

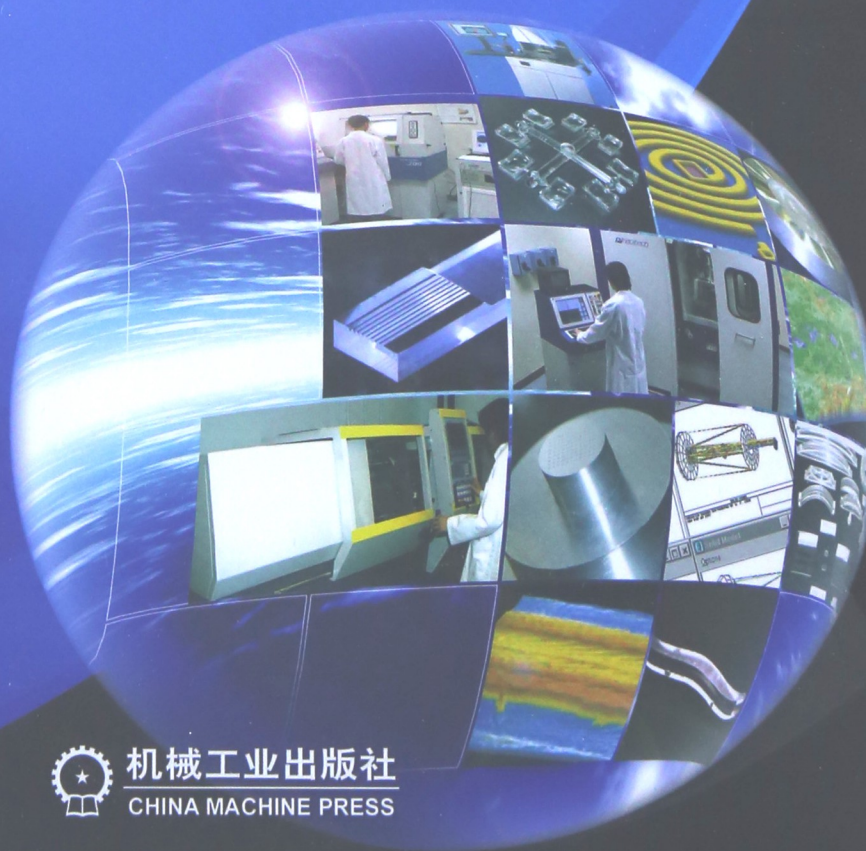
超精密自由曲面

光学设计、加工及测量技术

Design, Machining and Measurement Technologies
of Ultra-precision Freeform Optics

香港理工大学超精密加工技术国家重点实验室伙伴实验室

李荣彬 (Rongbin W. B. Lee) 杜雪 (Sandy S. To) 张志辉 (Benny C. F. Cheung) 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

超精密自由曲面

光学设计、加工及测量技术

Design, Machining and Measurement Technologies
of Ultra-precision Freeform Optics

香港理工大学超精密加工技术国家重点实验室伙伴实验室

李荣彬 (Rongbin W. B. Lee) 杜雪 (Sandy S. To) 张志辉 (Benny C. F. Cheung) 编著



机械工业出版社

超精密自由曲面的光学设计、加工及测量技术是一项新兴的技术。本书系统介绍了自由曲面光学组件设计、加工、测量的基本理论、最新发展及应用实例，介绍了作者多年从事超精密加工技术研究的成果和经验。全书共分 7 章，包括自由曲面光学超精密制造技术概述，自由曲面光学设计，超精密加工技术，光学自由曲面超精密测量技术，超精密加工过程仿真及优化，自由曲面光学组件设计、加工及面形测量集成制造技术平台，自由曲面光学设计实例。

本书可供从事光学设计及超精密加工的研究人员、相关企业的技术人员与决策者参考，也可作为高等学校相关专业研究生的参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

超精密自由曲面光学设计、加工及测量技术 / 李荣彬, 杜雪, 张志辉编著.
—北京: 机械工业出版社, 2014.12
ISBN 978-7-111-48229-1

I. ①超… II. ①李… ②杜… ③张… III. ①曲面—机械设计—光学设计
②曲面—超精加工③曲面—测量技术 IV. ①TH122②TG506.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 236008 号

编著委员会成员:

王文奎 孔令豹 王素娟 王波 蒋金波 张家儒 秦美珊

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 梁福军 责任编辑: 梁福军

版式设计: 杨林 责任校对: 张强

封面设计: 杨振 责任印制: 阴晓鹏

山西同方知网印刷有限公司印刷

2015 年 5 月第 1 版 · 第 1 次印刷

175 mm×245 mm · 17.5 印张 · 416 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48229-1

定价: 88.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

序

超精密加工技术是机械制造中的重要领域，对尖端技术和国防工业的发展具有重要影响。而超精密自由曲面光学设计、加工及测量技术又是其中很重要的一个分支，我很高兴看到有这样一本书可以针对这一重要分支做出详细的介绍。

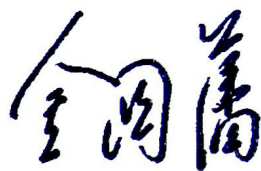
当今世界，科技发展突飞猛进，人们对高精度、高质量光电产品的要求日益增高，而这些光电产品也逐步向着微型化的方向发展。自由曲面光学在这些领域的出色表现，越来越受到设计人员的青睐，自由曲面光学设计、加工及测量技术在现代光电产品中的应用也随之日益广泛。超精密加工技术的发展使得自由曲面表面的加工变为可能，自由曲面光学为传统光学注入了新的生命力。含有自由曲面的光学元件，在航空、航天、军用及民用产品如计算机、光通信、数码影音等各种最新的光电产品中，都起着极其重要的作用。人们采用超精密制造技术，可以突破传统光学加工方法的限制，直接加工出自由曲面光学表面，被加工表面可以直接达到亚微米量级面形精度与纳米量级表面粗糙度，通过自由曲面加工及精密注塑技术的结合可以用光学塑料等新材料大批量注塑生产光学元件。

光学元件如果采用自由曲面，光学成像系统的成像质量可以获得极大改善，光学照明系统的照明均匀性和信息传输系统的传输效率也能得到显著提高。具有自由曲面的异形曲面透镜、透镜阵列、棱镜及全反射镜的采用，也使得光学系统的空间布局可以更加灵活，系统的光路可以大为压缩，系统的轻量化亦更易实现，产品的结构与性能都能得以优化。由于自由曲面光学元件也可以采取精密注塑技术大批量生产，从而可以降低产品的成本。因此，可以说自由曲面光学的设计与超精密制造技术，是当代最高水平的计算机辅助设计、制造与检测技术的高度集成。

该书作者结合近 20 年的具体项目研究及产品设计经验集结成此书，本书对从事自由曲面光学设计、加工及测量技术的技术人员大有裨益。本书内容

丰富，新颖先进，基础理论和技术实践相结合，图文并茂，我相信，对从事超精密自由曲面光学设计、加工及测量技术的技术人员来说是一本难得的参考书。为此，我愿意向从事超精密自由曲面光学设计、加工及测量技术相关技术的科技工作者推荐本书。

中国工程院院士 清华大学教授

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '金' (Jin) and '通' (Tong) in a stylized, cursive script.

2014 年 10 月 于北京

前 言

自由曲面给传统光学以新的生命力，由其构成的光学组件作为信息传递的关键组件，在计算机、光通信、手机、数码以及视听设备等各种光电产品中，起着极其重要的作用。自由曲面光学是伴随光电信息技术的迅速发展而形成新兴光学应用技术学科。

自由曲面光学与传统球面光学比较，有以下三个不同的特点：

一、突破传统光学成像的概念，根据现代光电信息技术对信息发送、接收、转换、传递与存储功能的特殊需要，光学面形可由非对称、不规则、复杂的自由曲面随意组合而成。

二、突破传统光学加工方法的概念，采用先进的数控超精密制造技术，直接加工出自由曲面光学面，被加工表面可以达到亚微米量级面形精度与纳米量级表面粗糙度。

三、突破传统光学玻璃材料的概念，采用光学塑料注塑等新材料新技术，大批量生产光学组件。

自由曲面的应用，使得光学成像系统的成像质量大大提高，光学照明和信息传输系统的照明均匀性和能量传输效率大大提高。各种变形透镜、棱镜与反光镜使得系统的空间布局灵活性增加，系统光路大大压缩，系统的轻量化更容易实现，产品的结构与性能得以优化。同时，自由曲面光学元件采取大批量生产工艺生产，大大降低了产品的成本，因此自由曲面光学产品极大地扩展了应用的空间，市场需求也获得急速增长。

自由曲面光学的设计与超精密制造技术，是当代最高水平的计算机辅助设计、制造与检测技术集成的先进光学制造工程技术。随着香港经济的转型，香港的制造业越来越向着高科技、高附加值方向发展。高精度、高质量产品的需求将日益增加，并且正在向着微型化的方向发展。因而，先进光学超精密制造技术对制造业的发展前景的影响确实是举足轻重的，而且对精密加工技术的发展也至关重要。

香港理工大学超精密加工技术国家重点实验室伙伴实验室（以下简称“实

验室”)获得香港特区政府创新科技署拨款于 1996 年成立,是亚洲最先进的光学制造实验室之一。实验室拥有先进的超精密加工及测量设备,并担负着在中国推广和使用超精密加工技术的使命,是香港首家推广与应用超精密加工技术、光学精密模具技术及光学产品精密注塑技术的先进光学制造实验室。

实验室在超精密加工技术领域不断进行科学研究、产品开发及科技推广活动。其研究工作主要包括:超精密切削机理;脆性材料超精密加工方法;金属晶体取向对超精密加工的影响;不同材料、切削量及切削速度对表面粗糙度的影响,以及在加工过程中材料引起的表面振动等情况的模拟(可成功地预测在不同条件下超精密加工表面的情况)。同时,实验室还对光学自由曲面及光学微结构的超精密加工技术进行研究,目前正在开发一套适合超精加工微型槽和微透镜列阵的刀具轨迹自动生成软件。

实验室经过多年的研究与发展,在理论与技术上日渐完善。

本书以设计与制造的实践为基础,详细讨论了自由曲面的光学设计、加工、测量等问题,为读者提供了与之相关的系统的理论、先进的技术、丰富的案例以及详实的方法。本书可为从事光学设计、先进制造技术的研究人员,以及对本领域感兴趣的技术人员提供参考。

本书的编写出版得到了“广东省引进创新科研团队计划——纳米级精度加工技术与装备的研发”(项目编号:201001G0104781202)和“国家自然科学基金——超精密多轴飞刀铣削金刚石刀具磨损在线测量和预测的理论及应用研究”(项目编号:51275434)项目的大力支持与资助。书中内容取材于作者多年的学术积累及有关参考文献,融入了为工业界及研究院所、大专院校提供技术服务所得的一些新见解,在此谨向相关作者及业界同仁致以诚挚的谢意!实验室的同事和研究生们为本书的编写做了大量的资料整理及收集工作,在此也向同事和研究生们一直以来对实验室发展所做的奉献及付出表示衷心的感谢!

衷心希望广大读者对书中的不足之处给予批评指正。

李荣彬 杜雪 张志辉

2015 年 1 月 于香港

目 录

序

前言

第 1 章 自由曲面光学超精密制造技术概述	1
1.1 自由曲面光学的发展	1
1.2 自由曲面光学组件	2
1.2.1 自由曲面光学组件的类型	2
1.2.2 自由曲面光学组件在光电系统设计中的应用	4
1.2.3 自由曲面光学组件的重要特征	5
1.2.4 自由曲面光学组件的加工工艺特征	6
1.3 自由曲面光学的特殊光学性能及应用前景	6
1.3.1 特殊光学性能	6
1.3.2 应用前景	7
1.4 超精密加工技术的发展	7
1.5 自由曲面光学组件的制造过程	10
1.5.1 光学产品设计及评估	10
1.5.1.1 光学系统应用研究	10
1.5.1.2 光学系统优化设计	12
1.5.1.3 光学透镜原型试制	12
1.5.1.4 光学组件原型检测与光学质量评估	13
1.5.2 实际生产光学组件及产品光学质量评估	14
1.5.3 利用计算机进行数字化设计与制造的探讨	14
1.5.3.1 光学系统数学原型的构成	14
1.5.3.2 光学成像质量的数字化检测	15
参考文献	17
第 2 章 自由曲面光学设计	18
2.1 自由曲面光学设计概述	18
2.2 非球面光学成像系统的设计	18

2.2.1	光学成像系统的基本结构	18
2.2.2	非球面的定义	19
2.2.3	非球面空间光线的追迹	22
2.2.4	非球面的初级像差	25
2.3	自由曲面光学系统的设计	27
2.3.1	自由曲面光学组件的特征与数学表达式	27
2.3.2	自由曲面光学组件的光线追迹	35
2.3.2.1	贝塞尔裁剪法	36
2.3.2.2	光线-有理贝塞尔曲面的相交	38
2.3.2.3	NURBS 曲面的光线追迹	41
2.4	光学系统的优化	43
2.4.1	评价函数	44
2.4.1.1	由几何像差构成的评价函数	44
2.4.1.2	由点列图构成的评价函数	45
2.4.1.3	由波差构成的评价函数	46
2.4.1.4	由光学传递函数构成的评价函数	46
2.4.2	最小二乘法	46
2.4.2.1	概述	46
2.4.2.2	阻尼最小二乘法	48
2.4.3	基因算法	50
2.5	光学系统的像质评定	52
2.5.1	瑞利判据	52
2.5.2	点列图法	53
2.5.3	光学传递函数法	54
2.6	自由曲面成像系统设计思路	57
2.7	照明系统设计基础	59
2.7.1	辐射度学中的量	60
2.7.2	亮度学中的量	62
2.7.3	辐射度学与亮度学中量的对应关系	64
参考文献		66
第3章 超精密加工技术		67
3.1	超精密加工机床的关键技术	67
3.1.1	超精密主轴部件	68

3.1.2 机床床身布局与精密导轨部件	69
3.1.2.1 超精密加工机床的布局	69
3.1.2.2 床身和导轨材料的选用	70
3.1.2.3 导轨形式的选用	71
3.1.3 高精密度的进给驱动系统	72
3.1.4 机床运动部件位移的纳米量级激光在线检测系统	73
3.1.5 超精密加工机床的数控技术	74
3.1.6 机床隔振及环境控制系统	74
3.2 单点超精密切削技术	75
3.2.1 两轴超精密加工机床	75
3.2.1.1 两轴超精密加工机床 Nanoform 200	75
3.2.1.2 大型两轴超精密加工机床	77
3.2.2 单点金刚石超精密切削原理	77
3.2.3 金刚石切削刀具的特性	79
3.2.4 切削参数对加工表面质量的影响	80
3.2.4.1 刀具几何参数对加工表面质量的影响	80
3.2.4.2 切削用量参数对加工表面质量的影响	81
3.2.5 非球面超精密加工及误差补偿技术	82
3.2.5.1 非球面透镜的加工技术	82
3.2.5.2 非球面工件的误差补偿	83
3.3 光学自由曲面超精密加工技术	86
3.3.1 光学自由曲面加工原理	86
3.3.2 大型五轴超精密加工中心	87
3.3.3 切削加工工艺参数对加工表面质量的影响	88
3.3.4 自由曲面加工刀具轨迹生成系统	93
3.3.4.1 自由曲面数学表示方法	93
3.3.4.2 光学自由曲面飞刀加工的刀位轨迹算法	94
3.3.4.3 自动数控编程及其刀具轨迹仿真软件	96
3.3.5 光学微透镜阵列的超精密加工	100
3.3.5.1 FTS 的结构特点与加工原理	101
3.3.5.2 FTS 加工非轴对称光学自由曲面过程	102
3.3.5.3 FTS 加工光学微透镜阵列过程	104
3.3.6 光学微沟槽的超精密加工	105
3.3.7 光学设计与制造一体化系统	107

3.4 超精密抛光自由曲面光学表面生成	110
3.4.1 自由曲面抛光	110
3.4.2 超精密抛光自由曲面	111
3.4.3 抛光策略建模与优化	113
3.4.4 试验研究	114
3.4.4.1 A 部分试验：抛光去除表面刀痕的效果	114
3.4.4.2 B 部分试验：抛光策略对表面生成的影响	115
参考文献	117
第 4 章 光学自由曲面超精密测量技术	120
4.1 概述	120
4.2 光学曲面形状与表面粗糙度测量技术	121
4.2.1 接触式激光干涉形貌测量法	121
4.2.2 非接触式激光干涉形貌测量法	123
4.2.3 超高精度原子力测量三维轮廓仪法	124
4.2.4 超精密 3D 坐标测量机	125
4.3 光学自由曲面形状测量原理	126
4.3.1 形状评定的数学模型	127
4.3.1.1 基准曲面的重构	128
4.3.1.2 测量面与基准面的匹配	128
4.3.2 形状误差评定参数	131
4.3.3 形状误差评定的仿真、试验分析	132
4.3.3.1 仿真分析	132
4.3.3.2 试验分析	135
4.4 基于曲面固有属性的自由曲面面形评定方法	136
4.4.1 表面数据采样策略及曲面重构指标	136
4.4.1.1 测量规划和采样策略	136
4.4.1.2 曲面重构和平滑指标	137
4.4.2 超精密自由曲面通用评定方法的开发	138
4.4.3 试验验证及结果	139
4.4.3.1 非球面表面评定	139
4.4.3.2 微透镜阵列表面评定	141
4.4.3.3 结果讨论与未来工作	141
4.5 光学自由曲面表面粗糙度测量原理	143

4.5.1 光学表面形貌测量	143
4.5.1.1 多项式拟合法	143
4.5.1.2 滤波法	143
4.5.1.3 Motif 法	144
4.5.1.4 分形法	144
4.5.2 稳健高斯滤波的数学模型	145
4.5.3 稳健高斯滤波算法的仿真分析及试验验证	146
4.5.3.1 仿真分析	146
4.5.3.2 试验验证	147
4.6 光学自由曲面三维形貌测量系统软件	150
4.7 光学自由曲面面形与表面粗糙度测量实例	152
参考文献	153
第 5 章 超精密加工过程仿真及优化	156
5.1 材致振动	156
5.1.1 材致振动的概念	156
5.1.2 微量切削力预测	157
5.1.3 动态切削系统模型	158
5.2 表面粗糙度预测	159
5.3 加工过程仿真工件模型	160
5.3.1 工件模型	160
5.3.2 仿真数据记录	162
5.3.3 刀具模型	163
5.3.3.1 刀具模型描述	163
5.3.3.2 刀具轮廓描述	163
5.3.3.3 刀具扫描体简化	163
5.3.4 车削加工过程仿真	164
5.4 虚拟加工和检测系统	164
5.4.1 VMIS 体系结构	165
5.4.2 虚拟现实环境	166
5.4.3 加工系统设备建模方法	167
5.4.3.1 虚拟机床	167
5.4.3.2 虚拟测量机	168
5.4.3.3 虚拟刀具	168

5.4.3.4 虚拟夹具	168
5.4.4 虚拟加工模块	169
5.4.4.1 刀具工件相对位置计算子系统	169
5.4.4.2 加工仿真子系统	170
5.4.5 虚拟检测模块	170
5.5 切削参数的优化选择	172
5.6 误差补偿	172
5.6.1 对刀误差预测与补偿	173
5.6.2 机床几何误差补偿	176
参考文献	178
第 6 章 自由曲面光学组件设计、加工及面形测量集成制造技术平台	180
6.1 概述	180
6.2 集成制造系统	181
6.2.1 光学设计模组	182
6.2.2 数据转换模组	182
6.2.3 加工过程仿真与优化模组	184
6.2.3.1 光学自由曲面自动编程及刀具轨迹仿真软件开发	184
6.2.3.2 加工过程仿真、精度预报、误差补偿及策略优化	189
6.2.4 自由曲面测量与评估模组	192
6.2.4.1 连续自由曲面误差评定算法	193
6.2.4.2 结构型自由曲面误差评定算法	196
6.3 成功应用案例	198
6.3.1 案例 1: 用于激光打印机的关键 f- θ 透镜型芯零部件	198
6.3.2 案例 2: 用于手机等微透镜阵列背光板的光学微结构	200
参考文献	202
第 7 章 自由曲面光学设计实例	204
7.1 非球面成像系统	204
7.1.1 非球面在校正与孔径有关的各区带高级球差上的应用	204
7.1.2 非球面在校正与视场有关的像差上的应用	206
7.2 自由曲面成像系统	209
7.2.1 奥林巴斯自由曲面手机摄像镜头	211
7.2.2 自由曲面 f- θ 透镜激光扫描系统	211

7.2.3 渐进式自由曲面老花眼镜的设计	213
7.2.3.1 单光眼镜（单焦点眼镜）	213
7.2.3.2 双光眼镜（双焦点眼镜）	213
7.2.3.3 三光眼镜	214
7.2.3.4 渐进眼镜（多焦点眼镜）	214
7.2.4 二元光学目镜	219
7.2.5 三角棱镜指纹仪镜头	220
7.2.6 多棱镜	225
7.2.6.1 视频镜头照相物镜设计	226
7.2.6.2 双影镜设计	227
7.2.6.3 柱面镜设计	228
7.2.6.4 多棱镜设计	228
7.2.6.5 蜂窝棱镜设计	229
7.2.7 光电鼠标的光学系统设计	229
7.3 自由曲面照明系统	233
7.3.1 LED 准直内透镜	234
7.3.2 LED 准直外透镜	236
7.3.3 LED 均匀照明二次光学器件	238
7.3.4 侧面发光 LED 内透镜	239
7.3.5 侧面发光 LED 外透镜	241
7.3.6 LED 二次光学组件	242
7.3.7 相机闪光灯的反光杯	242
7.3.8 自由曲面平板显示背光源模块的设计	247
7.3.8.1 手机背光源的基本结构	248
7.3.8.2 轮廓渐变的自由曲面 V 形槽设计	251
7.3.9 汽车前照灯自由曲面反光镜的设计	254
7.3.10 LED 路灯透镜二次光学组件的设计	258
参考文献	264

第 1 章 自由曲面光学超精密制造技术概述

1.1 自由曲面光学的发展

随着科学技术的发展与进步,100 多年来传统光学成像系统的设计方法,早已由查对数表的手工设计步入计算机自动设计,工艺技术也从玻璃的切、磨、抛光等传统方式走上高速抛光等现代化生产方式。设计方法的改进与工艺技术的进步,不但大大提高了光学设计的速度,而且也大大提高了光学系统成像的质量。光学工程这门分支学科与其他相关技术学科也在相互渗透之中不断发展与进步。

尽管如此,光学系统在具有大孔径和大视场时要想获得良好的成像质量,还必须对像差做精细校正和平衡,这不是用简单的光学系统结构就能实现的。因此,实际高性能的光学系统仍然需要比较复杂的多透镜结构形式,这是传统球面光学系统在设计原理上无法克服和逾越的障碍。

非球面是简化系统结构、减少镜片和提高成像质量的快捷方式。自 20 世纪 50 年代以来,非球面在光学系统中的应用日渐增多,反映出科研与生产的实际需要及其在现代光学工程中的重要作用。然而,传统的光学玻璃加工工艺难以解决非球面加工的问题,限制了非球面光学组件的广泛应用。随着超精密加工技术的发展,非球面光学组件的应用已经十分普遍。

20 世纪 80 年代初个人计算机的诞生与迅速普及,以及互联网的形成,使人们进入了信息时代。计算机本身需要大量超精密的硬盘、光盘、光学读写头,同时计算机技术使光、声、电以及图像技术等向数字技术转化,出现了种类繁多的大批量生产的数码照相机、手机、光驱等产品,其应用领域十分广阔,市场需求急速增长。这种客观上的需要,促进了先进自由曲面光学超精密数控制造技术的发展。

计算机使数字控制加工与检测技术成为现实。在纳米量级激光干涉测量技术的实时测量与控制下,采用单点金刚石切削使超精密机床的加工精度量级提高了 1 至 2 个数量级,达到了亚微米量级形状精度及纳米量级表面粗糙度。这表明单点金刚石超精密切削加工为光学镜面的机械加工奠定了可靠的技术基础。

光学镜面可以通过超精密加工直接获得,为非球面乃至更复杂自由曲面光学组件的加工提供了强有力的全新技术手段,使非球面与自由曲面光学设计及超精密制造技术得以迅速发展。

与此同时,对光学塑料的研究也取得了较大进展,其光学性能不断提高,折射率的范围不断扩大,品种不断增加,应用范围日渐扩大,为自由曲面光学组件的大批量注塑生产打下了物质基础。采用单点金刚石切削加工可以得到超精密塑料注射模具型芯,然

后通过精密注塑大批量生产自由曲面光学组件，能够大大降低制造成本，这为满足急速增长的市场需求创造了十分有利的条件。

综上所述，自由曲面光学是伴随着信息时代的到来以及光电信息技术与超精密制造技术的迅速发展，而逐渐形成的一门新兴光学应用技术分支学科。

1.2 自由曲面光学组件

自由曲面光学是根据现代光电信息系统对信息发送、接收、转换、传递与存储功能的特殊需要，突破传统光学成像概念，运用随意构造其光学面形的全新构想，来设计光学系统的。这是不同于传统球面光学的一种新兴光学应用技术学科。

1.2.1 自由曲面光学组件的类型

自由曲面光学组件已有很多类型，主要类型如图 1-1 所示。

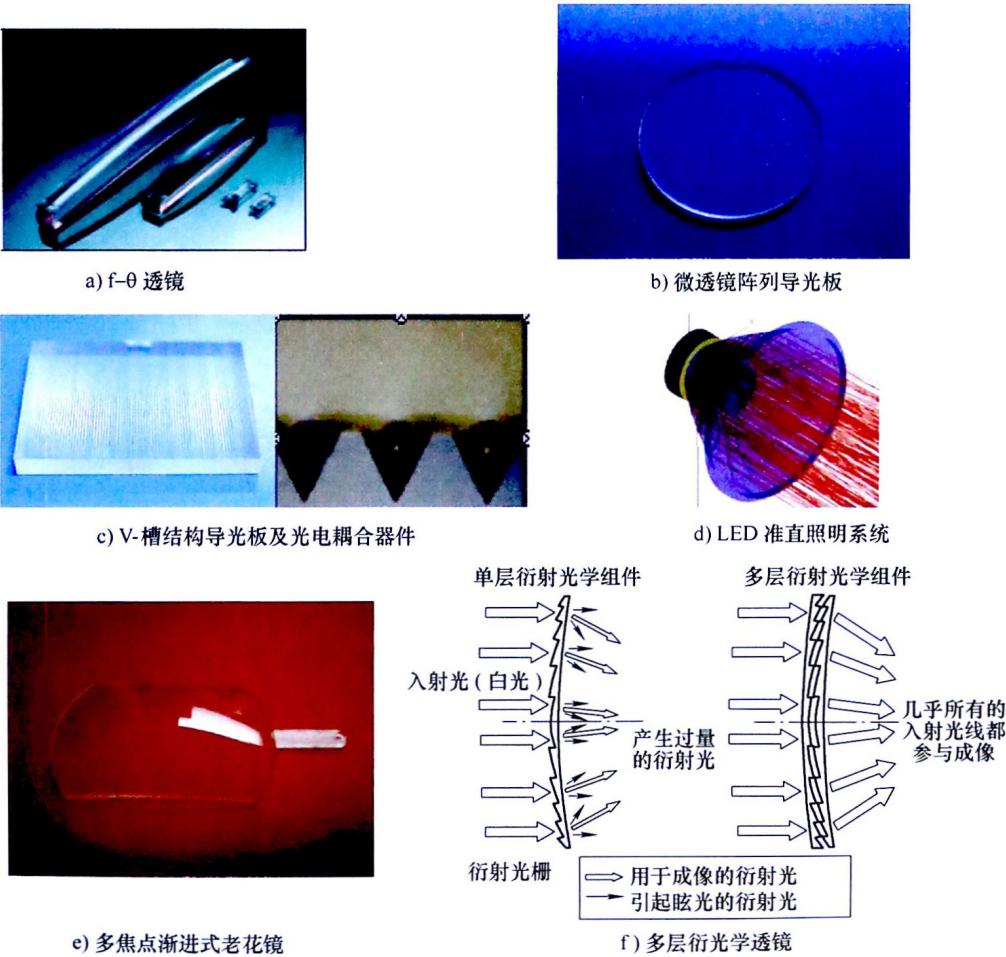
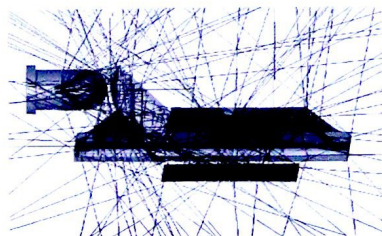


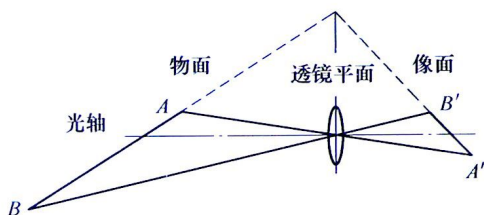
图 1-1 自由曲面光学组件的类型



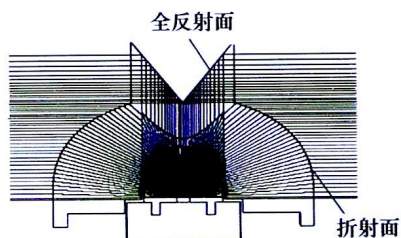
g) 汽车前照灯自由曲面反光镜



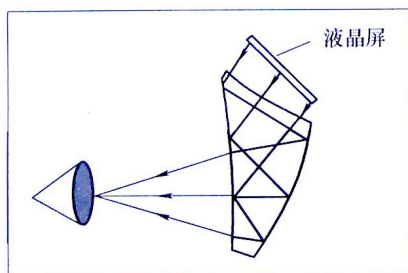
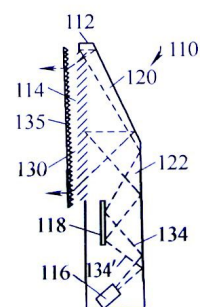
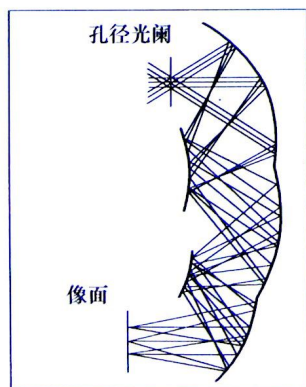
h) 光电鼠标自由曲面光学系统



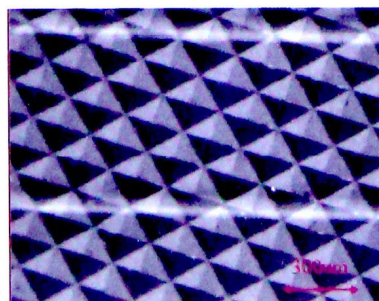
i) 物镜像三面共交指纹仪光组



j) 侧面发光自由曲面透镜组

k) 自由曲面棱镜式透镜系统
(奥林巴斯公司)l) 自由曲面反射镜式投影透镜
(富可视公司)

m) 离轴透镜系统(佳能公司)



n) 微棱镜阵列

图 1-1 自由曲面光学组件的类型(续)