

电磁轨道炮军事应用综述

吕庆敖, 雷 彬, 李治源, 池小平

(军械工程学院 弹药工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 从电炮实用电源、电枢与烧蚀、复杂轨道设计、与线圈炮对比、磁场增强措施、应用要求和军事使用效果等角度分析了当前电磁轨道炮的技术特征。结论为: 活塞式螺旋绕组磁通压缩发电机 (MFCCG) 适合作轨道炮电源, 该电磁轨道炮在采用固态电枢、无烧蚀高效率、高射速、超高速发射小质量射弹方面有无可比拟的优势。通过对比分析了高空小质量弹丸与地面大质量射弹的弹道学特征, 提出了轨道炮可能优先应用于高空飞机平台上用于自卫、防空、近程反导的电磁发射动能武器, 它具有响应快、作战半径大、高精度、抗电磁干扰等优势, 对未来作战效果和作战模式有广泛影响。

关键词: 电磁学; 电磁发射; 轨道炮; 磁通压缩发电机; 弹道学

中图分类号: TJ306

文献标志码: A

文章编号: 1673-6524 (2009) 01-0092-05

Summary of Electromagnetic Railgun Military Application

LV Qing-ao, LEI Bin, LI Zhi-yuan, CHI Xiao-ping

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

Abstract: Technical characteristics of railgun were analyzed from the points of view of actual power supply, armature and erosion, complex rail design, comparison with coil gun, magnetic field enhancement measures, application requirement and military application effect of electric gun. The analysis conclusions are: magnetic flux compression generator (MFCCG) of compact piston-type helical winding is suitable for power supply of the railgun. This kind of electromagnetic railgun has incomparable superiority in the fields of solid armature use, high effectiveness, no erosion, high fire rate and hypervelocity fire of small mass shot. By means of comparison of ballistic characteristics of small mass projectile in high altitude with large mass projectile on the ground, it was proposed that the railgun can be prior to mount on aircraft platform in high altitude to use as electromagnetic launched kinetic energy weapon for self-defense, air defense and close-in antimissile. The railgun has advantages of quick response, large combat range, high accuracy and electromagnetic jamming resistance and so on, and it also has extensive influence on future combat efficiency and combat modes.

Key words: electromagnetics; electromagnetic launch; railgun; magnetic flux compression generator (MFCCG); ballistics

当今正在研究的新概念武器主要包括定向能武器^[1]和超高速动能武器。前者包括高功率微波武器、强激光武器; 后者又分为由火箭推动的动能拦截器和由电磁发射的动能武器两大类。电磁发射可主要用于发射小型航天器, 航空母舰上弹射飞

机, 以及发射穿甲弹、拦截器和长程制导弹药等^[2-3]。

一般认为, 作为一种电发射动能武器, 采用固体电枢的轨道炮可以装配在陆军坦克上发射动能穿甲弹, 弹丸质量约几千克, 能量近 10 MJ。而目

前,电炮实用电源问题本身尚未解决,烧蚀带来的低效率必然对能量有更大需求。另一方面,弹质量约几克的小质量金属电枢和射弹已被成功加速到 $4.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 也没有烧蚀,对能量的需求也比较小。轨道炮军事应用的现存问题是要么选择低效率、大质量、较高速度的射弹,要么选择高效率、小质量、超高速度的射弹。笔者探索了电磁轨道炮本身的技术特征,结合脉冲功率电源和弹道学分析,得出了轨道炮可能首先在空基平台上使用的结论。

1 轨道炮技术特征

轨道炮系统包括轨道发射器、电枢和射弹、脉冲功率电源(PPS)和控制开关等。如图1所示,电磁轨道发射器由绝缘固定的两根通电平行导轨构成,电枢和射弹可沿轨道滑动,电枢与导轨间有滑动电接触。当开关闭合后,PPS、轨道和电枢构成串联回路。通电电枢受到轨道电流磁场的作用,电磁力可推动射弹以超高速发射。

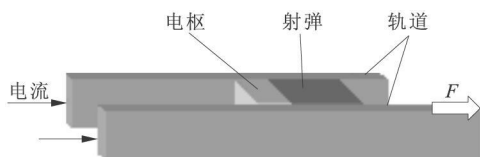


图1 电磁轨道炮结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of railgun launcher

早在发现电磁相互作用之初就有利用电磁力发射武器的设想,直到1978年才有了重大突破。澳大利亚国立大学 R A Marshall 等人采用等离子体电枢和 550 MJ 单极发电机(homopolar generator, HPG),在 5 m 长的轨道上把 3.3 g 的聚碳酸酯塑料弹丸加速到 $5.9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以说,高功率脉冲技术制约着电磁发射研究的进程。

1.1 脉冲功率电源

作为超高速动能武器,电磁轨道炮需要巨大的电能和极高的功率。传统高功率脉冲电源主要采用电容器组储能系统^[4],但这类电源驱动的电磁炮不适合地面战车上装备使用,其原因有两个:电容器目前的储能密度还比较低;作为储(电)能器件,电容器电源系统还需要发电设备,而传统发电机的功率还比较低。如世界主要军事强国主战坦克的发动机功率约为 1.1 MW。在实验室或大型战舰上,电容器组电源可以通过脉冲成形网络(PFN)给轨道炮负载提供平顶的电流脉冲。

另外,补偿脉冲交流发电机^[5-6](compensated pulsed alternator, Compulsator, CPA)可以装备在大型战舰上来驱动轨道炮或线圈炮。单极发电机在1978年被 R A Marshall 用来成功把 3.3 g 弹丸加速到 $6.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,留下了辉煌的历史记录。然而,有限功率的旋转储能机械必须预先存储足够的动能才能满足需要。这种预先启动以积累和存储动能的工作模式当然不适合应急的军事行动。

驱动轨道炮的脉冲功率电源可能是可重复使用的活塞式螺旋绕组磁通压缩发电机(MFCG)。早在1984年,R. A. Marshall^[7]就提出了一种逆轨道炮的单匝磁通压缩发电机,但其单匝绕组的电感较低,带动负载能力有限。于是1993年乌克兰科学家^[8]借用爆炸式MFCG概念直线动力系统,提出了活塞式螺旋绕组MFCG概念。1997年Peter Mongeau 等人^[9]给出了一种装载于坦克上的20 MJ的活塞式螺旋绕组MFCG系统设计。同年Edward Goldman 试验了用于电热炮的MFCG。2006年吕庆敖等人^[10]开展了活塞式螺旋绕组MFCG原理试验,本领域首次获得了放大的电流。

活塞式螺旋绕组MFCG适合带动轨道炮,并有如下优势:

- 1)轨道炮有较小的电阻和电感参数,适合作MFCG负载。
- 2)MFCG输出特性为低电压和大电流,适合作轨道炮电源。
- 3)体积小和质量轻,使用方便,直线式发动机比旋转式发动机有更大的功率密度。
- 4)MFCG及时响应能力和系统安全性非常适合军事使用。

1.2 电枢与滑动电接触

轨道炮本体主要包括轨道和电枢,电枢与轨道之间的滑动电接触是一项关键技术。R. A. Marshall^[11]认为金属间滑动电接触的电压降不超过1 V。A. Challita 等人^[12]测量了铝导体与铜盘之间滑动电弧接触电压,在轨道炮实际试验电流大小情况下测量出的电弧压降约为40 V,并推断固态电枢发生磨损烧蚀为复合电枢时双端电弧压降共约为80 V。由此可见,巨大能量消耗于放电烧蚀,而且严重的烧蚀还会缩短轨道寿命并严重影响下一发发射。无论从系统效率还是从系统工程角度,都必须避免使用等离子体电枢。

金属电枢效率比复合电枢和等离子体电枢的要高许多,但电枢与轨道之间的摩擦热以及速度

趋肤效应(VSE)带来的电流聚集造成的局部欧姆热共同作用,将使固态金属接触面局部发生液化、气化、和电离,最终形成的电弧接触代替了金属的直接接触,这种现象称为转捩(conversion)。克服转捩现象或提高(不可避免)转捩时的速度一度成为主要研究课题之一。R. A. Marshall^[13]对比评价了多种电枢,如固态块状电枢、层状电枢、线束电枢和多点电枢等。Li Zhi-yuan 等人还在第13届国际电磁发射会议上曾提出液态金属电枢概念。上述各种电枢的目的都是使电流在时间或空间上尽可能均匀分布到电枢与轨道的宏观接触面上,因为实际运动电接触微观分布是一些接触点而非接触面。

1.3 复杂的轨道设计

另一方面,很多复杂的轨道也被用来分散电枢上局部的电流密度。David·P·Bauer^[14]就设计了一种可以增加转捩速度的镶嵌金属条的绝缘轨道,每个金属条有各自的供电方式,如图2所示。它的接线方式显然复杂,而另外一种结构简单的轨道由I. S. Glushkov等^[15]设计。如图3所示,金属导轨上镶嵌了宽绝缘条,电枢接触面局部在时间上交替与金属轨道电接触,从而避免了电枢局部热积累,有效地提高了转捩速度。I. S. Glushkov开展的实验中,2.6 g的铝电枢获得了 $4.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的炮口速度而没有发生放电烧蚀,这是值得令人关注的。

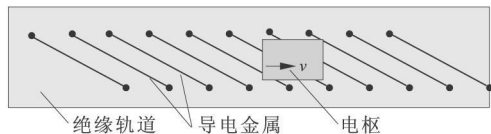


图2 能提高转捩速度的新型轨道结构

Fig.2 Novel rail structure to increase transition velocity

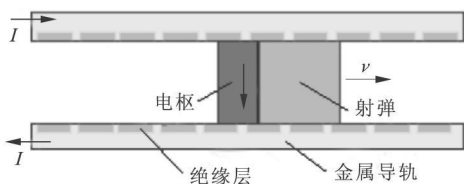


图3 齿状结构的轨道

Fig.3 Railgun with tooth-form rails

上述两种轨道改善了电枢与轨道交替电接触,但在电流一定的条件下不能有效提高载荷。为此,Meiwu Li等人^[16]设计了多层轨道的轨道炮,如图4所示。在理想条件下 N 层轨道的电感梯度约为单层的 N^2 倍。在供电电流相同情况下可以大大提高电磁力;或在供电功率相同的条件下,这种高电抗

负载(高电压低电流负载)可以大大降低电路欧姆损耗。总之多层轨道炮比单层轨道炮在一定程度上具有优势。

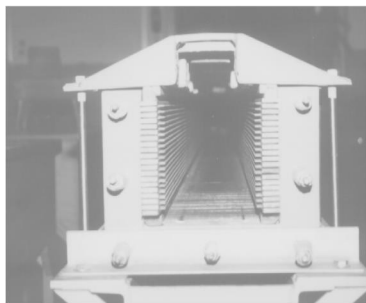


图4 多层轨道-电枢的结构

Fig.4 Railgun with multilayer rail-and-armature form

类似的,单匝轨道炮、多匝轨道炮和线圈炮的电感梯度依次增高,对电源的要求也是电压越来越高、电流越来越小,当然电路中欧姆损耗也相应地依次降低。或者说在电流密度的限制条件下,线圈炮适合加速大质量物体,而轨道炮适合加速小质量物体。据目前技术进展情况,线圈炮可以把超过几千克的大质量物体加速到接近 $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$;而轨道炮可以把几克的小质量宏观物体加速到超过 $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.4 磁场增强

尽管轨道炮能够无烧蚀地把小质量射弹加速到超高速,但从下面磁场角度分析可知,其系统效率仍然可以进一步提高。

磁场中无限长载流直导线受到电磁力 $F=BIl$ 作用,其中: F 为电磁力; B 为磁场; l 为磁场中导体长度; I 为导体电流。磁场越强、电流越大且磁场中导线越长,则电磁力越大。但是在有限能量情况下,磁场能(对应于 B)和电磁能(对应于 I)究竟如何分配才能获得最大电磁力 F ?针对这个问题已经进行了研究。当无限长载流直导线边界处的电流磁场强度等于外磁场强度时,电磁力有极大值。换句话说,对于给定电流的无限长载流直导线,导线的直径是确定最佳外磁场的主要参数之一。对于电磁轨道炮给定的电枢电流,当外磁场强度等于电枢电流在边界处的磁场强度时,电枢受到的力最大,这就是确定外界磁场(含轨道电流磁场)强度的判据和原则。一般来说,轨道电流所提供的磁场强度小于最佳的外界磁场,所以要提高效率需要采用辅助磁场增强措施,可以是永磁铁、电流磁场和超导体磁场等。换句话说,只有合适的增强磁场才能使普通的电磁轨道炮有更高的系统效率。

综上所述,多层、绝缘镶嵌的轨道配合合适的增强磁场可以把较大弹丸无烧蚀地加速到超高速。

1.5 轨道炮技术特性

- 轨道炮技术特点有:
- 1)可重复使用的活塞式螺旋绕组 MFCG 应急性好、体积小、质量小,输出电压低、电流大,很适合作电磁轨道炮电源。
 - 2)电磁轨道炮有较低的电感梯度,适合把小质量弹丸高效加速到超高速。
 - 3)合适导轨配合固态金属电枢有可能把近 10g 的小弹丸无烧蚀高效率地加速到 $5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的速度。
 - 4)多层导轨配合磁场增强方法可用来高效率地加速较大质量的物体到超高速。

2 军事应用新方向

如上所述,电磁轨道炮适合高效加速小质量弹丸到超高速。尽管能够发射超高速射弹,目前电磁轨道炮还不适合在陆基或天基上使用。小质量弹丸在地面稠密空气中飞行距离有限;大质量弹丸却需要巨大能量。天基轨道炮需要复杂的脉冲功率电源系统,而目前太阳能是不方便的。笔者认为在高空稀薄空气中电磁轨道炮可有独到的应用,尤其在高空飞机平台上可以用来巡航自卫、近程防空、近程反导或反卫星。

空基轨道炮超高速动能武器有如下的优势:响应时间短、作战距离长、拦截效率高、抗电磁脉冲武器。作为新型的空中堡垒,势必将影响未来的作战效能和作战模式。

2.1 响应快

电控制和电发射技术本身就有极短的响应时间,电信号的响应速度接近于光速 $3\times10^8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。小质量弹丸可以获得较高的装填速度。与小质量弹丸配合的轨道炮本体体积小、质量轻。小型轨道炮本体可以方便地瞄准和跟踪移动目标。轨道炮加速射弹的时间极短,一般为几毫秒。射弹以足够的超高速飞向目标。

总之,超高速发射小质量弹丸的轨道炮有尽可能短的响应时间。尤其在飞机自卫、近程防空和近程反导方面,响应时间短尤为重要。

2.2 作战距离较长

飞机本身就是长程覆盖的武器平台。轨道炮

炮口速度能超过 $5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,且稀薄空气中小质量弹丸能够飞行更长的距离。为了估计弹丸在稀薄空气中的射程,需要考虑经典弹道学。空气对小弹丸的粘滞阻力加速度由下列公式表示:

$$a = \rho^2 SC(M)/(2m) \tag{1}$$

式中: ρ 是空气密度,海拔每升高 16 km, ρ 降低到原来的 10%; v 是射弹与空气之间的相对速度; S 是射弹截面积; $C(M)$ 是粘滞因子, $M = v/v_0$ 是马赫数,表示射弹的速度与声速之比值; m 是弹丸质量。

把地面大弹丸与 16 km 高空形状相似的小弹丸外弹道特性进行比较,如表 1 所示。

表 1 16 km 高空小弹丸与地面大弹丸弹道参数瞬态比较
Tab. 1 Ballistic parameters comparison between small projectile in 16 km high altitude and heavy projectile on the ground

	ρ	$v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	S	$C(M)$	m/kg	a
地面 ρ_0		2	S_0	$\sim C(M)$	10	a_0
高空 $0.1\rho_0$		2	$0.01S_0$	$\sim C(M)$	0.01	a_0

在表 1 中,在粘滞因子接近情况下,初速 $2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、质量 10 kg 的地面大弹丸与 16 km 高空初速 $2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、质量 10 g 小弹丸相比,高空弹丸与地面弹丸有相近的弹道参数。也就是说,高空小弹丸从 $5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 炮口速度开始由于空气粘滞阻力而减速飞行,当减速到 $2\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 时才与地面大弹丸的弹道参数(速度、加速度)相近。而根据外弹道学计算,在上述减速飞行过程中,小弹丸已经飞行了近 10 km。可见,高空高速小弹丸比地面低速大弹丸的射程大得多。

2.3 精确有效拦截

尽管电磁轨道炮单发弹丸的质量很小,但对于没有特别装甲的飞机或导弹来说,高速度相对碰撞的仍然能够使后者招致致命的破坏。

空基轨道炮能够精确拦截的原因有两个:超高速飞行的弹丸可以预设更短的时间提前量;轨道炮发射小弹丸有更高的射速,大量的小弹丸形成巨大弹幕可阻滞来袭的飞机或导弹。

2.4 抗电磁干扰

现代信息战中,抗电磁干扰能力逐步成为评价武器装备生存能力的一项重要指标。空基电磁轨道炮能够抗电磁干扰有以下原因:一方面,作为高功率脉冲武器的电磁轨道炮,本身已经经受了自身系统的强电磁干扰;另一方面,强电磁脉冲对无导引装置的动能小弹丸平稳飞行无明显影响。反过来,具有长距离打击能力的轨道炮可以作为电磁武

器的克星。

2.5 有待解决的问题

活塞式螺旋绕组 MFCG 尚待进行完全成功的试验,更没有完成直接带动电磁轨道炮的试验。而电磁轨道炮本身也还没有把 10 g 弹丸无烧蚀地加速到 $5\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的炮口速度。而且小弹丸在稀薄空气中高速飞行的试验也没有完成。但上述高空飞机平台、可重复使用的 MFCG、小弹丸、无烧蚀等概念结合起来的形成高空轨道炮明显优势必然会推动技术进步。

3 结束语

经过了三十多年的快速发展,电磁轨道炮主要应用方向为对付地面装甲车辆,但距实战应用尚有距离。本文总结了电磁轨道炮的技术特征:活塞式螺旋绕组 MFCG 适合作电源,无烧蚀高效率地把小弹丸加速到超高速,多层轨道可以增大弹丸质量,磁场增强可以提高系统效率等。轨道炮的上述特点结合高空外弹道学理论,使中等能量的高海拔空基轨道炮成为一种出众的新概念武器。空基轨道炮具有响应时间短、作战半径大、射击精度高、抗电磁干扰等优势,适合用于巡航自卫、近程防空、近程反导、反卫星。

参考文献:

- [1] WEISE TH H G G, JUNG M, LANGHANS D, et al. Overview of directed energy weapons developments [C]. Proceeding of 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2004, 483-489.
- [2] FAIR HARRY D. Electric launch science and technology in the United States enters a new era [J]. IEEE Trans. Magn., 2005, 41(1), 158-164.
- [3] FAIR HARRY D. Electric launch science and technology in the United States [J]. IEEE Trans. Magn., 2003, 39(1), 11-17.
- [4] MCNAB IAN R. Pulsed power for electric guns [J].

IEEE Trans. Magn., 1997, 33(1), 519-523.

- [5] SPANN M L, PRATAP S B, Werst M D. Compulsator research at the university of texas at austin an overview [J]. IEEE Trans. Magn., 1989, 25(1), 519-523.
- [6] KITZMILLER JON R, PRATAP S B, DRIGA M D. An application guide for compulsators [J]. IEEE Trans. Magnetics, 2003, 39(1), 285-288.
- [7] MARSHALL R A. A reusable invers railgun magnetic flux compression generator to suit the earth-to-space launcher [J]. IEEE Trans. Magn., 1984, 20(2), 223-226.
- [8] KAPUSTJANENKO G G, PIGNASTY S S, SHEV-JAKIN S N. The linear electromechanical generator as power source for rail electromagnetic launchers [C]. Proceeding of 9th Pulsed Power Conference, 1993, 590-593.
- [9] MONGEAU P. Combustion driven pulsed linear generators for electric gun application [J]. IEEE Trans. Magn., 1997, 35(1), 468-473.
- [10] 吕庆敖, 高敏, 雷彬, 等. 活塞式螺旋绕组磁通压缩发电机的原理实验 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21), 156-159.
- [11] MARSHALL R A. Observation of solid armatures behavior [J]. IEEE Trans. Magn., 1995, 31(1), 214-218.
- [12] ANTONIOS CHALLITA, BARBER JOHN P. Rail-gun armature arcing voltage drop [J]. IEEE Trans. Magn., 1995, 31(1), 118-122.
- [13] MARSHALL R A. Multi-point, packed wire, and monolithic armatures [J]. IEEE Trans. Magn., 1995, 31(1), 209-213.
- [14] BAUER DAVID P. A novel railgun launcher design [J]. IEEE Trans. Magn., 1995, 31(1), 267-272.
- [15] GIUSHKOV I S, KAREEV YU A, KOTOVA L G, et al. Investigation of techniques to increase armature transition velocity [J]. IEEE Trans. Magn., 1997, 33(1), 549-553.
- [16] LI Mei-wu, WU Yu-hang, CHEN Yan-wei. DC constant current power supply used to power a multilayer launching system [J]. IEEE Trans. Magn., 2005, 41(1), 308-310.