



国外电磁炮发展概述

张龙霞 李碧清 霍 敏

摘 要 概述了国外电磁炮的分类、特点及其潜在的应用,并介绍了其发展的历程,特别是美国海军近期开展的高能电磁轨道炮项目的进展。对电磁炮相关的脉冲功率电源、导轨和电枢的设计、电能转换与大电流开关网络等关键技术及其发展现状进行了综述,指出目前电磁轨道炮实用化和武器化面临的技术困难,并展望了电磁炮技术今后的发展前景。

关键词 电磁炮 电磁发射技术 轨道炮 脉冲功率技术

引 言

2010年12月10日,美国海军宣布成功进行了新一轮电磁炮试验。根据美国海军网站的消息,在试验中炮弹的出口速度达马赫数7,出口动能为33MJ,预计射程可达370 km,这宣告了电磁轨道炮这一先进技术距离实用化又迈进了重要的一步。本文概述了国外电磁炮的发展过程和目前达到的技术水平,以期国内电磁炮技术的发展提供一些参考。

1 电磁炮的特点及其应用

电磁发射技术(Electromagnetic Launch, EML)是全部或部分利用电磁能量加速并发射弹

丸的技术,用EML技术发射弹丸的装置通常统称为电磁炮。从加速弹丸的原理上,EML装置可分为电磁炮和电热炮(ETC)两大类。前者通过脉冲大电流产生强磁场,弹丸(又称为电枢)受洛伦兹力而推动加速,按具体结构可分为轨道炮、线圈炮、重接炮、混合炮和其它类型电磁炮。电热炮依靠电磁能加热工质产生高压膨胀推动弹丸,其原理与常规火炮类似。本文中的“电磁炮”一词仅指第一类利用洛伦兹力驱动的电磁炮。

目前电磁炮的研究以电磁轨道炮为主。轨道炮虽然理论能量转换效率最低(最高50%),但结构简单、易于实现发射装置的轻型化,是目前发展较为成熟的类型。国外对电磁轨道炮进行了大量理论和实验工作,并已取得显著研究成果,有望在今后几年内走向实用化。

电磁炮与常规火炮相比具有以下优点:

1) 弹丸初速不受限制。火药驱动的火炮,由于受到火药气体膨胀音速的限制,目前技术水平下初速已经接近理论极限,野战火炮弹丸的炮口速度不超过1.8 km/s。电热炮虽然能较常规

火炮初速略高,但由于原理类似,同样也存在初速限制问题。而目前的电磁炮在发射大质量弹丸时速度已突破5 km/s,理论初速不受制约。

2) 存储使用安全。战场条件下的抗毁伤性能是武器系统可用性的重要指标。常规火炮、导弹等武器的弹药中有大量易燃易爆高能物质,储存和使用危险性高,受敌方攻击时易遭到毁伤。电磁炮系统的初级能源主要是动力燃料,制造、储存和维护较安全,即使遭到毁伤,其附带杀伤效应也较易预防或抑制。

3) 使用成本低。由于战场上武器的弹药消耗量大,高能炸药和火药的制造耗费巨大。电磁炮目前除了系统制造成本较高外,其所使用的动力燃料和弹丸成本均远低于常规弹药。

此外,电磁炮还具有隐蔽发射、可改变输入电能灵活控制初速和射程、工作稳定、炮管和弹丸形状不受限制、弹丸过载较小、理论射速高、射弹质量范围大等优点。

电磁炮在军事上最主要的应用是作为直瞄穿甲武器和远程压制武器。高速射弹的直接动能贯彻是目前打击坚固防护目标的主

本文2011-05-04收到,作者分别系西北核技术研究所工程师、副研究馆员、工程师



要方式,特别在反装甲和反永备工事领域,高速射弹几乎是唯一可选择的攻击手段。电磁炮以比常规火炮初速大得多的速度发射弹丸,不但穿甲能力得到提高,而且可大幅度减少弹药质量和体积,提高武器系统的携弹量。同样由于弹丸初速高,电磁炮可达到常规火炮几倍的射程,这对现代战场上敌火力范围外打击目标是非常重要的。

此外,电磁炮技术还可应用到战术和战略动能防空与反导、舰载机弹射装置、主动电磁装甲、实验室高速弹丸发射装置、空间发射、金属电磁成形加工、电磁列车等军民领域。

2 国外电磁炮的发展过程

20 世纪初就有人提出电磁炮的概念,但限于当时电能—动能转换的技术水平,未制造出任何实用的装置。1957 年美国空军科学研究所甚至得出了“电磁炮根本行不通”的结论,电磁炮的研究一度转入低潮。

60 年代起,随着脉冲功率技术的蓬勃发展,电磁炮相关的许多关键技术问题得到解决。1978 年,澳大利亚国立大学(ANU)的 Marshall 公布了用单极发电机和等离子体电枢技术,在 5 m 长的轨道上将 3 g 弹丸加速到 5.9 km/s,证明了电磁力将较重弹丸加速到超高速度的可能性,其研究成果具有划时代的意义。此后相继有学者论证了电磁发射的可行性,电磁发射技术重新获得重视。

80 年代初,美国劳伦斯国

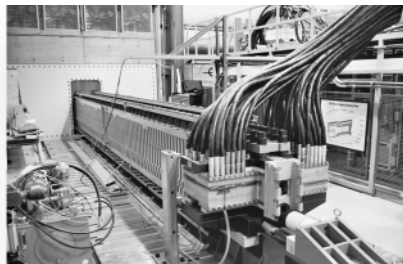


图 1 美国海军 32MJ 高能电磁轨道炮外形

家实验室(LLNL)利用口径 12.7 mm、5 m 长的轨道炮将 2.2 g 弹丸加速到 10 km/s; 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室将 3 g 弹丸加速到 10 km/s。80 年代中后期美国进行连发电磁轨道炮试验,发射速率 60 发/分,弹丸重 80 g,速度 2~3 km/s。

电磁发射技术的初期研究主要是对小质量(<10 g)弹丸的高速发射开展的,通过大量实验室装置的研制和研究,对电磁发射技术的理论基础和关键技术有了深入认识,建立了研究团队,确立了研究方向。80 年代后期起,开展电磁炮研究的主要国家均将注意力转移到大质量(kg 量级)弹丸的高速发射研究上,验证了其技术可行性,并拓展了电磁发射技术在多个领域的应用。

1991 年美国国防部成立电磁炮联合委员会,协调各单位进行电磁发射研究工作。2002 年美国海军海上系统司令部成立电磁武器办公室,协调水面舰艇用电磁炮武器的技术研究,主要集中在弹丸、发射器、电源和舰载集成四个方面。

1987 年美国得克萨斯大学成立高技术研究所,以协调全美 40 多个单位的电磁发射技术研

究工作。从目前公开的文献看,美国电磁发射技术的基础性研究成果大多都出于这个研究所或得克萨斯大学机电系。此外,英国 BAE 公司、美国通用原子能公司、美国陆海空三军各自的研究实验室也广泛参与了美国电磁炮技术的研究、设计与实验工作。

为了促进电磁发射技术理论和工程技术的提高,美国陆军军备研究和发 展司令部及国防高级研究计划局,1980 年召开了第一届电磁发射技术讨论会,并允许其它国家参加,具有一定的国际性。以后每隔 2~3 年召开一次,论文的数量和质量逐步增长和提高,最近的一次是 2010 年在比利时召开的第 15 届讨论会。欧洲各国也建立了“欧洲电磁发射技术讨论会”,第一届于 1988 年在荷兰召开。1997 年起,两个会议合并举行,成为观察当今国际电磁发射技术发展的窗口。

3 国外电磁炮武器化发展现状

进入本世纪后,电磁炮技术实用化和武器化是关注的重点,特别是美国军方出台了一系列有关电磁炮技术发展的国防政策和国防预研计划,对电磁炮的供电电源小型化、电磁脉冲功率传输飞航导弹 2011 年第 10 期

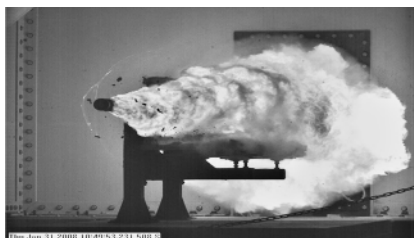


图2 美国海军 32MJ(总储能,下同) 高能电磁轨道炮发射试验中弹丸出膛及高速飞行击中靶板

和转换技术、轨道炮导轨与电枢(即电磁炮弹丸)的设计等关键课题进行了深入研究,推动了电磁炮在陆基和海基武器领域中的应用,并进行了一系列接近实战化指标的演示验证实验。从公开报道看,美国在此领域投入较多、进展较快,技术始终处于世界领先水平,研制的电磁炮已能将轻质弹丸加速到 $5\text{ km/s} \sim 9\text{ km/s}$ 、 $1\text{ kg} \sim 2\text{ kg}$ 弹丸加速到 $2\text{ km/s} \sim 4\text{ km/s}$,而且实现了连发设计,预计 2010—2020 年间可形成电磁轨道炮武器装备。

美国陆军计划以电磁炮承担自行反坦克武器、远程压制武器和防空武器的作用。为避免弹丸在空气中飞行产生严重烧蚀,一般控制初速在 4 km/s 以下,但这也达到了常规火炮初速的 $2 \sim 3$ 倍。1999 年美国陆军研究实验室制定了一项 6 年的电磁炮研究计划,分两个阶段。第一阶段主要研究脉冲电源、电磁发生器、弹丸技术和系统集成基础,第二阶段于 2003 年开始,制造一门结合第一阶段研究成果的试验样炮。该炮于 2005 年开始试验,炮长不超过 6 m ,可将 2.5 kg 的弹丸加速到 2.5 km/s 。根据报道,美国陆基电磁发射技术在大气中飞航导弹 2011 年第 10 期

发射精度 0.7% ,速度射向精度 0.003° 。

2003 年美国海军进行了电磁轨道炮发射试验,系统尺寸是未来原型机的 $1/8$,弹丸出口速度马赫数 6,动能 7.25 MJ 。

2007 年英国 BAE 公司向美国海军提供了一门 32MJ 试验型电磁炮,此外美国原子能公司也在研究电磁炮作为海军的候选方案。2008 年 1 月 31 日美国海军水面作战研究中心用该炮进行了一系列实验,电源总储能 32 MJ,以 10.68 MJ 的出口动能发射了重 $3.35\text{ kg} \sim 3.36\text{ kg}$ 的铝弹,出口速度 2.5 km/s ,动能 10 MJ 。



图3 高速摄像机拍下电磁炮弹丸发射瞬间

2010 年 12 月 10 日,美国海军宣布成功进行了新一轮电磁炮试验。试验中弹丸质量 10.4 kg ,炮口速度达 2.5 km/s ,动能为 33 MJ ,是上一次测试的 3 倍,这

表明电磁轨道炮距离实用又近了一步。

美国海军计划 2015 年进行全尺寸电磁炮试验,并计划在 2018 年开始装备未来的 DD(X) 驱逐舰,该炮的技战术指标为:电源能量 200 MJ ,炮管长 12 m ,射速 $6 \sim 12$ 发/分,以 2.5 km/s 速度发射 20 kg 弹丸,飞行质量 15 kg ,最大射程 360 km ,命中精度小于 3 m (末端制导),初始动能为 63 MJ ,命中目标时动能为 17 MJ 。

此外,美国空军还在演示 90 mm 口径电磁轨道炮,已经能将 6 kg 弹丸以 2 km/s 发射出去。同时,还正在研制以 400 kW 燃气轮机和单极发电机为电源的电磁炮,炮管长 7.5 m ,射速 500 发/分。美国国防部和空军联合主持一项天基动能武器研究计划——电磁轨道系统,安装在模拟空间环境真空室中的电磁炮发射小型弹丸速度已达 80 km/s 。

4 电磁炮的关键技术

4.1 脉冲功率电源技术

电磁炮最主要的部件就是电源,它为电磁炮提供发射用的能源和功率,是电磁炮的工作动力。电磁炮的发展与电源的进步息息相关,电磁炮能否最终达到实用,主要取决于能否找到理想的电源。

电磁炮用的脉冲电源与常见的脉冲功率电源是不同的,首先考虑的是要有异常高的输出总电能。以一台 10 m 长炮管、弹丸质量 1 kg 、炮口速度 2.5 km/s 的电磁轨道炮为例,电能转换为弹



丸动能的效率假设为 30%，则需要总能量为 10.4 MJ，持续时间为 8 ms(弹丸在炮管中匀加速运动)，平均功率 1 300 MW，电流一般要求 MA 量级。若用于战术或战略用途时，考虑武器系统的机动性，电源必须具有很高的能量密度。

实验室中用于研究的小型电磁炮，要求的脉冲电源功率不大，且无机动性要求，对电源体积和质量无严格要求。因此，用高压电容器组作为储能部件完全可以满足要求。目前几乎所有的实验室中电磁炮均以电容器为电源，即使美国现在正在研究和试验的武器化舰载电磁轨道炮原理样机，也是以高压电容器为驱动电磁发射装置的直接电源。



图 4 美国海军 32MJ 电磁轨道炮电源系统

高压脉冲电容器是利用电极间电介质在电场作用下产生极化效应存储电场能量的，因此，开发具有高介电常数和高击穿场强的新型电介质材料是提高储能密度的唯一途径。美国使用聚合物薄膜的高压电容器储能水平已达到 3 kJ/kg。此外，20 世纪 70 年代出现的双电层电容，虽然能量密度目前可达 11 kJ/kg，但快速放电后残余相当多的能量。因

此，目前其实际使用效率并没有普通静电电容器高。

应用于军事领域的轨道炮应该具有很高的能量密度，造价要尽可能低，显然电容器很难满足此方面要求。国外其它类型脉冲功率电源的研究主要集中在单极脉冲发电机、磁通压缩发生器、补偿脉冲交流发电机、电感储能装置等电能快速转换装置方面。电磁炮的电源问题一直是阻碍电磁炮实用化的主要因素。现有的技术水平下电容器似乎是电磁炮电源的唯一选择，也限制了电磁炮目前只能应用在舰载武器和陆基固定武器系统这一类对系统规模限制不大的场合。但各国还在积极改进现有的电源技术，寻求新的高功率脉冲电源，如最近提出的超导电感储能技术等。

4.2 导轨技术

导轨与电枢的形式决定了电磁炮的发射性能和效率。

电磁炮在发射弹丸时，通过两条导轨引入电流通过电枢，并产生强磁场推动电枢加速。导轨之间的反向电流产生的磁场，除了推动弹丸前进外，也相互作用产生强烈的排斥力。因此，导轨不但要求导电系数要低，还需要有足够的强度和刚度。目前大多数电磁炮采用复合结构导轨炮管：内层导电部分采用电阻低的铜或铜合金，绝缘外层由高强度聚合物与钢制外壳约束结构组成，这就是为何目前电磁炮发射装置笨重的原因。

电枢在导轨间高速飞行时，一方面要保证电枢与导轨良好的电接触，另一方面电枢在导轨上

滑动产生磨损或烧蚀。因此，电枢和导轨的材料选择至关重要。国外对各种材料的大电流传导、滑动磨损和等离子体烧蚀特性进行了深入研究，并用多种设计和技术手段提高炮管的寿命。

电源提供的大电流需经过导轨导向电枢。因此，导轨上产生的焦耳热损失也不可忽视，必要时需要有合适的冷却结构。另外，目前还发展有分段供电的电磁炮：导轨上分布多个用脉冲导通开关控制的大电流导入点，电枢在炮管中飞行经过某个导入点时，对应的脉冲开关导通，电流直接从导入点接入导轨，减少起导电作用的导轨长度，降低电能热损耗和炮管发热量。

4.3 弹丸与电枢技术

电磁炮的弹丸又称电枢，是电磁炮的关键部位之一。“电枢”的名词来源于直流电动机，其作用是将电磁能转换成动能。轨道炮用的电枢主要有固体电枢、等离子体电枢和混合电枢等。

固体电枢是最简单的电枢，早期轨道炮实验均采用这种电枢。如果设计合理，可在速度极限范围(1 km/s ~ 3 km/s)内使用。随着大口径电磁炮的发展，这种电枢在战术电磁炮上有着广泛的应用前景。如美国海军的 32 MJ 电磁轨道炮，根据公布的高速摄像资料对弹丸形态的分析，其采用的就是固体电枢。

电枢与导轨高速摩擦和产生焦耳热，电枢与导轨接触面间可能会因金属熔化而产生液态金属。若电枢到达炮口前金属间接触失败，接触电阻将急剧升高，

飞航导弹 2011 年第 10 期

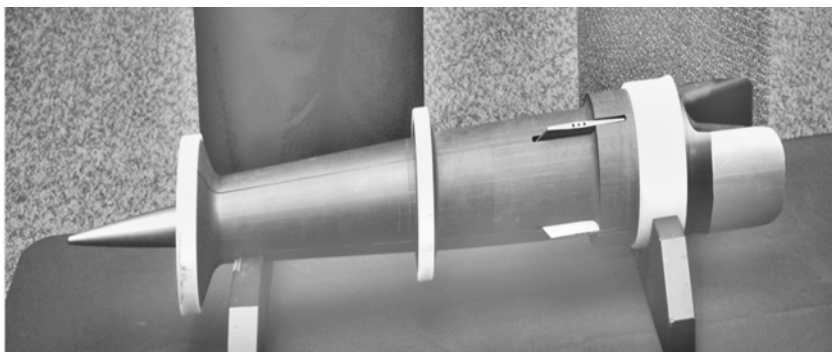


图5 美国发展的电磁炮用尾翼稳定固体电枢(弹丸)

用多个储能器时,各储能器电流的馈入时间必须控制精确。因此,耐高压和大电流的断路/导通开关是有效控制电源对电磁炮馈电输入的必要部件。目前正在大力发展的是固体开关,特别是半导体晶闸管开关,能承受很大导通电流,可方便的控制输出电压,并能在很短时间内重复转换状态。

固体电枢就转变为混合电枢:电枢的主体是金属,而与导轨接触的是等离子体。混合电枢工作不太稳定,实际很少使用。

当电流从一个导轨完全通过等离子体流向另一个导轨时,电枢为等离子体电枢。采用固体电枢的电磁轨道炮速度不超过5 km/s,而且导轨的滑动剥离现象严重,而等离子体电枢可达到更高的炮口速度,目前多数超高速小口径电磁炮都是采用等离子体电枢的。但这种电枢在导轨间运动时也会造成导轨表面的烧蚀,滞留在后膛的等离子体往往产生电流旁路分流总电流,从而减少作用于载荷上的推力。

4.4 电能转换与大电流开关网络技术

脉冲功率电源装置上储存的能量要以合适的方式转换成与电磁炮负载相匹配的能量形式,即要有合适的电流、电压、持续时间等。为充分发挥轨道炮炮管的长度,最理想的供电形式是恒

流源。电感型脉冲电源输出特性接近恒流源,只要经过合适的变压装置就可直接驱动电磁炮。而电容型脉冲电源输出电压和电流随时间呈衰减,但可采取多级放电、电感中间储能等方式维持驱动电流的基本不变,提高驱动效率。



图6 美国海军32MJ电磁轨道炮电源触发开关群

脉冲功率电源涉及大电流、高电压技术,其最基本的要求是要在电枢后面的炮管某点或若干点馈入合适的电压电流。对于使用单个储能器的后膛馈电轨道炮,电流馈入相对简单。但当使

5 结束语

虽然电磁炮的原理相对简单,但就目前国外发展水平看,还存在着驱动电源体积质量过大、发射装置笨重、炮管烧蚀严重等一系列有待突破的技术问题。然而,巨大的炮口动能、极高的速度和超远距离的射程,使得电磁发射技术和电磁炮在军事领域中有着光明的前景。随着相关技术的进一步发展,电磁炮必将走出实验室,迈向高技术主导的现代战场。

参考文献

- [1] 王莹、肖峰,电炮原理,北京:国防工业出版社,1995
- [2] 王莹,Marshall. 电磁轨道炮的科学与技术. 北京:兵器工业出版社,2006
- [3] Select papers From 14th symposium on electromagnetic launch technology. IEEE, 2008
- [4] 新概念武器编委会,新概念武器. 北京:航空工业出版社,2009