

一种解耦的爆磁压缩发生器运行损耗模型

吴碧^{1,2}, 张庆明², 何远航², 马月芬^{2,3}

(1. 空军装备研究院 总体所, 北京 100076; 2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 研究螺旋型爆磁压缩发生器的损耗机理, 建立了一种磁通损耗项和电阻损耗项解耦表示的爆磁压缩发生器运行模型, 并给出了物理意义明确的损耗项解析式; 经实验验证, 对于损耗机理更为复杂的紧凑型级联爆磁压缩发生器, 本模型仿真结果与实验结果仍符合良好, 仿真波形与实验波形总体趋势一致, 螺距变化的节点处过度清晰, 定子均绕段的波形相似度较高。

关键词: 爆磁压缩发生器; 电阻损耗; 磁通损耗

中图分类号: TM 359.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2012)07-0673-04

A Decoupling Operation Model of Flux Losses and Ohmic Losses in Magnetic Flux Compression Generator

WU Bi^{1,2}, ZHANG Qing-ming², HE Yuan-hang², MA Yue-fen^{2,3}

(1. Equipment Academy of Air Force, Beijing 100076, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A decoupling operation model has been developed for the helical magnetic flux compression generator. The model reveals the mechanism of losses with analytical expressions and clearly physical implication. Based on the proposed model, the experiment and simulation were implemented for the compact cascading magnetic flux compression generator with more complex losses mechanism. The results show that experimental results are in compliance well with the simulation results of the model. The current waveforms of experiment and simulation vary in the same trend, in which the change of transition is clear at the pitch points of stator. At the smooth segment of stator, the consistency of experimental waveforms with simulation ones is even better.

Key words: magnetic flux compression generator; ohmic losses; magnetic flux losses

螺旋型爆磁压缩发生器(helical explosive magnetic flux compression generator, HFCG)的损耗机制复杂, 结构参数的变化对发生器运行效率的影响难以预测^[1]。随着电磁脉冲武器研究的深入, 各国对小型爆磁压缩发生器的需求越来越迫切, 较之于大型爆磁压缩发生器, 小型发生器体积更小, 绝缘更

难, 击穿现象发生更频繁, 定子内体积的缩小使得相同初始电感的小型发生器需要更小的线径和螺距来绕制更多的匝数, 因而电阻损耗和跳匝现象更难避免, 接触磁通损失的影响也更为严重。发生器运行过程中电阻损耗机制和磁通损耗机制都不是单一的, 各种损耗现象的影响也不是线性的。为深入分

收稿日期: 2011-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11032003)

作者简介: 吴碧(1978—), 男, 博士生, E-mail: wubi_china@gmail.com.

通信作者: 张庆明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: qmzhang@bit.edu.cn.

析各种损耗机制的影响程度,本文中建立了一种解耦的爆磁压缩发生器运行损耗模型.

1 爆磁压缩发生器运行损耗模型

以 HFCG(图 1)为例,其主体结构由定子和电枢两部分组成,外层定子由高电导率导线螺旋绕制,内部电枢为装有高能炸药的金属管.由外部电路建立初始磁场,爆轰波和爆轰产物驱动电枢自起爆端向末端膨胀,顺序短路定子线圈,压缩磁通,理想条件下磁通守恒,发生器的输出电流随发生器电感的减小不断放大.实际条件下,发生器运行过程中损耗机制十分复杂,随着 HFCG 的小型化,各种损耗的影响都更为严重甚至进入非线性损耗阶段,发生器的运行效率实际是由各种损耗的综合效应主导.

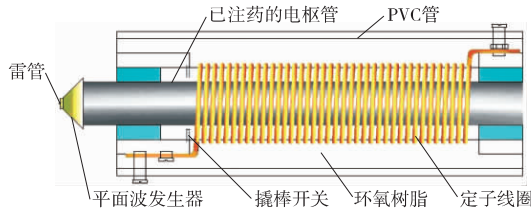


图 1 标准螺旋型爆磁压缩发生器
Fig. 1 Standard helical magnetic flux compression generator

考察 HFCG 的典型运行过程,如图 2 所示,左侧为初始磁通建立回路,C_I为提供初始电流的电

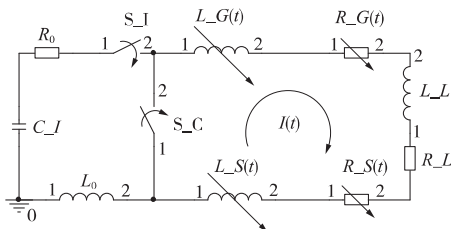


图 2 发生器的运行电路
Fig. 2 Operation circuit of generator

容, R₀, L₀ 为放电回路的电感与电阻;右侧为运行回路: L_G(t), R_G(t) 为发生器定子与电枢的电感和电阻, R_L, L_L 为负载电感与电阻, L_S, R_S 为接触点区域的电感和电阻. 定义回路总电感与总电阻为 L 和 R, 左侧开关 S_I 闭合之后, 开关 S_C 闭合之前, 为一个二阶电路:

$$du_c/dt = R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2}.$$

记图 2 右侧回路总电感与总电阻为 L(t) 和 R(t), 不计热效应与趋肤效应引起的负载电阻与电感变化, 且将接触点电阻(感)定义为与时间和空间

无关的等效电阻(感); 记扩散磁通和损失磁通等不继续参与磁通压缩过程的磁通为无效磁通, 对于标准 HFCG, 记无效磁通的生长速度因子 η, Φ_η 即为单位磁通损失的速度. 开关 S_C 的闭合后, L_G(t) 俘获初始磁场, 由基尔霍夫电压定律可得:

$$d\Phi/dt + \Phi\eta + R_i i_t = 0, \tag{1}$$

即

$$dL_i i_t / dt + L_i i_t \eta + R_i i_t = 0, \tag{2}$$

得

$$i_t = \frac{L_0 i_0}{L_t} \exp(-\int_0^t \eta dt) \exp(-\int_0^t \frac{R_t}{L_t} dt). \tag{3}$$

式中: L₀ 为线圈的初始电感; i₀ 为线圈的初始电流; L_t 为线圈的瞬时电感; i_t 为线圈的瞬时电流.

讨论式(3):

① 当 R_t = 0, 式(3)化简为

$$i_t = \frac{L_0 i_0}{L_t} \exp(-\int_0^t \eta dt) \exp(-\int_0^t \frac{0}{L_t} dt) = \frac{L_t i_t}{L_t} \exp(-\int_0^t \eta dt). \tag{4}$$

② 当忽略无效磁通的生长速度, 式(3)化简为

$$i_t = \frac{L_0 i_0}{L_t} \exp(-\int_0^t \eta dt) \exp(-\int_0^t \frac{R_t}{L_t} dt) = \frac{L_t i_t}{L_t} \exp(-\int_0^t \frac{R_t}{L_t} dt). \tag{5}$$

③ 当不计电路的电阻损耗, 同时忽略无效磁通的生长速度, 式(3)化简为

$$i_t = L_0 i_0 / L_t. \tag{6}$$

此时, 发生器 t 时刻的电流等于初始电流与电感变比倒数之积, dΦ/dt = 0, 即满足磁通守恒的理想条件, 式(6)可看作爆磁压缩发生器的理想方程. 而式(3)即为爆磁压缩发生器运行的一般方程.

由爆磁压缩发生器一般方程可知, 发生器的任意时刻电流 i_t 为初始电流、电感变比的倒数,

$$\exp[-\int_0^t \frac{R(t)}{L(t)} dt], \exp[-\int_0^t \eta dt]$$
 4 项的乘积.

定义电阻损耗引起的损耗因子为

$$\lambda_R(t) = \exp[-\int_0^t \frac{R(t)}{L(t)} dt], \tag{7}$$

该项仅与发生器的动态电阻及动态电感有关.

定义磁通损失引起的损失因子为

$$\lambda_\Phi(t) = \exp(-\int_0^t \eta dt), \tag{8}$$

该项仅与发生器的无效磁通生长速度因子 η 有关.

则式(3)表示为

$$i_i = \frac{i_i}{\eta_L(t)} \lambda_R(t) \lambda_\Phi(t), \quad (9)$$

由以上分析可发现,本爆磁压缩发生器运行损耗模型可以将 FCG 运行过程中各种损耗分类划分为电阻损耗和磁通损耗两类,两类损耗的定义方法和表达形式均有明确的物理意义,且解的形式是解耦的,求解的过程也是独立的.

2 模型中损耗因子的确定

由式(9)可知,爆磁压缩发生器运行过程中的回路电阻引起的损失由 HFCEG 的动态电阻与动态电感来确定;未能参与进一步压缩的磁通引起的损耗由无效磁通的生长速度因子来确定. 这样 HFCEG 的损耗历史和输出波形的确定问题就转化为发生器运行过程中动态电阻 $R(t)$ 、动态电感 $L(t)$ 以及无效磁通生长速率因子 $\eta(t)$ 这 3 个项求取问题. 爆磁压缩过程中主要的损耗现象根据其物理过程、发生机理或实验统计数据都可以确定其形式和部分参数,并纳入上述的 3 个项中来影响发生器的运行,这样便可建立发生器宏观输入输出参量与各个微观损耗机制的联系. 以下简述损耗因子中 $R(t)$ 、 $L(t)$ 、 $\eta(t)$ 的确定方法.

2.1 发生器动态电阻的确定

发生器电阻包括定子绕线电阻、电枢电阻以及定子与电枢的触点区域电阻,在此,不计负载电阻,根据发生器结构和运行过程,发生器的动态电阻表达式为

$$\begin{cases} R(t) = R_s + R_a + R_c, \\ R_s = f_p \rho(t) \frac{n \sqrt{(\pi d)^2 + p^2}}{S(t)}, \\ R_a = \lambda \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{[\pi d_i(t)]^2 + p^2}}{\sigma(t) p \delta}, \\ R_c = \frac{\delta_c(t, l)}{\sigma(t) S(t, l)}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_p 为由 B. M. Novac 引入的一个临近效应修正系数^[2-3]; d 为定子直径; p 为绕线螺距; $\rho(t)$ 为材料的电导率,可按绝热调节下能量沉积迭代求取温升来计算; $S(t)$ 为定子的有效截面积,可求取趋肤深度后按几何关系计算; $d_i(t)$ 为电枢膨胀过程中的直径; $S_i(t)$ 为电枢的有效截面积; λ 为待定系数; δ 为趋肤深度; $\sigma(t)$ 为触点区电导率,可按参考文献[4-5]中电导率、温度,以及比容的关系来计算; $S(t, l)$ 为接触面积.

2.2 发生器动态电感的确定

将定子看作是单匝线圈的串联,电枢在膨胀过程中会产生感应电流,与定子之间存在互感,并把电枢分割成与定子一一对应的内层单匝线圈的串联进行分析. 则发生器的动态电感可表示为定子绕匝自感 L , 定子绕匝间互感 M 和定子与电枢互感 M' 之和.

$$\begin{cases} L(t) = L + M + M', \\ L = \sum_{i=n+1}^N L_i, \\ M = 2 \sum_{i=n+1}^N \sum_{j=n+1}^N M_{ij}, \\ M' = - \sum_{i=n+1}^N \sum_{j=n+1}^N M_{ij}. \end{cases} \quad (j > i) \quad (11)$$

式中: 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,电枢中感应电流产生的磁通与定子中磁通的反向,故 M'_{ij} 为负. 而具体 L_i, M_{ij}, M'_{ij} 的形式可由文献[6]中查表计算.

2.3 无效磁通生长速度因子的确定

无效磁通生长速度因子 η 包括扩散速度因子和滞留速度因子,其中扩散速度因子可按等效条件由磁扩散方程求得,滞留速度因子主要由趋肤层、击穿、跳匝三种机制引起^[7],它们对应的表达式可由几何关系分析获得.

$$\begin{cases} \eta_1 = \sum_{i=1}^2 \left(\sqrt{\frac{i}{(di/dt) \mu \sigma_i}} H_i(t) \right) \times \\ \mu_0 D_E \frac{\sqrt{(\pi d)^2 + p^2}}{p L_i i}, \\ \eta_2 = \frac{\mu_0 H(t) l_b D_E \sqrt{(\pi d)^2 + p^2}}{L_i i \pi d}, \\ \eta_3 = \frac{\mu_0 H(t) D_E \sqrt{(\pi d)^2 + p^2}}{4 \pi d L_i i}. \end{cases} \quad (12)$$

3 模型的实验检验

为验证本文中模型的适用范围,对损耗更为严重的小型爆磁压缩发生器进行了仿真和实验,验证实验采用了装药 200 g、单端起爆、分段绕制的柱-柱结构的发生器. 实验结果与基于本模型的对应仿真结果如图 3 所示. 对比可发现,本模型对单端起爆变螺距绕制的爆磁压缩发生器输出电流波形仿真结果良好,仿真波形与实验波形总体趋势一致,螺距变化的节点处过度清晰,定子均绕段的波形相似度较

高;同时也发现对输出电流幅值预测误差仍较大,这表明模型中仍需引入与结构参数相关的待定系数,待定系数可通过系统的标定实验来确定.

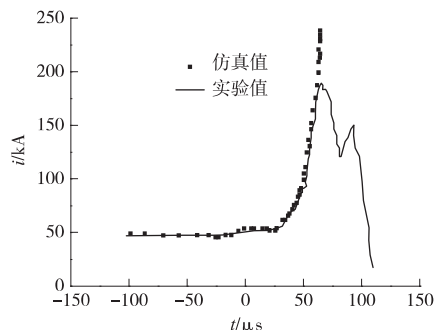


图 3 仿真与实验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation results with experimental results

4 结 论

建立了一种损耗解耦的爆磁压缩发生器运行模型,将发生器运行过程仿真的复杂问题转换为动态电感、动态电阻、无效磁通生长速度因子 3 个参量的求取问题;分析得出了爆磁压缩发生器运行过程中各种主要损耗现象对应损耗项因子的解析表达式,从而建立起具体微观损耗与宏观输出参量的联系,这对独立考察各种损耗机制的影响,计算发生器宏观输出,以及发生器优化设计都有一定意义;模型对装药量 200 g 的小型爆磁压缩发生器的仿真结果仍与实验结果符合良好,证明了本模型的适用性.

参考文献:

[1] Neuber A. Explosively driven pulsed power, helical magnetic flux compression generators [M]. Berlin:

Springer, 2005.

- [2] Novac B M, Smith I R, Enache M C, et al. Simple 2-dimensional model for helical flux-compression generator [J]. Laser and Particle Beams, 1997, 15(3): 379-395.
- [3] Novac B M, Smith I R, Enache M C, et al. 2-dimensional modelling of inductively-coupled helical flux-compression generator - fluxar systems[J]. Laser and Particle Beams, 1997, 15: 397-412.
- [4] 张宝平,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社, 2001.
Zhang Baoping, Zhang Qingming, Huang Fenglei. Detonation physics[M]. Beijing: Ordnance Industry Publishing House, 2001. (in Chinese)
- [5] 毕延. 冲击压缩至兆巴压力下铁的电导率以及地球物理意义[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2002.
Bi Yan. The impact of compression to the conductivity and geo physical significance of iron in the trillion bar pressure[D]. Mianyang: China Academy Engineering Physics, 2002. (in Chinese)
- [6] Калантаров П Л, Цейтлин Л А. 电感计算手册[M]. 陈汤铭,译. 北京:机械工业出版社, 1992.
Калантаров П Л, Цейтлин Л А. Inductance calculation manual[M]. Chen Tangming, transl. Beijing: China Machine Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [7] Novac B M, Smith I R, Stewardson H R, et al. Construction and testing of explosive driven helical generators[J]. Phys D: Appl Phys, 1995, 28: 807-823.

(责任编辑:刘雨)