

# 第1章

## 绪 论

本书介绍机构和机构学自古至今的发展历史。此为绪论,主要介绍几个问题:

- (1) 机构与机器,介绍定义和这些定义从近代到现代的演变;
- (2) 机构学史简介,介绍了解机构学发展史的目的,简介机构和机构学的发展历史,以及推动和影响机构学发展的各种因素;
- (3) 本书的写作特点。

### 1.1 机构与机器

人类创造、应用机构已有数千年的历史。但是在古代,并没有形成关于机构的理论。机构学是从文艺复兴时期开始酝酿,从19世纪初叶开始才逐渐形成为一门学科的。逐渐地,在专著和教科书中就出现了比较规范化的机构和机器的定义,而这个定义从近代到现代又有所变化。

#### 1.1.1 近代机构学中关于机构和机器的定义

近代最有影响力的机构学学派——德国学派的创始人雷罗(F. Reuleaux, 1829—1905),在1875—1876年间出版的《理论运动学》<sup>[RF]</sup>被认为是机构学的开山之作。他在该书中给出了机器的定义根据英文书籍<sup>[EH]</sup>译出:

“机器是一个刚体的组合体,它们被这样地相互连接,使其中一个或多个物体被施加以力或运动时,其中一些物体被导致执行期望的工作,并伴随着期望的运动。”

大体同时兴起的是俄国学派。到苏联时期,机械原理学科的领军人物是阿尔托包列夫斯基(I. Artobolevsky)。他的教科书在苏联高校中被长期使用。他给出

的机构和机器的定义是：

“机构是一个具有一固定杆的人造运动链，它被用来完成符合于一定目的的运动。供完成生产过程或能量变换过程所需要的有效功所用的机构或复合机构称为机器”。<sup>[AI]</sup>

应该说，相对于雷罗的定义来说，阿尔托包列夫斯基有继承，也有发展。所谓发展，就是明确地区分了机构和机器。另外，用“人造运动链”代替了“刚体”，当然就更准确些。

在许多英文教材中也有与上述大体类似的定义<sup>[MH,WC]</sup>。

由于历史的原因，苏联教科书对中国的高等教育有长期的、深刻的影响。从20世纪50年代至今，从早期的两本代表性的机械原理教材（分别为黄锡恺主编<sup>[HX]</sup>和孙桓主编<sup>[SH]</sup>）到“文化大革命”（以下简称“文革”）后出现的多种版本的教材，大体都沿用了苏联学派的定义。虽然在文字上或许偶有变化，但对机构和机器都给出了清晰的定义加以区分。此外，中国人又加了一句话：“机械是机器和机构的总称。”<sup>[HX]</sup>这可能是为了将“机构和机器”翻译得更简练些。在阿尔托包列夫斯基的俄文教材和各本英文书籍中，都没有见到这个“总称”之说。英文中的“machinery”并没有被解释为是“machine”和“mechanism”的总称。

### 1.1.2 关于机器的组成

前文所述是机构和机器的定义，那么机器是如何组成的呢？

#### 1. 马克思的机器组成说

卡尔·马克思(Karl Marx)经过长达20年的酝酿、构思和撰写，在1867年完成了大作《资本论》<sup>[MK]</sup>。在该书的开始部分，马克思给出了第一个关于机器组成的说明：

“所有发达的机器都由本质上不同的部分组成：发动机、传动机构、工具机或工作机。”

这句话可被称为“马克思的机器组成说”，它流传很广，包括在中国。图1.1是对这段文字的图解<sup>[YT1]</sup>。

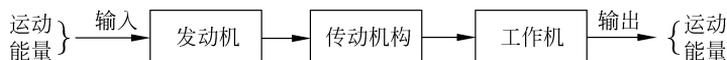


图 1.1 传统机器的组成

马克思的这一结论是如何得来的？从青年时期开始，到 1867 年出版《资本论》时(49 岁)，马克思观察、了解了第一次工业革命的全过程。

(1) 发动机：当时的发动机主要是蒸汽机。水力有一些应用，但电动机、内燃机都还没发明出来。

(2) 传动机构：马克思在文中提及，“传动机构由飞轮、转轴、齿轮、蜗轮、杆、绳索、皮带、联结装置以及各种各样的附件组成”。看来，当时只有 4 类机械传动，分别为齿轮传动、蜗轮传动、平皮带传动和绳索传动(链传动虽然在 1770 年已被发明，但直到 1880 年以后才得到广泛使用)。显然，传动机构的作用只是改变发动机输出的转速，一般是降速。

(3) 工作机：这一时期正是各种通用机床、压力加工设备(水压机、蒸汽锤)、多种纺织机和缝纫机、数种矿山和工程机械(颚式破碎机、挖掘机)、多种泵、收割机、印刷机、蒸汽机车等机器开始大量被发明、被使用的历史过程。

应该注意到，机床中齿轮传动的作用不仅是增减速，更要变速。变速，即改变切削速度和进给速度，是机械加工对机床的基本要求之一。因此，将机床中的齿轮变速机构(床头箱、进给箱)划入工作机的组成部分是更为合理的。

## 2. 马克思的机器组成说被突破

已故的吴雅老师曾写道：“这一观点(马克思的机器组成说)至 19 世纪后期斯潘塞研制成功了第一台自动车床为止，都是正确的。”<sup>[WY]</sup>我们同意吴雅老师的看法<sup>[ZC10]</sup>。

为了适应大批量加工螺纹紧固件的需要，1873 年，美国发明家斯潘塞(C. Spencer)发明了全自动转塔车床，其中包含了凸轮控制系统，即用安装在所谓“分配轴”上的多个凸轮来控制横向刀架和纵向刀架等部件的运动(如图 1.2 中的最下面的轴即为分配轴)。斯潘塞称这个分配轴为这台机床的“大脑”。虽然这还只是一个机械式的控制系统，但已经开始突破马克思的机器组成说。

在 20 世纪下半叶机电一体化的概念出现之前，曾经有过一段单纯依靠机械手段来实现机器自动控制的阶段，而凸轮则是机械式自动化的核心构件。这一“机械式自动化阶段”持续的时间可不短，约有多半个世纪。像卷烟机、包装机械中也有这类机械式自动化装置。20 世纪上半叶，液压控制也在某些机器(例如磨床)中得到广泛应用。

新出现的自动化机器用马克思的机器组成说已经解释不清楚了。但是今天，我们如果不将马克思的这一论点绝对化，而只将马克思的机器组成说看作是马克思根据他所生活的时代给出的“传统机器组成说”，那么这个定义是永远不过时的。

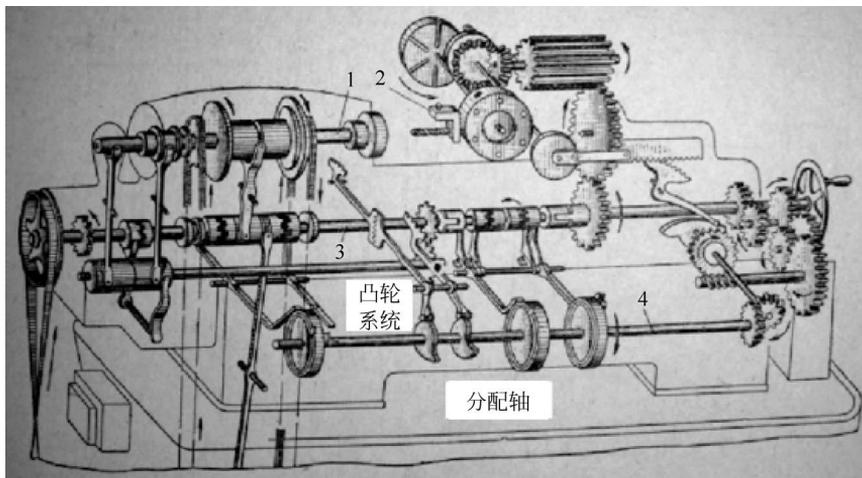


图 1.2 A20 型单轴六角自动车床中的分配轴和凸轮系统

### 3. 现代机械系统的出现

新的现代机械系统的组成概念是在第三次科技革命中形成的。

一个世纪以来,在电子技术等方面出现了一个持续的、巨大的链条——技术进步的链条。这个链条有 5 个分支:现代电子技术,电子计算机,现代控制理论,现代信号分析,传感器技术。后来,这 5 个分支就陆续地渗入机械工程中,在 20 世纪 80 年代,最终形成了一个新的学科——机械电子工程(mechatronic engineering)。它使机械系统产生了革命性的变化,出现现代机械系统,数控机床和机器人就是其典型代表。

机器人出现以后,出现了“传统机器的机器人化”的趋势<sup>[ZC10]</sup>。最典型的是工程机械的机器人化,出现了隧道凿岩、挖掘和码垛等机器人。这是一个非常重要的发展趋势,它逐步扩大了现代机械系统的空间,压缩了传统机器的空间,代表了传统机器改造的一个重要方向。

### 4. 现代机械系统的组成说

现代机械系统的实践走在其理论的前面:在一些现代机械系统出现很长时间以后,人们才归纳出“现代机械系统组成”的概念。

文献[YT1]首次给出了现代机械系统的组成说,并用结构图解释了传统机器与现代机械系统的区别。但是该文献的主题并不在于专门讨论此问题。在这里,我们对其给予进一步的细致讨论,并给出做了稍许修改的现代机械系统组成结构

图,如图 1.3 所示<sup>[ZC10]</sup>。

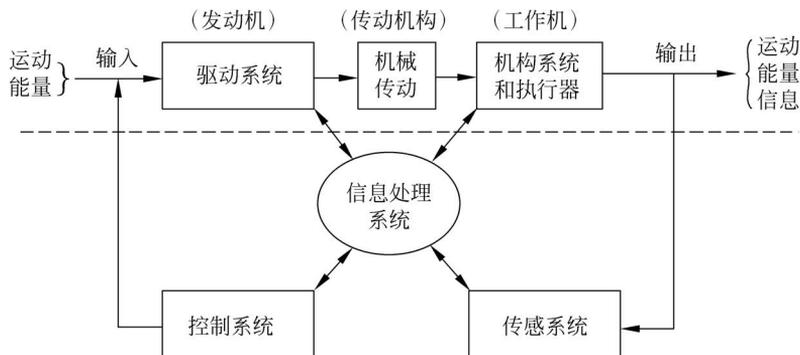


图 1.3 现代机械系统的组成

图 1.3 中,现代机械系统的 6 个组成部分是按照不同功能进行区分的,完全不代表机械的外观形态。例如,对机器人来说,其机械传动系统常常是谐波减速器;由于伺服电机都是可调速的,因此将图 1.1 中的发动机改成了驱动系统。机构系统和执行器对应于图 1.1 中的工作机。对机器人来说,机构系统就是一个串联或并联的连杆机构,而执行器就是输出端的焊枪、夹持器等。对颚式破碎机(图 1.4)来说,机构系统就是一个连杆机构,执行器是安装在连杆(图 1.4(a))或大摇杆(图 1.4(b))上的颚板。执行器的设计属于专业机械领域,不属于机构学的范畴。

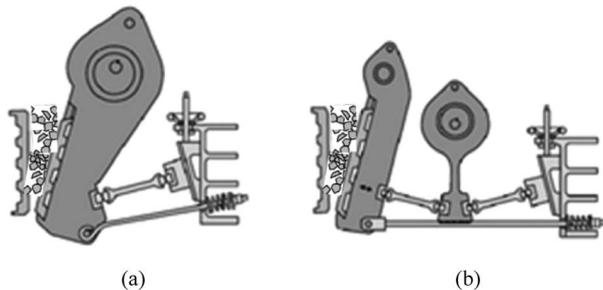


图 1.4 两种颚式破碎机

(a) 复摆式; (b) 简摆式

图 1.3 既能说明现代机械系统,也能覆盖传统机器,可以清楚地看出传统机器的一个现代化改造的方向。图中虚线的上方,以及括弧中的文字,即为图 1.1。虚线下方的部分则为由机械电子工程所带来的传感、控制和信息处理系统。传统机器要改造为现代机械系统的途径之一,就是要增加虚线下面的几个系统。

当然,从传统机器发展为现代机械系统,要从高速化、重载化、轻量化、精密化、自动化等几个方面去提高。自动化只是其中的一个重要方面,但它是导致机械系统组成变化的主要因素。

## 1.2 机构学史简介

本节介绍 3 个问题:①简述机构和机构学的发展简史;②介绍和机构学的发展相联系的几个重要关系,或推动和影响机构学发展的因素;③学习和了解机构学史的目的。

### 1.2.1 机构和机构学的发展简史

#### 1. 古代机构

本书中所称的古代,指从青铜时代开始直到文艺复兴运动(公元 14—17 世纪)开始之前的 6000 余年。在古代,出现了不少的机构和机器,也有少量的对一些机构和机器的描述性甚至分析性的文字,但没有形成理论。或者说,在古代,有机构的发明和使用,但没有机构学。

古代的机械文明主要集中在 3 个地区:中国、以埃及和两河流域为中心的阿拉伯地区、以希腊和罗马为中心的南欧地区。第 2 章中会对下述内容进行介绍:这 3 个地区的兴衰简史、机构与机器发展的不同特征、对力学和机械领域作出贡献的代表人物和相关著作,以及对各种古代机器和机构的简单介绍。

#### 2. 近代机构学

本书中,近代指从文艺复兴运动开始至第二次世界大战(以下简称“二战”)结束这一段历史时期,近代又可被划分为近代早期(文艺复兴至第一次工业革命前夜)、近代中期(第一次工业革命开始至第二次工业革命前夜)和近代晚期(第二次工业革命开始至“二战”结束)。

##### 1) 近代早期

文艺复兴本质上是一场思想解放运动。古代的机械发明发展到了近代,遇到了文艺复兴时期的达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519),达到了一个高峰。达·芬奇在人类历史上第一次发出呼唤:建立机构学的理论!从此,开始了机构学诞生之前的酝酿期。这个酝酿期延续了二三百年的:牛顿(I. Newton, 1642—1727)的经典力学为机构学的发展提供了力学基础;欧拉(L. Euler, 1707—1783)等的研究奠定了机构运动学的理论基础。

## 2) 近代中期

18世纪60年代第一次工业革命的爆发促进了机器的大量发明。19世纪初叶,法国理论运动学学派兴起,教育家蒙日(G. Monge, 1746—1818)把机构的知识引入了大学课堂。这两件事导致著名物理学家安培(A-M Ampère, 1775—1836)在法国科学院发表文章呼吁<sup>[AA]</sup>,给了这个新学科一个命名——kinematics。这一命名被很多学者看作是对机构学的命名和机构学诞生的标志。但笔者认为,在这一时期完整的机构学还远没有形成,这一命名只是对机构运动学的命名,而且它当时还被归属于力学的门下。机构的结构、机构的组成这样一些机构学特有的问题还没有被揭示出来。因此笔者认为,安培的命名可以被看作是机构学走向一个独立学科过程的开始,开启了机构学的诞生期。

1841年,英国科学家威利斯(R. Willis, 1800—1875)发出呼唤<sup>[WR]</sup>:建立机构结构学!同时,在19世纪中叶,机器动力学也得到了一定的发展。

## 3) 近代晚期

19世纪60年代,进入了第二次工业革命时期。在此期间,逐步形成了两个机构学学派:以雷罗为代表的德国学派和以契贝雪夫(P. Chebyshev, 1821—1894)为代表的俄国学派。雷罗的贡献是提出了运动副和运动链的概念,初步建立了机构结构学<sup>[RF]</sup>。而俄罗斯的青年机构学家阿苏尔(L. Assur, 1878—1920)则提出了机构学史上第一个机构的结构组成理论<sup>[AL]</sup>。

机构结构学的建立,使得近代机构学形成了包含结构学、运动学和动力学的完整体系。这才使机构学从力学中分离出来,成为机械工程门下的一个独立学科。这是机构学学科建立过程的完成期。

关于近代机构学的3个分支领域——机构结构学、机构运动学和机构动力学的发展,会在第3~5章中提及一些,但主要在第6章中介绍。

## 3. 现代机构学

从20世纪50年代中期开始,机构学进入了现代机构学的发展阶段。

现代机构学发展的大背景是第三次科技革命的兴起。在19世纪末发生的新物理学革命为未来的技术革命奠定了全新的科学基础;20世纪40年代末期的新的哲学思想为这场科技革命提供了先进的世界观和方法论。“二战”后,世界形成了较长时期的和平局面,这也有利于经济和科技的发展。

第三次科技革命以信息革命为统领,涉及原子能技术、航天技术、新能源技术、新材料技术、生物技术和海洋技术等诸多领域。

电子技术、计算机技术、控制技术、信息技术和传感器技术等领域各自都有一个为时不短的进步过程,最后汇聚成了新学科——机械电子工程。这个新学科的

出现极大地改变了机械工程的面貌。没有机械电子工程,就没有机器人,现代机构学就绝不是现在这个样子。

除此以外,以下几项技术进步对机械工程也有巨大的影响。

(1) 在数学和力学领域,出现了多体动力学、数学规划法,数值计算方法、振动理论取得了很大的进步。在人工智能领域,出现了符号运算、专家系统和人工神经网络。所有这些都先后应用于机械设计和机构学。

(2) 网络技术把世界连成一体,使资本、技术、知识和信息在全球极其迅速地流通和交流。网络协同设计和网络协同制造得到了发展。

(3) 各种新型材料和新型能源的出现,给机械设计带来了新的选择可能和新的问题。

(4) 随着航天技术的发展,要求发展新型航天器;随着海洋技术、新型能源的发展,需要相关的机器人装备。这些领域对机器人机构学、机构动力学的发展有巨大的推动作用。

电子计算机和机器人的出现和发展是影响现代机构学发展的最重要的因素。

机器人的兴起极大地冲击了机构学领域。机器人学和机构学交叉并融为一体,形成了机器人机构学。几十年来,这个交叉领域一直在扩大。它使机构学研究的课题成倍地增多、难度也大为增加。机器人是将机构学从传统推向现代的最重要的力量。

机械设计技术和制造技术日益表现出高端化、综合化的趋向,对理论指导的需求远比前两次工业革命时期更为强烈。在和平的环境中,高等教育、科学研究发展迅速。世界上出现了更多的研究型大学,实现了教育与科学研究的紧密结合。尤其是培养了大量博士生,他们是从事机械理论研究的生力军。

20世纪50年代中期,美国学者弗洛丹斯坦(F. Freudenstein, 1926—2006)在平面连杆机构综合中做出了两点创新:①用解析方法建立模型;②在计算机上进行求解。他的工作在美国机构学的发展中掀起了进步的大波,解析方法和计算机求解立即渗透到机构分析与综合的各个方面,一时形成了“美国学派”。美国开创了现代机构学,并始终是现代机构学的研究中心和主导力量。

与此同时,欧洲,特别是英、法、德、意等国,依然站在机构学发展的前沿。

改革开放以后,中国机构学在20世纪80年代崛起,只用了20~30年的时间便冲到了世界机构学的前沿,与美国和欧洲形成鼎足之势。

现代机构学在结构学、运动学、动力学等各个领域都得到了极大的发展,远非昔日的近代机构学可比。

第7章介绍现代机构学诞生和发展的背景、现代机构学的特点,以及机构学的国际组织——国际机器与机构理论联合会(IFToMM);第8章介绍现代机构学在

美国和欧洲的发展；第9章介绍现代机构学在中国的发展。关于现代机构学的各个分支领域，以及现代机构学时期相关的数学和力学的发展，会在第7~9章中提及一些，但主要在第10章和第11章中介绍。第12章简介现代机构学在未来可能的发展趋势。

### 1.2.2 推动和影响机构学发展的重要因素

研究任何学科的历史发展，都要了解推动和影响该学科发展的重要因素。研究机构学的历史，要了解以下4个重要的因素。

#### 1. 机构学发展背后的4大推动力

机构在应用中和机器是分不开的。机器理论和机构学的背后有4大推动力，它们是经济发展、国防建设、科学探索和人民生活。例如，机器人在这4个领域都有应用。

当然，对许多机构学家来说，对机构的研究是出自兴趣——巨大的兴趣，毕生的兴趣。但是，机构学研究不仅是一种个人行为，更是一种社会行为。不能排斥暂时没有，甚至在一段历史时期中都没能找到实际应用场合的纯理论研究，但终究要有实际应用作为依托，机构学才能进一步发展下去。

#### 2. 机构学的发展受到时代背景的影响

时代背景会对科学和技术的发展产生很大影响，积极的或消极的，举数例如下。

- 希腊古代特殊的社会和文化环境导致了科学发展的萌芽。
- 欧洲的中世纪大大地延缓了科学和技术的发展，因此被称为“黑暗的中世纪”。
- 第一次工业革命中，机构运动学诞生；第二次工业革命期间，两个重要的机构学学派出现，近代机构学形成完整的体系；第三次科技革命中，现代机构学出现并获得快速发展。
- 中国的汉、宋两朝经济繁荣，机器的发明就比较多；明清时代的闭关锁国阻断了中国曾经很繁荣的机械发明。
- “文革”使中国百业萧条；改革开放把中国机构学推到世界前列。

#### 3. 机构学的发展与自然科学基础的关系

机构学最重要的自然科学基础是数学和力学。

近代机构学的数学基础主要是几何、代数、微积分和微分方程。但到了现代机

构学阶段,又纳入了一个庞大的数学知识群,包括四元数、矩阵论、图论、旋量理论和有限元方法等,其中有多项并不是数学家专门为机构学而研究的,有的甚至是沉寂了百余年的创造,此时找到了应用场合,如旋量理论。据统计,国家自然科学基金委员会在1986—2011年这1/4世纪中,资助机构学的各种项目约400项,其中涉及运用现代数学工具解决机构学问题的项目就有50多项<sup>[WG]</sup>。美国科学基金资助的计算运动学的项目数占了机构学总项目数的1/3!

力学理论不仅是牛顿公式,不要忘记欧拉、拉格朗日和维登堡,没有这几个人物建立的理论,根本撑不起现代机构学的理论大厦。注意,这3个人物的理论都是“应运而生”的:欧拉适时地从质点转向了刚体,建立了刚体动力学;拉格朗日方程似乎就是为约束系统的出现而推出的;维登堡的多体动力学绝好地适应了航天器、机器人和车辆动力学的发展。

#### 4. 机构学的发展与相关科技领域的关系

除了自然科学基础外,相关科技领域也给机构学带来了强大的、不可或缺的影响,尤其是在现代机构学的发展过程中。没有计算机的出现,就不可能有现代机构学。数值计算、仿真分析、图形表达,甚至公式推导、专家系统,以及功能极为强大的商用有限元和多体动力学的分析软件,计算机无处不在!众所周知,中青年一代使用计算机的水平要高于老一辈,可以设想,年轻一代的水平还会更高。

没有控制理论的进步,就不会有现代的机器人。同理,材料领域、制造领域的进步也都对机构学有一定的影响。

#### 1.2.3 学习和了解机构学史的目的

为什么机械工程领域,尤其是机构学领域的大学生、研究生和教师,最好了解一些“机构学史”的知识呢?

60多年前,我国著名的化学家傅鹰教授(1902—1979)曾说过:“一门科学的历史是那门科学最宝贵的一部分。科学只给我们知识,而历史却给我们智慧。”<sup>[FY]</sup>

结合机构学史的研究和学习,可以进一步深化我们对1.2.2节所述的这几个重要因素的理解,形成科学的世界观,培养我们的人文精神。在教学中结合学科知识,恰当地引入一些科学史的内容,不仅可以增加教学的人文内涵,而且可以使抽象的科学知识生动起来、有趣一些,增加亲和力,有利于提升学生的求知欲望。

### 1.3 关于本书的名称

我们认识机构学学科是从大学课程“机械原理”开始的。中国的“机械原理”这