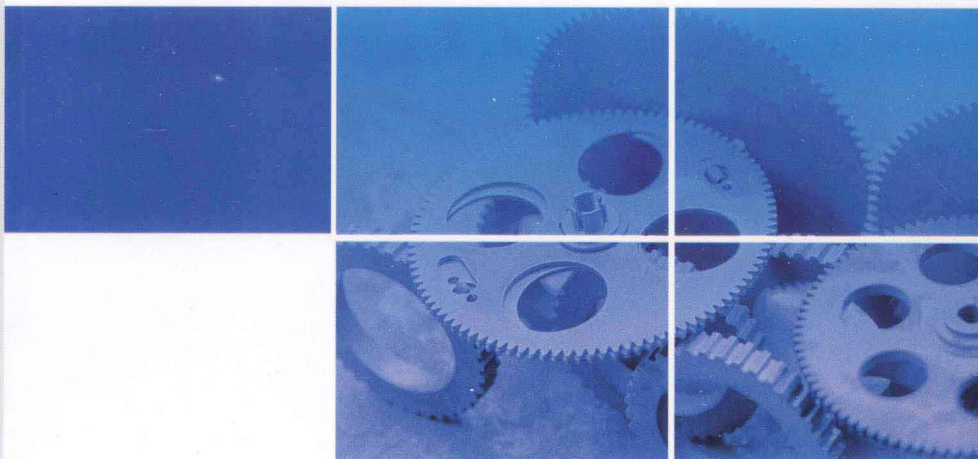




“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



机械原理

第3版

廖汉元 孔建益 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

机 械 原 理

第 3 版

武汉科技大学机械原理教研组 组编

主编 廖汉元 孔建益

参编 杨金堂 李 佳 闻欣荣

汤 勃 侯 宇 邹光明

李公法

主审 翁海珊



机 械 工 业 出 版 社

本书主要介绍机构及机械分析与综合的基本理论与方法。全书包括概论、机构的结构分析、平面机构的运动分析、机构的力分析、机构的型综合、平面连杆机构、优化方法及机构优化设计、凸轮机构、直齿圆柱齿轮机构、其他齿轮机构、齿轮系等典型机构的分析与综合,在此基础上介绍了组合机构及机构系统设计,传动系统设计中的机械运转及调速和机械的平衡等机械动力学方面的内容。

本书的特点在于根据当今工程设计的要求对机械原理教材内容进行了取舍和增补,并按设计程序安排顺序,根据科技发展的要求,与现代计算机技术与方法相结合。本书全部采用解析方法,且各章配有习题,附录编有计算机程序。阅读本书必须具备高等数学、理论力学、线性代数和算法语言等基础知识。

本书是作为高等院校工科大学教材编写的,也可供工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理 / 廖汉元, 孔建益主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2013. 5
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978-7-111-41529-9

I. ①机… II. ①廖…②孔… III. ①机构学—高等学校—教材
IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 031258 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 刘小慧 责任编辑: 刘小慧 韩旭东 邓海平
版式设计: 霍永明 责任校对: 肖琳
封面设计: 张静 责任印制: 乔宇
北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)
2013 年 7 月第 3 版第 1 次印刷
184mm×260mm·23.5 印张·564 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-41529-9
定价: 43.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

第3版前言

受编撰组委托撰写本教材第3版前言。庚寅本命逾古稀，方知人老多忆昔。

20世纪70年代末召开的全国《机械原理》新教材研讨会还历历在目，聆听众多前辈同行的教诲使我受益匪浅。由天津大学等五院校主编的《机械原理》新教材一改原有“几何学派”统治教材内容的格局，加入了不少解析法的内容。如张启先先生有关低副机构的运动分析、唐锡宽先生有关广义质量替代、陈立周先生有关优化方法等新的教材内容，给我很深的印象并引起我极大的兴趣和关注，但图解法仍是教材的主导内容。长期以来，由于图解法是教材的“精华”，大家对完全废弃图解法意见不一，所以教材内容未见本质改变。随着科学技术的进步，原有《机械原理》教材以图解法为主的体系已不能满足工程设计的需要。大家逐渐认识到放弃精度差、内容陈旧落后的图解法势在必行，创建一本以培养机械系统设计和创新能力为主线，采用现代计算方法的全解析法《机械原理》是本教材改革的方向。我和我的同仁经多年不懈探求，终于在1998年出版了全解析法的《机械原理》第2版，现今已使用了十多个春秋。从同仁、学生的评价和教学中取得的成果来看，教材改革是成功的。新版之际，希望再得到同行的建议和斧正，以期完美。

本教材特点如下：

1. 先进性

放弃落后的图解方法完全采用解析方法；机构综合采用现代设计方法，在分析与设计中，应用计算数学及优化的有关知识与方法，以期达到能应用给出的程序进行机构设计计算之目的。

2. 实用性和系统性

机械原理是一门与专业紧密相关、培养机构设计方法和机械系统创新设计能力的专业基础课，因此具有很强的实用性和系统性。但现有教材各章孤立，互不呼应，使学生感到学完课程后仍对“设计”一无所知。因此，教材的改革应从实用的观点以设计为主线实现其系统性。

建立以机械系统设计和培养创新能力为主线，以设计程序为顺序选择和安排教学内容的教材新体系。此教材新体系为：绪论（机构及其应用、设计方法简介——建立感性认识）→机构设计基础（机构的结构分析、运动分析、力分析——机构设计的基础）→机构型综合创新实践（机构型综合的连杆组合法——机构设计基础的应用）→典型机构的尺度综合（机构型综合的进一步深化——机械系统设计的基础）→机械系统设计（组合机构和机械系统设计方法）→机械系统的动力学（完成机械系统的完整设计）。这种新体系达到了实用性和系统性的完美统一。为把各章内容按设计程序有机地结合起来，多数章节的习题中安排有某一机器（如飞剪机）的分析设计，并与授课同步进行，这样在课程结束时学生已接受了单体机械设备完整分析设计的初步训练。

3. 创新性

教材内容应与时代发展相适应，有所发展和创新。教材有较大改变和更新的内容为：

IV 机械原理

①机构型综合的创造技法（数值分析的机构型综合连杆组合法）；②高级别机构的 Newton-Raphson 迭代法；③高副机构及两自由度机构的运动分析；④将圆柱齿轮机构改为以变位齿轮为主线编写，标准齿轮为其特例，并对内容作了较大删减；⑤介绍了优化方法和机构优化设计的建模方法；⑥首次提出的计入摩擦力分析的线性化法；⑦建立平面连杆机构尺度综合的全解析方法；⑧介绍了近年来的研究热点——受控五杆机构。

4. 开发了 PPT 教学课件

多媒体教学手段不仅使学生在课堂中能体验工程实际的动态感受，大大加强了学生对工程机械的感性认识和对本课程的学习热情，还可解决学时少与内容新、多、深间的矛盾。多媒体课件把图形、动画、音响、文字、机构仿真、录像等有机地组合起来，生动形象地描述教学内容，使无声的教材变成一位活跃在屏幕上的经验丰富的教师。本教材 PPT 教学课件有如下特点：

1) 画面具有与理论推导的同步性。画面的切换与理论推导同步，将理论推导过程形象化以加深学生的理解与印象。

2) 实际工程机械运动的可视性。将实际工程机械的运动用动画演示，使学生在课堂上即可体验工程机械的实际工作过程。

3) 实验和加工过程的演示性。将实验和加工过程用动画或仿真代替。

4) 本课件融合了丰富的教学方法。①启发式教学法——用自问、提问、讨论等多种形式启发思维与求知欲望，使学生集中精力地参与教学；②模式教学法——将某一理论、原理或概念，按照一定的模式进行从感性到理性、从抽象到具体的加工，使其变为具体的便于理解的图形；③设疑教学法——在讲解某一原理、方法、问题时，先有意地设置疑难问题，然后讲解解决问题的方法，以加深理解；④准实践教学法——利用计算机、多媒体等现代化教学手段，模拟、展现实体的特征与动态，以加深学生对实体的认识与理解，并激发学生的学习热情。

5) 便于师生使用。多媒体课件分为备课（自学）版、精简版和图表汇总版三种版本。备课（自学）版可满足教师备课或学生自学之需要；精简版能使教师事半功倍地授课；采用图表汇总版授课能充分地发挥教师的主观能动性。

本书与第2版相比，对圆柱齿轮机构和受控五杆机构进行了较大修改，其他各章节针对使用中发现的错误和不足进行了修订。全书由廖汉元、孔建益修改审定，各章修改分工如下：廖汉元第3版前言，孔建益第一章，李佳第二章、第十一章，李公法第三章、第七章，侯宇第四章、第五章，杨金堂第六章、附录和参考文献，邹光明第八章、第十二章，闻欣荣第九章、第十章，汤勃第十三章、第十四章。

本书是高等工科院校大学教材，也可供工程技术人员自学参考。

由于水平有限，遗误不妥之处难免，恳望同仁及广大读者批评指正。

廖汉元

第2版前言

本教材自1998年出版以来,已经历九年的教学实践。由于本教材适应社会发展和科学进步的要求,以设计程序建立教材新体系,对教材内容进行了充实与更新,使得在机械原理教学中对学生在形象思维能力、计算分析能力、发散思维、创新能力和工程实践能力的培养方面取得了可喜的进步。凡此种种说明,本教材在教学内容和设计方法的增减、取舍,建立以机械系统设计和培养创新能力为主线,以设计程序为顺序选择和安排教学内容的教材新体系等方面是成功的。再版之际,希望得到同行的批评和建议,以期更加完善。

本教材是以设计程序为顺序选择和安排教学内容的教材新体系,把各章孤立的内容有机地结合起来,以求达到实用性和系统性的统一。本教材有如下特点:

1. 机构的分析与综合全部采用解析法,以满足科学技术进步的需要。

2. 应用现代设计方法、计算数学及优化有关知识与方法,以期达到能利用给出的程序进行机构设计计算之目的,使学生的理论水平和设计、计算应用技能有大幅度提高。教材附录中给出了若干可应用的计算机程序。

3. 教材内容在下列方面有所发展和创新:

1) 机构型综合的创造技法(数值分析的机构型综合连杆组合法)。

2) 高级别机构运动分析的Newton-Raphson迭代法。

3) 高副机构及两自由度机构的运动分析及五杆两自由度机构简介。

4) 优化方法简介及机构的优化设计。

5) 计入摩擦的机构非线性力分析的线性化法。

4. 备有电子教案及课件。多媒体课件分为备课(自学)版、精简版和图表汇总版三种版本。备课(自学)版可满足教师备课或学生自学之需要;教师采用精简版能事半功倍方便地授课;采用图表汇总版授课能充分发挥教师的主观能动性。

在第1版使用中也发现一些错误和不足,再版时重新进行了修改并加以完善。由于工作等情况变迁,编撰、修改人员有所变更。本书第一、三、八、十四等章由廖汉元编撰;第二、十一章由李佳编撰;第四、七、十二章由孔建益编撰;第五章由侯宇编撰;第六章及附录由杨金堂编撰;第九章及第十章由闻欣荣编撰;第十三章由汤勃编撰。全书由杨金堂刊校;课件模块的交互控制和功能控制系统及有关动画由汤勃、侯宇、李佳等完成,研究生李公法、刘源炯、刘怀广、田松、曾国华、周艳、魏静、赵志杰等参与该项工作,在此表示衷心地感谢。全书由廖汉元、孔建益负责主编。

此次修订得到北京科技大学翁海珊教授认真的审阅和悉心的指导,谨此表示衷心感谢!

本书是工科院校大学教材,也可供工程技术人员自学参考。

由于水平有限,遗误不妥之处难免,恳望同仁及广大读者批评指正。

编者

第1版前言

随着科学技术的进步,现代计算方法和计算机技术得到迅速发展和广泛应用。原有《机械原理》教材以图解法为主的体系已不能满足工程设计的需要。编者结合教学、科研实践补充了其他《机械原理》教材的不足,本书完全采用解析方法。编著本书考虑到以下原则:

(1) 适应教学改革的要求。拓宽基础,淡化专业是教学改革的重要精神,《机械原理》学时势必减少。以解析法研究机构的分析与综合必可得到事半功倍之效果。

(2) 加强机构型综合的内容。原有教材重视机构的尺度综合,对机构的型综合强调不够。本书增加机构型综合的连杆组合法,并单独作为一章。连杆组合法是一种以数字综合形式表示的机构型综合创造技法,其最大特点是具有强烈的散发性思维成分,可以启发设计者创造新机构。在此基础上并介绍组合机构及机械传动系统设计。

(3) 删去图解法内容。图解法的取舍及其在教材中的地位,意见不一为时已久。尽管图解法具有直观简明之优点,但也存在着精确度差,难以建立运动参数与尺度参数间的关系等缺点,特别是当机构复杂时无法综合出最佳的机构尺寸。因此,用图解法作为研究机构的主要手段已不能适应现代设计之要求。本书在连杆机构型综合和尺度综合、计入摩擦的机构力分析、高级别机构的分析与设计、机构平衡、两自由度机构等内容提出了分析与设计的解析方法。这也是用解析法编著本书的重点、难点和特点。

(4) 与现代设计方法相结合。为分析与综合机构并使其达到最佳的性能,本书在分析与设计中应用了计算数学及优化的有关知识与方法。这方面的知识对于当代的工科大学生来说,是非常需要的。

本书是以其他《机械原理》教材为基础,结合编著者教学与科研实践,根据科学技术发展的需要重新增补编排后撰写的。本书在内容先后安排上考虑实际工程中机构综合的程序,因此与教学过程同步安排一个课外大作业可以把本书基本内容有机联系起来,为课程设计打下良好的基础。全书共分十四章,主要介绍机构及机械分析与综合的基本理论与方法。全书包括概论、机构的结构分析、运动分析、力分析、机构的型综合、优化方法简介以及连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系等典型机构的分析与综合。在此基础上介绍了组合机构和传动系统的设计以及机械平衡、调速等机械动力学方面的内容。每章后均有数量较多的习题,书后附录编入了机构分析与综合及机构优化设计等计算机程序。

本书第一、三、五、六、八、十四等章及各章习题、附录由廖汉元编写;第四、七、十二章由孔建益编写;第九章及第十章部分内容 by 钮国辉编写;第十三章由励明德编写;第十一章由鞠远萍和勾频编写;第二章由李佳编写;第十章部分内容 by 闻欣荣编写。全书计算机程序由胡晓涛复核。全书由廖汉元、孔建益、钮国辉主编。

本书承华中理工大学廖道训、武汉汽车工业大学张斌、武汉交通科技大学肖先镛、武汉冶金科技大学李友荣四位教授审阅,由廖道训教授主审。他们提出了很多宝贵的意见,为提高本书的质量给予了很大的帮助,在此谨致以衷心的感谢!本书在编写过程中,还得

到了李钢林、马慧、孔建利的大力帮助，在此也深表谢意！

本书是作为高等院校工科大学教材编写的，也可供工程技术人员自学参考。

由于水平有限，遗误不妥之处难免，恳望同仁及广大读者批评指正。

编 者

目 录

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第一章 概论	1
第一节 本课程的研究内容	1
第二节 机构的分析与综合及其方法	2
第三节 学习本课程的目的与方法	7
第二章 机构的结构分析	10
第一节 概述	10
第二节 平面机构自由度及其计算	13
第三节 机构的组成	17
第四节 平面机构的高副低代	20
第五节 机构运动简图	21
习题	24
第三章 平面机构的运动分析	29
第一节 概述	29
第二节 II级机构的运动分析	30
* 第三节 高级别机构的运动分析	34
* 第四节 多杆机构的运动分析方法	39
* 第五节 两自由度机构的运动分析方法	40
* 第六节 高副机构的运动分析方法	41
第七节 速度瞬心及其位置确定	44
习题	47
第四章 机构的力分析	53
第一节 概述	53
第二节 运动副反力及构件组静定条件	55
第三节 不考虑摩擦的机构力分析	59
第四节 考虑摩擦的机构力分析	66
第五节 机械效率与机械自锁	72
习题	79
第五章 机构的型综合	86
第一节 概述	86
第二节 机构型综合的连杆组合法及其分类	87
第三节 机构型综合的基本机构分类法	98
习题	104
第六章 平面连杆机构	105
第一节 概述	105
第二节 连杆机构的运动特性	107
第三节 机构综合的位移矩阵法	113
第四节 机构综合的代数式法	130
* 第五节 受控五杆机构简介	136
习题	141
第七章 优化方法及机构优化设计	147
第一节 概述	147
* 第二节 优化问题的几何描述	151
* 第三节 约束最优化的一般概念	152
* 第四节 随机搜索法	154
* 第五节 复合形法	157
第六节 机构优化设计	162
习题	173
第八章 凸轮机构	176
第一节 概述	176
第二节 从动件常用运动规律及其选择	179
第三节 凸轮的轮廓曲线设计	185
第四节 凸轮机构的结构参数	188
* 第五节 圆柱凸轮机构简介	195
习题	198
第九章 直齿圆柱齿轮机构	201
第一节 概述	201
第二节 渐开线及其特性	202
第三节 齿轮的基本参数	205
第四节 齿廓啮合基本定律	208
第五节 渐开线齿廓及齿轮传动的特性	209
第六节 齿轮加工	213
第七节 齿轮机构的几何尺寸计算	219
第八节 齿轮机构的传动设计	221
习题	228
第十章 其他齿轮机构	231
第一节 斜齿圆柱齿轮机构	231
第二节 蜗杆蜗轮	238
第三节 锥齿轮机构	242
* 第四节 非渐开线齿廓的齿轮机构	248

* 第五节 非圆齿轮机构	253	第一节 概述	308
习题	255	第二节 机器运动的等效量及其 动力学模型	310
第十一章 齿轮系	256	第三节 机械的运动方程式	314
第一节 定轴轮系及其传动比计算	256	第四节 机械系统的真实运动规律	315
第二节 周转轮系及其传动比计算	258	第五节 机械系统周期性速度波动的 调节	319
第三节 复合轮系及其传动比计算	262	习题	326
第四节 轮系的功用	265	第十四章 机械的平衡	331
* 第五节 行星轮系的效率及选型	268	第一节 概述	331
* 第六节 行星轮系各轮齿数和行星轮数的 选择	271	第二节 刚性转子的平衡原理	331
* 第七节 渐开线少齿差行星传动、摆线针轮 传动及谐波齿轮传动	274	第三节 转子的平衡试验及平衡精度	335
习题	279	* 第四节 平面连杆机构质量矩平衡方法	339
第十二章 组合机构及机构系统 设计	285	第五节 平面连杆机构惯性力平衡的 适用方法	345
第一节 概述	285	习题	350
第二节 机构组合的方式	286	附录	354
第三节 常见组合机构的运动设计	290	附录 A 求解线性方程组的高斯主元 消去法子程序	354
第四节 机构系统的方案设计	297	附录 B 优化方法及其源程序	355
第五节 机构系统的协调设计	303	附录 C 位移矩阵法及其程序	359
习题	306	参考文献	363
第十三章 机械运转及调速	308		

第一章 概 论

第一节 本课程的研究内容

机器这个词我们并不陌生，如汽车、拖拉机、机车、起重机、机床、纺织机、轧钢机、包装机、破碎机等都是机器。虽然机器有不同的用途与构造，但它们都有以下三个共同的特征：

1) 它们都是由一系列的运动单元体所组成的。一个运动单元体，称为一个**构件**。例如图 1-1 所示的内燃机，由壳体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4（齿轮 4' 与曲轴 4 固结在同一根轴上）、凸轮 5'（齿轮 5 与凸轮 5' 固结在同一根轴上）以及气阀杆 6 等一系列构件组成。

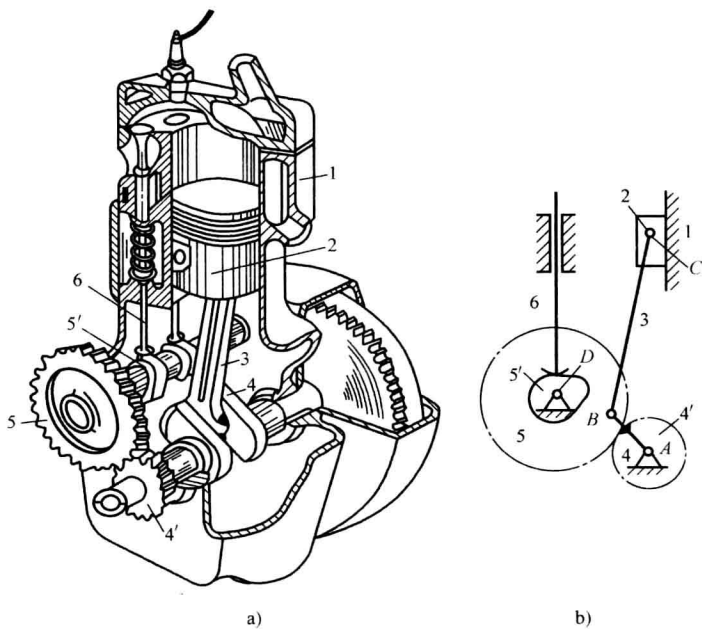


图 1-1 内燃机
1—壳体 2—活塞 3—连杆 4—曲轴
4'、5—齿轮 5'—凸轮 6—气阀杆

2) 组成机器的各构件之间都具有确定的相对运动。

3) 它们均能转换机械能或完成有用的机械功以代替或减轻人们的劳动。例如，内燃机能将热能转换成机械能，机床能切削工件完成有用的机械功。

这里特别要强调在机构学中应用最多的一个术语，即**构件**。所谓构件是由一个或多个零件所构成的运动单元体。如图 1-1 中曲轴 4 与齿轮 4' 是固结在同一根轴上的，只能是一

个构件。图 1-2 所示为内燃机中的连杆，它是由连杆体 1，连杆头 2，轴套 3、4，螺栓 5 和螺母 6 等零件相互刚性联接而成的，各零件间无相对运动，是作为一个整体而运动的，也只能作为一个构件。

机构与机器的根本区别是它不具备机器的第三个特征。即**机构**是由若干个构件组成的系统，各构件间具有确定的相对运动。在图 1-1 所示的内燃机中，由壳体 1、活塞 2、连杆 3、曲轴 4 等构成的系统称为连杆机构；由壳体 1、齿轮 4' 和 5 三个构件组成的系统称为齿轮机构；而由壳体 1、凸轮 5' 和气阀杆 6 三个构件构成的系统称为凸轮机构。一部机器可以是若干个机构的组合，也可以只有一个机构。所以又可以说，机器乃是能够完成机械功或转化机械能的机构或机构的组合。

从结构和运动的观点看机器和机构并无区别，故把机器和机构统称为**机械**。应该指出，机器和机构的含义随着科学技术的发展已有了扩展。不仅刚体，而且气体、液体、电子信息控制系统也参与了实现预期的机械运动，有的还可以代替人的脑力劳动。

机器大多是由一些常见的基本机构组合而成的，尽管机构的结构和用途千差万别，但只要对这些常见机构进行分析与研究就为机器的分析与设计打下了坚实的基础。本课程就是研究机器和一些常见机构的有关结构组成、运动学、动力学方面的分析与设计原理、方法的一门课程。其具体内容大致有：

- 1) 机构的结构分析、运动分析、动力分析。
- 2) 几种典型机构的分析与设计，包括连杆机构、齿轮机构、凸轮机构、轮系。并介绍一些特殊机构、组合机构等方面的知识。
- 3) 机器的运转、摩擦、效率、平衡等有关机器力学性能和机器动力学方面的内容。

就上述内容的性质而论，本课程所研究的问题又可归纳为两类：第一类问题是根据已有机构的结构和主要参数来分析该机构或由其所组成的机器的各种特性（结构、运动学和动力学），即**机构和机器的分析问题**，如机构的结构分析、运动分析、力分析和在已知力作用下机器的真实运动等；第二类问题是根据预期的各种特性来确定新的机构和机器的形式、结构和主要参数，即**机构和机器的设计问题**，如各种主要机构的运动设计、机构的平衡和机器速度波动的调节等。这里研究的问题只限于对与机构和机器的运动和动力特性有关的机构形式、结构和各部件主要参数之间的关系进行**综合**，而不研究与机械零件有关的问题，如零件的形状、构造、强度、材料和工艺等。故在机械原理学科中常用“综合”来代替上述的“设计”这一名词，以示区别。综合也就是分析的逆问题。

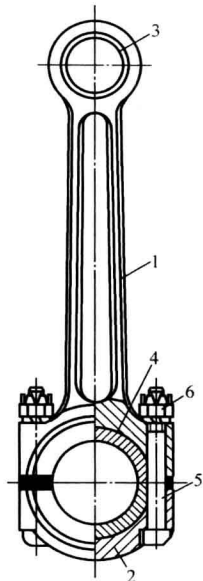


图 1-2 连杆
1—连杆体 2—连杆头
3、4—轴套 5—螺栓
6—螺母

第二节 机构的分析与综合及其方法

一、机构分析与综合

如上节所述，机构的分析与综合是机械原理研究的基本问题，也是机器设计者首先需

要解决的问题。

所谓机构综合即根据工艺过程对机构提出的运动学、动力学诸方面的要求来确定机构的结构形式、尺寸参数以及某些构件的动力学参数（如质量、转动惯量和质心的位置等）。应该指出，分析和综合在机械设计的过程中常常是互为因果，交替进行的。综合所得到的结果需要以分析（或需实验）来验证，而分析的结果常常为进一步改进设计提出方向。

总的来讲，机构综合大致包括三方面内容。

1. 机构的结构综合

机构的结构综合主要研究机构的组成规律。即用多少个构件，多少个运动副能组成多少个具有给定自由度的机构。这方面的研究在平面机构中有较大进展。当构件较多时，考虑不同类型的运动副，不同的构件配置可能组成的机构的种类相当庞杂，而且当构件数增多时使机构的运动积累误差增大，机械效率降低，因此总希望用较少构件的机构完成相同的运动。结构综合的目的就是根据机械预期实现的功能，把功能转换为运动，从可能构成的机构中选择实现运动方案的若干最佳机构，并把它们组合起来完成机械预期的功能。

2. 机构的尺度综合（或运动学综合）

对于一定结构形式的机构如何按给定的运动要求确定其尺寸参数，这是机构综合中研究得较充分也是十分重要的领域。工艺过程对机构提出的运动变换要求是多种多样的，典型的运动变换可概括为四种类型。

（1）刚体导引 当机构的原动件作简单运动（转动或移动）时，要求刚体在平面或空间按预定规律连续地变换其位置，此即刚体导引的机构综合问题。这类问题在工程机械、包装机械、机械手等方面的机械设计中可以遇到。

（2）函数变换 以机构原动件的运动参数（例如转角）为自变量，使机构某从动件的运动参数（如转角、位移）为自变量的给定函数，即函数机构综合。这类问题在解算机构、仪表显示装置的设计中可以遇到。例如仪表装置中将敏感元件的变形与被测物理量的非线性关系转变为指示装置示数刻度与被测物理量间的线性关系。

（3）轨迹复演 设计一机构使其运动过程中连杆上某点的轨迹能近似地与给定曲线复合，即复演轨迹机构综合。平面连杆机构连杆上各点在机构运动过程中绘出各种各样的连杆曲线，因此复演轨迹的机构综合是通过改变机构结构尺寸以及复演点在连杆上的位置尺寸而实现的。

（4）瞬时运动参数约束 机构在运动过程中各构件的运动参数是不断变化的，如果按给定机构中某些构件在某些特定位置时的运动量（如角速度、角加速度或线速度、线加速度等）来设计机构的结构参数，即为瞬时运动量约束机构综合。如带有间歇的机构综合即属此类。

在机构尺度综合问题中，机构在可能运动的全域内准确地实现上述要求，只有对某些个别的特殊问题才可以做到，例如图 1-3a、b 所示的正弦机构及直线导路机构等。而对一般的机构运动综合主要是研究在某一指定的区域内，近似地实现预期的运动要求的近似设计。

3. 机构的动力学综合

如果对所设计的机构不仅提出运动变换的要求，同时也提出某些动力学的要求，即为

4 机械原理

机构动力学综合。例如高速运转机械中考虑动载引起的构件弹性变形时,按机构真实运动规律与预期运动规律的误差,以及通过调整构件质量及其质心位置使机座上振动力极小的机构综合问题,即属机构动力学综合。

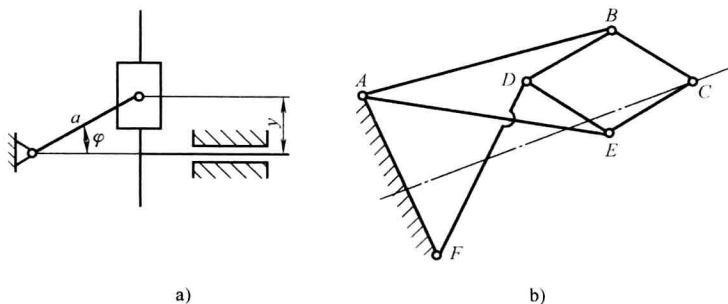


图 1-3 机构尺度综合
a) 正弦机构 b) 直线导路机构

二、机构的综合方法

尽管传统上使用的几何图解法具有简明快捷的突出优点,但同时也存在精度差,难以建立运动参数与尺度参数间的关系,且当机构复杂时难以综合出最佳机构尺寸等缺点。在国民经济飞速发展的今天,对机器提出高速、高生产率、高机械效率、高精度以及自动化、智能化等多方面的性能要求,几何图解法已不能适应。因此在本教材中对机构的分析与综合均采用解析方法。机构综合常用的近似方法有准点法、数值迭代法、优化方法及平方差法等,这里仅介绍前三种方法。

1. 准点法

若不要求在机构运动区域内准确地实现给定的条件,而只要求在区域内几个给定位置处符合给定条件,该近似设计方法称为准点法。所指定的符合预定条件的几个位置称为准点。

例如刚体导引机构综合 如图 1-4 所示,刚体位置用其上一直线 MN 表示,给定点 M 的运动轨迹 $y=f(x)$ 和 MN 的转角变化规律 $\varphi=\varphi(x)$ 。设所设计的机构某构件上 $M'N'$ 的导引规律的对应参数用 y' 、 φ' 表示,显然 y' 、 φ' 均是机构结构参数 r_k 的函数,即

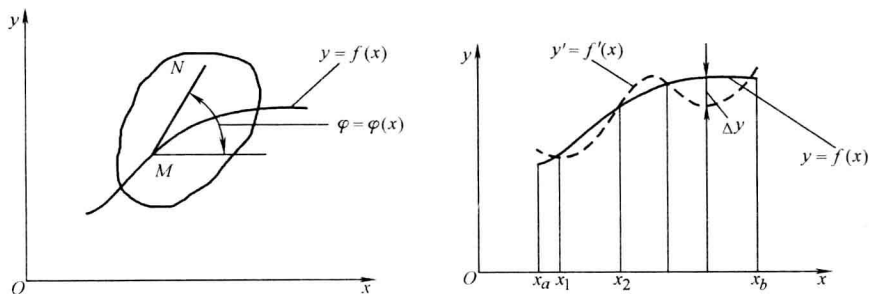


图 1-4 刚体 MN 及其给定点 M 的运动

$$\begin{cases} y' = f'(x, r_k) \\ \varphi' = \varphi'(x, r_k) \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (1-1)$$

式中, r_k 为机构的结构参数; m 为结构参数的个数。一般来说, 所选定的 r_k 使 $y = y'$ 、 $\varphi = \varphi'$ 是不可能的, 但可以在指定的几个点位 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 上, 设法选定 r_k 得到

$$\begin{cases} f(x_i) = f'(x_i, r_k) \\ \varphi(x_i) = \varphi'(x_i, r_k) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, n 为自变量 x 给定值的个数。所指定的 n 个位置即 n 个准点。上式说明, 机构所实现的运动关系只在准点处与预定的运动关系相符, 而准点以外允许有差异。此即为准点法机构综合。

准点以外 y 与 y' 不等, 其差值 $\Delta y = y - y'$ 称为机构的结构误差。减小结构误差的可能途径有:

1) 增加准点的数目。遗憾的是准点的数目受到所设计机构的待定结构参数的数目限制, 即与准点数 n 相等的可列方程数应等于待定的结构参数的数目 m , 式 (1-1) 才有定解。此外, 准点数目增多求解将变得复杂。

2) 合理确定准点的分布。研究表明, 准点位置分布也影响到结构误差的大小。初步设计时可按契比谢夫零值公式配置准点

$$x_i = \frac{(x_a + x_b)}{2} - \frac{(x_b - x_a)}{2} \cos \frac{(2i-1)\pi}{2n} \quad (1-2)$$

式中, i 为准点序号; x_a 、 x_b 为逼近域的下限和上限; n 为准点的数目。该式几何形象如图 1-5 所示 (此时 $n=4$)。

2. 数值迭代法

在机构分析和综合中常常遇到求解多元非线性方程的问题, 而当方程元数增多时, 这一求解过程几乎难以建立。此时可采用其级数并用迭代方法近似求解。

对于单变量非线性函数 $f(x) = 0$, 若当 $f(x)$ 在 x_0 处各阶导数均存在时, 其在 x_0 邻域内的泰勒 (Taylor) 公式为

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2}f''(x_0)(x - x_0)^2 + \dots = 0$$

若近似取其线性项, 则有

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad (1-3)$$

用式 (1-3) 可以将 $f(x)$ 关于 x 的非线性方程化为近似的线性方程。此即非线性方程近似线性化。这一方法将在高级别机构的运动分析及计及摩擦的机构力分析中应用。

对于多变量非线性函数 $f(X) = 0$, 在点 $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^T$ 处各阶导数均存在时, 其在 $X^{(0)}$ 邻域内的泰勒公式为

$$\begin{aligned} f(X) &= f(X^{(0)}) + f'(X^{(0)})(X - X^{(0)}) + \frac{1}{2}f''(X^{(0)})(X - X^{(0)})^2 + \dots \\ &= f(X^{(0)}) + f'(X^{(0)})\Delta X + \frac{1}{2}f''(X^{(0)})(\Delta X)^2 + \dots \end{aligned}$$

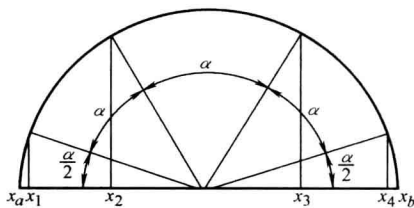


图 1-5 契比谢夫零值公式
配置准点几何图

$$=f(X^{(0)})+df(X^{(0)})+\frac{1}{2}d^2f(X^{(0)})+\cdots=0$$

若近似取其线性项, 则有

$$f(X) \approx f(X^{(0)}) + df(X^{(0)}) \approx 0 \quad (1-4)$$

而

$$df(X^{(0)}) = \left(\frac{\partial f(X^{(0)})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(X^{(0)})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(X^{(0)})}{\partial x_n} \right) \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ \vdots \\ dx_n \end{pmatrix}$$

于是对任一非线性函数组

$$f_j(X) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

有方程

$$f_j(X^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_j(X^{(0)})}{\partial x_1}, \frac{\partial f_j(X^{(0)})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_j(X^{(0)})}{\partial x_n} \right) \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ \vdots \\ dx_n \end{pmatrix} \approx 0$$

为简化符号, 记 $f_j(X^{(0)})$ 为 f_j , 且用 Δx_i 代替 dx_i , $i = 1, 2, \dots, n$, 则有

$$\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1}, \frac{\partial f_j}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \right) \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix} = -f_j$$

因此对于整个非线性方程组 $f_j(X) = 0$, $j = 1, 2, \dots, n$, 可得矩阵方程式 (1-5)

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ \vdots \\ -f_n \end{pmatrix} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 求出第 k 次迭代的 $\Delta X^{(k)}$ 后再由下式求出第 $(k+1)$ 次迭代的 $X^{(k+1)}$

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)}$$

就可以求出点 $(k+1)$ 处的 $f_j(X^{(k+1)})$ 的值。如此反复直到 $(k+r)$ 次使得

$$|f_j(X^{(k+r)} + \Delta X^{(k+r)})| \leq \varepsilon$$

为止。 ε 为根据需要所规定的极小值。此时的 $X^{(k+r+1)}$ 即为所求。

此种逼近求解方法通常称为牛顿—拉普森 (Newton-Raphson) 算法。

3. 优化方法

数学规划被引入机构综合中后, 提出了机构的最优化设计问题。机构综合的近似方法必然存在着结构误差, 而这种结构误差是机构参数的函数。如何确定机构的各个结构参数以使结构误差最小, 就是一个数学规划问题。如果从机构的具体工作要求出发对机构的结构参数、运动参数和某些动力学参数加上一定的约束, 在此条件下如何合理地确定机构的参数 (包含结构参数) 以使预定追求的目标值误差 (包括结构误差及其他性能误差) 最小, 这就是**机构最优化综合问题**。

在机构最优化综合问题中, 关键之一是建立优化数学模型, 其二是优化方法。由于本课程的重点不是优化方法, 因此本书仅从实用观点出发介绍优化的一般概念以及实用的两种优化方法。对优化方法的深入研究不是本课程要解决的问题, 可参阅有关专著。

优化问题的数学模型包括设计变量、目标函数及约束条件。例如在 $B \times L$ 的长方形地基上要求建一个容积为 V_0 , 长宽高分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 的水箱, 要求材料消耗最少。这就是一个优化问题。所谓目标函数即设计目标, 它是以设计变量为函数的数学表达式。所谓设计变量就是作为目标函数自变量的独立设计参数, 如水箱长宽高三个设计参数中只有两个是独立的, 另一个必须满足已知水箱容积 $V_0 = x_1 x_2 x_3$ 的要求, 如确定 x_1 、 x_2 为设计变量, 则 $x_3 = V_0 / (x_1 x_2)$ 为非独立设计参数, 就不能作为设计变量。这样数学模型就可以写成如下形式:

$$\text{目标函数} \quad \min F(X) = x_1 + x_2 + \frac{V_0}{x_1 x_2}$$

$$\text{设计变量} \quad X = (x_1, x_2)^T$$

$$\text{约束条件} \quad 0 < x_1, x_2, \frac{V_0}{x_1 x_2} \leq L_i$$

式中, L_i 表示 x_1 、 x_2 、 $V_0 / (x_1 x_2)$ 中人为规定的尺寸上限。可以根据优化方法不断改变 x_1 、 x_2 的值, 使得目标函数 $F(X)$ 值最小。这一计算过程是从若干个甚至几十个、几百个方案中找到 $F(X)$ 值最小的最优方案。可见这一计算过程必须借助于计算机才能完成。

优化方法尽管是一个近似方法, 但一般可以达到工程上要求的足够精度。此法与其他方法相比的一个突出优点是: 不但可以实现机构在位置上的预期要求, 而且能使机构具有优良的运动性能和动力性能, 它是机构综合中对各类设计问题都适用的一种方便且通用的方法。

第三节 学习本课程的目的与方法

一、学习目的

在介绍了本课程研究的内容之后, 对于学习本课程的目的就不难理解了。机械类各专