
9	内六角平端紧定螺钉	M5X10 M5X16 M6X10 M6X10	各 20	
10	内六角圆柱头螺钉	M5X12 M6X12 M6X20	各 20	
11	螺母	M6 M8 M10 M12	各 10	
12	垫圈	6 8 10	各 10	
13	加厚垫圈	12 X 24 X 2.5	10	
14	平键	4X20 5X15 5X20 6X20	各 5	

## 实验五 轮系方案创意搭接实验

### 一、实验目的

- 1、掌握轮系实验台的使用方法及实验原理；
- 2、训练学生的工程实践动手能力，培养学生创新意识及综合设计的能力；
- 3、加深对轮系机构的组成原理及其运动特性的理解和感性认识；
- 4、了解周转轮系和复合轮系机构的特殊性。

### 二、实验台特点

- 1、实验台机架上配有电动机、V带传动装置通过悬臂杆张紧轮张紧，机构搭接方式灵活、固定运动副位置在平面坐标上可以任意调节。
- 2、实验装置各传动系统层次分明，联接可靠，不会产生构件之间的运动干涉或脱离；元件之间的通用性好，可组成性能各异的轮系机构系统。

### 三、可搭接机构种类

2K-H 型行星轮系	16 种
2K-H 型差动轮系	12 种
2K-H 型运动分解轮系	12 种
3K 周转轮系	1 种
定轴轮系	1 种
复合轮系	2 种
运动分解、合成	2 种

### 四、主要技术参数

※实验台机架外形尺寸 1200mm×350mm×650mm（长×宽×高）

※旋转电机功率 N=60W          220V

转速：输出转速 n=10 转/分

### 五、思考题

- 1、选择搭建 2K-H 行星轮系、定轴轮系，画出机构简图，计算传动比，说明几何关系。

- 2、搭建 3K 型周转轮系，画出机构简图，计算传动比。
- 3、选择搭建 2K-H 差动轮系，计算自由度，画出机构简图。
- 4、搭建复合轮系，画出机构简图，计算传动比。

## 六、附件

### 附件：零部件配置清单

序号	名称	代号	数量	材料	规格	备注
1	2K-HT 行星轮系	13 (13A, 13B, 13C...13Q, 13T 共 16 种装配形式)				
2	支承支架	13-01	4	45	高 24.5	
3	支架 1	13-02	2	A3	高 43.5	
4	齿圈 1	13-03	2	45	m=2 z=90	
5	轮系齿轮 2-1	13-04	6	45	m=2 z=30	
6	转臂轴 1	13-05	6	45	L=28	
7	压紧螺钉 3	13-6	14	15	M5×8.5 (无台阶)	
8	转臂 1	13-07	2	45		
9	转臂出轴 1	13-08	2	45	L=73.5	
10	轮系铜套 1	13-09	8	锡青铜	内孔 $\Phi 14 \times 15$	
11	轮系齿轮 2-2	13-10	6	45	m=2 z=30	
12	转臂入轴 1	13-11	1	45	L=107	
13	固定套 1	13-12	2	45	内孔 $\Phi 11 \times 54.5$	
14	防转轴	13-13	4	45	L=43	
15	齿圈固定板 1	13-14	2	45	$\Phi 210 \times 11$	
16	转臂入轴 2	13-15	2	45	L=188.5	
17	固定板 1	13-16	1	A3	中心距 L=120	
18	支架 2	13-17	1	A3	高 53	
19	轮系齿轮 2-3	13-18	1	45	m=2 z=40	
20	定位螺钉	13-19	2	45	L=32	
21	转臂出轴 2	13-20	1	45	L=106	
22	固定套 2	13-21	1	45	内孔 $\Phi 11 \times 49$	
23	轮系铜套 2.3	13-22	3	锡青铜	内孔 $\Phi 16 \times 20$ (2) 内孔 $\Phi 16 \times 23$ (1)	

24	轮系输入轴 3	13-23	1	45	L=207.5	
25	轮系输出轴 3	13-24	1	45	L=96.5	
26	固定套 3	13-25	1	45	内孔 $\Phi 11 \times 39.5$	
27	轮系输入轴 4	13-26	1	45	L=198.5	
28	六角螺钉 1	13-27	2	45	L=71	
29	固定板 2	13-28		A3		
30	轮系输出轴 4	13-29	1	45	L=119	
31	固定套 4	13-30	1	45	内孔 $\Phi 11 \times 62$	
32	转系输出轴 5	13-31	1	45	L=132	
33	固定套 5	13-32	1	45	内孔 $\Phi 11 \times 42$ (代螺纹)	
34	六角螺钉 2	13-33	2	45	M8 $\times$ 16	
35	轮系输入轴 5	13-34	1	45	L=215	
36	固定套 6	13-35	1	45	内孔 $\Phi 11 \times 42$	
37	固定套 7	13-36	1	45	内孔 $\Phi 11 \times 55.5$	
38	转系输出轴 6	13-37	1	45	L=113.5	
39	轮系输出轴 7	13-38	1	45	L=145.5	
40	转系输出轴 8	13-39	1	45	L=127	
41	转臂 2	13-40	2	45		
42	2K-H 差动轮系	14 (14A, 14B, 14C...14V, 14X 共 24 种装配形式)				
43	转臂 3	14-01	1	A3		
44	输入轴用带轮 3	14-02	1	45	内孔 $10 \times 22$	
45	活动套 1	14-03	1	45	内孔 $11 \times 67.5$	
46	轮系输入轴 6	14-04	1	45	L=120	
47	轮系输入轴 7	14-05	1	45	L=101	
48	活动套 2	14-06	1	45	内孔 $11 \times 74.5$	
49	轮系输入轴 8	14-07	1	45	L=131.5	
50	轮系输出轴 9	14-08	1	45	L=67	
51	轮系输入轴 9	14-09	1	45	L=155	
52	顶圈	14-10	2	45	内孔 $11 \times 12.5$	
53	3K 周转	16	1			
54	轮系输入轴 11	16-01	1	45	L=99	

55	支架 3	16-02	2	A3	高 64.5	
56	轮系齿轮 3-1	16-03	3	45	m=2 z=20	
57	转臂轴 2	16-04	3	45	L=39	
58	六角螺母	16-05	2	45	M=16×4.5	
59	齿圈固定板	16-06	2	A3	Φ190×8	
60	限位轴	16-07	1	45	L=44.5	
61	轮系输出轴 11	16-08	1	45	L=70	
62	转臂 4	16-09	1	45		
63	轮系齿轮 3-2	16-10	1	45	孔 37×35	
64	齿圈 2	16-11	2	45	M=2 Z=77	
65	定轴轮系	17				
66	轮系输入轴 12	17-01	2	45	L=97	
67	支承支架	17-02	2	45	高 11.5	
68	中间输出轴 1	17-03	1	45	L=55	
69	定轴轮系中间支承	17-04	1	45	L=53	
70	轮系转动轴 1	17-05	1	45	L=109	
71	轮系输出轴 12	17-06	1	45	L=136.5	
72	复合轮系 1	18A				
73	复合轮系 2	18B				
74	轮系输入轴 13	18-01	1	45	L=95	
75	中间输出轴 2	18-02	1	45	L=56	
76	齿圈固定板与垫块	18-03-01 与 02	1 与 3	A3	Φ210×8	
77	垫板	18-04	4	45	内孔 8.5×6.5	
78	齿圈垫块	18-05	2	45	高 24.5	
79	齿圈 3	18-06	2	45	M=2 Z=90	
80	小支板	18-07	1	A3	Φ210 厚 17 宽 40	
81	铜套	18-08	2	QSn7-0.2	内孔 Φ 14 × 23	
82	中间输出轴 3	18-09	1	45	L=63	
83	轮系转动轴 2	18-10	1	45	L=103.5	

84	小从动轴 1	18-11	1	45	L=63	
85	中间输出轴 4	18-12	1	45	L=56.5	
86	小支架	18-13	1	A3	Φ210 高 36.5 宽 40	
87	轮系输出轴 13	18-14	1	45	L=55	
88	运动的合成	19				
89	活动套 3	19-01	1	45	内孔 Φ16×75.5	
90A	轮系锥齿轮 1	19-02	1	45	m=3 z=40 内孔 Φ16	
90B	轮系锥齿轮 2	19-03	1	45	m=3 z=30	
91	固联轴	19-04	1	45	L=72.5	
92	轮系输入轴 14	19-05	1	45	L=157	
93	轮系锥齿轮 3	19-06	1	45	m=3 z=40 内孔 Φ16	
94	小从动轴 2	19-07	1	45	L=66	
95	轮系支承 1	19-08	1	45	L=128.42	
96	压紧螺钉 4	19-09	10	45	M5×7.5	
97	运动分解	20				
98	轮系支承 2	20-01	2	45	L=71.5	
99	分解从动轴 1	20-2	1	45	L=86	
101	小支承臂	20-4	2	45	L=65.5	
102	小联接轴	20-05	1	45	孔距 L=73	
103	衬套	20-06	2	45	内孔 Φ11×10.5	
104	分解从动轴 2	20-07	1	45	L=92	
105	轮	20-08	2	45	Φ Φ140×15	
106	支承 1	02-06	1	45	L=86.5	
107	张紧轮轴	02-07	2	45	L=25, 37.5	
108	张紧轮	02-08	2	45	L=24.5, 37	
109	张紧轮转臂	02-09	2	A3	中心距 60	
110	张紧轮转臂轴	02-10	2	45	L=62	
111	限位套	02-11	各 2 共 6	45	L= L=28, 35.5	
112	压紧螺钉 1	03-13	2	45	M5×7.5 带台阶	
113	压紧螺钉 2	03-14	8	45	M4×9 无台阶	

114	大锥齿轮 1	05-04	2		m=2 z=45	
115	小锥齿轮 1	05-05	2	45	m=2 z=26	
116	主动轴	05-08	1	45	L=102.5	
117	轴用带轮 2	08-11	4	45	内孔 $\Phi 12 \times 34.5$ (单槽)	
118	后置齿轮 1	08-12-01	1	45	m=2 z=60 内孔 $\Phi 10$	
119	后置齿轮 2	08-12-02	2	45	m=2 z=60 内孔 $\Phi 16$	
120	机用带轮	08-13	1	45	内孔 $\Phi 12 \times 38$ (双槽)	
121	紧定螺钉	M5 $\times$ 10	6		GB70-85	标准件
122	内六角螺钉	M8 $\times$ 50	6		GB70-85	标准件
123	内六角螺钉	M8 $\times$ 60	6		GB70-85	标准件
124	内六角螺钉	M8 $\times$ 70	6		GB70-85	标准件
125	内六角螺钉	M6 $\times$ 60	6		GB70-85	标准件
126	沉头螺钉	M4 $\times$ 10	12		GB68-85	标准件
127	沉头螺钉	M6 $\times$ 20	10		GB68-85	标准件
128	沉头螺钉	M6 $\times$ 35	10		GB68-85	标准件
129	键	3 $\times$ 10	5		GB1096-79	标准件
130	键	3 $\times$ 28	5		GB1096-79	标准件
131	键	4 $\times$ 8	12		GB1096-79	标准件
132	挡圈 12		8		GB894-86	标准件
133	挡圈 14		4		GB894-86	标准件
134	挡圈 16		4		GB894-86	标准件
135	垫圈 10		2		GB97.1-85	标准件
136	垫圈 12		10		GB848-85	标准件
137	垫圈 16		2		GB848-85	标准件
138	螺母 M5		6		QB6170-86	标准件
139	螺母 M12		10		QB6170-86	标准件
140	薄螺母 M6		5		QB6172-86	标准件
141	薄螺母 M12		5		QB6172-86	标准件
142	薄螺母 M16		3		QB6172-86	标准件

## 实验六 计算机软件虚拟装配实验说明

### 一、 轮系虚拟装配



- 1、 打开桌面轮系装配软件。
- 2、 点击“后页”进入“装配训练”。
- 3、 选择“定轴轮系”或一种“2K-H型行星轮系”（16种）。
- 4、 观察该轮系的装配录像、装配视图、爆炸视图后进行装配训练。
- 5、 将装配训练结果保存并转换到 word 文档，配上装配原图后打印。
- 6、 在装配图上标注各个零件。
- 7、 完成思考题：画出轮系的机构简图并计算传动比。

### 二、 空间机构虚拟装配



- 1、 打开桌面空间机构装配软件。
- 2、 点击“后页”进入“装配训练”。
- 3、 选择实验三空间机构装配实验指导中思考题 1 或 2 中的一组机构，观察该组机构的装配录像、装配视图、爆炸视图后进行装配训练。
- 4、 将装配训练结果保存并转换到 word 文档，配上装配原图后打印。
- 5、 在装配图上标注各个零件。
- 6、 完成思考题 1、2(见实验三思考题)。

## 实验七 LSC-II 螺栓组及单螺栓联接综合实验

### 一、工程应用实例

螺纹联接是机器中广泛采用的联接形式，常为可拆联接。在机械设计中大量使用螺纹联接，例如流体传动中液压缸的法兰盘联接、汽车发动机中汽缸盖与缸体的联接等。在日常生活中，螺栓组联接也有广泛应用，例如空调的室外机的托架等等。

### 二、实验问题的提出

在螺栓承受变动外载荷时，粗螺栓的疲劳寿命比细长螺栓的寿命短，这是为什么呢？另一方面，在机器设计中可以通过哪些措施来提高螺栓的疲劳寿命，机械设计中介绍了三种措施：（1）提高被联接件的刚度；（2）减小螺栓的刚度；（3）提高螺栓联接的预紧力。也可以同时采用上述三种措施。第（1）（2）种措施将导致螺栓联接残余预紧力的减小，这对有密封要求的联接是必须考虑的；第（3）种措施会导致螺栓静强度的减弱。上述结论正确吗？我们通过本实验来观察、分析螺栓的联接特性。

螺栓联接常成组使用。在外界转矩或倾翻力矩载荷作用下，每只螺栓上承受的载荷一样吗？各螺栓上承受载荷间有什么关系呢？让我们用实验来研究这一问题。

### 三、实验目的

现代各类机械工程中广泛应用螺栓组机构进行联接。如何计算和测量螺栓受力情况及静、动态性能参数是工程技术人员面临的一个重要课题。本实验通过对一螺栓组及单个螺栓的受力分析，要求达到下述目的：

#### （一）螺栓组试验

- （1）了解托架螺栓组受翻转力矩引起的载荷对各螺栓拉力的分布情况。
- （2）根据拉力分布情况确定托架底板旋转轴线的位置。
- （3）将实验结果与螺栓组受力分布的理论计算结果相比较。

#### （二）单个螺栓静载试验

了解受预紧轴向载荷螺栓联接中，零件相对刚度的变化对螺栓所受总拉力的影响。

### (三) 单个螺栓动载荷试验

通过改变螺栓联接中零件的相对刚度，观察螺栓中动态应力幅值的变化。

## 四、螺栓试验台结构及工作原理

### (一) 螺栓组试验台结构与工作原理

螺栓组试验台的结构如：图 1 所示。图中 1 为托架，在实际使用中多为水平放置，为了避免由于自重产生力矩的影响，在本试验台上设计为垂直放置。托架以一组螺栓 3 联接于支架 2 上。加力杠杆组 4 包含两组杠杆，其臂长比均为 1:10，则总杠杆比为 1:100，可使加载砝码 6 产生的力放大到 100 倍后压在托架支承点上。螺栓组的受力与应变转换为粘贴在各螺栓中部应变片 8 的伸长量，用变化仪来测量。应变片在螺栓上相隔 180° 粘贴两片，输出串接，以补偿螺栓受力弯曲引起的测量误差。引线由孔 7 中接出。

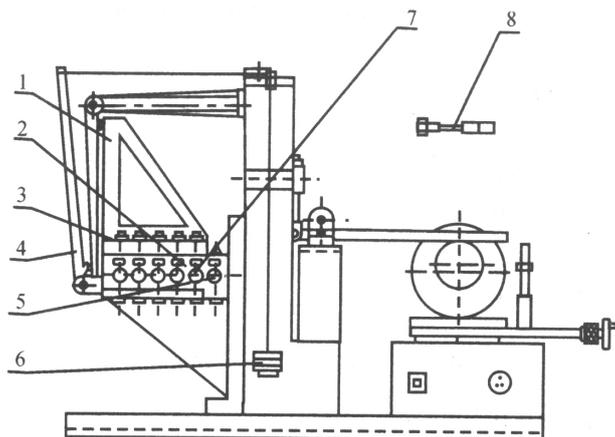


图 1 螺栓组试验台

加载后，托架螺栓组受到一横向力及力矩，与接合面上的摩擦阻力相平衡。而力矩则使托架有翻转趋势，使得各个螺栓受到大小不等的外界作用力。根据螺栓变形协调条件，各螺栓所受拉力  $F$ （或拉伸变形）与其中心线到托架底版翻转轴线的距离  $L$  成正比。即：

$$\frac{F_1}{L_1} = \frac{F_2}{L_2} \quad (1)$$

式中， $F_1$ 、 $F_2$ ——安装螺栓处由于托架所受力矩而引起的力（N）；

$L_1, L_2$  是从托架翻转轴线到相应螺栓中心线间的距离 (mm);

本试验台中第 2、4、7、9 号螺栓下标为 1; 第 1、5、6、10 号螺栓下标为 2; 第 3、8 号螺栓距托架翻转轴线距离为零 ( $L=0$ )。根据静力平衡条件得:

$$M = Qh_0 = \sum_{i=1}^{i=10} F_i L_i \quad (2)$$

$$M = Qh_0 = 2 \times 2 F_1 L_1 + 2 \times 2 F_2 L_2 \quad (N \cdot mm) \quad (3)$$

式中,  $Q$ ——托架受力点所受的力 (N)

$h_0$ ——托架受力点到接合面的距离 (mm), 见图 2。

本实验中取  $Q=3500N$ ;  $h_0=210mm$ ;  $L_1=30mm$ ;  $L_2=60mm$ 。

则第 2、4、7、9 号螺栓的工作载荷为:

$$F_1 = \frac{Qh_0 L_1}{2 \times 2(L_1^2 + L_2^2)} \quad (N) \quad (4)$$

第 1、5、6、10 号螺栓的工作载荷为:

$$F_2 = \frac{Qh_0 L_2}{2 \times 2(L_1^2 + L_2^2)} \quad (N) \quad (5)$$

## (二) 螺栓预紧力的确定

本实验是在加载后不允许联接接合面分开的情况下来预紧和加载的。联接在预紧力的作用下, 其接合面产生挤压应力为:

$$\sigma_p = \frac{ZQ_0}{A} \quad (6)$$

悬臂梁在载荷  $Q$  力的作用下, 在接合面上不出现间隙, 则最

小压应力为:

$$\frac{ZQ_0}{A} - \frac{Qh_0}{W} \geq 0 \quad (7)$$

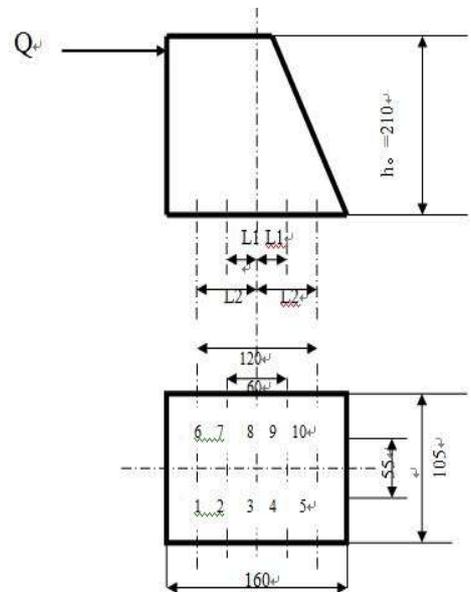


图 2 螺栓组的布置

式中,  $Q_0$ ——单个螺栓预紧力 (N);

Z——螺栓个数，Z=10；

A——接合面面积， $A=a(b-c)$  (mm)<sup>2</sup>；

W——接合面抗弯截面模量，

$$W = \frac{a^2(b-c)}{b} \quad (\text{mm}^3) \quad (8)$$

上式中，a=160 mm； b=105 mm； c=55mm。

$$\text{因此，} Q_0 \geq \frac{6Qh_o}{Za} \quad (9)$$

为保证一定安全性，取螺栓预紧力为：

$$Q_0 = (1.25 \sim 1.5) \frac{6Qh_o}{Za} \quad (10)$$

再分析螺栓的总拉力。

在翻转轴线以左的各螺栓（1、2、6、7号螺栓）被拉紧，轴向拉力增大，其总拉力为

$$Q_i = Q_0 + F_i * \frac{C_L}{C_L + C_F} \quad (11)$$

或

$$F_i = (Q_i - Q_0) \frac{C_L + C_F}{C_L} \quad (12)$$

在翻转轴线以右的各螺栓（4、5、9、10号螺栓）被放松，轴向拉力减小，总拉力为：

$$Q_i = Q_0 - F_i \frac{C_L}{C_L + C_F} \quad (13)$$

或

$$F_i = (Q_0 - Q_i) \frac{C_L + C_F}{C_L} \quad (14)$$

式中  $\frac{C_L}{C_L + C_F}$  ——螺栓的相对刚度；

$C_L$ ——螺栓刚度；

$C_F$ ——被联接件刚度；

螺栓上所受到的力是通过测量应变值而计算得到的，根据虎克定律

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (15)$$

式中， $\varepsilon$ ——应变值；

$\sigma$ ——应力 (Mpa)；

$E$ ——材料的弹性模量，对于钢材，取  $E=2.06 \times 10^5$  Mpa，则螺栓预紧后的应变

量为

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} = \frac{4Q_0}{E\pi d^2} \quad (16)$$

螺栓受载后总应变量为

$$\varepsilon_i = \frac{4Q_i}{E\pi d^2} \quad (17)$$

或

$$Q_i = \frac{E\pi d^2}{4} \varepsilon_i = K\varepsilon_i \quad (18)$$

式中， $d$ ——被测处螺栓直径 (mm)；

$K$ ——系数， $K = \frac{E\pi d^2}{4} (N)$

因此，可得到螺栓上的工作压力在翻转轴线以左的各螺栓（1、2、6、7号螺栓）的

工作拉力为：

$$F_i = K \frac{C_L + C_F}{C_L} (\varepsilon_i - \varepsilon_0) \quad (19)$$

在翻转轴线以右的各螺栓（4、5、9、10号螺栓）的工作拉力为：

$$F_i = K \frac{C_L + C_F}{C_L} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) \quad (20)$$

### （三）单螺栓试验台结构及工作原理

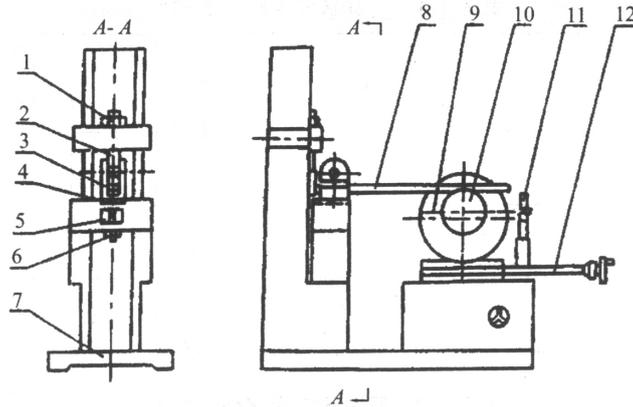


图3 单个螺栓试验台

单螺栓试验台部件的结构如图3所示。旋动调整螺帽1，通过支持螺杆2与加载杠杆8，即可使吊耳3受拉力载荷，吊耳3下有垫片4，改变垫片材料可以得到螺栓联接的不同相对刚度。吊耳3通过被试验单螺栓5、紧固螺母6与机座7相联接。电机9的轴上装有偏心轮10，当电机轴旋转时由于偏心轮转动，通过杠杆使吊耳和被试验单螺栓上产生一个动态拉力。吊耳3与被试验单螺栓5上都贴有应变片，用于测量其应变大小。调节丝杆12可以改变小溜板的位置，从而改变动拉力的幅值。

## 五、实验方法及步骤

### 1. 系统组成及联接

LSC-II型螺栓组及单螺栓联接静、动态综合实验系统，也可由LSC-II型螺栓组及单螺栓组合实验台、LSC-II螺栓综合实验仪、微机计算机及相应的测试软件所组成。如图7所示：

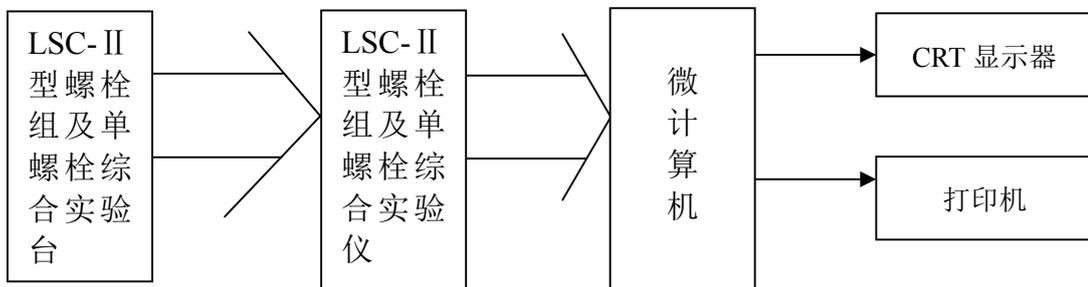


图7

在进行实验时，首先进行系统正确联接，即将螺栓实验台上1~12号信号输出线分别接入实验仪后板相应接线端子上，每路信号为4个接头，按黄、绿、黑、红从上至下联

接。

将计算机 RS232 串行口通过标准的通讯线，与实验仪背面的 RS232 接口联接。

打开实验仪面板上的电源开关，接通电源，并启动计算机。

注：应在可靠的联接好所有联线后再开启计算机及实验台电源，否则易损坏计算机。

启动螺栓实验应用程序进入程序主界面如图 8 所示：



图 8.程序主界面

## 2. 系统配置

启动主程序后，如果此设备第一次使用请先进行系统配置，点击系统配置进入图 9 界面。



图 9. 系统配置界面

如图 9 中的对话框请输入所在螺栓试验设备的编号,系统会自动配置所在设备一些系统设置参数.配置完成退出后这时你可以根据实验要求进入相应的实验。

### 3. 螺栓组静载实验

#### 1) 主界面及相关功能

点击“螺栓组平台”进入螺栓组静载实验界面，如图 10

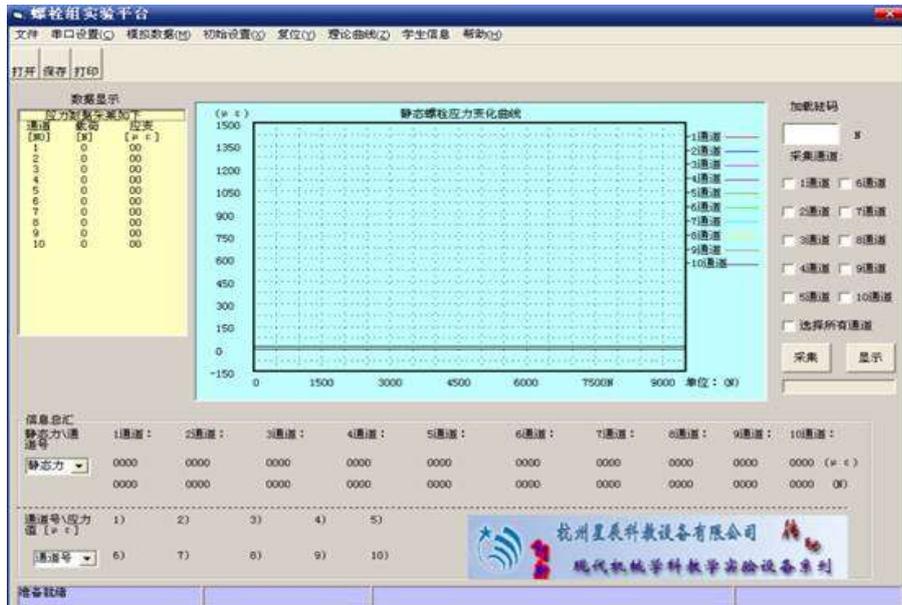


图 10:螺栓组静载试验界面

螺栓组静载实验界面由数据显示区，图形显示区，采集区，信息总汇，工具栏组成。

#### I .数据显示区

数据显示区显示当前螺栓检测的数据包括螺栓号，所受载荷及应变

#### II .图形显示区

显示螺栓所受力与应变的关系图

#### III.采集区

用户可通过选择采集通道中的复选框来选定所要检测的某几个通道的螺栓，或选择所有通道，当用户采集完需显示某几个通道螺栓数据时也可通过这些复选框来选定所要显示的螺栓受力情况。

#### IV.信息总汇

信息总汇有两个选择框，上一个选择框保存了最近十次采集的数据，用户选择任意选择其中一次显示数据及图形。如图 16



图 16

下一个选择框用户可以显示任意一个螺栓最近十次实验数据如图 17



图 17

## V.工具栏

包括文件，串口设置，模拟数据，初始设置，复位，理论曲线，学生信息，及帮助。

(1) 文件: 打开—可打开之前保存的数据文件; 保存数据—保存当前实验采集的数据; 保存图片—保存当前显示的图片; 打印—打印当前的图片, 相关数据, 及系统的一些参数; 另存为—同保存数据, 退出—退出系统。

(2) 串口设置: 如果计算串口选择的是端口 2 需要在串口设置中选择 COM2(默认 COM1)

(3) 模拟数据: 显示出厂设置中的保存的模拟数据及图形

(4) 初始设置

包括标准参数设置, 较零, 加载预紧力, 标定及恢复出厂设置

① 标准参数设置(如图 18): 如果更换设置中相应的器件, 需修改其中的参数。(一般不建议修改)



图 18 螺栓组参数设置

②较零:当用户第一次使用此设备或反复做本实验时需要较零如下图:

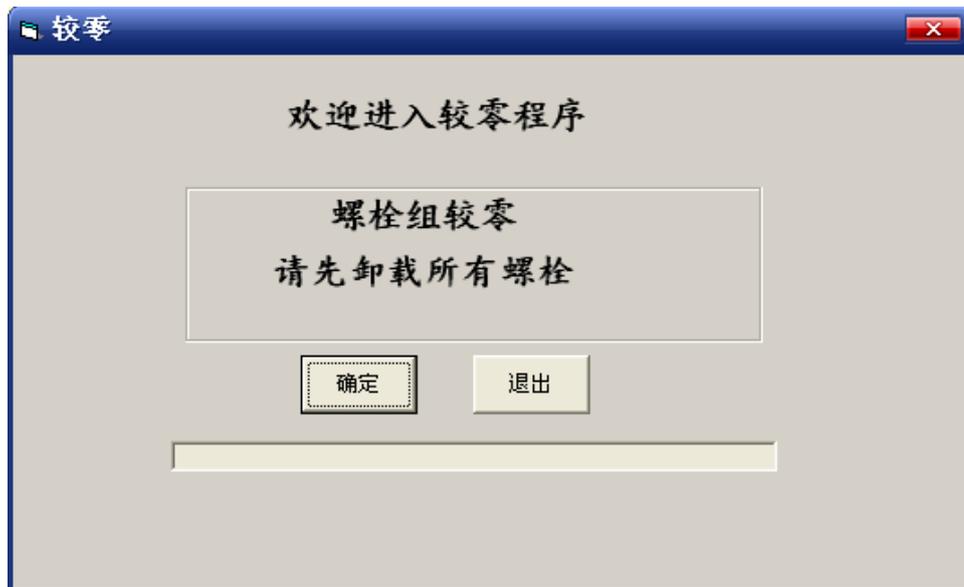


图 19

螺栓组较零前需先松开所有螺栓然后点击确定,系统会自动采集数据,按退出即关闭较零程序。

③加载预紧力:在螺栓组试验中在外挂砝码前需要先预紧螺栓,此功能能够实时采集螺栓预紧力大小。如图 20

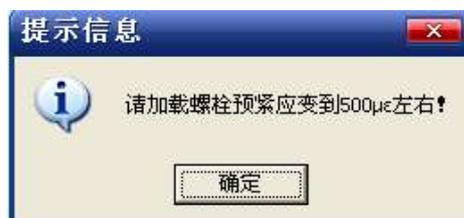


图 20 螺栓预紧力

④标定:当设备长期使用或其它原因造成实验数据严重不准确时,用户可自行标定系统参数(螺栓组标定系数)。如图下:



图 21

螺栓组标定分成三步:

第一步: 较零 (同上较零功能)

第二步: 螺栓预紧力加载

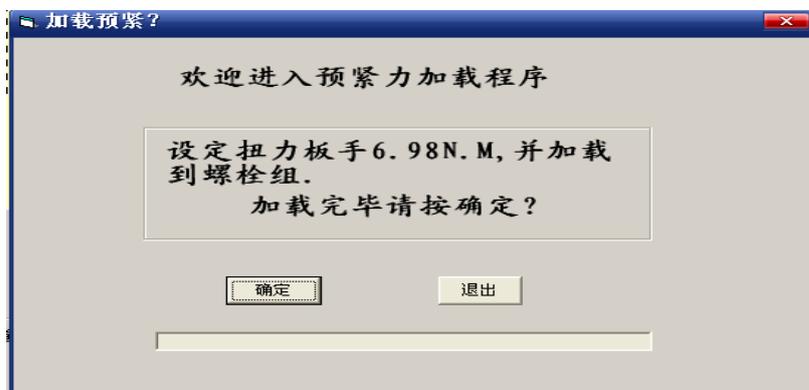


图 22

根据信息提示加载力到每个螺栓，加载完成后点击确定，系统会自动采集螺栓预紧力数据，点退出结束此功能项。

第三步:加载标准 3500N 砝码



图 23

外挂标准 3500N 砝码悬挂完成后点击确定。这时系统会再采集当前螺栓受力数据，采集完成后自动算出每个螺栓的标定系数并显示在下方的文本框中，用户可以保存数据或直接退出。注:标定的不准确会造成数据的失真，一般建议标定十次以上，用户需记录每次数据值最后做完数据处理请输入到标定结果栏中，通过选择其中的单选框用户可以修改或记录标定数据。修改记录完要记得保存数据方可有效。

#### ⑤恢复出厂设置:

当用户因标定或修改其它系统参数后而不能正常使用此系统时请选择此功能，恢复出厂设置会把系统数据恢复到原始出厂值。注:使用此功能会删除当前的所有数据不能恢复。

#### (5) 复位

此功能项会恢复程序到初始打开状态，但不会清除标定，较零，预紧力加载及系统参数值。

#### (6) 理论曲线

此功能会显示动态的理论曲线图供用户参考如图:

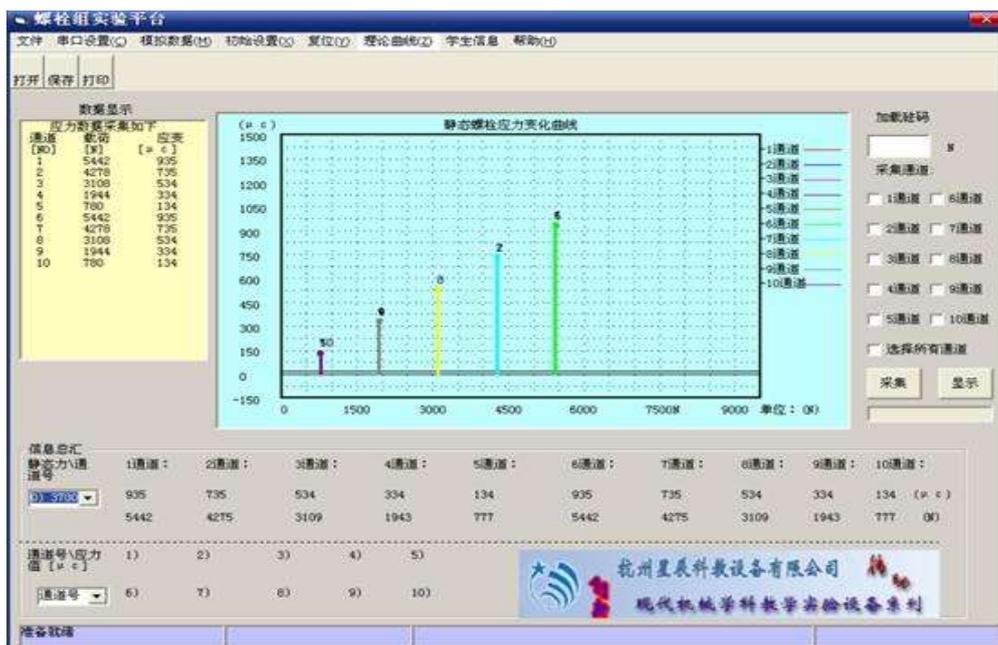


图 24

### (7) 学生信息

此功能项主要记录当前用户信息包括姓名，学号，班级，及设备使用时间。

### (8) 帮助

此功能包括使用说明及系统版本号，使用说明可以指导用户您很好使用本系统，你可以选择使用说明这一功能或按 F1

## 2) 实验操作方法及步骤

第一步：较零：松开螺栓组各螺栓。

点击工具栏中初始设置——较零



图 25

点击确定，系统就会自动较零。较零完毕后点击退出，结束较零。

第二步：给螺栓组加载预紧力：点击工具栏中初始设置——加载预紧力，出现如下图：

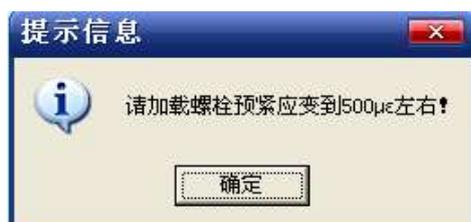


图 26

点击确定，此时用户可以用扳手给螺栓组加载预紧力，（注：在加载预紧力时应注意始终使实验台上托架处于正确位置，即使螺栓垂直托架与实验台底座平行。）系统则自动采集螺栓组的受力数据并显示在数据窗口，用户可以通过数据显示窗口逐个调整螺栓的受力到 500 微应变左右，加载预紧力完毕。

第三步：给螺栓组加载砝码：加载前先在程序界面加载砝码文本框中输入所加载的砝码的大小并选择所要检测的通道（如图 27）：

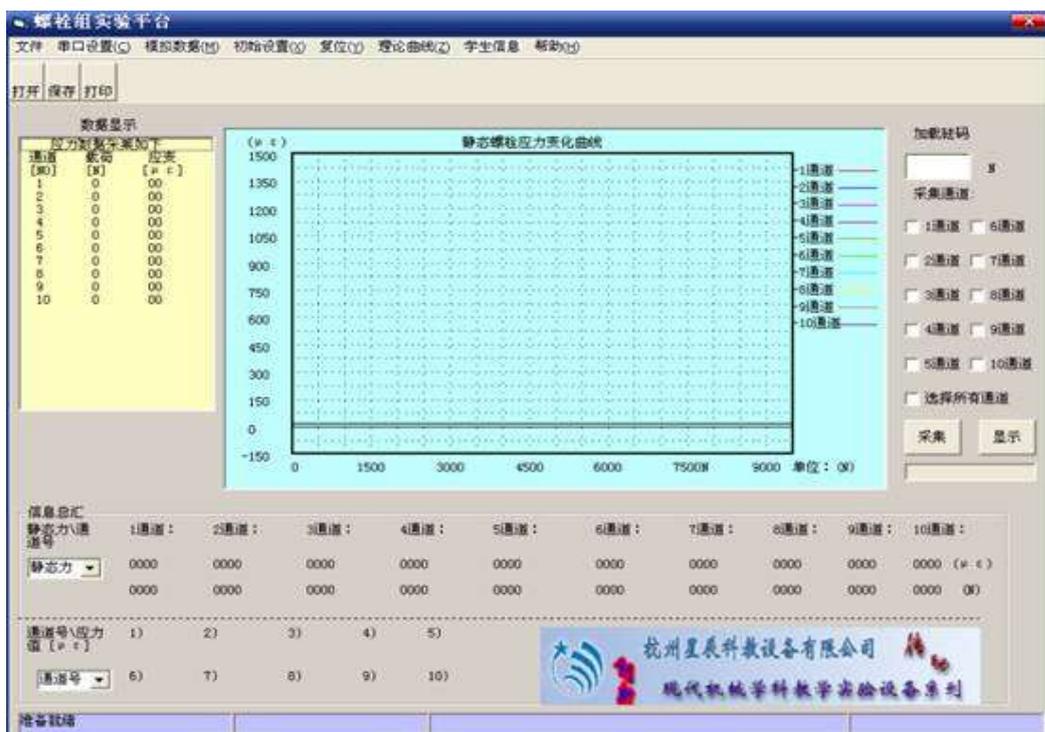


图 27

然后悬挂好所要加载的砝码，再点击采集，此时系统则会把加载砝码后的数据实时的采集上来，等到采集上来的数据稳定时点击停止按钮，这时系统停止采集，并将数据 B 图像显示在应用程序界面上，如图 28 所示：

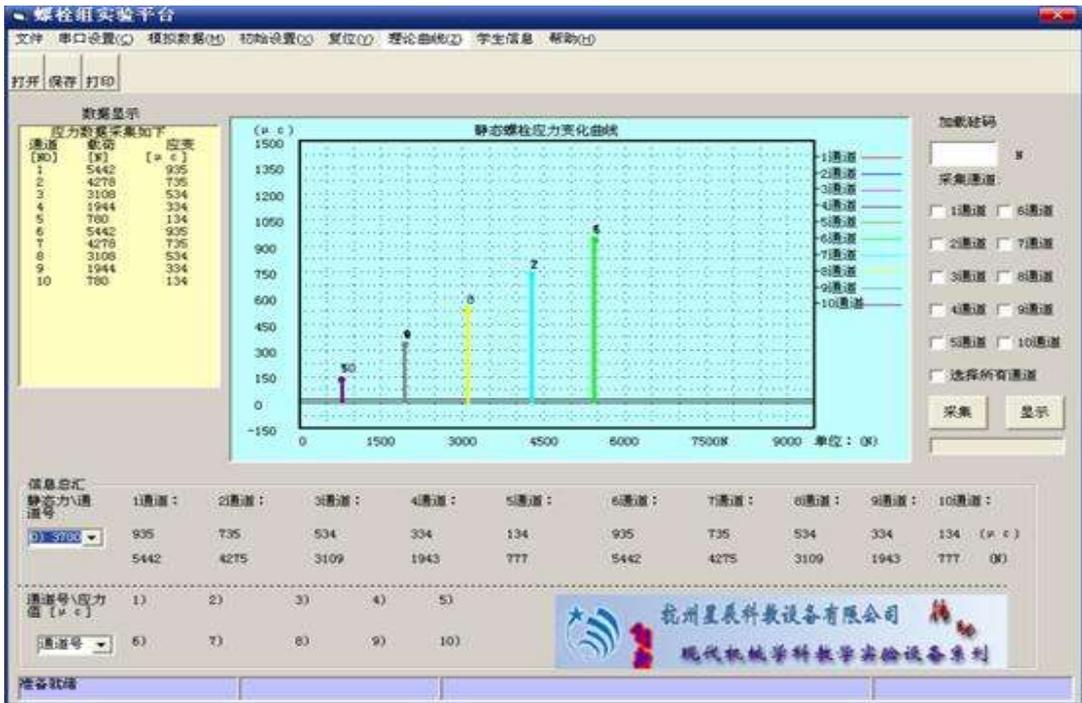


图 28

#### 4. 单螺栓静、动载试验

##### 1) 主界面及相关功能

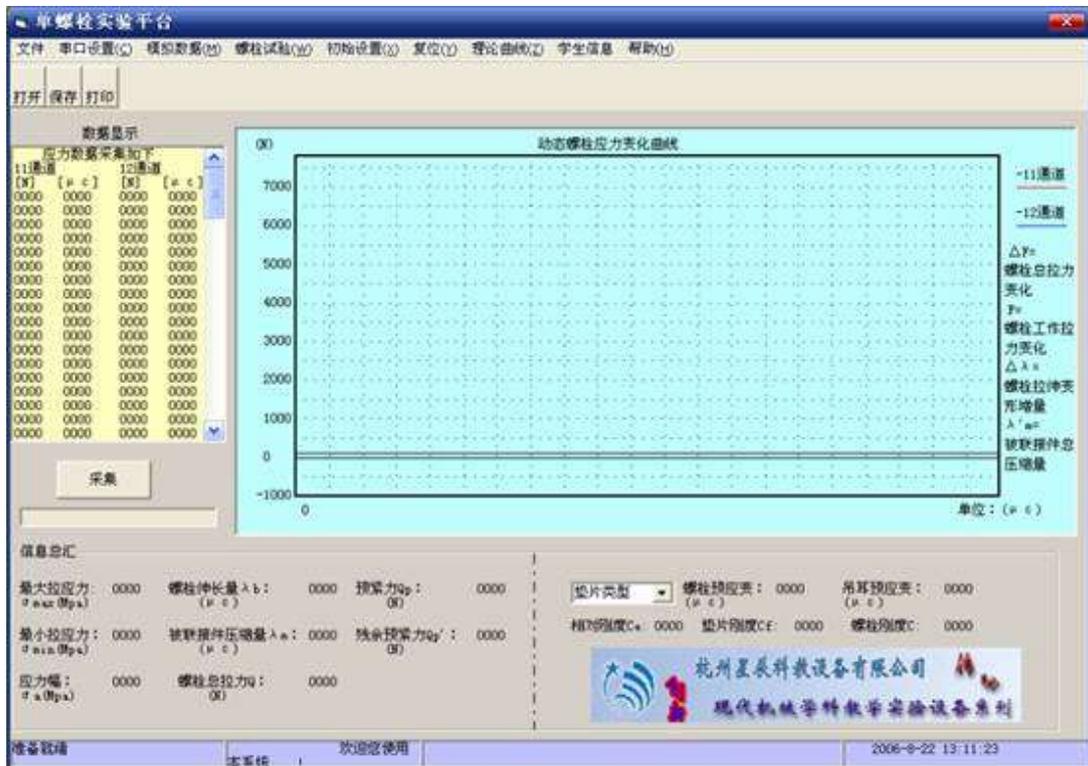


图 29 单螺栓界面

单螺栓界面主要实现相对刚度测量和螺栓动载荷实验。工具栏有文件，串口设置，模拟数据，螺栓试验，初始设置，复位，理论曲线，学生信息，帮助组成。

(1) 文件: 打开—可打开之前保存的数据文件；保存数据—保存当前实验采集的数据；保存图片—保存当前显示的图片；打印—打印当前的图片, 相关数据, 及系统的一些参数；另存为—同保存数据, 退出—退出系统。

(2) 串口设置: 如果计算串口选择的是端口 2 需要在串口设置中选择 COM2 (默认 COM1)

(3) 模拟数据: 显示出厂设置中的保存的模拟数据及图形。

(4) 螺栓试验: 包括标准参数设置, 相对刚度测量及动载荷实验。

(5) 初始设置

包括较零, 标定, 恢复出厂设置;

①较零: 当用户第一次使用此设备或反复做本实验时需要较零如下图:



图 30 较零

较零前需先卸载单螺栓及吊耳支撑螺杆, 即松开实验台中调整螺帽 1 和紧固螺母 6 (见图 3), 点击“确定”, 系统会自动进行较零, 较零完毕后按“退出”即结束较零。

②标定: 当设备长期使用或其它原因造成实验数据严重不准确时, 用户可自行标定系统参数(单螺栓及吊耳的标定系数)。如下图:

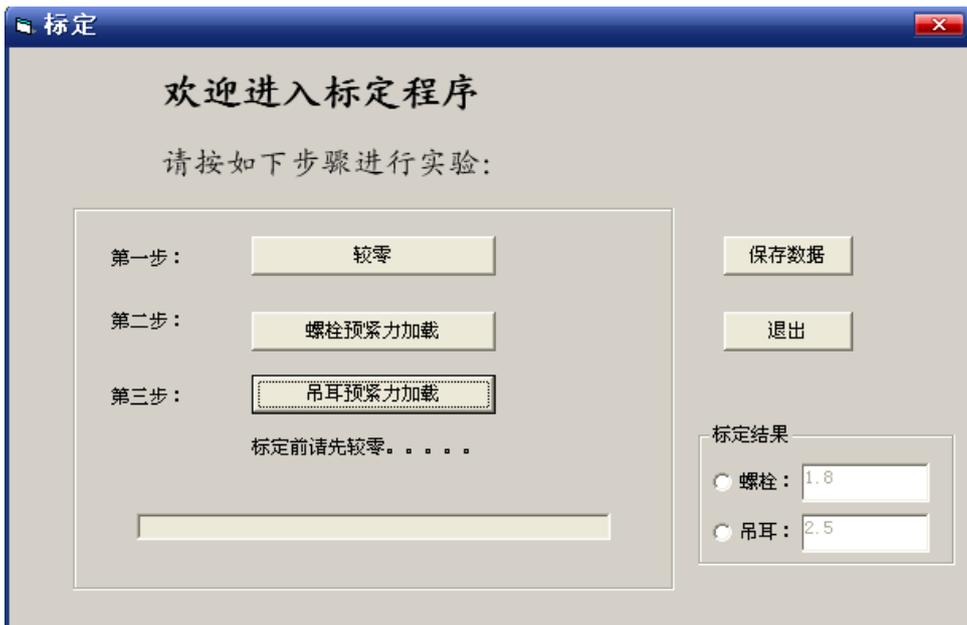


图 31 标定

标定分成三步:

第一步:较零同上栏较零功能;

第二步:螺栓预紧力加载如下图:

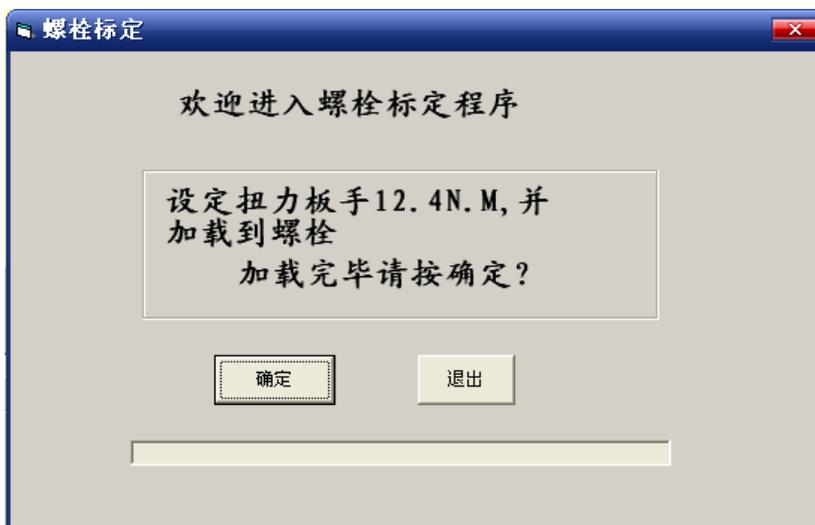


图 32 螺栓标定

此步骤根据界面提示信息，螺栓外力加载完毕后按确定，此时系统会自动采集数据，最后计算出螺栓标定的系数，按退出即退出此步骤；

第三步:吊耳预紧力加载如图



图 33 标定

此步骤根据界面提示信息，吊耳外力加载完毕后按确定，此时系统会自动采集数据，最后计算出吊耳标定的系数，按退出即退出此步骤；

标定结果显示在标定界面的右下角标定结果中，用户可选择保存数据或直接退出。（注：标定的不准确会造成数据的失真，一般建议标定十次以上，用户需记录每次数据值最后做完数据处理请输入到标定结果栏中，通过选择其中的单选框用户可以修改或记录标定数据。修改记录完要记得保存数据方可有效。）

### ③恢复出厂设置：

当用户因标定或修改其它系统参数后而不能正常使用此系统时请选择此功能，恢复出厂设置会把系统数据恢复到原始出厂值。注：使用此功能会删除当前的所有数据不能恢复。

### (6) 复位

此功能项会恢复程序到初始打开状态，但不会清除标定，较零，预紧力加载及系统参数值。

### (7) 理论曲线

此功能会显示动态的理论曲线图供用户参考如图：

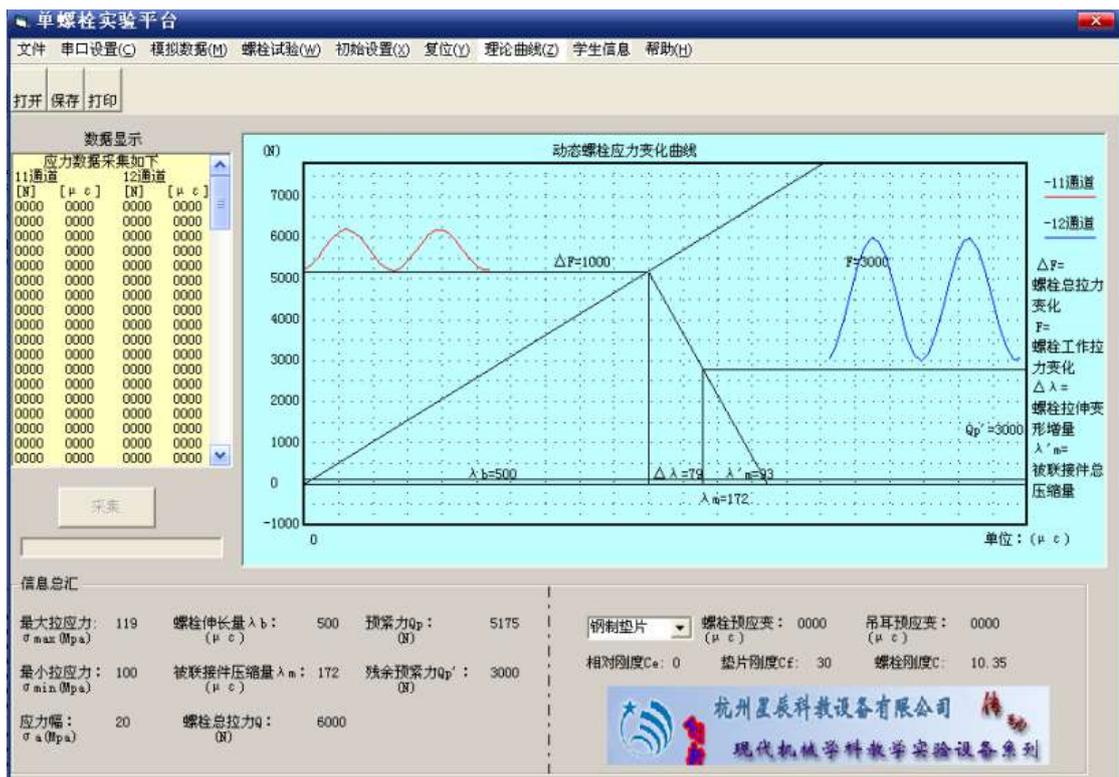


图 32 单螺栓动载试验

### (8) 学生信息

此功能项主要记录当前用户信息包括姓名，学号，班级，及设备使用时间。

### (9) 帮助

此功能包括使用说明及系统版本号，使用说明可以指导用户您很好使用本系统，你可以选择使用说明这一功能或按 F1。

## 2) 实验操作方法及步骤

点击单螺栓实验主界面工具栏中螺栓试验，单螺栓试验包括：标准参数设置，相对刚度测量及动载荷实验。

### (1)、标准参数设置(如图 35)：

如果更换设置中相应的器件，需修改其中的参数。(一般不建议修改)



图 35 螺栓参数计算公式

(2)、相对刚度测量(如图 36)：

测量垫片的刚度，实验步骤如下

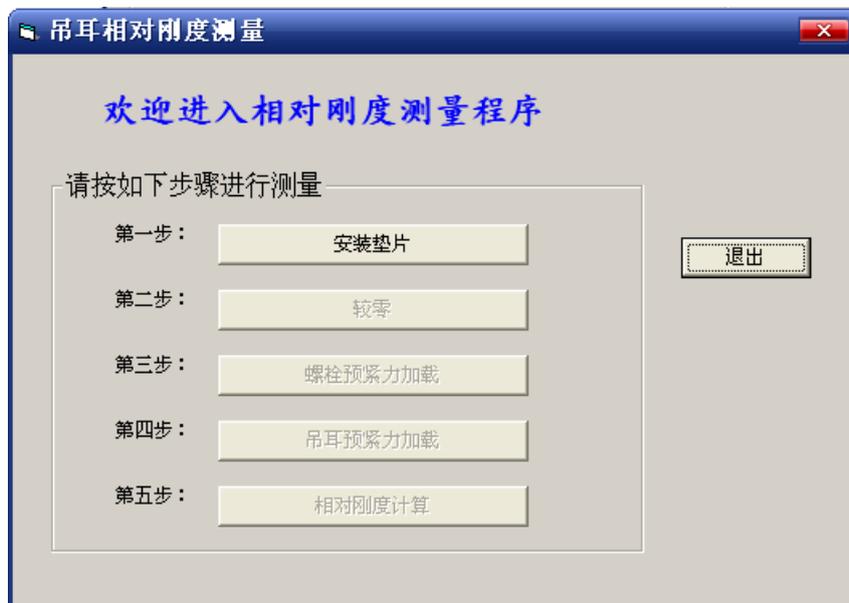


图 36

第一步:点击安装垫片键，选择安装的垫片类型，并点击确定。按提示卸载单螺栓及吊耳螺栓杆并安装好所选择的垫片，（参见图 3，即松开螺母 1 及螺母 6）。

第二步:点击螺栓较零，在螺栓及吊耳都未加载力前较零

第三步: 点击螺栓预紧力加载，如下图



图 37 预紧力加载

点击开始，系统会采集螺栓受力数据，这时用户可通过调节紧固螺母 6 对螺栓加载外力，并根据采集的应变数据值来判断所加载的力是否已经满足条件，当应变数据达到  $500 \mu \epsilon$  左右时点击确定表示加载完毕，系统自动保存数据退出，用户可以进入下一步操作。

第四步:点击吊耳较零，在卸载吊耳支撑螺杆状态下，按确定键，较零结束后退出。

第五步:点击吊耳预紧力加载，如下图:

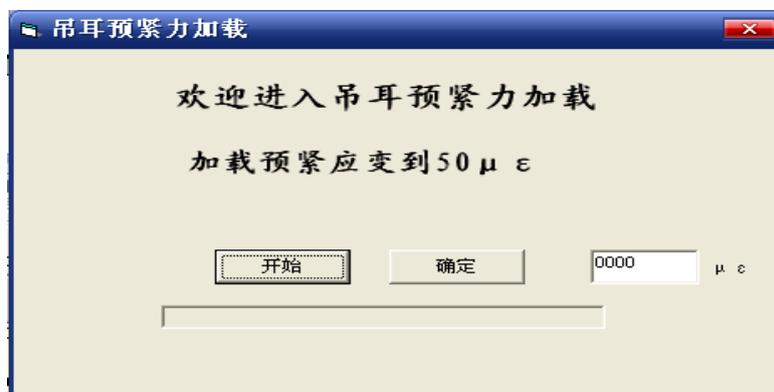


图 38 吊耳预紧力加载

点击开始，这时用户可通过旋转吊耳调整螺母 1（参见图 5）对吊耳加载到提示值，按确定结束预紧力加载。

第六步:点击相对刚度计算，如下图:



图 39 相对刚度计算

此操作会根据所采集的数据计算出相对刚度和被联接件刚度(垫片), 用户可对计算的数据保存如不保存直接按退出。

(3)、动载荷实验:包括较零、加载螺栓预紧力及数据采集。

见图 5, 首先旋转调节丝杆 12 摇手, 移动小溜板至最外侧位置, 并将加载偏心轮 10 转到最低点位置。

① 较零

点击单螺栓实验台主界面工具栏中初始设置, 操作方法见“初始设置”中的较零

② 加载螺栓预紧力

打开单螺栓实验台主界面工具栏中“螺栓试验”点击动载荷试验中加载螺栓预紧力, 如图 40:





2、被联接件刚度与螺栓刚度的大小对螺栓的动态应力颁布有何影响？

3、理论计算和实验所得结果之间的误差，是由哪些原因引起的？

## 七、实验报告

专业班级-----

姓名-----

指导老师-----

日期-----

〈一〉 实验目的

〈二〉 实验机构结构及工作原理图

〈三〉 实验步骤

〈四〉 数据和曲线

1、螺栓组静载试验

表 1 计算法测定螺栓上的力

螺栓号数										
螺栓预紧力										
螺栓预紧应变 $\varepsilon_0 \times 10^{-6}$										
螺栓工作拉力										

表 2 实验法测定螺栓上的力

螺栓号数										
螺栓 总应 变量	第一次测量									
	第二次测量									
	第三次测量									
	平均数									
由换算得到的 工作拉力 $F_i$										

绘制实测螺栓应力分布图

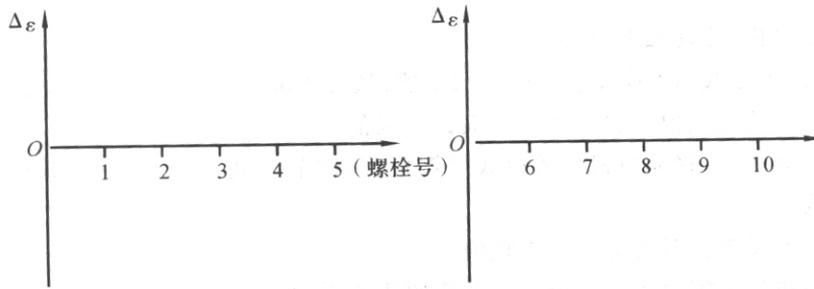


图 6 实测螺栓应力分布

## 2、单个螺栓静载及动载实验

### (1) 相对刚度测量

垫片材料	钢	环氧
$\epsilon$ (预紧)		
$\epsilon'$ (吊耳)		
$\epsilon_0$ (螺栓)		
$C_e$		

(2) 单个螺栓联接动载荷下螺栓、被联接件、载荷应力应变曲线图

〈五〉 实验结果分析