

低加速力波动感应线圈型发射器的外电路设计

王浩杰¹, 严仲明^{1,2*}, 林飞宏¹, 王 豫^{1,2}

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 四川 成都 611756)

Design of External Circuit for Induction Coilgun with Low Acceleration Force Fluctuation

WANG Haojie¹, YAN Zhongming^{1,2*}, LIN Feihong¹, WANG Yu^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Chengdu 611756, China)

Abstract: Induction coilgun usually generates pulsating electromagnetic force which causes the large acceleration force fluctuation of the armature during the launch process. The excessive peak of acceleration force and the inordinate acceleration force fluctuation may be harmful to the load, especially for those carrying sensitive electronic components, which limits the value of induction coil emitters in practical engineering applications. Addressing the above questions, a new type of driving circuit for multi-capacitance time-sharing triggering is proposed, and the feasibility of the circuit is illustrated by analyzing the influence of the change of capacitance value and armature triggering position on the emission efficiency of the launcher. Three modes of driving circuits are designed for comparison, and the calculation results show that: under the conditions of the same initial energy storage and the approximate muzzle velocity of the armature, compared with other circuit triggering modes, in the time-sharing triggering mode proposed, the peak of electromagnetic acceleration force of the armature is reduced by 2.04 kN, and the acceleration force fluctuation is reduced by 2.36 kN. Therefore, the driving circuit with time-sharing triggering capacitor could effectively reduce the peak acceleration force and acceleration force fluctuation, and provides reference value for the design of the induction coilgun with sensitive loads.

Key words: induction coilgun; electromagnetic force;

基金项目: 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室开放课题基金

Foundation of Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education

acceleration force fluctuation; sensitive load; time-sharing triggering system

摘要: 感应线圈型发射器中每级驱动线圈都会对电枢产生脉冲形式的电磁推力,导致电枢在发射过程中加速力波动较大。过大的加速力峰值以及加速力波动都可能对载荷造成不利影响甚至损坏其内部携带的敏感电子器件,因而限制了感应线圈型发射器在实际工程应用中的价值。针对上述问题,提出一种多电容分时触发的新型驱动电路,并通过分析电容值和电枢触发位置变化对发射器发射效率的影响,说明了该电路的可行性。设计三种模式的驱动电路进行对比,研究结果表明:相比于其他电路触发模式,提出的分时触发模式在初始储能相同和电枢出口速度近似的情况下,电磁加速力峰值降低了2.04 kN,加速力波动降低了2.36 kN。因此,采用分时光电的驱动外电路,可以有效降低电枢的加速力峰值和加速力波动,并为携带敏感载荷的感应线圈型发射器的设计提供了参考价值。

关键词: 感应线圈型发射器; 电磁力; 加速力波动; 敏感载荷; 分时触发系统

0 引言

电磁发射技术是利用电磁力驱动物体达到目标速度的一种发射技术。感应线圈型发射器是电磁发射领域中的一个重要分支,可用于发射多种类型的载荷^[1-3],在航空航天、交通运输和军事等领域都具有广阔的应用前景^[4-6]。在感应线圈型发射器中,驱动线圈由脉冲电容供电产生脉冲磁场,电枢在驱动线圈内部产生感应电流,在脉冲磁

场和感应电流的作用下,电枢受到脉冲形式的电磁推力,从而沿着感应线圈型发射器的轴向进行加速^[7]。

目前针对感应线圈型发射器的优化设计已有许多相关研究,其中大部分研究都是针对发射器的能量转换效率进行优化,包括采用智能优化算法或优化策略。智能优化算法是基于某一种机制来获得给定约束条件下的优化目标,智能优化算法在感应线圈型发射器中的应用包括遗传算法^[8-9]、蚁群算法^[10]和粒子群算法^[11]等。优化策略是采用一种新的拓扑电路或通过改变驱动线圈和电枢的结构参数^[12-16]来提高发射器的能量转换效率等。

随着电磁发射技术的发展,在高速发射的载荷上搭载高精度电子元件的需求越来越受到研究人员的重视。但是,由于感应线圈型发射器产生脉冲形式的电磁加速度力,要实现上述要求仍存在一定的困难。一方面发射器对电枢施加的电磁推力可能超过了负载所能承受的最大加速度力;另一方面,考虑到驱动线圈长度和电枢初始触发位置,相邻驱动线圈之间的触发存在一定的时间间隔,这就导致电枢的加速度波动过大,甚至在整个电磁发射过程中多次出现减速的情况。上述问题都会对载荷形成不利影响,尤其是对一些携带精密元器件或活体生物的敏感载荷。同时,若电枢在发射过程中能够持续以最大加速度进行加速,则可以更快达到目标速度,从而缩短感应线圈型发射器的长度。

本文提出了一种分时触发电容的驱动电路来降低电枢载荷所受的电磁加速度峰值和加速度波动。首先采用有限元电磁仿真软件对单级感应线圈型发射器进行建模与仿真。然后分析了脉冲电容器电容值和电枢触发位置变化对发射器发射性能的影响。最后,设计三种模式的驱动电路进行对比,仿真结果表明采用分时触发电容的驱动外电路,可以有效降低电枢载荷的加速度峰值和加速度波动。

1 感应线圈型发射器原理

传统感应线圈型发射器主要由电枢、载荷、驱动线圈和炮管组成,其结构模型如图 1 所示。发射器的驱动电路包括高压直流电源、脉冲电容器、

开关、驱动线圈以及续流二极管,如图 2 所示。在传统驱动电路中,首先由高压直流电源向脉冲电容器进行充电,接着在设定时间触发开关 S_1 ,由脉冲电容器对驱动线圈进行供电,整个电路构成一个 RLC 二阶电路。由于驱动线圈的时变电流,电枢内部产生涡流,电枢整体受到沿电磁发射器轴向的电磁脉冲加速力。当脉冲电容器的电压值降为零时,续流二极管导通,驱动线圈进入续流阶段,电流按照 RL 电路的指数规律衰减至零。

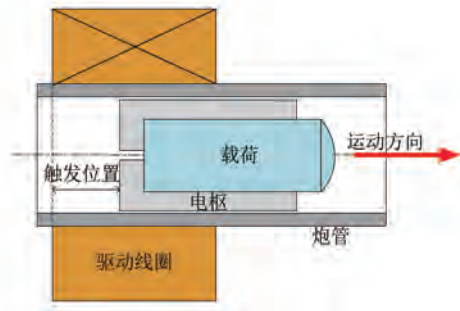


图 1 单级感应线圈型发射器模型

Fig. 1 Single-stage induction coilgun model

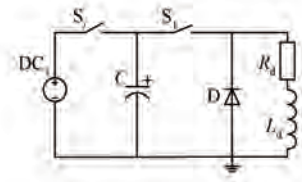


图 2 感应线圈型发射器驱动电路

Fig. 2 Driving circuit of induction coilgun

当触发开关 S_1 闭合时,通过列写回路电压方程可得:

$$U = IR + \frac{dLI}{dt} = IR + v \frac{dL}{dx} I + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

式中: U 为电容器两端电压; I 为驱动线圈电流; R 和 L 分别为驱动线圈的内阻和总电感; v 和 x 分别为电枢的速度和位移。

驱动线圈总电感包括线圈自感和线圈与电枢的互感,由于电枢的实时位置不断变化,线圈与电枢的互感也随之发生改变,因此驱动线圈的总电感随时间变化。

当电容电压降为零时,回路电压方程为

$$IR + v \frac{dL}{dx} I + L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (2)$$

从能量的角度分析,根据虚功原理可计算得出电枢发射过程中所受的加速度为

$$F = ma = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} I^2 \quad (3)$$

式中: m 为电枢载荷的质量; a 为电枢载荷的加速度。感应线圈型发射器的能量转换效率可由式(4)表示:

$$\eta = \frac{E}{W_c} = \frac{mv^2}{CU^2} \quad (4)$$

式中: E 和 v 分别为电枢载荷的动能和出口速度; W_c 为电容器的初始储能; C 和 U 分别为驱动电路中的总电容和总初始电压值。

由于传统驱动电路中带有续流二极管,在驱动线圈推进电枢载荷进行加速后,驱动线圈中仍存在较大的续流电流。因此,当电枢中的感应电流反向时,电枢载荷将受到较大的反向电磁力。针对上述问题,本文采用双极性电容器作为脉冲电源对驱动线圈进行供电并移除电路中的续流二极管,使驱动线圈中的剩余电流充入脉冲电容器中。在整个充放电过程中电路均为一个 RLC 二阶电路,加快了驱动线圈中脉冲电流的减小速度,减小了电枢所受到的反向电磁力。同时,存入脉冲电容器中的剩余能量也可以考虑用于后续的发射过程。

本文采用 Maxwell 电磁仿真软件建立感应线圈型发射器的仿真模型,发射器模型的参数如表 1 所示,驱动电路中电容器电压均设置为 1 kV,电容值为 800 μF ,电枢的触发位置为 22 mm。

表 1 感应线圈型发射器参数

Tab. 1 Parameters of induction coilgun

参数名称	参数值	
驱动线圈	长度/mm	45
	内径/mm	58
	外径/mm	70
	匝数	120
	材料	铝
电枢	长度/mm	40
	内径/mm	36
	外径/mm	50
	质量/g	102

2 分时触发电容的电路分析

2.1 分时触发电容的工作原理

本文提出的降低电枢加速力波动的分时触发电路如图 3 所示,该电路采用多个电容器在不同时刻触发。分时触发电路的工作流程为:在电磁

发射的起始阶段,由高压直流电源对脉冲电容器进行充电,直到脉冲电容器两端电压达到预设值时断开开关 S_2 ;接着闭合开关 S_1 ,脉冲电容器 C_1 向驱动线圈进行充电,感应线圈型发射器对电枢载荷施加脉冲形式的电磁加速力;当电枢载荷所受到的电磁推力下降到一定程度时,将选择开关 S_2 从 1 转换至 2,脉冲电容器 C_2 接入驱动电路对驱动线圈进行充电,从而使电枢载荷受到一个新的脉冲形式的电磁推力。

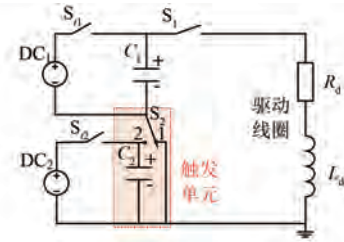


图 3 分时触发电路

Fig. 3 Time-sharing triggering circuit

感应线圈型发射器中电枢载荷通常受到较大的峰值加速力及过大的加速力波动,尤其在前几级电磁发射过程中^[17]。以三级电磁发射器为例,分别采用传统驱动电路和分时触发电容驱动电路的电枢载荷加速度示意图如图 4 所示。

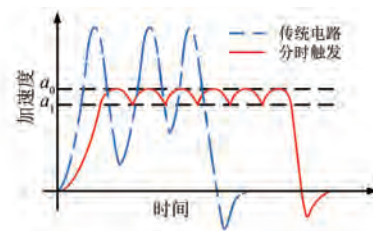


图 4 电枢加速度示意图

Fig. 4 Armature acceleration diagram

在采用分时触发电容驱动电路的加速度曲线中, a_0 是电枢载荷的最大加速度。当电枢载荷的加速度下降到 a_1 时,脉冲电容器 C_2 向驱动线圈放电,电枢载荷受到新的脉冲电磁力。 a_0 和 a_1 的值越接近,表明电枢载荷在加速过程中所受到的加速力波动越小。在分时触发驱动电路中可以通过添加更多的脉冲电容器分时触发来降低加速力波动。当电枢载荷的加速度能够保持在稍小于最大加速度的范围内波动时,电枢载荷能够更快到达目标速度,这有利于减小发射器的长度。

2.2 分时触发电容的电路设计

在电磁发射器加速电枢载荷时,驱动电路中

通常存在较大的脉冲电流,为了便于在驱动电路中接入多个脉冲电容器,本文针对图 3 分时触发电路中的触发单元进行优化设计,优化后的驱动电路如图 5 所示。

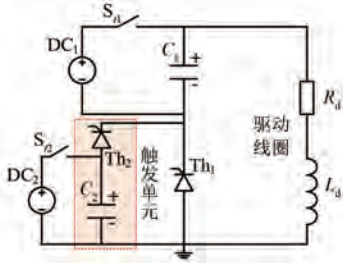


图 5 分时触发电容驱动电路

Fig. 5 Driving circuit of time-sharing triggering capacitor

在优化后的分时触发电容驱动电路中,一个晶闸管和一个脉冲电容器组成一个触发单元,每个触发单元并联连接在上一个触发单元的晶闸管两端。分时触发电容驱动电路的具体工作过程为:当晶闸管 Th_1 触发导通后,电容器 C_1 给驱动线圈 L_d 充电。当电枢载流的电磁加速力降低到一定程度时,触发晶闸管 Th_2 , 电容器 C_2 对晶闸管 Th_1 施加反向电压关断晶闸管,并对驱动线圈进行充电。在驱动电路中电容电压和电流的关系为

$$C \frac{dU}{dt} = I \quad (5)$$

式中: C 为驱动电路中的总电容值。当晶闸管 Th_2 触发时,电容值和总电容电压为

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (7)$$

式中: U_1 和 U_2 分别为电容器 C_1 和电容器 C_2 两端的电压。

当驱动线圈的电流减小时,驱动线圈对脉冲电容器进行充电,为了便于对脉冲电容器中的剩余能量进行重复利用,可以通过再次触发晶闸管 Th_1 , 将剩余能量全部充入电容器 C_1 中。

2.3 分时触发模型的参数分析

电枢触发位置和电容器电容参数对感应线圈型发射器的发射性能有一定影响^[18]。当电容器 C_2 开始对驱动线圈充电时,驱动电路的总电容值和电枢的位置发生变化。因此,需要对电枢触发位置和电容器电容参数变化对电磁发射性能的影响进行探究。

感应线圈型发射器在不同电容值和电枢触发位置参数下电枢的出口速度如图 6 所示,电容器的初始充电电压值均为 1 kV。

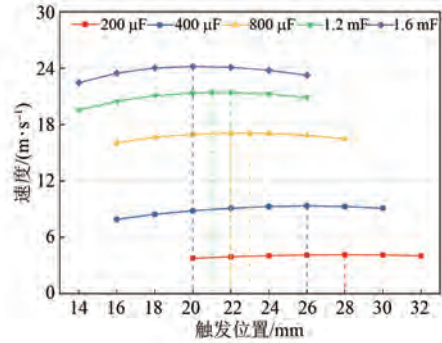


图 6 不同电容值和触发位置时电枢出口速度

Fig. 6 Muzzle velocity of armature at different capacitance values and triggering positions

从图 6 中可以看出,电枢的出口速度随着电容值的增加不断增大,且随着脉冲电容器电容值的不断减小,电枢的最佳触发位置逐渐向电枢运动方向移动。当后续电容向驱动线圈进行充电时,驱动电路中的总电容值减小,同时电枢的触发位置增大,这将有利于电枢的发射。

3 分时触发电容的仿真对比分析

本文共设计了三种驱动外电路模式下的感应线圈型发射器来验证采用所提出的分时触发电容的驱动电路能够降低电枢的电磁力峰值以及减小电枢的加速力波动。

感应线圈型发射器的参数如表 1 所示,电容器 C_1 和 C_2 的电容值分别为 800 μ F 和 400 μ F,电容器的初始电压值均为 1 kV。所设计的三种电路触发模式如下:模式 1 采用双脉冲电容器分时触发;模式 2 采用双脉冲电容器同时触发;模式 3 为两级感应线圈型发射器的驱动电路,采用双脉冲电容器分别给两级相同参数的驱动线圈进行供电。三种触发模式所采用的驱动电路如图 7 所示。

在针对模式 1 的优化设计中,电容器 C_1 参数为 800 μ F/1 kV,通过前面对不同电容值和触发位置时电枢出口速度的分析可知,该电容参数下电枢的最佳初始触发位置为 22 mm。然后对电容器 C_2 的触发时间进行优化分析,分别选取 1 ms、1.08 ms 和 1.16 ms 三个时刻触发电容器 C_2 ,并分

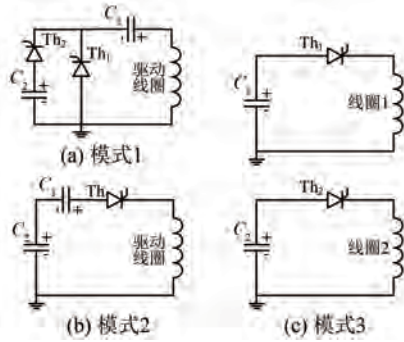
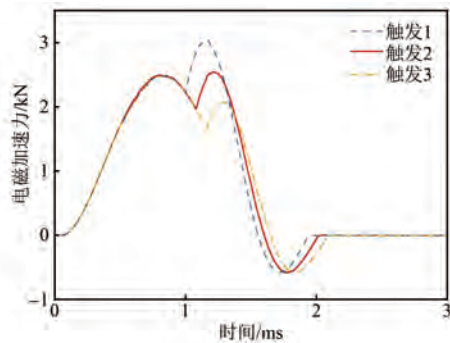


图7 三种模式的驱动电路

Fig.7 Three modes of driving circuits

别定义为触发1、触发2和触发3。电枢载荷所受电磁加速力曲线如图8所示。

图8 模式1 电容器 C_2 在不同触发时刻电磁力曲线Fig.8 Electromagnetic force curves at different triggering moments of capacitor C_2 in mode 1

从图8中可以看出,当电容器 C_2 的触发时间为 1.08 ms 时,两个脉冲电磁加速力的峰值相近,电枢载荷所受电磁加速力波动较小,波动范围约为 0.5 kN。电容器 C_2 的触发时间过早会导致电枢载荷所受脉冲电磁加速力的峰值过大,触发时间延迟又会导致电枢载荷所受电磁加速力下降过多,增大了电磁加速力的波动。因此,需要通过通过对电容器的触发时间进行优化,适时触发脉冲电容器 C_2 来平缓电枢载荷的电磁加速力曲线。当对电枢载荷的加速力波动范围有较高要求时,可以通过降低电容器 C_2 的初始电压值,同时提前触发电容器 C_2 来减小电磁加速力的波动范围。

通过优化得到模式1 双电容分时触发驱动外电路及电枢触发位置的参数如表2所示。

在模式3中电枢的最佳初始触发位置同样为 22 mm,由于模式2中脉冲电容器初始电容电压值的改变,因此需要对该模式下电枢的初始触发位置进行优化。通过仿真计算得到电枢的最佳触

发位置为 24 mm。

三种模式下电枢所受电磁加速力曲线如图9所示。

表2 电容分时触发外电路及电枢触发位置参数

Tab.2 Parameters of time-sharing triggering capacitors circuit and armature triggering position

参数名称		参数值
电容器 C_1	电容/ μF	800
	电压/kV	1
	触发时间/ms	0
电容器 C_2	电容/ μF	400
	电压/kV	1
	触发时间/ms	1.08
电枢	触发位置/mm	22

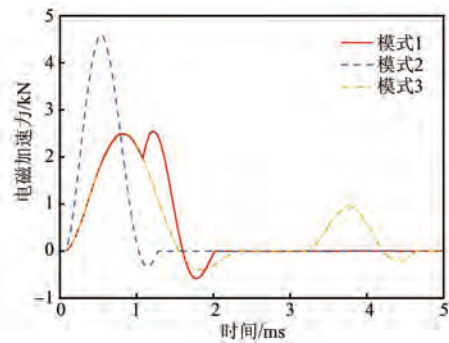


图9 三种模式下电磁力曲线

Fig.9 Electromagnetic force curves in three modes

从图9中可以看出模式1中电枢所受到的最大电磁加速力为 2.54 kN,而模式2中最大加速力为 4.58 kN,远大于模式1中电枢所承受的最大电磁加速力。在模式3中由于电枢在起始阶段速度较低,因此在第一级驱动线圈加速完成后和到达第二级驱动线圈的最佳触发位置前存在一定的时间间隔,这导致电枢所受到的加速力波动较大,且在发射过程中出现了多次减速的情况,模式1相较于模式3的加速力波动降低了 2.36 kN。从加速力曲线可以看出采用分时触发电容的方式可以适时对电枢施加一个新的脉冲电磁力,从而减小电枢在发射过程中的加速力波动。

三种模式下电枢的速度和位移曲线如图10和图11所示。从电枢速度曲线中可以看出模式1的电枢在加速过程中的速度曲线更加平缓,采用三种触发方式进行电磁发射所得到电枢的出口速度分别为 22.77 m/s、22.43 m/s 和 22.75 m/s。三种外电路模式下所得到电枢的出口速度相近,这说明采用分时触发电容的驱动电路并不会导致

电磁发射器发射效率的降低。从电枢速度和位移曲线中可以看出随着电磁发射加速过程的缩短,电枢能够更快达到出口速度,因此在相同时间内电枢的移动距离也就更远。

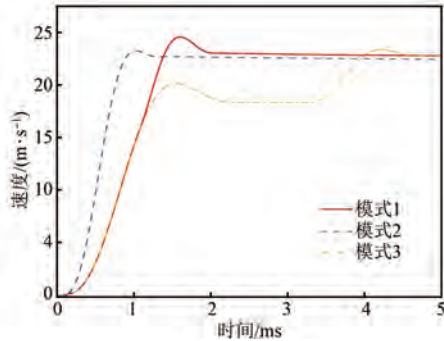


图 10 三种模式下电枢速度曲线

Fig. 10 Speed curves of the armature in three modes

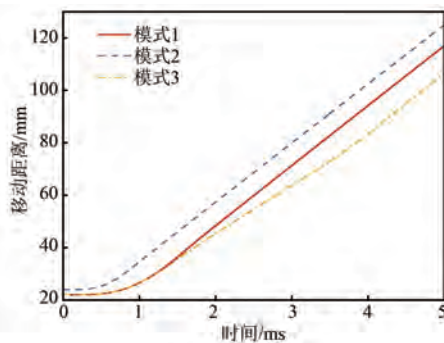


图 11 三种模式下位移曲线

Fig. 11 Displacement curves in three modes

三种模式下驱动线圈的电流曲线和脉冲电容器的电压曲线如图 12 和图 13 所示。从驱动线圈的电流曲线中可以看出采用分时触发电容器的方式相较于同时触发电容减小了驱动线圈所通过的最大电流,有利于驱动线圈的结构参数设计。同时,由于取消了驱动线圈的续流回路,线圈中脉冲电流的减小速度更快。图 13 中,模式 2 的电容电压为电容 C_1 和 C_2 的总电压。从脉冲电容器的电压变化曲线可以看出,发射器在加速电枢后,驱动线圈中的剩余能量被回收到脉冲电容器中,可以考虑将这部分能量用于后续的发射过程中,从而提高感应线圈型发射器的发射效率。

文献[17]采用多段式线圈结构的感应线圈型发射器来降低电枢加速力波动,但是由于其多段式的结构导致发射器长度的延长,以及所使用连接杆的稳定性需要进一步探究。本文所提出的分时触发电容的驱动电路结构简单,且采用

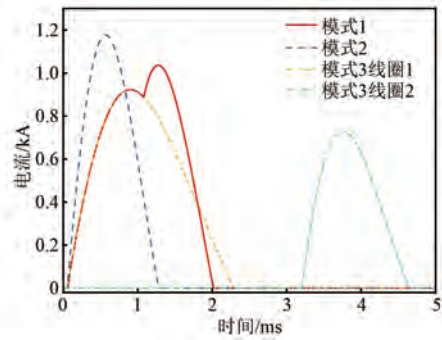


图 12 三种模式下线圈电流曲线

Fig. 12 Current curves of the coil in three modes

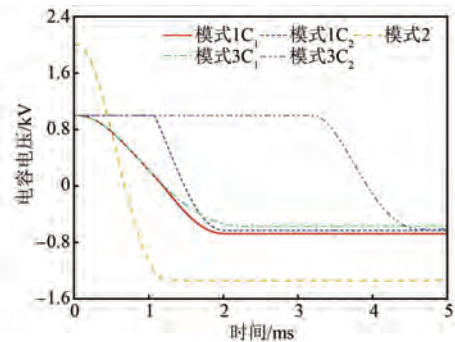


图 13 三种模式下电容电压曲线

Fig. 13 Voltage curves of the capacitor in three modes

该电路有利于缩短发射器的长度。

4 结语

本文提出了一种低加速力波动感应线圈型发射器的驱动电路设计方案,为携带敏感载荷发射器的设计提供了参考价值,通过研究和对比分析得到以下结论:

- (1) 采用双极性电容器作为脉冲电源并取消续流回路可以降低电枢捕获效应。
- (2) 设计的多电容分时触发的驱动电路能够降低电枢所受电磁加速力的峰值以及加速力波动。
- (3) 采用多电容分时触发的驱动电路可以使电枢的加速度保持在稍小于最大加速度的范围内波动,电枢能够更快到达目标速度从而缩短发射器的长度,这将有利于发射器的小型化设计。

参考文献

- [1] KAYE R J. Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 194-199.
- [2] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大

- 学学报, 2016, 38(6): 1-5.
- MA W M, LU J Y. Electromagnetic launch technology [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5.
- [3] 王莹. 电发射技术概论[J]. 电气应用, 2003, 10: 94-97.
- WANG Y. An introduction to electric launch technology [J]. Electrotechnical Application, 2003, 10: 94-97.
- [4] ZHANG Y D, ZHOU A, LIN X, et al. Design and development of an electromagnetic catapult for life-saving projectile [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(3): 868-873.
- [5] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
- MA W M, LU J Y. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959.
- [6] 姜洪涛, 周军. 电磁轨道炮让战争进入“秒杀新时代”[J]. 飞航导弹, 2017, 8: 7-11.
- [7] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- WANG Y, XIAO F. The Principle of Electrical Gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.
- [8] ZHANG Y D, LIN X. Optimization calculation of single stage coil launcher based on prediction model [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(7): 2176-2182.
- [9] 张晓, 鲁军勇, 李湘平, 等. 电磁感应线圈发射子弹系统优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4658-4665.
- ZHANG X, LU J Y, LI X P, et al. System optimization of electromagnetic induction coil launch bullet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4658-4665.
- [10] LIU W B, CAO Y J, ZHANG Y, et al. Parameters optimization of synchronous induction coilgun based on ant colony algorithm [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 39(1): 100-104.
- [11] SU X, LIN F C, ZHANG Q, et al. Stage-by-stage inversion and optimization algorithm of capacitor parameters for multistage induction coil launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(4): 1065-1075.
- [12] RAM R, THOMAS M J. A novel technique to arrest the armature capture effect in an induction coilgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(10): 3334-3340.
- [13] ZHANG T, GUO W, FAN W, et al. Acceleration mechanism and experimental research of multi-stage synchronous induction coilgun based on magnetic field arrangement [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(10): 4753-4759.
- [14] LU F L. Investigation of synchronous induction coilgun with stepped coil launcher and stepped armature [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(4): 1190-1194.
- [15] ZHANG Y D, GONG Y J, XIONG M, et al. Study of a multisection synchronous induction coil launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(8): 2959-2964.
- [16] 马偃毫, 于德江, 陈帅, 等. 异步感应线圈推进器推力稳定性研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(6): 28-36.
- MA Y H, YU D J, CHEN S, et al. Study on force stability of asynchronous induction coil electromagnetic launcher [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(6): 28-36.
- [17] KAYE R, TURMAN B, AUBUCHON M, et al. Induction coilgun for EM mortar [C]// 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, 2008.
- [18] GUAN S H, GUAN X C, WU B Q, et al. Analysis of the influence of system parameters on launch performance of electromagnetic induction coil launcher [J]. Energies, 2022, 15(20): 7803.

收稿日期:2024-03-02

收到修改稿日期:2024-03-21

作者简介:

王浩杰(1999-),男,硕士研究生,研究方向为脉冲功率与电磁推进技术,863176326@qq.com;

* 通信作者:严仲明(1982-),男,博士,研究员,研究方向为电磁推进技术、能量存储及变换等,yzm@swjtu.edu.cn。

Design of External Circuit for Induction Coilgun with Low Acceleration Force Fluctuation

WANG Haojie¹, YAN Zhongming^{1,2*}, LIN Feihong¹, WANG Yu^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Chengdu 611756, China)

Key words: induction coilgun; electromagnetic force; acceleration force fluctuation; sensitive load; time-sharing triggering system

With the development of electromagnetic launching technology, the demand for carrying high precision electronic components on high-speed launch loads is increasingly being emphasized by researchers. Induction coilgun usually generates pulsating electromagnetic force, which causes the large acceleration force fluctuation of the armature during the launch process. The excessive peak of acceleration force and the inordinate acceleration force fluctuation may be harmful to the loads, especially for those carrying sensitive electronic components, which limits the value of induction coil emitters in practical engineering applications.

In this paper, a circuit of time-sharing triggering capacitors is proposed to reduce the excessive electro-magnetic force and acceleration force fluctuation. The proposed circuit of time-sharing triggering capacitors as shown in Fig.1.

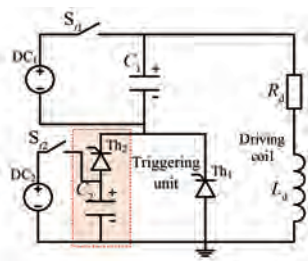


Fig. 1 The proposed circuit of time-sharing triggering capacitors

The capacitors (C_1 , C_2) are bipolar capacitors and the freewheeling diode is deleted in the circuit. The triggering unit consists of a capacitor and a thyristor, which is connected in parallel with

previous thyristor. More triggering units could be designed when smaller acceleration force fluctuation is required.

The influence of the changes of the capacitance value and the armature triggering position on the electromagnetic launch performance is analyzed, which can be concluded that the optimal triggering position increases with the decrease of total capacitance value. When the capacitor C_2 is connected into the circuit, the total capacitance value in the circuit is reduced, and meanwhile the triggering position of the armature increases, which is beneficial to the launching of the armature.

Three modes of driving circuits are designed for comparison, and the calculation results show that: under the conditions of the same initial energy storage and the approximate muzzle velocity of the armature, compared with other circuit triggering modes, the proposed time-sharing triggering mode in this paper, the peak electromagnetic acceleration force of the armature is reduced by 2.04 kN, and the acceleration force fluctuation is reduced by 2.36 kN. In the traditional driving circuit mode, the armature decelerates and the acceleration force fluctuates greatly at the driving interval of the two coils.

The results show that the driving circuit with time-sharing triggering capacitor could effectively reduce the peak acceleration force and acceleration force fluctuation of the armature, and provides reference value for the design of the induction coilgun with sensitive loads.