doi:10.11887/j.cn.201606003　　http://journal.nudt.edu.cn

多级电磁线圈发射器时序触发控制策略*

焦绍光[1,2],丁坚勇[1],鲁军勇[2]
(1.武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;
2.海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430033)

摘　要:为优化多级同步感应线圈电磁发射器性能,以提高发射速度和能量转换效率为检验指标,以影响上述指标的触发时序为优化对象,采用遗传算法建立单级同步感应线圈型电磁发射器触发位置优化数学模型,计算最佳触发位置,通过数值和有限元两种仿真系统对优化结果的正确性进行验证。采用该方法对两级以及十级同步感应线圈型电磁发射器的触发时序进行优化研究,并进行仿真验证。为解决仿真系统误差问题,提出采用动子线圈在各级的触发位置和速度作为控制因素的双控触发方式,并研究分析仿真过程中触发开关的随机抖动对出口速度误差的影响,得到最佳触发时序控制策略。

关键词:电磁发射;同步感应线圈;触发策略;遗传算法;优化
中图分类号:TM315　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2016)06-012-06

Trigger sequence strategy of multistage electromagnetic coil launcher

JIAO Shaoguang[1,2], *DING Jianyong*[1], *LU Junyong*[2]
(1. Academic of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To improve the performance of the SICEML (synchronous induction coil electromagnetic launcher), taking the launching speed and the power conversion ratio as the check mark, and taking the trigger sequence as the optimizing parameter, the mathematic model of Single-stage SICEML was established by using genetic algorithm. The best trigger situation was figure out. Validity of the result was confirmed by numeric and finite element analysis simulation system. In this way, a 2-stage and a 10-stage SICEML optimizing trigger sequences were approached and verified. To solve the inaccuracy problem of the emulate system, the situation and speed of armature were taken as the simultaneous qualification for switch trigger, and the effect of the activation switch's random flutter to armature's outlet speed was researched, and a best trigger sequence strategy is submitted.

Key words: electromagnetic launcher; synchronous induction coil; trigger strategy; genetic algorithm; optimization

电磁发射技术是一种新型直线推进技术,能够在短时间内将电磁能转化为载荷所需的瞬时动能。其中,同步感应线圈型电磁发射器(Synchronous Induction Coil ElectroMagnetic Launcher, SICEML)是一种非接触式的电磁发射器,能够有效减少磨损,提高装置寿命,具有广阔的应用前景[1-4]。

图 1 是单级 SICEML 结构原理图,装置主要由驱动线圈和电枢(圆筒型)组成,脉冲电容器 C 通过开关 K 向驱动线圈注入脉冲电流,形成变化磁场,并在电枢上感应出涡流,从而产生电磁力推动电枢前进。

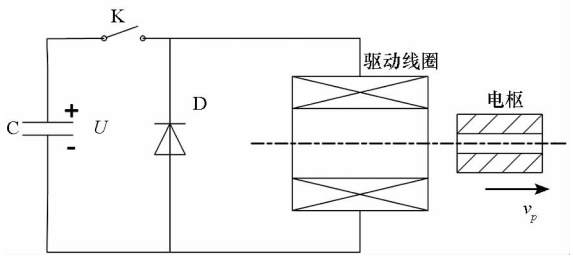


图 1　单级 SICEML 结构原理图
Fig. 1　Principle construction diagram of single-stage SICEML

发射速度和能量转换效率是 SICEML 最重要的两项指标[5-8],影响这两项指标的因素有很多,

*　**收稿日期**:2016-04-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407191,51522706);国家部委基金资助项目(613262)
作者简介:焦绍光(1977—),男,河北辛集人,博士研究生,E-mail:hgchengguo@126.com;
丁坚勇(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:dingjy@whu.edu.com

包括驱动线圈和电枢的结构参数(内径、外径、长度)、驱动线圈匝数以及电枢初始触发位置等。其中,在装置设计完成后,触发时序将直接影响出口速度和效率。

1　触发位置、时序优化

不同的触发位置对 SICEML 发射性能有很大的影响,在动态发射试验之前,确定最优的初始触发位置具有重要的指导意义。

对于十级 SICEML 样机,可以通过控制脉冲电源的数量,选择其中相邻的两级、三级或者更多级(最多十级)进行研究。对单级和两级 SICEML 触发位置以及十级触发时序进行了优化研究。

1.1　单级 SICEML 样机初始触发位置优化

单级 SICEML 的设计变量很多,而且某些变量如线圈匝数等又有一定的离散要求。因此,单级 SICEML 的优化设计是一个有约束、非线性的优化问题。

单级 SICEML 最关键的性能指标是电枢的出口速度 v_p 和能量转换效率 η。其中,能量转换效率为电枢(包括载荷 m_a)出口动能与电容初始储能之比,即:

$$\eta = \frac{m_a v_p^2/2}{CU^2/2} \tag{1}$$

由式(1)可知,在电容储能与电枢质量不变的情况下,能量转换效率是速度的单调函数,二者变化趋势是一致的。为同时体现二者的变化程度,可将它们的乘积作为目标函数,即:

$$\max f(X) = v_p \cdot \eta \tag{2}$$

影响目标函数的参数有很多,在放电回路参数一定的情况下,选取驱动线圈轴向长度 z_c 和内外半径(R_1,R_2),电枢轴向长度 z_p 和内外半径(r_1,r_2),驱动线圈匝数 N 以及电枢初始触发位置 z_0 作为优化设计变量,即:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{X} &= X(R_1, R_2, r_1, r_2, z_c, z_p, N, z_0) \\ &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{3}$$

根据系统结构参数特点,基本约束条件可设置为:

$$\begin{gathered} R_{\min} \leqslant R_2 - R_1 \leqslant R_{\max} \\ r_{\min} \leqslant r_2 - r_1 \leqslant r_{\max} \\ g_{\min} \leqslant R_1 - r_2 \leqslant g_{\max} \\ z_0 \geqslant 0 \\ N \in \mathbf{N}^+ \end{gathered}$$

其中,下标 min 和 max 分别表示约束的最小值和最大值。

根据约束方程 $\boldsymbol{AX} \leqslant \boldsymbol{b}$ 可得边界约束的系数矩阵为:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{b} = [\, -R_{\min} \quad R_{\max} \quad -r_{\min} \quad r_{\max} \quad g_{\max} \quad -g_{\min} \quad 0\,]^{\mathrm{T}}$$

联立式(1)~(3),结合约束条件即构成单级 SICEML 优化数学模型。设定单级 SICEML 样机及脉冲电源回路参数,见表 1。

表 1　单级 SICEML 样机及脉冲电源回路参数

Tab. 1　Parameters of single SICEML prototype and pulse power supply circuit

系统结构	参数	参数值
驱动线圈	外半径 R_2	67.5 mm
	内半径 R_1	32.5 mm
	轴向长度 z_c	100 mm
	匝数 N	40
电枢	外半径 r_2	29 mm
	内半径 r_1	15 mm
	轴向长度 z_p	200 mm
	质量 m_a	1 kg
脉冲电源回路	电容器电容值 C	16.6 mF
	电容器电压 U	4 kV
	回路电阻 R_d	2.9 mΩ
	调波电感 L_d	55 μH

对于单级 SICEML 样机最佳触发位置优化问题,优化变量只有一个,即初始触发位置 z_0。设置 z_0 的优化区间为 -10 mm ~ 100 mm,载荷出口速度 $-v_p$ 为目标函数。参照前述优化模型建立求解过程,利用遗传算法对单级 SICEML 样机最佳触发位置进行优化,优化目标函数随着迭代次数的变化如图 2 所示。

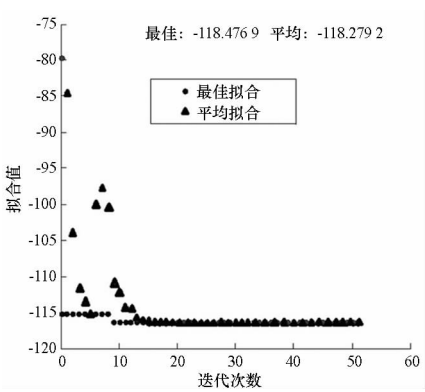
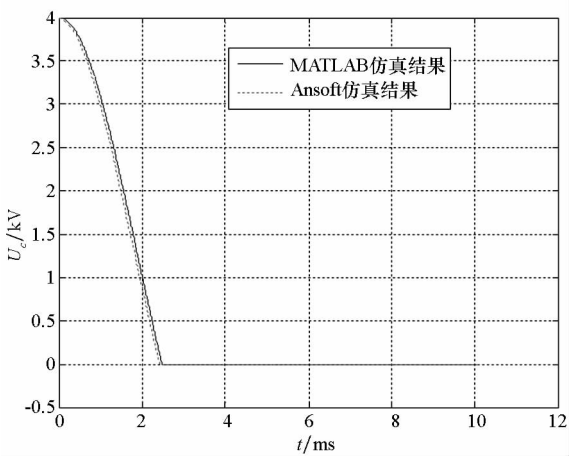


图 2　目标函数随迭代次数变化情况

Fig. 2　Trend of fitness value vs. generation

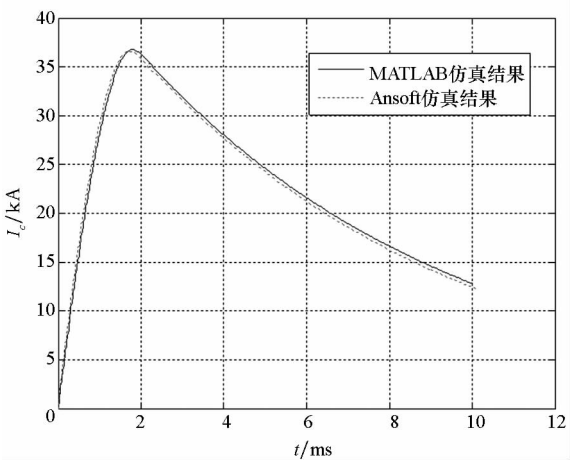
算法迭代 50 次后,目标函数趋于最优解,最高出口速度为 118.48 m/s,此时对应的最佳初始触发位置 z_0 = 12 mm。动态发射性能如图 3 所示。

分别利用数值仿真[9-13](采用电流丝法将电枢分为 5 片)和有限元两种系统仿真模型进行模拟,结果基本吻合。与 z_0 = 50 mm 仿真结果相比,放电回路电压、电流基本一致,但由于电枢位置的变化,线圈与电枢间的互感和互感梯度初始值改



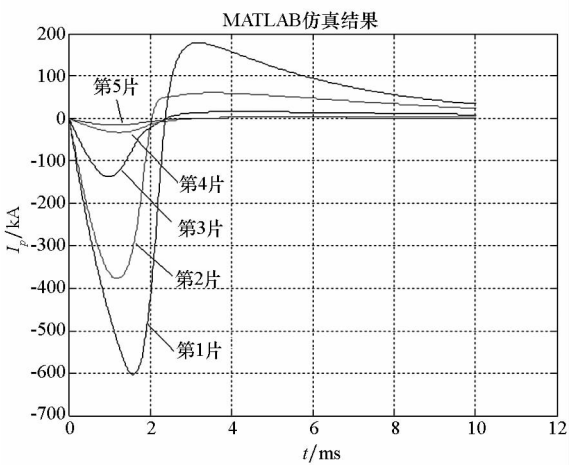
(a) 电容电压波形

(a) Waveform of capacitor voltage



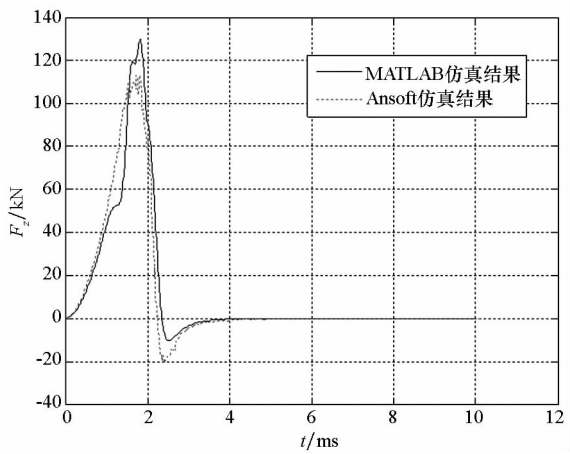
(b) 放电回路电流

(b) Waveform of circuit current



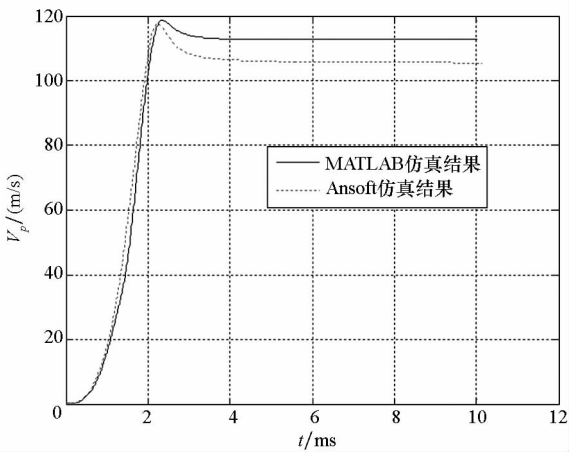
(c) 电枢分片电流波形

(c) Waveform of armature filaments



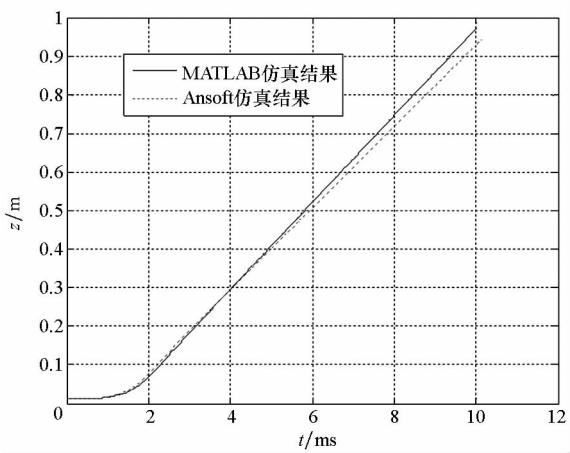
(d) 电磁力波形

(d) Waveform of electromagnetic force



(e) 速度波形

(e) Waveform of speed



(f) 位移波形

(f) Waveform of displacement

图 3　单级 SICEML 动态过程仿真曲线(z_0 = 12 mm)

Fig. 3　Simulation waves of single-stage SICEML(z_0 = 12 mm)

变,使得电枢分片感应电流变大,MATLAB 仿真的电磁力和速度分别增加到 129.9 kN 和 118.8 m/s(z_0 = 50 mm 时分别对应 89.8 kN 和 84.1 m/s),分别提高 44.7% 和 41.3%,发射指标大大提升。

单级 SICEML 样机不同触发位置对应的速度、效率值如表 2 所示,速度与位置对应关系曲线如图 4 所示。

表 2　单级 SICEML 样机触发位置与速度关系

Tab. 2　Relation between initial trigger position and speed of single SICEML prototype

触发位置 z_0/mm	中心距 z_{cp}/mm	出口速度 v_p/(m/s)	效率 η/%
-10	40	87.154	2.86
-5	45	106.23	4.25
0	50	109.33	4.5
4	54	114.33	4.92
12	62	118.48	5.28
15	65	117.89	5.23
20	70	116.25	5.09
25	75	113.54	4.85
30	80	108.13	4.4
35	85	102.17	3.93
40	90	96.96	3.54
45	95	90.85	3.11
50	100	84.09	2.662
55	105	78.19	2.302
60	110	72.46	1.97
65	115	65.82	1.63
70	120	58.9	1.306
80	130	43.96	0.73
90	140	26.53	0.265

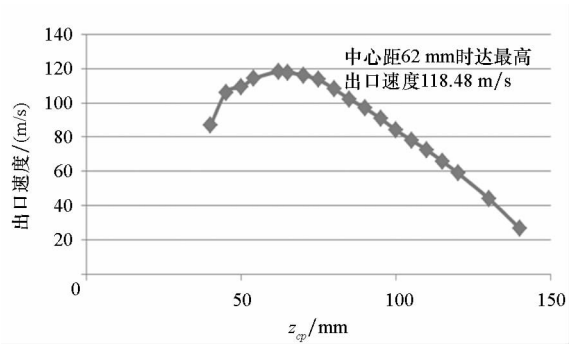


图 4　速度与中心间距关系曲线

Fig. 4　Curve of relation between speed and center interval

1.2　两级 SICEML 触发位置优化

两级 SICEML 同样存在最佳触发位置的问题,上节确定了单级最佳触发位置,但由于两级驱动线圈间的相互耦合,最佳位置可能会有所变化。因此,以第 1 级触发位置 z_1 和第 2 级触发位置 z_2 作为优化变量,出口速度为目标函数,对两级 SICEML 最佳触发位置进行优化。

优化结果表明,第 1 级和第 2 级触发位置分别为 14 mm 和 20 mm 时,系统获得最大出口速度,最大出口速度为 176.23 m/s。

图 5 为两级 SICEML 出口速度与第 1,2 级触发位置的关系图,从图 5 中也可以清晰直观地看出最优触发位置的空间分布。

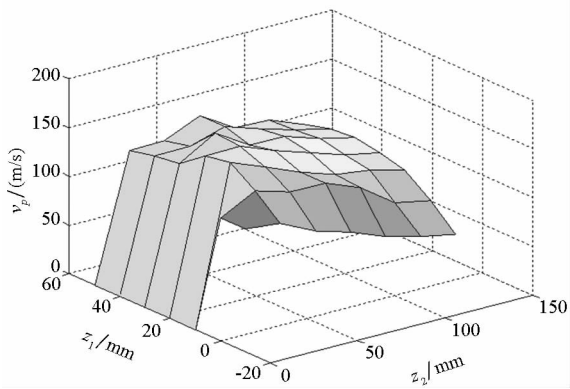


图 5　出口速度与第 1,2 级触发位置的关系图

Fig. 5　Relation between muzzle velocity and trigger position of the first and second coil

1.3　十级 SICEML 触发时序优化

对于十级 SICEML 触发时序的优化问题,仍以出口速度为目标函数,每一级的触发时刻为优化变量,由于第 1 级触发时间已经确定为 0 ms,因此只需对第 2 ~ 9 级触发时间进行优化。此外,由于级数间的相互耦合影响,单级 SICEML 优化的初始触发位置对多级不一定是最优的,因此将初始触发位置也作为优化变量之一。十级 SICEML 触发时序优化共有如下 10 个优化变量:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{X} &= X(z_0, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}) \\ &= (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10})^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{4}$$

由于每一级是依次触发的,因此有约束条件:

$$0 < x_2 < x_3 < x_4 < x_5 < x_6 < x_7 < x_8 < x_9 < x_{10} < t_{\max} \tag{5}$$

其中,$t_{\max}$是根据实际问题设定的触发时序的上限值。

根据约束方程 $\boldsymbol{AX} \leqslant \boldsymbol{b}$ 可得边界约束的系数矩阵为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0&1&-1&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&1&-1&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&-1&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&1&-1&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&1&-1&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&1&-1&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&1&-1&0\\0&0&0&0&0&0&0&0&1&-1\end{bmatrix};\ \boldsymbol{b}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\\0\end{bmatrix}。$$

此外,设置初始触发位置 z_0 上下边界[$z_{\min}$, $z_{\max}$]。全部设置完成后,利用遗传算法,调用编写的十级动态发射数学模型进行优化。

最优触发时序见表 3,初始触发位置 z_0 = 14 mm,出口速度达到 308.6 m/s。

表 3　十级 SICEML 最优触发时序表

Tab. 3　Optimized trigger time of ten-stage SICEML

级数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
触发时间/ms	0	1.08	1.9	2.4	3	3.5	4	4.5	4.6	5.1

2　考虑多因素影响的触发时序

在仿真过程中,不仅要控制时间或位置,还要控制动子线圈的速度,这样就考虑了系统的硬件、软件的误差。用优化得到的动子线圈在各级触发位置和速度作为控制因素触发,即动子线圈位置对应其速度,同时符合条件线圈才触发。因此,需要编制各级动子线圈位置 - 速度控制表。表 4 为第 2 级各位置和速度对应的控制表(以第 1 级线圈触发位置为起始位置,第 2 级线圈中心位置为终止位置)。同理可得其他各级位置和速度对应的控制表。

表 4　第 2 级位置与速度对应的控制表

Tab. 4　Control list between initial trigger position and speed of the second-stage of SICEML

触发位置/mm	所对应的速度/(m/s)
5	140.5
10	104.4
15	85.1
20	68.4
25	50.3
30	38.6
35	25.7
40	20.4
45	15.9
50	10.4
55	7.6
60	4.8

虽然双控制因素触发方式解决了系统误差的问题,但是触发开关的随机抖动误差是在触发的一瞬间才出现的,无法避免。下面对触发开关的随机抖动时间对发射性能的影响进行分析。随机抖动时间导致该线圈被馈电时出现一个偏离符合动子线圈发射位置要求的时间偏差,这将影响线圈发射器的性能。位置误差与动子线圈的速度成正比,因此,对于高速线圈发射器来说,位置误差的影响是最为突出的。误差是基于对抖动时间的标准正态随机分布规律的取样,最大(正的)误差与最小(负的)误差相等。

为了评估开关抖动的影响,假设随机抖动时间分布宽度参数为 ±50 μs。开关随机抖动时间在 ±50 μs 情况下,实际触发时间如下。

最大正误差各级实际触发时间为:0.000 05 s, 0.000 35 s, 0.000 55 s, 0.000 65 s, 0.000 75 s, 0.000 8 s, 0.000 9 s, 0.000 95 s, 0.001 s, 0.001 05 s。

零误差各级实际触发时间为:0 s, 0.000 3 s, 0.000 5 s, 0.000 6 s, 0.000 7 s, 0.000 75 s, 0.000 85 s, 0.000 9 s, 0.000 95 s, 0.001 s。

最大负误差各级实际触发时间为:0 s, 0.000 25 s, 0.000 45 s, 0.000 55 s, 0.000 65 s, 0.000 7 s, 0.000 8 s, 0.000 85 s, 0.000 9 s, 0.000 95 s。

图 6 和图 7 为三种误差情况下的动子线圈速度对比曲线和加速度对比曲线。图 6 和图 7 的结果表明:开关抖动时间对于最大时间误差限制时的出口速度的影响几乎是可以忽略的。

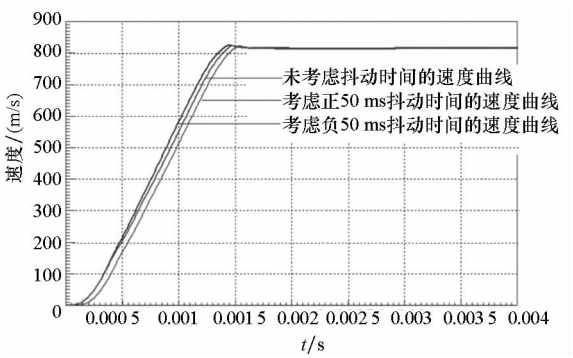


图 6　三种随机抖动时间下电枢速度对比曲线

Fig. 6　Contrast curve of armature speed under three different random jitter time

3　结论

同步感应线圈型电磁发射器时序触发优化一直是该系统参数设计的关键环节,尤其是多级的触发控制更为复杂。以单级和多级为例,通过数

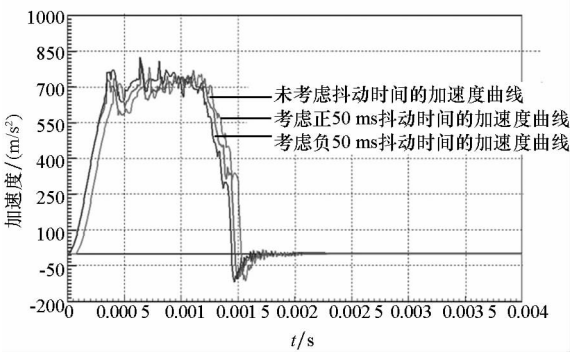


图 7　三种随机抖动时间下电枢加速度对比曲线

Fig. 7　Contrast curve of armature acceleration under three different random jitter time

值仿真和有限元仿真两种仿真模型,分别对实验室单级 SICEML 样机最佳触发位置、两级样机最佳触发位置以及十级样机最佳触发时序进行了优化研究,得到了理想的优化效果。采用动子线圈在各级的触发位置和速度作为控制因素的双控触发方式,解决了系统误差的问题。该触发时序优化方法可应用于更多级数发射系统,为实现最佳出口速度和高能量转换效率提供重要借鉴意义。

参考文献(References)

[1] 王德满, 谢慧才, 刘亮, 等. 线圈炮(电磁同轴发射器)综述[J]. 西安电子科技大学学报, 1992, 19(3): 113 – 121.
WANG Deman, XIE Huicai, LIU Liang, et al. Coil cannon (electromagnetic coaxial launcher) summary[J]. Transaction of Xi′an Electron Technology University, 1992, 19(3): 113 – 121. (in Chinese)

[2] 王莹. 行波电磁发射器[J]. 电工电能新技术, 1988: 28 – 37.
WANG Ying. Traveling wave electromagnetic emitter[J]. New Technique of Electrician and Electric Energy, 1988: 28 – 37. (in Chinese)

[3] He J L. Analysis and design of electromagnetic coil-launchers[D]. USA: Polytechnic University, 1990.

[4] Zhao K Y, Zhang Q F, Li Z Y, et al. Research on accelerative characteristics of three kinds of coaxial induction coil launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 39(1): 225 – 229.

[5] He J L, Levi E, Zabar Z, et al. Concerning the design of capacitively driven induction coil guns [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(3): 429 – 438.

[6] Kolm H, Mongeau P. Basic principles of coaxial launch technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20(2): 227 – 230.

[7] Vaneghi M M, Khatibzadeh A A, Khanbeigi G A, et al. Design and switching position optimization of multi-stage coilgun [C]//Proceedings of International Conference on Business, Engineering and Industrial Applications, 2011: 130 – 134.

[8] Liu W B, Zhang Y, Li R F, et al. Optimum structural design of pivotal assembler in synchronous induction coil launchers[C]// Proceedings of 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2012.

[9] Widner M M. WARP – 10: a numerical simulation model for the cylindrical reconnection launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 634 – 638.

[10] Burgess T J, Cnare E C, Oberkampf W L, et al. The electromagnetic theta gun and tubular projectiles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, MAG – 18(1): 46 – 59.

[11] Marder B M. SLINGSHOT—a coilgun design code[R]. USA: Sandia National Laboratories, 2001.

[12] Azzerboni B. Some remarks on the current filament modeling of electromagnetic launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 643 – 648.

[13] He Y, Gao G S, Song S Y, et al. Validation of a coilgun design code [C]//Proceedings of 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2012.