

# 移动式光电经纬仪光学设计

王立升

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

**摘要** 论述了光电经纬仪的光学总体设计,探讨了总体方案的优化选择,说明了各光学分系统的光路结构及主要光学参数的确定方法,给出光学设计结果,并指出了设计特点,对主要光学公差作了简要的分析。

**关键词:** 光电经纬仪; 总体设计; 卡塞格林系统; 孟琴镜

## 1 前 言

靶场光测设备,国内外已研制生产几十种型号,就其折反式光学系统结构,主要是二种,一种是牛顿式,另一种是卡塞格林式。该仪器根据总体性能要求,综合了各种方案的利弊,选用了穿轴式卡塞格林系统。这种系统虽然结构和装调显得复杂些,但从总体角度看,这种结构镜筒比较短,机械立柱也比较低,水平轴负荷可以减轻,这对小型仪器是很有利的。

60年代初研制的中型电影经纬仪采用了在卡塞格林折反射系统中加入无光焦度校正板和孟琴镜结构方案。孟琴镜主要用来校正二级光谱。但它不论是加工还是装调要求都比较复杂。在该系统中,总结了以前光学设计方面的成熟经验,在设计中做了一些改进。该系统中把孟琴镜换成单反射镜,降低一些光学件的加工精度要求,不但克服了孟琴镜的弊病,也简化了结构,同时保证了系统的质量。

现代的光测设备,需要多种测量手段,因此需用多种光路系统来传递光学信息,这些光路有独立系统。也有互相关联系统,为使总体结构简单、紧凑、使用方便,需综合考虑各分支光学系统之间的关系。所以在进行该仪器的光学设计时,应考虑光学总体设计,各分系统的光学设计及加工、装调公差等。

## 2 光学整体设计

所谓光学整体设计,就是根据总体结构,战术性能指标及使用要求等,确定光学整体方案、组成部分、主要光学参数和光路部局。

### 2.1 光学系统的组成部分

为了实现观察、记录、测角、自动捕获、跟踪、测距、显示、监视等目的,确定该仪器应具有10个光学系统。

摄影记录光学系统,瞄准望远镜系统,十字丝投影系统,点阵投影系统,画幅观察和点阵观察系统,激光发射系统,激光接收系统,电视跟踪测量光学系统,连续变焦距电视监视系统,编码器光学系统。

## 2.2 光路整体结构考虑

这么多光路都自成系统安装在仪器上,必然使仪器过分复杂庞大。我们必须从整体考虑,进行合理地结构安排。

在该仪器中,采用了多分支光学系统共用主摄影光路的方案。即把激光接收光学系统、主摄影光学系统、十字丝定标系统、点阵观察、画幅观察系统及点阵投影系统共用一个主光路系统。

利用光谱分光办法,使摄影系统主镜室部分光路和激光接收系统共用,凡是共用的光学零件的材料和镀膜,必须考虑可见光和 $1.06\mu\text{m}$ 波段的反射率和透过率。用镀膜办法制成分光元件,使其反射可见光,供摄影用,透 $1.06\mu\text{m}$ 波段供给激光接收用。

十字丝投影系统是取一准直物镜与主镜配合,并利用主光路的中心遮光部分将十字丝投影光路混合到主光路中,并共用摄影系统中的变倍物镜,使十字丝和目标共像面。

目视取景系统是用一块移动反射棱镜移入摄影系统,实现画幅观察。目视取景系统采用双准直物镜,在双准直物镜中间的平行光路中,插入另一块反射棱镜,就可观察到点阵。做一大视场目镜,这样画幅观察和点阵观察可共用一个目视系统。

共用主光路,除了结构紧凑、减小体积之外,由于同轴性好,也保证了仪器精度。整体光路部局示意图,如图1。

这是三维的立体示意图,图中摄影主镜筒是水平位置(即俯仰角为零)。激光接收系统是在主镜尾部,这样可减少配重,十字丝投影系统靠近主镜筒壁,这样,不增加仪器的外型尺寸,摄影变倍系统以及点阵投影、目视观察系统的一部分,都在机体立柱里边,充分利用仪器的内部空间。

测量电视系统、瞄准望远镜系统、以及连续变焦距电视系统都自成独立系统,它们分别在水平轴两端。(在图1中没画这三部分)。

## 2.3 主要光学参数的确定

这里所说的主要参数是主光路系统的主要光学参数。

### 2.3.1 焦距的确定

该焦距主要和测量精度及作用距离有关。当给定测角精度 $\leq 1''$ ,底片的判读精度 $\geq$

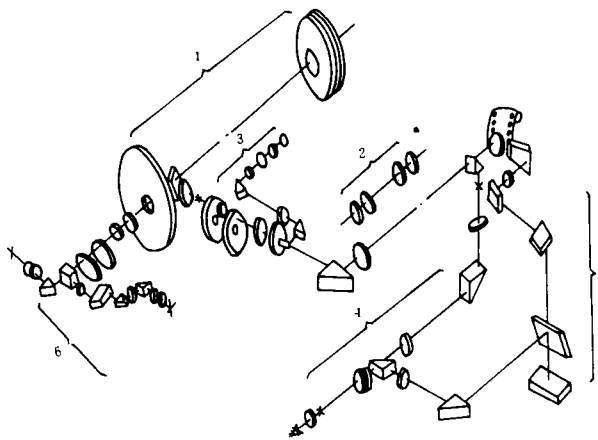


图1 整体光路部局示意图

1 摄影系统主光路,2 摄影变倍物镜,3 十字丝投影系统,4 目视观察系统,5 点阵投影系统,6 激光接收系统。

0.01mm,可求出焦距为 $f \geq 2000\text{mm}$ ,也就是说在判读精度一定的条件下,焦距越长,测角精度越高。但是对于地对空使用的光学仪器,由于大气抖动,焦距越长对测量影响越大。另一方面根据作用距离选择焦距。当给定目标尺寸和它的像在接收器上的极限尺寸以及作用距离,即可求出焦距长度。比如目标尺寸为1米,(等效圆直径),底片上像点直径的最小极限取 $\geq 0.025\text{mm}$ ,作用距离 $\geq 100\text{km}$ ,则焦距 $f \geq 2500\text{mm}$ 。以上计算是在目标和背景在接收器上的对比度大于接收器对比度阈值,目标在接收器上的能量大于接收器灵敏度阈值情况下考虑的。

### 2.3.2 仪器口径的确定

仪器口径是由进入仪器能量要求决定的,对一定的目标和一定的作用距离而言,口径越大,目标对口径的张角越大,进入仪器的能量就越多。当焦距一定时,口径大,则仪器的相对孔径也大,这样像面照度也提高了。当要求底片光密度 $D$ 等于0.5,曝光时间为0.01s时,则像面照度需要16lx,由公式(1)可求出摄影系统所需的相对孔径。

$$\frac{\pi B(\text{熙提})}{4A^2} \times \tau \times 10^4 = E \text{lx} \quad (1)$$

$B$ 为目标亮度估计0.5熙提。 $\tau$ 为大气透过率估计0.6, $E$ 为像面所需照度,一般为16lx, $A$ 为相对孔径倒数。由此求得 $A=12$ 。一般希望密度高一些,所以取 $A=11$ ,在焦距2500mm情况下,则有

$$\varnothing = \frac{2500}{11} = 227.27(\text{mm}) \quad (2)$$

$\varnothing$ 为仪器口径。由此看出,提高底片的感光度,对减小仪器口径将是有益处的。

### 2.3.3 视场角的确定

在选定接收器后,比如选用35mm摄影胶片,去掉点阵用去部分,给摄影的实际尺寸为 $18.8 \times 18$ ,由此算出长焦距的视场角为 $35.8'$ 。

## 3 各分系统的光学设计

根据光学整体和机械结构对光学系统提出的要求,对各分系统进行具体设计。

### 3.1 摄影光路系统

在整体设计中已确定了焦距、口径、视场等主光学参数,并选定了卡塞格林式光路形式,但是卡塞格林形式本身,又有不同的具体结构形式。选取了六种形式进行计算、比较、论证。最后选的光路如图1中的1,2部分所示。由校正镜,主反射镜,次反射镜,45°反射镜,第一场镜,变密度盘,滤光片,准直镜,反射棱镜,长焦物镜,短焦物镜,第二场镜所构成。光学参数为 $f=2509\text{mm}, 1263\text{mm}$ ;相对孔径为 $1/10.9, 1/6$ ;视场角为 $0.54^\circ, 1.12^\circ$ ;筒长为450mm,遮光比为 $1/5$ 。

#### 3.1.1 该光路的主要特点

去掉了孟琴镜。以往在加工同类工程中的孟琴镜时,材料的选择及加工装调,都非常困难,那么不用孟琴镜是否行呢?按着一般情况,如果不用孟琴镜,只能用特殊材料,(比如TF3, CaF, FK等),这些材料的某些性能和制造不如一般的光学材料,即使用特殊材料,也只能使二级光谱减小 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。而且由于材料的限制,对校正其它像差少个变数,这样使结构复杂化了。经过多方面的考虑和大量的计算,只用一块反射镜就代替了原来的孟琴镜,即没有特殊材料,也没用非球面,(国外K400, EOTS用了非球面,国内加工非球面比较困难)。光路也不复杂,二级

光谱仍能满足像质要求。

去掉了调焦光楔。用准直镜沿轴移动,实现调焦。

### 3.1.2 光路尺寸计算

卡塞格林系统的筒长和遮光比主要和第一像面前焦距有关。此焦距越短,筒长也越短,遮光比也小,见图2。

因为物方视场角已由总的短焦时的视场所确定,所以当给定遮光比为1/5时,则有遮光口径为40mm,第一像面的像高为20mm,物方最大视场角(即短焦的对角线方向)为±0.6093°,则有

$$f_1 = \frac{20}{\text{tg}0.6093} = 1880(\text{mm}) \quad (3)$$

$f_1$ 为第一像面前焦距。取  $f_1=1850\text{mm}$ 。

主反射镜的相对孔径一般不大于1:2.5,为便于设计和加工,取1:2.8,则有

$$2(h_1 - h_2)/d = 1/2.8 \quad (4)$$

$h_1=100\text{mm}$ ,为口径的一半, $h_2=20\text{mm}$ ,为遮光口径的一半,则有  $d=448\text{mm}$ 。 $d$ 为筒长。

从体积、重量以及光学设计角度,都希望第一像面到第二像面的尺寸小。由于机械结构尺寸的需要,使得该共轭尺寸长达567mm,如果也用推拉变倍,并采用物像交换原则的变倍形式,设两种总焦距值之比为 $\beta$ ,则长焦第二像面与第一象面的像高之比为 $\sqrt{\beta}$ ,而短焦时为 $\frac{1}{\sqrt{\beta}}$ ,设共轭距为 $L$ ,物距为 $L_1$ ,像距为 $L'_1$ ,则有下面关系式:

$$L_1 = L/(11 + \sqrt{\beta}) \quad (5)$$

当  $L=567\text{mm}$ ,  $\beta=2$ 时,  $L_1=234.88\text{mm}$ ,  $L'_1=332.12\text{mm}$ ,透镜移动距离为  $L'_1 - L_1 = 97.24\text{mm}$ ,这比原系统透镜移动距离长了,这对精度和结构都不利,说明推拉变倍是不可取的。采用双准直物镜的方法,用其一调焦,另一物镜变倍,这是有利的。

### 3.1.3 像差校正

用无光焦度校正板和主、次反射镜配合消除轴上像差,并照顾轴外像差,二个准直镜单独消色差,综合考虑其余像差,负场镜用来消畸变和场曲。表1,是每毫米60对线时,不同视场的传函数。

表1

弥散盘 光谱	视场			OTF 光谱	视场		
	0	0.7	1		0	0.7	1
D谱线	0.0005	0.009	0.004	T.S.D	0.8	0.6	0.3
C谱线	+0.003	0.0008	0.0027	C	0.7	0.5	0.36
F谱线	0.0007	0.01	0.03	平均值 F	0.7	0.5	0.3

实测结果:61lp/mm。

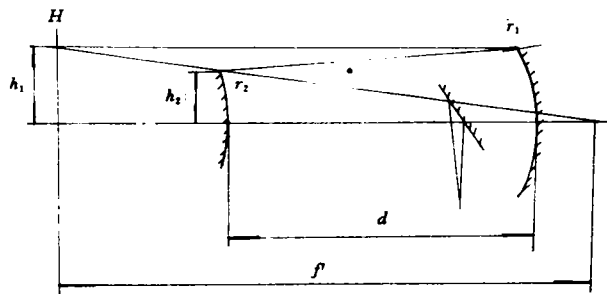


图2 光路尺寸计算图

### 3.1.4 透过率估算

根据现镀膜技术对可见光单面透过率可做到99%，单反可达98%，对透射面的光谱分光面对可见光的透过率为96%。共用的透光面，对可见光的透过率按96%计算，共用的反射面对可见光反射率按96%，1cm厚的玻璃透过率按99%计算如下：

$$\tau = 0.98^3 \times 0.96^3 \times 0.99^{26.5} = 60\% \quad (6)$$

### 3.1.5 杂光

对折反射系统的杂光一般比透射式系统的杂光要小，但是卡塞格林式系统，非成像光可直接射入45°反射镜后而进入像面，所以对于一次成像的卡塞格林系统，如果不是特殊消杂光，它的杂光是很大的。

对于二次成像的卡塞格林系统的直射杂光是可以消除的。见图3：

将次镜  $AB$  看做光阑， $A'B'$  为光阑的像，则  $AB$  以内的光，虽然直接进入45°反射镜，都将落在  $A'B'$  的外边，( $AB$  以外的光，射入主反射镜上的，都在  $A'B'$  内)。因为  $AB$  并不是经主反射镜成像，而是经过45°反射镜后，再经过场镜、准直镜成像。所以只要在  $A'B'$  处再加一比  $A'B'$  直径小的光阑，就完全可以消除直射入的杂光。对该系统  $AB$  即是次反射镜，其直径尺寸为50mm，它经过45°反射镜、场镜、准直镜刚好成像在直角棱镜上，像的尺寸为28.56mm，而直角棱镜的直角面尺寸为20×20mm，对角线尺寸为28.28mm，小于次镜的像，所以该棱镜即起消杂光作用。

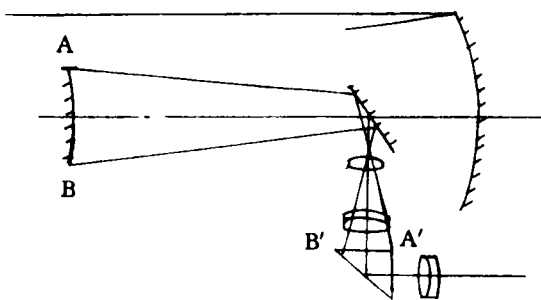


图3 消杂光原理图

对于筒壁的杂光，一般都是将筒壁作消杂光处理，即加消光螺纹，涂消光漆或植绒。但对强光直射在筒壁上(比如太阳等)，产生的杂光很强，对成像的对比有很大影响，所以应在镜筒前加遮光筒。当观测方向和太阳夹角为36°，镜筒内径为230mm时，杂光筒需313mm长。

### 3.1.6 调焦

由于物距和环境温度的变化，引起成像面沿轴位置的改变，为此需要调焦保持像面稳定。

该仪器的调焦方法，在3.1.1中已说明了用准直镜沿轴移动实现调焦。也就是说让准直镜的前焦点始终和变化后的第一像面位置重合。准直镜和变倍物镜之间的轴上光束为平行光，调焦时，第二像面的像和第一像面像的倍率保持不变。即不影响测量精度。

距离调焦。设物距为  $x$  (严格讲， $x$  应为物到前焦点之距离，因物距和焦距比，远远长于焦距，所以可把物距看做从物到仪器垂直轴之距离)。  $f_1$  为第一像面焦距， $\Delta x$  为近物距时第一像面位置和物距无穷远时第一像面位置的位移量，当然也是距离调焦量，则有

$$\Delta x = \frac{f_1^2}{x}$$

当  $f_1$  为1850mm时，不同物距时第一像面的位移见表2。

表2

$x(\text{km})$	0.5	0.8	1.0	1.5	2	3	5	10	20	50	100	0
$\Delta x(\text{mm})$	6.84	4.28	3.24	2.28	1.71	1.14	0.68	0.34	0.19	0.06	0.03	0

温度调焦。由于温度变化引起像面位移的主要变化量有  $d, r, n$ 。 $d$  为各光学表面顶点之距离； $r$  为光学零件表面曲率半径； $n$  为光学零件的材料对所用波长的折射率。

设常温(一般为  $T_0=20^\circ\text{C}$ )下的  $r, d, n$  分别为  $r_0, d_0, n_0$ , 温变后为  $r_T, d_T, n_T$ , 则有

$$r_T = r'_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (8)$$

$$d_T = d_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (9)$$

$$n_T = n_0 - \beta_0(T - T_0) \quad (10)$$

$\alpha$  为所用材料的线胀系数,  $\beta_0$  为折射率的温度系数。按公式(8)、(9)、(10)计算所有  $r, d, n$  在不同温度下变化数值。由计算数据看出, 引起第一像面位移最大的是主镜筒, 也就是主镜和次镜之间的距离变化引起第一像面位置的改变, 计算数值见表3。

表3

T(温度)	-40°C	-35°C	-20°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
$\Delta x$ (调焦量)mm	0.84	0.88	0.69	0.33	0.16	0	-0.16	-0.28

综合调焦量为距离调焦和温度调焦的代数和。

调焦公差。调焦误差引起最后像面位置变化量应小于一倍焦深。长焦距的焦深为 0.26mm。第二像面和第一像面的倍率近似为 1.4 倍, 则有调焦精度(沿轴)为 0.13mm。短焦时的焦深短了, 但倍率也小了, 所以调焦精度与长焦相同。调焦镜在移动过程中的垂轴误差受像面垂轴位移量的允许值和第二像面与第一像面倍率限制, 长焦距要求比短焦距高, 应按长焦距计算。应小于 0.01mm。

### 3.1.7 公差

像差公差。公差是由总体要求分配给光学系统的公差, 由此再求出各种像差之公差。按此像差公差, 在光学设计中进行像差平衡。

光学材料、光学零件的加工装调公差。这里主要说明一下该系统的主要光学零件的加工公差的特点。在该系统中几个主要光学零件的加工公差明显比过去低, 其公差所以低, 是从以下几个方面考虑的。

用像差互补办法。即不是将所有的零件公差都要求很小, 而是有正有负, 可以互相抵消。比如主、次反射镜的面形公差就是据此而定。

以往的公差计算是根据总公差, 按各面对像差的贡献分配给每个面, 看起来很合理, 但是因为面数多, 而每个面的公差就严, 尤其反射面, 甚至难以加工。如果将透射面的公差由 3~4 个光圈提高到 1 个光圈, 局部光圈提高到  $\frac{1}{10}$ , 这是容易加工的, 也可以说, 它对公差贡献可以忽略, 就相当于减少了面数。因此, 计算就可以将反射面的面形公差, 由  $N=0.1, \Delta N=0.05$ , 降到  $N=0.5, \Delta N=0.1$ , 这样即不影响总精度, 又容易加工。

根据具体情况, 区别对待。对于反射镜要看它在光路中的位置、作用。如  $45^\circ$  反射镜, 因为它

靠近像面,  $h$  高很小, 它的公差可以很低。经计算  $N=4$ ,  $\Delta N=0.4$  左右。

### 3.2 十字丝投影系统

十字丝的用途是为了在事后判读时, 测量目标像的位置有视轴基准以及便于整机装调定位。即然做为基准, 对它的精度要求必须严格, 除了系统像差以及装调误差对精度的影响外, 主要是必须牢固可靠。

该仪器的十字丝系统没有从镜筒前进入(从镜筒前进入和目标共光路, 可以消除各零件的影响和镜筒变形的影响)。因为该镜筒比较短, 变形量小, 十字丝从中部进入主光路也是可以的。具体光如图1中3所示。

从十字丝物镜出去的光为平行光, 再进入主摄影系统中的变倍物镜, 最后十字丝的像成在摄影系统的第二像面上。

### 3.3 画幅观察系统和点阵观察系统

经纬仪在装调时或在执行任务前用目视看十字丝和目标经过主系统所成的像, 比如靶标的像; 点阵观察系统是用眼睛来看点阵是否正常。

光路结构如图1中的4所示。在摄影系统第二场镜前插入直角棱镜, 将光路转入观察光路, 该光路中的二个物镜之间为平行光路, 由两个物镜焦距之比构成一定的倍率, 满足十字丝倍率要求。用插入平行光路中的直角棱镜, 将点阵的光路转入目视管。即实现了画幅观察、点阵观察共用一个目视管的目的。

这两个光路的倍率、视场、光阑位置都不一样, 在合并成同一光路时, 就必须全面考虑。在满足总要求情况下, 互相照顾。从两路光学系统看, 孔径光阑最好放在直角棱镜上, 这就需要用工场镜把孔径光转接好, 目视管的视场应按点阵光路系统考虑。

### 3.4 点阵投影光学系统

该系统是将显示高低, 方位、时间、地址等各种码的点阵排成像在底片上。其光路形式如图1中的5所录。

由于点阵排尺寸较大, 共轭尺寸又小, 所以使投影物镜的视场较大, 这就要求投影物镜的畸变要小。像面照度要均匀, 该系统的光路长度为293mm, 倍率为3.8倍。

### 3.5 电视测量系统

为满足目标远近及大小的需要, 将测量电视做成两种焦距, 由于焦距较长, 光路形式选择牛顿式的折反射系统。这种光路的特点是可以复消色差, 杂光小。用负镜组来消除变倍组的二级光谱。并可消除主镜中产生的球差和慧差。光学系统的主要参数, 焦距,  $f_1=200\text{mm}$ ,  $f_2=1000\text{mm}$ ; 第一像面焦距  $f=814\text{mm}$ , 口径为130mm, 相对孔径为1:15和1:7.5, 视场角为 $0.44^\circ$ 和 $0.88^\circ$ , 画幅尺寸为 $9.6 \times 12.8\text{mm}^2$ , 中心遮光比为1:4.6, 物距为1.5km, 透光率 $\geq 70\%$ 。

为了测量定标, 需加十字丝定标系统, 该十字丝系统焦距为9mm, 放大率12.5和6.5倍。

测量电视的具体光路见图4。

光通过保护玻璃1, 由主反射镜2反回, 进入负镜组3, 经 $45^\circ$ 反射镜4折射 $90^\circ$ 角, 射入空心屋

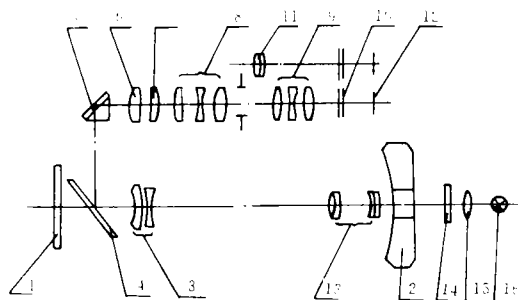


图4 测量电视光路图

脊5倒像后又折90°角进入场镜6收敛轴外光,再经过变密度盘7,进入准直镜8,此时轴上光束为平行光,再进入变倍物镜9,经过滤光片10后到达靶面12。

仅源16经聚光镜15聚焦后,再通过十字丝物镜13进入负镜组3,混合到主光路中。

### 3.6 瞄准、观察望远镜系统

靶场测量设备的主摄影系统,因视场小,需要对目标搜索、引导、跟踪再测量。其中由人通过观察望远镜进行搜索、跟踪目标就是其中一种手段。为了适应目标的远近,大小以及搜索、跟踪的需要,一般将观察望远镜做成二种倍率,见图5。

光学参数如下:放大倍率为23倍、9倍;物镜口径为82mm和32.4mm;物镜焦距为700mm和27.6mm;物方视角为3.2°和8°;相对孔径为1:8.5;目镜焦距为30.8mm;出瞳直径为3.6mm;出瞳距>23mm。

当搜索目标或观察近目标、大目标时,用小倍率望远镜。将可动反射镜4移出光路就变成大倍率望远镜,它可供观测远目标或小目标用,它具有较高的分辨角和高瞄准精度。

在该系统中用别汉棱镜转动来消除像的旋转,观测者面对目标,看到的是正像,增强了实感,便于操作。

## 4 结束语

这篇文章主要从光学总体方案和光学设计方面做一些论述,按着这种思想设计的光路系统,现在已研制生产了多台设备,并验收出厂使用,从出厂检测和使用效果看,说明光学系统设计是满足要求的,也证明了在主光路中去掉孟琴镜是可行的。并可供今后设计同类型仪器参考。

光学总体方案及主要光学技术指标是和该工程总体组协商共同确定的。具体光学设计是由王立升、杜效良完成的。王家祯主任对该文提出了宝贵意见,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

[1]王效才,778光电经纬仪光学系统设计. 光学工程,1986,(1):34—42  
 [2]王效才,电影经纬仪光学整体设计之一——作用距离估算. 光学工程,1982年,(3):17—30

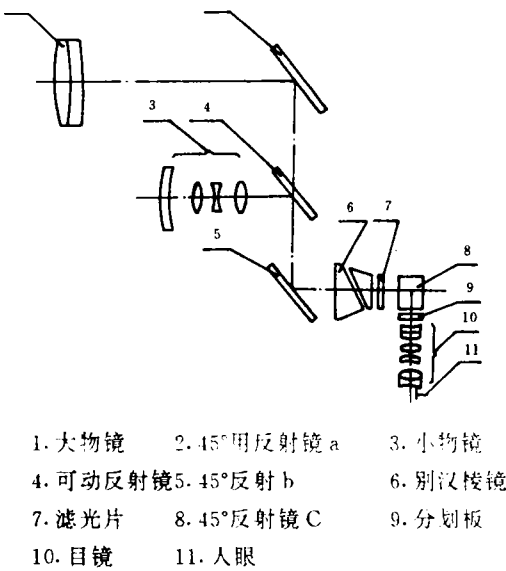


图5 观察望远镜系统图

## Optical Design of a Mobile photoelectric Theodolite

Wang Lisheng

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

### Abstract

The Optical overall design idea is described. Then the optimization of the optical configuration and the determination of the primary optical performance parameter for the sub-systems are discussed. As an example, an optical design result with a brief analysis is presented.

**Key words:** Photoelectric theodolite, Overall design, Cassegrain system, Mangin mirror