

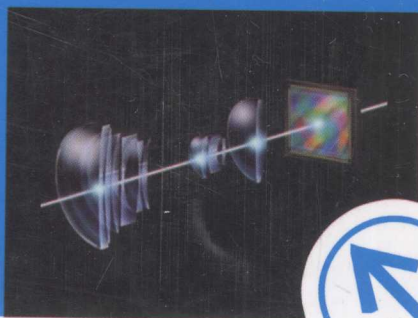
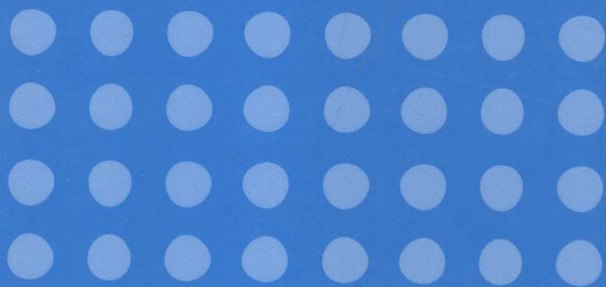


高等学校“十二五”重点规划教材  
光 电 工 程 系 列

Optical Design Tutorials Based on ZEMAX Software

# 基于ZEMAX的 光学设计教程

黄振永 卢春莲 俞建杰◎主编 周彦平◎主审



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

高等学校“十二五”重点规划教材光电工程系列

# 基于 ZEMAX 的光学设计教程

黄振永 卢春莲 俞建杰 主编  
周彦平 主审

（合肥）中国科学技术出版社



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本教程介绍了光学系统的像差理论、像质评价方法、光学设计软件 ZEMAX 的使用方法、典型光学系统设计的优化方法。其特色在于,通过大量的基于 ZEMAX 的光学设计实例及其翔实的设计过程诠释并强化了如何利用 ZEMAX 软件进行光学设计的使用技巧,更有利于高等院校培养技能型和应用型光学设计人才。

本书分为五编,共 27 章。第一编是光学设计基础(第 1~6 章);第二编是光学设计软件 ZEMAX 用户界面(第 7~14 章);第三编是基于 ZEMAX 的光学设计实例(第 15~20 章);第四编是典型光学系统设计的优化方法(第 21~26 章);第五编是课程设计与毕业设计教与学指南(第 27 章)。

本书可作为光学、光信息科学与技术、测控技术与仪器、光电信息工程、光学工程等专业的本科生和研究生的“光学设计”课程教材,也可作为“工程光学课程设计”或“应用光学课程设计”的指导教材,或光学设计工作者的参考资料,尤其适合于刚涉足学习 ZEMAX 软件的人员使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

基于 ZEMAX 的光学设计教程/黄振永,卢春莲,俞建杰  
主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013. 8(2014. 1 重印)  
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0597 - 4

I. ①基… II. ①黄… ②卢… ③俞… 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(2013)第 170110 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451 - 82519328  
传 真 0451 - 82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 24. 75  
字 数 616 千字  
版 次 2013 年 8 月第 1 版  
印 次 2014 年 1 月第 2 次印刷  
定 价 48. 00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

光学设计是一门古老而又崭新的学科。说它古老是因为早在战国时期《墨经》就记载了有关小孔成像的知识;说它崭新是因为这门学科随着计算机技术的发展、计算科学的进步、优化工具和评价方法的更新,一直保持着与时俱进的先进性。目前,ZEMAX 软件已经成为光学设计的主流软件之一。

正值国家“十二五”规划实施之际,鉴于光学设计是人民生活中众多产品(如眼镜、照相机、录像机、望远镜、显微镜、投影仪和光纤等产品)的关键技术之一,并考虑到现有教材中利用 ZEMAX 软件进行光学设计的章节比例偏少(其比例一般少于全书的 10%),严重制约着技能型人才和应用型人才的培养。因此,本教材的特色在于简明扼要地阐述了光学设计的像差和像质评价的理论知识,突出了计算机辅助光学设计的理念,通过大量的 ZEMAX 设计实例及其翔实的设计过程诠释并强化了如何利用 ZEMAX 软件进行光学设计的使用技巧,这样更有利于高等院校培养技能型和应用型光学设计人才。

本书分为五编,共 27 章。第一编是光学设计基础(第 1~6 章);第二编是光学设计软件 ZEMAX 用户界面(第 7~14 章);第三编是基于 ZEMAX 的光学设计实例(第 15~20 章);第四编是典型光学系统设计的优化方法(第 21~26 章);第五编是课程设计与毕业设计教与学指南(第 27 章)。第一编由哈尔滨工程大学卢春莲编写,第二编由哈尔滨工业大学俞建杰编写,第三编、第四编和第五编由北京理工大学珠海学院黄振永编写。黄振永完成了全书的审阅和统稿工作。全书由三位主编人员的导师哈尔滨工业大学周彦平教授主审,在此表示衷心的感谢。

鉴于光学设计像差理论比较成熟,在编写过程中参阅了大量文献,在此向各文献的作者表示衷心的感谢。

北京理工大学的苏秉华教授在本教程的编写过程中给出了很多好的建议和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书得到了以下课题项目的资金支持,在此表示感谢:

2011 年广东省民办高等教育专项资金项目——电子科学与技术省级重点专业建设项目;2012 年广东省高等教育教学改革项目——电子信息类工科应用创新型人才培养的探索与实践(编号 2012382);2011 年北京理工大学珠海学院教改课题项目——测控技术与仪器专业应用型人才培养模式的探索与实践;2012 年北京理工大学珠海学院科技发展基金项目——教师科技发展基金项目——基于 MATLAB 的光学实验仿真软件设计(编号 2012JS02),负责人黄振永;2012 年北京理工大学珠海学院科技发展基金项目——学生科技发展基金项目——基于 LABVIEW 的牛顿环光电成像及检测系统设计(编号 2012XS07),学生负责人纪楚鸿,指导教师黄振永。

本书可以作为光学、光信息科学与技术、测控技术与仪器、光电信息工程、光学工程等专业的本科生和研究生的“光学设计”课程教材,也可作为“工程光学课程设计”或“应用光学课程设计”的指导教材,也可作为光学设计工作者的参考资料,尤其适合于刚涉足学习 ZEMAX 软件的人员学习使用。

本教程自 2006 年 3 月策划并着手撰写,历时七个春秋有余,经过反复修改终于成稿。但由于作者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

欢迎交流:1754566452@qq.com。

编者

2013 年 7 月



# 目 录

## 第一编 光学设计基础

<b>第 1 章 光学设计的发展概述</b> .....	1
1.1 光学设计的概念 .....	1
1.2 光学设计的发展史概述 .....	2
<b>第 2 章 光学设计的过程与步骤</b> .....	4
2.1 光学设计的一般过程 .....	4
2.2 光学设计的具体步骤 .....	5
<b>第 3 章 仪器对光学设计的要求</b> .....	8
3.1 对光学系统基本特性的要求 .....	8
3.2 对光学系统外形尺寸的要求 .....	8
3.3 对光学系统成像质量的要求 .....	9
3.4 对光学系统使用条件的要求 .....	10
3.5 对光学系统经济性的要求 .....	11
3.6 对光学零件的技术要求 .....	12
<b>第 4 章 光学系统的像差概述</b> .....	19
4.1 球差 .....	19
4.2 正弦差与彗差 .....	22
4.3 像散与场曲 .....	25
4.4 色差 .....	27
4.5 畸变 .....	30
4.6 几何像差的曲线表示 .....	32
4.7 小结 .....	36
<b>第 5 章 光学系统的像质评价</b> .....	37
5.1 波像差与瑞利标准 .....	37
5.2 分辨率 .....	37
5.3 点列图在 ZEMAX 中的实现 .....	38
5.4 光学传递函数在 ZEMAX 中的实现 .....	41
5.5 点扩散函数 PSF 在 ZEMAX 中的实现 .....	44
5.6 包围圆能量曲线在 ZEMAX 中的实现 .....	45
<b>第 6 章 光学系统的像差公差</b> .....	47
6.1 望远物镜和显微物镜的像差公差 .....	47
6.2 望远目镜和显微目镜的像差公差 .....	48
6.3 照相物镜的像差公差 .....	49

6.4	中心厚度、不平行度和角度公差 .....	50
6.5	公差在 ZEMAX 软件中的实现 .....	51

## 第二编 光学设计软件 ZEMAX 用户界面

<b>第 7 章</b>	<b>国内外光学设计软件的发展概述 .....</b>	<b>52</b>
7.1	光学设计软件的发展简况 .....	52
7.2	常见光学设计软件简介 .....	52
<b>第 8 章</b>	<b>ZEMAX 用户界面 .....</b>	<b>56</b>
8.1	窗口类型 .....	56
8.2	主窗口 .....	58
8.3	透镜数据编辑窗口操作 .....	77
8.4	图形窗口操作 .....	83
8.5	文本窗口操作 .....	85
8.6	对话框窗口操作 .....	85
8.7	常用快捷键 .....	86
<b>第 9 章</b>	<b>文件菜单 .....</b>	<b>88</b>
9.1	文件菜单下拉选项 .....	88
9.2	参数 (Preferences) 选项设置 .....	89
<b>第 10 章</b>	<b>编辑菜单 .....</b>	<b>97</b>
10.1	透镜数据编辑窗口 (Lens Data Editor) .....	97
10.2	评价函数编辑窗口 (Merit Function Editor) .....	100
10.3	多重数据结构 (Multi - Configuration) .....	102
10.4	公差数据 (Tolerance Data) .....	104
10.5	附加数据 (Extra Data) .....	106
10.6	撤销 (Undo)、重做 (Redo) .....	108
<b>第 11 章</b>	<b>系统菜单 .....</b>	<b>110</b>
11.1	更新 (Update) 和全部更新 (Update All) .....	110
11.2	通用数据 (General) .....	111
11.3	视场 (Fields) .....	123
11.4	波长 (Wavelength) .....	124
11.5	结构 (Configuration) .....	124
<b>第 12 章</b>	<b>分析菜单 .....</b>	<b>125</b>
12.1	轮廓图 (Layout) .....	126
12.2	特性曲线 (Fans) .....	136
12.3	点列图 (Spot Diagram) .....	140
12.4	调制传递函数 (MTF) .....	145
12.5	点扩散函数 (PSF) .....	159
12.6	波前 (Wavefront) .....	165
12.7	均方根 (RMS) .....	169

12.8	包围圆能量(Encircled Energy)	175
12.9	照度(Illumination)	181
12.10	像分析(Image Analysis)	185
12.11	杂项(Miscellaneous)	192
12.12	赛得系数(Seidel Coefficients)	203
<b>第13章</b>	<b>工具菜单</b>	<b>205</b>
13.1	优化菜单	205
13.2	评价函数列表	214
13.3	公差	214
13.4	样板	218
13.5	库文件	220
13.6	镀膜文件	222
13.7	孔径变换	223
13.8	镜头元件反转	223
13.9	焦距变换	224
13.10	添加折叠反射镜	225
13.11	幻像发生器	226
13.12	输出IGES/STEP文件	227
<b>第14章</b>	<b>报告菜单</b>	<b>228</b>
14.1	表面数据(Surface Data)	228
14.2	系统数据(System Data)	230
14.3	规格数据(Prescription Data)	232
14.4	报告图形(Report Graphics 4/6)	235
<b>第三编 基于 ZEMAX 的光学设计实例</b>		
<b>第15章</b>	<b>单透镜设计</b>	<b>236</b>
15.1	设计任务	236
15.2	设计过程	236
15.3	设计结果	243
15.4	设计练习	244
<b>第16章</b>	<b>双胶合设计</b>	<b>245</b>
16.1	设计任务	245
16.2	设计过程	245
16.3	设计结果	248
16.4	设计练习	254
<b>第17章</b>	<b>三片式照相物镜设计</b>	<b>255</b>
17.1	设计任务	255
17.2	设计过程	255
17.3	设计结果	261



17.4	设计练习	268
<b>第 18 章</b>	<b>双高斯照相物镜设计</b>	269
18.1	设计任务	269
18.2	设计过程	269
18.3	设计结果	274
18.4	设计练习	283
<b>第 19 章</b>	<b>反射式望远物镜设计</b>	284
19.1	两反射镜式望远物镜设计	284
19.2	离轴反射式望远物镜设计	285
19.3	折反射混合式望远物镜设计	286
19.4	平面镜在 ZEMAX 中的设定	295
19.5	棱镜在 ZEMAX 中的设定	297
19.6	设计练习	298
<b>第 20 章</b>	<b>变焦距照相物镜设计</b>	299
20.1	变焦距理论基础	299
20.2	变焦距照相物镜设计示例	300
20.3	设计练习	311
<b>第四编 典型光学系统设计的优化方法</b>		
<b>第 21 章</b>	<b>光学系统初始结构的选定</b>	312
21.1	代数法	312
21.2	缩放法	317
<b>第 22 章</b>	<b>照相物镜设计的优化方法</b>	324
22.1	照相物镜的光学特性参数	324
22.2	照相物镜的像差校正要求	327
22.3	照相物镜的类型及优化方法	331
<b>第 23 章</b>	<b>望远物镜设计的优化方法</b>	341
23.1	望远镜系统的特性参数	341
23.2	望远物镜设计的特点	343
23.3	望远物镜的类型及优化方法	344
<b>第 24 章</b>	<b>显微物镜设计的优化方法</b>	349
24.1	放大镜的工作原理	349
24.2	显微镜的工作原理	349
24.3	显微镜的光学特性参数	350
24.4	显微物镜的像差校正要求	352
24.5	显微物镜的类型及优化方法	352
<b>第 25 章</b>	<b>目镜设计的优化方法</b>	355
25.1	目镜的光学特性参数	355
25.2	目镜的像差校正要求	357

25.3	目镜的类型及优化方法	357
25.4	目镜的设计原则	360
25.5	目镜的设计示例	361
<b>第 26 章</b>	<b>照明光学系统设计的优化方法</b>	<b>366</b>
26.1	照明光学系统的设计要求	366
26.2	照明方式分类及其特点	366
26.3	照明光学系统的像差校正要求	367
26.4	照明光学系统的结构类型	368
26.5	聚光照明系统的作用	369
26.6	聚光照明系统的分类及其特点	369
26.7	聚光照明系统的设计原则	371

## 第五编 课程设计与毕业设计教与学指南

<b>第 27 章</b>	<b>课程设计与毕业设计教与学指南</b>	<b>373</b>
27.1	课程设计的任务书及其要求	373
27.2	课程设计的参考设计结果	376
27.3	毕业设计的大纲撰写指南	381
<b>附录 1</b>	<b>双胶合透镜的 <math>P_0</math> 表</b>	<b>383</b>
<b>附录 2</b>	<b>双胶合透镜参数表</b>	<b>384</b>
<b>参考文献</b>		<b>385</b>

# 第一编 光学设计基础

## 第 1 章 光学设计的发展概述

### 1.1 光学设计的概念

随着科技的进步,传统光学仪器日趋成为光学、机械、电子和计算机一体化的现代智能化仪器,如数码相机、投影仪等。虽然如此,对于一个光学系统而言,无论是成像系统还是照明系统,光学设计是实现各种光学系统的重要基础。随着光学仪器的发展,光学设计的理论、优化算法、仿真工具和性能评价方法日益完善。

何谓“光学设计”呢?业界尚没有形成一个统一的说法。刘钧<sup>[1]</sup>等人认为,光学设计所要完成的工作应该包括光学系统设计(如图 1-1 所示)和光学系统结构设计(如图 1-2 所示)。

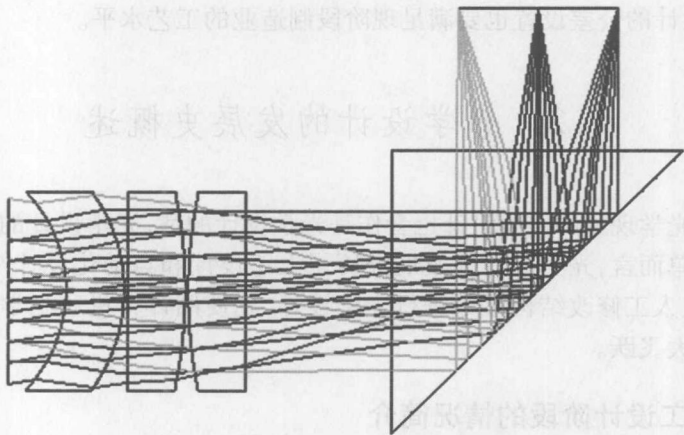


图 1-1 某投影物镜系统设计示意图

本教程讨论的对象主要是光学系统设计。所谓“光学系统设计”,就是根据仪器所提出的使用要求,来决定满足其使用要求的光学系统性能参数、外形尺寸参数和各光组的结构类型等。

一般而言,光学系统设计的过程大致分为两个阶段。

第一阶段:初步设计阶段。该阶段主要是根据光学仪器总体的技术要求,如性能指标、外形体积、使用环境和质量等,从光学仪器的总体出发,拟定出光学系统的原理图,并初步计算光学系

统的外形尺寸、确定结构类型以及各光组之间光焦度分配等问题。因此,这一阶段也称为“外形尺寸计算阶段”。

第二阶段:像差设计阶段。该阶段主要是根据初步设计结果,确定每个透镜组的具体结构参数,如曲率半径、厚度、间隔和材料等,以保证满足系统光学特性和成像质量的要求。

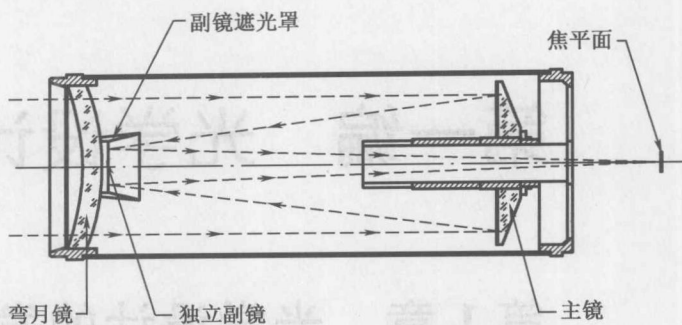


图 1-2 某 Cassegrain 式反射系统结构设计图

以上两个阶段既有区别又有联系:如在初步设计阶段,就要预算像差设计是否可以实现,以及系统结构的复杂程度;反之,当像差设计无法实现时,或系统结构过于复杂时,则必须重新进行初步设计。

一般而言,初步设计阶段是光学仪器设计的关键阶段。例如,我们现在要设计一个相对孔径为  $1/1.2$  的望远物镜系统,如果我们选择单组双胶合物镜作为初始结构,由于单组双胶合物镜的相对孔径一般不大于  $1/3$ ,所以可导致第二阶段的像差校正很困难,甚至可能导致设计任务无法完成,或成像质量不佳,或结构过于复杂。所以,一个好的光学设计应该在满足其使用要求(如成像质量要求和外形尺寸要求等)情况下,追求结构最简单化。

此外,光学设计还要追求设计标准化,如球面曲率半径的设计要以现阶段企业使用的磨具的曲率半径规格为标准进行设计,否则就要重新研制新的加工磨具,从而导致光学元件制造成本的增加。

当然,光学设计的公差设置也要满足现阶段制造业的工艺水平。

## 1.2 光学设计的发展史概述

如果把研究光学现象的实验设计也看作是光学设计的话,光学设计的发展历史是一个漫长的过程。简单而言,光学设计的发展经历了人工设计和自动化设计两个阶段,实现了由手工计算像差、人工修改结构参数进行光学设计,到使用计算机和光学自动优化设计程序进行设计的巨大飞跃。

### 1.2.1 人工设计阶段的情况简介

最初生产的光学仪器是利用人们直接磨制的各种不同材料、不同形状的透镜,把这些透镜按不同情况进行排列组合,并从中找出成像质量比较好的结构组合。一方面,当时制造透镜的工艺技术水平较低,另一方面,排列组合透镜有很大的偶然性。所以,这一阶段内要想组合出一个质量较好的结构,势必要花费很长的时间和很多的人力、物力和财力,而且很难拼凑到各方面都较为满意的结构。

随后人们利用几何光学中光路计算的理论和像差理论来进行光学设计。光学设计正是从光路计算开始快速发展的。用理论作指导进行光学设计是很重要的进步,但是由于光



学系统结构参数众多、光学结构参数与像差之间的关系又十分复杂,很多关系并非线性关系。所以,要想设计出一个好的结构,就必须进行长时间的、繁重的体力计算劳动。

### 1.2.2 自动化设计阶段的情况简介

自 20 世纪计算机的出现,光学设计人员逐渐从繁重的手工计算中解放出来,设计周期已大大缩减。设计人员的工作重心也由像差计算转移到像差计算数据分析和优化策略这些方面来,如利用 ZMEAX 软件分析某光学系统的场曲和畸变(Field Curv/Dist)、快速傅里叶变换振幅调制传递函数(FFT MTF)情况等(图 1-3、图 1-4)。

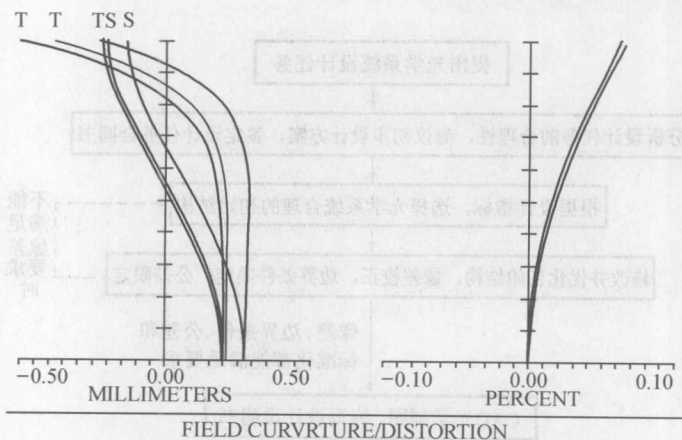


图 1-3 某光学系统的场曲和畸变(Field Curv/Dist)图

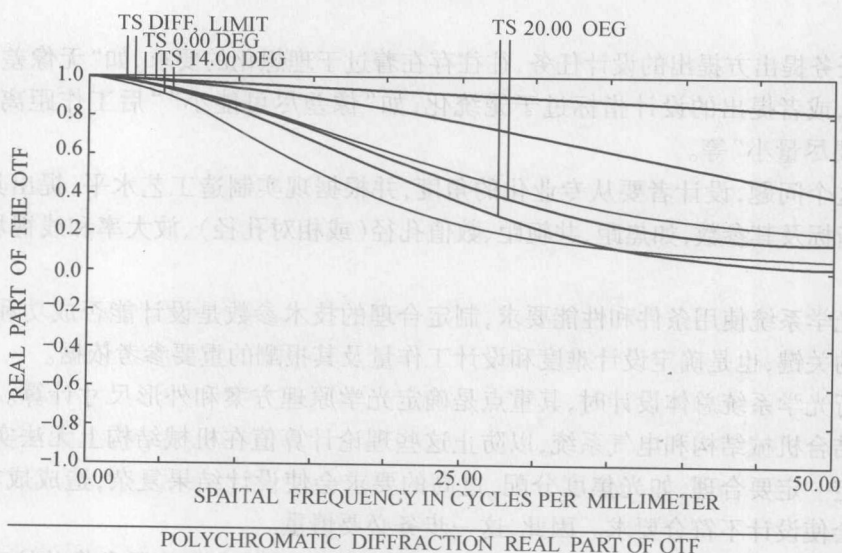


图 1-4 某光学系统的 FFT MTF 图

## 第2章 光学设计的过程与步骤

### 2.1 光学设计的一般过程

光学设计的一般过程简化表述如图2-1所示。

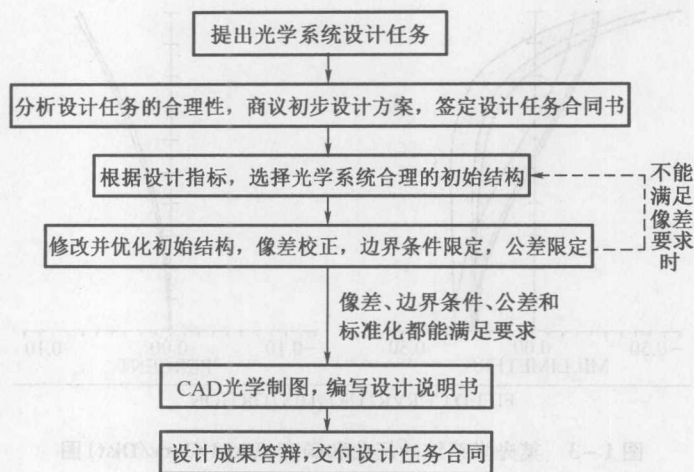


图2-1 光学设计的一般过程示意图

设计任务提出方提出的设计任务,往往存在着过于理想化的要求,如“无像差”“畸变为零”等要求,或者提出的设计指标过于笼统化,如“像差尽可能小”“后工作距离要尽可能小”“结构要尽量小”等。

面对这个问题,设计者要从专业化的角度,并根据现实制造工艺水平,提出具体的、合理的设计指标及其参数,如焦距、共轭距、数值孔径(或相对孔径)、放大率和线视场(或角视场)等。

根据光学系统使用条件和性能要求,制定合理的技术参数是设计能否成功和能否完成设计任务的关键,也是确定设计难度和设计工作量及其报酬的重要参考依据。

在进行光学系统总体设计时,其重点是确定光学原理方案和外形尺寸计算。在进行计算时还要结合机械结构和电气系统,以防止这些理论计算值在机械结构上无法实现。每项性能的确一定合理,如光焦度分配,过高的要求会使设计结果复杂,造成成本过高;过低的要求会使设计不符合要求。因此,这一步务必要慎重。

光组的设计一般分为三个阶段:选型阶段、确定初始结构参数阶段和像差校正阶段。

所谓“光组”,一般是以一对物像共轭面之间的所有光学零件为一个光组,也可进一步细分,如现有的常用镜头可分为物镜和目镜两个光组。

镜头在选型时,首先要依据工作波长范围、相对孔径(或数值孔径)、线视场(或角视

场)、有效焦距、后工作距离及共轭距等参数来选定镜头的类型,如长波红外系统常选择反射式系统类型。这里要特别注意各类镜头类型所能实现和承担的最大相对孔径、最大视场和最大光焦度等指标。选型常常利用现有的专利库和积累的工作经验来选定,选型是否合理直接影响设计的难度、设计的成本和设计成功率,是光学设计的关键。

初始结构的确定常有两种方法:

其一,解析法。即根据初级像差理论通过像差计算求解初始结构参数,如透镜的面型、曲率半径、玻璃厚度、元件间距、折射率、色散系数、视场、渐晕系数和光阑位置等初始结构参数。

其二,缩放法。即根据对光学系统设计的要求,找出性能参数比较接近的已有结构,将其各尺寸乘以缩放比  $K$  得到所要求的初始结构,并估算其像差大小和变化趋势。对像差影响较为敏感的参数,在优化设计过程中要谨慎对待。

确定好初始结构后,利用光学设计软件在计算机上进行光路仿真,输出其像差曲线,分析像差类型、大小和原因及其减小对策,再反复进行像差计算和平衡,直至像差满足要求为止。这里要注意的是,在优化的过程中要限定边界条件和优化函数类型及其大小,待成像质量较好时再进一步使参数符合实际制造企业光学元件样板标准化的要求。

根据国家或国际光学制图标准绘制各类 CAD 图纸,包括确定各光学元件之间的相对位置、装调后的实际大小和技术条件。这些 CAD 图纸为光学元件的加工、检验,组件的胶合、装调、校正,甚至整机的装调和测试提供依据。

在设计任务完成后往往还要编写设计说明书,并进行光学设计任务结题答辩。一般来说,设计说明书是进行光学设计整个过程的技术总结,是进行技术方案评审的主要依据。

## 2.2 光学设计的具体步骤

下面以缩放法为例,阐述光学设计的具体步骤(图 2-2)。

根据萧泽<sup>[2]</sup>新编著的《工程光学设计》(第二版)(电子工业出版社出版)第 4~5 页中图 1-1 可以得知常用镜头光学特性之间的关系如下:

(1) 同样结构形式者,相对孔径越小、角视场越小,则其像质越好;

(2) 焦距相同时,相对孔径越大,则角视场越小;

(3) 焦距相同时,视场角越大,则相对孔径越小;

(4) 物镜的焦距越长,对于同样结构类型的物镜,能够得到具有良好像质的相对孔径和视场角也越小,如图 2-3 所示。

切记:选型时光学系统设计的出发点是否合理,是设计成败的关键,一定要花足够的精力做好这项工作。

假如  $f'$  为已有系统的焦距,  $f'^*$  为所要设计系统的焦距,那么缩放比为

$$K = \frac{f'^*}{f'} \quad (2-1)$$

且缩放后的结构参数变为

$$\begin{cases} r^* = rK \\ d^* = dK \end{cases} \quad (2-2)$$

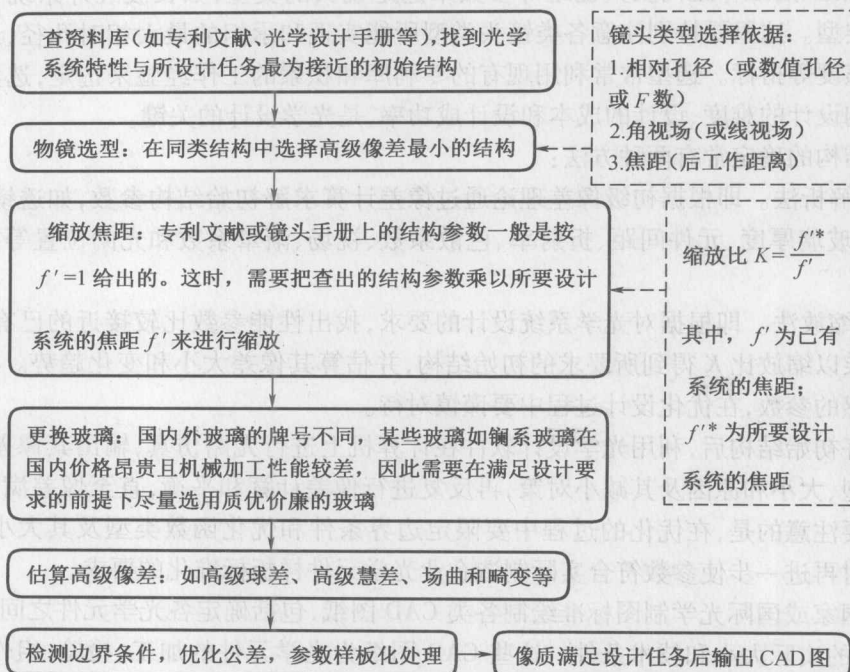


图 2-2 光学设计的具体步骤框图

其中,  $r$  为已有系统的曲率半径;  $r^*$  为所要设计系统的曲率半径;  $d$  为已有系统的透镜厚度或间距;  $d^*$  为所要设计系统的透镜厚度或间距。

为了保证更换玻璃后色差不变或变化很小, 更换玻璃时, 应尽量选用色散系数 (即阿贝数) 接近的玻璃。正透镜宜选用高折射率的冕牌玻璃, 它可以减小系统的高级像差和场曲。对于双胶合透镜应尽量确保使胶合面两边的折射率差变化不大, 这样可使原来系统的像差不会发生太大的变化。

更换好玻璃之后还应对更换玻璃的透镜的曲率半径作相应的修改, 以保证该透镜的光焦度不变。根据薄透镜的光焦度公式, 想要保持各折射面的光焦度不变, 新的折射率  $n^*$ 、曲率半径  $r^*$  和原来系统的折射率  $n$  和曲率半径  $r$  之间应满足以下关系

$$r^* = r \frac{n^* - 1}{n - 1} \quad (2-3)$$

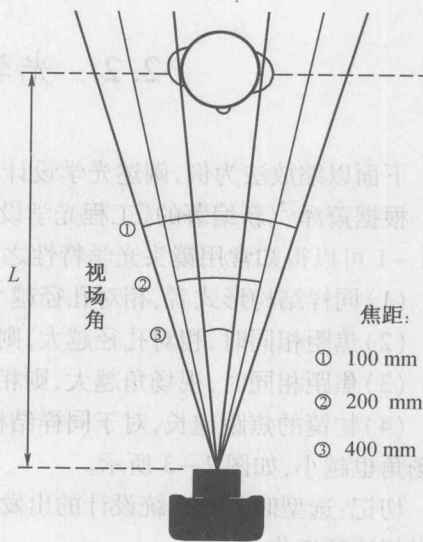


图 2-3 焦距与视场角的关系示意图



如果更换玻璃后单色像差虽好,但色差较大,可以用更换玻璃的方法校正色差。其思路是:如果0.707 1口径的位置色差较大,而全视场的倍率色差较小,则应更换靠近光阑的那块玻璃材料。这是因为,越靠近光阑时,孔径高度越小,倍率色差变化也就越小。反之,则应更换远离光阑的玻璃材料。如果两种色差符号相反,则应更换光阑前边的那块透镜的玻璃材料。