文章编号：1007-1180(2011)07-0054-05

光电经纬仪外场星校方法研究

张 炜[1]，柳玉晗[2]，李世诚[3]
（1. 91550部队装备部，辽宁 大连 116023
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033
3. 第二炮兵军事代表室，辽宁 锦州 116000）

摘 要：光电经纬仪作为靶场主要的高精度外弹道测量设备，在使用过程中，必须定期对其精度进行标校，才能满足测量任务的要求。对光电经纬仪外场星校方法进行了研究。介绍了拍星的过程，讲解了选星原则及星体理论值计算；在获得星体测量值后，建立数学模型，利用最小二乘法，对经纬仪的各单项差进行解算；最后阐述了采用星体标校方法需要考虑的几点因素。利用实际设备检测解算结果，实验结果与室内检测结果符合，表明该外场星校方法正确。

关键词：光电经纬仪；星体标校；最小二乘法；单项差
中图分类号：TH761.1 **文献标识码**：A
DOI：10.3788/OMEI20112807.0054

Optical-electronic Theodolite Calibration with Star in Range

ZHANG Wei[1], LIU Yu-han[2], LI Shi-cheng[3]
(1. 91550 *Army Unit, Dalian* 116023, *China*;
(2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
3. *The Military Delegate, The Second Artillery, Jinzhou* 116000, *China*)

Abstract: Optical-electronic theodolite is a primary measuring equipment of external trajectory. It's precision must be regularly calibrated in the course of use in order to meet the requirements of measuring tasks. The methods of optical-eletronic theodolite calibration in the range were studied. The course of measuring star was introduced, and the criterion of selecting star and the arithmetic of computing star theory were explained. The mathematic model was established after obtaining the measurement value of the star and the errors of the theodolite were calculated by using

*基金项目：国家863计划资助项目（No.2006AA703104）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

the least square method. At last, several factors of the calibration method with star were set forth. The computing results were checked by using factual devices. The result in range accorded with that of inner detection. It was showed that the calibration method with star in range was right.

Keywords: optical-electronic theodolite; calibration with star; least square method; monomial error

1 引 言

星体标校是利用恒星在天球上的准确视位置来标定光电经纬仪的精度，是光电经纬仪在外场进行精度检测和单项误差调整常用的方法之一，广泛地应用于各种靶场的外场实时检测。利用该方法可以随时了解光电经纬仪的精度状况，极大地方便了用户[1-6]。

光电经纬仪的星校包括引星、拍星和数据处理3个步骤。

在外场时，星校具体工作包括：通常选择晴朗的夜晚，在拍星前要拍战前方位标； 拍星前，时统设备必须与天文台进行对时和校频；选星；人工或计算机引导进行拍星；拍星同时记录地面温度和气压；拍战后方位标，计算仪器三差； 事后数据处理，获得精度[7-10]。

本文根据在实际工作中摸索获得的外场星校方法，通过建立数学模型，把测得的星体值进行解算，获得经纬仪各单项差。实验结果表明，外场星校与内场检测结果相符。

2 拍 星

2.1 选星的原则

光电经纬仪选星的基本原则是根据其探测器(电影、电视等)性能，决定所能探测的最低星等。比最低星等稍亮且符合方位角（0°~360°均匀分布）、高低角（20°~65°均匀分布）限制条件的所有恒星都可选用。

2.2 星体理论值计算

根据天体理论值计算，设 $i=n$ 为参加处理的星体序号，$j=m$ 为每颗星处理的画幅数，星体方位角和高低角理论值由下列公式计算：

$$\begin{cases} A_{ij}^{0}=\mathrm{tg}^{-1}\left(\dfrac{\cos\delta_i\sin t_{ij}}{\cos\delta_i\sin\phi\cos t_{ij}-\sin\delta_i\cos\phi}\right) \\ E_{ij}^{0}=\sin^{-1}\left(\sin\phi\sin\delta_i+\cos\phi\cos\delta_i\cos t_{ij}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中：

$$t_{ij}=S_0+(D_{ij}-8^h)(1+\mu)+\lambda-\alpha_i \tag{2}$$

A_{ij}^{0}为第 i 颗星第 j 画幅计算出来的方位角理论值；E_{ij}^{0}为第 i 颗星第 j 画幅计算出来的高低角理论值；α_i 为第 i 颗星的视赤经 (h, min, s)；δ_i 第 i 颗星的视赤纬 (°, ′ ,″)；S_0 为世界时零点时的真恒星时 (h,min,s)；λ 为测站的天文经度 (h,min,s)；ϕ 为测站的天文纬度 (°, ′, ″)；D_{ij} 为拍第 i 颗星第 j 画幅的北京标准时 (h, min, s)；μ 为民用时化恒星时系数，μ=0.002 737 91。(t_{ij} 的计算单位应化为度分秒后参加计算)

表1 A_{ij}^{0}所在象限判断

$\dfrac{\cos\delta_i\sin t_{ij}}{\cos\delta_i\sin\phi\cos t_{ij}-\sin\delta_i\cos\phi}$符号	$t_{ij}>12^h$或$t_{ij}<12^h$	A_{ij}^{0}所在象限
+	$t_{ij}>12^h$	I
+	$t_{ij}<12^h$	III
–	$t_{ij}>12^h$	II
–	$t_{ij}<12^h$	IV

2.3 任意时刻恒星视位置的计算

星体理论值计算中的一些基本参数，如 S_0，α_i，δ_i 等均来自于中国科学院南京紫金山天文台每年编算的《中国天文年历》。年历每10天给出恒星的准确视位置。在一年中，恒星的视位置变化不大（秒量级）。对于引导来说，我们只要适当地选择某一组数据就足够了（因为引导只要把恒星引导到光电经纬仪的视场内即可，而光电经纬仪的视场是分量级）。但是，仅有这些还不够，拍星的时间是随机的，我们不可能刚好选择年历表上已有的日期。为

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了数据处理的需要，还必须计算出星体在任意时刻的视位置。具备了上述有关参数后，才能精确地计算星体的理论值。

求任意时刻 t 的恒星视位置 f，其方法是采用拉格朗日三点插值。

设对应于连续 3 个表列时刻 t_{-1}，t_0，t_{+1} 的恒星视位置为 f_{-1}，f_0，f_{+1}，表列时间间隔为 ω，则：当 $t_{-1}<t<t_0$ 时，内插因子为 $n=\frac{t-t_0}{\omega}$，即 $t=t_0+n\omega$，则由拉格朗日三点内插公式，有：

$$f=L_{-1}\times f_{-1}+L_0\times f_0+L_{+1}\times f_{+1}=\sum_i L_i\times f_i \quad (i=-1,\ 0,\ +1) \qquad (3)$$

其中，L_i 为拉格朗日三点内插公式系数，其值为：

$$L_{-1}=\frac{n(n-1)}{2} \qquad L_0=(1-n)(1+n)$$

$$L_{+1}=\frac{n(n+1)}{2} \qquad (4)$$

2.4 拍星测量值

A_{ij}，E_{ij} 是经纬仪拍星观测值经修正设备的轴系误差后的值。

$$\begin{cases} A_{ij}=A''_{ij}+\Delta\alpha_{ij}-g-\mathrm{cseg}E''_{ij}-b\mathrm{tg}E''_{ij}+I\sin(\alpha_H-A''_{ij})\mathrm{tg}E''_{ij} \\ E_{ij}=E''_{ij}+\Delta e_{ij}-h-\Delta P_{ij}-I\cos(\alpha_H-A''_{ij}) \end{cases} \qquad (5)$$

其中，$\Delta\alpha_{ij}$ 为星体 j 在第 j 画幅上的方位角脱靶量(″)；Δe_{ij} 为星体 i 在第 j 画幅上的高低角脱靶量(″)；ΔP_{ij} 为大气折光差修正；c 为照准差；b 为水平轴倾斜值；g 为定向差；I 为垂直轴倾斜最大误差；h 为零位差；α_H 为垂直倾向角；A''_{ij} 为星体 i 在第 j 画幅上的方位码盘读数值(°，′，″)；E''_{ij} 为星体 i 在第 j 画幅上的高低码盘读数值 (°，′，″)。

3 解　　算

3.1 用最小二乘求解光电经纬仪各单项误差的方程

求解光电经纬仪各单项误差的方程如下：

$$\begin{cases} A^0_{ij}=A_{ij}+\dfrac{c}{\cos E_{ij}}+b\tan E_{ij}+I\sin(\alpha_H-E_{ij})+\nu_{Aij} \\ E^0_{ij}=E_i+I\cos(\alpha_H-A_{ij})+h-60.2''\times\dfrac{273}{273+t}\times\dfrac{P}{760}\times\cos E_{ij}+\nu_{E_{ij}} \end{cases} \qquad (6)$$

其中，A^0_{ij} 为由第 i 颗星第 j 画幅计算出来的方位角理论值；E^0_{ij} 为由第 i 颗星第 j 画幅计算出来的高低角理论值；A_{ij} 为由第 i 颗星第 j 画幅计算出来的方位角观测值；E_{ij} 为由第 i 颗星第 j 画幅计算出来的高低角观测值；ΔP_{ij} 为大气折光差修正；c 为照准差；b 为水平轴倾斜值；g 为定向差；I 为垂直轴倾斜最大误差；h 为零位差；α_H 为垂直倾向角；ν_{Ei_j} 为第 i 颗星第 j 画幅高低角观测值；$\nu_{A_{ij}}$ 为第 i 颗星第 j 画幅方位角观测值；P 为拍星时的气压（mmHg 柱）；t 为拍星时的气温（℃）。

由于

$$I\sin(\alpha_H-E_{ij})=I\sin\alpha_H\cos E_{ij}-I\cos\alpha_H\sin E_{ij}$$

$$I\cos(\alpha_H-A_{ij})=I\cos\alpha_H\cos A_{ij}+I\sin\alpha_H\sin A_{ij}$$

为了简化方程，设：

$$x=I\sin\alpha_H \qquad y=I\cos\alpha_H$$

$$\tan\alpha_H=x/y \qquad b_{1i}=\sin A_i$$

$$\Delta A_i=\frac{1}{m}\sum_{j=i}^{m}(A^0_{ij}-A_{ij})=\frac{1}{m}\sum_{j=i}^{m}(\Delta A_{ij})$$

$$a_{1i}=\cos A_i\tan E_i \qquad b_{2i}=-\cos A_i$$

$$a_{2i}=-\sin A_i\tan E_i \qquad b_{3i}=b_{4i}=b_{5i}=0$$

$$\Delta E_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(E^0_{ij}-E_{ij}+60.2''\times\frac{273}{273+t}\times\frac{P}{760}\times\cos E_{ij})$$

$$=\frac{1}{m}\sum_{j=i}^{m}(\Delta E_{ij})$$

$$a_{3i}=\tan E_i \qquad b_{6i}=1$$

$$\nu_{A_i}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(\nu_{A_{ij}}) \qquad a_{4i}=\frac{1}{\cos E_i}$$

$$\nu_{E_i}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(\nu_{E_{ij}}) \qquad a_{5i}=1 \qquad a_{6i}=0$$

其中，m 为第 i 颗星的样本数。

这样，方程（6）简化为：

$$\begin{cases} a_{1i}x+a_{2i}y+a_{3i}b+a_{4i}c+a_{5i}g+a_{6i}h-\Delta A_i=-\nu_{A_{ij}} \\ b_{1i}x+b_{2i}y+b_{3i}b+b_{4i}c+b_{5i}g+b_{6i}h-\Delta E_i=-\nu_{E_{ij}} \end{cases} \qquad (7)$$

其中，x，y，b，c，g，h 均为未知数。

3.2 求解光电经纬仪各单项误差

有了方程（7），就可以用最小二乘法求解光电

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

经纬仪的各单项误差。设测量了 n 颗星，就可以得到 $2n$ 个方程，用矩阵表示为：

$$AX=Q \tag{8}$$

其中：$X=[x \quad y \quad b \quad c \quad g \quad h]^{\mathrm{T}}$

$$Q=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}a_{1i}\Delta A_i+\sum_{i=1}^{n}b_{1i}\Delta E_i\\ \sum_{i=1}^{n}a_{2i}\Delta A_i+\sum_{i=1}^{n}b_{2i}\Delta E_i\\ \sum_{i=1}^{n}a_{3i}\Delta A_i\\ \sum_{i=1}^{n}a_{4i}\Delta A_i\\ \sum_{i=1}^{n}a_{5i}\Delta A_i\\ \sum_{i=1}^{n}b_{6i}\Delta E_i\end{bmatrix}$$

$$A=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}a_{1i}^2+\sum_{i=1}^{n}b_{1i}^2 & \sum_{i=1}^{n}a_{1i}a_{2i}+\sum_{i=1}^{n}b_{1i}b_{2i} & \sum_{i=1}^{n}a_{1i}a_{3i} & \sum_{i=1}^{n}a_{1i}a_{4i} & \sum_{i=1}^{n}a_{1i}a_{5i} & \sum_{i=1}^{n}b_{1i}b_{6i}\\ \sum_{i=1}^{n}a_{2i}a_{1i}+\sum_{i=1}^{n}b_{2i}b_{1i} & \sum_{i=1}^{n}a_{2i}^2+\sum_{i=1}^{n}b_{2i}^2 & \sum_{i=1}^{n}a_{2i}a_{3i} & \sum_{i=1}^{n}a_{2i}a_{4i} & \sum_{i=1}^{n}a_{2i}a_{5i} & \sum_{i=1}^{n}b_{2i}b_{6i}\\ \sum_{i=1}^{n}a_{3i}a_{1i} & \sum_{i=1}^{n}a_{3i}a_{2i} & \sum_{i=1}^{n}a_{3i}^2 & \sum_{i=1}^{n}a_{3i}a_{4i} & \sum_{i=1}^{n}a_{3i}a_{6i} & 0\\ \sum_{i=1}^{n}a_{4i}a_{1i} & \sum_{i=1}^{n}a_{4i}a_{2i} & \sum_{i=1}^{n}a_{4i}a_{3i} & \sum_{i=1}^{n}a_{4i}^2 & \sum_{i=1}^{n}a_{4i}a_{2i} & 0\\ \sum_{i=1}^{n}a_{5i}a_{1i} & \sum_{i=1}^{n}a_{5i}a_{2i} & \sum_{i=1}^{n}a_{5i}a_{3i} & \sum_{i=1}^{n}a_{5i}a_{4i} & \sum_{i=1}^{n}a_{5i}^2 & 0\\ \sum_{i=1}^{n}b_{6i}b_{1i} & \sum_{i=1}^{n}b_{6i}b_{2i} & 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^{n}b_{6i}^2\end{bmatrix}$$

则方程（8）的解为：

$$X=A^{-1}Q \tag{9}$$

由式（9）可以求出光电经纬仪垂直轴倾斜误差：

$$I=\sqrt{x^2+y^2} \tag{10}$$

垂直轴倾斜方向：

$$\alpha_H=\arctan\left|\frac{x}{y}\right| \tag{11}$$

表2 α_H所在象限判断

x的符号	y的符号	α_H的符号
+	+	Ⅰ
+	−	Ⅱ
−	−	Ⅲ
−	−	Ⅳ

4 星体标校需要考虑的几点因素

（1）选择晴朗的夜晚。为了使解算的结果更精确，最好拍星选在能见度好的晚上，这样可测的星多，数据量大，可以抵消读数误差，同时，在能见度好的晚上，图像对比度高，杂光小。

（2）脱靶量的提取。测星的关键是脱靶量的提取，可以采用图像处理技术提高图像对比度，精确提取脱靶量。

（3）测站天文精度对星体标校结果的影响。经纬仪星体标校是进行的天文测量，站址需要天文坐标，通常经纬仪测角精度≤10″时，站址最好有天文一等点的精度；经纬仪测角精度≤18″时，站址最好有天文二等点的精度[3]。

5 实验结果

根据用户要求，设计了光电经纬仪星校软件系统。如图 1 所示，标校界面包括选星功能、拍星功能、

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图1 软件标校界面

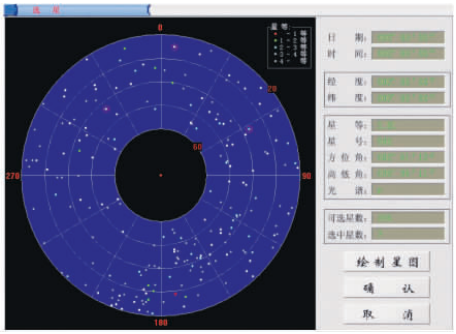

图2 星图界面

解算功能。图2所示为星图界面。系统有3个功能：

（1）选星；

（2）引导数据计算，它为光电经纬仪的拍星提供数据，引导光电经纬仪实现拍星；

（3）数据处理，根据拍星获得数据进行解算。

拍星时间：2010-07-25；

拍星地点：大连；

拍星时气压：P=769 mmHg；

拍星时温度：t=26 ℃。

光电经纬仪各单项误差的解算结果：

光电经纬仪视轴照准差：c=1.40″；

光电经纬仪水平轴倾斜误差：b=1.68″；

光电经纬仪垂直轴倾斜误差：I=1.09″；

光电经纬仪定向误差：g=−0.82″；

光电经纬仪零位误差：h=2.17″。

6 结 论

本文根据实际工作摸索获得了外场星校的方法，通过建立数学模型，把测得的星体值进行解算获得经纬仪各单项差，利用实际设备检测解算结果，外场实验结果与室内检测结果符合，表明了该外场星校方法的正确性；该方法同时具有良好的使用性与适应性。该方法尤其可以随时了解光电经纬仪的精度状况，极大地方便了用户使用。

参考文献

[1] 中国科学院紫金山天文台. 中国天文年历[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
[2] 姚坤一. 实用天文测量学[M]. 北京：测绘工业出版社，1985.
[3] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京：国防工业出版社，2001.
[4] 金光. 光电经纬仪的自动化标校与白天测星技术的研究[J]. 光学机械，1991(2)：87-90.
[5] 赵立荣，柳玉晗，朱玮，等. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量[J]. 光学 精密工程，2009，17(11)：2786-2793.
[6] 李艳平，李岩，郭立红. 对经纬仪静态精度检测中星校技术误差源的分析[J]. 光学 精密工程，2004，12(4)：79-83.
[7] 金光，倪伟. 星体弧长法标定光电经纬仪指向精度[J]. 光学 精密工程，1999，7(4)：91-95
[8] 车双良. GJ2341小型遥控光电经纬仪星库星表[J]. 光子学报，1994，23(4)：361-365.
[9] 张卫国，王礼有. 基于GPS授时的电影经纬仪野外拍星精度鉴定方法的研究[J]. 光子学报，2006，29(4)：27-29.
[10] 伍拉德 EW，克莱门斯 GM. 球面天文学[M]. 北京：测绘出版社，1984.

作者简介：张炜(1961−)，男，汉族，辽宁大连人，硕士，主要从事测控技术研究。E-mail：cczhaolirong@gmail.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net