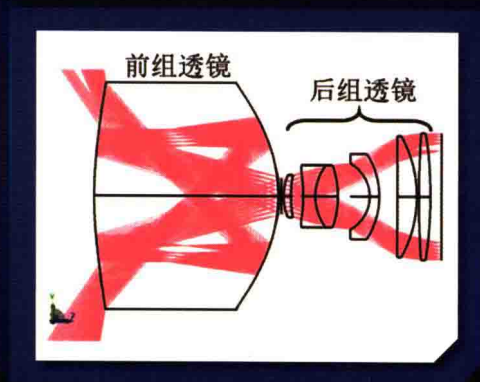
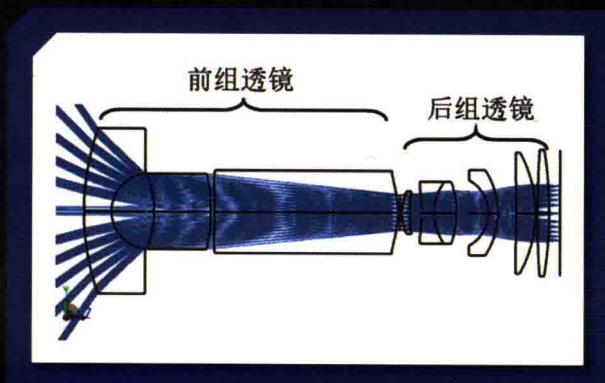


现代光学设计实用方法

MODERN OPTICAL DESIGN WITH EFFECTIVE METHODS

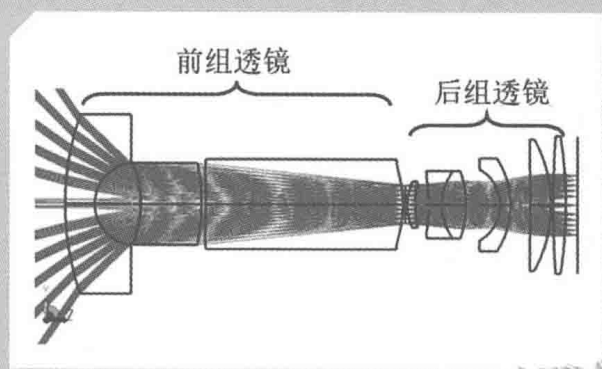
高志山 袁 群 马 骏◎编著



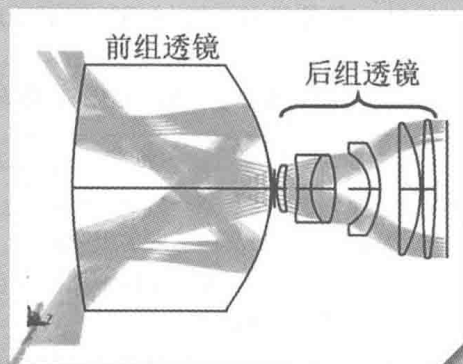
MODERN OPTICAL DESIGN WITH EFFECTIVE METHODS

现代光学设计实用方法

高志山 袁群 马骏◎编著



MODERN



METHODS

内 容 简 介

我国对光学设计人才需求强劲,现有人才培养方式与专业设计软件的虚拟实验平台没有深度融合,迟滞了深入理解、熟练运用专业知识从事专业设计的能力提升速度。本书以 ZEMAX 软件平台为例,将晦涩难懂的像差理论与实践应用、“无中生有”的初始结构建模方法与学科前沿有机融合,使基于光线结构的像差概念、像差理论的演变规律、像差设计的精准控制,变得具体可控、知行合一。本书融入了包括光学自由曲面系统设计、衍射超透镜设计的方法与要点、新型像质评价指标“椭率”在内的领域新成果。本书内容包括:光学系统像差理论、衍射成像与像质评价、光学自动设计原理、ZEMAX 在像差设计中的应用、玻璃库与玻璃选择、透镜分裂、像差设计在典型光学设计中的应用、自由曲面光学系统设计、新型光学系统设计等。

本书讲解的多种结构选型与建立思想,具有一定的先进性和启发性,可为从事光学设计的工程技术人员、相关技术研究人员、高等院校相关专业的师生提供专业参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

现代光学设计实用方法 / 高志山, 袁群, 马骏编著

. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2022. 1

ISBN 978 - 7 - 5763 - 0850 - 1

I. ①现… II. ①高… ②袁… ③马… III. ①光学设计—高等学校—教材 IV. ①TN202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 006116 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)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (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 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 22.5

字 数 / 528 千字

版 次 / 2022 年 1 月第 1 版 2022 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 110.00 元

责任编辑 / 刘 派

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

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

从成像光学的“像”信息本质与成像系统的发展动态可以看出，无论使用在何种领域，只要用到光学的基本元件，必然要控制元件对光波的聚焦、发散、准直等行为的波前质量，并对其效果进行评价。对元件能力的认知，是光学或光电信息工程专业的基本素质。

成像光学系统设计是一门已有多年理论积累与实践基础的工程学科，光学设计既是一门科学又是一门技术，而且涉及的内容深奥复杂，让人难以理解与掌握。

国外已有专著，在阐述光学系统像质评价技术的概念、像差理论、典型光学结构、材料时，嵌入具体的光学设计软件，进行现代光学设计，这种体系组织与论述方式，对光学设计具有浓厚兴趣的广大从业人员，便于入门与很快上手，但受语言限制，影响范围不大，不能满足我国在信息时代对光学设计技术人员的广泛需求。

自 2005 年起，本书作者作为南京理工大学本科生“应用光学课群”的负责人，承担南京理工大学光电信息工程专业的像质评价技术、光学 CAD 课程设计两门理论与实践紧密衔接的课堂教学。近 16 年的教学实践，深深感受到，不同于常规的、内涵清楚的数理类概念，依据大量隐性公式推导的像差理论与概念，是一些半经验公式，只能得到一堆过程或中间数据，只有通过对这些数据重新加工，才能得到光学设计实践中有用的结论。国内现有的同类教材体系，仍是沿袭“先理论、后实践”的编写思路，这对刚进入专业课，没有光学设计经验的大三本科生或新手来说，很难直接闯过晦涩的像差理论与概念知识点学习的关口，挫伤了学生的自信心与学习兴趣。为此，我们编写了《ZEMAX 在像差设计中的应用》讲义，将国内行业占有率最高的 ZEMAX 光学设计软件工具，作为学习像差理论的虚拟实验平台，晦涩难懂的像差概念可以应用 ZEMAX 工具，通过自建光学系统，观察现象与评价。这种将实践与理论相互融合的课程体系，打破了“先理论、后实践”的体系框框。在理论学习中，体验光学设计实践；在光学设计实践中，反刍像差理论与规律。该讲义除了被南京理工大学本科教学大量使用外，还被社会上光学设计培训班大量使用，几度增印。经过 15 年的教学实践并结合教学团队在光学设计方面的最新研究成果，需要进一步充实和修改《ZEMAX 在像差设计中的应用》讲义，

形成教材的条件已经成熟。

我们编写此书的目的，旨在探索一种能够批量培养光学设计人才的新型教学途径，满足我国先进制造大国对光学设计人才的急需。本书的内容体系是将 ZEMAX 软件作为工具融入理论学习与光学设计实践等多环节中，对有关的光学设计理论，着重在如何应用，摒弃许多著作或教材使用的复杂数学推导，只保留前人在像差理论、光学设计结构选型等方面的实用结论，用浅显易懂的语言与 ZEMAX 软件对复杂光线空间结构的表现能力，介绍现代光学设计与工程应用等方面的知识。

本书内容分为 12 章。

第 1 章绪论，介绍我国光学设计领域的发展历程、重大光学工程项目的快速发展以及取得的伟大成就，尽量为读者展现光学工程领域的全面画卷与发展动态。

第 2 章的目的是引导光学设计人员的思路。光学设计的首要工作是有结构参数，并从需方要求清晰地总结出光学特性参数，介绍影响像质的本质指标——几何像差，然后介绍如何用 ZEMAX 软件来定义这些参数，显示几何像差的光线结构与 ZEMAX 软件中的像差解读。

第 3 章介绍光学自动设计原理，其目的不是研制光学自动设计程序，而是使设计者更快、更好地掌握光学自动设计程序的使用方法。以阻尼最小二乘法为例，阐述驱动计算机自动设计涉及的评价函数、权因子、阻尼因子、优化涉及的数值计算方法，ZEMAX 中评价函数的定义方法与基本操作符概念。

第 4 章在光学设计较高的层次上，阐述像差设计在 ZEMAX 中的实现方法，对已经在光学设计领域具有较高水平的设计人员，展现了精准控制像差的直接途径，可以有针对性地提高光学设计的效率。

第 5 章介绍薄透镜系统的初级像差理论，重点为设计者浓缩过去像差理论研究中最有实用价值的成果，给定光学特性参数的设计要求，指导设计者认识需要控制的像差种类、量值大小、光学结构的选择和光学材料的使用，为设计者在像差的认知、实践体会之间形成良性循环，促进设计水平快速提高。

第 6 章从实用层面阐述在大相对孔径大视场光学系统、大 NA 显微系统、天文光学系统等诸多光学工程涉及的复杂光学系统领域，使用较多的综合评价指标，这些指标评价系统质量时应该注意的问题，介绍 ZEMAX 中像质评价指标的种类、物理含义、使用方法。

第 7 章~第 11 章，是实践方面的内容，与现代光学设计实践紧密相关，介绍作者研究团队在自由曲面、二元光学、大视场鱼眼镜头、大 NA 显微等领域的光学设计最新科研成果和设计体会。

第 7 章介绍国产无色光学玻璃的命名规律、主要光学参数（折射率、色散系数、光谱透过率）、比重、简单的物理化学性能，国际上玻璃材料的最新发展动态；介绍在模压非球面、3D 打印方面应用广泛的光学塑料，

红外材料的折射率、色散系数、光谱透过率特点；阐述 ZEMAX 中将玻璃作为变量的玻璃优化选择方法。

第 8 章依据我们已经掌握的理论 with 经验，重新阐述光学系统最基本单元——透镜的分裂与组合，在结构上调整光学系统的像差有效校正能力。

第 9 章是精准像差控制方法的应用实践，将第 3 章介绍的像差控制操作方法用于特殊像差控制要求的物镜设计，提高优化设计的效率。

第 10 章结合设计实践，介绍确保成像系统光学质量的照明系统设计 with 外型尺寸计算方法，涉及匀化照明方法、照明场大小 with 照明数值孔径角。

第 11 章针对当前自由曲面光学设计前沿，结合我们最新的研究成果，阐述自由曲面描述方法、初始结构生成方法、视场孔径逐步扩大优化设计方法。

第 12 章是最新研究成果的体现，介绍二元光学、折衍混合系统、超透镜系统、宽光谱大 NA 显微物镜设计、大视场胶囊内窥透镜设计方法。

为了配合知识点的学习，每章后面都设计了一些复习题，便于读者抓住要点。

本书撰写人员和分工如下：

前言，第 1~7 章、第 9 章，第 12 章 12.4~12.6 节，以及每章复习题，由高志山撰写；

第 8 章、第 10 章、第 11 章，由袁群撰写；

第 12 章 12.1~12.3 节，由马骏撰写。

全书由高志山统稿。

编写本书是作者 10 多年来的梦想。本书的内容组织，紧扣“实用”二字，是在作者多年从事南京理工大学光电信息工程专业本科、研究生光学设计教学，以及国内光学设计培训班教学、光学设计方向科学研究等基础上整理编写的，探索将光学设计的基本知识、方法与复杂光学设计实践的结合，一方面期望让初学入门的设计者轻松驾驭光学设计软件，另一方面对已经具有多年经验的设计者也能从中受益。但本书对从事光学设计软件的研制和光学设计理论研究，或者专门从事特殊类型复杂光学设计工作的人员来说，显然是不够的。

从光学专业的教学角度，本书第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章，可以作为“像质评价技术”或“像差理论”教学内容；本书第 4 章、第 7 章~第 9 章可以作为“光学 CAD 课程设计”的实践教学主要内容。第 10 章~第 12 章介绍的先进设计方法，可以作为研究生阶段“现代光学设计方法”的教学内容。

本书的立题，一方面出于开展教材改革与研究的需要，另一方面，也得到“江苏省高等学校重点教材”“南京理工大学规划教材”项目的支持；同时得到北京理工大学出版社李炳泉副社长、编辑们的大力支持，我们一拍即合，催生了本书的正式出版。本书在编写过程中，参考了国内外

同行的一些成果，引用了作者与同事们多年来的合作论文。南京理工大学教务处、电子工程与光电技术学院的领导们，对本书的完成给予了协助与支持，使得本书先后获得南京理工大学“本科教学改革与建设工程项目规划教材建设课题”和“江苏省高等学校重点教材”的立项。作者研究团队的博士生许宁晏、车啸宇，硕士生曹鑫、周俊涛、谢澎飞、第五蕊蕊等，在图表的绘制与整理上付出了辛劳，在此一并表示衷心的感谢！

本书是在多年从事光学设计研究工作的基础上产生的成果，并形成了教材。作者期望在此基础上，能有更多的光学设计爱好者产生从事光学设计方法研究的浓厚兴趣，使光学设计由少数人掌握的“艺术”，变成易掌握的实用化技术。

本书不妥之处望读者提出宝贵意见。

作者

2020年9月于南京

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	001
1.1 我国成像光学的发展与动力	001
1.2 成像光学的“像”信息本质	002
1.3 成像光学系统的发展动态	003
1.3.1 强度直接成像光学系统的几个重要发展动态	003
1.3.2 光场传输——聚能系统	009
1.3.3 干涉（相位）成像系统	011
1.3.4 偏振成像系统	013
1.4 光学工程的不断发展对光学设计实用方法带来的挑战	014
复习题	015
第2章 光学系统与几何像差	016
2.1 概述	016
2.2 光学系统的结构参数和光学特性参数	017
2.2.1 光学系统的结构参数	017
2.2.2 光学特性参数	019
2.2.3 实际光学系统描述举例	024
2.3 几何像差与光线结构	025
2.3.1 轴上点的像差	025
2.3.2 轴外物点的光线结构与像差	037
2.3.3 轴外像差的一般规律	045
2.4 高级像差的定义与实用计算方法	048
2.4.1 像差与视场、孔径的函数关系	048
2.4.2 高级像差的计算关系式	049
2.5 赛德像差多项式	049

2.5.1	垂轴像差分量表达形式	050
2.5.2	波像差表达形式	050
2.6	像差的曲线表示方法	051
2.6.1	独立几何像差曲线	051
2.6.2	光线像差(垂轴分量)曲线	053
2.7	ZEMAX 软件简介	053
2.7.1	ZEMAX 的视窗类型	054
2.7.2	主视窗的操作	054
2.8	ZEMAX 中光学系统的建立实例	056
2.8.1	设计要求	056
2.8.2	初始结构	056
2.8.3	其他光学特性参数的输入方法	057
2.8.4	ZEMAX 中的像质评价方法	061
2.9	ZEMAX 中几何像差垂轴表示法(Ray Fans)的解读	072
2.9.1	彗差的提取	074
2.9.2	像面与近轴像面之间离焦量的判别	076
2.9.3	场曲的判别	076
2.9.4	垂轴色差的解读	077
2.9.5	Ray Aberration 的地位	077
	复习题	078
第3章	光学自动设计原理	080
3.1	概述	080
3.2	广义像差与结构参数的隐晦函数关系	080
3.3	光学自动设计中的优化方法	083
3.3.1	评价函数	083
3.3.2	最小二乘法	084
3.3.3	阻尼最小二乘法(Damped Least Square, DLS)	085
3.3.4	阻尼因子与权因子的自动赋值方法简介	085
3.3.5	边界条件	086
3.4	ZEMAX 中评价函数(Merit Function)的构成要素	087
3.5	ZEMAX 默认评价函数(Default Merit Function)定义方法	087
3.5.1	RMS 或 PTV	088
3.5.2	Wavefront 或 Spot Radius 等	088
3.5.3	Centroid/Chief Ray/Mean	089
3.5.4	Pupil Integration Method	089
3.5.5	Thickness Boundary Values	089
3.5.6	其余辅助选项	089
	复习题	090

第4章 像差精准优化设计在 ZEMAX 中的实现方法	091
4.1 概述	091
4.2 ZEMAX 中评价函数与现有操作符	092
4.2.1 高斯光学参数 (外形尺寸数据)	093
4.2.2 像差控制操作符	094
4.2.3 以主光线为参照的垂轴几何像差	094
4.2.4 以质心为参照垂轴几何像差	095
4.2.5 波像差控制操作符	095
4.2.6 光学传递函数操作符	095
4.2.7 透镜边界条件	096
4.2.8 光学材料控制操作符	097
4.2.9 数学运算操作符	098
4.3 Default Merit Function 和现有像差控制操作符的局限性	098
4.3.1 轴上点的像差操作符局限性	098
4.3.2 轴外物点的像差操作符局限性	099
4.4 常见像差控制在评价函数中的实现	099
4.4.1 轴上球差、色差的控制操作符	099
4.4.2 轴外初级像差的控制操作符	102
4.4.3 轴外物点视场孔径高级像差的定义及其控制操作符	104
4.5 ZEMAX 中与色差有关操作符的像差计算基准	104
4.5.1 AXCL 操作符的计算基准	104
4.5.2 LAEL 操作符的计算基准	105
4.5.3 TRAY 操作符的计算基准	108
4.6 像差设计举例	108
4.6.1 设计要求	109
4.6.2 光学特性特点与像差校正要求	109
4.6.3 初始结构选择	109
4.6.4 优化设计	110
复习题	117
第5章 薄透镜系统的初级像差理论	118
5.1 概述	118
5.2 薄透镜系统的初级像差方程组	118
5.3 薄透镜组的普遍像差性质	121
5.3.1 薄透镜组的单色像差特性	121
5.3.2 薄透镜组的色差特性	122
5.4 单薄透镜组——双胶合、三胶合透镜像差校正能力的局限性	123
5.5 基于 ZEMAX 软件仿真的单透镜像差性质的讨论	124

5.5.1	物位于无限远时球差随透镜形状的变化规律	124
5.5.2	保持焦距、透镜形状不变,球差随折射率的变化规律	126
5.5.3	物位于无限远时光瞳在透镜上的彗差规律	127
5.5.4	孔径光阑远离单透镜的彗差规律	128
5.5.5	像散随孔径光阑位置的变化规律	131
5.6	平行平板引入的像差讨论	133
5.6.1	平行玻璃板的初级像差公式	133
5.6.2	倾斜平行玻璃板引起像散的校正方法	136
5.7	光学系统消场曲的条件	137
5.7.1	正、负光焦度远离的薄透镜系统	137
5.7.2	弯月形厚透镜	138
5.7.3	消场曲条件典型应用	138
	复习题	139
第6章 衍射成像与像质评价		140
6.1	衍射成像及基本概念	140
6.1.1	衍射成像	140
6.1.2	成像基本概念	142
6.2	综合像质评价指标	146
6.2.1	波像差与像差容限	146
6.2.2	斯特列尔值	147
6.2.3	调制传递函数	148
6.2.4	点列图	152
6.3	像差容限	153
6.4	天文光学中的椭率	153
	复习题	155
第7章 玻璃库与玻璃的选择		156
7.1	材料特性概述	156
7.2	玻璃图和部分色散	158
7.3	玻璃牌号的命名规律与折射率特征	161
7.4	玻璃选择的参数化范例	161
7.5	选择玻璃的方法	165
7.5.1	可用性	165
7.5.2	光谱透射性	166
7.5.3	应力双折射对折射率的影响	166
7.5.4	化学特性	166
7.5.5	热膨胀特性	166
7.6	塑料光学材料	167

7.7 红外材料	168
7.7.1 锗	170
7.7.2 硅	171
7.7.3 硫化锌	171
7.7.4 硒化锌	172
7.7.5 AMTIR I 和 AMTIR III	172
7.7.6 氟化镁	172
7.7.7 蓝宝石	172
7.7.8 三硫化砷	172
7.7.9 其他可用材料	172
7.8 高折射率的红外材料有利于降低像差的讨论	173
复习题	175
第8章 透镜分裂与组合	176
8.1 透镜分裂的理论依据	176
8.2 光刻投影系统	179
8.3 干涉仪光学系统	180
8.4 透镜的组合	183
复习题	183
第9章 像差精准控制方法的应用实践	184
9.1 特殊像差控制要求的物镜设计	184
9.1.1 目标像差不为0的望远物镜设计	184
9.1.2 高级像差精准控制的物镜设计	187
9.1.3 多组分系统的分组独立像差校正设计方法	190
9.2 物方远心光路的无限筒长显微物镜与管镜设计	195
9.2.1 显微物镜的特点	195
9.2.2 物方远心无限筒长物镜设计举例	196
9.2.3 远心光路定义	198
9.2.4 管镜设计	199
9.2.5 物镜与管镜合成	200
9.3 光瞳外置光学模拟器与目镜设计	200
9.3.1 光瞳外置的光学模拟器设计	201
9.3.2 光瞳外置的目镜设计	202
9.3.3 凯涅尔目镜设计	206
复习题	208
第10章 照明系统的设计	210
10.1 照明系统的基本概念	210

10.2	阿贝照明和柯勒照明	211
10.3	光学不变量和面角积	212
10.4	太阳模拟器匀光系统的设计	214
10.5	其他类型的照明系统	216
	复习题	217
第 11 章	自由曲面光学设计	218
11.1	自由曲面定义方法	218
11.1.1	正交多项式	219
11.1.2	非正交多项式	226
11.1.3	局部面型可控的函数	227
11.1.4	离散数据点表征的数值化正交多项式	229
11.2	自由曲面初始结构的生成方法	231
11.2.1	基于专利数据库或已有系统优化	231
11.2.2	对同轴结构做离轴化处理	232
11.2.3	直接设计法	235
11.2.4	基于无像差点曲面的微区分段拼接融合方法	239
11.3	自由曲面光学系统的优化方法	245
11.4	自由曲面光学系统的设计实例	247
11.4.1	自由曲面光谱仪的优化设计	247
11.4.2	自由曲面两反远心扫描镜的优化设计	258
	复习题	265
第 12 章	新型光学系统设计方法	266
12.1	消色差衍射光学元件设计	266
12.1.1	衍射光学元件工作原理	266
12.1.2	等效非球面相位	268
12.1.3	色散	268
12.1.4	消色差折衍混合透镜设计	269
12.2	消球差衍射光学元件设计	273
12.3	超透镜设计	277
12.3.1	简介	277
12.3.2	超透镜的设计流程	279
12.3.3	超透镜设计实例	279
12.4	宽光谱大数值孔径平场复消色差物镜设计	281
12.4.1	设计指标	282
12.4.2	光焦度分配方案	282
12.4.3	初始结构确定	283
12.4.4	优化设计结果	289

12.4.5	设计结果对比与讨论	293
12.4.6	公差分析	294
12.4.7	设计总结	299
12.5	大视场胶囊物镜的拼接融合型光学设计方法	300
12.5.1	双通道大视场紧凑型成像系统的结构选型	300
12.5.2	环形拼接 Q 非球面的定义及其特征	303
12.5.3	胶囊内窥镜物镜系统的光学设计	305
12.5.4	设计总结	317
12.6	基于视场分割的同心球内窥镜设计方法	317
12.6.1	基于视场分割的阵列面型设计理念	318
12.6.2	基于同心球内窥镜的设计指标	319
12.6.3	双层同心球结构的求解	319
12.6.4	基于视场分割的微透镜阵列系统设计	323
12.6.5	多环带 Q 非球面视场拼接设计方法	328
12.6.6	多环带 Q 非球面视场拼接设计结果与评价	332
12.6.7	设计总结	335
	复习题	335
	参考文献	337

第 1 章

绪 论

1.1 我国成像光学的发展与动力

近 30 年来我国科学技术与基础工业水平发生了翻天覆地的变化。1989 年在光学行业，做一个实验或设计光学系统，首先，没有普及的光学设计软件与仿真软件，虽然我国光学设计前辈潜心研发，形成了具有代表性的光学设计软件包产品，如：国内长春光机所第四研究所的翁志成先生领衔，与兄弟单位合作，研制出代表性的光学设计软件包 CAOD；北京理工大学的袁旭沧先生领衔研制了 SOD88 光学设计软件包，南京理工大学的孙培家先生领衔研制了 OP 光学设计软件包。这些软件包，形成了具有自主知识产权的国产光学设计软件包鲜明特色，也被销售到一定数量的国内光学企业与科研单位。到 20 世纪 90 年代末，由于多种原因，特别是国内没有充分认识到仿真与设计软件包的价值，后期投入不足，逐步被国外软件包冲散，目前基本消失。其次，要外购实验用的透镜组，没有现在的线上平台，产品目录少且不具备优选条件，如通过设计加工，由于没有现代化的先进工艺与制造装备，成本极高、周期较长。最后，手工设计时光线追迹计算量大，需要设置另一套复核计算，相互验证后，才能放心使用。

现今的光学工程领域百花齐放，我国的先进制造技术，工艺先进，门类众多，制造能力表现在口径小到亚毫米的医用内窥镜头，毫米级的手机镜头、显微镜组，大到几米或数十米级的大型望远镜主镜，都有配套的制造基础，使得我国光学工程领域大型光学工程项目如雨后春笋，一个接一个地应运而生，人们耳熟能详的有：嫦娥探月工程、“神光”系列、LAMOST 望远镜、神舟光学载荷，刚刚命名的“天问”火星探测项目，等等。光学工程领域的设计与仿真软件方面，尽管几乎被国外软件商垄断，但与 30 年前相比，已从国内少见的小型局域网 VAX-II 上的 CODE V，发展到几乎遍及国内光学企业的个人机版光学设计软件包 ZEMAX、CODE V、OLSO，同时用于照明或杂光分析的 ASAP、TracePro、LightTool、Fred 等软件包界面友好，方便使用。

当今世界，已经进入信息革命的时代，人工智能、远程医疗、无人驾驶等高科技产品已经与人类生活息息相关，光学系统是信息获取与传输的前端，一些超薄型、平面型、功能融合型新概念光学镜头不断涌现，体现出国民经济诸多行业对光学工程的专业人才需求强劲而面广。我国战略层面上的“核高基”“高分”“集成电路”专项，引领着包括光学行业在内的发展方向。国内光学产业，已经形成了具有代表性的几个高端光学产业集群，如：面向以

手机模组、显微模组、内窥模组等行业需要的微小光学组件制造的产业集群；面向智慧城市/家居、数码科技、基因测序、车载导航等行业需要的中等尺度光学组件制造的产业集群；面向新一代天文观测、航天相机、超短波光刻投影等领域需要的大口径光学组件产业集群。高等院校、科研院所与光学企业的功能定位逐步清晰：前者致力于新概念、变革性方面的基础研究，为光学企业做好新一代产品的技术储备；后者在解决产品定型的批量化制造工艺问题之后，密集扫描式追踪前者的前沿研究成果，为光学企业的产品转型升级寻觅超前的研发方向，做到“储备一代、研制一代、生产一代”之间的良性循环。国内新兴高科技企业，如华为、瑞声等大型公司与诸多研究团队的联系频繁而紧密。

国内光学产业的发展模式百花齐放，不再出现 20 年前的产品单一、热衷于为国外大公司做利润微薄的代工、对外贸大宗订单竞相压低单价而相互倾轧等怪异现象。现在的发展模式创新，如：由元件制造向兼顾核心部件、整机研发推进；或致力于小批量高端光学产品的订制型设计与研发，响应速度快；或面向于高等院所科研领域的单件但科技含金量高的实验/试验需求，等等。

以上格局变化与发展模式，对包括光电信息科学与工程专业或光学工程专业在内的研究与开发技术人才培养模式提出了更高的要求，要求我们既具有扎实的理论基础，具有基础研究的能力，具有鉴赏基础研究成果的敏锐洞察力，也要具备对理论知识的实用能力，才能满足光学行业“前瞻性、变革性、创造性”的发展需求。

1.2 成像光学的“像”信息本质

我国光学、光学工程事业的开拓者王大珩先生说过“光学老又新，前程端似锦”。众所周知，光信息的传输，离不开光波三要素，即振幅 A （或强度 $I = E \cdot E^*$ ）、相位（时间相位 ωt 、空间相位 $k \cdot z$ ），光波的数学表达式如式（1-1）所示：

$$E = A \exp(k \cdot z + \omega t) \quad (1-1)$$

式中， E 为光波的电场矢量； A 是光波的振幅； $\exp(k \cdot z + \omega t)$ 括号内表示光波的空间相位和时间相位，光波的频率为 ω ，波矢量为 k ，光波在空间的位置矢量为 z 。

常见的探测器与人眼感知的一般是光信息中的强度，光波强度随时间的变化频率很高，现有探测器难以达到如此高的频响，因此在时间尺度上，探测器感知的是平均强度。如果要感知偏振、相位信息，必须借助于器件，并经过精心设计。图 1-1 (a) 是常见强度图，依赖于强度信息，湖中的游船与环境对比，衬度不明显，不利于游船目标的显现；图 1-1 (b) 给出同样目标的图信息，由于精心安排偏振器件，得到了游船与背景的偏振信息差别，使得游船目标在背景中凸显；同样，图 1-1 (c) 也是强度图，图 1-1 (d) 通过偏振处理，可以凸显目标的纹理。

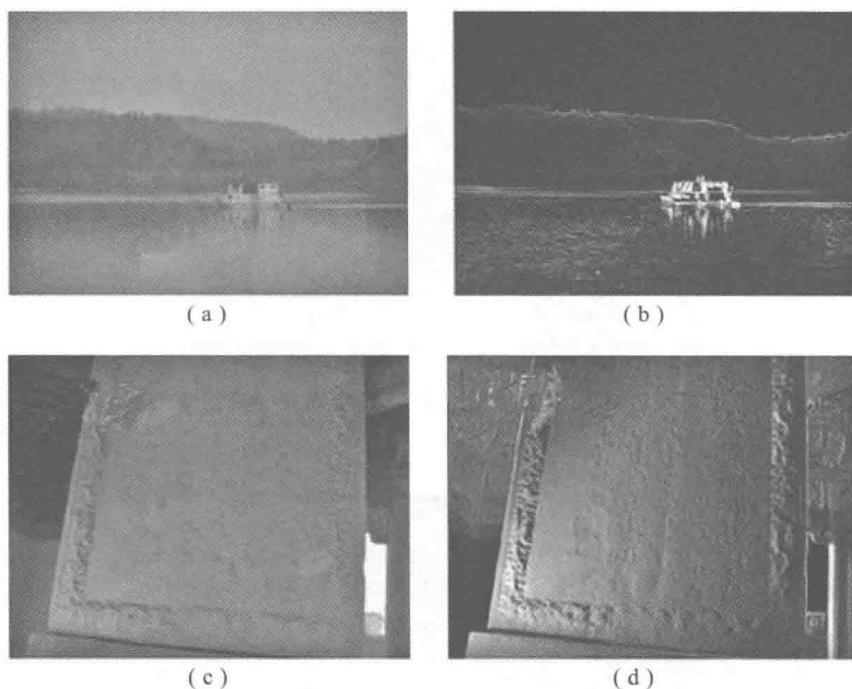


图 1-1 强度图与偏振度合成图效果对比

(a) 常见的信息图；(b) 通过偏振，目标显现；(c) 强度图；(d) 通过偏振凸现目标的纹理

1.3 成像光学系统的发展动态

按照对光波信息三要素的探测方式，现有光学系统可以归结为对强度直接成像系统、聚能系统、干涉（相位）成像系统、偏振成像系统。信息探测的重点不同，系统设计时的考虑要点也不同。

1.3.1 强度直接成像光学系统的几个重要发展动态

对光波强度直接成像的光学系统，实例很多，几乎是传统成像光学的不二代表。在国际上，1948年，口径5m的海尔望远镜在美国帕洛玛落成。1978年，口径6m的望远镜安装在苏联北高加索泽廖丘斯卡亚村附近的帕斯图霍夫山，当时被称为天文仪器中的“恐龙”。1990年4月25日清晨，在美国肯尼迪航天中心发射升空的口径2.4m哈勃空间光学望远镜（Hubble Space Telescope, HST），是人类第一架太空望远镜。由18块六边形组成的直径6.5m总镜面 25m^2 的新一代太空望远镜——詹姆斯-韦伯空间望远镜（James-Webb Space Telescope, J-WST），耗资100亿美元，经历了20多年建造，于2021年12月25日升入太空。图1-2是哈勃空间望远镜主镜与詹姆斯-韦伯空间望远镜主镜的比较示意图。图1-3是詹姆斯-韦伯空间望远镜将在太空运行的雄姿效果图。不仅如此，人类为了寻找另一个地球，由美国亚利桑那大学司徒沃特天文台制镜实验室正在抛光的8.4m凹面镜，将由这样的7块镜面组成呈现菊花瓣形状展开的大麦哲伦超级望远镜，2016年安装在南美洲智利，被称为“一场史无前例的豪赌”。