

编著

西安石油学院

大连理工大学

成都科技大学

吉林工业大学

合肥工业大学

上海机械学院

机构设计

JIGOUSHEJI

主编

傅则绍

出版

石油大学出版社



SHIYODAXUECHUBANSHE

机 构 计

傅则绍 主编

西安石油学院
大连理工大学
成都科技大学
吉林工业大学
合肥工业大学
上海机械学院

编著

石油大学出版社

鲁新登字10号

内 容 提 要

本书阐述机构的设计理论与方法。全书分八章：绪论、平面连杆机构、空间连杆机构、机器人机构、高副机构设计的理论基础、凸轮机构、齿轮机构、组合机构及变异机构。

本书可作为高等院校机械设计及制造专业的专业课教材、机械类专业本科高年级学生及研究生的必修或选修课教材，也可作为科技人员及高等工科院校师生的参考书。

机 构 设 计

傅则绍 主编

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

新华书店发行

山东电子工业印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 11.25印张 300千字

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7-5636-0390-5/TH·11

定价：11.50元

前 言

本书是在《机构设计学》的基础上重新编写的。《机构设计学》出版于1988年,经过三年的使用之后,我们广泛地征求了各使用院校的意见,并遵照这些院校的意见,进行了修编工作。

在这次编写中,我们根据本课程在教学计划中的性质、作用与任务,力求正确地反映本课程的教学要求。本课程是《机械原理》的后续课与提高课,在《机械原理》的基础上从深度和广度两方面进行了必要的开拓。它的主要任务是培养学生掌握机构设计的理论与方法,开阔设计的思路,提高机构设计的能力。作为教材,不仅要吸收国内外的新材料,反映编著者的科研成果,使教材内容新颖、具有特色,而且也要注意反映编著者的教学经验,考虑学生的实际水平,深入浅出,使教材富于启发性,便于教,便于自学。因此,在这次编写中,我们在内容上作了必要的调整,删去一些繁杂过深的理论,补充了应用实例,注重实用,并将书名改为《机构设计》。同时考虑到各校授课学时不等,有的学校由于学时限制,仅选讲书中部分章节。为此,在编写时既注意到各章的内在联系,又注意保持各章的独立,俾使在选讲时,不致发生前后脱节现象。本书按60课时编写,各校可根据具体情况选讲,这并不影响各章之间的衔接。本书在各章(除绪论外)的尾末,都附有一定数量的习题,以供教学中选用。

参加本书编著的有:西安石油学院傅则绍(一、五章);大连理工大学肖大准(二章);成都科技大学张眉、徐礼矩(三、四章);吉林工业大学胡秉辰(六章);合肥工业大学王厚宽(七章)和上海机械学院赵松年(八章)。由傅则绍担任主编。

本书承国家教委机械原理课程教学指导小组委员,西北工业

大学陈作模和石油大学卢子馨两位先生审阅，提出了很多宝贵意见，并参加了修改工作，特向他们表示诚挚的谢意。

由于水平所限，书中漏误欠妥之处在所难免，恳切希望有关教师和读者批评指正。

作 者

一九九三年二月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 本课程研究的对象、内容和方法	(1)
§ 1-2 学习本课程的目的	(4)
第二章 平面连杆机构	(5)
§ 2-1 概述	(5)
§ 2-2 复数的基本知识	(10)
§ 2-3 运动分析的一般方法	(15)
§ 2-4 平面四杆机构的精确点综合	(20)
§ 2-5 平面多杆机构的精确点综合	(45)
§ 2-6 平面连杆机构的近似综合	(48)
§ 2-7 曲率分析及其在连杆机构综合中的应用	(61)
习题	(76)
第三章 空间连杆机构	(83)
§ 3-1 概述	(83)
§ 3-2 空间连杆机构的结构分析	(88)
§ 3-3 坐标变换与方向余弦矩阵基础	(97)
§ 3-4 空间连杆机构的位移分析	(108)
§ 3-5 空间连杆机构的综合	(123)
习题	(132)
第四章 机器人机构	(139)
§ 4-1 概述	(139)
§ 4-2 机器人位置和姿态分析	(141)
§ 4-3 机器人间接位置问题的求解	(158)
习题	(172)

第五章 高副机构设计的理论基础	(177)
§ 5-1 瞬心线的形成及其性质	(177)
§ 5-2 瞬心线机构的设计	(180)
§ 5-3 空间相对运动	(191)
§ 5-4 两构件相对运动的螺旋轴	(194)
§ 5-5 瞬轴面机构和节面机构	(197)
§ 5-6 共轭曲线的形成及其性质	(200)
§ 5-7 共轭曲线机构的设计	(202)
§ 5-8 空间共轭曲面机构的设计	(212)
习题	(216)
第六章 凸轮机构	(218)
§ 6-1 从动件运动规律及其选择	(218)
§ 6-2 盘状凸轮廓线的设计	(229)
§ 6-3 盘状凸轮机构基本尺寸的确定	(242)
§ 6-4 凸轮机构力分析及按效率确定凸轮机构的基本 尺寸	(251)
§ 6-5 圆柱凸轮机构的设计	(257)
§ 6-6 高速凸轮机构	(262)
习题	(271)
第七章 齿轮机构	(273)
§ 7-1 周转轮系的几种基本型式	(273)
§ 7-2 周转轮系的力矩计算和功率流	(275)
§ 7-3 封闭式周转轮系中的功率流	(281)
§ 7-4 周转轮系的效率	(287)
§ 7-5 渐开线少齿差行星传动	(291)
§ 7-6 链条少齿差行星传动	(299)
§ 7-7 行星变速器	(306)
习题	(318)

第八章 组合机构及变异机构	(321)
§ 8-1 概述	(321)
§ 8-2 组合机构的组合方式	(321)
§ 8-3 组合机构的运动分析与综合	(326)
§ 8-4 变异机构概述	(342)
习题	(347)
主要参考文献	(349)

第一章 绪 论

§ 1-1 本课程研究的对象、内容和方法

本课程是在机械原理课程的基础上,从深度和广度两方面进行了必要的开拓,是机械原理的后续课和提高课。

解放之后,随着机械工业的日益发展和教学改革深入,机械原理课的内容也日臻完善。从解放初期的机械原理教材中可以看出,当时机械原理课内容充其量只不过是简单的机构学。经过解放后40多年的变革,今天的机械原理课程,除了有较为充实的机构学内容外,还有机械动力学和优化设计等方面的内容。它所研究的不仅仅是机构的分析与综合,还考虑到整个机械传动系统的综合、机构的选型以及机械优化设计等一系列问题。但机械原理毕竟是一门技术基础课,它的任务在于使学生掌握一些机械学的基本理论、基本知识和基本技能,所以当前机械原理课程所介绍的内容,虽有一定的广度,但仍属于“三基”知识。按照国家教育委员会1987年批准的“机械原理课程教学基本要求”的规定,机械原理课内的总学时为65至80学时。在这样的授课学时内,要兼顾到课程的深度与广度两方面是比较困难的。同时机械原理的授课时间一般都安排在第三学期、第四学期(或第五学期)。这个时期学生还处在低年级阶段,有许多课程还没有学到,知识还很不全面,因此很难把机械原理中某些内容讲深讲透。基于上述原因,机械原理课程的内容只能在广度方面进行开拓,而在深度方面却受到制约。但这对机械设计与制造专业的学生来说,仅仅具备机械原理课程所提供的机械基础知识,显然是不够的。

在英美和日本等国家中，有些学校将机械原理课程分段设课，分为“初级”和“高级”两段。初级课程与我国当前的机械原理有相似之处，着重于“三基”，着重于广度的开拓，它作为机械系学生的必修课和外系学生的选修课，安排在低年级学习。高级课程则着重于深度的挖掘，涉及到该领域的先进水平，安排在高年级学习。

在我国机械设计与制造专业的教学规划中，有关机械原理的高级课程是分科设立的。如机械优化设计、机械动力学和机构设计等都是分别单独设课的。

顾名思义，机构设计课程研究的对象是机构。

关于机构至今还没有一个确切的、为大家所公认的定义。18世纪中叶，蒸汽机的发明，促进欧洲的产业革命。尔后，涌现出大批的机构，这些机构的构件一般都是刚体，于是机构被定义为：“机构是用来把一个或多个刚体的运动，变换成其他刚体所需运动的刚性系统。”因此，机构是刚性构件组合体的概念沿袭至今。但由于科学技术的发展，近年来液体、气体、光、电等都参与了运动的变换，因而出现了液压机构、气动机构、光电机构以及光、机、电、气、液体等组合的机构。现代的机构已超出了刚体的范畴，而不能再认为机构就是刚性构件的组合体了。

变换运动是机构的特征，没有运动变换的装置就不能称为机构。为了与液压机构、气动机构和光电机构等相区别，我们将刚体构件组成的运动变换系统称为刚体机构。刚体机构有其固有的优点，如传动准确可靠等等，因而在目前还很难被其他类型的机构所代替。在现代机械传动中，刚体机构还占主导地位，所以，本课程所研究的机构是刚性机构（以后简称为机构）。

本课程研究的内容就是机械原理中机械分析与综合的部分，而从深度和广度上加以开拓。具体地说，本课程所研究的内容可以分为两部分：

（1）常用基本机构的分析与综合 如连杆机构、瞬心线机

构、共轭曲线机构、凸轮机构及其他常用传动机构的分析与综合。

(2) 组合机构及变异机构 随着生产过程的高度机械化和自动化,对机械输出杆的运动形式有多种多样的要求,对其动力性能的要求也愈来愈高,单一的基本机构已很难满足这些要求,如单一的凸轮机构不能实现从动件具有一定规律的整周运动;连杆机构无法实现从动杆精确的长期停歇和产生任意形式的轨迹曲线;圆形齿轮机构只能实现定传动比的整周转动或移动。因此,将几种单一的基本机构按一定方式适当组合而形成组合机构;或把机构的某些运动尺寸或结构加以改变而形成变异机构,从而满足生产对机械提出的多种多样的运动要求和更为理想的动力性能要求。

对于机构主要研究以下两个方面的问题:一是机构的分析,就是根据给定的机构简图,研究机构的运动特性和动力特性;二是机构的综合,就是根据预期的运动特性和动力特性,设计机构简图。而任何机构的综合问题也都是机构分析问题的逆命题。

从机构设计的观点来说,分析是综合的基础,分析的目的是为了综合。当然,从机构综合所得到的机构简图要变成生产上实用的机构,还需要考虑其他许多问题,特别是机构的结构问题,如在周转轮系的设计中,结构的优劣就决定着设计的成败。因此,本书除了对基本机构进行分析与综合之外,还涉及到某些机构的结构问题。为此,本书定名为《机构设计》,以区别于一般的《机构学》。

研究机构分析与综合的方法有图解法和解析法。图解法比较直观,可从图形中看出机构传动的几何原理,以及传动时的运动特性和动力特性。但图解法一般精度较低,而且在三维空间中很难用作图法求解。解析法适用范围广,解算精度高,但计算比较复杂。近年来由于电子计算机的普遍应用和数学工具的日臻完善,为用解析法研究机构的分析与综合提供了极为有利的条件,

故本书主要采用解析法，研究机构的分析与综合问题。虽然个别章节中也提到图解法，但只是用来说明机构传动的几何原理，作为解析法的“引子”而已。

§ 1-2 学习本课程的目的

在了解了本课程研究的对象与内容之后，对于学习本课程的目的是不难理解的。机器的类型尽管繁多，其动作也很复杂，经过对各种机器的剖析，我们可以看出，即使非常复杂的机器其机械部分总是由一些简单的机构所组成。例如现代的机电一体化产品是由机械、电子与计算机等部分所组成，其机械部分无非是各种机构的组合体；又例如现代的机器人，虽然“心脏”部分是微机控制系统，但其手、脚等执行部分则是机构的组合体。显然，要使现代的机器日臻完善，除了提高电子、计算机与控制技术之外，对于机构的设计质量与制造精度的提高也是关键问题之一。目前机器人的严重缺点之一，就在于手的挟持机构和脚的行走机构自由度过多，结构过于复杂，以至难以控制。在现代的机器中有大量的机构设计问题值得研究。

总而言之，简单的机器其本身就是机构的组合体，现代先进的机器其执行装置一般都是机械的，该机械部分也是机构的组合体。所以说机构是机器的基础，机器是离不开机构的。没有丰富的机构设计知识，是设计不出高质量的机器，机械设计与制造专业的学生要学好这门课，其道理就在这里。

第二章 平面连杆机构

§ 2-1 概 述

平面连杆机构仅用低副(转动副和移动副)来联接各个构件,故又称低副机构。低副元素为面接触,具有压强小、磨损轻、易于加工和保证精度以及靠其自身的几何形状能保持运动副封闭等优点。但连杆机构难以精确地实现任意预期的运动规律,且设计计算比较繁复。本章讨论平面连杆机构的运动分析和运动综合,并侧重于机构的运动综合。

平面连杆机构的运动分析,是已知机构,求运动规律。平面连杆机构的运动综合,则是运动分析的逆命题,即已知运动规律,求机构。在机构学领域内,机构运动综合和机构设计是同义语,均指按规定要求确定机构的运动简图(包括绘出简图所需的关键几何尺寸和轮廓形状)。但广义地说,“综合”和“设计”都有不同的内涵。“设计”的内涵要比“综合”广,它还包括零件的强度计算、结构形状和结构尺寸的确定、装配图和零件图的绘制、公差配合和材料的选择以及工艺要求等内容。然而,机构综合是机械设计的先导和基础。创造一部新机械以满足特定的要求,首先要解决的问题是运动方案的确定和机构的运动综合,即确定该机械的基本框架和有关尺寸。然后才是具体的零件结构设计和强度计算等设计内容。

平面连杆机构运动综合的任务,通常分为三大类型:

(1) 位置综合(亦称刚体导引综合) 这种综合要求连杆机构能引导某刚体按规定次序精确地经过若干给定的位置。例如图2-1所示为一条装配线上的两条传递带,需要设计一个四杆机构

将部件从下面传送带转运到上面的传送带，给定了该部件的四个位置。这就是机构的位置综合问题。

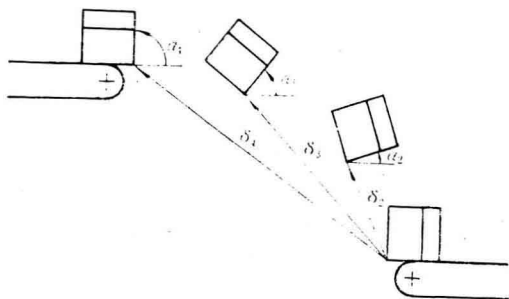


图 2-1

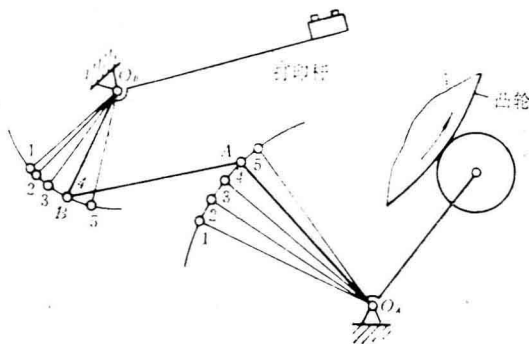


图 2-2

(2) 函数综合 这种综合要求连杆机构的输出杆和输入杆的位移满足给定的函数关系。函数综合的例子如图2-2所示,这是一个电动打字机中的冲击打印四杆机构,输入杆 O_4A 由凸轮驱动,

输出杆 $O_B B$ 连接打印杆。对应于输入杆相同的角位移增量，输出杆的角位移应当先小后大，即角速度逐渐加大，以便打印时有足够的冲力。

(3) 轨迹综合 这种综合要求连杆机构的连杆上某点沿给定的轨迹运动。例如图2-3所示为电影摄影机中的送片机构，该机构通过连杆上的 C 点间歇地带动胶片下移，移动时要求 C 点沿近似直线轨迹运动。这种机构的综合就属于轨迹综合。

机构综合的全过程，大致可分为三个阶段，即

a) 型综合——根据需要的性能选择机构类型，该阶段涉及工艺、材料、安全可靠、空间尺寸和经济性等因素，主要根据经验和现场条件决定。

b) 数综合——按所需自由度确定构件数和运动副数。

c) 尺度综合——按要求的运动规律确定机构的全部运动参数(长度和角度)。尺度综合问题是连杆机构综合中研究得比较充分的领域，已有比较成熟而完整的理论。本章只讨论平面连杆机构的尺度综合。

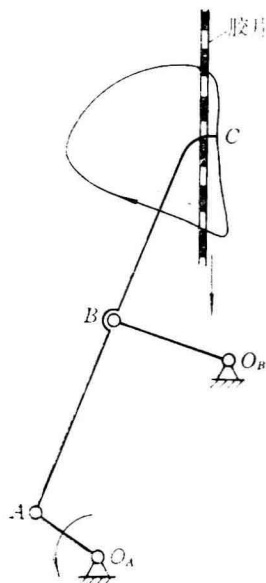


图 2-3

应当指出，平面连杆机构按上述运动要求完成尺度综合而求得一种机构方案之后，该机构是否可用，还必须接受四项准则的检验。这四项准则是：

(1) 有曲柄准则 大多数连杆机构的原动件是由电动机直接带动或经减速机构带动，因而它必须能整周回转，即应为曲柄。平

面四杆机构的原动件要成为曲柄,必须满足众所周知的 **Grashof** 准则:最短杆长与最长杆长之和小于或等于其余二杆长之和。在这一条件下取最短杆或与最短杆邻接的构件作为机架,它必有曲柄。

(2) 运动连续性准则 对于满足Grashof准则的四杆机构,譬如图2-4所示的曲柄摇杆机构,在构件尺寸不变的条件下,当曲柄 $O_A A$ 转动一周时,摇杆 $O_B B$ 既可以在扇形区 $B_1 O_B B_2$ 内也可以在扇形区 $B'_1 O_B B'_2$ 内摆动,取决于该机构初始装配时摇杆 $O_B B$ 处于哪一个区域。由于这两个扇形区互不连通,在机构装配完成后,摇杆 $O_B B$ 就不可能由其所在的区域连续运动到另一个区域。如果要求综合所得的机构在再现给定运动的过程中,摇杆时而在 $B_1 O_B B_2$ 区域内,时而又在 $B'_1 O_B B'_2$ 区域内,这在实际上是不可能的。故在机构综合完后,应进行检查,看机构是否满足运动连续性准则,若不满足,应重新进行综合,在条件允许时,也可修改原始设计条件。

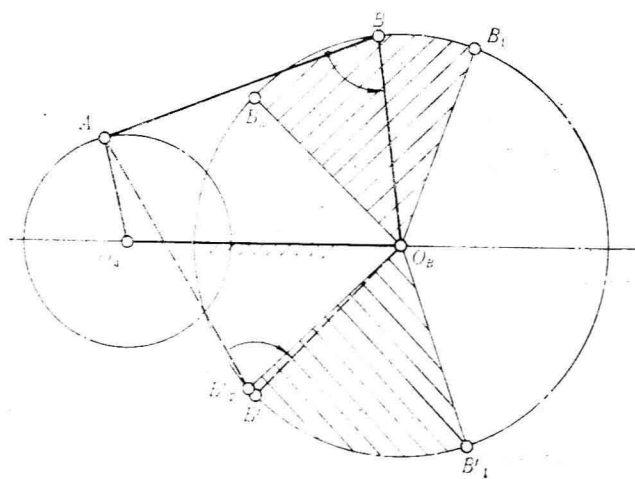


图 2-4

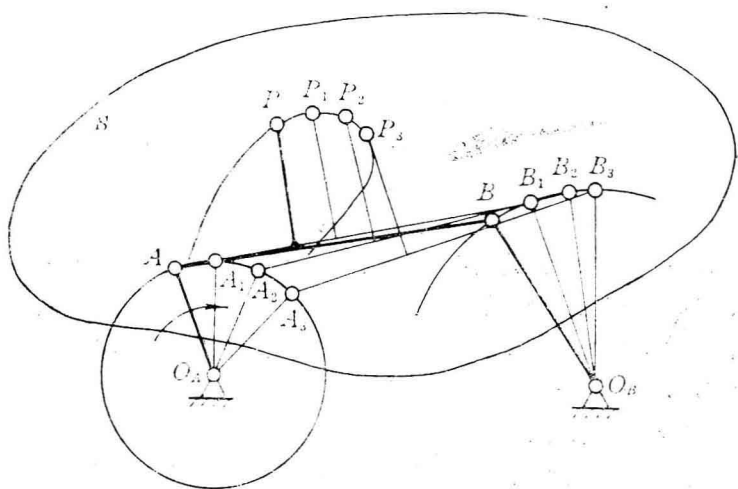


图 2-5

(3) 运动顺序准则 在平面连杆机构的运动综合中,规定的运动都有一定的顺序要求。如果尺度综合所得的机构能够再现给定的各个点位,但再现的顺序与要求的不一致,那么这样的设计也是不能接受的。因此,运动顺序在尺度综合之后也应加以检验。

(4) 传力准则 平面连杆机构的传力性能一般用传力角衡量。传力角太小,不但对机构受力不利,效率降低,而且会导致运动精度下降,冲击和噪音增大。通常要求机构在一个运动循环中的最小传力角 $\gamma_{\min}$ 不小于许用传力角 $[\gamma]$ 。

除了上述四项准则外,还可能会有一些其他的附加要求,例如连杆机构的总体尺寸和各构件尺寸的差别不宜过大等,这些需结合具体的应用场合加以考虑。

平面连杆机构综合的研究,主要是在两个广阔的领域里进行的:一个是基于经典布尔梅斯特(Burmester)理论的精确点综合;另一个则是基于函数逼近理论和数学规划方法(优化方法)的