

国防科技大学“十二五”研究生重点教材

高等机构学

□ 吴学忠 吴宇列 席翔 肖定邦 编著

Gaodeng Jigouxue



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科技大学“

教材

高等机构学

吴学忠 吴宇列 席翔 肖定邦 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书在传统高等机构学教材体系的基础上,结合现代机构学研究内容,系统地介绍了机构学的基础知识和现代机构学的分析理论、分析方法以及各种新型机构。本书的主要内容包括:机构学基础、机构学分析的数学基础、机构学分析的基本理论、机构运动学分析、机构奇异性分析、机构静力学与动力学分析、新型机构等。通过这些内容的学习,读者可以对现代机构学分析的基本理论和方法有初步的了解,为将来从事机构学方面的科研和工程工作打下基础。

本书适合作为机械类硕士研究生的专业基础课或者高年级本科生的选修课教材,也可供从事机构学相关工作的科研和工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高等机构学 / 吴学忠等编著. —北京:国防工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-118-11129-3

I. ①高… II. ①吴… III. ①机构学 IV. ①TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 287296 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 344 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

机构学又称为机构和机器理论,是机械工程领域中一门基础的学科,也是一门传统的学科。近代的机构学产生于18世纪的第一次工业革命,随着各种机器在工业中的大量应用,机构学在原来的机械力学基础上,通过对机械的结构学、运动学和动力学的研究,形成了机构学独立的体系和研究内容,发展成为一门独立的学科。随着新技术的发展,和航空航天、通信、电子、计算机、纳米技术、信息技术等新兴学科相比,机构学受到的关注度越来越低,一度曾被认为是夕阳学科。但是,机械工业作为人类社会现代化发展的基础工业,其地位永远是至关重要的。任何新技术和新产品,其本身或者其制造设备都离不开机械工业的支持。同时,随着技术的发展,机构学本身也在不停地发展和进步,新分析理论、新设计技术、新结构等纷纷出现,比较典型的有微分几何分析理论、并联机构、微纳机构等,使得机构学的研究内容、研究领域和研究方法都呈现了很大的变化,机构学已经由传统机构学逐步向现代机构学发展,并且在很多新兴领域得到应用。可以肯定的是,机构学不是夕阳学科,它不会过时消失,相反,随着技术的发展,机构学的研究内容和研究手段都会越来越先进。因此,作为机械学科的研究生,非常有必要了解现代机构学的研究内容和研究方法,以便为将来从事机械学科和其他相关学科的技术工作打下基础。作为高等机构学,本书的目的就是期望通过对新理论、新方法和新机构的介绍,使读者对现代机构学有初步的了解和认识,为深入的研究打下基础。

国内外专门讲述高等机构学,并且适合研究生的教材并不多。国外比较经典的是 Sandor 和 Erdman 教授 1984 年编写的 *Advanced Mechanism Design: Analysis and Synthesis, Volume 2*。这本教材的第一卷是为本科生编写,而第二卷则适合于研究生。国内几所高校也出版了自己的教材,这些教材参照国外教材和机构学发展情况,并结合自己学校的教学和科研特点编写而成,目前主要的教材有白师贤编著的《高等机构学》,楼鸿棣、邹慧君的《高等机械原理》,陆震的《高等机械原理》,韩建友的《高等机构学》,张春林的《高等机构学》。这些教材对促进高等机构学教学和科研的发展具有重要的意义。

现代机构学研究内容越来越广泛,研究手段越来越先进,如旋量分析法、图论分析法、微分几何分析法、机器人技术、并联机构、变胞机构、奇异位形等,而这些内容在传统的教材中体现比较少。本书编者根据多年科研的经验和自己的体验,在传统教材的体系基础上,把现代机构学的一些内容加入到高等机构学的教学中,使学生更加了解和贴近机构学研究的最新进展。因此,本书在编著过程中,参考了大量国内外相关专家学者的专著,如黄真教授的并联机构理论和旋量理论,马香峰教授的机器人动力学相关理论,李泽湘教授的机器人微分几何分析理论,马里兰大学 Lung-Wen Tsai 教授的并联和

串联机构分析方法等,书中附有详细的参考文献,在此不一一列举,并对他们的学术成果表示敬意和感谢!

本书由吴学忠、吴宇列和席翔等负责主编,在编写过程中,实验室的研究生李微、王秀、王子丹等同学对部分章节的编写和绘图工作付出了辛勤的劳动,在此表示感谢。

本书适合作为机械学科硕士研究生的专业基础课教材,也可作为机械学科高年级本科生的选修课教材。同时,本书也适合其他相关专业研究生,如航空航天机构设计、机器人机构设计等,作为他们了解高等机构学内容的辅助教材。

本书在编写过程中,由于编者水平有限,时间有限,难免出现纰漏和错误,在此敬请读者批评指正。

编者 2016 年 6 月
于长沙

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 机构学发展历史	1
1.2.1 国外古代机构学成就	1
1.2.2 中国古代机构学成就	3
1.2.3 近代机构学	6
1.2.4 现代机构学	7
1.3 我国机构学发展现状	10
1.4 高等机构学研究内容	12
参考文献	13
第2章 机构学基础	15
2.1 机构学基本概念	15
2.1.1 机器、机械、机构和运动链	15
2.1.2 机构的类型	16
2.1.3 运动链的类型	17
2.1.4 运动副及其类型	18
2.2 空间机构的自由度	21
2.3 并联机构简介	24
2.3.1 概述	24
2.3.2 发展历程	24
2.3.3 并联机构的主要类型	29
2.3.4 并联机构的应用	31
2.3.5 小结	33
参考文献	34
第3章 机构分析的数学基础	36
3.1 矩阵变换	36
3.2 张量简介	43
3.3 微分几何简介	47
参考文献	51
第4章 机构学分析的基本理论	53
4.1 机构的旋量分析	53

4.1.1	基本旋量理论	53
4.1.2	矩阵运算	55
4.1.3	指数变换	56
4.1.4	旋量运动	60
4.1.5	旋量系的线性相关性	64
4.1.6	反旋量和被约束的运动	69
4.1.7	机构运动的旋量分析	73
4.1.8	机构的旋量综合	74
4.2	机构的拓扑分析	78
4.2.1	拓扑和图论简介	78
4.2.2	图论基本概念	81
4.2.3	图的矩阵表示方法	86
4.2.4	机构的拓扑图	90
4.2.5	机构同构判定	91
4.2.6	拓扑刚度矩阵	93
4.2.7	串联机床与并联机床的刚度比较	95
4.3	机构分析的微分几何方法	97
4.3.1	群论	97
4.3.2	李群	97
4.3.3	李代数	99
4.3.4	李群与刚体运动	101
4.3.5	位移子群与位移子流形	103
4.3.6	基于微分几何的并联机构构型综合	105
4.3.7	小结	111
	参考文献	111
第5章	机构运动学分析	112
5.1	运动学分析基本概念	112
5.1.1	运动学分析过程	112
5.1.2	运动学求解	113
5.2	平面机构运动学	114
5.2.1	平面四杆机构运动分析	114
5.2.2	3自由度平面并联机构运动学分析	116
5.3	空间机构运动学分析	120
5.3.1	D-H 坐标系统	121
5.3.2	空间串联机构的运动学分析	126
5.3.3	空间并联机构的运动学分析	130
	参考文献	135

第 6 章 机构奇异性分析	136
6.1 机构奇异性概述	136
6.2 串联机构的奇异性分析	137
6.2.1 串联机构的雅可比矩阵.....	138
6.2.2 雅可比矩阵的构造方法.....	140
6.2.3 雅可比矩阵的奇异性.....	145
6.3 并联机构的奇异性分析	148
6.3.1 并联机构的位形空间.....	148
6.3.2 奇异位形的分析.....	149
参考文献.....	160
第 7 章 机构的静力学与动力学分析	162
7.1 机构的静力学分析	163
7.1.1 杆件之间的静力传递.....	163
7.1.2 机构的静力平衡与力雅可比矩阵.....	166
7.2 刚体的惯性张量	168
7.3 基于牛顿—欧拉方程的动力学算法	175
7.3.1 牛顿—欧拉方程.....	175
7.3.2 牛顿—欧拉方程分析步骤.....	177
7.3.3 实例分析.....	178
7.3.4 递推算法.....	180
7.4 基于凯恩方程的动力学算法	181
7.4.1 凯恩动力学方程.....	181
7.4.2 基于凯恩方程的动力学算法.....	184
7.4.3 平面 3 自由度并联机构凯恩方程动力学算法.....	188
7.5 多体动力学分析方法	191
7.5.1 多体动力学概述.....	191
7.5.2 休斯顿多体动力学方法简介.....	192
7.5.3 休斯顿多体动力学基本内容.....	192
7.6 机构动力学分析软件	195
参考文献.....	199
第 8 章 新型机构	200
8.1 柔顺机构	200
8.1.1 概述.....	200
8.1.2 伪刚体模型.....	202
8.1.3 柔顺机构的自由度计算.....	203
8.1.4 柔顺机构的静力学分析方法.....	205
8.1.5 柔顺机构的动力分析方法.....	206

8.1.6	小结	208
8.2	仿生机构	208
8.2.1	概述	208
8.2.2	仿生机构的基本类型	210
8.2.3	典型仿生机构介绍	210
8.2.4	小结	219
8.3	变胞机构	219
8.3.1	概述	220
8.3.2	变胞机构的特点及判定	223
8.3.3	变胞机构的变胞方式	224
8.3.4	变胞机构的变胞类型	224
8.3.5	变胞机构构态及变化的数学描述	225
8.3.6	典型变胞机构分析	228
8.3.7	小结	230
8.4	微纳机构	230
8.4.1	概述	230
8.4.2	微纳机构主要类型	232
8.4.3	微纳机构分析方法的特点	233
8.4.4	典型微纳机构介绍	237
8.4.5	小结	240
	参考文献	240

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

机构是由运动副和构件组成,能实现运动转换的机械系统,它是组成机器的基本单元。机构学又称为机构和机器理论,是研究机构结构、运动学和动力学的理论科学,它是以运动学和力学为主要理论基础,以数学分析为手段,研究各类机构基本规律以及运动和动力分析与综合方法的学科,是机械设计所依据的重要基础理论学科之一。机构学形成于 18 世纪下半叶的第一次工业革命时期,随着蒸汽机的完善和广泛应用,各式各样的机构开始在工业生产中得到应用,促使了机构学在原来机械力学的基础上发展成为一门独立的科学。机构学的建立,对促进 18 世纪和 19 世纪产生的各种工作机械和动力机械性能的完善和改进具有重大的意义。随着 20 世纪电子技术、计算机技术、传感器技术、航空航天技术、空间探测技术、海洋技术等现代科学技术的发展,传统机构学发生了深刻的变化,新的研究对象、研究内容、研究方法不断充实,完善和替换了原有的理论体系,现代机构学理论体系逐步建立和发展起来。高等机构学就是立足于现代机构学理论体系,选取其中具有典型性、基础性和重要性的现代机构分析方法进行介绍,为现代机构的科学研究提供一个理论基础。

为了更好地了解现代机构学的研究内容和发展趋势,下面首先对机构学的发展历史做一个简要的回顾。

1.2 机构学发展历史

人类对机械的认识、应用和研究具有十分悠久的历史,可以说自人类诞生以来,机械就是人类在自然界生存和发展必不可少的工具。一般认为,人类和其他动物重要的区别就是会使用工具,在原始社会,各种各样工具的制造和应用,如石器工具、木制捕猎工具等,是人类对机械最原始和最直观的感知和应用。

1.2.1 国外古代机构学成就

随着人类社会的进步和知识的积累,人类所利用的机械工具越来越多,也越来越复杂。大约在公元前 3000 年左右,埃及的凯奥普斯法老修建了巨大的陵墓——金字塔。这座金字塔十分庞大,其高达 140m,占地面积 50hm^2 ,是用巨石堆积而成,称为巨石是因为每块石块最轻的也有 3t,最重的可达到 30t。在当时的社会生产水平下,如何搬运

这样重的巨石是一个十分困难的问题。据分析,当时修建者是把若干根圆木头插在石块下的间隙里当“滚子木”来移动巨石,并使用滑轮往高处提起重物。但仅用滑轮提升重物的重量和高度都有限,像金字塔那样的建筑需将巨石提升到 100m 以上的高度,这就需要另外想一些办法。于是修建者便考虑了斜面的原理^[1],即修建了一条长长的斜坡,把垫了滚木的巨石逐步推升到百米的高度。

阿基米德(Archimedes,约公元前 287—212)是古希腊物著名的物理学家、数学家,他重视数学在物理学中的应用,重视物理实验,开创了公理方式在物理学中的应用,他是在机械领域最早做出杰出贡献的科学家。在力学方面,阿基米德系统地研究了物体的重心和杠杆原理,提出了精确地确定物体重心的方法,指出在物体的中心处支起来,就能使物体保持平衡的理论。他系统并严格地证明了杠杆定律(图 1-1),奠定了静力学研究的基础,并利用这一原理设计制造了许多机械。阿基米德的《论浮体》一书中,运用公理的方法论证了任何固态物体浸入液体中所失去的重量等于它排开液体的重量,也就是被人熟知的阿基米德定律。为解决用尼罗河水灌溉土地的难题,他发明了圆筒状的螺旋扬水机(图 1-2),也就是“阿基米德扬水机”,该装置利用螺旋本身并不向上移动而把水提升到高处,可称之为螺旋式输送机的始祖^[2]。



图 1-1 阿基米德的杠杆定律



图 1-2 阿基米德螺旋扬水机

继阿基米德之后,在科学、技术领域比较活跃的人物是海伦,他对重心理论、平衡理论、五种简单的机械运动(杠杆、车轮、滑轮、斜面和螺旋)、车轮的配合、应用齿轮进行动力传动的装置、压缩空气的应用等进行了研究^[1]。海伦设计了神殿自动开闭门(图 1-3),在这个机构中,海伦利用了气体的热胀冷缩原理:虔诚的信徒向神祈祷,点燃神殿前祭奠的火,气压升高引起水的流动,神殿的大门就静静地打开;祈祷结束后,祭奠的火熄灭,气压下降后水回到原处,大门又悄悄地自动关闭。不可否认,这是个十分出色的设计。同时,他还设计了第一台可以运转的蒸汽机(图 1-4),结构原理极其简单:在一只密封的大锅上接有两根管子,圆球放在管子中间,给装满水的锅加热,水沸腾之后,蒸汽经管子进入圆球,蒸汽从圆球的两个出口喷出,致使圆球高速旋转。这个设计利用了现代喷气推进的原理,构思十分巧妙。

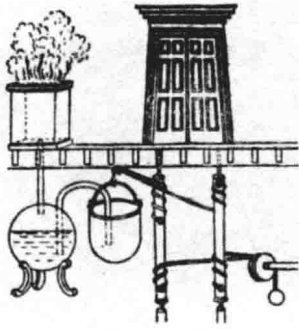


图 1-3 海伦的神殿自动开闭门



图 1-4 海伦蒸汽机

1.2.2 中国古代机构学成就

中国古代在机械领域取得了辉煌的成就,中国是世界上机械发展最早的国家之一,中国古代在机械方面有许多发明创造,在动力的利用和机械结构的设计上都有自己的特色。

早在春秋战国时期,中国古代机械已有相当高的成就。在农业生产中,铁锄、铁犁等铁制农具已得到普遍采用;纺织机械方面,手摇缫丝车的雏形已经出现,多综多踞织机也已开始使用;在战争机械方面,已有弩机、炮和四马战车等机械的出现和使用^[3]。这个时期对机械研究比较多的人物当属墨子和鲁班。墨子(前 468—前 376),春秋末战国初期宋国(今河南商丘)人,著名的思想家、教育家、科学家、军事家、社会活动家,墨家学派的创始人,创立了墨家学说,并著有《墨子》一书传世后人。墨子非常精通机械制造,他曾花费了 3 年的时间,精心研制出一种能够飞行的木鸟(图 1-5)。他在制造车辆方面也有很高的造诣,可以在不到一天的时间内造出载重 30 石^①的车子,运行迅速,省时省力,且经久耐用。除此之外,墨子谙熟了几乎全部的兵器、机械和工程建筑的制造技术,并有不少新的创造,他在《墨子·备城门》等篇中,记载了多种战争防御技术和器械,这在当时是很先进的成就,对后世的军事活动有着很大的影响^[4]。鲁班(前 507—前 444 年),复姓公输,鲁国人,具有高超的工匠技艺,一生中发明了很多的机械与工具,是中国古代杰出的匠师。在机械与工具方面,他改进了传统的锁具,发明了木工钻、铲子、石磨、木工刨等工具,《墨子》一书中还记载了他发明的能飞 3 天的竹制飞鹊。在兵器方面,他发明了云梯(图 1-6)和水战用的钩强,在一定程度上有利于军事水平的提高。由于鲁班在木工和机械方面的众多发明创造,长期以来一直被木工行业尊为祖师,为后人所熟知^[4]。

秦汉时期,古代机械在动力(弹力、畜力、风力、水力等)利用和机械结构方面的成就十分突出,中国古代的机械工程技术进入了成熟阶段。农业机械方面,掌握了利用脚踏碓、畜力碓、水碓加工粮食的方法,发明了高效率的粮食加工机械——风扇车(图 1-7)。

① 容量单位,10 斗等于 1 石。

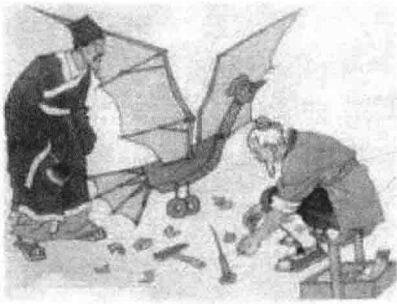


图 1-5 木鸟

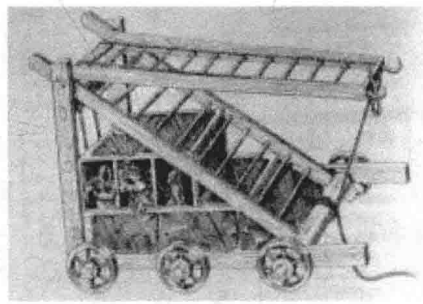


图 1-6 云梯

运输机械方面,出现了结构复杂的秦陵铜车马。在纺织机械方面,出现了手摇纺车、布机和提花机等重要机械。这一时期,在不少机械上出现了齿轮机构、凸轮机构和曲柄连杆机构等复杂的传动机构。西汉时期以指南车和记里鼓车为代表,指南车利用了齿轮、凸轮传动来实现指南,记里鼓车与指南车有不少相似之处,构思灵巧,结构精密。东汉出现具有典型代表意义的机器——水排(图 1-8),在东汉建武七年由南阳太守杜诗在人排、马排的基础上主持设计制造,利用水力进行驱动。它由“水轮—绳带传动—曲柄拉杆—鼓风器”组成,在构造上满足机器所具有的动力机构、传动机构、工作机构三个主要组成部分的要求,可以看作是一个自动机的雏形^[3]。这一时期,比较有名的还有张衡所造的天文仪器,如浑天仪。浑天仪是浑仪和浑象的总称,浑仪是测量天体球面坐标的仪器,而浑象是用来演示天象的仪表,其传动机构是齿轮装置。

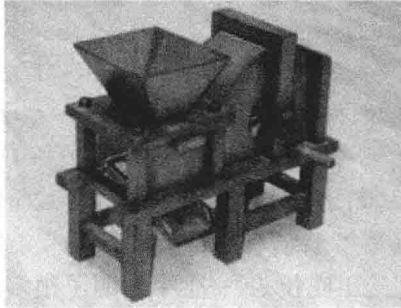


图 1-7 风扇车

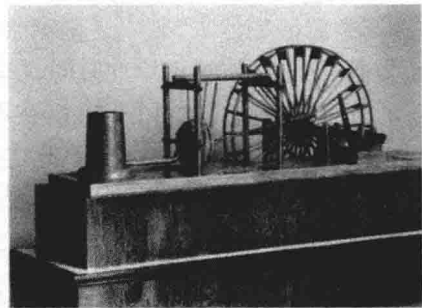


图 1-8 水排

三国至隋唐、五代时期,古代机械在这一时期得以持续发展。在战争机械方面,三国时代的诸葛亮发明了木牛流马(图 1-9),可用在崎岖的栈道上运送军粮。出师北伐时,他还发明了一种可以连发的射远器——连弩,每次可以把 10 支箭接连发射出去,效率很高。在农业机械方面,至唐宋时,手摇式缦车已经全面普及。在水力机械方面,出现了高转筒车(图 1-10)等灌溉工具。高转筒车以人力或畜力为动力,由上轮、下轮、简索、支架等部件组成,汲水高程可达 10 丈^①,如两架筒车配合则可达 20 丈。从传动方

① 长度单位,10 尺等于 1 丈。

式看,高转筒车也是链传动的实例,是现代斗式提升机和刮板输送机的雏形。

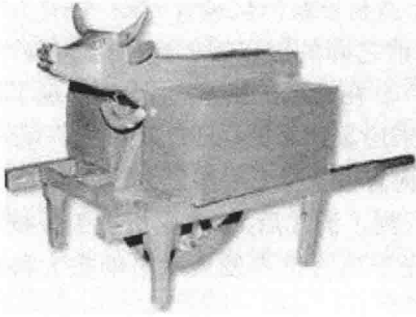


图 1-9 木牛流马

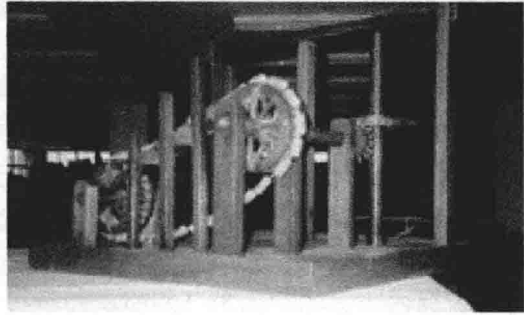


图 1-10 高转筒车

宋元时期,中国古代机械的发展水平进入高峰时期,其中以天文仪器、记时装置、兵器机械等方面的成就最为突出。天文仪器方面,北宋时期的苏颂等人在前人的基础上创制了水运仪象台(图 1-11),并首次使用了擒纵装置,可以说是现代钟表卡子的前身。他们将演示天象的浑象、观测天体的浑仪,以及计时的滴漏、司辰集成在一起,组成了“三器一机”的仪象台,结构复杂,功能多样^[5]。此外,著名的机械发明家郭守敬制作的简仪,于“百刻环内广面卧施圆轴四,使赤道环旋转无涩滞之患”,所使用的圆轴即现代的滚柱轴承^[3]。农业机械方面,这一阶段出现了论述农业机械的专著。宋代曾之谨的《农器谱》对农具的形制进行了专门论述。元代王祯《农书》中的“农器图谱”部分对当时的农业机械和许多生产工具进行了详细的论述,书中记述的水力大纺车、脚踏棉纺车等纺织机械,代表了当时纺织机械的水平^[6]。在兵器机械方面,出现了大炮、管形火器和喷射火箭等新式武器,如在宋代出现的绞车弩,需上百人张弩,射程能达千余米,杀伤力很大。除此之外,风车的发展和也在这一时期进入全盛时期,具有较高的风能利用率的立轴式风车(图 1-12)是我国独有的一项杰出发明。走马灯虽只是古代的一种玩物,但它是我国古代第一个以热力为驱动力的重要发明,相当于现代“燃气轮的始祖”^[5]。

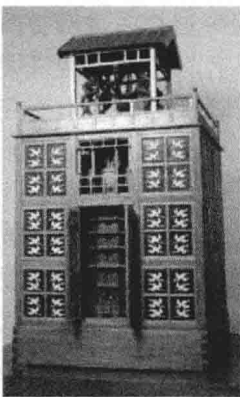


图 1-11 水运仪象台

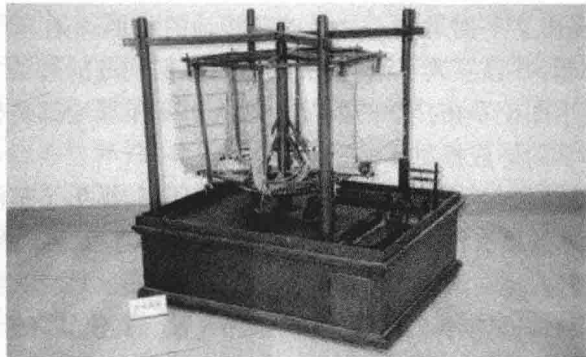


图 1-12 立轴式风车

明清时期,中国古代机械的发展趋势出现了明显的滑坡,但在某些方面仍旧取得了一些成就。在计时器机械方面,明朝初期的詹希元创制了新的机械计时器——“五轮沙漏”,其结构原理和后来的机械钟十分接近。明清之际的方以智创造了以“积沙下漏、悬桶漏水”为动力,驱动计时器运转的“运机”^[3]。在鼓风机械方面,明代出现了活塞式的木风箱,改进了金属冶铸的鼓风设备。明代宋应星编著的《天工开物》是一部关于中国古代工程技术的百科全书,讲述机械技术的内容占了全书一半以上的篇幅,充分证明了机械技术在古代工程技术中的重要地位^[7]。到了清代后期,中国机械工程技术的发展水平日渐落后于西方,几乎没再出现过领先于当时世界发展水平的重大科技成果。

1.2.3 近代机构学

18世纪下半叶,第一次工业革命促进了机械工程学科的迅速发展,机构学在原来的机械力学基础上,通过对机械的结构学、运动学和动力学的研究,形成了早期机构学独立的体系和独特的研究内容,发展成为一门独立的学科。机构学对于推动当时蒸汽机(图1-13)的发展、纺织机械(图1-14)的创新和内燃机性能的改善均起着不可估量的作用。

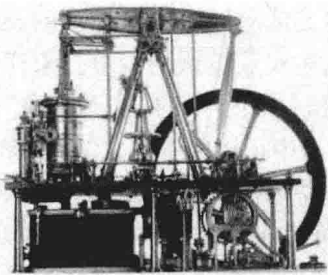


图1-13 瓦特蒸汽机

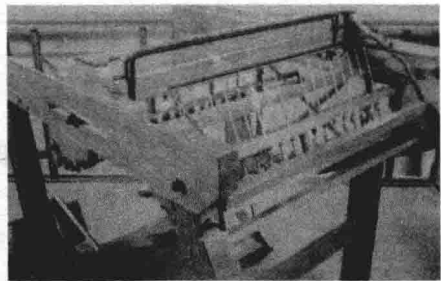


图1-14 珍妮纺纱机

莱昂哈德·欧拉是18世纪瑞士著名的数学家和物理学家,近代数学先驱之一。他是数学史上最多产的数学家之一,平均每年写出八百多页的论文,还写了大量的力学、分析学、几何学等课本。欧拉在解决力学、物理问题的过程中创立了微分方程这门学科,提出了平面运动——平动和转动的叠加理论。在1736年,欧拉解决了哥尼斯堡七桥问题,并且发表了论文《关于位置几何问题的解法》,对一笔画问题进行了阐述,是最早运用图论和拓扑学的典范。这些研究和理论都奠定了机构运动分析的基础,为近代机构学的形成提供了基础条件。

法国物理学家帕潘发明了蒸汽高压锅,提出了蒸汽机的基本原理。英国纽可门发明了早期的蒸汽机,被称为气压机、大气机。之后,英国瓦特对蒸汽机进行了多次改进:将冷凝过程安排在汽缸之外的容器(后称为冷凝器),大大提高了蒸汽机的效率。他发明了行星齿轮,将蒸汽机的往复运动变为旋转运动,使蒸汽机的应用范围得以扩展。瓦特吸取中国古代风箱设计的原理,发明了双作用蒸汽机,之后又不断改进,并发明了压力表,使蒸汽机配套齐全,切合实用。瓦特发明蒸汽机是继承了前人劳动的成果,具备时代需要的社会

背景,也是研究机构综合运动学的表现,为近代机构学的形成提供了技术支持^[8]。

英国剑桥大学的威利斯出版了 *Principles of Mechanisms*,形成了机构学的理论体系,是近代机构学形成和发展过程中的一个重要里程碑。德国的布尔梅斯特提出了几何方法应用于机构的位移、速度和加速度分析,开创了机构分析运动几何学派,使近代机构学得到了更进一步的发展。这些都是近代机构学发展史上的标志性成果,机构学和机械原理的很多理论和方法也都是这个时候形成的,为现代机构学的形成和发展提供了理论基础。

将机构的概念局限于刚性构件系统,具有确定运动,而且将机构的运动副假定为没有间隙,是近代机构学理论体系的特点,机构的运动学和动力学研究大为简化,一套适合当时发展水平的科学体系便形成了,为创造新机器和进行机械发明、改革提供了具有一定指导意义的理论和方法^[9]。近代机构学的发展将影响到机械行业各类产品的性能以及生产设备的机械化和自动化程度,推进制造业向深度和广度两个方面的发展。

1.2.4 现代机构学

20世纪60年代以后,在机构学中广泛应用计算机、大量引进各种数学计算方法,再加上机械设计科学与计算机科学、微电子科学、材料科学、软科学等的迅速融合,使机构学有了很大的发展,形成了现代机构学。现代机构学不但具有科学的先进性,同时具有很强的应用性,在科学技术的发展进程中起到独树一帜的积极作用。

新的数学分析工具的引入,如旋量、图论、微分几何等,促进了现代机构学的发展。以图论为例,其基础理论是研究机构内在结构特征而忽略一些如尺度、材料等外在因素,以点表示构件、以边表示运动副的拓扑图与机构的结构简图具有一一对应关系。在机构型综合方面,利用图论的原理,可把机构转化为矩阵符号,从而实现对机构的分析和综合手段向数学方法转变。

随着计算机的广泛应用,计算机辅助设计系统成为现代机构设计的主要手段。它是把机构设计理论、方法和参数选取等内容与计算机系统强大的逻辑推理、分析判断、数据处理等能力及其二维、三维图形显示等功能结合起来,通过人机对话的方式,直观、快速、最优地完成设计。例如,研究空间机构的拓扑特性、结构分析和运动链的自动生成,由计算机自动进行机构运动学和动力学的分析与综合,进行结构优化^[10]。

机构系统设计的引入充实了现代机构学的内容,为机构学在机械产品创新设计中的应用提供了有效途径。机械产品的核心是由若干机构组成的机构系统,系统内各机构的运动性能、动力特性和机构系统的整体性、相关性、最优化综合决定了机械产品创新程度的高低和工作性能的好坏。现代机构学的深入研究将可使机械产品的概念设计和方案设计达到一个新的高度,其中机构创新设计方法、机构系统设计新理论和新方法是机械产品概念设计和方案设计的创新点,有待我们进一步深入而系统的研究。

现代机械要求机构能够实现柔性输出,因此,机构的可控性日益成为现代机构学的重要研究内容之一。可控机构学是机构学中的前沿领域,可控机构在技术上与现代控制理论、传感器技术、人工智能技术相互结合,其研究内容具有明显的交叉性和创新性。

目前,对可调机构、可编程控制机构、混合驱动的 2 自由度机构以及多自由度可控机构的类型和设计方法的研究日益受到机构学界的重视,并且不少研究成果已经得到应用,使工作机械达到了性能优良、输出柔性、机电融合的先进水平。

现代机械产品的创新发展,对机构和机器的功能提出了新的要求,如输出特性的系统化、智能化和柔性化要求,也由此促进了广义机构学、机器人机构学、微型机构学、仿生机构学以及变胞机构学等机构学新分支的出现。

1. 广义机构学

科学技术迅速发展使机构学内容引入液、气、声、光、电、磁等工作原理,各种学科的横向结合使机构呈现多元化的趋势,扩大了机构的概念。将机构扩大为驱动元件与传统机构的集合体,使其成为“有源”机构,有利于机构的创新和机构可控性的研究和应用。在驱动元件上采用可编程控制,实现复杂多变的输出运动,输出由“刚性化”向“柔性化”转变,从而使机构有了质的变化,有利于现代机械的设计。研究广义机构的构成原理,分析运动学与动力学,进行型综合与尺度综合,形成完整的广义机构学理论体系,对于分析现有的广义机构以及对于创新发明新的机构有着重要的意义^[11]。

2. 机器人机构学

现代高新科技促进了机器人的进一步发展,机器人机构学的诞生使现代机构学进入了一个新的发展阶段,满足工业机器人与特种机器人对机构学理论和技术上的要求。机器人机构学的主要研究内容包括串、并联机器人机构学及其工业应用、灵巧手操作过程设计与分析,步行机器人机构学及工业应用等,主要针对机器人机构的类型、尺度综合、工作空间分析及稳定性等问题。机器人机构学的深入研究,冗余机器人机构问题(考虑关节弹性、冗余度等)以及新型机器人的研究等都已在现代机构学的研究领域中占有一席之地。

3. 微型机构学

微型化是现代机械的发展趋势之一,微型机械(图 1-15)具有体积小、能耗低、附加值高等特点,广泛应用在生物医学、航空航天、军事等方面^[11]。微型机构的主要研究内容包括微型机构的表面效应、尺寸效应、多尺度效应、跨尺度运动等。另外,在微型机构的动态分析与设计原理、可靠性分析与设计方面也应展开深入的研究^[12]。微型机构与微电子、微光学器件、微驱动、微传感和控制系统等高度集成构成了微机电系统(图 1-16),是现代机构学研究内容的重要趋势之一^[8]。

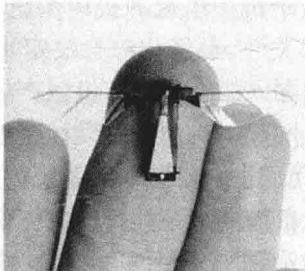


图 1-15 微型飞行器

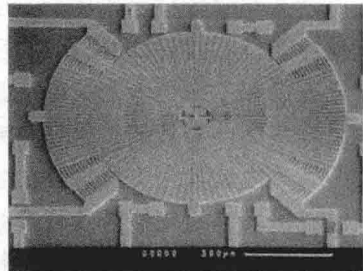


图 1-16 微机械陀螺