第 49 卷 第 2 期：871-884 高电压技术 Vol.49, No.2: 871-884
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221047

增强型电磁轨道发射技术现状及发展趋势

徐伟东[1,2,3]，叶文怡[1,2]，王　炅[1,2,3]，成文凭[1,2,3]，赵伟康[1,2,3]，
徐　蓉[1,2,3]，严　萍[1,2,4]

（1. 中国科学院电工研究所，北京 100190；2. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室，北京 100190；
3. 齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院，济南 250104；4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：电磁发射技术是将电磁能转化为动能的新型发射技术，具有初速高、初速可调、性能稳定等优点。增强型电磁轨道发射技术是电磁轨道发射技术的重要分支，具有电感梯度高的显著优点，近年来成为电磁轨道发射的研究热点之一，理论研究和工程应用均取得了较大进展。文中主要介绍增强型电磁轨道发射技术的工作原理，分析近年来相关研究机构在建模、计算仿真、试验验证等方面的主要研究成果，总结并分析近年来国内外研究现状及进展。分析结果表明，增强型电磁轨道发射技术具有增加装置等效电感梯度、降低驱动电流幅值、提升内膛寿命、提高有效载荷比等优点，但也带来电子器件使用限制、装置复杂性和绝缘风险增加等问题，提出了场路耦合计算仿真、一体化绝缘、长寿命、大张力成型、弹炮匹配等关键技术，进一步厘清增强型电磁轨道发射技术和装置的发展及应用方向，加快推进其工程化应用进程。

关键词：电磁轨道发射；增强型发射装置；电感梯度；驱动电流；工程化应用

Current Situation and Development Trend of Augmented Electromagnetic Launching Technology

XU Weidong[1,2,3], YE Wenyi[1,2], WANG Jiong[1,2,3], CHENG Wenping[1,2,3], ZHAO Weikang[1,2,3],
XU Rong[1,2,3], YAN Ping[1,2,4]

(1. Institute Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drives, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Institute of Electrical Engineering and Advanced Electromagnetic Drive Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250104, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract：Electromagnetic railgun is a new method to obtain the high velocity from electromagnetic energy, and it has advantages of high velocity, speed adjustment, and stable performances. Augmented railgun technology is an important branch of electromagnetic launch technology. Because of the distinct advantages of the high inductance gradient, it has become one of the research hotspots of electromagnetic launch in recent years. Substantial progress has been made both in theoretical researches and engineering applications. In this paper, the principle of augmented technology, the major achievements of modelling, calculation, simulation and tests are presented, and the research status improvements in recent years are summarized. The features of the high inductance gradient and relatively low driving current amplitudes contribute to improvements of the barrel lifetime and the payload ratio. However, problems such as restrictions on electronic components, the complexity of the system, and the rising risk of insulation have emerged as the gradual deepening of the study. Based on advantages and disadvantages of the augmented railgun, key technologies in terms of precise modelling, insulation, long lifetime, high tension winding, and projectile matching are proposed. The future trend of the augmented railgun is further discussed, which helps to advance its engineering applications.

Key words：electromagnetic launch; augmented railgun; inductance gradient;drive current; engineering applications

0　引言

电磁轨道发射技术是将电磁能转化为动能的新型发射技术，是继机械能和化学能之后发射技术领域的又一次革命性进步。该技术属于特种直线电机技术，通过调制储能系统的输出电流幅值(百千安至兆安量级)和脉宽(数毫秒)[1-2]，驱动发射体以极高过载加速至 2 km/s 以上，具有初速高、初速可调、性能稳定等优点，在国防领域具有广阔的应用前景。电磁轨道发射装置主要包含简单型和增强型两大

基金资助项目：国家自然科学基金(52173089)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52173089).

类。简单型发射装置结构简单，但电感梯度小，电流幅值高，槽蚀、熔蚀现象较为严重。增强型发射装置结构复杂，但具有电感梯度高，能有效降低驱动电流峰值，改善发射装置内膛运行状况和提高有效载荷占比等优点，成为电磁发射的研究热点[3-4]，并取得了较大进展[5-6]。

近年来，增强型电磁轨道发射技术发展迅速，在仿真建模、样机研制及试验等取得一系列成果。本文主要介绍了增强型电磁轨道发射技术的工作原理、最新研究进展及代表性成果，并总结其关键技术和展望其发展方向，加快增强型电磁轨道发射装置工程化应用。

1 电磁发射基本原理及技术特点

1.1 电磁发射基本原理

电磁轨道发射装置主要由平行轨道、高功率脉冲电源、电枢及载荷(弹丸)等组成，见图 1[7]。其工作原理如下：高功率脉冲电源产生的脉冲大电流流过电枢时，电枢在强磁场中获得极高的电磁力推动载荷加速运动，在较短时间内速度可达几千米每秒。

简单型发射装置中，电枢所受到的电磁推力大小 F 为

$$F=\frac{1}{2}L'I^2 \tag{1}$$

式中：F 为电磁推力；L'为发射装置电感梯度，主要与装置结构形式、尺寸相关；I 为驱动电流。

1.2 增强型电磁轨道发射装置结构形式及参数变化

电磁轨道发射装置按轨道匝数可分为简单型和增强型两种。相比简单型的单匝结构，增强型为多匝轨道，如图 2 所示。增强型发射装置利用电流流经多匝轨道时磁场产生叠加作用，在同样电流条件下有效增加磁场强度，进一步提高对电枢的电磁推力，根据式(2)可知，即增强型发射装置电感梯度大大增加[8]。随着轨道匝数增加，装置结构形式多样化。根据轨道数量(或匝数)，有 4 轨(双匝)、6 轨(3 匝)以及更多轨道对数。根据排布形式有串联增强、并联增强和层叠增强等。由于结构形式发生变化，n 匝增强型发射装置内电枢所受电磁推力为[9]

$$F=\frac{1}{2}(L_1'+\frac{2I_2}{I_1}M_{12}'+\frac{2I_3}{I_1}M_{13}'+\cdots)I_1^2=\frac{1}{2}L_{\text{total}}'I_1^2 \tag{2}$$

式中：F 为电磁推力；L_1' 为主轨道的电感梯度；M_{12}'，M_{13}'，…，分别为主轨道与各辅助轨道之间互感梯度；L_{total}' 为总电感梯度；I_1 为主轨道流过电流；I_2，I_3，…，分别为各辅助轨道流过的电流。

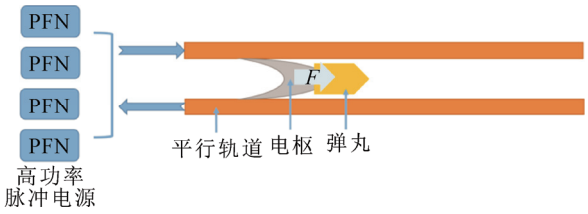


图 1 简单型电磁轨道发射装置示意图

Fig.1 Diagram of simple electromagnetic railgun

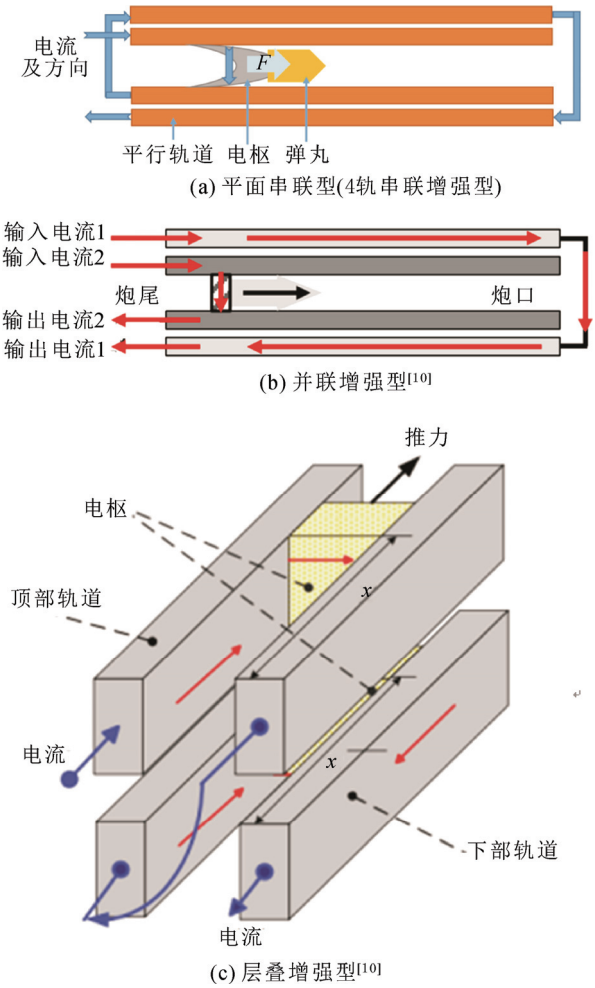


图 2 增强型电磁轨道发射装置的主要结构形式

Fig.2 Structural forms of augmented railgun

根据式(2)可知，增强型电磁发射装置通过增加辅助轨道数量，叠加一个外部磁场，使得电枢获得更大的电磁推力，意味着其等效电感梯度增大。增强型发射装置的等效电感梯度会随着轨道数量的增加得到一定程度的提高，在相同的加速距离和出膛速度下，更高的电感梯度使得增强型电磁发射装置可在更低的电流下工作。虽然轨道数量不断增加可以进一步提高发射装置的等效电感梯度，但轨道数

量的增加导致其初始等效阻抗增加，发射效率会受到一定影响，且其结构形式越来越复杂，工程实现难度不断提高。

图 3 为电磁发射等效电路图，其中电源侧中 R_1 为电源内阻，K 为电源开关，R_L 和 L_L 分别为电源模块输出电感的内阻和电感值，负载侧 R_0 和 L_0 分别为弹丸在初始位置条件下发射装置初始参数(初始电阻和初始电感)，R_x 和 L_x 分别为弹丸在不同位置对应的电阻和电感，R_a 为电枢等效电阻，U 为电源电压。

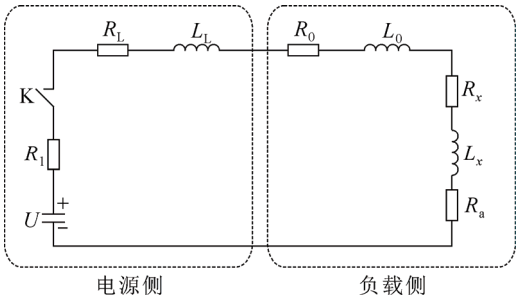


图 3　等效电路模型

Fig.3　Equivalent circuit model

发射装置初始参数与发射装置结构形式密切相关，简单型发射装置初始参数仅仅包含电枢后部区域的等效参数，增强型发射装置的初始参数除了包含电枢后部区域，还包含用于磁场增强的辅助轨道的等效电阻和电感。因此，简单型和增强型发射装置的初始参数有一定差异。如文献[12]中口径 20 mm 简单型发射装置初始电感 L_0 为 1.6 μH，初始电阻 R_0 为 0.6 mΩ；文献[13]中简单型发射装置初始电感 L_0 为 1.8 μH，初始电阻 R_0 为 1.0 mΩ；文献[14]中增强型发射装置初始电感 L_0 为 4.2 μH，初始电阻 R_0 为 0.6 mΩ；文献[15]中增强型发射装置初始电感 L_0 为 4.0 μH，初始电阻 R_0 为 0.1 mΩ。上述参数表明，与简单型发射装置相比，增强型发射装置初始电感有较大幅度增加，初始电阻值有一定的上升或下降，初始电感值增加导致驱动电流波形和系统效率受到影响[14]。

2　研究现状及进展

2000 年前后，增强型发射技术的研究成果主要集中在美国相关研究机构和学者，其他国家研究机构仅开展少量研究。但在 2010 年之后，尤其是 2015 年以来，国外电磁轨道发射公开发表的文献数量较 2010 年前后相对减少，尤其是美国的研究成果更是大幅减少，增强型发射技术研究也是如此。目前，在增强型发射技术研究领域，法德联盟实验室(ISL)处于研究前列，伊朗、俄罗斯、乌克兰等国家也开始展开相关研究。国内增强型电磁轨道发射技术研究迅猛增长，突破了一系列关键技术，逐步转向工程化研究。国内研究主要单位有西北机电工程研究所、中国科学院电工研究所、南京理工大学、燕山大学、中国工程物理研究院、武汉大学、军械工程学院、航天工程大学、空军工程大学等，在仿真计算、装置研制与发射试验等方面，获得一系列成果，推动增强型发射技术不断进步。

2.1　国外研究现状

法德联盟实验室(ISL)分别于 2009 年和 2014 年研制 SR\3–60(segmented railgun with 3 rail pairs)和 MASEL(modular augmented staged electromagnetic launcher)两型增强型发射装置，并开展一系列验证试验。

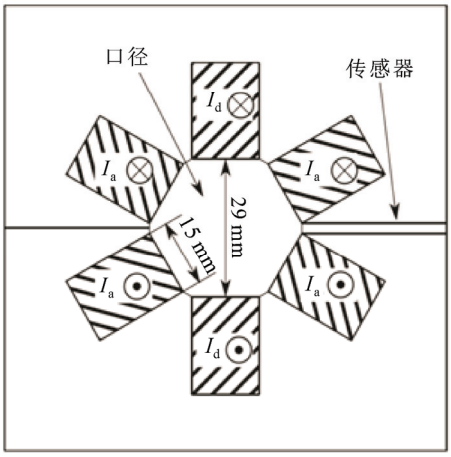
SR\3–60 装置及截面如图 4(a)、4(b)所示，包含 3 对相同的轨道，长度为 2 m，通过改变炮尾和炮口的连接方式可实现简单型和增强型发射方式的转换，其增强型和简单型的电感梯度分别为 0.93 μH/m 和 0.48 μH/m[16-17]。简单型条件下，可以通过调整预装在发射装置内部的 3 个弹丸之间的触发延时时间来调整其发射频率，2013 年公开文献中展示了 100、200 和 400 Hz 的发射能力[18]。2020 年通过对该装置的炮膛内磁场动力学展开研究，计算并通过试验验证了通流圆柱载荷周围的瞬态磁场分布随着与通流载荷表面距离增大而急剧衰减，为发射载荷中敏感器件布设提供指导，如图 4(c)所示[19]。

MASEL 装置口径为 20 mm×20 mm，长度 0.7 m，采用 2 个截面积为 4 mm×10 mm 的独立增强线圈，通过改变与主轨道的连接形式，发射装置可在简单型、并联增强型和串联增强型 3 种模式之间进行切换。试验结果与计算结果基本一致，简单型、并联增强型和串联增强型的系统效率分别约为 0.9%，2%和 2.6%[20]。2014 年文献[21]将 MASEL 装置增强线圈作为 XRAM 电源的储能电感，结果表明 XRAM 电源在增强型发射条件下具有较好的性能，但电容与电缆电感之间存在振荡，电容反向充电至 2 kV，影响电容器寿命。

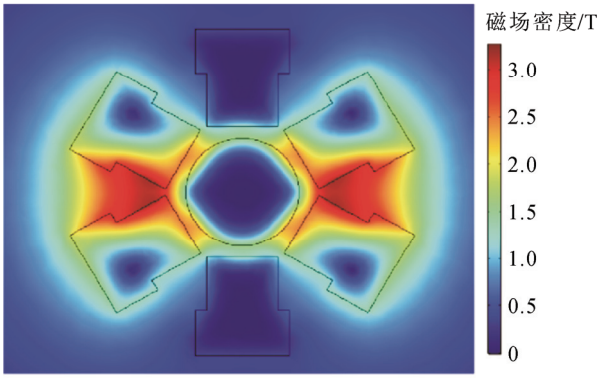
伊朗相关研究机构主要针对串联层叠增强型结构开展了仿真分析研究。2013 年，文献[22]指出双匝层叠串联增强型结构的电感梯度大大高于简单



(a) SR\3−60装置



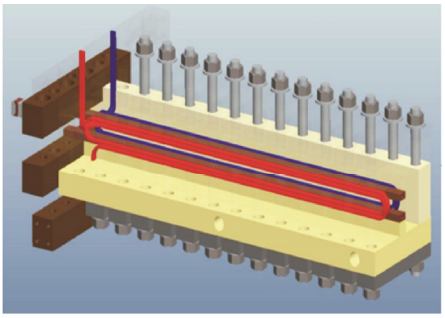
(b) 截面图



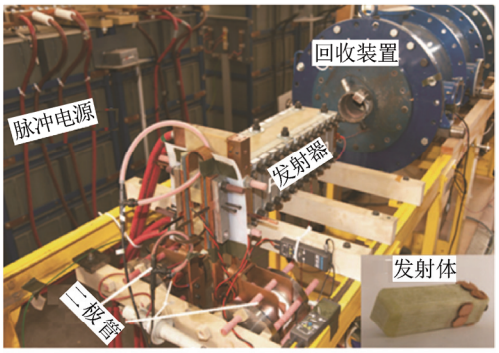
(c) 0.25 ms时刻磁场密度

图 4 SR\3–60 增强型电磁发射装置

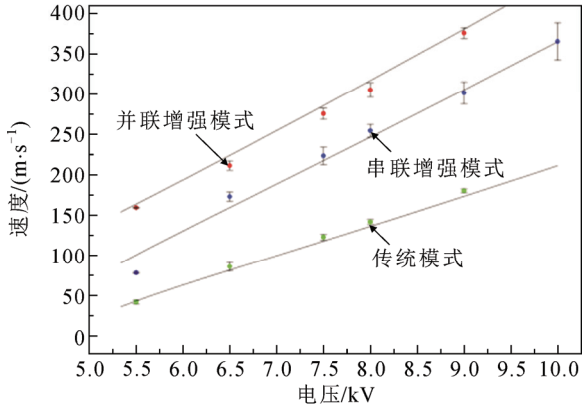
Fig.4 SR\3–60 augmented railgun



(a) 原理图



(b) 装置图



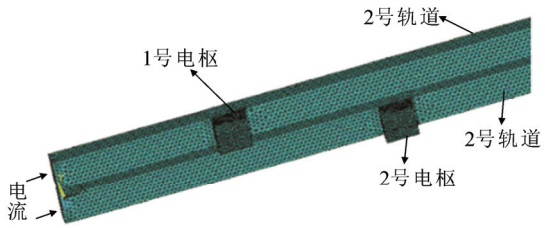
(c) 不同模式下速度

图 5 MASEL 增强型电磁发射装置

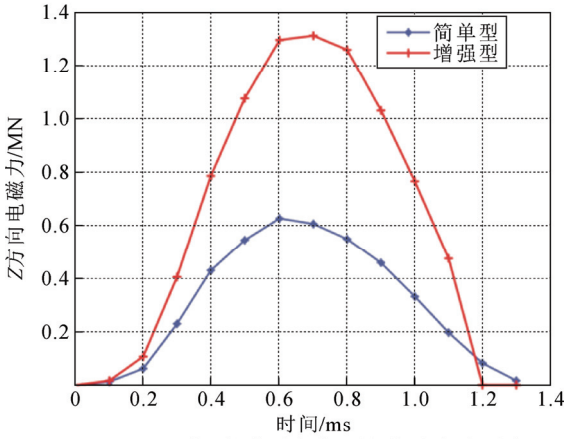
Fig.5 MASEL augmented railgun

型发射装置，同时该类增强型发射装置可以同步或者时序发射两个弹丸，如图 6(a)为有限元网格，图 6(b)为双匝型和简单型条件下轨道 Z 方向电磁力。2019 年，文献[23]介绍了一种基于多层磁体的增强型发射装置，如图 6(c)、6(d)所示，该发射装置具有磁场均匀的特点，电枢受到的电磁力包含外加磁场产生的电磁力和轨道电流产生的电磁力，适用于较大质量发射体发射。文中推导出洛伦兹力与速度的精确公式，在电流较低的条件下(约千安至数十千安量级)，与 Maxwell 软件的仿真结果具有较好一致性。但是在高电流条件下(100 kA 及以上量级)，与外磁场所产生的电磁力相比，轨道电流产生的电磁力增加并占主导地位，模型分析结果变差。

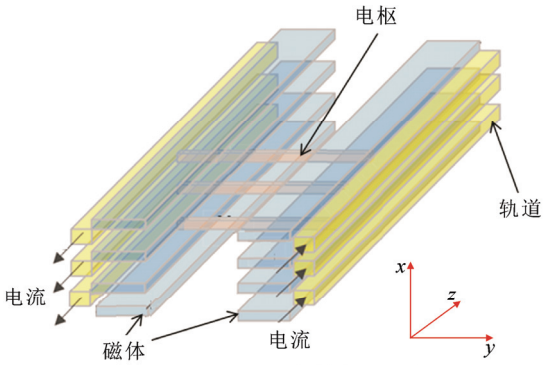
俄罗斯也致力于多轨层叠串联增强技术研究，于 2001 年研制相关发射装置，主要有 3 对轨道和 5 对轨道，共计 4 种发射装置，如表 1 所示。其中 MTR–3–1.3 发射装置如图 7(a)所示，包含 3 匝轨道，口径 45 mm×40 mm，加速距离 1.3 m，电感梯度 5.6 μH/m，驱动电流大大降低，电源开关应力也大大降低，但是发射装置复杂性大大增加，伴随着电压升高，导致内部击穿的风险增加。2017 年和 2019 年，开展磁流体发电机条件下的连续发射仿真计算研究，确定了射速、最大弹丸数和弹丸速度。增强型发射装置为口径 52 mm，在 1 GW 磁流体发电机系统和中间电感储能(inductive energy storage，IES，



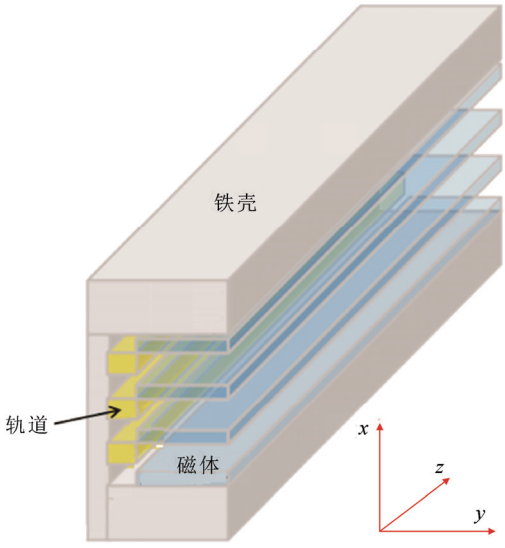
(a) 双匝型及两个电枢有限元网格



(b) 双匝型和简单型条件下轨道Z方向电磁力



(c) 带磁体的多匝发射装置示意图



(d) 铁壳封装示意图

图 6　伊朗多匝轨道增强型发射装置

Fig.6　Multi-turn augmented railguns in Iran

表 1　不同发射器参数

Table 1　Parameters with different launchers

型号	电极对数	电感梯度/(μH·m^{-1})	身管长度/m	口径截面/mm	轨道材料	电阻率/(μΩ·m)
RBM–3–1a	3	5.4	1	30×30	紫铜 M1	0.018
RBM–5–05	5	16.5	0.5	80×70	黄铜 LS59	0.065
RBM–5–2	5	16.5	2	80×70	钢 St3	0.11
RBM–3–1.3	3	5.6	1.3	45×40	钢 St3	0.11

储能分别为 80 MJ 和 40 MJ)供电条件下，如图 7(b)、7(c)所示，实现 20 个总质量 9.54 kg 弹丸时序发射，射频为 250~400 Hz[24]。同时，计算结果表明在长度为 5 m 的 3 匝增强型装置上，可将质量为 100、200 和 300 g 的弹丸分别加速至 2.7、2.2 和 1.8 km/s，射速 200~300 Hz[25]。

2.2　国内研究现状

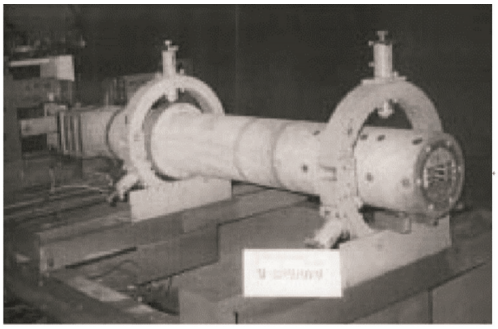
国内南京理工大学、西北机电工程研究所、陆军工程大学、中国科学院电工研究所、燕山大学、航天工程大学、空军工程大学防空反导学院等众多研究机构就增强型发射装置开展相关研究，以全增强型结构为主，其中南京理工大学还开展了局部增强型结构相关研究。

南京理工大学针对串联增强型发射技术开展了深入研究，包含全增强和局部增强两种结构形式。基于场–路耦合方法，建立三维串联增强型电磁轨道发射装置身管模型，模型考虑了接触电阻、速度趋肤效应以及滑动摩擦力，又通过试验结果与仿真结果两方面开展了大量开展对比分析，获得一系列重要成果。

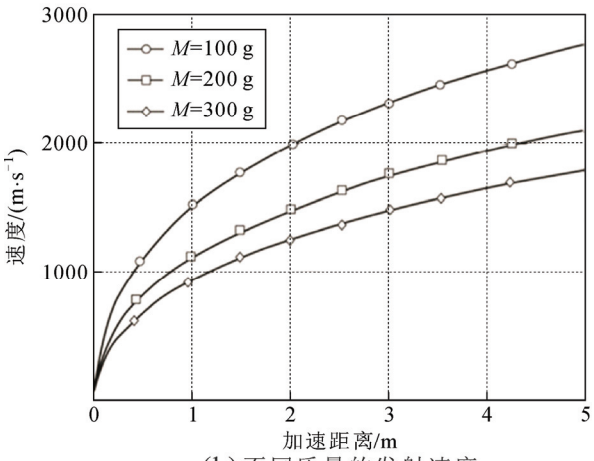
1）全增强型发射装置

2016 年基于离散预紧身管模型，计算分析结果表明身管部件的最大位移量远小于轨道的位移量，保证了电枢与轨道的接触[26]。并计算得到系统各部分损耗的比例，指出钢制外壳会使炮口动能降低 3.6%[15]。文献[14]指出由于增强型发射装置的初始电感较大，使得发射初始阶段炮尾电压幅值较高，导致电源模块中大功率晶闸管承受反向电压而关断，模块能量未能完全释放，影响放电效率。

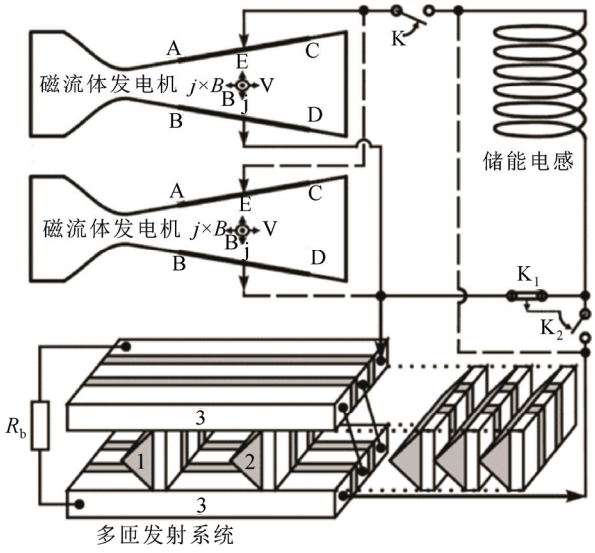
2018 年完成螺栓预紧一体化增强型发射装置，实现 1200 m/s 条件下的一体化弹丸发射试验[27]，如图 8(a)—8(c)所示。2019 年完成双匝串联增强型一体化身管设计及研制，如图 8(d)和 8(e)所示。发射装置口径 Φ 为 45 mm，长度为 5 m，外部为碳纤维 T800 复合材料，电感梯度为 1.07 μH/m。在驱动电



(a) MTR-3-1.3装置



(b) 不同质量的发射速度



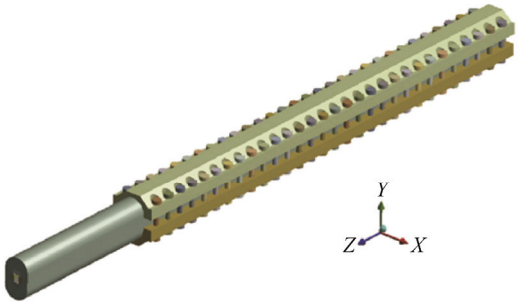
(c) 电感储能多匝发射系统

图 7 俄罗斯增强型研究装置

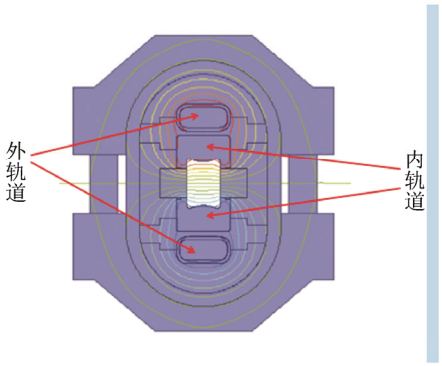
Fig.7 Augmented railguns in Russia

流 1.2 MA、脉宽 4.1 ms，发射体质量为 960 g 条件下，初速为 1875 m/s，系统发射效率约为 20%，仿真计算和实际试验炮口和炮尾电压波形基本相符。

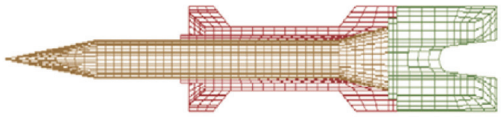
2020 年采用场–路耦合方法，建立双匝串联增强型发射装置的三维瞬态数值模型，仿真计算的炮尾电压波形与试验波形如图 9(a)所示，表明二者基



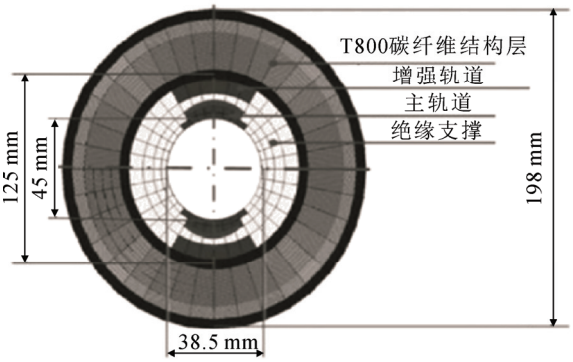
(a) 螺栓预紧一体化增强发射装置外形示意图



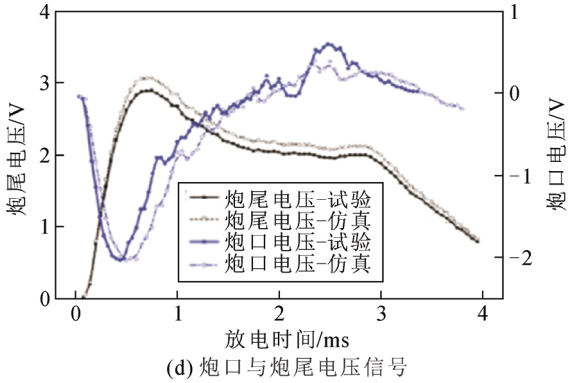
(b) 螺栓预紧一体化增强型发射器发射装置截面图



(c) 一体化弹丸模型图



(d) 一体化发射装置截面



(d) 炮口与炮尾电压信号

图 8 螺栓预紧一体化增强型发射装置及相关波形

Fig.8 Augmented railgun with bolts

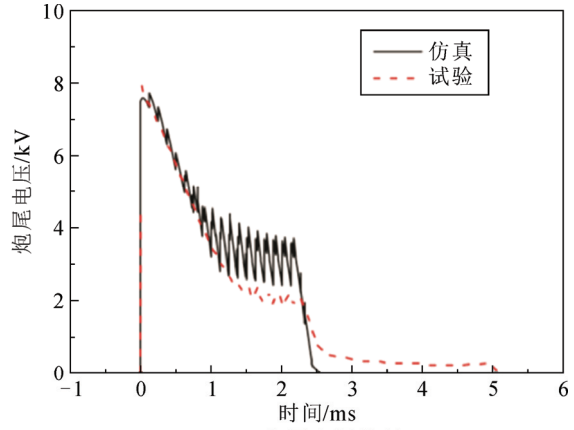
本相符。计算发射过程中的电感梯度曲线，如图 9(b)所示，2.0 ms 前电感梯度快速衰减，这与发射初始阶段电流和磁场快速扩散有关；2.0 ms 后，电感梯度曲线趋于平缓，约为 0.8 μH/m，远高于简单发射装置 0.45 μH/m；曲线尾部出现振荡，即电枢靠近炮口时，主轨道和辅助轨道间电流转接件产生的磁场影响电感梯度[28]。

2）局部增强型发射装置

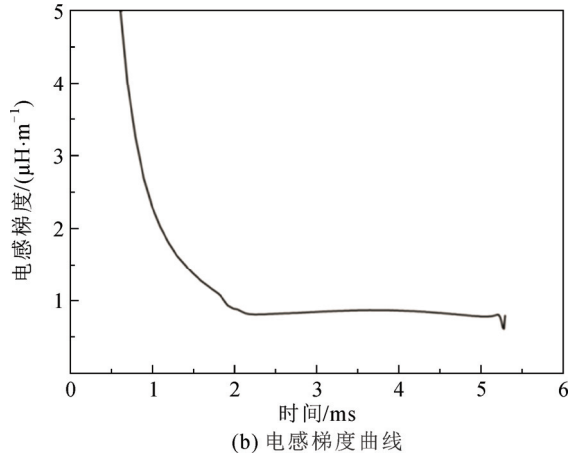
2020 年，研制了局部增强型发射装置，其结构如图 10 所示，方口径为 70 mm，主轨道长为 5.7 m，增强辅助轨道长度为 2.5 m，二者间距为 25 mm。基于该发射装置开展了滑动电接触特性研究，得到系统效率为 18%，其中接触电阻焦耳热占发射装置输入能量的 27.6%，严重影响发射系统的效率[29]。文献[30]分析了辅助增强轨道长为 2.2 m 的局部增强型发射装置，增强部位电感梯度为 1.07 μH/m，非增强部分电感梯度为 0.38 μH/m，见图 10(b)。

西北机电工程研究所通过研究电枢运动位移、速度与时间的关系，对长 4.5 m、口径 30 mm 的全增强型电磁轨道发射装置开展分析，其模型如图 11(a)所示，采用电−磁−热耦合的计算方法，考虑负载焦耳热、电阻焦耳热和摩擦热，建立轨道分段的电磁–温度–结构三维耦合瞬态温度场计算模型，得到了以电阻焦耳热与摩擦热为热载荷作用下的轨道温升时空分布特性[31-33]。研究表明，随着电枢的高速运动，枢轨间摩擦热量发生变化。在电枢运动到距轨道尾部 1~2 m 时，单位长度传导的摩擦热量达到最大值 6.5 kJ[32]。采用可变模式分解(VMD)噪声抑制方法处理炮口电压噪声信号，如图 11(b)—图 11(d)所示，根据可变模式分解的频率特性，在时域内有效抑制炮口电压系统噪声，计算的接触电阻曲线比较平滑，大大简化枢轨接触电阻特性分析，提高分析的准确性[34]。

陆军工程大学研究串联并列结构的电磁轨道发射装置及特制匹配电枢，发现串联并列结构可有效增大电感梯度。基于此结构开展了电磁–结构–热多物理场耦合分析，对不同电流峰值、不同过盈量电枢在发射过程中的速度、接触面压力、接触面温度等进行了数值仿真，仿真结果表明电枢接触面熔蚀区域从初始接触区域逐渐向尾部转移[35-36]，如图 12 所示。验证试验表明同一个电枢，其内层电枢接



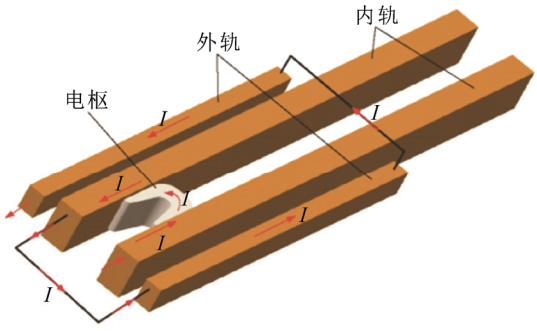
(a) 炮尾电压信号



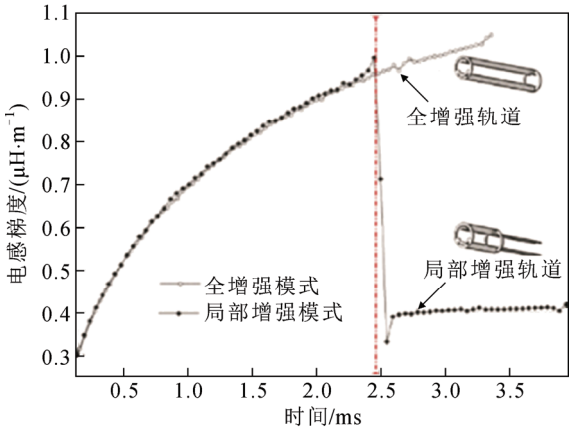
(b) 电感梯度曲线

图 9　增强型发射装置验证试验

Fig.9　Test of the augmented railgun



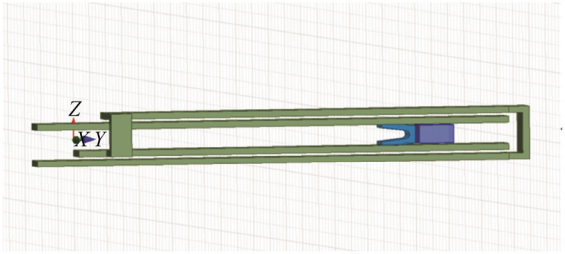
(a) 局部增强结构示意图



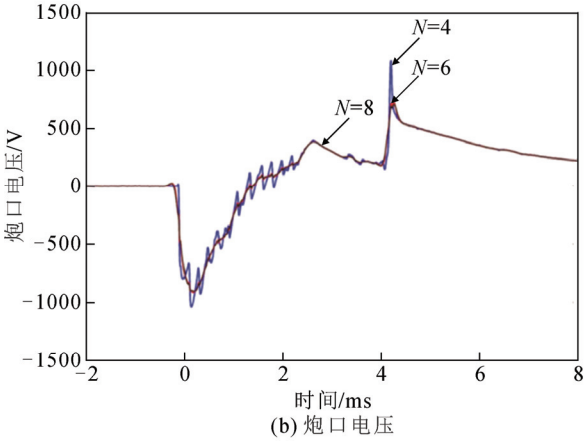
(b) 全增强和局部增强发射装置的电感梯度

图 10　局部增强发射装置

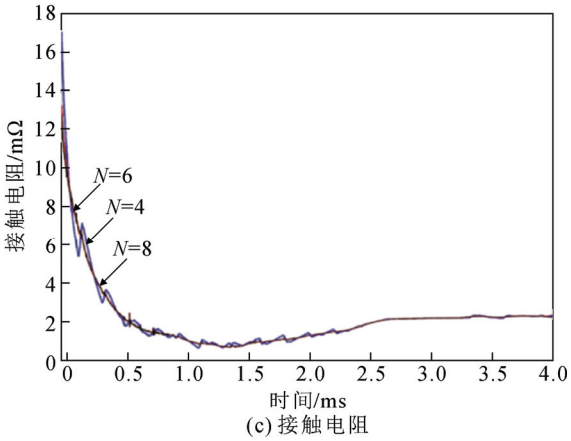
Fig.10　Segmented augmented railgun



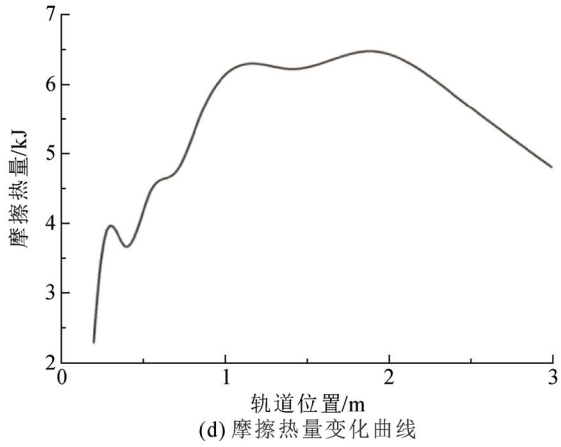
(a) 模型图



(b) 炮口电压



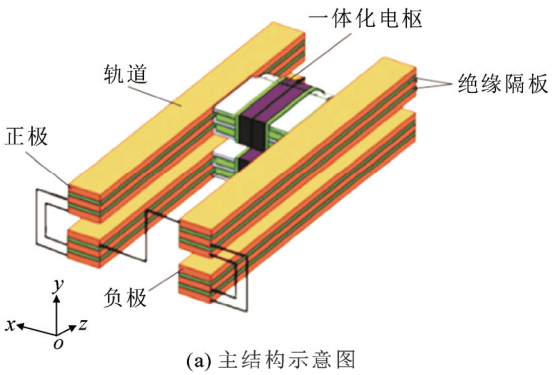
(c) 接触电阻



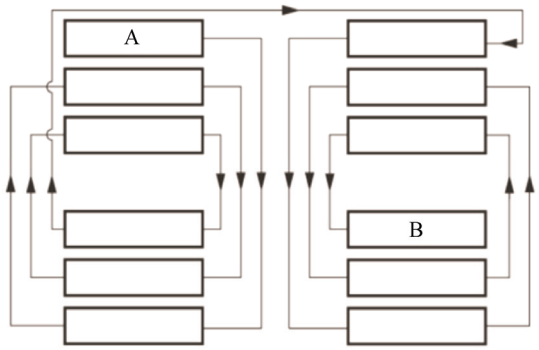
(d) 摩擦热量变化曲线

图 11 装置模型及 VMD 数据处理

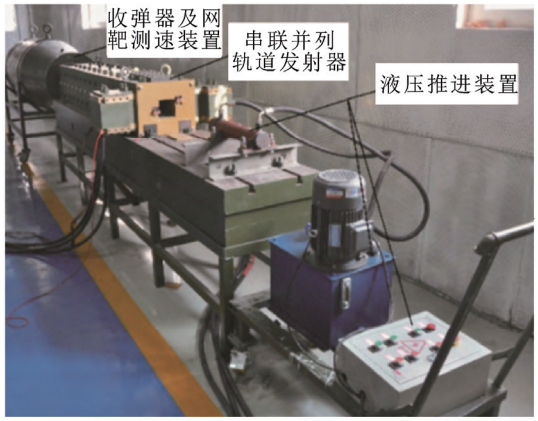
Fig.11 Augmented railgun model and treatment method with VMD



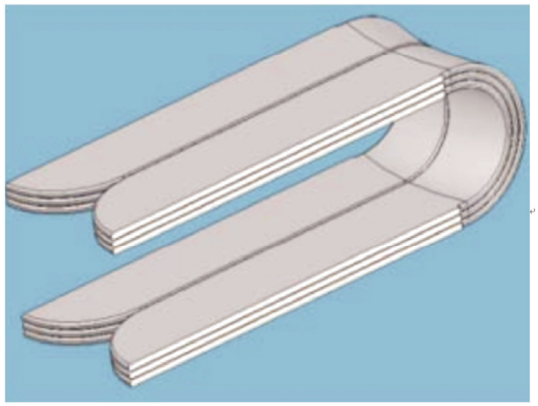
(a) 主结构示意图



(b) 电流流向示意图



(c) 装置图



(d) 电枢示意图

图 12 串联并列结构增强型发射装置

Fig.12 Series parallel augmented railgun

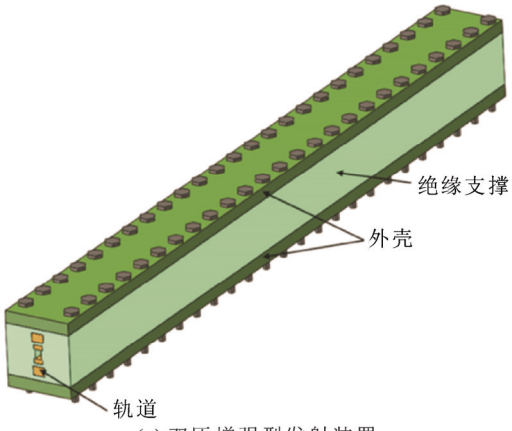
触压力最大，摩擦热功率相对较大，热量积累导致尾翼从外到内熔蚀增大；过盈量为 3.0 mm 的电枢，其熔蚀区域在电枢接触面中部并向电枢尾部推进，而过盈量 2.4 mm 电枢的熔蚀区域则更接近尾部，与仿真得出的结论一致[35]。

中国科学院电工研究所针对串联增强型发射装置开展了电磁场计算以及场路耦合仿真分析，结算结果表明随着主轨道和辅助轨道之间间距和轨道厚度的减小，发射装置电感梯度会逐渐增大，并结合发射试验结果分析了发射装置能量转化效率，指出输入发射装置的能量大部分转化为焦耳热，动能仅占发射装置输入能量的 27.76%[37,9]，如图 13 所示。同时，也开展了发射过程中电枢受力分析[38]，指出存在未达到材料“载流特征量”时，电枢尾翼转角处应力大于材料屈服强度导致尾翼断裂失效的情况，为电枢设计优化提供依据。

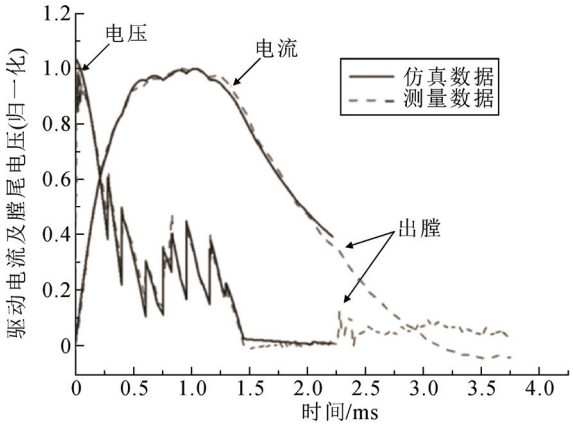
燕山大学在增强型电磁轨道发射技术开展了大量研究。2017 年建立串联增强型电路模型，指出电源初始电压、电源电容、电感梯度、电枢质量对电枢的出口速度影响较大，电枢初始位置、枢轨间动摩擦系数对出口速度影响较小；并且结合电磁结构耦合动力学和正交试验方法，优化身管结构参数[39-40]。2018 年开展了串联增强型发射装置研究，建立了电磁发射装置三维模型，分析各层轨道中电枢发射方向受力随时间的演化规律和电枢承受的冲量，确定出双层轨道具有更优异的性能[41]。2018 年建立了接触电阻与炮口电压、轨道电流、电枢速度、电枢位移等物理量之间的数学模型。通过对比分析轨道损伤仿真结果与试验后轨道损伤图像，发现枢轨接触特性曲线可以评价轨道损伤情况，对轨道损伤预测[42]。

2021 年，中国工程物理研究院将 Railgun3D 程序拓展到串联增强型轨道的计算，并对其电磁场演化特征进行细致分析，观察电流涡结构演化和电流速度趋肤效应。分析结果表明，由于增强轨道的存在，炮口一端的轨道上有显著的磁场和电流分布，感应电流的大小依赖于驱动电流的变化率。指出在电流下降段，电枢后表面上电流反向，导致电枢与轨道接触应力不足，甚至出现电枢转捩的重要因素[43]。

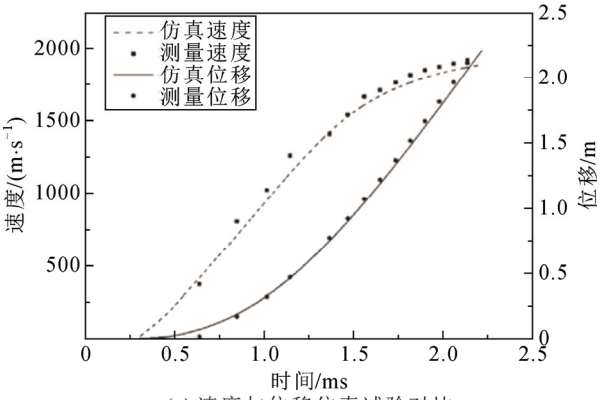
航天工程大学 2018 年和 2019 年开展增强型发射装置的电磁场、电感梯度、轨道参数、载荷等仿真计算分析，得到简单型、平面串联增强型和层叠增强型发射装置的电感梯度分别为 0.392、0.671、0.946 μH/m[44-45]。



(a) 双匝增强型发射装置



(b) 炮尾电压与驱动电流仿真试验对比



(c) 速度与位移仿真试验对比

图 13　电工所增强型发射装置

Fig.13　Augmented raigun in IEE

空军工程大学防空反导学院开展四极和六极的多轨增强发射装置的磁场强度、电流密度、电磁推力、电感梯度等方面仿真计算研究[46-47,10]。仿真结果表明：四极增强型发射装置电磁推力约为传统型四极发射装置的 2.5 倍，可以实现用更小的电流将发射体加速至相同的速度；电磁推力随轨道层数增多而增大，但增大程度越来越小。

2.3　主要成果

综上所述，针对增强型发射技术的多物理场仿

真模型、电路模型以及场路耦合模型等已逐步建立并完善。随着相关实验室装置和一体化工程样机的研制，以及滑动电接触和电感梯度等研究的开展，模型的准确性得到验证，仿真计算结果可以较好地指导增强型发射装置的设计。同时，相关研究人员开展脱壳穿甲弹弹托分离试验，初步验证弹丸与发射装置的匹配程度，表明增强型发射技术逐渐转入工程应用研究。

3 增强型电磁轨道发射技术优缺点

增强型发射技术的主要优点是电感梯度高，所需驱动电流幅值低，以及由此带来的众多优势；而主要缺点是系统结构复杂性高，以及由此引入的其他问题。层叠式结构相对复杂，口径较大，适合大质量低速发射场景；双匝平面串联增强型结构相对简单，适合中小质量高初速发射应用场景。

目前较多研究聚焦于高初速发射，因此对双匝平面串联增强型发射技术研究较为深入，基于现有研究，该类型发射技术具备以下优点：

1）降低驱动电流幅值

增强型发射装置中，外部叠加磁场的存在使得装置的总电感梯度增加，在同样电磁推力需求条件下，可以减小驱动电流幅值。如 4 轨串联增强型发射装置的电感梯度约为简单型发射装置的 1.7~2 倍[35,40]，电流幅值和电流线密度可降至简单型发射装置的 70.7%~76.7%。同时，电感梯度增加，在驱动电流不变的条件下，可使电枢获得更大的电磁推力，更易实现高初速。

2）增加内膛寿命

在相同的加速距离和出膛速度下，增强型发射装置所需的驱动电流幅值减小。因此减少因大电流集中引起的槽蚀、熔蚀现象，改善发射装置工作过程中的内膛环境，从而提高发射装置内膛使用寿命。

3）提高有效载荷占比

在载荷确定的前提下，发射装置口径确定。在相同口径前提下，由于驱动电流幅值的降低，发射过程中电枢所产生的焦耳热减少。在电枢设计时喉部厚度、肩部厚度以及尾翼厚度均可以减小，从而使得电枢质量减小。而电枢作为一体化弹丸中的无效质量，其质量降低也代表着有效载荷质量占比提高。

4）系统轻量化与小型化

电流幅值的降低可使得电缆和发射装置的通流面积进一步下降，达到减轻关键部件及分系统质量的目的。电流幅值的降低，能够减小发射装置口径，同时电磁推力不变，可实现中小质量载荷的高加速高初速发射，即增强型发射技术在中小口径具有较大的优势。同时，在发射条件一定的情况下，有效载荷占比的提高可使得系统储能减小，可进一步降低整体体积和质量，为全系统轻量化与小型化提供支撑。

但是，辅助轨道及其所产生的外部叠加磁场对增强型发射技术也带来一定的负面影响，主要包括以下几点：

1）增加装置复杂性

轨道数量的增加、主轨道和辅助轨道之间的流通转接方式、以及狭小的操作空间，均增加装置整体复杂性。

2）增加绝缘风险

增强型发射装置更大的初始电感，以及初始阶段磁通量骤变使得炮尾电压和炮口电压幅值大大提高[12,25,31]，降低了发射装置汇流等尾部关键区域以及内膛的绝缘可靠性。尤其是尾部包含汇流、主轨道和辅助轨道之间的电流转换等部件，由于空间狭小，对绝缘可靠性带来更大难度。

3）限制电子器件的使用

与简单型发射技术相比，外部叠加磁场使得增强型发射装置的电磁环境更为恶劣。尤其是在发射过程中，电枢前端始终存在较大磁场，对弹载电子器件的电磁屏蔽提出更为苛刻的要求，可能出现器件失效的情况，极大限制制导等电子元器的使用。

4 关键技术及发展趋势

4.1 关键技术

1）场路耦合计算仿真

增强型电磁轨道发射装置涉及多根轨道之间的磁场耦合、多根轨道的瞬态热特性、各部件之间电磁力的相互作用、轨道扩张量、电磁–温度–结构多场共同作用下的电接触特性等多个物理量。同时，相比简单型发射装置，其初始电感和初始电阻均有一定增加，在瞬态电流变化条件下，发射装置负载的电参数模型、瞬态多物理场耦合模型以及场路模型较为复杂，现有场路耦合仿真计算初速误差约为 1%~2%，满足相关规律性总结需求，但电磁发射对初速误差要求优于 5‰，继续深入研究发射过程中电、磁、热、力等多场耦合作用机理，提高场路协

同计算仿真精度，开展电流分布、电磁场分布、受力等分析，对全系统参数进行优化设计，在满足弹丸过载、初速等边界条件下，实现全系统小型化和轻量化。

2）一体化绝缘技术

发射装置绝缘性能主要包含内膛绝缘支撑和装置内部各部件之间绝缘两大部分。

绝缘支撑的主要作用是通过承受预紧力，确保两根主轨道位置准确，保证主轨道之间绝缘。绝缘支撑受高预紧力、瞬时高温、高速冲击等多因素耦合作用，工作环境极其复杂恶劣。为保证电磁发射过程的稳定性、可靠性及发射精度，要求绝缘支撑具备能承受持续高预紧力、高速冲击波、高温铝液滴或铝蒸汽冲击等能力，满足多次重复发射要求。目前，绝缘支撑材料以树脂基复合材料和结构陶瓷材料为主。其中树脂基复合材料在高温下容易受损，耐烧蚀性能差，耐受发射次数较少。经过一定次数的发射试验之后，可采用原位再制造技术对绝缘支撑表面进行处理，增加其使用次数。结构陶瓷韧性较弱，耐受冲击能力较差，通过改进其制备工艺，制造增韧陶瓷，如纤维增韧陶瓷，提高耐冲击能力，延长其极端工况下寿命。通过对韧性陶瓷加工及组合形式，满足绝缘支撑大尺寸需求。为保证在一定加速距离内使电枢获得高初速，增强型发射装置在发射起始阶段将承受极大的电流上升率，由于装置自身具备较高的初始电感，使得增强型发射装置尾部电压较高。此外，电枢前端区域磁通瞬时变化，使得口部产生约数千伏的感应电压。同时，为进一步提高发射装置电感梯度，主轨道和辅助轨道之间的间距越小越好，这都对发射装置内部绝缘处理提出了更高的要求。采用一体化成型绝缘技术，即绝缘薄弱环节以及关键部位用绝缘胶或绝缘树脂进行填充密封，提高绝缘强度，满足炮尾电压和炮口电压数千伏的绝缘需求。

3）长寿命技术

中小口径发射装置通电电流高达兆安量级，电流线密度高于 30 kA/mm，弹丸运动速度超过 2000 m/s，伴随着高温铝液滴、铝蒸汽以及等离子体弧，发射装置的轨道和绝缘支撑工作在高温及高速冲击的极端工况下，轨道和绝缘支撑的长寿命是发射技术转向工程应用的重要前提。采用高硬度高导电率的铜合金轨道，或者其他改性工艺，提高轨道表面耐冲击和耐磨性能。同时优化枢轨接触界面接触形态，使接触压力及电流分布更加均匀，达到数百发至上千发的使用要求。尤其是连续发射条件下的轨道热管理技术，降低轨道温度，保持较高的机械性能和电气性能，承受发射过程中弹丸对其的冲击，同时还具备较低的电阻，使发射效率处于较高水平。

4）口径及直线度控制技术

增强型装置虽然可以有效降低驱动电流幅值，但是发射过程中，受数百千安电流产生的电磁力影响，其轨道之间张力可达到数百吨，口径产生一定的变化量，对电枢与轨道之间的电接触性能产生一定变化，最终影响发射精度。需要采用大张力预紧成型技术，控制发射过程中轨道间距变化量，保证滑动电接触处于良好接触状态以及弹丸在膛内运动稳定性。

此外，相较于简单型电磁轨道发射装置，增强型发射装置的组成部件成倍增加。一体化工程样机研制过程为边组装边成型，成型流程及工艺相当复杂，耗时较长，精度控制难度高，其口径尺寸一致性与直线度等关键参数难以精确控制。而发射过程中，口径相关参数的高度一致性是弹丸速度精度的重要影响因素，这对发射装置一体化成型技术及工艺提出较高要求。需要研制专门工装组装各个部件，以及控制缠绕和成型过程中的直线度。

5）弹丸匹配技术

弹丸与发射装置的匹配程度决定电磁发射技术能否最终走向工程应用。电磁发射弹丸与传统火药发射弹丸的膛内、炮口、外弹道的环境存在巨大差别[48]。电磁轨道发射装置内膛为非封闭状态，过载高达十万个 g(重力加速度)，电枢在大电流和高速摩擦作用下，尾翼会发生软化和磨损，电枢与轨道的接触状态会发生较大变化，进而对弹丸在膛内的运行状态产生较大影响。同时，电枢整体温度急剧上升，其机械性能大大下降，需制备高温性能更好的铝合金材料，使电枢满足推动载荷以高过载运动的要求。剩余电流在炮口产生大电流电弧，对弹丸射向和出膛姿态会产生一定扰动，进而影响脱壳过程和射击精度。通过优化炮口消引弧技术，降低炮口电弧对弹丸出膛的扰动，提高射击精度。

同时，也要重点关注膛内强磁场对引信中相关部件生存能力的影响状况，根据膛内磁场分布，对引信的关键部件采取布局优化和屏蔽等措施，开展试验验证，加快电磁发射多弹种研究。

因此，需要深入开展弹丸与发射装置匹配技术

的研究，在逐渐提高初速的前提下，保证弹丸加速和飞行过程的稳定性，以满足工程应用需求。

4.2 发展趋势

1）中小口径应用

发射过程中，弹丸前端存在脉冲强磁场，会对电子元件的生存能力产生较大影响。因此，针对增强型发射装置程控弹发射应用，需要掌握发射过程中弹丸前端磁场分布及变化，对电子元器件的布设进行优化，以降低磁场对弹丸内部电子元器件的影响。同时，也应开展弹载电子元器件的抗强磁场和抗高过载研究，实现中口径制导弹丸应用。

为避免膛内强磁场影响，开展小口径无控弹高初速发射应用研究，主要开展一体化脱壳穿甲弹的试制及试验验证。同时，开展多弹种研究，实现引信中活动零部件的设计及防护、引信中电路的强磁环境耐受性及防护等，实现增强型小口径电磁轨道发射装置弹丸多样化。

2）工程样机研制

一体化工程样机的研制是电磁发射技术由实验研究走向应用的重要标志。需建立增强型一体化发射装置的电–磁–力–热等多物理场耦合模型，合理优化发射装置的截面、管长以及预紧力幅值等参数，确立研制过程的设计、加工、工艺、流程、检验标准，确保一体化发射装置产品的稳定性。并建立一体化发射装置的出厂试验标准，积极开展弹丸与发射装置的匹配试验，推动增强型发射装置尽快进入工程化应用。

5 结论

1）电磁轨道发射技术采用电能作为驱动能量，具有响应快速、灵活可调、精确控制等特点，结合一定的控制策略，具有智能化的潜力。

2）国内电磁轨道发射研究快速发展，关键技术得到突破，相关研究成果在国际上处于领先水平。

3）增强型发射技术具有电感梯度高，驱动电流幅值低、有效载荷比高等显著优点，应用前景较好。

4）结合增强型发射装置的负载呈感性这一特点，建立精确的场路耦合模型，优化电源系统和发射器参数，研制轻量一体化工程样机，开展弹丸与发射装置的匹配试验，可加速推进其工程应用进程。

参考文献 References

[1] 李 军. 电磁轨道炮中的电流线密度与膛压[J]. 高电压技术，2014，40(4)：1104-1109.
LI Jun. Linear current density and bore pressure of electromagnetic railgun[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1104-1109.

[2] 陈 允，徐伟东，袁伟群，等. 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性[J]. 高电压技术，2013，39(4)：937-942.
CHEN Yun, XU Weidong, YUAN Weiqun, et al. Sliding electrical contacts between aluminum armature and different material rails in railgun[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 937-942.

[3] ENGEL T G, VERACKA M J, NERI J M, et al. Design of low-current high-efficiency augmented railguns[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(12): 2385-2389.

[4] CRAWFORD M, SUBRAMANIAN S, WATT T, et al. The design and testing of a large-caliber railgun[C]//The 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology. Victoria, Canada: IEEE, 2008: 1-5.

[5] 万 敏，王志恒，李小将. 串联增强型电磁轨道炮技术特点与发展现状[J]. 火炮发射与控制学报，2015，36(3)：91-96.
WAN Min, WANG Zhiheng, LI Xiaojiang. Technical characteristics and development status of series-connected augmented railgun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2015, 36(3): 91-96.

[6] 乔志明，雷 彬，向红军，等. 增强型电磁轨道炮发展现状及技术特点[J]. 飞航导弹，2016(10)：28-31.
QIAO Zhiming, LEI Bin, XIANG Hongjun, et al. The current situation and technical characteristics of augmented electromagnetic railgun[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(10): 28-31.

[7] 王 莹，肖 峰. 电炮原理[M]. 北京：国防工业出版社，1995.
WANG Ying, XIAO Feng. The principle of electrical gun[M]. Beijing, China: National Defence Industry Press, 1995.

[8] 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, China: Science Press, 2020.

[9] 徐 蓉，袁伟群，成文凭，等. 增强型电磁轨道发射器的电磁场仿真分析[J]. 高电压技术，2014，40(4)：1065-1070.
XU Rong, YUAN Weiqun, CHENG Wenping, et al. Simulation and analysis of electromagnetic field for augmented railgun[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1065-1070.

[10] 苗海玉，刘少伟，刘 明，等. 串联增强型四极轨道发射器电磁推力仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)，2018，19(3)：71-76.
MIAO Haiyu, LIU Shaowei, LIU Ming, et al. Simulation and analysis of electromagnetic propulsion for series-connected augmented quadrupole railgun[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 71-76.

[11] POLTANOV A E, KONDRATENKO A K, GLINOV A P, et al. Multi-turn railguns: concept analysis and experimental results[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 457-461.

[12] 唐 波，徐英桃，栗保明. 电磁轨道炮被动式炮口消弧装置的理论分析与优化设计[J]. 弹道学报，2016，28(4)：62-67.
TANG Bo, XU Yingtao, LI Baoming. Theoretical analysis and optimization design of passive muzzle arc suppression device in a railgun[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(4): 62-67.

[13] GE X, CAO B, WANG Z, et al. Analysis and research on muzzle arc suppression device of arc striking railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(5): 1337-1344.

[14] 李贞晓，张亚舟，倪琰杰，等. 晶闸管关断特性在增强型轨道发射系统中的影响分析[J]. 兵工学报，2016，37(9)：1599-1605.
LI Zhenxiao, ZHANG Yazhou, NI Yanjie, et al. Analysis on the influence of turn-off characteristics of thyristor on augmented railgun[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(9): 1599-1605.

[15] LOU Y T, WAN G, JIN Y, et al. Research on energy loss distribution of

an augmented railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(5): 857-861.

[16] HUNDERTMARK S, VINCENT G. Performance of a hexagonal, segmented railgun[C]// 2009 IET European Pulsed Power Conference. Geneva, Switzerland: IET, 2009: 1-4.

[17] VINCENT G, HUNDERTMARK S. Using the SR\3–60 railgun in augmented mode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1555-1558.

[18] VINCENT G, HUNDERTMARK S. Using the hexagonal segmented railgun in multishot mode with three projectiles[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1431-1435.

[19] VERTELIS V, VINCENT G, SCHNEIDER M, et al. Magnetic field expulsion from a conducting projectile in a pulsed serial augmented railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(3): 727-732.

[20] ROCH M, HUNDERTMARK S, LÖFFLER M, et al. First experiment with the modular augmented staged electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 3239-3244.

[21] LIEBFRIED O, ROCH M. Augmented railgun with integrated XRAM current multiplication[C]// 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). Santa Fe, USA: IEEE, 2014: 279-282.

[22] KESHTKAR A, GHARIB L, BAYATI M S, et al. Simulation of a two-turn railgun and comparison between a conventional railgun and a two-turn railgun by 3-D FEM[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1392-1397.

[23] HEYDARI M B, ASGARI M, KESHTKAR A. A novel structure of augmented railgun using multilayer magnets and sabots[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(7): 3320-3326.

[24] AFONIN A G, BUTOV V G, SINYAEV S V, et al. Rail electromagnetic launchers powered by pulsed MHD generators[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1208-1212.

[25] SHVETSOV G A, STANKEVICH S V, BUTOV V G, et al. Multiparametric investigation of thermal limitations in a rapid-fire multirail railgun powered by a pulsed MHD generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(11): 5148-5152.

[26] 石江波，栗保明. 串联增强型电磁轨道炮螺栓预紧封装性能分析[J]. 火炮发射与控制学报，2016，37(1)：1-6.
SHI Jiangbo, LI Baoming. The encapsulation performance analysis of series enhanced electromagnetic railgun with bolt pre-tightening[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2016, 37(1): 1-6.

[27] LI B M, LIN Q H. Analysis and discussion on launching mechanism and tactical electromagnetic railgun technology[J]. Defence Technology, 2018, 14(5): 484-495.

[28] LIN Q H, LI B M. Field-circuit coupled analysis of a series-augmented electromagnetic railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(6): 2287-2293.

[29] 朱春燕，王　军，马富强，等. 基于炮尾电压的串联增强型电磁轨道炮滑动电接触特性分析[J]. 兵工学报，2020，41(7)：1280-1287.
ZHU Chunyan, WANG Jun, MA Fuqiang, et al. Analysis of sliding electric contact characteristics of series-augmented railgun based on breech voltage[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(7): 1280-1287.

[30] XIAO H C, YIN D M, LI B M. Electrodynamic response study on railgun launcher based on electromechanical coupling model[J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 655-665.

[31] 范　薇，苏子舟，张　涛，等. 增强型电磁轨道炮瞬态温升时空分布[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3346-3354.
FAN Wei, SU Zizhou, ZHANG Tao, et al. Spatial-temporal distribution of transient temperature rise in augmented electromagnetic railgun[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3346-3354.

[32] 王　烝，赵南南，苏子舟，等. 增强型电磁轨道炮导轨的多场耦合分析与研究[J]. 火炮发射与控制学报，2022，43(5)：1-8，23.
WANG Zheng, ZHAO Nannan, SU Zizhou, et al. Multi-field coupling analysis of the rails of an enhanced electromagnetic railgun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2022, 43(5): 1-8, 23.

[33] WEI F, YI J, YAN W, et al. Thermal measurement experiments and transient temperature distribution of rapid-fire augmented electromagnetic railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(5): 1351-1359.

[34] YAN J, LI J X, REN R, et al. System noise suppression of muzzle voltage in augmented electromagnetic railgun based on VMD and the application in armature–rail contact characteristics[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(2): 502-509.

[35] 邢彦昌，吕庆敖，雷　彬，等. 多匝串联并列轨道炮 U 形电枢接触界面熔蚀规律分析[J]. 兵工学报，2018，39(11)：2081-2091.
XING Yanchang, LV Qingao, LEI Bin, et al. Analysis of melting erosion characteristic on the contact interface between u-shaped armature and rails for multiturn serial-parallel railgun[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(11): 2081-2091.

[36] 邢彦昌，吕庆敖，雷　彬，等. 串联并列轨道炮特征参数对电密分布的影响[J]. 火炮发射与控制学报，2018，39(2)：38-43.
XING Yanchang, LV Qingao, LEI Bin, et al. Influence of characteristic parameters on current density distribution in series parallel railgun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2018, 39(2): 38-43.

[37] 符尊靖，徐　蓉，徐伟东，等. 增强型脉冲大电流直线驱动装置的场路协同仿真[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3716-3723.
FU Zunjing, XU Rong, XU Weidong, et al. Field-circuit simulation of augmented high pulse current linear drive[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3716-3723.

[38] 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.

[39] 关继红. 增强型电磁轨道发射装置受力及变形研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.
GUAN Jihong. Study on force and rails deflection of augmented electromagnetic rail launcher[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2017.

[40] 陈晓阳. 增强型电磁轨道炮性能仿真与优化研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.
CHEN Xiaoyang. Performance simulation and optimization of enhanced electromagnetic railgun[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2017.

[41] 黄立阳，刘　峰，党晟罡，等. 平面型增强轨道层数对电枢受力影响分析[J]. 科技通报，2018，34(3)：144-147.
HUANG Liyang, LIU Feng, DANG Shenggang, et al. Influence analysis of rail layer number of planar augmented railgun on armature force[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(3): 144-147.

[42] 王振春，鲍志勇，曹海要，等. 增强型电磁轨道炮电枢轨道接触特性研究[J]. 兵工学报，2018，39(3)：451-456.
WANG Zhenchun, BAO Zhiyong, CAO Haiyao, et al. Research on contact characteristics of armature and rail in augmented electromagnetic railgun[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(3): 451-456.

[43] 王刚华，谢　龙，赵海龙，等. 基于移动窗口的串联增强型轨道炮发射过程电磁场演化模拟分析[J]. 爆炸与冲击，2021，41(6)：

064201.
WANG Ganghua, XIE Long, ZHAO Hailong, et al. Simulational analysis on electromagnetic field evolution in launching process of a series enhanced electromagnetic railgun based on the moving-window method[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(6): 064201.

[44] 贺景瑞，李小将. 增强型电磁轨道发射器电磁场和电感梯度仿真分析[J]. 兵工自动化，2018，37(8)：78-82，86.
HE Jingrui, LI Xiaojiang. Simulation analysis of electromagnetic field and inductance gradient of augmented electromagnetic launcher[J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(8): 78-82, 86.

[45] 贺景瑞，李小将，李志亮. 增强型电磁轨道发射器重要参数分析及优化[J]. 火炮发射与控制学报，2019，40(1)：72-78.
HE Jingrui, LI Xiaojiang, LI Zhiliang. Analysis and optimization of important parameters of the augmented electromagnetic rail launcher[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(1): 72-78.

[46] 薛新鹏，舒　涛，刘　明，等. 平面增强型六极轨道电磁发射器仿真与分析[J]. 弹箭与制导学报，2018，38(4)：33-36.
XUE Xinpeng, SHU Tao, LIU Ming, et al. Evaluation and analysis of planar augmented sextupole rails electromagnetic launcher[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(4): 33-36.

[47] 连仲谋，冯　刚，童思远，等. 四轨电磁发射器的背场增强仿真分析[J]. 强激光与粒子束，2020，32(10)：105003.
LIAN Zhongmou, FENG Gang, TONG Siyuan, et al. Simulation analysis of background field enhancement of four-rail electromagnetic launcher[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(10): 105003.

[48] MA W M, LU J Y, LIU Y Q. Research progress of electromagnetic launch technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5): 2197-2205.



徐伟东
1979—，男，博士，副研究员
主要从事电磁发射技术、特种电源技术等方面研究工作
E-mail: xuwd@mail.iee.ac.cn

XU Weidong
Ph.D.
Associate professor



徐　蓉(通信作者)
1981—，女，博士，副研究员
主要从事高电压绝缘技术、脉冲功率技术等方面研究工作
E-mail: xr@mail.iee.ac.cn

XU Rong
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2022-06-26　修回日期　2022-12-06　　编辑　曹昭君