

doi: 10.7690/bgzd.2016.06.012

# 枪械瞄准角变化量三维坐标测试方法与仿真

都业宏, 孙珑后, 张 军, 李国富, 连素杰  
(中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

**摘要:** 为完成枪械瞄准角变化量测试, 提出一种新的高精度枪械瞄准角测试方法。在三维坐标测量机上, 选取枪械身管上某一位置作为原点建立坐标系测试瞄准角, 解决了传统方法中用平板和调整夹为枪械定位耗时长、精度低的问题。分析了新方法和传统方法的测试原理, 经测试误差公式推导发现新方法在理论上累积测试误差更小。通过 SolidWorks 建立枪管仿真模型导入 ANSYS 划分网格后, 将实际试验中测试数据的平均值作为载荷施加于仿真模型上, 进行仿真分析, 确立了在三维坐标测量机中以枪械身管建立坐标系的原点选取。在验证性试验中, 拟合实际测试结果数据发现具有很高的一致性。试验结果表明: 新方法在枪械瞄准角实际测试中操作方法简单、精度高, 满足枪械瞄准角变化量测试要求。

**关键词:** 瞄准角; 三维坐标; SolidWorks; ANSYS  
**中图分类号:** TJ206 **文献标志码:** A

## Gun Aiming Angle Change in 3D Coordinate Test Method and Simulation

Du Yehong, Sun Longhou, Zhang Jun, Li Guofu, Lian Sujie  
(Ordnance Test Center, Baicheng 137001, China)

**Abstract:** To complete the gun aiming angle variation test, this paper puts forward a new high precision of gun aiming angle test method. In a 3-dimensional coordinate measuring machine, aiming angle is tested by the selection of gun barrel in a certain position as the origin of a coordinate system, and it is solved that time consuming of the traditional method using plate and adjusting the clip for gun positioning and low accuracy problem. The new method and traditional method are compared, and the test error formula is derived to find that cumulative test error of new methods is smaller in theory. The simulation model of barrel built by SolidWorks is input into ANSYS and meshed, the mean value of data in practical test as a load is applied to the simulation model and simulated, and origin point selection is made sure with gun barrel fixed in the 3d coordinate measuring machine. In the verification experiment, the actual test results data are fit and the very high consistency is found. The results show that, the new test method of gun aiming angle is simple and precise, and satisfies the requirement of gun aiming angle variation test.

**Keywords:** aiming angle; 3-dimensional coordinates; SolidWorks; ANSYS

## 0 引言

枪械瞄准角变化量的测试对于枪械设计定型试验中考核枪械与瞄准具相互配合工作的稳健性及可靠性具有重要意义。传统的枪械瞄准角测试方法的误差过大, 无法完成枪械瞄准角变化量的测试。狙击步枪设计定型试验中, 对于出现在精度试验中射击精度不合格等问题难以准确及时分析问题原因、确定解决方法、为设计提供改进方案, 进而缩短研制周期、减少设计成本。文献[1]中提出图像处理和灰度加权重心法相结合的光斑中心提取算法提高瞄准系统测试精度, 这种方法实际操作相对复杂, 较高的精度来源于多种算法的补偿机制并非实际测试所得。文献[2]中提出用多功能枪械测试仪测试枪械瞄准角, 由于实际使用过程中误差较大, 无法完成枪械瞄准角变化量的测试。文献[3-5]分别在相应领域实现了瞄准基线的高精度测试, 但测试较为复杂、

耗时长。目前, 国内外尚无枪械瞄准角变化量测试准确性和可行性皆优的研究成果, 主要问题在于枪械瞄准角测试中高精度定位十分困难。

笔者提出在三维坐标测量机中以枪械身管上某一位置为原点建立坐标系, 以解决枪械瞄准角变化量测试中高精度定位的难题。该方法的难点在于原点和测试点的选取。笔者应用有限元分析方法<sup>[7-9]</sup>, 对影响枪械瞄准角的各种因素进行了多物理场耦合分析, 从而确定了原点的最佳选取位置, 进而准确、高效地完成枪械瞄准角变化量测试。

## 1 瞄准角测试方法

瞄准角定义为 2 条直线的夹角, 其中一条直线为枪管轴线, 另一条为表尺照门上沿和准星尖的连线。由于组成瞄准角的两边均为理论上的直线以及枪械结构上的原因, 瞄准角测试采用间接测量方法。

收稿日期: 2016-02-19; 修回日期: 2016-03-25

作者简介: 都业宏(1984—), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 从事常规兵器试验方法研究。

### 1.1 传统测试方法<sup>[2]</sup>

如图 1 所示,应用传统方法(枪械瞄准角测试仪测试方法)测量瞄准角,通过测量水平距离和垂直距离确定角度。用垂直光栅尺测量准星尖至表尺照门上沿的高度  $H$  和准星高度  $M$ ,用水平光栅尺测量瞄准基线  $L$ ,则瞄准角  $\alpha$  计算公式为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{H-M}{L}\right) \doteq \frac{H-M}{L} \quad (1)$$

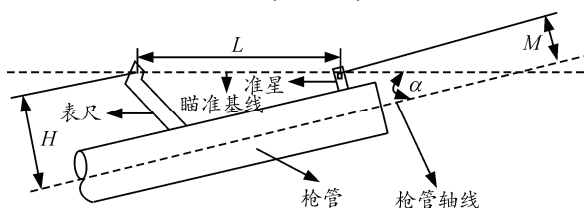


图 1 传统方法测试示意图

### 1.2 三维坐标测试方法

如图 2 所示,在枪身上某点  $O$  建立三维坐标系,测得枪管中心线上  $A$ 、 $B$  2 点坐标为  $(X_A, Y_A, Z_A)$ 、 $(X_B, Y_B, Z_B)$ ,准星上沿中心点  $C$  坐标为  $(X_C, Y_C, Z_C)$ ,缺口上沿中心点  $D$  坐标为  $(X_D, Y_D, Z_D)$ 。瞄准角  $\alpha$  计算公式为

$$\alpha = 2\arcsin\frac{L_3}{2}$$

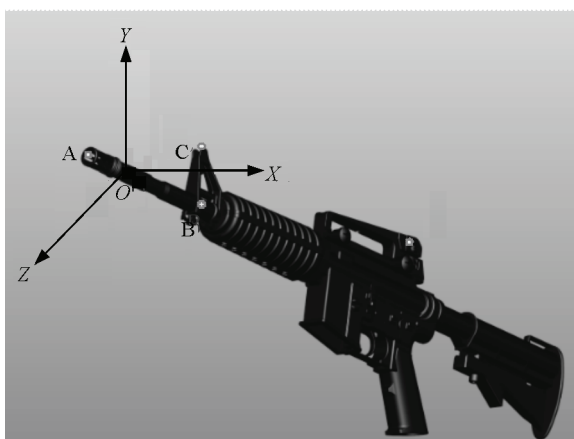


图 2 三维坐标测试

其中:

$L_3 = \sqrt{(X_{D'} - X_{B'})^2 + (Y_{D'} - Y_{B'})^2 + (Z_{D'} - Z_{B'})^2}$  为线段  $B'D'$  长;

$B' = (X'_B, Y'_B, Z'_B) = \left(\frac{X_B - X_A}{L_1}, \frac{Y_B - Y_A}{L_1}, \frac{Z_B - Z_A}{L_1}\right)$  为  $A$  点平移到原点,  $AB$  单位化后  $B$  点对应的坐标;

$D' = (X'_D, Y'_D, Z'_D) = \left(\frac{X_D - X_C}{L_2}, \frac{Y_D - Y_C}{L_2}, \frac{Z_D - Z_C}{L_2}\right)$  为  $C$  点平移到原点,  $CD$  单位化后  $D$  点对应的坐标;

$L_1 = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$  为线段  $AB$  长;

$L_2 = \sqrt{(X_D - X_C)^2 + (Y_D - Y_C)^2 + (Z_D - Z_C)^2}$  为线段  $CD$  长。

### 1.3 误差分析

在传统测试方法中,由式(1)得瞄准角测试误差传递公式为:

$$\Delta_{\alpha c} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial M}\right)^2 \Delta_M^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial H}\right)^2 \Delta_H^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial L}\right)^2 \Delta_L^2} \quad (2)$$

其中:  $\frac{\partial \alpha}{\partial M} = \frac{-\rho}{L}$ ;  $\frac{\partial \alpha}{\partial H} = \frac{\rho}{L}$ ;  $\frac{\partial \alpha}{\partial L} = -\frac{(H-M)\rho}{L^2}$ 。

由式(2)可知:瞄准角测试精度与水平、垂直距离测试精度以及枪械结构尺寸等因素有关。若不计入样柱尺寸的系统误差,在垂直距离测试误差为 0.02 mm、水平距离测试误差为 1 mm(量具本身读数误差)时,瞄准角测试误差  $\Delta_{\alpha c}$  范围为 44"~88";改善量具精度,在垂直距离测试误差为 0.006 mm、水平距离测试误差为 0.01 mm 时,瞄准角测试误差  $\Delta_{\alpha c}$  范围为 22"~43"。若计入测试样柱尺寸的系统误差,误差范围将变大。应用传统方法在实际测试过程中,测试人员为枪械定位困难、精度低,误差往往大于 2'。如将此方法引入枪械瞄准角变化量测试,误差范围会分别变成现有误差的 2 倍甚至更大。

在三维坐标测试方法中,误差仅来源于三维坐标测量机的测量误差  $\Delta_s$ , 范围是 0.3~1.0  $\mu\text{m}$ 。分别以  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  4 点为球心,  $\Delta_s$  为半径的球体即分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  4 点的散布空间,如图 3 所示。瞄准角最大测量误差为:

$$\max(\Delta_{\alpha s}) = \left(\arctan \frac{2\Delta_s}{L_1} + \arctan \frac{2\Delta_s}{L_2}\right) \quad (3)$$

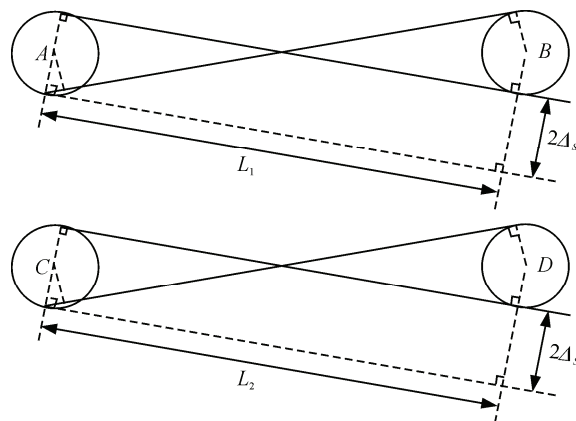


图 3 瞄准角误差

由式 (3) 可知：在三维坐标测试方法中，瞄准角测试误差  $\Delta_{\alpha_s}$  的最大值  $\max(\Delta_{\alpha_s})$  仅与  $\Delta_s$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  有关， $L_1$ 、 $L_2$  与  $\Delta_s$  一般差  $10^5$  的数量级以上；因此，瞄准角最大测量误差  $\max(\Delta_{\alpha_s}) \leq 4 \times 10^{-5} \times 180 / \pi$ ，满足枪械瞄准角变化量测试的要求。

## 2 仿真分析

三维坐标测试方法在理论上测试精度优于传统方法，难点在于坐标原点的选取。笔者通过有限元仿真的方法确定瞄准角测试中原点的选取。

### 2.1 模型的建立

枪管是枪械的重要组成部分，参照文献[9-10]的建模方法建立枪管简化模型如图 4 所示；枪管相关参数如表 1 所示。通过高速摄影观察枪械系统击发瞬间状态，枪管在枪弹的高压火药燃气作用下，除内管壁受到高压应力，枪管会发生非线性高频振动<sup>[11]</sup>。这些高压应力导致枪管发生一定的变形、非线性高频振动会导致枪管和瞄具的相对运动，是瞄准角变化量的主要成因。

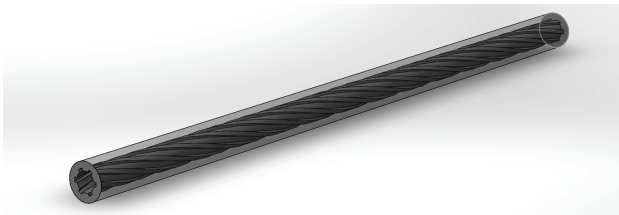


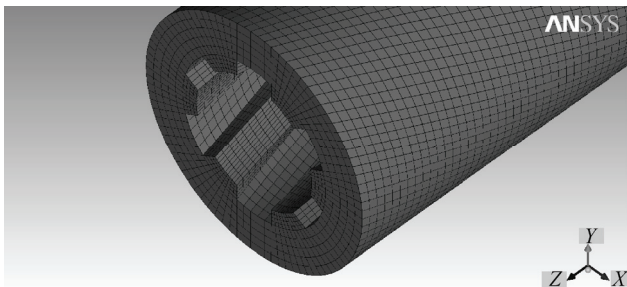
图 4 某型狙击步枪枪管简化模型

表 1 枪管参数

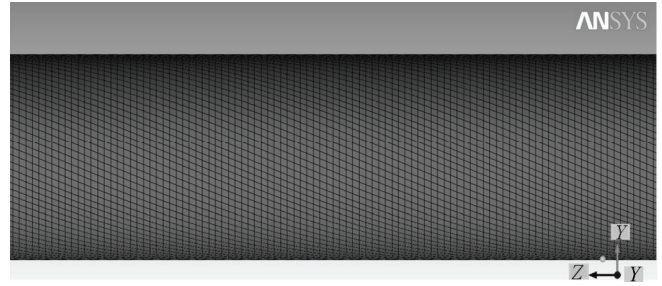
| 长度 $l$ /<br>mm | 内径 $d$ /<br>mm | 外径 $D$ /<br>mm | 导程 $S$ /<br>mm | 膛线数<br>NOF | 材料密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|--|
| 490            | 5.8            | 25             | 210            | 6          | 7 850  |

### 2.2 导入分析

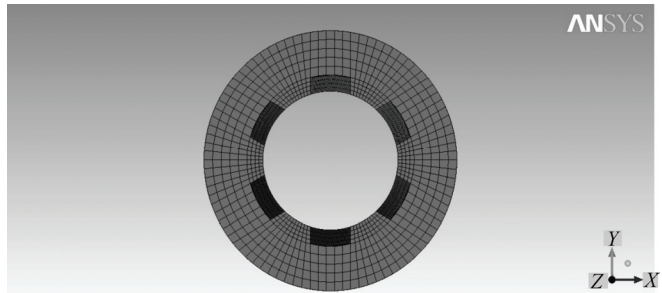
枪管模型建好后，通过适当的简化导入到 ANSYS，取弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3，体积模量为 166.67 GPa，切变模量为 76.923 GPa。采用 ICEM 对枪管进行网格划分，考虑到枪管内膛在工作时所处的恶劣环境，笔者对膛线进行了细致的划分，如图 5 所示。



(a) 等轴测



(b) 侧视图



(c) 正视图

图 5 采用 ICEM 手动划分枪管的网格

笔者对枪管进行耦合瞬态动力学、显示动力学、热力学等情况<sup>[12]</sup>的仿真分析。与实际射击中射手狙枪的动作相对应，进行对枪管在中部和尾部全约束条件下的模态分析。求解后，各阶频率如表 2 所示，一、二阶振型如图 6 所示。

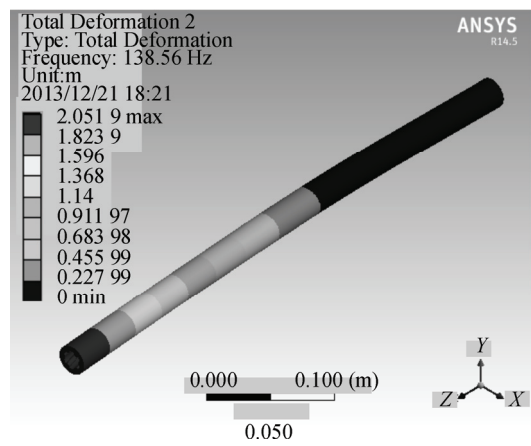
表 2 节点约束的梁单元枪管前六阶频率

| 阶数 $i$           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5     | 6     |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 频率 $f/\text{Hz}$ | 136 | 141 | 837 | 863 | 2 030 | 2 260 |

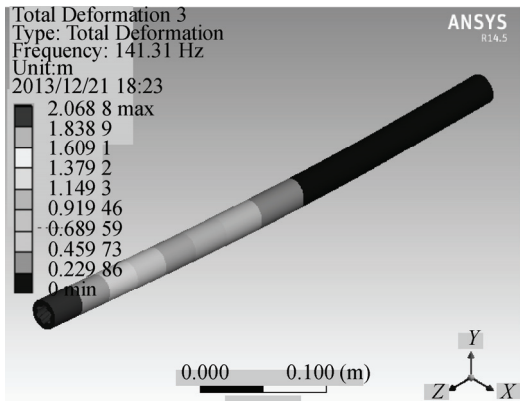
对枪管采用在距枪口 0.6l 处的枪管表面节点和枪管尾部节点进行全约束，在模态分析的基础上进行瞬态动力学分析，对枪管内膛表面施加压应力  $p(\text{MPa})$ ，其中：

$$p = 2.96 \sin(2 \times \text{PI} / 0.24 \times \{\text{TIME}\})。$$

枪管变形图如图 7 所示。



(a) 一阶振型



(b) 二阶振型

图 6 振型图

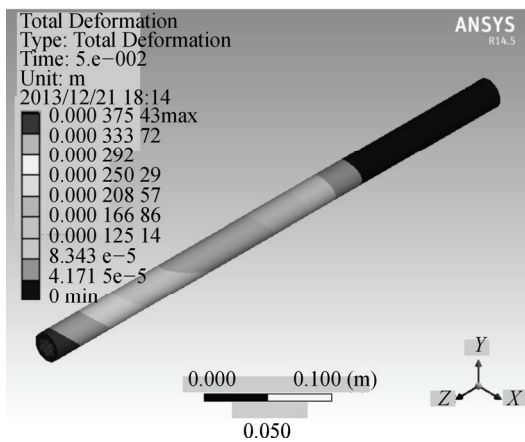


图 7 枪管变形

### 2.3 原点选取

在实际射击条件下，枪管的振动频率远远小于模态分析中的一阶频率，产生的形变均属完全弹性形变，射击结束后枪管恢复原状态。通过枪管的瞬态动力学分析发现，枪管在低射频条件亦属完全弹性形变，高射频条件下会发生微小位移的非弹性形变。这与枪械设计定型试验中枪管直线度检测结果的规律相吻合。

确定选取枪口附近区域某一位置为三维坐标测量机的测试原点。基于 2 个方面的考虑：

1) 规避枪管尾部弹膛位置在高温高压燃气恶劣条件下工作产生的微小变形，以免对测试精度产生影响；

2) 原点在枪管口部，使  $L_1$ 、 $L_2$  尽量取到较大值，由于  $\Delta_s$  不变，能够进一步减小测试误差。

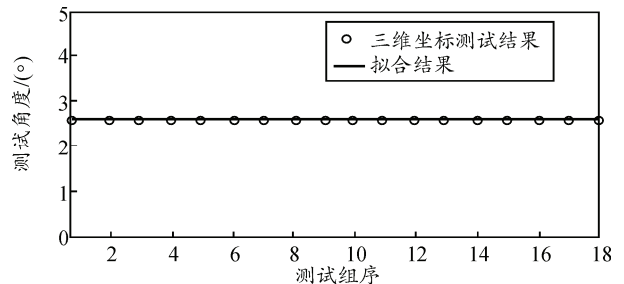
## 3 瞄准角变化量测试实例

### 3.1 实际测试结果拟合

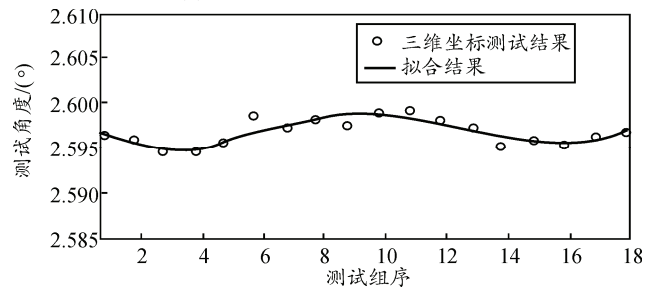
通过对同一支狙击步枪在不射击、不给予较大外力的情况下，采用三维坐标测试方法测试瞄准角，测试结果如表 3，拟合结果如图 8。

表 3 三维坐标测试方法实际测试结果

| 测试组序 $j$ | 测试角度 $a_s/(^\circ)$ | 测试组序 $j$ | 测试角度 $a_s/(^\circ)$ |
|----------|---------------------|----------|---------------------|
| 1        | 2.596 7             | 10       | 2.599 2             |
| 2        | 2.596 1             | 11       | 2.599 7             |
| 3        | 2.594 6             | 12       | 2.598 4             |
| 4        | 2.594 6             | 13       | 2.597 3             |
| 5        | 2.595 7             | 14       | 2.595 3             |
| 6        | 2.598 7             | 15       | 2.595 6             |
| 7        | 2.597 8             | 16       | 2.595 8             |
| 8        | 2.598 2             | 17       | 2.596 3             |
| 9        | 2.597 7             | 18       | 2.596 6             |



(a) 纵向在  $0^\circ \sim 5^\circ$  之间显示



(b) 纵向在  $2.585^\circ \sim 2.610^\circ$  之间显示

图 8 三维坐标测试方法瞄准角测试结果

表 3 和图 8 说明测试方法的稳定性很好。

### 3.2 三维坐标测试方法与传统测试方法结果对比

对某型狙击步枪应用传统测试方法和三维坐标测试方法进行测试，2 种方法实际测试结果对比如表 4，拟合结果对比如图 9。

表 4 2 种方法实际测试结果对比

| 测试组序 $j$ | 三维坐标测试角度 $a_s/(^\circ)$ | 传统方法测试角度 $a_c/(^\circ)$ | 测试组序 $j$ | 三维坐标测试角度 $a_s/(^\circ)$ | 传统方法测试角度 $a_c/(^\circ)$ |
|----------|-------------------------|-------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|
| 1        | 2.596 7                 | 2.51                    | 10       | 2.599 2                 | 2.58                    |
| 2        | 2.596 1                 | 2.58                    | 11       | 2.599 7                 | 2.46                    |
| 3        | 2.594 6                 | 2.7                     | 12       | 2.598 4                 | 2.56                    |
| 4        | 2.594 6                 | 2.56                    | 13       | 2.597 3                 | 2.72                    |
| 5        | 2.595 7                 | 2.54                    | 14       | 2.595 3                 | 2.62                    |
| 6        | 2.598 7                 | 2.83                    | 15       | 2.595 6                 | 2.82                    |
| 7        | 2.597 8                 | 2.74                    | 16       | 2.595 8                 | 2.56                    |
| 8        | 2.598 2                 | 2.52                    | 17       | 2.596 3                 | 2.48                    |
| 9        | 2.597 7                 | 2.74                    | 18       | 2.596 6                 | 2.58                    |

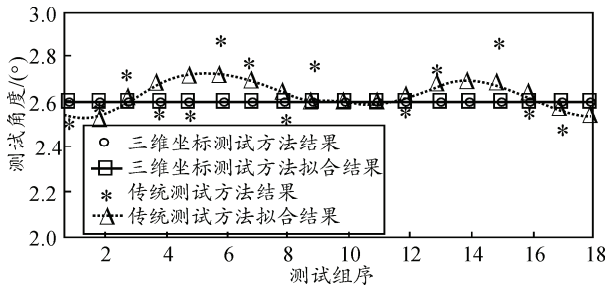


图 9 2 种测试方法实际测试数据拟合对比

2 种测试方法的均值较为接近，但三维坐标测试方法比传统测试方法更稳定，用于瞄准角变化量

的测试误差更小。

### 3.3 测试时间对比

在实际测试中，对 2 种测试方法进行了计时。计时结果如表 5 所示。

通过对比发现，三维坐标测试方法测试较传统方法迅速。与传统测试方法不同，三维坐标测试方法不需要繁琐的机械定位方式定位，只需将狙击步枪放在三维坐标测量机的测试平台上，预先设定好的程序会自动进行一系列测试操作，输出测试结果。

表 5 2 种实际测时间对比

| 测试组序 $j$ | 三维坐标测试时间 $T_s/s$ | 传统方法测试时间 $T_c/min$ | 测试组序 $j$ | 三维坐标测试时间 $T_s/s$ | 传统方法测试时间 $T_c/min$ |
|----------|------------------|--------------------|----------|------------------|--------------------|
| 1        | 247              | 42                 | 10       | 32               | 43                 |
| 2        | 32               | 44                 | 11       | 32               | 39                 |
| 3        | 32               | 38                 | 12       | 32               | 38                 |
| 4        | 32               | 38                 | 13       | 32               | 41                 |
| 5        | 32               | 39                 | 14       | 32               | 41                 |
| 6        | 32               | 40                 | 15       | 32               | 40                 |
| 7        | 32               | 38                 | 16       | 32               | 38                 |
| 8        | 32               | 38                 | 17       | 32               | 39                 |
| 9        | 32               | 39                 | 18       | 32               | 39                 |

## 4 结论

笔者提出了应用三维坐标测量机测试枪械瞄准角变化量的方法，应用仿真分析的方法确定了三维坐标测试方法中原点的选取。对比试验中传统方法和三维坐标测试方法的实测数据，得出如下结论：

1) 三维坐标测试方法在理论上是可行的，而且相比于传统测试方法，三维坐标测试方法的测试误差更小；

2) 三维坐标测试方法中只要将被测试枪械平放在三维坐标测量机的测试平台上即可完成被测试枪械的定位，非常便于操作；

3) 三维坐标测试方法的测试结果非常稳定，说明三维坐标测试方法的精度非常高，能够完成枪械瞄准角变化量的测试。

### 参考文献：

[1] 杨俊, 元洪兴, 李正文. 高重频激光瞄准系统精度测试方法研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 673-677.

[2] 张赤军, 赵学刚, 车英. 多功能枪械测试仪在靶场测试技术中的应用研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 90-92.

[3] 何耀新, 苏保欣, 于贵波, 等. 基于空间直线检测的地面火炮瞄准线偏移检测方法[J]. 机械工程学院学报, 2006, 18(3): 22-24.

[4] 梁妍, 石利霞, 赵峰. 光学瞄具零位走动量测试系统研

究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 31-33.

[5] 温彬, 李永亮, 曾佑洪, 等. 便携式红外瞄准镜瞄准基线检测系统研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1330-1332.

[6] 宋大虎, 李忠科, 程春霞. 基于线结构光的三维坐标测量技术研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(22): 291-293.

[7] 屈玉福, 浦昭邦, 赵慧洁. 基于单目视觉的自由曲面三维坐标测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1318-1321.

[8] 蔡力钢, 马仕明, 赵永胜, 等. 多约束状态下重载机械式主轴有限元建模及模态分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 165-173.

[9] 郑俊, 郝继贵, 叶声华. 三维坐标测量技术在汽车车身检测中的应用[J]. 工具技术, 2004, 38(24): 70-73.

[10] Isaak Vryzidis, George Stefanou, Vissarion Papadopoulos. Stochastic stability analysis of steel tubes with random initial imperfections[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 77(2013): 31-39.

[11] Cho J R, Song J M, Lee J K. Finite element techniques for the free-vibration and seismic analysis of liquid-storage tanks[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 37 (2001): 467-483.

[12] He Qingqiang, Sun Jia, Yan Chengxin, et al. Thermo-mechanical modeling and simulation of microstructure evolution in multi-pass H-shape rolling[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 76 (2013): 13-20.