

机 构 设 计

分析与综合

第 一 卷

[美] 阿瑟·G·厄尔德曼 乔治·N·桑多尔 著

庄细荣 党祖祺 译

张启先 校

高 等 教 育 出 版 社

(京) 112号

内 容 简 介

本书共两卷,系1984年出版的美国大学本科(第一卷)和研究生(第二卷)机构学教材(第二卷译本将较多引用本卷第一、八章内容)。本卷对机构的运动分析、动力分析和运动综合有较详细的理论分析及实例说明,对凸轮的运动分析及综合、齿轮及轮系也作了介绍,并有一章专论机构设计方法学。全书介绍的各种方法均与电子计算机或电子计算器的应用相结合;计算公式、设计实例和每章末的实用习题较多。本书可作为我国高等工业学校机械原理课程的教学参考书,也可供从事机构分析、机构综合的研究及设计的工程技术人员参考。

机 构 设 计

分析与综合

第一卷

[美] 阿瑟·G·厄尔德曼 著
乔治·N·桑多尔

庄细荣 党祖祺 译

张启先 校

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

民族印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 27 字数 610 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0001—2 110

ISBN 7-04-002008-4/TH·115

定价 14.40元

第一章 运动学与机构学绪论

1.1 引言

工程科学是建立在数学、物理和化学等基础科学之上的。大多数情况下,工程科学要应用这些基础科学的一个或几个基本原理分析能量从某个能源到一个或几个输出的转换。固体力学是物理学的一个分支,它包括三个主要部分:运动学,研究相对运动;静力学,撇开运动来研究力和力矩;动力学,论述力对物体的作用。也可把运动学和动力学合称作动力学。本书将适当地叙述一些为完成机构设计所需要的数学、运动学和动力学知识。

机构是一种机械装置,可用将运动和(或)力从输入传到输出。连杆机构由通常看作是刚性的构件(即杆)(见表 1.1)组成。它们由各种联接(见表 1.2),诸如铰链(回转副)或滑块来连接,形成开式链或闭式链(也称环)。这样的运动链,在至少一个构件固定之后,可有两种情况:(1)若至少有两个其它构件仍然可动,则为机构;(2)若不再保持可动,则为结构。换句话说,机构允许它的“刚性”构件之间有相对运动,而结构则不容许。由于连杆机构比较简单,又能被设计出来去完成复杂的工作任务,如运动和力的非线性传递等,本书将给以格外的关注。本书所介绍的连杆机构的某些设计方法,是机构学理论在利用计算机的基础上得以复兴的结果。好多设计方法是在 20 世纪 60 年代以前发现的,但大量繁琐的计算在当时阻碍了这些方法的进一步发展。

1.2 运 动

绝大多数机构的运动形式是这样的:它们所有的构件都在平行平面内运动。这种运动叫做二维运动或平面运动,本书将着重论述这一类运动。刚体平面运动包括绕垂直于运动平面的轴的转动和移动,即物体内部所有的点都沿完全相同的直线或曲线轨迹运动;物体内部所有的线都与它们的原始方向保持平行。第二卷第六章介绍的空间机构则可作三维运动,有可能实现绕三根不平行轴的转动和三个方向上的移动的各种组合,这取决于各种联接(球副、螺旋副、圆柱副,等等;见第二卷表 6.1)所施加的约束。

1.3 四 杆 机 构

机构用于大量形形色色的机器和装置中。最简单的闭环连杆机构是四杆机构,它有三个运动构件(加一个固定构件)^①和四个铰链联接(见图 1.1)。与动力源或原动机相连的构件称为输入件(A_0A)。输出件将动铰链 B 与定铰链 B_0 相连接。连杆或称浮动构件则连接两个动铰链 A 和 B ,从而把输入件与输出件“耦合”起来。

^① 有一个构件固定的杆系才是机构。

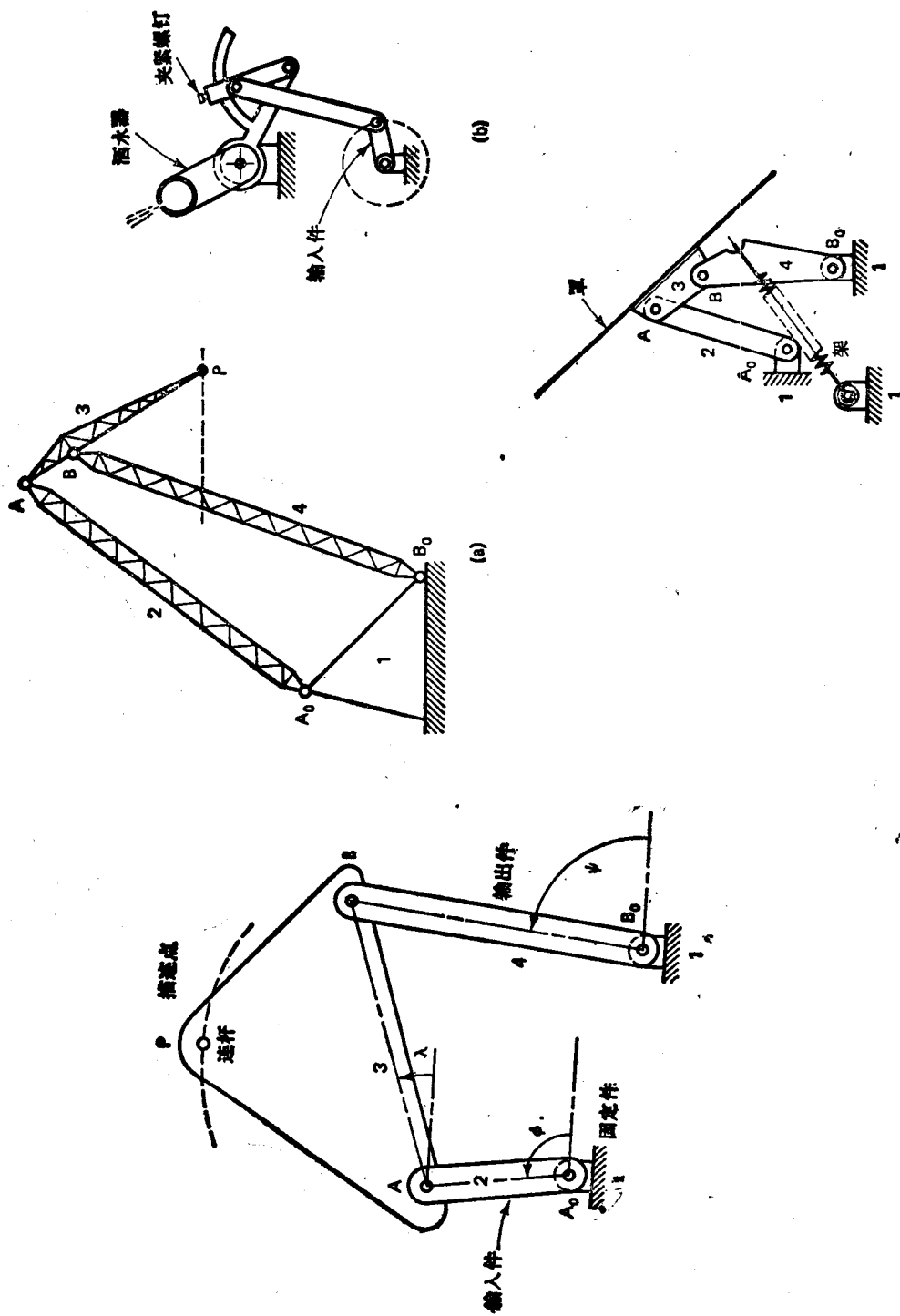


图 1.2

图 1.1

图 1.2 表示用四杆机构完成不同任务的三种应用实例。图 1.2 a 中的鹤式伸臂起重机是一种特殊形式的四杆机构,其描述点(点 P)作近似的直线运动。这一类起重机的额定起重量可达 50 吨,连杆上描述点的近似直线行程一般约长 9 米。

图 1.2 b 为一草坪洒水器的驱动连杆机构,它是可调的,可使洒水头得到不同的摆动范围。这种可调式连杆机构可以改变它的输出件与输入件之间的函数关系,方法是通过调整夹紧螺钉改变其输出件的长度和角度。图 1.2 c 表示汽车发动机罩用的一个四杆机构设计方案。这个机构用来控制罩和车架之间的相对运动。

图 1.2 表示的三种应用是很不相同的,事实上代表了三种不同的工作任务,根据这种任务的不同,所有机构可以按应用分为:轨迹生成、函数生成和运动生成(或称刚体导引)。在轨迹生成(图 1.2 a)中,我们关心的是描述点的轨迹。函数发生器(图 1.2 b)是这样一种连杆机构,对于它,感兴趣的是构件(通常是与机架相连的构件)之间的相对运动(或力的相互关系)。运动生成(图 1.2 c)中,关注的是连杆的整个运动。这三种任务在第二、第八章将得到比较深入的讨论。

四杆机构有一些特殊的型式,它们是由一个或多个构件变得无限长而形成的。图 1.3 中的滑块-曲柄(或曲柄-滑块)机构是一个带滑块的四杆运动链,这个滑块代替了无限长的输出件。内燃机引擎就是按这个机构做成的,曲柄为构件 2,连杆为构件 3,活塞则是滑块(构件 4)。

还存在四杆机构的其它形式,在这些形式中,滑块不是在固定构件上滑动,而是在运动构件上滑动,称之为滑块-曲柄机构的转换,这种转换是当另一个构件(曲柄、连杆或滑块)成为固定构件时而产生的。节 3.1 将展示滑块-曲柄机构转换形式的一些应用。

1.4 相对运动学

自然界中所观察到的所有运动都是相对运动,即被观察物体相对于观察者的运动。例如,坐在公共汽车上的乘客相对于在车站上等车的观察者来说,他在运动;但是,相对于另一个坐着的乘客,他却是静止的。而在汽车里过道上走动的乘客,则无论是相对于坐着的乘客还是相对于在车站上等车的观察者,他都处于运动中。

对运动的研究,即运动学,已被称作相对运动学。机器与机构的设计和分析有赖于设计者对机器构件之间相对运动的想象能力。本章的一个主要目的就是使读者熟悉各种连杆机构所产生的运动,从而对建立在这个基本理解的基础之上的分析与综合两个方面的论题有所准备。图 1.3 b 表示一个带有三角形连杆 ABP 的滑块-曲柄机构。连杆上每一点相对于机架(构件 1)都描出不同的轨迹,这种轨迹称作连杆曲线。点 A 的轨迹是圆心在 A_0 的圆弧;点 B 在一条直线上移动,点 P 的轨迹则是比较复杂的曲线。所有这些连杆曲线都是构件 3 的绝对运动^①的一部分。假定所要求的不是点 P 相对于构件 1 的轨迹,而是相对于构件 4 的轨迹,那么,只要想象自己是坐在构件 4 上来观察构件 3 的运动,特别是构件 3 上点 P 的运动,就能得到这一相对运动。

① 在机构分析中,若规定一个构件作为固定参考系将会很方便。于是,所有相对于这个构件的运动就称作绝对运动。

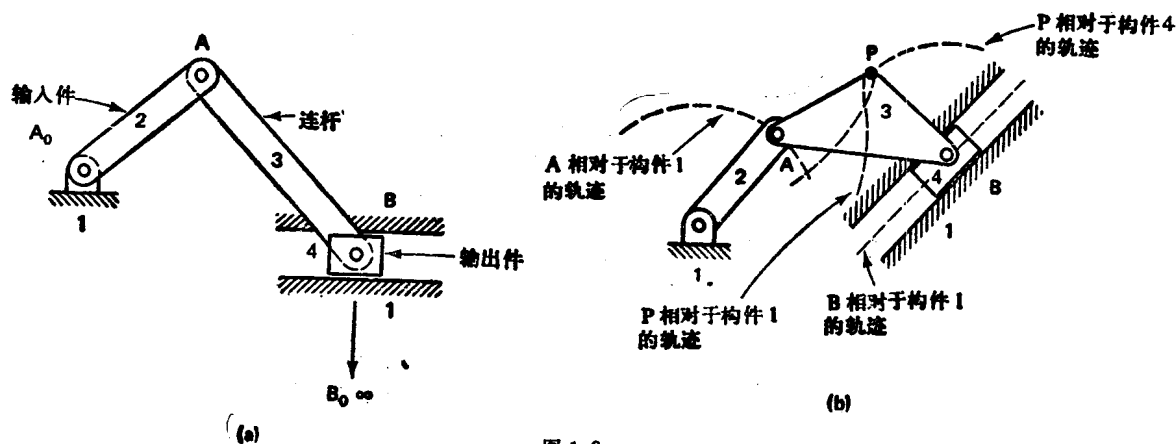


图 1.3

换句话说,把机构加以转换,将构件 4 而不是构件 1 固定,让机构的其余构件(包括以前固定的构件)相对于构件 4 运动。这时,点 P 相对于构件 4 的相对轨迹是圆心为 B 的圆弧。因此,绝对运动是相对运动的一种特殊情况。

1.5 运动简图

虽然四杆机构和滑块-曲柄机构很有用,它们的应用有上千种,但是,后面我们将会看到,这些机构的使用是有局限的,在要求比较苛刻的场合,往往要使用构件较多的连杆机构。

图 1.4 就是多环机构的一个典型应用,其中需要用到连杆机构。这是一种竖铰链窗,它必须从窗台向外开启 90° ,距离窗框的一边必须有足够的开距以满足规定的安全出口要求,离另一边也要有足够的距离以便接近窗玻璃的外侧去擦窗。同时,要求驱动连杆机构的力必须适合手动操作。图 1.4 a 和 b 分别表示一种普遍采用的竖铰链窗开闭机构处在 90° 和 30° 位置的情况。

要想象类似于图 1.4 所示多环机构的运动常常是困难的,特别是当其它零、部件也出现在同一个图上时更是如此。在较复杂机构的运动分析中,第一步是画等效的运动简图。需要画的是如图 1.5 那样的一个“去掉外表形状”的杆件图。这种简图的作用类似于电气线路图,它仅仅表示机构必要的骨架,不过,影响机构运动的关键尺寸要体现出来。运动简图有两种形式,可取其中之一:示意图(大致地有个比例,但不精确),或按比例的运动简图(通常用于进一步地分析位置、位移、速度、加速度、力和力矩传递,等等)。为了参阅方便,构件用数字编号(以固定件为数字 1 开始),而联接用字母编号,并标出输入件与输出件。表 1.1 列出了平面构件的常用简图。这种简图的一个目的是提供机构中相对运动的一种运动示意图。例如,铰链联接表示相对转动,滑块联接表示相对直线移动,等等。

图 1.5 表示竖铰链窗连杆机构的运动简图(示意图)。注意,在这个简图里有六个构件、五个铰链联接、一个滑块联接和一个滚子。同时注意,该机构有一个环包含滑块-曲柄机构(1、5、4、6)。与这个滑块-曲柄机构相连的为一个杆和一个滚子(2、3),它们为窗子的开、关提供输入。这种运动简图简化了机构,便于直观检查,如果按比例来画,那么运动简图还为进一步分

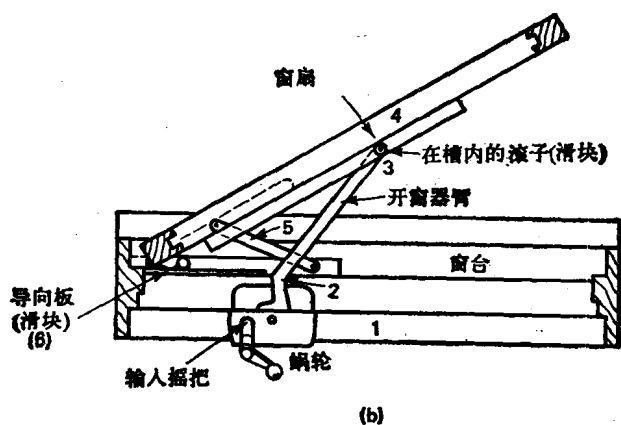
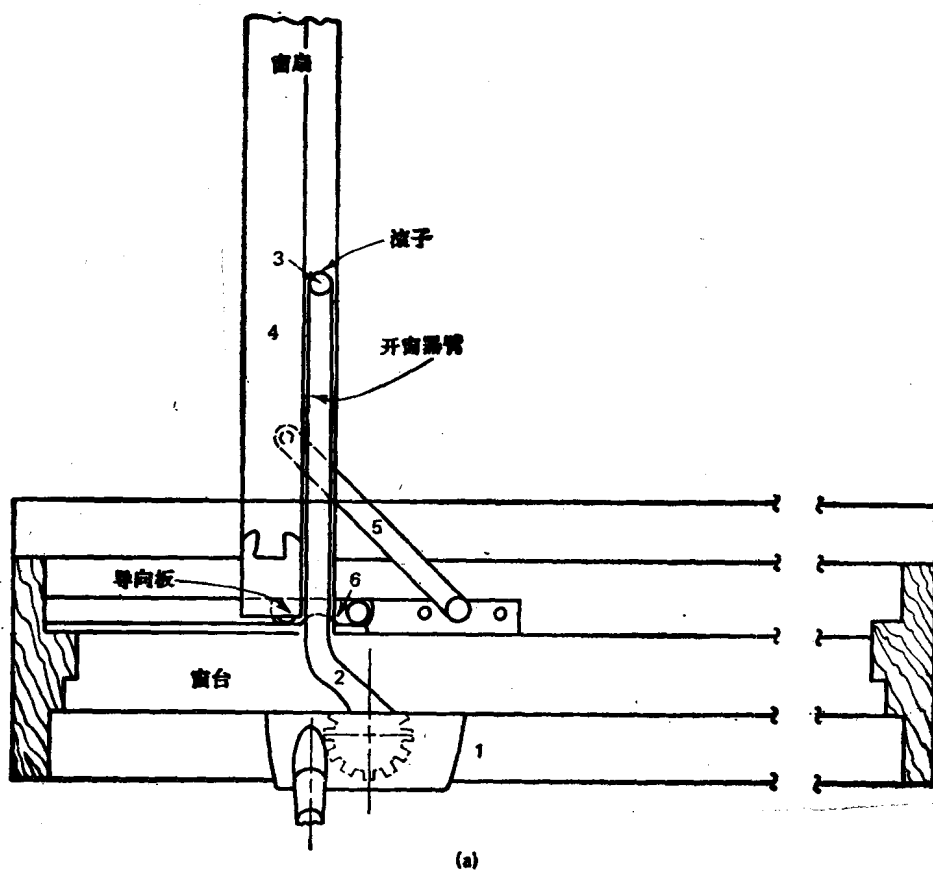


图 1.4 (由特鲁思公司——Truth Inc. 提供)

析提供了手段。

采用多环机构的另一个例子是一种已被推荐使用的变冲程引擎^[91] (图 1.6)。这种连杆机构能随功率要求而改变活塞冲程,其工作情况示于图 1.7。

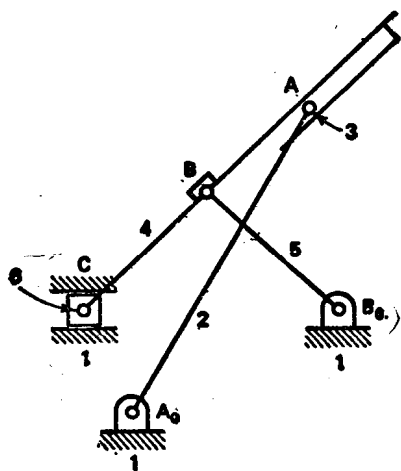


图 1.5 图 1.4 的等效运动简图

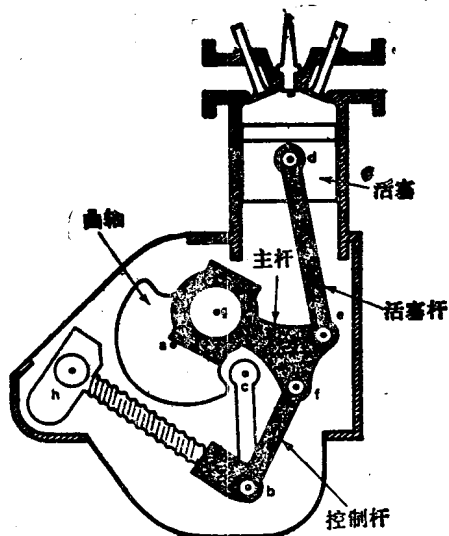
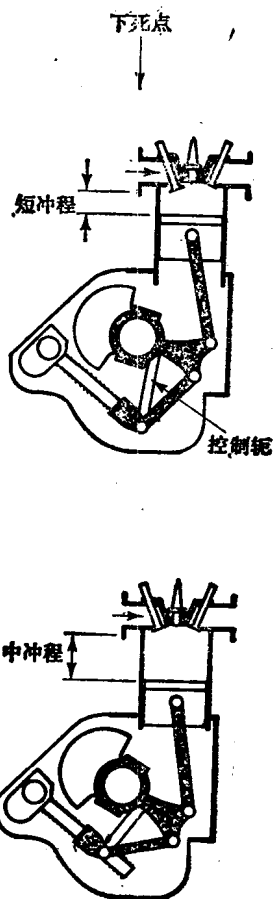
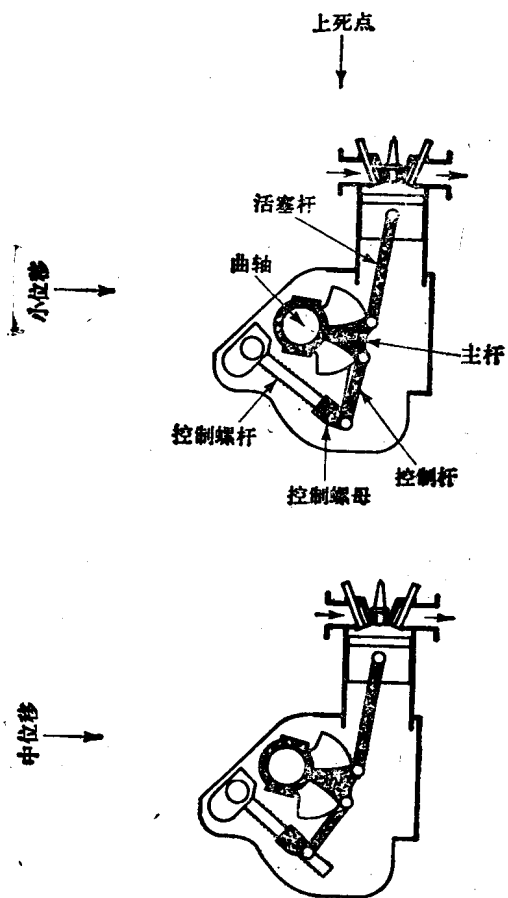


图 1.6 汽缸工作容量可变的引擎剖视图，图中表示了曲轴、主杆、活塞杆和冲程控制杆。冲程的改变是通过变动控制杆下端的位置来实现的



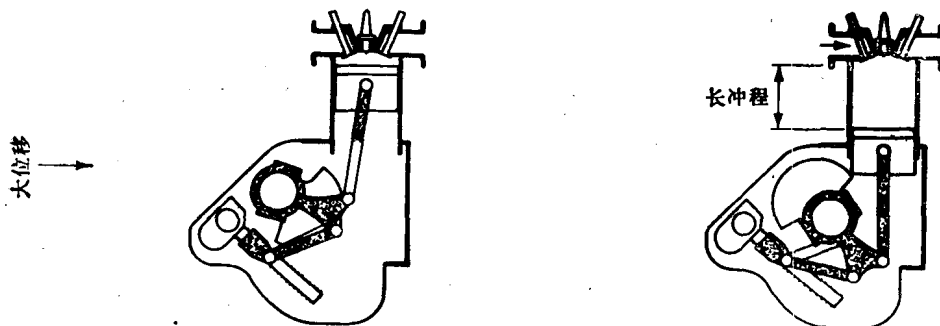


图 1.7 改变汽缸工作容量的连杆机构；冲程的变化是靠改变控制杆下端的位置来实现的

表 1.1 平面构件类型

构件类型	典型形式	简图
两副		
三副		
四副		

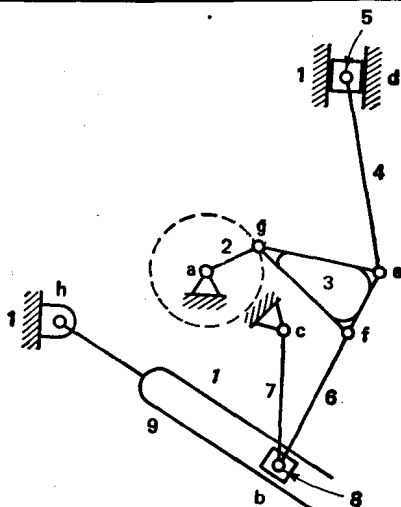


图 1.8 在这个图中没有把滑块(构件 8)表示成固定的

对于每个活塞，它的控制杆下端沿图中所示控制铰规定的圆弧进行调节。控制杆顶端连接到主杆上，而主杆又连接于一个起着一般连杆作用的零件。本质上，形成了一个曲柄半径可变的引擎。

当控制铰与垂直方向偏离小时(图 1.7 a)，主杆的运动受到限制，由此产生的活塞冲程就小。随着控制螺母沿控制螺杆往里拧，控制铰与“汽缸轴线”的夹角增大，使主杆在较大的弧度上运动。产生较长的冲程。控制铰与汽缸轴线的夹角在 0° 到 70° 之间变动，产生的冲程由 1 in 变到 4.25 in。“这种连杆机构是设计成这样的：它的压缩比保持大致相同，而与活塞冲程的长短无关。”

这种可调式机构的等效运动简图示于图 1.8。注意图上有九个构件、九个铰链和两个滑块。

1.6 六杆运动链

如果四杆机构不具备某种特殊应用所要求的那种功能，下一步通常考虑两类单自由度六杆机构(有七个回转副，中一类：瓦特运动链(Watt chain)或斯蒂芬森运动链(Stephenson chain)(见节 1.7 及图 1.9 至 1.13)。这是根据三副①构件(带有三个回转副的构件；见表 1.1)的配置来分类的。在瓦特运动链中，三副构件是相邻的；而在斯蒂芬森运动链中，三副构件是被两副构件(只带有两个回转副的构件)隔开的。举几个应用六杆运动链的例子将有助于我们熟悉这

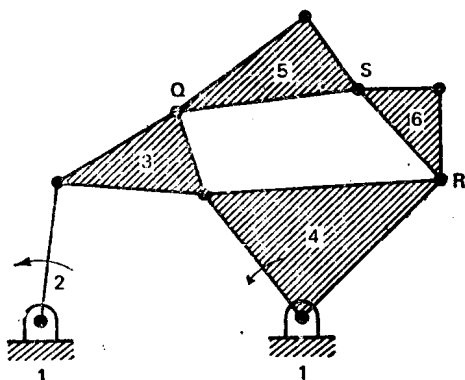


图 1.9 瓦特 I 型六杆机构

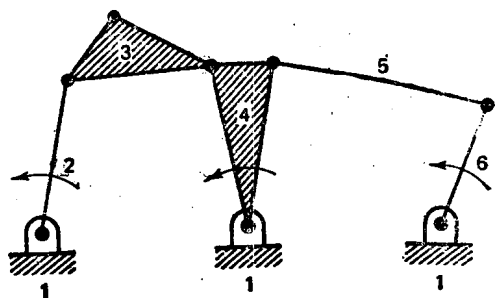


图 1.10 瓦特 II 型六杆机构

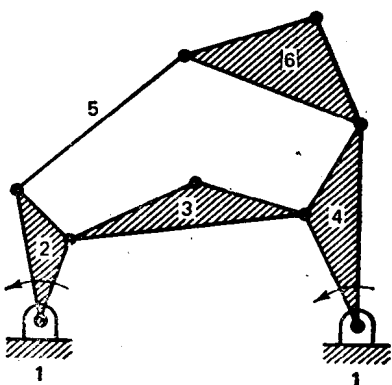


图 1.11 斯蒂芬森 I 型六杆机构

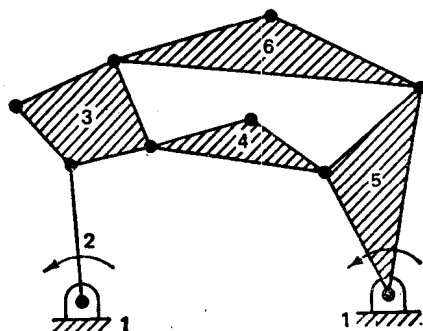


图 1.12 斯蒂芬森 II 型六杆机构

① 注意，在图 1.9 至 1.13 中，有些三角形构件确实是三副的，而另外一些则是为了表示浮动杆上可能的轨迹点才画成三角形的。

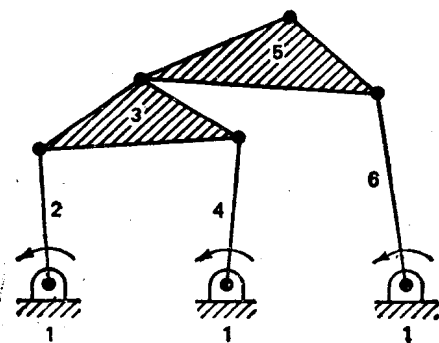


图 1.13 斯蒂芬森 III 型六杆机构

些连杆机构。

例 1.1^[88]

制造盒式磁带过程中，有时必须把装在装配好的磁带盒内的一段导带穿到一个装带装置上，再用这个装置把空白磁带卷进盒内。要探索一种连杆机构来穿这段导带。

图 1.14 表示磁带盒、导带和装带装置的位置，要求导带必须在导引机构开始动作时穿过装带装置。虚线是导带穿好以后的形状。

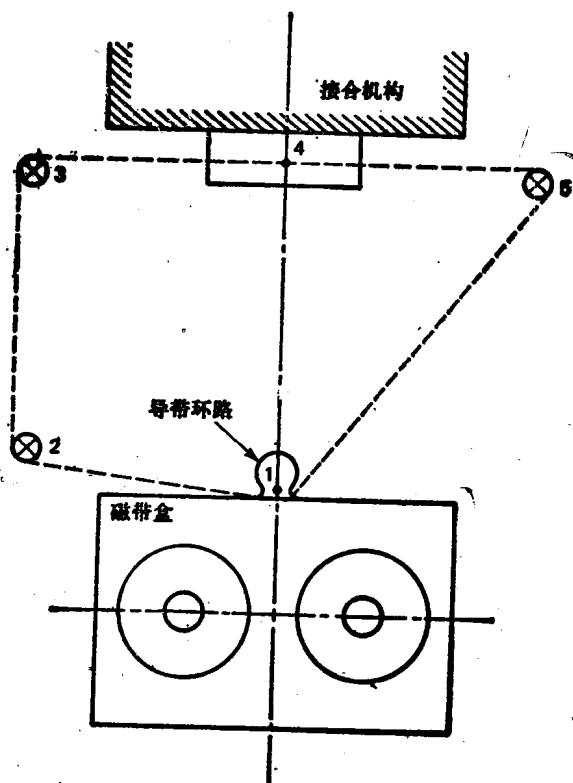


图 1.14

导带从磁带盒的两边拉出,随着导带的拉出就形成一个环路。数字 1 到 5 表示导带必须依次通过的位置。在位置 2、3、5 上带叉的圆(图 1.14)是导柱,它们将导带支撑成一个环路。最初,这些导柱低于拖带机构,而一旦导带环路经过某个位置,该位置上的导柱就立即升起,以支撑导带。必须引导导带以适当的运行方向离开位置 2、3、5 上的导柱。

这种机构必须满足如下要求:

1. 输入曲柄转动 360° 。
2. 轨迹点(穿导带的导引头)到达这些位置上时的输入转角必须定时,以便让位置 2、3、5 上的导柱在正确时刻升起。
3. 带轨迹点的连杆在每个预定的位置必须处在指定的角度方位上。

本例选用了斯蒂芬森 III 型运动链。图 1.15 所示的最终设计方案是根据第二卷第三章介绍的计算机辅助方法产生出来的。

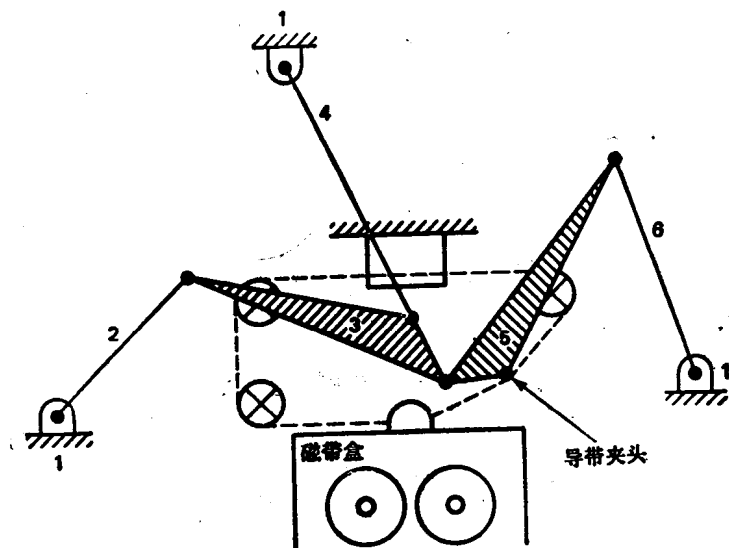


图 1.15

例 1.2^[83]

机构在仿生机械装置的设计中是极其有用的。例如,为截肢过膝的人设计外接假肢,就要求复现大腿骨和小腿骨(股骨和胫骨)之间相对转动中心(见第三章)的运动,以保持行走稳定。图 1.16 和 1.17 表示为这个目的而设计的斯蒂芬森 I 型六杆运动发生器。 0° 弯曲(完全伸直)位置示于图 1.16 a, 图中还示出构件 1 (假小腿)相对于股骨(构件 6)转动的瞬时中心轨迹。 90° 弯曲(曲膝)位置示于图 1.17, 这一连杆机构的运动简图示于图 1.16 b。

例 1.3^[62]

为了把圆柱形零件从料斗送到料槽以便进一步加工,需要一个送料机构(见图 1.18)。为此任务选用了瓦特 II 型机构。定时杆(6)传给杯形托一个转动(其转角是输入杆转角的特定函数),从而把零件从料斗送到料槽,而具有预定轨迹的输出连杆(点 P)则先把零件保持在杯形托上,然后又把零件推入料槽。

例 1.4^[96]

要求连杆机构有双重作用的另一个例子是同时实现轨迹生成和函数生成(图 1.19)。预定的函数是 $y=x^2$, 区间 $1 \leq x \leq 3$; 而要求的轨迹是近似直线。用第二卷第三章所述的方法综合了一个斯蒂芬森 III 型机构,图 1.19 表示了该机构在第一个预定位置的情况,其它四个预定位置示于图 1.20。

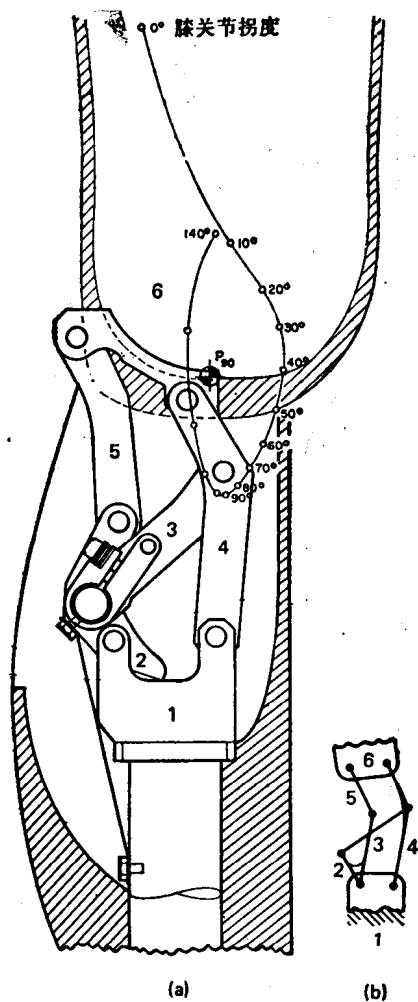


图 1.16 六杆假肢膝关节机构(柏克利加州大学生物力学实验室)

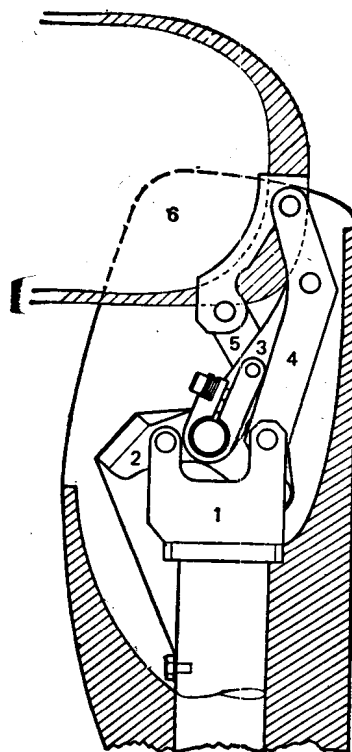


图 1.17 六杆假肢膝关节机构(柏克利加州大学生物力学实验室)

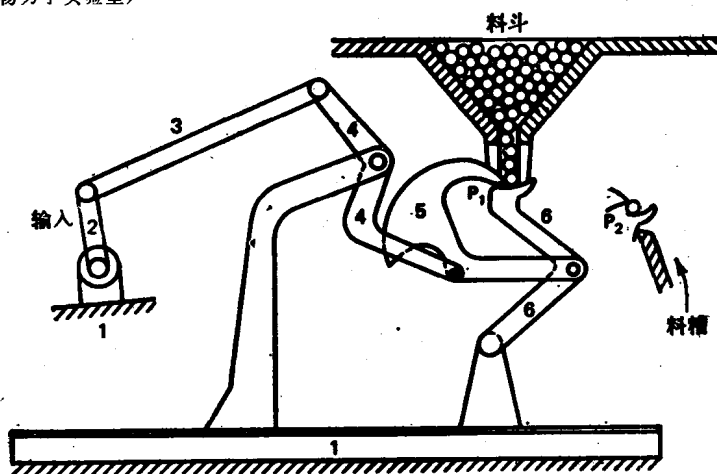


图 1.18

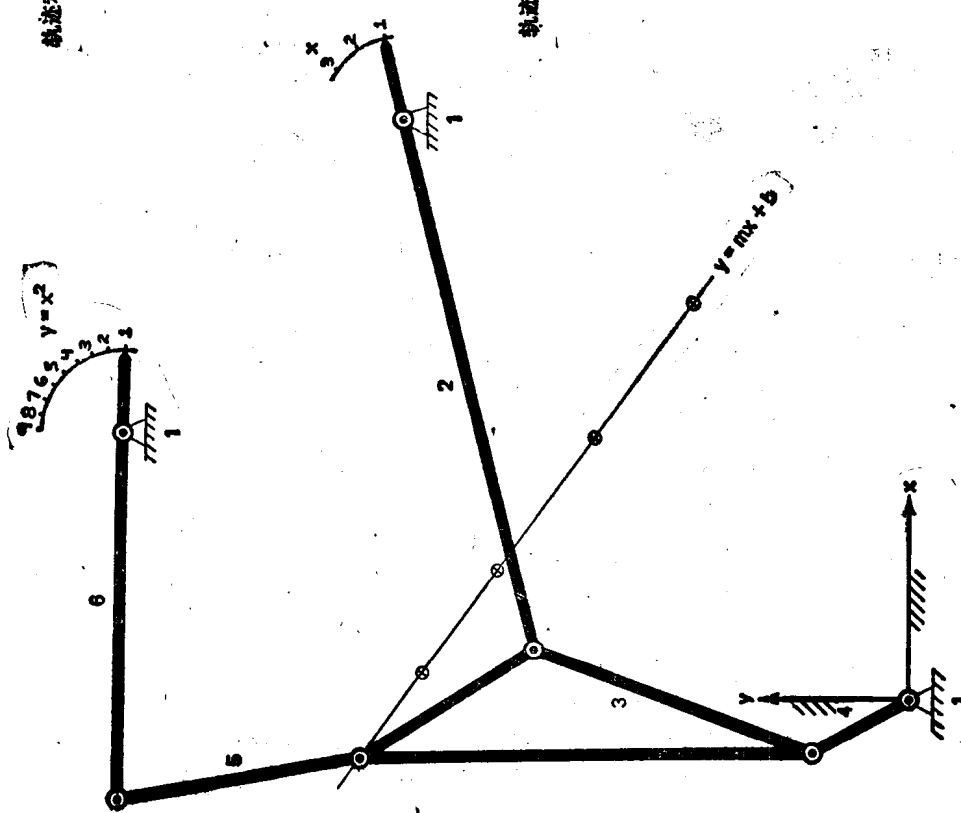


图 1.19

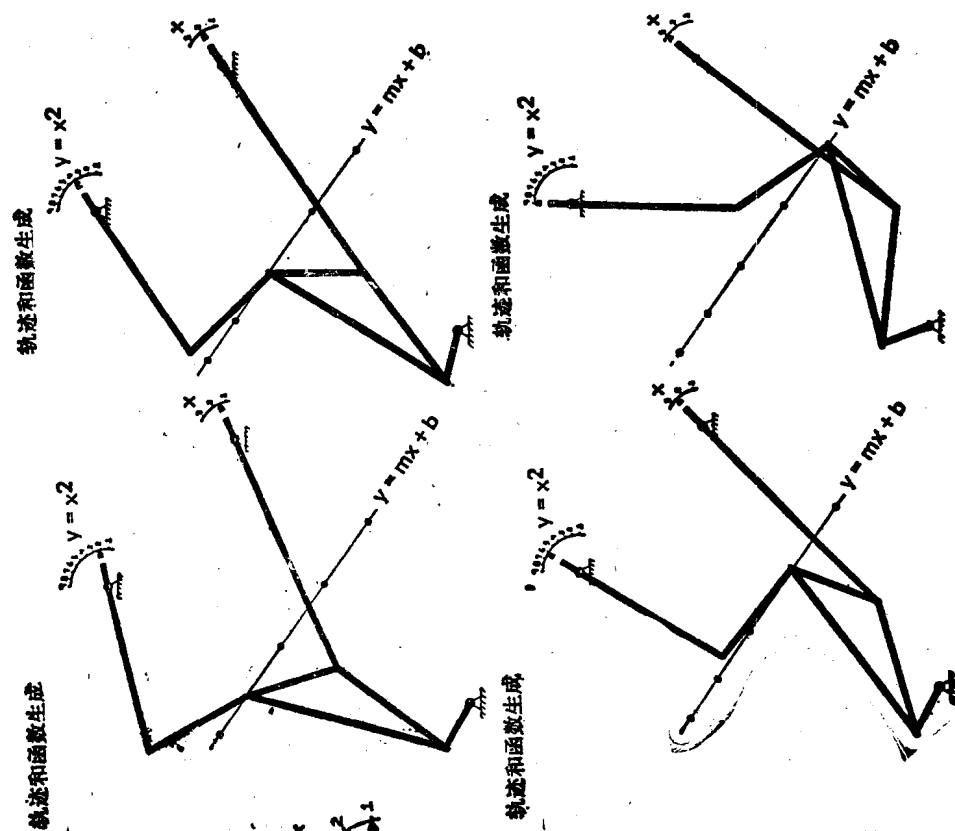


图 1.20

上述四个例子中的机构是由带铰链联接(即回转副)的杆件组成的。如果图1.9到1.13中的某个六杆机构中有一个或几个杆改用滑块,就得到不同的六杆机构。由于杆件、铰链和滑块有各种组合,所以存在着大量可能的六杆机构(见第八章附录中的实例研究)。

1.7 自 由 度

在机构的运动分析中,画出运动简图以后,下一步是确定机构的自由度数目。自由度的含义是,为使机构所有构件相对于机架的位置都确定下来所需要的独立输入的数目。人们能够发明的机构有成千上万种不同的类型。可以想象有一个口袋,里面装着表1.1和表1.2所列的大量各式各样的机构元件:两副构件、三副构件、四副构件等,铰链联接、滑块联接、凸轮和凸轮从动件、齿轮、链条、链轮、带、带轮,等等。(这里还不包括球联接、螺旋联接以及其它允许三维相对运动的联接,因为本书的这一部分只讨论在平行平面内的平面运动。三维运动在第二卷第六章里才涉及到。)进一步再想象把这些元件装配起来组成各种机构类型的可能性。例如,几个两副构件可用铰链把它们连接起来。有没有某些规则来指导如何构成这些机构呢?例如,我们希望在自变量 ϕ 和因变量 ψ 之间规定一个角度关系,那么,图1.21中的连杆机构是否可以用作函数发生器呢?

图1.21中机构的明显问题是,当一个电机接到输入件的轴上时,输出件可能没有直接的反应——看来,中间的构件太多了。显然,需要有某个可动性法则,按照此法则来组成连杆机构。可从分析单个构件开始来建立这样一个法则。

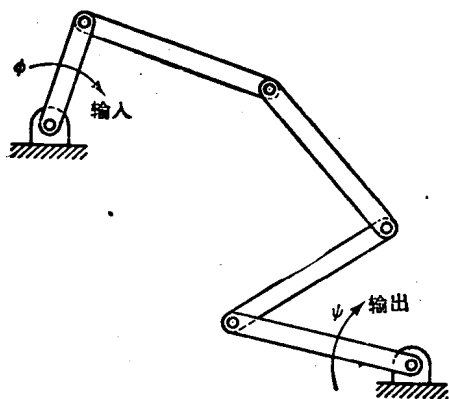


图 1.21

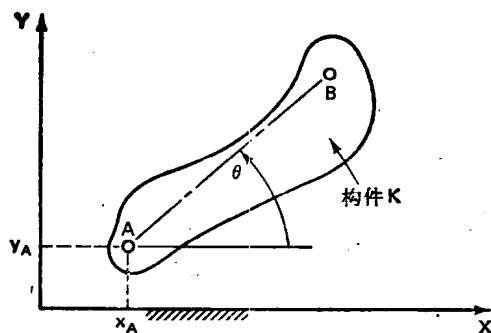


图 1.22

假定要求刚性构件K在如图1.22所示的坐标系XY中的确切位置,多少个独立变量才能完全规定这个构件的位置呢?比如说,从原点出发,先沿X轴移动 x_A ,然后沿Y轴方向移动 y_A ,就能到达点A。因此,代表这两个移动的两个坐标确定了点A的位置。不过,完全规定构件K的位置,还需要更多的参数。如果点A和B的连线与X轴的夹角知道了,那么构件K在XY平面内的位置就确定下来了。所以,与一个构件在平面内的位置有关的有三个独立变量: x_A 、 y_A 和 θ (两个移动和一个转动,即三个独立坐标)。换句话说,一个无约束的刚性构件在平面中有三个自由度。

如果有一个 n 个构件的集合, 则在它们被连接成一个连杆机构系统以前, 总共有 $3n$ 个自由度。构件之间的联接使整个构件系统的自由度减少。铰链联接(即回转副)叫做低副联接——在以前一些文献中把低副联接定义为元素(如销和套)之间为面接触的联接副。一个铰链联接要使它所连接的、原先未受约束的构件减掉多少个自由度呢? 如果图 1.22 中构件上的点 A 是构件 K 与机架之间的一个铰链联接, 那么两个独立变量 x_A 和 y_A 就被固定, 只剩下 θ 为构件 K 的一个保留着的自由度。

在图 1.21 那样的杆系里, 每个铰链联接将使前后构件之间的相对运动失去两个自由度。这一观察使我们想出一个确定由 f_1 个铰链连接 n 个构件(机架即固定件作为其中一个构件)的运动链的自由度公式:

$$\text{自由度数} = F = 3(n-1) - 2f_1 \quad (1.1)$$

公式(1.1)通称为格魯布勒公式(Gruebler's equation)。活动构件数为 $(n-1)$ 。铰链联接允许两个构件之间有一个相对自由度——这就是符号 f_1 的含义。这个公式是实践中最普遍应用的可动度公式之一。其它形式见参考文献 55。

大多数机构的任务是要求把一个单独输入传递到一个单独输出。因此, 具有约束运动的单自由度机构是用得最多的机构形式。例如, 凭直觉不难看出图 1.1 中的四杆机构是一个单自由度连杆机构。直观的自由度分析可以进行如下: 一旦自变量 ϕ 设定以后, 点 A 相对于 A_0 和 B_0 的位置就已知了; 由于连杆基线 AB 和输出件 B_0B 的长度为已知, 则 B_0AB 是一个不能再运动的三角形(零自由度), 从而连杆机构内其余构件的位置就被确定下来了①。

用格魯布勒公式确定图 1.1 中连杆机构的自由度, 则有

$$n = 4, \quad f_1 = 4$$

$$F = 3(4-1) - 2(4) = +1$$

这里“+1”表示该连杆机构有一个自由度。作为格魯布勒公式用法的进一步说明, 现引用图 1.9 中的瓦特 I 型六杆机构:

$$n = 6, \quad f_1 = 7$$

$$F = 3(6-1) - 2(7) = +1$$

凭直觉, 人们就能相信, 正如公式所预示的那样, 这个机构有一个自由度。一旦装配以后, 构件到 4 就构成一个四杆机构, 它已被论证有一个自由度。观察构件 3、4、5 和 6, 它们构成第二个四杆机构, 其中两个构件(3 和 4)的位置已经确定。由于点 Q 和 R 的位置已被确定, QSR 就构成一个“刚性”三角形, 从而整个机构的位置就定下来了。

下面来确定图 1.23 中挖沟机的自由度。这个连杆机构系统有一种元件在自由度讨论中至

① 实际上, 四杆机构的其余部分 (ABB_0) 有两个可能的分支, 它们是关于对角线 B_0A 的镜像, 构件 AB 和 BB_0 可按这两个分支装配。然而, 连杆机构如果不拆开, 它是不能从一个分支运动到另一个分支去的。因此, 连杆机构的自由度数与该机构可能有几个不同的分支是互不相关的。所以, 自由度的直观的定义可以明确地表达为: 如果构件位置的 n 个坐标(如 x, y, θ)设定以后, 其余构件可能的位置数是有限的, 则自由度就是 n 。分支概念在第三章讲到(主要参看图 3.18 和图 3.19)。

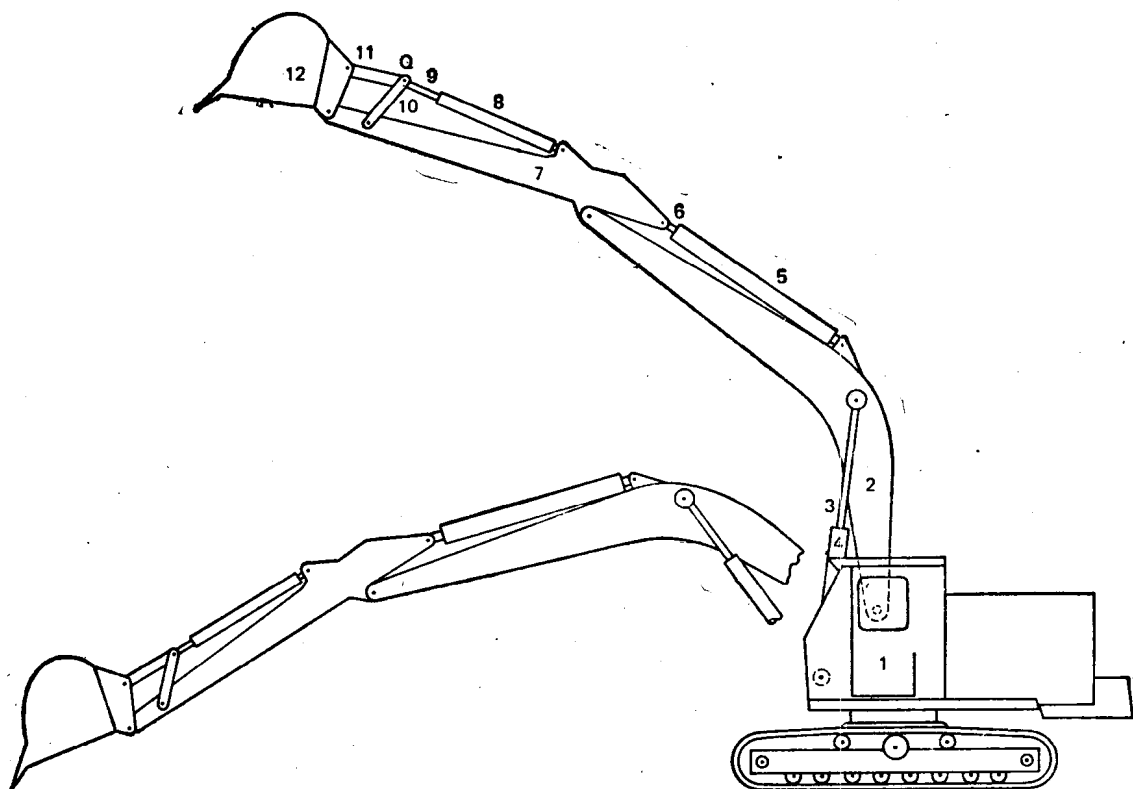


图 1.23

今尚未涉及到,这就是滑块(这里是液压缸)。因此,需确定一个滑动联接要从两个相邻构件中减掉多少个相对运动自由度;换句话说,一个滑块联接施加了多少个相对约束。在图 1.3 内,滑块(构件 4)相对于机架(构件 1)的运动在垂直方向受到了限制,同时在平面内的转动也被约束掉了。这样,滑块联接允许的运动只有沿导轨的移动,即减去了两个相对运动自由度:一个转动和一个移动。现在,公式(1.1)的应用范围可以扩大,使 f_1 等于铰链联接数与滑块联接数之和——因为它们两者都只允许一个相对运动自由度。

挖沟机有 12 个构件(驾驶室看作机架),12 个铰链联接和三个滑块联接(活塞-油缸组合)。如果你只数出 11 个铰链联接,就要比较仔细地查看一下图上的点 Q。该处三个构件由同一个铰链连接着。所以,在点 Q 有两个铰链联接,一个连接构件 9 和 10,另一个连接构件 10 和 11。一般地说,公共连接处的铰链联接数目为

$$f_1 = m - 1 \quad (1.2)$$

式中 m 为由同一个回转副连接的构件数。

所以,该挖沟机的自由度数为

$$F = 3(12 - 1) - 2(15) = +3$$