

天文望远镜光学的研究

(The Astronomical Telescope
Optics, Researches of)

中国科学院南京天文仪器研制中心和上海天文台的苏定强、王亚男、羿美良、王兰娟、周必方完成的一项研究工作。获1993年国家自然科学奖二等奖。主要内容如下：

1. 大望远镜的光学系统研究

新的折轴系统 在传统的望远镜中，折轴系统和卡塞格林系统用不同的副镜，系统转换时，需要更换副镜，增加了机械结构的复杂性，降低了光学系统准直的精度，使像质变坏。早在60年代，苏定强等就有使折轴系统和卡塞格林系统共用一个副镜的想法，在1966年举行的2.16 m望远镜上海会议上，提出了一系列新的折轴系统。1972年又提出了一个只增加一块中继镜全部由反射镜组成的折轴系统，并且发现只要将卡塞格林系统的副镜作小量平移并将中继镜取为适当的扁球面，获得的折轴系统能同时消去球差和彗差。当时正在设计的中国2.16m望远镜中就采用了这样的折轴系统(副镜移动10.69 mm，中继镜为 $e^2 = -0.2585$ 的扁球面)，此

系统的像质比传统的折轴系统提高了7.5倍,像斑小而且对称。这样的折轴系统可用于各种装置的大望远镜,且由于中继镜可将主镜成实像,适于在那里放置自适应光学的变形镜。著名的美国天文学家迈奈尔(Meinel)将这种系统中的中继镜称为SYZ(苏定强、俞新木、周必方)中继镜,并在他提出的大望远镜方案中都采用了类似的系统和SYZ中继镜。正在研制中的世界最大的望远镜——欧洲南天天文台的VLT中也采用了共用副镜的方案和这样的折轴系统。

新的“主焦点”系统和新的Nasmyth系统 1981年,提出了一个5m望远镜的光学系统方案,整个望远镜各系统共用一个副镜,对各系统将副镜平移到不同位置(最大的平移量仅52.5725mm)。其中提出了一种新的“主焦点”系统和新的Nasmyth系统。这个新的“主焦点”系统全部由反射镜组成,像质比一般的主焦点系统好,完全没有色差,有更宽的工作波段。新的Nasmyth系统可同时消去球差和彗差。

施密特望远镜的研究 施密特望远镜是最主要的大视场望远镜。我们用波像差方法研究了施密特望远镜和消色差施密特望远镜的色球差、残余色球差、轴外像差、最佳像面、轴外像差的色差、中性带高度的选择和失调状态的像差,导出了计算这些像差的全部公式,如施密特望远镜最佳像面上的像差为

$$\begin{cases} \delta'_{\kappa} = \frac{yf}{192r} \left[7 \left(\frac{y}{r} \right)^2 + 4 \left(\frac{z}{r} \right)^2 - \frac{41}{8} \right] \frac{\omega^2}{F^3} \\ \delta'_{\sigma} = \frac{zf}{192r} \left[4 \left(\frac{y}{r} \right)^2 + \left(\frac{z}{r} \right)^2 - \frac{23}{8} \right] \frac{\omega^2}{F^3} \end{cases} \quad (1)$$

上式中, y, z 为光线与入瞳交点的坐标, r 为通光半口径, f 为焦距, F 为焦比, ω 为视角。前两项为五级像差,第三项是三级像差。由

上式可得轴外像差最大弥散斑的角直径为

$$\Phi = \frac{5\omega^2}{256F^3} \quad (2)$$

最佳像面为通过视场中心焦点 S_0 的球面,球心在球面镜球心之内,半径为

$$R_1 = OS_0 \left(1 - \frac{17}{384F^2} \right) \quad (3)$$

OS_0 为球面镜球心到视场中心焦点间的距离。

证明了轴外像差的色差远小于单色轴外像差,(1)~(3)式对改正板折射率 n 在1.35~1.65间的各种施密特望远镜都适用。

导出了计算消色差施密特望远镜的残余色球差和轴外像差的公式。残余色球差为

$$\Phi_{cc} = \frac{1}{128F^3} \left| \frac{P_a - P_b}{v_a v_b} \right| \quad (4)$$

式中 $v = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1}$, $P = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1}$ 。

轴外像差等于改正板的折射率为 $n = \frac{n_a n_b (v_a - v_b)}{n_b v_a - n_a v_b}$ 时的不消色差施密特望远镜的轴外像差,所以(1)~(3)式对消色差施密特望远镜的轴外像差同样适用。

导出了各种失调状态下像差和像位移的计算公式,发现改正板的各自由度引起的像差和像位移都不大。1986年,为中国准备建造世界最大折射施密特望远镜的计划提出了将改正板放在观测室天窗上的设想,以克服施密特望远镜筒长这一主要缺点,并进一步提出对改正板采取主动光学校正,以获得更好的准直和更好的像质。

非共轴双镜系统和红外摆动副镜的研究

研究了非共轴双镜系统,导出了在副镜偏心 and 偏角同时存在且不限于它们与主镜光轴共面的普遍情况下非共轴彗差的表达式和包括共轴彗差在内的实际像差表达式,并讨论了其应用。特别对红外摆动副镜进行了研究,提出了评价副镜运动方案的4个指标:出瞳在探测器上的摆动量、主镜上通光区域的相

对摆动量、彗差和运动难度。并对常用的几种方案作了讨论。

2. 像场改正器

早期的工作 60 年代,用像差理论讨论了如何在各类反射望远镜中加入像场改正器同时消去球差、彗差、像散和场曲的问题,给出了像场改正器初始结构的计算公式。并实际设计和制造了一个口径 300 mm 的有像场改正器的卡塞格林望远镜。

透棱镜改正器 1984 年,伊皮斯(Epps)等提出在改正器中加入一对直视棱镜,以校正大气色散。1986 年,苏定强等提出不用直视棱镜,将原改正器中的两块单透镜改为胶合透镜,胶合面倾斜,称它为透棱镜(Lensm),称含有透棱镜的改正器为透棱镜改正器。透棱镜和棱镜相似,有色散的功能,会将视场中的目标形成光谱。当两块透棱镜绕光轴作反方向转动时色散就改变,能补偿不同天顶距处的大气色散。透棱镜又与透镜相似,有校正望远镜像差的功能。由于将单透镜变为胶合透镜,像质有可能提高。大量的设计表明,其像质确实比原改正器的更好,但分离的光学元件和空气界面并未增加。在这种思想指导下,他们设计了一系列新改正器。著名天文光学家威尔松(Wilson)在 1996 年出版的专著 *Reflecting Telescope Optics* 中,以约二整页的篇幅介绍了这种透棱镜改正器和有关这种改正器的工作。新的英-澳 AAT3.9m 望远镜 2° 视场主焦点(2dF)改正器、英国 4.2m 赫歇耳望远镜的主焦点改正器,都是含有透棱镜的改正器。

适用于天体测量工作的改正器 一般的像场改正器都是用于天体物理工作的,只要要求像斑小,对像斑的形状和畸变没有特殊的要求。在上海天文台的 1.56 m 天体测量望远镜和陕西天文台的 1.05 m 望远镜中,苏定强

等均设计了新的天体测量改正器,不仅消畸变、像斑小,且有极好的对称性。需要指出,CCD TDI 技术也要求消畸变,随着这种观测技术的发展,天体测量改正器将有更广泛和重要的应用前景。

消大气畸变改正器 在研究大气畸变的基础上,提出了消大气畸变改正器的设想,并给出了一些初步的方案。

改正器的优化 通过优化,苏定强等获得了一些国际上最好的结果,如 R-C 系统两片同种材料球面透镜改正器,得到了 $f/9$, 视场直径 $53'$, 从 365 nm 到 1400nm 各色光叠加在一起像斑最大的弥散小于 $0.32''$ 的结果。后来又得到了更好的结果。又如,抛物面主镜主焦点 4 片球面透镜改正器,得到了 $f/3.3$, 视场直径 $25'$, 从 365 nm 到 1014 nm 各色光叠加在一起像斑最大的弥散小于 $0.36''$ 的结果。再如, R-C 主镜主焦点 3 片非球面改正板加 1 片场透镜的改正器,得到了 $f/3$, 视场直径 1° , 从 365nm 到 1014nm 各色光叠加在一起像斑最大的弥散小于 $0.8''$ 的结果。另外,还设计和研究过多种卡塞格林非球面板改正器,其中有些是新型的。

3. 天文光学系统的优化

有特色的评价函数 参考两维哈特曼检验和照相天体测量学,提出了由清晰度和畸变度组成的新的评价函数。

清晰度:

$$\Phi_1 = \frac{1}{a_0 E_0 s_0} \int_0^{w_0} a(\tau) d\tau \int_0^\infty I(\lambda) d\lambda \iint_s [(y - y_c)^2 + z^2] ds \quad (5)$$

这里, s 为入射光瞳, y, z 为来自视场角 w 的空间光线与像平面交点的坐标, $(y_c, 0)$ 为选定的一个基准点,它实质上就是像斑的重心, $s_0 = \iint_s ds$ 即入瞳面积, λ 为波长, $I(\lambda)$ 为各个

波长的相对权重函数,等于光源的光谱和辐射接受器分光灵敏度的乘积, $E_0 = \int_0^\infty I(\lambda)d\lambda$, w_a 为视场半径, $a(w)$ 为各视角处关于清晰度的权重函数, $a_0 = \int_0^{w_a} a(w)dw$.

畸变度:

$$\Phi_2 = \frac{1}{b_0} \int_0^{w_a} (y_0 - C \tan w)^2 \cdot b(w) dw \quad (6)$$

$b(w)$ 为各视角处关于畸变的权重函数, $b_0 = \int_0^{w_a} b(w)dw$. C 是一个选定的使 Φ_2 为极小的系数. 然后计算下述函数:

$$\Phi = \frac{1}{1 + \eta} (\Phi_1 + \eta \Phi_2) \quad (7)$$

其中 η 为畸变度相对于清晰度的权重.

选取不同的像平面得到不同的评价函数值, 评价函数 Φ 是像面位置 x 的二次函数, 可严格导出计算评价函数为极小值时像平面位置的公式. 苏定强等把评价函数的最小值定义为光学系统的评价函数. 在实际应用时, 上面的重积分用有限项和代替.

这个评价函数中有许多做法与传统的光学设计不同, 如高斯平面被最佳像面所取代, 主光线与高斯平面的交点被像斑重心所取代, 焦距被一个特殊的比例系数 C 所取代, 不仅不区分各种单色几何像差, 色差也不再区分. 此评价函数特别适用于天文望远镜光学系统的优化, 与几何像差构成的评价函数相比, 更客观, 更少依赖设计者的经验.

优化方法的研究 苏定强等深入研究了列文伯格 (Levenberg) 的阻尼最小二乘法, 证明了它的解是以初始点为中心的 n 维椭球区域中评价函数的最小值点. 又参照分析力学中解约束运动的问题, 用拉格朗日乘子法导出了阻尼最小二乘法这种算法. 在提出导数消色差算法的基础上, 发现可通过一系列矩阵相乘, 严格求出光学系统优化中的偏导数,

这种算法不仅精度比差商法高, 且在变量多的情况下可减少运算量. 他们还提出了一种新的优化方法, 试用情况表明, 其效果与阻尼最小二乘法相当. 对优化方面进行的这些深入研究, 是优化工作获得好效果的重要因素之一.

优化的实际成果 苏定强等用自己的评价函数, 采用阻尼最小二乘法, 编制了光学系统优化程序. 中国对天文光学系统作的研究和研制的天文光学系统许多都是用这个程序优化的. 得到的结果都非常好, 有的超过了国外的结果. 有的外国专家用著名的 AccosV 程序优化不好的光学系统, 用苏定强等人的这种程序得到了很好的结果. 由于用这种程序可以迅速地得到极好的三镜系统的结果, 日本著名天文光学家山下泰正称赞说: 在苏定强、伊皮斯 (Epps) 等的努力下, 三镜系统的光学设计有了巨大进展. 20 多年来, 中国研制的主要天文望远镜, 如国内最大的 2.16 m 望远镜、1.56 m 天体测量望远镜、太阳磁场望远镜、太阳精细结构望远镜、人造卫星激光测距仪、太阳色球望远镜等的光学系统都是用这种程序优化的. 这些仪器都已投入工作, 像质很好, 在中国天文工作中起着重要作用.

4. 双折射滤光器

研制成中国第一个双折射滤光器 双折射滤光器是法国太阳物理学家 B. F. 利奥 (B. F. Lyot) 发明的重要的太阳观测仪器. 中国第一个双折射滤光器是苏定强等于 1968 年研制成功的. 为中国这方面的工作奠定了基础. 当时的一些工艺方法一直沿用至今. 后来又经艾国祥、胡岳风等人的努力, 目前中国双折射滤光器的研制已达到很高的水平, 并出口到日本、韩国等国家.

双折射滤光器的研究 提出了两种新的

多波段双折射滤光器,其中主要的一种是其每一级都由两种晶体材料组成,用公式证明了其透过带可严格落在两个选定的波长处,取其中一种晶体为基本晶体,其厚度与通常双折射滤光器中的相近,另一种是很薄的修正片。研究了双折射滤光器中非常光与寻常光焦点差的成因,导出了滤光器在非平行光束中锥角允许值的公式。

导出了 n 级利奥滤光器积分透过率的公式:

$$T_0 = \frac{1}{2^n \mu d_1} \quad (8)$$

$$T_1 = \frac{1}{\pi \mu d_1} \left[\frac{1}{2^{2n-1}} \sum_{s=1}^{2^n-1} \frac{s}{2^n - s} \sin(2^n - s) \frac{\pi}{2^{n-1}} + \frac{\pi}{2^{2n-1}} \right] \quad (9)$$

$$\eta = \frac{1}{2^{n-1} \pi} \sum_{s=1}^{2^n-1} \frac{s}{2^n - s} \sin(2^n - s) \frac{\pi}{2^{n-1}} + \frac{1}{2^{n-1}} \quad (10)$$

T_0 为第一级两相邻零点间的积分透过率(总透过能量), T_1 为主带的积分透过率(主带透过能量), η 为 T_1 与 T_0 之比,即主带透过能量与总透过能量之比, n 是滤光器的级数, μ 是双折射率, d_1 是第一级晶体厚度。

又导出了当滤光器的级数无限增加时 η 的极限值:

$$\eta_{n \rightarrow \infty} = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin t}{t} dt \quad (11)$$

用类似的数学方法严格证明了胡岳风、艾国祥由实验发现的可调利奥滤光器积分透过率守恒。

参考文献

苏定强、王亚男、羿美良、王兰娟、周必方:《天文望远镜光学研究》,《自然科学进展》,1996,第六卷,257~267。

苏定强、周必方、俞新木:《中国2.16 m 望远镜的主光路系统》,《中国科学》,A 辑,1989,(11):1187

~1196。

Su Ding-qiang: A New Type of Field Corrector with the Function of Correcting the Atmospheric Dispersion. *Astronomy and Astrophysics*, 1986, 156: 381~385。

苏定强、王亚男:《天文光学系统像差的自动校正》,《天文学报》,1974,15(1):51~60。

苏定强:《可调Lyot 双折射滤光器积分透过率守恒的严格证明及一种主带外总光量的测定方法》,《天体物理学报》,1986,第6卷,72。

(苏定强、王亚男)