

# 现代连杆机构设计

熊滨生 主编



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

## 内容提要

本书阐述了连杆机构的设计理论及设计方法。全书除绪论外，共十章，包括平面连杆机构的型分析，用函数逼近法进行平面机构综合，给定连杆平面三位置的平面杆机构综合，给定连杆平面四位置的平面机构综合，给定两连架杆对应角位移的平面机构综合，极点曲线及其应用，平面连杆机构的优化设计，刚体导引机构的综合，组合机构及开式链机构。在各章之后，附有一定数量的思考题和练习题。

本书可作为高等院校工科机械类专业学生的选修课教材，机械学科的研究生参考教材，也可供从事机构设计的科技人员及教师参考之用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

现代连杆机构设计/熊滨生主编. —北京: 化学工业出版社, 2005.12

ISBN 7-5025-8057-3

I. 现… II. 熊… III. 连杆机构-设计 IV. TH112.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 151460 号

---

现代连杆机构设计

熊滨生 主编

责任编辑: 张兴辉 李军亮

责任校对: 李 林

封面设计: 尹琳琳

\*

化学工业出版社出版发行  
工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$  字数 207 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8057-3

定 价: 18.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

连杆机构的设计，是一个比较复杂的问题。连杆机构所具有的运动副是低副，其运动形式和连杆曲线具有多样性，所以直至今日，人们对它的设计与研究仍在不断深入进行。本书定名为《现代连杆机构设计》，主要介绍了平面连杆机构图解法的基本理论及设计方法，解析法中的函数逼近法、刚体导引机构设计的理论及设计方法，机构优化设计的理论及方法，并且对与连杆机构有关的组合机构和开式链机构进行了论述。

对三位置刚体导引铰链四杆机构的设计及再现函数的平面连杆机构的优化设计，给出了C语言设计程序及计算结果，C语言设计程序由熊滨生、陈江义编写并调试。

在思考题及练习题选择上，力求有利于启发和加深学生对所学内容的理解，进一步培养他们分析和解决问题的能力。

本书绪论、第二章、第三章、第五章、第六章、第八章由郑州大学熊滨生编写，第一章、第十章由中原工学院熊安然编写，第四章、第九章由郑州大学肖献国编写，第七章由郑州大学陈江义编写。

郑州大学张明成教授悉心审阅了书稿，提出许多宝贵意见，特此表示感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中不妥之处难免，敬请读者指正。

编 者

2005年12月

# 目 录

绪论	1
第一章 平面连杆机构的型分析	4
第一节 一自由度机构的型分析	4
第二节 二自由度机构的型分析	10
第三节 多自由度机构的型分析	17
第四节 平面连杆机构型分析的杆组法	20
思考题及练习题	21
第二章 用函数逼近法进行平面连杆机构综合	23
第一节 函数逼近法的基本思想	23
第二节 用插值逼近法综合铰链四杆机构	31
第三节 用平方逼近法综合铰链四杆机构	40
第四节 用最佳逼近法综合铰链四杆机构	48
思考题及练习题	53
第三章 给定连杆平面三个相关位置的四杆机构综合	55
第一节 运动平面及转动极点	55
第二节 等视角定理	58
第三节 极三角形与镜极三角形	60
第四节 基点及三相关点所在圆的圆心	64
第五节 三相关点共线与四相关点共线	67
第六节 三相关线共点与四相关线共点	72
第七节 给定连杆平面三位置的机构综合	76
思考题及练习题	81

第四章 给定连杆平面四位置的平面机构综合 .....	83
第一节 四相关点共圆的圆心与转动极 .....	83
第二节 圆心曲线 .....	87
第三节 圆点曲线及其作图法 .....	92
第四节 对极四边形与圆心曲线 .....	95
第五节 给定连杆平面四位置的机构综合 .....	98
思考题及练习题 .....	104
第五章 给定两连架杆对应角位移的平面机构综合 .....	106
第一节 相对运动转换与相对转动极 .....	106
第二节 实现两连架杆一组及两组角位移的平面机构 综合 .....	109
第三节 相对转动极的极三角形和对极四边形 .....	113
第四节 给定两连架杆三组对应角位移的四杆机构综合 .....	115
思考题及练习题 .....	117
第六章 极点曲线及其应用 .....	118
第一节 极点曲线 .....	118
第二节 借助极点曲线实现给定连杆曲线的平面四杆机构 综合 .....	120
思考题及练习题 .....	122
第七章 平面连杆机构的优化设计 .....	123
第一节 优化设计数学模型 .....	124
第二节 优化设计方法的选择 .....	134
第三节 再现函数的平面连杆机构优化设计 .....	136
第四节 再现轨迹的平面连杆机构 .....	145
第五节 再现连杆角位移的平面连杆机构 .....	150
思考题及练习题 .....	155
第八章 刚体导引机构的综合 .....	157
第一节 刚体导引机构的应用及实现方法 .....	157
第二节 刚体导引机构的综合方程式 .....	159
第三节 给定位置数与任选参数个数的关系 .....	162

第四节	三位置刚体导引铰链四杆机构的设计·····	163
第五节	三位置刚体导引曲柄滑块机构的设计·····	174
	思考题及练习题·····	179
第九章	含有连杆机构的组合机构·····	181
第一节	机构的组合方式与组合机构·····	181
第二节	组合机构的类型及功能·····	186
第三节	组合机构的设计·····	193
	思考题及练习题·····	203
第十章	开式链机构·····	206
第一节	开式链机构的特点及功能·····	206
第二节	开式链机构的结构分析·····	207
第三节	开式链机构的运动学·····	215
	思考题及练习题·····	224
附录	·····	225
	C语言编写的内点罚函数法优化设计程序·····	225
参考书目	·····	239

# 绪 论

## 1. 机构学

机构的设计通常是机器设计的核心和首要环节。

按照应用力学的观点，机构学可分为两个分支：机构运动学和机构动力学。机构运动学只研究机构中各构件的相对运动关系，包括位移、轨迹、速度、加速度等。机构动力学研究运动过程中机构各构件的受力及力与运动的关系。除了机构运动学与动力学两大分支外，还有一个领域，称为机构的结构理论，它的研究对象是机构的自由度、结构类型、每种机构的种数。

机构学研究的问题：

第一类是机构分析，对已有机构进行运动学或动力学的分析计算；

第二类是机构综合，根据给定的运动学或动力学要求，设计机构简图。

机构分为开式机构与闭式机构。

开式机构：如串联式机械手。

闭式机构：主要有三种，齿轮机构、凸轮机构与连杆机构。由于连杆机构采用低副连接，因而结构简单，结实耐用，不易磨损，适于高速重载。连杆机构种类繁多，变化多端，能满足各种运动要求；连杆机构还有其他机构的理论结构原型，是机构的结构理论主要研究对象。同时机器人、机械手等开式机构也是低副机构，与连杆机构息息相关，更推动了连杆机构的发展。

机构学是一门实用性很强的应用科学，大至各种机器设备，小

至人们生活中的各种器具、电器、日常生活用品以及各种玩具，都可以发现机构学原理。一个机构学问题的解决，有时可以产生很大的经济效益。

### 2. 机构综合的基本问题

我们把机构运动简图的设计称为机构综合。

机构综合必须解决两个基本问题：第一个是机构结构综合；第二个是机构尺度综合。

结构综合可分为型综合与数综合。

型综合：为了产生某种运动，应选用什么类型的机构，该类机构应当由多少构件及哪些类型的运动副组成，因此称为机构的选型设计。

数综合：是一种机构枚举学。它研究由一定数量的构件和一定类型的运动副能组成一定自由度的运动链的种数。目前，机构的选型设计主要还是依靠设计人员的知识和经验，但现在已经出现了人工智能的专家系统软件。

尺度综合是按照给定的运动要求及动力要求，按照已选定的机构类型决定机构简图的尺寸，它可分为运动综合与动力综合。

传统的连杆机构综合即指尺度综合，它可归纳为三类问题：刚体导引、函数发生和轨迹发生。

刚体导引问题：是规定连杆必须经过的几个位置来寻求机构杆件的尺寸。

函数发生问题：是要求机构的输出变量与输入变量呈规定的函数关系。它们可以产生正弦、余弦、积分等关系。

轨迹发生问题：就是要求连杆上的点产生预期的轨迹。譬如要求一个循环中的某一段轨迹是圆、椭圆、直线等。

若考虑构件的弹性变形及运动副间隙的动力影响，则综合起来更复杂一些。本书只限于运动综合。

### 3. 精确综合与近似综合

如果将由于制造不精确、构件弹性变形及工作条件等因素造成的机构误差称为随机误差，那么，设计出来的机构简图理论上的运

动与要求的预期运动之间的误差称为结构误差。

凡是没有结构误差的机构综合称为精确综合；

凡是包含着按某种规律分布的结构误差的机构综合称为近似综合。

精确综合在用多杆机构精确实现轨迹发生上得到了发展。譬如人们综合出反演仪、仿图仪、直线机构、画二次曲线的机构以及画某些高次曲线的机构。

在许多情况下，实际上不可能得到既简单方便又能精确发生轨迹或函数关系的机构。因此，近似综合方法得到了很大发展。在很多场合，用最简单的四杆机构就可以实现这些任务。

以尽量小的结构误差，使机构简图的理论上的运动再现预期运动，这是机构近似综合所追求的目标。在数学上这属于函数逼近问题。常用的函数逼近法有差值逼近法、平方逼近法和最佳逼近法。函数逼近法中，凡是结构误差为零的点（也就是机构的位置）称为精确点。这种保证在某些机构位置上结构误差为零的综合方法也称为精确点综合。在插值点与插值点之间，结构误差一般不为零，它按某种规律分布，一般事先不易控制。这种结构误差的分布与精确点（插值点）的配置即预先对插值点选择有关系，可以调整精确点的配置来减小精确点之间的最大绝对误差。

优化方法（也叫数学规划）在机构综合中得到广泛的应用。应用这种方法，用不着针对具体问题寻求具体综合方法，而可以采用一般格式去处理问题。用计算机进行机构的优化设计是比较通用的方法。

优化方法也有它的缺点，譬如，它只能定量地得到机构参数的数值解，而对问题不便做定性分析。传统的综合方法，即基于函数逼近理论的解析法与基于运动几何学的几何法在这方面却要优越得多。传统的机构综合方法的主要发展方向就是用计算机来取代人工的繁重运算或作图，将运动几何原理以解析形式表达出来，用编程运算取代图上作业。

# 第一章

## 平面连杆机构的型分析

平面连杆机构的型分析，对于任意多杆机构来说，可以认为已经得到全面解决。但型综合和尺寸综合对于多杆机构来说还没有系统解决，因为综合要满足一系列性能指标，性能指标不仅和构件数有关，还和构件的基本尺寸有关，然而尺寸的变化是无穷的，所以综合比分析困难得多。

本章按机构的构件总数和机构自由度数，分析了平面多杆机构的型。

### 第一节 一自由度机构的型分析

根据机构自由度公式

$$W = 3(N - 1) - 2P_d \quad (1-1)$$

式中  $W$ ——机构自由度；

$N$ ——机构的构件总数，包括机架在内；

$P_d$ ——低副的数目。

当  $W = 1$  时，上式变为

$$P_d = \frac{3}{2}N - 2$$

得知杆件必须是偶数，对于闭式运动链组成的机构，有如下关系

杆件总数 $N$	4	6	8	10	12	...
低副总数 $P_d$	4	7	10	13	16	...

按各构件所具有的运动副数目和约束条件的关系看，有（包括机架）

$$N = n_2 + n_3 + n_4 + \cdots = \sum_{p=2} n_p \quad (1-2)$$

$$2P_d = 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + \cdots = \sum_{p=2} pn_p \quad (1-3)$$

式中， $n_p$  代表有  $p$  个运动副的构件数； $2P_d$  为机构的总约束条件的数目； $p=2$  是指闭式运动链中，各构件至少有两个运动副，即没有小于  $n_2$  的形式。

如果将式 (1-2)、式 (1-3) 代入式 (1-1)，可得下式

$$W = n_2 - 3 - \sum_{p=4} (p-3)n_p \quad (1-4)$$

这说明，有三个运动副的构件对机构运动副无影响，这是因为每个运动副为两构件所共有，各分担一个约束条件；三个运动副分担三个约束条件，正好抵消了构件的全部可能的自由度。还根据式 (1-3)， $p_d = n_2 + 2n_3/2 + 2n_4 + \cdots$ ， $p_d$  只能是整数，所以当  $n_5 = 0$  时， $n_3$  只能成对在闭式链中出现。

表 1-1 列出了一自由度机构的构件数和有不同运动副数的构件数目之间的关系。

根据上述分析，得如下一些机构的运动链形式和相应的机构的型。

### 一、四杆机构

如图 1-1，有唯一的运动链型，选定机架后也只有唯一型。如图 1-1(c)，考虑机架原动件后有两个型，用移动副代转动副将派生出多种，如图 1-1(d) 所示。

表 1-1 一自由度运动链的型

构件总数 N	具有不同运动副的各构件及其数目						备 注
	$n_2$ 二副件	$n_3$ 三副件	$n_4$ 四副件	$n_5$ 五副件	$n_6$ 六副件		
4	4						
6	4	2					
	5 <sup>①</sup>	0	1				
8	4	4					
	5	2	1				
	6	0	2				
	6 <sup>①</sup>	1	0	1			
10	4	6					
	5	4	1				$3 \times (10-1) - 1 = 26$
	6	3	0	1			总约束数
	6	2	2				$2 \times 10 = 20$
	7	1	0	1			每个构件先分 2 个约束
	7	0	3	0			$26 - 20 = 6$
	8	0	0	2			三运动副构件数
8 <sup>①</sup>	0	1	0	1		二运动副构件数	
12	4	8	0				$3 \times 11 - 1 = 32$
	5	6	1				$2 \times 12 = 24$
	6	4	2				$32 - 24 = 8$
	6	5	0	1			三运动副构件数
	...	...	...	...	...	...	$12 - 8 = 4$
							二运动副构件数

① 两个二运动副构件与四运动副构件固结在一起，致使总构件数降低，失去意义。

## 二、六杆机构

(1) 420 型，如图 1-2，有两个运动链：(a) 瓦特型 (Watt)；  
(b) 斯蒂芬逊型。

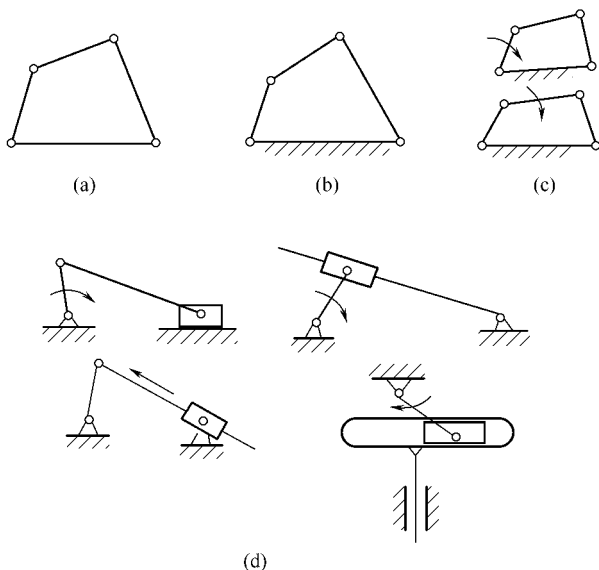


图 1-1

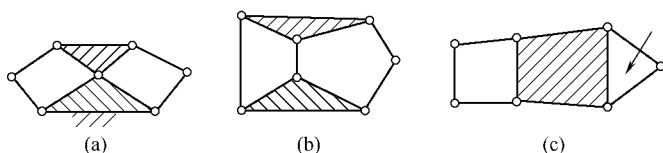


图 1-2

(2) 501 型, 有一个运动链, 如图 1-2(c), 但从图中可以看到, 其中两个二运动副构件与四运动副构件固结在一起, 成为一个刚体, 致使总构件数降低, 成为四杆运动链, 可见 501 型已失去实际意义。表 1-1 中其他注有①的型也有相似情况。

随着机架选择, 前者有两个型, 后者有三个型, 如图 1-3。

确定机架和原动件, 仅考虑取连架杆为原动件时, 可得图 1-4 的九种机构。如果考虑连杆是原动件, 机构类型将有所增加, 随着用移动副代替转动副, 即发展为一大批派生的六杆机构。还需指

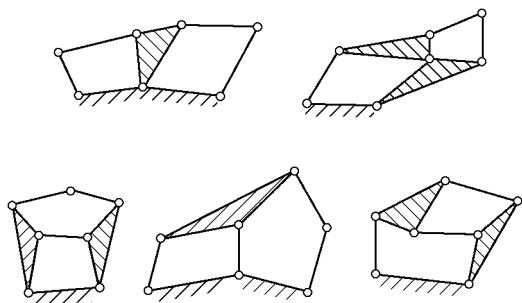


图 1-3

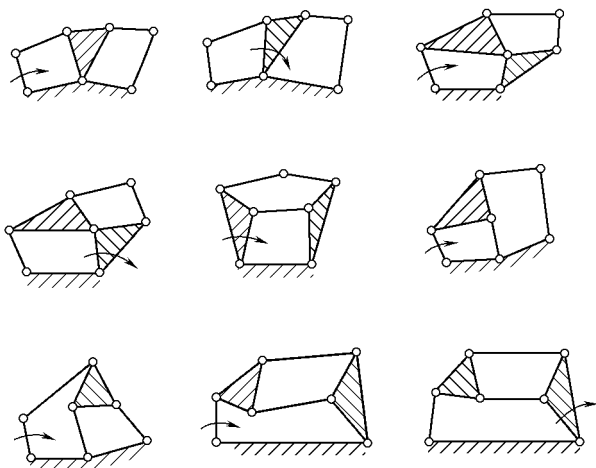


图 1-4

出，这里的型分析仅考虑构件的运动副数和构件的相互结合形式，没有考虑构件的基本尺寸特点。如果考虑尺寸特点来分析型，即使是四杆机构也是十分复杂的。

### 三、八杆机构

如图 1-5~图 1-8。如前所述，图 1-8 的 6101 型，已降低为六杆或四杆运动链，无实际意义。图中为简化起见，省略了表示转动

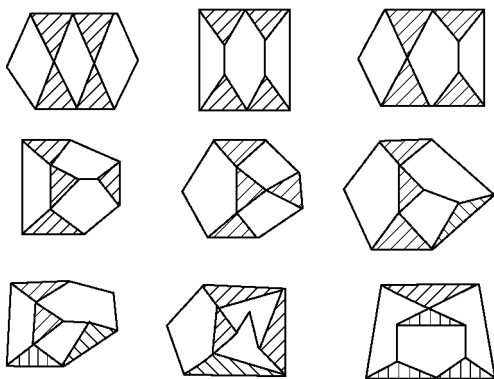


图 1-5 440 型

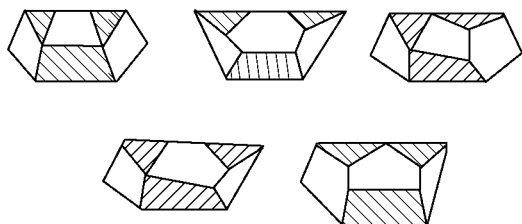


图 1-6 521 型

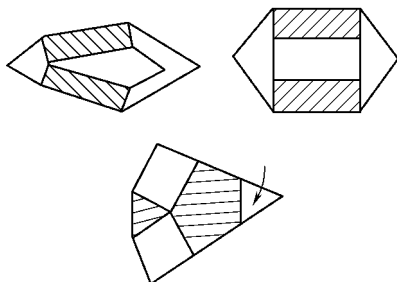


图 1-7 602 型

副的圆圈，从而可见八杆机构有十六种运动链形式，经过机架的转换和原动件的选择，可得很多机构的型。

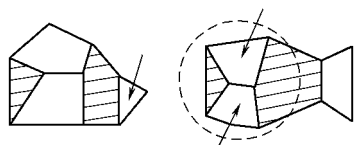


图 1-8 6101 型

#### 四、十杆机构

如按同法排列各种构件的结合形式，十杆运动链就可以组合成多达 230 种型。可见机构的型随杆件的增加而急剧增加。在图 1-9 内列举了运动链各种型中的一种。

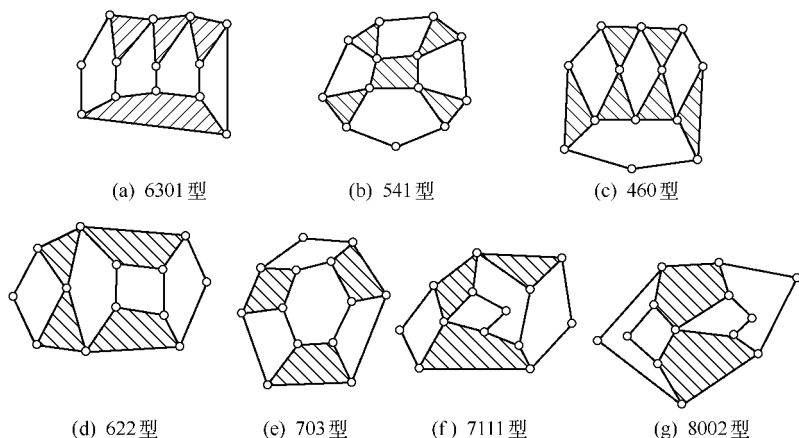


图 1-9

### 第二节 二自由度机构的型分析

所有一自由度机构加上一个杆和一个运动副，便可以得到二自由度机构。因为对于式 (1-1) 来说，当  $W=2$  时，必有

$$2P_d = 3(N-1) - W = 3N - 5$$

或

$$P_d = \frac{1}{2}(3N - 5)$$

可见这里如  $P_d$  为整数，则  $N$  必为奇数，是一自由度机构的偶数再加一，有如下关系：

杆件总数 $N$	5	7	9	11	13	...
低副总数 $P_d$	5	8	11	14	17	...

如果按式 (1-3) 来分配各杆件上的运动副数，得各种二自由度机构的闭式运动链，如表 1-2 所示。

表 1-2 二自由度机构运动链的型

构件总数 $N$	具有不同运动副的各构件及其数目					备 注
	$n_2$ 二副件	$n_3$ 三副件	$n_4$ 四副件	$n_5$ 五副件	$n_6$ 六副件	
5	5					
7	5	2				$3 \times 6 - 2 = 16$ $16 - 7 \times 2 = 2$ 三运动副构件数 $7 - 2 = 5$
	6	0	1			
9	5	4				
	6	2	1			
	7	0	2			
	7	1	0	1		
11	5	6				
	6	4	1			
	7	2	2			
	8	1	1	1		
	8	0	3			
	9	0	0	2		
	9	0	1	0	1	
13	5	8				
	6	6	1			
	...	...	...	...	...	