



## 电磁轨道炮及其应用

沈金华 贾浩

(1983年7月27日收到)

本文简要地介绍了电磁轨道炮的研究历史与现状,它们的基本结构与能源系统,及其在基础研究、军事与空间发射等方面的几种可能应用。

### 一、引言

电磁发射器是利用电磁力驱动物体的装置。七十年代以来,由于电磁能贮存,直线加速器,大电流开关,磁悬浮以及滑动接触的大电流传输等基础技术的发展,加速了实用电磁发射器的研究进展。

与通常的爆炸装置、空气炮和轻气炮等驱动技术相比,电磁轨道炮(电磁发射器的一种典型实用装置)驱动弹丸的速度要大得多。目前美国 LANL / LLNL\* 联合研究小组的轨道炮,发射的弹速已达  $11 \text{ Km/s}$  的水平<sup>[1]</sup>;日本东京工学院用轻气炮与轨道炮接力加速,可使弹速达到  $15 \text{ Km/s}$ <sup>[2]</sup>。研究表明,在  $1 \sim 2$  年内将大质量弹丸的速度提高到  $30 \text{ Km/s}$  没有困难<sup>[3]</sup>,而且从原理上说,这也不是极限值。因为与气炮不同,轨道炮不存在工作介质的声速限制问题。由于轨道炮能把大质量弹丸发射到极高速度,而且还能在很大范围内精确控制它,因此展示了可在科学技术的许多领域内得到广泛应用的前景。它涉及到各种武器、航天器、可控热核聚变以及工业交通上的应用。

电磁发射器的研究历史可追溯到本世纪初。但是,长期以来由于不合适的固体金属电枢设计概念,以及缺乏合适的电磁场能源,限制了实用电磁发射器的研制。

六十年代中期,随着能源技术和等离子体研究的发展,美国的 Brast 和 Sawle 首先利用等离子体弧在小口径电磁发射器上将  $31$  毫克的弹丸加速到  $6 \text{ Km/s}$ <sup>[4]</sup>。但是,研究工作并未深入下去,因此未引起注意。

七十年代,人们对电磁发射器的研究兴趣再次激起应归功于澳大利亚国立大学 (ANU) 的 Marshall 等人的工作<sup>[5]</sup>。他们在六十年代就开始研究大电流密度滑动接触装置,并在不断改进固体金属电枢的基础上成功地研究出等离子体弧电枢<sup>[6]</sup>。1978年,他们利用单极发电机作为能源建造的  $5$  米长电磁轨道炮,在等离子体弧电枢的驱动下将  $3$  克重的聚碳酸酯弹丸加速到  $5.9 \text{ Km/s}$ 。终于从实验上证明了用等离子体电枢代替固体金属电枢可以将克级弹丸加速到高速。从而推动了电磁发射器进入实用研究的时代。

在 ANU 发表了上述实验结果后,美国国防部于1978年底召集了60位科学家和工程师讨论电磁驱动方面基础技术的最新进展和发展态势,并提供资金与协调20多个科学团体和产业部门开展了多种类型的电磁发射器的理论与实验研究。一年后,理论研究结果陆续发表<sup>[7-9]</sup>;1980年1月,LANL / LLNL 联合研究小组发表了利用炸药磁通压缩发生器作能源的轨道炮实验结果。他们不仅迅速地重复了 ANU 的工作,还将塑料弹丸的速度提高到  $10 \text{ Km/s}$ <sup>[10]</sup>。1982年,又将金属弹丸发射

\* 美国洛斯·阿拉莫斯国家研究所 / 劳伦斯利弗莫尔国家研究所。

到  $10K m/s$  [11]，并解决了人们关心的发射器重复使用问题 [1]。最近，美国陆军已进行了电磁炮试验，把重284克的炮弹发射到速度约为常规火炮弹速的3倍 [12]。

据报导 [13]，苏联于1980年以前已经做了150次电磁轨道炮试验，而当时美国仅做了40次试验。最近，澳大利亚材料研究所发表了一个研究计划，准备将轨道炮用于爆轰学研究以及其它方面 [14]。

本文主要介绍电磁发射器中最简单的一种，即经典型电磁轨道炮及其可能的各种应用。

## 二、电磁轨道炮概述

目前研究的电磁发射器有好几种类型和变种，它们提供了各种应用 [15-16]。其中最有希望的是磁场梯度型和洛仑兹力型。前者主要分为大质量驱动器和磁场压缩加速器；后者有许多变种的轨道炮，如经典型、加强型、螺旋型、多级型和混合型。研究得比较深入的是经典型——一种直流电磁轨道炮。

图1给出经典型轨道炮的示意图。它主要由两个系统组成：能源和电枢—弹丸—轨道。两根平行的轨道既是电流和散热通道，又是弹丸运动的导轨。轨道间空腔称为炮膛，是弹丸加速通道。弹丸是被加速的负载，其后紧贴的小导体为金属熔片作电枢用，它既是轨道之间电流的连接件，又是弹丸接受洛仑兹力的媒介。能源系统保证在所要求的时间内提供弹丸加速所必需的电流。

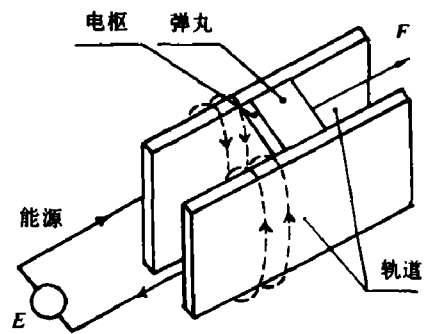


图1 轨道炮原理图

### 1 加速原理

如图1所示，当轨道中通以箭头所指方向的大电流时，轨道间将产生很强的磁场，电枢电流被磁场产生的洛仑兹力加速。如果把轨道视为单匝线圈，则作用到电枢上的力F为

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

式中  $I$  为电枢电流强度； $L_l$  为轨道电感梯度。它随轨道形状变化，对于平行轨道  $L_l$  为常数。在实际的轨道炮中， $L_l$  对轨道形状和尺寸的变化不是很敏感的，通常在  $0.2-0.8 \mu H/m$  之间。

根据牛顿第二定律，质量为  $m$  的弹丸沿轨道运动的加速度  $a$  为

$$a = \frac{1}{2m} L_l I^2 \quad (2)$$

若用10米长的加速距离达到  $10K m/s$  发射速度，则需要  $5 \times 10^6 m/s^2$  的加速度。从图2看出，欲使克级弹丸达到上述速度，需要几十万安培的大电流 [17]。

### 2、电枢—弹丸—轨道系统

最初的电枢是各种形式的固体金属导体，由于滑动速度受到限制以及电集肤效应的影响，使弹丸的加速受到限制。ANU的Barber等人 [6] 通过克服电集肤效应，并在不断改进固体金属电枢的实验基础上发现：如果弹丸后的电弧被约束，它不仅可以保证大电流的连续通过，也能使

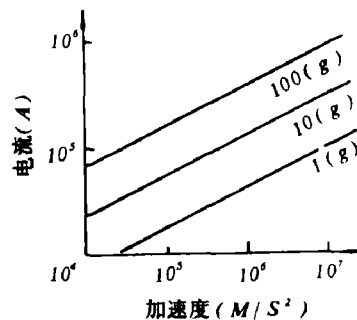


图2 轨道电流与不同质量弹丸加速度的关系 ( $L_l = 0.4 \mu H/m$ )

弹丸得到连续加速。进而找到了使用飞行式熔片和后背拍击式熔片(厚度为0.5mm的铜或铝箔)在大电流作用下迅速汽化而形成等离子体弧的技术,从而获得了等离子体弧电枢的设计概念。这种电枢除了大幅度提高弹丸的速度之外,还消除了固体电枢由于滑动接触的限制,而给弹丸和轨道带来的力学破坏,也消除了由于大电流作用在固体电枢尾部出现过高的电流密度,而引起轨道的阻抗加热。但是,它也带来了另一些问题:等离子体弧产生的高温会使弹丸后部出现烧蚀;如何防止等离子体弧漏入弹丸前部;如何减少等离子体弧对轨道的轰击等<sup>[18, 19]</sup>。

弹丸在炮膛内运动不仅要受内弹道学支配,而且在大电流环境下更要考虑到弹丸与轨道之间的滑动摩擦,烧蚀和热损耗等问题。此外,还需保证弹丸在加速期间的完整性和稳定性,超高压实验用的轨道炮,还要进一步保证作为冲击器用的弹丸平面度和小于 $1 \sim 2^\circ$ 的倾斜度<sup>[20]</sup>。当弹丸受的加速力超过其弹性强度极限时,弹丸将随应力的波形、幅度及弹丸的流动特性而改变,所以加速电流必须加以限制。若作用在面积为 $A$ 、质量为 $m$ 的弹丸上的应力为

$$\sigma = \frac{m a}{A} = \frac{L_1 I^2}{2 A} \quad (3)$$

对于给定的弹丸,动态强度极限为 $\sigma$ ,时,最大加速度和最大允许电流分别为

$$a = \frac{\sigma_y A}{m} = \frac{L_1 I_{max}^2}{2 m} \quad (4)$$

$$I_{max} = \left( \frac{2 \sigma_y A}{L_1} \right)^{1/2} \quad (5)$$

弹丸稳定性主要通过选取合适的宽/厚比来调节。弹丸太厚会降低加速度;太薄将引起弹丸飞行中的不稳定性发展。根据分析与实验,宽/厚的最大比值为0.64,一般是选用0.5为宜。弹丸的烧蚀可以通过在弹丸底部加一层抗烧蚀的绝缘材料层来防止。使用金属弹丸时,必须用上述材料做的弹丸衬套来保护。

轨道炮运行时,轨道要受到载荷的作用。它们包括轨迹间存在的强脉冲磁场,大电流的阻抗加热、电枢等离子体的轰击、弹丸与轨道滑动摩擦引起的加热和切削以及高温梯度等。所有这些载荷的综合作用将使轨道产生不希望有的熔化,屈服和形变<sup>[7]</sup>。因此在设计和建炮时必须综合考虑。

轨道的局部熔化主要由大电流通过时轨道的阻抗加热和等离子体轰击两种机制造成<sup>[3, 21]</sup>。此外,作用在弹丸上的应力同样要作用在轨道上,使轨道向外扩张和形变。为减小轨道的破坏,主要是控制轨道电流,将轨道周长上的电流密度限制在允许的水平上(对铜轨道为 $43 \text{ K A/m}$ );采用能经受大电流和等离子体轰击的轨道材料(如用镀钨的铜或钨—铜合金材料代替紫铜);使用弹丸注入设备以缩短等离子体轰击轨道的时间;以及适当地排热措施和对炮膛抽真空( $10^{-1}$ 大气压)防止假电弧。

炮膛口径有方、圆两种,其大小要根据需要、能源条件、弹丸和轨道材料特性确定。加大电流,炮管可以缩短,但要受到轨道熔化、弹丸形变的限制,因而必须增大口径,这样又会导致弹丸质量的增加,反过来又要求更大的电流,所以炮膛尺寸和炮管长度是各种因素、条件的综合考虑结果。目前采用的炮膛直径(或方口)在 $10 \sim 24 \text{ m m}$ 之间,大的可达 $50 \text{ m m}$ ;炮管长在 $2 \sim 5 \text{ m}$ 之间。若要求发射大质量的低速弹丸,用 $300 \sim 400 \text{ m m}$ 的炮管就够了。

### 3、能源系统

目前可供选择的能源主要有单极发电机、电容器组、磁通压缩发生器、分散式贮能器以及强制器等。其中,有些已用于实际的炮系统,有些尚处于研制阶段。

(1)单极发电机:电感式能量贮存器对于驱动轨道炮是很有吸引力的。然而,这种电感贮能器必须事先由初级能源充电后再向轨道炮输入大电流。目前较为理想的初级能源装置是单极发电机<sup>[22]</sup>。它基本上是一个法拉第圆盘,可将旋转的机械能转换为电能。优点是内阻抗低、放电时间长,在弹

丸加速过程中可近似保证稳恒电流, 而且尺寸和费用都比电容器组小和便宜。缺点是电压相当低, 对电感充电时间较长, 能量利用率较低, 只适用于低重复率的发射。目前美国和澳大利亚已拥有50~500 MJ的单极发电机<sup>[21]</sup>。据报导, 分散使用这种能源装置的多级轨道炮正在研究之中<sup>[21]</sup>。

(2) 电容器组: 这是目前技术上比较成熟和广泛使用的能源。可以和其他能源结合使用, 也能直接向轨道炮输入大电流。优点是充电时间短、放电快速并可重复使用。但与单极发电机相比, 能量密度较低, 体积庞大、费用高。它与单极发电机一样, 要达到较高的弹速, 加速时间长, 因而很大一部分能量损失于阻抗加热。克服这个缺点的办法是将多个电容器沿轨道方向分散使用, 这就构成了多级轨道炮。理论证明, 多级轨道炮内总的能量损耗近似正比于 $(1/\sqrt{N})$  ( $N$ 为级数)<sup>[7]</sup>。1981年美国德克萨斯大学已开始建造多级轨道炮<sup>[24]</sup>。

(3) 爆炸磁通压缩发生器: 这是一种将炸药的化学能转换为电磁能的装置<sup>[25-26]</sup>。磁通压缩发生器(MFCG)一轨道炮系统的工作原理见图3。它与一般轨道炮的差别

在于一条轨道上铺设了炸药。轨道间的磁场由初始外电源(如电容器组)产生。当开关接通时, 初始电源向暂时起贮能电感作用的MFCG输入电流, 而MFCG延长了传输给轨道炮的电流脉冲持续时间( $\sim ms$ )。当电容器组输出的电流接近最大值时, 雷管点火引爆炸药, 上轨道在爆炸作用推动下与下轨道贴合, 从而使轨道与电枢形成闭合回路, 磁场被封闭。随着爆轰波的传播, 磁通受压缩, 致使弹丸得到加速。使用MFCG作能源的轨道炮已成功地做了许多试验, 并取得了目前最高水平的结果: 3克重的钨弹丸速度达 $11Km/s$ <sup>[7]</sup>。MFCG的主要优点是提高电流和增加脉冲持续时间, 而且比较稳定; 其主要缺点只能用于爆炸试验场。使用这种能源时, 过去最关心的重复发射问题现在已得到解决<sup>[7]</sup>。为提高轨道炮发射能力, LANL正在研制其他形式的MFCG<sup>[27]</sup>。

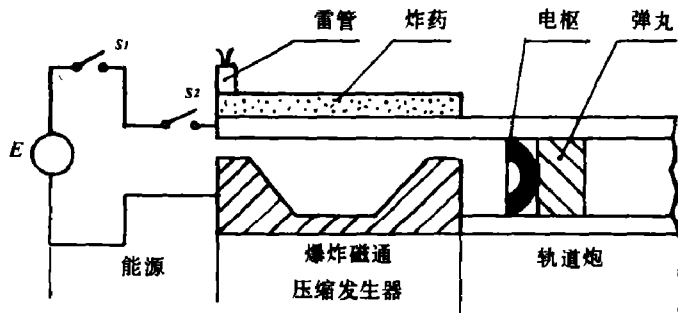


图3 爆磁压缩发生器轨道炮原理图

随着爆轰波的传播, 磁通受压缩, 致使弹丸得到加速。使用MFCG作能源的轨道炮已成功地做了许多试验, 并取得了目前最高水平的结果: 3克重的钨弹丸速度达 $11Km/s$ <sup>[7]</sup>。MFCG的主要优点是提高电流和增加脉冲持续时间, 而且比较稳定; 其主要缺点只能用于爆炸试验场。使用这种能源时, 过去最关心的重复发射问题现在已得到解决<sup>[7]</sup>。为提高轨道炮发射能力, LANL正在研制其他形式的MFCG<sup>[27]</sup>。

### 三、应 用

轨道炮可产生 $1-10TPa$ 的超高压<sup>[3]</sup>。这个压力区正是实验测量材料状态方程所希望获得的。目前, 在 $1TPa$ 以下可采用常规高压技术(化爆、气炮等)进行精确测量; 大于 $10TPa$ 时, 利用托马斯-费米理论计算比较精确。但是在 $1-10TPa$ 范围内, 对物质的性态知道的很少, 理论上还不能进行可靠的计算, 因此必须从实验上寻求解决途径。常规动高压技术都是利用膨胀气体推动负载获得高压的。由于负载的加速要受到压缩气体声速的限制, 因此速度不能提得很高。激光驱动冲击波以及电炮技术, 压力可达到 $TPa$ 以上, 但受到冲击器与试件尺寸以及时间极端性的限制, 给测试技术带来很大困难。地下核爆也可获得极高压力, 但费用高昂, 试验次数有限。因此上述动高压技术不大适用于一般科学团体。

轨道炮提供了把 $1-10$ 克负载发射到 $20Km/s$ 以上的可能性, 压力可达 $1-10TPa$ 。它加速的冲击器厚度和待侧时间比激光和气炮约大两个量级而接近轻气炮, 因此轻气炮和化爆技术加速飞片方法中使用的测试技术都可用于轨道炮。此外, 轨道炮操作简便和经济, 作为实验室的动高压装置

是较理想的。

Hawke<sup>[28]</sup>的估计指出,利用50MJ的能源加速直径为15mm、厚1.5mm的钛飞片,一次撞击钛靶就可获得~10TPa压力。Hawke<sup>[29]</sup>还指出,若轨道电流为1MA,产生的推力约 $2 \times 10^5$ 牛顿( $L_i$ 取 $0.42\mu H/m$ 。当弹丸质量为1克时,得到的加速度为 $2 \times 10^8 m/s^2$ ,只需1m的加速距离就可获到20km/s的速度。这样的结果对超高压研究是很有吸引力的。图4表示冲击器和靶材料相同时,轨道炮产生的冲击压力与靶材料原子序数以及冲击器速度之间的关系<sup>[29]</sup>。

目前,LANL/LLNL正在利用两种能源系统,在8-30mm口径的轨道炮上(预计弹丸速度为5-25Km/s)进行状态方程的实验研究<sup>[30]</sup>。利用轨道炮发射超高速弹丸去压缩磁通,有可能获得10MG以上的超强磁场,可用来研究材料的特性和等熵压缩<sup>[29]</sup>。

电磁轨道炮在美国得到高度重视的主要原因是它的军事应用前景。轨道炮只需使用相当短的炮管就可达到很高的发射速度,因而对革新常规火炮系统具有极大的吸引力。Brooks和Hawke<sup>[3]</sup>指出,发射高速炮弹的电磁炮有两个突出的优点:提高穿透目标的能力和缩短击中目标的时间。常规炮口速度约1.5Km/s,若能提高到3Km/s,穿透能力和击炮时间就可大大改观。此外,由于电磁炮能简便地通过控制电流来精确地控制发射速度,因而提高了瞄准精度。目前单极发电机的体积可做到办公桌大小,为各种电磁炮的机动性创造了条件。据1982年6月《防务工业报导》<sup>[12]</sup>:"美国陆军在1982年上半年进行了电磁炮试验,它把一个284克的炮弹推进到速度约为常规火炮炮弹速度的三倍。1983年陆军将集中力量研究快速连续发射技术和材料科学。在九十年代,电磁炮将进入使用阶段,可能用来发射穿甲弹,发射以舰船和陆地为基础的防空炮弹,发射鱼雷和以航空母舰为基地的飞机。"

随着电磁发射器研究和经验积累,将来工业应用的重点就会突出<sup>[29]</sup>。轨道炮将用作环境模拟设备,可对导弹部件和炮弹壳等脆性物体进行发射容限的检验。若轨道炮发射的弹丸用活塞代替,加速得到的动能可用来压缩磁通。于是强脉冲磁场就可当作磁力成型作业和稀有粉末材料压紧作业的工作"流体"。这种应用在粉末压紧过程中只产生很小的温升。这个特性不仅与爆炸压紧工艺不同,而且可使受热不稳定的粉末得到固化。另外,在隧道和采矿工程方面也具有应用潜力。前几年,Barber<sup>[17]</sup>和Hawke<sup>[21]</sup>等人先后发表了电磁炮空间发射的文章。文中对轨道炮目前的技术状态和用于空间发射的能力作了估价,详细讨论了以8Km/s速度穿过大气层的地面轨道炮系统的设备要求,设计中应考虑的各种因素。他们认为目前的直流电磁轨道炮达到的加速度水平和发射高速弹丸的性能可以满足空间发射的基本要求。若考虑到轨道炮不久将提高到的水平,那么轨道炮对于空间发射和直接发射都有巨大的潜力。据Hawke等人<sup>[21]</sup>的估算,电磁轨道炮有可能将几公斤重的低摩擦弹体以10-15Km/s速度穿过大气层而不会产生破坏性的烧蚀和减速。

1979年,美国能源部在LANL召开的《碰撞聚变专题讨论会》上<sup>[31]</sup>,对碰撞聚变的可能性,以及对实现惯性约束聚变的几种方法的潜力与困难进行比较<sup>[32]</sup>,结论是碰撞聚变与激光或带电粒子束相比优点更多。它可将碰撞用的高速小弹丸比较容易地注入到反应堆容器空腔内;可以达到热核反应所要求的几MJ能量,而能量转换效率比其它方法高得多。轨道炮发射高速弹丸的优

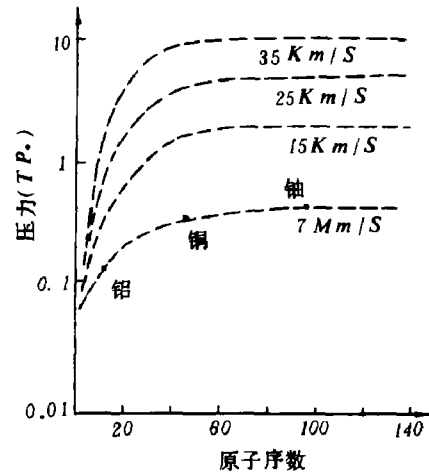


图4 冲击压力与材料原子序数、速度的关系(靶与冲击器材料相同时)

点是能量可集中在小范围内, 如果弹丸快速运动时保持了能量, 那么采用缩短弹丸尺寸的办法就能容易地在  $10\text{ns}$  时间内传递能量。Muller 指出<sup>[33]</sup>, 这种小弹丸长度为  $2\text{mm}$ 。Hawke<sup>[7,9,29]</sup> 已断定, 用轨道炮获得  $100\text{--}200\text{K m/s}$  的发射速度没有什么明显的障碍。为了达到这个速度, Hawke<sup>[7,9]</sup> Muller<sup>[33]</sup> 和 Marshall<sup>[24]</sup> 分析过的分段式(多级)轨道炮为发展成碰撞聚变的加速装置提供了有希望的途径。除上述应用之外, 轨道炮还可用来研究飞行器再入大气层时的摩擦与烧蚀现象, 超高速贯穿, 炸药的撞击引爆等。Bradlev 用轨道炮为大功率激光聚变装置提供高密度等离子体源, 其密度达  $10^{21}$  个离子/ $\text{cm}^3$ 。

最后, 我们引用 Hawke<sup>[29]</sup> 对上述各种应用所归纳的图 5 来具体认识它们是有意义的。图中表, 轨道炮各种可能的应用与弹丸质量和发射速度组合要求的关系。从图中看出, 几乎每种质量—速度的组合要求都超过了当代发射器所具有的重要性能指标的能力。显然, 轨道炮不久将提供这方面能力。

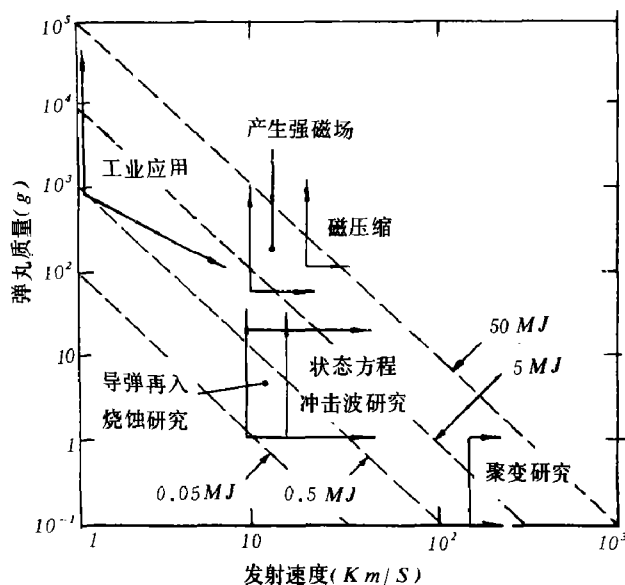


图5 轨道炮各种可能的应用与弹丸质量和发射速度的关系

#### 四、结 束 语

研究电磁轨道的主要目的是军事应用, 但作为高温、高压、高能密度物理的基础研究的一种实验室手段, 以及其他方面的应用也可能具有广阔的发展前景。随着高级能源系统和材料科学等基础技术的发展, 高性能轨道炮的设计、建造与运转经验的进一步取得, 不仅目前已提到的可能应用将逐步付诸现实, 而且其它的应用也将应运而生。尽管发展各种实用的战术电磁炮和电磁发射器还有不少困难, 但基本上没有障碍。

电磁轨道炮技术在我国还是个空白, 鉴于该技术的应用潜力与发展态势, 它不能不引起我们极大的关注。

## ELECTROMAGNETIC RAILGUN AND ITS APPLICATIONS

Chen Jinhua Jia Hao

## 参 考 文 献

- [1] UCRL-52000-82-7 (1982), 19 .
- [2] Sawaoka, A. et al., *8th AIRAPT Conf.*, (1981). 8,152-155 .
- [3] Brooks, A. L. et al., UCRL-85877, (1981) .
- [4] Brast, D. E. et al., *Proc. 7th Hypervelocity impact symposium Vol. 3* (1984), 187 (unpublished) .
- [5] Rashleigh, S. C., Marshall, R. A. et al., *J. Appl. Phys.* 49 (4) (1978), 2540 - 2542 .
- [6] Barber, J. P. and Marshall, R. A. et al., Magnetic propulsion for a hypervelocity launcher presented at the second international conference on magnetic field generation and related Topics, Washington, DC (1979) .
- [7] Hawke, R. S. et al., UCRL-82677 (1979) .
- [8] Brittingham, J. N., UCRL-52778 Part. 1 (1979) .
- [9] Hawke, R. S., UCRL-52778 Part. 2 (1979) .
- [10] UCRL-50025-80-1 (Electronics Engineering Department) .\*
- [11] *Design News* 2 (15), (1982), 28, 31 .\*
- [12] 电磁炮, 美国防工业报导, 1982年6月, (兵器知识, 第1期(1980)) .
- [13] Browne, M. W., Radically new gun design could alter warfare and space exploration (Rail-gun), *The New York Times* Tuesday, 11, (1980) .
- [14] Yong Chia Thio, MRL-R-848, (AD-A117692) (1982) .
- [15] Marshall, R. A., LA-8000-C, (1979) .
- [16] Kolm, H. H., LA-8000-C, (1979) .
- [17] Barber, J. P., AIAA 79-2091 .
- [18] Hawke, R. S. et al., UCRL-84875 (1980) .
- [19] Brooks, A. L. et al., UCRL-84876 (1980) .
- [20] Hawke, R. S. et al., UCRL-85298 (Conf. 810684-33) (1981) .
- [21] Hawke, R. S. et al., UCRL-85007 (Conf. 810493-3) (1981) .
- [22] Weldon, W. F. et al., *IEEE Trans. on Mag.* Vol. MAG-18, 1 (1982), 165 - 169 .
- [23] Friedrich, O. M., UCID-18830 Rev. 1 (1980) .
- [24] Marshall, Richard A. *IEEE Trans. on Mag.* Vol. MAG-18, 1 (1982), 11-15 .
- [25] Peterson, D. R. et al., LA-UR-79-2220 (1979) .
- [26] Fowler, C. M. et al., LA-UR-80-3190 .
- [27] Fowler, C. M. et al., LA-8669-MS (1981) .
- [28] Hawke, R. S. et al., AIRAPT 7th high-pres, *Sci. Tech. Conf.* (1979), 979-982 .
- [29] Hawke, R. S., UCRL-84623 Conf-801111-2 (1980) .
- [30] Fowler, C. M. et al., *AIP Conf. Proc.* 78 (1981), 686 - 689 .
- [31] Peaslee, A. T. Jr LA-8000C, Aug. (1979) .
- [32] Kostoff, R. N. et al., *IEEE Trans. on Mag.* Vol. MAG-18, 1 (1982), 194 - 196 .
- [33] Muller, R. A. et al., LA-8000-C Aug. (1979) 156 - 163 .
- [34] Bradlev, L. P. et al., UCRL-82539 (1979) .

\* 为消息报导, 没有具体作者。