



电枢外置线圈感应型电磁发射器磁场分布与运动特性

刘俊杰¹, 时建明^{1,2*}, 程军胜²

(1.空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2.中国科学院 电工研究所, 北京 100190)

摘要:为强化线圈感应型弹射器对弹射体外形的适应性,提升弹射器的空间利用率,提出了电枢外置式线圈感应型电磁发射器,建立了6组不同条件的发射器模型,通过数值计算求解驱动线圈的磁场分布,通过静态有限元仿真计算驱动线圈和电枢的耦合情况,理论分析了电枢的受力情况,进行了瞬态有限元仿真验证,研究了驱动线圈内径和电枢相对位置对发射器的影响。磁场计算结果表明,驱动线圈内部径向磁感应强度与外部径向磁感应强度近似相等,外置电枢包围的轴向磁通为 $5.51 \times 10^{-5} \sim 22.04 \times 10^{-5}$ Wb,内置电枢包围的轴向磁通为 $2.81 \times 10^{-5} \sim 17.39 \times 10^{-5}$ Wb,驱动线圈外部的磁感应强度峰值为 $5.38 \times 10^{-3} \sim 7.32 \times 10^{-3}$ T,内部磁感应强度峰值为 $1.57 \times 10^{-2} \sim 1.93 \times 10^{-2}$ T。静态有限元仿真结果显示,外置电枢与驱动线圈的互感和互感梯度大于内置电枢约1.5倍~3倍。瞬态有限元仿真结果表明,内置结构的效率为2.96%~17.57%,外置结构的效率为4.94%~19.76%。证明了外置电枢包围的磁通约为内置电枢包围磁通的1.27倍~1.96倍,因此在径向磁感应强度接近的情况下,外置电枢可以获得更大的加速力;驱动线圈外部的磁感应强度大约是内部磁感应强度的1/3,因此外置结构具有更好的电磁防护能力;外置结构的能量转换效率比内置结构的效率高12.5%~66.6%,因此外置结构具有更高的能量转换效率。

关键词:电磁发射系统;线圈感应型;电枢外置;电磁防护;有限元仿真

中图分类号: TJ768.2 文献标志码: A 文章编号: 1004-499X(2024)04-0070-09

Magnetic Field Distribution and Motion Characteristics of Coil-induction Electromagnetic Launcher with External Armature

LIU Junjie¹, SHI Jianming^{1,2*}, CHENG Junsheng²

(1.School of Air Defense and Antimissile, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2.Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To enhance the adaptability of the coil-induction launcher to the shape of the projectile and improve the space utilization by the launcher, an external-armature coil-induction electromagnetic launcher (CIEL) was proposed. Six sets of launcher models under different conditions were established. The influence of the driving-coil inner-diameter and the relative position of the armature on the launcher was studied. Numerical calculation was carried out to solve the magnetic field distribution of the driving coil, and static finite-element-simulation was carried out to calculate the coupling between the driving coil and the armature, and of the force on the armature was theoretically analyzed, and transient finite-element-simulation verification was carried out. The magnetic field calculation results show that the radial magnetic induction intensity inside the driving coil is approximately equal to that outside. The axial magnetic flux surrounded by the external armature is $5.51 \times 10^{-5} \sim 22.04 \times 10^{-5}$ Wb, and the axial magnetic flux surrounded by the internal armature is $2.81 \times 10^{-5} \sim 17.39 \times 10^{-5}$ Wb. The peak magnetic-induction-intensity outside the driving coil is $5.38 \times 10^{-3} \sim 7.32 \times 10^{-3}$ T, and the peak magnetic-induction-intensity

inside is $1.57 \times 10^{-2} \sim 1.93 \times 10^{-2}$ T. The static finite-element-simulation results show that the mutual inductance and mutual inductance gradient between the external armature and the driving coil are about 1.5–3 times greater than those of the internal armature. The transient finite-element-simulation results show that the efficiency of the internal structure is 2.96%–17.57%, and the efficiency of the external structure is 4.94%–19.76%. The magnetic flux enclosed by the external armature is approximately 1.27–1.96 times that of the internal armature. Therefore, while the radial magnetic induction intensity is close, the external armature can obtain greater acceleration force; the magnetic induction intensity outside the driving coil is about one-third of the internal magnetic induction intensity, so the external structure has better electromagnetic protection capability; the energy conversion efficiency of external structures is 12.5%~66.6% higher than that of internal structures, therefore external structures have higher energy conversion efficiency.

Key words: electromagnetic emission system; coil induction type; external armature; electromagnetic protection; finite element simulation

电磁发射可突破传统化学能发射方式的极限,具有能量高、效率高、启动快、可调节的显著优势^[1-3]。电磁发射按照结构形式可分为电机式、轨道式和线圈式3种^[4-5]。线圈感应型电磁发射系统属于线圈式电磁发射的范畴,与轨道式复杂的电、磁、热和力等多领域耦合特点不同^[6-8],线圈式具有无电接触、结构简单、控制简单、载荷大、速度低的特点,在无人机和导弹的弹射领域有显著的优势和良好的应用前景^[9]。

目前已有许多学者对无人机和导弹的电磁弹射做了研究,文献[10-13]研究了电机式弹射系统无人机,但直线电机电源系统相对线圈型发射系统的电源系统更加复杂,馈电控制要求更高。文献[14]研究了异步感应线圈型发射系统无人机,异步感应线圈炮的馈电控制相对复杂,且文献中使用内置电枢,对弹射体的外形有严格的尺寸要求。文献[15]研究了用于导弹弹射的多级线圈发射器,相较于固定翼无人机,导弹的外形比较适用内置电枢弹射系统,且驱动线圈内部的磁场强度相对较强,需要进一步研究弹射体的电磁防护。文献[16]研究了驱动线圈尺寸和导线结构对系统效率的影响。文献[17]研究了异步感应线圈炮驱动线圈的尺寸、电枢初始位置和电枢材料对系统效率的影响,但以上研究均以电枢内置作为基本条件,未研究电枢外置对系统的影响。文献[18]认为驱动线圈内部强磁场对带有电子设备的弹射体可能造成损毁。

基于以上研究,本研究提出电枢外置式线圈感应型电磁发射系统,电枢外置可降低电磁发射系统

对弹射体外形的约束程度和发射系统电磁场对弹射体的影响,且电枢在驱动线圈外部,可同时使用多个弹射器实现“并联弹射”的功能。本文为明确电枢外置结构对系统的影响,采用数值计算求解驱动线圈内外的磁场分布情况,采用理论推导定性分析电枢的受力情况,采用静态有限元仿真研究电枢与驱动线圈的耦合情况,通过磁场分布、受力情况和耦合情况推导电枢的动态特性,最后通过瞬态有限元仿真验证电枢的动态特性,对比分析论证电枢外置的可行性。

1 驱动线圈磁场分布求解及其对电磁力的影响

1.1 系统模型

电磁弹射器驱动线圈和电枢的尺寸对电磁发射有较大的影响。在材料确定的前提下,外置式电枢的尺寸决定了电枢可承受的最大应力;在驱动线圈导体尺寸确定的前提下,驱动线圈的横截面尺寸决定了驱动线圈的匝数;驱动线圈的内径和外径又决定了磁场轴向和径向的分布和系统效率。实际工程应用需要严格限制弹射器的外形尺寸,以便安装弹射器和预留弹射空间。

但弹射器的尺寸不可能无限压缩,一方面弹射器支撑结构需要满足最大应力的要求;另一方面电枢外置结构的驱动线圈馈电电缆需要从驱动线圈内部接线,驱动线圈直径过小将无法走线的空间需求。

为研究驱动线圈直径和电枢相对位置对系统的

影响,建立了如图 1 所示的电枢外置和电枢内置模型,两种模型的驱动线圈内径分别为 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm。除了驱动线圈和电枢的内径和电枢相对位置外,其余的参数保持一致(如表 1 所示)。

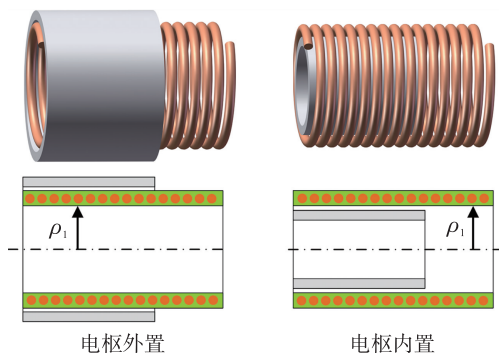


图 1 系统结构

Fig. 1 Structure of system

表 1 系统模型参数

Table 1 Parameters of the system model

驱动线圈			电枢			驱动线圈和 电枢的径向 距离/mm
厚度 /mm	长度 /mm	匝数	厚度 /mm	长度 /mm	配重 /kg	
20	80	30	10	50	1.6	2

1.2 基于数值计算的磁场分布求解

以驱动线圈的几何中心为原点,中轴线为 z 轴,电枢运动方向为 z 轴正方向,建立柱坐标系。忽略环柱形密绕驱动线圈导体之间的间隙,根据毕奥-萨伐尔定律,驱动线圈在真空中径向和轴向的磁场分布^[19-20]分别为

$$B_{\rho}(\rho', \varphi', z') = \frac{\mu_0 j}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{\rho_1}^{\rho_2} d\rho \int_{z_1}^{z_2} \frac{(z - z')}{r^3} dz \quad (1)$$

$$B_z(\rho', \varphi', z') = \frac{\mu_0 j}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{\rho_1}^{\rho_2} d\rho \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho(\rho - \rho' \cos\theta)}{r^3} dz \quad (2)$$

$$r = [\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos\theta + (z - z')^2]^{0.5}$$

$$\theta = \varphi - \varphi'$$

式中: (ρ', φ', z') 为空间中任意一点, ρ_1 和 ρ_2 为驱动线圈的内半径和外半径, z_1 和 z_2 分别为驱动线圈上下端面在 z 轴上的坐标, μ_0 为真空磁导率, φ 为柱坐标系的圆周角, θ 为任意一点的圆周角和所求点圆周角之差。式(1)和式(2)的积分是对驱动线圈导体区域的积分。

由式(1)和式(2)可知,磁场分布关于中心线呈

轴对称分布,为定性分析电枢的受力情况,可求解电枢运动区域和驱动线圈中心横截面及端面位置的磁场分布。求解区域沿电枢运动方向的剖面如图 2 所示。图中, l_1 和 l_2 的间隔为内电枢导体的边界; l_3 和 l_4 的间隔为外电枢导体的边界; l_1 至 l_4 线段的长度为 240 mm; l_1 与 l_2 、 l_3 与 l_4 的间隔为电枢厚度即为 10 mm; 电枢与驱动线圈的间隔为 2 mm, 即 l_1 和 l_4 与黄色区域的距离均为 12 mm, 黄色区域表示驱动线圈的等效导电部分; l_5 和 l_6 分别为过中心点和上端面的线段, 长度为 110 mm。

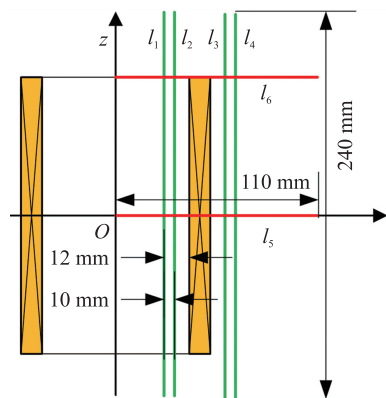


图 2 求解区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solving area

式(1)和式(2)很难获得解析解,但可通过数值计算方法求解。忽略空气和铜对磁导率的影响,并令导体中的电流密度为 1 A/m^2 , 经计算得到不同内径驱动线圈沿 l_5 和 l_6 的轴向磁感应强度, 分别如图 3 和图 4 所示。不同内径驱动线圈沿 l_5 的径向磁场为 0, 沿 l_6 的径向磁场分布如图 5 所示。从求解结果看, 不同内径驱动线圈沿 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 的径向磁感应强度分布, 轴向和径向的磁感应强度沿四条线的变化规律基本一致, 但 l_1 的磁感应强度小于 l_2 , l_3 的磁感应强度小于 l_4 , 限于文章篇幅只将 $\rho_1 = 30 \text{ mm}$ 和 $\rho_1 = 80 \text{ mm}$ 的径向磁感应强度分布绘制为图 6。不同内径驱动线圈沿 l_2 和 l_3 的径向磁感应强度分布如图 7 所示。不同内径驱动线圈沿 l_2 和 l_3 的轴向磁感应强度分布如图 8 所示。沿 l_2 和 l_3 的磁感应强度如图 9 所示。

由图 3 和 4 可知, 沿 l_5 处的轴向磁感应强度大于沿 l_6 处的轴向磁感应强度, 这是因为磁通具有连续性且有限长驱动线圈存在端部效应^[21], 所以端面的轴向磁场小于中心的轴向磁场。驱动线圈内径越小, 其内部轴向磁感应强度越大, 但其外部轴向磁感应强度越小。轴向磁感应强度沿半径方向先增大,

到驱动线圈导体位置开始减小,在导体剖面中心线右侧降为0,出导体后又开始缓慢上升,这种分布对电枢包围的磁通有较大影响。

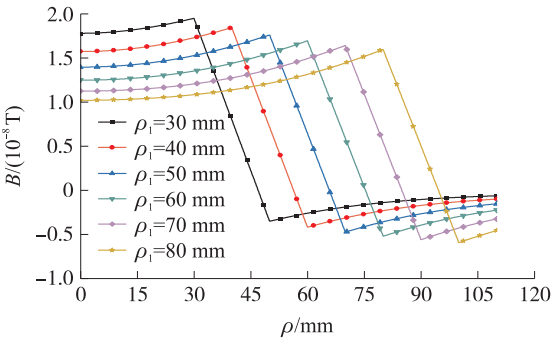


图3 沿 l_5 的轴向磁感应强度

Fig. 3 Axial magnetic flux density along l_5

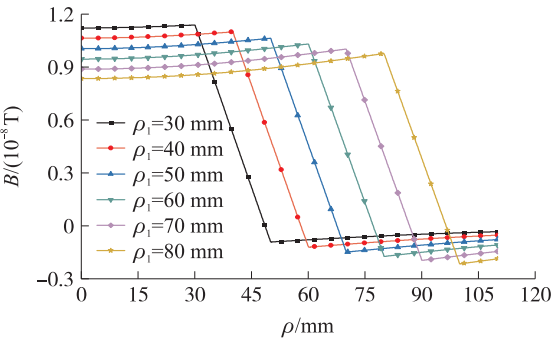


图4 沿 l_6 的轴向磁感应强度

Fig. 4 Axial magnetic flux density along l_6

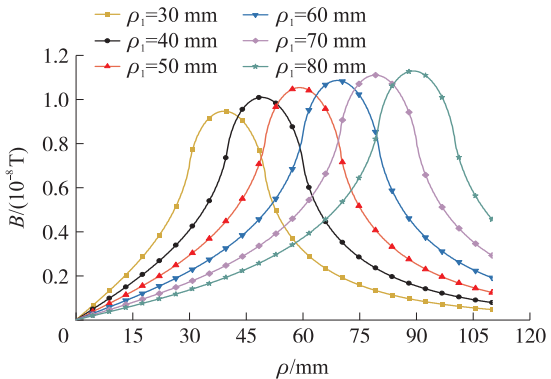


图5 沿 l_6 的径向磁感应强度

Fig. 5 Radial magnetic flux density along l_6

由图5可知,沿 l_6 处的径向磁场在驱动线圈导体剖面的中心线上达到峰值,并在中心线两边一定范围内近似对称分布,这对电枢的轴向受力有较大影响。从图6和图7可知,驱动线圈内径越大,其端部效应越明显,径向磁感应强度在端面处越大,远离导体时径向磁感应强度减小,与图2显示的结果一致。

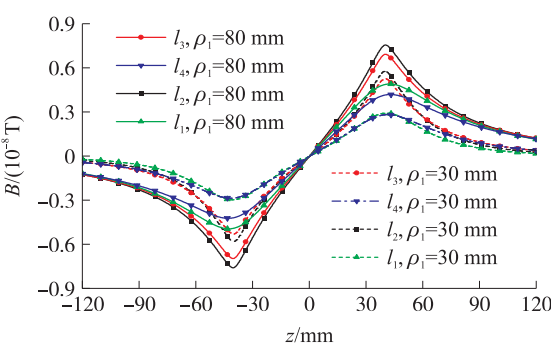


图6 $\rho_i = 30$ mm 和 80 mm 的径向磁感应强度

Fig. 6 Radial magnetic flux density with radius of 30 & 80

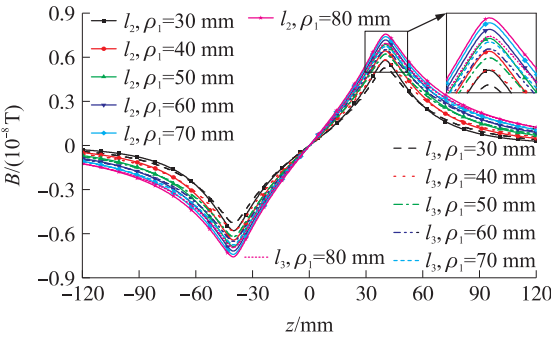


图7 沿 l_2 和 l_3 的径向磁感应强度

Fig. 7 Radial magnetic flux density along l_2 and l_3

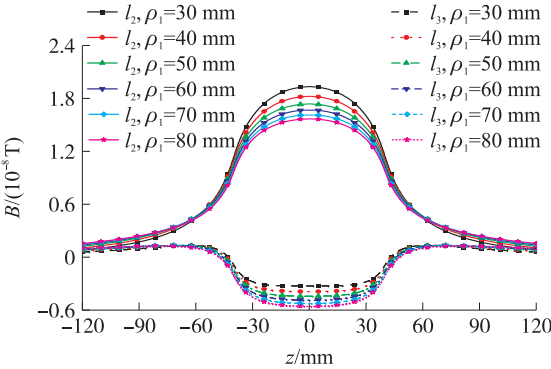


图8 沿 l_2 和 l_3 的轴向磁感应强度

Fig. 8 Axial magnetic flux density along l_2 and l_3

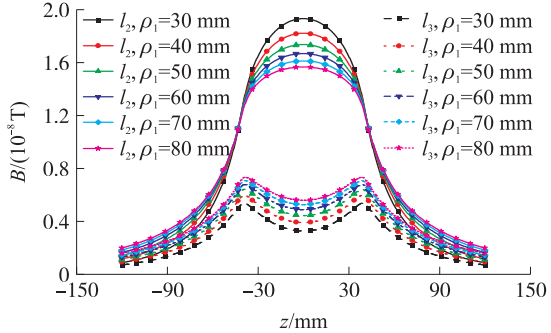


图9 沿 l_2 和 l_3 的磁感应强度

Fig. 9 Magnetic flux density along l_2 and l_3

由图 8 可知,驱动线圈内径越大,其内部轴向磁感应强度越小,外部轴向磁感应强度越大。总体看,驱动线圈内部的轴向磁感应强度是外部磁感应强度的 4~5 倍,这对电枢所受径向力有较大影响。由图 9 可知,驱动线圈内部的合成磁感应强度比外部合成磁感应强度大 2~4 倍,所以电枢外置比内置有更好的电磁防护能力。

1.3 电枢受力分析

电磁发射系统工作时,由脉冲电容向驱动线圈馈入变化的电流,产生随电流变化的磁场。磁场的轴向分量在电枢上产生感应电流,感应电流在径向和轴向磁场分量的作用下分别产生轴向和径向的电磁力。电磁发射系统电枢所受电磁力可分解为轴向和径向 2 个方向,为定性分析电枢受力并简化计算,统一以 l_2 处的磁场代替内置电枢轴向和径向磁场分布,以 l_3 处的磁场代替外置电枢轴向和径向磁场分布。

在 z 处电枢上取一微元 dz ,则有:

$$\varepsilon(z) = \frac{j}{j} \int_0^{\rho_L} B_z(z, \rho) 2\pi\rho d\rho \quad (3)$$

根据安培公式,有:

$$dF_z(z) \propto B_\rho(\rho_L, \varphi_0, z) \int_0^{\rho_L} B_z(\rho, \varphi_0, z) 2\pi\rho d\rho \quad (4)$$

$$dF_\rho(z) \propto B_z(\rho_L, \varphi_0, z) \int_0^{\rho_L} B_z(\rho, \varphi_0, z) 2\pi\rho d\rho \quad (5)$$

式中: $dF_z(z)$ 为电枢微元所受轴向电磁力; $dF_\rho(z)$ 为电枢微元所受径向电磁力数值大小的累加,其只反映径向受力的大小,没有实际物理意义; j 为主回路电流密度变化率; ρ_L 为电枢磁场选取位置的坐标; φ_0 为任一角度,由于驱动线圈磁场分布与 φ_0 无关,后文直接省略。

由式(4)和式(5)可知,电磁力与电枢附近的轴向和径向磁感应强度以及电枢包围的磁通成正比。电枢附近的轴向和径向磁感应强度已知,且不同内径的驱动线圈轴向磁感应强度在各处的大小规律是明确的。以沿 l_5 和 l_6 的轴向磁感应强度为例,虽然两处的数值并不相等,但大小规律完全一致。因此,求出任意一处所受的电磁力即可代表电枢所受电磁力大小,而求出所在位置的磁通即可反映电枢电磁力的大小。取 l_6 所在位置作为参考点,采用一阶保持法计算沿 l_6 的磁通,即:

$$\Phi = \int_0^{\rho_L} B_z(\rho, z) 2\pi\rho d\rho = \sum_{i=0}^n B_z(\rho_i, z) 2\pi\rho_i \Delta\rho_i \quad (6)$$

式中: $\Delta\rho_i$ 为离散间隔, n 为离散数据的数量。同过以上方法可求出不同条件下的磁通量,如表 2 所示。

表 2 不同电枢包围的磁通

Table 2 Magnetic flux surrounded by different armatures

线圈半径/mm	内置磁通/Wb	外置磁通/Wb
30	2.81×10^{-5}	5.51×10^{-5}
40	4.94×10^{-5}	8.17×10^{-5}
50	7.53×10^{-5}	11.20×10^{-5}
60	10.50×10^{-5}	14.54×10^{-5}
70	13.80×10^{-5}	18.17×10^{-5}
80	17.39×10^{-5}	22.04×10^{-5}

由图 5 可知,驱动线圈内外的径向磁感应强度关于驱动线圈导体近似对称。由表 2 结果可知,同一尺寸驱动线圈 l_2 与 l_6 交点处径向磁感应强度是 l_3 与 l_6 交点处径向磁感应强度的 1.09 倍,可以认为两者近似相等。从图 7 可知,对于不同尺寸的驱动线圈,其内径越大,则径向磁感应强度越大,但内径接近的径向磁感应强度相差不大,因此不同系统的电磁力大小顺序基本与表 2 所述的磁通大小一致。

由于磁感应强度大小沿轴向分布具有一致性,所以 $z=40$ mm 处的微元所受轴向电磁力可反映电枢所受轴向电磁力的合力,进而可以反映出不同结构和尺寸的系统所具有的电磁加速特性。

由式(5)可知,微元所受径向电磁力取决于微元附近的轴向磁感应强度和微元包围的磁通。电枢内侧轴向磁场随电枢内径增大而减小,但其变化范围相对比较小。在 $z=0$ 处, $\rho_1=30$ mm 的轴向磁感应强度约为 $\rho_1=80$ mm 的磁感应强度的 1.2 倍。由图 8 可知,电枢外侧的轴向磁场随内径增大而增大,其数值大小和变化范围比内侧的数值大小和变化范围小,且其磁感应强度方向与内侧的磁感应强度方向相反。综上所述,同为内置或者同为外置的电枢,轴向驱动线圈尺寸越大,电枢所受径向力越大;同一尺寸的驱动线圈内置电枢比外置电枢所受径向力更大,且内置和外置所受径向力的方向相反。

2 有限元仿真

2.1 外电路模型

外电路是电磁发射系统的重要组成部分,在电磁发射系统本体参数已确定的情况下,系统性能主要取决于外电路参数。系统等效电路如图 10 所示。图中, L_1 为驱动线圈电感, L_2 为电枢等效电感, $K1$ 为充电开关, $K2$ 为触发开关, R_1 为主回路等效电阻, R_2 为电枢等效电阻, C_1 为脉冲电容, $D1$ 为续流二极管, $BT1$ 为充电电源。

本文选取的参数: $C_1=3$ mF, $U_0=4$ kV, $R_1=40$ mΩ。

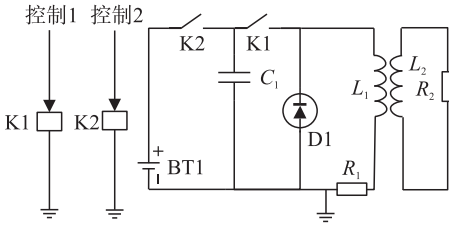


图 10 系统等效电路图

Fig. 10 Equivalent circuit diagram of the system

2.2 静态仿真

忽略电枢在运动过程的径向运动,从能量守恒原理导出电枢所受轴向电磁力与互感梯度的关系:

$$F_z = \frac{dM}{dz} i_d i_p \quad (7)$$

式中: i_d 和 i_p 分别为驱动线圈电流和电枢电流, M 为电枢和驱动线圈的互感。

式(7)反映了理想条件下电枢受力与位置的关系,即驱动线圈和电枢已知时,所承载导体相互作用力的轴向合力与电感梯度成正比。对感应型发射系统而言,电枢的电流受主回路电流变化率、电枢运动速度,电枢与驱动线圈相对位置的共同影响。由于电流在电枢中的分布存在趋肤效应,所以 i_d 与 i_p 的关系难以确定。但通过研究互感和互感梯度可以近似得到电枢所受轴向电磁力与轴向位置的关系。因此,从-120 mm 到 150 mm 间隔 1 mm 求解不同条件下电枢和驱动线圈的互感和互感梯度。

根据前文确定的模型,可在 Maxwell 有限元仿真软件中求出各状态条件下的互感和互感梯度,如图 11 和图 12 所示。图中, ρ_{i0} 和 ρ_{i1} 为外置电枢和内置电枢的驱动线圈内径。由图可知,驱动线圈内径越小,电枢与线圈的耦合越差;外置电枢比内置电枢与驱动线圈的耦合更好。原因是:电枢与驱动线圈的间隔固定时,驱动线圈内径越小,电枢包围的电磁能占驱动线圈总的电磁能的比例越低,但外置电枢尺寸大于内置电枢,当驱动线圈内径相等的情况下,外置电枢可以包围更多的电磁能。互感梯度的大小与互感的大小一致。互感梯度的峰值位于-30 mm 和 60 mm 处,与驱动线圈的尺寸和电枢内外置结构无关。结合图 11 和图 12 可知,互感梯度峰值与互感的峰值不重合。根据电磁感应定律并忽略电枢运动对电流的影响,则有:

$$F_z = \frac{dM}{dz} \frac{M}{L_p} i_d^2 \quad (8)$$

式中: L_p 为电枢的电感。式(8)是在忽略电枢动生

电动势的条件下推导的,电枢在驱动线圈内部时,严格成立。当电枢运动离开驱动线圈时,考虑到在电枢运动后期,动生电动势对电枢的影响相对较小,所以式(8)也可用于分析电枢受力。由式(8)可知,互感梯度和互感越大,电枢所受轴向力越大,加速特性越好。另外互感梯度和互感的峰值不重合,这是制约线圈感应型电磁发射系统效率的重要因素。

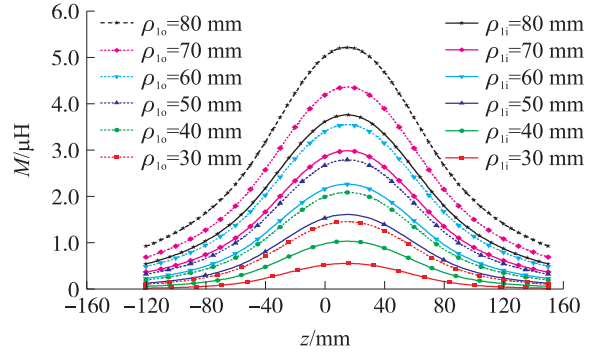


图 11 电枢和驱动线圈互感

Fig. 11 Mutual inductance between armature and drive coil

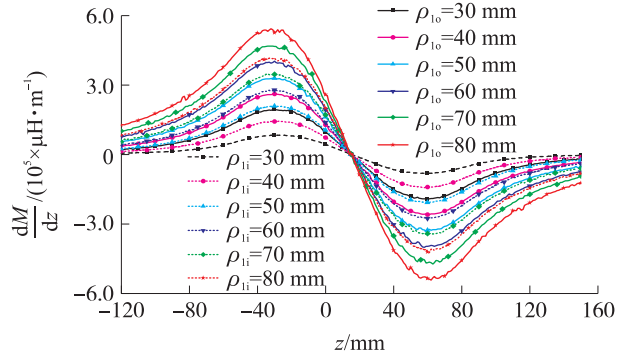


图 12 系统互感梯度

Fig. 12 System mutual inductance gradient

2.3 瞬态仿真

前文从磁场分布、电枢受力情况、驱动线圈和电枢互感及互感梯度的角度,定性分析了不同条件电磁发射系统的加速特性。为验证前文的分析结果,对前文建立的模型进行瞬态仿真。对于驱动线圈内径为 30~70 mm 的系统,设置其触发位置由 39~50 mm 间隔 1 mm 进行瞬态仿真;驱动线圈内径为 80 mm 的系统设置其触发位置由 37~50 mm 间隔 1 mm 进行瞬态仿真。各系统出筒最大速度与触发位置的关系如图 13 所示。各系统在最佳位置附近触发时,电枢运动速度、电枢轴向受力和主回路电流变化曲线分别如图 14~图 16 所示。各系统最佳触发位置与驱动线圈内径的关系如图 17 所示。

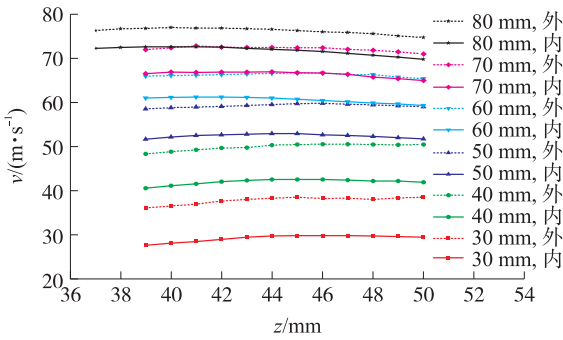


图 13 出筒速度与触发位置的关系

Fig. 13 Relationship between the exit speed and the triggering position

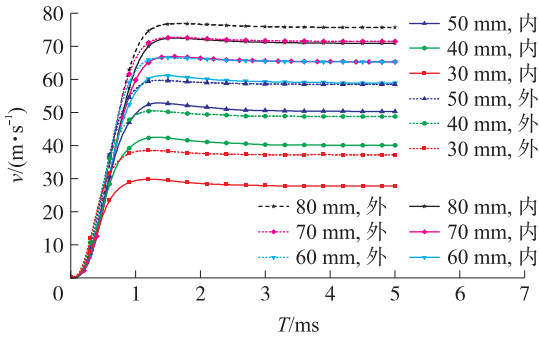


图 14 最佳触发位置速度曲线

Fig. 14 Optimal trigger position speed curve

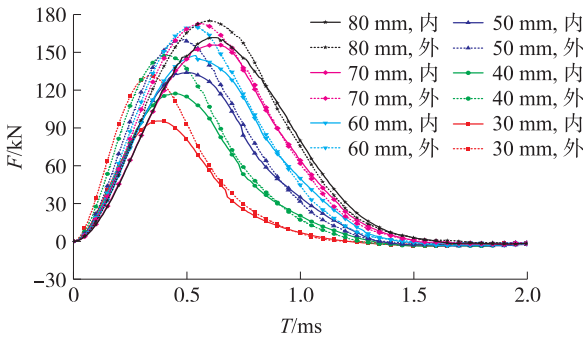


图 15 最佳触发位置推力曲线

Fig. 15 Optimal trigger position thrust curve

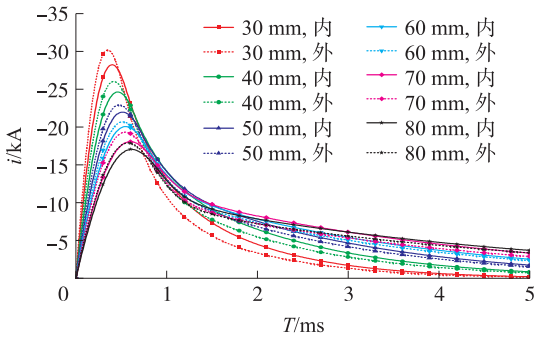


图 16 最佳触发位置主回路电流曲线

Fig. 16 Optimal trigger position main circuit current curve

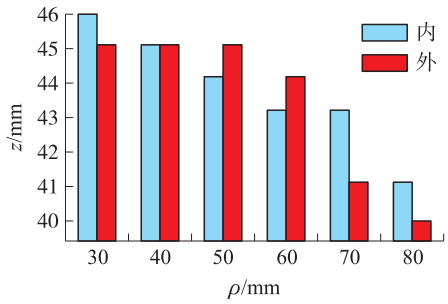


图 17 各系统最佳触发位置

Fig. 17 Optimal triggering position for each system

由图 13 可知,系统在最佳位置附近约 1 cm 范围内,出筒速度受触发位置变化的影响较小。出筒最大速度主要取决于驱动线圈的尺寸和电枢的内外结构,驱动线圈尺寸越大,电枢的出筒最大速度越高,外置电枢的最大出筒速度大于内置电枢的最大出筒速度。其速度大小与表 2 磁通量大小基本一致。

由图 14 可知,各系统在加速到最大速度后,速度有一定的下降,且电枢内置系统的降幅大于电枢外置系统,但随着驱动线圈尺寸增大,内外系统的速度之差减小。因为沿 l_1 和 l_2 轴向磁场变化率高于 l_3 和 l_4 , 所以其“电磁减速效应”更明显。各系统出筒最大速度和效率见表 3。

表 3 各系统最大速度和效率

Table 3 Maximum speed and efficiency of each system

内径 /mm	内置速度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	效率 /%	外置速度 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	效率 /%
30	29.80	2.96	38.48	4.94
40	42.53	6.03	50.52	8.51
50	52.90	9.33	59.74	11.86
60	61.20	12.49	66.65	14.81
70	66.91	14.88	72.77	17.65
80	72.60	17.57	77.00	19.76

从图 15 可知,电容馈电的发射系统电磁发射系统电磁力总体上先增加,后降低,最后趋于 0,驱动线圈尺寸越大,系统轴向推力越大。当驱动线圈尺寸较小时,外置系统的轴向力明显大于内置系统的轴向力;但当驱动线圈变大后,两者的差距逐步缩小。原因见表 2;当驱动线圈尺寸较小时,内外包围的磁通差距较大,随着驱动线圈尺寸增大,两者的差距逐步缩小。

由图 16 可知,驱动线圈尺寸越小,主回路电流峰值越大,峰值出现的时间越早;外置电枢比内置电

枢的峰值更大,出现的时间更早。因为驱动线圈尺寸越小则其电感越小,所以其回路电流越大,振荡周期越短;外置电枢比内置电枢的耦合系数大,所以外置系统的等效电感越小。

由图 17 可以看到,驱动线圈内径相等的条件下,电枢内置和电枢外置两种结构的最佳触发位置基本相等,除了内径为 70 mm 时,两种结构的最佳触发位置相差 3 mm,其余均在 1 mm 以内,因为采用有限元计算本身存在计算误差,加之求最佳触发位置时采用 1 mm 间隔也存在离散误差,在两个因素的共同作用下导致内径为 70 mm 时,两种结构的最佳触发位置相差较大。考虑计算误差的影响,由图 17 可知,最佳触发位置随驱动线圈内径的增加而降低。最佳触发位置本质是使式(8)中电流、互感和互感梯度关于时间积分取得最大值的电枢初始位移,而式(8)中的电流和互感存在相互影响,不便于分析,从最大出口速度分析驱动线圈内径和驱动结构对最佳触发位置的影响更便利。考虑计算误差的影响,表 3 所示的出口越小,触发位置越大,表 3 中,同一内径、不同结构的速度差均小于 10 m/s,所以同一内径不同结构的触发位置偏差大约在 1 mm 以内。不同内径的速度差与内径差正相关,在所计算的范围内,速度相差约 10 m/s,最佳触发位置则对应相差约 1 mm,所以同一内径、不同结构的最佳触发位置相差在 1 mm 以内。同一结构的发射器最佳触发位置随内径增加而非线性降低。

3 结束语

本文提出了固定驱动线圈尺寸对比电枢内置和外置的研究方式,通过数值计算对不同尺寸的发射系统开展了磁场分布,定性分析了电枢受力,进行了有限元仿真研究,得到以下结论:

①驱动线圈外部的磁感应强度比内部的磁感应强度弱约 50%,所以外置电枢系统比内置电枢系统具有更好的电磁防护能力。

②电枢与驱动线圈径向间距一定时,驱动线圈内径越大,电枢与驱动线圈的电磁耦合越紧密、互感梯度越大,系统可以获得更大的出筒速度和更高的能量转换效率。

③驱动线圈内径一定时,电枢外置系统比电枢内置系统的加速力更大,在大配重条件下,可获得更高的能量转换效率。

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 Electrotechnical Society, 2023, 38 (15): 3943 - 3959. (in Chinese)
- [2] 鲁军勇,马伟明. 电磁轨道发射理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2020.
LU Junyong, MA Weiming. Electromagnetic rail launch theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [3] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考[J]. 电工技术学报,2021,36(22):4628-4636.
MA Weiming. Thoughts on the development of frontier technology in electrical engineering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4628-4636. (in Chinese)
- [4] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报,2016,38(6):1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [5] MA Weiming, LU Junyong. Thinking and study of electromagnetic launch technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1071-1077.
- [6] 王国平,伍根洋,何斌,等. 电磁轨道发射系统动力学理论与设计方法研究进展[J]. 弹道学报,2024,36(2):1-9.
WANG Guoping, WU Genyang, HE Bin, et al. Research progress on dynamics theory and design method of electromagnetic rail launcher [J]. Journal of Ballistics, 2024, 36 (2): 1 - 9. (in Chinese)
- [7] 杜翔宇,刘少伟,关娇,等. 基于电接触特性的电枢臂形状优化设计[J]. 弹道学报,2022,34(3):103-110.
DU Xiangyu, LIU Shaowei, GUAN Jiao, et al. Optimization design of armature arm shape based on electrical contact [J]. Journal of Ballistics, 2022, 34(3): 103-110. (in Chinese)
- [8] 杜翔宇,刘少伟,关娇. 基于多场耦合仿真的四轨电磁发射器性能分析[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(4):112-120.
DU Xiangyu, LIU Shaowei, GUAN Jiao. Performance analysis of quadrupole electromagnetic railgun launchers based on multi-field coupling simulation [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(4): 112-120. (in Chinese)
- [9] MA Weiming, LU Junyong, LIU Yingquan. Research progress of electromagnetic launch technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5): 2197-2205.
- [10] 聂利超. 电磁弹射用超导直线电机的电磁特性分析及优化设计[D]. 北京:北京交通大学,2021.
NIE Lichao. Electromagnetic analysis and optimization design of superconducting linear motor for electromagnetic launch [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [11] 谢广磊. 无人机电磁弹射混合储能与模型预测控制的研究

- 究[D]. 长沙:国防科技大学,2021.
- XIE Guanglei. Research on hybrid energy storage and model predictive control for electromagnetic launcher of UAV [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [12] 李俊. 基于动圈式直线电机的无人机电磁弹射控制方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
- LI Jun. Research on control method of moving-coil linear motor for electromagnetic launcher for unmanned aerial vehicles [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 黄胜军. 固定翼无人机电磁弹射器高功率密度驱动与储能技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2017.
- HUANG Shengjun. Research of high power density driver and hybrid energy storage technology for fixed UAV electromagnetic launcher [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] 赵硕. 便携式电磁弹射系统研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2022.
- ZHAO Shuo. Research on portable electromagnetic ejection system[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022. (in Chinese)
- [15] 王小召. 导弹电磁线圈垂直弹射方案研究[D]. 南京:南京理工大学,2018.
- WANG Xiaozhao. Research on electromagnetic coil vertical launch scheme for missiles [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 王燕, 林福昌, 苏翔. 感应线圈炮中驱动线圈的设计与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 26-30.
- WANG Yan, LIN Fuchang, SU Xiang. Design and analysis of driving coil in induction coil gun [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 26-30. (in Chinese)
- [17] 蒋丽萍, 路梅, 杨洪. 单级异步感应线圈炮的设计仿真分析[J]. 微电机, 2019, 52(3): 14-17.
- JIANG Liping, LU Mei, YANG Hong. Simulation and design analysis of single stage induction coilgun [J]. Micromotors, 2019, 52(3): 14-17. (in Chinese)
- [18] 王秋良, 王厚生, 李献, 等. 同轴线圈电磁推进技术述评[J]. 高压电压技术, 2015, 41(8): 2489-2499.
- WANG Qiuliang, WANG Housheng, LI Xian, et al. Review of coaxial coil electromagnetic propulsion technology [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2489-2499. (in Chinese)
- [19] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- ZHAO Kaihua, CHEN Ximou. Electromagnetism [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 励庆孚, 杨 昕. 螺线管线圈磁场的高精度计算方法及其比较[J]. 电工电能新技术, 1996(4): 7-11.
- LI Qingfu, YANG Xin. The precise magnetic field calculation methods and their comparison for solenoid coil [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1996(4): 7-11. (in Chinese)
- [21] 朱英伟, 李海涛, 严仲明, 等. 线圈型电磁发射器磁场构型的设计与分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 464-468.
- ZHU Yingwei, LI Haitao, YAN Zhongming, et al. Design and analysis for magnetic field configuration of electromagnetic coil launcher [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4): 464-468. (in Chinese)