

直流螺旋线圈电磁发射器的能量转换效率*

杨 栋^{1,2}, 刘振祥³, 舒 挺¹, 杨丽佳¹, 沈 志³, 欧阳建明³

- (1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;
2. 莆田学院 机电工程学院, 福建 莆田 351100;
3. 国防科技大学 文理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:综合考虑换向过程、炮口剩余磁能和电阻的能量损耗等因素,建立等效电路模型,通过理论、数值计算和实验的方法,对比分析了常规螺旋发射器和一种新型螺旋发射器的效率。结果表明:电阻焦耳热损耗的能量最大,其次是换向磁能损失,而炮口剩余磁能损失最小。降低电阻、增大互感梯度、减小驱动线圈单元的匝数、增大工作电流等方式可以有效提高发射器的能量转换效率。然而,较大的互感梯度也会带来较大的换向磁能和炮口磁能损失,造成炮管烧蚀甚至损坏、能量泄放和效率降低。另外,恒流工作模式的螺旋发射器理论效率超过轨道炮,且新型螺旋发射器结构的理论效率接近100%,未来有望在超导或较低电阻的情况下实现应用。

关键词:电磁发射;线圈炮;螺旋线圈发射器;能量转换效率

中图分类号:TM303.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)05-103-06

Energy conversion efficiency of direct current helical coil electromagnetic launchers

YANG Dong^{1,2}, LIU Zhenxiang³, SHU Ting¹, YANG Lijia¹, SHEN Zhi³, OUYANG Jianming³

- (1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. School of Mechanical & Electrical Engineering, Putian University, Putian 351100, China;
3. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Considering the factors such as commutation process, residual energy of muzzle and Joule loss of resistance, the equivalent circuit model was established, and the efficiency of conventional helical launcher and a novel helical launcher was analyzed by theoretical, numerical and experimental methods, respectively. The results show that the Joule heat loss is the largest, followed by the magnetic energy loss of commutation, while the muzzle residual magnetic energy loss is minimal. The energy conversion efficiency of the launcher can be effectively improved by reducing the resistance, increasing the mutual inductance gradient, reducing the number of turns in the stator coil unit, and increasing the operating current, etc. However, larger armature coil turns will also bring greater magnetic energy of commutation and muzzle magnetic energy loss, resulting in barrel erosion or even damage, energy release and low efficiency. Besides, the theoretical efficiency of the helical launcher is higher than the one of the railgun under constant current operating mode. The theoretical efficiency of the novel helical launcher is close to 100%, which is expected to be implemented in the case of superconductivity or lower resistance in the future.

Key words: electromagnetic launch; coil gun; helical coil launcher; energy conversion efficiency

电磁发射器是一种将电磁能转换为物体动能的装置,主要分为轨道发射器、线圈发射器、重接炮和电热化学炮等。1961年, Thom等提出了一种螺旋线圈电磁发射器(Helical coil Electro-Magnetic Launcher, HEML)^[1]。随后经 Mongeau、Snow和 Engel等的深入研究,在理论和工程技术方面取得了较大的进展^[2-6]。2005年, Engel等研制了

一种口径为40 mm、长度为750 mm的螺旋线圈发射器,电枢采用空心外置结构,将525 g弹丸加速到140 m/s,能量效率达到18.2%^[7]。2009年, Engel等设计了一种口径为40 mm、长度为750 mm的螺旋线圈发射器,电枢采用实心内置结构,将170 g弹丸加速到64 m/s^[8]。空心外置结构的电枢适合弹射大质量载荷,而实心内置

* 收稿日期:2017-07-06

基金项目:国家部委基金资助项目(51326020601)

作者简介:杨栋(1983—),男,安徽桐城人,博士研究生, E-mail: d.yang@aliyun.com;

刘振祥(通信作者),男,教授,博士, E-mail: lzx_human@sina.com

结构更适合中低速弹丸发射。目前实心内置结构发射器尚未有发射较大质量弹丸的实验研究。

电磁发射器主要工作于大电流和高功率的状态下,大电流的有效换向是一项关键技术。电磁发射器采用直流工作模式,可以避免大电流在波动时引起较大感应电压,因此可以降低结构的绝缘要求。另一方面,直流工作模式可以使电磁加速力保持稳定,从而提高发射器的速度。当前轨道炮的发展较为成熟,其理想工作电流即为恒流模式。轨道炮的换向机制比较简单,其换向过程由前进的电枢自动完成。然而,轨道炮的负载阻抗较低,所需的大电流对电源有很高的要求。另外,恒流模式下的轨道炮存在与弹丸动能相等的炮口剩余磁能,其理论效率不超过 50%^[9]。

相对于轨道炮,线圈发射器具有高负载阻抗、高理论效率和对称结构等优点。相对于常规螺旋线圈电磁发射器(Conventional HEML, CHEML),新型螺旋线圈电磁发射器(Novel HEML, NHEML)的换向损失磁能和炮口剩余磁能更小,其理论效率更高。线圈发射器的缺点在于复杂的换向机制,高速、大电流的可靠换向一直是制约其发展的技术瓶颈之一。

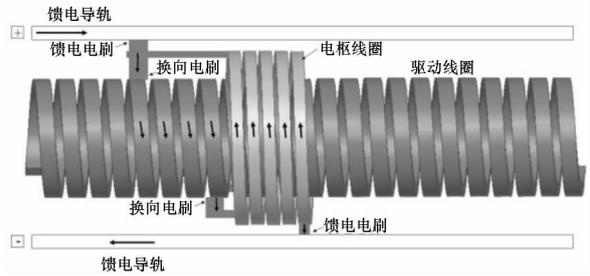
Engel 等对常规螺旋发射器和新型螺旋发射器的效率进行了研究,但未考虑换向过程和剩余磁能对发射器效率的影响^[10-11]。Musolino 等建立了螺旋发射器换向过程的数值模型,仿真结果表明,换向能量损失和电弧烧蚀对发射器效率的影响不可忽略^[12-13]。特别是在高速运动状态下,电刷滑动电接触产生的物质,极有可能引发激励区匝间短路,严重降低发射效率。新型螺旋发射器的换向损耗和炮口损耗都较低,有利于减小跳匝电弧和炮口电弧的烧蚀。

1 能量转换效率公式

图 1(a)所示为常规螺旋线圈电磁发射器,主要由驱动线圈、电枢线圈、两个馈电导轨、两个馈电电刷和两个换向电刷组成。固定在弹丸上的前后换向电刷使炮管部分激励,并使该激励段与电枢运动保持同步。驱动线圈与电枢线圈的电流方向相反,电枢线圈受到电磁排斥力的作用加速向前。图 1(b)所示为新型螺旋线圈发射器,只有一个馈电导轨、一个馈电电刷和一个换向电刷。新型螺旋发射器的驱动线圈初始处于全部激励的状态,其电流方向与电枢线圈的电流方向相同,产生

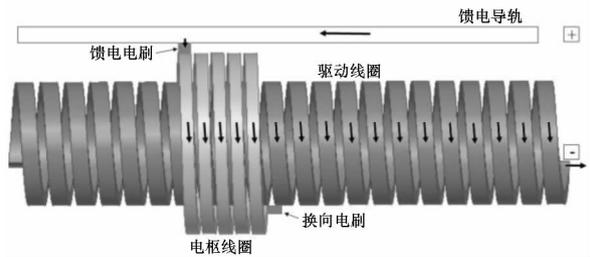
吸引力。

换向电刷使相邻驱动线圈匝短路,形成闭合的换向匝。为了同时满足换向和加速功能,电枢线圈必须位于换向匝的后方,运动的载流电枢线圈在换向匝中产生感应电流而进行换向^[3]。运动感应换向的条件取决于电枢和换向匝的相对位置、线圈匝数、电刷长度和驱动线圈匝间距等因素。螺旋发射器一般不满足完全换向的条件,由于换向匝电流的瞬间通断,实验中存在电刷跳匝、电弧烧蚀的现象。



(a) 常规螺旋线圈发射器结构图

(a) Structure diagram of the CHEML



(b) 新型螺旋线圈发射器结构图

(b) Structure diagram of the NHEML

图 1 两种 HEML 的结构图

Fig. 1 Structure diagrams of two different HEML

螺旋发射器的电磁加速力可以由系统磁储能在发射方向(即 z 方向)的梯度得到。

$$F(t) = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} \times 2M(z)i^2 \right]}{\partial z} = M' i(t)^2 \quad (1)$$

式中, $M' = dM(z)/dz$ 为 z 方向上驱动线圈和电枢线圈之间的互感梯度, t 为电枢加速时间, $i(t)$ 为发射器工作电流。

不同的螺旋线圈发射器结构,其电刷换向方式也有所不同。常规发射器存在前、后电刷换向,而新型发射器只有后电刷换向过程。Mongeau 对后换向过程的能量转换进行了研究^[2],得到了后换向过程的磁能损失:

$$\Delta U_{cl} = \frac{1}{2} L_T I_0^2 \left(1 - \frac{M_{TS}^2}{L_T L_S} \right) \quad (2)$$

式中, L_S 为驱动线圈自感, L_T 为换向匝自感, M_{TS}

为换向匝和驱动线圈的互感, I_0 为发射器的工作电流。

为了完整地分析螺旋发射器的效率, 还需要分析其前换向效率。图2为前换向过程的等效电路图, 换向刷的前、后沿相当于闭合开关 S_1 和断路开关 S_2 。前换向过程为: 换向刷前沿将换向匝短路, 即开关 S_1 闭合; 换向刷后沿将换向匝断开, 即开关 S_2 断开, 使前匝激励。在开关 S_2 断开之前, 驱动线圈回路电流为初始值 I_0 。开关 S_2 断开时, 其间隙形成位移电流或等离子体电弧 i_3 并消耗部分能量, 将其等效为可变电阻 $R(t)$ 。设驱动线圈电流为 i_1 , 开关 S_1 电流为 i_2 。分别考虑两个闭合回路, 根据基尔霍夫电压定律可得:

$$-L_S \frac{di_1}{dt} - M_{TS} \frac{di_2}{dt} - i_3 R(t) = 0 \quad (3)$$

$$-M_{TS} \frac{di_1}{dt} - L_T \frac{di_2}{dt} + i_3 R(t) = 0 \quad (4)$$

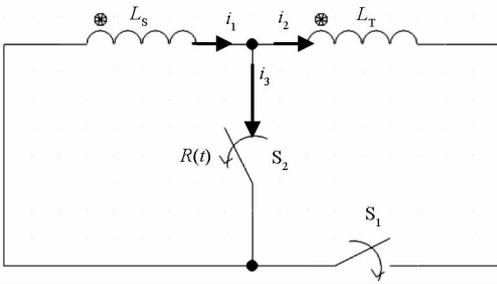


图2 前换向过程的等效电路图

Fig.2 Equivalent schematic of the front commutation process

由式(3)和式(4)得:

$$-L_S \frac{di_1}{dt} - M_{TS} \frac{di_2}{dt} = M_{TS} \frac{di_1}{dt} + L_T \frac{di_2}{dt} \quad (5)$$

对时间积分得:

$$-L_S \int_{I_0}^I di_1 - M_{TS} \int_0^I di_2 = M_{TS} \int_{I_0}^I di_1 + L_T \int_0^I di_2 \quad (6)$$

即

$$(L_S + 2M_{TS} + L_T)I = (L_S + M_{TS})I_0 \quad (7)$$

式(7)也可以由磁通守恒定律得到。换向后驱动线圈回路电流为:

$$I = \frac{L_S + M_{TS}}{L_S + 2M_{TS} + L_T} I_0 \quad (8)$$

前换向过程损失的磁能为:

$$\begin{aligned} \Delta U_{c2} &= \frac{1}{2} L_S I_0^2 - \frac{1}{2} (L_S + L_T + 2M_{TS}) I^2 \\ &= \frac{1}{2} I_0^2 \frac{L_S L_T}{L_S + 2M_{TS} + L_T} \left(1 - \frac{M_{TS}^2}{L_S L_T} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: M_{TS} 为前(后)换向匝和驱动线圈的互感, 对于绕线均匀的螺线管, 二者相等。

令 $K = M_{TS} / \sqrt{L_S L_T}$ 为换向匝和驱动线圈之间的互感系数, $L_0 = L_S + 2M_{TS} + L_T$ 为前换向完成后驱动线圈的总电感。最后可得前、后电刷换向的磁能损失:

$$\Delta U_{c2} = \frac{1}{2} I_0^2 \frac{L_S L_T}{L_0} (1 - K^2) \quad (10)$$

$$\Delta U_{c1} = \frac{1}{2} L_T I_0^2 (1 - K^2) \quad (11)$$

常规螺旋发射器运行过程中, 电源能量一部分转换为电枢动能 u_k , 一部分转换为线圈磁储能 u_m (通常以炮口电弧形式释放), 一部分在换向过程中损失 (Δu_c), 还有一部分转换为焦耳热损耗 u_R 。如果发射器工作于恒流模式, 发射器的加速长度为 l , 驱动线圈匝宽为 w , 弹丸质量为 m , 则电枢动能 $u_k = Fl = M' I_0^2 l$, 炮口剩余磁能 $u_m = L_e I_0^2 / 2$, 其中 $L_e = L_s + L_a - 2M$ 为发射器的等效电感。前、后换向损失能量的总和 $\Delta u_c = l (\Delta U_{c1} + \Delta U_{c2}) / w = \alpha I_0^2 L_T' l$, 焦耳热损耗 $u_R = I_0^2 R \sqrt{2ml} / (M' I_0^2)$, 其中 R 包括驱动线圈、电枢线圈、电刷的电阻以及接触电阻等。因此, 可以得到螺旋线圈发射器的能量转换效率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{u_k}{u_k + u_m + \Delta u_c + u_R} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{L_e'}{M'} + \frac{\alpha L_T'}{M'} + \frac{R}{I_0} \sqrt{\frac{2m}{LM'^3}}} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $L_e' = L_e / (2l)$, $L_T' = L_T / w$, 无量纲常数 $\alpha = (1 + L_S / L_0) (1 - K^2) / 2$ 为驱动线圈炮管的结构参数。

根据以上方法和式(12), 可以分析螺旋发射器不同能量损耗大小及其影响因素。

2 能量转换情况和效率影响因素

实验中, 发现螺旋发射器的炮管容易遭受匝间电弧以及炮口电弧的损坏。因此设计了一种单元型炮管结构, 由一系列线圈单元串联组成, 相邻单元之间加陶瓷绝缘环。这种模块化的结构方便损坏单元的更换、维护和匝密度的调整, 大大延长了炮管的寿命。同时, 发射器的封装结构坚固可靠, 能承受大电流发射时较大的电磁应力。该发射器的参数见表1。

表 1 螺旋线圈发射器的结构参数

Tab.1 Structural parameters of the HEML

参数	数值
驱动线圈外径/mm	150
驱动线圈内径/mm	120
驱动线圈单元宽度/mm	20
驱动线圈单元匝数	6
驱动线圈单元个数(激励)	5
弹丸线圈外径/mm	110
弹丸线圈内径/mm	50
弹丸线圈轴向长度/mm	80
弹丸线圈匝数	24
弹丸质量/kg	4.5
加速长度/m	1

为了方便计算发射器的一些电路参数,如线圈电感、电阻、电感梯度等,将电枢线圈和驱动线圈看成两个空心同轴矩形截面线圈,如图 3 所示,电枢线圈和驱动线圈分别由矩形截面绕 Z 轴旋转而成。采用网格数值方法近似计算线圈的电感,首先将线圈的矩形截面剖分成许多近似正方形的网格单元,然后用位于单元中心处的圆电流环近似每一个矩形单元。通过计算第一、第二类完全椭圆积分得到电流环的互感,从而求得线圈自感和互感。

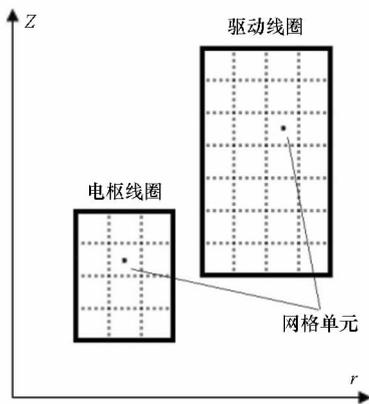


图 3 网格单元法计算矩形截面线圈的电感

Fig.3 Element method for calculating the inductance of rectangular section coils

图 4 为利用网格法计算得到的电感和电枢受力大小,其中在计算电感值时取线圈的匝数为单匝,而实际线圈的自感与匝数的平方成正比,互感

与两线圈匝数的乘积成正比。将驱动线圈和电枢线圈的互感对其相对位置求导得到互感梯度值 M ,取工作电流 $I_0 = 3 \text{ kA}$,由电枢受力式(1)计算得到加速力 F 。图 4 中横坐标 Z 表示新型螺旋发射器的驱动线圈的激励长度,激励长度减小到大约在两倍线圈直径以内时,电枢受力才开始明显减小。

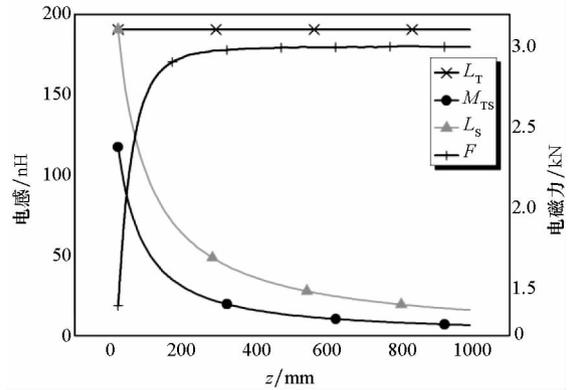


图 4 HEML 的电感和电枢受力

Fig.4 Inductance and acceleration force of the HEML

常规螺旋发射器的驱动线圈激励单元数为 5,即激励段长度 $z = 100 \text{ mm}$;驱动线圈和电枢线圈的绕线为铜线。由图 4 的计算结果,可得该结构常规螺旋发射器的电路参数,见表 2。由前面的换向磁能损失、炮口剩余磁能、电阻损耗和发射器效率公式等,计算得到表 3 的结果。在可无限减小电阻的理想情况下,即式(12)不考虑电阻项时,可得 HEML 的理论效率。

表 2 螺旋线圈发射器的电路参数

Tab.2 Circuit parameters of the HEML

参数	单匝值	实际值
驱动线圈电感/ μH	0.099 69	89.72
换向匝电感/ μH	0.190 62	6.86
驱动线圈和换向匝互感/ μH	0.053 13	9.56
电枢线圈电感/ μH	0.056 24	32.39
驱动、电枢线圈互感/ μH	0.018 54	13.35
互感梯度/ $(\mu\text{H}/\text{m})$	0.419	301.32
电枢线圈电阻/ $\text{m}\Omega$	0.008 64	4.98
驱动线圈电阻/ $\text{m}\Omega$	0.047 1	8.48
常数 α		0.755 9
电枢受力/ N	3.77	2712

表3 螺旋线圈发射器的发射性能参数

Tab.3 Launch performance parameters of the HEML

参数	CHEML	NHEML
速度/(m/s)	34.7	36.4
弹丸动能/J	2709	2981
换向损耗/J	2334	1388
电阻损耗/J	6979	2.464E+4
剩余磁能损失/J	429.3	145.8
理论效率/%	49.5	66.1
实际效率/%	21.8	10.3

对 HEML 的能量转换情况进行分析,可以得到以下结论:

1) 对于相同的驱动炮管、电枢线圈结构和工作电流,常规螺旋发射器和新型螺旋发射器的弹丸速度接近。

2) 螺旋发射器发射过程中,电阻焦耳热损耗的能量最大,其次是换向磁能损失,而炮口剩余磁能损失最小。因此,换向的匝间电弧烧蚀问题比炮口电弧烧蚀问题更严重。提高效率的有效方式依次包括:降低电阻、增大互感梯度、减小驱动线圈单元的匝数、增大工作电流等。

3) 常规螺旋发射器的换向损耗和剩余磁能损耗较大,理论效率较低;而新型发射器的电阻损耗较大,实际效率较低。新型发射器的炮口损失为常规发射器的 1/3,其换向损失约为常规发射器的 1/2。由于驱动线圈被全部激励,新型发射器的电阻热损耗严重,很难应用于实际中。只有在导体电阻很低或超导的情况下,新型螺旋发射器才能发挥效率优势。

从式(12)可知,增大互感梯度能提高能量转换效率。比较容易实现的方法是增大电枢线圈或者驱动线圈的匝数,通常前者较为合理。为了研究螺旋线圈发射器的效率影响因素,分别改变电枢线圈匝数和线圈绕线导体的电阻率,得到发射器的能量转换效率,如图5、图6所示。取 $Na = 100$,改变导线材料的电阻率,图6中横坐标为铜电阻率的倍数。

从图5、图6可以看出:

1) 总体上,能量效率随电枢线圈匝数的增加先增大然后缓慢降低。尤其在考虑电阻损耗时,增大 Na 能显著提高发射器的效率。当 $Na = 24$ 时,常规螺旋发射器的实际效率为 21.8%;当 $Na = 100$ 时,常规螺旋发射器的实际效率为 58.3%。

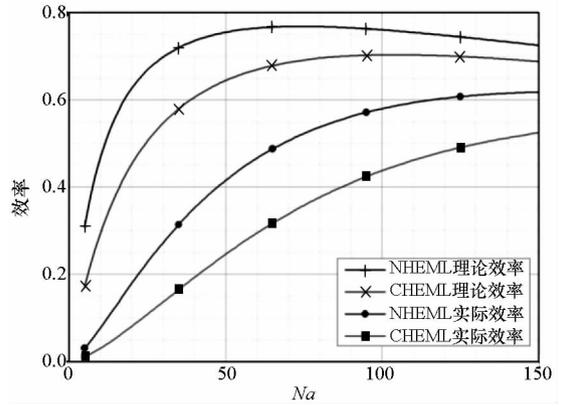


图5 电枢线圈匝数与效率的关系

Fig.5 Relation between the number of turns in the armature coil and the efficiency

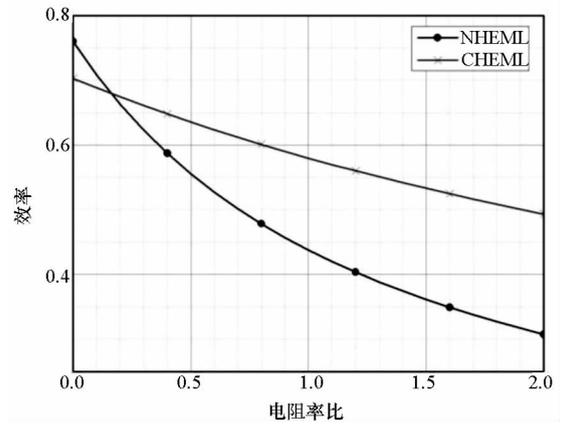


图6 $Na = 100$ 时,线圈导线材料电阻率与效率的关系

Fig.6 Relation between the resistivity of coils and the efficiency when $Na = 100$

2) 当 $Na > 25$ 时,常规螺旋发射器的理论效率大于 50%。这是由于在螺旋发射器的换向过程中,换向匝的磁能会通过线圈间的磁耦合进行部分回收。

3) 考虑电阻时,常规螺旋发射器的效率一般大于新型发射器。当导线电阻降低为铜电阻的 16% 以下时,该结构参数的新型螺旋发射器效率高于常规发射器的。

图7为常规螺旋发射器电枢线圈匝数、线圈导线材料电阻率和效率的三维图。可以直观地看到:在低电阻区, $Na = 100$ 附近的效率最高;当 $Na > 100$ 后,剩余磁能损失所占的比重越来越大。在高电阻区,换向损失能量和炮口剩余磁能所占比重较小,可以通过增大 Na 来提高发射器的效率。

3 实验结果

为了验证螺旋发射器效率的影响因素和在大

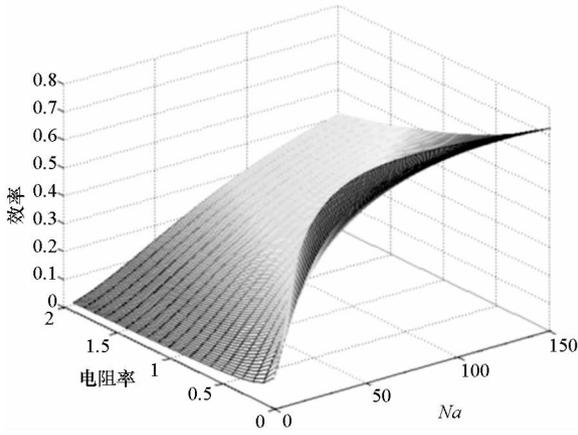


图 7 电枢线圈匝数、线圈导线材料电阻率和效率三维图
Fig. 7 3D diagram of the efficiency, number of turns in the armature coil and the resistivity

电流情况下的结构强度,根据表 1 的参数设计了一种单元炮管型螺旋线圈发射器。发射器炮管由 48 个相同的线圈单元串联而成,其等效电阻为 0.097Ω ,包括线圈导线、导轨、电刷电阻以及接触电阻等。电源系统由 10 个序列脉冲成形网络构成,产生近似平顶的电流。

分别将电枢线圈匝数改变为 8、17、24、48 和 72,利用网靶测速法测量弹丸速度,实验得到的发射器效率如图 8 所示。图中的实线和虚线分别为常规和新型螺旋发射器的理论计算效率,二者比较接近。这说明电阻焦耳热损耗在能量转换中占据了主要部分;相对而言,换向损耗和剩余磁能损耗对效率影响较小。降低电阻是提高螺旋发射器效率的最有效方法,例如采用液氮降温驱动线圈和电枢线圈以降低电阻等。

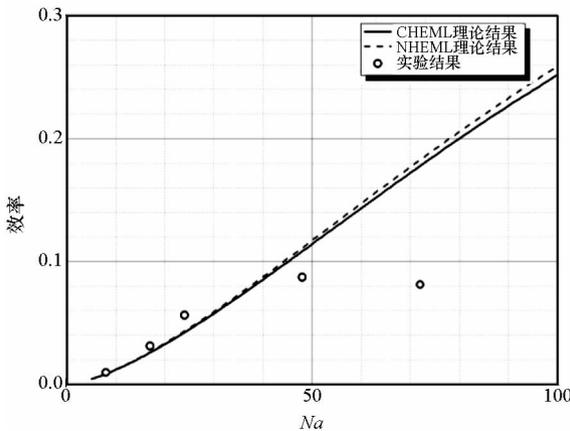


图 8 不同电枢线圈匝数时测量的 HEML 能量转换率

Fig. 8 Measured energy conversion efficiency of the HEML with different armature coil turns

当电枢线圈匝数较少时,实验结果与理论计算符合较好;而匝数较多时 ($Na = 72$),实验中出

现严重的匝间电弧烧蚀现象,实验效率远低于理论计算值。可见,通过增加电枢线圈匝数来提高能量转换效率时,要考虑换向感应电压和发射器电感增大可能引起的电弧烧蚀问题。电枢线圈的自感与其匝数的平方成正比, Na 较大时,换向过程中运动的载流电枢线圈在换向匝中产生较大的感应电压,造成单元间的绝缘损坏甚至烧蚀现象。另一方面,发射器阻抗变大,为了保持工作电流不变,需要提高电容器的电压,在一定程度上增加了绝缘难度。因此,单元炮管的封装虽然有效解决了大电流情况下结构强度的问题,然而电刷换向的匝间电弧烧蚀问题仍然是制约效率和速度的瓶颈之一。

4 结论

螺旋线圈电磁发射器通常适用于大质量载荷的低速发射,提高其能量效率对于实际应用具有重要意义。通过建立等效电路的方法,得到了螺旋发射器的效率公式。计算得到典型常规螺旋发射器电阻损耗、换向损耗和炮口损耗的占比分别为 56%、19% 和 3%。结果表明:电阻损耗所占比重最大,降低发射器的电阻对效率的提高最有效。其次,换向损耗产生的匝间电弧问题比炮口电弧问题更严重。新型发射器采用一组换向电刷,换向损耗减小 1/2;其电枢出口驱动线圈无激励,炮口损耗减小 2/3。但是,该发射器只有在超导或较低电阻的情况下才能实现应用。

实验中,改变电枢线圈匝数来调节发射器互感梯度较为方便。实验表明,增大发射器的互感梯度,可以将发射器的效率提高 2~3 倍。然而,较大的电枢线圈匝数也会带来较大的换向损耗和炮口损耗,造成炮管烧蚀损坏、能量泄放和效率降低。分析换向过程可知:丢匝时,电刷短路匝(换向匝)中的磁能不能全部耦合到激励区,一部分磁能以匝间电弧形式释放。如果利用运动的载流电枢在短路匝中感应反向电流,使短路匝中电流在丢匝时刚好减小为零,则不会形成换向损耗。满足这一完全感应换向条件时,螺旋发射器只有电阻损耗和炮口损耗,其效率能明显提高。由于新型螺旋发射器的炮口损耗非常小,在不考虑电阻,且满足完全感应换向条件时其理论效率接近 100%。运动感应换向策略有望解决螺旋线圈发射器的匝间电弧问题,在满足完全感应换向条件方面,还需进一步开展实验研究。

(下转第 145 页)

2) 结合分级递进优化方法和 NSGA - II 算法的耐撞性多目标优化模型的优化效率较高,有效地提高了结构单元的耐撞吸能水平,指导了结构单元的参数优化设计,且优化结果满足制造工艺要求,具有较高的工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 赵效东. 海洋工程结构物碰撞失效准则研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
ZHAO Xiaodong. Research of failure criterion of offshore structural collision [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [2] Ahmad Z, Thambiratnam D P. Application of foam-filled conical tubes in enhancing the crashworthiness performance of vehicle protective structures [J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(4): 349 - 363.
- [3] Zhang Y, Sun G Y, Li G Y, et al. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria [J]. Materials & Design, 2012, 38: 99 - 109.
- [4] Zarei H R, Kroger M. Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application [J]. Thin-Wall Structures, 2008, 46(2): 214 - 221.
- [5] Sun F F, Fan H L, Zhou C W, et al. Equivalent analysis and failure prediction of quasi-isotropic composite sandwich cylinder with lattice core under uniaxial compression [J]. Composite Structures, 2013, 101: 180 - 190.
- [6] ABAQUS Inc., Ltd. ABAQUS theory manual. V 6.12[M]. Rhode Island, USA: ABAQUS Inc., Ltd, 2012.
- [7] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 219 - 223.
ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 219 - 223. (in Chinese).
- [8] ASTM. Standard test method for high speed puncture properties of plastics using load and displacement sensors: ASTM D3763 - 06[S]. USA: ASTM International, 2008.
- [9] Yin H F, Wen G L, Hou S J, et al. Multi-objective crashworthiness optimization of functionally lateral graded foam-filled tubes [J]. Materials and Design, 2013, 44: 414 - 428.
- [10] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [M]. UK: John Wiley and Sons Ltd, 2001: 292 - 301.
- [11] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 - 197.

(上接第 108 页)

参考文献 (References)

- [1] Thom K, Norwood J. Theory of electromagnetic accelerator for achieving hypervelocities; NASA-TN-D-886 [R]. NASA Technical Reports Server, 1961.
- [2] Mongeau P. Analysis of helical brush commutation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20(2): 231 - 234.
- [3] Snow W R, Willig R L. Design criteria for brush commutation high speed traveling wave coilguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 654 - 659.
- [4] Engel T G, Nunnally W C, Neri J M. Development of a medium-bore high-efficiency helical coil electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5): 1893 - 1895.
- [5] Nunnally W C, Huenefeldt S M, Engel T G. Performance and scalability of MJ sequentially fired pulse forming networks for linear and nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(2): 484 - 490.
- [6] Engel T G, Veracka M J. The voltage-current scaling relationship and impedance of DC electromagnetic launchers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1271 - 1276.
- [7] Engel T G, Nunnally W C, Neri J M. High-efficiency, medium-caliber helical coil electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(11): 4299 - 4303.
- [8] Engel T G, Neri J M, Veracka M J. Solid-projectile helical electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(4): 603 - 607.
- [9] 王莹, 肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 94.
WANG Ying, XIAO Feng. Principle of electric gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 94. (in Chinese)
- [10] Engel T G, Veracka M J, Neri J M. The specific-force performance parameter for electromagnetic launchers [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(2): 194 - 198.
- [11] Engel T G, Neri J M, Veracka M J. The maximum theoretical efficiency of constant inductance gradient electromagnetic launchers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(4): 608 - 614.
- [12] Musolino A, Rizzo R. Numerical analysis of brush commutation in helical coil electromagnetic launchers [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2011, 5(4): 147 - 154.
- [13] Musolino A, Rizzo R. Numerical modeling of helical launchers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(3): 935 - 940.