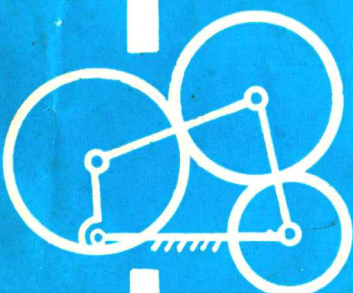


组合机构原理

ZUHEJIGOUYUANLI

叶 达 钧 编



洛 阳 工 学 院

前 言

国内在组合机构方面的研究刚起步不久；国外对组合机构的研究虽已有二十多年的历史，但至今也未见到这一方面系统化、理论化的著作。这不仅给本书的编写带来了一定的困难，还使本书中的某些观点不得不带有探讨性。

本书共分两篇。第一篇《组合机构的结构与运动学》，主要阐述组合机构组成原理并按结构分类进行运动分析和综合。第二篇《常用组合机构的分析与设计》，着重介绍了三种典型组合机构的分析与设计原理。为了适应现代工程设计计算机化的趋向，本书以解析法为主，并附有带计算程序的实例。

本书可作为高等工业学校机械类各专业的教材，也可供研究生及有关工程技术人员参考。

本书承机械原理课程教学指导小组组长，西安交通大学来虔教授及郑州工学院卢锡畴教授的仔细审阅，提出许多宝贵的修改意见，特此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，误漏欠妥之处所难免，竭诚欢迎广大读者继续对本书提出批评意见。

编 者 1985年12月

目 录

绪 言	(1)
-----	-------

第一篇 组合机构的结构与运动学

第一章 组合机构的结构分析	(3)
§ 1—1 串联式组合机构	(3)
§ 1—2 并联式组合机构	(4)
§ 1—3 反馈式组合机构	(5)
§ 1—4 迭合式组合机构	(5)
第二章 组合机构的运动分析	(12)
§ 2—1 串联式组合机构的运动分析	(12)
§ 2—2 并联式组合机构的运动分析	(16)
§ 2—3 反馈式组合机构的运动分析	(22)
§ 2—4 迭合式组合机构的运动分析	(26)
第三章 组合机构的运动综合	(29)
§ 3—1 组合机构的型综合	(29)
§ 3—2 组合机构的尺度综合	(34)

第二篇 常用组合机构的分析与设计

第四章 齿轮连杆机构	(45)
§ 4—1 概 述	(45)
§ 4—2 带停歇的齿轮四杆机构	(46)
§ 4—3 摆线齿轮连杆机构	(65)
§ 4—4 齿轮五杆机构	(70)
第五章 凸轮连杆机构	(77)
§ 5—1 概 述	(77)
§ 5—2 实现给定函数的综合	(77)
§ 5—3 实现给定轨迹的综合	(79)
第六章 齿轮凸轮机构	(83)
§ 6—1 概 述	(83)
§ 6—2 行星轮运动受控的齿轮凸轮机构	(83)
§ 6—3 系杆运动受控的齿轮凸轮机构	(93)
附录 部分实例的计算程序	(102)
主要参考文献	(116)

绪 言

在《机械原理》课程中,我们已经讨论了连杆机构、凸轮机构、齿轮机构和间歇机构等常用机构。这些大多是由最少构件组成的机构,我们称之为基本机构。各种基本机构有它们自己独特的运动规律和动力特性。随着生产过程机械化、自动化的发展,需要机器实现的运动规律愈来愈多样化,需要机器具有的动力性能也愈来愈高。如果生产中仅仅采用这些基本机构,一般是难以实现这些要求的。这就不得不去寻求新机构以满足生产过程所提出的多种多样的运动要求和更为理想的动力性能要求。

把两个或两个以上的基本机构按一定方式组合起来构成一个复合的机构,是发展新机构的重要途径之一。这种复合的机构,称为组合机构,构成组合机构的各基本机构称为组合机构的子机构。

对于组合机构目前还没有一个统一的看法。有人认为:“组合机构是用一种机构来约束和影响另一个多自由度机构的封闭式传动机构或几种基本机构互相协调和配合的传动系统”。也有人认为:“组合机构并不是几个基本机构的一般串联,而是利用附加机构去约束另一个多活动度执行机构某些主动件的运动而组成的封闭形式的传动机构”。这两种看法都有值得商榷之处。前者没有强调组合机构仍是一个机构,以致把它与机构的组合混为一谈,若按此办理,车床、滚齿机……都将属于组合机构,这显然是不妥当的。后者把组合机构局限于封闭式传动机构,使组合机构的研究范围过于狭小,当然也是不合适的。

那么,什么才是组合机构的确切含义呢?重要的是要划清两条界线。

(1) 要把组合机构与机构的组合区分开来。组合机构虽然由若干个子机构所组成,但它仍然是一个机构,而机构的组合是几个机构相互协调配合的传动系统,在概念上应属于整机的范畴,因此两者不能混为一谈。

(2) 要把组合机构的研究范围和研究重点区分开来。组合机构的研究重点可以是封闭式组合机构,但是决不能因之而排斥其他组合机构的研究,据统计,目前串联式组合机构约占全部组合机构的30%,它对旧设备的技术改造常常是简便而行之有效的。

关于组合机构的分类,目前也有几种不同的分法。有人按组成组合机构的子机构名称分,将它分为:齿轮-连杆机构,齿轮-凸轮机构,凸轮-连杆机构等;有人按子机构间运动传递路线分,将它分为:串联式、并联式、反馈式和迭合式等。现在见到的各种教材大多是按前一种方法分类的,他们对几种常用组合机构讨论得比较深入,有的已有专门的电算程序可供分析和设计使用,但它们都缺乏对组合机构全面、整体的说明,因此使读者对各种组合机构产生毫无联系之感。后一种分类方法能对组合机构的选型、分析和综合开拓一条统一的途径,便于初学者入门,但完全按这种分类法来阐述,也会限制对各种常用组合机构的深入讨论。同时,由于它把同一机构分别放在结构分析、运动分析和

运动综合三处断续地进行讨论，显得结构松散，给人以支离破碎之感。

为了扬两者之长而避两者之短，本书分设两篇。第一篇《组合机构的结构与运动学》，是以第二种分类法为基础，着重阐述组合机构的组成原理以及按结构框图对各种组合机构进行运动分析和运动综合的一般规律。第二篇《常用组合机构的分析与设计》，将以第一种分类法作为基础，对几种常用的组合机构展开比较深入的讨论，从而阐明对具体的组合机构进行分析和综合时的一些特殊规律。

组合机构的主要功能可以归结为以下几个方面〔10〕：

（1）实现给定的输出函数。基本作用和四连杆机构相近，但性能比较好，能更多地顺从设计者的意愿；

（2）生成路径和运动。前者指点按预定路径运动，后者指物体按一定要求完成某项运动（既按一定路径，又得按一定动作），这是单一基本机构所难以圆满完成的；

（3）实现间歇与反向。这是指在输出运动的一个周期中有间歇与反向，这是生产高度发展后必然的要求，组合机构的最主要功能也在这里。

（4）避免柔性冲击。机器的运转需要平稳，这在高速的周期性停歇机构中尤为重要。刚性冲击或柔性冲击在单一的基本机构中有时是不可避免的，如单一的槽轮机构。但在组合机构中，则能做到既无刚性冲击，也无柔性冲击。

（5）实现大摆角输出。对一个摆动输出构件来讲，在基本机构中摆角往往受到限制，但组合机构却能轻易地完成大摆角输出，而避免传动角过小或柔性冲击过大等等不利情况。

由此可见，组合机构的应用范围将是十分广泛的。据统计，在现有的二千多种机构中，组合机构已约占30%。

一般说来，组合机构的构件数和运动副数较多，结构比较复杂，这是它的一个缺点。但是，组合机构的设计和制造在技术上的难度并不与结构的复杂程度成正比。这是因为组合机构可以分解为若干个比较简单的子结构，而子机构都是一些常用的基本机构，它们的性能、特点与适用范围是人们比较熟悉的，因而组合机构的设计和制造较之于创造一个全新的机构在技术上的难度是比较小的。此外，由于组合机构的可靠性也比一个全新的机构要好，这就使组合机构在各种专用机械的应用中具有较大的竞争能力。因为专用机械的制造量往往较少，很难有足够的反复试制与改进的机会，因而希望尽量避免采用不成熟的设计方案。

自从党的十一届三中全会以后，我国的工农业生产过程也正在加速地向机械化、自动化方向发展，机械工业要为轻工业服务，产品设计由仿制到了独立设计阶段，要求产品更新换代的呼声越来越高，对生产设备迫切需要进行挖潜改造等等，此种形势，向机械设计人员提出了更高的要求，而研究机构组合规律以及组合机构的分析和综合，对提高机构设计水平，创制新的机构，以及改进现有不合理机构等都有着重要的意义。

第一篇 组合机构的结构与运动学

第一章 组合机构的结构分析

组合机构的结构分析就是要研究组合机构的组成原理，其具体内容是，根据给定的组合机构简图和输入、输出构件，找出各子机构及其相互之间的运动传递路线，用框图的形式它的结构表示出来，然后根据结构框图判定组合机构的类型。

§ 1-1 串联式组合机构

若干个子机构顺序连接，每一个前置机构的输出运动是其后续机构的输入，按这种方式组合而成的机构，称为串联式组合机构。

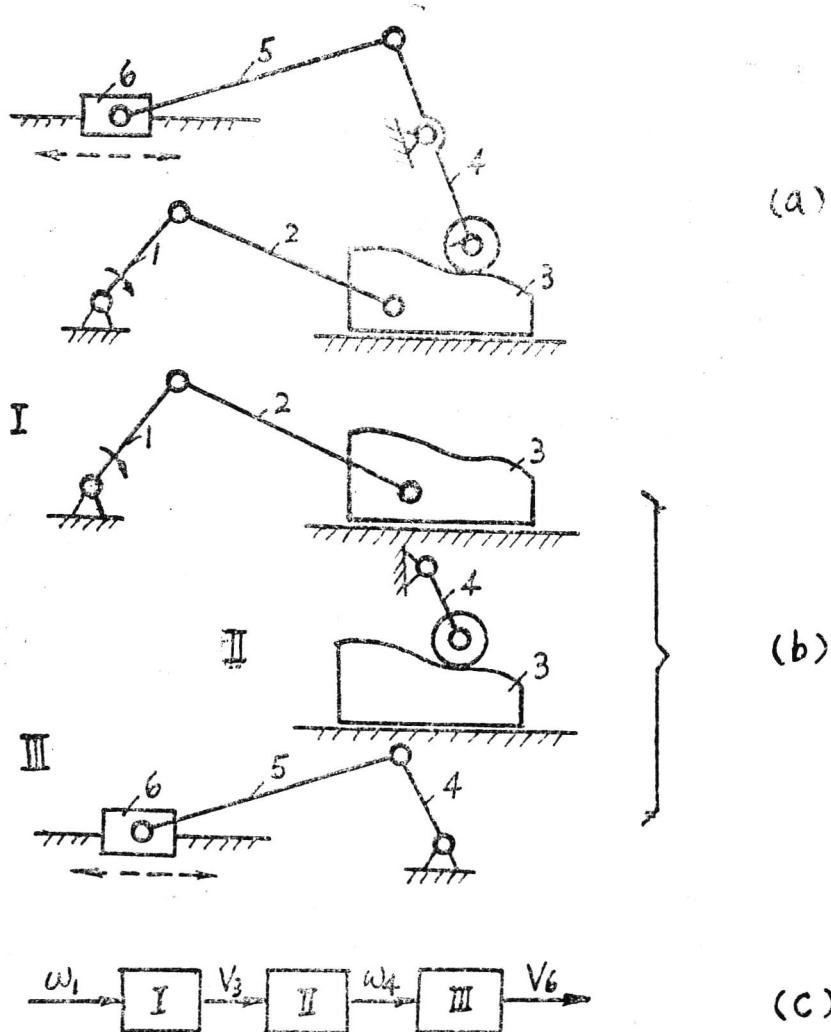
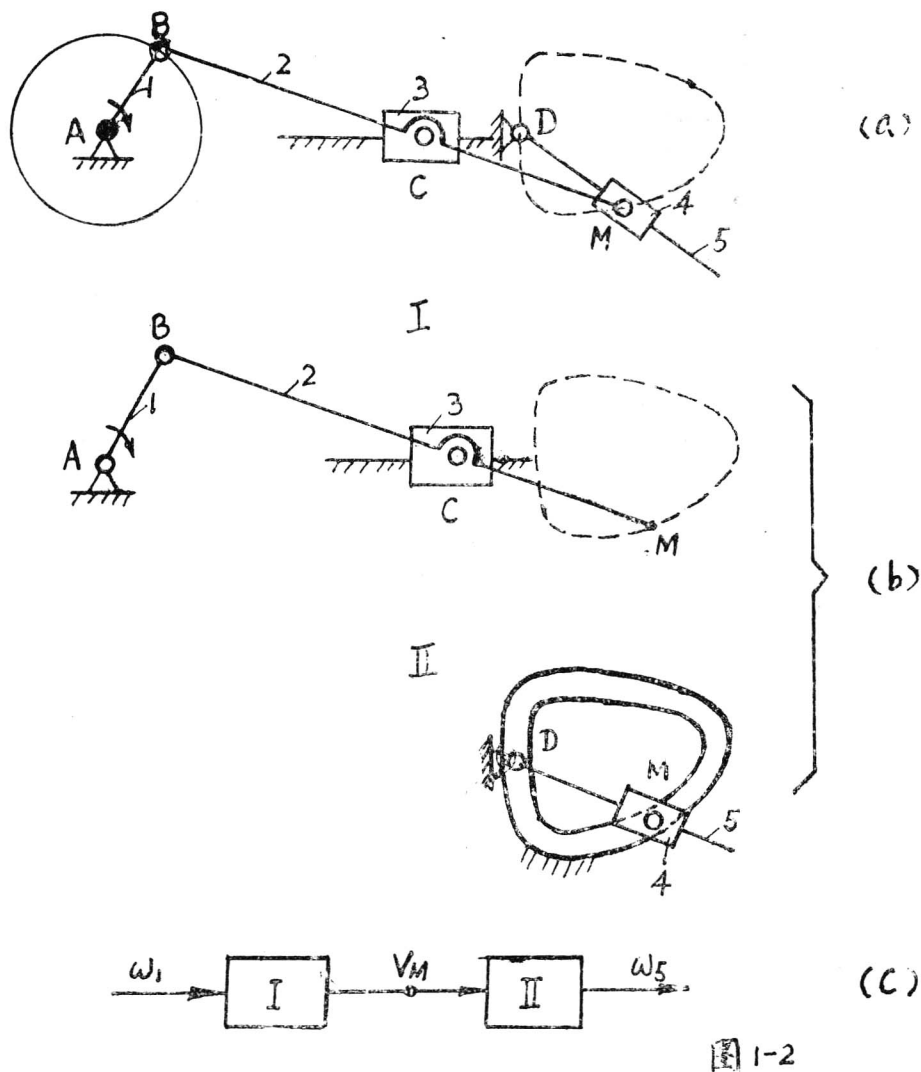


图 1-1

例 1—1 图 1—1 a 为冲压机床中的串联式组合机构。主动曲柄 1 作等速转动，从动滑块 6 以要求的运动规律运动。它是由三个单自由度子机构 I、II、III 串联而成（图 1—1 b）。其结构框图如图 1—1 c 所示。

例 1—2 图 1—2 a 为织布机的开口机构，要求构件 5 转动 180° 后停歇。曲柄滑块机构 I 的曲柄 1 输入等速转动（图 1—2 b），物件 2 在 M 点处和滑块 4 相连，M 点走图示



虚线轨迹时，带动机构 II 的导杆 5 实现所要求的运动。机构 II 可看作一个固定凸轮机构，摆杆的转动中心 D 在轨迹曲线的直线段上。其结构框图如图 1—2 c 所示。

§ 1—2 并联式组合结构

以一个多自由度机构为基础机构，基础机构的各输入构件与一个或几个单自由度附加机构的输出构件相连，而附加机构的输入构件的运动并非来自基础机构，按这种方式组合而成的机构，称为并联式组合结构。

例 1—3 图 1—3a 所示为铁板传送机构。它是由差动轮系Ⅲ（加法机构）为基础机构，齿轮机构Ⅰ和铰链四杆机构Ⅱ为附加机构组成（图 1—3b）。两个附加机构有公共的输入构件 1，组合机构的输出构件为送料辊 7。其结构框图如图 1—3c 所示。

例 1—4 图 1—4a 所示为作平方运算的计算机构。它是以摩擦式乘法机构Ⅲ为基础机构，齿轮-螺旋机构Ⅰ为附加机构组成（图 1—4b）。附加机构将 ϕ_1 与 S_2 同时输入乘法机构，而 S_2 又与 ϕ_1 成正比，因此该机构的输出函数 $\psi_3 = K\phi_1^2$ 。其结构框图如图 1—4c 所示。

例 1—5 图 1—5a 为 M 点实现给定轨迹“R”的联动凸轮机构。它是以矢量和机构Ⅲ为基础机构，凸轮机构Ⅰ、Ⅱ为附加机构组成（图 1—5b）。其结构框图如图 1—5c 所示。

§ 1—3 反馈式组合机构

以一个多自由度机构作为基础机构，基础机构的输出运动通过一个或几个单自由度的附加机构回授给基础机构的一个输入构件，按这种方式组合而成的机构，称为反馈式组合机构。

例 1—6 图 1—6a 所示为误差校正机构。它以两自由度的蜗杆蜗轮机构Ⅰ为基础机构，凸机构Ⅱ为附加机构组成（图 1—6b）。组合机构的输入构件为蜗杆 1，输出构件为蜗轮 2，蜗轮 2 与凸轮 3 固连，通过推杆 4 使蜗杆作轴向移动，蜗轮产生附加转动，使误差得到校正。机构的结构框图如图 1—6c 所示。

例 1—7 图 1—7a 是一种获得近似等速且具一有急回作用的齿轮-连杆机构。它以差动轮系Ⅲ为基础机构，以齿轮—导杆机构Ⅰ—Ⅱ为附加机构组成（图 1—7b）。组合机构的输入构件是齿轮 1，输出构件是齿轮 3，齿轮 3 与齿轮 4 固连，将运动回授给基础机构的系杆 H。其结构框图如图 1—7c 所示。若以构件 3 为输入构件。则机构的结构框图如图 1—7d 所示。此时，该机构变为并联式组合机构。因此，在进行组合机构的结构分析时，应特别注意其输入构件与输出构件。

§ 1—4 迭合式组合机构

将一个单自由度的子机构安装在另一个单自由度子机构的运动物件上，两个子机构形成运载与被运载的关系，按这种方式组合而成的机构，称为迭合式组合机构。



图 1-4

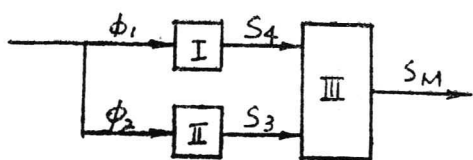
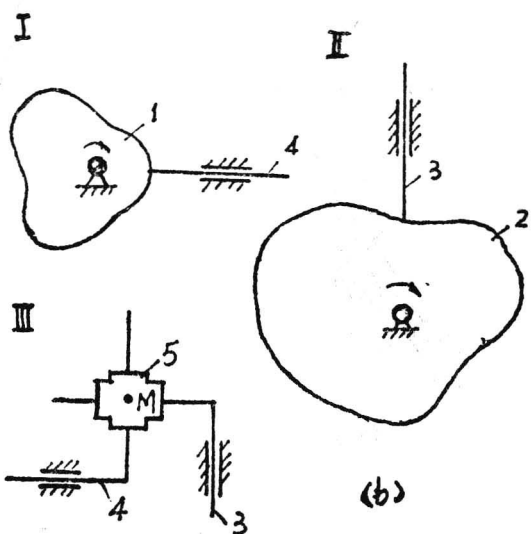
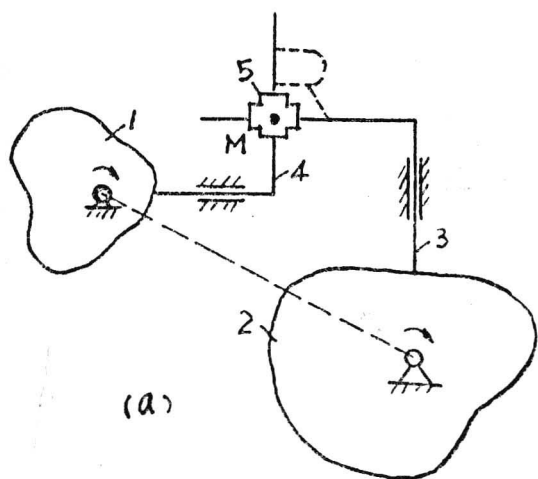


图1-5

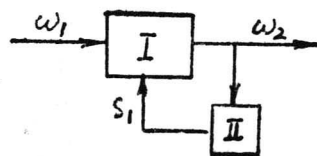
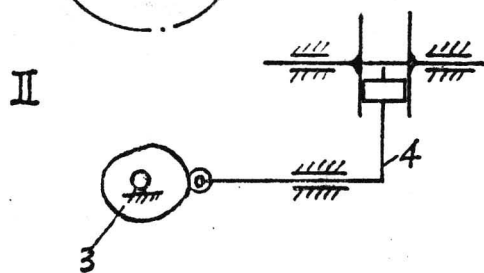
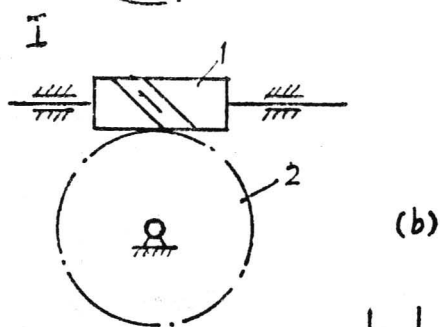
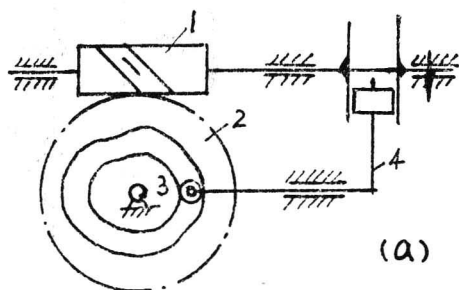
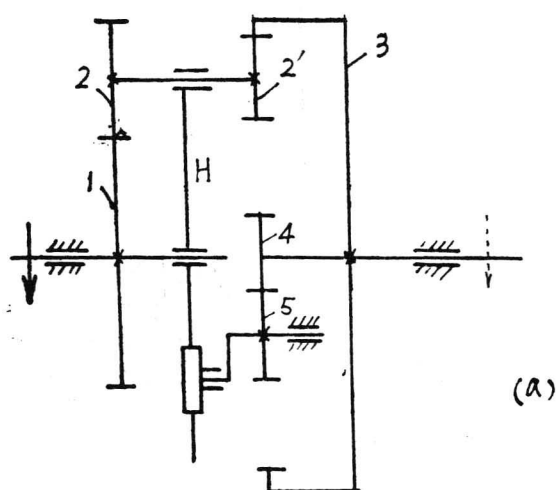
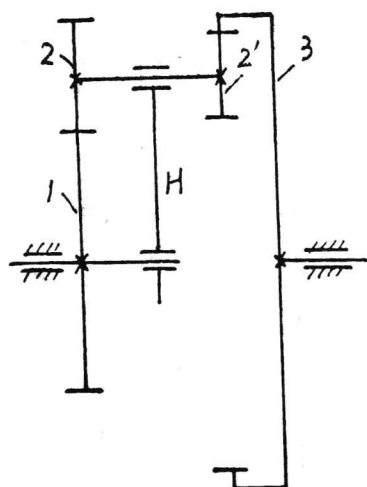


图1-6

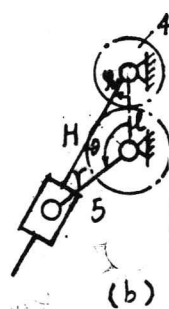


(a)

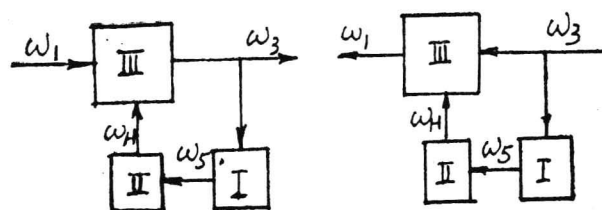
III



4, 5 为 I
导杆机构为 II



(b)



(c)

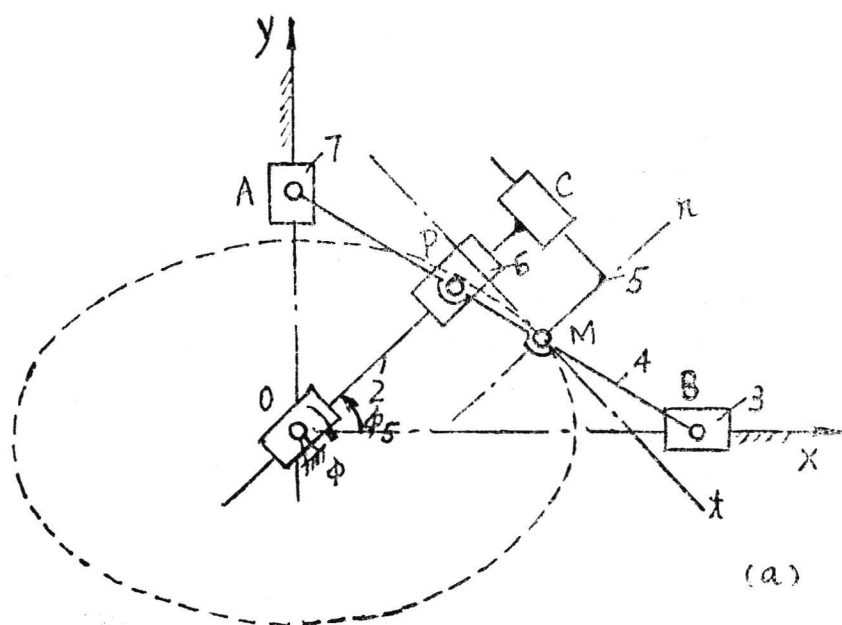
(d)

图 1-7

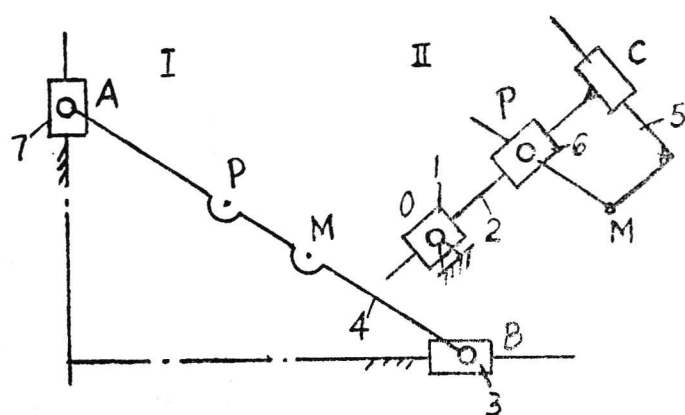
例 1—8 图 1—8a 为加工椭圆齿轮的机构。双滑块机构 I 是其运载机构，导杆机构 II 是其被运载机构（图 1—8b）。当 P、M 两点满足 $AP = MB$ 时，PC 始终通过 O 点，摇块 1 成为虚约束，因此被运载机构的自由度为 1。机构的输入构件是构件 1，输出构件是构件 5，其结构框图如图 1—8c 所示。

例 1—9 图 1—9a 为电动马游艺装置。运载机构是定轴转动的二杆机构 I，被运载机构是导杆机构 II（图 1—9b），两机构有各自的主动件带动。机构 II 实现马（M 点）的忽上忽下及马（构件 CM）的俯仰动作，机构 I 实现马沿圆周前进的动作。这三个运动合成马的飞奔向前的形象。其结构框如图 1—9c 所示。

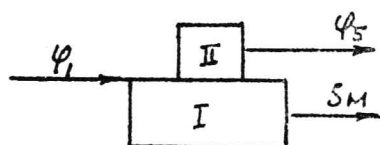
例 1—10 图 1—10a 为用于电风扇上的自动摇摆机构。该机构以双摇杆机构 I 为运载机构，以蜗轮蜗杆机构 II 为被运载机构（图 1—10b）。当装在摇杆上的电机带动风扇转动时，通过蜗杆蜗轮带动双摇杆机构的连杆作整周转动，从而使两摇杆来回摆动，即带动风扇来回摇摆。其框图如图 1—10c 所示。



(a)

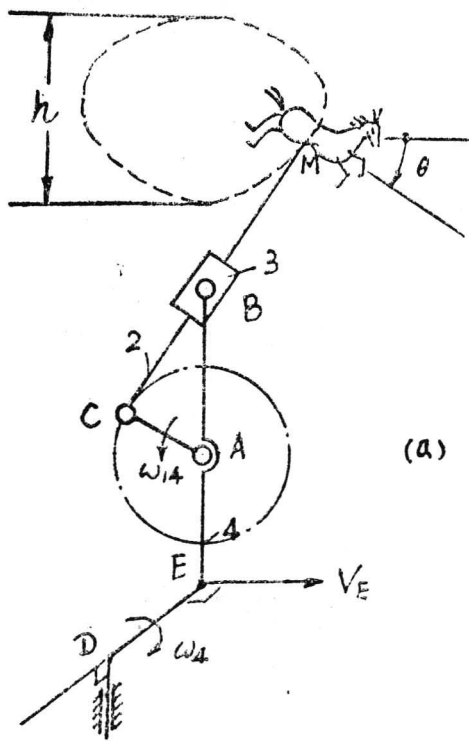


(b)

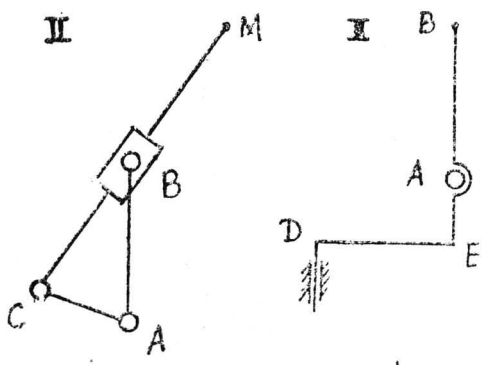


(c)

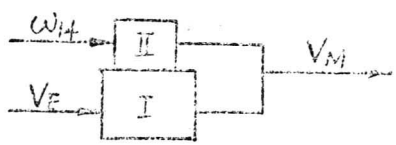
图 1-8



(a)

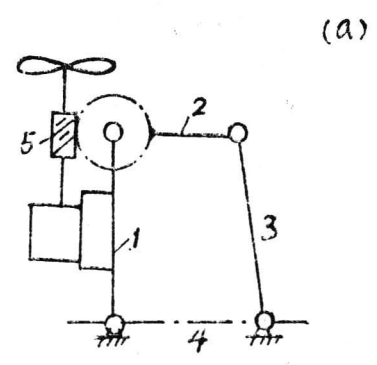


(b)

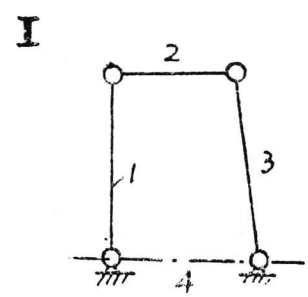


(c)

图 1-9



(a)



(b)

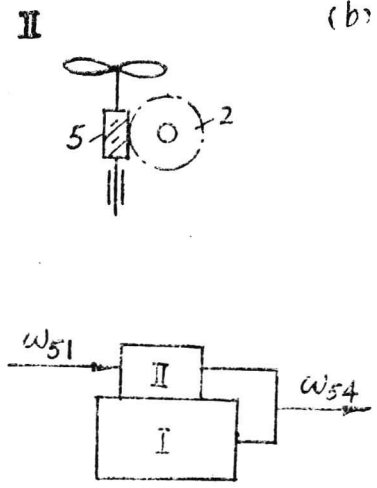


图 1-10

(c)

第二章 组合机构的运动分析

组合机构的运动分析就是要按给定的主动件运动规律求解从动件的轨迹、位移、速度和加速度。运动分析的步骤是先进行结构分析，了解运动传递路线，画出结构框图，确定机构的类型，然后按其相应的步骤进行求解。

运动分析的方法有图解法、解析法和实验法。

§ 2—1 串联式组合机构的运动分析

在串联式组合机构中，主动件的运动是通过各子机构依次传递给从动件的。所以在进行其运动分析时，可以从已知主动件运动规律的第一个子机构开始，用一个一个解决的办法，求得最后一个子机构的输出运动。本节着重讨论前置机构的输出构件与后续机构的输入构件刚性固结的情况，至于前置机构以轨迹点与后续机构相连的情况将在第四章§ 4—3 中予以说明。

当前置机构的输出构件与后续机构的输入构件刚性固连时，组合机构的位移关系式是各子机构的位移函数的复合函数。

若用 f_1 、 f_2 、 f_3 表示各个子机构，同时也表示它们各自的变换关系，则这种串联组合机构可进一步用框图 2—1 表示之。其中子机构 f_1 将位移 ϕ_0 变换为 ϕ_1 ， $\phi_1 = f_1(\phi_0)$ ；

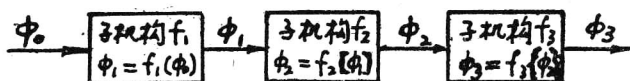


图 2-1

子机构 f_2 又将位移 ϕ_1 变换为 ϕ_2 ， $\phi_2 = f_2[\phi_1]$ ；最后子机构 f_3 将位移 ϕ_2 变换为 ϕ_3 ， $\phi_3 = f_3[\phi_2]$ 。所以该组合机构的位移关系式是：

$\phi_3 = f_3\{f_2[f_1(\phi_0)]\}$ （从左式不难导出该组合机构的总传动比 i_{03} 为：

$$i_{03} = i_{01} \cdot i_{12} \cdot i_{23}$$

式中 i_{01} 、 i_{12} 、 i_{23} 为各子机构的传动比）。

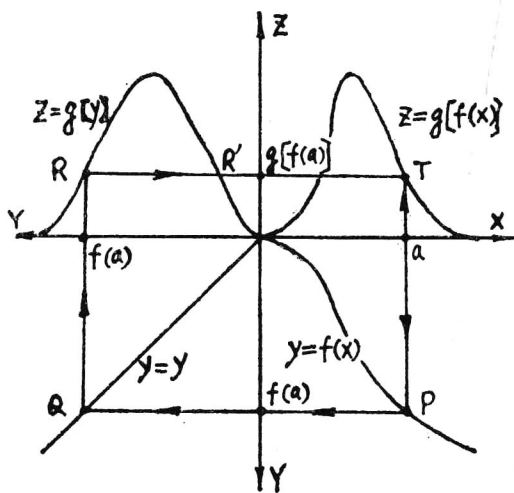


图 2-2

下面着重介绍复合函数问题的图解方法。

1、用平面直角坐标系的第 I、II、IV 三个象限作 $Z = g[f(x)]$, $Z = g[y]$, $y = f(x)$ 三个函数 (图 2—2), 第 III 象限除 $y = y$ 直线外没有意义。各轴的坐标零点可在轴上按需要选取, 一般可将各参量定义区间的下限取在直角坐标系的原点位置。对此, 图中均未表示, 以免有失清晰。

设已知 $Z = g[y]$ 及 $y = f(x)$ 两个简单函数, 其曲线表示于第 II 及第 IV 象限区域, 作复合函数 $Z = g[f(x)]$ 的步骤如下: 对于 x 轴上任选的一点 a , 作纵向直线 $x = a$, 与曲线 $y = f(x)$ 交于 P 点。从 P 点作水平直线 $y = f(a)$, 与直线 $y = y$ 交于 Q 点。从 Q 点作纵向直线 $y = f(a)$, 与曲线 $Z = g[y]$ 交于 R 点。最后从 R 点作直线 $Z = g[f(a)]$, 与直线 $x = a$ 相交, 得到曲线 $Z = g[f(x)]$ 上的一个点 T 。如此不断重复, 可得曲线上充分多的点, 光滑连接之, 即得所求的复合函数曲线。

2、在许多实际机构设计过程中, 另一类作图问题更为重要, 就是由已知一子机构的位移曲线, 及期望串联组合机构应有的位移曲线, 求作另一个子机构的位移曲线。

这类作图问题, 用图 2—2 中的符号来叙述, 就是由已知一个简单函数 $Z = y[y]$ 及复合函数 $Z = g[f(x)]$ 的曲线, 求作 $y = f(x)$ 的曲线。这在概念上比前一类问题复杂些。求作的曲线 $y = f(x)$ 是函数 $Z = g[f(x)]$ 与反函数 $y = g^{-1}[Z]$ 的复合。

$$y = g^{-1}[g[f(x)]]$$

其中函数 g 与反函数 g^{-1} 抵消后, 即得 $y = f(x)$ 。所以这里有一个从 g 求 g^{-1} 的问题。

然而, 这类问题的作图方法与前一类问题大同小异, 只是步骤略有差别而已。因此只需简单说明如下 (见图 2—2): 从某一 $x = a$ 值, 确定点 T , 然后从 T 出发, 按照前述问题相反的步骤, 依次确定 R 及 Q 点, 最后得到所求 $y = f(x)$ 曲线上的点 P 。

在这过程中, 从水平定线 TR 确定纵向直线 RQ 的步骤就是解反函数 $y = g^{-1}[Z]$ 。每一条水平线与 $Z = g[y]$ 有两个交点 R 及 R' , 可见此例反函数非单值。反函数非单值时, 作图结果不是唯一的。这时, 对于任选的第一个 $x = a$ 值, 可按照予想的串接相位关系取一个点 R 或 R' 作图。对于其他 x 值, 则应按照函数的连续性合理选取相应的点。在实际工作中, 一般情况下极易判断两个解中何者比较优越。当已知简单函数的曲线有对称性时, 其反函数即使非单值, 作图结果也是两解重合, 不存在选择问题。

作图问题还有一类提法, 已知 $Z = g[f(x)]$ 及 $y = f(x)$, 求解 $Z = g[y]$, 方法可以类推, 说明从略。

3、在实际工作中, 这种作图方法可以简化。在图 2—2 中 $PQRT$ 是一个跨越四个象限的长方形, 在图 2—3 中长方形作图完全在一个象限内进行。三条曲线 $Z = g[y]$ 、 $y = f(x)$ 、 $Z = g[f(x)]$ 和一条直线 $y = y$ 约被叠置于一个象限区域内, 各坐标轴在图的各边沿处标出。作图过程中所作各水平与纵向直线, 以及点 P 、 Q 、 R 、 T 等, 亦均落于相对的位置。图形叠置后, 作图时不必考虑各变量的变换关系, 可按如下概念求解。

座标轴叠置后, 横坐标轴不仅是 x 轴, 也是 y 轴, 故直线 $y = x$ 与 $y = y$ 重合。把 $y = x$ 及 $y = f(x)$ 两条作为一组, 它们与任一水平线有两个交点 A 及 B 。把曲线 $y = f(x)$ 上的 B 点看作是直线 $y = x$ 上的 A 点横向移动一个距离 AB 的结果。图上箭头表示移动方向 (如 A 至

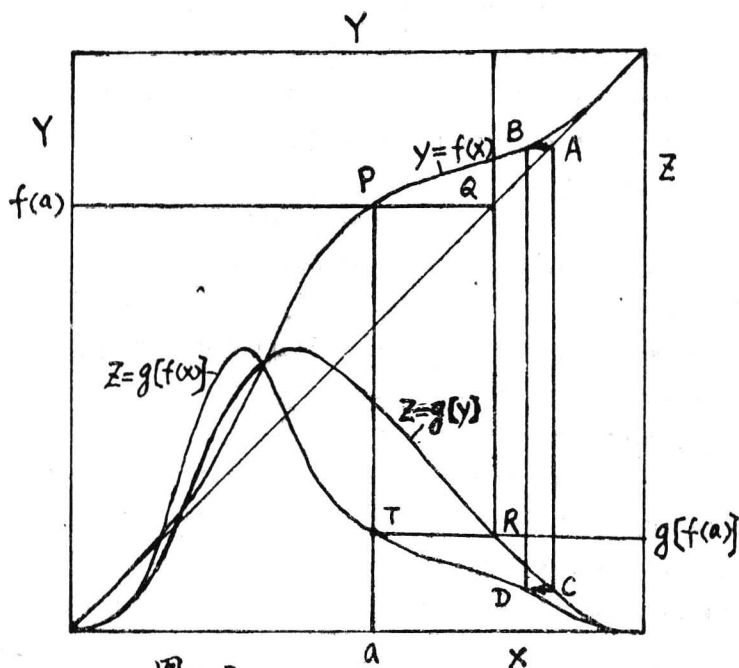


图 2-3

B)。曲线上每个点都如此对待，就可以把整个曲线 $y=f(x)$ 看作是直线 $y=x$ 横向移动变形的结果。与此相似，把曲线 $Z=g[y]$ 及 $Z=g[f(x)]$ 作为一组， $Z=g[f(x)]$ 曲线上的点D可以看作是 $Z=g[y]$ 线上的点C按 $\overrightarrow{DC}$ 箭头方向横向移动的结果。注意，这两组曲线相应点组A、B与C、D的移动距离是相同的。

作图求解时，不论问题如何提法， $y=x$ 直线总是已知的，其余三条曲线有两条已知，利用 $\overline{AB}=\overline{CD}$ 的关系，通过点的移动确定未知的点位就是很容易的了。

为了清楚起见，分别就求解前置机构、后续机构及串联组合机构时的三种不同情况，将作图时点的移动关系罗列如下：

已知函数	求解函数	点的移动	移动距离
$\begin{cases} z=g[y] \\ z=g[f(x)] \end{cases}$	$y=f(x)$ (前置机构)	$A \rightarrow B$	$\overline{AB} = \overline{CD}$
$\begin{cases} y=f(x) \\ z=g[f(x)] \end{cases}$	$z=g[y]$ (后续机构)	$D \rightarrow C$	$\overline{CD} = \overline{AB}$
$\begin{cases} z=g[y] \\ y=f(x) \end{cases}$	$z=g[f(x)]$ (串联组合机构)	$C \rightarrow D$	$\overline{CD} = \overline{AB}$

4、最后，说明一下各座标轴座标尺寸作图比例的选择。复合函数作图，一般有三个变量 x 、 y 、 z 。每个变量的定义区间在坐标轴上表现为一个线段。适当选择各轴的作图比例，可以使各变量的定义区间线段长度相等，从而使整个作图区域成为一个正方形。变量定义区间这样归一化后，各曲线之间的关系比较清楚，但作图时比例计算往