

JIYU ZEMAX DE GUANGXUE SHEJI JIAOCHENG

基于ZEMAX的 光学设计教程（第二版）

主编◎黄振永 卢春莲 苏秉华 俞建杰
主审◎周彦平

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内容简介

基于 ZEMAX 的光学设计教程

(第二版)

主编 黄振永 卢春莲 苏秉华 俞建杰
主审 周彦平

内容简介

本书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 和 TracePro、典型光学系统设计的优化方法。其特色在于,利用设计案例及其翔实的设计过程诠释了利用 ZEMAX 软件进行光学设计的技巧。本次修订补充了三个 TracePro 设计实例,满足了高校培养成像类和照明类光学设计人才的需要,同时更正了原版中存在的错误。

本版分为六编,共 28 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);第六编是照明系统设计案例(第 28 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,尤其适合于 ZEMAX 和 TracePro 软件的初学者使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于 ZEMAX 的光学设计教程 / 黄振永等主编. —2 版
—哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5661-1941-4

I. ①基… II. ①黄… 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(2018)第 157411 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 27.25
字 数 718 千字
版 次 2018 年 8 月第 2 版
印 次 2018 年 8 月第 1 次印刷
定 价 69.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn



第二版前言

根据读者的反馈和教学实践中的发现,本版修订了第一版中发现的错误。在此表示道歉和谢意。

本版添加了近两年国内影响力较大的光学设计竞赛的试题,便于学生了解本行业的赛事,为学生取得竞赛好成绩助力。

考虑到有些学校的课程名称是“光学设计”等,除了想让学生熟悉成像类光学设计软件以外,还想简明扼要地介绍照明类光学设计软件,因此本版添加了基于三个 TracePro 软件的照明光学系统设计案例,采用项目案例教学法,配有具体的设计步骤,学生只要跟着做一遍就能初步了解该照明设计软件的基本功能和设计方法,非常适合入门类、学时少的光学设计课程使用。

教学建议与本书使用说明如下:

1. 鉴于光学设计的理论历史悠久且内容繁杂、光学设计类课程的实践性很强,因此建议理论学时和上机实践学时按 1:1 设置,在上机实践中遇到的理论问题可以在机房内讲解。

2. 本书中有理论指导部分(建议在理论学时中完成)、工具性说明部分(建议在实践环节中遇到时再来查明,不用占用理论学时)、设计实例部分(建议在上机实践学时中完成)三部分内容。

3. 为综合评价学生的光学设计水平,建议课程总成绩包含理论考核和实践考核两部分。两部分各自占总成绩的比例分配方案按所在单位的要求处理。

4. 为避免设计报告出现雷同数据,建议设计参数尽量做到两点:每个人/组的设计参数不宜全同;难度系数大致一样(比如随着学号的增加,视场值越大,入瞳直径就越小,增加量/减小量不宜过大,也可以修改波长等参数)。

5. 本书不提供 PPT(之前做过 PPT,因为软件界面的截图放在 PPT 中在多媒体教室展示时发现图中字小,远距离的学生根本看不清楚,所以就不配 PPT),建议老师在有同步同屏功能的机房上课,老师在讲台上按需打开软件并操作,学生可以在面前的显示屏中清晰地观看操作,多年的教学实践证明学软件类的课在同步同屏机房上课效果更好。如果老师在备课时需要用到书中图片素材和部分设计案例的源文件,欢迎联系索取。E-mail:1754566452@qq.com。

鉴于能力有限,如果您发现书中还有不妥之处,欢迎批评指正。

感谢广大师生和光学设计爱好者对本书第一版的支持。

感谢哈尔滨工程大学出版社对本书第二版出版的支持。

感谢哈尔滨工程大学卢春莲博士为本书第二版出版工作付出的劳动。

感谢哈尔滨工程大学出版社石岭编辑为本书第二版出版工作付出的劳动。

感谢北京理工大学珠海学院信息学院对本版工作的支持。

感谢北京理工大学珠海学院苏秉华教授、薛峻文副教授对本版工作的支持。

感谢已列入参考文献及未列入参考文献的作者的前期贡献。

感谢光电信息技术与应用珠海市协同创新中心项目的支持。

感谢光电成像技术与系统教育部重点实验室(珠海分室)项目的支持。

最后感谢家人、领导们、同事们和朋友们对我们工作的支持。

编者

2018年4月

目 录

第一编 光学设计基础

第 1 章 光学设计的发展概述	1
1.1 光学设计的概念	1
1.2 光学设计的发展史概述	2
第 2 章 光学设计的过程与步骤	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
第 3 章 仪器对光学设计的要求	7
3.1 对光学系统基本特性的要求	7
3.2 对光学系统外形尺寸的要求	7
3.3 对光学系统成像质量的要求	8
3.4 对光学系统使用条件的要求	9
3.5 对光学系统经济性的要求	10
3.6 对光学零件的技术要求	11
第 4 章 光学系统的像差概述	18
4.1 球差	18
4.2 正弦差与彗差	21
4.3 像散与场曲	24
4.4 色差	26
4.5 畸变	29
4.6 几何像差的曲线表示	31
4.7 小结	35
第 5 章 光学系统的像质评价	36
5.1 波像差与瑞利标准	36
5.2 分辨率	36
5.3 点列图在 ZEMAX 中的实现	37
5.4 光学传递函数在 ZEMAX 中的实现	40
5.5 点扩散函数 PSF 在 ZEMAX 中的实现	43
5.6 包围圆能量曲线在 ZEMAX 中的实现	44
第 6 章 光学系统的像差公差	46
6.1 望远物镜和显微物镜的像差公差	46
6.2 望远目镜和显微目镜的像差公差	47
6.3 照相物镜的像差公差	48

6.4	中心厚度、不平行度和角度公差	49
6.5	公差在 ZEMAX 软件中的实现	50

第二编 光学设计软件 ZEMAX 用户界面

第 7 章	国内外光学设计软件的发展概述	51
7.1	光学设计软件的发展简况	51
7.2	常见光学设计软件简介	51
第 8 章	ZEMAX 用户界面	55
8.1	窗口类型	55
8.2	主窗口	57
8.3	透镜数据编辑窗口操作	76
8.4	图形窗口操作	82
8.5	文本窗口操作	84
8.6	对话框窗口操作	84
8.7	常用快捷键	85
第 9 章	文件菜单	87
9.1	文件菜单下拉选项	87
9.2	参数(Preferences)选项设置	88
第 10 章	编辑菜单	96
10.1	透镜数据编辑窗口(Lens Data Editor)	96
10.2	评价函数编辑窗口(Merit Function Editor)	99
10.3	多重数据结构(Multi-Configuration)	101
10.4	公差数据(Tolerance Data)	103
10.5	附加数据(Extra Data)	105
10.6	撤销(Undo)、重做(Redo)	107
第 11 章	系统菜单	109
11.1	更新(Update)和全部更新(Update All)	109
11.2	通用数据(General)	110
11.3	视场(Fields)	122
11.4	波长(Wavelength)	123
11.5	结构(Configuration)	123
第 12 章	分析菜单	124
12.1	轮廓图(Layout)	125
12.2	特性曲线(Fans)	135
12.3	点列图(Spot Diagram)	139
12.4	调制传递函数(MTF)	144
12.5	点扩散函数(PSF)	158
12.6	波前(Wavefront)	164
12.7	均方根(RMS)	168

12.8	包围圆能量(Encircled Energy)	174
12.9	照度(Illumination)	180
12.10	像分析(Image Analysis)	184
12.11	杂项(Miscellaneous)	190
12.12	赛得系数(Seidel Coefficients)	202
第13章	工具菜单	203
13.1	优化菜单	203
13.2	评价函数列表	212
13.3	公差	212
13.4	样板	216
13.5	库文件	218
13.6	镀膜文件	220
13.7	孔径变换	221
13.8	镜头元件反转	221
13.9	焦距变换	222
13.10	添加折叠反射镜	223
13.11	幻像发生器	224
13.12	输出IGES/STEP文件	225
第14章	报告菜单	226
14.1	表面数据(Surface Data)	226
14.2	系统数据(System Data)	228
14.3	规格数据(Prescription Data)	230
14.4	报告图形(Report Graphics 4/6)	233
第三编 基于 ZEMAX 的光学设计实例		
第15章	单透镜设计	234
15.1	设计任务	234
15.2	设计过程	234
15.3	设计结果	241
15.4	设计练习	242
第16章	双胶合设计	243
16.1	设计任务	243
16.2	设计过程	243
16.3	设计结果	246
16.4	设计练习	252
第17章	三片式照相物镜设计	253
17.1	设计任务	253
17.2	设计过程	253
17.3	设计结果	259

17.4	设计练习	266
第 18 章	双高斯照相物镜设计	267
18.1	设计任务	267
18.2	设计过程	267
18.3	设计结果	272
18.4	设计练习	281
第 19 章	反射式望远物镜设计	282
19.1	两反射镜式望远物镜设计	282
19.2	离轴反射式望远物镜设计	283
19.3	折反射混合式望远物镜设计	284
19.4	平面镜在 ZEMAX 中的设定	293
19.5	棱镜在 ZEMAX 中的设定	295
19.6	设计练习	296
第 20 章	变焦距照相物镜设计	297
20.1	变焦距理论基础	297
20.2	变焦距照相物镜设计示例	298
20.3	设计练习	309
第四编 典型光学系统设计的优化方法		
第 21 章	光学系统初始结构的选定	310
21.1	代数法	310
21.2	缩放法	315
第 22 章	照相物镜设计的优化方法	322
22.1	照相物镜的光学特性参数	322
22.2	照相物镜的像差校正要求	325
22.3	照相物镜的类型及优化方法	329
第 23 章	望远物镜设计的优化方法	339
23.1	望远镜系统的特性参数	339
23.2	望远物镜设计的特点	341
23.3	望远物镜的类型及优化方法	342
第 24 章	显微物镜设计的优化方法	347
24.1	放大镜的工作原理	347
24.2	显微镜的工作原理	347
24.3	显微镜的光学特性参数	348
24.4	显微物镜的像差校正要求	350
24.5	显微物镜的类型及优化方法	350
第 25 章	目镜设计的优化方法	353
25.1	目镜的光学特性参数	353
25.2	目镜的像差校正要求	355

25.3	目镜的类型及优化方法	355
25.4	目镜的设计原则	358
25.5	目镜的设计示例	359
第26章	照明光学系统设计的优化方法	364
26.1	照明光学系统的设计要求	364
26.2	照明方式分类及其特点	364
26.3	照明光学系统的像差校正要求	365
26.4	照明光学系统的结构类型	366
26.5	聚光照明系统的作用	367
26.6	聚光照明系统的分类及其特点	367
26.7	聚光照明系统的设计原则	369

第五编 课程设计与毕业设计教与学指南

第27章	课程设计与毕业设计教与学指南	371
27.1	课程设计的任务书及其要求	371
27.2	课程设计的参考设计结果	374
27.3	毕业设计的大纲撰写指南	379

第六编 照明系统设计案例

第28章	照明系统设计案例	381
28.1	用 TracePro 设计积分球	381
28.2	用 TracePro 设计导光管	392
28.3	用 TracePro 设计 LED 光源模块	402
附录 A	双胶合透镜的 P_0 表	418
附录 B	双胶合透镜参数表	419
附录 C	2016 年 CIOE 光学镜头应用设计大赛	420
附录 D	2017 年 CIOE 光学镜头应用设计大赛	423
参考文献		426

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,传统光学仪器日趋被光学、机械、电子和计算机一体化的现代智能化仪器所取代,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^[1]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(图1-1)和光学系统结构设计(图1-2)。

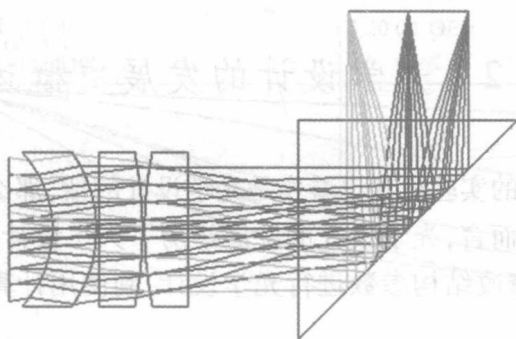


图 1-1 某投影物镜系统设计示意图

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以下两个阶段。

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,以及分配各光组之间光焦度等。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,以满足系统光学特性和成像质量的要求。

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透镜作为初始结构,由于单组双胶合物镜的相对孔径一般不大于 $1/3$,所以导致后续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。因此,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)的前提下,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。

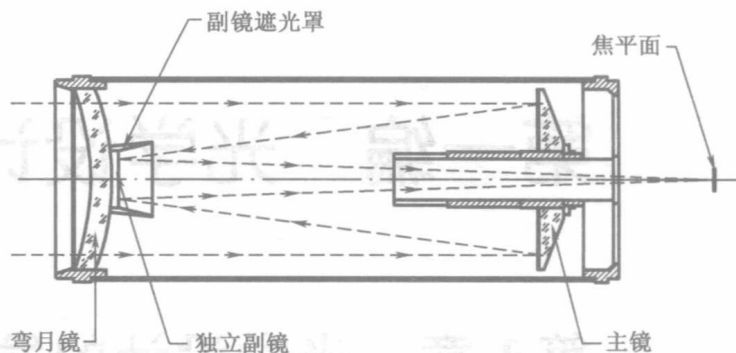


图 1-2 某 Cassegrain 式反射系统结构设计图

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,那么光学设计的发展历史就是一个漫长的过程。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、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,所以在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。因此,要想设计出一个好的结构,就必须进行长时间的、繁重的手工计算。

1.2.2 自动化设计阶段的情况简介

20 世纪计算机的出现,使光学设计人员逐渐从繁重的手工计算中解放出来,设计周期也大大缩减,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,如利用 ZEMAX 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)等(图 1-3、图 1-4)。

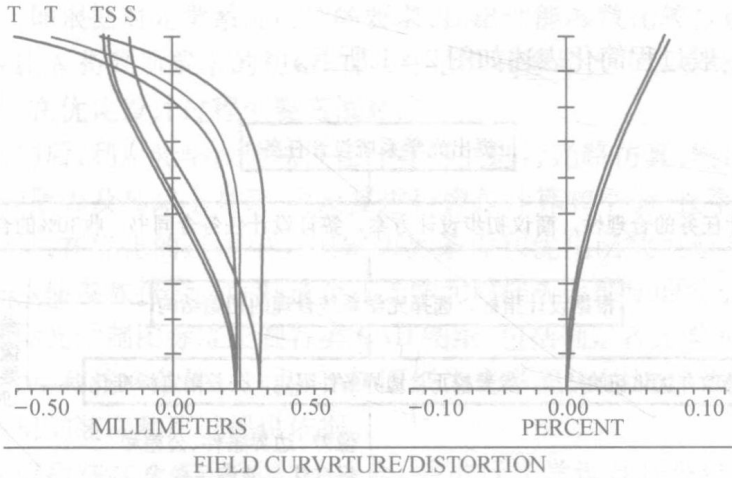


图 1-3 某光学系统的场曲和畸变(Field Curv/Dist)图

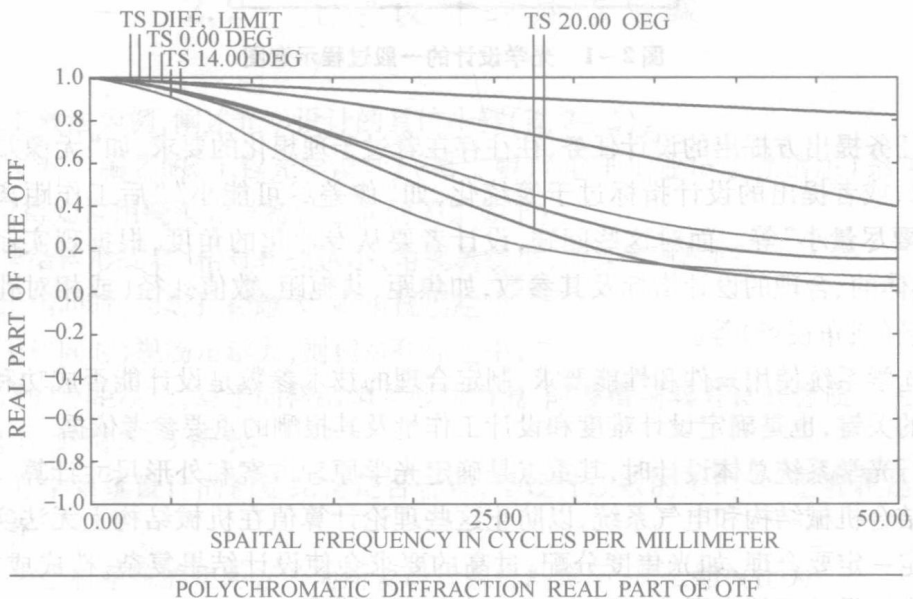


图 1-4 某光学系统的 FFT MTF 图

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。

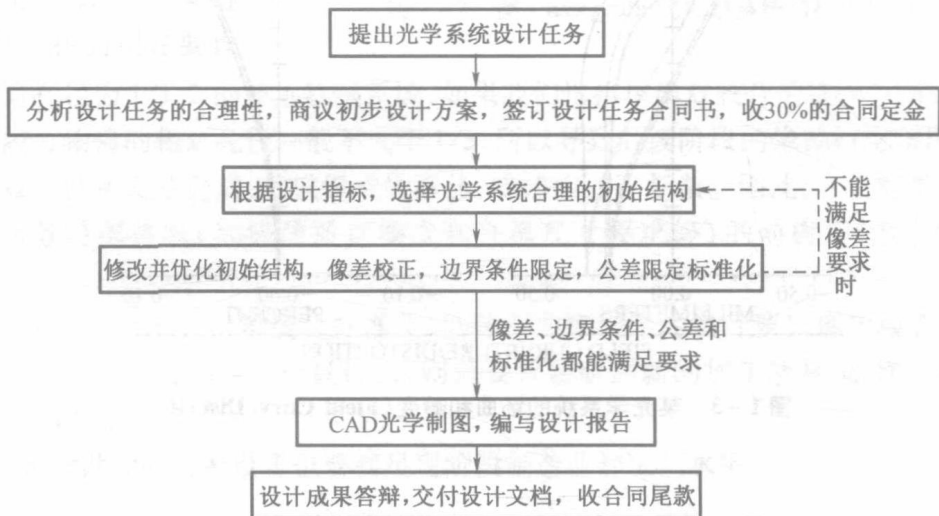


图2-1 光学设计的一般过程示意图

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。面对这些问题,设计者要从专业化的角度,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。每项性能的确定一定要合理,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,如显微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。

初始结构的确定通常有两种方法:

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报告,并进行光学设计任务结题答辩。一般来说,设计报告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)。

根据萧泽新^[2]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。

选型时光学系统设计的初始结构是否合理,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

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

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

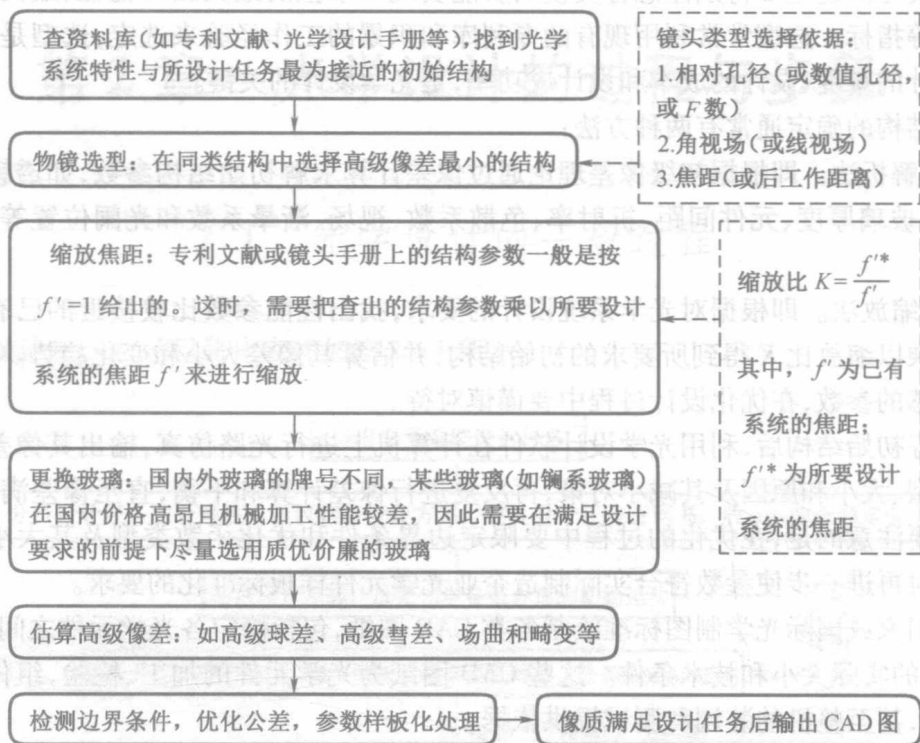


图 2-2 光学设计的具体步骤框图

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。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:

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

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 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,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,则应更换光阑前面的那块透镜的玻璃材料。

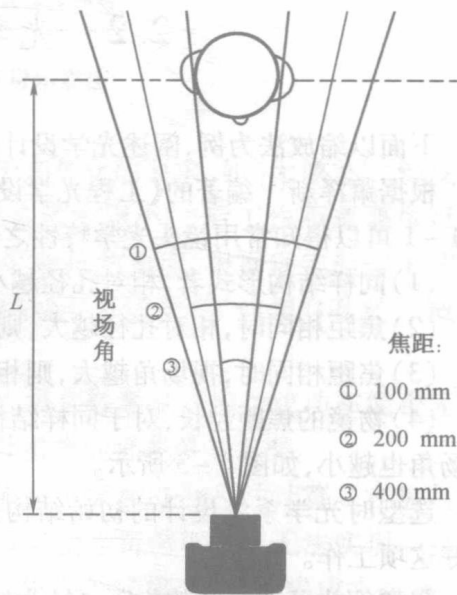


图 2-3 焦距与视场角的关系示意图

第3章 仪器对光学设计的要求

任何一种光学仪器的使用条件和功能必然会对它的光学系统提出一定的要求,如对外形尺寸、成像质量、机械性能及物理化学性能等方面的要求。

3.1 对光学系统基本特性的要求

常见的光学系统的基本特性参数有很多,如相对孔径、数值孔径、 F 数、线视场、角视场、工作波段、放大率、焦距、出瞳位置、入瞳直径、光阑位置、后工作距离、共轭距、折射率、色散系数、透镜厚度、透镜间距及透镜面型等。

3.2 对光学系统外形尺寸的要求

光学系统的外形尺寸计算要确定的结构内容包括系统的组成、各组元的焦距、各组元的相对位置(即轴向尺寸)和横向尺寸(即径向尺寸)。为了简化各种类型光组的外形尺寸计算,可以把光学系统看成是由一系列薄透镜组成的光学系统,经过简化后的光学系统可以用理想光学系统的理论和公式进行计算。但不是所有的光学系统或光组都可以看成是薄透镜光组,如广角物镜、大数值孔径的高倍率显微物镜等。

在进行光学系统的外形尺寸计算时,除了务必保证使用条件决定的基本光学特性外,还要考虑其在技术上和物理上能否实现,并且要和机械结构、电气系统匹配,还要具有良好的工艺性和经济性。

一般而言,光学系统的外形尺寸计算要满足三个方面的要求:

- (1) 系统的孔径、视场、分辨率、出瞳直径和位置等;
- (2) 几何尺寸,即光学系统的轴向和径向尺寸、整体结构的布局等;
- (3) 成像质量、孔径和视场的权重等。

在外形尺寸计算时,如果把系统看成是由薄透镜光组构成的,则高斯公式可变换为

$$\tan U'_k = \tan U_k + \frac{h_k}{f'_k} \quad (\text{空气中}) \quad (3-1)$$

转面公式即可写成

$$h_k = h_{k-1} - d_{k-1} \tan U'_{k-1} \quad (3-2)$$

式中 h_k, h_{k-1} ——光线与主平面的交点到光轴的距离,以光轴为计算起点,向上为正;

$\tan U'_k, \tan U'_{k-1}, \tan U_k, \tan U_{k-1}$ ——光线通过光学系统前、后与光轴夹角的正切值。

在外形尺寸计算时,常把任意光束截面的渐晕系数 K 看作常量。

平面反射镜的外形尺寸应由反射镜上光束截面的尺寸确定。在平行光束中反射镜上的光束截面是一个椭圆;在会聚或发散光束中,反射镜上的光束截面仍然是一个椭圆。考