

文章编号:1007-1180(2010)10-0050-05

光电经纬仪靶场精度检测数据误差分析

米 阳¹, 刘华军², 张 鹏²

(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. 91550 部队装备部, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 本文介绍了光电经纬仪靶场精度检测的试验方法及误差分析。靶场精度检测易受气候条件影响造成事后精度超差, 无法反映设备的真实状况, 文章提出了精度检测过程中的误差计算方法, 并对事后误差数据中跟踪部位及脱靶量误差进行数据修正。实战任务表明, 误差修正方法对校飞数据事后处理精度的提高具有很好的效果, 事后经纬仪系统总误差精度由原来的 60" 提高到 18"。

关键词: 光电经纬仪; 事后测角总误差; 动态测角随机误差; 脱靶量修正

中图分类号: 7H761.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102710.0050

Data Error Analysis for Precision Detection of Opto-electronic Theodolites in Shooting Range

MI Yang¹, LIU Hua-jun², ZHANG Peng²

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

2. 91550 Army Unit, Dalian 116023, China)

Abstract: This paper introduces the test method and error analysis for the photoelectric theodolite precision detection in shooting range. The accuracy of precision detection in shooting range is easily affected by climate conditions which result in the out-of-tolerance measure error and the equipment realities can not be reflected. Error calculation method is proposed for precision detection and data correction for the error of tracking position and the miss distance is also put forward in the paper. Combat mission shows that the error correction method for data processing accuracy afterwards has very good effect and the theodolite system error precision is improved from original 60" to 18".

Keywords: photoelectric theodolite, total error of measuring angle afterwards, random error of dynamic measuring angle, miss-distance correction

1 引言

光电测量设备经生产完成鉴定后, 还需进行靶场验收。在靶场验收中, 对光电测量设备进行对接、联试、校飞, 检验测量设备是否符合要求。首先, 制定联试校飞大纲和精度鉴定方案, 设计实时软件和飞机改装方案。然后, 根据通过光学设备获取的测量数据, 用精度较高的 GPS 定位信息和测速信息作为比较标准, 按事后数据处理的方法, 在各测量设备坐标系下比较各测量设备与 GPS 测量信息同一架次、同一进入、同时跟踪测量按预定航线飞行的飞机的数据, 检验被鉴定设备的测量误差: 总误差、系统误差、高频随机误差、低频随机误差^[1]。

光电经纬仪靶场精度检测根据具体条件安排的校飞计划一般在 3~5 天完成, 总共需完成 8~12 个成功进入, 每个架次需拍摄战前及战后方位标, 同时测量测站处和高空的温度、湿度和气压。校飞任务确定试验过程中多架次由于天气条件造成事后处理精度超差, 无法反映光电测量设备真实状态, 导致试验周期延长, 费用增加。经过对任务数据的综合分析, 发现图像数据的事后处理和误差处理方法对精度检测影响较大。因此, 文中根据综合校飞数据建立数学模型并提出了相应的处理方法, 对造成精度超差的问题进行了详细误差分析和处理, 最终得到较精确的任务数据, 印证了误差处理方法的可行性。

2 误差模型

2.1 误差组成及相关数学模型

靶场校飞任务总共飞行 4 个架次 (包括一次夜航), 白天任务超差数据段较多, 夜航数据较好, 随机误差基本满足精度。由于对光电经纬仪的精度检测主要采用事后数据综合判定的方法, 因此本文讨论经纬仪的精度主要建立于事后测角总误差的基础上。事后测角总误差分为静态测角总误差与动态误差增量综合。影响测角精度的因素有静态测角误差源和动态测角误差源两部分。其中静态测角误差源

有垂直轴误差、水平轴误差、视准轴误差、轴角编码器误差、零位差、定向差、判读误差等。动态测角误差源有动态摄影引起的动态误差和其他动态变形引起的误差^[2]。

光电经纬仪的事后测角总误差应为静态测角总误差和动态随机误差与动态误差增量的方差和的开方, 其误差数学模型为:

$$\sigma_A = \sqrt{\sigma_{As}^2 + \sigma_{Ar}^2 + \sigma_{A\Delta}^2} \quad \sigma_E = \sqrt{\sigma_{Es}^2 + \sigma_{Er}^2 + \sigma_{E\Delta}^2} \quad (1)$$

式中: σ_A , σ_E 为事后测角总误差; σ_{Ar} , σ_{Er} 为动态测角随机误差; $\sigma_{A\Delta}$, $\sigma_{E\Delta}$ 为动态误差增量; σ_{As} , σ_{Es} 为静态测角总误差。

静态测角总误差可以通过拍星的方法来获取^[2]。在时统信号的控制下, 光电经纬仪对星体进行静态拍摄, 可以得到星体的测量值, 根据拍星的时间、设备站址的天文经纬度、星体坐标等参数, 可以计算出星体的理论视位置值, 以此理论值作为比较标准, 经数据处理后, 可以获得光电经纬仪的静态测角误差。在拍星过程中, 外界环境的影响已包含在计算中。

动态误差增量的检测一般在设备出厂前在室内进行^[3]。动态随机误差可以通过实际跟踪测量, 利用变量差分法估计。

2.2 误差计算方法

本次任务引进 GPS 全球定位系统加两个基准站作为校飞精度基准, 用 GPS 转换结果与测量设备做比较计算总误差、系统误差, 以此判定设备标校效果。从比对的差值中计算出系统的总误差以及随机误差。

其中误差分为系统误差和随机误差两项, 随机误差又分为高频随机误差和低频随机误差。

以方位角 A 为例, 各误差的计算如下:

$$\Delta A_{ki} = A_{oki} - A_{ki} \quad [4] \quad (2)$$

其中: A_{ki} 为已换算到测量设备坐标系的测量元素的基准值; A_{oki} 为评定设备自身坐标系的方位测量值; $k=1, 2, \dots, m$, 为区段序号; $i=1, 2, \dots, n$, 为区段中的采样点序号^[5]。

规定 n 为 400 个点，每个区段为 20 s 400 个点。如果在一段内有效数据 < 200 个，此段就不做处理。

误差计算公式如下：

(1) 总误差 ΔA

$$\Delta A_k = [1/(n \sum_{i=1}^n \Delta A_{ki}^2)]^{1/2} \quad \Delta A = [1/(m \sum_{k=1}^m \Delta A_k^2)]^{1/2} \quad (3)$$

(2) 系统误差

$$SA_k = 1/(n \sum_{i=1}^n \Delta A_{ki}) \quad SA = 1/(m \sum_{k=1}^m \Delta SA_k) \quad (4)$$

(3) 随机误差

高频随机误差

用变量差分法求出 σA ：

$$\sigma A_k = \{ \sum_{i=1}^{n-p} (\Delta^p A_{ki})^2 / [(n-p)(2p)! / (p!)^2] \}^{1/2} \quad (5)$$

根据实际任务需求，取差分阶数 $p=3$ ，步长 $t=4$ ， $n=400$ 个点，则：

$$\Delta^3 A_{ki} = \Delta A_{ki} - 3\Delta A_{ki+4} + 3\Delta A_{ki+8} - \Delta A_{ki+12} \quad (6)$$

$$\sigma A = [1/(m \sum_{k=1}^m \sigma A_k^2)]^{1/2}$$

低频随机误差

$$\sigma LA = [\Delta A^2 - SA^2 - \sigma A^2]^{1/2} \quad (7)$$

这里要说明的是，单台设备的随机误差统计 ΔA_{ki} 用测量元素序列值代替。

对经纬仪的数据处理包括脱靶量修正、轴系误差修正、光波电波折射误差修正、跟踪部位修正以及垂线修正，针对数据超差具体问题，下文提出了相应修正方法。

3 数据误差分析

3.1 计算误差

3.1.1 跟踪部位修正

(1) 数据处理方法

由于光学设备的系统误差鉴定基准是 GPS 测量数据，而实际跟踪部位并非 GPS 所在位置，因此跟踪部位修正的准确性会影响测角的系统误差。以实际跟踪部位与修正后的位置差距 1 m 为例，可通过近似公式 $\Delta A = \arctan(\Delta L/R) \times 180 \times 3600 / 3.14159$ 估算在最远距离 20 km 时，方位、俯仰的误差在 10" 以内，在最近距离 7 km 时方位、俯仰的误差在 29" 以内，对方位、俯仰影响的具体数据根据飞机姿态而

定。因此，该修正误差对测角的误差计算影响较大。在整个航线中飞机是平行飞行的，跟踪部位对方位的误差影响较大，而对俯仰的误差影响要小些，从夜航的数据结果来看，也是符合这个规律的。

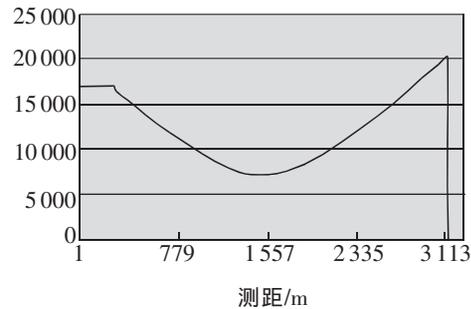


图1 飞机航迹测距值

在发射系对跟踪部位进行修正时，消除各测量设备跟踪部位不同所引起的测量误差。当合作目标与 GPS 天线相位中心安装与飞机水平纵轴平行时，简单修正公式为：

$$\begin{aligned} \Delta X &= \Delta L \times V_x / \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \\ \Delta Y &= \Delta L \times V_y / \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \\ \Delta Z &= \Delta L \times V_z / \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \end{aligned} \quad (8)$$

其中： V_x, V_y, V_z 为目标在测量系的 X, Y, Z 向的速度值； ΔL 为跟踪部位在飞机飞行方向上落后于飞机 GPS 安装位置的轴向距离，单位为米，超前为负；把计算出的 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 加到 X, Y, Z 。

几次任务中夜航数据最好，由于夜航悬挂的灯光标，点目标判读点易选取，因此误差较小。

(2) 公式计算

跟踪部位的详细修正公式及描述如下：

通过静态测量，可得到合作目标在机体坐标系为 (X_0, Y_0, Z_0) 。设 t 为任意时刻，GPS 天线在 WGS-84 坐标系下的坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) ，飞机姿态测量数据 (C, P, R) ，其中 C 为偏航角， P 为俯仰角， R 为滚动角，单位为度，跟踪部位不一致修正即计算出合作目标在 WGS-84 坐标系下的坐标为 (X_2, Y_2, Z_2) 。部位不一致修正可理解为将机体坐标系下的数据转换为 GPS 天线相位中心所在点的法线

测量系处的坐标数据，再将法线测量坐标数据转换为地心系下的坐标数据的过程。其转换关系如下：

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$R=[R_x(-P)R_y(C)R_z(-R)]=$$

$$\begin{pmatrix} \cos P & -\sin P & 0 \\ \sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C & 0 & \sin C \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin C & 0 & \cos C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & -\sin R \\ 0 & \sin R & \cos R \end{pmatrix} \quad (10)$$

根据上述公式^[6]修正后，试验数据精度有所提高，计算过程这里不作详细阐述。

3.1.2 脱靶量计算

根据试验方案的方法，脱靶量计算方法如下：

(1) 脱靶量换算

$$\Delta A = \frac{X}{f \cos E} + \frac{XY \sin E}{f^2 \cos^2 E} \quad (11)$$

$$\Delta E = \frac{Y}{f} - \frac{X^2}{2f^2} \tan E$$

式中： ΔA 、 ΔE 为方位、俯仰的脱靶量角度值； E 为被测目标的俯仰角； f 为电视物镜的焦距（mm）； X 、 Y 为目标像点相对主镜光十字丝中心的偏移量（mm）。

(2) 信息解算及脱靶量修正

$$A' = K_R \times A + \Delta A \times g / 3 \ 600 / \cos E + \Delta A \times \Delta E \times \tan E \times g^2 / \cos E / 3 \ 600^2 - A_0 \quad (12)$$

$$E' = K_R \times E + \Delta E \times g / 3 \ 600 - \Delta A \times \tan E \times g^2 / 2 \ 600^2 - E_0 \quad (13)$$

K_R 为测距距离值 R 的量化单位1m； g 为脱靶量的量化单位，由镜头焦距 f 决定（ $f=1$ m, $g=1.5$ s； $f=3$ m, $g=0.5$ s）；设备的出所检测焦距为1.872 m，脱靶量量纲为1.322"，而任务数据采用的量纲为1.3"，这里需说明的是，公式中的 ΔA 、 ΔE 为电视方位和俯仰脱靶量像元数。根据上面的计算方法，求出两个量纲的方位和俯仰综合角度值，然后计算差值，结果如图2和图3所示。

从图2、图3可以看出，由于量纲值参数的微小变化，给方位带来的最大误差有28"，给俯仰带来的

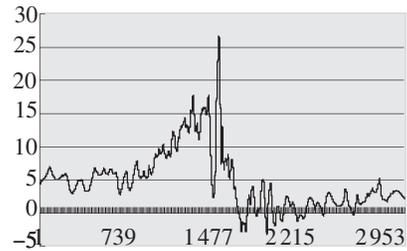


图2 所得方位的差值（角秒）

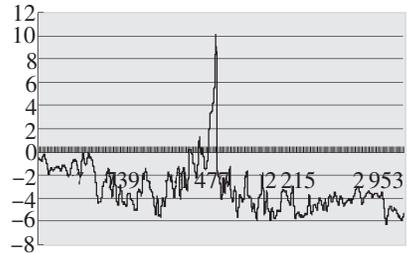


图3 所得俯仰差值（角秒）

最大误差有10"。可得出结论，脱靶量的换算过程中对关键参数误差的控制可直接影响设备测量精度。

3.2 判读误差

图像数据事后判读误差的主要来源是人工瞄准误差，即由选定的目标中心点与目标真实的中心点不一致产生的误差^[1]。

根据计算，光学设备使用1.872 m焦距时，数字图像的1个像元代表1.322"，这里判读时参考点的选择误差是存在的。主要原因是白天由于飞机目标大，并且目标在图像上的位置是不断变化的，还有出视场的情况，在目标参考点的选择上产生的误差尤为突出。从4次精度校飞的数据处理结果即可很明显地看出，夜航数据最好，主要原因就是夜航飞机的灯光是点目标，中心点选择存在的误差相对较小。但夜航的灯光能量较弱，易受距离和环境影响。因此，对于白天的试验，一是采用对比度强、尺寸大的合作目标；二是对事后图像采用图像拉伸的处理办法，提高事后图像对比度；最后采用人工单帧手动判读和数据平滑的处理办法。上述的处理办法虽然工作量较大，但数据处理效果非常明显，可有效降低判读误差。

4 结 论

综上所述,在光电经纬仪静态精度检测合格的情况下,靶场精度检测中影响光电经纬仪精度的主要有计算误差与判读误差,实战任务数据最大超差

43" (检测精度为 18")。文中通过对主要误差的分析,建立了误差模型,有针对性地提出了误差修正方法,最终得到了较满意地检测数据 (70%有效数据段误差 $<18''$),不仅真实地反映了设备状况,而且缩短了靶场检测周期。

参考文献

- [1] 何照才, 胡保安. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.10
- [2] 赵学颜, 李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京: 装备指挥学院, 2001.
- [3] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中科院长春光机所, 2001.
- [4] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 徐士良. 计算机常用算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [6] 戴天时. 矩阵论[M]. 吉林: 吉林技术出版社, 2000.
- [7] 张元林. 积分变换[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.

作者简介: 米阳(1976-), 男, 回族, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 2005年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事伺服控制方面的研究和光电经纬仪电总体设计。E-mail: miyang@vip.sohu.com

中国与白俄罗斯合作开发医疗激光器项目

据吉林省科技厅消息, 位于吉林省长春市高新区的中国-白俄罗斯科技园10月10日举行揭牌仪式, 预计今年年底前投入使用。

中国-白俄罗斯科技园坐落于长春市西南部的高新区, 占地面积10万平方米, 目前园区内有高精度直线电机和医疗激光器两个大型合作项目, 总投资3.5亿人民币。今年5月份该项目开工建设, 主体建设目前已经基本完成, 计划年底前竣工并投入使用。此外, 长春高新区管委会正在规划占地60万平方米的中白科技园二期工程建设, 初步建设方案已经完成。

2009年11月, 白俄罗斯国家科学技术委员会致信吉林省人民政府, 提议共建中国-白俄罗斯科技园(吉林园)。今年6月8日, 吉林省政府与白俄罗斯国家科学技术委员会签署了《中国吉林省人民政府与白俄罗斯国家科学技术委员会关于创建“中国-白俄罗斯科技园(吉林园)”的备忘录》。

早在2005年6月份, 中国科技部、白俄罗斯国家科学技术委员会、吉林省政府等部门就开始在吉林省举办“白俄罗斯科技日在中国”活动, 意在加强双方的科技合作和交流。在白俄罗斯国立大学, 白俄罗斯-中国科技园也早已建立并运行。

吉林省副省长马俊清表示, 中白科技园的创建, 不仅能够为吉林省发展带来新的机遇, 也将进一步提升中国和白俄罗斯国家间科技合作的层次, 有力地推动两国先进技术的交流和科技成果产业化。