

增强型导弹四极场电磁轨道发射器研究

杨志勇^{1,2}, 冯刚¹, 刘瑜倩¹, 刘少伟¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 95876 部队, 甘肃张掖, 734100)

摘要 为满足导弹发射过程中大推力、高能量、特殊电磁环境的实际需求,降低驱动电流量级,提出了整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器模型和分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器模型。理论分析了2种模型的能量转换效率,结合具体算例进行了对比说明;利用有限元分析法对导轨内电流分布、模型推力性能、发射组件受力特性进行了研究。结果表明:分段增强型的能量转换效率较整体增强型高,且随分段数目的增加而提高;在保护板作用下,2种模型中导轨内电流的邻近效应得以缓解;2种增强模型的推力大小相当,且较基本型均有较大提升,因而在保证所需发射推力的情况下可以减小驱动电流量级;整体增强型中导轨和保护板受力较大,而分段增强型的导轨和保护板受力较小,且其发射过程中存在周期性变化。2种增强模型均不同程度地优化了发射器的发射性能,可为导弹电磁发射工程化实践提供理论指导;分段增强型的综合性能更优于整体增强型。

关键词 导弹电磁发射器;四极场电磁轨道发射;整体增强;分段增强;能量转换效率;发射推力

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.013

中图分类号 TJ768.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0077-07

Research on Missile's Augmented Electromagnetic Rail Launchers by Quadrupole Magnetic Field

YANG Zhiyong^{1,2}, FENG Gang¹, LIU Yuqian¹, LIU Shaowei¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Unit 95876, Zhangye 734100, Gansu, China)

Abstract: To meet the practical needs of large thrust, high energy and special electromagnetic environment in the process of the missile launching and reducing the magnitude of the driving current, a mode of the missile's entire augmented electromagnetic rail launcher by quadrupole magnetic field and a mode of the missile's segmented augmented electromagnetic rail launcher by quadrupole magnetic field are proposed. The energy conversion efficiencies of two models are analyzed theoretically and recounted by the specific example. Current distributions in rails, thrust performances of models and loading characteristics of the launcher's modules are studied by the finite element analysis. The results show that the segmented augmented model's energy conversion efficiency is higher than entire augmented model's, and increases with the number of segments. Under the action of the protector plate, the proximity effects of currents in rails of two models are alleviated. Propulsive force of augmented models is higher than that of the basic model, the driving current magnitude can be reduced to guarantee the same propulsive force. The rail and

收稿日期: 2018-11-21

作者简介: 杨志勇(1992—),男,湖南娄底人,硕士,主要从事导弹发射技术研究。E-mail:1154379326@qq.com

引用格式: 杨志勇,冯刚,刘瑜倩,等. 增强型导弹四极场电磁轨道发射器研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 77-83. YANG Zhiyong, FENG Gang, LIU Yuqian, et al. Research on Missile's Augmented Electromagnetic Rail Launchers by Quadrupole Magnetic Field[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 77-83.

the protector plate of segmented augmented model take less force, and they are periodic changes in the launching process, while the rail and protector plate of the entire augmented model take more. These augmented models both optimize the launcher's performances in varying degrees. This can apply the missile electromagnetic launch engineering practice with theoretical guidance. The comprehensive performances of the segmented augmented model are better than that of the entire augmented model.

Key words: missile electromagnetic launcher; electromagnetic rail launch by quadrupole magnetic field; entire augmented; segmented augmented; energy conversion efficiency; propulsive force

导弹电磁发射技术是以电磁能作为导弹发射能源、为导弹飞行提供部分或全部动力的新型发射技术,具有巨大的军事潜力。其中地空导弹作为一种大质量的发射体,其发射过程中需要巨大的推力、良好的结构稳定性及严格的电磁场环境。四极磁场因其独特的磁场分布而能满足导弹发射的磁场环境要求,文献[1~2]对其磁场特点和动力学性能进行了研究验证,并将其应用到线圈型电磁炮中;文献[3]通过模拟计算验证了电磁轨道发射技术应用于大型抛体发射的可行性;文献[4]对超大炮口动能电磁轨道发射装置进行了设计和分析,并对其炮口动能和系统效率进行了研究。文献[5]设计的多通道增强型电磁轨道发射装置成功将 300 kg 抛体加速至 35 m/s,但其结构复杂,操作难度大^[6]。文献[7]则结合四极磁场的磁场优势和轨道型发射结构的稳定性,提出了导弹四极场电磁轨道发射模型,并对其磁场分布和推力性能进行了初步验证,但缺乏对四极磁场模型中电流邻近效应的影响及能量转换效率的进一步研究。追求更高的能量利用率和更高的电感梯度一直是电磁轨道发射技术不衰的主题^[8-9],为了进一步增强发射器的推力,降低驱动电流的量级,缓解导轨内部的电流邻近效应,以更好适应导弹的电磁发射需求,本文提出整体式和分散式增强型四极场电磁轨道发射器模型,并分别从能量转换效率、导轨内部电流分布、发射器推力及发射组件受力等方面对其展开研究。

1 物理建模

1.1 四极场电磁轨道发射器模型

四极场电磁轨道发射器由 4 根导轨等距离、对称安装,两相对导轨中加载大小相等的同向电流,该电流流经电枢从另外 2 根相对的导轨流出,导轨中的电流在发射区域内产生 1 个四极磁场,该磁场与电枢中的电流作用产生推力推动电枢前进,导弹装载在电枢上随之发射出去^[7]。

1.2 整体增强型四极场电磁轨道发射器模型

在电容器设计中,为抑制电容器板的电荷密度过于集中,通常在电容器板的周围加一保护环导体。

鉴于平行导体电流分布与平行板电容器的电荷分布的相似性,同样采用添加保护板的方式来改善四极场导轨内部的电流分布^[10]。同时,保护板内电流也在发射区域内产生磁场,对发射区域的磁场起到增强作用,从而可以增大发射器的推力。

整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器的导轨模型由导轨、绝缘层和保护板组成,导轨与保护板内通以相同方向的电流以增强整个发射区域的磁场分布。为降低发射过程中焦耳热损失,保护板采用导电性能良好的材料,绝缘层则采用散热性能良好的材料以提高导轨散热。

整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器物理模型见图 1。导轨的配置及各导轨的电流流向与导弹四极场电磁轨道发射器的基础模型保持一致,各导轨外围增加一个与导轨等长的保护板,保护板内通以与相邻导轨内方向一致的电流,用来改善导轨内电流分布及增强发射区域内磁场。导轨与保护板均可采用独立电源,从而可满足导弹发射过程中对电源能量的需求。

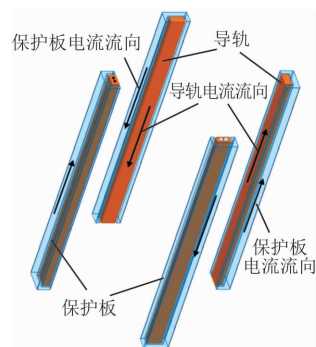


图 1 整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器轨道模型

1.3 分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器模型

分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器轨道简易模型见图 2。

其特点是在原有的四极场电磁轨道的基础上,保护板呈分段式沿导轨分布,每段保护板采用独立电源,电路的通断由电枢的运动位置决定。当电枢运动到某一段保护板对应的导轨位置时,该段保护板电路接通,进而在发射区域产生增强磁场,其余段保护电路则处于关闭状态;当电枢离开该区域时,则

该段保护板自动断电,以减小能量损耗。保护板内电流流向与相邻导轨内电流流向始终保持一致,各导轨上保护板的装配位置保持平齐。

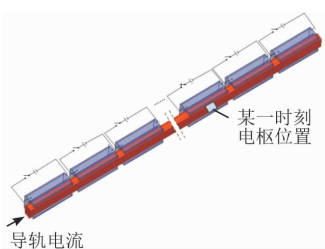


图2 分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器轨道模型

在分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器中,保护板产生一个个独立的外加磁场,从而加强对发射区域的磁场强度。在发射过程中,电枢依次经过这些区域时,电枢所受的电磁推进力也会因此加强。

在此模型中,电枢相对于保护板的位置是周期性变化的,即“进入保护-滑过保护板-离开保护板区域”,因此电枢所受的电磁推力、导轨及保护板受力、导轨内电流分布均可能因此而变化。以电枢滑经某一段保护板区域为例,将此过程简化为电枢刚进入外加磁场区域(电枢处于通电保护板后端)、在外加磁场中滑动(电枢处于通电保护板中部)、滑至外加磁场末端(电枢处于通电保护板前端)3个位置状态对发射性能进行研究,则由此得出整个发射过程中发射器的发射性能,见图3。

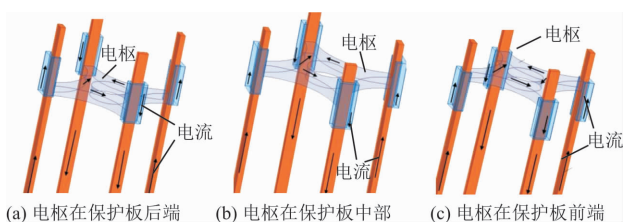


图3 电枢与通电保护板的相对位置示意图

为分析增强型导弹四极场电磁轨道发射器的优化作用,下面从能量转换效率、导轨电流分布、发射器推力、导轨和保护板受力4个方面对其进行详细研究。四极磁场的分布特性在文献[7]中已有研究,本文便不再细述。

2 能量转换效率分析

电磁轨道发射过程中,电源储存的能量不可能完全转化成抛体的动能,其能量损失主要体现在以下几个方面:电源内部电阻的能耗,导轨电阻能量损失,电枢电阻能量损失^[11],抛体发射时储存在回路中的残留磁能,固体电枢与导轨之间的摩擦损失^[12],抛体运动的空气阻力损失等^[13]。如果能减

少上述能量损失,提高系统的能量转换效率,则可降低发射系统的体积和重量,有利于机动作战。

整体增强型和分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器中,在二者结构尺寸相同的前提下,导轨与电枢接触面数目相同,电枢电阻能量损失与枢轨之间的摩擦损失可视为相同,电枢与导轨的空气阻力损失及电源内部能耗也可视为大体相同,且这三方面的能量损耗相对较小,因此二者系统能量转换效率的差异主要体现在导轨与保护板的电阻能耗和发射时回路中残留磁能这两方面。下文仅从这两方面的能量损耗对系统的能量转换效率进行理论分析,此时系统能量转换效率 η 可近似表示为:

$$\eta = \frac{W_k}{W_k + W_R + W_L} \quad (1)$$

式中: W_k 为抛体动能; W_R 为导轨与保护板的电阻能量损耗; W_L 为发射时电路残留磁能。

2.1 整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器能量转换效率

对于驱动电流为恒流的情形,当不考虑电流趋肤效应时,假设导轨恒定电阻梯度为 R'_d ,保护板恒定电阻梯度为 R'_b ,且保护板与导轨的电流均为 I 。易知每根导轨的通电长度即为电枢在导轨上的加速距离,由运动学方程:

$$l_i = \frac{1}{2}at^2 \quad (2) \quad a = \frac{F}{m} \quad (3)$$

可得 t 时刻导轨的电阻为:

$$R_d = \frac{R'_d Ft^2}{2m} \quad (4)$$

则在 dt 时间段内所有导轨的电阻能量损失为:

$$dW_{R_d} = 4I^2 R_d dt = \frac{2R'_d FI^2 t^2}{m} dt \quad (5)$$

积分可得发射周期内导轨的电阻能量损失为:

$$W_{R_d} = \int_0^T \frac{2R'_d FI^2 t^2}{m} dt = \frac{2R'_d FI^2 T^3}{3m} \quad (6)$$

式中: m 为抛体(导弹和电枢)质量; F 为抛体所受电磁推力; T 为发射周期。

在整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器中,保护板全长通电,其电阻能量损失为:

$$W_{R_b} = 4I^2 R_b T = \frac{2R'_b FI^2 T^3}{m} \quad (7)$$

抛体动能为:

$$W_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{F^2 T^2}{2m} \quad (8)$$

导弹发射时储存在磁场中的能量包括导轨电路的自感磁能和保护板与导轨间的互感磁能,即:

$$W_L = \frac{1}{2}I^2 L_d + I^2 M_{bd} = \frac{I^2 L'_d FT^2}{4m} + \frac{I^2 M'_{bd} FT^2}{2m} \quad (9)$$

式中: L_d 为导轨电路的等效自感; L'_d 为导轨电路的

等效自感梯度; M_{bd} 为保护板与导轨间的等效互感; M'_{bd} 为保护板与导轨间的等效互感梯度。

因此,整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器的能量转换效率为:

$$\eta_1 = \frac{W_k}{W_k + W_{R_d} + W_{R_b} + W_L} = \frac{6F}{6F + 3I^2(L'_d + 2M'_{bd}) + 8(3R'_b + R'_d)I^2T} \quad (10)$$

2.2 分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器能量转换效率

在分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器中,电枢每滑过一段通电保护板时,电枢所受的推力略有波动,此处选取电枢所受推力的平均值作为抛体的推力。根据2.1节分析结果,同样可得分段增强型发射器导轨的电阻能量损失为:

$$\overline{W_{R_d}} = \int_0^{T'} \frac{2R'_d \overline{F} I^2 t^2}{m} dt = \frac{2R'_d \overline{F} I^2 T'^3}{3m} \quad (11)$$

式中: \overline{F} 为电枢所受推力的平均值。

对于等段长的分段保护板,每段保护板的长度为:

$$l_i = \frac{l}{N} = \frac{mv^2}{2NF} = \frac{FT'^2}{2Nm} \quad (12)$$

电枢滑过第 i 段保护板磁场增强区域所需的时间为:

$$t_i = T' \left[\frac{i^{\frac{1}{2}} - (i-1)^{\frac{1}{2}}}{N^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (13)$$

则此段通电保护板所造成的电阻能量损失为:

$$W_{R_b}^i = I^2 R'_b l_i t_i = \frac{I^2 R'_b F T'^3}{2Nm} \left[\frac{i^{\frac{1}{2}} - (i-1)^{\frac{1}{2}}}{N^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (14)$$

$$\eta_2 = \frac{6\overline{F}}{6\overline{F} + 8R'_d I^2 T' + \frac{3I^2 L'_d + 6I^2 M'_{bd}}{N} + \frac{24I^2 R'_b T'}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{i^{\frac{1}{2}} - (i-1)^{\frac{1}{2}}}{N^{\frac{1}{2}}} \right]} \quad (19)$$

2.3 算例分析

为直观地展现2种模型的能量转换效率,分别对整体增强型和分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器的能量转换效率作简单的计算分析。假设发射轨道长度均为20 m,电枢与导弹质量合计200 kg。导轨的电阻梯度为 $3.56 \times 10^{-6} \Omega/m$,等效电感梯度为 $1.96 \mu H/m$;选用铜质保护板,且其横截面尺寸均保持相同,保护板的电阻梯度为 $1.62 \times 10^{-6} \Omega/m$,导轨与保护板之间的等效互感梯度为 $2.272 \mu H/m$ 。不同增强型导弹四极场电磁轨道发射器的能量转换效率见表1。

表1 不同增强型发射器能量转换效率 %

整体增强型	分段增强型				
	N=5	N=10	N=20	N=40	N=100
21.4	37.7	42.2	44.8	46.3	47.2

由表1可以看出,分段增强型导弹四极场电磁轨

整个发射过程保护板所造成的电阻能量损失为

$$\overline{W_{R_b}} = \sum_{i=1}^N 4W_{R_b}^i = \sum_{i=1}^N \frac{2I^2 R'_b F T'^3}{Nm} \left[\frac{i^{\frac{1}{2}} - (i-1)^{\frac{1}{2}}}{N^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (15)$$

抛体动能为:

$$\overline{W} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{\overline{F}^2 T'^2}{2m} \quad (16)$$

前 $N-1$ 段保护板断电时会储存自感磁能,在电枢离轨瞬间导轨电路残留自感磁能且与第 N 段保护板之间也存在互感磁能,则:

$$\overline{W_L} = \frac{1}{2} I^2 \left(1 - \frac{1}{N}\right) L_b + \frac{1}{2} I^2 L_d + I^2 M_{bd}^N = \frac{(N-1)I^2 L'_b F T'^2}{4Nm} + \frac{I^2 L'_d F T'^2}{4m} + \frac{I^2 M'_{bd} F T'^2}{2Nm} \quad (17)$$

式中: L_b 为保护板电路等效自感; L'_b 为保护板电路等效自感梯度; M_{bd}^N 为第 N 段保护板与导轨的等效互感。

因此,分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器的能量转换效率可表示为:

$$\tilde{\eta}_2 = \frac{\overline{W_k}}{\overline{W_k} + \overline{W_{R_d}} + \overline{W_{R_b}} + \overline{W_L}} \quad (18)$$

在实际应用中,如果合理设计电路参数,可使得通电保护板内电流在电枢离开时恰好谐振至零,从而可以避免通电保护板内储存自感磁能,此时分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器的能量转换效率为:

$$\eta_2 = \frac{6\overline{F}}{6\overline{F} + 8R'_d I^2 T' + \frac{3I^2 L'_d + 6I^2 M'_{bd}}{N} + \frac{24I^2 R'_b T'}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{i^{\frac{1}{2}} - (i-1)^{\frac{1}{2}}}{N^{\frac{1}{2}}} \right]} \quad (19)$$

道发射器的能量转换效率明显高于整体增强型,选用分段增强型发射器能提高能量利用率,降低对能源的要求。随着保护板数目的增加,分段增强型发射器的能量转换效率也随之提升,但其提升效果会逐渐减弱。另一方面,保护板数目越多,每段保护板的长度也就越短,提高了保护板电路精准控制的难度及其加工制造难度,因此在实际应用中需合理选择保护板的段长。此外,随着超导材料的兴起,如果能实现导轨及保护板材料的常温超导化,则由发射回路中电阻引起的能量损失将不再存在,发射系统的能量转换效率能得到很大提升,导轨的热腐蚀也将大为缓解。

3 增强型导轨内电流分布优化效果

为清晰地展现保护板对导轨与电枢接触处电流分布的影响,首先对未加保护板时四极场电磁

轨道发射器导轨与电枢接触处导轨电流分布进行研究。

将相对导轨内表面的距离设定为 600 mm, 导轨的其他结构尺寸见图 4。由于受趋肤效应的影响, 导轨中电流主要沿导轨表面分布^[14-15], 因此选择导轨表面的计算路径, 如图 4 中 S 所示, 导轨电流设为 10 kA, 考虑导轨中涡流效应的影响, 导轨中电流分布的有限元分析结果见图 5 中红色曲线。

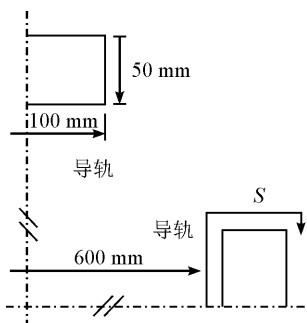


图4 导轨参数及导轨表面电流计算路径示意图

可以看出, 未添加保护板时, 导轨内表面及两导轨相邻面的电流密度均比较大, 导轨内拐角处存在较大的电流密度峰值。

3.1 整体增强型导轨内电流分布

为全面研究保护板对导轨内电流分布的影响, 首先选取中间段通电导轨某一横截面电流为研究对象, 探究保护板对导轨内电流邻近效应的缓释作用; 再以电枢接触处导轨横截面电流为研究对象, 分析保护板对电枢与导轨接触处电流分布的影响。以 100 kA 电流作为导轨和保护板输入电流, 采取图 4 所示的计算路径, 在保护板作用下, 中段导轨横截面电流分布如图 5 中蓝色曲线所示, 与电枢接触处导轨内电流分布则如图 5 中黑色曲线所示。

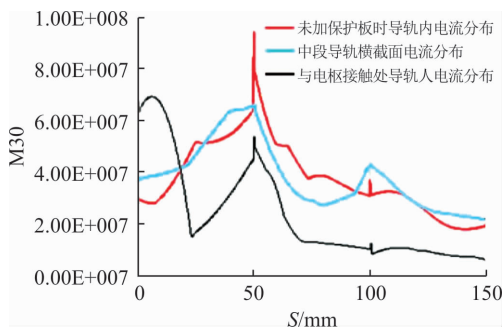


图5 导轨内电流分布

由图 5 中蓝色曲线可以看出, 虽然导轨内拐角 ($S=50$ mm) 处仍有较大的峰值电流密度, 但两相邻导轨表面电流的电流密度已大为降低, 其平均值甚至已低于导轨内表面电流; 导轨外拐角处的电流密度也大为降低。由此可见, 保护板对导轨内电流分布影响明显, 起到了改善导轨电流分布的作用。

由图 5 中黑色曲线则可以看出, 受电流集中通过电枢与导轨接触面的影响, 与电枢接触处导轨内表面电流密度依然较大, 但相比无任何措施时其密集区域较窄; 内拐角处存在峰值, 但其值较小, 可见保护板对电枢与导轨接触处的电流分布亦有一定的改善作用。

3.2 分段增强型导轨内电流分布

采用分段式保护板来加强发射区域磁场时, 由于只有电枢位置附近的保护板通电, 因此保护板也只对与电枢接触部分的导轨段电流分布有较大影响, 而对远离通电保护板段的导轨电流则无明显影响。因此以电枢接触处导轨横截面电流为研究对象, 选取每段保护板的长度为电枢厚度的 3 倍, 分析保护板对该段导轨内电流分布的影响。

下面分别对电枢处于保护板后端、保护板中间、保护板前端时与电枢接触处导轨内电流分布情况进行研究, 其结果见图 6。

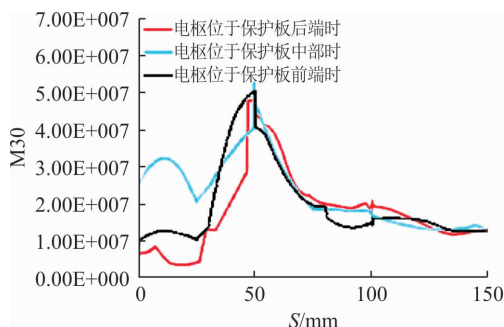


图6 电枢与导轨接触处导轨电流分布

由图 6 可以看出, 当电枢位于保护板前后两端时, 即电枢进入和离开增强磁场区域时, 保护板对电枢接触处导轨内电流分布有一定的改善作用, 导轨内表面的电流密度有较为明显的下降。当电枢在保护板中部时, 除导轨内拐角处电流略高以外, 导轨内表面电流分布基本处于比较均匀状态, 导轨内表面电流略高于导轨外表面。

电枢与保护板相对位置的不同引起保护板对导轨内电流分布的改善作用亦不同表明, 电枢滑经每一段外加磁场区域时, 相应导轨段的电流分布都会经历一个“不均匀-较均匀-不均匀”的反复变化, 这可能会对导轨表面的热腐蚀造成一定影响, 因此在设计发射器结构时需考虑此因素。

4 增强型发射器推力的优化效果

4.1 整体增强型发射器推力

在输入电流及其他参数条件不变的情况下, 对整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器的电磁推力

进行有限元计算,其结果见表2。为更清晰地体现整体增强型的优化效果,四极场电磁轨道发射器基本型的推力也展现于表2中,以作对比分析。

由表2可以看出,在同等输入电流量级的情况下,相比于导弹四极场电磁轨道发射器的基本型,整体增强型发射器能提供2倍以上的电磁推力。由此可以得出,保护板的作用并不只是类似于2个同等量级的发射器的简单叠加,而是对发射器的电感梯度进行了改善,使得发射推力大于2倍;因此,整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器的推力相对其基本型有较大改进。

表2 整体增强型与基本型推力对比 N

类型	F_x	F_y	F_z	Mag F
整体增强型	-5.9	-1.65	25 813	25 813
基本型	0.18	2.37	11 004	11 004

4.2 分段增强型发射器推力

电枢在滑动过程中电枢与导轨的相对位置发生变化引起了导轨与电枢接触处电磁特性的改变,进而会影响发射器对电枢的电磁推力。现仍以100 kA输入电流为例,对电枢滑经某一段保护板时电枢所受电磁力的变化情况进行研究,其结果见表3。

表3 电枢处于保护板不同位置时电枢所受电磁力 N

位置	F_x	F_y	F_z	Mag F
保护板后端	-7.8	-15	24 563	24 563
保护板中部	18	-12	24 957	24 957
保护板末端	-7.8	-3.1	24 761	24 761

由表3可以得出,无论电枢与保护板相对位置如何,分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器均能提供很大的电磁推力,其数值与整体增强型发射器十分接近。电枢刚进入增强磁场区域便能受到较大的电磁推力,在增强磁场中间位置时所受推力略大于两端,处于增强磁场末端时所受推力略有减小。但整体来讲,电枢滑经整个增强磁场区域时所受推力较为平稳。

5 导轨及保护板受力分析

5.1 整体增强型导轨及保护板受力

发射区域磁场增强时,电枢所受推力增大,但同时导轨受力也会增加,从而影响导轨发射性能和使用寿命。此外,保护板的引入也会增加系统复杂性和稳定性,必须对其进行分析。

表4展示了整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器中导轨所受电磁力的平均值和保护板所受电磁力的平均值。其中导轨受力32 108 N,保护板受力

20 249 N,其值之大不容小觑。从电磁场理论作简单分析:导轨与保护板内电流流向相同,产生相互吸引的电磁力,而其他导轨与保护板对此导轨综合产生一个排斥力,且二力方向相同,故使得导轨所受合力极大增强。因此在整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器中,导轨和保护板的强度、刚度及固定方式,是需要着重考虑的问题。

表4 整体增强模型中导轨与保护板受力平均值 N

位置	F_x	F_y	F_z	Mag F
保护板	0.31	20 249	0	20 249
导轨	0.43	-32 103	574	32 108

5.2 分段增强型导轨及保护板受力

电枢与保护板的相对位置不同时,增强磁场对导轨与保护板的电磁作用力均会产生相应变化,这主要是因为通电导轨与增强磁场间相互作用的范围不同。在保持导轨通电长度一致的情况下,电枢处于保护板不同区域时导轨及通电保护板所受电磁力见表5~6。

表5 电枢处于保护板不同位置时导轨所受电磁力 N

位置	F_x	F_y	F_z	Mag F
保护板后端	-1 539	16	501	1 619
保护板中段	-4 388	17.8	558	4 423
保护板前端	-7 248	16	537	7 268

表6 电枢处于保护板不同位置时保护板所受电磁力 N

位置	F_x	F_y	F_z	Mag F
保护板后端	1 686	28	0	1 687
保护板中段	2 578	28	0	2 578
保护板前端	3 585	26	0	3 585

从表5中可以看出,电枢刚进入增强磁场区域时,导轨所受电磁力比较小,随着电枢的向前运动,导轨所受电磁力快速增大;当电枢运动到该增强磁场区域的末端时,导轨所受电磁力是电枢刚进入该区域时的4~5倍。在此过程中,虽然导轨受力变化较大,但其大小相对于整体式外场增强发射器而言仍旧很小,可控制在轨道的承受范围之内。

从表6可以看出,随着电枢在增强磁场区域的向前运动,保护板受力也逐渐增大,但其变化幅度较小,且其量级也较小,相对易于结构稳固。

值得注意的是,电枢每经过一段增强磁场区域,导轨及保护板受力就会发生上述的周期性变化,这可能会使发射结构产生振动,也容易使发射结构内部出现疲劳损伤,因此在发射器结构设计时需注意防范。

6 结论

通过对整体增强型导弹四极场电磁轨道发射器和分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器2种模型的理论分析和数值模拟分析,对比研究得出以下结论:

1)2种增强型模型均增大了发射区域的磁场,提高了发射器推力,进而降低了驱动电源的量级,更利于导弹电磁发射器的工程化实现。

2)2种模型在发射过程中,导轨内电流邻近效应得以缓解,电流分布得以改善,能一定程度上降低热腐蚀。

3)整体增强型发射器存在导轨及保护板受力过大以至于很难保证发射结构稳定性的问题。分段增强型发射器导轨及保护板受力相对较小,利于稳固发射器结构。

4)分段增强型导弹四极场电磁轨道发射器能量转换效率高于整体增强型,且随保护板分段数目增加而提升。对于常规导体而言,整体式保护板加大了发射过程中的焦耳热损耗和发射器内电感磁能的残留,这对于长发射轨道将更为突出,但随着常温超导材料的兴起,整体增强的能量转换效率提升,采用整体增强型在其结构和系统控制方面将比分段增强型更为简便。

参考文献(References):

- [1] LI D, MEINKE R. Electromagnetic Launch by Linear Quadrupole Field [C]//IEEE 34th Annual Conference on Industrial Electronics IECON. [S.l.]:IEEE, 2008.
- [2] GUTIERREZ H. Electromagnetic Propulsion by Multipole Transversal Field: Numerical and Experimental Validation [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2016, 52(8): 1-10.
- [3] 陈庆国,王永红,魏新劳,等. 电容驱动型轨道电磁炮电磁过程的计算机仿真[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 68-71.
CHEN Q G, WANG Y H, WEI X L, et al. Computer Simulation of Electromagnetic Process in the Capacitor Driven Rail Gun [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 68-71. (in Chinese)
- [4] 周长军,苏子舟,张涛. 超大炮口动能电磁轨道炮设计与仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(3): 10-14.
ZHOU C J, SU Z Z H, ZHANG T, et al. Design and Simulation of a Extra Large Muzzle Kinetic Energy Railgun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013(3): 10-14. (in Chinese)
- [5] ZHANG J, GU G, XIANG Y, et al. Reserch on a Big Multi-Turn Rail Electromagnetic Launching System [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2007, 43(5): 2054-2058.
- [6] ZHANG J, THOMPSON J E, LU Z, et al. Analysis of the Advantages and Disadvantages of Multi-turn Railgun [C]// Electromagnetic Launch Technology of 2012 16th International Symposium. Beijing: [s. n.], 2012.
- [7] YANG Z Y, FENG G, XUE X P, et al. An Electromagnetic Rail Launcher by Quadrupole Magnetic Field for Heavy Intelligent Projectiles [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1095-1100.
- [8] NOVAC B M. Studies of a Very High Efficiency Electromagnetic Launcher [J]. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35: 1447-1457.
- [9] KATSNEL'SON S S, ZAGORSKII A V. Effect of the Initial State on the Efficiency of Acceleration in Electromagnetic Rail Launcher [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2001, 42(1): 10-13.
- [10] BENO J H, WELON W F. Active Current Management for Four Railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 1991, 27(1): 39-44.
- [11] STANKEVICH S V. Effect of the Shape of Metal Solids on the Rate of Their Joule Heating in Electromagnetic Rail Launcher [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2009, 50(2): 342-351.
- [12] 朱仁贵,张倩,李治源,等. 高功率脉冲电流作用下滑动界面初始熔蚀的试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1879-1884.
ZHU R G, ZHANG Q, LI Z Y, et al. Experiment Research on Initial Melt Erosion at the Sliding Interface under High Power Pulse Current [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1879-1884. (in Chinese)
- [13] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
WANG Y, XIAO F. Principle of Electric Gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [14] LIEBFRIED. Velocity-Induced Current Profiles inside the Rails of an Electric Launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1520-1525.
- [15] COTE P J. On the Role of Induced Fields in Railguns [J]. J Phys D: Appl Phys, 2007, 40(1): 274-283.

(编辑:徐敏)