



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404541

引用格式:石敬斌,关晓存,管少华,等.电磁发射复合电枢的动态特性及影响因素[J].科学技术与工程,2025,25(12):5029-5036.

Shi Jingbin, Guan Xiaocun, Guan Shaohua, et al. Dynamic characteristics and influencing factors of electromagnetic launch composite armature[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 5029-5036.

电磁发射复合电枢的动态特性及影响因素

石敬斌,关晓存,管少华*,袁立达

(海军工程大学电磁能技术全国重点实验室,武汉 430033)

摘要 电磁发射系统中的电枢结构及特性参数对发射性能有重要影响。为了探讨复合电枢的动态特性及影响因素,基于麦克斯韦方程组及电磁场理论,推导出嵌入式和半嵌入式复合电枢动态发射耦合数学模型,分析储能电容器的容量及初始工作电压、驱动线圈的匝数、复合电枢结构参数等因素对加速性能的影响,仿真计算复合电枢的结构参数 a 、 c 、 d 对发射性能影响。结果表明:储能电容器的初始工作电压和电容越高,复合电枢发射效率越高;同步感应线圈炮中驱动线圈匝数也对复合电枢发射性能产生影响,随着匝数增加,发射效率并非一直升高;参数中 a 、 c 对发射性能影响很小,而参数 d 对发射性能影响很大。所提出的数学模型和分析结果可为复合电枢的设计提供理论基础和数据参考。

关键词 电磁发射;复合电枢;动态特性;电路参数

中图分类号 TM832; **文献标志码** A

Dynamic Characteristics and Influencing Factors of Electromagnetic Launch Composite Armature

SHI Jing-bin, GUAN Xiao-cun, GUAN Shao-hua*, YUAN Li-da

(National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

[Abstract] The armature structure and characteristic parameters in electromagnetic launch systems have a significant impact on the launch performance. In order to explore the dynamic characteristics and influencing factors of composite armatures, based on Maxwell's equations and electromagnetic field theory, a mathematical model of dynamic emission coupling between embedded and semi embedded composite armatures was derived. The influence of factors such as the capacity and initial working voltage of energy storage capacitors, the number of turns of driving coils, and the structural parameters of composite armatures on acceleration performance were analyzed and studied. The influence of structural parameters a , c , and d of composite armatures on emission performance was calculated. The results show that the higher the initial working voltage and capacitance of the energy storage capacitor, the higher the emission efficiency of the composite armature. The number of turns of the driving coil in the synchronous induction coil gun also affects the firing performance of the composite armature. As the number of turns increases, the firing efficiency does not always increase. The parameters a and c have little impact on the emission performance, while parameter d has a significant impact on the emission performance. The proposed mathematical model and analysis results can provide a theoretical basis and data reference for the design of composite armatures.

[Keywords] electromagnetic launch; composite armature; dynamic characteristics; circuit parameter

电磁发射系统中,电枢结构及特性参数对发射性能有重要影响^[1-3]。在电磁发射方面,贾光勇等^[4]建立单边发射电机磁场解析模型,得到气隙磁场分布关系。翟小飞等^[5]建立电磁轨道发射装置的数学模型,并获得发射装置电磁参数和各部件应力分布。聂世雄^[6]推导液压平衡式水下发射系统的非线性动力学模型,采用比例-积分-微分控制和滑模控制实现了内弹道的有效控制。林庆华等^[7]

建立包含电路、电磁场、热场和结构场的数学模型,提出一种瞬态多物理场求解器。还有学者针对电磁轨道发射中电枢尾翼转角^[8]、发射数据测量^[9]、姿态测量方法^[10]、瞬变电磁系统^[11-14]等进行研究。Zhou等^[15]提出了一种利用神经网络进行数据预测的方法,模拟发射条件对轨道炮电流和电枢速度的影响,并预电流和电枢速度。Karpagam等^[16]采用有限元法对矩形、凸形和凹形轨道炮几何形状

收稿日期:2024-06-18; 修订日期:2025-02-12

基金项目:国家自然科学基金(51777212)

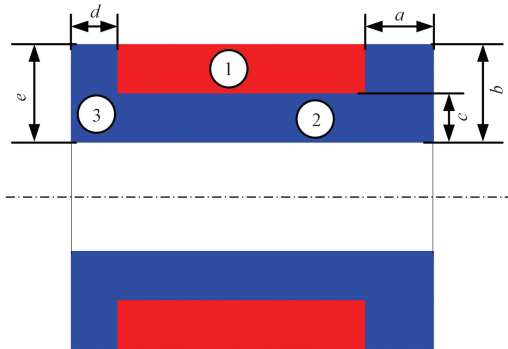
第一作者:石敬斌(1988—),男,汉族,山西长治人,博士研究生。研究方向:电磁发射技术。E-mail:18734142381@163.com。

*通信作者:管少华(1991—),男,汉族,山东潍坊人,博士,讲师。研究方向:电磁发射技术。E-mail:shaohuag511@163.com。

进行了比较和仿真,并通过对不同钢轨截面的电枢位置进行扫描,确定钢轨和电枢上的磁场分布。综上所述可知,目前在电磁弹射方面的研究缺乏复合电枢方面的理论研究,也鲜有分析外部电路、复合电枢中不同材料非线性、涡流影响及符合电枢结构参数等因素对电磁发射的影响。鉴于此,从工程角度提出复合电枢思路。首先,从麦克斯韦方程组及电磁场理论出发,推导出嵌入式和半嵌入式复合电枢动态发射耦合数学模型,应用 Crank-Nicholson 法进行求解;其次,分析研究储能电容器的容量及初始工作电压、驱动线圈的匝数、复合电枢结构参数等因素对加速性能的影响;最后,研究复合电枢的参数化结构中 a 、 b 、 c 、 d 参数对发射性能产生的影响。为复合电枢的设计提供一定的科学依据。

1 复合电枢结构模型和电磁场解析模型

通过广泛的分析和研究,设计两种不同结合方式,图 1 为嵌入式复合电枢的参数化模型。图 2 为半嵌入式复合电枢的参数化模型。



1 为材料为铝的实体圆筒;2、3 为设计的 45 号钢结构零件
图 1 嵌入式混合电枢模型

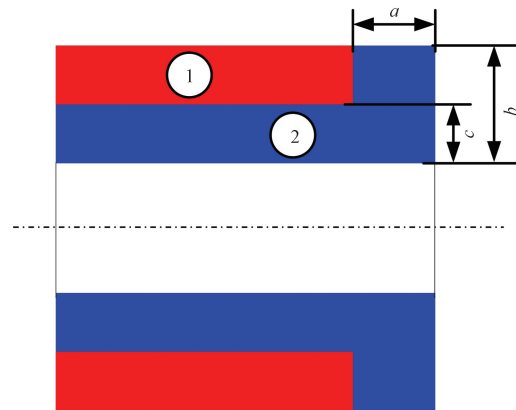
Fig. 1 Embedded hybrid armature model

如图 1 所示,嵌入式复合电枢是由 3 个零件组成,编号分别为 1、2、3。其中固定参数有:1 为实体圆筒,材料为铝,内半径 $R_{in} = 26$ mm,外半径 $R_{ow} = 29$ mm,长度 $L_1 = 40$ mm。零件 2 和 3 为所需要设计的结构零件,材料为 45 号钢,其结构尺寸分别用 a 、 b 、 c 、 d 、 e 表示。根据实际的情况,当把零件 3 去掉时,模型变为图 2,同样对零件 2 结构参数进行分析设计。

单级同步感应线圈炮的主要结构组成包括:驱动线圈和嵌入式复合电枢。图 3 为带有嵌入式复合电枢单级线圈炮的轴对称二维结构模型。

1.1 嵌入式复合电枢单级感应线圈炮磁场控制模型

为了便于建立复合电枢感应线圈炮内磁场及涡流场的控制模型,做如下假设^[17]。



1 为材料为铝的实体圆筒;2 为设计的 45 号钢结构零件,其结构尺寸分别用 a 、 b 、 c 表示

图 2 半嵌入式混合电枢模型

Fig. 2 Semi-embedded hybrid armature model

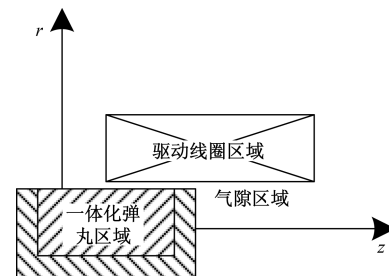


图 3 r 、 z 坐标系下的带有嵌入式混合电枢单级线圈炮的二维模型

Fig. 3 Two-dimensional model of a single-stage coil cannon with an embedded hybrid armature in the r , z -coordinate system

(1) 不考虑复合电枢的横向偏移,假定复合电枢轴线中心、炮管中心以及驱动线圈中心重合,满足轴对称条件。

(2) 不考虑复合电枢在电磁力的作用下而产生形变。

(3) 铁磁物质均匀、各向同性、并忽略位移电流。

(4) 忽略铁磁物质的磁滞效应和导体电导率、磁导率与温度的关系。

根据上述假设,考虑运动效应麦克斯韦方程组和物理本构方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: \mathbf{H} 为磁场强度, A/m; \mathbf{B} 为磁感应强度, T; \mathbf{D} 为电位移, C/m²; \mathbf{E} 为电场强度, V/m; \mathbf{J} 为电流密度, A/m²; ρ 为电荷密度, C/m³。

由于轴对称场中可知,矢量磁位 \mathbf{A} 仅存在 A_ϕ 分

量,复合电枢只在 z 方向上存在速度分量 V_z , 驱动线圈中源电流密度 \mathbf{J}_s 只存在 ϕ 方向上的分量 $J_{s\phi}$ 。因此根据文献[17]中的复合电枢本构方程以及麦克斯韦方程组可得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu_1 r} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu_1 r} \left[\frac{\partial(rA_\phi)}{\partial r} \right] \right\} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu_2 r} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu_2 r} \left[\frac{\partial(rA_\phi)}{\partial r} \right] \right\} = \\ & J_{s\phi} + \frac{\sigma_1}{r} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial t} - \frac{\sigma_1 V_z}{r} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial z} + \\ & \frac{\sigma_2}{r} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial t} - \frac{\sigma_2 V_z}{r} \frac{\partial(rA_\phi)}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

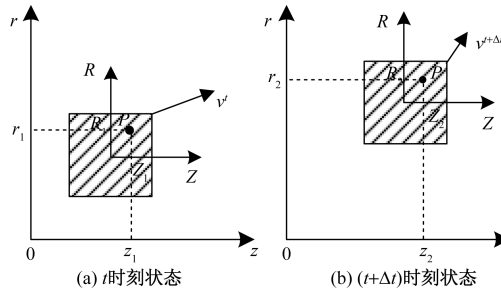
式(2)中: μ_1, σ_1 分别为铜材料的磁导率和电导率; μ_2, σ_2 分别为铝材料的磁导率和电导率,且均为常数; V_z 为电枢速度矢量 \mathbf{V} 在 z 方向上的速度分量; A_ϕ 为矢量 \mathbf{A} 在 ϕ 方向上的分量; $J_{s\phi}$ 为驱动线圈中的电流密度在 ϕ 方向上的分量,且有关系 $J_{s\phi} = \frac{n_c}{S_c} I_\phi$, 其中, n_c 为驱动线圈匝数; S_c 为驱动线圈的截面积; I_ϕ 为单匝电流在 ϕ 方向上的分量。

1.2 速度项的处理方法

在以上对线圈炮磁场控制方程的数学描述中,速度反映在方程的感应项 $\sigma \mathbf{V} \mathbf{B}$ 中,其中 σ 为材料电导率。这是由于对线圈炮在静止坐标系中描述,这种描述称为 Eulerian 描述,也常称静止坐标系描述。但是假如观察者本身处于运动体上,即在每一处运动区域上用一套与运动区域一同运动的坐标系进行描述,则感应项将不会显式出现在方程中,这种描述称为 Lagrangian 描述,或称运动坐标系描述。

如图4所示,以轴对称坐标系为例,其中, R, Z 为运动坐标系下的坐标, r, z 为静止坐标系下的坐标。

由于有限元法中对时间的差分近似,使得两种坐标系描述的方程在离散时并不完全等价,设在



(Z_1, R_1) 和 (Z_2, R_2) 分别为 $t, t + \Delta t$ 时刻下运动体上某点 P 在运动坐标系下的坐标; (z_1, r_1) 和 (z_2, r_2) 分别为 $t, t + \Delta t$ 时刻下运动体上某点 P 在静止坐标系下的坐标; $v^t, v^{t+\Delta t}$ 为对应时刻电枢速度

图4 静止与运动坐标系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the stationary and moving coordinate system

($t, t + \Delta t$) 时间段内,如图4所示,运动体上某点 P 沿 z 方向由 (z_1, r_1) 运动到 (z_2, r_2), 当时间离散采取差分格式时,在静止、运动坐标系下电枢感应电流 \mathbf{J}_e 计算方法分别如式(3)和式(4)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_e &= \sigma \frac{\partial \mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t)}{\partial t} - \sigma \mathbf{V} \nabla \mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) \\ &\approx \sigma \frac{\mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(z_2, r_1, t)}{\Delta t} - \\ &\quad \sigma \mathbf{V} \mathbf{B}(z_2, r_1, t + \Delta t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_e &= \sigma \frac{\partial \mathbf{A}(Z_1, R_1, t + \Delta t)}{\partial t} \\ &\approx \sigma \frac{\mathbf{A}(Z_1, R_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(Z_1, R_1, t)}{\Delta t} \\ &= \sigma \frac{\mathbf{A}(z_2, r_1, t + \Delta t) - \mathbf{A}(z_2, r_1, t)}{\Delta t} - \\ &\quad \sigma \mathbf{V} \mathbf{B}(z_2, r_1, t + \Delta t) \end{aligned} \quad (4)$$

时间离散后两种坐标系下涡流表达式的形式不同,在静止坐标系描述下表达式中包含 $\mathbf{V} \mathbf{B}(z_2, r_1, t + \Delta t)$, 即速度与点 (z_2, r_1) 处 \mathbf{B} 的差乘;而在运动坐标系描述下包含 $\mathbf{V} \mathbf{B}$, 即速度与 (z_1, r_1) ~ (z_2, r_1) 的平均磁密 $\mathbf{B} = - \frac{[\mathbf{A}(z_2, r_1, t) - \mathbf{A}(z_1, r_1, t)]}{\Delta z}$ 的乘积。

显然在静止坐标系描述下,方程组矩阵由于速度项的存在而不对称,但运动坐标系描述下可保证方程组矩阵的对称性。因此,采用固定在网格上的运动坐标系来描述问题自然更加方便。此时,方程中将不显式地出现 $\sigma \mathbf{V} \mathbf{B}$, 而速度反映在运动体的离散网格在每一时间步的位移中。在轴对称坐标下利用三角单元进行离散,假设:

$$A_i^{*e} = \sum_{j=1}^g N_{ij}^e A_{ij}^{*e} \quad (5)$$

式(5)中: A_i^{*e} 为通用假设项; N_{ij}^e 为第 i 个三角单元中第 j 个节点的形函数; A_{ij}^{*e} 为单元节点形函数; g 为第 i 个单元节点总数。

在运动坐标系中利用加权余量法建立式(2)的空间离散方程,对每个单元取其形函数 N_i^e 为权函数,进行加权积分、离散和整理后得

$$S_1 \mathbf{A}^* + S_2 \mathbf{A}^* + \frac{G_1 d\mathbf{A}^*}{dt} + \frac{G_2 d\mathbf{A}^*}{dt} = \mathbf{C} \mathbf{I} \quad (6)$$

各系数矩阵 $S_1^e, S_2^e, G_1^e, G_2^e, C^e$ 的计算公式分别为

$$S_{1ij}^e = \frac{1}{\mu_1 r} \sum_{j=1}^g \int_{S_i^e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial r} \frac{\partial N_j^e}{\partial r} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dS \quad (7)$$

$$S_{2ij}^e = \frac{1}{\mu_2 r} \sum_{j=1}^g \int_{S_i^e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial r} \frac{\partial N_j^e}{\partial r} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dS \quad (8)$$

$$G_{1ij}^e = \frac{\sigma_1}{r} \sum_{j=1}^g \int_{S_i^e} N_i^e N_j^e dS \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_{2ij}^e = \frac{\sigma_2}{r} \sum_{j=1}^g \int_{S_j^e} N_i^e N_j^e dS \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_i^e = \int_{S_i^e} N_i^e dS \quad (11)$$

式中: \mathbf{S}_{1ij}^e 为 t 时刻矢量磁势空间离散矩阵; N_j^e 为单元节点形函数; dS 为积分变量; \mathbf{S}_{2ij}^e 为 $t + \Delta t$ 时刻矢量磁势空间离散矩阵; \mathbf{G}_{1ij}^e 为 t 时刻矢量磁势变化率空间离散矩阵; \mathbf{G}_{2ij}^e 为 $t + \Delta t$ 时刻矢量磁势变化率空间离散矩阵; \mathbf{C}_i^e 为电流空间离散矩阵; S_i^e 为第 i 个三角单元的面积; N_i^e 为第 i 个三角单元的权函数。

2 系统电路参数对复合电枢发射性能的影响

结合文献[13]中关于边界条件的处理方法,以嵌入式复合电枢为例,分析电路参数对其发射性能的影响。

2.1 初始工作电压对加速性能的影响

以图3中模型为研究对象,研究初始工作电压分别为600、700、800、900、1 000 V时,复合电枢的加速性能。在此研究过程中,均令储能电容器的容量 $C = 1\ 200\ \mu\text{F}$,复合电枢的质量 $m = 1.285\ \text{kg}$,弹丸的初始发射位置(电枢末端处在 $Z = 5$ 的平面上)和初始注入速度(电枢及弹丸的初始注入速度为0)均保持不变。仿真结果如图5~图7所示。

从图5~图7可以看出:随着储能电容器初始工作电压的升高,驱动电流的峰值、弹丸受到的最大电磁加速力、弹丸的最大运动速度均呈增大趋势。同步感应线圈炮的发射效率是指电枢及弹丸在加速过程中所获得的最大动能与储能电容器原始储能的比值。该比值越大,发射性能越好。为了确定储能电容器的初始工作电压对发射性能的影响,根据上面的仿真数据分别计算了该单级同步感应线圈炮在初始工作电压分别为600、700、800、900、1 000 V条件下的发射效率,相应的发射效率分别为0.9%、1.4%、2.0%、2.7%和3.5%。这表明随着储能电容器初始工作电压的升高,发射效率也相应提高。

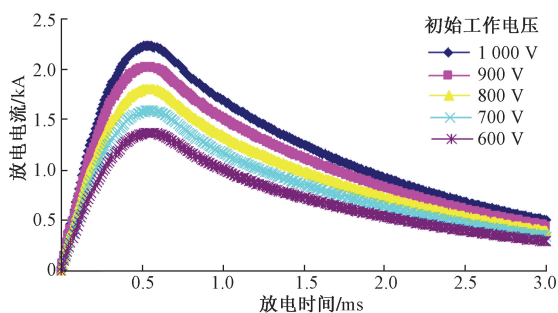


图5 充电电压对放电电流的影响

Fig. 5 Effect of charge voltage on discharge current

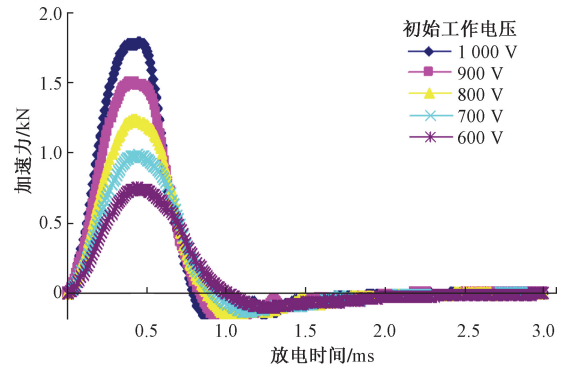


图6 充电电压对加速力的影响

Fig. 6 Effect of charging voltage on acceleration

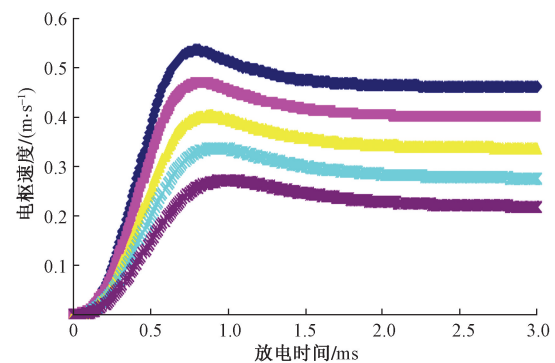


图7 充电电压对电枢速度的影响

Fig. 7 Effect of charging voltage on armature speed

2.2 储能电容器的容量对加速性能的影响

对于某一给定的单级同步感应线圈炮而言,当储能电容器的工作电压一定时,储能电容器的容量也会对其加速性能产生影响。结合图2、图3中的仿真模型,令电枢末端的初始发射位置始终位于 $Z = 5$ 的平面上,储能电容器的初始工作电压为1 000 V,复合电枢的初始注入速度为零,复合电枢的总质量 $m = 1.285\ \text{kg}$,加载过程中 $R_1 = 0.2\ \Omega$ 。现研究储能电容器的容量分别为600、800、1 000、1 200、1 400 μF 时,该复合电枢的加速性能,仿真结果如图8~图10所示。

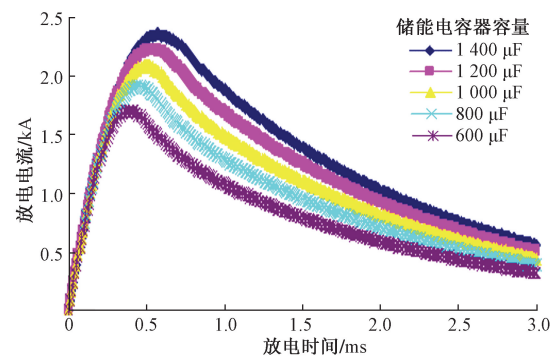


图8 容量对放电电流的影响

Fig. 8 Effect of capacity on discharge current

图 8 给出了在上述给定条件下,驱动电流与储能电容器的容量之间的关系,即随着储能电容器容量的增大,驱动电流的峰值呈增大趋势,且储能电容器的放电时间明显变长,驱动电流的峰值作用时间明显后移。对应于储能电容器的容量分别为 600、800、1 000、1 200、1 400 μF 时,驱动电流的峰值分别约为 1.70、1.91、2.08、2.23、2.34 kA。

图 9 给出了该单级同步感应线圈炮工作过程中,弹丸所受电磁加速力与储能电容器的容量之间的关系。从该图中可以看出:随着储能电容器容量的增大,弹丸所受电磁加速力的峰值显著增大,并且电枢所受电磁加速力峰值作用时刻随储能电容器容量的增大而后移。对应于储能电容器的容量分别为 600、800、1 000、1 200、1 400 μF 时,加速力的峰值分别约为 1.92、1.78、1.65、1.48、1.27 kN。

图 10 表明了在上述给定条件下,储能电容器的容量对速度的影响。从图 10 中可以看出:随着储能电容器容量的增大,弹丸获得最大速度也相应增大,且达到最大速度的时间随容量的增大而后移。对应于储能电容器的容量分别为 600、800、1 000、1 200、1 400 μF 时,弹丸获得的最大速度分别为 0.30、0.36、0.42、0.46、0.50 m/s,相应的发射效率分别为 1.00%、1.23%、1.45%、1.65%和 1.82%。

由此可见:随着储能电容器容量的增大,发射效率相应提高,但同步感应线圈炮的发射效率并不

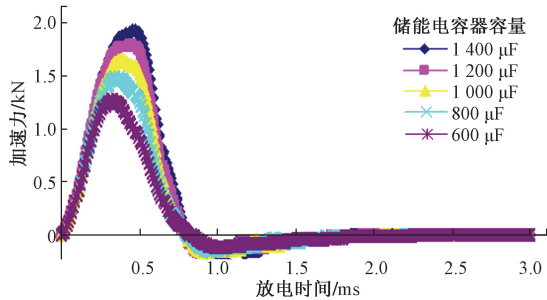


图 9 容量对加速力的影响

Fig.9 Effect of capacity on acceleration

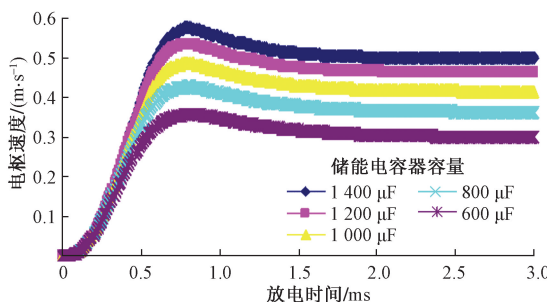


图 10 容量对电枢速度的影响

Fig.10 Effect of capacity on armature speed

是随着储能电容器容量的无限增大而增大。

2.3 驱动线圈结构参数对复合电枢发射性能的影响

驱动线圈的截面固定而匝数改变时也会对加速性能产生影响。以图 3 所示的仿真模型为研究对象,分别研究匝数分别为 50、60、70、80、90 匝时同步感应线圈炮的加速性能。研究过程中,令储能电容器的容量为 1 200 μF ,初始工作电压为 1 000 V,电枢末端的初始发射位置处于 $Z = 5$ 的平面上,初始注入速度为零,电枢及载荷的总质量为 1.285 kg,加载过程中 $R_1 = 0.2 \Omega$ 。仿真结果如图 11 ~ 图 13 所示。

从图 11 可以看出,随着驱动线圈匝数的增多,储能电容器放电过程变得愈加缓慢,同时放电电流或驱动电流的峰值也随储能电容器容量的增大而减小。分析表明:造成这一现象的原因在于随着驱动线圈匝数的增多,导致驱动线圈电感增大。驱动线圈的匝数分别为 50、60、70、80、90 匝时,相对应的驱动电流的峰值为 2.23、1.89、1.64、1.45、1.31 kA。

图 12 给出了驱动线圈匝数对电枢所受加速力的影响。可以看出,在上述给定条件下,随着匝数的增多,电枢所受电磁加速力的最大值并没有减

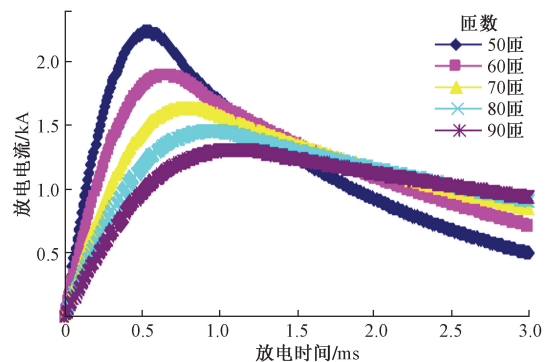


图 11 驱动线圈匝数对放电电流的影响

Fig.11 Effect of the number of turns of the drive coil on the discharge current

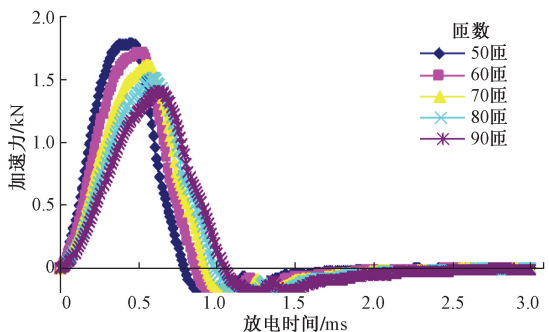


图 12 驱动线圈匝数对加速力的影响

Fig.12 Effect of the number of turns of the drive coil on the acceleration force

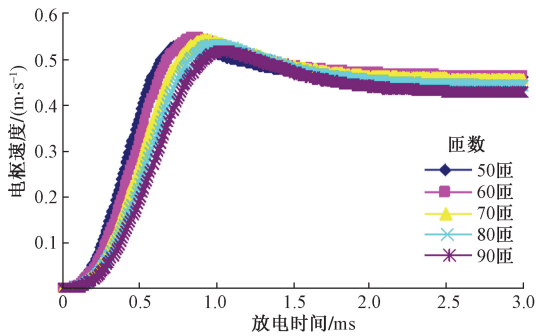


图 13 驱动线圈匝数对电枢速度的影响

Fig. 13 Effect of the number of turns of the drive coil on the speed of the armature

小,相反电枢所受的电磁加速力的最大值相应增大,但增加的幅度呈减小的趋势。此外,随着匝数的增加,储能电容器的放电过程变得缓慢,导致电磁加速力的峰值作用时间后移。驱动线圈的匝数分别为 50、60、70、80、90 匝时,相对应的电枢所受电磁加速力的最大值为 2.99、3.40、3.6、3.89、4.02 kN。

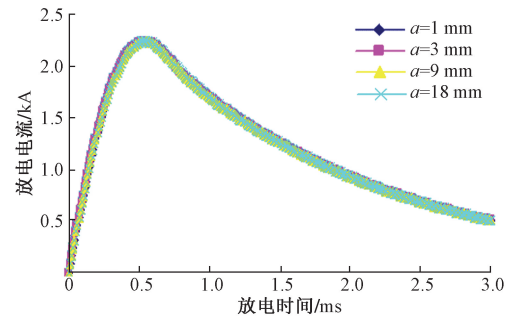
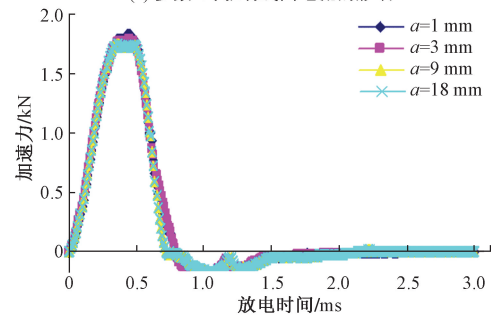
图 13 给出了上述条件下驱动线圈匝数对电枢及弹丸运动速度的影响。可以看出:随着驱动线圈匝数的增多,在加速过程的起始段加速效果稍差,但是匝数的增多,作用在电枢上的电磁加速力的作用时间变长,所以发射时加速过程也相应延长,电枢及弹丸获得在最大速度相应增加,但增加的幅度也呈减小的趋势。驱动线圈的匝数分 50、60、70、80、90 匝时,相对应的电枢及弹丸获得的最大速度为 0.90、1.24、1.56、1.85、2.09 m/s,发射效率分别约为 0.66%、1.23%、1.97%、2.76% 和 3.54%。由此可见,在上述情况下随着驱动线圈匝数的增多,感应线圈炮的发射效率显著增加。但是需要注意的是:随着驱动线圈匝数的增多,当匝数超过某一数值时,不但不能提高发射效率,相反会使发射效率降低。只有当储能电容器的容量与驱动线圈的匝数匹配时,同步感应线圈炮才能获得较高的发射效率。

2.4 复合电枢结构参数对其发射性能的影响

图 1、图 2 所示的嵌入式和半嵌入式混合电枢的参数化模型中,通过改变 a 、 b 、 d 参数来改变混合电枢的不同材料的比重,可分析结构参数对发射性能的影响。

2.4.1 参数 a 对其发射性能的影响

固定 $d=4$ mm 和 $b=6$ mm 参数,改变参数 a 的大小,分别计算每个参数下的混合电枢的发射性能,计算结果如图 14 所示。可以看出,当参数 $a=1$ 、3、9、18 mm 时,驱动线圈的峰值电流分别为 2.23、2.22、2.23、2.23 kA;嵌入式混合电枢的峰值

(a) 参数 a 对驱动线圈电流的影响(b) 参数 a 对电磁力的影响(c) 参数 a 对速度的影响图 14 参数 a 对发射性能的影响Fig. 14 Influence of parameter a on emission performance

电磁力分别为 1.80、1.77、1.74、1.74 kN;最终速度分别为 0.46、0.45、0.44、0.44 m/s。可以看出,参数 a 的变化对嵌入式混合电枢的动态性能很小,可以基本忽略。

2.4.2 参数 d 对其发射性能的影响

固定 $a=3$ mm 和 $c=3$ mm 参数,改变参数 d 的大小,分别计算每个参数下的混合电枢的发射性能,计算结果如图 15 所示。

从图 15 可以看出,当参数 $d=1$ 、3、9、18 mm 时,驱动线圈的峰值电流分别为 2.25、2.24、2.23、2.22 kA;嵌入式混合电枢的峰值电磁力分别为 1.84、1.84、1.79、2.27 kN;最终速度分别为 0.46、0.45、0.44、0.40 m/s。由此可见,参数 d 的变化对驱动线圈电流的变化影响很小,但随着 d 的变大,峰值电磁力随之增大,但是制动力也随之增大,这样造成的结果是混合电枢的最终速度变小,不利于发射性能提高。

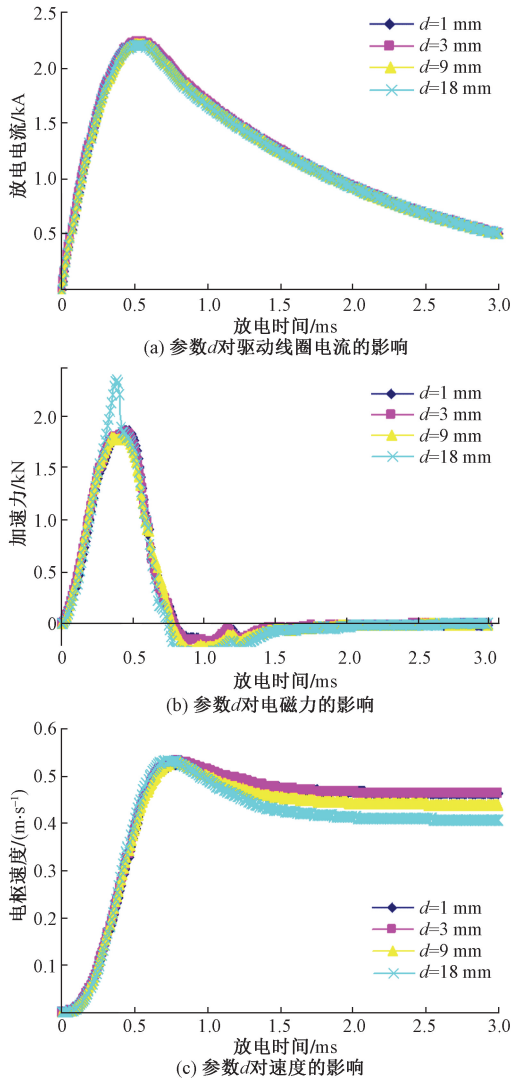


图 15 参数 d 对发射性能的影响

Fig. 15 Influence of parameter d on emission performance

2.4.3 参数 c 对其发射性能的影响

固定 $a = 3 \text{ mm}$ 和 $d = 5 \text{ mm}$, 改变参数 c 的大小, 分别计算每个参数下的混合电枢的发射性能, 计算结果如图 16 所示。可以看出, 当参数 $a = 1, 3, 9, 18 \text{ mm}$ 时, 驱动线圈的峰值电流分别为 2.23、2.22、2.23、2.23 kA; 嵌入式混合电枢的峰值电磁力分别为 1.80、1.77、1.74、1.74 kN; 最终速度分别为 0.46、0.45、0.44、0.44 m/s。由此可见, 参数 c 的变化对嵌入式混合电枢的动态性能很小, 可以基本忽略。

3 结论

基于麦克斯韦方程组及电磁场理论, 考虑外部电路、复合电枢中不同材料非线性、涡流影响及运动等因素, 推导出嵌入式和半嵌入式复合电枢动态发射耦合数学模型, 并应用 Crank-Nicholson 法进行

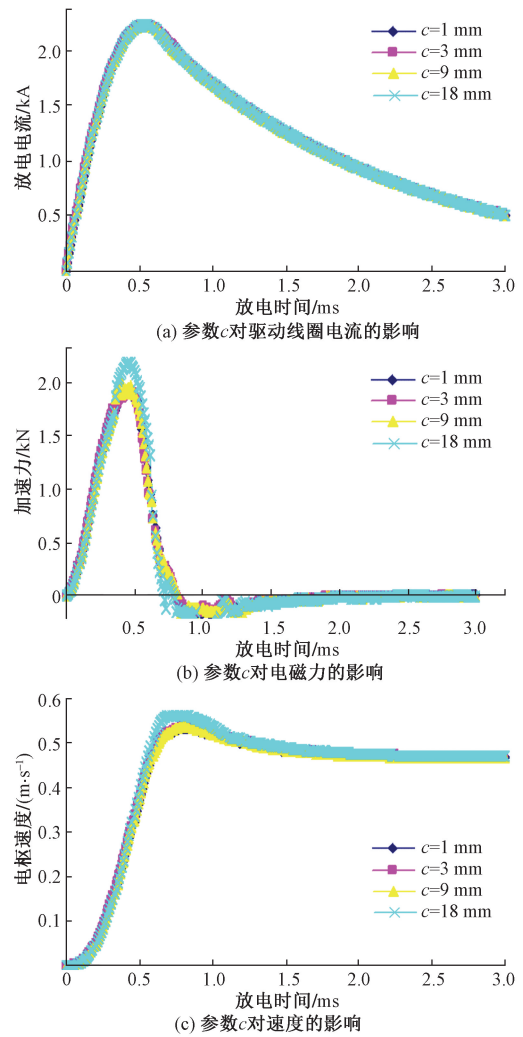


图 16 参数 c 对发射性能的影响

Fig. 16 Influence of parameter c on emission performance

求解。根据复合电枢耦合数学模型, 分析研究了储能电容器的容量及初始工作电压、驱动线圈的匝数、复合电枢结构参数等因素对加速性能的影响, 从而为复合电枢的设计提供依据。得出如下结论。

(1) 储能电容器的初始工作电压和电容越高, 复合电枢发射效率越高。此外, 同步感应线圈炮中驱动线圈匝数也对复合电枢发射性能产生影响, 随着匝数增加, 发射效率并不是一直升高, 存在最优值。

(2) 参数中 a, b, c 对发射性能影响很小, 基本可以忽略, 而 d 参数对发射性能影响很大, 故复合电枢中电枢后面的部件材料应该是非铁磁材料, 或者减少铁磁材料比重。

参考文献

[1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
Ma Weiming, Lu Junyong. Research progress and challenges of

- electromagnetic launch technology[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2023, 38(15): 3943-3959.
- [2] 张嘉伟, 鲁军勇, 谭赛, 等. 电磁轨道发射装置轨道表面损伤研究现状[J]. 兵工学报, 2023, 44(7): 1908-1919.
Zhang Jiawei, Lu Junyong, Tan Sai, et al. Research status of surface damage in rails for electromagnetic launchers[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(7): 1908-1919.
- [3] 沈剑, 李建华, 冯兴民, 等. 超高速弹丸电磁发射动力学[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4730-4734.
Shen Jian, Li Jianhua, Feng Xingmin, et al. Electromagnetic launching dynamics of hyper velocity projectile[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4730-4734.
- [4] 贾光勇, 孙兆龙, 黄垂兵, 等. 电磁发射用永磁同步直线电机磁场解析及推力波动优化[J]. 兵工学报, 2024, 45(7): 2159-2170.
Jia Guangyong, Sun Zhaolong, Huang Chuibing, et al. Magnetic field analysis and thrust fluctuation optimization of permanent magnet synchronous linear motor for electromagnetic launch[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(7): 2159-2170.
- [5] 翟小飞, 邹锴, 李配飞, 等. 身管外壳对电磁轨道发射装置发射性能影响分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 333-342.
Zhai Xiaofei, Zou Kun, Li Peifei, et al. Analyzing influence of barrel shellon launching performance of electromagnetic rail launcher[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 333-342.
- [6] 聂世雄. 集成式液压平衡电磁发射装置的非线性建模及控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 852-864.
Nie Shixiong. Nonlinear modeling and control of integrated hydraulic balanced electromagnetic launch system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 852-864.
- [7] 林庆华, 栗保明. 基于瞬态多物理场求解器的电磁轨道炮发射过程建模与仿真[J]. 兵工学报, 2020, 41(9): 1697-1707.
Lin Qinghua, Li Baoming. Modeling and simulation of electromagnetic railgun launching process based on a transient multi-physical field solver[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(9): 1697-1707.
- [8] 陈少辉, 成文凭, 袁伟群, 等. 计算焦耳温升作用的电磁轨道发射中电枢尾翼转角处受力分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2762-2769.
Chen Shaohui, Cheng Wenping, Yuan Weiqun, et al. Stress analysis of the armature tail corner in electromagnetic rail launch after taking joule heating into consideration[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2762-2769.
- [9] 李松乘, 鲁军勇, 程龙, 等. 基于灰色模型的电磁轨道发射装置温度研究[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(5): 90-97.
Li Songcheng, Lu Junyong, Cheng Long, et al. Research on temperature of electromagnetic rail launcher based on gray model[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(5): 90-97.
- [10] 李松乘, 鲁军勇, 程龙, 等. 电磁发射装置弹丸弹道姿态测量[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 4835-4842.
Li Songcheng, Lu Junyong, Cheng Long, et al. Research on ballistic attitude measurement of projectile in electromagnetic launcher[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23): 4835-4842.
- [11] 李永泉, 成豪杰, 唐旭, 等. 永磁同步电动机电磁振动特性及抑制措施[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 7148-7158.
Li Yongxiao, Cheng Haojie, Tang Xu, et al. Electromagnetic vibration characteristics and suppression methods for permanent magnet synchronous motor[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(17): 7148-7158.
- [12] 赵智忠, 关孟鑫, 陈海, 等. 增强型三线圈电磁斥力机构的运动特性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 596-609.
Zhao Zhizhong, Guan Mengxin, Chen Hai, et al. Analysis of motion characteristics of enhanced three coil electromagnetic repulsion mechanism[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 596-609.
- [13] 李国才, 徐亚昆, 赵振廷, 等. 基于 MAXWELL 的瞬变电磁“8”字形发射线圈仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(35): 10481-10484.
Li Guocai, Xu Yakun, Zhao Zhenning, et al. Simulation and analysis of 8-shaped coils structure for electromagnetic transmitter based on MAXWELL[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10481-10484.
- [14] 石琦, 刘丽华, 倪志康, 等. 伪随机编码磁性源瞬变电磁发射技术及电磁响应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1268-1278.
Shi Qi, Liu Lihua, Ni Zhikang, et al. Pseudo-random coded magnetic source transient electromagnetic emission technology and electromagnetic response analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1268-1278.
- [15] Zhou Y, Cao R. The artificial neural network prediction algorithm research of rail-gun current and armature speed based on B-dot probes array[J]. Measurement, 2019, 133: 47-55.
- [16] Karpagam R, Lydia J, Murugan R, et al. Understanding the behaviour of magnetic field distribution of railgun under transient conditions using finite element method[J]. Measurement: Sensors, 2023, 31: DOI: 10.1016/j.measen.2023.100971.
- [17] 关晓存, 李松乘. 电磁线圈发射装置的非线性动态发射模型及分析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(S1): 26-30.
Guan Xiaocun, Li Songcheng. Nonlineardynamic model and analysis of electromagnetic coil launcher[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(S1): 26-30.