

清华大学名优教材

机械设计基础系列课程教材

# 机械原理学习指导

(第3版)

A Guide to Theory of  
Machines and Mechanisms  
Third Edition

● 申永胜 主编  
● Shen Yongsheng

清华大学出版社

机械设计基础系列课程教材

# 机械原理学习指导 (第3版)

A Guide to Theory of  
Machines and Mechanisms  
Third Edition

● 申永胜 主编  
● Shen Yongsheng

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书是在第2版的基础上,根据教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会最新制定的“机械原理课程教学基本要求”和“机械原理课程教学改革建议”的精神,结合近几年来教学改革实践的经验修订而成的。

本书作为《机械原理教程(第3版)》一书的配套用书,仍由上、中、下3篇共15章组成,大多数章节包括基本要求,重点、难点提示与辅导,典型例题分析,复习思考题和自测题等5部分内容,旨在方便教师备课和有利于读者自学,帮助读者更好地理解 and 掌握该课程的基本概念、基本理论和基本的分析与设计方法,将理论学习与实际应用紧密结合起来。

本书既可作为学生学习“机械原理”课程的辅助教材及教师教学的参考用书,也可作为一般读者自学“机械原理及机械系统方案设计”的辅导读物。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

机械原理学习指导 / 申永胜主编. --3版. --北京:清华大学出版社, 2015

机械设计基础系列课程教材

ISBN 978-7-302-37680-4

I. ①机… II. ①申… III. ①机构学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 186430 号

责任编辑:庄红权

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.75

字 数:261 千字

版 次:1999 年 10 月第 1 版 2015 年 1 月第 3 版

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:24.00 元

产品编号:060033-01

# 第 1 版前言



学分制的实施和课内学时的减少,为学生自主学习提供了条件。为帮助学生更好地自主学习,我们编写了本书,作为《机械原理教程》一书的配套用书。

书中简要阐明了本课程教学的基本要求;具体指出了各章的重点和难点以及学习时容易出现的问题和错误;通过若干典型例题和复习思考题,帮助学生巩固所学知识,掌握正确的解题思路和方法,并提供解题规范;通过一定数量的精选习题,帮助学生学以致用;通过若干自测题,使学生能够自己检查对基本内容的掌握程度,发现自身学习中存在的问题,以利于自学。

本书可作为教师贯彻本课程教学基本要求和组织讨论课的依据,同时作为学生学习本课程的主要参考书。

参加本书编写工作的有申永胜(前言、第 3 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章及第 14 章部分内容),翁海珊(第 1 章、第 13 章、第 14 章部分内容、第 15 章),郝智秀(第 2 章)、方嘉秋(第 4 章),汤晓瑛(第 6 章、第 11 章、第 12 章)和于晓红(第 7 章、第 10 章)。全书由申永胜教授担任主编。

由于我们水平所限,疏漏欠妥之处在所难免,恳请机械原理课程教师和广大读者批评指正。

申永胜

1999 年 3 月于清华园

## 第2版前言

本书第1版自1999年出版以来,以其鲜明特色受到有关专家和同行的广泛关注,先后被评为“普通高等教育‘九五’国家级重点教材”和“面向21世纪课程教材”。短短几年间,已连续印刷10余次,被众多高等学校作为教学用书,受到广大教师和学生的一致好评,并于2001年获“国家级教学成果二等奖”,2002年获“全国普通高等学校优秀教材一等奖”。

本书是在第1版的基础上修订而成的。修订时,以教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会2004年最新制定的“机械原理课程教学基本要求”为依据,参考了课程教学指导分委员会提出的“机械原理课程教学改革建议”,并吸取了近几年教学改革的成功经验和同行专家及广大读者的意见。鉴于本书是《机械原理教程》一书的配套用书,本次修订是同《机械原理教程》一书的修订同步进行的。

多年的教学改革实践使作者深切感到,激发学生的学习兴趣,以知识为载体培养学生正确的思维方式和方法及自主获取知识的能力,是高等学校教师的重要任务。本次修订中,作者力求更好地贯彻这一教学理念。书中简要阐明了本课程教学的基本要求;具体指出了各章的重点和难点以及学习时容易出现的问题和错误;通过对若干精选典型例题的分析,帮助学生巩固所学知识,掌握正确的解题思路和方法;通过一定数量的复习思考题和习题,帮助学生学以致用;通过若干有代表性的自测题,使学生能够自己检查对基本内容的掌握程度,发现学习中存在的问题,以利于自学。

本书是《机械原理教程》第2版的配套用书,既可作为学生学习机械原理课程的主要辅助教材,也可作为教师贯彻本课程教学基本要求和组织讨论课的依据。

参加本书修订工作的人员有:申永胜(前言、第3章、第5章、第8章、第9章、第11章、第14章),翁海珊(第1章、第6章、第13章、第15章),郝智秀(第2章、第12章),阎绍泽、贾晓红(第4章),于晓红(第7章、第10章)。本书由申永胜任主编,负责全书的统稿、修改和定稿。

值此第2版出版之际,谨对为本书第1版编写作出贡献的人员表示深情感谢。本书在修订过程中,参阅了一些同类著作,在此特向其作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中疏漏欠妥之处在所难免,敬请广大读者批评斧正。

申永胜

2005年9月于清华园

# 第 3 版前言



本书是《机械原理教程(第 3 版)》一书的配套用书,其前两版的书名为《机械原理辅导与习题》。本次修订主要作了以下变动:

(1) 本次修订是同《机械原理教程》一书同步进行的,根据《机械原理教程(第 3 版)》内容的变化,对本书有关内容作了相应的调整和加强。

(2) 将本书前两版各章中的习题部分,经过增删和精选,移到了《机械原理教程(第 3 版)》一书的相应章节之后,将本书的目标集中定位于学习指导上。

修订后的本书更名为《机械原理学习指导》,以期使其更切合本书的辅导功能。

全书由上、中、下 3 篇共 15 章组成,大多数章节包括基本要求,重点、难点提示与辅导,典型例题分析,复习思考题和自测题等 5 部分内容。

本书既可作为学生学习机械原理课程的主要辅导用书,也可作为教师贯彻课程教学基本要求、备课和组织研讨课的依据,同时对从事机械工程领域工作的工程技术人员也具有一定的参考价值。

参加本书修订工作的人员有:申永胜(第 1 章、第 3 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章、第 12 章、第 14 章),郝智秀(第 2 章、第 6 章、第 10 章),阎绍泽(第 4 章、第 7 章),程嘉(第 11 章)、肖丽英(第 13 章、第 15 章)。本书由申永胜任主编,负责全书的统稿、修改和定稿。

值此第 3 版出版之际,谨对为本书前两版编写工作作出贡献的人员表示诚挚的感谢。本书在修订过程中,参阅了一些同类著作,在此特向其作者表达谢意。

由于编者水平所限,书中疏漏欠妥之处在所难免,敬请广大读者批评斧正。

申永胜

2014 年 6 月于清华园

# 目录



## 上篇 机构的运动设计

|          |                   |           |
|----------|-------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>机构的组成和结构分析</b> | <b>3</b>  |
| 1.1      | 基本要求              | 3         |
| 1.2      | 重点、难点提示与辅导        | 3         |
| 1.3      | 典型例题分析            | 11        |
| 1.4      | 复习思考题             | 16        |
| 1.5      | 自测题               | 16        |
| <b>2</b> | <b>连杆机构</b>       | <b>19</b> |
| 2.1      | 基本要求              | 19        |
| 2.2      | 重点、难点提示与辅导        | 19        |
| 2.3      | 典型例题分析            | 25        |
| 2.4      | 复习思考题             | 31        |
| 2.5      | 自测题               | 32        |
| <b>3</b> | <b>凸轮机构</b>       | <b>35</b> |
| 3.1      | 基本要求              | 35        |
| 3.2      | 重点、难点提示与辅导        | 35        |
| 3.3      | 典型例题分析            | 46        |
| 3.4      | 复习思考题             | 51        |
| 3.5      | 自测题               | 52        |
| <b>4</b> | <b>齿轮机构</b>       | <b>54</b> |
| 4.1      | 基本要求              | 54        |
| 4.2      | 重点、难点提示与辅导        | 54        |
| 4.3      | 典型例题分析            | 58        |
| 4.4      | 复习思考题             | 64        |

|          |               |           |
|----------|---------------|-----------|
| 4.5      | 自测题           | 66        |
| <b>5</b> | <b>轮系</b>     | <b>68</b> |
| 5.1      | 基本要求          | 68        |
| 5.2      | 重点、难点提示与辅导    | 68        |
| 5.3      | 典型例题分析        | 75        |
| 5.4      | 复习思考题         | 82        |
| 5.5      | 自测题           | 83        |
| <b>6</b> | <b>间歇运动机构</b> | <b>86</b> |
| 6.1      | 基本要求          | 86        |
| 6.2      | 重点、难点提示与辅导    | 86        |
| 6.3      | 复习思考题         | 87        |
| 6.4      | 自测题           | 87        |
| <b>7</b> | <b>其他常用机构</b> | <b>88</b> |
| 7.1      | 基本要求          | 88        |
| 7.2      | 重点、难点提示与辅导    | 88        |
| 7.3      | 复习思考题         | 88        |
| <b>8</b> | <b>组合机构</b>   | <b>89</b> |
| 8.1      | 基本要求          | 89        |
| 8.2      | 重点、难点提示与辅导    | 89        |
| 8.3      | 典型例题分析        | 91        |
| 8.4      | 复习思考题         | 94        |
| 8.5      | 自测题           | 95        |
| <b>9</b> | <b>开式链机构</b>  | <b>97</b> |
| 9.1      | 基本要求          | 97        |
| 9.2      | 重点、难点提示与辅导    | 97        |
| 9.3      | 典型例题分析        | 99        |
| 9.4      | 复习思考题         | 101       |

## 中篇 机械的动力设计

|           |               |            |
|-----------|---------------|------------|
| <b>10</b> | <b>机械的力分析</b> | <b>105</b> |
| 10.1      | 基本要求          | 105        |
| 10.2      | 重点、难点提示与辅导    | 105        |
| 10.3      | 典型例题分析        | 107        |
| 10.4      | 复习思考题         | 112        |

|                     |                          |            |
|---------------------|--------------------------|------------|
| 10.5                | 自测题                      | 113        |
| <b>11</b>           | <b>机械系统动力学</b>           | <b>114</b> |
| 11.1                | 基本要求                     | 114        |
| 11.2                | 重点、难点提示与辅导               | 114        |
| 11.3                | 典型例题分析                   | 116        |
| 11.4                | 复习思考题                    | 121        |
| 11.5                | 自测题                      | 122        |
| <b>12</b>           | <b>机械的平衡</b>             | <b>124</b> |
| 12.1                | 基本要求                     | 124        |
| 12.2                | 重点、难点提示与辅导               | 124        |
| 12.3                | 典型例题分析                   | 125        |
| 12.4                | 复习思考题                    | 128        |
| 12.5                | 自测题                      | 129        |
| <b>下篇 机械系统的方案设计</b> |                          |            |
| <b>13</b>           | <b>机械系统总体方案设计</b>        | <b>133</b> |
| 13.1                | 基本要求                     | 133        |
| 13.2                | 重点、难点提示与辅导               | 133        |
| 13.3                | 复习思考题                    | 134        |
| <b>14</b>           | <b>机械执行系统的方案设计</b>       | <b>135</b> |
| 14.1                | 基本要求                     | 135        |
| 14.2                | 重点、难点提示与辅导               | 135        |
| 14.3                | 典型例题分析                   | 139        |
| 14.4                | 复习思考题                    | 147        |
| 14.5                | 自测题                      | 148        |
| <b>15</b>           | <b>机械传动系统的方案设计和原动机选择</b> | <b>150</b> |
| 15.1                | 基本要求                     | 150        |
| 15.2                | 重点、难点提示与辅导               | 150        |
| 15.3                | 典型例题分析                   | 152        |
| 15.4                | 复习思考题                    | 153        |
| 15.5                | 自测题                      | 154        |
| 附录 自测题提示与参考答案       |                          | 156        |
| 参考文献                |                          | 160        |

# 上篇 机构的运动设计

机电产品的设计都是为了满足某种特定的功能要求,而这些功能要求往往是通过机构的动作来实现的,因此,机构的运动设计在机械系统方案设计中占有重要的地位。

本篇首先论述机构的组成和结构分析,然后介绍各种常用机构的类型、运动特点、功能和运动设计的方法。这些常用机构包括连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、间歇运动机构、其他常用机构、组合机构、开式链机构等。全篇重点讨论闭式链机构,也适当介绍开式链机构;每章重点讨论平面机构,也适当介绍空间机构。目的在于使读者在进行机电产品设计时,既有广阔的视野,又有坚实的基本功。本篇的学习将为机械系统的方案设计打下必要的机构学方面的基础。

通过本篇的学习,读者应在熟练掌握机构的组成和结构的有关知识的基础上,重点掌握连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、间歇运动机构、组合机构各章的有关内容,同时对其他常用机构和开式链机构有所了解。



# 1

## 机构的组成和结构分析

### 1.1 基本要求

(1) 熟练掌握机构运动简图的绘制方法。能够将实际机构或机构的结构图绘制成机构运动简图;能看懂各种复杂机构的机构运动简图;能用机构运动简图表达自己的设计构思。

(2) 掌握运动链成为机构的条件,能对构思的简单设计方案进行分析,判断其能否实现预期功能。

(3) 熟练掌握机构自由度的计算方法。能自如地运用自由度计算公式计算平面机构的自由度。能准确识别出机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束,并作出正确处理。

(4) 掌握机构的组成原理和结构分析的方法。了解高副低代的方法;会判断杆组、杆组的级别和机构的级别;学会根据机构组成原理,用基本杆组、原动件和机架创新构思新机构的方法;学会将Ⅱ级、Ⅲ级机构分解为机架、原动件和若干基本杆组的方法。

### 1.2 重点、难点提示与辅导

本章是进入整个机械系统设计的开篇。它不仅为学习各类机构的运动设计和动力设计打下必要的基础,也为机械系统方案设计和新机构的创新设计提供一条途径。

机构运动简图的绘制、运动链成为机构的条件和机构的组成原理是本章学习的重点。

#### 1. 基本概念

根据本章的知识要点提出以下基本概念,为了便于掌握,将相关概念成组列出。读者应通过比较,掌握各概念的定义、特点以及与相关概念间的不同点和相互间的联系。

(1)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{零 件} \\ \text{构 件} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{原(主)动件} \\ \text{从 动 件} \\ \text{机 架} \end{array} \right.$

(2)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{自由度} \\ \text{约 束} \end{array} \right.$

(3)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{运 动 副} \\ \text{运动副元素} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{空间运动副} \\ \text{平面运动副} \end{array} \right.$

(4)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{杆 组} \\ \text{运动链} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{闭(式)链} \\ \text{开(式)链} \end{array} \right.$

- |       |                            |       |                      |
|-------|----------------------------|-------|----------------------|
| (5) { | 机构运动简图<br>机构示意图<br>机械系统示意图 | (6) { | 复合铰链<br>局部自由度<br>虚约束 |
| (7) { | 运动副的级别<br>杆组的级别<br>机构的级别   | (8) { | 机构组成原理<br>机构结构分析     |
| (9) { | 机构<br>机器<br>机械             |       |                      |

这里需要特别强调构件与零件的区别。零件是加工制造的单元,而构件是作为一个整体参与运动的单元。一个构件可能是一个零件,也可以是若干个零件的刚性组合。机械原理以构件作为研究对象,将构件视为刚体,且往往不考虑构件本身的材料、形状和截面尺寸,这一点与理论力学课程相似。初学者往往由于区分不清构件与零件的区别,而在绘制机构运动简图和计算自由度时出错,因此要特别注意。

初学者容易出错的另一个问题是对运动副概念的理解。两个构件直接接触而形成的一种可动联接称为运动副。这一定义包含有三层含义:其一,两个构件——所谓“副”是“成对”的意思,只有两个构件才能构成一个运动副,一个构件不存在运动副,两个以上的构件则构成多个运动副(例如复合铰链);其二,直接接触——两个构件只有通过直接接触才能成“副”,由于直接接触,使构件的某些独立运动受到约束,两构件间相对的运动自由度便随之减少,一旦脱离接触,约束即不复存在,则它们所构成的运动副亦随之消失;其三,可动联接——直接接触的两个构件之间要能产生一定形式的相对运动,形成可动联接,才能叫做运动副,若两个构件之间形成的是不能产生相对运动的“死”联接,则二者将合成为一个构件,它们之间也就不存在运动副。初学者在计算运动链自由度时可能出现的错误中,大多与对运动副的上述三层含义理解得不透彻有关。建议读者通过具体实例,逐步加深对运动副概念的理解。

## 2. 机构运动简图的绘制

机构运动简图是一种用简单的线条和符号来表示的工程图形语言,也是设计者交流设计思想所需要的一种工具。它既要简洁,又要在讨论和评价设计方案时能正确表达设计思想;在计算自由度时,不至于数错构件数和运动副数;在作运动分析和力分析时,能保证计算无误。故运动简图应能正确表达出机构以哪些构件组成和构件间以什么运动副相联接以及各运动副之间的尺寸等,即表达出机构的组成形式,显示出设计方案。

由于机构运动简图是用来进行原理方案设计和分析的而不是用于结构设计和加工制造的,所以不可用机械的零部件图和总装图来代替。

### 1) 绘制运动副时应注意的事项

(1) 绘制转动副时,转动副的位置是关键;代表转动副小圆的圆心必须与回转中心重合;两个转动副中心连线的长度一定要精确。偏心轮和圆弧形滑块是转动副的特殊形式。它们的绘制是易错点。绘制时关键是要找出相对转动中心,具体可见 1.3 节的典型例题分析中的例 1.1。

(2) 绘制移动副时,导路的方向和位置是关键。必须注意:代表移动副的滑块,其导路的方向必须与相对移动的方向一致;导路间的夹角要精确,并要标注(如图 1.1);转动副到移动副导路间的距离要精确,若某一构件分别以转动副和移动副与另两个构件相联接,且转动副的回转中心不在移动副的导路上,则应标出转动副到导路的距离,即偏心距  $e$  (如图 1.2)。

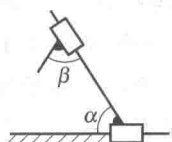


图 1.1 导路间夹角的表示方法

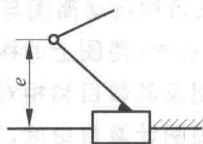


图 1.2 偏心距的表示方法

## 2) 绘制构件时应注意的事项

(1) 任意形状的构件,当它只以两个转动副与其他构件相联接,且外形轮廓也不以高副与其他构件相接触时,简图中只需以两个转动副几何中心的连线代表此构件。

(2) 尽量减少构件前后重叠时虚线可能引起的误会。例如,有时可变通地把小齿轮或外形小的凸轮、棘轮等移至大齿轮的前面,即画成实线,这在机械制图中是绝对不允许的,但在绘制运动简图时,只要不影响表达机构的组成和运动特性,这种变通是允许的。

(3) 当同一轴上安装若干零件时,必须明确表明哪些零件为同一构件。当不便以焊接符号表示时,还可用构件编号来表达,即不同构件标不同编号,同一构件中的不同零件(例如固结于同一轴上的大、小齿轮或齿轮与凸轮)则标以同样的构件编号,并在编号右上角加上不同的撇号以示区别,如  $3, 3', 3''$ 。

## 3) 绘制机构运动简图时应注意的事项

### (1) 机构运动简图、机构示意图和机械系统示意图的区别

当设计者只是为了表达机构的组成,讨论初步的设计构思,表达机构的动作原理而不需精确进行运动学、动力学计算时,可不必严格地按比例绘制运动副的精确位置和构件的准确尺寸,只需绘制机构示意图。在正式提交设计方案或要作定量的运动分析和动力分析时,则必须严格按比例绘制机构运动简图。这两种图形一般只绘制某一个或几个执行机构、传动机构或驱动机构。当需要包含从原动机开始的整个传动系统、执行系统时,则需要绘制机械系统示意图,其绘制方法与机构示意图相同。一些非常用机构的简图符号,可查阅国标 GB 4460—1984。

### (2) 机构运动简图绘制的步骤

机构运动简图的绘制是本章的一个重点,也是一个难点。初学者一般可按下列步骤进行。

① 分析机械的实际工作情况,确定原动件(驱动力作用的构件)、机架、从动件系统(包括执行系统和传动系统)及其最后的执行构件。

② 分析机械的运动情况,从原动件开始,循着运动传递路线,分析各构件间的相对运动性质,确定构件的总数、运动副的种类和数目。

③ 合理选择投影面。选择多数构件的运动平面或平行于运动平面的平面作投影面。必要时可选择辅助投影面或局部简图:将主投影面上无法表达的部分在辅助投影面上表达,

然后展开到主投影面的同一平面上;而将主投影面简图上难以表达清楚的部分,另绘局部简图。

④ 测量构件尺寸,选择适当比例尺,定出各运动副之间的相对位置,用表达构件和运动副的简单符号绘出机构运动简图。在机架上加上阴影线,在原动件上标上箭头,按传动路线给各构件依次标上构件号 1,2,3,⋯将各运动副标上字母 A,B,C,⋯

⑤ 为保证机构运动简图与实际机械有完全相同的结构和运动特性,对绘制好的简图需进一步检查与核对:简图上的构件数目与原机构的构件数是否相等;简图上的构件间的联接形式,即运动副及其数目和相对位置与原机构是否一致;简图上原动件和固定件与原机构是否一致;根据简图计算自由度,看其与实际机构的原动件数目是否相等。

(3) 绘制和使用机构运动简图时需要注意的问题

① 熟记常用运动副的符号和表示方法。机构运动简图与工程图纸(装配图)不同,切记不要把机械制图的一些画法照搬到机构运动简图中来。

② 在机构运动简图中,主要标出各运动副的位置及与运动有关的尺寸,运动副之间的连线即表示构件,一般不考虑构件本身的形状和截面尺寸。

③ 掌握比例尺的应用。在机构运动简图中,以及在后面有关章节中,当用图解法对机构进行运动分析和力分析时,正确地选择和应用比例尺非常重要。本课程中所用的比例尺,与机械制图中的“比例”不尽相同,初学者往往容易搞混,需要特别注意。在图纸上用一定长度的线段来表示一个实际的物理量时(如长度、速度、加速度和力),该线段的长度(图示长度)与实际物理量之间存在着下述关系

$$\mu = \frac{\text{实际物理量}}{\text{图示长度}}$$

我们用符号  $\mu_L$ 、 $\mu_v$ 、 $\mu_a$  和  $\mu_F$  来分别表示长度、速度、加速度和力的比例尺,其单位分别是:

$\frac{\text{mm}}{\text{mm}}$  (或  $\frac{\text{m}}{\text{mm}}$ )、 $\frac{\text{mm/s}}{\text{mm}}$  (或  $\frac{\text{m/s}}{\text{mm}}$ )、 $\frac{\text{mm/s}^2}{\text{mm}}$  (或  $\frac{\text{m/s}^2}{\text{mm}}$ ) 和  $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$ 。图上一定长度的线段只是实际物理量的代表线段,二者之间并不相等。因此,当将一个实际物理量用代表它的线段画到图上去时,必须除以相应的比例尺,即

$$\text{图示长度} = \frac{\text{实际物理量}}{\mu}$$

而根据图示长度求出它所代表的实际物理量时,则必须乘以相应的比例尺,即

$$\text{实际物理量} = \text{图示长度} \times \mu$$

提醒初学者务必熟练掌握上述比例尺的概念及其应用,以免在以后章节的学习中出现不应有的错误。

### 3. 机构自由度的计算

判断所设计的运动链能否成为机构,是本章的重点。运动链成为机构的条件是:运动链相对于机架的自由度大于零,且原动件数目等于运动链的自由度数。

机构自由度的计算错误会导致对机构运动的可能性和确定性的错误判断,从而影响机械设计工作的正常进行,因此机构自由度计算是本章学习的重点之一。在计算机构自由度时,应注意以下几点。

### 1) 正确使用机构自由度计算公式

首先要正确判断机构是属于平面机构还是空间机构。

空间机构一般采用公式

$$F = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

来计算自由度,但在计算前一定要判断是否存在公共约束,若存在  $q$  个公共约束,则自由度计算应使用下式:

$$F = (6 - q)n - \sum_{k=q+1}^5 (k - q)p_k$$

而平面机构一般采用公式

$$F = 3n - 2p_5 - p_4$$

来计算自由度

自由度计算公式选用是否恰当,是自由度计算正确与否的关键。

本章的重点是要求读者熟练掌握平面机构的自由度计算。

### 2) 搞清构件、运动副、约束的概念

概念清楚才能正确判断活动构件数、运动副的类型和各类运动副的数目。

构件是独立的运动单元体。对于貌似能独立运动,实际上不能作相对运动的所谓“构件”的组合应看作一个构件。例如图 1.3 中  $AB, BC, AC, AD, CD$  5 杆,其实是桁架结构,应视为一个构件。图 1.4 所示的杆件 3、凸轮  $3'$  和齿轮  $3''$ ,固结为一体同轴同速转动,应视为一个构件。

运动副是指两个构件直接接触形成的可动联接。要构成运动副必须满足以下条件:要有两个构件相接触,一个构件构不成运动副,两个以上的构件在一处接触可能构成多个运动副(见图 1.5);两构件要直接接触,否则不可能对构件的某些独立运动产生约束或限制,不能形成运动副;两构件要形成可动联接,若形成不可相对运动的联接,则这种联接称为固结,这两个“构件”实际上为一个构件。

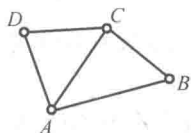


图 1.3 5 个零件组成一个构件

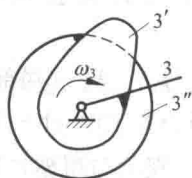


图 1.4 3 个零件组成一个构件

### 3) 正确识别和处理机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束

准确识别复合铰链、局部自由度和虚约束,并做出正确处理,是自由度计算中的难点,也是初学者容易出现错误的地方。

#### (1) 复合铰链

复合铰链是指两个以上的构件在同一处以转动副相联接时组成的运动副。准确识别复合铰链的关键是要分辨哪几个构件在同一处形成了转动副。图 1.5 中列举了一些较难辨别的情况。图(a)中杆 1,2 与机架 3 组成两个转动副;图(b)中杆 1,2 与滑块 3 形成两个转动副;图(c)中,杆 1,滑块 2 与机架 3 形成两个转动副;图(d)中,杆 1、滑块 2、滑块 3 形成两个

转动副;图(e)中,杆1、滑块3、齿轮2组成两个转动副;图(f)中,齿轮1、滑块2和机架3组成两个转动副。

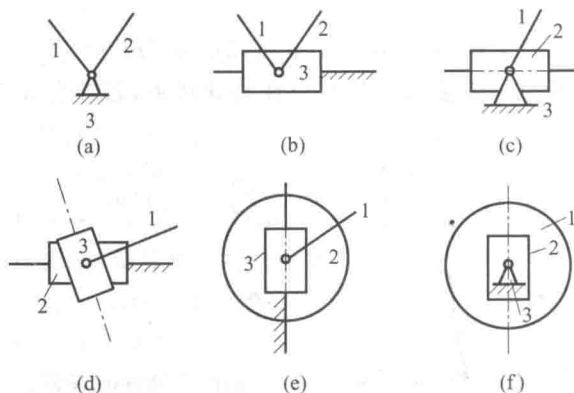


图 1.5 复合铰链示例

复合铰链的正确处理方法是:若有  $k$  个构件在同一处形成复合铰链,则其转动副的数目应为  $(k-1)$  个。

## (2) 局部自由度

局部自由度是机构中某些构件所具有的自由度,它仅仅局限于该构件本身,而并不影响其他构件的运动。局部自由度常发生在为减小高副元素间摩擦磨损而将滑动摩擦变成滚动摩擦所增加的滚子处。图 1.6 中滚子 3 绕其中心  $D$  转动的自由度就是局部自由度。若不作任何处理就简单地套用自由度计算公式,则得

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 5 - 2 \times 6 - 1 = 2$$

计算结果比机构的实际自由度大,产生了与事实不符的现象。正确的处理方法是:在计算自由度时,从机构自由度计算公式中将局部自由度减去,即

$$\begin{aligned} F &= 3n - 2p_5 - p_4 - \text{局部自由度数} \\ &= 3 \times 5 - 2 \times 6 - 1 - 1 = 1 \end{aligned}$$

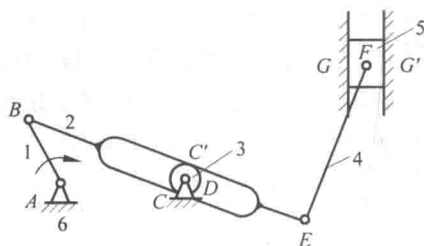


图 1.6 局部自由度的识别

也可以将滚子 3 视为与机架 6 固结为一体,预先将滚子这个构件除去不计,然后再利用公式计算自由度,即

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$

## (3) 虚约束

虚约束是机构中所存在的不产生实际约束效果的重复约束。在计算自由度时,若对虚约束不加识别和处理,直接套用公式计算,则计算结果将比机构的实际自由度数少,导致与事实不符的现象。正确的处理方法是:在计算自由度时,首先将引入虚约束的构件及其运动副除去不计,然后用自由度公式进行计算。

虚约束都是在一定的几何条件下出现的。这些几何条件有些是暗含的,如两构件组成若干移动副,但移动副导路互相平行;两构件组成若干转动副,但转动副的轴线互相重合;两构件组成若干平面高副,但各接触点的公法线彼此重合;以及某些不影响机构运动传递的重