文章编号:1008-1534(2024)02-0148-06

一种基于光电自准直法的装甲战车原位校炮系统

朱金达[1],董建国[1],张卫民[2],霍　宁[2],郑　明[2],黄风山[1]

(1. 河北科技大学机械工程学院,河北石家庄　050018;2. 河北前进机械厂,河北石家庄　050035)

摘　要:为了解决当前装甲战车校炮时空受限、精度低、过程复杂、无法现场原位校炮等问题,提出了一种基于光电自准直法的装甲战车原位校炮系统。基于镜炮一致性原理,设计校炮装置的机械结构;构建平行光管及其内部光路结构,利用光学自准直原理实现模拟无穷远处虚拟靶标;建立校炮装置的误差模型,通过对误差模型进行分析与合成以评定校炮装置参数的精确性,确定装置允许的最大误差值;通过实验对系统性能进行了实际测试与验证。结果表明:利用所设计的误差模型,其校准误差最大不超过传统校炮方式的 60%,且时间缩短了一半以上,符合设计要求,具有较强的稳定性。装甲战车原位校炮系统可应用于装甲战车校炮工作,提高校炮的效率及精度、实现现场原位校准,为装甲战车校炮提供了一种新方法、新思路。

关键词:机械学其他学科;装甲战车;校炮;瞄准精度;误差分析

中图分类号:H164　　**文献标识码**:A　　**DOI**: 10.7535/hbgykj.2024yx02009

An in-situ artillery calibration system for armored vehicles based on photoelectric self-collimation method

ZHU Jinda[1], DONG Jianguo[1], ZHANG Weimin[2], HUO Ning[2], ZHENG Ming[2], HUANG Fengshan[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Hebei Qianjin Machinery Factory, Shijiazhuang, Hebei 050035, China)

Abstract: In order to solve the current problems of restricted time and space, low accuracy, complicated process and inability to proofread artillery in situ for armored vehicles, an in-situ artillery calibration system for armored vehicles based on photoelectric self-collimation method was proposed. Based on the principle of mirror gun consistency, the mechanical structure of the artillery calibration device was designed; The parallel light tube and its internal optical structure were constructed to simulate the virtual target at infinity by using the principle of optical self-collimation; The error model of the artillery calibration device was established, the accuracy of the parameters of the artillery calibration device was evaluated by the analysis and synthesis of the error model, and the maximum error value allowed by the device was determined; The performance of the system was tested and verified through the experiments. The results show that with the error model

收稿日期:2023-08-28;修回日期:2024-01-19;责任编辑:王淑霞

基金项目:河北省重点研发计划项目(22351801D)

第一作者简介:朱金达(1980—),男,河北高碑店人,副教授,博士,主要从事数字化设计与制造、复杂装备数字孪生技术、基于 VR 的智能设计与制造技术方面的研究。

通信作者:黄风山教授。E-mail:hfs_high@126.com

朱金达,董建国,张卫民,等. 一种基于光电自准直法的装甲战车原位校炮系统[J]. 河北工业科技,2024,41(2):148-153.

ZHU Jinda, DONG Jianguo, ZHANG Weimin, et al. An in-situ artillery calibration system for armored vehicles based on photoelectric self-collimation method[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2024, 41(2): 148-153.

designed, the calibration error is no more than 60% of the traditional proofread artillery, and the time is shortened by more than half, which meets the design requirements and has strong stability. The in-situ artillery calibration system can be applied to the artillery calibration of armored vehicles to improve the efficiency and accuracy of the artillery calibration and to achieve the in-situ calibration on the spot, which provides a new method and a new way of thinking for the artillery calibration of armored vehicles.

Keywords: other disciplines in mechanics; armored vehicle; artillery calibration; aiming accuracy; error analysis

坦克、自行火炮、步兵战车等装甲战车具有机动性强、装甲坚固、火力猛等优点，是中国军队量大面广的重要装备，也是现代战争的中坚力量。射击精度是描述装甲战车火力性能的重要技术指标，直接影响其命中率[1]。装甲战车的射击精度会随时间受环境因素影响，因此，为了保证装甲战车训练和实战中的射击精度，需要对装甲战车的火控系统定期进行校准[2-3]。装甲战车校炮，即对装甲战车的瞄准精度和指向精度进行校准和标定，是对装甲战车射击精度和作战能力的重要保证，也是提高装甲战车射击精度必不可少的环节，对提高装甲战车战斗力具有极其重要的战略意义。常用的校炮方法一般为定距法[4]，该方法是在炮口处加装膛镜，随后操作员利用膛镜瞄准远处的靶标中心，以此确定火力线的位置；随后由装甲战车内部操作员调节瞄准镜，使得瞄准镜的十字准心指向远处靶标的中心，实现火力线和瞄准线在远处交汇，完成校炮。整个校炮过程需多人配合，车内、车外协作完成，对场地也有一定要求，存在着校炮便捷性差、作业时间长、精度低以及无法原位完成校炮等难题。

目前，针对装甲战车校炮的研究较少，孟波等[5]设计了调炮精度智能检测系统，建立了调炮精度空间解算模型，利用数据库技术，实现数据自动记录、运算、分析以及检测报告的实时出具。王建斌等[6]提出了一种新的坦克装甲车辆武器系统校炮方法，实现了火控系统瞄准线和火力线的自动校正，大大降低了系统操作的复杂性，有效提高了射击命中率。胡廷智等[7]将激光准直技术同轴孔定心测量技术相结合，提出了一种基于激光自准直的发动机轴孔同轴度实时检测方法，实现了轴孔同轴度误差的实时检测，解决了现有人工检测方法存在的效率低、精度不高的问题。上述研究为中国校炮技术的进一步研究和应用打下了很好的基础。但这些方法多是对火力线与瞄准线进行的一维校正，而并未对炮管的俯仰角和方位角的指向进行标定，难免影响射击精度；同时实际应用中存在不能原位校准、使用不便、工作不稳定及价格偏高等问题，因而未能得到普及应用。

本文提出一种基于光电自准直法的装甲战车原位校炮系统，以实现高精度、现场原位、快速、多维功能一体化校炮，突破校炮的时间和空间限制。

1　校炮系统设计

1.1　校炮流程设计

装甲战车校炮，即对其火力线（炮管轴线）和瞄准线（瞄准镜轴线）的平行度进行校准和标定[8]。

传统的校炮流程如图 1 所示。首先驾驶员需将待校准的装甲战车运送至维修部厂房，在炮管前一定距离设立靶标，并调节炮管至水平位置，在炮管内插入校炮镜，内外部操作人员相互配合将炮管对准至靶标上对应 0°位置的十字靶心；然后观察瞄准镜准心和靶标十字靶心的位置关系，调整瞄准镜的指向，使 2 个准心重合，则当前角度校准完成；随后分别调节炮管到其他角度，重复上述步骤，直至所有角度瞄准精度达到要求[9]。

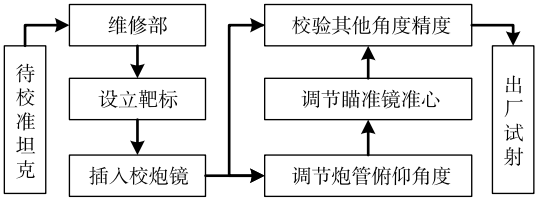


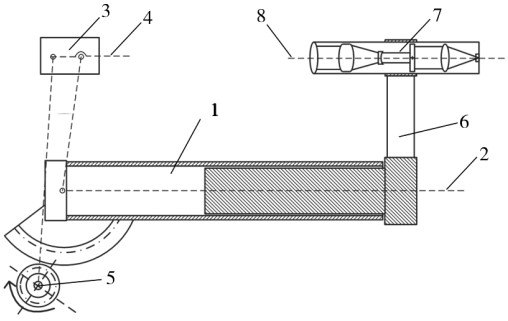
图 1　传统校炮流程

Fig. 1　Traditional artillery calibration process

本文研究的基于光电自准直法的装甲战车原位校炮系统，无需专用场地、无需多人配合，即可实现现场原位车内校炮。校炮时可在现场原位进行，操作人员只需将校炮装置安装在炮管上，随后在车内调整炮管俯仰角度，通过远程微端实时监测炮管俯仰角度变化，直到炮管俯仰角度调整至水平，随后透过瞄准镜观察平行光管内部虚拟十字靶标与瞄准镜准心位置关系，调整瞄准镜的指向使二者重合，此时当前角度指向精度校准完成。随后调节炮管到其他俯仰角度，与传统校炮方法不同的是可以实时观察炮管的俯仰角度，不仅能够完成固定角度的校准，还可以实现任意俯仰角度的校准，最后完成校炮。

1.2 校炮系统机械结构设计

本文研究的某型装甲战车的火控系统为上反稳像式，战车的瞄准镜外部的物镜吊装在炮塔的顶部，固定不动。如图 2 所示，瞄准镜内的镜体通过连杆机构连接在炮耳轴上，镜体随着炮管的俯仰同步转动，使得瞄准镜内的视角始终与炮管方向一致，并保证瞄准镜轴线和炮管轴线的平行度保持不变，以实现标定不同俯仰角和方位角下的瞄准精度。

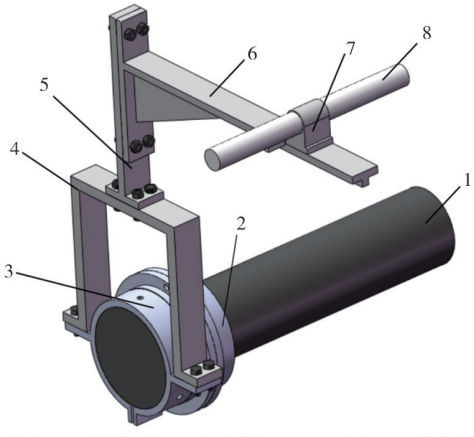


1—炮管；2—炮管轴线；3—瞄准镜；4—瞄准镜轴线；5—炮耳轴；6—校炮装置；7—平行光管；8—光管轴线。

图 2 校炮系统装置安装示意图

Fig. 2 Installation diagram of artillery calibration device

依据装甲战车的瞄准原理[10]，利用机械结构，使与炮管连接的定位轴和平行光管的平行度保持不变，利用平行光管代替炮管，当炮管的俯仰角度发生变化时，只需通过对比瞄准镜内十字刻度线与平行光管发出的虚拟十字靶标的误差来实现装甲战车内原位校炮。机械结构如图 3 所示，将定位轴插入炮管中，并通过固紧环固定在炮管上，连接环固定在定位轴上，由连接环伸出的固定平台支撑连接架，连接架上固定竖直支撑板，以此确定平行光管的竖直位置；水平支撑板与竖直支撑板的侧面连接，光管底座固定在水平支撑板的上平面，平行光管固定在光管底座内。



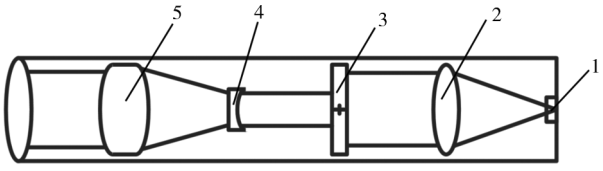
1—定位轴；2—固紧环；3—连接环；4—连接架；5—竖直支撑板；6—水平支撑板；7—光管底座；8—平行光管。

图 3 校炮系统机械结构

Fig. 3 Mechanical structure of artillery calibration system

1.3 平行光管设计

根据几何光学原理，无穷远处的物体经过透镜后成像在焦平面上；反之，从透镜焦平面上发出的光线经过透镜后成为一束平行光[11]。如果将十字分划板置于物镜的焦平面上，当光源通过分划板后，经过分划板后的每一点光源都是平行光源。因此，平行光管发出的虚拟十字像将成像在无穷远处，这样从装甲战车内部瞄准镜观察到的平行光管中的十字像就相当于一个无限远距离的目标。如图 4 所示，光源为 LED 点光源，具有发散小、强度高和方向性强等优点；当点光源经过物镜后，光路会由发散光变成平行光，在经过十字分划板后光源会从圆形光变为十字像，经过扩束镜和准直镜后十字像的范围会变大，方便观察。



1—光源；2—物镜；3—十字分划板；4—扩束镜；5—准直镜。

图 4 准直器的内部结构

Fig. 4 Internal structure of collimator

2 系统的误差建模与分析

误差分析的目的是评定实验数据的精确性[12]。通过误差分析，认清误差的来源及其影响，并设法消除或减小误差。当模型在测试集上的效果不佳，需要对模型在测试集上的误差来源进行分析，进而调整模型。

2.1 误差建模

系统误差又称可测误差，是一种非随机性误差，是由实验方法、所用仪器设备和实验条件等因素造成的[3,12]。这类误差的特点为在多次测定中会反复出现；所有测定都偏高或者偏低，具有单项性；由于误差来源于某一固定的原因，因此数值是恒定不变的。为了确定系统对瞄准精度的影响，对校炮系统的装置结构建立误差模型，研究安装和加工时产生的误差对瞄准精度的影响，根据要求，机械装置部分所产生的最大误差值应≤3 mil(0.18°)。

系统中校炮装置共有包括定位轴、定位筒、连接架、立板、横板、光管底座、光管等 7 个部件组成，其中定位轴通过固紧装置固定在炮管内，在炮管口的圆心建立坐标，以此作为误差模型的基坐标。装置中每个零件建立坐标系，其中，以定位轴轴向为原坐标的 x 轴，竖直方向为 z 轴，对应水平方向为 y 轴，坐标系{1}－坐标系{7}分别对应校

炮装置 7 个部件的坐标系，坐标将误差考虑到参考中，其沿坐标系每个方向产生的偏移量分别用 x_i、y_i、z_i 表示，产生的偏移角用 δ_{zi}、δ_{yi}、δ_{xi} 来表示（见图 5）。

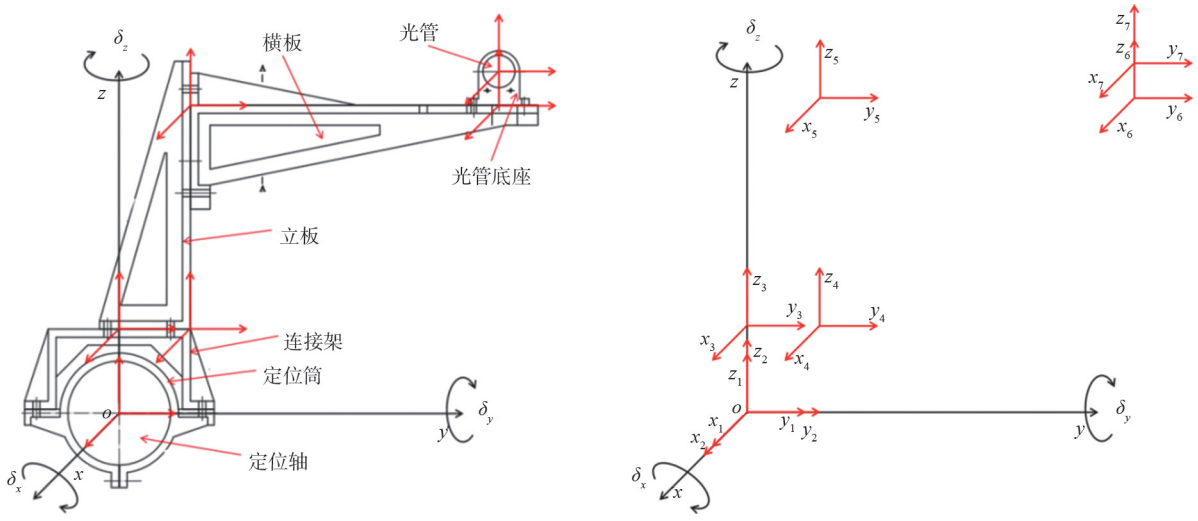


图 5　准直器装置机械结构坐标图

Fig. 5　Mechanical structural coordinate diagram of the collimator device

每个零件的齐次变换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_i^{i-1}=\mathrm{Trans}_y(y_i)\mathrm{Rot}_y(\delta_y)\mathrm{Trans}_z(z_i)\mathrm{Rot}_z(\delta_z)\ ,\tag{1}$$

式(1)中，$\mathrm{Trans}_y(y_i)$ 和 $\mathrm{Trans}_z(z_i)$ 分别为沿着 y 轴和 z 轴的平移，$\mathrm{Rot}_y(\delta_y)$ 和 $\mathrm{Rot}_z(\delta_z)$ 分别为绕着 y 轴和绕着 z 轴转动角度 δ_z。所以当第 i 个零件产生误差时，有：

$$\boldsymbol{T}_i^{i-1}=\begin{bmatrix}\cos\delta_{yi} & -\sin\delta_{yi}\cos\delta_{zi} & \sin\delta_{yi}\cos\delta_{zi} & z_i\cos\delta_{yi}\\ \sin\delta_{yi} & \cos\delta_{yi}\cos\delta_{zi} & -\cos\delta_{zi}\sin\delta_{zi} & y_i\sin\delta_{yi}\\ 0 & \sin\delta_{zi} & \cos\delta_{zi} & y_i\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

则光管坐标系{7}对于炮管坐标系{0}变换矩阵为

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}_1^0\cdots\boldsymbol{T}_i^{i-1}\cdots\boldsymbol{T}_7^6\ ,\tag{2}$$

其中：$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}n_x & o_x & a_x & P_x\\ n_y & o_y & a_y & P_y\\ n_z & o_z & a_z & P_z\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$。

向量 n、o、a 互相垂直，分别为光管位置坐标系相对于基坐标系的法线、指向和接近向量，向量 P 表示光管坐标原点相对于基坐标的位置。

由于装置零件的加工和装配等原因，各零件参数的实际值有一定的偏差，因此装置的几何位置误差可以表示为

$$\Delta P=[\Delta P_x\quad \Delta P_y\quad \Delta P_z]^{\mathrm{T}}=P_{真}-P_{理},\tag{3}$$

式中：$P_{真}$、$P_{理}$ 分别对应矩阵 $\boldsymbol{T}$ 前 3 行的最后一列。根据原始误差独立作用，因此，机构的误差可以表示为几何位置误差，对各原始误差的偏导求和可得：

$$\Delta P=\frac{\partial P}{\partial P}\Delta y+\frac{\partial P}{\partial P}\Delta z+\frac{\partial P}{\partial P}\Delta\delta_y+\frac{\partial P}{\partial P}\Delta\delta_z\ 。\tag{4}$$

令 $X=[y;z;\delta_y;\delta_z]$，则式(4)可表示为

$$\Delta P\approx\sum_{j=1}^{N}\left(\frac{\partial P}{\partial X_j}\right)\Delta X_j\ 。\tag{5}$$

令 $\boldsymbol{J}=\dfrac{\partial P_k}{\partial P_j}(k=x,y,z,j=1,2,\cdots,n)$ 误差雅各比矩阵可表示为

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}J_{1x} & \cdots & J_{jx} & \cdots & J_{nx}\\ J_{1y} & \cdots & J_{jy} & \cdots & J_{ny}\\ J_{1z} & \cdots & J_{jz} & \cdots & J_{nz}\end{bmatrix},\tag{6}$$

则光管位置误差矢量可以表示为

$$\Delta P=\boldsymbol{J}\Delta X\ ,\tag{7}$$

光管几何位置综合误差为

$$|\Delta P|=\sqrt{\Delta P_x^2+\Delta P_y^2+\Delta P_z^2}\ 。\tag{8}$$

2.2　误差分析与合成

在装置的设计阶段，需要根据装置各个零件的精度要求，合理设计并分配各零件的参数公差，确保装置瞄准精度的误差符合设计要求[13-14]。误差分析的目的就是评定实验数据的精确性，而误差合成是误差分析的重要部分，误差合成是将整个测量系统各个环节产生的误差分项进行合成的过程。

系统误差的大小是评定测量准确度高低的标志，一般采用代数法进行求解[15]。装置各部位的标准差分别为 u_i（$i=1,2,\cdots,n$），则光管的瞄准误差的标准偏差由式(8)可得：

$$u=\sqrt{u_x^2+u_y^2+u_z^2}\ 。\tag{9}$$

式(9)中，平行光管处瞄准误差各方向的误差分

量标准差为

$$u_j=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(a_{ij}u_{ij})^2+2\sum_{1\leqslant i\leqslant k}^{q}p_{ik}a_ia_ku_iu_k}\ ,\quad j=x,y,z, \tag{10}$$

式中：a_{ij} 、a_i 和 a_k 均为误差传递系数；p_{ik} 为相关系数；u_i 、u_k 为误差分量的标准偏差。相关的误差分量之间有一定的相关关系，在误差合成时，需要计算它们之间的相关系数。

装置的误差来源于加工和装配，原始误差相互独立，则瞄准误差的标准偏差为

$$u=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(a_{ij}u_i)^2}\ 。 \tag{11}$$

非理想条件各零件产生的误差类型如表 1 所示。由于零件的加工和装配精度不足导致的光管位置产生几何位置偏差，此类误差归结为标定误差；安装误差指装置在安装使用过程中产生的瞄准精度误差。标定误差共 48 项，安装误差共 1 项，其中部分误差，如各零件绕 z 轴转动产生的转动变量，对装置的瞄准精度无太大影响，故不计算在内。

表 1 校炮装置误差类型

Tab. 1 Types of calibration device error

误差类型	误差名称	符号
标定误差	各零件 x 方向尺寸误差	x_i
	各零件 y 方向尺寸误差	y_i
	各零件 z 方向尺寸误差	z_i
	各零件绕 x 轴转动误差	δ_{xi}
	各零件绕 y 轴转动误差	δ_{yi}
	各零件绕 z 轴转动误差	δ_{zi}
安装误差	定位轴安装误差	d_i

3 实验验证

为了验证装置在真实校炮环境下的精度和效率，在当地某工厂的地炮维修厂房进行现场实验验证。实验中将校炮装置插入某型装甲战车的炮管内（见图 6）。通过远程操作端确定光管的位姿状态，调整炮管至水平位置后将装置固定在炮管上。

图 6 校炮装置的安装

Fig. 6 Installation of the artillery calibration device

为了排除其自身精度等因素的干扰，本次实验采用的装甲战车为完成校准之后的设备。实验过程分为 2 步，分别为精度验证实验和重复性验证实验。精度验证实验应用校炮设备，分别对校炮流程中炮管在 −3°、3°、5°、10°和 15° 5 个角度的校准精度进行标定，其结果见表 2。为了探究装甲战车之间的差异所带来的精度影响以及设备的稳定性，进一步对其他同型号装甲战车进行多次相同的实验，将每门装甲战车得到的精度误差进行平均计算后，得到的结果见图 7。

表 2 多角度瞄准精度测量结果

Tab. 2 Measurement results of multi-angle aiming accuracy

校准角度/(°)	校准后角度/(°)	瞄准精度误差绝对值/(°)
−3	−2.97	0.03
3	3.05	0.05
5	5.04	0.04
10	9.91	0.09
15	15.01	0.01

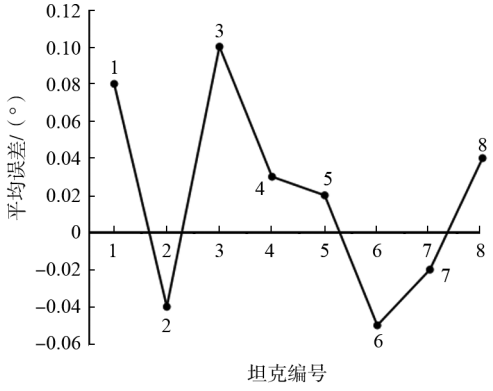


图 7 不同编号坦克校准后平均误差

Fig. 7 Average error after calibration of tank with different numbers

表 2 表明，在不同的俯仰角度，校准后装甲战车的瞄准精度误差均小于要求的 3 mil(0.18°)，证明本设备的校准精度符合设计要求。图 7 表明，设备在多台同型号装甲战车的精度校准实验过程中，每台装甲战车的平均误差也在允许的范围内，证明本设备的稳定性较强，误差在可控范围之内。

4 结 语

本文设计了一种装甲战车原位校炮系统，根据校炮流程和镜炮一致性原理设计了激光原位校炮装置，并且针对校炮装置的各类误差进行了误差建模和分析。

1）系统通过机械结构利用平行光管轴线代替炮管轴线，实现了镜炮一致；平行光管基于激光准直原理模拟无穷远处靶标，实现了原位校炮。

2）通过装置结构误差建模和分析，确定了各误差因素对校准精度的影响。

3）经过现场实验验证了装置的可靠性和校准精度达到设计要求。原位校炮系统解决了传统校炮方法校准精度低、校准周期长、无法现场原位校准等问题。

该系统的设计对提高装甲战车的可靠性、战地应急能力和武器装备综合保障水平具有非常重要意义。系统的不足之处在于当前系统不能完成对其他火控类型装甲战车的校准。后续将优化校炮装置结构，使其能适用于更多型号的装甲战车。

参考文献/References：

[1] QIAN Linfang, CHEN Guangsong, TONG Minghao, et al. General design principle of artillery for firing accuracy[J]. Defence Technology, 2022, 18(12): 2125-2140.

[2] 汪国胜，肖洁，赵韬硕，等. 坦克底盘角振动对火炮射击精度影响机理研究[J]. 火力与指挥控制，2016，41(3)：39-42.
WANG Guosheng, XIAO Jie, ZHAO Taoshuo, et al. Study on influence mechanism on gun firing accuracy resulted from angular vibration of target chassis[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(3): 39-42.

[3] 李豪杰，王伟强，李长生，等. 火炮膛线缠角误差对空炸引信定距精度影响及补偿方法[J]. 北京理工大学学报，2018，38(4)：371-375.
LI Haojie, WANG Weiqiang, LI Changsheng, et al. Influence of winding angle error of artillery rifling on the positioning accuracy of air-burst fuze and its compensation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(4): 371-375.

[4] 解宝琦，李英顺，王德彪，等. 一种坦克炮长瞄准镜系统状态评估的方法[J]. 兵工学报，2023，44(8)：2414-2423.
XIE Baoqi, LI Yingshun, WANG Debiao, et al. Method for evaluating tank gunner's sight system[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(8): 2414-2423.

[5] 孟波，王圣旭，游藩，等. 火箭炮调炮精度智能检测系统的设计与实现[J]. 兵器装备工程学报，2019，40(1)：78-82.
MENG Bo, WANG Shengxu, YOU Fan, et al. Design and implementation of intelligent detection system for rocket launcher's adjustment accuracy [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(1): 78-82.

[6] 王建斌，张春涛，文美石，等. 坦克装甲车辆直瞄武器的一种新型校炮方法[J]. 指挥与控制学报，2019，5(3)：254-258.
WANG Jianbin, ZHANG Chuntao, WEN Meishi, et al. A new boresighting method of tanks with direct fire weapons[J]. Journal of Command and Control, 2019, 5(3): 254-258.

[7] 胡廷智，张忠清，肖木峥，等. 基于激光自准直的发动机轴孔同轴度在线检测方法[J]. 推进技术，2019，40(9)：2099-2104.
HU Tingzhi, ZHANG Zhongqing, XIAO Muzheng, et al. Online detection method for shaft holes coaxiality of engine based on laser autocollimation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(9): 2099-2104.

[8] 杨延超，李英顺，李茂，等. 装甲装备观瞄系统状态评估的方法研究[J]. 火炮发射与控制学报，2020，41(4)：80-86.
YANG Yanchao, LI Yingshun, LI Mao, et al. Research on method of status evaluation of weapon equipment sighting system [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(4): 80-86.

[9] LIU Ziyu, CHEN Weiyi. Research and analysis on firing accuracy of naval gun[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1948: 012081.

[10] 张豪，杨鑫，陈龙淼，等. 基于双目视觉的火炮身管指向全自动测量方法[J]. 光学学报，2023，43(2)：98-106.
ZHANG Hao, YANG Xin, CHEN Longmiao, et al. Automatic measurement method of cannon barrel pointing based on binocular vision[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(2): 98-106.

[11] 赵珩翔，李立波，冯玉涛，等. 基于自准直原理的空间光学成像系统在轨几何定标技术[J]. 光子学报，2021，50(1)：123-130.
ZHAO Hengxiang, LI Libo, FENG Yutao, et al. Techniques for on-orbit calibration of space optical imaging systems based on auto-collimation [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50 (1): 123-130.

[12] 王向民，王军，谢杰涛，等. 基于射击误差状态方程的高炮毁伤概率建模[J]. 上海交通大学学报，2020，54(9)：961-966.
WANG Xiangmin, WANG Jun, XIE Jietao, et al. A damage probability calculation model based on state equation of firing error for anti-aircraft artillery[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(9): 961-966.

[13] 翟文宇，钱林方，陈光宋. 火炮自动装填系统摆动机构的运动精度可靠性与灵敏度[J]. 兵工学报，2023，44(4)：1062-1070.
ZHAI Wenyu, QIAN Linfang, CHEN Guangsong. The kinematic accuracy reliability and reliability sensitivity analysis of a swing mechanism with the automatic loading system of a cannon[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(4): 1062-1070.

[14] 戴文君，常天庆，张雷，等. 面向坦克火控系统的多尺度形变目标检测方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2019，31(12)：2082-2090.
DAI Wenjun, CHANG Tianqing, ZHANG Lei, et al. Multi-Scale deformable target detection method for tank fire control system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(12): 2082-2090.

[15] ZHANG Ye, ZHENG Yang. Research on a method for the optical measurement of the rifling angle of artillery based on angle error correction[J]. Current Optics and Photonics, 2020, 4(6): 500-508.