

电容器储能型轨道电磁炮的理论分析与动态仿真

陈庆国¹, 张海燕¹, 王永红¹, 魏新劳¹, 方崇志²

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 尚志市电业局, 黑龙江 尚志 150600)

摘要: 为分析电容器储能型轨道电磁炮发射过程中的影响因素, 介绍了轨道电磁炮的基本原理, 建立了电容储能型轨道电磁炮的电路模型, 根据此电路模型和电路、电磁场及电动力学原理建立了用于描述轨道电磁炮中电磁过程的微积分方程。同时, 建立了用于分析轨道电磁炮的动态仿真模型。仿真结果表明, 被发射体的速度随驱动电容容量的增加而增加, 随被发射体的质量增加而下降。

关键词: 电容储能型轨道电磁炮; 电路理论分析; 动态仿真

中图分类号: TM153.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-449X(2006)01-0023-04

The circuit theory analysis and dynamic simulation
for the capacitor driven railgunCHEN Qing-guo¹, ZHANG Hai-yan¹, WANG Yong-hong¹,
WEI Xin-lao¹, FANG Chong-zhi²(1. School of Electrical and Electronics Engineering, Harbin University of Science and Technology,
Harbin 150040, China; 2. Shangzhi Power Administration, Shangzhi 150600, China)

Abstract: In order to analyze the influencing factors during the launching of capacitor driven railgun, the basic principle of the railgun is introduced, and a circuit model for capacitor driven railgun is set up. The calculus equation used to describe the electromagnetic course in this type of railgun is established according to the principle of electric network, the electromagnetic field and the electromotive mechanics. And the simulation model is also established to simulate the dynamic process in the capacitor driven railgun. The simulation results show that the speed of emitted body will be improved with the increase of capacitance of driving capacitor, and will be decreased with the increase of the mass of emitted body.

Key words: capacitor driven railgun; circuit theory analysis; dynamic simulation

1 引言

随着科学技术的进步, 目前的发射装置已不能满足人们对发射能力的更高要求。在此情况下, 产生了新一代的超高速电磁推进技术, 它是一种能以

超高速发射物体的动能系统。电磁发射是将带有通电电枢的物体置于电磁发射装置的磁场内, 利用磁场对载流导体的作用力(洛伦兹力), 使携带电流的物体加速向前运动。被携带的物体可以是弹丸、炮弹、导弹、火箭、卫星、飞机等物体^[1]。由于电磁发

收稿日期: 2004-10-10; 修订日期: 2005-03-10

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E2004-27)

作者简介: 陈庆国(1970-), 男, 副教授, 从事高电压与绝缘技术、电工理论新技术方面的研究;

张海燕(1979-), 女, 硕士研究生, 从事电工理论新技术的研究;

王永红(1972-), 男, 讲师, 从事高电压与绝缘技术的研究;

魏新劳(1962-), 男, 博士生导师, 从事高电压与绝缘技术、电工理论新技术方面的研究。

射具有射程远、速度快、杀伤力大、射击无声响、无烟雾、无炮口火焰等特点,并具有良好的射击隐蔽性;另外,射程调整方便,不受推进剂原料的影响,电能可用任何初级能源来产生。其军事应用潜力非常大,在未来武器系统的发展计划中已成为越来越重要的部分^[2]。

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炮弹并以其动能毁伤目标的动能武器系统。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^[1,3]。

2 轨道电磁炮的基本原理

轨道电磁炮是由在2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^[4],如图1所示。当接通电源时,电流沿着一条导轨流经电枢,由另一条导轨流回,从而构成闭合回路。当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,这个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。

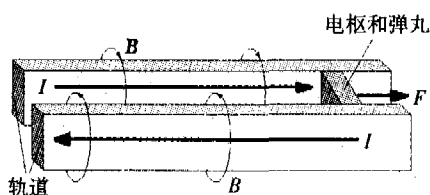


图1 轨道电磁炮原理图

Fig. 1 The basic geometry of railgun

当电枢运动时,在电枢中发生两个物理过程^[5]:一是当电枢中有电流流过时,电枢在磁场中受电磁力作用而使电枢和弹丸获得加速运动;二是当电枢由于运动而切割磁力线时,在电枢导体中将产生反电动势。此反电动势的作用是力图在电路中产生一个环路电流,此电流受磁场的作用而阻止电枢和弹丸的运动,这个过程是一个反向过程。反电动势的大小为 $E = Blv$ (B 为磁感应强度; l 为电枢长度; v 为电枢运动速度)

电磁发射是一个复杂的过程。由式 $F = BIl$ 可知,电流 I 的变化将引起力 F 的变化;而由全电流定律可知,当电流 I 变化时会引起 B 的变化, B 的变化相应的会影响力 F 的大小。如此相互联系、相互影响,再加上导轨的导磁性能、饱和状况、涡流、电源的脉冲频率、电枢的性能等一系列因素的影响,要精确

计算出 I 、 v 、 a 、 x 之间的相互关系,以及这些参数随时间的变化规律是很困难的,为此本文利用仿真分析手段来分析上述参数的动态特性及相互关系。

3 轨道电磁炮的电路理论分析

根据工作原理可得出电容器储能型轨道电磁炮的等效电路如图2所示。

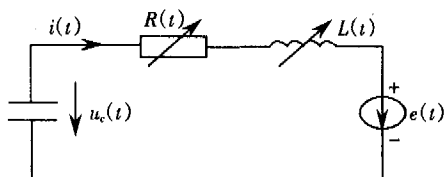


图2 储能电容供电的轨道炮等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of the capacitor driven railgun

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。

根据图2等效电路,可列出其回路方程为

$$u_c(t) - e(t) = R(t)i(t) + \frac{d(L(t)i(t))}{dt} \quad (1)$$

因为电枢的受力 $F(t)$ 与 $B(t)i(t)$ 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 $k_f(x)$ 是一个仅与电枢所在位置 $x(t)$ 有关的系数(有关这个问题在后文中讨论)。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 $L(t)$,可以表示为

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t k_f(x)i^2(t) dt \quad (3)$$

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{m} \int_0^t \left(\int_0^t k_f(x)i^2(t) dt \right) dt \quad (4)$$

$$R(t) = 2R_0 x_0 + 2R_0 \left(v_0 t + \frac{1}{m} \int_0^t \left(\int_0^t k_f(x)i^2(t) dt \right) dt \right) \quad (5)$$

$$L(t) = L_0 x_0 + L_0 \left(v_0 t + \frac{1}{m} \int_0^t \left(\int_0^t k_f(x)i^2(t) dt \right) dt \right) \quad (6)$$

对式(6)求导得

$$\frac{dL(t)}{dt} = L_0 \left(v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t k_f(x)i^2(t) dt \right) \quad (7)$$

式中: R_0 为轨道单位长度电阻; L_0 为轨道单位长度电感; x_0 为电枢初始位置; m 为电枢质量; c 为储能

电容的电容量; $u_c(t)$ 为电容器充电电压; v_0 为弹射体初速度。

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 $B(t)$ 与 $i(t)$ 成正比, 所以有:

$$e(t) = k_E(x)i(t) \left(v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t k_F(x)i^2(t)dt \right) \quad (8)$$

式中 $k_E(x)$ 也是仅与电枢位置 $x(t)$ 有关的系数。由储能电容器上的电压与电荷之间的关系可得

$$u_c(t) = \frac{q_0}{c} - \frac{1}{c} \int_0^t i(t)dt \quad (9)$$

其中的 q_0 是储能电容器的初始充电电荷。由式(1)~(9)可得

$$\begin{aligned} q_0 = & 2c \left(x_0 + v_0 t + \frac{1}{m} \int_0^t \left(\int_0^t k_F(x)i^2(t)dt \right) dt \right) \left(R_0 i(t) + L_0 \frac{di(t)}{dt} \right) + \\ & c(K_E(x) + L_0)i(t) \left(v_0 + \frac{1}{m} \int_0^t k_F(x)i^2(t)dt \right) + \int_0^t i(t)dt \end{aligned} \quad (10)$$

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, 以现有的数学知识要解出这个微积分方程的解析解是很困难的。即便是采用一般的龙格-库塔(Runge-Kutta)方法求解其数值解, 也是非常复杂的事情。

4 比例系数 $k_F(x)$ 和 $k_E(x)$ 的分析与简化

4.1 $k_F(x)$ 的分析与简化

图3为轨道电磁炮简图, 由电磁场基本知识可得出, 电枢所在处的平均磁感应强度可近似表示为

$$\bar{B} = \frac{\mu_0 I(t)}{\pi l} \frac{x(t)}{\sqrt{x^2(t) + (l/2)^2}} \quad (11)$$

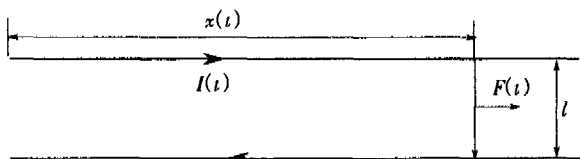


图3 轨道电磁炮简图

Fig. 3 The simplified schematic of railgun

于是, 电枢所受的总电磁力为

$$F(t) = \bar{B} l i(t) = \frac{\mu_0 I^2(t)}{\pi} \frac{x(t)}{\sqrt{x^2(t) + (l/2)^2}} \quad (12)$$

与式(2)相对比, 可以得出

$$k_F(x) = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{x(t)/l}{\sqrt{(x(t)/l)^2 + 1/4}} = \frac{\mu_0}{\pi} f\left(\frac{x(t)}{l}\right) \quad (13)$$

可见, $k_F(x)$ 的值取决于 $x(t)/l$ 的大小。图4给

出 $f(x(t)/l)$ 与 $x(t)/l$ 的关系曲线。由图4可知, 当 $x(t)/l = 4$ 时, $k_F(x)$ 值已经非常接近常数 μ_0/π 。

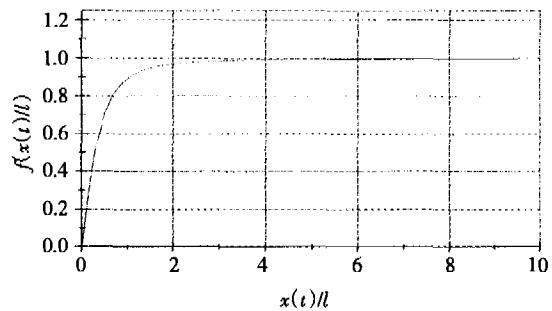


图4 $f(x(t)/l)$ 与 $x(t)/l$ 的关系曲线

Fig. 4 The relationship between $f(x(t)/l)$ and $x(t)/l$

一般情况下均有 $x(t) \gg l$, 上式可以简化为

$$k_F(x) = \frac{\mu_0}{\pi} = 4 \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (14)$$

4.2 $k_E(x)$ 的分析与简化

从电磁场基本知识可以知道, 电枢在运动时切割磁力线将会产生反电动势, 其大小可表示为

$$e(t) = \bar{B} l v(t) = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{x(t)v(t)i(t)}{\sqrt{x^2(t) + (l/2)^2}} \quad (15)$$

与式(8)相对比, 可以得出

$$k_E(x) = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{x(t)}{\sqrt{x^2(t) + (l/2)^2}} = \frac{\mu_0}{\pi} f\left(\frac{x(t)}{l}\right) \quad (16)$$

与 $k_F(x)$ 一样, 上式可以简化为

$$k_E(x) = \frac{\mu_0}{\pi} = 4 \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (17)$$

因此, 虽然理论上 $k_F(x)$ 和 $k_E(x)$ 均与 $x(t)$ 有关, 也与时间 t 有关, 但是在实际的轨道电磁炮中, 由于 $x(t) \gg l$, 所以这两个比例系数成为相等的常数, 其值为 $4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。这样一来, 轨道电磁炮的电路方程将成为

$q_0 =$

$$\begin{aligned} & 2c \left(x_0 + v_0 t + \frac{k_F}{m} \int_0^t \left(\int_0^t i^2(t)dt \right) dt \right) \left(R_0 i(t) + L_0 \frac{di(t)}{dt} \right) + \\ & c(K_E + L_0)i(t) \left(v_0 + \frac{k_F}{m} \int_0^t i^2(t)dt \right) + \int_0^t i(t)dt \end{aligned} \quad (18)$$

虽然这个方程比简化前简单了许多, 但是这仍然是一个关于电流 $i(t)$ 的高阶微分-积分混合方程, 可以用数值计算的方法来解决。

5 轨道电磁炮的动态仿真方案与结果

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^[6]。为了能够进行仿真, 根据以上所推导结果, 建立了回路电阻 $R(t)$ 、回路

电感 $L(t)$ 、电枢的反电势 $e(t)$ 的仿真模型及仿真的总体方案,分别如图5中的(a)、(b)、(c)、(d)。

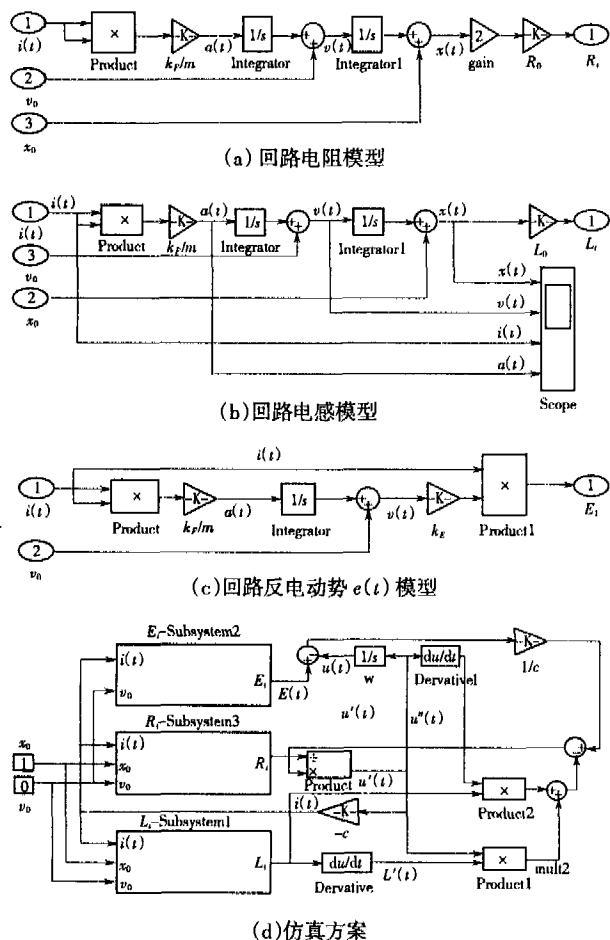


图5 电容型轨道电磁炮仿真模型与方案

Fig. 5 The simulation model and project of capacitor driven railgun

根据前述的仿真方案,针对轨道电磁炮发射速度与电容器容量及被发射体质量的关系进行了仿真,结果分别如图6中(a)、(b)所示。

6 结语

根据轨道电磁炮的工作原理建立了电容器储能型轨道电磁炮的电路模型,并根据此电路模型和基本的电路、电磁场和电动力学基本原理,建立了用于描

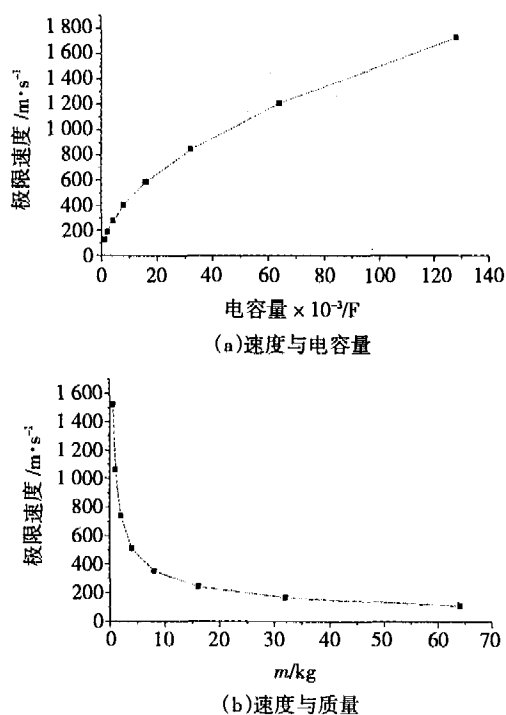


图6 轨道电磁炮速度与电容容量及被发射体质量的关系
Fig. 6 The relationship of the velocity vs capacitance and emitted mass

述轨道电磁炮中电磁过程的微积分方程。同时,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模型与方案。仿真结果表明:发射速度随驱动电容器电容量的增加而增加,但具有明显的饱和趋势;发射速度随被发射体质量的增加而降低,当质量大到一定程度时下降的幅度并不大。

参考文献:

- [1] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 于瀛,池建文,陈昕. 电磁飞机弹射系统[J]. 舰船科学技术, 2003, 25(4): 51-56.
- [3] MCNAB R. Early electric gun research[J]. *IEEE Transactions on Magnetic*, 1999, 35(1): 250-261.
- [4] ALV Egeland. Brikeland's electromagnetic gun: A historical review [J]. *IEEE Transactions on Magnetic*, 1989, 17(2): 73-82.
- [5] 刘廷贤. 发展中的电磁炮[J]. 大学物理, 1998, 17(4): 44-46.
- [6] 姚俊,马松辉. Simulink 建模与仿真(第一版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.