

基于磁屏蔽效应的抗强磁脉冲防护技术

李惠杰¹, 张晓明^{1,2}, 刘 强¹

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:针对电磁轨道发射武器发射瞬间强磁场脉冲冲击下电子元件损伤、信号饱和等问题, 传统解决方法是采用磁屏蔽材料或磁屏蔽结构对电子元件进行防护, 但是这些方法存在材料成本高、结构复杂等问题。该文提出了基于磁屏蔽效应在腔内线圈产生反向磁场, 实现强磁脉冲作用下磁屏蔽的方法, 对传感器元件进行防护。通过对该方法理论推导和仿真模拟线圈磁屏蔽效果, 并将静态磁场仿真数据与试验结果进行对比, 试验结果表明利用线圈进行磁屏蔽技术的可行性, 对输出电压信号屏蔽效果达到 77.4%, 证实了线圈磁屏蔽技术可用于传感器元件抗强磁脉冲冲击防护。

关键词:强磁场脉冲; 传感器元件; 磁屏蔽效应; 防护技术

中图分类号: TM937.1

文章编号: 1000-0682(2024)03-0089-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.016

Strong magnetic pulse protection technology based on magnetic shielding effect

LI Huijie¹, ZHANG Xiaoming^{1,2}, LIU Qiang¹

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education,
North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China)

Abstract: In response to the issues of electronic component damage and signal saturation caused by strong magnetic pulses during the launch of electromagnetic orbital launch weapons, the traditional approach involves utilizing magnetic shielding materials or structures to safeguard the electronic components. However, these methods often come with high material costs and complex designs. Our study introduces a novel magnetic shielding technique that leverages the magnetic shielding effect within the chamber coil to generate a counteracting magnetic field in order to mitigate the impact of strong magnetic pulses on sensor components. Through theoretical derivations, simulations of the coil's magnetic shielding effect, and comparisons with static magnetic field simulation data and experimental results, it is shown that utilizing the coil for magnetic shielding is feasible. Specifically, the tested output voltage signal achieved a shielding effect of 77.4%, confirming that the coil magnetic shielding technology can effectively protect sensor components from the impact of strong magnetic pulses.

Keywords: strong magnetic pulse; sensor element; magnetic shielding effect; protection technique

0 引言

电磁轨道发射武器以其众多优异性能和军事效果成为近些年各大国军事装备研发的热门^[1-3], 其通过脉冲电源产生大电流脉冲, 进而形成强磁脉冲, 并

利用电磁力将弹丸发射出去。模拟强磁场脉冲的发生, 脉冲强磁场是一种极端的物理实验条件, 强磁场的实质是线圈瞬间通入强电流, 电流围绕线圈时会形成闭合的磁场线^[4-8], 通过将线圈绕成特定的形状, 可以使磁场达到强烈的效果。腔内强磁环境会造成传感器不同程度的损伤, 导致传感器性能下降, 因此研究腔内强磁脉冲防护技术具有重要的实际意义。

与传统常规弹药相比, 电磁轨道发射武器除了在撞击目标时受到短脉宽高过载瞬态冲击的同时,

收稿日期: 2023-12-29

第一作者: 李惠杰(1997—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为地磁导航与组合导航。

E-mail: 935634999@qq.com

其在发射过程中会经受长脉宽高瞬态冲击作用,这种复杂高瞬态过程对传感器提出了极高的要求^[9-11]。国内外对该类型传感器研制集中于提高器件量程方面,对其在高瞬态强冲击作用下能量累积对传感器件的损伤防护很少有报道。

天津工业大学闫飞^[12]首次基于磁屏蔽原理提出一种三层端盖的新结构,证明该结构能有效减少远离初级线圈两端的漏磁通,可以有效改善 LVDT 的线性度,同时灵敏度也有相应的提升,磁屏蔽原理应用于防止漏磁通,来对传感器原磁路进行磁补偿。中国科学院电工研究所蒙金雪^[13]设计了一种有源磁屏蔽系统以降低无线充电过程中电动汽车车身周围磁场,试验结果显示该有源屏蔽磁系统可以有效降低目标磁屏蔽,区域内的磁感应强度目标磁屏蔽区域内的磁感应强度均下降到了 $1.5 \mu\text{T}$ 以下具有很好的应用前景。中国石油大学吉莉^[14]将谐振屏蔽法运用在圆形线圈上,在达到减弱泄漏磁场目的的同时,对圆形屏蔽线圈进行分析设计,提高了线圈的抗偏移性能。吉晓菲^[15]等人同样基于轨道炮,研究了采用导磁导电材料构成的双屏蔽层屏蔽电磁炮弹药遥测装置的问题,仿真结果表明所提出的方法屏蔽效果达 28.026 dB。

该文从线圈屏蔽原理入手,将楞次定律运用到线圈上,推导并验证了线圈屏蔽所需的条件,通过 Matlab 软件仿真线圈屏蔽环境,设计线圈匝数、半径、长度,利用控制变量法分析影响线圈屏蔽的主要参数,通过试验验证磁屏蔽效果,并与仿真结果一致。

1 磁屏蔽原理

1.1 线圈磁屏蔽原理过程

设发射过程中膛内强脉冲磁场为 $B_E(t)$,而包围磁传感单元的补偿线圈由低电阻率的纯铜线绕制而成,其半径为 r ,缠绕 N 匝,高度为 h ,其阻抗等效为 $Z(\omega) = R + j\omega L$ 。

室内强磁场脉冲在线圈内产生的总磁链为:

$$\psi_E(t) = N \cdot \phi_E(t) = N \cdot B_E(t) \cdot S \quad (1)$$

式中: ϕ_E 为穿过屏蔽线圈的磁通量; S 为屏蔽线圈的截面积; B_E 为螺线管产生的磁感应强度;磁场变化,则产生感应电动势:

$$\begin{aligned} \varepsilon_I(j\omega) &= -N \cdot F \left[\frac{dB_E(t)}{dt} \right] \cdot \pi r^2 \\ &= -N \cdot \pi r^2 \cdot j\omega B_E(t) \end{aligned} \quad (2)$$

根据频域内欧姆定律,可得线圈内的感应电流为:

$$I_\varepsilon(j\omega) = \varepsilon_I(j\omega) / Z(j\omega) = -N\pi r^2 \cdot F \left[\frac{dB_E(t)}{dt} \right]$$

$$\frac{1}{R + j\omega L} = -N\pi r^2 \cdot \frac{j\omega B_E(j\omega)}{R + j\omega L} \quad (3)$$

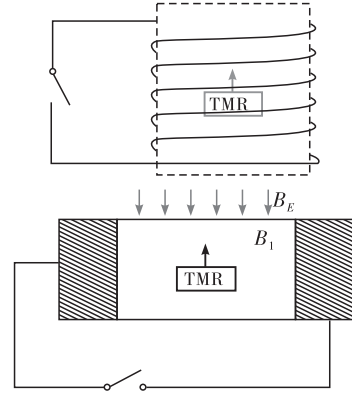


图 1 线圈屏蔽强磁场示意图

两边拉氏变换:

$$I_\varepsilon(s) = -N\pi r^2 \cdot \frac{s}{R + sL} B_E(s) \quad (4)$$

感应电流在线圈中心产生的感应磁场 $B_I(t)$ 可近似表示为:

$$\begin{aligned} B_I(s) &= \mu_0 n I(s) \cos(\arctan(\frac{2r}{l})) \\ &= -\mu_0 n^2 \pi r^2 \cdot \frac{s}{R + sL} B_E(s) \cos(\arctan(\frac{2r}{l})) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: n 为单位长度线圈匝数。

因此,线圈内的磁场为磁场 $B_E(t)$ 与感应磁场 $B_I(t)$ 之和:

$$\begin{aligned} B(s) &= B_E(s) + B_I(s) \\ &= B_E(s) + \mu_0 n I(s) \cos(\arctan(\frac{2r}{l})) \\ &= \left(1 - \mu_0 n^2 \pi r^2 \cdot \frac{s}{R + sL} \cos(\arctan(\frac{2r}{l})) \right) B_E(s) \end{aligned} \quad (6)$$

通过合理设计补偿线圈参数,可以实现对线圈内磁场较好的磁屏蔽效果。

若选择线圈电阻较小时,可以忽略,此时有

$$\begin{aligned} B(s) &= \left(1 - \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2 \cdot \frac{s}{R + sL} \cos(\arctan(\frac{2r}{l}))}{l} \right) B_E(s) \\ &\approx \left(1 - \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2 \cdot \frac{1}{L} \cos(\arctan(\frac{2r}{l}))}{l} \right) B_E(s) \end{aligned} \quad (7)$$

当满足下式时,内部磁场为 0。

$$\begin{aligned} 1 - \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2 \cdot \frac{1}{L} \cos(\arctan(\frac{2r}{l}))}{l} &= 0; \\ L &= \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2 \cos(\arctan(\frac{2r}{l}))}{l} \end{aligned} \quad (8)$$

由推导公式可得,当线圈电阻足够小且线圈电感满足上式时,线圈的屏蔽效果最好,同时线圈的电感大小与线圈的半径、匝数及线圈长度有关,用 Matlab 对线圈磁屏蔽过程进行仿真,改变线圈参数,验证线圈的屏蔽效果。

2 线圈磁屏蔽原理仿真

该文通过 Matlab 软件进行仿真,验证线圈电感对磁屏蔽效果的影响,首先固定螺线管的位置,信号发生器分别产生正弦交流信号、方波信号接入螺线管,磁传感器及屏蔽线圈放入螺线管中心,通过控制屏蔽线圈开关通断,达到屏蔽前后效果,示波器采集屏蔽前的电压波形,Matlab 仿真屏蔽原理过程,得到线圈感应电流及感应磁场的波形,将原磁场即螺线管产生的磁场与屏蔽线圈产生的感应磁场叠加后,得到叠加后的屏蔽效果。通过改变线圈的参数,仿真屏蔽线圈的效果,正弦信号屏蔽仿真效果如图 2、3 所示,正弦信号频谱图如图 4 所示,后对方波信号进行屏蔽仿真,效果如图 5、6 所示。电感对感应磁场影响较大,电感越大感应磁场越大;电阻影响较小,电感越大屏蔽效果越好。

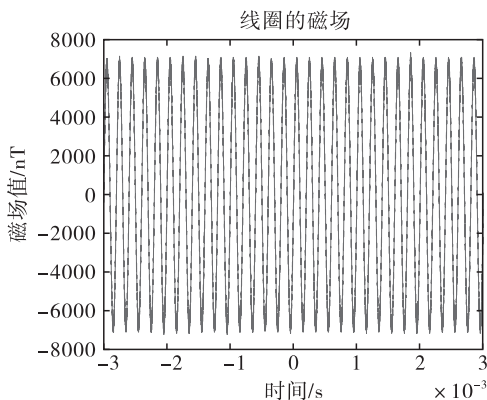


图2 正弦信号线圈的磁场

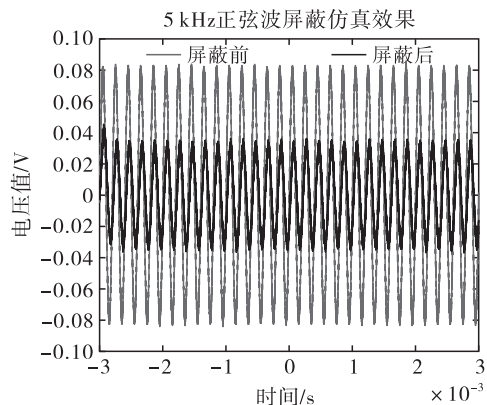


图3 正弦波屏蔽前后仿真效果图

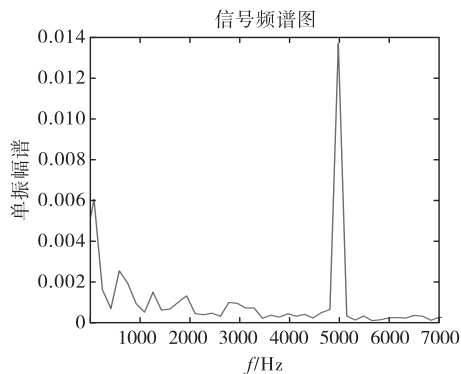


图4 正弦波信号频谱图

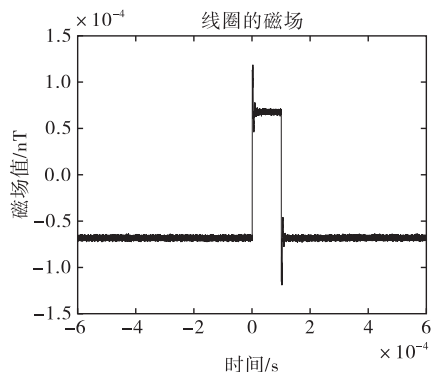


图5 方波信号线圈的磁场

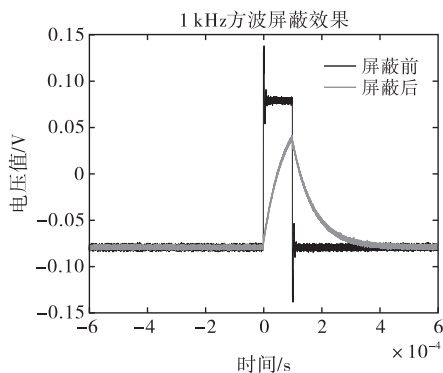


图6 方波信号屏蔽前后仿真效果图

3 磁屏蔽线圈试验验证

3.1 系统总体框架

系统由磁传感器电路板、圆形空心屏蔽线圈、磁场发生螺线管组成,示意图如图 7 所示,磁传感器用到 TMR2505 芯片,内部采用惠斯通电桥产生差分电压,后经过 AD8426 放大器放大后得到单极性电压。通过信号发生器输出正弦交流信号和方波信号后接入磁场发生螺线管两端 A 和 B,螺线管串联电阻,示波器对电阻两端感应电流波形的采集,将空心线圈放入其中,产生感应电流,根据楞次定律,感应电流的磁场总是阻碍引起感应电流的磁通量的变化,对磁传感器电压信号进行衰减,达到屏蔽强磁场的效果。

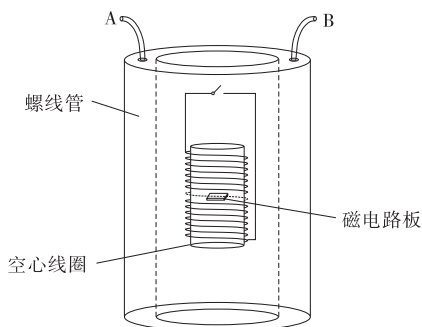


图7 系统整体示意图

3.2 屏蔽线圈的试验设计

屏蔽线圈的设计采用纯铜漆包线,绕制 0.4 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm 线径的空心线圈,对线圈不同

半径和匝数及线圈长度的仿真和试验对比,各个参数如表 1 所示。用 LCR 电感仪对线圈电感及电阻的测试如图 8 所示,由于缠绕线圈误差的存在,与理论电感计算对比,最大相差 2.22 μH 。



图8 1 mm 线径线圈电感测试

表 1 线圈参数表

序号	匝数	半径/m	线径/mm	电阻/m Ω	测量电感/ μH	计算电感/ μH	线圈长度/m
1	30	0.004 5	0.4	130.89	3.69	4.79	0.015
2	30	0.019	0.4	640.34	29.65	31.38	0.015
3	22	0.019	1	55.22	13.21	15.70	0.022
4	22	0.019	1.5	25.71	10.77	12.99	0.037
5	22	0.019	2	14.98	9.18	10.17	0.056
6	13	0.007 5	2	2.02	0.59	0.98	0.035
7	13	0.013	2	4.85	2.12	2.58	0.035

3.3 试验过程

(1)将屏蔽线圈夹在电路板的 TMR 芯片上,放入磁场发生螺线管中,使得 TMR 磁传感器敏感轴方向竖直向上;磁传感器放置在圆形空心线圈的中心,螺线管先后通入正弦交流信号、方波信号,使其产生正弦磁场,同时磁场发生线圈串联一个电阻,方便测量流经线圈的电流大小,示波器通道 1 接传感器输出,通道 2 接电阻两端。调节信号发生器频率,分别为 1 kHz、5 kHz、10 kHz 记录三组屏蔽前后的数据。

(2)在对磁场发生螺线管施加方波信号,使其产生占空比为 10% 的方波磁场,方波信号频率分别为 1 kHz、5 kHz,记录两组屏蔽前后的数据。

3.4 试验结果及分析

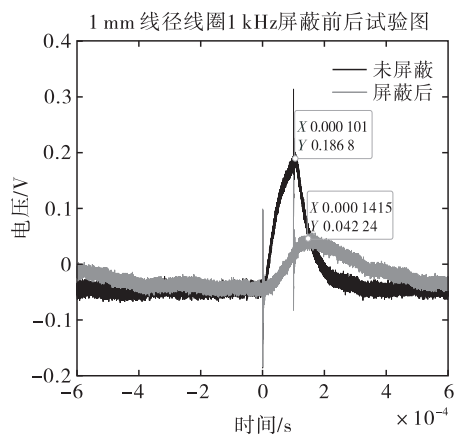
3.4.1 方波信号磁屏蔽实验

螺线管通入占空比 10% 的方波信号,通过改变方波的频率,测试不同线圈的屏蔽效果,试验结果如图 9、10 所示。

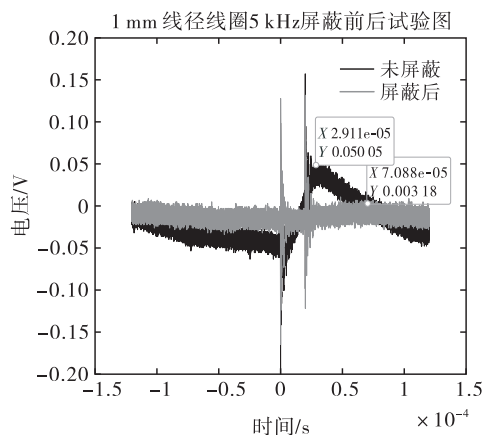
经过试验验证可得表 2 数据。

表 2 方波信号屏蔽效果表

频率/kHz	线圈线径/mm	线圈电感/ μH	屏蔽效果
1	1	13.21	77.4%
	2	9.18	52.7%
5	1	13.21	93.6%
	2	9.18	60.8%

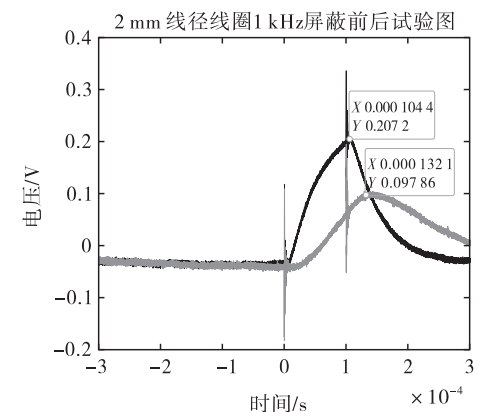


(a) 1 kHz 屏蔽前后试验图

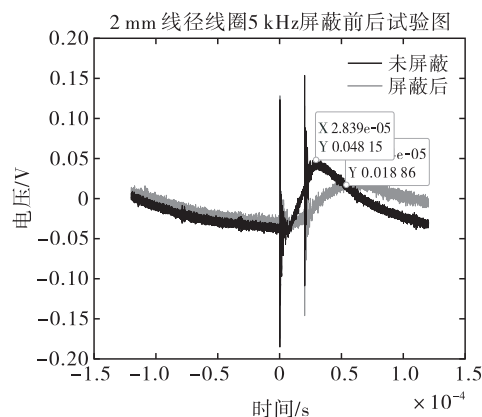


(b) 5 kHz 屏蔽前后试验图

图9 线径 1 mm 空心线圈不同频率屏蔽效果



(a) 1 kHz屏蔽前后试验图



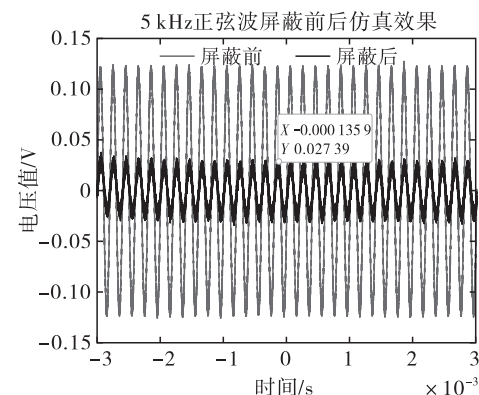
(b) 1 kHz屏蔽前后试验图

图 10 线径 2 mm 空心线圈不同频率屏蔽效果

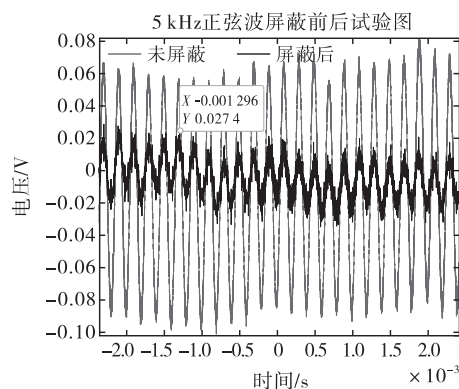
由实验数据得,当螺线管通入方波信号时,频率越大,屏蔽效果相对显著,但是噪声随之增加。同时,在电阻相对较小时,电感越大,屏蔽效果越好。

3.4.2 正弦波信号屏蔽仿真与试验对比

主要使用线圈内阻小、电感量大、屏蔽效果显著的线圈进行试验,经过反复测试,选用 5 kHz 正弦交流信号当作信号源,挑选 1 mm 线径和 2 mm 线径的线圈用作对比试验,并与仿真结果进行对比,两个线圈的屏蔽试验与仿真效果对比如图 11、12 所示,验证了线圈磁屏蔽防护性能。

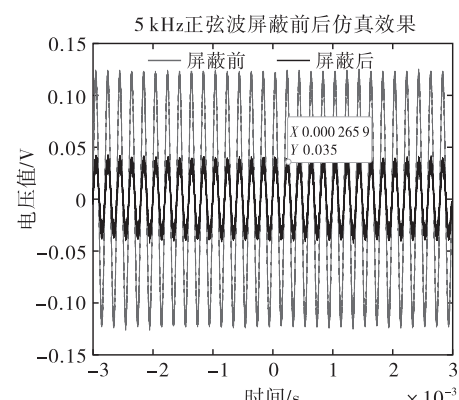


(a) 5 kHz仿真效果图

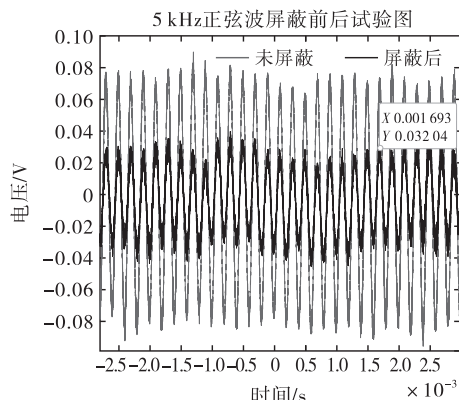


(b) 5 kHz试验效果图

图 11 1 mm 线径线圈仿真和试验屏蔽效果对比



(a) 5 kHz仿真效果图



(b) 5 kHz试验效果图

图 12 2 mm 线径线圈仿真和试验屏蔽效果对比

表 3 5 kHz 正弦波信号屏蔽效果表

线圈线径 /mm	线圈电感 /μH	屏蔽效果	仿真结果	误差
1	13.21	77.2%	68.5%	8.7%
2	9.18	67.5%	59.9%	7.6%

由表 3 屏蔽试验结果及仿真对比,试验结果与仿真结果最多相差 8.7%,1 mm 线径线圈屏蔽效果较为明显,屏蔽线圈电感的大小主要影响线圈的屏蔽效果,同一半径,相同匝数的线圈,内阻足够小时,电感越大,屏蔽效果越好。

3.4.3 脉冲波信号的屏蔽试验

考虑到电磁轨道炮发射瞬间产生极窄脉冲强磁场,对螺线管施加脉冲波,通过调节信号发生器脉宽的长度,验证线圈的磁屏蔽效果。如图 13 和 14 所示,施加 100 Hz 脉冲波时,脉宽越窄屏蔽性能越好。

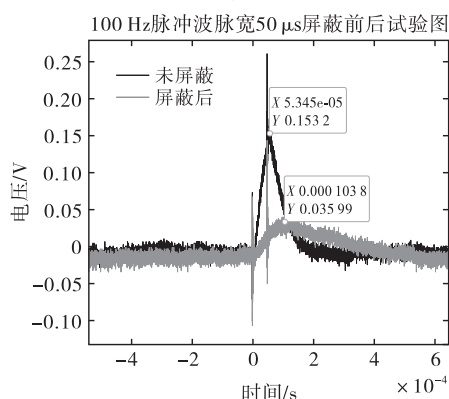


图 13 50 μs 脉宽脉冲波屏蔽效果试验图

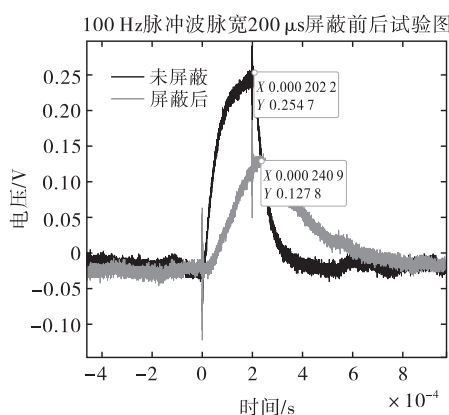


图 14 200 μs 脉宽脉冲波屏蔽效果试验图

4 结论

该文针对强磁脉冲冲击下传感器元件易受损、性能失调等问题,设计了自适应屏蔽线圈,通过理论推导,得出影响线圈磁屏蔽技术的主要参数,为验证线圈对强磁脉冲的优越屏蔽性能,该文在 Matlab 软件仿真了线圈对正弦波和方波信号的屏蔽效果,并对其进行物理试验验证,测试记录了 1 kHz 方波下,不同电感大小的线圈屏蔽数据,其中 1 mm 线径线圈屏蔽效果为 77.4%,2 mm 线径线圈屏蔽效果为 52.7%。同时,对比线圈对正弦交流信号屏蔽仿真与试验结果,试验结果与仿真结果最多相差 8.7%,屏蔽线圈电感的大小是主要影响线圈屏蔽效果的因素。最后对脉冲波信号进行实验结果表明,脉宽长度对线圈的屏蔽效果有显著影响。综上所述,当线圈内阻足够小时,线圈匝数越大,电感值越大,屏蔽效果越好,通过对屏蔽线圈参数合理设计,最大屏蔽量可达

77.4%,证明了线圈磁屏蔽技术可用于传感器元件抗强磁脉冲冲击防护,具有良好的磁屏蔽应用前景。

参考文献:

- [1] 陈帅,马偃毫,赵婉瑜,等. 电磁轨道炮最新研究进展及应用展望 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12 (17): 11-14.
- [2] 李四超,刘可可. 电磁轨道炮试验装置动态特性动力学分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (12): 177-181.
- [3] 陈景源,汪笑鹤,刘彬,等. 电磁轨道炮轨道表面功能化和防护 [J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45 (02): 134-140.
- [4] 李中启,熊鑫博,孔彭生,等. 无线充电系统电磁屏蔽与效率优化技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (05): 151-162.
- [5] LIU J, ZHONG C, LI H, et al. The influence of the inclination of strong magnetic field lines on the performance and plume divergence of a magnetically shielded Hall thruster [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53 (24): 46-55.
- [6] 蔡博林,冯刚. 电磁轨道发射装置材料损伤抑制方法研究现状 [J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47 (01): 122-130.
- [7] 李中启,李晶,全倡辉,等. 无线电能传输系统带磁屏蔽任意位置矩形线圈的互感计算 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (17): 4294-4305.
- [8] 计亚兵,王浩安,刘习凯,等. 磁屏蔽舱内极弱磁测量装置结构设计与应用 [J]. 机械设计与研究, 2023, 39 (05): 44-48+54.
- [9] 罗会彬,梅新华. 强磁场对电磁发射弹药引信的危害及防护 [J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4 (01): 58-62.
- [10] ZHAKATAYEV T, KAKIMOVA K. A new type of protective weapon based on the creation of a rotating powerful intensive beam of electro-magnetic waves (Emw) high frequencies (Hf) [J]. American Journal of Physics and Applications, 2021, 9 (3): 155-164.
- [11] ILLIA D, G. R O, VIACHESLAV Z, et al. Development of effective shielding against electricity meters tampering with strong magnetic fields [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213.
- [12] 闫飞,尹明富,孙会来,等. 基于磁屏蔽原理改善 LVDT 静态性能的结构研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(02): 6-10.
- [13] 蒙金雪,张玉旺,郭彦杰,等. 电动汽车无线充电系统的有源磁屏蔽研究 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (04): 44-51.
- [14] 吉莉,葛富辰,张弛,等. 基于电磁耦合结构的谐振屏蔽及抗偏移性能研究 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42 (07): 68-76.
- [15] 吉晓菲,孙发鱼,白瑞青,等. 电磁炮弹丸遥测装置的电磁防护方法 [J]. 探测与控制学报, 2019, 41 (02): 57-62.