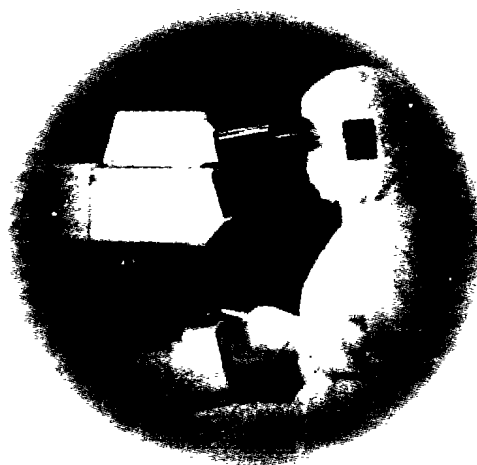


摘要:介绍了反射(折反)式望远镜物镜结构形式的发展,归纳和总结了典型结构的光学元件曲面形式和系统像差情况。

# 反射(折反)式望远镜物镜的形式及其像差



## 1 反射(折反)式望远镜物镜及其结构形式

望远镜是观察远距离物体的光学仪器,其光学系统由物镜和目镜组成。天文望远镜常采用反

射式物镜,与透射式物镜相比具有制造工艺相对简单、设计灵巧、对材料的要求低等优点。反射式物镜对光程的影响是双倍的,应该保证很高的面形加工精度。

物镜系统光学元件数目有1个、2个、3个、4个等,对应不同的形式。如图1所示。

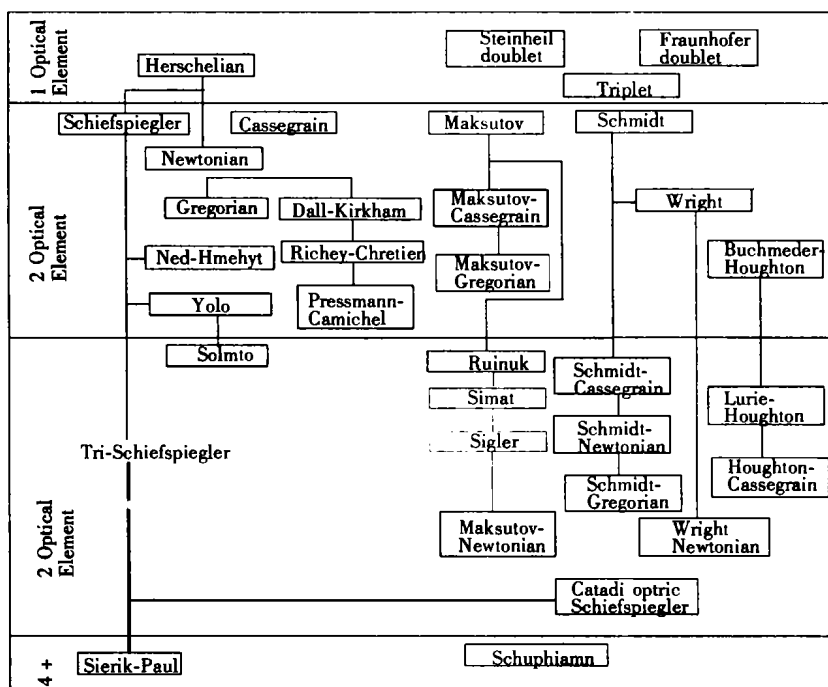


图1 物镜结构形式及分类

## 2 反射式物镜形式的发展及其像差

### 2.1 Gregorian 式

1663 年苏格兰数学家 James Gregory 设计了第一个反射式望远镜系统(见图 2)。该系统平行光依次经主镜和次镜反射后穿过主镜上的开孔。所用的主镜和次镜镜面分别为凹形抛物面和凹形椭球面,次镜放在主镜焦距之外。由于 17 世纪中叶还没有能够制造足够精确的反射镜的技术,James Gregory 的设计未能马上实现。

这种结构的特点是两镜都为凹形,次镜的制造和检测比 Cassegrain 式以及 Cassegrain 式的变种简单。由于次镜位于主镜焦点外,所以结构显得不十分紧凑。但主次镜的加工和检测相对简单,没有带来大的像差。近年来 Gregorian 式结构的使用有所增加,像差情况如表 1 所示。

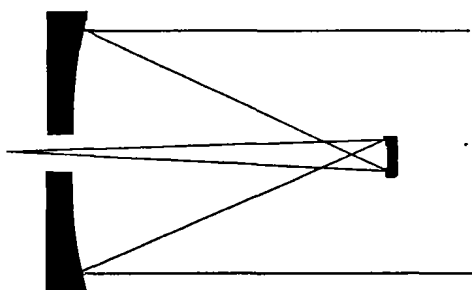


图 2 Gregorian 式物镜

表 1 Gregorian 式物镜的像差

主 镜	球 差	无
凹 形 抛物面	彗 差	中
	像 散	中
次 镜	场 曲	中
凹 形 椭球面	像面倾斜	无
	色 差	无

### 2.2 Cassegrain 式

1672 年法国雕刻家 Sieur Cassegrain 首次设计和制造了 Cassegrain 式望远镜(这种以他的名字命名的望远镜应该正确地称作 Cassegrainian,

但通常只被称之为 Cassegrain)。Cassegrain 设计的望远镜和 Gregory 设计的望远镜的主要差别是: Cassegrain 利用的次镜镜面为凸形,这样就可以把次镜放在主镜焦点之内,像差情况如表 2 所示。在其后的 200 年中,主要由于凸双曲面次镜加工和测试的困难, Cassegrain 式望远镜没有流行起来。随着技术进步, Cassegrain 式物镜逐渐成为许多大型专业望远镜最常用的形式,同时出现了许多新的变种。凸面次镜引起光路的折叠并使有效焦距增大。该望远镜及基于 Cassegrainian 的变化类型是一种非常紧凑的结构类型。

它的难点在于光学系统的试验,其主镜和 Newtonian 式望远镜主镜相似,可以用标准测试方法进行。而次镜由于是凸面反射镜,则需要一些辅助光学系统以便能够观察到面形。最好的方法是用自动准直设备,将主镜和次镜作为一个完整的系统来测试,或者将次镜的背面磨平,试验时把次镜看作一个平凸透镜。

当系统的  $f$  数  $\leq f/10$  时,系统的彗差比相同焦距的 Newtonian 式的彗差大好几倍。当  $f$  数较大时( $f/13 \sim f/15$  或更大),彗差的影响变小,但视场迅速变小。

从孔径方向看,平行光线照射到系统主镜,没有受到光阑的阻碍。但对于  $f$  数为  $f/10$  或者更小的系统,次镜就显得比较大(大约阻碍 34% 或更多的光线),起到了光阑作用。在  $f$  数较大的系统中,由于视场较小,所要求的光阑会使视场进一步减小。视场弯曲对目视观察来说无关紧要,但对摄影系统来说就必须加以注意。可以在焦面上设置视场展平装置。

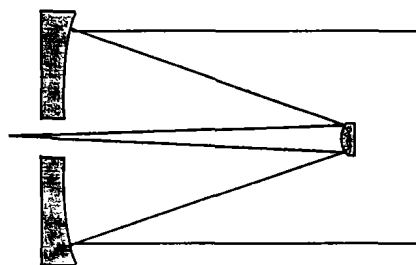


图 3 Cassegrain 式物镜

表 2 Cassegrain 式物镜的像差

主 镜	球 差	无
凹 形 抛物面	彗 差	中 - 大
	像 散	小
次 镜	场 曲	大
凹 形 椭球面	像面倾斜	无
	色 差	无

## 2.2.1 Pressmann - Camichel (Cassegrain

的变种)

这种形式的主镜是凹球面,次镜是凸形的扁平椭球面。凸形的扁平椭球面次镜的表面曲率小,曲面显得很陡峭,不借助自动准直设备就无法进行检测。在所有的 Cassegrain 式变种系统中,这种形式的彗差最大。

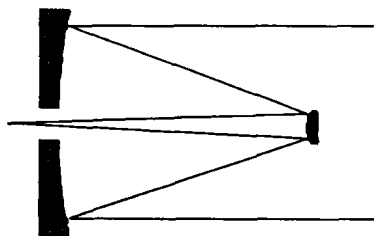


图 4 Pressmann - Camichel 式物镜

表 3 Pressmann - Camichel 式物镜的像差

主 镜	球 差	小
凹球面	彗 差	很 大
	像 散	小
次 镜	场 曲	大
凸扁平 椭圆面	像面倾斜	无
	色 差	无

## 2.2.2 Ritchey - Chretien 式

Ritchey - Chretien 式光学系统是由美国光学专家 George Willis Ritchey 和法国光学设计师 Henri Chretien 在 20 世纪初共同设计的。虽然经过了很多艰难和曲折,历史最终还是证明了它们的价值。Kitt Peak, Manna Kea, Cerro Tololo, the VLT 以及哈勃 (the Hubble Space Telescope) 等大

型光学系统都采用这种形式。

该光学系统的特点是能够在较大的视场内获得较高的成像质量。对空间星体观测时,彗差的存在使得对星体位置的定位难度增加。而该光学系统是无彗差的,使得观测范围内的星体呈圆形像点。

这种两镜都为双曲面的结构避免了在像的中心产生模糊。然而双曲面难以加工和检测,因此很少采用。只有在天文观测和天体测量时才采用这种镜面。

视场弯曲程度和主次镜的半径差有关。可以实现平面视场,但这样的系统要求主镜曲面具有大的曲率,这是难以实现的。主镜焦距较小时,次镜就比较大,引起超过 50% 的中心遮拦。在焦面处放置一校正镜时,可以同时校正像散和视场弯曲,而且校正镜不会带来球差和色差,使系统成为无像差系统。哈勃望远镜正是具有这种结构的系统。

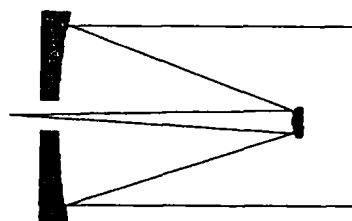


图 5 Ritchey - Chretien 式物镜

表 4 Ritchey - Chretien 式物镜的像差

主 镜	球 差	无
凹 形 双曲面	彗 差	无
	像 散	中
次 镜	场 曲	大
凹 形 双曲面	像面倾斜	无
	色 差	无

## 2.2.3 Dall - Kirkham 式

光学专家 Horace Dall 和业余天文爱好者 Allan Kirkham 分别在 1928 年和 1930 年设计出 Dall - Kirkham 光学系统。Dall - Kirkham 式系统实际上是 Cassegrain 式系统的简化,所采用的

## ► 现代光学仪器

镜面更容易加工,但所带来的彗差和场曲却比 Cassegrain 式系统大。椭圆形主镜可以通过在共轭焦点的试验进行检测,球面次镜可以不进行检测,通过研磨和抛光就可以获得比较好的表面精度。试验时可以通过主镜自动校正次镜的球面误差。如果主镜  $f$  数  $\leq f/4$ ,就可以不考虑彗差和场曲。彗差和场曲与次镜的放大率有关,系统  $f$  数减小,次镜放大率也减小。

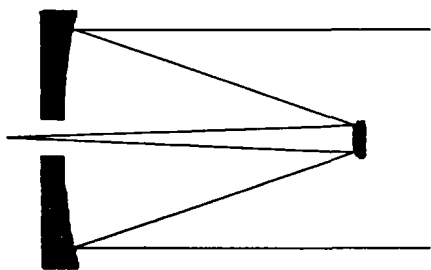


图6 Dall-Kirkham 式物镜

表5 Dall-Kirkham 式物镜的像差

主 镜	球 差	无 - 小
凹形扁长 椭球面	彗 差	大 - 很大
	像 散	小
次 镜	场 曲	大
球 面	像面倾斜	无
	色 差	无

### 2.3 Newtonian 式

1672 年牛顿首次发明了 Newtonian 式结构系统。但由于当时采用球面主镜和次镜使系统的球差太大而失败。1723 年 John Hadley 用抛物面镜代替 Newtonian 式的球面主镜,并提出所谓的 Newtonian 修改型。Newtonian 式的反射结构逐步成为世界上最流行的结构形式。该结构的两个镜子中有一个是平面(另一个是曲面),深受业余天文望远镜制造者的欢迎。

为了避免带来严重的彗差,Newtonian 式系统的  $f$  数不能大于  $f/4$ 。随着抛物面和球面之间差异变小,长焦距 Newtonian 式系统会产生球差。一般来说, $f$  数不小于  $f/8$ 、口径 10.16cm 左右的球

面主镜可达到衍射极限。口径增大时要同时加大焦距。1935 年 Andre Couder 给出了两者之间的关系:  $f^3 = 88.6D^4$  (单位为英寸)。对于给定直径的主镜,按公式得出的焦距是满足 Rayleigh 准的最大焦距。

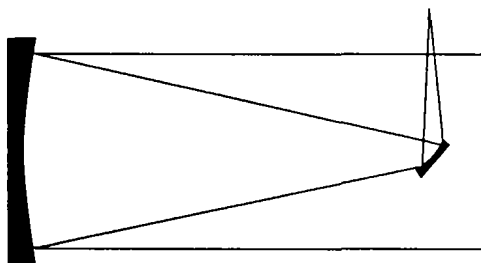


图7 Newtonian 式物镜

表6 Newtonian 式物镜的像差

主 镜	球 差	无
凹 形 抛物面	彗 差	中 - 大
	像 散	小
次 镜	场 曲	小
平面镜	像面倾斜	无
	色 差	无

### 2.4 Herschelian 式

这种想法首先由法国科学家 LaMaire 提出,后来引起了 William Herschel 的注意。他将这种形式的光学系统用于对深空星体的观测,主要优点是减少了光能散失,但带来了像差。后来 Franklin Wright 用 Maksutov 式校正镜消除了 Herschel 式系统的离轴像差。

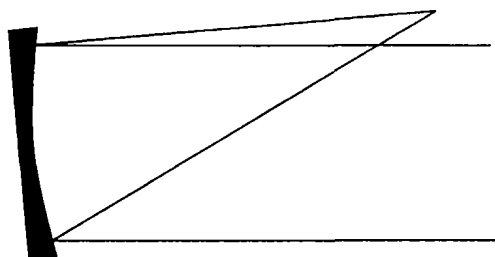


图8 Herschelian 式物镜

表 7 Herschelian 式物镜的像差

主镜	球 差	无
凹 形 抛物面	彗 差	很 大
	像 散	很 大
次 镜	场 曲	小
无	像面倾斜	无
	色 差	无

### 3 折反式望远镜物镜的发展

#### 3.1 Schmidt - Cassegrain 式

在发明 Cassegrain 式望远镜约 260 年后, 即 1930 年爱沙尼亚天文学家、透镜及反射镜制造商 Bernard Schmidt 设计出一种新的折反式望远镜。通过被称之为“校正镜”的透镜来补偿 Cassegrain 望远镜的光学像差, 特别是球面像差。这是首次将反射式望远镜或者称为折反式望远镜应用于天文照相的透镜。在 Schmidt 相机中, 为了获得最大的清晰度, 把校正镜支撑结构置于主镜的焦平面处。后来将 Schmidt 校正镜应用于 Cassegrain 式设计, 就产生了 Schmidt - Cassegrain 望远镜。

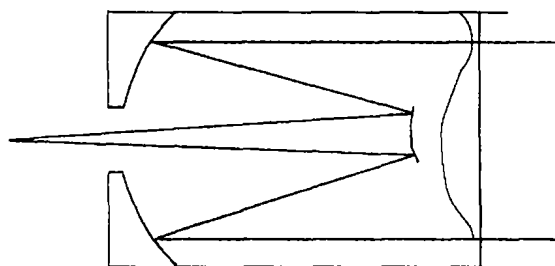


图 9 Schmidt 式物镜

#### 3.2 Maksutov 式

荷兰的 A. Bouwers 和俄罗斯的 Dmitry Maksutov 分别于 1941 年 2 月和 1941 年 10 月提出用曲面透镜, 即用 Meniscus 校正镜来替代形状复杂

的 Schmidt 校正镜。这种校正镜不仅能够校正球面像差, 而且更容易加工, 为望远镜的设计开辟了新道路。这就是后来称为 Meniscus - Cassegrain 的望远镜。

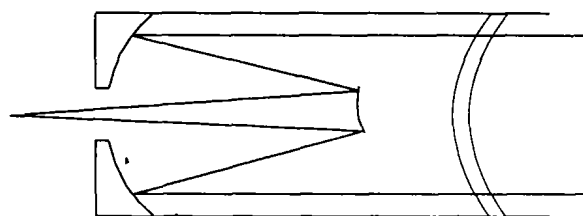


图 10 Maksutov 式物镜

#### 3.3 Gregory - Maksutov 式

1957 年一位名叫 John Gregory (与第一个反射式望远镜设计者 James Gregorian 同名, 很巧合) 的光学工程师进一步简化了 Meniscus - Cassegrain 望远镜的设计。

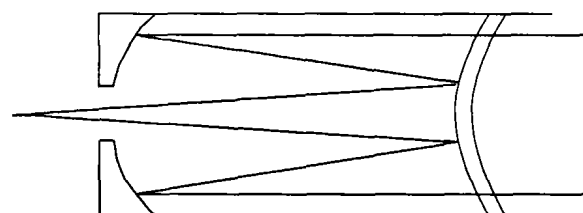


图 11 Gregory - Maksutov 式物镜

他去掉了独立的次镜, 用带有反射层的校正镜本身替代, 这就是非常著名的被称之为 Gregory - Maksutov - Schmidt - Cassegrain - Gregory 的现代光学装置, 简称为 ‘Mak’。

### 4 结束语

本文总结了反射, 折反式望远镜物镜的形式及其像差情况, 希望为同行提供参考。(No. 11)

丁延卫 王立国 编译