

Contemporary Optical System Design

C
ontemporary Optical System Design

现代光学系统设计

■ 王文生 等著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

现代光学系统设计

Contemporary Optical System Design

王文生 牟 达 陈 宇 著
苗 华 霍富荣 向 阳



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书针对光学工程专业、测控技术和仪器专业的高年级本科生、研究生和从事光学设计的工程师等科技人员的需求著写。全书共分12章,包括:光学系统自动设计,光学系统的像质评价,非球面及其在现代光学系统中的应用,衍射光学元件DOE及其在现代光学系统中的应用,梯度折射率透镜及其在现代光学系统中的应用,红外光学系统设计,紫外告警光学系统设计,投影光学系统设计,傅里叶变换光学系统设计,激光扫描光学系统设计,变焦光学系统设计和太赫兹光学系统设计。

图书在版编目(CIP)数据

现代光学系统设计/王文生等著. —北京:国防工业出版社, 2016.1
ISBN 978-7-118-10551-3

I. ①现… II. ①王… III. ①光学系统—系统设计 IV. ①TH740.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第271898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 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 406 千字

2016年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 79.00元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

本书针对光学工程专业、测控技术和仪器专业的高年级本科生、研究生以及从事光学设计的工程师等科技人员的需求著写。

本书具有以下特点：

(1) 各章所列举的光学系统均结合科研项目，且已在核心期刊以上公开发表或已申请相关专利，具有先进性。

(2) 内容丰富，涵盖非球面、二元面、梯度折射率透镜，从紫外、可见光、红外到太赫兹的所有波段，从定焦到变焦，从单波段到双波段，从红外非制冷到无热化。

(3) 各章所列举的光学系统均是根据设计的光学参数，进行像差分析，提出设计思想，并给出设计真实结果，数据翔实具体，具有实用性。

(4) 各光学系统均论述了光源、材料、探测器和镜头设计，使系统满足光谱匹配、分辨率匹配和视场匹配等原则，具有系统性。

(5) 以最通用的先进光学设计软件 ZEMAX 设计，并给出相关的注意事项。

本书第 1、2、11 章由王文生教授编撰，第 3、7 章由陈宇副教授和王文生教授编撰，第 4、12 章由霍富荣博士、王文生教授编撰，第 5 章由向阳教授、王文生教授编撰，第 6、8 章由牟达副教授、王文生教授编撰，第 9、10 章由苗华副教授、王文生教授编撰。全书由王文生教授统一编审。朱海宇、张鸿佳、周子楠、蓝岚、郭晓明、牟蒙等同志为本书的绘图、校对做了大量工作。

在本书出版之际，教研组要向所有为本书所引入的研究成果做过贡献的张宇博士、郭俊博士、陈方涵博士、李全勇博士、徐春云博士、郭阳雪博士以及王刚、李正、于远航、马永利、刘文哲、王晶晶、王波、王冕、郎琪、邹昕、赵翠玲、张露、徐悦、闫静、王梓萤、王海燕、林丽娜、宋姗姗、刘莹莹、金爱华、齐明、董家宁、杜玉楠、李洋、朱海宇、张鸿佳、蓝岚和周子楠等科研团队和其他同志表示衷心感谢。正是他们不懈的努力和卓越的研究成果，才使本书的理论与设计紧密结合，才使所讨论的方法具有实用性和先进性。

尽管教研组力求使本书内容更为全面、系统，但难免存在欠妥或错误之处，恳请读者批评指正。

长春理工大学“现代光学系统设计”教研组
2015 年 6 月 25 日于长春

目 录

第 1 章 光学系统自动设计	1
1.1 引言	1
1.2 像差的非线性	2
1.3 阻尼最小二乘法	2
1.4 ZEMAX 的优化函数和权	4
1.5 ZEMAX 优化设计的几点讨论	5
参考文献	8
第 2 章 光学系统的像质评价	9
2.1 成像光学系统	9
2.1.1 光学传递函数	9
2.1.2 相对畸变	15
2.2 非成像光学系统	16
2.2.1 点列图	16
2.2.2 点扩散函数	18
2.2.3 衍射/几何能量曲线	19
参考文献	19
第 3 章 非球面及其在现代光学系统中的应用	21
3.1 非球面像差	21
3.1.1 非球面应用概述	21
3.1.2 非球面数学模型	21
3.1.3 非球面的光路计算及像差特性	22
3.1.4 非球面应用举例	24
3.2 斯密特卡塞格林系统设计	26
3.2.1 卡塞格林系统简介	26
3.2.2 斯密特卡塞格林系统初始结构选取	27
3.2.3 斯密特卡塞格林系统优化	29
3.3 带有非球面的透射式红外摄远物镜设计	31
3.3.1 透射式球面红外摄远物镜	31
3.3.2 加入非球面简化物镜结构	33
3.4 ZEMAX 非球面设计的几点讨论	36
3.4.1 ZEMAX 有关 Conic 数值的注意事项	36
3.4.2 最佳非球面位置的选择	38

3.4.3	矢高数据的查询	38
	参考文献	39
第4章	衍射光学元件 DOE 及其在现代光学系统中的应用	40
4.1	衍射光学元件及其特性	40
4.2	ZEMAX 二元光学元件的设计及评价	46
4.3	带有衍射光学元件的长焦距平行光管设计	50
	参考文献	58
第5章	梯度折射率透镜及其在现代光学系统中的应用	60
5.1	梯度折射率透镜及其特性	60
5.1.1	梯度折射率光学概述	60
5.1.2	梯度折射率介质中的光线追迹	61
5.1.3	径向梯度折射率	61
5.1.4	梯度折射率光学系统像差	64
5.2	基于梯度折射率透镜的管道内窥镜设计	66
5.2.1	总体设计方案	66
5.2.2	显微物镜的设计	67
5.2.3	梯度折射率透镜设计	68
5.2.4	转像透镜与场镜设计	71
5.2.5	管道内窥镜系统优化	72
5.2.6	数值分析	75
5.3	基于阶跃型折射率透镜的医用内窥镜设计	76
5.3.1	光纤内窥镜工作原理	76
5.3.2	阶跃型光纤	77
5.3.3	光纤物镜	78
5.3.4	内窥镜物镜设计	81
	参考文献	84
第6章	红外光学系统设计	85
6.1	热辐射、红外材料及红外探测器	85
6.1.1	红外辐射概述	85
6.1.2	红外光学材料	86
6.1.3	红外探测器	88
6.2	非制冷型红外成像系统	91
6.2.1	红外光学系统的结构形式	91
6.2.2	红外光学系统设计的特点	92
6.3	非制冷型红外导弹导引头光学系统设计	93
6.3.1	初始结构的选取	93
6.3.2	设计过程的分析	94
6.4	红外双波段共光路摄远物镜设计	99
6.4.1	双波段红外光学系统结构形式的选取	100

6.4.2	红外双波段光学系统的像差校正	101
6.4.3	双波段红外摄远物镜优化实例	101
6.5	红外长波无热化摄远物镜设计	106
6.5.1	温度变化对光学系统的影响	106
6.5.2	光学系统无热化设计方法	107
6.5.3	光学系统无热化设计原理	108
6.5.4	红外长波无热化摄远物镜设计实例	110
6.6	制冷型红外长波摄远物镜设计	118
6.6.1	冷光阑效率	118
6.6.2	二次成像系统结构	119
6.6.3	红外长波制冷型消热差摄远物镜设计实例分析	120
	参考文献	127
第 7 章	紫外告警光学系统设计	128
7.1	日盲紫外、紫外材料及紫外 ICCD	129
7.1.1	日盲紫外	129
7.1.2	紫外材料	130
7.1.3	紫外探测器	132
7.2	日盲紫外球面光学系统设计	135
7.2.1	系统初步优化	137
7.2.2	增大视场缩放焦距	139
7.2.3	增加变量扩大视场	141
7.3	日盲紫外折衍混合光学系统设计	143
7.3.1	视场 25°、相对口径 1:4 球面系统设计	144
7.3.2	视场 46°、相对口径 1:4 折衍混合光学系统设计	145
7.3.3	视场 46°、相对口径 1:3.5 折衍混合光学系统设计	148
7.3.4	几点讨论	153
	参考文献	154
第 8 章	投影光学系统设计	155
8.1	数字微镜阵列 (DMD)	155
8.1.1	DMD 的结构及工作原理	155
8.1.2	DMD 红外景象生成器光学系统的组成	157
8.1.3	基于 DMD 的红外投影技术的优点	158
8.2	特殊投影棱镜设计	159
8.2.1	分光棱镜的特点	159
8.2.2	分光棱镜的设计	159
8.3	红外双波段共光路投影系统设计	161
8.3.1	初始结构的选择	162
8.3.2	红外双波段系统的优化	165
	参考文献	168

第 9 章 傅里叶变换光学系统设计	169
9.1 傅里叶透镜	169
9.1.1 透镜的相位调制作用	169
9.1.2 透镜的傅里叶变换	171
9.1.3 傅里叶透镜类型	171
9.2 空间光调制器	172
9.2.1 光寻址液晶空间光调制器	173
9.2.2 电寻址液晶空间光调制器	174
9.3 傅里叶透镜设计的几点讨论	176
9.3.1 傅里叶变换透镜的截止频率	176
9.3.2 傅里叶透镜的信息容量	177
9.3.3 傅里叶变换透镜设计要求	178
9.4 双分离傅里叶变换透镜设计	179
9.5 双远距型傅里叶变换透镜设计	187
9.6 傅里叶变换透镜在联合变换相关器中的应用	191
9.6.1 光电混合联合变换相关器	191
9.6.2 光学试验装置	193
参考文献	195
第 10 章 激光扫描光学系统设计	196
10.1 光束扫描器和扫描方式	196
10.1.1 光束扫描器	196
10.1.2 扫描方式	198
10.2 $f\theta$ 透镜及像差要求	198
10.2.1 $f\theta$ 透镜的特性	198
10.2.2 $f\theta$ 透镜参数确定	199
10.3 前扫描光学系统设计	200
10.3.1 激光 $10.6\mu\text{m}$ 扫描透镜设计	200
10.3.2 激光 $0.65\mu\text{m}$ 扫描透镜设计	208
参考文献	215
第 11 章 变焦光学系统设计	217
11.1 概述	217
11.1.1 变焦原理	217
11.1.2 像差控制	217
11.1.3 最小移动距离	217
11.1.4 变焦镜头的分类	218
11.2 光学补偿法 $0.486\sim 0.656\mu\text{m}$ 2 倍变焦光学系统设计	222
11.3 机械补偿法红外 $8\sim 12\mu\text{m}$ 10 倍变焦光学系统设计	229
11.4 机械补偿 10 倍制冷型中波红外变焦物镜设计	233
11.5 变焦曲线及其绘制	249

参考文献	251
第 12 章 太赫兹光学系统设计	253
12.1 太赫兹、太赫兹材料及其探测器	253
12.1.1 太赫兹简介	253
12.1.2 太赫兹材料	255
12.1.3 太赫兹探测器	256
12.2 50~100 μm 太赫兹光学系统设计	261
12.2.1 初始结构确定及设计过程分析	261
12.2.2 像质评价	265
12.3 30~70 μm 太赫兹物镜设计	268
参考文献	273

第 1 章 光学系统自动设计

1.1 引言

目前国内外成像光学系统的自动设计 (Optical Automatic Design, OAD) 主要基于 ZEMAX 和 CODE V 两种软件, 二者各有其特点。ZEMAX 窗口简洁明了, 便于操作, 价格低, 使用更为广泛, 故本书以 ZEMAX 软件为基础, 讨论各种现代光学系统设计方法, 并给出用 ZEMAX 软件设计时的一些注意事项。

在光学系统自动设计中, 镜头的光学技术参数是作为光学优化函数 (Optical Optimization Function——Merit Function) 的指标给出的。设计者的目的是寻求透镜的参数, 例如面型 (球面、非球面、二元面及梯度折射率等)、半径、材料、厚度、间距, 以实现镜头的技术指标。

优化函数 (Merit Function, MF) 可以用某些像差的平方和描述。而在光学系统自动设计中, 像差分为线性像差和非线性像差。

线性像差 (Linear Aberrations) 是指光学镜头的外部参数 (External Parameters), 主要包括:

- (1) 物距 L (Object Distance);
- (2) 近轴像高 y' (Height of the Paraxial Marginal Image);
- (3) 视场 ω (Field of View);
- (4) 光阑位置 l_z (Position of Stop)。

非线性像差 (Nonlinear aberration) 是指光学镜头的内部参数 (Internal parameters), 主要包括:

- (1) 焦距 f' (Focal Length);
- (2) 放大倍率 β (Magnification);
- (3) 几何像差 (Geometrical Aberration);
- (4) 波像差 (Wavefront Aberration);
- (5) 单色像差 (Monochromatic Aberration);
- (6) 复色像差 (Polychromatic Aberration)。

优化函数的大小定义为这些像差的平方和, 其理论基于两点: 斯特里尔比 (Stretch Ratio) 和调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)。

(1) 斯特里尔比是像质评价的准则之一, 它是实际点扩散函数的强度极大值与无像差的点扩散函数的强度极大值之比^[1], 即

$$S.D = \frac{(PSF_{\text{real}})}{(PSF_{\text{ideal}})} \quad (1.1)$$

斯特里尔比取决于点扩散函数，而点扩散函数是波像差的平方，不是波像差的绝对值。

(2) MTF 是成像系统的更实际的评价准则，主要用于具有较大残余像差的扩展物体的像质评价。MTF 取决于一组与像差密切相关的平方项，即

$$\begin{aligned} \text{MTF}_x(f) &\propto \sum [1 - 2\sin^2(\pi f \delta\xi')] \\ \text{MTF}_y(f) &\propto \sum [1 - 2\sin^2(\pi f \delta\eta')] \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中： MTF_x 为 MTF 弧矢方向的实部； $\delta\xi'$ 为横向像差的 X 分量； MTF_y 为 MTF 子午方向的实部； $\delta\eta'$ 为横向像差的 Y 分量。

ZEMAX 的优化程序就是使 $\sum \sin^2(\pi f \delta\xi')$ 最小，从而使 MTF 最大。

1.2 像差的非线性

除几种特殊的非典型的情况外，光学系统的像差是设计参数的非线性函数，而这与所需要的光学系统设计的优化方法相悖，优化方法要求像差和设计参数是线性关系。

例如，一个面的三级球差系数是

$$s_i = \text{luni}(i - i')(i' - u) \quad (s_i \propto C^3)$$

因为入射角 i 是曲率 C 的线性函数，所以 S_i 正比于曲率 C 的立方。5 级球差系数与曲率的关系更复杂。一般来说，光学系统的像差与设计参数之间没有简单的关系，一般用隐函数表示，即

$$\begin{cases} F_1 = f_1(x_1 \cdots x_n) \\ F_m = f_m(x_1 \cdots x_n) \end{cases} \quad (1.3)$$

式中： $x_1 \cdots x_n$ 为设计参数 R 、 d 、 n 等； $F_1 \cdots F_m$ 为像差； m 为像差数； n 为变量数。

三级像差 (Third-Order Aberration) 也称作初级像差，一般情况下随透镜的参数变化相对较慢，而高级像差 (High-Order Aberration) 变化较快。在镜头设计中，这个事实用于预先优化过程。优化程序应该能够减少高级像差。

在优化设计中，一般采用线性近似 (Linear Approximation) 和渐次逼近 (Progressive Approaching)。给出变量 x 的增量 δ_x ，计算像差的增量 δ_f ，即

$$\begin{cases} x = x_0 + \delta_x \\ \delta_f = F - F_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

1.3 阻尼最小二乘法^[2-5]

光学系统自动设计通常采用两种方法，即阻尼最小二乘法 (Damped Least Squares Method) 和自适应法 (Adaptive Method)，而阻尼最小二乘法应用更广泛，其原因是：

(1) 阻尼最小二乘法能自然地确定镜头设计的优化函数为一组像差的平方和；

- (2) 对给定的设计参数，阻尼最小二乘法能自动地给出一组最佳的参数变化量；
 (3) 虽然像差是非线性函数，但接近最小时，像差可看作线性的（在通过优化函数最小值时，像差可以由正值变为负值）。

设光学系统的像差数大于变量数 ($m > n$)，例如有大约 100 个像差。实际上，这些像差通常乘以权因子 (Weighting Factor) 和一个非零的目标值 (Target Value)。

为了解决像差的非线性，利用泰勒级数展开式的一次项——像差相对于设计参数变量的一阶微分，即

$$a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$$

如果以矩阵形式表示像差，则像差可表示为

$$\begin{cases} F_1 = F_{01} + \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \cdots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}) \\ F_m = F_{0m} + \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \cdots + \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}) \end{cases} \quad (1.5)$$

式中： F_0 为初始像差； F 为目标值（像差期望值）； $x_{01} \cdots x_{0n}$ 为初始设计参数； $\Delta x_n = x_n - x_{0n}$ 为参数变换的增量； $\Delta F = F - F_0$ 为像差增量。

像差矩阵可表示为

$$A\Delta x = \Delta F$$

$$A = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{Bmatrix}$$

$$\Delta x = \begin{Bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{Bmatrix} \quad \Delta F = \begin{Bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{Bmatrix} \quad (1.6)$$

残余像差可表示为

$$\phi = A\Delta x - \Delta F \quad (1.7)$$

优化函数定义残差的平方，即

$$\psi = \phi^2 = \phi^T \phi = \sum_{i=1}^m \phi_i^2 \quad (1.8)$$

式中：T 为转置运算 (Transpose Operation)。

假设参数变换是线性的，那么按最小二乘法，优化函数应最小，即

$$\min \psi = \min \phi^2 = \min [A\Delta x - \Delta F]^T (A\Delta x - \Delta F)$$

令 $\nabla \psi = 0$ ，则有

$$\begin{aligned} \nabla \psi(\Delta x) &= 2A^T A\Delta x - A^T \Delta F - A^T \Delta F \\ &= 2(A^T A\Delta x - A^T \Delta F) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\therefore A^T A \Delta x - A^T \Delta F = 0 \quad (1.9)$$

X 的增量为

$$\Delta x = (A^T A)^{-1} A^T \Delta F \dots$$

这就是最小二乘法求得的变量 X 的增量。

然而, 由于高级像差变换慢, 参数增量 Δx 一般很大, 这样非线性限制了其适用范围, 参数变化的透镜仅有很小的优化函数。为了解决这个问题, 需对上述公式加阻尼因子 P , 即

$$\psi' = (\phi^2 + p^2 \sum \Delta x_i^2) = (A \Delta x - \Delta F)^2 + P^2 \Delta x^2 \quad (1.10)$$

即参数增量 Δx 的平方前乘以 P^2 。

对式 (1.10) 微分, 求极小值, 得新的优化函数为

$$(A^T A + P^2 I) \Delta x - A^T \Delta F = 0$$

式中: I 为单位矩阵, 其解为

$$\Delta x = (A^T A + P^2 I)^{-1} A^T \Delta F \quad (1.11)$$

这就是阻尼最小二乘法。

实际上, 不要求这样准确的求解。简单地选择阻尼因子值, 使优化函数最小, 这就意味着容许少许偏离上述公式。

阻尼最小二乘法的特点之一是, 用这种方法计算出的参数增量最小, 能使优化函数 MF 下降到最小。所以, 可以求出参数增量的大小。但是这并不重要, 它仅是基本方法的另一种形式。

1.4 ZEMAX 的优化函数和权^[6]

在 ZEMAX 软件中, 优化函数用 MF (Merit Function) 表示, 并表示为

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2 + \sum W_j (V_j - T_j)^2}{\sum W_i} \quad (1.12)$$

式中: V_i 为实际值; T_i 为目标值; W 为权因子。

\sum 和式中的 i 仅包括正数加权的运算, 而 \sum 和式中的 j 仅包括拉格朗日 (Lagrange) 乘数运算。拉格朗日乘数运算用于控制边界条件, 如果拉格朗日目标值都已满足, 那么运算对优化函数无影响。

拉格朗日乘数是确定一组边界条件, 它需要精确求解, 而其他控制 MF 的条件按最小二乘法求解。为了精确求出满足某边界条件的值, 例如精确控制物像距离, 可以求解

$$(A^T A + P^2 I) + B^T \lambda - A^T \Delta F = 0$$

$$(A^T A + P^2 I) + B^T \lambda - A^T \Delta F = 0$$

$$B \Delta X = e$$

式中： B 为一组微分矩阵； e 为一组数值的矢量； λ 为一组标量乘数的矢量。其解由 λ 和 Δx 矢量组成，但是仅 Δx 是准确的。

如果用 μ 表示权因子，优化函数可表示为

$$\psi = \sum_{i=1}^m (\mu_i \varphi_i)^2 \quad (1.13)$$

如果 μ 较大，则优化函数 ψ 将优先减小对应的像差。权可以表示为

$$\mu_i = (\mu_F, \mu_M) \quad (1.14)$$

式中： μ_F 为由程序给出的固定的权因子； μ_M 为由设计者给出的可变的权因子。

1.5 ZEMAX 优化设计的几点讨论^[6-9]

优化函数可以用多种不同形式的像差组成，具体取决于设计者的偏好、经验和应用。下面几点讨论，可以帮助设计者在设计时少走弯路。

1. 近轴特性

光学系统的最重要的近轴特性（一级像差）是焦距、像面位置和放大倍率，它们由两个像差控制：目标值和权。

如果物体在无限远，取焦距 f' （Effective Focal Length）为一级像差；如果物体在有限距离，取横向放大倍率 β （Transverse Magnification）为一级像差；对于无焦系统（Afocal System），取角放大倍率为一级像差。第二个像差是后工作距离（Back Focal Length）。

2. 横向像差和波像差

在 ZEMAX 软件中，光线追迹的结果通常表示为横向像差，或者表示为波像差（Wavefront Aberration），横向像差是波像差的一阶微分。如果优化函数包含横向像差和波像差，波像差应给定的权较大。但在 ZEMAX 中优化设计中，二者只能选择一种。对于大视场、大相对孔径的镜头，最好用横向像差；而对于小视场、小相对孔径的镜头，最好用波像差。

3. 权因子选择

最小二乘法的过程将自动地进行像差平衡，但要获得最好的镜头特性，合理地选择权因子（Weighting Factors）是非常重要的。

在某些情况下，点扩散函数中心峰尖锐但具有较大弥散斑的镜头像质要优于弥散斑虽小但中心峰较低的镜头像质。

对于视场较大的镜头，各视场的像质不可能都好，故中心视场给定的权因子较大，边缘视场给定的权因子较小，是有意义的。

权因子值是相对的，在 ZEMAX 中最大为 1。设计者也可设定其他值，如果权因子的值设定为负值，表示权无限大。优化程序将首先满足该设计要求，但光学系统的其他特性要求（例如 MTF）很难同时满足。因此，尽可能不用负值的权。

4. 像差控制

不要企图控制那些不可能校正的像差，这有时是很重要的。共轴球面系统目镜的畸

变、兰姆斯登 (Ramsden) 目镜的色差、双胶合物镜的像散等像差是不可能校正的。

5. 边界条件

在 ZEMAX 中, 边界限制 (Boundary Condition) 可以自动给出, 也可以在预置优化函数 (Default Merit Function) 中, 通过输入空气或玻璃的边界值给出。

正透镜输入最小边缘厚度 (Minimum Edge Thickness, MNEG); 负透镜输入最小中心厚度 (Minimum Center Thickness, MNCG)。对于空气间隔, 相应的有 MNCA、MXCA 和 MNEA。

光学玻璃镜片不能太薄, 否则机械装配应力可能损坏镜片。另外, 空气间隔必须是正值。因此, 在设计初期, 不要同时设定多个玻璃和空气间隔作为设计变量, 否则会出现程序对边界限制失控 (Out of Control), 即间隔出现负值。

自动边界限制是指为省去某些对光学系统例行的边界限制的人工输入, 带有坐标间断 (Coordinate Breaks) 的复杂镜头或多重结构 (Multi-Configurations) 的镜头通常要求附加的边界限制。

表 1.1 给出光学玻璃的负透镜中心厚度和正透镜边缘厚度的边界限制^[1]。

表 1.1 透镜的中心厚度和边缘厚度的边界限制

口径/mm	极小值 (负透镜中心厚度) /mm	极小值 (正透镜边缘厚度) /mm
5	1.0	0.5
10	1.5	1
50	5	2
100	8	3
200	12	4

6. 玻璃材料边界条件限制

在优化设计中, 如果取光学材料作为变量, ZEMAX 允许折射率和色散在一定范围内的连续变化, 它表示玻璃是可变的。对于许多设计问题, 通常不需要把玻璃作为变量。

根据像差理论, 提高光学材料的折射率, 将改善光学系统的球差和场曲, 但对像散、彗差和畸变影响很小。例如一个单薄透镜, 当物体在无限远时, 最小三级球差正比于

$$\frac{n^2}{(n-1)^2} - \frac{n}{n+2}$$

若折射率由 1.5 变换到 1.8, 球差的变换量之比是 2.2 : 1。

当孔径光阑与薄透镜重合时, 单薄透镜的像散与透镜的折射率无关, 即

$$\sum_1^k S_m = J^2 \phi, \quad \sum_1^k S_w = J^2 \sum \frac{\phi}{n}$$

因此, 在优化设计中应尽可能少用 ZEMAX 的此项功能。该法虽然能改善光学系统的像质, 但会降低所设计的镜头的性价比, 或自动选择的光学材料稀少。

7. 渐次逼近

在优化设计中, 设计变量 x 的增量 δx 是按渐次逼近的方法变化的, 渐次逼近可用作运算收敛的准则。如果优化函数 ψ 保持循环运算, 则可以断定, 计算过程没有发散。如果 ψ 增加, 则计算过程结束。所以, 当 $\psi_s < \psi_{s-1}$ 时, 计算过程继续; 当 $\psi_s \geq \psi_{s-1}$ 时, 计

算过程终结。其中， S 是变量增量步进的序列号。

8. 初始数据选择

镜头优化设计的结果主要取决于输入到程序的初始数据，初始数据可由以下三个方法获得。

1) 根据设计要求对现有的设计镜头进行修改

初始数据可以从设计文件、专利文库或者镜头设计文集中选择，这可能是新的镜头设计的最常用的方法。例如，在 Lensview 中有 3 万多个镜头，在 ZEMAX 和 CODE V 中也有许多镜头实例。

2) 购买竞争对手的镜头

购买竞争对手的镜头，分析其结构特性，再进行修正。但在许多情况下，这是不实际的选择，因为竞争者的镜头通常是很难获得的。

3) 解析方法

在某些情况下，例如双胶合镜头、三片镜头或某些同心镜头，可以写出一组方程，用解析的方法求出薄透镜的解。一般来说，上述镜头比较简单，因此解析法不是解决新设计问题的最有效方法。

为了满足新镜头的设计要求，初始数据必须满足近轴光学的要求和像差理论的要求。一般来说，最好使设计系统的各光学元件的像差较小。

9. ZEMAX 优化步骤

在 ZEMAX Data 文件中，光学系统的半径、间隔、材料、视场、波长及入瞳等按要求输入后，应按以下步骤输入相关的数据，进行自动设计。

(1) 在 ZEMAX 窗口 Editor 中，单击 Lens Data，按 Ctrl+Z 组合键或单击鼠标右键确定半径、间隔等变量 (Variable)。

在设计初始阶段，应根据光学系统对像差的要求和各面对像差的贡献大小逐步选择变量，并根据像差分析中的“Seidel Coefficients”选择变量。

(2) 在 ZEMAX 窗口 Editor 中，单击 Merit Function，选择控制优化算子 (Operands) 如 EFL (Effective Focal Length)、TOTR (Total Track) 及其 Target、Weight 等，选择何种控制优化算子，取决于所设计的镜头的特性。

(3) 在 Merit Function Editor 中单击 Tools，再单击 Default Merit Function；在 RMS 或 PTV 中选择 Wavefront 和 Centroid，计算 OPD，或选择 Spot Radius 和 Chief Ray，计算横向像差 TRAR；在 Rings3、4、5、6 中，选择在入瞳处分割的环数；在 Arms6、8、10、12 中，选择在入瞳处分割的臂数。

如果玻璃厚度作为变量，在 Glass 的 Min, Max, Edge 位置处，根据设计要求，给出玻璃厚度边界限制；如果空气间隔作为变量，在 Air 的 Min, Max, Edge 位置处，根据设计要求，给出空气间隔边界限制。

因此，为了减少 ZEMAX 优化的像差数，在设计初始阶段，Rings 选择环数为 3，Arms 选择臂数为 6。

(4) 单击 OK。

(5) 在窗口中，单击 OPT5, 10, ..., inf，程序自动给出 Initial MF 和 Current MF。选择优化循环周期时，尽可能不用 inf，可选择 5 或 10，以便知道什么时候和如何

控制程序到有效的方向。当 MF 下降时, MTF 如果改善, 则继续优化。但有时程序也会失控, 当 MF 下降到某值时, MTF 却变坏。

ZEMAX 操作手册建议“Default merit function, coupled with a few predefined operands, is perfectly suitable for the majority of optical design”。故不要更改 ZEMAX 程序中预置的算子 (Operands) 及其权等预置参数。

10. ZEMAX 中光学玻璃优化步骤

如果在 ZEMAX 中优化玻璃, 可按下步骤进行。

- (1) 在 Glass 中选择 Substitute;
- (2) 在 Gen 中选择 Glass Catalogs, 如 China 或 Schott;
- (3) 在 Tools 中选择 Hammer Optimisation, 单击 Hammer。

参 考 文 献

- [1] M J Kidger. Intermediate Optical Design[M]. Washington: SPIE press, 2004.
- [2] 毛文炜. 现代光学镜头设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] 张以谟. 应用光学 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [4] 袁旭沧. 现代光学设计方法[M]. 北京, 北京理工大学, 1995.
- [5] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 (第三版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] M Laikin. Lens Design (Fourth Edition) [M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] G G slyusarev. Aberration and Optical Design Theory[M]. Philadelphia: Adam Hilger, 1984.
- [8] R Kingslake. Optical System Design[M]. Salt Lake: Academic press, 1983.
- [9] R Kingslake. Optical System Design[M]. Salt Lake: Academic Press, 1983.