

单级感应线圈炮最佳初始位置仿真研究

曹延杰¹, 刘文彪², 张媛², 庞金锋³

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台, 264001)

2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台, 264001;

3. 海军驻襄樊航空军代室, 湖北 襄樊, 441003)

摘要: 在单级感应线圈炮的发射过程中, 影响电磁发射效率的因素有很多, 弹丸初始位置就是其中之一。以驱动线圈和弹丸的初始中心距为变量, 以弹丸所能达到的最大速度为目标函数, 采用轴对称线圈磁场的数值计算方法和微分方程的前向差分法, 对单级感应线圈炮系统进行了仿真研究; 研究的结果表明, 对于给定的单级感应线圈炮系统, 确实存在一个最佳的初始位置, 使得弹丸的速度能达到最大。并且, 通过仿真计算, 得出了该最佳初始位置, 这为以后的工程实践提供了理论参考。

关键词: 单级感应线圈炮; 仿真; 最佳初始位置

中图分类号: O441.3 **文献标识码:** A

Simulation and Analysis of Single Stage Induction Coilgun's Best Initial Position

CAO Yan-jie¹, LIU Wen-biao², ZHANG Yuan², PANG Jin-feng³

(1. Naval Aeronautical Engineering Institute (NAEI), Yantai Shandong 264001, China)

2. Graduate Students' Brigade NAEI Yantai Shandong 264001, China

3. Aeronautical Military Representative Office of Navy in Xiangfan, Xiangfan Hubei 441003, China)

ABSTRACT: There are many factors which affect the efficiency of electromagnetic launch during the launch of the single stage induction coilgun, and the initial position of the projectile is such a one. In this paper the single stage induction coilgun is simulated and analyzed by the numerical value calculation method for axisymmetric coils magnetic field and the forward difference procedure for differential equation, by taking the maximal velocity of projectile as target function and taking the initial space of the centers of the driving coil and projectile as variable. The research result indicates that the best initial position which can make the projectile get the maximal velocity really exists in a given single stage induction coilgun system. The best initial position of the given single stage induction coilgun system is gained by simulation, which provides the theoretical reference for future engineering practice.

KEYWORDS: Single stage induction coilgun; Simulation; Best initial position

1 引言

电磁炮按结构和原理的不同可分为轨道炮、线圈炮、重接炮三种。其中, 线圈炮在相同电流条件下, 具有推力大、效率高、寿命长等其他电磁炮所不具有的优点^[1]。但是, 由于线圈炮结构、测定和控制系统复杂, 同步性要求高等原因而发展较慢^[2]。

在单级感应线圈炮系统中, 如果弹丸初始位置的选取不

同, 那么弹丸所能获得的最大速度将随之发生变化。对于这两者之间的关系, 试验研究往往只能对其进行定性的分析。因此, 为了定量分析这两者之间的关系, 本文使用轴对称线圈磁场的数值计算方法和微分方程的前向差分法, 对单级感应线圈炮系统中弹丸初始位置与弹丸最大速度的关系进行了仿真研究, 这也为以后同步感应线圈炮的研究提供了理论参考。

2 感应线圈炮工作原理

线圈炮早期被称为“同轴发射器”, “质量驱动器”, 或者

“行波加速器”等,其原理是用脉冲或者交变电流产生磁行波来驱动带有线圈的弹丸或者磁性材料弹丸。感应线圈炮是线圈炮的一个分支,其基本结构如图 1 所示。

若干个驱动线圈固定,弹丸最初位于第一个驱动线圈中间偏右的位置,先给第一个驱动线圈馈以脉冲电流 i_0 ,弹丸产生感应电流 i_1 ,由于 i_0 、 i_1 反向,两者互相排斥。驱动线圈虽然受向左的排斥力,由于固定而保持不动。弹丸受向右的排斥力,但是由于没有固定而被加速向右运动。当弹丸刚向右越过驱动线圈 2 中心后,再让驱动线圈 2 通以脉冲电流,那么弹丸又被感应出和驱动线圈中电流方向相反的电流,弹丸又受到向右的排斥力,继续被加速。于是,弹丸被一系列驱动线圈加速驱动。

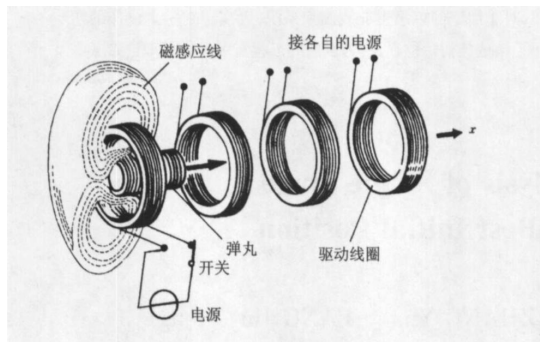


图 1 感应线圈炮工作原理示意图

图 1 所示的是一个四级的感应线圈炮,去掉后面的三级驱动线圈,就成了单级感应线圈炮。因此,对于感应线圈炮无论是单级还是多级,其基本原理相同。

3 单级感应线圈炮数学模型

3.1 电路方程

在单级感应线圈炮系统中,对于金属圆筒形的弹丸,其上因驱动线圈加电时所感应的电流沿轴向 x 的分布是不均匀的。因此,按连续体离散求解的观点,把电枢分为 m 片,每片为一圆环,并认为其环向电流沿截面为均匀分布。那么,单级感应线圈炮的等效电路图如图 2 所示。

图中 C 为储能电容器, R 为回路固有电阻,包括电容器电阻、放电开关电阻和接线电阻; L 为回路固有电感,包括电容器电感、放电开关电感和接线电感。 R_0 、 L_0 分别为驱动线圈的电阻和电感。 R_1 、 R_2 、 $\dots$ 、 R_m 和 L_1 、 L_2 、 $\dots$ 、 L_m 分别为弹丸各片的电阻和电感。 M_{01} 、 M_{02} 、 $\dots$ 、 M_{0m} 为驱动线圈和弹丸各片之间的互感, U_0 是电容充电电压。

在某一 t 时刻,对图 2 可建立电路方程如下:

$$(L + L_0) \frac{di_0(t)}{dt} + (R + R_0) i_0(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i_0(t) dt = U_0 + \frac{d}{dt} (M_{01} i_1(t)) + \frac{d}{dt} (M_{02} i_2(t)) + \dots + \frac{d}{dt} (M_{0m} i_m(t)) \quad (1)$$

$$L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 i_1(t) - \frac{d}{dt} (M_{10} i_0(t)) = 0 \quad (2)$$

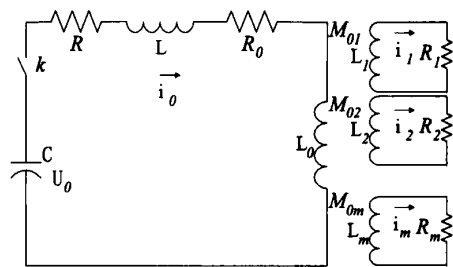


图 2 单级感应线圈炮的等效电路

$$L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 i_2(t) - \frac{d}{dt} (M_{20} i_0(t)) = 0 \quad (3)$$

...

$$L_m \frac{di_m(t)}{dt} + R_m i_m(t) - \frac{d}{dt} (M_{m0} i_0(t)) = 0 \quad (4)$$

3.2 推力方程

对弹丸所受加速力的计算,本文采用的是电感法,其计算依据是:力是储存能量在运动中的变化率,即在运动方向上的能量梯度。储存在载导体中的磁能与系统的电感有关,而电感是电路中每单位电流交链的磁通。因此,理想情况下单级感应线圈炮系统的总储能:

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m L_i I_i^2 + \frac{1}{2} L_0 I_0^2 + \sum_{i=1}^m M_{0i} I_i I_0 \quad (5)$$

如果以弹丸所指方向为 x 方向,那么弹丸仅沿 x 方向运动(炮管内运动忽略重力的影响),自感项磁能不变化,只有互感项磁能随 x 变化。若不计其它能量损失, t 时刻作用在弹丸上^[3]:

$$F(t) = \frac{dW_m}{dx} = \sum_{i=1}^m \frac{dM_{0i}(t)}{dx} I_i(t) I_0(t) \quad (6)$$

因此,要得到弹丸 x 方向的加速力,还需要计算驱动线圈与弹丸各片沿 x 方向上的互感梯度。在单级感应线圈炮系统中,驱动线圈和弹丸均可以等效为理想的轴对称空心圆柱线圈。对于两个空心圆柱线圈之间的互感和互感梯度,可以使用等效圆环线圈法进行计算^{[4][5]}。

3.3 运动方程

根据牛顿第二定律, t 时刻作用于弹丸上的安培力:

$$F(t) = m a(t) \quad (7)$$

由此可得,

$$a(t) = \frac{F(t)}{m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{dM_{0i}(t)}{dx} I_i(t) I_0(t) \quad (8)$$

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t) dt = v_0 + \int_0^t \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{dM_{0i}(t)}{dx} I_i(t) I_0(t) dt \quad (9)$$

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v(t) dt \quad (10)$$

以上式中, m 为弹丸的质量, $a(t)$ 为弹丸 t 时刻的加速度, $v(t)$ 为弹丸 t 时刻的速度, $x(t)$ 为弹丸 t 时刻的位移。

4 最佳初始位置仿真计算

4.1 仿真计算

根据以上数学模型, 如果给定初始条件就可以对单级感应线圈炮系统进行理论求解了。但是, 系统方程的解析计算涉及到椭圆积分, 而椭圆积分是无法用初等函数表示的, 这也就意味着系统方程无法手动求解。因此, 本文对椭圆积分的求解采用的是数值算法, 而对系统微分方程的求解采用的是前向差分法^[6], 通过编写程序利用计算机对其进行仿真计算。

程序编好后, 只要给定系统参数和初始条件, 就可以进行仿真计算了。本文所研究的单级感应线圈炮的系统参数和初始条件如表 1 所示。

表 1 单级感应线圈炮系统参数和初始条件

电 容	电容的容量 (μ F)	电容的初始电压 (V)								
	2600	5000								
驱动线圈 及回路	自感 (mH)	电阻 (m Ω)								
	0.206	171								
弹 丸	弹丸的分片数 m	弹丸的质量 m p(kg)								
	10	0.6								
	各片自感 (μ H)	L ₁	L ₂	L ₃	...	L ₈	L ₉	L ₁₀		
		4.3	4.3	4.3	...	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	各片电阻 (m Ω)	R ₁	R ₂	R ₃	...	R ₈	R ₉	R ₁₀		
1		1	1	...	1	1	1			

取时间间隔 $\Delta t = 0.01\text{ms}$ 根据上述系统参数和初始条件, 作者应用前面介绍的方法编定了程序 lwb6(s).m 和 lwb7.m。前者是在弹丸和驱动线圈的初始中心距固定的情况下, 对系统进行仿真计算; 后者调用前者, 以弹丸和驱动线圈的初始中心距为变量, 以弹丸所能达到的最大速度为目标函数进行比较寻优, 从而找出系统中使弹丸能够达到最大速度的最佳初始位置。两程序流程图如图 3 所示。

首先我们取初始中心距 $s = 0.023\text{m}$ (即把弹丸中心相距驱动线圈中心 0.023m 时弹丸所处的位置作为其运动的初始位置), 程序 lwb6(s) 运行结果如图 4 所示。

然后, 取初始中心距 s 在区间 $[0.05\text{m}]$ 里变化 (即变化初始位置来观察系统最大速度的变化情况), 运行程序 lwb7 得到的结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 弹丸最大速度随初始位置的变化

弹丸初始位置的取值 (m)							
0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007
0.008	0.009	0.01	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015
0.016	0.017	0.018	0.019	0.02	0.021	0.022	0.023
0.024	0.025	0.026	0.027	0.028	0.029	0.03	0.031
0.032	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039
0.04	0.041	0.042	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047
0.048	0.049	0.05					

0	7.8469	12.073	14.85	16.795	18.185	19.196	19.942
20.493	20.901	21.197	21.407	21.548	21.633	21.671	21.688
21.63	21.559	21.457	21.327	21.169	20.983	20.771	20.531
20.264	19.971	19.651	19.306	18.936	18.542	18.125	17.689
17.234	16.764	16.281	15.788	15.288	14.783	14.277	13.77
13.267	12.768	12.274	11.788	11.31	10.841	10.383	9.9349
9.4982	9.0732	8.6601					

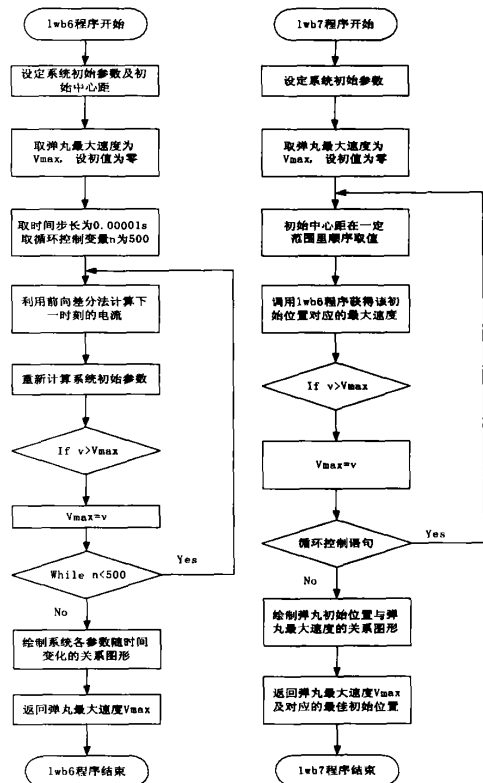


图 3 两程序的流程图

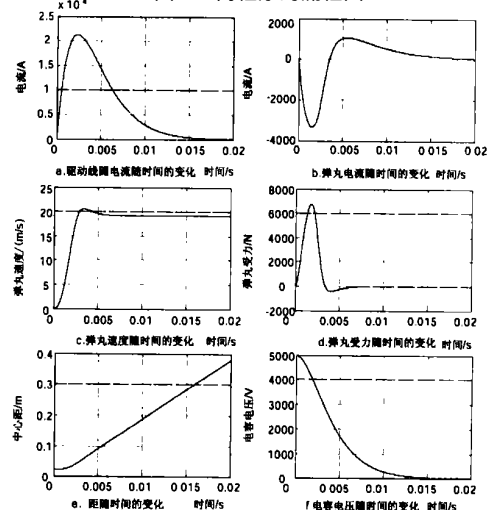


图 4 系统各参数随时间的变化 (下转第 31 页)

6 结论

弹射救生可视化仿真系统可以完成各种姿态下的仿真计算, 并利用 Vega 的可视化功能可获得直观的试验效果, 对系统设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] 龚卓蓉编译. Vega 程序设计 [M]. 国防工业出版社, 2002-8.
- [2] David J Kruglinski Visual C++ 技术内幕 [M]. 清华大学出版社, 1999.
- [3] 沈尔康. 航空弹射救生装备 [M]. 航空工业出版社, 1998

- [4] 和江华. 计算机仿真导论 [M]. 科学出版社, 2000.
- [5] 汪成为, 高文, 王行仁. 虚拟现实技术的理论、实现及应用 [M]. 清华大学出版社, 1996 1-493.
- [6] Nikolai M. Josutis. The C++ Standard Library [M]. 华中科技大学出版社, 2002.

[作者简介]



张科 (1968-), 男 (汉族), 江西人, 西北工业大学航天学院教授, 从事弹射救生仿真技术研究。

王聪 (1978-), 男 (汉族), 湖北人, 西北工业大学在读硕士, 从事弹射救生仿真技术研究。

王利恒 (1973-), 男 (汉族), 湖北人, 华中科技大学在读博士研究生, 主要研究方向为测控管一体化技术, 系统仿真。

(上接第 11 页)

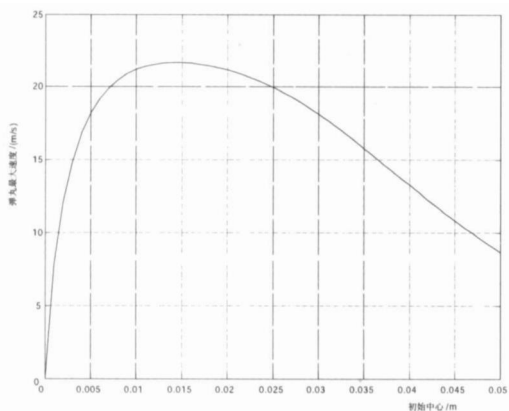


图 5 弹丸最大速度随初始位置的变化

4.2 结果分析

1) 通过图 4 可以发现在单级感应线圈炮系统中, 弹丸的加速时间非常短, 几乎是在 2 个 ms 内就被加速到最大速度, 达到最大速度后速度略有降低, 然后保持匀速向前运动 (此时没有考虑空气阻力与管壁摩擦)。因此, 以系统所能达到的最大速度作为目标函数进行研究是比较合理的。

2) 对表 2 和图 5 进行分析发现, 在系统其它条件不变的情况下, 随着弹丸和驱动线圈初始中心距的增加, 弹丸所能达到的最大速度先是迅速增加, 达到最大值后缓慢减小。可见, 确实存在一个最佳的初始位置使得弹丸的速度能达到最大。就本文研究的系统而言, 在弹丸和驱动线圈初始中心距取值为 $s = 14\text{mm}$ 时, 弹丸能获得最大的速度 $v_{\text{max}} = 21.67\text{lm/s}$

5 结论

本文对一个单级感应线圈炮系统的最佳初始位置进行

了仿真研究, 研究的结果表明对于给定的单级感应线圈炮系统, 确实存在一个最佳的初始位置, 使得弹丸的速度能达到最大。并且, 通过仿真计算能获得该最佳初始位置, 这为以后的工程实践提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 王莹, 肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 96-97.
- [2] 王莹, 马富学. 新概念武器原理 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996. 151-152.
- [3] T. J. Burgess, E. C. Cnare, W. L. Oberkampfer. The Electromagnetic Gun and Tubular Projectiles [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 1982, 18(1): 46-58.
- [4] 雷银照. 轴对称线圈磁场计算 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991. 209-213.
- [5] Y. Wu, A. Parameter Studies for Traveling Wave Coaxial Launchers [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 1991, 27(1): 617-622.
- [6] 陆金甫. 偏微分方程数值解法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.

[作者简介]



曹延杰 (1963.6-), 男 (汉族), 山东莱州人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 武器系统分析与仿真。

刘文彪 (1980.3-), 男 (汉族), 湖南沅江人, 硕士研究生, 主要研究方向: 武器系统分析与仿真。

张媛 (1982.2-), 女 (汉族), 山东蓬莱人, 硕士研究生, 主要研究方向: 战场环境仿真。

庞金锋 (1979.6-), 男 (汉族), 浙江嵊州人, 军代表, 主要研究方向: 航空兵器与火力控制系统。