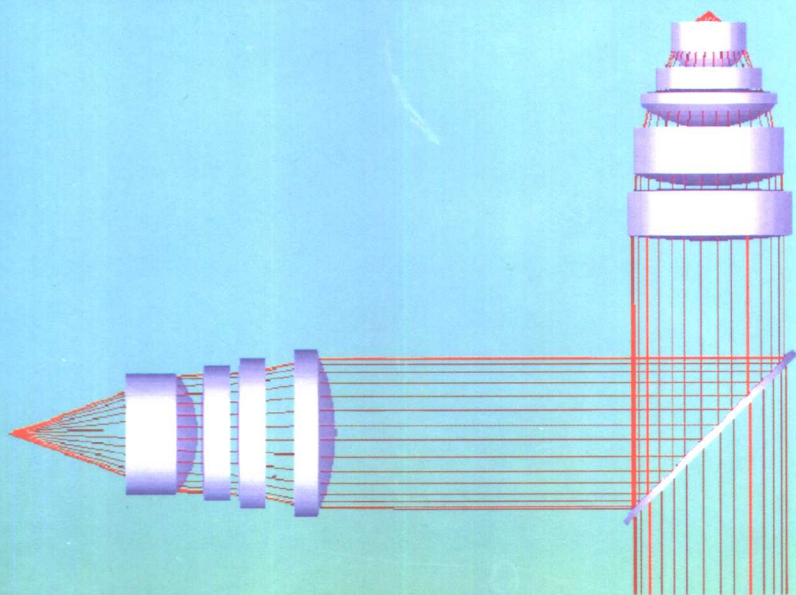


计算机辅助光学设计 的理论与应用

李林 安连生 编著

Theory and Application of Computer Aided Optical Design



国防工业出版社

计算机辅助光学设计 的理论与应用

Theory and Application of Computer
Aided Optical Design

李 林 安连生 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

计算机辅助光学设计的理论与应用 / 李林, 安连生编
著. —北京: 国防工业出版社, 2002. 4

ISBN 7-118-02699-9

I. 计... II. ①李...②安... III. 光学系统 - 计算机辅助设计 IV. TH740.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 077373 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{1}{4}$ 245 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

11/20/09

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员 (以姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

光学设计是 20 世纪发展起来的一门学科,在近 40 年的发展过程中,经历了由人工计算像差、人工修改结构参数进行设计到使用电子计算机和光学自动设计程序进行设计的巨大飞跃。目前,计算机辅助设计 CAD 在光学设计中应用已相当普遍,人们已经研制出功能比较完善的光学设计 CAD 软件。利用光学设计 CAD 软件,不仅节省了大批劳动力,缩短了设计周期,同时也使人们有可能设计出质量更高、结构更简单的新型光学系统。

然而,光学设计是一门专业知识领域相对来说比较狭窄的学科。对于一个现代的光学设计工作者来说,一方面要求他牢固地掌握光学设计的像差理论知识;另一方面又要求他在设计实践中不断地积累经验,掌握各种各样光学系统的像差特性和设计方法,而且还需要具有熟练的计算机操作和软件使用能力。所有这些要求使得光学设计比较难以掌握,它是一门非常专业的学科。光学设计 CAD 软件不同于一般的通用计算机软件,要熟练成功地运用光学设计 CAD 软件,使用者不仅需要扎实的专业知识和丰富的实际经验,而且还需要对软件的功能、数学模型及使用对象有充分的了解。现在,已经有不少关于光学设计像差理论的专业书籍,而有关光学设计 CAD 软件的数学模型及编程特点的书籍却几乎是一个空白,人们使用光学设计 CAD 软件,只能从软件的使用说明书中粗略地了解一些程序的原理及使用方法。这使得很多使用者不能充分利用软件所提供的功能,不能物尽其用,在使用中出现各种各样的问题也无法很好地解决。本书正是希望弥补这方面的缺陷,目的是要使读者了解光学设计 CAD 软件的数学模型和编程特点,使得在使用这些软件时能够做到心中有数,准确、充分地应用

软件所提供的各种功能,同时,对使用中出现的问題能够熟练自如地进行解决。

本书主要结合北京理工大学光电工程系技术光学教研室研制的微机用光学设计软件包 SOD88 来编写。虽然主要以 SOD88 中的软件来讨论,但由于不同的光学设计软件虽有差别,却都具有其基本共同点,因此本书仍具有普遍性。本书编写的特点是尽可能详细地介绍各软件的数学模型和编程特点,给出重要的流程图及重要的公式,针对该软件给出一具体的设计例子,同时对设计结果进行分析及必要的评价。这样,读者不光能够了解软件的数学模型和编程特点,而且能够应用所提供的公式自己进行编程,满足某些读者的特殊科研要求。

本书除了介绍典型的光学设计原理与程序外,还结合作者的科研成果,介绍目前光学设计中的最新动态,例如光学自动设计中的全局优化、光学系统的环境温度分析与无热设计等。本书内容基本上可以分为 6 个部分。第一部分是光学系统的像质评价,这是设计一个光学系统所必备的基础知识。在这部分里,首先详细地介绍了最常用的几何像差及相应的计算程序;然后,介绍了另一个重要的像质评价指标——光学传递函数,讨论了两种光学传递函数程序的特点与使用方法。第二部分是光学自动设计的原理与程序;介绍了适应法和阻尼最小二乘法这两种常用的光学自动设计程序的特点和使用方法。第三部分是变焦距系统的原理与程序,讨论了变焦距系统的像差计算与自动设计问题。第四部分是光学系统的公差分析与计算,介绍了公差分析计算软件的原理与编程特点。第五部分是光学系统的环境温度分析与无热设计,讨论了环境温度对光学系统的影响及无热设计的原理与程序。第六部分是典型光学系统设计,应用所介绍的光学设计程序对望远系统、显微物镜和照相物镜等进行了实际设计,并对所设计的例子进行了像质评价。对于应用光学和光学设计中的有关内容,本书直接引用,不再详细讨论,同时我们还假定读者已经基本掌握了这些有关知识,因为本书的前期必备知识就是应用光学和光学设计。

本书可作为从事光学设计和光学设计软件研制专业人员及高等院校光学专业师生的参考书。

本书第1,2,3,5,6章由李林负责编著,第4,7,8章由安连生负责编著,并对全书进行了总体审查。北京理工大学袁旭沧教授从20世纪70年代就开始进行光学设计计算机程序的研制,他领导的包括作者在内的科研组成功研制了国内应用最为广泛的SOD88光学设计软件包,本书中很多地方都直接或间接地受益于袁旭沧教授的研究成果;王学良、赵瑜、麦绿波、熊景杰、崔桂华、王煊等同志在硕士论文中所做的工作对本书的完成起了重要作用;作者所在教研室的全体教师及其他许多同志也给予了很大支持,在此一并表示衷心的感谢!清华大学教授、中国科学院院士金国藩先生和北京邮电大学教授徐大雄先生在百忙中审阅了全稿,对本书给予了高度的评价,并提出了宝贵的意见,在此也特向两位尊敬的前辈表示衷心的感谢。

计算机辅助光学设计是一门新兴的学科,它还将不断发展,本书中介绍的内容可能会有不少缺点错误,欢迎读者批评指正。

作者

于北京理工大学



李林，男，汉族，1957年11月生，四川资阳人。北京理工大学光电工程系教授，博士生导师。1984年研究生毕业于北京工业学院工程光学系，并留校任教，从事教学和科研工作。长期担任本科生及研究生的教学任务，多次获教学优秀奖，主编或合编了4本著作，在国内外发表了数十篇学术论文。主持参与并完成了30多项重要科研项目，获得国防科学技术一等奖1次、三等奖1次，兵器工业总公司部级二等奖1次、三等奖2次。主要研究领域为光学系统设计，光电仪器设计，光学系统检测，光学CAD软件研制，照明光学系统研究，光引擎研究。现为全国光学和光学仪器标准化技术委员会委员，中国光学学会会员，中国兵工学会会员，SPIE会员，中科院长春光学精密机械与物理研究所学报《光学精密工程》编委。

16/76/04



安连生，男，汉族，1941年10月生，河北唐山人。北京理工大学教授。1964年毕业于北京工业学院工程光学系，并留校任教，多年从事光学系统设计与检验及光学工程领域的教学和科研工作，现为北京理工大学光电工程系主讲教授。参与和主持了20余项科研课题，涉及航天遥感、红外热成像、飞行仿真、光电仪器设计等众多领域。获国家科技进步三等奖1次，国防科学技术一等奖1次及多项部级奖。参与或主编了7本教材和辞典，撰写论文20余篇。现担任中国照明学会理事，中国照明学会电影电视和舞台照明专业技术委员会委员，交通运输照明和光信号专业技术委员会委员，中国兵工学会光学学会委员，中科院长春光学精密机械与物理研究所学报《光学精密工程》编委，《光学技术》杂志编委等社会兼职。

目 录

第 1 章 光学系统像质评价	1
1.1 概述	1
1.2 光学系统的坐标系统和基本参数	2
1.2.1 坐标系统和基本量的符号及符号规则	2
1.2.2 共轴光学系统的结构参数	3
1.2.3 光学系统的特性参数	5
1.3 几何像差的定义及其计算	9
1.3.1 光学系统的色差	10
1.3.2 轴上像点的单色像差	11
1.3.3 轴外像点的单色像差	13
1.3.4 高级像差	17
1.4 垂轴像差的概念及其计算	19
1.5 几何像差计算程序的输入数据与输出数据	21
1.5.1 基本输入数据	21
1.5.2 基本输出数据	22
1.6 几何像差曲线及垂轴像差曲线	27
1.6.1 轴上点的球差和轴向色差曲线	27
1.6.2 正弦差曲线	27
1.6.3 畸变和垂轴色差曲线	28
1.6.4 像散曲线	28
1.6.5 轴外点子午球差和子午彗差曲线	29
1.6.6 子午垂轴像差曲线	31
1.6.7 弧矢垂轴像差曲线	33
1.7 典型光学系统的像差公差	35
1.7.1 望远物镜的像差公差	36
1.7.2 望远系统的像差公差	36

1.7.3 显微物镜的像差公差	37
1.7.4 照相物镜的像差公差	37
1.8 光线追迹子程序及其流程图	38
第2章 光学传递函数计算	47
2.1 概述	47
2.2 光学传递函数的基本概念和基本公式	48
2.2.1 线性和空间不变性	49
2.2.2 空间不变线性系统的成像性质	50
2.2.3 光学传递函数	51
2.2.4 用光学传递函数表示实际光学系统的成像质量	54
2.2.5 白光光学传递函数的计算	54
2.3 两次傅里叶变换光学传递函数的计算	57
2.3.1 利用样条函数插值法计算波像差	59
2.3.2 确定光束截面通光域	65
2.3.3 利用快速傅里叶变换法计算光学传递函数	66
2.4 自相关法光学传递函数的计算	71
2.4.1 计算实际出瞳的形状	72
2.4.2 计算波像差函数	73
2.4.3 在出瞳规化成单位圆时的光学传递函数计算公式	74
2.4.4 积分方法	77
2.4.5 程序流程图	78
第3章 光学像差自动校正程序及自动设计问题	79
3.1 概述	79
3.2 多元函数的极值理论	81
3.3 光学自动设计的数学模型	84
3.3.1 用像差算法求像差对结构参数的差商	88
3.3.2 建立像差线性方程组	89
3.3.3 求解像差线性方程组	89
3.3.4 按一定的步长修改光学系统	90
3.3.5 判断结束条件	90
3.4 阻尼最小二乘法光学自动设计原理	90
3.4.1 最小二乘法	91

3.4.2	阻尼最小二乘法	92
3.4.3	阻尼最小二乘法光学自动设计程序评价函数的构成	93
3.4.4	阻尼最小二乘法光学自动设计程序阻尼因子的选择	100
3.4.5	阻尼最小二乘法光学自动设计程序边界条件的确定	105
3.4.6	阻尼最小二乘法光学自动设计程序的特点	108
3.5	适应法光学自动设计原理	112
3.5.1	适应法光学自动设计的数学原理	112
3.5.2	适应法光学自动设计程序的像差参数、约束条件和边界条件	114
3.5.3	适应法光学自动设计程序像差方程组的建立和求解	118
3.5.4	适应法光学自动设计程序的线性检查、步长控制和边界条件确定	127
3.5.5	适应法光学自动设计程序的像差校正与适应过程	129
3.6	光学自动设计的全局优化	137
3.6.1	模拟退火法	138
3.6.2	随机抽样法	140
3.6.3	区间穷举法	141
3.6.4	逃逸函数法	142
3.6.5	人工神经网络技术	144
3.7	光学自动设计实例	150
3.7.1	使用阻尼最小二乘法光学自动设计程序设计成像物镜	150
3.7.2	使用适应法光学自动设计程序设计双胶合望远物镜	154
第4章	变焦距系统设计	158
4.1	引言	158
4.2	变焦距系统的构成与分类	158
4.2.1	用双透镜组构成变倍组	163
4.2.2	由负前固定组和正变倍组构成的低倍变焦距系统	165
4.2.3	由前固定组、负变倍组、负补偿组和后固定组构成的变焦距系统	165
4.2.4	由前固定组、负变倍组和正补偿组构成的变焦距系统	167
4.2.5	由前固定组、负变倍组和正变倍组构成的变焦距系统	167
4.3	变焦距系统设计实例	169

4.3.1	确定结构型式和高斯光学计算	169
4.3.2	像差校正	174
4.4	变焦距系统程序的使用	175
4.4.1	变焦距系统像差计算程序	175
4.4.2	变焦距系统适应法自动设计程序	176
第5章	光学系统的公差分析与计算	178
5.1	概述	178
5.2	光学系统的公差设计中的评价函数	179
5.3	公差分析中的概率关系	185
5.3.1	线性概率误差的基本公式	185
5.3.2	加工工艺平衡权因子的确定	188
5.4	公差设计中的随机模拟检验	194
5.4.1	蒙特卡洛方法的基本思路	194
5.4.2	调整装配过程的模拟	197
5.5	公差设计中的偏心光路追迹	201
5.5.1	空间面倾斜和顶点偏心的坐标变换法	202
5.5.2	顶点偏心的坐标变换	205
5.5.3	偏心球面光路追迹	207
第6章	环境温度分析与无热设计	214
6.1	概述	214
6.2	均匀温度变化对光学系统成像质量的影响	217
6.2.1	单个透镜的温度效应	217
6.2.2	空气折射率温度效应分析	218
6.2.3	透镜组合的温度效应	222
6.3	径向梯度温度对光学系统成像质量的影响	222
6.3.1	光学系统中的径向温度分布	222
6.3.2	径向温度梯度对光学系统像质的影响	226
6.4	光学系统的无热设计	229
6.4.1	均匀温度变化下的无热设计	230
6.4.2	径向温度梯度分布下的无热设计	233
6.5	热效应分析的光学设计软件	237
6.5.1	软件的主要功能	238

6.5.2	非均匀介质中的光线追迹	240
6.5.3	温度分布函数的拟合	242
6.5.4	径向温度梯度分布介质中的光线轨迹	242
6.5.5	径向温度梯度分布中的透镜面形的拟合	245
第7章	其它计算机辅助设计程序	250
7.1	玻璃数据库程序	250
7.2	出图计算程序	253
7.3	半径和厚度标准化程序	260
第8章	典型光学系统的设计方法	264
8.1	薄透镜系统的初级像差理论	264
8.2	望远物镜的设计方法	267
8.3	目镜的设计方法及物镜与目镜的像差补偿	271
8.4	显微物镜的设计方法	278
8.5	照相物镜的设计方法	282
参考文献		287

Contents

Chapter 1 Image Quality Criteria on Optical Systems	1
1.1 Introduction	1
1.2 Coordinate System and Basic Data of Optical System	2
1.2.1 Symbols and Sign Conventions of the Coordinate System and Basic Data	2
1.2.2 Construction Data of Coaxial Optical System	3
1.2.3 General Data of Optical System	5
1.3 Definition and Computation of Geometric Aberrations	9
1.3.1 Chromatic Aberrations of Optical System	10
1.3.2 Monochromatic Aberrations of the Image Point on Axis	11
1.3.3 Monochromatic Aberrations of Image Points off Axis	13
1.3.4 Higher Order Aberrations	17
1.4 Concept and Computation of Lateral Aberrations	19
1.5 Input and Output Data of Geometric Aberrations Computation Program	21
1.5.1 Basic Input Data	21
1.5.2 Basic Output Data	22
1.6 Curves of Geometric and Lateral Aberrations	27
1.6.1 Curves of Spherical Aberration and Axial Chromatic Aberrations for Axial Point	27
1.6.2 Curve of Sine Aberration	27
1.6.3 Curves of Distortion and Lateral Chromatic Aberrations	28
1.6.4 Curve of Astigmatism	28