

卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题

史光辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 对用于卫星对地观测用各种高分辨率长焦距光学系统,如折射系统,折反射系统和反射系统等各种形式和设计问题进行了分析和讨论。

关键词 光学系统 折射 折反射 反射

1 引言

当像敏感器(如感光胶片和 CCD 等)选定以后,光学系统就是决定卫星对地观测相机的性能、体积和重量的首要因素。对地观测能达到的地面分辨率取决于相机的角分辨率。为了获得高的相机角分辨率,就要求光学系统焦距很长,但由于受到口径的限制,相对孔径一般不允许很大,因此对于高的地面分辨率所需的特征频率的传递函数都不高,同时在相机工作过程中,像质还要因受多种因素的影响而降低,因此要求光学系统的像质尽可能达到或接近衍射极限。另一方面为缩小相机的体积和减轻重量,要求光学系统长度和体积尽可能的小,结构尽可能简单,这是一个很大的矛盾。此外,在光学系统设计时,还要考虑环境温度和气压变化对光学系统的影响和采取措施消除或减弱因大气散射,云层反射和太阳光直射等因素产生的杂光以及在保证成像质量的前提下,使光学系统具有宽松的公差要求等许多问题。

由于 CCD 的分辨率还远小于感光胶片的分辨率,因此为达到同样的相机角分辨率, CCD 相机光学系统焦距要比感光胶片画幅式相机长许多倍,太长的焦距会带来诸如体积、重量、材料和工艺方面的许多问题,甚至实现不了,因此为获得比较高的相机角分辨率,今后不仅需要线阵 CCD 推扫式相机,而且仍需要感光胶片画幅式相机。

根据焦距,相对孔径,视场以及波段的要求,相机的光学系统可采用折射式,折反射式和反射式等各种形式。下面分别进行讨论。

2 折射系统

二级光谱校正是光学系统设计时要解决的重要问题。校正二级光谱最有效的方法是采用

有特殊色散的光学材料如 CaF 晶体, FK(氟冕)玻璃等。但有特殊色散的光学材料的折射率温度系数为负值, 即随温度的增加, 折射率值降低, 而普通光学玻璃的折射率温度系数为正值。这样一来, 在消色差的透镜玻璃组合中, 因用特殊色散光学材料的透镜的光焦度为正, 而用普通光学玻璃的透镜的光焦度为负, 因此两种透镜因温度变化产生的对像面位移的贡献是叠加的, 而不像全用普通玻璃的消色差透镜组合对像面位移的贡献是相消的。所以用特殊色散光学材料校正二级光谱的光学系统, 环境温度变化引起的像面位移是很大的, 实际经验表明都大大超过允许的范围。如图 1 为一用三块 FK1 玻璃校正二级光谱的光学系统, 采用 F 线和 C 线消色差, 二级光谱为 0.18mm, 如果允许像面位移产生的波差为 $\lambda/8$, 则要求温度变化范围为 $\pm 0.15^\circ$; 这是很难实现的。

为了减小气压变化对像面位移的影响, 在组成消色差的, 产生正光焦度的透镜组合中, 应选择阿贝数大的, 即正透镜玻璃的折射率大于阿贝数小的, 即负透镜玻璃的折射率, 其差别越大, 受气压变化对像面位移的贡献越小^[1]。一般光学系统都不满足这一要求, 因此折射系统对气压变化要求都比较严。但特殊色散光学材料的阿贝数比普通玻璃大, 而折射率比普通玻璃低, 这就更加重了气压变化对像面位移的影响。仍按 $\lambda/8$ 要求, 图 1 所示系统允许的气压变化仅为 0.01 个大气压。

图 1 所示系统采用了正组和负组分离的远距形式, 为的是缩短筒长(从系统第 1 个折射面的顶点至像面距离)和校正场曲。

综上所述, 为了减小环境温度和气压变化对像面位移的影响, 只能采用普通玻璃校正二级光谱。但由于普通玻璃的相对色散很接近, 为了消除高级像差, 光学系统的结构就必然很复杂。图 2 为完全用普通玻璃校正二级光谱的例子。为了获得大视场, 采用了分离的正组, 负组和正组的三片形式。在设计中运用了利用本征色差校正二级光谱的设计思想^[2], 让正组产生负色差, 负组产生正色差。仍采用 FC 消色差。设计结果, 二级光谱量仅为 0.06mm。同样按 $\lambda/8$ 要求确定允许产生的像面位移量, 则允许温度变化量为 $\pm 2^\circ$; 比前例放宽了 13 倍。如果将二级光谱量增加到和前例同样的数量级, 则允许的温度变化范围还要宽。允许的气压变化范围也放宽了, 因为除了采用普通玻外, 又由于产生负色差的两正组透镜玻璃组合的折色率差很小(0.06), 而产生了正色差的中间负组的透镜玻璃组合的折射差很大(0.3), 这都有利于降低气压变化对像面位移的影响^[1]。同样的要求, 允许的气压变化为 0.05 个大气压, 比前例放宽了 5 倍。

就结构形式而言, 除了远距形, 三片形外, 常用的

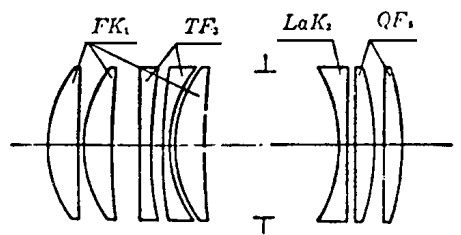


Fig. 1 Telephoto type using special dispersion glass FK1 to correct secondary spectrum, focal length 1.7m, F/7, field of view 12°

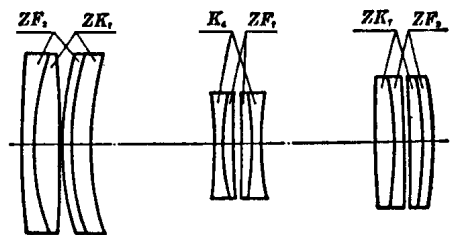


Fig. 2 Triplet type using normal glass to correct secondary spectrum, focal length 1.7m, F/7, field of view 18°

还有匹兹瓦形、即分离的正组和正组形式。这种形式可降低二级光谱,但场曲增加了。为校正场曲,需在像面前加一负场镜。该形式结构比较简单,但筒长大于焦距。图3为美国 Itek 公司研制的,用于航空相机的光学系统图^[3]。用对比为 2:1 分辨率测试卡,3414 底片并加黄滤光片进行拍照得到的静态分辨率为 120lp/mm。

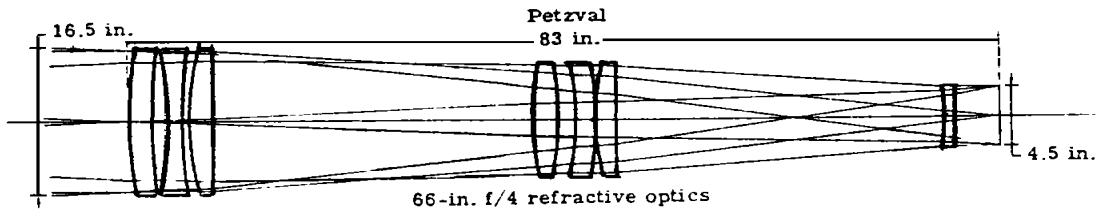


Fig. 3 Petzval type with field flattener, focal length 1.68m, F/4, field of view 6°

加黄滤光片的目的是为消除大气散射产生的杂光而将 $0.5\mu\text{m}$ 以下的波长光滤掉。而 $0.7\mu\text{m}$ 以后的波长光被底片截止。这样波长范围变为 $0.5 \sim 0.7\mu\text{m}$ 。对该波段可采用 e 线和 C 线消色差,这比起可见光波段采用 FC 消色差,二级光谱

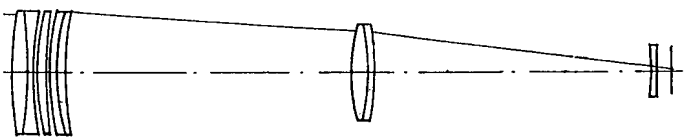


Fig. 4 Petzval type with field flattener taking C light and e light to correct chromatic aberration, focal length 1.7m, F/5.6, field of view 5.5°

要降低到 1/2 到 1/3 倍左右(和玻璃有关)。因此光学系统结构也可相对简单些。图4即为 e、C 消色差的例子。开始设计时,采用的是 F、C 消色差,让后组(双胶合,用 TF3 和 K9 玻璃)产生的二级光谱为 1 个波长,前组完全消二级光谱。后来改成 e、C 消色差,稍加重新进行像差平衡后,后组的二级光谱降低了一半多,前组的二级光谱变成了正值,和后组抵消了。因此系统的二级光谱几乎完全得到校正(小于 0.01mm)。计算传递函数时,取 D、e 和 C 线的平均值,得到 120lp/mm,中心视场 MTF 为 0.46,而衍射 MTF 值为 0.51。说明二级光谱很小,边缘视场的 MTF,弧矢为 0.42,子午为 0.29,也是比较高的。如果用同样的条件进行拍照试验,该系统的静态分辨率应当高于图3所示系统。但该系统多了一块透镜。

折射系统的缺点是口径不能做成很大。这是因为长焦距折射式光学系统对玻璃的光性要求很高。如图4所示系统,按 $\lambda/8$ 要求,折射率误差应小于 2×10^{-6} ,对光学均匀性的要求也同样的高。大块光学玻璃是很难满足这样的要求的。此外,对环境温度和气压变化要求高也是一大缺点。温度变化除产生像面位移外,温度梯度还会产生像差使像质变坏。消除温度梯度影响只能选用低膨胀系数的玻璃。但至今,低膨胀系数玻璃还不能用在折射系统中。

综上所述,折射系统适于口径比较小,视场比较大,波段比较窄的光学系统。

3 折反射系统

优点是:1、因为光焦度几乎都是由反射面产生的,而反射面不产生色差,因此二级光谱很小,不存在二级光谱校正问题。2、能用低膨胀系数的玻璃做反射镜,同时用低膨胀系数金属做反射镜的支撑材料,因此可使光学系统对环境温度的变化不敏感。3、因光经反射镜面反射前后的介质(通常为空气)相同,因此在气压变化时反射镜对像面位移无影响,而折射元件的光焦度

很小,因此折反系统对环境气压变化亦不敏感。4、光学系统结构比折射系统简单。缺点是:1、有中心遮拦,不仅会损失光通量,而且会降低中、低频的衍射 MTF 值。2、反射面面形加工精度比折射面要求高,约为 4 倍。3、装调困难,同心度不易保证。

常用的大视场折反系统是施密特形式。典型的施密特形式筒长很长,法国 Spot 资源卫星上用的 CCD 线阵扫描相机的光学系统用了所谓的准施密特形式。图 5 为按此形式设计的一个同样用于线阵 CCD 扫描的光学系统^[4]。设计质量,在 9° 视场内,50lp/mm 的 MTF 值达到或接近了衍射值。和 Spot 光学系统不同的是,场镜多了一块透镜,但视场增加了一倍。由于中心遮拦为一长孔,就面积而言,遮拦很小,因此对光通量和像质影响不大。

将图 4 所示系统前面的无光焦度校正透镜组放在球面反射镜和像面之间,可进一步缩短筒长。这样一来,球面反射镜的入射和反射光都要经过该透镜组,于是形成了具有两次透射的无光焦度透镜组。美国 CA910 航空相机就是采用这种形式^[5]。图 6 为按这种形式设计的一个光学系统^[6]。像质达到了衍射极限。

施密特系统的缺点是筒长长,体积大。即使是图 6 所示系统,长度也超过了焦距。为了减小体积,缩短筒长,一般都采用卡塞格林形式。由于光经过两次折反,筒长可大大的缩短。典型的卡塞格林系统视场很小,为了增大视场,若采用球面系统,校正五种像差,则需在系统的物方和像方各加一组校正透镜组,物方为无光焦度透镜组,像方的可称之谓场镜,其光焦度与主镜和次镜光焦度相匹配以校正场曲。

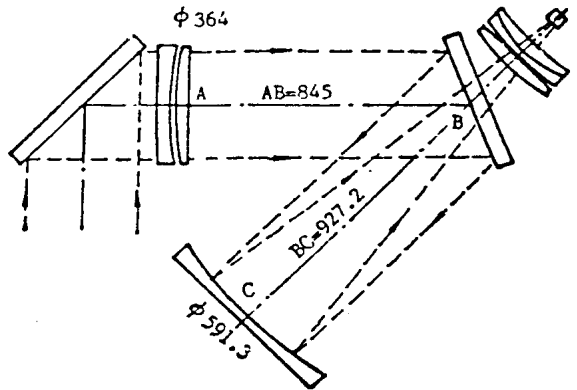


Fig. 5 Pseudo Shimidt system focal, length 1.25m, F/3.5, field of view 9°

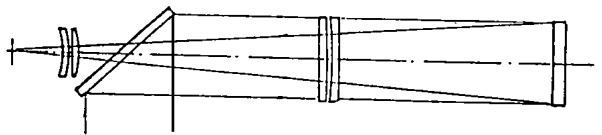


Fig. 6 Pseudo Shimidt system with through-twice afofocal corrective lens, focal length 2.7m, F/5.5 field of view 3.42°

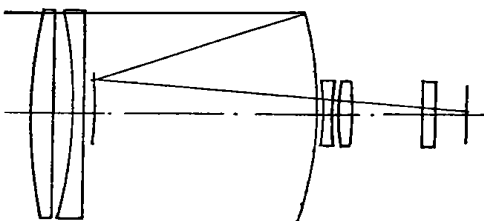


Fig. 7 Cassegrain system with afocal corrective lens and field lens, focal length 2.8m, F/8, field of view 3.2°

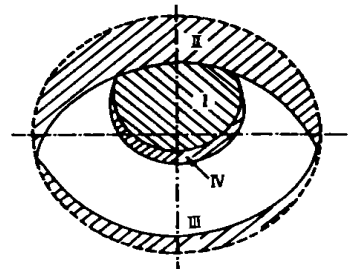


Fig. 8 Vignetting case of marginal field of view on the entrance pupil section. Shading indicates image rays prevented by central obscuration (), front aperture of the baffle barrel (), aperture of the primary mirror (), outside wall of the baffle barrel ()

一实例见图 7。在设计中,中心遮拦比和主、次镜的间隔是两个重要参数,需进行优选,它和相对孔径与视场大小有关,同时受到衍射 MTF 和高级像差的限制。该系统的 MTF 可达到或接近衍射值。但边缘视场的衍射 MTF 值比较低。因为边缘视场的衍射 MTF 不仅受中心遮拦的影响,还受到因拦光而产生的渐晕的影响。图 8 为边缘视场在入瞳面上的拦光情况。(孔径光阑设在次镜上)可见通光只有轴上像点 50% 左右。因此卡塞格林系统的视场不应设计成很大,一般应在 2° 以内较合适。

图 9 为一个适用于 TDICCD 扫描相机的小孔径,小视场的球面卡塞格林系统。次镜为一内反射镜,该负透镜和相邻的一块正透镜组成了一个两次透射的无光焦度透镜组。40lp/mm MTF 值,轴上为 0.45,边缘视场为 0.39。无中心遮拦的衍射 MTF 值为 0.56。

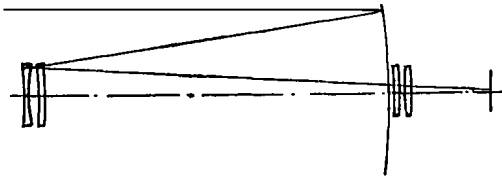


Fig. 9 Cassegrain system with through-twice afocal corrective lens and field lens may be used to small aperture and small field of view, focal length 5m, F/10, field of view 1.5°

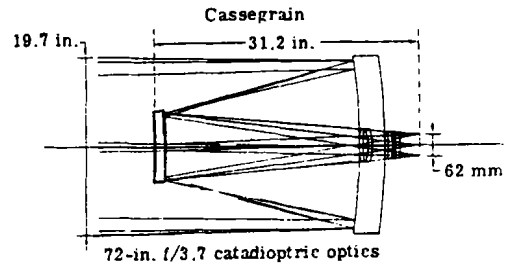


Fig. 10 Cassegrain system with two conic aspheric surfaces and two rear corrective lenses. Focal length 1.83m, F/3.65, field of view 1.9°

在图 7 所示系统中,如果将主镜和次镜设计成非球面,则可省掉前面的无光焦度透镜组。图 10 为美国 Itek 公司研制的航摄相机光学系统图^[7]。主镜为抛物面,次镜为双曲面,用对比为 2:1 的分辨率测试卡,3414 底片,加黄滤光片进行拍照,静态分辨率为 190lp/mm。如果主镜也用双曲面,后面只用一组校正透镜组就可以了,但对双曲面的检测要比抛物面困难得多,因为需要一个标准的参考球面。

图 11 为一个包括三个非球面的卡塞格林系统^[8]。主镜和次镜均为 6 次方非球面,场镜最后一面为一 4 次方非球面,是为校正畸变的,如果用弯曲校正畸变,会产生较大的高级像散。像质达到或接近了衍射极限。最大畸变为 0.14%。

为了获得较大视场和相对孔径,还可采用图 12 所示的施密特——卡塞格林系统。视场可大于 4° 。其特点是在离球面主镜 1.4 倍焦距处放一块施密特校正板。孔径光阑置于其上。主镜的口径比较大。筒长比施密特形式短,但比卡塞格林形式长。

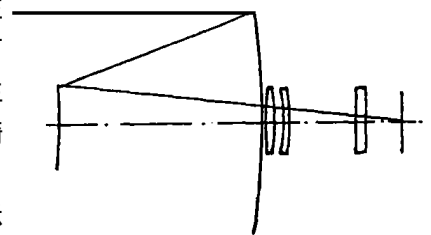


Fig. 11 Cassegrain system with three aspherical surfaces, focal length 2.8m, F/5.6, field of view 3.2°

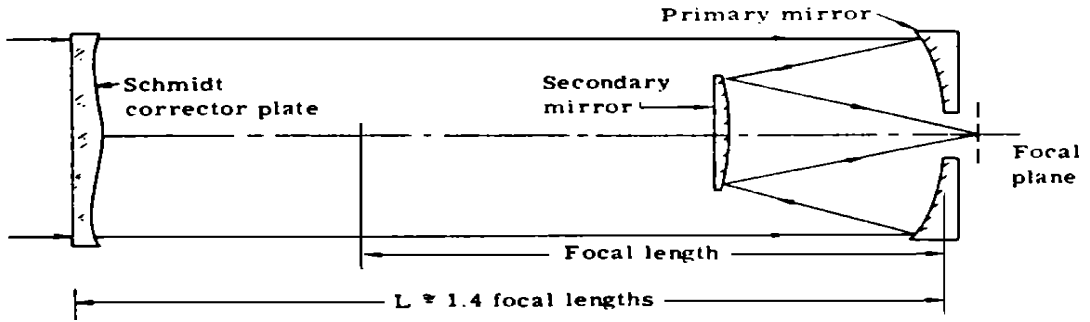


Fig. 12 Schmidt-Cassegrain system

4 反射系统

系统全为反射面。优点是通过的波段不受波长限制, 不像折射系统和折反射系统, 通过的波长受折射元件光学材料的限制, 因此很适用于紫外和红外摄影系统。还有设有色差, 结构简单的优点。缺点是需采用非球面, 光学和检测工艺难度大, 装调亦困难。

常用的是由两个反射镜组成的卡塞格林系统。主镜为抛物面, 次镜为双曲面, 仅能校正球差, 因此视场很小, 如果主镜也改用双曲面, 则能校正两种像差, 球差和彗差, 因此视场可大些。通过适当地选择中心遮拦比和主、次镜的间隔, 使两个反射面的顶点半径接近相等或相等, 则可校正场曲。中心遮拦比可以比较小, 对通光和像质影响不大。美国KH 侦察相机和哈勃太空天文望远镜都采用这种形式。哈勃望远镜的主、次镜都用了双曲面, 视场也只有 28°。

从 70 年代开始, 出现了三反射镜系统^[9]。即在卡塞格系统次镜后再加进一个第三反射镜。三个反射面采用三个非球面可以校正球差, 彗差和像散等三种像差。对小相对孔径, 小视场系统可采用二次曲面, 对比较大的相对孔径和比较大的视场, 系统为校正高级像差可采用二次(或四次)加 6 次方以上的高次曲面。利用非球面方程中 6 次方以上的高次项可有效地校正高级像差。和两反射镜卡塞格林系统比较, 三反射镜形式一个突出的优点是设有防止直接射到像面的杂光问题, 因此可不在主镜上加消杂光筒, 这就有利于避免轴外视场因杂光筒而产生的拦光现象。这不仅增加了轴外视场的光通量, 使像面照度均匀, 更重要的是大大提高了轴外视场的成像质量。因而三反射镜形式有利于设计较大的视场。

三反射镜形式可以设计成一次成像系统, 也可以设计成二次成像系统; 可以设计成轴对称的共轴系统, 也可以设计成视场, 或视场和孔径为离轴的共轴系统。如果对畸变无要求, 也可以设计成非共轴系统。共轴是指三个反射镜的球心于一条直线上, 不在一条直线上即为非共轴。

图 13 为一个一次成像轴对称共轴系统。图 14 为一个二次成像轴对称共轴系统。为把像从光路中移开, 需在像面前或中间像面处置一小平面反射镜, 因该镜处在光路中, 因此会产生二次

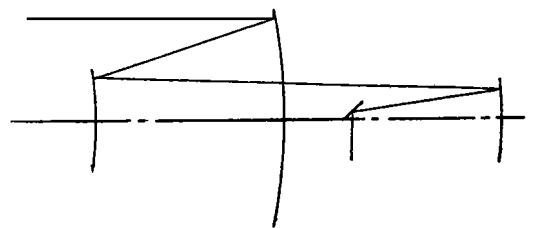


Fig. 13 On axis three-mirror system with common axis and single image

像。

遮拦。所以视场不能大。可用在线阵扫描相机中。

为避免二次遮拦, 可以把轴对称系统中的轴外视场作为可用的视场, 可称这样的视场为离轴视场。相应的反射镜的可用的通光孔径也变为离轴的了, 但作为孔径光阑的反射镜仍然是轴对称的。这种被利用的部分轴外视场中心相对光轴的视场角可称之为离轴视场角。这样做的结果, 代价是体积增加了, 加工, 检测和装调的难度也增加了。

如果将该系统用在线阵扫描相机中, 则可采用很小的离轴视场角就可以了, 而整个系统可以保持轴对称的。图 15 所示系统是这样的例子。它采用了二次成像系统。好处是在中间像面上可设置一光阑, 能有效地防止杂光。一次像成在主镜面的顶点处。第三镜面的成像倍率为 1 倍。A 点为轴外一次像点, 和它对称的 A' 点即为 A 点经第三镜成的最终像点。在 A 点设置一同像元同样宽的窄缝作为光阑。孔径光阑设在主镜上, 这样实际上次镜和第三反射镜的通光孔径为非轴对称的。如果仍取轴对称的(对加工, 装调和检测有利)并不增加体积, 重量增加很少。

设计时取中心遮拦比(次镜和主镜的轴上光孔径比)为 0.2, 加上边缘通光孔径后, 实际中心遮拦比为 0.3。三个反射面均为二次曲面, 主镜面和第三反射镜面均为椭球面, 次镜为双曲面。表 1 为该系统的 MTF 值, 都是衍射值。没有中心遮拦的衍射 MTF 值为 0.56, 可见中心遮拦的影响不算大。然而轴上和轴外视场 MTF 值比较平均, 且子午和弧矢几乎相同。畸变为 -3.1%。筒长(次镜至第三镜的距离)不能取得太短, 因为畸变随筒长的减小而显著增加。下面为三个中心遮拦比和筒长对应的畸变值:

field	sagittal MTF	tangential MTF
0	0.492	0.492
0.7	0.462	0.457
1.0	0.462	0.461

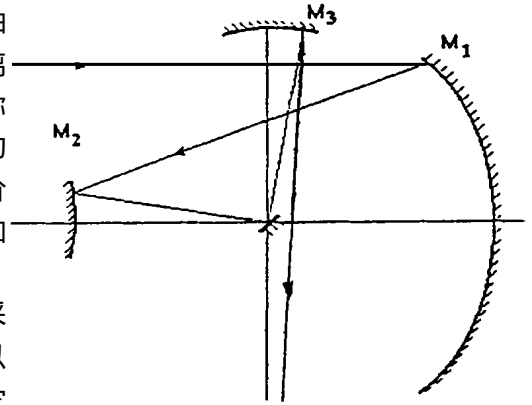


Fig. 14 On axis three-mirror system with common axis and reimaging

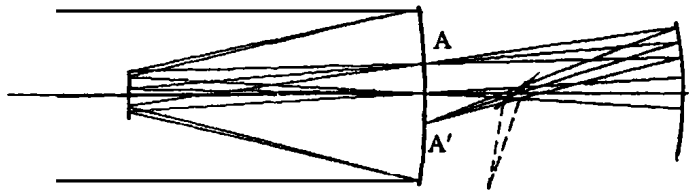


Fig. 15 Off-axis in field three-mirror system with common axis and reimaging, focal length 5m, $F/10$, field of view 1.2°

中心遮拦比	筒长	畸变
0.16	1269.2	- 10.9%
0.18	1558.0	- 5.5%
0.20	1890.2	- 3.1%

选择中心遮拦比和筒长时,还要考虑光学工艺和装调允许的公差。中心遮拦比很小,筒长很短,公差会很严。

通过加大离轴视角,可以将中心遮拦从孔径中消除,这样视场和反射镜的通光孔径就完全离轴了,于是就形成了视场和孔径都离轴的共轴系统。因无中心遮拦,通光增加了,像质也提高了。图 16 为 Santa Barbra 研究中心设计的一个用于 CCD 线阵扫描的,无中心遮拦的一次成像,视场和孔径均离轴的共轴系统^[10]。孔径光阑放在次镜上。像质达到 40lp/mm MTF 值全视场平均为 0.83,衍射值为 0.87。主镜面为 2 次和 6 次,8 次方非球面。次镜和第三反射镜面为二次加 6 次方非球面。此例说明三反射镜可以设计成较大的相对孔径和较大的视场。

图 17 为(Alabama 大学应用光学中心设计)用于紫外光(1200 - 2200 Å),面视场,二次成像,视场和孔径均离轴的共轴系统^[11]。为严格地消杂光,除在中间像面放置光阑外,还将孔径光阑放在主镜的前边,并在其共轭位置,像面的前边放一个光阑。系统的角分辨率为 390μrad,相当于像面分辨为 20lp/mm。三个镜面均为二次加 6 次、8 次和 10 次方非球面。

此外,施密特系统也可以设计成全都是反射面的形式^[12]。如图 18。这种系统可设计成大相对孔径和大视场,但体积很大,虽经过几次反射,总长仍为 3.915m,几乎为 2 倍焦距长。

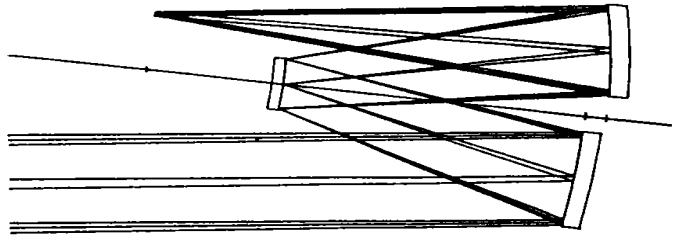


Fig. 16 Off-axis in field and aperture three-mirror unobscured system with common axis and single image. Focal length 1m, F/4.5, field of view $15^\circ \times 0.6^\circ$

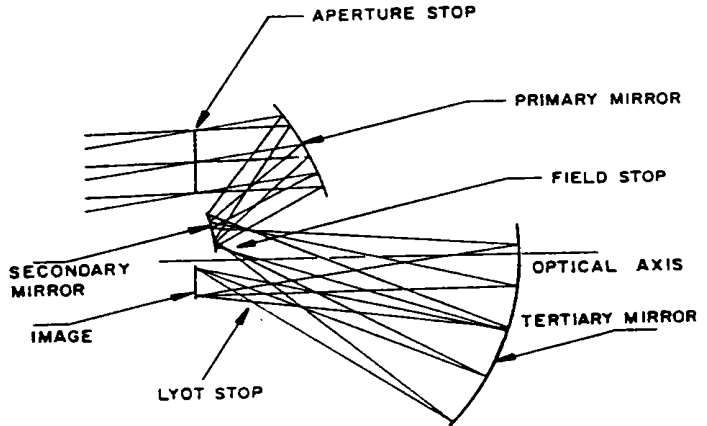


Fig. 17 Off-axis in field and aperture three-mirror system with common axis and reimaging. Focal length 128.9mm, F/3, circle field of view 8°

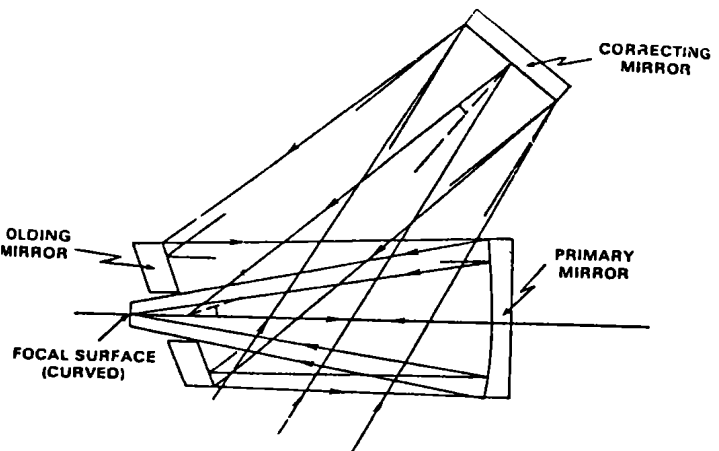


Fig. 18 Reflect Schmidt system focal length 1.97m, F/2 x F/3.28, circle field of view 4.67°

至于非共轴系统, 因为会产生子午和弧矢放大率不一致的畸变, 一般不用。但如果允许少量畸变, 将反射镜进行小量的倾斜或平移, 可改善像质^[13]。

参 考 文 献

- 1 史光辉, 姜会林. 环境温度气压变化对像面位移的影响与二级光谱校正. 光学学报, 1983, 3(7): 588 ~ 602
- 2 史光辉. 利用本征色差校正二级光谱. 光学学报, 1981, 1(5): 434 ~ 439
- 3 Coughlin John F. Introduction to long focal length Catadioptric system. Proc SPIE, 1980, 242: 84 ~ 90
- 4 史光辉, 丁甲民. 长焦距大视场折反系统光学设计. 光学学报, 1991, 11(7): 651 ~ 655
- 5 Ulms James J. Design of Catadioptric Lens for Long-range Oblique Aerial Reconnaissance. Proc SPIE, 1980, 242
- 6 史光辉. 具有两次透射的无光焦度正透镜组的准施密特系统. 光学学报, 1998, 18(3): 373 ~ 375
- 7 Henry J. Fredrickson, 72- in long oblique photography (lorop) camera. Proc SPIE, 1980, 242: 14 ~ 21
- 8 史光辉. 含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计. 光学学报, 1998, 18(2): 238 ~ 241
- 9 Korsch D. Three mirror space telescope. Opt Eng. 1975, 14(6): 533 ~ 535
- 10 Figoski Thon W. Development of a three-mirror wide-field sensor from paper design to hard ware. Proc SPIE, 1989, 1113: 126 ~ 133
- 11 Johnson R Barry. Wide field of view three-mirror telescopes having a common optical axis. Opt Eng., 1988, 27(1): 1046 ~ 1050
- 12 Criveller P. J Optics, 1980, 11(6): 364 ~ 372
- 13 Cook L G. Three-mirror anastigmat used off-axis in aperture and field. Proc SPIE, 1979, 183: 207 ~ 211

High Resolution Optical Systems Used to Observation from the Satellites to the Earth and Problems in Design

SHI Guang-Hui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

High resolution optical systems including refractors, catadioptric lens and reflectors used to observation from the satellites to the earth is presented and the problems in design is discussed.

Key words: Optical system, Refractor, Catadioptric lens, Reflector

史光辉 男, 1935年12月生, 研究员。1961年毕业于哈尔滨工业大学后一直在长春光机所从事光学设计。