

【武器装备】

一种电磁手枪的基本原理及性能分析^{*}

刘育刚,张波

(华南理工大学 电力学院,广州 510640)

摘要:介绍了线圈式电磁手枪的基本工作原理,从驱动线圈匝数、弹丸壁厚、电容器电容值、电容器充电电压等方面分析了其对弹丸电磁力、出口速度及能量利用率等方面的影响。利用电磁场有限元分析软件 Maxwell2D 进行建模仿真,借助 Matlab 强大的计算功能,分析电磁手枪各参数对弹丸的影响。

关键词:电磁手枪;有限元;Maxwell

中图分类号:TJ21

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)05-0008-03

电磁发射是一种利用电磁能量推进物体的发射技术,该项技术在20世纪初由挪威科学家 K. Birkeland^[1]首次提出。随着对电磁发射技术研究的不断深入,各种电磁武器应运而生,比如激光炮、电磁炮以及一些大功率的电磁干扰武器等,其中电磁炮在发达国家中研究比较广泛,且取得了一些较为引人注目的成就,尤其是导轨炮技术已经接近实战需求。目前,国内外电磁发射研究的重点是发射导弹及飞机推进等,对一些轻型武器的研究比较少^[2-6]。电磁手枪作为一种新型武器具有很强的实用性,它与普通手枪相比具有发射效率高、能源简易、无声、无污染、可控性好等明显优点。但由于电磁发射器体积大、充电电路复杂等,使得电磁手枪的推广和应用受到限制,对其性能的研究也比较缺乏。为此,本文中以线圈式电磁手枪为例,首先对电磁手枪的基本原理进行了介绍,然后利用电磁场有限元分析软件 Maxwell2D 进行建模仿真,借助 Matlab 强大的计算功能,分析电磁手枪各参数对弹丸的影响。

1 基本原理

某电磁手枪的外型如图1所示。它用纯铁做弹丸,用铜线绕制成驱动线圈,用电容做电源,同时配备高能稳压电源为电容器充电。

由于线圈型电磁发射器实质上是一个磁阻型电磁发射系统,通过大功率电容放电的方式产生驱动电流,形成磁场,加速弹丸前进^[7]。因此,电磁手枪的内部系统可简单看作由脉冲电源的充电回路和放电回路构成^[8]。



图1 高斯 GP-219 电磁无声手枪

图2给出了单级线圈型电磁手枪的基本组成框图。图中,稳压源、充电电路和高压大功率储能电容器共同组成充电回路,而放电回路包括高压大功率储能电容器、开关、驱动线圈、弹丸以及将他们联系在一起的传输线^[9]。

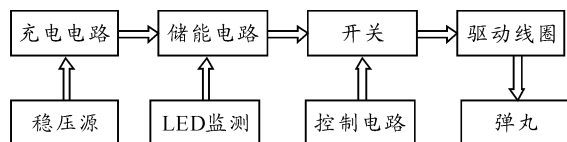


图2 单级线圈型电磁手枪的基本原理框图

另一方面,电磁手枪可等效为一典型的并联 RLC 电路,电源为一个大功率电容 C,电容 C 在触发开关的控制下向驱动线圈放电,由一稳压电源通过充电电路给电容器充电。

* 收稿日期:2010-02-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50937001);国家自然科学基金自主项目(50877028,50977033);广东省自然科学基金重点项目(8251064101000014);国家863高技术基金项目(2007AA05Z299);国家科技支撑计划项目(2008BAF34B09);粤港关键领域重点突破项目(2009205109);广东省教育部产学研结合项目(2009B090300363)

作者简介:刘育刚(1980—),男,硕士研究生,主要从事脉冲电源技术方面的研究。

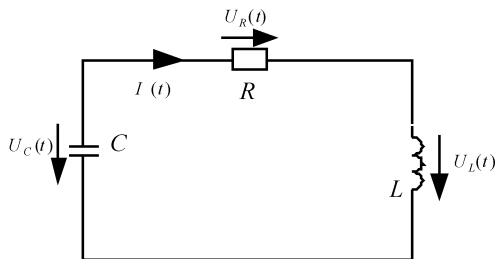


图3 单级线圈型电磁手枪的等效电路

结合线圈型电磁炮的有关研究^[10],得到单级线圈型电磁手枪的电路微分方程

$$cL(x) \frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + c(R + \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt}) \cdot \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t) = 0 \quad (1)$$

式中: C 为电容器的电容值; $U_c(t)$ 为电容器的瞬态电压; R 为回路等效电阻; $L(x)$ 为回路等效电感。

对于一个确定的对象,式(1)中电容 C 和回路电阻 R 可以认为是固定不变的常数,因而只要知道系统的电感和电感梯度就能知道电容的瞬态电压。

由图3可以看出,电容的瞬态电压可用回路电流来表示

$$U_c(t) = -\frac{1}{c} \int_0^t I_c(t) dt + I_c(t)R \quad (2)$$

在运动学方面^[11-12],弹丸的加速力主要是由系统的电磁加速力和弹丸与枪管之间的滑动摩擦及空气阻力引起。由于子弹与枪管之间没有直接接触,可以忽略摩擦力的影响,同时子弹的截面积和速度都不大,空气阻力也可以忽略,因此弹丸加速力主要来自系统的电磁力。对于磁阻型弹丸而言,在忽略磁漏的情况下,电磁力可近似表示为

$$F = ma(t) = \frac{dW_m(x)}{dx} \approx \frac{1}{2} \chi_m \mu_0 (NI_c(t))^2 A \quad (3)$$

式中: m 为弹丸质量; $a(t)$ 为弹丸瞬时加速度; $W(x)$ 为系统在弹丸不同位置时的能量; μ_0 为真空磁导率; $\chi_m = \frac{\mu}{\mu_0} - 1$ 为铁磁物质的磁化率; N 为驱动线圈匝数; $I_c(t)$ 为驱动线圈电流; A 为驱动线圈截面积。

结合式(1)、(2)、(3)可以建立电磁手枪的动态系统仿真模型。

2 模拟分析

2.1 有限元模型的建立

电子手枪的Maxwell 3D模型如图4所示。由图4可以看出,手枪枪管、子弹及驱动线圈均呈圆柱形,因而建立有

限元模型时可以用 $R-Z$ 坐标系进行二维建模。图5为电磁手枪的二维模型。

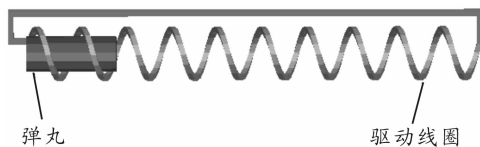


图4 电磁手枪三维仿真模型

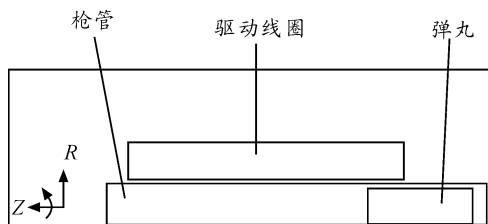


图5 电磁手枪二维模型

由于电磁手枪自身条件的限制,如长度不能太长,枪管不能太大,弹丸质量、外径也受到限制,因而对弹丸速度影响较大的主要是驱动线圈的匝数、弹丸的壁厚和电源电压等^[13]。

2.2 驱动线圈匝数对加速力的影响

首先考虑驱动线圈匝数对电磁力的影响,为便于分析,在这里暂不考虑线圈的过渡时间,根据式(3)知道系统的电磁力 $F \propto (NI)^2$,则系统的电压为

$$U = IR = IN\rho \frac{2\pi r}{A} \quad (4)$$

式中: ρ 为线圈的电导率; r 为线圈的绕制半径; A 为单根导线的截面积。

由式(4)可以知道 $F \propto U^2$ 。因而在理想情况下,改变驱动线圈的匝数不会对系统的电磁力产生较大影响。但实际上过渡时间还是存在的,在同等电压条件下,驱动线圈匝数越少,系统的过渡时间就越短,这样弹丸的出口速度就越大,发射效果越好。但是匝数越少,线圈需要承载的电流就越大,这就需要更粗的导线做驱动线圈,还会带来线圈发热、开关设计等一系列问题。因而在设计驱动线圈时要综合考虑这2方面的制约因素。根据式(3)可以将多股线圈并联的形式绕制驱动线圈,这样既增加了线圈匝数,同时由于是并联形式,系统的电阻减小,电流变大,对增加电磁力很有帮助。

2.3 弹丸壁厚对电磁力及加速度的影响

加速弹丸的电磁力主要是通过弹丸和驱动线圈磁场之间的相互耦合作用产生的,耦合作用越强电磁力就越大^[14]。因而在其他条件不变的情况下,减小弹丸的壁厚必然会减少通过弹丸的磁力线数目,耦合作用减小,电磁力就会减小。设定驱动线圈长125 mm,内径3 mm;弹丸长10 mm,外径2.5 mm,对不同壁厚的弹丸进行仿真,图6是弹丸进入驱动线圈5 mm时电磁力随弹丸壁厚的变化曲线。

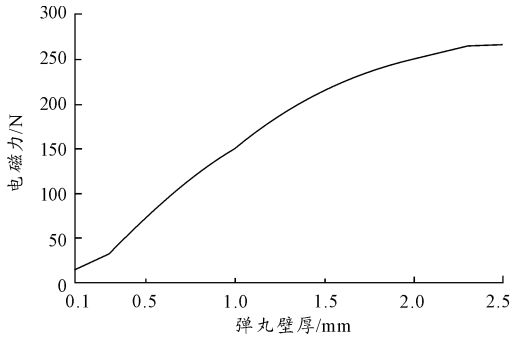


图6 电磁力随子弹壁厚的变化曲线

但对于子弹而言,弹丸壁厚增加,弹丸的质量也会增加。当弹丸长度不变时,弹丸的质量与其横截面积成正比。图7是弹丸加速度随子弹壁厚的变化曲线。

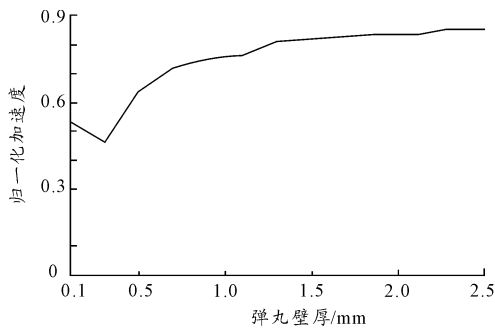


图7 弹丸加速度随子弹壁厚的变化曲线

2.4 电容器电容值对出口速度的影响

电容器的电容值直接影响电源所能提供的最大能量值和电流形式,因而直接影响弹丸的出口速度。选定电容器的充电电压为400 V,假定弹丸到达线圈中间时触发装置使电流迅速下降到零,改变电容器的电容值,得到弹丸出口速度随电容值的变化曲线,如图8所示。

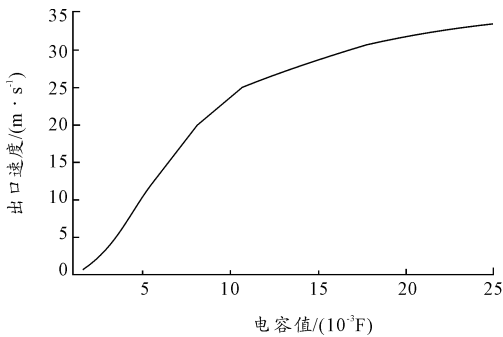


图8 弹丸出口速度随电容值变化的曲线

由图8可以看出:电容值越大,弹丸的出口速度越大,但系统的能量利用率并不一定越高。可以定义系统的能量利用率:

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\frac{1}{2}cU^2} \quad (5)$$

根据式(5)得到能量利用率随电容器电容值变化的曲线,见图9。

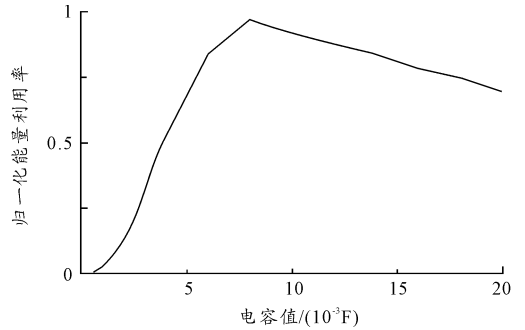


图9 能量利用率随电容值变化的曲线

由图9可见,增大电容虽然能够提高发射的速度,但这是以增加电源的初始能量为代价,发射的效率并不一定能提高,对于上述确定的参数,当电容值为7 000 μF 时,效率最高。

2.5 电容器充电电压对出口速度的影响

电容器的充电电压同样影响电源所能提供的最大能量和电流形式。其他参数不变,选定电容器的电容值为10 000 μF ,改变电容器的充电电压,得到弹丸出口速度随电容器充电电压变化的曲线,如图10所示。

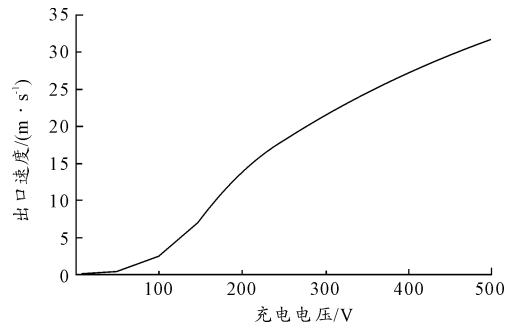


图10 出口速度随充电电压变化的曲线

同样根据式(5)得到系统能量利用率随充电电压变化的曲线,如图11所示。可见,在上述确定参数下,当电容器充电电压约为230 V时,能量利用率最高。

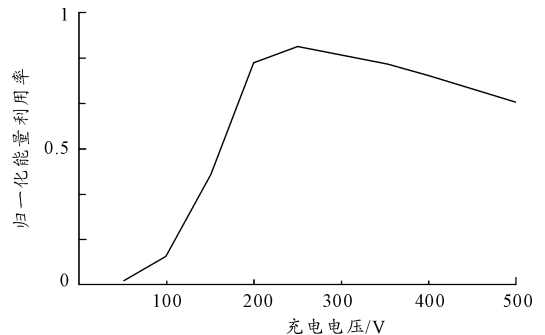


图11 能量利用率随充电电压变化的曲线