

文章编号 1004-924X(1999)04-0091-05

# 星体弧长法标定光电经纬仪指向精度

金光 王家骥

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

倪伟

(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

**摘要** 星体标校技术是利用恒星在天球上的准确视位置标定光电经纬仪的指向精度。其方法主要采用两种方式:时角法和弧长法。时角法是采用恒星视位置的计算公式,通过光电经纬仪瞄准并测量,然后与理论计算的真值进行对比,从而求出光电经纬仪的指向误差。弧长法则利用天球中北极星与任一恒星弧长不变的原理而发展起来的新型技术。本文详细介绍了星体弧长法标定光电经纬仪指向精度的基本原理,对标定精度进行了分析,指出了影响其精度的因素,并对其应用到靶场的外场实时检测方法进行了探讨。

**关键词** 星体 标定 经纬仪

**中图分类号** V556.5 **文献标识码** A

## 1 引言

利用星体标校技术来提高光电经纬仪的测角精度是八十年代末期兴起的一门新技术。该项技术是伴随着电脑、天文学、光电信息的发展而逐步趋于完善,并日益广泛地被应用于各种靶场的外场实时检测中。利用星体标校技术可以使光测设备的用户随时了解仪器的精度状况,对影响测量精度的主要误差(指系统误差)进行修正,从而极大地方便了用户。

目前,采用的星体标校技术主要是时角法,它是根据恒星视位置的计算公式,利用被标校仪器瞄准某一特定恒星,测出其在地平坐标系中的方位角 $A_{测}$ 和高低角 $E_{测}$ ,然后与恒星在被标校仪器处的理论方位角 $A_{理}$ 和高低角 $E_{理}$ 相比较,求出误差。

收稿日期:1998-10-21

修稿日期:1999-02-10

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= A_{\text{测}} - A_{\text{理}} \\ \Delta E &= E_{\text{测}} - E_{\text{理}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

使用时角法的前提条件是: ① 必须提供非常准确的时间( 误差小于 1ms );

② 测站的准确地理坐标。

因此, 时角法只能应用到具备满足上述两项条件的用户或固定站, 而对机动站应用起来受到一定的限制。

星体弧长法是借助于北极星与天球中任意一颗恒星之间弧长不变( 指短时间) 的基础上发展起来的一门技术。它克服了时角法( 两项前提条件) 的主要缺陷, 可实时对光测设备的测角精度进行精确标定, 为用户又提供了一种新的更为方便的外场检测方法。

## 2 星体弧长法的基本原理

根据天文学的理论, 所有恒星都分布在以地球质心为中心的天球上。地球自转的轴线延长线基本上与北极星( 指在天球坐标上) 重合。

因此, 可以假定北极星是处在地球的回转轴线上。基于这一基本假设使采用星体弧长法定标光电经纬仪指向精度成为可能。从天文学的角度上讲, 恒星的视位置一般用赤经, 赤纬来表示。星体弧长法的基本原理就是根据北极星与任意一颗恒星之间弧长做为理论真值, 然后利用被标校光电经纬仪先后瞄准北极星和某颗恒星, 并测出在地平坐标中的高低角和方位角, 代入弧长公式从而求出光电经纬仪的指向精度。下面将基本原理介绍如下:

如图 1 所示天球坐标系, 其中弧长  $BC$  表示在  $\Delta t = t_1 - t_2$  时间内北极星旋转的弧长。根据弧长公式:

$$\begin{aligned} \cos(d) &= \sin(\varphi_1)\sin(\varphi_2) \\ &+ \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\cos(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (2) \end{aligned}$$

其中:  $\varphi_1, \varphi_2$  是星体的赤纬;

$\lambda_1, \lambda_2$  是星体的赤经;

$d$  是两颗恒星间的弧长。

由于地球旋转, 造成了天球上恒星相对于地球坐标的角位置移动。一般来说, 在地球赤道处恒星最大角位移为  $15^\circ/s$ , 因此利用时角法定标光电经纬仪其时间精度要求较高。那么为什么利用星体弧长法对时间要求相当低呢? 我们根据(1) 式进行分析。

设  $t_1$  时刻, 北极星在  $B$  点, 另一颗恒星在  $B'$  点,  $t_2$  时刻, 北极星旋转到  $C$  点, 另一颗恒星

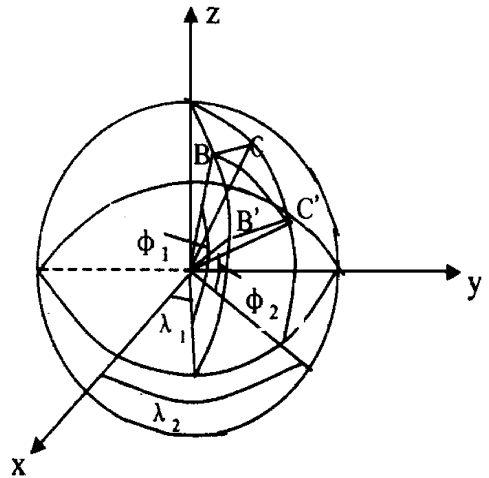


Fig. 1 Celestial sphere coordinate

旋转到  $C'$  点。由于光电经纬仪不可能在相当短的时间内测出北极星和另一颗恒星的方位角及高低角。因此, 势必产生误差, 从理论上讲, 应测出弧长  $\overleftarrow{BB'}$ , 而实际上测出的弧长为  $\overleftarrow{BC'}$ 。其误差为:

$$\Delta_{BC} = \overleftarrow{BB'} - \overleftarrow{BC'} \quad (3)$$

目前光电经纬仪的指向误差一般为  $5''$  左右。根据检验误差的  $1/3$  准则或  $1/10$  准则,  $\Delta_{BB'}$  应控制在  $1 \sim 0.5''$ 。由 (2), (3) 式:

$$\left. \begin{aligned} BC' &= \sin(\varphi_1)\sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\cos(\lambda_1 - \lambda_2) \\ BB' &= \sin(\varphi_1)\sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\cos(\lambda_1 - \lambda_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{BC} &= BB' - BC' \\ &= \cos(\varphi_1 - \varphi_2)[1 - \cos(\lambda_1 - \lambda_2)] \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $\varphi_1$  —— 北极星的赤纬; 由于  $\varphi_1 \approx 90^\circ$ , 故  $\cos(\lambda_1 - \lambda_2) = 1$

$\varphi_2$  —— 另一颗恒星赤纬; 设  $\varphi_2 = \theta$  (最大值);

$(\lambda_1 - \lambda_2)$  两颗星的赤经差, 相当于地平坐标系的时间差;

$\Delta_{BC}$  —— 两颗恒星间的弧长差。

$$\Delta_{BC} = (1 \sim 0.5) / \rho = (1 \sim 0.5) / 206265$$

解(4)式得:

$$\cos(\lambda_1 - \lambda_2) = 1 - [(1 \sim 0.5) / [\rho \cos 89^\circ]] = 0.999722 \sim 0.954965$$

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 1.350539^\circ \sim 0.9549645^\circ$$

由于地球自转  $15^\circ$  对应时间为 1h。

则有:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 1.350539^\circ \text{ 对应时间为 } 5\text{min}24\text{s}$$

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 0.954965^\circ \text{ 对应时间为 } 3\text{min}49\text{s}$$

根据上述分析, 利用星体弧长法标定光电经纬仪的指向精度时, 测量北极星和另一颗恒星之间在天球上角距应大于  $90^\circ$ , 时间差应控制在:

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \Delta = 1'' \quad \Delta &\leq 5\text{min}24\text{s} \\ \text{当 } \Delta = 0.5'' \quad \Delta &\leq 3\text{min}49\text{s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 3 星体弧长法的测量方法

星体弧长法标定光电经纬仪的指向精度是依据星体弧长公式(2)。它首先利用被检光电经纬仪测出北极星的方位角和高低角, 然后再瞄准另一颗恒星, 并测出其方位角和高低角, 代入(2)式求出弧长。之后再将北极星的赤经, 赤纬, 及另一颗恒星的赤经, 赤纬, 代入(2)式求出理论弧长。两条弧长之差即为光电经纬仪的指向误差。具体方法如下:

#### 3.1 理论弧长

根据前面的讨论, 所有恒星都分布在天球上, 其视位置一般用赤经, 赤纬来表示。如果需

要知道某年,月,日的某一颗恒星在天球上的视位置,可通过每年的《中国天文年历》中查出;也可通过专门计算程序求出某日某时的视位置。再代入(2)式求出理论弧长。

$$\cos(d) = \sin(\delta_1)\sin(\delta_2) + \cos(\delta_1)\cos(\delta_2)\cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (7)$$

其中:  $d$  —— 两颗恒星间的理论弧长;

$\delta_1$  —— 北极星的赤纬;

$\delta_2$  —— 另一颗恒星赤纬;

$\alpha_1$  —— 北极星的赤经;

$\alpha_2$  —— 另一颗恒星的赤经。

从(5)式可以看出,地球上两颗恒星之间弧长只取决于赤经( $\alpha$ )和赤纬( $\delta$ )。为了消除测量误差,可算出  $n$  颗星的弧长。 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 。

### 3.2 测出的实际弧长

一般而言,光电经纬仪都安置在地平坐标系中。由于地球的自转,造成了天球上的恒星相对于地平坐标系其高低角和方位角随地球经、纬度和时间都发生变化。因此采用恒星时角法标定光电经纬仪精度必须已知测站的经、纬度和测星的准确时间,否则,将引起较大的误差。而星体弧长法则克服了上述缺陷。它只要求测北极星与另一颗恒星相对时间满足(5)式即可。具体方法如下:

a) 测北极星, 求出  $A_0, E_0$

b) 测另一颗星, 求出  $A_1, E_1$

c) 测北极星, 求出  $A'_0, E'_0$

d) 测另一颗星, 求出  $A_2, E_2$

.....

可求出  $n$  颗星与北极星的  $A, E$ , 代入下式

$$\begin{cases} \cos(K_1) = \sin(E_0)\sin(E_1) + \cos(E_0)\cos(E_1)\cos(A_0 - A_1) \\ \cos(K_2) = \sin(E'_0)\sin(E_2) + \cos(E'_0)\cos(E_2)\cos(A'_0 - A_2) \\ \dots\dots \\ \cos(K_n) = \sin(E_0^n)\sin(E_n) + \cos(E_0^n)\cos(E_n)\cos(A_0^n - A_n) \end{cases}$$

从而求出  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$

光电经纬仪的指向误差为:

$$\Delta_{\text{指}} = \sum_{i=1}^n \frac{(d_i - k_i)}{n} \quad \sigma_{\text{指}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_i - \Delta_{\text{指}})^2}$$

## 4 结 论

星体弧长法标定光电经纬仪指向精度对作业时间误差要求不高和不受地理坐标等因素的限制,它可以迅速,准确地检定光电经纬仪的精度。该方法的推广和使用,可以为我国靶场光测设备提供一种行之有效的外场检验手段。

## 参 考 文 献

- 1 中国科学院南京紫金山天文台. 中国天文年历. 北京: 科学技术出版社, 1993

## Calibration of Pointing Accuracy with Electro-optic Phototheodolites by the Star Arc length

JING Guang, WANG Jia Qi

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

NI Wei

(*Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094*)

### Abstract

Calibration technology of the star makes use of true pointing of star to calibrate pointing accuracy of electro-optic phototheodolite. The method mostly use of two modes that are time angle and arc length. Time angle make use of account expressions of true pointing of star through pointing with electricity optical phototheodolite and compare with true value of theory and finally calculate the error of pointing of electro-optic phototheodolite. The arc length is new type technology that depends on principle of arc length changeless to use Polaris with other star in the celestial sphere. This paper introduces the basic principle of the calibration of pointing accuracy of electro-optic phototheodolite with the Star arc length. It analyzes the calibration of precision and point out the factors as affected the precision. It researches the check method in real time for the range.

**Keyword:** Star, Calibration, phototheodolite

金光 男, 1958 年生, 1982 年毕业于长春光学精密机械学院精密仪器系。现在长春光机所博士研究生。主要从事靶场光测设备和测绘相机的研究工作。