

高等专科学校教材

机械设计

文朴 李田 杨沿平 主编

机械工业出版社

高等专科学校教材

机 械 设 计

主编	文 朴	李 田	杨沿平
参编	周效雷	胡争先	吴原生
	陈再良	张力军	强宝钢
	刘莉莉		
主审	何季雄		



机械工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械设计/文朴等主编. —北京:机械工业出版社,1997.8

高等专科学校教材

ISBN 7-111-05594-0

I. 机… II. 文… III. 机械设计-高等学校-教材 N. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 02358 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 林 松 版式设计: 王 颖 责任校对: 刘志文
倪少秋

封面设计: 姚 毅 责任印制: 付方敏

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 7 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·27 印张·663 千字

6 001—8 000 册

定价: 34.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书是以国家教育委员会高等工程专科机械基础课委员会机械基础课程组 1995 年拟定的《机械原理》、《机械零件》教学基本要求为依据,结合国家教委批准的湘潭机电高等专科学校机械制造专业改革及兄弟院校教学改革经验而编写的。为优化专科毕业生知识能力的结构,强化机械设计的整体观念及加强综合应用能力的培养,本书将原《机械原理》、《机械零件》两部分内容合二为一,并加入了简单机械运动方案设计及典型机械零部件的精度设计等内容,定名为《机械设计》。本书可作为各类高等专科学校机械类专业用教材,参考教学时数为 120~140 学时,其内容各校可按专业特点自行取舍。

在编写过程中,本书力求做到:

(1)体现高等专科教育培养技术应用型人才的特点,选择、处理教学内容,以应用为目的,强调简单机械整机设计概念及设计能力的培养。

(2)有关基础理论的教学内容以必需、够用为度,以掌握概念、强化应用为重点,精简繁杂的理论分析及公式推演过程。另外,目录中带“*”号的章节可供教学选择。

(3)在内容编排上条理清晰、层次分明、言简意赅,并选用了适当的例题和习题,以利教学。

(4)各章内容、数据、资料等均采用最新国家标准。

(5)为便于培养学生运用计算机的能力,有关章节侧重介绍解析法设计的一般方法。

参加本书编写的有:湘潭机电高等专科学校文朴(绪论、第四章、第六章),李田(第八章、第十一章、第十五章),周效雷(第二章、第三章、第十七章),胡争先(第一章、第七章、第二十章),湖南师范大学杨沿平(第二十二章),华北工学院专科学校吴原生(第十九章、第二十一章),广东石油化工高等专科学校陈再良(第九章、第十二章),岳阳大学张力军(第十章、第十六章),丹东纺织工业专科学校强宝钢(第五章、第十八章),平原大学刘莉莉(第十三章、第十四章)。由文朴、李田、杨沿平任主编。

本书承全国高等院校汽车专业教学指导委员会委员、湖南大学何季雄教授主审。全国高等专科机械类专业协会副理事长、湘潭机电高等专科学校丁树模教授对本书的编写提出了很多宝贵的意见和建议。

编者对为本书付出辛勤劳动的同志表示深切的谢意。由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中不足之处在所难免,恳切希望广大读者和教师批评指正。

编 者

1996 年 10 月

目 录

前言		第四节 齿轮各部分名称及渐开线标准直齿圆柱齿轮的几何尺寸	76
绪论	1	第五节 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	82
第一节 本课程研究的对象和内容	1	第六节 渐开线直齿圆柱齿轮连续传动的条件	85
第二节 本课程在教学中的地位、作用和任务	2	第七节 渐开线齿轮的切齿原理和根切现象	87
第三节 机械设计的主要内容和一般设计程序	2	* 第八节 变位直齿圆柱齿轮传动	90
第一章 平面机构的组成及其自由度	3	第九节 平行轴斜齿圆柱齿轮机构	97
第一节 运动链和机构	3	习题	102
第二节 平面机构的运动简图	5	第五章 空间齿轮机构及其设计	104
第三节 平面机构的自由度	6	第一节 交错轴斜齿圆柱齿轮机构	104
第四节 平面机构的组成原理	10	第二节 蜗杆蜗轮机构	105
习题	13	第三节 直齿圆锥齿轮机构	109
第二章 平面连杆机构及其设计	16	习题	113
第一节 铰链四杆机构的基本形式及其演化	16	第六章 轮系及其设计	115
第二节 铰链四杆机构中的曲柄存在条件	21	第一节 轮系及其分类	115
第三节 平面四杆机构的工作特性	21	第二节 定轴轮系的传动比计算	115
* 第四节 平面连杆机构的运动分析	24	第三节 定轴轮系的应用	117
* 第五节 平面连杆机构的力分析	35	第四节 周转轮系的传动比计算	119
第六节 平面四杆机构的设计	45	第五节 复合轮系的传动比计算	122
习题	49	第六节 周转轮系和复合轮系的应用	123
第三章 凸轮机构及其设计	53	* 第七节 行星轮系的效率	125
第一节 凸轮机构的应用和分类	53	* 第八节 行星轮系的类型和行星轮系各轮齿数的选择	127
第二节 从动件的常用运动规律	54	* 第九节 渐开线少齿差行星齿轮传动、摆线针轮行星传动及谐波传动简介	129
第三节 图解法设计凸轮轮廓	59	习题	132
第四节 设计凸轮机构应注意的几个问题	62	第七章 其它常用机构	136
第五节 盘形凸轮轮廓的计算机辅助设计	65	第一节 棘轮机构	136
习题	68	第二节 槽轮机构	139
第四章 平面齿轮机构及其设计	71	第三节 万向联轴器	143
第一节 齿轮机构的特点和类型	71	第四节 螺旋机构	145
第二节 齿廓啮合的基本定律	72	第五节 不完全齿轮机构简介	146
第三节 渐开线及渐开线齿廓	73	习题	147

第八章 机械的平衡、运转及速度波动的调节	149	第十三章 带传动	227
第一节 概述	149	第一节 带传动的类型和应用	227
第二节 刚性转子的平衡	150	第二节 V带和带轮	228
第三节 等效力矩和等效转动惯量	153	第三节 带传动的工作情况分析	232
第四节 机械系统的运动方程	155	第四节 带传动的设计计算	234
第五节 机械系统速度的波动及其调节	157	第五节 带传动的张紧和维护	239
第六节 机械系统的平均速度和不均匀系数	157	习题	242
第七节 飞轮的转动惯量和主要尺寸	158	第十四章 链传动	244
习题	160	第一节 链传动的类型和特点	244
* 第九章 机械的效率	163	第二节 滚子链和链轮	244
第一节 机械效率和自锁	163	第三节 链传动的运动特性	248
第二节 斜面的效率与自锁	165	第四节 滚子链传动的设计计算	250
第三节 螺旋机构的效率和自锁	167	第五节 链传动的布置、张紧和润滑	254
习题	168	习题	258
* 第十章 简单机械运动方案设计	170	第十五章 齿轮传动	259
第一节 概述	170	第一节 轮齿的失效形式和计算准则	259
第二节 机器的运动方案设计	171	第二节 齿轮的材料及热处理	260
第三节 组合机构	174	第三节 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	262
第四节 机构的选型和运动的协调配合	178	第四节 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	272
第五节 传动机构组合方案的拟定	182	第五节 标准直齿圆锥齿轮传动的强度计算	277
第六节 机构运动简图设计	187	第六节 齿轮的结构	280
习题	190	第七节 齿轮传动的润滑	282
第十一章 机械零件设计概论	194	习题	283
第一节 机械零件设计概述	194	第十六章 蜗杆传动	285
第二节 机械零件的材料及选用	196	第一节 蜗杆传动的失效形式、计算准则和材料选择	285
第三节 机械零件的强度	199	第二节 普通圆柱蜗杆传动的强度计算	285
第四节 机械零件的耐磨性	202	第三节 蜗杆传动的效率、润滑及热平衡计算	290
第五节 机械零件的工艺性、标准化和优先系数	203	第四节 蜗杆蜗轮的结构	292
习题	204	习题	294
第十二章 螺纹联接和螺旋传动	205	第十七章 轴和轴毂联接	296
第一节 螺纹	205	第一节 轴的分类和设计要求	296
第二节 螺纹联接的主要类型、预紧和防松	206	第二节 轴的材料及其选择	297
第三节 螺栓组联接的结构设计和受力分析	209	第三节 轴的结构设计	298
第四节 螺栓联接的强度计算	213	第四节 轴的强度计算	303
第五节 提高螺栓联接强度的措施	218	第五节 轴的刚度计算和振动稳定性简介	307
第六节 螺旋传动	221	第六节 轴毂联接	308
习题	224	习题	314

第十八章 滑动轴承	316	第一节 概述	357
第一节 摩擦状态和润滑	316	第二节 联轴器	358
第二节 滑动轴承的典型结构	317	第三节 离合器	361
第三节 滑动轴承的材料	320	习题	364
第四节 轴瓦和轴套结构	323	第二十一章 弹簧	365
第五节 润滑剂和润滑方法	325	第一节 概述	365
第六节 非液体摩擦滑动轴承的计算	328	第二节 弹簧的材料和制造	366
第七节 动压润滑的形成原理	329	第三节 圆柱形螺旋压缩(拉伸)弹簧的 设计计算	369
习题	332	习题	375
第十九章 滚动轴承	333	* 第二十二章 典型机械零部件的精度 设计	376
第一节 概述	333	第一节 平键联接的精度设计	376
第二节 滚动轴承的类型和选择	333	第二节 矩形花键联接的精度设计	378
第三节 滚动轴承的代号	336	第三节 圆柱齿轮传动的精度设计	382
第四节 滚动轴承的寿命计算	339	第四节 普通螺纹的精度设计	403
第五节 滚动轴承的静负荷计算	345	第五节 滚动轴承配合的精度设计	414
第六节 极限转速	346	习题	423
第七节 滚动轴承的组合结构设计	348	参考文献	425
第八节 滚动轴承的润滑和密封	352		
习题	355		
第二十章 联轴器和离合器	357		

绪 论

第一节 本课程研究的对象和内容

在人们的生产和生活中，经常遇到如汽车、机床、电动机、洗衣机等机器设备。这些机器功能各不相同，结构性能各异。

图 0-1 所示为一单缸四冲程内燃机。燃气经燃烧膨胀作功，驱动活塞 11 往下移动，经连杆 10 带动曲轴 8 转动。曲轴通过一对齿轮 7 和 6，带动两凸轮 4 和 5，以控制进、排气阀 2 和 3 相对活塞的移动作定时启闭，以便将燃气吸入气缸和排出燃烧后的废气。气缸体 1 起支承作用。以上各种动作协调配合，将燃气燃烧时的热能，转变为曲轴转动的机械能。又如发电机由电枢（定子）和转子组成。当驱动转子转动时，发电机将机械能转换成电能。

综上所述，机器都具有以下三个明显的特征：

- 1) 它们都是人为的实物组合。
- 2) 组成机器的实物之间，具有确定的相对运动。
- 3) 能代替或减轻人的劳动，完成有用的机械功，或转换机械能。

将其它形式的能量转换为机械能的机器称为原动机，如电动机、内燃机等。利用机械能完成有用功，或将机械能转换成其它形式能量的机器称为工作机，如金属切削机床、球磨机、起重机、发电机、空气压缩机等。

机器由一个或多个机构组成。如内燃机中的曲柄滑块机构、凸轮机构、齿轮机构等。机构与机器的区别，仅在于机构不能转换机械能。

从运动和结构来看，机构与机器无太大区别，故通常将机构和机器统称为机械。

组成机构的具有确定

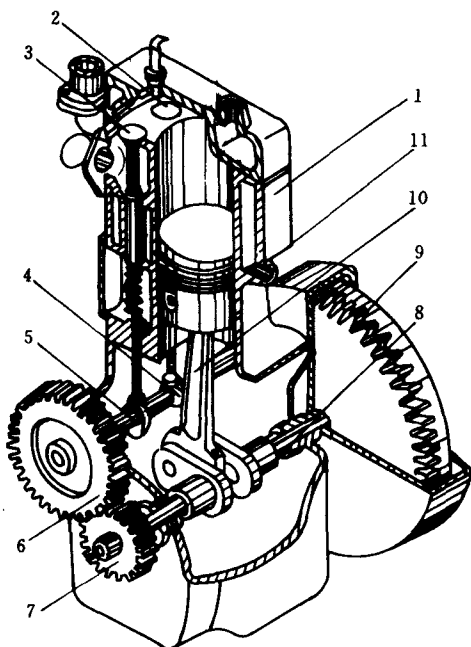


图 0-1 单缸四冲程内燃机

1—气缸体 2、3—进、排气阀 4、5—凸轮 6、7—齿轮
8—曲轴 9—飞轮 10—连杆 11—活塞

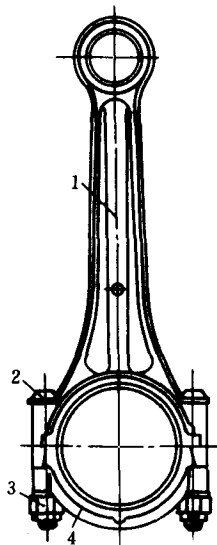


图 0-2 连杆

1—连杆体 2—螺栓
3—螺母 4—连杆盖

运动的杆件称为构件。构件是机构的最小运动单元，如曲柄滑块机构中的连杆等。

构件则由零件组成，零件是最小制造单元。有的构件即为一个零件，有的构件则由多个零件组成，如图 0-2 所示的连杆，由连杆体 1、螺栓 2、螺母 3 及连杆盖 4 等零件组成。

机器中普遍使用的机构称为常用机构，如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等。

机器中普遍使用的零件称为通用零件，如齿轮、轴、轴承、螺钉等。

只限于某些机械应用的零件称为专用零件，如内燃机中的活塞、活塞环等。

本课程主要研究机械中的常用机构和通用零件的工作原理、结构特点、设计方法及有关的基本理论。

第二节 本课程在教学中的地位、作用和任务

机械设计是机械类专业的主干技术基础课程，它为学生学习专业课程提供必要的理论基础。

本课程综合应用多种有关的基础理论与生产实践知识。如机械制图、金属工艺学、机械工程材料、工程力学、高等数学、公差配合等，是本课程的先修课程。

通过对本课程的学习，将使學生逐步掌握机构和机械零件的设计方法以及有关设计的一些基本理论与注意事项，了解机械设计的一般过程，具备简单机械的整机设计能力。同时，还将使學生应用本课程的基本理论知识，对现有的机器设备进行结构、性能等方面的分析，以便将来更好地应用或改进现有设备，不断挖掘机械设备的潜力，提高机械的运行效率。

第三节 机械设计的主要内容和一般设计程序

按预定目标和所需功能设计新机械，或对现有机械设备加以改进，以提高其应用效率，这便是机械设计的主要任务。

所设计的机械，在实现预期功能的前提下，应具有性能好，操作维修方便、安全可靠、外形美观、成本低等特点。

机械设计通常按照以下程序进行：明确设计要求；确定机械的工作原理；选择适宜的机构，拟定机械的传动方案；对机构进行运动和动力分析，计算作用于各构件上的载荷；对零部件进行工作能力计算，进行总体设计和零部件的结构设计。

机械设计过程是一个复杂的过程。设计者只有具备有关机械设计的坚实理论基础和丰富的实践经验，才能设计出较为合理的机械。

另外，当需设计一台新机器时，设计人员必须周密地进行社会调查，所设计的机器应有广泛的销售市场，在可靠性、使用性、成本等方面，必须具有很好的竞争能力，归根结蒂必须争取获得较好的经济效益。

第一章 平面机构的组成及其自由度

当组成机构的构件上诸点的运动轨迹位于一个或若干个相互平行的平面内时，称该机构为平面机构。

如绪论所述，机构由构件组成，各构件之间具有确定的相对运动。

本章将研究构件如何联接与组成机构；何谓平面机构运动简图及其绘制方法；应具备怎样的条件，机构才能有确定的运动；构件究竟应如何组合，才能使之成为具有确定运动的机构等问题。

第一节 运动链和机构

一、平面运动构件的自由度

由力学可知，作平面运动的构件具有三个独立的运动。如图 1-1 所示，一个是构件绕基点 A 的转动，另两个是构件随基点 A 沿 x, y 方向的移动，也就是说，平面运动构件具有三个自由度。

二、运动链和机构

1. 运动副及其分类

机构由构件组成。两构件之间应是一种具有某种形式的相对运动的可动联接。这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的联接，称为运动副。两构件组成运动副，不外乎通过点、线、面的接触来实现。这些组成运动副的点、线、面，称为运动副元素。

在平面运动机构中，两构件所组成的运动副称为平面运动副。按运动副元素的不同，可将平面运动副分为低副和高副两类。

(1) 低副 两构件通过面接触而成的运动副称为低副。按两构件的相对运动形式的不同，又可将之分为转动副和移动副两类。

1) 转动副 使两构件在一个平面内作相对转动的运动副，称为转动副，或称铰链。如图 1-2 所示的轴颈 1 和轴承 2，它们之间仅作平面相对转动。故轴颈和轴承以转动副联接。

在机构中，转动副用圆圈表示，其中心代表相对转动轴线，如图 1-3 所示。若组成转动副的两构件 1 和 2 都是活动件，则用图 1-3a 表示。若其中一个为机架，则用图 1-3b、c 表示，即表示机架的杆件应加上细斜线。

2) 移动副 使两构件 1、2 沿某一方向作相对直线移动的

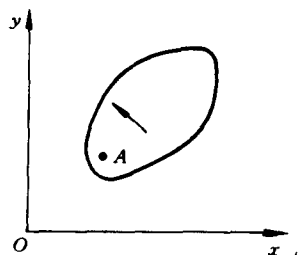


图 1-1 平面运动构件的自由度

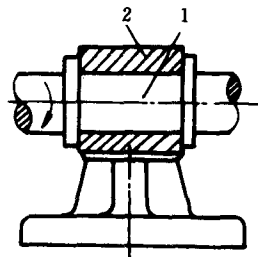


图 1-2 轴颈和轴承连接

1—轴颈 2—轴承

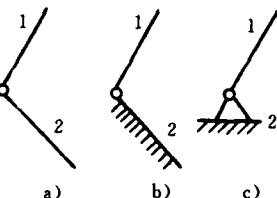


图 1-3 转动副

运动副，称为移动副（图 1-4a）。移动副的表示方法如图 1-4b、c 所示。对于组成移动副的构件 1、2，若其中之一作为机架，也应将其加上细斜线，如图 1-4c 所示。

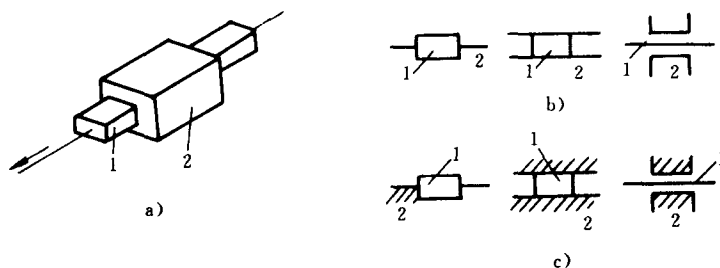


图 1-4 移动副

由上述可知，平面低副给予构件两个约束，使之仅有一个自由度。

(2) 高副 两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。如图 1-5a 中的凸轮轮廓 1 与从动件 2 的接触处 A，图 1-5b 中的轮齿 1 和轮齿 2 的接触处 A，均组成高副。

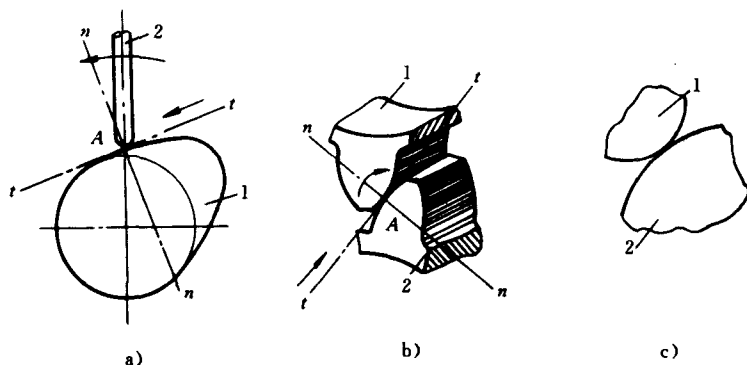


图 1-5 高副

如图 1-5a、b 所示，组成高副的两构件，可沿接触处的切线 $t-t$ 方向作相对移动，和绕接触线作相对转动。因此，高副使构件有两个自由度，仅给予构件在接触处的法线 $n-n$ 方向上一个约束。

高副通常用两构件的曲面轮廓接触来表示，如图 1-5c 所示。

另外，还有空间运动副，如球面副和螺旋副等，分别如图 1-6a、b 所示。关于对空间运动副的研究，因已超越本章范围，故不予赘述。

2. 运动链和机构

两个以上的构件通过运动副联接而成的系统，称为运动链，如

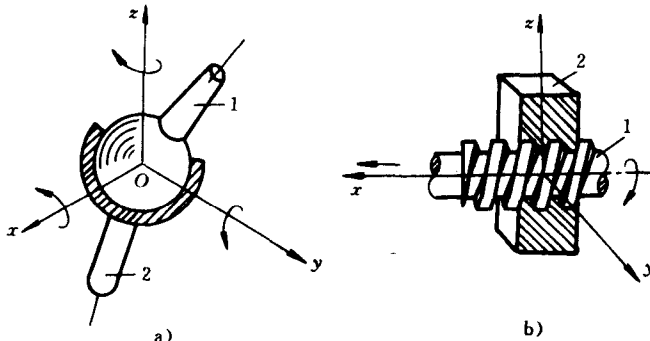


图 1-6 空间运动副

图 1-7 所示。若运动链中各构件首末相联，则称其为封闭运动链（图 1-7a），简称闭链，否则为开式运动链（图 1-7b），简称开链。一般机械都采用闭链。

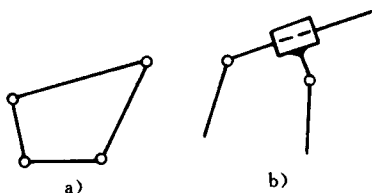


图 1-7 运动链

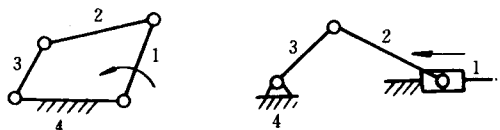


图 1-8 机构

在运动链中，将一个构件固定，使一个或少数几个构件按已知规律进行独立的运动，其余构件均随之作确定的运动，这种运动链便成了机构，如图 1-8 所示。机构中的固定构件称为机架，按已知规律进行独立运动的构件称为原动件，其余活动构件称为从动件。在图 1-8 中，构件 1 为原动件，在原动件上应标上带箭头的圆弧或直线。构件 2、3 为从动件，构件 4 被固定为机架。

第二节 平面机构的运动简图

在研究机构的运动时，为了反映各构件之间的相对运动关系，可不考虑各构件的真实形状及运动副的具体结构，仅用简单的线条和符号来代表构件和运动副，并按一定的比例定出各运动副之间的相对位置。这种反映机构各构件之间相对运动关系的简单图形，称为机构运动简图。

有关运动副的符号已于前节所述，下面来叙述含有多个运动副元素的单个构件的画法。

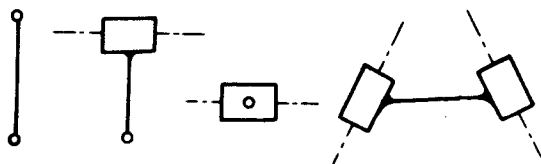


图 1-9 包含两个运动副元素的构件

图 1-9 表示包含两个运动副元素的构件的各种画法，图 1-10 表示包含三个运动副元素的构件的各种画法，图 1-11 表示包含四个运动副元素的构件的各种画法，以供绘制运动简图时参考。

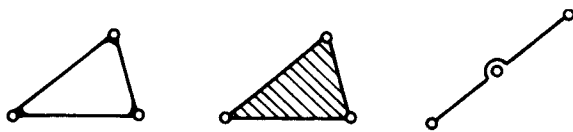


图 1-10 包含三个运动副元素的构件

下面通过实例来说明绘制机构运动简图的方法和步骤。

例 1-1 试绘制如图 1-12a 所示小型压力机的机构运动简图。

解 (1) 分析机构的运动和结构
该小型压力机由齿轮 1、偏心轮 2、连杆 3、滑杆 4、连杆 5、滚子 6、齿轮 7、凸轮 8、滑块 9、冲杆 10 和机架 11 组成。其中齿轮 1 和偏心轮 2 固联成一个构件，

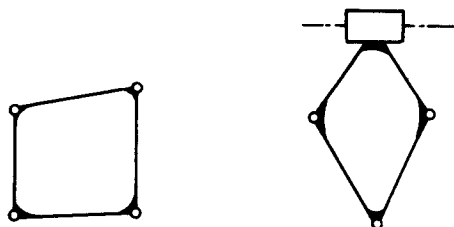


图 1-11 包含四个运动副元素的构件

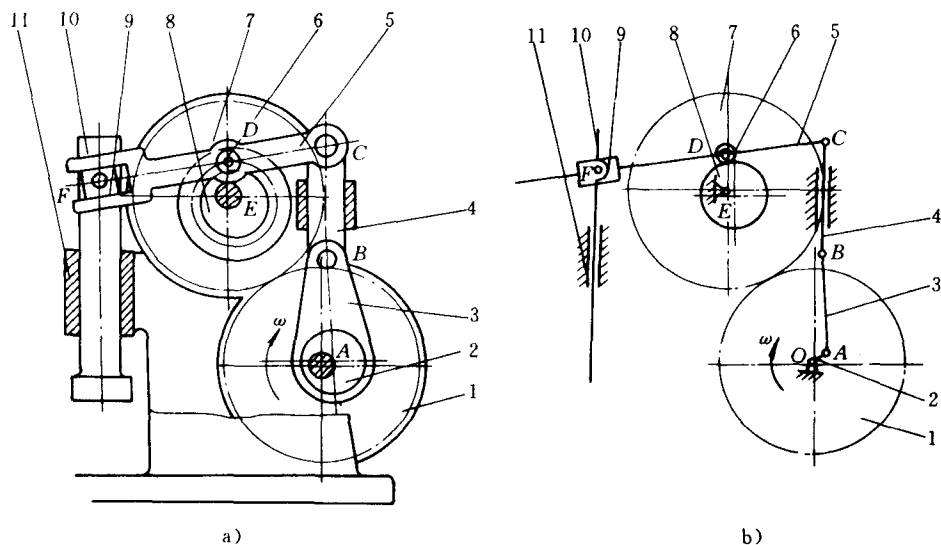


图 1-12 小型压力机

1、7—齿轮 2—偏心轮 3、5—连杆 4—滑杆 6—滚子 8—凸轮 9—滑块 10—冲杆 11—机架

齿轮 7 和凸轮 8 固联成一个构件。齿轮 1 为原动件，其余构件均为从动件。齿轮 1 和偏心轮 2 一起作整周转动，经连杆 3 带动滑杆 4 作往复移动。同时，齿轮 7 与齿轮 1 进行啮合传动，使凸轮 8 作整周转动。连杆 5 在滑杆 4 和凸轮 8 的共同作用下作平面运动，并通过滑块 9 使冲杆 10 作预定规律的往复直线移动。

(2) 确定运动副的类型 运动副的类型应由组成运动副的两构件之间的相对运动形式来确定。齿轮 1 和偏心轮 2 相对机架 11 转动，故与机架组成转动副；同理，连杆 3 与偏心轮 2 及滑杆 4 分别组成转动副，连杆 3 与偏心轮 2 的相对转动中心为偏心轮的几何中心，故应以其作为转动副的轴线位置；滑杆 4 相对机架移动，故与机架 11 组成移动副；滑杆 4 与连杆 5、连杆 5 与滚子 6、齿轮 7 及凸轮 8 与机架，滑块 9 与冲杆 10 等均分别组成转动副；连杆 5 与滑块 9，冲杆 10 与机架 11 均分别组成移动副；而滚子 6 与凸轮 8、齿轮 1 与齿轮 7，则分别用两封闭的圆弧曲线接触，以组成高副联接。

(3) 选择视图平面和比例尺，绘制机构运动简图 对平面机构，为将机构的运动关系表达清楚，应以机构的运动平面作为主视图平面。根据图面大小，选用适当的长度比例尺 μ_l [$\mu_l = \text{构件实际长度 (m)} / \text{构件图示长度 (mm)}$]，以便确定好运动副之间的相对位置，并用表示构件和运动副的规定符号绘出机构运动简图，如图 1-12b 所示。

如果不要要求用图解法分析机构的运动，仅要求表达各构件间的相对运动关系，则可不按比例绘制机构图形，这种图形称为机构示意图或机构简图。

第三节 平面机构的自由度

机构的各个构件之间应具有确定的相对运动。若将一些构件进行组合，而在构件之间并无确定的相对运动规律，或根本不能产生相对运动，则不能称其为机构。下面来研究机构具

有确定运动的条件。

一、平面机构的自由度及其计算

1. 平面机构的自由度

图 1-13a 所示为一平面四杆机构。构件 AB 为原动件，按已知规律作独立运动。用几何作图可知，对构件 AB 的任意位置，构件 BC 与 CD 均有一确定位置与之对应。亦即，该机构具有确定的运动。

图 1-13b 所示为一平面铰链五杆机构。若仅将构件 AB 作原动件，并使其按已知规律作独立运动，当其位于图示 AB 位置时，其余构件即可占据 BC 、 CD 、 DE 位置，也可占据 BC' 、 $C'D'$ 、 $D'E$ 等多个位置，即各构件之间无确定的相对运动。若同时将构件 AB 和 DE 作为原动件，则诸构件之间便具有确定的相对运动。

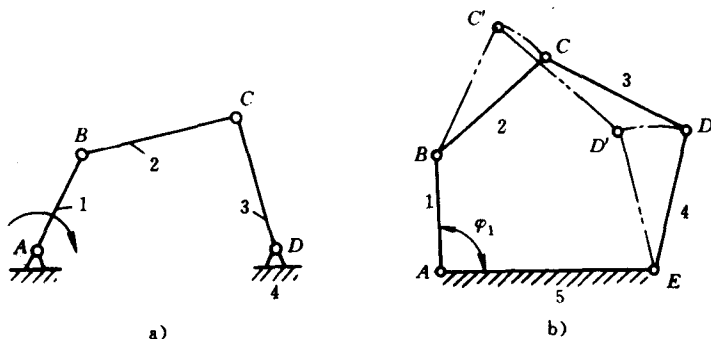


图 1-13 平面机构的自由度

综上所述，使机构中各构件间具有确定的相对运动的独立运动数目，称为机构的自由度。图 1-13a 所示机构的自由度为 1，图 1-13b 所示机构的自由度为 2。机构具有确定运动的条件为：机构的原动件数应等于机构的自由度数。

2. 平面机构自由度计算

设一平面运动链，含有 N 个构件， P_L 个低副及 P_H 个高副。未组成运动链时，诸构件的平面自由度总数为 $3N$ 。组成运动链后，诸构件所受的约束总数为 $2P_L + P_H$ 个。当将该链中某构件固定，使其成为机构时，又失去 3 个自由度，故该机构的自由度为

$$\begin{aligned} F &= 3N - 3 - (2P_L + P_H) \\ &= 3(N - 1) - 2P_L - P_H \\ &= 3n - 2P_L - P_H \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中， n 为机构中的活动构件数， P_L 为低副个数， P_H 为高副个数。

由式 (1-1) 可知，机构的自由度取决于活动构件数、平面低副及平面高副的数目。

如图 1-13a 所示的铰链四杆机构，其中活动构件数 $n=3$ ，低副个数 $P_L=4$ ，高副个数 $P_H=0$ ，此机构的自由度为

$$\begin{aligned} F &= 3n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1 \end{aligned}$$

由此可知，为使该机构的运动确定，只需一个原动件。

同样可以算得图 1-3b 所示的平面铰链五杆机构的自由度为 2，为使其具有确定的运动，应有两个原动件。

图 1-14a 所示的五构件组合，其自由度 $F=3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$ ，说明各构件组合成了刚性桁架。图 1-14b 所示三构件组合，其 $F=0$ ，故为刚性桁架。图 1-14c 为四构件组合，其自由度 $F=3 \times 3 - 2 \times 5 = -1$ ，自由度为负值，成为超静定桁架。

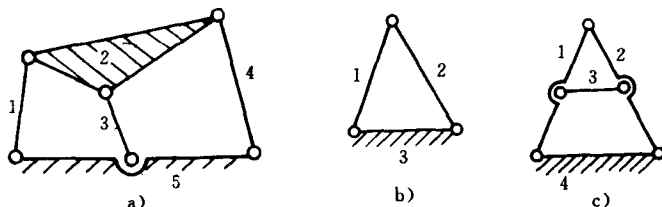


图 1-14 刚性桁架和超静定桁架

综上所述，机构的自由度必须大于零，并且机构的原动件数应等于机构的自由度，机构才能具有确定的运动，否则，不能称其为机构。

二、计算自由度应注意的几个问题

在用式 (1-1) 进行机构自由度的计算时，还应注意以下几个问题，否则计算将出现错误。

1. 局部自由度

如图 1-15a 所示凸轮机构，从动件的末端装有一滚子，当其于凸轮轮廓表面接触时，可减轻从动件与凸轮轮廓表面之间的磨损，但滚子相对从动件的转动，并不影响各构件的运动。这种不影响机构运动的自由度，称为局部自由度，在计算机构的自由度时，应将滚子和从动件刚化成一个构件，如图 1-15b 所示，然后再进行计算。

2. 复合铰链

若两个以上的构件同时在一处用转动副联接，则构成复合铰链。如图 1-16a 所示为三构件在 A 处组成复合铰链，图 1-16b 是其俯视图。从图 1-16a 可知，三个构件应组成两个转动副。依此类推，由 k 个构件汇交而成的复合铰链，应有 $(k-1)$ 个转动副，在计算机构自由度时应注意识别复合铰链。

3. 虚约束

在机构中，若运动副引入的约束不能限制机构的运动，则称其为虚约束。虚约束常出现于下列情况。

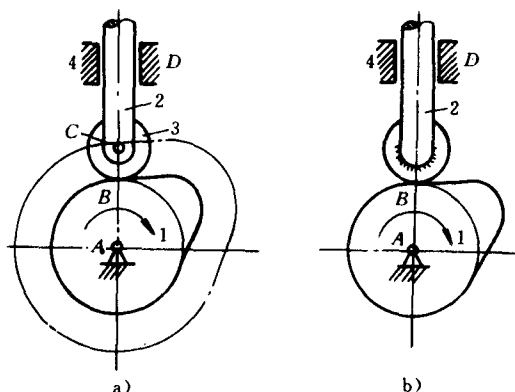


图 1-15 局部自由度

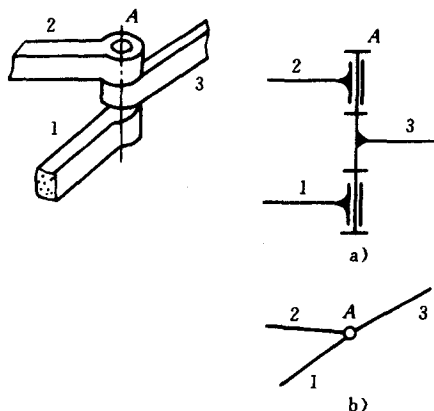


图 1-16 复合铰链

(1) 两构件之间组成多个轴线重合的转动副时 (如图 1-17a 所示), 此时若计算自由度, 则只取一个转动副, 其余均为虚约束。

(2) 两构件之间组成多个方向平行的移动副时 (如图 1-17b 所示), 只取一个移动副计算自由度, 其余均为虚约束。

(3) 当用一个构件和两个转动副联接两构件上距离不变的两个动点时, 此构件和联接用的两个转动副构成虚约束, 在计算自由度时, 应将其去除不计。

如图 1-18 所示的机构, 其中 $AB \parallel CD$ 、 $AE \parallel DF$ 。当该机构运动时, 两动点 E 、 F 之间的距离始终不变, 且等于 AD 。若用构件 EF (图中虚线所示) 以转动副将

E 、 F 两点联接, 其形成的约束并未影响该机构的运动, 故为虚约束。计算其自由度时, 应将 EF 构件和 E 、 F 处的两个转动副去除不计。

(4) 机构中某运动构件上的一动点, 和位于机架中的一点间的距离不变时, 若用一构件和两转动副将它们联接, 则构成虚约束。如图 1-19 所示机构,

$AB \parallel CD \parallel EF$, 由几何关系可知, 动点 E 和定点 F , 在运动中其距离 EF 始终不变, 故在计算自由度时, 应将构件 EF (图中虚线所示) 和 E 、 F 两处的转动副去除不计。

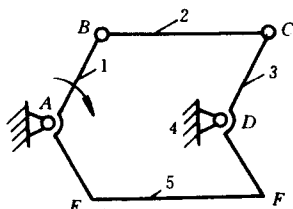


图 1-18 两构件上距离不变的两动点之间的联接

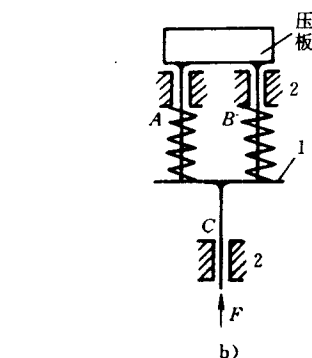


图 1-17 轴线重合的转动副和多个方向平行的移动副

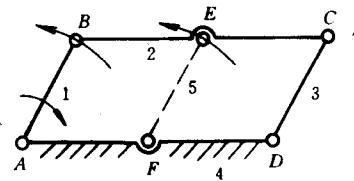


图 1-19 构件上的一动点和一定点间的距离不变的联接

(5) 为使机构在运动过程中

形成动态平衡, 常设计成对传递运动不起独立作用的对称部分。如图 1-20 所示行星轮系, 轮 $2'$ 与传递运动的轮 2 对于中心轮 1 为对称布置, 以达到运转中的动态平衡。因轮 $2'$ 对传递运动不起独立作用, 故轮 $2'$ 及其与轮 1 、轮 3 形成的高副联接构成虚约束, 在计算自由度时, 亦应将它们去除不计。

综上所述, 机构中的虚约束都是在一些特定的几何条件下出现的, 是对机构的运动毫无影响的重复约束。为便于加工装配, 以利机构的运动, 应尽量减少机构中的虚约束。但在机构中引入虚约束, 对提高构件的运转刚度及平衡性能等, 往往是行之有效的办法, 但对含虚约束的机构进行加工制造时, 则要求较高的制造精度, 否则将使其虚约束转化成真实的约束, 使机构不能顺利地运转, 或不能运转, 关于这点, 须特别加以注意。

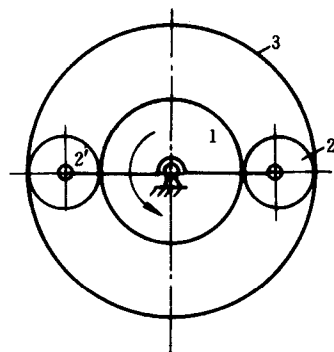


图 1-20 轮系中的对称布置结构

例 1-2 图 1-21 所示为凸轮—齿轮—连杆组成的组合机构，试计算其自由度。

解 凸轮机构从动件的滚子，因相对从动件转动，为局部自由度，应将其与从动件刚化成一个构件。此外， F 点是三构件相铰接的复合铰链，应按两个转动副计算。凸轮与大齿轮为一个构件，因此 $n=9$, $P_L=12$, $P_H=2$

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 9 - 2 \times 12 - 2 = 1$$

例 1-3 图 1-22 所示为一平面铰链五杆机构，其中 $AB \parallel CD \parallel EF$ ，求该机构的自由度。

解 该机构的 $n=4$, $P_L=6$, $P_H=0$ ，因此 $F=3n-2P_L-P_H=3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$ 。然而该机构应有确定的运动，故自由度不应为零。经观察，构件 3 或构件 4 为虚约束。现将构件 4 及其 E 、 F 处的两转动副去除，则 $n=3$ 、 $P_L=4$ ，机构的自由度为

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

该机构的自由度为 1，原动件数为 1，故运动确定。

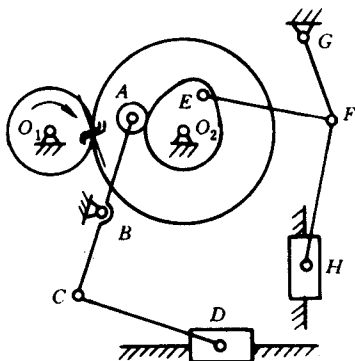


图 1-21 组合机构

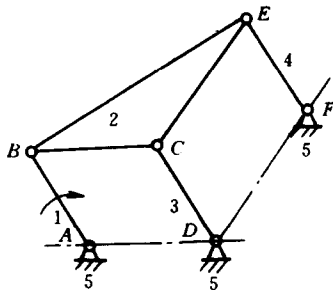


图 1-22 平面铰链五杆机构

第四节 平面机构的组成原理

一、平面机构的组成原理

平面机构由机架、原动件和若干从动构件组合而成。由于原动件个数应等于机构的自由度，那么，除机架和原动件外的构件组的自由度必然为零。为便于对机构进行运动和力的分析，尚须将构件组拆成若干个自由度为零的最简单的构件组。这样一些最简单的构件组，称为基本杆组。现设机构中各构件全由低副组成，显然，基本杆组应满足

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

或

$$P_L = \frac{3}{2}n \quad (1-2)$$

由于活动构件数 n 与低副数 P_L 应为整数，故满足上式的基本杆组有

杆组	n	2	4	6	...	...
低副数	P_L	3	6	9	...	...