

# 多级同步感应线圈炮的动态特性仿真

李三群<sup>1</sup>, 张朝伟<sup>2,3</sup>, 邓启斌<sup>3</sup>, 曹延杰<sup>4</sup>

- (1. 北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100000; 2. 空军雷达学院, 武汉 430010;  
3. 北京特种机电研究所, 北京 100012; 4. 海军航空工程学院, 烟台 264000)

**摘要:** 电磁发射过程中, 动态特性源于电磁场变化、温度场变化以及应力变化等, 它们同电枢的触发位置、初速度、结构等参数密切相关。为提高多级同步感应线圈炮的性能, 基于 Maxwell 2D 仿真环境, 建立了同步感应线圈炮的二维有限元模型, 对影响其性能的触发位置、初速度, 特别是它们之间的配合问题进行了极为重要的动态仿真分析。仿真及分析结果表明: 对于多级同步感应线圈炮, 初速度不同, 电枢有不同的最佳触发位置, 它们之间的有效配合对提高多级同步感应线圈炮的性能有重要影响; 而多级同步感应线圈炮级数有限制, 并非越多越好。

**关键词:** 多级同步感应线圈炮; 电枢; 触发位置; 初速度; 动态; 仿真; 效率

中图分类号: TM301.4 文献标志码: A 文章编号: 1003-6520(2009)12-3065-06

## Simulation of Dynamic Characteristic of Multi-stage Synchronous Induction Coilgun

LI San-qun<sup>1</sup>, ZHANG Chao-wei<sup>2,3</sup>, DENG Qi-bin<sup>3</sup>, CAO Yan-jie<sup>4</sup>

- (1. Beijing Institute of Technology School of Astronomic Science and Technology, Beijing 100000, China; 2. Airforce Radar Academy, Wuhan 430019, China;  
3. Beijing Institute of Special Electromechanical Technology, Beijing 100012, China;  
4. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264000, China)

**Abstract:** In the process of electromagnetic launch, dynamic characteristic is the result of variable electromagnetic field, variable temperature field and variable stress field. The correlation between those variable field and trigger position, initial velocity and structure is closely interconnected. Based on the simulation environment of Maxwell 2D, two dimension finite element models of synchronous induction coilgun were put forward. The dynamic simulation about trigger position, initial velocity and their cooperation that greatly affect the performance of synchronous induction coilgun is discussed. The simulation results reveal that different initial velocity has different optimum trigger position for multi-stage synchronous inductive coilgun; Their effective cooperation improves the multi-stage synchronous induction coilgun's performance; The stage number of multi-stage synchronous induction coilgun is limited.

**Key words:** multi-stage synchronous induction coilgun; armature; trigger position; initial velocity; dynamic; simulation; efficiency

## 0 引言

同步感应线圈炮是电磁炮主要类型之一, 从原理上来说, 同步感应线圈炮的电枢电流是由单相的驱动线圈同步脉冲放电产生, 多级工作时类似直线同步电动机。从结构上来说, 有单级和多级之分<sup>[1-3]</sup>。单级同步感应线圈炮和多级同步感应线圈炮相比, 要想获得相同的弹丸出口速度, 需要更大的驱动电流, 而电流增大, 驱动线圈上消耗的焦耳热就会成平方增长, 从而降低能量利用效率。因此, 要想获得更大的出口速度, 需采用多级发射装置<sup>[4,5]</sup>。

对于多级同步感应线圈炮的研究, 动态特性分析尤为重要。Z. Zabbar 等人从高功率脉冲电源、等

效电路及参数、结构优化设计等多个角度深入分析多级同步感应线圈炮的动态特性, 指出使用电容器放电效果较好, 并且要注重系统参数的优化<sup>[6-9]</sup>。Ki-Bong Kim 等人从发射管内电枢的姿态包括振动、旋转等角度, 研究其对线性感应发射器性能的影响, 保持较小的间隙不仅有利于磁耦合, 对电枢的动态稳定性也至关重要<sup>[10,11]</sup>。Sami Barmada 等人通过对 5 级发射器工作过程中电枢的趋肤效应、热效应及机械应力等分析, 指出电枢尾部应加固设计等<sup>[12]</sup>。国内对同步感应线圈炮的研究多集中在单级线圈炮的模型和参数仿真、多级线圈炮的设计及相关的实验验证等方面, 提出了一些感应线圈炮的结构及参数优化设计方案<sup>[13-17]</sup>。

在多级同步感应线圈炮发射过程中, 电枢的动态特性来源于电枢运动过程中的电磁场变化、感应涡流引起的温度场变化及电枢内部应力变化等, 这

基金资助项目: 武器装备基金项目(YJXJM 07023)。

Project Supported by Foundation of Weapon Equipment

(YJXJM 07023)

些变化同电枢的触发位置、初速度、结构等参数密切相关。本文研究了这些参数及其之间的依赖关系以揭示速度、力、电流等物理量在过渡过程中随时间变化的规律,对多级同步感应线圈炮的设计和提其能量利用效率有指导意义。

### 1 仿真模型

多级同步感应线圈炮是由多个单级同步感应线圈炮串联而成,借助开关使驱动线圈逐级同步放电来加速电枢<sup>[18,19]</sup>。除同步放电技术外,其它类似单极同步感应线圈炮,因此其动态特性研究是建立在单级同步感应线圈炮动态特性分析之基础上。

对于单级同步感应线圈炮而言,由于结构对称,只需建立二维有限元仿真模型,就能对其动态特性进行仿真分析。基于 Maxwell 2D 仿真环境,根据表 1 中的模型参数,建立 2D 仿真模型。

表 1 中,  $U$ 、 $C$ 、 $I$  分别是脉冲电容器组的初始电压、电容和电流。驱动线圈、电枢、放电开关、脉冲电容器组等组成的放电回路可看作  $R-L-C$  串联电路,工作在欠阻尼状态。单级同步感应线圈炮的 2D 仿真模型如图 1 所示。

### 2 触发位置对性能的影响

定义触发位置为电枢底部至驱动线圈底部的距离  $l$ 。以  $l$  为变量,其它模型参数不变,动态仿真结果如图 2 所示。

图 2(a) 为不同触发位置情况下, 1 ms 时刻获得的电枢速度。从图 2(a) 中可以推断,电枢离驱动线圈太近( $l < 10$  mm) 或太远( $l > 40$  mm) 时,电枢获得的速度都会降低很多,只有电枢处于驱动线圈中的适当位置( $l = 25.5 \sim 26.5$  mm) 时,电枢获得的出口速度最大,同步感应线圈炮效率也最高。原因是,电枢离驱动线圈太近,电流下降沿(对加速起副作用)产生影响时,电枢尚未离开驱动线圈作用范围,而电枢离驱动线圈太远,又会过早脱离线圈作用范围,两种情况都会导致电枢速度降低。因此,触发位置  $l$  约为 26 mm。

图 2(b) 反映了  $l = 26$  mm 时,电枢速度的变化情况。关于电枢速度下降、效率降低这一点,从图 2(b) 中可以得到验证。在  $t = 0.8$  ms 时,电枢速度开始下降,并且从  $t = 0.6$  ms 时,电枢增速已不明显。

0~ 1 ms 时间段内,对应的驱动线圈电流和电枢位移曲线如图 2(c) 所示。图 2(c) 中,在  $t = 0.40 \sim 0.91$  ms 时,驱动线圈电流一直处于下降趋势。且  $t = 0.855$  ms 时,电枢位移  $x = 24$  mm,即电枢刚刚到达炮口。可见,此时电枢仍未脱离驱动线圈电

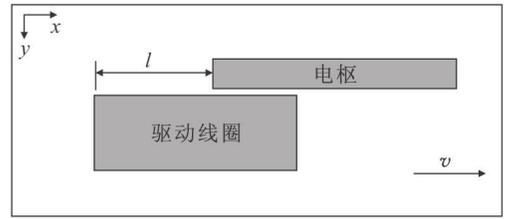


图 1 2D 有限元模型

Fig. 1 2D finite element model

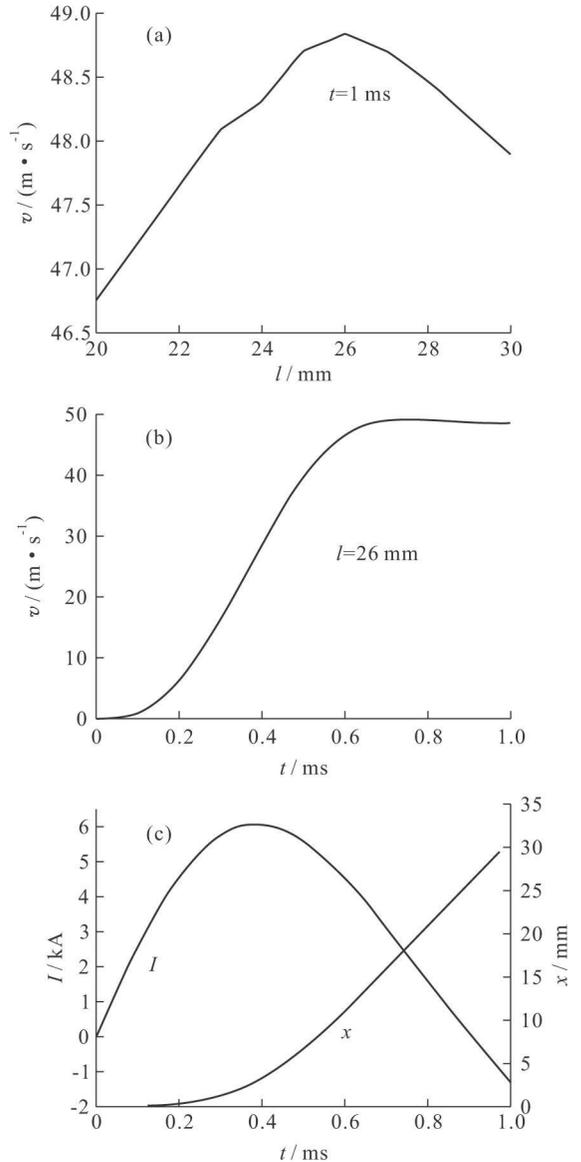


图 2 触发位置及电枢速度曲线

Fig. 2 Curves of trigger position and armature velocity

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameter of model

元件	内半径/mm	外半径/mm	长度/mm	匝数
驱动线圈	30	55	50	60
电枢	18	28	50	实体电枢

注: 初始条件为:  $U = 4000$  V;  $C = 500$   $\mu$ F;  $I = 0$ ; 气隙 = 2 mm。

流的作用范围。即在  $t = 0.40 \sim 0.91$  ms 时间段内, 驱动线圈电流的作用已变成阻碍电枢前进, 导致电枢增速不明显, 并有逐步下降趋势。

上述分析说明, 电枢的触发位置对电枢出口速度影响极大, 选择在较佳的位置触发, 可有效提高同步感应线圈炮的能量转化效率。

### 3 电枢初速度对性能的影响

实际电磁发射过程中, 可以从静止开始加速电枢, 也可以利用化学能的火炮、冲压加速器等将电枢注入同步感应线圈炮的电磁发射管, 即电枢的初速度对性能会产生影响。同时, 初速度不同, 触发位置也会变化较大。要对不同初速度的电枢进行分析比较, 首先就要确定最佳触发位置。选取初速度  $v_0 = 50$  m/s, 仿真结果如图 3 所示。

图 3(a) 为不同触发位置条件下的电流-时间曲线。随着触发位置的减小, 电流有所增大, 但增幅不明显。

图 3(b) 为不同触发位置条件下的位移-时间曲线。从图中可以看到,  $l$  为 2、4、6、8、10 mm 时随着触发位置的增大, 电枢到达驱动线圈出口所用的时间分别为 0.719、0.689、0.659、0.629、0.599 ms, 所对应的电枢出口速度分别为 84.40、85.77、86.58、86.81、86.48 m/s。由此可见, 最佳触发位置为  $l = 8$  mm。以此类推, 可得到其它参数不变时,  $v_0 = 100$  m/s 和  $v_0 = 150$  m/s 时的最佳触发位置(见表 2)。

由表 2 可知, 随着电枢初速度的增加, 最佳触发位置变化很大。当  $v_0 > 50$  m/s 时, 最佳触发位置几乎始终固定在  $l = 0$  处, 也就是电枢中心面和驱动线圈中心面重合的地方, 此时该级不起作用。可见, 电枢初速度对同步感应线圈炮性能影响较大。参照表 2 的 4 种情况进行仿真, 结果如图 4 所示。

图 4(a) 为不同初速度条件下的位移-时间曲线。随着初速度的增大, 电枢到达驱动线圈出口处的时间明显减少, 分别为 0.870、0.629、0.455、0.324 ms。此时刻对应的出口速度如图 4(b) 所示, 分别为 48.60、86.81、125.8、163.6 m/s。根据这些数据, 可以绘制效率曲线, 如图 4(c) 所示。从图中可以看出, 效率并不是随着初速度的增加而一直增加, 在达到某一值时, 反而下降。对此现象, 可结合表 2 和图 3 进行分析。

从表 2 可知, 无论初速度如何增大, 最佳触发位置最小也只能是略  $> 0$  (由同步感应线圈炮原理可知, 如果触发位置  $< 0$ , 将会朝反方向运动, 故触发位置必须  $> 0$ )。也就是说存在一个临界初速度, 刚好使触发位置在 0 处, 而从表中可以看出, 该速度明显

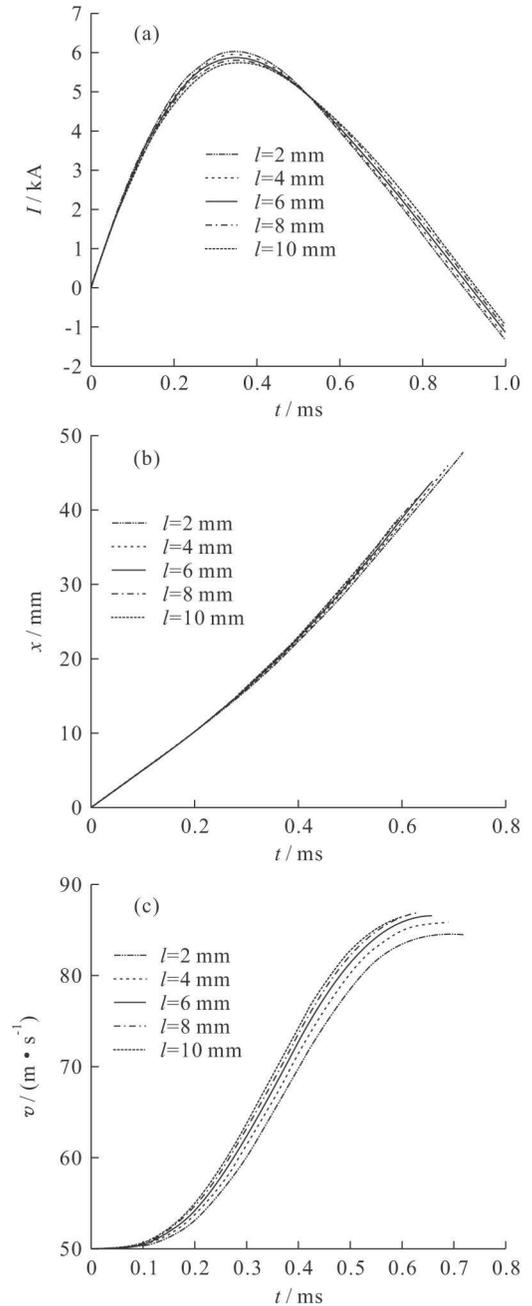


图 3 初速 50 m/s 时的仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of initial velocity at 50 m/s

表 2 仿真结果及模型参数  
Tab. 2 Simulation result and parameter of model

初速度/(m · s <sup>-1</sup> )	0	50	100	150
触发位置/mm	26	8	0	0

$> 50$  m/s。即使该速度仅 50 m/s, 从图 4(a) 可见, 电枢到达驱动线圈出口处的时间较短(0.629 ms), 对应此时间段内的电流曲线如图 3(a), 可知电枢处于电流下降沿的作用时间大约为 0.279 ms。而当初速度为 0 时, 电枢处于电流下降沿的作用时间约 0.520 ms。作用时间几乎大了 1 倍, 而电流下降沿

对电枢加速起副作用(仅对利用电流上升沿加速的情况),即初速度为 50 m/s,能够较快脱离电流下降沿的影响,因此其效率高于初速度为 0 的情况。

当初速度 > 100 m/s 时,电枢脱离驱动线圈电流作用的时间更快。此时,驱动线圈电流的上升沿尚未完全作用,电枢受力没有达到峰值,就脱离有效磁场作用范围,即电枢过快脱离驱动线圈电流的作用,导致效率随着初速度的增大反而下降。

上述分析对多级同步感应线圈炮的设计有 2 点借鉴之处:一是对于多级同步感应线圈炮的第  $n$  ( $n > 1$ ) 级来说,都会有一个初速度,相当于单级时的注入速度。该级最佳触发位置不应大于前级最佳触发位置。二是如果多级同步感应线圈炮级数太多,随着前级出口速度增大到某一值时,本级和后面各级的效率会下降,甚至不起作用,即多级同步感应线圈炮并不是级数越多越好。

#### 4 触发位置与初速度的配合

由前文分析可知,电枢的初速度和触发位置相互关联,它们之间的配合对同步感应线圈炮的性能影响极大。

在不失一般性分析的基础上,以获取最大效率为出发点,对较简单的多级(2 级)同步感应线圈炮进行分析。2 级同步感应线圈炮的结构示意图如图 5 所示。第 1 级和第 2 级发射器中,除了触发位置不同,其它参数均和表 1 中数据相同。定义第 1 级和第 2 级驱动线圈间的级间距为  $s$ ,分两种情况进行讨论:一是第 1 级和第 2 级驱动线圈都在最佳触发位置放电;二是第 1 级和第 2 级驱动线圈的触发放电位置不变。

第 1 种情况:

对于第 1 级驱动线圈,电枢的最佳触发位置  $l = 26$  mm,出口速度约是 50 m/s。图 6(a) 是电枢在 1 级驱动线圈作用下运动 2.5 ms 的位移-时间曲线。从图中可知,在  $t = 1.99$  ms 时,电枢共前进了 82 mm,此时刻的速度约是 50 m/s。为简化问题分析,假定  $s = 50$  mm。即在  $t = 1.99$  ms 时,电枢尾部刚好到达第 2 级驱动线圈内 8 mm 处。由前文可知,  $v_0 = 50$  m/s 时,最佳触发位置是 8 mm,即此处是第 2 级驱动线圈的触发放电位置。

第 2 种情况:

在  $s = 50$  mm,第 1 级和第 2 级驱动线圈的触发位置  $l = 26$  mm 不变的情况下,电枢到达第 2 级触发位置的行程是 100 mm,时间是  $t = 2.33$  ms。此时刻,电枢的速度大约还是 50 m/s。

参照上述两种情况设定的参数进行仿真,结果

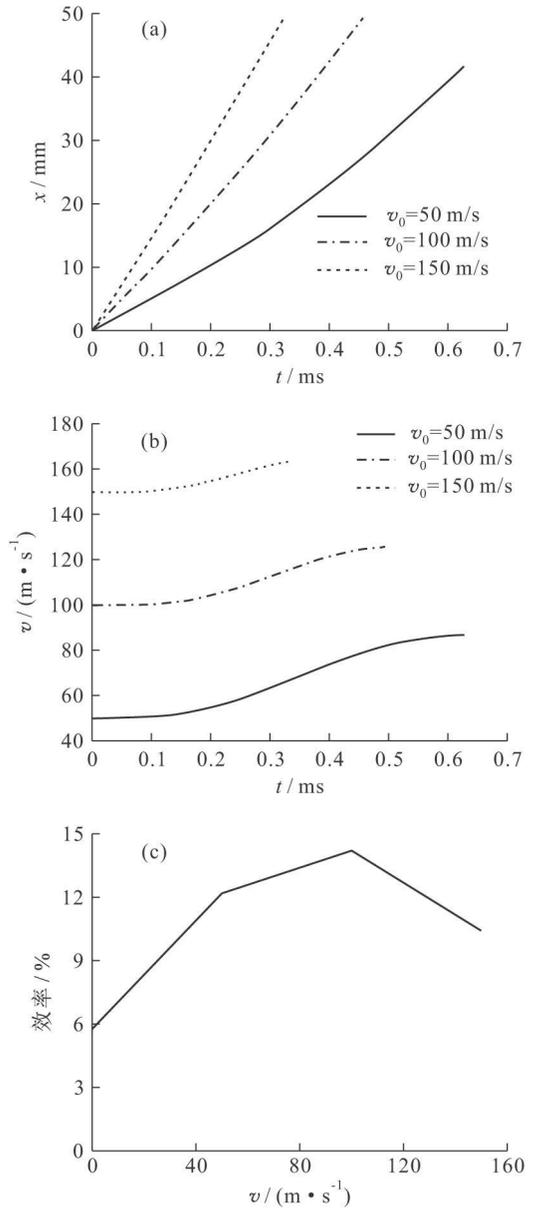


图 4 初速变化时的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of variable initial velocity

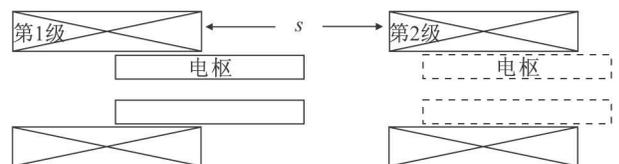


图 5 两级同步感应线圈炮示意图

Fig. 5 Schematic diagram of two stage synchronous induction coilgun

如图 6 所示。图 6(b) 是电流-时间曲线。可见,第 1 种情况下,第 2 级的驱动线圈电流要大,电枢受到的电磁推力也大。

图 6(c) 是速度-时间曲线。对于第 1 种情况,  $t \approx 2.62$  ms 时,电枢到达第 2 级驱动线圈的出口,此

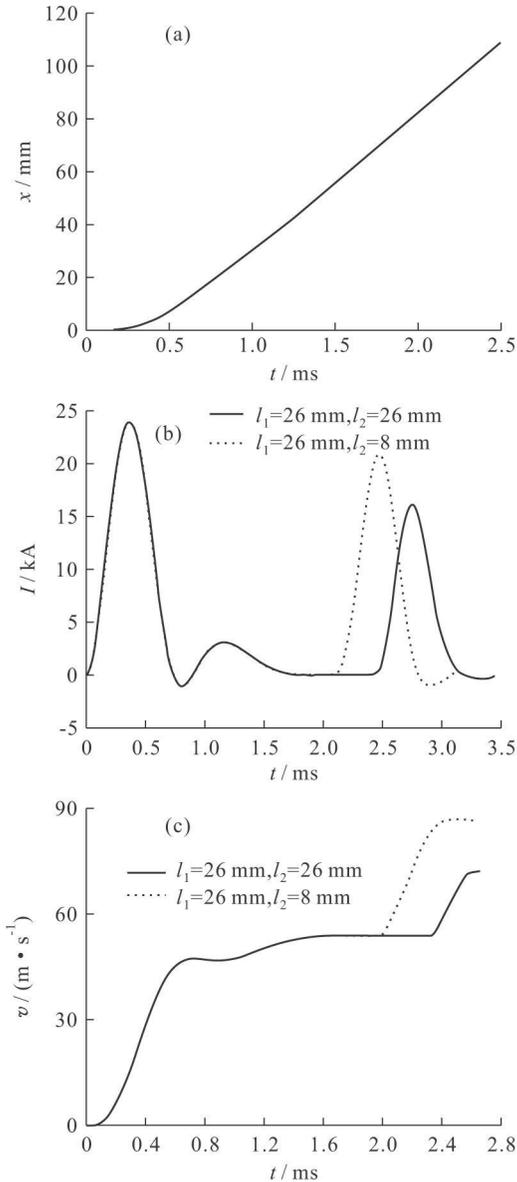


图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

时的出口速度是 86.81 m/s。对于第 2 种情况,  $t \approx 2.74$  ms 时, 电枢到达第 2 级驱动线圈的出口, 此时的出口速度是 71.36 m/s。毫无疑问, 第 1 种情况的效率要好于第 2 种情况。

## 5 结语

多级同步感应线圈炮中, 电枢的触发位置和初速度对其性能影响较大, 并且二者具有相关性。通过对它们影响多级同步感应线圈炮性能的仿真, 可知在电枢和驱动线圈等物理参数既定情况下, 提高多级同步感应线圈炮效率的途径可有以下 3 条: 一是对应不同的电枢注入速度, 每一级都有最佳触发位置, 确保电枢运动到此位置, 驱动线圈放电。二是通过调整级间距, 使电枢速度达到峰值的时候刚好

到达下一级最佳触发位置; 三是多级同步感应线圈炮级数有限制, 并非越多越好。

## 参 考 文 献

- [1] 杨世荣, 王莹, 徐海荣, 等. 电磁发射器的原理与应用[J]. 物理学和高新技术, 2003, 32(4): 253-256.
- [2] 王德满, 王跃进, 谢慧才. 线圈炮-电磁同轴发射器及其系统分析[J]. 宇航学报, 1996, 17(4): 79-82.  
WANG De-man, WANG Yue-jin, XIE Hui-cai. Coilgun (electromagnetic coaxial launcher) and its systems analysis[J]. Journal of Astronautics, 1996, 17(4): 79-82.
- [3] 程键, 任兆杏. 单级线圈加速电枢的机理分析[J]. 电工技术杂志, 1997(5): 29-31.
- [4] McKinney K, Mongeau P. Multiple stage pulsed induction acceleration[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20(2): 239-242.
- [5] Andrews J A. Coilgun structures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 637-642.
- [6] Lu X N, Levi E, Zabar Z, et al. Behavior of azimuthal currents induced in the projectile of the linear induction launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 696-700.
- [7] Balicci A, Zabar Z, Birenbaum L, et al. Improved performance of linear induction launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 171-175.
- [8] He J L, Levi E, Zabar Z, et al. Equivalent circuits and parameters for induction-type electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 667-674.
- [9] He J L, Levi E, Zabar Z, et al. Transient performance of linear induction launchers fed by generators and by capacitor banks[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 585-590.
- [10] Kim Ki-Bong, Zabar Z, Levi E, et al. In bore projectile dynamics in the linear induction launcher (LIL), part I: oscillations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 484-488.
- [11] Kim Ki-Bong, Zabar Z, Levi E, et al. In bore projectile dynamics in the linear induction launcher (LIL), part II: balloting, spinning and nutation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 489-492.
- [12] Barmada Sami, Musolino Antonino, Raugi Marco, et al. Analysis of the performance of a multi-stage pulsed linear induction launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 31(1): 111-115.
- [13] 董健年, 桂应春, 李军, 等. 电磁弹射系统的脉冲功率源设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 105-107.  
DONG Jian-nian, GUI Ying-chun, LI Jun, et al. Design of pulsed power supply for electromagnetic launch[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 105-107.
- [14] 赵纯, 邹积岩, 何俊佳. 多级重接式电磁发射的电磁分析与有限元仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 78-82.  
ZHAO Chun, ZOU Ji-yan, HE Jun-jia. Electromagnetic analysis and finite element simulation of the multi-stage reconnection electromagnetic launch[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 78-82.
- [15] 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.  
ZHAO Ke-yi, LI Zhi-yuan, CHENG Shu-kang. Dynamic simulation of working process of the single coilgun[J]. High Volt-

age Engineering, 2008, 34(8): 1667-1671.

[16] 赵科义, 李治源, 程树康. 同步感应线圈炮内磁场及涡流场的有限元分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 492-495.

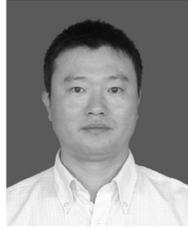
ZHAO Ke yi, LI Zhi yuan, CHENG Shu-kang. Finite element analysis of magnetic field and eddy field in synchronous induction coilgun[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 492-495.

[17] 张朝伟, 李治源, 陈风波, 等. 感应线圈炮的电枢受力分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 32-34.

ZHANG Chao-wei, LI Zhi-yuan, CHEN Feng-bo, et al. Analysis of force acting on the armature in induction coil gun[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 32-34.

[18] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[19] 王莹, 马富学. 新概念武器原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997.



李三群

1974—, 男, 博士生

研究方向为兵器发射理论与技术

电话: (0311) 87992412

E-mail: zcw2002345@yahoo.com.cn

LI San-qun

Ph. D. candidate

收稿日期 2009-05-05 修回日期 2009-10-15 编辑 蒋英圣