

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.07.005

单级感应线圈发射器实验研究

窦燕^{1,2}, 段航^{1,3}, 曹延杰¹, 刘文彪¹(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国联合网络通信有限公司莱州分公司, 山东 莱州 261400;
3. 中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为了研究感应线圈发射器发射过程中的机电特性, 搭建了单级感应线圈发射实验装置。采用自积分式 Rogowski 线圈法进行回路放电电流测量, 并结合工程的实际条件对线圈机电模型进行仿真。通过发射实验, 测得了系统发射过程中的放电电流和弹丸的初速度。实验结果表明: 在电枢初始位置不变的情况下, 弹丸初速度与电容器组的充电电压几乎成线性关系; 在电压相同的情况下, 随着电枢初始位置不断远离驱动线圈中心, 弹丸初速度先增加后减小, 存在一个最佳的电枢初始位置使得弹丸能获得最大的初速度, 这一结论同前期仿真结果相吻合。

关键词: 感应线圈炮; 电流测量; 速度测量; 弹丸初速度**中图分类号:** TP306⁺.2 **文献标识码:** A

Experimental Research on Single Stage Induction Coil Launcher

Dou Yan^{1,2}, Duan Hang^{1,3}, Cao Yanjie¹, Liu Wenbiao¹

(1. Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Laizhou Branch of China United Telecommunication Co., Ltd., Laizhou 261400, China;

3. No. 91245 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

Abstracts: In order to research electromechanical characters of the induction coil launchers during the launching process, an experimental installation of single stage induction coil was established. The circuit current was measured by using Rogowski coil. And electromechanical model was simulated by referencing the engineering practice. During the experiment, muzzle velocity of the projectile and charging voltage were gained. The experimental results showed that muzzle velocity of the projectile was almost linear with the charging voltage of the capacitor bank when the initial position of the armature was fixed. The muzzle velocity of the projectile increased firstly and then decreased when the distance between the initial position of the armature and the centre of the drive coil increased gradually while the discharge voltage were invariable. Therefore there exists the best initial position of the armature at which the projectile can get maximal muzzle velocity, which was well matched with the simulation results.

Keywords: single stage induction coil launchers; current measuring; velocity measuring; muzzle velocity of armature

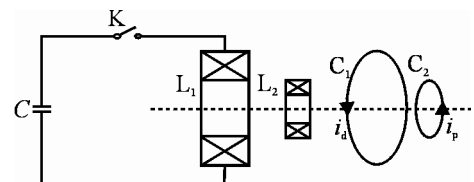
0 引言

感应线圈属于电磁炮, 是一种新概念动能武器, 其弹丸与驱动线圈无机械接触、效率高、力学结构合理, 具有十分广泛的军事应用前景^[1-2]。故国内外都在开展其相关的仿真和实验研究。文献[3]分析了单级线圈加速电枢的机理, 并进行了单级线圈加速的实验研究。文献[4-5]对单级感应线圈炮的工作过程进行了仿真, 并计算了系统的效率。参考文献[6]介绍了美国的感应线圈炮最新进展情况, 美军电磁感应线圈迫击炮即将走出实验室进入工程研制阶段。故搭建了一套单级感应线圈发射器实验装置, 以进行原理性实验。

1 单级感应线圈炮工作原理及实验装置

1.1 基本工作原理

单级感应线圈炮工作原理如图 1。



C-脉冲电源; K-触发开发; L₁-驱动线圈; L₂-弹丸线圈

图 1 单级感应线圈炮结构原理图

将驱动线圈 L_1 和弹丸线圈 L_2 简化为电流环 C_1 和 C_2 。由电磁感应定律可知, 当 C_1 通以变化的电流 i_d 时, 在线圈的周围产生的磁场亦是变化的, 可知 C_2 中有电流 i_p 产生, 电流 i_p 与电流 i_d 产生的磁场相互作用, 在 C_1 、 C_2 之间产生与轴线水平和垂直 2 个方向的作用力。垂直方向上电磁力的作用效果是把 C_2 向内压缩; 水平方向电磁力的作用效果是在 C_1 固定时, 推动 C_2 水平向右运动, 它是决定弹丸线圈初速度的一个重要因素^[7]。对于同步感应线圈炮, 由

收稿日期: 2010-01-24; 修回日期: 2010-02-24

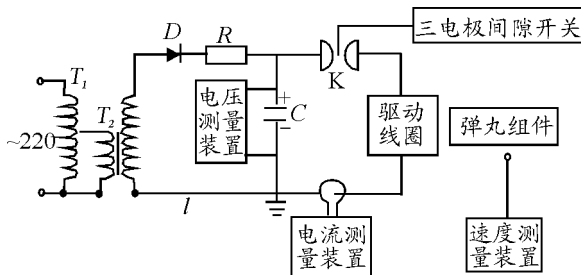
作者简介: 窦燕 (1978-), 女, 山东人, 在读工程硕士, 助理工程师, 从事计算机科学与技术研究。

于驱动线圈电流和感应电流方向是相反的, 故仅存在排斥方式的电磁力, 只有当弹丸线圈的中心面越过驱动线圈的中心面时才能放电。

1.2 实验装置

如图 2 搭建了单级感应线圈炮发射实验装置, 主要由以下部分组成:

- 1) 充电装置: 将电网中的交流电经过整流后, 送入电容器组中存储起来。
- 2) 脉冲电源: 由若干个电容器并联组成, 在触发开关的控制下为驱动线圈提供脉冲大电流。
- 3) 触发装置: 由触发电路和一套三电极间隙开关组成, 控制脉冲电源对驱动线圈放电。
- 4) 驱动线圈: 当脉冲大电流经过时感生脉冲强磁场, 并使电枢产生方向相反感生电流。
- 5) 电枢: 当脉冲大电流流经驱动线圈时, 感生出与之相反的电流, 受到排斥力而将弹丸加速推出炮口。
- 6) 电流测量装置: 测量放电回路的脉冲电流。
- 7) 速度测量装置: 测量弹丸的初速度。



T₁-调压器; T₂-高压变压器; D-高压整流硅堆; R-限流电阻;
C-电容器组; K-放电开关; I-传输线

图 2 实验装置结构原理图

实验装置的工作流程为: 首先, 通过充电装置给脉冲电容器组充电; 充电完毕后, 启动线圈触发电路并发出一高压脉冲信号, 使三电极间隙开关导通; 脉冲大电流流经驱动线圈, 产生脉冲强磁场, 推动弹丸飞出; 弹丸飞出炮口时, 速度测量装置测出弹丸的初速度。

2 回路电流及弹丸速度测量

2.1 回路电流测量原理

在实验中, 回路放电电流的测量采用自积分式 (LR 型) Rogowski 线圈法。自积分式 Rogowski 线圈结构简单、频带宽、自身上升时间小, 是测量快速变化的脉冲大电流的理想手段, 其测量误差为 ±3% 左右^[8-9]。实验装置中采用截面为圆形的 Rogowski 线圈, 结构如图 3。图 4 是实验用 Rogowski

线圈。将测量导线均匀地绕在一个非磁性骨架上, 即可构成一个 Rogowski 线圈, 实际上相当于初级线圈为一匝的空心电流互感器。任何一个随时间变化的电流 I 流经其包围的截面时, 将在线圈的两出线端间感应一个电势 e , 根据电磁感应定律, 可得:

$$e = \frac{d\phi}{dt} = M \frac{dI}{dt} = L \frac{di}{dt} + iR_L + i_R R \quad (1)$$

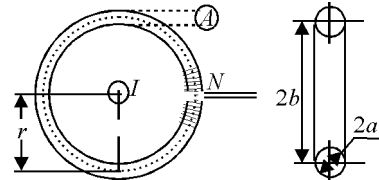


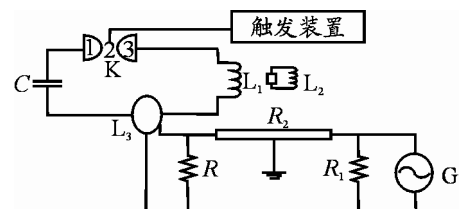
图 3 Rogowski 线圈结构图

式中: ϕ 是线圈的磁链; I 是待测电流; M 是线圈与待测电流之间的互感; L 是线圈的自感; R_L 是线圈电阻; R 是信号电阻; i 是测量回路电流^[10]。



图 4 实验用 Rogowski 线圈

电流测量装置原理示意图如图 5, 由 Rogowski 线圈、信号电阻、同轴电缆、匹配电阻、数字示波器五部分组成。放电回路的传输线通过 Rogowski 线圈的中心。当放电电流流经传输线时, 在信号电阻上产生一个与放电电流成正比的电压。由于匹配电阻和同轴电缆的特征阻抗是匹配的, 因此在示波器的一端不会发生波的反射, 信号电阻上的电压可以不失真地传送给数字示波器 (实验中采用 Tektronix 的 TDS 1012 型存储式数字示波器)。



C-电容器组; K-三电极间隙开关; L1-驱动线圈; L2-电枢;
L3-Rogowski 线圈; R-信号电阻; R1-匹配电阻;
R2-同轴电缆; G-数字示波器

图 5 脉冲电流测量装置示意图

图 5 中的脉冲电流测量实验装置的接线属于“并联匹配”, 在示波器上观测到的电压波形并不是信号电阻上的电压, 而存在着一个比例系数。设信

号电阻上的电压为 U_0 ，示波器上的电压为 U_1 ，则：

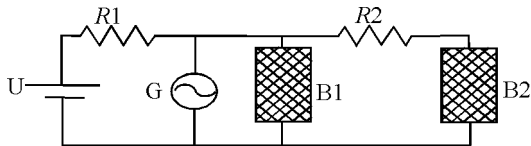
$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{R_1}{R + R_1} \quad (2)$$

2.2 速度测量原理

弹丸的运动速度是线圈炮的重要技术指标之一，也是衡量系统性能及效率的标志之一。电枢运动速度的测量方法很多，而且原理也都不尽相同。在单级感应线圈炮实验装置中，大电流引起的接地干扰和强电磁场引起的噪声会对测量精度产生较大的影响。综合考虑各种因素，采用网靶测速的方法来测量电枢的初速度更加简单、实用。

测速装置的原理图如图 6：直流电源 $U=8\text{ V}$ ，耐热电阻 $R_1=2\text{ k}\Omega$ 、 $R_2=2\text{ k}\Omega$ 为分压电阻，示波器 G 采用放电电流测量装置中的存储式数字示波器，网靶用漆包铜线制作，强度较低，对弹丸速度影响较小。用示波器采集网靶 $B1$ 两端的电压信号。当弹丸穿过测速区域，撞断网靶的铜丝， t_1 时刻网靶 $B1$ 被撞断，示波器开始采集 R_1 两端电压 $U/2$ ， t_2 时刻网靶 $B2$ 被撞断，示波器开始采集电源电压 U ，时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 即为弹丸在测速区域运行的时间。令两网靶间的距离为 l ，并认为在 l 距离内速度是匀速的，则电枢的初速度为：

$$v = l / (t_2 - t_1) \quad (3)$$



U-直流电源；R、R1-耐热电阻；B1-网靶 1；B2-网靶 2；G-示波器

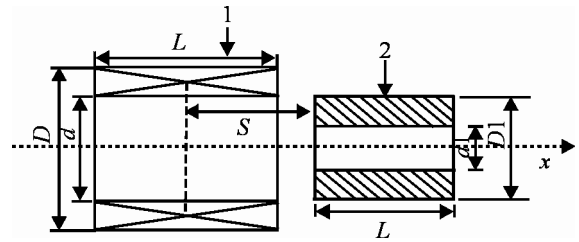
图 6 测速装置的原理示意图

3 实验过程

根据参考文献[4,6]对线圈机电模型的仿真结果，并结合工程的实际条件，实验装置的具体参数设置如下：

1) 脉冲电源：由 13 个电容器并联组成，总电

容约为 $2\ 200\ \mu\text{F}$ ，耐压 5 kV ；2) 驱动线圈：线圈宽度为 175 mm 、其线径为 2 mm 、匝数为 39 匝，如图 7，线圈所受到的径向力和轴向力由外层的加固装置承担；3) 电枢：铝制空心圆筒，长 75 mm ，外径 43 mm 、内径 37 mm 、质量 66 g ，如图 7；4) 网靶：测速区域的距离为 $l=250\text{ mm}$ ；5) 电流测量装置：回路放电电流 $i \approx 8\ 652 U_1$ 。



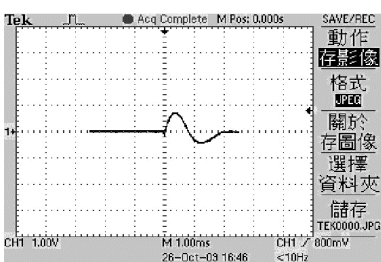
1-驱动线圈；2-电枢；S-电枢底部到驱动线圈中心面的距离

图 7 电枢与驱动线圈

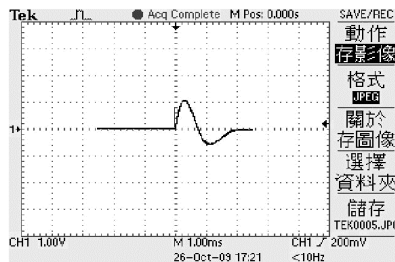
实验前，按设计要求对单级感应线圈发射器进行安装、固定和调试。主要有以下工作：充电装置能否对储能电容器可靠充电；触发控制装置能否给出适当大小的触发控制信号；三电极间隙开关在触发控制信号的作用下能否可靠接通放电回路；储能电容器能否可靠地对驱动线圈放电。

按照以下步骤进行实验：闭合电源开关，调节调压器，通过变压器为脉冲电容器组充电，在充电时观察分压器输出指示中的电压值，当电容器组的充电电压满足要求时，闭合触发装置的控制开关，脉冲电容器组驱动线圈放电。实验结束后，脉冲电容器组上的剩余能量通过放电电阻释放，观察分压器输出指示器中的电压，当电压降到很低的值时，可用短路棒与大地短路。

实验数据主要包括放电电流和弹丸初速度两部分，初速度通过记录电压波形并读取弹丸在测速区域内运行的时间 Δt ，然后按照式 (2) 计算得出；电流信号则须先保存测得的波形，再用专门软件判读。几种不同情况下，电流测量装置与测速装置记录的波形如图 8、图 9。



(a) 充电电压为 1 000 V 时



(b) 充电电压为 1 500 V 时

图 8 不同情况下测量出的回路电流波形

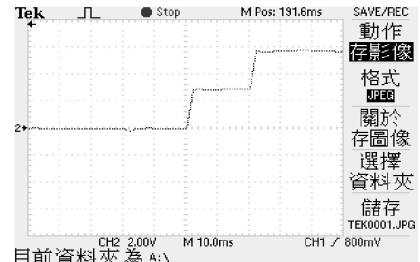


图 9 充电电压为 1 500 V 时速度测量装置的电压波形

4 实验结果分析

为验证对线圈的仿真结果,探索其发射过程中的机电特性,在2种情况下进行了发射试验:

- 1) 充电电压不变,电枢初始位置改变;
- 2) 电枢初始位置不变,电压改变。

4.1 充电电压改变对弹丸初速的影响

从放电回路脉冲电流表达式^[2]

$$i(t) = \frac{U_0}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{\frac{C}{L}} \exp[-\alpha(t/\sqrt{LC})] \sin\left(\frac{\sqrt{1-\alpha^2}t}{\sqrt{LC}}\right)$$

可知:放电电流的幅值与脉冲电容器组的充电电压成正比,改变脉冲电容器组的充电电压可以改变发射体的速度特性。因此,提高脉冲电容器的充电电压可以达到提高弹丸组件速度的目的,但是脉冲电容器的充电电压不可能无限制地增加,它一方面受到脉冲电容器的耐压限制,另一方面还要考虑到系统结构的耐压。电枢置于电枢底部刚好越过驱动线圈中性面的位置。充电电压分为5档,测得弹丸经过测速区域的时间以及按式(3)求出的弹丸初速度如表1。

表1 不同电压下得出的弹丸初速

充电电压 (V)	弹丸穿过网靶时间 (ms)	弹丸初速度 (m/s)
1 000	31.0	8.1
1 500	20.0	12.5
2 000	15.0	16.6
2 500	12.8	19.5
3 000	11.5	21.7

4.2 电枢初始位置改变对弹丸初速的影响

确定电枢相对驱动线圈的最佳触发位置是提高发射效率的重要途径,实验中,在相同电压条件下,测试了电枢相对于驱动线圈不同触发位置的速度。在电容器充电电压 $U=2\ 000\text{ V}$ 的条件下,将电枢分别置于0 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm、30 mm六个位置上进行实验,记 $S=0\text{ mm}$ 表示电枢底部刚好越过驱动线圈中心面的位置。实验测得的放电电流峰值、弹丸经过测速区域的时间以及求出的弹丸初速度如表2。

表2 不同初始位置下得出的弹丸初速

电枢初始位置 (mm)	弹丸穿过网靶时间 (ms)	弹丸初速度 (m/s)
0	18	13.9
10	12	20.8
15	10	25.0
20	8	31.0
25	10	25.0
30	11	22.7

通过试验,以上设计的实验装置能正常运行,无误触发和不触发现象,能较准确地测出弹丸飞出炮口的初速和放电电流。并且得到了电压和电枢初始位置与电枢初速度之间的近似关系:在电枢初始位置不变的情况下,弹丸初速度和电容器组充电电压近似成线性关系;在电容器组电压不变的情况下,当电枢初始位置位于超过驱动线圈中心面20 mm的位置时,弹丸的初速度速度最大。

5 结束语

通过自行设计制作的参数测量装置测得了系统发射过程中的放电电流以及弹丸的初速度,通过实验研究了放电电压和电枢初始位置变化对弹丸初速度的影响,为后期的多级同步感应线圈炮发射实验打下了基础。由于该装置还存在发射效率低的缺陷,大部分能量消耗于驱动线圈、电枢、导线接头处的发热以及驱动线圈的形变,因此,在后续的实验中,将在线圈的绕制,电枢的形状、材料,工程实现等方面进行改进。

参考文献:

- [1] 王莹,马富学.新概念武器原理[M].北京:兵器工业出版社,1997.
- [2] 王莹,肖峰.电炮原理[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [3] 赵科义,李治源,程树康.单级感应线圈炮工作过程的动态仿真[J].高电压技术,2008,34(8):1667-1671.
- [4] 曹延杰,刘文彪,张媛,等.单级感应线圈炮最佳初始位置仿真研究[J].计算机仿真,2006,23(12):9-11.
- [5] 古刚,向阳,张建华.国际电磁发射技术研究现状[J].舰船科学技术,2007,29(1):156-158.
- [6] 刘文彪,钟佩琳,邹平,等.单级感应线圈炮初速度仿真[J].海军航空工程学院学报,2009,24(1):31-33.
- [7] 冯霏,雷彬,李治源,等.5级同步感应线圈发射试验装置及控制系统研究[J].军械工程学院学报,2007,19(1):42-44.
- [8] Zhang Chao wei, Li Zhiyuan, Hu Jianli, et al. Measurement of Pulsed Heavy Current in Rail Launcher Using Rogowski Coil[C]. ISTM/2005 6th International Symposium on Test and Measurement, Beijing, P.R.China: Beijing World Publishing Corporation, 2005: 2800-2804.
- [9] John D, Ramboz. Machinable Rogowski Coil Design and Calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 511-515.
- [10] 张朝伟.导轨-同步感应线圈混合发射器的基础研究[D].石家庄:军械工程学院博士论文,2006.
- [11] 毛少娟,刘秉琦,李刚.一维位置敏感探测器信号检测电路及EWB仿真[J].四川兵工学报,2009(7):98-99.