

射频爆磁压缩发生器磁通损失问题分析

韩颖超, 李红梅, 邱景辉

(哈尔滨工业大学 微波与天线技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 在介绍射频爆磁压缩发生器优点及脉冲产生原理的基础上,对射频爆磁压缩发生器能量转换效率低的主要原因——磁通损失问题进行了详细分析。指出趋肤深度、跳匝问题、电击穿是射频爆磁压缩发生器磁通损失的主要原因。对趋肤深度、跳匝现象、电击穿产生的原因进行了分析,给出了这些现象对射频爆磁压缩发生器磁通影响的数学公式。最后提出了降低这些磁通损失、提高射频爆磁压缩发生器能量转换效率的方法。

关键词: 射频爆磁压缩发生器; 磁通损失; 趋肤深度; 跳匝; 电击穿

中图分类号: TN78; TN712 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)03-0015-03

Flux Loss Analysis of Radio Frequencies Explosive Magnetic Flux Compression Generator

HAN Ying-chao, LI Hong-mei, QIU Jing-hui

(Microwave and Antenna Research Center of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The advantage and working principle of Radio Frequencies Explosive Magnetic Flux Compression Generator (RF MFCG) was introduced. The main causes of inefficiency in energy transfer of Radio Frequencies Explosive Magnetic Flux Compression Generator were analyzed. It was put forward that skin depth, turn-skipping, and electric breakdown were the main causes of flux loss. The causes were analyzed and the mathematical model of Radio Frequencies Explosive Magnetic Flux Compression Generator flux affected by those factors was given. The way to reduce flux loss and improve the energy transforming efficiency was put forward.

Key words: RF MFCG; flux loss; skin depth; turn-skipping; electric breakdown

爆炸磁通量压缩发生器 (Explosive Magnetic Flux Compression Generator, MFCG 或 FCG) 是通过炸药爆炸驱动电枢向外膨胀, 对磁场同轴均匀压缩, 把化学能转换为电能的一种一次性脉冲产生装置。

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(61071035)

作者简介: 韩颖超(1987—), 男, 内蒙古呼伦贝尔市人, 硕士, 主要研究方向为射频爆磁压缩发生器、超宽带天线、天线小型化、射频电路开发应用。

MFCG具有结构紧凑、质量轻、脉冲上升时间短、储能密度高(MJ/kg量级)等特点,使其在现代高能密度物理、强磁场物理、核爆模拟、军事应用等一系列研究上具有十分广泛的应用。射频爆磁压缩发生器(Radio Frequencies Explosive Magnetic Flux Compression Generator, RF MFCG)是在螺旋型MFCG的基础上加一小电容构成的(如图1所示)。附加上小电容后,电路中电流具有振荡特性,装置中的某些元件可视为辐射单元,从而使得RF MFCG同时兼备脉冲产生和辐射功能。

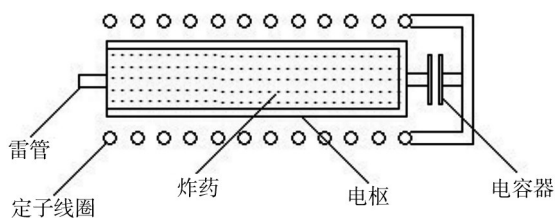


图1 射频爆磁压缩发生器结构示意图

Fig. 1 Structure of RE MFCG

RF MFCG正处于不断发展和完善中。其中一个主要问题是能量转换效率。影响RF MFCG能量转换效率的因素很多,磁通损失是其中最主要的原因。造成磁通损失的原因也很多,诸如趋肤深度、跳匝问题等。文中逐一对这些造成磁通损失的原因进行了详细分析,给出了减小磁通损耗、提高能量转换效率的方法。

1 趋肤深度磁通损失

实际导体电导率都为有限值。在发生器运行过程中,由于趋肤效应的存在,一部分磁通会渗透到定子线圈和电枢内部,这部分磁通在RF MFCG工作过程中得不到压缩。如果导体的尺寸太小,甚至会发生磁场扩散到导体外部的情形,造成更大的磁通泄漏。电导率为常值的导体中趋肤深度为:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: ω 为脉冲频率; μ 为导体材料的磁导率; σ 为电导率。 τ_s 为趋肤时间:

$$\tau_s = \frac{1}{2} \pi \mu \sigma \delta^2 \quad (2)$$

发生器空腔压缩磁场的时间远小于 τ_s , 磁场才

能增大。这要求压缩速度^[1-2]:

$$v > \frac{2}{\pi \mu \sigma \delta} \quad (3)$$

如图2所示,炸药爆炸后电枢受力膨胀与定子线圈短路接触,接触点为A。

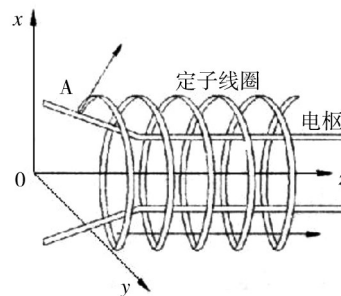


图2 短路接触点A轨迹示意

Fig. 2 Track of the short dot A

设A点运动速度为 v_A , 轴向运动速度为炸药爆轰波速 v_E , 沿电枢横截面圆的径向运动速度为 v_T 。以一匝定子线圈为例, 则 v_A , v_E , v_T 满足图3关系。

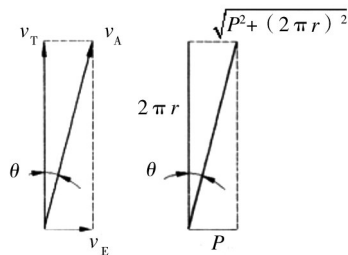


图3 速度三角形和长度三角形

Fig. 3 Velocity and length triangles

则 v_T 为:

$$v_T = \frac{v_E}{\tan \theta} = v_E \frac{2\pi r}{P} \quad (4)$$

式中: θ 为该匝定子线圈的绕线倾角; r 为定子线圈内径; P 为螺距。

设总的趋肤效应磁通损失为 Φ_s , 扩散到定子线圈和电枢中的磁通分别为 Φ_{s1} , Φ_{s2} , 则趋肤效应磁通损失速率为^[3]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_s}{dt} &= \frac{d\Phi_{s1}}{dt} + \frac{d\Phi_{s2}}{dt} = \mu_0 H v_T (\delta_{\phi 1} + \delta_{\phi 2}) = \\ &\mu_0 H v_E \frac{2\pi r}{P} (\delta_{\phi 1} + \delta_{\phi 2}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; H 为磁场强度; $\delta_{\phi 1}$ 和 $\delta_{\phi 2}$ 分别是定子线圈和电枢中的趋肤深度。

当电流按指数规律上升时, 趋肤深度可表示为:

$$\delta_{\phi 1}(t) = \delta_{\phi 2}(t) = \sqrt{\frac{2}{\omega(t)\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{I}{(dI/dt)\mu\sigma}} \quad (6)$$

式中: 等价频率 $\omega(t) = (2/I)dI/dt$ 。对于 RF MFCG 的电感, 可认为 $L \propto 1$, 则有:

$$\Phi = LI \approx \frac{dL}{dt} \frac{l}{v_E} I = \mu_0 HS \quad (7)$$

式中: l 为电枢长度; S 为定子线圈和电枢之间所围的有效磁通面积。可得:

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{dL}{dt} \frac{l}{S} \frac{4\pi r}{P} \cdot \sqrt{\frac{I}{(dI/dt)\mu\sigma}} \cdot I \quad (8)$$

设 R 为电枢的外半径, 则趋肤效应磁通损失速率为:

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{dL}{dt} \frac{P}{\pi(R^2 - r^2)} \cdot \frac{4\pi r}{P} \sqrt{\frac{I}{(dI/dt)\mu\sigma}} \cdot I \quad (9)$$

其等效电阻形式为:

$$R_s = - \frac{d\Phi_s/dt}{I} = - \frac{dL}{dt} \frac{P}{\pi(R^2 - r^2)} \cdot \frac{4\pi r}{P} \sqrt{\frac{I}{(dI/dt)\mu\sigma}} \quad (10)$$

2 跳匝问题引起的磁通损失

RF MFCG 运行过程中, 膨胀的电枢和定子线圈的接触点不连续滑动, 而是发生接触点跨过某段定子线圈的现象, 称为跳匝。引起跳匝的原因很多, 包括电枢和定子线圈轴线不重合、电枢不对称膨胀、电枢外表面不平滑、定子线圈内切面的不规则以及电枢装药爆轰的边缘效应等。产生跳匝的条件如下^[4-6]。

1) 电枢轴线与定子线圈轴线平行但不重合, 偏心为:

$$d \geq P \tan(\alpha/4) \quad (11)$$

式中: α 为爆炸管扩张角。

2) 电枢轴线与定子线圈轴线成一夹角 β :

$$\beta \geq \arctan(P \tan \alpha / 4l) \quad (12)$$

式中: l 为电枢长度。

3) 电枢壁厚偏差:

$$\delta_{w_a}(W_a/4) P \tan(\alpha/r_g - r_a) \quad (13)$$

式中: W_a 为电枢壁厚; r_g, r_a 分别为定子线圈、电枢的半径。

4) 起爆雷管轴线与电枢轴线偏差为:

$$\delta \geq P^2 / (16r_a) \quad (14)$$

5) 装置内表面不对称度为:

$$\Delta_b \geq P \tan \alpha \quad (15)$$

由跳匝问题引起的磁通损失速率为:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 H(t) v_E}{8\pi r L I} \sqrt{(2\pi r)^2 + P^2} \quad (16)$$

3 接触损失

接触损失包括发生在电枢和定子线圈接触面上的各种磁通损失。诸如击穿损失、磁通延迟、匝间切换以及电枢与定子线圈短路点接触不良等引起的损失等。

击穿对 RF MFCG 的能量转换效率有十分严重的影响。在电枢和定子线圈的滑动接触点附近, 如果电枢表面存在缺陷, 如同心度不好, 则有可能在几何接触的前面形成击穿(如图4所示), 包含在这个体积内的磁通就会全部损失掉^[7]。

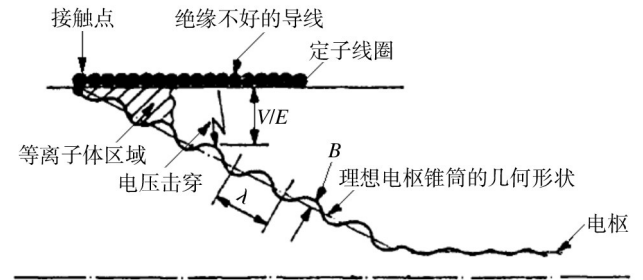


图4 假设电枢表面存在正弦起伏时的击穿示意

Fig. 4 Schematic drawing of breakdown in case of existing sine fluctuation on armature surface

设电枢表面的起伏具有简单正弦规律, 起伏幅度为 B , 但高电压的存在将加强这个幅度。设 V 是电压, E 为该条件下击穿场强, 则加强的幅度为 V/E 。这时电枢和定子线圈没有几何接触但电接触存在^[7]。发生在定子线圈和电枢表面突起的每一次击穿都使得包含在这个体积内的磁通损失。引起的磁通损失速度为^[3]:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 H(t) l v_E}{2\pi r L I} \sqrt{(2\pi r)^2 + P^2} \quad (17)$$

Freeman 估算击穿等效电阻为 R_{vb} ^[8]:

(下转第22页)

失效案例通过精密的计算和试验证明,有些与腐蚀相关的叶片断裂问题的主因与叶片共振有关^[6]。

复查结果表明,叶片出厂时测频为3 177 Hz,符合Ⅲ级压气机转子叶片修频不大于3 465 Hz的要求,并且该型发动机经过了长期使用,设计也经过了不断修正,正常情况下不会出现叶片共振现象。断口观察结果也否定了共振疲劳的可能,但转子叶片在实际工作中不可避免地存在振动,典型的振型有一弯、二弯、三弯和一扭、二扭等。对于压气机转子叶片,最重要的是一弯、二弯和一扭振型^[7]。叶片在这些位置处振动应力最大,也最容易发生断裂。失效压气机叶片断裂在2/3叶身处,该位置处于二弯共振区,振动应力较大,因此,该叶片裂纹是在存在严重腐蚀损伤情况下发生的振动疲劳,腐蚀损伤对疲劳裂纹的萌生起着重要的作用。

3 结论

1) 发动机压气机Ⅲ级转子叶片是在存在严重

腐蚀损伤情况下发生的振动高周疲劳断裂。

2) 空气中的S,Cl元素导致叶片进气边产生严重腐蚀损伤,对疲劳裂纹的萌生起着重要的作用。

参考文献:

- [1] 苏清友. 航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南[M]. 北京:航空工业出版社,2004:111.
- [2] 傅国如,禹泽民,王洪伟. 航空涡喷发动机压气机转子叶片常见失效模式的特点与规律[J]. 失效分析与预防,2006,1(1):18—24.
- [3] 姜涛,薛润东,刘高远,等. 某发动机二级涡轮叶片断裂失效分析[J]. 材料工程,2003,32(增刊):162—165.
- [4] 陈丹明,程丛高. 舰载飞机腐蚀防护与控制标准体系框架设计[J]. 装备环境工程,2008,5(6):41—43.
- [5] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 第2版. 北京:中国标准出版社,2002:474—475.
- [6] 刘庆琰. 发动机I级压气机转子叶片断裂分析[J]. 失效分析与预防,2007,6(2):34—36.
- [7] 陶春虎,钟培道,王仁智,等. 航空发动机转动部件的失效与预防[M]. 2000:41.(余不详)

(上接第17页)

$$R_{vb} = 2\pi\mu_0 v_E B \cos \frac{\alpha(2r - B)}{p^2} \quad (18)$$

4 结语

在RF MFCG装置运行过程中,趋肤效应、跳匝、电击穿引起磁通损耗是不可避免的。提高炸药爆速可以减少磁通压缩时间,从而减小因趋肤效应引起的磁通损失,后续工作应致力于此。电枢与定子的不对称度越大,跳匝引起的磁通损耗越多。可以在工程上尽量做到同心度好。由于电击穿(特别是空腔击穿)引起的磁通损耗非常大,因而在装置工作过程中击穿现象必须尽力排除。实验中通常以加大导线绝缘层厚度的方法来加以解决,但是导线绝缘层厚度增加势必加大接触电阻值,从而导致磁通损耗加大,所以装置设计时必须在保证不击穿条件下尽量减小导线绝缘层厚度。

通过对磁通损失的分析,减小或避免以上情况可以有效地减少磁通损失,从而提高RF MFCG的能

量转换效率。

参考文献:

- [1] ALTGILBERS L L, BROWN M D J, GRISHNAEV I, 等. 磁通量压缩发生器[M]. 北京:国防工业出版社,2008:20—30.
- [2] 李红梅,邱景辉,贾世楼. 射频爆磁压缩发生器等效电路分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(7):1044—1047.
- [3] 金兆鑫,焦清介,陈曦. 螺旋型爆磁压缩发生器非Ohmic损失分析与放大率计算[J]. 火工品,2008(5):6—9.
- [4] 孙志奇. 螺旋型爆磁压缩装置的磁通损耗[J]. 爆轰波与冲击波,1998(3):23—29.
- [5] 马月芬,张庆明,吴碧,等. 爆磁压缩发生器的耦合损耗因子研究[J]. 兵工学报,2009,30:80—83.
- [6] RASTY J, LE X, DICKENS J, et al. Design Criteria for Prevention of Armature "Turn-Skipping" in Helical of Magnetic Flux Compression Generators[J]. IEEE,2003(2):1077—1080.
- [7] 杨汉武. 爆炸磁压缩发生器及其脉冲功率调制研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002:19—21.
- [8] FREEMAN J R, GLUN J M. Numerical Studies of Helical CMF GeneratorS[M]. New York: Plenum Press, 1980:205—218.