

清华大学机械工程基础系列教材

光学镜头的优化设计

Optimized Design of
Optical Lenses

● 毛文炜 编著
● Mao Wenwei

清华大学出版社

清华大学机械工程基础系列教材

光学镜头的优化设计

Optimized Design of Optical Lenses

毛文炜 编著

Mao Wenwei

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是为初学光学镜头的优化设计者们编写的教材,全书共5章:光学镜头的优化设计概述;简单光学镜头优化设计实例;三片镜头优化设计实例;中等复杂镜头优化设计实例;适应法优化设计实例和全局优化设计实例。书中列有6个附录:初级像差系数;平行平板的初级像差系数;薄透镜初级像差系数的PW表示式;双胶薄透镜的求解步骤;书中优化设计光学镜头实例所用光学设计程序OSLOLT 5.4(OSLO EDU 6.4.5)中部分像差表示的含义;双胶薄透镜 $\hat{P}_0$ 、 $\hat{Q}_0$ 表。书中介绍10余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,这样优化设计过程的介绍大体是按照由易到难的顺序进行的。与讲述光学镜头设计的传统书籍不同,书中所介绍的每一个优化设计实例,都列有详细的优化设计过程,可以复现。

本书适用于对初级像差理论较为熟悉的光学工程、测控技术与仪器以及机电类专业大专院校师生和从事相关领域工作的工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

光学镜头的优化设计/毛文炜编著. —北京:清华大学出版社, 2009.6

(清华大学机械工程基础系列教材)

ISBN 978-7-302-19692-1

I. 光… II. 毛… III. 光学透镜—镜头—最优设计—高等学校—教材 IV. TH74

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第036508号

责任编辑:张秋玲 洪 英

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:17

字 数:368千字

版 次:2009年6月第1版

印 次:2009年6月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。

联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:014234-01

“机械工程基础”系列教材编委会

顾 问 (按姓氏笔画序)

金国藩(中国工程院院士)

温诗铸(中国科学院院士)

主 任 李庆祥

副主任 丁天怀 贾惠波 申永胜

委 员 刘朝儒 陈 恩 王东生 王伯雄

毛文炜 郁鼎文 郝智秀 季林红

秘 书 冯 涓

前言



为总结教学改革成果,配合新教学规划的落实,编写出新课程体系的系列教材,清华大学精密仪器与机械学系学术委员会组织相关课程的授课教师编写本科生教材。本书是该系列教材中的一本,内容主要涉及光学工程学科中的光学镜头的优化设计。

“光学透镜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。如果把一个透镜设计问题交给 12 个不同的设计师,往往会得到 12 种不同的设计结果。这是因为光学透镜的设计问题与习惯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,光学透镜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。”正因为如此,对于光学镜头设计的初学者来说,针对若干初步的设计练习题目,如果有步骤清楚、路线可行、结果可以复现的路,跟着一步一步地学走一遍,完整、清楚地了解整个设计过程,几个循环下来,可能对学习是有帮助的。更何况现代的光学镜头设计,都是在计算机上借助于光学镜头优化设计程序逐步完成的。事实上,“优化”是一个修改已有系统以提高像质的过程,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。基于这个认识,本书中的每一个设计实例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得到最后的结果。

全书共 5 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、过程与一些应该注意之处,并介绍光学设计中的两种常用的优化方法,即阻尼最小二乘法和适应法。讲述镜头优化设计方法的数学原理、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,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 2~4 章共列有 10 余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,这样优化设计过程的介绍大体也就按照由易到难的顺序进行了。

第2章列有激光聚焦物镜、激光扫描物镜和低倍显微物镜3个优化设计实例。其中,激光聚焦物镜给出了3个不同的初始结构,并给出了从这3个初始结构出发优化出来的4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,并选择了3对玻璃分别优化设计出结果,以资比较;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3个优化设计实例。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7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7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,一些自变量的微小变化引起的像差变化,就比较容易通过其他自变量的微小变化补偿回来。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。通过将“双胶”结构改为“双分”结构,使得两个物镜的色球差都校正得很好,加之它们的位置色差也校正得很好;所以在像差曲线上,看它们的二级光谱像差就非常明确、清楚。

第4章列有中倍李斯特显微物镜、四片放映物镜和双高斯照相物镜3个优化设计实例。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,通常都没有显式地输出。另外又将用配合法设计出的中倍李斯特显微物镜作进一步的优化,从而消除了像散。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年教学备课房间的变动,使得写作本书时怎么也找不到王树森于30多年前撰写的那份打字油印的设计资料了,现在的数据来自阅读笔记。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。另一个是直接采用程序设定的默认评价函数,同样优化出了好的结果;双高斯照相物镜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,得到了可与书中优化设计光学镜头例子中所用光学设计程序OSLOLT 5.4所给出的范例相比的优良结果。

第2~4章中所有的优化设计实例都使用了OSLOLT 5.4程序,这个程序采用的算法是阻尼最小二乘法。适应法也是光学优化设计程序中常常采用的主流算法,与阻尼最小二乘法一样,适应法也是一种局部优化算法。所以光学设计中的全局优化算法也就成了一个研究领域。第5章中列有一个使用适应法优化程序将C. G. Wynne $40\times$ 平场显微物镜的彗差和高级球差作了显著改进的设计实例,还列有一个使用全局优化程序设计的三片照相物

镜实例。

书中优化设计光学镜头实例中所用的光学设计程序主要是 OSLOLT 5.4,它是一个免费的教育版程序,它最多能算 12 面(物面和像面不计入总面数)以下的镜头。读者可在 http://www.lamdares.com/education/oslo_edu 找到免费下载的最新版,不过它们一般最多能算 10 面。因为新版不能计算双高斯照相物镜,而较旧的版本 OSLOLT 5.4 却是可以的,加之新版与旧版的核心功能差不多,所以本书采用旧版 OSLOLT 5.4。

附录中 $\hat{P}_0$ 、 $\hat{Q}_0$ 表的数据摘录于《光学仪器设计手册(上册)》(国防工业出版社,1971)。

书中部分插图的绘制以及 $\hat{P}_0$ 、 $\hat{Q}_0$ 表数据的录入和校对是郭超完成的,在此致谢。

作 者

2009 年 4 月于清华大学

目录

1	光学镜头的优化设计概述	1
1.1	引言	1
1.2	光学镜头设计中常用的两种最优化方法的数学原理	3
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	5
1.2.4	边界条件	6
2	简单光学镜头优化设计实例	7
2.1	He-Ne 激光光束聚焦物镜的优化设计	7
2.1.1	镜头片数及玻璃选择的考虑和初步分析	8
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	以负前凸型和负前凹型为基础的高折射率双片镜头的优化设计	22
2.2	激光扫描物镜的优化设计	32
2.2.1	自行构造评价函数优化设计激光扫描物镜	33
2.2.2	采用评价函数 GENII 优化设计激光扫描物镜	42
2.2.3	进一步的考虑与优化	44
2.3	$-5\times$ 显微物镜的优化设计	47
2.3.1	依据初级像差理论求解初始结构	47
2.3.2	玻璃对(BaK7,ZF3)基础上的优化	50
2.3.3	玻璃对(K3,ZF2)基础上的优化	55
2.3.4	玻璃对(ZF2,BaK2)基础上的优化	61
2.3.5	Shannon 设计法	65

3	三片镜头优化设计实例	72
3.1	三片摄影物镜的优化设计	73
3.1.1	Richard Ditteon 三片摄影物镜的初始解	73
3.1.2	Richard Ditteon 三片摄影物镜的优化设计	78
3.2	三片数码相机物镜的优化设计	89
3.3	大孔径望远物镜优化设计实例 1	103
3.4	大孔径望远物镜优化设计实例 2	121
4	中等复杂镜头优化设计实例	127
4.1	中倍李斯特显微物镜优化设计实例 1	128
4.1.1	用改进了的配合法设计李斯特显微物镜	128
4.1.2	优化校正李斯特物镜存在的像散实例 1	139
4.1.3	优化校正李斯特物镜存在的像散实例 2	148
4.2	中倍李斯特显微物镜优化设计实例 2	160
4.3	四片放映物镜优化设计实例 1	175
4.4	四片放映物镜优化设计实例 2	187
4.5	双高斯照相物镜优化设计实例	205
5	适应法优化设计实例和全局优化设计实例	226
5.1	用适应法优化设计程序优化 Wynne 40 $\times$ 平场显微物镜实例	226
5.2	用全局优化方法设计的三片照相物镜实例	233
附录 A	初级像差系数	238
附录 B	平行平板的初级像差系数	239
附录 C	薄透镜初级像差系数的 PW 表示式	240
附录 D	双胶薄透镜的求解步骤	241
附录 E	OSLOLT 5.4(OSLO EDU 6.4.5)中部分像差表示的含义	243
附录 F	双胶薄透镜 $\hat{P}_0$、$\hat{Q}_0$ 表	244
	参考文献	262



光学镜头的优化设计概述

1.1 引言

光学设计的一般过程大体上可以分 6 个步骤：

第 1 步根据仪器总体性能设计要求，确定光学镜头的性能指标，即确定镜头的焦距(f')要多长，视场范围(角视场 ω 或线视场 y')要多广，相对孔径(D/f')或数值孔径(NA)要多大，同时应该确定镜头的成像质量要求。

第 2 步根据这些具体的指标初步选择镜头的结构型式，并给出一个初始结构。例如要设计一个焦距 $f'=50\text{ mm}$ ，相对孔径 $D/f'=1/3.5$ ，全视场 $2\omega=50^\circ$ 的照相物镜，一般选择三片(柯克)型式如图 1-1 所示，或天塞型式如图 1-2 所示。

如果相对孔径 $D/f'=1/2$ ，其他要求类似，则一般选用双高斯型式，如图 1-3 所示。

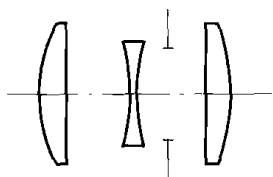


图 1-1 三片(柯克)型照相物镜

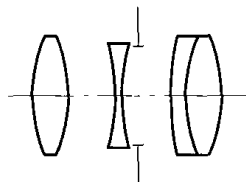


图 1-2 天塞型照相物镜

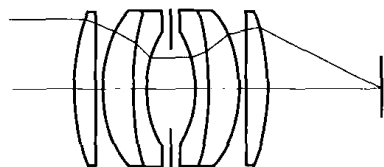


图 1-3 双高斯照相物镜

又例如要设计一个低倍显微物镜，它的横向放大率 $\beta=-5\times$ ，它的数值孔径 $\text{NA}=0.1$ ，则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 $\text{NA}=0.3$ ，就选择两组双胶的李斯特(Lister)型式，如图 1-5 所示。

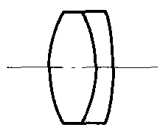


图 1-4 双胶型式的低倍显微物镜

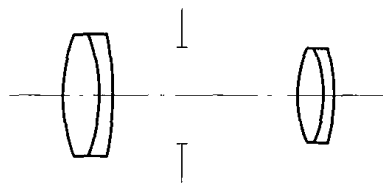


图 1-5 李斯特显微物镜

之所以这样选择是根据广大光学设计人员的经验和实践,从这些结构型式出发容易取得好的结果。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,系统的结构也就更复杂。自然系统的视场增大,系统的焦距增长,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雷同的镜头通过焦距缩放作为初始结构,例如 3.4 节大孔径望远物镜设计例 2,以及 4.5 节双高斯照相物镜优化设计例;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 $5\times$ 显微物镜优化设计例,以及 3.1.1 节三片摄影物镜优化设计例;有光学设计经验者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。

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、非球面透镜的各非球面系数),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。

第 4 步是进行像质评价,按照仪器总体性能指标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。

对于一些常见的常规镜头,有许多现成的成像质量好的结果作参照,容易做到正确的选型;如果是针对新型的系統,分解出来的镜头要求较少参照物,则要在选型上花一番工夫。选型不好,则在第 3 步和第 4 步之间虽经多次校正,像质仍达不到要求,此时要转入第 2 步,寻找新的结构型式。

第 5 步是计算、分配、制定镜头诸元件、组件的加工公差和装配公差。

第 6 步是绘制光学系统图、光学组件和零件图并作规范的各项标注。

在光学设计的 6 个步骤中,第 3 步像差校正工作量较大,艺术性较强,也是最重要的一步。一般来说,像差校正是一个循序渐进的过程,很少有一蹴而就的事,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而将其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,三靠设计人员设计经验的积累与判断。

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

速发展又有可能将已证明是有效的部分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、过程与一些注意之处;并介绍光学设计中的两种常用的优化方法,即阻尼最小二乘法和适应法。

1.2 光学镜头设计中常用的两种最优化方法的数学原理

在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。

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

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f_1 \\ &\vdots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f_m \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

上式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 $j=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, n$ 。原则上它可由光路计算得出; 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。当我们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 , 这个目标往往不是一步达到的,因为事实上办不到,其原因是用线性化方法解非线性问题是有限限制的,但可以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目 n 相等,分 $m \leq n$ 和 $m > n$ 两种情况分别讨论。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 $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)^T$,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小于或等于可改变的结构参数总数目外,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'_1 ,初级弧矢场曲 x'_2 和初级像散 x'_3 这3种像差是相关像差,因为3者中的任何一个都可用其余两个表示出来。若将这3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,亦相当于式(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数目 m 大于可改变的结构参数总数目 n ,适应法则不能应用,通常采用如下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)的方程数目 m 多于自变量数目 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。这样做的期望是,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平方和为最小。

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 0.1 mm 的小像差镜头,其球差和场曲小于 0.1 mm 就可以了,但对波色差 $\sum (D-d)\delta n$ 来说,要小于 0.000 25 mm 才认为满意,而正弦差 OSC 则允许 0.002 5。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,各广义像差的量纲并不一致,这使得式(1-3)的物理意义不很明确。改进的办法是在上式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我们希望的一个好的解,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 的步长往往太大,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就是采用阻尼最小二乘法。

1.2.3 阻尼因子 p 、权重因子 μ_j 和评价函数 ϕ

如前所述,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,特别是非线性程度愈高的问题愈是如此,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 称为阻尼因子的缘由。当镜头在优化设计时,本地结构参数附近范围里可线性化程度究竟如何,是可以通过计算在线地迅速作出判断的,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,相应的优化过程可快一些;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,所以人工权重因子给 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容易了一些。

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呢?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做出判断和决策,并且要在设计过程中适时做出调整。这是构造评价函数的要点。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。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 $D/f'=1/4$,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 3 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 100 mm 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。权重因子取 1,即选自动权重。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。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求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。例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。这类限制称为边界条件。在阻尼二乘法程序中,对边界条件的处理方法是把它们和像差一样对待。当某个参数违背边界条件时,将它们的违背量加一个适当的权重因子放入评价函数,这些都能在程序中自动设置完成。使用者只需要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 3 者是相关的,只能将其中两个拿出来加以控制,加入第 3 个就会和前两个发生矛盾。

本章讲述了镜头优化设计方法中常用的适应法和阻尼最小二乘法的数学原理,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,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。

2

简单光学镜头优化设计实例

在以球面构成的光学镜头中,若要考虑适当校正像差,则由两片镜片组成的镜头是最简单的光学镜头。本章给出 3 个简单镜头的优化设计实例,第 1 个例子是激光光束聚焦物镜,第 2 个例子是激光扫描物镜,第 3 个例子是低倍显微物镜。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。

对于每一个设计例子,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复现整个优化过程,便于分析比较。

2.1 He-Ne 激光光束聚焦物镜的优化设计

本节利用 OSLOLT 5.4(OSLO EDU 6.4.5)程序优化设计一个激光光束聚焦物镜。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,最终找到了多个像质较优的解。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为:

- (1) 物距 $l = \infty$, 视场角 $\omega = 0^\circ$, 焦距 $f' = 60 \text{ mm}$, 相对孔径 $D/f' = 1/2$, 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 0.002 mm ;
- (4) 镜头结构尽量简单,争取用两片镜片达到要求。

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

玻璃采用普通的 K9, 折射率为 $n_{0.6328} = 1.51466$, 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 OSLOLT 5.4 程序设计一个焦距为 $f' = 60$ mm, 相对孔径为 $D/f' = 1/2$, $\omega = 0^\circ$ 的激光光束聚焦物镜。以单片透镜的一个半径作为自变量, 另一个半径用来保证焦距。可以在计算机上输入初始数据的过程中在线完成这一步。

OSLOLT 5.4 中评价函数有 3 种构成型式: 一是以像差系数为基础构成的评价函数, 称为像差系数型式的评价函数; 二是以光线的几何像差、横向像差以及波像差构成的评价函数, 简称光线型式的评价函数; 三是程序本身设定的默认评价函数, 称为 GENII 误差函数。

现采用基于像差系数的评价函数, 将三级球差 SA3、五级球差 SA5、七级球差 SA7 和全部球差 SA 都加入到评价函数中, 每一项的权重都取 1, 进行优化。优化后的结构参数如表 2-1 所列, 像差曲线如图 2-1 所示, 点列图如图 2-2 所示, 像差数据列于表 2-2 中。

表 2-1 低折射率单片的结构参数

r/mm	d/mm	n
∞ (光阑半径)		
36.221	6	1.51466
-197.599		

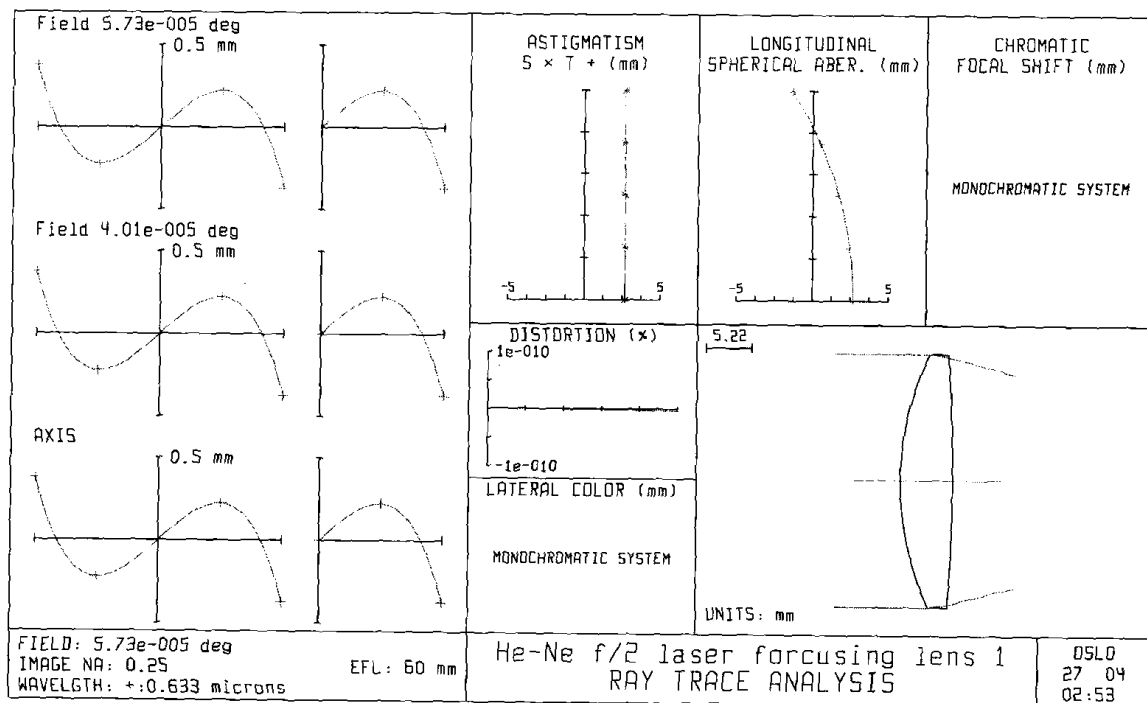


图 2-1 低折射率单片的像差曲线