

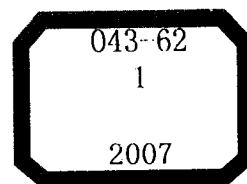
# 实用光学

## 技术手册

SHI YONG GUANG XUE  
JI SHU SHOU CE

主 编 王之江  
副主编 顾培森





# 实用光学技术手册

主 编 王之江  
副主编 顾培森



机 械 工 业 出 版 社

本手册具体内容如下:

第一篇 几何光学: 光线光路及像差理论计算;

第二篇 近代光学: 激光、自适应光学技术;

第三篇 各类元器件: 光学零部件、液晶显示器、等离子体、CCD (包括 CMOS)、光纤和光通信器件、CD、DVD;

第四篇 光学系统设计: 像差自动平衡, 像质评价, 公差计算, 望远、显微、目镜、照相物镜、变焦距系统设计, 非球面光学系统设计, 使用激光器的光学系统设计, 采用 Zemax 软件设计的 20 多个传统光学系统和现代光学系统, 以及光学零件技术条件;

第五篇 光学零件制造工艺: 透镜、平面光学零件、非球面加工工艺, 光学塑料零件加工工艺, 眼镜片加工工艺以及光学薄膜技术和光学零件刻划工艺;

第六篇 光学测量: 光学零件和光学薄膜测量;

第七篇 光学仪器: 眼镜、放大镜和显微镜、望远镜、照相机、数码照相机、大地测量仪器、计量用光学仪器及设备、医用光学仪器和印刷工业用光学仪器。

手册共列出各种类型光学系统结构参数 308 个, 供设计者参考。

附录中的大量数据以及文后中英文对照索引供读者查阅。

本手册可供光学技术工作者、有关院校师生查用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

实用光学技术手册/王之江主编. —北京: 机械工业出版社, 2006.9

ISBN 7-111-19817-4

I. 实... II. 王... III. 光学 - 技术手册 IV. 043 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 099157 号

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: 牛新国、张沪光 责任编辑: 张沪光、刘星宁 版式设计: 冉晓华

责任校对: 李秋荣 封面设计: 陈 沛 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 77.5 印张 · 6 插页 · 2672 千字

0 001—4 000 册

定价: 180.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

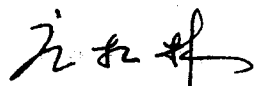
编辑热线电话 (010) 88379767

封面无防伪标均为盗版

## 序 一

20年前以王之江教授为主编，聚集了当时国内应用光学领域在一线工作的著名学者，编写出版了《光学技术手册》，取得了很好的效果，得到了光学界的称颂。20年来随着新原理、新材料、新工艺的应用和发展，光学技术取得了飞速的进步，在经济、科学、教育、国防等各方面都越来越显示出其重要性。为适应我国光学技术在各领域应用的发展，王之江院士又主编了这本《实用光学技术手册》。本手册部分内容精选自《光学技术手册》，同时将在光存储、光通信、光显示等高新技术产业发展中起引领作用的相关光学技术作为主要内容编入手册，使其在基础性、实用性和先进性等方面都得到了很好的体现。这是一本适合于在光学工程领域从事科研、教学及产品研发人员的常用工具书。相信《实用光学技术手册》的出版，会受到广大光学工作者的欢迎。

中国工程院院士



2006年6月27日

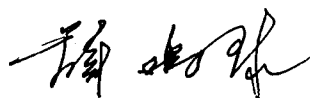
## 序 二

《实用光学技术手册》在主编王之江院士的主持下，在副主编、编辑组组长顾培森的具体负责下即将出版了，这是光学界的一件大事，我感到非常高兴。《实用光学技术手册》的内容，部分精选自《光学技术手册》，并补充了最新的科技成果。《光学技术手册》的出版曾取得很好的效果，得到海内外广大光学科技工作者，特别是从事工程光学的科技工作者的高度称颂。相信《实用光学技术手册》的出版同样会受到有关人员的热烈欢迎。

光学是一门古老的学科，它的应用涉及到很多部门，它在发展过程中在很多方面都起到过重要的和独特的作用。在诺贝尔物理学奖的获奖领域中，光学也占了不小的比例。20世纪60年代以来，由于激光的出现和发展，光学和电子学、计算机技术的密切结合，自适应光学方法的引入，工艺水平的提高，新的光学材料的涌现，接受器等光学元器件的更新和质量的提高，使得光学在科研、应用和生产方面有了飞跃的进展，形成了如光盘、数码相机、高清晰度电视机、手机摄影、高效照明等深入到人们生活中的新技术。医疗光学涉及到许多医学科学领域；激光加工、激光打标等技术应用到很多工业领域；光纤通信等技术得到蓬勃的发展；涉及有关国家安全方面的工作，如远距离跟踪测量、光电对抗、光纤陀螺、夜视、航天技术，以及防伪等等，都对光学技术提出了新的更高的要求，在这种形势下，出版一本实用的光学技术手册是十分必要的，也是非常适应目前的需要的。

本手册的特点是密切结合当前生产实际的需要，涉及到光学产业所需技术的绝大部分内容，是一本具有先进性、实用性和科学性的手册。

本手册的撰写者有着丰富的实际工作经验，在选材、编写上是很严格的，审稿是认真的、科学的。相信本手册会促进我国光学技术事业的发展，进而为我国的社会主义建设做出它的贡献。

 院士

2006年6月28日

# 前 言

光学既是一门基础科学，又是一门应用科学。把光的现象和规律应用于人类的生产活动中便形成了应用光学或称之为工程光学，并由此发展成为光学技术或光学工程。这是基础科学向应用科学技术发展的必然过程。正如王大珩院士最近指出的“光学老又新，前程端似锦”。

为了适应我国光学技术在各个领域的发展，我们组织编写了这本《实用光学技术手册》。本手册内容除部分精选自《光学技术手册》外，同时又总结了近年来光学技术各分支领域的新技术、新经验、新方法。如自适应光学技术、数码照相机、液晶显示器、等离子体、CCD（包括CMOS）、CD、DVD、光纤和光通信器件以及印刷工业用光学设备和部件，还有现代光学系统和膜系的计算机辅助设计方法等。

本手册及时地反映了光学技术及其各分支领域的发展。以光学系统设计为例，在手段上介绍了目前国际上比较流行的Zemax光学软件，在内容上设计了24个高质量光学系统实例，如集成电路亚微米级加工中的投影光刻物镜、存储技术中的写入镜头、手机中的微型照相物镜、背投彩电系统等。

我国是一个光学镜片生产大国，但是近年来关于光学零件制造工艺的著作很少。而本手册中此部分内容是比较完整的，并且撰写者在此领域都是有实践经验的专家、学者，值得读者借鉴、参考。

在编写过程中我们按照内容要“完整、实用、先进、有特色”这一宗旨制定了编写提纲，并进行选稿、组稿。本手册主要内容包括几何光学、近代光学、各类元器件、光学系统设计、光学零件制造工艺、光学测量、光学仪器共计7篇40章。

本手册由我国光学界老中青三代作者来完成，他们中既包括中科院光电技术研究所姜文汉院士，还有上海第二工业大学原党委书记陈林教授，上海理工大学副校长兼上海出版印刷高等专科学校校长、博导陈敬良教授，民企嘉光光学集团总裁马仁勇教授，上海光学仪器研究所徐福侯教授，也有刚从上海光学精密机械研究所毕业的张大伟博士和刚从日本NEC公司培训回国的上海广电NEC液晶显示器有限公司的孟啸廷工程师、吴鸿杰工程师。更为难得的是70多位经验丰富的资深专家、学者也参与了编写，他们之中有（按姓氏笔画为序）马涛、王宝、王民强、王掌发、古成昌、史大道、冯秀恒、沈冠群、李元康、吴文增、邵朝宗、杨广烈、杨靖岳、陈元文、陈晃明、周鹏飞、赵俊民、赵如磋、贺莉清、顾耀宗、桑胜泉、徐维铮、唐武、陆乃驹、翁自强、曹天宁、谭仲甫等。他们分别来自清华大学、浙江大学、上海理工大学、北京理工大学、长春光学精密机械与物理研究所、西安西北光电仪器厂等近40个单位。

承蒙中国计量学院院长、上海理工大学光电学院院长、上海光学仪器研究所所长庄松林院士和中科院西安光学精密机械研究所原所长、现为苏州大学的薛鸣球院士为本手册作序。这是对我们的关心和支持。

在编写本手册的过程中得到了上海理工大学党委副书记、博导张仁杰教授，科研处季剑平副处长，光电学院办公室何勇胜主任，上海激光技术研究所所长王又良教授，上海激光学会常务副秘书长邵兰星高级工程师，中国仪器仪表行业协会光学仪器分会秘书长冯琼辉高级工程师的关心和支持。同时也得到了（以姓氏笔画为序）丁旭明、戈兆祥、牛万春、沈丽平、杨欢、

肖向国、陆圣、陈金娣、季舒蔚、周诗雯、施治平、徐光华、黄祖兴、傅志中、熊广欣等同志的帮助，在此表示衷心感谢。

原《光学技术手册》编委会、编辑组、全体特约审稿人、全体统稿人以及该手册责任编辑郑姗姗对该手册做出的贡献和留下的宝贵经验给了我们很大的帮助和启示。在此向他们表示崇高敬意和衷心感谢。

由于本手册篇幅有限，原《光学技术手册》很多内容只能忍痛割爱，在此表示遗憾并对这部分内容的作者表示深深歉意。

本手册附录及中英文对照索引由顾振昕编写。于洪收、毛厚丰、冯秀恒、田金生、刘志伟、刘梦蕙、沈永明、张大德、全仁春、章慧贤、郭迪礼、潘兆鑫、樊善卿、魏绮龄等同志提供了资料。在此表示衷心感谢。

还有许多同志对本手册给予了支持和帮助，恕不一一提名，在此一并表示感谢。

本手册如有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

《实用光学技术手册》编辑组

2006年6月

主 编 王之江  
副 主 编 顾培森

编 辑 组

|       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 组 长   | 顾培森 |     |
| 副 组 长 | 郑 刚 | 杨永才 |
| 组 员   | 孟啸廷 | 顾振昕 |
| 全书统稿  | 顾培森 |     |
| 责任编辑  | 张沪光 | 刘星宁 |

## 本手册作者、特约审稿人名单

### 第1篇 几何光学

|     |         |     |
|-----|---------|-----|
| 第1章 | 光线的光路计算 | 贺莉清 |
| 第2章 | 像差理论及计算 | 顾培森 |

### 第2篇 近代光学

|     |         |     |
|-----|---------|-----|
| 第1章 | 激光      | 方洪烈 |
| 第2章 | 自适应光学技术 | 姜文汉 |

### 第3篇 各类零部件

|     |          |                                             |
|-----|----------|---------------------------------------------|
| 第1章 | 光学零部件    | 陈敬良、陈晃明、陈联娣、王国华、吴菊秋、<br>华定元、周文龙、张晓啸、陆汉民、丁林辉 |
| 第2章 | 液晶显示器    | 孟啸廷 吴鸿杰<br>特约审稿人 陈勤达                        |
| 第3章 | 等离子体     | 张荣福 特约审稿人 马军山                               |
| 第4章 | 电荷耦合器    | 杨永才 特约审稿人 马军山                               |
| 第5章 | 光纤及光通信器件 | 马军山 特约审稿人 杨永才                               |
| 第6章 | CD、DVD   | 贾宏志 特约审稿人 马军山                               |

### 第4篇 光学系统设计

|      |              |                            |
|------|--------------|----------------------------|
| 第1章  | 像差自动平衡       | 徐福侯                        |
| 第2章  | 像质评价         | 徐福侯                        |
| 第3章  | 光学系统参数的公差计算  | 贺莉清                        |
| 第4章  | 望远系统设计       | 杨植溪                        |
| 第5章  | 显微镜系统设计      | 王掌发                        |
| 第6章  | 目镜设计         | 王掌发                        |
| 第7章  | 照相物镜设计       | 冯秀恒                        |
| 第8章  | 变焦距光学系统设计    | 顾培森                        |
| 第9章  | 非球面光学系统设计    | 李元康                        |
| 第10章 | 使用激光器的光学系统设计 | 张恒金, 李元康,<br>翁自强, 韩放华, 王民强 |
| 第11章 | 光学系统设计实例     | 徐福侯<br>特约审稿人 庄松林           |
| 第12章 | 光学零件技术条件     | 黄芬馨                        |

## 第5篇 光学零件制造工艺

|     |            |     |     |
|-----|------------|-----|-----|
| 第1章 | 透镜加工工艺     |     | 赵德宏 |
| 第2章 | 平面零件加工工艺   |     | 曹天宁 |
| 第3章 | 非球面加工工艺    | 马仁勇 | 周鹏飞 |
| 第4章 | 光学塑料零件加工工艺 |     | 王 宝 |
| 第5章 | 眼镜片加工工艺    | 史大道 | 蔡培良 |
| 第6章 | 光学薄膜技术     | 张 明 | 张大伟 |
| 第7章 | 光学零件刻划工艺   | 陈 林 | 张晓啸 |

## 第6篇 光 学 测 量

|     |          |     |
|-----|----------|-----|
| 第1章 | 光学零件的测量  | 张武祖 |
| 第2章 | 光学薄膜性能测量 | 史大道 |

## 第7篇 光 学 仪 器

|     |            |                         |     |
|-----|------------|-------------------------|-----|
| 第1章 | 眼镜         |                         | 赵俊民 |
| 第2章 | 放大镜和显微镜    | 王掌发 古成昌                 | 谭仲甫 |
| 第3章 | 望远镜        |                         | 陆乃驹 |
| 第4章 | 大地测量仪器     | 杨广烈                     | 赵如磋 |
| 第5章 | 照相机        |                         | 马 涛 |
| 第6章 | 数码照相机      |                         | 朱维涛 |
|     |            | 特约审稿人                   | 毛厚丰 |
| 第7章 | 计量用光学仪器和设备 | 王家道 夏国鑫                 | 史国兴 |
|     |            | 顾耀宗 杨靖岳 陈元文 俞康壮         | 桑胜泉 |
|     |            | 张晨奇 张健勇 雷孔成             | 刘逢鸾 |
| 第8章 | 医用光学仪器     | 赵安宁                     | 吴振福 |
| 第9章 | 印刷工业用光学仪器  |                         |     |
|     |            | 徐维铮 程永梅 姚海根 邵朝宗 沈冠群 唐 武 | 吴文增 |
|     |            | 本章第2节特约审稿人              | 孔玲君 |

# 目 录

|    |  |
|----|--|
| 序一 |  |
| 序二 |  |
| 前言 |  |

## 第 1 篇 几 何 光 学

|                                 |    |                                     |     |
|---------------------------------|----|-------------------------------------|-----|
| 第 1 章 光线的光路计算 .....             | 1  | 2.4.4 轴向波色差 .....                   | 28  |
| 1.1 光路计算基本公式 .....              | 1  | 2.4.5 轴外波色差 .....                   | 28  |
| 1.1.1 基本公式组 .....               | 1  | 2.5 几何像差与波像差的关系 .....               | 28  |
| 1.1.2 入射光瞳位置的计算 .....           | 6  | 2.5.1 波像差与球差的关系 .....               | 28  |
| 1.2 球面系统的空间光线计算 .....           | 8  | 2.5.2 轴外点波像差与垂轴像差的关系 .....          | 29  |
| 1.3 旋转轴对称非球面的空间光线计算 .....       | 8  | 2.5.3 参考点移动产生的波像差 .....             | 29  |
| 1.4 柱面的空间光线计算 .....             | 9  | 2.5.4 轴向波色差与初级位置色差的<br>关系 .....     | 29  |
| 1.5 光学系统的瞳形计算 .....             | 9  | 2.5.5 轴外波色差与初级倍率色差的<br>关系 .....     | 29  |
| 1.5.1 无渐晕时入瞳形状计算 .....          | 9  | 2.6 最佳像面与离焦 .....                   | 29  |
| 1.5.2 根据给定的通光口径计算渐晕<br>瞳形 ..... | 10 | 2.7 $PW$ 形式初级像差公式 .....             | 30  |
| 1.5.3 根据线渐晕系数计算瞳点坐标 .....       | 10 | 2.7.1 薄透镜系统初级像差的 $PW$ 表<br>示式 ..... | 30  |
| 1.6 坐标变换 .....                  | 10 | 2.7.2 由 $PW$ 求薄透镜系统的初始解<br>过程 ..... | 30  |
| 参考文献 .....                      | 12 | 2.7.3 薄透镜系统的基本像差参量 .....            | 30  |
| 第 2 章 像差理论及计算 .....             | 13 | 2.8 由初级像差确定光学系统的结构参数 .....          | 31  |
| 2.1 实际几何像差计算 .....              | 13 | 2.8.1 双胶合薄透镜和单透镜 .....              | 31  |
| 2.1.1 单色几何像差计算 .....            | 13 | 2.8.2 双分离物镜 .....                   | 38  |
| 2.1.2 色差 .....                  | 13 | 2.8.3 三片式薄透镜组 .....                 | 38  |
| 2.1.3 实际几何像差分布及曲线 .....         | 13 | 2.8.4 无光焦度薄透镜组 .....                | 41  |
| 2.2 初级(三级)几何像差 .....            | 22 | 2.8.5 两组定焦距薄透镜 .....                | 41  |
| 2.3 实际几何像差级数展开式 .....           | 25 | 2.8.6 厚透镜 .....                     | 41  |
| 2.4 波像差计算 .....                 | 27 | 2.9 同轴非球面的初级像差理论 .....              | 116 |
| 2.4.1 波像差的一般表示式 .....           | 27 | 2.10 同轴柱面望远系统的初级像差 .....            | 116 |
| 2.4.2 初级波像差表示式 .....            | 28 | 参考文献 .....                          | 116 |
| 2.4.3 初级波色差一般表示式 .....          | 28 |                                     |     |

## 第 2 篇 近 代 光 学

|                  |     |                      |     |
|------------------|-----|----------------------|-----|
| 第 1 章 激光 .....   | 117 | 1.1.1 激光器的组成部分 ..... | 118 |
| 1.1 激光工作原理 ..... | 118 | 1.1.2 工作原理 .....     | 118 |
|                  |     | 1.2 光学谐振腔理论 .....    | 118 |

|                         |     |                            |     |
|-------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 1.2.1 谐振腔的特点和基本参量 ..... | 118 | 2.1.2 波前斜率测量 .....         | 126 |
| 1.2.2 谐振腔的几何理论 .....    | 119 | 2.1.3 像清晰化技术 .....         | 128 |
| 1.2.3 谐振腔的衍射理论 .....    | 121 | 2.2 波前校正器 .....            | 129 |
| 1.3 激光辐射动力学 .....       | 122 | 2.2.1 分类 .....             | 129 |
| 1.3.1 速率方程理论 .....      | 122 | 2.2.2 主要性能要求 .....         | 130 |
| 1.3.2 半经典理论简介 .....     | 124 | 2.2.3 驱动器 .....            | 131 |
| 参考文献 .....              | 124 | 2.2.4 波前控制 .....           | 132 |
| 第2章 自适应光学技术 .....       | 125 | 2.3 系统设计问题 .....           | 133 |
| 2.1 动态波前测量 .....        | 126 | 2.3.1 系统误差来源和主要参数的确定 ..... | 133 |
| 2.1.1 动态波前测量的特点 .....   | 126 | 2.3.2 自适应光学系统补偿效果评价 .....  | 135 |
|                         |     | 参考文献 .....                 | 136 |

### 第3篇 各类元器件

|                         |     |                            |     |
|-------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 第1章 光学零部件 .....         | 138 | 1.6.9 反射棱镜应用实例 .....       | 166 |
| 1.1 菲涅耳透镜 .....         | 138 | 1.6.10 反射多面棱镜(多面体) .....   | 169 |
| 1.1.1 菲涅耳透镜的原理及类型 ..... | 138 | 1.7 折射棱镜 .....             | 169 |
| 1.1.2 菲涅耳透镜的像差 .....    | 139 | 1.7.1 折射棱镜的性质及主要计算公式 ..... | 169 |
| 1.1.3 菲涅耳透镜设计 .....     | 141 | 1.7.2 折射棱镜组 .....          | 170 |
| 1.2 全息透镜 .....          | 144 | 1.8 光楔和补偿器 .....           | 171 |
| 1.2.1 全息透镜的制作 .....     | 144 | 1.8.1 平行光路中的补偿器 .....      | 171 |
| 1.2.2 全息透镜的理想成像位置 ..... | 144 | 1.8.2 会聚光路中的补偿器 .....      | 172 |
| 1.2.3 全息透镜的焦距和放大率 ..... | 145 | 1.8.3 焦面上的旋转光楔 .....       | 173 |
| 1.2.4 全息透镜的像差 .....     | 146 | 1.9 偏振棱镜 .....             | 173 |
| 1.2.5 全息透镜的应用 .....     | 146 | 1.10 滤光片 .....             | 174 |
| 1.3 梯度折射率透镜 .....       | 146 | 1.10.1 按其作用分类 .....        | 174 |
| 1.4 网格透镜 .....          | 147 | 1.10.2 按制造工艺分类 .....       | 174 |
| 1.4.1 球面网格透镜 .....      | 147 | 1.10.3 滤光片的其他要求 .....      | 175 |
| 1.4.2 柱面网格透镜 .....      | 148 | 1.11 场镜、分划板及标尺 .....       | 175 |
| 1.4.3 圆柱自聚焦光纤网格透镜 ..... | 148 | 1.11.1 场镜 .....            | 175 |
| 1.4.4 锥形自聚焦光纤网格透镜 ..... | 149 | 1.11.2 分划板 .....           | 176 |
| 1.5 反射镜 .....           | 149 | 1.11.3 标尺 .....            | 178 |
| 1.5.1 平面反射镜 .....       | 149 | 1.12 保护玻璃 .....            | 178 |
| 1.5.2 平面反射镜系 .....      | 150 | 1.12.1 密封性保护玻璃 .....       | 178 |
| 1.5.3 球面反射镜 .....       | 150 | 1.12.2 抗压力保护玻璃 .....       | 179 |
| 1.5.4 非球面反射镜 .....      | 150 | 1.12.3 保护光学零件表面的保护玻璃 ..... | 179 |
| 1.6 反射棱镜 .....          | 151 | 1.12.4 照明窗及观察窗玻璃 .....     | 179 |
| 1.6.1 反射棱镜的基本定义 .....   | 151 | 1.12.5 导电加热的保护玻璃 .....     | 179 |
| 1.6.2 反射棱镜的分类及符号 .....  | 151 | 1.12.6 盖玻片 .....           | 180 |
| 1.6.3 反射棱镜的外形尺寸计算 ..... | 152 | 1.13 光束分割器 .....           | 181 |
| 1.6.4 反射棱镜的两面角计算 .....  | 152 | 1.13.1 中性分光元件 .....        | 181 |
| 1.6.5 反射棱镜的视场角 .....    | 153 | 1.13.2 分色元件 .....          | 181 |
| 1.6.6 反射棱镜的初级像差系数 ..... | 153 | 1.14 投影屏 .....             | 182 |
| 1.6.7 反射棱镜的误差 .....     | 153 | 1.14.1 透射式投影屏 .....        | 182 |
| 1.6.8 常用反射棱镜 .....      | 156 | 1.14.2 反射式投影屏 .....        | 183 |
|                         |     | 1.15 光栅 .....              | 183 |

|                                 |     |                                   |     |
|---------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 1.15.1 光栅的形式 .....              | 183 | 2.9.8 切断 .....                    | 208 |
| 1.15.2 衍射光栅的性能 .....            | 185 | 参考文献 .....                        | 208 |
| 1.15.3 衍射光栅的选择 .....            | 185 | <b>第3章 等离子体</b> .....             | 209 |
| 1.15.4 衍射光栅的制造 .....            | 187 | 3.1 工作原理 .....                    | 209 |
| 1.15.5 计量光栅的应用 .....            | 188 | 3.2 PDP 的特征 .....                 | 210 |
| 1.16 光学码盘及编码器 .....             | 191 | 3.3 PDP 的应用领域 .....               | 210 |
| 1.16.1 基本概念 .....               | 191 | 参考文献 .....                        | 211 |
| 1.16.2 循环码及其转换 .....            | 192 | <b>第4章 电荷耦合器</b> .....            | 213 |
| 1.16.3 精码、粗码和校正码 .....          | 193 | 4.1 CCD 工作原理及特性 .....             | 213 |
| 1.16.4 码盘的精度指标 .....            | 193 | 4.1.1 MOS 光敏元的工作原理 .....          | 213 |
| 1.16.5 码盘参数的选择 .....            | 194 | 4.1.2 移位寄存器 .....                 | 213 |
| 1.16.6 编码器 .....                | 195 | 4.1.3 光敏单元中的电荷向移位寄存器<br>转移 .....  | 214 |
| 参考文献 .....                      | 196 | 4.1.4 面阵 CCD .....                | 216 |
| <b>第2章 液晶显示器</b> .....          | 197 | 4.2 CCD 输出信号的处理方式 .....           | 218 |
| 2.1 液晶显示器的近期发展趋势 .....          | 197 | 4.3 CCD 的典型应用 .....               | 218 |
| 2.2 液晶显示器的优点 .....              | 197 | 4.3.1 线阵 CCD 在动态测量直径中的应用 .....    | 218 |
| 2.3 液晶显示器的种类 .....              | 197 | 4.3.2 面阵 CCD 在摄像测量中的应用 .....      | 218 |
| 2.4 液晶的分类 .....                 | 198 | 4.3.3 机器人视觉系统 .....               | 219 |
| 2.5 对显示材料液晶的要求 .....            | 198 | <b>第5章 光纤及光通信器件</b> .....         | 221 |
| 2.6 液晶的特性 .....                 | 198 | 5.1 光纤 .....                      | 221 |
| 2.6.1 光的偏振性质 .....              | 198 | 5.1.1 光纤的结构及导光原理 .....            | 221 |
| 2.6.2 液晶的光学特性 .....             | 198 | 5.1.2 光通信中几种常用光纤技术指标及<br>应用 ..... | 221 |
| 2.6.3 液晶的形变特性 .....             | 199 | 5.2 光纤连接器 .....                   | 222 |
| 2.6.4 液晶的电学性质 .....             | 199 | 5.2.1 圆柱套筒型连接器 .....              | 222 |
| 2.6.5 光在液晶盒中的传播 .....           | 200 | 5.2.2 阵列式活动连接器 .....              | 223 |
| 2.7 扭曲向列相液晶显示 .....             | 200 | 5.3 光纤耦合器 .....                   | 223 |
| 2.7.1 结构 .....                  | 200 | 5.3.1 熔融拉锥型光纤耦合器 .....            | 223 |
| 2.7.2 TN 型液晶的驱动方法 .....         | 200 | 5.3.2 树形耦合器 .....                 | 224 |
| 2.7.3 反射式扭曲向列相液晶显示器 .....       | 201 | 5.4 波分复用器/解复用器 .....              | 224 |
| 2.8 薄膜晶体管液晶显示器 .....            | 201 | 参考文献 .....                        | 225 |
| 2.8.1 TFT 液晶显示器的成像原理 .....      | 201 | <b>第6章 CD、DVD</b> .....           | 226 |
| 2.8.2 薄膜晶体管液晶显示器结构 .....        | 202 | 6.1 光盘存储技术简介 .....                | 226 |
| 2.8.3 薄膜晶体管液晶显示器的工作<br>原理 ..... | 203 | 6.2 光盘的主要类型 .....                 | 227 |
| 2.8.4 FET 工作原理 .....            | 203 | 6.2.1 只读光盘 .....                  | 227 |
| 2.8.5 薄膜晶体管液晶显示器的驱动 .....       | 203 | 6.2.2 一次写入光盘 .....                | 227 |
| 2.9 工程分类 .....                  | 204 | 6.2.3 可擦写光盘 .....                 | 228 |
| 2.9.1 化学汽相沉积 .....              | 205 | 6.3 光盘机的原理 .....                  | 228 |
| 2.9.2 溅射技术 .....                | 205 | 6.4 高密度光盘 DVD .....               | 229 |
| 2.9.3 曝光技术 .....                | 206 | 参考文献 .....                        | 231 |
| 2.9.4 刻蚀 .....                  | 206 |                                   |     |
| 2.9.5 PI 液凸版印刷 .....            | 207 |                                   |     |
| 2.9.6 摩擦 .....                  | 207 |                                   |     |
| 2.9.7 液晶滴下 ODF .....            | 207 |                                   |     |

## 第 4 篇 光学系统设计

|                            |     |                                                |     |
|----------------------------|-----|------------------------------------------------|-----|
| 第 1 章 像差自动平衡 .....         | 232 | 2.5.2 施特雷尔判据公差 .....                           | 258 |
| 1.1 常用的几种价值函数 .....        | 233 | 2.5.3 低对比分辨能力判据公差 .....                        | 259 |
| 1.1.1 引导型价值函数 .....        | 233 | 参考文献 .....                                     | 259 |
| 1.1.2 校正型价值函数 .....        | 234 | 第 3 章 光学系统参数的公差计算 .....                        | 260 |
| 1.2 常用的几种最优化方法 .....       | 236 | 3.1 概述 .....                                   | 260 |
| 1.2.1 梯度法 .....            | 236 | 3.2 参数公差计算原理 .....                             | 260 |
| 1.2.2 阻尼最小二乘法 .....        | 237 | 3.2.1 参数灵敏度计算 .....                            | 260 |
| 1.2.3 正交化法 .....           | 237 | 3.2.2 松居法计算公差 .....                            | 261 |
| 1.2.4 适应法 .....            | 237 | 3.2.3 松居法的改进 .....                             | 261 |
| 1.3 阻尼因子和权因子 .....         | 239 | 3.3 参数公差的调整 and 产品质量预测 .....                   | 262 |
| 1.3.1 阻尼因子的选取方法 .....      | 239 | 3.4 偏心公差计算 .....                               | 263 |
| 1.3.2 权因子的选取方法 .....       | 239 | 3.4.1 透镜中心误差的定义和术语 .....                       | 263 |
| 1.4 边界条件处理 .....           | 240 | 3.4.2 偏心误差初级像差理论 .....                         | 263 |
| 1.4.1 第一类边界条件处理 .....      | 240 | 3.4.3 偏心公差的计算 .....                            | 265 |
| 1.4.2 第二类边界条件处理 .....      | 240 | 3.4.4 偏心公差的调整 .....                            | 265 |
| 1.4.3 自动选玻璃方法 .....        | 240 | 3.5 棱镜公差 .....                                 | 265 |
| 参考文献 .....                 | 241 | 3.5.1 棱面的面形误差 .....                            | 265 |
| 第 2 章 像质评价 .....           | 242 | 3.5.2 反射棱镜的角度误差 .....                          | 266 |
| 2.1 光学系统成像 .....           | 242 | 3.6 局部误差 .....                                 | 267 |
| 2.1.1 几何描述 .....           | 242 | 参考文献 .....                                     | 267 |
| 2.1.2 波动描述 .....           | 242 | 第 4 章 望远系统设计 .....                             | 269 |
| 2.1.3 透镜成像 .....           | 243 | 4.1 望远系统的原理和性能 .....                           | 269 |
| 2.1.4 定义 .....             | 243 | 4.1.1 设计的基本步骤 .....                            | 269 |
| 2.2 衍射能量分布和质量判据 .....      | 244 | 4.1.2 光学性能的确定 .....                            | 269 |
| 2.2.1 点像衍射能量分布 .....       | 244 | 4.2 伽利略望远系统和开普勒望远系统 .....                      | 271 |
| 2.2.2 点分辨能力判据 .....        | 245 | 4.2.1 伽利略望远系统 .....                            | 271 |
| 2.2.3 施特雷尔判据 .....         | 245 | 4.2.2 开普勒望远系统 .....                            | 272 |
| 2.2.4 瑞利四分之一波长定则 .....     | 247 | 4.3 内调焦望远系统 .....                              | 273 |
| 2.2.5 最佳离焦 .....           | 247 | 4.3.1 内调焦望远镜满足准距条件的公式 .....                    | 274 |
| 2.3 几何能量分布与几何像差 .....      | 249 | 4.3.2 由三部分组成的内调焦望远镜物镜 .....                    | 275 |
| 2.3.1 点列图和几何像差方差 .....     | 249 | 4.4 反射式和折反射式望远系统 .....                         | 276 |
| 2.3.2 波像差与几何像差 .....       | 249 | 4.4.1 反射式望远物镜 .....                            | 276 |
| 2.3.3 几何特征 .....           | 251 | 4.4.2 折反射式望远物镜 .....                           | 276 |
| 2.4 光学传递函数 .....           | 252 | 4.5 透镜转像系统 .....                               | 277 |
| 2.4.1 光学传递函数的定义和表示 .....   | 253 | 4.5.1 对转像系统的要求 .....                           | 277 |
| 2.4.2 光学传递函数的计算 .....      | 253 | 4.5.2 放大率 $\beta_m = -1$ 的双透镜组转像系<br>统设计 ..... | 277 |
| 2.4.3 几种特殊情况下的调制传递函数 ..... | 254 | 参考文献 .....                                     | 277 |
| 2.4.4 多色光学传递函数 .....       | 256 | 第 5 章 显微镜系统设计 .....                            | 278 |
| 2.4.5 几何光学传递函数 .....       | 257 | 5.1 概述 .....                                   | 278 |
| 2.5 像差公差 .....             | 258 |                                                |     |
| 2.5.1 几何像差公差 .....         | 258 |                                                |     |

|                                            |            |                                       |            |
|--------------------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|
| 5.1.1 常用公式 .....                           | 278        | 7.2.10 反射和折反射系统 .....                 | 342        |
| 5.1.2 初级像差系数取值范围 .....                     | 279        | 7.3 Petzval 物镜的设计 .....               | 343        |
| 5.1.3 显微物镜种类及对校正像差的要求 .....                | 279        | 7.3.1 Petzval 物镜的设计方法 .....           | 343        |
| 5.2 消色差物镜设计 .....                          | 280        | 7.3.2 Petzval 物镜的实例 .....             | 345        |
| 5.3 复消色差物镜设计 .....                         | 283        | 7.4 三片物镜的设计 .....                     | 350        |
| 5.4 平场消色差物镜设计 .....                        | 285        | 7.4.1 三片物镜的设计方法 .....                 | 350        |
| 5.5 半复消色差物镜、平场半复消色差物镜<br>及平场复消色差物镜性能 ..... | 288        | 7.4.2 三片物镜的实例 .....                   | 352        |
| 5.6 长工作距离物镜设计 .....                        | 290        | 7.5 双高斯物镜的设计 .....                    | 361        |
| 5.6.1 折射式长工作距离物镜设计 .....                   | 290        | 7.5.1 对称型结构的像差特点和双高斯物<br>镜的结构分析 ..... | 361        |
| 5.6.2 反射式及折反射式长工作距离物镜<br>设计 .....          | 292        | 7.5.2 双高斯物镜的复杂化 .....                 | 362        |
| 5.7 典型结构参数 .....                           | 295        | 7.5.3 双高斯物镜的实例 .....                  | 363        |
| 5.8 显微镜聚光镜设计 .....                         | 295        | 7.6 制版物镜的设计 .....                     | 374        |
| 5.8.1 透射式明场聚光镜类型及设计 .....                  | 295        | 7.6.1 制版物镜的基本性能和像差要求 .....            | 374        |
| 5.8.2 透射式暗场聚光镜及设计 .....                    | 315        | 7.6.2 用初级像差求解初始结构 .....               | 375        |
| 5.8.3 落射式暗场聚光镜及设计 .....                    | 316        | 7.6.3 像差平衡和厚透镜化 .....                 | 376        |
| 参考文献 .....                                 | 317        | 7.6.4 制版物镜的实例 .....                   | 377        |
| <b>第 6 章 目镜设计</b> .....                    | <b>318</b> | 7.7 远距物镜的设计 .....                     | 380        |
| 6.1 观察目镜设计 .....                           | 318        | 7.7.1 远距物镜的设计方法 .....                 | 380        |
| 6.1.1 观察目镜的特点和一般要求 .....                   | 318        | 7.7.2 远距物镜的实例 .....                   | 382        |
| 6.1.2 目镜的像差及校正方式 .....                     | 318        | 7.8 反远距物镜的设计 .....                    | 389        |
| 6.1.3 几种常用的目镜类型 .....                      | 319        | 7.8.1 反远距物镜的高斯光学 .....                | 389        |
| 6.1.4 目镜的设计方法 .....                        | 320        | 7.8.2 反远距物镜前组的结构形式和像差<br>分析 .....     | 390        |
| 6.2 摄影目镜(或投影目镜)设计 .....                    | 325        | 7.8.3 反远距物镜后组的结构形式和像差<br>平衡 .....     | 392        |
| 6.2.1 摄影正目镜 .....                          | 325        | 7.8.4 反远距物镜中鼓形透镜的应用 .....             | 393        |
| 6.2.2 摄影负目镜 .....                          | 325        | 7.8.5 鱼眼物镜 .....                      | 395        |
| 6.3 典型结构参数 .....                           | 325        | 7.8.6 反远距物镜的实例 .....                  | 396        |
| 参考文献 .....                                 | 332        | 7.9 广角和超广角物镜的设计 .....                 | 406        |
| <b>第 7 章 照相物镜设计</b> .....                  | <b>333</b> | 7.9.1 Topogon 物镜 .....                | 406        |
| 7.1 照相物镜的基本性能参数和像差要求 .....                 | 333        | 7.9.2 Pyccap 物镜 .....                 | 407        |
| 7.1.1 照相物镜的基本性能参数 .....                    | 333        | 7.9.3 广角和超广角物镜的实例 .....               | 408        |
| 7.1.2 照相物镜的像差要求 .....                      | 334        | 7.10 非球面在照相物镜中的应用及实例 .....            | 413        |
| 7.2 照相物镜的结构演变和分类 .....                     | 335        | 7.10.1 非球面在照相物镜中的应用 .....             | 413        |
| 7.2.1 早期的简单风景物镜 .....                      | 335        | 7.10.2 带有非球面的照相物镜的实例 .....            | 413        |
| 7.2.2 对称型的不晕物镜和消像散物镜 .....                 | 335        | <b>第 8 章 变焦距光学系统设计</b> .....          | <b>416</b> |
| 7.2.3 Petzval 物镜及其演变 .....                 | 336        | 8.1 概述 .....                          | 416        |
| 7.2.4 三片物镜及其复杂化 .....                      | 337        | 8.2 变焦距光学系统的高斯光学 .....                | 416        |
| 7.2.5 双高斯物镜及其复杂化 .....                     | 338        | 8.2.1 光学补偿高斯光学 .....                  | 416        |
| 7.2.6 远距物镜 .....                           | 339        | 8.2.2 机械补偿高斯光学 .....                  | 425        |
| 7.2.7 反远距物镜 .....                          | 340        | 8.3 变焦距光学系统的初始解和像差平衡 .....            | 442        |
| 7.2.8 对称型广角和超广角物镜 .....                    | 341        | 8.3.1 变焦距光学系统的初始解 .....               | 442        |
| 7.2.9 变焦距物镜 .....                          | 342        | 8.3.2 像差平衡 .....                      | 443        |

|                                        |     |                                         |     |
|----------------------------------------|-----|-----------------------------------------|-----|
| 8.4 变焦距光学系统结构与参数 .....                 | 444 | 10.1.1 $f\theta$ 透镜的特征及其主要性能 .....      | 470 |
| 8.4.1 16mm 电影摄影变焦距物镜之一<br>(正组补偿) ..... | 444 | 10.1.2 $f\theta$ 透镜设计 .....             | 471 |
| 8.4.2 16mm 电影摄影变焦距物镜之二<br>(负组补偿) ..... | 446 | 10.2 激光扩束望远镜的设计 .....                   | 472 |
| 8.4.3 内调焦双组联动电影摄影变焦距<br>物镜 .....       | 449 | 10.2.1 概况 .....                         | 472 |
| 8.4.4 $6\times$ 彩色电视摄影变焦距物镜 .....      | 449 | 10.2.2 激光束的特点 .....                     | 472 |
| 8.4.5 $10\times$ 彩色电视摄影变焦距物镜 .....     | 452 | 10.2.3 激光扩束望远镜的设计特点及其<br>应用 .....       | 472 |
| 8.4.6 35mm 放映变焦距物镜 .....               | 454 | 10.3 傅里叶变换透镜 .....                      | 474 |
| 8.4.7 变焦距望远物镜 .....                    | 455 | 10.3.1 傅里叶变换透镜的性能指标 .....               | 474 |
| 8.4.8 具有虚焦面的正焦距变倍目镜 .....              | 457 | 10.3.2 傅里叶变换透镜的设计特点 .....               | 475 |
| 8.5 调焦方法比较 .....                       | 457 | 10.3.3 常见的傅里叶变换透镜 .....                 | 478 |
| 8.6 凸轮曲线计算 .....                       | 457 | 10.3.4 傅里叶变换透镜的设计方法 .....               | 478 |
| 8.6.1 正组补偿 .....                       | 457 | 参考文献 .....                              | 479 |
| 8.6.2 四组元变焦距光学系统 .....                 | 460 | <b>第 11 章 光学系统设计实例</b> .....            | 480 |
| 8.6.3 无前固定组三组元变焦距光学系统 .....            | 461 | 11.1 光学系统的设计方法 .....                    | 480 |
| 8.6.4 三组元全动型变焦距光学系统 .....              | 461 | 11.1.1 决定光学系统的性能指标 .....                | 480 |
| 8.6.5 双组联动变焦距光学系统 .....                | 463 | 11.1.2 选择合适的初始结构 .....                  | 480 |
| 8.6.6 二组元变焦距光学系统 .....                 | 463 | 11.1.3 优化 .....                         | 481 |
| 参考文献 .....                             | 464 | 11.1.4 评价 .....                         | 481 |
| <b>第 9 章 非球面光学系统设计</b> .....           | 465 | 11.1.5 ZEMAX 软件入门 .....                 | 482 |
| 9.1 轴对称非球面 .....                       | 465 | 11.2 经典光学系统 .....                       | 483 |
| 9.1.1 非球面方程式 .....                     | 465 | 11.2.1 目镜 .....                         | 484 |
| 9.1.2 实际光线的光路追踪 .....                  | 465 | 11.2.2 显微物镜 .....                       | 484 |
| 9.2 非球面初级像差理论 .....                    | 465 | 11.2.3 投影物镜 .....                       | 489 |
| 9.3 用单个非球面校正系统球差 .....                 | 466 | 11.2.4 照相物镜 .....                       | 492 |
| 9.3.1 单个非球面使无限远物点成理想像 .....            | 466 | 11.2.5 折反射系统 .....                      | 493 |
| 9.3.2 用非球面校正系统原有球差 .....               | 466 | 11.2.6 航空摄影物镜 .....                     | 495 |
| 9.4 用单个非球面校正系统像散 .....                 | 467 | 11.2.7 远焦系统 .....                       | 497 |
| 9.4.1 对于无限远物体, 要求校正像散 .....            | 467 | 11.2.8 F Theta ( $f\theta$ ) 扫描透镜 ..... | 497 |
| 9.4.2 用非球面校正原有像散 .....                 | 467 | 11.2.9 FT 傅里叶变换透镜 .....                 | 499 |
| 9.5 具体实例 .....                         | 468 | 11.3 现代光学系统 .....                       | 502 |
| 9.5.1 放大镜 .....                        | 468 | 11.3.1 激光聚焦镜头 .....                     | 502 |
| 9.5.2 打靶透镜 .....                       | 468 | 11.3.2 集成电路加工中应用的高分辨光学<br>系统 .....      | 504 |
| 9.5.3 天文望远镜中的 R-C 系统的设计 .....          | 468 | 11.3.3 医用内窥镜主镜 .....                    | 510 |
| 9.5.4 非涅耳透镜 .....                      | 468 | 11.3.4 微型摄像机中的定焦距摄像物镜 .....             | 510 |
| 9.6 非轴对称非球面 .....                      | 469 | 11.3.5 手机中使用的微型照相物镜 .....               | 512 |
| 9.6.1 柱面透镜 .....                       | 469 | 11.3.6 光学仪器中使用的 CCD 接口<br>物镜 .....      | 513 |
| 9.6.2 柱面望远镜 .....                      | 469 | 11.3.7 投影显示技术的新应用 .....                 | 513 |
| 9.6.3 轮胎镜 .....                        | 469 | 11.3.8 数码照相机用的镜头 .....                  | 517 |
| 参考文献 .....                             | 469 | <b>第 12 章 光学零件技术条件</b> .....            | 523 |
| <b>第 10 章 使用激光器的光学系统设计</b> .....       | 470 | 12.1 光学制图 .....                         | 523 |
| 10.1 $f\theta$ 透镜 .....                | 470 |                                         |     |

|                                |     |                                  |     |
|--------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 12.1.1 一般规定 .....              | 524 | 12.3.3 零件外径及配合公差确定 .....         | 543 |
| 12.1.2 光学系统图 .....             | 528 | 12.3.4 透镜的中心最小厚度及边缘最小厚度的确定 ..... | 544 |
| 12.1.3 光学胶合件图和光学零件图 .....      | 528 | 12.3.5 零件厚度公差 .....              | 544 |
| 12.2 材料 .....                  | 531 | 12.3.6 光学零件的倒角 .....             | 544 |
| 12.2.1 无色光学玻璃简介 .....          | 531 | 12.3.7 光学零件的中心偏差 .....           | 544 |
| 12.2.2 对无色光学玻璃的要求 .....        | 535 | 12.3.8 角度公差 .....                | 545 |
| 12.2.3 有色光学玻璃的质量指标及其选用原则 ..... | 536 | 12.3.9 光学零件表面疵病 .....            | 546 |
| 12.2.4 对晶体材料的要求 .....          | 536 | 12.3.10 光学分划零件的要求 .....          | 547 |
| 12.3 对零件的加工要求 .....            | 536 | 12.3.11 表面镀膜要求 .....             | 549 |
| 12.3.1 表面半径数值系列标准及选择 .....     | 536 | 参考文献 .....                       | 552 |
| 12.3.2 光学零件的面形偏差 .....         | 542 |                                  |     |
|                                |     |                                  |     |
| <b>第 5 篇 光学零件制造工艺</b>          |     |                                  |     |
| <b>第 1 章 透镜加工工艺</b> .....      | 553 | 2.3.4 棱镜角度的测量 .....              | 605 |
| 1.1 透镜基本成型 .....               | 553 | 参考文献 .....                       | 609 |
| 1.1.1 透镜滴料成型 .....             | 553 | <b>第 3 章 非球面加工工艺</b> .....       | 610 |
| 1.1.2 透镜块料加热成型 .....           | 553 | 3.1 概述 .....                     | 610 |
| 1.1.3 透镜块料加工成型 .....           | 555 | 3.1.1 非球面分类 .....                | 610 |
| 1.2 透镜精磨 .....                 | 570 | 3.1.2 非球面光学零件的面形精度指标 .....       | 610 |
| 1.2.1 透镜成盘 .....               | 570 | 3.2 非球面光学工艺编制 .....              | 611 |
| 1.2.2 用散粒磨料精磨 .....            | 575 | 3.2.1 主要工艺参数计算 .....             | 611 |
| 1.2.3 用固着磨料精磨 .....            | 575 | 3.2.2 粗磨加工余量计算 .....             | 612 |
| 1.3 透镜抛光 .....                 | 578 | 3.2.3 非球面光学零件的精磨与抛光 .....        | 613 |
| 1.3.1 抛光原理概述 .....             | 579 | 3.2.4 非球面工艺计算实例 .....            | 614 |
| 1.3.2 古典法抛光 .....              | 579 | 3.3 非球面的加工方法 .....               | 614 |
| 1.3.3 弧线摆动法抛光 .....            | 582 | 3.3.1 概述 .....                   | 614 |
| 1.3.4 范成法抛光 .....              | 585 | 3.3.2 仿形磨削法 .....                | 615 |
| 参考文献 .....                     | 586 | 3.3.3 样板研磨法 .....                | 615 |
| <b>第 2 章 平面零件加工工艺</b> .....    | 587 | 3.3.4 修磨法 .....                  | 616 |
| 2.1 玻璃平板与光楔的加工工艺 .....         | 587 | 3.3.5 数控磨削法 .....                | 617 |
| 2.1.1 玻璃平板加工工艺 .....           | 587 | 3.3.6 计算机控制的修正研磨法 .....          | 618 |
| 2.1.2 光楔加工工艺 .....             | 589 | 3.3.7 复曲面的加工 .....               | 618 |
| 2.1.3 玻璃平板与光楔的测量 .....         | 590 | 3.3.8 离子抛光法 .....                | 619 |
| 2.2 精密平面加工工艺 .....             | 591 | 3.3.9 真空镀膜法 .....                | 619 |
| 2.2.1 提高光学平面度的方法 .....         | 591 | 3.3.10 复制法 .....                 | 620 |
| 2.2.2 精密平面加工工艺 .....           | 592 | 3.4 非球面面形检验 .....                | 620 |
| 2.2.3 精密平行平面加工工艺 .....         | 593 | 3.4.1 坐标面形法 .....                | 620 |
| 2.2.4 精密平面的测量 .....            | 594 | 3.4.2 样板法 .....                  | 621 |
| 2.3 棱镜的加工工艺 .....              | 598 | 3.4.3 星点法 .....                  | 621 |
| 2.3.1 棱镜的精度等级及加工方法 .....       | 598 | 3.4.4 光栅法 .....                  | 622 |
| 2.3.2 小批量加工棱镜的工艺 .....         | 598 | 3.4.5 阴影法 .....                  | 624 |
| 2.3.3 大批量加工棱镜的工艺 .....         | 600 | 3.4.6 漫射阴影法 .....                | 625 |
|                                |     | 3.4.7 实时全息检验法 .....              | 625 |