

(14) Kerrisk, J. F., LA-9092-MS (1981).

(15) 高顺受等, 一种小型轨道炮的能源系统。本刊本期

## EXPERIMENTAL STUDIES ON THE TEST ELECTROMAGNETIC RAILGUN

Gong Xinggen, Sun Chengwei, Zhou Zhikui

Shi Jianxun, Cai Mingliang, Wu Xingmei, Li Zongyi

### Abstract

The principle, experimental arrangement and related results of the test electromagnetic railgun are described in this paper. A 50kJ capacitor bank is used as the primary power supply, and an inductor of  $2.5 \mu\text{H}$  as the secondary magnetic energy storage. In order to supply a sustained current to the railgun, four switches are inserted in the circuit for adjusting the variation of the current. The barrel is 30cm long and with a cross-sectional area of  $0.8 \times 0.6 \text{cm}^2$ . It is shown from two launching tests that a 0.34 gram polycarbonate projectile might be accelerated the speed over 1.5km/s.

## 一种小型轨道炮的能源系统

高顺受 陈素年 冷观松 韩俊玉

本文介绍了一个50kJ的能源系统,它是专为进行轨道炮原理性实验而研制的。初级能源是4mF的电容器组,它再通过储能电感给轨道炮输送能量。初步实验表明,这个能源系统设计基本合理,使用可靠。文中还初估了轨道炮的性能。

### 一、引言

电磁轨道炮是一种新型的弹丸发射装置。国外对电磁驱动问题早在二十年代就开始研究,直到七十年代澳大利亚材料研究实验室对电磁轨道炮取得突破性进展之后,才引起各国的重视。近年来美国、日本、澳大利亚等国开展了广泛深入的研究。电磁轨道炮种类很多,它依据应用目的,供能方式和作用原理而划分。我们选取进行研究的轨道炮是一种直流加速型电磁轨道炮。它的作用原理是,当电流流过轨道和电枢时,产生磁场,磁场与流过电枢电流相互作用,产生洛伦兹力,从而加速弹丸。弹丸可以加速到非常高的发射速度。用于状态方程研究的轨道炮要求把1-3g的弹丸加速到15km/s或更高些。我们所设计的能源是为加速0.5g聚碳酸酯弹丸达到1-3km/s的速度提供的。

## 二、轨道炮能源系统的选择

电磁轨道炮能源的选择是根据发射弹丸的质量、速度以及用途来确定的。我们研究的弹丸是0.5g的聚碳酸酯弹丸,希望达到的发射速度为1-3km/s。根据对国外技术资料的调研,电磁轨道炮的总效率约为1-3%,故欲达到3km/s的发射速度,相应的能源能量约需25-75kJ。根据以上分析,又考虑到我们现有的条件,决定设计能源的总能量为50kJ。轨道炮能源系统的初级能源的种类很多,主要有两种,单极发电机和电容器组。它的中间能源有螺线管和磁压缩器。我们选取电容器组作为初级能源,螺线管作为中间能源。这种中间储能式的电源结构可以克服电容器放电太快的缺点,调整电流波形,有利弹丸的加速。图1是它的原理图。

初级能源电容器组由28台MY5-140脉冲电容器组成。它的总容量为4067 $\mu$ F。在5kV的工作电压下,总能量达50kJ。用于给电容器组充电的是一台硅堆整流设备。28台电容器分为两组,每组14台,由一个闭合开关控制。当电容器充电之后,由高压脉冲产生器输出触发脉冲,经由脉冲变压器分为两个同极性的高压脉冲,同时触发两台闭合开关,使两组电容器同时放电。之所以选用两个开关同时放电的结构,目的在于减轻开关的负荷,同时也是防止电容器事故的安全措施。

当电流达到或接近电流的峰值时,断路开关及时切断电容器组和电感储能线圈的电路。我们选取爆炸丝开关作为断路开关。这个开关要维持电流上升时间达200 $\mu$ s左右。开关的切断作用是靠长柱形铜蒸汽的产生来完成的。开关汽化和爆炸的时刻,同金属丝的欧姆加热状态有关。随着电流的增加和金属丝电阻率的增加,爆炸丝吸收的功率越来越大。当其温度达到足够高时,表面急速汽化,产生爆炸。为了维持开关的断路(或高阻状态),必须填充高质量物质,依靠填充物的惯性阻止或降低金属铜蒸汽的膨胀。断路开关在爆炸时,还应引起足够大的电流变化,使电感储能线圈产生足够高的脉冲电压来启动轨道炮装置的触发间隙。在我们爆炸丝开关中,采用了四根铜金属丝,其总截面积为3.14 $\text{mm}^2$ ,长度为14cm。它周围的填充物质为一定粒度的石英砂。

储能电感线圈是由五组铝绞合线平行绕制。在直径为270mm的绝缘筒上制成。电感值为2.51 $\mu$ H。

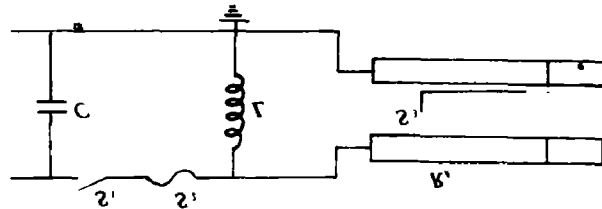


图1 中间电感储能式能源

$S_1$ ,闭合开关  $S_2$ ,断路开关  $S_3$ ,轨道炮触发间隙  
C 电容器组 L,中间储能电感 R,轨道炮

## 三、初级能源电路和储能电感对轨道炮装置放电电路的分析

初级能源,即中间电感储能式结构能源的第一回路,它的电路图示于图2。初级能源电路的电流微分方程可以写成:

$$L \frac{d^2 I_1}{dt^2} + (R_0 + R_w) \frac{dI_1}{dt} + \frac{I_1}{C} = 0 \quad (1)$$

其中  $R_w$  为爆炸丝开关的电阻, 其值是随时间而变化,  $R_0$  为放电回路的内电阻 (包括传输线、电感线圈、电容器组及开关),  $L$  为放电回路的总电感 (包括储能线圈、传输线及电容器、开关等)。在放电过程中,  $R_w$  值 ( $R_w = \rho \cdot (l/s)$ ,  $\rho$  为电阻率,  $l$  为金属丝的长度,  $s$  为金属丝的截面积) 中的电阻率  $\rho$  是借助比作用量 ( $g = \int j^2 dt$ ) 参数计算得到的。

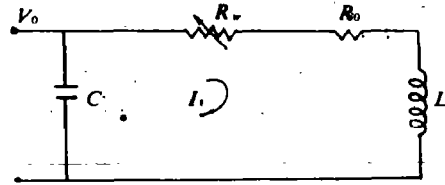


图2 初级能源等效电路

$C$  主电容  $R_w$  爆炸丝开关电阻

$R_0$  放电回路内电阻  $L$  放电回路总电感

通过对 (1) 式的数值计算, 选择我们所需要的金属爆炸丝开关的参数和尺寸, 取得最佳的能量转换效率。

储能电感对轨道炮装置的放电过程, 为第二回路放电过程。等效电路图示于图3。储能电感对轨道炮装置放电过程涉及的物理问题比较多, 我们仅结合实际情况给予初步分析。

轨道炮的电枢是等离子体电枢。一般说来, 等离子体电枢两端电压降  $V_A$  在运行过程中几乎是常数, 通常在 100V—250V 范围内。由于电流变化在轨道电感上产生的电压  $V_e$  可以表示为

$$V_e = \frac{d(L_r \cdot I_2)}{dt} = L_r \frac{dI_2}{dt} + I_2 \frac{dL_r}{dt} \quad (2)$$

故储能电感对轨道炮体的放电可用以下微分方程式来描述

$$I_2 R_{00} + L_{00} \frac{dI_2}{dt} + I_2 R_r + I_2 \frac{dL_r}{dt} + L_r \frac{dI_2}{dt} + V_A = 0 \quad (3)$$

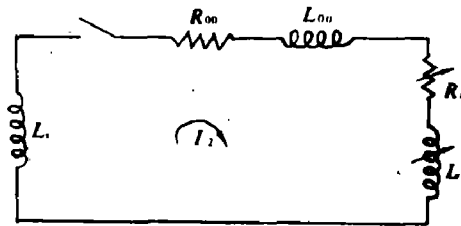


图3 第二回路的等效电路图

$R_{00}$  寄生电阻,  $L_{00}$  寄生电感 (可以不计),  $R_r$  轨道等效电阻,  $L_r$  轨道等效电感,  $L$  储能电感。

式中  $R_{00}$  为放电回路的寄生电阻,  $L_{00}$  为放电回路的寄生电感,  $R_r$  为轨道炮体的等效电阻,  $L_r$  为轨道炮的内电感。等效电阻  $R_r$  是电流密度和时间的函数, 它与轨道温度、电流扩散情况等有关。但是, 由于我们实验中的弹丸质量小, 速度也小, 没有明显的熔化、汽化、浸蚀等现象发生, 属于固体碰撞类型, 所以方程式 (3) 中  $R_r$  可以表示为

$$R_r = R_1 z \quad (4)$$

式中  $R_1$  是常数,  $z$  是弹丸的行程。

方程式 (3) 中的  $L_r$  可以表示为

$$L_r = L_1 z \quad (5)$$

式中  $L_1$  为单位长度轨道的内电感量

则有

$$\frac{dL_r}{dt} = L_1 \frac{dz}{dt} = L_1 v \quad (6)$$

又由于

$$\frac{dv}{dt} = \frac{L_1 I_2^2}{2m} \quad (7)$$

其中  $m$  为弹丸和电枢的质量。  $v$  是弹丸的速度。这样方程式 (3) 可以写成关于未知函数  $I_2$ ,

$z$ 和 $v$ 的常微分方程组,即

$$\begin{cases} \frac{dI_2}{dt}(L_{00} + L_1 z) + I_2(R_{00} + 2R_1 z + L_1 v) + V_A = 0 \\ \frac{dv}{dt} = \frac{L_1 I_2^2}{2m} \\ \frac{dz}{dt} = v \end{cases} \quad (8)$$

对方程组(8)进行数值计算,就可以对轨道炮的运行状态作出初步的估计。从图4、5、6的计算曲线中可知,弹丸是一个减加速过程。初始加速度最大,随着加速时间的增加,速度的增长率越来越小。因此,对任何一个初始电流来说,都存在着一个极限速度。轨道长度的设计必须合理。轨道选择过短,会浪费不少能量。从图6中可知,储能电感对轨道炮体的放电电流是线性衰减的波形。而弹丸加速度和电流的平方成比例,由此可知,加速度的衰减是非常快的,所以轨道长度的选择也不宜过长。从图5及图6中可以看出,电枢电压对速度曲线有明显的影响,等离子体电枢电压越低,用来加速弹丸的有效能量越大。这就是说等离子体电枢状态的选择是轨道炮设计中不可忽略的重要因素。

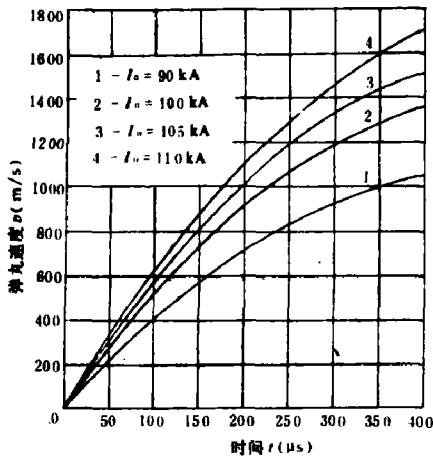


图4 对不同的初始放电电流的速度计算曲线 ( $V_A = 250V$ )

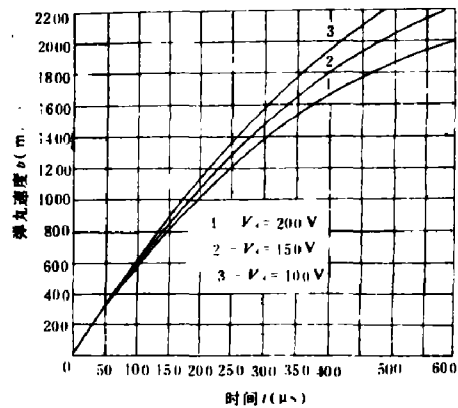


图5 在不同电枢电压下的速度计算曲线 (初始电流  $I_0 = 105 kA$ )

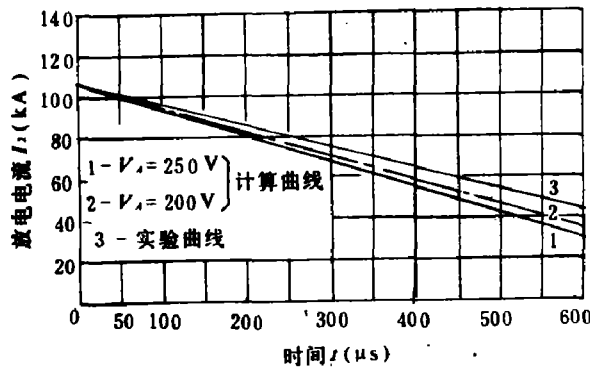


图6 不同的电枢电压下的放电电流计算曲线 (初始电流  $I_0 = 105 kA$ )

#### 四、能源参数和实验结果讨论

我们对初级能源作了实验,取得了第一放电回路的参数。首先对不含 $R_c$ (爆炸丝开关)的情况进行了实验。给电容器组充电到4.5kV,然后对储能电感线圈放电。这种情况属于欠阻尼振荡的状态,所以它的放电电流可以用下列公式表示

$$I = \frac{V_0}{\omega L} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sin \omega t \quad (9)$$

$$\omega = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)^{1/2}$$

由图7的放电电流波形,可以直接测出它的放电周期和邻近的两个电流峰值之比。由此算出放电回路的总电感为3.51 $\mu$ H,总电阻为2.74m $\Omega$ 。因为我们储能线圈的电感为2.51 $\mu$ H,

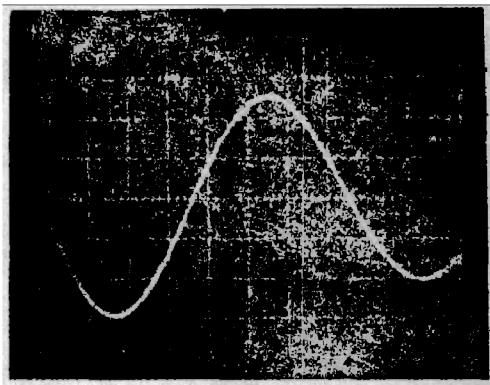


图7 不含爆炸丝开关的放电电流波形图  
扫速 0.1 ms/div  
幅值  $4.87 \times 10^4$  A/div

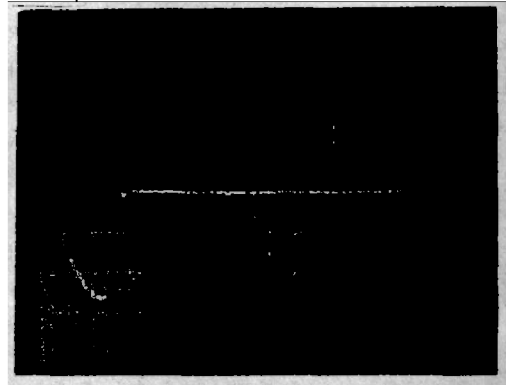


图8 含有爆炸丝开关的放电电流波形图  
扫速 0.1 ms/div  
幅值  $4.87 \times 10^4$  A/div

传输线的电感为0.8 $\mu$ H,所以我们的电容器组系统的电感为0.2 $\mu$ H。

图8给出了含爆炸丝开关的放电电流波形图,放电电流是在接近电流最大值时被截断的。电流峰值的下凹处就是开关金属丝的爆炸时刻。由图8的电流波形,我们可以得到初级能源的能量分配情况。在4.5kV的工作电压下,电容器组总的储能为41kJ,当爆炸丝开关切断电容器组放电回路时,回路总电感储能为20kJ,其中储能电感线圈的能量为14kJ,放电回路电阻消耗的能量约为2.5kJ,电容器组残余的能量约为1.5kJ,爆炸丝消耗的能量为17kJ。我们金属丝爆炸开关消耗的能量和Jamison K. A. 等<sup>[3]</sup>报导的情况相同,开关消耗总能量的40%。从开关爆炸消耗的能量来看,金属丝的爆炸过程是一个准爆炸过程。

根据方程式(3)我们对弹丸的情况作一个初步的分析。

我们轨道炮使用的弹丸质量为0.34g,测得的弹丸末速度约为1.5km/s<sup>[4]</sup>,它的相应动能为0.43kJ,仅占储能电感线圈的能量的3%,效率是很低的。从国外报道的资料可知,电感储能线圈对轨道炮的能量转换效率达到20%以上。我们轨道炮能量转换效率低的原因很多,从图6的实验曲线来分析,我们弹丸的运行时间小于350 $\mu$ s,有三分之一的能量未被利用,这表明我们选择的轨道长度偏短;另外一个原因是存在着等离子体泄漏现象。除了轨道炮炮体本身的结构设计之外,还和炮口触发间隙、放电回路寄生参量有关。

总之, 这个轨道炮能源系统仅是初步的, 各个另部件尚需进一步的改进和完善。从上述的分析可知, 能量的百分之四十被金属丝爆炸开关消耗掉了, 为了有效地提高供给轨道炮的能量, 必须对开关予以改进, 或者改变电路的形式。

## 五、结束语

我们这套能源的建立, 仅是轨道炮能源研究的开始。这套能源初步满足了实验轨道炮对能源的要求, 但它的工作可靠, 性能良好。

参加本项工作的还有丰树平、戴英敏、张秀华、张可川等。

对所资料室的大力支持, 经福谦, 孙承纬等的指导和帮助, 表示感谢!

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Hawke, R. S., Scudder, J. K., *UCRL-82667*, (1979).
- [ 2 ] Hawke, R. S., Scudder, J. K., *Magnetic Propulsion Railgun: Their Design and Capabilities Presented at the Second International Conference on Megagauss Field Generation and Related Topic*, (1979).
- [ 3 ] Jamison, K. A., et al., *ARBL-TR-0252, AD-A131153*.
- [ 4 ] 沈金华 (私人通信)。
- [ 5 ] Tucker, T. J., Toth R. P., *SAND-75-0041*.
- [ 6 ] Hawke, R. S., et al., *UCRL-88703* (1983).
- [ 7 ] 杨秀会, 对MK-2装置的快速开关几个问题的讨论 (内部资料)。
- [ 8 ] 龚兴根等, 原理性实验轨道炮的实验研究, 本刊本期。

## A PULSED POWER SYSTEM FOR TEST RAILGUN EXPERIMENT

Gao Shunshou Chen Sunian Leng Guansong Han Junyu

### Abstract

A 50kJ pulsed power system, which has been developed in order to perform railgun experiments, is described in this paper. A capacitor bank of 4mF is used as the primary power supply, and through a storage inductor as the intermediate stage fed its energy to the experimental test railgun device. The preliminary experimental results show that this system is rational and reliable. The performances of the railgun are also evaluated numerically herein.