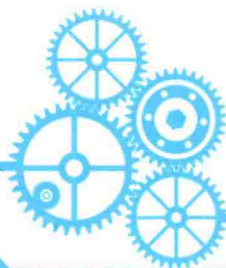


“十二五”国家重点出版物出版规划项目

新概念动能武器系列丛书



电磁感应线圈炮 原理与技术

向红军◎编著

兵器工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
新概念动能武器系列丛书

电磁感应线圈炮 原理与技术

向红军 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书共分 11 章。第 1 章主要介绍了电磁感应线圈炮的研究背景、发展历史、特点分类、技术现状及其发展趋势；第 2 章主要介绍了单级感应线圈炮、多级感应线圈炮、含续流支路感应线圈炮的工作原理和静态特性；第 3 章主要介绍了感应线圈炮的分析方法，包括基本参数的求解方法和有限元软件使用方法；第 4 章主要介绍了感应线圈炮的磁场、涡流场和电磁力基本特性；第 5 章主要介绍了不同电枢速度下，电枢感应电流和电磁力的变化特性以及电枢的加速特性；第 6 章主要介绍了感应线圈炮的触发策略和具体的实现方法；第 7 章主要介绍了感应线圈炮的发射效率分析和影响发射效率的因素；第 8 章主要介绍了不同电枢初速下感应线圈炮主要参数的动态特性；第 9 章主要介绍了基于正交试验法的感应线圈炮参数灵敏度分析及优化设计方法；第 10 章主要介绍了感应线圈炮的测控原理和基本参数测试方法；第 11 章为展望。

本书可供从事电磁发射技术研究的科研工作者阅读，并对高等院校、科研院所的博士生、硕士生与本科生也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁感应线圈炮原理与技术 / 向红军编著. — 北京:
兵器工业出版社, 2015. 12
(新概念动能武器系列丛书 / 李治源主编)
“十二五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5181-0172-6

I. ①电… II. ①向… III. ①电磁炮 IV. ①TJ866

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第290958号

出版发行：兵器工业出版社

发行电话：010-68962596, 68962591

邮 编：100089

社 址：北京市海淀区车道沟 10 号

经 销：各地新华书店

印 刷：北京圣夫亚美印刷有限公司

版 次：2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑：林利红

封面设计：揽胜视觉

责任校对：郭 芳

责任印制：王京华

开 本：710×1000 1/16

印 张：12.75

字 数：230 千字

定 价：48.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

《新概念动能武器系列丛书》

编审委员会

主 编：李治源

副主编：胡金锁

顾 问：王 莹

编 委：李小鹏 向红军 赵科义 张明安

张 倩 张亚东 周国印 陈庆昌

褚庆国 胡森哲 雷 彬 李 兵

李 超 李惠元 林秀梅 吕庆教

王育维 杨 帆 俞海燕 辛建国

石志彬 王晓方 卢志刚 李金胜

樊向武 金 灿 王志刚

丛书序言

人类的军事科技发展历史几乎与人类的历史一样漫长，在漫长的发展过程中，人们总是将最先进、最前沿的科学技术首先应用到军事领域，创造出各种各样的武器。从最早的石头、标枪、弓箭开始，直到如今门类齐全、类型众多的新概念武器。

武器的最终目的是杀伤敌人、毁伤目标。从目前的毁伤技术来说，尽管定向能（高功率微波武器和强激光武器）、声能（次声和噪声武器）、生物能（基因武器）、化学能（化学武器）和核能（核武器）等新型毁伤技术不断发展，但受到国际政治、战场环境、作战对象和毁伤效能等各方面的影响，尚难以广泛应用于军事行动；而动能毁伤以其针对目标广泛、毁伤范围可控、毁伤时效快速等特点，使得动能武器成为武器装备发展的主流。因此，以动能毁伤为目标的各类新概念动能武器受到了世界各国的重视也成为了目前新概念武器研究领域的热点，特别是以电能为发射能源的电磁发射动能武器技术方兴未艾。20 世纪 80 年代，电磁轨道炮首次实现了超高速发射，经过不懈努力，电磁轨道炮的最大炮口动能已超越现役的大口径火炮，高功率脉冲电源、轨道烧蚀和刨削等关键技术也已基本突破，随着高功率脉冲电源小型化技术、一体化弹药技术和系统集成与热管理技术的不断进步，新概念动能武器将在不久的将来率先实现军事应用。

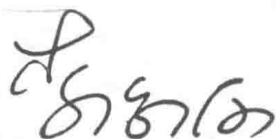
在新概念动能武器发展过程中，我国紧跟世界兵器科学发展动态，从最开始的动态跟踪、理论探索、验证试验，到今天成为国际电磁发射技术委员会中的重要成员，前后经历了 30 多年的漫长过程。多年来，几代人本着“科技强军”的理想，自力更生，艰苦奋斗，为发展我国新概念动能武器技术，增强我国国防力量做出了无私的奉献，也培育、锻炼了一支成熟的高素质队伍。同时，也可以预见，要实现新概念动能武器的军事应用，还需要继续坚持不懈的努力，克服一系列的科学难关，同时也需要一大批年轻的、杰出的人才投入这个领域，为发展我国的兵器科学而奋斗。

本丛书的编写，既是系统总结 30 多年来积累的宝贵财富，为从事新概

念动能武器研究的专业技术人员提供借鉴和参考，也可为刚进入这一领域的科学工作者提供帮助以尽快熟悉本领域的情况，在较高的起点上开展工作，也能作为与本专业有关的院校、研究所和部队的教学参考材料。

本丛书主要涵盖了电热化学发射技术、电磁轨道发射技术、电磁线圈发射（弹射）技术、电磁装甲防护技术的概述、原理、应用及相关理论与关键技术。

在本丛书的编写过程中，得到了有关单位和领导的大力帮助和支持。主要拟稿者都是本领域各单位具有扎实理论功底和丰富实践经验的学术带头人和技术骨干。经过反复审校、修改补充，本丛书终于编印出版，对参与本丛书编写、出版的所有人员在此一并表示衷心的感谢。



前 言

电磁发射技术作为继机械能、化学能发射技术之后出现的一种新型发射技术，其在军事领域的应用将推动兵器技术发生革命性变化。电磁感应线圈炮作为电磁发射技术的一种应用形式，具有其自身鲜明的特点。经过广大科研工作者的长期努力，目前已对电磁感应线圈炮的相关理论内涵、技术基础和工程实践方式都有了一定的认识。笔者作为众多从事电磁发射技术研究者中的一员，在电磁感应线圈炮研究方面有一点粗浅的认识和体会。为进一步推动电磁发射技术进步，笔者在清华大学袁建生教授的鼓励 and 帮助下，在整理、分析前人研究成果的基础上，结合自身在电磁感应线圈炮研究方面的收获，编写此书，以期为广大电磁发射技术领域的科研工作者或爱好者提供互相交流借鉴、促进提高的“引玉之砖”。

全书共分为 11 章，主要由向红军编著，赵科义参与编写第 4 章，课题组雷彬、吕庆敖、张倩、关晓存、池小平、周志广等亦有贡献，在此向他们的付出表示衷心的感谢。

本书所涉及的内容只是电磁感应线圈炮技术研究中的阶段性成果，还存在许多不完善的地方，同时由于笔者水平有限，书中难免有疏漏和谬误之处，恳请读者批评赐教。

向红军

2015 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电磁炮分类及原理	2
1.2.1 电磁轨道炮	2
1.2.2 电磁重接炮	3
1.2.3 电磁线圈炮	4
1.3 电磁炮的发展简史	5
1.4 电磁感应线圈炮技术研究现状	8
1.4.1 电枢受力与加速特性	8
1.4.2 多级触发控制技术	12
1.4.3 驱动线圈设计	14
1.4.4 感应线圈炮参数分析	17
1.5 电磁感应线圈炮发展趋势	17
1.5.1 电磁迫击炮	18
1.5.2 电磁弹射飞机	19
1.5.3 导弹电磁弹射	20
1.5.4 引信动态模拟试验	21
1.5.5 火炮电磁增程	23
第2章 电磁感应线圈炮基本原理与静态特性	24
2.1 电磁感应线圈炮基本原理	24
2.2 单级感应线圈炮工作原理及模型	27
2.2.1 等效电流环模型	27
2.2.2 电流丝模型	30
2.3 多级感应线圈炮工作原理及模型	35
2.4 感应线圈炮充放电回路基本特性	39
2.4.1 充电回路基本特性	40
2.4.2 放电回路基本特性	42
2.5 含续流支路的感应线圈炮	44

第3章 计算及分析方法	47
3.1 数值计算方法	47
3.1.1 电阻计算方法	48
3.1.2 自感计算方法	50
3.1.3 互感计算方法	55
3.2 有限元分析方法	58
3.2.1 有限元方法基本原理	58
3.2.2 Ansoft 软件使用简介	61
3.2.3 Ansoft 软件分析示例	69
第4章 感应线圈炮磁场特性	73
4.1 感应线圈炮的控制方程	73
4.2 感应线圈炮磁场及涡流场特性分析	74
4.2.1 电枢和驱动线圈同轴时的有限元分析	74
4.2.2 电枢和驱动线圈非同轴时的有限元分析	81
第5章 感应线圈炮加速特性	85
5.1 电枢感应电流特性	85
5.1.1 感生电流变化特性分析	86
5.1.2 动生电流变化特性分析	91
5.1.3 合成电流变化特性分析	92
5.2 电枢受力与反向点变化特性	94
第6章 触发策略与实现方法	97
6.1 触发策略及触发位置确定方法	97
6.1.1 考虑电枢速度的触发策略	97
6.1.2 最佳触发位置计算方法	100
6.2 不同触发位置加速效果	102
6.3 触发策略实现方法	104
6.3.1 触发位置与电枢速度的数值关系	105
6.3.2 触发策略实现中的软硬件关键技术	107
第7章 发射效率分析	116
7.1 理想发射效率与实际发射效率	116
7.2 影响发射效率的参数	120
第8章 参数动态特性	121
8.1 驱动线圈长厚比	121
8.2 驱动线圈匝数	123

8.3 电容量	126
8.4 电容电压	129
8.5 级间距离	132
8.5.1 耦合作用形式	132
8.5.2 耦合因素分析	134
8.5.3 耦合效应仿真分析	137
第9章 电磁感应线圈炮优化设计	143
9.1 优化设计方法	143
9.1.1 设计原则	144
9.1.2 设计步骤	144
9.2 82mm 线圈炮设计实例	146
9.2.1 参数灵敏度分析	146
9.2.2 参数优化	150
9.2.3 工程约束处理	152
第10章 测控与诊断技术	156
10.1 测控系统	156
10.1.1 现场总线控制系统	157
10.1.2 虚拟仪器技术	163
10.2 参数测试方法	165
10.2.1 脉冲电流的测量	165
10.2.2 充电电压测量	172
10.2.3 电枢加速度测量	174
10.2.4 驱动线圈应变测量原理	176
第11章 展望	178
11.1 电磁感应线圈炮的技术瓶颈	178
11.1.1 储能密度及规模	178
11.1.2 触发开关的适时响应	179
11.1.3 驱动线圈的强度	179
11.1.4 高过载和强磁场环境的适应性问题	180
11.2 电磁感应线圈炮相关技术研究	180
11.2.1 高温超导技术	180
11.2.2 电磁兼容技术	182
11.2.3 强磁体技术	182
11.3 我国电磁感应线圈炮研究设想	183

11.3.1 近期目标和长远规划协调发展	183
11.3.2 集中优势力量加快科研攻关	184
11.3.3 基础研究和试验验证并行不悖	184
参考文献	185

第1章 绪 论

1.1 引 言

所谓发射 (Launch), 就是在较短时间内用较大的功率把物体推进到一定速度, 在空间飞向目标。发射器 (Launcher) 是指发射物体的装置。

发射技术和人类历史是同步发展的, 在冷兵器时代, 由于科学技术的落后, 只能使用机械能发射, 例如弓箭、弩、抛石机等。机械能发射器是借助人体肌肉的力直接抛射物体或储存势能然后抛射物体的一类发射器, 是把一种机械能 (如势能) 变成另一种机械能 (动能) 的发射器。机械能发射器能量变换过程简单, 抛射物体所用的能量也原始和易得, 但它为发射提供的脉冲功率小, 因此难以把物体发射到高速度, 一般在每秒几米到几十米范围内。

后来, 随着能源的进步, 我国在 14 世纪发明了火药, 使发射技术进入到化学能发射时代。化学发射器是利用相关化学推进剂燃烧 (化学反应) 产生气体推进物体到高速度的, 其实质是利用化学能发射物体。典型的化学能发射器有火枪、火炮、火箭和冲压加速器等。化学能发射器是一种把化学能变为发射体动能的能量变换器。由于化学推进剂储能密度较高 (有时高达 55MJ/kg), 且化学反应 (燃烧) 较快, 因此化学能发射器能提供较高的功率, 能把物体发射到较高的速度, 一般达到每秒几百米到千米。与冷兵器相比, 发射物体的初速至少被提高了两个数量级。然而, 传统化学发射器 (如火炮) 由于自身的局限性, 其发射弹丸初速一般不能超过 2000m/s 。为实现弹丸高初速精确发射, 电磁炮发射技术日益得到重视。电磁炮是一种将电磁能转换为弹丸或电枢动能的发射装置。与常规的化学火炮相比, 电磁炮具有如下特点:

(1) 初速大, 射程远。电磁炮采用电能作为能源, 从理论上讲, 只要能源足够大, 就能把弹丸 (或大质量的有效载荷) 加速到超高速 ($\geq 2.5\text{km/s}$), 这是目前常规火炮弹丸难以达到的。因此电磁炮具有初速高、射程远、威力大的特点。

(2) 可实现“三无”发射, 隐蔽性好。电磁炮将电能转换为弹丸的动能, 发射过程不需要发射药、火药等含能材料, 因此在电磁炮炮口不会产生很大的噪声、烟雾和光, 可实现“三无”(无声、无烟、无光) 发射, 因此具有更好的隐蔽性和战场防护及生存能力。

(3) 可控性好。电磁炮可根据打击目标的性质和距离, 通过调整电源的储能来自由调节弹丸的初速和射程, 可控性非常好。

(4) 成本低, 后勤负担小。从发射能源的成本来看, 常规火炮的发射药产生每兆焦耳能量需 10 美元, 而电磁炮只需 0.1 美元, 而且电磁炮还可以省去火炮的药筒和发射装置, 故而质量轻、体积小、结构简单、运输及后勤保障等方面更为安全可靠和方便。

(5) 响应速度快。电磁炮的初速很高, 从发现目标到发射首发弹药击中目标所需要的时间非常短, 可以起到“首发制敌”“首发命中”的目标。

除此之外, 不同的电磁炮还具有自身的一些特点。正是电磁炮技术具有传统火炮无可比拟的技术优势, 因而被视为是继机械能到化学能的跨越式发展之后, 人类历史上发射技术的又一次革命, 成为目前国内外研究的热点。

1.2 电磁炮分类及原理

电磁炮的种类很多, 但是按照工作原理, 大体上可分为三类: 包括电磁轨道炮、电磁重接炮和电磁线圈炮。下面将分别简要介绍三种电磁炮的基本构成和工作原理。

1.2.1 电磁轨道炮

电磁轨道炮又可以分为简单轨道炮、串联增强轨道炮、分布馈电式轨道炮等。尽管轨道炮的结构不同, 但是其基本原理都和简单轨道炮相同。为此只简要介绍简单轨道炮的结构组成和工作原理。

简单轨道炮主要由一对平行的金属导轨、可以沿导轨滑动的电枢(或其他发射载荷)、高功率脉冲电源、大功率触发开关等组成, 如图 1-1 所示。电枢在两轨道之间, 根据需要, 可以选择不同的形状和金属材料。两金属导轨必须是良导体, 其材料能耐腐蚀和磨损, 且应有良好的机械强度。这种导轨常常镶嵌在高强度的复合材料绝缘筒内, 共同形成炮管。导轨的功能除了传导大电流外, 还用于导向电枢或弹丸运动, 导轨中的电流主要由脉冲功率电源提供, 电流一般可达到 10^6 A 量级。

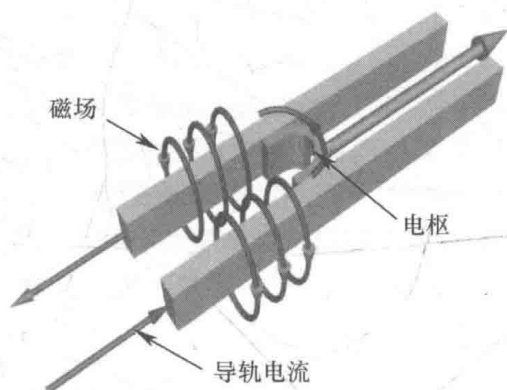


图 1-1 简单轨道炮原理结构

其工作原理主要是利用脉冲电源放电向轨道中注入脉冲大电流，从而在导轨和电枢构成的回路中产生脉冲强磁场，使得带电电枢在磁场作用下受到电磁力的驱动而被发射出去。

理论上，只要脉冲功率电源提供的电流足够大，就可以将电枢加速到非常高的速度，但由于电枢和轨道之间存在机械接触，在大电流、高温、高压、高速等条件下，轨道会产生严重的烧蚀或刨削，如图 1-2 所示。经过多次发射后，轨道的发射性能将显著下降，从而严重降低轨道炮的使用寿命，这也是制约电磁轨道炮技术一直没有得到工程化应用的关键难题之一；此外，轨道发射效率相对较低，理论上最大发射效率不超过 50%。

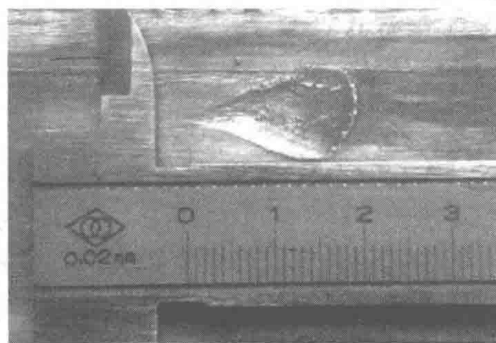


图 1-2 轨道表面的刨削损伤

1.2.2 电磁重接炮

电磁重接炮的研究始于 20 世纪 80 年代，从本质上，它是一种特殊的线圈炮，同时它是一种无管炮，发射过程中不存在过热和烧蚀现象。电磁重接炮工作原理如图 1-3 所示。电磁重接炮主要由驱动线圈、发射体和高功率脉冲电源构成。发射前，非导磁金属材料制成的发射体置于驱动线圈

某一个合适的初始位置，脉冲功率电源向驱动线圈放电产生磁场，磁力线见图 1-3，由于发射体的存在，磁力线会被截断，使其空间分布发生改变，但发射体尾部的磁力线会重新结合，弯曲的磁力线有拉直的趋势，这种拉直的力量会推动发射体向前运动。电磁重接炮的理论加速效率较高，而且发射过程中不需要炮管，电枢和载荷的形状比较灵活，因而电磁重接炮技术被认为是非常具有发展潜力的研究方向之一，但因其技术比较复杂，投入较大，系统的控制和配合较为困难，因此目前仍然处于研究的初级阶段。

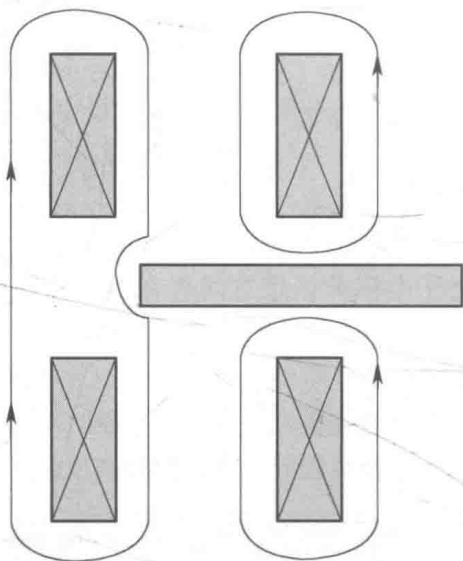


图 1-3 电磁重接炮工作原理

1.2.3 电磁线圈炮

电磁线圈炮是一种利用脉冲或交变电流产生磁行波来驱动带有线圈或电枢的弹丸的发射装置，它利用驱动线圈和弹丸线圈（电枢）间的磁耦合机制工作，本质上是一台直线电动机。电磁线圈炮的种类非常多，按照工作原理可以分为电刷换向线圈炮、感应线圈炮、磁阻线圈炮等；按照储能方式可以分为电感储能线圈炮、电容储能线圈炮、脉冲交流发电机储能线圈炮等。其中电容储能型感应线圈炮具有结构简单、电枢和驱动线圈之间无机械接触、可发射大质量载荷、发射效率高等优点，具有非常广阔的应用前景，是当前国内外研究的热点。因此以电容储能型感应线圈炮为例，简要介绍其工作原理。

电容储能型单级感应线圈炮工作原理如图 1-4 所示，主要由驱动线

圈、电容器组、触发开关、非导磁金属电枢等组成。其工作过程为：首先利用充电设备（例如充电机）对储能电容器组进行充电，使储能电容器组带有一定的电能，然后闭合触发开关，使储能电容器组对驱动线圈瞬间放电，在驱动线圈中产生脉冲大电流，并激发脉冲磁场，脉冲磁场在金属电枢中感应出电流，如果电枢的初始位置合适，感应电流在磁场作用下，会使电枢受到电磁推力的作用而加速运动。

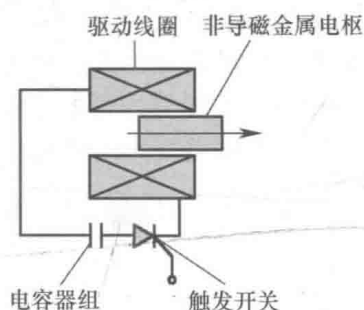


图 1-4 电容储能型单级感应线圈炮工作原理

1.3 电磁炮的发展简史

电磁炮最早出现在 1845 年，由哥伦比亚学院的 Charles 教授采用电池供电，制作了一个小型的电磁线圈炮装置，并利用它将金属棒抛射到 20m 的地方。1901 年，挪威的奥斯陆大学的 Brikeland 获得了世界上第一个“电火炮”专利，使用线圈发射器把 500g 重的弹丸加速到了 50m/s。之后，法国、美国和英国都相继开展试验研究。但由于受到储能、材料、控制等相关技术的限制，线圈炮的研究一度陷入低潮，甚至得出了“电磁发射根本不可行”的结论。20 世纪 70 年代，在澳大利亚国立大学工作的 Marshall 博士利用单极发电机供电，采用 5m 长的轨道把 3g 的弹丸加速到了 5.9km/s，这是电磁发射技术史上具有里程碑意义的成果。至此，许多国家开始关注电磁发射技术的军事应用。1983 年，里根总统授权科学家和工程委员会论证电磁发射作为反核弹导弹的可行性，并把其列入国防关键技术。1980 年，首届电磁发射技术国际会议在美国召开，之后，每隔 1~2 年都会召开一次电磁发射技术国际会议。效仿美国，欧洲各国为推动电磁发射技术的进步，也建立了“欧洲电磁发射技术讨论会”制度，第一届会议于 1988 年 9 月在荷兰的德尔夫特召开。自 1997 年，这两个会议合并举行，电磁发射会议已成为观察当今世界电磁发射技术发展的窗口。到目前为止，已经举办了 16 届国际电磁发射技术会议，世界各国从事电磁发射技术的科研人员共聚一堂，交流电磁发射技术领域的最新成果，极大地促进了电磁发射技术的发展。1986 年，苏联利用 80 级线圈炮，将 9g 的圆筒形弹丸加速到了 1.56km/s，1993 年，美国制造一台类似的多级线圈炮，将 150g 的弹丸加速到 1km/s。

20 世纪 90 年代, 桑迪亚国家实验室设计了 50mm 口径的 40 级线圈炮试验装置, 在室温条件下, 利用 10kJ 的储能, 将 340g 的铝制弹丸发射到 406m/s, 其测试的目标是将 200 ~ 400g 的弹丸加速到 1000m/s。之后, 还相继设计了不同类型的线圈炮, 其技术指标和试验数据如表 1-1 所示。

表 1-1 桑迪亚国家实验室设计的线圈炮和试验数据

电 枢		驱动线圈		炮口初速	
直径/mm	质量/g	长度/m	加速级数	速度/(m/s)	能量/kJ
25	10	0.44	10	317	0.5
131 × 112 (方形)	139	2.3	14	1004	70
47	237	1.6	35	1000	119
140	5000	0.8	6	335	281

进入 21 世纪以来, 电磁发射技术的军事应用前景更加明确, 研究的目标更加清楚, 相关的储能、控制、大功率开关技术都得到了较快发展, 电磁发射技术研究也进入了一个新的快速发展阶段。目前, 国外开展线圈炮研究的国家有美国、俄罗斯、英国、澳大利亚等, 其中以美国的技术最为先进, 并主要集中于美国的桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratory, SNL) 和美国德克萨斯大学的高技术研究所 (Institute for Advanced Technology, IAT)。

为了将电磁线圈炮应用于“未来战斗系统”, 2007 年, 桑迪亚国家实验室基于电磁迫击炮的军事应用, 研制了 45 级的 120mm 口径的电磁线圈炮, 每个驱动线圈 15 匝 ($42\mu\text{H}$, $10\text{m}\Omega$), 由各自的电容器组按顺序激励, 每一级所存储的能量约为 160kJ。由于该炮的所有线圈都相同, 所以对电容器组的电容和电压都进行了调节 (第 1 级电容器组为 8.5mF , 第 45 级为 0.8mF), 从而使电流升压时间与电枢穿过特定线圈的时间保持一致, 通过电容和所需的储能确定了其电容器组的电压 (炮尾处为 6kV, 炮口处为 20kV), 使电容器组向驱动线圈输送 65 ~ 95kA 的电流脉冲。通过该试验装置, 实现了将 18kg 改装后的迫击炮训练弹发射到 424m/s 的目标, 炮口动能 6MJ, 发射时间 14ms, 加速行程 2.1m, 发射效率约 22%。

同年, 美国的密苏里大学哥伦比亚分校和美国海军研究实验室对小电流、高效率、应用于中低速度的线圈炮进行了研究, 并研制了实体弹丸螺旋线圈发射器试验装置, 利用口径 40mm、长 750mm 的螺旋线圈发射器将约 500g 的弹丸发射到了 150m/s, 峰值电流为 12 ~ 14kA, 峰值电压为 400 ~ 800V, 发射效率高达 32%。