



普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材

机械原理

Mechanisms and Machine Theory

◎ 于靖军 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



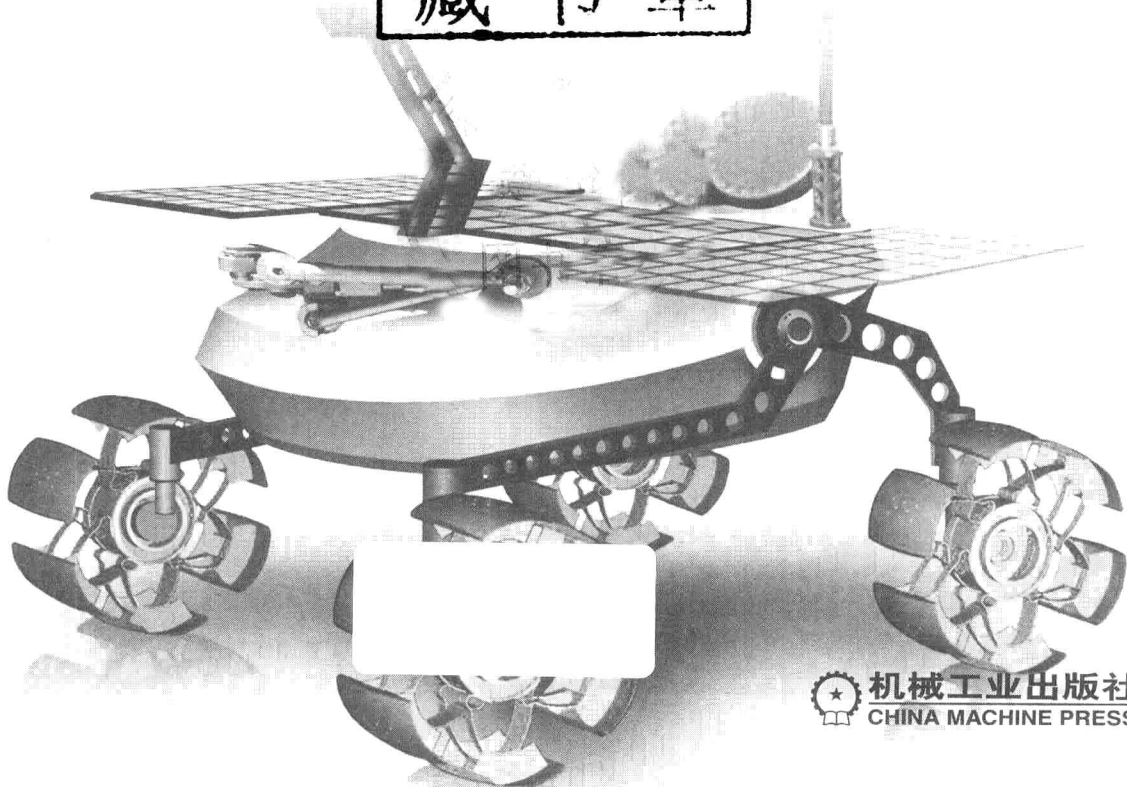
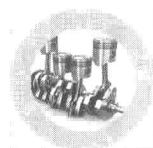
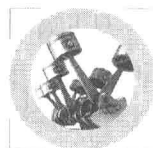
普通高等教育“十二五”卓越工程能力

机械原理

Mechanisms and Machine Theory

- ◎ 主 编 于靖军
◎ 副主编 郭卫东 韩建友 方跃法 廖启征
◎ 参 编 房海蓉 邱丽芳 李端玲 郭 盛 孙明磊 裴 旭 贾 明
◎ 主 审 张 策 张春林

常州大学图书馆
藏书章



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书详细阐述了机构学中常用机构的工作原理、分析及设计方法。本书纸质版本按照内容可分为分析篇、设计篇和附录。分析篇包括常用机构、机构的结构和运动分析、机械系统静力学和动力学基础,以及机械的平衡;设计篇包括机构的数型综合与创新设计、平面机构的运动综合、凸轮机构设计、齿轮机构设计、轮系设计,以及机构系统的概念设计;附录包括特种机构、机构系统创新设计题目和刚体运动的数理基础。

作为对教材内容的补充与深化,本书还附有网络电子资源,在纸质版本的基础上增加了若干知识点、内容、仿真文件及动画,包含各章带*小节的详细描述及标注网络电子资源的章节;此外,网络电子资源中还包含3章正文及4个附录。其中,正文包括空间连杆机构和柔性机构的设计,以及机构设计综合实例;附录包括重要名词术语中英文对照表、图论和旋量理论基础,机构史及发展趋势。

本书可作为高等学校机械工程类本科教材,也可作为相关专业的研究生、科研人员与工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/于靖军主编;郭卫东等编. —北京:机械工业出版社,2013.3
普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材
ISBN 978-7-111-41547-3

I. ①机… II. ①于…②郭… 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033027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:舒恬 责任编辑:舒恬 章承林

版式设计:霍永明 责任校对:陈越 李婷

封面设计:张静 责任印制:杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2013年8月第1版第1次印刷

184mm×240mm·24.25印张·487千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41547-3

定价:49.80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

前言

机构学是一门十分古老的科学，但机器人学的兴起，给传统机构学带来了新的活力。当前，我国科学快速进步、自主创新得到了大力发展，这为机构学带来了空前的发展机遇。经验表明，任何机械系统的创新都离不开机构的创新。国内外目前对机构学的研究可谓方兴未艾，其行业范围已不再局限于科研院所，而是逐渐向行业（如制造业）拓展，从业人员日益增加。

相对于传统机构学，现代机构学的内涵已发生了重大变化。机械原理以机构学为主要载体，也需要在内容上做一些调整。另外，为适应我国的发展需求，机械原理教学越来越向设计尤其是创新设计倾斜。本教材尝试从欧美现行机械原理教材中寻求启示，在教育部颁布的教学基本要求基础上，结合“卓越工程师教育培养计划”，加强学生基础理论和创新能力的培养。

本教材遵循以机构设计（机械系统概念设计）为主线（纲）的基本主导思想，强化创新设计。具体体现在：

（1）理论体系有别于其他教材。除第1章绪论外，全书按照内容编排分为分析篇、设计篇和附录。从第2章到第7章是本书的分析篇，主要讲解与机构结构学、运动学及静、动力学分析相关的基本概念、原理及方法。第2章（包括附录A）主要帮助学生认识机构，介绍丰富多彩的机构世界。第3章主要对机构的结构进行解析，主要包括两个部分：自由度分析与结构组成原理。第4章介绍机构的位移、速度和加速度的各种分析方法及适用范围。第5章介绍机构的静力学分析方法，同时包含机构摩擦与自锁方面的内容。第6章为机械系统的动力学基础。第7章主要涉及有关机构静平衡、动平衡的基本方法。从第8章到第13章是本书的设计篇，包括机构综合与创新设计方法、各类机构（含平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系等）及机构系统的运动设计等。第8章主要介绍机构设计过程及几种主要构型综合方法。第9章侧重于平面机构运动综合方面的内容。第10~12章分别为凸轮机构、齿轮机构及轮系的设计。第13章则详细讲述了组合机构系统的概念设计过程。

（2）将本科机械原理与研究生高等机械原理的主要知识点有机衔接于一体。本书虽以简单的平面机构为主，但增加了对单闭链空间机构、并联机构、柔性机构等新机构相关概念的陈述，反映了学科的最新研究进展和成果。

（3）侧重介绍机构创新设计的理论、方法及实践内容，并提供专门章节对数理

基础进行描述。

(4) 注重将机构原理与现代设计方法相结合, 强化虚拟样机设计思想, 侧重于使用解析法对机构进行分析与设计。

(5) 对各个主要知识点的阐述(如速度瞬心、构型综合、运动综合等)都由浅入深, 力求详尽。此外, 还介绍了对机构进行分析与设计的多种方法。

(6) 将最新的科研成果融入于教学中。

本教材在内容表现形式上也进行了较大幅度的变革: 提供大量的机构简图和示意图(多数为半实体或实体模式)、真实图片、习题和设计案例, 并提供相应的网络电子资源, 包括机构运动仿真、录像等。读者可通过访问网址 www.cmpedu.com/gaojiao/41547/wrindex.html 下载相关文件。为了方便读者在阅读本书时观看相关机构的运动仿真动画及视频, 本书中包含了近三百个二维码, 读者可使用智能手机或平板电脑扫描二维码, 上网观看相关的资源。

本书纸质版的内容按照 50~70 学时编写而成, 主要用于本科生的“机械原理”教学。网络电子资源中则补充了高等机构学的教学内容。若作为研究生教材, 建议配合网络电子资源使用。

参加本书编写的院校有北京航空航天大学、北京科技大学、北京交通大学、北京邮电大学 4 所院校。编写该书的作者均由这四所高校中从事机械原理教学与机构学科研一线的教师组成。每位主编及副主编都有编写机械原理及机构学方面教材的经历。教材封面的机构图源于上海交通大学高峰教授的杰作。

本书编写过程中, 得到了很多同仁的大力支持, 在此表示衷心的感谢。全书中多数并联机构的三维线框图源于清华大学刘辛军教授创造性的劳动; 书中涉及的部分机构分析与设计实例来自于北京航空航天大学博士学位论文; 另外陆登峰、李伟、李振国、旷静、余家柱等研究生也参与了文中机构的绘制与仿真工作。在编写过程中参考了国内外一些同类教材及著作, 在此也对这些教材及著作的作者表示真诚的感谢!

本书承蒙天津大学张策教授、北京理工大学张春林教授精心审阅, 并提出许多宝贵意见和建议, 在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限, 书中难免有疏虞之处, 敬请读者和专家批评指正。

在使用二维码观看本书附带的仿真动画及视频资源时, 需要注意以下问题:

1. 本书附带的所有仿真动画及视频资源免费向读者提供, 但是在观看仿真动画需要耗费较大流量, 请尽量在 Wi-Fi 环境下访问相关资源。本书作者和出版社不承担任何由于观看本书附带仿真动画及视频资源产生的流量及上网费用。

2. 部分的动画文件较大, 在网络使用环境欠佳的情况下, 可能会出现网页打开较慢或无法显示动画的情况, 请读者谅解。

3. 本书附带的所有视频文件版权所有, 未经允许请勿擅自使用。

4. 由于二维码技术首次在机械原理教材中使用, 难免有不成熟的地方。若读者在使用本书时遇到任何问题, 请您及时与本书策划编辑联络(联系方式见本书读者信息反馈表)。感谢您的支持和理解!

编者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 机器与机构	1
1.2 运动与约束	3
1.3 机构分析与综合	4
1.4 力学与机构学	4
1.5 数学与机构学	5
1.6 辅助工具及软件	5
1.7 机构设计与工程实践	6
1.8 机构设计实例——小型扑翼机构的设计	6
1.9 本书涉及的研究内容与目标	11
1.10 辅助阅读材料	14
讨论题与习题	14
第2章 常用机构	15
2.1 机构的识别——构件、运动副与运动链	15
2.2 机构的表达——机构运动简图与其他表达形式	23
2.3 常用机构的特点及应用	25
2.4 机构的等效与转化	38
2.5 辅助阅读材料	43
讨论题与习题	43
第3章 机构的结构分析	46
3.1 一般意义上的机构自由度计算公式	46
3.2 机构的结构组成分析	57
3.3* 机构的自由度与约束分析（网络电子资源）	63

3.4 辅助阅读材料	63
讨论题与习题	63
第4章 机构的运动分析	66
4.1 平面机构运动分析的图解法	67
4.2 平面机构速度分析的瞬心法	71
4.3 平面机构位置分析的解析法	78
4.4 平面机构速度、加速度分析的解析法	84
4.5 平面机构运动学分析通用方法总结	93
4.6 平面机构的运动学性能指标	93
4.7* 空间连杆机构的位置分析 (网络电子资源)	101
4.8* 空间连杆机构的速度、加速度分析 (网络电子资源)	101
4.9 辅助阅读材料	101
讨论题与习题	102
第5章 机构静力学基础	105
5.1 作用在机械上的力	106
5.2 不考虑摩擦情况下平面机构的静力分析	107
5.3 使用解析法直接计算平衡力和平衡力矩	113
5.4 运动副中摩擦力的确定	116
5.5 考虑运动副摩擦的机构力分析	119
5.6 自锁	120
5.7 机械效率与自锁	123
5.8* 机器人机构的力雅可比矩阵 (网络电子资源)	126
5.9 辅助阅读材料	126
讨论题与习题	126
第6章 机械系统动力学基础	128
6.1 机械的运转	129
6.2 基于拉格朗日方程的机械动力学模型	130
6.3 单自由度机械系统的等效动力学模型	135
6.4 机械运转周期性速度波动的调节	142
6.5 辅助阅读材料	147
讨论题与习题	147
第7章 机械的平衡	150
7.1 机械平衡的分类	151

7.2 刚性转子的平衡	151
7.3 平面连杆机构的平衡	158
7.4 辅助阅读材料	165
讨论题与习题	165
第8章 机构的数型综合与创新设计	167
8.1 机构综合的分类	167
8.2 机构创新设计过程与方法	172
8.3 机构数型综合的枚举法	176
8.4 演化法	183
8.5* 基于约束的复杂机构构型综合方法（网络电子资源）	188
8.6* 其他方法（网络电子资源）	188
8.7 辅助阅读材料	188
讨论题与习题	189
第9章 平面机构的运动综合	190
9.1 平面机构运动综合的主要任务	190
9.2 运动综合的两种主要方法	192
9.3 平面机构运动综合的图解法	194
9.4 平面机构运动综合的解析法	198
9.5 基于图谱法及实验法的轨迹综合	212
9.6 辅助阅读材料	214
讨论题与习题	214
第10章 凸轮机构设计	217
10.1 凸轮机构的运动与传力特性	217
10.2 凸轮机构的廓线设计	223
10.3 辅助阅读材料	231
讨论题与习题	232
第11章 齿轮机构设计	236
11.1 平面齿轮机构的齿廓设计原理及实现	236
11.2 渐开线标准直齿圆柱齿轮的参数设计	240
11.3 标准齿轮的加工	249
11.4 斜齿圆柱齿轮的设计	255
11.5 锥齿轮的设计	258
11.6 辅助阅读材料	260

讨论题与习题	261
第12章 轮系设计	263
12.1 定轴轮系的传动比计算	263
12.2 周转轮系的传动比计算	267
12.3 混合轮系的传动比计算	271
12.4 轮系设计	273
12.5 辅助阅读材料	278
讨论题与习题	278
第13章 机构系统的概念设计	281
13.1 机构系统概念设计的一般过程	282
13.2 基本机构的分类枚举	283
13.3 基本机构的组合方式	283
13.4 简单机构系统的创新设计方法	288
13.5 复杂机构系统的创新设计方法	289
13.6 机构系统运动方案的优选与设计	295
13.7 机构系统运动循环图	297
13.8 典型机构系统的运动分析与设计	301
13.9 综合实例	303
13.10 辅助阅读材料	305
讨论题与习题	306
附录A 特种机构	307
A.1 直线机构	307
A.2 平行导向机构	309
A.3 仿图仪机构	310
A.4 虚拟运动中心机构	311
A.5 运动缩放机构	312
A.6 变点机构	314
A.7 正交机构	314
A.8 变胞机构	315
A.9 往复直线运动机构	316
A.10 联轴装置与虎克铰	318
A.11 反向驱动机构	319
A.12 分度机构	320
A.13 振荡机构	320

A. 14	换向机构	321
A. 15	间歇机构	321
A. 16	肘杆机构	322
A. 17	常力机构	322
A. 18	双稳态机构	323
A. 19	经典的空间过约束机构	324
A. 20	常见的关节型工业机器人	327
A. 21	经典并联机器人	330
A. 22	发动机	333
附录 B	机构系统创新设计题目	335
B. 1	飞机襟翼展开机构设计	335
B. 2	飞机起落架收放机构设计	336
B. 3	飞机飞行高度指示机构设计	336
B. 4	小型扑翼机构设计	337
B. 5	触觉机构设计	338
B. 6	单自由度柔性夹钳设计	338
B. 7	钢板翻转机构设计	339
B. 8	载重汽车的起重后板设计	339
B. 9	自动钻床送进机构设计	340
B. 10	自动打标机构系统设计	341
B. 11	榉槽成型半自动切削机构系统设计	341
B. 12	薄壁零件冲压机构系统设计	341
B. 13	半自动平压模切机构系统设计	342
B. 14	平台印刷机主传动系统设计	343
B. 15	改型理发椅机构设计	344
B. 16	双人沙发床机构设计	344
B. 17	听课折椅机构设计	345
B. 18	洗瓶机推瓶机构系统的设计	345
B. 19	图形放缩机构的设计	346
B. 20	折叠伞的创新设计	346
B. 21	抛光机器人创新设计	347
B. 22	自适应越障机器人的改进设计	347
附录 C	刚体运动的数理基础	349
C. 1	坐标系	349
C. 2	向量	350

C.3	坐标变换·····	358
C.4	刚体运动的基本描述·····	360
C.5	平面刚体的相对运动·····	363
C.6	速度瞬心·····	367
C.7	刚体力学基础·····	368
C.8	空间刚体运动（网络电子资源）·····	371
参考文献·····		372

第1章

绪论

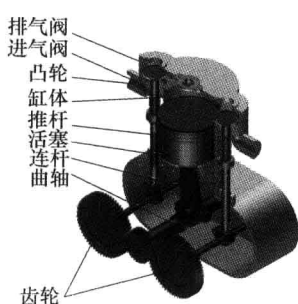
1.1 机器与机构

谈起机器，人们并不陌生。因为在日常生活及生产中，人们无时无刻地在和各类机器打交道，比如家庭必备的洗衣机、日益普及的代步工具汽车，以及五花八门的机器人等。那么，何谓机器？其共性特征体现在哪里呢？具体而言，机器（machine）是一种根据某种任务要求而设计的通过部件变换或传递运动、能量、物料及信息的装置。定义中并未对部件的性能特征或者能量的表征方式作任何限制，因此机器的范畴非常广泛。例如汽车，它是一种将燃油的热能转化为驱动车轮运动的机器，称之为工作机器（主要完成机械功或物料搬运）；还有一些可以实现其他能量形式与机械能之间转换的机器，称之为动力机器；而现在人们熟悉的复印机、照相机等机器则属于信息机器（传递或变换信息）。除了这些现代机器，还有像风车、水碾等人类早期发明的简单机器，它们同样为人类文明做出了重大贡献。

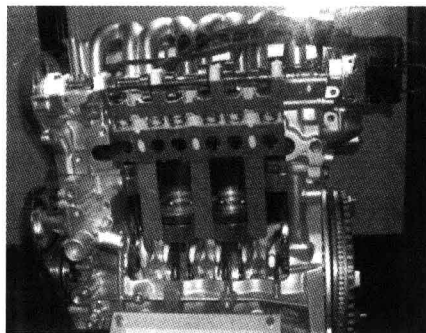
机器的表现形式尽管多种多样、千差万别，但现代机器一般都由动力、传动、执行、控制等子系统组成，每台机器上都在一定程度上存在着“机械元素”，例如，大家所熟悉的汽车、机器人等。就其功能实现而言，机器的本质共性在于通过“机械运动”来实现各物理量的传递和变换。因而，我们不妨将结构各异的机器中能够实现特定运动传递与变换的子系统单独抽出来，研究其共性，并赋予它们一个名词术语——机构（mechanism）。

以单缸四冲程内燃机（图 1-1）为例，它属于动力机器。对其工作原理的描述可参考附录 A. 22。图 1-2a ~ c 则分别展示了该机器内含的三种机构：曲柄滑块机构、凸轮机构和齿轮机构。其中，由缸体、活塞、连杆和曲轴组成曲柄滑块机构，当燃气在缸体内腔燃烧膨胀而推动活塞移动时，通过连杆带动曲轴绕其轴线转动，从而实现了从移动到转动运动形式的转换。由于以上四种构件的基本形状为杆状或块状，因而称之为连杆机构（linkage）；而由凸轮和推杆组成凸轮机构（cam mechanism），机构中凸轮利用其特定轮廓曲线使推杆按指定规律作周期性

的往复移动；齿轮组成齿轮（系）机构（gear train），其形状特点是具有齿轮，其运动特点在于将高速转动变为低速转动。如图 1-2 所示，上述三种机构按照一定的时间顺序相互协调、协同工作，将燃油燃烧的热能转变为曲轴转动的机械能，从而使这台机器输出旋转运动和驱动力矩，成为能做有用功的机器。



a)



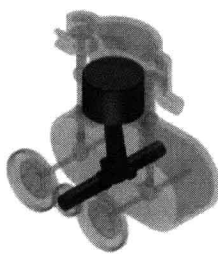
b)



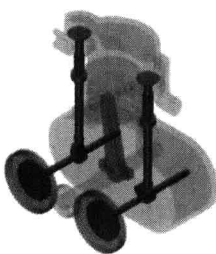
[图 1-1 仿真]

图 1-1 内燃机

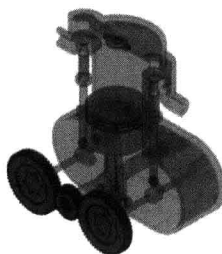
a) 结构组成 b) 实物图片



a)



b)



c)

图 1-2 内燃机中的 3 种典型机构 [仿真]⊙

a) 连杆机构 b) 凸轮机构 c) 齿轮机构

由上面的例子可以看出，一部机器可以由连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等多种机构组合而成；而有时一个简单的机器仅包含一个机构。例如人们所熟悉的雨伞和剪刀，就分别只含有一个曲柄滑块机构（连杆机构）和杠杆机构。同样，一台机器（如内燃机）可以含有多种相同或不同的机构，而一种机构也可以用在不同的机器中（如曲柄滑块机构在内燃机和雨伞中的应用）。从一定意义上讲，机器与机构之间可看做是一种具体和抽象、个性与共性的关系。除此之外，它们之间的主要差别还在于机构中没有能量的转换和信息的传递。而从结构和运动的观点来看，两者并无区别。因此，人们更习惯用机械（machinery）一词作为机器与机构的总称。

当然就机构而言，其种类绝不限于前面所提到的几种。除了齿轮机构、凸轮机构、连杆机构以外，典型的机构还有槽轮机构、棘轮机构、不完全齿轮机构等间歇运动机构，基于带传动、链传动或摩擦轮传动的挠性机构等。第 2 章和附录 A 中提供了各类机构的分类和详细描述。

⊙：本书中，凡包含 [仿真] 的图，均可在网络电子资源中提供仿真动画。

1.2 运动与约束

自然界中所观察到的所有运动都是相对运动，即被观察物体相对观察者或参照物的运动。例如，坐在公共汽车上的乘客相对车站（或车站上等车的观察者）而言在运动，但相对另一名坐在同一车里的乘客是静止的。反过来，在车站等车的观察者在行驶的公共汽车中的乘客眼里也在运动。另外，对任意两个物体而言，单个物体的运动描述都与参照物的选择有关，但其相对运动并不随着参照物的改变而变化，称之为相对运动不变原理。该原理将在本书的多个知识点中得以体现。

前面提到，机构的本质在于运动。而运动学（kinematics）就是描述物体之间相对运动的科学。通过对理论力学的学习，应当对刚体的各种基本运动有了充分的认识和理解，尤其是平面内的运动。刚体平面运动包含有定轴转动、平动及一般平面运动三种类型。绝大多数平面机构的运动最后都可以归结为平面运动，因此这也是本书重点讨论的一类运动。刚体运动还包括复杂的空间刚体运动。有关运动的描述和分析在本书后续章节还有涉及。

平面运动实质上是空间运动的一个子集。理论力学中，对于一个质点，其运动空间不超过三维，即确定质点位形的独立参数最多只需要3个（质点没有姿态）。由此引出了自由度（degree of freedom, DOF）的概念，即质点的自由度不超过3。同样，对于一个刚体，如果作空间运动，确定其位形的独立参数最多需要6个（3个位置参数和3个姿态参数），其自由度最大为6；如果作平面运动，确定其位形的独立参数最多需要3个（2个位置参数和1个姿态参数），其自由度最大为3。机构也有自由度的概念，即确定机构位置和形状所需的独立参数或广义坐标数。机构自由度是机构学研究中最重要概念之一。

空间中任一自由刚体都具有6个自由度：沿笛卡儿坐标系（即直角坐标系）3个坐标轴的移动和绕3个坐标轴的转动。这是一种最基本的定量描述机构运动的方式。因此，空间中任何刚体的运动都可以看作6个基本运动的组合，如图1-3所示。

无论质点还是刚体，如果受到约束（constraint）作用，其运动就会受到限制，其自由度相应变少。具体被约束的自由度数称为约束度（degree of constraint, DOC）。约束的种类很多，包括几何约束和运动约束，定常约束和非定常约束，完整约束和非完整约束等。根据麦克斯韦（Maxwell）理论，任何物体（无论刚性体还是柔性体）如果做空间运动，其自由度 F 和约束度 C 都应满足如下的公式

$$F + C = 6 \quad (1.2-1)$$

对于作平面运动的物体，则应满足

$$F + C = 3 \quad (1.2-2)$$

对机构而言，约束在物理上通常表现为运动副（kinematic pair）的形式；对刚性机构而言，运动副的本质就是约束。同样，约束对机构的运动会产生重要的影响，无论对机构进行构型设计、运动学设计或动力学设计，都必须要考虑约束的影响。

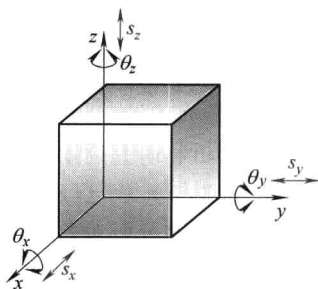


图1-3 笛卡儿坐标系下刚体运动的分解

1.3 机构分析与综合

在对机构的研究中,不可避免地要触及两个主题:机构分析 (mechanism analysis) 与机构综合 (mechanism synthesis), 而机构综合通常被称为机构设计 (mechanism design), 但它们之间的含义是有差别的。相对机构综合而言, 机构设计的内涵其实更广一些。更为重要的是, 机构综合逐渐向一门严谨的科学迈进, 而机构设计从本质上讲则是科学与艺术的统一体, 后者对创造性、直觉、想象力、判断及经验的要求不可或缺。

对一个构型和结构参数都已知的机构, 当求这个机构的工作特性 (包括运动特性与力特性等) 时, 总会得到确定的解, 这一过程称为机构分析; 反之, 对于未知机构的设计问题, 已知的是对机构的工作要求, 待求的是机构的型式和各结构参数值, 视要求不同, 可以有确定解, 也可能无解或有无穷多解。进行机构设计时, 必须在确定结构参数之前解决采用何种机构的问题, 即确定机构运动副的类型、构件数目和机构的自由度, 将这个过程称为构型综合 (type synthesis), 而确定机构结构参数的问题称为尺寸综合 (size synthesis)。随着数学及信息技术等迅速发展, 机构综合理论及方法日益完善, 并逐渐成为机构设计中一个强有力的工具。以数据结果精确可靠、高程式化等为特征的现代综合方法使机构设计变得越来越便捷, 但同样要认识到科学工具还无法完全代替设计者自身的决断和创造力。

机构综合理论及方法必须要有机构分析的支持, 后者可以为已有设计或正在进行的设计提供可靠的评估手段, 使设计变得越来越完善。往往机构设计过程中, 机构分析与机构综合交相辉映、相辅相成。无论机构分析还是机构综合, 基于数学和力学的建模方法及理论是解决问题最为有效的科学手段之一。

1.4 力学与机构学

用于分析和研究运动、力与时间相关性的学科称为力学 (mechanics)。作为一门在中世纪 (公元 476—1453 年) 就已经建立起来的科学, 力学由静力学 (statics) 和动力学 (dynamics) 两个部分组成。前者的分析对象是静态系统, 而後者的分析对象是时变系统。动力学又可细分为运动学和运动力学 (kinetics, 由欧拉于 1775 年提出), 前者只关注运动, 而后者同时关注运动和力。

对于机构设计而言, 首先需要考虑的是该机构的运动机理, 即属于机构运动学的研究范畴。相对一般运动学的概念, 机构运动学要小得多。本书将首先关注机构运动学, 并将其作为本书的重点内容, 而对于机构静力学和运动力学仅作简要介绍。机构运动学、静力学与动力学共同构成了传统机构学 (classical mechanism)。因此可以说传统机构学是力学的一个分支。图 1-4 所示为四位力学与机构学的奠基人。

值得注意的是, 运动学和运动力学可分离的前提是其所涉及的研究对象是刚体。对于柔体以及柔体组成的机构 (典型的如柔性机构), 由于其运动依赖于所施加的力, 因而其运动学和运动力学很难剥离。好在目前绝大多数真实机器的运动都可以看作刚体运动 (或组成的元素为刚性元件), 本书也将重点放在刚性机构上。



牛顿 (Newton)



欧拉 (Euler)



瓦特 (Watt)



勒洛 (Reuleaux)

图 1-4 力学与机构学的奠基人

1.5 数学与机构学

如果说机构学是力学的衍生体,数学则是机构学发展的推动力。纵览机构学的发展史可以发现,机构学更是与数学息息相关,中世纪许多新机构的发明都是从数学中得到的启示。现代机构学的诞生更是离不开数学工具的使用,如勒洛在其专著《机器运动学》(《Kinematics of Machinery》)中就阐述了机构的符号表示法和构型综合。布尔梅斯特(Burmester)提出了几何方法应用于机构的位移、速度和加速度分析。布尔梅斯特和弗洛西斯坦(Freudenstein)用几何方法研究了连杆机构的尺寸综合,形成了系统的机构设计几何学理论。而现代机构学(modern mechanism)的诞生同样也离不开数学的推动作用。计算机的发明与大量算法的提出大大提高了机构分析与综合过程中的计算效率。

与机构学联系紧密的数学工具有很多:如传统意义上的欧氏几何、线性代数与矩阵理论、用于拓扑结构分析及综合的图论(graph theory)等;现代数学工具有线几何(line geometry)、旋量理论(screw theory)、现代微分几何[如李群李代数(Lie group and Lie algebra)、克利福德(Clifford)代数等包含在其中]等。由于每种数学工具都有其自身的特色,在机构学研究中的作用也各有侧重。例如矩阵法在机构分析中有非常普遍的应用,而在机构综合过程中,图论、旋量理论以及李群李代数等数学工具的作用更为突出些。

1.6 辅助工具及软件

20世纪60年代始,计算机技术的飞速发展为机构分析与综合带来了革命性变革。最为突出的变化莫过于大量运用于机构建模、分析与设计的专用算法以及计算机辅助工具软件的诞生。这些算法可以从近30年间国内外出版的机构学(机械原理)教材及专著、机构学核心期刊的学术文献中得以体现,其中部分已经固化到各类工具软件包中。

最早的机构分析软件是由IBM于1964年发布的KAM(运动分析方法, kinematic analysis method),可对平面与空间机构的位置、速度、加速度及力进行分析。基本方法源于切斯(Chace)提出的向量多边形(vector polygon)法(本书将予以详细介绍)。

近年来开发的很多大型通用CAD/CAE软件,提供了包括NASTRAN、ANSYS等在内的基于有限元法进行机构分析的手段,但主要用于分析与力载荷相关的静力、应力等。

专用的运动学及动力学分析仿真软件主要包括 ADAMS、DADS 等, 并得到了广泛的工程应用。ADAMS 由密歇根 (Michigan) 大学开发, DADS 由爱荷华 (Iowa) 州立大学协同 CADSI 公司开发。这两种软件的功能都较强, 包括碰撞检测、冲击、弹性及控制等功能, 并含有专门的设计模块。功能相对简单的机构分析软件包括有 UG/Scenario、Pro/MECHANISM、SolidWorks、CATIA/KIN、MSC/Working Model 等。本书将以 ADAMS 为主要仿真工具, 具体使用方法可参看参考文献 [64]。

相对而言, 运动学综合软件相对较少, 并且非常具有局限性 (运动综合相比运动分析要复杂得多)。KINSYN 是最早的运动学综合软件, 由麻省理工学院研发而成。而后, 密歇根大学开发了 LINCAGES, 荷兰特温特 (Twente) 大学伙同 Heron 科技公司开发了瓦特机构设计工具软件, 荷兰 ARTAS 公司开发了 SAM 商用软件。不过以上运动综合软件只适用于平面机构。对空间机构的运动综合目前只有加州大学尔湾 (Irvine) 分校开发的非商用软件 SYNTHETICA。图 1-5 和图 1-6 所示为使用该软件包实现运动综合的两种特殊机构。

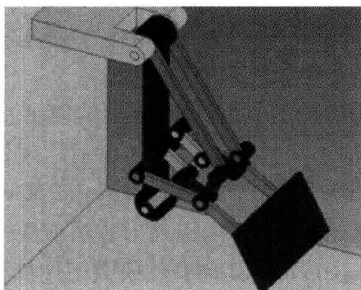


图 1-5 用于调整脚踏板位置的 6 杆机构

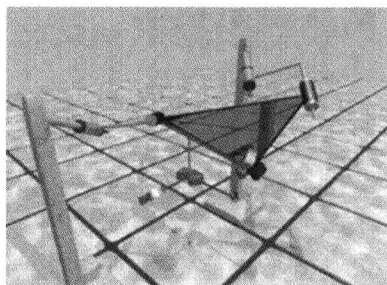


图 1-6 贝尼特 (Bennett) 连杆机构

1.7 机构设计与工程实践

机构学发展的最终目标是要服务于工程设计, 正所谓“从实践中来, 到实践中去”。正如 18 ~ 19 世纪运动几何学带来了各行业产业机构的产生, 快速推动了机械化的进程; 20 世纪后半叶以来, 计算运动学带来了大量空间机构、机器人等多种新机构的诞生, 推进了智能化的步伐。

机构学说到底是一门工程科学。这类学科的特点总是在“科学主导工程”和“工程促进科学”的反复循环中不断向前发展的。这很像设计过程本身, 分析与综合交相辉映、循环往复, 直到满足预期目标为止。科学的研究目的是探究“是什么”的问题, 工程则是对“可能用作什么”的一种创造和实现, 而这种创造本身就是设计。机构学是一门很好地将科学和工程有机结合的学科, 连接纽带正是机构设计。在机构学研究中, 机构设计过程与方法研究同样重要, 除了建立有效的理论指导之外, 其实践性不容忽视。例如, 同样的一种机构, 应用于不同的场合时, 要求的设计指标就会不同, 从而导致设计参数出现很大差异, 甚至所采用的设计方法也大不相同。有关机构设计的话题将在本书设计篇中详细涉及。

1.8 机构设计实例——小型扑翼机构的设计^[71]

机构设计是个不断往复的过程。下面通过一个具体实例 (小型扑翼机构的设计) 来了解一下