

电磁炸弹中磁通压缩发生器的动态电感分析

朱绪斐, 张智军

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:对电磁炸弹的核心—磁通压缩发生器进行分析,建立了其等效电路模型,并着重对工作过程中等效定子线圈的匝数及电枢半径变化情况进行分析,得出了明晰实用的动态电感随时间变化的表达式。

关键词:电磁炸弹;爆炸磁通压缩发生器;动态电感

中图分类号:V246 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)05-0015-03

磁通压缩发生器(Magnetic Flux Compression Generators, MFCG)是一种利用炸药爆炸将化学能转化为电磁能的脉冲电源,与其它能源相比有着体积小、重量轻、脉冲窄、功率大等优点,广泛应用于军事和民用领域。前苏联的VNIIEF(the All-Russian Scientific Research Institute of Experiment Physics)和美国的LANL(the Los Alamos National Laboratory)自20世纪60年代起就开始了对其广泛的研究,爆炸磁通压缩装置已应用于美军的MK84炸弹与AGM86巡航导弹和俄罗斯的阿特罗普斯电磁脉冲炮弹。面对国际形势发展和新时期军事斗争的需要我国的许多高校和研究所也在开展爆炸磁通压缩发生器的研究与开发。

磁通压缩发生器的结构形式有很多种,如圆柱形、锥形、平板型、螺旋型等等,其中螺旋型压缩发生器应用最为广泛。在工作过程中,电枢的半径和定子线圈的匝数是在不断变化的,也是其动态电感表达式中最重要的两个量。文献[1]认为前一个电枢线圈完全短路定子线圈后,后一个电枢线圈才刚刚起爆,建立电感表达式;文献[2]认为螺线管中的磁场为均匀磁场,利用螺线管的有效电感近似正比于其所占有有效空间体积的关系,建立电感表达式。两者都没有反映出爆炸过程中各参量的连续变换过程。本文通过考虑定子线圈匝数和电枢半径随时间的逐步变化,建立动态计算模型并分析,得出定子匝数、电枢半径与时间的明晰关系式,从而得出动态电感表达式。

1 磁通压缩发生器的工作原理和等效电路

1.1 工作原理

螺旋形磁通压缩发生器的基本结构见文献[3],定子为裸导线绕成的螺线管,初始电感很大。电枢一般为中空的铜管或铝管,中间添满炸药,并与定子同轴。为保障爆炸后,电枢将所接触部分的定子线圈短路良好,一般电枢比定子要长。本文为分析方便假设它们是等长的。初始时刻由电容器组供电,提供初始磁通。随着炸药爆炸,爆轰波的不断前进,定子和电枢之间的空间减小,电枢接触定子,定子电感减少,磁通得到压缩,从而达到放大电流和能量的目的。

根据Kirchoff磁通守恒定律^[4],在一个电感回路中当电感随时间变化时有 $I(0)(L(0)+L)=I(t)(L(t)+L)$ 。式中: $I(0)$ 为初始时刻电流; $L(0)$ 为动态电感 $L(t)$ 的初始电感, $L(t)$ 最后变为零; L 为负载电感。则最终电流为 $I=I(0)[L(0)+L]/L$ 。电感最后储能为 $I^2L/2=(L(0)+L)I^2(0)(L(0)+L)/2L$ 。式中: $(L(0)+L)I^2(0)/2$ 为初始电感储能, $(L(0)+L)/L$ 称为放大因子。可见,当 $L(t)$ 从 $L(0)$ 减小为

收稿日期:2003-12-10

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:朱绪斐(1980-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事电磁场理论与微波技术研究;

张智军(1960-),男,河北磁县人,教授,主要从事电磁场理论与微波技术研究。

零时,电流从 $I(0)$ 增大为 I ,同时储能也得到放大。

1.2 等效电路

根据文献[1]、[5]结构模型,可将磁通压缩发生器用图1等效。其中, C 为电容器, F 为熔丝(有额定电流), K 为触发开关, R_m 、 L_m 为螺线管等效电阻和电感, R_f 、 L_f 为负载等效电阻和电感。初始时刻由 C 对磁通压缩发生器供电,提供初始磁通,当电流达到最大时, F 断掉并且 K 闭合,同时引爆电枢中的炸药,磁通压缩发生器开始工作。由等效电路可得到方程 $d(L_m(t) + L_f)I(t)/dt + (R_m(t) + R_f)I(t) = 0$ 。式中: $R_m(t)$ 、 $L_m(t)$ 、 $I(t)$ 均为时间 t 的函数。上式解为 $I(t) = \frac{L(0)I(0)}{L_m(t) + L_f} \exp(-\int_0^t \frac{R_m(t) + R_f}{L_m(t) + L_f} dt)$ 。式中: $L(0)$ 、 $I(0)$ 分别为初始电感和初始电流, R_f 、 L_f 设为已知。可见要想得到电流必须对动态的 $R_m(t)$ 和 $L_m(t)$ 进行分析。

2 动态电感和动态电阻的分析

2.1 动态电感

磁通压缩发电器的电感和电阻都是随时间变化的,可以采用时间递推的思想,对发生器进行离散化分析。把定子看作是单匝线圈的串联,并且由于电枢在膨胀过程中也会产生感应电流,与定子之间产生互感,也会影响到定子的电感,因此把电枢分割成与定子线圈一一对应的内层单匝线圈的串联来分析,见图2。

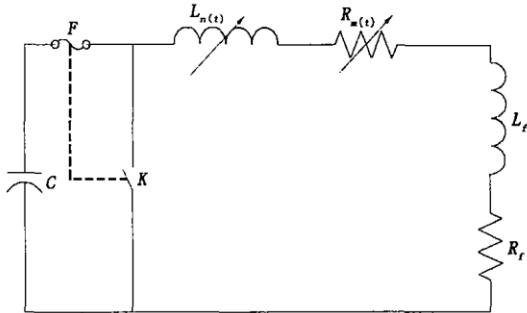


图1 磁通压缩发生器的等效电路

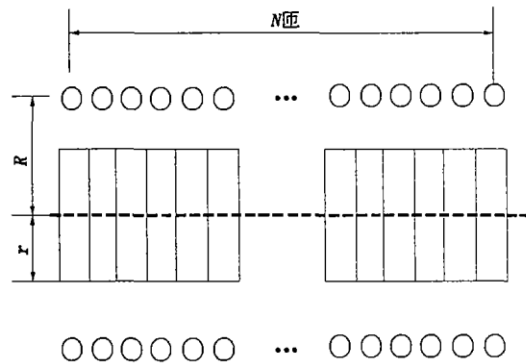


图2 动态电感的分析模型

动态电感: $L_m(t) = L + M + M'$; $L = \sum_{i=n+1}^N L_i$; $M = 2 \sum_{i=n+1}^N \sum_{j=n+1}^N M_{ij} (j > i)$; $M' = - \sum_{i=n+1}^N \sum_{j=n+1}^N M'_{ij}$ 。式中: N 为线圈匝数; L_i 为定子各线圈的自感; M_{ij} 为定子各线圈相互间的互感; M'_{ij} 为定子各线圈与电枢各线圈之间的互感,因为电枢中感应电流的方向与定子中电流方向相反,故 M'_{ij} 前为负号; n 表示第 n 个被短路的定子线圈(而在此之后的定子线圈皆未被短路, $n \geq 1$), n 是一个随时间变化的整数,详见式(1)、式(2)。根据电感计算手册可以得到 $L_i = \mu_0 R_i (\ln(8R_i/a) - 2)$ 。式中: R_i 为定子线圈的半径, $R_i = R$ 是不变的, a 为螺线管导线的半径($R_i \geq 10a$)。 $M_{ij} = \mu_0 R_i F / 4\pi$, F 可根据 $\xi = X_{ij} / 2R_i$ 查表求得^[6], X_{ij} 为第 i 个和第 j 个定子线圈的距离。 $M'_{ij} = \varphi \mu_0 \sqrt{R_i r_j} / 4\pi$, φ 可根据 $m^2 = [(R_i - r_j)^2 + X_{ij}^2] / [(R_i + r_j)^2 + X_{ij}^2]$ 查表求得, X'_{ij} 为第 i 个定子线圈与第 j 个电枢线圈的轴向距离, r_j 为第 j 个电枢线圈的半径。

由以上公式可以看出,要想求得电感 L_m 必须对 n 和 r_j 进行分析。

2.1.1 对 n 分析

图3中, $t=0$ 时引爆炸药,设径向爆轰波速为 V_x ,轴向爆轰波速为 V_y ,并假设均为匀速,其大小决定于电枢的材料和炸药的种类。则电枢线圈从起爆到接触定子线圈的时间为 $t_0 = (R - r) / V_x$ 。 $t > t_0$ 时刻起,每过 d / V_y 时间,被短路线圈的匝数 n 增加1, d 为相邻两电枢线圈的轴向距离,则第 n 个被短路的时刻 t 为

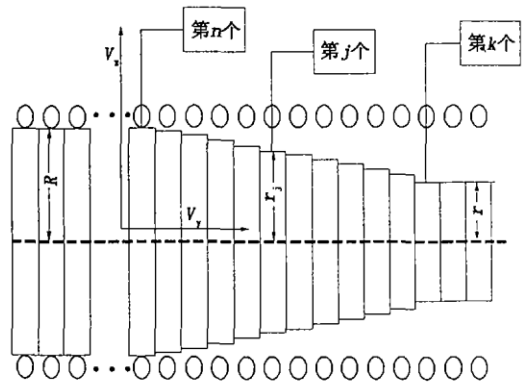


图3 动态匝数 n, r_j 的计算模型

$$t = t_0 + (n - 1)d/V_y, \quad (1)$$

所以

$$n = \text{int}[(t - t_0)V_y/d] + 1 \quad (2)$$

这样就求得任意时刻 t 剩余未被短路的定子线圈数, $i \in [n + 1, N]$ 。

2.1.2 对 r_j 分析

由于 d 的存在(参见图3), 得 $r_j - r_{j+1} = V_x d/V_y$ 。设 t 时刻第 n 个电枢线圈接触定子线圈, 即 $r_n = R$, 而第 k 个($n < k \leq N$, 见式(15))刚刚起爆, $r_k = r$, 有 $k = \text{int}[tV_y/d] + 1$ 。第 j ($n + 1 \leq j \leq k - 1$) 个电枢线圈半径为 $r_j = R - (j - n)dV_x/V_y$ 。这样即可求得任意时刻 r_j 的大小。

2.2 动态电阻

首先考虑定子线圈的电阻为 $R_m = \rho l_i/s$ 。根据文献[1], 得 $\rho = \rho_0[1 + \beta(T - T_0)]$; $T - T_0 = \int_0^t \frac{\rho}{C_V} I^2 dt$; $l_i = 2\pi R(N - n)$; $s = \pi a^2$ 。式中: ρ 是与温度有关的螺线管材料的电阻率; β 是电阻温度系数; C_V 是定容比热; T 是 t 时刻温度; T_0 是初始温度; l_0 是 t 时刻导线长度。

同时, 电枢为良导体, 其作用为短路定子, 在膨胀过程中会产生感应电流, 产生焦耳热, 导致化学能和磁能的一部分损耗, 这部分损耗可通过引入一损耗系数等效^[2], 而不必考虑其进入等效电路的电阻。

3 结论

通过上面的分析可见, 影响磁通压缩发生器工作性能的关键因素是动态电感和动态电阻。本文按时间递推的思想, 将定子等效为单匝线圈的串联, 并将电枢分割成与定子线圈一一对应的内层单匝线圈的串联, 建立计算模型, 得出动态电感和动态电阻与爆轰波速度的关系式, 可以相对精确的求得任意时刻发生器的动态电感和电阻, 为数值模拟和实验提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 王海强, 李连军. 单端起爆螺旋性爆炸磁通压缩发电机的等效电路模型[J]. 军械工程学院学报, 2000, 12(3), 67 - 70.
- [2] 孙奇志, 龚兴根. 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.
- [3] Lileikis D E. Numerical Simulation of A Helical, Explosive Flux Compression Generator[EB/OLA]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel3/3932/11381/100531647.pdf>.
- [4] Irvin R Lindemuth, Carl A Ekdahl. U S/Russian Collaboration in High - Energy - Density Physics Using High - Explosive Pulsed Power: Ultrahigh Current Experiment, Ultrahigh Magnetic Field Applications, and Progress Toward Controlled Thermo-nuclear Fusion[J]. IEEE Trans Plasma Science, 1997, MTT - 25(6): 1357 - 1372.
- [5] Degnan J H. Analytic Criteria for Fuses for Explosive Flux Compression Generators[J]. Digest of Technical Papers of Tenth IEEE International, 1995, (2): 1063 - 1067.
- [6] 卡兰塔罗夫. 电感计算手册[M]. 陈汤铭. 北京: 机械工业出版社, 1992.

(编辑: 姚树峰)

A Dynamic Inductance Analysis of Magnetic Flux Compression Generator in Electric Magnetic Bomb

ZHU Xu - fei, ZHANG Zhi - jun

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: This paper analyzes the core of the electric magnetic bomb - explosive magnetic flux compression generator, builds up its equivalent circuit model, and then focuses on the changes of the number of the equivalent stator loop and the armature radius in the process of operation. Finally it gives an explicit time formula for dynamic inductance ((10) - (16) formula).

Key words: electric magnetic bomb; explosive magnetic flux compression generator; dynamic inductance