

大视场红外光电经纬仪精度标定

刘岩俊¹, 闫海霞², 王东鹤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. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 为了提高大视场红外光电经纬仪测角精度, 提出了一种多元回归分析的静态精度标定方法。对影响其精度的原因进行分析, 并提出相应的解决办法。首先介绍了红外光电经纬仪的系统组成和测量原理, 分析了物像空间在大地坐标系下的坐标对应关系, 然后, 指出了影响大视场红外光电经纬仪测量精度的原因是由于加工与装调过程中引起的误差, 并且该误差与光学设计值不完全一致。最后, 针对这一问题, 提出了使用多元回归分析数据处理方法, 该方法在全视场内按区域建立多元回归分析计算模型, 当进行精度解算时, 通过多元回归分析模型对脱靶量进行修正, 使用修正后的脱靶量进行测角精度计算。实验结果表明: 经过多元回归分析修正后的方位角与高低角测角误差标准差分别由 21.44" 与 26.81" 提高到 7.62" 与 6.38"。有效地提高了大视场红外光电经纬仪的测角精度。

关键词: 光电经纬仪; 多元回归分析; 测角精度; 红外相机

中图分类号: TH761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0832-05

Calibration for wide field of view infrared theodolite

Liu Yanjun¹, Yan Haixia², Wang Donghe¹

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

2. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to improve the precision of wide field of view infrared optoelectronic theodolite, a calibration method based on multiple regression analysis was established, the reasons which effected the precision of wide field of view infrared optoelectronic theodolite were analyzed and the solution was proposed. First, the measurement theory and shipment of wide field of view infrared optoelectronic theodolite were introduced, the relationship between the object and the image in geodetic coordinates was analyzed. Then, the reason which effected the measurement of wide field of view infrared optoelectronic theodolite was the error between optical design, produce and machining, and the effect must be resolved after installation and adjustment. Lastly, a method based on multiple regression analysis was proposed, the calibration mode was established in all field of view by multiple regression analysis, after that, when measurement, the measurement data will be revised by the calibration multiple regression analysis mode. Experimental results indicate that the precision of the system in horizontal and vertical are improved from 21.44" and 26.81" to 7.62" and 6.38". This method improves the measurement precision effectively.

Key words: optoelectronic theodolite; multiple regression analysis; measurement precision; infrared camera

收稿日期: 2014-07-20; 修订日期: 2014-08-27

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2009AA8080603)

作者简介: 刘岩俊(1978-), 男, 副研究员, 主要研究方向为高精度光电测量设备、数字图像处理。Email: liuyanjun@ciomp.ac.cn

通讯作者: 闫海霞(1977-), 女, 讲师, 主要研究方向为信号处理。Email: yanhx@jlu.edu.cn

0 引言

光电经纬仪是靶场光电测量的重要设备,主要用于国内靶场的导弹、卫星等航天器发射、测控任务^[1],以及运载段的观测与控姿,同时可用于常规靶场的武器精度鉴定及性能检测工作^[2]。

光电经纬仪测量精度一直是其研究重点,其中中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的韩光宇等人对经纬仪定向误差变化的原因及解决方法进行研究^[3],提出了调平机构与抗扭薄膜组合的结构,解决了定向差的变化问题。中国科学院西安光学精密机械研究所的田留德等人对三轴误差对光电经纬仪测角的影响进行研究,通过仿真结果认为照准差和水平轴倾斜影响方位角测量误差,而垂直轴倾斜影响的是方位角的正切函数^[4]。苏成志等人对平面几何测量中的图像畸变进行校正^[5]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王会峰等人对移动特征靶标的摄像机径向畸变标定进行研究,提出的基于物面移动同心圆特征靶标的径向畸变标定方法,处理精度可以达到 0.6 个像素^[6]。刘岩俊等人对高精度 CCD 拼接相机标定方法进行研究,对同一光学系统中的多个图像传感器结构进行模型标定^[7]。李增等人对动基座条件下的补偿方法进行研究^[8]。但对于大视场红外光电经纬仪的研究在国内还未见报道。

文中结合所内测量项目,对大视场红外光电经纬仪的精度标定方法进行研究,从红外相机成像特点及光电经纬仪测量型建立方面入手,提出了使用多元回归分析法的标定相机模型的数据处理方法,该方法有效地提高了大视场红外电光经纬仪的测量精度。

1 光电经纬仪组成及测量原理

1.1 光电经纬仪组成

光电经纬仪基本结构主要由调平机构、垂直轴力矩电机、照准架、高低编码器、可见变焦距系统、中波红外系统、四通、瞄准镜、水平轴力矩电机、方位编码器等组成。如图 1 所示。

从测量角度来看,以上各分系统可以抽象为水平轴、垂直轴、照准轴及其他相关部件。其中水平轴与垂直轴是光电经纬仪机械转动的轴线,而照准轴

是经纬仪光学系统物镜像方节点与十字丝中心的连线,照准轴应该经过水平轴与垂直轴的交点,并且保持正交关系。

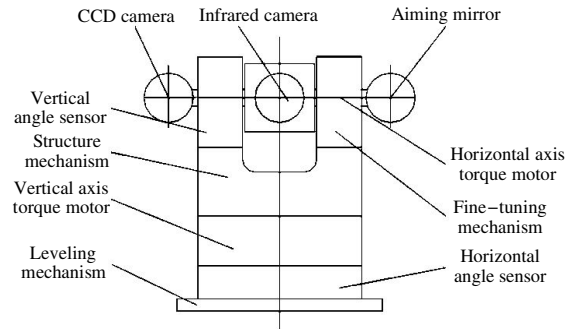


图 1 经纬仪的组成

Fig.1 Component of optoelectronic theodolite

1.2 光电经纬仪测量原理

光电经纬仪工作过程如下,首先将设备放置于测量基座上,使用电子水平仪或者其他调平方式将设备调平,这样俯仰角就为交会处理时的高低基准;然后经过拍方位标或者对瞄方式,调整方位角与大地正北方向一致时,将方位角清零,这是交会处理的方位基准。方位与高低都经过校准后,即可进行测量工作。测量过程中使用红外相机获取被测物体的图像,然后经过图像处理,获得被测物体在二维图像中的特征信息,再结合经纬仪编码器提供的方位与俯仰角度信息,经过交会处理,即可获得目标在三维大地坐标系下的信息。

光电经纬仪测量原理是中心投影原理,即三维物空间经过相机成像于二维空间,像空间的一个点对应物空间的一条线,图 2 是中心投影原理下的物

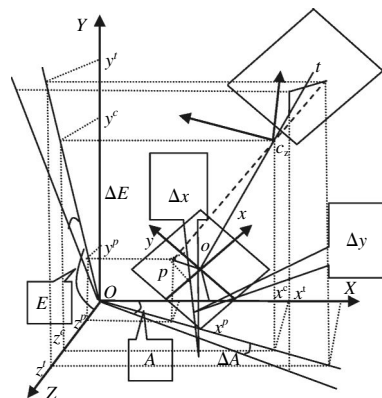


图 2 光电经纬仪测量原理

Fig.2 Measurement principle of theodolite

像关系,其中 $O-XYZ$ 是大地坐标系, xoy 是相机的像面坐标系, c 为相机主点, t 为物点, 经过经纬仪旋转中心后, 在像面上成像点为 p 点。经纬仪的编码器提供了像面与“正北方向”的水平角度 A 、及像面与“水平面”之间的角度 E , 分别为水平角与高低角, 像点坐标分别为 x, y , 脱靶量分别为 $\Delta x, \Delta y$ 。 ΔA 是像点与物点连线和相机视轴在水平方向投影的夹角, ΔE 是像点与物点连线和相机视轴在垂直方向投影的夹角。公式(1)、(2)是经过投影后的以上各元素之间的关系。通过公式(1)、(2)可以计算出目标点的对应的角度 A', E' 。 f 是光电经纬仪焦距^[1]。

$$\Delta x = \tan(\Delta A) \cdot (f \times \cos E + \Delta y \times \sin E) \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{f \times (\tan \Delta E \times \cos E - \sin E \times \cos \Delta A)}{\tan \Delta E \times \sin E + \cos \Delta E \times \cos E} \quad (2)$$

由于光电经纬仪的水平轴、垂直轴、照准轴不能够完全正交, 因此设备本身存在照准差 C 、零位差 L 、以及不垂直度 D 。在公式(1)、(2)的基础上增加公式(3)、(4), 对以上三个单项差进行修正, 修正后的角度值为目标点在大地坐标系下对应的绝对角度。

$$A^T = A' + \frac{Err_C}{\cos E^T} + Err_D \times \tan E^T \quad (3)$$

$$E^T = E' - Err_L \quad (4)$$

式中: A^T, E^T 分别为修正后的方位角、俯仰角的测量值; A', E' 分别为编码器的方位角、俯仰角; Err_C, Err_D, Err_L 分别照准差、零位差、不垂直度, 单位为角度值^[1]。

2 光电经纬仪静态精度标定方法

2.1 静态精度标定方法

光电经纬仪静态精度检测是在室内的装校标车间完成的, 标定系统包括稳定平台、红外光电经纬仪、大口径平行光管、检测架、0.5"莱卡经纬仪等系统。将光电平台调整后, 使用 0.5"莱卡经纬仪对方位角 0° 、高低角 0° 的 1# 光管、方位角 90° 、高低角 0° 的 5# 光管, 及方位角 90° 、高低角 65° 的 6# 光管进行标定。以上标定值作为计算真值。

使用红外经纬仪对全视场 20 个点进行静态测量, 公式(1)、(2)计算各点的合成角度。最后将合成角度与标定值进行比较, 计算静态测角精度标准差:

$$\sigma_{\Delta A} = 21.44'', \sigma_{\Delta E} = 26.81''$$

从计算结果看, 静态测角精度标准差均大于

10", 不能满足设计指标。

2.2 光学畸变修正方法

分析造成该结果的原因, 由于大视场光学设计过程中存在球差、场曲、位置色差、彗差、像散及畸变等影响因素, 与其他的光学设计参数相比, 光学畸变对像高的影响比较大。

图 3 是理论像高与光学畸变的关系, 从图 3 中可以看到, 当最大的理论像高达到 3.4 mm 时, 光学畸变可以达到 0.91 mm。因此, 畸变对测角误差影响比较大。光学畸变的修正方法, 首先通过图像的理论像高与光学畸变量之间关系, 计算出目标点的理论像高 d' , 依据获得的脱靶量计算目标点与水平方向的角度 α , 最后, 根据理论像高, 使用公式(5)、(6)计算出理论脱靶量 $\Delta x', \Delta y'$ 。然后将 $\Delta x', \Delta y'$ 使用公式(1)、(2)计算角度, 并计算各数据之间的均方差。

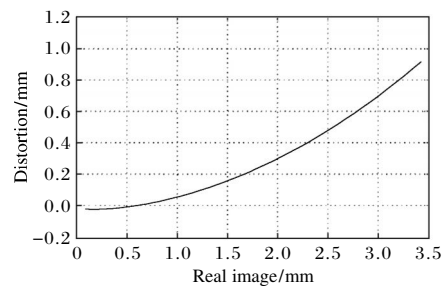


图 3 实际像高与畸变量的关系

Fig.3 Relationship between real height and distortion

$$\Delta x' = d' \times \sin \alpha \quad (5)$$

$$\Delta y' = d' \times \cos \alpha \quad (6)$$

分析经过公式(5)、(6)修正后的脱靶量, 计算静态测角精度标准差:

$$\sigma_{\Delta A} = 12.73'', \sigma_{\Delta E} = 14.38''$$

从计算结果看, 静态测角精度标准差均大于 10", 不能满足设计指标。分析问题产生的原因, 光学镜头由以下部分组成: 前组组件、外镜筒、前组镜筒、内镜筒、变倍组件、第一相面、调焦组件、后组镜筒、红外热像仪。图 3 所提供的实际像高与理想像高之间的关系是在理想状态下的设计值, 但由于加工工艺、装调水平等影响, 设计的理论值不能够完全符合实际结果, 而且从装调结果看, 镜头与理想装调位置之间存在误差。

因此, 使用光学畸变的修正方法不能满足精度要求, 该文提出了基于像面拟合的精度修正方法。

3 动态精度测量实验

分析以上所述的原因,笔者认为由于加工、装调的原因,使用光学设计的结果对测量进行修正是不合理的,因为,经过装调后的镜头内镜片的安装位置、安装角度会和设计值存在一定的误差,所以需要提供一种基于装调后的镜头与像机位置标定方法。基于以上原因,提出了基于多元回归分析的相机模型标定方法,使用该方法修正脱靶量,使用修正后的脱靶量进行测角计算。

当使用主点对目标点进行角度测量时,其脱靶量误差为 0,当使用任意点的脱靶量测量 Δx 、 Δy 时,由于存在脱靶量误差 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$,导致了测角误差,脱靶量的误差包括第 2 节所述的焦距误差、光学畸变引起的像高误差等方面。通过测量点的编码器角度值及目标点的真值,可以得到目标点的理论脱靶量 Δx^T 、 Δy^T ,通过建立理论脱靶量与实际脱靶量 Δx 、 Δy 之间的曲面拟合函数,可以从标定角度解决光学设计及加工装调带来的测角误差。

红外相机图像的分辨率为 320×256 ,焦距为 220 mm 与 60 mm 两档,当焦距为 220 mm 时,视场角为 $1.24^\circ \times 0.99^\circ$,每个像元对应的的角度为 $14.1''$;当焦距为 60 mm 时,视场角为 $4.57^\circ \times 3.66^\circ$,每个像元对应的的角度为 $51.52''$;由于长焦、短焦计算方式一致,以长焦为例进行计算。关于分区的数量问题通过实验进行过测试,当不使用分区时,由于 320×256 的区域均使用同一回归分析系数,因此修正精度不能达到要求;当使用 5×4 分区时,其处理精度没有明显提高,但增加了计算量。通过以上实验测试,将最后的分区数量定义为 4×3 。即满足精度要求,并且处理速度可以接受。

在凝视状态下,对全视场内均匀分布的目标点进行图像采集,获得目标点对应的编码器角度值 A_i 、 E_i ,及对应的脱靶量 Δx_i 、 Δy_i 。对两个脱靶量分别建立多元回归分析曲面拟合函数。

$$\Delta x^T = a_0 \Delta x^2 + a_1 \Delta y^2 + a_2 \Delta x \Delta y + a_3 \Delta x + a_4 \Delta y + a_6 \quad (7)$$

$$\Delta y^T = a_0 \Delta x^2 + a_1 \Delta y^2 + a_2 \Delta x \Delta y + a_3 \Delta x + a_4 \Delta y + a_6 \quad (8)$$

下面需要分别计算(7)、(8)的多元回归函数,以公式(7)为例,介绍其计算过程,由于多元回归时,

考虑到算法的计算复杂度与拟合效果,这里采用二次形式,将公式(7)表示为多元线性回归的数学模型式

$$Y = XB + \varepsilon \quad (9)$$

其中

$$Y = [\Delta x_1^T, \Delta x_2^T, \dots, \Delta x_n^T]^T$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & y_2^2 & x_2 y_2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & x_n y_n & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]^T, \varepsilon = [\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5]^T$$

构造公式(7)的多元线性回归方程:

$$y_i = \mu + \beta_1 (\Delta x_i^2 - \Delta \bar{x}_i^2) + \beta_2 (\Delta y_i^2 - \Delta \bar{y}_i^2) + \dots + \beta_M (\Delta y_i^2 - \Delta \bar{y}_i^2) + \varepsilon_i \quad (10)$$

应该使全部观测值 y_i 与回归值 \hat{y}_i 的参差平方和最小,即公式(11)的值最小,

$$Q = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

求解公式(11),首先需要构造方程组(9)的正规方程组, $A = X^T X$,

$$A = \begin{bmatrix} N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & l_{M1} & l_{M2} & \dots & l_{MM} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} N & 0 \\ 0 & L \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$B = \left[\sum_{i=1}^N y_i \quad l_{1y} \quad l_{My} \right]^T \quad (13)$$

其中

$$l_{ij} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) = \sum_{i=1}^N x_i x_j - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N x_j \right)$$

$$l_{jy} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i) y_i = \sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)$$

矩阵 A 的逆矩阵 C 具有如下形式:

$$C = \begin{bmatrix} 1/N & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

这样即可求得回归系数 b ,

$$b = CB \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1/N & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \left[\sum_{i=1}^N y_i \quad l_{1y} \quad \dots \quad l_{My} \right]^T \quad (16)$$

以上步骤求出了公式(7)的多元回归分析模型,

使用同样的步骤求出公式(8)的多元回归分析模型。在进行角度测量过程中,对该区域内目标点使用多元回归分析模型计算修正后的脱靶量。

4 实验数据分析

下面以区域 1 为例计算多元回归分析过程。区域 1 内的测量点经过修正后的数据见表 1,分别为目标点像面坐标、编码器角度及修正后的像面坐标。

$$\Delta x^T = -0.00627\Delta x^2 - 0.00006\Delta y^2 + 0.00022\Delta x\Delta y + 1.40771\Delta x - 0.02133\Delta y + 318.806 \quad (17)$$

$$\Delta y^T = 0.00928\Delta x^2 - 0.00018\Delta y^2 - 0.00041\Delta x\Delta y - 0.68476\Delta x - 0.89402\Delta y - 250.01 \quad (18)$$

在全视场计算过程中,将整幅图像分区后,分别计算各区域内的多元回归系数。然后在计算测角精度时,首先根据脱靶量分析目标点所在区域,然后使用该回归分析系数,修正脱靶量,再使用修正后的脱靶量目标点对应的角度。经过公式(17)、(18)修正后,静态测角精度标准差为:

$$\sigma_{\Delta A} = 7.62'', \sigma_{\Delta E} = 6.38''$$

以上测角精度满足为 10'' 的技术指标要求。

表 1 多元回归分析计算结果

Tab.1 Results of multiple regression analysis method

	x/pixel	y/pixel	$A/(\circ)$	$E/(\circ)$	x^T/pixel	y^T/pixel
1	20.82	20.37	12.62	-0.92	37.63	33.64
2	21.12	20.29	12.62	-0.92	37.67	33.67
3	56.25	21.15	12.51	-0.92	70.29	33.7
4	57.57	54.89	12.5	-0.81	70.47	64.44
5	56.35	54.25	12.5	-0.81	70.25	64.31
6	56.65	54.26	12.5	-0.80	70.38	64.40
7	22.02	53.53	12.62	-0.80	37.72	64.35
8	21.54	53.92	12.62	-0.80	37.68	64.61
9	21.52	53.31	12.62	-0.80	37.74	64.29
10	22.42	86.3	12.62	-0.68	37.67	94.89
11	22.56	86.29	12.62	-0.68	37.65	94.91
12	21.97	86.29	12.62	-0.68	37.73	94.87
13	57.56	86.89	12.50	-0.68	70.31	94.91
14	57.93	87.37	12.5	-0.68	70.41	94.97
15	57.52	87.03	12.50	-0.68	70.29	94.94

5 结论

文中对大视场红外光电经纬仪的静态精度检测方法进行了分析,提出了使用光学畸变修正脱靶量的误差修正方法,经过光学畸变修正后的方位角与高低角测角误差标准差分别由 21.44'' 与 26.81'' 提高到 12.73'' 与 14.38'', 分析了光学加工与安装会影响其修正效果。针对以上不足,提出了使用多元回归分析数据处理方法,该方法在全视场内建立计算模型,当进行精度解算时,通过该模型进行精度修正。给出了基于多元回归分析的计算过程,并在项目中实施该过程。实验结果表明:经过多元回归分析修正后的方位角与高低角测角误差标准差分别由 21.44'' 与 26.81'' 提高到 7.62'' 与 6.38''。该方法有效地提高了红外光电经纬仪的测角精度。

参考文献:

- [1] Zhao Xueyan, Li Yingchun. Optical Measure at Shooting Range [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [2] Sun Zelin, Wang Zhao, Zhai Huanchun. Analysis and control of error on two theodolite intersection measurement for gun rotated accuracy of artillery[J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(10): 2434-2441. (in Chinese)
- [3] Han Guangyu, Cao Lihua, Han Guangzhao. Cause of varying of theodolite orientation error and its solution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 699-702. (in Chinese)
- [4] Tian Liude, Liu Chaohui, Zhao Jianke. Impact of three-axis error on angle measurement of photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (S1): 192-197. (in Chinese)
- [5] Su Chengzhi, Wang Enguo, Hao Jiangtao, et al. Distortion correction for images in planar metrology [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(1): 161-167. (in Chinese)
- [6] Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 41(5): 1335-1338. (in Chinese)
- [7] Li Yimin, Liu Yanjun, He Xin, et al. Research of calibration method for high2precision CCD butting cameras [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29 (10): 799-802. (in Chinese)
- [8] Wang Yifan. Alignment and detecting of photoelectric theodolite system through utilizing interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1275-1279. (in Chinese)