

# 电容式电磁炮电源电路的设计与仿真

杨玉东<sup>1,2</sup>, 王建新<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学光电院, 江苏 南京 210094; 2. 淮阴工学院电信系, 江苏 淮安 223001)

**摘要:** 通过对脉冲功率电源电路参数和电磁炮参数的分析,建立了两者之间的关系方程并对电源电路进行了设计。通过对典型实例的仿真,验证了电路的可行性。计算和仿真结果表明,采用多组脉冲功率电源驱动电磁炮,能够获得较为理想的弹丸出膛速度。

**关键词:** 电容储能; 功率电源; 电磁炮

中图分类号: TM86

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0435-03

## Design and Simulation of Power Source for Capacitive EM Gun

YANG Yu-dong<sup>1,2</sup>, WANG Jian-xin<sup>1</sup>

(1. NJUST Institute of Electronics and Light, Nanjing 210094, China;

2. Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China)

**Abstract:** Analyzing the circuit parameters of pulse power source and the parameters of EM gun, an equation concerning the two kinds of parameters was obtained and the source circuit was designed. The feasibility of the circuit was verified by a case simulation. The results demonstrate that perfect outlet speed of projectile can be obtained by using multi-group pulse power supply to drive the EM gun.

**Key words:** capacitor energy storage; power source; EM gun

### 0 引言

电磁轨道炮是利用电磁力发射高速弹丸并以其动能毁伤目标的动能武器系统,由两根平行连接着大电流源的固定轨道和一个与轨道保持良好电接触、能够沿着轨道轴线方向滑动的电枢组成。常用的电枢目前主要有3种形式,即固体电枢、等离子体电枢和复合电枢。3种电枢中,固体电枢电阻率低,热能消耗少,能量转换效率比等离子体电枢高。当接通电源后,电流沿着一条轨道流经电枢,再由另一条轨道流回,构成一个闭合回路。强大的电流流经两平行轨道时,在两轨道间产生强大的磁场,该磁场与流经电枢的电流相互作用,产生强大的电磁力,在该力的作用下电枢沿着 $x$ 方向加速运动推动前面的弹丸,使弹丸获得较高的出膛速度,电磁轨道炮结构见图1。常用的脉冲功率电源有电容储能式、电感储能式、旋转脉冲发电机等。其中,电容储能式功率脉冲电源由于价格低廉、系统容易维护、电路稳定、脉冲容易成形而被广泛采用。德国从1998年开始研究能量密度为 $2.4 \text{ MJ/m}^3$ 的高储能电容器,并在2002年研制了紧凑式高功率放电装置。韩国在2000年建立了 $300 \text{ kJ}$ 的脉冲电源模块,充电电压 $22 \text{ kV}$ ,电流

$150 \text{ kA}$ ,整个系统的总贮能 $2.4 \text{ MJ}^{[1-3]}$ 。

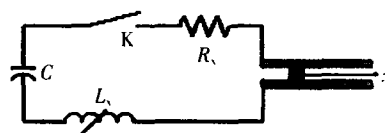


图1 电磁炮结构简图

文[1]对脉冲功率电源作了介绍,仅假设了负载为电阻。文[2,3]分析了轨道炮的模型,没有涉及轨道炮参数与电源的关系。笔者以电磁轨道炮为例,从理论上分析电磁炮轨道长度、弹丸出膛速度与所需脉冲电流的幅度、脉宽之间的关系,结合计算机仿真技术分析计算脉冲功率电源中电压、电容和电感等参数。

### 1 电容储能式脉冲功率电源电路

电容储能式功率脉冲电路包括高压充电电源 $U$ 、储能电容 $C$ 、阻尼二极管 $D_1$ 与 $D_2$ 、主开关 $R_2$ 、调波电感 $L$ 和负载 $R$ 几部分。电容作为储能器件,具有容量大、内部电感极小、耐压高的特性,储能达数千焦耳至数兆焦耳。开关采用真空触发开关,应具有极高的 $di/dt$ 性能。调波电感用来调整负载电流的幅度和脉宽。阻尼二极管的作用是防止反向电压对电容反向充电,避免损坏电容器。负载 $R$ 包括轨道

收稿日期:2007-03-05; 修回日期:2008-01-13

作者简介:杨玉东(1966-),男,博士生,研究方向为功率脉冲技术,信号与信息处理。

阻抗和电枢阻抗,见图2。

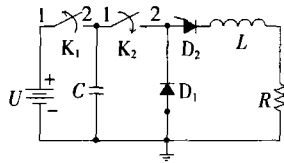


图2 单模块脉冲功率电源电路

假设开关是理想的,当开关闭合时,电容向负载放电,同时向电感充电,此阶段为电流上升阶段,二极管  $D_1$  反偏截止;当电流上升到最大值时,二极管  $D_1$  正偏导通,阻止电流对电容反向充电,此时电感中积蓄的能量经二极管  $D_1$ 、 $D_2$  继续向负载供应,此阶段为电流下降阶段。整个过程可用如下函数来表示<sup>[4,5]</sup>

$$\begin{cases} i(t) = I_0 \sin \omega t & 0 \leq t < t_0 \\ i(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $\omega = 1/\sqrt{LC}$   $t_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC}$ 。

由电路理论可知,当负载电阻很小时,有

$$I_0 \approx U\sqrt{C/L}; \quad T = \pi\sqrt{LC} \quad (2)$$

式(2)中,  $I_0$  为电流最大值;  $T$  为电流脉冲底宽。放电电流曲线见图3。  $t < t_0$  负载电流呈正弦变化;  $t \geq t_0$  负载电流呈指数变化。

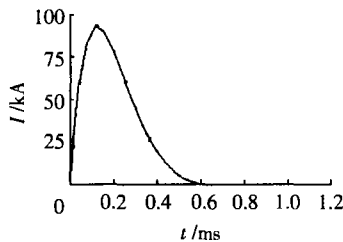


图3 ZC 电流曲线

目前用于电磁炮的工作电流模式有2种:①零退出电流模式(ZC),流过电枢的电流从零增大,然后减小,当电枢离开轨道时,电流自然减少为零,如图3所示的电流为ZC模式的一种,又称为单脉冲电流模式;②恒定电流模式(CC),电枢在轨运行期间,电流恒定为常数,直至电枢离开轨道,见图4。

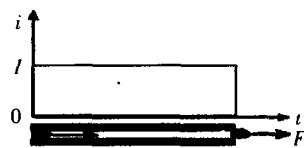


图4 CC 电流曲线

CC 模式作用于电磁轨道炮是比较理想的,在CC 模式作用下,弹丸受力均匀,理论分析比较方便。由于获得几十 kA 的恒定电流比较困难,实际的恒定电流通常由多个单脉冲电流合成近似得到,即多个单模块电源分成若干组串连和并联,并联的电源模块同时放电获得较大的电流幅度,串连的电源模

块依次顺序放电获得较宽的电流宽度。

## 2 电磁轨道炮参数分析

实际电磁炮中电枢运动过程要受到诸多因素的影响,如电枢与导轨臂的摩擦、空气的阻力等,笔者仅考虑电磁力对电枢的作用。

由电磁理论可知,电枢所在处的平均磁感应强度  $B$  为

$$B = \frac{\mu_0 i x}{\pi h \sqrt{x^2 + (h/2)^2}}$$

$x$  为电枢在轨道运动时距离炮尾的距离;  $h$  为导轨间距;  $\mu_0$  为磁导率 ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)。于是,电枢所受到的电磁力  $F$  为

$$F = Bih = \frac{\mu_0 i^2 x}{\pi h \sqrt{x^2 + (h/2)^2}} h = \frac{1}{2} \left( \frac{2\mu_0 x}{\pi \sqrt{x^2 + (h/2)^2}} \right) i^2$$

$$\text{令 } L' = \frac{2\mu_0 x}{\pi \sqrt{x^2 + (h/2)^2}} \quad (3)$$

$$\text{得: } F_L = \frac{1}{2} L' i^2 \quad (4)$$

当材料和系统结构确定后,则  $L'(x)$  近似为一固定值,反映了单位长度导轨的电感,即为电感增量。通过分析得到加速度、速度和运动位移的一组公式

$$\begin{cases} a = L'(x) i^2(t) / (2m) \\ V = V_0 + \int_0^t a dt = V_0 + \frac{L'(x)}{2m} \int_0^t i^2(t) dt \\ x = x_0 + \int_0^t V dt = x_0 + \frac{L'(x)}{2m} \int_0^t \int_0^t i^2(t) dt dt \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,  $V_0$  为电枢的初速度,  $x_0$  为电枢的初始位置,  $m$  为电枢质量和弹丸质量。由式(5)可以看出,当轨道结构和尺寸确定后,流过轨道和电枢的电流的波形、脉宽决定了弹丸运动的加速度和弹丸的出膛速度。下面讨论CC 模式下,电流的幅度、脉宽与弹丸的出膛速度的关系<sup>[6-8]</sup>。

## 3 恒定电流对轨道炮参数的影响

假设加载到电枢的电流为幅值  $I_p(t)$  的恒定电流,则由式(5)可简化得到一组脉冲电流宽度、电流幅度与弹丸速度、轨道长度、电枢和弹丸质量之间的近似方程

$$\begin{cases} a = L'_g(x) I_p^2(t) / (2m) \\ V = L'_g(x) I_p^2(t) t / (2m) \\ x = L'_g(x) I_p^2(t) t^2 / (4m) \end{cases} \quad (6)$$

整理式(6)得

$$\begin{cases} t = 2mV / [L'_g(x) I_p^2(t)] \\ x = mV^2 / [L'_g(x) I_p^2(t)] \end{cases} \quad (7)$$

对于设定的弹丸出膛速度、电枢和弹丸质量及轨道长度,由式(7)可计算出所需电流的宽度(即电枢在轨道上的运行时间  $t$ )和所需电流的幅度  $I_p$ 。

考虑轨道和电枢的电阻,忽略电枢与轨道间的摩擦阻力和空气阻力,假设电流为恒定的,则根据能量守恒定理,有下列关系成立

$$\frac{1}{2}CU_0^2 = \frac{1}{2}LI_p^2 + \frac{1}{2}mV^2 + I_p^2Rt \quad (8)$$

等式左边为电容储能,右式为电感储能、电枢(含弹丸)动能和电阻耗能。

结合式(7),得到如下关系式

$$CU_0^2 - LI_p^2(t) = \frac{4mVR}{L'_g(x)} + mV^2 \quad (9)$$

式(9)反映了电源参数  $C$ 、 $L$ 、 $R$ 、 $U_0$  与弹丸出膛速度  $V$  之间的关系。

#### 4 仿真实例

设轨道选用铜金属材料,长度为 2 m、宽度为 14 mm、间距 14 mm、厚度为 2 mm,固体电枢质量  $m_a=2$  g,弹丸采用铝合金材料,尺寸为 14 mm×14 mm×28 mm,质量  $m_p=20$  g,电枢与弹丸的质量比  $\zeta=0.1$ 。轨道电感梯度  $L'_g(x)=0.5 \mu\text{H}/\text{m}$ 。预定弹丸出膛速度为  $V_m=2$  km/s,轨道及电枢电阻  $R$  约为  $3 \times 10^{-4} \Omega$ 。

由式(7)求出:平顶电流幅度为  $I_p=282$  kA,平顶电流的持续时间为  $t=2$  ms。考虑到轨道的摩擦和空气阻力等因素,实际电流应大于 282 kA。

由式(9)和轨道炮轨道材料参数,取充电电压  $U_0=12$  kV,调波电感为  $83 \mu\text{H}$ ,得: $C=47$  mF。

由于实验室目前没有如此大容量的电容,故选择电容 4.7 mF/20 kA 10 只。

电路设计采用 10 个单模块电源并联放电,单模块中电容量为 4.7 mF,调波电感为  $8.3 \mu\text{H}$ 。10 只电容总容量为 47 mF。电路结构见图 5。电路的每个模块中与电容并联的二极管防止电容反充电,串连的二极管保证单向电流;T 为 1:1 的电流脉冲变压器,起到隔离电源和轨道负载以及阻抗变换的作用。电路中开关控制放电时间间隔分别为: $\tau_1=0$  ms; $\tau_2=0.28$  ms; $\tau_3=0.5$  ms; $\tau_4=0.7$  ms; $\tau_5=0.9$  ms; $\tau_6=1.1$  ms; $\tau_7=1.3$  ms; $\tau_8=1.5$  ms; $\tau_9=1.7$  ms; $\tau_{10}=1.9$  ms,则可得到近似的恒定电流。总的合成电流幅度达到 285 kA,整个电流波形底宽为 3 ms,其中恒定脉宽长度约 2 ms。电流仿真结果见图 6。

#### 5 结语

电容储能式功率脉冲电源与其他电流发生装

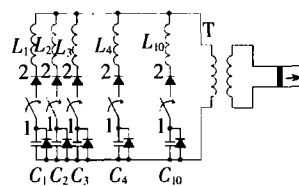


图5 多模块电路结构图

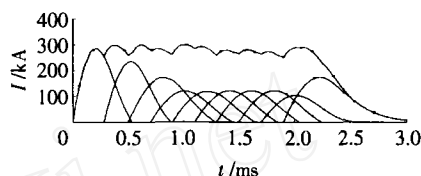


图6 放电电流合成曲线

置相比,系统简便,电路设计相对容易,且能够获得较大幅度的脉冲电流,目前已成为研究和试验电磁轨道炮电源的首选。建立电磁炮电路的模型,从理论上分析弹丸的速度和所需的电流幅度和脉宽的关系,是选定元器件和材料的必要环节。计算和仿真结果表明,采用若干个现有参数的元器件构成电容储能式电源组,作为电磁炮的能源供应、获得理想的弹丸出膛速度是可行的。当然,此结果是在忽略许多因素情况下得到的,如电枢和轨道的热损耗、电枢运动产生的反向电动势、电枢运动中与轨道间的摩擦力等等<sup>[6-8]</sup>。这些因素都要消耗能量,考虑到这些因素,实际电路中需根据试验结果适当调整电路的一些参数,如适当增大电容量、增大充电电压、调整触发时间以增大合成电流和增加脉宽长度。

#### 参考文献:

- [1] 陈国呈,译. 大电流能量技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 杨世荣, 王莹. 电磁发射器的原理与应用[J]. 物理学与高新技术, 2003(4), 254-255.
- [3] DETHLFSEN R. Pulse Power Applications of Silicon Diodes in EML Capacitive Pulsers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 934-938.
- [4] SLLAN FELICIANO. The Design and Optimization of a Power Supply for a One-meter Electromagnetic Railgun [D]. California: Naval Postgraduate School Monterey, 2001.
- [5] 陈庆国, 王永红. 电容驱动型轨道炮电磁过程的计算机仿真[J]. 电工技术学报, 2006, 4(4): 69.
- [6] 李强, 范长增. 电磁轨道炮导轨和金属弹丸中的焦耳热分析[J]. 弹道学报, 2006, 12(4): 39-40.
- [7] 孟绍良, 栗保明. 用于电热化学发射实验的脉冲电源系统[J]. 弹道学报, 2004, 3(16): 86.
- [8] WARNOCK D S. The Design and Optimization of a 600 kJ Railgunpower Supply[D]. California: Naval Postgraduate School Monterey, 2003.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!