

DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.2016.02.019

电磁轨道炮关键技术与发展趋势分析

乔志明, 雷 彬, 吕庆敖, 向红军, 黄 旭

(军械工程学院 弹药工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 电磁轨道炮是利用电磁力将弹丸加速到超高速的新概念武器系统, 可遂行直瞄打击、超高空或超远程投送弹药等多种作战任务。介绍了轨道炮的基本原理, 从电能利用角度对轨道炮研究中电源与电力控制、轨道与电枢结构设计、超高速滑动电接触理论与技术以及轨道炮系统集成等关键技术进行了分析。依据电磁轨道炮发展规律及现有技术水平, 分析其新的发展趋势为大炮口动能轨道炮设计、基于轨道发射的弹丸设计以及轨道长寿命研究, 对新概念武器发展有一定参考意义。

关键词: 电磁发射; 电磁轨道炮; 脉冲功率电源; 滑动电接触; 炮口动能

中图分类号: TM153

文献标志码: A

文章编号: 1673-6524 (2016) 02-0091-05

Analysis of the Key Technologies and Development Tendency of Electromagnetic Railguns

QIAO Zhiming, LEI Bin, LYU Qing'ao, XIANG Hongjun, HUANG Xu

(Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, Hebei, China)

Abstract: Electromagnetic railguns are new concept weapons which accelerate projectiles to a high value with electromagnetic force. They are possibly applied to various military operations such as direct attack, high-altitude or long-range launching of ammunition. An introduction is made of the basic principle of railguns. An analysis is made of the novel electric power supply and electricity control research, structure designs of armatures and rails, sliding electrical contact technologies, and the integration technologies in electromagnetic launch from the perspective of the use of electricity. Based on the law development and current technical level of railguns, the new development tendencies are represented by guns with high muzzle kinetic energy, railgun projectile design and the long-life of rails, which has a certain reference value for the development of new concept weapons.

Key words: electromagnetic launching; railguns; pulsed power supply; sliding electrical contact; muzzle kinetic energy

电磁发射技术是利用载流体在磁场中受力, 对目标物体进行加速的一项重要电磁能应用技术, 具备电力应用的独特优势, 在弹丸发射、舰载机弹射、火箭和导弹弹射等方面有很好的发展前景。

在军事领域, 电磁轨道炮备受青睐^[1-3]。电磁轨道炮炮口初速大, 可在新形势信息化作战条件下

遂行多种作战任务, 是新概念武器研究的一个重要方向。根据 2001 年美国电磁发射技术专家 McNab 对初速 2.5 km/s 的细长圆锥形弹丸外弹道分析, 质量为 60 kg 弹丸在 51°仰角发射条件下, 最大射高为 120 km 左右, 在 6 min 内可达到 400 km 的最大射程, 而且弹丸末速度超过了 1.5 km/s^[4]; 利用其在

收稿日期: 2015-08-25

基金项目: 国家安全重大基础研究项目 (6132270102); 国家自然科学基金项目 (51407195)

作者简介: 乔志明 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁发射技术研究。E-mail: qiaozhiming99@163.com

短时间内将弹药远距离投送优势,可实现对敌快速、大纵深火力覆盖以及作为登陆作战中的有效火力掩护;利用其射高高的特点,可覆盖战斗机机群飞行高度,用作近程防空武器;发挥其弹丸速度高的特点,实现对厚壁目标动能打击,攻击敌方装甲目标或工事,同时摆脱了对发射药的依赖;另外,轨道炮弹丸速度高,目标小,具备不易拦截、攻击性强的优势。

1 电磁轨道炮基本原理

轨道炮基本组成包括大功率脉冲电源、电能控制模块、两条平行金属轨道、位于两轨道间且与两轨道保持滑动电接触的载流电枢、电枢推动的弹丸以及绝缘固定装置等,如图 1 所示。

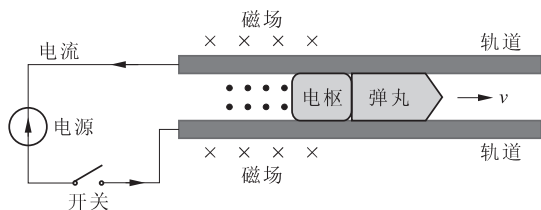


图1 轨道炮结构图

电枢被压入炮膛(两轨道间)后,接通电源开关,电流由后膛馈入,流经轨道、电枢、另一侧轨道,形成闭合回路。两根轨道中反向电流在轨道之间区域形成磁场,对载流电枢产生电磁力作用。由于在电磁发射过程中,极短时间内电流迅速增大到几兆安,所形成的洛伦兹力远大于电枢的运动阻力,电枢推动弹丸向炮口加速运动。

依据法拉第定律、虚功定律以及能量守恒定律,可得到“轨道炮作用力”定律为^[1]

$$F = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (1)$$

式中: F 为电枢受到的电磁力; L' 为单位长度轨道的电感值,即电感梯度; I 为通过回路的电流。

由图 1 和式 (1) 可以看出,电磁轨道炮作为高电压应用条件下的机电系统,其技术核心在于脉冲大电流的产生及利用,因此,适配电磁轨道炮的大功率脉冲电源技术、基于改善结构通流能力问题的枢轨结构设计技术、超高速滑动电接触技术以及强电磁环境下的系统集成技术是制约轨道炮性能的优化和发展的关键技术。

2 电磁轨道炮关键技术分析

2.1 电源与电力控制技术

轨道炮对电源有极高的性能要求,轨道炮电源在毫秒量级时间段内释放几兆焦甚至更多的电能,以满足轨道炮超高速发射性能需求。同时,为便于电源运载,轨道炮电源还应具有能量密度高、结构紧凑的特点。

目前,大功率脉冲电源主要储能形式有电容储(电)能、电感储(磁)能、旋转机械储(动)能和化学能储能等。轨道炮发射系统的电源多采用单极发电机或电容器组。单极发电机采用旋转机械储能,储能密度大,放电过程电流平稳,其缺点主要是储能周期长,最大的单极发电机是澳大利亚国立大学的堪培拉单极发电机,据试验记载,可储能 550 MJ^[1];电容器组经充电后可形成高压,放电速度快,是试验用轨道炮的主要电源之一,缺点是能量密度小,不适用机动场所,目前,市场化的电容器最大储能密度约 4 MJ/m³,实验室用电容器的最大储能密度为 7 MJ/m³,这仍然远低于用于火箭发射的碳氢燃料和火炮发射的发射药能量密度^[5]。

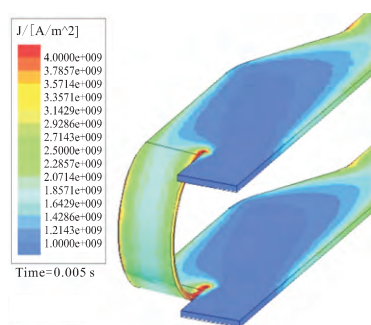
合理设计供电模式,采用有效的电力控制可提高能源利用率,轨道发射中,脉冲成型网络(PFN)对电流波形影响很大,通过改善电流输出波形可以提高系统效率及炮口动能,理想的轨道炮电源输出电流波形为梯形平顶脉冲^[6]。

2.2 轨道与电枢结构设计

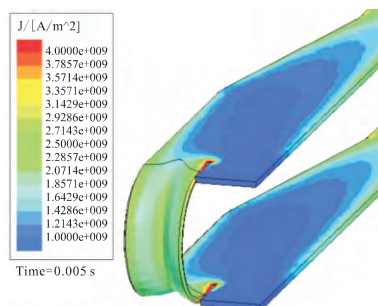
依据“轨道炮作用力”定律,增加轨道电感梯度和加大回路电流能够提高轨道炮作用力,合理设计轨道与电枢结构可提高轨道电感梯度 L' 值,改善结构通流能力,增加炮口动能,延长轨道寿命。

发射装置口径、轨道几何尺寸、矩形轨道宽高比都直接影响电感梯度值的大小^[7];不同的封装工艺对轨道电感梯度值影响很大,相同条件下,采用导磁性好、导电性能差的封装材料,有利于提升轨道电感梯度值^[8];在结构上设置磁场增强轨道,通过增加磁场可提高电感梯度值,美国 IAT 设计的增强型轨道炮电感梯度达到了 1 μH/m,较简单轨道炮 0.4 μH/m 左右的电感梯度值提高达 2.5 倍^[9]。其他主要形式还有多轨式增强型轨道炮^[10]、多层串联轨道炮^[11]、层叠式和并排式轨道炮^[12]等。

合理设计电枢结构可以改善电流分布,减少趋肤效应、速度趋肤效应以及电流传导短路径聚集现象带来的电流分布不均,改善电枢热应力分布,采用“马鞍面”状电枢与多匝轨道相结合的复杂轨道炮结构,可显著改善电流分布^[13]。其中“马鞍面”状电枢可利用“电流分布的短路径聚集效应”反作用于“脉冲电流的趋肤效应”,与柱面结构相比,能有效提高电枢电流分布的均匀化程度,如图2所示。



(a) 柱面带状U形电枢电流密度分布



(b) 马鞍面带状U形电枢电流密度分布

图2 结构U形电枢拱形部电流密度分布对比

2.3 超高速滑动电接触理论与技术

在电磁轨道炮中,大脉冲电流经一条轨道通过电枢流到另一条轨道,电枢与轨道之间以过盈接触方式保证良好滑动电接触。大电流流经电枢与轨道滑动接触表面时,会伴随机械效应、热效应、可能的电火花或电弧效应。

大电流轨道炮的枢轨界面间超高速滑动电接触导致的问题主要有:

- 1) 滑动电枢与固定轨道相互运动过程中,轨道上微颗粒或应力中心对电枢的冲击作用,产生了刨削现象,在轨道上形成液滴状刨坑。
- 2) 由于电枢与轨道的不良接触而引起接触面之间产生电弧击穿,发生转捩和烧蚀。
- 3) 由于电流在电枢边缘汇聚和金属液滴侵蚀作用导致槽蚀现象,在轨道上电枢两侧位置形成

沟槽。

4) 另外,由于铝质电枢尾翼滑动接触界面的熔融,在铜合金轨道上形成银白色金属沉积层,使得电接触界面更加复杂。

通过合理设计枢轨结构可优化枢轨电接触状态,有效减少轨道损伤,延长发射器寿命。美国高技术研究局(IAT)采用电镀铝膜作为枢轨接触预先涂层,试验证明可有效预防刨削现象,减轻轨道损伤^[14]; Marshall 和 Persad 在试射多层层叠电枢时,发现其刨削区域明显小于单体电枢,证实了分层结构对改善电接触状态的可观效果^[1]。

电接触研究进展缓慢,国外研究主要单位是美国高技术研究局(IAT)、美国海军研究实验室(NRL),主要研究方法是轨道沉积层组分、形态分析,以及基于大量实验数据的电接触状态仿真。2004年,IAT宣称,在2~3 km/s速度范围内解决了轨道刨削和电枢转捩问题^[15],取得了重大进展。

2.4 系统集成技术

目前,大功率脉冲电源能量密度较低,由于电磁轨道炮系统的大电流需求,系统的供能模块占用空间较大;大电流工作环境下的轨道炮系统会形成脉冲强电磁场,需要有效的电磁防护模块;若实现轨道炮电枢弹丸装填、瞄准、发射的高度自动化,强电磁环境下的机电设备布置也是亟需解决的问题。所以,随着大电流工作模式下的电磁轨道炮不断走向实用化进程,对其发射的可靠性、操作的灵活性、使用的安全性以及运载的简易性提出了更高要求,其系统集成技术也显得更加重要。

美国波音公司/英国航空航天公司(BAE)研制的电磁轨道炮于2014年7月上舰展示,是轨道炮军事实用化进程的重大进展,表明美海军轨道炮系统集成技术达到了很高的水平。我国在进行电磁轨道炮加工进程中也更加重视系统的小型化和紧凑性,轨道炮装置的研发制作将会更加突出一体化的特点。

3 轨道炮发展趋势

轨道炮的研究,是在顺应其军事应用目标中曲折发展的,经历了处于技术探索阶段的堪培拉轨道炮、以反洲际弹道导弹为应用目标的天基在轨轨道炮、以反装甲为目标的陆基机动轨道炮以及至今作为研究主流的以超远程火力打击为目标的海基轨

道炮 4 个主要阶段。

如今,美海军轨道炮系统代表着电磁轨道炮发展的最高水平。2008 年,美国海军进行了 10.6 MJ 炮口动能圆膛炮发射试验。2010 年,使用同近方膛轨道炮发射装置进行试验,将 10 kg 弹丸加速到 2.5 km/s 炮口速度,炮口动能达到 32 MJ^[16]。2012 年,美海军首次进行了轨道炮全威力样机发射试验,如图 3 所示。2014 年 7 月,美海军研制的炮口动能 32 MJ 电磁轨道炮进行了舰上展示,如图 4 所示。



(a) 美海军全威力轨道炮试验系统



(b) 电枢飞出膛膛场景

图3 美海军32 MJ炮口动能的全威力样机发射试验



图4 BAE公司研制的电磁轨道炮系统于美海军战舰上展示

在现有技术水平和作战需求下,轨道炮具有如下发展趋势:

1) 大炮口动能轨道炮设计。随着轨道炮技术不断趋于实用化,轨道炮将会在不久后走出实验室,服务于军事。各国在进行加大发射初速研究的同时,更加注重加大弹丸质量和炮口动能以改善弹丸性能,提高打击精度、增强杀伤效果。美国海军

计划下一步提高弹丸质量至 20 kg,炮口动能达到 64 MJ。图 5 所示为初速 2.5 km/s 不同质量细长圆锥形弹丸的外弹道曲线^[4],其中,采用 60 kg 弹丸以 2.5 km/s 炮口初速发射,炮口动能达 187.5 MJ,最大射高为 120 km 左右,射程可达到 400 km。大炮口动能轨道炮的远射程发射性能对作战模式和国际规则有重要影响,且由于弹丸在高于 30 km 高空飞行时,几乎不受空气阻力影响,高射高发射也更利于形成有益于弹丸飞行的空气动力学条件。受制于现有关键技术水平,目前,大初速、高炮口动能的电磁轨道炮在工程研制进程中还不够成熟,大炮口动能轨道炮研究的发展将在不断加大弹丸质量和炮口初速中曲折发展。

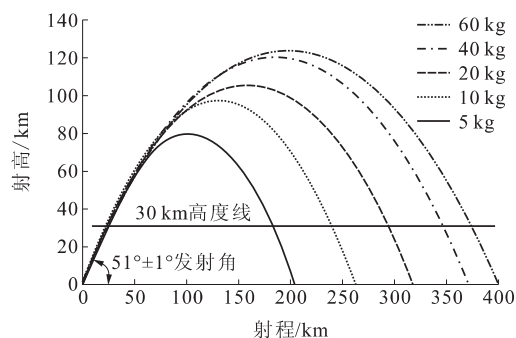


图5 初速2.5 km/s不同质量的细长圆锥形弹丸外弹道曲线

2) 基于轨道发射的弹丸设计。关于轨道发射的弹丸设计主要有以下几个方面:

① 电枢与弹丸的一体化设计,目标是使得电枢将弹丸可靠推动到超高速,弹托和弹丸分离后,弹丸实现稳定飞行。美海军在 2004 年 3 月进行的一体化发射组件的自由飞行演示中,成功使用了方膛轨道炮脱壳弹丸组件;2010 年 8 月,美海军在内凸方膛轨道炮上发射试验了脱壳弹药。

② 轨道炮弹丸的制导需求,精确打击是信息化条件下作战的主要特点,轨道炮发射超远射程弹丸,由于在膛内电枢与轨道接触状况复杂、电枢出口速度快以及受环境因素影响,弹丸在无制导条件下打击精度还不够高。

③ 若实现炮口初速在 1.7 km/s 以上,在现有发射器水平上,弹药将承载约 3 万个重力加速度,高于目前制导弹药 2 万个重力加速度承载能力^[5]。

④ 由于发射过程中的强磁场作用,很可能造成制导电子元器件不准确或失灵。

因此,基于轨道炮发射条件下制导弹药一体化设计是伴随大炮口初速轨道炮研究的重要研究方向。

3) 轨道长寿命研究。由于高参数轨道炮发射过程中的大电流形成欧姆热效应,以及电接触界面存在的磨擦磨损、刨削、转捩烧蚀、槽蚀、沉积层等多方面作用,导致轨道的使用寿命受到很大限制。而轨道炮的使用寿命直接制约着其军事应用空间,轨道炮若遂行大纵深火力覆盖、对敌大面积毁伤作战任务,必须解决轨道的长寿命问题。在轨道炮发展过程中,由于固体电枢取代了等离子电枢,轨道炮寿命由单发发展为多发,轨道长寿命的实现仍将在很大程度上取决于材料、枢轨结构的改善。

4 结束语

作为新概念武器,电磁轨道炮可加速弹丸到超高速。与传统武器相比,由于其炮口初速大、易控制、安全性高等特点,电磁轨道炮在遂行防空、反导弹、反装甲、超远程火力压制等军事任务中具有很大优势。随着电源与电力控制、轨道与电枢结构设计、超高速滑动电接触以及系统集成等关键技术水平的提高,弹丸发射初速和炮口动能已初步达到军事应用水平,大炮口动能轨道炮、基于轨道发射的弹丸设计以及轨道长寿命将是伴随轨道炮走向实用化的发展趋势。

参考文献(References)

- [1] MARSHALL R A, WANG Ying. Railguns: their science and technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 1-11.
- [2] FAIR H D. Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 44(1): 225-230.
- [3] MCNAB I R, BEACH F C. Naval railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 463-468.
- [4] MCNAB I R, FISH S, STEFANI F. Parameters for an electromagnetic naval railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 223-228.
- [5] 李军,严萍,袁伟群. 电磁轨道发射技术的发展与现状 [J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
LI Jun, YAN Ping, YUAN Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064. (in Chinese)
- [6] 刘佩进. RBCC 引射火箭模态性能与影响因素研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
LIU Peijin. Investigation on performance and influence factors of rocket ejector mode of RBCC [D]. Xi'an: North-western Polytechnical University, 2001. (in Chinese)
- [7] 周媛,严萍,袁伟群,等. 电磁轨道发射装置中轨道几何参数对电感梯度的影响 [J]. 电工电能新技术, 2009, 28(3): 23-27.
ZHOU Yuan, YAN Ping, YUAN Weiqun, et al. Effect of rail geometrical parameters on inductance gradient of EML [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(3): 23-27. (in Chinese)
- [8] 刘守豹,阮江军,黄道春,等. 封装对轨道炮电感梯度的影响 [J]. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 42-45.
LIU Shoubao, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Influence of shielding on rail gun induction gradient [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(4): 42-45. (in Chinese)
- [9] FAIR H D. Electromagnetic launch: a review of the U. S. national program [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 11-16.
- [10] GALLANT J, LEHMANN P. Experiments with brush projectiles in a parallel augmented railgun [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 188-193.
- [11] LI Meiwu, WU Yuhang, ZHAO Xi, et al. DC constant current power supply used to power a multilayer launching system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 213-215.
- [12] ZHANG Yujiao, RUAN Jiangjun, LIAO Junpeng, et al. Comparison of salvo performance between stacked and paralleled double-projectile railguns [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1410-1415.
- [13] LYV Qing'ao, LI Zhiyuan, LEI Bin, et al. Primary structural design and optimal armature simulation for a practical electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1403-1409.
- [14] TREVOR W, MOTES D T. The effects of surface coating on the onset of rail gouging [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 38(1): 220-225.
- [15] 周媛,李敏堂,王菁华. 美国电磁轨道发射技术现状及特点分析 [J]. 火力指挥与控制, 2010, 35(9): 1-4.
ZHOU Yuan, LI Mintang, WANG Jinghua. Analysis on present state and characteristics of the U. S. electromagnetic rail launch technology [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(9): 1-4. (in Chinese)
- [16] 王明东,王天祥. 新概念武器的现状与发展趋势 [J]. 四川兵工学报, 2014, 35(6): 1-5.
WANG Mingdong, WANG Tianxiang. Actuality and development trend of new concept weapons [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(6): 1-5. (in Chinese)