

# 两类折反射望远镜的研究\*

王兰娟

(中国科学院上海天文台)

苏定强

(中国科学院南京天文仪器厂)

## 提 要

本文研究了二类折反射望远镜。第一类是由一块非球面反射镜和分别放置在它的前面和焦点前的两块非球面薄板组成的。第二类是由一块球面反射镜和一块非球面弯月形透镜组成的, 这块弯月形透镜相当于一块球面的马克苏托夫(Maksutov)弯月形透镜加上一块施密特(Schmidt)非球面薄板。本文通过优化, 得到了这两类折反射望远镜的一系列较佳结构, 然后对大量的光线进行追迹, 从追迹的结果研究了其性能。文中列出了这两类望远镜的像质和点图。

## 一、本文研究的两类折反射望远镜

### 1. 第一类

在反射镜3的前面和它的焦点前, 分别放置两块非球面薄板(图1), 适当选择这两块薄板和反射镜形状的非球面四次幂项的系数, 就能同时消去三级的球差, 彗差和像散, 而适当选择更高次幂项的系数, 更能进一步减少高级像差。这样的系统是由布朗(Brown)首先发明的<sup>[1]</sup>, 本文详细地研究了它。

在这个系统中, 两块改正板的位置可以任意选定。小改正板2放得离焦点远一些, 一般可得到更好的像质, 但为了不使挡光过多, 它不能放得离焦点太远。随着大改正板1放的位置不同, 可得到各种结构。大改正板放在A位置是最佳结构, O位置是典型施密特系统, F位置是短筒结构。与典型施密特望远镜相比, 有的像质更好, 有的是镜筒短, 造价低, 有的可适合特殊用途。

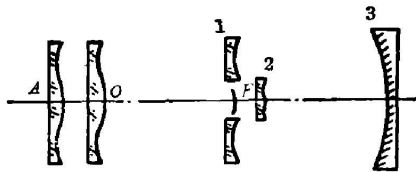


图1 第一类折反射望远镜

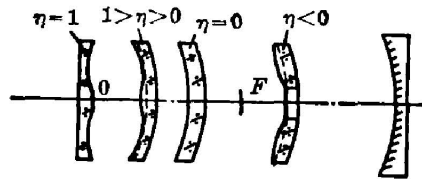


图2 第二类折反射望远镜

Fig. 1. The first type of catadioptric telescope

Fig. 2. The second type of catadioptric telescope

收稿日期: 1981年12月21日, 收到修改稿日期: 1982年5月12日

\* 本文曾于1981年8月31日在奥地利格拉茨举行的第12次国际光学会议(ICO-12 Conference)上宣读。

## 2. 第二类

将满足自消色差条件的球面弯月形透镜的两个面中的一个改成非球面, 用这样的透镜来作为改正透镜, 只要适当选择它到球面反射镜的距离, 就能使整个系统消去彗差 (图 2)。

定义  $\eta = \frac{a_1}{a}$ , 这里  $a$  是改正透镜总的三级角球差,  $a_1$  是薄的非球面部分所产生的三级角球差。若  $\eta = 0$ , 就是马克苏托夫望远镜。 $\eta = 1$ , 就是施密特望远镜。 $\eta$  可以取各种值, 也可以是负值。改正透镜到反射镜的距离和像质随  $\eta$  而变。这是由马克苏托夫望远镜和施密特望远镜推广而成的一族望远镜。

## 二、研究方法

先优化得到这些折反射望远镜的一系列典型结构, 然后追迹大量的空间光线来了解它们的性能。为了获得较佳结构, 本文编制了专门的非球面优化自动设计程序, 所用的评价函数和对球面系统的类似工作, 见文献 [3], [4]。

本工作中, 光学面的截面形状表示为:

$$x = \frac{c_0 y^2}{1 + \sqrt{1 - c_0^2 y^2}} + \left[ a \left( \frac{y}{h} \right)^2 + b \left( \frac{y}{h} \right)^4 + c \left( \frac{y}{h} \right)^6 + d \left( \frac{y}{h} \right)^8 \right] \times h,$$

其中  $h$  是一个适当选定的常量。优化时用 4047 Å 和 4861 Å 两种波长的光, 它们是等权的。每种光在半个入瞳上均匀取 14 根, 视角均匀取 4 个, 在每一视角处计算光线与像面的交点, 以各点离重心距离的平方和构成评价函数, 程序中会随时自动地选择最佳的弯曲像面。入瞳都取第一面顶点, 口径取为 1000。在第一类中, 大改正板厚度取 20, 小改正板厚度取 8, 它到焦点距离取  $0.12|f'|$ , 相对口径和视角取  $f/2, 12^\circ; f/3, 8^\circ; f/4, 6^\circ$  三种。在第二

表 1 第一类折反射望远镜  $f/4, 2W=6^\circ$  的象质

Table 1 Image qualities of the first type of catadioptric telescope  $f/4, 2W=6^\circ$

	$W$	0	$0.75^\circ$	$1.5^\circ$	$2.25^\circ$	$3^\circ$
典型的施密特望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.16(0.06)	0.17(0.06)	0.23(0.07)	0.32(0.08)	0.44(0.10)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.01(0.01)	0.02(0.00)	0.06(0.01)	0.15(0.02)	0.27(0.04)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.24(0.08)	0.24(0.08)	0.25(0.08)	0.28(0.07)	0.30(0.06)
	$l_1, l_2$	0, 0	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00
短筒结构望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.40(0.15)	0.54(0.17)	0.83(0.20)	1.0(0.24)	1.2(0.34)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.13(0.03)	0.33(0.08)	0.54(0.12)	0.67(0.13)	0.82(0.23)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.69(0.24)	0.75(0.24)	0.88(0.22)	0.99(0.19)	1.7(0.32)
	$l_1, l_2$	0, 0	-0.09, 0.11	-0.13, 0.17	-0.08, 0.11	0.09, -0.12
最佳结构望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.20(0.07)	0.20(0.07)	0.20(0.07)	0.21(0.07)	0.28(0.08)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.02(0.01)	0.04(0.01)	0.04(0.01)	0.06(0.02)	0.13(0.02)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.21(0.07)	0.21(0.07)	0.21(0.07)	0.20(0.07)	0.23(0.07)
	$l_1, l_2$	0, 0	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00

表 2 第一类折反射望远镜  $f/3$ ,  $2W=8^\circ$  的象质Table 2 Image qualities of the first type  
catadioptric telescope  $f/3$ ,  $2W=8^\circ$ 

	$W$	0	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$
典型的施密特 望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.29(0.11)	0.36(0.12)	0.59(0.15)	1.00(0.21)	1.5(0.29)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.11(0.03)	0.13(0.03)	0.19(0.03)	0.57(0.08)	1.1(0.17)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.63(0.23)	0.64(0.22)	0.70(0.20)	0.79(0.16)	0.91(0.15)
	$l_1, l_2$	0, 0	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00
短筒结构 望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.84(0.31)	1.8(0.46)	2.9(0.63)	3.6(0.76)	3.8(1.2)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.63(0.16)	1.4(0.37)	2.3(0.52)	2.8(0.55)	3.6(0.98)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	1.9(0.63)	2.5(0.68)	2.9(0.69)	3.2(0.59)	5.6(1.2)
	$l_1, l_2$	0, 0	-0.22, 0.29	-0.33, 0.44	-0.23, 0.31	0.18, -0.24
最佳结构 望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.45(0.15)	0.50(0.16)	0.52(0.17)	0.56(0.18)	0.85(0.20)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.04(0.01)	0.13(0.04)	0.15(0.05)	0.19(0.06)	0.49(0.08)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.51(0.18)	0.55(0.18)	0.52(0.18)	0.49(0.17)	0.63(0.16)
	$l_1, l_2$	0, 0	0.00, -0.01	0.01, -0.01	0.00, 0.00	-0.01, 0.01

表 3 第一类折反射望远镜  $f/2$ ,  $2W=12^\circ$  的象质Table 3 Image qualities of the first type  
catadioptric telescope  $f/2$ ,  $2W=12^\circ$ 

	$W$	0	$1.5^\circ$	$3^\circ$	$4.5^\circ$	$6^\circ$
典型的施密特 望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.52(0.20)	0.70(0.26)	2.3(0.50)	5.2(0.94)	9.2(1.6)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	1.2(0.37)	1.3(0.30)	1.7(0.25)	4.0(0.59)	8.0(1.2)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	2.7(1.0)	2.8(0.97)	3.2(0.80)	3.8(0.68)	6.6(0.96)
	$l_1, l_2$	0, 0	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00	0.00, 0.00
短筒结构 望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	2.4(0.82)	12(2.9)	19(4.2)	25(4.6)	26(7.8)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	5.1(1.4)	12(3.0)	17(4.1)	21(4.1)	29(7.5)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	8.7(2.7)	15(3.7)	18(4.4)	20(3.9)	36(7.7)
	$l_1, l_2$	0, 0	-1.0, 1.4	-1.7, 2.3	-1.7, 2.3	-0.68, 0.90
最佳结构 望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	1.4(0.49)	1.8(0.55)	1.8(0.62)	2.7(0.70)	4.7(0.98)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.06(0.02)	0.68(0.23)	1.0(0.33)	1.5(0.39)	3.5(0.59)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	1.8(0.66)	2.1(0.69)	1.8(0.71)	2.1(0.68)	2.8(0.65)
	$l_1, l_2$	0, 0	0.00, 0.00	0.00, 0.01	-0.01, 0.01	-0.01, 0.01

表 4 第二类折反射望远镜  $f/3$ ,  $2W=8^\circ$  的象质。Table 4 Image qualities of the second type catadioptric telescope  $f/3$ ,  $2W=8^\circ$ 

	$W$	0	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$
典型的马克苏托夫望远镜 $\eta=0$	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	3.4(0.85)	3.4(0.87)	3.5(0.98)	5.3(1.3)	8.1(1.8)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	3.0(0.77)	2.9(0.80)	3.4(0.93)	5.5(1.3)	8.2(1.8)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	2.3(0.81)	2.5(0.85)	3.5(0.99)	5.6(1.3)	8.4(1.9)
	$l_1, l_2$	0, 0	-0.39, 0.52	-0.78, 1.0	-1.2, 1.6	-1.6, 2.1
$\eta=0.69$ 的望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.46(0.16)	1.0(0.29)	2.4(0.66)	4.7(1.3)	8.0(2.2)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	0.60(0.18)	0.94(0.29)	2.1(0.65)	4.4(1.3)	7.7(2.2)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	1.3(0.30)	1.6(0.37)	2.6(0.68)	4.3(1.3)	7.3(2.2)
	$l_1, l_2$	0, 0	-0.31, 0.42	-0.63, 0.83	-0.94, 1.3	-1.3, 1.7
$\eta=-0.79$ 的望远镜	4047 Å 的 $d(\sigma_r)$	5.2(1.2)	5.8(1.3)	8.3(2.2)	14(4.3)	21(7.4)
	4341 Å 的 $d(\sigma_r)$	3.3(0.91)	3.9(1.0)	7.2(2.1)	13(4.3)	21(7.4)
	4861 Å 的 $d(\sigma_r)$	2.6(0.77)	2.7(0.94)	6.1(2.1)	12(4.3)	22(7.5)
	$l_1, l_2$	0, 0	-0.44, 0.58	-0.87, 1.2	-1.3, 1.7	-1.7, 2.3

类中, 弯月形透镜厚度取 100, 相对口径取  $f/3$ , 视角取  $8^\circ$ 。透射元件材料是 UBK<sub>7</sub>。

对优化所得结构, 追迹大量空间光, 归算得的像质列在表 1~4。表中括号外是像斑弥散的最大值  $d$ , 括号内是以像斑重心为基准点的像斑均方半径  $\sigma_r$ ,  $l_1$  和  $l_2$  为 4047 Å 和 4861 Å 的像斑重心相对于 4341 Å 的像斑重心的位移量。 $d$ ,  $\sigma_r$ ,  $l_1$  和  $l_2$  是在同一个弯曲像面上计量的, 这个弯曲像面是 4341 Å 的最佳弯曲像面。 $d$ ,  $\sigma_r$ ,  $l_1$  和  $l_2$  的单位都是角秒, 当光学系统按比例变化时, 这些量是不变的。

### 三、结 论

#### 1. 第一类折反射望远镜

(1) 典型的施密特望远镜: 当大改正板放在反射镜的顶点曲率中心附近, 没有小改正板。优化时的自变量为改正板的一个面上的  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  系数和改正板到反射镜的距离。得到的像质见表 1~3。需要指出, 传统的施密特望远镜的设计是: 改正板非球面顶点放在反射镜球心处, 以  $\sqrt{3}/2$  带为消球差基准带, 然后根据消球差的原则计算改正板非球面的形状。而本文的方法与此完全不同, 这里设计的施密特望远镜在像的大小和对称性方面, 都略优于传统方法设计的结果。

(2) 短筒结构: 本文计算的短筒结构是将大改正板放在焦点处。这时望远镜的筒长和反射镜与大改正板直径之差都仅是典型施密特望远镜的一半, 造价将显著降低。优化时的自变量为大、小改正板各一个面上的  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  系数和反射镜面上的  $b$ ,  $c$ ,  $d$  系数, 共 11 个自变量。得到的像质见表 1~3。轴外的单色像斑约为典型施密特望远镜的 3~4 倍, 色球差约为 2 倍。在天文观测中, 与大气宁静度和长露光中的各种误差相比, 像差造成 1~2'' 的

像斑是允许的，所以当焦比大于 4 时，这种短筒结构的望远镜能够取代典型的施密特望远镜。在许多情况下，更大的像差也是允许的，例如在较小的望远镜中，角分辨率被乳胶所限制，它往往要比 2'' 显著大，故此结构的望远镜能用到更小的焦比。图 3 是  $f/4, 2W=6^\circ$  的短筒结构望远镜的点图。

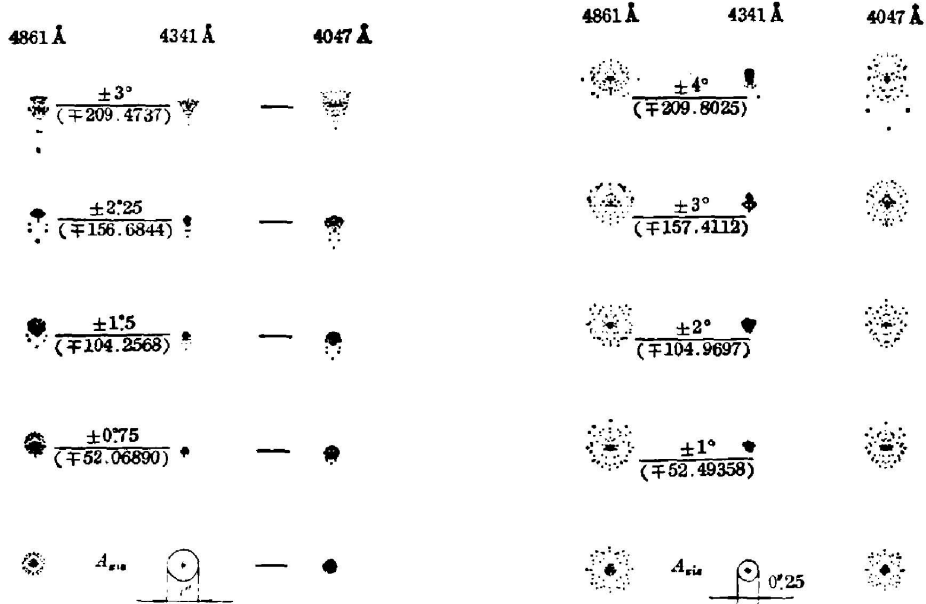


图 3 短筒折反射望远镜  $f/4, 2W=6^\circ$  点图  
Fig. 3 Spot diagrams of the short-tube catadioptric telescope  $f/4, 2W=6^\circ$

图 4 最佳结构折反射望远镜  $f/3, 2W=8^\circ$   
Fig. 4. Spot diagrams of the optimum construction catadioptric telescope  $f/3, 2W=8^\circ$

(3) 最佳结构: 取大、小改正板各一个面上的  $a, b, c, d$  系数, 反射镜面上的  $b, c, d$  系数, 反射镜面上的  $b, c, d$  系数和大改正板到反射镜的距离共 12 个变量作为优化时变量。从优化后得到的结构可以看到, 此时大改正板处在反射镜顶点曲率中心附近。在表 1~3 中可看到最佳结构的像质比典型施密特望远镜要平均化, 而轴外较远处的单色像斑仅约为典型施密特望远镜的一半。当需要较佳的像质时, 这样的系统是值得采用的。图 4 是  $f/3$  的最佳结构望远镜的点图。

在第一类折反射望远镜中, 如要减小色像差, 可将改正板做成消色差板。

### 2. 第二类折反射望远镜

优化了的  $f/3$ , 视角  $8^\circ$  图 4 的典型马克苏托夫望远镜  $\eta=0, \eta=0.69$ , 和  $\eta=-0.79$  三个例子。像质列在表 4, 与典型施密特望远镜相比, 像质要差得多。在第二类中, 存在着三级像散和横向色差(除  $\eta=1$  典型的施密特望远镜外), 改正透镜离反射镜越近即  $\eta$  越小, 这两种像质越大, 但对于有些工作, 像散和横向色差影响不大, 第二类折反射望远镜可适用于这方面的工作。此外, 第二类中的非球面弯月形透镜, 也可用在各种望远镜的像场改正器和其它光学系统中。

## 参 考 文 献

- [1] D. S. Brown; *Optical Instruments and Techniques* (J. H. Dickson, Oriel Press, 1969), 521.  
[2] D. S. Maksutov; *J. Opt. Soc. Am.*, 1944, **34**, 270.  
[3] 苏定强, 王亚男; *天文学报*, 1974, **15**, No. 1 (Apr), 51.  
[4] 苏定强, 俞新木等; *天文学报*, 1976, **17**, No. 1 (Jun), 9.

**The studies of two types of catadioptric telescope**

WANG LANJUAN

*(Shanghai Observatory, Academia Sinica)*

SU DINGQIANG

*(Nanjing Astronomical Instrument Factory, Academia Sinica)*

(Received 21 December 1981 revised 12 May 1982)

**Abstract**

This paper deals with two types of catadioptric telescope. The first type consists of an aspheric mirror and two thin aspheric correcting plates, which are located in front of the mirror and its focus respectively. The second type consists of a spherical mirror and an aspheric meniscus, which is an equivalent of a spherical Maksutov meniscus with a Schmidt thin aspheric plate. A series of excellent construction for these catadioptric telescopes have been obtained by optimization. Then great numbers of rays have been traced. The performances of these telescopes have been testified by the rays tracing results. The image qualities of these catadioptric telescopes are given in the tables and spot diagrams.

---

\* This paper was presented to ICO-12 (Graz/Austria) in August 1981.