

文章编号 1004-924X(2009)12-2939-07

应用坐标变换动态修正光电经纬仪脱靶量

王芳¹, 贾涛², 张春林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. 中国人民解放军 63861 部队, 吉林 白城 137001)

摘要:分析了目前采用的脱靶量修正模型的适用条件,采用坐标变换法推导出经纬仪脱靶量修正公式,获得了与球面三角学相一致的推导结果,并在此基础上推导出成像系统无照准轴平行约束条件的通用脱靶量合成公式。采用光学系统的物方焦点作为摄像机系统的投影中心,推导出投影中心与经纬仪回转中心不重合条件下摄像机投影中心在测量坐标系中的坐标值。经测量设备的实际验证表明,该修正方法突破了现有修正模型的局限性,适用于多传感器经纬仪成像系统。对于水平不平行度为 6.13° ,物方焦点到固联中心的距离为 0.247 m 的成像系统,脱靶量合成修正误差 $<16.0''$ (高低角为 65°);投影中心位置误差 <0.04 m。

关键词:光电经纬仪;脱靶量;修正模型;坐标变换

中图分类号:V557.5 **文献标识码:**A

Dynamic correction of target deviations for photoelectric theodolites by coordinate transform

WANG Fang¹, JIA Tao², ZHANG Chun-lin¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Unit 63863 of the PLA, Baicheng 137001, China*)

Abstract: A correction formula for target deviations is derived by using the coordinate transform and its suitable conditions are proposed. Experiments show that it is coincident with the spherical trigonometry well. A new correction model for the target deviation is deduced when the optical axis is not parallel to the collimating axis, and the coordinates of the camera projection center in measuring coordinate systems are calculated in conditions of the mismatching between the optical center and the theodolite rotation center by using the object focus optical system as the projective center of camera system. A practical test proves that the approach breaks through the limitation of existing model, and is suitable for multi-sensor imaging systems of theodolites. When the level parallelism is 6.13° and the distance is 0.247 m between the object focus and the solid joint center, the target deviation of the imaging system is less than $16.0''$ (elevation is 65°), and the projection center position error is less than 0.04 m.

Key words: photoelectric theodolite; target deviation; correction model; coordinate transform

收稿日期:2009-09-24;修订日期:2009-10-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA7034320B)

1 引言

光电经纬仪广泛用于火箭、导弹和航空炸弹等飞行目标的外弹道轨迹参数测量,并兼顾目标姿态和遭遇段脱靶量参数测量以及实况记录^[1],是靶场主要光测设备之一。

光电经纬仪是由电影经纬仪发展而来的,典型的经纬仪跟踪架是由相互垂直的垂直轴和水平轴组成的两轴地基式结构^[2],主摄像(影)光学系统的望远镜筒安装在水平轴的轴体中部,其光轴为跟踪架的照准轴(视准轴),且与水平轴垂直。伺服系统控制经纬仪在方位和俯仰两个方向转动,使照准轴指向空中目标。理想情况下目标的定位点(例如导弹的质心或头部、尾部等)位于摄像机的光轴上,轴角编码器给出的方位角、高低角就是目标相对于经纬仪的方位角和高低角。但是由于跟踪偏差影响,一般目标的定位点相对光轴存在一个小的角度偏离,在摄像机的像平面上表现为目标投影相对于像平面中心点(视准轴投影点)的偏移量,称为脱靶量。

在经纬仪数据处理时,需要对跟踪误差进行修正以获得目标相对经纬仪的方位角和高低角,即脱靶量合成。目前光电经纬仪采用的脱靶量合成公式仍是沿用电影经纬仪的跟踪误差修正模型^[3]。该跟踪误差修正模型有两个适用前提:(1)成像系统满足中心投影(透视变换投影);(2)成像系统的光轴与照准轴重合或平行。

现代光电经纬仪为了提高目标探测能力,一般加装红外、可见光、激光、雷达、GPS 等多种探测器,多个探测器可以自由组合、搭配,构造“积木”式测量系统。位于水平轴的轴体中央只能放置一个主摄像(影)光学成像系统,而其它探测系统需要放置在水平轴的轴头或固联在水平轴体上。由于机械加工、装配工艺水平所限以及使用中的变形影响,这些探测器的光轴难以完全平行于照准轴,存在不平行度误差;另外,为了保证大的测量视场和高分辨率,有些光电经纬仪采用多传感器外拼接模式,每个摄像机的光轴要求与照准轴保持一定角度。因此,对于具有多个独立光学成像系统的光电经纬仪来说,由于装配等误差或设计需要造成了非主摄像系统的光轴与照准轴不平行,使电影经纬仪的跟踪误差修正模型不再

适用,需要建立无照准轴平行约束条件的通用脱靶量合成模型。

另一方面,获取光学系统投影中心坐标是经纬仪数据处理的前提。现有的主摄像系统投影中心坐标求取方法是对大地测量获得经纬仪的点坐标进行仪器中心高修正,得到经纬仪的回转中心坐标作为投影中心坐标,在经纬仪转动过程中保持不变。该方法是假定成像系统的投影中心与经纬仪回转中心重合,在经纬仪转动过程中投影中心的位置保持不动,成像系统只作纯旋转运动。显然,只有安装在水平轴体中部的摄像机系统可能满足此条件,而其他位置的摄像机系统由于投影中心与经纬仪回转中心并不重合,其间距可达米级。即使对于主摄像机系统,严格意义上其投影中心与经纬仪回转中心亦往往不重合(后文将加以详述)。所以,在经纬仪转动过程中,成像系统的运动就包括旋转和平移,投影中心的位置是动态变化的。这种成像系统平移运动的影响在高精度测量中是不可忽略的。

本文针对多探测器光学系统,建立了一种通用的光电经纬仪脱靶量和坐标动态修正模型。

2 非主摄像系统脱靶量合成公式推导

与主摄像系统不同,其它摄像系统还需要对不平行度进行修正。现有的修正方法首先采用式(1)修正不平行度:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_0 + \alpha_d / \cos \lambda_0 \\ \lambda_1 &= \lambda_0 + \lambda_d \end{aligned} \quad (1)$$

式中: α_0 、 λ_0 为照准轴的方位角和高低角; α_d 、 λ_d 为光轴的水平 and 垂直不平行度; α_1 、 λ_1 为光轴的方位角和高低角。

然后,采用脱靶量合成公式(2)得到目标相对该摄像系统投影中心的方位角和高低角:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \arctan\left(\frac{x}{f \cos \lambda_1 - y \sin \lambda_1}\right) \\ \alpha &= \alpha_1 + \Delta\alpha \\ \lambda &= \arctan\left(\frac{(f \sin \lambda_1 + y \cos \lambda_1) \cos \Delta\alpha}{f \cos \lambda_1 - y \sin \lambda_1}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为方位角跟踪误差; α 、 λ 为目标相对于投影中心的方位角和高低角; f 是成像系统焦距; x 、 y 是目标归一化脱靶量。

该修正方法实际上只对较小的不平行度误差

有效,对于大的不平行度将引入较大模型误差,而在高的俯仰角情况下,其结果甚至是荒谬的。

主摄像系统脱靶量合成公式(2)是由球面三角学推导得出的^[4]。本文首先采用坐标变换来推导公式(2),并在此基础上,推导出通用的脱靶量合成修正模型。

首先引入所涉及的 3 个坐标系:测量坐标系、摄像机坐标系和主摄像机坐标系。

测量坐标系定义:测量坐标系($O_V X_V Y_V Z_V$)是以光电经纬仪的回转中心为原点,以大地北为 X 轴正向; Y 轴垂直于水平面,向上为正; Z 轴与 X 轴、 Y 轴构成右手坐标系。

摄像机坐标系($O_C X_C Y_C Z_C$)定义:为了描述方便,本文采用的摄像机坐标系定义与传统的定义略有不同。具体定义为:以摄像机的投影中心为坐标系原点; X 轴(原定义 Z 轴)与摄像机的光轴重合,且摄像方向为正向; Y 轴、 Z 轴与图像坐标系 Y 轴、 X 轴一致。

主摄像机坐标系($O_{MC} X_{MC} Y_{MC} Z_{MC}$)是指投影中心与经纬仪的回转中心重合; X 轴与照准轴重合; Z 轴与水平轴重合的摄像机坐标系。这里需要说明一点,在经纬仪系统中,经纬仪回转中心可能并不存在实际摄像系统,但本文为了描述简便,假定存在一个“虚拟”摄像系统,并建立相应的坐标系。

当经纬仪的方位角和高低角均为零(经纬仪主摄像机光轴位于水平面内且指向大地北),主摄像机坐标系与测量坐标系重合。图 1 是 3 种坐标系示意图,为了表述方便,将像平面移到投影中心的前方,使目标成正像。

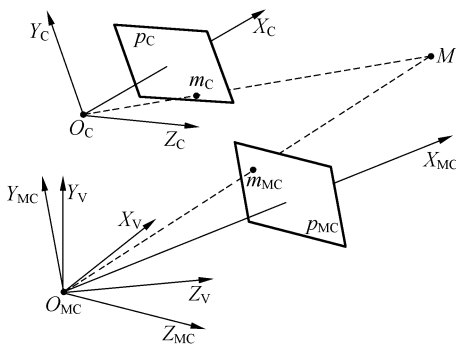


图 1 经纬仪坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate frames of theodolite

假定空间任意一点 M 位于主摄像系统的视

场内,而经纬仪的方位角 α_0 、高低角 λ_0 可由轴角编码器的角度值经误差修正获得,点 M 在像平面上投影点 m_{MC} 的归一化脱靶量为 (x, y) 。经纬仪转动的角度(方位角 α_0 和高低角 λ_0)等价于测量坐标系绕 Y 轴顺时针旋转 α_0 (经纬仪测量系统顺时针旋转为正),然后绕 Z 轴顺时针旋转 λ_0 ,与主摄像机坐标系重合。点 M 在主摄像机坐标系的坐标可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{mc} \\ y_{mc} \\ z_{mc} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z(-\lambda_0)\mathbf{R}_Y(-\alpha_0) \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: (x_{mc}, y_{mc}, z_{mc}) 为点 M 在主摄像机坐标系的坐标; (x_v, y_v, z_v) 为点 M 在测量坐标系的坐标; $\mathbf{R}_Z, \mathbf{R}_Y$ 分别为 Z 轴、 Y 轴的旋转矩阵^[5]。

因为旋转矩阵为单位正交矩阵,所以有

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_Z(-\lambda_0)\mathbf{R}_Y(-\alpha_0))^{-1} \begin{bmatrix} x_{mc} \\ y_{mc} \\ z_{mc} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(\alpha_0)\mathbf{R}_Z(\lambda_0) \begin{bmatrix} x_{mc} \\ y_{mc} \\ z_{mc} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

如图 1 所示,点 M 在像平面上投影点 m_{MC} 位于射线 OM 之上,若在摄像机坐标系中 m_{MC} 坐标为 (f, y, x) ,那么点 M 在主摄像机坐标系中坐标可表示为 $k(f, y, x)$,其中 k 为比例系数。由公式(4)可得出:

$$\begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(\alpha_0)\mathbf{R}_Z(\lambda_0) \begin{bmatrix} x_{mc} \\ y_{mc} \\ z_{mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 & 0 & \sin \alpha_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_0 & 0 & \cos \alpha_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \lambda_0 & -\sin \lambda_0 & 0 \\ \sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kf \\ ky \\ kx \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 (\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y) + \sin \alpha_0 x \\ \sin \lambda_0 f + \cos \lambda_0 y \\ -\sin \alpha_0 (\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y) + \cos \alpha_0 x \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则点 M 在测量坐标系中方位角 α 、高低角 λ 为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{x_v}{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}\right) = \arccos\left(\frac{\cos \alpha_0 (\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y) + \sin \alpha_0 x}{\sqrt{(\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y)^2 + x^2}}\right)$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{y_v}{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}\right) = \arctan\left(\frac{\sin \lambda_0 f + \cos \lambda_0 y}{\sqrt{(\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y)^2 + x^2}}\right), \quad (6)$$

令 $\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{x}{\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y}\right)$ 代入公式

(6), 则有

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{(\sin \lambda_0 f + \cos \lambda_0 y) \cos \Delta\alpha}{\cos \lambda_0 f - \sin \lambda_0 y}\right), \quad (7)$$

式(7)与式(2)相同, 表明采用坐标变换推导与球面三角学推导的结果一致。

如果摄像机系统光轴平行于照准轴(主摄像系统光轴), 跟踪误差修正模型可采用式(7)。但是考虑更一般情况, 即摄像机系统光轴与照准轴并不平行, 且设水平不平行度为 α_d ; 垂直不平行度为 λ_d , 从坐标变换角度来看, 相当于主摄像机坐标系绕 Y 轴顺时针旋转 α_d , 然后绕 Z 轴顺时针旋转 λ_d , 并且主摄像机坐标系坐标原点平移到摄像机坐标系原点。那么点 M 在摄像机坐标系的坐标可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z(-\lambda_d) \mathbf{R}_Y(-\alpha_d) \begin{bmatrix} x_{mc} - x_{co} \\ y_{mc} - y_{co} \\ z_{mc} - z_{co} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: (x_c, y_c, z_c) 为点 M 在摄像机坐标系的坐标; (x_{mc}, y_{mc}, z_{mc}) 为点 M 在主摄像机坐标系的坐标; (x_{co}, y_{co}, z_{co}) 为摄像机坐标系原点在主摄像机坐标系的坐标。

式(8)求逆可得:

$$\begin{bmatrix} x_{mc} \\ y_{mc} \\ z_{mc} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z(\alpha_d) \mathbf{R}_Y(\lambda_d) \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{co} \\ y_{co} \\ z_{co} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

根据式(7)可知, 在主摄像机坐标系中射线 $O_c M$ 的方位角 α_c 、高低角 λ_c 为

$$\Delta\alpha_c = \arctan\left(\frac{x}{\cos \lambda_d f - \sin \lambda_d y}\right)$$

$$\alpha_c = \alpha_d + \Delta\alpha_c, \quad (10)$$

$$\lambda_c = \arctan\left(\frac{(\sin \lambda_d f + \cos \lambda_d y) \cos \Delta\alpha_c}{\cos \lambda_d f - \sin \lambda_d y}\right)$$

由公式(10)可知, 点 M 在像平面上的投影点 m_c 在主摄像机坐标系中的坐标可表示为 $f(\cos \alpha_c \cos \lambda_c, \sin \lambda_c, \sin \alpha_c \cos \lambda_c)$ 。那么根据式(7)就可以得出射线 $O_c M$ 在测量坐标系中的方位角 α 、高低角 λ 为:

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\sin \alpha_c}{\cos \lambda_0 \cos \alpha_c - \sin \lambda_0 \tan \lambda_c}\right)$$

$$\alpha_c = \alpha_0 + \Delta\alpha,$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{(\sin \lambda_0 \cos \alpha_c + \cos \lambda_0 \tan \lambda_c) \cos \Delta\alpha}{\cos \lambda_0 \cos \alpha_c - \sin \lambda_0 \tan \lambda_d}\right) \quad (11)$$

式中: α_0 为照准轴的方位角; λ_0 为照准轴的高低角。

通过两次坐标变换获得的公式(10)和(11)可修正光轴与照准轴不平行的脱靶量, 当然同样适用光轴与照准轴平行的情况, 是无照准轴平行约束条件的通用脱靶量精确修正公式。

3 摄像机投影中心坐标推导

单站光电经纬仪数据处理实质是求解摄像机指向目标的射线, 射线的方向矢量可由目标的方位角和高低角确定; 另外还需要射线上的一个已知点。经纬仪光学系统采用中心投影成像模型, 摄像机指向目标的射线都经过摄像机的投影中心, 而且投影中心的坐标可通过站点的大地测量坐标经计算得出, 所以一般通过解析投影中心的坐标来确定射线。

在摄影测量、计算机视觉、大地工程测量等领域, 对投影中心的定义并不统一。成像系统的物方焦点、像方节点、光心、像平面主点等均被不同研究者定义为投影中心^[10]。在经纬仪数据处理中, 通常以成像系统的固联中心作为成像投影中心位置, 这种定义实际是不严密的。

经纬仪摄像机的镜头一般是由多组透镜、棱镜等构成的复杂光学系统, 在摄影测量学中等效于针孔成像模式^[10]。因为经纬仪光学系统位于同一介质(空气)中, 所以其物方焦距和像方焦距值相等, 且节点与主点重合。如图 2 所示, 空间点

M 经透镜组在像平面上投影 m' , 如果将物方主平面作为“虚拟像平面”, M 在此“虚拟像平面”投影为 m'' , 这样此透镜组就等效于其下面所示的针孔模型, 因此投影中心是光学系统的物方焦点 F 。至于像方节点、光心等实际是投影中心的近似, 在短焦大视场精密测量系统中其影响不可忽略。物方焦点 F 是位于光轴上的一个虚拟点, 其实际位置可以直接测量获得, 也可以通过主平面位置、焦距值推导得出, 对于焦距较长的光学系统, 其一般位于镜筒前端, 甚至在镜筒之外。而实际镜头装配时由于考虑结构安排、配重平衡等因素, 大致将光学系统质心位于固联中心, 所以物方焦点与固联中心位置往往并不重合, 在高精度测量中, 不能简单以固联中心作为物方焦点的近似。

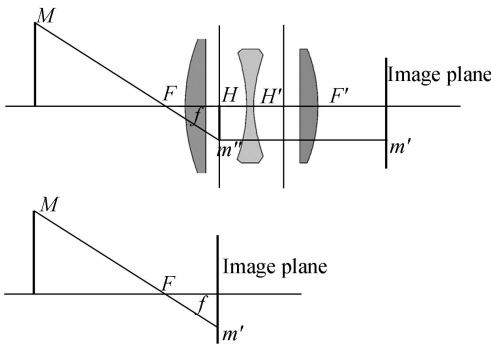


图 2 经纬仪光学系统及等效针孔成像模型

Fig. 2 Optical system and equivalent pin-hole model of theodolite

考虑经纬仪系统之间的刚性连接, 摄像机投影中心(物方焦点)在主摄像机系统中的坐标是可以在经纬仪装调时实际测出, 其对应的测量坐标系的坐标由公式(12)求出:

$$\begin{bmatrix} x_{vi} \\ y_{vi} \\ z_{vi} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Y(\alpha_0) \mathbf{R}_Z(\lambda_0) \begin{bmatrix} x_{mci} \\ y_{mci} \\ z_{mci} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: α_0 为方位编码器角度值; λ_0 为高低编码器角度值; (x_{vi}, y_{vi}, z_{vi}) 为摄像机投影中心在测量坐标系中的坐标值, $(x_{mci}, y_{mci}, z_{mci})$ 为摄像机投影中心在主摄像机坐标系中的坐标值。求得摄像机投影中心在测量坐标系中的坐标, 就可以通过进一步坐标变换获得投影中心在世界坐标系的坐标值。

4 实际结果验证

“XX 着靶实况景象测量仪”采用 4 台高速摄像系统沿水平方向进行外拼接。以其中一台测量仪为例, 该测量仪由左至右 4 台高速成像系统光轴与测量仪主光轴的不平行度(方位和高低)分别为: 1# $(-6.12^\circ, 0.03^\circ)$ 、2# $(-2.05^\circ, -0.02^\circ)$ 、3# $(2.07^\circ, 0.04^\circ)$ 和 4# $(6.13^\circ, 0.05^\circ)$ 。分别对不同高低角的靶标进行成像, 采用原有公式和新模型对脱靶量进行合成并与真值进行比较, 比较结果见表 1。

表 1 跟踪误差修正结果

Tab. 1 Correction results of tracking errors

编号	高低角标值 10°靶标				高低角标值 30°靶标				高低角标值 65°靶标			
	新合成模型		原合成模型		新合成模型		原合成模型		新合成模型		原合成模型	
	$\Delta\alpha$	$\Delta\lambda$	$\Delta\alpha$	$\Delta\lambda$	$\Delta\alpha$	$\Delta\lambda$	$\Delta\alpha$	$\Delta\lambda$	$\Delta\alpha$	$\Delta\lambda$	$\Delta\alpha$	$\Delta\lambda$
1#	22.4"	16.7"	10.6"	12.5"	40.3"	28.6"	11.4"	14.2"	134.7"	74.2"	13.3"	13.4"
2#	18.4"	11.3"	11.2"	9.6"	46.7"	31.2"	10.8"	11.8"	109.6"	95.3"	14.7"	11.9"
3#	19.5"	21.7"	9.7"	13.1"	37.3"	27.1"	9.3"	15.7"	102.3"	107.7"	11.5"	17.1"
4#	24.8"	17.1"	12.1"	10.4"	53.2"	41.3"	10.6"	12.4"	122.3"	96.6"	13.6"	15.5"

由表 1 可知, 原合成公式计算偏差较大, 并随着高低角的增大而增大; 新合成模型计算偏差较小, 与高低角的变化无关。

以该测量仪对 300 m 处靶标在视场不同位

置成像, 分别以固联中心和物方焦点作为成像系统的投影中心, 计算出了其到目标射线的误差。以 4# 光学成像系统为例, 其物方焦点到固联中心的距离为 0.247 m, 比较结果见表 2。

表 2 投影中心位置误差

Tab.2 Position errors of projection center

脱靶量(x, y)	固联中心	物方焦点
(2,3)	0.06 m	0.02 m
(301,285)	0.13 m	0.03 m
(-10,36)	0.03 m	0.02 m
(-502,-487)	0.16 m	0.04 m
(56,-79)	0.09 m	0.03 m
(-201,18)	0.11 m	0.04 m

由表 2 可知,采用固联中心作为投影中心引入的误差较大,并且其大小与成像位置有关;采用物方焦点作为投影中心引入的误差较小,且与成像位置无关。

参考文献:

- [1] 赵学颜,李迎春.靶场光学测量[M].北京:装备指挥技术学院,2001.
ZHAO X Y, LI Y CH. *Optical Measurement in Shooting Range*[M]. Beijing: Institute of Command and Technology, 2001. (in Chinese)
- [2] 高策,乔彦峰.光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 846-851.
GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 846-851. (in Chinese)
- [3] 李慧,沈湘衡.光电经纬仪轴系误差仿真计算的新方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 334-337.
LI H, SHEN X H. New shafting error simulating method of photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 334-337. (in Chinese)
- [4] 金光,王家骥,倪伟.利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 89-94.
JIN G, WANG J Q, NI W. Theodolite shafting error derived from coordinate transformation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)

5 结 论

根据实际结果验证,在“XX 着靶实况景象测量仪”中,对于水平不平行度为 6.13° ,物方焦点到固联中心的距离为 0.247 m 的成像系统,脱靶量合成修正误差 $< 16.0''$ (高低角 65°);投影中心位置误差 < 0.04 m。

本文所推导出的经纬仪跟踪误差和动态坐标修正模型,突破了已有修正模型的局限性,适用于任意位置、任意角度的成像系统,满足了多探测器光电经纬仪高精度数据处理的需要。该修正模型直接或略加改动可应用于其他光测设备。

- [5] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [6] WILLSON R G, SHAFER S A. What is the center of the image [J]. *Opt Soc Am A*, 1994, 11(11): 2946-2955.
- [7] HORAUD R, SKORDAS T, VEILLON F. Finding geometric and relational structures in an image [C]. *In Proceedings of the 1st European Conference on Computer Vision, Antibes, France, 1996*: 374-384.
- [8] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86.
- [9] MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al.. A comparison of affine region detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 65(7): 43-72.
- [10] HARTLEY R. Self-calibration from multiple views with a rotating camera [C]. *In Proc. 3rd European Conf. on Computer Vision, Stockholm, 1994*: 471-478.

作者简介:



王 芳(1966—),内蒙通辽人,研究员,1988年于长春邮电学院获学士学位,主要从事光电跟踪测量方面的研究。E-mail: flybir125@yahoo.com



张春林(1973—),男,河北唐山人,助理研究员,主要从事光电设备的研发工作。E-mail: alin412@163.com



贾 涛(1968—),男,辽宁瓦房店人,高级工程师,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: jt_681110@yahoo.com

● 下期预告

红外锁相法的热波检测技术及缺陷深度测量

刘俊岩^{1,2},戴景民²,王 扬¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

研究了红外锁相法热波检测技术原理、缺陷深度测量及在蜂窝夹层结构及焊接构件检测中的应用。首先,建立了二维热传导有限差分模型,采用该模型计算了强度按正弦规律变化热流引起的试件表面温度变化历程和采用锁相法提取有缺陷与无缺陷处的准稳态温度变化,并计算二者的相位差。然后,建立了热波在试件中传导的热—电等效模型,利用该模型对红外锁相法热波检测技术进行了仿真研究,得到了缺陷深度和反射热波与入射热波相位差之间的关系。最后,采用红外锁相法热波检测技术对模拟缺陷的蜂窝夹层结构试件和实际焊接构件进行了无损检测试验研究。实验结果表明:有限差分模型和热—电等效模型计算有缺陷与无缺陷处的相位差与试验结果基本一致,偏差 $<5\%$ 。采用红外锁相法热波检测技术能够快速、准确地获得缺陷大小和位置,对具有复杂曲面结构的构件也适用。