

旋转磁通压缩脉冲发电机 驱动电磁轨道炮实验

李 格¹, 刘保华², 秦文汀², 陈 强², 李佳民², 张延标²

(1. 中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要 介绍了被动式旋转磁通压缩发电机和电磁轨道炮的基本原理。给出了 25MW 被动式旋转磁通压缩发电机的短路实验和驱动电磁轨道炮的连发实验, 连续将 4 发 7.8g 弹丸驱动到 $250\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关键词 电磁发射 被动式旋转磁通压缩电机 短路实验

中图分类号 TM342

文献标识码 A

1 引言

电磁发射系统目前面临的一个主要问题是电源小型化的问题, 其原因是目前所用的电容器储能密度过低, 装置体积、重量大, 价格昂贵。高储能密度的旋转磁通压缩脉冲发电机恰好可以解决这个问题^[1]。用电感储能的旋转磁通压缩发电机具有直接与初始功率源耦合的特点, 它将惯性储能、机电能量转换和脉冲成形三者融为一体, 通过磁通的交替压缩与膨胀, 实现部分机电能量的可逆转换。它既可以省去大电流多重重复的放电开关, 又能大大提高脉冲功率源的能量利用效率, 还可以进行重复连发, 这些优良性能是其它类型的脉冲功率源所无法比拟的。

为发展以上诸技术, 在相关工作的基础上^[2], 研制了最简单的轨道型原理实验装置, 并进行了旋转磁通压缩脉冲发电机的短路实验和驱动电磁连发轨道炮的实验。

2 基本原理

2.1 电磁连发轨道炮原理

电磁轨道炮作为电磁发射系统的一类, 其原理图如图 1 所示。当电磁轨道有电流 I 通过时, 与被发射体组成线圈回路的磁场余能为:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1)$$

其中, L 为电磁轨道与被发射体组成的线圈回路的电感。

由虚位移原理,可求出被发射体在发射方向所受的推力:

$$F = \frac{\partial W_m}{\partial z} = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L}{\partial z}$$

(2)

其中, $\frac{\partial L}{\partial z}$ 为电磁轨道的电感梯度; z 为被发射体的发射方向。

2.2 被动旋转磁通压缩脉冲发电机原理

被动旋转磁通压缩脉冲发电机的原理是在交流发电机励磁绕组和气隙电枢绕组之间安装了一个均匀的、与励磁绕组保持相对静止的非磁性导电补偿圆筒,电枢绕组放电时,在补偿圆筒中感应产生的涡流将电枢磁通压缩于补偿圆筒与电枢绕组之间的气隙中,使电机运行时保持恒定的极低内电感,极大地提高了脉冲发电机的功率密度。

2.3 系统简介

被动式旋转磁通压缩电机由一台 11kW 感应式无级调速电动机通过三角皮带和升速齿轮箱来驱动,轴承采用高速滚动轴承喷雾润滑,一台独立的可控硅整流电源供给励磁。被动式旋转磁通压缩实验样机的基本参数列于表 1。拖动系统采用电机驱动加一级柔性皮带传动的形式,能达到耐冲击的要求。

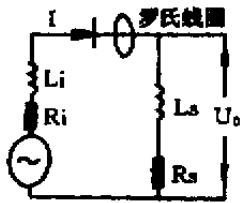


图 1 电磁轨道炮原理图

表 1 被动式旋转磁通压缩电机的基本参数

额定电流/kA	68	额定电压/V	250
峰值功率/MW	17.1	总重/kg	1000
最高转速/r·min ⁻¹	4298	惯性储能/MJ	0.20
电枢绕组电感/ μ H	4.04	极数	4
电枢绕组电阻/m Ω	0.39		

被动式旋转磁通压缩发电机开始研制的目标是为了验证该电机的基本原理,只需带假负载试验。此后由于美国得克萨斯大学的作为连发炮电源的被动式旋转磁通压缩发电机取得异常惊人的进展,本电机的任务也被扩展为带炮进行连发试验。但是经核算,按原来的设计,小型电磁炮的弹丸由于电源电流过小而会卡壳。此后又进行了重新设计,将原来电枢绕组匝数由 10 匝改为 5 匝,这样内感降为原来的 1/4,电压降低 1/2,短路电流增加 1 倍,可达 20kA 以上,即可将炮弹射出。试验将 4 发 7.8g 弹丸加速至 250m·s⁻¹ 的速度。

3 电机出口短路实验

3.1 不同励磁下的短路实验

为了与电磁炮连发实验相配合,我们将电磁轨道炮的入口短路。短路后,尚有一定的回路电阻和电感,其等效电路如图 2 所示。图 2 中的罗氏线圈用来测量放电电流 I ,电机出口电压 U_0 由分压器测量。测量结果输入计算机处理,得出 I 、 dI/dt 、 U_0 随时间的变化,并推算出电机

电枢绕组参数和短路回路参数。在这种情况下,测得的短路电流应比真正的电机出口短路电流小。

表 2 列出不同励磁电压下的电机出口电压峰值和短路电流峰值, V_F 、 V_M 、 V 和 I 分别为励磁电压、电机放电前的空载电压峰值、电机出口电压峰值和电机电流峰值。

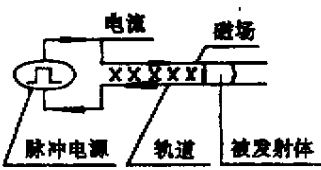


图 2 短路实验等效电路如图

表 2 不同励磁电压下的电机出口电压峰值和短路电流峰值

$n = 2763\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	V_F/V	V_M/V	V/V	I/kA
	10	21.6	15.64	8.41
	20	41.78	26	14.02
	30	62.67	36.56	21.50
	40	73.1	41.78	25.23
	50	88.78	52.2	30.84
	60	101.83	62.67	35.5
	70	114.89	67.89	39.25
	80	125.33	75.2	42.99
	90	130.56	78.33	46.10
$n = 4298\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	50	141.0	78.33	41.37
	70	188	97.13	52.0

3.2 典型短路实验分析

图 3 是一次典型的轨道炮入口短路实验电机电压、电流的波形图。计算机测得的电机电流曲线,处理得出 di/dt 曲线,利用基本公式 $U = Ldi/dt + Ri$,推算出电机电枢绕组参数和短路回路参数,结果列于表 3。

电机电枢绕组测试内感在低速下较大。

3.3 电磁炮连发实验时电机效率的测试

在电磁炮连发实验时,我们测量了电机出口电压、电机出口电流、轨道炮入口电压及电机励磁前、放电前和放电后的转速,从而经计算机处理得出电机的励磁损耗和励磁的平均损耗功率、电机输出能量、轨道炮吸收能量及电机效率。

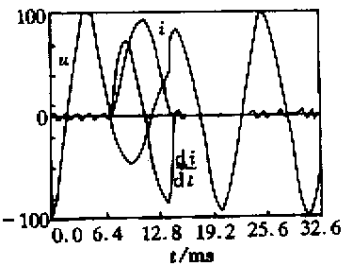


图 3 电机在炮口短路时放电波形图
电压的刻度值为 2V,电流的刻度值为 0.4kA ; di/dt 的刻度值为 $2 \times 10^5 \text{A} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 3 不同转速下的电机电枢绕组内感参数

转速 $n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	励磁电压 V_F/V	电机内感 $L_i/\mu\text{H}$
3070	30	3.8
1842	30	7

在转速为 $3684\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、励磁电流为 385A 时,电磁炮放电实验的结果是:励磁时间 300ms ;励磁损耗 2000J ;励磁损耗平均功率 66kW ;电机输出电压 78V ;电机电流 19kA ;电机输出功率 1.2MW ;轨道炮入口电压 35V ;放电前转速 $3039\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$;放电后转速 $2896\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$;电机动能下降 9300J ;电机输出能量 2531J ;电磁炮吸收能量 1031J ;电机效率 27% 。

4 结论与展望

旋转磁通压缩脉冲发电机脉宽涵盖的区域从 $20\mu\text{s}$ 至 10ms ,近 3 个数量级,它将惯性储能、机电能量转换与脉冲整形三者融为一体,具有较高的储能密度与功率密度,在脉冲功率技术领域被称为“单元件的多用途电源”。它的优良的性能使其在电磁发射、电热发射、脉冲功率技术等相关项目应用中占有重要的地位。尤其目前美国 NASA 与英国 Sussex 大学合作的电磁发射技术在航天运载系统领域已完成概念演示实验。在这一领域,旋转磁通压缩脉冲发电机驱动的电磁运载系统有望创造出新一代廉价的航天运载系统。

对被动式旋转磁通压缩脉冲发电机驱动的电磁发射技术,我们的研究表明:(1)与其它储能类型的脉冲电源相比,旋转磁通压缩脉冲发电机是理想的电磁发射系统的驱动源。(2)与传统电机相比,旋转磁通压缩脉冲发电机的磁通压缩效应使它具有极低内阻抗,因此极大地提高了电机的峰值功率,这种特性尤其与电磁发射系统的低阻抗特性相匹配。(3)我们设计的 25MW 电机成功地驱动一连发轨道炮,将 4 发 7.8g 弹丸连发至 $250\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度。(4)对驱动一连发轨道炮来讲,选择被动类电机有较理想的输出波形,但我们采用的被动类补偿圆筒有较简单的结构和较好的机械强度,易于加工。(5)被动式旋转磁通压缩脉冲发电机补偿铝筒在低速下的补偿效果较差,这是由于低速时,电枢放电所感应的补偿铝筒涡流效应降低,磁通压缩效应降低及气隙电枢磁通膨胀所致。(6)电磁发射是一新的推进方式,可作为初级推进段,与传统运载方式的后级火箭推进相结合。

总之,对旋转磁通压缩脉冲发电机驱动的电磁发射技术的研究拓展了脉冲功率技术的应用领域,丰富了电机这门古老学科的理论。

感谢导师、中国工程院院士、中科院等离子体物理研究所潘垣研究员的选题与对本文研究工作的具体指导。

参考文献

- [1] 李格. 旋转磁通压缩脉冲发电机的理论与实验研究 [D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理所, 1993.
- [2] 李格. 被动补偿发电机气隙绕组电感的解析计算 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2000, 20(2): 125.

EXPERIMENTS OF ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS DRIVEN BY THE PASSIVELY ROTATED FLUX-COMPRESSED PULSED ALTERNATOR

LI Ge¹, LIU Bao-hua², QIN Wen-ting², CHEN Qiang², LI Jia-min², ZHANG Yan-biao²

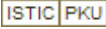
(1. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract : Basic principles of the passively rotated flux-compressed pulsed alternator and electromagnetic launchers have been presented. Short circuit experiments of such a 25MW alternator and experiments of the launcher driven by this alternator are given. Four pellets, each one weighing 7.8g, have been successively projected to $250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ by the launcher.

Key words : Electromagnetic launcher ; Passively rotated flux-compressed pulsed alternator ; Short circuit experiment

旋转磁通压缩脉冲发电机驱动电磁轨道炮实验

作者: [李格](#), [刘保华](#), [秦文汀](#), [陈强](#), [李佳民](#), [张延标](#), [LI Ge](#), [LIU Bao-hua](#),
[QIN Wen-ting](#), [CHEN Qiang](#), [LI Jia-min](#), [ZHANG Yan-biao](#)
作者单位: [李格, LI Ge \(中国科技大学国家同步辐射实验室,\)](#), [刘保华, 秦文汀, 陈强, 李佳民](#),
[张延标, LIU Bao-hua, QIN Wen-ting, CHEN Qiang, LI Jia-min, ZHANG Yan-](#)
[biao \(中国科学院等离子体物理研究所,\)](#)
刊名: [核聚变与等离子体物理](#) 
英文刊名: [NUCLEAR FUSION AND PLASMA PHYSICS](#)
年, 卷(期): [2001, 21 \(1\)](#)

参考文献(2条)

1. [李格](#) [被动补偿发电机气隙绕组电感的解析计算](#) [期刊论文] - [核聚变与等离子体物理](#) 2000 (02)
2. [李格](#) [旋转磁通压缩脉冲发电机的理论与实验研究](#) 1993

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hjbydlztw1200101007.aspx