



北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

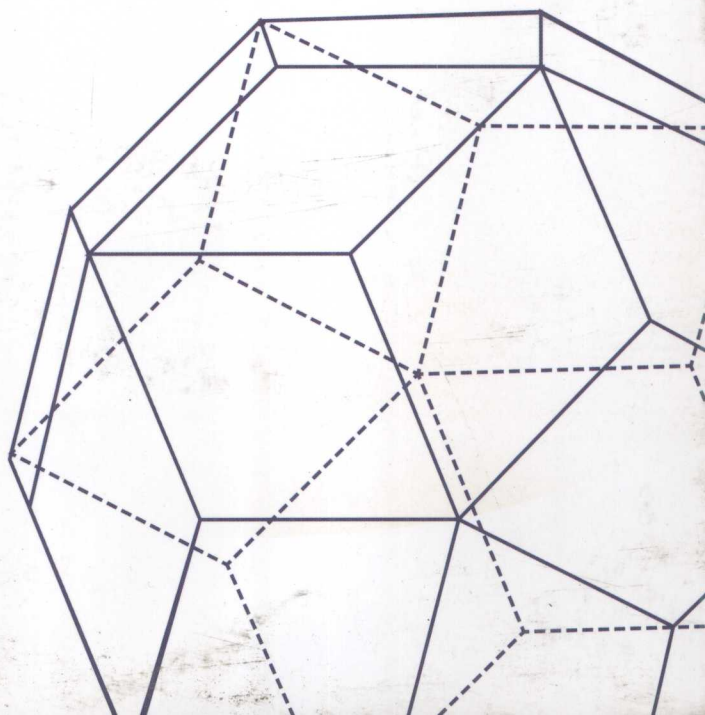
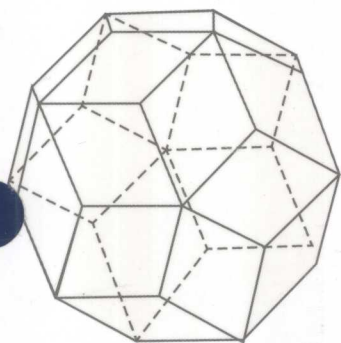
Advanced Optical Manufacturing Engineering and Technology

先进光学制造工程 与技术原理

程灏波 (Cheng Haobo)

[中国香港] 谭汉元 (Hon-Yuen TAM)

著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014009774

TH740.6
05

北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

先进光学制造 工程与技术原理

程灏波 (Cheng Haobo)

[中国香港] 谭汉元 (Hon-Yuen TAM)

著



TH740.6
05

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1695949

01400977

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

先进光学制造工程与技术原理/程灏波, 谭汉元著. —北京: 北京理工大学出版社, 2013. 8

北京理工大学“985 工程”国际交流与合作专项资金资助图书

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7553 - 8

I. ①先… II. ①程… ②谭… III. ①光学零件 - 制造 IV. ①TH740. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 060318 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
82562903 (教材售后服务热线)
68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京泽宇印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 22.5

字 数 / 418 千字

版 次 / 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

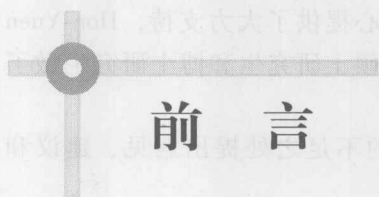
责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前言

光学是一门历史悠久的科学。光学是经典的，它是人类观察世界和认知世界的有效工具；光学是创新的，它是活跃且富于创造的科学技术。与世界万物一样，光学科学也有一个从简单到复杂的逐步深入的发展过程，伴随着这个过程的是人们对它的认识和应用。从支撑着生物技术及现代医学诊治技术不断进步的光学显微技术近 400 年的发明与发展进程，到 40 年前激光技术的问世，乃至近年来空间精细遥感器的出现，光学科学在一次次革命性的技术突破中为人类认识和探索科学的无穷奥妙提供了广泛的新技术途径。

先进光学制造工程与技术是光学工程技术领域的一个重要分支，与光学仪器、装备的功能实现紧密联系。进入新世纪，对光学仪器、装备更高性能和功能的要求促进了光学仪器理论和技术的跨越式发展。然而，在实现过程中，适应这一快速发展态势的先进光学制造及检测技术并不是想象中的易于实现，就单一光学元件来讲，例如达到光学理论上所追求的高精度的光学异型曲面元件曾一度被视为难能可贵；而针对复杂光学系统如空间精细遥感器的系统装调以及准确检测就更是极具难度。但是，著者认为，先进光学制造及检测技术尚未发展成为现代化的完全可控技术，其主要原因是人们对于这一技术的工艺特点及内在机理的认知有待进一步完整，一致性的科学规范有待进一步形成。著者始终坚信，随着时代的发展，先进光学制造及检测装备技术必然在航空航天、国防、天文以及信息技术等领域发挥越来越重要的作用，形成一门先进光学制造新学科。

全书共 11 章。第 1 章介绍了光学仪器及光电仪器、先进光学制造技术的发展等内容。第 2 章主要介绍了光学零件的基础理论，包括数学描述、零件材料、抛光机理、质量评价等内容。第 3 章至第 6 章详细介绍了计算机控制小工具头技术、磁流变抛光技术、电流变技术、磁射流技术等光学非球面制造技术。第 7 章综述了其他先进光学制造新技术。第 8 章至第 11 章介绍了光学非球面检测技术，包括轮廓检测技术、干涉检测技术、子孔径拼接技术、亚表面损伤检测技术。

本书适用于航空航天、天文和信息技术等领域的从事光学制造检测工作的工程技术人员，以及大专院校相关专业的学生和科研人员。

本书的编写出版得到了北京理工大学出版社、国际教育交流与合作教材专著建设计划项目的大力支持与资助。内容取材于著者多年的学术积累，融入了新的

学术见解并参考了大量的文献,在此谨向相关作者及同仁致以诚挚的感谢!北京理工大学—香港中文大学光机电工程联合研究中心提供了大力支持, Hon-Yuen TAM 和冯云鹏提供了有价值的学术观点;著者的硕士研究生和博士研究生做了大量的资料整理工作,在此表示衷心的感谢!

由于著者水平有限,诚恳希望读者对本书的不足之处提出意见、建议和指正。

著者

2013年2月

目 录

第1章 先进光学制造工程概述	1
§1.1 光学及光电仪器概述	1
§1.2 光学制造技术概述	3
§1.3 先进光学制造的发展趋势	8
第2章 光学零件及其基础理论	13
§2.1 光学零件概述	13
§2.2 光学零件的材料	17
§2.3 非球面光学零件基础理论	26
§2.4 抛光机理学说	36
§2.5 光学零件质量评价	38
参考文献	47
第3章 计算机控制小工具技术	49
§3.1 计算机控制小工具技术发展概述	49
§3.2 计算机控制小工具加工原理及数学模型	52
§3.3 计算机控制小工具设计与在线测量系统	67
§3.4 计算机控制小工具加工工艺研究	74
§3.5 固着磨料在计算机控制小工具技术中的应用	85
参考文献	92
第4章 磁流变抛光技术	95
§4.1 磁流变抛光技术概述	95
§4.2 磁流变效应	98
§4.3 磁流变抛光工具设计及分析	100
§4.4 磁路设计及磁性微粒场致微观结构	109
§4.5 磁流变抛光去除函数模型	114
§4.6 磁流变抛光技术工艺规律	120
参考文献	123
第5章 电流变抛光技术	125
§5.1 电流变效应	125

§ 5.2	电流变抛光液	130
§ 5.3	电流变抛光机理及模型	142
§ 5.4	电流变抛光工具设计与研究	145
§ 5.5	工艺实验结果	151
参考文献		157
第 6 章	磁射流抛光技术	160
§ 6.1	磁射流技术概述	160
§ 6.2	流体动力学基础	168
§ 6.3	磁射流工作原理	172
§ 6.4	磁射流抛光去除函数模型分析与特性	176
§ 6.5	磁射流抛光工具设计	180
§ 6.6	磁射流抛光工艺研究	186
§ 6.7	磁射流加工实例	198
参考文献		203
第 7 章	其他先进光学加工技术	206
§ 7.1	电磁流变抛光技术	206
§ 7.2	应力盘研抛技术	210
§ 7.3	离子束抛光技术	213
§ 7.4	等离子体辅助抛光	218
§ 7.5	应力变形法	227
§ 7.6	光学玻璃非球面透镜模压成形技术	230
§ 7.7	光学塑料非球面零件注射成形技术	235
§ 7.8	非球面真空镀膜法	236
§ 7.9	非球面复制成形法	238
参考文献		241
第 8 章	光学非球面轮廓测量技术	243
§ 8.1	非球面轮廓测量技术概述	243
§ 8.2	数据处理	248
§ 8.3	轮廓测量精度分析与误差补偿	262
§ 8.4	非球面检测路径	268
§ 8.5	点云曲率和法矢计算方法分析	270
§ 8.6	非球面轮廓测量实例	274
参考文献		275
第 9 章	非球面干涉测量技术	276
§ 9.1	光学非球面检测方法	276
§ 9.2	干涉检测波前拟合技术	278

§ 9.3 非球面补偿检测技术	283
§ 9.4 计算机辅助检测	289
§ 9.5 离轴非球面检测校正技术	295
§ 9.6 大口径平面检测技术	301
参考文献	304
第 10 章 子孔径拼接干涉检测技术	307
§ 10.1 概述	307
§ 10.2 基础理论	313
§ 10.3 子孔径划分方法	321
§ 10.4 子孔径拼接测量实验	326
参考文献	332
第 11 章 亚表面损伤检测技术	334
§ 11.1 亚表面损伤概述	334
§ 11.2 亚表面损伤产生机理	335
§ 11.3 亚表面损伤检测技术	336
§ 11.4 磁流变斜面抛光法测量亚表面损伤深度	344
参考文献	346

第1章

先进光学制造工程概述

§ 1.1 光学及光电仪器概述

光学的起源可追溯到远古时代。我国春秋战国之际,墨翟^①及其弟子提出了一系列几何光学知识的经验规律,因此《墨经》称得上是有关光学知识的最早记录。在西方,古希腊数学家欧几里得^②的《反射光学》(Catoptrica)叙述了光的直线传播和反射定律,提出了光的投射学说。光学的发展经历了萌芽时期、几何光学时期、波动光学时期、量子光学时期、现代光学时期。直到21世纪,光学和其他学科之间的相互交叉和拓展形成了一批新的学科分支,如光谱学、自适应光学、晶体光学、傅里叶光学、微光学、非线性光学、统计光学、散射光学、薄膜光学、量子光学、辐射度学、X射线光学,等等。

光学既是物理学中最古老的一个基础学科,又是当前科学研究中最活跃的前沿阵地,具有强大的生命力和不可估量的前途,是科技发展的重中之重。因此,严济慈^③院士说过“光学是一门很老的科学,又是一门很新的科学”。王大珩^④院士也说过“光学老又新,前程端似锦”。

光学仪器的出现和发展促进了光学的发展,同时也受光学发展水平的制约。大自然存在的水面、大气,甚至小孔都可以认为是一种简单的光学仪器(元件)。中国古时用铜制成的凹面镜——阳燧(见图1-1),用以聚集日光,点燃艾炷施灸。李时珍^⑤《本草纲目》卷主:“阳燧,火镜也。以铜铸成,其面凹,

① 墨翟(公元前468—前376年),春秋末战国初期宋国(今河南商丘)人,一说鲁国(今山东滕州)人,是战国时期著名的思想家、教育家、科学家、军事家、社会活动家,墨家学派的创始人。

② 欧几里得(Euclid,希腊文Ευκλειδης的英化名字,约公元前325—前265年),古希腊最负盛名、最有影响力的数学家之一,被称为“几何之父”。

③ 严济慈(1900—1996),谱名泽荣,字慕光,号厂佛,浙江东阳人。中国科学院院士,著名物理学家、教育家,中国现代物理学研究的开创人之一,也是中国光学研究和光学仪器研制工作的奠基人之一。

④ 王大珩(1915—2011),中国科学院院士,中国工程院院士,国际宇航科学院院士,著名光学家,中国近代光学工程的重要学术奠基人、开拓者和组织领导者,“两弹一星功勋奖章”获得者,杰出的战略科学家、教育家。

⑤ 李时珍(1518—1593),字东璧,晚年自号濒湖山人,蕲州(今湖北省黄冈市蕲春县蕲河镇)人。中国历史上最著名的医学家、药学家和博物学家之一。

摩热向日，以艾承之，则得火。”其实早在北宋时期，沈括^①的《梦溪笔谈——阳燧照物》中就有对阳燧的介绍。阿拉伯学者阿勒·哈增（Al Hazen, 965—1038）首先发明了凸透镜。

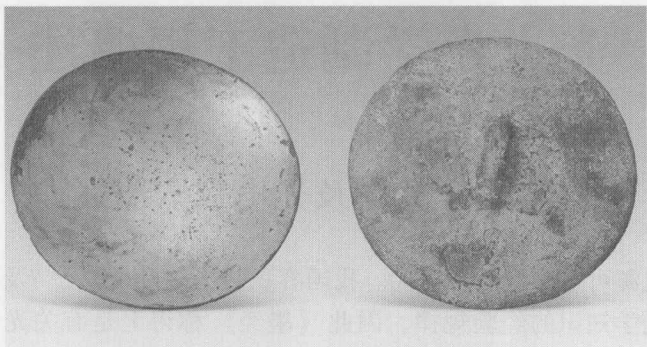


图 1-1 中国古时取火用阳燧

1268 年，罗吉尔·培根^②最早记录了用于光学目的的透镜。与此同时，在欧洲和中国已经出现了装入框中用于阅读的放大透镜。在欧洲，最早的眼镜出现在约 1286 年的意大利，由亚历山德罗·德拉·斯宾纳^③发明。此后的 15 世纪和 16 世纪，凹面镜、凸面镜、眼镜、透镜等光学元件也相继出现。

最早记录的望远镜由汉斯·利伯希^④于 1608 年在荷兰米德尔堡（Middelburg）完成。1609 年，伽利略完成了第一架按照科学原理制造的望远镜（伽利略式望远镜），并用来进行天文观测。艾萨克·牛顿^⑤于 1668 年第一个成功地自制了反射式望远镜，后来据称又首次发表了关于沥青抛光方法的报告。

此后的几个世纪中，光学仪器作为人类眼力的提升工具，得到比较快的发展，光学工程作为光学的一门应用技术，也普遍得到科学技术工作者的认同。但是，这期间的光学仪器大都是目视光学仪器，或者采用感光胶片进行接收。进入 20 世纪以后，随着光学理论及其交叉学科的发展，光学仪器得到了长足的发展，如电荷耦合器件（Charge Couple Device, CCD），激光器^⑥、电子显微镜，等等。

① 沈括（1031—1095），字存中，号梦溪丈人，杭州钱塘（今浙江杭州）人，北宋科学家、改革家。我国历史上最卓越的科学家之一，精通天文、数学、物理学、化学、地质学、气象学、地理学、农学和医学，他还是卓越的工程师、出色的外交家。

② 罗吉尔·培根（Roger Bacon, 1214—1294），英国方济各会修士、哲学家、炼金术士。他学识渊博，著作涉及当时所知的各门类知识，提倡经验主义，主张通过实验获得知识。

③ 一说由萨尔维诺·德戈阿玛蒂（Salvino D'Armata）发明。

④ 汉斯·利伯希（Hans Lippershey, 1570—1619），荷兰眼镜商人，据说是第一台望远镜的制作者。

⑤ 艾萨克·牛顿（Isaac Newton, 1643—1727），爵士，英国皇家学会会员，英国物理学家、数学家、天文学家、自然哲学家和炼金术士，是人类历史上出现过的最伟大、最有影响的科学家之一。

⑥ 1960 年 7 月 8 日，美国科学家梅曼发明了第一台红宝石激光器。

由于微电子技术和微光电子技术的发展,光电子器件的集成度越来越高,这使得光电探测技术和光电转换技术日趋成熟,传统的光学仪器越来越少,现代光电仪器越来越多,如用于日常消费领域的数码照相机、投影仪等;用于办公和商务领域的激光打印机、扫描仪等;用于大地测量的经纬仪、水平仪、激光测距仪等;用于科学研究的大口径望远镜等。

§ 1.2 光学制造技术概述

光学制造技术是一门有着悠久历史的加工技术,传统抛光工具离不开沥青,加工过程十分依赖操作者的经验和技巧,又被称为“黑色艺术(Black Art)”。早期的加工方法侧重于手工式操作,需要付出繁重的体力劳动,加工工艺具有很强的随意性。早期制成的光学仪器质量不稳定,其原因除了工艺的不确定因素外,也有材料的问题。在望远镜和显微镜问世后两百多年时间里,按照光学要求设计的仪器,经过制造后成像质量总是时好时坏,相当长的时间里找不出原因。直到19世纪初期,才知道这是由于没有对制造光学元件的材料——玻璃提出相应的要求所致。因此光学制造技术不仅与光学材料的加工工艺有关,也与光学材料的特性有着直接关系。

现代光学(光电)仪器大多由光学元件、精密机械、电子系统、光学系统等部分组成,涉及学科门类较多。限于篇幅和着重点的不同,本书主要讨论组成光学(光电)仪器的光学零件及其光学系统的制造检测问题。本书所叙述的光学制造技术,主要指光学零件的加工制造过程、工艺以及设备等,其中包含必要的光学检测和光学表面质量评价。检测技术在光学元件制造中的地位十分重要。一方面检测是加工的前提和依据,光学表面的加工需要依靠更高精度的检测进行指导;另一方面光学表面的加工结果要通过检测进行评价和验证。限于篇幅,除了必要的检测手段和方法,本书只说明使用的方法,略去了其详细的检测手段和方法,请读者自行查阅相关著作和文献。

在光学制造领域,由于每一种光学零件的几何参数、材料特性、公差配合、加工精度等的要求不同,使用的设备和工艺往往也有很大的差别。比如非球面的加工工艺大大区别于普通球面的加工工艺;深陡度的共形光学元件,其加工难度也高于普通光学元件。在民用消费品领域,光学元件更多的要求是控制生产成本,实现批量化生产,且要求的精度不高。而在科研和国防应用上,光学元件的突出特点是极端口径(极大口径或极小口径)、高精度、特殊应用场合和特殊参数要求。这种差异也造成在光学元件的加工制造过程中,使用的技术和工艺不同。本书所叙述的光学制造技术侧重于国防和科研中光学元件的加工制造技术,重点在于介绍非球面及自由曲面的加工技术、工艺及设备。

光学制造技术的发展是随着光学仪器的发展而发展的,在光学仪器不断发展

更新的过程中,随着所需要的光学元件的品种不断增加,光学制造技术也产生了质的变化。

通常情况下,光学元件的加工一般要经过铣磨成形、研磨、抛光几个阶段。根据国外文献报道及国内的工艺实践,得出各加工阶段所需达到的精度如表 1-1 所示,研磨后的光学工件表面质量将直接影响抛光过程的效率与精度。本书重点阐述了光学元件研磨和抛光两个阶段的制造技术与工艺,同时介绍非球面元件检测方面的相关内容。

表 1-1 各加工阶段所需达到的精度

加工阶段	加工精度 (RMS)/ μm
铣磨	8 ~ 12
研磨	0.3 ~ 1.5
抛光	0.012 ~ 0.3

1.2.1 经典光学加工技术

经典光学加工技术主要包括传统的手工加工技术、古典抛光技术、修带法、样板法、轨迹成形法以及这些技术的改进方案。

传统手工加工技术利用刀口仪(或者干涉仪等检测设备),人工判读出光学元件表面的误差,并根据误差分布情况选择合适的工具模形状,如图 1-2 所示,依据加工人员的经验,反复使用手工加工。这种基于人工的方法对操作人员的技术素质和悟性要求很高,加工周期长,加工质量控制非常困难。但是由于人工的灵活性,可以用于加工非球面等特殊光学元件。例如,我国在 1958 年制作的第一块大口径非球面反射镜,从立项到制造完成完全由研究员级的专业人员作业完成,如图 1-3 所示。

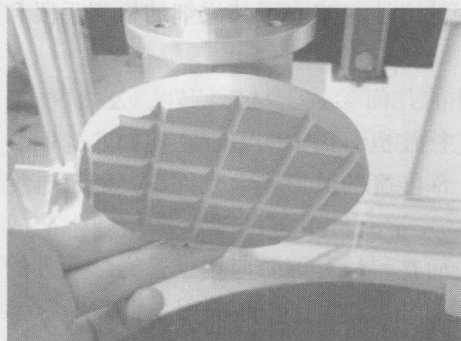


图 1-2 研磨抛光工具模



图 1-3 人工加工非球面镜

古典抛光法是一种传统的玻璃冷加工方法,抛光机采用摩擦轮传动,主轴转速较低,用平面摆动三脚架施压,压力靠负荷重量调节。在工作时,负荷的压力

始终是铅直向下的,加工平面时上下盘之间的垂直压力是稳定的。而在加工球面时,摆动位置不同压力在球心方向的分量也不同,这样就造成上下盘的抛光压力随时变化,增加了球面表面形状不稳定性。抛光模用松香、柏油或毛毡等材料制作,由于抛光模比较柔软,加工后的表面粗糙度小、表面缺陷小,可以加工较高精度等级的零件。在古典抛光过程中,抛光模表面的形状容易变化,需要随时进行修整,这就要求作业人员有较高的操作技能,必须经过长期的培训才能掌握,而且生产效率低。在少量和小批量加工中,它有很大的优点:对于抛光机的精度要求低,抛光模的代用率较高,设备、工装夹具的投入费用小。图1-4所示为单轴机正在研磨抛光光学元件。

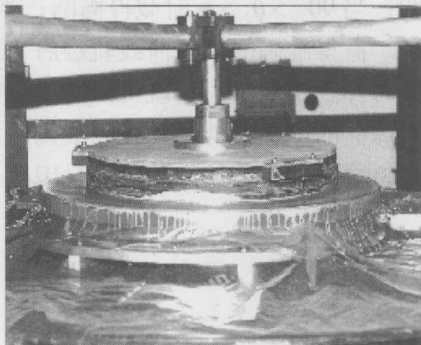


图1-4 单轴机研磨抛光

根据所采用的方法和手段不同,单就材料去除法而言,典型的研磨抛光技术主要有修带法、样板法以及轨迹成形法等。其中的修带法在加工非球面元件时首先要确定不同带区的不同修磨量,然后利用人工或机器辅助的方式进行材料去除,具体的工作原理是根据被加工工件表面残留的不同带区误差,修正工具模的形状,使得工具模表面相对于被加工工件表面不同带区有不同的接触面积,这样在相同的加工时间内,不同带区误差在修带工具模上驻留路程不同,实现对工件表面材料的不均匀去除。样板加工法根据设计的非球面理论值,借助于精密车床直接加工出全形的片状金属样板并以等比例复制出非球面母线轮廓,由于非球面每一带区的曲率都是不相同的,因而样板模具只能在平面内转动使用,同时要控制避免摆动引入新的带区误差。样板法加工出的工件精度直接受到金属样板制造精度的限制,一般适用于精磨或粗抛光加工阶段,并且由于在加工过程中样板中心与工件顶点的线速度为零,材料去除量很少,从而导致中心隆起。因此,样板法也往往要配合修磨法来校正局部误差。无论是样板法还是修带法加工非球面元件,对工艺经验的依赖性 is 绝对的,技术决策者必须能够根据加工状况决定如何修改抛光模的形状,如何应对加工过程中出现的各种表面缺陷而在下一步采取相应的工艺措施加以消除,因此,加工、测量和判断决策要反复进行,其反复次数非常之多,而且无法预料。

轨迹成形法也可以称之为一种仿形加工方法,主要是工具直接按照靠模的母线(即轮廓曲线)去跟踪运动加工,来实现工件母线造型,并以此为基础逐条加工曲面上的所有曲线,最后获得要求加工的曲面形状。所以,这种造型方案的特点在于重点解决所需复杂加工运动轨迹路线的准确性,而工具形状则一般力求简单方便。轨迹成形法的基本原理是圆锥曲线与轨迹截取的数学模型,即一个平面与一个圆锥面相截,截取位置不同,可以得到圆、椭圆、双曲线、抛物线,所

以二次曲线也称为圆锥曲线,其具体截取方法如图1-5所示。在半顶角为 α 的圆锥体母线(如AC)上的某一点(如D)上,如果以一平面与圆锥体轴线成 θ 角相切时,平面与圆锥体相交截出的轨迹均为二次曲线。若平面 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 和 $d-d$ 分别以 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 的角度与圆锥体相切,则当 $\theta_1 = 90^\circ$ 时截得圆;当 $90^\circ > \theta_2 > \alpha$ 时截得椭圆;当 $\theta_3 = \alpha$ 时截得抛物线;当 $\theta_4 < \alpha$ 时截得双曲线。截得准确的二次曲线轨迹后,通过轨迹成形法,加工机床把准确的轨迹精确地转移到工件上去,就可以加工二次非球面光学零件。实施轨迹成形法加工光学非球面的前提条件是要找到准确的加工轨迹,并在加工过程中能够精确地把准确的轨迹转移到被加工工件上,因此,这种方法对于加工设备的精度要求很高。

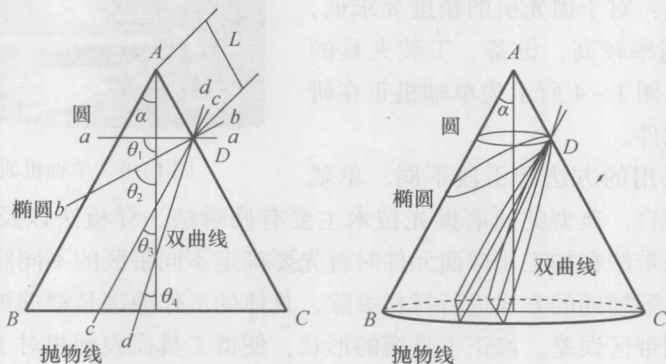


图1-5 圆锥曲线的截取方法

1.2.2 先进光学制造技术

从人造的第一片光学元件、第一台光学仪器开始,在经历了几个世纪漫长的过程中,光学制造技术进展比较迟缓,基本上是“低速、散料、高技艺、不确定”的状态。所谓“低速”指的是加工机器速度很低;所谓“散料”指的是研磨使用的磨削材料是散料磨料,基本上是“一把砂子,一把水”的加工状态;所谓“高技艺”指的是整个工艺看似简单,却需要高技术的员工操作,这种高技术,主要不是高深的知识而是长年经验的积累;所谓“不确定”指的是在关键的抛光阶段,完成零件加工的时间往往不确定,精度越高的零件,完成加工的时间越不确定。

20世纪50年代以后,由于制造技术的整体发展,先进光学制造技术也得到了长足的进步。与传统意义上的光学加工技术不同,先进光学制造技术已经成为高科技发展的重要领域之一,也是国际竞争争夺的领域之一。它具有许多明显的特点:

(1) 多学科交叉和集成的新兴科学。先进光学制造技术已经逐步成长为一门新兴的、多学科交叉的工程科学,多学科交叉是其主要特征。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、精密制造、材料科学、精密测量等各学科的先进科技成果于一体,在解决当代高科技前沿提出的极富挑战性的光学制造任务中,自身作为一门学科不断得到发展和完善。它以计算机控制技术为主要特征,把其他领域的技术引进、嫁接、渗透和集成,为先进光学制造技术所用,体现了一种典型的集成性。

(2) 精密化与超精密化。先进光学制造技术的重要特点是超精密加工,即指纳米^①级技术。它是指加工精度以原子、分子间的距离的倍数为极限,即达到纳米级。精密化与超精密化是国家级大型高技术工程的需求,是现代先进光学制造技术的重要特征,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,而并非单纯的外在指标体系。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、移动或堆积。

(3) 确定性加工 (Deterministic Process)。定量化和可重复性是确定性加工的重要特征。先进光学制造技术采用计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助工艺 (CAPP)、计算机辅助制造 (CAM) 以及精密的在线测量技术,因此能实现定量化和重复性。确定性加工是现代先进光学制造技术区别于传统光学加工技术的关键。

先进光学制造技术的研究始于20世纪70年代,由此引发了对传统光学加工技术的大规模技术革命和创新活动。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:光学技术的进展与成像、传感、通信及制导控制技术等的发展紧密相联,具有重要的杠杆作用。随后,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 Manufactures 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、科学及政府各界的共同努力,于1990年,美国陆军材料司令部投资在罗彻斯特大学组建面积达1 670平方米的光学制造中心 (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。同时由亚利桑那大学 (Uni. of Arizona) 和中央佛罗里达大学 (Uni. of Center Florida) 在洛杉矶 (Los Angeles)、奥兰多 (Orlando) 和佛罗里达 (Florida) 等地分别建立分中心。COM近年发展的新一代先进光学制造技术中,其有代表性的工作是确定性加工技术,包括:①计算机控制光学表面成形 (Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)。CCOS近年发展是采用确定性超精磨 (Deterministic Microgrinding) 和

① 1 纳米 (nm) = 10^{-9} 米 (m) = 10^{-3} 微米 (μm)。

确定性抛光 (Deterministic Polishing) 在 CNC 设备上生产高精度透镜, 以达到以磨代抛。②离子束成形技术 (Ion Beam Figuring, IBF)。③磁流变抛光技术 (Magnetorheological Finishing, MRF)。

在美国对光学工业进行现代化改造的同时, 法国、英国、俄罗斯、日本等发达国家也对先进光学制造技术进行积极的技术创新, 使之得以高速发展并形成充分的技术储备, 正在其国防、高技术等领域发挥着重要作用。常规意义上的旋转对称型光学非球面元件的核心制造技术已经突破, 并支撑光学设计人员设计出应用于空间光学、军事光电装备等复杂、尖端技术领域的先进光学系统。与此同时, 其制造技术也成功转化并推广于国民经济的相关产业, 形成以民用光电数码产品如摄像镜头、DVD 读取物镜为代表的中低端应用方向。

进入 21 世纪, 以计算机控制光学表面成形、流体辅助光学加工 (Fluid-assisted Manufacturing, FAM)、超声波辅助抛光 (Ultrasonic Assisted Polishing, UAP)、单点金刚石车削 (Single Point Diamond Turning, SPDT)、热复制 (Hot Replication) 和模压成形技术为代表的先进光学制造技术的蓬勃发展态势已经愈演愈烈。这一发展态势促使光学元件的设计与制造有了更大的自由度和灵活性——光学系统向着光轴折叠、折反射组合、非对称、极端化、多元化元件系统一体化 (System in Elements) 方向发展, 并进一步推动了工业发达国家在复杂光学异形曲面如自由曲面光学元件制造技术上投入大量资金和研究力量。2004 年冬季, 美国精密工程协会 (American Society for Precision Engineering, ASPE) 召开“光学自由曲面的设计、制造、测量及装配”专题会议, 旨在推进光学自由曲面元件在更广泛领域的成熟应用。然而, 单就光学加工技术而言, 由于自由曲面形面曲率变化显著, 要求工具与工件间点对点的对应关系更加确定, 且其技术进步的目标是实现光学元件表面残余误差的确定性去除。

我国在先进光学制造技术方面起步虽然较晚, 但也取得了丰硕成果。在“九五”期间立项, 由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所承担研究重点空间项目中的关键部件——非球面主反射镜的制造难题, 历经十余年, 取得了核心技术的突破, 形成了以空间应用的轻质大口径离轴非球面反射镜制造为代表的独特技术优势, 为高质量空间成像光学系统提供了有力的技术支撑和储备。此后, 在国家自然科学基金等项目支持下, 北京理工大学、清华大学、中国科学院等科研机构相继开展了磁流变抛光技术、电流变抛光技术、应力盘抛光技术、磁射流抛光技术等技术研究, 取得了丰硕的研究成果。

§ 1.3 先进光学制造的发展趋势

1. 先进光学制造技术的发展动力

高技术牵引、国防工业需求以及市场竞争促使先进光学制造技术的发展。

(1) 高技术牵引

高技术竞争无可避免地成为全球范围内各国综合国力竞争的核心内容。这种竞争相当程度上体现为制造技术的竞争。1983 年美国总统里根的 SDI 倡议,其后欧共体的尤里卡计划,日本的科技计划,苏联的对策计划,以及我国的“863”计划,等等,都是高科技全球竞争中相应的高技术发展战略计划。高科技在各个领域的发展,直接牵引了先进光学制造技术的发展。

20 世纪 70 年代初启动的举世闻名的美国哈勃空间望远镜^① (Hubble Space Telescope, HST) 计划,其轻质主反射镜口径达 2.4 m,由 Perkin-Elmer 公司加工完成。该计划的直接影响是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。

目前,美国国家航空航天局 (The National Aeronautics and Space Administration, NASA) 正在积极研究的下一代空间望远镜 (Next Generation Space Telescope, NGST),其中的 James Webb 天文望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST),其主反射镜的口径将达到 6.5 m,由 18 块 1.32 m 大小的六边形子镜拼接而成。

将坐落于智利的拉斯·坎培那斯 (Las Campanas) 的 GMT 望远镜 (The Giant Magellan Telescope) 使用 7 块口径达 8.4 m 的子镜拼合成相当于 25 米口径, F/0.7 主镜 (如图 1-6 所示)。而预计 2018 年投入使用的 “The European Extremely Large Telescope, E-ELT”,主镜直径将达到 42 m,它由 5 块子镜组成。

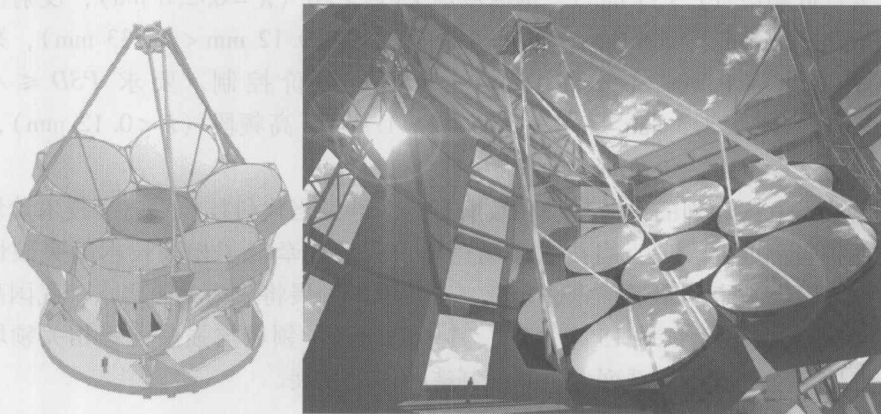


图 1-6 25 米口径 F/0.7 的 GMT 主镜示意图

美国在其激光惯性约束核聚变工程 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 中的国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 中,需要方形的标准尺寸为

^① 哈勃空间望远镜以天文学家爱德温·哈勃 (Edwin Powell Hubble) 命名,乘坐发现者号于 1990 年 4 月 24 日发射升空。