

磁阻型电磁发射系统的发射体形态优化研究

胡 浩, 陈息坤, 王燕彬

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 根据磁阻型电磁发射原理及驱动线圈内部磁场分布情况, 推导了基于线性化电感的发射体运动模型, 给出了一个用于计算发射体在线圈中的受力和加速情况的简化方法, 并归纳了部分影响因素。使用 ANSYS Maxwell 仿真软件对不同形状发射体在线圈中的受力变化进行仿真分析。研究结果为实际磁阻型电磁发射中应用的发射体形状设计提供了参考。

关键词: 磁阻型电磁发射; 受力分析; 运动模型; 线性化电感

中图分类号: TM 153+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)11-0088-06

Research on Optimization of Emitter Shape for Reluctance Launch System

HU Hao, CHEN Xikun, WANG Yanbin

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: According to the principle of the device and the magnetic field of the drive coil, the motion model of emitter was deduced based on the linear inductance model. A simplified calculation method for the force and the acceleration of emitter in the coil was given and some influence factors were concluded. The force to the different shapes of emitter in the coil was simulated by ANSYS Maxwell. All of these provided the guide for the further design and optimization of emitter used in reluctance launch system.

Key words: reluctance launch; force analysis; motion model; linear inductance

0 引 言

相比利用燃料燃烧产生反推力的传统发射方式, 电磁发射具有噪声小、无烟雾、速度高等优点, 在军事和民用领域应用前景广泛。根据结构的不同, 电磁发射可以分为轨道型、线圈型和重接型, 其中线圈型根据加速原理的不同又可以分为感应型和磁阻型两类^[1]。在磁阻型电磁发射方案中, 发射体作为磁阻型电磁发射的最终作用对象, 其自身作为磁路的一部分通过磁场直接与驱动线圈耦合。发射体的材料、截面积、长短、位移量的差异均可能引起线圈的电感、磁路磁阻等方面的变化, 进而影响电磁发射的效果。文献[2]介绍了磁阻电磁炮的一般理论, 分析了系统的能量变化。文献[3]从磁通链的角度建立了电感与位置及电

流变化的一般关系。文献[4-6]利用有限元仿真从不同的角度探讨了磁阻电磁发射的一般规律。对于磁阻型电磁发射装置的设计问题, 难以归纳出一个有效的参考方法, 也缺少针对于发射体形状差异对其受力变化规律的讨论。

本文以磁阻型电磁发射为研究对象, 在介绍发射原理及驱动线圈内部磁场分布情况的基础上, 推导了基于线性化电感下的发射体运动模型, 给出了一个对发射体在线圈中的受力和加速情况计算的简化方法, 并归纳了部分影响因素。最后利用 ANSYS Maxwell 有限元分析软件对发射体运动时的受力情况进行仿真, 通过改变发射体有效截面积、长度、锥度等参数, 探讨不同形状发射体在磁场中的受力规律, 为磁阻型电磁发射的设计与应用提供参考。

作者简介: 胡 浩(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

王燕彬(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

陈息坤(1962—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变换与控制技术、新型储能及控制技术等。

1 磁阻型电磁发射原理

磁阻型电磁发射装置主要由驱动线圈、铁磁发射体、发射管道、供电电源、电力电子开关等部件组成,其基本结构如图 1 所示。

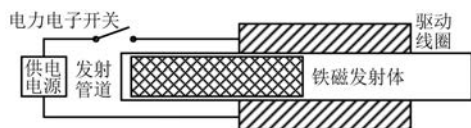


图 1 磁阻型电磁发射装置基本结构

用作电-磁能量转换的驱动线圈一般采用空心线圈结构,通电后产生磁场作用于铁磁发射体使之磁化。由于发射体比之空气具有较高的磁导率,根据磁阻最小原理,磁通总是沿着磁导最小的路径闭合,磁力线具有力图缩短磁通路径以减小磁阻和增大磁导的本性,发射体在磁场的作用下会受到轴向的电磁力,向线圈中心即磁阻最小的方向移动^[7]。持续的受力将形成加速作用,在合理的电流控制下能够使得发射体以一定的速度脱离驱动线圈,实现电磁发射。

根据磁阻型电磁发射的基本原理可知,发射体在系统中的受力被定义为磁场能量的梯度^[8],即电感储能在发射体位移方向上的导数,从电感量的角度可以表述为

$$F(t, x) = \nabla W = \frac{1}{2} i(t)^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (1)$$

式中: W ——电感储能;

$i(t)$ —— t 时刻电感电流;

$L(x)$ ——相对位移 x 时的线圈电感。

根据式(1)可知,发射体在驱动线圈中的受力大小由当前时刻的线圈电感变化率和线圈电流大小共同决定。若外部采用电容器或恒压源等电源进行供电,则电流的大小将受到线圈电感变化的影响,两者互相耦合。由于通常情况下发射体所使用的铁磁材料具有非线性的 $B-H$ 曲线,磁阻的变化受到磁场强度的影响,而无法使用上述电感、电流所表述的储能公式^[3]。只能通过对磁通链 $\Psi(x, i)$ 进行积分计算来得到线圈的储能,进一步计算可得发射体受力为

$$F(x, I) = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^I \Psi(x, i) di \quad (2)$$

已知稳定的电流产生恒定磁场,为了分析发射体自身形状的改变对其在线圈中受力变化的影响,探究发射体的优化方向。假定线圈上所通电流维持为一个恒定值,则发射体受力大小仅与线圈电感变化率相关。在无限大的真空中,电流分布已知的情况下,利用毕奥-沙伐定律可以将磁场中的任意一点 P 处的磁场强度 $H(P)$ 表述为^[9]

$$H(P) = \int_v \frac{J(O) \times a_R}{4\pi R^2} dv(O) \quad (3)$$

式中: $J(O)$ ——源点电流密度;

a_R ——由源点 O 指向点 P 的单位矢量;

R ——源点 O 到点 P 的距离;

$dv(O)$ ——源点 O 周围的体积元。

磁阻型电磁发射所使用的驱动线圈作为一个紧密绕制的多层螺线管,可以看成是有限个载流圆环线圈的叠加,其磁场强度分布如图 2 所示。

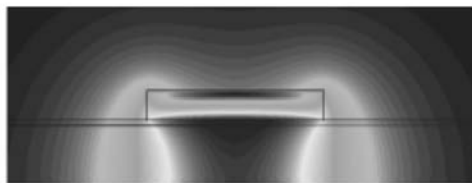


图 2 驱动线圈的磁场强度分布

对毕奥-沙伐定律进行积分,可得线圈内部中点的磁场强度为

$$H_0 = \frac{NI}{l} \quad (4)$$

式中: N ——线圈的匝数;

I ——恒定电流大小;

l ——线圈长度。

进而可以将沿轴线的磁场强度表述为^[10]

$$H(x) = \frac{NI}{2l} \left[\frac{l + |2x - l|}{\sqrt{4r^2 + (l + |2x - l|)^2}} + \frac{l - |2x - l|}{\sqrt{4r^2 + (l - |2x - l|)^2}} \right] \quad (5)$$

式中: x ——发射体与线圈相对位移;

r ——线圈的半径。

线圈本身产生的磁场在发射体运动过程中并不变化,但铁磁发射体磁化产生的附加磁场使线圈的自感和互感发生了变化,有发射体下的磁感应强度分布如图 3 所示。

由毕奥-沙伐定律可知,当空间电流分布增大

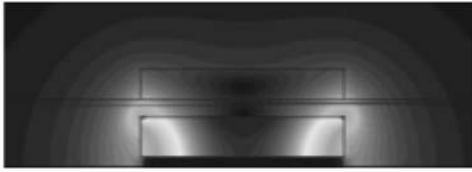


图3 有发射体下的磁感应强度分布

μ_r 倍时,磁场的磁感应强度也增大 μ_r 倍,有磁介质存在的磁场比无磁介质时增大了 μ_r 倍,即:

$$B_e = \mu_r B_0 - B_0 \quad (6)$$

从磁场能量的角度可得电感的表达式为^[11]

$$L = \frac{\int_{\text{vol}} B \cdot H dv}{I^2} \quad (7)$$

由上述分析可知,线圈电感量是一个关于发射体与驱动线圈相对位移有关的非线性函数 $L(x)$,且关于线圈轴向中心位置对称。为了简化计算,视电感在发射体的有效运动范围内呈线性变化,进而将整个电感进行线性化。忽略发射体从无限远靠近到驱动线圈入口这一过程中所引起的电感变化,视发射体在驱动线圈入口边缘时为相对位移零点,假定此时的电感为空心线圈的电感量 L_0 。

若保持发射体等效截面积不变,同时将线圈内部看作为磁场强度不变的恒定磁场,利用电感计算的公式,可简化计算电感的变化量为

$$\Delta L = \frac{K\mu_0 N^2}{l^2} (\mu_r S_e l_e - Sl) \quad (8)$$

式中: K ——线圈形状系数;

μ_0 ——真空磁导率;

S ——线圈面积;

μ_r ——发射体相对磁导率;

S_e ——发射体有效截面积;

l_e ——发射体有效长度。

若考虑发射体截面积变化,并且假设线圈内部磁场均匀按轴线上磁场强度变化,结合式(5)通过积分可得:

$$\Delta L = \mu_0 \int_0^l S_e(x) B(x) H(x) dx - K\mu_0 H_0^2 Sl \quad (9)$$

式中: $S_e(x)$ ——发射体在相对位移 x 上的有效截面积;

$B(x)$ ——发射体在相对位移 x 上的磁感

应强度。

线性化处理结果如图4(a)所示,在此基础上再根据实际情况进行一个修正偏移,可得近似后的电感变化曲线如图4(b)所示,其中 $-x_0 \leq x \leq l_s - x_0$ 为线性区段。对于不同长度的发射体,可以将电感量表述为一个在一定范围内受发射体进入线圈长度变化而变化的线性函数,即:

$$L(x) = \begin{cases} L_0 + \Delta L \frac{x - x_0}{l_s} & (x < l_e + x_0 \leq l_s + x_0) \\ L_0 + \Delta L & (l_e + x_0 < x < l_s + x_0) \end{cases} \quad (10)$$

式中: l_s ——有效运动距离;

x ——发射体与线圈的相对位移;

x_0 ——位置偏移量。

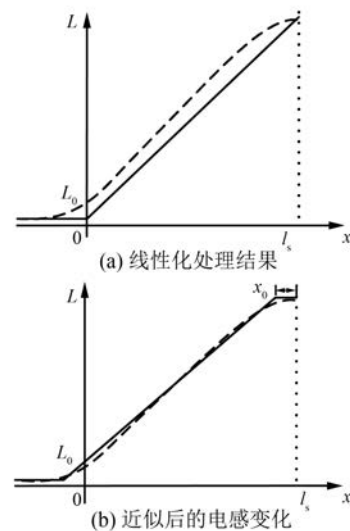


图4 线性化处理后的电感变化曲线

若线圈电流持续恒定,则发射体在该线性区段上的受力可以等效视为一个恒力,如图5所示。忽略阻力的影响,电磁力的做功多少即发射体所获得的动能大小受到发射体在线性区段中运动距离的限制^[12]。根据力做功的定义,可在一定程度上估算发射体在电磁发射中所获得的动能为

$$W = \frac{sI^2 \Delta L}{2l_s} \quad (11)$$

式中: I ——线圈上所加恒定电流;

s ——发射体在线性区段上运动的距离。

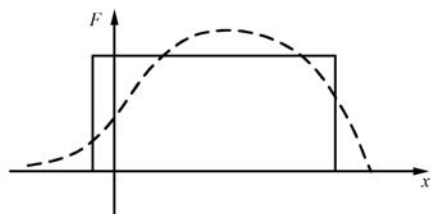


图5 电感线性化后恒定电流下的等效受力

2 发射体受力仿真与分析

利用磁阻型电磁发射结构以及规则形态发射体中心轴对称的特点,在 ANSYS Maxwell 电磁仿真软件中建立 R - Z 柱面坐标系下的 2D 仿真模型,进一步对不同形态的发射体在磁阻型电磁发射过程中的受力情况进行观察分析。

图 6 给出了建立的仿真模型及其网格剖分情况,包括发射管道、求解区域、驱动线圈、铁磁发射体、运动区域。模型基础条件中发射管道直径为 30 mm;驱动线圈设置为绞线,共 240 匝,材料设置为铜;铁磁发射体直径为 26 mm,长度为 50 mm,材料设置为 10 号钢;运动区域材料设置为空气,以更接近真实情况。

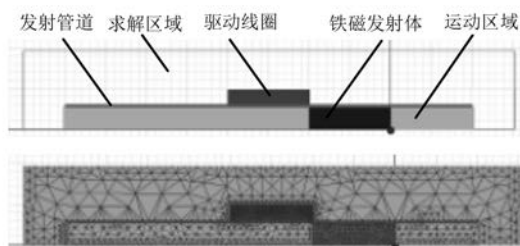


图6 Maxwell 2D 仿真模型及其网格剖分

根据理论分析所得到的影响条件,仿真从发射体横截面积变化、发射体与驱动线圈相对长短变化、发射体前端锥度变化 3 个方面分别对不同形状发射体的在电磁发射中的受力情况进行探究。

2.1 发射体截面积变化

仿真选择在发射体中间开设大小不同的通孔和减小发射体直径两种方式来改变发射体有效截面积,以观察发射体受力与发射体有效截面积大小之间的关系。为排除其他参数对于仿真结果的影响,采用同样的线圈电感结构,相同的发射体运动速度,保持发射体材料、长度不变,忽略摩擦力

等力的影响,考虑在恒定电流下发射体在运动过程中的受力情况。

选取 3 种不同的发射体直径 ($D = 26$ 、22、18 mm) 进行仿真,可得线圈电感变化曲线如图 7(a) 所示,发射体受力曲线如图 7(b) 所示。

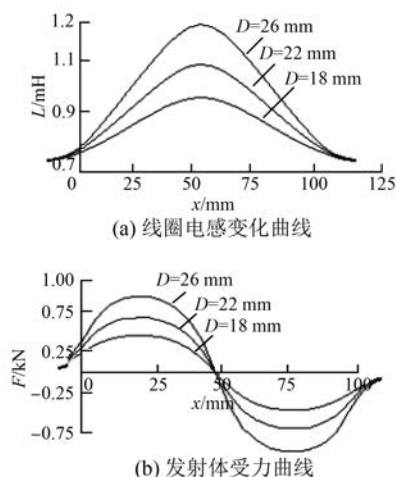


图7 不同直径发射体的仿真曲线

保持发射体直径 $D = 26$ mm 的情况下,在其中心开设 3 种不同直径 ($d = 4$ 、8、12 mm) 的通孔分别进行仿真,可得线圈电感变化曲线如图 8(a) 所示,发射体受力曲线如图 8(b) 所示。

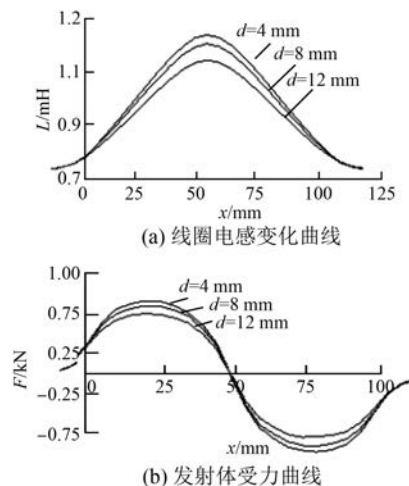


图8 不同孔径发射体的仿真曲线

由仿真结果可知,发射体的有效截面积越大,在线圈中运动的时候电感变化量和电感变化率越大,同一相对位移时在磁场中受到的电磁力也越大。在图 8 中取电感变化量线性度较好的区段数据记录并计算,如表 1 所示。根据表 1 中数据计

算可得线性区段的电感变化率 k 与发射体截面积 S_e 成正相关关系,即 $k \propto S_e$,同时发射体的最大受力 $F \propto k$ 。

表 1 发射体截面积变化仿真结果

直径 D/mm	通孔直径 d/mm	截面积 S_e/mm^2	电感变化率 $k/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$	最大受力 F/kN
26	0	530	0.10	0.89
22	0	380	0.07	0.64
18	0	254	0.05	0.43
26	4	518	0.10	0.86
26	8	480	0.09	0.80
26	12	417	0.08	0.70

2.2 发射体与线圈相对长短变化

在上述仿真条件的基础上,保持发射体直径 $D=26\text{ mm}$ 、线圈长度 $l=50\text{ mm}$ 不变,选取 3 种不同的发射体长度($l_e=35、50、65\text{ mm}$),观察在恒定电流下,不同长度发射体在线圈中运动时的受力情况,以发射体与驱动线圈重合点为相对位移零点,得到线圈电感变化曲线如图 9(a)所示,发射体受力情况如图 9(b)所示。

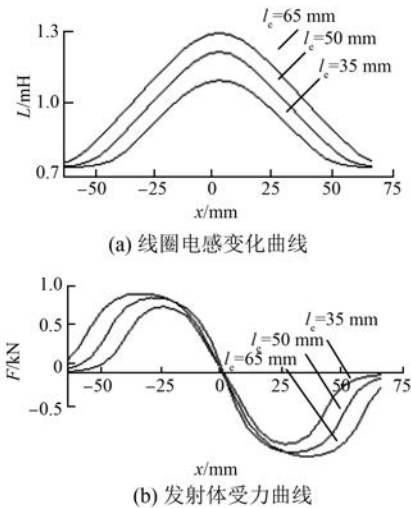


图 9 不同长度发射体的仿真曲线

选取图 9 中线性度较好的区间记录数据如表 2 所示,可以看出相同截面积下其电感变化率基本一致,而发射体的最大受力在一定程度上受到发射体长度的影响。发射体长度小于线圈长度时受力大小明显减小,发射体长度超过线圈长度后受力会有少量增加。这是由于发射体参与磁路

的长短不同,同时发射体在线圈外的部分对于线圈电感变化影响较小。因为本文前述的估算方法中重点考虑线圈内部的有效铁心长度,未对完整发射体作计算,通过忽略线圈外的部分,将发射体与线圈相对位移零点作为电感变化起始进行线性化分析,故而与实际有所差异。

表 2 发射体长度变化仿真结果

发射体长度 l_e/mm	电感变化率 $k/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$	最大受力 F/kN
65	0.11	0.93
50	0.11	0.89
35	0.10	0.78

当发射体短于线圈长度时,发射体完全进入线圈后的状态可以看作是发射体在线圈内部运动的过程,在无长度增加的同时通过改变位置来影响磁导率,电感量变化小且以非线性为主,线性区段变窄,有效加速距离变窄。当发射体等于或长于线圈长度时,则可以视作为发射体在线圈中逐渐伸长的一个过程,同时因为磁阻最小的时刻仅与发射体中心和线圈轴向中心重合的时刻有关,因此根据发射体长度的不同,在线圈长度一定的情况下,实际有效加速距离在一定程度上能够随发射体加长而得以延长。

2.3 发射体前端锥度变化

仿真针对常规炮弹前端一般呈现类锥形结构的情况,在保持发射体总长度 $l_e=50\text{ mm}$ 不变的条件下,将其前端设置为相同底面直径 $D=26\text{ mm}$,不同高度($h=0、20、40\text{ mm}$)的椎体进行观察,得到线圈电感变化曲线如图 10(a)所示,发射体受力情况如图 10(b)所示。

发射体锥度变化仿真结果如表 3 所示。从仿真结果中取适量数据记录,当发射体前端锥度减小时,其入射时电感增加减缓,这是由于相同位移下的发射体有效截面积变化小,对应电感变化率也降低,而发射时的电感变化则相对较快。同时发射体与线圈重合点即磁阻最小的点当锥度减小时会适当向前移动,在实际发射中需要根据实际准确的零点位移进行电流控制以达到最大的加速可能,但此时等效平均受力较小,在相同的电流即相同的线圈损耗下无法获得一个高效的加速结果,实际发射中可以根据需要适当减少对椎体部分的加速时间。

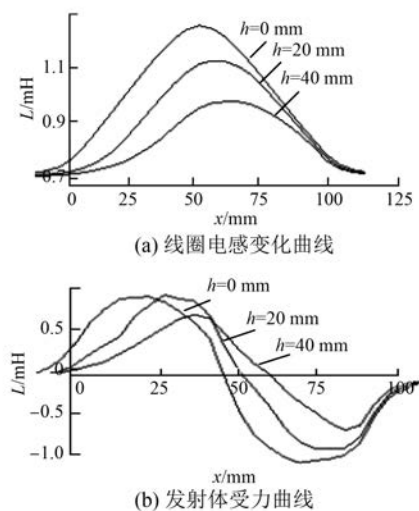


图 10 不同锥度发射体的仿真曲线

表 3 发射体锥度变化仿真结果

锥体长度 h/mm	电感变化率 $k/(H \cdot m^{-1})$	受力零点位移 x/mm	最大受力 F/kN
0	0.11	50	0.93
20	0.10	57	0.87
40	0.08	66	0.70

3 结 语

本文首先介绍了磁阻型电磁发射的原理和磁场情况,进而推导了基于线性化电感下的发射体运动模型,给出了一个发射体受力与其形态的简化关系并归纳了部分影响因素。然后,利用 ANSYS Maxwell 仿真软件中的 2D 瞬态求解器对不同形状弹丸在电磁发射中的受力情况进行了仿真研究。结果表明:发射体在电磁发射过程中的加速能力主要与线圈电感量变化的线性区段长度有关;在发射体长度和线圈参数一定的情况下,线圈的电感变化率与发射体的等效截面积成正相关关系,发射体在线圈中的受力大小与发射体的等效截面积成正相关关系;发射体的受力大小在一定程度上受到发射体与驱动线圈相对长度的影响,尤其当发射体长度大于线圈长度时,能够在一

定程度上延长加速距离;发射体的锥度变化或发射体形态的不规则变化会改变电感量的变化并且引起受力零点的移动,根据实际情况调节加速控制时间能够改善加速效果。研究分析及仿真结果将为后续磁阻型电磁发射中的发射体和线圈形状结构设计提供指导。

【参考文献】

[1] 王莹,肖峰.电炮原理[M].北京:国防工业出版社,1995.

[2] BRESIE D A, ANDREWA J A.Design of a reluctance accelerator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991,27(1): 623-627.

[3] INGRAM S K, PRATAP S B.A control algorithm for reluctance accelerators [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991,27(1): 156-159.

[4] 王泽民,王中华.磁阻型电磁发射装置分析与建模[J].电脑知识与技术,2016,23(23): 232-234.

[5] 宋玉贵,彭甲,陈武军,等.磁阻型电磁发射抛体参数寻优[J].通讯世界,2015(6): 230-231.

[6] 崔鹏,刘少克.磁阻型线圈发射器弹丸速度与截面积关系[J].兵工自动化,2006,25(12): 39-41.

[7] BARRARA T, BEARD R. Exploration and verification analysis of a linear reluctance accelerator [C]//Electromagnetic Launch Technology (EML), 2014 17th International Symposium on, IEEE, 2014: 1-6.

[8] HAYT W H, BUCK J A. Engineering Electromagnetics[M].西安:西安交通大学出版社,2009.

[9] 李纯钢,高娥娥,刘艳.长直载流螺线管磁场的研究[J].科技信息,2009(9): 416-417.

[10] 宋黎明,杨前明,谢计业,等.电感式位移传感器输出特性仿真分析[J].机电工程,2012,29(7): 795-798,802.

[11] 吴素文.空心圆柱线圈的电感计算[D].郑州:郑州大学,2003.

[12] SLADE G W. A simple unified physical model for a reluctance accelerator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005,41(11): 4270-4276.

收稿日期: 2018-07-06