

天文仪器文集

中国科学院南京天文仪器厂

一九八四年十月

序

“天文仪器”文集出版了，这是天仪厂科技人员工作结果的记录，范围及内容较广，有：光学设计，光学工艺，光学检验，机械设计，机械工艺，计量技术，电子学技术，光电接收技术，自动控制技术，计算机应用，仪器装校技术以及有关的综合性文章。

天仪厂过去主要是从事光学天文仪器的研制，近年来又开展了较大口径的精密射电天线的研制。从1958年成立到现在已为我国各天文台装备了不少专用的天文仪器，其中有一些仪器的性能已达到了国际上的头等水平。

但是，由于我们的专业化程度较深，过去除了将一些仪器的设计资料归档外，科技人员没有机会将自己工作的大多数结果与成绩以刊物的形式发表出来，一方面作为一种记录，另一方面也可供相近专业的同行们参考、交流。

这本文集就是为这个目的而出的，以后还将不定期地出版。希望同行各界阅后多提宝贵意见并指正。

潘 君 骅

84年10月

勘 正 误 表

页 数	行 数	正	误
目 录	1	苏定强	苏苏强
1 5 1	2	黄铁琴	黄秩琴
1 5 1	4	的定位	的 位
1 5 1	7	说或是	说我是
1 5 2	7	分辨率	分 γ 率
1 5 2	1 8	比的齿轮	比的运输
1 5 3	8	度、分、秒	度、分钟、秒
1 5 3	1 4	求不高	求不要
1 5 3	倒 4 行	没法把	此法把
1 5 3	倒 3 行	这样组	这能组
1 7 2	8	$F_c \dot{\theta}_c$	$F_c \dot{\theta}_c$
1 7 3	7	的作用	的作手
1 7 4	2	谐振频率 ω	谐振 ω
1 7 5	6	度却为	度都为
1 7 7	1 4	阻尼系数	阻尼系统
1 7 7	1 7	传递函数	传进函数
2 2 2	12、13	奖	将
2 2 3	9	施密特	施出

目 录

光学系统中非球面的数值计算	苏苏强 王亚男 王兰娟	(1)
一个 5 米望远镜的光学系统方案	苏定强 邵联贞 梁 明	(24)
卡塞格林系统非球面板像场改正器的设计和研究	羿美良	(31)
一种改进的主焦点改正器	曹昌新	(53)
$\varnothing 630\text{ mm}$ 改正透镜组的胶合	陈馨凯	(73)
2.16 米主镜手修情况介绍	姚执华	(77)
国内外大型望远镜主镜材料使用概况	郭乃暨	(84)
WGS 人造卫星跟踪摄影机光学系统的调正	何业文	(87)
一米真空无偏振太阳塔的设想	李 挺	(100)
EM-1 机架换装米级镜筒的两个设计方案	包可人	(110)
第一类和第二类完全椭圆积分 $K(k)$ 和 $E(k)$ 的数值计算	华家骏	(129)
13.7 米射电望远镜的筒架加工工艺	陆翡翠	(134)
一种 22 位组合式光学绝对编码器设计	黄铁琴	(151)
13.7 米射电望远镜关于锻铝合金 6061 (LD ₂) CS 机械 结构件的焊接	闻人俊	(156)
首次在国外观测成功“闪光光谱”的“日食光谱仪”通过鉴定	卢保罗	(161)
60 厘米望远镜的红外斩波副镜	顾玉华 祝 捷 夏自立	(162)
大望远镜伺服系统机械谐振的补偿	沈盘安 罗宁苏	(171)
日食光谱仪的电气控制系统	王其祥 相宜林 张振超	
	许桂红	(181)
伺服系统计算机控制的若干问题	陈子衡	(195)

三阶动力学系统稳定性的简易分析
控制“转头”的一种新方案
关于技术档案鉴定工作的一些设想
简 讯

朱立卿 (207)
郭荣华 (216)
葛志芬 (222)
(76)

光学系统中非球面的数值计算*

苏定强

王亚男

王兰娟

提

要

本文叙述在非球面数值计算方面的一套算法。1. 在一个光学系统中, 计算一个面的形状, 使系统消球差; 2. 在一个光学系统中, 同时计算两个面(相邻的或不相邻的)的形状, 使系统消球差和满足正弦条件; 3. 非球面的优化(非球面的自动设计)。对于每种情况都给出了天文光学系统上的例子。本算法可以任意地升高多项式的次数, 并且原则上可以给出任意精确的结果。

非球面在天文光学系统中占有极重要的地位。本文叙述多年来我们在这方面不断发展所形成的一套算法:

在本文中, 光学系统的面形表示为:

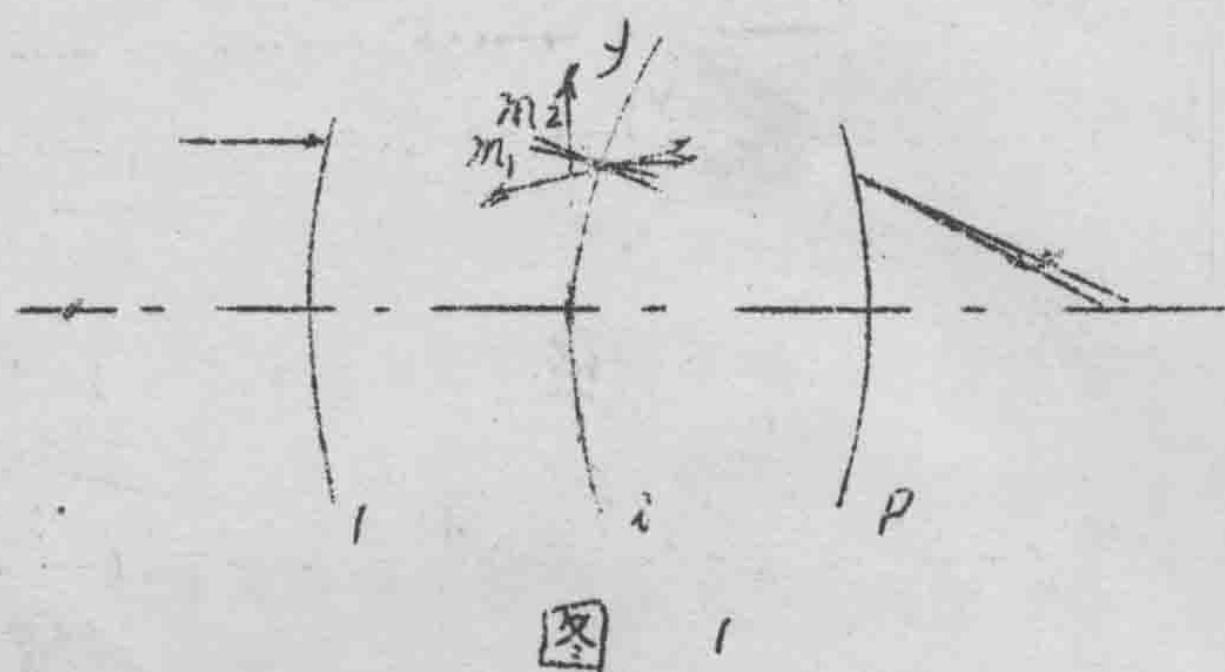
$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2(1 - e^2)y^2}} + \left[A_1 \left(\frac{y}{h} \right)^2 + A_2 \left(\frac{y}{h} \right)^4 + \dots + A_S \left(\frac{y}{h} \right)^{2S} \right] \cdot h. (1)$$

若 $A_1 = 0$, 则 C 为顶点的曲率。若 $A_1, A_2, \dots, A_S$ 全为零, 它表示的是一个圆锥曲面, 如果 $e^2 \geq 0$, 则 e 为偏心率, 但 e^2 也可取为负值, 此时表示的是扁球面, h 是选定的一个常量, 若几个面的通光口径差别不太悬殊(例如相差不到 5 倍), 可选用相同的 h , 当入瞳口径也和这些面的通光口径相差不很大时, 取 h 等于入瞳半径。

* 原载天文学报第 25 卷(1984 年)第 1 期 86 页

一、计算一个面形，使系统消球差

早在文献〔1〕中我们就提出了这样的算法，后来又进一步完善了它，这种算法现已为国内一些研究所和工厂应用。



设第 i 面为要计算的面。

1. 方法

(1) 第 i 面的初始面形记为 $x_1(y)$ ，追迹一根光线，求其与此面交点的纵坐标 y 和法线斜率 m_1 ，以及此光线的球差值，然后改变法线斜率，用一维寻查法（实际上只要用线性插值法即可）求出球差值小于 ε_1 时的法线斜率值，记为 m_2 ，满足消球差条件的镜面形状记为 $x_2(y)$ ，又记 $\xi = x_2 - x_1$ ，则近似地有：

$$\frac{d\xi}{dy} = m_1 - m_2 \quad (2)$$

(2) 按上述方式，在半个入瞳上计算 k 根光线，得到各条光线和第 i 面（初始面形）交点的纵坐标 $y_1, y_2, \dots, y_k$ 和

$$\left. \frac{d\xi}{dy} \right|_1, \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_2, \dots, \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_k。$$

$$(3) \text{ 令 } \frac{d\xi}{dy} = a_1 \frac{y}{h} + a_2 \left(\frac{y}{h}\right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y}{h}\right)^{2k-1} \quad (3)$$

于是有：

$$\begin{cases} \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_1 = a_1 \frac{y_1}{h} + a_2 \left(\frac{y_1}{h}\right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y_1}{h}\right)^{2k-1}, \\ \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_2 = a_1 \frac{y_2}{h} + a_2 \left(\frac{y_2}{h}\right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y_2}{h}\right)^{2k-1}, \\ \vdots \\ \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_k = a_1 \frac{y_k}{h} + a_2 \left(\frac{y_k}{h}\right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y_k}{h}\right)^{2k-1}. \end{cases} \quad (4)$$

此方程组的系数行列式是一个范德蒙行列式，只要各 y 值互不相同，它的值就不为零。解此方程组，即可求得 $a_1, a_2, \dots, a_k$ 。

(4) 对 (3) 式积分之，得第 1 面的新面形 $x_2(y)$ 为

$$x_2 = x_1 + \left[\frac{a_1}{2} \left(\frac{y}{h}\right)^2 + \frac{a_2}{4} \left(\frac{y}{h}\right)^4 + \dots + \frac{a_k}{2k} \left(\frac{y}{h}\right)^{2k} \right] \cdot h \quad (5)$$

将系数 $\frac{a_1}{2}, \frac{a_2}{4}, \dots, \frac{a_k}{2k}$ 的值，与 x_1 原表达式中的系数 $A_1, A_2, \dots, A_k$ 值分别相加，得到的第 1 面的新形状 x_2 仍是 (1) 式形式的。

(5) 在步骤 (1) 中，用一维寻差求消球差的法线方向时，用的是光线和初始面形的交点。这样做是近似的，即 (2) 式是近似的。因此在求得新的形状 $x_2(y)$ 后，应对光学系统重新追迹上述 k 根光线，检查球差值是否都小于 ε_2 ，若不满足此条件，则以 $x_2(y)$ 作为新的初始面形，重复以上 5 个步骤。

2. 说明

(1) 本算法中, 初始面形可以任意选取 (为简单起见一般用球面或平面), 可以经过近轴光学分析来得到 (为简单起见一般用球面), 也可以由三级解得到。

(2) 在上述计算中, 只保证了所选用的 k 根光线是没有球差的 (球差值小于 ε_2), 而在这些光线之间的带区上, 球差值有可能会大于允许值 ε , 这时就应取更大的 k 值 (计算更多的光线) 或在入瞳上将光线重新分布。

本算法中, ε_1 和 ε_2 值的选取可以是相当任意的, 但都应取得比 ε 更小, 而且 ε_1 应比 ε_2 更小。

(3) 计算球差时, 可以取近轴象点作为基准点, 也可以取一根基准光线, 以其象点作为基准点。

(4) 镜面形状中 y^2 项的系数将影响到近轴光学的参数。如果消球差是以近轴象点为基准的, 或要求近轴光学的参数不变 (此时消球差的基准点也应为近轴象点), 则应令 $a_1 = 0$, 即在这些情况

下, 应取(3)式为 $\frac{d\varepsilon}{dy} = a_2 \left(\frac{y}{h}\right)^3 + a_3 \left(\frac{y}{h}\right)^5 + \dots + a_k \left(\frac{y}{h}\right)^{2k-1}$,

计算 $k-1$ 根光线来定出系数 $a_2, a_3, \dots, a_k$, 而得到的镜面

形状为 $x_2 = x_1 + \left\{ \frac{a_2}{4} \left(\frac{y}{h}\right)^4 + \frac{a_3}{6} \left(\frac{y}{h}\right)^6 + \dots + \frac{a_k}{2k} \left(\frac{y}{h}\right)^{2k} \right\} \cdot h$ 。

如果不仅要求初始结构的近轴参数不变, 而且希望它的三级象差值也不变, 则应令 $a_1 = 0, a_2 = 0$, 计算 $k-2$ 根光线, 定出(5)式中的系数 $a_3, a_4, \dots, a_k$ 。

3. 例

例 1: 计算一个 Schmidt 望远镜改正板的形状。

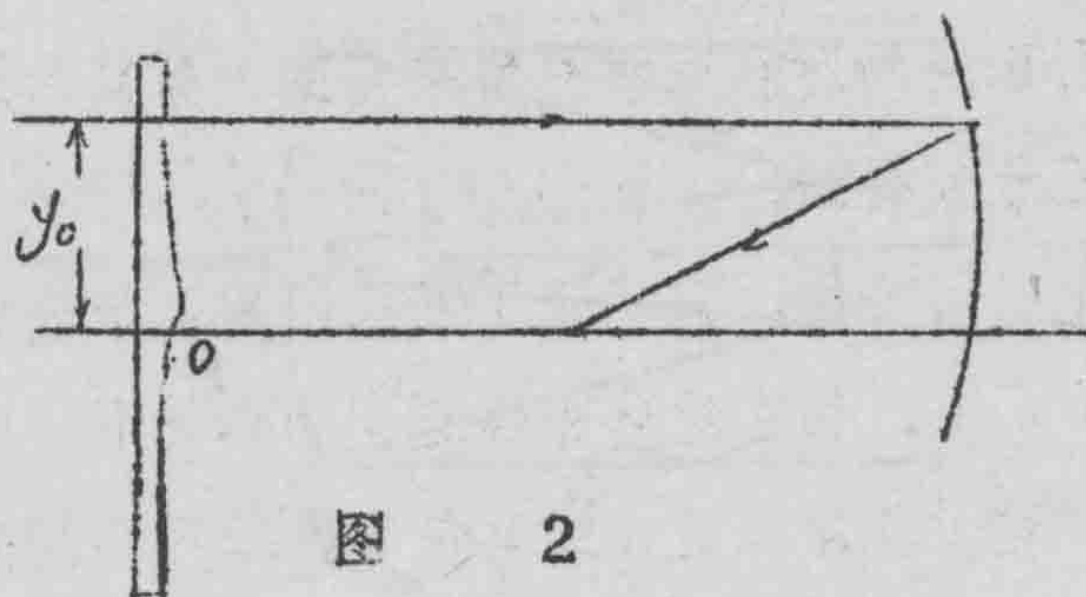


图 2

改正板通光口径 1000, 球面反射镜曲率半径 $r = -4000$
 (系统焦比近于 2), 改正板折射率 1.52644. 改正板的第二面为
 非球面, 其顶点在反射镜球心, 以 $y_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 500 = 433.01270$
 的光线作为计算球差的基准光线, 取改正板第二面的初始形状为平面,
 $h = 500$, $k = 5$, 算得:

$$x = \left[A_1 \left(\frac{y}{h} \right)^2 + A_2 \left(\frac{y}{h} \right)^4 + A_3 \left(\frac{y}{h} \right)^6 + A_4 \left(\frac{y}{h} \right)^8 + A_5 \left(\frac{y}{h} \right)^{10} \right] h,$$

$$\begin{aligned} A_1 &= -1.3953734 \times 10^{-3} & A_4 &= 7.0500339 \times 10^{-7}, \\ A_2 &= 9.0596807 \times 10^{-4} & A_5 &= 3.2142137 \times 10^{-8}, \\ A_3 &= 2.0847836 \times 10^{-5}. \end{aligned}$$

例 2: 计算一个球面主镜 Cassegrain 望远镜的副镜形状。

主镜口径 4000, 焦比 2. 系统焦比 6.

近轴光学结构为:

	顶点曲率半径 r	间 隔 d
主 镜	-16000	-5450
副 镜	-7650	至焦点 7650

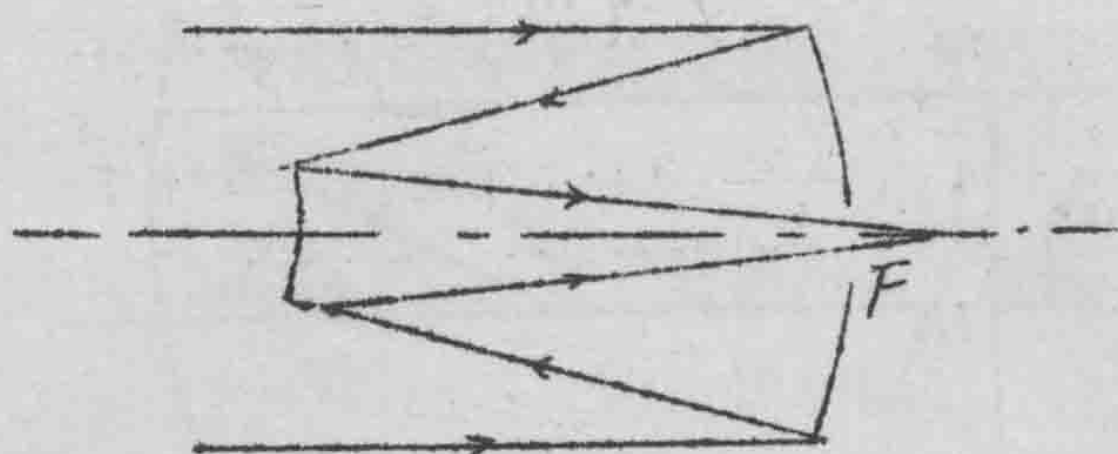


图 3

要求近轴光学参数不变，以近轴象点作为计算球差的基准点，令 $a_1 = 0$ ，以半径等于 -7650 的球面作为副镜的初始形状，取 $h = 2000$ ，计算 4 根光线，得副镜形状：

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2 y^2}} + [A_2 \left(\frac{y}{h}\right)^4 + A_3 \left(\frac{y}{h}\right)^6 + A_4 \left(\frac{y}{h}\right)^8 + A_5 \left(\frac{y}{h}\right)^{10}]h,$$

$$c = 1 / -7650$$

$$A_2 = -1.4716255 \times 10^{-2}, A_4 = -3.3633086 \times 10^{-3},$$

$$A_3 = -5.7403945 \times 10^{-3}, A_5 = -1.3609707 \times 10^{-3}.$$

上述两例用本文的方法，在 TQ-16 计算机上的运算时间小于 1 秒。

4. 讨论

上述算法可做如下改进：

仍令

$$\frac{d\varepsilon}{dy} = a_1 \frac{y}{h} + a_2 \left(\frac{y}{h}\right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y}{h}\right)^{2k-1},$$

但计算比 1 根更多的光线，得方程组：

$$\begin{cases} \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_1 = a_1 \frac{y_1}{h} + a_2 \left(\frac{y_1}{h} \right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y_1}{h} \right)^{2k-1} \\ \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_2 = a_1 \frac{y_2}{h} + a_2 \left(\frac{y_2}{h} \right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y_2}{h} \right)^{2k-1} \\ \vdots \\ \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_n = a_1 \frac{y_n}{h} + a_2 \left(\frac{y_n}{h} \right)^3 + \dots + a_k \left(\frac{y_n}{h} \right)^{2k-1} \end{cases} \quad (6)$$

$n > k$

用最小二乘法求得系数 $a_1, a_2, \dots, a_k$, 镜面形状为:

$$x_2 = x_1 + \left[\frac{a_1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 + \frac{a_2}{4} \left(\frac{y}{h} \right)^4 + \dots + \frac{a_k}{2k} \left(\frac{y}{h} \right)^{2k} \right] \cdot h$$

二、同时计算两个面形, 使系统消球差和满足正弦条件

第 i 面和第 j 面为所要计算的面, 它们可以是相邻的, 也可以是不相邻的。

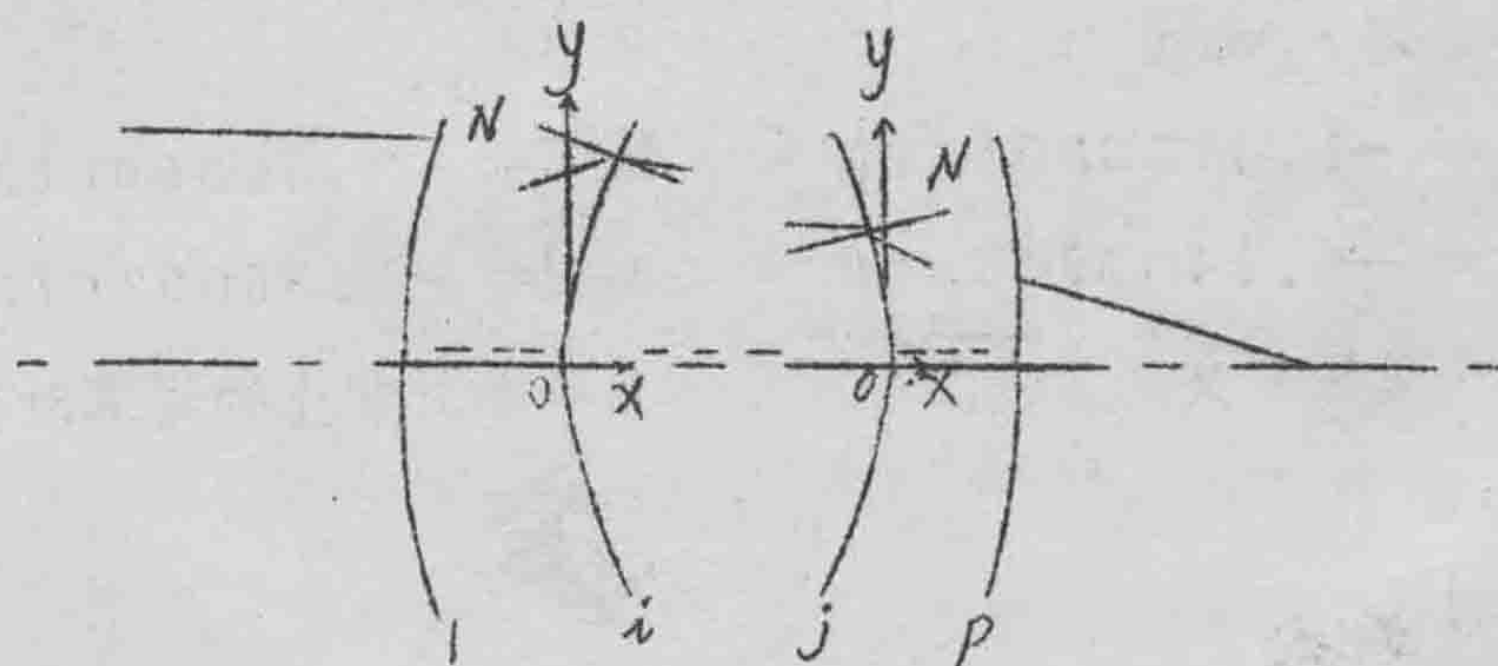


图 4

1. 方法

在计算中, 对第 i 面和第 j 面分别以其顶点作为坐标原点。

(1) 第 i 面和第 j 面的初始面形记为 $x_{i1}(y)$ 和 $x_{j1}(y)$ 。追迹一根光线, 求其与第 i 面交点的纵坐标 y_i 和法线斜率 m_{i1} , 与第 j 面交点的纵坐标 y_j 和法线斜率 m_{j1} 。改变 j 面上的法线斜率, 用一维寻查法求出球差值小于 ε_1 时的法线斜率值, 同时求出此时的 osc' 值。

(2) 改变第 i 面上的法线斜率, 每改变一次都必须重复步骤 (1), 对第 i 面用一维寻查法, 求出满足 $|osc'| < \sigma_1$ 时该面上的法线斜率。因为每改变一次 i 面上的法线斜率, 都重复步骤 (1), 故这样得到的系统同时满足消球差和正弦条件。将此时第 i 面和第 j 面的法线斜率记为 m_{i2} 和 m_{j2} , 这两个面的理想面形记为 x_{i2} 和 x_{j2} , 又记 $\xi_i = x_{i2} - x_{i1}$, $\xi_j = x_{j2} - x_{j1}$, 则近似地有:

$$\frac{d\xi_i}{dy} = m_{i1} - m_{i2}, \quad (7)$$

$$\frac{d\xi_j}{dy} = m_{j1} - m_{j2}. \quad (8)$$

(3) 追迹 k 根光线。与 I 中 (2), (3), (4) 完全相似地可以求得 i 面和 j 面的新形状:

$$x_{i2} = x_{i1} + \left[\frac{a_1}{2} \left(\frac{y}{h_i} \right)^2 + \frac{a_2}{4} \left(\frac{y}{h_i} \right)^4 + \dots + \frac{a_k}{2k} \left(\frac{y}{h_i} \right)^{2k} \right] h_i, \quad (9)$$

$$x_{j2} = x_{j1} + \left[\frac{b_1}{2} \left(\frac{y}{h_j} \right)^2 + \frac{b_2}{4} \left(\frac{y}{h_j} \right)^4 + \dots + \frac{b_k}{2k} \left(\frac{y}{h_j} \right)^{2k} \right] h_j. \quad (10)$$

将上述系数与(1)式形式的 x_{i1} , x_{j1} 中相应的系数相加, 得到的新面形 x_{i2} , x_{j2} 仍是(1)式形式的。

(4) 在上述求满足消球差和正弦条件的法线斜率时, 用的是光线和初始面形的交点, 这样做是近似的, 为此在求得新面形后, 应对光学系统重新追迹 k 根光线。检查球差值是否都小于 ε_2 , $|osc'|$ 值是否都小于 σ_2 , 只要有一个不满足, 就应以 $x_{i2}(y)$ 和 $x_{j2}(y)$ 作为新的初始面形, 重复上述计算。

2. 说明

(1) 同(一)中的说明(1)。

(2) 上述计算中只保证了所计算的 k 根光线的球差值小于 ε_2 和 $|osc'|$ 小于 σ_2 , 而在这些光线之间的带区上, 球差值和 $|osc'|$ 有可能会大于允许值 ε 和 σ 。这时就应取更大的 k 值(计算更多的光线)或将光线在入瞳上重新分布。

本算法中, ε_1 , ε_2 , σ_1 , σ_2 的选取可以是相当任意的, 但 ε_1 , ε_2 都应取得比 ε 小, ε_1 应比 ε_2 更小。 σ_1 , σ_2 都应比 σ 小。 σ_1 应比 σ_2 更小。由于球差对 osc' 的值是有影响的, 为避免计算上的麻烦, 我们故意将 ε_1 , ε_2 , ε 取得过小一些, 使残余球差对所要求的 $|osc'|$ 值来说是可以忽略的。

(3) 在这里, 不仅消球差的基准点可以由设计者选定, 而且计算 osc' 时的焦距值也可以由设计者选定。

(4) 如果计算球差和 osc' 时, 以初始结构的近轴象点和焦距为基准, 或计算过程中要求初始结构的近轴光学参数不变, 那末应令 $a_1 = 0$, $b_1 = 0$, 即计算 $k-1$ 根光线来定出(9)式和(10)式中的系数 a_2 , a_3 , ..., a_k 和 b_2 , b_3 , ..., b_k 。

如果不仅要求初始结构的近轴参数不变, 而且希望它的三级象差

值也不变, 则应令 $a_1 = 0$, $a_2 = 0$, $b_1 = 0$, $b_2 = 0$, 计算 $k-2$ 根光线, 来定出 (9) 式和 (10) 式中的系数 $a_3, a_4, \dots, a_k$ 和 $b_3, b_4, \dots, b_k$ 。

(5) 需要指出, 满足消球差和正弦条件的系统, 实际上往往需要使用一定大小的视场, 因而所需要的镜面也比前面只算轴上光线时所需要的大, 而用这里的方法所求出的面形在所选择的 k 根光线之外, 将很快与理想的形状有较大的偏离, 为了使轴外光线所需用到的较大的镜面区域与理想的形状不要有较大的偏离, 往往将 k 根光线中高度最大的光线选得比入瞳半径更高一些。

3. 例

例 3: 计算一个 Ritchey—Chretien 望远镜主、副镜的形状。

主镜口径 4000, 焦比 2。系统焦比 6。

近轴光学结构为:

顶点曲率半径 r		间 隔 d
主 镜	-16000	-5450
副 镜	-7650	至焦点 7650

要求近轴光学的参数不变。以近轴象点作为计算球差的基准点, 以这时的焦距值作为计算 osc' 的基准。令 $a_1 = 0$, $b_1 = 0$, 以半径等于 -16000 和 -7650 的球面作为主、副镜的初始形状。取 $h = 2000$, 计算 4 根光线, 得主镜形状:

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2 y^2}} + \left[A_2 \left(\frac{y}{h} \right)^4 + A_3 \left(\frac{y}{h} \right)^6 + A_4 \left(\frac{y}{h} \right)^8 + A_5 \left(\frac{y}{h} \right)^{10} \right] h$$

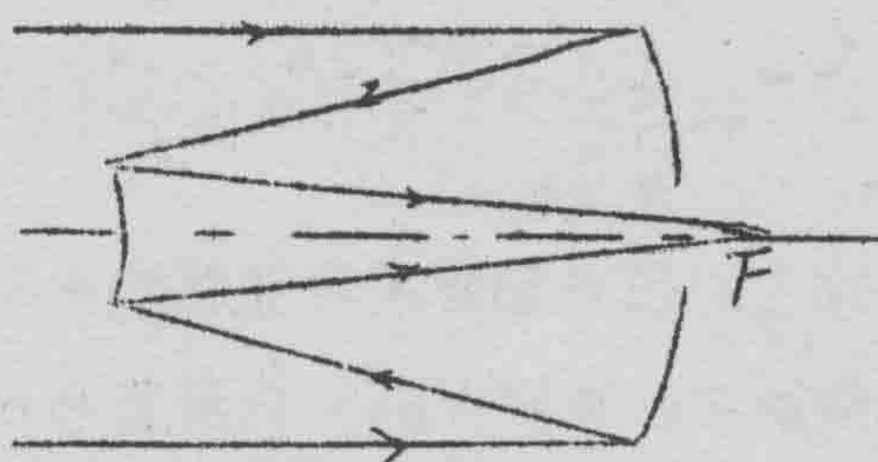


图 5

$$c = 1 / -16000 ,$$

$$A_2 = 2.6947049 \times 10^{-4} , A_4 = -2.5981400 \times 10^{-7} ,$$

$$A_3 = 2.2449287 \times 10^{-6} , A_5 = 1.1609594 \times 10^{-7} .$$

副镜形状：

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2 y^2}} + \left[B_2 \left(\frac{y}{h} \right)^4 + B_3 \left(\frac{y}{h} \right)^6 + B_4 \left(\frac{y}{h} \right)^8 + B_5 \left(\frac{y}{h} \right)^{10} \right] h .$$

$$c = 1 / -7650 ,$$

$$B_2 = 1.1388003 \times 10^{-2} , B_4 = -2.5927420 \times 10^{-3} ,$$

$$B_3 = -8.2256702 \times 10^{-4} , B_5 = 1.1178985 \times 10^{-2} .$$

例 4：计算一个抛物面主镜满足消球差和正弦条件的双反射板象场校正器的面形。

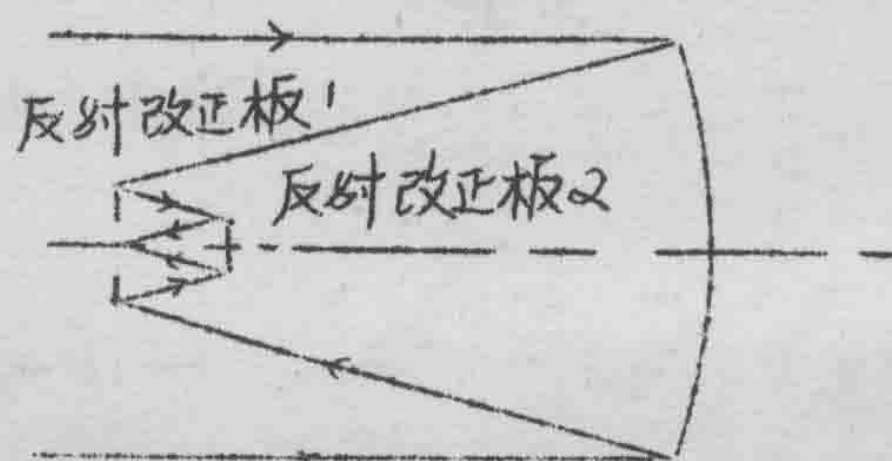


图 6

主镜口径 5250, 焦比 2 (系统焦比也极近于此值), 抛物面, $r = -21000$ 。间隔 d 为 -8500 和 1000 。两块反射板的初始形状取为平板, 以 $y_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2625 = 1856.1553$ 的

光线作为计算球差和 osc' 的基准光线, 即以此光线的象点作为计算球差的基准点, 以此光线的 $y_0/\sin U_0'$ 作为计算 osc' 的基准。

取 $h = 2625$, $k = 5$, 得

反射改正板 1 的形状:

$$x = \left[A_1 \left(\frac{y}{h} \right)^2 + A_2 \left(\frac{y}{h} \right)^4 + A_3 \left(\frac{y}{h} \right)^6 + A_4 \left(\frac{y}{h} \right)^8 + A_5 \left(\frac{y}{h} \right)^{10} \right] h.$$

$$A_1 = 2.5427306 \times 10^{-3}, \quad A_4 = 2.2303875 \times 10^{-1},$$

$$A_2 = -6.9971599 \times 10^{-2}, \quad A_5 = -2.8989147 \times 10^{-2},$$

$$A_3 = 3.1556020 \times 10^{-2},$$

反射改正板 2 的形状:

$$x = \left[B_1 \left(\frac{y}{h} \right)^2 + B_2 \left(\frac{y}{h} \right)^4 + B_3 \left(\frac{y}{h} \right)^6 + B_4 \left(\frac{y}{h} \right)^8 + B_5 \left(\frac{y}{h} \right)^{10} \right] h.$$

$$B_1 = 1.0249860 \times 10^{-2}, \quad B_4 = 2.6458487 \times 10^{-1},$$

$$B_2 = -1.1547902, \quad B_5 = -2.6195882 \times 10^3.$$

$$B_3 = 6.0559389,$$

上述两例在 TQ-16 计算机上的运算时间为几秒到十几秒。

4. 讨论

与(一)中的讨论相似, 更好的方法是计算比 k 根更多的光线, 用最小二乘法定出 i 面与 j 面的系数 $a_1, a_2, \dots, a_k$ 和 $b_1, b_2, \dots$