

# 一种光学经纬仪动态精度简易鉴定方法分析

官志华 段鹏伟 徐 旭 岳 锐 田志方

(中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

**摘要** 针对目前光学经纬仪动态精度鉴定“硬方法”粗糙、工程繁杂, 鉴定结果不准确、可靠性差、不完善等问题, 提出一种光学经纬仪动态精度简易鉴定的“软方法”, 推导了数学模型并给出了解算方法; 通过仿真数据设计, 分别采用这两种鉴定方法进行了验证计算, 结果表明, 该方法对于光学经纬仪动态精度鉴定的准确性和可靠性具有更大的优势, 有利于工程应用。

**关键词** 测量; Hermite 函数; 动态精度; 数据融合; 光学经纬仪; 连续波雷达

**中图分类号** V556.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1112004

## Analysis on a Method of Convenient Dynamic Accuracy Appraisal for Optical Theodolite

Gong Zhihua Duan Pengwei Xu Xu Yue Rui Tian Zhifang

(Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng, Jilin 137001, China)

**Abstract** Dynamic accuracy appraisal method of optical theodolite, called ‘Hard method’, is rough and complex in engineering. Its appraisal result is inaccurate, poor in reliability and imperfect. For these reasons, a convenient dynamic accuracy appraisal method of optical theodolite is proposed, called ‘Soft method’. Its mathematical model and solution method are deduced. Through simulation, comparative calculation with these two appraisal methods is carried out. The results show that for dynamic accuracy appraisal of optical theodolite, ‘Soft method’ takes greater advantages in accuracy and reliability. In addition, the method is easier and more conducive to engineering applications.

**Key words** measurement; Hermite function; dynamic accuracy; data fusion; optical theodolite; continuous wave radar

**OCIS codes** 120.4820; 200.4560; 330.4150; 350.4600; 350.4800

## 1 引 言

光学经纬仪是靶场获取外弹道测量数据和飞行状态的重要测量手段之一, 需要两台光学经纬仪以交会方式计算被测目标空中位置。为保证光学经纬仪获得高精度的测量数据, 在实际使用设备之前, 必须对其测量水平进行精度鉴定, 以评价设备研制是否成功, 是否达到测量精度要求。对光学经纬仪进行精度鉴定主要包括静态鉴定和动态鉴定<sup>[1-3]</sup>, 相比于静态鉴定, 动态鉴定是评估设备实际参试和测量能力的重要环节, 是了解测量设备实际测量精度水平的重要手段。但是在动态精度鉴定方面, 至今未有很明确的评定方法<sup>[1,4]</sup>, 目前多采用“硬方法<sup>[5]</sup>”为鉴定手段, 但考虑到现实多种因素, 如标准设备测量能力、设备布局、精度指标、气象环境、试验航路、

飞行架次和参试设备保障等, 该方法组织和实施非常繁杂, 而且作为被鉴定设备, 光学经纬仪的测量精度一般都非常高, 选出比其测量精度高 3~10 倍的比较标准设备<sup>[5]</sup>, 往往非常困难。因此, 为摆脱“硬方法”束缚, 本文提出一种新的动态精度鉴定方法, 能够实现简易、快速对测量设备动态精度的评估与校准, 在以尽量少使用标准设备的前提下, 通过数学方法实现对测量设备动态精度高效、准确鉴定的目的, 不但可以解决光学经纬仪动态精度准确鉴定的难题, 进一步提高设备测量精度, 而且节省大量的人力、物力和财力, 具有重大的经济效益。

## 2 鉴定方法

对 2 台光学经纬仪进行动态精度考核, 选取一

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-06-17

作者简介: 官志华(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事外弹道测试和数据处理方面的研究。

E-mail: gzh63298@126.com

部连续波雷达为鉴定设备。则由光学经纬仪可以提供 2 个方位角  $\alpha$  测元数据和 2 个俯仰角  $\theta$  测元数据,连续波雷达提供 1 个径向速度  $v$  测元数据,则由 5 个测元数据数据可建立如下联合误差方程。

为压缩待估弹道参数数量,考虑用 Hermite 函

数对弹道参数进行表征<sup>[6]</sup>。假设函数  $H(x)$  在  $n$  个节点  $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1}$  上的函数值为  $y_0, y_1, \dots, y_{n-1}$ , 一阶导数值为  $y'_0, y'_1, \dots, y'_{n-1}$ , 则  $H(x)$  可以用 Hermite 函数近似代替为<sup>[7]</sup>

$$H(x) = P_{2n-1}(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \{y_k + (x - x_k)[y'_k - 2y_k l'_k(x)]\} l_k^2(x), \quad (1)$$

式中  $l_k(x) = \prod_{n-1} \left[ \frac{(x - x_j)}{(x_k - x_j)} \right], l'_k(x) = \sum_{n-1} \left( \frac{1}{x_k - x_j} \right)$ 。

则弹道坐标、速度参数用三次 Hermite 函数表征为

$$\begin{cases} x_{t_i} = f_3(t_i, \beta_x, T_x) = \sum_{j=0}^{m_x} [\beta_{x(j \times 2)} f_{x1}(T_{xj}) + \beta_{x(j \times 2 + 1)} f_{x2}(T_{xj}) + \beta_{x(j \times 2 + 2)} f_{x3}(T_{xj}) + \beta_{x(j \times 2 + 3)} f_{x4}(T_{xj})] \\ z_{t_i} = f_3(t_i, \beta_z, T_z) = \sum_{j=0}^{m_z} [\beta_{z(j \times 2)} f_{z1}(T_{zj}) + \beta_{z(j \times 2 + 1)} f_{z2}(T_{zj}) + \beta_{z(j \times 2 + 2)} f_{z3}(T_{zj}) + \beta_{z(j \times 2 + 3)} f_{z4}(T_{zj})] \\ y_{t_i} = f_3(t_i, \beta_y, T_y) = \sum_{j=0}^{m_y} [\beta_{y(j \times 2)} f_{y1}(T_{yj}) + \beta_{y(j \times 2 + 1)} f_{y2}(T_{yj}) + \beta_{y(j \times 2 + 2)} f_{y3}(T_{yj}) + \beta_{y(j \times 2 + 3)} f_{y4}(T_{yj})] \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{t_i} = \dot{f}_3(t_i, \beta_x, T_x) = \sum_{j=0}^{m_x} [\beta_{x(j \times 2)} \dot{f}_{x1}(T_{xj}) + \beta_{x(j \times 2 + 1)} \dot{f}_{x2}(T_{xj}) + \beta_{x(j \times 2 + 2)} \dot{f}_{x3}(T_{xj}) + \beta_{x(j \times 2 + 3)} \dot{f}_{x4}(T_{xj})] \\ \dot{z}_{t_i} = \dot{f}_3(t_i, \beta_z, T_z) = \sum_{j=0}^{m_z} [\beta_{z(j \times 2)} \dot{f}_{z1}(T_{zj}) + \beta_{z(j \times 2 + 1)} \dot{f}_{z2}(T_{zj}) + \beta_{z(j \times 2 + 2)} \dot{f}_{z3}(T_{zj}) + \beta_{z(j \times 2 + 3)} \dot{f}_{z4}(T_{zj})] \\ \dot{y}_{t_i} = \dot{f}_3(t_i, \beta_y, T_y) = \sum_{j=0}^{m_y} [\beta_{y(j \times 2)} \dot{f}_{y1}(T_{yj}) + \beta_{y(j \times 2 + 1)} \dot{f}_{y2}(T_{yj}) + \beta_{y(j \times 2 + 2)} \dot{f}_{y3}(T_{yj}) + \beta_{y(j \times 2 + 3)} \dot{f}_{y4}(T_{yj})] \end{cases}, \quad (3)$$

$$\text{式中} \begin{cases} f_1(T) = 1 - 3T^2 + 2T^3 \\ f_2(T) = T(1 - T)^2 \\ f_3(T) = 3T^2 - 2T^3 \\ f_4(T) = -(1 - T)T^2 \end{cases}, \begin{cases} \dot{f}_1(T) = -6(T - T^2) \\ \dot{f}_2(T) = -2T(1 - T) \\ \dot{f}_3(T) = 6(T - T^2) \\ \dot{f}_4(T) = -2T + 3T^2 \end{cases}, T = \frac{t_i - t_k}{t_{k+1} - t_k} \in [0, 1], 1 - T = \frac{t_{k+1} - t_i}{t_{k+1} - t_k}, t_i \text{ 为实际}$$

采样时刻,  $t_k \leq t_i \leq t_{k+1}, t_k \in T \in (T_x, T_z, T_y)$ , 相邻节点之间的时间也归一化。 $(T_x, T_z, T_y)$ 、 $(m_x, m_z, m_y)$  和  $(\beta_x, \beta_z, \beta_y)$  分别为弹道坐标参数的拟合函数节点分布、内节点个数和待估拟合函数系数。

以  $f_3^{(x,z,y)}, \dot{f}_3^{(x,z,y)}$  代替  $f_3[t_i, \beta_{(x,z,y)}, T_{(x,z,y)}], \dot{f}_3[t_i, \beta_{(x,z,y)}, T_{(x,z,y)}]$ , 则由以上 5 种独立测元组成的联合误差方程<sup>[8-9]</sup>为

$$\begin{cases} e_{a_{1i}} = \alpha_{1i} - \hat{\alpha}_{1i} - s_{a_1} = \alpha_{1i} - \alpha_{1i0} + \alpha_{1i\Delta} + \frac{\tilde{z}_i - z_0}{d_{1i0}^2} f_3^x - \frac{\tilde{x}_i - x_0}{d_{1i0}^2} f_3^z + \alpha_{1T} - s_{a_1} \\ e_{a_{2i}} = \alpha_{2i} - \hat{\alpha}_{2i} - s_{a_2} = \alpha_{2i} - \alpha_{2i0} + \alpha_{2i\Delta} + \frac{\tilde{z}_i - z_0}{d_{2i0}^2} f_3^x - \frac{\tilde{x}_i - x_0}{d_{2i0}^2} f_3^z + \alpha_{2T} - s_{a_2} \\ e_{\theta_{1i}} = \theta_{1i} - \hat{\theta}_{1i} - s_{\theta_1} = \theta_{1i} - \theta_{1i0} + \theta_{1i\Delta} + \frac{(\tilde{y}_i - y_0)(\tilde{x}_i - x_0)}{(r_{1i0})^2 d_{1i0}} f_3^x + \frac{(\tilde{y}_i - y_0)(\tilde{z}_i - z_0)}{(r_{1i0})^2 d_{1i0}} f_3^z - \frac{d_{1i0}}{(r_{1i0})^2} f_3^y - s_{\theta_1} \\ e_{\theta_{2i}} = \theta_{2i} - \hat{\theta}_{2i} - s_{\theta_2} = \theta_{2i} - \theta_{2i0} + \theta_{2i\Delta} + \frac{(\tilde{y}_i - y_0)(\tilde{x}_i - x_0)}{(r_{2i0})^2 d_{2i0}} f_3^x + \frac{(\tilde{y}_i - y_0)(\tilde{z}_i - z_0)}{(r_{2i0})^2 d_{2i0}} f_3^z - \frac{d_{2i0}}{(r_{2i0})^2} f_3^y - s_{\theta_2} \\ e_{v_i} = v_i - \hat{v}_i - s_v = v_i - \frac{\tilde{x}_i - x_0}{r_{i0}} \dot{f}_3^x - \frac{\tilde{z}_i - z_0}{r_{i0}} \dot{f}_3^z - \frac{\tilde{y}_i - y_0}{r_{i0}} \dot{f}_3^y - s_v \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $(\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, \theta_{1i}, \theta_{2i}, \nu_i)$  为各测元实测数据,  $(s_{a1}, s_{a2}, s_{\theta1}, s_{\theta2}, s_\nu)$  为各测元系统误差模型, 如常值、线性或非线形函数模型等;  $(\tilde{x}_i, \tilde{z}_i, \tilde{y}_i)$  为初值,  $(x_0, z_0, y_0)$  为站址已知坐标,  $\alpha_T$  为判象限角,  $r_{i0} = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_0)^2 + (\tilde{z}_i - z_0)^2 + (\tilde{y}_i - y_0)^2}$ ,  $\alpha_{i0} = \arcsin\left(\frac{\tilde{z}_i - z_0}{d_{i0}}\right)$ ,  $\alpha_{i\Delta} = \frac{-(\tilde{z}_i - z_0)}{d_{i0}^2} \tilde{x}_i + \frac{\tilde{x}_i - x_0}{d_{i0}^2} \tilde{z}_i$ ,  $d_{i0} = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_0)^2 + (\tilde{z}_i - z_0)^2}$ ,  $\theta_{i0} = \arctan\left(\frac{\tilde{y}_i - y_0}{d_{i0}}\right)$ ,  $\theta_{i\Delta} = \frac{-(\tilde{y}_i - y_0)(\tilde{x}_i - x_0)}{(r_{i0})^2 d_{i0}} \tilde{x}_i + \frac{-(\tilde{y}_i - y_0)(\tilde{z}_i - z_0)}{(r_{i0})^2 d_{i0}} \tilde{z}_i + \frac{d_{i0}}{(d_{i0})^2} \tilde{y}_i$ 。

将(4)式写成矩阵形式为

$$\xi = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{C} + \boldsymbol{\eta}, \quad (5)$$

式中  $\xi = (e_{a1}, e_{\theta1}, e_{a2}, e_{\theta2}, e_\nu)^T$  为测元残差向量,  $\mathbf{H}$  为与 Hermite 函数有关的系数矩阵(亦称为设计矩阵),  $\mathbf{X} = [\beta_{x0}, \dots, \beta_{x(2m_x+3)}, \beta_{z0}, \dots, \beta_{z(2m_z+3)}, \beta_{y0}, \dots, \beta_{y(2m_y+3)}]^T$  为与 Hermite 函数有关的待估参数向量,  $\mathbf{G}$  为系统误差模型系数矩阵,  $\mathbf{C}$  为系统误差模型待估参数向量,  $\boldsymbol{\eta} = (\alpha_{1i} - \alpha_{1i0} + \alpha_{1i\Delta}, \theta_{1i} - \theta_{1i0} + \theta_{1i\Delta}, \alpha_{2i} - \alpha_{2i0} + \alpha_{2i\Delta}, \theta_{2i} - \theta_{2i0} + \theta_{2i\Delta}, \nu_i)^T$  为常数向量。

对(5)式依据最小二乘原理解算可以得到待估参数(Hermite 函数系数和系统误差模型系数)矩阵解, 为

$$\begin{cases} [\mathbf{X}^T, \mathbf{C}^T]^T = -([\mathbf{A}, \mathbf{B}]^T \mathbf{P} [\mathbf{A}, \mathbf{B}])^{-1} [\mathbf{A}, \mathbf{B}]^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} \\ \mathbf{P} = \text{diag}(P_{a_1}, P_{\theta_1}, P_{a_2}, P_{\theta_2}, P_\nu) \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{P}$  为权值矩阵, 由各测元实测数据统计方差决定。在实际求解中, 由于初始弹道坐标参数的近似性和非线性函数级数展开带来的截断误差, 误差联合方程需要进行叠代计算。将最终解算得到 Hermite 函数拟合系数和系统误差函数系数代入弹道参数表达式和误差函数表达式中, 即可得到最终融合计算后的弹道参数和各测元系统误差值, 进而实现对被鉴定设备动态精度的鉴定。

### 3 仿真验证

某型光学经纬仪作为被鉴定设备, 设计对其进行动态误差鉴定与校准, 以某型弹道相机和连续波雷达为鉴定设备。仿真数据设计: 在局部三维坐标系下, 依据质点弹道方程推算一条理论弹道, 在假设以上测量设备对弹道进行全程跟踪测量的基础上, 以该理论弹道为基准, 反推产生 2 台经纬仪 4 个角度测元数据、2 台弹道相机 4 个角度测元数据和一部连续波雷达 1 个径向速度测元数据, 并给每个测元加入相应的随机误差和系统误差, 具体数值见表 1 所示。雷达、经纬仪站址和弹道轨迹的几何关系如图 1 所示, 其中, 2 台光学经纬仪和 2 台弹道相机站址同址并分别布设在弹道左侧, 连续(CW)波雷达布设在炮位后方。

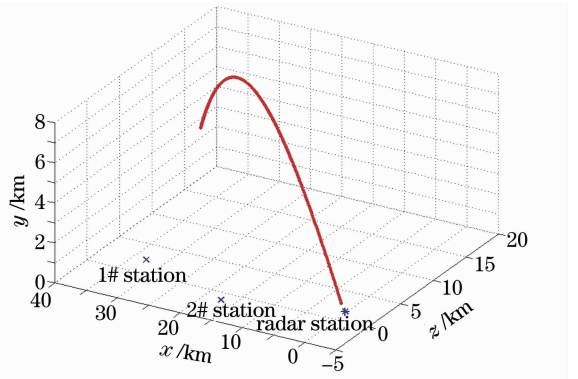


图 1 设备布站与弹道的空间几何关系

Fig. 1 Space geometry relation of station distribution and trajectory

表 1 测量设备仿真测元加入误差值情况

Table 1 Errors added to every simulating measuring elements

Measuring equipment	1st theodolite		2nd theodolite		1st ballistic camera		2nd ballistic camera		CW radar
Measuring elements	$\alpha / (")$	$\theta / (")$	$\alpha / (")$	$\theta / (")$	$\alpha / (")$	$\theta / (")$	$\alpha / (")$	$\theta / (")$	$\nu / (m \cdot s^{-1})$
Random error (real value)	19.42	21.17	19.42	21.17	4.93	5.12	4.72	5.12	0.30
System error (real value)	6.48	-9.23	-8.05	-9.23	0	0	0	0	0

#### 3.1 “硬方法”鉴定

以高精度弹道相机作为比较标准, 通常要求标准设备的精度比被鉴定设备高 3~10 倍, 从表 1 可

见, 弹道相机的测角精度比经纬仪高 3 倍以上, 并且不含系统误差, 满足条件。首先, 对 2 台弹道相机测元数据进行交会计算, 以计算获得的弹道坐标数据

为基准,再转换为以被鉴定设备经纬仪站址为中心的测元值,并以其为真值与经纬仪测元值比对,以估

算被鉴定设备的测量精度。鉴定结果如图 2 和表 2 所示。

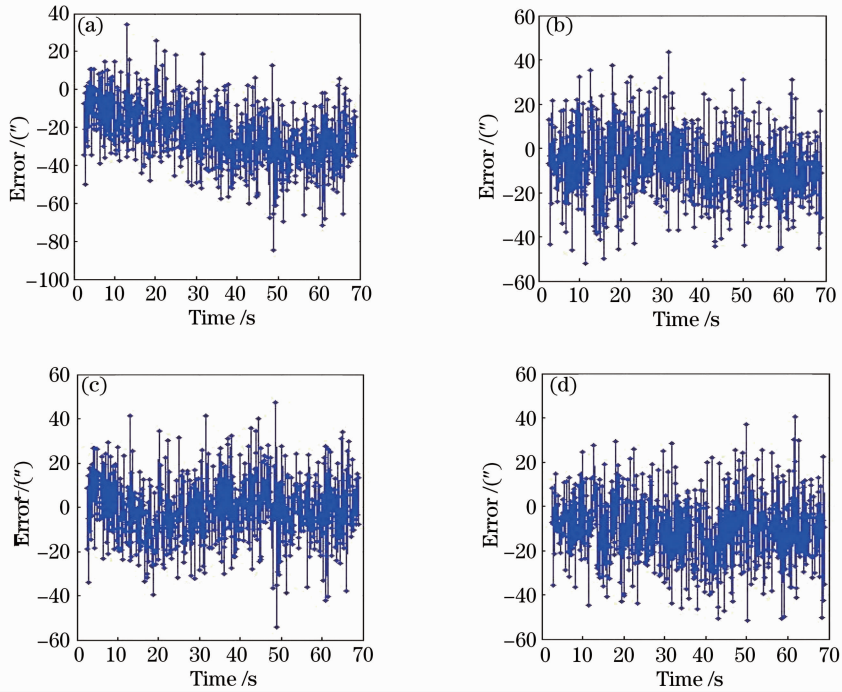


图 2 以弹道相机为比较标准获得经纬仪测元比对误差曲线。(a) 1# 经纬仪方位角; (b) 1# 经纬仪俯仰角; (c) 2# 经纬仪方位角; (d) 2# 经纬仪俯仰角

Fig. 2 Measuring error curves of optical-theodolite compared with ballistic camera. (a) 1st theodolite azimuth; (b) 1st theodolite elevation; (c) 2nd theodolite azimuth; (d) 2nd theodolite elevation

表 2 以弹道相机为比较标准获得经纬仪测元比对误差统计结果

Table 2 Measuring error statistics of optical-theodolite compared with ballistic camera

Measuring equipment	1st theodolite		2nd theodolite		
	Measuring elements	$\alpha$	$\theta$	$\alpha$	$\theta$
Random error (calculated)		16.44"	15.76"	15.00"	15.76"
Absolute error		2.98"	5.41"	4.42"	5.41"
Comparative error		15.3%	25.6%	22.8%	25.6%
System error (calculated)		-23.83"	-7.47"	-1.26"	-10.03"
Absolute error		30.31"	1.76"	7.24"	0.8"
Comparative error		467.7%	19.1%	73.8%	8.7%

从表 2 可以看到,采用弹道相机作为比较标准设备对经纬仪测元进行精度评估,经纬仪角度测元随机误差鉴定准确度在  $1 - 0.256 = 74.4\%$  以上,但对测元系统误差鉴定准确度很差,不能保证每个测元实现可靠鉴定。另外,在测元数据仿真设计中,对标准鉴定设备弹道相机的测元中分配的随机误差非常小,而且不含系统误差,这在实际工程中,相对较长的一段弹道,弹道相机很难达到这样的测量精度水平,因此,实际应用中,这种方法的鉴定效果会更差。

### 3.2 “软方法”鉴定

只采用一部连续波雷达为鉴定设备,将 2 台被鉴定设备光学经纬仪的 4 个角度测元数据和雷达的

1 个速度测元数据统一处理,采用上述数学方法,在获得高精度弹道坐标解算的同时,也获得各设备测元的系统误差探查,实现对被鉴定设备测量精度的评估。鉴定结果如图 3 和表 3 所示。

从表 3 可以看到,在只有一部连续波雷达作为鉴定设备的基础上,只采用雷达一个速度测元数据,通过计算方法,被鉴定设备经纬仪角度测元随机误差鉴定最大绝对误差只有  $0.54''$ ,鉴定准确度在  $1 - 0.026 = 97.4\%$  以上,系统误差鉴定最大绝对误差  $0.88''$ ,鉴定准确度在  $1 - 0.103 = 89.7\%$  以上。

如果将弹道相机的 4 个测元也加入进来,共 9 个测元数据统一进行数据融合计算,则所有设备测元的误差计算结果如表 4 所示。

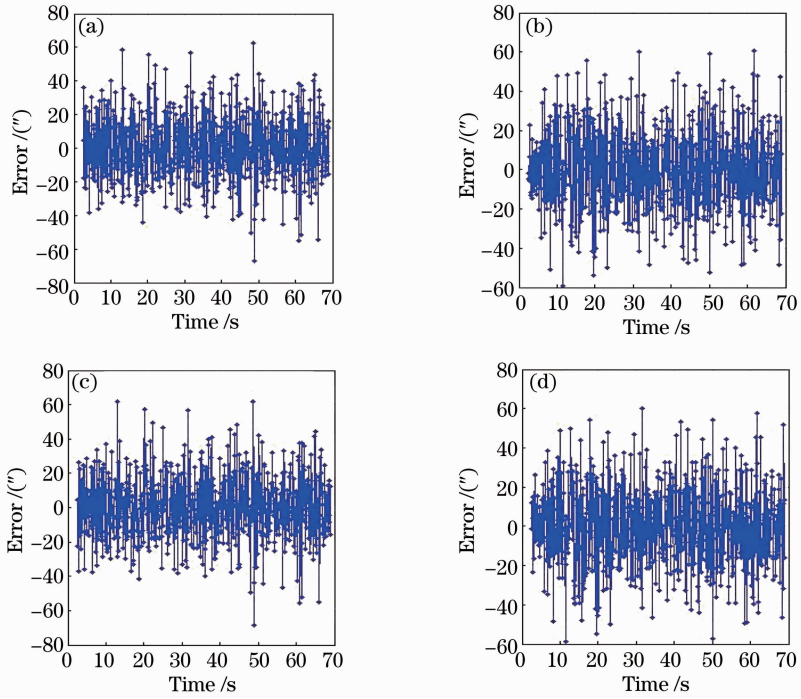


图3 软方法计算获得经纬仪测元残差曲线。(a) 1#经纬仪方位角；(b) 1#经纬仪俯仰角；(c) 2#经纬仪方位角；(d) 2#经纬仪俯仰角

Fig. 3 Residual curves of optical-theodolite measurement elements obtained by ‘Soft method’. (a) 1st theodolite azimuth; (b) 1st theodolite elevation; (c) 2nd theodolite azimuth; (d) 2nd theodolite elevation

表3 软方法计算获得经纬仪测元误差统计结果

Table 3 Error statistics of optical-theodolite measurement elements obtained by ‘Soft method’

Measuring equipment	1st theodolite		2nd theodolite		CW radar
Measuring elements	$\alpha$	$\theta$	$\alpha$	$\theta$	$v$
Radom error (calculated)	18.98"	20.63"	18.98"	20.63"	0.343 m/s
Absolute error	0.44"	0.54"	0.44"	0.54"	0.043 m/s
Relative error	2.27%	2.55%	2.27%	2.55%	14.3%
System error (calculated)	6.19"	-9.49"	-7.63"	-9.08"	0
Absolute error	0.29"	0.26"	0.88"	0.15"	0
Relative error	4.48%	2.82%	10.34%	1.63%	0%

表4 全部测元参与的软方法计算获得的测元误差统计结果

Table 4 Error statistics of all measuring equipments measurement elements obtained by ‘Soft method’

Measuring equipment	1st theodolite		2nd theodolite		1st ballistic camera		2nd ballistic camera		CW radar
Measuring elements	$\alpha$	$\theta$	$\alpha$	$\theta$	$\alpha$	$\theta$	$\alpha$	$\theta$	$v$
Random error (calculated)	19.18"	20.83"	19.18"	20.83"	4.95"	5.16"	4.74"	5.16"	0.338 m/s
Absolute error	0.24"	0.34"	0.24"	0.34"	0.02"	0.04"	0.02"	0.04"	0.038 m/s
Comparative error	1.24%	1.61%	1.24%	1.61%	0.41%	0.78%	0.42%	0.78%	12.7%
System error (calculated)	6.39"	-9.28"	-8.87"	-9.28"	0	0	0	0	0
Absolute error	0.09"	0.05"	0.36"	0.05"	0	0	0	0	0
Comparative error	1.39%	0.54%	4.23%	0.54%	0%	0%	0%	0%	0%

从表4可以看到,在以上所有设备测元全部参与计算的条件下,被鉴定设备经纬仪角度测元随机误差鉴定最大绝对误差只有0.34",鉴定准确度又

提高到 $1-0.016=98.4\%$ 以上,系统误差鉴定最大绝对误差为0.36",鉴定准确度提高到 $1-0.042=95.8\%$ 以上。

## 4 结 论

基于上述仿真实例验证计算,得到如下结论:

1) 采用“硬方法”对被鉴定光学经纬仪进行动态精度鉴定,在具有高精度的比较标准设备的基础上,对被鉴定设备的测元随机误差鉴定具有一定的能力,但由于标准设备自身测元随机误差的存在,这在实际测量中是不可避免的,极大影响了其对被鉴定设备测元系统误差的校准能力。因此,“硬方法”对被鉴定设备动态精度的鉴定能力是有限的。

2) 提出的基于数据融合思想的“软方法”动态精度鉴定技术,通过合理设计,只需动用一部设备,采用一个测元就能实现对被鉴定设备动态精度的准确鉴定,从仿真实例计算结果已经得到了很好证明。对该方法被鉴定设备光学经纬仪的随机误差具有准确的鉴定能力,并对系统误差的校准也就具有很强的能力,是对光学经纬仪动态系统误差进行修正的一种可靠手段。该方法对经纬仪动态精度鉴定与校准具有非常强的优势,工程应用简易,鉴定结果准确可靠。

3) 在有更多鉴定设备参与的对光学经纬仪进行动态精度鉴定的条件下,即使鉴定设备测量精度不高,采用“软方法”进行分析计算,对获得准确的鉴定结果同样提供了可靠的保障。

考虑到对仿真数据设计的局限性,在实际工程应用中,由于被鉴定设备动态误差特性的复杂性,关于鉴定设备类型与测元的选用、设备之间布站几何关系<sup>[10]</sup>对鉴定精度的影响等问题,作者还会持续研究探索。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Zhenying, Fei Yetai, Chen Xiaohuai. Study and development of the theory of the accuracy of dynamic measurement [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2001, 22(4): 70-71, 74.  
许桢英, 费业泰, 陈晓怀. 动态精度理论研究与发展[J]. 仪器仪表

表学报, 2001, 22(4): 70-71, 74.

- 2 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu, *et al.*. Imaging model and high-precision calibration of quasi-concentric general theodolite-camera [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0715003.  
苑云, 朱肇昆, 张小虎, 等. 准同心广义经纬相机的成像模型及高精度标定[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0715003.
- 3 Dai Dongkai, Wang Xingshu, Hu Chunsheng, *et al.*. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312005.  
戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0312005.
- 4 Huo Jinming, Shen Xiangheng, Ye Lu, *et al.*. Testing of low contrast dynamic target acquisition ability for photoelectric tracker [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0512004.  
霍金明, 沈湘衡, 叶露, 等. 光电跟踪设备低对比度动态目标捕获能力的检验[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0512004.
- 5 Liu Bingshen, Liu Chunkui, Du Haitao. The Measuring Equipment Accuracy Appraisal on the Range [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.  
刘丙申, 刘春魁, 杜海涛. 靶场外测设备精度鉴定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- 6 Zhan Wuping, Shen Tingzheng, Liu Cheng, *et al.*. Hermite interpolation fusion method for netted radar measuring colored noise data [J]. Modern Radar, 2012, 34(6): 41-44.  
詹武平, 谌廷政, 刘成, 等. 组网雷达测量色噪声数据的 Hermite 插值融合方法[J]. 现代雷达, 2012, 34(6): 41-44.
- 7 Xu Shiliang. Commonly Used Algorithm for Assembly (C Language Description) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.  
徐士良. 常用算法程序集(C语言描述)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 8 Guo Junhai. Trajectory Data Fusion Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.  
郭军海. 弹道测量数据融合技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- 9 Cai Min, Yu Hui, Song Weihong, *et al.*. Joint positioning method for data fusion of photo-electric theodolite and radar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212002.  
柴敏, 余慧, 宋卫红, 等. 光学无线电测量信息融合定位方法[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212002.
- 10 Wang Xiaoli. Research on Data Fusion Based on Netted Radar to Improve Measurement Precision of Aerial Targets' Flight Track [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.  
王晓丽. 基于雷达组网提高空中目标航迹测量精度的数据融合方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

栏目编辑: 何卓铭