文章编号　1674-2915(2010)06-0653-06

船载光电经纬仪坞外星体标校

马庆坤[1,2],乔彦峰[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:为了适应海上应用并降低经纬仪坞内标校成本,采用恒星位置代替固定方位标,将原本在坞内的标校工作转移到海上。首先,根据恒星星表精确、实时地计算出恒星位置。然后,通过坐标转换算法将其位置值转化到测量系下,运用船摇自稳定算法保证经纬仪的正常跟踪并记录数据。最后,根据事后解算算法分析记录数据,分离设备单项差并计算系统误差。实验结果表明,海上星校单项差的标定与坞内通过方位标标定结果非常接近,照准差、水平差、垂直差的偏差分别为0.015″、0.22″和0.014″,系统误差的标定与坞内结果具有很好的一致性,完全能够满足经纬仪海上标校的要求。
关　键　词:光电经纬仪;坞外恒星标校;解算
中图分类号:V556.5;TP391.4　　**文献标识码**:A

Offshore star calibration of electro-optical shipborne theodolite

MA Qing-kun[1,2], QIAO Yan-feng[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China)*

Abstract: In order to meet the requirements of offshore calibration for theodolites and to reduce calibration costs, this paper presents a calibration method of shipborne theodolites. Using this method, almost all the work can be carried out at sea. At first, based on FK5 ephemeris, the apparent position of a star can be calculated in real-time. After the coordinate transition, bootstrap values in the measurement system are ready. The algorithm of ship movement is used to keep the stablization of tracking at sea. At the same time, real-time data are acquired and recorded, and the axis errors and system errors of the theodolite can be calculated based on several algorithms. Experimental results indicate that the precisions of the calibration in dry-dock and the star calibration are very close. The tolerances of visual axis error, horizontal axis error and the vertical axis error are 0.015″, 0.22″and 0.014″, respectively. The star calibration agrees with the former results very well in system errors after calculations. It can satisfy the requirements of offshore calibrating of a ship-based theodolite.
Key words: theodolite; offshore star calibration; calculation

收稿日期:2010-06-21;**修订日期**:2010-10-13
基金项目:粤港关键领域重点突破项目(No. 2004A10403021);广东省攻关项目(No. 2006A10401006);国防科技预研基金资助项目(No. 104-0603)

1 引 言

传统的经纬仪标校需要建立多个方位标，用精确的大地测量方法确定方位标到待标校经纬仪的方位和俯仰角位置，然后与经纬仪实测数据比对，实现经纬仪自身的标定。该方法自动化程度不高，耗资较多。

恒星的位置可以实时地计算出来，且精度很高。利用这种恒星位置的确知性，以精确的恒星位置代替方位标来标定经纬仪的各单项差，方法简单且自动化程度高，目前这种方法已在国内外的许多靶场开始应用，效果很好。

以精确的恒星位置为基准，对运动平台上的经纬仪进行精度标校，目前有迫切的应用需求。例如航天测量船船载光电经纬仪在海上情况下，无法人工建立测量基准标。如果测量任务前在海上被迫进行了轴系或零位调整，也只有用星校的方法，才能在一定精度内对轴系和零位进行重新标定。在海上动态情况下，通常只好利用星体标校法在测量任务前后实现船载经纬仪轴系差、零位差的标定，监视经纬仪自身的轴系及零位误差，为事后分析测量精度提供必要依据。另外，航天测量船船载经纬仪的常规标校需要定期进入船坞，坐墩后在船坞周围建立方位标，再用大地测量的方法精确测定方位标作为测量基准，整个过程至少要半个月，费用巨大。星体标校方法可以在不进坞的条件下实现标校，甚至在测控任务的航渡期间就可完成，自动化程度高，耗费时间短，因而有望取代坞内标校。

本文介绍了远洋测量船船载标校经纬仪的海上标校实验，具体试验环境要求为：时间统一勤务系统提供时间统一服务，GPS 定位系统提供平台实时位置，惯性导航系统提供平台实时姿态数据，运动平台变形测量系统提供平台实时变形数据，跟踪伺服系统完成船摇自稳定跟踪。整体过程大致如下：首先利用 FK5 星表选择合适的恒星，经纬仪测量电视跟踪测量数颗恒星并记录数据，再利用 FK5 星表和测量时记录的各帧时间码、平台 GPS 位置数据、平台姿态数据计算恒星的理论位置数据，与实测数据作差，利用适当的差分模型求解，进而完成标校。标校结果表明，海上星校单项差的标定与坞内通过方位标标定的结果非常接近，且方法简单易行，有望取代坞内标校。

2 工作原理

2.1 获取恒星理论位置

星体标校的核心是应用星库对理论位置精确的计算，该系统微机内设置星库，星库中每个恒星的记录有星号、星等、平赤经、赤经百年自行、平赤纬、赤纬百年自行、恒星视向速度、恒星周年视差、光谱等参数，依据这些参数进行天文计算，可以得到任一时刻精确的星体位置。

首先，对 2000 年首平赤经和平赤纬 α_0，δ_0 进行岁差和自行修正，获得观测时刻的平位置 α_p 和 δ_p，对 α_p 和 δ_p 进行章动修正，计算观测时刻恒星的真位置 α_z 和 δ_z，对真位置 α_z 和 δ_z 进行光行差修正，得到 α 和 δ'，对 α 和 δ 进行视差修正，得到最终的恒星视位置 α_s 和 δ_s。然后，计算真恒星时，

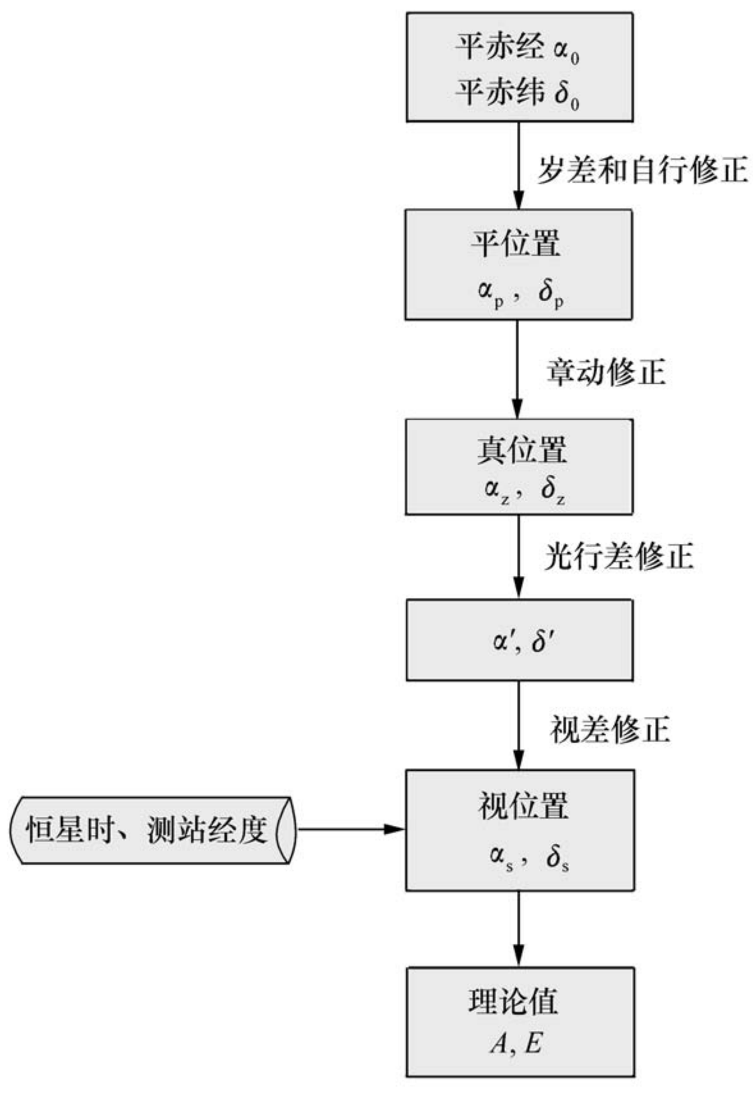

图 1 计算恒星位置原理图

Fig. 1 Block diagram of star orientation

带入已知测量站的经度 λ, 得到恒星对应测量站的时角, 从而得星体在大地坐标系中的方位角和高低角。其流程如图 1 所示。

由于大气折射, 观测得到的星体位置与星体真实位置不同, 观测得到的星体高度应减去蒙气差, 才得到星体真实高度。星体的天顶距越大, 蒙气差越大, 温度气压有所改变, 蒙气差的大小就有所不同, 星体理论高低角在用作引导数据时应加蒙气差修正。

$$E_{ij}^{0} = E_{ij} + \Delta E' \tag{1}$$

式中 E_{ij}^{0}为已加蒙气差修正的星体理论俯仰角; E_{ij}为未加蒙气差修正的星体理论俯仰角。

$$\Delta E' = 60.2'' \cot E_{ij} \cdot 273p/1\,013T, \tag{2}$$

式中 p 为测站气压, 单位为 Pa; T 为测站温度, 单位为 K。

2.2　稳定跟踪

在无稳定平台的舰船上, 经纬仪采用速度前馈稳定的方法, 用软件完成船摇隔离。具体实现方法是经纬仪主控计算机分系统接收惯性导航系统船姿数据, 采用最小二乘法进行船体速度、位置预测, 经过坐标转换及前馈处理, 生成测量系的引导值, 送给跟踪伺服系统, 实现在无机械稳定平台下的星体跟踪测量。

3　关键算法

3.1　坐标系转换

通过上述过程得到地平系中恒星(A_d, E_d)理论值, 在运动平台上引导还需经过如下坐标转换到测量系(A_c, E_c)。转换流程如图 2 所示。

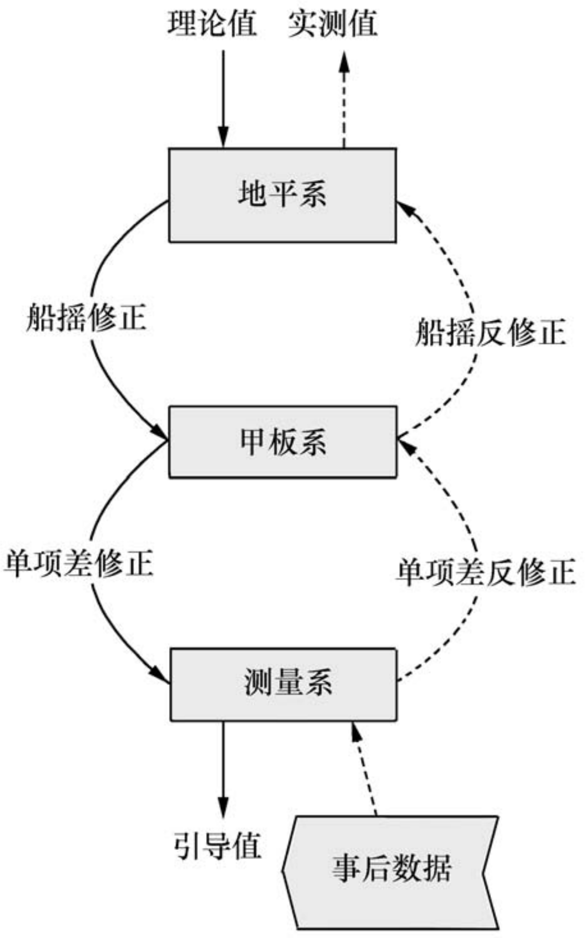

图 2　坐标转换结构示意图

Fig. 2　Framework of coordinate transition

地平极坐标系至直角坐标系。

$$\begin{cases} X_d = \cos E_d \cos A_d \\ Y_d = \sin E_d \\ Z_d = \cos E_d \sin E_d \end{cases}, \tag{3}$$

地平直角坐标系至甲板直角坐标系。

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & \sin R \\ 0 & -\sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H & 0 & \sin H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin J & 0 & \cos H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix}, \tag{4}$$

其中航向 H、纵摇 P、横摇 R 由惯性导航系统实时提供。

甲板直角坐标系至极坐标系。

$$\begin{cases} A_j = \arctan^{-1}(Z_j/X_j) \\ E_j = \arcsin^{-1}(Y_j) \end{cases}, \tag{5}$$

修正经纬仪单项差, 甲板系转至测量系产生引导位置数据, 发往跟踪伺服。

$$\begin{cases} A_c = A_j + g + c\sec E_j + b\tan E_j - I\sin(\alpha - A_j)\tan E_j \\ E_c = E_j + h + I\cos(\alpha A_j) \end{cases}, \tag{6}$$

其中 g 为定向差, c 为照准差, b 为横轴差, h 为零位差, I 为垂直轴误差, α为垂直轴倾斜角。

3.2 事后解算算法

光电经纬仪测量电视是高精度的光测系统，测量星体的精度高，可以认为测星的误差是由于经纬仪的零位差和轴系差引起，即：

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{A} &= F_1(b, c, b, I, \alpha) \\ \Delta \boldsymbol{E} &= F_2(h, I, \alpha, p_1, p_2)\end{aligned}, \qquad (7)$$

其中：p_1 为弯沉误差，p_2 为折射误差，ΔA_i 和 ΔE_i 为第 i 颗星方位角和高低角误差。

F_1，F_2 实际上是比较复杂的函数，通过工程近似得到的线性模型，利用最小二乘法求出 $g, c, b, I, \alpha, h, p_1, p_2$ 的估计值。

设测星理论值为 A_t 和 E_t，可得出理论值与实测值之差为：

$$\begin{aligned}\Delta A_i &= A_t - A_r \\ \Delta E_i &= E_t - E_r\end{aligned}, \qquad (8)$$

根据最小二乘法计算出单项差。

$$\begin{aligned}\zeta &= (B^{\mathrm{T}}B)^{-1}B^{\mathrm{T}}\Delta A \\ \eta &= (C^{\mathrm{T}}C)^{-1}C^{\mathrm{T}}\Delta E\end{aligned}, \qquad (9)$$

其中：

$$\zeta = \begin{pmatrix} g \\ c \\ b \\ x \\ y \end{pmatrix} \quad \eta = \begin{pmatrix} h \\ x \\ y \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}, \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} 1 & \sec E_1 & \tan E_1 & \sec E_1 \tan E_1 & \cos A_1 \sin A_1 \\ 1 & \sec E_2 & \tan E_2 & \sec E_2 \tan E_2 & \cos A_2 \sin A_2 \\ \cdots \\ 1 & \sec E_n & \tan E_n & \sec E_n \tan E_n & \cos A_n \sin A_n \end{pmatrix}, \qquad (11)$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 1 & \sin A_1 & \cos A_1 & \cos A_1 & \cot A_1 \\ 1 & \sin A_2 & \cos A_2 & \cos A_2 & \cot A_2 \\ \cdots \\ 1 & \sin A_n & \cos A_n & \cos A_n & \cot A_n \end{pmatrix}, \qquad (12)$$

$$\Delta \boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} \Delta A_1 \\ \cdots \\ \Delta A_n \end{pmatrix} \quad \Delta \boldsymbol{E} = \begin{pmatrix} \Delta E_1 \\ \cdots \\ \Delta E_n \end{pmatrix}. \qquad (13)$$

接下来计算系统误差。ΔA_{ij}、ΔE_{ij} 为第 i 颗星第 j 画幅方位和高低角误差，N 为用于解算的星数，M 为单颗星记录的画幅数。

测量角总误差为：

$$\sigma_A = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}(\Delta A_{ij})^2}{MN-1}, \qquad (14)$$

$$\sigma_E = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}(\Delta E_{ij})^2}{MN-1}. \qquad (15)$$

测量角单位误差为：

$$\sigma_{AS} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\Delta A_i)^2}{N}, \qquad (16)$$

其中：$\Delta A_i = \sum_{j=1}^{M} \Delta A_{ij} / M$。

$$\sigma_{ES} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\Delta E_i)^2}{N}, \qquad (17)$$

其中 $\Delta E_i = \sum_{j=1}^{M} \Delta E_{ij} / M$。

测量角随机误差为：

$$\begin{aligned}\sigma_{AR} &= \sigma_A^2 - \sigma_{AS}^2 \\ \sigma_{ER} &= \sigma_E^2 - \sigma_{ES}^2\end{aligned}. \qquad (18)$$

4　测量实验与结果

本方法在远洋测量船船载标校经纬仪的改造中进行了首次试验, 船在坞内时轴系误差的标定采用拍固定方位标或对平行光管两种方法, 其中对周围 4 个预设方位标引导记录, 然后用主控软件的解算程序解算轴系三差, 换操作手重复 3 次。因测量船在坞内坐墩, 结果具有高度一致性, 因此对平行光管只重复了 2 次。海上标校时分时段, 分环境进行了 5 次。前 3 次夜间测星, 测星数分别为 12 颗、24 颗和 8 颗, 天气、海况均佳, 特别是第 2 次, 因所测星数较多且均匀分布, 结果与坞内标校结果非常接近, 将第 2 次测星结果与第 2 次坞内拍标结果进行比较, 照准差偏差为 0.015″, 水平差偏差为 0.22″, 垂直差偏差为 0.014″。3 种标校方法结果如表 1 所示。

表 1　3 种标校方法结果

Tab. 1　Results of three different calibrations

分类	编号	照准差/(″)	水平差/(″)	垂直差/(″)
坞内拍标	1	-0.501	-4.74	0.238
	2	-0.511	-4.82	0.247
	3	-0.500	-4.66	0.237
海上拍星	1	-0.473	-4.39	0.228
	2	-0.496	-4.60	0.233
	3	-0.514	-4.84	0.257
平行光管	1	-0.504	-4.71	0.241
	2	-0.506	-4.71	0.242

在船出坞后的某次设备例行维护中, 主传感器在维护人员擦拭过程中偏离了原位置, 照准差需重新标定, 且只能通过拍星的方式进行。在海况、天气、时间段都合适的情况下, 进行了多次星校, 取一致性较好的数据, 保证了标校经纬仪在后续多次任务中的精度。同时证明, 通过海上拍星, 可以产生有效可用的轴系三差数据。经过反复验证表明, 通过海上测星解算出的系统误差与坞内坐墩时具有很好的一致性, 偏差为 ±3″。

5　结　论

本文对远洋测量船船载标校经纬仪进行了海上标校实验, 结果表明, 在海况、天气、时间段合适的情况下海上星校数据与坞内标校数据非常接近。照准差偏差为 0.015″, 水平差偏差为 0.22″, 垂直差偏差为 0.014″。由此证明, 船载经纬仪海上标校方法标校精度高, 且简便易行, 可以取代坞内标校, 以此可以大大节约设备改造、坞内标校及海上校飞的经费。

参考文献:

[1]　蔡建军, 朱杰, 周朝猛, 等. 船载遥测设备海上动态标校方法[J]. 中国科技信息, 2006(6): 139-140.
CAI J J, ZHU J, ZHOU CH M, *et al*. A theory of dynamic calibration of shipborne telemetering equipments[J]. *China Sci. Technol. Information*, 2006(6): 139-140. (in Chinese)

[2]　金光. 光电经纬仪的自动化标校与白天测星技术研究[J]. 光学 精密工程, 1991(2): 87-90.
JIN G. A technical study of the automation demarcation and correction and the day light steller measurement for electro-optical tracking systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1991(2): 87-90. (in Chinese)

[3]　孙晓昶, 皇甫堪. 以恒星位置为基准的运动平台上测控雷达精度标校技术[J]. 宇航学报, 2002, 23(3): 29-33.
SUN X C, HUANG F K. Precision calibration of moving platform based radar with stars as reference marks[J]. *J. Astro-*

nautics, 2002, 23(3) : 29-33. (in Chinese)

[4] 李艳平, 李岩, 郭立红, 等. 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(2) : 79-83.

LI Y P, LI Y, GUO L H, *et al*. Error analysis of star calibration technique in theodolite static presision detection[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2004, 12(2) : 79-83. (in Chinese)

[5] 姚兆宁, 孙晓昶. 舰载精密测量雷达星体标校方法及应用[J] . 现代雷达, 1999, 21(4) : 7-12, 31.

YAO ZH N, SUN X C. Shipborne accurate instrumentation radar star checkout method and application[J] . *Modern Radar*, 1999, 21(4) : 7-12, 31. (in Chinese)

[6] 刘云飞. 船载测控系统的标校[J] . 无线电通信技术, 2003, 29(2) : 1-3.

LIU Y F. Calibration of ship-based measurement and control system[J] . *Radio Communications Technol.* , 2003, 29(2) : 1-3. (in Chinese)

[7] 袁诚宏, 朱晓峰, 陈健, 等. 基于联合放球的船载雷达角度零值标校方法[J] . 飞行器测控学报, 2009, 28(4) : 23-25.

YUAN C H, ZHU X F, CHEN J, *et al*. Balloon-tracking zero angle calibration method for ship-borne radars[J] . *J. Spacecraft TT&C Technol.* , 2009, 28(4) : 23-25. (in Chinese)

[8] 王琦, 张继旭. 基于 CCD 激光经纬仪的雷达标校及数据处理方法[J] . 战术导弹技术, 2009(1) : 89-92.

WANG Q, ZHANG J X. A method of radar calibration and data processing based on CCD laser theodolite[J] . *Tactical Missile Technol.* , 2009(1) : 89-92. (in Chinese)

作者简介: **马庆坤**(1981—) , **男, 河南沈丘人, 硕士研究生, 主要从事实时控制软件和虚拟仪器软件方面的研究。**

E-mail: markingkun@ 163. com

乔彦峰(1962—) , **男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事光电测量、光电瞄准、光电测控技术方面的研究。**

E-mail: qiaoyf@ ciomp. ac. cn