

线圈型电磁发射器换向过程分析

侯炎磐,刘振祥,杨丽佳,沈志,欧阳建明,杨栋,蒋雅琴

(国防科技大学理学院,长沙 410073)

摘要:定量地分析了线圈型电磁发射器换向过程中能量的转化及转移,并利用 Ansoft 电磁场有限元分析软件对换向过程进行了仿真计算,得到以下结论:① 换向过程中,驱动线圈层数固定时,增大弹丸线圈层数会提高发射器能量转换效率;② 弹丸线圈层数固定时,驱动线圈层数增大会在一定程度上降低发射器能量转换效率;③ 当驱动线圈与弹丸线圈层数较大时,换向之后储存在炮管线圈中的巨大能量会在炮口处以炮口电弧的形式释放。

关键词:线圈发射;换向;有限元仿真

中图分类号:TM303.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)06-0061-04

Commutating Analysis of the Coil Electromagnetic Launcher

HOU Yan-pan, LIU Zhen-xiang, YANG Li-jia, SHEN Zhi,
OUYANG Jian-ming, YANG Dong, JIANG Ya-qin

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

Abstract: The transformation and diversion of energy during commutating process of the coil electromagnetic launcher (coil EML) was quantificationally analyzed and the commutating process of the coil EML was numerically simulated using Finite Element software Ansoft. The conclusions are as follows: if the quantity of the layers of the drive coil is fixed, the efficiency of the magnetic energy transforming to the kinetic energy would be induced by the increase of the quantity of the layers of the projectile coil; if the quantity of the layers of the projectile coil is fixed, the efficiency of the magnetic energy transforming to the kinetic energy would be reduced by the increase of the quantity of the layers of the drive coil; if the quantity of the layers of the projectile coil and the drive coil reached a specific value, the residual energy would be released in the form of the electric arcing at muzzle.

Key words: coil launching; commutating; finite element simulation

线圈型电磁发射器与导轨型电磁发射器相比有诸多优点:电感梯度大,这样就避免了大电流工作,有效避免了对炮管及导轨的烧蚀;能量转换效率高,降低了发射器对脉冲功率电源的要求;利于实现大尺寸载荷的发射^[1-3]。然而线圈发射器同步技术相对复杂,尤其是使弹丸在加速过程中始终处于最大加速位置比较难于实现^[4],并且弹丸在炮管中运动过程中,容易出现能量在炮管线圈中的恶性积累,导致驱动线圈匝间电弧持续放电现象。

匝间电弧不仅造成了能量的浪费,并且对发射器电刷、驱动线圈等结构造成了烧蚀^[5-6]。匝间电弧的产生是由于

换向过程中换向匝的能量不能有效转移至激励线圈并转化为弹丸线圈的动能,造成了炮管线圈中能量的累积,在匝间形成换向电压所导致的。所以研究发射器换向过程中的能量转移与转化有利于提高发射器工作效率并且有效抑制匝间电弧的产生,提高发射器寿命。

1 理论分析

换向的过程是能量转移的过程,能量的来源是驱动线圈换向匝(commutator)从发射器系统电路中断开。

收稿日期:2013-03-01

作者简介:侯炎磐(1989—),男,硕士研究生,主要从事电磁发射、数值仿真研究。

图1中,驱动线圈首尾部分为换向匝,为了比较清晰地分析问题,在绘制模型过程中,将换向匝与激励线圈部分留出间隔,并进行不同的着色。实际中的换向匝与激励线圈是连接的,并且材料等线圈参数完全相同。弹丸向前运动的过程中,在前换向匝内部产生感应电压,并通过短路将其孤立出炮管系统,使之进入换向电路;同时短路向前移动,换向电路舍去后换向匝,使之重新进入炮管线圈系统,完成了一次换向过程。

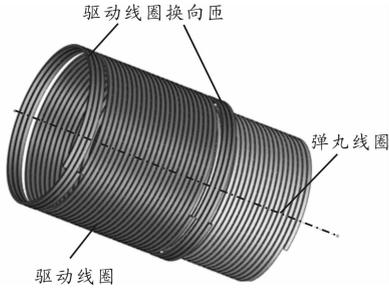


图1 线圈型电磁发射器换向单元模型

实际上,换向过程中,后换向匝退出换向电路与前换向匝进入换向电路是同时进行的,然而在分析问题时,本文将该过程分解成两个步骤:第一步,后换向匝断开,换向匝的能量大部分转移到驱动-弹丸线圈系统,使得系统电流增大;第二步,弹丸向前运动,前换向匝进入换向电路,能量回归驱动线圈系统,驱动-弹丸线圈系统电流降低,完成换向过程。

首先可以将驱动线圈激励部分看成载流螺线管(solenoid),换向匝断开之后载流螺线管电流发生变化,设定螺线管电流的初始值为 I 。可将弹丸(projectile)线圈与激励线圈看做整体,根据磁通守恒原理有

$$(L_p + L_s + M_{cs} + M_{cp} + 2M_{ps})I = (L_p + L_s + 2M_{ps})I'' \quad (1)$$

式中: L_p, L_s 分别为弹丸线圈与激励线圈自感; M_{cs} 和 M_{cp} 分别为换线匝与激励线圈之间和与弹丸线圈之间的互感; M_{ps} 为弹丸线圈与激励线圈之间的互感。

换向匝断开后驱动-弹线圈系统电流为

$$I'' = \left(1 + \frac{M_{cs} + M_{cp}}{L_p + L_s + 2M_{ps}}\right)I \quad (2)$$

其次为驱动-弹丸线圈系统与前换向匝的连接,同样运用磁通守恒原理

$$(L_p + L_s + 2M_{ps})I'' = (L_p + L_s + M'_{cs} + M'_{cp} + 2M'_{ps})I''' \quad (3)$$

则

$$I''' = \frac{L_p + L_s + 2M_{ps}}{L_p + L_s + 2M'_{ps} + M'_{cs} + M'_{cp}}I'' \quad (4)$$

其中 M'_{cs} 与 M'_{cp} 分别为换向之后前换线匝与激励线圈之间和与弹丸线圈之间的互感。 I''' 为换向之后驱动-弹丸线圈系统的电流。

换向过程中弹丸动能增量可表示为换向前后驱动-弹丸线圈系统的磁能之差

$$\Delta W_k = \frac{1}{2}(L_p + L_s + L_c + 2M_{cs} + 2M_{cp} + 2M_{ps})I^2 - \frac{1}{2}(L_p + L_s + L_c + 2M'_{cs} + 2M'_{cp} + 2M'_{ps})I'''^2 \quad (5)$$

而换向过程中,后换向匝从换向电路中断开,转移至整个系统的能量为

$$W_c = \frac{1}{2}L_c I^2 + M_{cs} I^2 + M_{cp} I^2 \quad (6)$$

换向过程中,发射器的能量转换效率为

$$\eta = \frac{\Delta W_k}{W_c} \quad (7)$$

2 仿真设计

线圈型电磁发射器的 Ansoft 仿真模型如图2所示。由于发射器及弹丸为轴对称结构,故使用二维求解器分析。在建立模型过程中,为了简化模型,舍去了导轨及电刷,并且炮管也未进行径向切割处理,而是进行了参数重新设置,尽量符合实际的发射器情况。

首先在 Define model 模块下绘制发射器模型,之后在 Setup Materials 以及 Setup Boundaries /Sources 设定驱动线圈材料为紫铜,弹丸材料为铸铁,并且将其电导率设定为0,对应于实际设计中将弹丸铁芯部分进行径向切割以避免涡电流的产生;将边界条件设定为 balloon。

在电流激励区,驱动线圈电阻设定为实际值,然而在电流激励区以外,则将其设定为 ∞ ,近似于断路。

在 Setup Solution 模块下设定网格划分,各项设定完成之后,运用 Nominal Problem 工具进行数值运算。

设定单线匝厚度为2 mm,宽度为3 mm,线匝内部电流为1 200 A,驱动线圈材料为紫铜,弹丸线圈材料为铝。

在仿真过程中,将驱动线圈与弹丸线圈层数分别设为 l_s, l_p ,二维轴对称模型如图2所示。

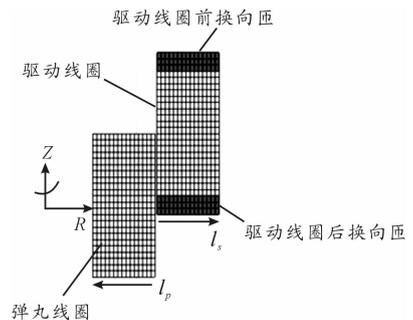


图2 线圈型电磁发射器二维模型

图3中可以看出,能量主要集中于驱动-弹丸线圈系统中心位置,中心磁能达到 $2.88 \times 10^7 \text{ J/m}^3$,在轴线方向能量分层密集,说明能量梯度较大,弹丸总是朝着磁能减小的方向运动。定量的结果见表1。

表1 仿真结论

	L_c/mH	L_p/mH	L_s/mH	M_{cs}/mH	M_{cp}/mH	M_{ps}/mH	M'_{ps}/mH	M'_{cs}/mH	M'_{cp}/mH
$l_s = 1, l_p = 1$	0.002 26	0.056 6	0.049 99	0.004 53	0.007 96	0.034 56	0.040 20	0.004 54	0.002 333
$l_s = 1, l_p = 2$	0.002 26	0.216 0	0.050 00	0.004 52	0.015 30	0.066 64	0.077 40	0.004 53	0.004 562
$l_s = 1, l_p = 3$	0.002 26	0.463 5	0.050 01	0.004 52	0.022 03	0.096 37	0.111 73	0.004 53	0.006 684
$l_s = 1, l_p = 4$	0.002 26	0.785 0	0.050 01	0.004 52	0.028 20	0.123 83	0.143 35	0.004 54	0.008 694
$l_s = 1, l_p = 5$	0.002 26	1.168 1	0.050 01	0.004 52	0.033 84	0.149 12	0.172 39	0.004 54	0.010 588
$l_s = 2, l_p = 5$	0.008 79	1.168 0	0.201 13	0.018 55	0.066 72	0.296 14	0.341 44	0.018 58	0.021 471
$l_s = 3, l_p = 5$	0.019 31	1.168 0	0.455 17	0.042 66	0.098 68	0.441 06	0.507 21	0.042 70	0.032 623
$l_s = 4, l_p = 5$	0.033 58	1.168 1	0.814 00	0.077 47	0.129 75	0.583 92	0.669 79	0.077 54	0.044 011
$l_s = 5, l_p = 5$	0.051 57	1.168 0	1.279 80	0.123 49	0.159 98	0.724 72	0.829 23	0.123 55	0.055 609
$l_s = 5, l_p = 10$	0.051 58	3.607 9	1.279 80	0.123 49	0.260 52	1.197 70	1.363 10	0.123 50	0.095 420
$l_s = 10, l_p = 10$	0.195 16	3.607 9	5.290 80	0.539 02	0.48810	2.311 40	2.602 50	0.539 04	0.197 560
$l_s = 10, l_p = 15$	0.195 16	6.107 0	5.290 90	0.539 03	0.596 44	2.849 60	3.198 50	0.539 22	0.248 250
$l_s = 15, l_p = 15$	0.427 92	6.107 4	12.332 0	1.308 00	0.842 77	4.127 30	4.591 20	1.308 00	0.378 820

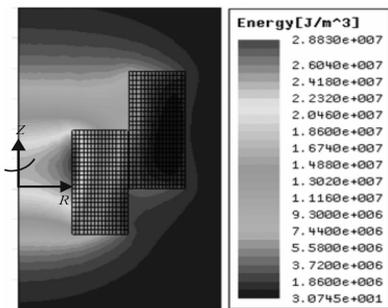
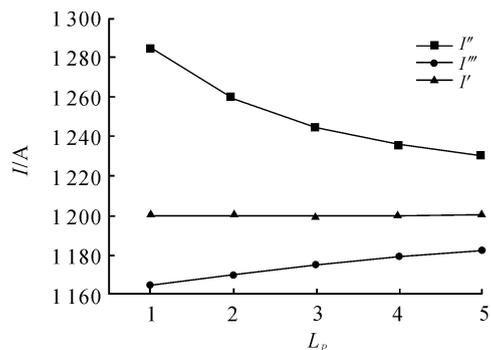


图3 线圈发射过程中能量分布

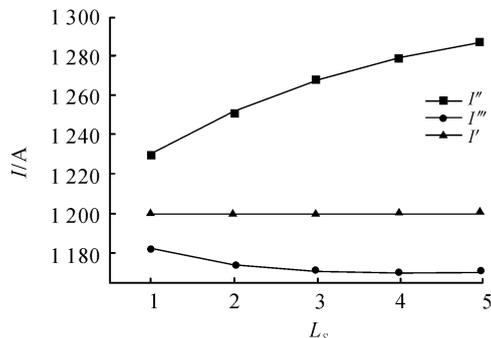
对于结构确定的线圈型电磁发射器,每个线圈的自感及之间的互感都是确定的,并可以用数值计算的方法求解,表1中,通过改变 l_s, l_p 的值进行分析,线圈系统的自感与自身匝数的平方成正比,而两线圈系统的互感,与二者匝数的乘积成正比。将求解所得的电感值代入理论推导公式(5)~式(7),就可以求解出换向过程中磁能转化为弹丸动能的部分,以及发射器的能量转换效率。

图4(a)中为驱动线圈为单层,弹丸线圈在1~5层之间变化时,换向过程中的电流分布,由图可知:后换向匝从换向电路断匝的过程为电流增大的过程,此时断匝的能量大部分转移至驱动-弹丸线圈系统,前换向匝进入换向电路的过程为电流减小的过程,即驱动-弹丸线圈系统能量有部分转移至发射器系统,其中驱动-弹丸线圈系统磁能之差为弹丸动能的增量;当驱动线圈层数固定时,换向的2个步骤之间电流变化程度随着弹丸线圈层数的增大而变小,然后换向匝断开产生电流变化的趋势更明显。图4(b)中为驱动线圈为

5层,弹丸线圈在1~5层之间变化时换向过程中的电流分布,可知:当弹丸线圈层数固定时,换向的2个步骤之间电流变化程度随着驱动线圈层数的增大而增大,同样是后换向匝断开产生电流变化的趋势更明显,定量结论见表2。



(a) 驱动线圈为单层



(b) 驱动线圈为5层

图4 换向过程中的电流分布

表2为表1中电感计算数值代入理论推导公式所得结论。可知:驱动线圈厚度固定时,增大弹丸线圈厚度可极大提高发射器效率;弹丸线圈厚度固定时,驱动线圈厚度增大会减小发射器效率;当驱动线圈与弹丸线圈层数达到15层时,即厚度达到3 cm时,弹丸每前进一个换向单元(约1 cm)动能增加710 J,然后换向匝转移至驱动-弹丸线圈系统能量为3 405 J,其余的能量大部分转移至前换向匝,然而对于弹丸出炮口的情况,这部分能量会以炮口电弧形式释放。

表2 数值结论

	$\Delta W_k/J$	W_c/J	η
$l_s = 1, l_p = 1$	8.373	19.627	0.427
$l_s = 1, l_p = 2$	15.692	30.182	0.520
$l_s = 1, l_p = 3$	22.278	39.880	0.559
$l_s = 1, l_p = 4$	28.247	48.758	0.579
$l_s = 1, l_p = 5$	33.628	56.871	0.591
$l_s = 2, l_p = 5$	66.033	129.122	0.511
$l_s = 3, l_p = 5$	97.3790	217.457	0.448
$l_s = 4, l_p = 5$	127.616	322.681	0.395
$l_s = 5, l_p = 5$	156.669	445.420	0.352
$l_s = 5, l_p = 10$	243.805	590.112	0.413
$l_s = 10, l_p = 10$	441.168	1 619.568	0.272
$l_s = 15, l_p = 15$	710.544	3 405.211	0.209

3 结束语

本文对线圈型电磁发射器换向过程进行了理论分析与仿真计算,得出以下结论:①换向过程中,驱动线圈层数固定时,弹丸线圈层数增大导致磁能转化为动能的效率增大;

②弹丸线圈层数固定时,驱动线圈层数增大在一定程度上会降低发射器能量转换效率;③当驱动线圈与弹丸线圈层数较大时,换向之后储存在炮管线圈中的巨大能量会在炮口处以炮口电弧的形式释放,所以对于线圈型电磁发射器可以在炮口处外接高阻抗工质将剩余能量消耗,以提高炮管使用寿命。

参考文献:

- [1] Engel T G, Nunnally W C, Neri JM. High-Efficiency, medium-caliber helical coil electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(11): 4299-4303.
- [2] Engel T G, Dwayne Surls, Nunnally W C. Prediction and verification of electromagnetic forces in helical coil launches [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 112-115.
- [3] Harry D. Fair. Electric Launch Science and Technology in the United States [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 11-17.
- [4] SITZMAN A, SURIS D, MALLICK J. Stretch meat grinder: a novel circuit topology for reducing opening switch voltages-tress [C]//15th IEEE International Pulsed Power Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 493-496.
- [5] WANG YING, XIAO Feng. The theory of electric gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 142-143.
- [6] Bresie D A and Andrews J A. Design of Reluctance Accelerator [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1991, 27(1): 623-627.
- [7] 窦燕, 段航, 曹延杰, 等. 单级感应线圈发射器实验研究 [J]. 兵工自动化, 2010(7): 12-15.

(责任编辑 杨继森)