

线圈型电磁发射器反向电流分析 及其对发射器系统的影响

李翔城,刘振祥,侯炎磐,杨丽佳,沈志,欧阳建明

(国防科技大学理学院,长沙 410073)

摘要:线圈型电磁发射器利用驱动线圈和弹丸线圈的磁通耦合机制加速弹丸向前运动,磁通耦合的大小决定了弹丸的受力及其加速过程。然而高速运动的弹丸会造成其前部磁力线压缩,在驱动线圈内部产生与驱动电流方向相反的感应电流,抑制了电源的正常放电,导致发射器系统电流波形呈下滑趋势。针对该问题,从理论上导出了运动磁体周围环形电场分布方程,分析了运动磁体各项参数对感生电场的影响;运用有限元分析方法模拟了永磁体弹丸运动过程并利用钕铁硼柱体做了验证实验;运用线圈型电磁发射器实验平台测得了环形感应电流;通过分析不同电源电压条件下发射器系统电流分布提出了零电流输出模式的方案。

关键词:反向电流;ZC模型;线圈型电磁发射器

本文引用格式:李翔城,刘振祥,侯炎磐,等.线圈型电磁发射器反向电流分析及其对发射器系统的影响[J].四川兵工学报,2014(2):59-62.

中图分类号:TM303.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)02-0059-04

Analysis of Back Current in Coil Electromagnetic Launchers and the Effect Acting on the Launching System

LI Xiang-cheng, LIU Zhen-xiang, HOU Yan-pan,
YANG Li-jia, SHEN-Zhi, OUYANG Jian-ming

(College of science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: During the coil electromagnetic launching process, the projectile is accelerated due to the mutual coupling of magnetic flux between the drive- and projectile coils, which determine the force acting on the projectile and also the acceleration process. However, high-speed movement of the projectile will cause the magnetic field lines compress in the front and back current induced in the drive coils which suppresses the normal discharge of power supply. This paper investigates the back current induced in drive coils due to the movement of projectile in coil electromagnetic launchers. The equation of circular electric field round the projectile is theoretically derived based on a hypothesis that all the magnetic dipoles are uniformly distributed in the projectile; the finite element model to calculate the back current is established in ANSOFT MAXWELL, and the numerical result of which is validated by Nd-Fe-B experiment; the back current of coil electromagnetic launcher is detected indirectly and the program of zero exist current mode is proposed after analyzing the current waveforms of the launcher system under conditions of different power supply voltages.

Key words: back current; ZC model; coil electromagnetic launchers

Citation format: LI Xiang-cheng, LIU Zhen-xiang, HOU Yan-pan, et al. Analysis of Back Current in Coil Electromagnetic Launchers and the Effect Acting on the Launching System[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(2): 59-62.

收稿日期:2013-09-22

作者简介:李翔城(1992—),男,硕士研究生,主要从事电磁波与材料研究。

线圈型电磁发射器是利用脉冲电流产生磁行波驱动带有线圈的弹丸或磁性材料弹丸的装置^[1-4]。与导轨型电磁发射器相比,具有效率高、适于发射大质量弹丸等优势。线圈型电磁发射器利用驱动线圈和弹丸线圈的磁通耦合效应加速弹丸向前运动,磁通耦合的大小决定了弹丸的受力,同时决定了弹丸加速过程^[5-7]。然而在线圈型电磁发射器工作过程中,高速运动的弹丸会在驱动线圈内部产生感应电动势,由于驱动线圈是一闭合的回路,感应电动势作用于驱动线圈就会在驱动线圈内部产生感应电流,并且感应电流的方向与原电流的方向相反,这样就使得系统电流强度下降。同时使得弹丸受力减小,影响了弹丸的正常加速。

线圈型电磁发射器运行时的反向电流问题至今很少有文献进行论述,并且由于发射器工作时,内部存在恶劣的电磁环境,利用现有仪器很难在不影响发射器正常工作的条件下直接对发射器内部工作状态进行测量。为寻求反向电流分布规律及其对发射器系统的影响,数值仿真及弹丸运行的模拟实验是很有必要的。

本文首先从理论上推导出了运动弹丸周围感生电场方程,并分析了各项参数;之后建立模拟弹丸运动的有限元模型,利用环形线圈探针探测由于弹丸运动产生的环形电流强度并在此基础上做了验证实验;在线圈型电磁发射器实验平台测得反向电流波形,分析了反向电流对发射器系统电流的影响,在此基础上提出线圈型电磁发射器零电流输出模型。

1 理论分析

线圈发射器的弹丸结构一般为在外表面缠绕螺旋线圈或者弹丸为一整块磁体。发射器正常工作时,驱动线圈产生的磁场与弹丸磁场发生耦合,二者相互作用加速弹丸向前运动。事实上弹丸材料不论为导体或者磁体,当研究向前运动的电场辐射时,都可以将弹丸看成是磁体,原因是载流螺旋管与圆柱体磁体产生的磁场具有极强的相似性。

为了简化模型,把被磁化了的弹丸看作是圆柱体磁体,如图1所示。

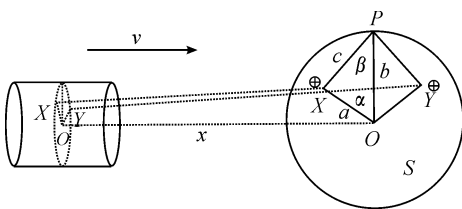


图1 运动弹丸的简化模型

在图1中,弹丸长为40 mm、外径为33 mm,设弹丸内部所有铁原子的磁矩都沿弹丸长度方向整齐排列,每个铁原子平均磁矩设定为 $M_0 = 1.8 \times 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$,观测点为P。

首先考虑圆柱磁体中心O的磁偶极子辐射情况,设P到磁偶极子所在直线的垂直距离为b,射影距离为x,磁体运动速度为v,单个磁偶极子磁矩为M,真空磁导率为 μ_0 。

由于对称性,磁偶极子沿纵向运动产生的感应电场的电力线是一族垂直轴线的同心圆。则P点所在的圆S上电场强

度相等,由法拉第电磁感应定律可知

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

而O点的磁偶极子在P点磁感应强度的纵向分量为

$$B_x = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \left[\frac{3x^2}{(b^2 + x^2)^{5/2}} - \frac{1}{(b^2 + x^2)^{3/2}} \right] \quad (2)$$

得出运动磁偶极子周围感应电场强度分布为

$$E = \frac{3\mu_0 M}{4\pi} \cdot \frac{xbv}{(b^2 + x^2)^{5/2}} \quad (3)$$

为了求出整个磁体在P点的感应电场,在弹丸上任取关于径向对称分布的2点X、Y,并将该平面移至P点所在与弹丸运动方向垂直的圆S,磁体运动产生的感应电场可看成磁偶极子感应电场对体积空间的积分

$$E = \int_0^{a_0} \int_0^{2\pi} \int_{x_0}^{x_0+l_0} \frac{3\mu_0 MN}{4\pi} \cdot \frac{xb(b - a\cos\alpha)}{(c^2 + x^2)^{5/2}} cdad\alpha dx \quad (4)$$

其中 a_0 为弹丸半径,P至中心距离 $OP = b$,弹丸长度 l_0 ,弹丸左端点距O点为 x_0 ,N为弹丸内部单位体积磁偶极子数目。求解式(4)可得

$$E = \frac{3\mu_0 MNv}{4\pi} \int_0^{a_0} \int_0^{2\pi} (b - a\cos\alpha) cdad\alpha \int_{x_0}^{x_0+l_0} \frac{x}{(c^2 + x^2)^{5/2}} dx = \frac{3\mu_0 MNv}{4\pi} \int_0^{a_0} \int_0^{2\pi} cdad\alpha \int_{x_0}^{x_0+l_0} \frac{1}{(c^2 + x^2)^{5/2}} d(x^2 + c^2) \quad (5)$$

令 $t = x^2 + c^2$,则:

$$E = \frac{3\mu_0 MNv}{4\pi} \int_0^{a_0} \int_0^{2\pi} cdad\alpha \int_{x_0^2+c^2}^{(x_0+l_0)^2+c^2} \frac{1}{t^{5/2}} dt = \frac{\mu_0 MNv}{4\pi} \int_0^{a_0} \int_0^{2\pi} \left[\frac{(b - a\cos\alpha)}{(c^2 + x_0^2)^{3/2}} - \frac{(b - a\cos\alpha)}{(c^2 + (x_0 + l_0)^2)^{3/2}} \right] cdad\alpha \quad (6)$$

故:

$$E = \frac{\mu_0 MNv}{4\pi} \int_0^{a_0} \int_0^{2\pi} \left[\frac{(b - a\cos\alpha)}{(c^2 + x_0^2)^{3/2}} - \frac{(b - a\cos\alpha)}{(c^2 + (x_0 + l_0)^2)^{3/2}} \right] cdad\alpha \quad (7)$$

其中: $c^2 = a^2 + b^2 - 2abc\cos\alpha$;弹丸内部单位体积铁原子数: $N = \rho N_0 / A$,其中密度 $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$,原子量 $A = 55.85$,阿伏伽德罗常数 $N_0 = 6.023 \times 10^{23} / \text{g}$,则 $N = 0.841 \times 10^{29} / \text{m}^3$;真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。

求解式(7)可得环形电场强度E随探测点位置及弹丸速度的变化情况,如图2所示。

图2中,b选取3个值(分别是33 mm,40 mm,50 mm),对于弹丸上的同一个环(即b相同),分别设定弹丸磁体的速度(v分别是10 m/s,100 m/s,1 000 m/s)。可以得到以下结论:

1) 在弹丸运动速度相同时,探测点离弹丸位置的垂直距离b越小,环形电场强度E越大。并且电场强度呈类正弦波形。

2) 对于同一个圆环位置,即b相同,弹丸磁体的运动速度越快,环形电场强度E越大。并且电场强度呈类正弦波形。

如果在弹丸的感生电场附近存在导电回路,那么由于导电介质的欧姆定律

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

可以求出回路的环形电流。

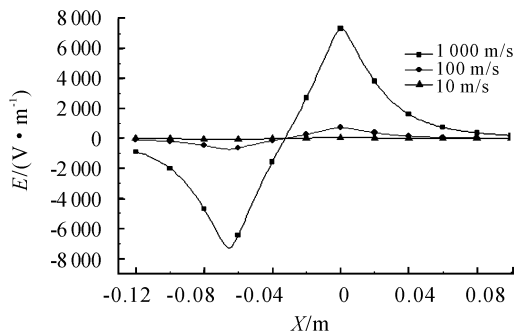
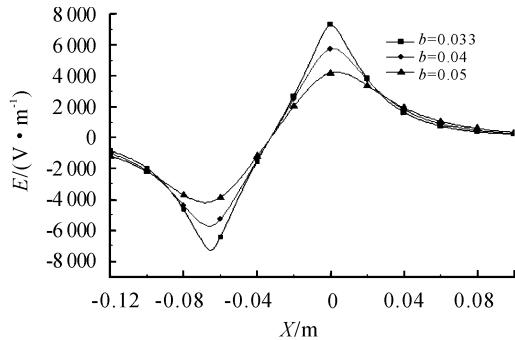


图2 环形电场强度随弹丸速度、探测点位置分布

2 反向电流的数值分析与实验验证

上述的理论分析中,假定了所有铁原子的磁矩都沿弹丸运动方向排列以及不考虑铁芯内部由于弹丸运动的一些非线性效应。这种理想化的假设只是在研究环形电场波形时有用,对于贴近实际的分析需用有限元的方法进行计算机模拟。

运用 ANSOFT 电磁场有限元分析软件,对上述过程进行建模仿真:弹丸口径 33 mm,长 40 mm,模拟一环形探针,该探针为螺旋线圈,材料为紫铜,电导率为 5.8×10^7 s/m,探测点位置 $b = 0.02$ m。设定弹丸速度为 5 m/s,所得结论见图 3。

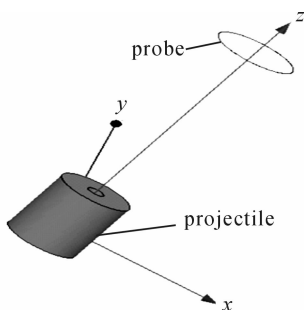


图3 运动弹丸有限元模型

探测线圈,并将漆包线两端接到示波器两端进行观察,所得结果如图 4 所示。

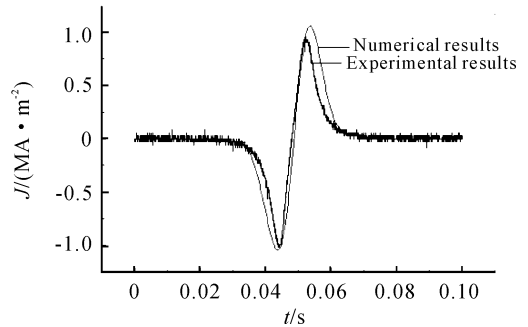


图4 感应电流密度分布(数值模拟-D;实验结果-B)

从图 4 可以分析出数值模拟的结果和实验的结果总体规律是一致的,并且两者比较之间的误差是合理的。向前运动的弹丸在激励线圈内部产生感应电场,由于激励线圈为闭合的回路,所以会产生感应电流,并且感应电流方向总是试图阻止弹丸的运动,即感应电流的方向与源电流方向相反。由式(7)可以看出,弹丸运动速度越大,感应电场强度就越大,反向电流就越强。实际的线圈发射试验中, $v = 23$ m/s, $b = 0.05$ m,测得的数据如图 5 所示。

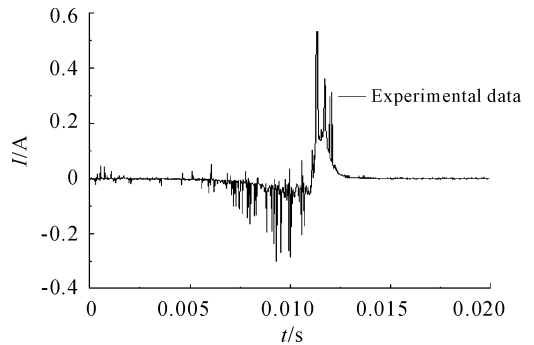


图5 探测线圈内部电流分布

3 反向电流对发射器系统电流的影响

对于驱动电流较大的情况,弹丸作为一个运动强磁载体,在周围感生的电场会对原系统电路造成影响,在连续换向过程中,驱动-弹丸线圈系统始终为导通状态,这样反向电流就在一定程度上削弱了正常的驱动电流。抑制了电源的正常放电,如图 6 所示。显然,当炮管长度增大或者弹丸速度升高时,反向电流对原系统电流的减小趋势将更加明显。这样就有可能通过设计炮管尾部参数实现弹丸出炮口时系统电流将为零。

4 零电流输出模式(ZC 模式)

线圈型电磁发射器炮口部分 PSPICE 简化电路模型如图 7 所示,开关部分用来模拟弹丸出炮口时电路瞬间断开, U 和 R 分别为电源电压和系统等效电阻, L 为发射器系统等效电

相同初始条件下,运用钕铁硼模拟永磁体,漆包线作为

感,通过设定电感 L 的电流可模拟零电流输出模式。

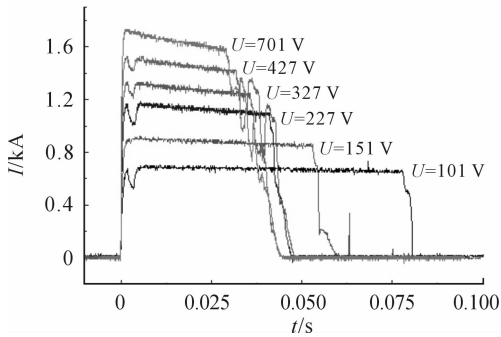


图6 不同电源电压、电流与时间关系

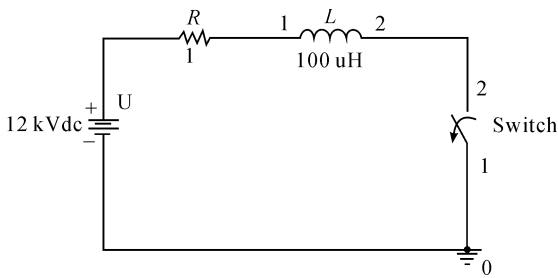


图7 线圈型电磁发射器炮口部分等效电路模型

通过改变炮口处系统电感值,可以模拟弹丸出炮口瞬间系统的电压及电流分布情况,如图8、图9所示。结果表明当电感值较大时,发射器系统在弹丸出炮口瞬间电流变化趋势较小,然而在炮口处会引起较大的感应电压。

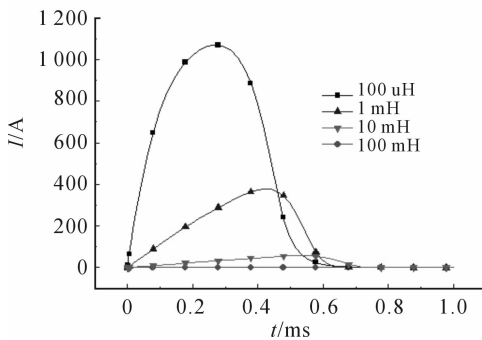


图8 不同电感条件下电流和时间的关系

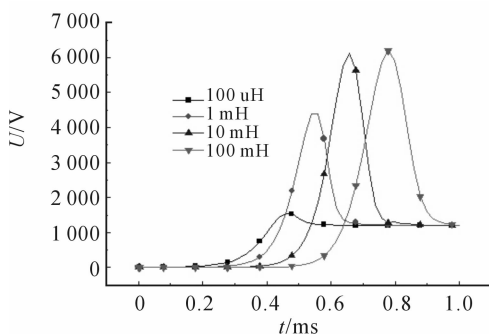


图9 不同电感条件下电压和时间的关系

发射器系统能否达到零电流输出模式,主要决定因素为出炮口处驱动线圈系统电感与电源放电主导地位的归属。对于电源电压较低而炮口处发射器系统电感较大的情况,则ZC模式可以实现,但是并不代表出炮口过程中没有电流的产生,而是相对于系统正常工作的电流小得多。

对于原发射器系统电路可以考虑在炮口驱动线圈串联大电容器件,可以实现电流输出时电流的稳定,避免对导轨的烧蚀。然而电感也不宜过大,电路断开的瞬间会造成极高的感应电压,造成间隙的击穿,形成电弧。

5 结论

1) 在弹丸运动速度相同的条件下,探测点离弹丸位置的垂直距离越小,环形电场强度越大;弹丸的运动速度越快,环形电场强度越大。并且电场强度呈类正弦波形。

2) 通过研究反向电流对发射器系统电流的影响,分析出当电源电压较小时,波形接近于方波,说明弹丸运动对发射器系统电流影响不大;随着电源电压的增大,弹丸速度增大,电流波形呈下降的程度越来越明显,可以推测增大炮管长度之后弹丸出炮口时电流将会降到更低的值,同时分析了磁感应系数论证了反向电流对发射器电流的影响。

3) 在炮口处将驱动线圈串联大电容器件,可以实现电流输出时电流的稳定,避免对导轨的烧蚀。并且串联大电感器件可以实现电流零电流输出模式。

参考文献:

- [1] Engel TG, Nunnally WC, Neri JM. High-Efficiency, medium-caliber helical coil electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(11): 4299 - 4303.
- [2] Engel TG, Dwayne Surls, Nunnally WC. Prediction and verification of electromagnetic forces in helical coil launches [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 112 - 115.
- [3] Lee S. Reduced modeling of eddy current-driven electromechanical system using conductor segmentation and circuit parameters extracted by FEA [J]. IEEE Trans Magn, 2005, 41(5): 1148 - 1451.
- [4] Mohammed O A. High frequency PM synchronous motor model determined by FEA analysis [J]. IEEE Trans Magn, 2006, 42(4): 1291 - 1294.
- [5] 王莹, 肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 174 - 178.
- [6] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 609 - 612.
- [7] Bresie D A, Andrews J A. Design of Reluctance Accelerator [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1991, 27(1): 623 - 627.