

文章编号 1004-924X(2015)08-2369-07

用于外场试验的交会测量

陶家园¹, 王克逸^{1*}, 罗国雄²

- (1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027;
2. 中国航空工业集团公司 航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441003)

摘要:提出结合坐标系转换和按行独立的加权总体最小二乘法(RWTLS)的交会测量方法用于外场试验。该方法利用空间坐标系转换方法获得目标点在大地坐标下的空间角度参数;通过多余观测数建立条件方程确定起算数据间的角度位置关系,用 RWTLS 和高斯-牛顿迭代方法求得运动目标点在任一时刻的空间角度坐标;最后,利用对静态目标点的观测获得基距,结合目标点的空间角度坐标求得其轨迹曲线。实验结果表明:观测站的坐标误差在 ± 0.15 m 以内,运动目标在 X、Y、Z 方向上的坐标误差在 ± 0.4 m 内。与传统的两站前方交会测量方法相比,该方法无须校正经纬仪坐标系,也不必已知观测站位置参数,从而减少了对起算数据的需求,减少了布站工作量,具有直接简便、收敛速度快、精度较高等优点,在飞行目标外场测试中有良好的实用性。

关键词:坐标系转换;按行独立的加权总体最小二乘法;交会测量;高斯-牛顿法;外场试验

中图分类号:V556.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2369

Intersection measurement for field tests

TAO Jia-yuan¹, WANG Ke-yi^{1*}, LUO Guo-xiong²

- (1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Aerospace Life-Support Industry Co., Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Xiangyang 441003, China)

* Corresponding author, E-mail: kywang@ustc.edu.cn

Abstract: An intersection measurement method by combination of coordinate system transformation with Row-wised Weighted Total Least Squares(RWTLS) was proposed for field tests. The angles of the target points on a geodetic coordinate system was obtained by using the space coordinate transformation method. Then, the angle relationship between the initial data was determined through condition equation established by redundant observation numbers, and the moving object's space coordinate of position at any moment was acquired by using the RWTLS and Gauss-Newton method. Finally, the base distance was get through the observations of the static target, and the targets' trajectory curve was obtained with the target space angle coordinates. The experimental results show that the errors of the coordinates of the observation station are within ± 0.15 m, and the target point errors in X, Y, Z

收稿日期:2015-04-15;修订日期:2015-06-14.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61275011)

directions are within ± 0.4 m. The method avoids the correction of theodolite coordinate and does not need to give the position parameters of the observation station, so it reduces calculation of starting data and the number of the observation stations and is characterized by quick convergence, high accuracy and good practicability in field tests of flying targets.

Key words: coordinate transformation; Row-wised Weighted Total Least Square(RWTLS); intersection measurement; Gauss-Newton method; field test

1 引言

动态目标跟踪测量一直是飞行目标测试研究中的热点和难点,一般选用布置在若干固定点位上的两台或两台以上光电经纬仪分别对目标进行跟踪测量,利用前方交会测量方法确定飞行目标的运动轨迹,由于每个观测站都能够得到目标点的方位角和高低角^[1-3],结合观测站位置参数即可直接计算出飞行目标关于主场地的位置坐标。光电经纬仪作为交会测量中的一种重要目标探测手段,具有低成本、易布站、高精度等优点^[4]。目前目标点方位角和高低角获取方法已属于成熟技术,测角精度高达 $10''$ 以内^[5]。

目前,国内对光电经纬仪交会测量的研究多在靶场内进行,研究重点多集中在系统误差分析^[6-8]、多目标交会^[9-10]等方面,这些研究都是基于光电经纬仪位置校正好、观测站布局及其位置参数已知的情况下进行的,而基于靶场环境的限制和实际测试的需要,进行外场飞行目标测试的需求越来越多。为克服固定式经纬仪测量作用范围有限,不能灵活机动布站,越来越难以满足具有大航程、长航时、机动性强等特点的现代武器的观测需求^[11],针对外场试验的交会测量方法已成为该领域的研究热点。20 世纪 60 年代,美国便开始研究外场试验的交会测量方法,从机载测站发展到后面的车载测控站,进行了一系列改进。我国在这方面起步较晚,近年来长春光学精密机械与物理研究所和国防科学技术大学才开始相关平台方面的研究^[12-15]。

本文提出基于坐标系转换和按行独立的加权总体最小二乘法(RWTLS)结合的用于外场试验的交会测量方法,相比于传统的两站前方交会测量方法,该方法无须校正经纬仪坐标系,通过多余

观测数建立条件方程确定起算数据间的角度位置关系,减少了起算数据的需求,从而减少了布站工作量。

2 空间前方交会测量原理

如图 1 所示, A、B 分别为两台经纬仪(观察站)的中心(水平轴和垂直轴交点),其坐标系任意, P 点为观测目标点。选定测量坐标系时,设 A 为原点, A B 连线的水平投影为 X 轴,过 A 点的铅垂方向为 Z 轴,以右手法则确定 Y 轴,构成空间直角坐标系 A-XYZ。A、B 两观测站的水平间距为基线长 X_B , 高度差为 Z_B , 两分站所测目标点 P(x, y, z) 俯仰角分别为 α_1 、 α_2 , 方位角分别为 β_1 、 β_2 。

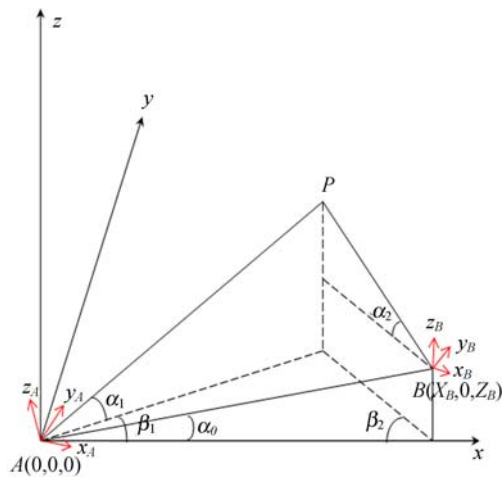


图 1 空间前方交会测量原理

Fig. 1 Principle of space forward intersection measurement

根据几何投影关系,利用两观测站的测量数据和基线距离,可解算出目标点 P 在上述 A-XYZ 坐标系的坐标 $P(x, y, z)$:

$$\begin{cases} x = \frac{X_B \sin \beta_2 \cos \beta_1}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} \\ y = x \tan \beta_1 \\ z = \frac{1}{2}(z' + z'') \\ z' = \frac{x \tan \alpha_1}{\cos \beta_1} \\ z'' = z_B + y \frac{\tan \alpha_2}{\sin \beta_2} \end{cases} \quad (1)$$

从公式(1)可以看出,要解算出目标点 $P(x, y, z)$ 的坐标,需要至少 4 个参数,包括 3 个角度参数和 1 个起算距离参数。交会点的精度主要由角度观测误差和起算数据误差两部分决定,只考虑测角误差的交会点点位精度比同时顾及起算数据误差和测角误差的交会点点位精度要高^[16]。

3 用于外场试验的交会测量方法

在实际运用交会测量算法处理飞行目标测试

时,受试验场地限制,特别是外场试验中,由于经纬仪放置位置的误差,两观测站不能互测等影响因素,导致计算出的目标位置坐标误差较大。为解决这个问题,本文提出一种无需互测的交会算法。该算法通过坐标系变换得到经纬仪测量角度在上述 A-XYZ 坐标系下的观测角度,结合多个交会点的 RWTLS 和高斯-牛顿迭代方法得到不能互测的角度参数,选取合适的静态目标点测量得到基线长度,从而达到自动消除系统误差的目的,提高交会点的位置精度。

3.1 坐标系转换

如图 2 所示, OXY 为 A-XYZ 坐标系的水平面, Ox_y 为经纬仪坐标系的水平面,通过两个互成 90° 的两个电子倾角仪,测量得到两坐标系的位置倾角分别为 γ_1, γ_2 , 两坐标系转换可通过公式(2)所示旋转矩阵变换获得。

$$(X, Y, Z, 1) = (x, y, z, 1) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & \sin \eta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \eta & 0 & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: (x, y, z) 为目标点 P 在经纬仪坐标系中的坐标值; (X, Y, Z) 为目标点 P 在大地坐标系中的坐标值,计算可知 λ, η 的值分别为 $\sin \lambda = \sin \gamma_2 / \cos \gamma_1, \eta = \gamma_1$ 。

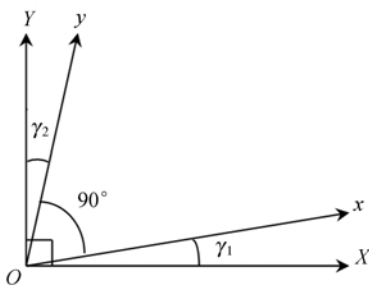


图 2 大地坐标系和经纬仪坐标系间的关系

Fig. 2 Relationship of geodetic coordinate and theodolite coordinate

3.2 两站交会的 RWTLS 方法

如图 1 所示,设 A、B 两观测站互测的方位角分别为 L_0, R_0 测得目标点 $P(x, y, z)$ 的方位角为 L_1, R_1 , AB 连线与水平投影线的俯仰角为 α_0 ,由

于两站有时不便精确对瞄(特别是外场环境中不可互视时根本不能观测),故把 L_0, R_0, α_0 作为未知参数,利用交会点的多余观测,通过 RTWLS 方法和高斯-牛顿迭代方法求得未知参数及目标点 P 的位置坐标。其中 $\beta_1 = L_1 - L_0, \beta_2 = R_0 - R_1, Z_B = X_B \tan \alpha_0$, 每一个交会点 $P_i (i=1, 2 \dots c)$ 都会产生一个多余观测量,它所产生的条件方程由公式(1)得:

$$z_i' - z_i'' = 0, \quad (3)$$

即:

$$F_i(\hat{L}_j, \hat{X}_k) = \sin(R_0 - R_i) \tan \alpha_{i1} - \sin(L_i - L_0) \tan \alpha_{i2} - \sin(L_i - L_0 + R_0 - R_i) \tan \alpha_0 = 0. \quad (4)$$

对每一个交会点 $P_i (i=1, 2 \dots c)$, 把 $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, L_i, R_i$ 作为有偶然误差的观测值, L_0, R_0, α_0 作为未知参数,令 $V = \hat{L} - L$ (\hat{L} 表示观测值估值, L 表示观测值), $\delta = \hat{X} - X$ (\hat{X} 表示参数估值, X 表示初值),由公式(4)可得改正数方程:

$$AV + B\delta + W = 0, \quad (5)$$

式中

$$\mathbf{A}_{c \times m} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{L}} \Big|_{L, X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial L_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial L_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_c}{\partial L_1} & \dots & \frac{\partial F_c}{\partial L_m} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{c \times n} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{L, X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial X_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_c}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial F_c}{\partial X_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}_{c \times 1} = \mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{X}).$$

由于观测值之间相互独立,式中系数矩阵行与行之间不相关,各行相互独立^[17,18]且涉及到坐标变换,使用 RWTLs 大大降低计算的复杂程度^[19],利用该方法可将式(5)写成:

$$\mathbf{B}\delta + \mathbf{W} \approx \mathbf{0}, \quad (6)$$

令 $\bar{\mathbf{B}} = [\mathbf{B} \ \mathbf{W}] \in \mathbf{R}^{m \times (n+1)}$, $\bar{\delta} = [\delta^T \ \mathbf{1}]^T \in \mathbf{R}^{(n+1) \times 1}$,由式(5)和(6)可知

$$\mathbf{r} = -\mathbf{A}\mathbf{v} = \bar{\mathbf{B}}\bar{\delta}, \quad (7)$$

其中 $r_i = -\mathbf{A}_i\mathbf{v} = \bar{\mathbf{B}}_i\bar{\delta}$ 表示第 i 行的残差,根据误差传播定律,得到残差协因矩阵的表达式为:

$$\mathbf{Q}[\mathbf{r}_i] = \mathbf{A}_i\mathbf{Q}\mathbf{A}_i^T = \bar{\delta}^T \mathbf{Q}[\bar{\mathbf{B}}_i]\bar{\delta}, \quad (8)$$

此时, $\mathbf{Q}[\mathbf{r}_i]$ 不再是奇异矩阵,令 $\mathbf{P}[\mathbf{r}_i] = \mathbf{Q}[\mathbf{r}_i]^{-1}$,原问题等价于以下问题^[19]

$$\begin{cases} \hat{\delta} = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^m r_i(\delta)^T \mathbf{P}[\mathbf{r}_i] r_i(\delta) \\ s. t. \mathbf{r}_i = -\mathbf{A}_i\mathbf{v} = \bar{\mathbf{B}}_i\bar{\delta} = \mathbf{B}_i\delta = \mathbf{W}_i \end{cases} \quad (9)$$

式(9)为经典间接平差问题,可得误差参数为

$$\hat{\delta} = -(\mathbf{B}^T \mathbf{P}[\mathbf{r}] \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}[\mathbf{r}] \mathbf{W}, \quad (10)$$

其中残差向量的协因矩阵为 $\mathbf{Q}[\mathbf{r}] = \mathbf{A}\mathbf{Q}\mathbf{A}^T$, $\mathbf{P}[\mathbf{r}] = \mathbf{Q}[\mathbf{r}]^{-1}$.

下面给出 RWTLs 方法的计算步骤:

- 1) 令 $k=0$,按简单 TLS 方法解得初值 $\mathbf{X}^{(0)}$,并指定误差上限 ϵ ;
- 2) 求改正数方程的雅可比矩阵 $\mathbf{A}(\mathbf{X}^{(k)})$, $\mathbf{B}(\mathbf{X}^{(k)})$;
- 3) 计算残差的协因矩阵 $\mathbf{Q}[\mathbf{r}^{(k)}]$;
- 4) 带入公式(10)求出误差参数 $\delta^{(k)}$;
- 5) 令 $\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \delta^{(k)}$;
- 6) 若 $\|\delta^{(k)}\| < \epsilon$,则停止迭代,得到最优解 $\mathbf{X}^* = \mathbf{X}^{(k+1)}$;否则,置 $k = k+1$,转 2)。

最终得到未知参数 L_0, R_0, α_0 及修正后的 $L_i, R_i, \alpha_i, \alpha_{2i}$ 。

3.3 基线长度的测量

如图 3 所示,两观测站 A、B 对静态目标点 Q 的角度进行多次来回测量,对测量角度参数取平均值然后进行坐标系转换,得 $L_A, R_B, \alpha_A, \alpha_B$ 4 个测量结果,通过激光测距望远镜(精度为 ± 1 m 以下)测得两观测站 A、B 到目标点 Q 的距离 l_A, l_B 。

根据正弦定理可得基线长度:

$$X_B = \frac{1}{2} \sin(L_A - L_0 + R_0 - R_B) \cdot \left(\frac{l_A \cdot \cos \alpha_A}{\sin(R_0 - R_B)} + \frac{l_B \cdot \cos \alpha_B}{\sin(L_A - L_0)} \right). \quad (11)$$

结合 3.2 的结果代入 L_0, R_0 可以得到基线 X_B 的长度,代入公式(1)求得目标点 P_i 和 B 观测站的坐标值。

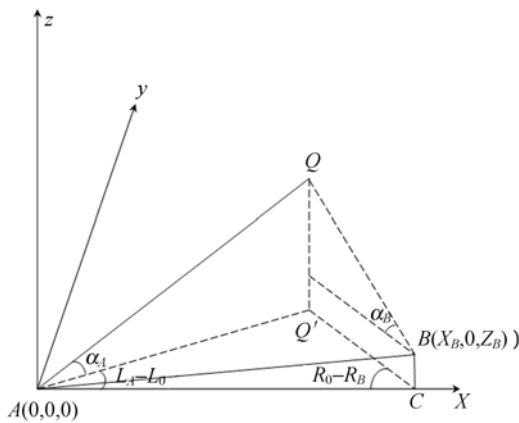


图 3 基线测量原理

Fig. 3 Principle of baseline measurement

4 结果及分析

为验证上述方法的可靠性,根据现有的试验数据对两站交会测量的仿真试验如下:在图 1 所定坐标系下目标按轨迹曲线方程(11)运动, B 观测站的真实坐标为(2 000, 0, 300)。

$$\begin{cases} X = t \quad t \in [-100, 1800] \\ Y = 800 - 0.3t \\ Z = 1600 - 0.1t - 0.0003t^2 \end{cases} \quad (12)$$

仿真时,在目标轨迹曲线等间距取 100 个点,对每个点(包括静态目标点 Q)先根据公式(1)计算出各台经纬仪和倾角仪无误差时的真值数据 $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_i, \alpha_{2i}, L_i, R_i$,然后在真值数据基础上加入 $\mu=0, \sigma=10''$ 的正态分布随机误差作为实际观测值,对两观测站 A、B 到静态目标点的距离 l_A, l_B

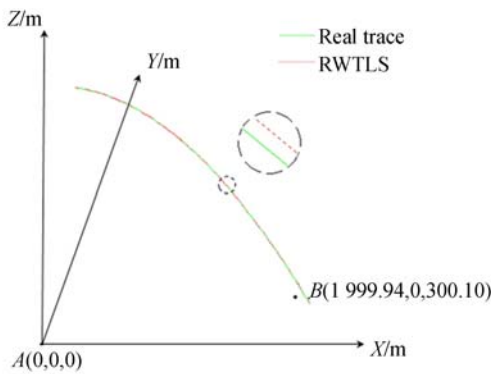


图 4 RWTLS方法轨迹与实际轨迹比较

Fig. 4 Comparison of trajectory obtained by RWTLS and real trace

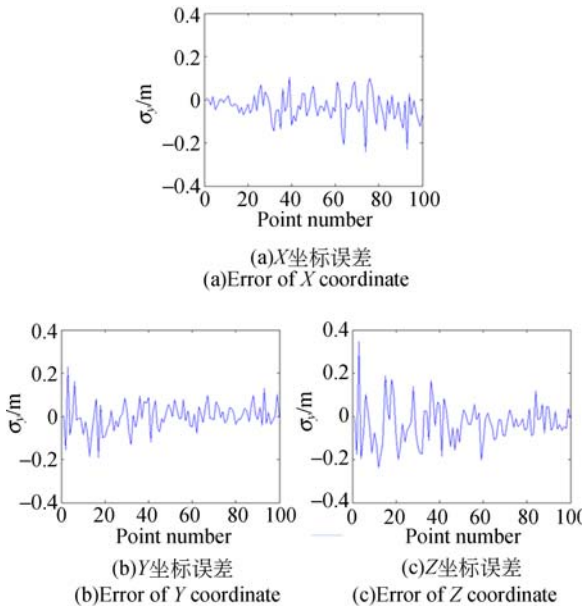


图 5 坐标误差

Fig. 5 Errors of coordinates

分别加上 ± 1 的随机误差作为实际观测值,经坐标转换后用 RWTLS 方法和高斯-牛顿迭代方法得到目标点 P_i 和 B 观测站的角度参数,最后结合基线长度和目标点角度参数算出目标点 P_i 的位置坐标,绘制出 RWTLS 轨迹曲线。

此算例以 $\|\epsilon\| < 10^{-10}$ 作为迭代结束标志,使用 Matlab 进行多次模拟,迭代 4 次即可收敛,收敛速度快,得到的参数误差差值都在 10^{-12} 数量级以下,说明其主要为数值计算误差。随机取一组观测数据进行分析,图 4 为 RWTLS 方法的交会结果与实际轨迹的比较,图 5 为 RWTLS 方法交会结果的绝对误差。从图中可以看出,基于坐标系转换和 RWTLS 方法的两站交会的测量方法把系统误差转变为测量误差,利用多余观测数条件,通过 RWTLS 方法和高斯-牛顿法迭代计算,得到的目标轨迹曲线有较高的精度,在 x, y, z 各方向上误差在 ± 0.4 m 以内,并且 B 观测站的坐标误差也在 0.15 m 以内,满足在外场不标定观测站情况下的精度要求。

5 结 论

针对外场飞行目标测试的需求,设计了针对外场试验的交会测量算法。文中提出一种基于坐标系变换和 RWTLS 相结合的交会方法,该方法具有直接简便、收敛速度快、精度较高等优点,交会测量结果显示,本文方法在 x, y, z 各方向上的误差在 ± 0.4 m 以内,在外场飞行目标测试中有良好的实用性。

参考文献:

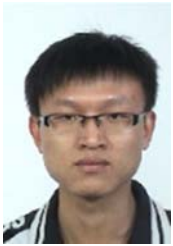
[1] 张玲霞,马彩文,陈明,等. 靶场光电经纬仪多台交会测量数据的一种处理方法[J]. 测绘学报, 2003, 32(5):139-142.
ZHANG L X, MA C W, CHEN M, et al.. A data processing method on trajectory measurement by intersection in shooting range [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(5): 139-142. (in Chinese)

[2] 柴饶军,纪大山,马彩文. 电视经纬仪复杂多目标交会测量点匹配算法[J]. 光电工程, 2004, 31(9):29-32.
CHAI R J, JI D SH, MA C W. Points matching algorithm for sophisticated multi-target intersection of TV theodolite [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9):29-32. (in Chinese)
[3] 吕帅华,苏秀琴,张占鹏,等. 一种基于高斯-牛顿法的光电经纬仪交会测量算法[J]. 光电工程, 2006, 33(11):22-25.

- LV SH H, SU X Q, ZHANG ZH P, *et al.*. Algorithm of opto-electronic theodolite intersection based on Gauss-Newton method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(11):22-25. (in Chinese)
- [4] 周绍光,熊仁生,吴圣雄. 交会法测量多弹道方法研究[J]. 测绘学报, 1997, 26(3):213-220.
- ZHOU SH G, XIONG R SH, WU SH X. Research on the method of multiple trajectories by intersection [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1997, 26(3):213-220. (in Chinese)
- [5] 苏理云,吴钦章,高晓东,等. 基于模糊聚类的光电经纬仪多子弹弹道测量[J]. 光电工程, 2006, 33(10):5-8.
- SU L Y, WU Q ZH, GAO X D, *et al.*. Opto-electronic theodolite multiple ballistic test based on fuzzy c-means clustering [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10):5-8. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王向军,韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):686-690.
- WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):686-690. (in Chinese)
- [8] KAMEN E W. Multiple target tracking based on symmetric measurement equations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(3):371-374.
- [9] 闫海霞,刘岩俊. 共面多目标交会方法及误差分析[J]. 光电工程, 2008, 35(8):15-19.
- YAN H X, LIU Y J. Method of coplanar multiple targets intersection and error analysis of measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(8):15-19. (in Chinese)
- [10] STORMS P P A, SPIEKSM A F C R. An LP-based algorithm for the data association problem in multitarget tracking [J]. *Computers and Operations Research*, 2003, 30(7):1067-1085.
- [11] 周剑. 摆场动平台光学测量问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
- ZHOU J. *Study on optical measurement techniques based on unstable & moving platforms in shooting range* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 张晓禹. 车载平台变形测量和误差校正技术的研究[D]. 北京:中国科学院, 2003.
- ZHANG X Y. *The Research of vehicle plane distortion measuring and error emendation technology* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [13] 盛磊,吴志勇,刘旨春,等. 船载经纬仪数据处理[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9):2421-2429.
- SHENG L, WU ZH Y, LIU ZH CH, *et al.*. Data processing for shipboard theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2421-2429. (in Chinese)
- [14] 盛磊,吴志勇,高世杰,等. 船载经纬仪测量数据的回归及补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9):2536-2544.
- SHENG L, WU ZH Y, GAO SH J, *et al.*. Regression and compensation of measuring data for shipboard theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2536-2544. (in Chinese)
- [15] 张政. 车载光电经纬仪在准动基座下的测量误差修正研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- ZHANG ZH. *Research on measurement error correction of vehicle photoelectric theodolite working on the quasi-moving base* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [16] 宁伟,周立,焦明连,等. 顾及起算数据误差的测角前方交会点坐标精度分析[J]. 测绘通报, 2014(9):51-53.
- NING W, ZHOU L, JIAO M L, *et al.*. Analysis of coordinate accuracy of the front intersection fixed point in view of initial data errors [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(9):51-53. (in Chinese)

- [17] MARKOVSKY I, VAN HUFFEL S. Overview of total least squares methods [J]. *Signal Process*, 2007, 87; 2283-2302.
- [18] 周拥军, 邓才华. 线性 EIV 模型的 TLS 估计及其典型应用[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(3): 948-953.
ZHOU Y J, DENG C H. Extended total least squares problems for linear errors-in-variables model and its typical applications [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(3): 948-953. (in Chinese)
- [19] 周拥军, 朱建军, 邓才华. 附参数的条件平差与按行独立的加权总体最小二乘法估计的一致性研究[J]. *测绘学报*, 2012, 41(1): 48-53.
ZHOU Y J, ZHU J J, DENG C H. The consistency between row-wised weighted total least squares and condition adjustment with parameters [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(1): 48-53. (in Chinese)

作者简介:



陶家园(1989—),男,重庆城口人,博士研究生,2012年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光电信息检测方面的研究。E-mail: tjy520@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



王克逸(1962—),男,河北保定人,教授,博士生导师,1995年于中国科学院等离子体物理研究所获得工学博士学位,1995年至1996年在中国科学技术大学精密机械与精密仪器系做博士后,主要从事于近场光学和微光学的教学和科研工作。E-mail: kywang@ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)