

PINGMIANLIANGANJIGOUFENXIXUYUZONGHE

平面连杆机构

分析与综合

陆钟吕 刘乃钊 叶华武 编著



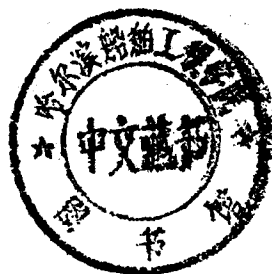
哈尔滨船舶工程学院出版社

376922

771112
89-2

平面连杆机构分析与综合

陆钟吕 刘乃钊 叶华武 编著



哈尔滨船舶工程学院出版社

(黑)新登字第9号

内 容 简 介

全书共分八章。介绍了平面连杆机构的组成原理;复数法分析平面连杆机构的速度和加速度;平面运动构件二、三和四个相邻位置间的几何性质,欧拉-萨伐利方程在平面曲线曲率理论中的应用及确定曲率中心的方法,利用齐次坐标研究常定曲率三次曲线的几何性质,作图方法及其退化的条件;几何法综合平面连杆直线机构,间歇运动机构及实现已知函数机构的方法;解析法综合函数机构的方法。

本书可作为机械专业硕士研究生或高年级本科生的教材,也可作为高校机械专业师生的参考书。对从事机械设计的工程技术人员也是一本有实用价值的参考书。

平面连杆机构分析与综合

陆钟吕 刘乃钊 叶华武 编著

*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版

新华书店首都发行所发行

黑龙江新华印刷二厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 8.875 字数 220 千字

1992年12月 第1版 1992年12月 第1次印刷

印数:1—1 000 册

ISBN 7-81007-236-6/TH·13

定价:2.40 元

序 言

随着科学技术的迅速发展,有关机构学方面的理论引起了日益广泛的重视。机构是一个作为变换刚体机械运动的装置,其理论主要是研究机构的性质及其方案设计的一般方法。虽然大多数基本机构的原理几乎都已经知道了,但是当前的主要任务仍需要继续不断综合过去所发展的理论,进一步深入研究那些基本机构的性质,针对国民经济发展中所提出的新问题,设计出满足实际需要的、具有高性能的各种机构。在这些性能中,不仅要考虑到其运动学方面的要求,而且更重要的是满足动力学方面的条件。按已知动力特性设计机构的问题是非常复杂的,至今还远远没有完成,期待着广大从事研究机构学的学者们去逐个解决。当今机构的运转速度高,载荷性质不断改变以及载荷大小的不断增加和工作过程要求的不断提高,在设计时需要考虑机构各个部分的弹性变形,质量的变化,运动副间隙等因素对运动的影响。

从目前情况看,发展比较迅速的有:机器人机构,自动调节机构以及代替人类器官作用的医疗器械机构等方面。

机器人中的机械手机构是用来实现人类手的动作的装置,其工作机构需要进行复杂的多自由度空间运动。在自动化技术中,机械手可以用来抓取各种放射性物质、进行水下的各种作业、在危险条件下和疲劳作业中代替人的各种工作。

自动调节机构是用来调节由于工作过程的变化而需要及时改变各种机构参数的机械装置。这在各种自动化技术中得到广泛的应用。

医疗器械机构发展迅速,例如人工轻型心脏按摩器、人工血液循环器、假肢等等。这些机构的主要特点是将人类工作器官调节到

连续的正常工作状态。

在解决现代技术的许多新问题中,不仅与创建满足实际要求的新机构有关,而且还与赋予这些机构新的特性有关。因此需要从事机构学研究的同行们对现有的各种机构方案进一步研究,从中总结出一些新的机构特性,并建立起一些新的设计方法。在这些机构中有平面机构,也有空间机构。

本书是作者在总结 30 余年本科生和研究生教学经验的基础上编写而成的。希望能对有关机械类专业的在校生的从事实际工作的设计人员有所帮助。

在第一章中,简要地论述了机构的叠加原理,介绍了以各个运动副本身所具有的自由度数和机构图形的环数计算机构自由度的公式。

在第二章中,系统而又比较详细地介绍了目前还未普遍采用的复数法分析机构的速度和加速度的方法。在这种方法中,由于运算算子 $e^{i\theta}$ 求导比较简单,所以给计算复杂机构的速度和加速度带来很大的方便,并为机构运动分析中应用电子计算机奠定了基础。

在第三、四、五章中着重研究了构件运动平面的两个、三个和四个相邻位置间的几何性质。推导了欧拉-萨伐利方程的三种形式和常定曲率三次曲线的方程。利用欧拉-萨伐利公式来研究运动平面上动点轨迹曲线及包络线的曲率理论。在四个相邻位置中,重点引进齐次坐标,并用来研究常定曲率三次曲线的几何性质。详细探讨了曲线的求法和三次曲线退化成圆和直线的条件。

在第七章中,重点介绍了利用几何法综合各种四连杆机构的方法。其中有按照三个精确点和四个精确点综合实现已知轨迹和实现已知函数的四连杆机构及六杆间歇运动机构。利用点位简化法综合五个和六个精确点的导向机构。在本章中还介绍了按连杆点的精确点和相应的曲柄转角和摇杆转角的机构综合方法。这些内容对于广大的实际工程设计人员有较大的实用价值。在第八章中简要地介绍了解析法综合实现已知函数机构的方法。作者相信

随着电子计算机的普及和计算机辅助设计的迅速发展,解析法将显得愈来愈重要。

本书由陆钟吕,叶华武和刘乃钊三人编写。第一、二、三章由叶华武编写。序言及四、五、七章由陆钟吕编写,第六、八两章由刘乃钊编写。最后由陆钟吕审校定稿。

由于受编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 平面机构的自由度和结构	(1)
§ 1-1 平面运动副及运动链	(1)
§ 1-2 平面机构及其自由度	(5)
§ 1-3 平面机构的组成	(8)
第二章 平面机构的运动分析	(13)
§ 2-1 平面构件的位移	(13)
§ 2-2 构件在平面运动中的速度	(19)
§ 2-3 构件在平面运动中的加速度	(21)
§ 2-4 两个运动重合点的相对运动	(26)
§ 2-5 曲柄摇杆机构的运动分析	(30)
§ 2-6 曲柄滑块机构的运动分析	(35)
§ 2-7 曲柄导杆机构的运动分析	(36)
§ 2-8 三齿轮连杆机构的运动分析	(37)
第三章 构件在平面中的两个相邻位置	(44)
§ 3-1 概 述	(44)
§ 3-2 连杆相对于机架两个相邻位置间的 几何性质	(45)
§ 3-3 摇杆相对于曲柄两个相邻位置间的 几何性质	(47)
§ 3-4 滑块相对于曲柄两个相邻位置间的 几何性质	(51)
§ 3-5 连杆对曲柄两个相邻位置间的几何性质	(53)
第四章 构件在平面中的三个相邻位置	(56)
§ 4-1 构件三个有限近相邻位置间的几何性质	(56)

§ 4-2	瞬心线	(68)
§ 4-3	构件在平面中的三个无限近相邻位置	(71)
§ 4-4	欧拉-萨伐利方程	(72)
§ 4-5	曲率中心及其求法	(87)
§ 4-6	包络线的曲率中心	(102)
§ 4-7	瞬心线的曲率半径	(105)
第五章	构件在平面中的四个相邻位置	(121)
§ 5-1	对极和对极四边形	(121)
§ 5-2	极点曲线及其求法	(124)
§ 5-3	圆心曲线	(128)
§ 5-4	圆点曲线	(130)
§ 5-5	四个无限近相邻位置	(133)
§ 5-6	常定曲率点的圆心曲线	(146)
§ 5-7	常定曲率圆点曲线的图解法	(149)
§ 5-8	常定曲率点的圆心曲线作图法	(156)
§ 5-9	常定曲率圆点曲线及其圆心曲线的退化	(158)
§ 5-10	波尔点	(167)
第六章	机构综合的基本问题	(170)
§ 6-1	机构综合的基本任务	(170)
§ 6-2	机构运动综合的阶段	(180)
§ 6-3	机构运动综合的方法	(186)
第七章	几何法综合平面连杆机构	(187)
§ 7-1	实现构件已知位置的机构综合	(187)
§ 7-2	按照四个相邻位置综合近似直线机构	(191)
§ 7-3	曲柄摇块机构的综合	(200)
§ 7-4	实现间歇运动机构的综合	(205)
§ 7-5	点位简化法及其应用	(217)
§ 7-6	按照连杆点的轨迹和连架杆的 转角综合四铰销机构	(230)

· § 7-7 按已知函数综合机构	(238)
§ 7-8 罗伯脱-契贝谢夫定理	(247)
第八章 平面机构运动综合的解析法	(254)
§ 8-1 利用精确点法综合实现已知函数的 四连杆机构	(254)
§ 8-2 利用精确点-导数法综合四连杆机构	(264)
§ 8-3 利用复数法按速度和加速度综合 四连杆机构	(267)
参考文献	(271)

第一章 平面机构的自由度和结构

组成平面机构的基本要素是运动副。因此掌握运动副的基本概念及其主要性质对研究机构的确定运动以及在设计时创建新机构具有十分重要的意义。在本章中着重讨论各类平面运动副和运动链的性质、机构自由度的确定以及机构组成的原理。

§ 1-1 平面运动副及运动链

1·1·1 平面运动副

两个在平面中运动的构件,如图 1-1 中的两个具有一定形状的构件,在 A 点直接接触组成一个联接,在保持接触的条件下,这

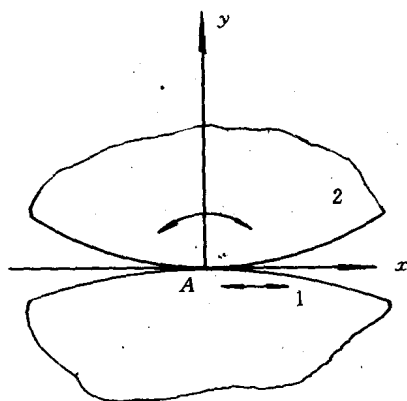


图 1-1 平面运动副(高副)

个联接既允许构件 2 有相对于构件 1 进行运动的可能性,又限制了它们之间的相对运动,这样的活动联接叫做运动副。

在平面运动副中按照两个构件所能进行的相对运动数目,可以分成高副和低副两种。

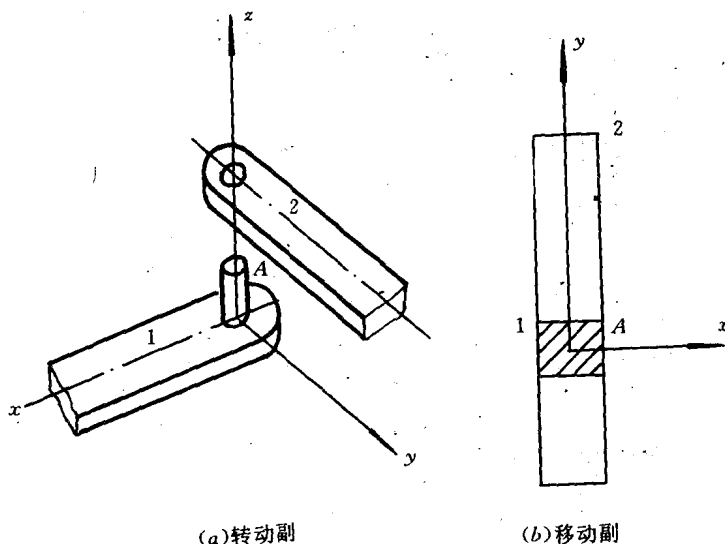


图 1-2 平面低副

高副可以允许构件间有两个相对运动,如图 1-1 所示。在不破坏 A 点接触的条件下构件 2 对构件 1 的相对瞬时运动有两个,一个是沿接触点 x 轴线方向的移动,一个是在 A 点绕垂直于图纸平面轴线 z 的旋转。显然,为了保持构件间的接触,不允许构件 2 沿 y 轴方向的移动,受到运动副的约束。由此可见,高副的性质是:允许构件间有两个独立的相对运动,即有两个自由度;提供一个约束条件。一般来讲,平面高副是线接触或者是点接触。

低副可以允许构件间有一个独立相对运动。图 1-2(a)是构件 1 和 2 在 A 处组成一个铰销。它们之间只能绕铰销轴线 z 相对转

动,限制了它们在 x, y 轴线方向的相对移动。凡是允许两个构件间进行相对转动的运动副叫做转动副。

图 1-2(b)是滑块 1 在导槽 2 中进行相对滑动,接触部分是一个平面。结构本身只允许滑块 1 在导槽轴线 y 方向的相对移动。凡是允许两个构件间进行相对移动的低副叫做移动副。

显然,在平面低副中,无论是转动副还是移动副,都只有一个独立的相对运动。因此平面低副的性质是:具有一个自由度,提供两个约束条件。一般来讲,低副中的两个构件是面接触(平面或者圆柱面)。

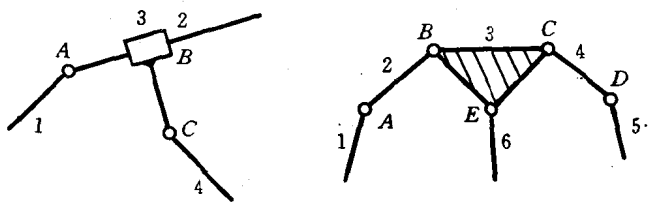
1.1.2 平面运动链及其性质

两个或者两个以上的构件通过运动副联接所组成的组合体叫做运动链。如果运动副都是平面运动副,则其组成的运动链是平面运动链。

根据运动副所组成的几何图形可以分成开式运动链和闭式运动链。

(一)开式运动链

开式运动链的特点是各个构件在平面中没有形成封闭的多边形,如图 1-3 所示。在图 1-3(a)中,构件 1 和 4 上只有一个运动副,分别是转动副 A 和 C 。在图 1-3(b)中,构件 1, 6, 5 上都只有一个运动副,它们分别是转动副 A, E, D 。



(a) 单式运动链

(b) 复式运动链

图 1-3 开式运动链

在开式运动链中,如果每个构件上的运动副数目最多只有两个则称为单式运动链,如图 1-3(a)所示。如果一个构件或者一个以上的构件有两个以上的运动副,则称为复式运动链,如图 1-3(b)中构件 3 所示。

设开式运动链的构件总数为 N ,运动副总数为 g 。在开始组成开链时,先由两个构件组成一个运动副,如图 1-3(a)中构件 1 和 2 组成运动副 A ,然后每增加一个构件就增加一个运动副。显然此时所增加的构件数目将等于运动副增加的数目。由此可见,在开式运动链中,总的构件数 N 和运动副数 g 之间具有下列关系,即

$$N = g + 1 \quad (1-1)$$

由(1-1)式可以看出,开式运动链的主要性质是:组成运动链的构件总数要比运动副总数多 1 个。

(二)闭式运动链

在闭式运动链中,每个构件上至少有两个运动副,而且组成封闭的几何图形,如图 1-4 所示。

具有一个封闭多边形的运动链称为单环闭式运动链;具有两个或者两个以上封闭多边形的,则称为多环闭式运动链,如图 1-5 所示。

在单环闭式运动链中,构件总数 N 和运动副总数 g 之间的关系为

$$N = g$$

或者 $N - g = 0 \quad (1-2)$

如果在单环运动链中,如图 1-5 的 $ABCFG$ 中,再增加一个封闭多边形 $CDEF$,所增加的运动副数为 D 和 E 两个,而所增加的构件数只有一个构件 4。此时所增加的运动副数要比增加的构件数多 1 个。现在设多环闭式运动链中有 N 个构件, g 个运动副, L 个封闭多边形。设想该运动链是在一个单环的基础上再增加 $L-1$ 个环所形成的。由前面知道,每增加一个环,则所增加的运动副数

要比增加的构件数多 1 个。现在增加了 $L-1$ 个环, 则其增加的总运动副数要比构件数多 $L-1$ 个。在第一个环中, 由 (1-2) 式可以知道运动副数应该等于构件数。因此, 在 L 个环的闭式运动链中, 其构件数 N 、运动副数 g 及环数 L 之间有

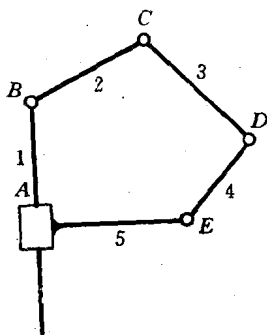


图 1-4 单环闭式运动链

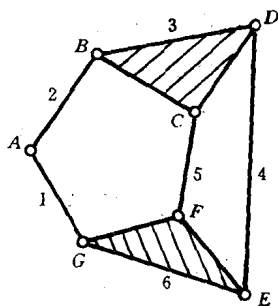


图 1-5 多环闭式运动链

$$g - N = L - 1 \quad (1-3)$$

或者 $g - N + 1 = L \quad (1-4)$

式 (1-4) 是描述了闭式运动链的一个重要性质。

§ 1-2 平面机构及其自由度

在平面运动链中, 固定一个构件, 而其余构件的运动都是确定的, 则该运动链构成了一个平面机构。图 1-6 为一平面四杆机构。它是由闭式运动链 $ABCD$ 所形成的。在该运动链中, 固定构件 1, 在构件 2 上加上一个独立的运动规律以后, 其他构件都能进行确定的运动。给予运动规律的构件叫做原动件或主动件, 由原动件所驱动的构件叫做从动件。

现在大多数常用的机构都是由闭式运动链所组成的闭链机构。但是一般常用的工业机械手中,都采用开链机构,如图 1-7 所示。一般来讲,开链机构大多数是多自由度机构。

组成机构的运动副都是低副,则称为低副机构。如果在机构中有一个或一个以上的运动副是高副,则称为高副机构,如凸轮机构和齿轮机构等。

由机械原理中知道,确定机构位置所需要的独立参数的数目是该机构的自由度数。

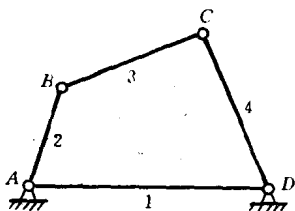


图 1-6 平面四杆机构

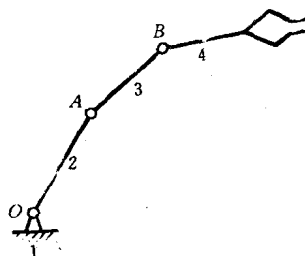


图 1-7 开链机构

可以从两方面来计算机构的自由度数。一方面是根据各个运动副所提供的约束条件数来计算。另一方面也可以根据运动副所具有的相对自由度数来计算。

设机构是由 N 个构件和 g 个运动副所组成,其中有 p_1 个低副和 p_2 个高副。机构中 $(N-1)$ 个运动构件所具有的总自由度数为 $3(N-1)$; p_1 个低副所提供的约束条件数为 $2p_1$ 个, p_2 个高副所提供的约束条件数为 p_2 个。因此机构的自由度数 F 应为

$$F = 3(N - 1) - (2p_1 + p_2) \quad (1-5)$$

我们也可以从运动副所具有的相对自由度数来计算机构的自由度 F 。设机构中第 i 个运动副的自由度数为 f_i ,所提供的约束条件为 u_i ,则第 i 个运动副有

$$f_i + u_i = 3 \quad (1-6)$$

式中 3 是平面运动副所具有总的相对自由度数。由 (1-6) 式,

得到

$$u_i = 3 - f_i \quad (1-7)$$

显然, 机构中全部运动副 g 所提供的约束条件数为

$$\sum_{i=1}^g (3 - f_i) \quad (1-8)$$

代入(1-5)式, 得到

$$F = 3(N-1) - \sum_{i=1}^g (3 - f_i) \quad (1-9)$$

化简后, 得到

$$F = 3(N - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (1-10)$$

由(1-4)式知道,

$$N - g - 1 = -L$$

代入(1-10)式, 得到用机构环数 L 计算自由度的公式

$$F = \sum_{i=1}^g f_i - 3L \quad (1-11)$$

利用上式计算多环闭链机构的自由度 F 比较方便。

现在举例来说明公式(1-11)的应用。在图 1-6 中的四杆机构中, 有一个环, 即 $L=1$, 四个转动副, 每个运动副的相对自由度数为 $f_i=1$, 由此得到机构的自由度数 F 为

$$F = 4 - 3 \times 1 = 1$$

在图 1-7 的开链机构中, 有三个转动副, 每个运动副的自由度数为, $f_i=1$, 环数为 $L=0$, 所以

$$F = 3 - 0 = 3$$

利用这种方法计算较复杂机构的自由度数时, 应当仔细分析机构中是否存在虚约束的问题。图 1-8

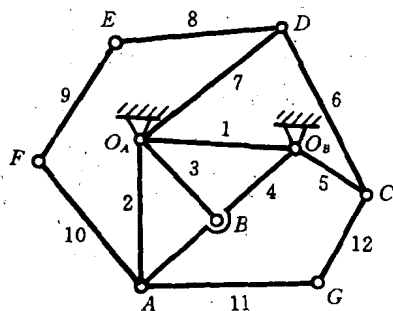


图 1-8 多环机构

为一多环机构。构件 1, 3, 4 组成三角形 $\triangle O_A B O_B$ ，是一桁架，构件 1, 2, 4 也是一个桁架，这两个桁架都只能算作一个固定件。因此机构只能算作有三个环，即 $L=3$ ，运动副总数 $g=11$ ，每个转动副的自由度数为 1，即 $f_i=1$ 。由此得到机构的自由度数为

$$F = 11 - 3 \times 3 = 2$$

§ 1-3 平面机构的组成

由机构确定运动条件知道，机构的原动件数一定要等于其自由度数。由于机架的自由度数为零，所以我们可以设想机构的自由度数集中在原动件上。由原动件所驱动的从动件组的自由度数则为零。

图 1-9(a) 为一常用的四铰销机构，其自由度数为 1，只需要一个原动件。设构件 1 为机架，构件 2 为原动件，则构件 3 和 4 及运动副 A, B, O_B 组成一个从动件组。把运动副 A 和 O_B 分别算作构件 3 和 4 上的运动副， O_A 算作原动件 2 上的运动副。这样，原动件 2 上有一个构件和一个低副，其自由度数为

$$F = 3 - 2 = 1$$

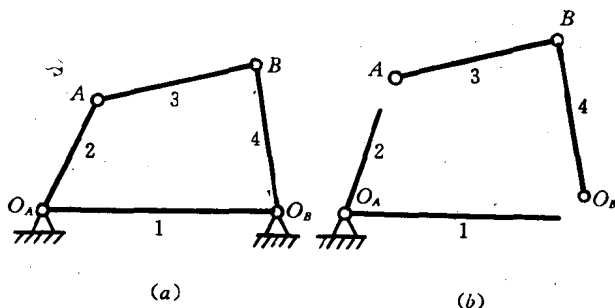


图 1-9 四铰销机构