

doi: 10.7690/bgzdh.2020.05.018

单级线圈发射器中电枢的受力分析

郭小源, 张 军, 董健年

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高发射效率, 对单级线圈发射器中大质量电枢的受力情况进行分析。基于大质量电枢在线圈中的运动规律, 利用仿真软件建立单级线圈发射模型, 对不同质量电枢的运动特性和电枢以不同初速度进入线圈的受力情况进行仿真并总结其规律, 并将弹射线圈使用与否 2 种情况下的效率进行对比。结果表明: 在放电回路参数相同的条件下, 电枢质量增加, 电磁力反向时间推迟; 电枢进入线圈的初速度增加, 电磁力反向时间提前。加设弹射线圈的模型能提高发射效率。

关键词: 电磁发射; 电磁线圈发射器; 动态仿真

中图分类号: TJ760.2 **文献标志码:** A

Force Analysis of Armature in Single-stage Coil Launcher

Guo Xiaoyuan, Zhang Jun, Dong Jiannian

(School of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the launching efficiency, the force of armature with large weight in single-stage coil launcher is analyzed. Based on the motion law of large weight armature in coil, a single-stage coil launching model is established by using simulation software. The motion characteristics of armature with different weights and the force of armature entering coil at different initial speeds are simulated and summarized. The efficiency of the 2 cases is compared. The results show that under the same discharge circuit parameters, the armature mass increases, the reverse time of electromagnetic force delays, the initial speed of armature entering the coil increases, and the reverse time of electromagnetic force advances. The launching efficiency can be improved by adding the model of bomb-ray circle.

Keywords: electromagnetic emission; electromagnetic coil launcher; dynamic simulation

0 引言

电磁线圈发射器 (electromagnetic coil launcher, EMCL) 一直是电磁发射领域的研究热点之一。它将电能通过同步感应线圈技术转化为载荷所需动能, 可用于舰载导弹垂直弹射、无人机弹射等^[1]。电磁线圈弹射器应用于导弹的垂直发射, 可以解决热、冷发射的缺点和不足。与热发射相比, 具有以下优点: 利用电能发射大质量物体, 没有火焰等红外特征, 没有强冲击波和烟雾的产生, 隐蔽性好^[2], 并且没有高温气体的产生, 噪声低, 后坐力小, 不会对舰载设备产生危害。在冷发射方面, 可以通过改变电源的储能和驱动线圈的级数等方式, 发射各种型号的导弹, 实现通用化, 来弥补不可控制的弹道过载和导弹型号单一等不足^[3]。

在利用电磁发射器发射大质量载荷方面, 美国的研究处于领先地位。美国桑迪亚实验室和洛马公司合作开发了 EMMML 系统。2004 年底, 该实验室通过 5 级驱动线圈的发射装置将 650 kg 的发射物体

加速到 12 m/s, 系统的效率提升了 17.4%。该实验验证了电磁线圈发射器用于发射大质量物体的可行性^[2], 展现了电磁线圈发射技术的广阔前景。

单级线圈发射器是电磁线圈发射器的设计基础。单级线圈发射器的工作原理是当驱动线圈通过变化的电流时, 在线圈周围产生变化的磁场, 在电枢中会产生感应电流。感应电流与变化磁场作用产生带动发射部件向前运动的电磁力。笔者对大质量电枢以不同初速度进入驱动线圈时的受力变化进行仿真研究^[4]。

1 单级线圈发射器的工作原理

单级感应线圈发射器一般由储能电源、驱动线圈、被发射组件 (电枢) 和开关组成。当驱动线圈通过一个大的脉冲电流时, 在线圈内部会产生变化的强磁场, 电枢感应出强电流, 感应电流与磁场相互作用产生带动电枢向前运动的电磁力^[5]。其发射原理如图 1 所示。

收稿日期: 2020-01-11; 修回日期: 2020-03-13

作者简介: 郭小源 (1994—), 女, 河北人, 硕士, 从事电磁发射研究。E-mail: guoxiaoyuan940530@163.com。

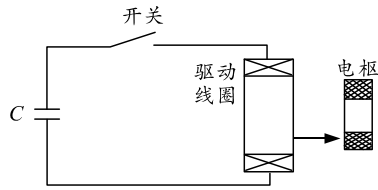


图 1 单级线圈发射器原理

1.1 电路方程

单级线圈发射器驱动线圈的等效电路如图 2。

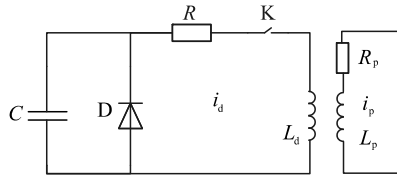


图 2 驱动电路等效电路

图中： C 为驱动线圈馈电的电容； U_0 为电容器充电电压；为了防止回路中产生反向电流，加入续流硅堆 D ； R 包括驱动电路中的所有电阻； L_d 为驱动线圈电感； K 为开关； i_d 为回路中的电流； i_p 为电枢中感应产生的电流； R_p 为电枢电阻； L_p 为电枢电感。驱动线圈电路可等效为 RLC 串联回路，电路参数满足 $R < 2\sqrt{L/C}$ 。等效电路方程为

$$U_0 = Ri_d(t) + e \tag{1}$$

式中 e 为感应电动势。

利用 $E = -\partial A / \partial t - \nabla \varphi$ 沿导电回路对电场强度进行线积分的感应电动势，进而可建立场路耦合关系。驱动线圈 L_d 的感应电动势为

$$e = -\frac{N_c}{S_c} \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} Ahd\mu \tag{2}$$

式中： S_c 为绕组截面积； N_c 为线圈匝数； A 为矢量磁位。

1.2 动力学方程

由电磁线圈发射器的工作原理可知：电枢内感应电流 $I(t)$ 和这一时刻电枢所在位置的磁感应强度 $B(t)$ 的大小，决定了它此时所受电磁力的大小。在电枢中任意取一段电流元 $I_t dl$ ，并且假设 t 时刻此电流元所在位置的磁感应强度为 B_t ，则该电流元在 t 时刻所受电磁力为

$$dF_t = I_t dl \times B_t \tag{3}$$

电枢内的感应电流可看作是由 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n (n \rightarrow \infty)$ 等无数个环形闭合电流回路组成，故由式(3)可以推出， t 时刻电枢所受的总电磁力为

$$F_t = \oint_L dF_t = \oint_L I_t dl \times B_t \tag{4}$$

式中 $L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n (n \rightarrow \infty)$ 。

因为该仿真模型为垂直发射仿真模型，所以电枢在运动中除了受到向上的电磁推力 $F_z(t)$ 作用外，还会受到向下的自身重力作用。因此， t 时刻作用于电枢上的合力 $F(t)$ 应为 t 时刻电枢所受电磁推力减去电枢自身重力：

$$F(t) = F_z(t) - m_p g \tag{5}$$

式中： m_p 为电枢质量； g 为重力加速度。

由此可得 t 时刻电枢的加速度 $a(t)$ 和 $v(t)$ ：

$$a(t) = \frac{F(t)}{m_p} = \frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \tag{6}$$

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt = \int_0^t \left[\frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \right] dt \tag{7}$$

上述电路方程和动力学方程是仿真的理论基础，通过计算可得到放电回路中的电流、电枢所受的电磁力，以及运动过程中电枢的速度及位移等参数变化的特性曲线。

2 仿真分析

仿真模型的基本参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

相关参数	数值或类型	相关参数	数值或类型
电枢材料	铝	线圈内径/mm	830
电枢外径/mm	760	线圈长度/mm	180
电枢内径/mm	600	电容器容值/mF	8
电枢长度/mm	180	电压/kV	10
线圈匝数	230	电阻/ Ω	0.5
线圈材料	铜	电感/nH	300
线圈外径/mm	1 030		

利用 ansoft maxwell 搭建模型，为方便分析和计算，在不影响分析结论的情况下，作以下假设：

- 1) 电枢轴线和驱动线圈的轴线始终重合，不考虑电枢轴线偏离驱动轴线的情况，这样可以将驱动线圈和电枢的 3 维结构简化为轴对称模型；
- 2) 忽略驱动线圈中绝缘层的厚度，假设电流在导线截面上分布均匀^[6]。

基于假设，建立单极线圈发射器的模型如图 3 所示。

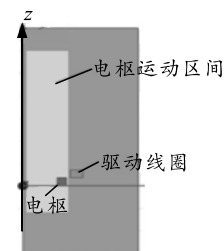


图 3 仿真模型

图 3 中浅色区域为电枢运动区间，深色物体为电枢，浅色物体为驱动线圈，整个模型绕 z 轴呈轴对称。

将电枢质量参数设置为 350 kg，初速度参数设置为 0 m/s 进行仿真，得到图 4—6。

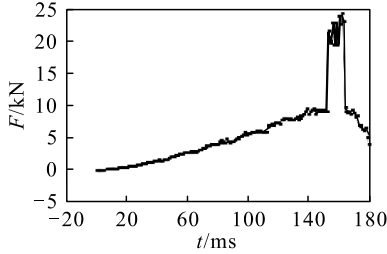


图 4 电枢所受电磁力

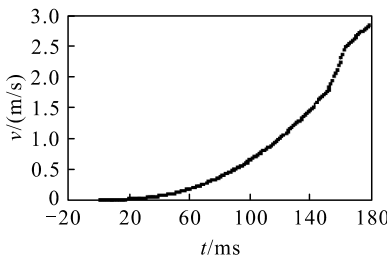


图 5 电枢运动速度

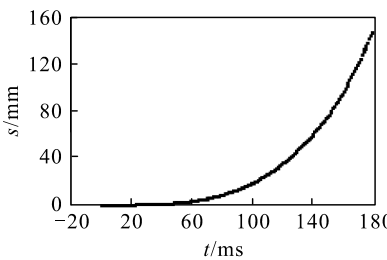


图 6 电枢运动距离

由图 4—6 可知：电枢在磁场中受力向前运动，所受电磁力逐渐加大，电枢做加速度逐渐增加的加速运动，电磁力增大到一定时间后开始减小至反向，电枢做加速度逐渐减小的加速运动至减速运动。

2.1 电枢质量对运动特性的影响

将电枢质量设置为 250,300,350,400,500 kg，电枢初速度设置为零进行仿真，仿真结果如图 7—9。

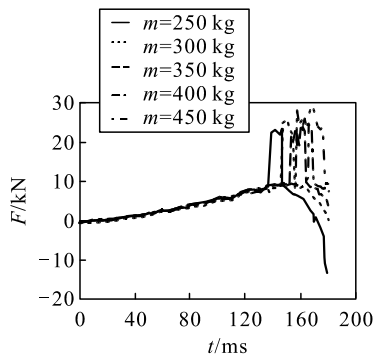


图 7 不同质量的电枢所受电磁力

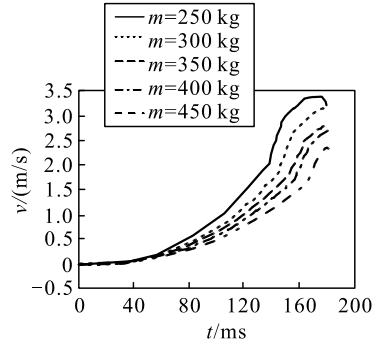


图 8 不同质量的电枢运动速度

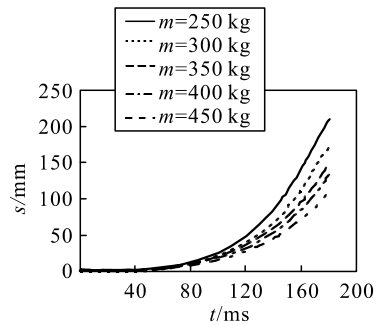


图 9 不同质量电枢的运动距离

由图 7—9 可知：在驱动线圈的作用下，电枢一开始受到正向推力做加速运动，到达一定时间后，电枢所受电磁力发生反向变化，电枢的加速度开始减小。受力反向点的时间与电枢的质量有很大关系。当电枢的质量为 250,300,350,400,450 kg 时，线圈受力的反向点分别在 1.43,1.50,1.62,1.65,1.69 s。由于电枢质量的增大，电枢运动过程中所受电磁力的峰值也在增大，分别为 24.06,24.26,24.31,24.96,29.16 kN。但由于质量的增加，电枢运动中的速度峰值随质量的增加逐渐减小，分别为 3.43,3.22,2.81,2.71,2.36 m/s。在仿真范围内的位移也随着质量的增加逐渐减小，分别为 209.16,174.89,146.90,132.45,108.92 mm。由此可知：在放电回路参数相同的条件下，电磁力的反向点随着电枢质量的增加而向右移动，即电磁力反向时间不断推迟，电磁力的峰值增加，电枢速度峰值下降，电枢总位移下降。

由于电磁力反向点推后，电枢加速区间随着质量的增大也不断增加，但质量的增加导致电磁力与电枢质量的比值即电枢加速度的下降，电枢的速度峰值也逐渐下降，所以大质量物体发射时要考虑物体的质量带来发射速度下降导致效率降低的问题。

2.2 电枢初速度对运动特性的影响

将电枢的质量设置为 350 kg，电枢进入线圈的初速度分别设置为 0,2,4,6,8 m/s，仿真结果如图 10—12。

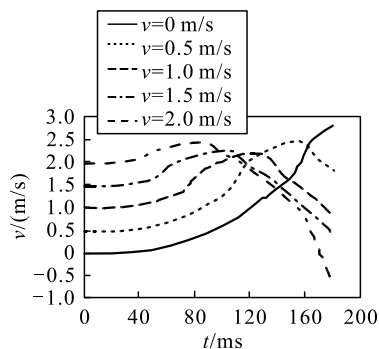


图 10 不同初速度的电枢速度

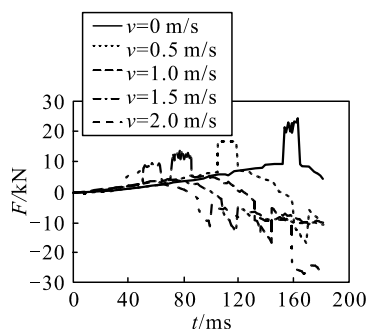


图 11 不同初速度的电枢受力情况

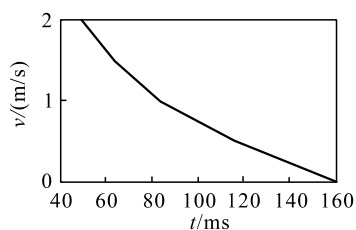


图 12 受力反向点与速度的关系

由图 10—12 可知：在驱动线圈的作用下，电枢一开始受到正向推力做加速运动，达到一定时间后，电枢所受电磁力发生反向变化，电枢的加速度开始减小。受力反向点的时间与电枢进入线圈的初速度有很大关系。电枢以 0,0.5,1,1.5,2 m/s 进入驱动线圈时线圈的受力反向点分别在 1.62,1.15,0.83,0.63,0.49 s。由此可以得出：在放电回路参数相同的情况下，电磁力的反向时间随着电枢进入线圈的初速度增加而提前。

由于电磁力反向点提前，电枢的加速区间随着初速度的增大而不断减小；因此，部分电能没有用于提高电枢速度，降低了发射效率。在进行多级线圈发射器的设计时，为了提高发射效率，随着电枢速度的不断增加，应适当调整各级驱动线圈的电路参数或结构参数，以实现参数和电枢速度的匹配，使电源能量得到充分利用。

2.3 加入弹射线圈后电枢的运动特性

在电枢运动初期，由于电枢质量较大，一级驱

动线圈的效率较低，通常在发射系统电枢底部加入弹射线圈。由于弹射线圈与电枢之间的耦合更紧密，在相同的条件下，弹射线圈比驱动线圈可以产生更大的电磁力，可以减少驱动线圈级数，降低同步控制的难度^[7]。

建立仿真模型如图 13 所示。

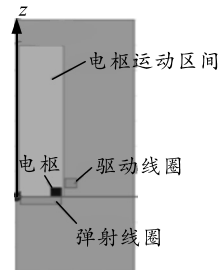


图 13 加入弹射线圈后的仿真模型

图 13 中被发射物体正下方为新增设的弹射线圈。表 2 为弹射线圈的相关参数。

表 2 弹射参数

相关参数	数值或类型	相关参数	数值或类型
线圈匝数	60	电容量/mF	8
线圈材料	铜	电容电压/kV	6
线圈外径/mm	760	电阻/ Ω	0.5
线圈内径/mm	70	电感/nH	300
线圈长度/mm	140		

将电枢的质量设置为 350 kg，仿真结果如图 14、15 所示。

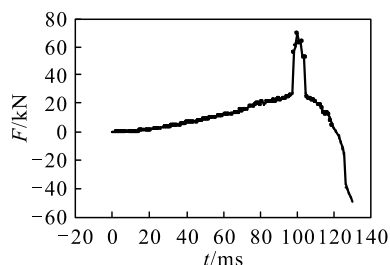


图 14 电枢所受电磁力

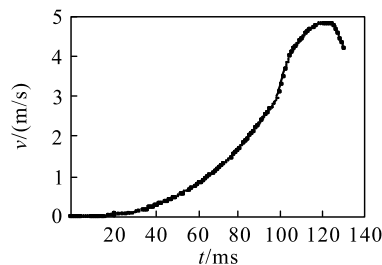


图 15 电枢运动速度

由图 14、图 15 可知：加入弹射线圈后，电枢在仿真时间内电枢受到逐渐增加的正向推力，做加速度增加变加速直线运动。在运动过程中，电枢所受的推力峰值为 70.26 kN，达到速度峰值为 4.85 m/s。

由表可知: 所形成的毁伤元头部速度较高, 同时 EFP 长径比在不产生头尾速度差的情况下达到最大值, 有利于 EFP 实现远距离飞行, 在大炸高的情况下仍然具有较好的毁伤性能, 而 JPC 的长径比较大, 能够保证其在一定距离内稳定飞行, 具有较大的后效杀伤效果。

3 结论

笔者仿真分析了船尾结构对成型装药形成毁伤元的影响, 得出结论:

1) 船尾成型装药形成的毁伤元头部速度随着船尾半径的增加而有所增大, 在成型装药结构设计中宜采用在合理范围内船尾半径较大的结构; 而毁伤元头部速度随着船尾倾角的增大先快速增大然后缓慢递减。

2) 船尾半径和船尾倾角对于毁伤元头部长径比的影响较毁伤元头部速度的影响大, 当船尾半径和船尾倾角角度改变时, 毁伤元的长径比变化较大, 且成形形态差别也较大, 而毁伤元的头部速度在较小范围内变化。

3) 笔者研究的 $\Phi 100$ mm 口径成型装药双模战斗部的船尾结构确定为: 最佳船尾半径为 22.5 mm, 最佳船尾倾角为 45° 。该船尾结构所形成的毁伤元

(上接第 79 页)

经计算, 加入弹射线圈之前单级弹射线圈在仿真时间内的效率为 3.45%; 加入弹射线圈后的发射效率为 4.02%。

由此可以得出, 弹射线圈的加入可以使电枢发射过程的效率提高。

3 结论

通过仿真分析可知, 在电枢所受电磁力的方向在运动过程中发生了反向。在驱动线圈的电路参数和结构参数都相同的情况下: 随着电枢质量的增加, 电磁力反向时刻不断推迟, 电磁力峰值不断增加, 电枢运动速度峰值不断下降, 电枢最终运动位移不断减小, 使发射效率降低; 随着电枢速度的增加, 电磁力的反向时刻前移, 使得加速区域和电能利用率明显减小, 从而降低了系统的发射效率, 而且反向点前移的根本原因是电枢进入线圈的速度。在大质量电磁发射的研究中要考虑发射速度随着质量增加而减小的问题, 而且为了提高多级线圈发射器的发射效率, 应适当调整各级线圈的电路参数或结构

头部速度较大, 双模毁伤元的长径比都较为合理且成形形态最好。

参考文献:

- [1] 陈忠勇, 李文彬, 高旭东, 等. 药型罩结构参数对侵彻体成型的影响[J]. 四川兵工学报, 2011(2): 18-21.
- [2] 吴义锋, 王晓鸣, 李文彬, 等. 船尾装药结构对侵彻体性能影响的仿真研究[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(2): 231.
- [3] 陈奎. 双模毁伤元侵彻威力匹配研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [4] 范晨阳. 弹丸侵彻混凝土 SPH 数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [5] 石少卿, 汪敏, 孙波, 等. AUTODYN 工程动力分析及应用实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 38-40.
- [6] 汤建明. 基于 ANSYS\LS-DYNA 进行 EFP 成形及切割仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [7] 黄正祥. 聚能杆式侵彻体成型机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [8] 郭萌萌, 廉鹏, 陈松, 等. 基于水力空化原理倒出装药的模拟与实验[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 58-61.
- [9] 曹兵. EFP 成型机理与关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.

参数。电枢受力反向时刻随速度提高而提前的现象, 为多级线圈炮触发策略研究提供了基础。并且, 在大质量物体发射的方案设计中, 在被发射物体底部加设弹射线圈可提高发射效率。

参考文献:

- [1] FAIR H D. Guest Editorial 18th IEEE International EML Symposium[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1064-1066.
- [2] 张红旭, 张军, 董健年, 等. 添加轭铁对磁阻型电磁发射的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 44-47.
- [3] 李伟波, 曹延杰, 朱良明, 等. 电磁线圈弹射导弹技术研究[J]. 飞航导弹, 2012(11): 52-55.
- [4] 王钊, 曹延杰, 王旻, 等. 三级电磁线圈垂直发射器工作过程仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 14-19.
- [5] 李凤层, 雷彬, 李治源, 等. 单级感应线圈发射器参数分析与动态特性计算[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 72-75.
- [6] 向红军. 电磁感应线圈炮原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015: 12-15.
- [7] 邹本贵, 孙学锋, 曹延杰, 等. 舰载导弹电磁线圈垂直发射方案设计[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 45-48.