

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407520

# 新型小型化磁传感弹速测试关键技术研究\*

陈 仟 武锦辉

(中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

**摘要:**针对区截测速领域中,传统测速装置存在有效面积小、位置固定、布置繁琐等问题,基于电磁感应原理,提出并验证了一种新型电磁感应传感单元,用于精确测量弹丸初速。与传统磁感应线圈相比,该结构采用感应线圈包裹永磁体,使弹丸无需磁化即可产生感应电动势,提高了测速靶的灵敏度和测量精度;另外传感单元与弹道同轴独立布置,有效解决了弹道方向与测试装置稳定位置之间的相对位置问题,增大磁感应有效面积,增强了测量装置的便携性,可以使其灵活运用于多种弹丸测速场合。该方案利用COMSOL软件对传感单元进行建模,对永磁体模型和在不同条件下弹丸穿过磁场的动态过程进行了详细的仿真分析。依据仿真数据制作线圈传感单元,并对仿真结果进行多次实验验证,测试结果表明,传感单元感应电压随弹丸速度的加快而增大,且二者之间在一定范围内呈线性关系,与仿真所得结果一致。该研究不仅为电磁感应测速靶的优化提供了理论依据和数据支持,而且为电磁炮和其他高速发射系统的膛内、外弹道初速测量提纲了有效解决途径。

**关键词:** 区截测速;弹丸初速;电磁感应原理;COMSOL 仿真

中图分类号: TJ410.6; TN98

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

## Research on the key technology of new miniaturised magnetic sensing ball velocity test

Chen Qian Wu Jinhui

(School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of small effective area, fixed position and cumbersome arrangement of the traditional velocimetry device in the field of area-intercept velocimetry, based on the principle of electromagnetic induction, a new type of electromagnetic induction sensing unit is proposed and verified for the accurate measurement of the initial velocity of the projectile. Compared with the traditional magnetic induction coil, this structure adopts an induction coil wrapped with a permanent magnet, so that the projectile does not need to be magnetised to generate an induced electromotive force, which improves the sensitivity and measurement accuracy of the velocimetry target. In addition, the sensing unit is independently arranged coaxially with the trajectory, which effectively solves the problem of the relative position between the direction of the ballistic trajectory and the stable position of the test device, increases the effective area of the magnetic induction, and strengthens the portability of the measurement device, which can make it Flexible use in a variety of projectile velocity measurement occasions. The solution uses COMSOL software to model the sensing unit, and conducts detailed simulation analysis of the permanent magnet model and the dynamic process of the projectile passing through the magnetic field under different conditions. Based on the simulation data to create a coil sensing unit, and the simulation results of a number of experimental verification, test results show that the sensing unit sensing voltage increases with the speed of the projectile, and the two are linear within a certain range, consistent with the results obtained from the simulation. This study not only provides theoretical basis and data support for the optimisation of electromagnetic induction velocity target, but also outlines an effective solution for the measurement of in-bore and out-of-bore ballistic muzzle velocity of electromagnetic artillery and other high-speed launch systems.

**Keywords:** zone interception velocity; projectile muzzle velocity; electromagnetic induction principle; COMSOL simulation

收稿日期: 2024-05-14 Received Date: 2024-05-14

\* 基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202203021211087)、山西省回国留学人员科研资助项目(2023-141)、中北大学研究生科技立项(20231939)项目资助

## 0 引言

弹丸初速的准确测量对于武器系统的性能评估、弹道计算、设计改进和质量控制等方面至关重要,是确保武器系统有效性和可靠性的关键步骤<sup>[1-2]</sup>。目前国内外采用的非接触测量方法具体分为天幕靶、多普勒雷达、光电测速靶、线圈靶和 B 探针等,线圈靶是基于电磁感应原理<sup>[3]</sup>,通过感应弹丸飞行时切割磁场线产生的电动势来测量其速度<sup>[4]</sup>,由于结构简单,可重复使用,方便迅速等优点而受大众青睐<sup>[5-6]</sup>。这些技术在国内外得到了广泛的研究与应用,为武器系统的研发和性能提升提供了强有力的支持<sup>[7-8]</sup>。

传统的线圈靶因其结构简单、成本较低而得到广泛应用<sup>[9]</sup>,但由于励磁线圈其有效面积小、位置固定、布置繁琐<sup>[10]</sup>,感应线圈需要磁化弹丸费时费力,且对弹丸要求较高等劣势,测量精度容易受到影响<sup>[11-13]</sup>。为了克服这些限制,基于电磁感应原理,提出了一种改进型的电磁感应测速靶。新型电磁感应测速靶采用与弹道同轴独立布置的结构,优化了感应磁场的设计,提高了对弹丸切割磁场产生感应电动势的灵敏度,同时减轻了重量,增强了便携性,这些优势可以灵活运用于多种弹丸测速场合<sup>[14]</sup>。

为了验证测速靶的设计理念 and 性能,本研究对测速靶进行了 COMSOL 仿真工作,COMSOL 仿真是一种基于有限元分析的数值模拟方法<sup>[15]</sup>,它能够有效模拟电磁场、力学场、热场等多种物理场的相互作用和相互影响<sup>[16]</sup>。通过 COMSOL 仿真,精确预测了在不同工作条件下,测速靶对磁场变化的响应特性,以及感应电动势的动态变化过程<sup>[17]</sup>。

## 1 新型电磁感应测速靶测速原理优化

在传统的线圈靶测速系统中,一般分为两种测速模式<sup>[18]</sup>,一种是励磁线圈,该类线圈靶由内圈的励磁线圈和外圈的感应线圈构成,工作室需要通入外部直流电源,形成恒定磁场。当导体弹丸通过感应线圈时,引起感应线圈的磁通量变化,产生感应电动势,完成测速;另一种为感应线圈,此种测量方时需要先将弹丸磁化<sup>[19]</sup>,磁化弹丸移动时作用感应线圈产生感应电动势,达到测速目的<sup>[20]</sup>。

对于励磁线圈而言,由于外部电源长时间供电,导致热噪声产生,影响感应信号,产生测量误差。另外励磁线圈会给装置的便携性增加难度,另外传统感应线圈需要对弹丸进行磁化,容易造成结果失真,会影响测速的实时性<sup>[21]</sup>。

基于上述两种线圈靶的局限性,设计出一种体积较小、精度较高、磁感应利用率较大的新型磁传感测速靶。该靶在永磁体的周围缠绕感应线圈作为探测点,具有由两个或以上的探测点构成的区截装置。相较于励磁线圈和感应线圈,新型测速靶不需外部供电,没有冗长的测速系统,同时不需磁化弹丸线圈中就可以产生感应电动势。

这种设计不仅提高了测量的灵敏度和精确度,而且通过减轻重量增强了便携性,显著提升了装置的实用性。探测点测速原理如图 1 所示。

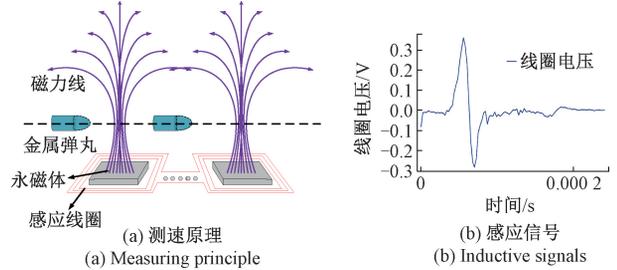


图 1 新型测速靶测速原理与信号

Fig. 1 The principle and signal of the new velocimetric target

对于新型电磁感应测速靶的研究,首先建立理论模型,探讨线圈包裹永磁体探测点的电磁感应特性,随后通过仿真和实验验证其性能,以为电磁炮和其他高速发射系统的弹丸初速测量提供一种新的解决方案。COSMOSL 的仿真模型采用物理场为有限元磁场 (magnetic fields, MF),“磁场”接口可以计算线圈、导体或者磁体内部的磁场分布或者电流的分布。通过麦克斯韦方程组求解矢量磁位  $\mathbf{A}$ 。下列公式为有限元条件下的物理场设置。

其中矢量磁位  $\mathbf{A}$  与磁感应强度  $\mathbf{B}$  的关系为:

$$\vec{\mathbf{B}} = \nabla \times \vec{\mathbf{A}} \quad (1)$$

简化 PDE 公式为:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \vec{\mathbf{A}}) = \vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad (2)$$

其中,  $\nabla$  代表哈密顿算子;  $\mathbf{D}$  向量表示电位移矢量,单位为  $\text{C}/\text{m}^2$ ;  $\rho$  为自由电荷体密度,单位为  $\text{C}/\text{m}^3$ ;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度,单位为  $\text{T}$ ;  $\mathbf{J}$  表示电流密度矢量,单位为  $\text{A}/\text{m}^2$ 。

场域方程为:

$$(\mathbf{j}\omega\sigma - \omega^2\epsilon)(\vec{\mathbf{A}}_{ext} - \vec{\mathbf{A}}_{red}) + \nabla \times [\mu^{-1} \nabla (\vec{\mathbf{A}}_{ext} - \vec{\mathbf{A}}_{red})] = \vec{\mathbf{J}}_c \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{A}_{red}$  代表感生磁位,  $\mathbf{A}_{ext}$  代表已知背景磁位。

瞬时方程为:

$$\nabla \times [\mu^{-1} \nabla (\vec{\mathbf{A}}_{ext} - \vec{\mathbf{A}}_{red})] = \vec{\mathbf{J}}_c \quad (4)$$

$$\nabla \times [\mu^{-1} (\nabla \mathbf{A}_{red} - \mathbf{B}_{ext})] = \vec{\mathbf{J}}_c \quad (5)$$

对于空气域 (除永磁体与线圈之外的所有域),采用

物理场用安培定律定义,满足以下条件:

$$\nabla \times H = J \quad (6)$$

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

$$J = \sigma E \quad (8)$$

对于永磁体在满足(2.6~2.8)的情况下也同时满足:

$$B_r = f(\|B_r\|) \frac{e}{\|e\|} \quad (9)$$

对于线圈,类型选择为均匀多匝,电流大小为 0。设置匝数为已经定义好的参数 *Coil\_Turns*,线圈内电流密度满足公式如式(10)所示。

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A} e_{coil} \quad (10)$$

根据电磁感应原理,当金属弹丸高速通过永磁体时会产生磁场的变化,磁场的变化又会在线圈中产生感应电动势,通过捕捉电压信号并对其进行分析,可以了解弹丸的运动情况;感生电动势和匀强磁场的计算公式如式(11)和(12)所示<sup>[22]</sup>。

$$U = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (11)$$

$$\Phi = BS \quad (12)$$

其中, $n$ 为感应线圈的匝数, $S$ 为感应线圈的面积, $\Phi$ 为通过感应线圈的磁通量, $B$ 为磁场强度;在弹丸出膛穿过测速靶时,磁场分布均匀且中心对称,弹丸飞行轨迹与磁场轴线任一平面垂直,其中, $k$ 为磁场分布系数, $B$ 为炮管中心轴线处的磁感应强度,由于实际情况磁场强度不会是均匀分布,所以 $k$ 的取值与 1 有偏差,得到式(13),式(13)为弹丸运动时在线圈中产生的感应电压的计算公式。

$$U_0 = -nkS \frac{dB_0}{dl} v(l) \quad (13)$$

对式(13)进行分析,线圈产生的磁感应电动势只与线圈匝数  $n$  和速度  $v(l)$  有关。在第 3 节会对此结论进行仿真验证。

## 2 测速系统

将以上用感应线圈包裹的永磁体探测点用 pcb 板固定,与计时器相连接,形成区截装置,当弹丸从两个探测点上方经过时形成两个感应信号,基于 stm32 设计的采集电路获取计时器的信号,传送至上位机,计算出弹丸的速度。测速系统如图 2 所示。

感应线圈中线圈线径的选择对感应信号的影响至关重要,线径的大小会影响线圈的电阻和电感值,较大的线径可以承载更大的电流,在测速中引发时间误差。综合考虑之后,油性漆包线、高强度聚氨酯漆包线、高强度环

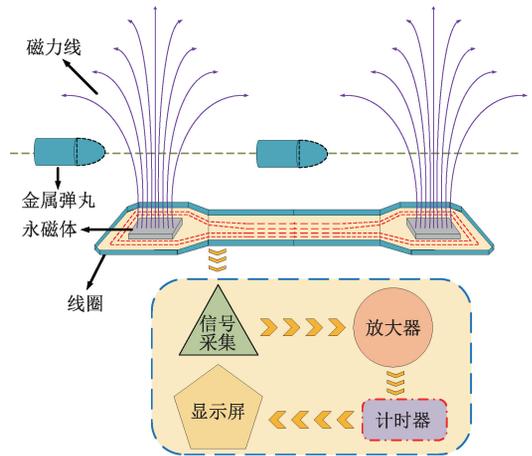


图 2 测速系统

Fig. 2 Speed measurement system

氧等都是用于仪表线圈中和电机中,可以从这些材料中选择,线径初步定为 0.3 mm。

在永磁体的选取和布置方面,必须根据测速靶尺寸和环境条件,精选适用的永磁体,将其固定在 PCB 八层板中,在其周围缠绕均匀多匝的感应线圈。在传感器设计和数据采集方面,需采用高精度、高灵敏度的传感器,并采用适当的电路和数据采集方案对感应电动势进行处理和记录。

对于线圈匝数和永磁体选取和布置,使用 COMSOL 软件进行弹丸切割磁场仿真,以选取合适的参数。通过仿真结果,确定了最适合的永磁体尺寸和线圈匝数,以确保系统性能和稳定性。

## 3 弹丸测速模型仿真与实验测试

COMSOL Multiphysics 是一款多物理场仿真软件,它提供了一个强大的平台,用于建模和模拟各种物理现象和工程问题,被广泛应用于科学研究、工程设计和产品开发等领域。

测速靶仿真 COMSOL 的核心功能是解决和求解常微分方程、偏微分方程和代数方程等数学模型。基于有限元分析方法,可以对复杂的物理系统进行建模和仿真,涵盖了电磁场、热传导、流体力学、声学、结构力学、化学反应等多个物理场。

由于磁体的参数等自身因素会对测速精度造成误差,先对永磁体的模型进行了静态建模,选取到永磁体合适的参数之后,再创建弹丸模型,对弹丸穿过磁场产生感应电压进行仿真。

### 3.1 静态永磁体仿真

在对永磁体模型以及弹丸穿过永磁体产生感应电压进行仿真的过程中,首先进行了静态永磁体的磁场分布

仿真。通过点击模型向导,选择三维模型,并进行物理场的选择。该仿真采用 AC-DC 模块,在电磁场中选择磁场进行研究。在几何模块中选择长方体和圆环建立测速靶的几何模型,同时建立一个球体模型作为空气域模型。然后,在定义栏中建立无限元域,选择球体的 8 个表面,并在全局定义中选择材料并赋予所建立的模型,将空气添加到整个球体域中,永磁体材料选为 N45 (Sintered NdFeB),即钕磁铁,线圈材料设为 Copper;在磁物理场中将全部模型定义安培定律,将铜环附加线圈的属性,通入 2 A 的电流,磁化模型选择剩余磁通密度,密度方向为 Z 轴方向,在此之后将网格调整为合适大小之后进行计算,操作栏如图 3 所示。

计算完成之后,在结果一栏中调出磁通密度模—体—线上箭头,可以观测到探针静态的磁场分布如图 3 所示。

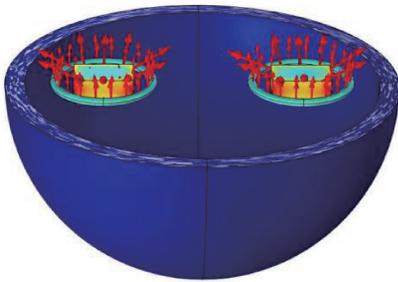


图 3 永磁体静态磁场分布模型

Fig. 3 Static magnetic field distribution model of a permanent magnet

### 3.2 动态弹丸仿真

由于动态仿真需要添加运动网格,在三维模型仿真中会有很多不稳定因素的干扰,所以该动态仿真选择二维模型。

根据静态仿真的结果设定测速靶的长度,永磁体尺寸模型设定为长宽高分别为 10 mm×5 mm×5 mm。添加椭球模型来模拟弹丸测速的动态仿真,探测模块设置为 3 个;其余参数设定与上述相同,只需要运动的 1~3 部分设定为动网格并依次给它们添加指定变形的网格,并且设定连续性边界让其稳定,指定变形的距离分别为  $V_0 \cdot t \cdot (X+400[mm]) / (40[mm])$ 、 $V_0 \cdot t$ 、 $V_0 \cdot t \cdot (200[mm]-X) / (330[mm])$ , $X+$ 、 $-X$  分别规定为正方向和负方向;动态模型如图 4 所示。

仿真的核心目标是探究线圈匝数对于感应电压的影响,以优化电磁感应测速靶的设计。为此,选取了 5.56 mm 口径、长度为 51 mm 的弹丸作为研究对象,并设定其速度为 940 m/s。通过 COMSOL Multiphysics 软件,对不同匝数的线圈靶进行了仿真实验,具体匝数分别为 10 匝、20 匝、30 匝、40 匝和 50 匝,以下仿真取第一个探

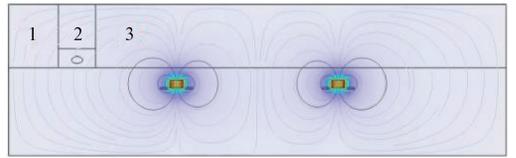


图 4 动态弹丸测速模型

Fig. 4 Dynamic projectile velocity measurement model

测点所得结果作为参考,对不同匝数的仿真结果如图 5 所示。

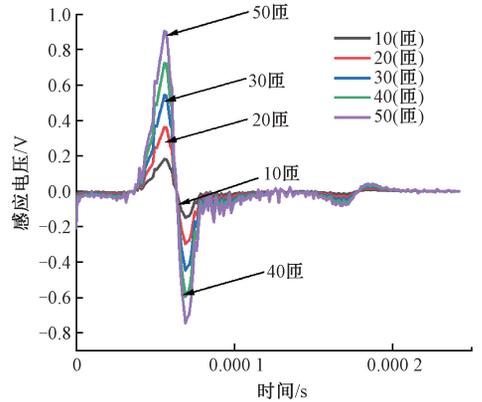


图 5 不同匝数的感应电压

Fig. 5 Induced voltages for different turns

仿真实验的目的是为了模拟弹丸穿越线圈时磁场的变化,以及这些变化如何在线圈中感应出电动势。通过精确的数值模拟,能够捕捉到弹丸速度与线圈匝数对感应电压的具体影响。实验结果表明,线圈的匝数对感应电动势的幅度具有显著的影响。

为了更直观地展示这一关系,取图 5 所呈现的不同线圈匝数下的感应电压最大值,并重新绘制成图 6。在图 6 中,可以清晰地观察到,随着线圈匝数的增加,感应电压的最大值呈现出正相关的趋势。这一发现对于设计高灵敏度的测速靶具有重要的指导意义。

根据图 6 所示,在一定范围内,弹丸运动所产生的感应电压与线圈匝数成正比,在条件一定时,可以通过增加线圈匝数来提升探测器的灵敏度,提高感应电压。基于这一结论,并结合实际测速靶的尺寸和设计要,选取 30 匝线圈进行进一步的仿真,旨在深入探讨感应电压与弹丸速度之间的关系,以期为以后测速靶的制作和其他高速发射系统的弹丸初速测量提供更加精确的指导。

针对实际使用的 5.56 mm 口径弹丸,设置了 4 种不同的速度进行仿真实验,分别为 850 m/s、940 m/s、1 200 m/s 和 1 500 m/s。通过 COMSOL 软件,模拟了弹丸穿越线圈时的电磁感应效应,并记录了在每种速度下线圈中产生的感应电压信号,如图 7 所示。

仿真结果表明,感应电压随着弹丸速度的增加而显

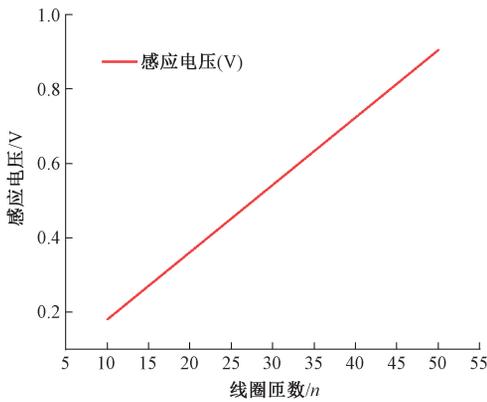


图 6 不同匝数的感应电压最大值

Fig. 6 Maximums of induced voltages for different turns

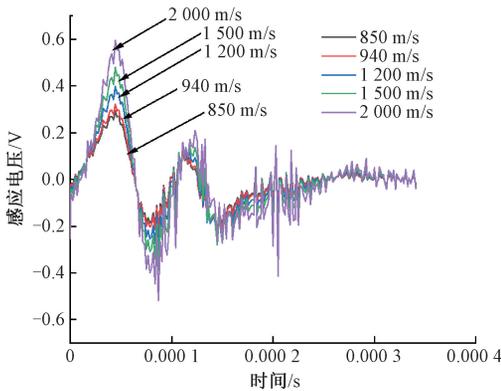


图 7 不同速度的感应电压

Fig. 7 Induced voltages at different speeds

著增大。为了更准确地分析这一关系,对每种速度下的仿真结果进行了最值分析,即提取了感应电压的最大值进行比较,如图 8 所示。分析结果进一步证实了感应电压与弹丸速度之间的正相关性,即感应电压与弹丸速度成正比。

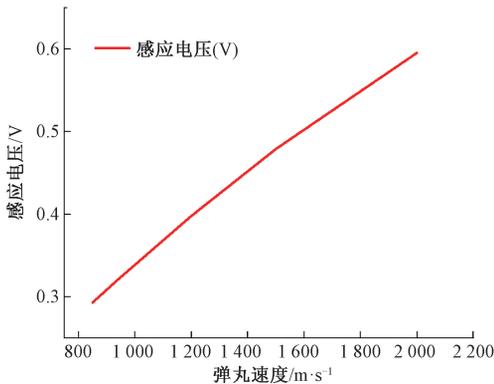


图 8 不同速度的感应电压最大值

Fig. 8 Maximums of induced voltages at different speeds

通过上述仿真实验,不仅验证了线圈匝数、弹丸运动速度与感应电压之间的关系,而且为电磁感应测速靶的

优化提供了重要的数据支持。

### 3.3 实验室测试

根据上述仿真,将两块长宽高分别为为 10 mm、5 mm、5 mm 钕磁铁嵌入到 145 mm 的八层板中,两两中心间隔为 130 mm;线径 0.3 mm 的线圈围绕钕磁铁缠绕 20 匝。制作的测速靶部分如图 9 所示。



图 9 新型感应线圈测速靶

Fig. 9 A new type of velocity target and a small steel ball

通过理论及数据支撑,结合实际情况,将制作好的一套测速靶在实验室中摆放,用弹弓和小钢珠代替子弹进行实验室实验,图 10 为经过放大器之后金属弹丸实测的波形。之后取不同速度所测的感应带电压的最值绘制曲线,如图 11 所示。

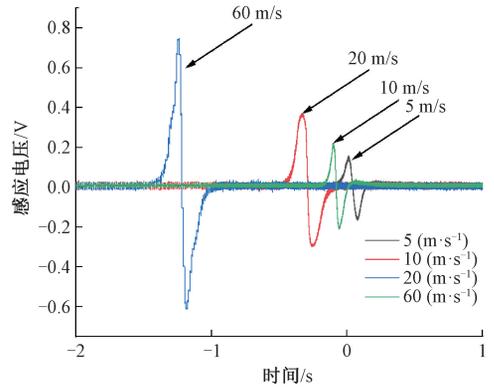


图 10 实验所用弹弓与金属钢珠

Fig. 10 Slingshot and metal steel balls used in the experiment

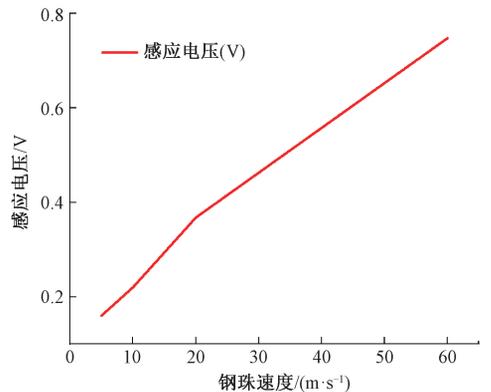


图 11 不同速度感应电压最大值

Fig. 11 Maximum values of induced voltages at different speeds

仿真出的测速靶测速性能与实验所得结果一致,新型感应线圈测速靶体积较小,安装简易,新型感应线圈磁感应利用率大,后续可设计一套固定的装置,绑定在枪口附近进行弹丸初速检测。新型感应测速靶对于枪炮初速的测量具有一定的应用价值和参考意义。

## 4 结 论

本研究的核心目标是设计一种无需磁化弹丸即可测量感应信号的线圈靶,并通过仿真数据验证其可行性。主要技术创新在于将漆包线以精确匝数缠绕于钕磁铁周围,并将其固定于八层 PCB 板内。技术难点包括材料种类的选择和距离设计的仿真,以确保磁场的稳定性和测量数据的准确性。基于仿真与实验结果,本研究确定感应靶的长度为 145 mm,钕磁铁的尺寸为 10 mm×5 mm×5 mm,两者间隔为 130 mm,线圈匝数设定为 30 匝。

该测速靶在实际应用中无需外部供电,避免了复杂的测速系统,并且其体积紧凑、结构便于携带和简易安装。同时,长期工作下不产生额外的功率消耗,有效消除了热噪声对感应信号的干扰。实验结果表明,经过优化的感应线圈显著提升了信号的灵敏度和信噪比,增强了信号的强度和数据的可靠性。

综上所述,本研究的结论被认为是有效且可靠的,为弹道测速领域的发展提供了重要的理论支持和实践依据。通过增加探测点的数量,可以进一步改进测速装置的区截结构,深入探讨弹丸速度的变化规律。这不仅为弹道研究提供了精准的数据,也为评估武器系统的毁伤效果、射程和精度等关键性能指标提供了有力的支持。通过精确测量弹丸速度的变化,本研究为武器系统设计的验证和优化奠定了基础,确保其在实际应用中的有效性和可靠性。

## 参考文献

- [ 1 ] 赵磊,刘吉,武锦辉,等. 光电阵列动态扫描式弹丸坐标及速度测量方法[J]. 探测与控制学报,2023,45(2):51-54,60.  
ZHAO L, LIU J, WU J H, et al. Dynamic scanning method for measuring the coordinates and velocities of projectiles using photoelectric arrays [J]. Journal of Detection and Control, 2023, 45 (2): 51-54,60.
- [ 2 ] 辛瑞楠. 线圈炮用光电反射式多点测速技术[D]. 西安:西安工业大学,2024.  
XIN R N. Photoelectric reflective multipoint velocity technology for coil cannons [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [ 3 ] 苏凝钢,刘吉,武锦辉,等. 多路激光测速控制系统的设计[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(4):186-190.

- SU N G, LIU J, WU J H, et al. Design of a multi-channel laser speed measurement control system [J]. Journal of Weapon Equipment Engineering, 2020, 41 (4): 186-190.
- [ 4 ] 李玉,李湘平,武晓康. 基于磁探针阵列的电磁发射内膛速度拟合方法[J]. 海军工程大学学报,2016,28(S1):31-34.  
LI Y, LI X P, WU X K. Method for fitting the velocity of elect magnetic launch chamber based on magnetic probe array [J]. Journal of Naval Engineering University, 2016, 28 (S1): 31-34.
- [ 5 ] 李唐安,郑楚君,孙清雯,等. 线圈型磁通量传感器多路复用结构优化研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(11):14-23.  
LI T AN, ZHENG CH J, SUN Q W et al. Research on multiplexing structure optimization of coil-type magnetic flux sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(11):14-23.
- [ 6 ] 李士彦,蔡德咏. 基于电磁感应的炮口测速装置设计与试验研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(10):80-82.  
LI SH Y, CAI D Y. Design and experimental research of muzzle velocity measurement device based on electromagnetic induction [J]. Journal of Weapon Equipment Engineering, 2019, 40 (10): 80-82.
- [ 7 ] 周家杰,孔德仁,徐春冬,等. 阵列式破片速度及飞散特性一体化测量系统[J]. 电子测量技术,2022,45(12):133-140.  
ZHOU J J, KONG D R, XU CH D, et al. Integrated measurement system for array fragment velocity and dispersion characteristics [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (12): 133-140.
- [ 8 ] 张建宏,武锦辉,王高,等. 多普勒雷达弹丸测速信号的速度重建方法[J]. 中国测试,2020,46(4):31-35.  
ZHANG J H, WU J H, WANG G, et al. A velocity reconstruction method for Doppler radar projectile velocity signals [J]. China Test, 2020,46 (4): 31-35.
- [ 9 ] 何耀军. 炮口线圈与激光测速靶关键技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2017.  
HE Y J. Research on key technologies of gun mouth coil and laser velocity target [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [ 10 ] 韦啸成,余红英,杨臻. 一种改进型线圈靶测速系统[J]. 科学技术与工程,2016,16(25):286-290.  
WEI X CH, YU H Y, YANG ZH. An improved coil target velocity measurement system [J]. Science, Technology and Engineering, 2016, 16 (25): 286-290.
- [ 11 ] 范建英. 弹丸炮口速度测试技术研究[D]. 太原:中

- 北大学, 2014.
- FAN J Y. Research on the testing technology of bullet mouth velocity [ D ]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [ 12 ] 仝修亮, 于丽霞, 武锦辉, 等. 某型导弹舵机放大器性能检测系统设计 [ J ]. 国外电子测量技术, 2023, 42(9): 84-90.
- TONG X L, YU L X, WU J H, et al. Design of a performance detection system for a certain missile servo amplifier [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42 ( 9 ): 84-90.
- [ 13 ] 曾周末, 许恩蕾, 黄新敬, 等. 高灵敏低压电磁感应式滑油磨屑传感器 [ J ]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 1-9.
- ZENG ZH M, XU EN L, HUANG X J, et al. High sensitivity and low voltage electromagnetic induction type oil and debris sensor [ J ]. Journal of Instrumentation, 2022, 43 ( 2 ): 1-9.
- [ 14 ] MA J, PEI D X, SHEN D W, et al. Smart projectile acceleration testing in harsh launch environment [ J ]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2018, 9(2): 121-124.
- [ 15 ] 崔佳嘉, 马宏忠, 李楠, 等. 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 48-55.
- CUI J J, MA H ZH, LI N, et al. Simulation and analysis of vibration and noise of oil immersed transformer core based on COMSOL [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 ( 4 ): 48-55.
- [ 16 ] 王彦, 朱伟, 汪俊亮, 等. 基于 ELM 算法的柔性 FBG 形状重构末端分析 [ J ]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 81-89.
- WANG Y, ZHU W. WANG J L, et al. Terminal analysis of flexible FBG shape reconstruction based on ELM algorithm [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 ( 5 ): 81-89.
- [ 17 ] 刘真伟, 韩文花, 杨婷. 一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 192-202.
- LIU ZH W, HAN W H, YANG T. Fast finite element modeling and solving method for 2D defect magnetic leakage field experimental [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023 ( 2 ): 192-202.
- [ 18 ] LI S CH, LU J Y, CHENG L, et al. A high precision in-bore velocity measurement system of rail gun based on improved Bi-LSTM network [ J ]. Measurement, 2021, 169, 108501.
- [ 19 ] 王珂. 线圈靶测速技术研究 [ D ]. 西安: 西安工业大学, 2016.
- WANG K. Research on coil target velocity measurement technology [ D ]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [ 20 ] 王祎楠. 测速线圈靶弱信号处理技术 [ D ]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- WANG Y N. Speed measurement coil target weak signal processing technology [ D ]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [ 21 ] 骆君东. 一种改进型线圈靶测速装置 [ J ]. 电子设计工程, 2022, 30(19): 130-133, 138.
- LUO J D. An improved coil target velocity measurement device [ J ]. Electronic Design Engineering, 2022, 30 ( 19 ): 130-133, 138.
- [ 22 ] 李振涛. 低旋弹炮口高精度自测速系统设计及其应用 [ D ]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- LI ZH T. Design and application of high precision self measuring velocity system for low spin gun mouth [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2021.

## 作者简介



**陈仟**, 2021 年于天津农学院获得学士学位。现为中北大学硕士研究生主要研究方向为嵌入式系统及仪器。

E-mail: 15135496159@163.com

**Chen Qian** received his B. Sc. degree from Tianjin Agricultural University in 2021.

He is currently a M. Sc. candidate at North University of China. His main research interests include embedded systems and instruments.



**武锦辉** (通信作者), 2013 年于中北大学获得博士学位, 现为中北大学教授, 主要研究方向为高动态参数光电探测技术、光纤传感技术、嵌入式系统及仪器。

E-mail: wujinhui@nuc.edu.cn

**Wu Jinhui** ( Corresponding author ) received his Ph. D. degree from North University of China in 2013. He is currently a professor at North University of China. His main research interests include high dynamic parameter photoelectric detection technology, optical fiber sensing technology, embedded systems and instruments.