

文章编号 1004-924X(2011)10-2434-08

# 双经纬仪交会测量火炮调炮精度的误差分析与抑制

孙泽林<sup>1,2\*</sup>, 王 昭<sup>1</sup>, 翟唤春<sup>2</sup>

- (1. 西安交通大学 制造系统与质量工程研究所, 陕西 西安 710049;
2. 中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

**摘要:**为了改进调炮精度测量方法,对双经纬仪交会测量火炮调炮精度的测量误差和误差抑制方法进行了研究。首先,根据双经纬仪交会测量原理,建立了测量调炮精度的空间解算模型。接着,以DT202C电子经纬仪为例,对影响其测量精度的各项因素进行了系统的定量分析,并建立了测量误差模型。最后,在预先确定炮管上两标记点的前提下,研究了经纬仪最佳布站方式以抑制其测量误差,并采用遗传算法进行了寻优解算。理论计算和试验结果表明,通过经纬仪合理布站,可以使调炮精度的测量误差控制在0.20 mil以内。提出的方法满足了试验需求,消除了经纬仪随机布站引起的测量结果的不确定性。

**关键词:**调炮精度;经纬仪;交会测量;布站;遗传算法

**中图分类号:**TH761.1;TJ306 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2434

## Analysis and control of error on two theodolite intersection measurement for gun rotated accuracy of artillery

SUN Ze-lin<sup>1,2\*</sup>, WANG Zhao<sup>1</sup>, ZHAI Huan-chun<sup>2</sup>

- (1. *Institute of Manufacturing System and Quality Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

2. *The 63870 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Huayin 714200, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: sunzelin73@126.com*

**Abstract:** To improve the measurement for gun rotated accuracy, the measurement error and the method to control the error for measuring the gun rotated accuracy by two theodolite intersection were researched. First, according to the principle of two theodolites intersection measurement, a space calculation model for measuring the gun rotated accuracy was established. Then the factors influencing the measurement error were quantitatively analyzed by the DT202C electronic theodolite, and the measurement error model was established. Finally, the idiographic realization method for the theodolite optimal disposition to control the measurement error was researched after predefining two markers on the gun tube, and the optimal disposition place was calculated by genetic algorithm. The theoretical calculation and the test results indicate that the measuring error of the gun rotated accuracy can be controlled within 0.20 mil by the reasonable disposition of the theodolites. It can meet the test re-

收稿日期:2011-03-20;修订日期:2011-05-17.

基金项目:“十一五”国防科研专项基金资助项目(No. AL-CGJ-CG-0980)

quirements and can remove the uncertainty brought by the stochastic disposition of the theodolite.

**Key words:** gun rotated accuracy; theodolite; intersection measurement; disposition; genetic algorithm

## 1 引言

调炮精度是自行火炮火控系统的关键战技指标,直接影响到武器系统射击精度<sup>[1]</sup>,是靶场评估火控系统性能的必测和常测项目。

调炮精度的测量过程实质上就是一个测量身管指向变化量的过程。目前测量身管指向变化的方法较多,其中 CCD 加网格坐标靶法、点光源加 CCD 或位敏探测器(PSD)法只适用于身管指向变化很小的场合<sup>[2-3]</sup>,无法满足调炮精度测量过程中至少  $60^\circ$  变化范围的考核要求;双轴速率陀螺测量法或自整角机加精密传动机构的方法都假定身管转动基点不变<sup>[4-5]</sup>,这不仅与实际情况不符,也没有考虑调炮过程中方位角与俯仰角之间的耦合效应,无法保证测量调炮精度时 0.20 mil 的测量精度要求;GPS 测量法只有在两天线间距离大于 8 m 时,才能保证有比较高的测量精度<sup>[6]</sup>,而且该方法受外界屏蔽和电磁干扰等影响较大,无法适应调炮精度的测量场合。

近年来,经纬仪检测技术因具有非接触、适应能力强、可靠性高、结构简单、成本低等特点,在现代工业检测中受到了广泛重视。工业界普遍采用多台经纬仪对空间单个点的坐标进行交会测量<sup>[7-8]</sup>。但火炮身管是个长条形圆柱体,以身管上单个点的坐标变化无法表征整根身管空间姿态的变化。因此,兵工行业开发出利用双经纬仪交会测量身管上两标记点的空间坐标,从而解算出身管指向的测量方法,并指出了影响其测量精度的一些误差因素<sup>[1]</sup>。不过由于该方法没有对系统进行综合定量分析,其测量结果的准确度欠佳;个别文献研究了双经纬仪交会测量身管指向变化时布站方式对测量精度的影响,并阐述了基于两经纬仪之间的基线长一定的前提下,寻求最优布站的具体实现过程<sup>[9]</sup>,而在实际测量过程中,都是先在

身管上扫描确定两标记点(一般自行火炮在出厂时已冲好标记点),再根据情况进行经纬仪布站。由于先确定两经纬仪之间的基线长,再根据最佳布站方式来确定身管上两标记点间的距离,在实际应用中经常会出现标记点间距离超出身管长度的情况,以致需要反复调整布站方式,操作繁琐,影响试验周期。

基于以上情况,本文研究了利用双经纬仪交会测量自行火炮调炮精度的方法,对影响其测量精度的各项因素进行了系统的定量分析,建立了综合的测量误差模型;并在此基础上,研究在预先确定炮管上两标记点的前提下,寻求经纬仪最佳布站方式以抑制其测量误差的具体实现方法,以保证测量数据的准确性和简化操作环节。

## 2 双经纬仪测量调炮精度的原理

双经纬仪交会测量法测量调炮精度的原理是利用经纬仪分别测量出火炮身管上两标记点的空间坐标,再利用空间坐标解算出身管指向,两次身管指向角度之差为火炮实际调转角度,火炮实际调转角度与火炮预期调转角度之差即为火炮调炮精度。测量时,在身管上扫描出两标记点  $P_1$  和  $P_2$ ,以两者的连线代表炮膛轴线,两经纬仪调平、对

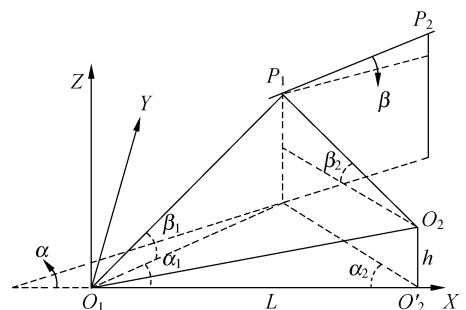


图 1 经纬仪测量坐标系原理图

Fig. 1 Measuring principle of theodolite coordinates

瞄后,建立如图 1 所示的测量坐标系。 $O_1$  为一台经纬仪的三轴中心, $O_2$  为另一台经纬仪的布站点, $O_2'$  为  $O_2$  在  $O_1$  所在水平面的投影点,以  $O_1, O_2'$  点连线为  $X$  轴,过  $O_1$  点的铅垂方向为  $Z$  轴, $Y$  轴由右手法则确定<sup>[1,7-9]</sup>。设  $P_1, P_2$  点坐标分别为  $(x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1})$  和  $(x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2})$ ,  $O_2, O_2'$  点坐标分别为  $(L, 0, h)$  和  $(L, 0, 0)$ ,  $L$  为两经纬仪的基线长,  $h$  为两经纬仪的高程差。若  $O_1$  点观测到  $P_1$  点的方位角和俯仰角分别为  $\alpha_1$  和  $\beta_1$ ,  $O_2$  点观测到  $P_1$  点的方位角和俯仰角分别为  $\alpha_2$  和  $\beta_2$ , 则  $P_1$  点坐标及两经纬仪高程差  $h$  为:

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{\sin \alpha_3 \sin \alpha_4 \sin (\alpha_1 + \alpha_2) - \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin (\alpha_3 + \alpha_4)}{\cos \alpha_3 \sin \alpha_4 \sin (\alpha_1 + \alpha_2) - \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin (\alpha_3 + \alpha_4)} \right], \quad (2)$$

$$\beta = \arctan \left[ \frac{\tan \beta_3 \sin \alpha_4 \sin (\alpha_1 + \alpha_2) - \tan \beta_1 \sin \alpha_2 \sin (\alpha_3 + \alpha_4)}{\sqrt{\sin^2 \alpha_2 \sin^2 (\alpha_3 + \alpha_4) + \sin^2 \alpha_4 \sin^2 (\alpha_1 + \alpha_2) - 2 \sin \alpha_2 \sin \alpha_4 \sin (\alpha_1 + \alpha_2) \sin (\alpha_3 + \alpha_4) \cos (\alpha_1 - \alpha_3)}} \right]. \quad (3)$$

设调转身管一定角度后,身管在测量坐标系下的方位指向为  $\alpha'$ , 俯仰指向为  $\beta'$ , 则身管相对前面状态转动的角度为:

$$\begin{cases} \Delta \alpha = \alpha' - \alpha \\ \Delta \beta = \beta' - \beta \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $\Delta \alpha$  为身管指向方位角变化量;  $\Delta \beta$  为身管指向俯仰角变化量。

由公式(2)、(3)、(4)可知,身管空间指向以及指向变化量由经纬仪的观测角来确定,因此,经纬仪观测角的测量误差直接影响到调炮精度的测量精度。

### 3 经纬仪观测角的测量误差分析

经纬仪观测身管标记点时的测角误差主要由经纬仪本身测角误差、经纬仪互瞄对准误差、操作手观瞄误差及经纬仪调平引起的误差等因素决定<sup>[1,7,9]</sup>。本文以 DT202C 电子经纬仪为例,确定经纬仪观测角的测量误差。

#### 3.1 经纬仪本身测角误差

经计量,该型经纬仪的方位测角误差  $\delta_{1\alpha}$  与俯

$$\begin{cases} x_{P_1} = \frac{\cos \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)} L \\ y_{P_1} = \frac{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)} L \\ z_{P_1} = \frac{\tan \beta_1 \sin \alpha_2}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)} L \\ h = \left( \frac{\sin \alpha_2 \operatorname{tg} \beta_1 - \sin \alpha_1 \tan \beta_2}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)} \right) L \end{cases}. \quad (1)$$

同理可以确定  $P_2$  点的空间坐标。设  $O_1$  点观测到  $P_2$  点的方位角和俯仰角分别为  $\alpha_3, \beta_3$ ,  $O_2$  点观测到  $P_2$  点的方位角和俯仰角分别为  $\alpha_4, \beta_4$ , 根据空间几何关系,可确定此时火炮身管相对图 1 所建立的测量坐标系  $O_1$ -XYZ 的指向,其方位角  $\alpha$  和俯仰角为:

仰测角误差  $\delta_{1\beta}$  均为  $2.0''$ , 即:  $\delta_{1\alpha} = \delta_{1\beta} = 2.0''$ 。

#### 3.2 经纬仪互瞄对准误差引起的测角误差

经纬仪互瞄对准误差属于随机误差,只影响方位角观测,采用试验统计的方法进行确定。将两经纬仪调平、对瞄、清零后,互瞄 20 次,根据实测数据,利用公式(5)、(6)解算其标准偏差<sup>[10]</sup>,得到经纬仪互瞄对准误差引起的方位角观测误差:  $\delta_{2\alpha} = 1.6''$ 。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (5)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

式中:  $x_i$  为每次互瞄的观测角;  $\bar{x}$  为观测角的平均值;  $n$  为互瞄次数;  $\delta$  为观测角的标准偏差。

#### 3.3 操作手观瞄误差引起的测角误差

操作手观瞄误差是随机误差,将一台经纬仪调平后,反复观瞄同一目标点 20 次,并记下每次观瞄数据。采取与确定经纬仪互瞄对准误差同样的处理过程,得到经纬仪方位观瞄误差  $\delta_{3\alpha} = 1.0''$  和俯仰观瞄误差  $\delta_{3\beta} = 2.4''$ 。

### 3.4 经纬仪调平误差引起的测角误差

DT202C 型经纬仪的调平误差  $\delta$  为  $15.0''$ , 它对方位角、俯仰角观测都会产生影响<sup>[11-12]</sup>。

经纬仪调平误差对方位角观测的影响如图 2 所示,图中,  $F$  面为倾斜面、 $T$  面为水平面,  $O_1O_2'$  为测量坐标系的  $X$  轴,  $\varphi$  为水平面内的方位角,  $\varphi'$  为倾斜面内观测的方位角,  $O_1A$  为水平面内观测方向线,  $K$  为  $A$  点在  $F$  面上投影点。

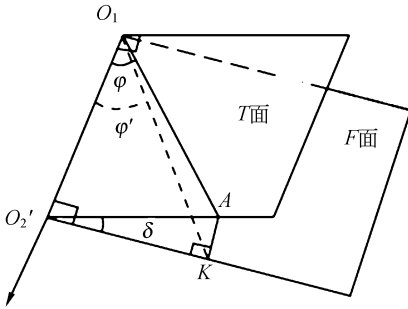


图 2 经纬仪调平误差对方位角观测的影响示意图  
Fig. 2 Impact of theodolite leveling error on azimuth observation

根据几何关系得到经纬仪调平误差引起的方位角观测误差  $\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = \arctan(\tan \varphi \cos \delta) - \varphi$ 。

利用 matlab 编程计算,得到经纬仪调平误差引起的方位角观测误差随方位角大小变化如图 3 所示。 $\Delta\varphi$  在  $\varphi = \pi/4$  时取极大值,大小为  $2.7 \times 10^{-4}''$ ,因此,经纬仪调平误差引起的最大方位角观测误差为: $\delta_{4\alpha} = 2.7 \times 10^{-4}''$ ,是一个极小的量,基本上可以忽略不计。

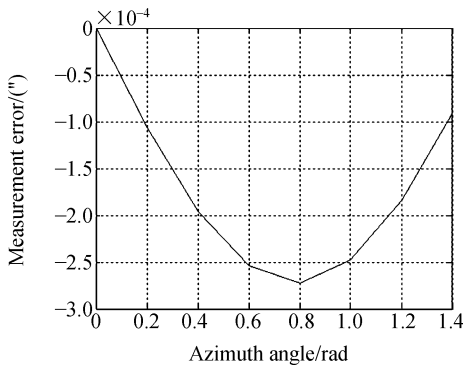


图 3 方位角观测误差随方位角大小变化的曲线图  
Fig. 3 Azimuth surveying error vs. azimuth change

经纬仪调平误差对俯仰角观测的影响如图 4 所示,  $\gamma$  为水平面内的俯仰角,  $\gamma'$  为倾斜面内观测的俯仰角,铅垂面  $O_1KP$  为俯仰角观测方向面,由图 4 可以看出:俯仰角观测误差  $\Delta\gamma = \gamma' - \gamma = \delta'$ 。

很显然  $\delta' \leq \delta = 15.0''$ ,经纬仪倾斜方向一定时,经纬仪不同的观测方向有不同的  $\delta'$  值,当经纬仪倾斜方向与观测方向一致时,  $\delta' = \delta$  成立,因此,经纬仪调平误差引起的最大俯仰角观测误差为: $\delta_{4\beta} = 15.0''$ 。

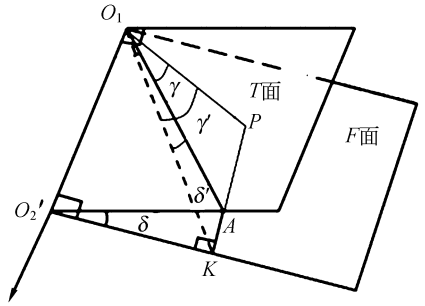


图 4 经纬仪调平误差对俯仰角观测的影响示意图  
Fig. 4 Impact of theodolite leveling error on pitch angle observation

### 3.5 观测角总测量误差

根据误差合成原理<sup>[10]</sup>,可以确定经纬仪方位观测角最大测量误差  $\delta_\alpha$  为:

$$\delta_\alpha = \sqrt{\delta_{1\alpha}^2 + \delta_{2\alpha}^2 + \delta_{3\alpha}^2 + \delta_{4\alpha}^2} = 2.7'' = 0.01 \text{ mil} .$$

经纬仪俯仰观测角最大测量误差  $\delta_\beta$  为:

$$\delta_\beta = \sqrt{\delta_{1\beta}^2 + \delta_{3\beta}^2 + \delta_{4\beta}^2} = 15.3'' = 0.07 \text{ mil} .$$

从中可以看出,经纬仪俯仰观测角的测量误差要远大于方位观测角的。

## 4 调炮精度测量误差分析

将公式(2)、(3)对方位角和俯仰角分别求偏导数,可得到某一状态下身管指向的方位角和俯仰角测量误差函数分别如公式(7)、(8)所示:

$$f_1 = f(\alpha_i, \delta_\alpha) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial(\Delta\alpha)}{\partial\alpha_i} \right)^2} \cdot \delta_\alpha, \quad (7)$$

$$f_2 = f(\alpha_i, \beta_i, \delta_\alpha, \delta_\beta) = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial\alpha_i} \right)^2 \right] \delta_\alpha^2 + \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial(\Delta\beta)}{\partial\beta_i} \right)^2 \right] \delta_\beta^2} . \quad (8)$$

由于公式(7)、(8)得到的是在测量坐标系下,

测量一次身管指向的误差,而火炮身管实际调转角度是身管调转后指向与其初始指向的差值,包含确定两次身管指向的测量误差,因此根据误差合成原理,可得到身管指向的方位角变化量测量误差函数为:

$$f_a = \sqrt{f_{11}^2 + f_{12}^2}, \quad (9)$$

式中:  $f_{11}, f_{12}$  为两次测量的方位角测量误差。

身管指向的俯仰角变化量测量误差函数为:

$$f_\beta = \sqrt{f_{21}^2 + f_{22}^2}, \quad (10)$$

式中:  $f_{21}, f_{22}$  为两次测量的俯仰角测量误差。

由公式(7)、(8)、(9)、(10)可知,在调炮精度测量过程中,调转角度是经纬仪观测角的函数,其误差函数也是经纬仪观测角的函数,不同的观测角带来不同的测量误差。在火炮状态不变的情况下,随着经纬仪相对火炮布站位置的不同,其观测角会发生变化,因此调炮精度的测量结果会有一定差别,要达到最优测量精度,必须寻求经纬仪的最佳布站方式。

## 5 经纬仪最佳布站与遗传算法寻优

搜寻经纬仪最佳布站的过程,就是要在被测量状态不变的情况下,在某一区域内,在已确定身管上两标记点的情况下,找到一组观测角  $(\alpha_i, \beta_i)$ ,使得身管调转角度的测量精度最高。由于很难找到一组观测角  $(\alpha_i, \beta_i)$ ,使得方位角与俯仰角测量精度同时达到最高,因此,以总的角度测量精度  $f_{\text{total}}$  来衡量布站效果,根据误差合成原理,  $f_{\text{总}}$  与  $f_a, f_\beta$  的关系可用公式(11)表示:

$$f_{\text{total}} = \sqrt{f_a^2 + f_\beta^2}, \quad (11)$$

约束公式(11)中的  $f_a$  与  $f_\beta$ , 使  $f_a < 0.20$  mil,  $f_\beta < 0.20$  mil, 这是为了保证每个方向上的测量精度都能满足指标要求,是后面寻优过程中很重要的一个约束条件。由公式(9)、(10)可以约定:  $f_{11}, f_{12}, f_{21}$  和  $f_{22}$  均小于  $0.2/\sqrt{2} = 0.14$  mil。

找到一组观测角  $(\alpha_i, \beta_i)$  使得  $f_{\text{total}}$  最小,且测量角满足一定的约束条件  $(\pi > \alpha_1 > \alpha_3 > 0, \pi > \alpha_4 > \alpha_2 > 0, 0 < \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 < \frac{\pi}{2}, \pi > \alpha_1 + \alpha_2, \alpha_3 + \alpha_4 > 0)$  时,将观测角  $(\alpha_i, \beta_i)$  代入公式(1),可得到两标记点  $P_1, P_2$  的空间坐标关于  $L$  的函数。由于两标记点的距离  $d$  为:

$$d = \sqrt{(x_{P_1} - x_{P_2})^2 + (y_{P_1} - y_{P_2})^2 + (z_{P_1} - z_{P_2})^2}. \quad (12)$$

将  $P_1, P_2$  的空间坐标关于  $L$  的函数代入公式(12),由于身管上两标记点距离  $d$  已知,因此可确定两经纬仪基线长  $L$ ,再根据公式(1)可得到高程差  $h$  与  $P_1, P_2$  的空间坐标,因此可计算出  $O_1P_1, O_2P_2, O_2P_1$  与  $O_2P_2$  的距离,从而确定两经纬仪的最佳布站位置。

寻求经纬仪最佳布站点问题实际上是寻找一组观测角  $(\alpha_i, \beta_i)$  使得  $f_{\text{total}}$  最小的寻优问题,是一个复杂的非线性问题,因此采用遗传算法寻求经纬仪最佳布站点。寻优过程如图 5 所示,主要包括在规定的范围内随机生成初始种群、选择、交叉和变异等步骤<sup>[13-14]</sup>。

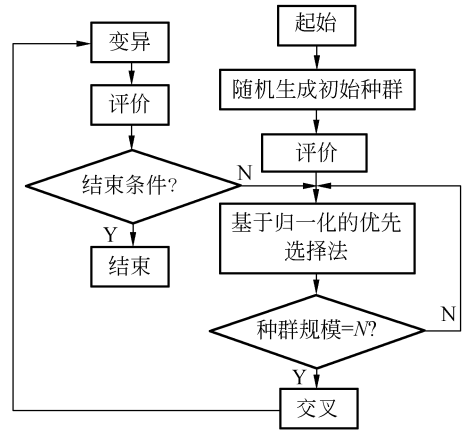


图 5 遗传算法寻优流程图

Fig. 5 Flow chart of optimization process using genetic algorithm

寻优过程的目标函数是  $f_{\text{total}}$ , 要使  $f_{\text{total}}$  达到最小;而遗传算法是使其适应度函数  $f$  慢慢达到最大,因此,取适应度函数  $f = -f_{\text{total}}$ , 这样  $f$  趋于最大时,  $f_{\text{total}}$  趋于最小,此时对应的测量角  $(\alpha_i, \beta_i)$  即为要寻求的最佳测量角。设初始种群  $N = 30$ , 最大进化代数  $T = 1\ 000$ , 取交叉概率  $p_c = 0.6$ , 变异概率  $p_m = 0.08$ 。以基于归一化的优先选择法进行个体选择,利用 matlab 编程运算,两标记点的距离  $d = 2\ 178$  mm 时,得到某次运行结果为:  $\alpha_1 = 0.861\ 7$  rad,  $\alpha_2 = 0.607\ 9$  rad,  $\alpha_3 = 0.629\ 2$  rad,  $\alpha_4 = 0.970\ 6$  rad,  $\beta_1 = 0.103\ 6$  rad,  $\beta_2 = 0.122\ 8$  rad,  $\beta_3 = 0.145\ 8$  rad,  $\beta_4 = 0.257\ 9$  rad,  $O_1P_1 = 4\ 114$  mm,  $O_1P_2 = 5\ 918$  mm,  $O_2P_1 = 5\ 480$  mm,  $O_2P_2 = 4\ 285$  mm,  $O_1O_2' = 7\ 014$  mm。

由于遗传算法生成初始种群的随机性,每次运行得到的结果不一样,即存在多种布站方式能达到最优测量精度,可以根据实际情况选择最佳布站方式。

### 6 对比试验验证

在某型自行榴弹炮上进行了调炮精度测量对比试验,先按上述方法寻求到经纬仪最佳布站点,并以此布站,记录经纬仪观测角;再凭经验将经纬仪分别按随机布站 1(两经纬仪距炮约 8 m,基线长约为 8 m)和随机布站 2(两经纬仪距炮约 15 m、基线长约为 8 m)进行测量,计算在不同布站方式下测量结果与火炮实际装定角度的偏差,结果如表 1 所示。从中可以看出,在最佳布站方式下的测量结果更接近于实际装定值。将身管在不同指向状态下的经纬仪观测值代入公式(7)、(9),可计算出每次测量身管指向的方位角变化量的测量误差;同样利用公式(8)、(10)计算出每次测量身管指向的俯仰角变化量的测量误差,具体结果见表 2 所示。从表 2 中数据可知,在最佳布站方式下的调炮精度测量误差控制在 0.20 mil

表 1 不同布站方式下的调炮精度试验对比数据

Tab.1 Contrast data between the different theodolite dispositions in test for gun rotated accuracy (mil)

实际装定 诸元变化量		方位角测量结果与 装定量的偏差			俯仰角测量结果与 装定量的偏差		
方位	表尺	最佳 布站	随机 布站 1	随机 布站 2	最佳 布站	随机 布站 1	随机 布站 2
0-00	2-00	0.16	0.23	2.51	0.13	0.10	1.36
0-00	4-00	0.15	0.40	2.72	0.12	0.14	1.53
0-00	6-00	0.18	0.16	2.27	0.20	0.49	1.95
0-00	8-00	0.19	0.56	3.90	0.15	0.36	1.87

### 参考文献:

[1] 罗鸿飞,张英堂,任国全,等.基于空间坐标解算的火炮调炮精度检测方法研究[J].火炮发射与控制学报,2007(3):50-52.  
 LUO H F, ZHAN Y T, REN G Q, et al.. Research on measuring method of gun rotated accuracy

以内,要明显优于其它两种方式下的测量精度,而在随机布站情况下,只有个别角度变化量的测量误差控制在 0.20 mil 以内,这说明采用最佳布站方式能提高测量结果的准确度。

表 2 不同布站方式下的调炮精度测量误差

Tab.2 Measuring error of gun rotated accuracy in different theodolite dispositions (mil)

实际装定 诸元变化量		方位角变化量 测量误差			俯仰角变化量 测量误差		
方位	表尺	最佳 布站	随机 布站 1	随机 布站 2	最佳 布站	随机 布站 1	随机 布站 2
0-00	2-00	0.08	0.21	2.43	0.10	0.15	1.34
0-00	4-00	0.09	0.34	2.65	0.13	0.15	1.45
0-00	6-00	0.09	0.10	2.23	0.14	0.41	1.90
0-00	8-00	0.10	0.49	3.82	0.13	0.29	1.82

### 7 结 论

本文根据双经纬仪交会测量原理,建立了测量自行火炮调炮精度的空间解算模型,对影响其测量精度的各项因素进行了系统的定量分析,建立了综合的测量误差模型;在此基础上,研究了在预先确定炮管上两标记点的前提下,寻求经纬仪最佳布站方式以抑制其测量误差的具体实现方法,并采用遗传算法进行了寻优解算。理论计算和试验结果表明:通过经纬仪合理布站,可以使调炮精度的测量误差控制在 0.20 mil 以内。同时得出以下结论:经纬仪交会法测量自行火炮调炮精度的测量误差是由经纬仪观测角的测量误差引起的;采用经纬仪最佳布站方式可以提高测量精度;在试验过程中经纬仪要严格调平,以抑制俯仰角观测误差。对不能采用最佳布站方式的试验环境,建议采用文中推导的误差公式对试验数据进行测量精度确认。

based on spatial coordinate algorithm[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2007(3):50-52. (in Chinese)  
 [2] 赫赤,赵克定,许宏光,等.炮控系统性能试验中角位移量的几种测量方法[J].火炮与指挥控制,2004,29(6):103-106.  
 HE CH, ZHAO K D, XU H G, et al.. Several measurement methods of angle displacement in char-

- acteristics test of gun control system [J]. *Fire Control & Command Control*, 2004, 29(6):103-106. (in Chinese)
- [3] 秦嘉, 卢志刚, 李勇, 等. 坦克火控系统稳定精度图像测试分析方法[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(10):175-179.
- QIN J, LU ZH G, LI Y, *et al.*. Method of testing and analyzing the dynamic stabilization precision in tank fire control system based on image processing [J]. *Fire Control and Command Control*, 2009, 34(10):175-179. (in Chinese)
- [4] 王春忠, 杨忠国, 荣明, 等. 基于陀螺仪的坦克炮控稳定精度检测仪设计[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(1):85-87.
- WANG CH ZH, YANG ZH G, RONG M, *et al.*. Design of test instrument for stabilization accuracy of tank gun control system using gyroscope [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(1):85-87. (in Chinese)
- [5] 裴益轩, 霍文妮, 王光华, 等. 炮塔方位角测量装置应用[J]. *火炮发射与控制学报*, 2006(3):27-29.
- PEI Y X, HUO W N, WANG G H, *et al.*. Application of turret azimuth angle measuring device [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2006(3):27-29. (in Chinese)
- [6] 王静, 王世凯. GPS 在自行火炮中的应用[J]. *火炮发射与控制学报*, 2005(4):36-38.
- WANG J, WANG SH K. Application of GPS in self-propelled gun [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2005(4):36-38. (in Chinese)
- [7] 刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1822-1830.
- LIU ZH CH, GUO L H, GUAN W C, *et al.*. Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1822-1830. (in Chinese)
- [8] 张滋黎, 郝继贵, 耿娜, 等. 双经纬仪三维坐标测量系统设计[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(5):660-664.
- ZHANG Z L, ZHU J G, GENG N, *et al.*. The design of double-theodolite 3D coordinate measurement system [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(5):660-664. (in Chinese)
- [9] 董起顺, 姜涛, 苏成志. 火炮复瞄精度测试中经纬仪的最佳布站研究[J]. *兵工学报*, 2007, 8(5):513-515.
- DONG Q SH, JIAN G T, SU CH ZH. Theodolite optimal disposition in artillery duplicate-aim precision detection [J]. *Acta Armamentaria*, 2007, 28(5):513-515. (in Chinese)
- [10] 钱政. 测试误差分析与数据处理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- QIAN ZH. *The Testing Error Analysis and Data Processing* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 姜晨光. 经纬仪整平误差对水平角观测影响机理的研究[J]. *测绘工程*, 1999, 8(4):48-51.
- JIANG CH G. A study on theodolite setting error influence upon the horizontal angle surveying [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 1999, 8(4):48-51. (in Chinese)
- [12] 姜晨光. 经纬仪整平误差对竖直角观测的影响 [J]. *北京测绘*, 1999(1):32-35.
- JIANG CH G. Theodolite setting error influence upon the vertical angle surveying [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 1999(1):32-35. (in Chinese)
- [13] 王雪. 测试智能信息处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- WANG X. *The Processing on Aptitude Information for Testing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 王丽萍, 张立超, 何锋贇, 等. 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1020-1025.
- WANG L P, ZHANG L CH, HE F Y, *et al.*. Design of aspheric mirror for panoramic imaging system using multi-population genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1020-1025. (in Chinese)

## 作者简介:



孙泽林(1973—),男,湖南娄底人,博士生,高级工程师,1997年于湘潭大学获得学士学位,2005年于军械工程学院获得硕士学位,主要从事火炮测试技术及仪器设备等方面的研究。E-mail: sunzelin73@126.com



翟唤春(1973—),男,陕西华阴人,高级工程师,1994年于西安工业学院获得学士学位,2004年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事环境试验、环境模拟设备、自动控制等方面的研究。E-mail: zhai\_huanchun@163.com

## 导师简介:



王昭(1964—),女,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,1998年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光电测量、光学信息处理、光学精密仪器等方面的研究。E-mail: wangzhao@mail.xjtu.edu.cn

## ●下期预告

## 轻型碳化硅质反射镜坯体制造工艺

赵文兴,张舸,赵汝成,包建勋

(中国科学院 长春光机学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

研究了轻型碳化硅质反射镜坯体制造技术,讨论了制备工艺中的关键环节。发明了一种先进的消失模技术,采用该技术能够制备得到性能更加优异的背部半封闭式轻量化结构;研究了素坯凝胶注模成型过程中高固相含量低粘度 SiC 浆料的配置、浆料固化时间控制及大尺寸复杂形状 SiC 湿坯的液体干燥工艺等;坯体烧结过程,测试分析了素坯的热失重与差热曲线,制定了最佳的烧结工艺。通过对以上关键技术的研究,制备得到了不同形状与轻量化结构形式的单块轻型 SiC 坯体,最大尺寸为 1 100 mm×820 mm。