



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十三五”规划教材

机械设计基础

Fundamentals of
Mechanical Design

第5版 (多学时)

范顺成 李春书 主编

F

非
外
借

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十三五”规划教材

机械设计基础

(多学时)

第5版

主 编	范顺成	李春书		
副主编	郭聚东			
参 编	范晓珂	冯 运	吴晓龙	
	关志刚	葛杏卫	王晓慧	
	李洪来	杨建伟	邓必懋	
主 审	张 策	来新民		



机械工业出版社

本书是根据教育部 2011 年制订的“机械设计基础课程教学基本要求”进行修订的。这次修订在授课内容上做了一定的调整、补充和修改，更新了大部分国家标准，注重机械设计基础理论和方法的讲述，使重点突出，基本概念更准确，并易于理解。

本书以培养学生工程意识和设计能力为主线，突出各类机构和零部件设计的系统性、综合性，突出零部件结构设计与分析。各章的实践教学环节有助于学生深入理解和实践。

全书除绪论外，共十七章，包括：平面机构的结构分析，平面连杆机构，凸轮机构，齿轮机构，轮系，间歇运动机构及组合机构，机械的平衡和调速，连接，带传动，链传动，齿轮传动，蜗杆传动，轴，滑动轴承，滚动轴承，联轴器和离合器，弹簧。

本书为高等工科院校近机类、机械类（专科）专业机械设计基础课程的教材，也可供其他相关专业的师生及工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

机械设计基础：多学时/范顺成，李春书主编.—5 版.—北京：机械工业出版社，2017.10

普通高等教育“十三五”规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-57602-0

I. ①机… II. ①范… ②李… III. ①机械设计—高等学校—教材
IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 187613 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：余 皞 责任编辑：余 皞 王 良

责任校对：潘 蕊 封面设计：张 静

责任印制：孙 炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 10 月第 5 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.5 印张 · 449 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-57602-0

定价：42.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

前 言

本书是在普通高等教育“十一五”国家级规划教材《机械设计基础》第4版的基础上进行修订的。

在保持原有教材“培养学生工程意识和工程设计能力”特色的基础上,根据教育部高等学校机械基础课程教学指导委员会最新修订的“机械设计基础课程教学基本要求”,以及各校使用本教材以后提出的改进建议,为适应目前高等工科教育教学的发展,本次修订对基本内容做了进一步的精选和删减,以使内容精炼,适用面广,便于教学。

修订后的教材基本保留了第4版的体系结构和基本内容。修订的主要方面和内容如下:

(1) 将第4版中的第七章和第八章内容精选、整合为一章,删去了“机械零件设计概论”一章。

(2) 在齿轮传动、蜗杆传动两章中,按照新标准和规范,对其设计与计算等内容进行了调整,使其设计内容更加简洁、易懂,使用更方便。

(3) 在滑动轴承一章中,删去了流体摩擦径向滑动轴承的计算,调整了流体动压润滑基本原理的内容。

(4) 全书采用新标准和规范,对第4版的图、表做了调整和更换。

参加本书修订工作的有:河北科技大学郭聚东(第一章、第二章)、石家庄铁道大学范晓珂(第三章、第十七章)、河北科技大学冯运(第四章、第五章)、河北工业大学吴晓龙(第七章)、河北科技大学葛杏卫(第八章)、河北工业大学王晓慧(第九章、第十章)、河北工业大学李洪来(第十三章)、广东工业大学南海研究院邓必懋(第十五章)、河北工业大学李春书(绪论、第六章、第十一章、第十二章),河北工程大学关志刚(第十四章)及北京建筑大学杨建伟(第十六章)。

本书由范顺成、李春书担任主编,郭聚东担任副主编。全书由天津大学张策教授和上海交通大学来新民教授担任主审。

编者恳请广大读者对书中错误和不妥之处提出批评指正。对本书的意见请寄天津市红桥区丁字沽一号路河北工业大学机械工程学院(300130)。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第一节 引言	1
第二节 本课程研究的对象和内容	1
第三节 本课程的性质和任务	3
第四节 机械设计的基本要求和一般程序	3
第一章 平面机构的结构分析	5
第一节 平面机构的组成	5
第二节 平面机构的运动简图	6
第三节 平面机构具有确定运动的条件	8
实践教学环节	12
习题	12
第二章 平面连杆机构	14
第一节 平面连杆机构的应用和类型	14
第二节 四杆机构的基本特性	21
第三节 平面连杆机构的设计	25
第四节 平面连杆机构的结构设计	29
实践教学环节	32
习题	32
第三章 凸轮机构	34
第一节 凸轮机构的应用和分类	34
第二节 从动件常用运动规律	37
第三节 图解法设计盘形凸轮轮廓	40
* 第四节 用解析法设计凸轮轮廓的基本方法	44
第五节 凸轮机构设计中的几个问题	45
实践教学环节	51
习题	52
第四章 齿轮机构	53
第一节 齿轮机构的分类	53
第二节 渐开线及渐开线齿廓	54
第三节 标准直齿圆柱齿轮各部分名称及尺寸计算	56
第四节 渐开线标准齿轮的啮合传动	58
第五节 渐开线齿廓的切制原理	62
第六节 渐开线齿廓的切齿干涉和标准齿轮的最少齿数	65
* 第七节 渐开线变位齿轮概述	67
第八节 渐开线斜齿圆柱齿轮机构	68
第九节 锥齿轮机构	74
实践教学环节	77
习题	77
第五章 轮系	79
第一节 轮系的分类	79
第二节 定轴轮系传动比的计算	80
第三节 周转轮系传动比的计算	82
第四节 混合轮系传动比的计算	85
第五节 轮系的功用	86
* 第六节 K-H-V 型行星轮系简介	88
实践教学环节	91
习题	91
第六章 间歇运动机构及组合机构	93
第一节 棘轮机构	93
第二节 槽轮机构	96
第三节 其他间歇运动机构	98
第四节 组合机构	100
实践教学环节	101
习题	101
第七章 机械的平衡和调速	102
第一节 刚性转子的平衡	102
第二节 机械速度的波动及调节	107
实践教学环节	112
习题	113
第八章 连接	114
第一节 螺纹	114
第二节 螺旋副的受力分析、效率及自锁	116
第三节 螺纹连接	118
第四节 螺栓连接的强度计算	124
第五节 螺纹连接的结构设计	129
第六节 螺旋传动	133
第七节 键连接与花键连接	136
第八节 销连接及其他连接	139

实践教学环节	141	实践教学环节	222
习题	141	习题	222
第九章 带传动	143	第十三章 轴	223
第一节 带传动的工作原理、类型和 几何关系	143	第一节 轴的分类和设计要求	223
第二节 带传动的基本理论	144	第二节 轴的材料	224
第三节 V 带及 V 带轮	147	第三节 轴的基本直径的估算	226
第四节 普通 V 带传动的设计计算	151	第四节 轴的结构设计	226
第五节 带传动的张紧装置	157	第五节 轴的强度计算	229
第六节 同步带传动及其他带传动简介	160	第六节 轴的刚度计算	234
实践教学环节	166	实践教学环节	235
习题	166	习题	235
第十章 链传动	167	第十四章 滑动轴承	237
第一节 链和链轮	167	第一节 滑动轴承的摩擦状态及 应用特点	237
第二节 链传动的运动分析和受力分析	171	第二节 滑动轴承的结构及材料	238
第三节 链传动的设计计算	174	第三节 不完全流体润滑滑动轴承的 设计计算	243
第四节 链传动的布置、张紧及润滑	179	第四节 润滑剂及润滑装置	244
实践教学环节	180	第五节 流体润滑滑动轴承简介	248
习题	181	实践教学环节	250
第十一章 齿轮传动	182	习题	251
第一节 渐开线齿轮传动强度设计 计算基础	182	第十五章 滚动轴承	252
第二节 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	186	第一节 滚动轴承的结构	252
第三节 载荷系数及许用应力	191	第二节 滚动轴承的主要类型、 代号及选择	253
第四节 直齿圆柱齿轮传动设计计算顺序及 有关设计参数的选择	194	第三节 滚动轴承的计算	258
第五节 平行轴斜齿轮传动的强度计算	197	第四节 滚动轴承部件的结构设计	267
第六节 直齿锥齿轮传动的强度计算	200	实践教学环节	271
第七节 齿轮结构与润滑	202	习题	271
实践教学环节	205	第十六章 联轴器和离合器	272
习题	205	第一节 概述	272
第十二章 蜗杆传动	207	第二节 常用联轴器类型及选择	272
第一节 蜗杆传动的特点和类型	207	第三节 常用离合器类型及选择	276
第二节 普通圆柱蜗杆传动的主要 参数和几何尺寸计算	209	实践教学环节	277
第三节 普通圆柱蜗杆传动强度设计 计算基础	212	习题	277
第四节 普通圆柱蜗杆传动的 强度计算	213	第十七章 弹簧	278
第五节 蜗杆传动的效率、润滑和 散热计算	216	第一节 弹簧的类型和应用	278
第六节 蜗杆、蜗轮的结构	219	第二节 弹簧的材料和许用应力	279
		第三节 圆柱螺旋弹簧的设计计算	282
		实践教学环节	287
		习题	287
		参考文献	288

绪 论

第一节 引 言

人类在长期的生产实践中创造和发展了机械。早在古代,人类就将杠杆、楔、滚子等工具和简单机械用于建筑和运输。16世纪的第一次工业革命和19世纪欧洲的产业革命形成了机械工业并使之得到迅猛发展。

在我国,机械的创造、发展和使用有着悠久的历史。三千年前就出现了简单的纺织机。两千年前已把绳轮、凸轮等用于生产作业器具。汉代以后的指南车及记里鼓车中利用了齿轮和轮系传动。东汉张衡将杆机构巧妙地使用在人类第一台地震仪——候风地动仪上。元朝则有利用曲柄、滑块和飞轮的纺织机。可是,由于我国长期的封建制度以及近代历史上长年战乱和帝国主义的入侵,使我国的机械工业和其他科学技术领域一样长期得不到应有的发展而处于落后状态。

1949年新中国诞生后,我国的工农业生产及科学技术取得了前所未有的巨大发展,机械工业和机械科学水平相应有了很大提高。目前,我国不但能自行设计制造大型、精密、成套和高新技术设备,而且在为数不少的科技门类中已接近和赶上先进工业国家水平,有的已处于领先地位。同时,还建立了学科齐全、装备精良的机械科学设计和研究部门。

机械化是社会生产率发展水平的重要标志。在各个生产部门实现机械化、自动化,利用机械来代替和减轻人们的体力劳动乃至脑力劳动,不断提高生产率,这对促进国民经济的发展有着极其重要的意义。因此,对高等工科院校一些与机械工业相关的专业学生,学习“机械设计基础”等机械学科的课程是十分必要的。

第二节 本课程研究的对象和内容

机械通常是机器和机构的总称。

在生产实践和日常生活中,广泛地使用了各种机器。经常见到的如电动机、内燃机、汽车、起重机和洗衣机等都是机器,它们的作用是实现能量的转换,或完成有用的机械功,以代替人的劳动。随着生产的发展,机器的种类、形式和功能将越来越多。

为便于研究机器的工作原理、分析运动特点和设计新机器,通常又将机器视为是由若干机构组成的。

如图0-1所示的单缸内燃机,它由气缸体(机架)1、曲柄2、连杆3、活塞4、进气阀5、排气阀6、推杆7、凸轮8及齿轮9、10组成。当燃气推动活塞4作往复移动时,通过连杆3使曲柄2作连续转动,从而将燃气的压力能转换为曲柄的机械能。齿轮、凸轮和推杆的作用是按一定的运动规律按时启闭阀门,以吸入燃气和排出废气。这种内燃机可视为由三种机构组成:①由活塞4、连杆3、曲柄2和机架1构成的曲柄滑块机构,它将活塞的往复移动转变为曲柄的连续转动。②由齿轮9、10和机架1构成的齿轮机构,其作用是改变转速的

大小和转动的方向。③由凸轮 8、推杆 7 和机架 1 构成的凸轮机构，它将凸轮的连续转动转变为推杆的往复移动。

由此可见，所谓机构乃是若干具有确定相对运动的构件的组合，它在机器中起着改变运动形式、速度大小或运动方向的作用。组成机构的构件，可以是单一的零件，也可以是由几个零件固结而成的运动单元体。如图 0-1 中的内燃机连杆，就是由如图 0-2 所示的连杆体 1、

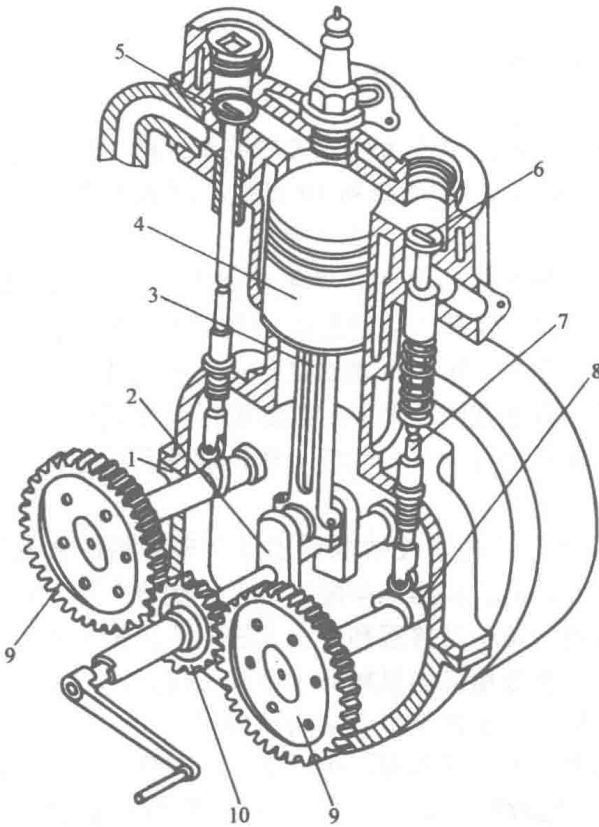


图 0-1 单缸内燃机

- 1—机架 2—曲柄 3—连杆 4—活塞
- 5—进气阀 6—排气阀 7—推杆
- 8—凸轮 9、10—齿轮

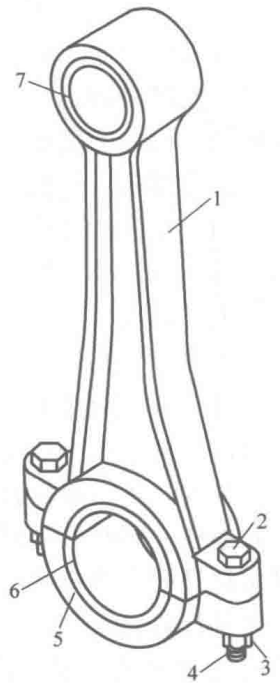


图 0-2 内燃机连杆

- 1—连杆体 2—螺栓 3—螺母
- 4—开口销 5—连杆盖
- 6—轴瓦 7—轴套

连杆盖 5、螺栓 2、螺母 3、开口销 4、轴瓦 6 和轴套 7 等多个零件构成的一个构件；又如图 0-1 中的齿轮 - 凸轮轴，则是由如图 0-3 所示的凸轮轴 1、齿轮 2、键 3、轴端挡圈 4 和螺钉 5 等零件构成的又一个构件。显然，构件是运动基本单元，而零件是制造基本单元。

各种机械中普遍使用的机构称为常用机构，如平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构和间歇运动机构等。

各种机械中普遍使用的零件称为通用零件，如螺钉、齿轮、轴和弹簧等；只在某一类型机械中使

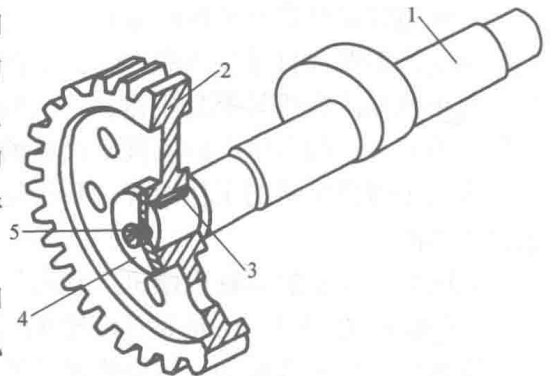


图 0-3 齿轮 - 凸轮轴

- 1—凸轮轴 2—齿轮 3—键
- 4—轴端挡圈 5—螺钉

用的零件称为专用零件，如汽轮机中的叶片、内燃机中的活塞等。

本课程作为机械设计的基础，主要介绍机械中的常用机构和通用零件的工作原理、运动特性、结构特点、使用和维护、标准和规范以及设计计算的基本理论和方法。

第三节 本课程的性质和任务

“机械设计基础”课程是一门培养学生能够具有一定机械设计能力的技术基础课。

随着科学技术的发展，生产过程的机械化和自动化水平不断提高，机械在各个领域中的应用日益广泛。因此，除机械制造部门外，动力、采矿、冶金、石油、化工、轻纺、食品工业、生产管理等各部门的工程技术人员也应具有一定的，有时甚至是较深入的机械及机械设计基础知识。本课程正是为适应这一需要而设置的。

本课程的主要任务是：

1) 掌握机构的结构、运动特性和机械动力学的基本知识，初步具有分析和设计基本机构的能力，并对机械运动方案的确定有所了解。

2) 掌握通用机械零件的工作原理、特点、维护和设计计算的基本知识，并初步具有设计机械传动装置和简单机械的能力。

3) 具有运用标准、规范、手册、图册等有关技术资料的能力。

“机械设计基础”课程与许多学科密切相关。其主要先修课有工程图学、金属工艺学、理论力学和材料力学、金属材料及热处理、互换性及技术测量、工程数学等。本课程涉及的知识面广，具有综合性、实践性和工程性特点，其为后续专业课的学习奠定了基础。

第四节 机械设计的基本要求和一般程序

一、机械设计的基本要求

机械产品的功能、成本等很大程度上取决于设计工作的优劣。因此，不论是设计新产品还是对现有设备进行技术改造，设计人员都必须满腔热情并负责地对设计过程的每个细节做周密、细致和深入的考虑。

用户希望能得到物美价廉的产品。物美价廉是产品获得市场、经济效益和社会效益的先决条件，也是机械设计的基本要求。设计人员不仅有责任使产品具有良好的使用功能和优越的质量，同时也有责任使产品价格便宜、合理。

对机械设计而言，物美就是指所设计的机械能有效地执行预期的全部功能，在预定的工作期限内安全可靠的工作，操作简便、维护方便、效率高、不易造成环境和产品污染及引起人身伤害、外形美观大方等。

价廉就是要尽量降低成本，同时又要降低维护费用。这就要求设计人员合理地选择材料；使机械及其零件有良好的工艺性和适当的精度和表面质量；在产品中推行标准化、系列化、通用化等以尽可能地降低材料、能源、劳动力的消耗，从而降低成本提高经济效益。

二、机械设计的一般过程

任何机械设备从设计任务的提出到制成并投入使用都必须经历设计过程。机械设计的过程一般可简化为下列几个阶段。

(1) 明确设计任务 机械设计任务通常是为实现某种功能（如满足生产要求）而提出的。提出任务时，应首先分析实现机械要求的可能性，然后根据对所设计机械的工作要求确定功能范围、各项技术性能指标等，以明确设计任务。

(2) 方案设计 根据设计任务，设计人员在广泛调研和查阅相关文献的基础上，根据设计任务的要求，进行多种设计方案构思，并对经济技术指标及方案的可行性进行比较，从中选择最佳方案。

(3) 技术设计 技术设计是将所选择的设计方案具体转化为机械各部分的合理结构。本阶段应确定主要参数和尺寸，并考虑如生产批量、材料供应情况、毛坯类型、加工和装配工艺、有关标准和规范等方面的因素，绘制总装配图、部件装配图、零件工作图和编制技术文件等。

(4) 样机试制、试验 样机试制、试验是验证设计是否合理以及能否转入生产准备的重要阶段。同时，对设计方案从技术上、经济上作出全面评价。样机试制、试验中发现的不合理处，应及时加以修改，以使设计达到最优状态。

(5) 提供设计方案 经评价确认设计的技术价值和经济价值均优时，即可向承制部门提供设计方案。提供的设计方案应包括完整的设计图样以及各种技术文件，如总装配图、零（部）件图、计算说明书、使用说明书、样机试验报告、技术经济评价报告、有关工艺文件等。

必须指出，以上设计过程的各个阶段并不是截然分开的，而常常是相互联系、相互影响和相互制约的。因此，设计过程对设计方案各阶段往往需交叉进行，不断修改，不断完善，以达到最佳设计。

第一章 平面机构的结构分析

各运动构件均在同一平面内或相互平行平面内运动的机构，称为平面机构。平面机构应用广泛。

前已述及，机构是若干具有确定相对运动的构件组合，但是若干构件的任意组合，并不一定能成为机构。如图1-1所示，设计者意欲由凸轮1推动杠杆2而使冲头3上下运动，以完成冲压工作。但不难看出，实际上构件2、3和机架4是不能运动的构件组合。

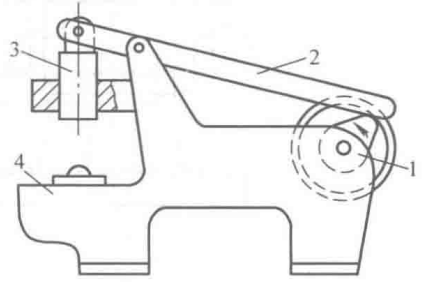


图 1-1 不能运动的构件组合
1—凸轮 2—杠杆
3—冲头 4—机架

由此可见，构件组合必须具备一定的条件才能成为机构。因此对平面机构进行结构分析，即①了解机构的组成；②绘制机构运动简图；③讨论机构具有确定运动的条件，对设计新机械或对已有机械进行分析都是十分重要的。

本章将主要讨论上述三个问题。

第一节 平面机构的组成

一、构件及其自由度与约束

机构是由若干具有确定相对运动的构件组成的，构件是运动的基本单元。

构件的运动是指构件的位置在空间的变化。如图1-2所示，在 xOy 坐标系中，构件 S 有三个独立运动的可能性，即沿 x 轴、 y 轴方向移动和绕其上任一点 A 的转动。构件的这种可能出现的独立运动称为自由度。因此，一个作平面运动的自由构件有三个自由度。

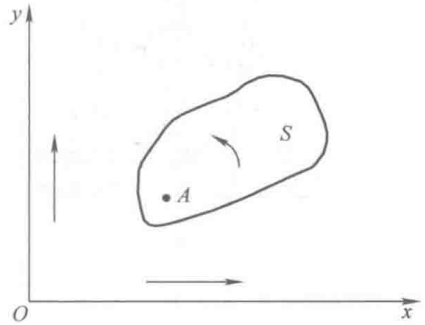


图 1-2 平面构件的自由度

当一构件与其他构件相互连接时，其相对运动将受到限制，对构件独立运动所加的限制称为约束。约束增多、构件的自由度将减少，约束的数目与构件的连接形式有关，构件每增加一个约束，便失去一个自由度。

二、运动副及其分类

构件组成机构时，每个构件都以一定的方式与其他构件相连接。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。组成运动副的两构件若只能相对作平面运动的运动副称为平面运动副。

两构件不外乎通过点、线或面来实现接触。按照接触情况和两构件接触后的相对运动形式的不同，通常把平面运动副分为低副和高副两类。

1. 低副 两构件通过面接触所构成的运动副称为低副。低副又有转动副和移动副之分，如图1-3所示。

在图 1-3a、b 所示构件 1、2 组成的运动副中，两构件只能绕 z 轴相对转动，即沿 x 轴、 y 轴方向的相对移动受到约束。组成运动副的两构件只能绕某一轴线作相对转动，则这种运动副称为转动副或称铰链。如图 1-3a 所示转动副中，有一个构件是固定的称为固定铰链；图 1-3b 所示构件 1、2 组成的转动副，两构件都未固定，称为活动铰链。

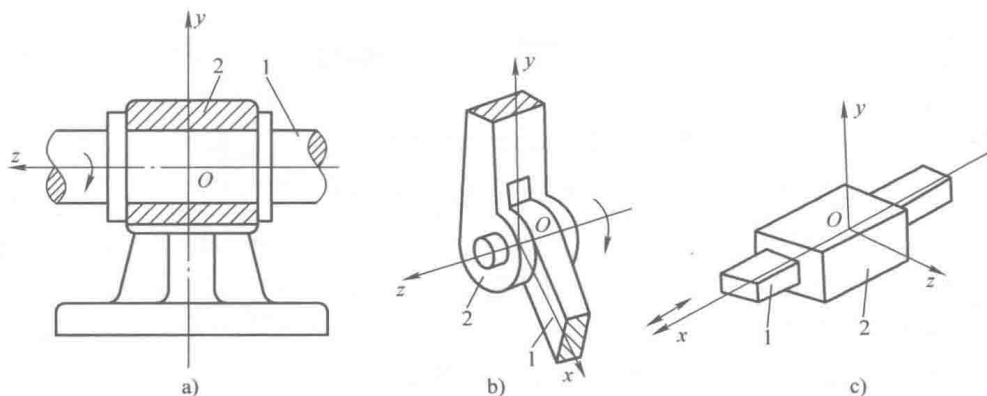


图 1-3 平面低副

图 1-3c 所示运动副中的两构件只能沿 x 轴方向作相对移动，沿 y 轴方向的相对移动和绕 z 轴的相对转动均受到约束。这种两构件只能作相对直线移动的运动副，称为移动副。

转动副只能在一个平面内相对转动，移动副只能沿某一轴线方向移动。因此，一个低副引入两个约束，即减少两个自由度。

2. 高副 两构件通过点或线接触所构成的运动副，称为高副，如图 1-4 所示。

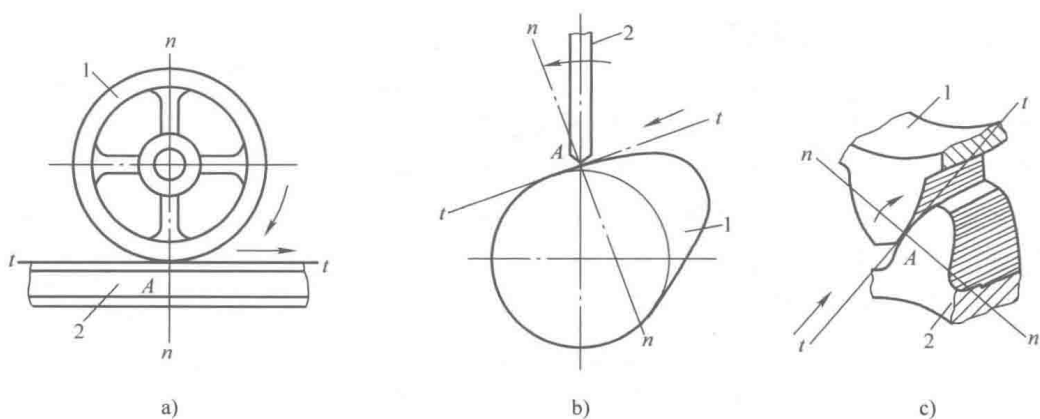


图 1-4 平面高副

两构件组成高副，彼此间可沿接触处切线 $t-t$ 方向作相对移动和在平面内作相对转动；而沿法线 $n-n$ 方向的相对移动受到约束。因此，一个高副引入一个约束，即减少一个自由度。

第二节 平面机构的运动简图

在研究机构运动时，为了使问题简化，可以不考虑那些与运动无关的构件外形和运动副的具体构造，仅用简单线条和符号表示构件和运动副，并按比例定出各运动副的位置。这种表明机构各构件间相对运动关系的简单图形称为机构运动简图。

为了绘制机构运动简图，首先要明确三类构件，即固定件（又称机架）——机构中固结于定参考系的构件；原动件——机构中作用有驱动力或力矩的构件，有时也将运动规律已知的构件称为原动件；从动件——机构中除了原动件以外的随着原动件的运动而运动的其余可动构件。其次还需弄清该机构是由多少个构件组成，各构件间组成何种运动副，然后按照表 1-1 “部分常用机构运动简图符号”所规定的符号和尺寸关系，按比例绘制机构运动简图。

表 1-1 部分常用机构运动简图符号（摘自 GB/T 4460—1984）

名称	代表符号		名称	代表符号
杆的固定联接			链传动	
零件与轴的固定				
轴承	向心轴承	 普通轴承	滚动轴承	 滚动轴承
	推力轴承	 单向推力 双向推力	推力滚动轴承	 推力滚动轴承
	向心推力轴承	 单向向心推力 双向向心推力	向心推力滚动轴承	 向心推力滚动轴承
联轴器	 可移式联轴器 弹性联轴器		外啮合圆柱齿轮机构	
离合器	 啮合式 摩擦式		内啮合圆柱齿轮机构	
制动器			齿轮齿条传动	
在支架上的电动机			锥齿轮机构	
带传动			蜗杆传动	
			棘轮机构	 (外啮合)
			槽轮机构	 (外啮合)

图 1-5a 所示为一颚式破碎机，主体机构由机架 1、偏心轴 2、动颚 3、肘板 4 等 4 个构件以转动副连接而成。当偏心轴 2 在带轮 5 的带动下绕 A 轴心转动时，驱使动颚 3 作平面运动，从而将矿石轧碎。图中所示的排料口调整机构 6，在破碎机工作时静止不动，故在简图

绘制时，视它与机架为同一固定构件。

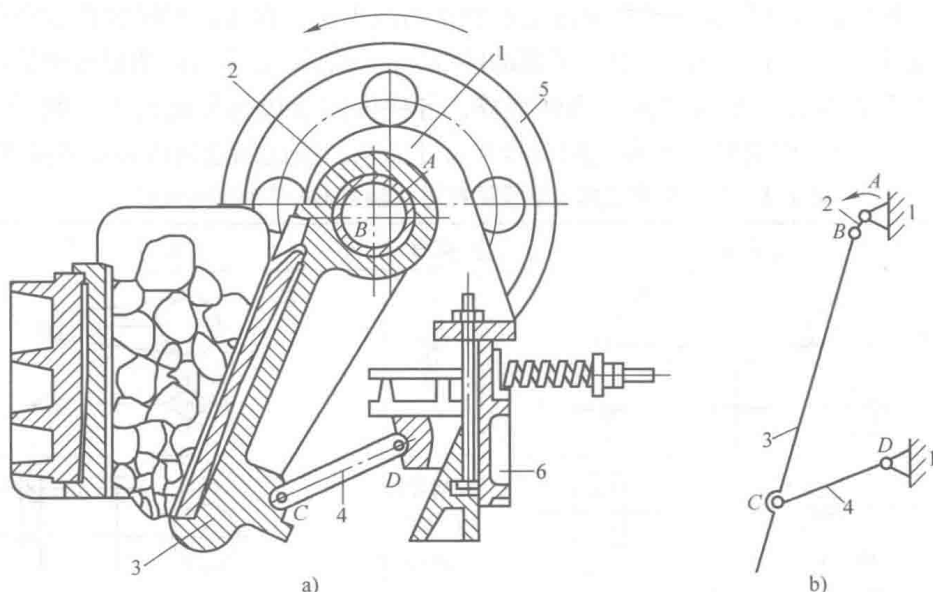


图 1-5 颚式破碎机及其机构运动简图

1—机架 2—偏心轴 3—动颚 4—肘板 5—带轮 6—排料口调整机构

现以颚式破碎机为例，说明机构运动简图的绘制步骤。

1) 找出原动件、从动件和机架。由图可知，机构运动由带轮 5 输入，而带轮和偏心轴 2 固连成一体（属同一构件），绕 A 转动，所以偏心轴 2 为原动件，动颚 3 和肘板 4 为从动件，构件 1 为机架，共 4 个构件。

2) 由原动件开始，沿着运动的传递，分析各构件之间相对运动的性质，从而确定运动副数目及其类型。偏心轴 2 与机架 1、偏心轴 2 与动颚 3，动颚 3 与肘板 4，肘板 4 与机架 1 均组成转动副，共 4 个转动副。

3) 选择适当的绘图面，并选定机构运动的一个瞬时位置来绘制机构运动简图。若一个平面视图不能表达清楚运动传递关系，可另加辅助视图。图 1-5a 所示绘图面和机构运动的瞬时位置，较好地表达了机构运动的传递关系，因此可按此绘制运动简图。

4) 选择适当的长度比例尺 $\mu_l = \frac{\text{实际长度 (m 或 mm)}}{\text{图示长度 (mm)}}$ ，绘制运动简图。按选定的比例尺，确定各运动副的相对位置，并按规定符号绘出运动副，如图 1-5b 中的 A、B、C、D（转动副 B 虽然半径大于偏心距 AB，但运动简图只表示相对运动性质，不表示具体结构，所以转动副 B 与其他转动副用同样大小的圆圈表示）。然后用直线（或曲线）将同一构件上的运动副相连接来代表构件。连接 A、B 为偏心轴 2，连接 B、C 为动颚 3，连接 C、D 为肘板 4，并将图中机架画出斜线，在原动件 2 上标出指示运动方向的箭头。这样便绘出图 1-5b 所示的颚式破碎机主体机构运动简图。

第三节 平面机构具有确定运动的条件

为使组合起来的构件能产生确定的相对运动，需要确定机构的自由度和判定机构是否具

有确定运动的条件。

一、平面机构自由度的计算

如前所述，一个作平面运动的自由构件具有三个自由度，若机构中有 n 个可动构件（即不包括机架），在未通过运动副连接前共有 $3n$ 个自由度。当用 P_L 个低副和 P_H 个高副连接组成机构后，每个低副引入两个约束，每个高副引入一个约束，共引入 $2P_L + P_H$ 个约束，因此整个机构相对机架的自由度数，即机构的自由度为

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

下面举例说明此式的应用。

例 1-1 试计算图 1-5 所示颚式破碎机主体机构的自由度。

解 由其机构运动简图不难看出，该机构有 3 个活动构件， $n = 3$ ；包含 4 个转动副， $P_L = 4$ ；没有高副， $P_H = 0$ 。因此，由式 (1-1) 得该机构自由度为

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

二、计算平面机构自由度的注意事项

应用式 (1-1) 计算平面机构自由度时，还必须注意以下一些特殊情况。

1. 复合铰链 图 1-6a 表示构件 1 与构件 2、3 组成两个转动副。当两个转动副的轴线间距离缩小到零时，两轴线重合，得到图 1-6b 所示的复合铰链，其侧视图如图 1-6c 所示。这是由三个构件组成的包含两个转动副的复合铰链，由此可知，由 K 个构件组成的复合铰链，应当包含有 $K-1$ 个转动副。

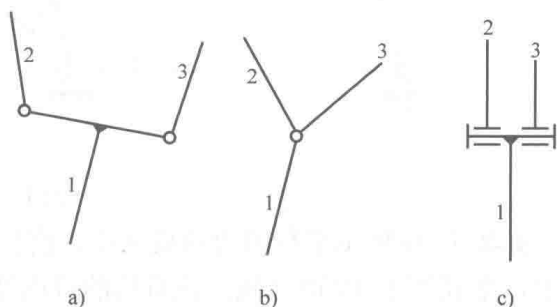


图 1-6 复合铰链

2. 局部自由度 在机构中如某构件的运动，并不影响整个机构的运动，这种与整个

机构运动无关的自由度称为局部自由度。在计算机构自由度时，局部自由度应除去不计。如图 1-7a 所示凸轮机构，用式 (1-1) 计算其自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 = 2$ ，而实际上滚子绕其自身轴线的自由转动是局部自由度，应除去不计。在计算时可以设想滚子与从动件焊成一体，如图 1-7b 所示。其自由度则为 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$ 。

3. 虚约束 在运动副引入的约束中，有些约束在机构中与其他约束重复而不起限制运动作用的约束称虚约束，或称消极约束。计算机构自由度时应除去不计。

虚约束是在特定的几何条件下出现的，平面机构中的虚约束常出现在下列场合。

1) 两个构件之间组成多个导路平行的移动副，在计算机构自由度时，只能按一个移动副计算，其他为虚约束。如图 1-7a 中构件 2 和机架 4 组成两个移动副，有一个是虚约束，应按图 1-7b 计算自由度。

2) 两个构件之间组成多个轴线重合的转动副，如图 1-8 所示，构件 1、2 在 A、B 两处组成转动副，其中有一个转动副是虚约束。应按一个转动副对待。

3) 在机构中，如果两构件相连接，而该两构件上连接点的运动轨迹与连接前互相重合时（图 1-9b 所示），则此连接引入的约束必为虚约束。

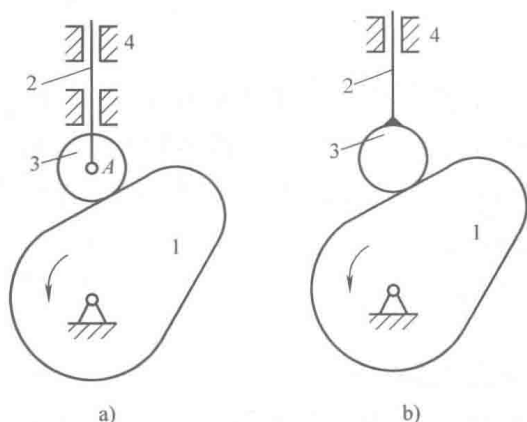


图 1-7 局部自由度

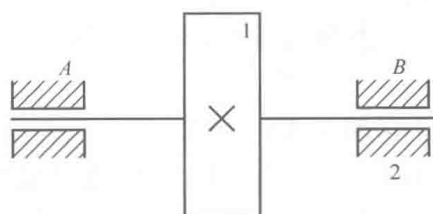


图 1-8 两构件组成多个转动副

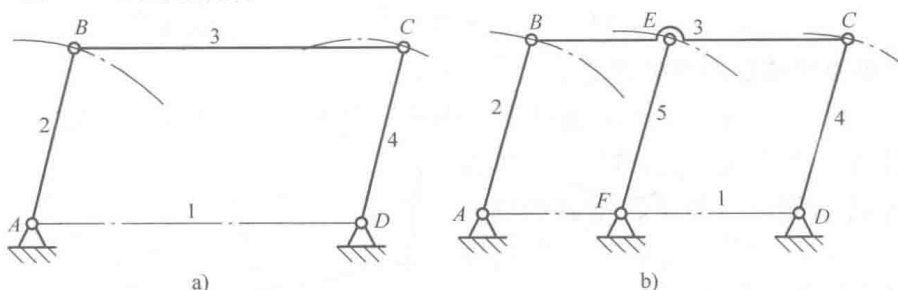


图 1-9 虚约束

如图 1-9a 所示平行四边形机构中，连杆 3 作平面运动，其上各点的轨迹均为圆心在 AD 线上而半径等于 AB 的圆弧。该机构的自由度为 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$ 。现若在该机构中加上构件 5，与构件 2、4 相互平行且长度相等，如图 1-9b 所示。显然这对机构的运动并不产生任何影响，但此时，用式 (1-1) 计算该机构自由度却变为 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$ 。这是因为加入构件 5 后，引入 3 个自由度，却因增加两个转动副而引入 4 个约束所致。这个多引入的约束对机构运动是不起约束作用的，因而是虚约束。在计算机构自由度时应除去不计，即按图 1-9a 所示机构计算机机构自由度。

4) 机构中不影响运动的对称部分，如图 1-10 所示的行星轮系，为了受力均衡并提高承载能力，安装三个相同的行星轮，实际上只要一个行星轮就能满足运动要求。而每增加一个行星轮，增加两个高副一个低副，就引入一个虚约束。在计算机机构自由度时应将引入虚约束的构件及运动副除去不计。该机构的自由度为 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$ (注意， O 处为复合铰链)。

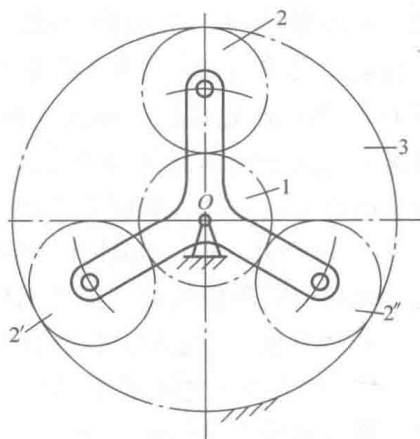


图 1-10 对称部分的虚约束

还有一些类型的虚约束需要通过复杂的数学证明才能判别，这里就不一一列举了。

虚约束是在特定的几何条件下产生的，它不影响机构的运动，但是为了改善机构的刚性及受力情况，在结构上往往需要这样做。应当指出，如果加工安装误差太大，不能保证这些特定的几何条件，虚约束就会成为实际约束，而使机构不能运动。因此，在设计时，应避免不必要的虚约束。

例 1-2 试计算图 1-11a 所示大筛机构的自由度。

解 机构中的滚子有一个局部自由度。顶杆与机架在 E 和 E' 组成两个导路平行的移动副，其中之一为虚约束。 C 处是复合铰链，3 个构件组成两转动副。将滚子与顶杆焊成一体，去掉移动副 E' ，如图 1-11b 所示。该机构有 7 个活动构件， $n=7$ ， $P_L=9$ （7 个转动副和 2 个移动副）， $P_H=1$ ，由式 (1-1) 得

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

此机构的自由度等于 2。

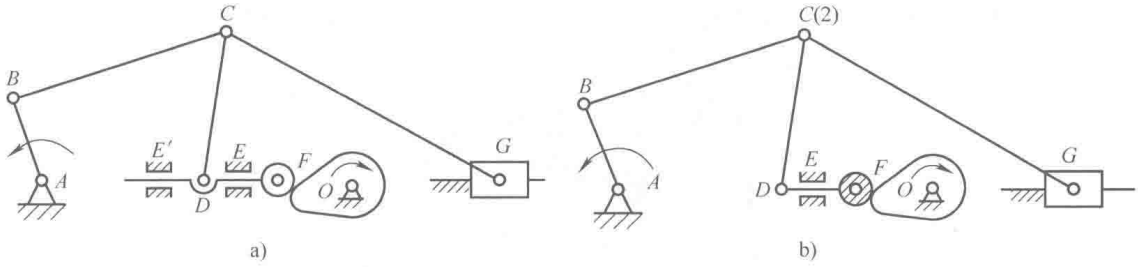


图 1-11 例 1-2 图

三、机构具有确定运动的条件

机构的自由度也即是平面机构具有独立运动的个数。机构要运动，其自由度 F 必大于零。通常机构中每个原动件具有一个独立运动。如图 1-12 所示，原动件 AB 与机架以转动副相连，只能绕 A 转动；或原动件滑块与机架组成移动副，滑块只能沿导路直线移动，均只有一种运动。因此，机构自由度必定与原动件的数目相等。

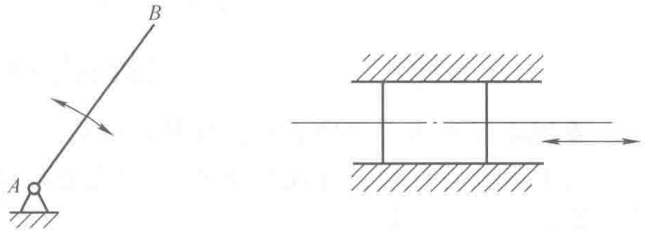


图 1-12 原动件具有一个独立运动

机构原动件的独立运动是由外界给定的。如果给定的原动件数目不等于机构自由度，则将产生如下的影响。

图 1-13 所示为原动件数目小于机构自由度数的例子，图中原动件数等于 1，而机构自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 0 = 2$ 。显然，当只给定原动件 1 的位置角 φ_1 时，从动件 2、3、4 的位置不能确定。只有给出两个原动件，使构件 1、4 都处于给定位置，才能使从动件获得确定的运动。

图 1-14 所示原动件数大于机构自由度的例子，图中原动件数等于 2，机构自由度 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$ 。如果原动件 1 和原动件 3 的给定运动都要同时满足，势必将杆 2 拉断。

图 1-15 所示为机构自由度等于零的构件组合 ($F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 6 - 0 = 0$)，它的各构件之间不可能产生相对运动。

综上所述可知，机构具有确定运动的条件是 $F > 0$ ，且 F 等于原动件个数。