

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>

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:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

光学是一门历史悠久的科学,又是一门活跃而富有创造的崭新科学,也是一门应用日趋广泛的科学技术.在光学显微镜技术近400年的发明与发展进程中,它支撑着生物技术及现代医学诊断、治疗的不断发展.光学在对物质的微细结构的认识、有效利用与世界改造的方面起到重大的作用.望远镜成了天文学的基本工具,开阔了人类对宇宙认识的视野,成为人类文明的重要标志之一.40年前激光的问世,是光学科学技术的一次革命性突破,对认识世界和改造世界提供了广泛的新技术途径.这些有关光学科学技术的进展,都与作为光学仪器的设计、制造技术的发展有着紧密联系.尤其与其中核心的光学元部件所能达到的功能与制造质量密切相关.光学仪器一直被视为一种精密工具,正是在于它发挥了光学功能的特点,一方面靠带有精密科学数据的光学设计,再则是工艺上实现这种功能的精密程度.传统的精密光学元部件绝大部分借助于工艺上较易获得的光学球面,只有在极其特殊的情况下,例如天文望远镜的大型镜面才采用非球面.初始时只能采用浅薄的非球面,即非常接近球面的非球面.即使这样要达到光学理论上所追求的高水平要求曾被视为难能可贵,几乎被认为是一手绝技,以至于掌握这种技术的人被认为是屈指可数的名手.当然,在这种系统中,光学性能会受到很大的限制,如视场、体积及重量等等.

20世纪下半叶,科学技术的迅猛发展和进步,促使对光学仪器具有更高性能和功能的需求,促进了光学仪器理论和技术的不断前进.特别是计算机的出现,自动控制技术的发展以及精密机械工艺技术的不断提高,使许多光学上新的器件(如衍射光学元件、深度非球面元件与大型非球面以及需要降低成本的大批量生产的光学元件)得以迅速发展,使光学加工工艺出现了新的跃进,成为现代化的可控技术,并正在形成一门先进光学制造技术的新学科.

本书内容着重论述了这一技术领域在近年来的突出进展,作者大都是活跃在先进光学制造技术领域里既参与光学工程研究、研制,又亲身从事光学加工技术实践的科技工作者,因此本书是在先进光学制造技术领域具有第一手性质的一本最新专著,特在此向读者推荐这本新书.

王大珩
2000年10月31日

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

目 录

序	王大珩
前 言	杨 力
第一章 现代先进光学制造概论	杨 力 1
§ 1.1 绪论	1
1.1.1 光学	1
1.1.2 光学的应用与展望	1
1.1.3 光学制造技术	4
§ 1.2 先进制造技术发展概况	5
1.2.1 近代世界经济特征与相关制造技术特点	5
1.2.2 先进制造技术特征与国外发展状况	6
§ 1.3 先进制造技术	7
1.3.1 计算机辅助技术	8
1.3.2 综合自动化技术	12
1.3.3 21 世纪的制造系统	14
§ 1.4 先进光学制造技术	16
1.4.1 特点、内涵	16
1.4.2 发展背景	16
1.4.3 加速光学制造现代化的发展进程	19
§ 1.5 先进光学制造技术的学科交叉	23
1.5.1 信息技术、微电子技术与光刻技术	23
1.5.2 光学制造与机械制造	24
参考文献	25
第二章 现代大型反射镜制造	杨 力 郑 耀 27
§ 2.1 大型反射望远镜及其主反射镜	27
2.1.1 世界有代表性的天文台与望远镜	27
2.1.2 望远镜光学的进展	31
2.1.3 在技术创新基础上的现代大型望远镜革命性进展	35
2.1.4 现代大型望远镜革命性发展的启迪	43
§ 2.2 大镜研、抛技术(lapping techniques)概述	45
§ 2.3 计算机控制小工具抛光技术	46

2.3.1	概述	46
2.3.2	计算机控制抛光技术的几个基础理论	48
2.3.3	抛光设备	56
2.3.4	计算机控制小工具抛光中的几个问题	62
§ 2.4	应力盘抛光技术	67
2.4.1	概述	67
2.4.2	应力盘技术的基础理论	68
2.4.3	应力盘的结构	75
2.4.4	应力盘抛光机床	78
2.4.5	采用应力盘的大镜加工工艺与面形检测	79
§ 2.5	大型非球面主镜制造技术的不同流派	80
2.5.1	自主产权与技术流派	80
2.5.2	美国大型非球面主镜制造体系	81
2.5.3	欧洲大型非球面主镜制造体系	84
§ 2.6	大型光学镜在加工中的支承设计	86
2.6.1	概述	86
2.6.2	单列支承和多列支承	88
2.6.3	多点支承	92
	参考文献	99
	附录一 主要天文望远镜的历史年表	102
	附录二 若干大型天文望远镜	104
第三章	能动光学器件	凌 宁 官春林 曾志革 107
§ 3.1	概述	107
§ 3.2	能动光学器件的驱动方式	107
3.2.1	压电陶瓷的基本概述	107
3.2.2	压电陶瓷的特性及其测试	108
3.2.3	叠片式压电驱动器的研制	109
3.2.4	压电驱动器的性能	110
§ 3.3	光学精密平移器	110
3.3.1	基本结构及工作原理	110
3.3.2	国内外发展状况	111
3.3.3	光学精密平移器的主要性能及检测	111
§ 3.4	二维高速倾斜反射镜	115
3.4.1	概述	115
3.4.2	倾斜镜特性	116

3.4.3	倾斜镜的性能检测	117
3.4.4	国内外发展情况	119
§ 3.5	变形反射镜	120
3.5.1	变形反射镜的分类	120
3.5.2	变形镜的国内外发展动态	121
3.5.3	变形镜的制造流程	122
3.5.4	变形镜的性能及其检测	124
§ 3.6	能动薄主镜技术	127
3.6.1	简介	127
3.6.2	能动薄主镜技术工作原理	128
3.6.3	能动薄主镜技术的特点及现有的应用	129
3.6.4	能动薄主镜技术的国内技术基础	132
	参考文献	137
第四章	微光学制作技术	杜春雷 139
§ 4.1	微光学方法	139
4.1.1	衍射微光学元件	139
4.1.2	连续浮雕折射微光学元件	150
4.1.3	掩模图形数据处理	154
§ 4.2	微光学技术与工艺	156
4.2.1	关键工艺技术	156
4.2.2	微光学元件质量评价	163
§ 4.3	微光学应用	166
4.3.1	微透镜阵列用于波前传感	166
4.3.2	微透镜阵列光聚能器	168
	参考文献	173
第五章	反射镜轻量化技术	方敬忠 175
§ 5.1	引言	175
§ 5.2	反射镜稳定性分析	175
5.2.1	自重引起的变形	175
5.2.2	环境温度引起的变形	181
§ 5.3	反射镜轻量化的意义	182
§ 5.4	反射镜轻量化的力学基础	183
5.4.1	采用四边简支板模型分析反射板的刚性	184
5.4.2	采用加强筋增强模型进行分析	184
§ 5.5	轻型反射镜结构形式与性能比较	186

§ 5.6 轻型反射镜结构设计	191
5.6.1 轻型反射镜蜂窝单元形状影响作用	191
5.6.2 轻型反射镜高度对结构刚性的影响	193
5.6.3 镜体结构设计的其他问题	194
§ 5.7 轻型反射镜材料选择	195
5.7.1 轻型反射镜材料性能要求	195
5.7.2 备选镜坯材料及其性能	196
§ 5.8 玻璃质轻型反射镜制备技术	198
5.8.1 浇铸成型法	198
5.8.2 高温熔接法	200
5.8.3 熔接物封接法	204
5.8.4 机械钻削减重法	207
§ 5.9 轻型反射镜技术展望	208
参考文献	209
第六章 超高精度光学元件制造技术	伍 凡 陈 强 211
§ 6.1 亚微米投影光刻物镜光学制造技术	211
6.1.1 高精度样板制造	213
6.1.2 计算机控制精密抛光技术	215
6.1.3 厚度测量	216
6.1.4 透镜的高精度定心无变形胶合	217
6.1.5 光刻物镜的装校	222
§ 6.2 超光滑表面加工技术	225
6.2.1 超光滑表面加工概述	225
6.2.2 几种超光滑加工技术介绍	226
参考文献	233
第七章 惯性约束聚变工程光学元部件制造	许 乔 杨 力 235
§ 7.1 惯性约束聚变工程	235
§ 7.2 ICF 固体激光驱动器对光学元部件的需求	237
7.2.1 ICF 激光驱动器的基本结构	237
7.2.2 激光驱动器光学元件	239
§ 7.3 强光光学元件光学质量评价要求	241
7.3.1 强光光学元件评价研究进展	242
7.3.2 强光光学元件关键评价指标	245
§ 7.4 ICF 光学元部件制造方法	257
7.4.1 平面光学元件加工技术	258

7.4.2	小工具数控抛光技术	263
7.4.3	晶体光学元件的 SPDT 加工技术	272
7.4.4	高阈值激光薄膜制造技术	279
	参考文献	285
第八章	现代光学检测技术	许 乔 287
§ 8.1	波面相位检测技术	287
8.1.1	概述	287
8.1.2	相移波面相位检测技术	290
8.1.3	波面的绝对相位检测	297
§ 8.2	波前功率谱密度(PSD)检测技术	303
8.2.1	波前 PSD 的定义	303
8.2.2	波前 PSD 的检测方法	306
8.2.3	空间频率传递函数校准	308
8.2.4	典型光学元件检测结果	314
§ 8.3	子孔径拼接	318
§ 8.4	表面粗糙度测量	321
	参考文献	324
第九章	光学非球面检验	伍 凡 326
§ 9.1	轴对称非球面的曲面方程表达式及其关系	326
9.1.1	曲面方程	326
9.1.2	系数关系	327
§ 9.2	光学非球面检验方法	328
9.2.1	检验二次曲面的无像差点法	328
§ 9.3	检验二次曲面的补偿法	336
9.3.1	光学补偿法	337
9.3.2	凸二次曲面的透镜式自准检验	341
§ 9.4	法线像差补偿法	343
9.4.1	Dall 补偿器设计	344
9.4.2	Offner 补偿器设计	347
9.4.3	镜式补偿器设计	352
9.4.4	干涉仪零检验补偿器设计	357
9.4.5	大口径透镜凸面零检验的补偿器设计	361
9.4.6	补偿器的加工及安装精度	363
	参考文献	365

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.光学的历史悠久,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.激光器还将以光陷获方式控制孤立原子,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,加工过程十分依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和成长,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也具有重要意义。

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 μ m 分辨率时进给速度可达 24m/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.

实现 CIMS 的关键技术:(a) 信息传输,不解决通信问题就不可能把企业内相互分离的各个部分集成为一个统一的整体.工业局域网是利用计算机及通信技术将分散的数据处理设备连接起来的一种计算机网络.其中发展迅速的有 MAP 网和以太网(ethernet).MAP(manufacturing automation protocol)是美国通用汽车公司在 1980 年首先提出用以连接该公司内 4 万多台自动化设备.其后,MAP 用户协会在 1989 年成立,目前 MAP 已成为世界性的制造自动化通信标准.TOP(technical and office protocol)与 MAP 类似,为技术和办公室通信建立一个统一的工业标准.TOP/MAP 网可以互联.(b) 产品集成模型,现有的 CAD 系统大都建立在几何建模的基础上,难以满足集成化的要求.为此需要建立产品模型,产品模型的信息是面向产品、面向技术、面向生产过程的,包含了与工艺过程密切相关的特征,相对于几何建模而言,称这种建模为产品建模或特征建模.(c) 建立现代生产管理体系的新概念.

1.3.3 21 世纪的制造系统^[9]

21 世纪的制造技术的发展研究已受到国内外普遍关注.21 世纪,以计算机技术、信息技术为主导的一系列高技术制造技术构成了先进制造技术的重要组成部分.国际化市场竞争更加激烈,产品的更新换代更加迅速,信息技术进一步推动制造技术的改造和发展.企业经营从封闭系统到开放系统,从技术系统到“社会-技术系统”变化,企业的组织结构向集成化和分布式发展.

下述几种新的制造系统值得注意.

1. 快速成形系统 成形(forming)是将物质有序地组织成具有确定外形和一定功能的三维实体.成形方式分为四种:去除成形(dislodge forming);受迫成形(forced forming);堆积成形(stacking forming);生长成形(growth forming).车、铣、刨、磨、电火花加工、激光切割与打孔等均属去除成形.铸、锻、粉末冶金等属受迫成形.在这四种方法中,堆积成形是 20 世纪 90 年代出现的新方法,突破了传统工艺观念,有广阔的发展前景.由此原理产生了快速原型零件制造技术(rapid prototype manufacturing, RPM),即采用离散/堆积成形原理自动完成由 CAD 数字模型到物理模型的转变.代表性方法的举例是根据产品的三维 CAD 模型,经计算机处理成“切片”横截面面化模型,用计算机控制激光束按数字截面轮廓和内部网线对容器中的液态光敏树脂扫描使该层固化,下沉一个层面高度,然后第二层,直至最后一层固化,生成实体模型件.应该说这是一种计算机数控物理成形法,体现了成形过程中物理过程与信息过程的统一,材料提取过程与成形过程的统一.RPM 技术的发展方向为智能化、实用化,以及颇具浪漫色彩的面向市场的桌面化制造系统(desktop system).离散/堆积成形决非限于一般意义上的对传统制造概念上的突破,随着生物工程、活性材料、信息科学的发展并与制造科学相结合,将会产生全新

的制造信息过程与制造物理过程精美结合的成形技术。

生长成形技术应该与材料科学中的晶体生长发育技术相关联,也与医学领域,生物技术中的基因工程、细胞工程的发展相关,研究生物信息流和制造信息流的关系,创造仿生成形新技术,是 21 世纪制造科学的一个重要发展方向。

2. 智能制造技术 机械制造领域自动化发展经历了四个发展阶段:从原始的劳动密集型(无自动化)到设备密集型(设备自动化),再到信息密集型(适应控制与最优化),最终走到知识密集型(智能化)。智能自动化是以知识密集为特征的在更高层次上的集成,其核心是知识库共享与人工智能技术的运用,达到真正的柔性 and 集成。

在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初,通过制造自动化、新一代人工智能、计算机与信息技术等高技术的集成而发展起来的新型制造工程——智能制造技术(intelligent manufacturing technology, IMT)和智能制造系统(intelligent manufacturing system, IMS)是 21 世纪的先进制造技术,受到高度重视,是制造技术的一个重要发展趋势。

智能制造技术是指在制造过程的各个环节上,以高度柔性和高度集成的方式,通过计算机来模拟人类专家的智能活动,对制造中的问题进行分析、判断、推理、构思和决策,旨在取代或延伸制造环境中人的部分脑力劳动,并对人类专家的制造智能进行收集、存储、完善、共享、继承和发展。智能制造中,智能不仅存入,而且还将智能“增殖”。集成是智能的基础,而智能也将反过来推动更高水平的集成。未来的制造自动化应是高度集成化与高度智能化的融合体。从更高层次而言,智能制造是人类从信息时代走向智能时代所面临的一个重要里程碑。

3. 虚拟制造系统 在计算机仿真技术和网络技术的基础上,由虚拟物理系统(virtual physical system, VPS)和虚拟信息系统(virtual information system, VIS)构成的制造系统称为虚拟制造系统(virtual manufacturing system, VMS)。虚拟制造系统不消耗现实资源和能量,生产的产品是可视的虚拟产品,具有真实产品所必须具备的特征,是一个数字产品。采用虚拟制造技术后,可采用虚拟设计、虚拟加工、虚拟装配等虚拟新产品开发技术,提供有关生产全过程的管理决策信息,优化制造资源的调动与组合,提高新产品生产过程开发效率。在上述虚拟制造技术的基础上,从更宏观的角度出发又产生虚拟企业、虚拟工厂、虚拟仓储等技术。建立虚拟企业必须有全国范围内或一个相当大范围的计算机协议企业网络为基础或前提,利用大型综合数据库及相应的服务系统,实现形象的虚拟企业,以信息的方式出现在 Internet 网上。也可以实现实体联合的虚拟企业,利用不同地区不同企业间的资源优化组合,迅速组成一种没有围墙、超越空间、利用信息高速公路联系和统一指挥的联合实体,以增强企业的竞争优势。

4. 其他先进制造技术理念 精益(lean production)、敏捷(agile manufactur-

ing)、柔性生产 (flexible manufacturing) 系统, 统称精益、灵捷、柔性生产系统 (LAF)。生物型制造系统, 绿色制造, 清洁制造, 绿色产品等均会在 21 世纪的制造业的发展中占据重要地位。由于篇幅所限, 不能一一介绍, 有兴趣的读者可去参阅有关文献。

§ 1.4 先进光学制造技术

1.4.1 特点、内涵

毋庸讳言, 为先进光学制造技术下一个精确的定义并不是一件容易的事情。首先, 先进性有显明的时代特征。其次, 就其研究对象和侧重的领域不同而有所差异。一般认为, 先进光学制造技术按着开发的目的, 在两大方向上发展: (a) 为适应全球化的国际市场激烈竞争, 以增强企业市场竞争力为基本宗旨的综合自动化方向上的发展: 特殊、高精度、小批量生产, 以满足高精度、多品种、小批量、低成本与快速交货的信息时代的市场竞争; 高质量、大批量、廉价光学元件的制造; (b) 为保证高技术项目的实施而发展的先进光学制造技术, 往往带有一定的特殊性, 用以支持和保障国家级高技术项目的顺利实施和完成。在高技术项目实施中和完成后, 作为其支撑技术之一的光学制造技术往往会发展和成长为一门带有普遍意义的先进光学制造技术领域。然而, 这两大发展方向之间在技术内涵上又有一定关联, 并无绝对界限。

现代先进光学制造技术具有如下特征:

(1) 现代先进光学制造技术已经逐步并正在成长为一门新兴的多学科交叉的工程科学, 多学科交叉是其主要特征。正在由一门制造技艺发展为一门制造科学。现代先进光学制造技术充分利用数学模型来描述加工过程, 集信息技术与计算机技术、光学、精密机械、微电子技术、数学、物理、化学、自动化技术, 机械制造科学, 材料科学, 精密测量等各学科的先进科技成果成为一体, 为解决当代高科技前沿提出的极富挑战性制造任务中, 自身作为一门学科不断得到发展和完善。

(2) 精密化与超精密化。精密化与超精密化是国家级大型高技术工程的指导方针, 追求精密化与超精密化是现代先进光学制造技术的重要发展内涵、而非单纯的外在评价指标体系。从 $10^{-1}\mu\text{m}$ 到 $10^{-3}\mu\text{m}$ 的精度指标是精密加工与超精密加工的重要标志, 以实现原子级的材料去除、移动、堆积或生长。

(3) 确定性加工 (deterministic processes) 是现代先进光学制造技术区别不可定量、不可重复的经典光学加工的关键所在。

1.4.2 发展背景

高技术需求牵引和市场竞争的驱动是现代先进光学制造技术发展的基本动力。

1. 高技术需求牵引 20 世纪 70 年代初启动的举世闻名的美国哈勃空间望远镜(Hubble space telescope)计划,其直径 2.4m 轻质主反射镜的制造直接牵动了美国多家著名光学制造商竞相发展计算机控制小工具抛光技术,从而开拓了大镜光学制造领域的数控加工时代.哈勃空间望远镜计划首席科学家 C Robert O Dell 在其事后撰写的“建造哈勃空间望远镜”(building the Hubble space telescope)^[4]一文中幽默地使用了“mirror, mirror”,即“反射镜、反射镜”重叠词.生动地描绘了哈勃空间望远镜大型反射镜制造的艰难曲折的历程为他留下的难以忘怀的记忆.

非常有趣的是,传统观念上以天文望远镜为代表的—个大型光学系统只需—个大型主镜的惯例已被突破.例如欧洲南方天文台的超大型天文望远镜由四架口径 8.4m 的主镜组成^[17].美国 ICF 计划的国家点火装置需要方形、标称尺寸 41×41cm 有效口径的高质量高抗激光损伤阈值的各种大尺寸激光光学元部件 7518 件^[5].美国 NASA 新的空间望远镜计划需要在空间装设数千平方米光学镜面阵列^[6].

随着光学工业传统产品向光电子产品和高技术附加值产品的转化,以及高技术项目的特殊需求,近年来,光学元、部件的精度指标要求已经提高了一个量级以上.面形精度要求早已从经典的牛顿环转变为数字式面形波面偏差 PV (峰-谷差)、RMS(均方差).如光刻物镜透镜的技术指标要求已达 PV 优于 $\lambda/40$,RMS 达到 $\lambda/200$,透镜中心厚度要求由 0.1mm 提到 0.001mm.在高功率物理中将功率谱密度(PSD)作为—项重要指标引入光学元件质量评价体系中,从而为动态、定量地评估系统质量提供依据.这是对经典光学元件质量评价体系的—个重要发展.

2. 国际光学工业市场竞争的驱动^[34] 进入 21 世纪国际光学工业市场竞争更趋剧烈,除了对光学高技术产品更新快、小批、质优、价廉、交货迅速的精益、灵活、柔性生产方向之外,对优质廉价的光学元件大规模逼近需求和生产也是—个重要的发展趋势.光学工业市场需求的巨大牵引为光学制造业和光学制造工作者提出了严峻的挑战和新的发展机遇.

非球面.如所周知采用非球面透镜或反射镜有极大好处,在现代光学技术领域,广泛采用高精度低造价的非球面已成为势在必行的发展趋势.非球面制造涉及机械加工成形、抛光和检测三项设备技术.包括采用金刚石车削,计算机控制小磨头抛光,离子束抛光,被动或主动的可柔性抛光磨头,可变形刚性大尺寸抛光头,磁流变抛光法等等.未来趋势是由旋转对称非球面、包括它们的离轴部分向非对称非球面发展.

衍射光学元件.光依托衍射光学元件表面的微观图案来控制而非宏观的曲率控制.衍射光学元件具有全新的应用途径和巨大发展潜力.衍射光学元件制造技术以光刻技术为基础,可用于微光学制造、可制造微光学元件阵列.衍射光学元件有校正球差与其他像差的能力,有控制波前形状和聚焦焦斑的能力,在大尺寸时具有

很轻的重量.将折射光学元件与衍射光学元件结合、将非球面与衍射光学元件结合为新设计带来巨大潜力,例如头盔显示器,先进的传感系统,激光与宽波段成像,高速数据传输的光学互连,光学数据存储,目标捕获系统的光学校正器,用户数字成像及复杂光学系统检测等.衍射光学元件正处于发展的关键阶段,具有惊人的市场前景.

光学薄膜.光学元件制造的最后步骤是镀制光学薄膜用于控制光线或保护光学元件表面.特殊的窄带滤光片用于远程通信设备的波分复用传输技术(WDM),在光通信技术中具有特别重要的意义.

光学材料.光学成像元件使用多种材料.使用最多的是光学玻璃,资料可列出300多种光学玻璃,其中只有不到50种不需特殊熔炼,大约有10种占光学玻璃应用的90%.对大多数一般应用目的,设计者掌握16种材料即可.光学系统中聚合材料的应用逐渐增加.注入式模压塑料透镜的质量在很多场合已达玻璃透镜的质量.然而所能用的光学聚合材料很少,并受到折射率低、散射高,不均匀性及环境容许程度的限制等.新的高质量光学聚合材料的发明一定会为光学市场带来巨大的经济效益.某些场合需用其他光学材料,如在激光发射波长透过的单晶硅可用于高能激光器中需抗热效应的反射基底.超纯净石英用于光纤制造.掺钕玻璃用于光纤放大器,溶胶-凝胶材料用于特殊光纤和波导.

新一代非球面、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世纪光学元件的发展主流.

与光学制造技术紧密相关的光电子、光子元件大规模生产,综合了先进光学制造技术、光电子和电子工业制造技术与通信技术等,主要包括:光纤、光纤器件和光波导.光纤是光子技术中广泛应用的可靠、可重复生产的元件.二氧化硅光纤生产包括三个阶段:初期加工、抽拉光纤和组合光缆.非二氧化硅光纤,例如塑料光纤,氟光纤等也有一定的应用前景.早期的光纤器件是通过控制光纤的组合制成,例如分束器与耦合器.作为纯粹的被动器件,提供的功能有限.掺钕光纤放大器的引入开始了一类全新的器件.高功率光纤激光器、拉曼放大器、散射补偿器、光纤光栅滤波器和反射器等现已出现在商业市场.通常需要特殊的连接技术将这些器件连到传输光纤上,从市场发展的角度看,目前仍存在一些技术障碍.平面波导器件主要有两类,用于集成开关和调制器的铌酸锂电光器件,用于集成被动波导的硅基底上的二氧化硅器件.两种技术都基于利用扩散和沉积原理形成平面波导薄膜,然后用光刻技术形成波导结构.铌酸锂调制器用于有线电视和高性能通信系统.平面光波导器件在商业通信上用作分束器、混合器和WDM线路选通器.由于这些器件是平面的,连接到光纤传输线上是很复杂的.市场的发展需要更多的采用光电子器件单块集成结构来避免分离器件安装的复杂性.

半导体光电子元件. 半导体光电子元件的市场不包括平面显示器, 在 1995 年美国的国家税收达 60 亿美元, 今后 10 年将达到 200 亿美元, 这与全球信息体系的持续增长有关. 这个领域的制造技术的主要挑战有: 大容量芯片产品成本的下降, 以及芯片处理、测量、检验和部件装配的自动化; 光子器件及其装配的 CAD 工具的发展, 像硅工业领域一样, 功能集成化芯片的发展至关重要; 不断提高激光器的性能、激光阵列、廉价部件装配和高功率激光器; 发展实用化的绿、蓝和极紫外激光器. 发展高性能低成本的成像阵列. 半导体光电子元件涉及: (a) 远距离传输系统元件. 以光纤传输系统为主, 主要应用高性能 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长的激光发射器和 PIN 场效应晶体管接收器. 全 WDM 功能要求光学交叉连接和光学频率转换器, 目前尚没有商品供应. (b) 光学数据通信线路. 这类低成本多模系统多采用大直径塑料(1mm)和玻璃光纤(0.2 mm), 集成激光器或探测器阵列的单模系统比较理想, 应用垂直腔面激光器(VCSELs)有吸引力, 目前 $1.3\mu\text{m}$ 高镜面反射率的 VCSELs 制造很难. (c) 通过空气介质的红外线路连接器件. 便携式通过空气介质的红外通信正在普及, 用于手提式计算机或打印机下载文件, 1995 年达到 4 Mb/s 的传输速率, 预计不久将达 65 Mb/s, 高功率 VCSEL(0.2~0.5W)阵列可能会是目前采用的镓铝砷(GaAlAs)发光二极管的替代产品, 但商业要求每个 VCSEL 阵列应非常廉价(例如低于 2 美元). (d) 半导体激光器. 随着半导体激光器功率的提高, 有可能在医疗和加工业中逐渐取代气体和固体激光器. 随着镓铝砷激光器亮度的不断增加, 转换到蓝、绿波段会有更广泛用途. (e) 可见光发光二极管. 未来的发展方向是提高效率, 扩大蓝、绿波段, 降低单位光通量成本. 可见光发光光源的内部量子效率在 10%~40% 范围, 明显低于近红外发光光源(约为 100%). 近年来在基于镓氮的蓝、绿发光二极管的蓝宝石基底研究方面取得突破性进展, 可能会使整个可见光谱范围内由发光二极管覆盖. 开发低成本的晶格匹配的基底, 如碳化硅、氮化镓、氮化铝等是必要的. (f) 成像阵列. 成像阵列主要应用 CCD 技术, 今后的挑战是发展达到胶片摄影要求的高分辨率、高性能的成像阵列.

激光器和波导集成组装. 由电子包装到光子包装, 带来的新问题是外部光纤与光波导连接只允许亚微米级的公差. 光纤精密连结结构逐渐被集成组装系统所取代. 目前, 在不同的组件集成系统里所有的光子元件均为离散器件, 通信向 WDM 发展趋势将增加对集成化的需求, 光纤器件已组装在细管或光纤绕筒内, 能直接连接到光纤传输线中. 随着波导组件包和集成化的发展, 这些元件将大多数被集成组装成波导来减小尺寸和费用. 光学多芯片模块将简化与硅电子元件的互连和集成.

1.4.3 加速光学制造现代化的发展进程

1. 光学工业自动化

(1) 美国^[15,17~20]. 美国自 20 世纪 50 年代起, 由于种种原因, 对制造业的看法

失之偏颇,制造技术的发展受到冷遇,导致美国产品的国际竞争力大幅下降,整个制造业遇到国际竞争者的致命打击.直到 20 世纪 80 年代后期,美国的一些国会议员、政策咨询和研究机构纷纷要求政府出面组织、协调和支持产业技术发展,挽回当时的经济形势.1991 年布什政府时期白宫科学技术政策办公室发表了总数为 22 项的美国国家关键技术,其中制造技术占 4 项,标志着美国科技政策的转变.克林顿上台后,对产业技术的发展给予了实质性的有力支持,对美国经济发展起到显著作用^[21].

1987 年美国国防部与商业部提出了一份有关光学工业存在问题的研究报告.研究认为,光学技术的进展与相关技术例如成像、传感、通信、制导控制等的发展紧密相关,具有重要的杠杆作用.然而美国的光学元件和系统的加工与生产在国际竞争中,尤其是对日本及太平洋周边国家,已失去了领导地位.从 1970 年以来,光学工业的基础在缓慢地但是持续性地倾斜.商业策略从强调制造转变到关心从世界范围资源的采购,导致美国的很多制造业主变成进口商.1981~1986 年的统计表明,光学工业的从业人数下降了 50%.当时,进口在商用和国防两方面的光学市场中均占支配地位.报告的结论是美国的光学工业需要现代化.

稍后一个联合美国光学制造业主的全国性组织“美国精密光学制造协会(American Precision Optics Manufacturers Association, APOMA)”成立,协会联合的纽带是光学制造现代化.在 APOMA 的倡议下经过工业、科学、政府各界的努力在 Rochester 组建了光学制造中心(center for optics manufacturing, COM).中心的宗旨是发展先进光学制造技术,促进技术转化,建立美国光学工业的培训和教育基地.拟发展的技术领域包括材料、工艺、质量、设备、测量和管理.长远目标是发展创新性的新制造技术,以提高美国的光学制造基础及其客户的竞争力.中心在罗彻斯特大学光学研究所(University of Rochester's Institute of Optics)和 APOMA 的支持下启动,得到科学和工业界的赞助.COM 主体位于罗彻斯特大学内.亚利桑那大学和中央佛罗里达大学(Univ. of Central Florida)在 Los Angeles, CA, Orlando 和 Florida 分别建立分中心.其他大学和国家实验室也将提供可用资源.中心的有利地位使之能够集中科学界、政府和工业组织中的专家资源.

该中心由四个部分组成.第一部分致力于近期现代化,包括材料、加工、测量与质量方法.为业界成员和用户制造数据库服务.第二部分旨在发展先进制造技术,侧重在测量、设计和计算机集成制造(CIM).第三部分提供有关新型机床与新型仪器的训练,这对于向最广泛范围内的制造商和光学用户传递信息是至关重要的.第四部分研究跨越五年以上长远目标的具有前瞻性和创新性的制造技术,以提高美国光学制造业及其用户的竞争力.

COM 近年发展新一代先进光学制造技术中,其有代表性工作是确定性加工(deterministic processes).包括 3 个方面:(a)计算机控制光学表面成形(computer