

电容驱动型轨道电磁炮电磁过程的计算机仿真

陈庆国 王永红 魏新劳 张海燕

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院 哈尔滨 150040)

摘要 为研究电容驱动型轨道电磁炮的轨道长度选择问题及发射大质量物体的可能性,首先分析电容驱动型轨道电磁炮发射时的电磁过程,并推导描述电磁过程的方程。在此基础上,利用 Simulink 建立仿真模型及方案。仿真结果表明,在实际可用的电压范围内,电容驱动型轨道电磁炮的轨道长度可选择在 15m 以内;利用电容驱动型轨道电磁炮可以实现对大质量物体的发射。

关键词: 电磁炮 电容储能 轨道长度

中图分类号: TM153.3

Computer Simulation of Electromagnetic Process in the Capacitor Driven Rail Gun

Chen Qingguo Wang Yonghong Wei Xinlao Zhang Haiyan

(Harbin University of Science and Technology Harbin 150040 China)

Abstract In order to study the suitable rail length of the capacitor driven rail gun and the feasibility of launching a heavy body, the electromagnetic process in the capacitor driven rail gun is analyzed, and some equations are deduced in this paper. The models and projects are also built for simulation of the electromagnetic process in the rail gun. The simulated results show that the length of rail within 15 meter is suitable, and it is feasible to launch a heavy body by the rail gun.

Keywords: Rail gun, capacitance storage, rail length

1 引言

目前以火药为发射能源的传统火炮,将几千克的弹丸加速到 2km/s 左右的炮口速度,已经接近理论上的极限速度。化学火箭发动机的速度虽然不受滞止声速的限制,但由于烯料中氧化硫的分子质量大和自然燃烧时的火焰限制,其比推力上限小,而比推力很大的核能火箭发动机由于受核装置重量的限制,其推力/质量的比率很小,火箭每次发射成本也很高,技术也非常复杂。

电磁炮(EMG)也称为脉冲能量电磁炮,它是利用电磁发射技术,以电磁力发射超高速弹丸并以其动能毁伤目标的动能武器系统^[1,2]。它是由 Colonel Dixong 于 1844 年提出的,并经过了多年的

发展。由于受当时科学技术水平限制,在电源、材料、电枢等技术难题方面一直没有很好的解决方案,所以限制了其发展。

按照结构的不同,电磁炮可分为轨道电磁炮、同轴线圈炮和磁力线重接炮三种^[2,3]。轨道电磁炮是由在两条平行联接着大电流源的固定导轨和一个与导轨保持良好电接触、能够沿着导轨轴线方向滑动的电枢组成^[2],如图 1 所示。当接通电源时,电流沿着一条导轨流经电枢,再由另一条导轨流回,从而构成闭合回路。强大的电流流经两平行导轨时,在两导轨之间产生强大的磁场,该磁场与流经电枢的电流相互作用,产生强大的电磁力,该力推动电枢和置于电枢前面的弹丸沿着导轨加速运动,从而获得高速度^[4,5]。

由于电磁炮是以脉冲电源作为能源,远比火箭推进剂的成本低,而且在发射过程中的可控性和安

全性也是化学发射器所不能比拟的。因此,电磁炮在科学实验、武器装备、导弹防御系统、发射火箭和卫星以及航空弹射器等许多领域内有着广泛的应用前景。20 世纪 80 年代,电磁发射引起了各国军方的极大关注,纷纷投入大量的人力、物力对电磁发射进行试验研究。我国电磁发射技术的研究工作起步较晚,在“九五”期间几个单位进行电磁发射装置的理论研究或部件性能单元技术的跟踪研究工作。

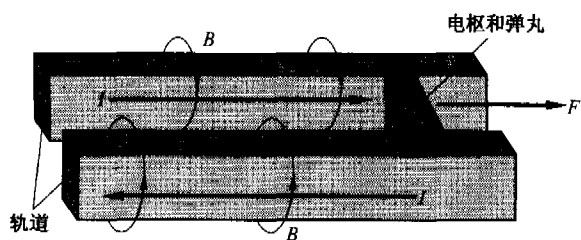


图 1 轨道电磁炮原理图

Fig.1 Principle of rail gun

针对电磁炮所应开展的研究内容很多,如:电磁炮的合理结构与尺寸,储能电容的储能密度与寿命,电磁炮发射大质量物体的可行性与效率等。本文从分析电容器储能轨道电磁炮发射时的电磁过程入手,利用计算机仿真手段来研究电磁炮轨道的合理长度和发射大质量物体的可行性。

2 轨道电磁炮的电路模型

轨道电磁炮在其工作时电磁过程非常复杂,影响因素也很多。为了抓住主要影响因素,并解决主要问题,本文做如下简化:

(1) 忽略电枢运动过程中的空气阻力、电枢和导轨之间的摩擦力。

(2) 忽略导轨电流的集肤效应。

根据上述简化,可以得出以电容器储能为能源轨道炮的等效电路图如图 2 所示。

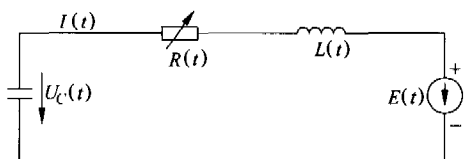


图 2 储能电容供电的轨道炮等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of capacitor driven rail gun

图中, $U_C(t)$ 为储能电容器上的电压, $I(t)$ 为放电回路的电流, $R(t)$ 为回路的总电阻, $L(t)$ 为回路的总电感, $E(t)$ 为电枢的反电动势。

由图 2 等效电路可列出回路方程为

$$\begin{aligned} U_C(t) - E(t) &= R(t)I(t) + \frac{d}{dt}[L(t)I(t)] \\ &= R(t)I(t) + L(t)\frac{dI(t)}{dt} + I(t)\frac{dL(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

因为电枢的受力 $F(t)$ 与磁感应强度 $B(t)$ 和电流 $I(t)$ 的乘积 $B(t)I(t)$ 成正比, 而磁感应强度 $B(t)$ 又与电流 $I(t)$ 成正比, 所以电枢的受力 $F(t)$ 与电流 $I(t)$ 的平方成正比, 即

$$F(t) = ma(t) = k_F(x)I^2(t) \quad (2)$$

式中的 $k_F(x)$ 是一个与电枢所在位置 $x(t)$ 有关的比例系数。由于在通常情况下电枢的长度远小于轨道的长度, 所以 $k_F(x)$ 实际可以看成是一个与电枢所在位置 $x(t)$ 无关的常数, 通过分析其值为 $4 \times 10^{-7} [6]$, 于是式(2)简化为

$$F(t) = ma(t) = k_F I^2(t) \quad (3)$$

由此可得出电枢的速度 $v(t)$ 、运动距离 $x(t)$ 、轨道回路的电阻 $R(t)$ 、轨道回路的电感 $L(t)$ 分别为

$$v(t) = v_0 + \frac{k_F}{m} \int_0^t I^2(t) dt \quad (4)$$

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{k_F}{m} \int_0^t \left(\int_0^t I^2(t) dt \right) dt \quad (5)$$

$$R(t) = 2R_0 x_0 + 2R_0 \left[v_0 t + \frac{k_F}{m} \int_0^t \left(\int_0^t I^2(t) dt \right) dt \right] \quad (6)$$

$$L(t) = L_0 x_0 + 2L_0 \left[v_0 t + \frac{k_F}{m} \int_0^t \left(\int_0^t I^2(t) dt \right) dt \right] \quad (7)$$

式中 R_0 ——轨道单位长度电阻

L_0 ——轨道单位长度电感

x_0 ——电枢初始位置

m ——电枢质量

$U_C(t)$ ——电容器充电电压

v_0 ——弹射体初速度

对式(7)求导, 得

$$\frac{dL(t)}{dt} = L_0 \left(v_0 + \frac{k_F}{m} \int_0^t I^2(t) dt \right) \quad (8)$$

由于电枢在运动时切割磁力线所产生的反电动势 $E(t)$ 与磁感应强度 $B(t)$ 和速度 $v(t)$ 的乘积成正比, 而 $B(t)$ 又与 $I(t)$ 成正比, 因此有

$$E(t) = k_E(x)I(t) \left(v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t k_F(x)I^2(t) dt \right) \quad (9)$$

由于在通常情况下电枢的长度远远小于轨道的长度, 所以 $k_E(x)$ 也可看成是一个与电枢所在位置 $x(t)$ 无关的常数^[6], 其值也为 4×10^{-7} 。于是式(9)简化为

$$E(t) = k_E I(t) \left(v_0 + \frac{k_F}{m} \int_0^t I^2(t) dt \right) \quad (10)$$

由储能电容器上的电压与电荷之间的关系可得

$$U_C(t) = \frac{q_0}{C} - \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \quad (11)$$

式中 q_0 ——储能电容器的初始充电电荷

C ——储能电容的电容量

由式(1)和式(11)可得

$$q_0 = 2C \left[x_0 + v_0 t + \frac{k_F}{m} \int_0^t \left(\int_0^t I^2(t) dt \right) dt \right] \cdot \left(R_0 I(t) + L_0 \frac{dI(t)}{dt} \right) + C (K_E + L_0) I(t) \cdot \left(v_0 + \frac{k_F}{m} \int_0^t I^2(t) dt \right) + \int_0^t I(t) dt \quad (12)$$

由此可见,这是一个关于电流 $I(t)$ 的高阶微分、积分混合方程,以现有数学手段无法求得解析解。

3 轨道电磁炮的动态仿真方案

根据以上的理论推导结果,本文采用 Matlab 软件所提供的动态仿真工具 Simulink 来对电容储能型轨道电磁炮进行仿真分析^[7]。

为了能够进行仿真,首先必须建立回路电阻 $R(t)$ 、回路电感 $L(t)$ 、回路电感对时间的导数 $dL(t)/dt$ 以及电枢的反电动势 $E(t)$ 的仿真模型。

根据回路电阻的数学表达式,回路电阻 $R(t)$ 可由图 3 所示的模型进行动态仿真。对于回路电感 $L(t)$,根据其表达式,可以用图 4 的模型进行仿真,同时,图中增加了用于观察回路电流、被弹射体速度、加速度和距离的示波器。回路反电动势 $E(t)$,根据其表达式,可以用图 5 所示的模型进行仿真。

整个轨道电磁炮仿真方案可用图 6 表示。

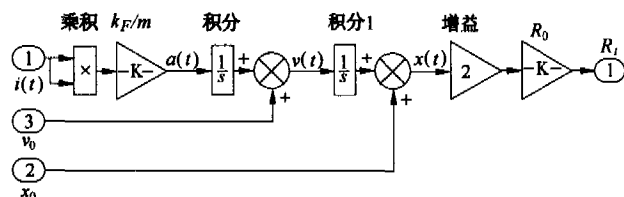


图 3 回路电阻的仿真模型

Fig.3 Simulation model for the loop resistance

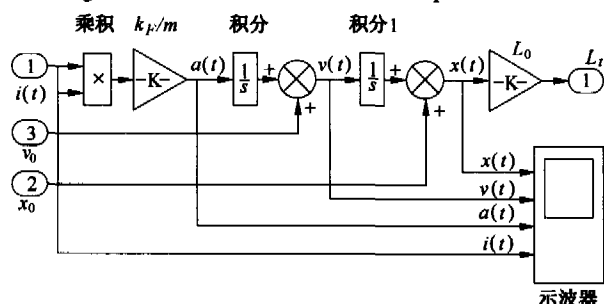


图 4 回路电感的仿真模型

Fig.4 Simulation model for the loop inductance

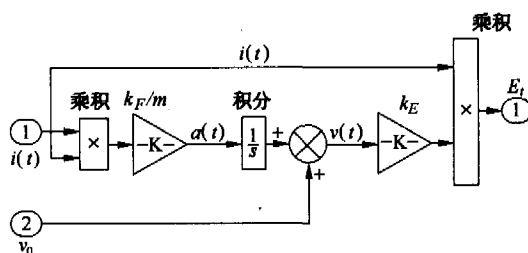


图 5 回路反电动势 $E(t)$ 的仿真模型

Fig.5 Simulation model for the loop anti-electromotive force $E(t)$

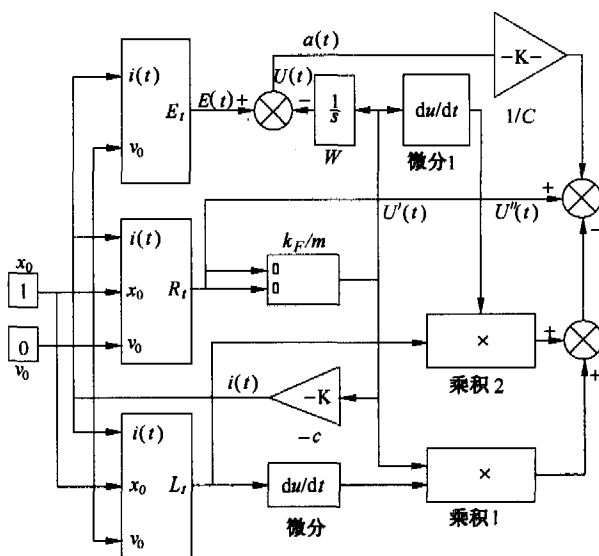


图 6 电容型轨道电磁炮仿真方案

Fig.6 Simulation project of capacitor driven rail gun

4 仿真结果

根据前述的仿真方案,针对轨道电磁炮合理轨道长度选择和大质量物体发射的可能性问题进行仿真分析。分析时选择轨道截面为 17.6cm^2 ,轨道宽度为 2m 。

4.1 轨道长度的合理选择

轨道电磁炮的轨道长度对发射有重要影响。如果轨道过短,虽然可以使整个轨道电磁炮的结构尺寸减小,但由于被弹射体在离开轨道时所获得的能量占总初始储能的比重下降,从而导致整个装置的效率降低。相反,如果轨道太长,虽然被弹射体在离开轨道时可以充分获得能量,使整个装置的效率增加,但过长的轨道将使整个装置的结构尺寸增加,而且,过长地选择轨道长度对提高整个装置效率的作用并不是很大。所以,对于轨道电磁炮而言,存在一个合理轨道长度的选择问题。

对电容驱动型轨道电磁炮的轨道长度进行选择,有两种方法:一是根据电能与动能之间的转化率;二是根据被弹射体离开轨道的实际速度与理想

速度（轨道长度不受限制时的速度）之比。前一种方法受轨道电磁炮自身效率的影响比较大，而自身效率又与很多因素有关，不便于仿真分析，所以本文选择第二种方法。因为它是把轨道长度不受限制的结果作为参照基准，以此基准去确定一个合适的轨道长度，使得在这个轨道长度下，电磁弹射的效果与参照基准下的弹射效果相接近。从概念上理解这种方法显然更符合合理轨道长度的含义。在模拟过程中，本文定义：合理轨道长度是指，在其他条件均相同的情况下，当采用此轨道长度进行发射时，被弹射体所获得的速度可以达到理想速度（轨道长度不受限制时的速度）的 95% 以上。

根据以上讨论，在不同电容量、充电电压情况下，对电容驱动型轨道电磁炮电磁过程进行仿真分析，求出了符合以上定义的轨道长度，其仿真分析结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 合理轨道长度、效率与电容容量的关系

Tab.1 The relationship of appropriate rail length and efficiency vs. capacitance

电容量/ μF	500	1000	2000	4000	8000	16000
轨道合理长度/m	7.5	8.7	9.9	11.2	12.4	13.4
效率 (%)	27.2	28.7	30.0	31.1	31.8	32.5

注：充电电压 $U=40\text{kV}$ ，弹射质量 $m=2\text{kg}$ 。

表 2 合理轨道长度、效率与充电电压关系

Tab.2 The relationship of appropriate rail length and efficiency vs. charged voltage

充电电压/kV	5	10	20	30	40	50
轨道合理长度/m	5.7	7.9	10.1	11.4	12.5	13.3
效率 (%)	23.9	27.8	30.4	31.4	32.0	32.5

注：电容 $C=10000\mu\text{F}$ ，弹射质量 $m=2\text{kg}$ 。

从以上各表可以看出：①在电容器充电电压和被弹射体质量固定不变的情况下，合理轨道长度随电容器电容量的增加而增长。但当电容达到一定值后，合理轨道长度随电容的增加很缓慢。②在充电电容器电容量和被弹射体质量固定不变情况下，合理轨道长度随充电电压的升高而增长。但当充电电压达到一定值后，合理轨道长度随充电电压的增加也很缓慢。总结以上规律，同时考虑轨道电磁炮的体积要求，决定了轨道电磁炮合适的轨道长度以不超过 15m 为好。

4.2 发射大质量物体的可能性

为探讨利用电磁炮发射大质量物体的可能性，对被弹射体在不同质量下可达到的速度及效率进行了仿真分析，结果如表 3 所示。

表 3 弹射体速度、发射效率与质量的关系

Tab.3 The relationship of the velocity and efficiency vs. mass

质量/kg	50	100	200	400	800	1600
极限速度/(m/s)	353.9	242.3	164.4	110.2	72.7	47.7
效率 (%)	25.0	23.5	21.6	19.3	16.9	14.6

注：充电电容 $C=10000\mu\text{F}$ ，充电电压 $U=50\text{kV}$ 。

从上面的仿真结果可明显地看到，随着被弹射体质量的增加，轨道电磁炮的效率下降很多。即使这样，仍可以将大质量物体发射到一定速度。这表明轨道电磁炮可以在军事上成为导弹的初级驱动装置或舰载飞机的弹射器。

5 结论

(1) 建立了利用 Simulink 对电容驱动型轨道电磁炮中的电磁过程进行仿真分析的方案。

(2) 通过仿真分析解决了有效轨道长度选择的问题，结果表明：对于实际可用的电压范围，电容驱动型轨道电磁炮的轨道长度取 15m 已经足够。

(3) 对利用轨道电磁炮进行大质量物体弹射的可能性进行了仿真分析，结果表明：可以利用电容驱动型轨道电磁炮实现对大质量物体的发射。

参考文献

- 1 庄国臣. 电磁发射及其应用. 电工技术杂志, 1997, 16 (6):19~22
- 2 王莹, 肖峰. 电炮原理. 北京: 国防工业出版社, 1992
- 3 Alv E. Brikeland's electromagnetic gun: a historical review. IEEE Transactions on Magnetic, 1989, 17 (2): 73~82
- 4 Michael R D, Douglass J S, Thomas C, et al. Electromagnetic aircraft launch system. IEEE Transactions on MAG, 1995, 31 (3): 528~533
- 5 Fair H D. The science and technology of electric launch. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 25~32
- 6 魏新劳, 张海燕, 陈庆国. 电容器储能型轨道电磁炮的电路理论分析. 电磁发射学术会议, 2004: 1~4
- 7 姚俊, 马松辉. Simulink 建模与仿真. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002

作者简介

陈庆国 男, 1970 年生, 博士, 教授, 从事高电压技术和电工理论新技术方面的研究。

王永红 男, 1972 年生, 硕士, 从事高电压技术和电工理论新技术方面的研究。