

● 西南交通大学“323实验室工程”系列教材

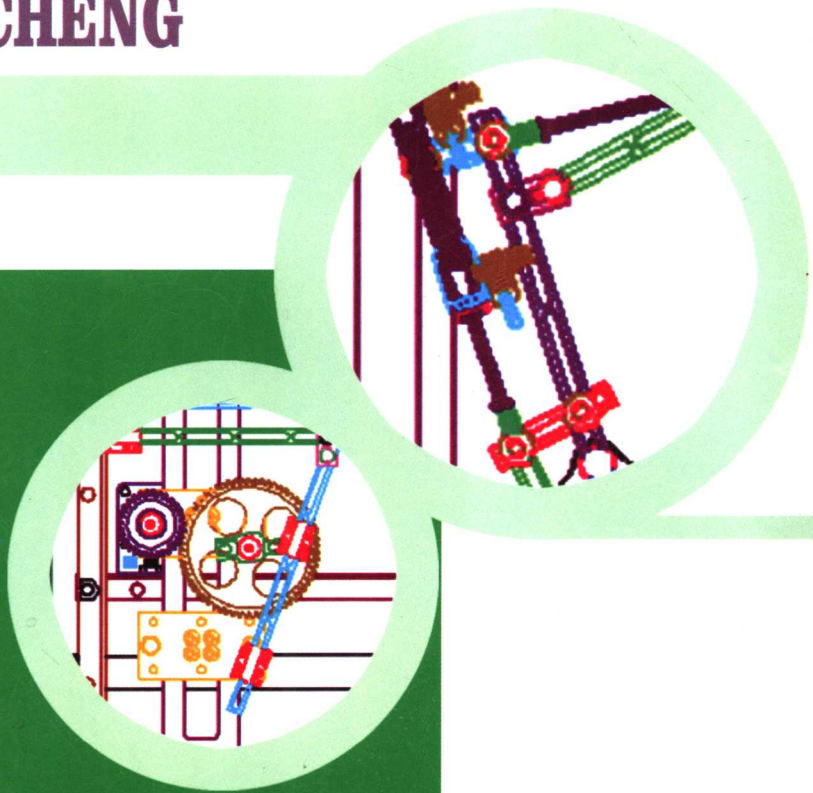
● 机械基础实验教学示范中心系列实验教材

机械原理实验教程

主 编 卢存光 谢 进 罗亚林

主 审 西南交通大学实验室及设备管理处

JIXIE YUANLI
SHIYAN JIAOCHENG



西南交通大学“323 实验室工程”系列教材
机械基础实验教学示范中心系列实验教材

机械原理实验教程

主编 卢存光 谢进 罗亚林

主审 西南交通大学实验室及设备管理处

西南交通大学出版社

·成都·

内 容 简 介

本书是西南交通大学全面实施“323 实验室工程”中,机械基础实验教学示范中心的系列实验教材之一。本实验教材为配合四川省省级精品课程“机械原理”的教学而编写,其中大部分内容为新开设的实验项目或新的实验设备而设置,它很好地补充完善了“机械原理”课程教学的实践与创新环节。本书适用于大学本科。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理实验教程 / 卢存光, 谢进, 罗亚林主编. 一成都: 西南交通大学出版社, 2007.3
(西南交通大学“323 实验室工程”系列教材)
机械基础实验教学示范中心系列实验教材
ISBN 978-7-81104-430-0

I. 机… II. ①卢…②谢…③罗… III. 机构学—实验—高等学校—教材 IV. TH111-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 024535 号

西南交通大学“323 实验室工程”系列教材
机械基础实验教学示范中心系列实验教材

机械原理实验教程

主编 卢存光 谢进 罗亚林

*

责任编辑 李晓辉

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 9.125

字数: 222 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-430-0

定价: 12.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

通常,受众能掌握阅读内容的10%,耳闻内容的15%,亲身经历内容的80%。实验就是实现亲身经历的学习过程。

实验室在育人方面具有独特的作用。它不仅可以传授知识和技术,可以培养学生的动手能力和分析问题、解决问题的能力,而且可以影响人的世界观、思维方法和作风。许多经典教学实验,实际是科技发展史上一些伟大发现的简化模拟。这些发现客观上体现着辩证唯物主义的思维方法、实事求是的作风和严谨的科学习惯。如果实验教学的指导思想明确,可以在大学生长达4年之久的一系列教学实验活动中,培养青年一代许多好的品质。

实验在培养学生的智能结构中有着不可替代的作用。高等工程教育培养学生的智能,一般可概括为下列内容:培养注意力、观察力、想象力、创造力以及自学能力、思维能力、实验能力、表达能力、组织能力、研究能力等。在高等学校学习,如果没有在一系列教学实验活动中的学习,要具备上述多方面的能力是很难想象的。

实验能力(包括与实验有关的能力)可综合为以下5方面:

- (1) 实验器材的正确选用和操作能力。
- (2) 仪器设备装置的安装调试能力。
- (3) 获取工程实验数据及分析处理的能力。
- (4) 综合运用实验知识和技能解决生产实际问题,开展科学研究的能力。
- (5) 无形能力(如应变能力、捕捉机遇能力、协同配合能力以及信念、作风等)。

为了提高学生的以上能力,西南交通大学启动了323实验室工程,投入了大量的物力、人力,建设了国家级的机械基础实验教学示范中心。本实验教材配合省级精品课程“机械原理”的教学,其中大部分是为新开的实验项目或新购的实验设备编写的。这些实验项目完善补充了“机械原理”课程的教学、实验体系。

机械原理课程的教学实验项目从教学过程和教学方法来看,可以分为3个层次:“带着走”的实验——以传授知识为主;“指着走”的实验——既传授知识又培养学生的智能;“自己走”的实验——以培养和发展学生的创新动手能力为主。3个层次的实验组成有序的联系,使机械原理课程的一系列实验成为严密的教学过程整体。

机械原理课程的教学实验项目从培养学生的能力的作用来看,可以分为另外3个层次:认知性实验、机构性能研究性实验、综合创新性实验。

认知性实验主要是指按课程大纲要求开出的单项、验证性或基本性的实验。对于基础性实验,本书在原理上给予了必要的阐述,在实验方法和仪器使用上进行了详细讲解,在实验的数据处理、误差分析方面也做了必要的论述。学生学习了相应的理论后,只要仔细阅读实验教程,就可以了解实验的目的、内容、原理、实验方法以及实验仪器的原理和使用方法。

机构性能研究性实验主要是指需要运用某一门或多门课程的综合知识、实验原理和技术,进行的一种复杂程度较高的教学实验。这类实验使学生能够综合所学知识,观察、分析一些

简化了的工程技术问题，能够积极思考，同时使学生在实验过程中受到科学实验方法的初步训练。进行这类实验，对学生的要求是：①在教师的指导下拟定实验方案；②了解、掌握主要测试仪器的工作原理与操作；③正确观察、分析、判断实验结果，并写出符合要求的实验报告；④培养严肃认真的工作作风。

对于机构性能研究性实验，本实验教程给出实验目的、内容、原理，给出主要仪器设备的使用说明，要求学生从中学习有关知识，拟定实验方案，自己动手做实验，处理数据、分析问题，最后写出实验报告。

综合创新性实验是机构性能研究性实验的拓展，是更高层次的实验。它要求学生综合运用包括机械、电气、气动等各学科的知识 and 原理，进行方案的设计和模拟实施，培养学生运用已有知识发现问题、分析问题、解决问题的能力，也就是创新动手的能力。

机械原理课程的教学实验设计，根据高校教学特点，从培养人才的需要出发，注意了实验的科学性与系统性。实验方案设计尽量巧妙新颖、独具特色，以激发学生的学习积极性和创造性。教学实验是分阶段的，先从简单实验开始，使学生掌握简单的仪器设备操作，熟悉实验方法，观察实验现象，搜集整理实验数据，而后循序安排设计性创新性实验项目。

本实验教程由冯春（实验1），于淑梅、罗亚林（实验2、实验5、实验6），李柏林（实验3、实验4），万洪章、罗亚林（实验8），刘光帅（实验9），罗亚林（实验7、实验10、实验11、实验12、实验14），谢进（实验13），卢存光（实验15）编著，卢存光、谢进、罗亚林主编，陈永教授审核。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，敬请广大读者给予批评指正。

编 者

2007年2月

目 录

第一章 机构结构分析和设计	1
实验 1 运动副的认知实验	1
实验 2 机构运动简图的测绘	4
实验 3 机构组成原理与自由度	6
第二章 机构运动分析和设计	8
实验 4 高副机构共轭曲线的设计和加工	8
实验 5 渐开线齿轮范成原理	9
实验 6 渐开线直齿圆柱齿轮的参数测定	12
实验 7 机械运动学参数测定与分析	14
第三章 机械的力分析和设计	24
实验 8 转子动平衡	24
实验 9 平面机构惯性力平衡设计	28
第四章 机械运动控制	36
实验 10 可编程控制器的梯形图编程方法与应用	36
实验 11 交流伺服系统控制	37
实验 12 两相混合式步进电机和精密定位控制	40
实验 13 机械系统速度波动的调节	43
实验 14 三自由度冗余并联机器人运动规划	47
第五章 机构创新设计	58
实验 15 机械方案创意设计模拟实施实验	58
附录 实验报告	99
参考资料	140

第一章 机构结构分析和设计

实验 1 运动副的认知实验

一、实验目的

- (1) 建立运动副的概念，对平面和空间的各种运动副都有比较深刻的认识。
- (2) 识别各种运动副，掌握每种运动副的运动约束数和自由度数。
- (3) 通过观察各种运动副，认识到结构不同但运动副可能相同，改变构件的结构可能会改变运动副的属性。

二、实验内容

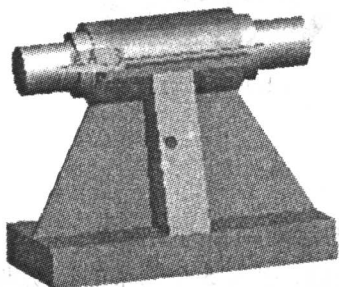
为了使多个构件组成一个系统后相互之间具有确定的运动，构件与构件需要一种既直接接触又有相对运动的联接，这种联接称为运动副（见图 1.1）。

1. 运动副

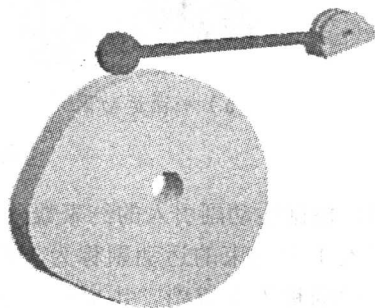
两构件直接接触所形成的可动联接，称为运动副。

2. 运动副元素

两构件直接接触而构成运动副的点、线、面部分，称为运动副元素。图 1.1 (a) 中轴的外圆柱面与轴承内孔为运动副元素；图 1.1 (b) 中凸轮与滚子接触部分为运动副元素。



(a) 轴与轴承构成运动副



(b) 凸轮与滚子间构成运动副

图 1.1 运动副示例

3. 构件的自由度

构件所具有的独立运动的数目。两个构件构成运动副后，构件的某些独立运动受到限制，这种限制称为约束。约束是指运动副对构件的独立运动所加的限制。运动副每引入一个约束，构件就失去一个自由度。

4. 运动副的分类

(1) 根据组成运动副两构件之间的接触特性分类（见图 1.2）。

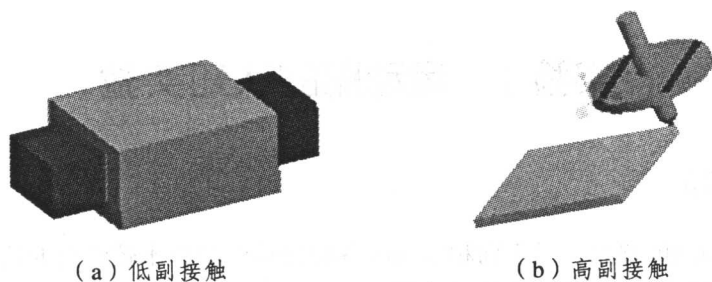


图 1.2 运动副的分类 1

① 低副——两构件以面接触的运动副称为低副。根据它们之间的相对运动是转动还是移动，运动副又可分为转动副和移动副。

➤ 转动副——组成运动副的两构件之间只能绕某一轴线作相对转动的运动副。通常转动副的具体形式是用铰链连接，即由圆柱销和销孔所构成的转动副。

➤ 移动副——组成运动副的两构件只能作相对直线移动的运动副。

② 高副——两构件以点或线接触的运动副称为高副。

(2) 根据构件相对运动的形式分类（见图 1.3）。

① 平面运动副——两构件之间的相对运动为平面运动的运动副。

② 空间运动副——两构件之间的相对运动为空间运动的运动副。



图 1.3 运动副的分类 2

(3) 根据运动副引入的约束数分类。

引入 1 个约束的运动副称为 1 级副，引入 2 个约束的运动副称为 2 级副，引入 3 个约束的运动副称为 3 级副，引入 4 个约束的运动副称为 4 级副，引入 5 个约束的运动副称为 5 级副。

(4) 根据构件间接触部分的几何形状分类（见图 1.4）。

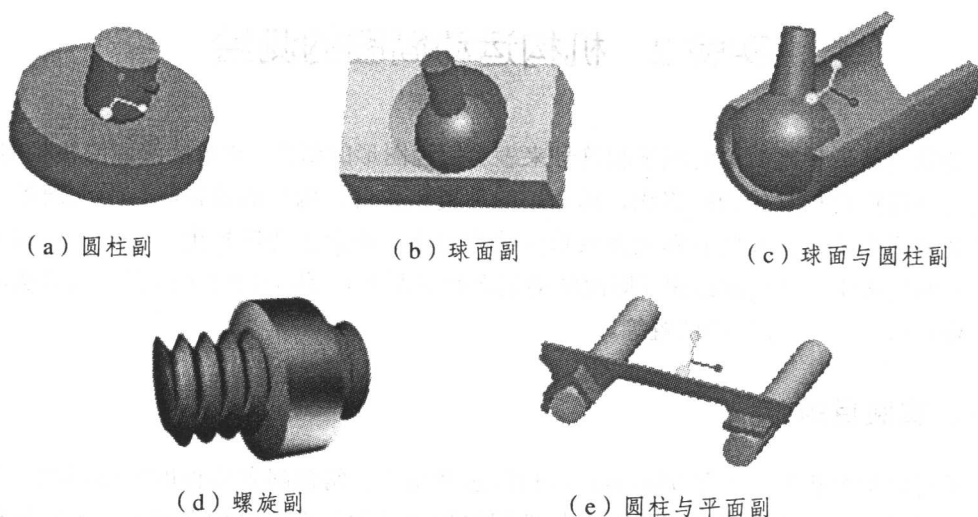


图 1.4 运动副的分类 3

三、实验设备及材料

- (1) 计算机模拟：螺旋副、转动副、移动副。
- (2) 实物：螺旋副、转动副、移动副、扩大转动副。

四、实验原理

通过计算机动画模拟，反映出构件之间的装配关系与相对运动关系；模拟各种运动副的运动情况。

五、实验步骤

- (1) 复习运动副的概念、分类等教学内容。
- (2) 计算机模拟运动副时，仔细观察机构的运动，分清各个运动单元，从而确定组成机构的构件数目；根据相互连接的两构件间的接触情况及相对运动的特点，确定各个运动副的种类。
- (3) 在 CAD 软件上按一定比例尺，从原动件开始，逐步画出机构运动简图，用数字 1、2、3…分别标注各构件，用拉丁字母 A、B、C、…分别标注各运动副。
- (4) 确定机构名称、计算机构自由度数，并将结果与实际机构的自由度相对照，观察计算结果与实际情况是否一致。
- (5) 观察实物运动时，确定实物、模型所提供的运动副的属性，并对运动副的加工、安装、受力等方面进行分析和比较。
- (6) 填写实验报告（见附录）。

实验 2 机构运动简图的测绘

运动简图是一种用简单的线条和符号来表示工程图形的语言,要求能够表明机构的种类,能够描述出各机构相互传动的路线、运动副的种类和数目、构件的数目等。运动简图应选择在能清楚表明主要机构或能看到大多数构件的方向上。在图上还应标出与运动有关的尺寸,如构件上两铰链中心之间的距离(即两转动副之间的距离)、移动构件上铰链中心的运动线的位置(导向)、各固定铰链的位置等。

一、实验目的

在进行机构分析时,为了突出表达机构的运动特征,常忽略各零件的实际形状,用简单的线条和运动副的代表符号表示机构各构件间的相对运动关系,这种简单的图形称为机构运动简图。绘制机构运动简图是设计和分析各种机构的基本手段之一。

本实验的目的是,通过对一些机器实物(如缝纫机)或模型的机构运动简图的测绘和计算,掌握运动副的表示方法、机构运动简图的测量绘制方法及机构自由度的计算方法。

二、实验内容

对实验室提供的机器实物(如缝纫机)或模型进行机构参数测绘,按比例用运动副和构件的代表符号绘出机构运动简图,进而计算机构的自由度。

三、实验设备及材料

- (1) 若干机构和机器的实物或模型(如曲柄滑块泵、曲柄摇块泵、曲柄摇杆泵及缝纫机等)。
- (2) 学生自备直尺、铅笔、橡皮擦、三角板、圆规及草稿纸等。

四、实验原理

机构各部分的运动,仅取决于该机构中原动件的运动规律、各运动副的类型和运动尺寸(各运动副相对位置的尺寸),而与构件的外形和运动副的具体构造无关。为了便于分析和研究机构的运动,只需根据机构的运动尺寸,以简单的线条和符号表示构件和运动副,绘制机构运动简图,这样既简单明了又保持机构的运动特征不变。

五、实验步骤

机构运动简图的测绘示例如图 1.5 所示。

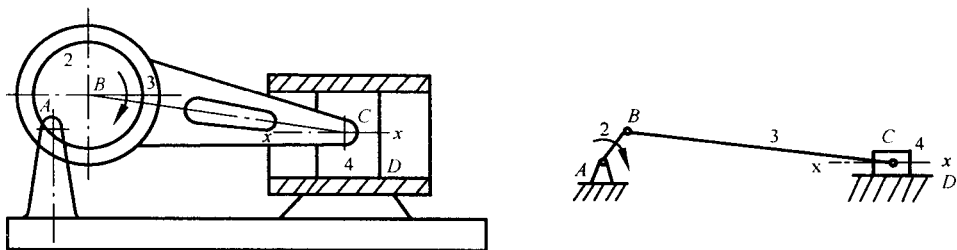


图 1.5 偏心轮机构

1. 机构运动简图测绘步骤

(1) 转动手柄，使机构运动。

注意观察此机构中哪些是活动构件，哪些是固定构件，确定出主动件及其数目，并逐一标注构件号码（如：1—机架；2—手柄及偏心轮；3—边杆；4—活塞）。

(2) 判断各构件间的运动副性质和数目。

从主动构件开始，按照运动传递的顺序，仔细观察各构件之间的相对运动，逐个确定出每两个构件间运动副的类型和各类型运动副的数目。

转动手柄，判定构件 2 与构件 1 的相对运动是绕轴 A 转动，故 2 与 1 在 A 点组成转动副；构件 3 与 2 的相对运动是绕偏心轮 2 的圆心 B 点转动，故 3 与 2 在 B 点组成转动副；构件 4 与 3 绕销 C 相对转动，故 4 与 3 在 C 点组成转动副；构件 4 与 1 沿水平方向 x-x 相对移动，故 4 与 1 组成方位线为 x-x 的移动副。这样，此偏心轮机构有 3 个转动副和 1 个移动副，共 4 个低副。

(3) 绘出机构草图，并测出构件尺寸。

在草稿纸上先大致画出机构的图形，然后测量各构件的尺寸，并将测量的尺寸标注在草图上。

对于组成转动副的构件，不管其实际形状如何，都只用两转动副之间的连线来表示，例如 AB 代表构件 2，BC 代表构件 3。

对于组成移动副的构件，不管其截面形状如何，总用滑块表示，例如滑块 4 代表构件 4，并通过滑块上转动副 C 的中心线 x-x 代表 4 与 1 相对移动的方向线（导向）。

机架部分用斜线表示，以便与活动构件区别，如构件 1；原动件上打箭头表示，以便与从动件区别，如构件 2。

图 1.5 (b) 即为图 1.5 (a) 所示机构的运动简图，测量尺寸标注在草图上。

(4) 根据测量的构件尺寸，按比例绘制简图。

选择恰当的长度比例尺 μ_L (m/mm) 按比例画出机构运动简图。

$$\mu_L = \frac{\text{构件的实际长度 (m)}}{\text{简图上所画的构件长度 (mm)}}$$

运动分析是要把机构的复杂的“外衣”脱掉，只把简单的运动特征划出来，决定它运动性质的是运动副和构件的杆长，用运动副的代表符号和简单的线条按比例画出的图即机构运动简图。

2. 计算机构的自由度

(1) 计算机构自由度。

自由度公式：

$$F=3n-2P_L-P_H \quad (1.1)$$

式中， n 为活动构件数； P_L 为低副数； P_H 为高副数。

在本机构中， $n=3$ （构件 2、3 和 4 是活动构件）

$$P_L=4 \text{（转动副 } A、B \text{ 和 } C \text{ 以及移动副 } D\text{）}$$

$$P_H=0$$

将参数代入（1.1）式得：

$$F=3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

（2）核对计算结果是否正确。

根据计算所得的自由度 $F=1$ ，给机构一个原动件——手柄，当手柄转动时，观察机构各构件的运动是否确定，则可知计算结果是否符合实际。

3. 填写实验报告（见附录）

六、实验注意事项

- （1）要按构件的实际方向和位置画图。
- （2）一个构件上有两个转动副的两个副之间的尺寸要测量。
- （3）固定机架有偏距的要测量。

实验 3 机构组成原理与自由度

本环节由高副低代、基本杆组与机构的组成以及平面机构自由度计算 3 部分组成。

一、实验目的

- （1）加深对高、低副机构转换的认识。
- （2）熟悉基本杆组的概念、分类和结构组成；使学生能利用基本杆组进行机构的结构设计，为机构的运动分析和动力分析打下基础。
- （3）加深对自由度与机构确定运动规律的认识。

二、实验内容

- （1）给定一个凸轮机构，对机构进行高副低代。
 - ① 确定机构的级别。
 - ② 验证低代前后机构运动规律（位移、速度和加速度）的变化。
- （2）给出不同杆件数的机构，对比分析这些机构的组成与基本杆组的类型，进行机构的结构组成分析（机构的自由度、包含的基本杆组，拆除基本杆组是否影响机构的自由度），提

出改变机构结构组成（保持机构的级别不变或改变机构的级别）的方案。

(3) 当给定不同的主动件或不同的主动件个数时，观察机构是否有确定的运动规律。

三、实验设备及材料

机构模型、计算机和软件（实验室提供）。

四、实验原理

- (1) 高副低代。
- (2) 基本杆组与机构的组成。
- (3) 平面机构自由度的计算。

五、实验步骤

(1) “高副低代”实验。

进入实验主界面，点击按钮“凸轮机构”，可以看到凸轮机构的动态演示，同时也画出凸轮机构的位移、速度和加速度与时间的关系曲线；点击按钮“连杆机构”，可以看到高副低代后连杆机构的动态演示，同时也画出了连杆机构位移、速度和加速度与时间的关系曲线。

(2) “基本杆组与机构的组成”实验。

进入实验主界面，点击按钮“四杆机构”，可以观察四杆机构的运动；点击按钮“六杆机构”，可以观察到六杆机构的运动，同时也看到四杆机构和六杆机构的不同；点击按钮“八杆机构”，可以同时观察四杆、六杆和八杆机构的运动及不同之处。

(3) “平面机构自由度的计算”实验。

进入实验主界面，可以看到“五杆机构”的示意图，点击按钮“具体操作步骤”进入软件 Pro/E，观察五杆机构主动件数分别为 1、2、3 时的机构运动情况。

(4) 填写实验报告（见附录）。

第二章 机构运动分析和设计

实验 4 高副机构共轭曲线的设计和加工

一、实验目的

- (1) 使学生对共轭曲线的包络原理有深入的认识。
- (2) 明确要实现两个构件之间的某种相对运动可以有无穷多共轭曲线（但在设计时必须考虑曲线的加工问题）。

二、实验内容

- (1) 标准齿轮范成加工。
- (2) 变位齿轮范成加工。
- (3) 任意形状齿轮范成加工。
- (4) 任意包络线的生成。

三、实验设备及材料

齿轮范成仪、计算机和软件（实验室提供）。

四、实验原理

- (1) 共轭曲线的特性与形成。
- (2) 高副的运动副元素为共轭曲线。
- (3) 已知两构件之间的相对运动关系（速度瞬心）曲线和一个构件的曲线，或已知两个构件的运动和一个构件的曲线，用包络方法就可以求作另外一个构件的曲线形状。齿轮机构的设计属于第一种情况，凸轮机构的设计属于第二种情况；包络方法也奠定了高副的加工方法。

五、实验步骤

- (1) 进入实验主界面，点击按钮“点击进入”。
- (2) 选择“齿轮参数输入”或选取默认值。
- (3) 点击“控制按键”，可以看到两个构件的运动和共轭曲线的形成。
- (4) 填写实验报告（见附录）。

实验 5 渐开线齿轮范成原理

一、实验目的

- (1) 通过用范成仪描绘渐开线齿轮的齿廓，掌握用范成法制造渐开线齿轮的原理。
- (2) 了解渐开线齿轮产生根切的现象，以及用移矩变位法来避免产生根切的方法。
- (3) 观察比较标准齿轮与变位齿轮的异同。

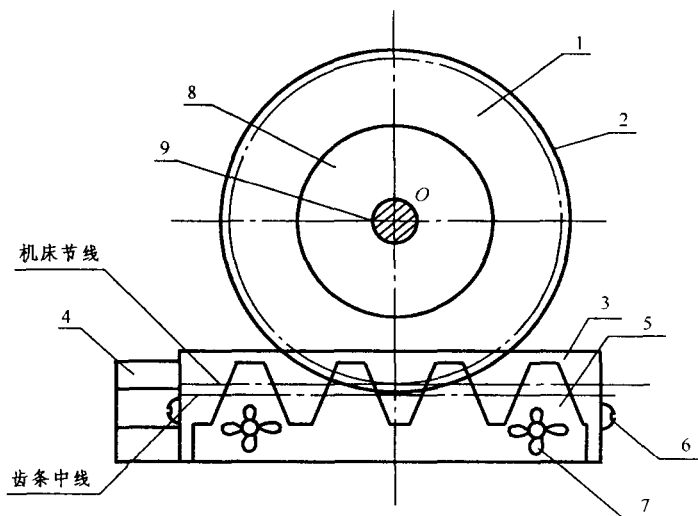
二、实验内容

用范成仪描绘渐开线标准齿轮与变位齿轮的齿廓。

三、实验设备及材料

- (1) 设备。

齿轮范成仪，结构如图 2.1 所示。



1—圆盘—装轮坯的工作台；2—弦线—对应轮坯分度圆；3—上滑板；4—机架；
5—齿条刀具；6—螺丝；7—压紧螺丝；8—一定位圆盘；9—压紧螺帽

图 2.1 齿轮范成仪

圆盘 1 装在机架 4 上，可绕 O 轴旋转，圆盘上绕有弦线 2（弦线中心线所在的圆代表被切齿轮之分度圆）。弦线的两端由螺丝 6 固定的上滑板上，上滑板 3 可在机架 4 的导槽内沿水平方向左右移动，齿条刀具 5 装在上滑板上，通过弦线的作用，使圆盘 1 的转动与上滑板 3 的移动联系起来，分度圆始终与机床节线作纯滚动，从而构成范成运动。通过压紧螺丝 7 可调整齿条刀具中线相对于圆盘中心 O 之间的径向距离，塑料圆盘 8 起定位及压紧轮坯（图纸）的作用。

(2) 自备工具。

圆规、剪刀、铅笔 (HB)、厚绘图纸一张 (280 mm×280 mm)。

四、实验原理

(1) 齿轮与齿条啮合时, 其相对运动可视为是齿轮分度圆沿齿条节线做纯滚动。如果将齿条换为齿条刀具, 图纸换为齿坯使它们保持上述相对运动, 再使齿条刀具沿齿坯轴线方向作切削运动就可加工出齿轮, 这种方法称为范成法 (滚切法)。

(2) 加工标准齿轮: 齿条刀具线 (模数线) 与被加工齿轮分度圆相切。

(3) 加工变位齿轮: 齿条刀具中线与被加工齿轮分度圆二者分离。

说明: 刀具中线相对齿坯中心外移为正变位, 刀具中线内移为负变位。

五、实验步骤

(1) 实验前按实验报告 (见附录) 表格中的要求计算标准齿轮与变位齿轮的几何尺寸。

(2) 将算出的几何尺寸画在实验用图纸上 (见图 2.2), 并绘出定位圆 ($R=62.5\text{ mm}$), 检查所画尺寸无误后, 可沿齿顶圆外 1 mm 处剪下, 并剪好中心孔。

说明: 定位圆为本实验台所专用, 实物机床用心轴定位。

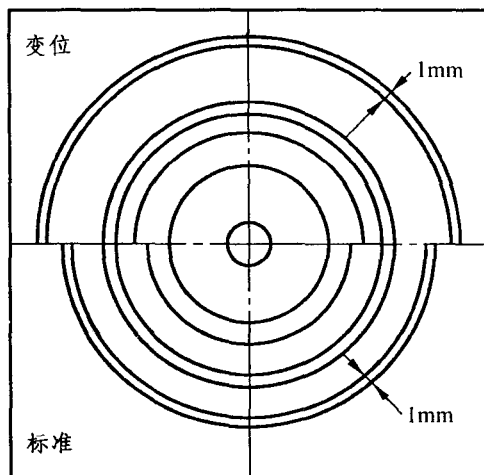


图 2.2 在图纸上绘定位圆

(3) 松开压紧螺帽 9, 取下定位圆盘, 将剪好的图纸的中心孔套入中心轴内, 同时将标准齿轮部分插入齿条与上滑板之间放上定位圆之圆盘, 使所画之定位圆与塑料圆盘重合后旋紧压紧螺帽 (注意保持图纸上的中心线与齿条刀上的中线平行)。

① 绘制标准齿轮。

调整齿条, 使齿条刀具中线与被加工齿轮 (图纸上画的) 分度圆相切, 左右移动上滑板检查无误后拧紧螺丝 7。将上滑板移至右边 (或左边) 的垂直位置 (即机架中间位置), 然后用铅笔将所有压在齿条刀下的图纸上的齿条齿廓的投影线, 全部描绘在图纸上 (在机床上

就是刀具对轮坯切了一刀)；每移动一格(刻度在机架上)描绘一次，逐个描绘，直至上滑板移至左(或右)边的垂直位置，这样便包络出被加工齿轮的2~3个轮齿，如图2.3所示的根切现象。

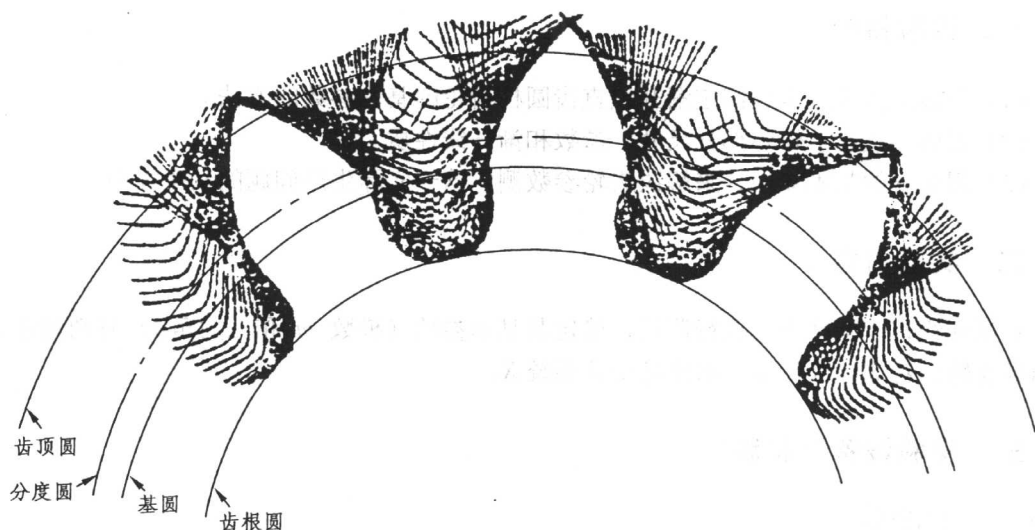


图 2.3 标准齿轮 ($Z=10$)

② 绘制变位齿轮。

压住上滑板转动圆盘将变位齿轮部分的图纸，转至齿条刀具及上滑板之间，仍使图纸中心线与齿条刀具中线平行，松开压紧螺丝7将齿条5远离轴心的方向移动距离 x (该距离可参考齿条上的标尺)，然后按上述同样方法绘出2~3个轮齿，如图2.4所示。

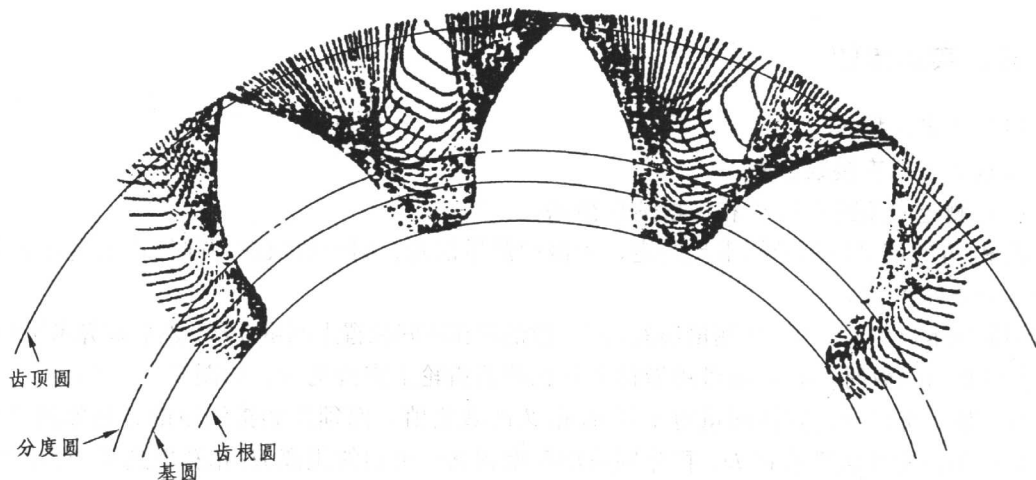


图 2.4 正变位齿轮 ($Z=10, x=0.4117$)

(4) 填写实验报告(见附录)。