

中国 2.16m 望远镜的主光路系统

苏定强 周必方

(中国科学院南京天文仪器厂)

俞新木

(浙江省金华县劳动人事局)

摘 要

本文介绍中国 2.16m 望远镜主光路系统的方案和设计结果。这架望远镜有 Cassegrain、折轴和主焦点三个工作焦点, Cassegrain 系统采用的是 R-C 系统, 焦点和主焦点分别配有由两片透镜和三片透镜组成的改正器。光学系统最大的特点是折轴系统和 Cassegrain 系统共用同一个付镜, 折轴系统中加有一个中继镜, 转换时副镜作小量移动, 所得的折轴系统是同时消球差和消彗差的。本文也介绍了我们提出的一些其它折轴方案和一个缩焦器安置方案。

关键词: 天文仪器, 天文光学, 望远镜, 光学设计

我国自行研制的国内最大的 2.16m 望远镜, 在中国科学院南京天文仪器厂经过了总装和初步试观测, 1988 年秋已出厂运至北京天文台兴隆观测站。本文介绍这架望远镜的主光路系统(图 1), 主镜通光口径为 2.16m, 焦比为 3, 设有 Cassegrain、折轴和主焦点三个工作焦点, 前两个作为第一期工程, 主焦点作为第二期工程。望远镜为英国式赤道装置。

一、Cassegrain 系统

根据使用要求, 这是最重要的工作焦点, 采用了 Ritchey-Chrétien (R-C) 系统, 焦比为 9, 有不加和加改正器两种工作方式。

1. 不加改正器情形

R-C 系统的严格定义是对一切高度的光线消球差和满足正弦条件, 主、副镜的截面形状是复杂的曲线^[1], 对于实际的天文望远镜, 常近似地取为圆锥曲线, 上述条件近似地取为消去三级球差和彗差, 由三级球差和彗差系数 $S_I = 0$, $S_{II} = 0$, 可推得

$$\left\{ \begin{aligned} e_A^2 &= 1 + \frac{2\left(1 + \frac{mb}{f}\right)}{m^2\left(1 - \frac{b}{f}\right)}, \\ e_B^2 &= \frac{(m+1)\left[m^2\left(1 - \frac{b}{f}\right) + 1 + \frac{b}{f}\right]}{(m-1)^2\left(1 - \frac{b}{f}\right)}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} S_{III} &= \frac{2m+1 + \frac{b}{f}}{2\left(1 + \frac{mb}{f}\right)}, \\ S_{IV} &= \frac{m^2\left(1 - \frac{b}{f}\right) - m - 1}{1 + \frac{mb}{f}}, \end{aligned} \right. \quad (2)^a$$

式中 e^2 为偏心率的平方, 即负的圆锥常数值 ($-cc$), 下标 A, B 分别代表主镜和副镜, f 为系统焦距, m 为副镜放大率(本文中规定 Cassegrain 系统的 f 和 m 都为正), b 为主镜顶点到 Cassegrain 焦点的位移, 焦点在外为正, S_{III}, S_{IV} 为三级象散和场曲系数. 在 Gauss 平面上, 轴外象斑呈椭圆形, 其对称轴沿子午和弧矢方向, 这两个方向的直径分别记为 θ_1 和 θ_2 , 有

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_1 &= |3S_{III} + S_{IV}| \frac{\omega^2}{2F}, \\ \theta_2 &= |S_{III} + S_{IV}| \frac{\omega^2}{2F}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中 ω 为视角, F 为焦比, θ_1, θ_2 和 ω 都以弧度为单位. 若采用最佳焦面(与最小弥散圆位置一致的焦面), 则轴外象斑呈圆形, 其直径记为 θ , 有

$$\theta = |S_{III}| \frac{\omega^2}{2F}, \quad (4)$$

θ 也以弧度为单位, 最佳焦面的曲率半径 R 为

$$R = -\frac{f}{2S_{III} + S_{IV}}. \quad (5)$$

对 2.16m 望远镜, $f = 19440\text{mm}$, $F = 9$, $m = 3$, $b = 1250\text{mm}$, 得 $e_A^2 = 1.0944353$, $e_B^2 = 5.0687191$, $S_{III} = 2.961$, $S_{IV} = 3.706$, $\theta_1 = 0.6994\omega^2$, $\theta_2 = 0.3704\omega^2$, 长径沿子午方向, $\theta = 0.1645\omega^2$, $R = -2019\text{mm}$, 最佳焦面凹向副镜. 若要求象斑小于 $0''.5$, 采用平焦面, 最大视场 $2\omega = 18'.1$ (焦平面已平移到使视场中心和边缘象斑都为 $0''.5$), 采用最佳焦面, 最大视场 $2\omega = 26'.4$, 若要求更大的视场, 应加入改正器. 以上的讨论仅考虑到三级象差, 但空间光线追迹表明, 两者是高度符合的, 所以这里不再列出空间光线追迹所得的点图.

虽然仅考虑三级象差已够了, 但在 2.16m 的设计中, 为了得到更好的结果, 我们是这样设

1) 按本文公式求得的三级象差系数值与焦距=1, 第一辅助光高度=1, 第二辅助光倾角=1规定下求得的象差系数值相同, 公式(3)~(5)中的象差系数应是这种值, 表3中给出的象差系数也是这种值.

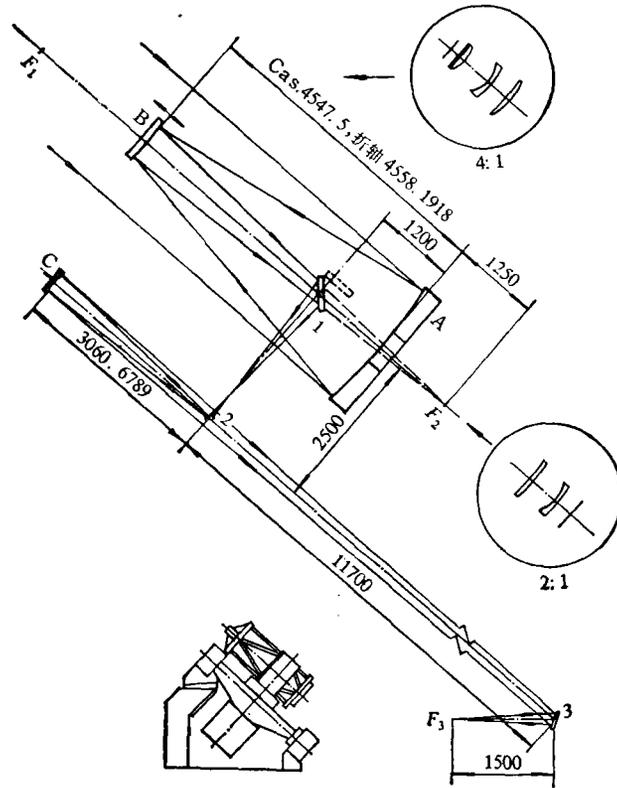


图 1 2.16m 望远镜的主光路系统

(A——主镜, 通光口径为 2160, B——副镜, 通光口径为 717, C——折轴中继镜, 通光口径为 401; 1, 2, 3——平面镜, 通光口径分别是: 1— $2a$ 为 400, $2b$ 为 283, 2— $2a$ 为 65, $2b$ 为 46, 3— $2a$ 为 168, $2b$ 为 158, F_1 ——主焦点, F_2 ——Cassegrain 焦点, F_3 ——折轴焦点; 长度以 mm 为单位)

计的: 镜面仍取为圆锥曲面, 以 e_A^1 和 e_B^2 为变量, 根据边缘光与傍轴光消球差和视角 $\omega = 10^\circ$ 处消彗差两个条件, 得 $e_A^1 = 1.0951347$, $e_B^2 = 5.0775260$, 这样的解比 $S_I = 0, S_{II} = 0$ 解更好, 但两者差别很小; 这样的系统它的象差和最佳焦面半径仍可足够好地用 (2)–(5) 式来描述, $\theta_1, \theta_2, \theta$, 和 R 的数值当然也和前面的几乎一样。表 1 列出了 Cassegrain 系统 (R-C 系统) 的结构。

表 1 2.16m 望远镜 Cassegrain 系统 (R-C 系统) 的结构
(焦比为 9, 长度以 mm 为单位)

半径 r	e^2	间隔 d
-12960	1.0951347	-4547.5
-5797.5	5.0775260	5797.5 (至焦平面)

2. 加改正器的情形

作照相观测时要求在直径 300mm (角直径 $53'$) 中获得优秀的象质, 必须加改正器, 当

时, 我们和上海天文台 1.56m 望远镜的光学设计师王兰娟、叶稚凤合作, 以一个口径 1m 的 Cassegrain 望远镜为例, 设计了 20 多个球面透镜改正器^[2], 所用的方法见文献[3]. 初始结构一律取为平板, 其中双镜系统有的是 R-C 系统, 有的是类 R-C 系统, 改正器有的由两片透镜, 有的由三片透镜组成, 有的用同种材料, 有的用不同材料, 有的消畸变, 有的不消畸变, 有的视场为 1°, 有的为 0°5'. 虽然这是一个 1m 望远镜, 但只要结构成比例, 以角秒表示的象差值不变, 这项工作对 2.16m 望远镜采用怎样的双镜系统和改正器, 起了重要的作用, 正是由于我们设计的由两片熔石英球面透镜组成的改正器, 在 R-C 的情况下, 象质即已十分满意, 最后决定采用 R-C 系统和这样的改正器. 表 2 列出了改正器的结构, 因 2.16m 与文献[2]中的 1m 望远镜比例略有差别, 这里的结构是针对 2.16m 的情况设计的. 图 2 是它的点图, 视

表 2 2.16m 望远镜 Cassegrain 焦点改正器的结构
(主、副镜结构见表 1, 焦比 9.0038, 视场直径 53', 全部球面, 长度以 mm 为单位)

r	d	介质	通光口径
-6726.2918	5423.7887 (副镜至改正器)	空气	326
-1661.3083	30	熔石英	
-627.0527	196.433	空气	301
-1864.7269	18	熔石英	
	130.9753 (至焦平面)	空气	302.3 (视场线直径)

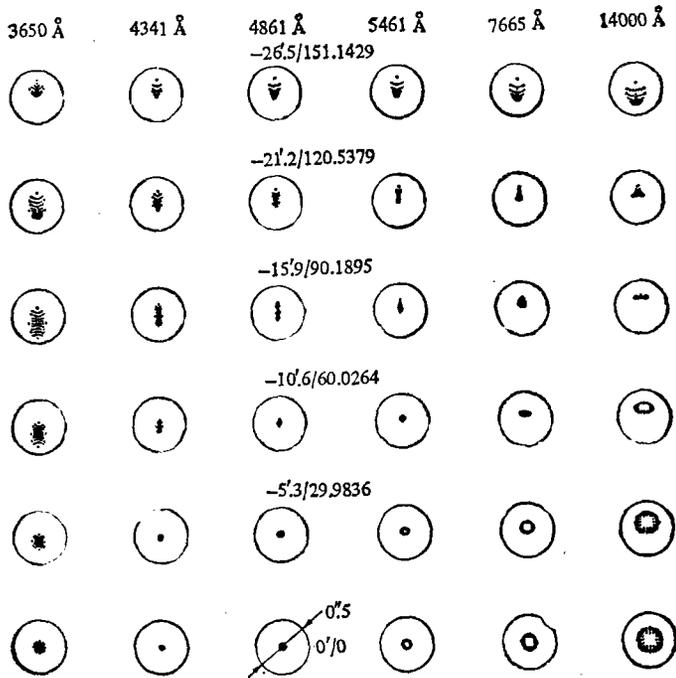


图 2 2.16m 望远镜 R-C 系统改正器的点图

场直径 53', 在同一个固定的象平面上, 波段 3650—14000 Å, 象斑总的弥散小于 0''32。这个设计虽然是 1974 年作的, 但直到今天除文献[4]中的工作外, 我们还未看到类似条件下国内外象质比这更好的结果。

二、折轴系统

传统的望远镜, Cassegrain 和折轴系统用不同的副镜, 转换时需要更换, 这不仅增加了机械结构的复杂性, 也往往降低了光学系统准直的精度, 有些机构, 转换时还要化去不少时间。为了使 Cassegrain 和折轴系统间的转换更简单、更精确和更快, 早在 60 年代, 我们就已产生了 Cassegrain 和折轴系统公用同一个副镜的想法和一些其他想法。在 1966 年举行的 2.16m 望远镜上海会议上, 我们提出了一系列新的折轴系统方案, 其中代表性的几个例在图 3(a)一(f)中: (a) 利用一组较大的透镜, (b) 利用一个小的倒 Cassegrain 系统, (c) 利用两组小透镜¹⁾, (d) 将平面镜 1 改为偏轴双曲面镜, 由这些元件使象成到折轴焦点, (e) 平移副镜, 使象成到折轴焦点, 引入的球差靠加入一改正板或将两块平面镜之一改为非球面来消除。上

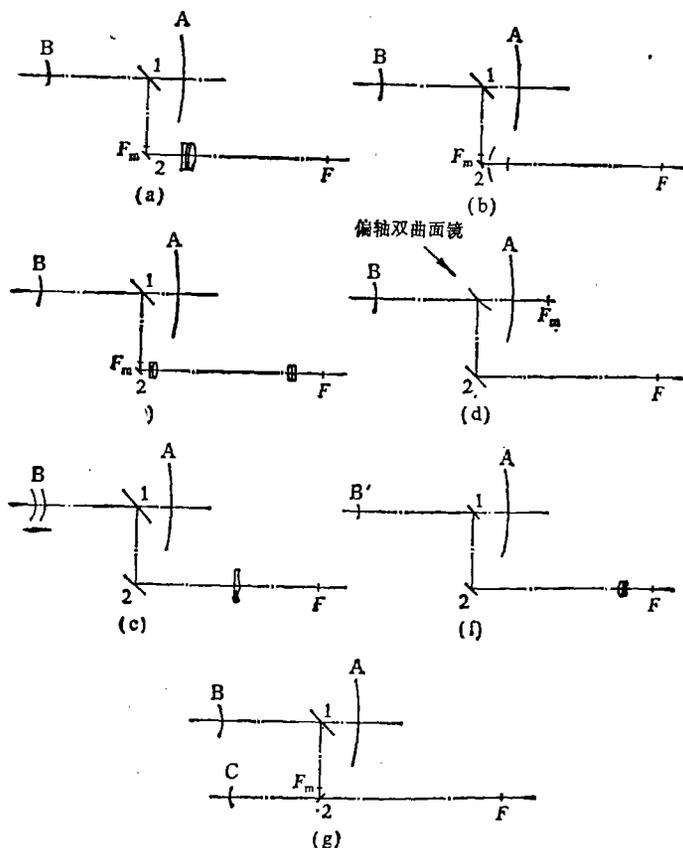


图 3 各种新折轴系统方案

(A——主镜, B——副镜, 1, 2——平面镜, F_m ——中间焦点, F ——折轴焦点)

1) 当时, 紫金山天文台杨世杰也曾有过这种想法。

述五种方案 Cassegrain 与折轴系统都公用同一个副镜, (f) Cassegrain 与折轴用不同的副镜, 但折轴副镜是一个小抛物面镜, 在折轴焦点前再加入一组小透镜或一个小 Cassegrain 系统。以上这些方案的优点是: 转换时能保持更好的准直, 结构简单, 转换快, 大镜面减少。缺点是: 或由于光学元件增多光量损失增加, 或有折射元件波段受限制和有色差, 或加工难度较大, 或视场太小, 或数点兼有之。后来, 我们见到 Richardson 也提出过与图 3(f) 相似的折轴系统^[5], 1979 年作者之一访问日本时得知当时日本正在建造的 45m 毫米波望远镜的折轴系统与图 3(d) 相似也用了偏轴圆锥曲面镜。

1972 年, 2.16m 望远镜设计正式开始, 我们又想出了图 3(g) 这个方案, 它全部由反射镜组成, 仅增加了一个镜 C, 平面镜 2 很小, 各镜面加工都没有困难, 光学系统能保持很好的准直, 决定采用这个方案。最初, 这个系统转换时副镜是不动的, 镜 C 是一个椭球面镜, 1973 年底, 主镜到 Cassegrain 焦点的距离 b 和平面镜 1 到主镜的距离有一些改动, 为了保持折轴的焦比不变, 将镜 C 移动了一个位置, 但机械设计师希望最好不变。于是我们就改让副镜沿光轴平移一个位置, 只要改变 e_2^2 值, 系统仍是可以消球差的, 但计算结果却使我们发现, 这时系统的彗差系数 S_{II} 值和 e_2^2 值都改变了符号, 这给我们一个重要的启示: 只要镜 C 的位置允许变动, 转换时副镜作适当的移动, 所得的系统可以是消彗差的, 或者镜 C 可以是球面镜¹⁾。起初, 赤纬轴与极轴交点到折轴交点的距离定为 7.5m, 折轴焦比定为 30, 折轴摄谱仪沿极轴斜放, 最后, 1975 年折轴摄谱仪改为在望远镜的下一层水平放置, 7.5m 改成 13.2m, 为使镜 C 不太大, 折轴焦比改成了 45, 而此时机械设计师对镜 C 的位置已没有限制。表 3 列出了按焦比 45 和 13.2m 设计的副镜不动、镜 C 为球面和消彗差三种折轴系统的结构, 同时列出了各个结构的三级象差系数值, 这三种结构各有特色。对 2.16m 望远镜, 我们选用了消彗差的结构, 这时镜 C 是一个扁球面镜, 这样的折轴系统其象差与 R-C 系统相似。(3)–(5)式仍适用, 将 $S_{III} = 28.29$, $S_{IV} = -17.66$ 代入得 $\theta_1 = 0.7468\omega^2$, $\theta_2 = 0.1181\omega^2$, 椭圆象斑的长径沿子午方向,

表 3 三种折轴系统的结构
(主、副镜结构除 d 外见表 1*, 焦比 45, 长度以 mm 为单位)

结构	主镜至副镜 d_1	副镜移动量	副镜至镜 C d_2	镜 C 至折轴焦点	r_c
1. 副镜不动	-4547.5	0	9085	-16437.5	-5479.1665
2. 镜 C 为球面	-4554.1950	-6.6950	8980.4397	-16326.2447	-5410.8391
3. 消彗差	-4558.1918	-10.6918	8918.8707	-16260.6789	-5370.7028

e_2^2	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
0.44444444	0.06649**	-12.10	9.587	-16.95	19.60
0	0.008531**	-4.522	21.37	-17.40	39.82
-0.2585	-0.01993**	-0.04728**	28.29	-17.66	51.67

* 平面镜 1, 2, 3 的位置与象差无关, 表中未列出。图 1 列出了结构 3 所有镜面以及它们与轴系间的相互尺寸, 参照本表和图 1 (注意 1250, 1200, 2500, 11700, 1500 各尺寸是不变的) 即可将另外两个结构的有关尺寸定出。

** 因为采用的边缘光和傍轴光消球差、视场边缘消彗差, 所以这些三级象差系数值不严格为零。

1) 当时, 我们很快就意识到, 副镜移动是关键, 镜 C 的位置不变, 若焦比改变一些, 消彗差或镜 C 是球面镜这些结果同样可得到。

$\theta = 0.3143w^2$, 折轴系统要求的视场直径 $2w = 5'$, 在 Gauss 平面上, 视场边缘象斑的长径 $\theta_1 = 0''08146$, 短径 $\theta_2 = 0''01288$. 在最佳焦面上, 视场边缘圆象斑的直径 $\theta = 0''03428$, 由(5)式得最佳焦面半径 $|R| = 2497\text{mm}$, 但最佳焦面凹向镜 C. 空间光线追迹的结果与这里按三级象差理论所得的结果符合得很好, 故不再列出点图.

如果 2.16m 望远镜按传统的更换副镜的方法来构成折轴系统, 那么要增加一块通光口径 445mm 的副镜, 平面镜 1 的通光区应为 $2a = 543\text{mm}$, $2b = 384\text{mm}$, 平面镜 2 为 $2a = 488\text{mm}$, $2b = 345\text{mm}$, 平面镜 3 为 $2a = 175\text{mm}$, $2b = 164\text{mm}$. 在 Gauss 平面上, 视场直径 $5'$ 的边缘, 象斑达 $0''61$, 且主要为彗差. 在我们的光学系统中, Cassegrain 与折轴系统公用同一个副镜, 只要转动平面镜 1 和副镜平移约 10mm, 即可实现两个系统的转换. 图 1 列出了平面镜 1, 2, 3 的通光区尺寸, 平面镜 1, 尤其是 2, 比传统方案小多了, 从象质来讲, 不仅 Cassegrain 系统是消球差、消彗差的 R-C 系统, 折轴系统也是消球差、消彗差的, 与传统方案相比唯一的缺点是折轴光路中多了一个反射镜. Richardson 在与图 3(f) 相似的折轴系统中^[5], 对每一个小镜面都备有数块, 对不同波段镀以高反射膜换用, 这点我们可以参照他的办法, 至少对平面镜 2 和 3 是极易做到的, 这样增加一个镜面引起的光损失可减到仅 2% 左右. 此外, 由于平面镜 2 很小, 也可以改用数个对不同波段镀有高增透膜的全反射棱镜. 另一方面, 与传统方案相比, 由于副镜笼结构的简化和平面镜 1 的减小, 它们引起的挡光也减少了(这种挡光还影响到 Cassegrain 系统, 甚至主焦点系统), 综合这些因素, 总的说, 我们的光学系统与传统的相比几乎不增加光量损失. 顺便指出, 传统的折轴系统, 由于光路过粗很难封闭, 而我们的系统如果需要, 可在中间焦点附近和极轴出口处各放置一块玻璃窗, 将轴系中的光路封闭起来, 内部充氦或抽真空, 这样改善轴内部的大气扰动也许是有意义的. 最后, 需要指出, 图 3 中的各种折轴方案不仅可用于英国式赤道装置, 原则上, 也可用于叉式、马蹄式、德国式赤道装置和地平式、水平式装置.

三、主焦点系统

2.16m 望远镜主镜是双曲面镜, 主焦点即使只用轴上点, 也要加改正器, 我们采用三片透

表 4 2.16m 望远镜主焦点改正器(4047—4861 Å)的结构
(主镜参数见表 1, 焦比 3.1473, 视场直径 $50'$, 全部球面, 长度以 mm 为单位)

半径 r	间隔 d	介质	通光口径
	-6230.5551 (主镜至改正器)	空气	
-365.7518	-13.7650	UBK7	173
-1939.1167	-62.5766	空气	
-456.7037	-4	UBK7	136
-117.8993	-115.4558	空气	
-180.6612	-15.7680	UBK7	123
-1581.0420	0		
∞	-4	UBK7	122
∞	-50.3443	空气	101.7
	(至焦平面)		(视场线直径)

镜组成的改正器, 参考 Wynne 为美国 Kitt Peak 天文台 3.81m(150 英寸) 望远镜设计的三片型改正器^[6], 视场直径定为 $2\omega = 50'$, 在 4047—10140 Å 波段范围设计三个改正器:



图 4 2.16m 望远镜主焦点改正器的点图

4047—4861 Å, 4861—6563 Å, 6563—10140 Å, 互换进行工作。这些改正器是月光学自动设计方法在电子计算机上进行设计的, 基本方法见文献[3], 改正器各面都是球面, 自变量共 9 个: 三片透镜的 6 个曲率半径和 3 个位置, 初始结构取为三块平板。在优化中我们发现, 如果控制叠代步长的条件取得不同, 将会收敛到两个不同的极值, 当然我们选用的是评价函数更小的那个, 表 4 列出了我们设计的三个改正器中 4047—4861 Å 改正器的结构。考虑到滤光片和探测器的窗, 改正器中包括了一块 4mm 厚的玻璃平板, 图 4 是它的点图, 视场直径 50', 在同一个固定的象平面上, 波段 4047—4861 Å, 象斑总的弥散小于 $0''.82^D$, 达到了优秀的结果。由于象质很好, 实际上 4047—10140 Å 整个波段, 只要用两个改正器就可以了。

四、一个特殊的缩焦器安置方案

一个视场较大、象质好的缩焦器, 需要占有一段很长的长度, 当然也会有很大的重量。对于一般望远镜, 这是一个很大的困难。然而在 2.16m 望远镜上, 极轴轴线到平衡重的外端长约 3.3m, 而很重的重量放在这里正好代替了平衡重的一部份重量。根据这些特点, 1975 年, 我们提出在平衡重处安置一个大缩焦器(图 5), 只要转动平面镜 1(它的尺寸要加大一些), 即可实现它与 Cassegrain 系统的转换, 只要放上或移开平面镜 2 和平移场透镜, 即可实现它与折轴焦点的转换, 若更换最后的照相机, 并可得到不同的焦比, 这样的缩焦器视场可达 $40'—1^\circ$ 。可惜, 由于某些原因, 这个方案在 2.16m 上未被采用, 这里仍将它发表出来, 以供今后参考。

五、2.16m 望远镜有关工作的发展

2.16m 望远镜主光路的设计完成于 70 年代中期, 自那时以来, 我们和同事们又继续做了许多有关的工作。徐钦贵设计了偏置导星光学系统, 周必方用象差理论和优化相结合, 设计了抛物面主镜的主焦点球面改正器^[7], 羿美良设计了各种 Cassegrain 系统的非球面板改正器^[8], 邵联贞设计了主焦点非球面板改正器^[9], 邵联贞和苏定强用移动方法, 使同一套非球面板改正

1) 这个改正器当时是按 BK7 设计的, 而点图是按 UBK7 计算的, 两者的折射率略有不同, 如果优化时用的是 UBK7 的折射率, 那末点图形状仍与图 4 相似, 但略小一点, 象斑总的弥散最大约 $0''.80$ 。

器能用于极宽的波段,但每次用其中的一段^[10],邵和苏还发现,如果放弃平场条件,这样的改正器用于焦比 3 的主焦点,视场可达 1.2—1.5°,但这些非球面板加工是相当困难的,且尺寸比本文中的主焦点改正器约大一倍。苏定强和梁明提出并设计了一类新的能同时校正象差和大气色散的改正器^[11-13],羿美良和苏定强设计出了象质比本文中更好的 Cassegrain 焦点球面改正器^[4]。2.16m 望远镜的折轴系统,曾多次受到国外天文学家和光学家的好评和引用^[14-18],Meinel 夫妇把这种折轴系统中的镜 C 命名为苏俞周中继镜(SYZ relay mirror),并把这种中继镜推广用到 Nasmyth 系统中。接着,我们也应用了具有中继镜的 Nasmyth 系统和移动副镜方法,提出了一个 5m 望远镜的方案^[19]。苏定强、王亚男并和 Meinel 夫妇合作,为美国 Texas 大学 7.6m 望远镜提出了一个方案^[20],其中也用了具有中继镜的 Nasmyth 系统和移动副镜方法。另一方面,我们和同事们,又将 2.16m 设计中发现的移动副镜方法推广为移动各种元件来改善象质,用于许多光学系统的设计和研究中^[4,8,10,19-22]。2.16m 的改正器是用王亚男和我们建立的光学自动设计程序设计的,初始结构都是平板,改正器的优秀的象质,是程序功能的有力证明。最后需要提到的是,1974 年,我们还特地编了一个计算非共轴光学系统点图和由它构成的评价函数的程序,用它计算了 2.16m 光学系统的允差,自那时以来,我们和同事们已用这个程序计算了许多光学系统的允差和对一些非共轴系统作了研究。

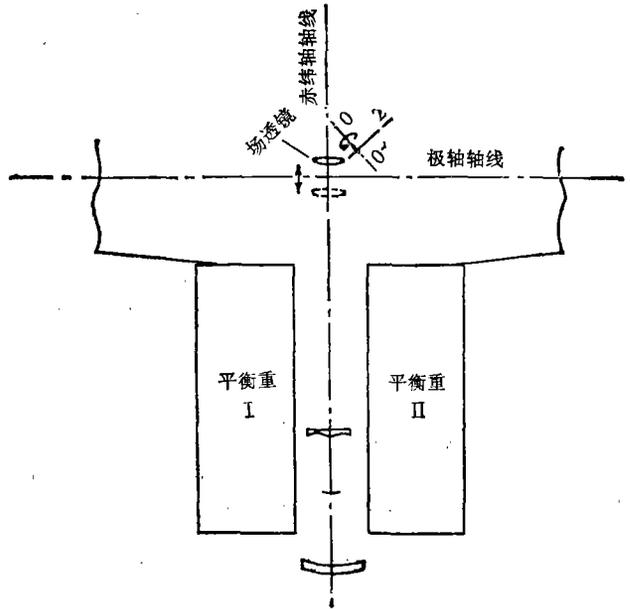


图 5 为 2.16m 望远镜考虑的一个特殊的缩焦器安置方案
(绕 0° 转动,可更换镀有不同高反膜的平面镜 2,也可为
场透镜让出一个空间)

2.16m 望远镜的光学工作,自始至终得到我国已故著名光学家龚祖同教授的关怀与鼓励,谨附此以志纪念。2.16m 的折轴方案得到了郭乃坚、陈录顺先生的热情支持,在此向他们表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Chrétien, H., *Rev. Opt.*, 1(1922), 49.
- [2] 苏定强等, *天文学报*, 17(1976), 9.
- [3] 苏定强、王亚男, *天文学报*, 15(1974), 51.
- [4] 羿美良、苏定强, *天文学报*, 27(1986), 80.
- [5] Richardson, E. H., *Proceedings of ESO/CERN Conference on Large Telescope Design*(Ed. West, R. M), 1971, 179.

- [6] Wynne, C. G., *Ap. J.*, **152**(1968), 675.
- [7] 周必方, *天文学报*, **20**(1979), 308.
- [8] 羿美良, *天文学报*, **23**(1982), 398.
- [9] Shao Lianzhen, *Astron. Astrophys.*, **141**(1984), 401.
- [10] Shao Lianzhen & Su Dingqiang, *Optica Acta*, **30**(1983), 1267.
- [11] Su Dingqiang, *Astron. Astrophys.*, **156**(1986), 381.
- [12] Su Dingqiang & Liang Ming, *Proceedings of SPIE Conference on Advanced Technology Optical Telescopes III* (Ed. Barr, L. D.), **628**(1986), 479.
- [13] Liang Ming and Su Dingqiang, *Proceedings of ESO Conference on very large Telescopes and their Instrumentation*(Ed. Ulrich, M. H.), 1988, 237.
- [14] Goldberg, L., *Sky and Telescope*, **56**(1978), 383.
- [15] Meinel, A. B. et al., *Appl. Opt.*, **19**(1980), 2670.
- [16] Meinel, A. B. & Meinel, M. P., *Appl. Opt.*, **19**(1980), 2683.
- [17] Meinel, A. B. & Meinel, M. P., *Current Trends in Optics* (Invited Papers from the ICO-12 Meeting, Graz, Austria, 1981) (Eds. Arecchi, F. T. and Aussenegg, F. R.), published by Taylor & Francis Ltd, 1981, 40.
- [18] Richardson, E. H. & Morbey, C. L., *Proceedings of SPIE Conference on Adaptive Optics* (Ed. Ludman, J. E.), **551**(1985), 26.
- [19] Su Dingqiang, Shao Lianzhen & Liang Ming, *Optica Acta*, **29**(1982), 1237.
- [20] Meinel, A. B., Meinel, M. P. & Su Dingqiang, *Appl. Opt.*, **23**(1984), 2469.
- [21] Su Dingqiang & Wang Lanjuan, *Optica Acta*, **29**(1982), 391.
- [22] 苏定强、羿美良, *天体物理学报*, **5**(1985), 158.