

doi: 10.7690/bgzd.2013.11.002

三级同步感应线圈发射器的速度抖动

孟昭福¹, 王亚民², 陈学慧³, 王旻³(1. 装甲兵工程学院外训系, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 68128 部队, 兰州 730046;
3. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 同步感应线圈发射器是电磁发射器领域的重要分支, 多级同步感应线圈发射器通过对各级驱动线圈的有序放电来推动电枢向前运动。介绍三级同步感应线圈发射器的工作原理, 对速度抖动进行理论分析, 在对一个给定参数的三级同步感应线圈发射器进行电磁场仿真计算的基础上, 通过不同触发时间的模拟, 得到了速度抖动的影响规律。分析结果表明: 毫秒级以下的抖动对三级电磁线圈发射器的速度不会造成显著影响, 可适当降低对高压开关等器件的响应时间要求。

关键词: 三级同步感应线圈发射器; 延时控制; 抖动; 驱动线圈; 电枢**中国分类号:** TJ303 **文献标志码:** A

Velocity Jitter of Three-Stage Synchronous Induction Coil Launcher

Meng Zhaofu¹, Wang Yamin², Chen Xuehui³, Wang Min³

(1. Foreign Training Department, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. No. 68128 Unit of PLA, Lanzhou 730046, China;

3. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Synchronous induction coil launcher (SICL) is an important branch in electromagnetic launcher field. Through successive discharge to drive coil of each stage, multi-stage SICL pushes the armature to move ahead. In this paper the working principle of three-stage SICL is introduced, and theory analysis of speed jitter is carried out. Based on the electromagnetic calculation of the three-stage SICL which has given parameters, the influence rule of speed jitter is obtained through simulation of various trig times. The results show that the velocity impact is not evidence for jitter of millisecond level below, and the respond time demand to the instrument like high voltage switch can be reduced.

Key words: three-stage synchronous induction coil launcher; time-delay control; jitter; drive coil; armature

0 引言

抖动是系统参数的各个有效瞬时对其当时理想位置的短期性偏离, 可以分为 2 类: 一类是确定性抖动, 由可识别的干扰引起, 具备特定的产生原因; 一类是随机抖动, 是指由较难预测的因素导致的随机变化。在多级同步感应线圈发射器(synchronous induction coil launcher, SICL)中, 每一级的微小抖动可能产生电枢速度上的偏移, 经过多级叠加后将累积成整个系统很大的偏移, 因此定量地分析速度的抖动十分必要。

对于级数较多的场合, 虽说用程序来控制线圈的放电时间很容易实行, 但却很难在实验中实现, 因为只要实际速度与程序计算的速度产生微小偏离, 将会导致在下一级线圈馈电时, 实际的和估计的电枢位置产生显著变化, 使线圈产生的磁场与电枢位置产生偏离, 从而显著降低线圈弹射器的性能。文献[1]的方法是基于电枢的位置给线圈馈电, 而不是一个预先设定的延时时间。尽管如此, 即使得到

了正确的位置, 从电容器中馈电仍会有一个时间延后。总的延时既包括控制系统的软件和硬件的原因, 又有开关的原因。平均延时可通过改变电枢的位置来得到, 不会影响弹射器的性能。而自由抖动将造成馈电时电枢位置的偏离, 降低弹射器的速度。位置的偏差与电枢速度成正比, 速度越高位置偏差越大, 所以对多级 SICL 来说, 其影响是相当明显的。为了评估这种抖动的影响, 笔者仿真了三级 SICL 第 2 级和第 3 级错误触发时间的情况。通过对不同抖动时刻的模拟, 得到出口速度的不同分布。

1 三级 SICL 基本工作原理

三级 SICL 模型如图 1 所示, 由储能电容、同步触发控制电路及开关、驱动线圈和电枢等组成, 在发射过程中, 先对第 1 级的驱动线圈馈电, 然后其余各级驱动线圈依次馈电。

工作原理如下: 闭合左边第 1 级驱动线圈的电路开关, 根据电磁感应定律, 当驱动线圈通以变化的电流时, 在线圈周围产生的磁场亦是变化的, 可

收稿日期: 2013-05-17; 修回日期: 2013-06-18

作者简介: 孟昭福(1959—), 男, 河北人, 学士, 副教授, 从事电工技术领域研究。

知电枢中有感应电流产生，2 种电流产生的磁场相互作用，在驱动线圈和电枢之间产生与轴线水平和垂直 2 个方向的作用力。垂直方向上的电磁力作用效果因为轴对称而相互抵消；水平方向的电磁力的作用效果是在驱动线圈固定时，推动电枢水平向右运动。当电枢越过第 2 级驱动线圈适当位置后，闭合第 2 级电路开关，给第 2 级驱动线圈馈以脉冲电流，那么电枢又被感应出和驱动线圈中电流方向相反的电流，电枢又受到向右的排斥力继续被加速。同理，进入后面的驱动线圈，电枢被不断地加速驱动，直至最后飞离炮管^[2-5]。

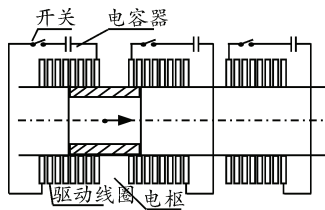


图 1 三级 SICL 模型

2 速度抖动分析

三级 SICL 的速度扰动可能由电枢的位置误差或控制系统的抖动引起。假设 SICL 触发时间预先已设定，理论上最优结果下的平均速度为 v_0 ，平均加速度为 a_0 ，那么速度和位移分别^[6]为：

$$v_1(t) = v_0 + a_0 t \quad (1)$$

$$s_1(t) = v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 \quad (2)$$

其中 v_0 为初始速度。

若系统存在某种原因引起的扰动。设初始速度为 $v_0 + \delta v$ ，既然 v_0 为理论上的最优速度，那么就可以假设，在扰动的情况下加速度由式 (3) 得到：

$$a_2(t) = a_0 - \alpha |s_2(t) - s_1(t)| \quad (3)$$

表 1 三级 SICL 的结构参数

电枢				驱动线圈						
电枢材料和类型	外径/mm	内径/mm	长度/mm	初始位置/mm	材料和类型	外径/mm	内径/mm	长度/mm	匝数	间距/mm
铝，空心圆柱圆筒	850	700	130	65	紫铜，圆筒状线圈	940	870	90	200	90

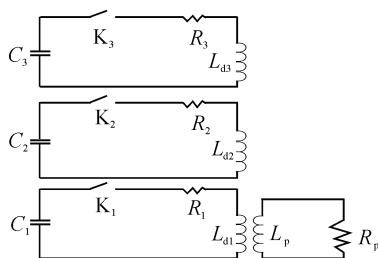


图 2 三级 SICL 外置电路

3.2 仿真结果

图 3 给出了各级驱动线圈电流的波形。从图中

从式 (3) 可看出，加速度的扰动与误触发的距离成正比，常数 a 可以基于仿真结果进行估计。电枢的运动方程为：

$$\frac{dv_2}{dt} = a_0 - \alpha |s_1(t) - s_2(t)| \quad (4)$$

$$\frac{ds_2}{dt} = v_2 \quad (5)$$

初始条件是

$$s_2(0) = 0 \quad (6)$$

$$v_2(0) = v_0 + \delta v \quad (7)$$

若 $\delta v < 0$ ，则 $s_1 > s_2$ ，

$$v_2(t) = v_0 + a_0 t + \delta v \cosh(\sqrt{\alpha} t) \quad (8)$$

若 $\delta v > 0$ ，则：

$$v_2(t) = \begin{cases} v_0 + a_0(t) + \delta v \cos(\sqrt{\alpha} t) & t \leq \frac{\pi}{\sqrt{\alpha}} \\ v_0 + a_0(t) - \delta v \cosh(\sqrt{\alpha} t - \pi) & t \geq \frac{\pi}{\sqrt{\alpha}} \end{cases} \quad (9)$$

3 三级 SICL 电磁场仿真

3.1 物理模型参数及仿真初始条件

在 Maxwell 软件中建立三级 SICL 的结构模型，其参数如表 1 所示。表 1 中，电枢初始位置为第一级驱动线圈和电枢的中心距，仿真时运动区域宽 265 mm，高 2 400 mm，周围包裹的空气宽 150 mm，高 150 mm。使用最大长度限制来划分网格。外电路如图 2 所示，其中电容器 C_1 、 C_2 、 C_3 的初始电压 4.7 kV，容量 8 mF， R_1 、 R_2 、 R_3 均为 0.5 Ω 。弹丸质量设为 650 kg。电枢的初始速度设为 0 m/s，仿真起始时间为 0 ms，终止时刻为 200 ms，时间步长取 0.5 ms。延时设置采用电流源串联电流控制开关的从电路来获得，第 2 级延时时间为 32 ms，第 3 级延时时间为 51 ms。

可以看出，驱动线圈电流波形是一种典型的欠阻尼 RLC 串联电路电流波形，呈近似衰减状的正弦分布，各级延时时间也可以从图中清楚地看出。

电枢受力和速度的波形如图 4 所示。从图中可以看出：电枢有 3 个受力峰值，在 28 ms 时，第 1 级驱动线圈对电枢的作用力峰值达到 149.4 kN，53 ms 时，第 2 级驱动线圈的作用力峰值达到 177 kN，70 ms 时，第 3 级驱动线圈的作用力峰值达到 197 kN。电枢的速度在三级驱动线圈的作用下上升比较平

稳,也可以说三级驱动线圈对电枢速度的提高起到了一个连续的作用。每级电枢动能的增加量与每级出口速度与初始速度的平方之差成正比:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m(v^2 - v_0^2) \quad (10)$$

其中: ΔE 为电枢的动能的增量; v 为出口速度; v_0 为初始速度。

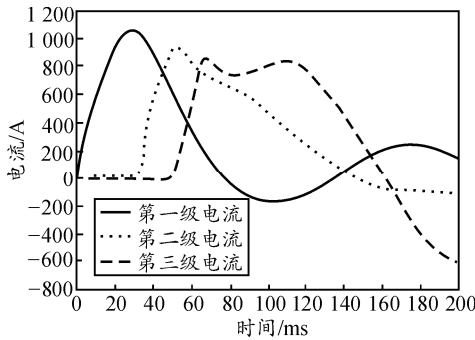


图 3 各级驱动线圈电流波形

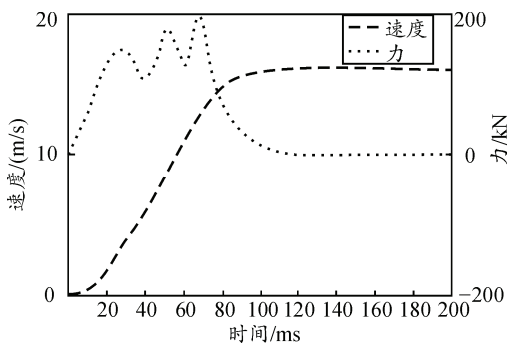


图 4 电枢受力和速度波形

每级驱动能量相同,即使各级效率一样高,速度的增加会越来越慢。到 120 ms 后电枢基本摆脱了各级驱动线圈的作用,速度稳定在 15.94 m/s 左右。

4 三级 SICL 抖动的仿真

延时抖动可以分为延时叠加和延时不叠加 2 种情况。所谓延时叠加,就是每一级的延时都比正常的放电时间要提前或推后,这样延时就会累积,级数越多累积量越大;延时不叠加是指某一级可能因为某种原因触发时间提前或滞后,但是对后续级触发时间没有累积效应^[7]。下面将分析三级 SICL 延时触发发生抖动的情况。

1) 三级延时不叠加触发 ±1 ms 的抖动。

以最佳触发时间 0, 32, 51 ms 为基准时间, -1 ms 表示提前 1 ms 触发,相应的+1 ms 表示滞后 1 ms 触发。提前 1 ms 触发即触发时间为 0, 31, 50 ms, 其受力波形如图 5。滞后 1 ms 触发即触发时间为 0, 33, 52 ms, 其受力波形如图 6。

2) 三级延时叠加触发 ±1 ms 的抖动。

提前 1 ms 触发即触发时间为 0, 31, 49 ms, 其受力波形如图 7。滞后 1 ms 触发即触发时间为 0, 33, 53 ms, 其受力波形如图 8。

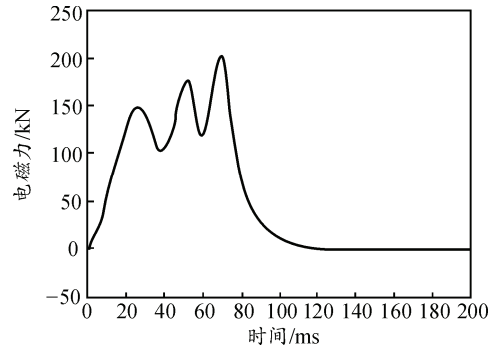


图 5 -1 ms 触发电枢受力波形

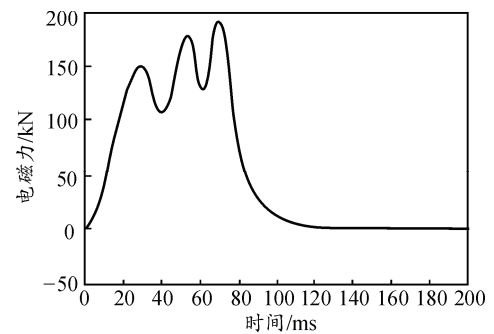


图 6 +1 ms 触发电枢受力波形

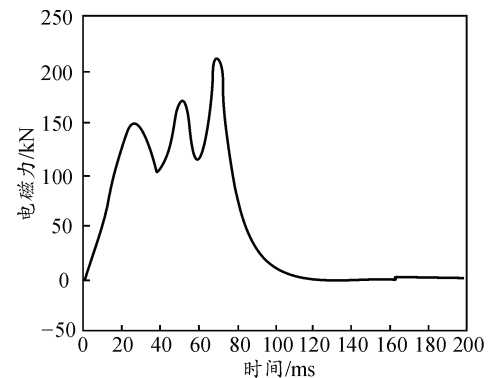


图 7 -1 ms 叠加触发电枢受力波形

3) 三级延时不叠加触发 ±10 ms 的抖动。

以最佳触发时间 0, 32, 51 ms 为基准时间, -10 ms 表示提前 10 ms 触发,相应的+10 ms 表示滞后 10 ms 触发。提前 10 ms 触发,即触发时间为 0, 22, 41 ms 时的受力波形如图 9。滞后 10 ms 触发,即触发时间为 0, 42, 61 ms 时的受力波形如图 10。

4) 三级延时叠加触发 ±10 ms 的抖动。

以最佳触发时间 0, 32, 51 ms 为基准时间, -10 ms 表示提前 10 ms 触发,相应的+10 ms 表示滞后 10 ms 触发。提前 10 ms 触发,即触发时间为 0, 22,

31 ms 时的受力波形如图 11。滞后 10 ms 触发，即 触发时间为 0, 42, 71 ms 时的受力波形如图 12。

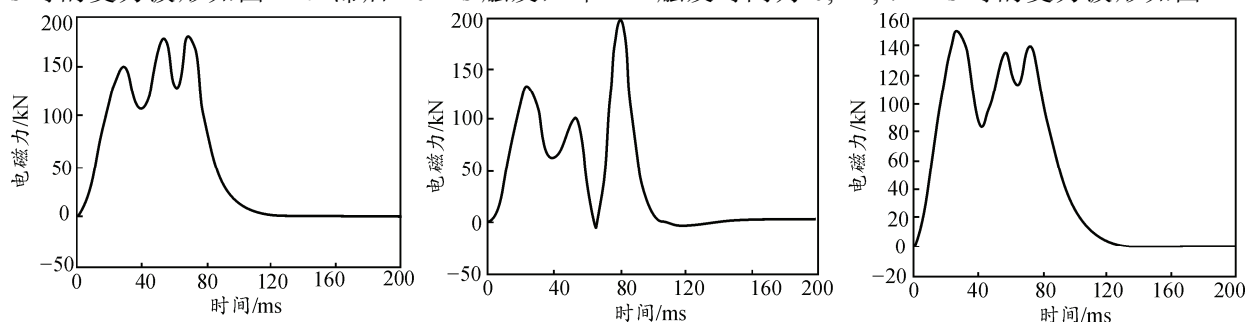


图 8 +1 ms 叠加触发电枢受力波形 图 9 -10 ms 触发电枢受力波形 图 10 +10 ms 触发电枢受力波形

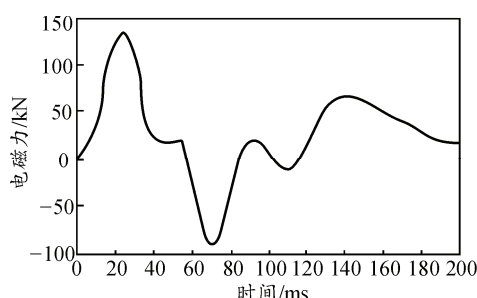


图 11 -10 ms 叠加触发电枢受力波形

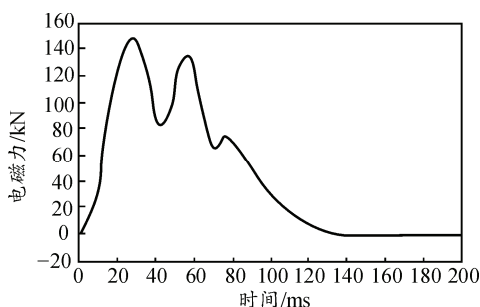


图 12 +10 ms 叠加触发电枢受力波形

实际上延时触发与位置触发本质上是相同的，表 2 为触发时间变动时弹射器的出口速度，表 3 为每一次延时触发所对应的触发位置。表中位置 0 表示最佳触发位置，负数表示触发位置提前，正数表示触发位置滞后。

表 2 三级延时触发的速度抖动

序号	第 1 级触发时间/ms	第 2 级触发时间/ms	第 3 级触发时间/ms	速度/(m/s)
1	0	22	31	8.44
2	0	22	41	12.13
3	0	31	49	15.91
4	0	31	50	15.93
5	0	32	51	15.94
6	0	33	52	15.90
7	0	33	53	15.87
8	0	42	61	14.86
9	0	42	71	13.79

从表 2 和表 3 中可以看出，在最佳触发时刻(0, 32, 51 ms)电枢的速度最大，为 15.94 m/s。时间偏离越大，触发位置偏离也越大。不管是提前还是滞后触发，速度都比最佳触发时刻要低。延时不叠加

时，提前 1 ms 触发速度降低 0.01 m/s，延时叠加触发时，提前 1 ms 触发速度降低 0.03 m/s，推后 1 ms 触发对速度的影响也不大。当时间偏差达到 10 ms 时，速度的降低就会十分显著，最坏的情况是在触发时刻(0, 22, 31 ms)，速度降低将近 50%，只有 8.44 m/s。因此在大载荷电磁线圈弹射器发射过程中，毫秒量级以下的抖动对弹射器的发射没有十分显著的影响。在弹射器级数较少时，延时触发方便简单，不需要调整触发位置，且易于控制。

表 3 三级延时触发对应的触发位置 mm

序号	第 1 级触发位置	第 2 级触发位置	第 3 级触发位置
1	0	-30.01	-116.97
2	0	-30.01	-74.10
3	0	-4.01	-15.48
4	0	-4.01	-8.05
5	0	0	0
6	0	+4.24	+8.08
7	0	+4.24	+16.31
8	0	+50.69	+78.23
9	0	+50.69	+177.41

5 结论

笔者建立了 SICL 物理模型，给定系统参数，对三级弹射器发射过程中的速度抖动作了深入分析。分析结果表明：毫秒量级以下的抖动对三级电磁线圈发射器的速度不会造成显著的影响，因此可适当降低对高压开关等器件的响应时间要求。

参考文献：

[1] Aubuchont M S., Lockner T R., Turman B N. Results from Sandia National Laboratories/Lockheed Martin electromagnetic missile launcher(EMML)[J]. IEEE Trans. on Magn., 2005, 41(1): 75-78.
 [2] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 96-97.
 [3] Kaye R J. Operational requirements and issues for coilgun EM launchers[J]. IEEE Trans. on Magn., 2005, 41(1): 194-199.