

# 电磁轨道炮的物理原理

杜钧福

(中国科学院物理研究所 100190)

近年来,一种新的武器概念进入公众视野。它就是基于电磁弹射原理制造的电磁轨道炮。美国人用于航空母舰上飞机起飞的新的电磁弹射也基于同一原理。它是物理学和电工学用于国防技术的典型事例。电磁轨道炮是一种动能武器,就是依靠发射弹丸的动能摧毁目标。它的工作原理是将电磁能转换成动能,可称电磁发射。当然电磁发射的也不一定是用于武器的弹丸。它有更广泛的用途。

把电磁轨道炮和传统的火炮比较,火炮是将炸药的化学能转化为动能,所发射的炮弹的初速度不可能超过炸药爆炸产生的高温气体分子的热速度,一般不会超过每秒 1.8 ~ 2 千米。除非使用火箭原理,在飞行过程中不断加速。电磁轨道炮可以数倍于这个极限。

## 1. 电磁轨道炮的工作原理

电磁轨道炮的基本结构是两条平行的金属导轨,所抛射的弹丸也由良导体构成,处于两导轨之间,可以沿导轨滑动。启动时在两导轨端部加上直流电压,电流就从一个导轨经过弹丸流经另一导轨构成电流回路。按照麦克斯韦方程规定的右手定则,流经两导轨的电流产生的磁场如图 1 所示。这个磁场的大小和电流强度成正比。按照线电流假设,就是认为导轨很窄又很长,电流可以看成电流线,磁场的大小和与电流的距离成反比。所以两导轨之间距离越小,一定强度的电流所产生的磁场越强。

在两导轨之间,电流产生的磁场垂直于导轨所在

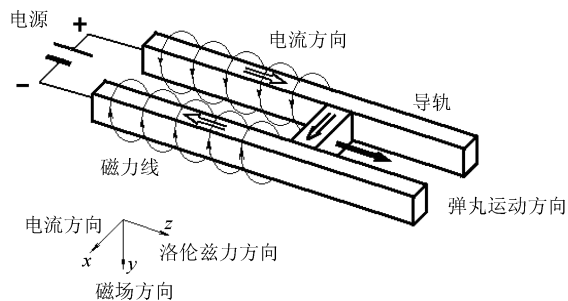


图 1 电磁轨道炮工作原理图

平面,当然也与两导轨垂直,与弹丸中流过的电流垂直。这个电流与磁场相互作用产生一个洛伦兹力。这个洛伦兹力与电流磁场都垂直,在直角坐标中的方向这样确定,就是电流和磁场如果分别在  $x$  和  $y$  坐标方向的话,力就在  $z$  坐标方向,强度与电流和磁场都成正比。所以,流经导轨和弹丸的电流和磁场的作用就对导轨和弹丸产生了一个扩张力。导轨是固定的,无法运动,而弹丸在这个力的推动下,沿导轨向前不断加速运动,直至脱离导轨飞出。

以上所述的原理可以在任何一本电动力学教程的前几页中找到。也有一些业余爱好者根据这一原理研制了电磁轨道炮的模型。当然这种新概念武器也有其他类型,如线圈炮系利用通电线圈之间的作用力推动在其中感应了电流的弹丸(线圈)飞行。它的优点是弹丸可以不与固定部件接触。

以上是定性分析,现在做一些定量分析。我们假设用于战术武器的电磁轨道炮的弹丸重量为 10g,需要达到 10 km/s 的初速度。作为比较,AK-74 步枪(AK-47 式的一种升级版)的弹丸重量 3.45 g,初速度 0.9 km/s。

很容易计算以这样速度飞行的弹丸的动能是 0.5 MJ。再假设发射的轨道的长度为 5 m。弹丸在导轨上的平均速度为终速度之半: 5 km/s,那么在轨道上运动时间为 1 ms。也就是说,需要在 1 ms 时间里,向弹丸提供 0.5 MJ 的能量,相应的瞬时功率为 500 MW。500 MW 什么意思呢?这已经是一座现代电站的发电水平了。况且,我们还没有考虑到能量转换效率问题。这个转换效率是很低的,大约只有 0.1 的样子。如果这样,所需功率还要提高一个量级。

只有核动力航空母舰有这样量级的动力(美国尼米兹航母核动力 205 MW)。但是航母不能把动力都提供给这种武器,况且能量转换也很费事。

可以说,没有任何固定的功率源能提供如此强度的瞬态功率。所以,必须采用某种储能机构,将能量

储存起来，在瞬间释放。因为要不断向储能机构输送能量，也需要一个连续的功率源。对这一功率源的要求取决于弹丸的发射率。在上一个例子里，要求 1 ms 内提供 500 MW 的瞬时功率。如果发射率是每秒一发，那么所需平均功率为其千分之一，即 0.5 MW。当然考虑到效率问题，这个值还要大得多，但从技术上看每秒一发也有困难。现在坦克发动机的功率可以达到 1 MW。所以从能源看，给坦克配备这样的电磁轨道炮是可能的。

上面说，作为战术武器的电磁轨道炮的弹丸重量可以和步枪子弹比较，但速度要高得多。也就是说，电磁轨道炮弹丸的动能  $mv^2/2$  中，优先选取增加速度  $v$ ，而重量并不很大。这是因为做为武器，高速飞行的弹丸有很多优点。

## 2. 发展简史

下面介绍一下电磁轨道炮的历史。这种设备是 1920 年法国人维勒鲁伯发明的。其后，经许多人改进，特别是二战时期德国人和日本人做了很多试验，但是遇到一些困难，在很长一段时期未取得进展。

困难在什么地方呢？上面的例子说明，真正能使用的电磁轨道炮的瞬态功率要求在百兆瓦，至少几十兆瓦的量级。大家知道，一个电路的功率是电流乘以电压。在这个轨道电路和传输电路里，电阻必须做的很小以减低焦耳能耗，因而使瞬态电流应达到兆安量级以上。这样大的电流，即使在毫秒级的短暂时间里也会加热流过电流的弹丸至很高温度，甚至使这个质量很小的弹丸在发射前烧毁。这就是小弹丸和大电流之间的矛盾，长久得不到解决。

直到 1978 年，澳大利亚国立大学的 R. A. 马歇尔教授解决了这个技术难题。解决的思路是将抛射弹丸和流经两导轨间的电流通道分开，弹丸不负电流载体的任务，这个任务交给一种导电性能更好、质量更轻物质来承担，使其受电磁力（洛伦兹力）在后面推动弹丸向前运动。换句话说，弹丸不管开车，只当乘客。

这种轻的导电物质就是等离子体，气体电离后变成的一种带电气体。它的电导性接近金属，质量几乎可以忽略。它不怕被烧毁，因为它本身就是烧毁的产物。

所以，在长达半个多世纪的时间里，每当导体弹丸在实验用的轨道上烧毁时，自然界实际上在提醒人们解决的方向，但是没人理会这点，直到马歇尔教授

领悟了这个道理。

知道了这个原理，技术的改进就容易了。弹丸用不导电的塑料制成，弹丸后面在两导轨间置放一根细金属丝。当电压加在两导轨间的时候，电流通过金属丝将其烧毁形成电弧。电弧作为电流通道接受洛伦兹力作用推动弹丸沿导轨运动。当然有多种方法引弧。

马歇尔教授在 1978 年使用 550 MW 的单极电机作脉冲电源，在 5 m 长的轨道上将 33 g 的弹丸加速到 5.0 km/s，在技术上取得重大突破。此后，电磁轨道炮技术得到飞快的发展，并逐渐考虑应用在各个领域。

实际上马歇尔教授在电磁轨道炮技术上取得的突破有另一背景，就是 20 世纪 50 年代以来等离子体物理和技术的进展。和电磁轨道炮技术极为相近的一种等离子体技术——等离子体枪，或称同轴枪技术在这些年里得到平行发展。这种枪和电磁轨道炮构型的区别在于它是同轴型的，电极不是两平行导轨，而是直棒状内电极和同心的圆筒外电极，所驱动的是介于两电极间的等离子体团。

这种等离子体枪用途广泛，可以作为初始等离子体注入到聚变等离子体装置如磁镜中。也可使出射的等离子体聚焦形成高密度高温度的等离子体焦点，可作为结构简单的 X 射线源和中子源。也可加上一个螺线管线圈，产生角向电流，注入到一个体积内形成所谓球马克的一种高温等离子体装置。这样几种装置的目的都不是为了加速，而是为了产生等离子体。如果用于加速，很容易将等离子体团加速到 100 km/s 以上。国外有人设计将其加速到 3000 km/s，用于武器目的。

所以，如果这两技术领域的人能早些交流，电磁轨道炮的进展也许能更快一些。

## 3. 储能方式

再以电容储能为例，较详细地说明电磁轨道炮的技术细节。电容储能比较容易控制，适用于原理性研究，国外一些大规模实验也使用了这种储能方法。

使用电容量为  $C$  的电容器组充以一定的电压  $V$ ，然后通过开关  $S_1$  向负载线圈  $L$  放电。放电的回路方程是

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = 0。$$

这种放电有三种模式，依赖于参量  $\Delta = R^2 - 4L/C$ ， $R$  为电阻。当  $\Delta < 0$  时为阻尼振荡，放电波形是一个

衰减的正弦波。如果忽略电阻，放电电流为一正弦波形，最大电流为  $I_{\max} = V_0 \sqrt{C/L}$ ，放电半周期为  $T/2 = \pi \sqrt{LC}$ 。所以，为了得到最大电流，应该提高充电电压，增大电容和降低电感。为了缩短放电周期，应该降低电容和电感。所以这种电容储能的关键技术问题是减少电感。一般来说，充电电压应在 10 kV 以上，电容量视最终达到动能而选择。电感降到几十到一百 nH，即  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  H。为了降低电感，应选择低电感的电容器组。从电容器组到负载（轨道）也应采用低电感模式。在能量较低时可以使用同轴电缆。在大能量时须采用平行板传输。一些业余爱好者试验的效率低下，可能是不注意低电感问题引起的。如果电感过大，电流上升慢，电流未达峰值时弹丸就飞出轨道，不能获得充分能量。

电容放电的另一重要技术问题是开关。这种开关要求大能量、电感低、动作时间短、同步性能好（用于多组电容器）、能重复使用。也可用轨道间的放电作为开关，以简化结构，但单独的开关更便于控制。现在往往将开关和电容作在一起，以减小电感。

上面谈到，为增加储能，必须提高电容容量。但是电容容量的提高会延长放电周期，即增加电流上升时间，与弹丸加速时间不匹配。电容储能式的电磁轨道炮的能量转换效率低，这是重要原因之一。为解决这个问题，可以采用分级加速的方法，即将导轨分成彼此绝缘的若干段，电容器也分成若干组，每组单独对某段导轨放电，控制各段放电时间，使弹丸逐级加速。这一方案既能保证总储能量，又使每一放电电流有陡峭的上升前沿。

为什么广泛用电容储能呢？因为这种储能方式储的是电能，可以以最快速度转换为电流。但是电能储存密度是最小的，上述战术武器所要的储能电容的体积不可能被单辆坦克所容纳，当然也不可能是空基的，只有舰船，最好是大型舰船可以考虑使用。

这里简单介绍一下储能问题。储能方式有电能、磁能、机械能、化学能、核能几种。电能是电容储能，磁能是电感储能，机械能有多种方式，可以应用的是飞轮机组，化学能用于武器就是炸药，核能有裂变和聚变两种。就储能密度来看，以核能为最大，但是很少能用于战术武器。化学能次之。这就是火器在几百年里一直作为主要战场武器的道理。再差为机械能，

再差为磁能，最差为电能。

所以，电容储能作为最容易控制、发展最完备的电源，适用于实验室，但在实用上最不方便，成本也最高。这不但是电磁轨道炮这种武器，也是微波弹、激光武器所面临的主要技术问题之一，可以说是这些技术的短板。

电感储能是采用一个大电感线圈，使其中感应大的电流，然后使这个电流转换到负载回路中，称为换流。这种储能方式的储能密度较电容储能高，成本也较低，但是只能由部分电流能置换到负载电路中，而且换流技术也比较复杂，所以现在一般不予采用。

机械储能是用一个很快旋转的飞轮储存能量。原来的飞轮用结构钢制成，后来发展为合成材料，可以得到更高的转速。在使用的时候将这一动能转化为电流。方法是使之带动一个电机产生直流或交流电流再整流，驱动负载。

实际上，飞轮机组经常匹配一种单极电机，直接发出脉冲直流电流。其名称由来是因为电机内的磁场极性不变。其结构一例可见图 2。其转子是一个导电圆盘，由飞轮带动高速旋转。需要产生脉冲电流的时候，定子（励磁线圈）流过直流电流，产生和圆盘垂直的磁场，在圆盘中感应径向电动势。用圆盘边缘和轴处的电刷将电流引出。同时带动飞轮减速，飞轮动能直接化为电流的能量。导磁机座用高导磁材料制成，以尽量增加圆盘表面的垂直磁场强度。这种单极电机也可以配合电感储能使用。

使用飞轮机组时，电容储能放电的回路方程适用，其中的电容  $C$  相当于  $C=2W_0/V_0^2$ ， $W_0$  是转子额定转数时的动能， $V_0$  是初始电源电压（未整流前，或单极电机的输出电压）。因此，此时放电回路的性质类似于电容储能放电。飞轮储能设备能量转换效率高（可达 90%），成本也较低，但含有更高的技术含量。

虽然原则上可在坦克上使用飞轮机组储能，但是高速旋转的飞轮造成陀螺效应减低了坦克行动的机动性。所以飞轮机组主要用在舰船上。

#### 4. 磁通压缩

另一方案是磁通压缩。其原理可见图 3 所表示的导轨加速系统。如果在脉冲电流驱动弹丸运动的过程中，压迫两导轨在弹丸后面彼此接近的方向运动，使整个导电回路被压缩，由于磁通守恒，回路里面磁场增加，使作用于弹丸的洛伦兹力增加。为说明磁通



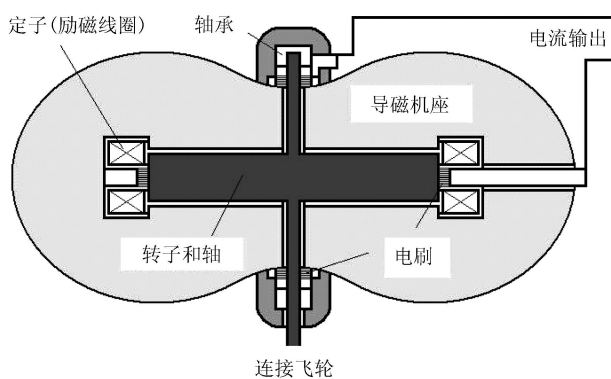


图2 单极电机结构

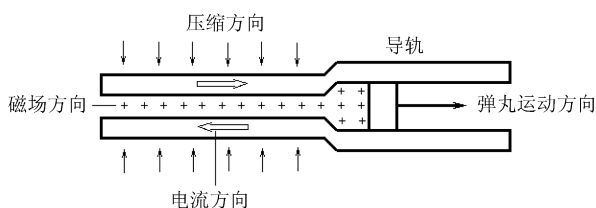


图3 磁通压缩原理图

守恒，考虑电路方程  $U = RI + L \frac{dI}{dt}$  中，电阻很小，电阻项可以忽略。再考虑自感  $L$  的变化，方程化为  $U = \frac{d(LI)}{dt} = \frac{d\Phi}{dt}$ ，其中  $\Phi = LI$  为通过回路的磁通。如果电压保持不变，则磁通守恒。

这个加速过程也可这样理解：既然整个回路面积增大即自感增大相当于将磁能传输给弹丸的动能，那么压缩回路、减少自感就意味着相反的过程，即增加磁能。一个电路的磁能是  $LI^2/2$ 。磁通压缩后，磁通  $LI$  保持不变，自感  $L$  减少，必然电流增加，使磁能增加。所以，如果自感减小一半，就是放电回路面积减小一半，磁场强度增加一倍，电流也增加一倍，加在弹丸上的洛伦兹力增加到原来的4倍。

磁通如何压缩呢？可以用炸药爆炸的方法。这就利用了化学能储能密度高、便于携带的优点。这里的能量转换过程是化学能→磁能→动能。

图3这样的磁通压缩方案可以用来解释这一方法的物理原理，但是缺乏实用性，因为导轨必须有很大强度，能抵抗磁场作用，但这样的导轨不易变形，一般被炸药压缩变形后难于恢复重复使用。

实际上用于轨道炮的磁通压缩采取不同设计方案。图4是一种螺旋绕组爆炸式磁通压缩发电机的原理图（取自吕庆敖、高敏、池小平《磁通压缩发电机——

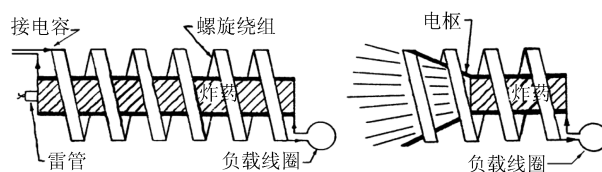


图4 螺旋绕组爆炸式磁通压缩发电机原理图

军用高功率脉冲电源》，《现代物理知识》19卷4期）。这个电机是一个螺旋绕组，中间轴心处放置一个同轴金属筒电枢，筒内装满炸药。电流从电源（如电容器组）流经螺旋绕组，再经过负载（如轨道），经金属筒返回。工作时通过远端的雷管爆炸，使金属筒电枢扩张成圆锥形，和螺旋绕组短路，并高速向右端运动，减小绕组长度、压缩磁通。电枢扩张速度可达2000 m/s。

另一种活塞式磁通压缩发电机用一个柴油燃烧驱动的活塞代替上述电枢，沿螺旋绕组运动减少自感压缩电容。这样的活塞可以反复使用，适用于坦克的内部环境。

除去电源问题以外，电磁轨道炮的主要技术问题还有轨道的烧蚀问题，须寻找适当的材料以延长使用年限。另外，在高加速度的作用下，弹丸须有很高的机械强度。

除去作为电磁轨道炮这种武器以外，电磁发射技术还有非常广阔的应用前景。众所周知的是航母上的飞机弹射。对飞机弹射的要求是：飞机4.5~45 t，100~370 km/h，相当于几十到100 m/s。以前都是使用蒸汽弹射，设备相当复杂，所以从很早起，就考虑使用电磁方法弹射。由于飞机的重量很大，所需储能量远远高于战术武器的要求。但是由于要达到的速度较低，有长的加速距离，可用的加速时间远较战术武器长，可以准确调整、控制电流波形，所以能量利用效率较高，可以达到60%左右。

总的来说，电磁发射技术近年来的发展，使得在舰船和坦克上作为武器的使用渐趋成熟，预计可在近期内装备部队。作为航母弹射装备也可望在未来几年内成为现实。

电磁发射还可用于潜艇的鱼雷发射。原来的鱼雷都是用压缩空气将其排出鱼雷管。这种方法会产生气泡，暴露潜艇的位置。如用电磁发射的方法，因为不追求发射速度，在技术上应无重大困难。