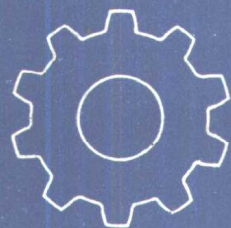


机械原理

杨基厚 主 编

曲继方 朱恒生 副主编



机械工业出版社

机 械 原 理

杨基厚 主编

曲继方 朱恒生 副主编



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书是根据1986年全国高校审定的《机械原理课程教学基本要求》，结合教学经验组织编写的。与此书配套的有《机械原理课程设计》。本书是采用新的教学课程体系——以机构为系统而组织编写的，它比过去的《机械原理》教材系统性有所改进，便于理解与学习。

本书共分十三章：导论、简单机构、连杆机构的型和运动分析、平面连杆机构受力分析、平面连杆机构综合、空间连杆机构、凸轮机构、齿轮啮合原理、齿轮机构、轮系、间歇运动及其他机构、机械系统的组成分析和机械系统的动力分析与计算。书后附有习题供复习参考。本书文字通顺、举例丰富，是一本很实用的教材。

此书可作为高校、大专机械原理课的教材，也可供广大机械工程技术人员参考。

机 械 原 理

杨基厚 主编

曲继方 朱恒生 副主编

*

责任编辑：王世刚 版式设计：乔玲

封面设计：王伦 责任校对：罗文莉

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张17 1/3·字数427千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 00,001—11,300·定价：5.55元

*

ISBN 7-111-01367-0/TH·233

前 言

为了使机械原理教材能适应科学技术不断发展的形势,为了满足对教材提出的既要传授知识,更要培养能力的要求,我们根据机械原理学科近期的发展和成就,结合多年的教学经验,提出《机械原理》教材新体系^[1]。新体系是:机械原理应该用机构这个模型对机械传递运动、力和做功的过程进行全面讨论的课程,整个课程是以机构贯穿始终进行展开和发展的。所以课程体系的主体部分,以机构的基本类型为对象,全面讨论它们的类型组成、运动、动力性能和综合方法。

新体系以机构为研究对象,对各种机构的基本类型的分析研究的着眼点是传递运动、力和做功的过程,有可能使各章的形式与方法相似、结构严谨;所讨论的机构的基本类型由简到繁,由低副到高副,再综合起来以机构系统为对象进行一定的分析与综合,可以得到由个别到一般,由局部到整体的认识规律,希望给设计者一个明确的思路;对于每一种机构的基本类型都根据它的特点从运动到受力,从机构的型分析到尺寸综合依次而连贯的系统论述,能有利于掌握分析问题和理论联系实际的方法;以机构的基本类型划分章节,能有利于把分析结果和机构性能特点结合起来,便于掌握机构基本参数和性能的关系;新体系注意突出技术基础课的工程性质,更倾向于为分析机器和设计机器作准备,而把数学和力学作为分析问题和解决问题的手段,避免和理论力学课程体系的重复。

如何精选教材内容则是我们反复考虑和关注的。教材内容应该和课程设计指导书、课程实验指导书协调起来,全面反映机械原理学科的基本理论、基本知识和基本技能,它应是先修课程基本理论的应用和发展,又是后续课程的基础。教材内容还应当从实际出发不断更新。我们力争内容更新适度,并把我国科技工作者在教学、科研中取得的经验和成果适当融会到教材中去,以期编写出有特色、符合实际需要的教材来。

基于以上的想法,我们参照1986年全国高校机械原理教学指导小组审定的《高等工业学校机械原理课程教学基本要求》,按新的课程体系精选了课程内容,在过去实践的基础上,组织编写了这本教材。

教材共分十三章:第一章导论;第二章简单机构;第三章连杆机构的型和运动分析;第四章平面连杆机构的受力分析;第五章平面连杆机构的综合;第六章空间连杆机构;第七章凸轮机构;第八章齿轮啮合原理;第九章齿轮机构;第十章轮系;第十一章间歇运动及其他机构;第十二章机械系统的组成分析;第十三章机械系统的动力分析。书后习题适合于各章学后练习之用。带※号的章节,属于提高和扩展的内容,可以不讲。

本教材的总学时为75,可作为高等、大专学校机械原理课程的教材或教学参考书,也可作为在职工程技术人员的参考书。

参加本书编写的人员有:杨基厚(第一、二、四、十三章),曲继方(第八、九章)、朱恒生(第十章)、刘德恒(第三章)、钱振霞(第五章)、高峰(第六章)、刘兰荣(第七章)、刘政崑(第十一章)、沈卫民、杨基厚(第十二章)、曲继方、高峰(习题)。本书由大连轻工业学院杨基厚任主编,由燕山大学曲继方和大连铁道学院朱恒生任副主编。

限于我们的水平,如有谬误之处,竭诚欢迎广大读者和同行给以批评指正。

编者

1988年5月

目 录

前言

第一章 导论..... 1

- § 1-1 机器和机构..... 1
- § 1-2 运动副及其分类..... 3
- § 1-3 机构及其自由度..... 6
- § 1-4 机构的基本类型..... 11
- § 1-5 课程内容和方法..... 14
- § 1-6 课程的地位和作用..... 16

第二章 简单机构..... 17

- § 2-1 滑块机构..... 17
- § 2-2 螺旋机构..... 21
- § 2-3 转动机构..... 25
- § 2-4 转动机构的平衡原理..... 29

第三章 平面连杆机构的型和运动分析..... 34

- § 3-1 平面连杆机构的组成和型分析..... 34
- § 3-2 平面连杆机构运动分析的图解法..... 37
- § 3-3 平面连杆机构运动分析的解析法..... 40
- § 3-4 铰链四杆机构的运动性能..... 45
- § 3-5 含有滑块的四杆机构..... 53
- ※ § 3-6 平面多杆机构的应用..... 56

第四章 平面连杆机构的受力分析..... 60

- § 4-1 平面连杆机构的静力分析..... 60
- § 4-2 平面连杆机构动态静力分析图解法..... 62
- § 4-3 平面连杆机构动态静力分析解析法..... 66
- § 4-4 平面四杆机构的传动角..... 67
- ※ § 4-5 平面连杆机构的平衡原理..... 69
- ※ § 4-6 四杆机构震动力的平衡计算..... 71

第五章 平面连杆机构的综合..... 74

- § 5-1 平面连杆机构综合的两类基本问题..... 74
- § 5-2 用图解法按连杆的位置要求求进行机构综合..... 75
- § 5-3 用实验法按连杆上点的轨迹要求求进行机构综合..... 79

- § 5-4 用图解法按两连架杆的位置要求求进行机构综合..... 80

- § 5-5 用图解法按给定的行程速比系数 K 进行机构综合..... 85

- ※ § 5-6 用解析法进行机构综合..... 87

第六章 空间连杆机构..... 91

- § 6-1 概述..... 91
- § 6-2 空间四杆和五杆机构的型分析..... 91
- § 6-3 空间机构运动分析的向量法..... 92
- § 6-4 空间机构运动分析的矩阵代数法..... 95

第七章 凸轮机构..... 93

- § 7-1 凸轮机构的应用及分类..... 93
- § 7-2 平面高副机构运动分析..... 99
- § 7-3 从动件常用运动规律..... 101
- § 7-4 平面凸轮机构的受力分析..... 108
- § 7-5 盘形凸轮基圆半径的确定..... 110
- § 7-6 平面凸轮轮廓设计的图解法..... 114
- § 7-7 平面凸轮轮廓设计的解析法..... 117
- § 7-8 圆柱凸轮机构..... 122
- ※ § 7-9 高速凸轮机构简介..... 124

第八章 齿轮啮合原理..... 127

- § 8-1 齿轮机构的类型和应用..... 127
- § 8-2 齿廓啮合基本定律..... 129
- § 8-3 共扼齿廓..... 130
- § 8-4 渐开线的形成及其特性..... 134
- § 8-5 一对渐开线齿廓的啮合传动..... 137
- § 8-6 渐开线标准齿轮的基本参数和尺寸..... 139
- § 8-7 渐开线齿轮的传动条件..... 143
- § 8-8 渐开线齿廓的切齿干涉及标准齿轮的最少齿数..... 148
- § 8-9 渐开线变位齿轮..... 150
- § 8-10 一对变位齿轮齿廓的啮合传动..... 153
- § 8-11 变位齿轮机构的类型及设计..... 155

第九章 齿轮机构..... 160

- § 9-1 斜齿圆柱齿轮机构..... 160

§ 9-2	螺旋齿轮机构	167
§ 9-3	蜗轮蜗杆机构	170
§ 9-4	直齿锥齿轮机构	177
※ § 9-5	摆线齿轮机构	180
※ § 9-6	圆弧齿轮机构	181
第十章	轮系	183
§ 10-1	轮系的组成及其分类	183
§ 10-2	定轴轮系传动比的计算	187
§ 10-3	动轴轮系传动比的计算	189
§ 10-4	行星轮系的效率	194
§ 10-5	动轴轮系的应用	196
§ 10-6	行星轮系各轮齿数的确定	198
※ § 10-7	其他类型的行星轮系简介	200
第十一章	间歇运动及其他机构	204
§ 11-1	棘轮机构	204
§ 11-2	槽轮机构	206
§ 11-3	不完全齿轮机构	210
§ 11-4	凸轮式间歇运动机构	212
※ § 11-5	间歇连杆机构	213
※ § 11-6	其他常用机构	213
第十二章	机械系统的组成分析	217

§ 12-1	机械系统的功能框图	217
§ 12-2	机构按功能的分类和连接方 式	220
§ 12-3	组合机构	222
§ 12-4	机械系统的运动循环图	229
※ § 12-5	机械系统的运动传递式	230
第十三章	机械系统的动力分析	233
§ 13-1	机械系统动力分析的内容	233
§ 13-2	机械系统的机械效率	234
§ 13-3	机械系统的等效构件	236
§ 13-4	等效构件的等效量	237
§ 13-5	机械系统等效构件的动力分 析	240
§ 13-6	机械系统动力方程的求解	242
§ 13-7	机械系统速度波动及其调节 方法	245
§ 13-8	飞轮转动惯量的确定	247
结 语		250
习 题		252
参考文献		273

第一章 导 论

机械原理是讨论机械内部普遍存在的共性规律的一门课程和学科。学生在生产实践及校内外实习的基础上,进入本门课程的学习时,首先需要了解一些基本名词和基本概念,其中包括机器、机构、运动副、运动链及机构的自由度等。然后具体了解本课程所讨论问题的范围、内容和所用的一般方法,从而初步明了本课程的地位和在国民经济中的作用。

§1-1 机器和机构

自古以来人类为了求得自己的生存和发展,首先学会了使用工具,由简单的整体工具,(如斧、锄)发展为略为复杂的可动工具(如剪子、铡刀、车轮等)。随着生产活动的深化,人类头脑相应地得到进化,所用工具也日益完善,于是出现了能代替人类做某些劳动的机器。我国在东汉时期出现的水排是用水车带动风箱的全套装置,它是人类最早创造的最完整的一部机器^[1,2]。现代大功率机器的发展首先应归功于英国的瓦特,他在1769年发明了蒸汽机。这一发明导致了在欧洲发生的第一次工业革命,人类的生产活动为之面目一新,物质文明也因之取得了飞跃发展。随后在19世纪中期出现的发电机和电动机大大改善了机器的能源供应。如今在生产和生活的各个领域里,有数以万计各式各样的机器为人类工作。生产的发展必然推动人类物质文明和精神文明的提高,从而推动社会由低级向高级步步前进。

由于机器种类极其繁多,工作性能和特征相差很大,要想用一个简单的定义完美无缺地概括它的全部性能、特点是不现实的。正是由于这个原因,加以机器本身也在不断地发展变化之中,机器的定义存在着若干有差异的提法是不足为奇的^[3-4,6]。

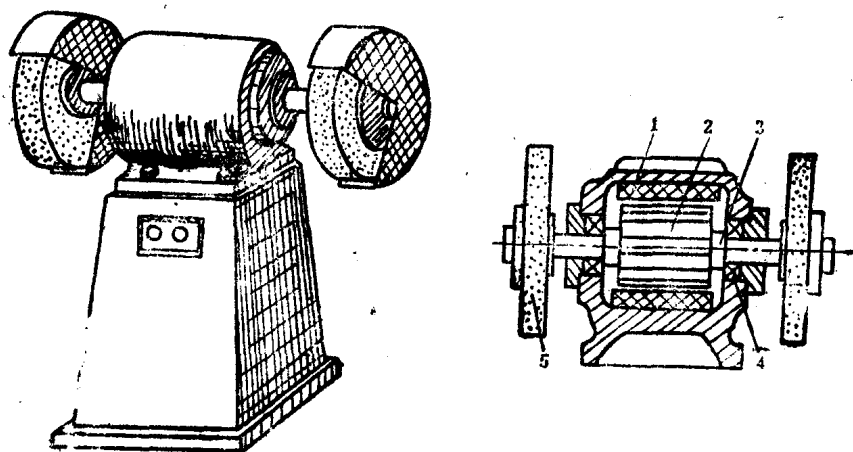


图 1-1

下面用两个实例来分析机器的基本特征。

图1-1表示一台砂轮机及其组成情况。在机座上装一个电动机,当电流通入固定在机架上的定子绕组1后,它带动转子2转动,于是将电能转换成机械能。转子的转动直接驱动转轴3在固定支承4上转动。同时转轴带动两端的砂轮5转动,进行磨削工件的工作。可见这

台砂轮机是将电能转换为机械能之后，通过传动轴送到砂轮上去作机械功的。

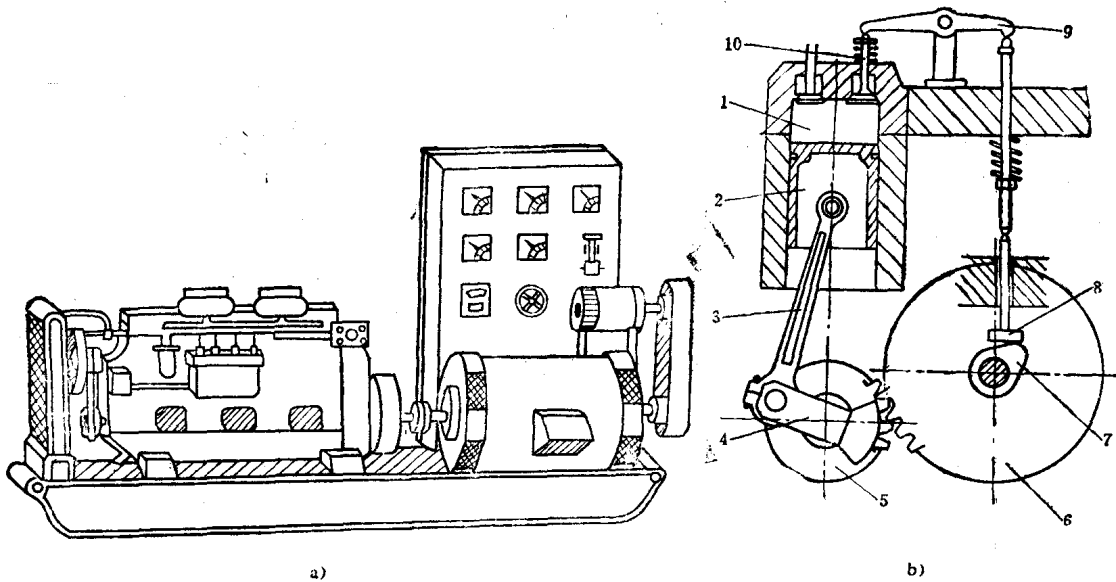


图 1-2

图 1-2 a 表示一台柴油机发电机组，它将燃烧后的化学热能转变为柴油机曲轴转动的机械能，驱动发电机转动，使机械能变为电能。这台机器的工作原理可以简要示于图 1-2 b。燃油喷入气缸 1 与空气混和燃烧后，由于气体的升温膨胀而推动活塞 2 向下运动。活塞 2 经过连杆 3 推动曲轴 4 转动。为了保证曲轴能够连续转动，实际在各种内燃机上都有多个活塞依次进行工作，并且在曲轴上装有飞轮以保持曲轴转动的均匀性。曲轴 4 和发电机转子联成整体一起转动实现发电做功。为了在内燃机内连续完成工作的循环，还必须适时控制空气进入气缸和废气排出气缸，为此曲轴经过齿轮 5、6 带动凸轮轴 7 转动，推动直动、从动杆 8 和摆杆 9，使进气或排气阀 10 实现开关的动作。总的说来，活塞需要有两个往复行程，即曲轴转动两周完成进气—压缩—燃烧爆发—排气一个工作循环。上面只是说明了内燃机工作的基本过程和它的组成情况，实际机器还要复杂得多，如燃油供油问题、润滑油供油问题，冷却水的循环和冷却问题、发电、蓄电与电力起动问题等等。

结合上述实例，综合各种机器的特点，可以认为机器是有机运动、运用自然能源能代替人做功或转换能量的实物装置。常认为机器具有三个组成部分：1) 将自然能源（水、热、电、风、原子能）转换为机械能的原动部分；2) 完成有益工作的工作部分；3) 将原动力传送到工作部分去的传动部分。机器的传动部分是机器的主体，它改变和调整一系列运动方式和运动速度，改变一系列传力方式和大小。

机器的分类方法多样，概括为：1) 动力机；2) 工作机；3) 起重运输机。但是随着科学技术的进步，机器的发展，有人又补充了检验操纵机、逻辑机、控制机三种^[8]。与前者能代替人的体力劳动相比，后者主要起着代替人的脑力劳动的作用。测量与分检滚珠尺寸的设备是检验操纵机之一，机械式计算分析装置是逻辑机之一。近年有认为电子计算机是能代替人脑力劳动、传递信息最能有力的机器，从而扩大了机器的范围和概念。为此确定机器的定义如下：

机器是执行机械运动的装置，用来变换或传递能量、物料与信息。

这里所说变换物料是指工作机的作用, 传递物料是指起重运输机的作用, 变换信息就表示计算机的作用了。

根据上述分析, 机器是一种人为的实物装置, 在结构上它是由许多材料不同、形状不一的零件装配而成的。为了能够最有效地代替人的劳动, 它应该满足一系列条件, 如效率高、节省能, 重量轻、省材料, 强度好、寿命长, 工艺性能好、易于加工制造, 外形美观、安全性能好等等。但是对机器最基本的要求是能传递运动、力和作功。为了突出机器的这方面性能, 忽略那些和传递运动、力和作功无关的结构参数, 专门研究和传递运动、力和作功有关的参数和性能时, 就形成了机构这一概念。

可以认为机构是反映机械实现预期运动乃至传力、作功过程的模型。例如我们说内燃机或冲床是一个曲柄滑块机构时, 仅仅表示它是一个将直线往复运动变为回转运动, 或将回转运动变为直线往复运动的模型, 而不考虑滑块是个活塞还是冲头座, 也不考虑连杆的截面形状和尺寸, 更不考虑曲轴是多节多支承的还是一个简单的偏心轴。但是, 做为曲柄滑块机构必须考虑和实现运动、传力作功有关的参数, 如曲柄半径、连杆长度和滑块导轨中心的方向等。用机构这一概念来分析研究机械性能时, 是把机械的复杂结构问题做了简化, 因此机构组成的最小单元已经不是零件, 而是在传动中做为一个整体实现运动和传力的刚体, 称它为构件。例如前述曲柄滑块机构中的曲柄、连杆和滑块就是这个机构上三个可动的构件。事实上从实物和结构的观点上来考察, 它们都是由多个零件所组成, 尤其是做为这个机构的不动构件即机架很可能是由许多零件组成的, 但从机构的角度上来看, 它仍不过是一个构件。

现在公认的机构定义是: 机构是用来传递运动和力的, 有一个构件为机架的, 用运动副连接起来的构件系统。

我国广泛使用机械这个名词, 根据使用习惯, 它较机器的含义更广。除了各种机器, 机器的不完整组成部分如减速器, 无能源的自行车、家用缝纫机, 有机械运动的精密器械等都可以称为机械。现用机械的定义为机械是机器与机构的总称。这里所说的机构是指机器的某些组成部分, 因为人们有时也把机构理解为实体, 认为减速器和减速机构是一回事。

可以说机械原理就是将机械抽象成机构之后集中研究机械内部传递运动、力和作功性能的学科。在18世纪末期法国第一次从应用力学里分离出新开课程“机构学”的时候, 做为机构是完全讨论如何实现运动的。后来逐渐强化了机械的运动速度和传力性能, 人们也相应地用机构来分析静力的传递过程和效率。现在人们普遍地用机构这种模型来分析机械的动态受力过程和机械在外力作用下的真实运动规律等动力学的过程。因此机构的定义必然要从原有的提法^[4,5,7]向前发展。从这个意义上可以说, 机构学和机械原理、机器理论的界限越来越小。

§ 1-2 运动副及其分类

机构是由相互运动着的构件所组成的, 各个构件之间即有某些相对运动, 又有接触连接而在运动上存在着限制。这种构件间直接接触组成的可动连接称为运动副。在两个构件上组成可动连接的直接接触表面称为运动副的元素。例如图 1-1 上砂轮转轴和机架之间的相互转动就是一个转动副。组成这个转动副的转轴轴颈和机架支承的内孔就是这个转动副的两个要素。又如图 1-2 b 上一对齿轮的齿面及凸轮和从动顶杆的接触曲面都是运动副和对应的要

素。

任何一个物体在空间内自由运动时都有六个自由度，在力学中已经谈到，它可以表达为在直角坐标系内沿着三个坐标轴的移动和绕三个坐标轴的转动。因此为使一个物体在空间内有确定的运动状态，就必须给这个物体规定六个独立的运动条件。实际上在具体确定一个物体在空间上的位置和运动状态时，所给定的六个独立运动参数可以采取不同的形式。

当机构上一个运动构件和机架组成运动副时，取定坐标系在机架上，这个运动构件由于受到运动副的相互运动约束，自由度就为之减少。如果运动副内有一个约束条件，运动构件就变为有五个自由度，而运动副内最多可以有五个约束条件，运动构件将只剩一个自由度。

对于机构上两个相互运动着的构件，如果它们有运动副存在，则一构件相对于另一个构件上的坐标系来说，也有同上情况，只不过这时的自由度表示两构件间存在的相对运动的自由度而已。

这样，我们可以根据运动副内存在的约束数来对运动副进行分级、分类。

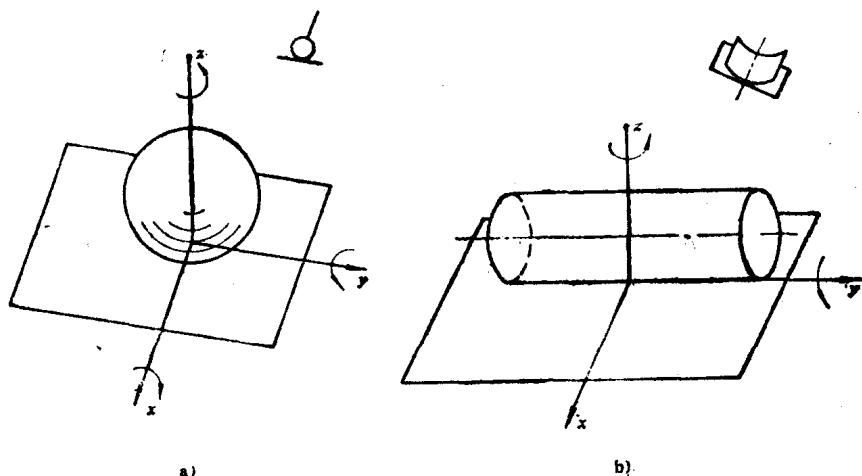


图 1-3

图 1-3 a 表示球面和平面或其它曲面构成的一级运动副。这个运动副的约束条件是两要素之间始终保持有一个点接触，当选定坐标轴 z 是接触点的公法线方向时，一级副唯一的约束条件是沿 z 轴的移动。由任意两个空间曲面实现点啮合的运动副都是一级副。

图 1-3 b 是圆柱面和平面构成的二级副。当把两者的接触线定为坐标轴 y 时，如图所示，两个约束条件是沿 z 轴的移动和绕 x 轴的转动。任何以直线为母线的两个曲面，当母线相切构成运动副时属于二级副，从空间啮合的角度来看一对直齿圆柱齿轮的齿廓啮合就属于这种情况。一级副和二级副可以统称为曲面副。

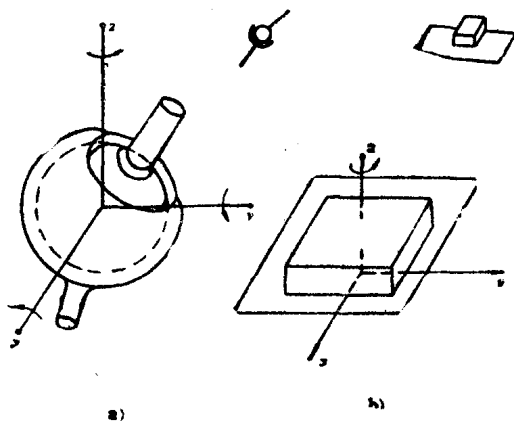


图 1-4

图 1-4 a 是两个互相包围的内外球面所组成的球面副，它是三个方向的移动受到约束的

三级副。图 1-4 b 是空间平面副，保留了平面的三个自由度的三级副，但实际应用较少。

图 1-5 是两种四级副。图 a 为圆柱副，有沿轴线移动和绕轴线转动的两个自由度；图 b 为球销副，它是在球面副上增添了一个向着球心的销轴约束组成的。上述各图的右上角是该运动副的简图表示法。

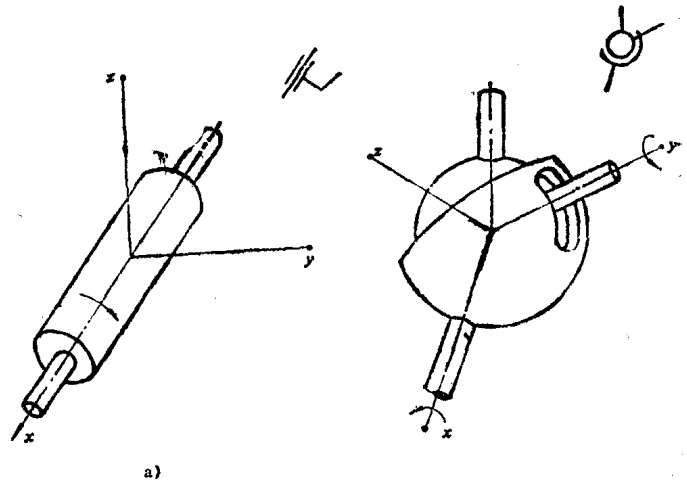


图 1-5

图 1-6 表示了三种五级副，其中图 a 是移动副，图 b 是转动副，图 c 是螺旋副。螺旋副看上去它能同时沿着轴线移动和绕轴转动，但它不具有两个自由度而仅一个自由度，因为这个移动和转动是

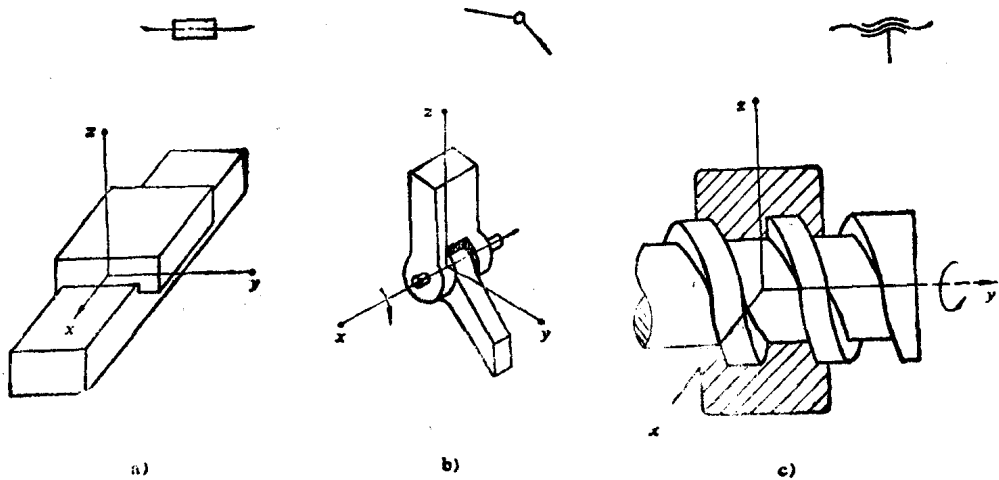


图 1-6

互为制约的，其中一个独立改变后，另一个必然随之产生定量的改变。

在上述九种运动副中就各个运动副要素的接触状态来说，有点接触的，线接触的和面接触的。点、线接触的一级副和二级副统称为高副，而所有面接触的运动副称为低副。所谓高低是指运动副的自由度多少而说的。

运动副还可按两要素的相对运动状态分为空间运动副和平面运动副。平面运动副是两构件做相对平面运动且在运动平面内有约束的运动副。一个物体在做平面运动时最多只能有三个自由度，即在平面内沿着两个坐标轴方向的移动和绕垂直于平面的轴线的转动。因此平面运动副可分类如下表 1-1：

需要说明的是，图 1-4 b 具有平面内可动的全部三个自由度而没有运动平面内的约束，故不列为平面运动副。可见前述 9 个运动副类型中只有图 1-6 a、b 是平面运动副，而平面运动副中的高副，可以认为是从二级副进一步增加平面运动以外的约束条件而来的。

从上述分析说明中可以见到，构成机构的运动副只有屈指可数的几种类型，且并不是都

表1-1 平面运动副分类

运动副分类		运动副简图	约束数及自由度
低副	移动副		约束数2
	转动副		自由度1
高副			约束数1(约束沿接触点法线方向上的移动) 自由度2

得到普遍应用。当考虑构件靠这有数的几种运动副连接以组成各式各样的机构，从而做出数以万计的机器时，是令人叹止的。人们研究将不同数量的构件选用不同的运动副组成机构的原理和方法，已经付出了约 200 年的努力，至今还有若干问题需要解决。

§ 1-3 机构及其自由度

一、运动链

用运动副连接起来相对可动的构件系统称为运动链。运动链视各构件相对运动状况可以分为空间运动链和平面运动链。当运动链上所有构件的相对运动都在相互平行的平面内时，就叫做平面运动链。例如图 1-7 a 是一个由六个构件组成的运动链，其所有转动副的轴线都垂直于纸面，移动副的运动又平行于纸面，可见这个运动链上的全部构件都在平行于纸面的平面内运动，所以说它是一个平面运动链。

依此类推，图 1-7 c、d 所示也是平面运动链，而图 b、e 是空间运动链。需要指出，平面运动链只能由平面运动副组成；而空间运动链不限于只用空间运动副，甚至全由平面运动副也能组成空间运动链。例如图 1-7 b 的 1、4、3 三个构件之间由两个转动副联接，但由于转动副的轴线不平行，1、3 两构件就不在相互平行的平面内运动，而形成了空间运动链。

运动链还按各构件间组成运动副的数目和连接特点分为开式运动链和闭式运动链。当每个构件至少有两个运动副元素并且各构件用运动副连接起来组成了闭环时，称为闭式运动链，即任何构件都如图 1-7 a、b。闭式链按链中组成的封闭形数目又分为单环闭式链和多环闭式链。图 1-7 b 是单环闭式链，图 a 是双环闭式链。如果运动链内有一个或更多的构件仅具有一个运动副的要素，就称做开式运动链。图 1-7 c、d、e 都是开式运动链，因为图 c 中的构件 1 和构件 4 只和其他一个构件组成运动副，图 d 中的构件 5 和图 e 中的构件 1 和 5 也是一样。

在生产中大量采用闭式运动链做为机构使用是有许多原因的，如运动可靠性，机器的刚度，动力学性能，原动力的输入方便等等，所以，过去的机构学几乎都只分析研究闭式运动链问题。然而由于现代机器对运动灵活性、复杂性的要求日益增加，液压，电器驱动方式和

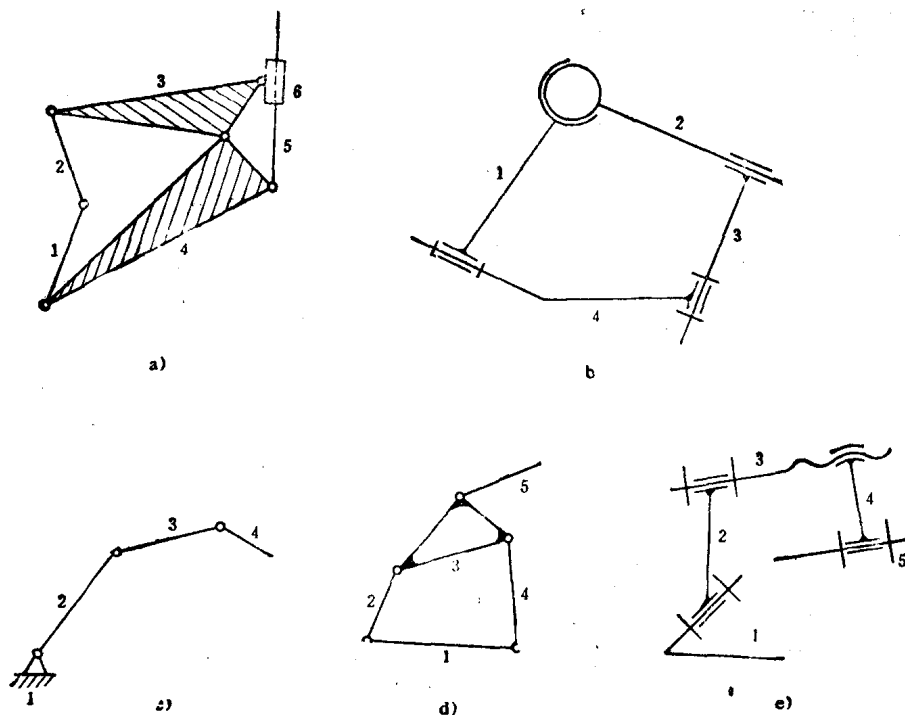


图 1-7

性能的不断发 展，用开式运动链形成的机构已经迅速增加。这个尤其集中表现在机械手、工业机器人等机器设备上。因此对于开式运动链的分析和研究也需要予以注意。

二、机构及其组成构件的功能

为了说明机构上各个构件的运动，需要选其中一个构件作为说明运动的参考坐标系。通常这个构件是固定不动的，称为机架。当整个机器，例如车、船、飞机等运输机，相对地球做运动时，机构的机架就是这些机器的机身。

直接接受能源或最先接受能源作用有驱动力或力矩的构件，称作主动件或原动件。

机构上除了机架和原动件，其余构件统称为从动件，而在从动件中直接输出动力的构件，称为输出构件。输出构件常只有一个，但有时会有多个。

由平面运动链形成的机构称为平面机构，由空间运动链形成的机构称为空间机构。

三、机构简图

表示机构的简化图形称为机构简图。在能够充分反映机构实现运动和传力做功性能的前提下，要求图形越简单明了越好，因此如图 1-9 所示，连杆机构仅用圆圈表示转动副，而用两个转动副之间的联线表示杆件。一个杆件（如曲轴）的形状可能是各式各样的，但用两个转动副间的连线表示它，就达到了最简单的程度。各种机构简图及有关构件的表示方法，已经在国家制图标准（GB 138—74）中做了规定。

需要注意的是机构并不仅仅反映构件和运动副的连接形式和机械实现运动的性能，它也反映机械传力、做功等静力学和动力学性能。因此表示机构的简图也包括下列一些形式和方法。

在图 1-8 内，图 a 表示凸轮机构的静态受力状况，从中可以分析各运动副内的受力状况和驱动力矩 M ，和阻力 P 之间应有的关系。图 b 表示四杆机构各构件的质量和惯性以

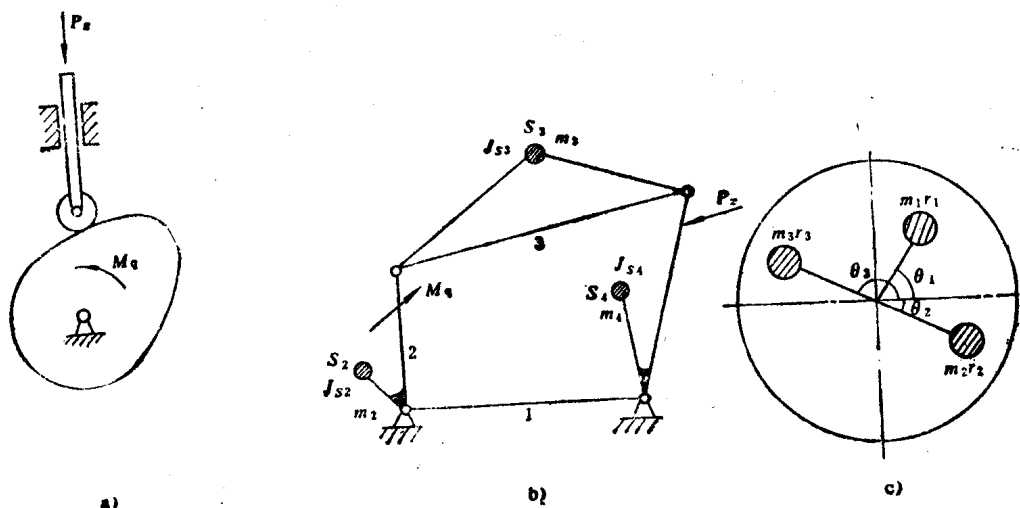


图 1-8

及机构所受外力状况，从中可以对机构进行动力学分析。图 c 表示转动件的质量分布状况，从中可以分析转子的平衡方法。总之，随着运用机构这个模型来研究机械问题的深化和发展，机构简图也将随之有所发展。

四、平面机构的自由度

在运动链上架可以自由选择，而原动件的选定是需要遵守一定条件的。分析图 1-9 所示三种情况：用实验的办法很容易观察到图 1-9a 中没有任何一个构件能够运动，五个构件的这样一种组合形成了桁架，已经失去了运动链应具有的性质。图 1-9b 是一个四杆机构，只能规定其中一个构件的运动方式和参数。图 1-9c 是五杆机构，规定其中一个构件的运动参数还不足以使其余构件产生预期的确定运动，而必须选定两个构件为原动件。

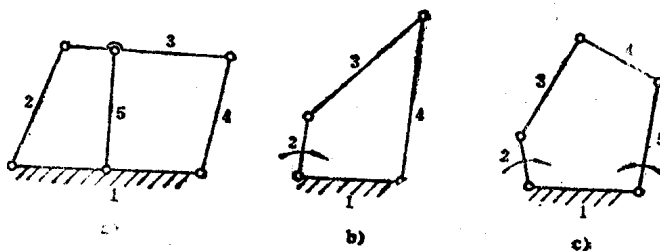


图 1-9

这说明，各种构件以不同的运动副组成机构时，有一个机构自由度的问题。所谓机构的自由度是机构上可以给定的独立运动变量的数目。在图 1-9 中，图 a 的自由度为零，图 b 的自由度为 1，图 c 的自由度为 2。从此也可以看出由运动链形成机构时，在选定机架构件之后，需要设法计算机构的自由度，而当规定机构的原动件数和它的自由度相等时，才能使机构实现预期的运动。

当用 P_h 表示平面机构上的高副数目，用 P_l 表示低副数目时，对于有 N 个杆件的机构来说，可动构件为 $n=N-1$ ，在没有组成机构之前，每个可动构件都有 3 个自由度，总共有 $3n$ 个自由度。在各个构件之间每组成一个高副就要减少 1 个自由度，每组成一个低副就要减少 2 个自由度，所以用 P_l 个低副和 P_h 个高副组成机构时，各构件总共减少了 $(2P_l + P_h)$ 个自由度。所以两相抵消，机构的自由度 w 可按式计算：

$$w = 3(N-1) - 2P_5 - P_4 = 3n - 2P_5 - P_4 \quad (1-1)$$

四杆机构有三个可动构件，四个低副，所以机构的自由度为：

$$w = 3n - 2P_5 - P_4 = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

在利用式(1-1) 计算机构自由度时，会碰到某些特殊情况，使得计算结果与实际情况发生矛盾，为此需要做出正确判断与特殊处理。可分为下列几种情况。

1. 复合铰链

在机构上的同一处，如果有三个和三个以上构件组成转动副，则称为复合铰链，如图1-10 a中的转动副C，在这里，如果把它当做一个铰链来计算，有

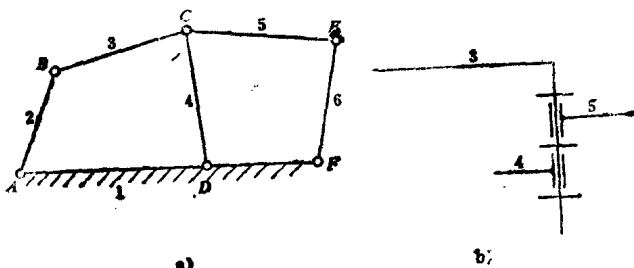


图 1-10

$$w = 3 \times 5 - 2 \times 6 = 3$$

所求结果与实际不符，实际机构的自由度是1。这种复合铰链的实际情况如图1-10b所示，三个构件在一处实际上组成了两个转动副。一般地若有K个构件在一处组成复合铰链，那么在这里将有(K-1)个转动副。所以上述机构具有五个可动构件和七个转动副，自由度为1。

2. 局部自由度

图1-11所示为凸轮机构，它的从动部分和凸轮表面接触处用一个滚子，这种情况和从动推杆直接与凸轮表面接触相比，用滚动代替了滑动，可以减少运动副要素表面的磨损，提高寿命和效率，不过在计算机构自由度时，将得到：

$$w = 3n - 2P_5 - P_4 = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 = 2$$

对所得结果的解释是，除了凸轮可以独立改变运动参数外，在不破坏高副接触条件下，滚子可以自由转动。不过滚子的自由转动对机构的从动推杆的运动不产生任何影响。个别构件上所具有的对整个机构的运动传递不发生作用的自由度，称为局部自由度。从机构的整个运动来看，将滚子和推杆固结在一起，减小一个构件和一个低副，其运动效果不变，这样机构就归结为一个自由度。计算机构自由度时，凭观察从计算所得自由度中减去局部自由度就是机构实际的自由度。

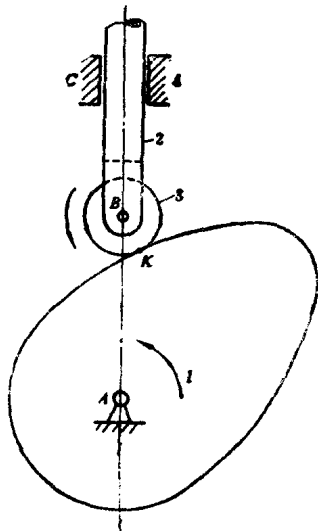


图 1-11

对所得结果的解释是，除了凸轮可以独立改变运动参数外，在不破坏高副接触条件下，滚子可以自由转动。不过滚子的自由转动对机构的从动推杆的运动不产生任何影响。个别构件上所具有的对整个机构的运动传递不发生作用的自由度，称为局部自由度。从机构的整个运动来看，将滚子和推杆固结在一起，减小一个构件和一个低副，其运动效果不变，这样机构就归结为一个自由度。计算机构自由度时，凭观察从计算所得自由度中减去局部自由度就是机构实际的自由度。

3. 虚约束条件

图1-12 a所示为平行四边形机构，它的自由度和一般四杆机构一样是1。这个机构的连杆BC上任意一点的运动轨迹都是半径为AB(=DC)的圆。若在BC杆上的E点和它的轨迹中心F点之间加一个杆件5，并用转动副连接起来，如图1-12 b，由于E点距F点的尺寸始终不变，杆件5的增加与否不会对平行四边形机构的运动产生任何影响。然而用机构自由度公式进行计算时，却得：

$$w = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$

这说明本来增加一个构件和两个低副，犹如图 1-9 a，机构将被卡死而失去运动的可能性，但在这里由于所增构件的尺寸和运动副位置的特殊性，没有起到任何约束作用。机构中由一个构件和两个低副引入而不起作用的一个约束条件称为虚约束条件。在计算机构自由度时需要减去虚约束条件，所以上述机构仍具有一个自由度。

不过虚约束条件并不像局部自由度那样一目了然，需要仔细观察甚至要结合运动分析来做出判断。在图 1-12 c 内表示在平行四边形机构的两曲柄上再联出任何平行四边形机构，

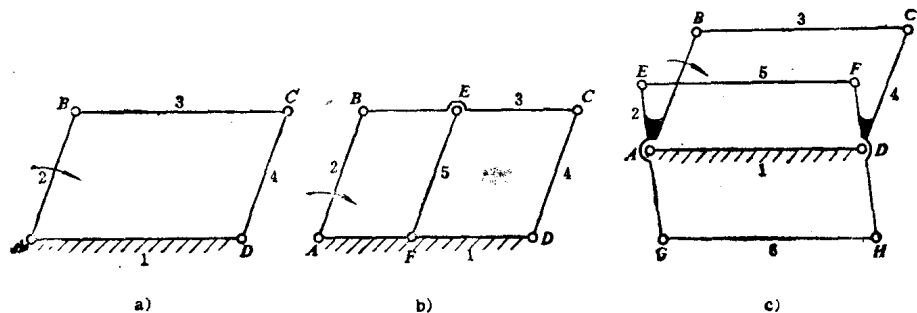


图 1-12

(如杆件 5 和 6 分别和两曲柄组成的平行四边形机构)都具有虚约束条件。这也可以解释为两曲柄在转动过程中 EF 和 GH 始终保持距离不变所致。推而广之，机构上的轨迹重合点用铰链相联必有一个虚约束条件。

图 1-13 为用另一种形式表示曲柄滑块机构，曲柄 2 和机架 1 组成了两个转动副 A 和 A' ，按机构自由度公式计算，机构的自由度为 $w = 3 \times 1 - 2 \times 2 = -1$ ，说明曲柄将被彻底卡死。但实际上曲柄能够转动，其原因是两个转动副的轴线重合，它们对曲柄的约束作用一样，可以认为有两个虚约束条件。通常在这样情况下认为两者是一个转动副。

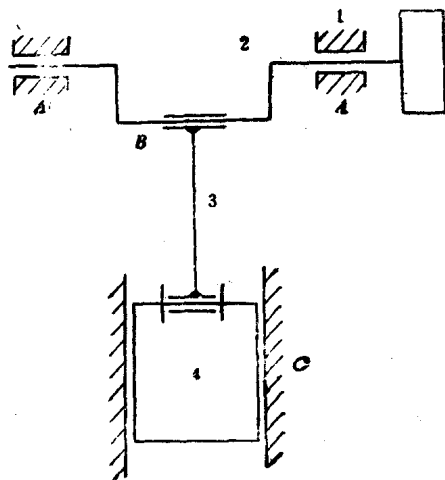


图 1-13

需要强调指出，这些虚约束条件的存在和成立是以某些特定的几何条件（如轨迹重合，定长度关系，轴线重合等）为前提，如果几何条件、几何精度遭到破坏，虚约束将变为真正的约束，机构可能失去自由度而成为不可动的桁架。这就是说机构上虚约束条件的存在为加工和装配机械时提出了附加的精度条件，但另一方面，它可以提高机械的刚度，保持传动的可靠性。

在平面机构上各个铰链轴线的平行性是必须保证的，如图 1-13 上铰链 B 、 C 的轴线如不平行，滑块就无法在导轨内保持正常的移动。这也是将平面机构提高到空间机构的角度上来观察时，出现了和虚约束条件有联系的问题。

五、空间机构的自由度

如果把计算平面机构自由度的原理推广到空间机构，那么，当机构有 n 个可动构件时，在未建立运动副之前总共有 $6n$ 个自由度。如果这个机构含有各级运动副的数目分别为 P_i 、

P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 ，机构自由度应按下式计算：

$$w = 6(N-1) - \sum_{i=1}^5 i P_i = 6n - \sum_{i=1}^5 i P_i \quad (1-2)$$

例 1-1 图 1-14 所示机构， $n=3$ ， $P_5=2$ ， $P_4=1$ ， $P_3=1$ 。所以

$$w = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 = 6 \times 3 - 5 \times 2 - 4 - 3 = 1$$

说明这个机构应当规定一个原动件。

但是需要说明的是对空间机构来说，有更多的情况应用上式计算的结果和实际情况不符。例如对于图 1-13 所示平面机构，若用空间自由度公式进行验算时，会得到 $w = 6 \times 3 - 5 \times 4 = -2$ 。和实际情况不符的正确解释是，所有的构件都不许离开垂直于曲轴的运动平面，因而在各个构件之间存在着 3 个公共约束条件，将其从自由度公式的各项系数中减去，得：

$$\begin{aligned} w &= (6-3)n - (5-3)P_5 - (4-3)P_4 \\ &= 3n - 2P_5 - P_4 \end{aligned}$$

这又回到了平面机构的自由度公式(1-1)。

对于其他某些空间机构来说，可能存在的公共约束条件数不等，设公共约束数为 m 时，修改后的空间机构自由度公式可以表达为：

$$w = (6-m)n - \sum_{k=m+1}^5 (K-m)P_K \quad (1-3)$$

对于不同机构观察判断 m 值并没有什么统一的捷径。尽管许多人在这方面进行过努力，最后往往不能离开机构的具体尺寸和几何条件而取得一般性结果^[9]。

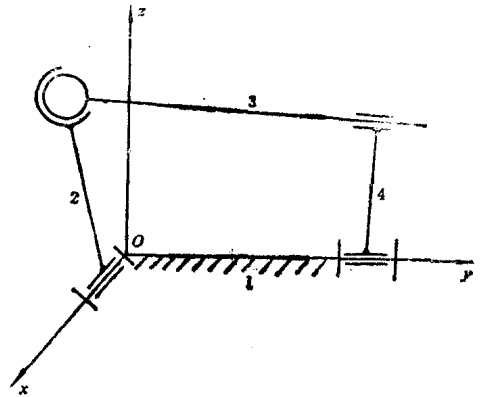


图 1-14

§1-4 机构的基本类型

如今在生产各个领域出现的机械是品种繁多，千差万别的，组成各种机械的机构系统（通常称作机械传动系统）也是各不相同的。那么如何着手去分析研究这样多的不同系统呢？通过大量各种机械传动系统的分析比较，可以发现在各种不同的传动系统中却有不少相似或相同的组成环节。例如前面已经提到在内燃机和冲床里都有曲柄滑块机构这样的组成环节，而许多机械中都可以见到齿轮机构等。

在机械传动系统内按着组成特点、功用和性能，可以把机构划分为若干基本单元称为基本类型。尽管各种机械的整个传动系统可能是品种繁多的，但组成机构系统的基本类型却是不多的。因此我们在认识和分析各种机械时，只要掌握机构各个基本类型的性能，就能够较容易地取得结果。

下面列出机构的基本类型