



21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

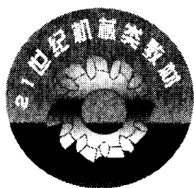
先进制造技术

宾鸿赞



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

先进制造技术

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书是 21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材。

本书体系新颖、内容丰富,反映了当代国内外先进制造技术的新成果。本书以可持续发展策略为核心,强调科技创新对于先进制造技术的重要性,强调“以人为本”等先进制造的思想理念。除绪论外,本书共分 6 章:第 1 章介绍科技创新与先进制造理念;第 2 章介绍材料成形与材料去除的先进制造技术;第 3 章介绍特种加工技术及其应用;第 4 章介绍可持续制造技术;第 5 章介绍生物制造技术;第 6 章介绍制造信息化技术。

本书可作为高等工科院校机械工程及自动化、机械设计制造及其自动化专业的教材,也可作为普通高等院校其他专业的教材或参考书,亦可供从事机械制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进制造技术/宾鸿赞. —武汉:华中科技大学出版社,2010.10

ISBN 978-7-5609-6425-6

I. 先… II. 宾… III. 机械制造工艺 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 136346 号

先进制造技术

宾鸿赞

策划编辑:刘 锦

责任编辑:姚同梅

封面设计:潘 群

责任校对:李 琴

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:22.5

字 数:477 千字

版 次:2010 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:38.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

21 世纪高等学校 机械设计制造及其自动化专业系列教材

总 序

“中心藏之，何日忘之”，在新中国成立 60 周年之际，时隔“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”出版 9 年之后，再次为此系列教材写序时，《诗经》中的这两句诗又一次涌上心头，衷心感谢作者们的辛勤写作，感谢多年来读者对这套系列教材的支持与信任，感谢为这套系列教材出版与完善作过努力的所有朋友们。

追思世纪交替之际，华中科技大学出版社在众多院士和专家的支持与指导下，根据 1998 年教育部颁布的新的普通高等学校专业目录，紧密结合“机械类专业人才培养方案体系改革的研究与实践”和“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革研究与实践”两个重大教学改革成果，约请全国 20 多所院校数十位长期从事教学和教学改革工作的教师，经多年辛勤劳动编写了“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”。这套系列教材共出版了 20 多本，涵盖了“机械设计制造及其自动化”专业的所有主要专业基础课程和部分专业方向选修课程，是一套改革力度比较大的教材，集中反映了华中科技大学和国内众多兄弟院校在改革机械工程类人才培养模式和课程内容体系方面所取得的成果。

这套系列教材出版发行 9 年来，已被全国数百所院校采用，受到了教师和学生的广泛欢迎。目前，已有 13 本列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材，多本获国家级、省部级奖励。其中的一些教材（如《机械工程控制基础》《机电传动控制》《机械制造技术基础》等）已成为同类教材的佼佼者。更难得的是，“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”也已成为一个著名的丛书品牌。9 年前为这套教材作序的时候，我希望这套教材能加强各兄弟院校在教学改革方面的交流与合作，对机械

工程类专业人才培养质量的提高起到积极的促进作用,现在看来,这一目标很好地达到了,让人倍感欣慰。

李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,人无完人,文无完文,书无完书。尽管这套系列教材取得了可喜的成绩,但毫无疑问,这套书中,某本书中,这样或那样的错误、不妥、疏漏与不足,必然会存在。何况形势总在不断地发展,更需要进一步来完善,与时俱进,奋发前进。较之9年前,机械工程学科有了很大的变化和发展,为了满足当前机械工程类专业人才培养的需要,华中科技大学出版社在教育部高等学校机械学科教学指导委员会的指导下,对这套系列教材进行了全面修订,并在原基础上进一步拓展,在全国范围内约请了一大批知名专家,力争组织最好的作者队伍,有计划地更新和丰富“21世纪机械设计制造及其自动化专业系列教材”。此次修订可谓非常必要,十分及时,修订工作也极为认真。

“得时后代超前代,识路前贤励后贤。”这套系列教材能取得今天的成绩,是几代机械工程教育工作者和出版工作者共同努力的结果。我深信,对于这次计划进行修订的教材,编写者一定能在继承已出版教材优点的基础上,结合高等教育的深入推进与本门课程的教学发展形势,广泛听取使用者的意见与建议,将教材凝练为精品;对于这次新拓展的教材,编写者也一定能吸收和发展原教材的优点,结合自身的特色,写成高质量的教材,以适应“提高教育质量”这一要求。是的,我一贯认为我们的事业是集体的,我们深信由前贤、后贤一起一定能将我们的事业推向新的高度!

尽管这套系列教材正开始全面的修订,但真理不会穷尽,认识不是终结,进步没有止境。“嚶其鸣矣,求其友声”,我们衷心希望同行专家和读者继续不吝赐教,及时批评指正。

是为之序。

中国科学院院士

John
2009.9.9

前言

2009年初,我应邀撰写作为华中科技大学出版社“21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”之一的《先进制造技术》一书。经一年的笔耕,该书终于有望在我古稀之岁出版,为我即将步入的寓公生活增添了些许欣慰。

2006年1月,我与西北工业大学的王润孝教授主编的《先进制造技术》经高等教育出版社出版,目前已重印了四次,似颇得同行认可。

我此次接受邀请再次撰写《先进制造技术》,其想法是:写书要写出个性,还是以独撰为佳;写书需要充沛的时间与精力,我感觉可以胜任;写书需有一定的阅历和经历,我这个年龄较为合适。为了有别于已出版的高教出版社版的《先进制造技术》,我重新构建了全书架构,写出了呈现在读者面前的这本华中科技大学出版社版的《先进制造技术》。

全书共分六章。

绪论论述了先进制造技术的内涵、特征;强调了科技创新是先进制造技术可持续发展的引擎;结合制造技术领域的情况,介绍了科技创新的空间、动力、方法;指出了工业化、信息化“两化”融合有利于加快我国从制造大国变为制造强国的速度;论述了国际水平制造技术的评判指标;归纳了本书的特色。

第1章阐述了科技创新与先进制造理念,指出了科技创新是先进制造技术的前提,论述了科技创新的类型、方法,通过引用先进制造技术的实例,阐述了“以人为本”、“以环境为本”、“以信息为核心”、“快速响应市场”和“师法自然”等先进制造理念。

第2章介绍了材料成形与材料去除的先进制造技术,论述了(近)净形成形技术的进展、精密和超精密加工技术、微纳加工技术、高速切削加工技术、高效磨削加工技术等,介绍了相关的刀具与机床,指出了各方法的工艺特点,并对难加工工程材料的加工作作了特别介绍。

第3章介绍了特种加工技术及其应用。国际上将特种加工誉为“21世纪的技术”,本书花了不少笔墨,重点介绍分层直接制造、工程陶瓷加

工、半导体及大规模集成电路的加工等。

第4章阐述了可持续制造技术,介绍了竞争性可持续制造的策略,以及再制造技术、误差补偿技术。

第5章介绍了生物制造技术,包括仿生制造技术、生物加工技术、活体制造技术等先进制造技术。

第6章介绍了制造信息化技术,包括信息、信息获取、信息处理、制造过程的信息化建模、虚拟制造与仿真加工、企业管理信息化等内容。

本人的学识有限,面对先进制造技术这样一个宽泛的命题,尽管在成书时花费了不少心血,但缺憾在所难免,请读者指正为感。

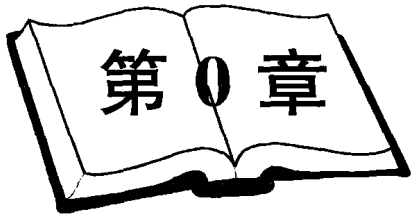
非常感谢华中科技大学出版社为本书出版所付出的辛勤劳动与支持。

宾鸿赞

2009年岁末



第 0 章	绪论	(1)
第 1 章	科技创新与先进制造理念	(6)
1.1	先进制造技术的前提——科技创新	(6)
1.2	先进制造技术的依据——先进制造理念	(18)
第 2 章	材料成形与材料去除的先进制造技术	(52)
2.1	净形成形技术	(52)
2.2	精密和超精密加工技术	(62)
2.3	微纳加工技术	(94)
2.4	高速切削加工过程技术	(113)
2.5	高效磨削过程技术	(141)
第 3 章	特种加工技术及其应用	(151)
3.1	特种加工技术概述	(151)
3.2	分层直接制造技术	(152)
3.3	工程陶瓷加工技术	(174)
3.4	半导体及大规模集成电路加工技术	(185)
第 4 章	可持续制造技术	(191)
4.1	竞争性可持续制造	(191)
4.2	再制造技术	(198)
4.3	误差补偿技术	(211)
第 5 章	生物制造技术	(220)
5.1	生物制造技术概述	(220)
5.2	生物制造	(227)
5.3	活体制造	(234)
第 6 章	制造信息化技术	(238)
6.1	信息及信息获取和预处理	(238)
6.2	制造过程的信息建模	(245)
6.3	虚拟制造与仿真加工	(302)
6.4	企业管理信息化	(331)
	参考文献	(348)



绪论

18 世纪前,人们以手锤、砧为工具,手工业制造技术不断发展;19 世纪,蒸汽机发明,各类机床、城市工厂出现,制造技术实现了机械化;20 世纪,计算机的发明使数控(NC)机床得到迅猛发展,实现了制造技术的自动化、柔性化;21 世纪,进入信息化时代,生物工程获得重大成果,将使制造技术具有网络化、信息化、智能化、全球化、生命化等特点,有望实现人工脏器的制造,使传统意义上的只能制造“死物”的制造技术具有制造有生命的“活物”的能力。

“先进”制造技术是相对于“传统”制造技术而言的,从这个意义上讲,每一个发展阶段都有各自的先进制造技术。

自美国 20 世纪后期提出 AMT(advanced manufacturing technology)这一概念,我国学界将其翻译成先进制造技术以后,“先进制造技术”逐渐成为人们耳熟能详的术语。但人们尚未能一致地给出其严谨的学术定义,对其涵盖的范围也各有见地。不过这些并不能妨碍人们对先进制造技术的内涵与特点达成共识。表 0-1 列出了当代一些主要的制造技术类别,每一种制造技术类别中都有相应的先进制造技术——凡是对该类别的传统制造技术进行创新而出现的新型技术都可以称为先进制造技术,如高速切削技术、高速磨削技术、超精密加工技术、直接金属分层制造技术、柔性制造系统(FMS)技术、可重构制造系统(RMS)技术、微纳制造技术、产品全生命周期管理(PLM)信息系统技术等都是先进制造技术。

先进制造技术的特征可归纳如下。

(1) 集成性特征

先进制造技术是多学科的渗透、交叉、融合,是集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新型学科,其中机械学科是使能学科,其他学科主要起辅助作用,而不是相反。

(2) 动态性特征

如前所述,每一种先进技术都在不断发展、进步,它们单独地或综合地促进先进制造技术的动态变化,如数控加工、分层制造技术的出现,使传统制造技术产生了突破性进展。

(3) 数字化特征

先进制造技术的制造哲理是使制造过程离散化或数字化,传统制造中的许多定性描述,都要转化为数字化定量描述,在这一基础上逐步建立不同层面的系统的数字化模型,并进行仿真。数字化特征也体现出柔性化的特征。

表 0-1 主要机械制造技术类别

制造类别	工艺方法	工艺方法简介
增量制造(SFF, 亦称增材制造、生长型制造、分层制造、快速原型制造)	立体光刻(SLA)	使用激光照射光敏树脂而固化
	分层实体制造(LOM)	使用激光或刀片切割有黏性的层片而黏结成形
	选择性激光烧结(SLS)	使用激光熔化粉末状的金属或其他物质
	熔融沉积成形(FDM)	将热塑料通过喷嘴挤出后固化成形
减量制造(亦称减材制造,传统的金属或材料切除法)	车削	采用材料去除技术,如切削加工等,在加工过程中,通过一定的方式逐渐切除毛坯上的多余材料,获得具有一定形状、尺寸、性能的零件,仍是当今最主要的加工方法
	钻削	
	铣削	
	磨削	
	电火花加工(EDM)	
	电化学加工(ECM)	
等量制造(亦称变形过程)	轧制	如将铝锭轧制成厨房用铝箔
	板材成形	如将板材切割弯曲成肥皂盒
	挤压	不同横截面的材料通过模具挤压成形
	锻造	热锻、冷锻均是在模腔中塑性变形
相变过程	铸造	将熔化的金属注入铸型中而凝固成形
	注塑成形	将热液塑料注射到模腔而成形
结构变化过程	镀层	用化学、物理方法在基体表面上镀一层其他材料,改变性能,如镀铬
	表面合金化	使表面合金化或喷丸处理
	感受残余应力	
固化连接过程	粉末冶金	金属粉末在模具中成形并烧结成形
	复合材料	不同碳纤维板的层叠是复合材料的一例
	焊接	通过局部熔化而将相邻板材连接
生物制造(或仿生加工)	原子操作技术	21世纪,生物技术、生命科学、材料科学不断融入先进制造技术,将引起一场新的制造革命,如人体脏器的制造等
	克隆制造	

(4) 可持续性特征

先进制造技术应符合可持续发展策略,能实现资源的充分利用,实现洁净生产,实现能耗少、附加值高的制造模式。

(5) 服务型特征

先进制造技术应能实现服务型制造、“最小制造最大服务”模式,以服务增加产品的附加值,这是“两化”(工业化、信息化)融合的具体体现。

科技创新是先进制造技术赖以持续发展的引擎,只有不断进行科技创新,先进制造技术才能始终保持先进性。当代世界人类面临三大社会问题:人口问题、资源问题、环境问题。如何体现“以人为本”,如何节能减排,如何实现“无废弃物”加工,如何使“两化”融合、如何实现“最小制造最大服务”的制造模式,等等,均属于当前先进制造技术的关注热点。对于我国制造业而言,发展先进制造技术,将中国由“制造大国”变成“制造强国”更是一项紧迫而明确的任务。

经过几代人的前仆后继,数亿人的发奋努力,中国已经成为继英国、美国、日本后的又一个“世界工厂”。中国制造(made in China)的产品已成为许多国家人民生活不可缺少的物件。但是,“世界工厂”并不意味着我国就是世界制造强国了,有制造没有创造的国家是难以成为制造强国的。制造强国的主要标志有六个,如图 0-1 所示。

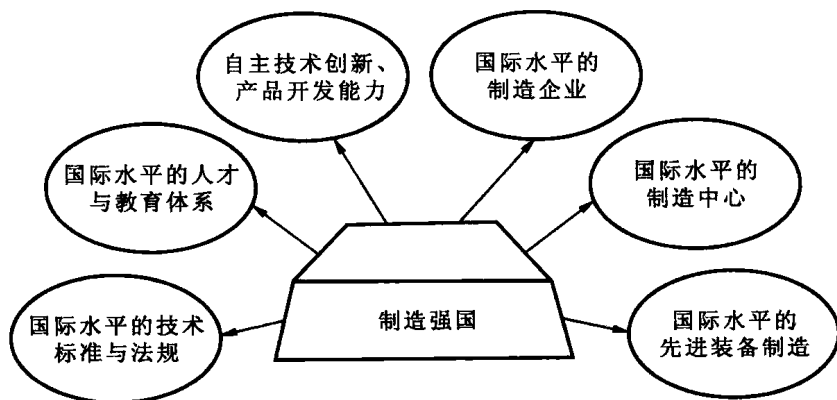


图 0-1 制造强国的主要标志

对照制造强国的这些标志,可见我国与其差距还不小。我国在 20 世纪下半叶开始了工业化进程,比欧洲晚了 200 年。我国在工业化进程中,虽然建设速度超过世界平均水平,但 20 世纪末我国工业化的指标与发达国家还相差甚远。第一,我国制造业虽名列世界第四位,但总体规模仅相当于美国的 1/5、日本的 1/4。第二,制造业的人均劳动生产率远远落后于发达国家,仅为美国的 1/25、日本的 1/26、德国的 1/20。第三,制造业结构仍然偏轻,表现为装备制造在制造业中的比重较低。第四,技术创新能力十分薄弱,产业主体技术依靠国外,有自主知识产权的产品少,依附于国外企业的组装业比重大,表现为工业增加值率仅为 26%,远低于美国(49%)、日本(38%)、德国(48.5%),并且呈现逐年降低的趋势。第五,低水平生产能力严重过剩。据第三次全国工业普查,机械、电子、化工、建材、轻工、冶金等行业生产能力利用率分别为 51.86%、54.45%、54.9%、64%、46.09%和 35.55%,同时高水平生产能力不足,大量先进装备仍主要依赖进口。第六,国有企业改革远未到位。企业集中度低,大型骨干企业少,而且围绕大型骨干企业的中小企业群体也未形成。

但也应该清醒地看到,信息化时代的优势、信息的网络传输,使我国更有条件做到“两化”融合,缩短工业发达国家曾经走过的工业化历程。只要坚持科学发展观和科学的发展方式,是可以用较短的时间将我国建设成为制造强国的。

什么样的制造技术是国际水平的制造技术呢？图 0-2 列举了国际水平制造技术应具有的条件(从技术创新性和技术先进性两个方面来衡量)。

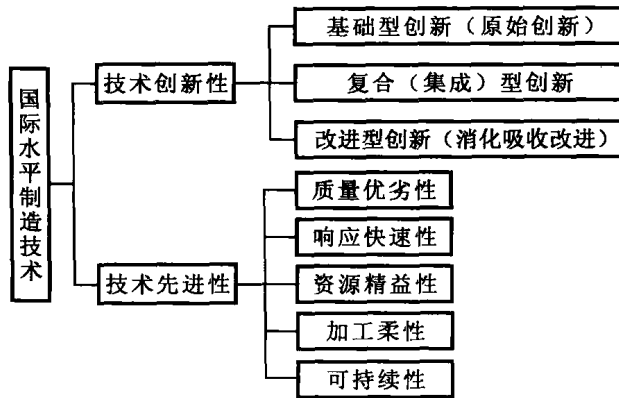


图 0-2 国际水平制造技术评判指标

图 0-2 所示的技术先进性的五个评判指标,贯穿产品全生命周期的设计、制造、服务阶段。指标排列顺序是随机的,达到任一指标都有同等的困难和重要性。

(1) 质量优劣性

先进制造技术生产的产品必须是高质量的,它应具有高质量的输出、输入与工艺过程(含过程内、外)。对产品须进行 100% 的检验,既要使产品满足顾客需求,又要保证制造技术易于实现,且少、无缺陷,无废品。缺陷率应达到 0.03%~0.1%,即每 100 万道工序,只允许 300~1000 道工序出现缺陷。为了使缺陷不扩散,需采用傻瓜型设备,一旦出现故障,就可通过声、光、电装置及时报警提示并排除故障。

(2) 响应快速性

先进制造技术要能快速响应市场需求,其制造提前期(lead time)要尽可能地缩短,总的加工提前期较传统的制造技术缩短 50%;消除一些无用的、不必要的过程,将保留的过程流线化;尽可能地减少存储、库存、材料管理等环节;关键供应商尽可能在工厂附近 3 km 范围内,使物流时间减至几小时或更短;生产过程与生产装备内装式发光、发声装置,若出现故障,可视控制装置立即通报故障状态及其部位,数秒钟内维修、排除故障。有这些措施作保证,才可实现客户订单处理时间短、市场响应快的目标。

(3) 资源精益性

先进制造技术要比传统的制造技术使用少得多的人力、物力、场所等方面的资源,实现精益生产,能充分发挥资源的作用。采用市场驱动或订单拉动式生产,按时、按量加工产品与零件,既减少库存和在制品,又节省仓库的投资(在相同产量下,先进制造技术只需采用传统技术库存的 10%);培训多技能工人,实现自动化加工,一个工人最多可同时操作 12 台机床;非直接参与制造的辅助组织与人员大大减少,节省人力资源;减少调整时间,可实现批量为 1 的流动生产,即大批量定制模式生产。

(4) 加工柔性

先进制造技术必须是具有加工柔性的。所谓加工柔性就是要能按零件的几何形状、物理性能、订货周期等要求调整加工模式。实现加工柔性的目的是使从一种生产模式变换成另一种生产模式耗费的时间少。CNC 机床、加工中心机床、柔性制造系统(FMS)的大量使用,实现了加工软件的柔性化,但机床硬件没有柔性,不能重构,故柔性未能充分发挥作用;可重构加工系统和可重构加工机床的出现,能同时实现软件和硬件的柔性化,软件、硬件都采用模块化技术,可根据特定的加工要求进行重构,大大提高了加工柔性;加工过程调整时间短,模具可在数分钟内更换,生产线使用更柔性的产品布局,设备按产品生产顺序布局而不按工艺布局,提高了成本竞争优势。

(5) 可持续性

先进制造技术必须符合可持续发展策略,其产品应满足可循环、可修理、可重新制造、可重用、可生物降解等要求,生产方式由传统的资源消耗型转变为技术密集型,实现以人为本,进行“天人合一”的环境友好型生产。

面对当今世界人口、资源、环境三大难题,各国均以法定文件形式将可持续发展确定为 21 世纪产业发展模式。我国在《中国 21 世纪议程》(1994 年)中对清洁生产作出了明确的规定。国际标准化组织提出了 ISO 14000 系列标准,对未能取得 ISO 14000 系列标准认证的企业产品禁止或限制进入市场流通,以保证企业及其产品的环境竞争力。

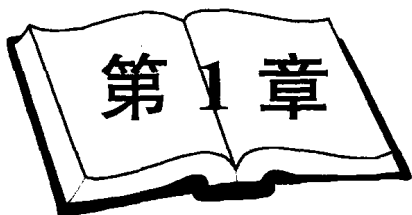
基于以上的诸多考虑,本书在写作时力求具有下述特色。

① 通过对科技创新的讲解,激励、引导学生大胆创新,开发有创新特色的制造技术。因为科技创新是先进制造技术可持续发展的“引擎”,先进制造理念是先进制造技术的“点火器”。

② 彰显信息化、环保的当代特色。用较多的篇幅讲述制造信息化、可持续制造技术,重视“两化”融合。

③ 内容新颖,注意反映当代最新颖、最先进的制造技术。本书内容不仅涵盖了传统制造领域(减材制造领域)的先进制造技术,传统的切削、磨削加工领域的先进制造技术,还涵盖了特种加工技术领域的先进制造技术,涵盖了电子制造、生物制造领域的若干先进制造技术,以扩大学生的制造技术视野。

④ 突出实例教学、努力将研究成果转化为教学内容。



科技创新与先进制造理念

先进制造技术是在传统制造技术的基础上发展起来的,依靠的是科技创新,贯彻的是先进制造理念;随着人类经济社会的发展,先进制造技术要不断地保持先进,依靠的还是科技创新,贯彻的还是先进制造理念。因此,科技创新和先进制造理念是先进制造技术的前提和依据,是先进制造技术可持续发展的“引擎”。

1.1 先进制造技术的前提——科技创新

1.1.1 科技创新的内涵与类型

1. 科技创新的内涵

创新、技术创新、科技创新这些术语现已广为流传,创新的内涵可描述为:创新是“生产要素的重新组合”,是“抛开旧的,创造新的”,是“对设计、制造、分配和/或使用的社会和技术系统的任一改变,其目标是改善成本、质量、和/或满足客户要求的程度”。可以概括地认为,创新是促进人类科学技术、经济社会进步的破旧立新行为。

科技创新(作者认为,用“科技探新”似乎更确切些,但“科技创新”已约定俗成,故沿用)是原创性科学研究与技术创新的总称。

从“制造”到“创造”,虽只一字之差,但企业需要做的却大不一样,而最重要的是要有新的创意。传统观点认为,创意来自于灵光一现,可遇而不可求。而现代的研究成果显示,新的创意来自于同一个思路——杂交,亦即前述的重新组合。

比如,Victorinox公司最近推出的一款附带移动硬盘的瑞士军刀。新的移动硬盘非常实用,可以在外出时携带。但是在乘坐飞机的时候,瑞士军刀只能托运,这对用户的数据来说存在安全隐患。为此,该公司又进一步创新改进,把移动硬盘做成可拆卸式的,这样就两全其美了。瑞士军刀和移动硬盘是两种风马牛不相及的产品,二者通过“杂交”或“重新组合”创新出一种新产品,为人类社会创造了新的财富。

科技创新的形式多种多样,如开发一个新产品,开辟一个新的市场,找到一种原料的新来源,开发一种新的生产工艺流程,采用一种新的企业组织形式,等等。

图 1-1 所示为科技创新的过程示意图。从根据新的创意进行自由探索开始到产品规模产业化,这一过程中产生了社会财富增值,其中大部分用来提高人们的社会生

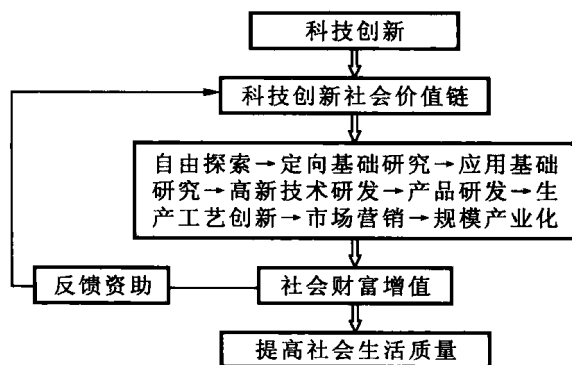


图 1-1 科技创新过程示意图

活质量，一小部分用于进一步的创新活动。应该指出的是，并不是所有的创新产品都能实现规模产业化，但一定要鼓励和允许自由探讨。

创新并不等同于发明，如前述的带移动硬盘的瑞士军刀，瑞士军刀和移动硬盘都是已有的产品，将二者重新组合或杂交在一起，就创造出了一款新产品。

2. 科技创新的类型

按科技创新的方式分类，可将科技创新分为基础型创新、复合型创新、改进型创新三大类，如图 1-2 所示。

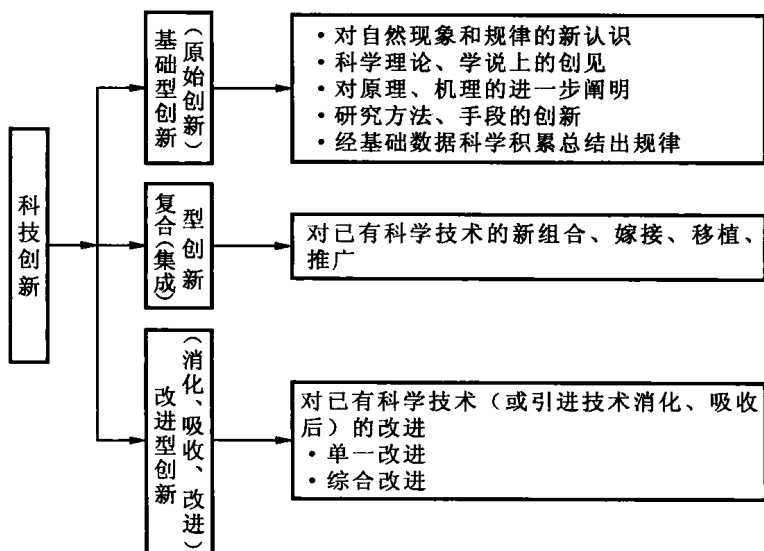


图 1-2 科技创新的类型

基础型创新主要发生于数学、物理、化学、天文、地理、生物等学科领域，比如对当前全球气候变暖的认识、量子力学的创立、分形几何的建立、神经网络的应用、计算机网络的建立、计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)、刀具磨损规律的发现，等等。这一类创新偏重于基础理论，其创新成果具有普遍的指导、参考价值。

复合型创新或称集成型创新是机械工程领域中的最主要的创新方式，先进制造

技术就是多学科综合、集成的成果。高速切削加工就是集成了新型刀具材料、刀具结构与机床的多学科技术的创新成果；激光切割、雕刻技术创新体现了激光技术、CNC技术、机床设计制造技术的集成。

改进型创新，或引进技术的消化吸收后的改进也是机械工程领域重要创新手段之一。平时人们所讲到的技术革新就是这一类创新。如对传统机床的数控化改造，将机械传动改进为数控驱动是对传统机床的单一改进创新；引进某些产品后，通过消化吸收，全面实现其国产化，可视为一种综合改进型创新。

若按形态学方法对科技创新进行分类，可得到图 1-3 所示的结果。

核心概念

	加强	推翻
不 改 变	渐进式创新	模块化创新
改 变	体系 (architectural) 创新	基础型 (radical) 创新

核心概念与元素之间的联系

图 1-3 科技创新的形态学方法分类

形态学方法的概念来源于植物形态学，植物形态学是研究植物的形态结构及其发生发展的科学，其主要任务如下：探索结构的规律性；研究植物及其器官在系统发育中的形成过程，以阐明植物进化的趋向和各类群间的亲缘关系；研究植物及其器官在个体发育中的形态建成，探讨形态建成的机理，以利用和控制其过程及创造新类型。

因此，形态学方法就是利用类群间的关系来分析、创造新型形态的一种人工分析方法。通过形态构成因素的属性之间的不同组合，可以构建出不同的形态。

现以金属切削加工为例，按形态学方法来对创新类型进行分类。金属切削加工过程的核心概念为金属切削加工，而实现金属切削加工的各元素之间的联系的是加工工艺系统，即机床—刀具—夹具—工件所构成的封闭系统。

1) 渐进式创新

这种创新强化金属切削加工的核心概念，而加工工艺系统不改变，即产生了高速切削加工。随着刀具材料的不断进步，如由工具钢→高速钢→硬质合金→金刚石、CBN 等刀具材料的渐进，切削速度不断提高，在机床结构、加工工艺、切削理论、刀具结构、工件的结构等方面相应地也有了创新。但这种创新是渐进式的，故称为渐进式创新。例如，图 1-4 所示的高速机床主轴是实现高速切削加工的重要部件，这种电主轴采用的是电磁磁浮轴承，转速高达 40 000 r/min，径向静态刚度达 1 500 N/μm，轴向静态刚度为 700 N/μm，功率达 40 kW。

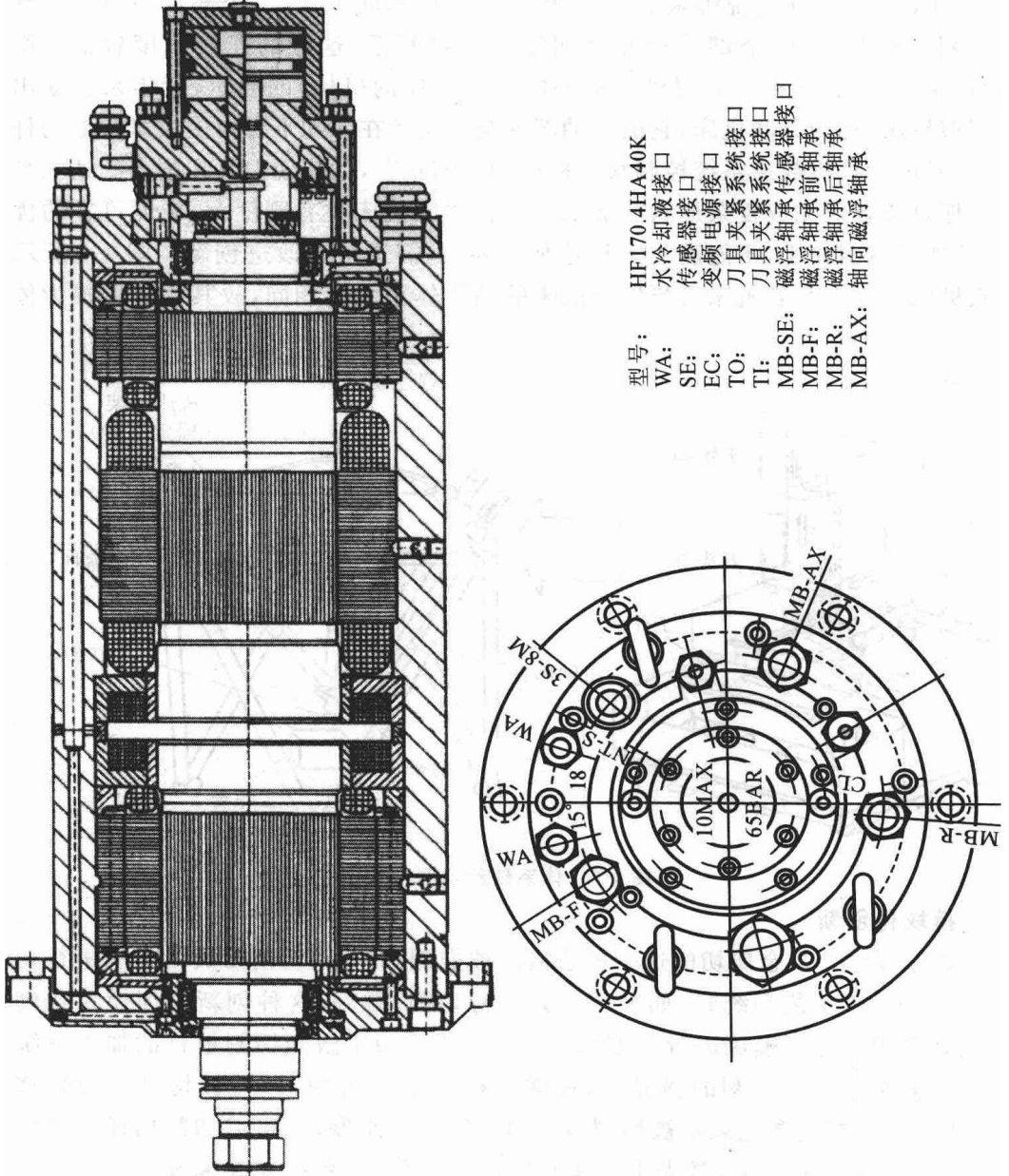


图 1-4 具有磁悬浮轴承的电机轴结构