

弹丸配重对线圈炮最佳 初始位置影响研究

苏子舟 国 伟 张 涛 陈彦辉 任 人

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要 在单级感应线圈炮的发射过程中, 弹丸初始位置是影响电磁发射效率的因素之一, 而弹丸配重又对弹丸最佳初始位置有很大影响。因此, 本文针对不同弹丸配重, 以弹丸初始发射位置为变量, 以弹丸所能达到的最大出口速度为目标, 应用有限元法对单级线圈炮系统进行研究。研究结果表明, 对于给定的单级感应线圈炮系统, 配重确实影响最佳初始位置, 随着配重增加, 最佳初始发射 d 增大、弹丸出口速度降低、系统效率降低, 为以后的工程实践提供参考。

关键词: 电气工程; 配重; 最佳初始位置; 线圈炮

Effect of Launch Initial Position on The Performance of Coil-gun by the Pullback Weight of the Projectile

Su Zizhou Guo Wei Zhang Tao Chen Yanhui Ren Ren

(Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang, Shaanxi 712099)

Abstract There are many factors which affect the efficiency of the electromagnetic launch during the launch of the single stage induction coil-gun, of course the initial position of the projectile is one of them, and the pullback weight of the projectile effect much of launch initial position on the performance of coil-gun. In this paper the single stage induction coilgun is simulated and analyzed by the numerical value of pullback weight for axisymmetric coil smagnetic field and the forward difference procedure for differential equation. The research result indicates that the best initial position which can make the projectile get themaximal velocity really exists in a given single stage induction coilgun system with difference pullback weight, which provides the theoretical reference for future engineering practice.

Key words: electrical engineering; pullbackweight; best initial position; coil-gun

1 引言

电磁发射技术是将电能转化为电磁能, 进而转化为抛体动能, 借助电磁力做功, 把抛体发射出去, 从而完成对抛体推进的技术, 具有发射速度高、能源简易、性能优良、效率高、可控性好和结构多样等优点。从本质上说, 是变化的磁场在特定结构抛体(电枢)内产生涡流, 涡流又与变化的磁场相互作用, 产生电磁力加速抛体运动。

电磁炮就是利用电磁力加速炮弹, 使炮弹达到超高速的电磁发射装置。电磁炮按结构和原理不同

可分为轨道炮、线圈炮、重接炮三种。作为本文研究对象的线圈炮在相同电流条件下, 具有效率高、推力大、寿命长等优点。同时, 线圈炮也存在结构、测定和控制系统复杂、高同步性要求等问题。

在单级感应线圈炮系统中, 弹丸所能获得的速度随弹丸初始位置的变化而变化。在给定的条件下, 通过调节弹丸初始位置, 能够获得一个最大速度, 这个发射位置就叫做最佳初始位置。最佳初始位置一般是在没有配重的情况下确定的。实际上, 抛体电枢只是弹丸的一部分, 另外还包括引信、装药、壳体、定位导航系统等部分, 所以有必要深入

研究弹丸配重对线圈炮弹丸运动性能的影响。这里就引出一个问题,即不同配重对弹丸受力运动的影响规律。对于这两者之间的关系,由于试验研究的成本较高,往往只选择有代表性的进行定性研究。因此,为了定量分析这两者之间的关系,本文应用有限元分析软件 maxwell 对单级感应线圈炮系统配重与弹丸最佳初始位置之间的关系进行了定量研究,为以后同步感应线圈炮弹丸配重问题的研究提供理论参考。

2 同步感应线圈炮工作原理

线圈炮是受直线电动机原理的启发设计的,利用线圈磁场给弹丸加速。炮身由一个或多个线圈组成,相当于电动机定子线圈;弹丸类似电动机的转子,在驱动线圈产生的磁场作用下发射出去。线圈炮包括磁阻线圈炮、脉冲感应线圈炮、同步及异步感应线圈炮、电刷换向螺旋线圈炮、无刷螺旋线圈炮和磁化弹丸行波炮等。

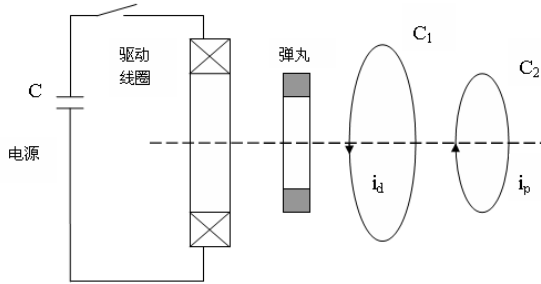


图 1 单级感应线圈炮工作原理

感应线圈炮利用多个脉冲电源对各级线圈同步放电和弹丸内的磁通交变感应加速弹丸运动。炮管由多个同口径、同轴线圈串联而成,弹丸受力抛体为铜质空心圆筒。当弹丸到达第 1 个驱动线圈的适当位置时,该驱动线圈放电,其磁场在弹丸内变化,弹丸感应产生电流,磁场与感应电流相互作用,推动弹丸前进;然后经第 2、3、4 个线圈……直至最后 1 个线圈,逐级把弹丸加速到很高的速度。其中单级感应线圈炮的工作原理,如图 1 所示。

为方便分析,把驱动线圈和弹丸线圈简化成图 1 所示的电流环 C_1 和 C_2 。当线圈 C_1 通以变化的电流 i_d 时,在线圈周围产生变化磁场;当线圈 C_2 的截面中磁场发生变化时,由电磁感应定律可知 C_2 中有电流 i_p 流动。设弹丸与驱动线圈之间的互感为 M ,则可得作用在弹丸上的驱动力

$$F_p = i_d i_p \frac{dM}{dx} \quad (1)$$

产生与轴线水平和垂直两个方向的作用力。垂直方向上的电磁力的作用效果是把线圈 C_2 向内压缩;水平方向的电磁力的作用效果是推动弹丸在水平方向运动,它是决定弹丸线圈出口速度的最重要因素。前者可以减小电磁发射时的摩擦力;后者可以应用于电磁加速。对于同步感应线圈炮由于驱动线圈电流和感应电流方向是相反的,仅存在排斥方式的电磁力,只有当弹丸线圈的中心面越过驱动线圈的中心面时才能放电。

3 弹丸配重与最佳初始位置计算

弹丸初速高可以增大弹丸射程和穿甲能力,还可以缩短射击的提前量,进而提高命中率,因此可以认为炮口初速是影响线圈炮性能的最重要参数之一。以下研究确定弹丸最佳初始发射位置均以获得最高炮口初速为标准。

3.1 仿真研究

本文所研究的单级感应线圈炮系统采用电容器储能,电容器参数见表 1,驱动线圈参数见表 2,弹丸参数见表 3。

表 1 电容器参数

电容器容量/ μF	1000
电容器电压/V	8000

表 2 线圈参数

长度/mm	63
外径/mm	58.25
内径/mm	30.25
匝数	63
电阻/ $\text{m}\Omega$	16
电感/ μF	210
导线材质	铜
矩形导线规格/mm	4*7
矩形导线绝缘厚/mm	0.5

表 3 弹丸参数

筒形弹丸材质	铜
筒形弹丸长度/mm	70
筒形弹丸厚度/mm	6
筒形弹丸外径/mm	30
弹丸质量/kg	0.6384

初始位置 d 定义为弹丸的后端与线圈的末端之间的距离,如图 2 所示。

根据以上初始条件,利用 maxwell 软件建立该线圈炮系统模型,通过调节参数,研究该线圈炮的性能。

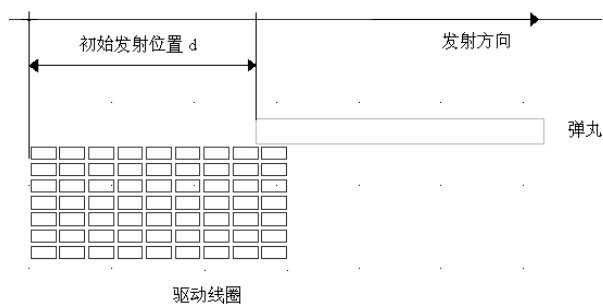


图2 弹丸初始发射位置示意图

3.2 配重为0时最佳初始位置计算

利用 maxwell 软件计算弹丸配重为0（即不配重）时，不同初始位置的出口速度，计算结果见表4。

表4 不同初始位置下最大速度

初始位置 d/mm	最大速度/(m/s)
5	59.7
15	76.8
35	96.54
37	99.83
38	100.2
39	100.4
40	100.5
41	100.6
42	101
43	100.78
44	100.59
45	100.4
47	98.9
50	95.53
55	88.5
70	51.5
100	11.2

从图3、表4可以很清晰的看出，初始位置取值从5mm增加到100mm的过程中，速度从59.7m/s增大到101m/s再减小到11.2m/s，确实存在一个使出口速度达到最大的最佳初始位置。对于本单级线圈炮系统最佳初始发射位置为 $d=42\text{mm}$ 处，出口速度达到101m/s。在发射位置从38mm增加到45mm的过程中，出口速度都在100m/s以上，相差在1%以内，也就是说虽然在 $d=42$ 时才取得最大出口速度，但在这个小范围内出口速度对初始发射位置不是很敏感，这有利于控制驱动线圈触发。

3.3 弹丸不同配重最佳初始位置计算

改变弹丸的配重主要是基于以下考虑：

目前炮弹的主要杀伤功能还是由装药实现的，配重能力大也就意味着装药能力强。另外，至少实

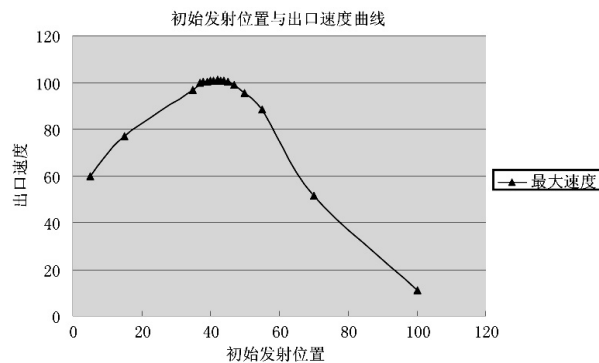


图3 初始发射位置与出口速度曲线

际使用的弹丸形状不会是纯粹的圆筒状，以更符合空气动力学，同时试验研究中要在弹丸上加装加速度传感器等测控设备，这些都要求深入研究弹丸配重对线圈炮性能的影响。

表5 不同配重时最佳初始位置及出口速度

配重相对值（令 初始弹重为1）	最佳初始 位置 $d/(\text{mm})$	出口速度/ (m/s)	效率 /%
0	42	101	10.18
0.25	43	88.44	9.75
0.5	44	79.06	9.35
1	48	66.07	8.71
2	52	51.1	7.81
4	53	36.46	6.63
8	54	23.92	5.14
16	56	15.64	4.15
100	56	3.39	1.17

在 maxwell 软件中改变配重可以很容易的实现，只要设置不同的弹丸质量就可以实现，一定程度上相当于在不改变铜的性状的前提下，改变铜的密度。求取最佳初始发射位置的过程和配重为0时完全相同，在此不再一一赘述，只列出结果。不同配重时最佳初始位置及出口速度见表5，配重与最佳初始位置和速度曲线如图4所示，配重效率曲线如图5所示。

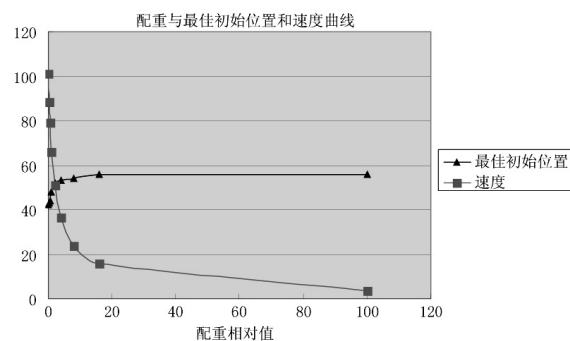


图4 配重与最佳初始位置和速度曲线

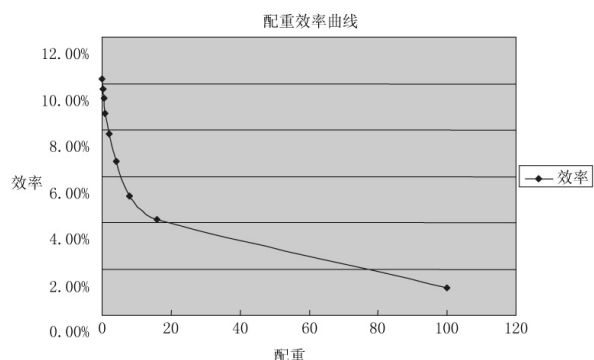


图5 配重效率曲线

表5中配重相对值表示配重是弹丸重量的倍数,如0.5表示弹丸重为0.6384kg时,则配重为0.3192kg,即弹丸配重是弹丸重量的一半,其它依此类推。这里,效率 η 定义为弹丸动能与电容器初始储能的比值

$$\eta = \frac{1/2 \times m \times v^2}{(1/2) \times C \times U^2} \quad (2)$$

配重相对值为0.5时,线圈炮效率

$$\eta_{0.5} = \frac{1/2 \times ((1+0.5) \times 0.6384) \times 79.06 \times 79.06}{(1/2) \times 0.001 \times 8000 \times 8000}$$

$$\eta_{0.5} = 9.35\%$$

3.4 结论

(1) 随着配重增加,最佳初始位置 d 增加。这是因为弹丸受力不变而配重增加,弹丸速度降低,使得弹丸不能摆脱电流下降沿对其影响。发射位置 d 增大,可以减小电流下降沿的不利影响,从而增加出口速度。

(2) 随着配重增加,即便在最佳初始位置发射,无论是弹丸出口速度还是效率都降低。

(3) 配重增加到一定程度,如16倍以上,最佳发射位置失去意义,因为此时线圈炮的效率太低。另外,配重大时由重力引起的摩擦力此时已经不可忽略,实际中此时弹丸根本发射不出去,情况类似于电机的堵转。也就是说对于给定的线圈炮系统,配重存在着极限,超过这个极限最佳初始位置失去意义,弹丸配重就更无从谈起。

4 结论

通过对给定单级线圈炮系统的计算,可以得出如下结论,弹丸配重对最佳初始位置影响很大,随着配重增加,最佳初始位置 d 增大、出口速度降低、效率降低,为以后的工程实践提供参考。

参考文献

- [1] 林福昌,李劲,姚宗干.电磁发射兵器用电容器的选取[J].兵工学报,2003(3):416-418.
- [2] 程键,任兆杏.单极线圈加速电枢的机理分析[J].电工技术杂志,1997,16(5):29-31.
- [3] 李梅武,魏建中,薛飞.一种航母电磁飞机弹射系统研究[J].舰船科学技术,2007,29(1):33-35.
- [4] 陈庆国,王永红,魏新劳.电容驱动型轨道电磁炮电磁过程的计算机仿真[J].电工技术学报,2006,21(4):68-71.
- [5] 罗宏浩,吴峻,常文森.新型电磁弹射器的动态性能仿真[J].系统仿真学报,2006,18(8):2285-2288.
- [6] 董健年,吴毅,桂应春等.电磁弹射装置中线圈受力与电流相位的关系[J].高压电技术,2006,32(7):79-80.
- [7] 吴泊宁,裴锦华,杜军玲.某型无人机导轨起飞装置气液压能源系统的应用[J].南京航空航天大学,2005,37(4):427-430.
- [8] 王莹,马富学.新概念武器原理[M].北京:兵器工业出版社,1997.
- [9] JAMES T E. Why solid armatures fail and how they can be improved[J]. IEEE Trans on Magn., 2003, 39(1): 56-61.
- [10] Stephen Williamson, Alexander Simth. Pulsed coilgun limits[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 201-207.

作者简介

苏子舟(1980-),男,助理工程师,主要从事电磁发射技术研究。