

doi: 10.7690/bgzd.2015.09.006

舰载导弹电磁垂直发射系统仿真研究

李伟波¹, 曹延杰², 朱良明²

(1. 海军航空工程学院军事教育训练系, 山东 烟台 264000; 2. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264000)

摘要: 舰载导弹电磁垂直发射器是在电磁发射技术基础上发展起来的新概念发射装置, 具有良好的共架发射能力和隐身性能。以舰载电磁垂直发射系统建模问题为重点, 提出了一种由螺旋线圈和圆盘线圈组成的同时驱动电枢的混合弹射方式。通过分析电磁垂直发射器的基本原理, 明确了系统功能和组成, 采用理论分析、建模仿真相结合的方法建立发射器的数学模型, 对电路、运动和动力分别进行研究, 并进行了仿真计算。仿真结果表明: 该方法可行、有效, 能为舰载导弹电磁垂直发射器的工程化提供有效的技术支持。

关键词: 电磁垂直发射器; 导弹; 系统; 模型

中图分类号: TJ768 **文献标志码:** A

Simulation Research on Electromagnetic Vertical Launcher for Shipborne Missile

Li Weibo¹, Cao Yanjie², Zhu Liangming²(1. Department of Military Education & Training, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264000, China;
2. Department of Command, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264000, China)

Abstract: The electromagnetic vertical launcher for shipborne missile (EMVLSM) is a new concept launcher that based on the electromagnetism launching technique foundation. It can use on the aircraft carrier and destroyer, the launcher uses the magnet coil launching technique to change the electric energy to the kinetic energy of armature and delivers to the missile, compared the traditional launcher, it can store up the missile that can launch the various qualities by way of the progression or power supply to adjust the drive coil, and possesses good altogether frame emissive ability and the stealth function. The paper researches the simulation on EMVLSM. By analyzing the basic principle of the electromagnetism vertical launcher, the paper definite the function and component of the system, and builds the mathematical model by simulation and academic analysis, studies respectively to circuit, motion and motive force, then carry out simulation calculation. It can provide the active technology support for the engineering of the EMVLSM.

Keywords: electromagnetic vertical launcher; missile; system; model

0 引言

电磁发射技术是借助电磁能做功, 将电磁能转化为发射载荷动能的一种发射技术^[1]。与常规的发射方式相比, 电磁发射能提供较大动能, 可将弹丸等有效载荷加速到化学发射方式难以达到的超高初速和射速, 应用于导弹发射既可以消除热发射所产生安全问题, 消除发射特征信号, 提高隐身性能, 又克服了冷发射方式无法发射大载荷导弹、发射装置占用舰艇空间较大的缺点, 同时可以通过调节发射能量来弹射不同类型的导弹, 对通用化发射具有重要意义, 在舰载垂直发射领域有良好的应用前景。2004—2013 年公开的美国专利相继发布了利用舰载导弹电磁垂直发射装置的相关资料, 发射装置利用电磁线圈发射技术把将大质量导弹模型加速到与当前舰载导弹发射近似的参数, 证明了利用电磁发射技术发射导弹的可行性^[2]。舰载导弹电磁垂直发射系统 (electromagnetic vertical launcher for shipborne missile, EMVLSM) 作为新概念武器系统,

相比传统化学和物理机械发射系统有质的飞跃。虽然受到材料、脉冲功率等技术的制约, 其实用化进程受到了一定阻碍, 但从目前各国研究的情况和取得的进展看, 其发射效率和发射速度不断提高, 随着相关关键技术的突破, 舰载导弹电磁垂直发射系统在不久的将来会装备到新型的全电推进舰艇上, 并革命性地提高舰艇的作战防御能力。

1 EMVLSM 系统组成与工作原理

1.1 EMVLSM 系统组成

舰载电磁导弹弹射器是基于海军舰载平台的发射装置, 其电磁弹射系统置于舰艇的舰体内, 其整体布局如图 1 所示。

舰载电磁导弹弹射系统主要由目标探测跟踪定位系统、武器控制系统、发射控制器、电磁线圈弹射器系统以及电源系统组成, 如图 2 所示。目标探测跟踪定位系统提供目标信息并向发射控制器发送开火指令, 发射控制器通过数据总线向导弹发送目

收稿日期: 2015-04-13; 修回日期: 2015-05-16

作者简介: 李伟波(1981—), 男, 山东人, 讲师, 博士, 从事电磁发射与验证研究。

标和飞行信息，同时通过信号线向电源系统发送充电指令，电源系统通过脉冲电流总线给驱动线圈提供脉冲电流。

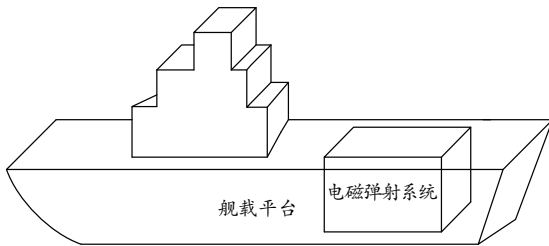


图 1 舰载电磁弹射系统整体布局

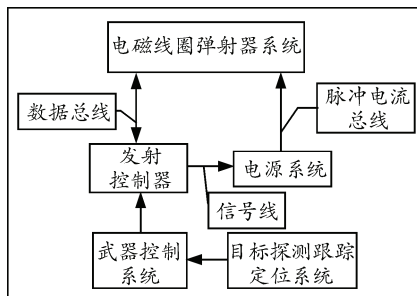


图 2 舰载电磁导弹弹射系统

电磁线圈弹射器的基本组成如图 3 所示，主要由驱动线圈、弹射线圈、电枢、连接装置、导弹和发射盖组成。

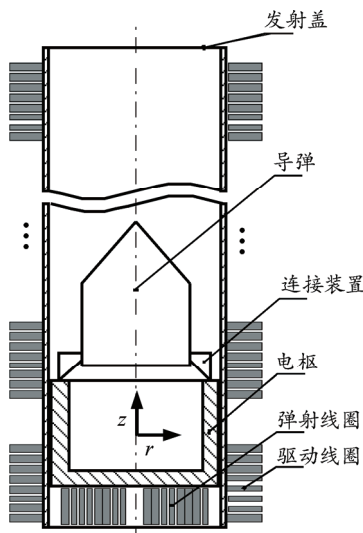


图 3 电磁线圈弹射器的基本组成

1.2 EMVLSM 系统工作原理

EMVLSM 系统实际上是由多级感应驱动线圈串列而成，各级驱动线圈由相应的控制电路来驱动，首先闭合第 1 级线圈(包括弹射线圈和驱动线圈)的控制开关，电容器对第 1 级驱动线圈放电，圆筒电枢感应出与驱动线圈方向相反的电流，发射组件在洛伦兹力的作用下产生一定的初速度，当发射组件到

达第 2 级驱动线圈的触发位置后，触发第 2 级驱动线圈的控制电路，由第 2 级的电容器对第 2 级驱动线圈放电，实现对发射组件的再加速，然后发射组件经过各级驱动线圈的加速到达指定的速度。

2 EMVLSM 系统数学建模

由 EMVLSM 结构和工作原理可知：EMVLSM 的工作过程虽然包括弹射加速和驱动加速 2 个过程，但其工作原理都是由于磁场与涡流相互作用产生电磁力推动电枢加速运动，所以可以将 2 个过程联合建立 EMVLSM 的数学模型。EMVLSM 的数学模型主要包括等效电路方程、动力学方程和运动学方程。为了便于后面叙述，笔者将弹射线圈和驱动线圈统称为发射线圈。

2.1 EMVLSM 系统电路方程

若有一个由 n 个驱动线圈组成的电磁弹射器，在其发射过程中，如果驱动线圈是顺序触发的，当其中一个驱动线圈触发时，其他驱动线圈均处于接通状态。把电枢均匀地分为 m 片，等效电路如图 4。

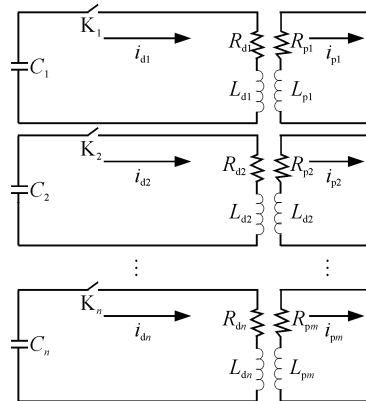


图 4 多个驱动线圈的等效电路

其中： C_1, C_2, \dots, C_n 是系统各电容器组容量； K_1, K_2, \dots, K_n 是各驱动电路的开关； $R_{d1}, R_{d2}, \dots, R_{dn}$ 是系统各回路电阻，包括驱动线圈电阻、电容器电阻、放电开关电阻和接线电阻等； $L_{d1}, L_{d2}, \dots, L_{dn}$ 是系统各驱动线圈电感； $i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn}$ 是各驱动线圈中的电流； $R_{p1}, R_{p2}, \dots, R_{pm}$ 是电枢各分片电阻； $L_{p1}, L_{p2}, \dots, L_{pm}$ 是电枢各分片电感； $i_{p1}, i_{p2}, \dots, i_{pm}$ 是电枢各分片中的电流； M_{pmdi} 表示驱动线圈和电枢分片的自感。

从 0 时刻到某一 t 时刻，对于系统有 n 个驱动线圈顺序放电，可建立电路方程^[3]：

$$R_{pm} i_{pm} + \sum_{i=1}^n \frac{d(M_{pmdi} i_{di})}{dt} + \sum_{j=1}^m \frac{dM_{pmpj} i_{pj}}{dt} = 0 \quad (1)$$

2.2 EMVLSM 系统动力方程

线圈弹射是根据脉冲感应加速原理工作，当弹射线圈有脉冲电流通过时，弹射线圈产生的变化磁场将在电枢中感应出涡流，感应电流与磁场相互作用，使电枢受到电磁力的作用而加速向上运动。

由电磁发射器的工作原理知，在某一时刻，电枢所受电磁力的大小取决于电枢所在位置的磁感应强度 $B(t)$ 和电枢内感应电流 $I(t)$ 。假设在电枢中取任意一电流元 $I_t dl$ ，该电流元所在位置的磁感应强度为 Bt ，则 t 时刻该电流元所受电磁力为

$$dF_t = I_t dl \times B_t \quad (2)$$

由电磁学的有关理论可知，电枢内的感应电流可看作是由 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n (n \rightarrow \infty)$ 等无数个环形闭合电流回路组成，故由式 (2) 可以推出， t 时刻电枢所受的总电磁力为

$$F_t = \oint_L dF_t = \oint_L I_t dl \times B_t \quad (3)$$

式中 $L=L_1+L_2+L_3+\dots+L_n (n \rightarrow \infty)$ 。

2.3 EMVLSM 系统运动方程

因为发射组件的运动方向是竖直向上的，所以发射组件在运动过程中除了受作用在电枢上沿运动方向的电磁力 $F_z(t)$ 外，还受到发射组件自身的重力作用。因此， t 时刻作用于电枢上的合力 $F(t)$ 为

$$F(t) = F_z(t) - m_p g \quad (4)$$

式中： m_p 为发射组件的质量； g 为重力加速度。

由此可得 t 时刻发射组件的加速度 $a(t)$ 和 $v(t)$ ：

$$a(t) = \frac{F(t)}{m_p} = \frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \quad (5)$$

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt = \int_0^t \left[\frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \right] dt \quad (6)$$

EMVLSM 系统的电路方程、动力学方程和运动学方程构成了系统的数学模型，该模型系统完整地描述了 EMVLSM 的工作过程。

3 EMVLSM 系统发射过程仿真分析

EMVLSM 系统十分复杂，因此建立、分析和验证其模型非常必要。对模型的设计要立足于系统目标任务和现有的发射技术。其设计目标是建立满足任务需求的体积最小、重量最轻和效率最高并能把现有发射技术发挥到最佳的弹射器^[4]。

确定电枢质量与导弹质量的比值是一个十分重要的过程，大载荷速度的大小和方向必须精确控制，加速器的加速峰值必须尽可能低，也就是加速要尽

量均匀，以减少对发射导弹和弹射器本身的应力破坏。综合以上考虑以三级加速发射装置为例，设定 EMVLSM 系统的参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验参数

部件	参数	数值
弹射线圈	线圈外径/mm	500
	线圈内径/mm	40
	线圈高度/mm	30
	第一级触发时刻/ms	0
	线圈匝数	60
驱动线圈	线圈外径/mm	700
	线圈内径/mm	550
	线圈高度/mm	100
	第一、二级间距/mm	50
	第二、三级间距/mm	80
电枢	线圈匝数	60
	电枢外径/mm	500
	电枢内径/mm	460
	电枢底部厚度/mm	30
	电枢轴向高度/mm	90
外置电路	发射导弹质量/kg	550
	电容器电压/kV	8
	电容/mF	8
	回路电阻/mΩ	8
	回路电感/μH	2

系统回路电流、电枢受力、导弹速度和位移随时间变化的曲线如图 5~图 8 所示。

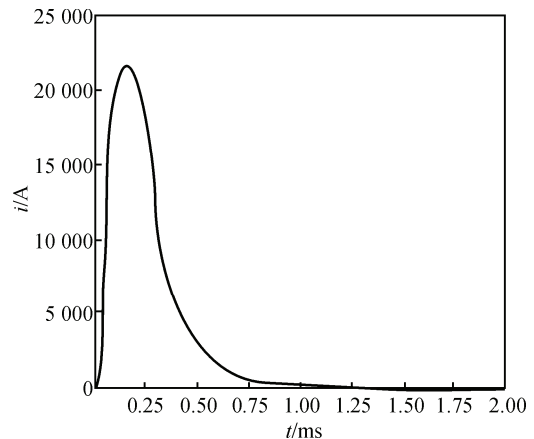


图 5 回路电流随时间变化曲线

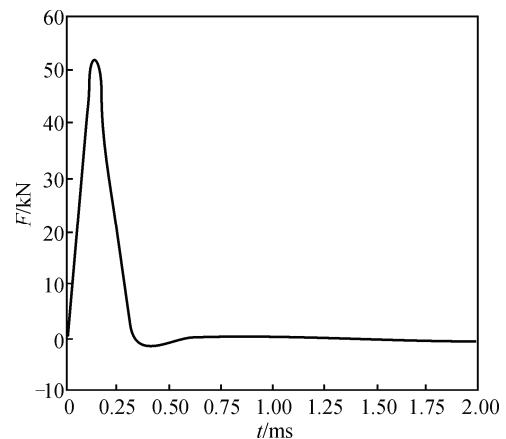


图 6 电枢受力随时间变化曲线

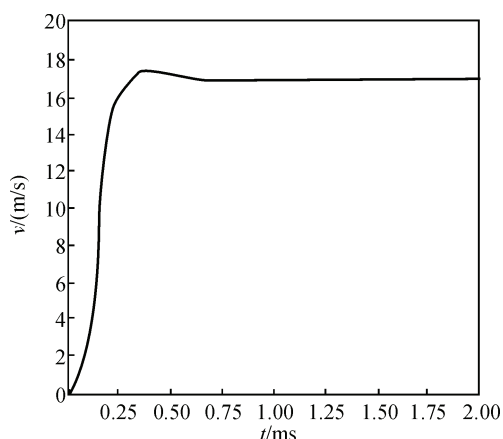


图7 导弹速度随时间变化曲线

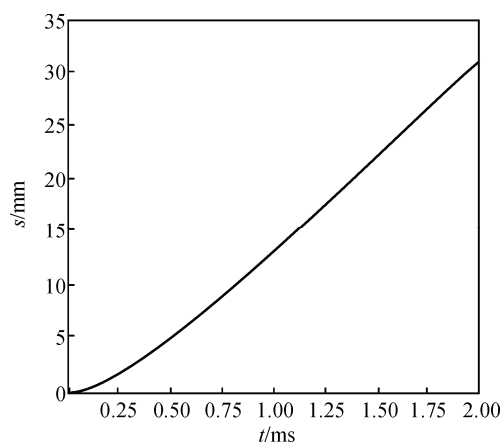


图8 导弹位移随时间变化曲线

从图5~图6可以看出:回路电流放电时间很短,在0.16 ms时放电回路电流达到峰值21.59 kA,电枢受到最大电磁力53.81 kN,随后放电回路电流、电枢受力逐渐减小。从图7~图8可以看出:当放电电压为3 kV时, t 为1.28 ms以后,电枢速度达到最大值,稳定在16.88 m/s,此时电枢的位移为19.24 mm。在1.28 ms以后虽然发射装置的放电回路中还有电流,但由于电枢与发射线圈间的距离变大,电磁力对其加速作用很小,此时,电枢主要靠惯性向前运动。

通过对仿真的结果对比分析可得到以下结论:

1) 随着放电电压的增大,放电回路电流峰值不断增大,电枢受到最大电磁力不断增大,电枢所能达到的最大速度也从8.27 m/s逐渐增大到16.88 m/s。因此,可以得出如下结论:在EMVLSM发射过程中,可以通过给弹射线圈提供不同的充电电压,使电枢具备不同的发射初速度,从而给后续的驱动线圈提供不同的入口速度。

2) 比较电枢受力、电枢速度曲线发现,相同外

电路条件下,弹射线圈对电枢的作用时间短,作用力大,且电枢在较短时间完成加速过程;而驱动线圈对电枢的作用时间长,作用力小,电枢需要较长时间完成加速过程;弹射线圈单独作用时电枢获得的最大速度要高于驱动线圈单独作用时。

3) 在给定的EMVLSM系统中,各级驱动线圈存在一组最佳触发位置,对应最佳触发时间,能够使得电枢获得最大的出口速度,这为以后的实验研究提供了重要的理论参考。

4) 最佳触发位置、最佳触发时间随着电枢进入驱动线圈速度的不同而有所变化,经过多次仿真分析,发现最佳触发时间是电枢初速度的函数。

4 结束语

笔者以舰载电磁线圈的导弹弹射为例,介绍了EMVLSM系统的基本组成,分析了圆盘线圈和螺旋线圈驱动电枢的工作原理,提出了一种由螺旋线圈和圆盘线圈组成的同时驱动电枢的混合弹射方式,建立了它的系统模型,主要包括电路方程、动力方程和运动学方程3组方程。然后通过三级仿真发射模型对发射过程进行仿真计算和分析,仿真结果可为后续的多级发射器的原型试验提供数据支持。

参考文献:

- [1] 王莹. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 2-3.
- [2] Balikci A, Zabar Z, Birenbaum L. On the design of coilguns for super-velocity launchers[J]. IEEE Trans. on Magn., 2007, 43(1): 107-110.
- [3] 刘守豹, 阮江军, 彭迎, 等. 改进电流丝法及其在感应线圈炮场路结合分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 128-134.
- [4] 杨栋, 沈志, 刘振祥, 等. 螺旋线圈电磁发射器径向受力仿真与电枢设计[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(3): 47-50.
- [5] Hainsworth G, Leonard P J, Roger D. Finite element modeling of magnetic compression using coupled electromagnetic-structural codes[J]. IEEE Trans. on Magn, 1996, 32(3): 1050-1053.
- [6] 关晓存, 雷彬. 2种结构驱动线圈对电枢受力的影响[J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(1): 44-47.
- [7] Powell J R, Lipinski R J, Palmer M R. Startram: a new approach for low-cost earth-to-orbit transport[J]. IEEE Trans. on Magn, 2001, 37(1): 2569-2590.
- [8] 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.