

经纬仪静态测角精度分析

王 涛 唐 杰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

【摘要】现代光电经纬仪具有实时测量、高精度、自动跟踪监控和易于图像再现等优点,广泛应用于航空、航天、武器试验等科研和军事领域。它的测量精度直接关系到测量结果和试飞结论的准确性,而测角精度又是光电经纬仪中一项最重要的指标。根据光电经纬仪的工作状态,其测量误差又可以分为静态误差和动态误差。通常在设备的总误差中,静态误差占据主要部分,因而是目前研究的重点。本文针对经纬仪室内测角精度检测进行分析,对影响测角精度的各种因素分别进行探讨,并给出基于 EXCEL 的经纬仪静态测角误差修正表。

关 键 词: 光电经纬仪; 测角精度; 静态测角

中图分类号: TH761.1

Accuracy Analysis of Static State Angle Measurement of Theodolite

WANG Tao TANG Jie

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Modern photoelectronic theodolite has many advantages, such as real-time measurement, high accuracy, auto-tracking monitoring and easy image reconstruction. It is widely applied in scientific and military area covering of aviation, aerospace, and weapon test. Its measuring accuracy has strong effect on the measuring result and test flying conclusion, and the angle measurement accuracy is the most important in the photoelectronic theodolite. According to working status of the photoelectronic theodolite, its measuring error can be divided into static state error and dynamic state error. Generally, the static state error in the total error of the equipment is the main part, so it is the key that is being studied. The paper aims at theodolite indoor measuring accuracy analysis, the factors that influence the measuring accuracy, and also gives a revised table of the theodolite static state measuring error.

Keywords: photoelectronic theodolite; angle measurement accuracy; static state angle measurement

1 引言

现代光电经纬仪具有实时测量、高精度、自动跟踪监控和易于图像再现等优点，广泛应用于航空、航天、武器试验等科研和军事领域。它的测量精度直接关系到测量结果和试飞结论的准确性，而测角精度又是光电经纬仪中一项最重要的指标。根据光电经纬仪的工作状态，其测量误差又可分为静态误差和动态误差。通常在设备的总误差中，静态误差占据主要部分，因而是目前研究的重点。光电经纬仪测角精度检测分外场和室内，在室内常用不同高角的平行光管检测；光学测量设备外场精度检测主要采用拍星等方法。本文主要针对室内检测分析经纬仪的静态测角误差。

2 经纬仪静态测角精度室内检测方法

经纬仪静态测角精度室内检测是采用专用检测架装置来检测。检测架上加装了不同高角和方位角的平行光管，通过光管中分化板上的像作为无穷远目标，用 T4 经纬仪测定目标的标定值 (A, E) 与被检经纬仪测量值之差便是测角误差，如图 1 所示。

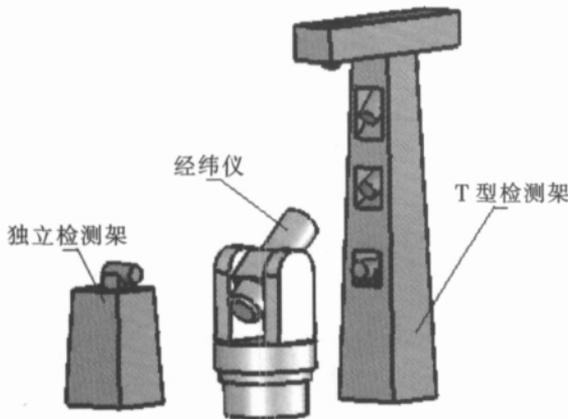


图 1 室内检测示意图

独立检测架中装有一个水平光管，T型检测架中装有不同高角的光管，从上至下分别约为 65°、45°、30°以及水平的光管，独立检测架与 T 型检测架方位夹角约为 90°，各光管的视轴交汇于一点，

经纬仪测量时将其垂直轴与水平轴的交点安装在该点附近。检测过程中先用精度高的 T4 经纬仪测得各光管的角度值作为真值，然后将被检经纬仪测得各光管角度值作为测量值，测量值与真值之差即为被检经纬仪的静态测角误差。

3 经纬仪静态测角精度分析

导致光电经纬仪产生静态测角误差的主要因素为 3 大误差源，即轴系误差、编码器误差、判读误差 (脱靶量读取误差)。

3.1 轴系误差

轴系误差包括垂直轴误差，水平轴误差和视轴误差。经纬仪的三轴关系如图 2 所示，垂直轴垂直于水平面，水平轴应垂直于垂直轴，视轴垂直于水平轴。

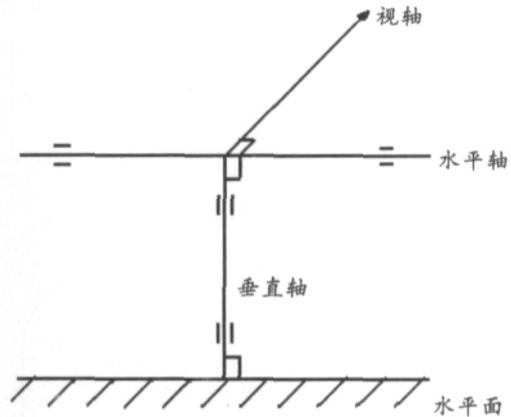


图 2 地平式跟踪架轴系示意图

3.1.1 视轴差

经纬仪的视轴与水平轴的不垂直度即为照准差，常用符号 C 表示。当经纬仪存在照准差时，会给方位角的测量带来误差 A，如图 3 所示。

图中 H-H 为水平轴，OZ 为垂直轴，OD 为理想视轴，X 为目标 (高角为 E)。设 C=0，则视轴划圆弧 \widehat{DZ} ，若 C ≠ 0，视轴则为 OB，此时视轴划圆弧 \widehat{BXY} ，过点 X 做弧线 \widehat{AXZ} 及圆弧 \widehat{HH} 垂直 \widehat{DZ} 且交于点 P，那么 $\triangle ZXP$ 为球面直角三角形，其中：

$$\widehat{XZP} = \widehat{AZD} = K, \widehat{XP} = \widehat{BD} = C, \widehat{XZ} = 90^\circ - E, \widehat{AX} =$$

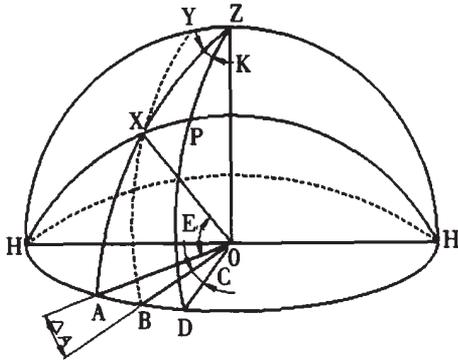


图3 存在照准差时,会给方位角的测量带来误差

E, 由球面三角正弦公式得:

$$\sin K = \sin C / \sin(90^\circ - E)$$

由于角 K, C 很小, 所以根据幂级数公式得:

$$K \approx C \sin E$$

上式是照准差相对于理想视轴的方位角影响公式, 而实际应用中则用带有照准差的视轴 OB 来定义方位编码器的零位, 理想视轴已经产生了一个 -C 的偏差角度, 所以在做方位角修正时需要带入 -C 计算, 即以 OB 定向时, 照准对方位角的影响为:

$$A = C(\sec E - 1)$$

照准差的检测方法如图 4 所示。

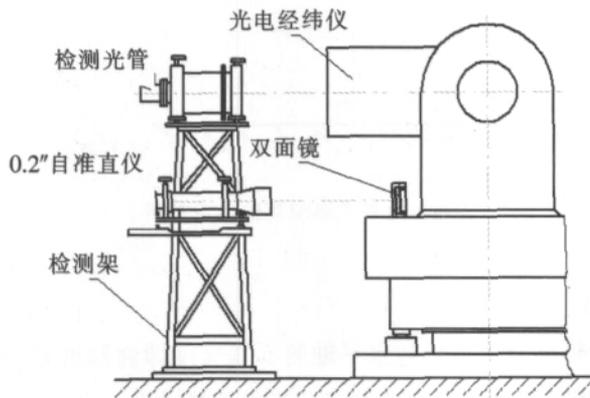


图4 照准差检测

将检测架固定在稳定平台上, 检测光管置于检测架上, 并使其水平偏差 < 10。接通电源, 照明十字丝, 作为无穷远的目标。

在转台表面固定双面镜, 调节镜座使双面镜的法线与垂直轴轴线垂直并大致相交。在检测架上架设 0.2 自准光管, 使其视轴垂直于双面镜。

光电经纬仪分别以正镜、倒镜瞄准目标, 即使光电经纬仪的十字丝中心与检测光管的十字丝中心重合, 读 0.2 自准光管水平方向的读数 (或读方位编码器的读数)。正镜、倒镜重复瞄准 3 次得 A 和 A:

$$\text{正镜: } A = (A_1 + A_2 + A_3) / 3$$

$$\text{倒镜: } A = (A_1 + A_2 + A_3) / 3$$

则照准差: $C = (A - A) / 2$ (用 0.2 自准光管读数)

$$C = (A - A \pm 180^\circ) / 2 \quad (\text{用方位编码器读数})$$

C 为正值 表示视轴偏向左立柱;

C 为负值 表示视轴偏向右立柱。

3.1.2 横轴差

水平轴和垂直轴的不垂直度为横轴差。在图 2 中垂直轴垂直于水平面, 建设水平轴与水平面的夹角为 I, 当 I=0 时视轴绕水平轴旋转所产生的轨迹平面为一个铅垂平面, 当 I ≠ 0 时, 则产生一个倾斜平面。因而产生测角误差 E。根据与照准差类似的方法推导出:

$$\Delta E = I \times \tan E$$

式中 E 为目标高角值。

横轴差的检测与照准差相似。利用图 1 中 T 型检测架的 65° 光管作为目标, 光电经纬仪分别以正镜、倒镜瞄准目标, 即使光电经纬仪的十字丝中心与检测光管的十字丝中心重合, 读方位编码器的读数。正镜、倒镜重复瞄准 3 次得 A、A。

$$\text{正镜: } A = (A_1 + A_2 + A_3) / 3$$

$$\text{倒镜: } A = (A_1 + A_2 + A_3) / 3$$

则横轴差:

$$I = [(A - A \pm 180^\circ) / 2 - C \sec E] / \tan E$$

式中 E 为光管高角。

3.1.3 竖轴差

竖轴差包括倾斜和晃动。竖轴偏离铅垂位置成为竖轴倾斜误差, 设竖轴线和铅垂线夹角为 V, 竖轴倾斜引起水平轴不水平因而产生测角误差, 由球面三角可得: $\Delta = V \tan E$ 。经纬仪中都设有调平机构, 使用时要先将仪器调平, 所以在综合计算中不

引入竖轴倾斜误差。

竖轴晃动可以分解为 2 个方向，即沿水平轴方向和垂直水平轴方向，二者分别影响横轴差和高低测角差。检测方法也分为 2 个方向，分别将电子水平仪沿水平轴方向或垂直水平轴方向放置于经纬仪转台上，经纬仪转动，每隔 30° 读数，正转 2 周后再反转 2 周（因为轴的转速是钢球的 2 倍），将数值按傅里叶级数^[1]展开：

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$$

其中，常数项为水平仪轴线与垂直轴轴线不垂直，是常量。一次谐波为调平误差，其余为晃动。

同理，水平轴检测方法是在水平轴端面安装一个可调的平面反射镜，再用 0.2 自准平行光管对准平面反射镜。水平轴旋转 2 周后，再反转 2 周，每隔 30° 测 1 个数据，分别测出水平轴晃动在高低方向的分量（将影响水平轴倾斜误差 A_i ）和在水平方向的分量（将影响视轴照准差的误差 AC ），再展开成傅里叶级数：

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$$

其中，常数项为反射镜与水平轴不垂直，是常量。用实测数值减去常数项即可直接用于经纬仪测角误差的修正。

3.2 编码器误差

编码器误差主要有码盘偏心误差、刻划误差、细分误差以及带动误差等。方位和俯仰编码器分别影响方位和俯仰测角精度，转换关系为 1:1，可以通过多面体检测。

3.3 判读误差

误差分为系统误差和随机误差。系统误差可由设备标定后予以修正。随机误差则由构成系统的各环节引入。由于其随机性而无法修正，是构成综合判读误差的主要来源。随机误差主要包括脱靶量量化误差，像元分辨率及其误差，算法误差，跟踪误差和定位误差等。其中脱靶量量化误差与相机有关，

其余误差均与像元分辨率误差有关。

像元分辨率可以表示为：

$$\Delta_{TV} = \frac{n}{f \times 10^3} \times \frac{360}{2\pi} \times 60 \times 60$$

式中： n 为像元尺寸； f 为焦距值。

由于它带来的误差应该服从^[2]均匀分布，故应取其误差值：

$$\sigma_{\text{分辨}} = \Delta_{TV} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

3.4 综述

在视轴装调良好的情况下（视轴晃动等指标均较小），影响光电经纬仪测角精度的主要因素是跟踪架误差。可以从以下几个方面提高经纬仪测角精度。

(1) 编码器可以在安装过程中通过多面体检测，反复调整，精度可以满足要求。

(2) 轴系装调过程中，通过傅里叶级数展开测量轴系晃动，分析原因尽量减小晃动量。

(3) 跟踪架装配过程中，通过修研左右立柱等高等方法减小横轴差。

(4) 视轴装配时保证视轴垂直水平轴，装配后在不影响视场的前提下可以通过调整 CCD 来调整照准差。

(5) 通过俯仰编码器电调零可以修正零位差。

4 基于 EXCEL 的经纬仪静态测角误差修正

根据上述分析，在检测经纬仪静态测角误差时需要各单向差的修正。按照各单向差对测角精度的影响将公式嵌入 EXCEL 表中，直接输入测得角度值即可得出测角误差（见表 1）。

表中 1# 光管为图 1 中独立检测架上的光管，2# 光管为图 1 中 T 型检测架中的接近 65° 的光管。标定值为高精度 T4 经纬仪对 2 个光管方位，高低方向的标定结果。被检经纬仪分别以正镜和倒镜瞄准各光管测得方位，高低角度值输入表中即可。

修正公式。根据上述分析将各单向差的修正公式嵌入表中：

研究生论坛 Postgraduate Forum

表 1 静态测角误差分析表

	A	B	C	D
1	静态测角误差	方位	高低	2#~1# 方位标定值
2	1# 正镜	10.00417	359.96528	91.2740972
3	1# 倒镜	190.0025	180.03667	2# 高低标定值
4	2# 正镜	101.27306	64.68139	64.6774861
5	2# 倒镜	291.27167	115.31917	
6	照准差	3.01	角秒	
7	零位差	3.51	角秒	
8	水平轴倾斜	- 5.66	角秒	
9	2# 相对 1# 方位静态测角误差	- 10.73	角秒	
10	高低静态测角误差	10.55	角秒	

$$B6 = \text{ROUNDUP}(((B2 - B3 + 180) / 2) \times 3600, 2)$$

$$(\text{RADIANS}(D4)) - 1) - B8 \times \text{TAN}(\text{RADIANS}(D4)), 2)$$

$$B7 = (C2 + C3 - 3 \times 180) / 2 \times 3600$$

$$B10 = \text{ROUNDUP}((C4 - D4) \times 3600 - B7, 2)$$

$$B8 = \text{ROUNDUP}(((B4 - B5 + 180) / 2 - B6 / \text{COS}(\text{RADIANS}(D4))) / \text{TAN}(\text{RADIANS}(D4)), 2)$$

以上公式中 180 的倍数以及前面的正负号都可以根据实际数值修正。(No.8)

$$B9 = \text{ROUNDUP}((B4 - B2 - D2) \times 3600 - B6 \times (1 / \text{COS}$$

参考文献:

[1]高福晖.大型经纬仪轴系晃动的傅里叶谐波分析方法[J].光电工程, 1998, 25(5): 1- 10.

[2]毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社,1982.

荷兰 Avantes B.V.公司

荷兰 Avantes B.V.公司是全球微型光纤光谱仪的权威制造商, 产品包括微型光谱仪、光谱灯、光谱仪应用软件、光纤及探头、各种附件等, 同时针对多种常见应用推出不同的应用系统。Avantes 公司在光纤光谱仪的研发、生产及应用领域拥有超过 14 年的经验, 而且一直致力于为高端科研及工业用户提供具有革命性先进技术的光谱仪产品, 产品广泛应用于化学、生物制药、半导体和食品加工等领域, 所应用的测试技术有颜色测量、紫外/可见吸收测量、辐射测量、LED 测量、薄膜厚度测量及镀膜过程监控、氧含量测量、宝石成分测量、荧光测量、喇曼测量、LIBS 测量等。该公司以优良的产品质量和专业周到的技术支持及售后服务赢得了广大中国用户的青睐。

为了更好地服务中国用户, 我们已经在北京成立了 Avantes China 公司, 并于 2007 年 7 月成立深圳办事处, 而且建立了“光谱实验室”, 目前可以为用户提供颜色测量、荧光测量、透过率/吸光度测量、辐射测量、宝石测量、发光光谱测量, 同时我们还提供光谱仪定标服务。欢迎广大用户与我公司联系, 我们的专家会根据您的应用为您推荐最合理的解决方案。

联系人: 张志伟 电话: 010- 34574045 13901104240 (手机)