

机械原理



类目：机械类

书名：机械原理

主编：黎海涛 李彦明 李晓刚

出版社：哈尔滨工业大学出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5767-3076-0

使用层次：通用

出版时间：2026 年 6 月

定价：49.80 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

策划编辑：闻 竹
责任编辑：谢晓彤
封面设计：唐语书装

机械类“十五”创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材



机械类“十五”创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

机械原理



机械原理

JIXIE YUANLI



主 编 黎海涛 李彦明 李晓刚

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



机械原理

主 编 黎海涛 李彦明 李晓刚

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



机械类“十五五”创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材



机械原理

主 编 ◎ 黎海涛 李彦明 李晓刚
副主编 ◎ 胡变娜 王贵冲 黄 凯
 王明俊 周 萌 王广印
 李利欣 李明贺 方 芳
 刘 俊 李 梅



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统阐述了机械原理的基本理论、分析方法和设计技术,内容涵盖机构运动分析、常用机构设计及机械系统总体设计等核心知识。全书共 12 章,包括绪论、机构的基础知识、机构的运动分析、平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、蜗杆机构、轮系、其他常用机构、机器的机械效率与摩擦、机械的平衡及机械系统总体设计。各章均配有思考与练习,便于巩固与拓展。

本书注重理论与实践结合,既深入剖析机构学基本概念与设计方法,又引入学科发展前沿成果,旨在培养读者机械产品运动方案设计、机构创新及工程应用能力,可作为高等学校机械类专业教材,也可供相关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理 / 黎海涛, 李彦明, 李晓刚主编. — 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2026. 6. — ISBN 978-7-5767-3076-0

I. TH111

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026D115F4 号

策划编辑 闻 竹
责任编辑 谢晓彤
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 三河市祥达印刷包装有限公司
开 本 889 mm×1 194 mm 1/16 印张 13.5 字数 362 千字
版 次 2026 年 6 月第 1 版 2026 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5767-3076-0
定 价 49.80 元

(如因印装质量问题影响阅读, 我社负责调换)

前言

作为机械类专业核心技术课程，机械原理承担着关键的教学使命，既要培养学生设计机械传动系统的核心能力，更要为他们后续从事机械产品的设计与创新筑牢理论根基。对于机械产品设计工作者而言，熟练掌握机械传动原理、精准开展机构运动分析、科学进行传动系统设计是不可或缺的专业素养。

然而，当前教学中存在学生被动学习的现象，传统教材已难以满足培养能设计出性能优异、安全可靠且富有创新性的机械产品人才的需求。为破解这一难题，推动教材革新势在必行，而本书的编写正是对这一趋势的积极回应。

本书立足机械原理课程在机械专业课程体系中的关键地位，以赋能学生形成强大的机械产品创新设计能力为核心目标，构建起“夯实基础、突出典型、服务社会”的全新设计及创新能力培养体系。

在内容编排上，第一章呈现课程背景，凸显其在机械专业领域的重要性；第二章至第九章聚焦机械系统中的典型传动系统，深入解析其工作原理与计算方法，结合丰富的实际工程案例，重点阐释连杆传动与齿轮传动的独特特征；第十章至第十二章则系统讲解机械整体系统的合理化设计，为学生提供从局部到整体的完整知识架构。

本书在编写的过程中，参阅了大量的书籍和资料，在此对原作者一并表示感谢！

由于编者水平所限，书中的疏漏与不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2026 年 3 月

目 录

第一章 绪论 1

第一节 机械原理研究的对象及内容	2
第二节 机械原理课程的特点与学习	5
第三节 机械原理学科发展现状	6
思考与练习	7

第二章 机构的基础知识 8

第一节 运动副及其分类	9
第二节 平面机构运动简图	12
第三节 平面机构的自由度计算	14
第四节 平面机构的组成原理及结构分析	19
思考与练习	24

第三章 机构的运动分析..... 26

第一节 机构运动分析的内容、目的和方法	27
第二节 用速度瞬心法做机构的速度分析	27
第三节 用矢量方程图解法做机构的运动分析	31
第四节 综合运用速度瞬心法和矢量方程图解法对复杂机构进行速度分析	35
第五节 用解析法做机构的运动分析	36
思考与练习	39

第四章 平面连杆机构 42

第一节 平面连杆机构的特点及应用	43
第二节 平面连杆机构的类型及延伸	46
第三节 铰链四杆机构的工作特性	52
第四节 平面四杆机构的设计	56
第五节 机构的组合方式与组合机构	59
思考与练习	62

第五章 凸轮机构 64

第一节 凸轮机构的特点和类型	65
第二节 凸轮从动件常用运动规律分析	68
第三节 盘形凸轮轮廓设计	73
第四节 凸轮机构基本参数的选择	76
思考与练习	79

第六章 齿轮机构 81

第一节 概述	82
第二节 渐开线齿廓及其啮合特性	83
第三节 标准直齿圆柱齿轮的基本参数及几何尺寸	85
第四节 齿轮的啮合传动	88
第五节 齿轮切齿方法、根切现象和变位齿轮	89
第六节 齿轮的失效形式、常用材料及热处理	93
第七节 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	98
第八节 齿轮主要参数和精度等级的选择	105
第九节 斜齿圆柱齿轮传动	106
第十节 直齿圆锥齿轮传动	113
第十一节 齿轮的结构和齿轮传动的润滑	119
思考与练习	120

第七章 蜗杆机构 122

第一节 蜗杆传动的类型和特点	123
----------------------	-----

第二节 蜗杆传动的失效形式、材料和结构	125
第三节 蜗杆传动的基本参数和几何尺寸计算	127
第四节 蜗杆传动的设计计算	130
思考与练习	132

第八章 轮系..... 134

第一节 轮系的分类	135
第二节 轮系传动比的计算	137
第三节 轮系的应用	142
思考与练习	144

第九章 其他常用机构 145

第一节 螺旋机构	146
第二节 棘轮机构	153
第三节 槽轮机构	157
第四节 不完全齿轮机构	159
第五节 广义机构	160
思考与练习	162

第十章 机器的机械效率与摩擦 163

第一节 机械效率与自锁	164
第二节 运动副中的摩擦	167
思考与练习	174

第十一章 机械的平衡 176

第一节 机械平衡的目的及类型	177
第二节 刚性转子的平衡	178
第三节 刚性转子的平衡实验	181
第四节 转子的平衡精度	183
第五节 平面机构的平衡	184
思考与练习	189

第十二章 机械系统总体设计 191

第一节 概述	192
第二节 原动机与机构的选型	194
第三节 执行系统的协调设计	198
第四节 机械运动方案设计	201
思考与练习	205

参考文献 207

01

第一章 绪论

- 第一节 机械原理研究的对象及内容
- 第二节 机械原理课程的特点与学习
- 第三节 机械原理学科发展现状

第一节

机械原理研究的对象及内容

一、机械原理学科的形成

机械原理是一门研究机械的基础学科，它的历史还是比较短的。在 19 世纪末，随着机器制造业的迅速发展，产生了基础科学怎样与工程技术相结合的问题，因此，就从力学中分出了材料力学、应用力学、机构学、机械零件等独立的学科。其中，机构学发展成为现在的机械原理。到了 20 世纪，由于高速、重载机械的出现，在机构学课程中加入了机械动力学的研究内容。随着机器生产的不断发展，又增加了许多新的分析与设计的问题，渐渐形成了现在的机械原理课程。所以，机械原理是机器和机构理论的简称，它是一门以机器和机构为研究对象的学科。一般将机器和机构总称为机械，但机械与机器在用法上略有不同，机器常用来指一个具体的概念，如抽油机、拖拉机、内燃机等；而机械则常用在更广泛、更抽象的意义上，如石油机械、机械工业、机械化等。

二、有关机器的若干概念

我们对机构并不陌生，在以前的学习中了解了连杆机构、齿轮机构、凸轮机构和螺旋机构等，各种机构都是用来传递与变换运动和力的可动的装置。机器则是执行机械运动的装置，可用来变换或传递能量、物料和信息。

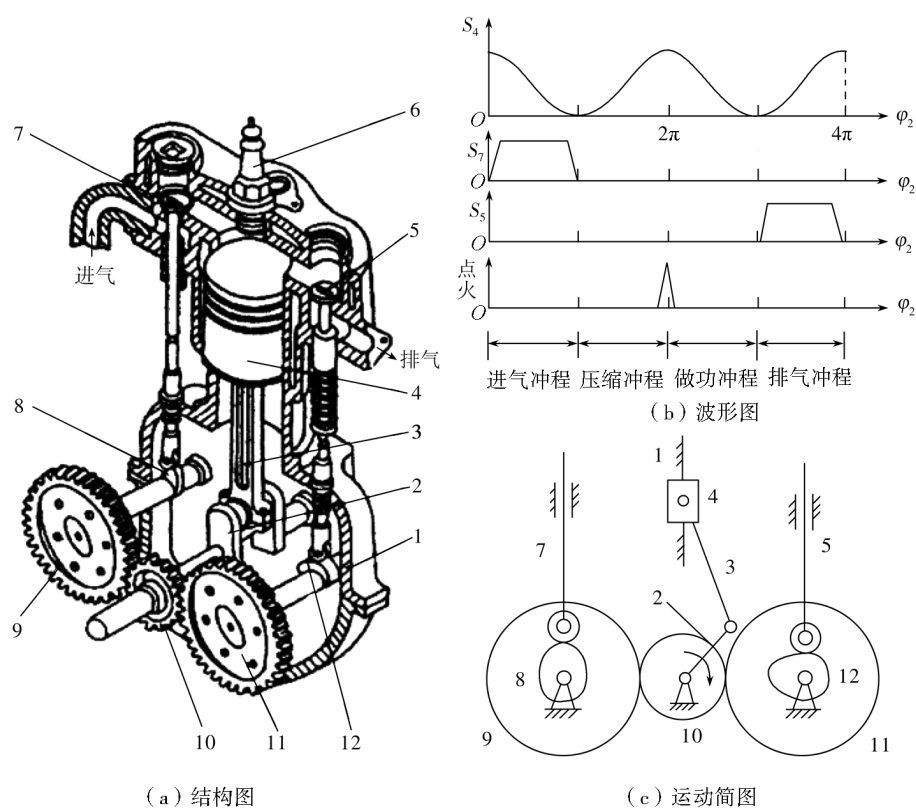
在长期的生产实践中，人类为了减轻劳动强度，改善劳动条件，提高劳动生产率，创造和发明了各种机器，如汽车、车床、电动机、缝纫机、洗衣机、抽油机等。

机器的种类繁多，其构造、性质和用途等各不相同。但从机器的组成分析，又有共同点，即都是由一些典型的机构和零件组成。图 1-1 所示为单缸内燃机。当活塞 4 做往复移动时，通过连杆 3 使曲轴 2 做连续转动，从而将燃气的热能转化为曲轴 2 的机械能。通过齿轮 9~11、凸轮 8 和 12、推杆 5~7 及弹簧等的作用，按一定规律启闭进气阀和排气阀，用以输入燃气和排出废气，保证了内燃机的连续工作。

图 1-2 所示为游梁式抽油机。整个抽油装置由电动机 1 带动，动力通过 V 带 2、减速箱 13、曲柄摇杆机构和横梁 7 把电动机 1 的高速旋转运动变为了抽油机驴头 9 的低速上下往复运动，通过悬绳器 10 带动抽油杆以实现油井中抽油泵的往复抽油运动。

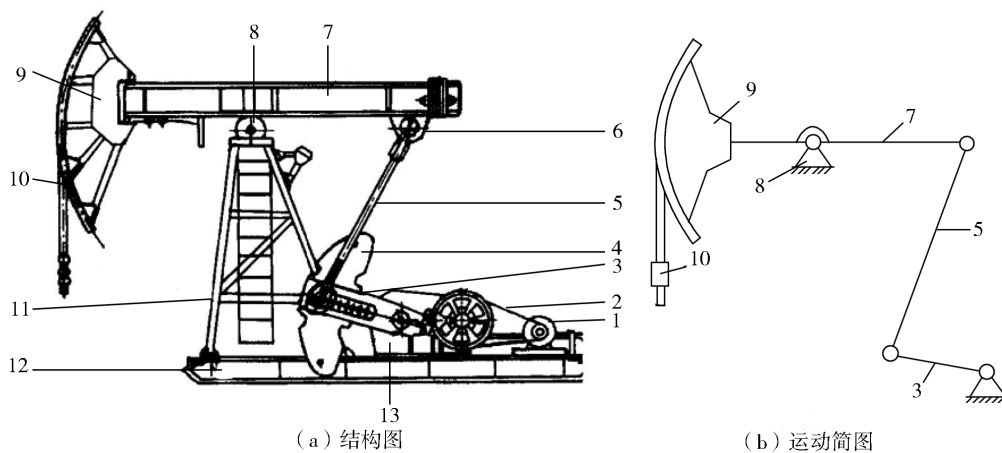
从以上示例可知，机器具有下列 3 个共同特征：

- (1) 是人为的实物组合体。
- (2) 各组合体之间具有确定的相对运动。
- (3) 能完成有效的机械功或转换机械能。



1—缸体；2—曲轴；3—连杆；4—活塞；5~7—推杆；8、12—凸轮；9~11—齿轮。

图 1-1 单缸内燃机



1—电动机；2—V带；3—曲柄；4—平衡块；5—连杆；6—平衡重；7—横梁；
8—轴承座；9—抽油机驴头；10—悬绳器；11—支架；12—橇座；13—减速箱。

图 1-2 游梁式抽油机

同时具备上述 3 个特征的组合体称为机器，只具备前两个特征的组合体称为机构。

机构中形成相对运动的各个运动单元称为构件，同一构件上的任意两点距离始终保持不变；零

件则是加工制造的基本单元。通常将机械零件分为通用机械零件和专用机械零件两大类：前者是在各种机器中经常都能用到的零件，如螺钉、齿轮、轴等；后者是在特定类型的机器中才能用到的零件，如石油钻井用的牙轮，泥浆泵的活塞、缸套及灌注泵的叶轮等。为完成同一使命，在结构上紧密联系在一起的一套协同工作的零件组合称为部件，如减速器、联轴器、离合器等。

就结构而言，一般情况下，机器是由若干机构协调组合而成，机构则是由若干构件以动连接组合而成，构件又是由若干零件以静连接组合而成，机器按结构的组成关系如图 1-3 所示。

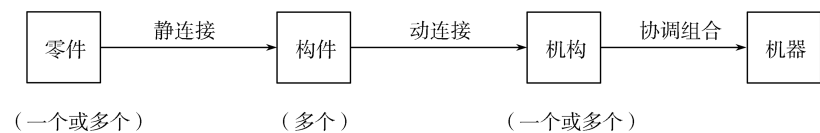


图 1-3 机器按结构的组成关系

就功能而言，一部机器一般都包含 4 个基本的组成部分，它们分别为：原动机、传动装置、工作机和控制系统，机器按功能的组成关系如图 1-4 所示。原动机是机器的运动和动力来源，常用的原动机有电动机、内燃机、液压缸或气动缸等。传动装置介于原动机和工作机之间，把原动机的运动和动力传递给工作机。工作机处于整个传动路线的终端，完成机器预期的动作，它的结构形式完全取决于机器本身的用途。控制系统是控制机器的其他基本部分，使操作者能随时实现或终止各种预定的功能，现代机械的控制部分既包括机械控制系统，又包括电子控制系统，其作用为监测、调节、计算机控制等。

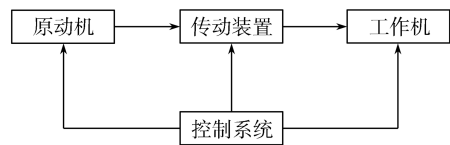


图 1-4 机器按功能的组成关系

三、机械原理课程的研究内容

机械原理课程的研究内容主要包括以下几个方面。

1. 机构的结构分析

首先研究机构是怎样组成的以及如何建立一个机构；其次研究机构的组成原理及机构的结构分类；最后研究如何绘制机构运动简图等问题。

2. 机构的运动分析

对机构进行运动分析，是了解现有机械运动性能的必要手段，也是设计新机械的重要步骤。本书将介绍机构的运动分析的基本原理和方法。

3. 机器的动力学

分析和研究机器在运转过程中各构件的受力情况以及这些力做功的情况；分析和研究影响机械效率的主要因素和机械效率的计算方法；研究机械在外力作用下的真实运动规律和速度波动问题，

以及设计调速装置来降低速度波动的不良影响；分析和研究不平衡惯性力和惯性力矩的平衡问题。

4. 常用机构的分析与设计

分析和研究各种常用机构的工作原理、类型、运动特点、功能及设计方法。常用机构主要指连杆机构、凸轮机构、齿轮机构这三大机构。

5. 机械系统的方案设计及机构的创新设计

讨论机械设计时机构的选型、组合、变异和机械系统的方案设计，并介绍机构创意创新等问题。

四、机械原理课程的任务

机械原理课程的任务：认识机构和设计机构。

为满足各行各业和广大人民群众日益增长的新需求，就需要创造出更多的新产品，故现代机械工业对创新型人才的渴望与日俱增。机械原理课程在培养机械方面的创新型人才中将起到不可或缺的作用。

第二节 机械原理课程的特点与学习

机械原理是机械类专业学生必修的一门十分重要的课程。本课程不研究某类具体的机械，而是研究一切机械所具有的共性问题，本课程所涉及的基础知识对任何机械而言都具有普遍意义。

学生在学习本课程之前必须具有扎实的高等数学、机械制图、物理、理论力学的基本知识。而在学习后续的机械设计、机械制造技术及机械制造装备设计等课程之前，必须较好地掌握机械原理的基本概念、基本理论及基本技能，具备一定的机构分析与机构综合的能力。因此，本课程是处在理论基础课与机械专业课之间的一门承上启下的技术基础课程。

机械原理是引领机械类专业学生认识与了解机械的第一门课程，是富于创造性的课程。没有此课程良好的知识基础，学生在今后的学习和工作中就难以顺利地完成机械设计任务，也更难开展机械创新设计工作。一切有志于促进我国机械工业发展的学生都应该重视机械原理的学习，并且深入掌握此课程的基本概念、基本理论与基本技能。

作为机械类专业的一门技术基础课，机械原理具有较为系统的理论特征；本课程的知识最早源于前人对实际机械的长期分析与总结，随后上升到一定高度而成为理论系统，再反过来服务于机械设计的实际，因而又具有很强的实践性。严密的理论与很强的实践性相结合的特点往往使初学者感到困难。

本课程理论体系让学生感到困难的原因在于其抽象性，该课程所用的机构运动简图完全不同于实际机械的图样。针对机构运动简图进行运动学和动力学分析与设计时，需要综合运用数学、物理、图学、力学、计算机等方面的知识，任何项知识欠缺都会给学习带来不便。

另外，机械原理所要解决的问题并不抽象，所有问题的解决对于实际机械都具有很强的针对性。

但一般初学者普遍缺乏对现实机械的认识与了解，因而很难找到将机械原理知识应用于实际机械的切入点，以致难以激发学习的浓厚兴趣。

由于机械原理课程的理论抽象性和实际机械的实践性，在学习本课程时，应提倡“加强课堂学习，培养自学能力，树立设计观念，理论联系实际”的24字学习方针。

机械原理的研究是通过以下两大内容来进行的：

- (1) 研究机构和机器所具有的一般共性问题，如机构的组成、机构的运动学、机器的动力学等；
- (2) 研究常用机构的性能及其设计方法，以及机械系统方案设计的问题。

要注意培养自己运用所学的知识去发现、分析和解决工程实际问题的能力。解决工程实际问题往往可以采用多种方法，所得结果一般也不是唯一的，这就涉及分析、对比、判断和决策的问题。对事物进行正确的分析、判断和决策是工程技术人员必须具备的基本能力。

在应用机械原理课程所学的知识时要融会贯通，不要墨守成规，尤其是在独创性已成为决定产品设计成败关键的今天，更要注意培养自己的创新精神和能力。一般学习过程中应用的是归纳、演绎、逻辑推理的思维方式，而创造性活动常常是一种逻辑思维和形象思维并存的思维活动，因为创造常常是偶然中出现的，也就是必然性包含在偶然之中。在具体的机构设计方法上，常常是作图和计算交叉进行，相互启发，以获得合适的答案。在思维方式上，既要培养顺着教材启发的逻辑思维，还要培养激发创造力的形象思维方式。掌握合适的思维方式，勤学、勤思、勤动手，一定能获得相应的创造性成果。

第三节

机械原理学科发展现状

机械原理学科是机械学学科的重要组成部分，是机械工业和现代科学技术发展的重要基础。当今世界，电子学、计算机科学、信息科学等，以及学科间的相互渗透与相互融合，极大地促进了机械学科的发展。现代机械工业多极化的发展趋势就是多学科相互渗透与结合的充分体现。



机械原理学科发展现状

机械工业所谓的“三极”就是指“极大”“极小”和“极灵敏”：“极大”者如大飞机、超级油轮、巨无霸水压机和超大型空间站等；“极小”者如能进入人体血管爬行以清除堵塞物的微型装置、收集情报用的“蚊子机器人”等；“极灵敏”者如高命中率的超远程巡航导弹等。一些庞然大物似的机器或机构的运动速度可数倍于音速，或者有的能实现微米级甚至纳米级的微位移。机械工业发展的极端状态必定促进机械原理传统理论的演绎与发展，因此，新的研究课题层出不穷，新的研究方法日新月异。

为了适应激烈的市场竞争环境，开发的商业软件可用于常用机构和组合机构中复杂运动规律运动学及动力学参数的分析与设计。计算机的广泛应用，使得人们在机构的结构理论研究中，令图论、网络分析、几何学、螺旋坐标等各种数学方法的应用成为可能。根据设计要求给出由设计变量、约束条件和目标函数所确定的最优化数学模型，优选设计变量，确定最优化设计方案的优化设计方法，

已成为在较复杂机构综合设计中普遍适用的方法和主要发展方向。

机械原理学科研究领域十分广阔，内容极为丰富，发展非常迅猛。机械原理学科涌现出的大量前沿研究课题，极大地吸引着国内外从事机械工程的教师或研究者。当然，机械原理课程只是一门技术基础课，学习本课程还不能获得解决本学科前沿课题的能力，但可以由此掌握进一步研究机械原理新课题的知识基础。有志于探索机械原理学科前沿课题的青年学子在已有的机械原理知识的基础上继续深造、不懈求索，就一定能够获得攻克前沿难题的可喜成果。



思考与练习

1. 试说明机器、机构、构件、零件的定义。
2. 一部完整的机器通常由哪些基本部分组成？
3. 请指出汽车、自行车的原动机、传动装置、工作机和控制系统。
4. 请查阅资料说明刚性机构、变胞机构(属于变拓扑机构)、气动机构、液压机构及广义机构的定义，并举例。

02

第二章 机构的基础知识

- 第一节 运动副及其分类
- 第二节 平面机构运动简图
- 第三节 平面机构的自由度计算
- 第四节 平面机构的组成原理及结构分析

如绪论所述，机构是由构件组成的，各构件之间具有确定的相对运动。显然，任意拼凑的构件组合不一定能发生相对运动，即使能够发生相对运动，也不一定具有确定的相对运动。讨论构件按照什么条件进行组合才具有确定的相对运动，对于分析现有机构和设计新机构都具有十分重要的意义。另外，机械的外形和结构都很复杂，为了便于分析研究，在工程设计中应学会用简单的线条和规定的符号来绘制机构的运动简图。

所有构件都在同一平面或相互平行的平面内运动的机构称为平面机构，否则称为空间机构。目前工程中常见的机构大多属于平面机构，本章只讨论平面机构。

第一节 运动副及其分类

一、运动副的概念

当许多构件组成机构时，机构的各个构件需要以一定的方式与其他构件相互连接，还要具有一定的相对运动，如轴与轴承之间的连接，活塞与气缸之间的连接，火车车轮与钢轨之间的连接等，这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的连接称为运动副。

二、运动副的分类

运动副根据组成运动副的两构件间相对运动的不同分为平面运动副和空间运动副。

两构件只能在同一平面相对运动的运动副称为平面运动副。两构件间通常有 3 种接触形式，即点接触、线接触和面接触。根据两构件的接触特性，将平面运动副分为低副和高副两大类。

1. 低副

两构件以面接触的运动副称为低副。根据构件相对运动形式的不同，它又分为转动副和移动副。

两构件只能做相对转动的运动副称为转动副或铰链。如图 2-1(a)、(b) 所示，有一个构件固定的称为固定铰链；若两构件均不固定，则称为活动铰链，此时，两构件之间为相对转动。

两构件只能沿某一轴线做相对移动的运动副称为移动副，如图 2-1(c) 所示。

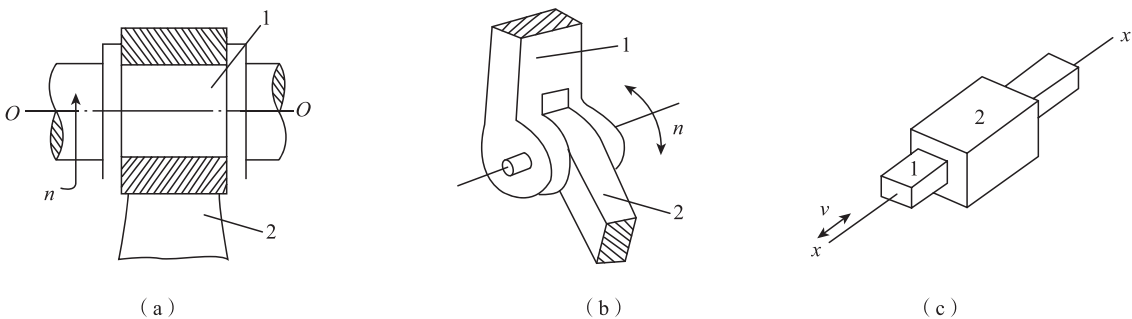


图 2-1 低副

2. 高副

两构件以点、线相接触而组成的运动副称为高副，如图 2-2 所示。

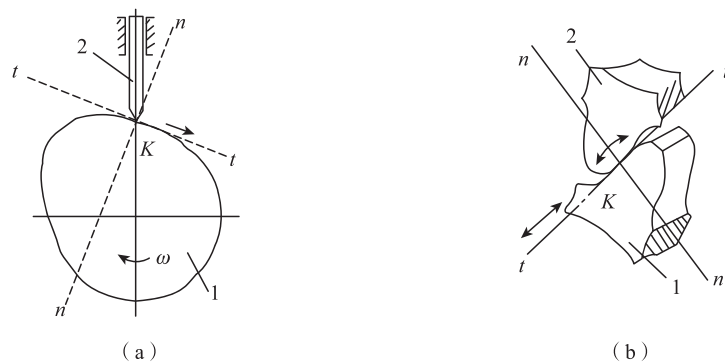


图 2-2 高副

此外，在常用的运动副中，如球面副、螺旋副[图 2-3(a)、(b)]等，它们都属于空间运动副，即两构件的相对运动为空间运动。

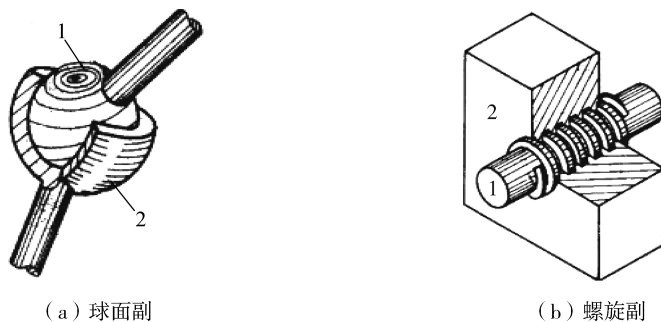


图 2-3 空间运动副

三、运动副的表示方法

由于两构件间的相对运动仅与其直接接触部分的几何形状有关，而与构件本身的实际结构无关，为突出运动关系，便于分析、研究，常将构件和运动副用简单的符号来表示。

1. 转动副

两构件组成转动副时，其表示方法如图 2-4 所示。图 2-4(a)表示图面垂直于回转轴线；图 2-4(b)表示图面不垂直于回转轴线。构件画上斜线表示机架。

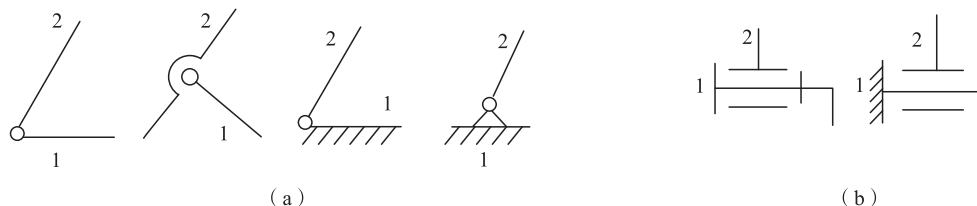


图 2-4 转动副的表示方法

2. 移动副

两构件组成移动副的表示方法如图 2-5 所示。

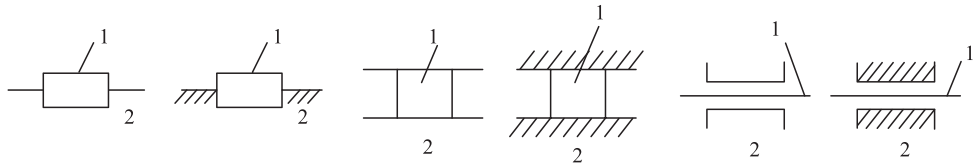


图 2-5 移动副的表示方法

3. 平面高副

当两构件构成高副时，其运动简图中，可在两构件的接触处示意性地画出曲线轮廓。对于凸轮、滚子，习惯画出其全部轮廓；对于齿轮，常用点画线画出其节圆，如图 2-6 所示。

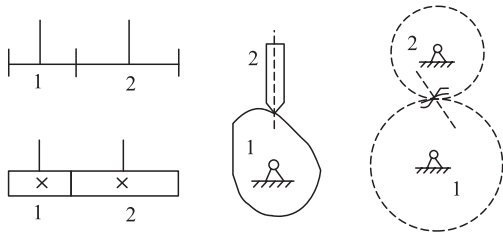


图 2-6 平面高副的表示方法

四、构件及其表示方法

1. 构件的分类

机构中的构件可以分为 3 类：固定构件(机架)——机构中相对固定不动的构件，它是用来支撑活动构件的；主动件——按给定运动规律的活动构件，一般与机架相连；从动件——随主动件运动的其余活动构件。

2. 构件的表示方法

构件的表示方法如图 2-7 所示。图 2-7(a)表示一个可组成 2 个转动副的构件，图 2-7(b)表示可组成 1 个转动副和 1 个移动副的构件；图 2-7(c)、(d)均表示可组成 3 个转动副的构件，其中图 2-7(c)表示焊 1 接在一起组成 3 个转动副的构件。

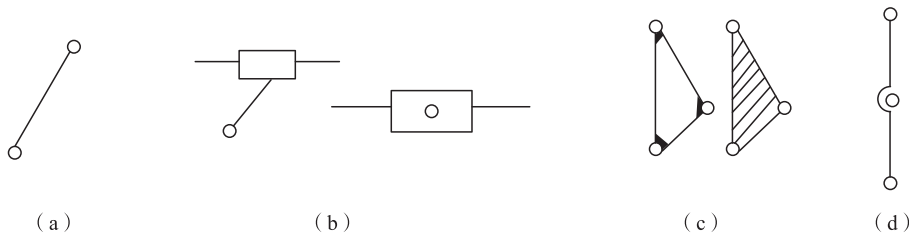


图 2-7 构件的表示方法

五、运动链和机构

2 个以上的构件通过运动副连接而成的系统称为运动链。运动链中各组成构件形成首末相连的封闭运动链称为闭式运动链，如图 2-8(a)所示；否则称为开式运动链，如图 2-8(b)所示。



图 2-8 运动链

在运动链中，若将某一个构件加以固定作为机架，而另一构件或几个构件按给定的运动规律相对于该固定构件运动时，其余构件也均随之具有确定的相对运动，这种运动链就称为机构。

平面机构的组成要素是构件和运动副。一个机构有 3 类构件，即主动件、从动件和机架。平面运动副的分类中，高副和低副是按照接触方式的不同分类的。应熟练掌握构件和运动副用简化符号表示的方法。

第二节 平面机构运动简图

一、平面机构运动简图的概念

在研究或设计机构时，为避免机构复杂的结构外形对运动分析造成干扰，可以不考虑机构中与运动无关的因素，仅用简单的线条和符号来表示构件和运动副，并按一定比例表示各运动副的相对位置。这种表示机构的组成和各构件间相对关系的运动简图，称为平面机构运动简图。

二、平面机构运动简图的绘制

绘制平面机构运动简图时，首先要分析机构的构造和运动情况，其次按照构件和运动副的组成情况进行运动简图的绘制。具体步骤如下：

- (1) 分析机构的运动和结构，找出机架、主动件、从动件，以及执行件（直接完成工作动作的构件）。
- (2) 分析机构的运动特征，从主动件开始，沿运动传递路线，逐个分析构件间相对运动的性质，依次确定运动副的类型和数量。
- (3) 选择适当的视图平面和比例尺。
- (4) 用规定符号和线条绘制平面机构运动简图。



【例 2-1】 试绘制图 2-9 所示颚式破碎机主体机构的运动简图。

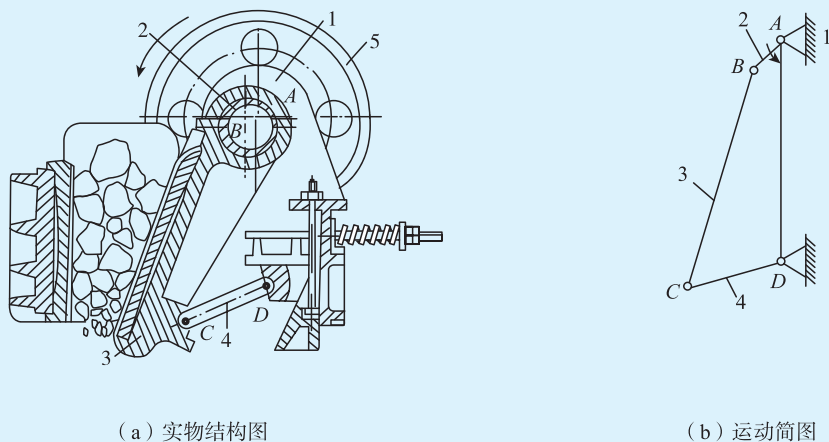


图 2-9 颚式破碎机

解：

(1) 分析机构的运动和结构，找出机架、主动件、从动件、执行件。图 2-9 所示的颚式破碎机主体部分由机架 1、偏心轮(主动件)2、动颚板(从动件)3、肘板 4 共四个构件组成。偏心轮 2 绕轴 A 转动时，驱使动颚板 3 做平面运动，将矿石粉碎，故动颚板 3 也称执行件。

(2) 分析机构的运动特征，确定运动副的类型和数量。偏心轮 2 与机架 1、偏心轮 2 与动颚板 3、动颚板 3 与肘板 4、肘板 4 与机架 1 均构成转动副，转动中心分别为 A、B、C、D。

(3) 选择构件的工作平面为视图平面，如图 2-9(a)所示。

(4) 根据实物结构尺寸及图纸的大小，按适当的比例尺依次确定转动副 A、B、C、D 的位置，而后用规定符号和线条绘制出机构运动简图，并用箭头标出主动件的运动方向，如图 2-9 (b)所示。

【例 2-2】 试绘制图 2-10 所示抽水唧筒主体机构的运动简图。

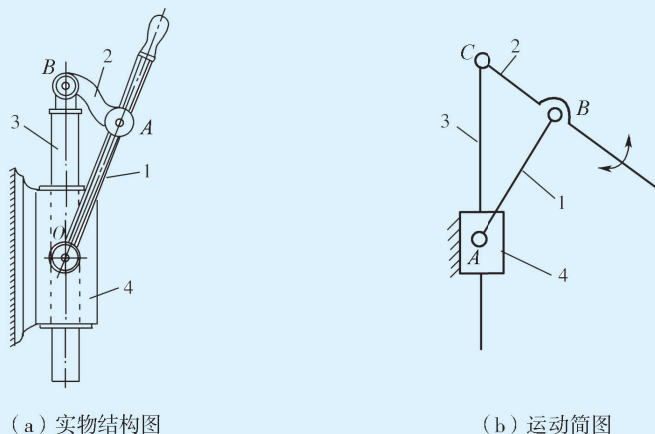


图 2-10 抽水唧筒

解：

(1) 分析机构的运动和结构，找出机架、主动件、从动件、执行件。图 2-10 所示的抽水唧筒由手柄 1(主动件)、杆件 2、活塞杆 3、抽水筒 4(机架)共四个构件组成。当人将手柄往复推拉时，刚性结构的活塞和活塞杆上下移动便可将水抽出。

(2)分析机构的运动特征,确定运动副的类型和数量。手柄1与杆件2、杆件2与活塞杆3、手柄1与抽水筒4均构成转动副,抽水筒4与活塞杆3构成移动副。

(3)选择构件的工作平面为视图平面,如图2-10(a)所示。

(4)根据实物结构尺寸及图纸的大小,按适当的比例尺依次确定转动副A、B、C的位置,而后再用规定符号和线条绘制出机构运动简图,并用箭头标出主动件的运动方向,如图2-10(b)所示。

平面机构运动简图是比较抽象的,其绘制是重点和难点,在学习的时候,一定要掌握其要点和步骤。

第三节 平面机构的自由度计算

为了判定所设计的机构是否产生相对运动并具有运动确定性,就必须计算平面机构的自由度。

一、平面机构自由度的计算

1. 自由度和约束

任何一个构件在空间自由运动时皆有6个自由运动:沿着3个坐标轴的移动和绕3个坐标轴的转动。而对于一个做平面运动的构件,只能做3种运动,即沿 x 、 y 轴的移动和 xOy 平面内的转动,平面运动构件的自由度如图2-11所示。这种构件相对于参考系所具有的独立运动参数的数目称为自由度。

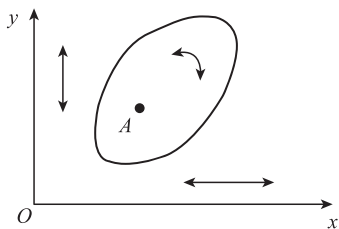


图 2-11 平面运动构件的自由度

当构件通过运动副连接后,其某些相对运动就会受到限制。这种对构件的相对运动所加的限制称为约束。

2. 平面机构自由度的计算方法

平面机构的自由度就是该机构中各构件相对于机架所具有的独立运动的数目。

设一个平面运动链共有 N 个构件,取其中1个构件作为机架,则活动构件的数目 $n = N - 1$ 。在未用运动副连接之前,1个活动构件有3个自由度, n 个活动构件共有 $3n$ 个自由度。若用 P_L 个低副和 P_H 个高副连接运动链,平面机构的自由度 F 的计算公式为

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (2-1)$$

由式(2-1)可知,平面机构的自由度 F 取决于运动链中活动构件的数目、运动副的类型和数目。机

机构的自由度必须大于零,才能够运动。如果自由度等于零,机构就不能运动,即不是机构。

【例 2-3】 试计算图 2-9 所示颞式破碎机主体机构的自由度。

解:

此机构活动构件数 $n=3$, 低副数 $P_L=4$, 高副数 $P_H=0$ 。

由式(2-1)得

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

二、机构具有确定运动的条件

机构能否实现预期的运动,取决于运动是否具有可能性和确定性。由前所述,只有自由度大于零的机构才能运动。由于每个主动件只有一个独立运动,故机构自由度与主动件的数目必定相等。图 2-9 所示的颞式破碎机主体机构中,该机构的自由度为 $F=1$, 主动件数目为 1。

如图 2-12(a)所示的五杆铰链机构中,若取构件 1 为主动件,则该机构的自由度 $F=3 \times 4 - 2 \times 5 - 0=2$ 。主动件数小于 F , 当构件 1 处于图示位置时,从动件 2、3、4 的位置既可在实线处,也可在双点画线处,其位置是不确定的。只有给出 2 个主动件,才能使从动件获得确定运动。

如图 2-12(b)所示的平面四杆机构中,由于主动件数为 2, 大于机构自由度 $F=3 \times 3 - 2 \times 4 - 0=1$, 因此主动件 1 和主动件 3 不可能同时按图中给定方式运动。

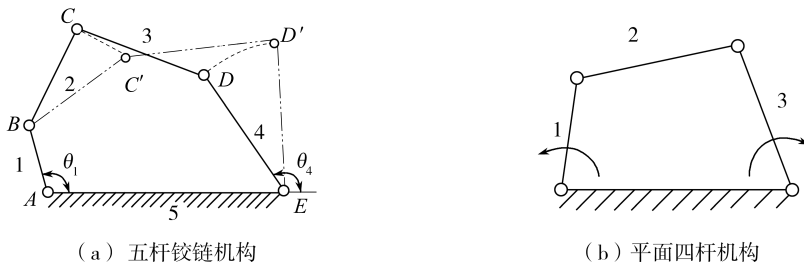


图 2-12 不同自由度机构的运动

由此可见,机构具有确定运动的条件是:机构自由度必须大于零,且主动件数与其自由度必须相等。

三、计算平面机构自由度时的注意事项

1. 复合铰链

由 3 个或 3 个以上构件在同一轴线上用转动副构成的连接,称为复合铰链。如图 2-13(a)所示为 3 个构件在点 A 处构成的复合铰链。从图 2-13(b)可见,3 个构件实际上构成了共轴线的 2 个转动副。所以由 m 个构件组成复合铰链时,应具有 $(m-1)$ 个共轴线转动副。

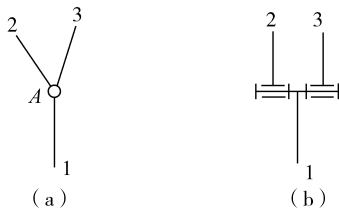


图 2-13 复合铰链

【例 2-4】 计算图 2-14 所示圆盘锯直线机构的自由度。

解：

机构中有 7 个活动构件， F 、 B 、 C 、 D 四处均为 3 个构件构成的复合铰链，各有 2 个转动副， E 、 A 处各有 1 个转动副，因此，该机构 $n=7$ ， $P_L=10$ ， $P_H=0$ 。

由式(2-1)可得

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 = 1$$

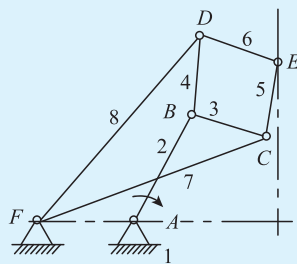


图 2-14 圆盘锯直线机构

2. 局部自由度

在机构中，不影响其他构件的运动的某些构件的局部运动自由度称为局部自由度。在计算机构自由度时，可略去不计。

如图 2-15(a)所示的凸轮机构中，当主动件凸轮 1 顺时针转动时，通过滚子 3 使从动件 2 沿机架直线往复移动。显然，滚子 3 绕其自身轴线 C 转动与否并不影响凸轮 1 与从动件 2 之间的相对运动，形成机构的局部自由度，在计算机构的自由度时，应将转动副 C 略去不计，视滚子 3 与从动件 2 为 1 个构件来考虑，如图 2-15(b)所示。此时，在机构中， $n=2$ ， $P_L=2$ ， $P_H=1$ ，其自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$ 。即此凸轮机构中只有 1 个自由度。



图 2-15 局部自由度

3. 虚约束

在机构的运动中不起限制作用的约束称为虚约束。在计算机构自由度时应将虚约束去除不计。虚约束经常出现在以下几种情况中。

①两构件间组成多个运动副，其中只有 1 个运动副起约束作用，其余为虚约束。如图 2-16(a)所示轴与轴承之间组成 2 个相同且轴线重合的转动副 A 和 B ，其中 1 个转动副为虚约束；如图 2-16(b)所示两构件组成多点接触且公法线重合的高副，只考虑 1 处高副；如图 2-16(c)所示两构件组成多个导路平行或重合的移动副，按 1 个移动副考虑。

②两构件上某两点间的距离在机构运动中始终保持不变，此时将该两点用 1 个构件和 2 个转动副连接后，由此引入的约束为虚约束。如图 2-16(d)所示的平行四边形机构中，用 1 个定长度的杆 5 将

2 个转动副 E 和 F 连接起来, 由此带来的约束为虚约束, 不会影响原机构的运动。去除虚约束后, 该机构的自由度 $F=3 \times 3-2 \times 4-0=1$ 。

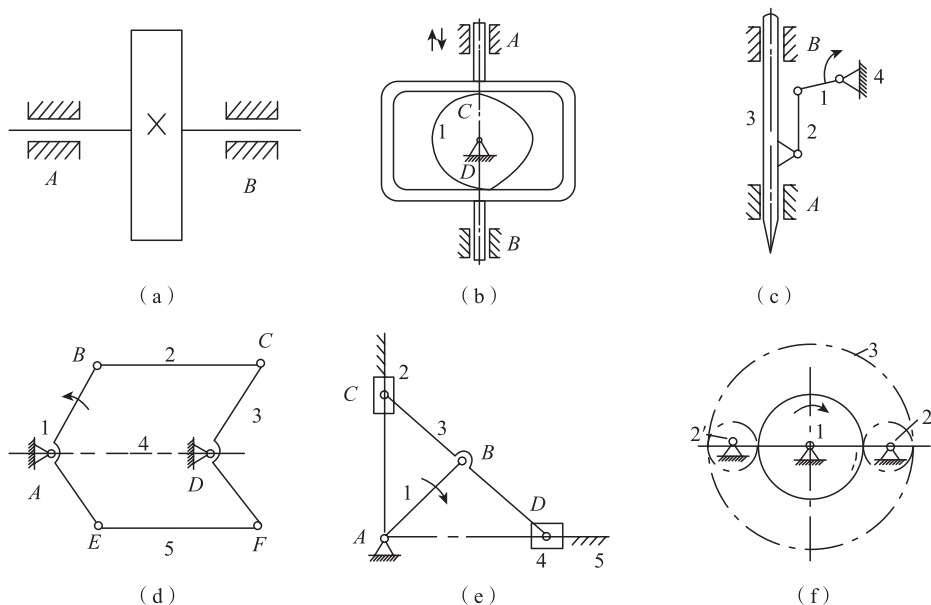


图 2-16 虚约束

③两构件连接前后, 连接点的运动轨迹相互重合时, 此种连接(运动副)引入的约束为虚约束。如图 2-16(e)所示的椭圆仪机构中, 由于滑块 2 和杆 3 在连接点 C 有相同的运动轨迹, 所以滑块 2 及其转动副和移动副引入的约束为虚约束, 不会影响原机构的运动。去除虚约束后, 该机构的自由度 $F=3 \times 3-2 \times 4-0=1$ 。

④机构中与运动无关的对称部分引入的约束为虚约束。在图 2-16(f)所示的轮系中, 中心轮 1 通过 2 个对称布置的小齿轮 2 和 2' 驱动内齿轮 3, 其中仅有 1 个小齿轮对传递运动起独立作用。其余小齿轮的约束为虚约束。对机构的运动没有影响, 但改善了机构的受力状况, 增强了构件的刚度。

【例 2-5】 试计算图 2-17 所示机构的自由度。

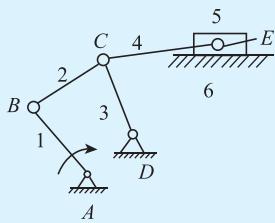


图 2-17 例 2-5 图

解:

当主动件 1 等速回转时, 滑块 5 做往复直线运动。机构中有 1 个主动件 1, 由 6 个构件、7 个低副组成, 即 $n=6$, 低副数 $P_L=7$, 高副数 $P_H=0$ 。

机构自由度由式(2-1)得

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 6-2 \times 7-0=1$$

【例 2-6】 试计算图 2-18 所示大筛机构的自由度。

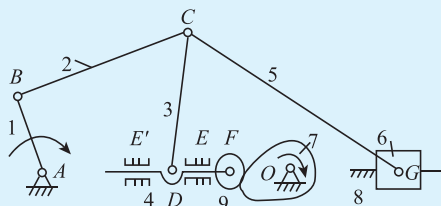


图 2-18 大筛机构

解:

(1) 判断复合铰链、局部自由度和虚约束。机构在 C 处形成复合铰链。滚子 F 处有 1 个局部自由度。从动件与机架在 E 和 E' 组成 2 个导路平行的移动副，其中之一为虚约束。

(2) 确定活动构件和各类运动副数目。在计算机构自由度的过程中，可将滚子 F 与从动件焊成一体，去掉移动副 E' ，确定 $n=7$ ，低副数 $P_L=9$ ，高副数 $P_H=1$ 。

(3) 计算机构的自由度。

由式(2-1)得

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 1 = 2$$

此机构自由度等于 2，与主动件数相等，机构具有确定的相对运动。

要正确地计算平面机构的自由度，首先要看懂机构的运动简图，正确地分析机构的组成，最主要的是要能够正确找出机构中活动构件的数目，区别复合铰链、局部自由度及虚约束 3 种情况。最后判断机构是否具有确定的运动。

【例 2-7】 试分析图 2-19(a) 所示牛头刨床实物结构图中运动机构的组成，绘制该机构的运动简图，计算机构自由度并判断机构能否实现刨床工作中所需要的确定运动。

解:

(1) 分析运动机构的组成及各部分的功能。由图 2-19(a) 可知，该牛头刨床运动机构由电动机、小齿轮、大齿轮、滑块、导杆、刨头、床身(机架) 7 个构件组成；其中，小齿轮为主动件，床身为机架，其余的活动构件均为从动件。

(2) 分析各构件的连接形式及数目。构件滑块 4 与导杆 5、导杆 5 与摇块 10、刨头 6 与床身 9 均组成移动副，构件小齿轮 2 与大齿轮 3 组成平面高副，其余相互接触的构件均为转动副，即该机构共有 1 个齿轮副、5 个转动副和 3 个移动副。

(3) 选择构件的工作平面为视图平面，如图 2-19(a) 所示。

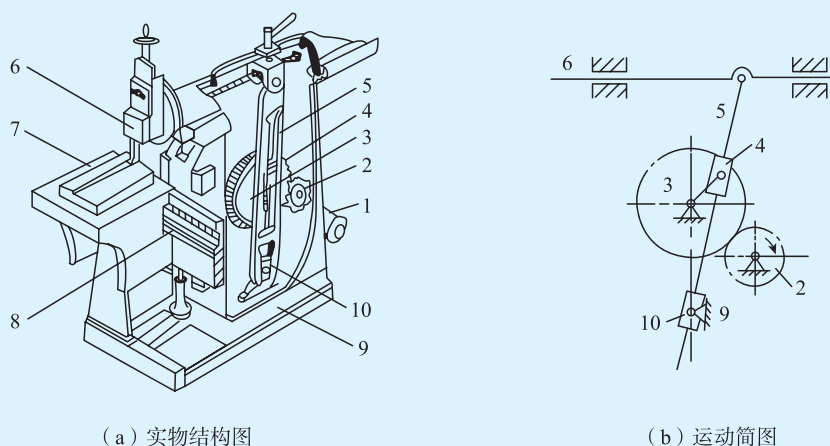
(4) 根据实物结构尺寸及图纸的大小，按适当的比例尺依次确定各转动副的位置，用规定符号和线条绘制出刨头机构的平面机构运动简图，如图 2-19(b) 所示。

(5) 根据图 2-19(b) 计算该机构的自由度，判断能否实现刨床工作中所需要的确定运动。

此机构活动构件数 $n=6$ ，低副数 $P_L=8$ ，高副数 $P_H=1$ 。由式(2-1)得

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

自由度 F 与机构主动件数是相等的，能实现刨床在工作中所需要的确定运动。



1—电动机；2—小齿轮；3—大齿轮；4—滑块；5—导杆；
6—刨头；7—工件；8—丝杠；9—床身；10—摇块。

图 2-19 牛头刨床

第四节 平面机构的组成原理及结构分析

一、平面机构的组成原理

任何机构都包含机架、主动件和从动件系统三部分。由于机构具有确定运动的条件是主动件的数目等于机构的自由度，因此，若将机构的机架及和机架相连的主动件与从动件系统分开，则余下的从动件系统的自由度应为零。有时这种从动件系统还可分解为若干个更简单的、自由度为零的构件组。这种最简单的、不可再分的、自由度为零的构件组称为基本杆组或阿苏尔杆组。

例如，图 2-20(a)所示的是自由度为 1 的平面六杆机构，设构件 1 为主动件，显然该机构的运动是确定的。现若将主动件 1 和机架 6 从机构中拆出[图 2-20(b)]，则余下的是由杆 2、3、4 和 5 及 6 个平面低副组成的从动件系统，其自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 6 - 0 = 0$ 。又如图 2-20(c)所示，由杆 2、3、4 和 5 组成的从动件系统还可再拆分为由杆 2、3 和杆 4、5 构成的 2 个自由度为零的两杆三副的基本杆组。

根据式(2-1)，组成平面机构的基本杆组应满足条件

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 0 \quad (2-2)$$

如果基本杆组的运动副全为低副，则式(2-2)变为

$$F = 3n - 2P_L = 0 \text{ 或 } n = 2/3P_L \quad (2-3)$$

由于活动构件数 n 和低副数 P_L 都必须是整数，所以根据式(2-3)， n 应是 2 的倍数， P_L 应是 3 的倍数，它们的组合有 $n = 2$ 、 $P_L = 3$ ， $n = 4$ 、 $P_L = 6$ ，…。由此可见，最简单的平面基本杆组是由 2 个构件 3 个低副组成的杆组，称为 II 级杆组。它是应用最广的基本杆组。由于平面低副中有转动副

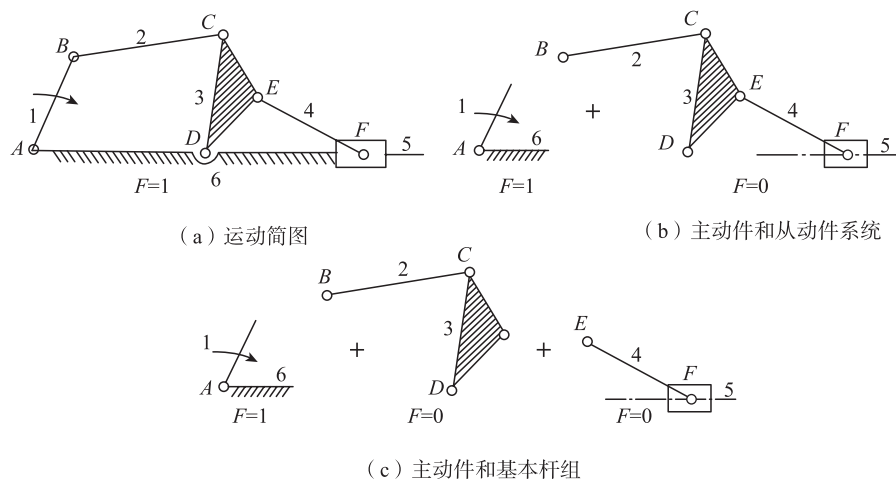


图 2-20 平面六杆机构的组成

(常用 R 表示)和移动副(常用 P 表示)2 种类型, 对于由 2 个构件 3 个低副组成的 II 级杆组, 根据其 R 副和 P 副的数目及排列的不同, 总共有 5 种不同结构形式, 见表 2-1。

表 2-1 II 级杆组及常见的 III 级杆组的结构形式

基本杆组	活动构件数	低副数	杆组结构形式	特点
II 级杆组	2	3	(1) RRR 	1 个内端副、 2 个外端副
			(2) RRP 	
			(3) RPR 	
			(4) PRP 	
			(5) RPP 	
III 级杆组	4	6		3 个内端副、 3 个外端副

注: 内端副指杆组中的构件连接所构成的运动副, 外端副指杆组中的构件与杆组外的其他构件连接所构成的运动副。

除Ⅱ级杆组外,还有Ⅲ级等较高级别的基本杆组。表 2-1 中给出了 4 种Ⅲ级杆组,它们都是由 4 个构件 6 个低副组成的。在实际机构中,这些比较复杂的基本杆组应用较少。

按杆组的概念,任何机构都可以看成是由若干个基本杆组依次连接于主动件和机架上或相互连接所组成的系统,这就是机构的组成原理。图 2-20 表示了根据机构组成原理组成机构的过程。首先把Ⅱ级杆组 BCD 通过外端副 B 、 D 连接到主动件和机架上,形成四杆机构 $ABCD$,再将Ⅱ级杆组 EF 通过外端副依次与Ⅱ级杆组 BCD 及机架连接,组成图 2-20(a)所示的六杆机构。同理,图 2-21 表示了平面八杆机构的组成。

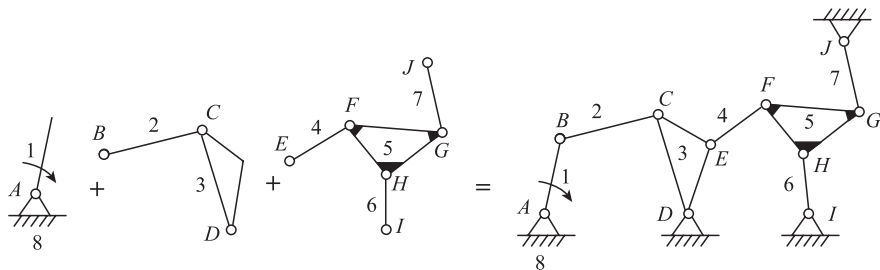


图 2-21 平面八杆机构的组成

在同一机构中,可含有不同级别的基本杆组,将机构中所包含的基本杆组的最高级数作为机构的级数。例如,图 2-20 所示机构基本杆组的最高级别是Ⅱ级,称为Ⅱ级机构;图 2-21 所示机构基本杆组的最高级别是Ⅲ级,称为Ⅲ级机构;而把由主动件和机架组成的机构(如杠杆机构、斜面机构、电动机等)称为Ⅰ级机构。这就是机构的结构分类方法。一般来说,机构的级别越高,机构的运动和动力分析也越困难。

二、平面机构的结构分析

机构结构分析的目的在于确定机构的结构组成和判定机构的级别,以便对同一类机构应用相似的方法对其进行运动分析与动力分析。结构分析的过程与由杆组依次组成机构的过程正好相反,通常也称为拆杆组。机构结构分析就是将已知机构分解为主动件、机架和若干个基本杆组,进而了解机构的组成,并确定机构的级别。对于任一平面机构,其结构分析的步骤如下。

(1) 除去机构中的虚约束和局部自由度。若有高副,则进行高副低代,计算机构的自由度并确定主动件。

(2) 拆分杆组。从远离主动件的构件开始拆分,按基本杆组的特征,每次均先试拆Ⅱ级杆组,如果剩余部分不能构成一个自由度不变的完整机构,再试拆高一级别杆组。直到拆分到只剩下主动件和机架所组成的Ⅰ级机构为止。

(3) 确定机构的级别。所拆出的基本杆组的最高级别便是机构的级别。

例如图 2-20(a)所示的六杆机构。构件 1 为主动件,该机构无虚约束和局部自由度,自由度等于 1。判定机构的级别时,先拆出远离主动件的构件 4、5 组成的Ⅱ级杆组,剩余部分仍是自由度为 1 的完整机构 $ABCD$,继续拆出构件 2、3 组成的Ⅱ级杆组,最后只剩下主动件 1 与机架 6 组成的Ⅰ级机构。组成机构的杆组最高级别为Ⅱ级,故为Ⅱ级机构。对该机构进行运动分析与动力分析时,应采用Ⅱ级机构的分析方法。

同理, 对于图 2-21 所示机构, 当构件 1 为主动件时, 先拆出Ⅲ级杆组 4、5、6、7, 再拆出Ⅱ级杆组 2、3, 最后只剩下Ⅰ级机构。组成机构的杆组最高级别为Ⅲ级, 故该机构为Ⅲ级机构。

同一机构所选主动件不同, 机构的级别可能不同。图 2-21 所示机构, 当以构件 7 或 6 为主动件时, 机构将成为Ⅱ级机构。

三、平面机构中的高副低代

为使平面低副机构的结构分析和运动分析方法能适用于含有高副的平面机构, 可根据一定的约束条件将平面机构中的高副虚拟地用低副替代, 这种以低副来替代高副的方法称为高副低代。它表明了平面高副与平面低副的内在联系。要想不改变机构的结构特性及运动特性, 高副低代必须具备以下条件。

- (1) 替代前后机构的自由度不变。
- (2) 替代前后机构的瞬时速度和瞬时加速度不变。

图 2-22(a) 所示为自由度为 1 的平面高副机构, 构件 1 和 2 上的高副元素(轮廓曲线)接触于点 C 。若过接触点 C 作高副元素的公法线 nm , 则在公法线上可分别找出两高副元素在接触点处的曲率中心 O_1 和 O_2 , 现引入一虚拟构件 4, 且用两个转动副 O_1 和 O_2 将虚拟构件分别与构件 1、2 相连, 则可得图 2-22(b) 所示的全部为低副(图示为转动副)的替代机构。

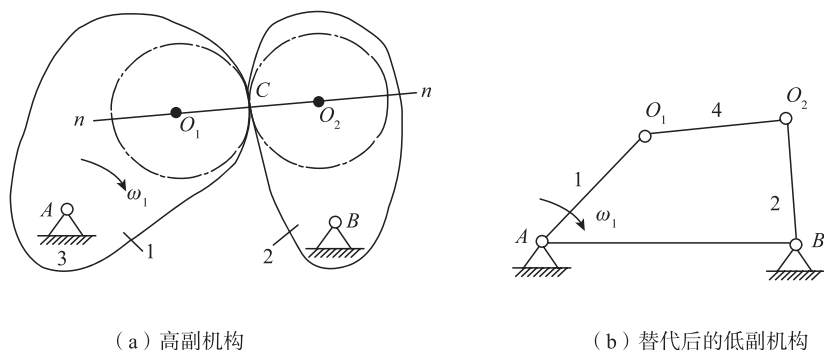


图 2-22 平面高副的低代

因为用 1 个虚拟构件和 2 个转动副的组合会引入 1 个约束, 而原机构中的 1 个平面高副也具有 1 个约束。因此, 必然使替代前后的两机构的自由度保持不变。将转动副中心配置于曲率中心可保证高副低代后机构瞬时运动(速度和加速度)保持不变。

需要指出的是, 当机构运动时, 随着接触点的改变, 两轮廓曲线在接触点处的曲率中心也改变。因此, 对于一般高副元素为非圆曲线的高副机构只能进行瞬时替代, 机构在不同位置时将有不同的瞬时替代机构, 但是替代机构的基本形式不变。

由上述可见, 高副低代的关键是找出构成高副的两轮廓曲线在接触点处的曲率中心, 然后用 1 个构件和位于 2 个曲率中心的 2 个回转副来代替该高副。如果两接触轮廓之一为直线, 如图 2-23(a) 所示, 则因直线的曲率中心已趋于无穷远, 故该替代转动副演化为移动副, 如图 2-23(b) 所示。若两接触轮廓之一为一点[图 2-24(a)], 则因该点曲率半径为零, 故该曲率中心即为接触点本身, 其替代方法如图 2-24(b) 所示。

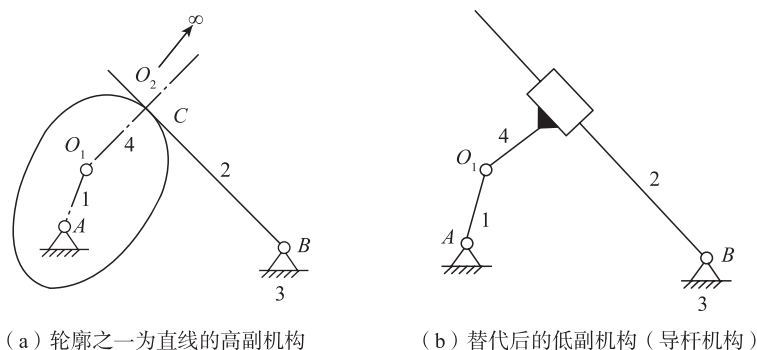


图 2-23 轮廓之一为直线的平面高副的低代

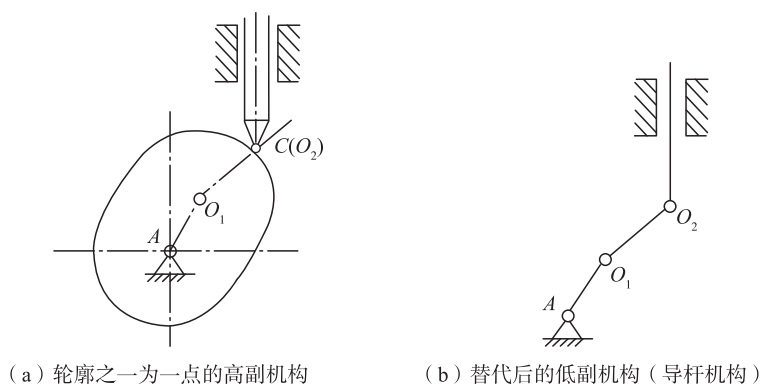


图 2-24 轮廓之一为一点的平面高副的低代

【例 2-8】 对图 2-25 所示的电锯机构进行结构分析。

解：

由图 2-25(a) 可见，构件 1 为主动件，该机构无虚约束，有滚子 10 的局部自由度，机构的自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 8 - 2 \times 11 - 1 = 1$ 。对 K 处的高副进行低代，得到图 2-25(b) 所示的瞬时替代机构运动简图。然后进行机构分解，从传动关系上离主动件最远的部分开始试拆杆组。依次拆除由构件 6 与 8、7 与 5、4 与 3、2 与 11 组成的 4 个双杆组（Ⅱ级杆组），最后剩下主动件 1 和机架 9，如图 2-25(c) 所示。组成机构的杆组最高级别为Ⅱ级，故该机构为Ⅱ级机构。

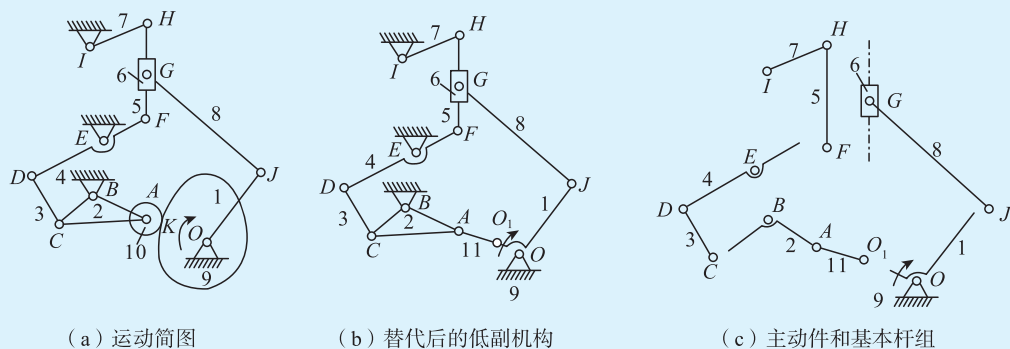
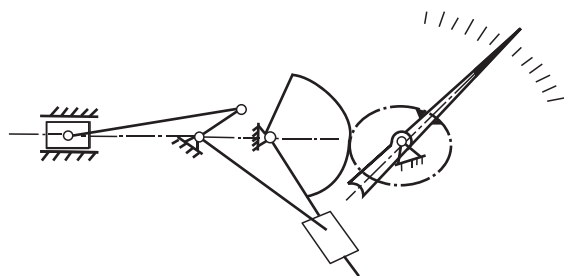


图 2-25 电锯机构

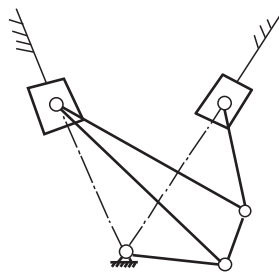


思考与练习

1. 试列举 3 个自由度为 2 的平面机构。
2. 一般情况下, 一构件能否同时与另一构件构成 2 个或 2 个以上的运动副? 如果两构件同时构成 2 个或 2 个以上的移动副或转动副, 又能产生相对运动, 应具备什么条件?
3. 何谓机构的组成原理? 基本杆组具有什么特性? 如何确定机构的级别?
4. 在平面机构中, 如何进行高副低代? 其目的是什么?
5. 抄画图 2-26 所示机构运动简图, 并计算其自由度 F 。



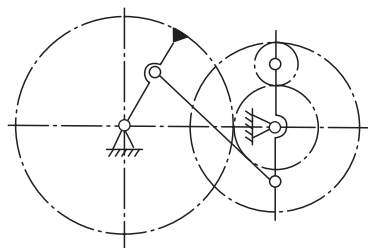
(a) 测量仪表机构



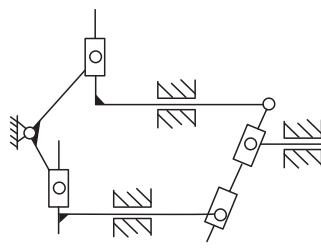
(b) V型发动机

图 2-26 第 5 题图

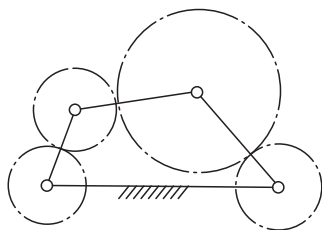
6. 抄画图 2-27 所示机构运动简图, 补注构件号、运动副符号, 计算自由度 F 。若有局部自由度、复合铰链、虚约束, 请在图上明确指出。



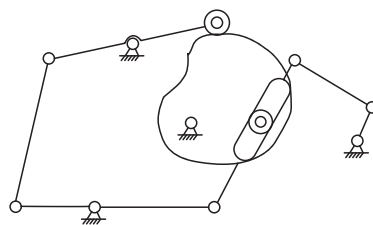
(a) 连杆齿轮组合机构1



(b) 多杆机构



(c) 连杆齿轮组合机构2



(d) 凸轮连杆机构

图 2-27 第 6 题图

7. 画出图 2-28 所示机构的运动简图并计算自由度 F 。试找出主动件, 并标以箭头。

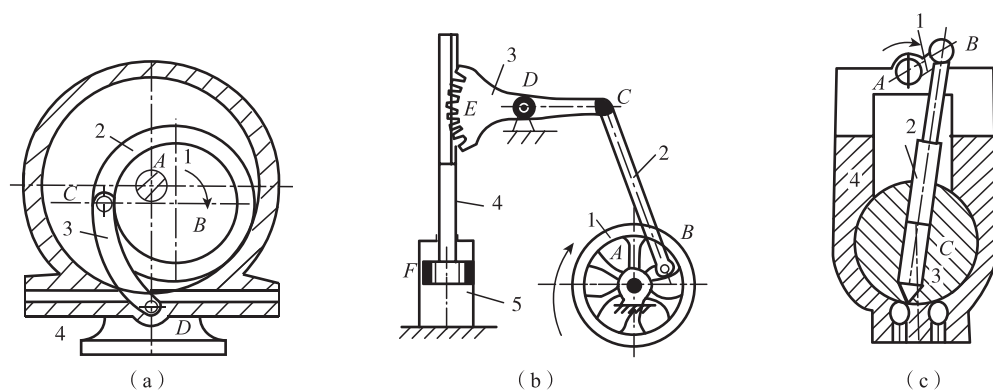


图 2-28 第 7 题图

8. 图 2-29 所示为某偏心轮滑阀式真空泵。偏心轮 1 绕固定轴心 A 转动，与外环 2 固连在一起的滑阀 3 在可绕固定轴心转动的圆柱 4 中滑动。当偏心轮 1 按图示方向连续回转时，可将设备中的空气吸入，并将空气从阀 5 中排出，从而形成真空。试绘制其运动简图，并计算其自由度。

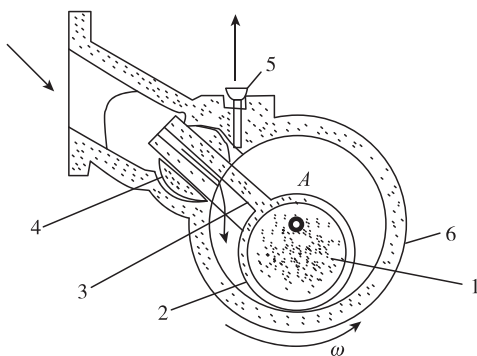


图 2-29 第 8 题图

03

第三章 机构的运动分析

- 第一节 机构运动分析的内容、目的和方法
- 第二节 用速度瞬心法做机构的速度分析
- 第三节 用矢量方程图解法做机构的运动分析
- 第四节 综合运用速度瞬心法和矢量方程图解法对复杂机构进行速度分析
- 第五节 用解析法做机构的运动分析

第一节

机构运动分析的内容、目的和方法

机构运动分析就是根据机构尺寸和主动件的运动规律,分析机构中其他构件上某些点的位移、轨迹、速度和加速度,以及这些构件的角位移、角速度和角加速度。这些分析内容无论是对于设计新的机械,还是了解现有机械的运动性能,都是十分必要的。

通过对机构进行位移或轨迹分析,可以确定某些构件在运动时所需的空間,判断当机构运动时各个构件之间是否会互相干涉;确定机构中从动件的行程;考察构件上某一点能否实现预定的位置或轨迹要求等。通过对机构进行速度分析,可以了解从动件的速度变化规律能否满足工作要求。通过对机构进行加速度分析,可以确定构件的惯性力和惯性力矩,它是研究机械动力性能的必要前提。

平面机构运动分析的方法有图解法和解析法。图解法的特点是形象直观,一般也较简单,但精度不高,而且就机构的一系列位置进行分析时,需要反复作图,也相当烦琐。解析法的特点是把机构中已知的尺寸参数和运动变量与未知的运动变量之间的关系用数学式表达出来,然后借助计算机求解。采用解析法不仅可获得很高的计算精度及一系列位置的分析结果,而且可以精确地知道或了解机构在整个运动循环过程中的运动特性,并能绘出机构相应的运动线图。其缺点是不像图解法那样形象直观,而且计算有时比较复杂,计算工作量可能很大。

第二节

用速度瞬心法做机构的速度分析

机构速度分析图解法又有速度瞬心法和矢量方程图解法。对于构件数目较少的机构,采用速度瞬心法进行速度分析往往比较简便。

一、速度瞬心的概念

由理论力学可知,当两构件(即两刚体)互做平面相对运动时(图 3-1),在任一瞬时,它们的相对运动都可认为是在绕某一点做相对转动,该点即为两构件的速度瞬心,简称瞬心。显然,两构件在瞬心处是没有相对速度的,或者说相对速度为零,绝对速度相等。故瞬心可定义为两构件上的瞬时速度相等的重合点,即等速重合点。若该点的绝对速度为零,为绝对瞬心,否则为相对瞬心。以 P_{ij} 表示构件 i 、 j 的瞬心。

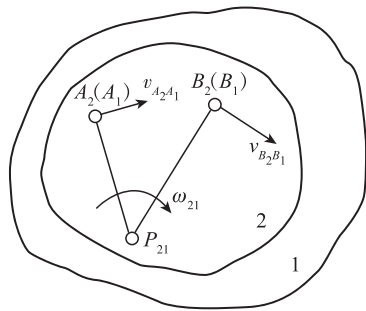


图 3-1 两构件互做平面相对运动

二、机构中瞬心的数目

做相对运动的每两个构件就有 1 个瞬心,因此由 N 个构件(含机架)组成的机构,根据排列组合的知识可知,其瞬心总数为

$$K = \frac{N(N-1)}{2} \quad (3-1)$$

三、机构中瞬心位置的确定

1. 由瞬心的定义确定两构件的瞬心

直接构成运动副的两构件的瞬心位置可由瞬心的定义直接确定。如图 3-2 所示，两构件以转动副相连，转动副的中心即为其瞬心 P_{12} [图 3-2(a)]；若两构件以移动副相连，因两构件间任一重合点的相对运动速度方向均平行于导路，故其瞬心位于移动副导路的垂直方向上的无穷远处 [图 3-2(b)]；两构件以平面高副相连，当高副两元素之间做纯滚动时，瞬心就在接触点处 [图 3-2(c)]，当高副两元素有相对滑动时，瞬心则在过接触点高副元素的公法线上 [图 3-2(d)]。

机构中瞬心位置的确定

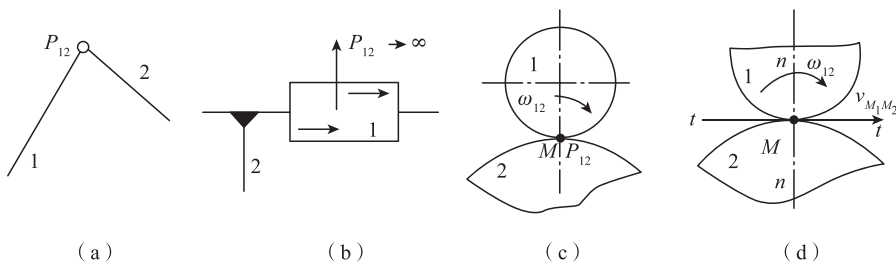


图 3-2 瞬心位置

2. 用三心定理确定两构件的瞬心

对于不通过运动副直接相连的两构件的瞬心位置，可根据三心定理来确定。

三心定理：做平面运动的 3 个构件共有 3 个瞬心，它们位于同一直线上。

证明如下：

如图 3-3 所示，构件 1、2、3 是做平面运动的 3 个构件，构件 2、3 分别以转动副与构件 1 相连。根据式(3-1)，它们共有 3 个瞬心，即 P_{12} 、 P_{13} 、 P_{23} 。其中 P_{12} 、 P_{13} 分别位于两转动副的中心处，故可直接求出。现证明 P_{23} 必定位于 P_{12} 和 P_{13} 的连线上。为简便起见，设构件 1 是固定的，则 P_{12} 和 P_{13} 均为绝对瞬心，于是构件 2 和构件 3 上任一点的速度方向必分别与该点至 P_{12} 及 P_{13} 的连线相垂直。 P_{23} 为构件 2 和构件 3 的等速重合点，只有当 P_{23} 位于 P_{12} 和 P_{13} 的连线上时，构件 2 及构件 3 的重合点的速度方向才能一致（例如，任取构件 2 及构件 3 的一重合点 K ，则 v_{K_2} 和 v_{K_3} 的方向显然不同），故知 P_{23} 与 P_{12} 、 P_{13} 必在同一直线上。

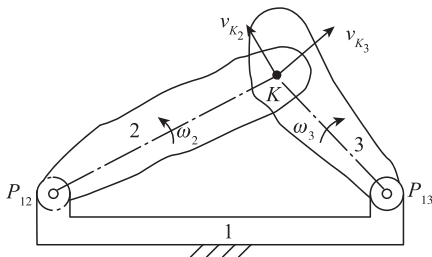


图 3-3 3 个构件

【例 3-1】 图 3-4 所示为曲柄滑块机构，试确定该机构在图示位置时其全部瞬心的位置。

解：

根据式(3-1)可知，该机构共有 $K = \frac{4(4-1)}{2} = 6$ 个瞬心，即 P_{12} 、 P_{13} 、 P_{14} 、 P_{23} 、 P_{24} 、 P_{34} 。

其中 P_{12} 、 P_{23} 、 P_{34} 、 P_{14} 的位置可直观地加以确定，而其余 2 个瞬心 P_{13} 和 P_{24} 则可应用三心定理来确定。

根据三心定理，对于构件 1、2、3 来说， P_{13} 必在 P_{12} 及 P_{23} 的连线上，而对于构件 1、4、3 来说， P_{13} 又应在 P_{14} 及 P_{34} 的连线上，因此上述两连线的交点即为瞬心 P_{13} 。同理可求得瞬心 P_{24} 。

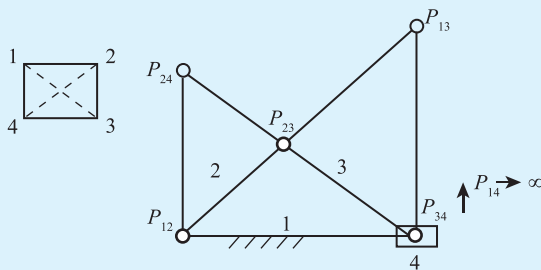


图 3-4 曲柄滑块机构

注意 瞬心 P_{14} 在垂直于移动副导路的无穷远处，所以 P_{34} 和 P_{14} 的连线为过 P_{34} 与移动副导路垂直的直线。

为便于确定不通过运动副连接的两构件的瞬心，可以采用瞬心多边形法，瞬心多边形的边数为机构中构件的数目 N ，顶点表示构件编号，每两个顶点之间的连线代表 1 个瞬心。通常直接连接成副的瞬心用实线连接两构件号，不直接成副的瞬心用虚线连接两构件号，如图 3-4 左上角所示。由三心定理可知，任何构成三角形的 3 条边所代表的 3 个瞬心位于同一直线上。

四、速度瞬心法在机构速度分析中的应用

利用速度瞬心法进行速度分析，可求出两构件的角速度之比、构件的角速度及构件上某点的速度。

在图 3-5 所示的平面四杆机构中，已知各构件的尺寸，又知主动件 2 以角速度 ω_2 沿顺时针方向回转，求在图示位置时从动件 4 的角速度 ω_4 、构件 2 与构件 4 的角速度之比 ω_2/ω_4 及 C 点的速度 v_C 。

该机构共有 6 个瞬心，由瞬心的定义可知，转动副 A、B、C 及 D 分别为瞬心 P_{12} 、 P_{23} 、 P_{34} 及 P_{14} 。 P_{13} 和 P_{24} 可应用三心定理来确定。

因为 P_{24} 为构件 2 及构件 4 的等速重合点，故有

$$\omega_2 \overline{P_{12}P_{24}}\mu l = \omega_4 \overline{P_{14}P_{24}}\mu l \quad (3-2)$$

式中 μl ——机构的尺寸比例尺，是构件的真实长度与图示长度之比，单位为 m/mm。

由式(3-2)可知

$$\omega_4 = \omega_2 \frac{\overline{P_{12}P_{24}}}{\overline{P_{14}P_{24}}}$$

或

$$\frac{\omega_2}{\omega_4} = \frac{\overline{P_{14}P_{24}}}{\overline{P_{12}P_{24}}} \quad (3-3)$$

式中 $\frac{\omega_2}{\omega_4}$ —— 该机构的主动件 2 与从动件 4 的瞬时角速度之比，称为机构的传动比(或传递函数)。

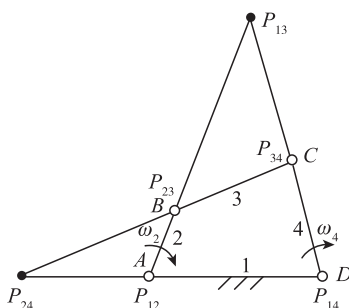


图 3-5 平面四杆机构

由式(3-3)可知，此传动比等于该两构件的绝对瞬心 P_{12} 、 P_{14} 至相对瞬心 P_{24} 距离的反比。因相对瞬心 P_{24} 在两绝对瞬心 P_{12} 、 P_{14} 的同一侧，故 ω_2 与 ω_4 转向相同。此关系可以推广到平面机构中任意两构件之间的角速度关系中，如构件 2 与构件 3 的角速度之比 $\frac{\omega_2}{\omega_3}$ 等于它们的绝对瞬心 P_{12} 、 P_{13} 至相对瞬心 P_{23} 距离的反比，即

$$\frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{\overline{P_{13}P_{23}}}{\overline{P_{12}P_{23}}} \quad (3-4)$$

因相对瞬心 P_{23} 在两绝对瞬心 P_{12} 、 P_{13} 之间，故 ω_2 与 ω_3 转向相反。

C 点的速度 v_C 即为瞬心 P_{34} 的速度，则有

$$v_C = \omega_4 \overline{P_{14}P_{34}} \mu l = \omega_2 \frac{\overline{P_{12}P_{24}}}{\overline{P_{14}P_{24}}} \overline{P_{14}P_{34}} \mu l \quad (3-5)$$

又如图 3-6 所示的凸轮机构，设已知各构件的尺寸及凸轮 2 的角速度 ω_2 ，利用速度瞬心法来确定从动件 3 的移动速度 v 。

如图 3-6 所示，凸轮 2 与从动件 3 构成高副，过高副接触点 K 作其公法线 nn ，由前述可知，此公法线 nn 与瞬心 P_{12} 、 P_{13} 连线的交点即为构件 2 和构件 3 的相对瞬心 P_{23} 。又因其为两构件的等速重合点，故可得

$$v = v_{P_{23}} = \omega_2 \overline{P_{12}P_{23}} \mu l \text{ (方向垂直向上)} \quad (3-6)$$

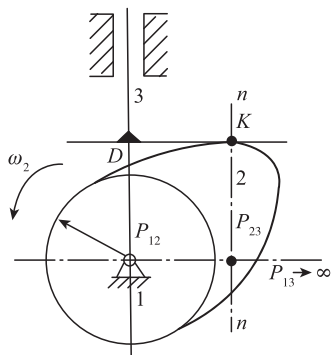


图 3-6 凸轮机构

通过上述例子可见,利用速度瞬心法对某些机构进行速度分析是比较简单的,但当瞬心数目很多或者某些瞬心位于图纸之外时,将给求解带来困难,使速度分析问题复杂化。同时,速度瞬心法不能用于机构的加速度分析。

第三节 用矢量方程图解法做机构的运动分析

矢量方程图解法又称相对运动图解法。在对机构进行运动分析时,首先根据运动合成原理列出矢量方程,然后进行作图求解。下面就以在机构运动分析中常遇到的两种不同情况为例,说明其基本原理和基本作法。

一、利用同一构件上两点间的运动关系做机构的速度和加速度分析

在图 3-7(a)所示的平面四杆机构中,设已知各构件尺寸及主动件 1 的运动规律(以 ω_1 逆时针方向匀速转动),求图示位置点 C、E 的速度和加速度,以及构件 2、构件 3 的角速度和角加速度。

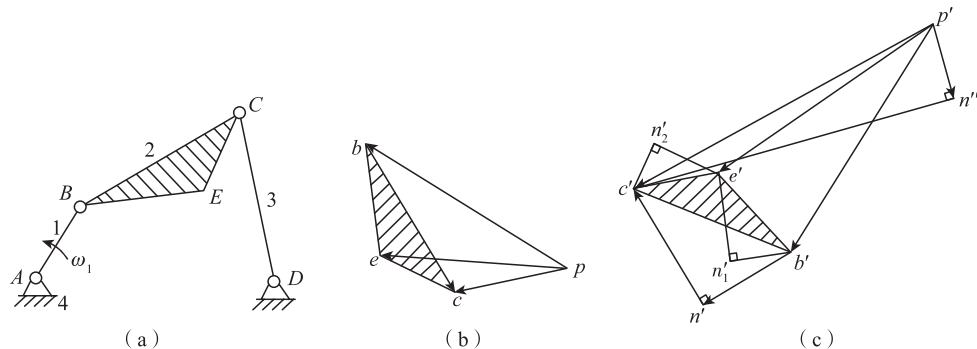


图 3-7 平面四杆机构

1. 速度分析

由已知条件可求得 B 点的速度为 $v_B = \omega_1 l_{AB}$ 。根据运动合成原理可知,连杆 2 上任一点(如点 C 或点 E)的运动可认为是随基点 B 做平动(牵连运动)与绕基点 B 做转动(相对运动)的合成,故点 C 的速度为

$$\mathbf{v}_C = \mathbf{v}_B + \mathbf{v}_{CB} \quad (3-7)$$

方向 $\perp CD \quad \perp AB \quad \perp BC$

大小 $? \quad \omega_1 l_{BC} \quad ?$

式中 $\mathbf{v}_C$ ——C 点速度,方向垂直杆 CD,大小未知;

$\mathbf{v}_B$ ——B 点速度,方向和大小均为已知;

v_{CB} ——点 C 相对于点 B 的相对速度, 其大小等于连杆 2 的角速度 ω_2 与 B、C 两点之间的实际距离 l_{BC} 的乘积, 即 $v_{CB} = \omega_2 l_{BC}$, ω_2 未知, 所以其大小未知, 方向与 BC 连线垂直, 指向与 ω_2 的转向一致。

故式(3-7)矢量方程中有 2 个未知数, 可用作图法求解。具体求解过程如下:

先按尺寸比例尺 μ_l 作机构的运动简图[图 3-7(a)]。

速度分析如图 3-7(b)所示, 由任一点 p 作代表 v_B 的矢量 $\overrightarrow{pb}$ ($\overrightarrow{pb} = v_B / \mu_v$, 其中 μ_v 为速度比例尺, 即图中每单位长度所代表的速度大小, 单位为 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) / \text{mm}$; 再分别过 b 点和 p 点作代表 v_{CB} 的方向线 $bc(\perp BC)$ 和代表 v_C 的方向线($\perp CD$), 两者交于点 c , 则有

$$v_C = \mu_v \overrightarrow{pc} \quad (3-8)$$

$$v_{CB} = \mu_v \overrightarrow{bc} \quad (3-9)$$

$$\omega_2 = \frac{v_{CB}}{l_{BC}} = \frac{\mu_v \overrightarrow{bc}}{\mu_l BC} \quad (3-10)$$

ω_2 的方向可用矢量平移法确定, 即将代表 v_{CB} 的矢量 $\overrightarrow{bc}$ 平移至机构图上的 C 点, 其绕 B 点的转向即为 ω_2 的方向(顺时针), 则有

$$\omega_3 = \frac{v_C}{l_{CD}} = \frac{\mu_v \overrightarrow{pc}}{\mu_l CD} \quad (3-11)$$

同理, 将代表 v_C 的矢量 $\overrightarrow{pc}$ 平移至机构图上的 C 点, 其绕 D 点的转向即为 ω_3 的方向(逆时针)。

连杆 2 上 B、C 两点的速度已知后, 为了求点 E 的速度 v_E , 可利用 E 与 B 和 E 与 C 之间的速度关系, 列出矢量方程 $v_E = v_B + v_{EB} = v_C + v_{EC}$, 再用图解法求解。如图 3-7(b)所示, 分别过点 b 、 c 作 v_{EB} 的方向线 $be(\perp BE)$ 和 v_{EC} 的方向线 $ce(\perp CE)$, 两者交于点 e , 则 $\overrightarrow{pe}$ 即代表 v_E 。由图可见, 由于 $\triangle bce$ 和 $\triangle BCE$ 的对应边垂直, 故二者相似, 其角标字母的顺序方向也一致。所以, 把图形 bce 称为图形 BCE 的速度影像。当已知同一构件上两点的速度时, 则此构件上其他任一点的速度便可利用速度影像原理求出。例如, 当构件 2 上的 bc 作出后, 以 bc 为边作 $\triangle bce \sim \triangle BCE$, 对应字母的顺序方向一致, 即可求得点 e 和 v_E , 而不需要再列矢量方程求解。

图 3-7(b)称为速度多边形(或速度图), p 点称为速度多边形的极点。在速度多边形中, 由极点 p 向外放射的矢量代表构件上相应点的绝对速度, 而连接两绝对速度矢端的矢量则代表构件上相应两点间的相对速度, 例如 $\overrightarrow{pe}$ 代表 v_{CB} , 方向由 b 指向 c 。

2. 加速度分析

由已知条件可求得 B 点的加速度大小 $a_B = \omega_1^2 l_{AB}$ 。根据运动合成原理可知, C 点的加速度为

$$a_C = a_B + a_{CB} = a_B + a_{CB}^n + a_{CB}^t$$

或

$$a_C = a_{CD}^n + a_{CD}^t = a_B + a_{CB}^n + a_{CB}^t \quad (3-12)$$

方向 $C \rightarrow D$ $\perp CD$ $B \rightarrow A$ $C \rightarrow B$ $\perp BC$

大小 $\omega_3^2 l_{CD}$? $\omega_1^2 l_{AB}$ $\omega_2^2 l_{BC}$?

式中 a_C ——点 C 的加速度, 其又可分为法向加速度 a_{CD}^n 和切向加速度 a_{CD}^t , $a_{CD}^n = \omega_3^2 l_{CD}$, ω_3 可由速度矢量方程求得, 其方向沿 CD, 并由点 C 指向点 D, $a_{CD}^t = a_3^2 l_{CD}$, 其方向垂直于