

# 电磁炮的基本原理及在军事上的应用

黄莹

赵佳

(太原理工大学(西区)物理系 山西 030024) (北京工商大学基础部 北京 100037)

电磁发射技术的萌芽早在100多年前就出现了,但只是近20多年间,由于材料科学、能源技术、开关技术的飞速发展,该技术才取得了突破性进展,显示了在众多领域的应用前景。

军事应用是电磁发射技术的重要应用领域之一。随着现代战场上进攻和防御水平的不断提高,对武器系统的技术性能指标、可靠性程度提出了更为苛刻的要求。以火炮为例,通过火药燃烧释放化学能发射炮弹的传统火炮,其最大初速度一般在2千米/秒左右,理论上普通火炮的炮口动能可达15MJ。尽管如此,对于像前苏联FST-3型坦克,仍显力不从心。这种坦克的主装甲至少需要25~30MJ才能被摧毁,而采用目前的火炮技术几乎是不可能实现的。

电磁发射技术的进步,为火炮的发展找到了新的出路。电磁炮的主要优势在于:在技术上突破传统化学炮的极限,其速度可达3~5千米/秒,甚至更高;实现膛内压力的合理分布,降低了对炮结构的要求;弹体速度高,可以精确控制。速度的增加大大提高了弹丸射程和反装甲能力,提高了对付快速目标的射击精度。因而引起了各个军事大国的重视。

## 电磁炮的基本原理

军事应用电磁炮可采用轨道炮和线圈炮两种发射方式。轨道炮适于发射质量不大的弹丸,线圈炮

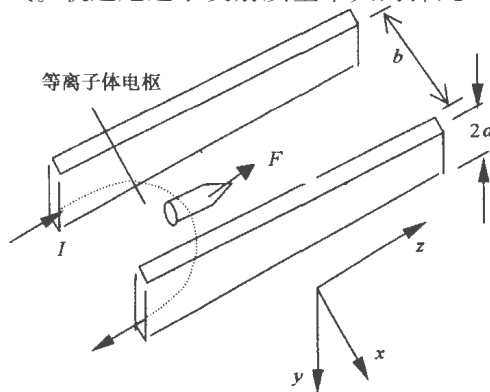


图1



用做发射质量较大的弹丸。在此初步说明轨道炮和线圈炮的电磁学原理。轨道炮的构造如图1所示。有两根宽为 $2a$ 、间距为 $b$ 、互相平行的长直、刚性平行金属导轨,炮弹可在两导轨间滑行。当强大的电流 $I$ 从一根轨道经等离子体电枢(由金属薄箔制成,当大电流通过时迅速汽化形成等离子体,使炮弹和轨道之间形成良好接触)和炮弹,由另一根轨道沿相反方向流回时,电流所产生的磁场,使炮弹因受安培力而沿轨道方向加速,从而得到很高的发射速度。若设轨道全长为 $L$ 、轨道电流 $I$ 数值不变,则水平发射时炮弹的发射速度可按如下方式近似求解。

图2为左边轨道的横截面,忽略轨道厚度,把轨道看成是宽为 $2a$ 的半无限长均匀载流薄板。坐标轴如图2所示,将载流薄板看作由无数多根半无限

长载流直导线组成。则根据毕奥-萨伐尔定律和磁场叠加原理,可求得 $P$ 点处的总磁感应强度为:

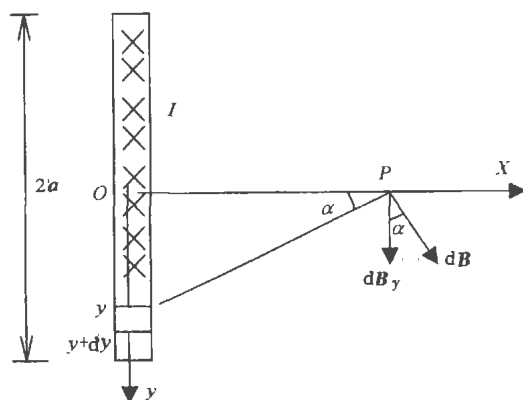


图2

长载流直导线组成。则根据毕奥-萨伐尔定律和磁场叠加原理,可求得 $P$ 点处的总磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left[ \arctan \frac{a}{x} + \arctan \frac{a}{b-x} \right]$$

由对称性分析可知, $x$ 轴上任一点 $P$ 处的磁感应强度 $B$ 沿 $y$ 轴正向。根据安培力公式,炮弹所受的安培力指向 $Z$ 轴正向,大小为:

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} \left[ \frac{1}{2} \pi b - b \arctan \frac{b}{a} + a \ln \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right]$$

作用在炮弹上安培力所做的功转化为炮弹运动的动能。当水平发射时,忽略摩擦等损耗,  $A = mv^2/2$ , 当轨道电流  $I$  数值不变时,发射速度为

$$v = \sqrt{\frac{2A}{m}} = I \left[ \frac{\mu_0 L}{\pi a m} \cdot \left[ \frac{1}{2} \pi b - b \arctan \frac{b}{a} + a \ln \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

可见发射速度与电流强度成正比,只要电流强度足够大,就可以获得很高的发射速度。日本东京大学在轨道炮的实验中,获得了出膛速度为 7.45km/s 的好成绩。

轨道电磁炮遇到的一个严重问题是炮弹内壁受到高温高压的等离子体电弧的作用产生烧蚀和变形,影响发射,降低炮膛寿命。在过去的几年间,美国经过深入研究,已使炮膛寿命增加了 100 倍,基本达到了战术系统要求的指标。

线圈炮是靠磁场耦合来推动弹体的,其构造原理如示意图 3 所示,炮筒上固定有若干个线圈,依次将高压交变电流引进这些静止的线圈,形成强大的磁场。如先给线圈 1 加一脉冲交变电流,其他线圈先不通电。则由电磁感应,在弹体上的线圈中有感应电流产生,该电流与加速线圈 1 的电流相位相反,因而弹体受到一个斥力被推向前。当弹体离开加速线圈 1、2 之间进入 2、3 之间时,在线圈 2 中接通电流……于是弹体受到一系列加速线圈的加速而获得很高的发射速度。

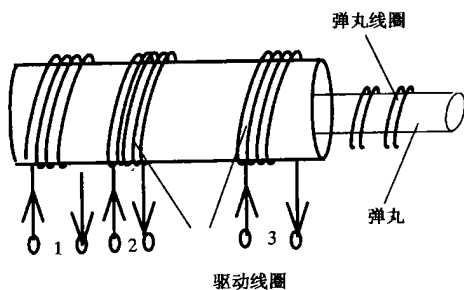


图 3

以加速线圈接通的瞬间为计时起点,设所加电动势为  $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t + \alpha)$ 。在没有铁磁质且忽略互感对加速线圈电流影响的情况下,有

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = \epsilon_0 \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

$$i_1(0) = i_2(0) = 0$$

式中  $L_1$ 、 $R_1$ 、 $i_1$  和  $L_2$ 、 $R_2$ 、 $i_2$  分别为加速线圈和弹丸线圈的自感、电阻和电流; $M$  是二者之间的互感。

由实际情况  $R_1 \ll \omega L_1$ ,  $R_2 \ll \omega L_2$ , 所用的交变电流频率很高( $f=1000\text{Hz}$ ),脉冲周期约为 1ms。而弹体在整个炮膛内飞行时间也仅有 1~2ms,因此用半定量方法计算,有

$$\begin{aligned} i_1 &= I_{10} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \\ i_2 &= \frac{MI_{10}}{L_2} [-\cos \alpha + \cos(\omega t + \alpha)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $I_{10} = \epsilon_0 / \omega L$ 。式(3)表明,  $i_1$ 、 $i_2$  始终保持反相,因此两线圈之间始终存在斥力相互作用。

设  $M_0$  为电源接通瞬间加速线圈与弹体线圈之间的互感,弹体线圈向前运动后,互感渐减至零。当经过  $N$  级线圈加速,质量为  $m$  的炮弹,在水平发射时(不计摩擦等损耗),发射速度为

$$\begin{aligned} v &= M_0 I_{10} \sqrt{N \left[ \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \right]} \\ &= -\frac{\epsilon_0 M_0}{\omega L_1} \sqrt{N \left[ \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \right]} \end{aligned}$$

线圈炮的优点在于它是一种无接触发射,可以克服轨道炮面临的导轨烧蚀问题,可以加速大弹,加速力施加在整个弹体长度上(轨道式电磁炮加速力只作用在弹尾横截面上),能量转换率高。线圈炮的关键技术在于保证激励电流与弹体的运动同步,从而使整个电路较为复杂。

## 应用

突破传统火炮的速度极限是对火炮技术的一次革命。电磁炮以其优越的性能,显示了终将代替传统火炮的趋势,是未来战场上防空、反导、穿甲的有效手段。

陆军应用主要在于电磁炮弹丸高速运动能带来的穿甲能力。美国的实验证明,50 克、初速 3km/s 的弹丸能穿透 25.4 毫米的装甲板。

海军目前面临最严重的问题是在高性能反舰导弹攻击下如何防卫的问题。用高速电磁炮代替小口径火炮进行防空反导,可以极大地增大防卫半径和杀伤概率。海军感兴趣的另一项应用是舰载电磁弹射装置,作为航空母舰上的飞机弹射器。采用了类似线圈炮的原理,能在 3 秒钟内把一架全载的 F-14 战斗机(总重 36 吨)以 277 千米/小时的速度弹射出去。这种弹射器重量只有蒸气弹射器的 1/10,而且安全可靠,减小了噪声和空气污染。

空军方面可用电磁发射装置来发射无人侦察机、滑翔运输机等。采用电磁加速器可以形成一种全新的野战机场和短程起降方式。此外,美国早在

# 微米/纳米技术军事应用潜力巨大

任风云 樊昊 付耐根

(徐州空军学院航空弹药系 江苏 221000)

微米/纳米技术包括从亚毫米到亚微米尺寸的材料、工艺和器件的综合和集成技术,该技术领域将对航天工程、信息技术、制导武器、计算机、传感器探测技术、航空航天电子技术、雷达技术、隐身技术、微型机械设计与制造、微型光学自适应技术等诸多技术领域产生重大影响,其军事应用价值和潜力十分巨大!所以美国空军航天与导弹系统中心(SMC)从20世纪90年代初就开始预测微米/纳米技术在上述技术领域对未来空军武器装备系统和新系统结构发展的潜在影响。

众所周知微电子技术发展曾使精确制导武器命中率提高2个数量级;使相控阵雷达功能提高了 $10 \times 10^3$ 倍,平均无故障时间提高了230倍,重量和功耗大大减少;利用信息技术(IT)使电子对抗系统的信息处理能力达到几十亿条指令/秒;微电子技术是军事通信的核心,它使军用集成电路可以实现保密通信;利用微电子技术研制的大型计算机可以处理复杂战场态势变化;微电子芯片技术已经使新武器系统和整个信息兵器出现了质的变化,是新型武器的“大脑”和“眼睛”……具有代表性的武器装备如固体相控阵雷达、合成孔径雷达、预警飞机、导弹预警卫星、C4ISR系统、各种高精度制导武器、军事定位卫星、军事通信卫星、军事仿真系统、作战模拟系统、可视化系统、综合电子战系统等都使用了微电子技术,而且使这些系统具有更高的功能、更快的速度、更高的精确度和更强的自动攻防能力,并使指挥控制系统具有更高、更快、更精确以及安全、快捷和机动的应变能力。近10年内微米/纳米技术领域的发展已经使上述技术获得更大的飞跃!纳米技术是操纵原子、分子重新排列组合,形成新的物质,制造出

具有特殊功能材料的技术。目前该技术领域的微工程技术已经将大规模集成电路即“专用集成电路”发展为“专用集成微型仪表”(ASIM)技术,ASIM技术是一种高水平微型器件,它可以将各种传感器、致动器、信号和数据处理器集成在一块基片上,构成一个微型仪表,这种仪表实际上就是一个高度复杂的系统。用它可探测局部地区或遥远地区的环境信息,并可以按已编制的程序指令做出决策,并使微致动器与电、流体控制器以及信息数据处理系统工作,信息还可通过基片与相关的微型仪器进行直接通信或无线电通信。关于ASIM的制造技术与工艺是由半导体工艺技术——ASIC技术发展起来的,其中最典型的是将硅和其他材料进行三维机械加工,而制成的各种“微机电系统”(MEMS),MEMS主要研究内容包括微型传感器、微型执行器、信号处理器、智能器件和控制电路于一体的微型机电一体化产品,MEMS尺寸极其微小,达到微米/纳米范畴。但这种微型MEMS确具有高级智能,它具有识别、分析、判断和动作等功能。预计到2010年左右将有一大批产品问世,将形成21世纪难以估量的庞大高技术市场,其规模之大将会超过微电子芯片产业,MEMS技术已经成为世界十大科学技术之一。预计到2015年利用微米/纳米技术将可以研制出单量子计算机、量子波计算机、单量子通信和量子波通信设备,其运算和通信功能将比微电子器件快1000~10000倍,能耗降低到1%,量子微型处理器的效率可提高100万倍。目前已经研制出 $10^{12} \sim 10^{14}$ 的存储器、单电子器件和各种传感器。利用纳米生物技术将在21世纪研制出DNA神经网络计算机,1998年美国普林斯顿大学两位科学家已经获得了DNA计算机专利。

80年代初就提出研制每分钟能发射500发炮弹的电磁炮作为机载武器和防空武器。

从战略防御的角度讲,用电磁炮拦截战略弹道导弹有其独特的优势——用动能摧毁目标效果比较可靠。计算表明电磁炮弹丸只要具有几兆焦耳的动能就有把握摧毁来袭导弹。如重10克、速度为20千米/秒

的2兆焦耳的弹丸,完全可以使导弹外壳裂解或气化。

总之,现代战争绝对需要比较高的弹头速度和动能。此问题对于防空反导最为关键,同时,随着坦克的装甲越来越厚,穿甲武器的动能也必须大大提高。电磁发射技术特别是电磁炮技术的应用无疑会发动一场新的常规武器系统革命。