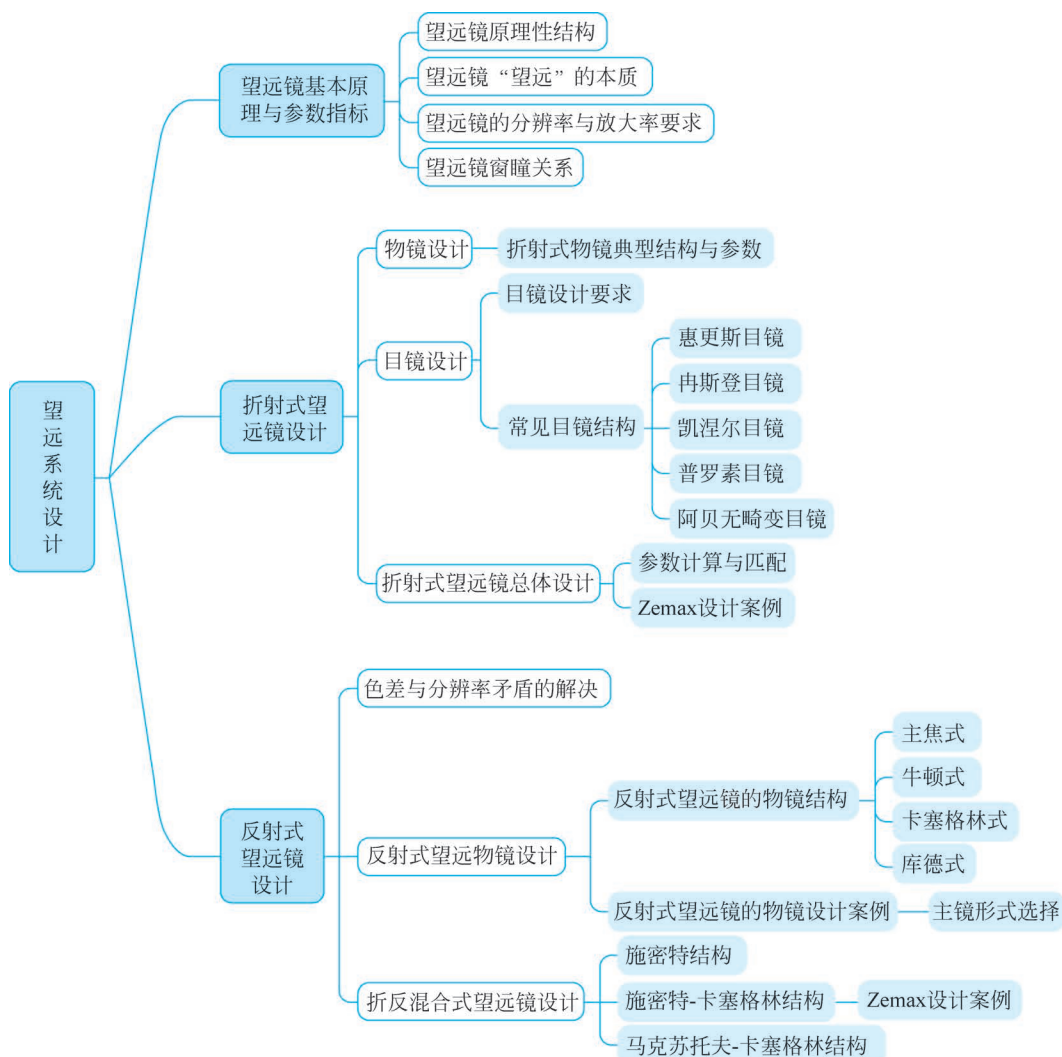


# 第5章 望远系统设计



## 【知识目标】

- ◆ 掌握望远镜原理与相关概念。
- ◆ 了解折射式望远镜物镜的结构类型。

- ◆ 掌握反射式望远镜物镜的结构类型。
- ◆ 掌握不同类型的目镜参数特征。

#### 【技能目标】

- ◆ 能够利用 Zemax 实现望远镜典型物镜设计与不同要求的目镜设计。
- ◆ 能够利用 Zemax 实现折射式望远镜物镜和目镜组合像差补偿。
- ◆ 能够利用 Zemax 实现反射混合式望远镜结构设计。

望远系统,作为人类探索宇宙奥秘的重要工具,自诞生之日起便承载着无尽的好奇与渴望。从伽利略手中简陋的折射望远镜到现代大型天文望远镜,每一次技术革新与突破都极大地拓展了人类的视野,让我们得以窥见宇宙的宏伟与神秘。通常的望远镜发明史认为是荷兰眼镜商人偶然发现用两块镜片组合可以看清远处的景物。伽利略制造了更精确的望远镜,开始为科学服务。而新的历史证据表明,望远镜的最初发源地很可能是在西班牙,进而传入荷兰。比如在 1608 年,很多荷兰眼镜商就对这一发明宣示主权。1609 年,伽利略用一片凸透镜做物镜,一片凹透镜做目镜,制作了一架口径 4.2cm,长约 1.2m 的望远镜,该望远镜成正立的虚像。1611 年天文学家开普勒改用凸透镜作为目镜,从而可以在目镜前置入分划板,对目标进行定量测量,直接提高了天文观测精度。美国 NASA 的开普勒望远镜被称为“系外行星猎手”的神奇之眼,一直服役到 2018 年才宣告退役。它的离去留下了一段传奇,同时也为未来的探索留下了无限的遐想。本章将从望远镜原理与参数出发,介绍望远镜物镜与目镜的典型结构与设计要求,以及折射式、反射式和折反混合式望远镜的典型结构与设计案例。



视频讲解

## 5.1 望远镜基本原理与参数指标

### 5.1.1 望远镜原理性结构

常见望远镜可简单分为伽利略望远镜和开普勒望远镜两种组成结构。伽利略望远镜在自然科学发展史中占有重要地位,其结构简单,如图 5-1(a)所示,由一个凸透镜(物镜)和一个凹透镜(目镜)构成,能直接成正像。然而自从开普勒望远镜问世,伽利略望远镜就逐渐淡出了专业天文观测领域,转而在普通望远镜领域找到了新归宿。正因如此,伽利略望远镜也常被人们称为“观剧镜”。开普勒望远镜的物镜和目镜都是凸透镜,如图 5-1(b)所示。由于两者之间有一个实像,可方便地安装视场光阑或分划板,并且光学性能方面表现出色,具有高分辨率、良好的对比度和宽视场等优势,所以目前军用望远镜、小型天文望远镜等专业级望远镜都采用此种结构。开普勒望远镜的物镜和目镜焦点重合,分别为  $F'_o$  和  $F_e$ 。因此,通过物镜和目镜使入射平行光束仍保持平行出射,属于典型无焦系统,即

$$\frac{f'_o}{f_e} = \frac{D}{D'} \quad (5-1)$$

式中,  $f'_o$  和  $f_e$  分别为物镜和目镜的焦距;  $D$  和  $D'$  分别为二者的通光口径(在实际系统中一般分别为物镜的入瞳口径和目镜的出瞳口径)。因此,可认为望远镜的物镜加目镜的经典组合都是无焦系统。当然,现代天文望远镜很多以工业(或科研)相机代替人眼。

### 5.1.2 望远镜“望远”的本质

人眼感觉物体的大小是由物体在视网膜上的像的张角决定的。人眼具有“近大远小”的视

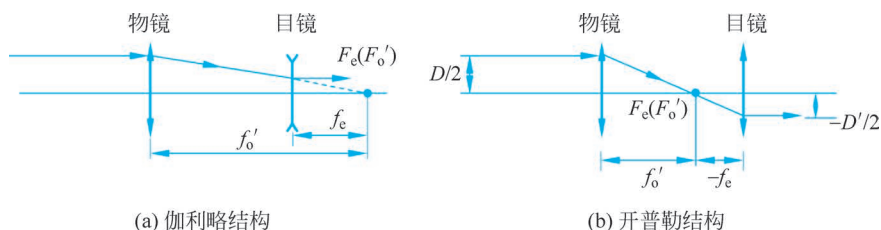


图 5-1 望远镜基本结构

觉感知特征,是因为越远处的物体上相同间距的两点对于人眼的张角  $\omega$  越小,如图 5-2(a)和(b)所示(图中仅画出主光线)。即使体积庞大的星球,由于位于距离地球遥远处,对于人眼来说仍然看起来很小。如果小到一定程度,星球上下边缘对于人眼来说已经贴近到一起,即对人眼的张角极小,则很难看清或是分辨出物体,如图 5-2(b)所示。而望远镜正是用于解决这一问题的光学仪器,它能把远处物体对人眼很小的张角按一定倍率放大,使之在像空间具有较大的张角,和用眼睛看近处的物体一样,如图 5-2(c)所示,使得本来远处无法用肉眼看清或分辨的物体变得清晰可辨。望远镜的这种“视角放大”的能力就是其能够望远的奥秘,因此以视觉放大率来表述望远镜的这种能力。

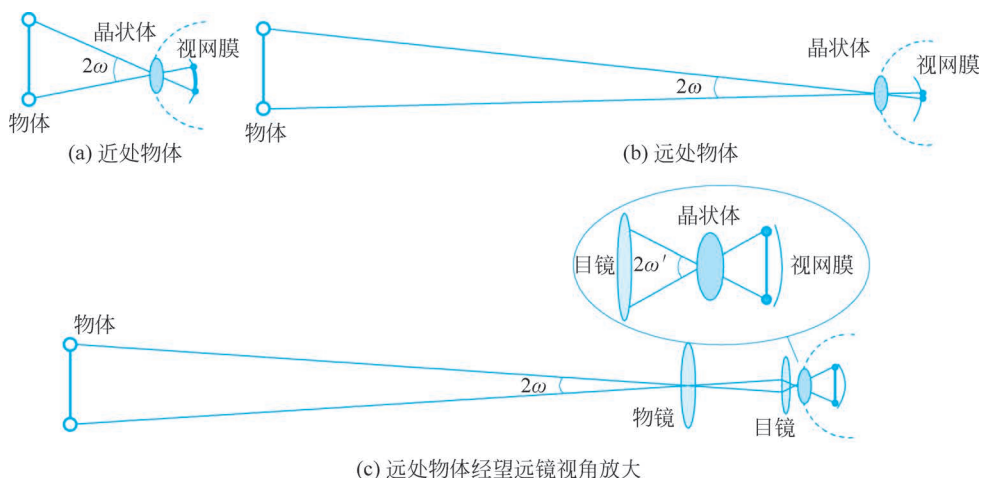


图 5-2 人眼对于物体的视角(视觉张角)

望远镜的视觉放大率也称倍率,是指望远镜对视觉张角的放大能力,一般以视角的正切值的放大倍数来表示视角放大率。如图 5-3 所示,远处物体对于望远镜的张角为  $-\omega$ (这和无望远镜时物体对人眼的直接张角一致),经过望远镜后光束对于人眼的张角为  $\omega'$ ,则视觉放大率为

$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{f'_o}{f_e} = \frac{D}{D'} \quad (5-2)$$

20 倍望远镜观察到的 200m 远的物体的效果和人眼直接观察到的 10m 远的物体的效果是相似的。很多人总认为倍率越高越好,但实际中还需兼顾其成像视场和稳定性。高放大倍率一般意味着大口径,气流和空气的波动对其影响也较大,同时其物方视场也相对较小;手持观测的双筒望远镜的稳定性较之于支架型望远镜弱,一般倍率为 7~10 倍较为合适,例如我国军用手持望远镜放大率主要为 7~8 倍。

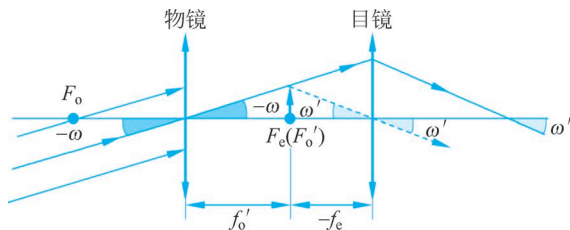


图 5-3 开普勒望远镜视觉放大率计算图示

### 5.1.3 望远镜的分辨率与放大率要求

分辨率是指望远镜能够分辨两个星点之间的最小间距。如图 5-4 所示,当两个星点经过物镜成像后的间距小于分辨率  $\sigma$  时,望远镜便不能分辨两个星点。但望远镜观察远处的物体本身与望远镜间距较大,不同距离处物方分辨率不一致,故其分辨率一般转化为物方分辨角  $\varphi$  表示, $\varphi$  是以 rad 为单位的数值。如图 5-4 所示,可用根据瑞利判据求得

$$\varphi = \sigma / f'_o = 0.61\lambda / (n' \sin u') = 1.22\lambda / D \quad (5-3)$$

式中, $D$  为望远镜(物镜)的通光口径(直径); $\lambda$  为光波长,可见光部分可以取 550nm,可将角分辨率转化为简单的角度计算

$$\varphi = 140'' / D \quad (5-4)$$

式中, $D$  是以 mm 为单位的数值。若按照道威判据

$$\varphi = 120'' / D \quad (5-5)$$

所以,在接收一定波长的光时,望远镜的口径越大,极限分辨角越小,衍射极限光斑越小,分辨本领就越强。我国大视场巡天望远镜主镜口径为 2.5m,甚至有的采用 500m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST),其目的之一就是提高分辨本领。值得注意的是,人眼的视觉分辨率约为  $60''$ ,因此望远镜的极限分辨角确定后,还应考虑该极限分辨角经望远镜放大后能否被人眼分辨,即满足

$$\varphi \Gamma \geq 60'' \quad (5-6)$$

按照道威判据,有

$$\Gamma \geq 60'' / \varphi \approx D / 2.3 \quad (5-7)$$

式(5-7)的视觉放大率为有效放大率。当然人眼一直处在分辨极限条件下容易疲劳,因此在设计望远镜放大率时应留出足够的冗余度,称为工作放大率,比如取

$$\Gamma = D \quad (5-8)$$

当然,当物镜的分辨率确定后,过高的视觉放大率就没有意义了。

### 5.1.4 望远镜窗瞳关系

伽利略望远镜和开普勒望远镜结构中,眼睛作为出瞳都在目镜后。然而,由入瞳与出瞳的共轭关系可知,二者的入瞳完全不同。如图 5-5(a)所示,开普勒望远镜的入瞳是物镜框,经过目镜成像后的出瞳与人眼重合;图 5-5(b)所示的伽利略望远镜的入瞳由出瞳位置决

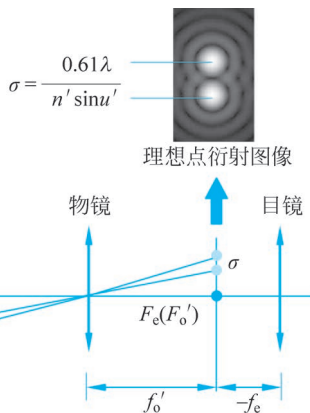


图 5-4 望远镜视分辨率计算

定,是人眼对于整个系统的共轭像。由于开普勒望远镜物镜有实际焦点,一般在此处放置分划板,分划板框即成为视场光阑,控制实际系统的视场大小,如图 5-5(c)所示;而伽利略望远镜的物镜框作为系统视场光阑,能够充满入瞳的离轴视场的光束并不能全部进入系统参与成像,如图 5-5(d)所示会出现渐晕现象。随着视场越大,渐晕越严重。

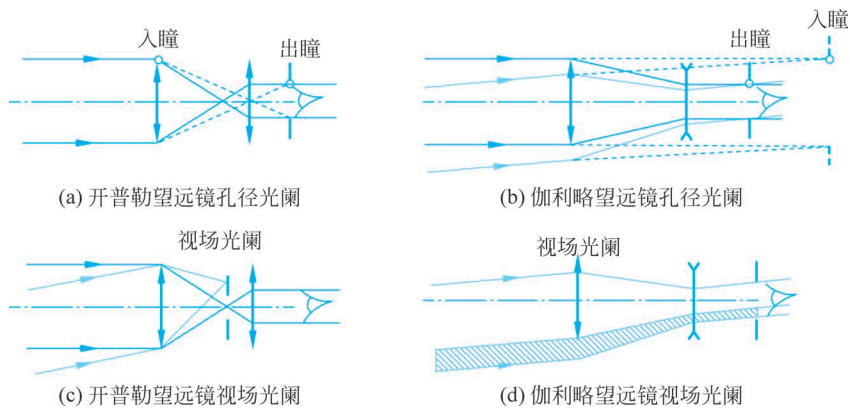


图 5-5 望远镜窗瞳关系

望远镜的视场越大,观测的范围就越开阔。以开普勒望远镜为例,由于开普勒望远镜的分划板一般放置在物镜焦点处作为视场光阑,因此望远镜物方视场角(不分正负)为

$$2\omega = \arctan(y'/f'_o) \tag{5-9}$$

目镜视场为

$$\tan\omega' = \Gamma \tan\omega \tag{5-10}$$

## 5.2 折射式望远镜设计

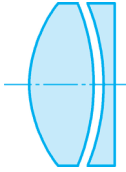
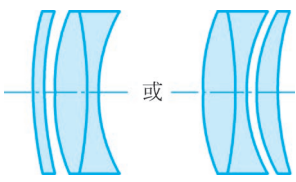
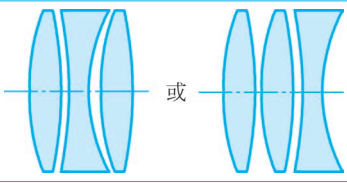
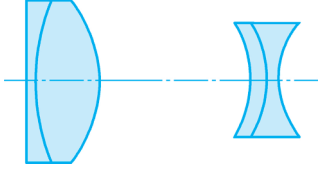
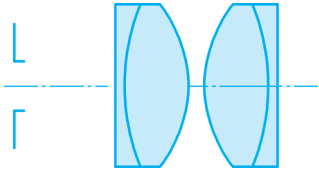
### 5.2.1 物镜设计

望远镜物方视场  $\omega$  不需要很大,就足以观察遥远距离处的大范围区域,视场角大多数小于  $12^\circ$ ,且倍率越大,视场就越小。由于望远镜物镜的相对孔径和视场都不大,同时视场边缘成像质量要求不高,因此它的结构形式比较简单。望远镜物镜主要矫正球差、彗差、轴向色差,而对应于视场的二次方的各种单色像差(像散、场曲、畸变)和倍率色差则处于次要地位。望远镜物镜的光学特性和像差矫正要求决定了它的结构主要有双胶合物镜、双分离物镜、三片式物镜、三分离物镜、摄远物镜、对称型物镜等。表 5-1 列出了典型望远镜物镜结构的相关参数。

表 5-1 典型望远镜物镜结构的相关参数

望远镜物镜类型	$D/f$	$2\omega$	优点	缺点	结构
双胶合物镜	$<1/3$	$<12^\circ$	结构简单	可消除的像差有限,胶合面易产生应力,口径太大时胶合不牢	

续表

望远镜物镜类型	$D/f$	$2\omega$	优点	缺点	结构
双分离物镜	$1/3 \sim 1/2$	$< 10^\circ$	利用空气间隙减小高级球差	成像质量对于双分离物镜空气间隙的大小和两个透镜的同心度很敏感, 装配困难	
三片式物镜	$1/3 \sim 1/2.5$	$< 5^\circ$	两个组分分担光焦度, 在同样的条件下, 半径可以较大些, 可以减小高级像差, 且矫正像差的变量较多	装配困难	
三分离物镜	$1/2 \sim 2/3$	$< 4^\circ$	相对孔径不大的情况可矫正二级光谱	装配调整困难, 光能损失和多面反射杂光较大	
摄远物镜	$1/8$	/	视场角相对较大	相对孔径较小	
对称型物镜	/	$20^\circ \sim 30^\circ$	视场角比较大	相对孔径较小	

值得注意的是, 由于望远镜物镜是与目镜甚至棱镜等转像系统组合起来使用的, 所以在设计望远镜物镜时, 应考虑到其像差可与其他部分之间的像差实现互相补偿。在存在棱镜转像的情况下, 棱镜的像差等效于展开以后的平板像差, 要靠物镜来补偿。另外, 目镜中通常有少量剩余球差和轴向色差, 也可以通过物镜的像差实现补偿。下面给出了相关物镜结构的详细说明。

#### 1) 双胶合物镜

双胶合物镜的结构简单, 可以消除的像差有限, 一般可以矫正球差、色差和彗差, 但难以消除像散和高级球差。因此, 它的相对孔径和视场受到限制, 相对孔径不大于  $1/3$ , 视场不超过  $12^\circ$ 。而在实际的望远镜物镜设计中, 也尽量不要设计  $D > 100\text{mm}$  的双胶合物镜, 口径太大时, 胶合不牢。同时, 当温度改变时, 胶合面容易产生应力, 影响像质。表 5-2 列出了常用焦距对应的相对口径比例, 可作为设计参考。

表 5-2 双胶合透镜常用焦距对应的相对口径比例

焦距/mm	50	100	150	200	300	500	1000
相对口径	1/3	1/3.5	1/4	1/5	1/6	1/8	1/10

### 2) 双分离物镜

双分离物镜由一个正透镜和一个负透镜组成,两透镜之间不胶合,而是由一定的空气层隔开。在双分离物镜中,两透镜之间的距离也是一个变量,可以利用这一变量减小高级球差。相对口径可能增大到  $1/3 \sim 1/2$ 。然而成像质量对于双分离物镜空气间隙的大小和两个透镜的同心度很敏感,这给实际装配带来了难度,因此双分离物镜在望远镜中应用不多。

### 3) 三片式物镜

它通常由一个单透镜和一个双胶合透镜组成。单透镜可以在前,也可以在后。因为由两个组分分担光焦度,在同样的条件下,半径可以较大些,可以减小高级像差,且矫正像差的变量较多,能提高相对口径至  $1/3$  左右。

### 4) 三分离物镜

三分离物镜的特点是能够较好地控制高级球差和色球差,相对口径可增大到  $1/2 \sim 2/3$ ,视场角不超过  $4^\circ$ 。三分离物镜可矫正二级光谱,缺点是装配和调整困难,光能损失和多个反射面之间多次反射的杂光相对较多。

### 5) 摄远物镜

一般物镜整体长度(筒长,第一面到像面的距离)都大于其焦距。尤其是高倍的望远镜中,物镜焦距长,导致系统整体体积大。为了减小仪器的体积和重量,希望在保持焦距长度的同时缩小物镜系统长度,甚至实现物镜整体长度小于焦距。这种物镜结构如图 5-6 所示,由一个正透镜组和一个负透镜组构成,使得整个物镜的后主面前移到第一透镜的前方,实现筒长  $L$  小于焦距  $f'$ ,这种物镜称为摄远物镜。

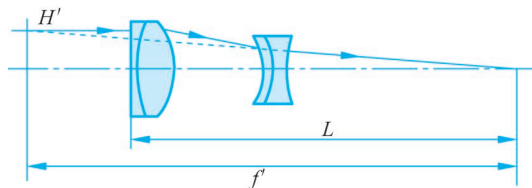


图 5-6 摄远物镜

由于这种物镜有两个双胶合透镜,因此除了矫正球差、彗差、轴向色差外,还有可能矫正像散和场曲。因此可以充分利用它的像差矫正能力来补偿目镜的像差,使目镜的结构简化或提高整个系统的成像质量。其缺点是相对口径较小。因为为了使整体焦距较长,前组的相对口径必然大于整体相对口径,而其前组的简单双胶合透镜形式所能承担的相对口径无法做到很大,这就限制了摄远物镜的整体相对口径,一般约为  $1/8$ 。

### 6) 对称型物镜

对称型物镜一般由两个双胶合透镜构成,主要用于焦距短、视场要求较大的情况,视场角可达  $20^\circ \sim 30^\circ$ 。

## 5.2.2 目镜设计

### 1. 目镜设计要求

目镜是一种位于物镜之后,将物镜成像进行视角放大供眼睛再次成像观察的光学系统。



一般物镜的一次成像面在目镜的焦平面上,因此目镜出射平行光,平行光经过人眼成像至视网膜。人眼一般在目镜后方,与目镜的出瞳重合。为了观察舒适度,其出瞳要求距离目镜最后一面至少 6mm。在某些军用光学仪器中更是要求大于 20mm,一般该距离与目镜的像方焦距相当,这也就意味着其入瞳在距离目镜系统较远处。出瞳直径一般与人眼瞳孔相当,为 2~8mm。由于目镜承担视场角放大的作用,其像方视场一般较大,为  $40^\circ\sim 50^\circ$ ,广角目镜视场可达  $60^\circ\sim 80^\circ$ 。当然其焦距相应就较小,一般只有 10~40mm。

可见,目镜是一种大视场、小孔径、短焦距的光学系统。由于目镜的大视场特征,在设计时应着重考虑矫正其轴外像差。然而目镜的出瞳口径较小,所以轴上像差与轴外像差对比相对不明显。目镜通常也不单独矫正场曲,因为用分离的负光焦度组矫正场曲的方案会增加像散的矫正难度。由于目视光学系统对畸变矫正要求不高,目镜  $40^\circ$  视场允许 5% 的相对畸变,  $60^\circ$  视场可允许最大 10% 的相对畸变。从上述分析来看,目镜的主要像差控制对象以像散和垂轴色差为主。

目镜设计时,可进一步考虑剩余像差与物镜相互补偿。首先应尽量单独控制物镜和目镜的像差,这对很多在物镜后焦面安装分划板的望远系统来说是必要的,否则将影响物镜成像面的测量精度。若系统中无须安装分划板,则可以在二者组合时综合优化整体性能。值得注意的是,目镜不仅可用于望远系统,还可用于很多目视光学系统中,如显微镜系统。显微镜的目镜和物镜一般经常以各种倍率搭配互换使用,所以必须独立完成像差矫正。

在设计目镜时,通常按反向光路计算像差,即假定物平面位于无限远,目镜对无限远目标成像,在目标的焦面上衡量系统的像差。实际系统的出瞳作为反向光路时目镜的入瞳。

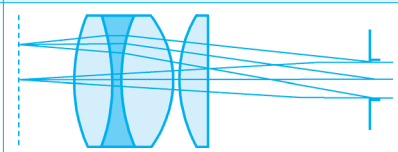
## 2. 常见目镜结构

典型的目镜结构及参数如表 5-3 所示。

表 5-3 典型的目镜结构及参数

目镜类型	$F$	$2\omega'$	出瞳距离	结构
惠更斯目镜	8~25mm	$25^\circ\sim 40^\circ$	5~10mm	
冉斯登目镜	4~30mm	$25^\circ\sim 40^\circ$	0~5mm	
凯涅尔目镜	6~25mm	$40^\circ\sim 52^\circ$	5~14mm	
普罗素目镜	3~55mm	$42^\circ\sim 52^\circ$	5~46mm	

续表

目镜类型	$F$	$2\omega'$	出瞳距离	结构
阿贝无畸变目镜	4~34mm	40°~45°	5~27mm	

1) 惠更斯(Huygenian)目镜

惠更斯目镜是小型目镜的首选,出自1703年惠更斯之手,由两片平凸透镜组成,叫作场镜和接目镜,两片透镜凸面都朝向物镜一端。场镜的焦距一般是接目镜的2~3倍,为消除垂轴色差,场镜与接目镜的间距是它们焦距和的1/2。惠更斯目镜视场小,为25°~40°,所以目前这种目镜一般出现在显微镜中。

2) 冉斯登(Ramsden)目镜

冉斯登目镜于1783年设计成功,由两片平凸透镜组成,凸面相对。透镜间距为两者焦距和的2/3~3/4,色差较大,目前已很少采用。图5-7所示为 $2\omega = 30^\circ$ ,4×角放大率的冉斯登目镜 Zemax 仿真,注意采用的是反向设计法,角放大率为0.25。

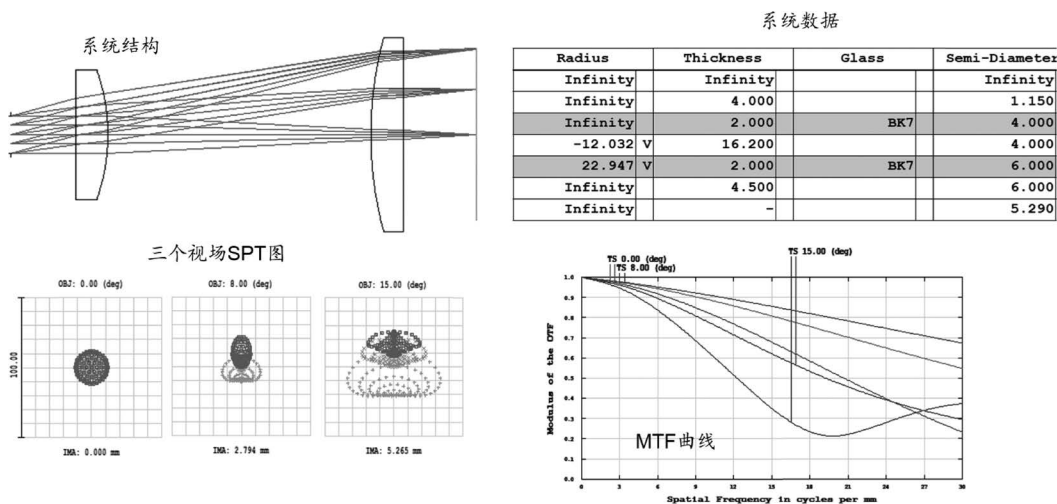


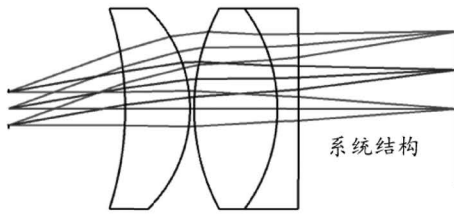
图 5-7  $2\omega = 30^\circ$ 的冉斯登(Ramsden)目镜 Zemax 仿真

3) 凯涅尔(Kellner)目镜

将冉斯登目镜的单片接目镜分裂为双胶合消色差透镜,可大大改善色差和边缘像质,这就是凯涅尔目镜,其视场可达40°~0°,低倍时可保持合适的出瞳距离,适合一些中低倍望远镜。但靠近焦平面的场镜表面灰尘容易参与成像,影响观测。美国一家公司制作了改进型凯涅尔(Revised Kellner, RKE)目镜,典型焦距为6~25mm,出瞳距离为5~14mm,视场为40°~52°。图5-8所示为 $2\omega = 40^\circ$ 的RKE目镜 Zemax 仿真,出瞳直径为4mm,出瞳距为14mm,有效焦距为27mm,视场为40°,畸变为5%左右,可以适当牺牲清晰度平衡畸变。

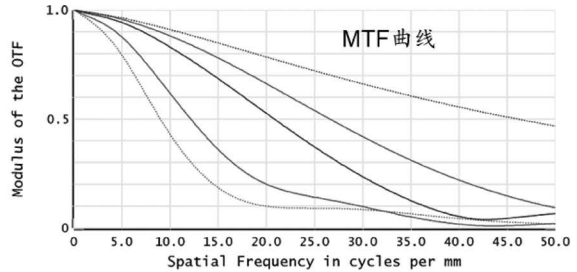
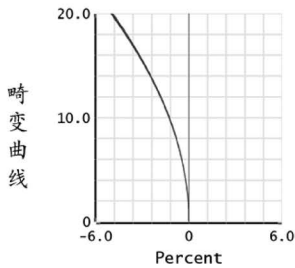
4) 普罗素(Plossl)目镜

普罗素目镜又叫对称目镜,由相同的两组双胶合消色差透镜组成,具有大出瞳距离和视场,由于前后组相同,因此成本更低。其适用于所有的放大倍率设计,是目前应用最为广泛的目镜结构。焦距约为3~55mm,出瞳距离为5~46mm,视场为40°~50°。图5-9所示为

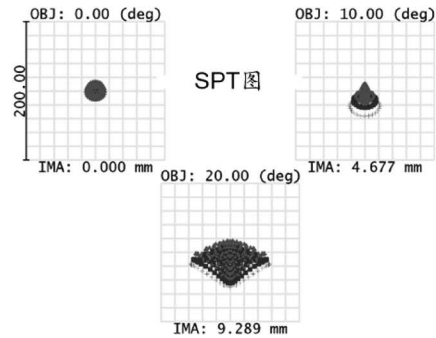


系统数据

Radius	Thickness	Material	Clear Semi-I
Infinity	Infinity		Infinity
Infinity	14.000		2.000 U
-38.778 V	7.767	N-SK5	12.000 U
-16.753 V	0.500		12.000 U
25.362 V	10.000	N-BK7	12.000 U
-20.178 V	2.540	SF1	12.000 U
-1011.586	19.000		10.000 U
Infinity	-		9.285

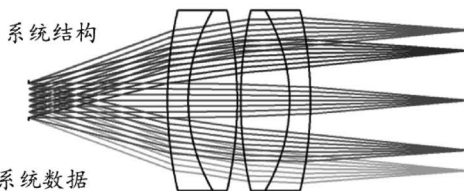


Legend for MTF curves:  
 - 0.00 (deg)-Tangential, 0.00 (deg)-Sagittal, -10.00 (deg)-Tangential, -10.00 (deg)-Sagittal, 20.00 (deg)-Tangential, 20.00 (deg)-Sagittal



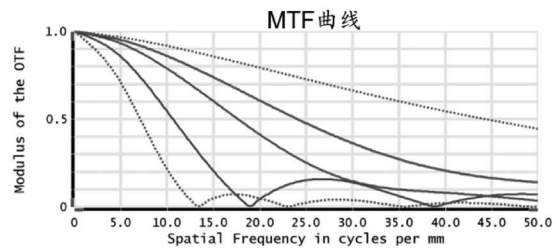
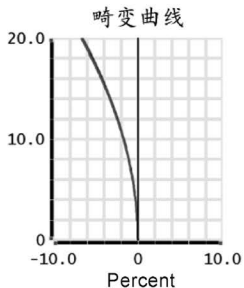
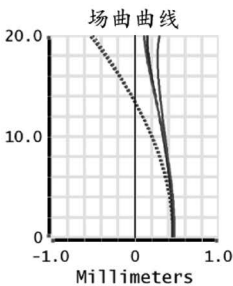
Units are  $\mu\text{m}$ . Legend items refer to Wavelengths  
 Field : 1 2 3  
 RMS radius : 8.036 14.365 30.569  
 GEO radius : 13.112 36.593 59.683

图 5-8  $2\omega = 40^\circ$  的 RKE 目镜 Zemax 仿真

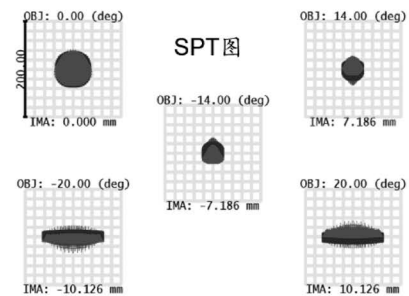


系统数据

Surface Type	Radius	Thickness	Material	Clear Semi-I
0 OBJECT Standard	Infinity	Infinity		Infinity
1 STOP Standard	Infinity	20.000		2.500 U
2 (aper) Standard	57.426 V	3.000	SF1	13.000 U
3 (aper) Standard	25.626 V	7.070	N-SK14	13.000 U
4 (aper) Standard	-58.415 V	0.500		13.000 U
5 (aper) Standard	58.415 P	7.070 P	N-SK14	13.000 U
6 (aper) Standard	-25.626 P	3.000 P	SF1 P	13.000 U
7 (aper) Standard	-57.426 P	22.537 V		13.000 U
8 IMAGE Standard	Infinity	-		10.150



Legend for MTF curves:  
 - 20.00 (deg)-Tangential, 20.00 (deg)-Sagittal, -10.00 (deg)-Tangential, -10.00 (deg)-Sagittal, 0.00 (deg)-Tangential, 0.00 (deg)-Sagittal, 10.00 (deg)-Tangential, 10.00 (deg)-Sagittal, 20.00 (deg)-Tangential, 20.00 (deg)-Sagittal



Units are  $\mu\text{m}$ . Legend items refer to Wavelengths  
 Field : 1 2 3 4 5  
 RMS radius : 23.739 11.447 11.447 28.833 28.833  
 GEO radius : 29.841 23.243 23.243 55.414 55.414

图 5-9  $2\omega = 40^\circ$  的普罗素目镜的设计案例

$2\omega = 40^\circ$ 的普罗素目镜的设计案例,  $10\times$ 角放大率, 出瞳直径为 5mm, 距离像面为 58.4mm, 视场为  $40^\circ$ , 畸变为 6.5%左右。像散导致全视场弧矢 MTF 较差。

5) 阿贝无畸变(Orthoscopic, OR)目镜

阿贝无畸变目镜 1880 年由德国物理学家、蔡司公司创始人之一的阿贝设计, 为四片两组结构, 其中场镜为三胶合透镜, 接目镜为平凸透镜, 该目镜成功地控制了色差和球差, 并把场曲降低到难以察觉的程度, 它还具有  $40\sim 50^\circ$ 的平坦视场和足够的出瞳距离, 在各倍率都有良好表现, 一直被广泛采用。典型焦距为  $4\sim 34\text{mm}$ , 出瞳距离约为焦距的 0.8 倍, 视场为  $40^\circ\sim 45^\circ$ 。图 5-10 所示为  $2\omega = 40^\circ$ 的阿贝无畸变目镜的设计案例, 出瞳直径为 5mm, 距离像面为 59.36mm, 视场为  $40^\circ$ , 畸变接近于 0。

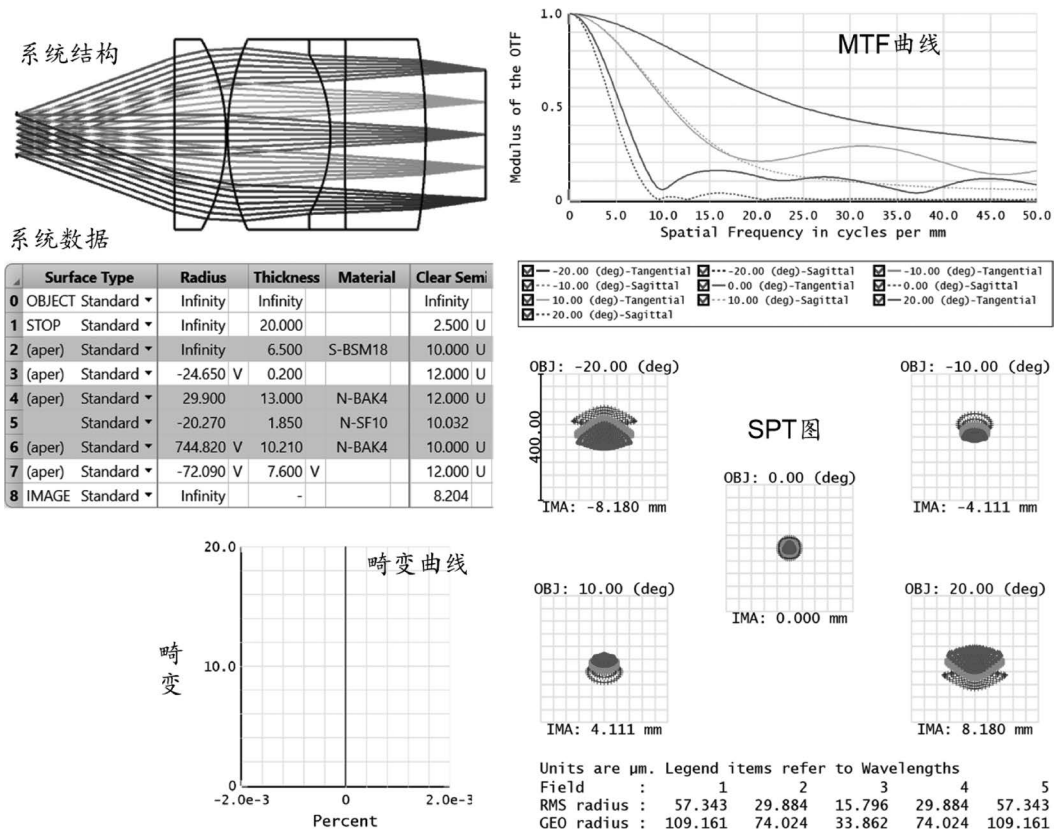


图 5-10  $2\omega = 40^\circ$ 的阿贝无畸变目镜的设计案例

### 5.2.3 折射式望远镜总体设计

望远镜的设计涉及放大倍数、分辨率、视场、物镜相对孔径和出瞳直径等关键参数的精确计算与调整。

(1) 放大倍数: 表示望远镜将物体放大的能力, 等于物镜焦距与目镜焦距的比值。为匹配人眼的极限分辨率( $60''$ ), 望远系统的视觉放大倍率应大于极限放大率  $1.5\sim 2$  倍, 以保证人眼观察的舒适度。高放大倍率会导致视场抖动明显, 影响观察舒适度, 故手持望远镜一

般放大率小于  $10\times$ ，地面观测类望远镜放大倍率一般小于  $30\times$  或  $40\times$ 。

(2) 分辨率：表征望远镜区分相近物体的能力，理想情况下由光学系统的衍射极限决定。即使望远镜具有高于人眼极限( $60''$ )的分辨率，但超出部分对于肉眼来说并无实际意义。为提高分辨率，需矫正系统中的各类像差，主要是球差、彗差和轴向色差。

(3) 视场：指望远镜能够观察到的物体角度范围，通常与目镜的视场有关。常用的目镜视场角大多在  $70^\circ$  以下，这限制了望远镜的视场设计。望远镜或者说望远镜物镜的视场较小，且允许边缘视场的成像质量适度降低。

(4) 物镜相对孔径：决定了望远镜的聚光能力和成像质量。相对孔径  $D/f'$  小于  $1/5$  的物镜设计相对容易保证足够的光通量并控制成像质量。

(5) 出瞳直径：出于光瞳衔接原则，望远镜的出瞳直径应与入瞳直径相似，观察类望远镜出瞳直径一般为  $2\sim 8\text{mm}$ 。出瞳距为了方便人眼观察(在后焦面附近)一般为  $20\text{mm}$  左右，目镜的焦距因此一般在  $25\text{mm}$  左右。

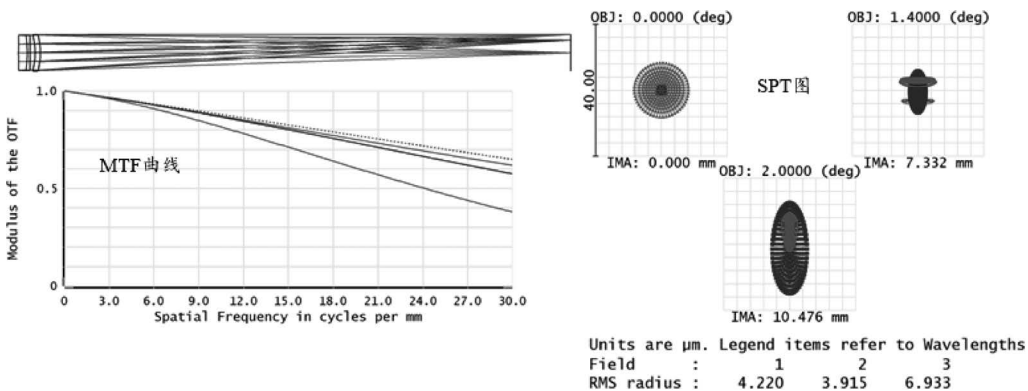
此外，望远镜的设计根据应用场合不同还应考虑其他因素，如重量、体积、充氮防水等，这些因素直接影响望远镜的便携性、使用舒适度以及环境适应性。

下面设计一个简易折射望远镜结构，要求望远镜放大率  $\Gamma=10\times$ ，视场  $2\omega=4^\circ$ 。

(1) 根据工作放大率，取物镜口径为  $D=2\Gamma=20\text{mm}$ ，视场为  $4^\circ$ ，选择双胶合加单片式物镜结构。

(2) 根据  $|D/D'|=10$  可知目镜出瞳直径为  $2\text{mm}$ ，反向设计时物方视场为  $40^\circ$ ，以保证  $10$  倍角放大率，选择普罗素目镜结构。根据  $|f'_o/f_e|=10$ ，可选择  $f'_o=300\text{mm}$ ， $-f_e=30\text{mm}$ 。

首先设计一个三片式物镜(视场为  $4^\circ$ )，结果如图 5-11(a)所示。进而设计一个普罗素目镜结构，如图 5-11(b)所示。最终将逆向设计的目镜翻转，其像面与物镜像面重合，形成望远镜结构，注意控制出瞳大小，望远镜整体如图 5-11(c)所示。为了观察望远镜成像效果，可在出瞳处设置理想透镜以模拟人眼成像效果。



(a) 物镜

图 5-11 折射望远镜总体设计案例

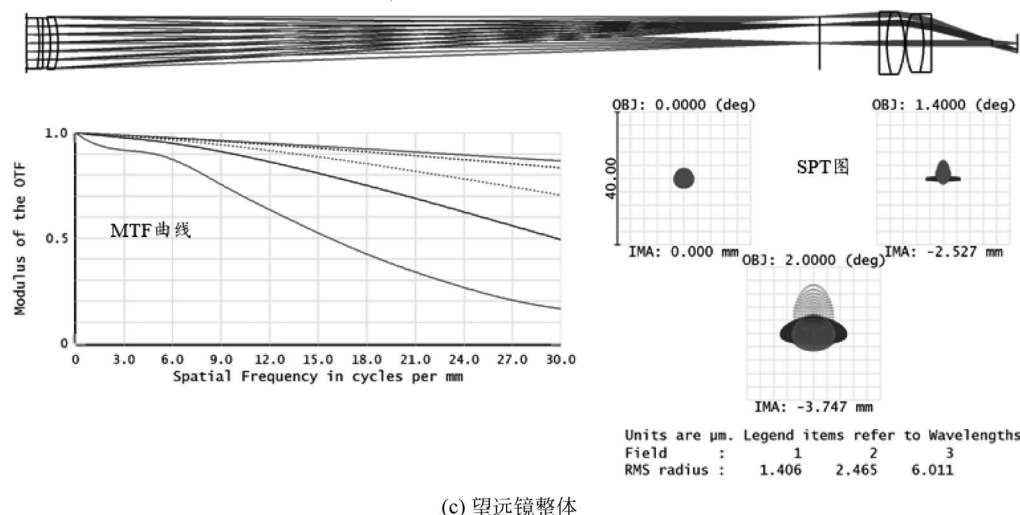
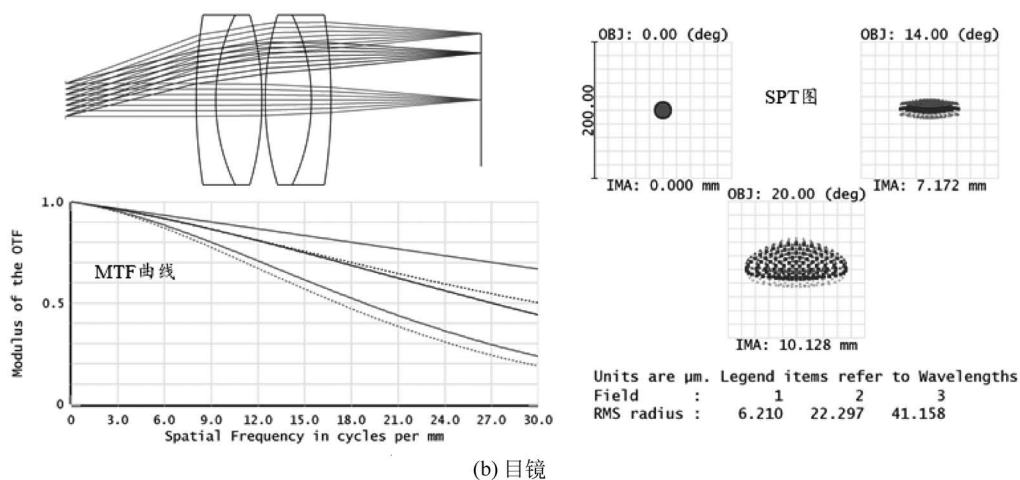


图 5-11 (续)

### 5.3 反射式望远镜设计

虽然望远镜能把远处的物体放大,但由于色差的影响,早期的望远镜观测结果并不清晰。研究者们通过减小望远镜物镜相对口径或者增大  $F/\#$  ( $f'/D$ ) 来制作更加清晰的望远镜(减小像差)。为了保证分辨率,物镜通光口径  $D$  越大越好,因此需要急剧增加物镜焦距  $f'$  来平衡像差。于是,早期“长颈鹿”式望远镜(图 5-12)诞生了,  $F/30$ 、 $F/40$  这样的  $F/\#$  都算是小的,  $F/60$ 、 $F/70$  也是很常见的,如惠更斯  $F/291$  的巨大望远镜(物镜直径为 220mm,焦距为 64m)。望远镜分辨率越高,需要物镜口径越大,但却越难以控制像差,尤其色差难以控制,因此

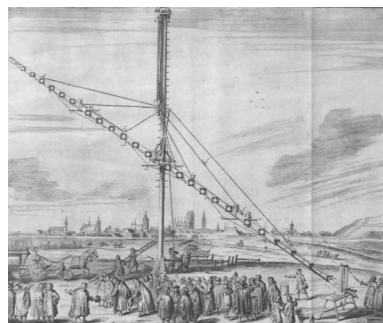


图 5-12 “长颈鹿”式望远镜

越需要增大  $F/\#$ ，目前世界上最大的折射望远镜叶凯士望远镜口径约为 1.02m，镜筒长 19m。另外，大口径的折射透镜的生产也十分困难。

是否有办法解决上述矛盾呢？由于玻璃材料的色散特性，或者说折射定律的本质：光线弯曲程度与波长相关，色差不可避免。如果要避免这一定律的干扰，必须寻找其他出路。设计者们很快想到，反射是不受折射率影响的，任意波长的入射光经过界面后均只遵从反射角等于入射角的定律，与波长无关。因此很多设计者们开始寻求以反射元件替代折射透镜的望远镜出路。

### 5.3.1 色差与分辨率矛盾的解决

如上所述，分辨率提高需要增大物镜口径，但大口径折射透镜加工困难，且色差难以控制，如果采用反射镜替代折射镜，则可以解决这一问题。例如某些二次曲面反射镜拥有较好的光学特性，可以在反射式望远镜中发挥重要作用。图 5-13 给出了常见的反射式望远镜原理图。



图 5-13 常见的反射式望远镜原理图

人们对于捕捉宇宙之魅影的大口径反射式望远镜的渴望永不止步。然而，反射式望远镜的口径扩展同样是对光学材料与加工技术的挑战，其难度随着口径增大呈几何级数增长。在这场与光的较量中，世界各国纷纷亮出了自己的王牌：超低膨胀系数的石英玻璃、轻盈坚硬的铍，以及坚韧不屈的碳化硅等。我国长春光机所于 2018 年研制成功了 4.03m 口径的碳化硅反射镜（见图 5-14），这面镜子如同巨人的瞳孔，成为了迄今为止世界上最大尺寸的碳化硅反射镜。它的诞生，无疑将法国为欧洲“赫歇尔”红外望远镜精心铸造的 3.5m 直径主反射式望远镜挤下了王座。另一个使用反射式望远镜的是大名鼎鼎的美国哈勃太空望远镜，它的直径为 2.4m。众所周知，哈勃望远镜在太空的观测几乎刷新了人类对于宇宙的认识，其观测效果简直堪称奇迹，分辨率竟然达到了惊人的 0.1m 级。可见大口径反射式望远镜在提高分辨率方面表现卓越。

当然，为了追逐分辨率的极致，科学家们翘首以盼更大的物镜诞生。然而大口径镜坯的制作和运输十分困难，目前世界上最大的光学单口径反射式望远镜口径约为 8.4m。尤其是太空望远镜，如 6.5m 口径的韦布望远镜，即使是在地面上使用，制造这么大的镜子都很有挑战性，况且还要被发射到太空。如果哈勃空间望远镜的 2.4m 镜面按比例放大到韦布

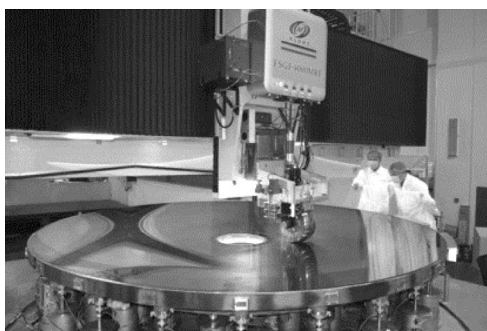


图 5-14 我国长春光机所 2018 年研制的 4.03m 口径的碳化硅反射镜

望远镜尺寸,则重量太大,无法发射到轨道。于是,韦布望远镜的设计团队巧妙地决定采用铍来打造众多正六边形的子镜面,如图 5-15 所示,每段大约重 20kg。最后拼接为近似圆形的镜面形状。比起圆形子镜面,六边形的子镜面具有较高的填充系数,意味着各段可以无间隙地结合在一起。

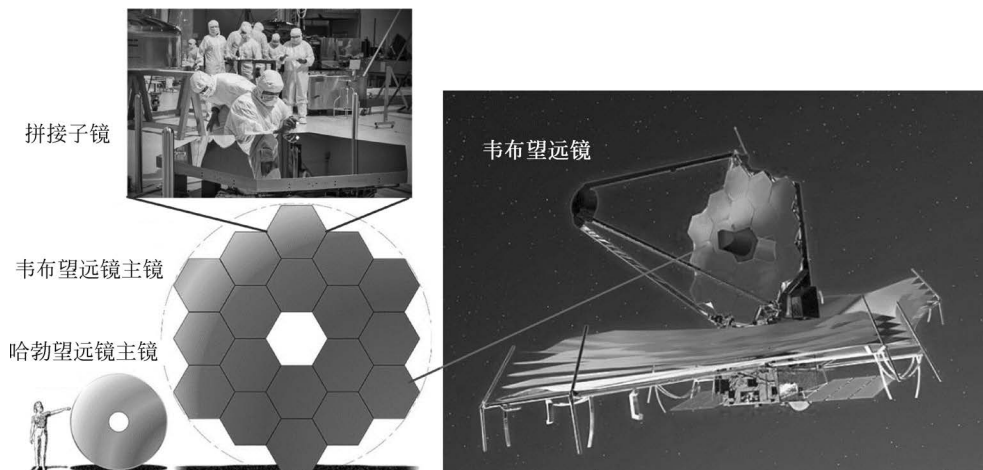


图 5-15 韦布望远镜的子孔径拼接技术

### 5.3.2 反射式望远物镜设计

反射式望远镜的物镜一般由主镜和次镜(有些结构没有次镜)组成,主要有以下几种结构类型。

#### 1) 主焦式

主焦式结构是最简单的反射式望远镜物镜,如图 5-16(a)所示,其由一个凹面反射镜充当物镜,使无穷远处入射的平行光聚焦。该系统的成像是一个倒像,但并不影响天文观测。

#### 2) 牛顿式

牛顿式如图 5-16(b)所示,便于观察,目镜被安置在靠近望远镜镜筒的侧方,利用一块反射镜改变主焦式结构的 optical 走向,实现物镜在镜筒侧方聚焦。

#### 3) 卡塞格林式

卡塞格林式如图 5-16(c)所示,为了同时消除球差和色差,采用主镜和次镜两组系统进

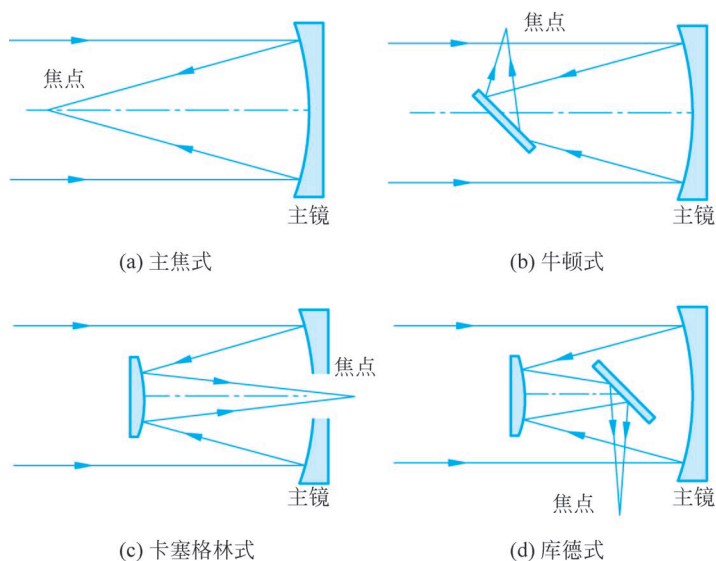


图 5-16 反射式望远镜结构

行聚焦,主镜在次镜后方,光线经主镜和次镜两次反射后从主镜预留的小孔中射出,到达目镜。根据采用的主镜和次镜类型不同可以有不同的表现,表现良好的一般为非球面,例如主镜为抛物面凹面镜,次镜为椭球面凸面镜。最顶级的主镜和次镜都是双曲面的卡塞格林望远镜也叫作 RC-卡塞格林望远镜,哈勃望远镜就属于这种类型。双曲面的磨制难度较高,价格也非常高,哈勃用的 2.4m 主镜由 Perkin Elmer 公司制作时的成本就高达 4 亿美元。这就不得不提到哈勃曾因主镜镜面边缘区域加工出现了约  $2\mu\text{m}$  面形偏差,导致发射后传回的第一批图像模糊(球差影响),使得航天员们不得不进入太空对在近地轨道的它进行维修,维修费用为 8600 万美元,而如果这一故障在地球上就被发现且矫正,维修费用只需要 200 万美元。这就体现了精密光学面形检测的重要性,这部分内容将在第 14 章进行描述。

#### 4) 库德式

库德式(如图 5-16(d)所示)是将卡塞格林结构的焦点利用平面镜转向侧面,其结构对于卡塞格林结构,就相当于牛顿式结构对于主焦结构。

上述结构严格来说仅是望远镜的物镜结构。其中牛顿式和库德式结构仅是主焦式和卡塞格林结构的变形,将焦点转至侧面便于观察。以主镜口径为 100mm,后焦距约为 200mm 的主焦式结构为例,在 Zemax 中进行仿真,球面主镜如图 5-17(a)所示。当凹面镜为球面时,难以矫正轴上球差,点列图 RMS 半径约为  $61.2\mu\text{m}$ ,当半视场为  $1^\circ$  时, RMS 半径达  $92.599\mu\text{m}$ ,很多二次曲面(非球面)具有良好的光学性质,图 5-17(b)将凹面反射镜变为抛物面,可将轴上球差矫正为 0,半视场为  $1^\circ$  时 RMS 也仅有  $67.236\mu\text{m}$ 。从这个角度看,作为望远镜主镜时,抛物面似乎比球面镜有着更加优良的表现。

但真的是这样吗?离轴视场入射的光线必然带来彗差。观察到图 5-17 中非球面主镜中  $1^\circ$  视场中的彗差明显比球面主镜带来的彗差严重。打开 Zemax 中像差的分析图(见图 5-18)由图可见球面主镜的像差中绝大部分是球差,离轴彗差并不大,而抛物面主镜虽然可以完美矫正球差,但离轴彗差非常大。这是由于球面有无数的对称轴而抛物面仅有一条对称轴,即使入射角度很小,成像质量也迅速降低。从这个角度来看,使用非球面对于增大望远镜视场未

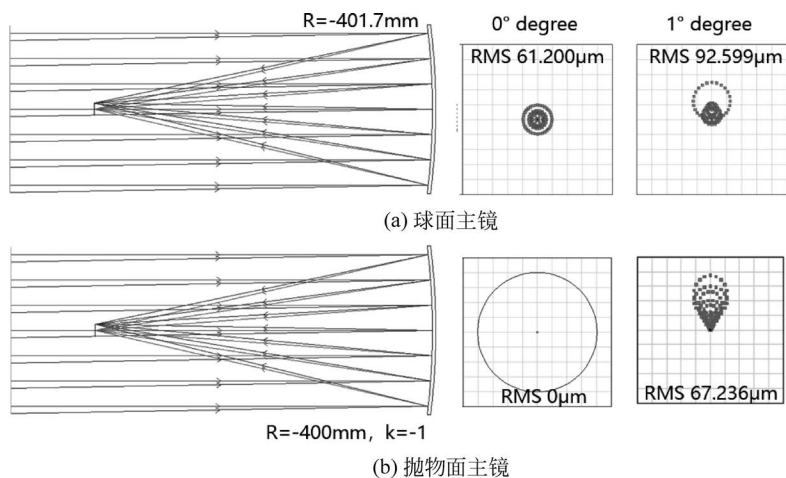
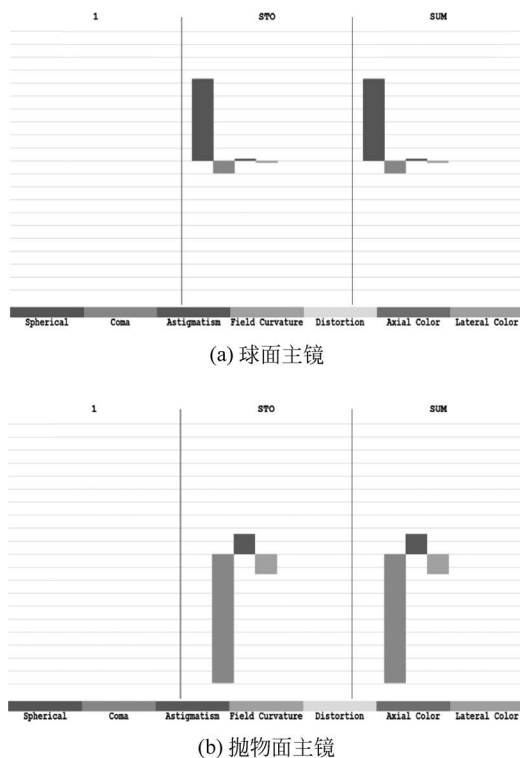


图 5-17 Zemax 仿真反射式望远镜物镜的轴上与离轴视场表现

必是有利的,在更大的视场上,彗差等离轴像差将急剧增加,在设计中应根据实际指标要求综合考虑使用。


 图 5-18 反射式望远镜的  $1^\circ$  离轴视场像差

因此,如果想增加视场,是否可以考虑仍然采用球面反射镜,并配上其他手段矫正球差呢?毕竟轴上球差的矫正手段较多,较之彗差矫正也更为简单。于是,折反混合式望远镜结构便呼之欲出了。

### 5.3.3 折反混合式望远镜设计

折射式望远镜单色像差可控,但有色差且尺寸越大越昂贵,反射望远镜没有色差、造价低廉且反射镜口径可以制造得更大,但可能会出现额外的彗差等离轴像差。因此,结合两者的优势,通过折射透镜补偿反射式物镜的像差成了必然选择,从而出现了很多折反混合式的望远镜。如图 5-19 所示,常见的折反混合式望远镜结构有施密特结构、施密特-卡塞格林结构、马克苏托夫-卡塞格林结构等。

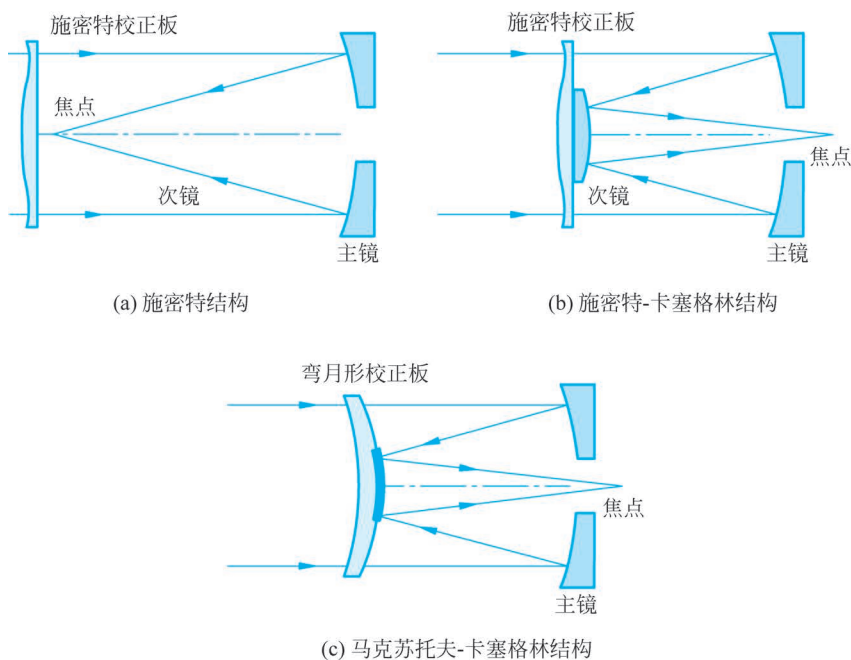


图 5-19 折反混合式望远镜常见结构

#### 1) 施密特结构

1930 年,德国人施密特制成了第一台折反混合式望远镜。施密特望远镜是最常用的大视场望远系统,最大视场可达  $5^\circ$ 。其结构特点为:不采用非球面反射主镜,而是采用球面反射主镜,并用一块弱非球面透镜置于反射镜球心位置,设为孔径光阑,起到矫正单色像差的作用。这种特殊结构使得焦面上各处像点具有成像对称性,因而轴外像差很小。最大的施密特望远镜位于德国陶登堡史瓦西天文台,矫正镜直径为 1.34m,球面直径为 2m,焦距为 4m,视场为  $3.4^\circ$ 。

#### 2) 施密特-卡塞格林结构

施密特-卡塞格林结构承袭卡塞格林的两组式聚焦设计,使用凹球面镜做主镜,以凸球面镜做次镜,并在入射光路中添加施密特校正板来矫正球差。施密特校正板通常设计为非球面透镜形式。有些设计还在焦平面的附近增加其他的光学元件,如平场镜。图 5-20 为视场  $2^\circ$  的施密特-卡塞格林结构设计案例,相对口径为 0.3,筒长小于 300mm,由图可见其像差可以被控制得较好。

#### 3) 马克苏托夫-卡塞格林结构

马克苏托夫-卡塞格林望远镜是另一种折反混合式望远镜。其主镜仍为球面镜,前端采

结构数据

	Radius	Thickness	Material	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Sem	Conic	TCE x 1E-6	2nd Order Te	4th Order Te	6th Order Te
0	Infinity	Infinity		Infinity	0.000	Infinity	0.000	0.000			
1	3.448E+04	4.000	BK7	25.000	0.000	25.047	0.000	-	0.000	-1.708E-08	-3.530E-13
2	Infinity	198.000		25.047	0.000	25.047	0.000	0.000			
3	Infinity	80.000		14.000 U	0.000	14.000	0.000	0.000			
4	-260.559	-76.724	MIRROR	29.921	0.000	29.921	0.000	0.000			
5	-307.116	81.634	MIRROR	13.671	0.000	13.671	-1.540	0.000			
6	Infinity	-		3.491	0.000	3.491	0.000	0.000			

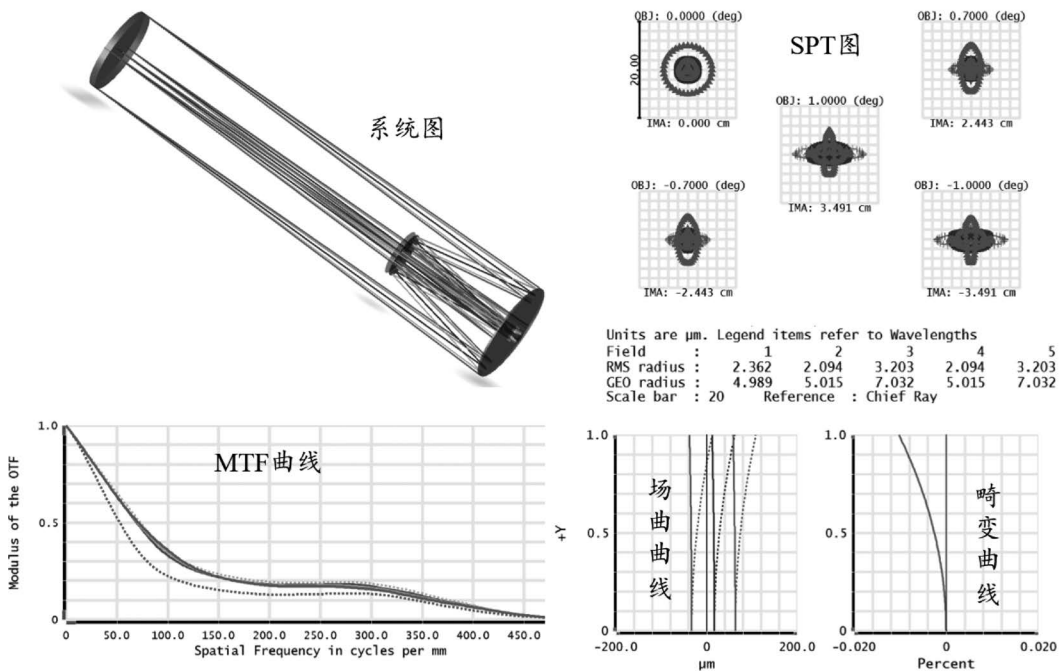


图 5-20 视场 2° 的施密特-卡塞格林结构设计案例

用的校正板为一块较厚的双球面弯月透镜,可消除球差、色差和彗差。大部分的马克苏托夫-卡塞格林结构的次镜,都是直接在弯月透镜后方中央部分镀上铝反射膜。马克苏托夫-卡塞格林望远镜同施密特望远镜一样存在场曲,且焦点很可能处于镜筒内部,其优点是球面弯月镜加工成本相对较低。

**拓展阅读**

**我国大口径光学天文望远镜**

众所周知,我国最大的天文望远镜是位于贵州黔南布依族苗族自治州境内的直径为 500m 的“中国天眼”。“中国天眼”不只是中国最大的,也是全世界最大的单体射电望远镜,但却不是我们通常说的用于光学成像的天文望远镜。那么,中国最大的光学望远镜有多大?

自 20 世纪 90 年代起,国际天文学界见证了一系列 8~10m 级地基光学望远镜的落成,这些设施构成了当前全球顶尖观测阵列的核心。近年来,各国竞相提出 30~40m 级超大口径望远镜的设计蓝图。

我国最大口径的光学望远镜是建于国家天文台兴隆基地的 4~6m 级郭守敬望远镜(LAMOST)。这是一台光谱巡天望远镜,并不具备成像观测的能力。因此只能说郭守敬望

远镜是我国最大的专用型光学望远镜。

我国制造的通用型光学望远镜中最大的是 2.16m 望远镜。它和郭守敬望远镜都位于中国科学院国家天文台兴隆观测基地。另外在云南还有一台从国外购买的 2.4m 的望远镜,是截至目前我国及东亚地区口径最大的通用型光学望远镜。然而早在 1917 年美国就建成了同等级口径的胡克望远镜。这样的境况,让拥有一台大望远镜,成为多年来中国天文学家的梦想。

2016 年之前,获得一架梦寐以求的大望远镜有两个争议方案:一是出资 10% 参加“三十米口径望远镜”(TMT)国际合作项目,获得相应的观测时间份额;二是以中国为主导发起国际合作,自主建造一架大口径望远镜。最终中国天文学界终于达成一致:两条腿走路,除积极参与国际合作大望远镜项目外,也要自主建造一台 12m 口径的大望远镜。而 12m 口径的大望远镜的建成也必将成为一座科学上可占领国际天文研究前沿高地、技术方案上有中国创新和特色并代表未来发展方向的大型天文望远镜。

## 习题

1. 某天文望远镜物镜焦距为 600mm,  $F/5$ , 出瞳直径为 4mm, 求放大率和目镜焦距。
2. 设某开普勒望远镜的孔径光阑为物镜框, 视场角  $2\omega = 6^\circ$ , 视觉放大率  $\Gamma = -6\times$ , 出瞳直径  $D' = 4\text{mm}$ , 出瞳距  $l'_z = 13\text{mm}$ 。试计算:
  - (1) 物镜的通光口径;
  - (2) 视场光阑的口径;
  - (3) 不渐晕时目镜的通光口径。
3. 本章介绍的目镜结构是否适用于其他光学系统的目镜设计?
4. 简述望远镜结构中采用非球面的优缺点。
5. 利用 Zemax 设计一个视场为  $20^\circ$  的惠更斯目镜。
6. 利用 Zemax 设计一个视场为  $2^\circ$ , 相对口径为 0.3, 筒长小于 300mm 的马克苏托夫-卡塞格林结构望远镜。