

爆炸磁通量压缩发生器设计的几点考虑*

谢卫平 龚兴根 孙奇志

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都 523 信箱 58 分箱 610003)

摘 要 通过分析提出了爆炸磁通量压缩发生器(MFCG)接触磁通损失的模型和MFCG电感线圈设计的基本原则,并在MFCG设计中得到应用和实验检验。

关键词 爆炸磁通量压缩发生器(MFCG) 磁通损失 电感 电压

中图分类号 TN 61

爆炸磁通量压缩发生器(MFCG)是使用炸药的化学能产生膨胀力加速导体和压缩磁通,从而把炸药的部分化学能转变成电磁能的装置。它是一种高能量密度和大功率的装置,目前功率已达到 10^{12} W 量级,能输出兆安级的大电流和产生上百特斯拉的磁场,对于军事和科学研究应用极有潜力^[1]。迄今,它作为能源广泛地应用在等离子体焦点装置(DPF)、电磁内爆装置和高功率微波功率源装置等。

在设计和制造MFCG功率源时,一般要求高的能量增益、较大的负载电感(大于100nH)、容易改变MFCG的输出参数、造价低和高可靠性,其中能量增益的高低是MFCG装置性能好坏的一个重要参数。MFCG种类很多^[2],其中螺旋型MFCG具有较大的初始电感,能量放大倍数比其它类型MFCG的都大,而且结构简单,因而得到广泛的重视和研究。本文得出的结论,不仅适合于螺旋型MFCG,也适合于其它类型。

1 磁通损失模型

影响MFCG能量增益的因素很多,而磁通损失将直接影响MFCG能量增益,其因素也很多:a 由于内电压击穿或磁通压缩区域部分地过早闭合成回路从而损失部分磁通;b 由于回路电阻的存在将减小电流幅值;c 存在渗透到MFCG元件内而不可收回的磁通;d 爆炸管与电感线圈短路点接触不良的区域将俘获去少量的磁通。其中因素b和c是MFCG工作过程中不可避免的。但是,如果合理选择电感线圈导线的材料和直径,这两种磁通损失因素将不是主要的。通过发生器的电感的合理设计和限制装置加工要求,因素a也可以避免,这种情况在后面将详细讨论。所以可以假设因素d,即接触磁通损失为主要因素。把损失部分的磁通 $\Delta\Phi$ 与损失部分的电感(或称无用电感)的变化 $\delta L'$ 联系起来。

$$\Delta\Phi = - I \cdot \delta L' \quad (1)$$

而
$$\delta L' = \delta S \cdot n^2 \cdot \Delta t \cdot D \quad (2)$$

式中 n 为线圈导线的密度; $\Delta t \cdot D$ 为无用电感变化量为 $\delta L'$ 时,爆炸管向前推进的距离, D 为爆轰速度。另一方向,在 Δt 时间内,线圈的电感 L_g 变化为:

$$\Delta L_g = (S - S_0) n^2 D \Delta t \quad (3)$$

* 国家 863 激光技术领域资助项目

1997 年 12 月 10 日收到原稿,1998 年 3 月 3 日收到修改稿。

谢卫平,男,1964 年 11 月出生,硕士,助研

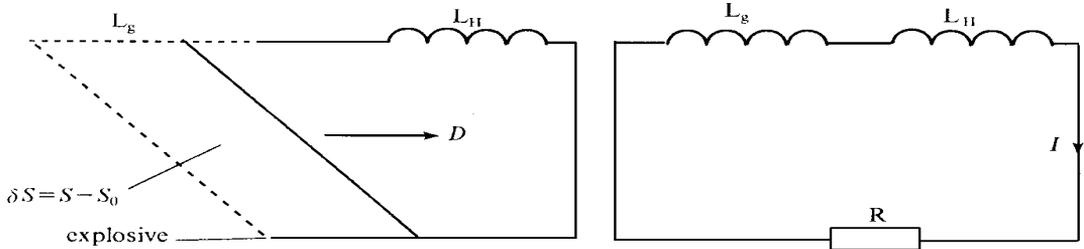


Fig 1 Schematic of MFCG operation and its effective circuit

图 1 MFCG 工作过程及其等效电路图

$$\text{由(2)(3)式得:} \quad \delta L = -\alpha \Delta L_g \quad (4)$$

式中 α 为磁通损失常数, 其数值决定磁通损失的大小。把(4)式代入(1)式得磁通损失模型:

$$d\Phi = \alpha I dL_g \quad (5)$$

$$\text{上式积分得:} \quad \Phi = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^\alpha \quad (6)$$

Φ_0 为初始磁通; L_0 为线圈初始电感。

2 线圈电感的合理设计

2.1 最佳能量增益的 MFCG 电感线圈螺距

为了获得最佳能量增益, 希望磁能的增量应等于爆炸管每前进一个单位长度的净动能 E , 即

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} [(L_g + L_H) I^2] = E \quad (7)$$

假设磁通在压缩过程中守恒, 则满足(7)式的判据为:

$$L_g + L_H = \frac{L_{g0} + L_H}{E/E_0 + 1} \quad (8)$$

式中 E_0 为发生器的初始储能, L_H 为负载电感。若 MFCG 电感线圈的匝间螺距为 P , 则 P 与发生器轴向距离 x 的线性关系为^[3]:

$$P = \left[\frac{\mu_0 S E_0}{(L_{g0} + L_H) E} \right]^{1/2} \cdot \left(\frac{E}{E_0} + 1 \right) \quad (9)$$

这说明朝轴向输出端应逐渐加大螺距。为了增大电流的传导能力, 还必须逐渐加大线圈导线的直径, 均匀地变化螺距往往给工艺带来困难, 实际上分成许多段, 采用每段螺距不同的方法来等效的增加螺距。

2.2 MFCG 电感线圈电感设计原则

当爆炸管同发生器电感线圈闭合后, 俘获初始磁通。随爆炸管不断地向前推进, 发生器内磁通密度不断增加, 则发生器上的电压降 $L_g dI/dt$ 也将不断的增加。磁通变化越快, 发生器上的电压降也就越高, 发生器内部电压击穿的可能性也就越大。为了解决这个问题, 发生器内部可采用绝缘措施, 例如增加线圈绕线的绝缘强度; 在爆炸管和线圈之间充 SF_6 等绝缘气体。但是增强发生器内部的绝缘不但会给发生器的制造工艺带来困难, 还可能增加其它方面的磁通损耗。所以为了从根本上解决问题, 需从发生器的电感参数设计上来考虑。根据 MFCG 运动的一般规律, 有如下关系式成立:

$$\int_0^T V_0 dt > \int_0^T V(t) dt, \quad V(T) > V_0 \tag{10}$$

式中 T 为发生器的运行时间; $V(t)$ 为发生器上的电压 $L_g \cdot \frac{dI}{dt}$; V_0 为一电压常数。所以, 既要避免发生器内部电压击穿, 又要追求较高的能量增益, 电感的设计要求满足:

$$L_g \cdot \frac{dI}{dt} = V_0 \tag{11}$$

由 (5) 和 (11) 式得: $(1 - \alpha) \cdot I \cdot \frac{dL_g}{dt} = -V_0$ (12)

将 (6) 式代入上式得 $\frac{1}{L_g^{(1-\alpha)}} \cdot \frac{dL_g}{dt} = -\frac{V_0}{(1-\alpha) \cdot I_0 \cdot L_{g0}^{(1-\alpha)}}$ (13)

微分方程 (13) 满足条件: $t = 0$ 时, $L_g = L_{g0}$; $t = T$ 时, $L_g = L_H$ 。方程 (13) 的解为:

$$L_g(t) = L_{g0} \left[\left(\frac{L_H}{L_{g0}} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{V_0}{\Phi_0} \cdot (T-t) \right]^{1/\alpha} \tag{14}$$

为了便于讨论, 假设发生器无损耗, 即 $\alpha = 0$, 则电感的变化规律为:

$$L_g(t) = L_{g0} \cdot e^{-\frac{V_0}{\Phi_0} t} \tag{15}$$

(15) 式表明朝发生器输出端的电感要逐渐减小, 这同 (9) 式给出的结论和文献 [3] 的结论相符合。式中

$$V_0 = \frac{\Phi_0}{T} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[1 - \left(\frac{L_H}{L_{g0}} \right)^\alpha \right] \tag{17}$$

在选择发生器电感线圈的导线时, 所考虑的导线的耐压强度由 V_0 的大小决定。(14)、(15) 和 (16) 式定性给出了发生器电感线圈电感设计的一般原则。

3 实 验

图 2 和图 3 是两发典型的 MFCG 实验波形。图 2 所示的实验为 1994 年研制的 8-4 型锥形 MFCG 的典型实验波形。MFCG 的初始电感为 $99\mu\text{H}$, 螺距均匀变化。此发生器的内电压很高, 要采取特殊的绝缘措施, 但磁通损耗很大。在电感负载 $5.1\mu\text{H}$ 上, 测得电流 31kA , 电压大于 79kV , 脉冲长度为 $10\mu\text{s}$ 。图 3 所示的实验为 1997 年研制的 8-5-II 型 MFCG 锥形段的典型实验波形。MFCG 的初始电感为 $72\mu\text{H}$, 在电感变化规律的设计中, 采用了本文介绍的电感设计原则, 螺距为变螺距的。在电感负载 $5.93\mu\text{H}$ 上, 测得电流 73.5kA , 电压为 62.3kV , 脉冲长度约为 $10\mu\text{s}$ 。所以图 3 所示的 MFCG 的实验结果明显优于图 2 所示的结果。

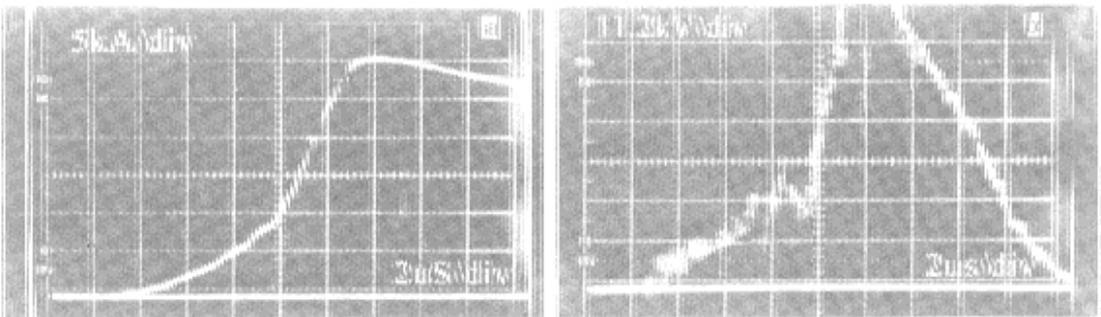


Fig 2 Experimental waveforms of 8-4 MFCG current (a) and voltage (b) on inductive load

图 2 8-4 型 MFCG 电感负载上电流 (a)、电压 (b) 的实验波形

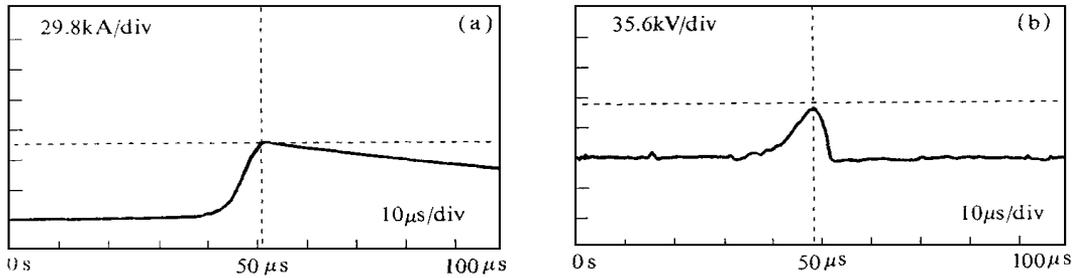


Fig 3 Experimental waveforms of 8-5-II type cone MFCG current (a) and voltage (b) on inductive load
图 3 8-5-II 型 MFCG 锥形段在电感负载上电流 (a)、电压 (b) 的实验波形

4 结 论

在只考虑接触磁通损失时,给出了 MFCG 工作过程中磁通损失模型 ((5) 式); 并给出了 MFCG 电感线圈电感设计的一般原则。这对 MFCG 设计具有一定的指导意义, 并且螺距 P 与发生器轴向的距离 x 的线性关系 ((9) 式) 和 MFCG 电感设计原则在我们 MFCG 的设计中, 都得到了应用和实验的检验。

致 谢 周传明、丁伯南、孙承纬一直关心此课题, 得到了他们很大的帮助, 谨在此深表谢意。

参考文献

- 1 Fowler CM. Magnetic Field Compression. DE89016991 (1989)
- 2 Cnare E C, et al. An explosive Generator of Cascade Helical Stages. 4th IEEE Pulsed Power Conf. 1983. 102
- 3 Chernyshev V K, et al. Helical Generator Model and Voltage Distribution. In: Fowler CM, Caird R S, Erickson D J. Megagauss Technology and Pulsed Power Application. New York and London: Plenum Press, 1987. 371

DESIGN CONSIDERATIONS ON INDUCTANCE OF EXPLOSIVE FLUX COMPRESSION GENERATOR

Xie Weiping, Gong Xingen, Sun Qizhi

Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523-58, Chengdu 610003

ABSTRACT A contacting flux loss model about explosive flux compression generator (MFCG) is introduced through analysis. And also a rational inductance variation of the MFCG coil is given in this paper. This is helpful for the design of the MFCG and its theoretical consideration.

KEY WORDS explosive flux compression generator (MFCG), flux loss, inductance, voltage