

多级磁力线重接炮的控制与速度测量

周正阳, 廖敏夫, 赵 纯, 邹积岩

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116023)

摘要: 重接炮是利用磁力线重接而对弹丸产生推力的电磁发射形式。多级重接炮的关键就在于各级能量的有序释放。本文介绍了重接炮的工作原理, 设计了一套多级重接炮的发射控制方案和速度测量系统。以一个自制的三级重接炮系统为基础, 实现了其系统控制和速度测量, 获得了发射过程中的速度数据及其曲线。对本系统而言, 当储能电容器组充电电压为 3500V 时, 160g 弹丸的发射速度可达 24.991m/s。

关键词: 重接炮; 控制方案; 速度测量

中图分类号: TM83

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2007)02-0076-05

1 引言

重接炮, 也称重接式电磁发射装置, 是电磁发射的一种形式。作为电工新技术之一, 最早是在 1986 年由美国的考恩(M. Cowan)等科学家提出来的^[1]。它除了具有无接触、无烧蚀等一般线圈型电磁炮的优点外, 其径向磁力极小, 而轴向加速用的磁力极大, 因而它的欧姆损失相对小得多^[2]。目前研究的有两种结构形式: 一种是平板形状的弹丸, 弹丸在两个驱动线圈的间隙内被加速; 另一种是圆柱型的弹丸, 弹丸在轴对称的圆筒线圈内被加速, 很像同轴型的线圈式电磁发射器^[2]。

多级重接炮需要按顺序逐级将各电容器组的能量释放给发射线圈, 以实现弹丸的多级加速^[3]。为了使这个过程协调地进行, 各级的顺序控制成为关键。本文以自制的三级重接炮为基础, 设计并实现了一套多级重接炮的控制方案。弹丸在发射过程中的加速是一个变化的过程, 难以动态地记录运动的全过程。通过采集弹丸在发射过程中的不同位置, 最终获得了发射全过程的实时速度, 绘制成了速度曲线。实验结果表明, 这套控制系统能有效完成三级重接炮的发射控制, 得到弹丸在各级加速的速度。

2 重接炮工作原理

重接炮的组成主要包括带有间隙的发射线圈和垂直于线圈轴线的位于间隙中的弹丸, 它利用磁力线的重接来推动弹丸前进, 其实质是通过弹丸和发射线圈之间相互的电磁力来使弹丸获得加速^[1]。

从线圈磁力线的角度分析重接炮, 单个线圈就是一级磁力线重接炮。单个线圈分析如图 1 所示, 当弹丸前沿到达线圈前沿时, 外接脉冲电容向线圈充电; 线圈电流达到最大值, 同时弹丸的后沿与线圈的后沿重合时, 将外接的脉冲电源断开, 此时的电能以磁能方式储存在上下两个线圈的磁场中, 两线圈产生的同向磁力线被板状弹丸完全“截断”, 如图 1b 所示; 当弹丸飞行到尾部与线圈左侧拉开一个缝隙时, 如图 1c 和 d 状态, 被弹丸截断的磁力线在拉开的缝隙中重接, 重接使原来弯曲的磁力线有被拉直的趋势, 推动弹丸前进。这样原来储存在上下两个线圈中的磁能转变为弹丸的动能。本质上, 由于变化的磁场在弹丸中产生涡流, 涡流又与变化的磁场相互作用而产生电磁力加速弹丸^[4]。

图 2 是 ANSOFT 仿真得到的磁力线分布图, 显示了弹丸在线圈间隙中影响磁力线分布的情况。弹丸依靠电磁力悬浮在线圈间隙中, 上下两边和左右

收稿日期: 2006-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50507001)

作者简介: 周正阳(1981), 男, 浙江籍, 博士研究生, 主攻高电压新技术和脉冲功率技术的研究;

廖敏夫(1975), 男, 湖南籍, 副教授, 博士, 主要从事智能化高压电器及高电压新技术的研究;

邹积岩(1954), 男, 辽宁籍, 教授/博导, 博士, 主要从事智能化高压电器和高电压新技术的研究。

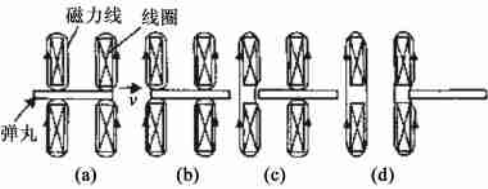


图 1 磁力线重接过程示意图

Fig. 1 Process of magnetic field line reconnection

两边受力均衡, 不需要额外的悬浮装置。只有弹丸的后端比前端受力大, 推动弹丸前进, 如图 2 弹丸向右射出。

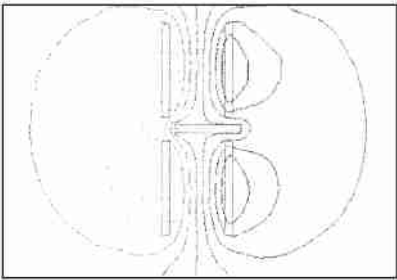


图 2 磁力线分布图

Fig. 2 Distribution of magnetic field line

从系统能量角度分析, 由能量转换守恒原理可以得到弹丸在线圈中的运动方程^[5]。

$$F(x, t) = m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} i^2(t) \frac{dL(x)}{dx} \quad (1)$$

其中, $F(x, t)$ 是弹丸的受力, 一个关于时间 t 和弹丸在线圈中的位置 x 的函数。 m 为弹丸质量, v 为弹丸速度。 $i(t)$ 为线圈中的电流, 一个关于时间的函数, 分析电容储能型重接炮主回路容易得到, 这是一个衰减振荡函数, 它与电路的电感、电容和回路电阻有关。 $dL(x)/dx$ 为弹丸在线圈中不同位置的耦合电感梯度。理论上, 通过计算回路电流和测量弹丸在不同位置的电感梯度, 可以计算弹丸在不同位置和时刻的加速度和速度。

3 多级重接炮的控制方案

多级重接炮是很多个单级重接炮组合而成, 如何使多个单级重接炮协调完成多级的加速, 成为其中的关键。以三级为例, 一台三级重接炮的整体布局如图 3 所示^[6], 三套相对独立的单级重接炮由一控制系统统一协调, 联合起来完成三级的发射。系统核心部件由三个线圈顺序排列而成, 弹丸依次通过线圈中的间隙而得到加速, 形式上类似于线圈炮的炮筒。

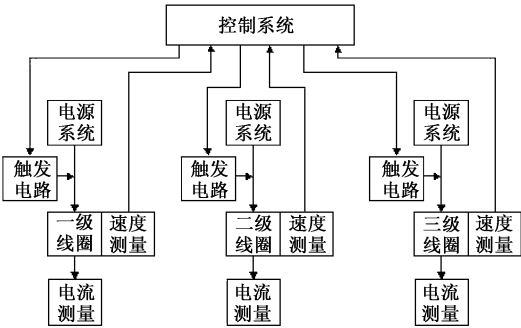


图 3 三级重接炮整体布局图

Fig. 3 Composition of three stage reconnection gun

围绕核心部件, 辅以电源系统、触发电路、电流测量、速度测量以及控制整套系统运行的控制系统。电源系统采用电容器组, 这也是重接炮最常用的电源方式, 给线圈提供大功率的脉冲能量。实验中采用了 10 个 150μF 的脉冲电容器为一组, 充电电压等级在 1500V 至 5000V 之间, 获得不同储能下的弹丸发射速度。触发系统采用高压击穿低压续流的触发电路, 通过触发真空触发间隙 (TVS) 来导通主回路, 触发延时控制在 40μs 之内, 符合实验要求。电流测量是记录放电过程中线圈电流的波形和大小, 也就是方程 (1) 中的 $i(t)$, 可以分析放电过程中的电流变化规律, 实验中采用了罗氏线圈来测量电流。

三级重接炮的控制方案和工作过程: 当三级电源系统的脉冲电容器组均充电完毕后, 控制系统向第一级重接炮的触发电路发启动信号, 第一级电容器组向第一级线圈放电, 弹丸从静止开始加速, 飞离第一级线圈的间隙; 弹丸进入第二级线圈的间隙后, 由安装在第二级线圈出口位置的第一个槽形光耦检测到, 并产生一个启动信号给第二级重接炮的触发电路, 第二级电容器组向第二级线圈放电, 弹丸得到进一步加速, 飞离第二级线圈的间隙; 弹丸进入第三级线圈的间隙后, 完成与第二级相似的自动控制过程, 直至弹丸得到第三次加速, 飞离第三级线圈的间隙, 获得三级重接炮的出口终速度。

为保证系统运行的稳定性和可靠性, 采用光纤通讯实现系统主回路和控制回路的高低电压隔离, 防止系统误触发, 导致重接炮能量的无序释放。

4 控制系统与速度测量

4.1 控制系统

控制系统负责调度整个系统的运行, 使各级发射依次顺序执行, 并且采集相关数据, 计算弹丸的实

时速度。本实验的控制系统采用 AT89S52 单片机 (MCU) 做主要控制单元, 采用 PC 机做上位机, VB 编程实现控制界面, 单片机与上位机之间采用 RS-232 串行通信方式实行控制信号和数据的传递。单片机程序和上位机程序的流程图分别如图 4 和图 5 所示。

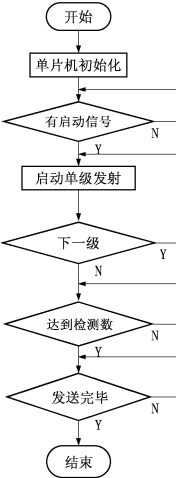


图 4 单片机程序

Fig. 4 Program of MCU

单片机程序中, 首先进行初始化, 设定定时器工作方式、中断方式、串行通信工作方式及波特率等; 然后等待来自上位机的启动命令, 接到命令后立即启动单片机的定时器并启动第一级发射; 弹丸得到加速后向前飞行, 每到达一个预定位置的槽形光耦, 就引起一次外部中断, 执行相应的中断处理程序, 在该中断处理程序中, 读取定时器的值并将其记录在单片机的 RAM 中, 此即发射体到达该位置的时刻, 同时再通过程序选择下一个槽形光耦, 以引起下一次中断; 根据中断次数来判断下一级是否到来; 当达到预定的位置检测数之后, 弹丸加速即已完成, 向上位机发送存储在单片机 RAM 中的数据, 发送完毕后程序结束。

上位机程序采用 VB 设计, 同样先进行初始化, 设定串行通信的方式及波特率, 并输入各槽形光耦之间的距离, 实验中设定的距离是 20mm; 当各级电容充电完成后, 向单片机发命令以启动第一级发射; 然后进入等待, 当发射体加速完成时, 接收单片机传送过来的时间数据; 对这些时间数据和事先输入的距离数据进行处理, 得到并输出计算结果, 程序结束。

图 6 是设计的控制界面, 一个独立的可执行文件, 便于在不同的计算机环境下运行。分时间、距离

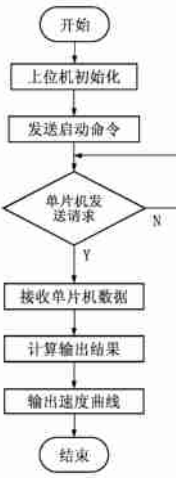


图 5 上位机程序

Fig. 5 Program of VB

和速度三个版面, 可以自由切换, 每个版面都有 3 组光耦分别对应重接炮的三级, 图中显示即为计算所得弹丸在各级的发射速度。

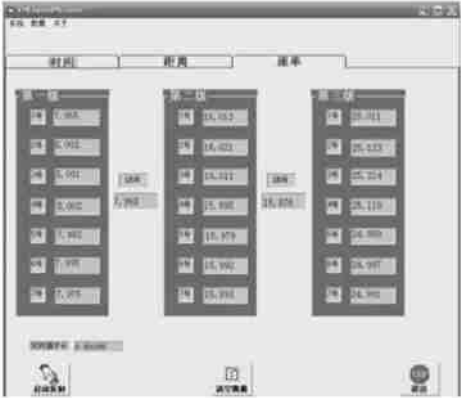


图 6 控制系统界面

Fig. 6 Panel of control system

4.2 速度测量

速度测量采用了 24 对 (8 对 1 组、共 3 组) 槽形光耦对弹丸进行实时位置检测, 利用单片机记录弹丸所到位置的时刻, 相邻两个位置之间的距离除以它们之间的时间差便得到了弹丸的发射速度。

图 7 以 1 组为例, 在线圈间隙出口, 排列了 8 对光耦, 光耦检测弹丸到达这些位置, 产生外部中断给单片机, 控制系统记录下这些时刻, 并根据这些时间和预定的距离计算出在整个加速过程中的速度变化。考虑到弹丸处于高速的情形, 本系统测速的极限取决于光耦的响应时间和单片机的时钟频率之间的配合。一般光耦产生信号的延迟时间为 3~5μs, 取 5μs 为例, 系统预先设定的光耦间距 20mm, 单片机采用 11.059MHz 的晶振, 定时步长为 1.085μs, 理论上速度极限为 $20 \times 10^{-3} / (5 \times 10^{-6}) = 4 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。由于单片机此时的时钟计数只在 4~5 之间, 如果计数出现一个误差就会对测速结果带来较大影响。进一步提高速度的测量值, 可以同时采用高速光耦和 DSP 处理器, 还可以加大光耦间距。线圈间隙中的弹丸是一长方形实心铝板, 重约 160g。采用铝板是因为它的密度小, 而且在强磁场中感应的涡流大, 有利于发射。

图 8 是根据所得速度数据绘制的速度趋势图, 显示了三级重接炮发射的整个动态过程, 纵轴代表弹丸发射速度, 横轴代表弹丸经过的不同位置, 横轴下标为三组光耦的编号, 相邻两组光耦之间 200mm 间距是线圈的一边。观察图 8 可知弹丸加速集中在

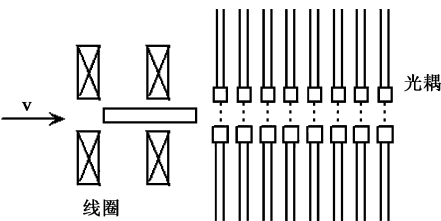


图 7 测速原理图

Fig. 7 Principle of velocity test

各组第一对光耦处, 因为脉冲电流瞬间完成, TEK2DS210 数字示波器测得这个电流的持续时间是 50μs, 乘上弹丸的即时速度, 可得弹丸加速距离在 1mm 左右, 这在线圈出口处前两对光耦的距离之内。弹丸在前两对光耦之间就已完成加速过程, 忽略运行过程中弹丸所受的摩擦阻力, 弹丸在余下的 7 对光耦间匀速运动。图 8 中水平线显示了弹丸在各级加速完成后的匀速速度。

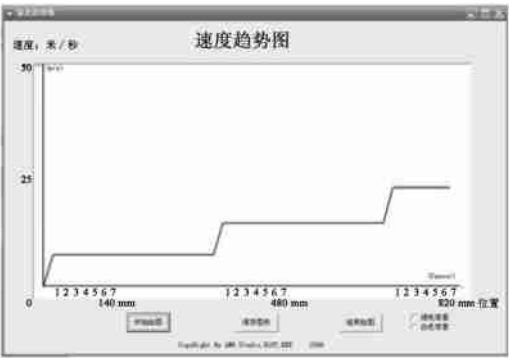


图 8 速度趋势图

Fig. 8 Trend of tested velocity

图 8 所示实验结果是在各组电容充电电压均为 3500V 时获得, 160g 的铝板弹丸获得了 24.991m/s 的最终发射速度。因为本实验中弹丸属水平发射, 所以弹丸在加速完成后呈自由落体运动。根据弹丸出口高度以及落地点与出口之间的水平距离, 可以计算其初速度, 计算结果证明了这种测量方法的正确性。

5 结论

设计并实现了一套多级重接炮的控制方案和速度测量系统。通过上位机 VB 设计和单片机程序设计, 成功控制三级重接炮的发射过程, 实时获得各级的发射速度, 并绘制速度趋势图。实验结果表明, 质量为 160g 的铝板在 3500V 的电容电压下, 能够被逐级加速到 24.991m/s 的最后发射速度。

参考文献 (References):

[1] M Cowan, E C Canre, B W Duggin, et al. The reconnection gun [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1986, 22(6): 1429-1434.

[2] 李立毅, 程树康, 刘宝廷 (Li Liyi, Chen Shukang, Liu Baoting). 直线电磁发射技术的发展现状及前景 (Status and foreground of development of technique of linear electromagnetic launch) [J]. 微电机 (Micromotors), 1999, 32(2): 26-30.

[3] 赵纯, 邹积岩, 廖敏夫, 等 (Zhao Chun, Zou Jiyan, Liao Minfu, et al.). 一种多级重接式电磁发射系统的触发电路 (A trigger circuit of multi-stage reconnection electromagnetic launch system) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(3): 77-80.

[4] 李小鹏, 李立毅, 程树康, 等 (Li Xiaopeng, Li Liyi, Chen Shukang, et al.). 重接式电磁发射技术的现状及应用前景 (Status and foreground of technique of reconnection electromagnetic launch) [J]. 微电机 (Micromotors), 2002, 35(4): 39-41.

[5] Cheng Shukang, Li Xiaopeng, Li Liyi, et al. Reconnection electromagnetic launcher and its application [A]. 38th IAS Annual Meeting [C]. UT, USA, 2003. 1672-1676.

[6] 赵纯, 李小鹏, 柏兴林, 等 (Zhao Chun, Li Xiaopeng, Bai Xinglin, et al.). 三级重接炮的控制系统设计 (Control system design of three stage reconnection gun) [A]. 中国电机工程学会高电压专委会 2004 年学术会议 (2004 Symposium of the Chinese electrical engineering masters professional committee of high voltage) [C]. 重庆 (Chongqing), 2004. 964-968.

Control and velocity measurement of multi-stage reconnection gun

ZHOU Zheng-yang, LIAO Min-fu, Zhao Chun, Zou Ji-yan

(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Reconnection gun is a type of electromagnetic launcher whose propulsive force is generated by the magnetic field line reconnection. The key point of multi-stage reconnection gun is the discharge of preserved energy in sequence at different stages. The principle of reconnection gun is introduced. A control project of multi-stage reconnection gun as well

as the velocity measurement system are presented on the basis of a fabricated three stage reconnection gun. The velocity data and its curve during the launch process are attained. A pill of 160 grams can be accelerated to 24.991m/s when the energy storage capacitor banks are charged to 3500V.

Key words: reconnection gun; control project; velocity measurement

(上接第 75 页, cont. from p. 75)

- Systems Eng. and Electronics, 2003, 14(4): 31-33.
- [2] 樊亚军, 石磊, 刘国治, 等 (Fan Yajun, Shi Lei, Liu Guozhi, et al.). Chopping peaking 开关形成高功率超宽带双极脉冲的实验研究 (Generation of high power ultra wide band bipolar pulse with chopping peaking switch) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2004, 16(4): 501-504.
- [3] Alex Pokryvailo, Yefim Yankelevich, M Shapira. A compact source of subgigawatt subnanosecond pulses [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2004, 32(5): 1909-1918.
- [4] Ó Loughlin J P, Copeland R P. Subnanosecond power conditioning technique using transmission line to transmission line charging [A]. The 20th IEEE Power Modulator Symposium [C]. 1992. 351-354.
- [5] 康强, 常安碧, 李名加, 等 (Kang Qiang, Chang Anbi, Li Mingjia, et al.). 带脉冲形成线的 1.0MV, 100Hz 紧凑型 Tesla 变压器的研制 (Development of a 1.0MV 100Hz compact tesla transformer with PFL) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2006, 18(3): 451-454.
- [6] 许建军, 常安碧, 夏世维, 等 (Xu Jianjun, Chang Anbi, Xia Shiwei, et al.). 新型高功率高重复频率脉冲电源研制 (Development of new type high power and high repetition rate pulse power supply) [J]. 高电压技术 (High Voltage Eng.), 2003, 29(7): 43-44.
- [7] Carl E Baum, Jane M Lehr. Tapered transmission line transformers for fast high voltage transients [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(5): 1712-1721.
- [8] 李军浩, 王晶, 王颂, 等 (Li Junhao, Wang Jing, Wang Song, et al.). 一种亚纳秒高压脉冲源的研制 (Development of subnanosecond high voltage pulsed source) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(1): 77-80.
- [9] 施耀, 王鑫, 杨建涛, 等 (Shi Yao, Wang Xin, Yang Jiantao, et al.). 脉冲等离子体反应器放电特性研究 (Investigation of pulse plasma reactor discharge characteristics) [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 59-62.

High power electromagnetic pulse source based on transmission line charging technology

XU Jianjun^{1,2}, LIAO Cheng¹, XIAO Kaiqi²

(1. Electromagnetic Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Southwest Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to investigate the generation of high power electromagnetic pulse, a high power electromagnetic pulse radiation setup is developed in this paper. In the setup a high power pulse driving source with high output impedance based on Tesla transformer is utilized as charging source, and the subnanosecond pulse conditioning and radiation is realized by using transmission line charging technology and double ridged horn shaped antenna connected with impedance transformer respectively. High power electromagnetic pulses with pulse repetition frequency (PRF) reached 100Hz and maximum field-range product equal to 294KV can be achieved by the setup. The spectrum of radiated pulse is concentrated in 0.4~1.0GHz.

Key words: high power; transmission line charging technology; subnanosecond pulse conditioning; double ridged horn shaped antenna