



普通高等教育机械类专业规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU JIXIELEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

机械原理教程

JIXIE YUANLI JIAOCHENG

张三川 ○ 编著



郑州大学出版社



普通高等教育机械类专业规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU JIXIELEI ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

机械原理教程

JIXIE YUANLI JIAOCHENG

张三川 ◎ 编著



郑州大学出版社

内容简介

本书共 11 章,内容包括绪论,平面机构的组成与结构分析,平面机构的运动分析、力分析,平面连杆机构设计,凸轮机构综合,齿轮机构及其综合,齿轮系及其综合,机械的动静平衡,机械的运转及其速度波动调节和机械系统方案设计。对要求较高的各章均单独编写了一节以近年研究生入学试题为主的典型示例。

本书可作为高等院校本科层次机械类专业的教材,也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理教程/张三川编著. — 郑州:郑州大学出版社,2009.9

普通高等教育机械类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5645 - 0130 - 3

I. 机… II. 张… III. 机构学 - 高等学校 - 教材 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 146084 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

新乡市凤泉印务有限公司印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:13.75

字数:325 千字

版次:2009 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371 - 66966070

1/16

印次:2009 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978 - 7 - 5645 - 0130 - 3

定价:26.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

前 言

QIANYAN

机械原理是机械类本科专业教学计划中的主干课程之一,在机械类人才培养中具有十分重要的地位。机械原理课程内容主要涉及常见机构的运动及工作性能,并以此为基础,为机械产品创新设计提供不可或缺的方法性和技术性指导。

本书从机械原理课程体系与机械工程学科体系建设与发展需求出发,突出以概念为基础的分析问题、解决问题的思维方式和行为方式培养,强化各知识点间的内在关联性提示,旨在以此形成学生处理机械设计问题的定式推演逻辑,从而建立起一种“基于学科系统的机械原理课程教学方法体系”。同时,本书也力求满足学生初学与提高研习之需。

本书在内容及其编排上具有如下特点:

(1)在内容安排顺序上,从结构分析、运动分析、机构设计,再到动力学和系统方案设计,尽可能使一类问题在一章或连续几章中作出较完整的叙述。从而使“以概念为主线”的内容体系得以较好的体现。

(2)全书在概念、定义的介绍上力求做到准确简单、清楚明了;对概念、定义的主干词加以更多的解释,并在后续的示例分析中加以体现。

(3)全书的分析和设计更侧重于图解法,这与目前多数同类教材的趋向是不同的,其目的在于切实解决机械原理“概念”的“形”观念的建立问题,同时还希望借此提高学生的动手能力。解析法的提及主要介绍了在应用计算机求解中最为方便的杆组法,并以此使读者明确机构设计的发展趋向。

(4)在主要章中突出增加了“典型示例”一节。其内容选用了几所重点高校在近几年颇具特色的研究生入学考试题作为实例,以期借此来进一步提高学生分析和解决问题的实战能力。

此外,还须指出的是,在本书中删除了“其他常用机构”的内容,主要是从课时和内容一贯性两个方面考虑的。事实上,书中主要知识点已经足以使学生对诸如“槽轮机构”等其他常用机构具有自学能力,因此许多学校也早已将此作为自学内容。

本书是在许多机械原理课程教学前辈的成果的基础上,结合本人教研实践与认识编写的。在此向主要参考文献的著者表示感谢;同时对未列入参考文献,但在现代机械高等教育思想上给本人以启迪的成果之著者也表示深切感谢。

由于作者水平有限,错误和不当之处在所难免,敬请广大同仁和读者批评指正。

张三川

2009年3月25日

于郑州大学新校区

目 录

MULU

第1章 绪论	1
1.1 机械原理研究对象	1
1.2 机械原理研究的内容	2
1.3 机械原理课程的地位	3
第2章 平面机构的组成与结构分析	4
2.1 机构的组成	4
2.2 机构运动简图及其绘制	6
2.3 机构自由度计算	8
2.4 平面机构的结构分析	14
2.5 典型示例	19
第3章 平面机构的运动分析	26
3.1 瞬心法用做机构的速度分析	26
3.2 矢量方程图解法用做运动分析	29
3.3 杆组解析法用做速度分析	34
3.4 典型示例	37
第4章 平面机构的力分析	46
4.1 构件惯性力及其确定	46
4.2 运动副摩擦力及其确定	48
4.3 不考虑摩擦时机机构的力分析	51
4.4 考虑摩擦时机机构的力分析	55
4.5 机械效率的力表达式	56

4.6	考虑摩擦时的机械自锁	57
4.7	典型示例	60
第5章	平面连杆机构及其设计	65
5.1	平面连杆机构类型	65
5.2	平面四杆机构特性	68
5.3	平面连杆机构设计	73
5.4	典型示例	81
第6章	凸轮机构及其设计	90
6.1	凸轮机构的应用及分类	90
6.2	从动件常用运动规律	91
6.3	凸轮轮廓线设计的基本原理	94
6.4	凸轮机构基本尺寸的确定	104
6.5	典型示例	107
第7章	齿轮机构及其设计	115
7.1	齿轮机构的特点及类型	115
7.2	齿轮的齿廓曲线	117
7.3	渐开线齿廓的啮合特点	118
7.4	渐开线直齿圆柱齿轮的基本参数和几何尺寸	121
7.5	渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	125
7.6	渐开线齿轮加工与变位修正	129
7.7	平行轴斜齿圆柱齿轮机构	137
7.8	蜗杆传动机构	142
7.9	圆锥齿轮传动机构	146
7.10	典型示例	149
第8章	齿轮系及其设计	156
8.1	定轴齿轮系	156
8.2	周转齿轮系	158
8.3	混合齿轮系	160
8.4	轮系的功用与选型	162
8.5	周转轮系的设计	166
8.6	典型示例	168
第9章	机械的平衡分析	175
9.1	刚性转子的平衡	175

9.2 平面机构的平衡	178
9.3 典型示例	180
第10章 机械的运转及其速度波动的调节	184
10.1 机械的运转过程	184
10.2 机械运动方程的建立	186
10.3 机械运动方程的求解	188
10.4 机械的速度波动及其调节	190
10.5 典型示例	193
第11章 机器系统的方案设计	199
11.1 机械系统构成与系统效率	199
11.2 机器系统运动协调关系表达	202
11.3 机器系统方案设计	204
参考文献	210

第 1 章

绪 论

1.1 机械原理研究对象

机械原理是关于机器系统组成共性规律的一门科学,顾名思义其研究对象就是机器系统的构造原理。机器是执行机械运动的装置,用来变换或传递能量、物料和信息。使用机器的目的是代替或部分代替人的体力劳动和脑力劳动。如图 1.1 所示为一将化学能转变为机械能的单缸内燃机。它由活塞 1(或称滑块)—连杆 5—曲轴 4(或称曲柄)构成的曲柄滑块机构、齿轮 4'—齿轮 3''构成的齿轮机构、凸轮 3(及 3')—挺杆 2(及 6)构成的凸轮机构组成。

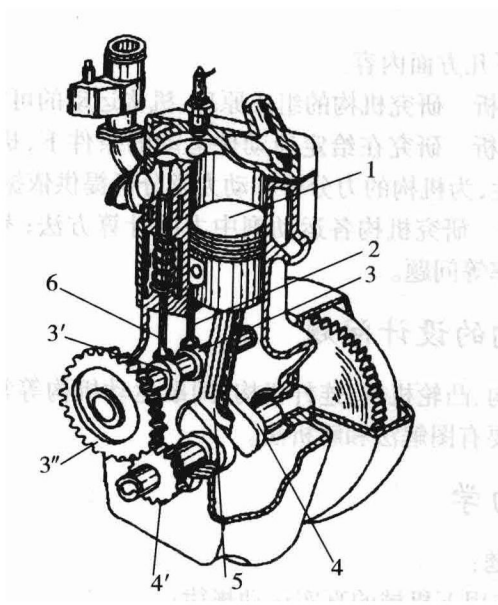


图 1.1

按机器用途的不同,一般可以分为动力机器(如电动机、内燃机、发电机等)、工作机器(如汽车、机床、织布机、自行车、缝纫机等)和信息机器(如复印机、打印机、点钞机等)三类。机器的构成主要有原动力(如自行车的脚蹬)、传动(如自行车的链传动)、执行(如自行车后轮)与控制(如自行车的前把)等四个部分,不过有些简单机器(如家用绞肉机)就没有控制部分。但无论简单或复杂机器,它们都必然具有三个共同的特征:

- (1)所有机器都是一种人造的实物(机件)组合体;
- (2)组成机器的各部分之间都具有确定的相对运动;
- (3)能够完成有用的机械功或转换机械能。

为了对机器系统中的某一类问题作全面深入的研究,对其引入和冠以“机构”的概念,如机床床头箱中的齿轮传动部分就可称为齿轮机构,再如缝纫机的脚踏板—连杆—大带轮可称为曲柄摇杆机构等。因其只是机器的组成部分,故其与机器的区别只是不能够完成有用的机械功或转换机械能,也就是不具有机器的使用功能而已。由此可见,机构具有机器的前两个特征,即也是人造的实物组合体,各实物组合体之间具有确定的相对运动。

从结构和运动的观点来看,机构和机器之间是没有区别的。因此常用“机械”一词来作为机器和机构的总称。

1.2 机械原理研究的内容

机械原理作为一门课程,其主要内容有以下几个方面。

1.2.1 机构分析

机构分析包括以下几方面内容。

- (1)机构的结构分析 研究机构的组成原理、机构运动的可能性及确定性条件。
- (2)机构的运动分析 研究在给定原动件运动的条件下,机构各点的轨迹、位移、速度和加速度等运动特性,为机构的力分析和动力学分析提供依据。
- (3)机构的力分析 研究机构各运动副中力的计算方法;考虑运动副摩擦时的机构力分析方法及机械效率等问题。

1.2.2 常用机构的设计问题

主要包括齿轮机构、凸轮机构、连杆机构、间歇运动机构等常用机构的设计理论和设计方法。设计方法主要有图解法和解析法。

1.2.3 机械动力学

主要研究如下问题:

- (1)在已知外力作用下机械的真实运动规律;
- (2)机械运转过程中速度波动调节以及惯性力系的平衡问题。

1.2.4 机器系统方案设计

该部分主要介绍和研究:

(1) 机械系统的组成原理与效率计算方法。

(2) 机器系统运动协调关系表达。

(3) 机器系统方案设计,主要包括功能分析与工艺动作分解;确定机械执行系统的运动方案;合理选择机构型式,以及机构的变异、拓展和组合;机构方案的评价等。

1.3 机械原理课程的地位

机械原理是机械类专业的主干课程之一,属技术基础类理论课程范畴,它与后续的机械设计课程一起成为机械设计及理论学科的基本框架。该学科涉及机构设计学、机械动力学、机械优化设计、机械设计方法学和摩擦学等领域,同时还为各种专业机械(如汽车、工程机械、机床、模具等)的设计提供基本理论和方法性技术支持。

一般机械产品设计需要经历四个阶段:初期规划设计阶段,总体方案设计阶段,结构设计阶段,生产施工设计阶段。在这四个阶段中,总体方案设计在很大程度上决定了产品是否具有创新性和经济性,而总体方案正是机械原理所研究的内容。

需要指出的是,工程问题往往是比较复杂的,会涉及诸多方面的因素,而且这些因素还往往相互矛盾;同时,由于工程问题的复杂性,有许多问题尚无法或准确建立数学模型,这就使得问题的处理既会有严格的理论分析,也会有通过实验、试凑及近似简化等处理手段。这也是本课程不同于其他理论基础课程的地方,从某种意义上讲,机械原理课程实际上是学生从严格的数理逻辑向“机械”的工程逻辑转化的基石,因此在学习方法上也必须适当地加以改变,以求把这门课程学好。

第 2 章

平面机构的组成与结构分析

本章要求:弄清构件、运动副、约束、自由度及运动链等重要概念;能绘制比较简单的机械的机构运动简图;能正确计算平面机构的自由度并能判断其是否具有确定的运动;对虚约束对机构工作性能的影响及机构结构合理设计问题的重要性有所认识;对平面机构的组成原理有所了解,并能对给定机构正确分级。

机构的组成及其具有确定运动的条件是本章重点,其中机构的分类和组成原理将主要为后续的机构运动、机构力的程序化分析或进一步学习研究机构学理论奠定基础。本章需要首先弄清楚构件、零件、运动副、约束、运动链、机构等重要概念及其相互关系;其次能够正确绘制出机构运动简图,这一点在实际工程中具有重要的意义,体现在新产品开发初期的方案设计或传动原理设计中,但在机械原理教学中则更强调的是对给定机构运动简图的解读能力;最后,掌握平面机构自由度计算方法和机构的分级。这些是本章知识掌握与否的主体考查点。

2.1 机构的组成

绪论中图 1.1 所示的活塞 1—连杆 5—曲轴 4 组成的曲柄滑块机构中,连杆与曲柄间的装配要求其大端必须制成剖分式的,这就引出了构件与零件两个概念。同时在机构中,各构件之间往往还需要能够作相对运动,这种可动的联接又提出运动副的概念。

2.1.1 构件与零件

(1) 构件 机器中每一个独立运动的单元体都被称为一个构件,也就

是说构件是最小的运动单元。值得注意的是构件有刚性构件(如内燃机的连杆)和柔性构件(如自行车的链条)之分,在机械原理中主要涉及的是刚性构件。

机构中构件表示方法的误读是需要特别注意的,如图 2.1 中的(a)图不能读成两个构件,而(b)、(c)图的表达意义是相同的,均表示一个构件。(b)图的焊接符号明确提示原来的三个构件已焊接成一体而成为一个构件;(c)图的三个构件利用转动副首尾相接而成为固定的桁架结构,也是一个构件,在实际学习分析中它极易被误读为三个构件。

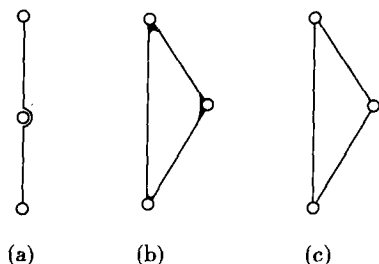


图 2.1

(2)零件 以能够制造和装配为目的,而对构件进行最小分割后的结构单元实体,称为零件。零件是最小的制造单元。一个构件必定是由一个或一个以上零件构成。如发动机中的连杆就须多达 11 个零件组成。

2.1.2 运动副与约束

(1)运动副 由两个构件直接接触而组成的可动联接,称为运动副。一个运动副的构成具有三个要素,即两个构件、直接接触和联接可动。这个概念将直接应用于机构自由度分析计算中的复合铰链的判断。在运动副识读中,图 2.2 所示构件联接易误读,须注意。图 2.3 为常见的平面运动副及其表示方法。

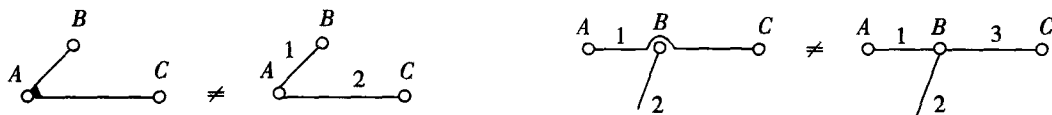


图 2.2

(2)约束 两个构件构成运动副后,原来构件的总自由度个数将必然有所减少,使自由度个数减少的联接方式就称为引入的约束。自由度减少的个数就是约束数。约束数的分析是机构自由度计算式导出的关键。

显然,构件能组成运动副,必须有约束的存在;但反过来却不一定了,原因是约束可能使构件不能运动。引入约束数的多少取决于参与接触的运动副的表面(即运动副元素),运动副元素不同,约束数也就不同,这一点在机构分析中必须清楚。机械原理涉及的平面运动副有高副(点、线接触形式)和低副(面接触形式)之分,如图 2.3。高副约束了一个沿法线方向的自由度,保留了两个自由度;低副提供了两个约束,保留了一个自由度。

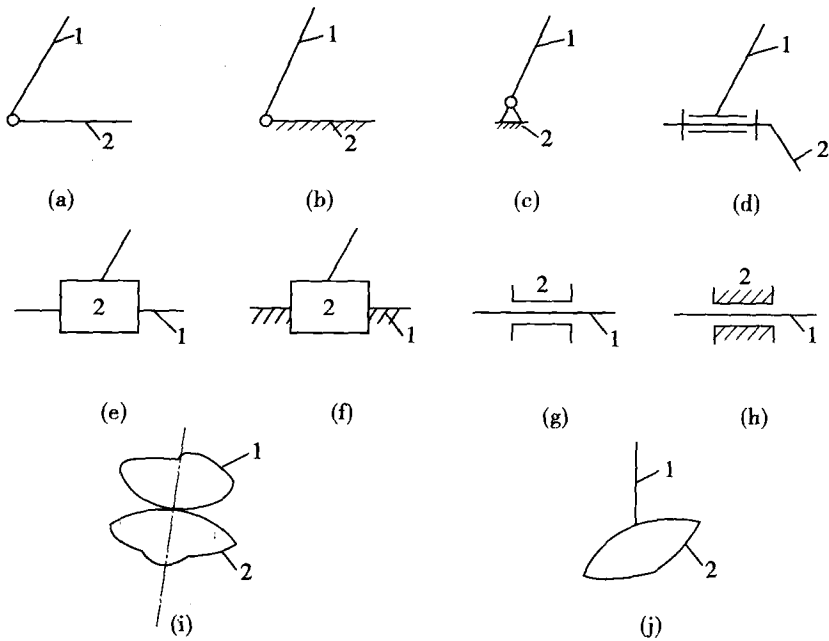


图 2.3

2.1.3 运动链与机构

(1) 运动链 由若干个构件通过运动副联接组成的构件系统称为运动链。

运动链分为闭式链和开式链。一般机构大多采用闭式链,而机器人机构大多采用开式链。

根据运动链中各构件间的相对运动为平面运动还是空间运动,可以把运动链分为平面运动链和空间运动链两类。

(2) 机构 把运动链中的一个构件固定作为机架时,则将这个运动链称为机构。

显然,运动链中没有机架的存在,则这个运动链就不能成其为机构。在机构中有机架、原动件、从动件之分,也可有机架、连架杆和连杆的划分,这些称谓会在不同的场合出现,但只要弄清楚所说杆在机构的位置,叫什么就无所谓了。如原动件与机架相连,也可叫连架杆。

2.2 机构运动简图及其绘制

在研究机构运动时,为了便于分析,可以不考虑那些与运动无关的因素,仅用简单的线条和规定的符号来组成图形以简明地表达一部复杂机器的传动原理,并可用来分析机构上各点的轨迹、位移、速度和加速度及力。

机构运动简图就是从实际机器抽象出来的,用规定的符号、线条来表明机构的结构和

运动传递特征的简明图形。

机构运动简图必须能够正确表达机构的组成结构和运动情况,各运动副位置必须是按尺寸比例确定的。不严格按比例绘制的机构结构图称为机构示意图,它只能表达出机构的结构情况。

绘制机构运动简图的目的主要有两个:第一,可据此图进行机构的运动和受力分析;第二,构造新的机械产品设计的雏形。

绘制机构运动简图的关键点:第一,视图平面的选择,与机械制图的主视图选择具有相似性,要尽可能多地表达出机构的结构关系;第二,绘制时要使机构处于一般位置,不能采用如有两杆重叠的位置等;第三,运动副中转动副的回转中心的确定,实质上会涉及杆(块)构件的确定,须特别注意。

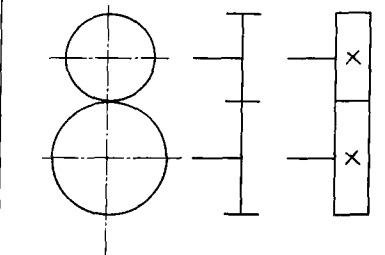
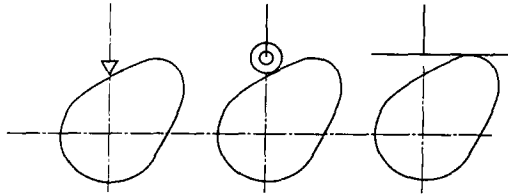
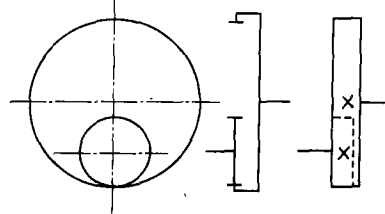
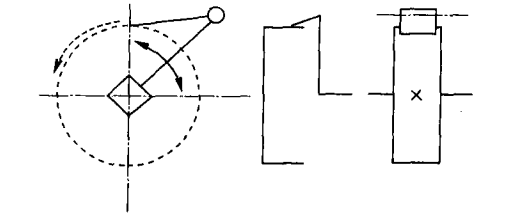
绘制机构运动简图的工作过程可以概括为:先定原动部分和工作部分(即先抓两头),弄清运动传递路线(即后中间,再从头到尾走一遍。对并联机构还要分别寻路),确定构件数目及运动副的类型(构件数和运动副与原机器相同),并用符号表示出来。

需要指出的是,正确应用规定的运动副符号与线条绘制出对象机器的机构运动简图,及其运动简图中的运动副符号与线条代表的实际意义,在工程实践中非常重要。但在学习过程中却可能难以全面掌握,因此无论是教学或选拔类考试往往要求能够熟练阅读给定机构的运动简图即可。这样常见的运动副和机构简图(表2.1)的熟识就成为后续学习的基础。

表 2.1 几种常见的机构运动简图(GB 1460—84)

名称	简图	名称	简图
电机		锥齿轮传动	
带传动		齿轮齿条传动	
链传动		蜗杆传动	

续表 2.1

名称	简图	名称	简图
外啮合齿轮传动		凸轮传动	
内啮合齿轮传动		棘轮机构	

2.3 机构自由度计算

任何机器都需要原动力(如电动机、内燃机、液压马达等)提供动能使其具有确定的运动,这些原动力装置提供的运动显然是独立于机器本身的,它提供给机器的驱动运动就称为独立运动。由此不难想见外界提供独立运动(驱动)的数目(即电动机等的数目)一定要与机构(机器)可能作的独立运动数目(称为机构的自由度)相等,这样机构才有确定的运动。如曲柄滑块机构,只需要动力源(如内燃机或电动机)驱动在滑块或曲柄即可。

2.3.1 机构具有确定运动的条件

机构具有确定运动的条件是:机构的自由度数目大于零,且等于原动件数。

当机构自由度 F 为零时,该机构将成为一个静定的桁架系统;自由度 F 为负时,机构则成为一个超静定系统;但自由度数多于原动件数,则构件间的运动是不确定的;若 F 大于零,但小于原动件数,则构件间会产生运动干涉,甚至构件断裂。

2.3.2 机构自由度计算

平面内的任何构件在没有引入约束的情况下,必然具有三个可能的运动(沿 X 轴、 Y 轴的移动和在平面内的转动),即平面内自由构件具有三个自由度。由于采用运动副联接而引入约束后,引入一个低副减少两个自由度,而引入一个高副减少一个自由度。一个含有 n 个活动构件的机构的自由度与约束变化如表 2.2 所示。

表 2.2 自由度与约束数

机构自由度	自由构件(n 个)自由度	引入低副约束数(p_l) (自由度减少数)	引入高副约束数(p_h) (自由度减少数)
F	$3n$	$2p_l$	p_h

由表 2.2, 机构自由度的计算表达式可写成

$$F = 3n - 2p_l - p_h \quad (2.1)$$

式中, n 为活动构件的数目; p_l 为机构中引入低副的个数; p_h 为高副的数目。

2.3.3 机构自由度计算中的五个重要问题

2.3.3.1 复合铰链

按照运动副的定义, 两个直接接触的可动构件以转动副联接, 就构成 1 个转动低副, 也就是要引入 2 个约束。这样图 2.4(a) 中的 A 处为 3 个构件以转动副联接, 则应为 2 个转动副, 这就是复合铰链。对于有 m 个构件重叠并构成转动副时的复合铰链个数为 $m - 1$ 个。图 2.4(b) 中 B 处则不存在复合铰链。

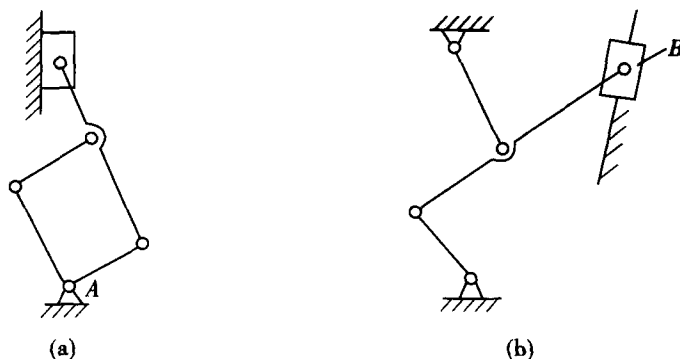


图 2.4

复合铰链判断容易出错的几种情况如下。

第一, 有滑块铰接处, 如图 2.5(a) 中的 E 处。参与铰接的只有两个滑块, 杆件 CDE 与上面的滑块构成滑动副, 因此该处不构成复合铰链。而该图中的 C 处, 杆件 CB 在该处参与了两滑块的铰接, 成为三个构件两两直接接触的铰链联接, 故为复合铰链。

第二, 含有盘类构件的地方, 如图 2.5(b) 中的 A 处, 是由机架 5、小齿轮 2 和杆件 3 三个构件两两接触并通过铰接组成复合铰链。易误读的是对齿轮 1 的回转中心判断。其实若使齿轮 1 为原动件, 那么齿轮 2 的运动是由齿轮 1 传递来的, 和与齿轮 1 同轴的杆件 3 传递给与齿轮 2 固连的 BC 杆的运动的合成运动, 是一个并联结构, 不能误以为为齿轮 1 的回转中心在 A 处。在图 2.5(c) 中, A、B、C、D 四处都是两根杆件和一个盘形构件两两直接接触的转动副, 都是复合铰链。