

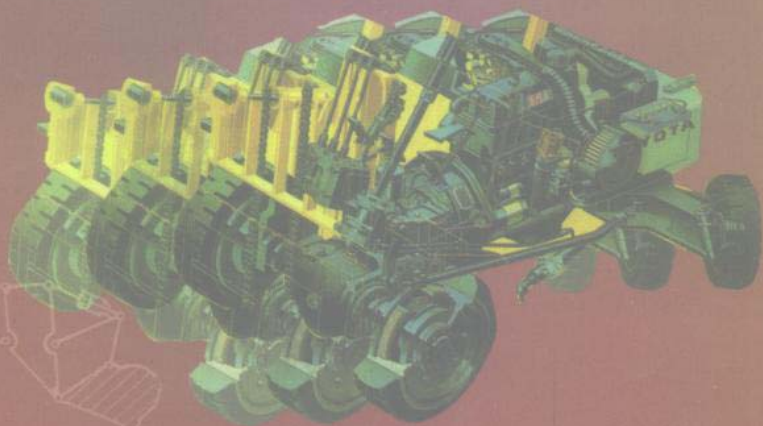
机构设计丛书

# 连杆机构设计

「机构设计丛书」编审委员会 编

华大年 华志宏 吕静平 编著

上海科学技术出版社



TH112

H72

机构设计丛书

# 连杆机构设计

《机构设计丛书》编审委员会 编

华大年 华志宏 吕静平 编著

上海科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书系“机构设计丛书”之一，主要叙述平面连杆机构及可用当量平面机构法分析和设计的简单空间连杆机构。全书共十章，依次阐述连杆机构的组成分析和创新设计、运动分析和精度分析、力分析及其平衡、计算机辅助设计和优化设计以及机构的结构设计。每章都辅以设计计算实例。

本书供从事机械设计和技术改造的工程技术人员阅读，也适于大学机械专业师生参考。

责任编辑 钮国俊

机构设计丛书  
连杆机构设计

《机构设计丛书》编审委员会 编

华大年 华志宏 吕静平 编著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所经销 上海市印刷三厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 15.5 插页 4 字数 405,000

1995年10月第1版 1995年10月第1次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-5323-3866-5/TH·74

定价：23.80元

## 编 审 委 员 会 名 单

雷天觉 张启先 路甬祥

邹慧君 李华敏 徐振华 华大年  
谢存禧 殷鸿梁 吕庸厚

## 丛 书 序

照传统说法，一切机器都可分为三部分，动力源、传动和执行机构。一切机器的作用不外两点，一是利用能量来代替微弱的人力、畜力，另一则用机器的运动来代替人手的动作。虽然两者都是为了减轻劳动，可是它们发展的历史却很不一样。能源开发是近代的成就，应该说由水车开始。而且从历史眼光看其发展并不能说很快，一般是量变。用机器运动来代替手工动作则历史长得多，而且进步也比较大。只要比较一下上古制陶器的陶车和近代在人的大脑中进行外科手术的机器人便清楚了。这可能是因为能源开发虽然艰巨，其目标却是单一的。用机器运动代替人工劳动，目的是多种多样的，随着人类生活的发展而不断变化。因此形成很多复杂的行业。

到底机器的哪部分是用来产生代替人手的动作呢？事实上这和传统的原则性的说法略有不同。倘机器要执行的动作非常简单，则动力源—传动—执行这划分还是对的。但近代机器常极复杂，对它要求的动作也非常精细而且复杂（且不说人工智能问题）。这种精细复杂的运动常常要从传动中获得。这就使机器的传动部分和执行部分的界限模糊了，同时也使传动成为更复杂的技术。表面上好像很简单的问题，做起来可能会很困难。我常常喜欢提一个历史上的例，这里再说一次：当瓦特设计他的蒸汽机时，他需要一个直线运动来带动阀门。从表面看这是一个很简单的问题，在今天用一个导轨便成了。但在那时的加工设备和润滑技术，还不能制出导轨，而须用连杆。但瓦特想不出这样一种连杆，便要求格拉斯哥大学的数学家们帮忙，但数学家们也想不出。后来事情传开了，竟发现全世界的数学家都解决不了这问题。瓦特只得用了一个近似的直线机构。这问题直到瓦特死后几十年，

才由一位法国数学家解决了。这一事说明了在机器上对传动机构要求之高和问题解决之难。只要机器还在使用，传动机构也必然要继续发展。

传动机构的类型很多，而且还在不断增加。特别是近年来在高精技术领域，各种类型传动(齿轮、凸轮、连杆、液压、气动、电动)常联合使用。最近趋势是在使用液压气动时，传动介质和轴承润滑和压力常联为一体，这就使技术更加复杂。在这种情况下，我们迫切需要一部包括各种传动(最好还包括摩擦学)的专著。目前对每种类型传动的论著并不少，有的也很深入。但却没见过将各种传动(机构)汇为一书的。上海科学技术出版社出版的“机构设计丛书”是这种类型专著的第一次出现，很希望它能满足读者的上述需求。当然，将各种传动融会贯通、形成一体是需要时间的，但这套书总是一个很好开端。丛书计七题，依次是《机构系统设计》、《齿轮机构设计》、《凸轮机构设计》、《连杆机构设计》、《空间机构设计》、《间歇运动机构设计》及《组合机构设计》。由于它包括了各种传动，而且篇幅很大、内容比较详尽、阅读方便；又由于它是由一个统一的编审委员会领导下完成的，易于作到理论协调、体例一致。估计本书将成为前沿设计和生产工作者很欢迎的书。

笔者希冀本书在我国机械工业中起良好作用！

高子完

九四年十月廿九日

# 前 言

连杆机构具有显著的优点。连杆机构中的运动副一般均为低副，其元素之间为面接触，传动时单位接触面积所受压力较小，磨损亦相应减少；构成这些运动副的元素（如圆柱面、平面等）加工比较简便，易得到较高的制造精度；低副元素的接触是依靠本身的几何约束来保证的，不需要附加诸如弹簧等零件；连杆机构还能起增力或扩大行程的作用，若接长连杆，则能控制较远距离的某些动作。所以，连杆机构已在各种机器和仪表中获得广泛应用。

但是，连杆机构所能实现的运动规律有一定的局限性，即难以准确地实现任意的运动规律。而且，连杆机构中特定的设计参数较多，设计连杆机构远比设计凸轮机构复杂。

连杆机构分为平面连杆机构和空间连杆机构。本书主要叙述平面连杆机构，其次叙述可应用平面连杆机构研究方法进行分析和设计的简单空间连杆机构。

在实际生产中应用的连杆机构与由其抽象出的机构运动简图往往在外形上有较大的差别；同一个连杆机构运动简图，可以构造出具有相同运动特性而不同形态的一组连杆机构。这样，摆在工程技术人员面前有两个问题：其一，欲对工程中某个连杆机构进行分析和设计，能否应用本书或其他连杆机构书籍中介绍的典型机构的分析和设计公式；其二，针对一个连杆机构实物或设计方案，能否推演出与其运动特性相同的一组设计方案，获得更多的选优机会。据此，本书在介绍平面连杆机构组成分析的基础上，着重阐述机构同性异形的演化规则，这如同在连杆机构实物与其机构运动简图之间架起了一座“桥梁”。工程技术人员掌握了这些演化规则，就能较好地解决上述两个问题。同时，将平面机构组成分析的基本理论推向实际应用，介绍了机构创新设计方法——再生运

动链法。将现有机构作为原始机构，举一反三，构思出众多的新机构设计方案。

连杆机构设计，通常归纳为下列三类问题：刚体导引问题、再现函数问题及再现轨迹问题。实际生产中遇到的连杆机构设计问题是多种多样的，其中有的是上述三类问题的特例，而更多的是这些问题的引伸和扩展。为此，本书按工程上对输出从动件的各种工作要求来编写连杆机构设计内容，尽可能便于机械设计人员直接引用，解决有关工程问题。

随着机器向高速方向发展，连杆机构设计工作中力分析和平衡问题更显突出。本书将介绍极力法和线性方程组解法。极力法综合应用虚位移原理和速度瞬心解题，特别适用于液气动连杆机构。线性方程组解法更适合于计算机辅助设计。连杆机构的平衡是个难题，本书尽可能避开复杂的数学推导，着重阐述平衡的原理和方法，使读者了解连杆机构震动力和震动力矩平衡的各种途径。

连杆机构设计的繁重计算工作量可由计算机辅助设计(OAD)来承担。目前，在我国中、小型工矿企业中普遍拥有微型电子计算机，但应用于连杆机构设计却甚少。本书旨在推广这种现代设计手段。首先阐明建立机构计算机辅助设计数学模型的三个准则：对于OAD的适应性；减少运算的复杂性；力求公式的通用性。然后分别介绍计算机辅助平面连杆机构运动分析、力分析、平面四杆机构综合及优化设计等内容，相应的程序列于有关章附录，并举实例说明其具体应用。

机器和机构的结构设计是机械设计人员的经常性工作。本书不去重述机械设计人员已熟悉的结构设计内容，而是着重从机构学的角度叙述连杆机构同性异形的演化、构件和运动副的构造、构件间运动干涉以及构件运动的调节等对机构结构设计的影响。这对改善连杆机构的结构设计会有一定帮助。

书中附有较多例题与正文相呼应，其中大多数例题是经编著者亲身实践过的。



编著者希望本书的出版，有助于工程技术人员进一步理解连杆机构设计的基本理论，应用现代设计方法解决生产实际中不断涌现的连杆机构设计课题，对机械产品开发和技术改造作出新贡献。

编著稿分工为：华大年编写第一章至第五章，华志宏编写第六章、第九章，吕静平编写第十章，华志宏和华大年合编第七章、第八章，华大年策划并统审全稿，最后经编审委员会审定。姜月玲描绘全部插图。

编著者

1994.12 月于沪上

# 目 录

前言.....	1
<b>第一章 平面连杆机构组成分析与创新设计.....</b>	<b>1</b>
<b>§1-1 平面连杆机构与平面凸轮机构的关联.....</b>	<b>2</b>
一、平面连杆机构替代平面凸轮机构的条件 .....	2
二、平面连杆机构替代一般平面凸轮机构的瞬时性 .....	3
三、一般平面连杆机构有着与其输入输出运动相同的平面凸轮机构 .....	5
<b>§1-2 平面连杆机构运动简图及其同性异形演化.....</b>	<b>10</b>
一、平面连杆机构运动简图绘制 .....	10
二、平面连杆机构运动简图同性异形演化 .....	15
<b>§1-3 平面连杆机构自由度.....</b>	<b>20</b>
一、自由度计算公式 .....	20
二、局部自由度 .....	21
三、虚约束 .....	22
<b>§1-4 平面连杆机构组成分析.....</b>	<b>25</b>
一、主动件为连架杆的平面连杆机构 .....	25
二、主动件为非连架杆的平面连杆机构 .....	31
<b>§1-5 平面连杆机构创新设计——再生运动链法.....</b>	<b>35</b>
一、创新设计程序 .....	35
二、一般化原则 .....	36
三、连杆类配 .....	36
四、组合运动链 .....	40
五、铰链夹紧机构创新设计 .....	42
<b>第二章 平面连杆机构运动分析.....</b>	<b>52</b>
<b>§2-1 平面连杆机构位置确定.....</b>	<b>52</b>
一、用覆盖试凑法确定高级机构位置 .....	52
二、用轨迹相交法确定高级机构位置 .....	53

三、用杆长逼近法确定高级机构位置 .....	54
<b>§2-2 平面连杆机构中的速度瞬心 .....</b>	<b>55</b>
一、平面连杆机构中瞬心的数目 .....	55
二、三心定理 .....	56
三、应用瞬心多边形求瞬心 .....	57
四、确定瞬心位置的解析式 .....	58
五、应用瞬心作机构的速度分析 .....	59
<b>§2-3 平面四杆机构速比极值位置 .....</b>	<b>61</b>
一、铰链四杆机构速比极值位置 .....	62
二、曲柄滑块机构速比极值位置 .....	64
三、导杆机构速比极值位置 .....	64
<b>§2-4 复数矢量运算基础 .....</b>	<b>66</b>
一、矢量的复数表示 .....	67
二、复数矢量的回转 .....	67
三、复数矢量的导数 .....	68
四、复数矢量方程的消元 .....	69
<b>§2-5 平面四杆机构运动分析 .....</b>	<b>70</b>
一、铰链四杆机构运动分析 .....	70
二、曲柄滑块机构运动分析 .....	73
三、导杆机构运动分析 .....	75
<b>§2-6 I级平面多杆机构运动分析 .....</b>	<b>78</b>
一、刚体运动分析 .....	79
二、I级杆组运动分析 .....	79
三、I级平面多杆机构运动分析举例 .....	90
<b>§2-7 高级平面连杆机构运动分析 .....</b>	<b>95</b>
一、双副杆约束方程式 .....	95
二、高级杆组运动分析 .....	97
三、高级平面连杆机构运动分析举例 .....	99
<b>§2-8 包含液压气动元件的平面连杆机构运动分析 .....</b>	<b>104</b>
一、一缸 I级杆组运动分析 .....	104
二、平面多杆机构运动分析 .....	105
<b>第三章 连杆曲线及其应用 .....</b>	<b>108</b>

<b>§3-1 瞬心线</b> .....	108
一、定瞬心线与动瞬心线 .....	108
二、瞬心速度 .....	111
<b>§3-2 拐点圆与欧拉-萨伐里公式</b> .....	112
一、拐点圆 .....	112
二、欧拉-萨伐里公式 .....	114
三、连杆上任一点曲率半径的确定 .....	115
<b>§3-3 近似直线导向机构设计</b> .....	117
一、单近似直线导向机构设计 .....	117
二、双近似直线导向机构设计 .....	118
<b>§3-4 曲率驻点曲线</b> .....	124
一、曲率驻点条件 .....	124
二、曲率驻点曲线方程式 .....	124
三、瞬心线为圆时的特例 .....	128
四、鲍尔点(平点) .....	129
<b>§3-5 近似等角速比机构设计</b> .....	131
<b>§3-6 同源(同迹)机构与对称连杆曲线</b> .....	135
一、西尔威斯特仿图仪 .....	135
二、罗培兹-契贝谢夫定理 .....	136
三、对称连杆曲线 .....	138
<b>§3-7 连杆曲线的尖点与重点</b> .....	141
一、尖点 .....	141
二、重点 .....	143
<b>第四章 平面连杆机构设计</b> .....	147
<b>§4-1 按从动杆急回特性设计平面连杆机构</b> .....	147
一、曲柄摇杆机构 .....	147
二、导杆机构 .....	158
三、曲柄滑块机构 .....	158
四、扩大从动杆行程的急回机构 .....	160
<b>§4-2 按从动杆大摆角设计平面连杆机构</b> .....	162
一、利用导杆机构扩大摆角 .....	163
二、利用铰链四杆机构扩大摆角 .....	163

三、两级扩大摆角 .....	164
<b>§4-3 按连杆位置设计平面连杆机构 .....</b>	<b>165</b>
一、刚体位移矩阵 .....	165
二、应用双铰杆作连架杆 .....	167
三、应用铰移杆作连架杆 .....	172
<b>§4-4 按主、从动杆相对位置设计平面连杆机构 .....</b>	<b>175</b>
一、插值结点 .....	176
二、铰链四杆机构 .....	177
三、曲柄滑块机构 .....	178
<b>§4-5 按给定轨迹设计平面连杆机构 .....</b>	<b>181</b>
<b>§4-6 按从动杆近似停歇要求设计平面连杆机构 (利用     极限位置) .....</b>	<b>183</b>
一、一套四杆机构 .....	183
二、两套四杆机构串联 .....	184
三、三套四杆机构串联 .....	190
<b>§4-7 按从动杆近似停歇要求设计平面连杆机构 (利用     连杆曲线) .....</b>	<b>195</b>
一、在一极限位置近似停歇 .....	195
二、在两极限位置近似停歇 .....	198
<b>§4-8 按从动杆近似等速移动要求设计平面连杆机构 .....</b>	<b>200</b>
一、从动杆在单行程内作近似等速运动 .....	200
二、从动杆在往复两行程内作近似等速运动 .....	202
<b>§4-9 利用瞬停节设计锁紧机构 .....</b>	<b>208</b>
一、四杆运动链中瞬停节 .....	208
二、六杆运动链中瞬停节 .....	209
三、瞬停节在锁紧机构中应用 .....	209
<b>§4-10 应用几何学定理设计平面连杆机构 .....</b>	<b>214</b>
一、直线导向机构 .....	214
二、圆锥曲线机构 .....	215
<b>§4-11 高级平面连杆机构 .....</b>	<b>217</b>
一、实现较高要求的刚体导引 .....	218
二、实现主、从动杆间较复杂的函数关系 .....	218

三、大幅度调节从动杆的动程或速度 .....	218
四、改进机构中运动副的配置 .....	220
五、改善机构中执行件的工作条件 .....	221
六、获得较大的增力作用 .....	222
<b>第五章 简单空间连杆机构分析与设计 .....</b>	<b>224</b>
§5-1 空间连杆机构自由度 .....	224
§5-2 简单空间连杆机构运动分析 .....	227
一、当量平面机构法的一般步骤 .....	228
二、空间连杆机构的当量平面机构中不含尺寸变化的构件 .....	228
三、空间连杆机构的当量平面机构中仅含一个尺寸变化的构件 .....	229
§5-3 简单空间连杆机构设计 .....	245
一、按从动杆摆角与行程速度变化系数等设计 RSSR 机构 .....	245
二、按主、从动杆三个对应位置设计 RSSR 机构 .....	249
三、按给定函数关系设计 RSSR 机构 .....	252
§5-4 RSSR 机构中曲柄存在条件 .....	254
一、平面铰链四杆机构中连杆的临界长度 .....	254
二、RSSR 机构中连杆的临界长度 .....	255
§5-5 RSSR 机构中压力角 .....	258
一、压力角 $\alpha$ 的计算公式 .....	258
二、曲柄摇杆机构的 $K-\psi_0-\alpha$ 线图 .....	259
三、两投影面上的压力角 $\alpha'$ 和 $\alpha''$ .....	260
<b>第六章 平面连杆机构精度分析 .....</b>	<b>265</b>
§6-1 机构精度分析基本原理 .....	265
§6-2 机构精度分析解析法 .....	266
§6-3 机构精度分析数值微分法 .....	270
§6-4 机构精度概率统计特性 .....	272
§6-5 机构精度分配方法 .....	275
一、精度分配常用算法 .....	275
二、精度合理调整 .....	277
<b>第七章 平面连杆机构力分析与平衡 .....</b>	<b>279</b>
§7-1 平面连杆机构静力分析 .....	279

一、极力法	279
二、含弹簧的连杆机构静力分析	280
三、气液动连杆机构静力分析	281
<b>§7-2 平面连杆机构动态静力分析</b>	<b>286</b>
一、运动副反力和构件惯性力的表示	286
二、动态静力分析解析法	289
<b>§7-3 震动力和震动力矩及其平衡概念</b>	<b>294</b>
<b>§7-4 平面连杆机构惯性力的完全平衡</b>	<b>296</b>
一、平面铰链四杆机构惯性力的平衡	297
二、平面连杆机构惯性力完全平衡的一般方法	301
<b>§7-5 平面连杆机构惯性力和惯性力矩的平衡</b>	<b>305</b>
一、惯性力已平衡的铰链四杆机构惯性力矩	305
二、铰链四杆机构惯性力和惯性力矩的完全平衡	306
<b>§7-6 震动力和震动力矩的部分平衡</b>	<b>308</b>
一、附加匀速回转平衡质量部分平衡震动力	309
二、附加齿轮机构部分平衡震动力和震动力矩	312
<b>第八章 平面连杆机构计算机辅助设计</b>	<b>318</b>
<b>§8-1 机构计算机辅助设计的数学模型</b>	<b>318</b>
一、对于 CAD 的适应性	318
二、减少运算的复杂性	319
三、力求公式的通用性	321
<b>§8-2 计算机辅助平面连杆机构运动分析</b>	<b>322</b>
一、运动分析子程序集	323
二、数学子程序集	329
三、计算机辅助平面连杆机构运动分析举例	329
<b>§8-3 计算机辅助平面连杆机构力分析</b>	<b>339</b>
一、解线性代数方程组子程序	339
二、计算机辅助平面连杆机构力分析举例	339
<b>§8-4 平面四杆机构计算机辅助设计</b>	<b>355</b>
一、双铰杆作连架杆的刚体导引问题	355
二、铰移杆作连架杆的刚体导引问题	357
三、铰链四杆机构再现函数问题	358

四、曲柄滑块机构再现函数问题 .....	359
五、平面四杆机构计算机辅助设计举例 .....	361
附录 平面连杆机构计算机辅助设计程序 .....	366
一、平面连杆机构运动分析子程序集 .....	366
二、解线性代数方程组子程序 .....	377
三、平面四杆机构设计程序集 .....	379
<b>第九章 平面连杆机构最优化设计 .....</b>	<b>399</b>
<b>§9-1 最优化技术基础 .....</b>	<b>399</b>
一、最优化问题的数学模型 .....	399
二、无约束最优化方法 .....	401
三、约束最优化方法 .....	405
四、局部最优点与全局最优点 .....	407
五、最优化程序 .....	408
六、机构最优化设计的一般步骤 .....	410
<b>§9-2 平面连杆机构运动综合最优化设计 .....</b>	<b>411</b>
一、平面铰链四杆机构再现轨迹的最优化设计 .....	411
二、两套四杆机构串联实现从动杆较长时间停歇的最优化设计 .....	417
<b>§9-3 平面连杆机构震动力和震动力矩最优化平衡 .....</b>	<b>424</b>
一、连架杆上附加平衡质量最优平衡震动力和震动力矩 .....	425
二、附加平衡质量的最小转动惯量 .....	430
三、附加平衡 I 级杆组(变速转子)最优平衡震动力矩 .....	432
<b>§9-4 输入扭矩和运动副反力的最优化平衡 .....</b>	<b>435</b>
<b>§9-5 平面连杆机构动力综合最优化设计 .....</b>	<b>439</b>
附录 最优化程序 .....	443
<b>第十章 平面连杆机构结构设计基础 .....</b>	<b>449</b>
<b>§10-1 连杆机构构件 .....</b>	<b>449</b>
一、具有转动副的构件 .....	449
二、具有移动副和转动副的构件 .....	453
三、具有两个移动副的构件 .....	453
<b>§10-2 转动副结构 .....</b>	<b>457</b>
一、滑动轴承式转动副 .....	457
二、滚动轴承式转动副 .....	459



§10-3 移动副结构	460
一、滑动导轨式移动副	460
二、滚动导轨式移动副	463
§10-4 构件运动干涉	466
§10-5 构件长度及支座位置调节	468
一、调节构件长度	471
二、调节支座位置	471
§10-6 虚约束应用	472
一、改善受力状态	473
二、增强机构刚度	473
三、帮助机构渡过运动不确定位置	473
四、简化结构	473
参考文献	475