

# 机械学发展战略研究

温诗铸摇黎摇明摇主编

清华大学出版社



# 前摇摇言

机械工程与科学是一门古老的学科,它将人们从繁重的体力劳动中解放出来。当古人尝试着制造石器来狩猎或耕种时,已经产生了最初的设计萌芽。几千年来,一次次的产业革命,实现了社会分工的变革并改变了人们的生活方式,但机械科学和以此为为基础的制造业仍然是一个国家的支柱产业,是社会财富的来源,也是国家富强和国防稳固的基础。据报导,美国约 70% 的财富来源于制造业,日本约 60% 的国民生产总值是由制造业创造的。我国制造业产值占 GDP 的比重也已达到了 30% 以上。在物质丰富、科学技术高度发达和人类已进入信息时代的今天,制造业仍然发挥着无可替代的作用。

制造业的灵魂是产品设计。现代设计的特点首先是面向市场、面向用户的设计。好的产品始于先进的设计理念和对市场需求的深刻了解,以及贯穿整个设计过程中的以人为本的信念。其次,现代设计要求对产品进行全寿命周期设计,即在设计过程中要考虑设计、制造、安装、运行、维修和报废等每一个阶段中用户的要求。也就是说,设计不仅要实现产品的基本功能要求,还应该体现人性化和环境友好的先进设计思想。此外,设计对象从最初的单一功能产品变为越来越复杂的系统,功能更加先进和全面,因此需要在设计时运用集成、综合、系统的方法与技术来解决设计问题。

机械学是机械设计的理论基础,它是对机电产品进行功能综合并定量描述以及控制其性能的基础技术科学。它的主要任务是把各种知识、功能要求或约束注入设计过程,并将其加工成机械制

造系统所能接受的信息并输入机械制造系统,生产出满足使用要求和能被市场接受的产品。机械学包括机械设计学、机械强度学、机械动力学、摩擦学、机械传动科学与技术、流体传动与控制、机构学与机器人机械学以及近年来兴起的微机械学等分支学科。

近年来随着信息技术、生物技术、材料科学等学科的发展,机械学的内涵与发展趋势也产生了很大的变化,新的设计思想与设计理念正在形成,设计方法与设计手段不断实现自动化与智能化。而创新能力的提高仍然是现代设计的关键之所在。由于市场全球化,经济发达国家纷纷把产品的制造和装配等低增值部分放到低工资的第三世界国家,而自己抓住新产品、新工艺和新装备的开发设计等高增值的关键环节。反观我国,我们自主开发的产品只占全部机械产品的 源豫,并且这些产品仍然需要部分或全部引进国外先进技术。换句话说,我国缺乏完全独立自主开发新机电产品的能力,主要原因之一是设计理论与方法方面的基础研究落后。

为了适应当前科学技术的发展特点以及我国现代化建设和经济发展的需要,结合我国机械学研究领域的特点和研究现状,制定机械学研究发展战略,提出我国在前沿领域研究中的对策,国家自然科学基金委员会机械学科组织了十几位机械学领域的专家撰写了这本《机械学发展战略研究》文集。本项研究的内容与任务是:根据国家发展科技的方针和规则,遵照学科发展的自身规律,了解和分析本学科发展的国际动态、趋势和前沿,总结国内研究状况和需求,明确本学科的发展在科技、经济、社会发展中的地位、作用和影响关系,从而把握本学科发展全局,确定中、近期战略目标和重点研究领域,并对必须采取的重大步骤和措施提出建议。研究报告按照以下原则进行撰写:

(员) 先进性与针对性。作为机械学的发展战略,首先必须具有先进性,应处于国际发展的前沿,把握机械学发展的战略方向和优先领域。同时也应考虑到我国机械学发展现状与世界先进水平

之间差距,要立足于国情,找出适合我国机械学发展的重点领域和方向。

(圆) 系统性。机械学是一门系统科学。随着科学技术的发展,新的研究领域或交叉学科也在不断产生。因此在编写过程中要把握好全局与局部的关系,既要注意覆盖的范围,又要做到重点突出。另外,对于交叉领域也应予以足够的重视。

(猿) 基础性与实用性。机械学是在工程实践的基础上发展起来的技术基础学科,它不仅具有系统的理论体系,而且具有很强的实用性。在编写过程中,既要有深入的理论分析,又要与工程实践相联系,做到理论与实践的紧密结合。

(源) 可读性。由于研究报告是以著作形式出版发行,面向科学研究、工程设计、技术管理等广大读者,因此不同于一般科学论文,它必须具有很强的可读性。要做到观点明确,思路清晰,分析论证合理,材料准确,文字简练通畅并通俗易懂。

本书第 员章由中国工程院院士,西安交通大学谢友柏教授编写;第 圆章由浙江大学冯培恩教授编写;第 猿章由西安交通大学郭万林教授编写;第 源章由南京航空航天大学胡海岩教授编写;第 缘章由西南交通大学周仲荣教授编写;第 远章由重庆大学秦大同教授编写;第 苑章由浙江大学杨华勇教授等编写;第 愿章由北京航空航天大学宗光华教授编写;第 怨章由中国科学院院士,清华大学温诗铸教授编写。

基础科学研究的优先资助领域遴选和发展战略研究,已成为各国政府和学术研究资助机构战略决策的重要依据,也是实现有限研究资源优化配置和集成的途径之一,对促进学科发展具有重要意义。国家自然科学基金委员会早在 员怨愿年就开展了学科发展战略研究,已经积累了较丰富的经验。但由于我们水平有限,在编写本战略研究报告过程中,无论从内容上还是编排上一定都存在着许多不尽人意的地方,恳盼读者不吝指正。

本书的出版得到国家自然科学基金委员会工程与材料学部资助。在图书的编写过程中,清华大学摩擦学国家重点实验室邹茜、王晓力、张向军等付出了大量的辛勤劳动,在此特向她们致以诚挚的谢意。

国家自然科学基金委员会工程与材料学部

黎摇明

二〇一〇年 苑月 员日

# 目摇摇录

前言 .....	I
第 员章 摇机械学总论 .....	员
员员 摇机械学的内涵 .....	员
员圆 摇未来的机械 .....	苑
员猿 摇机械学的前景 .....	员园
员源 摇机械学知识的应用 .....	员猿
员缘 摇结束语 .....	员愿
参考文献 .....	员怨
第 圆章 摇机械设计学 .....	圆
圆员 摇机械设计学的体系结构 .....	圆
圆圆 摇机械设计理论和方法学 .....	圆猿
圆猿 摇机械设计方法和技术 .....	圆苑
圆源 摇机械设计自动化方法和技术 .....	圆愿
圆缘 摇结束语 .....	圆
参考文献 .....	圆
第 猿章 摇机械强度学 .....	猿
猿员 摇概述 .....	猿
猿圆 摇研究现状与动向 .....	猿
猿猿 摇交叉学科和热点研究领域 .....	猿

猿源 猿源 工程技术领域中的关键强度问题 .....	猿源
猿源 猿源 发展展望 .....	猿源
猿源 猿源 参考文献 .....	猿源
第 猿章 猿源 机械动力学 .....	猿源
猿源 猿源 概述 .....	猿源
猿源 猿源 研究现状和发展趋势 .....	猿源
猿源 猿源 我国与国外现有研究水平的对比 .....	猿源
猿源 猿源 今后的发展趋势和方向 .....	猿源
猿源 猿源 发展策略与建议 .....	猿源
猿源 猿源 参考文献 .....	猿源
第 缘章 猿源 摩擦学 .....	猿源
猿源 猿源 概述 .....	猿源
猿源 猿源 国内外研究进展和发展趋势 .....	猿源
猿源 猿源 今后的发展趋势和发展方向 .....	猿源
猿源 猿源 有关交叉学科的发展概况及其可能的 应用领域 .....	猿源
猿源 猿源 发展策略与建议 .....	猿源
猿源 猿源 参考文献 .....	猿源
第 远章 猿源 机械传动科学与技术 .....	猿源
猿源 猿源 概述 .....	猿源
猿源 猿源 机械传动的发展历史 .....	猿源
猿源 猿源 机械传动的发展趋势 .....	猿源
猿源 猿源 相关研究进展及展望 .....	猿源
猿源 猿源 参考文献 .....	猿源

第 苑章 摇流体传动及控制	员 愿
苑.1 摇概述	员 愿
苑.2 摇发展特征与主要科学问题	员 怨
苑.3 摇新发展方向	员 员
苑.4 摇结束语	员 愿
参考文献	员 怨
第 愿章 摇机构学与机器人机械学	员 愿
愿.1 摇沿革	员 愿
愿.2 摇研究范围及任务	员 愿
愿.3 摇国外研究进展和发展趋势	员 愿
愿.4 摇国内研究现状与差距	员 愿
愿.5 摇发展目标、重点研究领域和交叉领域	员 愿
愿.6 摇对策与建议	员 怨
参考文献	员 愿
第 怨章 摇微机械学	员 缘
怨.1 摇概述	员 缘
怨.2 摇国内外微型机械研究进展	员 苑
怨.3 摇微型机械设计提出的科学问题	员 苑
怨.4 摇微机械学研究方向	员 怨
怨.5 摇研究发展战略	员 缘
参考文献	员 苑

# 第 1 章 机械学总论

西安交通大学 谢友柏

## 1.1 机械学的内涵

“机械学”这个词在什么时候被首次使用,当时的内涵是什么,尚有待考证。自 20 世纪 50 年代起,“机械学”的使用频次增加。首先它是俄文字  $\text{МАШИНОВЕДЕНИЕ}$  的中文译名<sup>[1]</sup>,在需要译成英文时,因为找不到带“~~机械学~~”字尾并与“机械”对应的字<sup>[2]</sup>,又曾经有人用过 ~~机械学~~ 作为英文译名。后来国务院学位委员会将其作为“机械工程”一级学科中一个二级学科的名称,并逐渐广为流传。但是,其内涵在不同的用途中则往往有所不同,例如在自然科学基金委员会的学科分类中,将其作为机械学科下面的一个子学科的名称<sup>[3]</sup>。这种用法意味着机械学是一个比机械工程或机械学科范围小的学科。在很长时期中,按国务院学位委员会机械工程学科评议组的划分,机械学下面还包含着 7 个左右三级学科,它们是机械制图(后来改名为计算机图学)、机构学、机械设计、机械动力学、机械结构强度、摩擦学、机器人机构学等,后来又增加了振动冲击噪声。而自然科学基金委员会的划分中,里面还有传动机械学,但不包括振动冲击噪声。这种划分在很多情况下主要是一种行政上的安排,它们之间明显的联系则是

都属于机械工程中比较基础的领域。在计划经济体制下,学科发展也要受行政计划控制。如果一个学科不能纳入某种计划的框架,那么这个学科就难以得到发展所需要的支持,所以很多研究者都希望自己的研究方向能挤到计划框架的某一个空格中。但是行政总是从管理上的方便考虑问题,而不管学科之间的关系,有时会发生一些很有争议的事。为了弄清 МАШИНОВЕДЕНИЕ 的含义,作者(在 20 世纪 80 年代)曾经特地请教过俄国科学院机械研究所的一位所长。他的回答非常明确,МАШИНОВЕДЕНИЕ 等同于英文的 机械学,也就是说,机械学与机械工程在俄文中是一个意思。这种解释,显然是不可能为我国已经习惯的传统理解所接受。设想如果引入“机械科学”的概念,这个概念所具有的内涵无疑是大于机械工程。考虑到传统上对“机械学”的用法,把机械学定位于机械科学中的基础部分,应当是可以站得住的。而机械工程则是机械科学中的应用技术部分。对于像机械科学这样一个广泛涉及人类生产、生活的学科,承认它有基础部分和应用部分,大概不会发生什么问题。我国行政划分中的“机械工程”,虽然帽子很大,其包括的范围实际上非常狭窄,这一点从我国各大学的院、系构成和各一级学会所辖范围的划分中可以明显看出。它不包括航空航天工程、核能工程、内燃机工程、热能动力工程等,甚至也不包括车辆工程、船舶工程等。严格地讲,它仅是“机械制造工程”。这也是计划经济框架中的产物。同时也反映了长期以来我们不重视机械科学基础规律的研究,满足于引进别人的技术,仿制别人的产品,以把产品做出来为目标,不屑于下工夫去做基础研究,以至今日在产品创新上举步维艰。所以把机械学理解为机械科学的基础部分也许更能推动对于机械科学中基本理论和基本方法的研究。无论是航空航天工程、核能工程、内燃机工程、热能动力工程,甚至车辆工程、船舶工程以及机械制造工程本身都不能不以上述那几个三级学科领域为其理论基础,

因为不管如何,都不能否定这些领域所研究的对象主要是由某种机械结构所构成或其所需要的功能主要是由某种机械结构所实现的。当然随着机械科学的发展,机械学所研究的范围将会大大超越上述几个三级学科的边界,这并不等于立刻要增加无数占空格的研究方向和独立的学科分支名称。一个新学科的产生是要由学科自身发展的历程自然形成,而不能由命名典礼来解决。科学发展到现在阶段,更重要的是各个学科以及分支之间的相互渗透,更需要的是集成而不是细分。总的说来,只要认定机械学是机械科学中的基础部分这一划分,就不会产生太大的偏差。用这个划分来审视过去(不论是哪一个机构)定义的机械学的范围,与国际上通常的理解比较,作为机械科学的基础,现在机械学研究范围明显的缺陷是缺少与“能量”有关的许多学科的内容。从发展趋势上看,将要增加的会是与“智能”、“信息”和“材料”有关的一些学科的内容。下面分别进行一些讨论。

人类自从用机械代替简单工具,使手和足的“延长”在更大程度上得到了发展。但是人还以头脑为其独有的特征,为了使头脑的功能得以延伸,因而产生了控制理论、计算机科学、人工智能科学和信息科学。正如机械虽然在某些方面极度地延长了手和足的功能,却仍然不能代替手和足一样,计算机在若干方面极度地延长了头脑的功能却也不能代替头脑。另一方面,手足是受头脑控制的。理所当然,机械的发展,也必然是计算机(为简单起见,在理解上认为同时包括控制理论、计算机科学、人工智能科学和信息科学)控制下的机械。计算机不是仅仅用来做计算的机器,它起头脑的作用,有人把它译成“电脑”,我们没有采用这个译名,但是要求对计算机作广义的理解。所以我们说,不论是什么机械,都将发展成为一个机器人<sup>[10]</sup>。没有头脑的手和足,或是头脑功能低下,不能很好指挥手足,当然是不行的。但是没有手足的头脑,或是手足不灵,不听头脑指挥,又能做什么呢?有些人只看到计算机是前

沿学科,认为机械已经过时,没有什么好发展的了,其实这是一种很片面的观点。美国高技术泡沫的破灭,实际上也与这种片面的认识有关。如果头脑发展得过快,手足的发展还用不了这么多头脑的功能,头脑再强,也是没有市场的,它并不能为社会带来想象中的效益,这是一个很简单的道理。所以,中共中央在关于第十个五年计划的建议中指出,在“加快传统产业技术改造”中,要“大力振兴装备制造业”<sup>[10]</sup>,讲的就是这个道理。“头脑”发展了;“手足”也必须有相应的发展,反过来又会促进头脑的发展。现在的机器,已经远远不再是马克思时代定义的“原动机 垣传动机 垣工作机”。是不是用当时的机械科学理论就能指导今天的装备制造?结论是显而易见的,那就是说,机械科学也必须有一个与控制理论、计算机科学、人工智能科学和信息科学相适应的飞跃发展,否则不仅会妨碍机械工程本身的发展,而且会严重妨碍其他学科和国民经济的发展。

机械系统不可能脱离物质材料而存在。而材料的制备以及把它们变成零部件,到目前为止,也还在很大程度上依赖于机械。所以机械的发展始终是与材料的发展互为因果关系,机械科学的发展也始终是与材料科学的发展相互支持。当然机械科学与材料科学是两个相互独立的研究领域,不过材料科学的发展,新材料的出现,会对机械系统的原理、结构、设计和制造产生决定性的影响,从而使机械科学获得丰富的新内容和产生许多新的生长点。长期以来,机械系统是以金属材料,特别是钢铁材料为主。这是因为它们具有与当时对机械的要求相适应的多方面优异特性。从机械科学的内容看,许多研究领域都可以看到金属材料、特别是钢铁材料的影子。

由于对机械系统性能要求的苛刻程度不断提高,使得在过去数千年中材料科学、特别是对钢铁的认识和提高钢铁性能的技术得到了长足的发展。但是,金属或钢铁材料不能解决一切问题。

例如,在摩擦学环境下的材料,比结构中构件材料的工作条件要更加严酷得多<sup>[10]</sup>,金属或钢铁材料早已不能满足要求,于是产生了一类可以称之为摩擦学材料<sup>[11]</sup>的材料,其中包括以气体、液体、半液体或固体状态存在的润滑材料。其他还可以举出因为在电磁场中工作而满足一定电、磁性能要求的电、磁材料,满足超导要求的高温超导材料,在高温条件下工作的耐高温材料,在强腐蚀介质中工作的耐腐蚀材料,具有记忆或其他自适应能力的机敏材料,可以对不同物理量进行转换的能量变换材料等。这是从功能和应用分。如果从组成和结构分,在金属材料以外,陶瓷材料、高分子材料和复合材料在 20 世纪的后半期受到了特别的关注和广泛的应用,成为材料科学中的明星。从构成的尺度上分,纳米材料是近年来迅速上升的一颗新星。

与上面的出发点不同,从材料的设计思想出发,也有一些很有趣的设想,例如仿生材料就是属于这种性质。<sup>[12]</sup>

人类利用生物材料,可以追溯到人类的文明之前。在机械发展历程中,生物材料有过不可磨灭的贡献。例如传动用的皮革带、作为润滑剂的动物脂肪、水润滑轴承的仓梨木。当然,这些都是用它们的尸体。由于生物的身体有许多特异性能,由人造材料来实现这些性能自然就成为人们追逐的目标。

这里简单讨论一下仿生的问题。不仅有仿生材料,就机器本身而言,仿生设计也是非常热门的话题。经过亿万年的进化发展,生物的功能、行为和结构之间的协调和关系,简直可以说是到了美妙绝伦的境地。就拿人和动物的“头”来说,它的视觉、听觉、嗅觉、味觉等最重要的信息采集机制都离大脑这个信息处理和决策机制所在的地方如此之近,如此之密集,这可以保证信息传递的最短路径,达到传递迅速和最少干扰,同时也最容易保护这些对生命最不可少的器件,避免外界的破坏。而执行器,如手、足之类,由于行为尺度的要求,不得不远离头脑,但是如果受到损伤,其对生命

的重要程度则相对较低。实际上,即使做一块真正的皮肤,做一个真正的关节,从目前的技术水平看,也还有许多不可克服的困难。另一方面,生物材料通常都不是简单的均质材料,绝大部分都是由非常复杂的微结构组成。就拿皮肤为例,它不仅起保护内部组织的作用,柔软、弹性和根据需要变形,而且能够排泄(分泌体液),作为体毛或鳞片生长的基础,维持某种生物电的电平,提供触觉信息,接受控制器的指令做出反应,接受血液送来的营养和进行呼吸以及遭受创伤以后的自修复和新陈代谢。如果要仿生设计一种“不沾土”的材料(皮肤)就要考虑到能实现上述这些功能的微结构。要做一块真正的皮肤,不仅在材料组成上做不到,在细微结构上做不到,最重要的,是还不能赋予它们以生命。所以说,仿生是一种设计思想,但是完全模仿,在目前的技术条件下,则未必是上策。因为目前我们还做不出这种材料,做不出这种零部件,特别是做不出有生命的东西。试看现在大多数机械系统都不是完全按照人和动物的动作来实现所需要的功能,就是这个道理。

为了实现复杂的微结构,另一个关于材料设计的新思想就是所谓数字化材料<sup>[6]</sup>。其基本点是:材料各个细微部分可以具有独立的组成和性质从而能够实现各种梯度特性和功能,为此不能采用均质材料整块制造的工艺,而需要以将各个细微部分逐点拼接起来的所谓“增材制造”的概念代替。这时,材料已经不是原来的概念了,人们设计的实际上是一个能实现某种特定功能的结构,所以提出这一思想的作者们称之为“理想材料零件”,不能区分究竟是材料还是零件。当然,所有这些操作,都离不开现代的数字技术。纳米材料技术、微光机电技术、计算机技术和生命技术的结合,再加上数字化材料零件的设计与“增材制造”技术,也许有一天人们能制造出而不是“克隆”出真正意义上的生物材料。那时的机械系统就将是无数各种微光机电系统的集成,而机械学所研究的问题也会与现在大不相同了。当然,要实现这个理想,前面的

问题还非常之多。只要举其中的一点 就可以知道困难之所在了。例如 这样堆积起来的材料零件 ,各个细微部分之间物理量的传递将会是什么情况?用什么样的工艺能够保证所需要的传递特征?而失效的机制又将会是怎样?从而机械学又会面对无数新的问题。实际上 ,金属材料发展了这么多年 ,上面所提到的这些问题也没有能得到满意的解决<sup>[56]</sup>。

从以上简短的讨论可以看出 ,材料科学与机械科学之间的相互依赖关系是何等的密切。任何无视材料科学发展的机械学研究 ,都不可能机械学的发展做出很大的贡献。

## 展望未来的机械

要研究机械科学的范畴 ,不能不先研究机器本身发展的趋势。未来机器究竟是什么样子?这是很难预测和描述的。传统上认为“机械是机构和机器的总称。能把各种机械能或非机械能转换为可方便利用的机械能 ,以及将机械能变换为某种非机械能或用机械能来做一定工作的装备或器具……第一类称为动力机械……第二类称为能量转变机械……第三类称为工作机械……<sup>[57]</sup>”这是上面提到的“原动机 垣传动机 垣工作机”的另一种说法。传统上也认为 ,机械是由机械结构构成的。但是 ,在计算机广泛应用的今天 ;“机器”又常常被用来称呼计算机 ,如“机器语言”、“机器可读”、“机器学习”等。现代的计算机肯定不是主要由机械结构构成的 ,虽然在 19世纪 50年代之前 ,人们所用的计算机还完全是一种机械结构。这种现象即使不能使人认同计算机就是我们在这里讨论的“机器”(本文亦无意于进行这种联系) ,但至少也可以说明人们在追求手足延长的时候 ,期望得到一种“有头脑”的手足的延长 ,或者在潜意识中把头脑的延长也列为机器的任务。事实上 ,众多的事例表明 ,传统上关于机械仅仅是由机械结构构成的概念 ,

已经陈旧了。由于各种器件的微小化和相互嵌入,相关学科研究领域相互影响和渗透,严格划分几乎已经不可能。例如所谓的微型光学电子机械系统(配译)就是微米量级的光学器件、微电子线路和微机构组成的微系统<sup>[5]</sup>。在 market 需求的驱动下,机械的品种、结构、材料、用途以及相关理论及实现方法正在日新月异变化和发展。现在满足家庭生活用途的许多机器是一个极大的市场,大多数无法归纳到上面所讲的三类之中,像电视机、机器(宠物)猫、数码相机、扫地机等,就是这种情况。作为技术进步的许多种战争机器,恐怕也不好归到哪一类。现代和未来机器的特点是功能日益多样化、高效化和强化,特别是日益具有主动控制的功能、信息处理功能和人工智能。这种变化对于机械学的理论和解决问题的方法也会产生根本性的影响。

从上述事例中,至少可以为现代机械增加三个新的特征:

首先,机械应当是一种“有头脑”的手足的延长,即使其中的“头脑”并不理想。简单地说,应当具有主动控制的功能。例如磁悬浮系统,它并不需要人经常去关注,能根据环境输入的变化按照事先存储在机械中的控制策略自动调节悬浮力的输出,并在情况不正常时向人们发出警告。

其次,传统“机械”只处理物质和能量,但是人们现在更关心的是处理信息。如果机械排斥处理信息的功能,不是有意识地去研究机械中的信息流,其结果只能是机械自己被人们所抛弃。文献<sup>[6]</sup>定义生命系统是由信息组织起来的物质和能量。大量一代又一代新的机械产品,都是为了处理信息而不是为了处理物质和能量而设计和开发的。

第三,仅仅一般的“有头脑”的手足的延长还是不能满足人们对机器的要求,我们说过,今后的机器都将是机器人。这意味着机械将具有更强的智能,包括玩具和宠物都不例外。宠物机器猫需要能响应人的爱抚,表现出对人的感情,这就不是“有头脑”的手