

文章编号: 1001-4322(2009)10-1571-04

# MA 量级螺线圈型爆磁压缩发生器\*

孙奇志, 刘伟, 刘正芬, 池原, 戴文峰, 方东凡, 孙承纬

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 采用多分支螺线圈型爆磁压缩发生器数值模拟程序 MFCG8-7 进行理论模拟及参数优化, 设计了 EMG-125 型螺线圈型发生器, 并开展了实验研究。电感负载实验结果表明: EMG-125 型发生器可以在 25 nH 电感负载上输出大于 3 MA 脉冲电流, 负载能量大于 100 kJ, 电磁能量放大 50 倍。

**关键词:** 爆磁压缩发生器; 爆炸脉冲电源; 脉冲功率; 螺线圈

**中图分类号:** TN245 **文献标志码:** A

常见的 MA 量级爆磁压缩发生器包括螺线圈型、平板型、同轴型、圆盘型等类型。由于螺线圈型发生器初始电感大, 其电感负载可以达到百 nH 量级, 电磁能量放大可以达到几十至 100 倍, 而其它类型大电流发生器电感负载通常为几 nH, 电磁能量放大在 10 倍左右。故螺线圈型发生器一般用作其它类型大电流发生器的能量助推级, 为其提供 MA 量级种子电流, 然后通过此类发生器进行电流再放大, 在几 nH 电感负载上输出 100 MA 量级脉冲电流。MA 量级螺线圈型发生器在高能量密度物理实验研究中有广泛用途, 比如驱动 MAGO 产生磁化等离子体、驱动固体套筒内爆、磁驱动高速飞片实验研究、磁驱动材料等熵压缩研究、超高压力条件下材料状态方程研究、流体动力学不稳定性研究等<sup>[1-3]</sup>。国内目前在 100 kA 量级、紧凑型两级串联螺线圈型发生器研究中取得了一定进展<sup>[4-6]</sup>, 但在 MA 量级发生器技术及应用研究方面基础薄弱。中国工程物理研究院流体物理研究所在 20 世纪 70 年代及 90 年代末期曾开展过 MA 量级螺线圈型爆磁压缩发生器理论及初步实验研究<sup>[7]</sup>, 但获得的实验结果较低, 输出电流只达到 0.5~1.0 MA。本文介绍一种输出电流达到 MA 量级的 EMG-125 型螺线圈发生器设计及实验研究结果。

## 1 结构设计及参数

在设计 MA 量级螺线圈型爆磁通量压缩发生器时, 不但要考虑螺线圈型发生器磁通损耗、发生器内部高电压击穿、发生器残余电感等因素, 还必须遵循如下设计原则: (1) 爆炸管上线电流密度不能超过 1 MA/cm<sup>[8]</sup>, 否则达不到磁场压缩目的, 对于螺旋线圈上的电流密度, 通常不要超过 0.2 MA/cm, 以避免由于非线性磁扩散引起的损耗急剧增大<sup>[9]</sup>; (2) 绕制螺旋线圈的导线上电流比作用量要小于  $10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4}$ , 否则由于欧姆热效应, 导线电阻率将急剧上升, 甚至造成导线熔断; (3) 螺旋线圈每一根导线上受到的洛伦兹力要小于由发生器结构强度决定的极限, 以避免在发生器运行结束前螺旋线圈遭到破坏。同时, 在设计发生器时, 必须考虑由于洛伦兹力作用在导线上产生的径向和轴向位移, 若径向位移过大, 会带来严重的跳匝问题, 若轴向位移过大, 会导致匝间距缩小, 造成匝间电压击穿, 甚至造成线圈提前破坏; (4) 等电压或等电场原则。通过优化螺旋线圈分段数、段内螺距、段长等参数, 尽量使螺旋线圈上电压保持常量, 为了达到此要求, 通常段长不能超过螺线圈直径。

根据上述设计原则及采用 MFCG8-7 程序进行的数值模拟结果, 设计了 EMG-125 型发生器。EMG-125 型发生器螺旋线圈内直径 125 mm, 铜爆炸管外直径 63 mm, 长度 900 mm, 中间填充 RDX 粉状炸药 2 670 g, 炸药密度约为 1 g/cm<sup>3</sup>, 爆速约 6.3 km/s, 爆炸管膨胀半锥角约 15°。为加强绝缘, 发生器设计有气体密封结构, 并充入 0.2 MPa SF<sub>6</sub> 气体。EMG-125 型发生器结构示意图见图 1, 绕制完成的 EMG-125 发生器螺线圈图见图 2, 螺线圈参数见表 1。在表 1 中, EMG-125 型发生器内螺线圈分为等长度的 6 段, 为绕制方便, 每段中采用的导线型号及单线螺距  $P$  相同, 绕制根数成倍增长, 表中  $t$  为单线螺距  $P$  与绕制根数之积, 表示段内螺距。发生器螺线圈电感、电阻测量采用的频率均为 10 kHz, 这主要是考虑到发生器运行时间在 100  $\mu\text{s}$  左右,

\* 收稿日期: 2009-03-30; 修订日期: 2009-07-06

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 孙奇志(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事爆磁压缩技术及应用研究; bcys@caep. ac. cn.

对应的频率即为 10 kHz, 测量值更接近实际情况。螺旋线圈空心电感测量值为  $87 \mu\text{H}$ , 金属中心管安装完后电感测量值为  $69 \mu\text{H}$ , 电阻测量值为  $0.15 \Omega$ 。

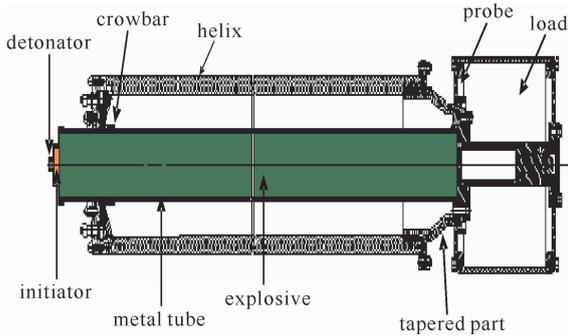


Fig. 1 Sketch of generator EMG-125

图 1 EMG-125 型发生器结构示意图

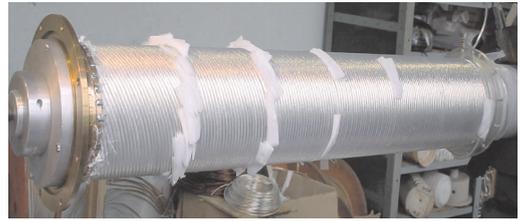


Fig. 2 Helix photograph of generator EMG-125

图 2 绕制完成的 EMG-125 型发生器螺线圈

表 1 螺线圈参数表

Table 1 Helix parameters of generator EMG-125

part number	part length/mm	pitch/mm	branches	$t/\text{mm}$	diameter of wire/mm	section of wire/ $\text{mm}^2$
1	130	5	1	5	2.5	4.91
2	130	5	2	10	2.5	9.82
3	130	5	4	20	2.5	19.64
4	130	5	8	40	2.5	39.28
5	130	5	16	80	2.5	78.56
6	130	5	32	160	2.5	157.12

针对上述设计参数, 采用 MFCG 8-7 程序对发生器不同输入能量情况进行了理论计算。脉冲电容器电容量为 1 mF, 充电电压分别取 4, 8, 12 kV, 对应的实际输入到发生器上的能量为 2, 8, 18 kJ。计算时磁通损耗系数取为 0, 即设为理想无损耗状态。图 3 为发生器电感随时间变化曲线,  $L$  为螺旋线圈空心电感值,  $L_g$  为发生器有效电感值。由图可见, 无中心管时螺旋线圈初始电感计算值为  $90 \mu\text{H}$ , 有中心管时螺旋线圈初始电感计算值为  $67 \mu\text{H}$ , 与测量值(分别为  $87 \mu\text{H}$  和  $69 \mu\text{H}$ )基本吻合。图 4 为对应的耦合系数计算值, 其中  $K_{12}$  为螺旋线圈与未膨胀部分爆炸管间耦合系数,  $K_{13}$  为螺旋线圈与已膨胀但未接触线圈部分爆炸管间耦合系数。图 5 和 6 分别为不同充电电压下计算得到的负载电流和螺旋线圈上感应电压曲线。由图 5 可见, 当充电电压取 4, 8, 12 kV 时, 在 25 nH 电感负载上能获得的最大输出电流(无损耗输出电流)分别为 3.3, 5.9, 7.9 MA, 对应的螺旋线圈上最大感应电压分别达到 38, 77, 114 kV。对于上述发生器结构参数, 螺旋线圈上最大感应电压出现在第一段运行将结束处, 并随发生器运行逐渐降低。

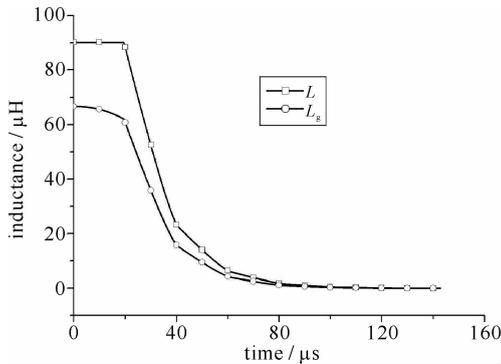


Fig. 3 Calculated inductance of generator

图 3 发生器电感变化计算值

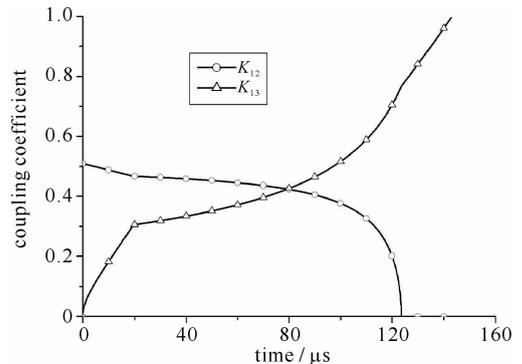


Fig. 4 Calculated coupling coefficient

图 4 耦合系数计算值

## 2 电感负载实验

EMG-125 型发生器电感负载实验采用 20 台额定电压 20 kV、单台容量  $50 \mu\text{F}$ 、总容量 1 mF 的电容器组能源供电, 闭合开关采用 100 kA, 25 kV 的大电流真空开关, 电容器组能源通过真空开关及传输电缆向爆炸塔内

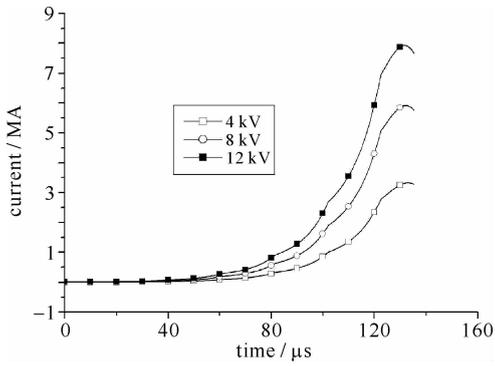


Fig. 5 Calculated current on the load

图 5 负载电流

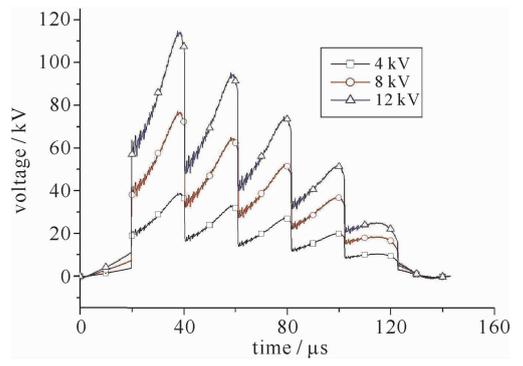


Fig. 6 Calculated voltage distribution

图 6 螺旋线圈上感应电压

发生器提供种子电流, 发生器种子电流、负载上电流及其微分采用罗柯夫斯基线圈型电流探针及相应的微分、积分电路进行测量, 实验主要结果见表 2。

表 2 EMG-125 电感负载实验结果

Table 2 Experimental results of generator EMG-125

$V_0/kV$	$I_0/kA$	$E_0/kJ$	$I_H/MA$	$E_H/kJ$	$E_H/E_0$	$(dI_H/dt)/(GA \cdot s^{-1})$	$\alpha$
12	23.2	18.6	3.0	103	5.5	78.5	—
8	15.4	8.3	3.2	118	14.2	71.0	0.12
4	7.5	2.0	3.0	103	51.5	74.8	0.03

表 2 中, 充电电压指电容器组能源上电压, 为验证输入初始能量对发生器负载电流的影响, 充电电压  $V_0$  分别取 4, 8, 12 kV, 相应地输入到发生器上的种子电流大小、初始能量大小也不相同。表中初始能量是指实际输入到螺线圈上能量, 而不是电容器组上储存能量。在实际情况中, 由于传输电缆较长, 传输电缆以电感形式储存的能量及回路电阻消耗的能量较大, 使得馈电回路能量传输效率较低(约为 25%)。表 2 中能量放大倍数表示电感负载上最大储能与实际输入到螺线圈上能量之比值, 磁通损耗系数  $\alpha$  是根据实验获得结果由 MFCG8-7 程序修正计算获得经验系数。可参阅文献[7]。图 7 为充电电压 4 kV 时负载电流微分计算结果与实验结果的比较及计算获得的发生器螺线圈上感应电压, 图 8 为充电电压 4 kV 时负载电流计算结果与实验结果的比较。

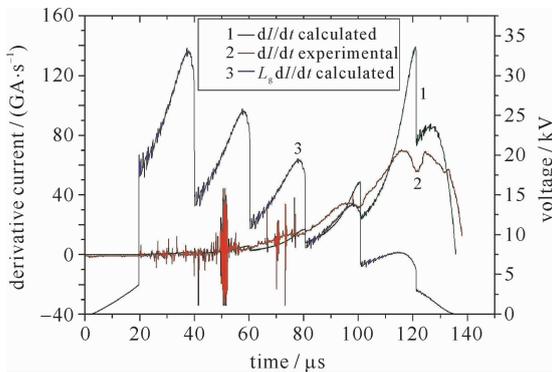


Fig. 7 Waveform of derivative current and voltage distribution

图 7 电流微分、螺线圈上电压波形

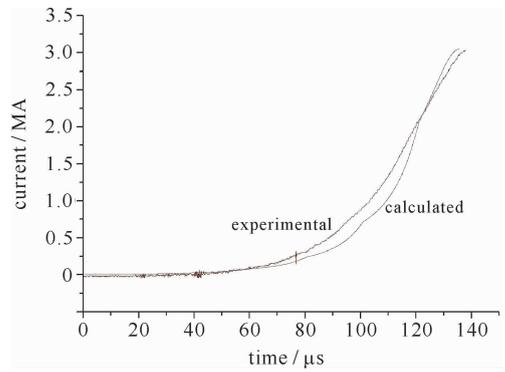


Fig. 8 Waveform of load current

图 8 负载电流波形

### 3 结论

本文依据多分支爆磁压缩发生器数值模拟程序 MFCG8-7 设计了直接馈电的 EMG-125 型螺线圈型发生器。当脉冲电容器充电电压为 4 kV 时, 理论计算表明 EMG-125 型发生器在无损耗状态下可在 25 nH 电感负载上输出 3.3 MA 电流, 实验结果达到输出电流 3 MA。计算结果与实验结果比较可见, 当磁通损耗系数  $\alpha$  取为 0.03 时, 输出电流峰值的实验结果与计算结果完全吻合。图 3 中发生器计算电感与表 1 中发生器实测初始电感吻合, 也验证了 MFCG8-7 程序对此类发生器进行数值模拟的准确性。对应于每一种发生器, 必然存在输入电流(或输入能量、输入磁通)极限, 当输入电流(或输入能量、输入磁通)超过此极限后, 发生器输出性能反而

会降低。在表 2 中,提高电容器组充电电压实验结果表明,负载电流峰值只能达到约 3 MA。主要原因在于发生器采用导线绝缘不够,造成内部高电压击穿,尽管增加了输入能量,但输入能量越高,发生器内部电压越高,由于击穿造成的磁通损耗越大,因而负载上输出电流并没有增加,明显表现于发生器内电流微分极值只能达到约 75 GA/s。提高输入能量实验结果表明,设计的 EMG-125 型发生器输入电流极限约为 8 kA。进一步需要合理设计螺线圈参数,尽量使电感按指数规律变化,以降低内部电压,同时需要加强发生器内部绝缘,尤其是增加螺线圈导线绝缘强度,以避免内部击穿现象发生,提高发生器输入电流极限和最终负载输出电流。

### 参考文献:

- [1] Chernyshev V K. The main types of explosive magnetic generators, their application[C]//Proceedings of 7th International Conference on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics. 1996:235-240.
- [2] Fowler C M. The MK-IX generator[R]. LA-UR-89-1911, 1989.
- [3] Chernyshev V K. Super-high power explosive-magnetic energy sources for thermonuclear and physical applications[C]//Proceedings of 7th International Conference on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics. 1996:39-54.
- [4] 孙奇志. 8-5-II 型爆磁压缩发生器技术研究[C]//第六届全国激光科学技术青年学术交流会文集. 2001:249-252. (Sun Qizhi. Research on type 8-5-II //Proc of 6th National Youth Technician Laser Conference. 2001:249-252)
- [5] 孙奇志, 龚兴根, 谢卫平, 等. 输出能量 20 kJ, 脉宽 10  $\mu$ s 的爆磁压缩电流发生器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(4):625-628. (Sun Qizhi, Gong Xinggen, Xie Weiping, et al. Experimental study on the magnetic flux compression generators with output 20 kJ and pulse duration 10  $\mu$ s. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(4):625-628)
- [6] 孙奇志, 孙承伟, 刘伟, 等. 缩短两级爆磁压缩发生器输出脉冲宽度的一种途径[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7):1203-1206. (Sun Qizhi, Sun Chengwei, Liu Wei, et al. Approach of reducing pulse duration of compact two-stage helical EMGs. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(7):1203-1206)
- [7] 孙奇志, 龚兴根, 谢卫平, 等. 高能爆磁压缩电流发生器理论分析与实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, **23**(1):51-55. (Sun Qizhi, Gong Xinggen, Xie Weiping, et al. Theoretic and experimental study of an explosive magnetic flux compression generator with high energy output. *Explosion and Shock Waves*, 2003, **23**(1):51-55)
- [8] Freman B L. Advanced high explosive flux compression generator development: the CN-III series[R]. LA-12348, 1992.
- [9] 孙承伟, 周之奎. 磁通量压缩发生器[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:153-155. (Sun Chengwei, Zhou Zhikui. Magnetocumulative generator. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:153-155)

## Experimental study on small helical EMG with load current up to MA level

Sun Qizhi, Liu Wei, Liu Zhengfen, Chi Yuan, Dai Wenfeng, Fang Dongfan, Sun Chengwei  
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** According to the results of the code MFCG8-7 based on the circuit model, an EMG-125 type generator has been designed and tested. The EMG-125 generator is 900 mm in length, 125 mm in diameter, and its charging explosive weighs 2.7 kg. A series of experiments show that, there would be serious breakdowns inside the generator if the input current is beyond the limit of 8 kA (the limit of the input energy is about 2 kJ). In the case of input current 8 kA, the peak current 3 MA was measured on the inductive load 25 nH, which is 0.3 MA less than the calculated result without magnetic flux losses. The maximal energy on the inductive load is 100 kJ with the peak gain of 50. The calculated results agree with the experimental results when the calibrated coefficient of magnetic flux losses is set as 0.03.

**Key words:** magnetic flux compression generator; explosive power source; pulsed power; helix