

# 三级线圈发射模型研究

## Design of the Model of Three-stage Coil Launcher

哈尔滨理工大学 高俊山, 杨晶, 杨嘉祥

Gao Jun-shan, Yang Jing, Yang Jia-xiang

**摘要** 基于电磁感应原理,设计和制作了电磁发射模型。模型采用光电传感器触发三级线圈加速抛体。该模型在30V电压下,可将重量为6.5g的抛体加速至5.85m/s,文中所获得的模型结构参数和实验数据对进一步研究线圈发射起到参考作用。

**关键词** 电磁发射 三级线圈发射 电磁感应原理

**Abstract** :Based on electromagnetic induction principle, a model of three-stage coil launcher with optical trigger is analyzed and designed in this paper.

A 6.5g projectile can be accelerated to 5.85m/s at DC voltage of 30V in this model. The construction parameters of the model and experimental data are useful for investigation of electromagnetic launcher further.

**Key words** :Electromagnetic launch Three-stage coil launcher Electromagnetic induction principle

中图分类号:TP211.53 文献标识码:B 文章编号:1003-7241(2003)03-0042-03

### 1 引言

电磁发射是利用运动电荷或载流导体在磁场中所受电磁力发射有效载荷的装置,这种技术正从实验室可行性研究逐步过渡到实用研究<sup>[1]</sup>。

线圈发射是电磁发射的主要方式,这种技术在航天领域可作地对空的定向发射和纯有效载荷,也可在天基推动航天器进行轨道转移<sup>[2]</sup>,在交通领域,用线圈发射原理制造电磁列车,使用原铁路轨道,其成本仅是磁悬浮车的1/4<sup>[3]</sup>。在工业上,用其原理制造电磁抽油机,代替目前油田的游梁式抽油机,可大幅降低设备成本<sup>[4]</sup>,同时还可用于科研,如高压物理领域中研究材料在高压力作用下的性质及受控核聚变等<sup>[5]</sup>。

本文针对线圈发射技术上所存在的问题,如:体积大,系统笨重,能耗大,效率低,炮管易损,烧蚀严重等,在综合国内外的研究基础上对其结构设计进行了新的探索。

### 2 线圈发射模型原理

线圈发射原理类似于直线电机。螺线管线圈从储能元件中

万方数据

获得大电流,产生磁场,迅速改变磁场在电枢(抛体)上感应电流,产生洛伦兹力推动抛体前进。

抛体之所以能产生感应电流是因为它在接近图2.1所示通电线圈形成的磁场时,内部产生磁偶极子,在两端形成异极性磁极。抛体前端受到引力,后端受到向后拉力,其合力为:

$$F = u_0 (P_1 H_1 - P_2 H_2)$$

式中  $P$ —磁化强度;

$H$ —磁场强度

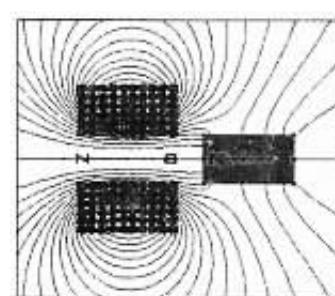


图 2.1 线圈发射原理

由于线圈中心的磁场强,抛体受力分布曲线如图2.2所示,抛体所受引力大于拉力,抛体被吸入线圈。抛体到达线圈中央时,吸力等于拉力,合力为零,若抛体和线圈长度比选择适当,抛

体凭借初始速度脱离炮管。

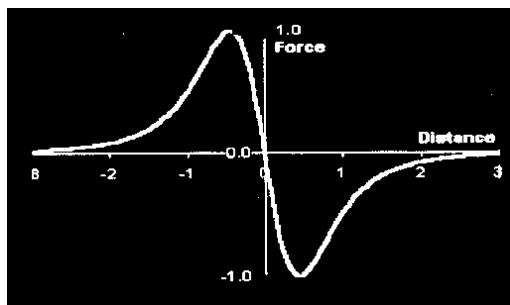


图 2.2 抛体受力分布

### 3 发射模型结构设计

三级线圈发射模型由三个同口径的同轴固定线圈构成,每级线圈由各自储能电容供电(如图 3.1)。第一级电容器组释放电流,抛体在线圈强磁场作用下产生感应电流,磁场与感应电流相互作用,生成电磁力,推动抛体前进。抛体达到第二级线圈,经炮管上的光电传感器时检测到抛体位置,光电传感器发出信号触发第二级电容器组向第二级线圈放电,继续推动抛体前进至第三级线圈时,经相同的过程第三级将抛体加速到预计速度。

抛体的出口速度与抛体长度和初始位置、线圈匝数和长度以及电容放电电压有关。相同力下抛体越短加速度越大,但是,抛体和磁场间的作用力也随之减少。线圈电感与线圈匝数成正比,电感小则磁场作用时间短不能推动抛体,电感大则磁场作用时间长,即  $L/R$  时间常数大,抛体进入线圈时,电流还未达到最大值,因此须在抛体进入线圈时,立即导通线圈,这样抛体达到一定范围时,电流逐渐增大并达到峰值,为确保线圈有适当的阻抗,线圈采用漆包线将电流限制在安全值。

在考虑以上影响因素的情况下,本文所设计的电磁发射模型尺寸为:炮管长 42cm、外径 8mm、壁厚 1mm,抛体材料为磁性材料(钢),长 26mm,抛体与炮管的间隙为 1mm。

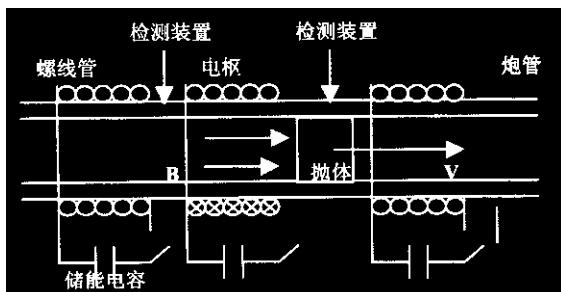


图 3.1 三级线圈发射模型

### 4 发射系统控制回路

本文采用电容器组供电,24V 交流电为电容充电至变压器次级峰值电压 34V( $= 24V \times 0.414$ )。经稳压模块和二极管整流,将 24V 交流电转换成 +5V 的直流电为元器件供电。

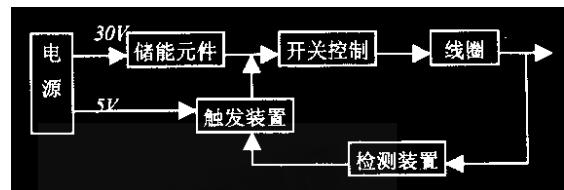


图 4.1 发射系统控制回路

第一级线圈由起动开关触发晶闸管,控制电容放电,导通线圈,发射抛体,当第一级线圈的电压降至晶闸管闭锁电压,晶闸管关断。

第二级和第三级各级线圈由炮管上光电传感器检测抛体位置控制晶闸管通断,常态时传感器开通,传感器输出电压为零,没有电流流过,晶闸管门极电压为零,处于关闭状态。当抛体通过传感器时,挡住传感器的光源,传感器关断,输出电压上升至 2.5V,电流经放大流入晶闸管门极。晶闸管在几毫秒内开通,开通后电压为 1.5V,电容放电,线圈导通,加速抛体前进,然后传感器再次导通。用电容过滤电路的干扰以防止小电压触发晶闸管。

为保证各线圈产生的磁场与抛体的运动位置精确同步,线圈的触发时刻要精确,采用触发延迟电路以更好地调节给线圈供电时刻。除电容连接线圈的导线及整流器的阳极的电流外,所有的电路都为小电流,线圈点火时会产生杂散干扰,采用双绞线连接发光管和传感器,以减少不必要的干扰。

### 5 性能测试

通过本文所设计的模型进行实验,获得如下实验数据。图 5.1 抛体长度与抛体速度、抛体能量关系表明长度为 25~40mm 的抛体发射速度和动能最佳。由图 5.2 抛体在线圈的初始位置与速度关系可见,抛体初始位置在 15mm 处速度达最大值。分析图 5.3 电容电压与抛体速度、能量转换效率的关系得出如下结论,增大电容电压抛体速度加快,但是超过 30V 后,抛体速度增益不明显,同时能量转化率降低。

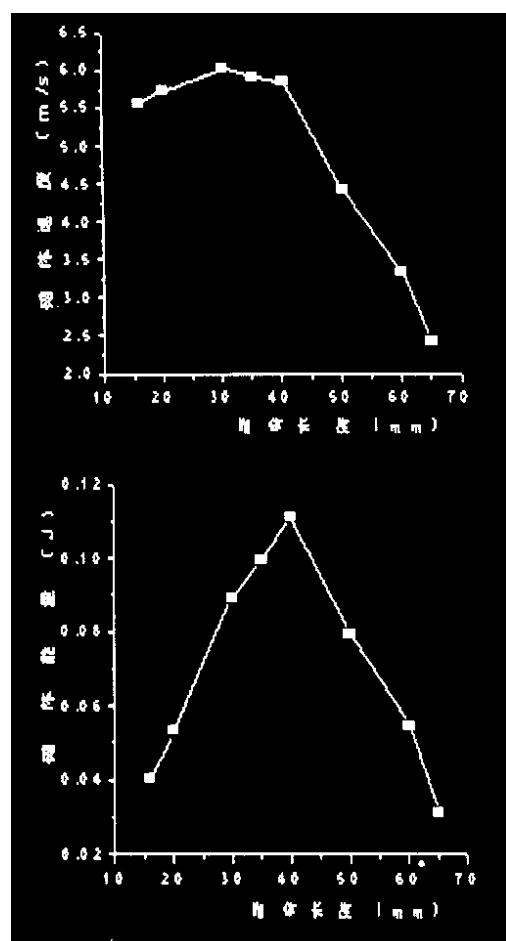


图 5.1 抛体长度与抛体速度、抛体动能关系

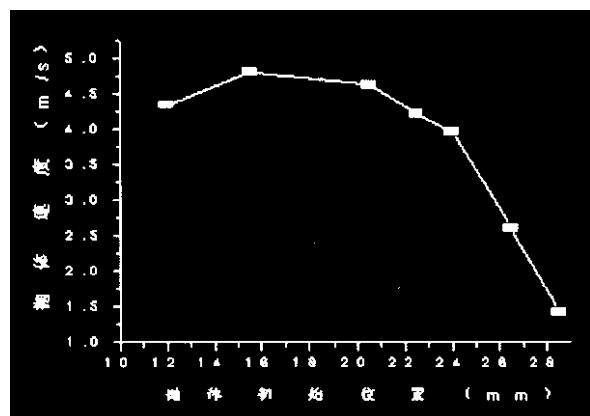


图 5.2 抛体初始位置与速度关系

## 6 结束语

本文依据电磁感应原理,探讨了线圈发射原理和方式,推算电源脉冲功率,设计控制回路。发射实验结果表明3级电磁发射装置在30V电压下,将质量为6.5g的抛体加速至5.85m/s,能量转化率达0.112%。但是,对工程实用,为进一步提高能量转换率需进行结构优化。

44 | 万方数据

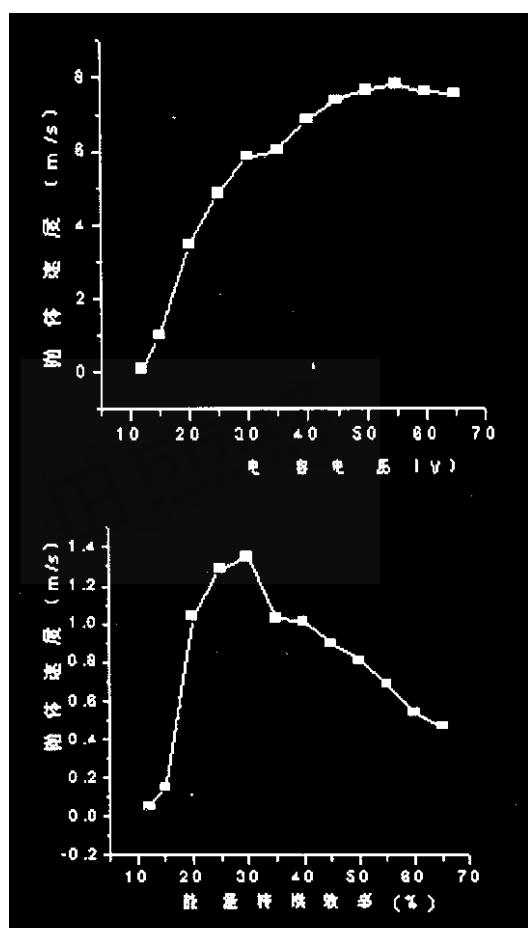


图 5.3 电容电压与抛体速度、能量转换效率关系

## 7 参考文献:

- [1] Zak A R. Structural analysis of realistic solid propellants material[J]. *spacecraft and Rockets*, 1968, 5
- [2] 庄国臣, 等. 电磁发射器及应用[J]. *电工技术杂志*, 1997, 6
- [3] 程健, 等. 单级线圈加速电枢的机理分析[J]. *电工技术杂志*, 1997, 9
- [4] 朱宽宁, 梁艳萍. 电磁场有限元后处理中矢量场的可视化[J]. *电机与控制学报*, 2002, Vol. 6
- [5] Horowitz and Hill, *The Art of Electronics* [C]. Cambridge University Press, 1980, ISBN 0521231515

作者简介 高俊山(1962-),男,副教授,硕士,研究方向:控制科学与工程。

# 三级线圈发射模型研究

作者: 高俊山, 杨晶, 杨嘉祥  
作者单位: 哈尔滨理工大学  
刊名: 自动化技术与应用  
英文刊名: TECHNIQUES OF AUTOMATION AND APPLICATIONS  
年, 卷(期): 2003, 22(3)  
引用次数: 8次

## 参考文献(5条)

1. [Zak A R Structural analysis of realistic solid propellants materials](#) 1968
2. [庄国臣 电磁发射器及应用](#) 1997
3. [程健 单级线圈加速电枢的机理分析](#) [期刊论文]-[电工技术杂志](#) 1997(5)
4. [朱宽宁, 梁艳萍 电磁场有限元后处理中矢量场的可视化](#) [期刊论文]-[电机与控制学报](#) 2002(1)
5. [Horowitz, Hill The Art of Electronics](#) 1980

## 相似文献(1条)

1. 学位论文 [高俊山 三级电磁推进模型及系统研究](#) 2007

电磁发射技术的出现是近年来推进技术领域的一次飞跃, 它为解决人们对超高速、大质量的推进要求开辟了一条新途径, 尤其它较低的推进成本更是引起了各国的注意。电磁发射是将电磁能转化成动能, 借助电磁力做功, 把抛体(电枢)发射出去, 从而完成对抛体的推进。而线圈型电磁发射技术, 实质上是由于变化的磁场在抛体内产生涡流, 涡流又与变化的磁场相互作用, 产生电磁力, 从而推动抛体运动的技术。电磁发射技术是以电磁能取代传统化学能来发射物体的新技术。在国防和民用工业领域, 电磁发射技术已经应用于飞行器弹射系统、电磁炮、交流电磁泵和打夯机等行业。今天, 传统的发射技术已经很难满足人们对动力系统速度、安全等方面的需求, 而近年来刚刚复兴的电磁发射技术却为解决这一问题提供了新的研究方向。在相关应用技术领域, 电磁发射技术是今天最有潜力、极具优势的技术, 但是相对于传统技术, 电磁发射技术要复杂得多。电磁发射过程是一个瞬变过程, 定子线圈与抛体间的相互作用随时间的变化而改变。因而依据电磁发射理论建立数值仿真模型进行仿真, 然后进行实验证, 并以此作为实际应用中设计具有良好工作状态的电磁发射系统的依据是十分必要的。

电磁发射器在其发展过程中出现了三大基本类型: 轨道炮、线圈炮及重接炮。线圈炮(也称线圈型电磁发射器)可以理解为圆筒型的直线电动机, 其有如下特点: 抛体在被加速过程中, 由于存在磁悬浮效应, 因而不存在与筒线圈的摩擦; 结构简单; 抛体质量范围大; 抛体可采用不同形状; 能源简易; 具有高初速度; 受控性好; 工作性能优良。鉴于线圈型电磁发射器的上述特点, 因此本文对这种发射器进行研究。本文在分析了驱动线圈电路特征和系统运动特性后, 建立了三级电磁发射系统方程, 系统方程为非线性常微分方程。由于采用了抛体分片技术, 使得自感、互感、互感梯度的计算结果更加接近于实际情况。根据参数的对称性, 采用赋值表的方法, 减少了计算时间。选择了有较好稳定性的 Treanor算法求解非线性常微分方程组, 得到稳定解。编写了计算机仿真程序, 仿真的运算结果可以较好地逼近实际三级电磁发射系统, 仿真结果与实际实验观测结果基本吻合。利用获得的最佳参数, 设计并制作了三级线圈发射系统试验模型。并进行了大量的试验验证。为进一步提高系统的发射效率, 本文对放电回路进行了改进。实验结果表明, 在相同能量条件下, 改进后的发射器发射效率要比改进前的发射器的发射效率高。为提高系统的单位时间内的抛体发射次数, 设计并制作了采用 DSP 控制的串联谐振式恒流充电电源, 并用 PSPICE 硬件仿真软件对电路进行了仿真, 同时给出实测曲线。提高了储能电容器的充电速度, 改善了充电性能。理论分析和实验研究表明, 本文提出的模型和分析方法具有合理性, 为以后的进一步研究打下了基础。

## 引证文献(8条)

1. [崔鹏, 刘少克, 罗宏浩, 王楠 新型线圈发射器的电磁场仿真分析](#) [期刊论文]-[计算机仿真](#) 2006(05)
2. [孙百瑜, 高俊山, 黄海 提高能量转化率的一阶电磁发射系统的控制优化](#) [期刊论文]-[自动化技术与应用](#) 2006(05)
3. [崔鹏, 刘少克, 罗宏浩 基于时控方法的感应线圈发射器研究](#) [期刊论文]-[电气应用](#) 2006(05)
4. [崔鹏, 刘少克, 罗宏浩 一种四级线圈发射器模型研究](#) [期刊论文]-[火炮发射与控制学报](#) 2005(04)
5. [崔鹏 新型电磁发射技术的研究](#) [学位论文]硕士 2005
6. [周晓强, 公立滨, 牟晓光 三级电磁发射装置及控制部分研究](#) [期刊论文]-[应用能源技术](#) 2004(05)
7. [高俊山, 公立滨, 牟晓光 三级电磁发射装置及控制部分研究](#) [期刊论文]-[应用能源技术](#) 2004(04)
8. [姜红军, 高俊山, 邱瑞生 电磁发射装置的结构优化及抛体受力分析](#) [期刊论文]-[自动化技术与应用](#) 2004(01)