

基于 boost 效应的 XRAM 电路研究

姜松¹, 蔡萌萌¹, 饶俊峰²

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 苏州 215163)

摘要: 电感储能型脉冲电源在脉冲磁场领域有着广泛的应用前景, 其中利用多级电感串联充电和并联放电的 XRAM 电路拓展性更强。提出了一种利用 MOSFET 开关、且有电容 boost 效应辅助升流的 XRAM 电路, 其结构简单, 便于模块化设计, 无需高压直流源就可产生大电流脉冲和脉冲磁场。基于这种拓扑, 搭建了由 2 个两级 XRAM 电路并联的四级 XRAM 电路, 只需 24 V 直流供电电压, 即可在 10 μ H 电感负载上产生频率 10~100 Hz、脉宽 0~2 ms 的 0~150 A 脉冲电流, 进而产生最大 0.125 T 的脉冲磁场, 验证了方案的可行性。电路仿真验证了电容的升流作用, 并对不同充电时间的升流效果进行了比较。通过增加并联支路数量, 可以获得更强的脉冲磁场。

关键词: XRAM 电路; 电感储能; 脉冲电流; 脉冲磁场

中图分类号: TN 782 **文献标志码:** A

Research on XRAM circuit based on boost effect

JIANG Song¹, CAI Mengmeng¹, RAO Junfeng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

Abstract: Inductive energy storage pulse power supply has a wide range of applications in the field of pulsed magnetic field, in which the XRAM circuit utilizing multi-stage inductors in series charging and parallel discharging is more expandable. An XRAM circuit using MOSFET switches and capacitor boost effect to increase the current magnitude was proposed. The structure was simple and easy for modular design. The circuit could generate high-current pulses and pulsed magnetic fields without a high-voltage DC source. Based on the topology, two two-stage XRAM circuits in parallel are constructed, which can generate 0~150 A pulse current with frequency of 10~100 Hz and pulse width of 0~2 ms on a 10 μ H inductive load, with only 24 V DC supply voltage. It can generate a pulse

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12205192)

第一作者: 姜松 (1989—), 男, 副教授。研究方向: 脉冲功率及其应用。E-mail: jecifer@163.com

通信作者: 饶俊峰 (1985—), 男, 研究员。研究方向: 脉冲功率及其应用。E-mail: raojf@sibet.ac.cn

引文格式: 姜松, 蔡萌萌, 饶俊峰. 基于 boost 效应的 XRAM 电路研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(3): 309-316.

Citation: JIANG Song, CAI Mengmeng, RAO Junfeng. Research on XRAM circuit based on boost effect[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(3): 309-316.

magnetic field of up to 0.125 T, which verifies the feasibility of the scheme. Circuit simulations verify the current boost effect of the capacitor, and compare the current boost effect with different charging times. A stronger pulsed magnetic field can be obtained by increasing the number of parallel branches.

Keywords: XRAM circuit; inductive energy storage; pulse current; pulse magnetic field

脉冲发生器能够产生脉冲电场和脉冲磁场^[1-2], 脉冲磁场技术在治疗心血管疾病^[3]、骨质疏松症^[4]、慢性疾病^[5-6]等生物医学领域^[7-8]有着广泛的应用, 传统的脉冲磁场设备通常采用大容量电容进行储能^[9], 体积大且放电速度较慢。而电感储能具有更高的储能密度和更快的放电速度^[10]。由于脉冲磁场主要与电流大小有关, 电感储能型脉冲电源对初级电源的电压要求不高。当前电感储能型脉冲电源的典型拓扑模式主要有 2 种: XRAM 模式和 meat grinder 模式^[11], 前者利用多级电感串联充电和并联放电实现电流倍增, 后者利用磁通压缩原理实现电流倍增。

XRAM 电路是通过切换开关将电感由串联充电转换为并联放电, 从而在负载上获得急剧上升的脉冲电流, 理论幅值为各电感电流之和^[12-14]。这种拓扑可以通过调整电感的级数来改变输出电流的大小, 拓展性较强, 方便构建不同能级的电源。较高能级一般选用晶闸管, 但必须用 inverse current commutation opening switch(ICCOS)来确保晶闸管可靠关断^[15]。本文所需能级较低, 因此选用 MOSFET 开关代替晶闸管, 全控型器件可以通过驱动信号控制实现可靠关断, 结构简单^[16-17]。实现脉冲磁场需要使用储能能力强的大体积电感, 为了减小实物体积, 本文在电感与 XRAM 初级电源之间加入电容来升压, 预先提高电流, 进而在电感量较小的情况下实现更大电流, 产生更大的脉冲磁场。FPGA 控制的 MOSFET 开关管在充电回路能够通过调节储能电感的充电时间来调节脉冲幅值, 在放电回路能够调节脉宽^[18]。

1 XRAM 电路的拓扑及工作原理

1.1 XRAM 电路的拓扑

图 1 为本文提出的 XRAM 电路拓扑结构, 以两级电路为例。每级电路包含一个电感、一个充电管和 2 个二极管。充电阶段电感为串联状态, 充电管 Q1、Q2 可以起到隔离作用。放电阶段由放

电开关管 Q3 控制开通关断时间, 二极管 D1~D4 控制电流方向, 确保电感负载上的电流为储能电感 L1、L2 的电流之和。初级电源附近的电容 C 参与储能, 能够进一步提高电流。

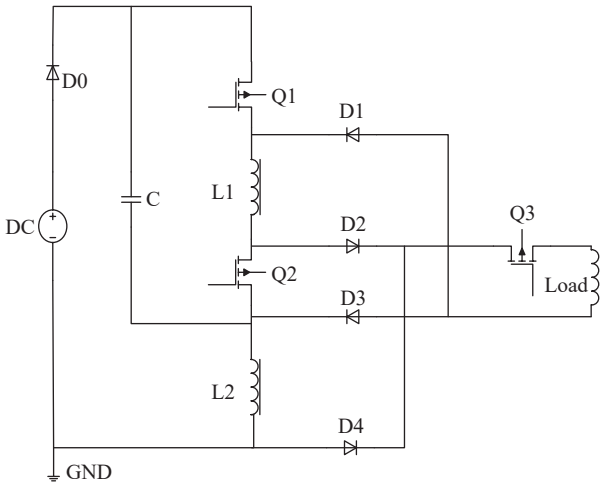


图 1 提出的 XRAM 电路原理图
Fig.1 Schematic diagram of the proposed XRAM circuit

1.2 XRAM 电路的工作原理

本节首先介绍不包含储能电容的电感串联充电和并联放电工作原理, 然后介绍储能电容对电流的提升作用。

a. 充电阶段。如图 2 所示, 开关管 Q1、Q2 导通, Q3 关断, 初级电源对电感 L1、L2 进行充

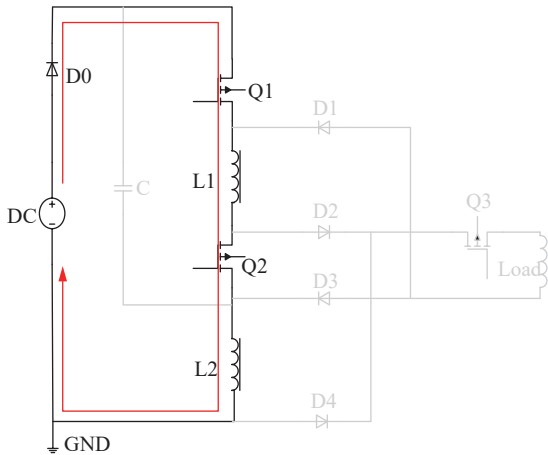


图 2 充电阶段
Fig.2 Charging process

电,二极管 D0 起到隔离作用^[19]。通过调整充电时间,可以控制储能电感最终的电流值。

b. 放电阶段。充电完成,开关管 Q1、Q2 关断, Q3 导通,此时储能电感 L1、L2 与初级电源之间没有电流通过,由于电流不能突变,两级储能电感的电流同方向流经电感负载,获得脉冲电流,如图 3 所示。通过调整放电管的放电时间,可以调整脉冲电流的宽度。

c. 电容的作用。设定电源电压为 U_{in} , 电容 C 上的电压为 U_c , 一个周期内开关管 Q1、Q2 导通时间为 T_{on} , 关断时间为 T_{off} 。第一周期,开关管 Q1、Q2 导通,初级电源给电感 L1、L2 充电,如图 4(a)所示,此时电感 L1、L2 上的电压均近似为 $U_{in}/2$ 。开关管 Q1、Q2 关断,初级电源和电感 L2 共同给电容 C 充电,如图 4(b)所示,电感

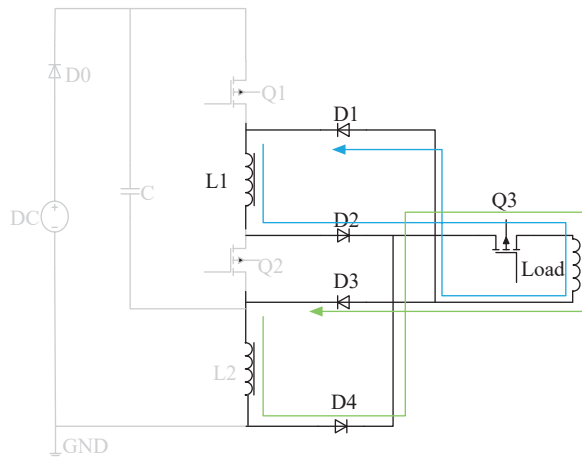


图3 放电阶段

Fig.3 Discharging process

L2 上的电压可表示为 $U_c - U_{in}$ 。假定电感 L2 的电流恒定不变,由电感 L2 伏秒平衡可得^[20]:

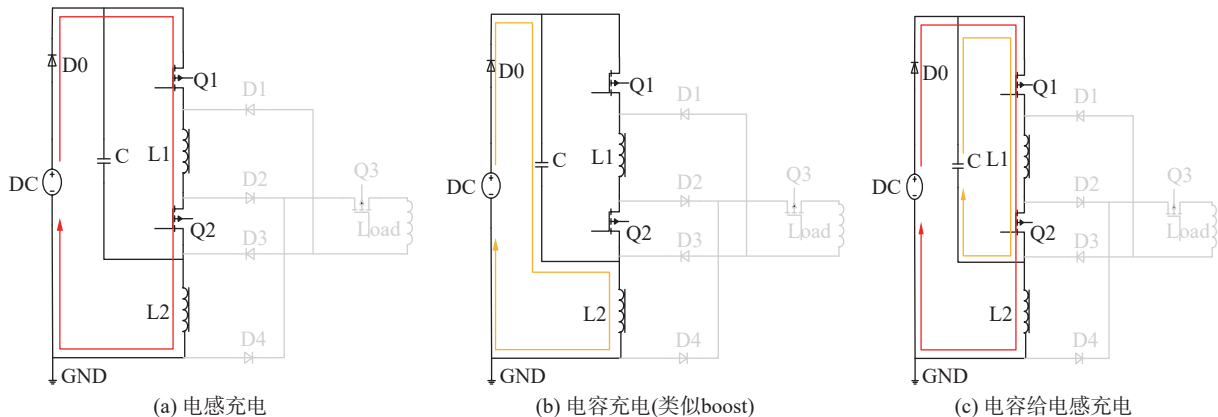


图4 储能电容的 boost 效应工作过程

Fig.4 The operating principle of the boost effect in energy storage capacitors

$$\frac{U_{in}}{2} \cdot T_{on} = (U_c - U_{in}) \cdot T_{off} \quad (1)$$

$$U_c = U_{in} \left(1 + \frac{T_{on}}{2T_{off}} \right) \quad (2)$$

这类似于 boost 电路,电容 C 上的电压比初级电源更高。

第二周期,如图 4(c)所示,开关管 Q1、Q2 导通,初级电源给电感 L1、L2 充电,电容 C 能够同时给电感 L1 充电,储能电感可以得到比第一周期更高的电流。

理想情况下,电容 C 储存的能量能够全部转移到电感 L1 上,设定增加的电流为 I_0 ,则有:

$$\frac{1}{2} C U_c^2 = \frac{1}{2} L I_0^2 \quad (3)$$

式中: C 为储能电容的容值; L 为电感 L1 的电感值。可得, $I_0 = U_c \sqrt{\frac{C}{L}}$, 这部分电流可在开关管

Q1、Q2 关断后转移到负载。加入储能电容 C,相当于初级电源在开关管 Q1、Q2 关断阶段也提供能量,提高了能量利用率。

d. 最大负载电流理论值。理想状态下,储能电感的最大充电电流由充电电压和电感内阻决定,设定储能电感内阻为 R_L , 则有:

$$I_1 = \frac{U_{in}}{2R_L} \quad (4)$$

负载电流为两级储能电感电流之和,因为 L1 的电流还要加上电容 C 提供的, 则有:

$$I_{out} = 2I_1 + I_0 = \frac{U_{in}}{R_L} + U_{in} \left(1 + \frac{T_{on}}{2T_{off}} \right) \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5)$$

2 仿真结果与分析

为了验证 XRAM 电路的工作原理, 采用 PSpice 仿真了两级 XRAM 电路。为了降低成本,

初级电源从常见的大功率直流电源中选择。电压有 12 V、24 V、36 V 等，输出功率为 1500 W。电源电压越大，储能电感的电流值越大，但不能超过电源的最大电流。选择初级电源电压为较大的 24 V，输出功率 1500 W，则最大输出电流为 62.5 A，两级电路升流后满足负载电流超过 100 A 的要求。负载实际上为换能线圈，仿真中设定为 10 μH 的负载电感。通常，XRAM 电路的储能电感要达到 mH 级别，考虑到电感的体积随电感量的增加

而增大，选择单个储能电感为 500 μH。储能电感的大小影响电路的时间常数：电感越大，时间常数越大，充电速度越慢；电感越小，时间常数越小，放电开始之前电流已经迅速下降。从这一角度考虑，500 μH 电感也是合适的选择。电容要储能能力强，但容值过大会使得充电结束后电容仍未充满电。综合考虑实验室现有条件，选择储能电容为 800 nF。具体电路参数如表 1 所示，仿真电路如图 5 所示。

表 1 电路参数

Tab.1 Circuit parameters

输入直流电源/V	充电时间/ms	放电时间/ms	周期/ms	储能电容/nF	储能电感/μH	电感电阻/Ω	负载电感/μH
24	2	0.5	10	800	500	0.1	10

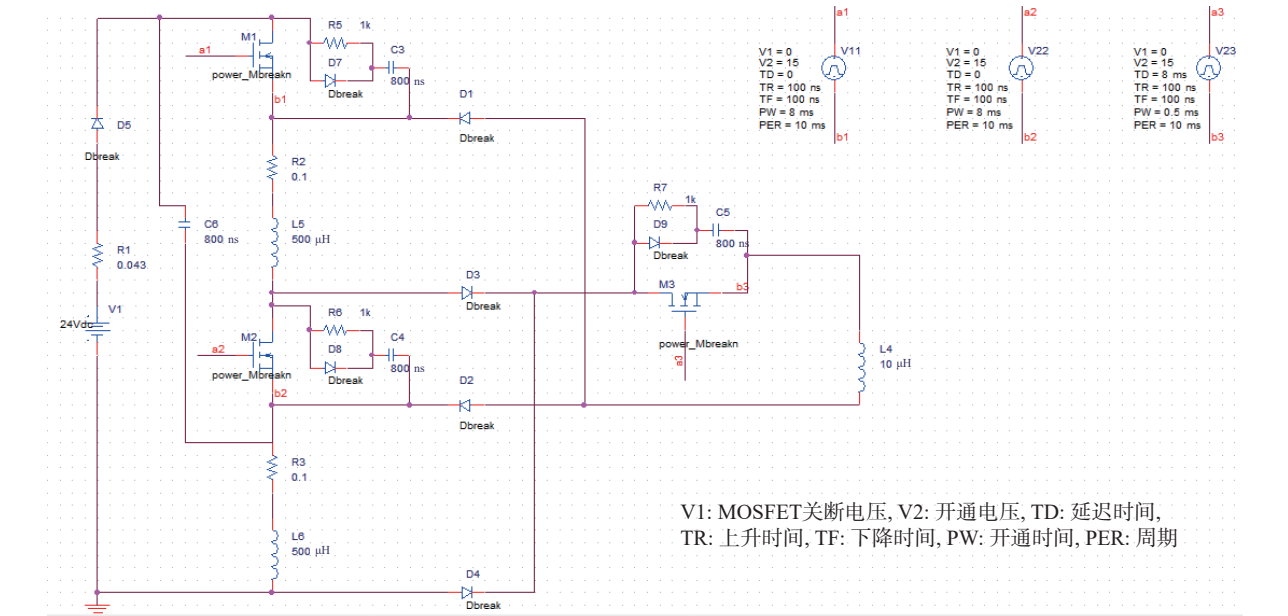


图 5 两级 XRAM 仿真电路
Fig.5 Two-stage XRAM simulation circuit

首先，找到合适的充电时间。图 6 为不加入电容时储能电感的电流，在 10 ms 的范围内，储能电感能够完成充电，且在 8 ms 左右即可达到最大电流 40 A。本次仿真选择充电时间为 2 ms，充电电流为 27.5 A。

其次，在第二周期稳定时验证了储能电容的升流作用。如图 7 所示，加入电容后，负载电流最高达到 58.5 A，比不加电容时的 52.8 A 提高了 5.7 A，提升 10.8%。没有电容情况下的负载电流比 55 A 的理论值偏低，这是由于有管压降以及杂散电阻等的存在。前文已经计算了负载电流增加的理论值，即 $I_0 = U_c \sqrt{\frac{C}{L}}$ ，假定 L2 电流恒定时，

这一值为 $I_0 = U_{in} \left(1 + \frac{T_{on}}{2T_{off}} \right) \sqrt{\frac{C}{L}}$ ，代入充电 2 ms 时的参数，计算结果为 1.08 A。但实际上，电感 L2 上的电流一直在变化，仿真中测得的电容电压为 350 V，代入电流公式，结果为 14 A。仿真得到的负载电流增加值为 5.7 A，在二者之间。

图 8 为放电管开通时间不同时，负载上的电流波形。负载电流脉宽的可调范围为 0~2 ms，电流峰值可达 58.5 A。电流的下降速度与电路中等效电感和等效电阻的比值有关。图 9 为负载电流与储能电感电流的对比，证明了负载电流为储能电感上的电流之和。由于储能电容的加入，会与储能电感形成 LC 振荡。

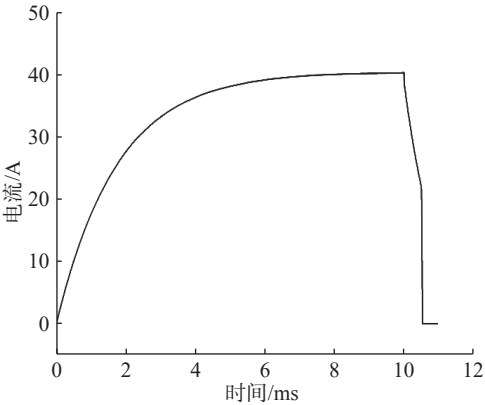


图 6 储能电感中的电流波形

Fig.6 Current waveforms of energy storage inductor

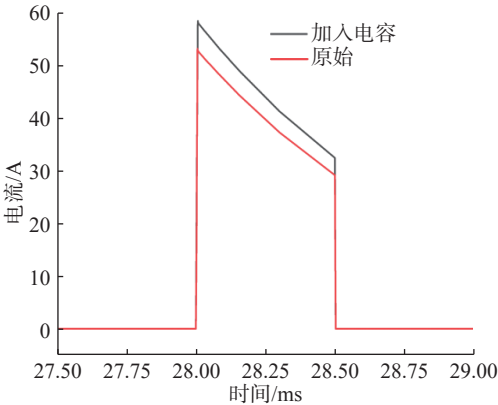


图 7 升流作用对比

Fig.7 Comparison of current boost effect

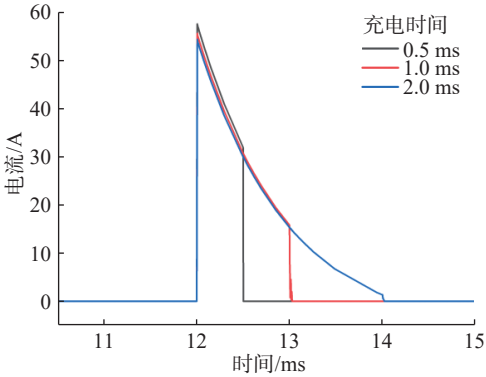


图 8 不同充电时间下的负载电流

Fig.8 Load current with different charging times

图 10 为放电时间 0.5 ms 不变, 充电时间为 2、4、6、8 ms 时, 储能电容的升流效果对比图。由图 10 可知, 充电时间越短, 相对的升流效果越好。经过计算, 升流百分比依次为 10.8%、3.7%、2.1%、1.1%。这是由于充电时间越短, 每周期的开关管断开时间, 即电容充电的时间越长, 在 C-L1 回路中被电感电阻及杂散电阻消耗的能量可以及时补足。且因为充电时间短, 电容给储能电感

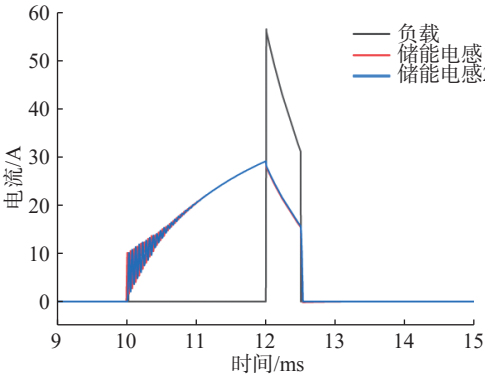


图 9 电流比较

Fig.9 Comparison of current

充电完成之后很快转移到负载电感, 这一过程中的能量消耗也较少。

3 实验结果与分析

实验中, 将采用 2 个两级 XRAM 电路并联为电感负载提供电流, 这种方式可以降低干扰, 且两级的电容都能够起到升流作用。开关管型号为 C2M0080120D, 开关管的漏极和源极之间并联了剩余电流保护器 (residual current protective device, RCD) 防止过电压。FPGA 提供开关管的驱动信号, 分别控制充电管与放电管, 且所有充电管同步开关, 放电管也同步开关。由于 MOSFET 的开通需要 20 ns 左右, 放电管提前开通 30 ns, 在充电管关断之后, 储能电感的电流立刻沿放电回路向负载电感放电, 避免在电路内阻上消耗过多能量。初级电源采用 24 V 低压大电流的开关电源。电感与电容的参数与仿真相同, 储能电感为环形螺旋式的 500 μH 电感, 储能电容为 800 nF 的薄膜电容。负载电感为绕制的 10 μH 电感, 详细情况稍后说明。使用美国 Pearson 公司的 411 电流探头对负载电流进行测量, 在 PyCharm 平台利用 Python 语言对数据进行预处理, 过滤异常及反复波动的数据, 得到相对平滑的波形。

如图 11 所示, 当每周期时间为 10 ms, 充电时间为 2 ms 时, 负载电流最大可达 113 A。XRAM 电路的负载电流为储能电流与级数的乘积, 因此, 实验中的四级电路, 负载电流理论上为仿真中两级电路的 2 倍。仿真中这一值为 58.5 A, 2 倍则为 117 A, 仿真值与实验值的误差为 3.54%。图 11(a)为单个脉冲波形; 图 11(b)为 100 Hz 重频模式下的波形, 输出电流稳定。图 12 为不同频率

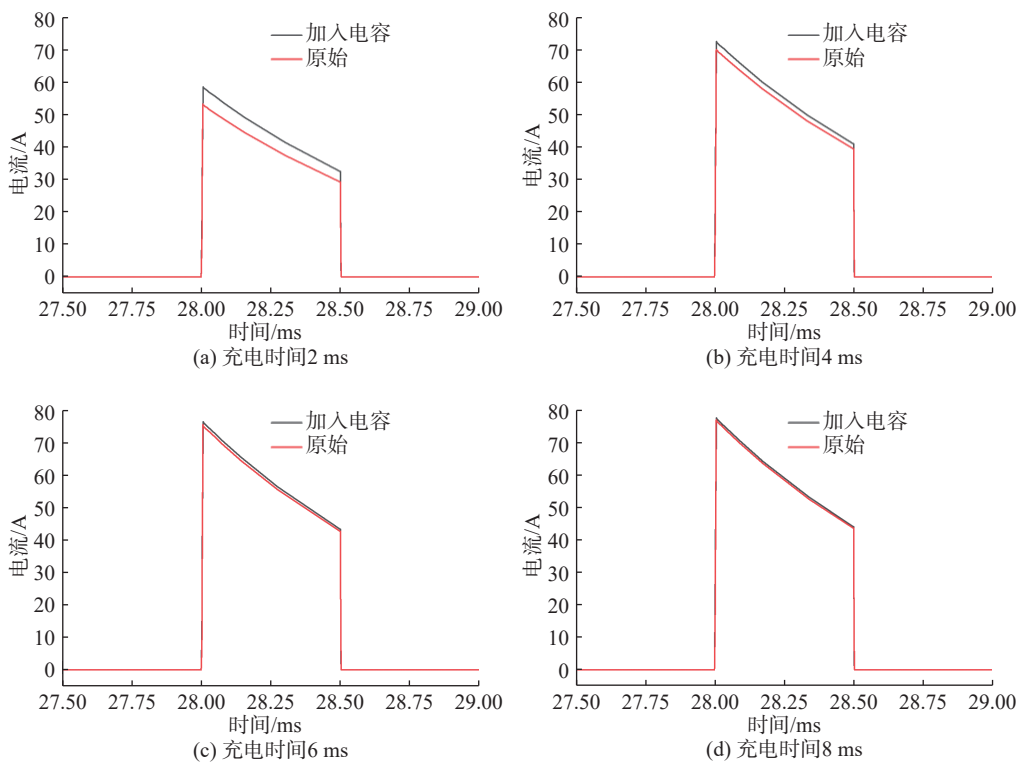


图 10 不同充电时间的升流效果

Fig.10 Current boost effect with different charging times

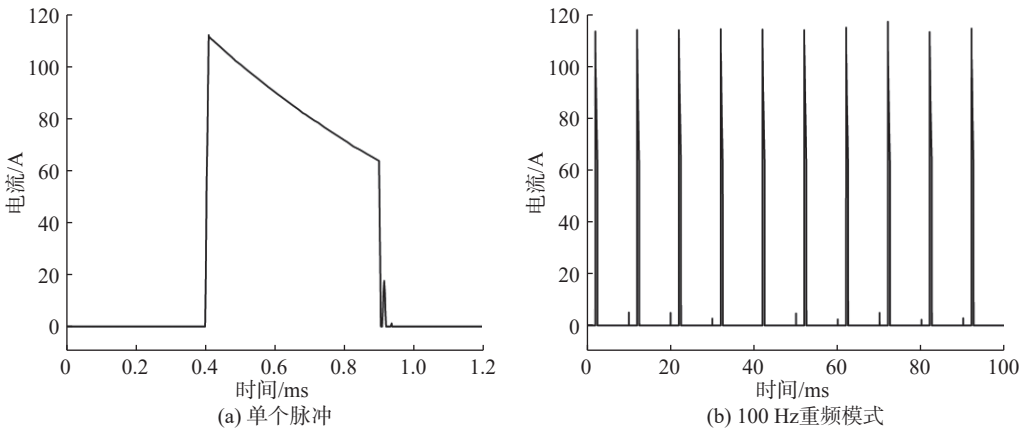


图 11 充电时间为 2 ms 时的负载电流

Fig.11 Load current at 2 ms charging time

下的负载电流波形，可以看出，改变频率不影响电流幅值。

如图 13 所示，XRAM 电路可以通过改变充放电时间来调节电流幅值和脉宽。图 13(a)为充电时间不同时的负载电流，充电时间可以影响储能电感上最终充到的电流值，进而影响负载电流。充电时间为 8 ms 时，该 XRAM 电路能够产生的最大负载电流为 150 A 左右。仿真中这一值为 77.5 A，2 倍则为 155 A，仿真值与实验值的误差为 3.33%。图 13(b)为放电时间不同时的负载电流，脉宽最大为 2 ms。

图 14 为延迟开通放电管 3 ms 时的负载电流和储能电感电流波形。储能电感上的电流在放电管开通之前，会通过电感内阻及杂散电阻消耗掉，因此会使负载电流降低，这也是负载电流的实验值低于理论值的原因。此外，充电管不同步关断会导致放电回路的改变，影响负载电流。因此，采用同步性很好的光耦隔离驱动十分合适。

仿真中，不同充电时间的升流效果不同，充电时间越短，升流效果越好，如图 10 所示。仿真计算得到了充电时间为 2 ms 情况下的升流比，因此，实验中验证升流效果同样选择充电时间 2 ms

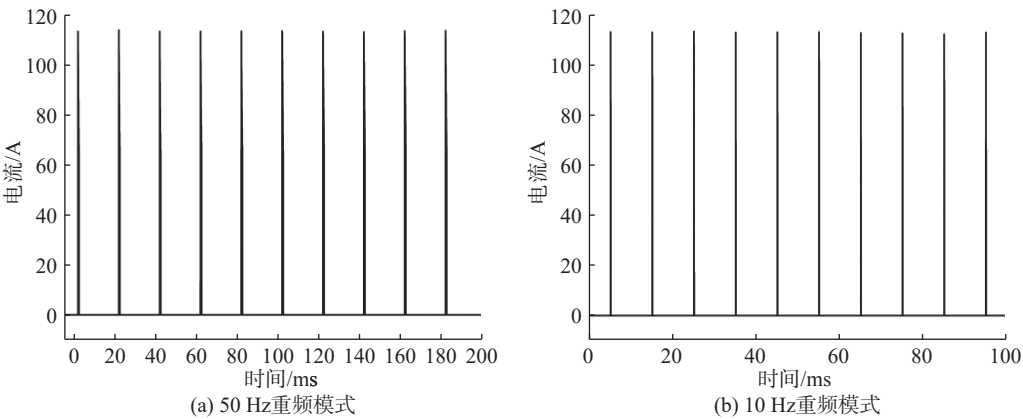


图 12 不同频率下的负载电流波形

Fig.12 Waveform of load current at different frequencies

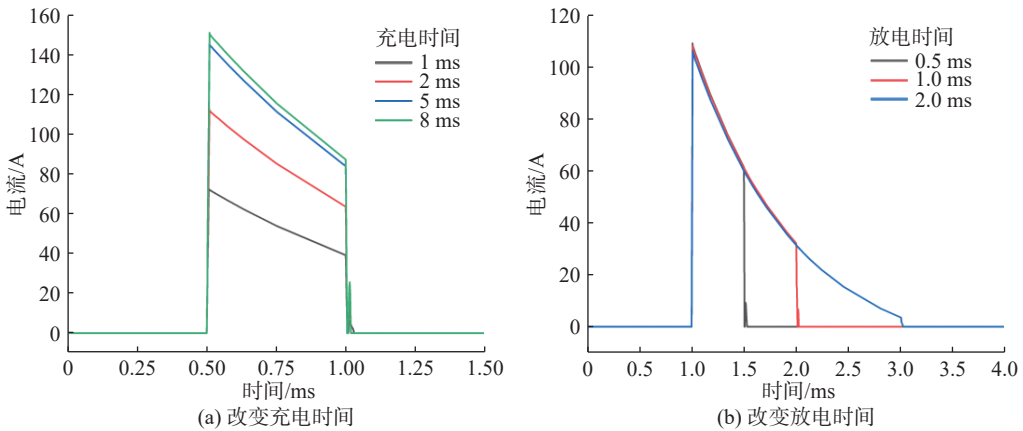


图 13 幅值和脉宽可调的负载电流

Fig.13 Load current with adjustable magnitudes and pulse widths

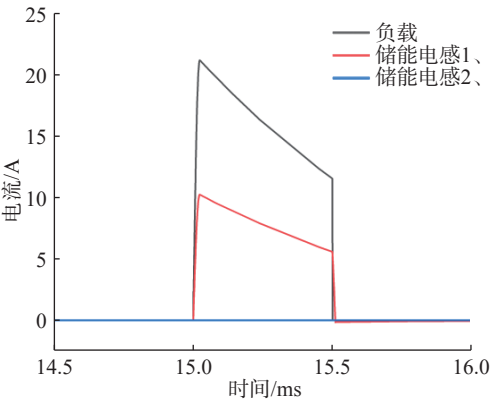


图 14 延迟开通放电管 3 ms 时的电流波形

Fig.14 Current waveforms at a delayed turn-on of 3 ms for the discharge tube

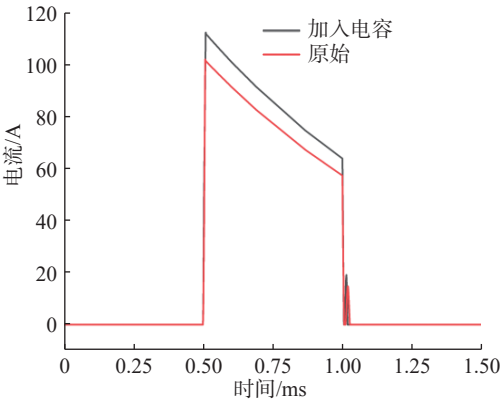


图 15 升流作用对比

Fig.15 Comparison of current boost effect

的情况。图 15 为充电时间为 2 ms 时, 是否加入储能电容的比较, 加入储能电容后电流为 113 A, 相比原始的 102.2 A 提高了 10.8 A, 提升 10.6%, 这与仿真中的 10.8% 相近。

大型 XRAM 装置通常采用 1500~1800 V 的初级电源, 20 级电路能够产生 50~1000 kA 的电

流^[21], 即每一级的电流电压比在 1.3~33。本文电源电压为 24 V, 四级电路的最大负载电流为 150 A, 经过计算, 本文 XRAM 电路每一级的电流电压比最大为 1.56, 符合要求。

铜导线的安全载流量为 5~8 A/mm², 为了保证铜线不被烧毁, 负载电感选用内径 7 mm 的铜导

线,最大工作电流为 192.4~307.9 A^[22],适用于本文中的 XRAM 电路。绕制后线圈内径为 30 mm,高度为 140 mm,匝数为 20 匝,电感值经过测量为 10 μH 左右。根据毕奥-萨伐尔定律计算磁场 B 为

$$B = \int_L \frac{\mu_0 n}{4\pi} \cdot \frac{Idl \times e_r}{r^2} \quad (6)$$

示中: μ_0 为真空磁导率; n 为匝数; Idl 为电流元; r 为矢径; e_r 为单位矢量。经计算,电流为 150 A 时,线圈中心处的磁场为 0.125 T。常用脉冲磁场装置的磁感应强度范围在 0.1~2.5 T^[23],本文的 XRAM 电路能够满足需求。电磁发射、脉冲激光等领域需要更大的脉冲磁场,本文电路便于模块化,增加模块即可提升幅值,但电磁干扰及串并联设计等需要进一步的深入研究。此外,针灸等领域需要低频可变换的脉冲电流,也可进一步开展这方面的探索。

4 结 论

本文提出了一种 boost 效应辅助升流的 XRAM 电路,无需高压直流源即可产生大电流脉冲,且便于模块化设计。只需 24 V 直流供电的四级 XRAM 电路,即可在电感负载上得到最大 150 A 的电流,其频率 10~100 Hz 可调、脉宽 0~2 ms 可调,每级电压电流比最大达 1.56,进而产生最大 0.125 T 的脉冲磁场。通过 FPGA 驱动开关管,电路结构简单、便于调节,通过调整充放电时间可以改变电流幅值和脉宽,进而调节脉冲磁场强度,为脉冲磁场技术在生物医学领域的应用提供可靠的脉冲电流源方案。

参考文献:

[1] 李彪,李孜,饶俊峰,等. 磁压缩脉冲发生器的仿真与研究 [J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(4): 374-380.
[2] 姜松,朱策. 脉冲电场作用下 Hela 细胞穿孔率研究 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(2): 134-139.
[3] 罗二平,焦李成,申广浩,等. 低强度脉冲电磁场对兔心血管系统的影响 [J]. 第四军医大学学报, 2005, 26(6): 557-561.
[4] WANG T, YANG L, JIANG J, et al. Pulsed electromagnetic fields: promising treatment for osteoporosis[J]. *Osteoporosis International*, 2019, 30(2): 267-276.
[5] 许琼瑜,陈尚杰,冯德荣,等. 脉冲磁场对慢性盆腔炎患者生活质量的影响 [J]. 临床医学工程, 2010, 17(4): 10-12.
[6] FLATSCHER J, LORIÈ E P, MITTERMAYR R, et al.

Pulsed Electromagnetic Fields (PEMF)-physiological response and its potential in trauma treatment[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(14): 11239.
[7] 厉中山,包义君,刘洁,等. 低频脉冲磁场诱导 TRPC1 改善 COVID-19 患者康复期下肢的肌肉无力症状 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(16): 2605-2612.
[8] 黄铮. 1.10 Hz 脉冲磁场暴露对原代人牙龈成纤维细胞的影响; 2. 游离龈移植增宽植体周角化黏膜的临床应用 [D]. 杭州: 杭州师范大学, 2022.
[9] 文峻,屈学民,杨继庆,等. 脉冲磁场刺激仪的研制 [J]. 医疗卫生装备, 2006, 27(11): 5-6.
[10] 李军,严萍,袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状 [J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
[11] 马山刚,于歆杰,李臻. 用于电磁发射的电感储能型脉冲电源的研究现状综述 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 222-228,236.
[12] 江伟华,德地明,须贝太一,等. 小型脉冲功率发生器的电路方法与实践 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(5): 055001.
[13] 张玉宸,戴玲,樊晟廷,等. 多级 XRAM 型脉冲功率电源开关器件简化研究 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(2): 025002.
[14] ZHAO B, LI H T, WANG L W, et al. A new modular XRAM-like inductive high- current pulse generator circuit topology[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 210158-210166.
[15] DEDIE P, BROMMER V, SCHARNHOLZ S. Experimental realization of an Eight-Stage XRAM generator based on ICCOS semiconductor opening switches, fed by a magnetodynamic storage system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(1): 266-271.
[16] 马山刚,于歆杰,李臻,等. 含有强耦合电感的 XRAM 发生器及 100 kJ 模块设计 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 475-480.
[17] 戴成栋,李孜. 固态 Marx 发生器均流技术研究 [J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(3): 227-234.
[18] 黄超林,姜松,饶俊峰,等. 用于脉冲叠加器的 LLC 谐振充电电源的研究 [J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(2): 149-155.
[19] DEDIE P, SCHARNHOLZ S, BROMMER V. ICCOS counter-current thyristor high-power opening switch for currents up to 28 kA[C]//2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology. Victoria: IEEE, 2008: 1-4.
[20] 金爱娟,尹鹏鸿,夏震,等. 电流型 Buck-Boost DC-DC 变换器的分岔与混沌 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(3): 299-301,306.
[21] 梁志. 高储能密度 XRAM 型脉冲功率电源研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
[22] 戴新文. 常用钢芯铝绞线及铜导线载流量的经验计算公式 [J]. 电工技术, 1996, (1): 46-47.
[23] 文峻,钟力生,谢恒堃,等. MC-Ⅲ型低频脉冲强磁场发生仪的研制 [J]. 生物医学工程学杂志, 2002, 19(4): 569-571.