

# 电磁发射技术\*

马伟明,鲁军勇

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430033)

**摘要:**电磁发射技术是未来发射方式的必然发展趋势。分析了电磁发射的原理和技术特点,研究了电磁弹射、电磁轨道炮、电磁推射三个技术分支的国外发展情况,概述了电磁发射的关键技术,并依此提出了发展思路及电磁发射技术的推广应用前景。

**关键词:**电磁发射;电磁弹射;电磁轨道炮;电磁推射

**中图分类号:**TM832 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)06-001-05

## Electromagnetic launch technology

MA Weiming, LU Junyong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Electromagnetic launch technology is an inevitable trend among methods of launch in the future. The principle and technology characteristics of electromagnetic launch is analyzed, three branches of electromagnetic launch technology development overseas in electromagnetic ejection, electromagnetic railgun and electromagnetic pushing were studied, and the key technology of electromagnetic launch was summarized. Furthermore, the development strategy and the extension application prospect of electromagnetic launch technology was proposed.

**Key words:** electromagnetic launch; electromagnetic ejection; electromagnetic railgun; electromagnetic pushing

电磁发射是一种全新概念的发射方式,电磁发射技术在军事和民用领域都有着巨大的潜在优势和广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

将目标物体加速到更高的初速度是人类一直以来不懈追求的目标。在冷兵器时代,人类利用机械能来抛射物体,而后,随着火药在我国的发明,人类开始借助化合物燃烧或爆炸时产生的能量来完成目标物体的发射。化学能的应用使得发射目标的初速度从每秒几十米飞跃至每秒上千米,战争也由此进入了热兵器时代。然而科技的发展远未止步于此,20世纪70年代末,澳大利亚国立大学的科研人员利用一台大型的单极发电机,成功地将一枚质量为3 g的聚碳酸酯弹丸加速到5.9 km/s<sup>[3]</sup>,完美证实了电磁发射技术在超高速发射领域所具备的无可比拟的技术优势<sup>[4]</sup>。

发展到今天,电磁发射装置的种类已经很多,其中技术较为成熟的有电磁弹射、电磁轨道炮、电磁推射等<sup>[5]</sup>。

## 1 概述

### 1.1 电磁发射技术原理

电磁发射技术是机械能发射、化学能发射之后的一次发射方式的革命,利用电磁力(能)推进物体到高速或超高速的发射技术<sup>[6-7]</sup>。它通过将电磁能变换为发射载荷所需的瞬时动能,可在短距离内实现将克级至几十吨的负载加速至高速,可突破传统发射方式的速度和能量极限,是未来发射方式的必然途径。图1为电磁发射装置系统构成图,它由脉冲储能系统、脉冲变流系统、脉冲直线电机和控制系统四部分组成,发射前通过脉冲储能系统将能量在较长时间内蓄积起来,发射时通过将脉冲变流系统调节的瞬时超大输出功率给脉冲直线电机,产生电磁力推动负载至预定速度,控制系统实现信息流对能量流的精准控制。

\* 收稿日期:2016-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51522706);国家部委基金资助项目(613262)

作者简介:马伟明(1960—),男,江苏镇江人,中国工程院院士,博士,博士生导师,ma601901@vip.163.com

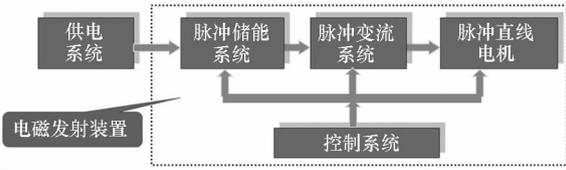


图 1 电磁发射装置组成

Fig. 1 Composition of electromagnetic launch system

### 1.2 技术分支

按照发射长度和末速度的不同,电磁发射技术可分为电磁弹射技术(发射长度百米级,末速度可达100 m/s),电磁轨道炮技术(发射长度十米级,末速度可达3 km/s),电磁推射技术(发射长度千米级,末速度可达8 km/s),三种技术的基本原理相同,涉及的具体关键技术有一定差别,但总的技术可概括为高能量密度储能技术、大容量功率变换技术、大功率直线电机技术和新型网络控制技术,如图 2 所示。

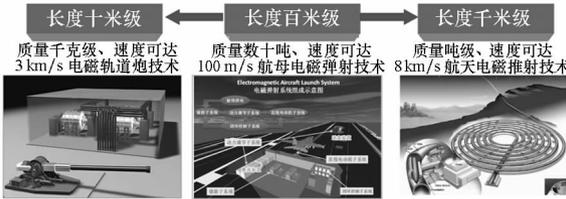


图 2 电磁发射技术分支

Fig. 2 Branches of electromagnetic launch technology

### 1.3 电磁发射技术特点

电磁发射技术是随着材料技术、电力电子器件、高性能控制技术而取得重大进展的一种发射技术,具有“更高、更快、更强”三种典型特征。

更高,首先指的是发射速度高,可超越化学能发射的速度极限,速度可从100 m/s到8 km/s,传统火药仅1 km/s以下;其次是发射效率高,理论效率可达50%,传统发射方式如蒸汽弹射仅为4%~6%;最后是有有效载荷比大,推动负载的动子一般为铝制结构。

更快,首先指的是启动时间短,从冷态到发射仅需几分钟;其次是发射间隔短,可以在数秒内实现重复发射;最后是保障要求低,对辅助配套设施要求低,仅需一定充电功率和少量冷却水。

更强,首先指的是发射动能大,电磁弹射可达120 MJ,航天推射可达千兆焦,电磁炮动能毁伤能力强;其次是发射负载可变,可灵活调节电流实现不同载荷发射;最后是持续作战能力强,可靠性

高,可维护性好,操作维护人员少。

## 2 国外发展现状分析

### 2.1 电磁弹射技术发展现状

航母电磁弹射装置是目前最先进的飞机起飞装置,它不但适应了现代航母电气化、信息化的发展需要,而且具有系统效率高、弹射范围广、准备时间短、适装性好、控制精确、维护成本低等突出优势,是现代航母的核心技术和标志性技术之一<sup>[8-10]</sup>。美国将其视作实现“空海一体战”的利器和领跑世界航母技术的关键,已于2014年配备在“福特号”航母上<sup>[11]</sup>。电磁弹射技术应用于航母,将显著提升航母的综合作战能力,滑跃和传统弹射类型的航母将难以对电磁弹射航母构成实质性威胁。英国“威尔士亲王号”航母也将改装电磁弹射器,俄罗斯、印度新一代航母方案也将采用电磁弹射方案<sup>[12]</sup>。

### 2.2 电磁轨道发射技术发展现状

自从20世纪80年代世界再次掀起电磁轨道炮研究热潮以来,欧美海军均认为这种新概念武器将最先应用于海军部队,这是因为现有科技条件下储能电源体积过于庞大,而海军战舰具有宽敞的作战平台,并具有良好的发配电系统,便于提供发射时所需的高功率脉冲电源。特别是近年来舰船综合电力技术的应用,可将全舰的能量集中调配使用,能够为作战平台搭载舰载电磁轨道炮提供行之有效的技术途径。目前,美国海军电磁轨道发射水平代表了当今世界电磁轨道发射的最高水平,分别于2008年、2010年进行了10 MJ和33 MJ电磁轨道炮试验,实现了10 kg射弹初速达2.5 km/s<sup>[13-14]</sup>。2013年,美国解决了非连续发射条件下的轨道抗烧蚀问题<sup>[15-16]</sup>,预计将于2025年左右在濒海战斗舰、DDG51及DDG1000上装备不同能量等级的舰载电磁轨道炮<sup>[17]</sup>。

### 2.3 电磁推射技术发展现状

电磁发射成本低、操控安全、适应性强、能量释放易于控制、可重复快速发射等优点,为快速、低成本地向太空投送小卫星和物资提供了新的思路<sup>[18-21]</sup>。20世纪80年代,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Agency, NASA)开始进行电磁线圈推射技术的概念性研发工作<sup>[22-23]</sup>。

1980年,美国的研究人员在威斯汀豪斯研究和发展中心用电磁炮成功地发射了一颗质量为317 g的弹丸,其飞行速度为4200 m/s。NASA尝

试修建一个长 700 m、仰角 30°、口径 500 mm 的电磁线圈巨炮,将 2000 kg 的火箭加速到 4000 ~ 5000 m/s,推送到 200 km 以上的高度,使用这个系统可重复发射小型卫星或者为未来兴建大型近地空间站提供廉价的物资运输。1990 年初,美国 Sandia 国家实验室设计了一种线圈型电磁发射装置,由 9000 级驱动线圈组成,发射装置长 960 m,倾角 25°,计划将 600 kg 的电枢和 1220 kg 的飞行器加速到 6 km/s,加速度高达 2000g<sup>[24]</sup>。目前,NASA 正在开展工程应用前期论证,研究“电磁+火箭”复合发射方式,已看到初步应用前景。

### 3 电磁发射关键技术

电磁发射技术是电磁场理论的应用技术,它利用电磁力对载荷进行加速发射。与所有发射系统一样,要实现电磁发射,必须具备脉冲直线电机、发射体、高储能密度和高功率密度脉冲电源(能源)、控制系统四大部分,因此,电磁发射技术方向集中在脉冲直线电机技术、发射体技术、脉冲电源技术、网络控制技术、电磁发射总体技术等方向。

#### 3.1 脉冲直线电机技术

脉冲直线电机是指提供可控驱动磁场,并将一定质量的物体发射到一定速度的装置。可承载电流能力:数万安培至数兆安培量级;出口速度:依据发射质量大小,在每秒几十米到十千米之间。主要形式有多相行波直线电机、直线直流电机、多级脉冲线圈发射电机等类型,其关键技术主要包括:多段初级直线电机设计技术、长行程直线电机串联分段供电与开断技术、连续发射下电机冷却技术、轨道抗烧蚀技术、不同高强度金属材料复合工艺、多物理场强耦合建模技术、强磁场与应力冲击条件下的定子线圈成形技术、定子线圈同步放电技术等。

#### 3.2 发射体技术

发射体是发射器加速的对象,能够承载强电流,其承载的强电流与静态或交变磁场相互作用产生较强电磁力而致使其高速运动。发射质量  $10^{-3} \sim 10^4$  kg 量级。其主要技术包括:高强度直线电机定子结构设计技术、超高速一体化制导弹丸技术、一体化弹丸集成与分离技术、高效动能毁伤技术、强感应电流及轻量化定子线圈技术、超高速运动体稳定悬浮技术等。

#### 3.3 高储能密度、高功率密度脉冲电源技术

脉冲电源需要瞬时给直线电动机提供用于适

应驱动磁场要求和时序的能量,具备提供稳态或瞬态电流的能力,具有高功率、大电流连续脉冲输出能力,脉宽毫秒至秒量级。其主要技术包括:混合储能技术、高能量密度惯性储能技术、飞轮能量释放机电动态控制技术、大功率电能变换技术、高能量密度长寿命脉冲电容储能技术、重复频率快速开断技术、脉冲成形与波形精确控制技术、脉冲功率绝缘介质技术等。

#### 3.4 网络控制技术

网络控制是发射系统的顶层“大脑”,负责信息处理及指令下达,具有可靠性高、信息量大、实时性强和鲁棒性高等特点。由控制网、数据网和健康网组成,实现对整个发射系统的监控,并实现数据资源共享,及时分析、排除运行过程中出现的故障,实现系统的功能检查与故障诊断、系统测试与参数设定、工作状况的自动调节与监控、动静态参数的自动测量与处理、测量结果的管理与检索,并与舰船数据系统连接,接受发射公告和气象信息,下达发射参数等功能。其主要技术包括:底层的 OPC 通信技术及 TCP/IP 数据实时交互技术、全系统健康诊断与网络化监测技术、发射流程设计与网络化总体集成技术、全系统控制策略与网络化控制技术等。

#### 3.5 电磁发射系统总体技术

在总体需求、任务使命、体系结构、顶层规划牵引下,研究电磁弹射、电磁轨道发射、电磁推射等应用相关的总体设计技术。其主要技术包括:电磁发射系统与应用平台适应性技术、电磁发射武器系统技术、强电磁环境下的电磁兼容与安全防护技术等。

## 4 发展思路

发展电磁发射技术,并将其成果应用于电磁弹射、电磁轨道炮、电磁推射等,实现舰载武器高效发射能力、中近程防空反导能力、超远程精确打击能力及作战快速保障能力。

#### 4.1 电磁弹射技术

电磁弹射系统利用直线电机可以灵活地控制电磁推力,在预定的距离和所允许的最大加速度条件下推动各型飞机加速至起飞速度。电磁弹射潜在应用方向可考虑在两个方面:一是舰载机(包括有人机和无人机)弹射,二是隐蔽短跑道快速起飞<sup>[25]</sup>。舰载机电磁弹射装置的使用,可降低飞机起降对跑道长度的要求,实现舰载机快速投送,提高航母综合作战能力。电磁弹射系统在紧

急条件下可以快速部署野外机场或隐蔽跑道,提高地面飞机的生存力。

发展重点:进行高功率密度、高能量密度的惯性储能技术研究,优化设计电能变换系统,发展高效率、高可靠性、强抗冲击性、高灵敏度直线电动机;在此基础上,实现电磁弹射技术闭环控制。开展电磁弹射系统研究,通过研制工程样机来攻克满足工程应用的关键技术、接口技术、电磁兼容性、实机弹射试验等,实现航母大型飞机弹射装备的应用。

## 4.2 电磁轨道炮技术

将电磁发射技术用于常规兵器,由于可产生更高的初速和更大的炮口动能,既可增加射程,又能缩短打击时间,是增强未来常规武器战术作战能力的有效手段之一,其主要应用前景为远程精确打击、中近程防空反导、反临近空间目标等。

发展重点:鉴于舰艇具有强大的电能和宽阔的作战平台,结合海军综合电力技术的研究进展,进行储能、舰炮的舰船适装性集成,实现发展大口径、远程打击的电磁炮武器系统目标。在大口径、远程打击的电磁发射武器系统电源与发射技术取得突破的基础上,考虑小口径、高射速的电磁发射,实现战术能力的增强,并依据不同的作战使用需求,选择不同的能级、长度、储能规模。

## 4.3 电磁推射技术

电磁推射技术是利用电磁发射技术实现空间物资快速投送或小型卫星等航天器的快速发射,可实现航天器重复发射,大大降低发射成本。电磁推射系统的应用,能够快速、低成本、安全地向空间发射卫星和运送物资,可为未来空间站等空间平台提供燃料或保障物资。

发展重点:开展电磁推射总体技术论证与研究,进行纯电磁发射、火箭与电磁复合发射等方案研究及关键技术梳理;在此基础上,研究超高速同轴悬浮线圈推进技术,分段供电电源技术、同步控制技术,发展感应供电和其他非接触供电技术。研制缩比样机进行关键技术的验证和载荷试验研究,逐步具备工程应用技术能力。

## 5 推广应用前景

### 5.1 储能技术

电磁弹射技术所用的飞轮储能技术,在军事领域,可应用于航母、高能武器、航天航空设备、军用战斗车辆、大型水面舰艇、新型潜艇等舰船;在民用领域,可以做成“绿色”的飞轮电池,运用到

大型牵引机车、家用轿车、不间断电源等上。

电磁轨道炮技术所用的高比能锂电池储能技术可推广应用于其他民用场合,如纯电力或混合动力车辆、储能电站等;长寿命脉冲电容储能技术可用于民用 X 光机等需要瞬时超大功率等场合。

### 5.2 脉冲电流技术

数十甚至数百兆瓦的变换器技术是强弱电混合、机电一体化的综合性技术,已经渗透到电气传动领域的所有技术部门中。在军事上,该技术可应用于航母、大型水面舰艇、新型潜艇等舰船,特别是新一代舰船综合电力系统中的区域配电、电力推进的变频调速装置上,还可应用于雷达发射器、高能脉冲武器、分布式独立电源供电系统等。在民用方面,可运用到电力拖动、柔性直线输电系统、应用电源系统、电力电子变压器、变速发电机组等。

### 5.3 直线电机技术

直线电机技术在军事方面可用于鱼雷发射器、导弹发射器、火箭炮增程器、航母舰载机起降运输机、潜艇潜望镜升降装置等需直线运行的场合。在民用方面的煤炭输送、空调压缩机、矿井提升机、直线电梯、大型冲压机、过山车、直线电机地铁等诸多领域,该项技术也有广阔的应用前景。

可见,电磁发射技术可以电磁弹射技术引领其他分支发展,最终整体发力,形成发射方式的革命,并实现军民融合发展,带来多方面的效益。

## 6 结论

按照发射长度和出口末速的不同,将电磁发射技术划分为电磁弹射、电磁轨道炮、电磁推射三大分支。在国外研究水平和发展现状的基础上,总结了相关的关键技术,提出了合理的发展思路,并进一步指明了电磁发射技术广阔的推广应用前景,为我国电磁发射技术的发展提供了重要参考。

## 参考文献 (References)

- [1] Fair H D. Progress in electromagnetic launch science and technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 93-98.
- [2] McNab I R. Large-scale pulsed power opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(5): 1118-1126.
- [3] Rashleigh S C, Marshall R A. Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(4): 2540-2542.
- [4] Marshall R A, Wang Y. Railguns: their science and technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [5] 王莹, 肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社

- 社, 1995.
- WANG Ying, XIAO Feng. The principle of electrical gun[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [6] 王莹. 电发射技术概论[J]. 电气应用, 2003(10): 94-97.
- WANG Ying. An introduction to electric launch technology[J]. Electrotechnical Application, 2003(10): 94-97. (in Chinese)
- [7] 王莹. 电磁发射技术综述[C]//电气技术发展综述, 2004: 66-72.
- WANG Ying. Overview of electromagnetic launch technology[C]// Overview of electrical technology development, 2004: 66-72. (in Chinese)
- [8] Doyle M R, Samuel D J, Conway T, et al. Electromagnetic aircraft launch system-EMALS[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 528-533.
- [9] Fair H D. Guest editorial the past, present, and future of electromagnetic launch technology and the IEEE international EML symposia[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1112-1116.
- [10] 潘镜芙. 国外航空母舰的发展和展望[J]. 自然杂志, 2007, 29(6): 315-321.
- PAN Jingfu. The review and prospect of aircraft carriers[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(6): 315-321. (in Chinese)
- [11] 刘相春. 美国“福特”级航母“一站式保障”技术特征和关键技术分析[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(6): 1-5.
- LIU Xiangchun. Technical features and critical technologies for“Pit-Stop” aircraft servicing adopted by Ford class aircraft carriers[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(6): 1-5. (in Chinese)
- [12] 朱英富, 熊治国, 胡玉龙. 航空母舰发展的思考[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 1-7.
- ZHU Yingfu, XIONG Zhiguo, HU Yulong. On the development trends of aircraft carriers[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 1-7. (in Chinese)
- [13] US Navy. Navy rail gun test Dalgren, VA. 2006 & 2008 [EB/OL]. [2016-04-01]. [http://www.eugenelesslover.com/VIDEOS/Rail\\_Gun.html](http://www.eugenelesslover.com/VIDEOS/Rail_Gun.html).
- [14] Fein G. Navy sets new world record with electromagnetic railgun demonstration[EB/OL]. [2016-04-01]. [http://www.navy.mil/submit/display.asp?story\\_id=57690](http://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=57690).
- [15] Zhao L, Su X B, Pan Y F. Research on reliability and lifetime of solid insulation structures in pulsed power systems[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(1): 165-172.
- [16] Wild B, Schuppler C, Alouahabi F, et al. The influence of the rail material on the multishot performance of the rapid fire railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 2095-2099.
- [17] 张世英, 裴桂艳, 张俊. 美国海军电磁轨道炮研发计划评析[J]. 现代舰船, 2011(9): 46-49.
- ZHANG Shiyang, PEI Guiyan, ZHANG Jun. Comments on the research on the development plan of the United States navy electromagnetic rail gun[J]. Modern Ships, 2011(9): 46-49. (in Chinese)
- [18] Schroeder J M, Gully J H, Driga M D. Electromagnetic launchers for space applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(1): 504-507.
- [19] Kaye R, Turman B, Aubuchon M, et al. Induction coilgun for EM mortar[C]//Proceedings of IEEE International Pulsed Power Conference, 2007: 1810-1813.
- [20] Fair H D, Coose P, Meinel C P, et al. Electromagnetic earth-to-space launch[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(1): 9-16.
- [21] Meinke R B, Kirk D R, Guterrez H. Electromagnetic launching for affordable agile access to space [R]. Electromagnetic launching for affordable agile access to space, 2006.
- [22] Mongeau P, Milliams F. Helical rail glider launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, 18(1): 190-193.
- [23] Driga M D, Weldon W. Induction launcher design considerations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(11): 153-158.
- [24] Lipinski R J, Beard S, Boyes J, et al. Space applications for contactless coilguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 691-695.
- [25] Lu J Y, Ma W M. Research on two types of linear machines for covert airstrip electromagnetic catapult [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 105-109.