

电刷换向螺旋线圈炮的 Pspice 仿真及电弧分析

林志朋, 刘振祥, 杨 栋, 杨佳丽

(国防科技大学 理学院, 长沙 410073)

摘要: 使用高压电源驱动螺旋线圈发射器时, 电刷在换向过程中容易产生电弧, 严重时会造成短路并毁坏系统。针对该问题, 对线圈发射器换向过程进行了 Pspice 仿真, 分析了开关过渡时间和单元间电容对换向电压的影响。仿真结果表明: 随着弹丸运动速度增加, 开关过渡时间变小, 换向电压变大, 容易引发电弧, 进而降低能量转换效率和发射速度; 适当调节发射器单元间电容, 可以使匝间电流得到缓冲, 降低单元间电压, 避免电弧产生。

关键词: 螺旋线圈发射器; Pspice; 换向; 电弧; 电容

本文引用格式: 林志朋, 刘振祥, 杨栋, 等. 电刷换向螺旋线圈炮的 Pspice 仿真及电弧分析[J]. 四川兵工学报, 2014(10): 114 - 117.

中图分类号: TM303.1

文献标识码: A

文章编号: 1006 - 0707(2014)10 - 0114 - 04

Pspice Simulation of Brush Commutation Spiral Coil Launcher and Analysis of Arc

LIN Zhi-peng, LIU Zhen-xiang, YANG Dong, YANG Jia-li

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

Abstract: It is easy to get arc when do commutation for coil launch with high voltage power, which can make damage to device severely. This article simulates commutation of coil launch with Pspice. We analyze the effect of unit capacity and switch TTRAN to commutating voltage. Simulation results show that a long with pill speed up, TTRAN of switch will be short, which will cause large commutating voltage and bring arc. This phenomenon will limit the speed of coil launcher. By adjust unit capacity properly, we can buffer inter turn current, and reduce unit voltage drop to avoid arc arise.

Key words: coil launch; Pspice; commutation; arc; capacity

Citation format: LIN Zhi-peng, LIU Zhen-xiang, YANG Dong, et al. Pspice Simulation of Brush Commutation Spiral Coil Launcher and Analysis of Arc[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(10): 114 - 117.

在电刷换向螺旋线圈炮(HEMLs)中, 由于电压较大, 换向开关容易发生大规模放电现象, 产生等离子体, 击穿绝缘间隙, 使电导变大, 形成电弧^[1], 电弧温度极高, 既损害设备又影响发射效率。为此本文对线圈炮换向电路进行 Pspice 仿真。图 1 是电刷换向螺旋线圈炮的结构^[2-4]。

对于轨道炮抑制电弧的方法主要从改进电枢和分流 2 方面着手。电枢以 Zn - Cu 纤维电枢为主。分流的办法很多, 有炮口分流、多轨炮等, 欧洲 ISL 还通过使用并联增强型导轨炮, 不仅提高了发射速度, 也使通过弹丸的电流更小, 起到了抑制电弧的效果^[5-8]。

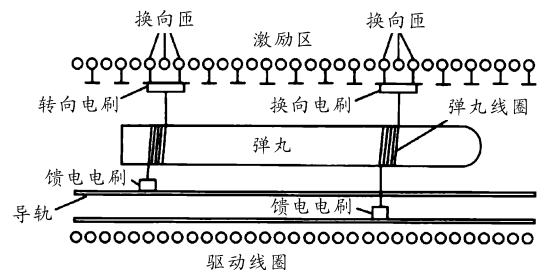


图 1 电刷换向螺旋线圈炮

收稿日期: 2014 - 05 - 18

基金项目: 国家部委资助项目。

作者简介: 林志朋(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁发射与等离子体研究。

然而,关于 HEMLs 的换向时产生的电弧现象的研究很少。Musolino 和 Rizzo 对其做了数值分析,但并没有提及如何抑制电弧^[9-11]。

1 线圈炮的电路仿真

图 2 是线圈炮的 Pspice 仿真电路。

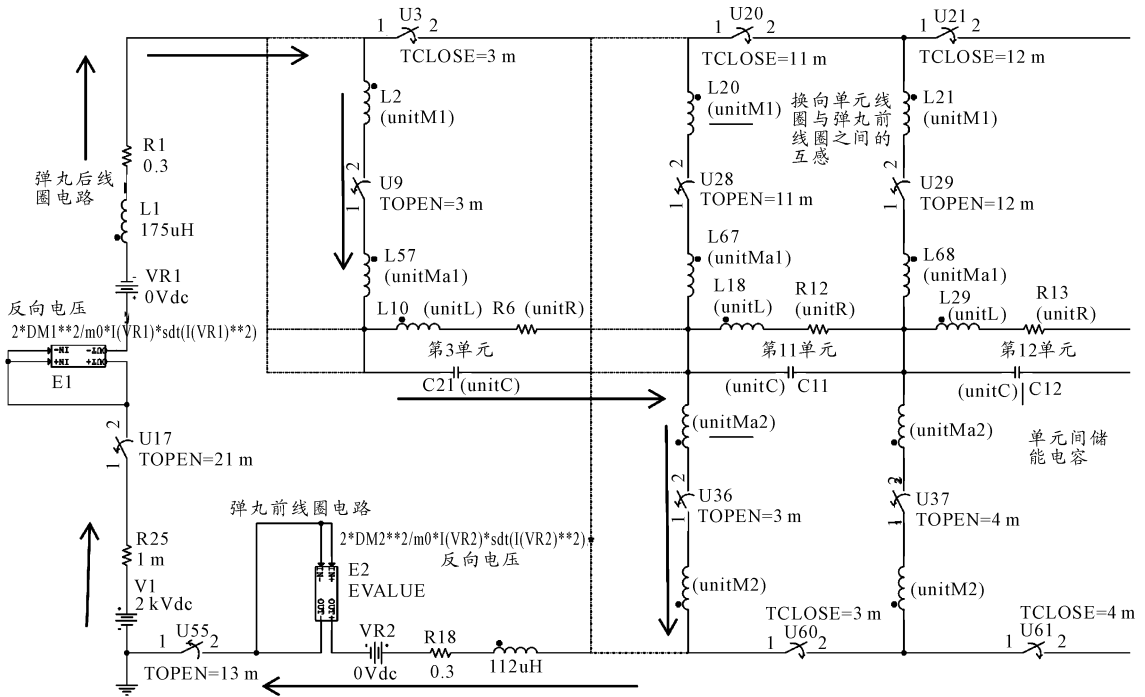


图 2 线圈炮电路

1.1 单元电路设计

串联时,由于弹丸与驱动线圈之间的电感为 $L = L_p + L_d \pm 2M$,其中 L_p 为弹丸线圈电感, L_d 为驱动线圈电感, M 为它们之间的互感。因此前后线圈与驱动线圈之间需要串联互感线圈。考虑单元外壁金属产生的电容,并通过开关模拟换向过程,炮管单元电路可以等效为图 2 中的第 3、第 11 单元。由于弹丸前线圈一开始已位于炮管内,所以前线圈与前几个单元没有直接电气连接。

1.2 弹丸线圈电路

弹丸在运动时会产生反向电压^[12-13],利用反向电压公式(1),可得弹丸线圈电路

$$V_{\text{back}} = 2M'iv$$

$$v = \int \frac{M'i^2}{m} dt$$
(1)

其中: V_{back} 是反向电压; M' 是互感梯度; v 是弹丸速度; i 是电流; m 是弹丸质量。

如图 2 所示,利用 evaluate 器件将反向电压公式代入电路中。图 2 中弹丸前、后线圈电路间串联炮管单元电路,外加电源和地线。

1.3 换向过程

换向时弹丸后线圈由前一单元移动到下一单元,此时其与前一单元间的开关断路,同时与下一单元的开关闭合。同理可得前线圈换向过程。

由于 Pspice 所提供的开关器件 Sw_tClose 和 Sw_tOpen

过渡时响应时间存在一定偏差,需要修正其 Pspice 模型以反映真实的开关换向过程。将 Sw_tClose 的 Pspice 模型响应函数修改为:

$$V1 \ 3 \ 0 \ \text{pulse}(0 \ 1 \ \{t_{\text{close}} - t_{\text{tran}}/3\} \ \{t_{\text{tran}}\} \ 1 \ 10k \ 11k)$$

采取如图 3 所示的电路测试开关,取开关时间在 1 ms,过渡时间为 0.5 ms,则修正前后电流曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看到修正前,过渡期间会出现电流趋于 0 的情况,这将导致仿真出的速度小于实际情况。修正 Pspice 的开关后,这种现象就能避免。

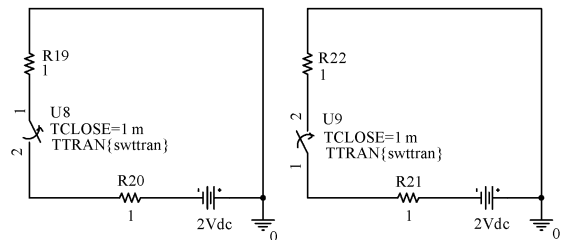


图 3 开关过渡过程测试电路

1.4 仿真结果

图 5 所示为单元电容为 40 pF, 2 kV 电源,开关过渡时间为 200 μs 时,第 3 单元(在 3 ms 时后线圈换向)和第 11 单元(在 3 ms 时前线圈换向, 11 ms 时后线圈换向)的降压曲线。从图 5 中可以看到开关在换向期间会引发较大的单元压降,进而产生电弧。

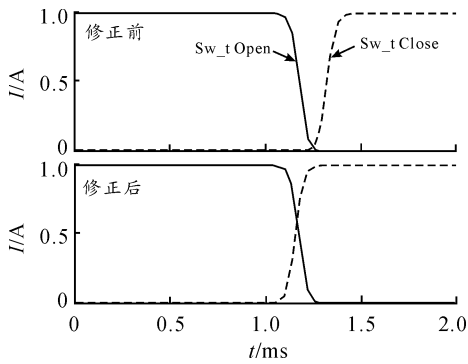


图4 修正前后开关电流

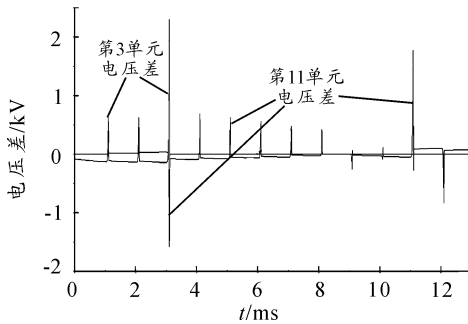


图5 单元压降

2 单元电容对电压的影响

不考虑开关过渡修正,图6是在开关过渡时间为 $10\ \mu\text{s}$, $2\ \text{kV}$ 电源时,单元电容分别为 $40\ \text{pF}$ 、 $100\ \text{nF}$ 时,第3单元的电位曲线。

从图6中可以看到当单元电容增大时,单元间电压下降,且电流通过振荡得到缓冲,以缓慢的方式降低。适当地加以利用和控制可以抑制电弧的产生。

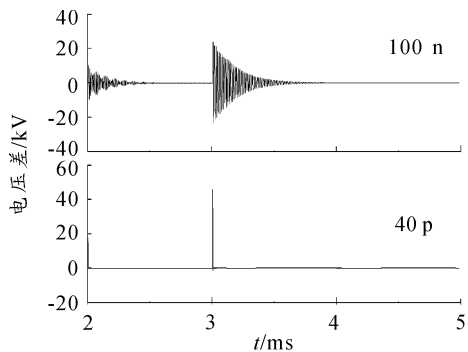


图6 单元电容对单元压降的影响

3 开关过渡时间对电压的影响

考虑开关过渡修正,图7是在单元电容为 $40\ \text{pF}$, $2\ \text{kV}$ 电源时,开关过渡时间分别为 $20\ \mu\text{s}$, $80\ \mu\text{s}$, $140\ \mu\text{s}$, $200\ \mu\text{s}$,第3单元的电位曲线。

若电流在电刷上均匀分布,且电刷长度大于单元长度,

则开关过渡时间 $\tau=l/v$,其中 l 是过渡段长度, v 是弹丸运动速度。由于存在一定的趋肤效应,应有 $l < d$, d 是单元长度。由图7可知,当 v 比较大时,由于开关过渡时间大为减小,将产生很大的换向电压,进而引发电弧。这限制了HEMLs速度的提高。

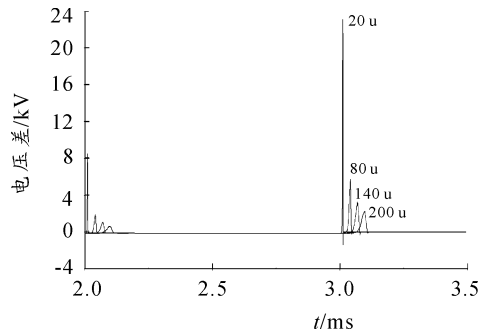


图7 开关过渡时间对单元压降的影响

另外图8是不同开关过渡时间过渡时的速度变化曲线。从图8中可以看出随着运动加快,开关过渡时间变小,导致通电变得急促,电流得不到有效传导,从而使得换向时瞬间加速度变小。

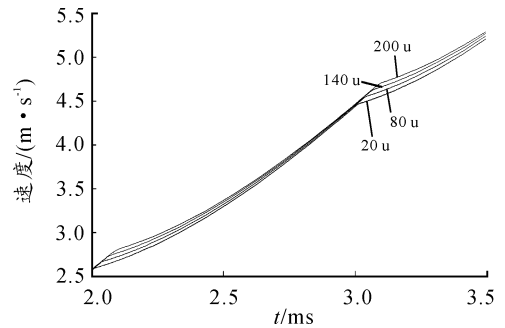


图8 开关过渡时间对速度的影响

4 结束语

通过对HEMLs的仿真发现,增大单元电容,可以缓冲换向电流,并可以降低电压,适当地加以利用和控制可以抑制电弧的产生。

当弹丸运动速度较低时,由于开关过渡时间较长,使得换向电压较小,电流导通较好,能量损失较小。随着弹丸速度的提高,由于开关过渡时间变短,换向电压将升高,产生严重的电弧放电,限制了HEMLs速度的提高。

参考文献:

- [1] 王蕾,陈乐生. 开关电弧仿真数学模型研究进展[J]. 电工材料,2013(3):32-40.
- [2] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [3] Dong Y, Zhenxiang L, Yang L, et al. Design and realization

- of a novel helical COIL electromagnetic launcher[J]. Plasma Science, IEEE Transactions on, 2013, 41(5): 1100 - 1103.
- [4] 侯炎馨,刘振祥,杨丽佳,等.线圈型电磁发射器换向过程分析[J].四川兵工学报,2013,34(6):61-64.
- [5] Gallant J,Lehmann P. Experiments with brush projectiles in a parallel augmented railgun[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2005, 41(1): 188 - 193.
- [6] Lehmann P, Peter H, Wey J. First experimental results with the ISL 10 MJ DES railgun Pegasus[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2001, 37(1): 435 - 439.
- [7] Lehmann P, Reck B, Vo M D, et al. Acceleration of a suborbital payload using an electromagnetic railgun[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2007, 43(1): 480 - 485.
- [8] Lehmann P. Overview of the electric launch activities at the French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL) [J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2003, 39(1): 24 - 28.
- [9] Musolino A, Rizzo R. Numerical analysis of brush commutation in helical coil electromagnetic launchers[J]. Science, Measurement & Technology, IET, 2011, 5(4): 147 - 154.
- [10] King-jet T, Yaoming W, Vilathgamuwa D M. An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1997, 12(3): 429 - 436.
- [11] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE PRO, 1994, 141(2): 148 - 154.
- [12] Huenefeldt S M, Engel T G, Nunnally W C. A 750 KJ computer controlled Sequentially-Fired pulse forming network for a helical COIL electromagnetic launcher [C]//Pulsed Power Conference, 2005 IEEE. [S. l.]: [s. n.], 2005: 237 - 240.
- [13] Fair H D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era [J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2005, 41(1): 158 - 164.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 102 页)

参考文献:

- [1] 郑淑贤, 李佳, 孙庆丰. 基于特征映射的义齿表面三维变形设计方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 129 - 134.
- [2] 潘伟, 赵毅. 提高光栅投影测量精度的相移精确测量法[J]. 上海交通大学学报, 2003(7): 1068 - 1071.
- [3] Kinell L, Sjodahl M. Robustness of reduced temporal Phase unwrapping in the measurement of shape, APPI. Opt. 2001, 40(14): 2297 - 2303.
- [4] Huntley J M, Saldner H O. Error-reduction methods for shape measurement by temporal phase unwrapping algorithms[J]. Meas Sci Technol (S0957-0233), 1997, 8(9): 986 - 992.
- [5] 徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2008, 45(3): 537 - 540.
- [6] 郭进, 袁建英, 陈小宁. 基于多视几何的重叠云点删除算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(3): 958 - 962.
- [7] 袁建英, 郭进. 基于多视图约束的结构光扫描系统冗余点去除算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(12): 1901 - 1909.

(责任编辑 周江川)

(上接第 113 页)

参考文献:

- [1] 邓辉宇. 导弹突防的三维视景仿真研究与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [2] 张斌. 导弹作战系统视景仿真技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [3] 李军华. 弹道导弹视景仿真技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] 卢卫平. 基于 Vega Prime/Multigen Creator 的飞行复现视景仿真系统设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [5] 沈巍巍. 导弹数字化设计平台视景仿真系统 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [6] 王琪, 邓会亨, 马璐. 基于粒子系统的海洋环境仿真 [J]. 计算机系统应用, 2013, 22(2): 230 - 232.
- [7] 刘喜作, 周晶, 毛建周. 航海模拟器中靠离码头训练的特殊设计 [J]. 兵工自动化, 2014, 33(1): 25 - 28.
- [8] 王祎. 虚拟现实碰撞检测关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [9] 白彬, 李文生, 王国民. 基于 Vega 的光电制导武器电子对抗视景仿真技术 [J]. 四川兵工学报, 2013(5): 35 - 37.

(责任编辑 杨继森)