

电磁发射器的原理与应用^{*}

杨世荣¹ 王莹² 徐海荣³ 骆颖^{1,†}

(1 桂林空军学院 桂林 541003)

(2 军械工程学院 石家庄 050003)

(3 第一军医大学 广州 510515)

摘要 传统的化学推进技术已不能满足人类的进一步要求,从原理和能源上变革发射技术势在必行,因此电磁发射技术便应运而生。因其在国防、航天等领域应用前景广阔,目前国内外电磁发射技术发展迅速。文章论述了电磁发射技术的发展历史、现状和电磁发射器的基本原理和广阔的应用前景。

关键词 电磁发射器 原理 应用

Principle and applications of electromagnetic launchers

YANG Shi-Rong¹ WANG Ying² XU Hai-Rong³ LOU Ying^{1,†}

(1 Guilin Air Force College, Guilin 541003, China)

(2 Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

(3 First Military Medical University, Guangzhou 510515, China)

Abstract Traditional chemical technology cannot meet the demands of future propulsion development. Launching technology must be updated on the basis of new principles and energy sources, hence the birth of electromagnetic (EM) launchers. Because this technology can be applied to many fields such as national defense and space flight it is developing rapidly throughout the world. We present the history and status of EM launching at the same time pointing out its basic principle and wide ranging future applications.

Key words EM launcher, principle, applications

1 引言

电磁发射器(EM Launcher),就是利用电磁力提升和推动物体,或者把物体加速到超高速($> 3\text{km/s}$)的装置,由于起初仅以作武器为目的,因此又称电磁炮(EM gun)。

第一个提出电磁发射概念并进行试验的是挪威奥斯陆(OSLO)大学物理学教授伯克兰(Birkeland),之后几起几落,历经沧桑。直到1978年,澳大利亚国立大学R. A. 马歇尔(Marshall)博士在5m长的轨道电磁炮上把3.3g的聚碳酸酯弹丸加速到5.9km/s,从实验上证明了电磁发射的可行性。从此,电磁发射的研究工作迈入了新阶段,各军事强国纷纷投入大量人力财力进行研究、试验。目前美国处于领先地位。

1992年美国电磁轨道炮已经走出实验室,德克萨斯大学把2.4kg的弹丸加速到2.6km/s,其能量可用于实战,美国正式宣布2010—2015年电磁炮将用于实战。

2 电磁发射器原理

电磁发射器可分为轨道型、线圈型、电热型。

2.1 轨道型电磁发射器原理

图1为轨道型电磁发射器原理示意图,由两条互相平行且被固定的长直、刚性金属轨道和高功率脉冲电源、电枢以及发射体(如弹丸)等构成。轨道截面可以是部分圆环形(如图1),也可以是矩形,电

* 2002-09-10收到初稿,2002-10-28修回

† 通讯联系人, E-mail duoying-li@21cn.com

枢位于两轨道之间,由导电物质构成,可以是固态金属块,也可以是等离子体,或为二者的结合;发射体位于两轨道之间,电枢之前。合上开关,电流*i*通过馈电母线、轨道、电枢,沿另一条轨道构成回路,在两轨道之间产生磁场,电枢受磁场力被加速,推动发射体前进。

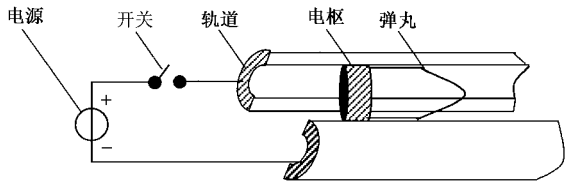


图1 轨道型电磁发射器原理示意图

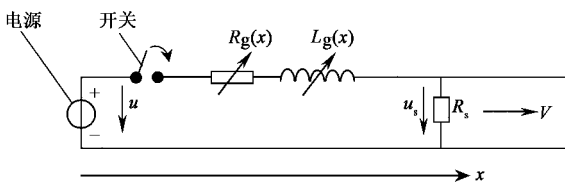


图2 轨道型电磁发射器电路模型图

把轨道型电磁发射器看做电源的一个负载,由于发射过程中电枢和发射体运动,轨道发射器可以看做一个随发射体位置*x*变化的电感*L_g(x)*和电阻*R_g(x)*与电枢电阻*R_s*的串联(如图2),则负载的电感和电阻分别为

$$\begin{cases} L(x) = L_0 + xL'_g(x) + L_s \\ R(x) = R_0 + xR'_g(x) + R_s \end{cases} \quad (1)$$

式中*R₀*、*L₀*分别为回路连线的寄生电阻和电感,其值甚小,一般可忽略;*L'_g(x)*、*R'_g(x)*分别为轨道电感和电阻对*x*的导数,即轨道单位长度的电感和电阻,分别称轨道的电感梯度和电阻梯度。从图2可知电源路端电压为

$$\begin{aligned} u &= \frac{d}{dt}[L_g(x)i] + iR_g(x) + u_s \\ &= L_g(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL_g(x)}{dt} + iR_g(x) + u_s \end{aligned} \quad (2)$$

式中*t*表示时间,*u_s*为电枢上的电压降。若忽略*u_s*和轨道电阻及各种能量损失,则从(2)式可知电源输出功率为

$$p = iu = [L_g(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL_g(x)}{dt}] \quad (3)$$

电磁发射器系统的能量为

$$E = E_m + E_k = \frac{1}{2}L_g(x)i^2 + \frac{1}{2}mV^2 \quad (4)$$

*E_m*为系统磁能,*E_k*、*m*、*V*分别为被加速组件的动能、

质量、速度,电源输出功率应等于系统能量增长率*dE/dt*,因此有

$$\begin{aligned} [L_g(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL_g(x)}{dt}] &= \\ iL_g(x) \frac{di}{dt} + \frac{1}{2}i^2 \frac{dL_g(x)}{dt} + mVa \end{aligned} \quad (5)$$

*a*为加速度,从(5)式可得被加速组件所受合力为

$$F = ma = \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{2}i^2 \cdot \frac{dL_g(x)}{dt} = \frac{1}{2}i^2 L'_g(x) \quad (6)$$

由(6)式可得被加速组件的加速度、速度和行程位置的表达式:

$$\begin{cases} a = L'_g(x)i^2/2m \\ V = V_0 + \int_0^t a dt = V_0 + L'_g(x)g(t)/2m \\ x = x_0 + \int_0^t V dt = x_0 + L'_g(x)h(t)/2m \end{cases} \quad (7)$$

式中*g(t) = ∫₀^t i² dt*, *h(t) = ∫₀^t g(t) dt*, *V₀*、*x₀*分别为被发射组件注入后的初速度和初位置。若*x*为已知,则从(1)式可求出系统的电感和电阻,再根据(7)式采用迭代法,用计算机可模拟发射过程的特性。若采用平顶脉冲电流(视为直流*I*),可得到良好的一级近似:

$$\begin{cases} a = L'_g(x)I^2/2m \\ V = V_0 + L'_g(x)I^2t/2m \\ x = x_0 + L'_g(x)I^2t^2/4m \end{cases} \quad (8)$$

因此,对于给定的*I*和*m*,在*x₀ = 0*、*V₀ = 0*的情况下,从(8)式可计算出发射体出口速度为*V_m*时所需加速时间*τ*和发射体行程*X*(对轨道电磁炮来说就是所需炮管的长度):

$$\begin{aligned} \tau &= 2mV_m [L'_g(x)I^2] \\ X &= mV_m^2 [L'_g(x)I^2] \end{aligned} \quad (9)$$

取*m = 5 × 10⁻² kg*, *V_m = 3 × 10³ m/s*(电磁炮目前努力要达到的出口速度),*I = 10⁶ A*(高功率脉冲电源目前可提供的电流),*L'_g(x) = 0.5 μH/m*,则得*τ = 0.6 ms*, *X = 0.9 m*。以上仅是对简单轨道电磁炮而言,为了提高其性能和实战要求,科学家又设计了“分散馈电轨道炮”、“增强型轨道炮”、“多轨轨道炮”、“多相轨道炮”等等,本文不一一介绍。

2.2 线圈型电磁发射器原理

图3为线圈型电磁发射器原理示意图,若干个驱动线圈固定并分别馈以电流*i₁*,发射体线圈携带

电流 i_2 , 令 i_1, i_2 反向, 两种线圈相斥. 设每个驱动线圈自感为 L_1 , 发射体线圈自感为 L_2 , 之间的互感为 M , 则一驱动线圈和发射体线圈磁能为

$$E_m = \frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 + M i_1 i_2, \quad (10)$$

一个驱动线圈作用于发射体上的力为

$$F = \frac{dE_m}{dx} = \frac{dM}{dx} i_1 i_2 = M'(x) i_1 i_2, \quad (11)$$

$M'(x)$ 叫互感梯度, $M'(x)$ 正负变化时(两种线圈由互相接近到互相远离), 力的方向发生变化. 因此当 i_1, i_2 反向, 发射体位于驱动线圈 1 中心右边(如图 3)时, 驱动线圈 2 或者先不通电, 或者让其电流和 i_2 同向, 当发射体刚向右越过驱动线圈 2 中心后, 再让驱动线圈 2 通以和 i_1 反向的电流……于是, 发射体被一系列驱动线圈加速.

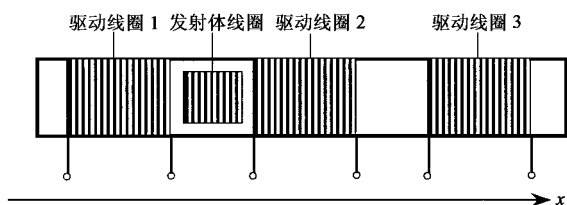


图 3 线圈型电磁发射器原理示意图

对发射体线圈馈电方式, 第一种是直接激励, 即用电刷滑动接触或者等离子体电弧放电使电源向发射体线圈馈电, 第二种是感应力激励, 即利用驱动线圈电流的变化, 使被短路的发射体线圈产生感应电流, 可证明感应电流和激励电流方向相反^[2], 在感应激励时, 发射体线圈可以用管状导体发射体(相当于单匝线圈)代替, 第三种是自载激励, 即发射体线圈自载电流, 这种电流可由装在发射体线圈中的小电池或充电的电容器提供, 也可以用事先充电的超导发射体线圈或超导管状发射体, 它还可以是高阻抗的发射体线圈通电后断电, 以时间常数保持电流.

2.3 电热型电磁发射器

图 4 为电热型电磁发射器原理示意图, 高功率脉冲电源通过电极向工质进行电弧放电, 使工质加热转换成等离子体, 含有内能和动能的等离子体可直接推动发射体运动(直热式), 也可利用等离子体再加热质量更大的低分子量轻工质(因为发射体最大极限速度和工质分子量的平方根成反比^[3]), 使其化学反应变成高温气体(含少量等离子体), 借助于这些气体推动发射体(间热式).

3 电磁发射器的应用

3.1 军事应用

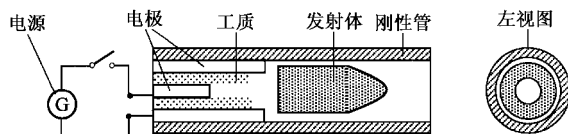


图 4 电热型电磁发射器原理示意图

电磁炮是电磁发射器最早、最重要的军事应用. 电磁炮有以下异乎寻常的优点:

(1) 具有高初速. 火炮受气体膨胀速度的限制, 弹丸初速停留在 1km/s 左右, 很难再有大的提高. 而电磁炮只要电源功率足够高, 弹丸初速除受光速限制外可无限地提高, 就目前技术水平而言, 可达 3km/s 左右. 高初速一直是兵家梦寐以求的, 因为高初速能增大弹丸射程和穿甲深度, 缩短射击提前量, 从而提高命中率.

(2) 射弹质量范围大. 火炮发射 100kg 以上弹丸比较困难, 而电磁炮发射的弹丸可大可小, 从几克到几吨、几十吨乃至几百吨. 在弹丸动能不变的情况下可做得小而轻, 这意味着装载平台可储存更多的炮弹, 也可充当重型远射程炮, 发射制导炮弹、战术导弹、较重的微波弹, 等等.

(3) 能源简易. 火炮, 特别是液体发射药火炮及火箭的推进剂, 都是优良昂贵的燃料, 运输、使用不安全. 而电磁炮使用一般的低烃类燃料作初级能源发电, 安全且成本低.

(4) 受控性好. 火炮是采用改变装药量来控制射程, 而电磁炮只需简单地控制电流, 便可控制初速和射程, 若精确控制初速, 可发射“灵巧弹药”.

(5) 工作性能优良. 电磁炮不存在火炮那种因点火和发射药燃烧不均匀而造成的延迟点火、突然撞击和加速度突变等问题, 电磁炮弹丸几乎是匀加速运动, 因此可发射智能弹药; 电磁炮不使用药筒, 无需退弹壳, 无炮栓, 因此装填方便, 在长管和多级电磁炮中可同时前后加速几个弹丸, 提高射速, 且电磁炮无声响、无烟尘、无炮口焰、生存力强, 等等.

电磁炮置于陆基作为战术武器, 可用于反坦克, 战术防空, 对付敌战略轰炸机、巡航导弹、各种战术弹道导弹等; 作舰载武器用, 可对付低空突防的飞机和掠海导弹; 电磁炮置于天基作为战略武器, 可拦截敌方洲际弹道导弹, 摧毁敌军事卫星, 等等.

电磁发射器还有其他许多军事应用, 由于它能发射大质量有效载荷, 因此可安装在航母上用来弹射飞机, 其重量仅为传统的蒸汽弹射器的 $1/10$. 也可用来弹射无人驾驶机, 比目前使用的火药和火箭

弹射安全、经济。

3.2 航天应用

电磁发射器在航天领域的应用前景绝不亚于电磁炮。目前的航天运载工具——火箭和航天飞机都是使用化学推进剂,其潜力基本告罄。火箭发射的有效载荷和火箭质量比很小,且为一次性,发射成本高,综合评估,发射 1kg 有效载荷需 2000—8000 美元,而电磁发射器可重复使用,发射成本低,每千克有效载荷仅 1—1.5 美元。科学家们设想先用电磁发射器把火箭加速到 1.6km/s,然后火箭点火,将有效载荷加速到 11km/s。

3.3 其他领域内的应用

电磁发射可把物体加速到每秒十几公里的超高速,因此可在高压物理学中进行材料状态方程的研究,分析材料在高压下的性状,还可以模拟导弹再入和陨石坠落时的气动特性及烧蚀状况。

在抽空的炮管中,把小弹丸加速到 50—150km/s

的极高速度,用其撞击轻核燃料靶,将其动能转变为靶的内能,以此进行超高速碰撞核聚变可能性的研究。

电磁发射技术还可用于“电磁列车”,这种列车直接使用现有火车铁轨作轨道发射器的轨道,车箱作发射体。这种列车比磁悬浮列车成本低,比传统列车运行速度高。

理论和国内外的实验都证明电磁发射是可行的,电磁发射技术有着十分广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 王莹,肖峰. 电炮原理. 北京:国防工业出版社,1995 [Wang Y, Xiao F. Principle of Electric Gun. Beijing: National Defense Industry Press, 1995 (in Chinese)]
- [2] 杨世荣. 工科物理, 1993, 1 : 42 [Yang S R. Engineering Physics, 1993, 1 : 42 (in Chinese)]
- [3] 王莹,马富学. 新概念武器原理. 北京:兵器工业出版社, 1997. 7 [Wang Y, Ma F X. Principle of New Concept Weapons. Beijing: Weapon Industry Press, 1997. 7 (in Chinese)]

· 物理新闻与动态 ·

蝴蝶与光子晶体

(Butterflies and photonic crystals)

近年来,科学家们发现有着各种各样颜色的动物,如有花斑的甲壳虫、美丽的小鸟和五彩斑斓的蝴蝶等,它们身上的彩虹都来自于一种称为光子晶体(photonic crystals)的微结构。通常的颜料是由其本身的化学成分在吸收或反射一定频率的光线后呈现出各种颜色的,但光子晶体与此不同,它对光的反射是来自于本身的物理结构的功能,也就是说,光子晶体具有周期性的空穴或凸隆阵列,这种有一定尺寸的阵列,在晶体本身完全是无色的情况下,也能反射兰色光线,并吸收其他颜色的光线。这是由于光子晶体的阵列从不同角度去看时会有一些微小的差别,而从不同角度观看颜料时是完全相同的,因此光子晶体就能使彩虹的颜色具有各种可变动的色调。这类结构能帮助某些雄性动物吸引异性来进行交配,有时也能帮助它们建立自己的领地。

最近匈牙利与比利时以 J. Vigneron 教授为首的一些科学家对这个问题进行了研究,他们发现有一些地区的吕坎型蝴蝶(lycaenid butterflies)群,其雄性蝴蝶身上载有光子晶体显色的特性,而另一些地区的吕坎型蝴蝶却没有这类特性。科学家们利用高分辨率的电子扫描显微镜对各种蝴蝶进行了检测。他们证实,凡是有显色功能的蝴蝶都具有亚微米大小的空穴阵列,从而形成了一个天然的光子晶体;与这类蝴蝶非常相近的种属,但没有空穴阵列的那些蝴蝶,其翅膀则呈现出单调的深褐色,而不是彩虹般的兰色。这种差异可能来自于进化中的残存。同时他们还发现,在相同的照明条件下,褐色蝴蝶的翅膀温度要比彩虹类蝴蝶的高,因此他们相信,褐色蝴蝶将能更好地经受住冷空气的影响,并能保持更长时间的交配能力。

如果蝴蝶的这种奇迹般的热控作用是由于光子晶体所导致的话,那么人造光子晶体也将能在某些特殊环境下提供可调节的温控功能,这可直接应用于太空或沙漠地区使用的服装或其他物品上。

(云中客 摘自 Physical Review E , February 2003)