

# 侵彻引信用磁电传感器的输出特性仿真分析

何瑶<sup>1</sup>, 段雨涵<sup>1</sup>, 隋丽<sup>1</sup>, 张美云<sup>2</sup>

(1.北京理工大学 机电工程与控制国家级重点实验室, 北京 100081;  
2.西北工业集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:** **目的** 解决侵彻引信用磁电传感器在不同侵彻环境下输出特性难以预知的问题, 掌握不同结构参数对传感器输出的影响。**方法** 基于一种新型磁电传感器的结构原理, 提出一种联合仿真研究方法, 研究过程分为 2 部分, 一部分是利用 ADAMS 软件进行磁电传感器惯性系统的力学特性仿真, 另一部分是利用 COMSOL 软件进行传感器机电转换元件的磁电特性仿真, 仿真模型的输入是战斗部在穿靶过程中的过载信息。通过磁电传感器在多次冲击加载试验中获取的实测数据, 对仿真模型的仿真结果进行验证。改变仿真模型的相关参数, 模拟并分析传感器结构对仿真输出特性的影响。**结果** 仿真穿靶时间的平均绝对误差约为 138  $\mu\text{s}$ , 穿靶时刻仿真电压值的平均相对误差约为 5.9%。在给定力学环境的前提下, 侵彻引信用磁电传感器中的线圈与磁铁的相对高度会影响输出信号的正负、幅值以及波峰出现的时间, 线圈匝数、线圈与磁铁之间的间隔仅对信号的幅值产生影响。**结论** 仿真误差在可控范围内, 验证了联合仿真模型的正确性与该研究方法的可行性。该仿真模型可以为侵彻引信用磁电传感器的设计提供指导, 并为后续进一步验证侵彻引信起爆控制系统的性能工作提供了新的思路。

**关键词:** 侵彻引信; 磁电传感器; 联合仿真; 输出特性; 目标识别; 起爆控制

中图分类号: TJ43 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)11-0018-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.003

## Simulation Analysis on Output Characteristics of Magnetolectric Sensor for Penetration Fuze

HE Yao<sup>1</sup>, DUAN Yu-han<sup>1</sup>, SUI Li<sup>1</sup>, ZHANG Mei-yun<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Northwest Industries Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to solve the problem that the output characteristics of magnetolectric sensor for penetration fuze in different penetration environments are difficult to predict, and to grasp the influence of different structural parameters on the sensor output. Based on the structure principle of a new magnetolectric sensor, a joint simulation research method is proposed. The research process is divided into two parts, one is to use ADAMS software to simulate the mechanical characteristics of the magnetolectrical sensor inertial system, and the other is to use COMSOL software to

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-09

Received: 2022-09-15; Revised: 2022-11-09

作者简介: 何瑶 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为目标探测与智能控制。

**Biography:** HE Yao (2000-), Female, Postgraduate, Research focus: target detection and intelligent control.

通讯作者: 隋丽 (1978—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为引信技术。

**Corresponding author:** SUI Li (1978-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: fuze technique.

引文格式: 何瑶, 段雨涵, 隋丽, 等. 侵彻引信用磁电传感器的输出特性仿真分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 018-026.

HE Yao, DUAN Yu-han, SUI Li, et al. Simulation Analysis on Output Characteristics of Magnetolectric Sensor for Penetration Fuze[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 018-026.

simulate the magneto-electrical characteristics of the sensor electromechanical conversion components. The input of the simulation model is the overload information of the warhead in the penetrating process. The simulation results of the simulation model are verified by the measured data obtained from magnetosensors in multiple shock loading tests. Change the relevant parameters of the simulation model, simulate and analyze the influence of the sensor structure on the simulation output characteristics. The verification results showed that the average absolute error of the simulated penetration time is about 138  $\mu\text{s}$ , and the average relative error of the simulated voltage value at the penetration time is about 5.9%. Under the premise of given mechanical environment, the relative height of the coil and the magnet in the magneto-electric sensor will affect the positive and negative amplitude of the output signal and the time of the peak. The number of coil turns and the interval between the coil and the magnet will only affect the amplitude of the signal. In conclusion, the simulation error is within the controllable range, which verifies the correctness of the joint simulation model and the feasibility of the research method. The simulation model can provide guidance for the design of the magneto-electric sensor for the penetration fuze, and provide a new idea for further verifying the performance of the initiation control system of the penetration fuze.

**KEY WORDS:** penetration fuze; magnetic sensor; co-simulation; output characteristic; object identification; initiating control

在现代战争中, 世界各国为了提高毁伤型武器在战斗中的生存能力, 一般采取将其地下深埋或增强防护结构等措施。在这种情形下, 出现了大量具有坚固结构的硬目标。这些硬目标主要分为深层厚目标和多层硬目标 2 类, 其中, 地下机库、洞穴等是典型的深层目标, 舰船、多层建筑物等是典型的多层硬目标<sup>[1-3]</sup>。统计结果表明, 同等化学当量的装药在硬目标内部的最佳位置处起爆与在其表层起爆相比, 能量耦合效率可以提高 20~50 倍不等<sup>[4]</sup>, 控制战斗部在深入硬目标内部后再起爆是实现高效毁伤的关键。

侵彻弹药通常具有精确制导的能力, 使用具有延时起爆功能的引信, 可以控制战斗部在进入目标内部后的适当时机发出起爆控制信号, 从而对目标总体结构以及结构内部的有生力量进行高效毁伤<sup>[5-7]</sup>。使引信设计满足相应战术指标与技术指标的要求是侵彻引信研制工作的主要任务之一, 在研制过程中, 很难全面考虑到打击目标的复杂性、多变性<sup>[8]</sup>。硬目标侵彻引信对炸点的精准控制<sup>[9-12]</sup>是侵彻弹药实现预期毁伤效果的关键, 国内一些研究单位已经对侵彻引信的炸点控制方法进行了研究<sup>[13-16]</sup>。

侵彻引信要想实现精准的炸点控制, 需要获取弹丸在侵彻靶板过程中的目标信号<sup>[17]</sup>, 利用高  $g$  值传感器或加速度阈值开关作为敏感元件是获取弹丸侵彻加速度信号的主要手段<sup>[18-19]</sup>。识别目标信号的难易程度对后续信号处理的难度有很大影响<sup>[20]</sup>。目前, 侵彻引信用高  $g$  值传感器主要有压电式加速度传感器<sup>[21-22]</sup>和压阻式加速度传感器<sup>[23-26]</sup>。这 2 类加速度传感器都能够用于弹体长度较短的弹丸, 但是当弹体增长、弹速增加时, 传统的侵彻引信用压电式或压阻式加速度传感器在测量过程中会出现零漂、加速度信号混叠粘连严重等问题, 识别弹丸穿层信号的难度将会增大, 基于低通滤波的信号处理方法不再可行。西安

机电信息技术研究所的张海涛等<sup>[27]</sup>通过对压阻式加速度传感器进行二次封装的机械滤波方法提高了传感器振动模型的阻尼比, 从而达到缩短传感器动态指标中的稳定信号建立时间、降低侵彻过程中加速度信号混叠现象的目的。西安机电信息技术研究所的董灵飞等<sup>[28]</sup>提出了一种基于应力波衰减材料的目标层特征凸现方法, 使用应力波衰减材料加快应力波在弹内传播时的衰减速度, 使应力波在弹体内传播的时间小于弹体在两层靶板之间的飞行时间, 从而避免应力波沿着弹体多次重复混叠, 造成侵彻加速度的层间粘连。实验表明, 采用缓冲措施后, 测得的侵彻冲击加速度特征更加明显。然而, 上述这些方法的本质还是基于滤波原理, 仅是把获取信号后进行的滤波改为在获取信号前进行, 并没有从根本上解决穿层信号混叠的问题。

基于上述情况, 北京理工大学研制了一种对穿层信号<sup>[29]</sup>敏感的侵彻引信用磁电式速度传感器, 它可以在一定程度上解决信号粘连混叠严重、难识别的问题。该传感器的输出特性受多种结构参数影响, 因此在设计过程中难以预知其在不同侵彻环境下的输出, 这类磁电传感器设计方面的相关研究目前未见报道。本文以侵彻引信用磁电式速度传感器为研究对象, 基于这种磁电传感器的结构原理, 建立了联合仿真模型, 可以利用该模型模拟不同侵彻环境下的传感器输出情况, 从而实现指导侵彻引信用磁电传感器结构设计的目的。

## 1 磁电传感器工作原理

侵彻引信用磁电传感器是能够获取弹丸穿层信息的惯性传感器, 传感器的结构如图 1 所示。内部由惯性系统、支撑结构和转换元件组成, 其中转换元件

包括磁铁和线圈。磁铁也是惯性系统的质量块，其底面由弹簧支撑，顶面是骨架，骨架和限位结构决定了磁铁的最大行程。当侵彻弹丸碰击目标产生冲击过载

时，磁铁因惯性与线圈产生相对运动而产生感应电动势，感应电动势的大小和磁铁及线圈之间相对运动速度成正相关。

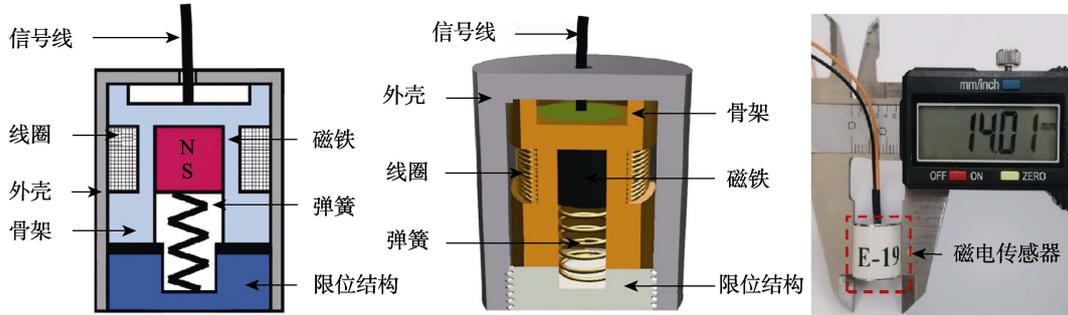


图1 侵彻引信用磁电传感器结构  
Fig.1 Structure diagram of magnetolectric sensor for penetration fuze

## 2 磁电传感器联合仿真分析

根据侵彻引信用磁电传感器的结构原理，建立联合仿真模型，该模型分为2部分：

1) 磁电传感器惯性系统的力学仿真模型，以侵彻过载作为模型输入，获得磁铁在侵彻过程中的速度及位移变化情况。

2) 磁电传感器转换元件的磁电仿真模型，以力学仿真模型获得的磁铁运动速度或位移作为模型输入，通过磁电仿真得到传感器的输出信号。

### 2.1 惯性系统的力学仿真方法及步骤

#### 2.1.1 模型建立

利用 Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS) 软件建立如图2所示的磁电传感器惯性系统的力学仿真模型，将战斗部在穿靶过程中的过载信息作为该模型的仿真激励，通过仿真得到动力学响应，即质量块(磁铁)的运动位移。该模型包括上挡板、磁铁(质量块)、弹簧结构、底座限位结构4部分，其中，磁铁的质量和弹簧的刚度、预压量等参数对仿真结果的影响较大。上挡板在力学仿真过程中仅起到给弹簧结构提供初始抗力的作用，底座限位结构起到支撑弹簧质量系统并限制磁铁行程的作用，该力学仿真模型中，磁铁的最大行程为3mm。

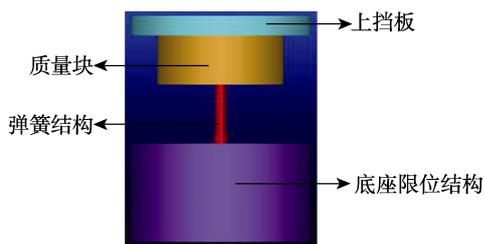


图2 磁电传感器惯性系统仿真模型  
Fig.2 Simulation model of magnetolectric sensor inertial system

#### 2.1.2 参数设置

设置模型中各部分结构的材料参数，定义质量块、上挡板、底座限位结构的密度、杨氏模量、泊松比，定义弹簧结构的刚度、阻尼、原长、预压量。本文建立的力学模型中的部分结构参数见表1。

表1 结构参数  
Tab.1 Structural parameter

结构	材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	刚度 (N·m <sup>-2</sup> )
质量块	钕铁硼 N35	150	0.240	7.5	0.64
弹簧	钢	—	—	—	—
其他	铸铁	100 000	0.211	7.8	—

由于上挡板的几何参数对力学模型的仿真结果不造成影响，为了减少ADAMS软件的仿真计算量，上挡板的几何结构应当在允许范围内越小越好，为了防止仿真出现自穿透现象，该结构的厚度不应过薄。综合考虑以上因素，设置上挡板为半径5mm、高度1mm的圆柱体。

ADAMS 利用碰撞函数的理论计算公式(1)对碰撞过程进行仿真<sup>[30]</sup>。

$$F_{\text{contact}} = k \times (\Delta x)^e - \text{step}(x, 0, 0, d, C) \times \dot{x} \quad (1)$$

式中： $F_{\text{contact}}$ 为2个物体间接触力； $k$ 为刚度系数； $\Delta x$ 为碰撞物体的变形； $e$ 为碰撞指数； $d$ 为侵入深度； $C$ 为最大阻尼系数； $\text{step}$ 函数为阶跃函数，用于表征过渡过程， $\text{step}$ 函数的5个参数分别表示自变量以及自变量和函数的初始值、终值。其中，刚度系数 $k$ 越大，2个物体之间的穿透量越小；碰撞指数 $e$ 越大，2个物体之间的穿透量越大；最大阻尼系数 $C$ 越大，碰撞力曲线越趋于平滑。

物体的碰撞是一个极其复杂的力学过程，对于旋转物体之间的碰撞而言，仿真模型的刚度系数 $k$ 可以根据式(2)确定。

$$\begin{cases} k = \frac{4}{3} R^{1/2} E^* \\ \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{E^*} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  分别是 2 个碰撞物体的半径;  $v_1$ 、 $v_2$  分别是 2 个碰撞物体的泊松比;  $E_1$ 、 $E_2$  分别是 2 个物体的弹性模量。

在上挡板与质量块之间设置接触 1, 在质量块与底座限位机构之间设置接触 2, 使得质量块在惯性力、重力和弹簧力的合力作用下在上挡板与底座限位机构之间上下运动。分别设置 2 个接触的碰撞参数, 包括刚度系数  $k$ 、碰撞指数  $e$ 、最大阻尼系数  $C$  和切入深度。根据式 (2), 通过计算对 2 个碰撞过程的碰撞参数进行设置, 见表 2。

表 2 碰撞参数  
Tab.2 Collision parameter

参数	刚度系数 $k/10^6$	碰撞指数 $e$	最大阻尼系数 $C/10^3$	切入深度/ mm
接触 1	9.618	1.5	9.618	0.01
接触 2	7.552	1.5	7.552	0.01

### 2.1.3 仿真结果

以图 3 所示的半周期正弦信号为例, 其中, 信号的脉宽为 200  $\mu\text{s}$ , 幅值为 10 000g。将该信号作为侵入过载, 转换成力载荷, 为惯性系统的力学仿真过程提供力学输入, 通过仿真得到如图 4 所示的磁铁动力学响应。磁铁在惯性力、重力、弹簧力的合力作用下, 由初始位置向下运动, 速度方向为正, 呈现先快速增大、再缓慢减小的趋势。在 360  $\mu\text{s}$  左右, 磁铁与底座限位结构发生碰撞, 此时磁铁速度迅速降为 0。随后磁铁在弹簧力作用下向上运动, 速度缓慢增大, 速度方向为负。

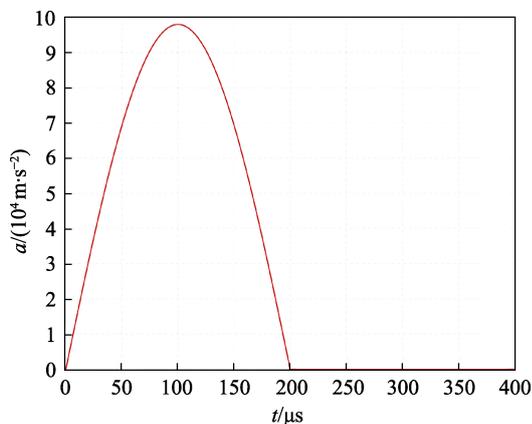
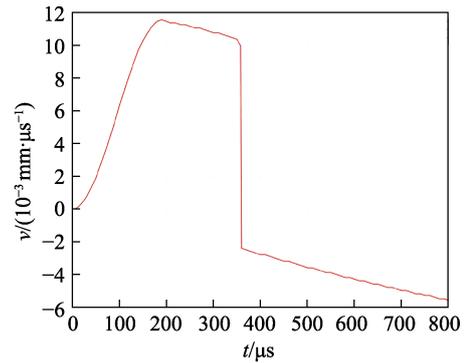
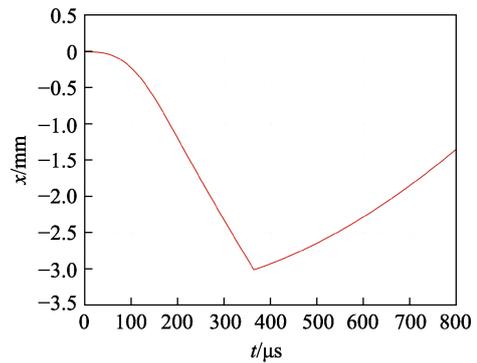


图 3 侵入过载 (半周期正弦信号)

Fig.3 Penetration overload (half period sinusoidal signal)



a 质量块的运动速度



b 质量块的运动位移

图 4 质量块 (磁铁) 的动力学响应  
Fig.4 Dynamic response of mass block (magnet)

## 2.2 转换元件的磁电仿真方法及步骤

### 2.2.1 模型建立

在 COMSOL 软件中建立传感器机电转换元件的磁电仿真模型。由于该结构具有旋转体的特点, 所以可以通过建立 1/2 的剖面二维模型对整体进行研究。仿真结果后处理时, 利用几何的对称性和磁场的反对称性, 还原整体的磁场分布, 以实现简化运算的目的。建立模型时, 使用“形成装配体”功能来确定几何, 此功能假设所有对象都不相交, 并在对象之间的接触边界处自动创建“一致对”, “一致对”用于在“磁场”接口中定义“对连续性”的边界条件, 以确保场在不一致的网格中是连续的。将 2.1 节中力学仿真获得的磁铁运动位移作为该模型的力学输入, 模拟磁铁在空气域中的运动, 仿真得到线圈的感应电压, 即磁电传感器的输出信号, 磁电仿真模型的结构如图 5 所示。

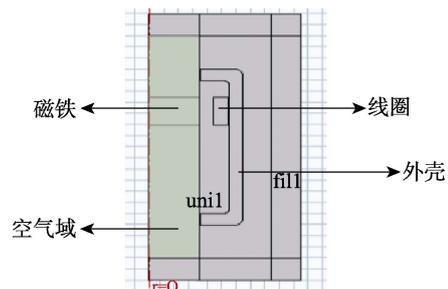


图 5 磁电传感器转换元件仿真模型

Fig.5 Simulation model of magnetoelectric transducer

该模型包括磁铁（质量块）、线圈、外壳和空气域 4 部分，磁铁置于空气域中，磁铁在初始位置处与线圈等高，线圈位置固定。用矩形表示磁铁和多匝线圈模型，磁铁和线圈没有使用圆角，这会使网格更简单，求解规模也较小。虽然尖角会将局部奇异性引入磁场，但是在机电转换元件的磁电仿真过程中，无需担心这个问题，因为仿真的求解目标仅是线圈中的感应电压，此电压是通过域上的场积分来计算的，对场中的奇异性极不敏感。

### 2.2.2 参数设置

磁铁的运动过程反映了电磁感应现象，即线圈因磁通量变化而产生感应电动势及感应电流的现象。由于物理场中有电流产生，所以要通过 AC/DC 模块下的“磁场 (mf)”接口进行仿真分析。对物理场进行设置，定义轴对称、磁绝缘、初始值和安培定律，磁化模型选择“剩余磁通密度”，回复磁导率选择“来自材料”。设置模型的材料参数，定义磁铁的质量、剩余磁通密度的大小及方向等。设置线圈参数，导线模型选择“均匀多匝”，线圈激励选择“电流”，并定义线圈电流为 0，设置线圈匝数、导线电导率以及圆导线直径。

采用四边形网格和自由三角形网格进行网格划分，首先规定磁铁上下空气域 4 条边上的节点数，然后通过边映射的方法在空气域中划分出正四边形网格，接着选中剩余域，利用物理场自动划分自由三角形网格，最后手动调整网格的疏密程度。一般来说，磁场强度较大或者需要单独分析的部分网格要进行细化处理。设置动网格参数，在空气域中设置动网格来描述磁铁的运动位移，限制磁铁在  $r$  轴方向上的位移为 0，通过插值函数确定磁铁网格在  $z$  轴方向上的位移。当网格在移动过程中发生过度撕扯或翻转，导致网格质量低于预设的阈值时，求解器不收敛，此时需要使用自动重新划分网格功能。

### 2.2.3 仿真结果

本文使用 2 个步骤对转换元件模型进行求解。首

先，通过磁场的稳态分析计算出磁铁在起始位置处产生的磁场，为后续磁场和动网格的瞬态分析提供初始条件。最后，通过瞬态分析得到所需的磁电传感器仿真输出信号。将图 4 所示的磁铁仿真位移作为转换元件磁电仿真模型的输入，可以得到如图 6 所示的传感器输出信号。

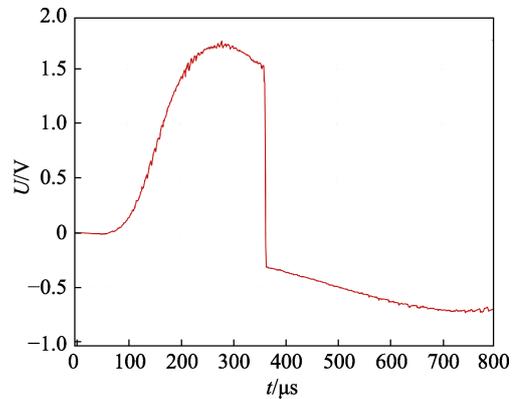


图 6 磁电传感器仿真输出信号

Fig.6 Simulation output signal of magnetoelectric sensor

将图 4 所示的磁铁运动位移与图 6 所示的传感器输出进行对比，可以看出，当磁铁向下运动时，磁铁产生磁场切割线圈，穿过线圈的磁通量不断地发生变化，线圈产生方向为正的感应电动势，传感器的输出信号为正。在大约 360  $\mu\text{s}$  时刻，磁铁与底座限位结构发生碰撞，速度降为 0，此时线圈中的感应电动势迅速下降到 0。随后，在弹簧力作用下，磁铁向上运动，线圈中产生负电动势，传感器输出负信号。

### 2.3 正确性验证

本文利用落锤试验验证联合仿真模型的正确性，试验装置如图 7 所示。将 3 层套靶固定于试验台体上，由牵引机构将试验台体提升后突然释放，试验台体与承载台体撞击，获得过载信号和磁电传感器输出信号。将该过载信号作为联合仿真模型的初始激励，仿真得到传感器的输出信号。落锤试验得到的实测过载信号如图 8 所示。

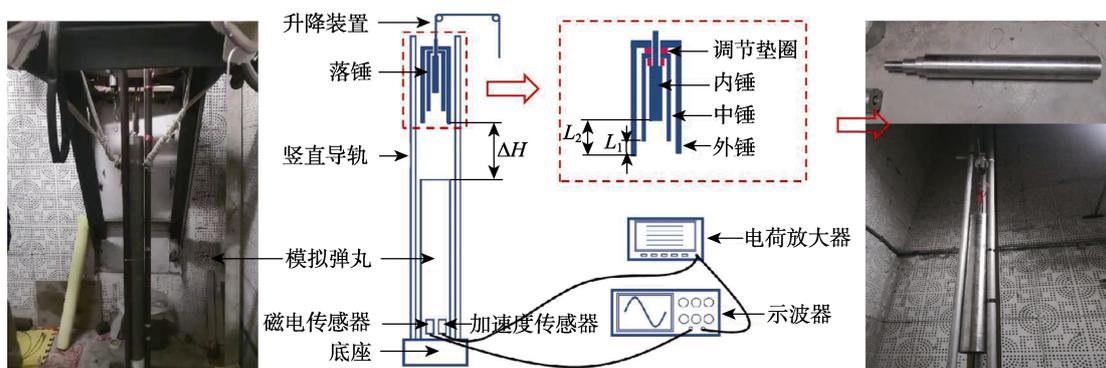


图 7 落锤试验原理

Fig.7 Principle diagram of drop hammer test

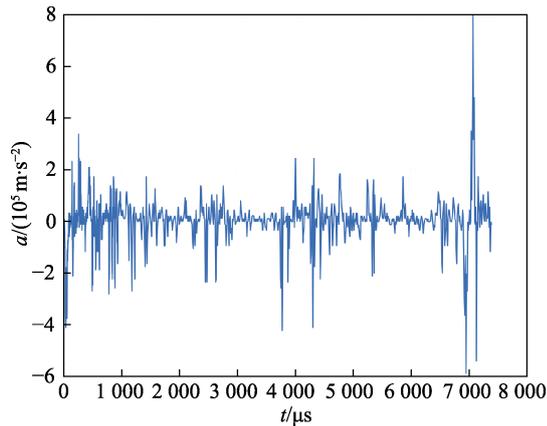


图 8 落锤试验实测过载曲线  
Fig.8 Measured overload curve of drop hammer test

落锤试验得到的磁电传感器实测输出和通过本文建立的联合仿真模型得到的传感器仿真输出如图 9

所示。对比仿真与实测得到的穿靶时间与穿靶时的电压值, 结果见表 3。

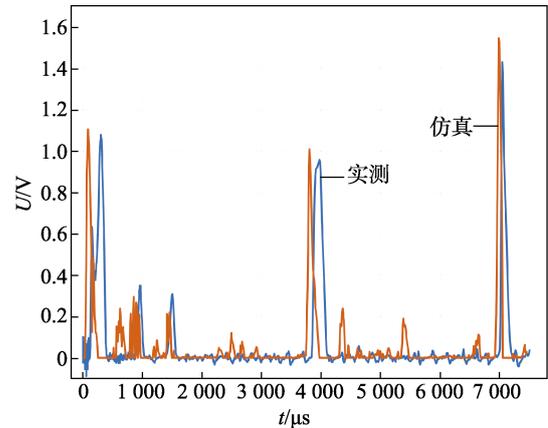


图 9 磁电传感器输出  
Fig.9 Magnetolectric sensor output

表 3 传感器实测输出与仿真输出对比  
Tab.3 Comparison table of measured output and simulation output of sensor

	第一层靶		第二层靶		第三层靶	
	穿靶时间/ $\mu\text{s}$	穿靶时的电压值/V	穿靶时间/ $\mu\text{s}$	穿靶时的电压值/V	穿靶时间/ $\mu\text{s}$	穿靶时的电压值/V
实测曲线	294	1.062 08	3 970	0.957 696	7 040	1.431 36
仿真曲线	110	1.105 4	3 800	1.01	6 980	1.546 9
绝对误差	184	0.043 32	170	0.052 304	60	0.115 54
相对误差	—	4.1%	—	5.5%	—	8.1%

由于实际的磁电传感器本身存在滤波电路等处理电路, 所以穿靶信号波峰出现的时间相对滞后, 且穿靶时刻的电压值会在一定程度上小于仿真得到的电压值。仿真结果表明, 弹丸侵彻首层靶时, 穿靶时间的绝对误差为 184  $\mu\text{s}$ , 电压值的相对误差为 4.1%; 穿过第二层靶时穿靶时间的绝对误差为 170  $\mu\text{s}$ , 电压值的相对误差为 5.5%; 穿过第三层靶时穿靶时间的绝对误差为 60  $\mu\text{s}$ , 电压值的相对误差为 8.1%。

仿真穿靶时间的平均绝对误差约为 138  $\mu\text{s}$ , 穿靶时刻的仿真电压值的平均相对误差约为 5.9%。虽然仿真数据与实测数据之间由于随机误差不可避免地存在一定的差异, 但是仿真信号与实测信号的变化趋势一致, 且仿真误差均在可控范围内, 仿真结果不影响后续目标识别与起爆控制功能的实现。

综上所述, 本文建立的联合仿真模型具有正确性和合理性, 该研究分析方法具有可行性, 可以利用该模型来指导侵彻引信用磁电传感器的设计。

### 3 结构参数对磁电传感器输出特性的影响

侵彻引信用磁电传感器的输出特性受力学仿真模型和磁电仿真模型 2 部分影响。其中, 惯性系统的力学仿真输出 (即磁铁的运动位移) 取决于磁铁质量

$m$ 、弹簧刚度  $k$ 、弹簧阻尼  $C$ 、限位行程  $d$  等结构参数, 在力学仿真输出一定的前提条件下, 转换元件的磁电仿真输出主要取决于线圈参数。

#### 3.1 仿真条件

在本次研究中, 不改变力学仿真模型的结构参数, 仅改变磁电仿真模型中的线圈参数, 即在给定侵彻过载的条件下, 磁电传感器惯性系统的力学输出是一定的, 仅有传感器转换元件的输出特性发生改变。以弹丸侵彻单层厚靶 (靶厚 2 m, 靶材为 C30 混凝土, 弹长 1.6 m, 弹速为 1 200 m/s) 时的侵彻过载作为联合仿真模型的初始激励, 通过惯性系统的力学仿真可以得到磁铁的运动位移, 如图 10 所示。将该位移作为磁电模型的仿真输入, 分别改变线圈的匝数、位置以及线圈与磁铁之间的间隙进行一系列的仿真对比与分析, 各次仿真的传感器结构参数见表 4。

#### 3.2 线圈匝数对仿真结果的影响

分别进行仿真 1、2、3、4, 可以得到如图 11 所示的磁电传感器输出信号。由图 11 可知, 在其他线圈参数一定时, 仅改变线圈的匝数, 对传感器信号中穿层信号的起始时间、结束时间以及波峰出现的时间不会造成影响。随着线圈匝数的增多, 穿层信号的幅值增大, 因此侵彻引信用磁电传感器中线圈的匝数不

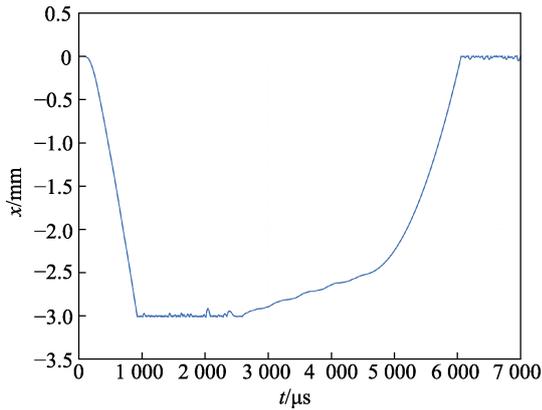


图 10 磁铁的运动位移  
Fig.10 Motion displacement of magnet

表 4 传感器结构参数  
Tab.4 Sensor structure parameter

仿真编号	线圈匝数	线圈相对于磁铁的位置	线圈与磁铁间隔/mm
1	300	等高	1
2	250	等高	1
3	350	等高	1
4	400	等高	1
5	300	高于磁铁 2 mm	1
6	300	低于磁铁 2 mm	1
7	300	低于磁铁 4 mm	1
8	300	等高	0.5
9	300	等高	0.8
10	300	等高	1.5

相对于磁铁的位置，会影响穿过线圈的磁通量的正负，即对输出信号的正负造成影响。当线圈高于磁铁时，输出信号大致的趋势是先正后负；反之，当线圈低于磁铁一定距离时，输出信号大致的趋势是先负后正。在实际应用中，可根据具体需求，通过处理电路，滤去正半轴波形或负半轴波形。此外，线圈与磁铁的相对高度会影响穿层信号波峰出现的时间。从图 12 中可以看出，当线圈与磁铁等高以及线圈低于磁铁 4 mm 时，信号的幅值都相对较大，并不是线圈与磁铁在高度上越接近时幅值越大。

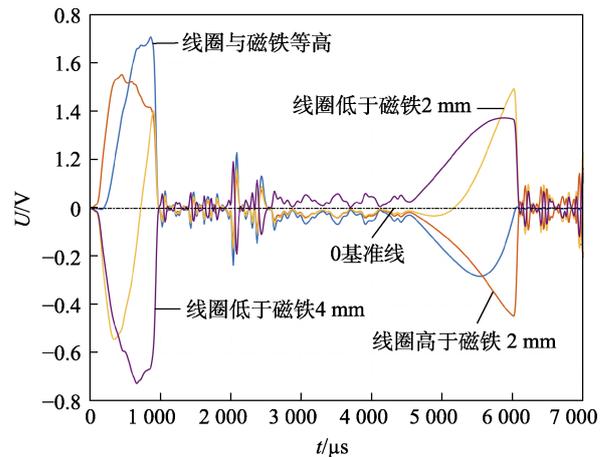


图 12 不同线圈位置时的磁电传感器仿真输出  
Fig.12 Simulation output of magnetoelectric sensor at different coil positions

### 2.4 线圈与磁铁间隔对仿真结果的影响

分别进行仿真 1、8、9、10，可以得到如图 13 所示的磁电传感器输出信号。由图 13 可知，改变线圈与磁铁之间的间隔会对输出信号中穿层信号的起始时间造成影响，间隔越小，起始时间越小，但是对穿层信号的结束时间基本没有影响。线圈与磁铁之间

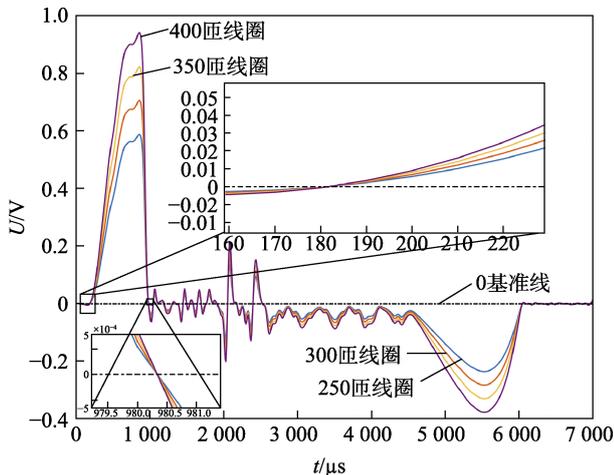


图 11 不同线圈匝数时的磁电传感器仿真输出  
Fig.11 Simulation output of magnetoelectric sensor with different coil turns

应过小。在实际应用中，可以根据所给的目标识别与起爆控制策略，设置合适的线圈匝数。

### 3.3 线圈位置对仿真结果的影响

分别进行仿真 1、5、6、7，可以得到如图 12 所示的磁电传感器输出信号。由图 12 可知，改变线圈

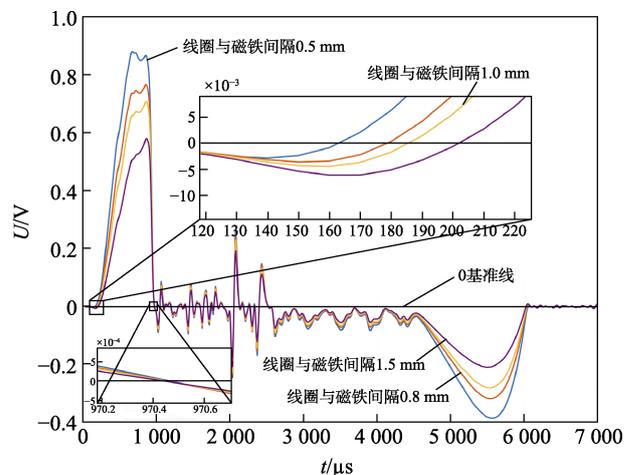


图 13 改变线圈与磁铁间隔时的磁电传感器仿真输出  
Fig.13 Simulation output of magnetoelectric sensor with changing interval between coil and magnet

的间隔越小, 穿层信号的幅值越大。实际应用中, 可以根据具体需求一定程度上减小两者之间的距离, 获取电压幅值更大的输出信号。

## 4 结论

基于侵彻引信用磁电传感器的结构原理, 提出了联合仿真模型。模型验证实验表明, 仿真与实测得到的磁电传感器输出信号的变化趋势一致, 吻合度较高, 证明了该模型的正确性与合理性。

给定侵彻过载, 在不改变力学仿真模型参数的条件下, 通过调整转换元件磁电仿真模型的结构参数, 模拟并分析了线圈参数对磁电传感器输出特性的影响。线圈与磁铁的相对高度会影响输出信号的正负、幅值以及波峰出现的时间, 线圈匝数和线圈与磁铁之间的间隔仅对信号的幅值产生影响, 线圈匝数越多、与磁铁之间的间隔越小, 输出信号的幅值越大。该模型可以指导磁电传感器的设计, 有效降低磁电传感器的设计成本, 缩短传感器的研制周期。

基于仿真得到的磁电传感器输出, 通过合适的目标识别与起爆控制策略, 可以获取穿层信号与起爆控制信号, 为侵彻引信起爆控制系统性能的验证工作提供了新的思路, 具有一定的现实意义和工程价值。

### 参考文献:

- [1] 林玉琛. 近期局部战争对陆军防空作战的启示[J]. 现代防御技术, 2003, 31(1): 5-11.  
LIN Yu-chen. Enlightenment of Army Air Defence Combat from the Recent Local Wars[J]. Modern Defense Technology, 2003, 31(1): 5-11.
- [2] 毕兰金, 刘勇志. 精确制导武器在现代战争中的应用及发展趋势[J]. 战术导弹技术, 2004(6): 1-4.  
BI Lan-jin, LIU Yong-zhi. The Application and Development Tendency of Precision Guided Weapon in Modern War[J]. Tactical Missile Technology, 2004(6): 1-4.
- [3] 席鹏, 南海. 串联侵彻战斗部装药技术及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2014(6): 87-90.  
XI Peng, NAN Hai. Charge Technology and Development Trend of Series Penetrating Warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(6): 87-90.
- [4] 宋丽萍, 王华. 美国精确制导侵彻钻地武器的发展[J]. 飞航导弹, 2000(1): 40-44.  
SONG Li-ping, WANG Hua. Development of Precision Guided Ground Penetrating Weapons in America[J]. Winged Missiles Journal, 2000(1): 40-44.
- [5] 周小超. 美国战争史中的“新空中制胜论”[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.  
ZHOU Xiao-chao. Newaerial Victory Theory in the War History of the USA[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
- [6] 于雪泳, 朱清浩. 美军钻地弹的发展使用及其防御技术综述[J]. 飞航导弹, 2012(11): 56-58.  
YU Xue-yong, ZHU Qing-hao. Development, Application and Defense Technology of US Ground Penetrating Bomb[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(11): 56-58.
- [7] 侯超, 刘勇涛, 杨旭. 侵彻硬目标武器及其智能引信关键技术研究[J]. 航空兵器, 2012, 19(2): 44-48.  
HOU Chao, LIU Yong-tao, YANG Xu. Penetrating Hard Target Weapons and the Key Technology Research of Its Smart Fuse[J]. Aero Weaponry, 2012, 19(2): 44-48.
- [8] 冯琳娜. 硬目标侵彻引信仿真测试系统信号重构方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
FENG Lin-na. Research on Signal Reconstruction Method of Hard Penetration Fuze Simulation Test System[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [9] 游金川, 李东杰, 欧阳科, 等. 侵彻引信炸点精确控制技术[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 114-118.  
YOU Jin-chuan, LI Dong-jie, OUYANG Ke, et al. Precise Detonating-Control Technique for Hard-Target Penetration Fuze[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 114-118.
- [10] 满晓飞, 张合, 马少杰, 等. 侵彻引信计层起爆炸点控制实物模拟实验方法研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(10): 1556-1561.  
MAN Xiao-fei, ZHANG He, MA Shao-jie, et al. Study of Physical Simulation Experiment of Penetration Fuze Layer-Count Burst Point Control[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(10): 1556-1561.
- [11] 邱扬刚. 硬目标侵彻计层/计空穴原理研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.  
QIU Yang-gang. The Principle Study of Counting Layers/Counting Holes of Hard Target Penetration[D]. Taiyuan: North University of China, 2011.
- [12] 高国旺, 张瑞萍. 侵彻硬目标的导弹引信起爆控制方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2012, 32(2): 103-106.  
GAO Guo-wang, ZHANG Rui-ping. Explosion Control Method of Missile-Projectile Penetrating Hard Target[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(2): 103-106.
- [13] 王东晓. 侵彻火箭弹引信关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.  
WANG Dong-xiao. Research on Key Technology of Penetrating Rocket Fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [14] 李蓉, 康兴国. 一种实时计算硬目标侵彻着速的方法[J]. 探测与控制学报, 2004, 26(2): 32-35.  
LI Rong, KANG Xing-guo. A Real-Time Algorithm for Calculating Impact Velocity of Hard-Target Penetration [J]. Journal of Detection & Control, 2004, 26(2): 32-35.
- [15] 李蓉, 陈侃, 康兴国, 等. 硬目标侵彻引信炸点控制方法综述[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(6): 1-4.  
LI Rong, CHEN Kan, KANG Xing-guo, et al. Hard Target Smart Fuze Detonating Control Summary[J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(6): 1-4.
- [16] 胡怀春. 侵彻混凝土目标贯穿特性分析及靶后炸点精

- 度控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- HU Huai-chun. Analysis of Penetration Characteristics of Penetrating Concrete Target and Research on Precision Control of Explosion Point Behind Target[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [17] 张美云, 石庚辰, 刘强, 等. 侵彻硬目标引信侵彻信号获取与处理技术[J]. 制导与引信, 2020, 41(3): 1-10.
- ZHANG Mei-yun, SHI Geng-chen, LIU Qiang, et al. Acquisition and Processing Technology of Penetrating Signal of Penetrating Hard Target Fuze[J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(3): 1-10.
- [18] 徐鹏, 祖静, 范锦彪. 高  $g$  值侵彻加速度测试及其相关技术研究进展[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 739-745.
- XU Peng, ZU Jing, FAN Jin-biao. Research Development of High  $g$  Penetration Acceleration Test and Its Correlative Technology[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(6): 739-745.
- [19] 尚雅玲, 彭艳垒, 梁捷. 引信抗大过载技术研究及方案设计[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(6): 121-124.
- SHANG Ya-ling, PENG Yan-lei, LIANG Jie. Research of Fuze Resisting High G-Load Technology and Scheme Design[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(6): 121-124.
- [20] 韩永杰. 新型压电加速度传感器特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- HAN Yong-jie. The Study on Characteristics of a Novel Piezoelectric Accelerometer[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [21] 张兵, 石庚辰. 侵彻硬目标识别技术中的机械滤波[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(4): 25-29.
- ZHANG Bing, SHI Geng-chen. Mechanical Filtering for Target Recognition of Hard Target Penetration[J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(4): 25-29.
- [22] 张瑜, 祖静, 张红艳, 等. 基于存储测试技术的弹底压力测试技术[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(1): 172-175.
- ZHANG Yu, ZU Jing, ZHANG Hong-yan, et al. Research on Projectile Breech Pressure Measuring Method Based on Storage Measurement Technique[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(1): 172-175.
- [23] BAE K M, LEE J M, KWON K B, et al. High-Shock Silicon Accelerometer with Suspended Piezoresistive Sensing Bridges[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(4): 1449-1454.
- [24] KUELLS R, et al. Novel Piezoresistive High- $g$  Accelerometer Geometry with very High Sensitivity-Bandwidth Product[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 182: 41-48.
- [25] 肖威盛, 卞玉民. 一种高  $g$  值压阻式加速度传感器[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(4): 261-267.
- XIAO Xian-sheng, BIAN Yu-min. A High- $g$  Piezoresistive Accelerometer[J]. Micronanoelectronic Technology, 2017, 54(4): 261-267.
- [26] 许高斌, 汪祖民, 陈兴. SOI 特种高  $g$  值 MEMS 加速度计设计与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 561-568.
- XU Gao-bin, WANG Zu-min, CHEN Xing. Design and Analysis of SOI Special High- $g$  MEMS Accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(6): 561-568.
- [27] 张海涛, 张康, 李朝阳, 等. 降低加速度信号粘连的传感器二次封装材料[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(7): 37-41.
- ZHANG Hai-tao, ZHANG Kang, LI Zhao-yang, et al. Secondary Packaging Materials to Reduce the Acceleration Sensor Signal Blocking[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(7): 37-41.
- [28] 董灵飞, 戴黎红, 李蓉. 基于应力波衰减材料的目标层特征凸现方法[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(2): 52-55.
- DONG Ling-fei, DAI Li-hong, LI Rong. A Method on Revealing Target Layer Characteristic by Stress Wave Attenuation Material[J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(2): 52-55.
- [29] 于润祥, 石庚辰. 硬目标侵彻引信计层技术现状与展望[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(5): 1-6.
- YU Run-xiang, SHI Geng-chen. Development and Situation of Multi-Layer Hard Target Penetration Fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2013, 35(5): 1-6.
- [30] 谢最伟, 吴新跃. 基于 ADAMS 的碰撞仿真分析[C]//第三届中国 CAE 工程分析技术年会暨 2007 全国计算机辅助工程(CAE)技术与应用高级研讨会论文集. 大连: 中国机械工程学会, 2007.
- XIE Zui-wei, WU Xin-yue. Collision Simulation Analysis Based on ADAMS[C]//Proceedings of the 3rd China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference & 2007 National Computer Aided Engineering (CAE) Technology and Application Advanced Seminar. Dalian: Chinese Mechanical Engineering Society, 2007.

责任编辑: 刘世忠