



齐鲁工业大学 (山东省科学院)  
QILU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SHANDONG ACADEMY OF SCIENCES

# 实验指导书

学院名称	机械与汽车工程学院
课程名称	机械原理、机械设计 2、机械元件
开课系 (教研室)	机械设计系
执笔人	白晓兰
审定人	高立营
修 (制) 订日期	2020 年

# 目 录

实验一、机构运动简图测绘及分析实验.....	1
实验二、齿轮范成原理实验 .....	9
实验三、动平衡实验 .....	15
实验四、创新及机构组装实验.....	23

# 实验一 机构运动简图测绘及分析实验

## 一、实验目的

熟悉机构运动简图的绘制方法，掌握从实际机构中测绘机构运动简图的技能；巩固机构结构分析原理及自由度计算方法。

## 二、实验设备及工具

1. 测绘用四种机构实物模型；
2. 测量用尺、分规、铅笔及草稿纸。

## 三、实验原理

### 1. 机构运动简图的常用符号

如图 1-1 至图 1-4 所示(详见《机械制图》GB4460—84“机构运动简图符号”)。

(1) 转动副，如图 1-1 所示。

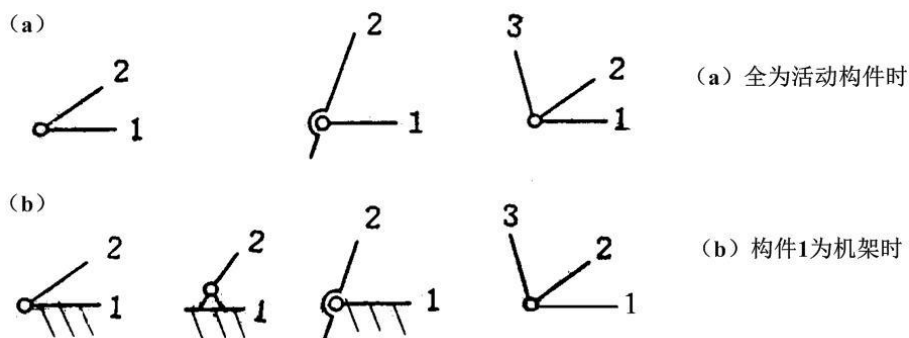


图 1-1 转动副

(2) 移动副，如图 1-2 所示。

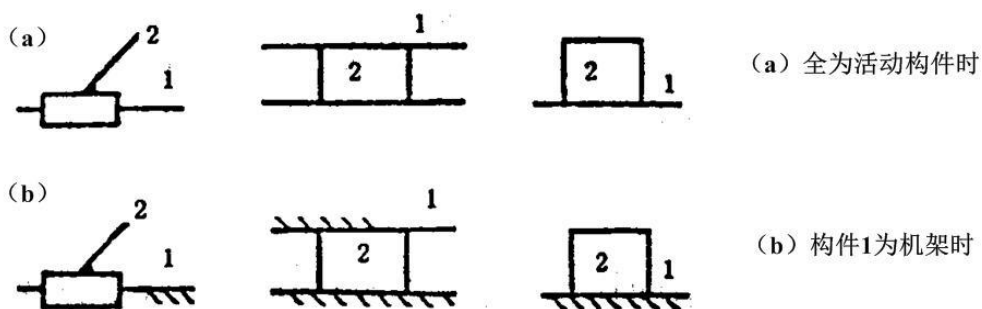


图 1-2 移动副

(3) 高副，如图 1-3 所示。

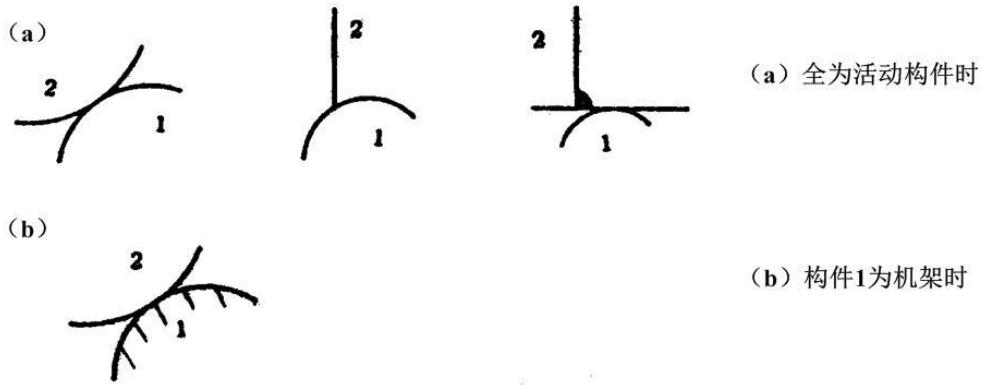


图 1-3 高副

(4) 构件图例，如图 1-4 所示。

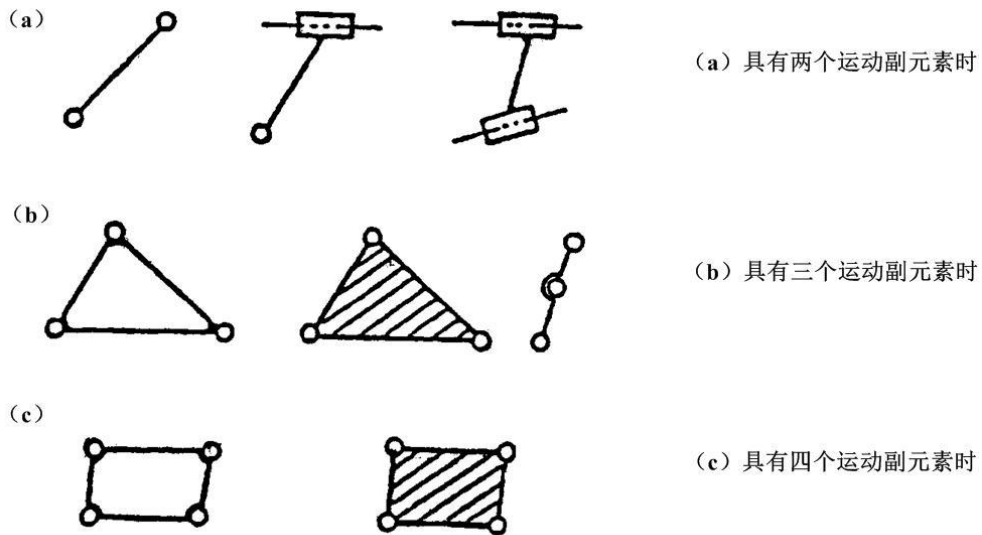


图 1-4 构件图例

## 2. 实验原理

机构各部分的运动，是由其原动件的运动规律、该机构中各运动副的类型（高副、低副，转动副、移动副等）和机构的运动尺寸来决定的，而与构件的外形、断面尺寸、组成构件的零件数目及固联方式等无关。所以，只要根据机构的运动尺寸，按一定的比例尺定出各运动副的位置，就可以用运动副的代表符号和简单的线条把机构的运动简图作出来。

正确的机构运动简图中各构件的尺寸、运动副的类型和相对位置以及机构组成形式应与原机构保持一致，从而保证机构运动简图与原机构具有完全相同的运动特性，以便根据该图对机构进行运动及动力分析。

所谓机构运动简图就是从运动的观点出发，用规定的符号和简单的线条按一定的尺寸比例来表示实际机构的组成及各构件间相对运动关系。

### 3. 绘制机构运动简图的方法及步骤

#### (1) 分析机构的实际构造和运动情况

任选原动件并缓慢转动，根据各构件之间有无相对运动，分清机构是由哪些构件组成的；按照机构运动的传递顺序，仔细观察各构件之间相对运动的性质，从而确定运动副的类型和数目。

#### (2) 合理选择投影面和原动件位置，作机构示意图

选择恰当的投影面，一般选择与大多数构件的运动平面相平行的平面为视图平面；合理选择原动件的一个位置，以便简单清楚地将机构的运动情况正确地表达出来。

不考虑各构件的具体结构形状，找出每个构件上的所有运动副，沿运动传递路线，用简单的线条联接该构件上的所有运动副元素来表示每一个构件。即用简单的线条和规定符号来代表构件和运动副，从而在所选投影面上作出机构的示意图。

#### (3) 计算机构的自由度并检验机构示意图是否正确

##### a、机构自由度计算公式： $F = 3n - 2P_L - P_H$

式中： $n$ ——机构活动构件数

$P_H$ ——平面低副个数

$P_L$ ——平面高副个数

##### b、核对计算结果

机构具有确定运动的条件为：机构的自由度大于零且等于原动件数。因本实验中各机构模型均具有确定的运动，故各机构计算自由度应与其原动件数相同；否则说明所作示意图有误，应对机构重新进行分析、作示意图。

注意：转动副和移动副虽同为低副，但因其运动性质不同，在作示意图时一定不能混淆互换。可单单通过自由度计算，又不能发现转动副与移动副相混淆的错误情况，故应将所作图中的各运动副类型与原机构进行逐一核对检查。

#### (4) 量取运动尺寸

运动尺寸是指与机构运动有关的、能确定各运动副相对位置的尺寸。在原机构上量取机构的运动尺寸，并将这些尺寸标注在机构示意图上。

#### (5) 绘制机构运动简图

选取适当的长度比例尺，依照机构示意图，按一定顺序进行绘图，并将比例尺和运动尺寸标注在图上。

长度比例尺的意义如下： $\mu_l = \frac{\text{实际长度}(m)}{\text{图示长度}(mm)}$

例如：某构件的长度  $L_{AB}$ ，绘在图上的长度  $AB=1000\text{mm}$ ，则长度比例尺为：

$$\mu_l = \frac{L_{AB}}{AB} = \frac{1}{1000} = 0.001 \frac{\text{m}}{\text{mm}}$$

(6) 用数字标注出各个构件，用大写字母标注出运动副，将机架画上阴影线，在原动件上标注表示运动方向的箭头，即为机构运动简图。

#### 四、例题

绘制出偏心轮机构的运动简图，并计算其自由度。

1. 选择手柄作为原动件并缓慢转动，根据各构件之间有无相对运动，分清机构是由哪些构件组成的。在图 1-5 (a) 中，机构由 1—机架，2—手柄（即曲柄，本例中取为原动件），3—连杆，4—滑块（即从动件）组成。

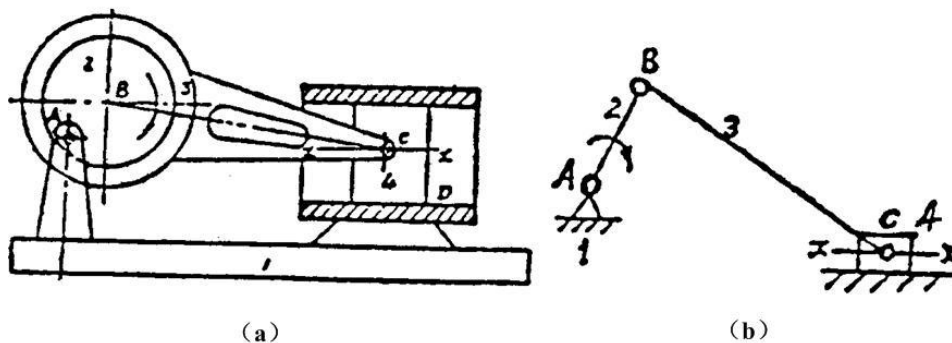


图 1-5 偏心轮机构的运动简图

2. 从原动件开始，按照机构运动的传递顺序，仔细观察各构件之间相对运动的性质，确定运动副的类型和数目。在图 1-5 (a) 中，曲柄 2 为原动件，则运动传递顺序为：曲柄 2，连杆 3，滑块 4。回转件的回转中心是相对回转表面的几何中心，而构件 2 可以绕构件 1 的偏心轴 A 作相对转动，故构件 3 与构件 2 在 B 点处也组成转动副；构件 4 与构件 3 在 C 点处又组成转动副；构件 4 沿 X-X 方向在构件 1 上作相对直线运动，组成移动副。

3. 合理选择原动件的一个位置，以便简单清楚地将机构的运动情况正确地表达出来，如图 1-5 (b) 所示，用规定的符号和简单的线条画出机构的示意图。

#### 4. 计算机构自由度

(1) 机构自由度计算公式： $F = 3n - 2P_L - P_H$

本例所作示意图中， $n = 3$ ， $P_L = 4$ ， $P_H = 0$ ，代入上式得：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$

(2) 核对计算结果

观察各构件的运动可知该机构的运动是确定的，则机构的自由度应大于零且等于原动件数，由计算得： $F=1=$ 原动件数，从而验证以上所作机构示意图的正确性。

### 5. 量取运动尺寸

在构件 2、3 上分别量取两相邻转动副中心之间的距离  $L_{AB}$ 、 $L_{BC}$ ；量取转动副 A 到滑块运动轨迹 X-X 之间的距离，并将所量尺寸标注在机构示意图上。

### 6. 作图（略）

## 五、实验内容

1. 选择一至两种实际机械模型，顺序测量各运动副间的相对位置，绘制机构运动简图。

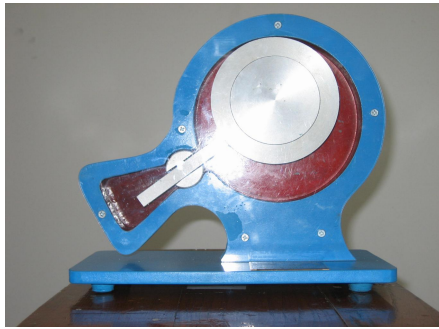
2. 计算上述实物或模型的机构自由度，并验证其运动是否确定。

3. 绘制上述实物或模型的结构立体图。

4. 根据教材图 5-33、图 5-34 的机构运动简图，用硬纸板（或 ABS 板）和按扣作出机构模型，并用这几种机构构想出几种概念产品。

5. 完成实验报告。

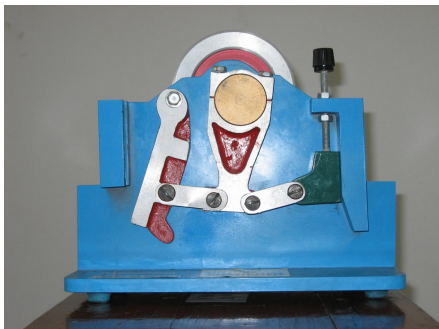
## 六、机械模型



附图 1-1



附图 1-2



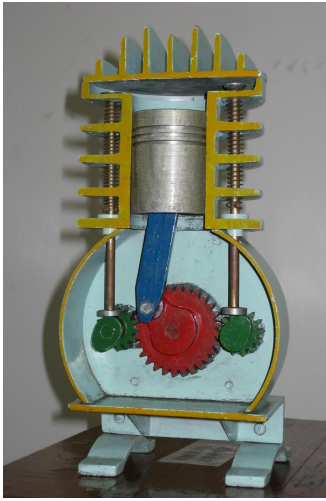
附图 1-3



附图 1-4



附图 1-5



附图 1-6



附图 1-7



# 实验一 机构运动简图测绘及分析实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 班级：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 成绩：\_\_

同组者姓名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

一、实验目的

二、测绘机构运动简图及计算自由度

三、机构的自由度计算及运动确定性判断结果

#### 四、思考题

1. 机构运动简图应包括哪些内容？
2. 原动件选取不同、原动件位置不同对绘制机构运动简图有什么影响？
3. 在绘制机构运动简图时，应标注哪些尺寸？

#### （五）收获和体会

## 实验二 齿轮范成原理实验

### 一、实验目的

1. 掌握范成法切制渐开线齿轮的原理，观察齿轮渐开线齿廓及齿根过渡曲线的形成过程。
2. 了解齿轮轮齿的根切现象，产生的原因和发生根切后的齿形。
3. 了解应用变位法避免根切及变位后所范成的齿形。
4. 比较标准齿轮和变位齿轮的异同点。

### 二、实验设备与工具

1. 齿轮范成仪、剪刀。
2. 学生自备计算器、圆规、三角尺、两支不同颜色的铅笔或圆珠笔、A4 绘图纸。

### 三、实验原理和实验方法

范成法是利用一对齿轮相互啮合时其共轭齿廓互为包络线的原理加工轮齿的一种方法。加工时，其中一轮为刀具，另一轮为轮坯，二者相对滚时，好像一对齿轮互相啮合传递运动一样；同时刀具还沿轮坯的轴向作切削运动，最后在轮坯上被加工出来的齿廓就是刀具刀刃在各个位置的包络线。为了看清楚齿廓形成的过程，可以用图纸作轮坯。在不考虑切削和让刀运动的情况下，刀具与轮坯相对滚动时，刀刃在图纸上所引出的各个位置的包络线，就是被加工齿轮的曲线。目前生产中大量使用渐开线齿轮，故刀具轮廓必然亦为渐开线。

由于在实际加工时，看不到刀具刀刃在各个位置形成包络线的过程，故通过齿轮范成仪来实现轮坯与刀具间的传动过程，并用笔将刀具刀刃的各个位置画在图纸上，这样我们就能清楚地观察到齿轮范成的过程。

齿轮范成仪的结构简图如图 2-1 所示，所用刀具为渐开线齿条刀 2，刀具用螺母 6 固定在溜板 3 上，可随溜板 3 一起在导轨内左右移动。圆盘 4 相当于被加工的毛坯，并绕着固定铰链回转，为保持齿条刀和被加工齿轮间的固定速比关系（齿条刀的移动速度 = 被加工齿轮的分度圆线速度），圆盘 4 和溜板 3 之间用二条钢带 7 来传动。

在范成仪中，齿条插刀的已知参数是：压力角 $\alpha$ ；齿顶高系数 $k_a^*$ ；径向间隙系数 $c^*$ ；模数 $m$ ；被加工齿轮分度圆直径 $d$ 。当切削标准齿轮时，将刀具中心线调节至与被加工齿轮分度圆相切的位置（或使刀具的齿顶与被加工齿轮的齿根圆相切）；当加工正移距修正齿轮时，要重新调节刀具中线的位置，其移距值 $x_m$ 由横拖板端面上的刻度读出（或使刀具的齿顶与变位齿轮的齿根圆相切）。

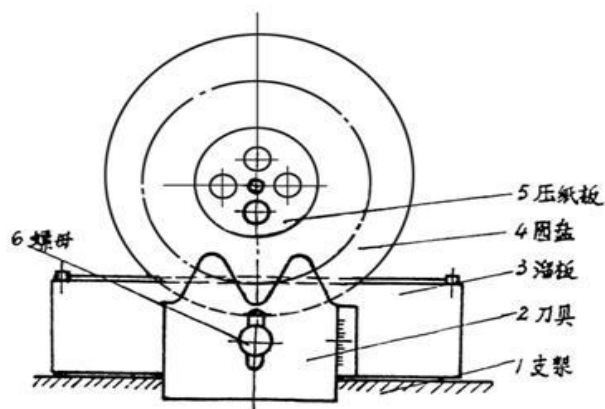


图 2-1 齿轮范成仪的构造

#### 四、实验步骤

1. 根据已知刀具的模数  $m$ 、压力角  $\alpha$  和被加工齿轮的齿数  $z$ ，计算被加工的标准齿轮与移距修正齿轮的分度圆、基圆、齿根圆及齿顶圆直径。

2. 将上述各圆分别画在绘图纸上（只画半圆即可），然后将纸剪成比最大的齿顶圆直径略大 1~2mm 的半圆形作为轮坯。

3. 把代表轮坯的图纸放在圆盘上，将刀具移至机架的正中位置，使半圆正对刀具，将图纸中心与圆盘中心（有两种尺寸  $D=10\text{mm}$  或  $D=52\text{mm}$ ）对准后用压环 7 压住。

4. 对刀：即调节刀具中心线，使在切削标准齿轮时，刀具分度线与被加工齿轮的分度圆相切（或刀具齿顶与轮坯根圆向切）。

5. 切削齿廓时，先将刀具推至范成仪的一端，然后每当向另一端移动一个小的距离时(2~3mm)，即在代表轮坯的图纸上用笔画出刀刃的齿廓线(代表已切去)，直到形成 2~3 个完整的轮齿时为止。

在上述过程中应注意轮坯上齿廓形成的过程。

6. 观察标准渐开线齿廓有无根切现象。如有根切则分析其原因。

7. 根据你所确定的移距系数  $x$  和移距量  $x_m$ ，在同一张标准渐开线齿廓上，重新调节刀具（先外移  $x_m$ ），使在切削正变位齿轮和负变位齿轮时的位置上，重复步骤 4，用另一种颜色的笔画刀具刀刃齿廓线，也形成 2~3 个完整齿为止。

8. 比较所得标准齿轮、正变位齿轮和负变位齿轮的齿厚、齿间距、周节、齿顶厚、根圆、顶圆、分度圆和基圆相对变化的特点。

#### 五、实验要求

(1) 认真预习实验指导书；

(2) 计算好标准、正变位、负变位三种齿形的齿顶圆、齿根圆、分度圆和基圆直径并且把各圆画在图纸上（如图 2-2 缩小图所示三等分）；

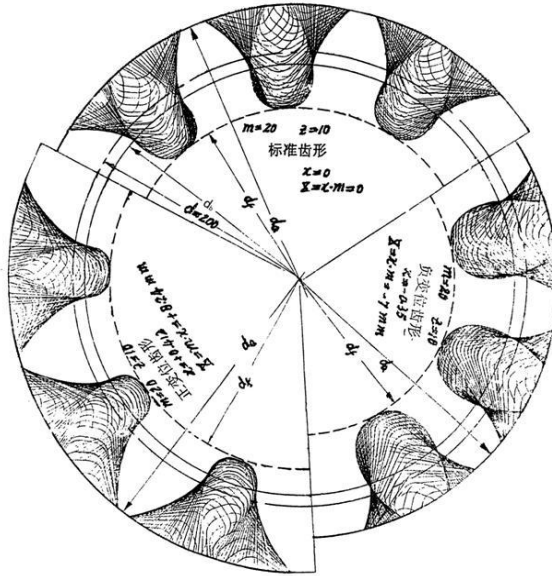


图 2-2 齿形齿 (缩小)

由于  $z=10$ ，标准齿轮产生根切，（图示的黑影部分）故负变位齿形产生更严重的根切现象，工程上不产生此种齿形。

#### 六、思考题

1. 什么叫正变位？什么叫负变位？
2. 正变位、负变位过大的齿轮会出现哪些不良现象？
3. 为什么齿条刀具能切出齿轮的渐开线齿廓？
4. 通过实验说明你所观察到的根切现象是怎样的？是由于什么原因？根切现象发生在基圆内还是发生在基圆之外？避免根切的方法有哪些？

## 实验二 齿轮范成原理实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 班级：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 成绩：\_\_

同组者姓名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

### 一、原始数据

	齿条刀具基本参数				被加工齿轮的参数	
组别	$m$	$\alpha$	$h_a^*$	$c^*$	齿数	分度圆直径 $d$ (mm)
A	20	20°	1	0.25	10	

### 二、齿轮几何参数计算

序号	项目名称	计算公式	计算结果			结果比较	
			标准齿轮	正变位	负变位	正变位	负变位
1	最小变位系数	$x_{\min} = h_a^* \frac{z_{\min} - z}{z_{\min}}$					
2	实取变位系数	$x$					
3	分度圆半径	$r = mz / 2$					
4	基圆半径	$r = mz \cos \alpha / 2$					
5	齿顶高	$h_a = (h_a^* + x)m$					
6	齿根高	$h_f = (h_a^* + c^* - x)m$					
7	全齿高	$h = h_a + h_f$					
8	齿顶圆半径	$r_a = r + h_a$					
9	齿根圆半径	$r_f = r - h_f$					
10	分度圆齿距	$p = \pi m$					
11	分度圆齿厚	$s = \frac{1}{2} \pi m + 2xm \tan \alpha$					
12	分度圆齿槽宽	$e = p - s$					
13	齿顶圆齿厚	$s_a = r_a s / r$					
14	基圆齿厚	$s_b = s \cos \alpha + d_b \operatorname{inv} \alpha$					

注：在结果比较栏，尺寸比标准齿轮大的填入“+”号，小的填入“-”号，一样的填入“0”

三、附绘制的齿廓图（注上有关的尺寸）

#### 四、思考题



## 实验三 动平衡实验

### 一、实验目的

1. 巩固和验证回转构件动平衡的基本概念，加深对转子动平衡概念的理解；
2. 掌握刚性转子动平衡实验的原理及基本方法。

### 二、实验设备和工具

1. JPH-I型动平衡实验台；
2. 试件，平衡块。

### 三、试验台结构与工作原理

#### 1. 动平衡试验台的结构

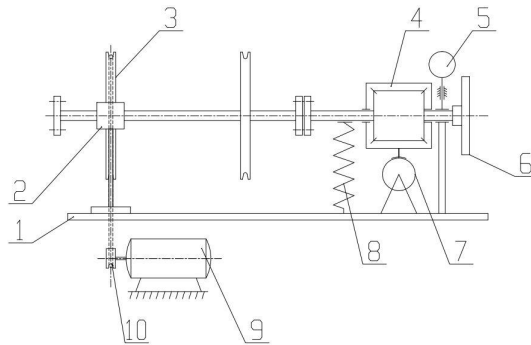


图 4-1 动平衡实验台结构简图

- 1.摆架 2.工字形板簧座 3.转子试件 4.差速器 5.百分表  
6.补偿盘 7.蜗杆 8.弹簧 9.电机 10.皮带

动平衡的结构如图 4-1 所示。待平衡的试件 3 安放在框形摆架上的支承滚轮上，摆架的左端固定在工字形板簧 2 中，右端呈悬臂。电动机 9 通过皮带 10 带动试件 3 旋转；当试件有不平衡质量存在时，则产生离心惯性力使摆架绕工字型板簧上下周期性地振动，通过百分表 5 可观察振幅的大小。

通过转子的旋转和摆架的振动，可测出转子试件的不平衡量（或平衡量）的大小和方位。测量系统由差速器 4 和补偿盘 6 组成。差速器 4 安装在摆架的右端，它的左端为传动输入端（ $n_1$ ）通过柔性联轴器与试件 3 连接；右端为输出端（ $n_3$ ），与补偿盘相连接。

差速器是由齿数和模数相同的四个圆锥齿轮和一个外壳为蜗轮的转臂 H 组成的周转轮系。

（1）当差速器的转臂蜗轮不转动时  $n_H=0$ ，则差速器为定轴轮系，其传动比为

$$i_{31} = \frac{n_3}{n_1} = -\frac{z_1}{z_3} = -1$$

$$n_3 = -n_1 \quad (4-1)$$



显然，补偿盘的转速  $n_3$  与转子的转速  $n_1$  大小相等转向相反。

(2) 当  $n_1$  和  $n_H$  都转动时则为差动轮系，传动比按周转轮系公式计算



$$(4-2)$$

蜗轮的转速  $n_H$  是通过手柄摇动蜗杆 7，经蜗杆轮副在大速比的减速后得到。因此蜗轮的转速  $n_H \ll n_1$ 。

由式 (4-2) 可看出：当  $n_H$  与  $n_1$  同向时，，这时  $n_3$  方向不变，且与  $n_1$  反向，但速度减小。当  $n_H$  与  $n_1$  反向时，，这时  $n_3$  仍与  $n_1$  反向，但速度增加了。由此可知，当手柄不动时，补偿盘的转速大小与试件相等，转向相反。正向摇动手柄（蜗轮转速方向与试件转速方向相同），补偿盘减速，反向摇动手柄，补偿盘加速。这样就可改变补偿盘与试件圆盘之间的相对相位角。

## 2. 动平衡机的工作原理

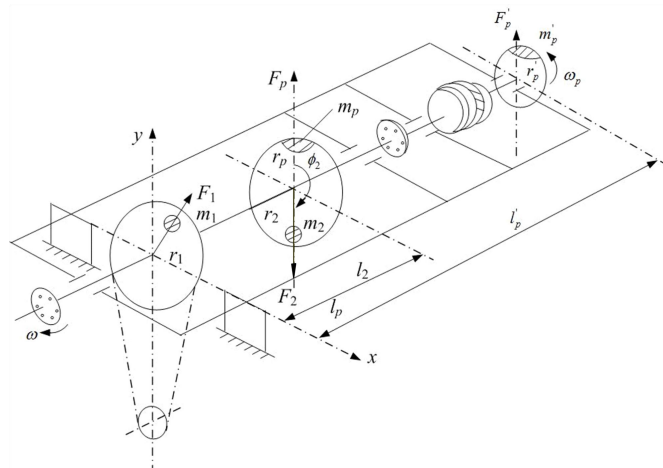


图 4-2 动平衡机的工作原理

由于转子材料的不均匀、制造的误差、结构的不对称等诸因素使转子存在不平衡质量。因此当转子旋转后就会产生离心惯性力，组成一个空间力系，使转子动不平衡。要使转子达到动平衡，则必须满足空间力系的平衡条件：

$$\begin{cases} \bar{F}=0 \\ \bar{M}=0 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \bar{M}_A=0 \\ \bar{M}_B=0 \end{cases} \quad (4-3)$$

这就是转子动平衡的力学条件。

如图 4-2 所示，当试件上有不平衡质量存在时，试件转动后产生离心惯性力  $F = \omega^2 mr$ ，它可分解成垂直分力  $F_y$  和水平分力  $F_x$ 。由于平衡机的工字型板簧和摆架在水平方向（绕  $y$  轴）的抗弯刚度很大，所以水平分力  $F_x$  对摆架的振动影响很

小可忽略不计。而在垂直方向(绕  $x$  轴)的抗弯刚度小,因此在垂直分力产生的力矩  $M=F_y \cdot L=\omega^2 m r \cos \phi \cdot L$  的作用下,使摆架产生周期性的上下振动(摆架振幅大小)的惯性力矩为:

$$M_1 = 0$$

$$M_2 = \omega^2 m_2 r_2 l_2 \cos \phi_2$$

要使摆架不振动,必须要平衡力矩  $M_2$ 。在试件上选择圆盘作为平衡平面,加平衡质量  $m_p$ 。则绕  $x$  轴的惯性力矩  $M_p = \omega^2 m_p r_p l_p \cos \phi_p$ 。要使这些力矩得到平衡,可根据公式(4-3)来解决,即

$$\sum \bar{M}_A = 0 \quad M_2 + M_p = 0$$

$$\omega^2 m_2 r_2 l_2 \cos \phi_2 + \omega^2 m_p r_p l_p \cos \phi_p = 0 \quad (4-4)$$

在(4-4)式中消去  $\omega^2$  后得:

$$m_2 r_2 l_2 \cos \phi_2 + m_p r_p l_p \cos \phi_p = 0 \quad (4-5)$$

要使(4-5)式为零,必须满足:

$$\begin{cases} m_2 r_2 l_2 = m_p r_p l_p \\ \cos \phi_2 = -\cos \phi_p = \cos(180^\circ + \phi_p) \end{cases} \quad (4-6)$$

满足上式(4-6)的条件,摆架就不振动了。式中  $m$ (质量)和  $r$ (矢量)之积称为质径积,  $mrl$  称为质径矩,  $\phi$  称为相位角。

转子不平衡质量的分布是有很大的随机性,而无法直观判断他的大小和相位。因此很难用公式来计算平衡量,但可用实验的方法来解决,其方法如下:

选补偿盘作为平衡平面,补偿盘的转速与试件的转速大小相等但转向相反,这时的平衡条件也可按上述方法来求得。在补偿盘上加一个质量  $m_p'$ (图 4-2),则产生离心惯性力对  $x$  轴的力矩

$$M_p' = m_p' \omega^2 r_p' l_p' \cos \phi_p'$$

根据力系平衡公式(4-3)得:

$$\sum \bar{M}_A = 0 \quad M_2 + M_p = 0$$

$$m_2 r_2 l_2 \cos \phi_2 + m_p' r_p' l_p' \cos \phi_p' = 0$$

要使上式成立必须有

$$\begin{cases} m_2 r_2 l_2 = m_p' r_p' l_p' \\ \cos \phi_2 = -\cos \phi_p' = \cos(180^\circ - \phi_p') \end{cases} \quad (4-7)$$

公式(4-7)与(4-6)基本上是一样,只有一个正负号不同。从图 4-3 可进一步比较两种平衡面进行平衡的特点。图 4-3 是满足平衡条件时平衡质量与不平衡质

量之间的相位关系。

图 4-3(a)为平衡平面在转子上的平衡情况,在试件旋转时平衡质量与不平衡质量始终在一个轴平面内,但矢径方向相反。

图 4-3(b)补偿盘为平衡平面, $m_2$  和  $m_p'$ 在各自的旋转中,只有在 $\varphi_p'=0^\circ$ 或  $180^\circ$ , $\varphi_2=180^\circ$ 或  $0^\circ$ 时,它们处在垂直轴平面内,与图 4-3(a)一样达到完全平衡。其他位置时它们的相对位置关系如图 4-3(c)所示,为 $\varphi_2 = 180^\circ - \varphi_p'$ 。图 4-3(c)这种情况, $y$  方向分力矩是满足平衡条件的,而  $x$  方向分力矩未满足平衡条件。

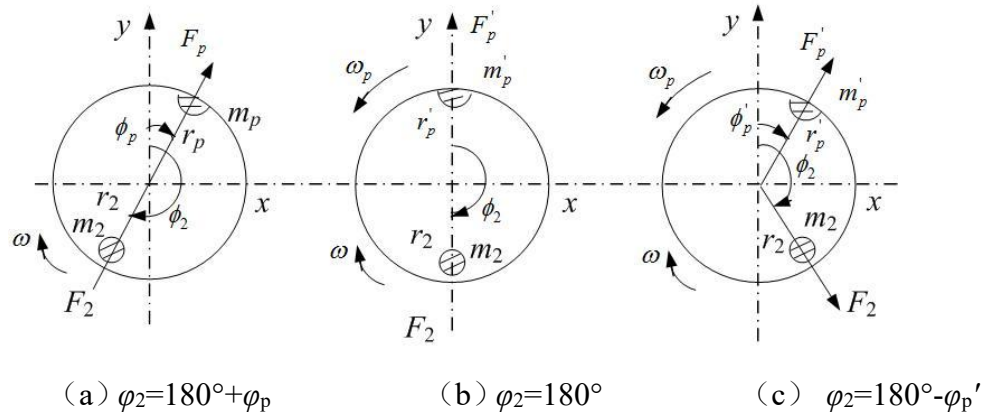


图 4-3 平衡质量与不平衡质量之间的相位关系

用补偿盘作为平衡平面来实现摆架的平衡可进行下列操作:在补偿盘的任何位置(最好选择在靠外缘处)试加一个适当的质量,在转子旋转的状态下摇动摇杆手柄使蜗轮转动(正转或反转),这时补偿盘减速或加速转动。摇动手柄同时观察百分表的振幅使其达到最小,这时停止转动手柄。停机后在原位置再加一些平衡质量,再开机测试,转动手柄,重复循环此操作,直到百分表跳动很小,可认为摆架已达到平衡。最后将调整好的最小振幅时的手柄位置保持不动。停机后用手转动转子使补偿盘上的平衡质量转到最高位置,这时的垂直轴平面就是  $m_p'$  和  $m_2$  同时存在的轴平面。

摆架平衡不等于试件平衡,还必须把补偿盘上的平衡质量转换到试件的平衡面上。选试件圆盘 2 为待平衡面,根据平衡条件

$$m_p r_p l_p = m_p' r_p' l_p'$$

$$m_p r_p = m_p' r_p' l_p' / l_p \quad (4-8)$$

或

$$m_p = m_p' r_p' l_p' / r_p l_p$$

若取

$$r_p' l_p' / r_p l_p = 1$$

则

$$m_p = m'_p$$

(4-8) 式中,  $m'_p r'_p$  是所加的补偿盘上平衡量质径积,  $m'_p$  为平衡块质量,  $r'_p$  是平衡块所处位置的半径 (有刻度指示),  $l_p$ 、 $l'_p$  是平衡面至板簧的距离, 这些参数都是已知的, 这样就求得了在平衡面 2 上应加的平衡量质径积  $m_p r_p$ 。一般情况下, 先选择半径  $r$  求出  $m$  加到平衡面 2 上, 其位置在  $m'_p$  最高位置的垂直轴平面中。

本动平衡机及转子在设计时已取  $r'_p l'_p / r_p l_p = 1$ , 所以  $m_p = m'_p$ , 这样可取下补偿盘上平衡块  $m'_p$  (平衡块) 直接加到待平衡面相应的位置, 这样就完成了第一步平衡工作。根据力系平衡条件 (4-3), 到此才完成了一项  $\sum \bar{M}_A = 0$ , 还必须做  $M_2 + M_p = 0$  的平衡工作, 才能使试件达到完全平衡。

第二步工作: 将试件从平衡机上取下重新安装成以圆盘 2 为驱动轮, 再按上述方法求出平衡面 1 上的平衡量 (质径积  $m_p r_p$  或  $m_p$ )。为此, 整个平衡工作全部完成。

#### 四、实验方法与操作步骤

实验前学生必须作好预习, 了解实验原理、掌握实验方法, 达到独立操作、独立完成。

JPH-I型动平衡实验台操作步骤如下:

1. 处水平位置 1、将平衡试件装到摆架的滚轮上, 把试件右端的联轴器盘与差速器轴端的法兰盘, 通过联轴器弹性过渡盘联接, 组成一个柔性联轴器。装上传动皮带。

2. 用手转动试件和摇动蜗杆上的手柄, 检查动平衡机各部分转动是否正常。松开摆架最右端的两对锁紧螺母, 调节摆架上面的支承弹簧使摆架, 检测摆架振动是否灵活。在差速器右端的支承板上安放百分表, 使之有一定的接触, 并随时注意振动大小。

3. 开机前卸下转子上的附加不平衡块和补偿盘上所有的平衡块。接上电源启动电机, 待摆架振动稳定后, 调整好百分表的位置并记录下振幅大小  $y_0$  格, 百分表的位置以后不要再变动, 停机。

4. 添加不平衡量: 在平衡盘的槽内距轴心半径为  $r_p$  处 (参见图 4-2 动平衡机的工作原理), 加上一个适当的平衡块 (如二块平衡块)。开机后观察百分表振幅变化。记录下振幅大小  $y_x$  和蜗轮位置角  $\beta_1$  (差速器外壳上有刻度指示), 停机。此时默认为  $y_x$  是需要平衡掉的不平衡量。

5. 平衡不平衡量: 在补偿盘的槽内距轴心半径为  $r'_p$  处 (参见图 4-2 动平衡机

的工作原理), 加上一个适当的平衡质量(一块平衡块)。开机后摇动手柄观察百分表振幅变化, 手柄摇到振幅最小时停止摇动。记录下振幅大小  $y_1$  和蜗轮位置角  $\beta_1$  (差速器外壳上有刻度指示), 停机。然后按照上述方法在原来加平衡块的地方再加一块平衡块, 手柄摇到振幅最小时停止摇动。记录下振幅大小  $y_2$  和蜗轮位置角  $\beta_2$  (差速器外壳上有刻度指示), 停机。重复上述方法, 直到当  $y_n < y_0$ 。

摇动手柄的方法: 蜗杆安装在机座上, 蜗轮安装在摆架上, 两者之间有很大的间隙。蜗杆转动到适当的位置可与蜗轮不接触, 这样才能使摆架自由的振动, 这时观察振幅才是正确的。摇动手柄蜗杆接触蜗轮使蜗轮转动, 这时摆架振动受阻, 反摇手柄使蜗杆脱离与蜗轮接触, 使摆架自由地振动, 再观察振幅。这样间歇性的使蜗轮向前转动, 并观察振幅变化, 最终找到振幅最小值的位置。

6. 在不改变蜗轮位置情况下, 停机后, 按转子转动方向用手转动转子使补偿盘上的平衡块转到最高位置。取下平衡块安装到转子的平衡面(圆盘 2)中相对应的半径为  $r_p$  处槽内, (参见图 4-2 动平衡机的工作原理)。

7. 解开联轴器, 开机让转子自由转动, 若振幅依然很小, 则第一步平衡工作结束。若还存在一些振幅, 可适当的调节一下平衡块的相位, 即在圆周方向左右移动一个平衡块进行微调相位和大小。

8. 将转子两端 180 度对调, 这时圆盘 2 为驱动盘, 圆盘 1 为平衡面。再按上述方法找出圆盘 1 上应加的平衡量。这样就完成了转子的全部平衡工作。

#### 注: 实验注意事项

1. 动平衡的关键是找准相位, 第一次就要把相位找准, 当试件转子接近平衡时相位就不灵敏了。所以  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  是主要位置角。

2. 若转子振动不明显可人为地加一些不平衡块。

3. 运行时间不宜太长, 隔一段时间应停下来检查机构联接是否松动。

4. 实验时必须注意安全。女生必须戴帽, 将长发盘于帽中。操作者必须紧扣衣袖扣。

5. 实验结束后, 按步骤拆除零件, 并在擦拭干净后涂上防锈油, 归放原处妥善保管。

#### 五、思考题

1. 当一个转子的平面已平衡后, 在平衡第二个平面时, 是否仍一定要使第一个平面通过摆动轴线? 为什么?

2. 动平衡实验法适用于哪些类型的转子, 转子经过平衡后是否满足静平衡条件? 为什么?

#### 六、实验报告

# 实验三 动平衡实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 班级：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 成绩：\_\_

同组者姓名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 一、试验机构及测试原理图

## 二、实验数据

### 1. 平衡试件转子初始位置平衡参数记录表

不加平衡块时：转速：\_\_\_\_\_ r/min 振幅  $y_0$  = \_\_\_\_\_ 格

序号	配重(克)	振幅 $y$ (格)	蜗轮位置角 $\beta$ (度)	转速 (r/min)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

### 2. 平衡试件转子位置两端对调 180 度平衡参数记录表

序号	配重(克)	振幅 $y$ (格)	蜗轮位置角 $\beta$ (度)	转速 (r/min)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

## 三、思考题

#### 四、心得与意见



## 实验四 创新及机构组装实验

### 一、实验目的

1. 加深学生对机构组成理论的认识，为机构创新设计奠定良好的基础；
2. 通过对典型机构的组装，掌握活动联接（运动副）和固定连接的特点；
3. 培养学生运用创新设计意识思维方法，组装各种不同的平面运动机构；
4. 训练学生的工程实践动手能力及综合设计的能力。

### 二、实验任务

1. 学生根据命题（选择实验指导书中提供或自拟）设计机构运动创新方案，画出机构运动简图；
2. 学生设计好机构运动方案，在 BR-CXD 型机构创新设计实验台搭接、运行，满足机构设计要求。

### 三、实验设备及工具

1. BR-CXD 型机构运动方案创新设计组装搭建实验台，配有实现旋转和直线运动的旋转电动机和直线电动机，配有的多功能零部件（包括齿轮、凸轮、带轮、槽轮、连杆、转动件、滑块，连接件等）。
2. 内六角扳手、开口扳手、橡胶锤、一字或十字螺丝刀、1 米卷尺、笔和纸。

### 四、实验原理

#### 1. 杆组的概念

由于平面机构具有确定运动的条件是机构的原动件数与机构的自由度数相等，因此任何机构都是由机架、原动件和从动件系统通过运动副联接而成。将从动件系统拆成若干个不可再分的、自由度为零的运动链，称为基本杆组，简称杆组。根据杆组的定义，组成平面机构基本杆组的条件是：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 0$$

式中，活动构件数  $n$ ，低副数  $P_L$  和高副数  $P_H$  都必须是整数。由此可以获得各种类型的杆组。

当  $n = 1, P_L = 1, P_H = 1$  时，即可获得单构件高副杆组。常见有如下两种：



图 5-1 单构件高副杆组

因此满足上式的构件数和运动副数的组合为： $n = 2, 4, 6, \dots, P_L = 3, 6,$

9.....。

最简单的杆组为  $n = 2, P_L = 3$ , 称为II级组, 由于杆组中转动副和移动副的配置不同, II级杆组共有如下五种形式 (如图 5-2 所示):

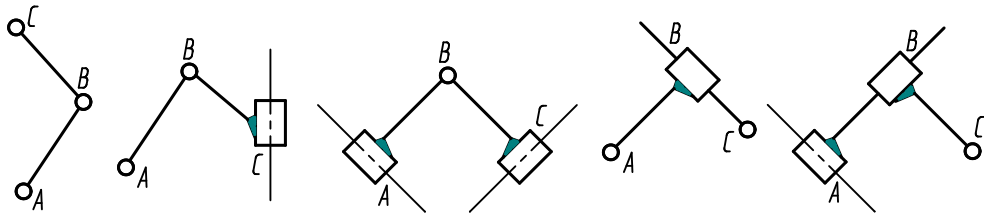


图 5-2 平面低副II级杆组

$n = 4, P_L = 6$  的杆组称为III级杆组, 其形式较多, 图 5-3 所示的是几种常见的III级杆组:

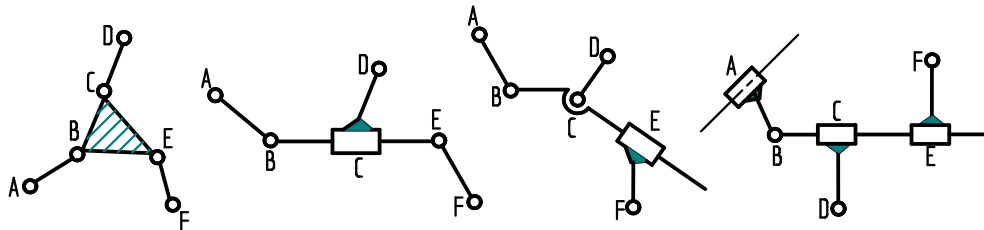


图 5-3 平面低副III级杆组

## 2. 机构的组成原理

任何平面机构均可以用零自由度的杆组依次连接到原动件和机架上的方法组成, 这是本实验的基本原理。

## 五、实验台搭建方法

### 1. 实验台主要零部件及功能

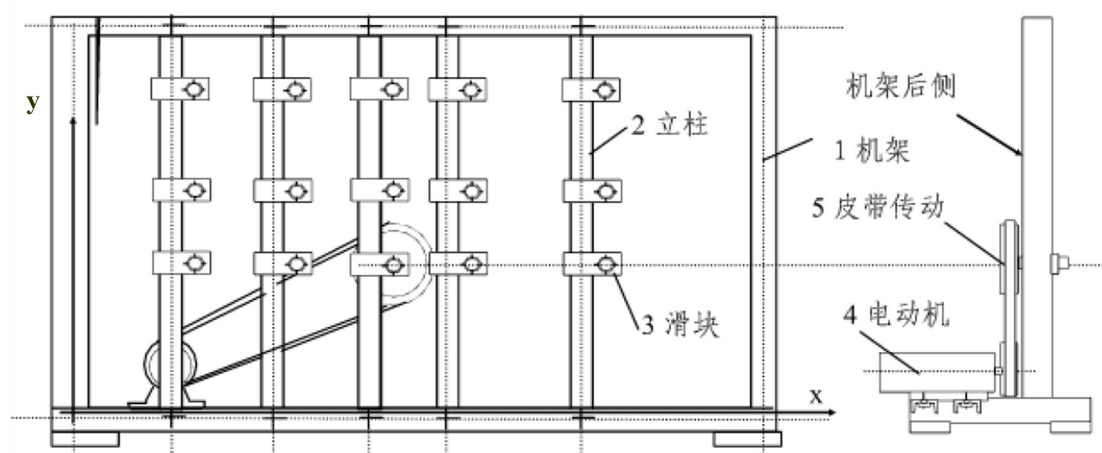


图 5-4 实验台机架

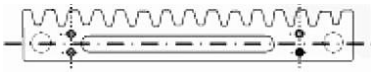
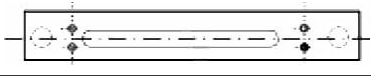
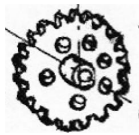
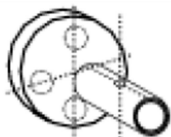
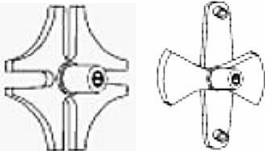
本搭建实验在如图 5-4 所示的专用实验台的机架 1 上完成的。5 根铅垂直立柱 2 可在上下横梁中沿 x 轴方向 (双手上下均匀用力) 调整其位置, 然后用上下横

梁上的螺栓固定。滑块 3 可在立柱 2 上沿 y 方向调整其位置，然后用其上的内六角螺钉和蝶型螺母固定。滑块上的圆孔销轴。电动机安装在机架后侧后侧的底盘上，其上的主动带轮通过皮带驱动从动带轮，从动带轮的轴安装在滑块 3 的圆孔中。搭接机构是在机架前侧平面上完成的。

本实验提供连接用的滑块、螺母、限位套、键及标准件 M5 平头螺钉、M3 圆头螺钉等。其他主要零部件及功能见表 5-1。

表 5-1 主要零部件及功能

序号	名称	示意图	功能
1	主动轴带轮		用带键槽的销轴与滑块相连，用销轴螺钉固定。
2	电机轴带轮		与电机输出轴相连。
3	固定支座的销轴		与机架相连，带键槽的为主动销轴，不带键槽的为从动销轴。
4	销轴		用于构成转动副或移动副的连接轴。
5	从动轴		与螺钉套联接构成转动副。
6	销轴螺钉		紧固销轴
7	螺钉套		用于轴端头，可压紧轴端头或压紧套在轴上的连杆。
8	隔套		用隔套形成装配空间，或将两零件分开一定距离，以便其运动不发生碰撞、摩擦。
9	卡环		对带有键槽的销轴进行定位。
10	连杆		将 3、4、5 的圆柱或扁头装在其上的圆孔或槽中，用 7 压紧轴端头，构成转动副或移动副。

11	齿条		与齿轮啮合，构成齿轮齿条传动。
12	齿条护板		通过螺孔与齿条相连，使齿轮与齿条在同一平面上啮合。
13	齿轮		
14	凸轮		
15	槽轮和拨盘		组成槽轮机构

## 2. 运动副的拼接

### (1) 轴相对机架的拼接

有螺纹端的轴颈可以插入滑块的套孔内，通过垫片（或隔套）、防脱螺母的连接与机架形成转动副或与机架固定。若按图 5-5 拼接后，轴相对机架固定，该轴主要用于与其它构件形成移动副或转动副、也可将连杆或盘类零件等固定在轴颈上，使之成为一个构件。若不使用垫片，则轴相对机架作旋转运动，拼接者可根据需要确定是否使用垫片。

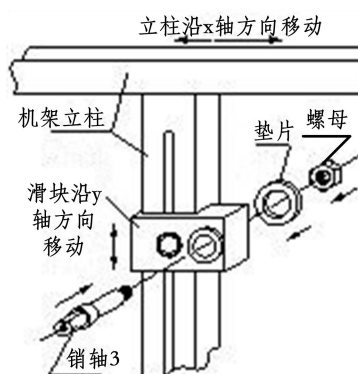


图 5-5 轴相对机架的拼接图

### (2) 转动副的拼接

若两连杆间形成转动副，可按图 5-6 所示方式拼接。其中，主轴颈可分别插入两连杆 10 的圆孔内，再用销轴螺钉和带隔套的销轴螺钉分别与主轴两端面上的螺孔连接。这样，有一根连杆被销轴螺钉固定在主轴的轴颈处，而与带隔套的销轴螺钉相连接的主轴相对另一连杆转动。

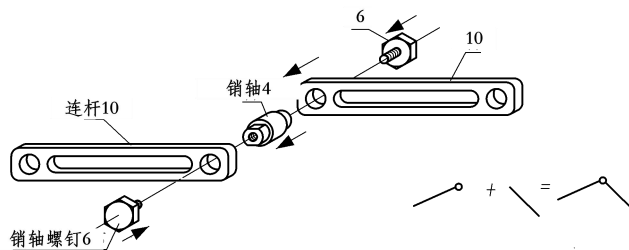


图 5-6 转动副拼接图

### (3) 移动副的拼接

如图 5-7 所示，销轴的圆轴端插入连杆的长槽中形成转滑副轴，通过带隔套的销轴螺钉的连接，销轴可与连杆形成移动副。

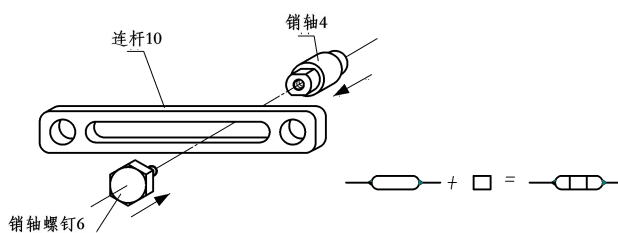


图 5-7 移动副的拼接

提示：转滑副轴的另一端扁平轴可与其它构件形成转动副或移动副。

另外一种形成移动副的拼接方式如图 5-8 所示。选用两根轴固定在机架上，然后再将连杆的长槽插入两轴的扁平轴颈上，旋入带隔套的螺钉，则连杆在两轴的支撑下相对机架作往复移动。

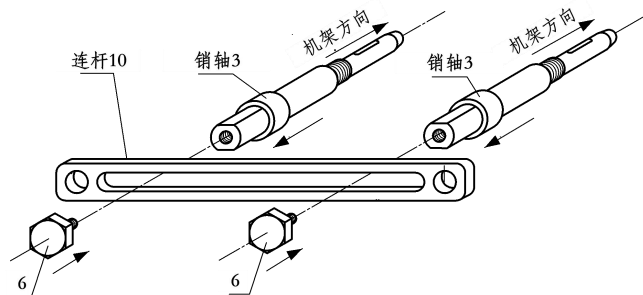


图 5-8 移动副的拼接

### (5) 滑块与连杆组成转动副和移动副的拼接

如图 5-9 所示的拼接效果是销轴 4 的扁平轴颈处与连杆形成移动副；在螺钉、螺钉套的帮助下，转动副轴的圆轴颈处与另一连杆在连杆长槽的某一位置形成转动副。首先用螺钉将固定转轴块锁定在连杆上，再将转动副轴的圆轴端穿插到固定转轴块的圆孔及连杆的长槽中，用带隔套的螺钉旋入圆轴颈端面的螺孔中，这样转动副轴与连杆形成转动副。将转动副轴扁头轴颈插入另一连杆的长槽中，将带隔套的螺钉旋入转动副轴的扁平轴端面螺孔中，这样转动副轴与另一连杆形成

移动副。

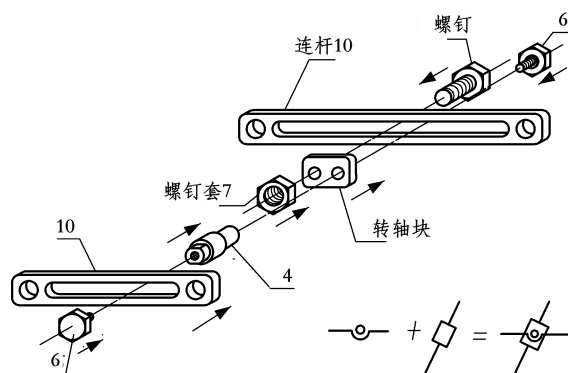


图 5-9 滑块与连杆组成转动副、移动副的拼接

(6) 齿轮与轴的拼接

如图 5-10 所示，齿轮装入主轴时，应紧靠轴的根部，以防止造成构件的运动层面距离的累积误差。按图示连接好后，用内六角紧定螺钉将齿轮固定在轴的上（注意：螺钉应压紧在轴的平面上）。

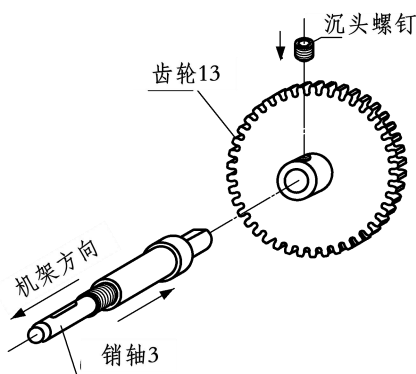


图 5-10 齿轮与轴的拼接图

若不用内六角紧定螺钉将齿轮固定在轴上，欲使齿轮相对轴转动，则选用带隔套的螺钉旋入轴端面的螺孔内即可。

(7) 齿轮与连杆形成转动副的拼接

如图 5-11 所示拼接，连杆与齿轮形成转动副。

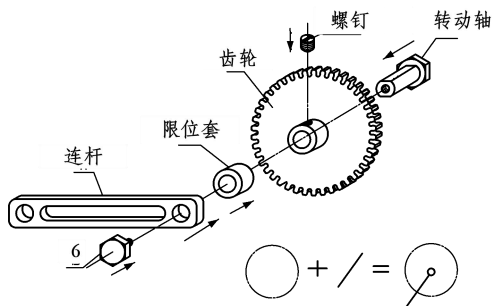


图 5-11 齿轮与连杆形成转动副的拼接

### (8) 齿条护板与齿条的拼接

如图 5-12 所示，当齿轮相对齿条啮合时，需选用两根齿条护板和螺栓、螺母按图示方法进行拼接。

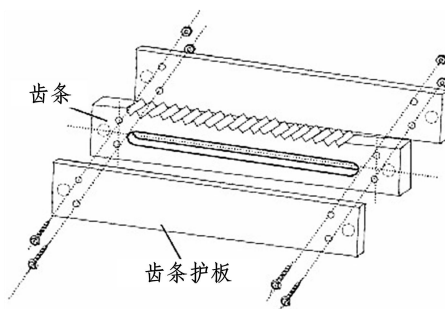


图 5-12 齿条护板与齿条的拼接

### (9) 凸轮与轴的拼接

按图 5-13 所示拼接好后，凸轮与轴形成一个构件。

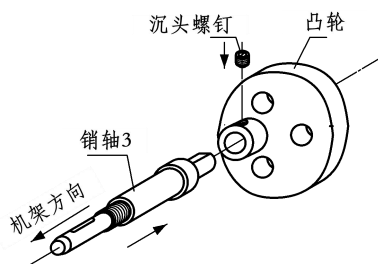


图 5-13 凸轮与轴的拼接

### (10) 槽轮机构的拼接

按图 5-14 所示拼接好后，槽轮机构形成一个构件。

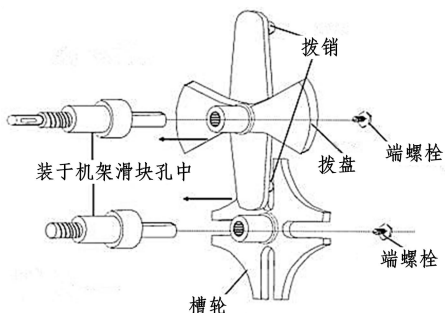


图 5-14 槽轮机构的拼接

## 六、实验内容

机构运动创新设计搭接实验，第一部分学生可任选一个实验指导书中提供的源于工程实践的平面机构运动方案，根据机构运动简图，搭接实验；第二部分可由学生构思平面机构运动简图进行创设计，并完成方案的搭接，达到开发学生创新思维的目的。

该实验台提供的配件可完成约40种机构运动方案的拼接实验。实验时每

台架可有4名学生一组，完成不同机构运动方案的搭接设计实验。

注：为配合操作者拼接实验指导书中的机构运动方案，机构运动简图中标注的数字编号的意义为：横杠前面的数字代表构件编号，横杠后面的数字为建议该构件所占据的运动层面。运动层面数的第1层是指机架的拼接起始参考面，层面数随逐渐远离第1层而增大。

工程实践中各种平面机构如下：

### 1. 内燃机机构

**结构说明：**由曲柄滑块与摇杆滑块组合而成的机构（如图 5-15 所示）。

**工作特点：**当曲柄 1 作连续转动时，滑块 6 作往复直线运动，同时摇杆 3 作往复摆动带动滑块 5 作往复直线运动。

### 2. 自动车床送料机构

**结构说明：**自动车床送料机构（如图 5-16 所示）由平底直动从动件盘状凸轮机构与连杆机构组成。

**工作特点：**当凸轮转动时，推动杆 5 往复移动，通过连杆 4 与摆杆 3 及滑块 2 带动从动件 1（推料杆）作周期性往复直线运动。

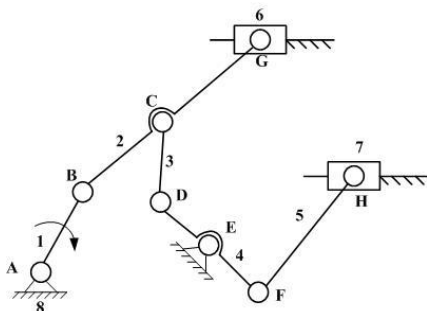
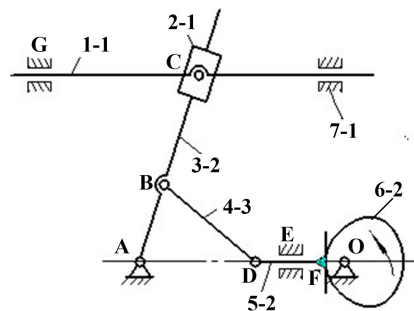


图 5-15 内燃机机构图



5-16 自动车床送料机构

### 3. 插床的插削机构

**结构说明：**图 5-17 所示，在  $ABC$  摆动导杆机构的摆杆  $BC$  反向延长线的  $D$  点上加由连杆 4 和滑块 5 组成的二级杆组，成为六杆机构。在滑块 5 固接插刀，该机构可作为插床的插削机构。

**工作特点：**主动曲柄  $AB$  匀速转动，滑块 5 在垂直  $AC$  的导路上往复移动，具有急回特性。改变  $ED$  连杆的长度，滑块 5 可获得不同的规律。

### 4. 插齿机主传动机构

**结构说明及工作特点：**图 5-18 所示的六杆机构为插齿机的主传机构。利用此六杆机构可使插刀在工作行程中得到近于等速的运动，它既具有空回行程的急回特性，又具有工作行程的等时性。



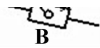


图 5-17 插床的插削机构

图 5-18 插齿机主传动机构

### 5. 齿轮-曲柄摆块组合机构

**结构说明:** 如图 5-19 所示, 该机构由齿轮机构、曲柄摆块机构组成。其中齿轮 1 和杆 2 可相对转动, 齿轮 4 则装在铰链  $B$  点并与导杆 3 固联。

**工作特点:** 杆 2 做圆周运动, 曲柄通过连杆使摆块摆动从而改变连杆的姿态, 使齿轮 4 带动齿轮 1 作相对曲柄的同向回转和逆向回转。

### 6. 转动导杆与凸轮放大升程机构

**结构说明:** 图 5-20 所示, 曲柄 1 为主动件, 凸轮 3 和导杆 2 固联。

**工作特点:** 当曲柄 1 从图示位置顺时针转过  $90^\circ$  时, 导杆和凸轮一起转过去时  $180^\circ$ 。图 15 所示的机构常用于凸轮升程较大, 而升程角受到某些因素的限制不能太大的情况。该机构制造安装简单, 工作性能可靠。

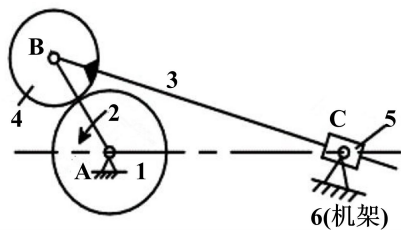


图 5-19 齿轮-曲柄摆块组合机构

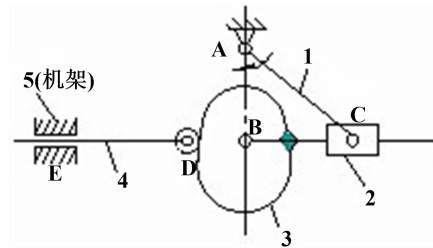


图 5-20 转动导杆与凸轮放大升程机构

### 7. 凸轮-连杆组合机构

**结构说明:** 如图 5-21 所示, 该机构由凸轮机构、曲柄连杆机构和齿轮齿条机构组成, 且曲柄  $EF$  与齿轮 4 固联。

**工作特点:** 凸轮为主动件匀速转动, 通过摇杆 2、连杆 3 使齿轮 4 回转, 齿轮 4 和齿条 5 相互啮合使齿条作直线运动。由于凸轮轮廓曲线和行程限制及各杆件的尺寸制约关系, 齿轮 4 只能作往复转动, 从而使齿条 5 只能作往复直线运动。

### 8. 冲压机构

**结构说明:** 该机构由齿轮机构、凸轮机构、连杆机构组成。其中齿轮 2 与凸轮 3 固联 (如图 5-22 所示)。

**工作特点:** 齿轮 1 匀速转动, 齿轮 2 带动固联的凸轮 3 一起转动, 通过连杆机构使滑块 7 和滑块 10 作往复直线运动, 其中滑块 7 完成冲压运动, 滑块 10 完成送料运动。该机构可用于连续自动冲压机床或剪床 (剪床则由滑块 7 为剪切工具)。

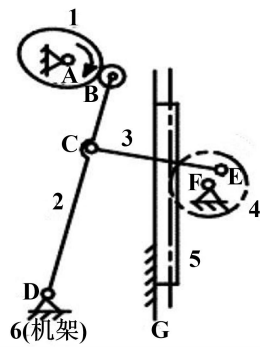


图 5-21 凸轮-连杆 组合机构

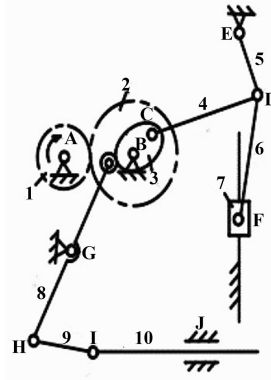


图 5-22 冲压机构

## 七、实验方法与操作步骤

组装搭建机构运动方案时，根据拟定或由实验中获得的机构运动学尺寸（单位：mm），利用机构运动方案创新设计实验台提供的零件按机构运动的传递顺序进行组装。学生按照先易后难、循序渐进的方式，进行机构创新方案的组装搭建，即先进行基本机构的搭建，再作组合机构和复杂机构的搭建，最后才是创新机构的设计、搭接和实现。

组装时，首先要分清机构中各运动构件所占据的运动层面，其目的是避免各运动构件发生运动干涉；然后，以实验台机架铅垂面为组装的起始参考面（即运动层面数的第 1 层），按预定组装计划进行搭接。

注意：组装中建议机构中各构件的运动层面以交错层的排列方式进行组装，搭接顺序由里向外（由第 1 层到最外层，层面数随构件运动层面逐渐远离第 1 层而增大）进行搭接。应注意各构件的运动平面是平行的，所组装机构的外伸运动层面数愈少，机构运动愈平稳；另外，由两个零件拼接而成的一个运动构件需要占用两个运动层面。

具体实验操作步骤如下：

### （1）机构分析

① 测绘时使测绘的机构缓慢地运动，从原动构件开始仔细观察机构运动，分清各运动单位，确定原动件、机架、传动部件和执行部件。从而确定组成机构的构件数目，运动副的数目。

② 根据联接构件间的接触情况及相对运动的性质，确定各个运动副的种类。

③ 要选择最能表现机构特征的平面作为视图平面。

④ 在稿纸上徒手按规定的符号及构件的联接次序逐步画出机构运动简图的草图。然后用数字 1、2、3…… 分别标出各构件，用 A、B、C…… 分别标出各运动副。

⑤ 仔细测量机构各运动尺寸（如转动副间的中心距、移动副导路的位置），对于高副则应仔细测出高副的轮廓曲线及其位置，然后以适当的比例做出机构运动简图。

（2）绘制机构运动简图的步骤

- ① 搞清机械的实际构造、动作原理和运动情况；
- ② 沿运动传递路线，逐一分析每两个构件之间相对运动的性质，确定运动副的类型和数目；
- ③ 选择恰当的视图平面和作图比例尺；
- ④ 确定各运动副的相对位置，用各运动副的代表符号、常用机构运动简图符号和简单线条，绘制机构运动简图；
- ⑤ 在原动件上标出箭头以表示其运动方向。

## 实验四 创新及机构组装实验报告

姓名：\_\_\_\_\_ 班级：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 成绩：\_\_

同组者姓名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

一、绘制实际组装的机构运动方案简图。

二、利用不同的杆件进行机构组装，检查运动是否确定。

三、组装搭接体会