

光学设计

袁旭沧 主编



北京理工大学出版社

光 学 设 计

主 编 袁旭沧

编 者 袁旭沧 李士贤
郑乐年 安连生

北京理工大学出版社

光学设计

内 容 简 介

本书是高等院校应用光学、光学仪器专业的教材，也可以作为光学设计工程技术人员的参考书。内容包括：像差计算，像差理论，各类典型光学系统设计，像差自动校正和光学传递函数。书中列举了各种典型光学系统的具体设计过程和设计方法，便于读者学习和掌握。

光 学 设 计

袁旭沧 主编

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

永清县印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 27.375印张 675千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN7-81013-154-0/O·29

印数：1—2400册 定价：5.35元

前 言

光学设计是二十世纪发展起来的一门学科,虽然出版的书籍已经相当多,但是对初学者来说,往往还有这样的情况:尽管读了不少有关的书籍,但是一接触具体设计任务,仍会感到不知从何入手。我们认为造成这种情况的原因:一方面是因为光学设计的理论至今还很不完善,还不能根据理论用统一的方法和步骤来解决不同类型光学系统的设计问题,像差理论还只能给出一些近似的或者定性的结果;另一方面,也因为现有的书籍,讲一般理论比较多,讲具体方法比较少,尤其是如何应用理论来解决设计中遇到的实际问题就更少了。本书力图能克服现有书籍的这一不足之处,希望既能帮助初学者很快入门,也能使已入门者得到提高。

全书以初级像差理论为基础,在初级像差分析的基础上,用实际光路计算的方法,找出系统的高级像差规律,从而得出较好的设计结果。本书全部内容共有十一章。前三章是讲实际像差的计算和像差理论。在像差理论方面除了系统地介绍初级像差理论而外,还提出了一种由实际像差计算结果来估计高级像差数量的方法。它使我们有可能对不同系统高级像差的规律进行定量研究。从第四章到第九章,分别介绍了各种不同类型光学系统的设计,包括望远镜物镜、目镜、显微镜物镜、聚光照明系统、照相物镜和折反射系统。对每一类系统首先用像差理论分析它们的特点,然后系统介绍它们的各种典型结构型式及相应的像差特性,为设计者选择结构型式时作参考。最后结合几种有代表性的典型结构实例,按实际设计过程讲述它们的设计方法,而且尽可能对每一步修改和修改以后得出的结果用像差理论进行说明。通过这些设计实例,既可以学到具体的设计方法,也能进一步了解不同系统的具体特点,提高分析问题解决问题的能力。全书共有设计实例二十多个,它们的结构参数和像差都是实际设计结果。

由于电子计算机在光学设计中的应用,从手工计算像差发展到像差自动校正,给光学设计带来了一个跃进。为了适应使用电子计算机设计光学系统的要求,光学设计的某些内容需要加以改进和提高。这一点在本书中已有所反映,但还只是初步。

如何编制像差自动校正程序的问题,不属于本书预定的内容。但是目前光学设计已普遍使用像差自动校正程序。因此在本书第十章(使用像差自动校正程序进行光学设计)中,从使用程序的角度出发,介绍了自动校正的原理和有关问题以及目前最常用的两种自动校正程序(阻尼最小二乘法程序和适应法程序)的特点和使用中应注意的问题。第十一章(光学传递函数在光学设计中的应用)介绍了有关光学传递函数的基本概念和它的计算方法,以及如何用它来评价光学系统的成像质量。

本书是高等学校应用光学、光学仪器专业的教材,是在作者原先编著的《光学设计》(1983年科学出版社出版)一书基础上改编而成的,本书也可以作为有关科技人员的技术参考书。本书由袁旭沧主编,参加工作的还有李士贤、郑乐年、安连生同志。

编者

1988年于北京理工大学

引言

设计一个光学仪器的光学系统，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），从仪器各部分（光学、机械、电路）出发，拟定光学系统的原理图，并初步计算系统的外形尺寸，以及系统中各个部分要求的光学特性等等。一般称为“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），保证满足系统光学特性和成像质量的要求，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型式，反之当像差设计无法实现，或者结构过于复杂时，不得不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，严重的可能使仪器根本无法完成工作，其次给第二阶段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，结构最简单。

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，则初步设计比较简单，而像差设计却较为复杂。本书主要解决像差设计问题，而不讨论初步设计，并且认为读者已经具备了应用光学的一般基础知识。

最初生产的光学仪器是人们直接磨制了各种不同形状的透镜，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。由于实际透镜的制作比较困难，要找出一个质量比较好的结构，势必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来代替。对不同结构参数的光学系统，由同一物点出发，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，就可以知道该物点的成像质量，在整个成像物平面上计算若干个点，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，但是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和像差之间的关系十分复杂，要找到一个比较理想的结果，仍然需要经过长期的繁重计算过程，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，促使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。但是这方面的进展是不能令人满意的，直到目前为止像差理论只能给出一些近似的结果，或者指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，最后得到一个较为满意的结果。因此设计人员的经验对设计的进程有着十分重要的意义，同时不同的人对不同的系统所采用的设计方法和步骤差别很大。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去积累经验。

由于电子计算机的出现，才使光学设计人员从繁重的手工计算中解放出来，过去一个人需用几个月的时间进行计算，现在用电子计算机只要几十分钟甚至几分钟就能完成了。设计人员的主要精力已经由像差计算转到整理计算资料和分析像差结果这方面来。光学设计最近的发展是除了应用电子计算机来进行像差计算外，让机器进一步代替人做分析像差和自动修改结构参数的工作，这就是所谓“自动设计”，或称“像差自动校正”。

光学设计领域中应用了电子计算机以后，使光学设计产生了一个跃进，不少过去需要长时间才能完成的工作，今天在较短时间内就可能完成，有些过去由于受到计算量的限制而无法进行的工作，今天有可能进行了。电子计算机的采用，不仅节省了大批劳动力，缩短了设计周期，同时也使我们有可能设计出质量更高、结构更简单的光学系统。

由于电子计算机的应用，使光学设计面临着一个改进和提高的任务，某些内容则已经很不适用了，大部分内容今天仍然可以应用，但须要加以发展和改进，本书在这方面已有所反映。本书原始材料是原北京工业学院光学专业的讲义，大部分材料是1974年前后写成的，鉴于当时的情况，我们基本上是按照使用电子计算机计算像差，而用人工修正结构参数这样一种设计方式来写的。由于近年来光学自动设计在我国发展十分迅速，今天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。某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有用处了，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能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，人的主观能动性仍然起主导作用，特别是那些为了满足某些特殊需要而设计的新结构型式，主要是依靠设计人员的理论分析和实际经验来完成的。因此我们认为，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。

本书的内容大体分成三部分，第一部分是像差计算，这是光学设计的基础和基本的手段。考虑到目前国内已普遍使用电子计算机计算像差，我们删去了过去采用的手工计算的内容，而以适用于电子计算机编制程序的球面和非球面的向量公式和有关数据处理，以及像差表示方法为重点。第二部分是像差理论，它讨论像差的基本性质和像差与光学系统结构参数的关系，它是光学设计的理论基础。本书着重系统地介绍初级像差理论，特别是薄透镜的初级像差理论。定性地讨论了某些高级像差的性质。第三部分是不同类型光学系统的设计。除了介绍不同类型系统的共同特点，基本结构型式和像差的特点而外，结合例子按照实际的设计步骤详细介绍它们的设计方法。着重说明如何应用基本的像差理论来分析和解决设计中遇到的具体问题。通过实际应用进一步加深对理论的理解。

本书第十章是“使用像差自动校正程序进行光学设计”。介绍了目前用得最广泛的两种

自动设计方法——阻尼最小二乘法 and 适应法的基本原理及有关问题。主要是为了使用程序设计光学系统，而不是为了编程序。第十一章介绍了光学传递函数和它的计算方法以及如何用来评价光学系统的质量。

光学设计是一门实践性很强的学科，它并没有很多高深的理论，但要真正掌握它必须要在实际设计过程中，通过理论和实践的反复结合，才能达到应用自如。本书编写过程中，我们在这方面作了不少的努力，读者在学习过程中，也应对此狠下功夫。

目 录

引言

第一章 共轴球面系统的像差分类和像差计算

§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 介质的色散和折射率插值公式	(1)
§ 1-3 光学系统的色差——轴向色差和垂轴色差	(5)
§ 1-4 轴上点的单色像差——球差	(7)
§ 1-5 轴外点单色像差的分类	(8)
§ 1-6 球面光路计算的向量公式	(11)
§ 1-7 二次曲面光路计算的向量公式	(15)
§ 1-8 高次非球面光路计算的向量公式	(18)
§ 1-9 像差计算的起始和终结公式	(21)
§ 1-10 轴外点细光束子午和弧矢场曲的计算	(30)
§ 1-11 近轴物点宽光束弧矢彗差——正弦差的计算	(35)
§ 1-12 二次和高次曲面的细光束焦点计算公式	(37)
§ 1-13 编制像差计算程序中的几个光学问题	(39)
§ 1-14 像差的曲线表示	(42)

第二章 像差理论

§ 2-1 概述	(47)
§ 2-2 轴上点的初级球差公式	(48)
§ 2-3 轴外点的初级像差公式	(52)
§ 2-4 初级像差性质的讨论	(56)
§ 2-5 共轴球面系统的初级像差计算公式	(63)
§ 2-6 单个折射球面像差特性的讨论	(67)
§ 2-7 场曲和光学系统结构关系的讨论	(72)
§ 2-8 像差和光阑位置的关系	(75)
§ 2-9 初级色差公式	(76)
§ 2-10 适合计算机应用的初级像差计算公式	(79)
§ 2-11 玻璃平板的初级像差公式	(86)
§ 2-12 波像差和几何像差的关系	(88)
§ 2-13 非球面的初级像差公式	(93)
§ 2-14 像差的级数表示式	(95)
§ 2-15 像差平衡	(97)
§ 2-16 高级像差的数量估计	(103)
§ 2-17 高级色差和色差的平衡	(106)
§ 2-18 高级像差数量估计的应用举例	(108)

第三章 薄透镜系统的初级像差

§ 3-1 概述	(111)
----------	-------

§ 3-2	薄透镜系统的初级单色像差公式	(111)
§ 3-3	像差特性参数 P 、 W 的归化	(114)
§ 3-4	薄透镜系统的初级色差公式	(119)
§ 3-5	双胶合物镜结构参数和 $\overline{P}_\infty$ 、 $\overline{W}_\infty$ 、 $\overline{C}$ 的关系	(122)
§ 3-6	选玻璃程序的编制	(125)
§ 3-7	单透镜结构参数和 $\overline{P}_\infty$ 、 $\overline{W}_\infty$ 、 $\overline{C}$ 的关系	(127)
§ 3-8	单个薄透镜球差特性的讨论	(129)
§ 3-9	单个薄透镜对无限远物平面成像时的彗差和像散特性	(133)
第四章 望远镜物镜设计		
§ 4-1	望远镜物镜的特点	(138)
§ 4-2	望远镜物镜的类型和设计方法	(139)
§ 4-3	双胶合望远镜物镜设计	(141)
§ 4-4	双胶合望远镜物镜的二级光谱色差	(151)
§ 4-5	消色差谱线的选择	(154)
§ 4-6	摄远物镜设计	(155)
§ 4-7	望远镜物镜像差的公差	(171)
第五章 目镜设计		
§ 5-1	目镜的特点	(179)
§ 5-2	常用目镜的类型和像差分析	(181)
§ 5-3	冉斯登、惠更斯和凯涅尔目镜设计	(187)
§ 5-4	对称式目镜和无畸变目镜设计	(196)
§ 5-5	I 型广角目镜设计	(204)
§ 5-6	II 型广角目镜 (艾尔弗广角目镜) 设计	(211)
§ 5-7	望远镜系统像差的公差	(221)
第六章 显微镜物镜设计		
§ 6-1	显微镜物镜的光学特性	(224)
§ 6-2	显微镜物镜的类型	(226)
§ 6-3	低倍消色差物镜设计	(229)
§ 6-4	中倍消色差物镜设计	(232)
§ 6-5	显微镜物镜像差的公差	(241)
第七章 聚光照明系统设计		
§ 7-1	聚光照明系统的作用和要求	(244)
§ 7-2	照明系统的类型	(246)
§ 7-3	光线折射的作图法	(248)
§ 7-4	透镜式照明系统的设计方法	(249)
§ 7-5	非球面 (二次曲面) 照明系统设计	(252)
§ 7-6	照明螺纹透镜设计	(255)
第八章 照相物镜设计		
§ 8-1	照相物镜的光学特性和设计特点	(262)
§ 8-2	照相物镜的基本类型	(264)
§ 8-3	基本类型照相物镜的演变型式	(269)
§ 8-4	变焦距照相物镜	(276)

§ 8-5	像差变化量表的计算	(280)
§ 8-6	照相物镜设计例一——根据像差变化量表用逐步修改的方法设计反摄远物镜	(281)
§ 8-7	照相物镜设计例二——从设计半部系统出发设计双高斯物镜	(294)
§ 8-8	照相物镜设计例三——从初级像差求解入手设计三片型照相物镜	(312)
§ 8-9	照相物镜像差的公差	(323)
第九章 折反射系统设计		
§ 9-1	概述	(326)
§ 9-2	光程和等光程条件	(326)
§ 9-3	反射和折反射的望远镜物镜和照相物镜	(329)
§ 9-4	折反射显微镜物镜	(333)
§ 9-5	施密特校正板的设计	(334)
§ 9-6	折反射球面系统设计举例	(337)
第十章 使用像差自动校正程序进行光学设计		
§ 10-1	概述	(343)
§ 10-2	像差自动校正的基本原理及其和人工校正过程的关系	(343)
§ 10-3	像差自动校正程序中的几个问题	(347)
§ 10-4	怎样使用阻尼最小二乘法程序	(350)
§ 10-5	怎样使用适应法程序	(353)
§ 10-6	使用阻尼最小二乘法程序的一个例子	(354)
§ 10-7	使用适应法程序的例子	(362)
第十一章 光学传递函数在光学设计中的应用		
§ 11-1	概述	(373)
§ 11-2	图像的分解和合成——傅里叶级数和傅里叶变换	(373)
§ 11-3	什么是光学传递函数	(377)
§ 11-4	怎样计算光学传递函数	(379)
§ 11-5	几何传递函数的计算	(381)
§ 11-6	波像差和瞳函数的计算	(382)
§ 11-7	用两次傅里叶变换法计算光学传递函数	(384)
§ 11-8	用自相关法计算光学传递函数	(385)
§ 11-9	白光传递函数	(385)
§ 11-10	光学传递函数的应用	(387)
附录一 几何光学的基本公式		(391)
附录二 双胶合参数表		
双胶合薄透镜参数表 (王冕玻璃在前)		(396)
双胶合薄透镜参数表 (火石玻璃在前)		(412)

第一章 共轴球面系统的像差分类和像差计算

§ 1-1 概 述

共轴光学系统一般来说成像并不理想,由同一物点发出的光线经过系统以后,出射光线并不聚交于理想像点,实际光线与理想像面的交点和理想像点之间位置的差就是像差,像差越大,成像质量越差。光路计算就是为了求得像差,从而确定系统成像质量的优劣。本章将首先介绍共轴系统中像差的基本概念和分类,然后介绍像差的计算。

光学设计无论是自动设计还是人工校正,基本上是按如下的过程来进行的。首先给出一个系统的初始结构,按照要求的物平面位置和光学特性(光束口径和视场)在整个物平面上选取若干个物点,从每一物点出发计算几条光线,根据这些光线的像差大小确定系统的成像质量。如果成像质量不能满足要求,则修改结构参数,重新计算像差。这样不断重复直到满足要求为止。所以光路计算或像差计算是光学设计的基础,在使用电子计算机以前,光路计算长期以来是依靠对数表或机械计算机用手工进行计算,而要完成一个设计必须反复地进行大量的光路计算,这是一项繁重的脑力劳动。光学设计所需要的时间,一方面和采用的设计方法有关,同时也与光路计算的速度这一重要因素有关。因此,光路计算一直是光学设计研究的重要课题,研究的主要方向是改变公式的形式,编制不同的表格,以便减轻光路计算的劳动,加快光路计算的速度。但是效果一直并不十分显著,直到光学设计中采用了电子计算机以后,这个问题才从根本上获得了解决。

由于计算工具的改变,所用的数学方法也必须相应地变化。过去手工计算所用的公式都是采用附录一中给出的三角公式(附-2)~(附-5),那时光路计算必须依靠三角函数表或三角函数对数表来进行,因此光路计算也叫做“三角计算”。在使用电子计算机的情况下,三角公式对电子计算机编制程序就很不方便,而采用向量代数的公式就很合适。今天光路计算的研究已经从如何节省时间,减少计算工作量以及从计算结果中如何获得有关成像质量的更多的知识等方面,转变为如何导出更适合于编制程序的公式,如何提高计算精度,以及如何更精确更全面地表示一个光学系统的成像质量,使设计结果更符合实际使用的要求。因此,目前除了计算几何像差之外,还进行波像差和光学传递函数的计算。不过由于几何像差简单,而且直观,仍然是设计过程中采用的主要方法,而波像差和光学传递函数大多作为最后的精确评价使用。

目前光路计算工作已经完全由电子计算机来完成。本章内容主要是介绍适合于电子计算机编制程序的光路计算的向量公式,以及如何应用这些公式计算像差和各种像差的表示方法。

§ 1-2 介质的色散和折射率插值公式

实际使用的共轴光学系统,都是由若干个透镜组成的,每个透镜则是用不同的介质(如光学玻璃、晶体等)和曲面构成的。光线在这些透镜的表面进行折射达到成像的目的。一切透

明介质的折射率都随着光的波长增加而减小，如图1-1所示。因此光学系统的成像性质也随着波长的改变而改变。

自然界中绝大多数发光体发出的光都有一定的波长范围，例如在地面上接收到的太阳光，就是一个波长在290nm以上的连续光谱，因此进入光学系统成像的光线一般也都有一定的波长范围。由于不同波长光线的折射率不同，光学系统的成像性质也随之改变。

随着光学仪器的用途不同，光线的有效波长范围也不同。例如直接用眼睛观察的光学仪器，有效的波长范围大约为400~800nm，称为“可见光”。不同波长的光线颜色不同，一般把光的颜色分成红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种。红光的波长最长，紫光的波长最短。白光则是由各种颜色的光线混合而成的一个连续光谱，不同颜色的光线对应的波长范围如图1-2所示。波长小于400nm的光线称为紫外线，大于800nm的光线称为红外线。一般的光学玻

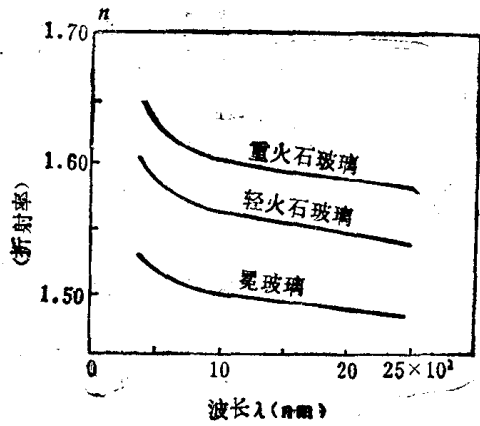


图1-1

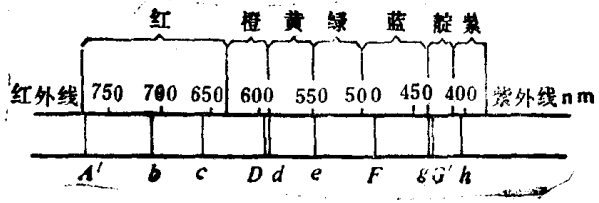


图1-2

璃只对350~2000nm的光透明。水晶、莹石等一些特殊的光学材料则能透过红外线和紫外线。

介质对不同波长光的光学特性，一般用若干特征谱线的折射率表示。获得这些单色光的方法是用不同元素气体放电。这些特征谱线都用一定的字母表示，如表1-1所示。

表1-1

谱线符号	颜色	元素	波长(nm)
A'	红	K	768.20
b	红	He	706.52
C	红	H	656.28
D	黄	Na	589.30
d	黄	He	587.57
e	绿	Hg	546.07
F	蓝	H	486.13
g	靛	Hg	435.83
G	靛	H	434.05
h	紫	Hg	404.66

在光学玻璃的产品目录上,除了直接给出若干谱线的折射率而外,还给出下列一些参数:

色散:它代表不同谱线折射率的差,例如,

$$(n_F - n_C), (n_F - n_D), (n_C - n_{A'}) \dots$$

其中 $(n_F - n_C)$ 称为中部色散,其它称为部分色散。

色散倒数,也称为阿贝数,用 ν 表示,它的表达式为:

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

部分相对色散:用 P 表示,其表达式为:

$$P_{FD} = \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}, \quad P_{FC} = \frac{n_F - n_C}{n_F - n_C}, \dots$$

在设计光学系统过程中,除了玻璃产品目录上给出的一些常用谱线的折射率而外,随着仪器的用途不同,有效的波长范围随之不同,因此还需要知道其他波长光线的折射率。利用已知的折射率推算其他波长折射率的公式称为折射率插值公式。类似的公式很多,我们这里介绍两种公式。

一、根据 $n_{A'}$, n_C , n_F , n_A 计算任意波长的折射率公式

$$n_\lambda = n_{A'} B_{A'} + n_C B_C + n_F B_F + n_A B_A \quad (1-1)$$

如果已知某一种光学玻璃的四个折射率: $n_{A'}$, n_C , n_F , n_A , 要求某一波长 λ 的折射率,首先按以下公式计算系数 $B_{A'}$, B_C , B_F 和 B_A :

$$B_{A'} = -9.74802711 + 12.81327634\lambda^2 + \frac{2.005673172}{\lambda^2 - 0.035} + \frac{-0.1314220822}{(\lambda^2 - 0.035)^2}$$

$$B_C = 17.41684396 - 18.92716898\lambda^2 + \frac{-3.958684180}{\lambda^2 - 0.035} + \frac{0.2723451558}{(\lambda^2 - 0.035)^2}$$

$$B_F = -9.051099716 + 8.120605102\lambda^2 + \frac{2.777953720}{\lambda^2 - 0.035} + \frac{-0.2296678272}{(\lambda^2 - 0.035)^2}$$

$$B_A = 2.382282858 - 2.006712462\lambda^2 + \frac{-0.824942713}{\lambda^2 - 0.035} + \frac{0.08874475383}{(\lambda^2 - 0.035)^2}$$

以上公式中 λ 以微米 (μm) 为单位 (可见光为 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$)。求出四个系数以后,即可由公式 (1-1) 计算折射率,为了使用方便,我们计算出一个表格,如表 1-2 所示,对表中所列波长的系数可以不必计算,直接由表中查出。利用这种公式进行折射率插值时,在 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内最大误差不超过 0.00003 ,超出这个范围误差就要加大。表 1-3 中还列出了可见光和近红外范围内目前已有的一些激光的波长和它们对应的系数值。

表1-2

$\lambda(\mu\text{m})$	$B_{A'}$	B_C	B_F	B_h
0.400	-0.06353077	0.14911345	-0.22691408	1.14133140
0.410	0.05637012	-0.13381926	0.22100135	0.85644778
0.420	0.12353867	-0.29688925	0.54058054	0.63277004
0.430	0.15244501	-0.37123906	0.76136377	0.45743027
0.440	0.15402653	-0.38050519	0.90603663	0.32044201
0.450	0.13659404	-0.31273134	0.99214378	0.21399351
0.460	0.10648850	-0.27175700	1.03333808	0.13193040
0.470	0.06856203	-0.17823583	1.04030107	0.06937272
0.480	0.02653368	-0.07039029	1.02142818	0.02242841
0.490	-0.01674514	0.04542452	0.98334353	-0.01202292
0.500	-0.05909093	0.16429578	0.93129001	-0.03649486
0.510	-0.09883674	0.28243021	0.86942722	-0.05302069
0.520	-0.13471669	0.39690733	0.80106065	-0.06325129
0.530	-0.16577734	0.50548958	0.72881923	-0.06853148
0.540	-0.19130918	0.60647540	0.65479361	-0.06995984
0.550	-0.21079356	0.69851488	0.58064464	-0.06843597
0.560	-0.22386125	0.78087040	0.50768880	-0.06469795
0.570	-0.23026007	0.85264647	0.43696584	-0.05935225
0.580	-0.22982935	0.91343444	0.36929264	-0.05289773
0.590	-0.22247994	0.96291872	0.30530619	-0.04574497
0.600	-0.20817828	1.00091209	0.24549806	-0.03823188
0.610	-0.18693390	1.02732812	0.19024217	-0.03063639
0.620	-0.15878941	1.04215910	0.13981718	-0.02318687
0.630	-0.12381260	1.04545852	0.09442465	-0.01607056
0.640	-0.08269015	1.00732697	0.05420372	-0.00944055
0.650	-0.03372259	1.01790094	0.01924317	-0.00342152
0.660	0.02117960	0.98734375	-0.01640887	0.00188551
0.670	0.08249925	0.94583837	-0.03473693	0.00639929
0.680	0.15011490	0.89358168	-0.05375162	0.01005502
0.690	0.22390233	0.83077982	-0.06748433	0.01280166
0.700	0.30373858	0.75764457	-0.07598285	0.01459969
0.710	0.38949818	0.67439038	-0.07930773	0.01541915
0.720	0.48105997	0.58123217	-0.07752938	0.01523812
0.730	0.57830082	0.47838344	-0.07072562	0.01401134
0.740	0.68110566	0.36905483	-0.05897973	0.01181913

续表1-2

$\lambda(\mu\text{m})$	$B_{A'}$	B_C	B_F	B_h
0.750	0.78935890	0.24445350	-0.04237882	0.00856641
0.760	0.90294919	0.11378137	-0.02101250	0.00428192
0.770	1.02176872	-0.02576450	0.00502819	-0.00103241
0.780	1.14571333	-0.17399288	0.03565165	-0.00737210
0.790	1.27468259	-0.33071849	0.07076641	-0.01473052
0.800	1.40857981	-0.49576219	0.11028172	-0.02309934

表1-3

激光器名称	$\lambda(\mu\text{m})$	$B_{A'}$	B_C	B_F	B_h
He-Cd气体激光器	0.4416	0.15232962	-0.37721863	0.92335355	0.30153544
Ar ⁺ 离子气体激光器	0.4880	-0.00810242	0.02187774	0.99222849	-0.00600381
	0.5145	-0.11552452	0.33454532	0.83929592	-0.05831671
Kr ⁺ 离子气体激光器	0.6472	-0.04792910	1.02446969	0.02849843	-0.00503903
	0.4762	0.04278978	-0.11261919	1.03118807	0.03864133
	0.5208	-0.13738969	0.40583645	0.79539313	-0.06383990
	0.5682	-0.22960869	0.84052618	0.44949202	-0.06040952
He-Ne气体激光器	0.6328	-0.11280617	1.04432864	0.08263683	-0.01415930
红宝石固体激光器	0.6929	0.24643808	0.81062496	-0.07048530	0.01342224
	0.6943	0.25749831	0.80058558	-0.07177687	0.01369302
砷化镓半导体激光器	0.8400	1.99164327	-1.23575454	0.31058066	-0.06346939
	0.9020	3.03610407	-2.61746396	0.74487210	-0.16351221
YAG钕玻璃激光器	1.0600	6.38050371	-7.25639673	2.43126684	-0.55537383

二、肖特 (Shott) 光学玻璃折射率插值公式

$$n_{\lambda}^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \quad (1-2)$$

在该厂的光学玻璃产品目录中,对每一种玻璃除了给出若干指定波长的折射率而外,同时给出了它的六个系数 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 的数值。对于不同波长可以直接根据公式(1-2)计算它的折射率。 λ 同样用微米(μm)作单位。使用这个公式进行折射率插值,在0.335~1.014 μm 波长范围内误差不超过 0.5×10^{-5} ,但只能用于肖特厂的玻璃。

§ 1-3 光学系统的色差——轴向色差和垂轴色差

由上节知道,构成透镜的介质的折射率随着光的颜色不同而改变。由共轭点方程式(附-14)和(附-15)可知,对同一物点(l 和 y 一定)来说,介质的折射率 n 和 n' 不同,像面位置

l' 和像高 y' 都要发生改变。由同一物点发出的白光经光学系统以后,不同颜色光线不再聚交于一点,因而不能成一白色像点,而出现色彩,这样的现象称为色差。不同颜色光线像面位置之差称为**轴向色差**,不同颜色光线像高之差称为**垂轴色差**。下面分别进行介绍,

一、轴向色差

如果我们把一个简单的正透镜用来对无限远物体成像,不同颜色光线所成的像面位置不同,红光的像面最远,紫光的像面最近,如图1-3所示。对轴上点来说不同颜色光线的像点依次排列在光轴上。如果在紫光的像点 F'_v 处用屏幕观察,则屏幕上呈现一个圆形的光斑,光斑中心为一紫色亮点,外边绕有红色边缘,如图中位置I所示;如果在 F'_r 处观察,则光斑中心为黄色亮点,周围出现红光和紫光合成的紫红色光环,如图中位置II所示;如果在 F'_g 处观察,则光斑中心为红色亮点,周围有紫色边缘,如图中位置III所示。因此像平面在任何位置上都得不到一个清晰的白色像点,而使得整个像面模糊不清。通常用两种指定波长光线的像平面位置之差表示轴向色差,最常用的是波长为486.13nm的F光和波长为656.28nm的C光:

$$\Delta l'_{FC} = l'_F - l'_C \quad (1-3)$$

轴向色差对整个像面上每个像点的质量都要产生影响。

二、垂轴色差

根据无限远轴外物点像高的计算公式(附-21)

$$y' = f \tan \omega$$

透镜的折射率改变,物方焦距 f 也将改变,因此像高 y' 也就发生变化,如图1-4所示。红

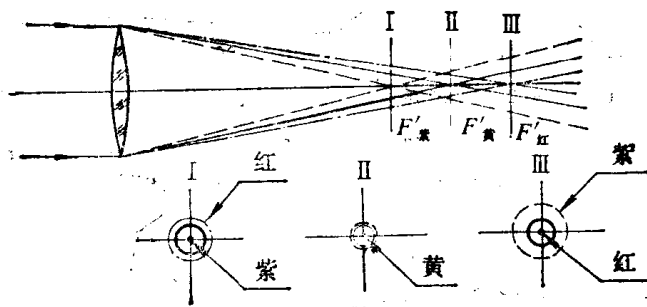


图1-3

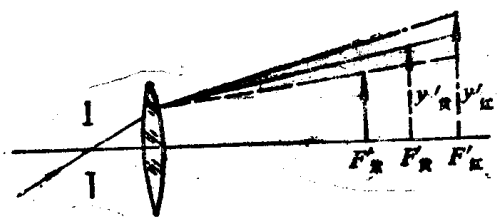


图1-4

光的像高最大,紫光的像高最小,这种不同颜色光线像高的差异称为**垂轴色差**。当光学系统存在垂轴色差时,轴外物体所成的像将出现由红到紫的色边。一般用两种指定波长光线在同一像平面上主光线的投射点高度之差表示垂轴色差,如图1-5所示。

$$\Delta y'_{FC} = y'_F - y'_C \quad (1-4)$$

轴上点显然没有垂轴色差,不同像高的像点垂轴色差各不相同,一般随着像高的增加而加大。

用不同色散的光学玻璃做成的正透镜和负透镜组合在一起，可以消除色差。所以实际光学系统中的透镜组大多数由正透镜和负透镜组合而成。

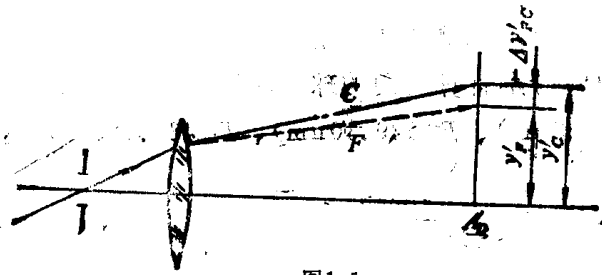


图1-5

§ 1-4 轴上点的单色像差——球差

即使是同一波长的光线通过透镜成像时，出射光线一般也并不聚交于理想像点。这样的像差我们称为**单色像差**。首先我们来讨论轴上点的情形。如图1-6所示，轴上无限远的物点通过一个平凸透镜成像，由物点发出的一束与光轴平行的光线，与第一个平面垂直不发生折射，进入透镜内部仍为一平行光束。当遇到第二个球面时要产生折射。如果我们用附录一中的光路计算公式（附-2）～（附-5）计算几条不同入射高度的光线，就会发现它们的折射光线和光轴的交点到球面顶点的距离 $L'_1 \dots L'_4$ ，随入射高度 h 的增加而减小。而且 h 越大， L' 减小得越迅速。如图1-6中的曲线所示。

由于共轴系统的对称性， h 相同的光线（这些光线位于一个以光轴为中心线的圆柱面上）经过透镜折射以后，出射光线和光轴的交点显然相同。同时位于通过光轴的任意一个截面内的光束结构都是相同的。因此可以从整个光束中取出一个过光轴的平面光束，用来代表整个光束的结构，如图1-6中所表示的那样。

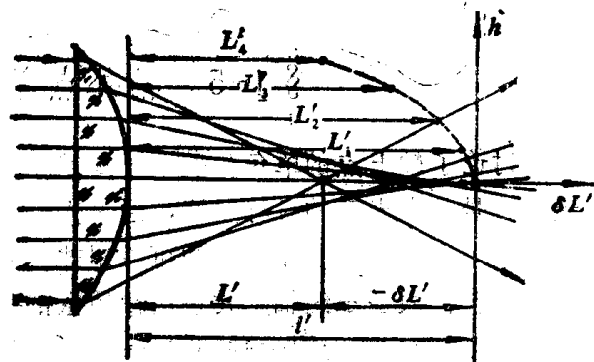


图1-6

通常用不同入射高的光线和光轴的交点到理想像点的距离 $\delta L'$ 来表示轴上点球差的大小， $\delta L'$ 称为**轴向球差**或简称为**球差**。 $\delta L'$ 的符号规则是：

$\delta L'$ ——以理想像点为计算起点到实际光线和光轴的交点，向右为正，向左为负。

由图1-6按符号规则标注了图形以后，根据几何关系可以得到：

$$-\delta L' = l' - L'$$

或者

$$\delta L' = L' - l' \quad (1-5)$$

为了说明整个光束的球差情况，可以用球差与入射高 h 之间的关系曲线（ $\delta L' - h$ ）来表示。球差为负一般称为**球差欠校正**，球差为正则称为**球差过校正**。

利用正负透镜组合可以消除球差，但通常只能使某一个或两个入射高度的光线球差为零，其他光线还有球差，如图1-7(a)所示。

轴上点的单色像差可以用球差表示，或者说轴上点的单色像差只有球差。对包含各色光线的白光来说，轴上点除球差而外，还有轴向色差。为了全面地说明轴上点的成像质量，既