

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209184

全站仪测量自行火炮身管指向的方法改进

程泽俊¹,滕红智²,王怀光¹,石志勇¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区车辆工程教研室 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军32180部队 北京 100072)

摘要: 在实现自行火炮身管指向测量的各类方法中,全站仪测量法综合性能表现良好。但传统全站仪测量身管指向方法存在缺乏北向基准、存在轴线模拟误差的问题,因此提出了一种基于旋转矩阵的全站仪测量自行火炮身管真实指向方法。然后,利用欧拉-罗德里格斯公式推导出标记点连线与真实轴线指向的偏差公式,进而得到了真实指向相对于各观测量的不确定度模型。随后,为了减小测量方法的误差,研究了全站仪最佳布站位置,并基于蒙特卡罗方法原理进行寻优解算。最后,进行了模拟身管实装实验,实验结果表明,最佳布站方式下的测量不确定度在0.1以内,验证了本方法的可行性和准确性,抑制了由于布站方式引起的测量误差。

关键词: 全站仪;身管指向;布站方式;蒙特卡罗;测量技术

中图分类号: TH761 TJ306+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Improvement of the method for measuring self-propelled artillery barrel orientation with total station

Cheng Zejun¹, Teng Hongzhi², Wang Huaiguang¹, Shi Zhiyong¹

(1. Department of Vehicle and Electronic Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. The 32180 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

Abstract: Among the various methods to realize the self-propelled gun barrel orientation measurement, the total station measurement method has good comprehensive performance. However, the traditional methods of measuring barrel orientation with the total station have the problems of lack of north reference and axis simulation error. Therefore, a method based on a rotation matrix to measure the accurate orientation of the self-propelled artillery barrel with a total station is proposed. Then, the Euler-Rodrigues formula is used to deduce the deviation formula between the line connecting the marked points and the accurate axis orientation. In this way, the uncertainty model of the accurate orientation relative to each observation could be achieved. Then, to reduce the error of the measurement method, the optimal location of the total station is studied, and the optimal solution is implemented based on the principle of the Monte Carlo method. Finally, a simulated barrel installation experiment is carried out. Experimental results show that the measurement uncertainty under the optimal station layout scheme is within 0.1, which evaluate the feasibility and accuracy of this method and suppressed the measurement error caused by the station layout scheme.

Keywords: total station; barrel orientation; station arrangement; Monte Carlo method; measurement technology

0 引言

自行火炮是我军列装的主要压制兵器,随着军事科技的不断发展,现代战争对自行火炮的自主作战能力和精确打击能力提出了更高要求^[1]。而自行火炮的打击精度主要依赖其身管指向精度,由于炮塔绕回转轴和身管绕炮耳轴转动过程中存在外部干扰、动力学耦合、传动

轴摩擦等问题,自行火炮实际身管指向总是存在一定的偏差,影响身管指向精度^[2]。因此,在维修后、射击前对自行火炮身管指向进行测量尤为重要。

目前实现自行火炮身管指向测量的主流方案是双经纬仪测量^[3-4]和全站仪测量^[5-7]。虽然两种方法均能在一定程度上实现较高精度测量,但都存在一定的缺陷。例如,实现双经纬仪测量方案所需人力、物力成本过高,操作不够简便,实现一次测量需要花费大量时间^[8-9]。全站

仪测量身管指向的方法中,通常以“一点靠近炮口、一点靠近炮尾、两点尽量与炮膛轴线保持平行”的方案选择身管标记点,但由于自行火炮身管受自重弯曲、热弯曲等情况的影响^[10],导致选择的标记点连线无法保证与炮膛轴线保持平行。此外,两种主流方法均存在缺乏北向基准问题,导致现有测量方法仅能测量出身管的相对指向,即自行火炮身管调整后的位置相对于初始位置的方位、高低指向变化。自行火炮作为压制兵器,往往采用间接瞄准的方式射击,往往难以精确获取敌对目标位置与自行火炮位置的相对关系,因此仅测量相对指向不利于自行火炮的精确瞄准打击。

因此,针对传统全站仪测量身管指向方法过程中缺乏北向基准、轴线模拟存在误差的问题,本文提出了一种改进的全站仪测量自行火炮身管真实指向方法,随后分析改进方法的测量不确定度模型,并基于蒙特卡罗原理对全站仪设站点位进行布站优化以抑制该测量方法的误差。最后进行模拟身管的实装实验验证方法的可行性和准确性。

1 测量系统组成

本方案采用的测量系统主要由北京理工雷科公司生产的 LK-NAV/Z-502 型北斗便携定位定向终端、南方测绘公司生产的 NTS-391 型全站仪以及一台手提电脑组成。这其中,定位定向终端主要用于确定测量区域的方向基准,全站仪主要用于测量待测点位的相应参数,手提电脑主要对终端及全站仪传输的数据进行处理、解算。部分测量设备如图 1 所示。



图 1 测量系统组成设备

Fig. 1 The equipment for the measurement system

2 改进单全站仪测量身管指向方法原理

改进后的全站仪测量身管指向方法的原理如图 2 所示,首先利用 RNSS 定向仪确定测量区域的真北指向,随后通过全站仪对 RNSS 定向仪的主、副站进行观瞄及角度解算,确定全站仪观测中心处真北指向,以全站仪观测中心 S 点为原点,以真北指向为 y 轴,以全站仪竖轴为 z 轴,通过右手法则确定 x 轴,建立绝对测量坐标系 $S - xyz$ 。建立绝对测量坐标系 $S - xyz$ 后,将自行火炮身

管调至水平,在身管上设置两标记点 A, B ,尽可能保证两标记点的连线(简称标线)与炮膛轴线保持平行,以标线替代实际轴线。随后以标记点 B 为坐标原点,以平行于身管轴线的直线为坐标 x' 轴, B 点与炮口处身管轴线端点的连线为 y' 轴,通过右手法则确定 z' 轴,建立炮口坐标系 $B - x'y'z'$ 。随后利用全站仪分别观瞄两标记点,若观测 A 点得到的斜距、方位角和俯仰角分别为 L_1, α_1, β_1 ,则标记点坐标 $A(x_A, y_A, z_A)$ 可表示为^[11]:

$$\begin{cases} x_A = L_1 \cdot \cos\beta_1 \cdot \cos\alpha_1 \\ y_A = L_1 \cdot \cos\beta_1 \cdot \sin\alpha_1 \\ z_A = L_1 \cdot \sin\beta_1 \end{cases} \quad (1)$$

同理可以确定 B 点的空间坐标 $B(x_B, y_B, z_B)$ 。随后测得标记点 A, B 处的身管半径分别为 R_A, R_B ,根据式(2)标定标记点 A 在自行火炮身管上的固定位置 $A'(x_{A'}, y_{A'}, z_{A'})$:

$$\begin{cases} z_{A'} = z_A - z_B \\ (R_B - y_{A'})^2 + z_{A'}^2 = R_A^2 \\ (x_{A'})^2 + (y_{A'})^2 + (z_{A'})^2 = (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 \end{cases} \quad (2)$$

至此完成测量前的准备工作。随后将身管调至测量姿态,利用全站仪观瞄两标记点,解算得到测量姿态下两标记点坐标分别为 $A(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}), B(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ 。根据得到标记点 A, B 的坐标,根据坐标系间的空间几何关系,可确定此时炮口坐标系 $B - x'y'z'$ 转换为站心坐标系 $S - xyz$ 的旋转矩阵 C_B^S ,站心坐标系 $S - xyz$ 可认为是炮口坐标系 $B - x'y'z'$ 以 z' 轴为轴旋转 ε 角后,再以 y' 轴为轴旋转 γ 角得到,因此旋转矩阵 C_B^S 可表示为 $C_B^S = R_y^T(\gamma) \cdot R_z^T(\varepsilon)$ 。代入前面测量得到的 $A(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}), B(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$,则标线 AB 在测量绝对坐标系 $S - xyz$ 下的单位方向向量可以表示为:

$$C_B^S \cdot \begin{bmatrix} \frac{x_{A_1} - x_{B_1}}{\sqrt{(x_{A_1} - x_{B_1})^2 + (y_{A_1} - y_{B_1})^2 + (z_{A_1} - z_{B_1})^2}} \\ \frac{y_{A_1} - y_{B_1}}{\sqrt{(x_{A_1} - x_{B_1})^2 + (y_{A_1} - y_{B_1})^2 + (z_{A_1} - z_{B_1})^2}} \\ \frac{z_{A_1} - z_{B_1}}{\sqrt{(x_{A_1} - x_{B_1})^2 + (y_{A_1} - y_{B_1})^2 + (z_{A_1} - z_{B_1})^2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{A'}}{\sqrt{(x_{A'})^2 + (y_{A'})^2 + (z_{A'})^2}} \\ \frac{y_{A'}}{\sqrt{(x_{A'})^2 + (y_{A'})^2 + (z_{A'})^2}} \\ \frac{z_{A'}}{\sqrt{(x_{A'})^2 + (y_{A'})^2 + (z_{A'})^2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $A'(x_{A'}, y_{A'}, z_{A'})$ 、 $A(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 均为已知, 可以根据式(3) 解出旋转矩阵 C_B^S 的具体形式。

自行火炮身管轴线指向的单位向量在炮口坐标系 $B-x'y'z'$ 中表示为 $(1, 0, 0)^T$, 通过解算出的旋转矩阵 C_B^S , 可以得到身管轴线在大地坐标系 $S-xyz$ 下的指向 $\vec{n}_x = C_B^S \cdot [1 \ 0 \ 0]^T = [\cos \varepsilon \cos \gamma \ \sin \varepsilon \cos \gamma \ \sin \gamma]^T$ 。由此可得到自行火炮身管在测量坐标系下某测量位姿的方位角 ε 、高低角 γ 。

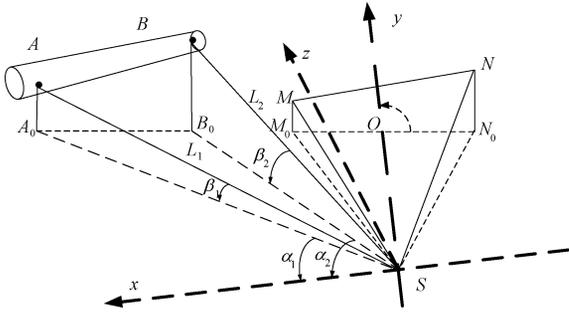


图2 测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measuring principle

由此看出, 自行火炮身管指向由全站仪对标记点的观测距、观测角来确定, 因此全站仪观瞄的测量误差对自行火炮身管指向的解算影响较大。

3 测量方案的误差模型建立

全站仪观瞄自行火炮身管标记点时的测量误差主要有全站仪本身测角误差、测距误差、全站仪整平引起的误差、操作人员观瞄误差、方位基准角引入误差及全站仪布站位置变化引起的误差。全站仪本身测角、测距误差和方位基准角引入误差属于系统误差, 无法进行修正; 全站

$$\gamma_{AB} = \arctan \frac{z_{B'} - z_{A'}}{\sqrt{(y_{B'} - y_{A'})^2 + (x_{B'} - x_{A'})^2}} =$$

$$\arctan \frac{L_B \cdot \sin \beta_B - L_A \cdot \sin \beta_A}{\sqrt{(L_B \cdot \cos \beta_B \cdot \sin \alpha_B - L_A \cdot \cos \beta_A \cdot \sin \alpha_A)^2 + (L_B \cdot \cos \beta_B \cdot \cos \alpha_B - L_A \cdot \cos \beta_A \cdot \cos \alpha_A)^2}} \quad (5)$$

得到某测量姿态下标记点连线 AB 位于测量坐标系下的指向后, 需得到标记点连线与真实身管指向间的关系。假定某次测量过程中, 标线 AB 在炮口坐标系 $B-x'y'z'$ 与轴线 $O'O$ 的位置关系如图4所示, 其中轴线 $O'O$ 的指向可以用单位向量 $(1, 0, 0)^T$ 表示, 因此确定向量 \vec{AB} 与向量 $\vec{O'O}$ 间的关系可转化为确定向量 \vec{AB} 与 x' 轴正半轴的关系。而在炮口坐标系中, x' 轴正半轴指向可表示为单位向量 $(1, 0, 0)^T$, 向量 \vec{AB} 做单位化处理后可看做是由单位向量 $(1, 0, 0)^T$ 先以 z' 轴为轴旋转 $\angle DCB$ 后再以

仪整平引起的误差可通过全站仪的电子补偿器进行补偿; 操作人员观瞄误差可以通过预先观瞄标定进行补偿。显然, 除系统误差及布站位置变化引起的误差外, 其余测量误差均可通过一定方式进行补偿, 为了提高身管指向测量精度, 必须减小由布站方案引起的测量误差, 尽可能地达到最优测量精度, 因此必须寻找测量过程中全站仪的最优布站方案^[12]。对布站方案进行寻优前, 需确定测量姿态下标记点连线在测量坐标系 $S-xyz$ 下指向的表达式, 由于第2节中所述方法涉及旋转矩阵, 而带矩阵进行解算流程过于复杂。因此根据第2节中所述方法, 利用回归分析, 得到标记点连线与真实身管指向间的近似关系, 从而得到真实身管指向关于各观测量的表达式。随后, 确定全站仪布站位置与各观测量的解析关系, 并推导出方位角、高低角测量误差与观测量之间的数学关系, 间接反映全站仪布站位置对真实身管指向方位角、高低角解算的影响。

3.1 真实轴线指向与观测量解析关系

将自行火炮身管调整至某一测量姿态, 测量示意图如图3所示。图3中, 坐标原点 S 为全站仪的三轴中心, 坐标系 $S-xyz$ 为按第2节中所述方法建立的绝对测量坐标系。 A 、 B 为身管上扫描出的标记点, A' 、 B' 分别为 A 、 B 在 xSy 平面上的投影点。假设 S 对 A 的观测数据为: 水平角 α_A 、俯仰角 β_A 、斜距 L_A , 对 B 的观测数据为水平角 α_B 、俯仰角 β_B 、斜距 L_B 。根据空间几何关系, 可以解算出某测量姿态下标记点连线 AB 位于测量坐标系下的指向, 指向主要由方位角 ε_{AB} 、高低角 γ_{AB} 表示, 参考式(1)可表示为:

$$\varepsilon_{AB} = \arctan \frac{y_{B'} - y_{A'}}{x_{B'} - x_{A'}} = \arctan \frac{L_B \cdot \cos \beta_B \cdot \sin \alpha_B - L_A \cdot \cos \beta_A \cdot \sin \alpha_A}{L_B \cdot \cos \beta_B \cdot \cos \alpha_B - L_A \cdot \cos \beta_A \cdot \cos \alpha_A} \quad (4)$$

y' 轴为轴旋转 $\angle ACB$ 得到, 其中绕两轴旋转的方向由标记点 A 在炮口坐标系下的位置决定, 则当自行火炮身管处于方位角为 ε 、高低角为 γ 的测量指向时, 单位化后的向量 \vec{AB} 在测量坐标系 $S-xyz$ 中的指向可以表示为:

$$\vec{k} = R_y \cdot R_z \cdot \vec{n}_x \quad (6)$$

其中, 单位向量 \vec{k} 代表单位化后的向量 \vec{AB} , 矩阵 R_y 、 R_z 分别为向量 \vec{n}_x 绕 y' 轴、 z' 轴旋转时形成的旋转矩阵, 参考欧拉-罗德里格斯公式^[13-14] 如式(7)所示。

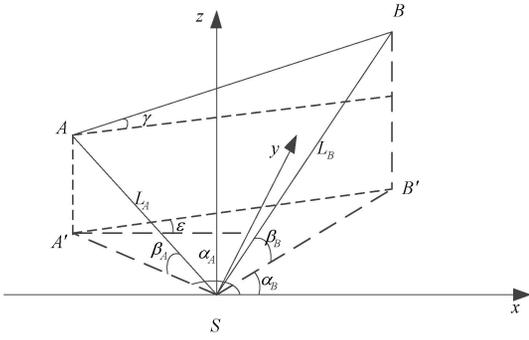


图3 测量姿态下测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement under measurement attitude

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \sin\theta \cdot \mathbf{K} + (1 - \cos\theta) \cdot \mathbf{K}^2 \quad (7)$$

其中,矩阵 \mathbf{I} 为单位矩阵, θ 为旋转的角度,矩阵 \mathbf{K} 为标准反对称矩阵。

考虑到欧拉-罗德里格斯公式的非奇异性及实际自行火炮身管情况, $\theta_{y'}$ 、 $\theta_{z'}$ 可按小角度的情况做近似化处理,并忽略高阶三角函数项^[3]。于是单位向量 \vec{k} 在测量坐标系 $S - xyz$ 中的指向可以写成:

$$\vec{k} = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon \cos \gamma - \sin \theta_{z'} \sin \varepsilon + \sin \theta_{y'} \cos \varepsilon \sin \gamma \\ \sin \varepsilon \cos \gamma + \sin \theta_{z'} \cos \varepsilon + \sin \theta_{y'} \sin \varepsilon \sin \gamma \\ \sin \gamma + \sin \theta_{y'} \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (8)$$

由此,在测量坐标系 $S - xyz$ 下标记点连线与真实身管指向间的关系如式(9)。根据式(9),真实轴线指向的方位角、高低角可以表示为式(10):

$$\begin{cases} \cos \varepsilon_{AB} \cos \gamma_{AB} = \cos \varepsilon \cos \gamma - \sin \theta_{z'} \sin \varepsilon + \sin \theta_{y'} \cos \varepsilon \sin \gamma \\ \sin \gamma_{AB} = \sin \gamma + \sin \theta_{y'} \cos \gamma \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_{AB} \pm \Delta \varepsilon \\ \gamma = \gamma_{AB} \pm \Delta \gamma \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \gamma$ 分别是标线与真实轴线的方位角、高低角偏差。根据式(10),在标记点位置不改变的情况下, $\Delta \varepsilon$ 是关于 ε 的隐函数, $\Delta \gamma$ 是关于 γ 的隐函数,解析关系均无法用具体表达式表出,但可以通过非线性回归分析得到偏差 $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \gamma$ 分别关于 ε_{AB} 、 γ_{AB} 的函数,在标线指向不变即 ε_{AB} 、 γ_{AB} 不变时,可以得到该姿态下的偏差 $\Delta \varepsilon$ 、 $\Delta \gamma$,得到真实轴线指向。

3.2 各观测量关于布站位置的解析关系

为了寻找测量过程中全站仪的最优布站方案,需建立全站仪布站位置与观瞄身管标记点获取的观测量 α_A 、 α_B 、 β_A 、 β_B 、 L_A 、 L_B 的解析关系,并根据解析关系解算出当前布站位置下全站仪对标记点的观测值,计算全站仪在

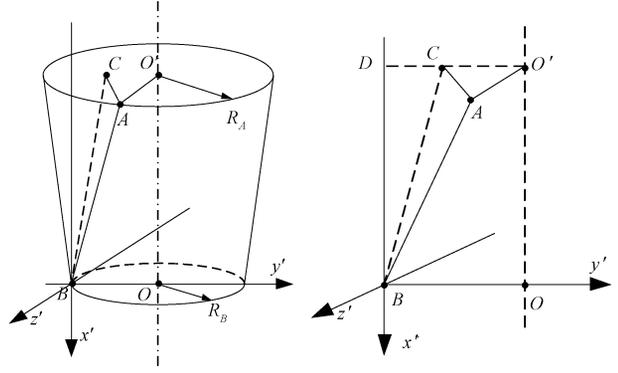


图4 标线与轴线位置关系

Fig. 4 The relationship between the marking line and the axis

不同布站点位的测试误差。解析关系如图5所示, S 点为全站仪观测中心, $S - xyz$ 为已建立的测量坐标系, A 、 B 为设置的身管标记点, A' 、 B' 为 A 、 B 在平面 xSy 上的垂直投影点。假定标记点 A 、 B 连线长为 p_l , 全站仪观瞄中心 S 与炮管近端的垂直距离为 k , 炮管尾端十字线与全站仪观测中心高差为 h , l 为布站点沿 x 轴移动的距离, 自行火炮身管在该测量姿态下的高低角为 γ 、方位角为 ε 。假设全站仪初始设站点正对身管正中, 布站点位移动至 x 轴正半轴时 l 取正值, 反之取负值。由此可以得到观测量 α_A 、 α_B 、 β_A 、 β_B 、 L_A 、 L_B 与已知参数的关系表达式(其中 α_A 、 α_B 均为与 x 轴正向夹角), 具体表达式形式如式(11) ~ (16) 所示。

$$\alpha_A = \begin{cases} \arctan \frac{k}{\left| -\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} - l \right|}, & l \leq -\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} \\ \pi - \arctan \frac{k}{\left| -\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} - l \right|}, & l > -\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\alpha_B = \begin{cases} \arctan \frac{k + p_l \cos \gamma \sin \varepsilon}{\left| \frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} - l \right|}, & l \leq -\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} \\ \pi - \arctan \frac{k + p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{\left| \frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} - l \right|}, & l > -\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta_A = \arctan \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} + l\right)^2 + k^2}} \quad (13)$$

$$\beta_B = \arctan \frac{h + p_l \sin \gamma}{\sqrt{\left(\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} - l\right)^2 + (k + p_l \cos \gamma \sin \varepsilon)^2}} \quad (14)$$

$$L_A = \sqrt{\left(\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} + l\right)^2 + k^2 + h^2} \quad (15)$$

$$L_B = \sqrt{\left(\frac{p_l \cos \gamma \cos \varepsilon}{2} - l\right)^2 + (k + p_l \cos \gamma \sin \varepsilon)^2 + (h^2 + p_l \sin \gamma)^2} \quad (16)$$

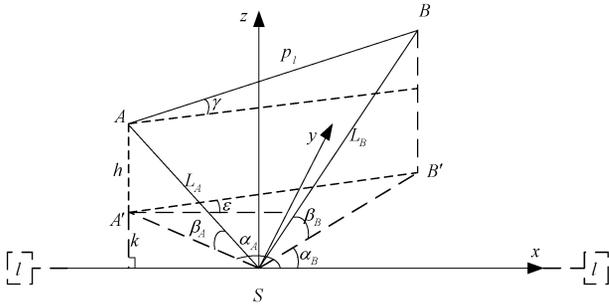


图5 全站仪布站位置与观测量解析关系

Fig. 5 The relationship between the position of the total station and the observation quantity

考虑到测试区域通常平坦开阔,因此全站仪布站位置不会发生明显的高度变化,即图中全站仪的观测中心 S 仅在 xSy 平面内移动,因此炮管尾端十字线与全站仪观测中心高差 h 不变。通过上述解析关系,在已知自行火炮身管指向的高低角 γ 、方位角 ε ,炮管尾端十字线与全站仪观测中心高差 h ,标记点 A 、 B 连线长 p_l 时,可以求出全站仪在不同的 k 、 l 值下对应的 α_A 、 α_B 、 β_A 、 β_B 、 L_A 、 L_B 。

3.3 真实指向方位角不确定度模型

为建立身管指向方位角误差模型,需确定各个观测量对方位角解算的不确定度,并确定其不确定度系数,并通过误差传递公式,建立误差模型。在式(4)中,令 $\tan \varepsilon_{AB} = A = M/N$,其中 $M = L_B \cdot \cos \beta_B \cdot \sin \alpha_B - L_A \cdot \cos \beta_A \cdot \sin \alpha_A$, $N = L_B \cdot \cos \beta_B \cdot \cos \alpha_B - L_A \cdot \cos \beta_A \cdot \cos \alpha_A$ 。随后分别求出方位角 ε 对 α_A 、 α_B 、 β_A 、 β_B 、 L_A 、 L_B 的偏导。

取误差传递系数为 $1^{[15]}$,将求得的 ε 关于角度量的偏代入误差传递公式。本测量方案中全站仪整平误差、操作观瞄误差、方位基准角引入误差均视为系统误差,因此将全站仪测角精度 $1'' = 0.0046 \text{ mil}$ 代入误差传

递公式中,可以得到角度观测对身管指向方位角误差的模型,形式如式(17)所示。

$$\sigma_{\varepsilon_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha_A}\right)^2 \times 0.0046^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha_B}\right)^2 \times 0.0046^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta_A}\right)^2 \times 0.0046^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta_B}\right)^2 \times 0.0046^2} \quad (17)$$

由于测距误差与测角误差并非同类型误差,无法直接代入误差传递公式。为此需先确定布站对测距造成的影响,随后根据测距误差及身管标记点连线长度推算造成的测角误差,最后将两部分测角误差代入误差传递公式,确定方位角误差不确定度。

测量中使用的南方 NTS-391R10 型全站仪的免棱镜测距精度为 $\pm(3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$,考虑到实验场地允许的最大范围为 50 m ,同时综合考虑自行火炮车高、身管长度、俯仰范围等因素,测量身管标记点产生的测距误差最大为 $\pm 3.434 \text{ mm}$ 。假设全站仪测距精度服从均匀分布,需乘转换因子 $0.6^{[16]}$,由此得到全站仪测距不确定度为 2.0604 mm ,代入误差传递公式得到距离观测对身管指向方位角误差的模型:

$$\sigma_{L_\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L_A}\right)^2 \times (2.0604 \times 10^{-3})^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L_B}\right)^2 \times (2.0604 \times 10^{-3})^2} \quad (18)$$

考虑到普通自行榴炮身管长度为 4 m ,远大于测距误差最大值,因此由测距误差产生的测角不确定度可表示为 $\sigma_{\varepsilon_2} = \arcsin \frac{\sigma_{L_\varepsilon}}{4} \approx \frac{\sigma_{L_\varepsilon}}{4}$ 。因此,由方位角测量不确定度可以表示为 $\sigma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_{\varepsilon_1}^2 + \sigma_{\varepsilon_2}^2}$ 。

3.4 真实指向高低角不确定度模型

与建立身管指向方位角误差模型类似,建立身管指向高低角误差模型也需确定各个观测量对方位角解算的不确定度,并确定其不确定度系数,并通过误差传递公式,建立误差模型。在式(5)中,令 $\tan \gamma_{AB} = B = X/\sqrt{Y}$,其中 X 代表等式分子, \sqrt{Y} 代表等式分母。利用式(5)分别求 γ 对 α_A 、 α_B 、 β_A 、 β_B 、 L_A 、 L_B 的偏导。

同样取误差传递系数为 1 ,不确定度取 0.0046 mil ,将求得的 γ 关于角度量的偏代入误差传递公式得到式(19)。同样取测距不确定度为 2.0604 mm ,代入误差传递公式得到式(20)。

$$\sigma_{\gamma_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \alpha_A}\right)^2 \times 0.0046^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \alpha_B}\right)^2 \times 0.0046^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \beta_A}\right)^2 \times 0.0046^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \beta_B}\right)^2 \times 0.0046^2} \quad (19)$$

$$\sigma_{L_\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial L_A}\right) \times (2.060 \times 10^{-3})^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial L_B}\right) \times (2.060 \times 10^{-3})^2} \quad (20)$$

考虑到普通自行榴炮身管长度为4 m,远大于测距误差最大值,因此由测距误差产生的测角误差可表示为:

$\sigma_{\gamma_2} = \arcsin \frac{\sigma_{L_\gamma}}{4} \approx \frac{\sigma_{L_\gamma}}{4}$ 。因此,由高低角测量不确定度可以表示为: $\sigma_\gamma = \sqrt{\sigma_{\gamma_1}^2 + \sigma_{\gamma_2}^2}$ 。由此,测量方案总测角不确定度可表示为 $\sigma = \sqrt{\sigma_\epsilon^2 + \sigma_\gamma^2}$ 。

4 全站仪布站方案寻优

对全站仪布站方案寻优的实质是使方位角、高低角测量不确定度尽可能达到最小。为了减小不确定度,孙泽林等^[4]提出采用遗传算法寻优的方案。方案虽能一定程度上减小不确定度,提高检测测量精度。但由于遗传算法中初始个体的随机性,每次运行算法得到的结果均不相同,采用遗传算法得到的布站方案是否是全局最优解仍有待研究。为此需确定合适的布站寻优方案,并利用该方案对布站方案进行优化。

4.1 确定寻优方案

全站仪观测中心 S 仅在平面 xSy 内移动,可看作平面 xSy 内有无数连续的最优布站的可能点位,每个点位概率均等,可近似看成矩形分布。因此寻找最优布站位置属于一种随机性问题,可以采用统计模拟的方法解决。蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法作为一种传统的统计实验方法,通过统计抽样实验为数学问题提供近似解,在很多随机性问题的解决上具有良好的表现^[17]。由于蒙特卡罗方法有“分布函数连续且严格递增”的限制条件^[18],因此蒙特卡罗方法并不完全适用第3节中建立的不确定度模型。因此仅参考蒙特卡罗的抽样原理,并结合实际测量操作中全站仪设站位置很难达到厘米级的变化的实际情况,考虑在测量区域内以合适的扫描步长对测量区域进行网格化划分,根据式(14)~(19)确定每个网格点处对应的 $\alpha_A, \alpha_B, \beta_A, \beta_B, L_A, L_B$,代入第3节中建立的模型确定该点位测量不确定度,随后确定该次仿真中测量精度较高的区域,在精度较高的区域中逐渐缩小扫描步长重复之前的操作,寻找令方位角、高低角的总不确定度达到最小的某些点位作为测量区域内的最优布站点位。

4.2 仿真模拟实验

参考目前列装的某型自行火炮身管长4 m,炮尾距地面3.4 m,可在方向 $(-35^\circ, 35^\circ)$,高低为 $(-5^\circ, 55^\circ)$ 的范围内进行调炮,自行火炮瞄准校验中最大测距范围

为50 m,因此假定标记点 A, B 连线长 $p_l = 4$ m,图4中标记点 A 偏差对应的圆心角 $\angle DO'A = 45^\circ$ 。参考双经纬仪测量自行火炮身管指向方案中双经纬仪最优布站方案,测量仪器距离自行火炮较远时,测量误差较小。考虑到实际测量区域的范围,设置全站仪观测中心 S 与炮管近端的垂直距离 k 的变化范围为 $(15 \text{ m}, 20 \text{ m})$,布站点横向移动距离 l 的变化范围为 $(20 \text{ m}, 35 \text{ m})$,假定某次测量中炮管尾端十字线与全站仪观测中心高差 h 为2 m,自行火炮身管在测量姿态下的真实指向:轴线高低角 $\gamma = 500 \text{ mil}$ 、方位角 $\epsilon = 500 \text{ mil}$ 。

随后先以0.5 m的扫描步长对划定的测量区域进行网格化处理,并根据第3.2、3.3节中所述内容绘制不确定度函数 σ 在区域内的变化如图6所示。

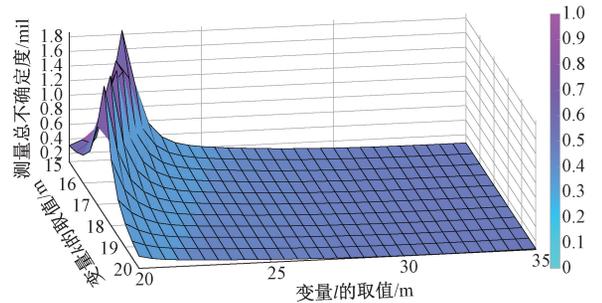


图6 仿真结果

Fig. 6 The simulation results

从图6中不难看出,在 $k \in (15 \text{ m}, 19 \text{ m}) \cup l \in (25 \text{ m}, 35 \text{ m})$ 的范围内,总不确定度 σ 取值范围小于0.2,满足作为自行火炮发射前瞄准使用的基准。随后在 $k \in (15 \text{ m}, 19 \text{ m}) \cup l \in (25 \text{ m}, 35 \text{ m})$ 范围内以0.2 m的扫描步长重复上述操作,得到如图7所示的结果。

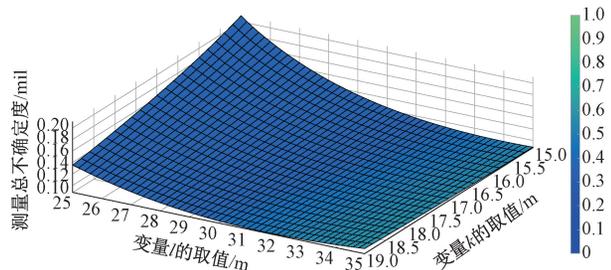


图7 缩小范围后的仿真结果

Fig. 7 The simulation results after narrowing down the range

可以看出,在 $k \in [18 \text{ m}, 19 \text{ m}] \cup l \in [31 \text{ m}, 33 \text{ m}]$ 的范围内,总不确定度 σ 取值范围达到最小。在同一布站点位,自行火炮身管指向的变化不会使总不确定度 σ 发生较明显的变化。因此可认为上述范围内进行全站仪布站是划定测量场地内的最优布站范围,能够满足各种角度下的身管指向高精度测量。

5 对比实验

在常温情况下,进行了模拟身管空间指向测量实验。依照第3节中确定的最优布站范围进行布站,得到模拟身管在5个不同空间位置时的测量数据如表1;随后凭经

验选取最优布站范围外任意2种布站方式进行测量,分别得到每种方式下身管在5个不同空间位置的测量数据如表2和3所示。随后根据建立的不确定度模型,求得各点位各空间位置下的不确定度如表4所示(表中数据已进行脱密处理)。

表1 最佳布站测量数据($k=18\text{ m}$, $l=32\text{ m}$)

Table 1 Measured data of optimal position ($k=18\text{ m}$, $l=32\text{ m}$)

序号	标记点 A			标记点 B		
	α_A	β_A	L_A/m	α_B	β_B	L_B/m
1	34°31'43"	08°37'19"	28.720	31°56'10"	04°30'25"	32.317
2	32°03'48"	14°22'37"	27.874	31°30'51"	07°39'44"	31.870
3	27°22'42"	12°57'14"	27.507	29°30'45"	06°13'26"	31.762
4	29°44'16"	13°57'09"	31.802	29°56'04"	07°04'07"	33.681
5	34°01'25"	08°38'32"	28.712	31°40'12"	04°42'05"	31.024

表2 随机布站位置1测量数据($k=20\text{ m}$, $l=8.5\text{ m}$)

Table 2 Measured data of Random station position 1 ($k=20\text{ m}$, $l=8.5\text{ m}$)

序号	标记点 A			标记点 B		
	α_A	β_A	L_A/m	α_B	β_B	L_B/m
1	89°54'54"	13°31'26"	18.411	78°35'47"	07°26'53"	19.591
2	92°09'58"	22°57'00"	17.75	79°30'38"	12°43'09"	19.298
3	88°47'03"	23°16'53"	15.601	77°13'50"	10°49'47"	18.326
4	79°12'33"	23°31'03"	19.217	73°41'27"	12°01'18"	19.899
5	89°53'15"	13°33'50"	18.402	78°34'28"	07°27'35"	19.586

表3 随机布站位置2测量数据($k=12\text{ m}$, $l=10\text{ m}$)

Table 3 Measured data of Random station position 1 ($k=12\text{ m}$, $l=10\text{ m}$)

序号	标记点 A			标记点 B		
	α_A	β_A	L_A/m	α_B	β_B	L_B/m
1	81°14'03"	23°15'33"	10.904	64°11'15"	11°41'50"	12.526
2	83°57'25"	39°41'48"	10.836	64°52'57"	20°06'24"	12.361
3	74°05'10"	43°08'40"	9.017	60°10'15"	17°21'45"	11.539
4	62°43'41"	36°12'38"	12.980	56°53'05"	18°00'28"	13.407
5	81°10'33"	23°19'46"	10.898	64°08'50"	11°35'04"	12.663

对自行火炮身管的5个不同身管姿态进行的测量基本可以反映出该测量方法的测量精度,且在最佳布站方式下的测量结果相较于随机布站方式下的测量结果不确定度更小。在实际测量过程中,找到不确定度最小的布站点这一过程费时较长,另外,在全站仪设站进行测量时可能

会存在一定的偏差,不可能与不确定度最小的布站点位完全重合,由于不确定度函数是初等连续函数,不会存在突变,而且根据表中数据可知,在求得的最优布站范围内的布站点已经可以满足极高精度的身管指向测量,因此并不需要寻求最优点,只需在最优范围内尽量接近最佳值即可。

表4 各布站方式测量不确定度比较

Table 4 Comparison of measuring precision of different positions

序号	最佳布站	随机布站 1	随机布站 2
1	0.088 8	0.169 3	0.246 2
2	0.089 4	0.160 8	0.233 4
3	0.090 5	0.152 4	0.265 0
4	0.090 2	0.180 0	0.226 0
5	0.089 7	0.179 1	0.281 4

6 结 论

针对传统全站仪测量自行火炮身管指向方法过程中存在的缺乏北向基准、轴线模拟存在偏差的问题,本文提出了一种改进的单全站仪测量方法,并分析出全站仪布站位置是影响测量精度的重要因素。在此基础上,分析了身管标记点连线与实际身管轴线在测量坐标系下的位置关系,建立了真实身管指向的不确定度模型。随后基于蒙特卡罗原理对布站位置进行了仿真实验,得到最优布站区域。最后进行模拟身管实装实验,验证了寻优结果的准确性。但是,受客观条件和仪器设备的限制,测试还存在一些不足之处。然而,经实验验证,优化布站是一种可行的提升测量精度的手段,可为自行火炮打击精确化发展提供良好的效果。

参考文献

- [1] 李伟,姜俊峰,任海波,等. 行进间火炮指向稳定跟踪系统建模与控制[J]. 兵工学报,2018,39(8):1479-1490.
LI W, JIANG J F, REN H B, et al. Modeling and control of pointing-stabilizing-tracking system for marching guns[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(8):1479-1490.
- [2] 田建辉. 火炮身管指向控制中的非线性问题研究[D]. 南京:南京理工大学,2011.
TIAN J H. Research on the nonlinear problem in the pointing control of the gun [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [3] WU D, DU F. A new method of precise orientation adjustment based on matrix similarity for large-scale component[J]. Assembly Automation, 2018, 38(2):207-215.
- [4] 孙泽林,王昭,翟唤春. 双经纬仪交会测量火炮调炮精度的误差分析与抑制[J]. 光学精密工程,2011,19(10):2434-2441.
SUN Z L, WANG ZH, ZHAI H CH. Analysis and control of error on two theodolite intersection measurement for gun rotated accuracy of artillery [J]. Optics and Precision Engineering, 2011,19(10):2434-2441.
- [5] LIU J, KHAN T U, NIE Z, et al. Calibration and precise orientation determination of a gun barrel for agriculture and forestry work using a high-precision total station[J]. Measurement, 2021, 173: 108494.
- [6] RYU N, KWON K, KIM G, et al. Design optimization of wheeled military vehicle to minimize elevation and azimuth error of gun barrel [J]. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 2019, 27(4):245-251.
- [7] SHEN C, ZHOU K, LU Y, et al. Modeling and simulation of bullet-barrel interaction process for the damaged gun barrel [J]. Defence Technology, 2019, 15(6):972-986.
- [8] CHENG Q, YANG G, YU C, et al. The modal analysis of three-dimension gun barrel using isogeometric analysis and its application to optimization [J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8):6277-6287.
- [9] ZHANG Y, LIU W, LAN Z, et al. Global measurement method for large-scale components based on a multiple field of view combination[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017:8765450.
- [10] WU B, LIU B, ZHENG J, et al. Strain-based health monitoring and remaining life prediction of large caliber gun barrel[J]. Measurement, 2018, 122:297-311.
- [11] 李洋,翟剑苏,李鸿儒. 大型火箭橇位置参数测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(5):16-22.
LI Y, ZHAI J S, LI H R. Method for measuring position parameter of large rocket sled[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):16-22.
- [12] 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(5):513-515.
DONG Q SH, JIANG T, SU CH ZH. Theodolite optimal disposition in artillery duplicate-aim precision detection[J]. Acta Armamentarii, 2007,(5):513-515.
- [13] DAI J S. Euler-Rodrigues formula variations, quaternion

conjugation and intrinsic connections [J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 92: 144-152.

- [14] KAHVECI D, GOK İ, YAVH Y. Some variations of dual Euler-Rodrigues formula with an application to point-line geometry [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2018, 459(2): 1029-1039.
- [15] 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 20-30.
ZHANG H J, MA J J, ZHANG J. Multi parameter error model and calibration of laser tracker [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 20-30.
- [16] 孙威, 缪东晶, 李建双, 等. 系统参数标定过程对多边坐标测量系统测量不确定度的影响[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 50-57.
SUN W, LIAO D J, LI J SH, et al. Influence of system parameters calibration process on measurement uncertainty of multilateral coordinate measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 50-57.
- [17] 朱陆陆. 蒙特卡洛方法及应用[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
ZHU L L. The Monte Carlo method an application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [18] HAMMERSLEY J. Monte carlo methods[M]. Springer Science & Business Media, 2013.

作者简介



程泽俊, 2020 年于湖南大学获得学士学位, 现为陆军工程大学石家庄校区硕士研究生, 主要研究方向为自行火炮检测技术。

E-mail: szy651010@163.com

Cheng Zejun received his B. Sc. degree from Hunan University in 2020. He is currently a master student at Shijiazhuang Campus of Army Engineering University. His main research interests include self-propelled artillery detection technology.



石志勇(通信作者), 1988 年于军械工程学院获得学士学位, 1997 年于军械工程学院获得硕士学位, 2000 年于军械工程学院获得博士学位, 现为陆军工程大学石家庄校区教授, 主要研究方向为装备性能检测与诊断技术和惯性导航技术。

E-mail: chengzejun@hnu.edu.cn

Shi Zhiyong (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Ordnance Engineering College in 1988, 1997, and 2000, respectively. He is currently a professor at Shijiazhuang Campus of Army Engineering University. His main research interests include equipment performance detection and diagnosis technology and inertial navigation technology.