



实用光学设计方法 与现代光学系统

张登臣 郁道银 编著

机械工业出版社

高新技术丛书

实用光学设计方法 与现代光学系统

张登臣 郁道银 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书系统地介绍了光学系统的外形尺寸计算方法、初始结构的计算方法、象差校正和平衡方法、象质评价、光学系统自动设计、光学计算程序的设计及现代光学系统的特点和计算方法,并着重讨论了光学设计中经常遇到的、初学者常感困难的问题,如各种典型物镜的设计思想和象差分析,怎样从已有资料中选择初始结构、象差校正和平衡方法,如何减少剩余象差提高成象质量以及计算结果处理等,并用大量实例来说明各种方法的具体应用。

书中还给出一个实用光学设计程序,读者可直接用它在IBM微型计算机上进行光学设计。

在现代光学系统中系统地介绍了激光光学系统、傅里叶变换光学系统、扫描光学系统和光电光学系统的基本原理、成象特性、光学设计要求和方法及大量应用实例。

本书可供从事光学设计、光学信息处理和现代光学的工程技术和科研人员阅读,也可作为高等院校光学仪器及光学专业的师生及研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

实用光学设计方法与现代光学系统/张登臣,郁道银编
著. —北京:机械工业出版社, 1995.6

(高新技术丛书)

ISBN 7-111-04627-7

I. 实… I. ①张…②郁… I. ①光学仪器-机械设计
②光学系统 V. TH740.2

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第15929号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:韩雪清 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新
封面设计:肖晴 责任印制:王国光
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1995年7月第1版·1995年7月第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·25.5印张·624千字
001—800册
定价:42.00元

前 言

近年来,国内出版了很多光学设计方面的书。这些书都偏重于基本理论的阐述,而对具体光学设计方法讲得较少,因此学完这些书对光学设计仍感困难。随着科学技术的进步,现代光学也有了飞跃的发展,使古老的光学焕发出青春,并对现代光学系统的设计提出了更高的要求。但在目前的光学书中很少反映这方面的内容。本书力图弥补这两方面的不足,书中专门讲述光学设计方法和现代光学系统的特点和设计方法,希望它能够成为一块引玉之砖。

本书由三部分内容组成:光学系统设计方法、光学设计程序和现代光学系统。第一部分是按着光学设计过程编写的,并以象差校正方法为线索来讲解各种典型物镜设计,这样,读者不但对整个光学设计过程有更全面的了解,而且能够学会光学设计的方法和技能。

在具体章节中,本书是按基本理论—设计步骤—计算实例的顺序编写的。这样,可使读者更加明确光学设计的思路,学会用基本理论解决实际问题的方法。

本书的重点是光学设计中经常用到的,而现有光学设计书中又很少讲到的内容,例如,对各种典型物镜的设计思想和象差分析,怎样从已有的资料中选择初始结构、象差校正和平衡方法以及计算结果处理等都进行较为详尽的叙述,并用大量实例加以说明。这些都是初学光学设计的同志经常遇到的而又不易掌握的困难问题,阅读本书可迎刃而解。

第二部分简要地介绍常用的光学设计程序。在每个程序中都给出计算公式和程序框图,并有源程序供读者参考。读者可直接利用它在IBM-PC/XT, IBM286和IBM386微型计算机上进行光学设计或者参考它设计自己需要的光学设计程序。

第三部分较系统地叙述了现代光学中常用的各种光学系统,如激光光学系统、傅里叶变换光学系统、扫描光学系统、光纤光学系统和光电光学系统的基本原理和成像特性,并简要地介绍了各种光学系统的设计要求和设计方法。有些内容是作者近年来的工作体会,旨在向读者介绍国内外光学书中很少涉及的问题。此外,还介绍了各种光学系统的应用实例,它反映了国内外先进科学技术在本门学科的新成就。

我们深知,国内有不少高水平的光学设计程序,更有许多造诣较深的光学设计专家和权威,本书旨在作为引玉之砖以求得进一步向他们学习的机会。

本书是在张以谟主编的《应用光学》的基础上编写的,读者只要有与之相当的基础理论,就能顺利阅读本书。

中国光学学会常务理事、光电专业委员会主任、光学专家张以谟教授在百忙中审阅了本书全稿,并给予许多有益的指导。中国仪器仪表学会理事吴继宗教授在书稿编写过程中给以大力支持和热情帮助。天津市光学学会理事李大山高级工程师对本书提出许多宝贵意见。李云青、于为在书稿整理中给予许多帮助,王勇在程序的编制和调试中付出了辛勤的劳动。在此表示感谢。

IV

本书的第一、二部分由张登臣编写，第三部分由郁道银编写。
由于我们的水平有限，书中的缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

张登臣 郁道银
1992年5月于天津大学

目 录

前言

第一篇 光学系统设计

第一章 引言	1
第一节 对光学系统的要求	1
第二节 光学系统设计过程概述	2
第二章 光学系统的外形尺寸计算	4
第一节 外形尺寸计算的任务	4
第二节 典型光学零件和部件的外形尺寸计算	4
第三节 开普勒望远镜的外形尺寸计算	10
第四节 伽利略望远镜的外形尺寸计算	13
第五节 具有透镜转象系统的望远系统外形尺寸计算	16
第六节 具有棱镜转象系统的望远系统外形尺寸计算	19
第七节 内调焦望远物镜的外形尺寸计算	22
第八节 生物显微镜的外形尺寸计算	24
第九节 读数显微镜的外形尺寸计算	26
第十节 投影系统的外形尺寸计算	29
第十一节 带有椭圆反射镜照明系统的投影系统外形尺寸计算	34
第三章 光学系统初始结构的计算方法	38
第一节 引言	38
第二节 用代数法求解初始结构	38
第三节 分离双光组物镜的初始结构计算方法	42
第四节 分离三光组物镜的初始结构计算方法	47
第五节 密接双光组物镜的初始结构计算方法	52

第六节 折反射系统的初始结构计算方法	63
第七节 照明聚光系统的初始结构计算方法	86
第八节 各种典型物镜结构的设计思想和象差分析	100
第九节 从已有资料中选择初始结构的方法	114
第四章 计算结果处理与象差校正和平衡方法	121
第一节 概述	121
第二节 计算结果的图示法	122
第三节 象差平衡方法	126
第四节 象差的综合	136
第五节 计算结果的处理方法	139
第六节 用代数法校正象差	142
第七节 用试验法校正象差	152
第八节 用象差变化量表校正象差	159
第九节 用初级象差系数校正象差	164
第十节 用双线图法校正象差	172
第十一节 减小剩余象差的方法	176
第十二节 初级象差理论在象差校正中的应用	179
第十三节 光学玻璃在象差校正中的应用	191
第五章 象质评价和象差公差	196
第一节 象质评价方法简介	196
第二节 用光学传递函数评价成象质量	198
第三节 各种光学系统允许的剩余象差值	200
第四节 光学系统的象差公差	201
第六章 光学系统自动设计	204
第一节 概述	204
第二节 阻尼最小二乘法	207
第三节 适应法	213
第四节 边界条件的处理方法	216

第二篇 光学设计程序

第七章 通用多功能光学设计

程序(OADP)219

第一节 程序的功能和特点219

第二节 OADP程序的使用说明221

第三节 主程序框图和源程序225

第八章 光学设计中常用的计算和传统

设计手段的程序设计229

第一节 近轴光线的计算程序229

第二节 倒描近轴光线的计算程序230

第三节 光瞳位置的计算程序231

第四节 理想光学特性参数的
计算程序232

第五节 初级象差系数分布的
计算程序233

第六节 空间光线初始值的计算程序235

第七节 矢量法空间光线的计算程序237

第八节 求实际入瞳位置的计算程序241

第九节 轴上点象差的计算程序243

第十节 轴外点细光束象差的
计算程序245

第十一节 子午宽光束象差的
计算程序247

第十二节 弧矢宽光束象差的
计算程序248

第十三节 缩放焦距的计算程序249

第十四节 交换光焦度的计算程序250

第十五节 弯曲透镜的计算程序252

第十六节 修改参数的计算程序252

第十七节 透镜的焦距及前后截距的
计算程序256

第十八节 全部象差的计算程序257

第十九节 象差变化量表的计算程序265

第九章 适应法自动设计程序269

第一节 引言269

第二节 象差函数的选择269

第三节 不同类型自变量的统一尺度271

第四节 线性检查和步长控制273

第五节 象差校正过程和自动排除象差
相关的方法274

第六节 排除象差相关与加快

收敛速度276

第七节 程序的框图和源程序277

第八节 怎样使用适应法自动
设计程序268

第九节 使用适应法自动设计程序
的实例290

第十章 双优选阻尼最小二乘法

自动设计程序292

第一节 引言292

第二节 象差函数的选择292

第三节 权因子的优选293

第四节 阻尼因子的优选294

第五节 程序的框图和源程序295

第六节 怎样使用阻尼最小二乘法自动
设计程序305

第七节 计算实例307

第三篇 现代光学系统

第十一章 激光光学系统311

第一节 高斯光束的特性311

第二节 高斯光束的传播312

第三节 高斯光束的透镜变换314

第四节 高斯光束的聚焦、准直
与扩束318

第十二章 傅里叶(Fourier)变换

光学系统323

第一节 傅里叶变换物镜323

第二节 相干光学处理系统326

第三节 功率谱分析系统329

第四节 傅里叶全息存储系统330

第十三章 扫描光学系统333

第一节 扫描方程式333

第二节 光学扫描系统334

第三节 扫描物镜—— $f\theta$ 物镜335

第四节 棱镜扫描系统337

第五节 声光扫描系统339

第六节 全息扫描系统341

第十四章 光纤光学系统343

第一节 阶跃型光纤的基本原理343

第二节 光纤束的传光、传象特性346

第三节 光纤光学系统的特性 350
 第四节 纤维内窥镜光学系统 352
 第五节 其它光纤光学系统 357
 第六节 梯度折射率光纤原理 359
 第七节 自聚焦透镜的等效光学系统 364
 第八节 自聚焦透镜成象 368
 第九节 自聚焦透镜的象差 377
 第十节 自聚焦透镜阵列 379

第十一节 棒状透镜系统 384
第十五章 光电光学系统 390
 第一节 几种主要的光电转换器件 390
 第二节 红外夜视系统 393
 第三节 光电检测系统 394
 第四节 光电图象输入系统 396
 第五节 电子内窥镜系统 398
参考文献 400

第一篇 光学系统设计

第一章 引言

第一节 对光学系统的要求

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。

一、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。

二、系统的外形尺寸

系统的外形尺寸，即系统的横向尺寸和纵向尺寸。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。

三、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；对于照相物镜要求整个视场都要有较好的成像质量。

四、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 $500NA \leq \Gamma \leq 1000NA$ 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 Γ ，一定要把望远系统的极限分辨率和眼睛的极限分辨率一起来考虑。在眼睛的极限分辨率为 $1'$ 时，望远镜的正常放大率应该是 $\Gamma = \frac{D}{2.3}$ ，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。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，以便具有较大的出瞳直径，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合理，应该参照下列关系式来选择这三个参数

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

式中， $C_m = 0.22 \sim 0.26$ ，称为物镜的质量因数。实际计算时，取 $C_m = 0.24$ 。 $C_m < 0.24$ 时，则光学系统的象差校正就不会发生困难。 $C_m > 0.24$ 时，则系统的象差很难校正，成象质量是坏的。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能够实现，并且具有良好的工艺性和经济性。

第二节 光学系统设计过程概述

所谓光学系统设计就是根据使用要求，来决定满足使用要求的各种数据，即决定光学系统的性能参数、外形尺寸和各光组的结构等。因此我们可以把光学设计过程分为4个阶段：外形尺寸计算、初始结构计算、象差校正和平衡以及象质评价。现对每个阶段分别简述如下。

一、外形尺寸计算

在这个阶段里要设计拟定出光学系统原理图，确定基本光学特性，使其满足给定的技术要求，即确定放大率或焦距、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。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。在计算时一定要考虑机械结构和电气系统，以防止在机械结构上无法实现。每项性能的确定一定要合理，过高要求会使设计结果复杂造成浪费，过低要求会使设计不符合要求，因此这一步骤必须慎重行事。

二、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. 根据初级象差理论求解初始结构 这种求解初始结构的方法就是根据外形尺寸计算得到的基本特性，利用初级象差理论来求解满足成象质量要求的初始结构，即确定系统各光学零件的曲率半径、透镜厚度和间隔、玻璃折射率和色散等。

利用初级象差理论求解的初始结构，不仅对小孔径小视场的光学系统非常有效，就是对于比较复杂的光学系统也比任意选择的结构更容易接近所求的解，使设计容易获得成功。这是因为在求解过程中，要对各种象差进行全面分析，对各种象差之间的关系有了全面了解，所以在象差校正时能够做到总体平衡，不致于陷入象差的局部性校正。

2. 从已有的资料中选择初始结构 对于大视场和大孔径及结构复杂的光学系统，如广角物镜、大孔径照相物镜等，一般都从已有的技术资料 and 专利文献中选择其光学特性与所要求的相接近的结构作为初始结构。这是一种比较实用又容易获得成功的方法。因此它被广大光学设计者广泛采用。但要求设计者对光学设计理论有深刻了解，并有丰富的设计经验，只有这样才能从类型繁多的结构中挑选出简单而又合乎要求的初始结构。

初始结构的选择是透镜设计的基础，选型是否合适关系到以后设计是否成功。一个不好的初始结构，再好的自动设计程序和有经验的设计者也无法使设计获得成功。

三、象差校正和平衡

初始结构选好后，要在电子计算机上进行光路计算，或用象差自动校正程序进行象差自动校正。然后根据计算结果画出象差曲线，分析象差找出原因，再反复进行象差校正和平衡，直到满足成象质量要求为止。

四、象质评价

在设计过程中可用轴外象差特性曲线上的弥散斑来预估光学系统的成象质量。设弥散斑直径的平均尺寸为 $2\Delta y'$ ，则系统的分辨率为 $N=1/(2\Delta y')$ ，根据分辨率的大小就可以判断出成象质量的好坏。待设计完成后，可用本书第五章介绍的象质评价方法，进行全面的质量评定。在象质评价方法中光学传递函数被认为是一种比较好的象质评价方法，它能更确切、更全面评价整个系统（包括光能接收器）的成象质量，并为设计、生产和使用三者之间提供一个统一的标准。

第二章 光学系统的外形尺寸计算

第一节 外形尺寸计算的任务

在进行外形尺寸计算时，首先要根据使用要求拟定光学系统的原理图。合理的光学系统原理图能够保证系统得到良好的成象质量。其次是按技术要求确定光学系统的基本特性和外形尺寸。对某些光学系统还要进行光能量计算。最后是确定系统各部件的基本特性，以便选择各光组的结构。

为了简化各种类型光组的计算，可以把光学系统看成是由一系列无限薄的光组组成的。经过简化后的光学系统就可以用理想光学系统的理论和公式进行外形尺寸计算。

下面三种光学系统就可以认为是这种简化的系统。第一种是只由物镜和目镜组成的光学系统。例如，低倍显微镜、大地测量仪器瞄准用的开普勒望远镜。第二种是具有棱镜转象系统的望远镜，例如，棱镜式单筒望远镜和双筒望远镜。第三种是具有透镜转象系统的望远镜，例如潜望镜等。

但也有一些仪器和光组不能认为是薄透镜光组，例如，照相物镜、广角物镜、大数值孔径的高倍显微物镜等。对于这种系统的外形尺寸计算要与求解初始结构一起进行，它的外形尺寸就是象差校正好以后的结构尺寸。

总之，外形尺寸计算必须保证由使用要求决定的基本光学特性，计算出系统的外形尺寸，同时还应考虑在技术上和物理上有实现的可能性，并且要和机械结构、电气系统有很好的配合，还要具有良好的工艺性和经济性。

第二节 典型光学零件和部件的外形尺寸计算

在一些较复杂的光学系统中除物镜、目镜外，常常带有转象系统、场镜、反射镜、反射棱镜等光学零件和部件。为了以后计算方便，我们先对这些光学零件和部件进行计算。

一、光路计算公式

如前节所述，在外形尺寸计算时，可以把整个光学系统看作是由无限薄光组组成的，因此可以利用高斯公式进行光路计算，为计算方便将高斯公式变换成

$$\operatorname{tg} U'_k = \operatorname{tg} U_k + \frac{h_k}{f_k} \quad (2-1)$$

转面公式

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

二、任意光束截面的渐晕系数

在外形尺寸计算时，都把任意光束截面的渐晕系数 K 看作常量。现将其证明如下，如图 2-1 所示。

设 $AB = -y$ 是物高； $A'B' = y'$ 是象高； P 是入瞳中心； h_1 和 h_{10} 是入瞳平面上轴上光束

和轴外光束的半径； Q 是任意光束截面； h'_1 和 h_1 是 Q 面上轴上光束和轴外光束的半径； ALA' 是轴上光线； BMB' 是轴外主光线； BKB' 是任意轴外光线。经过各个相似三角形变换后，可得如下关系

$$K = \frac{h'_{1\infty}}{h'_1} = \frac{h_\infty}{h} = \frac{h_{1\infty}}{h_1} \quad (2-3)$$

由式(2-3)可以看出，在垂直于光轴的任意平面内，轴外光束的渐晕系数是一个常量。

三、棱镜转象系统

在望远系统需要具有较短的筒长和紧凑的仪器结构时，都采用棱镜转象系统。有时根据使用要求需要对光轴做各种转折，也必须采用反射镜或反射棱镜作为转象系统。

1. 平面反射镜的外形尺寸计算 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，如图2-2所示。其短轴半径 $2b$ 等于平行光的口径 D 。其长轴 $2a$ 由下式确定

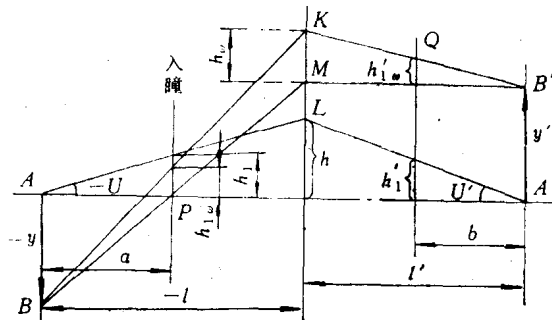


图 2-1

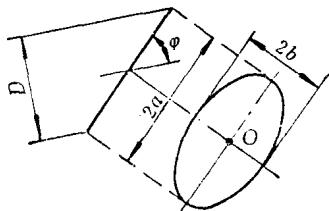


图 2-2

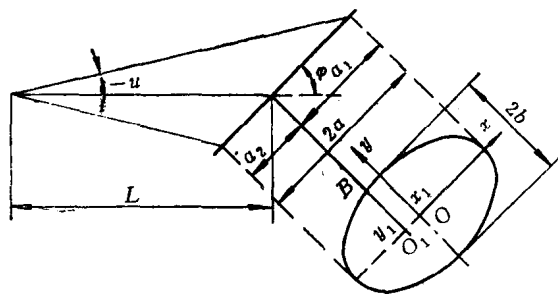


图 2-3

$$2a = \frac{D}{2\sin\varphi} \quad (2-4)$$

式中， φ 是反射镜与光轴的夹角。

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，如图2-3所示。假定发散光束与光轴的夹角为 $2u$ ，反射镜与光轴的夹角为 φ ，光轴与反射镜的交点到光束顶点的距离为 L 。由图2-3可以看出，椭圆的长轴 $2a = a_1 + a_2$ ，而 a_1 和 a_2 可由正弦定理求出

$$a_1 = \frac{L\sin u}{\sin(\varphi - u)} \quad a_2 = \frac{L\sin u}{\sin(\varphi + u)} \quad (2-5)$$

由上式可以看出，椭圆的中心 O 不与反射镜和光轴的交点 O_1 重合。为求椭圆的短轴 $2b$ ，我们将坐标系 xOy 的原点取在椭圆中心 O 点上，并使 x 轴与椭圆的长轴重合，则椭圆上任意一点 B 的坐标为

$$x_1 = OO_1 = a - a_2 = a - \frac{L\sin u}{\sin(\varphi + u)} \quad y_1 = Ltgu$$

因为 B 点在椭圆上，所以应该满足椭圆方程 $\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{y_1^2}{b^2} = 1$ 由此得出短轴为 $2b = \frac{2ay_1}{\sqrt{a_1^2 - x_1^2}}$

将 x_1 和 y_1 值代入上式, 整理后得

$$2b = \frac{2aL \operatorname{tg} u}{\sqrt{\frac{L \sin u}{\sin(\varphi + u)} \left(2a - \frac{L \sin u}{\sin(\varphi + u)} \right)}} \quad (2-6)$$

由式(2-5)和式(2-6)可以看出, 反射镜的长度 $2a$ 和 φ 角有关, φ 角越小长度越大。考虑到安装和调整, 反射镜的实际尺寸应比计算尺寸大 $2 \sim 3 \text{mm}$ 。

2. 反射棱镜 在外形尺寸计算中, 为了简化计算, 首先把反射棱镜展开成等效玻璃平行平板, 然后再将其变成等效空气板。这样简化就可以不考虑玻璃的折射, 能很方便地计算出光线在等效空气板入射面和出射面上的入射高度和出射高度, 它就是实际棱镜入射面和出射面的光线高度。当计算光线通过棱镜后的实际象面位置时, 只要把玻璃平行平板的轴向位移 Δl 加入即可。

有关反射棱镜展开及求等效空气板的方法可参看参考文献[1]中有关章节, 此处不再重述。本节只讨论反射棱镜的外形尺寸计算问题。

图2-4是把反射棱镜变换成等效空气板后的光路图。图中, D_1 是物镜的口径; D_2 是棱镜入射面的口径; D_3 是出射面的口径; D_4 是视场光阑的口径。假定 $D_1 > D_4$, 由图2-4a可得

$$D_3 = 2y' + 2a_1 \operatorname{tg} \alpha \quad (2-7)$$

式中, y' 是象高; a_1 是棱镜出射面到象面的距离, 一般取 $a_1 \geq 0.01f_2^2$ (f_2 是目镜的焦距)。

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_1 - D_4}{2f_1} \quad (2-8)$$

式中, f_1 是物镜的焦距。

在图2-4中, 棱镜的入射光束截面口径 D_2 大于出射光束截面口径 D_3 , 因此棱镜的尺寸应该由 D_2 决定。但 D_2 和棱镜的等效空气板厚度 \bar{d} 都是未知的。我们可以用下述两种方法来确定 D_2 的尺寸。

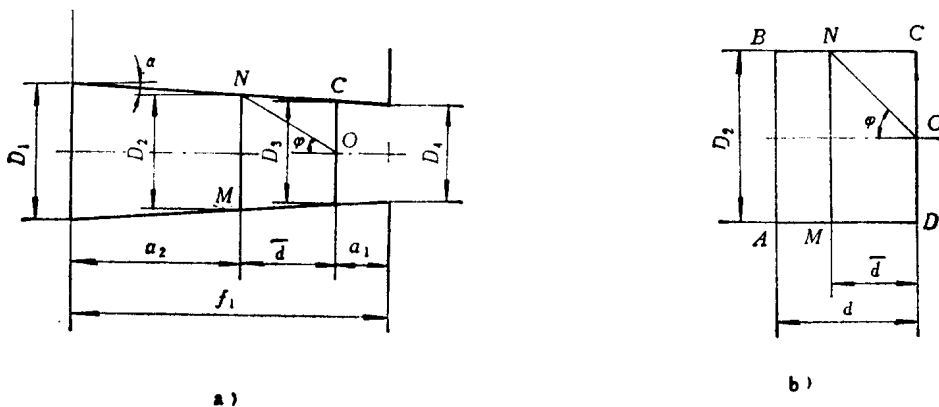


图 2-4

(1) 图解法 假定图2-4b中 $ABCD$ 是反射棱镜展开后的玻璃平行平板, 展开长度为 d , 其等效空气板的厚度为 \bar{d} 。作直线 MN 垂直于光轴, 并使其到出射面的距离为 \bar{d} , 连结点 N 和 CD 的中点 O , 则得角 φ 。由图2-4b可得 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{D_2}{2\bar{d}}$ 。因为 $d = KD_2$, $\bar{d} = \frac{d}{n}$, 则得

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{n}{2K} \quad (2-9)$$

由式(2-9)可以得出,角 φ 对于已知类型的棱镜是一个常数,与棱镜的尺寸无关。在棱镜结构型式选定后,棱镜常数 K 和玻璃折射率 n 是已知的,由式(2-9)就可以求出角 φ 。

现在我们用作图法来求棱镜的通光口径 D_2 。在图2-4a中,过棱镜的出射面中点 O 作直线 ON ,使其与光轴夹角为 φ ,与轴外上光线交于 N 点。过 N 点作垂直于光轴的直线 MN ,则直线 MN 就是棱镜的通光口径 D_2 。故可求出 $d = KD_2$, $\bar{d} = d/n$ 。

(2) 解析法 在图2-4a中,三角形 ONC 的三个角分别为: $\angle NOC = 90^\circ - \varphi$, $\angle ONC = \varphi - \alpha$, $\angle NCO = 90^\circ + \alpha$ 。由正弦定理得

$$\frac{D_3}{2 \sin(\varphi - \alpha)} = \frac{NO}{\sin(90^\circ + \alpha)}, \quad NO = \frac{D_2}{2 \sin \varphi}$$

整理后, 则得

$$D_2 = \frac{D_3 \sin \varphi \cos \alpha}{\sin(\varphi - \alpha)} \quad (2-10)$$

式中, α 按式(2-8)确定; D_3 按式(2-7)确定。求出 D_2 后, 便可求出 d 和 \bar{d} 。

在实际计算中, 有时已知棱镜的入射面到物镜的距离 a_2 , 这时, $D_2 = D_1 - 2a_2 \tan \alpha$, 然后求出 d , \bar{d} 和 $D_3 = D_2 - 2d \tan \alpha / n$ 。

在 $D_1 < D_4$ 时, $D_3 > D_2$, 则棱镜的出射面口径 D_3 按式(2-7)计算, d 和 \bar{d} 应按 D_3 确定。

四、透镜转象系统

所谓透镜转象系统就是放置在物镜实象面后的使象再一次倒转成正象的透镜系统。它的物平面与物镜的象平面重合, 象平面与目镜的前焦面重合。在有些光学系统中, 如潜望镜, 内窥镜需要放置透镜转象系统以增加仪器的筒长。

透镜转象系统可分为单组的和双组的两种, 现分别叙述如下。

1. 单组透镜转象系统 单组透镜转象系统的原理图如图2-5所示。图中 y 是被物镜成的象, y' 是转象系统成的象。点 A 与物镜后焦点重合, 点 A' 与目镜前焦点重合, 则转象系统的垂轴放大率 $\beta = -\frac{y'}{y} = -\frac{l'}{l}$ 。因为 $\beta < 0$, $f'_1 > 0$, $f_2 > 0$, 则望远系统的总放大率

$\Gamma = -\frac{f'_1}{f_2} \beta > 0$ 。所以整个系统得到正象。转象系统的放大率一般取 $\beta = -1$ 倍, 这时转象系统的共轭距等于4倍转象透镜的焦距。

外形尺寸计算时, 如果已知整个系统的总长度 L_T , 则转象系统的共轭距 $L = L_T - f'_1 - f_2$ 。已知 β 和 L 时, 可用高斯公式求出转象透镜的 f' 、 l 和 l' 。

$$f' = \frac{-L\beta}{(1-\beta)^2} \quad l = \frac{L}{\beta-1} \quad l' = \frac{L\beta}{\beta-1} \quad (2-11)$$

由于 $\beta = -1$ 倍单组透镜转象系统承担较大的相对孔径, 难以得到满意的象质, 故常用双组透镜转象系统。

2. 双组透镜转象系统 图2-6是两个光组之间为平行光的双组透镜转象系统。由于这种结构在 $\beta = -1$ 倍时, 其象差校正加工装调都比较方便, 又容易获得满意的象质, 所以在实际中得到广泛的应用。

由于两个镜组之间是平行光, 第一镜组的前焦面与物镜的后焦面重合, 第二镜组的后焦面与目镜的前焦面重合, 所以可以把这个系统看作是放大率为 Γ_{T_1} 和 Γ_{T_2} 的两个望远系统的组合, 这时系统的总放大率为

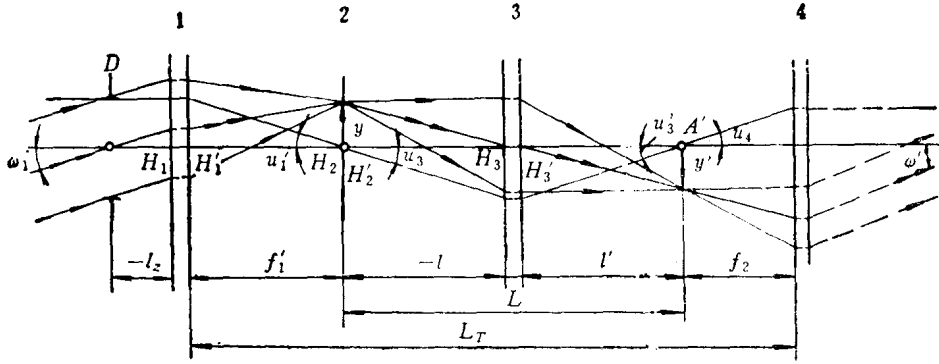


图 2-5
1—物镜 2—场镜 3—转象镜 4—目镜 D—入瞳

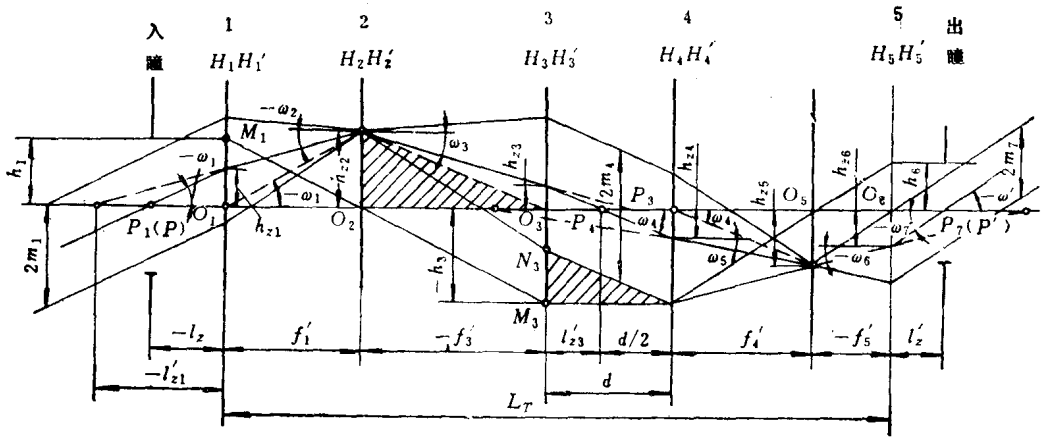


图 2-6
1—物镜 2—场镜 3、4—转象镜 5—目镜

$$\Gamma = \Gamma_{T1} \Gamma_{T2} \quad \text{或} \quad \Gamma = -\frac{f'_1}{f'_2} \beta \quad (2-12)$$

下面来确定转象系统的焦距和间隔

(1) 转象系统的焦距和视场角的确定 由于 $\beta = -1$ ，系统是全对称的，所以转象系统的焦距 $f'_3 = f'_4$ ， $D_3 = D_4$ 。为了简化计算，对转象系统的通光口径附加一些限制条件。一般取 D_3 等于轴上光束口径，或者等于场镜的口径，或者等于技术条件中规定不允许超过的最大口径。我们取 $D_3 = D_4 = 2h_3$ 。从相似三角形 $M_1 O_1 O_2$ 和 $M_3 O_2 O_3$ 可以得出 $O_3 M_3 / M_1 O_1 = h_3 / h_1 = D_3 / D = f'_3 / f'_1$ 。由此得出

$$f_3 = f'_4 = \frac{D_3 f'_1}{D} \quad (2-13)$$

把物镜和第一转象透镜看作是一个放大率 $\Gamma_{T1} = -\frac{f'_1}{f'_3}$ 的望远镜，由此可以求出转象系统的视场角 ω_3

$$\text{tg} \omega_3 = \Gamma_{T1} \text{tg} \omega_1 = -\frac{f'_1}{f'_3} \text{tg} \omega_1 \quad (2-14)$$

已知 $f'_3 = f'_4$ 和 $D_3 = D_4$ ，则转象透镜的相对口径 $D_3 / f'_3 = D_4 / f'_4$ 。由此可以选出转象系统的

光组结构。

(2) 转象镜组间隔 d 的确定 整个系统的筒长 L_T 一般在技术条件中是已知的, 它等于各光组的焦距和间隔 d 之和, 即

$$L_T = f'_1 + f'_3 + d + f'_4 + f'_5$$

由此可求出

$$d = L_T - f'_1 - f'_3 - f'_4 - f'_5 \quad (2-15)$$

如果没有给出系统的筒长 L_T , 可按给定的渐晕系数 K 来确定间隔 d 。在图 2-6 中, 由画剖面线的两个相似三角形可得 $D_2/(2f'_3) = M_3N_3/d$, 式中, $M_3N_3 = 2h_3 - 2m_4 = D_3 - 2m_4$, 而 $2m_4 = KD_3$, 所以 $M_3N_3 = D_3(1 - K)$ 。代入 $d = \frac{M_3N_3}{\text{tg}\omega_4} = \frac{M_3N_3}{D_2/(2f'_3)}$, 则得 $d = 2f'_3 D_3(1 - K)/D_2$, 因为 $D_2 = 2y' = 2f'_1 \text{tg}\omega_1$, $D_3 = Df'_3/f'_1$, 所以

$$d = \frac{(1 - K)D}{|\text{tg}\omega_1|} \left(\frac{f'_3}{f'_1}\right)^2 \quad (2-16)$$

如果已知 L_T , 可按式 (2-15) 求出 d , 再按式 (2-16) 验算渐晕系数 K 。假如 K 比给定的允许值大, 可用减小间隔 d 的方法修正筒长 L_T 使其满足渐晕系数 K 给定的允许值。

五、场镜的计算

在某些光学系统中, 为了减小转象系统和目镜的通光口径, 常常在物镜的象平面上 (或附近) 放置一块透镜。这种加在中间象面上 (或附近) 的透镜称为场镜。

由于场镜位于象平面上 (或附近), 它的光焦度对系统的总光焦度并无贡献, 也不影响轴上光束的象差和系统的放大率; 但对轴外象差有影响。场镜的焦距可由物镜的出瞳和转象系统的入瞳之间的物象共轭关系来确定。

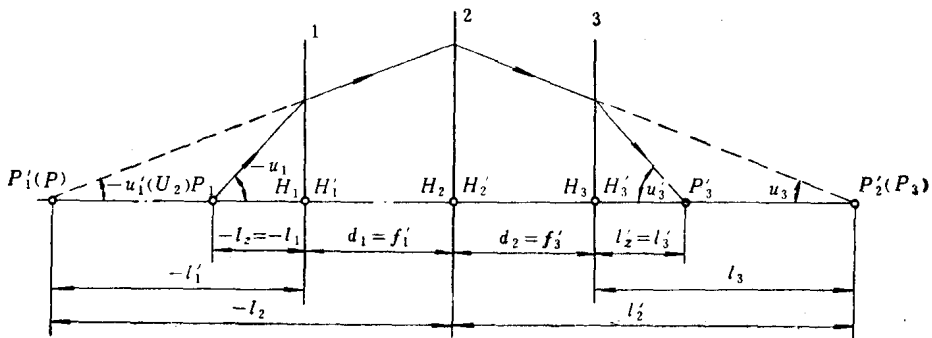


图 2-7

1—物镜 2—场镜 3—目镜

在图 2-7 中, f_1 是物镜焦距; f_3 是转象透镜 (或目镜) 的焦距; l_2 是入瞳距; l'_2 是出瞳距; P_1 是入瞳中心; P'_3 是出瞳中心。

场镜 f_2 可由主光线与入瞳中心的交点 P_1 和转象透镜 (或目镜) 的出瞳中心 P'_3 的共轭关系来确定。因此整个系统各个光组的光瞳都能够很好的衔接。由图中可以看, $\phi_2 = 1/l'_2 - 1/l_2$, 式中, $l_2 = l'_1 - f'_1 = l'_1 - 1/\phi_1$; $l'_2 = l_3 + 1/\phi_3$ 。而 $l_1 = l_2$, $l'_3 = l'_2$ 。对第一和第三块透镜应用高斯公式, 整理后得

$$l'_1 = \frac{l_2}{1 + l_2\phi_1}, \quad l'_3 = \frac{l'_2}{1 - l'_2\phi_3}$$