Mechanism Analysis and Optimization Design of Initial Velocity Limitation in Large-Caliber Electromagnetic Railgun

ZHAO Wanyu*, LI Zhenchao, MA Yanbo, CHEN Chong, CHEN Shuai, TANG Xiaoyan, CHEN Dong
(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan 450047, China)

Abstract: Large-caliber electromagnetic railguns accelerate large-mass projectiles by Lorentz force from pulsed high-current, the theoretical muzzle velocity of which is far higher than that of the conventional chemical artillery. However, the practical muzzle velocity is generally below 2 000 m/s, greatly restricting its engineering application. Mathematical models are constructed from circuit, electrodynamics and energy-conversion perspectives. Six limiting factors are analyzed, i. e., pulsed-power constraints, armature-rail contact and ablation, barrel structural limit, projectile-armature bearing capacity, in-bore resistance and multi-field coupling efficiency. Velocity-improvement approaches are proposed and a preliminary scheme is obtained through lumped-parameter simulation, providing theoretical support for its technical iteration.

Key words: large-caliber electromagnetic railgun; launch muzzle velocity; restrictive mechanism; armature-rail electrical contact; energy conversion

EEACC: 5180; 7910; 8580 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.040

大口径电磁轨道炮发射初速受限机理分析与优化设计

赵婉瑜*, 李振超, 马偃亳, 陈 冲, 陈 帅, 唐晓燕, 陈 东
(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 河南 450047)

摘 要: 大口径电磁轨道炮利用脉冲大电流产生的洛伦兹力加速大质量弹丸, 理论初速上限远高于传统化学火炮, 但工程实测初速普遍难以突破 2000 m/s, 远低于理论极限, 制约了大口径电磁轨道炮的工程应用。基于电路、电动力学、能量转换三种理论角度, 构建了数学模型。从脉冲电源电气约束、枢轨电接触与热烧蚀、炮体力学结构极限、弹丸与电枢承载性能、膛内气动与摩擦阻力、多场耦合系统效率六大维度, 深入分析了大口径电磁轨道炮的发射初速受限机理。针对大口径简单轨道炮提出初速优化技术路径, 通过集总参数仿真计算, 初步形成设计方案, 为大口径高初速电磁轨道炮的技术迭代与工程应用提供理论依据。

关键词: 大口径电磁轨道炮; 发射初速; 受限机理; 枢轨电接触; 能量转换
中图分类号: TM832 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0983-06

电磁轨道炮是利用洛伦兹力原理实现电磁能向弹丸动能转化的新概念武器, 突破了传统化学火炮的速度极限, 具备初速高、射程远、威力大、可控性强等优势, 在防空反导、远程火力打击等军事领域拥有广阔应用前景。

经过数十年技术攻关, 电磁轨道炮在原理验证、样机试制、外场试验等方面取得诸多突破, 但高初速、高射速、长寿命难以兼顾的技术难题始终制约其技术进展与工程应用[1-3]。目前美国电磁轨道炮技术处于领先水平, 近年虽缩减相关研究投入, 但规划在新型战列舰搭载 32 MJ 电磁轨道炮系统。国内相关研究较为丰富[4-6], 但现有成果多聚焦于小口径轨道炮与单一物理场分析, 针对大口径轨道炮的系统性研究较为匮乏, 尚未厘清电气、热学、力学、流体多场耦合作用下的初速受限机理, 无法支撑大口径轨道炮的高性能优化设计。

实际上电磁轨道炮受电源系统、枢轨烧蚀、结构力学、弹丸承载、能量传输等多因素耦合限制, 发射初速并非可无限提升, 且存在显著的大口径放大效应。本文以简单轨道炮为研究对象, 从系统电路、发射受力、能量转换三个角度分别构建数学模型, 系统剖析大口径轨道炮初速受限机理, 明确各影响因素的作用规律。结合集总参数仿真开展优化设计, 提出针对性的速度性能提升技术方案, 可为大口径高初速电磁轨道炮的技术迭代与工程应用提供理论支撑。

收稿日期: 2026-07-21 **修改日期**: 2026-08-21

1 电磁轨道炮系统模型

电磁轨道炮系统主要由发射器、脉冲电源、弹丸组成。发射器的核心结构由两条平行导电轨道和滑动电枢组成(图 1)。通过两条平行轨道和电枢构成闭合回路,当大电流流经两平行轨道时,两轨道间产生强磁场,与流经电枢的电流相互作用产生安培力,推动电枢和弹丸沿着轨道加速运动。

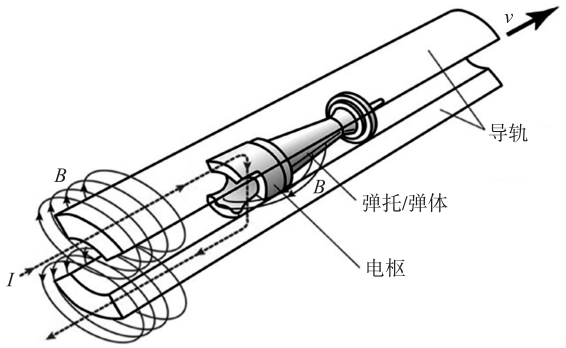

图 1 电磁轨道炮系统工作原理

1.1 系统电路模型

从电路的角度,发射器是一个分布式阻抗负载,存在分布电感、分布电阻;电枢可等效为一个阻性负载,同时考虑枢轨间的接触电阻,则电磁轨道发射系统的等效电路模型如图 2 所示。

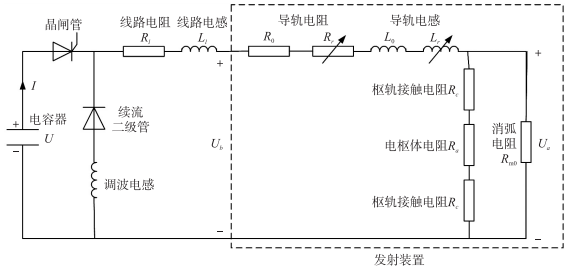

图 2 电磁轨道发射系统等效电路模型

图 2 中,U 为脉冲电容器电压,L 为调波电感,U_b 为发射器馈电电压,U_a 为发射器膛口电压。

根据电路理论,馈电电压 U_b 表示为:

$$U_b = L_r\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + i\frac{\mathrm{d}L_r}{\mathrm{d}t} + i(R_r+R_a) + 2iR_c \tag{1}$$

式中:$L_r\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 为发射器感生电动势;$i\mathrm{d}L_r/\mathrm{d}t$ 为发射器动生电动势;L_r 为发射器电感;$i(R_r+R_a)$ 为发射器电阻电压;R_r 为轨道电阻;R_a 为电枢电阻;R_c 为电枢一侧与轨道接触电阻。

①动生电动势

电枢高速滑动切割磁场产生动生电动势,式(1)中发射器动生电动势为:

$$U_d = i\frac{\mathrm{d}L_r}{\mathrm{d}t} = i\frac{\mathrm{d}L_r}{\mathrm{d}x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = iL_r'v \tag{2}$$

式中:i 为回路瞬时电流,L_r'为发射器电感梯度,v 为速度。动生电动势与瞬时速度成正比。但动生电动势的方向与外部驱动电流相反,阻碍电枢运动。当它与电源电动势相等时,回路电流为零,速度达到最大值。

②感生电动势

变化磁场产生感生电动势,式(1)中发射器感生电动势为:

$$U_g = L_r\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = (L_0+L_r'x)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中:L_0 为发射器初始电感,x 为位移。由式(3)可知,发射器感生电动势不仅与电流变化相关,还与位移、初始电感和发射器电感梯度等因素有关。

③电阻电压

由于电枢尺寸远小于发射器轨道尺寸,电枢电阻远小于发射器轨道电阻,通常电枢电阻可忽略不计,因此式(1)中发射器电阻电压简化为:

$$U_z = i(R_r+R_a) \approx iR_r = i(R_0+R_r'x) \tag{4}$$

式中:R_0 为发射器轨道初始电阻,R_r'为发射器轨道电阻梯度。由此可见,发射器电阻电压不仅与轨道初始电阻和电阻梯度有关,还与电枢运动位移相关。

④枢轨接触电压

基于电枢与轨道之间无转捩情况下开展分析,采用热通量表示枢轨接触电阻[7],因此式(1)中枢轨接触电压为:

$$U_c = 2iR_c = (\rho_r+\rho_a)\frac{ci}{A_c}\left(\frac{H_aA_c}{F_{\mathrm{ar}}}\right)^n \tag{5}$$

式中:ρ_r 为轨道电阻率,ρ_a 电枢电阻率,i 为回路瞬间电流,A_c 为枢轨接触面积,H_a 为电枢硬度,F_{ar} 为枢轨接触压力,c 和 n 均为接触常数。

1.2 发射载荷受力模型

电磁轨道发射过程中发射载荷受力模型如图 3 所示。

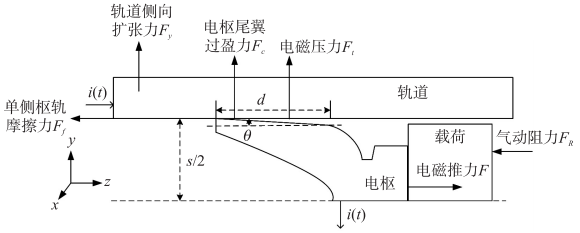

图 3 发射载荷受力示意图

在枢轨接触面 y 方向上,由于枢轨间无相对运动,枢轨间受到的接触压力 F_{ar}是电枢尾翼机械过盈力 F_c 与电磁压力 F_t 之和。

在发射器轴向 z 方向上,电枢头部受到电磁推力 F,电枢两侧尾翼受到摩擦阻力 $2F_f$,发射载荷前面受空气阻力 F_R,上述几个力的合力 F_A 使发射载

荷沿 z 方向加速运动。

考虑枢轨摩擦阻力和膛内空气阻力,发射载荷所受合力为:

$$F_A = ma = F - 2F_f - F_R \tag{6}$$

因此发射速度算式可表示为:

$$v = \int \frac{F_A}{m} \mathrm{d}t \tag{7}$$

式中:m 为发射载荷质量,a 为发射载荷加速度。

①电磁推力

电磁轨道炮的核心加速力为洛伦兹力,工程上通用的平均推力计算公式为:

$$F = \frac{1}{2} L_r' i^2 \tag{8}$$

由公式(6)~(8)可知,电磁推力与电感梯度、电流平方呈正相关,提升电流与电感梯度是理论上提升发射初速的核心方式。

②枢轨摩擦阻力

电枢单侧受到的摩擦力公式为:

$$F_f = \mu_f (F_c + F_t) = \mu_f \left(F_c + \frac{L_r' i^2 d}{2s} \cos\theta \right) \tag{9}$$

式中:μ_f 动摩擦系数,d 为电枢尾翼长度,s 为轨道间距。

③膛内空气阻力

发射载荷在洛伦兹力的作用下沿轨道运动,除枢轨滑动摩擦阻力外,发射载荷还受到膛内空气阻力作用。膛内空气阻力公式[8]为:

$$F_R = \frac{\gamma+1}{2} \rho_{\mathrm{air}} \left(Sv^2 + Sxa + \frac{C_f D v^2 x}{2} \right) \tag{10}$$

式中:γ 为空气比热比,ρ_{air} 为膛内空气密度,S 为电枢横截面积,C_f 为空气粘滞摩擦系数,D 为电枢截界面周长。由式(10)可知发射载荷在膛内高速运动受到空气阻力与速度平方呈正相关。

④轨道侧向扩张力

两根轨道结构形式相同,但通入的电流大小相同、方向相反,通电轨道受到的电磁力主要体现为排斥力。当轨道轴向长度远大于轨道间距时,轨道所受的电磁力为:

$$F_y = \frac{\mu_0 i^2 l_r}{4\pi s} \tag{11}$$

式中:μ_0 为真空磁导率,l_r 为轨道轴向长度,s 为轨道间距。

1.3　能量转换模型

根据式(1),发射过程中脉冲电源传输给发射器的能量主要转变为三部分(图 4):轨道电阻的焦耳热 Q_r、枢轨接触电阻的焦耳热 Q_c、枢轨接触间断时产生的电弧热 Q_{arc};发射载荷动能 E_k、克服枢轨间摩擦力和膛内空气阻力做功 E_d;剩余在轨道电感中的磁能 E_m。

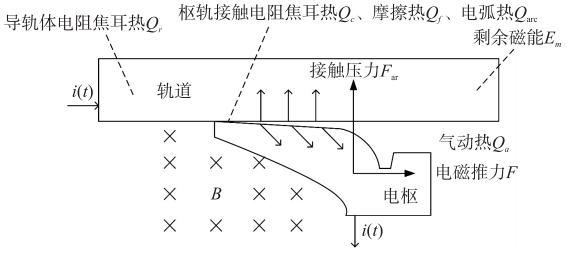

图 4　枢轨接触界面热效应示意图

①焦耳热损耗:

$$E_J = Q_r + Q_c + Q_{\mathrm{arc}} = \int_0^t i^2 (R_0 + R_r' x) \mathrm{d}t + \int_0^t i U_a \mathrm{d}t \tag{12}$$

②发射载荷动能+阻力做功损耗:

$$E_k + E_d = \int_0^t i^2 L_r' v \mathrm{d}t \tag{13}$$

③磁场储能损耗:

$$E_m = \int_0^t i \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} (L_0 + L_x' x) \mathrm{d}t \tag{14}$$

根据上述三部分能量占比可见[9],轨道电阻和枢轨接触电阻消耗了一半以上的能量,若想提高发射器发射效率,需降低轨道电阻和枢轨接触电阻。

2　电磁轨道炮初速受限机理分析

2.1　脉冲电源电气约束机理

脉冲电源系统是电磁轨道炮的能量输入核心,电源特性与回路电气损耗直接决定驱动能力上限,是初速受限的根源性因素。

①高速动生电动势电流抑制效应

由式(2)可知,U_d 随 v 线性增长。随着 v 越大,U_d 快速攀升,大幅抵消电源端 U_b,回路有效驱动压差急剧下降,F 随 i 平方衰减,加速能力下降。

大口径电磁轨道炮 L_r' 更大,同等速度下 U_d 远高于小口径轨道炮,电流衰减起始速度更低、衰减速率更快,导致加速后半段几乎无有效推力,弹丸无法继续增速,形成初速限制。

②脉冲功率储能与峰值电流约束

大口径电磁轨道炮弹丸质量大,所需的 E_k 极高($E_k \geqslant 30$ MJ),对脉冲电源提出严苛要求。首先,由式(8)可知,高 v 需要 MA 级峰值电流 I_m,但大口径导电回路长度长、接触节点多,回路总电阻显著增大,E_J 呈爆炸式增长,大部分电能转化为热能损耗,无法用于弹丸加速。

其次,现有脉冲电源储能密度偏低,设备体积重量受限,储能难以持续匹配大质量弹丸的高速发射

需求。同时,大功率开关器件存在性能瓶颈,瞬时高压、大电流冲击下易发生击穿损坏,制约超高电流脉冲的稳定输出。

③高速运动速度趋肤效应损耗

电枢高速运动引发速度趋肤效应,磁场扩散速度滞后于电枢移动速度,电流仅集中在轨道、电枢表层区域,有效导电截面积大幅减小,回路动态电阻随 v 持续上升。轨道载流总量极大,趋肤效应引发的局部热流密度远高于小口径轨道炮,E_J 进一步加剧,i 持续衰减,严重限制初速提升。

2.2 枢轨电接触与热烧蚀约束机理

枢轨滑动电接触界面是大口径电磁轨道炮最薄弱的环节,接触失效、电弧转捩、热烧蚀是制约高初速发射的核心工程难题。

①电枢接触转捩临界速度限制

低速发射工况下,电枢尾翼与轨道保持稳定的金属固态接触,导电性能良好。当发射速度超过临界阈值,接触界面在大电流、高速摩擦、高温耦合作用下发生转捩现象。转捩发生后,接触电阻瞬间提升,回路绝大部分电能转化为电 Q_c 和 Q_{arc},F 急剧衰减;同时膛内等离子体形成附加气动阻力,抵消剩余推力;超高温电弧会瞬时熔蚀枢轨接触面,造成永久性结构损伤,是大口径电磁轨道炮难以突破高初速的决定性因素。

②枢轨耦合热烧蚀损耗

由式(12)可知,膛内热载荷由趋肤焦耳热、滑动摩擦热、电弧辐射热三部分组成。大口径大电流工况下,界面热流密度极高,电枢尾部持续烧蚀损耗,同时轨道表层铜合金材料持续磨损,导致枢轨接触压力失稳,接触间隙随机波动,进一步诱发局部电弧,形成恶性循环。

③动态接触压力衰减失效

轨道通流后产生巨大的向外电磁斥力 F_y,大口径轨道跨度大、刚度有限,极易发生轻微张开变形,导致枢轨的垂直接触压力动态衰减。高速发射过程中,轨道振动、弹丸扰动会加剧枢轨局部脱开,产生间隙电弧,破坏稳定电接触状态,大幅降低电磁轨道炮的极限发射速度。

2.3 炮体结构力学约束机理

超大电流产生的电磁力不仅是弹丸加速的动力,同时会对炮体结构产生极强的破坏性载荷,结构力学强度成为轨道炮提速的重要刚性约束。

①轨道侧向扩张应力问题

由式(11)可知,F_y 大小与 i 平方成正比,MA 级电流工况下,轨道需承受数十兆牛级的侧向撑开力。常规铜基轨道抗拉强度有限,外部封装结构长期承受交变强载荷,易出现疲劳形变、开裂失效。而轨道一旦发生微小形变,会导致轨道间隙不均匀,引发电流偏载、局部烧蚀加剧,破坏发射稳定性。

②轴向冲击与振动约束

弹丸可在数 ms 内从静止加速至数 km/s,过载可达数万 g_n。大口径长轨道在数万 g_n 的瞬时加速度激励下,会产生剧烈的轴向弹性振动。电枢高速运动过程中与振动轨道发生高频冲击碰撞,破坏枢轨电接触的稳定性,极易诱发局部电弧转捩,大幅压缩高速段的有效加速行程,限制炮口初速提升。

③轨道尺寸的制衡局限

理论上延长轨道可增加弹丸加速距离、提升 v,但轨道长度越大,整体抗弯、抗扩张刚度越差,结构形变风险提升,同时轨道回路电感、电阻损耗同步增加,因此,轨道长度存在最优阈值,无法通过无限加长轨道实现持续提速。

2.4 弹丸与电枢承载性能约束机理

超高初速发射工况对电枢与弹丸的结构强度、耐热性能、电学性能提出极致要求,其自身承载能力直接锁定速度上限。

①弹上电子器件抗过载能力限制

电磁轨道炮发射过程的数万 g_n 超高过载,可使制导弹药内部的电路板、传感器、引信等精密电子元器件断裂、损毁、失效,仅非制导弹药可勉强承受超高过载,严重限制轨道炮的实战应用价值;同时,轻质复合弹体在超高应力作用下易出现分层、碎裂等结构破坏问题。

②电枢结构与材料性能制衡

传统金属固体电枢导电性能优异,但密度大、自重偏高,挤占弹丸有效载荷,降低加速效率;铝、镁等轻质低密电枢材料,熔点较低,在大电流、高温工况下更易熔融烧蚀,稳定性较差。同时,固体电枢的结构尺寸影响其载流能力,从而限制电磁推力。等离子体电枢虽可实现轻量化加速,但电弧放电不可控、能量损耗高、一致性差,无法满足高精度、重复发射需求。

2.5 膛内气动与摩擦阻力约束机理

高初速工况下,各类阻力损耗呈指数级增长,成为消耗电磁推力、限制初速的重要因素。

①膛内空气阻力损耗

由式(10)可知,F_R 气动阻力与速度 v 的平方成正比,速度越高阻力损耗放大效应越显著。大口径弹丸迎风截面积大,同等速度下气动阻力远大于小口径弹丸;当速度超过 1 500 m/s 时,膛内空气发生

气动加热电离,形成等离子体阻力,与空气阻力叠加,大量电能被用于克服阻力而非加速弹丸。

②载流滑动摩擦阻力损耗

由式(9)可知,F_f 与 i 平方正相关。大口径大电流工况下,F_{ar}极大,滑动摩擦阻力与摩擦热损耗同步激增。虽然高速熔化金属可形成短暂润滑膜降低摩擦,但该状态极不稳定,极易诱发电弧转捩,无法实现持续提速。

2.6　多场耦合能量转换效率约束

大口径电磁轨道炮存在多物理场强耦合效应,各类损耗相互叠加、相互强化,导致系统能量转换效率低。工程实测数据表明[10],大口径电磁轨道炮综合能量利用率仅为 20~30%。其中,回路焦耳热损耗 E_J 占总储能~50%,阻力做功损耗 E_d 占~10%,磁场储能损耗 E_m 占~10%,多重损耗耦合形成明显的速度饱和效应。即使持续提升电源储能,有效转化为弹丸动能的能量增量持续收窄,初速提升幅度不断降低。

3　大口径电磁轨道炮系统优化设计

通过上述发射初速受限机理分析可知,电磁发射参数冲突本质是电磁能量转化的平方律特性:推力、发热、轨道斥力均与电流平方成正比,提升加速能力的核心变量(i、L_r'、l_r),都会同步放大损耗、破坏、载荷类负面效应;不存在一组参数能同时满足高初速、低烧蚀、轻小型化、高能量效率、长寿命等全部指标,工程上只能做折中取舍。

3.1　发射器

发射器设计主要考虑两方面因素:一是发射器本身性能,合理设计与优化轨道发射器结构,提高电感梯度和能够导通的电流;二是与电源的匹配性,调整脉冲电源参数,有效提高系统效率,这样才能充分发挥电磁轨道炮系统的性能。

本设计要求大口径电磁轨道炮设可将 30 kg 弹丸加速至 2000 m/s 以上,口径为 180 mm,发射器轨道长度不超过 15m,峰值电流不超过 6 MA,线电流密度不超过 35 kA/mm。轨道由铜合金制造,身管封装选用碳纤维复合材料。①为了提高有效载荷比,内膛设计接近方形,有利于减小一体化发射组件的寄生质量,提高发射效率。②在所需 F 不变的情况下,提高发射器的 L_r',可减小所需的 I_m,有利于减小轨道烧蚀、延长轨道寿命。发射器的 L_r'由轨道的材料、尺寸决定[6],为提高 L_r',应尽量增大轨道间距 s,同时缩小轨道宽度 h,并在保证发射装置结构强度及载流能力的情况下,尽量减小轨道厚度 w。③脉冲电流峰值与轨道高度的比定义为线电流密度[11]。线电流密度 i/h 与膛压 P_r、轨道承受的磁压力成正比,在满足身管内膛尺寸要求的前提下,应尽量减小轨道的线电流密度。

3.2　电枢

为了保护电枢在轨道中不受损坏,提高弹丸 v,电枢设计的关键是考虑速度、效率、烧蚀及与发射系统的协调一致等问题,重点研究电枢的结构、电枢的材料、枢轨界面接触特性等。

该设计中的电枢采用 U 形铝合金固体电枢,质量不超过 10 kg。电枢臂将略大于内膛尺寸,以施加预紧力确保电枢轨道可靠接触。电枢载流量也是十分重要的设计参数,国际上习惯将导体材料达到熔化时的承载电流特征值定义为 SAM 值[12]。

3.3　脉冲电源

目前,电磁轨道炮基本上采用电容型储能电源。脉冲电源的工程化研究一方面要提高电容器的储能密度,在模块化、小型化、一体化、可靠性和脉冲成型网络等方面开展研究;另一方面是要开展脉冲交流发电机的研究工作,虽然该技术尚不成熟,但 a 其为电磁轨道炮脉冲电源工程应用的理想电源。

本设计脉冲电源系统由 400 个独立触发的 500 kJ 模块组成,充电 7 kV 时系统总储能 200 MJ,每个模块由 20 mF 金属化膜电容器、半导体开关、调波电感、二极管构成。

3.4　系统仿真计算

根据系统等效电路模型(图 2),利用 PSpice 软件建立了大口径电磁轨道发射系统仿真模型。大口径发射器模型考虑了电枢运动引起的系统参数变化。轨道电阻和电感随电枢运动线性增加,设电阻梯度为 0.1 mΩ/m,电感梯度为 0.45 μH/m,以简单轨道炮为设计对象,对口径 180 mm 的电磁轨道炮进行了仿真计算。电流波形(紫)、弹丸速度曲线(红)、弹丸位移曲线(绿)如图 5 所示。

表 1　大口径电磁轨道发射系统仿真结果

序号	电源储能/MJ	发射质量/kg	电感/(μH/m)	长度/m	过载/g_n	电流/MA	发射初速/(m/s)	出口/动能/MJ
1	200	30	0.45	15	2.06	5.56	2 190	72.2
2	200	40	0.45	15	1.61	5.68	1 880	71.2
3	200	50	0.45	15	1.23	5.58	1 640	67.4

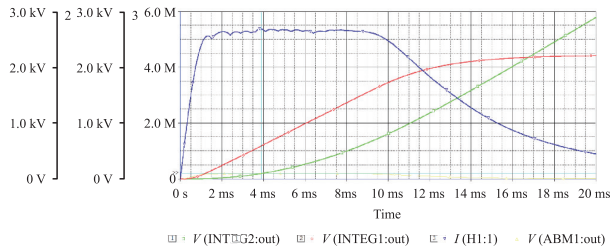

图 5 大口径电磁轨道发射系统 30 kg-2 000 m/s 仿真曲线图

4 结论

大口径电磁轨道炮的发射初速提升并非单一技术问题,而是电气特性、材料性能、结构强度、弹丸承载、电磁损耗、系统集成多因素耦合制衡的结果。其中,枢轨电接触与热烧蚀是核心速度瓶颈,超大电流工况下的结构应力损伤、脉冲电源储能、电磁能量损耗是重要限制性因素,共同决定了现有技术条件下电磁轨道炮的速度上限。

当前电磁轨道炮仍处于技术迭代阶段,超高初速的电磁轨道炮系统无法通过单一参数优化实现突破。未来需依托新型材料技术、轻量化结构设计、高精度脉冲控制技术等协同升级,系统性解决烧蚀、损耗、形变、储能等核心问题,才能持续提升电磁轨道炮的发射速度与综合作战性能,推动新质武器的工程应用。

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.

[2] 吕庆敖,向红军,苑希超,等. 电磁轨道炮发展困境与高威力发射器概念设计[J]. 2025,4(2):20-26.

[3] 刘旭堃,于歆杰,刘秀成,等. 电磁轨道炮运行阶段系统发射效率和电枢出膛动能的研究[J]. 电工技术学报,2017,32(3):210-217.

[4] 李天亮,李秋生,刘真,等. 基于遗传算法的电磁轨道炮能量效率优化研究[J]. 现代防御技术,2024,52(4):146-153.

[5] 金亮,巩德鑫. 电磁轨道炮电枢电磁推力特性分析与验证[J]. 火炮发射与控制学报,2023,44(6):1-7,27.

[6] 谭赛,鲁军勇. 电磁轨道炮的电气参数特性研究及优化设计[J]. 船电技术,2012,32(2):8-12.

[7] 陈少辉,王炅,成文凭,等. 电磁轨道发射器能量转换过程[J]. 电机与控制学报,2024,28(5):60-71.

[8] 沈剑,王少龙,宁益晨,等. 电磁炮超高速弹丸膛内运动稳定性研究[J]. 弹箭与制导学报,2020,40(4):1-4.

[9] 鲁军勇,马伟明. 电磁轨道发射理论与技术[M]. 科学出版社,2020:1-505.

[10] 翟小飞,李鑫航,刘华,等. 电磁轨道发射系统电路模型及发射效率研究[J]. 电工技术学报,2023,38(11):2841-2860.

[11] 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.

[12] 邢彦昌,吕庆敖,李治源,等. 电磁轨道炮熔化限制条件下速度极限分析[J]. 火炮发射与控制学报,2014,35(3):11-15.

赵婉瑜(1989—),女,博士,高级工程师,主要研究方向电磁发射技术、脉冲功率技术、复合材料技术,zhaowanyu_hpu@163.com。