

# 火炮偏离角测量数字化系统

李丹妮, 呼丹, 王劲松, 张继明, 安志勇

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 提出了一种用于火炮炮膛轴线偏离射面的角度测量的数字化测试系统, 该系统基于激光跟踪仪空间点坐标测量原理, 通过对火炮身管指定点三维坐标的测量, 结算出调炮前后空间直线方程, 从而计算出火炮偏离角, 并针对目前 GJB 方法对火炮炮膛轴线偏离射面的偏离角度测量方法中存在的精度不高、效率低、工作人员多、结构分散等问题进行了分析。与现行 GJB 方法进行测量实验比较, 实验数据表明使用该方法对火炮偏离角进行测量, 效率和精度都有明显提高。

**关键词:** 火炮; 偏离角; 激光跟踪仪; 空间向量投影

**中图分类号:** TJ306<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0317003

## Digital system of artillery deviation angle measurement

Li Danni, Hu Dan, Wang Jinsong, Zhang Jiming, An Zhiyong

(Department of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A digital test system was presented, used to measure the angle of shot gun bore axis deviates from exit surface. Based on the principle of laser tracker space coordinates measurement, by measuring the 3D coordinates of the gun barrel, the system accounts for the linear equation of space before and after the adjustment of gun, thus the deviation angle of the gun was calculated, and the problems of low precision, low efficiency, too much staff and structure dispersion were analyzed in the measurement method of gun bore axis deviation angle from the exit surface in view of the current GJB method. Comparing the experimental measurements with the current GJB method, the experimental data show that by using this method to measure the deviation angle of the gun, the efficiency and accuracy are improved obviously.

**Key words:** gun; angle of departure; laser tracker; space vector projection

收稿日期: 2015-07-10; 修订日期: 2015-08-12

基金项目: 吉林省科技支撑计划重大专项资助课题(20106010)

作者简介: 李丹妮(1982-), 女, 硕士生, 助理研究员, 主要从事激光非接触检测技术方面的研究。Email: ldn@cust.edu.cn

导师简介: 安志勇(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光非接触检测技术方面的研究。Email: an\_zhiyong@126.com

## 0 引言

火炮作为当前主要压制性常规兵器之一,在未来战争中,各种不同类型的火炮仍将发挥重要作用。随着现代高技术的迅速发展和生产工艺的不断改进,未来的火炮在精准度,射程,威力,机动性方面都将有显著的提高。为保证其在战争中能够充分发挥其作战性能,其精度和威力是最主要的参考指标。而评价其精度的参数众多,火炮偏离角即是其中一个<sup>[1]</sup>。火炮炮膛轴线偏离射面的角度简称为火炮偏离角,反映的是在锁定方向机调炮时,火炮身管轴线在水平面投影线的指向偏离身管水平状态时的角度。火炮偏离角是火炮定型实验中评定火炮性能的重要依据,也是火炮射表模拟试验中重要的修正参数<sup>[2]</sup>。现行 GJB 中对火炮偏离角的测量要使用经纬仪、象限仪、百分表、钢卷尺和火炮总装参数光电测试系统完成对火炮身管轴线投影偏离零位的测量,其测量方法劳动强度高,操作费时,计算测量麻烦。而采用激光跟踪仪,对火炮身管处指定点的空间三维坐标测量从而计算出火炮偏离角的方法能够提高测量精度和效率、降低工作强度,是一种具有发展前景的数字化测量方法<sup>[3]</sup>。

## 1 激光跟踪仪测量原理

激光跟踪测量系统的工作原理是在被测目标位置上安装一个目标反射靶球,由激光跟踪仪的跟踪头发射出的光束,照射到反射靶球后,光束返回到跟踪头。当反射靶球位置改变,跟踪头处的出射光线将自动调整方向来再次对准反射靶球。在此过程中,通过反射靶球反射回的光束由被检测系统接收,可以计算出反射靶球的空间坐标<sup>[4-5]</sup>。

### 1.1 空间点三坐标测量

激光跟踪仪是基于极坐标测量原理进行空间点坐标测量的,如图 1 所示。测量点的坐标由反射靶球到跟踪头的距离  $S$  以及跟踪头输出的水平角  $\alpha$  和垂直角  $\beta$  计算出来的。

可采用公式(1)将球坐标转换为直角坐标:

$$\begin{cases} x = S \cos \beta \sin \alpha \\ y = S \cos \beta \cos \alpha \\ z = S \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中:反射靶球到跟踪头的距离斜距  $S$  可以通过激光干涉仪或绝对测距测量,水平角  $\alpha$  和垂直角  $\beta$  可

以由光电角度编码器测出。并且激光跟踪仪会根据气象补偿参数和自身校验参数对测量中的系统误差进行补偿<sup>[6-7]</sup>。

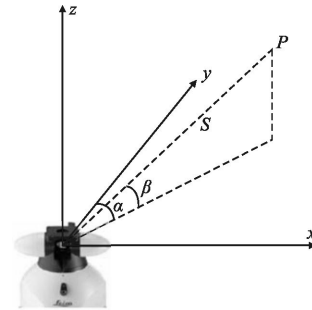


图 1 激光跟踪仪的坐标测量原理图

Fig.1 Schematic of coordinates measurement of laser tracker

### 1.2 激光跟踪仪测量方式

在自动化扫描测量系统中,激光跟踪仪通过如下三种方式来完成测量任务,以 Leica 公司激光跟踪仪 AT901 为例:

(1) 通过跟踪一个带镜面的小球,也就是反射球。通过靶球的反射镜反射激光,从而获得靶球所在测量点的三维空间坐标值。在扫描测量开始之前,需要激光跟踪仪通过该方式测量装配现场的 ERS 点,从而构建扫描测量坐标系。

(2) 通过跟踪 Leica T-Probe 产品,一种手持式可移动的无线通信接触式传感器。激光跟踪仪与 T-Probe 一起使用可以测量难以测量到的隐藏的洞或腔并且获得极高的精度。

(3) 通过跟踪 Leica T-Scan 产品,一种非接触式的高速激光扫描仪。激光跟踪仪与 T-Scan 一起使用时,可以快速进行整体扫描,这种测量方式不仅测量效率高,而且具备很高的测量精度,满足了对精度的严格要求。

针对此系统,采用方法(3)进行测量。

## 2 激光跟踪仪火炮偏离角测量

激光跟踪仪火炮偏离角测量设备由激光跟踪仪系统、高速激光扫描仪、信号采集与处理软件等组成。靶球 1、2、3 放置在火炮附近的水平台,用来确定火炮所在的投影平面。当火炮身管调至水平时,测量点  $a$ 、 $b$  连线表征火炮身管轴线的初始位置。利用激光跟踪仪测量火炮偏离角的原理如图 2 所示。

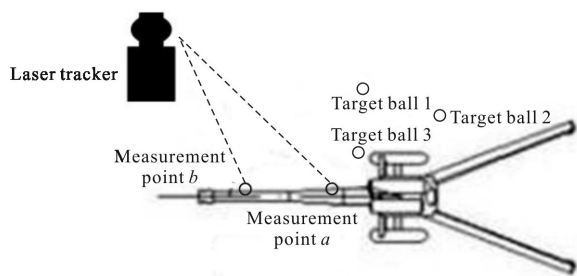


图 2 偏离角测量示意图

Fig.2 Schematic of deviation angle measurement

设测点  $a$  的坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 测点  $b$  的坐标为  $(x_2, y_2, z_2)$ , 则由两点确定的空间直线方程为:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (2)$$

$ab$  确定的空间向量为  $\vec{n}=(x_2-x_1, y_2-y_1, z_2-z_1)$ 。由此可得偏离角测量解析图如图 3 所示, 火炮身管水平时两点中心连线决定的空间直线为  $AB$ , 它在水平台平面上投影为  $A'B'$ ,  $O_1$  为火炮耳轴心。当火炮身管沿高低方向调整到  $\varphi$  角时, 两钢球中心连线决定的空间直线为  $A_1B_1$ , 其在水平台平面上的投影为  $A_1'B_1'$ ,  $A'B'$  与  $A_1'B_1'$  之间的差角  $u$  即为偏离角。设空间点坐标分别为  $A_1(x_1, y_1)B_1(x_2, y_2)A(x_3, y_3)B(x_4, y_4)$ , 空间点坐标分别投影至投影平面 (可看作水平面), 投影后  $Z$  值均相等, 可转换为平面直角坐标系下计算, 偏离角解算如图 4 所示。

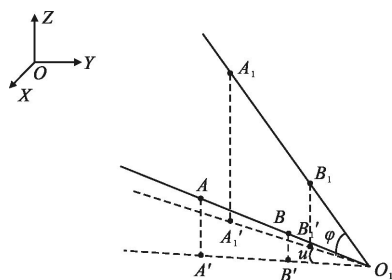


图 3 投影解析图

Fig.3 Projection analysis diagram

两个钢球初始位置投影后的坐标为  $A_1'(x_1', y_1')$   $B_1'(x_2', y_2')$   $A'(x_3', y_3')$   $B'(x_4', y_4')$ , 则直线  $A_1'B_1'$  的方程为:

$$y-y_1' = \frac{y_2'-y_1'}{x_2'-x_1'}(x-x_1')$$

直线  $A'B'$  的方程为:

$$y-y_3' = \frac{y_4'-y_3'}{x_4'-x_3'}(x-x_3')$$

直线  $A_1'B_1'$  与  $A'B'$  的夹角为  $u$ , 即为火炮偏离角:

$$u = \left| \arctan \frac{y_2'-y_1'}{x_2'-x_1'} - \arctan \frac{y_4'-y_3'}{x_4'-x_3'} \right| \quad (3)$$

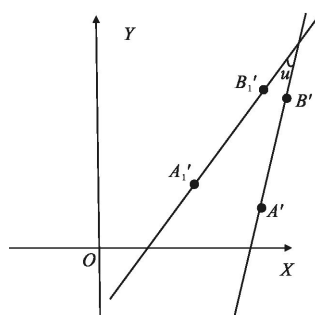


图 4 偏离角解算示意图

Fig.4 Schematic of deviation angle settlement

### 3 精度分析

对公式(3)求全微分:

$$du = \frac{\partial u}{\partial x_1'} dx_1' + \frac{\partial u}{\partial x_2'} dx_2' + \frac{\partial u}{\partial y_1'} dy_1' + \frac{\partial u}{\partial y_2'} dy_2' + \frac{\partial u}{\partial x_3'} dx_3' + \frac{\partial u}{\partial x_4'} dx_4' + \frac{\partial u}{\partial y_3'} dy_3' + \frac{\partial u}{\partial y_4'} dy_4'$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_1'} = -\frac{\partial u}{\partial x_2'} \quad \frac{\partial u}{\partial y_1'} = -\frac{\partial u}{\partial y_2'}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_3'} = -\frac{\partial u}{\partial x_4'} \quad \frac{\partial u}{\partial y_3'} = -\frac{\partial u}{\partial y_4'}$$

近似取两点的微元相等, 由于系数绝对值相等, 取其中一个即可。

$$du = \left[ \frac{y_2'-y_1'}{(y_2'-y_1')^2+(x_2'-x_1')^2} \right] dx + \left[ \frac{x_2'-x_1'}{(y_2'-y_1')^2+(x_2'-x_1')^2} \right] dy - \left[ \frac{y_4'-y_3'}{(y_4'-y_3')^2+(x_4'-x_3')^2} \right] dx + \left[ \frac{x_4'-x_3'}{(y_4'-y_3')^2+(x_4'-x_3')^2} \right] dy$$

以有限增量代替无穷小量, 则:

$$\Delta u = \left[ \frac{y_2'-y_1'}{(y_2'-y_1')^2+(x_2'-x_1')^2} \right] \Delta x + \left[ \frac{x_2'-x_1'}{(y_2'-y_1')^2+(x_2'-x_1')^2} \right] \Delta y - \left[ \frac{y_4'-y_3'}{(y_4'-y_3')^2+(x_4'-x_3')^2} \right] \Delta x + \left[ \frac{x_4'-x_3'}{(y_4'-y_3')^2+(x_4'-x_3')^2} \right] \Delta y \quad (4)$$

取测点间距 1 m 计算, 所取坐标如下:  $x_1=3.5$  m,  $y_1=2$  m,  $x_2=4.9$  m,  $y_2=3.4$  m,  $x_3=5.5$  m,  $y_3=1$  m,  $x_4=6$  m,  $y_4=2.8$  m。

系统采用 AT901 型号激光跟踪仪, 其测距精度为  $10 \mu\text{m}/\text{m}$ , 激光跟踪仪放置于距离火炮 3~4 m 处, 测量精度取为  $\sigma=40 \mu\text{m}$ , 转换为角度精度,  $\Delta x, \Delta y$  值在区间内可视为均匀分布, 取  $k=\sqrt{3}$ , 则:

$$\sigma(x) = \frac{\Delta x}{k} \quad (5)$$

公式(5)转换为  $\Delta x = \Delta y = \sqrt{3} \sigma, \Delta u = 0.0000209 \text{ rad}$ , 换算成密位为 0.019 mil。

### 4 对比实验及数据分析

#### 4.1 现行 GJB 测量实施过程

现行 GJB 中对火炮偏离角的测量是通过经纬仪、象限仪、百分表、钢卷尺和火炮总装参数光电检测系统来完成的。先将火炮放置在平坦的场地上成战斗状态并调整火炮纵、横水平,将经纬仪架设在炮口正前方约 2~2.5 倍身管长的位置上,并调整水平。使用经纬仪瞄准火炮炮口端面上的十字线和药室内带有十字线的药筒,用百分表来确定火炮身管在铅垂面的位置,用象限仪来装定火炮射角调整经纬仪或火炮身管,使经纬仪十字线与炮身的两个十字线相重合,并读取水平角值<sup>[8-9]</sup>。

图 5 为测量原理图,其计算偏离角公式为:

$$\Delta \varphi_i = \left( \frac{D+L}{L \cdot \cos \varphi_i} - 1 \right) \Delta \beta_i \quad (6)$$

式中:  $\Delta \varphi_i$  为火炮高低角为  $\varphi_i$  时的偏离角 ( $\angle B_1OA_1$ );  $D$  为仰角为  $0^\circ$  时,炮口端面到经纬仪的距离  $B_1T$ ;  $L$  为火炮耳轴中心到炮口端面距离  $OA$ ;  $\Delta \beta_i$  为经纬仪对瞄时的水平角 (即经纬仪仰角为  $\alpha$  时的方向角  $\beta_i$  与经纬仪平时的方向角  $\beta_0$  之差  $\angle B_1TA_1$ );  $\varphi_i$  为火炮高低角  $\angle AOA_1$ 。

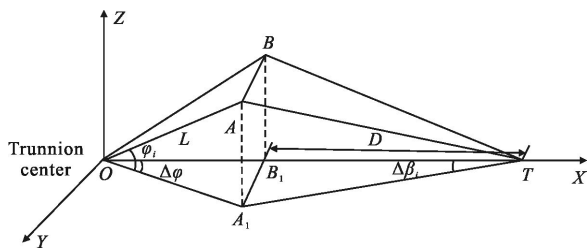


图 5 经纬仪对瞄观测法示意图

Fig.5 Schematic of sight observation method theodolite

#### 4.2 激光跟踪仪测量实施过程

(1) 布站。根据产品的几何尺寸、形状、空间姿态、测量环境、测试要求,合理科学地布置主机的位置,将激光跟踪仪放置火炮左上方 3~4 m 的位置。

(2) 调整火炮身管初始位置成水平状态,借助炮口塞规(测平塞规)辅助进行。将水准仪放置在测平塞规处,调节火炮高低机使之水平,再将水平仪放置在水平台上,调节水平台使水平仪气泡居中,这样火

炮身管即与水平台保持水平,将三个标定靶球分布在水平台上,此位置即为初始位置。

(3) 具体参数测试。火炮调整为零位(身管轴线水平状态),在身管外侧的炮口和炮尾处选取两个测量点,距离尽量大,通过高速激光扫描仪对测量点扫描确定其轴线。

(4) 数据处理。数据拟合工具球球心,计算出初始位置与被测位置的身管轴线在水平面投影的方位角,计算火炮偏离角。

#### 4.3 实验及数据分析

按前述方法进行相同高低角情况下的偏离角测量,测量五次,测量结果分别如表 1、表 2 所示。

表 1 GJB 偏离角测量记录表(单位: mil)

Tab.1 GJB deviation angle measurement record (Unit: mil)

Trial numbers	Angle of site			
	15°	30°	45°	60°
1	0.59	1.10	2.14	2.64
2	0.61	1.11	2.09	2.61
3	0.59	1.09	2.08	2.57
4	0.63	1.14	2.10	2.58
5	0.56	1.08	2.07	2.59
Mean	0.59	1.10	2.09	2.59
$\sigma$	0.034	0.023	0.025	0.026

表 2 激光跟踪仪方法偏离角测量记录表(单位: mil)

Tab.2 Laser tracker method for measuring the deviation angle record (Unit:mil)

Trial numbers	Angle of site			
	15°	30°	45°	60°
1	0.571	0.629	0.769	1.092
2	0.568	0.631	0.776	1.090
3	0.571	0.629	0.771	1.087
4	0.572	0.631	0.770	1.087
5	0.569	0.632	0.764	1.091
Mean	0.572	0.630	0.770	1.089
$\sigma$	0.002 3	0.002 4	0.002 9	0.002 5

对比两种方法的测量数据和方法,GJB 这种方法测量偏离角的缺点是操作劳动强度大,计算测量

比较麻烦。由于调整经纬仪的上下运动是靠伸缩三脚架的三个木腿,左右运动是靠移动整个三脚架,并同时要调经纬仪水平,所以使经纬仪望远镜十字线与炮口十字线,炮膛起始部十字线这三点成一线(叫“穿线”)很困难,仅“穿线”操作熟练者约需要 90 min 左右,有的甚至整个上午,操作需四~五人。计算偏离角需要四个参量,其中  $\Delta\beta$  还要进行正倒镜读数后的计算,计算复杂。利用激光跟踪仪对火炮偏离角测量比现行 GJB 操作省时,劳动强度降低,工作人员减少二三人,对比分析  $\sigma$  值,精度提高 70% 以上。

## 5 结 论

利用激光跟踪仪可以使测试实现高精度、高效率、高可靠性,与传统的 GJB 方法相比缩短了测试时间,降低测试劳动强度,人员减少二三人,精度提高 70% 以上。利用激光跟踪仪对火炮偏离角测量从劳动强度、测试精度、测试效率都明显优于现行 GJB 的方法。

### 参考文献:

- [1] Meng Xiangfei, Wang Changming, He Boxia, et al. Research Gun Barrel static multi-parameter measurement system [J]. *Nanjing University of Technology*, 2013, 37(1): 117-132. (in Chinese)  
孟翔飞, 王昌明, 何博侠, 等. 火炮身管静态多参数测量系统的研究[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(1): 117-132.
- [2] Kim L. Boyer Robust Online detection of pipeline corrosion from range data [J]. *Machine Vision and Application*, 2001, 12: 291-304.
- [3] Sun Haili, Yao Lianbi, Zhou Yueyin, et al. Laser tracker measurement accuracy analysis [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(1): 177-181. (in Chinese)  
孙海丽, 姚连璧, 周跃寅, 等. 激光跟踪仪测量精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 177-181.
- [4] Yuan Feifei. An automatic scanning system design of airfoil assembly based on Laser Tracker [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 16-17. (in Chinese)  
袁菲菲. 基于激光跟踪仪的飞机机翼自动化扫描测量系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 16-17.
- [5] Ouyang J F, Liu W L, Yan Y G. Angular error calibration of laser tracker system[C]//SPIE, 2006, 6344: 6344-6348.
- [6] Wang Liang. Research on the method of laser tracker on measure target ball automatic positioning based on computer vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 14-15. (in Chinese)  
汪亮. 基于机器视觉的激光跟踪仪测量靶球自动定位方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 14-15.
- [7] Hu Baohai. Based on measurements of key technologies collaborative multi EMSCON laser tracker [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)  
胡宝海. 基于 EMSCON 的多激光跟踪仪协同测量关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] The General Armaments Department. GJB artillery static test method[S]. Beijing: China Standard Press, 2006: 39-41. (in Chinese)  
总装备部. GJB 火炮静态检测方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 39-41.
- [9] Wang Baogui, Zhan Yonghong, Wang Jian. Effectiveness evaluation of artillery based comprehensive test construction technology [J]. *Spacecraft TT & C Technology*, 2014, 33(3): 214-218. (in Chinese)  
王保贵, 战永红, 王坚. 基于效能评估的火炮综合测试构建技术研究[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(3): 214-218.