



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

光学设计

■ 刘 钧 高 明 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

光学设计

刘 钧 高 明 编著



西安电子科技大学出版社

2006

内 容 简 介

本书系统地论述了“光学设计”课程的基本理论及设计方法,重点介绍了具有普遍意义的典型光学系统的有关设计内容,以阐明光学设计中带有共性的问题。

全书分四部分,共14章。第一部分是光学设计的基础理论(第1~5章);第二部分是典型光学系统设计(第6~11章);第三部分是夜视仪器的光学系统(第12章);第四部分是光学设计软件ZEMAX简介和光学制图(第13、14章)。

本书可作为已具备应用光学基础的本科生或研究生的教材,也可作为实际光学设计的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

光学设计/刘钧,高明编著. — 西安:西安电子科技大学出版社,2006.10

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 7-5606-1747-6

I. 光… II. ①刘… ②高… III. 光学系统 系统设计—高等学校—教材
IV. O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 116527 号

策 划 臧延新 云立实

责任编辑 郭云辉 邵汉平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.375

字 数 432千字

印 数 1~4000册

定 价 22.00元

ISBN 7-5606-1747-6/O·0082

XDUP 2039001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

光学设计是在应用光学的基础上,总结了前人的设计经验,提炼了光学仪器中典型光学系统的设计精华而形成的一门学科。光学设计发展至今,经历了由手工计算和人工校正像差,到计算机计算像差及像差自动校正的巨大变革。随着科学技术的发展,对光学仪器和光电仪器中的光信息的识别和提取的要求也越来越高,而作为仪器的核心部分——光学系统设计也面临新的挑战,从而要求光学设计者应具有扎实的理论基础和较高的设计技巧。

本书是根据全国高等学校仪器仪表学科教学指导委员会关于“仪器仪表学科发展战略”及“光学设计”教学大纲编写的。

本书系统地论述了光学设计的基本理论及设计方法,重点介绍了具有普遍意义的典型光学系统的有关设计内容,以阐明光学设计中带有共性的问题。

“光学设计”是以设计为主的专业课程,其目的是使学生掌握光学设计的理论和方法,培养学生独立设计与研发光学系统的能力。

全书共分14章,分别为绪论、像差综述、光学系统的像质评价和像差容限、光学系统的外形尺寸计算、光学系统的初始结构计算方法、望远镜物镜设计、显微镜物镜设计、目镜设计、照相物镜设计、照明光学系统设计、轴对称非球面设计概述、夜视仪器的光学系统、光学设计软件ZEMAX简介及光学制图。其中,第1~6章及13、14章由刘钧执笔,第7~12章由高明执笔,全书由刘钧统稿。

由于光学设计理论较为成熟,因此,本书依据前人的设计理论及经验,在张以谟主编的《应用光学》,袁旭沧主编的《光学设计》,郁道银、谈恒英主编的《工程光学》,张登臣主编的《实用光学设计方法与现代光学系统》等书的基础上,参阅大量文献资料并根据笔者的设计经验编写而成。在此对文献作者表示衷心感谢。另外,也十分感谢研究生宋波、尚华、辛维娟及笔者的同事吕宏,他们为该教材进行了文字整理和插图制作,并对文稿进行了校对。

本书可供高等工科院校测控技术与仪器专业及光电信息工程专业师生使用,同时也可供从事光学系统及光电仪器的研究、设计、制造和系统开发的工程技术人员学习和参考。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,希望读者提出宝贵意见。

编 者

2006年8月

欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~国家级、部级重点教材~~~~~

计算机系统结构(第四版)(统编)	25.00
离散数学(第三版)(统编)(乔维声)	16.00
雷达对抗原理(统编)	15.00
雷达原理(第三版)	23.00
通信网的安全——理论与技术	42.00
模拟电子线路基础(傅丰林)	16.00
移动通信(第三版)(统编)(郭梯云)	26.00
智能控制理论和方法	18.00

~~~全国信息技术水平考试指定教材~~~

计算机网络信息安全理论与实践教程	32.00
网页设计与网站开发基础教程	54.00
中小校园网络管理基础教程	19.00
中小校园网络管理实验教程	25.00

~~~~~计算机提高普及类~~~~~

计算机应用基础(第三版)(丁爱萍)	19.00
计算机组装与维护(高职)(杜飞明)	22.00
计算机组装与维护实用教程(第二版)(高职)	29.00
计算机应用基础(Windows 2000 &Office 2002)(教育部高职)	23.00
《计算机应用基础》实践技能训练 与案例分析(教育部高职)	11.00
计算机综合能力实训教程(高职)	10.00
办公自动化技术及应用教程	22.00
办公自动化设备的使用和维护 (第二版)(高职)	18.00
网络办公自动化技术及应用(高职)	21.00

~~~~~计算机网络类~~~~~

Internet基础与使用(第二版)(高职)	13.00
计算机网络安全(高职)	15.00
计算机网络管理	20.00
网络安全技术(高职)	17.00
网络安全与保密	24.00
网络信息安全技术	17.00

网络信息安全	11.00
网站建设与维护(崔良海)	18.00
网站建设与维护(廖常武)	19.00
Internet技术及其应用教程	15.00
Windows网络程序设计	26.00
嵌入式系统原理与开发	21.00
通信网理论与技术	25.00
计算机图形图像与网页制作(高职)	19.00
互联网实用技术与网页制作(高职)	14.00
局域网组建、管理与维护(高职)	20.00
综合布线技术(高职)	18.00
计算机网络技术导论	16.00
计算机网络(第二版)(袁家政)	26.00
计算机网络技术(刘敏涵)	20.00
计算机网络(第二版)(蔡皖东)	18.00
计算机网络(第二版)(雷振甲)	21.00
计算机网络工程	20.00
计算机网络实验教程	14.00
计算机组网实验教程	23.00
计算机网络学习辅导及习题详解	23.00
网络工程设计与实践	29.00
网络应用程序设计	21.00
现代网络技术	24.00
网络计算	19.00

~~~~~计算机技术类~~~~~

计算机系统结构(陈智勇)	22.00
计算机系统设计——概念与技术(洪龙)	18.00
计算机组成原理 与系统结构实验教程(杨小龙)	12.00
计算机系统安全	22.00
实用计算机类毕业设计指导	18.00
计算机原理课程设计	10.00
电子政务理论与实务	20.00
电子商务概论(李晓燕)	17.00
电子商务概论(宋沛军)	20.00

数据融合理论与应用 (第二版)	20.00	机械加工技术 (高职) (魏康民)	24.00
自动控制原理 (赵四化)	16.00	计算机辅助机械设计 (秦汝明)	19.00
自动控制原理 (薛安克)	19.00	数控机床原理与编程 (高职) (陈富安)	20.00
《自动控制原理》学习指导与题解 (方斌)	22.00	数控加工与编程 (高职)	19.00
自动控制原理及其应用 (高职)	15.00	数控加工工艺 (高职) (赵长旭)	22.00
智能化仪器原理及应用 (曹建平)	16.00	数控编程与操作 (高职) (秦启书)	16.00
楼宇自动化 (高职)	14.00	数控技术及应用 (高职) (马一民)	17.00
电梯原理及逻辑排故 (高职)	22.00	数控机床故障分析与维修 (高职) (潘海丽)	19.00
~~~~~家用电器与机电类~~~~~			
电视原理与系统 (赵坚勇)	16.00	数控机床电气控制 (高职) (姚勇刚)	21.00
电视原理与电视机检修 (高职)	16.00	机电一体化技术 (高职)	17.00
数字电视技术	20.00	机床电器 PLC (高职) (李伟)	14.00
电器原理与技术 (裴昌幸)	24.00	机床电气与 PLC (高职)	16.00
调音技术 (高职)	16.00	电机及拖动基础 (高职) (孟宪芳)	17.00
音响技术	13.00	电机拖动与控制 (高职) (刘保录)	25.00
现代音响与调音技术	19.00	电机与电气控制 (高职) (冉文)	23.00
电气控制与 PLC 原理及应用 (常文平)	17.00	电切削加工技术 (高职) (詹华西)	13.00
工程力学 (皮智谋) (高职)	12.00	金属切削与机床 (高职) (聂建武)	22.00
工程力学 (史艺农) (高职)	23.00	模具制造技术 (高职) (刘航)	22.00
工程材料与热加工技术 (高职) (程晓宇)	20.00	液压与气动技术 (朱梅)	19.00
机械工程基础 (李茹) (高职)	26.00	特种加工技术 (周旭光)	10.00
机械设计基础 (赵冬梅) (高职)	21.00	汽车电工电子技术 (高职) (袁建华)	20.00
机械设计基础 (张京辉) (高职)	24.00	工业机器人技术 (高职) (郭洪红)	16.00
机械设计基础 (郭红星) (高职)	20.00	互换性与技术测量 (高职) (杨好学)	16.00
机械基础 (周家泽)	17.00	车工基本技能训练 (高职) (武建荣)	6.00
机械 CAD/CAM 技术 (方新)	20.00	钳工基本技能训练 (高职) (彭彦)	5.00
机械制图 (刘家平) (高职)	32.00	焊接基本技能训练 (高职) (王红英)	6.00
机械制造工艺装备 (高职) (吴秀佳)	19.00	建筑管道工基本技能训练 (高职) (陈斐明)	8.00
机械制造技术 (高职) (邵堃)	24.00	铣工基本技能训练 (高职) (韩振武)	4.00
		高等教育管理导论 (研究生)	36.00

欢迎来函索取本社最新书目和教材介绍, 欢迎投稿!

从邮局或银行汇款邮购者, 汇款单上务必写清收书人姓名、地址、邮编、电话。款到后我社将挂号发书, 加收5元包装邮寄费 (一次购书30元以上者可免收邮费)。

通信地址: 西安市太白南路2号      西安电子科技大学出版社发行部      邮 编: 710071

电 话: (029) 88201467

传 真: (029) 88213675

主 页: <http://www.xduph.com>

E-mail: [xdupfb@pub.xaonline.com](mailto:xdupfb@pub.xaonline.com)

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 光学设计的发展概况 .....	1
1.1.1 光学设计的概念 .....	1
1.1.2 光学设计的发展概况 .....	2
1.2 光学系统设计的具体过程和步骤 .....	3
1.2.1 光学系统设计的具体过程 .....	3
1.2.2 光学设计的设计步骤 .....	4
1.3 仪器对光学系统性能与质量的要求 .....	4
1.3.1 光学系统的基本特性 .....	4
1.3.2 系统的外形尺寸 .....	5
1.3.3 成像质量 .....	5
1.3.4 仪器的使用条件 .....	5
第 2 章 像差综述 .....	6
2.1 轴上点球差 .....	6
2.1.1 球差的定义和表示方法 .....	6
2.1.2 球差的校正 .....	8
2.2 正弦差及彗差 .....	12
2.2.1 正弦差 .....	12
2.2.2 彗差 .....	14
2.3 像散与像面弯曲(场曲) .....	17
2.3.1 像散 .....	17
2.3.2 像面弯曲(场曲)和轴外球差 .....	18
2.4 畸变 .....	22
2.5 色差 .....	24
2.5.1 位置色差、色球差和二级光谱 .....	24
2.5.2 倍率色差 .....	27
2.6 波像差 .....	28
第 3 章 光学系统的像质评价和像差容限 .....	30
3.1 几何像差的曲线表示 .....	30
3.1.1 独立几何像差的曲线表示 .....	30
3.1.2 垂轴几何像差曲线(像差特征曲线) .....	32
3.2 瑞利(Reyleigh)判断和中心点亮度 .....	35
3.2.1 瑞利判断 .....	35
3.2.2 中心点亮度 .....	36
3.3 分辨率 .....	37
3.4 点列图 .....	38
3.5 利用光学传递函数评价成像质量 .....	40
3.5.1 利用 MTF 曲线来评价成像质量 .....	41

3.5.2 利用 MTF 曲线的积分值来评价成像质量 .....	42
3.6 其他像质评价方法 .....	42
3.6.1 基于几何光学的方法 .....	43
3.6.2 基于衍射理论的方法 .....	44
3.6.3 其他需要评价的成像质量 .....	45
3.7 光学系统的像差公差 .....	46
3.7.1 望远物镜和显微物镜的像差公差 .....	47
3.7.2 望远目镜和显微目镜的像差公差 .....	48
3.7.3 照相物镜的像差公差 .....	49
<b>第 4 章 光学系统的外形尺寸计算</b> .....	<b>50</b>
4.1 典型光学零件和部件的外形尺寸计算 .....	50
4.1.1 光路计算公式 .....	50
4.1.2 任意光束截面的渐晕系数 .....	51
4.1.3 棱镜转像系统 .....	51
4.1.4 透镜转像系统 .....	54
4.1.5 场镜的计算 .....	56
4.1.6 目镜的视度调节 .....	57
4.2 典型光学系统外形尺寸计算 .....	58
4.2.1 刻普勒望远镜的外形尺寸计算 .....	58
4.2.2 伽利略望远镜的外形尺寸计算 .....	61
4.2.3 具有透镜转像系统的望远系统外形尺寸计算 .....	63
4.2.4 具有棱镜转像系统的望远系统外形尺寸计算 .....	64
4.2.5 内调焦望远物镜的外形尺寸计算 .....	66
4.2.6 生物显微镜的外形尺寸计算 .....	68
4.2.7 读数显微镜的外形尺寸计算 .....	69
4.2.8 投影系统的外形尺寸计算 .....	72
<b>第 5 章 光学系统的初始结构计算方法</b> .....	<b>75</b>
5.1 代数法(解析法和 PW 法) .....	75
5.1.1 PW 形式的初级像差系数 .....	75
5.1.2 薄透镜系统初级像差的 PW 表示式 .....	76
5.1.3 薄透镜系统的基本像差参量 .....	78
5.1.4 双胶合透镜组的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 和结构参数的关系 .....	82
5.1.5 单透镜的 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{C}_I$ 和结构参数的关系 .....	86
5.1.6 用 PW 方法求初始结构的实例 .....	87
5.2 缩放法 .....	90
5.2.1 物镜选型 .....	90
5.2.2 缩放焦距 .....	91
5.2.3 更换玻璃 .....	91
5.2.4 估算高级像差 .....	93
5.2.5 检查边界条件 .....	95
5.2.6 计算举例 .....	95

<b>第 6 章 望远镜物镜设计</b> .....	99
6.1 望远光学系统 .....	99
6.1.1 望远系统的一般特性 .....	99
6.1.2 伽利略望远镜和刻普勒望远镜 .....	101
6.2 望远物镜设计 .....	103
6.2.1 望远物镜的特点 .....	103
6.2.2 望远物镜的类型和设计方法 .....	104
<b>第 7 章 显微镜物镜设计</b> .....	122
7.1 显微镜及其光学特性 .....	122
7.1.1 显微镜成像原理 .....	122
7.1.2 显微镜中的光束限制 .....	123
7.1.3 显微镜的景深 .....	126
7.2 显微镜的分辨率和有效放大率 .....	128
7.3 显微镜物镜的类型 .....	129
7.3.1 消色差物镜 .....	129
7.3.2 复消色差物镜 .....	130
7.3.3 平像场物镜 .....	131
7.3.4 反射和折反射显微镜物镜 .....	132
7.4 显微镜物镜的像差校正说明及设计举例 .....	133
7.4.1 像差校正说明 .....	133
7.4.2 设计举例 .....	133
<b>第 8 章 目镜设计</b> .....	138
8.1 目镜的特点 .....	138
8.1.1 目镜的光学特性 .....	138
8.1.2 目镜的像差特点 .....	139
8.1.3 目镜的视度调节 .....	139
8.2 目镜的基本类型 .....	140
8.2.1 惠更斯目镜和冉斯登目镜 .....	140
8.2.2 凯涅尔目镜 .....	141
8.2.3 对称式目镜 .....	142
8.2.4 无畸变目镜 .....	142
8.2.5 广角目镜 .....	143
8.3 目镜设计举例 .....	143
8.3.1 目镜设计原则 .....	143
8.3.2 目镜设计举例 .....	144
<b>第 9 章 照相物镜设计</b> .....	161
9.1 照相物镜的光学特性和像差要求 .....	161
9.1.1 照相物镜的光学特性 .....	161
9.1.2 照相物镜的像差要求 .....	164
9.2 照相物镜的基本类型 .....	164
9.2.1 常用大孔径物镜 .....	165
9.2.2 广角物镜 .....	168

9.2.3 长焦物镜 .....	173
9.2.4 变焦距物镜 .....	174
9.2.5 折反射照相物镜 .....	175
9.3 照相物镜设计实例 .....	176
<b>第 10 章 照明光学系统设计</b> .....	182
10.1 照明系统 .....	182
10.2 聚光照明系统 .....	183
10.3 聚光照明系统的设计 .....	185
<b>第 11 章 轴对称非球面设计概述</b> .....	190
11.1 使用非球面的可能性 .....	190
11.2 初级像差理论 .....	190
11.3 用单个非球面准确校正球差 .....	194
11.4 用单个非球面准确校正像散 .....	197
11.5 非球面在照相物镜中的应用 .....	201
<b>第 12 章 夜视仪器的光学系统</b> .....	206
12.1 直视型光学系统 .....	206
12.1.1 物镜 .....	206
12.1.2 目镜 .....	212
12.1.3 夜视仪器的基本光学性能 .....	214
12.2 间视型光学系统 .....	225
12.2.1 红外光学系统的作用 .....	226
12.2.2 红外光学系统的特点与主要参数 .....	227
12.2.3 前置望远系统和中继透镜组 .....	230
12.2.4 光机扫描 .....	232
<b>第 13 章 光学设计软件 ZEMAX 简介</b> .....	244
13.1 光学设计软件 ZEMAX 的特点 .....	244
13.2 ZEMAX 用户界面简要说明 .....	244
13.2.1 窗口类型 .....	244
13.2.2 主窗口的操作 .....	245
13.2.3 编辑窗口操作 .....	245
13.2.4 图形窗口操作 .....	246
13.2.5 文本窗口操作 .....	247
13.2.6 对话框 .....	247
13.3 快捷方式的总结 .....	248
13.4 ZEMAX 基本操作要点 .....	249
13.4.1 概述 .....	249
13.4.2 新建镜头 .....	249
13.5 ZEMAX 应用实例 .....	256
13.5.1 三片分离式照相物镜设计 .....	256
13.5.2 对称式目镜设计 .....	258
<b>第 14 章 光学制图</b> .....	260
14.1 光学制图 .....	260

14.1.1	总则 .....	260
14.1.2	光学系统图 .....	262
14.1.3	光学部件图 .....	264
14.1.4	光学零件图 .....	265
14.2	光学零件的技术要求 .....	266
14.2.1	对光学材料的要求 .....	266
14.2.2	对光学零件的加工要求 .....	267
<b>附录</b> .....		276
<b>参考文献</b> .....		284

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 光学设计的发展概况

### 1.1.1 光学设计的概念

随着科学技术的发展,光学仪器已普遍应用在社会各个领域。我们知道,光学仪器的核心部分是光学系统。光学系统成像质量的好坏,决定着光学仪器整体质量的好坏。然而,一个高质量的成像光学系统是要靠好的光学设计去完成的。因此说,光学设计是实现各种光学仪器的基础。随着光学仪器的发展,光学设计的理论和方法也在日益发展和完善。

光学设计所要完成的工作应该包括光学系统设计和光学结构设计。本书主要讨论的是光学系统设计。

所谓光学系统设计,就是根据仪器所提出的使用要求,来决定满足各种使用要求的参数,即设计出光学系统的性能参数、外形尺寸和各光组的结构等。如今,我们要为一个光学仪器设计一个光学系统,大体上可以分成两个阶段。第一阶段是根据仪器总体的技术要求(性能指标、外形体积、重量以及有关技术条件),从仪器的总体(光学、机械、电路及计算技术)出发,拟定出光学系统的原理图,并初步计算系统的外形尺寸,以及系统中各部分要求的光学特性等。一般称这一阶段的设计为“初步设计”或者“外形尺寸计算”。第二阶段是根据初步设计的结果,确定每个透镜组的具体结构参数(半径、厚度、间隔、玻璃材料),以保证满足系统光学特性和成像质量的要求。这一阶段的设计称为“像差设计”,一般简称“光学设计”。这两个阶段既有区别又有联系。在初步设计时,就要预计到像差设计是否有可能实现,以及系统大致的结构形式,反之,当像差设计无法实现,或者结构过于复杂时,则必须回过头来修改初步设计。一个光学仪器工作性能的好坏,初步设计是关键。如果初步设计不合理,严重的可致使仪器根本无法完成工作,其次会给第二阶段的像差设计工作带来困难,导致系统结构过分复杂,或者成像质量不佳。当然在初步设计合理的条件下,如果像差设计不当,同样也可能造成上述不良后果。评价一个光学系统设计的好坏,一方面要看它的性能和成像质量,另一方面还要看系统的复杂程度。一个好的设计应该是在满足使用要求(光学性能、成像质量)的情况下,结构设计最简单的系统。

初步设计和像差设计这两个阶段的工作,在不同类型的仪器中所占的地位和工作量也不尽相同。在某些仪器,例如大部分军用光学仪器中,初步设计比较繁重,而像差设计相对来说比较容易;在另一些光学仪器,例如一般显微镜和照相机中,初步设计则比较简单,而像差设计却较为复杂。

### 1.1.2 光学设计的发展概况

光学设计是 20 世纪发展起来的一门学科，至今已经历了一个漫长的过程。

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，并把这些透镜按不同情况进行组合，找出成像质量比较好的结构。由于实际制作比较困难，要找出一个质量好的结构，势必要花费很长的时间和很多的人力、物力，而且也很难找到各方面都较为满意的结果。

为了节省人力、物力，后来逐渐把这一过程用计算的方法来代替。对于不同结构参数的光学系统，由同一物点发出，按光线的折射、反射定律，用数学方法计算若干条光线；根据这些光线通过系统以后的聚焦情况，也就是根据这些光线像差的大小，就可以大体知道整个物平面的成像质量；然后修改光学系统的结构参数，重复上述计算，直到成像质量满意为止。这样的方法叫做“光路计算”，或者叫做“像差计算”，光学设计正是从光路计算开始发展的。用像差计算来代替实际制作透镜这当然是一个很大的进步，但这样的方法仍然不能满足光学仪器生产发展的需要，因为光学系统结构参数与像差之间的关系十分复杂，要找到一个理想的结果，仍然需要经过长期繁重的计算过程，特别是对于一些光学特性要求比较高、结构比较复杂的系统，这个矛盾就更加突出。

为了加快设计进程，促进人们对光学系统像差的性质及像差和结构参数之间的关系进行研究，希望能够根据像差要求，用解析的方法直接求出结构参数，这就是所谓“像差理论”的研究。但这方面的进展不能令人满意，直到目前为止像差理论只能给出一些近似的结果，或者给出如何修改结构参数的方向，加速设计的进程，但仍然没有使光学设计从根本上摆脱繁重的像差计算过程。

正是由于光学设计的理论还不能使我们采用一个普遍的方法，根据使用要求直接求出系统的结构参数，而只能通过计算像差，逐步修改结构参数，最后得到一个较满意的结果，所以设计人员的经验对设计的进程有着十分重要的意义，因此学习光学设计，除了要掌握像差的计算方法和熟悉像差的基本理论之外，还必须学习不同类型系统的具体设计方法，并且不断地从实践中积累经验。

由于电子计算机的出现，使光学设计人员从繁重的手工计算中解放出来，过去一个人几个月的时间进行的计算，现在用计算机只要几分钟或几秒钟就能完成了。设计人员的主要精力已经由像差计算转移到整理计算资料和分析像差结果这方面来。光学设计的发展除了应用计算机进行像差计算外，还进一步让计算机代替人做分析像差和自动修正结构参数的工作，这就是所谓的“自动设计”，或者“像差自动校正”。

现在大部分光学设计都在不同程度上借助于这样或那样的自动设计程序来完成。有些人认为在有了自动设计程序以后，似乎过去有关光学设计的一些理论和方法已经没用了，只要能上机计算就可以做光学设计了。其实不然，要设计一个光学特性和像质都满足特定的使用要求而结构又最简单的光学系统，只靠自动设计程序是难以完成的。在使用自动设计程序的条件下，特别是那些为了满足某些特殊要求而设计的新结构形式，主要是依靠设计人员的理论分析和实际经验来完成的。因此，即使使用了自动设计程序，也必须学习光学设计的基本理论，以及不同类型系统具体的分析和设计方法，才能真正掌握光学设计。

光学设计的发展经历了人工设计和光学自动设计两个阶段，实现了由手工计算像差、

人工修改结构参数进行设计,到使用电子计算机和光学自动设计程序进行设计的巨大飞跃。国内外已出现了不少功能相当强大的光学设计 CAD 软件。如今,计算机辅助设计(CAD)已在工程光学领域中普遍使用,从而使设计者能快速、高效地设计出优质、经济的光学系统。然而,不管设计手段如何变革,光学设计过程的一般规律仍然是必须遵循的。

## 1.2 光学系统设计的具体过程和步骤

### 1.2.1 光学系统设计的具体过程

#### 1. 制定合理的技术参数

从光学系统对使用要求满足程度出发,制定光学系统合理的技术参数,这是设计成功与否的前提条件。

#### 2. 光学系统总体设计和布局

光学系统总体设计的重点是确定光学原理方案和外形尺寸计算。为了设计出光学系统的原理图,确定基本光学特性,使其满足给定的技术要求,首先要确定放大率(或焦距)、线视场(或角视场)、数值孔径(或相对孔径)、共轭距、后工作距、光阑位置和外形尺寸等。因此,常把这个阶段称为外形尺寸计算阶段。一般都按理想光学系统的理论和计算公式进行外形尺寸计算。

在上述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在机械结构上无法实现。每项性能的确定一定要合理,过高的要求会使设计结果复杂,造成浪费;过低的要求会使设计不符合要求。因此,这一步必须慎重。

#### 3. 光组的设计

一般分为选型、确定初始结构参数、像差校正三个阶段。

##### 1) 选型

光组的划分,一般以一对物像共轭面之间的所有光学零件为一个光组,也可将其进一步划小。现有的常用镜头可分为物镜和目镜两大类。目镜主要用于望远和显微系统,物镜可分为望远、显微和照相摄影物镜三大类。镜头在选型时首先应依据孔径、视场及焦距来选择镜头的类型,特别要注意各类镜头各自能承担的最大相对孔径、视场角。在大类型的选型上,应选择既能达到预定要求而又结构简单的一种。选型是光学系统设计的出发点,选型是否合理、适宜是设计成败的关键。

##### 2) 初始结构的计算和选择

初始结构的确定常用以下两种方法:

(1) 解析法(代数法):即根据初级像差理论求解初始结构。这种方法是根据外形尺寸计算得到的基本特性,利用初级像差理论来求解满足成像质量要求的初始结构,即确定系统各光学零件的曲率半径、透镜的厚度和间隔、玻璃的折射率和色散等。

(2) 缩放法:即根据对光组的要求,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  $K$ ,得到所要求的结构,并估计其像差的大小或变化趋势。

### 3) 像差校正、平衡与像质评价

初始结构选好后,要在计算机上进行光路计算,或用像差自动校正程序进行自动校正,然后根据计算结果画出像差曲线,分析像差,找出原因,再反复进行像差计算和平衡,直到满足成像质量要求为止。

### 4. 长光路的拼接与统算

以总体设计为依据,以像差评价为准绳,来进行长光路的拼接与统算。若结果不合理,则应反复试算并调整各光组的位置与结构,直到达到预期的目的为止。

### 5. 绘制光学系统图、部件图和零件图

绘制各类图纸,包括确定各光学零件之间的相对位置,光学零件的实际大小和技术条件。这些图纸为光学零件加工、检验,部件的胶合、装配、校正,乃至整机的装调、测试提供依据。

### 6. 编写设计说明书

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。

### 7. 进行技术答辩

必要时可以进行技术答辩。

## 1.2.2 光学设计的设计步骤

光学设计就是选择和安排光学系统中各光学零件的材料、曲率和间隔,使得系统的成像性能符合应用要求。一般设计过程基本是减小像差到可以忽略不计的程度。光学设计可以概括为以下几个步骤:

- (1) 选择系统的类型;
- (2) 分配元件的光焦度和间隔;
- (3) 校正初级像差;
- (4) 减小残余像差(高级像差)。

以上每个步骤可以包括几个环节,重复地循环这几个步骤,最终会找到一个满意的结果。

## 1.3 仪器对光学系统性能与质量的要求

任何一种光学仪器的用途和使用条件必然会对它的光学系统提出一定的要求。因此,在进行光学设计之前一定要了解对光学系统的要求。这些要求概括起来有以下几个方面。

### 1.3.1 光学系统的基本特性

光学系统的基本特性有:数值孔径或相对孔径,线视场或视场角,系统的放大率或焦距。此外还有与这些基本特性有关的一些特性参数,如光瞳的大小和位置、后工作距、共轭距等。

### 1.3.2 系统的外形尺寸

系统的外形尺寸,即系统的轴向尺寸和径向尺寸。在设计多光组的复杂光学系统时,如一些军用光学系统,外形尺寸计算以及各光组之间光瞳的衔接都是很重要的。

### 1.3.3 成像质量

成像质量的要求和光学系统的用途有关。不同的光学系统按其用途可提出不同的成像质量要求。对于望远系统和一般的显微镜只要求中心视场有较好的成像质量;对于照相物镜则要求整个视场都要有较好的成像质量。

### 1.3.4 仪器的使用条件

根据仪器的使用条件,要求光学系统具有一定的稳定性、抗振性、耐热性和耐寒性等,以保证仪器在特定的环境下能正常工作。

在对光学系统提出使用要求时,一定要考虑在技术上和物理上实现的可能性。例如生物显微镜的视觉放大率 $\Gamma$ ,一定要按有效放大率的条件来选取,即满足 $500 \text{ NA} < \Gamma < 1000 \text{ NA}$ 条件。过大的放大率是没有意义的,只有提高数值孔径(NA)才能提高有效放大率。

对于望远镜的视觉放大率 $\Gamma$ ,一定要把望远系统的极限分辨率和眼睛的极限分辨率放在一起考虑。在眼睛的极限分辨率为 $1'$ 时,望远镜的正常放大率应该是 $\Gamma = D/2.3$ ,式中, $D$ 是入瞳直径。实际上,在多数情况下,按仪器用途所确定的放大率常大于正常放大率,这样可以减轻观察者眼睛的疲劳度。对于一些手持的观察望远镜,它的实际放大率比正常放大率低,以便具备较大的出瞳直径,从而增加观察时的光强度。因此望远镜的工作放大率应按下式选取:

$$0.2D \leq \Gamma \leq 0.75D$$

有时对光学系统提出的要求是互相矛盾的。这时,应进行深入分析,全面考虑,抓住主要矛盾,切忌提出不合理的要求。例如在设计照相物镜时,为了使相对孔径、视场角和焦距三者之间的选择更加合理,应该参照下列关系式来选择这三个参数:

$$\frac{D}{f} \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} = C_m$$

式中, $C_m = 0.22 \sim 0.26$ ,称为物镜的质量因数。实际计算时,取 $C_m = 0.24$ 。当 $C_m < 0.24$ 时,则光学系统的像差校正就不会发生困难;当 $C_m > 0.24$ 时,则系统的像差很难校正,成像质量很差。但是,随着高折射率玻璃的出现、光学设计方法的完善、光学零件制造水平的提高以及装调工艺的完善, $C_m$ 值也在逐渐提高。

总之,对光学系统提出的要求要合理,保证在技术上和物理上均能够实现,并且要具有良好的工艺性和经济性。

## 第2章 像差综述

实际光学系统与理想光学系统有很大的差异,即物空间的一个物点发出的光线经实际光学系统后,不再会聚于像空间的一点,而是形成一个弥散斑,弥散斑的大小与系统的像差有关。

光学设计的目的就是为了校正像差,使光学系统能够在一定的相对孔径下对给定大小的视场成清晰的像。为此,我们有必要就各种像差的成因、度量、计算方法以及它们与相对孔径、视场之间的关系和与光学系统结构参数之间的关系进行讨论。

光学系统对单色光成像时产生五种单色像差:球差、彗差、像散、像面弯曲(场曲)及畸变。对白光成像时,光学系统除对白光中各单色光成分有单色像差外,还会产生两种色差,轴向色差和垂轴色差。下面我们就对各种像差分别进行阐述。

### 2.1 轴上点球差

#### 2.1.1 球差的定义和表示方法

绝大多数光学系统具有圆形入射光瞳,轴上点发出的充满入射光瞳的光束在通过光学系统前后均对称于光轴。因此,为了了解轴上点的成像情况,只需在子午面内光轴以上的半个光束截面讨论若干光线的会聚情况即可。

由几何光学的内容可知,自光轴上一点发出的与光轴成有限孔径角  $U$  的光线,经球面折射以后所得的截距  $L'$  为  $U$  角的函数,即  $L'$  和  $U'$  随入射高度  $h_1$  或孔径角  $U_1$  的不同而不同,如图 2-1 所示。因此,轴上点发出的同心光束经光学系统各个球面折射以后,不再是同心光束,其中与光轴成不同角度(或离光轴不同高度)的光线交光轴于不同的位置上,相对于理想像点有不同的偏离,这种偏离称之为球差,以  $\delta L'$  表示之,具体定义为

$$\delta L' = L' - l' \quad (2-1)$$

其中  $L'$  代表一定孔径高光线的聚交点的像距;  $l'$  为近轴像点的像距。

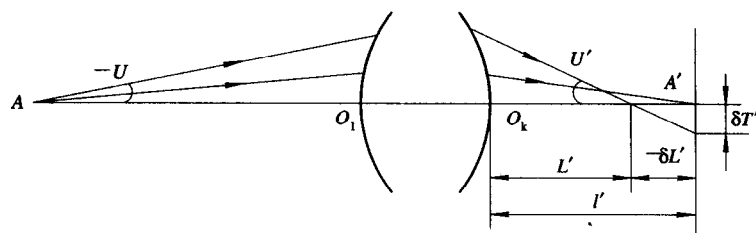


图 2-1 球差