

246

TH740.6
Y28

先进光学制造技术

杨 力 主编

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书重点介绍光学制造技术领域近期的进展和成就.全书共9章,主要论述现代先进光学制造概念;现代大型反射镜制造;能动光学器件;微光学制作技术;反射镜轻量化技术;超高精度光学元件制造技术;惯性约束聚变工程光学元部件制造;现代光学检测技术;光学非球面检验等.每章末还附有参考文献.

本书可供从事光学、光学工程(尤其是光学制造技术)的科技人员参考,也可供大专院校有关专业师生阅读.

图书在版编目(CIP)数据

先进光学制造技术/杨力主编. -北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009170-1

I.先… II.杨… III.光学仪器-制造-技术 IV.TH740.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 04308 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年9月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2001年9月第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 1—2 500 字数: 446 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

先进光学制造技术是光学学科的分支,从制造的角度看它同时也属于制造科学的范畴.典型的学科交叉赋予先进光学制造技术更多的重任.先进光学制造技术同信息技术、生物技术、新材料技术、先进制造技术等关键领域的发展息息相关.先进光学制造技术正在由一门经典的加工工艺成长为一门制造科学,并将进一步突破光学工艺的经典范畴,光学元件的概念也会突破数百年来的一般棱、透镜加工的局限,从单纯的成像元件扩展到功能元件,从静态元件扩展到动态元件,从单一元件发展到集成元、部件.鸟瞰科技发展画卷,从现代 10m 以上口径的大型天文望远镜非球面主镜的制造到微电子技术 $0.1\mu\text{m}$ 级精细线条和图形的形成,从信息到能源,从地面到太空,从人类基因到激光核聚变,先进光学制造技术在广阔的科学技术领域的发展进程中扮演着至关重要的角色.跨入新世纪,先进光学制造技术在同光学、光电子、微电子技术等交叉、融合中,不断创新和突破,将形成新一代光学制造技术,同时也必然开拓出具有高回报的国际市场新兴产业.目前,新兴信息产业对先进光学制造技术需求迫切,对人材求贤若渴,光学制造技术面临难得的发展机遇,国家重大光学工程计划的发展需要先进光学制造技术的强有力的支撑,先进光学制造技术作为一门新的学科正在逐步形成.在这种背景之下,编写了这本专著,但愿本书的出版对读者会有所裨益.

本书内容主要包括:先进光学制造技术概论;现代大型非球面主镜的制造;能动光学元器件;微光学制作技术;反射镜轻量化技术;超高精度光学元件制造技术,包括光刻物镜制造与超光滑表面加工;光学非球面检验;现代光学检测;惯性约束聚变光学元部件制造等等.这些内容都是当前国内外光学和光学工程发展前沿和国际上一些新兴产业所关心的、与国家级大型光学工程发展实际紧密相关的先进光学制造技术.当然也是本书作者正在从事的研究领域,包括国内、外近年来取得的最新进展,尤其包括了本书作者的最新研究成果,其中很多内容属首次发表.

本书第一章由杨力编著;第二章由杨力、郑耀编著;第三章由凌宁、官春林、曾志革编著;第四章由杜春雷编著;第五章由方敬忠编著;第六章由伍凡、陈强编著;第七章由许乔、杨力编著;第八章由许乔编著;第九章由伍凡编著.

本书主要读者对象为从事光学、光学工程(尤其是光学制造技术)的研究、设计、制造技术人员和管理人员,同时也适合于更广泛专业领域的研究技术人员阅读和参考.此外,还可供高等学校学生、研究生、教师参考.

中国科学院光电技术研究所对本书的出版资助了全部经费,并热诚地允许本

书作者引用他们在中国科学院光电技术研究所开展的研究工作与取得的研究成果,包括一部分数据、曲线、图片等.本书第七章和第八章的编著也同样得到了中国工程物理研究院的积极支持,允许引用作者在中国工程物理研究院所做的研究成果.作者在此对中国科学院光电技术研究所和中国工程物理研究院表示衷心感谢.

书中讨论的部分研究工作是在国家高技术“863”计划的相关领域和主题的支持下进行的,谨在此致以诚挚的谢意.

郑耀对全书的统稿做了大量工作.本书第二章引用了中国科学院光电技术研究所曾志革博士关于应力盘能动驱动计算机仿真的部分尚未发表的研究结果.愿在此表示衷心感谢.

本书的出版得到了姜文汉院士,姚汉民、张雨东、袁家虎研究员,以及杨虎研究员、李伟先生和吴时彬先生的大力支持和帮助.中国科学院光电技术研究所有关室、部的同事对有关章节的计算机绘图等方面给予积极协助,在这里一并表示由衷的谢意.

由于作者的学识有限加之时间仓促,本书内容不大可能包容正在不断发展中的先进光学制造技术领域的全部范畴,书中的疏漏甚至错误之处亦恐难免,敬希指正.

杨 力

2001年2月18日

第一章 现代先进光学制造概论

§ 1.1 绪 论^[34]

1.1.1 光学

光学:包括光的产生、传输、控制及利用的有关物理现象的技术科学及工程领域,总称之为光学。自盘古开天,光就无所不在,紫外线可能促进了生命起源,光合作用在过去、现在和未来都支撑着自然界生命的存活、延续和发展。光学历史悠久,但又非常现代,尤其是近几十年科学技术的革命使光学焕然一新、蓬勃发展。人们现在开始享受 20 世纪 60 年代研制成功的激光的成果,激光以前所未有的相干性开创了光的新的定向、传播和聚焦方式,使光纤通信、高密度光盘、能源以及激光手术等领域开辟了新的纪元。而非相干光也有广阔的应用领域,如加工计算机芯片用的光刻系统、高分辨率显微镜、遥感与夜视红外传感器、地基天文研究用自适应光学系统,以及新型高效光源等。光学是一门最不吝啬的科学,它在人类发展的大系统中扮演着支撑的角色,成为推进所有其他领域发展的“助推器”。

近期国外关于光学领域发展的研究表明,从不断有所创新突破、近期有希望得到迅速发展、且具有广阔的市场前景、并得到政府和有关方面广泛关注的 21 世纪光学发展的主要趋势和应该关注的主要方面有:(a)信息技术及远距离通信;(b)保健、医疗与生命科学;(c)光学传感、照明与能源;(d)国防光学;(e)光学在加工制造业中的应用;(f)光学元件与系统的加工制造;(g)光学研究与教育。

光学是一种难以估价的科学和技术,发展前途远大,与各学科紧密相关,正是它的这种普遍存在的重要性使之肩负更多的责任和面临更大的挑战。

1.1.2 光学的应用与展望

在过去 10 年中,信息技术及远距离通信取得令人瞩目的成就,目前全球光纤的安装铺设速度为 1000 m/s,光传输信息的速度现为 Gb(10^9),预期在 15 年内将达到 Tb(10^{12}),即进入未来信息技术的“太纪元”,太纪元的发展将主要依靠于光学技术。为适应今后 10~20 年计算机和通信技术发展的需求,必须在较宽的前沿领域(例如传输、开关、数据存储和显示技术等方面)寻求新的突破。在医疗保健领域,光学技术正在改变着物理疗法和手术的实施手段,并为医疗诊断提供新的方法,光学技术为生物工程研究提供了新的途径:如人体内部造影、测量、分析与处理;共焦激光扫描显微镜展现详细的生物结构三维图像;双光子技术增加了荧光显

显微镜的能力,同时开辟了在细胞内部进行高度定位的光化学疗法;近场技术将分辨率提高到衍射极限以上;激光器已成为确定 DNA 化学结构排序系统的关键组成部分,“DNA 芯片”高级复杂系统和简单的传输探针系统成为光学技术在生物技术方面的应用例证.光源和分布系统的发展已经减少了全美 1/5 的用于照明的能量消耗,并将进一步为采用能源的照明方式产生深远影响.随着光学传感器的发展大幅度的扩展人类视觉能力成为可能,进一步展现和揭示前所未有的信息领域.光学在加工制造业中的应用可分为两大领域,其一是用光进行加工制造,包括光刻、激光材料加工、激光焊接、激光烧结和三维激光快速制模等.今天世界上批量生产的每一片半导体芯片都是用光刻设备和光刻技术实现的.为半导体加工所配备的必要的光学加工设备的市场销售额为 10 亿美元,而最终实现 2000 亿美元的电子市场销售额.另一领域是用光学元件或系统来控制加工和制造,包括计量方法、机器视觉系统和各种传感器等.光学在现代战争中发挥中枢作用,激光精确制导已成为现实战例.卫星监控系统是光学尖端技术应用的成果.夜视成像和卫星制导“占有黑夜”并控制战场.激光辐射用于瞄准和测距、激光陀螺导航.基于气体和化学激光器的激光武器将会产生大于 1MW 的能量,从而为研制开发地基和天基定向能武器(directed-energy weapons)打开大门.光学技术的发展使先进国家明显相对减少国防开支,因为许多军用成果都同时有民用价值.

展望新世纪,基于光学材料的新发展,使人们有可能大量生产价格低廉的高质量光学元件和系统,整个世界将由高速光纤通信系统连在一起,由此带来的是高速 Internet 网、视频传输及其他新的宽带通信用户线的飞速发展.用光学方法进行人体监测,低成本、高效率、非侵入地监测个人的健康状况.光学对疾病诊断、治疗医学、生物研究和生命质量等许多领域的影响会越来越大.高效照明技术会减少世界上照明消耗的能量.利用太阳能电池减少对矿物燃料的依赖.在工业领域内将更广泛应用光学传感器.数字式相机与数字式摄像机取代传统摄影、摄像术.光刻技术将使用软 X 射线和极紫外光源,使线宽达 $0.1\mu\text{m}$. 光学技术将广泛用于国防建设,从提高武器的瞄准精度到对生物、化学战的光学探测与空间应用.光学技术未来的发展将会贯穿所有科技领域,高功率激光系统会使粒子加速器的研制得以成功,从而扩大粒子物理实验的能量界限.激光器还将以光陷阱方式控制孤立原子,激光干涉实验可能揭开万有引力的秘密.在未来的某一天,像计算机科学过去几十年已经形成一门学科一样,光学领域也会形成一门完整的学科被世界教育机构所承认.

光学在近期具有重大意义的研究发展机遇的领域可列举如下:

1. 原子光学 原子光学已经作为一个新兴领域出现,原子透镜可在衬底上很大面积内沉积 $0.05\mu\text{m}$ 的线条或点,可被用于制备高密度光学存储元件的表面.一种有希望的方法是用光使原子与空间分辨率好于 $0.1\mu\text{m}$ 的抗蚀剂进行化学反应.原子分束器、反射镜和衍射光栅组成原子干涉仪已被证实是灵敏的加速器和陀

螺仪.对原子进行控制可生成新的物态,用激光干涉形成的驻波干涉图建立了周期性势阱,可用此势阱捕获原子.这种光学点阵提供“凝聚态物质”概念,原子被冷却凝聚成一种高密度的单量子态,一旦处于单量子态,温度的概念不再有效.科学家正以极大兴趣研究这种新形物态的性质,可能由此产生一些重要应用.单量子态被称为玻色-爱因斯坦凝聚,玻色凝聚态可能会给原子的应用带来一场革命.光学技术是高精度物理量测量的量子极限研究的主要手段.

2. 生物光学 光学显微技术的飞速进展为生物科学研究带来新的机遇.400年来光学显微技术的发展几乎是紧密伴随着生物技术的成长,1625年发明的通用光学显微镜导致科学家发现了藻类、酵母、原生动物,虎克在软木中观察到细胞.其后发明了消色差镜头、复消色差镜头、科勒照明技术和细胞染色技术,使显微镜成为医学通用诊断工具.相衬法使观察活体细胞成为可能.现代各项新技术的综合发展,如激光用于共焦显微镜、快速扫描共焦显微镜与计算机结合可进行三维成像、数字图像处理、图像识别技术,近场光学显微镜已获得了分子级纳米分辨率.深入研究激光捕获技术发展了“光钳”.进一步发展了用于紫外和红外的石英及萤石透镜,生物技术发展了单荧光分子成像、绿荧光蛋白质标记、飞秒双光子成像,近年发展了数字计算机和诺曼斯基显微镜.可以说,与生物科学、生物工程科学发展息息相关的光学显微技术已经发展成为一门生物光学.

3. 飞秒光学 光的短时闪烁提供了捕捉和研究高速事件的一种方法,高速电子闪光精度可达到纳秒级.采用激光器作光源使高速事件的测量精度几乎成百万倍的提高.在20世纪70年代和80年代用染料激光技术实现了飞秒时域,20世纪90年代飞秒固体激光技术开拓了更广阔的应用领域.现在已有能力在飞秒时标上($10^{-11} \sim 10^{-14}$ s)观察组成物质的原子、电子、分子间的最基本的相互作用,这会对广阔范围的技术发展产生重大影响.飞秒脉冲的使用会超出测量的范畴,形成控制和改变物质的新方法.飞秒脉冲以极短的持续时间使低廉的能源放大到极高功率成为可能.飞秒技术的主要受益者是科学应用,但也在开创商用机会:利用飞秒技术在超高速技术方面的优势;利用宽光谱带宽、高聚焦峰值强度、相位相干、改进的探测力及精确的重复率;光学通信系统已从超速光学中获益并为超短脉冲的应用保留了大量领域.

4. 极紫外和X射线光学 如所周知,可见光谱的短波一侧有紫外、远紫外、极紫外(EUV)和真空紫外(VUV),真空紫外以其辐射不能通过空气而得名.在VUV之外是软X射线和X射线波长区域,再延到 γ 射线.EUV和软X射线显微技术展示了未来更高分辨率显微术的发展前景,将对诸如纳米材料科学和生物材料的亚细胞结构等领域的研究产生重要影响.光刻技术正从紫外(UV)向极紫外(EUV)和软X射线过渡,以满足更微细线条和图形的形成.极紫外和X射线光学将为广阔的基础科学和技术科学的发展带来新的机遇.

5. 半导体和先进的固体激光器 激光对于国民经济已成必不可少. 先进的固体激光器对推动科学和工业的发展起到极其重要的作用. 激光光源向固体激光器的过渡对激光市场的发展带来有益的影响.

先进的固体激光器的特征是其能在 1ms 的时间内存储光学能量,并在极短的时间内释放所存储光学能量,在几个纳秒的延迟时间内形成一个高的峰值功率脉冲,能通过锁模用大的增益带宽控制超短脉冲生成.

高功率二极管激光泵浦固体激光器(DPSSLs)的工作效率提高 10%,这对传统的灯泵浦激光器是一个重要的改善.此外,灯的寿命一般为 200h,而二极管激光器的寿命一般为 7000h,加之尺寸小、结构紧凑,二极管激光器和固体激光器工作可靠性高,电子效率高,适于低成本批量生产.在科技、工业、医疗、国防等方面极大地扩展了其应用范围.先进的 5~250kW 的机载固体激光器可用于防御,并可发展成为未来兆瓦级激光器.

6. 先进的发光和光控材料 如非线性频率转换材料,半导体量子阱材料,光子带隙材料,光束成形和聚焦材料等先进的发光和光控材料的研究,对于光学技术的发展是非常重要的.

1.1.3 光学制造技术

光学制造技术是一门有着悠久历史的加工技术,由于传统抛光工具离不开沥青,加工过程十分倚重操作者的经验和技巧,又被称之为“黑色艺术”(black art).这门制造技术伴随着光学科学走过了几个世纪的发展历程.有趣的是,早期的著名科学家往往又是天文望远镜的设计者和它的制造者和使用者,例如 Isaac Newton 在 1668 年第一个成功地自制成一架口径 1in(英寸)(1in=2.54cm)的反射式望远镜.后来据称又首次发表了关于沥青抛光方法的报告^[1].早期的加工方法侧重手工操作,需付出繁重的体力劳动,加工工艺具有很强的随意性.现代先进光学制造技术已经发展为用数学模型描述工艺过程、以计算机数字控制为主导的可确定性加工.应该说光学制造技术几个世纪以来与光学科学一起历经了艰苦卓绝的探索 and 成长,取得了持续的发展和辉煌.

高技术全球范围的竞争越演越烈,这种竞争是各国综合国力的竞争,在相当程度上体现为制造技术的竞争.从 20 世纪 80 年代开始,随着国家高技术“863”计划的实施以及中国的微电子技术、光通信技术、航空、航天、天文事业,国防科技等的全面发展,对当代光学制造工作者和光学制造业提出了严峻挑战,同时也带来了新的发展机遇.我国的先进光学制造技术得到前所未有的加速发展^[7].

现代光学工业同电子工业、信息技术、通信技术紧密结合,光学制造技术同光电子技术、光子技术、电子工业技术密切相关.一个值得关注的趋势,即对光学元件和光学加工传统观念上的突破,从成像元件扩展到功能元件,从被动元件延伸到主

动元件. 以非球面、衍射光学元件、超高精度薄膜技术加工的 WDM 波分复用器件、新一代光刻设备超高精度光学元件、ICF 惯性约束聚变光学元件、共形光学元件 (conformable optical element)、导引头光学元件等, 主导着新一代光学元件的发展主流. 光子元件被国际上列为现代光学元件大规模生产范畴, 例如光纤、光纤器件和光波导, 半导体光电子元件, 激光器和波导集成组装等等. 从某种意义上而言, 目前光子技术还处于早期发展阶段, 类似于 40 年前硅电子技术的发展状态. 但是这正预示着光子技术和光通信技术在 21 世纪的无与伦比的发展前途, 已引起国际上极大关注.

先进光学制造技术的发展与先进制造技术的发展息息相关. 离开先进光学制造技术谈先进制造技术的发展, 在制造科学总体上显得难以完整; 而不研究制造科学总体的发展, 对先进光学制造技术的发展研究也不会深入和全面. 认真了解制造科学总体作为一门学科的发展规律、研究内容和研究发展方向, 对于从事光学制造技术研究发展的科技人员、管理人员会是十分有益的. 在 § 1.2 和 § 1.3 将首先对先进制造技术的发展进行较全面的概要介绍, 然后在 § 1.4 再集中讨论先进光学制造技术.

§ 1.2 先进制造技术发展概况^[9]

1.2.1 近代世界经济特征与相关制造技术特点

近代世界经济特征可按三个经济时代进行简要叙述.

(1) 1760~1949 年世界经济处于资源经济时代, 社会需求为温饱型, 产品粗放、品种单一, 采用手工作业与经典机械, 生产相对落后, 能源和材料消耗大, 成本高.

(2) 1950~1979 年世界经济处于能源经济时代, 社会需求主流为小康型, 产品质量要求提高、数量剧增, 但对款式和造型要求尚为其次. 采用电气自动化和刚性生产线方式, 机器用于替代繁重的体力劳动, 小品种、大批量生产模式. 由卖方主宰市场.

(3) 1980 年至今世界经济处于信息经济时代, 社会需求主流转向富裕性, 商品需求多样化, 产品质量、款式、交货期、性能价格比成为市场竞争的决定因素. 同时, 对产品和制造过程的环保、物耗、能耗等要求越发严格. 通过采用现代化制造技术, 机电一体化、智能化和集成化, 满足生产过程优质、高效、低耗、洁净及灵活等要求, 以赢得更大的市场. 采用多品种小批量生产方式, 商品生产周期缩短, 由买方主宰市场.

对应上述三个经济时代, 发达国家制造技术的发展有着较为显明的转换期. 对不同国家和地区有一定的过渡、重叠和转换时带. 中国目前整体上还处于能源经济

时代,制造技术发展并不平衡,在某些部门和大型工程项目已经采用了适应信息经济时代的先进制造技术.

1.2.2 先进制造技术特征与国外发展状况

1. 先进制造技术特征 与传统制造技术相比较,先进制造技术有如下特征:

(1) 多学科交叉融合一体化. 综合应用各种技术于制造全过程,是一门多学科交叉、融合的新技术.

(2) 设计与制造工艺一体化. 计算机辅助设计/计算机辅助工艺规划/计算机辅助制造,即 CAD/CAPP/CAM 一体化,使设计与工艺同步统一,提高制造业的竞争力.

(3) 制造科学与制造技术一体化. 一系列新模式的制造系统必然要有一门跨学科的综合科学作为支撑基础,这就是制造科学. 传统工艺往往局限于“手艺”,过程难以用数学方法描述,缺少信息技术支撑,难以成为制造科学. 计算机集成制造系统是制造科学与制造技术一体化的典型范例.

(4) 制造技术与管理技术一体化. 先进制造技术更加重视技术与管理的结合. 制造技术的发展与管理科学及社会科学紧密相关. 由先进的生产模式把制造与管理组合为统一的制造系统.

(5) 制造工程成为一个系统工程. 传统制造是一个孤立的局部的过程,先进制造技术向柔性化、集成化和智能化发展,成为能控制生产全过程物质流、能量流和信息流的系统工程.

2. 国外先进制造技术发展概况

(1) 美国的概况. 美国在 20 世纪 80 年代末率先提出先进制造技术这个概念,并于 1994 年列为国家预算重点扶持的惟一领域,投入 14 亿美元研究经费,旨在确立美国在世界制造业的领导地位. 这一计划集中体现四个方面:设计技术;制造工艺;以信息技术为主线的辅助技术和制造基础设施.

(i) 设计技术:产品、工艺过程和工厂设计;快速原型制造.

(ii) 制造工艺:材料生产工艺;加工工艺;连接和装配;测量与检测;环保技术;维修技术;其他技术(表面处理、包装,等).

(iii) 辅助技术:

(a) 信息技术:接口与通信、集成框架、软件工程、人工智能、专家系统和神经网络、数据库技术……;

(b) 标准与框架:数据标准、产品定义标准、工艺标准、检验标准和接口框架;

(c) 机器与工具技术;

(d) 传感与控制技术.

(iv) 制造基础设施:

- (a) 质量管理;
- (b) 劳动力培训与教育;
- (c) 用户/供应商的交互作用;
- (d) 全面监督和基准评测.

(2) 日本的概况. 日本在优先发展先进制造技术的三个“振兴法”基础上, 于 1990 年提出了 IMS 计划, 旨在将日本的制造技术与美国的软件技术、欧洲的精密仪器仪表技术结合起来, 建立先进的 IMS. 1993 年日、美在东京建立了一个世界级制造中心, 总投资十亿美元, 侧重发展六大项目: 全功能型通用控制系统; 加工过程无污染制造; 全局性 CE; 设计制造知识库与快速成型技术. 项目的承担单位涉及 73 家企业和 63 所大学、研究机构, 至今日本 IMS 计划总投资已累计达 40 亿美元.

(3) 德国的概况. 1995 年德国政府出资 4.5 亿马克设立“制造 2000”研究计划, 研究德国制造业 21 世纪发展战略与实施办法, 以提高德国制造业的国际竞争力. 认为德国未来的工作机会、稳定的收入、社会保障和较高的环境标准主要取决于高效率的出口型制造业.

(4) 韩国的概况. 1991 年底韩国提出了高级先进技术国家计划, 即 G7 先进制造技术计划, 拟到 2000 年把韩国提高到世界第一流工业发达国家的水平. 其中与先进制造技术相关的内容有

(i) 共性基础技术:

(a) 开放式集成系统: 包括关键单元软件、设计自动化、并行工程、网络系统、系统仿真、管理软件、系统开发与集成;

(b) 标准与性能评价: 包括 IMS 战略、标准化、性能产出评价和运营战略.

(ii) 下一代加工系统:

(a) 加工设备开发: 包括各种不同类型的高精度高生产率加工中心与 CNC 滚珠丝杠磨床;

(b) 机械技术: 高精度加工与测量技术、高性能主轴、柔性外围设备、伺服电机及驱动器、CNC 控制器;

(c) 运营技术;

(d) 集成技术: 包括 CAD/CAM/CAE, 智能工艺规划 CAPP、物料搬运系统与系统集成.

(iii) 电子产品的装配和检验系统.

§ 1.3 先进制造技术^[9,10]

先进制造技术可以说是计算机技术、信息技术和制造技术相结合而发展的一门新技术, 引导着制造技术在 21 世纪的发展方向. 对先进制造技术的研究已经引

起广泛的关注,涉及先进制造技术的文献层出不穷,为使读者能得到一个较清晰的轮廓,本章只概要讨论如下内容:计算机辅助技术;综合自动化技术;面向 21 世纪的制造系统。

1.3.1 计算机辅助技术

计算机辅助技术是利用计算机辅助工程师进行工程和产品设计、制造、管理的总称。主要应用有 CAD, CAM, CAE, CAPP, CIMS 等。CAD 内容包括:产品规划、建模、计算分析、模拟试验、自动绘图、工程数据库管理和编写技术文件。CAM 内容包括:数字控制(NC)、计算机数控(CNC)、直接数字控制(DNC)、成组技术(GT)、计算机辅助工艺规划(CAPP)、计算机辅助质量控制(CAQC)、计算机辅助工程(CAE)、计算机集成制造系统(CIMS)等。

本节只讨论 CAD, CAPP 和 CAM 相关技术。

1. 计算机辅助设计技术(CAD) CAD 是计算机技术在工程设计中的综合应用技术,近 20 年来取得飞速发展,被认为是当代最杰出的工程技术成就之一。CAD 技术的发展和水平已成为衡量一个国家科技现代化和工业现代化的重要标志之一。

20 世纪 50 年代末,美国麻省理工学院的 Ross 发展了 APT (automatically programmed tools)程序系统,产生了 CAD 的最初概念。1963 年,该校的 Sutherland 首次提出了计算机图形学,其后,美国通用汽车公司和 IBM 公司设计了 DAC-1 (design augmented by computer)系统,用于汽车设计、而后扩展至航空业,英、日、意等国汽车业也开始实际应用。20 世纪 70 年代,随着大规模集成电路的应用使小型计算机的性能价格比大幅优化,三维几何处理软件、图形输入设备等也相继发展,出现了面向中小企业的 CAD 商品化系统。20 世纪 80 年代,计算机软硬件产品功能达到新的水平,外围设备品种齐全、大量成熟的商品化软件不断涌现,为 CAD 向更高水平发展提供了必要条件。同时, CAM, CAPP, CAQC 等也得到全面高速发展。进入 20 世纪 90 年代, CAD 得到广泛应用,发展成为综合设计、制造、管理多方面信息、支持并行工程的集成化 CAD 系统技术。一个 CAD 系统并非具体的传统设计流程的简单再现,而应能反映先进的设计方法和进程,充分发挥计算机优势的辅助设计系统。因此,从事 CAD 技术研究开发人员应该既懂计算机专业知识又熟悉现代设计方法并能驾驭产品设计过程。

充分利用计算机高速计算功能,巨大的存储能力和丰富、灵活的图形文字处理功能,结合人的知识、经验、逻辑思维能力,形成一种人机各尽所长、紧密配合的系统,提高设计效率和质量。这种人机结合的交互式设计过程即构成了 CAD 的工作过程。

设计过程:任务规划;方案设计;结构设计;试制加工;试验试用。

CAD 硬件系统分为独立式和分布式两种。

独立式包括:主机系统(main frame system),即一个中央处理机配有多个图形终端的系统;成套系统(turn key system)亦称交钥匙系统,由 CAD 供应商按用户要求提供的成套系统,针对性强,效率高,但扩展能力相对较差;工程工作站系统(workstation system),即一个工程工作站是一个只有单一用户的 CAD 系统,是 CAD 系统的主要硬件环境;个人计算机系统(PC system),即单用户微机 CAD 系统,与工程工作站的差别越来越小,已经打破了 PC 机不能胜任 CAD/CAM 工作的以往界限,受到广泛欢迎。

分布式 CAD 系统:将分布于各处的多台各类计算机以网络形式相联接构成分布式 CAD 系统。网络中的计算机间的通信由制造商的网络软件完成。每台机器各自独立,可资源共享,易于扩展,从而提高了 CAD 系统的技术性能,有利于大型工程设计。目前比较流行服务器/客户机(server/client)连接方式。

CAD 系统的软件可分为系统软件、支撑软件(绘图软件、几何建模软件、有限元分析软件、优化方法软件、数据库系统软件、系统运动学/动力学软件等)和应用软件。

CAD 技术的发展趋势如下:

(1) CAD 系统的集成化。由于早期的 CAD, CAPP, CAM 是分别独立开发的, CAD 产生的数据和图文不能直接用于 CAM, 在 CAM 中需重新再次输入。因此, CAD 系统的集成化成为重要的研究方向。把产品发展的整个过程, 企业计划、方案构思、产品设计、工艺准备、生产组织、数控加工、运动仿真、组装模拟、测试检验、文档编写、企业管理等环节集成到一个统一的系统中。按集成规模的大小、层次高低, 可分为 CAD/CAM 集成系统、计算机辅助工程系统(computer aided engineering, CAE)、计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)。

(2) CAD 系统的标准化。实现集成和统一的数据交换就必须定义标准接口。国际上已制定有多项标准。国内也有相应标准发布。

(3) CAD 系统的智能化。将人工智能技术引入 CAD, 研究使 CAD 系统智能化的专家系统是必然发展趋向。

(4) CAD 系统的几何建模的特征化。目前已有大量的商品化的三维几何建模软件, 人们希望其建模过程更加简捷、快速, 并为后续工作环节如 CAPP, CAM 方便地提供详尽信息, 包括非几何量(如尺寸、公差、粗糙度等)文字信息。因此, 开展以特征为基本元素进行实体造型的特征建模研究十分必要。

(5) CAD 系统的界面友好化与开发工具化。用户希望人机界面变得简便易学、清晰明了。软件的界面友好与否影响到其生存价值。

现代设计技术, 除了包括采用 CAD 技术之外, 还涉及到一系列新的设计观念和方法, 例如并行工程(concurrent engineering), 成组技术(GT), 虚拟现实技术

(virtual reality technology, VRT)和制造仿真技术等.

(i) 并行工程是集成并行地设计产品及其相关各种过程的系统方法,要求产品开发人员在开始设计时就考虑产品整个生命周期的所有因素,充分利用企业资源,最大限度满足市场和用户需求.在制造业中,CE 是研究 CIM 的重要哲理,是一种指导思想和方法论,是 CIM 环境下一种新的管理模式.

(ii) 成组技术(GT)的基本概念在 20 世纪 50 年代由苏联的 Митрофанов 提出,并在苏联机械工业部门推广,引起世界各国的重视.几十年来成组技术与数控技术、计算机技术结合起来后,其水平有了大幅度提高,应用范围也由单纯的工业领域扩大到产品设计和生产管理,成为 CAD, CAPP, CAM, FMS 和 CIMS 的重要基础.成组技术有如下特点:(a) 事物的集中处理.把具有相似性和重复性的事务集中起来处理,以避免频繁地在事物之间转移所花费的时间;(b) 事物的标准化、规范化.把具有相似性和重复性的事务汇集起来并使之标准化、规范化,使对具有相似性的一组事物提出统一的最优解决方案;(c) 信息的重复使用.把具有相似性和重复性的有关事务的信息进行合理化处理,以便有效存储和重复使用.成组技术即研究和利用事务的相似性,把相似的问题归类成组,寻求解决这一类问题的最优方案,以求省时、高效,取得期望的经济效益.

成组技术必然采用相应的零件分类编码系统,以评定有关零件具有的相似程度和零件组的属性.成组技术以结构相似的零件组成零件组(族),按零件组制造,以零件在尺寸上相近,形状上、工艺上相似为理论根据,从而使小批量的生产具有流水线的生产方式.一般,相似零件的制造工艺也相似,制造工艺的相似表现在三方面:采用相似的加工方法制造,采用相似的夹具进行安装,采用相似的测量工具进行测量.

(iii) 虚拟现实技术(virtual reality technology, VRT),利用计算机生成一个三维空间,由此去感知和研究客观事物的变化规律.VRT 的出现是计算机图形学、人-机接口技术、传感器技术以及人工智能技术等交叉和综合的结果.

虚拟世界的对话性、自律性、表现力与临场感构成了 VRT 的四个基本要素.使用 VRT 可以满足如下要求:显示现实,显示那些实际存在、但因某种原因人类难以到达或直接体验的场所或现象;模拟现实,通过与实际存在事务的比较显示实际不存在的事物;创造现实,创造一个现实世界并不存在、而且今后也不会存在的数字化全新场景,虽属虚拟,但仍与现实息息相关.VRT 已经用于科研、军事、建筑设计、医学等领域,并将得到越来越广泛的应用,更加接近人们的生活.

(iv) 制造仿真技术通过对产品设计、制造、销售等整个产品生命周期进行统一建模,在计算机网络系统上或某一终端上模拟或显示产品的制造过程,以便达到对产品制造过程做出综合评价.

制造仿真技术涉及的关键技术是:(a) 建模技术,利用统一的数据结构和图形

模型,能够将一个新产品从概念设计到制造全过程用计算机进行模拟;(b) 分布式智能协同求解系统;(c) 可制造性评价。

2. 计算机辅助工艺规程设计 工艺规程设计是产品设计与制造之间的纽带,是生产准备工作的第一步,工艺规程设计结果是操作人员进行零件加工的基本依据,对生产进程有直接影响。传统上需要一批有丰富经验的工艺工程师来完成工艺规程设计,但手工编制的工艺规程缺乏一致性,存在大量的重复劳动,不仅浪费时间,也难以得到最优结果,难以标准化,影响到企业的竞争力。

CIMS的关键是信息的集成,而CAD和CAM的集成是实施CIMS的关键环节之一。用两个接口把CAD、CAPP和CAM三个自动化孤岛集成起来,其中CAPP是一个重要环节。代替传统的手工工艺编制,CAPP应具备如下功能:(a) 检索标准工艺文件;(b) 选择加工方法;(c) 安排加工路线;(d) 选择机床、刀具、夹具;(e) 确定切削用量;(f) 选择毛坯、计算工序尺寸及公差;(g) 计算加工时间和加工费用;(h) 绘制工序图;(i) 生成刀具运动轨迹。

CAPP系统有两种工作原理:派生法和创成法。

(1) 派生法(variant)。派生法CAPP系统是依据成组技术的原理,对每一个零件组设置一个主样件,为主样件编制一个标准工艺规程,并以文件形式存储,当需要设计一个零件的工艺规程时,按分组信息自动调出该组的标准工艺规程,进行编辑修改,得出所需零件的工艺规程。这种方法比较成熟,应用广泛。

(2) 创成法(generative)。创成法CAPP系统不以原有工艺规程为基础,而是在系统中收集了大量的加工知识和工艺数据,建立系统工艺决策逻辑,在为一个零件编制一个新的工艺规程时,系统能在没有人工干预的情况下自动生成这一工艺文件。目前,创成法CAPP系统尚不够完善,需做进一步探索。

CAPP系统虽然已取得重大的成就,但仍有待进一步发展。CAD和CAM技术向集成化和智能化发展,对CAPP也提出了新的要求。目前开发的CAPP系统多数集中在具体的应用背景上,人们需要对不同的应用背景开发不同的CAPP系统,从而限制了CAPP系统的使用和推广。因此,开展CAPP体系结构的研究具有重要意义,所谓CAPP体系结构就是建立一个系统的框架、能适应多种零件类型、多种生产环境的系统,工艺设计本身也通过高层次的组织和抽象,以达到通用化和工具化。对于面向对象技术的应用和研究,对CAPP系统的柔性化与工具化发展 also 具有重要意义。

3. 计算机辅助制造(CAM) CAM是指利用计算机系统,通过计算机与工厂生产设备的直接或间接连接,去规划、管理和控制生产制造全过程。广义的CAM包括工艺准备、生产作业计划、物流过程运行控制、生产控制、质量控制等,也包括物流需求计划(MRP)、成本控制、库存控制等管理软件和CNC机床、机器人等数控设备。

CAM 的应用分为两个主要类型:(a)CAM 的直接应用,指通过接口而构成计算机过程控制系统与过程监测系统;(b)CAM 的间接应用,是指计算机与加工过程间没有直接接口,离线工作,只是用计算机支持制造活动,提供制造过程所需数据和信息.例如:计算机辅助工艺规程设计(CAPP),计算机辅助数控程序编制,计算机辅助工装设计与计算机辅助作业计划编制.

CAD/CAM 集成技术是 CIMS 中的关键技术之一,CAD/CAM 系统应具备以下性能:(a) 具有一个设计用的交互式图形系统和支持软件;(b) 具有一个用户化的制造软件包,一般包括 NC 编程程序、自动工艺编制程序、夹具设计程序和其他辅助生产程序;(c) 具有能为设计和制造服务的公共数据库.

1.3.2 综合自动化技术

1. 数控机床与数控加工技术 数字控制(numerical control)技术指用数字量及字符发出指令并实现自动控制的技术.采用数控技术的控制系统称为数控系统,装备了数控系统的机床称为数控机床.

数控机床是典型的机电一体化产品,是数据驱动和软件控制的自动化设备,其主要特点是:(a) 加工过程的全部动作和运动编入程序并按程序执行,不需人为参与,自动化程度高;(b) 采用标准通用夹具,加工复杂零件不需另加专门的工夹具,缩短了准备工作时间;(c) 加工精度高,一致性好;(d) 净切削时间达 15%~17%,带自动换刀可达 75%~85%,效率高;(e) 容易集成为更高一级的制造系统.

现代数控机床和数控加工技术的发展方向为:(a) 高精度、高速度,由于采用了 32 位简单指令集 RISC CPU 以及交流伺服系统等措施,使在 $0.1\mu\text{m}$ 分辨率时进给速度可达 $24\text{m}/\text{min}$,采用快速换刀和装卸工件机构,减少辅助时间,换刀时间甚至可达 1s 以内;(b) 工序集中化,在机床上一次装夹完成多工序多表面加工,从而提高了加工精度,缩短装调时间和整个制造周期,减少加工设备台数节省占地面积;(c) 提高可靠性;(d) 提高集成化、智能化程度.

数控机床是发展现代化机械制造技术所必须的基础设施,智能集成数控技术是数控系统的发展方向和研究热点,国外将之列为战略技术发展,代表未来制造技术发展趋势.

2. 柔性制造系统(FMS)^[12]与柔性制造技术(FMT) 柔性制造系统又可称之为柔性自动化制造系统,一般必须包括三个基本部分:CNC 加工系统、计算机控制(信息流)系统和运输存储(物流)系统组成.

柔性制造系统的主要特点是“柔性”,所谓柔性是指系统具有适应不同加工零件的能力.

柔性制造系统按层次可分为柔性制造模块(FMM)、柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)和柔性自动线或厂(FMF).

柔性制造模块(FMM)由单台 CNC 机床配以工件自动装卸装置组成,它能进一步组成柔性制造单元和柔性制造系统.柔性制造模块本身可以独立运行,但不具备工件、刀具的供应管理功能,没有生产调度功能.

柔性制造单元(FMC)由 2~3 个柔性制造模块组成,中间用工件自动输送设备进行连接,整个单元由计算机控制,能独立完成整套工艺操作,具有一定的生产调度能力.

柔性制造系统(FMS)将柔性制造单元扩展,增加必要的加工中心台数,配备完善的物料刀具管理系统,通过一整套计算机控制系统管理全部生产进度计划,并对物料搬运和机床群的加工过程实现综合控制,形成一个标准的 FMS.

柔性制造工厂(FMF)以 FMS 为主体进行扩大,达到全厂内的生产管理过程、机械加工过程和物料的储运过程全部自动化,并由计算机进行有机的联系.其主要特点是:(a)采用分布式多级计算机控制系统;(b)全部日常进度计划可由主计算机和各级计算机通过在线控制系统进行调整;(c)各种不同类型 CNC 机床达十几台或数十台;(d)系统可自动加工各种形状、尺寸和材料的工件.全部刀具可自动交换及自动更换;(e)物料储运系统必须包括自动仓库.

国外较成功的柔性制造系统的效益统计显示大致为操作人员减少 50%,成本降低 60%,在制时间为原来的 50%,机床利用率可达到一个新的水平 60%~80%,机床台数减少 50%,生产面积减少 40%^[8].

柔性制造系统发展趋势:FMS 将获得进一步迅速发展;配置小型化;系统结构的模块化;控制管理软件的结构典型化;从 CIMS 的高度进行 FMS 的规划设计.

3. 计算机集成制造技术^[13] 计算机集成制造(computer integrated manufacturing, CIM)的概念由美国人 Joseph Harrington 博士于 1973 年首先提出. CIM 是运用系统工程的整体化观点,将现代化的信息技术和生产技术结合起来综合应用,通过计算机网络和数据库技术把生产的全过程连接起来,有效的协调和提高企业内部对市场需求的响应能力和劳动生产率,取得最大的经济效益,以保持企业生产的不断发展和生存能力.

因此, CIM 是组织现代化生产的“制造哲理”(manufacturing philosophy). 而计算机集成制造系统则为一种工程技术系统,是 CIM 的具体实施.

从功能上看,一个制造企业的 CIMS 包括经营管理、工程设计、产品制造、质量保证和物资保障等五个功能系统,同时还要有能有效连接这些功能系统的支撑环境,即计算机网络和数据库系统,从而构成企业的信息集成系统.

1985 年,美国科学院对在 CIM 方面处于领先地位的五家美国制造企业的调查和分析,得出关于实施 CIMS 后的效益如下:产品质量提高 200%~500%;生产率提高 40%~70%;设备利用率提高 200%~300%;生产周期缩短 30%~60%;提高工程师的工作能力 300%~3500%等.