

文章编号: 2095-4980(2017)06-1004-05

基于超级电容储能方式的秒级磁场

杨晓亮, 罗光耀, 黄 华, 金 晖, 王 朋, 罗 敏

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对高功率微波(HPM)源的引导磁场需求, 设计并研制了一套基于超级电容储能方式的秒级脉冲磁场系统。首先简要说明了基于超级电容储能方式磁场系统的基本原理和计算方法, 接着详细讨论了超级电容磁场电源设计和对应的螺线管磁场线圈设计, 最后通过模拟和实验验证了储能型磁场系统可以输出秒级磁场脉冲, 满足高功率微波磁场需求。结果显示, 超级电容脉冲磁场输出稳定, 磁场位形较好, 比较适宜于高功率微波源系统的外加磁场系统。最后分析了设计和仿真过程中的问题并展望了此类技术的应用前景。

关键词: 超级电容; 引导磁场; 秒级磁场; 励磁电源

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.1004

Design of second-level magnetic field based on storage supercapacitor

YANG Xiaoliang, LUO Guangyao, HUANG Hua, JIN Hui, WANG Peng, LUO Min

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A second-level magnetic field system based on storage supercapacitor is designed to fulfill guiding magnetic field requirement in High Power Microwave(HPM) source field. Firstly, basic principles and calculation methods on super capacitor magnetic field system are briefly introduced. Then the excitation source and corresponding solenoid are discussed in detail. Through simulation and experiment, it is verified that the magnetic field system based on supercapacitor storage could well meet the needs of HPM magnetic field. Finally, the bottleneck and outlook of this kind of magnetic field are analyzed generally.

Keywords: supercapacitor; guiding magnetic field; pulse magnetic; excitation source

在高功率微波(HPM)源系统中, 某些微波器件如速调管、返波管等的正常工作需要外界提供一定的磁场环境, 通过外加磁场可以实现对电子束的引导, 从而使电子束和微波发生波束互作用, 实现微波的放大或调制^[1-3]。常见的外加磁场主要有4种方式: 一是恒流磁场电源配合常规水冷磁体技术, 此方法优点是成本低, 寿命长, 容易实现长时间连续运行, 但体积较大, 消耗电网功率大, 对馈电网产生较大的冲击; 二是利用超导磁体技术, 超导磁体可以提供较高的磁场强度, 同时能耗低, 但超导磁体冷却和失超保护系统复杂, 经济成本高; 三是脉冲磁场技术, 磁场脉冲持续时间短, 主要用于单次或者重频型脉冲功率微波源系统; 四是超级电容储能通过电流调制准稳恒磁场技术, 该技术采用超级电容储能对磁场线圈放电, 通过开关的脉宽调制作用可以产生秒级准稳恒磁场, 应用较为广泛^[4-7]。不同类型的HPM器件可以共用超级电容磁场电源, 针对不同的磁场需求只需要设计磁场大小和均匀度不同的磁场线圈, 而超级电容励磁电源可以设置不同的参数实现磁场线圈的电能供给。俄罗斯大电流研究所、国防科技大学等单位均研制过此种方式的磁场系统用于微波器件实验。本文设计并研制了一套基于超级电容储能的4.5 F/1 200 V 磁场电源和中心磁场1.5 T, 孔径200 mm, 长1 000 mm 磁场线圈, 运行模式1 s/3 min。实验表明, 此技术路线研制的磁场系统运行稳定, 引导电子束作用明显, 适于微波实验研究。

1 超级电容储能型脉冲磁场原理

1.1 基本原理

超级电容器储能型磁场系统利用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术控制超级电容器对励磁线圈放

电，使电流在一段时间内维持恒定，从而在磁场线圈内产生准稳恒磁场。它主要由超级电容为主要部分的脉宽调制型励磁电源和磁场线圈 2 部分组成。超级电容储能型的磁场系统原理如下：开关电源对储能的超级电容充电，实现超级电容储能，超级电容一般由若干超级电容模块串并联组成，需要超级电容管理电路；通过开关和 PWM 控制电路控制超级电容对磁场线圈放电；当放电电流达到设定值后，通过闭环的反馈回路将放电电流稳定在设定值附近，并持续一段时间，直到电容器组储能不满足设定电流要求，电流再逐渐下降到 0^[8]。

超级电容储能型的磁场系统原理见图 1：图中 C 为超级电容器组的电容， R_c 为超级电容内阻； L 和 R 分别为磁场线圈的电感和电阻； D_1 为二极管， R_D 为限流电阻。超级电容 C 充电完成后，收到放电信号，开始对磁场线圈 (L, R) 放电，此时开关 S (一般为绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)) 的闭合与断开由流过励磁线圈的电流决定。当开关 S 闭合时，电容器组对励磁线圈放电，二极管 D_1 截止；当开关 S 断开时，励磁线圈通过二极管 D_1 续流，保证线圈中的电流不会突变为 0，此过程反复进行直至超级电容储存的能量无法满足放电电流需求。

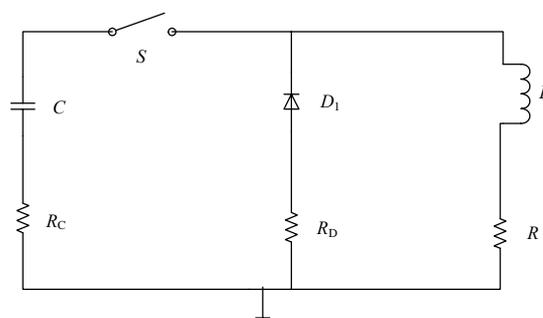


Fig.1 Simplified circuit of supercapacitor magnetic field system
图 1 超级电容磁场系统简化电路

1.2 理论分析和计算

通常情况下，引导磁场的磁场需求参数已知，具体参数要求见表 1；中心磁场 B_0 为 1.5 T，均匀区 $650 \text{ mm} \times \varphi 200 \text{ mm}$ ，均匀度好于 98%，工作模式为 1 s/3 min。显然，该磁场为螺线管型磁场，磁场强度高，均匀区大，孔径大，均匀度高。

表 1 引导磁场的目标参数

Table1 Target parameters of guiding magnetic field	
magnet parameters	target values
B_0/T	1.5
homogeneity zone/mm	$650 \times \varphi 200$
homogeneity/%	98
operation mode	1 s/3 min

针对引导磁场的目标磁场参数，需确定的主要参数是超级电容参数和磁场线圈参数 2 类^[9-10]。电容参数主要包括电容值 C 、初始充电电压 U_0 、电容储能 W ；磁场线圈参数主要包括线圈电阻 R 、线圈电感 L 、线圈外半径 R_2 等。其中电容储能和初始电压大小基本反映了磁场电源体积大小和工程研制难度，线圈外半径大小反映了线圈体积的大小和研制成本。长直螺线管的中心磁场和电流满足关系式(1)，螺线管电阻 R 和总匝数的关系见关系式(2)和(3)，主放电回路的脉冲时间和超级电容参数见式(4)。

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \tag{1}$$

$$R = \frac{\rho \pi (R_1 + R_2) N}{S_1} \tag{2}$$

$$N = \frac{(R_2 - R_1) l \lambda}{S} \tag{3}$$

$$\tau = \frac{C}{2I^2 R} [(U_0 - R_c I)^2 - I^2 R^2] \tag{4}$$

式(1)~(4)中： I 为线圈流过的准稳态电流； τ 为线圈能以准稳态电流 I 励磁的持续时间； R_c 为电容器内阻； ρ 为铜导线的电阻率； R_1 为线圈的内半径； R_2 为线圈的外半径； μ_0 为真空磁导率； l 为线圈的长度； N 为线圈匝数； λ 为线圈的占空系数； S_1 为中空导线的导电截面积； S 为中空导线的总截面积。显然，磁场 B 和 τ 已知，需要求解的参数主要有 3 个，超级电容电容量 C ，超级电容初始充电电压 U_0 ，线圈外半径 R_2 ，其他参数如储能 W ，电阻 R ，电感 L 等都可以根据已知条件得出。

2 电磁设计

2.1 主参数选择

根据磁场参数要求和已知条件，当 $B_0=1.5 \text{ T}$ ，持续时间 $\tau=1 \text{ s}$ ，螺线管长度为 $1\,000 \text{ mm}$ 时，通过计算得出超级电容器储能与线圈外半径、电容值的关系曲线。经计算，螺线管外径 R_2 和超级电容初始充电电压 U_0 关系如图 2 所示，图中电容依次从 0.5 F 到 5.5 F 线性变化，步长 1 F，电压单位 V，储能单位 J，外径单位 m。从图中可以看出，当电容为某一固定值时，随着线圈外径 R_2 的增大，超级电容初始充电电压逐渐减小，到达某一最小

值时，随着外径的增大，初始电压逐渐增大，但增大趋势较为缓慢。超级电容储能 W 和线圈外半径 R_2 之间也有类似关系。这说明在给定条件下，超级电容的储能和螺线管线圈的储能存在能满足磁场需求的最小值，该最小值即为满足式(1)~(4)的最优解。在螺线管线圈相同的外半径条件下，所需电容初始电压越高，所需电容量越小。

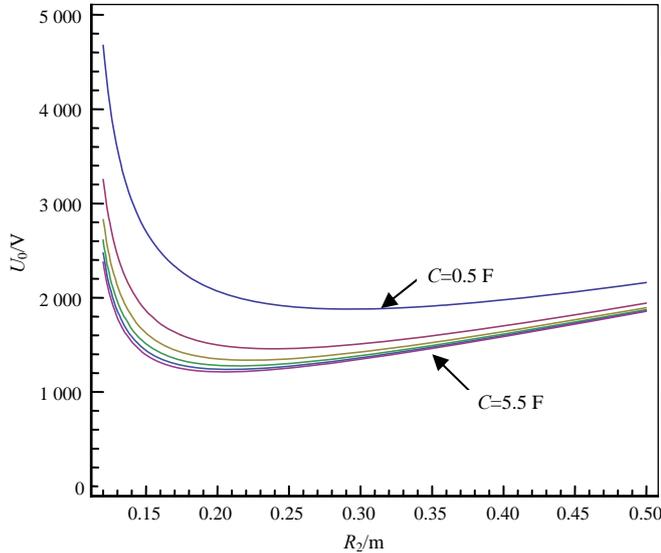


Fig.2 Initial voltage U_0 vs. R_2
图 2 初始充电电压 U_0 和线圈外半径 R_2 关系

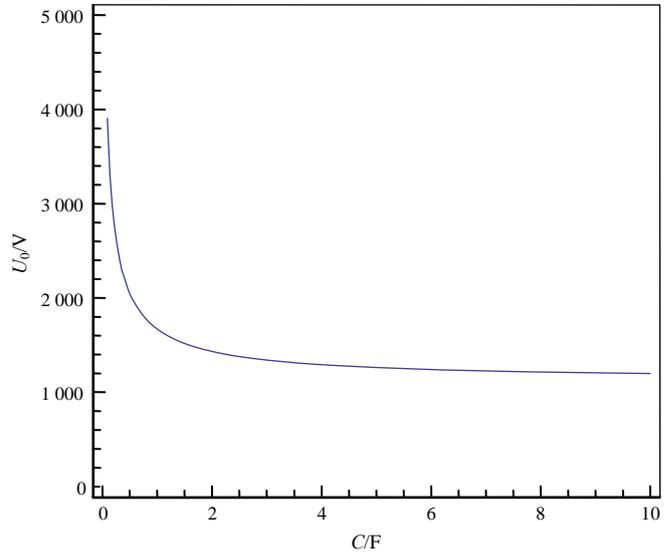


Fig.3 Initial voltage U_0 vs. C
图 3 初始充电电压 U_0 和电容 C 的关系

图 2 说明，在满足磁场环境的需求条件下，存在超级电容能量和线圈外半径的最小值，此时，超级电容以最小的能量就能满足所需磁场需求，同时线圈尺寸最小，螺线管空间得以充分利用。选定 $R_2=0.205$ m，可以得出超级电容初始充电电压 U_0 和电容 C 的关系，见图 3。

选取电容 $C=4.5$ F，线圈外径 $R_2=0.205$ m，电源和线圈的相关参数可以计算得出。经计算，线圈稳恒电流所需值约 600 A，线圈电阻 $R=1.43$ Ω ，电感 L 约 0.5 H，储能 $W=5.1$ MJ，初始充电电压 $U_0=1.2$ kV。此参数条件下超级电容对线圈负载自由放电情况(无反馈)如图 4 所示。

2.2 磁场模拟

螺线管提供的磁场因均匀度要求一般需要多阶匀场线圈，这会增大螺线管外半径和总匝数。有时由于微波种子源的馈入，螺线管需分段，使得整体结构受到破坏。如图 5 所示，左端为二极管发射电子位置，所需孔径较大，为 200 mm，均匀区后半段为微波器件(RKA 相对论速调管)位置，因为需要馈入微波种子源(gap 处馈入)造成螺线管线圈分段，分段的螺线管线圈结构设计见图 5。

图 5 中，由于馈入微波种子源可能使得螺线管线圈中间有间隙 24 mm，前端高功率微波源的二极管尺寸较后端微波器件大，所以靠近加速器端(左侧)的内孔孔径 $\phi 200$ mm，微波器件端孔径 $\phi 150$ mm，在应用式(1)~(4)时， R_1 应灵活处理。经模拟，此种线饼分布产生的轴向磁场如图 6 所示。

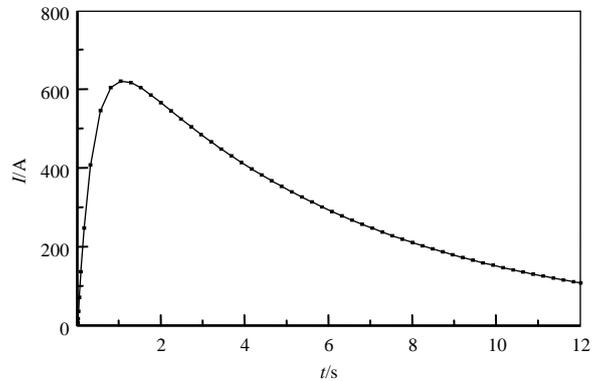


Fig.4 Waveform of supercapacitor discharging
图 4 超级电容对线圈放电波形

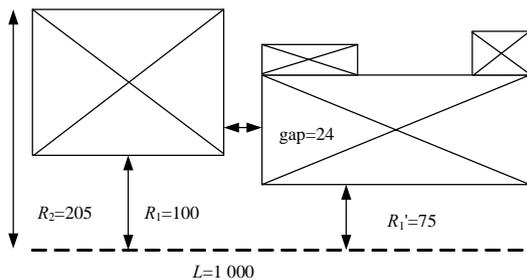


Fig.5 Design of solenoid load (unit: mm)
图 5 超级电容负载螺线管设计(单位: mm)

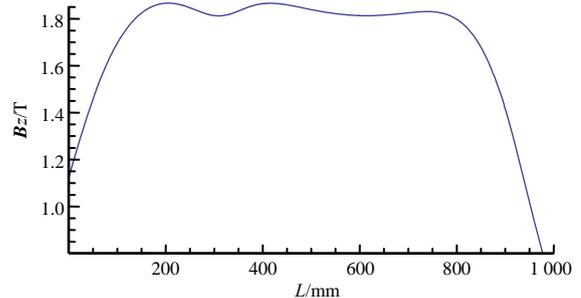


Fig.6 B_z distribution of solenoid load
图 6 螺线管轴向磁场 B_z 的分布情况

经力热校核,在 1 s/3 min 的脉冲工作模式下,受力和散热可以满足实验需要。超级电容的能量分 3 部分,只有很少一部分用于电磁场储能,不足 10%,绝大部分用于螺旋管电阻发热和超级电容内阻热损耗,还有极少部分用于杂散参数消耗。

3 实验验证

通过实验验证了设计研制的磁场电源和磁场线圈。研制的螺线管线圈总长度 1 000 mm,外径小于 500 mm,孔径 200 mm,均匀区长度 650 mm,设计的磁场系统和运行电流情况见图 7。其中,超级电容磁场电源采用 166 F/48 V 的超级电容模块串并联组合提供所需的电压和能量,主开关采用指标不低于 1 000 A/1 700 V 的 IGBT 并联使用,磁场电源整体轮廓尺寸为 1 100 mm×1 400 mm×1 800 mm,输出 600 A 秒级电流脉冲,功率小于 15 kW,通过光纤进行计算机远程控制。标定后的电流值在电流平顶时间内顶降小于 5%。同时用霍尔探头在低电流 25 A 直流情况下,测量了轴向的 B_z 磁场位形分布,磁场测试位形见图 8,与理论计算相符,均匀区满足 2% 的不均匀度要求。

4 结论

设计并研制了提供引导磁场的超级电容储能型秒级磁场系统,主要包括超级电容电源和螺线管磁场线圈 2 部分。经理论计算、仿真模拟和实验验证,在超级电容充电 1.2 kV,电容 4.5 F 的情况下,对电阻约 1.43 Ω 、电感 0.5 H 的螺线管线圈放电可以产生 1.5 T、均匀度好于 98% 的准稳恒磁场。在设计和仿真过程中,可能存在下列 3 个误差或者不确定性:a) 螺线管线圈分段和匀场线圈会造成超级电容输出电流能力下降,但通过适当提高充电电压可以得到补偿;b) 超级电容的内阻在模拟和实际过程中不可忽略,所以超级电容电源要做好散热和保护;c) 螺线管所通电流较高,需要考虑冷却和薄弱环节的绝缘。超级电容储能型秒级磁场系统消耗功率小,且只要负载散热和绝缘满足条件,此超级电容磁场电源可以给不同磁场线圈供电,具有很大的灵活性。同时体积、质量、成本、控制、功率需求等在 HPM 磁场类型中存在较大的优势,有较好的发展应用前景。

参考文献:

- [1] BENFORD J, SWEGLE J A, SCHAMIOGLU E. High power microwaves[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 36(3):569-581.
- [2] KOROVIN S D, ROSTOV V V, POLEVIN S D, et al. Pulsed power-driven high-power microwave sources[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7):1082-1095.
- [3] 周传明, 刘国治, 刘永贵. 高功率微波源[M]. 北京:原子能出版社, 2007:17-63. (ZHOU Chuanming, LIU Guozhi, LIU Yonggui. High power microwave sources[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007:17-63.)
- [4] 罗光耀, 谭杰, 范植开. 一种电容储能器脉冲磁场的设计及仿真分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(3):58-61. (LUO Guangyao, TAN Jie, FAN Zhikai. Design and simulation analysis of pulsed magnetic field of storage capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3):58-61.)
- [5] 张军, 靳振兴, 张点. 4.8 MJ 脉宽调制型励磁电源设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3):443-446. (ZHANG Jun, JIN Zhenxing, ZHANG Dian. 4.8 MJ magnetic field excitation source using pulse width modulation technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(3):443-446.)
- [6] 余小辉, 杨汉武, 杨实. 重复频率脉冲磁场初级能源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4):748-752. (YU Xiaohui, YANG Hanwu, YANG Shi. Primary energy source for repetitive pulsing magnetic field[J]. High Power Laser and Particle Beams,

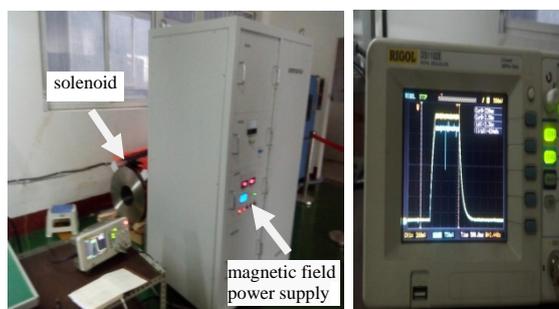


Fig.7 Magnetic field power supply and solenoid
图7 磁场电源和螺线管磁场线圈

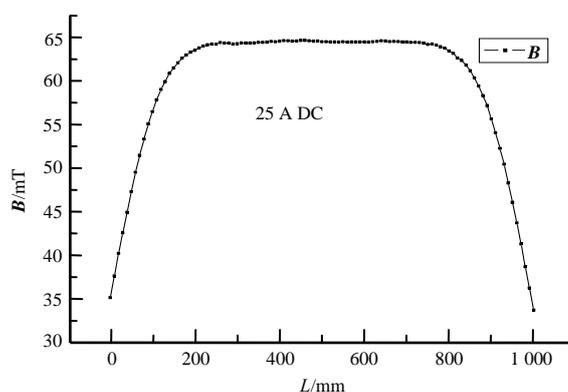


Fig.8 B_z of solenoid(experiment)
图8 螺线管轴向磁场 B_z 的分布情况(实验)

- 2010,22(4):748-752.)
- [7] 李海冬,李希南,齐智平. 超级电容器用于建立强脉冲磁场的可行性[J]. 高电压技术, 2007,33(5):14-17. (LI Haidong,LI Xinan,QI Zhiping. Feasibility of establishing high pulse magnetic field using super capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(5):14-17.)
- [8] 余小辉. 紧凑重频脉冲导引磁场电源的研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2009. (YU Xiaohui. Research of compact re-frequency pulse guiding magnetic field power supply[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2009.)
- [9] 荆晓兵,陈楠,李勤. 宽平顶低横向场分量螺线管线圈设计[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(3):591-594. (JING Xiaobing,CHEN Nan,LI Qin. Design of wide flat-topped low transverse field solenoid magnet[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(3):591-594.)
- [10] 邵剑波,谢鸿全,李正红. Ku 波段低磁场返波管振荡器的模拟与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):80-85. (SHAO Jianbo,XIE Hongquan,LI Zhenghong. Simulation and experiment of Ku-band backward wave oscillator with low magnetic field[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1): 80-85.)

作者简介:



杨晓亮(1986-), 男, 河南省新县人, 助理研究员, 主要从事脉冲功率技术及加速器设计研究.email:a020602@qq.com

王 朋(1987-), 男, 江西省萍乡市人, 助理研究员, 主要从事脉冲功率源脉冲形成与传输技术研究.

罗光耀(1976-), 男, 广西壮族自治区南宁市人, 副研究员, 主要从事脉冲功率初级能源技术研究.

黄 华(1970-), 男, 重庆市人, 研究员, 主要从事高功率微波器件研究.

金 晖(1972-), 女, 四川省绵阳市人, 副研究员, 主要从事脉冲功率源及测控技术研究.

罗 敏(1972-), 男, 四川省南充市人, 副研究员, 主要从事脉冲功率技术研究.