

文章编号: 1001-1455(2003)01-0051-05

高能爆磁压缩电流发生器 理论分析与实验研究^{*}

孙奇志, 龚兴根, 谢卫平, 刘正芬, 戴文峰, 池 原, 付 嵩
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 根据多分支爆磁压缩电流发生器的电路方程, 建立了多分支爆磁压缩电流发生器的等效电路模型, 并利用该模型优化设计了一种长 600mm、直径 120mm、总质量 10kg 且具有高能量输出的爆磁压缩装置 8-7A。实验结果表明, 8-7A 型装置能在 360nH 电感性负载上产生峰值为 512kA 的脉冲电流, 储能 45.8kJ, 能量放大 90 倍。

关键词: 流体力学; 爆炸电源; 爆磁压缩发生器; 等效电路模型

中图分类号: O361; TN245 国标学科代码: 130°2547 文献标志码: A

1 引 言

作为一种强流爆炸脉冲能源, 爆磁压缩装置 (Magnetic Flux Compression Generators, 简称 MCG) 在脉冲功率技术中有着广泛的用途。例如驱动微波器件产生高功率微波、Z-箍缩及等离子体焦点 (DPF) 源、大面积金属网格炸药起爆器等, 也可用于驱动功率调节系统产生脉冲高电压 (几兆伏) 来实现雷电模拟及防护研究、石油及矿物勘探^[1] 等。通常高输出阻抗 MCG 装置脉宽窄, 但能量放大倍数较低, 而许多应用项目都要求 MCG 具有很高的输出能量。多分支小电感负载爆磁压缩装置能量放大倍数高、输出能量大, 可以有效地满足这种应用要求。多分支爆磁压缩装置理论模型有多种, 包括磁流体动力学模型、有限元件模型、等效电路模型等。不同的理论模型有不同的特点。磁流体动力学模型以多维磁流体动力学方程组为基础, 对装置内部磁扩散损耗的计算较为精确; 而有限元件模型对装置内部电阻损耗计算较为精确。

本文中将要介绍的等效电路模型把磁通损耗用一经验常数与电感梯度的积表示并计入电阻损耗中, 然后依据爆磁压缩装置的等效 LR 电路对其进行数值计算。比较而言, 这种等效电路模型虽然经验性较强、物理图像不够细致, 但模型理论成熟、方法简单可靠, 更适用于爆磁压缩装置的理论设计及参数优化。以下将详细介绍多分支爆磁压缩装置等效电路模型, 并用该模型优化设计了一种 8-7A 型爆磁压缩装置, 最后进行了理论分析结果与初步实验结果的比较。

2 等效电路模型

2.1 基本原理及方程

多分支爆磁压缩装置一般采用直接馈电模式, 装置简图及等效回路图分别见图 1、图 2。其工作过程为: 当电容器充电到预定电压 (V_0) 后, 开关 S_2 闭合, 电容对回路放电; 当 L_g 中电流达到最大值时, 雷管引爆炸药, 膨胀的金属铜管使开关 S_1 闭合, 并不断压缩磁场, 在负载电感 L_H 中形成电流及能量放大。其等效电路方程为

* 收稿日期: 2001-11-20; 修回日期: 2002-02-25

作者简介: 孙奇志 (1971—), 男, 硕士, 助理研究员。

S_1 闭合前

$$\frac{1}{C} \int I dt + I(R_H + R_g) + (L_g + L_H) \frac{dI}{dt} = V_0 \quad (1)$$

S_1 闭合后

$$\frac{d\Phi}{dt} + L_H \frac{dI}{dt} + (R_g + R_H)I - \alpha \frac{dL_g}{dt} I = 0 \quad (2)$$

式中: R_H 为负载电阻, R_g 为装置电阻, Φ 为装置内磁通, I 为负载中电流, α 为装置磁通损耗系数。 α 与导线绝缘层厚度、螺距、中心铜管性能等相关。由于爆磁压缩装置制作很复杂、工艺分散性较大,要精确估计 α 的值是不可能的,也没必要,因而通常用经验常数代替。其他相关参数如图1、图2所示。

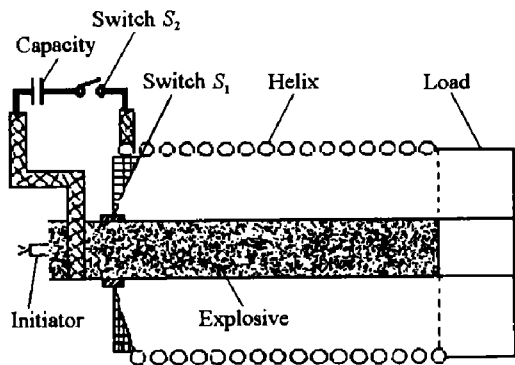


图1 装置简图

Fig.1 Sketch of multi-branch MCG

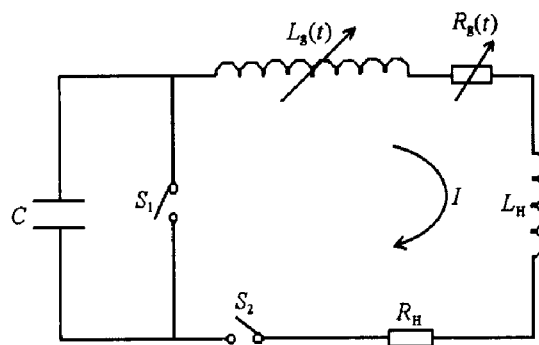


图2 等效电路图

Fig.2 Circuit of multi-branch MCG

2.2 电感 L_g 的计算

设多分支爆磁压缩装置的螺旋线圈由 K 段不同螺距的螺线管串联而成,第 i 段有 N_i 匝,则在没有中心铜管时装置总电感

$$L = \sum_{i=1}^K (L_i + \Delta L_i) + \sum_{i,j=1}^K M_{ij} \quad i \neq j \quad (3)$$

式中: L_i 为第 i 段螺线管自感, ΔL_i 为考虑导线绝缘层厚度的自感修正值, M_{ij} 为第 i 段和第 j 段螺线管互感。它们分别有如下表示式^[2]

$$L_i = \frac{\mu_0}{4\pi} N_i^2 D \varphi_i \quad (4)$$

$$\Delta L_i = \mu_0 N_i \frac{D}{2} J_i \quad (5)$$

$$M_{ij} = \frac{\pi \mu_0}{8} N_i N_j \frac{D^2}{l_i l_j} ((A_1 + A_4) - (A_2 + A_3) - (A_1 \lambda_1 + A_4 \lambda_4) + (A_2 \lambda_2 + A_3 \lambda_3)) \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空中磁导率, N_i 、 N_j 为第 i 、 j 段螺线管匝数, l_i 、 l_j 为第 i 、 j 段螺线管长度, D 为螺线管直径, φ_i 、 J_i 为与第 i 段螺线管几何尺寸相关的系数,可查表^[2] 求出。互感表达式中其他参数为

$$A_k = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + x_k^2} \quad k = 1, 2, 3, 4$$

$$\lambda_k = 1 - F_k \quad k = 1, 2, 3, 4$$

式中: $x_1 = x + \frac{l_j + l_i}{2}$, $x_2 = x - \frac{l_j - l_i}{2}$, $x_3 = x + \frac{l_j - l_i}{2}$, $x_4 = x - \frac{l_j + l_i}{2}$, 这里 x 表示第 i 、 j 段螺线管中心距离。 F_k 为与 $\frac{D}{2A_k}$ 相关的系数,也可查表^[2] 求出。

当有膨胀的中心铜管时,装置有效电感可按图 3 中模型计算:把中心铜管分为与线圈接触部分(图中 4)、已膨胀部分(图中 3)和未膨胀部分(图中 2)三段,并假定装置运行过程中中心铜管内没有磁渗透,螺线管内磁场分布均匀,则有中心铜管的螺线管有效电感可以近似正比于其所占有有效空间体积,这样装置有效电感

$$L_g = L (1 - k_{12}^2 - k_{13}^2) \quad (7)$$

式中: $k_{12} = (r_2/r_1) \sqrt{l'_2/l'_1}$, $k_{13} = (r_3/r_1) \sqrt{l'_3/l'_1}$; r_1 为螺旋线圈内半径, r_2 为铜管外半径, $r_3 = \sqrt{(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}/3$ 为已膨胀部分中心铜管平均几何外半径, l'_1, l'_2, l'_3 分别为图 3 中 1、2、3 的长度。

2.3 电阻 R_g 的计算

由于爆炸管(即中心铜管)截面较大,计算中忽略爆炸管电阻,并假定第 i 段螺线管中有 n_i 根导线并绕(即有 n_i 个分支),每根导线中电流均分,于是装置总电阻

$$R_g = \sum_{i=1}^K \frac{R_i}{n_i} \quad (8)$$

式中: $R_i = \gamma_i l_i / S_i$ 为第 i 段螺线管中一根导线电阻,这里 γ_i, l_i, S_i 分别为随时间变化的第 i 段螺线管中导线电阻率、导线长度及导线有效截面积。以下讨论 γ_i, l_i, S_i 的近似计算方法。

2.3.1 导线电阻率 γ_i

关于导线电阻率,根据文献[3],有

$$\gamma_i = \rho(\varphi) \eta(\varphi, t) \quad (9)$$

式中

$$\rho(\varphi) = \rho_j + \beta_j (\varphi - \varphi_j) \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$\eta(\varphi, t) = 1 \quad \varphi \leq \varphi_j \quad (11)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\eta \nu(\varphi)}{r_0} \quad \varphi > \varphi_j \quad (12)$$

$$\nu(\varphi) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \varphi \leq \varphi_j \\ A_1 (\varphi - \varphi_j)^2 & \varphi_j < \varphi \leq \varphi_k \\ A_2 (\varphi - \varphi_k) / (\varphi - \varphi_k + A_3) + A_4 & \varphi > \varphi_k \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\gamma_i I^2}{n_i^2 S_i^2} \quad (14)$$

式中: φ 为导线导体内能量密度, r_0 为导线导体初始半径, $\rho_j, \varphi_j, \beta_j, A_j$ 均为实验给出的经验常数。

2.3.2 导线长度 l_i

设第 i 段螺线管螺距为 H_i , 有 n_i 根导线并绕,则第 i 根导线的长度为

$$l_i = N_i \sqrt{(\pi D)^2 + (n_i H_i)^2} \quad (15)$$

式中: N_i 为第 i 段螺线管匝数, D 为螺线管直径。

2.3.3 导线有效截面积 S_i

考虑趋肤效应,每根导线的趋肤深度为 $\delta = \sqrt{\frac{\tau}{\mu_i \sigma_i}}$, 其中 $\tau = I / (dI/dt)$ 为装置特征时间, μ_i, σ_i 分别为对应导线随时间变化的磁导率和电导率,则当趋肤深度 δ 小于导线导体直径 d_i 时,导线有效截面积

$$S_i = \frac{d_i^2}{4} \arccos\left(\frac{d_i - 2\delta}{d_i}\right) - \left(\frac{d_i}{2} - \delta\right) \delta \sqrt{\frac{d_i}{\delta} - 1} \quad (16)$$

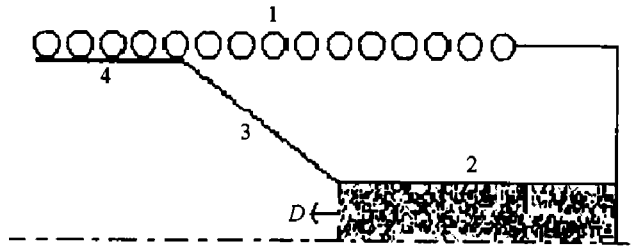


图 3 装置有效电感模型图

Fig.3 Sketch of efficient inductance of MCG

3 数值模拟与 8-7A 型 MCG 初步实验结果比较

根据理论分析结果,优化设计了一种 8-7A 型多分支爆磁压缩装置。装置外直径为 120mm、长 600mm,爆炸管外直径为 62.4mm,壁厚 2.5mm。理论结果表明,在理想情况下(即没有额外磁通损耗,(2)式中 $\alpha=0$)8-7A 型 MCG 可在 89nH 负载上获得 3.55MA 脉冲大电流,电流变化速率达 330GA/s,负载中储能 560kJ,能量放大约 560 倍。在 8-7A 型 MCG 初步实验中,采用 1010 μ F 电容器为装置提供约 500J 初始能量,中心铜管填充密度为 1.07g/cm³ 的 RDX 粉状炸药,采用 Rogowski 线圈测量负载电流及电流变化速率。目前共进行了 4 次 8-7A 型 MCG 电感性负载实验,主要输出性能参数见表 1。表 1 中 ρ 为炸药密度, L_0 、 I_0 、 E_0 分别为初始电感、初始电流、初始能量, I_H 、 E_H 分别为负载电流、负载能量, η_T 为磁通转换系数, n_E 为能量放大倍数。实验结果表明,在 89nH 负载上,可以获得 850kA 脉冲大电流,负载中储能为 32.5kJ,能量放大 70 倍,电流变化速率极大值为 56GA/s;在 360nH 负载上可产生 512kA 脉冲电流,储能 45.8kJ,能量放大 90 倍。图 4、图 5 为理论结果与 No.3 实验输出电流及电流变化速率比较图。从图中可见,由于实验中存在的螺线管匝间漏磁及铜管与线圈的接触损耗都较大,使装置实际输出电流比理论输出电流小很多。但从图中分析也表明,若在计算中取磁通损耗系数 $\alpha=0.19$,理论结果与实验结果还是较为吻合的。这也验证了我们设计的多分支爆磁压缩发生器等效电路模型的合理性。

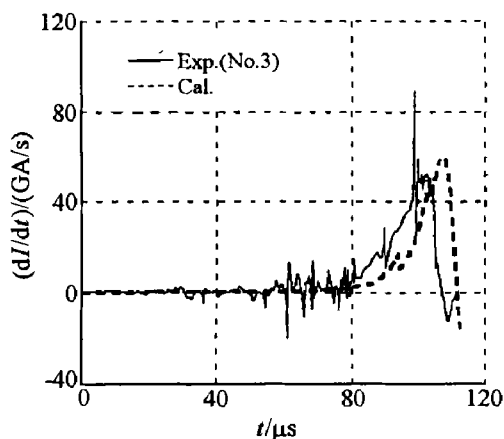


图 4 电流变化速率与时间关系曲线

Fig. 4 Waveform of derivative current

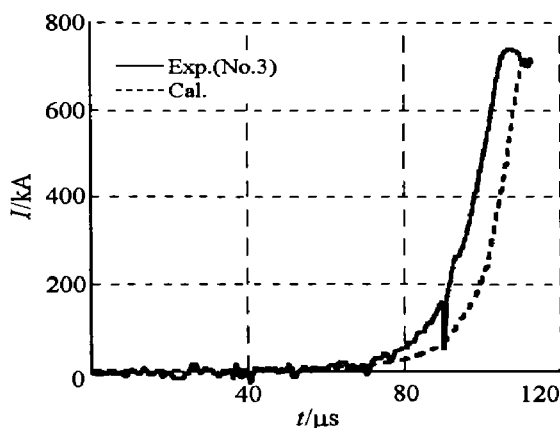


图 5 负载电流与时间关系曲线

Fig. 5 Waveform of load current

表 1 8-7A 型 MCG 初步实验结果

Table 1 Experimental results of type 8-7A MCG

No.	ρ / (g/cm ³)	L_0 / μ H	I_0 / kA	E_0 / kJ	L_H / μ H	R_H / Ω	I_H / kA	E_H / kJ	η_T	n_E
1	1.07	694.3	1.19	0.492	0.360	0.005				
2	1.07	691.1	1.16	0.470	0.089	0.002	854.1	32.5	0.096	69
3	1.07	697.1	1.17	0.468	0.086	0.002	727.6	22.8	0.080	49
4	1.07	694.6	1.22	0.513	0.360	0.005	512.0	45.8	0.210	89

4 讨论

通过 8-7A 型 MCG 数值模拟与实验结果比较,验证了等效电路模型程序的合理性。尽管由于装置在实验中产生的磁通损耗较大,使得实验结果与计算的理想结果有较大差别,但当取适当的磁通损耗系数进行计算时,电流、电流变化速率以及它们随时间变化的趋势还是比计划较吻合的。进一步应改进多分支爆磁压缩装置的绕制工艺,尽量降低装置磁通损耗系数,提高装置输出性能,以使 8-7A 型 MCG 实验结果达到或接近理论设计水平。

参考文献:

- [1] Boriskin A S. Transportable devices based on MCG for simulating the pulsed component of lightning current on extensive

- objects[A]. Cheryshev V K. Proceedings of the MG - VI[C]. Sarov(Arzamas-16): VNIIEF, 1996:933-938.
- [2] 卡兰塔罗夫. 电感计算手册[M]. 陈汤铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] Fortov V Y. Explosive generators of powerful pulses of an electrical current[M]. Moscow: Nauka, 2002:331-332.

Theoretic and experimental study of an explosive magnetic flux compression generator with high energy output

SUN Qi-zhi, GONG Xing-gen, XIE Wei-ping,
LIU Zheng-fen, DAI Wen-feng, CHI Yuan, FU Song
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: According to the circuit model of multi-branch explosive magnetic flux compression generator with a moderate inductance load and high energy output, a generator of this kind, type 8-7A, was designed and tested. The 10kg 8-7A generator with a length of 600mm and 120mm in diameter, output pulsed current 512kA on inductance load of 360nH, and the total output energy is about 45.8kJ, and the energy amplification is about 90.

Key words: fluid mechanics; explosive power; magnetic compression generator; circuit model