

①: 92(3)

1-7

## 电磁轨道炮的效率分析

TJ 399

陈秋华 周之奎 龚兴根 高顺受

**摘要** 本文利用我们发展的用于预估电磁轨道炮性能的 RGI 计算程序研究了电磁轨道炮发射过程中的各部分的能量分配。对于一定质量的弹丸,讨论了储能线圈的电感量与获得最大速度时的炮长的关系。给出了相同发射条件下,不同的弹丸质量时,回路各部分能量占总能量的比值,并讨论了提高系统效率的可能途径。

**关键词** 效率 电弧等离子体 能量分配

电磁轨道炮

## 一、引言

电磁轨道炮研究至今已取得了很大的进展。尤其在大质量弹丸的研究方面。美国 Texas 大学已将 2.4kg 的弹丸加速到 2.6km/s,使弹丸动能达到 8MJ。但是在小质量弹丸的超高速发射的研究方面却遇到了一些困难,迄今还处于 8km/s 左右的水平。在超高速发射中,一般使用等离子体电枢来推动弹丸。这是因为等离子体电枢能与轨道良好的接触。但是对于等离子体电枢来说,由于烧蚀,炮膛材料进入电枢中,引起电弧的增长和分离及二次击穿等因素限制了速度的提高。这是造成轨道炮效率低的内在因素。确定轨道炮运行过程中能量分布对于提高轨道炮系统转换效率及了解轨道炮的运行性能都有重要意义。本文的目的就是试图通过理论计算来分析轨道炮运行过程中能量的分布状况,从而对轨道炮的转换效率有个进一步的认识。当然,影响系统转换效率高低的因素很多,如能源的总能量、弹丸质量的大小、电路结构和参数等。能源的总能量大,同样的系统转换效率也会高。

## 二、轨道炮原理及控制方程

电磁轨道炮的基本原理为大电流从一根轨道经过电枢进入另一根轨道中,在这两根平行轨道间产生强磁场,这个强磁场与电枢中的电流相互作用产生洛仑磁力,它推动弹丸向前运动。图 1 为轨道炮系统的等效电路图。

设电容器组的充电电压为  $U_0$ ;通过  $R_1, L_1$  的电流为  $I_1$ ;流进轨道的电流为  $I_2$ ;弹丸速度为  $v$  及其位移为  $x$ 。同时我们假设等离子体是均匀的,其温度是常数,发射过程中无泄漏,也不发生二次击穿,电弧不分离、不增长,那么在一维情况下,可以得到下列方程:

$$\frac{d}{dt}[(m_p + m_a)v] = \frac{1}{2}L'I_2^2 - (2C_p m_a/k)v^2 \quad (1)$$

$$\frac{dm_a}{dt} = aI_2 U_a \quad (2)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

在短路开关  $S_2$  闭合之前:

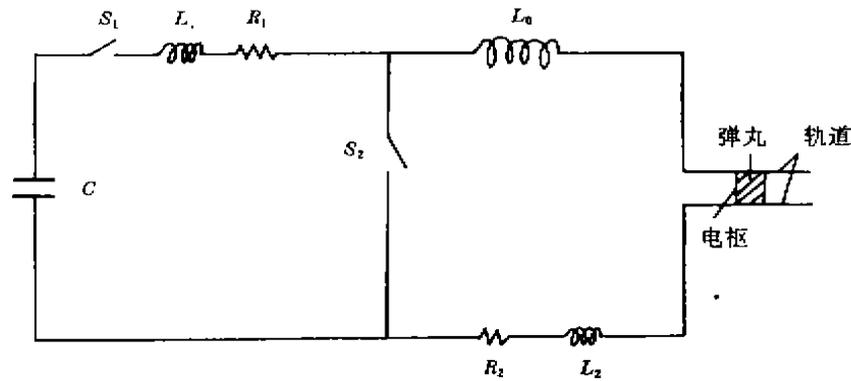


图1 电磁轨道炮等效电路图

$C$ ——电容器组;  $S_1$ ——主开关;  $S_2$ ——短路开关;  
 $R_1, R_2$ ——杂散电阻;  $L_1, L_2$ ——杂散电感;  $L_0$ ——储能电感

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{U_c - I_2(R_1 + R_2 + R'x) - U_m - L'vI_2}{L_0 + L_1 + L_2 + L'x} \quad (4)$$

其中  $R'$  是轨道的每单位长度的电阻。

$$R' = \frac{2}{\sigma h \delta(t)} \quad (5)$$

$\delta(t)$  为趋肤深度。

$$\delta(t) = \sqrt{\frac{\pi t}{\sigma \mu}} \quad (6)$$

$$I_1 = I_2 \quad (7)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{I_1}{C} \quad (8)$$

(5)式中的系数2是因为电流流过两根轨道。

在短路开关  $S_2$  闭合之后

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = U_c - I_1 R_1 \quad (9)$$

$$(L_0 + L_2 + L'x) \frac{dI_2}{dt} = -L'vI_2 - I_2(R_2 + R'x) - U_m \quad (10)$$

在以上各式中,  $m_p$  为弹丸质量,  $m_a$  为电枢质量,  $L'$  为轨道的电感梯度,  $C_f$  摩擦系数,  $h$  轨道间距,  $a$  为烧蚀系数,  $U_m$  为炮口电压,  $U_c(t)$  为电容器组上的电压,  $\sigma$  为轨道电导率,  $\mu$  为轨道磁导率,  $C$  为电容器组的电容量。

轨道炮运行过程中的能量分布

①线路的欧姆损失

$$E_{R1}(t) = \int_0^t I_1^2 R_1 dt \quad (11)$$

$$E_{R2}(t) = \int_0^t I_2^2 R_2 dt \quad (12)$$

②轨道和电枢的欧姆损失

$$E_{R'}(t) = \int_0^t (I_2^2 R' x + I_2 U_m) dt \quad (13)$$

③杂散电感及储能线圈中的能量

$$E_{L1}(t) = \frac{1}{2} L_1 I_1^2(t) \quad (14)$$

$$E_{L2}(t) = \frac{1}{2} L_2 I_2^2(t) \quad (15)$$

$$E_{L0}(t) = \frac{1}{2} L_0 I_2^2(t) \quad (16)$$

④电容器组中的能量

$$E_c = \frac{1}{2} C U_c^2(t) \quad (17)$$

⑤贮存在轨道中的能量:

$$E_L(t) = L' \int_0^t I_2 x \frac{\partial I_2}{\partial t} dt \quad (18)$$

⑥进入轨道炮的能量

$$E_{进}(t) = \int_0^t (I_2^2 R' x + I_2 U_m + I_2^2 L' v + L' I_2 x \frac{\partial I_2}{\partial t}) dt \quad (19)$$

⑦弹丸动能

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v^2 \quad (20)$$

在以上各式中,(11)、(12)、(14)、(15)、(16)、(17)和(19)式之和等于电容器组中的初始总能量:

$$E_{总} = \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (21)$$

### 三、系统效率与发射效率

电磁轨道炮的发射效率  $\eta_{发射}$  被定义为弹丸的动能与进入到轨道炮中的能量之比<sup>[1]</sup>:

$$\eta_{发射} = \frac{\frac{1}{2} m_p v^2}{E_{进}} \times 100\% \quad (22)$$

系统效率  $\eta_{系统}$  被定义为弹丸动能与能源总能量之比:

$$\eta_{系统} = \frac{\frac{1}{2} m_p v^2}{E_{总}} \times 100\% \quad (23)$$

发射效率和系统效率虽然概念不同,但都能体现轨道炮系统的能量转换效率,系统效率则更严格些。

#### 四、计算与实验的比较

在我们的计算程序 RGI 中,烧蚀系数  $\alpha$  取  $35\text{g/MJ}$ ,  $C_f=0.002$ , 不考虑空气阻力,  $L_c=2.6\mu\text{H}$ , 电容器组充电电压  $U_0=23\text{kV}$ 。

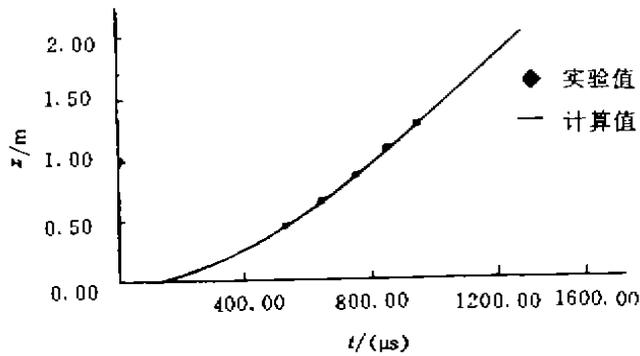


图2 弹丸位移与时间曲线

我们对口径为  $14\text{mm}$  的方膛炮进行了模拟计算, 并同实验号 92121 的实验结果作了比较, 如图 2 所示。测得的炮口电压为  $245\text{V}$ 。实验结果和数值计算结果符合得比较好, 说明参数的选择是合理的。92121 号实验采用了  $14\text{mm}$  的方膛炮, 弹丸质量为  $10.366\text{g}$ 。图 3 为这次试验的磁探针信号之一的波形图。从磁探针信号可以看出没有等离子体泄漏或分离, 所以该次实验与计算条件是基本相符的。

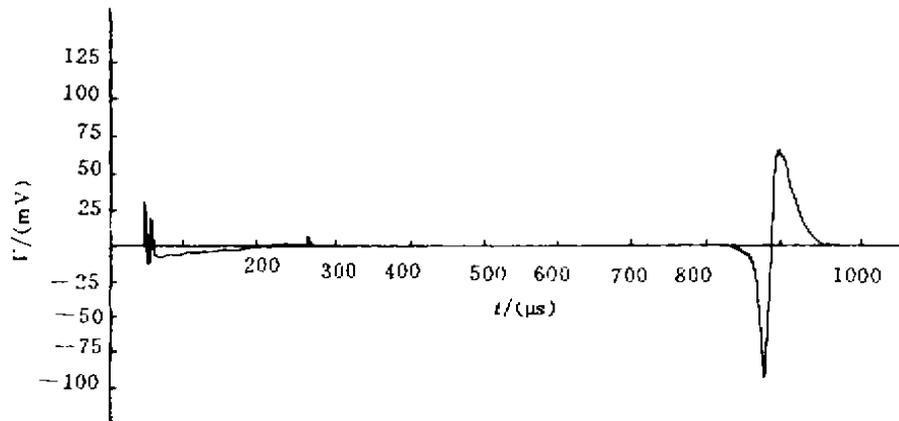


图3 92121号实验的磁探针信号

#### 五、储能线圈电感量与炮长的关系

如果能源的总能量一定, 那么对于一个储能线圈来说选取一个最佳的发射效率是个很重要的问题。当弹丸被加速到一定速度时, 由于烧蚀, 电枢质量增加以及摩擦阻力等因素, 弹丸将达到一定速度不再加速。在(1)式中, 当  $dv/dt=0$  时, 速度达到最大值。为了简单起见, 这里我们假定  $m_0$  为常数, 这样:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{L'k}{4C_1 m_0}} I_2 \quad (24)$$

由此可得最大炮长  $x_{\max}$  为:

$$x_{\max} = \int_0^{t^*} v dt \quad (25)$$

其中  $t^*$  为  $v=v_{\max}$  时的时间。

从(24)式中可以看出,  $v_{\max}$  与通过轨道的电流  $I_2$  有很大关系。电流  $I_2$  愈大,  $v_{\max}$  就愈高。但是我们知道  $v_{\max}$  的值愈高, 相应的弹丸不再加速时的电流就大, 这样剩余在储能线圈中的能量就大, 所以超高速发射时能量转换效率一般是较低的。想要提高系统效率可以通过加大弹丸质量, 从而降低弹丸不再加速时的电流, 减少剩余在储能线圈中的能量的办法来达到这一要求, 当然这时炮的长度也相应增加。图4给出了  $L \sim v_{\max}$  及  $x_{\max} \sim v_{\max}$  的曲线关系的计算结果。在计算中, 我们取质量为 1g 的轻弹丸, 除  $L$  变化外, 其余参数均保持不变。

$$L = \begin{cases} L_0 + L_2 & (L_0 > 0, \quad L_2 = \text{const}) \\ L_2 & (L_0 = 0) \end{cases} \quad (26)$$

$L_2$  为杂散电感, 为了能够说明问题, 当储能线圈电感量为 0 时, 改变  $L_2$  的值进行计算。

弹丸的质量不同, 相应的取得最大速度的电感值也不同。图4仅给出了 1g 弹丸的情形。事实上, 由于轨道受最大电流的限制<sup>[2]</sup>以及轨道炮口径、炮体强度等因素的影响, 电感值不可能太小, 要视具体情况选合适值。

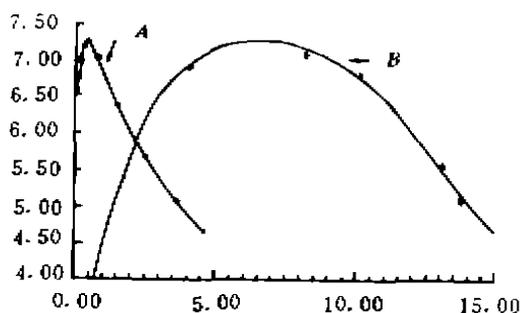


图4  $L \sim v_{\max}$  及  $x_{\max} \sim v_{\max}$  的曲线

A—— $L \sim v_{\max}$  曲线, 横坐标:  $L(\mu\text{H})$ ; 纵坐标:  $v_{\max}(\text{km/s})$

B—— $x_{\max} \sim v_{\max}$ , 横坐标:  $x_{\max}(\times 0.1\text{m})$ ; 纵坐标:  $v_{\max}(\text{km/s})$

## 六、能量分配的计算结果

表1给出了弹丸质量为 1g 和 10g 两种情况下的能量分配的计算结果。计算时  $L_0 =$

2.  $6\mu\text{H}$ ,  $L_1=0.5\mu\text{H}$ ,  $L_2=0.57\mu\text{H}$ ,  $R_1=3\text{m}\Omega$ ,  $R_2=1.22\text{m}\Omega$ ,  $L'=0.367\mu\text{H/m}$ ,  $C_f=0.002$ , 炮口电压  $U_m=245\text{V}$ , 充电电压  $U_0=23\text{kV}$ 。

电容器组上的总能量的很小一部分转换弹丸的功能,大部分消耗在线路杂散电阻、轨道电阻及电枢电阻上,以及剩余在线路的杂散电感,储能线圈及轨道电感中。 $E_{m1}$ 、 $E_c$  及  $E_{L1}$  之和为短路开关闭合后,剩余在由电容器组、杂散电阻及杂散电感组成的第一个回路中的能量。由表 1 可以看出这部分能量占总能量的 25% 以下,即总能量的 75% 强( $E_{m1}+E_{L2}+E_{L0}+E_{m2}$ )进入了由轨道炮、储能线圈组成的第二个回路中。从表 1 中还可以知道:①对于同一烧蚀系数,质量重的弹丸系统效率高,而剩余在储能线圈中的能量比低质量弹丸的少,这说明了重弹丸是以降低速度来换取高效率的。②烧蚀系数对于系统效率的影响是很大的。当  $\alpha$  由 35g/MJ 减少到 20g/MJ 时,对于 1g 重的弹丸系统效率由 2.01% 上升到 3.55%,所以烧蚀系数在轨道炮研究中是个很重要的参数。只有通过大量的有关电弧等离子体的研究来进一步理解它,从而改善电磁轨道炮的运行性能。

表 1

烧蚀系数 质 比 值	$\alpha=35\text{g/MJ}$		$\alpha=20\text{g/MJ}$	
	$m_p=1\text{g}$	$m_p=10\text{g}$	$m_p=1\text{g}$	$m_p=10\text{g}$
$(E_{m1}/E_m)/(\%)$	20.39	22.7	20.65	22.69
$(E_{m2}/E_m)/(\%)$	14.77	33.5	15.42	34.41
$(E_{L1}/E_m)/(\%)$	1.70	0.02	0.00	0.00
$(E_{L2}/E_m)/(\%)$	7.04	2.42	5.94	1.75
$(E_{L0}/E_m)/(\%)$	32.13	11.02	27.11	7.98
$(E_{m1}+E_{L2}+E_{L0}+E_{m2})/E_m/(\%)$	24.51	32.39	30.66	35.72
$(E_c/E_m)/(\%)$	0.55	0.00	1.99	0.00
$(E_s/E_m)/(\%)$	2.01	3.75	3.55	5.08
$\eta_{\text{系统}}/(\%)$	8.19	11.57	11.58	14.22
$\eta_{\text{弹丸}}/(\%)$	2.01	3.75	3.55	5.08

表中的能量百分比均指在  $v=v_{\text{max}}$  时的值。

## 七、讨 论

1. 在(11)~(20)式的能量表达式中,杂散电阻和杂散电感的能量损失除了尽量减少杂散电阻及杂散电感外,是无法消除掉的,关键是输入轨道炮的能量这一项。在表达式(19)中,如果  $I_2=\text{常数}$ ,那么

$$L'I_{2x} \frac{\partial I_2}{\partial t} = 0 \quad (25)$$

上式表示了没有能量贮存在轨道中,这样就有更多的能量转换到弹丸动能上。所以在这种情况下,系统能量转换效率是最高的。但是在一般情况下,都不是常电流的情形,所以

为了提高进入轨道炮的能量就必须减少炮口电压(在相同的烧蚀系数下),这就必须对电弧等离子体的行为有更多的了解。

2. 从表1中可以看出,烧蚀系数对系统效率的高低有很大的影响,所以采用弹丸以一定速度注入轨道炮来降低材料烧蚀的办法是有利于提高系统效率的。

3. 由于  $v_{max}$  正比于  $I_2$ , 这就决定了超高速发射的系统效率是比较低的。

针对上述讨论,为了提高系统效率,进一步了解电磁轨道炮的性能,我们认为:

- ①采用前级注入器将弹丸以一定速度注入轨道炮,以降低轨道的烧蚀;
- ②尽量减少线路杂散电阻及杂散电感;
- ③针对电弧等离子体动力学,进行单元技术研究;
- ④探讨新的实验线路。

#### 参 考 文 献

- [1] Karthaus W, Zeeuw W A, Kolkert W J. On the design and testing of solid armatures for rail accelerator applications, IEEE Trans Mag, 1991, 1: 308~313
- [2] Hawke R S et al. Electromagnetic Railgun Launchers; Space-propulsion Applications, UCRC-85007, 1981