

活塞式螺旋绕组磁通压缩发电机的原理实验

吕庆敖, 高敏, 雷彬, 杨秋学, 赵科义

(军械工程学院弹药工程系, 河北省石家庄市 050003)

Experiment on the Piston-type Magnetic Flux Compression Generator With a Helix Winding

LÜ Qing-ao, GAO Min, LEI Bin, YANG Qiu-xue, ZHAO Ke-yi

(Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: A kind of piston-type magnetic flux compression generator (MFCG) prototype model with a helix winding is developed to prove the working principle of decreasing the inductance for the enlarged current. The traditional $\phi 100\text{mm}$ gun accelerates the piston into the magnetic region within a helix winding. The piston is composed of the conical armature and the copper-wire-bundle brush etc.. The helix winding has an inductance of $42\mu\text{H}$ and an inherent resistance of $3.7\text{m}\Omega$. Fed by the charged $600\mu\text{F}$ capacitors, the winding is scanned and shorted by the piston with an about 200 m/s velocity in the experiment, as a result, the circuit current is magnified continuously in the whole time interval about 2.5ms . At last, the current evaluation is analyzed in three aspects: the ambiguous transition of the feeding and the generating, the particular fluctuation of the amplifying process, and the reason of the noise at the end of the fluctuation.

KEY WORDS: magnetic flux compression generator; pulsed power supply; prototype model; experiment; helix winding

摘要: 为了验证活塞式螺旋绕组磁通压缩发电机(MFCG)“减小电感以放大电流”的工作原理,设计制作了活塞式螺旋绕组 MFCG 原理样机,并完成了原理实验。借用传统火炮作动力系统,活塞组件采用短路毛刷、锥形电枢等复合结构, $600\mu\text{F}$ 电容器组为 $42\mu\text{H}$ 螺旋绕组提供种子电流,活塞组件以约 200m/s 的速度完成磁通压缩发电的过程。测量结果显示:在电感逐步减小的 2.5ms 时间间隔内,回路电流逐步放大。分析了电流波形的三个问题:充电段与发电段的模糊过渡、独特的电流放大波形、发电结束时的噪声问题等。根据测量结果推测了运动电接触的阻值范围。原理实验为进一步 MFCG 研究提供了重要参考。

关键词: 磁通压缩发电机; 脉冲功率电源; 原理样机; 实验; 螺旋绕组

0 引言

在高功率脉冲电源技术领域,有电容器组储(电能)电源、电感器储(磁)能电源、单极发电机(HPG)、磁流体(MHD)发电机、磁通压缩发电机(MFCG)等电源方案。其中磁通压缩发电机(magnetic flux compression generator, MFCG)可以集动力系统、发电、波形调节于一体,技术集成度高,结构紧凑。目前主要应用于电磁发射、强电磁脉冲、强磁场物理、模拟核爆炸实验等研究领域^[1-3]。

近几年,活塞逐步短路螺旋绕组的 MFCG 因有特别优势而受到广泛关注^[4-10],主要优点有:可重复使用,节约使用成本;及时短路绕组,可降低回路电阻,提高系统发电效率;重量轻、体积小,可机动部署;无须提前准备,可随时发电供设备使用。然而,这种活塞式 MFCG 方案“减小电感而放大电流”的工作原理至今没有从实验方面得到直接验证。为了检验这种活塞式螺旋绕组 MFCG 方案的原理可行性并探索工程技术问题,在对爆炸式螺旋绕组 MFCG 发电过程分析^[11]的基础上,对现有活塞式 MFCG 方案^[5]的活塞组件做了重要改进,设计和制作了活塞逐步短路螺旋绕组 MFCG 的原理实验样机,并完成了初步的原理演示实验,探索了所需工程技术条件。

1 活塞式螺旋绕组 MFCG 的工作原理

与所有 MFCG 一样,活塞式螺旋绕组 MFCG 工作的基本原理是通过减小电感而实现电流的放大。其电路模型是一个取值 $L(t)$ 的可变电感和一个取值 $R(t)$ 的可变电阻串联成回路,回路电流为 $I(t)$,

则回路电压方程为

$$\frac{d}{dt}[L(t)I(t)] + I(t)R(t) = 0 \quad (1)$$

考虑初始条件 $L(t)|_{t=0} = L(0)$, $I(t)|_{t=0} = I(0)$, 则上述电压方程的解为

$$I(t) = \frac{L(0)}{L(t)} I(0) \exp\left\{-\int_0^t \frac{R(t)}{L(t)} dt\right\} \quad (2)$$

式(2)表明: 在电阻较小 $R(t) < -dL(t)/dt$ 的情况下^[6], 电感减小则电流变大, 这就是活塞式螺旋绕组 MFCG 的工作原理。实验验证这个原理就是控制回路电阻, 减小电感, 测量到放大的电流。

对要研制的活塞逐步短路螺旋绕组 MFCG 的原理实验样机, 绕组电感、绕组内阻、连接导线的电阻、活塞组件短路绕组的速度、回路电流等都是可直接测量的参数, 不便直接测量的是电刷与螺旋绕组之间的运动接触电阻。在电磁导轨炮研究过程中, 对运动金属之间的接触电阻有广泛的研究, 分为点接触电阻模型和速度趋肤效应模型两类^[12-13]。对于 MFCG 只能考虑点接触电阻模型, 然而此模型也只能提供接触电阻与侧压力成正比的定性结论, 接触电阻的阻值只能靠具体的实验测试。运动接触电阻的不确定, 直接导致回路总电阻的不确定。

2 活塞式螺旋绕组 MFCG 原理实验机

图 1 是活塞逐步短路螺旋绕组 MFCG 的原理实验机结构示意图, 它包括六大系统: 动力系统、发电通道、活塞组件、充电系统、测量系统、机械固定与连接系统等。

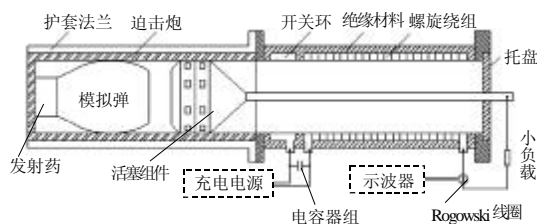


图 1 活塞式磁通压缩发电机结构示意图
Fig. 1 Schematic configuration of MFCG

动力系统借用国产 100mm 口径某型号的迫击炮、相匹配的发射药、相匹配的模拟弹等设备。

发电通道主要由开关环、绝缘材料、螺旋绕组, 并配以法兰和其它紧固件等构成。其中螺旋绕组电感 $42\mu\text{H}$, 内阻 $3.7\text{m}\Omega$, 纯铜材料制成, 内径 $f100\text{mm}$, 内壁裸露。

从尾部开始, 活塞组件包括缓冲体、两套电刷体、锥形电枢、中心导杆、防护托盘和连接导线等

6 部分。缓冲体能够缓冲冲击力, 保证模拟弹碰撞活塞组件时两者都不破裂。两层电刷体上共有 16 把铜丝毛刷, 电刷外缘尺度略大于发电通道内径。活塞组件可在发电通道内滑动, 如接通电路, 即当电刷扫过开关环和绝缘环时, 完成电容器组对螺旋绕组的充电与断开两过程; 当电刷扫过绕组时, 能连续短路螺旋绕组。电枢为前部尖的锥形体, 铝材料制成。中心导杆也为铝材料, 既充当回路的一部分, 又对活塞组件起导向作用。在发电结束时, 对中心导杆起支撑作用的防护托盘随活塞组件和模拟弹一同被打进收弹土堆中。连接导线是外套绝缘皮的铜编织带。

充电系统可为螺旋绕组充电, 形成种子电流, 在绕组内空间形成种子磁通。它主要包括电容器组、连接导线和为电容器组本身充电的回路。为电容器组充电的回路包括整流硅堆、限流电阻、车载发电机、连接导线等。车载发电机适合在野外作业。

测量系统指罗柯夫斯基(Rogowski)线圈和示波器。罗柯夫斯基线圈为电磁发射实验室现有的, 记忆存储示波器为美国 Tektronix 的双通道存储示波器, 该测量系统主要测量脉冲电流的脉宽 $3 \times 10^{-4}\text{s} \sim 3 \times 10^{-3}\text{s}$ 、幅值 $10^2\text{A} \sim 10^5\text{A}$ 。

机械固定与连接系统包括实验支架、护套法兰、同轴定位芯棒及配套连接与固定等。

3 MFCG 原理实验的结果与分析

在某兵器试验基地进行了磁通压缩发电的原理实验。装配过程: 用护套法兰卡住火炮, 与发电通道同轴固定连接, 再一同固定在接近水平放置的发射平台上。首先进行 LCR 振荡实验。选择不同数量的 MY5-150 电容器并联组成电容器组对螺旋绕组充电, 用测量系统记录 LCR 振荡波形。所测量的振荡周期如表 1 所示。

由表 1 可知, 1、3、4 块电容器与螺旋绕组 LCR 振荡周期分别为 0.5、0.8、1ms。由于活塞穿过充电开关环的时间估计为 0.25ms, 则选择 4 块 MY5-150 为绕组充电, 磁通压缩发电过程开始时螺旋绕组内的种子电流将正好能达到峰值。

表 1 螺旋绕组与不同电容的 LCR 振荡周期的实验结果
Tab. 1 The LCR vibration period

MY5-150 电容器数目	电容值/ μF	振荡周期/ms
1	150	0.5
3	450	0.87
4	600	1.0

活塞式 MFCG 原理实验过程为：根据图 1，按先后顺序从炮口堵塞模拟弹和活塞组件；穿过 Rogowski 线圈连接螺旋绕组、小负载、中心导杆等构成测量主回路；Rogowski 线圈连接示波器；并联 4 块 MY5-150 电容器作为电容器组，接入发电通道的接线端子，由车载交流发电机经充电回路为电容器组充电后断开；示波器设置为自动触发和记录状态；隐蔽，拉发开炮，模拟弹在火药力作用下运动并推动活塞组件。活塞组件在发电通道内滑动完成对绕组的自动充电、断开、磁通压缩发电、再断开等一系列过程。活塞组件和模拟弹在发电通道内的速度约为 200m/s。穿过发电通道后，活塞组件和模拟弹都打在收弹的土堆中。

示波器记录的典型回路电流波形如图 2 所示。在图 2 中，电容器开始为螺旋绕组充电的触发时刻发生在横坐标第二格即 1ms 处，触发之前回路电流为零。触发开始后延续半格即 0.25ms(LCR 振荡的 1/4 周期)是电容器组为螺旋绕组充电的阶段，种子电流呈正弦率上升直至峰值(对应图 2 中约 1.2kA)。从触发后 0.25ms 开始直至过程结束为磁通压缩发电过程，回路电流在这段时间间隔内持续上升(对应图 2 中约 1.2kA 到约 3.2kA)。

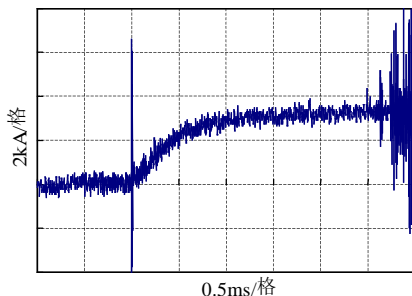


图 2 磁通压缩发电过程的电流波形

Fig. 2 The current fluctuation of the piston-type MFCG

仔细观察图 2，还可以发现 3 个问题：①充电段与磁通压缩发电段没有明显的过渡突变；②磁通压缩发电段电流上升先快后慢，尤其发电开始 0.5ms 后电流虽仍上升，但上升幅度较小；③磁通压缩过程结束时噪声信号太大。

第 1 个问题和活塞组件的特殊结构有关。参看图 1 所示的活塞组件可知：在运动电刷主导的充电过程还没有结束时，锥形电枢已经进入了螺旋绕组内部，开始了磁通压缩发电过程。体现在电流波形上就是充电阶段与发电阶段没有明显的过渡突变。

第 2 个问题是个关键。在 MFCG 基本理论方程中唯一不能确定的参量就是运动过程的接触电阻。

本实验中电刷采用铜丝毛刷结构，由于运动中与钢材、铜材、玻璃纤维的摩擦损耗，有效的铜丝数量会减少。根据运动的点接触电阻模型，A 点减少则接触电阻增大，这就是回路电阻逐步增大、回路电流上升先快后慢的原因。在 MFCG 开始时，A 点数量较多，接触电阻较小，阻值较小的导体内阻占主要因素，表现为电流上升较快；其后，A 点逐步被磨损，接触电阻阻值迅速增大成为主要因素，回路导体内阻逐渐减小成为次要因素，表现为回路电流上升得越来越慢。

反过来，根据电流临界放大的条件 $R(t) \leq -dL(t)/dt$ 和实验数据曲线可以估计运动接触电阻阻值的大小。在本文中，电枢以 200m/s 的速度扫过绕组，则绕组电感系数的减小率约为 $15\text{m}\Omega$ 。当所测电流上升缓慢接近于恒定时，回路总电阻应接近于电感减小率即 $15\text{m}\Omega$ ，减去必要的连接线内阻，则接触电阻最大值超过了 $10\text{m}\Omega$ ，当然也不能超过 $15\text{m}\Omega$ 。

第 3 个问题是在电刷要冲出发电通道的瞬间和其后阶段，形体的扰动造成电刷和绕组的瞬间断路，而发射药燃气等离子体的及时导电延续了回路电流，但等离子体的扰动噪声是明显的。所以发电结束时的强噪声正是发射药燃气等离子体导电的反应，也是活塞组件冲出发电通道的标志。

总之，图 2 所示的独特的回路电流波形正好反应了图 1 所示的活塞逐步短路螺旋绕组 MFCG 原理实验机的结构和发电特性，验证了“减小电感以放大电流”这个活塞逐步短路螺旋绕组 MFCG 的工作原理。

4 结论

介绍了 MFCG 工作原理，利用现有某型号迫击炮作动力系统，设计制作了活塞逐步短路螺旋绕组的 MFCG 原理实验方案。螺旋绕组的内径为 $\phi 100\text{mm}$ 、活塞组件的速度达 200m/s。测试结果在 2.5ms 的磁通压缩发电过程中电流连续上升，从而验证了“通过减小电感获得放大电流”的活塞逐步短路螺旋绕组 MFCG 工作原理，并推算了铜丝电刷在运动过程中的接触电阻最大值超过了 $10\text{m}\Omega$ 。

本次实验验证了“通过减小电感而放大电流”活塞式螺旋绕组 MFCG 的基本原理。但是运动接触电阻限制了电流放大的幅度，如何增大电感的减小率^[6,14]和限制回路电阻仍然是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] Fowler C M, Caird R S, Garn W B. An introduction to explosive magnetic flux compression generators: LA-5890-MS [R]. Los Alamos: Los Alamos National Lab, 1975.
- [2] 王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [3] 陈冬群, 曹胜光, 刘永贵, 等. SF₆ 爆磁压缩发生器的高压绝缘实验研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 9, 19.
Chen Dongqun, Cao Shengguang, Liu Yonggui, et al. Experiment study on HV insulation of explosively driven magnetic flux compression generator Using SF₆[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 9, 19(in Chinese).
- [4] Mongeau P. Combustion driven pulsed linear generators for electric gun application [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 35(1): 468-473.
- [5] Goldman E B, Davies F, Bickford J, et al. Development of a flux compression power unit for milli-second ETC pulsed power application[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1999, 35(1): 340-345.
- [6] 严萍, 孙鹤鸿, 潘洋, 等. 活塞式磁通压缩发电机的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(5): 47-49.
Yan Ping, Sun Yaohong, Pan Yang, et al. Investigation on a piston-type magnetic flux compression generator[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(5): 47-49(in Chinese).
- [7] 李军, 王莹, 王赞基. 电炮用磁通压缩脉冲直线发电机的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 43-46.
Li Jun, Wang Ying, Wang Zanji. A Mathematical model of the reusable pulsed linear magnetic flux compressor for the electric gun[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 43-46(in Chinese).
- [8] 李军, 王莹, 高敏. 电炮用磁通压缩脉冲直线发电机的数学模型[J]. 兵工学报, 1998, 17(3): 31-35.
Li Jun, Wang Ying, Gao Min. Analysis of combustion driven Linear Generator for electric guns application[J]. Acta Armentrii, 1998, 17(3): 31-35(in Chinese).
- [9] Wang Ying, Li Jun, Wang Zhanji, et al. A mathematical model of reusable pulsed linear magnetic flux compressor[J]. IEEE Trans. on Magn., 2001, 37(1): 147-151.
- [10] Li Jun, Wang Ying, Gao Min. Analysis of the combustion driven linear generator for electric gun applications[J]. IEEE Trans. on Magn., 1999, 35(1): 361-366.
- [11] 吕庆敖, 高敏, 赵科义. 爆炸式螺旋绕组磁通压缩发电机的理论和技术[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 56-57, 83.
Lü Qingao, Gao Min, Zhao Keyi. Theory and technology of explosive magnetic flux compression generator with a helix winding[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 56-57, 83(in Chinese).
- [12] Barber J P, Challita A, Mass B L, et al. Contact transition in metal armature[J]. IEEE Trans. on Magn., 1991, 27(1): 228-232.
- [13] Barber J P, Dreizin Y A. Model of contact transition with realistic armature-rail interface[J]. IEEE Trans. on Magn., 1995, 31(1): 96-100.
- [14] 吕庆敖, 高敏, 赵科义. 爆炸式螺旋绕组磁通压缩发电机的理论和技术(续)[J]. 高电压技术, 2005, 31(6): 42-43, 51.
Lü Qingao, Gao Min, Zhao Keyi. Theory and technology of explosive magnetic flux compression generator with a helix winding (II) [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6): 42-43, 51(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-13。

作者简介:

吕庆敖(1968—), 男, 理学博士, 副教授, 主要从事脉冲功率技术、电磁发射技术、低温等离子体物理、新概念武器等研究, E-mail: lvqing-ao@163.com;

高敏(1963—), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为引信和弹药工程、脉冲功率技术、电磁发射技术等;

雷彬(1962—), 男, 留德博士, 教授, 研究方向为机械制造与检测、引信和弹药工程、脉冲功率技术、电磁发射技术等;

杨秋学(1965—), 男, 讲师, 研究方向为脉冲功率技术、电磁发射技术等;

赵科义(1973—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为脉冲功率技术、电磁发射技术等。

(编辑 王剑乔)