

# 透 镜 设 计 基 础

〔美〕 R. 金斯莱克 著

机 械 工 业 出 版 社



# 透 镜 设 计 基 础

〔美〕 R. 金斯莱克 著

梁 伟 声 译

陈 晃 明 校



机 械 工 业 出 版 社

## 内 容 简 介

本书对应用光学的基本知识作了简明的叙述,并以大量篇幅阐述了最常见的各种典型透镜的设计方法和步骤。

本书可供从事光学设计的工程技术人员及有关院校师生阅读。

## LENS DESIGN FUNDAMENTALS

RUDOLF KINGS LAKE  
ACADEMIC PRESS, INC.

1 9 7 8

## 透 镜 设 计 基 础

[美] R. 金斯莱克 著

梁伟声 译

陈晃明 校

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32 ·印张12<sup>3</sup>/<sub>8</sub> ·字数 280 千字

1985年12月 重庆第一版·1985年12月 重庆第一次印刷

印数 0,001—1,950 ·定价 2.70 元

统一书号: 15033·5945

## 译者的话

本书对应用光学的基本知识作了简明的叙述，然后以大部分篇幅用于阐述最常见的各种典型透镜的设计。叙述简明扼要，没有繁杂的数学推导，而是通过具体实例说明设计方法和步骤。以象差理论为指导，通过反复的试验性计算来获得最佳设计方案，这是经典光学设计的基本做法。本书的内容和叙述方法正是和这个事实相一致的。对于已经掌握了应用光学的基本知识而开始从事透镜设计的人，这样的一本书无疑是有参考价值的。此外，正如作者指出的，即使在用电子计算机作透镜象差自动校正已经很普遍的今天，设计者了解自己选用的透镜结构型式的象差特性及其所以然仍然十分必要，在这方面，本书也可以给人以有用的知识和启发。

本书原文错误颇多，翻译时已经一一订正，其中比较重要的更正加了注脚说明。由于译者水平不高，译文难免有错误，敬请读者指正。

## 前 言

本书可以看成是康拉第 (Conrady) 五十年前的著作《应用光学与光学设计》(其第一册于1929年出版<sup>⊖</sup>) 经过扩展和更新而成的。康拉第上述著作是供学习透镜设计的高年级学生用的第一本用英文写的教本, 曾经博得全世界的欢迎。

自然, 在如今飞速进步的时代, 任何一本1929年前写的科学著作, 到1977年大概都会显得过时的。本世纪初, 全部透镜计算都是用对数缓慢而艰苦地进行的, 追迹一条光线通过一个面至少需要五分钟, 因此康拉第花了许多时间和心血, 致力于建立通过追迹很少的光线取得尽可能多的信息的方法。如今用小型计算机 (甚至只需用可编程程序的袖珍计算器) 追迹一条光线通过一个面只需要几秒钟或更短时间, 于是康拉第那些多少复杂化了的公式就过时了; 但是它们仍然是有效的, 任何不怕麻烦地熟悉了这些公式的人都可以使用这些公式而得益。同样, 如今三级象差 [赛德 (Seidel) 象差] 在透镜设计中的重要性已经大为减小。但是即使如此, 在某些场合 (例如作三透镜组照相物镜初始设计) 中, 作三级象差计算仍然会使我们节省许多时间。

自从康拉第时代以来, 涌现出了大量新知识, 创立了各种新方法, 由此而论, 接替康拉第上述著作的书是来得太迟

---

⊖ A. E. Conrady, "Applied Optics and Optical Design," Part I, Oxford Univ. Press, London, 1929; 以及 Dover, New York, 1957, Part I, Dover, 1960.

了。如今许多年轻的光学工程师在借助大型计算机用最优化程序设计透镜，但是他们对透镜的性能及其作用的认识却很少，这是不够的，更何况这些最优化程序有忽略掉许多经典透镜结构型式（这些经典结构型式在近一个世纪以来已经被公认是令人满意的）的倾向，所以这些认识尤其重要。任何一位有用人工设计透镜经验的人，都会比刚踏入这个领域的新手（那怕后者有极好的专业基础，并且使用计算机十分熟练）能更好地发挥最优化程序的功能。基于上述原因，一本阐述经典透镜设计方法，适合今天使用要求的教本肯定是有价值的。计算机所能做到的充其量只不过是令既定系统最优化，而设计者越聪明能干，他能给程序提供的初始结构就越好。对一个系统作初步的早期分析往往能指出理论上存在多少个解，哪一个解有希望提供最佳的最终结构形式。

本书把相当大的篇幅用于探讨各种类型的透镜和反射镜系统的有效设计方法，都附有完整的例子。力劝读者搞清楚这些例子的思路，并且真正了解是怎么一回事，尤其是要注意每一个自由度是怎样用来控制某一种象差的。自然，并非任何类型的透镜都考察到了，但是本书所提供的设计方法用来设计其它更复杂的透镜是容易的。本书假定读者具备使用小型计算机作光线追迹的条件，否则会发觉这些计算是如此费时间，以至于陷入无法达到既定目标的境地。

本书沿用康拉第的符号和正负号规则，只是象差正负号按照目前的习惯反转过来。本书经常引用前述康拉第的著作，以“Conrady, p. …”注明。康拉第已经做过的许多重要公式的推导，以及他已经考察过的其它问题在本书中都不再重复。最末一章[这一章的编写得到了唐纳德·费德 (Donald Feder)的帮助]是关于最优化程序的结构简单介绍，

提供给渴望了解这种程序要涉及哪些问题，以及怎样处理数据的读者。

作者曾经于伦敦帝国学院在康拉第杰出的指导下求学，然后在伊斯曼·柯达 (Eastman Kodak) 公司任光学设计主任三十年，还在罗切斯特 (Rochester) 大学光学学院从事透镜设计教学近四十五年，本书是在这些经历中所获得的成果。这些经历给了我最大的恩惠和永志不忘的教益，而希望它对我的学生亦有所裨益。

R. 金斯莱克

# 目 录

## 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一章 透镜设计者的工作 .....             | 1  |
| I 设计者和工厂的关系 .....              | 2  |
| II 设计步骤 .....                  | 8  |
| III 光学材料 .....                 | 10 |
| IV 折射率的内插 .....                | 15 |
| V 本书考察的透镜类型 .....              | 19 |
| 第二章 子午光线追迹 .....               | 22 |
| I 引言 .....                     | 22 |
| II 图解光线追迹 .....                | 26 |
| III 球面上的三角光线追迹 .....           | 28 |
| IV 一些有用的关系式 .....              | 34 |
| V 倾斜面上的光线追迹 .....              | 37 |
| VI 非球面上的光线追迹 .....             | 42 |
| 第三章 近轴光线和初始解 .....             | 45 |
| I 近轴光线追迹 .....                 | 45 |
| II 用 ( $W$ , $U$ ) 法追迹光线 ..... | 51 |
| III 倍率和拉格朗日定理 .....            | 54 |
| IV 透镜系统的高斯光学 .....             | 56 |
| V 光学系统的初级象差设计 .....            | 62 |
| VI 变焦距系统的薄透镜设计 .....           | 69 |
| 第四章 色差 .....                   | 82 |
| I 双胶合透镜的色球差 .....              | 82 |
| II 单个面对初级色差的贡献 .....           | 84 |
| III 系统中的薄镜片的近轴色差贡献 .....       | 86 |



|      |                       |     |
|------|-----------------------|-----|
| IV   | 近轴二级光谱 .....          | 90  |
| V    | 复消色差薄三透镜组的初始设计 .....  | 94  |
| VI   | 消色差分离薄透镜(双分离透镜) ..... | 97  |
| VII  | 色差公差 .....            | 103 |
| VIII | 有限孔径上的色差 .....        | 104 |
| 第五章  | 球差 .....              | 112 |
| I    | 各面球差贡献公式 .....        | 112 |
| II   | 带球差 .....             | 126 |
| III  | 初级球差 .....            | 127 |
| IV   | 平面平行板引起的象位移 .....     | 131 |
| V    | 球差的公差 .....           | 133 |
| 第六章  | 消球差的消色差透镜的设计 .....    | 136 |
| I    | 四光线法 .....            | 136 |
| II   | 薄透镜分析设计法 .....        | 138 |
| III  | 带球差的校正 .....          | 143 |
| IV   | 复消色差物镜设计 .....        | 147 |
| 第七章  | 斜光束 .....             | 152 |
| I    | 斜光束在球面上的通过 .....      | 152 |
| II   | 斜光束的子午光线追迹 .....      | 157 |
| III  | 空间光线追迹 .....          | 161 |
| IV   | 空间光线象差的图示 .....       | 167 |
| V    | 来自透镜某一带上的光线的分布 .....  | 171 |
| 第八章  | 彗差和正弦条件 .....         | 173 |
| I    | 光学正弦定理 .....          | 173 |
| II   | 阿贝正弦条件 .....          | 174 |
| III  | 对正弦条件的违反, OSC .....   | 176 |
| 第九章  | 齐明物镜设计 .....          | 184 |
| I    | 分离密接型 .....           | 184 |
| II   | 平行空气间隔型 .....         | 187 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| Ⅱ 齐明双胶合透镜 .....           | 189 |
| Ⅲ 齐明三胶合透镜 .....           | 191 |
| Ⅳ 有隐蔽消色差面的齐明透镜 .....      | 194 |
| Ⅴ 配合原则 .....              | 196 |
| 第十章 斜光束象差 .....           | 203 |
| Ⅰ 象散和柯丁顿公式 .....          | 203 |
| Ⅱ 匹兹伐定理 .....             | 212 |
| Ⅲ 畸变 .....                | 216 |
| Ⅳ 横向色差 .....              | 221 |
| Ⅴ 对称原理 .....              | 224 |
| Ⅵ 赛德象差的计算 .....           | 225 |
| 第十一章 光栏位置是自由度的透镜 .....    | 230 |
| Ⅰ $H'-L$ 图 .....          | 230 |
| Ⅱ 简单的风景透镜 .....           | 232 |
| Ⅲ 潜望型透镜 .....             | 237 |
| Ⅳ 消色差风景透镜 .....           | 240 |
| Ⅴ 消色差双透镜 .....            | 245 |
| 第十二章 光栏固定的对称双消象散透镜 .....  | 256 |
| Ⅰ 达戈镜头设计 .....            | 256 |
| Ⅱ 有空气间隔的双分离型透镜设计 .....    | 259 |
| Ⅲ 双高斯型物镜 .....            | 268 |
| 第十三章 不对称的摄影物镜 .....       | 276 |
| Ⅰ 匹兹伐肖像镜头 .....           | 276 |
| Ⅱ 远摄镜头设计 .....            | 285 |
| Ⅲ 普洛塔镜头 .....             | 294 |
| Ⅳ 天塞镜头设计 .....            | 302 |
| Ⅴ 库克 (COOKE) 三透镜组镜头 ..... | 312 |
| 第十四章 反射系统和折反射系统 .....     | 322 |
| Ⅰ 反射镜和透镜的比较 .....         | 322 |

|      |                       |     |
|------|-----------------------|-----|
| I    | 反射系统的光线追迹 .....       | 324 |
| II   | 单反射镜系统 .....          | 324 |
| IV   | 单反射镜的折反射系统 .....      | 332 |
| V    | 双反射镜系统 .....          | 350 |
| 第十五章 | 目镜设计 .....            | 363 |
| I    | 军用型目镜设计 .....         | 364 |
| I    | 埃尔弗目镜 .....           | 369 |
| II   | 伽里略取景器 .....          | 372 |
| 第十六章 | 透镜自动校正程序 .....        | 375 |
| I    | 象差和自由度个数相等的情况 .....   | 375 |
| I    | 象差个数多于自由变量个数的情况 ..... | 377 |
| II   | 边界条件 .....            | 382 |

## 第一章 透镜设计者的工作

透镜要预先设计好才能加工，也就是说，要预先计算或规定好各组元的表面曲率半径、厚度、空气间隔和直径以及所采用的玻璃牌号。透镜结构之所以如此复杂，是因为人们力求使由一个既定物点发出的各种波长的光线准确地通过其象点，并且平面的象应当是平面，直线的象应当没有畸变（弯曲）。

科学家惯于力求将复杂事物分解成几部分来处理，对透镜成象质量的分析也不例外。经过几百年的努力，人们已经认识到透镜产生的不完善象的各种所谓象差。它们可以借改动透镜结构来改变。典型的象差有球差、色差和象散。但是在任何实际的透镜中，各种象差是混合在一起出现的，因而校正（或消除）一种象差只能在和这种象差在总象差混合体中所占的分量相当的程度上改善最终成象质量。某些象差可以轻易地仅仅借一片或多片镜片的变形得到改变，而另一些象差的改变则要求整个系统作大幅度的变动。

可供设计者改动的透镜参数称为“自由度”，它们包括各面的曲率半径、各厚度和空气间隔、各镜片所用的玻璃的折射率和色散率、孔径光栏（或镜框）的位置。不过在改动这些参数时，透镜焦距要经常保持在要求的数值上并且不变，否则相对孔径和象高会改变，以至于设计者最后得到的透镜虽然质量良好，但其规格却不是原拟设计所要求的

了。因而任何一个结构改动都要辅以其它某些方面的改动，以保持焦距不变\*。此外，如果透镜要在固定倍率下工作，在设计过程中就必须保持倍率恒定。

“透镜”一词的含义是不明确的。它可以指单个镜片，也可以指装在照相机上的那样的整个物镜\*\*。术语“系统”经常用来表示由诸如透镜、反射镜、棱镜、起偏器和检偏器等那样的元件构成的组合体。“镜片”总是指两面抛光的单片玻璃，因而一个透镜通常包含一个或一个以上的镜片。有时把一组胶合的或有空气间隙的密接镜片称为透镜的一个“组元”。但是以上各术语的用法还没有标准化，读者在书中刊中遇到时，要注意判断它们的含义。

## I 设计者和工厂的关系

透镜设计者必须和工厂建立良好的关系，因为他设计出来的透镜终究是要加工的。他应当熟悉各种加工方法，和光学工艺师紧密合作。要时刻记住，制造镜片是要花钱的。当成本是重要指标时，更应当尽可能少用镜片。当然，有的时候象质放在第一位，此时在透镜结构的复杂性和体积方面就不加限制。在大多数情况下，要求设计者采用比较少的镜片、曲率比较小的面（因而在—盘中可以一次抛光比较多的镜片）、比较便宜的玻璃、比较大的厚度（便于夹持加工），以降低成本。

---

\* 这种说法不全面。例如单独改变光栏位置并不会导致焦距变动——译者注。

\*\* 在本书中，“透镜”还往往泛指包括折射、反射和折反射系统在内的各种光学构件——译者注。

### A. 球面和非球面之间的选择

在绝大多数情况下,设计者仅限于采用球面折射面和球面反射面(平面可以看成是曲率半径为无穷大的球面)。标准的透镜加工方法<sup>⊖</sup>能够制造精度很高的球面,而如果为了给设计者提供更多的自由度而允许采用非球面的话,将会带来极大的加工困难,这是万不得已才采用的办法。斯密特(Schmidt)照相机中的非球面校正板就是使用非球面的一个典型例子。不过压铸成形的非球面是十分实用的,只要生产率足够高而使成本相宜就可以采用。它特别适用于用压铸法制造的塑料透镜。用特制的机器可以在玻璃上加工出极精确的抛物面。

使用非球面除了精密成形和抛光方面的困难之外,还有对中心方面的问题。多个球面组成的共轴透镜有一条通过所有的面的曲率中心的光轴,而非球面有其自己独立的光轴,必须使它和通过系统所有的其它曲率中心的轴重合。大多数天文仪器以及少数几种照相机镜头和目镜采用了非球面,不过还是建议设计者尽可能避免采用这种曲面。

### B. 厚度的确定

负镜片的中心厚度应当在外径的百分之六至十之间,而确定正镜片的厚度则要作更多方面的考虑。镜片的玻璃毛坯边厚不得小于1mm,以保证在研磨、抛光加工时便于夹持

---

⊖ F. Twyman, "Prism and Lens Making." Hilger and Watts, London, 1952. D. F. Horne, "Optical Production Technology." Crane Russak, New York, 1972.

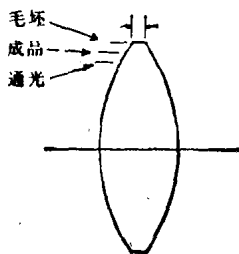


图1 正镜片厚度的确定

(图1)。镜片经过磨边形成实际外径时，至少要去掉1mm的半径长度，还要留出至少1mm供安装镜片于框上用。记住这些余量，知道面的曲率，就可以确定容许的正镜片最小中心厚度。不过上述余量界限是针对普通大小（直径 $1/2 \sim 3$ 英寸之间）的镜片而言的，对于小镜片，可以减小一些，

而对于大镜片则要增大。边缘尖锐的镜片是很难制造和处理的，要尽量避免。因此和玻璃加工车间工长商讨这类问题是很有好处的。

一般说来，弱面比强面加工成本低<sup>\*</sup>，因为前者使我们可以在一个盘上放比较多的镜片一起抛光。但是如果只需要加工一个镜片，不必加工多盘，此时强面就不比弱面成本高。

还有一点事情虽小但值得注意的是，两面接近等凸的镜片，在胶合或装配时一不小心很容易将前后面调乱。可能的话应当用微小弯曲的办法使它两个面的曲率准确地相等，由此产生的象差由系统其它部分补偿。还要注意的是两块镜片的边缘之间很小的距离是很难保证的，最好令它们在直径稍大于通光孔径的圆上相接触，或令边缘距离不小于1mm。这样大的距离可以用隔圈或镜框上的固定结构实现。图2是几种类型的镜框。要记住，为快门或可变光栏留出的空位，应按照从凹面的斜角到凸面的顶点之间的空间计算。

\* 弱面指曲率半径大的面，强面指曲率半径小的面——译者注。

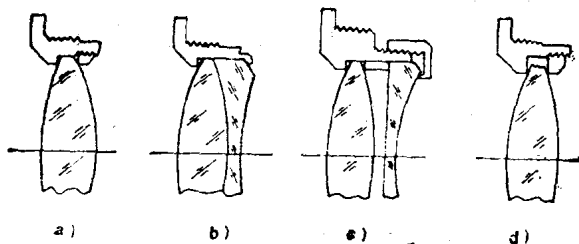


图2 典型的透镜框

(a)压圈 (b)包边 (c)隔圈和螺帽 (d)镜框定中心

### C. 增透膜

如今几乎所有玻璃-空气界面都镀增透膜,以改进透光性和消除幻象,因为可以把许多镜片放在钟罩内一起镀制,使工艺成本便宜得出人意料。不过,若要在较宽的波长范围内差不多完全消除表面反射,就要镀多层膜,于是成本马上提高。

### D. 胶合

小镜片常用加拿大树胶或某些适宜的有机聚合物将其胶合在一起。但是当镜片直径超过3英寸时,若采用硬胶,则由于冕牌玻璃和火石玻璃的膨胀差异而往往引起扭曲变形甚至碎裂。此时可以在镜片界面之间加进软胶或液态油。但是对于尺寸大的镜片,更有效的办法是用小片锡箔或真正的隔圈把两个面隔开。胶合层在光线追迹时总是被忽略,光线直接从一种玻璃向另一种玻璃折射。

将镜片胶合起来为的是(a)消除两个面上的反射损失;(b)防止空气间隙上的全反射;(c)将两个强的镜片组合成一个弱得多的双胶合透镜,以便于安装。这两个强的镜片的定中心是在胶合时进行的,而不是在镜框中调整的。



可以将两片以上的镜片胶合，但这时很难保证全部被胶合的镜片良好地对中心。建议设计者在采用三胶合透镜或四胶合透镜之前先和加工部门商量。透镜的精密胶合，其劳动成本不低，如果在镜框中将空气间隔分隔开的两个面镀膜，往往比将它们胶合起来便宜。

## E. 确定公差

设计者为透镜每一个尺寸规定公差是很重要的。此事若设计者不做，必有别人代劳，而别人给的公差可能是完全不正确的。公差太松，透镜质量可能很差，太严则加工成本会不合理地增加。因此，对于半径、厚度、空气间隔、表面质量、玻璃折射率和色散、镜片直径和同心度，都要注意这个问题。这些公差一般是这样确定的：给每一个参数一个小误差，然后追迹足够多的光线通过这个改动过的透镜，以确定这个误差的影响。只要知道玻璃折射率和色散率的公差要求，就能够判断是可以利用手头已有的玻璃存货，还是必须订购公差异常严格的玻璃。后一种做法会严重地耽误生产，而且提高了透镜的成本。制造单个高质量的透镜，通常是先按玻璃手册上列的折射率设计透镜，然后订购玻璃，最后按实际情况由玻璃厂购得的玻璃的折射率重新设计。但是设计生产批量大的透镜时，必须使设计方案能适应工厂的玻璃参数的正常变化范围，即约 $\pm 0.001$ 的折射率和 $\pm 0.2$ 的 $V$ 值。

装配时实行厚度选配是使各镜片的制造公差得以放松的可行（虽然是费时间的）办法。例如，在图3的双高斯物镜中，设计者可以按照如下方案规定两个双胶合透镜的厚度公差：

每个单透镜

$\pm 0.2\text{mm}$