



应用型高等学校“十三五”规划教材

ZEMAX GUANGXUE XITONG SHEJI SHIXUN JIAOCHENG

ZEMAX光学系统设计实训教程

吉紫娟 包佳祺 刘祥彪 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

应用型高等学校“十三五”规划教材

ZEMAX 光学系统设计 实训教程

主 编 吉紫娟 包佳祺 刘祥彪
副主编 俞 侃 尹娟娟 郑秋莎

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书以 Zemax OpticStudio 16 SP2 为软件平台,以实训项目的形式阐述了光学设计的理论及 ZEMAX 在光学设计中的使用方法与技巧,培养读者理论与实践相结合的能力。

全书分 4 个部分,共 10 章。第 1 部分为光学系统设计预备知识(第 1 章~第 4 章),主要介绍光学系统设计及像差理论知识;第 2 部分为基于 ZEMAX 的光学系统设计实训(第 5 章~第 9 章),通过 12 个实训项目详细阐述了望远物镜、显微物镜、目镜及照相物镜等经典光学系统的设计理念及过程,以丰富的实训项目使读者理解并掌握 ZEMAX 的使用方法。此外,为使读者了解现代光学系统的发展及应用,本书第 3 部分为光学系统设计知识拓展(第 10 章),简单介绍了红外、紫外、激光扫描、太赫兹成像等光学系统的设计思路,以供读者自学及参考。第 4 部分为附录及参考文献。

本书深入浅出,通俗易懂,实例丰富,既可供光电类专业师生作为教材使用,也可供光学设计人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

ZEMAX 光学系统设计实训教程/吉紫娟,包佳祺,刘祥彪主编. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8
ISBN 978-7-5680-4414-1

I. ①Z… II. ①吉… ②包… ③刘… III. ①光学设计-教材 IV. ①TN202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 184521 号

ZEMAX 光学系统设计实训教程
ZEMAX Guangxue Xitong Sheji Shixun Jiaocheng

吉紫娟 包佳祺 刘祥彪 主编

策划编辑:范莹
责任编辑:李露
封面设计:原色设计
责任监印:赵月

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913
武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部
印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司
开 本:787mm×1092mm 1/16
印 张:17.5
字 数:445千字
版 次:2018年8月第1版第1次印刷
定 价:46.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着光学设计 CAD 技术的发展,光学设计类软件种类日渐繁多。目前,国内外使用较为广泛的光学设计软件为 ZEMAX 软件。为满足技能型及应用型光学设计人才的培养需求,本书以 Zemax OpticStudio 16 SP2 软件为平台,以项目式设计实例为主线,将理论与实践融合统一,提高学生分析及解决问题的能力。在每章后辅以思考题,便于学生巩固知识点并根据自身兴趣和需要有针对性地自学。在 ZEMAX 设计实例内容安排上,本书既包含了经典光学系统的设计,又加入了现代光学系统设计的相关知识,努力反映光学设计领域的新进展。

在编写过程中,本书参考了多部优秀教材及专业论坛等相关资料,并结合教学实践,以必需、够用为度,在理论基础部分避免了大量烦琐公式的推导,内容深入浅出,通俗易懂,便于读者理解掌握。为与 ZEMAX 软件说明书及工具书相区别,本书简化了对 ZEMAX 操作界面的详细介绍,避免读者对过厚书籍产生畏难情绪。

本书第 1 章由文华学院俞侃老师编写;第 2 章、第 3 章由文华学院包佳祺老师编写;第 4 章由武汉宇熠科技有限公司刘祥彪工程师编写;第 5 章至第 9 章由湖北第二师范学院吉紫娟老师编写;第 10 章由文华学院尹娟娟老师编写;附录及部分图表由湖北第二师范学院郑秋莎老师编写、绘制。最终由吉紫娟老师负责完成全书的文字审阅及相关复习题和实例的搜集、编制和校核。

鉴于编者相关知识水平有限,本书中难免会出现错误之处,恳请广大读者给予批评指正!

编 者

2018 年 5 月

目 录

第 1 部分 光学系统设计预备知识

第 1 章 光学系统设计简介	3
1.1 概述	3
1.2 仪器对光学系统的设计要求	4
1.3 光学系统设计的过程与步骤	5
1.3.1 光学系统设计的具体过程	5
1.3.2 光学系统设计的步骤	6
思考题	7
第 2 章 光学系统的几何像差	8
2.1 概述	8
2.2 球差	8
2.2.1 球差的定义及表示方法	8
2.2.2 球差的校正	10
2.2.3 ZEMAX 中球差的描述	12
2.2.4 小结	15
2.3 彗差	16
2.3.1 彗差的定义及表示方法	16
2.3.2 彗差的校正	18
2.3.3 ZEMAX 中彗差的描述	20
2.3.4 小结	22
2.4 细光束像散	23
2.4.1 像散的定义及表示方法	23
2.4.2 像散的校正	25
2.4.3 ZEMAX 中像散的描述	25
2.4.4 小结	29
2.5 细光束场曲	31
2.5.1 场曲的定义及表示方法	31
2.5.2 场曲的校正	32
2.5.3 ZEMAX 中场曲的描述	34
2.5.4 小结	37
2.6 畸变	37

2.6.1	畸变的定义及表示方法	37
2.6.2	畸变的校正	38
2.6.3	ZEMAX 中畸变的描述	38
2.6.4	小结	42
2.7	色差	42
2.7.1	位置色差的定义及表示方法	43
2.7.2	位置色差的校正	44
2.7.3	倍率色差的定义及表示方法	45
2.7.4	倍率色差的校正	46
2.7.5	ZEMAX 中色差的描述	47
2.7.6	小结	49
2.8	像差校正技巧小结	50
	思考题	51
第 3 章	光学系统的像质评价及像差公差	52
3.1	概述	52
3.2	分辨率	53
3.3	点列图	54
3.4	光学传递函数	55
3.5	相对畸变	57
3.6	点扩散函数	58
3.7	包围圆能量曲线	60
3.8	光线追迹曲线	61
3.8.1	子午垂轴像差曲线	62
3.8.2	弧矢垂轴像差曲线	63
3.9	光程差	63
3.10	光学系统的像差公差	64
3.10.1	望远物镜和显微物镜的像差公差	65
3.10.2	望远目镜和显微目镜的像差公差	66
3.10.3	照相物镜的像差公差	66
	思考题	68
第 4 章	基于 ZEMAX 软件的光学系统自动设计	69
4.1	概述	69
4.2	ZEMAX 优化方法介绍	70
4.3	ZEMAX 评价函数的使用	74
4.3.1	评价函数的定义	74
4.3.2	ZEMAX 中默认评价函数的使用	75
4.4	ZEMAX 优化设计要点	81
	思考题	84

第 2 部分 基于 ZEMAX 的光学系统设计实训

第 5 章 ZEMAX 操作训练	87
5.1 ZEMAX 简介及基本界面介绍	87
5.1.1 引言	87
5.1.2 ZEMAX 的基本界面介绍	87
5.2 实训项目 1	93
5.3 实训项目 2	102
思考题	105
第 6 章 望远物镜设计训练	107
6.1 望远物镜设计的特点	107
6.2 折射式望远物镜的设计	109
6.3 实训项目 3	111
6.4 反射式望远物镜的设计	125
6.5 实训项目 4	127
6.6 折反射式望远物镜的设计	135
6.7 实训项目 5	136
思考题	141
第 7 章 显微物镜设计训练	143
7.1 显微物镜设计的特点	143
7.1.1 显微物镜的光学特性	144
7.1.2 显微物镜设计中应校正的像差	146
7.2 显微物镜的类型	147
7.2.1 消色差物镜	147
7.2.2 复消色差物镜	149
7.2.3 平像场物镜	149
7.3 实训项目 6	150
7.4 实训项目 7	159
思考题	164
第 8 章 目镜设计训练	166
8.1 目镜设计的特点	166
8.1.1 目镜光学特性的特点	166
8.1.2 目镜的像差和像差校正的特点	167
8.2 目镜的类型	168
8.3 实训项目 8	172
8.4 实训项目 9	181
思考题	190
第 9 章 照相物镜设计训练	192
9.1 照相物镜的发展及其基本结构	192

9.2 照相物镜的光学特性及设计特点	197
9.2.1 照相物镜的光学特性	197
9.1.2 照相物镜的设计特点	200
9.3 实训项目 10	201
9.4 实训项目 11	211
9.5 实训项目 12	220
思考题	228

第 3 部分 光学系统设计知识拓展

第 10 章 现代光学系统设计	231
10.1 光学材料简介	231
10.1.1 光学器件常用材料	231
10.1.2 光学透镜常用材料	234
10.2 红外光学系统设计简介	236
10.2.1 概述	236
10.2.2 中红外(3.2~4.2 μm)物镜的设计	237
10.3 紫外光学系统设计简介	240
10.3.1 概述	240
10.3.2 紫外光学系统的设计	241
10.4 激光扫描光学系统设计简介	243
10.4.1 概述	243
10.4.2 激光物镜前扫描系统的设计	245
10.5 太赫兹光学系统设计简介	251
10.5.1 概述	251
10.5.2 太赫兹摄影光学系统的设计	253
10.6 光学系统设计的经验法及提示	256
思考题	257

第 4 部分 附录及参考文献

附录 A 实训报告及课程设计报告指南	261
附录 B ZEMAX 操作数手册	262
附录 C 双胶合透镜的 P_0 表	266
附录 D 双胶合透镜参数表	268
附录 E 单透镜参数表	270
参考文献	271

第 1 部分

光学系统设计预备知识

第 1 章 光学系统设计简介

1.1 概述

任何一个光学系统不管用于何处,其作用都是把目标发出的光按仪器工作原理的要求改变它们的传播方向和位置,送入仪器的接收器,从而获得目标的几何形状、能量强弱等各种信息。因此,对光学系统成像性能的要求主要有两个方面:第一方面是光学特性,包括焦距、物距、像距、放大率、入瞳位置、入瞳距离等;第二方面是成像质量,即光学系统所成的像应该足够清晰,并且物像相似,变形要小。其中,第一方面的光学特性要求主要属于应用光学的讨论范畴,第二方面的成像质量要求则属于光学设计的研究内容。

所谓光学系统设计就是根据使用性能要求与条件,来决定光学系统的性能参数、系统原理方案、外形尺寸和各光组的具体结构等。

设计一个光学仪器的光学系统,大体上可分为两个阶段。第一阶段是根据仪器总体的技术要求(性能指标、外形尺寸、重量及相关技术条件),从仪器各部分(光学、机械、电路等)出发,拟定光学系统的原理图,并初步计算系统的外形尺寸,以及确定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,或称外形尺寸计算。第二阶段是根据初步设计的结果,确定每个镜头的具体结构参数(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,一般也称光学设计。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型式。当像差设计无法实现,或者结构过于复杂时,就要反过来修改初步设计。要实现良好的光学仪器性能,初步设计是关键。如果初步设计不合理,可能使仪器根本无法完成工作,还会给第二阶段的像差设计工作带来困难,导致系统结构过于复杂,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,同样也会造成上述不良后果。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,结构最简单的设计。初步设计和像差设计在不同类型的仪器中所占的地位和工作量不同,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;一般显微镜和照相机中,初步设计比较简单,而像差设计比较复杂。

随着计算机技术的发展,光学自动设计软件的用户界面已日趋完善,软件对用户的要求也越来越低,设计者能快速、高效地设计出优质、经济的光学系统。虽然像差自动校正软件可以极大地减轻设计者的劳动强度和减少设计时间,但它也仅仅是一个工具,只能完成整个设计过程中的一部分工作。不管设计手段如何改变,光学设计过程的一般规律仍然是必须遵循的。

1.2 仪器对光学系统的设计要求

任何一种光学仪器都有其用途和使用条件,也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,一定要了解这些要求。这些要求概括起来包括以下几个方面。

1. 光学系统的基本特性

光学系统的基本特性有数值孔径(NA)或相对孔径、线视场或视场角(视场角在光学工程中又称为视场)、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。

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,如设计军用光学系统时,外形尺寸计算以及各光组之间光瞳的衔接都是很重要的。

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。

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 Γ ,一定要按有效放大率的条件来选取,即满足条件 $500 \text{ NA} < \Gamma < 1000 \text{ NA}$ 。过高的放大率是没有意义的,只有提高数值孔径才能提高有效放大率。

对于望远镜的视觉放大率,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。当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。对于一些手持望远镜,它的实际放大率比正常放大率低,以便获得较大的出瞳直径,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:

$$0.2D \leq \Gamma \leq 0.75D \quad (1-1)$$

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、视场角和焦距的选择更加合理,应该参照下式来选择这三个参数:

$$\frac{D}{f} \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} = C_m \quad (1-2)$$

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,光学系统的像差校正就不会发生困难;当 $C_m > 0.24$ 时,光学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,保证其在技术上和物理上均能够实现,并且要使其具有良好的工艺性和经济性。

1.3 光学系统设计的过程与步骤

1.3.1 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的满足程度出发,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(或视场角)、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。

在进行上述计算时,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。对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。

3. 光组的设计

光组的设计一般分为选型、确定初始结构、像差校正等阶段。

1) 选型

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。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) 确定初始结构

确定初始结构常用以下两种方法。

(1) 解析法(代数法):这是根据初级像差理论求解初始结构的方法。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: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 ,即得到所要求的结构,并要估计其像差的大小或变化趋势。

3) 像差校正

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,以像差评价为标准,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。

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的加工、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

设计说明书是对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。

1.3.2 光学系统设计的步骤

光学系统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。一般光学设计旨在将像差减小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)。

以上每个步骤还包括几个环节,循环执行这几个步骤,最终会得到一个满意的结果,整个设计流程如图 1-1 所示。

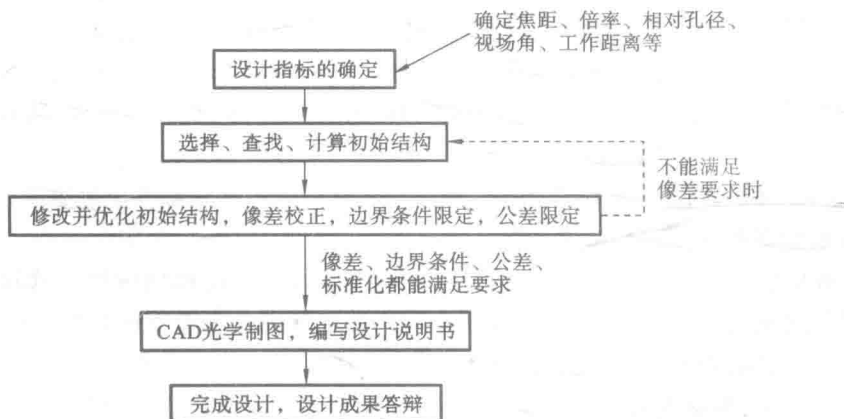


图 1-1 光学系统设计流程图

思考题

- (1) 什么是光学系统设计？光学系统设计包含哪些工作内容？
- (2) 光学系统设计发展的过程是怎样的？其难度在哪里？
- (3) 光学系统设计的具体过程是怎样的？
- (4) 光学系统设计的性能与质量要求包含哪些？

第 2 章 光学系统的几何像差

2.1 概述

实际的光学系统都有一定大小的相对孔径和视场,相对孔径和视场远远超出近轴区所限定的范围。像差的大小反映了光学系统质量的优劣。常见的几何像差有五种单色像差和两种色差。五种单色像差分别为球差、彗差、像散、场曲和畸变。两种色差为位置色差和倍率色差。在实际光学系统中,各种像差是同时存在的。这些像差影响光学系统成像的清晰度、相似性和色彩逼真度等,降低了成像质量。成像光学系统设计中,了解基本的像差理论,懂得像差在光学系统中形成的原因,可以极大地帮助我们校正产生的这些像差,达到很好的成像质量。

在应用光学课程中,我们学习了光路计算和像差理论,故此章抛开烦琐的推导过程,简明扼要地回顾像差基本知识,主要围绕光学系统中七种几何像差的定义、表示方法、对成像质量的影响、校正(或消除)方法以及在 ZEMAX 中的描述等方面展开阐述。

2.2 球差

2.2.1 球差的定义及表示方法

1. 球差的定义

当光入射到如图 2-1 所示的单个透镜上时,无限靠近光轴的光线将聚焦到近轴像的位置。随着透镜上光线高度的增加,像方空间中光线与光轴相交,即聚焦的位置越来越靠近透镜。这种随孔径变化的焦点位置的变化称为球差(spherical aberration),也称球面像差。

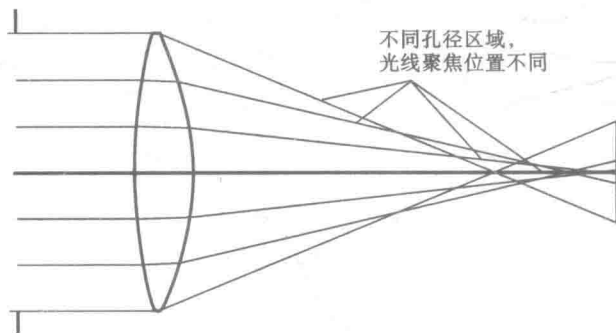


图 2-1 球差示意图

球差的大小取决于光线的孔径角 U (或在入瞳上的高度 h) 的大小,可在沿轴方向和垂轴方向度量,如图 2-2 所示。沿轴方向度量的球差称为轴向球差(也称纵向球差),用符号 $\delta L'$ 表示,其公式为

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

式中: L' 为与光轴成一定孔径角 U (或在入瞳上的高度为 h) 的光线聚焦点的像距; l' 为近轴像点的像距。

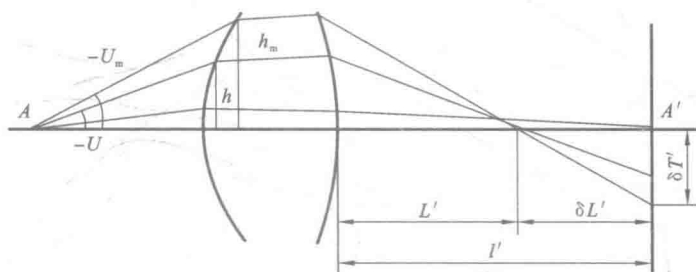


图 2-2 球差的度量

显然,与光轴成不同孔径角 U 的光线具有不同的球差。孔径角 U_m 对应的入射光线高度 h_m 称为全孔径,对应的球差称为边光球差,用 $\delta L'_m$ 表示;若 $h/h_m = 0.707$,则称之为 0.707 孔径或 0.707 带光,对应的球差称为 0.707 带光球差,用 $\delta L'_{0.707}$ 表示;其他带光球差,如 $\delta L'_{0.3}$ 、 $\delta L'_{0.5}$ 、 $\delta L'_{0.8}$ 等,也可类推称之。进一步类推到视场,若视场中 $y/y_m = 0.707$,也可称之为 0.707 带视场。

在垂轴平面内度量的球差称为垂轴球差(也称横向球差),用符号 $\delta T'$ 表示,其表达式为

$$\delta T' = \delta L' \tan U' \quad (2-2)$$

垂轴球差表示由轴向球差引起的弥散圆半径,用来度量球差大小。但平常所说的球差一般指的是轴向球差 $\delta L'$ 。

2. 球差的表示方法

已知球差 $\delta L'$ 是入射光线高度 h 或孔径角 U 的函数,并且在轴上视场产生时为旋转对称像差,故在级数展开式中只能包含 h 或 U 的偶次项。当 $h=0$ 或 $U=0$ 时, $\delta L'=0$,因此展开式中没有常数项。此外,球差是轴上点像差,与视场无关,所以展开式中没有视场 y 或 ω 项,因此球差的级数展开式可表示为

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 + A_3 h^6 + \dots$$

或
$$\delta L' = A_1 U^2 + A_2 U^4 + A_3 U^6 + \dots \quad (2-3)$$

式(2-3)中,第一项称为初级球差,第二项为二级球差,第三项为三级球差,以此类推。除了第一项初级球差,后面的球差统称高级球差。 A_1 、 A_2 、 A_3 分别为初级球差系数、二级球差系数和三级球差系数。大部分光学系统二级以上的更高级的球差很小,可以忽略。因此,球差可近似用初级球差和二级球差两项来表示。在绘制球差曲线的时候,通常把纵坐标取为 h/h_m ,所以球差也可以表示为

$$\delta L' = A_1 \left(\frac{h}{h_m} \right)^2 + A_2 \left(\frac{h}{h_m} \right)^4 \quad (2-4)$$

初级球差的大小与结构参数 r 、 d 、 n 密切相关,而高级球差的数值则相对固定,所以校正球