

电影经纬仪场外拍星测精度方法

李璿年

前 言

电影经纬仪从生产单位运输到使用基地、或在基地经过维修后，其主要单项差和总精度是什么情况，这是需要检测的，利用星体检测就是一种很好的方法。这个拍星测精度方法，又分为弧长法、时角法和比较法。我们使用了时角法和比较法对电影经纬仪进行了测试，结果较好，下面就测量方法和精度分析加以讨论。

一. 时 角 法

时角法测精度，它的实质是先求出星体的理论位置，再由电影经纬仪的拍照判读结果与其比较，求出电影经纬仪的单项差、静态总精度等等。

1 能拍摄到星体的等级和对胶片的要求。

在测量时，我们选用了恒星，其影像处的照度由下例公式决定。

$$Z_i = \frac{Z_M D^2 \tau}{d^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中： Z_M ：——目标在光具组入瞳处所形成的照度。

D ：——入射光瞳直径。

d ：——星体在胶片上成像星点直径。

τ ：——光具组的透过率。

Z_i ：——影像处的照度。

如果没有像差、也没有大气抖动，则影像直径（适用于波长为可见光谱中间部分的光线）为

$$d = 134 \times 10^{-5} f / D \text{ 毫米} \dots\dots\dots (2)$$

式中 f ：——主摄影系统的焦距（毫米）

则星体影像的平均照度

$$Z_i = \frac{Z_M D^4 \tau}{18 \times 10^{-7} f^2} \text{ 勒克司} \dots\dots\dots (3)$$

有了照度和曝光时间 t （由摄影频率和开口角决定），就可求得胶片的感光度。

$\frac{1}{Z_i t}$ 即为用 ASA 或 FOCT 表示的胶片感光度。

但实际上，由于有大气干扰、曝光时的影像移动，并且主摄影系统并非十分完善。据有关资料刊载，将使影像面积增加近 5 倍，而照度小 5 倍。

2 星体的选择

利用星空图和测站天文经纬度及拍摄时间，选择可见又适用的黑体，最好选高角在 $30^\circ \sim$

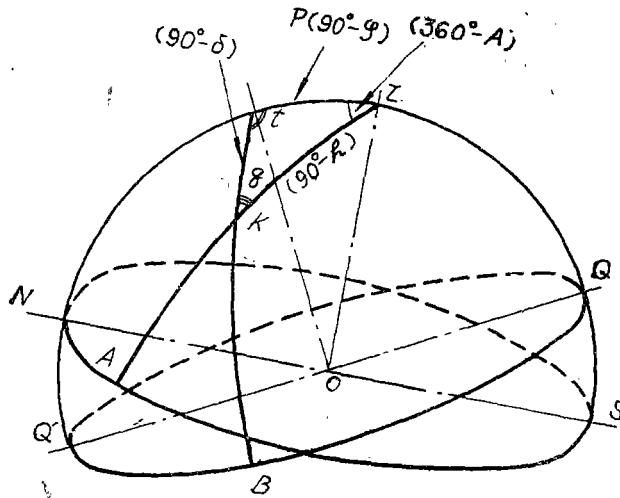


图 1

$$h' = \sin^{-1}(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos t) \dots\dots\dots (4)$$

$$h = h' + R = h' + R_0(1 + a + b) \dots\dots\dots (5)$$

对 $h < 45^\circ$ 者用 α' 代替 α

$$A = \sin^{-1}(\sin t \cos \delta / \cos h) \dots\dots\dots (6)$$

$$t = S_0 + (1 + \mu)T + \lambda - \alpha \dots\dots\dots (7)$$

式中

h' : 星体的理论高角。

h : 星体的视高角 (包函大气折射的影响)。

A : 星体的方位角。

α : 星体的赤经。

δ : 星体的赤纬。

t : 星体的时角。

q : 星体的星位角。

λ : 测量地点的天文经度。

φ : 测量地点的天文纬度。

S_0 : 世界时零时的恒星时。

T : 观测时间 (世界时)。

μ : 世界时向恒星时转换的系数。

R : 蒙气差。

R_0 、 a 、 α' 和 b 为求 R 时用的参数, 它们分别由高角、温度和气压做引数在天文年历中查出。

4 时角法的测量过程

将电影经纬仪与时统站对接好, 将时统信号与天文时号校对好, 做好电影经纬仪测量的准备工作 (包括垂直轴调平、装好胶片、选调好调光调焦位置、选好开口角、选好十字丝亮度等等); 将选好的星引导程序输入计算机, 引导拍星, 其中正倒镜均需拍照, 并且对所拍之星, 按其编号排入附加信息点阵中去。拍照后冲洗判读。

5 时角法的数据处理

70°之间; 方位角在0°~360°之间近似均匀分布的星体4颗以上。并且最好事先将选好的星体, 按电子计算机的要求排好程序, 拍照时, 用电子计算机引导, 正倒镜拍照。

3 星体理论位置的求得

星体的理论位置由图1, 利用球面三角公式和蒙气差修正公式, 得出下例公式。图1中Z-N.A.S.为地平坐标系, P-Q'BQ为赤道坐标系, Z为天顶, P为北天极, S为南点, N为北点, K为被拍星体, O为地心。

设 ΔA_{ij} 和 Δh_{ij} 为第 j 颗星在方位方向和高低方向上的判读计算值与理论值之差值。其中 i 为对某星体的不同计算值的编号， j 为各颗星的编号， n 为对第 j 颗星测量的总次数， S 为被测星体数。

$$\text{则高低角测角的系统误差 } \delta_{高j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_{ij} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{高低角测角的随机误差 } m_{高j} = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta h_{ij} - \delta_{高j})^2}}{\sqrt{n-1}} \dots\dots\dots (9)$$

由各星体求得的误差去求经纬仪高低角测角总误差时可用下式。

$$m_{高总} = \pm \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\sum_{j=1}^S \delta_{高j}^2 + \sum_{j=1}^S m_{高j}^2} \dots\dots\dots (10)$$

为保险起见，选 $\delta_{高j}$ 和 $m_{高j}$ 中大的值做测角的系统误差和随机误差。

对方位角测量的处理如下，设 K 为经纬仪方位指示零向与正北方向的夹角。则对某 j 星方位角系统误差为

$$\delta_{方j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta A_{ij} - K \dots\dots\dots (11)$$

随机误差的实验标准差为

$$m_{方j} = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta A_{ij} - \delta_{方j})^2}}{\sqrt{n-1}} \dots\dots\dots (12)$$

电影经纬仪方位测角总误差为

$$m_{方总} = \pm \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\sum_{j=1}^S \delta_{方j}^2 + \sum_{j=1}^S m_{方j}^2} \dots\dots\dots (13)$$

选 $\delta_{方j}$ 和 $m_{方j}$ 中大的值做方位角测角系统误差和随机误差。

6 时角法测量的精度分析

为求星体的理论位置的精确度，可对(4)及(6)式进行微分，再按误差理论处理，而得下列方程式。

$$m_A^2 = (\sin A \tanh')^2 m_\varphi^2 + (\sin q \operatorname{csch}')^2 m_\delta^2 + (\cos \delta \cos q \operatorname{csch})^2 m_t^2 \dots\dots (14)$$

$$m_h^2 = \cos^2 A m_\varphi^2 + \cos^2 q m_\delta^2 + (\cos \varphi \sin A)^2 m_t^2 \dots\dots\dots (15)$$

式中

m_A : 为方位角理论值求定的实验标准差。

m_h : 为高低角理论值求定的实验标准差。

m_φ : 测点纬度求定值的实验标准差。

m_δ : 星体赤纬求定值的实验标准差。

m_t : 时角求定值的实验标准差。

如我们取 t 的测定值的实验标准差在10毫秒之内，则利用有关资料(如 FK_4 星表)对(14)和(15)式进行计算，可得出。

$$m_A = \pm 0.6 \text{秒} \quad m_h = \pm 0.5 \text{秒}$$

可见星体的理论位置是可以计算得比较准确的，因此可将它近似的作为真值。

理论位置确定之后，将拍得并判读计算后的各颗星位置与其进行比较，即得出方位角和高低角的测角误差。

7 电影经纬仪的主要单项误差测试

电影经纬仪主要单项误差的场外测试，是由正倒镜拍摄靶标及正倒镜拍摄星体，并按(5)及(6)式修正时间不同带来的角度不同量之后得出的，即

$$\text{照准差 } C = \frac{\overline{d}_{\text{方正}} - \overline{d}_{\text{方倒}} \pm \pi}{2} \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{零位差 } L = \frac{\overline{d}_{\text{高正}} + \overline{d}_{\text{高倒}} \pm \pi}{2} \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{横轴差 } H = \left[\frac{d'_{\text{方正}} - (d'_{\text{方倒}} - \Delta d'_{\text{方倒}}) \pm \pi}{2} - \sec C \right] \text{coth} \dots\dots\dots (18)$$

式中 C：照准差。

L：高低零位差。

H：横轴差（也称不垂直度）。

$\overline{d}_{\text{方正}}$ ：正镜拍照靶标的方位均值。

$\overline{d}_{\text{方倒}}$ ：倒镜拍照靶标的方位均值。

$\overline{d}_{\text{高正}}$ ：正镜拍照靶标的高低角均值。

$\overline{d}_{\text{高倒}}$ ：倒镜拍照靶标的高低角均值。

$d'_{\text{方正}}$ ：正镜拍照星体时、星体的方位角值。

$d'_{\text{方倒}}$ ：倒镜拍照星体时、星体的方位角值。

$\Delta d'_{\text{方倒}}$ ：倒镜拍星与正镜拍星由时间差而带来的星体在方位方向的移动量

h：高低角（星体视位置的高低角）。

垂直轴倾斜与幌动的测量仍用与室内测量相同的方法进行，即是将水准器（1秒格值或2秒格值等）的轴线与经纬仪横轴在基本平行的情况下放在内转台的调平架上，调正调平架，使水准器的气泡基本处于量程的中间位置，之后每隔30°正转经纬仪照准部，稳定后读一次水准器读数，直至转完720°，再倒转测量，也转720°，共读出数据48个，取相同角度4个点的平均值 \overline{d}_{vi} ，共得12个值，按复利叶级数处理，分出一级谐波和常数项，即可得出垂直轴调平值和幌动值。

调平值由下列一次谐波公式得出

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \dots\dots\dots (19)$$

其中 $a_1 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} dvi \cos i30^\circ \dots\dots\dots (20)$

$$b_1 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} dvi \sin i30^\circ \dots\dots\dots (21)$$

$$a_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} dvi \dots\dots\dots (22)$$

$$X_i = dvi - \frac{a_0}{2} - a_1 \cos i30^\circ - b_1 \sin i30^\circ \dots\dots\dots (23)$$

其中 X_i 还可进一步处理成实验标准差的型式。

$$M_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} \left(X_i - \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} X_i \right)^2}{(12-1)}} \dots\dots\dots (24)$$

二 比 较 法

比较法的实质就是将高精度的测星仪器（如 T_4 经纬仪）与电影经纬仪建立起关系，之后将高精度仪器测得值做近似真值、将电影经纬仪测得值与近似真值比较，而求得电影经纬仪测量误差。

它们之间的关系，分几何关系及时间关系。

（一）几何关系

几何关系又可分为天文坐标点关系及视轴零位关系。

1 天文坐标点关系

这个关系就是要求出由于高精度测星仪器放置点与电影经纬仪放置点不同，而带来的测星误差。放置点不同可看成有经纬度差，比如 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\varphi$ 。对 (5)、(6) 式进行微分（并将 (7) 式代入 (5)、(6) 式）并以微小量代替微分值而得下式。

$$\Delta h = \frac{(\sin\delta\cos\varphi - \cos\delta\sin\varphi\cos t)\Delta\varphi - \cos\delta\cos\varphi\sin t\Delta\lambda}{\cos h} \dots\dots\dots (25)$$

$$\Delta A = \frac{\cos t\cos\delta\cos h\Delta\lambda + \sin t\cos\delta\sin h\Delta h}{\cos^2 h\cos A} \dots\dots\dots (26)$$

2 视轴零位关系

这个关系的建立又可分为对靶标法、对星法和互瞄法。

（1）对靶标法

如图 (2)，设靶标为 C ，电影经纬仪在 A 点， T_4 经纬仪在 B 点，则

$$r = \cos^{-1} \frac{\overline{AC}^2 + \overline{BC}^2 - \overline{AB}^2}{2\overline{AC} \cdot \overline{BC}} \dots\dots\dots (27)$$

r 角即为电影经纬仪与 T_4 经纬仪由于位置不同而带来的方位角测值误差。可将此值修正进去。修正后就等于建立起二仪器的方位零位的关系了。

（2）对星法

它的实质，就是在星体于某一段时间内某一方向变化最慢时，两种仪器都瞄准它，从而通过星体的中间关系而建立起两种仪器的视轴零位关系。

高低角零位关系的建立较易，即各自测自己的零位差就可以了，两仪器的零位差之差即为它们的高低零位关系。

方位零位关系的建立，是选某星的大距时刻，在此时刻二仪器都在瞄准它，此时方位角读数的关系即为视轴方位零位的关系，但此法只限于用高角很低的星，否则照准差和横轴差将带来很大影响。

大距时刻的求得由 (图 3) 中参数，按纳比尔准则得：

$$\cos t = \operatorname{tg}\varphi / \operatorname{tg}\delta \dots\dots\dots (27)$$

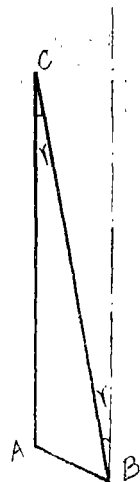


图2

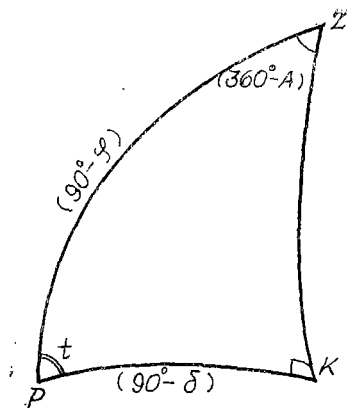


图3

东、西大距时刻的恒星时为

$$S_{\text{东}} = \alpha - \cos^{-1} \left(\frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \delta} \right) \dots \dots \dots (28)$$

$$S_{\text{西}} = \alpha + \cos^{-1} \left(\frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \delta} \right) \dots \dots \dots (29)$$

(3) 互瞄法

将 T_4 经纬仪中心（视轴与横轴的交点）与电影经纬仪中心基本置于同一水平面内，将 T_4 经纬仪中心十字丝照明，用电影经纬仪主镜十字丝中心去瞄准 T_4 经纬仪主镜十字丝中心（如果电影经纬仪主镜十字丝能被 T_4 经纬仪看到时，则用 T_4 经纬仪去瞄准电影经纬仪主镜十字丝中心，这样更方便），瞄准后，各自进行方位角和高低角读数，从而就建立起了双方视轴零位的关系。

(二) 时间关系的建立

时间关系建立的目的，是使两仪器测星时取得时间的一致。

在时间关系的建立中，一般习惯称为玛瑙轮法、星过中心法和利用寻星头法。

1 玛瑙轮法

在这个方法中，电影经纬仪的时统站要和天文时号很好标定。 T_4 经纬仪的天文表也要在测前和测后都和天文时号标定。在测星时，电影经纬仪由时统站输入信号拍照，并打上秒标记， T_4 经纬仪通过旋转玛瑙轮对星，并开动与玛瑙轮及天文表联接的计时器，而把星在 T_4 经纬仪视场中的位置和天文表记的时建立起关系，从而就建立起 T_4 经纬仪测量值和电影经纬仪测量值之间的关系。

2 星过中心法

选取靠北天极的星（在北半球），如北极星，这样它在 T_4 经纬仪视场中移动较慢，找出它的移动轨迹，使 T_4 经纬仪视场十字丝中心处于此轨迹上。在星过中心之前注意等待，当星过中心时，立刻发出信息，如点亮电影经纬仪氙灯点阵中的某一氙灯等等。这样，在有此亮氙灯的第一张画幅的测星值就与 T_4 经纬仪的测星值同时了。

3 寻星头法

它是星过中心法的进一步发展，它能测星空中任何可用的星，它的特点是能实时的将星体在视场中的位置用光电的办法自动记录下来，为此就建立起两种仪器间的时间关系。

(三) 比较法的测量过程

在建立起几何和时间关系后，再按与时角法相同的办法选择星体，做仪器拍照前的准备工作，上述工作做完之后就开始了测星了。

测量过程中，可用电子计算机引导拍星、也可用人工识星法拍星。用玛瑙轮法和寻星头法时必须用时统站，时统站也要事先与天文时号校对好再用。使用星过中心法时，可以不用时统站，只要双方在时间上取其一致就可以了。拍照过程也分为正镜和倒镜拍照星体和靶标。并用附加信息点阵记下不同星体的标记，拍照后冲洗、判读和计算。

(四) 比较法的数据处理

设 ΔA_{ij} 和 Δh_{ij} 为对第 j 星电影经纬仪第 i 次测量值与 T_4 经纬仪测量值在修正了几何差和时间差之后的方位角和高低角的差值。则电影经纬仪的测角误差如下。

对第 j 星
高低角系

$$\text{统误差: } \delta_{\text{高}j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_{ij} \dots \dots \dots (30)$$

高低角随机误

$$\text{差的实验标准差: } m_{\text{高}j} = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta h_{ij} - \delta_{\text{高}j})^2}}{\sqrt{n-1}} \dots \dots \dots (31)$$

$$\text{高低测角总误差: } m_{\text{高总}} = \pm \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\sum_{j=1}^S \delta_{\text{高}j}^2 + \sum_{j=1}^S m_{\text{高}j}^2} \dots \dots \dots (32)$$

$$\text{方位角系统误差: } \delta_{\text{方}j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta A_{ij} \dots \dots \dots (33)$$

方位角随机误差

$$\text{的实验标准差: } m_{\text{方}j} = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta A_{ij} - \delta_{\text{方}j})^2}}{\sqrt{n-1}} \dots \dots \dots (34)$$

$$\text{方位测角总误差: } m_{\text{总方}} = \pm \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\sum_{j=1}^S \delta_{\text{方}j}^2 + \sum_{j=1}^S m_{\text{方}j}^2} \dots \dots \dots (35)$$

上述公式中, S 为测量的星的个数, n 为对第 j 颗星的测量次数。

选 $\delta_{\text{高}j}$ 、 $m_{\text{高}j}$ 、 $\delta_{\text{方}j}$ 和 $m_{\text{方}j}$ 中最大者作为电影经纬仪测角的系统误差和随机误差。

(五) 比较法的精度分析

我们这里仅以互瞄做几何取齐, 以星过中心作为时间取齐来做精度分析, 其它方法的精度将更高。

1 误差来源

(1) T_4 经纬仪的测量误差

我们取 T_4 经纬仪测量的实验标准差为 $m_s = \pm 0.7$ 秒

(2) 星过中心时的瞄准误差及向电影经纬仪发出信息的合成误差的置信限, 根据我们的几次测量的经验可取为 ± 2 秒之内, 且为正态分布, 则其实验标准差可取为 $m_s = \pm 0.7$ 秒

(3) 电影经纬仪与 T_4 经纬仪互瞄时误差的置信限, 根据我们的经验取为 ± 2.0 秒之内, 且为等概率分布, 则其标准差 $m_s = \pm 1.2$ 秒。

(4) 编码器空度带来的误差

对 19 位编码器来说, 空度理论值为 2.5 秒它带来的误差为等概率分布, 则其标准差 $m_s = \pm 1.47$ 秒

(5) 电影经纬仪零位测量误差

可取实验标准差为 $m_s = \pm 0.33$ 秒

(6) T_4 经纬仪的零位测量误差

可取实验标准差为 $m_s = \pm 0.33$ 秒。

2 方位角测量误差的实验标准差

$$\begin{aligned}m_{\text{方}}^2 &= \pm \sqrt{m_a^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_d^2} \\ &= \pm \sqrt{0.7^2 + 0.7^2 + 1.2^2 + 1.47^2} \\ &= \pm 2.1 \text{秒}\end{aligned}$$

如果利用编码器转换点处位置进行互瞄，则将消除空度差，因此

$$m_{\text{方}} = \pm 1.6 \text{秒}$$

3 高低角测量误差的实验标准差

$$\begin{aligned}m_{\text{高}} &= \pm \sqrt{m_a^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_d^2} \\ &= \pm \sqrt{0.7^2 + 0.7^2 + 0.33^2 + 0.33^2} \\ &= \pm 1.1 \text{秒}\end{aligned}$$

(六) 比较法测单项误差

其方法与时角法相同，在这里不重述。

以上，我们对时角法和比较法进行了简单的阐述。从我们对某一电影经纬仪的场外测试经验感到，对已有天文坐标点和时统站的单位，用时角法较好，因为它可较快速的测量出多颗星体，如果有电子计算机引导拍星，那么速度将会更快。该法能真实和全面的反映电影经纬仪的场外精度（因为它能在方位 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，之间选多颗星体，而比较法则不能选那么多星体）。但由于有蒙气差的存在（外加大气抖动），在气象条件不好的单位，此法精度受到影响。

比较法的优点是排除了蒙气差及大气抖动的影响，并且不需要天文坐标点，对其中的星过中心法还不需要时统站，因此比较灵活和简单。但测星过程较慢，并且只在测靠近北极的星（在北半球）才能获得高精度。因此测量点少，且受限制、反映仪器精度不如时角法全面。

在有条件的单位，可二法同时应用，并互相比对。这样就更有把握的鉴定出电影经纬仪的场外精度。

注：在此工作开展过程中和此报告内参考了有关仪器安装校准与使用条例及国防科委情报所出版的刊物等。