

螺旋型爆炸磁通量压缩发生器输出电流仿真分析

张发强, 樊祥

(电子工程学院 脉冲功率激光国家重点实验室, 安徽 合肥, 230037)

摘要: 在分析螺旋型爆磁压缩发生器工作原理的基础上, 给出了其集总参数的等效电路, 并对发生器电路参数的计算方法进行了详细论述。结合具体实例和相应的简化条件, 利用 MATLAB 软件仿真了爆磁压缩发生器接不同负载时的输出电流波形。仿真结果表明: 负载的选择对爆磁压缩发生器输出电流波形有很大的影响, 在实际的设计过程中要综合各方面因素, 合理选择发生器的负载。

关键词: 爆磁压缩发生器; 电路参数; 负载; 输出电流

中图分类号: TJ450.2 **文献标识码:** A

Simulation Analysis on the Output Current of Helical Explosive-driven Magnetic Flux Compression Generator

ZHANG Fa-qiang, FAN Xiang

(Pulse Power Laser National Key Laboratory, Electronic Engineering Institute, Hefei, 230037)

Abstract: Based on the simple analysis of the work principle of helical explosive-driven magnetic flux compression generator, the lumped factor equivalent circuit is proposed. The calculation method of circuit parameters of generator is discussed in detail. According to the example and some predigested conditions, the output current wave is got by MATLAB when the load is different. The simulation results show that the influence of load selection on the output current wave of generator is serious. The suitable load of generator should be selected by considered of many factors.

Key words: Explosive-driven magnetic flux compression generator; Circuit parameter; Load; Output current

爆炸磁通量压缩发生器(简称爆磁压缩发生器, 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一种高功率脉冲电源装置^[1]。由于爆磁压缩发生器储能密度高, 同时在空间上和时间内对能量进行压缩, 可以产生幅值较大和脉冲持续时间较长的大电流脉冲, 并且实际制作相对简单, 所以被广泛地应用于高科技领域^[2]。特别是近年来电子软杀伤概念的兴起, 爆磁压缩发生器的发展极大地促进了以电磁脉冲弹

为代表的微波武器的发展^[3]。本研究简单介绍了螺旋型爆磁压缩发生器的工作原理, 详细分析了发生器的各项参数, 并结合具体的实例和相应的简化条件对发生器的输出电流波形进行模拟分析。

1 爆磁压缩发生器工作原理

螺旋型爆磁压缩发生器的结构如图 1 所示, 其工作过程可描述为: 放电开关闭合, 电容器向定子线圈

收稿日期: 2008-01-25

作者简介: 张发强 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事脉冲功率技术研究。

和负载放电,在线圈中建立起初始磁通。当线圈中的电流达到最大值时,炸药起爆,推动电枢膨胀,使撬断开关闭合,充电回路被短路;而电枢则和定子接触,使发生器和负载形成闭合回路,电枢的继续膨胀造成线圈电感不断减小。根据磁通量守恒原理,磁通不变,回路的电感减小,则流过电感线圈的电流增加,从而实现电流的放大^[4]。

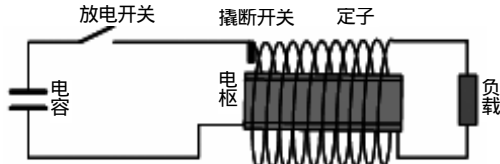


图1 螺旋型爆磁压缩发生器结构示意图
Fig.1 The schematic diagram of MFCG

为了更精确地描述爆磁压缩发生器的运行过程,一般采用集总参数电路对发生器进行等效,其等效电路如图2所示^[5]。

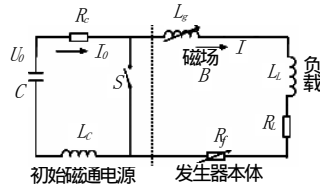


图2 爆磁压缩发生器等效电路图
Fig.2 The equivalent circuit of MFCG

图2中： U_0 为电容器初始电压， R_c 为电路分布电阻， L_c 为电路分布电感， I_0 为电容放电回路初始电流， S 为隔离开关， L_g 为发生器的自身电感， R_f 为发生器的可变电阻， L_L 为负载电感， R_L 为负载电阻。其中虚线左半部分为初始磁通电源，为发生器提供初始电流，右半部分为发生器本体和负载。其中发生器的电感 L_g 和电阻 R_f 在运行过程中为动态参数。

当撬断开关即图2中的 S 闭合后,描述电路的微分方程为^[6]:

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

上述方程的解为:

$$I(t) = \frac{L_0 I_0}{L(t)} \exp\left[-\int_0^t \frac{R(t)}{L(t)} dt\right] \quad (2)$$

式(2)中: $L(t) = L_g(t) + L_L$, $I(0) = I_0$, $R(t) = R_f(t) + R_L(t)$, $L_0 = L(0)$ 。

分析式(2)得:对于给定的发生器和已知的充电电压 U_0 , L_0 和 I_0 为定值,要得到输出电流波形,还需要求解 $R(t)$ 和 $L(t)$ 随时间的变化函数, $R(t)$

包括发生器可变电阻 $R_f(t)$ 和负载电阻 R_L ,对于给定的负载, R_L 为一已知值; $L(t)$ 包括发生器自身电感 $L_g(t)$ 和负载电感 L_L ,同样,对于给定的负载, L_L 为一已知值。所以求解的关键是发生器可变电阻 $R_f(t)$ 和自身电感 $L_g(t)$ 。此外,膨胀的电枢与第1匝线圈接触所需的时间 t_c 、发生器总工作时间 τ 是求解爆磁压缩发生器输出电流波形必需的重要参数。

2 爆磁压缩发生器电路参数的求解

2.1 发生器电阻

发生器电阻的大小对发生器的输出影响很大,计算发生器的有效电阻,对于发生器的仿真分析是必不可少的。发生器在未工作前可以认为其电阻是不随时间而变化的,即为静态电阻,静态电阻分两部分,螺旋线的静态电阻和电枢的静态电阻。当发生器开始工作时,由于磁通扩散、趋肤效应等因素的影响,发生器的电阻将是一个复杂多变的动态函数。

2.1.1 发生器的静态电阻

发生器的静态电阻的计算比较简单,为电枢和定子螺旋线静态电阻之和:

$$R_0 = R_{a0} + R_{s0} \quad (3)$$

式(3)中: R_{a0} 为电枢的静态电阻, R_{s0} 为螺旋线的静态电阻,计算公式分别如下^[6]:

$$R_{a0} = \rho_a \frac{(R_a + W_a)^2 - R_a^2}{(R_a + W_a)^2} \cdot \frac{l_a}{S_a} = \rho_a l_a \frac{(R_a + W_a)^2 - R_a^2}{\pi(R_a + W_a)^2 R_a^2} \quad (4)$$

$$R_{s0} = N \rho_s \frac{l_s}{S_s} = 8N \rho_s \frac{R_s}{d^2} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: ρ_a 为电枢材料的电阻率, l_a 为电枢长度, R_a 为电枢内半径, W_a 为电枢壁厚, S_a 为电枢的截面积, ρ_s 为定子线圈绕线的电阻率, N 为螺线管匝数, l_s 为定子截面周长, S_s 为定子线圈绕线的截面积, R_s 为线圈半径, d 为定子线圈的绕线直径。

2.1.2 发生器的动态电阻

精确计算发生器的动态电阻实际上是不可能的,在工程实践中也是没有必要的。如果主要考虑由于磁扩散作用而导致发生器电阻的变化,笔者认为 $R_f(t)$ 仅由两部分组成,即:

$$R_f(t) = R_a(t) + R_s(t) \quad (6)$$

式(6)中： $R_a(t)$ 是电枢的有效电阻， $R_s(t)$ 是螺旋线的有效电阻。

发生器在压缩过程中，电枢材料密度基本上不发生变化，可以近似认为是不可压缩的流体。结合发生器的储能公式和发生器的工作过程，可得电枢的有效电阻和螺旋线的有效电阻为^[5]：

$$R_a = \frac{n^2 \rho_a (2A-1)}{a} S_a \quad (7)$$

$$R_s = \frac{n^2 \rho_s (2A-1)}{af} S_s \quad (8)$$

式(7)~(8)中： n 为螺旋线匝密度， S_a 为电枢的外表面积， S_s 为螺线管的内表面积， f 为螺旋线的填充因子，是与发生器结构有关的常量，且 $f < 1$ ， a 为电枢的趋肤深度， A 为与趋肤深度有关的量^[6]：

$$A = [1 - \exp(-2W_a/a)]^{-1} \quad (9)$$

式(9)中： $a = \tau / \sigma \mu$ ， τ 为发生器总工作时间， σ 为电枢的电导率， μ 为电枢的磁导率。在发生器动态运行过程中，电枢和定子线圈的电阻率都是随时间变化的动态参数，在发生器各部件的材料和尺寸给定的条件下，可以获得电枢和定子线圈的电阻率随时间变化的关系式，在此不再赘述。

2.2 发生器电感

发生器的电感包括发生器静态电感和动态电感。发生器静态电感也就是螺线管(定子)的电感，其计算是比较简单的(这时电枢的电感可以忽略)。在忽略层间绝缘距离，静态电感可以表达为^[7]：

$$L_{g0} = \pi \mu_0 N^2 \frac{R_s^2}{l} K_a \quad (10)$$

式(10)中： μ_0 为真空磁导率， l 为螺线管长度， K_a 是随比值 $\alpha = l/2R_s$ 变化的数值，其它参数同上。

发生器的动态电感计算非常复杂，要精确求解发生器的动态函数形式是十分困难的。通常采用的办法是用线性模型或指数模型来表征动态电感的变化规律，能较好地描述发生器的压缩运行过程，即^[5]：

$$L_g(t) = L_{g0} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \quad (11)$$

$$\text{或 } L_g(t) = L_{g0} \exp(-t/\tau) \quad (12)$$

式(11)~(12)中 τ 为发生器总工作时间。

2.3 膨胀的电枢与第1匝线圈接触所需时间和发生器总工作时间

电枢的膨胀过程可以描述为：电枢在炸药爆轰作用下膨胀，电枢的轴向变形速度几乎与爆轰波的轴向速度相同，而在径向上做初速度为零的变加速运动。由于定子外面的加固结构，故认为定子为刚性的，即没有受膨胀电枢的作用而变形。当膨胀的电枢与定子接触时，膨胀电枢的速度几乎达到最大。这里为了简化，设电枢的膨胀极限半径约等于定子半径，即：

$$R_{lim} \approx R_s \quad (13)$$

对于圆柱形装药，爆轰产物膨胀到任意半径处时速度满足下式：

$$v(r) = \frac{r}{R_{lim}} v_0 \quad (14)$$

式(13)~(14)中： R_{lim} 为金属壳体破裂时的极限半径， R_s 为定子的内半径， v_0 为壳体破裂时的速度，实际上是壳体碎片的最大速度。

在电枢膨胀过程中，电枢外半径由 $(R_a + W_a)$ 变为 R_s 时，膨胀的电枢与线圈刚好接触，可得膨胀的电枢与第1匝线圈接触所需的时间^[5]：

$$t_c = \frac{R_{lim}}{v_0} \ln \frac{R_s}{R_a + W_a} \quad (15)$$

其中电枢飞片的最大径向速度 v_0 为^[5]：

$$v_0 = \sqrt{2(E_e - E_0)} \sqrt{\frac{M_e/M_0}{1 + 0.5 M_e/M_0}} \approx \sqrt{2E_e} \sqrt{\frac{M_e/M_0}{1 + 0.5 M_e/M_0}} \quad (16)$$

式(16)中： E_e 为炸药的能量密度， E_0 为爆炸完成后爆轰产物残留能量密度， M_e 为炸药质量， M_0 为电枢膨胀后金属飞片质量，其中 $\sqrt{2(E_e - E_0)}$ 称为格尼常数，为炸药的一个特征参数。在计算中常可以忽略 E_0 值。

根据发生器的运行过程，可简单求得发生器总工作时间为：

$$\tau = l_a / D - t_c \quad (17)$$

式(17)中： l_a 为电枢长度， D 为炸药爆速。

3 爆磁压缩发生器仿真与分析

利用所介绍的方法，本文利用 MATLAB 仿真软

件对某一具体的爆磁压缩发生器进行了模拟,针对不同的负载情况,得到其电流波形及其相关数据,如图3和表1所示,其中图3中的编号和表1相对应。

表1中 I_0 为发生器的初始电流, I_{max} 为发生器输出电流的最大值, I_{max}/I_0 为电流放大倍数, t_{max} 为发生器输出电流到达最大值的时刻, τ_{half} 为输出电流脉冲的宽度(按上升沿和下降沿各达到峰值一半时的宽度计算)。

表1 发生器接不同负载时电路模拟的初值及结果

Tab.1 The simulation initial values and results of MFCG based on different loads

编号	A	B	C	D	E
R_L/Ω	0.05	0.05	0	0.05	0.1
$L_L/\mu H$	0.5	0	0.5	1.0	0.5
I_0/kA	8.699	8.741	9.487	8.657	7.961
I_{max}/kA	133.1	179.8	551.9	107.9	75.75
I_{max}/I_0	15.3	20.57	58.17	12.46	9.52
$t_{max}/\mu s$	45.50	45.50	142.6	45.50	38.51
$\tau_{half}/\mu s$	37.77	27.28	-	46.93	32.77

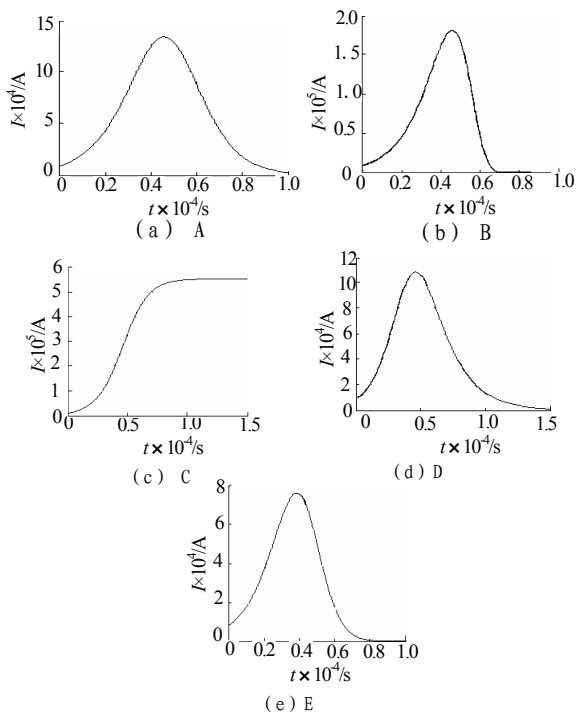


图3 发生器输出电流波形图

Fig.3 The output current wave of MFCG

分析图3和表1可得:

(1) 由A、B和D可以看出:负载电感的作用是减小电流峰值及电流放大倍数,并较大幅度增大电流脉宽,但对电流达到峰值的时刻几乎没有影响。

(2) 由A、C和E可以看出:负载电阻的作用是减小电流峰值及电流放大倍数,并且随着电阻的增

加,电流脉冲宽度减小。而且,如果负载为纯电感时,在发生器的运行时间内,电流值是单调上升到最大值的。

(3) 当发生器直接接负载时,负载阻抗较小,一般为毫欧量级;当负载电阻比较大时,如达到欧姆量级时,发生器的峰值电流和电流放大倍数急剧下降,这与爆磁压缩电磁脉冲发生器是一个低阻抗的电流放大器是一致的。

4 结论

本文从螺旋型爆磁压缩发生器的工作原理入手,得出了其集总参数的等效电路,并对发生器的电阻、电感以及膨胀电枢与第1匝线圈接触所需时间和发生器总工作时间的计算方法进行了详细论述,最终通过计算机仿真得到了具体的爆磁压缩发生器的电流输出波形及数据。只要在爆磁压缩发生器各部分的材料和尺寸等参数确定之后,结合一些经验公式,就可以仿真得到其输出电流的波形,本方法简单方便,其缺点是精度稍差,对于精度要求不高的工程计算基本上可满足要求。

参考文献:

- [1] J.W.Shearer et al. Explosive-driven magnetic field compression generators[J].J.Appl Phys ,1968 ,39(4):18-22.
- [2] 王莹.高功率脉冲电源[M].北京:原子能出版社,1991.
- [3] 刘勇波,樊祥,孟凡科.爆磁压缩电磁脉冲弹浅析[J].航天电子对抗, 2002(5):14-17.
- [4] 孙奇志,龚兴根,谢卫平,等.高能量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.
- [5] 刘勇波.爆磁压缩脉冲发生器及功率调制系统理论分析与数值模拟[D].合肥:电子工程学院,2003.
- [6] 张发强.爆磁压缩发生器脉冲大电流测量技术研究[D].合肥:电子工程学院,2008.
- [7] П.Л.卡兰塔罗夫,等.电感计算手册[M].陈汤铭,译.北京:机械工业出版社,1986.