

■ 潘君骅 著


光学非球面

的

设计、加工与检验

THE DESIGN,
MANUFACTURE AND TEST
OF THE ASPHERICAL
OPTICAL
SURFACES

◆ 苏州大学出版社

 苏州大学出版社

潘君骅 著

光学非球面的 设计、加工与检验

图书在版编目(CIP)数据

光学非球面的设计、加工与检验/潘君骅著. 苏州:
苏州大学出版社, 2004. 12
ISBN 7-81090-400-0

I. 光… II. 潘… III. 非球面透镜—基本知识
IV. TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 113758 号

内 容 简 介

本书对非球面光学系统作了科学的分类,并详细分析了各类系统的特点,阐述了它们的设计步骤、加工方法和检验措施。

全书共分十章,第 1 章介绍了轴对称非球面的数学-光学性质;第 2 至第 5 章介绍了二镜系统、施密特系统、同心系统及其非球面校正板、三反射镜系统的设计、加工与检验方法;第 6 至第 8 章讲述了离轴抛物面镜、非球面单透镜和大型夜视物镜中的非球面的设计与加工技术;第 9 与第 10 章分别介绍了掠入射环面镜和偏轴两镜准直系统的设计、加工与检验。

本书可供高等院校应用光学专业和激光专业的师生阅读,也可供从事光学设计和光学元件加工的科技人员参考。

光学非球面的设计、加工与检验

潘君骅 著

责任编辑 陈兴昌

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路 200 号 邮编:215021)

丹阳教育印刷厂印装

(地址:丹阳市西门外 邮编:212300)

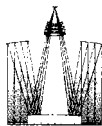
开本 720mm×910mm 1/16 印张 13.25 字数 193 千

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81090-400-0/TH·6 定价:28.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换
苏州大学出版社营销部 电话:0512-67258835

序



Preface

非球面,即与球面有偏离的表面,近二三十年来在光学系统中得到愈来愈广泛的应用.这首先是由于近代科学与技术的发展,要求光学系统的应用向可见光波段的两端,即红外与紫外延伸,而透红外及紫外光的材料制造较困难,品种又少,其中尺寸大的更难解决,在极紫外(XUV)波段则根本没有透射材料.若不采用反射光学系统并依靠非球面来消像差,则这些困难无法克服.其次,由于工艺技术的进步,光学系统中有关非球面制造上的难题逐步被解决,采用非球面在经济上也可以承受.

翻开国外的主要光学杂志,如美国的“Applied Optics”(《应用光学》),每年在“光学设计”、“光学加工”、“光学检验”、“光学系统”、“反射镜”、“望远镜”、“非球面”等分类标题中登载大量有关非球面的设计、加工和检验的文章.这些文章大多数反映了科研或生产上的实际需要,于此可窥见非球面在现代光学工程中的重要作用.

作者在中国科学院长春光机所工作期间,在王大珩教授的指导下长期从事光学检验、光学工艺及光学设计的研究工作,而对光学非球面研究得更多.在苏联学习期间,得到 Д. Д. Максудов 通信院士的亲自指导,获益匪浅,在以后的长期实际工作中又积累了一些知识和经验.

要恰到好处地将非球面应用到光学系统中去,需要光学仪器总体设计师、光学设计师与光学工艺、检验工程师的相互沟通.国内目前尚缺乏这方面的交流与沟通,而这方面专业书的短缺是造成这种情况的主要原因.

因之一. 作者写这本书的动机就源于此. 此外, 本书对从事光学技术工作的研究生、高年级本科生或拟涉足非球面的光学设计的研究人员也将有所裨益. 作者特别强调搞非球面光学工艺及检验的工程师应加强非球面光学设计知识的充实, 因为只有这样才能使自己的工作处于主动地位, 有利于各种各样实际问题的解决, 避免由于对问题的认识不足而引起失误.

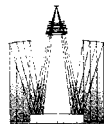
在本书编写过程中, 何鑫、李新南同志参加了第 8、第 9、第 10 章有关部分的计算工作, 特此致谢.

作者谨以本书纪念先慈朱贞慧女士诞辰 100 周年.

潘君骅

1993 年 2 月于南京

再版序



Preface of Re-edition

本书于1994年出版之后受到同行较普遍的欢迎。然当初估计不足,印刷数量较少,很快就脱销了,以致不能满足后来求购者的需求。再者,和其他工作一样,非球面技术也是不断在发展,这几年来由于科学及国防方面的需要,新的非球面系统不断被设计出来,推动了非球面制造技术的前进,所以新的内容不断增加。这两方面的原因,促使我加紧再版的准备工作。

此次再版,去掉了一些不必要的曲线图及附录中用PC1500机编的计算程序。添加的内容主要有:离轴三反射镜的设计方法、红外成像系统的设计方法、一个新的PC系统以及一些必要的增补。这都是这几年来自己在工作中遇到或发现的问题。我想,写出来和大家分享是应该的。

苏州大学出版社对本书的再版给予了极大的帮助,在此表示衷心感谢。

潘君骅

2004.11 于苏州

目 录

第 1 章 轴对称非球面的数学表达式及数学-光学性质	1
1.1 轴对称非球面的数学表达式	1
1.2 二次曲线的重要光学性质及两种表达式参数间的关系	5
1.3 二次曲面的非球面度	8
第 2 章 两镜系统的设计、检验及加工	10
2.1 两镜系统的理论基础	11
2.2 常用的两镜系统	21
2.3 两镜系统的具体设计过程	31
2.4 二次曲面凹面镜的检验方法	37
2.5 二次曲面凸面镜的检验方法	51
2.6 加工问题	62
2.7 一个新的两镜系统	68
第 3 章 施密特系统的设计、检验及加工	72
3.1 用三级像差理论讨论施密特校正板方程	73
3.2 施密特曲线的严格解	77
3.3 目标在有限距离时的施密特系统设计	83
3.4 卡塞格林-施密特系统的设计	87
3.5 施密特校正板的消色差问题	92
3.6 反射式施密特系统	101
3.7 施密特校正板的加工与检验	108
3.8 加工大口径施密特校正板应具备的主要设备	118
第 4 章 同心系统及其非球面校正板的设计与加工	120
4.1 同心系统的初步解	121
4.2 消除剩余球差的非球面校正板的设计	123

目 录

4.3	同心系统的消色差问题	126
4.4	同心系统非球面校正板的加工与 检验问题	129
第5章	三反射镜系统的设计	130
5.1	公式推导	131
5.2	三镜系统的分析与实例计算	134
5.3	离轴三反射镜系统	138
5.4	有高次项的镜面检验方案	141
第6章	离轴抛物面镜的加工与检验	145
6.1	离轴抛物面的表示方法	146
6.2	离轴抛物面的加工与检验方法	147
6.3	起始球面的选择	148
6.4	离轴抛物面非球面度的计算	149
6.5	实例计算	152
第7章	非球面单透镜	156
7.1	非球面单透镜的非球面度	156
7.2	非球面单透镜的面形	159
7.3	眼底镜的设计	161
7.4	透射非球面的自消球差条件	165
7.5	非球面单透镜的检验	166
第8章	大型夜视物镜中的非球面	168
8.1	大型夜视物镜的设计	168
8.2	大型红外物镜的设计	176
第9章	掠入射环面镜的设计、加工及检验	179
9.1	掠入射环面镜的设计	179
9.2	环面镜的几何学问题	182
9.3	环面镜的加工方法与检验方案	185
第10章	偏轴两镜准直系统的设计、加工 及检验	189
10.1	偏轴两镜系统的设计	190
10.2	双曲率面镜的加工及检验	197

第1章

轴对称非球面的数学表达式及数学-光学性质

- ▶ 1.1 轴对称非球面的数学表达式
- ▶ 1.2 二次曲线的重要光学性质及两种表达式参数间的关系
- ▶ 1.3 二次曲面的非球面度

1.1 轴对称非球面的数学表达式

设 x 表示非球面的旋转对称轴, y 表示入射光线在非球面上的高度, 则轴对称非球面的子午截面曲线一般可用两种形式的方程式来表达.

第一种
$$y^2 = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots \quad (1.1)$$

这种表达式在两种情况下比较方便: 一是对于二次曲面, 到第二项为止, 即严格地表达了曲面形状; 二是对于相对口径很大的非球面, 逼近得很快, 即高次项为数不多. 这种表达式的不便之处是, 当含 x^3 以上项时, 给定 y 值求解 x 用分析法很繁杂, 一般要用逐次逼近法. 式(1.1)中 a_1 只与非球面顶点曲率半径有关, 即

$$a_1 = 2 \dot{R}.$$

这种表达式用在强聚光系统很方便,以一个反射聚光镜为例.该聚光镜基本上是一个凹椭球面,为了使有一定尺寸的光源发光区均匀地照明一个有一定大小直径的积分透镜,在设计上需将凹椭球面稍加变形,使之得到最佳效果.结果,这个面也只需三项就够了,而这时的光源半包络角 u 达 125° . 具体的面形方程为

$$y^2 = 407.2x - 0.199x^2 + 0.000038x^3.$$

$$\text{第二种} \quad x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + \dots \quad (1.2)$$

这种表达方法常用在偏离平面很小的改正板一类光学元件上.将 x 表达为 y^2 的幂级数在设计时特别方便.由于总的偏离量一般不大,故逼近得很快.实际需要的项数和系统的相对口径有关.一个相对口径为 $1:3$ 的施密特系统的校正板,实际上到 y^4 项就足够了,也就是说用三级像差理论解出的方程就能满足要求.在口径特别大时,最多加上 y^6 项也就够了.设计者应该力求做到取最少的项数满足要求,因为无谓的增加项数有时会给加工和检验带来更多的困惑,或者做出的实物和设计的曲线并不一致.反之,如果从设计角度认为必须取多项,则一定要考虑相应的检验和加工方法.式(1.2)中第一项的系数也和非球面顶点曲率半径有关,即

$$A = \frac{1}{2R}.$$

实际光学系统在很多情况下用二次曲面就够了,并且二次曲面在检验上有它的方便之处.因此,从工艺角度出发希望尽量采用二次曲面.

二次曲线又称圆锥曲线,它有两个参数.坐标原点选择不一样,或坐标变量取得不一样,则同一曲线非球面参数有所不同,而且它们代表的几何意义也不同.对从事非球面光学设计的人来说,熟悉它们之间的关系和各自代表的几何光学意义是十分重要的.

常用的二次曲线表达式主要有下列四种形式:

$$(1) \quad \frac{x^2}{a^2} \pm \frac{y^2}{b^2} = 1, (\text{椭圆及双曲线}) \quad (1.3)$$

$$y^2 = 2px. \quad (\text{抛物线})$$

这两式是解析几何中一般采用的两种形式,式(1.3)中前一式的坐标原点

取在曲线的对称中心,后一式坐标原点取在曲线的顶点.式中参数 a 、 b 分别是椭圆或双曲线的半长轴和半短轴, p 是抛物线的焦点到准线的距离,也是抛物线顶点的曲率半径.用式(1.3)前一式从数学角度讨论曲线的性质及一些衍生的数学关系比较方便;但从几何光学的角度看,除了求曲线的几何焦点外,用该式却不很方便.以后我们将利用它的参数来求曲线焦点的位置.

$$(2) \quad y^2 = 2 \overset{\circ}{R} x - (1 - e^2)x^2. \quad (1.4)$$

此式是讨论光学问题最常用,也是最方便的形式之一.从式(1.4)立即可以看出,不论对哪一种曲线,其坐标原点都在曲线的顶点.式中参数 $\overset{\circ}{R}$ 是曲线顶点的曲率半径, e^2 是曲线的离心率平方,也就是曲线的形状参数.这种表达式的另一个好处是把扁球面也包括在内.扁球面是绕椭圆的短轴旋转而成的二次曲面,在非球面光学中经常要用到.形状参数与曲线性质的对应关系如下:

$e^2 < 0$,	扁圆
$e^2 = 0$,	圆
$0 < e^2 < 1$,	椭圆
$e^2 = 1$,	抛物线
$e^2 > 1$.	双曲线

如果取相同的 $\overset{\circ}{R}$,不同 e^2 值对应的二次曲线的图形如图1.1所示.

$$(3) \quad y^2 = a_1 x + a_2 x^2. \quad (1.5)$$

这种表达式实质上 and 式(1.4)是一致的,但有些读者习惯以这种形式表达.与式(1.4)对照可知:

$$\begin{aligned} a_1 &= 2 \overset{\circ}{R}, \\ a_2 &= e^2 - 1. \end{aligned}$$

(4) 如将二次曲线以 y^2 表达 x ,则可变成一个以 y^2 升幂排列的无穷级数

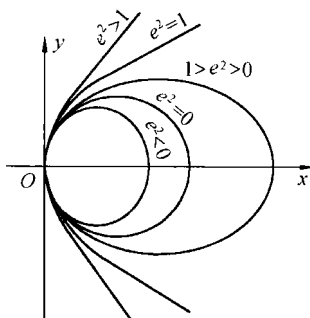


图 1.1

$$x = \frac{y^2}{2R} + \frac{y^4}{8R^3}(1-e^2) + \frac{y^6}{16R^5}(1-e^2)^2 + \frac{5y^8}{128R^7}(1-e^2)^3 + \dots \quad (1.6)$$

方程式右边各项的系数均由参数 $\overset{\circ}{R}$ 及 e^2 决定。这种表达式在根据 y 计算 x 时比较方便,但得到的是 x 的近似值。应该取多少项,决定于所要求的精度及相对口径和面形参数。以一个 $F/3$ 的双曲面为例:设 $e^2=5$,则当 $y=1$ 时,第三项的值为 4×10^{-6} mm。如果这个面的通光口径为200mm,即 $y=100$,则第三项对 x 的贡献为 $0.4 \mu\text{m}$,这在计算中已是不可忽略的了。

我们再看式(1.2)表达的一般形式的非球面。国际上现都写成以下形式:

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}} + dy^4 + ey^6 + \dots \quad (1.7)$$

其中 c 为顶点曲率($=\frac{1}{R}$), K 为二次曲线常数, d, e, \dots 为系数。

这种表达式如果只取右边第一项则为严格的二次曲线。从式(1.4)解出 x ,得

$$x = \frac{\overset{\circ}{R} - \sqrt{\overset{\circ}{R}^2 - (1-e^2)y^2}}{1-e^2} \quad (1.8)$$

式(1.8)上下乘同一因子并化简后,用 $\overset{\circ}{R}$ 除分式上下,令 $c = \frac{1}{R}$, $K = -e^2$,得

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}}$$

式(1.2)与式(1.7)各有优缺点。式(1.2)的第一项只和顶点曲率半径有关,适用于表示平板型非球面;而式(1.7)在以二次曲线为基础加高次项时很容易知道高次非球面偏离二次非球面的程度。

ZEMAX 程序中偶次非球面的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + \dots$$

其中第一项为一般的二次曲面方程,第二项为二次抛物面方程。第一项的

顶点曲率半径 $R_1 = \frac{1}{c}$, 第二项的 $R_2 = \frac{1}{2\alpha_1}$. ZEMAX 计算程序偶次非球面“曲率半径”一栏中的数是 R_1 . 因此, 如果 $\alpha_1 \neq 0$, 则实际曲面顶点曲率半径 R 决定于 R_1 和 R_2 , 即 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$. 如果 c 和 α_1 异号, 数值上又是 $R_1 > R_2$, 则 R 将和 R_1 异号.

1.2 二次曲线的重要光学性质及两种表达式参数间的关系

► 1. 与法线有关的重要性质

图 1.2 所示为二次曲线的一部分, $P(x, y)$ 为其上一任意点, PC_y 为该点的法线, C_y 是法线与 x 轴的交点, C 是曲线顶点的曲率中心. 光学上记做 $\overline{CC_y} = \Delta R$, 称为法线像差. 用解析几何方法不难求得

$$\Delta R = xe^2, \quad (1.9)$$

从而

$$\begin{aligned} \overline{OC_y} - x &= \dot{R} - (1 - e^2)x, \\ \varphi &= \arctan \frac{y}{\dot{R} - (1 - e^2)x}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

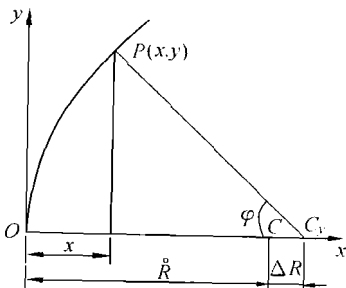


图 1.2

在用补偿法检验非球面时, 特别是自准直式光路, 需要设计折射或反

射补偿系统,这时往往将非球面法线看做光线,需要先算出法线与光轴的交点位置及角度.

► 2. 椭圆及双曲线的参数

应该注意,椭圆及双曲线的几何学焦点与光学上的焦点含义不同.几何学上的焦点有重要的光学性质,是我们常用到的.式(1.3)表示的椭圆及双曲线,其几何焦点在 x 轴上,离坐标原点的距离为 $\pm c$. c 与系数 a 、 b 的关系为

$$c^2 = a^2 - b^2, \quad (\text{椭圆})$$

$$c^2 = a^2 + b^2. \quad (\text{双曲线})$$

如果将坐标原点平移到椭圆的左方顶点及双曲线右边一支的顶点,即得到式(1.4)的坐标轴,几何焦点到曲线顶点的距离分别通过参数 a 及 c 来表示,如图 1.3 所示.经过简单推导可得:

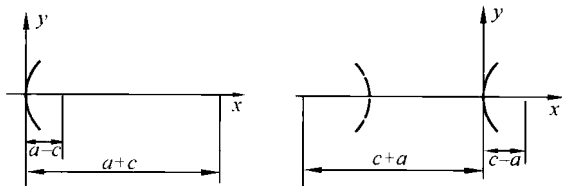


图 1.3

椭圆

$$a - c = \frac{\dot{R}}{1 + e}, \quad (1.11)$$

$$a + c = \frac{\dot{R}}{1 - e};$$

双曲线

$$c - a = \frac{\dot{R}}{1 + e}, \quad (1.12)$$

$$c + a = \frac{\dot{R}}{1 - e}.$$

注意,双曲线的 $e^2 > 1$,故 $c+a$ 是一负值,与光学设计的符号规则一致.此外,还可以得到

$$\begin{array}{ll} \text{椭圆} & \text{双曲线} \\ a = \frac{\dot{R}}{1-e^2}, & a = \frac{\dot{R}}{e^2-1}, \\ c = \frac{e\dot{R}}{1-e^2}; & c = \frac{e\dot{R}}{e^2-1}. \end{array} \quad (1.13)$$

这两种曲线共有关系:

$$\begin{aligned} e &= \frac{c}{a}, \\ \dot{R} &= \frac{b^2}{a}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

对于抛物线,式(1.3)中的 p 等于式(1.4)中的 \dot{R} ,而

$$x = \frac{y^2}{2\dot{R}}. \quad (1.15)$$

对于扁球面,即 $e^2 < 0$,没有几何学上的焦点,但在非球面光学中需要用到.在求其法线向量时,式(1.9)及式(1.10)仍然有效,此时 ΔR 为负值,即其边缘带的法线与光轴的交点离顶点的距离小于顶点曲率半径.

前面讲了,扁球面是绕椭圆的短轴旋转而成的二次曲面,而常规椭球面是绕椭圆的长轴旋转而成的.在子午截面里,它们可以是同一个椭圆.下面将推导出,同一个椭圆所得的扁球面和常规椭球面之间的参数关系.如图 1.4 所示,此椭圆的方程为

$$y^2 = 2\dot{R}x - (1-e^2)x^2,$$

绕 x 轴旋转,得到常规椭球面,其参数为 \dot{R} 及 e^2 .

现将顶点移到新位置 O' ,有

$$x' = x - a, \quad y' = b - y,$$

或 $x = x' + a, \quad y = b - y'$.

其中 a 和 b 分别为椭圆的半长轴和半短轴.

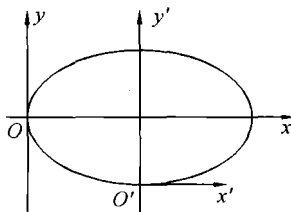


图 1.4

代入原方程,并将 y' 与 x' 对换,即 $y' \rightarrow x, x' \rightarrow y$,得

$$(x-b)^2 = 2\dot{R}(y+a) - (1-e^2)(y+a)^2.$$

将此式展开,并注意到式(1.13)及式(1.14),可得

$$y^2 = 2\dot{R} \frac{1}{(1-e^2)\sqrt{1-e^2}} x - \frac{1}{1-e^2} x^2.$$

设扁球镜的顶点曲率半径为 \dot{R}_E , 离心率平方为 E^2 , 其方程式应为 $y^2 = 2\dot{R}_E x - (1-E^2)x^2$. 与原方程式比较,可得

$$\dot{R}_E = \dot{R} \frac{1}{(1-e^2)\sqrt{(1-e^2)}}, \quad E^2 = \frac{e^2}{e^2-1}.$$

由于 $0 < e^2 < 1$, 故 E^2 一定是负值.

以上方程式的曲线,若绕 x 轴旋转,就得到轴对称曲面. 以 $y^2 + z^2$ 项代替 y^2 项,即得到曲面的方程式.

用极坐标表示二次曲线,在非球面光学中用得较少,它的参数仍为 \dot{R} 及 e^2 , 坐标参数为 ρ 及 φ , 表示式为

$$\rho = \frac{\dot{R}}{1 - e \cos \varphi}. \quad (1.16)$$

$\varphi=0$ 时, ρ 变为 ρ_0 , 其方向为光轴. 二次曲面由曲线绕 ρ_0 轴旋转而成(图 1.5). 坐标原点 O 为

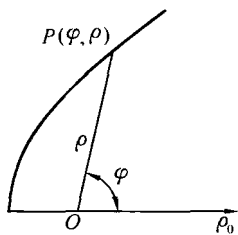


图 1.5

二次曲面的几何焦点之一. 在计算反射聚光镜时用这种表示式比较方便.

1.3 二次曲面的非球面度

非球面度是指某一非球面表面和一个比较球面在沿光轴方向的偏差. 一般总希望非球面度尽可能小, 因此要选择一个“最佳比较球面”. 这是与非球面在顶点及边缘接触的一个球面, 如图 1.6 所示. 当非球面度较

小时, 最大非球面度发生在 $y = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 带, 其数值为

$$\delta_{\max}^{\circ} = \frac{DA^3}{4096} e^2. \quad (1.17)$$

其中, D 为镜子的口径, A 为镜面的相对口径, e^2 为二次曲面参数. 当相对口径很大时, 应根据非球面方程式和比较球面方程式作数值计算而求得.

非球面度的大小反映加工的难度, 但是不能只看其绝对数值, 还要看镜面直径大小. 真正反映加工难度的是非球面度的变化值, 或称非球面斜率, 如在镜面径向每 10mm 内非球面度的差值.

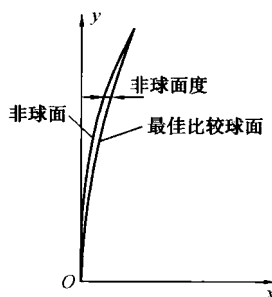


图 1.6