

Modern Optical Lens Design

Methods and Examples

第②版

现代光学镜头

设计方法 与实例

毛文炜 著

Mao Wenwei

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



现代光学镜头 设计方法与实例

Modern Optical Lens Design:
Methods and Examples

第2版

毛文炜 著
Mao Wenwei



机械工业出版社

本书讨论光学镜头的优化设计, 分别为: 光学镜头的优化设计概述, 简单光学镜头的优化设计实例, 三片镜头的优化设计实例, 中等复杂镜头的优化设计实例, 非球面光学镜头的优化设计实例, 复杂光学镜头的优化设计实例。书中列有近三十个光学镜头的优化设计实例, 镜头不按通常的使用范畴归类划分, 而是按它们的结构由简单到复杂的顺序介绍优化设计过程, 优化设计过程的介绍大体上按照由易到难的顺序进行。与讲述光学镜头设计的传统书籍不同, 书中所列的每一个优化设计例子, 都列有详细的优化设计过程, 可以追踪复现。全书所有的设计实例都用 ZEMAX 程序设计, 并提供了一种表述评价函数中所用像差等操作数的语句括号, 便于读者与 ZEMAX 程序中的标识、提示及填写内容相比较。

新版增加了紫外光刻物镜优化设计实例, 提出了双远心光路可以孔径光阑为界分前后两个半部, 先分别单独优化再合起来一块儿优化的路线, 提出了以两个显微物镜拼接成光刻物镜初始基型的思路与方法, 并用这个方法和优化路线设计了一个衍射置限的紫外光刻物镜。即使是光学设计的新手, 在经过了前五章的设计练习, 在第 6 章中按图索骥也能完成紫外光刻物镜的设计练习。

书中假定读者了解像差概念, 对初级像差理论较为熟悉。本书适用于光电信息工程、仪器与测控专业的研究生和本科生以及相关领域的工程技术人员。

(编辑邮箱: jinacmp@163.com)

图书在版编目 (CIP) 数据

现代光学镜头设计与实例/毛文炜著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-111-56769-1

I. ①现… II. ①毛… III. ①镜头-最优设计 IV. ①TB851

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 100695 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: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲 刘丽敏

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 张 静

责任印制: 常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2017 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23.5 印张 · 615 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-56769-1

定价: 58.00 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: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前言

光学镜头的设计既是科学又是艺术和技巧。它是科学，因为设计者们在用数学和科学定律（几何光学和物理光学）来度量和量化设计。它是艺术与技巧，因为各种有效结果常常取决于设计者的个人选择。如果把一个镜头设计问题交给 12 个不同的设计师，往往会得到 12 种不同的设计结果。这是因为光学镜头的设计问题与常见的学术性问题是根本不同的。典型的教科书例题都有定义好的输入量和一个正确答案。与之相反，光学镜头设计问题通常都严重地定义不足，并且可能有许多差别很大的解。这说明，光学镜头的设计是一项实践性极强的工作。

对于现代光学镜头设计而言，其优化设计仍然是一件复杂的事情。有人计算过，一个有 15 个变量的镜头，在计算机的计算速度为每秒 10^6 光线面的情况下，要找出这个镜头的全局最优解，需要这台计算机运行约 10^4 年。现代光学镜头设计的成功与否取决于两点，一是合理的初始结构，二是正确的优化路线。而且，优化设计的路线不是“华山一条路”，更不是“道路笔直又笔直”，设计方法也将是五彩缤纷的。

因此，对于光学镜头设计的初学者来说，若有一个类似于学习绘画中的“临摹”、学习书法中的“描红”、学习外语发音中的“Follow me”的过程，则对学习和掌握设计方法一定是有益的。也就是说，如果有若干初步设计的练习题目，有步骤清楚、方案可行、结果可以复现的路，初学者能一步一步地跟着走一遍，完整、清楚地了解整个设计过程，那么，几个循环下来，对学习一定是有帮助的。

事实上，“优化”是一个修改已有系统以提高像质的过程，而缺乏过程的结果在初学者看来似乎是“来路不明”的，是难以模仿的，是难以学习的。所以，本书中的每一个设计例子都列有详细的步骤和优化设计过程，初学者可以沿着这条优化设计路线从初始结构出发分若干步骤追踪到最后的結果。

另外，本书的优化设计实例不再是按通常的镜头使用范畴来归类，而是按它们的结构由简单到复杂（或按有效变量的多少）的顺序来划分，这样对优化设计过程的介绍也就是大体按照由易到难的顺序进行的。

为将评价函数中的像差等操作数表述得更清楚完整，书中提出了一种“操作语句括号”，用它将程序中的标识与提示，以及要求设计者填写的相应内容都简洁、完整、清楚地表示出来了。这有助于更清晰地描述优化设计过程。

全书共分 6 章，本版新加内容为第 3.5 节、第 3.6 节，及第 6 章。第 1 章简述光学镜头优化设计在光学设计中的地位，并简述镜头优化设计的数学原理，其目的在于使读者了解优化设计中的基本原理、思路、过程与一些需注意之处。

第 2 章列有激光聚焦物镜、激光扫描物镜和低倍显微物镜的优化设计实例。激光聚焦物镜给出了三个不同的初始结构，并给出了从这三个初始结构出发优化出来的几个结果及相应

的优化过程。激光扫描物镜给出了两条不同的优化路线，并给出了相应的两个优化结果。低倍显微物镜的初始结构由两种不同的方法给出，一种是依据初级像差理论解出初始结构；另一种是参考同类镜头直接选用一对玻璃，大致分配光焦度，由此给出一个初始结构送入计算机进行优化。

第3章列有三片摄影物镜、三片数码相机物镜和大孔径望远物镜的优化设计实例。三片摄影物镜的优化设计过程中，主线是逐步调整各个初级像差的目标值，使得初级像差与高级像差达到好的平衡，从而优化出好的结果。三片数码相机物镜的初始结构是由三片摄影物镜缩放而来的，由此带来了镜片太薄的问题；加厚镜片不是一步到位而是分七步完成的，每一步都只增加一小点厚度接着就进行一次优化，如此经过七步才将镜片的厚度加上去；这样做是基于一个推测，即推测镜头像差与镜头结构参数以及光学特性参数之间的函数空间在相当的范围内极有可能是连续空间，在好的解附近，情况更可能是如此；这样，一些自变量的小量变动引起的像差变化，就比较容易通过其他自变量的小量变动补偿回来。大孔径望远物镜的初始结构有两个：一个是自行构造的，另一个是参考同类物镜缩放的；两个物镜的色球差和位置色差都校正得很好，在像差曲线上看，它的二级光谱像差就非常明确、非常清楚。

在3.5节中，以激光聚焦物镜的优化设计为例，用分裂透镜的办法减小了低折射率材料产生的高级像差，完成了物镜设计，并给第6章做了铺垫。

3.6节是一个特大孔径测距仪接收系统的设计实例，它是由两片高折射率激光聚焦物镜演变出来的，用分裂透镜的办法减小了孔径大幅增加后产生的高级像差，从而完成了物镜设计，也为第6章做了铺垫。

第4章列有中倍李斯特显微物镜、四片放映物镜和双高斯摄影物镜的优化设计实例。中倍李斯特显微物镜的设计采用改进了的配合法，在配合设计过程中辅以初步优化，从而省去了由中间数据手算透镜半径的过程，使得过程简单可行，因为那些中间数据一般是埋藏在光学设计程序中没有显式的输出；另外又将配合法设计出的中倍李斯特显微物镜做进一步的优化，从而消除了像散，而在经典的配合法设计中，李斯特显微物镜的像散是没有消除的。四片放映物镜的初始结构的构成思路和偏角分配数据来自王树森的“堆砌法”思想，遗憾的是，由于2007年教学备课房间变动时，丢失了王树森于三十几年前撰写的一份打字油印的设计资料，现在的数据来自笔者的阅读笔记。四片放映物镜的优化设计中平行使用了两个不同的评价函数，一个是自行构造的评价函数，且在优化设计的不同阶段进行逐步改造，直至优化出好的结果；另一个评价函数直接采用程序提供的默认评价函数，同样优化出了好的结果。为进一步提高像质，将四片放映物镜的结构复杂化，从四片分裂成六片，再经优化，使它的调制传递函数有了大幅度的提高。双高斯摄影物镜的设计列有三个实例：第1个实例是将ZEMAX程序中的一个范例做了破坏后，再将它优化为一个质量可与范例相比的好结果；第2个实例从一个像质很差而且大量违反边界条件的原始结构出发，经逐步优化，得到了可与OSLO程序给出的范例相比的优良结果；第3个实例追踪复现了《光学系统设计》(Optical System Design)书中的范例。

第5章是关于非球面在光学镜头中应用的内容，列有四个实例：第1个实例是低折射率单片激光聚焦物镜；第2个实例是孔径角达 62° 的单块凸平聚光镜；第3个实例是面形仅为二次圆锥曲面的三片光电转换耦合物镜；第4个实例是总长短的广角物镜。设计这些物镜时，一般是将非球面系数从低阶到高阶适时逐步释放作为变量加入到优化中去起作用的。

第6章以紫外光刻物镜作为复杂镜头的代表,分析了它的光路特点,提出了以两个显微物镜拼接成光刻物镜初始基型的思路与方法,提出了具有双远心光路的镜头可以孔径光阑为界分前后两个半部,先分别单独优化两个半部,再合起来一块儿优化的路线,利用3.5节和3.6节中所述的透镜分裂办法减小了各级剩余像差,优化设计出了一个像质优良、结构新颖简单的紫外新光刻物镜。本章还利用在设计新光刻物镜中构造出来的评价函数,对参考文献[17]中的光刻物镜范例做了再优化,得到了一个成像质量更好的结果,使它的调制传递函数达到了衍射置限水平,相对畸变减小了两个数量级。

第2版中增加的紫外投影光刻物镜的优化设计方法与实例是原创性的首发稿,其中由传统镜头显微物镜拼接出光刻物镜初始结构的启示提升了第1版传统实例中原创内容的意义,另外第1版中各实例都采用的“操作语句号”是使人“耳目一新的原创内容”。由此将第1版中的“编著”修改成了“著”。

书中有关参考文献中列出了选择双胶镜头玻璃对所用到的 P_0 表,由于这些内容不难找到,为了节省篇幅,第2版删去了第1版中的附录E。

作者
于清华大学

目 录

前言

第 1 章 光学镜头优化设计概述 1

- 1.1 引言 1
- 1.2 光学镜头设计中常用优化方法的数学原理 2
 - 1.2.1 适应法 3
 - 1.2.2 阻尼最小二乘法 4
 - 1.2.3 阻尼因子 p 、权重因子 μ_j 和评价函数 ϕ 4
 - 1.2.4 边界条件 5

第 2 章 简单镜头设计实例 7

- 2.1 He-Ne 激光光束聚焦物镜设计 7
 - 2.1.1 镜头片数及玻璃选择的考虑和初步分析 7
 - 2.1.2 以“正前凸”型为基础的高折射率双片镜头的优化设计 11
 - 2.1.3 以“负前凸”型为基础的高折射率双片镜头的优化设计 22
 - 2.1.4 以“负前凹”型为基础的高折射率双片镜头的优化设计 28
- 2.2 激光扫描物镜设计 37
 - 2.2.1 自行构造评价函数优化设计激光扫描物镜 39
 - 2.2.2 利用 ZEMAX 程序提供的默认评价函数优化设计激光扫描物镜 46
- 2.3 $-5\times$ 显微物镜设计 52
 - 2.3.1 依据初级像差理论求解初始结构 53
 - 2.3.2 $-5\times$ 显微物镜的优化设计例 1 55
 - 2.3.3 $-5\times$ 显微物镜的优化设计例 2 59

第 3 章 三片镜头设计实例 65

- 3.1 三片摄影物镜的优化设计 65

- 3.1.1 Richard Dittion 三片摄影物镜的初始解 65
- 3.1.2 Richard Dittion 三片摄影物镜的优化设计例 1 69
- 3.1.3 Richard Dittion 三片摄影物镜的优化设计例 2 95
- 3.2 三片数码相机物镜的优化设计 112
- 3.3 大孔径望远物镜优化设计例 1 130
- 3.4 大孔径望远物镜优化设计例 2 140
- 3.5 三片低折射率激光聚焦物镜的优化设计 145
- 3.6 测距仪接收系统的优化设计 151

第 4 章 中等复杂镜头设计

实例 156

- 4.1 中倍李斯特显微物镜优化设计例 1 156
 - 4.1.1 用改进了的配合法设计李斯特显微物镜 157
 - 4.1.2 优化校正李斯特物镜的像散例 1 167
 - 4.1.3 优化校正李斯特物镜的像散例 2 176
- 4.2 中倍李斯特显微物镜优化设计例 2 197
- 4.3 四片放映物镜优化设计例 1 208
- 4.4 四片放映物镜优化设计例 2 222
- 4.5 双高斯物镜优化设计例 1 243
- 4.6 双高斯物镜优化设计例 2 257
- 4.7 双高斯物镜优化设计例 3 265

第 5 章 非球面镜头设计实例 278

- 5.1 引言 278
- 5.2 非球面激光光束聚焦物镜优化设计 280

5.3 孔径角大于 62° 、后工作距大于 22mm 的非球面聚光镜优化设计	284	6.4 紫外投影光刻物镜的优化设计	340
5.4 非球面光电转换耦合镜头优化 设计	294	6.5 优化改进参考文献 [17] 中的光刻 物镜范例	354
5.5 总长短的非球面广角物镜优化 设计	301	附录	361
第 6 章 复杂镜头设计实例	326	附录 A 初级像差系数	361
6.1 紫外投影光刻物镜的光路分析、消像 差方案及初始基型选择	326	附录 B 平行平板的初级像差系数	362
6.2 紫外投影光刻物镜后半部 g_a 的优化 设计	329	附录 C 薄透镜初级像差系数的 PW 表示式	363
6.3 紫外投影光刻物镜前半部 g_b 的优化 设计	337	附录 D 双胶薄透镜的求解步骤	364
		参考文献	366

第 1 章 光学镜头优化设计概述

1.1 引言

光学设计的一般过程大体上可以分为六个步骤：

第 1 步，根据仪器总体性能设计要求，进行光路整体布局，确定光学镜头的性能指标，确定焦距 f' 、视场（角视场 ω 或线视场 y' ）、相对孔径 $\frac{D}{f'}$ 或数值孔径 NA ，同时确定镜头的成像质量要求。

第 2 步，根据光学镜头的性能指标选择镜头的结构型式，给出一个初始结构。在光学设计的发展过程中，镜头设计者们已经取得了丰硕的成果和丰富的经验，并将这些成果归纳分类，形成了许多典型的结构型式；从这些结构型式出发容易取得好的设计结果。

例如，要设计一个焦距 $f' = 50\text{mm}$ ，相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{3.5}$ ，全视场 $2\omega = 50^\circ$ 的摄影物镜，选择“三片（柯克）”型式或“天塞”型式较好，它们分别如图 1-1 和图 1-2 所示。

如果相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2}$ ，其他要求类似，那么选用“双高斯”型式好一些，如图 1-3 所示。

又例如，要设计一个低倍显微物镜，若横向放大率 $\beta = -5\times$ ，数值孔径 $NA = 0.1$ ，则一般选择简单的双胶型式即可，如图 1-4 所示。如果是设计一个中倍显微物镜，要求其横向放大率 $\beta = -10\times$ ，数值孔径 $NA = 0.3$ ，就选择两组双胶的“李斯特（Lister）型式”，如图 1-5 所示。

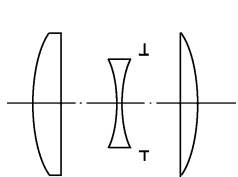


图 1-1 三片（柯克）型摄影物镜

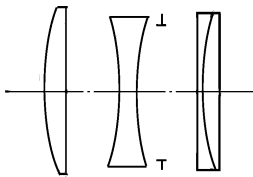


图 1-2 天塞型摄影物镜

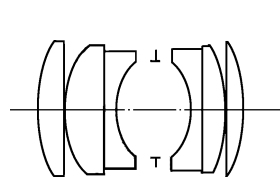


图 1-3 双高斯摄影物镜

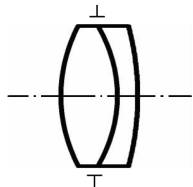


图 1-4 双胶型式的低倍显微物镜

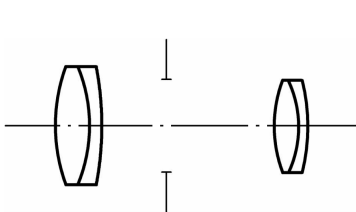


图 1-5 李斯特显微物镜

另外，从图 1-1 和图 1-3 的比较，或者图 1-4 和图 1-5 的比较，可直观看出，光学系统的孔径增大，系统结构的复杂性也就增加。自然，系统的视场增大，系统的焦距加长，一般而言，系

统的结构也就更复杂。

初始结构的确定可有多种途径,最常用的是在失效或公开的专利中或者学术期刊上发表的论文中找一个光学特性类似的镜头,通过焦距缩放作为初始结构,例如本书中3.4节大孔径望远物镜优化设计例2,以及4.7节双高斯物镜优化设计例3;或者以初级像差理论为依据通过解像差方程得出一个初始结构,例如2.3.1节依据初级像差理论求解初始结构,以及3.1.1节三片摄影物镜的初始解;有光学设计经验者还可试探性地确定各镜片或镜头中组件的偏角负担、分配光焦度,依据它们在光路中的位置和对像差有利的弯曲状况来确定出它们各自的形状,依此给出一个初始结构,例如4.3节四片放映物镜优化设计例1。

第3步,进行像差校正。即通过改变镜头诸面的面形参数(球面透镜的曲率半径,以及非球面透镜的诸非球面系数),改变透镜的厚度及透镜之间的间隔,更换透镜材料,来使得镜头的像差逐步减小。在现代光学设计中,这一步工作是在计算机上借助于光学镜头的优化设计程序完成的,谓之现代光学镜头的优化设计。当把镜头的像差校正到一定程度后,转入第4步像质评价。

第4步,进行像质评价。按照仪器总体性能指标所要求的成像质量,对镜头的像差值和像差状况进行评价,评价后如果没有达到要求,则仍转回第3步,分析原因,决定采取的步骤和措施,继续进行像差校正,直至镜头的成像质量符合要求。对于一些常规镜头,有许多现成的成像质量好的结果作参照,容易作到正确的选型;如果是针对新型的系统,则分解出来的镜头成像质量要求往往参照较少,因此在选型上要多花一番功夫。若选型不好,在第3步和第4步之间虽经多次校正,像质仍达不到要求,则此时要转回第2步,寻找新的结构型式。

第5步,计算,分配,制定镜头诸元件、组件的加工公差和装配公差。

第6步,绘制光学系统图,光学组件和零件图并作规范的各项标注。

在光学设计的六个步骤中,第3步像差校正是工作量较大、艺术性较强,也最重要的一步。一般来说,像差校正是一个循序渐进的过程,很少能一蹴而就,特别是一些要求高、结构复杂的镜头更是如此。

由于支配光线在光学系统中传播的物理定律——折射定律是非线性的,所以导致光学系统一般存在像差,而且像差与结构参数的关系也是一个极为复杂的非线性问题。要将镜头的成像质量从初始结构时的状况经过一步一步地调整部分或全部结构参数引导到一个较佳的状态,其实质就是在问题的解空间中寻找一条“曲折”但可行的路线,使镜头从像质不佳的位置逐步走到像质较佳的位置。而且,这个镜头要在物理上是存在的,实践上是能够做出来的,其性能价格比应该是优良的。要能够走出这样一条路,靠什么呢?一靠对于当前像差状况的计算与分析,二靠像差理论的指导,三靠设计人员的设计经验积累与判断。

数学上对于这类非线性问题有若干卓有成效的数值算法;电子计算机和计算技术的飞速发展又有可能将好的设计经验镶嵌到镜头设计的非线性数值算法中,构成了镜头的优化设计,并反映在国内外一系列商品化的光学设计程序中。

本章先简述镜头优化设计的数学原理,其目的在于使读者了解优化设计中的基本原理、思路、过程与一些需注意之处,并介绍光学设计中的两种常用的优化方法,即适应法和阻尼最小二乘法。

1.2 光学镜头设计中常用优化方法的数学原理

在现代光学镜头的优化设计中,将所有镜头结构参数,即镜头诸面的面形参数、各透镜的厚

度和透镜间的间隔、各透镜的材料参数统称为自变量。而将镜头的焦距、横向放大率、后工作距等,以及各类几何像差、波像差等都称为像差,即广义像差。它们都是结构参数的函数。

镜头的结构参数用 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示,广义像差用 f_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 来表示,即

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_n) &= f_1 \\ &\vdots \\ f_m(x_1, \dots, x_n) &= f_m \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式(1-1)是一组非常复杂的非线性函数关系式,几乎不可能写出它们的显式关系。但在已知的初始结构参数处及其附近,广义像差与结构参数的关系是可以近似为线性关系的,因而能写出如下的显式:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n \\ &\vdots \\ f_m &= f_{0m} + \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \Delta x_n \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式(1-2)中, f_{0j} 是初始结构参数为 x_{0i} 时的广义像差,这里: $j = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$ 。 f_{0j} 原则上可由光路计算得出。 f_j 是当结构参数变为 $x_i = x_{0i} + \Delta x_i$ 时的广义像差,各偏导数原则上可由基于光路计算的差商求得。当以一个初始结构为基础校正像差时,总是需要提出像差要达到的目标值 f'_j , 这个目标值往往不是一步求得的,因为事实上办不到,众所周知原因是用线性化方法解非线性问题是有很大限制的,解决的方法是分成若干步逐步迭代。设 $(f_j - f_{0j})$ 是要求广义像差减少量 $(f'_j - f_{0j})$ 的若干分之一,则式(1-2)就近乎实际地表达了解空间的情况。一般来说,广义像差的个数 m 并不总是与结构参数的总数 n 相等,分 $m \leq n$ 和 $m > n$ 两种情况分别讨论。下面先讨论 $m \leq n$ 的情况。

1.2.1 适应法

当 $m < n$ 时,式(1-2)有无穷多组解向量 $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)^T$,可从中挑一组结构参数变化最小的解向量,即 $\Delta \mathbf{x}^T \Delta \mathbf{x}$ 为最小的解。在数学上可利用拉格朗日乘子法在约束条件式(1-2)

下求 $\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2$ 的极小值,从而得到问题的解。

然后,以这个新解为基础构造出新的式(1-2),再走出第2步,以及类似的第3步,第4步,……。这就是适应法的数学原理。

当 $m = n$ 时,由式(1-2)即得唯一解,然后再以这个解构造出新的式(1-2),继续走出类似的第2步,第3步……

使用适应法的限制除要求校正的像差数目必须少于或等于可改变的结构参数总数外,一般不能将相关的广义像差放在一起校正。例如,某一视场的初级子午场曲 x'_t 、初级弧矢场曲 x'_s 和初级像散 x'_a ,这三种像差是相关像差,因为三者中的任何一个都可用其余两个表示出来。若将这三者放在一块儿同时去校正,并且提出了相互不匹配的像差目标,就等于在式(1-2)中列出了相互矛盾的方程,当然没有解;如果提出的像差目标相互间是匹配的,则相当于式(1-2)中有完全一样的两个方程,出现了冗余。值得庆幸,依据适应法的现代镜头优化程序有能力发现相关像差,并使其中之一退出控制。

若要校正的广义像差的个数 m 大于可改变的结构参数总数 n ，则适应法不能应用，通常采用如下所述的阻尼最小二乘法这一优化方法。

1.2.2 阻尼最小二乘法

当 $m > n$ 时，式 (1-2) 的方程的个数 m 多于自变量的个数 n ，属于超定方程，方程不可解，但可以寻找最小二乘意义上的解，即求

$$\varphi = \sum_{j=1}^m \left[f_j - \left(f_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \cdots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Delta x_n \right) \right]^2 \quad (1-3)$$

的极小值。这样做的目的是，虽然做不到改变一定的自变量后每一个要校正的广义像差都达到它们各自的期望值，但希望达到与诸项广义像差期望值偏离的二次方和为最小。

因为在一个镜头中，不同的像差其要求的数量级差别很大，例如对一个焦深为 0.1mm 的小像差镜头，其球差和场曲小于 0.1mm 就可以了，但对波色差 $\Sigma (D - d) \delta n$ 来说，要小于 0.00025mm 才认为满意，而正弦差 OSC 则允许 0.0025。这样，那些数量级小的像差要求在式 (1-3) 中很难反映出来，其结果是，这样得到的最小二乘解不会反映数量级小的像差校正要求，也就是说，此例中波色差、正弦差不会被校正。另外，诸广义像差的量纲并不一致，这也使得式 (1-3) 的物理意义不很明确。改进的办法是在式 (1-3) 右端每一项前面加权重因子 μ_j ，即寻找下式 φ 的极小值：

$$\varphi = \sum_{j=1}^m \mu_j \left[f_j - \left(f_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \cdots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Delta x_n \right) \right]^2 \quad (1-4)$$

计算实践表明，这样一个加权的最小二乘解也往往并不是所希望的一个好的解，其原因在于镜头中像差是结构参数的非线性函数，而以式 (1-4) 的极小值求得的 Δx_i 其步长往往太大，已远跨出了实际允许的线性区。改进的办法是将带另一个权重 p 的 $\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2$ 加入 φ 中，即构造 ϕ 为

$$\phi = \sum_{j=1}^m \mu_j \left[f_j - \left(f_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \cdots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Delta x_n \right) \right]^2 + p \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2 \quad (1-5)$$

并去寻找使这个 ϕ 为极小值的解。实践证明，这个方法是成功的。这里第二个权重 p 称为阻尼因子，式 (1-5) 称为评价函数，这个优化方法称为阻尼最小二乘法。显然，阻尼最小二乘法在原理上也适用于 $m < n$ 的情况，因为在式 (1-5) 中加入了 $p \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2$ 项，实际上又加入了 n 项要求，使总的要求数目变为 $m + n$ ，当然 $m + n > n$ 。现行的许多光学镜头优化设计程序采用阻尼最小二乘法，例如后面各章优化设计各镜头实例时所用的 ZEMAX 光学设计程序采用的就是阻尼最小二乘法。

1.2.3 阻尼因子 p 、权重因子 μ_j 和评价函数 ϕ

如前述，阻尼最小二乘法是目前镜头优化设计程序中较为普遍采用的一种方法，而评价函数的构造、阻尼因子和权重因子的合理选择是使用这个方法成功的关键。阻尼因子一般由程序自动设置完成，无须光学镜头设计人员给出。而权重因子一般分为两部分，一部分由光学镜头优化设计程序自动选择给出，称为自动权重因子；另一部分由设计人员给出，并在设计过程中作适当的调整，这一部分权重因子称为人工权重因子。自动权重因子和人工权重因子的乘积泛称权重因子 μ_j 。

1. 阻尼因子 p

从由最小二乘法演化为阻尼最小二乘法的思路中, 不难看到引入阻尼因子的目的和作用。用线性化近似来处理非线性问题时, 其步子不能跨得太大, 特别是非线性程度越高的问题越是如此, 而用最小二乘法求出的步长, 即结构参数的改变量, 在绝大多数情况下早已超出了本地结构参数实际允许的线性化区域, 这正是最小二乘法在光学镜头的优化设计上难有作为的原因所在。而将步长 Δx_i^2 带权重 p 加入到评价函数 ϕ 中, 就是希望找到的最小二乘解是小步长的解, 这也正是将 p 称为阻尼因子的原由。当镜头在优化设计时, 本地结构参数附近范围内可线性化程度究竟如何, 是可以通过计算迅速作出判断的, 如果可线性化范围较大, 则让阻尼因子取小的值, 允许步长跨得大一些, 相应地优化过程可快一些; 而如果可线性化范围较小, 则加大阻尼因子, 使步长小下来, 虽慢但可达。

目前商品化的镜头优化设计程序已经比较完善地做到了阻尼因子的自动设置。

2. 权重因子 μ_j

权重因子的作用可归结为: 统一评价函数中各广义像差的量纲; 利用它调节各种广义像差在结构参数空间中变化的相对速度, 从而改变评价函数的收敛路径; 使像差的平衡方案更符合设计者的要求。

广义上讲, 权重因子的选择与评价函数的构造不无关系, 因为权重因子体现了进入评价函数中广义像差的相对重要性, 对于没有选进评价函数中的像差可认为是权重因子为零的像差。由于权重因子中有一部分自动权重因子由镜头优化程序自动设置, 所以人工权重因子选择 1, 即相当于权重因子 μ_j 完全由程序自动设置。在现行的镜头优化程序中, 已经充分吸收了光学镜头设计的经验和规律, 自动权重因子设置得比较完好, 留给人工权重因子设置的难度已经相对低了一些。

3. 评价函数 ϕ 的构造

对于具体的镜头设计要求和选出的初始结构型式, 需要选择哪些结构参数作为自变量用以校正像差? 选择哪些像差进行校正? 在希望校正的像差中, 其相对重要性又如何? 这些都需要设计人员作出判断和决策, 并且要在设计过程中适时作出调整。这是构造评价函数的要点。设计人员根据像差理论的指导、自己设计经验的总结、对别人设计实例和结果的分析与学习, 并通过反复试探与比较, 是可以给出一个比较合适的评价函数的。可以说, 选定了评价函数就选定了问题的解空间, 选定了像差随结构参数的变动路线。

例如, 设计一个焦距 $f' = 100\text{mm}$, 相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{4}$, 全视场 $2\omega = 8^\circ$ 的望远物镜。初步选型

为双胶型式, 光阑安放在物镜上。自变量选三个球面半径, 可外加两种玻璃材料, 但两块透镜的厚度不作为校正像差的自变量, 因为这里厚度变化对像差的影响很不显著; 在保证焦距为 100mm 的前提下, 要校正的像差为轴上点球差、轴上点位置色差和正弦差。人工权重因子取 1, 即选权重因子由程序自动设置。这样一个评价函数就构造出来了。

在目前所用的商品镜头优化设计程序中, 已设置了一些默认的评价函数, 使用者只要选定自变量就可以直接应用它, 无须再选择要校正的像差、确定权重因子。它们集中了镜头设计的经验与成果, 且经过了一段时间的考验, 是相当好用的。有时, 光学镜头的设计人员针对具体的设计对象, 可以以这些默认的评价函数为基础, 另作一些修改构造出新的评价函数。然而对于特殊的镜头设计, 设计人员还是自己构造评价函数为好。

1.2.4 边界条件

前面已经说过, 优化设计出来的镜头不仅光学性能和像质要符合预定的仪器总体性能的要

求,而且还应该是物理上存在的,生产实践中是可以制作出来的,这就对结构参数有了一定的限制,如正透镜的边缘厚度和负透镜的中心厚度不能小于一定的数值,透镜之间的空气间隔不能为负值等。此外,实际使用的镜头,还必须满足某些外部尺寸的要求,如像方截距,或者说像距 l' ,入瞳距或出瞳距 l_z 、 l'_z ,系统的总长度等。这类限制被统称为边界条件。

在阻尼最小二乘法程序中,对边界条件的控制是分类处理的。因为负透镜的中心厚度、镜头中的空气间隔等的边界条件就是对结构参数(自变量)变化范围的限制,一般称为第1类边界条件。正透镜的边缘厚度,以及像距 l' ,入瞳距或出瞳距 l_z 、 l'_z ,系统的总长度等,是镜头结构参数的函数,对它们的限制一般称为第2类边界条件。

对第1类边界条件的处理有几种方法:

1) 用“冻结”与“释放”的办法处理,即在每次迭代后,对变数违反第1类边界条件者执行冻结,即暂不再将它作为变数,重新进行求解。经若干次迭代后再将被“冻结”的变数释放,重新参与求解。

2) 用所谓变数惩罚法处理,即每次迭代后,对变数违反第1类边界的,人为地改变其值,使其不至违反边界条件。

3) 对透镜中心厚度的控制,有时也定义一个新的变数 x_i ,它与透镜中心厚度 d_i 的关系为

$$d_i = d_{0i} + k_i x_i^2$$

式中, d_{0i} 是透镜最小厚度; k_i 是个正数。这个处理办法谓为变数替换。

对第2类边界条件处理的方法是把它们和像差一样对待。当某个参数违反边界条件时,将它们的违反量加一个适当的权重因子放入评价函数,经几次迭代后若不再违反边界条件,再行释放。或者采用拉格朗日不定乘数法求解,严格控制边界条件。

无论采用什么办法处理边界条件,它们都是在程序中自动设置完成的。使用者只需要选择要控制的边界条件,并确定有关边界条件的参数。

但是设计者在决定哪些边界条件需要控制时,必须仔细分析选择,不能把一些不必要的边界条件选出加以控制,更不能把一些相互间相关甚至矛盾的边界条件通通加以控制。因为过度施加边界条件将会大大降低对像差的校正。例如,对有限距离成像的系统,共轭距、光焦度和倍率三者是相关的,最多只能将其中两个拿出来加以控制,加入第三个控制就会和前两个发生矛盾。

本章讲述了光学镜头优化设计中常用的适应法和阻尼最小二乘法的数学原理,讲述了评价函数、权重因子、阻尼因子以及边界条件的含义和处理思路,其主要目的是说清思想、理清思路,而不在于具体数学公式的推导与演化。

第2章 简单镜头设计实例

以球面构成的光学镜头中，若要考虑适当校正像差，则由两块镜片组成的镜头是最简单的光学镜头了。本章给出三个简单镜头的优化设计实例，第1个实例是激光光束聚焦物镜，第2个实例是激光扫描物镜，第3个实例是低倍显微物镜。它们的结构都很简单，只有两块镜片，要校正的像差数目较少。优化时，它们的变量容易选择，它们的评价函数容易构造，经过少量的优化步骤即可达到设计要求。作为学习光学镜头的优化设计，由此容易入门。

对于每一个设计实例，这里都给出完整的优化路径，给出选择的变量，给出要优化的像差及要校正像差的权重，给出所施加的边界条件及其权重，给出关键的优化阶段，并给出每步优化后的结果以及最后结果。详细罗列的目的在于初学者可以追踪整个优化过程，设计出好的结果，并便于分析比较。

2.1 He-Ne 激光光束聚焦物镜设计

本节利用 ZEMAX 程序优化设计一个激光光束聚焦物镜。激光光束聚焦物镜是相对孔径较大、视场较小的光学镜头，它在单色光波长下工作，成像质量要达到衍射受限水平。设计过程中，先用具体的计算结果初步讨论玻璃的选择和透镜片数的考虑，然后选择几个不同的初始结构，针对每一个初始结构，分别采用适当的评价函数，并有针对性的逐步调整相应的评价函数，最终找到多个像质较优的解。这些优化结果表明，像质优良的解不是唯一的。具体设计任务的要求如下：

- 1) 物距 $l = \infty$ ，视场角 $\omega = 0^\circ$ ；焦距 $f' = 60\text{mm}$ ；相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2}$ ；工作波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 。
- 2) 此镜头只需校正轴上点球差。
- 3) 几何弥散圆直径小于 0.002mm 。
- 4) 镜头结构尽量简单，争取用两块镜片达到要求。

2.1.1 镜头片数及玻璃选择的考虑和初步分析

1. 低折射率单片的像质

先看看用一块镜片作此物镜，像差状况如何。玻璃采用普通的 K9，折射率 $n_{0.6328} = 1.51466$ ，与玻璃表中的其他玻璃相比，它的折射率算是比较低的。利用 ZEMAX 程序设计一个焦距 $f' = 60\text{mm}$ ，相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2}$ ， $\omega = 0^\circ$ 的激光光束聚焦物镜。光阑放在透镜的第一面，入瞳直径取为 30mm ，令透镜的第一面半径作变量，第二面半径用以保证物镜的相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2}$ ，这一步在计算机上输入初始数据的过程中可以在线完成；透镜厚度取为 6mm 。

在 ZEMAX 程序主窗口中完成上述数据输入的过程和路径如下：

- 1) Gen→Aperture→Aperture Type (Entrance Pupil Diameter)→Aperture Value (30)→OK。
- 2) Fie→Type (Angle)→Field Normalization (Radial)→Use →1 (✓)→Y Field (0)→Weight(1)→

OK。

3) 用鼠标右键单击第二面半径数据旁的方块→Solve Type (Marginal Ray Angle)→Angle (-0.25)→OK。

4) Wav→Use →1 (✓)→Select (HeNe(6328))→Primary(1)→OK。

上述路径中, 括号中的内容就是括号前标示项目所选或所填写的内容。例如 1) 中 Aperture Type 中选 Entrance Pupil Diameter, 即选择“入瞳直径”; 又如 2) 中 Y Field 取 0, 即确定是零视场。

将 0.3、0.5、0.7、0.85 和全孔径的横向球差“TRAY”加入到评价函数中, 它们的目标值都取 0, 权重都取 1。

之所以评价函数中要求五个孔径的横向球差, 是考虑到这个物镜的相对孔径比较大, 而球差又要求很小, 所以校正的思想一是各级球差都要尽可能小, 二是各级球差间要达到合理的平衡。至于物镜的像质能否达到要求, 重要的是看它的结构中是否有能达到设计要求的内因。下面的分析中, 将会看到单片结构是没有这方面内因的。

值得指出, 这里所写的“TRAY”是 ZEMAX 程序中的定义, 程序中的称谓为横向像差操作数, 其含义在此处相当于统称的横向球差。使用“TRAY”时其下要确定三个参数: 第一个是当前要计算的波长“Wave”, 例如这里是 He-Ne 激光, 波长为 $0.6328\mu\text{m}$, 而在前述 4) 中已将它放在“Primary”中编序为“1”了, 所以在“Wave (波长)”的地方填写“1”即表示波长为 $0.6328\mu\text{m}$; 第二个明确是哪个视场“Hx, Hy”的, 例如这里只考虑轴上点的像质, 因此是零视场的, 所以“Hx=0, Hy=0”; 第三个明确是哪个孔径“Px, Py”的, 例如上述评价函数中分别指定为 0.3、0.5、0.7、0.85 和全孔径, 则“Px=0, Py=0.3”就表示是 0.3 孔径的。一般情况下横向球差“TRAY”的单位为微米 (μm)。至于视场为什么用 (Hx, Hy) 两个数表示, 孔径为什么用 (Px, Py) 两个数表示, 读者可参考 ZEMAX 程序使用手册。值得说明的是, 这里设计的都是轴对称系统, 所以视场只用一个数即可明确, 故可令 Hx=0, 而只用 Hy 表示视场就足够了; 又因为这里是讨论轴上点的像差, 所以可令 Px=0, 只用 Py 表示孔径也已足够。

为了简单明了地表示操作数中必须由设计者确定的内容和填写的内容, 这里定义一种操作语句括号, 它由四部分构成: 第一部分以操作数开头, 例如“TRAY”; 第二部分是紧跟操作数后的小括号, 小括号内有若干个数需要设计者确定, 其中属性相同的数之间用逗号“,”分开, 属性不同的数之间用分号“;”分开。这若干个数的数目和含义则视具体的操作数而定; 第三部分是小括号后的像差目标值; 第四部分是操作数所表示像差的权重。这四个部分用大括号括在一起, 构成一个完整的操作语句。为将操作语句括号的内容、标识及调用时填写的内容表示清楚, 每一行只书写一个操作语句括号, 一行分为两端, 中间用双箭头“⇒”将两端联系起来, 左端中的内容是 ZEMAX 程序给出的内容标识及提示, 右端填写的是相应内容的取值。将上述评价函数用操作语句括号分句写出来如下:

```
{TRAY(Wave;Hx,Hy;Px,Py);Target,Weight}⇒{TRAY(1;0,0;0,0.3);0,1}
{TRAY(Wave;Hx,Hy;Px,Py);Target,Weight}⇒{TRAY(1;0,0;0,0.5);0,1}
{TRAY(Wave;Hx,Hy;Px,Py);Target,Weight}⇒{TRAY(1;0,0;0,0.7);0,1}
{TRAY(Wave;Hx,Hy;Px,Py);Target,Weight}⇒{TRAY(1;0,0;0,0.85);0,1}
{TRAY(Wave;Hx,Hy;Px,Py);Target,Weight}⇒{TRAY(1;0,0;0,1);0,1}
```

用上述评价函数优化初始结构, 优化后, 其结构参数见表 2-1, 像差曲线和点列图分别如图 2-1 和图 2-2 所示。

从优化结果看, 现在的弥散圆直径为毫米量级, 说明像质距离设计要求相差甚远。