

# 磁通压缩发电机

## ——军用高功率脉冲电源

吕庆敖 高敏 池小平

目前,正在研究的新概念武器主要有定向能(强激光、高功率电磁脉冲、粒子束)武器和电发射动能武器两大类等。除了使用有毒气体的化学激光武器之外,上述新概念武器都需要脉冲功率电源(Pulsed Power Supply, PPS)激励或驱动。

军用 PPS 除具有普通电源的脉冲高功率和巨大能量外,还要求有系统独立性和轻便性。独立性是指不依赖于其他(如民用电网)系统,轻便性则要求其体积和重量符合军用运载工具的要求。而磁通压缩发电机(Magnetic Flux Compression Generator, MFCG)是一种已初步用于军事并逐步拓展应用领域的脉冲功率电源。

### 一、MFCG 概念和物理原理

MFCG 按照结构不同可以分为三类。第一类为一次性使用的爆炸式磁通压缩发电机,英文名称为 Magnetic Flux Compression Generator(MFCG)或 Flux Compression Generator(FCG),相应的汉语名称为磁通压缩发电机或磁压缩发生器。第二类为旋转式磁通压缩发电机,名称为旋转磁压缩发生器(Magnetic Flux Generator)、补偿脉冲交流发电机(Compensatory Pulse Alternator 或 Compulsator, 缩写为 CPA)等。第三类为活塞式磁通压缩发电机,名称有脉冲直线发电机(Pulsed Linear Generator)、直线通量压缩器(Linear Flux Compressor)、磁通压缩功率器(Flux Compression Power Unit)。上述三种脉冲发电机都称为 MFCG,原因是其工作过程遵循同样的物理原理——总磁通(或磁通匝链数)守恒原理。

一个可变电感  $L(t)$  和可变电阻  $R(t)$  串联为回路,回路电流为  $I(t)$ ,则有基尔霍夫回路电压方程  $(d/dt)[L(t)I(t)] + R(t)I(t) = 0$ 。当回路电阻  $R(t)$  小到可以忽略时,上述方程的解为  $L(t)I(t) = L(0)I(0)$ ,即任何时刻的总磁通都等于初始时刻的总磁通,这就是总磁通(或磁通匝链数)守恒



原理。磁通压缩发电机就是根据总磁通守恒原理,在外力作用下实现电感减少、电流放大、总磁能  $0.5L(t)I^2(t)$  也相应变大等功能的装置或设备。从以上电路模型看, MFCG 是伴随电感减少过程的电流放大器,也是磁能放大器,因此有人提议,“磁能累积器(Magnetic Energy Accumulator)”最能说明 MFCG 的物理本质。MFCG 在小体积内积累起来的磁场强度远远高于超导体提供的磁场强度,目前强磁场的世界纪录就是由爆炸式磁通压缩发生器产生的。

MFCG 概念也可以空间电磁场模型表述:在外力作用下,如果导体快速压缩磁场所占的空间,由于导体的瞬间抗磁性,则空间磁力线密度(即磁感应强度)变大,磁能也相应增加。

从上述两种模型可很快归纳出 MFCG 的基本特征:在阻性负载较小及快压缩过程(相应的脉宽毫秒级或更窄)时,磁场能量随磁场所占空间体积的减少而增大。

### 二、MFCG 的技术特征

MFCG 的技术特征为能量高、功率大、结构简单、技术复杂、体积小、重量轻,适合军事使用。

发电功率高、能量大 三类典型的 MFCG 分别采用炸药驱动、柴油机带动旋转储能飞轮驱动、活塞式直线驱动,典型脉宽为毫秒和亚毫秒级,功率在 GW 级以上。典型的电枢速度如下:炸药驱动金属电枢形变速度约  $2\text{km/s}$ ,坦克发动机带动的储能飞轮轮缘线速度可超过  $500\text{m/s}$ ,而直线式活塞推进速度一般为  $200\sim 600\text{m/s}$ 。炸药的储能密度约为  $5\text{MJ/kg}$ ,柴油的储能密度约为  $43\text{MJ/kg}$ (不计所需氧气质量)。MFCG 采用普通线圈绕组的近于零负载的正反馈电流励磁,脉冲电流可达  $10^6\text{A}$  以上,磁感应强度可达  $10^1\text{T}$  以上,超过了超导体提供的磁感应强度数值。基于电枢速度快、磁感应强度大等特点, MFCG 的发电功率高、能量大。

适合军事应用 MFCG 具有隐蔽性好, 准备性好、响应快, 机动性好, 符合作战模式要求, 经济节约的特点, 因而适合军事应用。

隐蔽性好。MFCG 处于待发状态时, 无明显的特征信号(如红外、电磁波信号)辐射, 在战场上易于伪装和隐蔽, 提高了武器装备的生存能力和对敌人打击的突发性, 形成对敌威慑力。

准备性好、响应快。MFCG 带动负载时, 可随时处于待发状态, 无须提前准备, 也无须启动预热、预热等部件。

机动性好。MFCG 体积小、重量轻, 可机动部署并脱离民用电网独立工作。对于现有实验室以电容器组为主体的脉冲功率电源, 电容器储能密度约为  $1\text{kJ}/\text{kg}$ , 若储能  $50\text{MJ}$ , 重量则为  $50$  吨, 坦克不能承载。而爆炸式 MFCG 要发电  $50\text{MJ}$ , 系统重量不足  $1$  吨; 可重复使用的 MFCG 要发电  $50\text{MJ}$ , 系统重量也不足  $10$  吨, 因此坦克或装甲车辆都能承载。

符合作战模式要求。一次性爆炸式 MFCG 可装配导弹、航空炸弹或炮弹进行饱和攻击; 可重复使用的 MFCG 支持的电炮, 具有高射速和持续打击的作战能力。

经济节约。现代战争越来越重视经济成本。一次性爆炸式 MFCG 使用炸药、铜材、蓄电池、电容器等普通器材; 可重复使用的 MFCG 则采用柴油, 燃烧热高, 且无须专门开发推进剂。

### 三、典型 MFCG 与军事应用

MFCG 可分为爆炸式、旋转式、活塞式三类, 下面分别介绍其结构和军事应用情况。



图1 螺旋绕组爆炸式MFCG结构示意图  
装配完好的MFCG(左图)和工作过程中的MFCG(右图)

爆炸式 MFCG 可以有多种不同结构, 但最常用的是同轴式螺旋绕组结构。图 1 所示的是一种经典的单端起爆同轴式螺旋绕组 MFCG 结构。螺旋绕组内同轴放置一个高电导率、高延展性的圆筒形铜电枢, 电枢两端绝缘固定, 电枢内盛炸药。当已经充电的电容器组为绕组充电并形成种子电流后, 由雷管从电枢一端引爆炸药柱, 爆轰波速度约为  $8\text{km}/\text{s}$ , 炸药爆炸推动电枢扩张的速度约为  $2\text{km}/\text{s}$ ,

这样就形成了约  $14^\circ$  的锥角。在炸药逐步的爆炸过程中, 电枢连续接触绕组使绕组长度逐步变短, 在负载上测出逐步放大的电流。

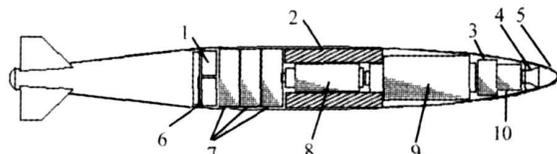


图2 美国MK84高功率微波弹头结构示意图  
1.功率源, 2.介质护套, 3.脉冲成形网络, 4.微波辐射天线, 5.介电锥头, 6.蓄电池, 7.储能电容器, 8.第一级MFCG, 9.第二级MFCG, 10.虚阴极振荡器

这种螺旋式 MFCG 出现于上世纪 50 年代。美国桑迪亚实验室和法国马特拉公司都采用这种典型的 MFCG 两级串联用于微波弹的驱动电源(图 2)。在图 2 所示的微波弹头结构中, 1 和 6 为蓄电池, 它为电容器组 7 供电; 7 又为 MFCG 8 提供种子电流, 同时 8 发电的电流又是 MFCG 9 的种子电流; 9 为虚阴极振荡器 10 供电; 10 把电压和电流的能量转换为微波能, 并由微波天线 4 辐射出去。据说, 美国在第一次海湾战争中就已试用这种 MFCG 驱动的微波弹。

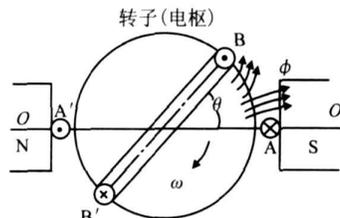


图3 补偿脉冲交流发电机(CPA)结构示意图

旋转式 MFCG 的动力是高速旋转的动能飞轮。旋转式 MFCG 的高功率脉冲发电可采用多种形式, 有单级发电机(HPG)、磁通压缩发电机等, 但 HPG 输出电压较低, 应用范围受限。旋转式 MFCG 的主要类型称为补偿脉冲交流发电机(CPA), 主要结构如图 3 所示, 包括 NS 磁极、转子线圈  $BB'$ 、固定线圈  $AA'$ 。转子线圈  $BB'$  在 NS 磁极形成的固定磁场中转动产生种子电流, 固定线圈  $AA'$  与转子线圈  $BB'$  串联。两线圈重合时有最大电感, 两线圈反向重合有最小电感。当两线圈从最大电感位置转动到最小电感位置时, 因磁通压缩而发电。这种依靠减少电感获取放大电流和能量的装置自然属于磁通压缩发电机。

CPA 于 1978 年由美国德克萨斯大学机电中心发明, 作为电磁发射技术的主要电源方案之一, 在世界范围内进展迅速, 现已开发出多种形式。虽然这

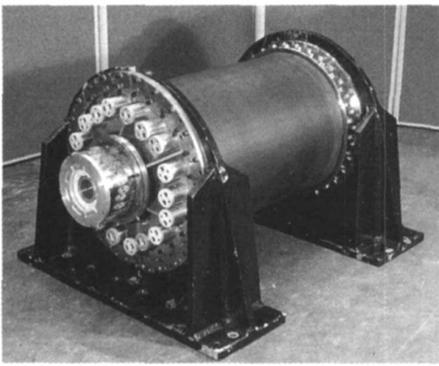


图4 美国准备用于大型舰艇上作为电炮电源的一种脉冲发电机。这种旋转飞轮的储能密度较高,但是高速转动飞轮的巨大角动量却降低了其机动性,所以旋转储能的脉冲发电机适合安装在舰艇等平台上。图4是最新开发的准备用于舰艇上作为电炮电源的一种脉冲发电机,在军事上的优势之一是较高的放电重复率(对应于电炮的射速,如每分钟5发)。

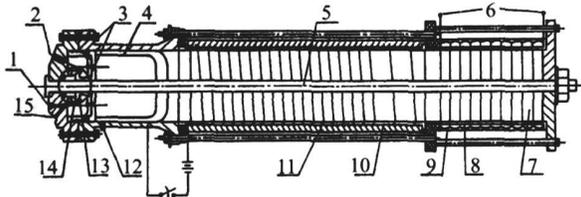


图5 活塞式螺旋绕组MFCG结构示意图

1. 点火引线, 2. 燃料加注孔, 3. 电刷, 4. 活塞, 5. 中心导杆,
6. 输出端, 7. 空气室, 8. 初级线圈, 9. 次级线圈, 10. 螺旋绕组,
11. 复合材料, 12. 排气, 13. 卡锁, 14. 卡销, 15. 充气塞

旋转式MFCG的飞轮虽然储存了足够的动能,但如此大角动量的陀螺效应却导致机动性不佳。为此,1993年乌克兰专家提出适合机动战车搭载的活塞式螺旋绕组MFCG概念,其后引起了包括美国和中国在内各国专家的重视,开展了工程设计、验证试验等。图5为美国卡曼电磁公司设计的活塞式螺旋绕组MFCG,主要由机械、机电、输出三大部分构成。机械部分包括燃烧室、发电室、减速室等,燃烧室含柴油-空气注入孔、点火器、卡锁、卡销结构等;发电室即活塞加速和发电的通道;减速室含排气孔和密闭气体室。发电部分主要由螺旋绕组、种子电流源、开关、电枢、电刷、中心导杆等组成,输出部分主要有变压器结构的初级线圈和次级线圈,初级线圈即发电的负载、次级线圈即电炮负载的电源。

活塞式MFCG工作过程为:在燃料燃烧形成的推力作用下,活塞组件轴向运动。组件上的电枢和电刷可以连续短路螺旋绕组,使绕组电感减少、电流放大。当活塞离开发电段时发电过程结束,排气阀

门打开,活塞组件在惯性作用下压缩减速室内的空气并最终被压缩空气反弹回燃烧室,准备启动下一个发电过程。很明显,活塞式MFCG结构最紧凑,能够装载于M1A1坦克,机动性好;而且在带动负载前无须预先启动旋转部件和预热部件,准备性好。



图6 装载微波武器“主动拒止系统”的“悍马”军车

活塞式螺旋绕组MFCG用于电磁发射时,可以带动射速不低于传统火炮的电炮。另一方面,美国在驱赶暴徒时使用的机载微波武器“主动拒止系统”(图6)就暴露了采用军车发动机发电带动微波武器的不足,而活塞式螺旋绕组MFCG则可解决上述问题。当然,活塞式螺旋绕组MFCG也可潜在应用于电能泵浦的固态激光和自由电子激光等可重复使用的新概念武器的脉冲功率电源。它与旋转式MFCG相比,体积更小、机动性更好。

总之,无论是一次性的爆炸式,还是可重复使用的旋转式和活塞式,磁通压缩发电机(MFCG)是一种技术集成度高、体积小、重量轻、准备性好、响应及时的脉冲功率电源。与目前实验室使用的电容器组脉冲电源系统相比,突出优点是独立性和轻便性,适用于新概念武器。

(河北省石家庄市军械工程学院弹药工程系 050003)

### 封面照片说明

这是一台全超导非圆截面托卡马克核聚变实验装置(EAST),是由中国科学院等离子体研究所研制的。该实验装置集全超导和非圆截面两大特点于一身,同时具有主动冷却结构,能产生稳态的、具有先进运行模式的等离子体。它的研制成功使我国的聚变研究向前迈进了一大步,并受到国际同行的关注。

(李博文)