



·脉冲功率技术·

## 平顶脉冲磁场连续微调控系统设计\*

万 昊<sup>1,2</sup>, 张绍哲<sup>1,2</sup>, 刘沁莹<sup>1,2</sup>, 魏文琦<sup>1,2</sup>, 王正磊<sup>1,2</sup>, 韩小涛<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 国家脉冲强磁场科学中心, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘 要:** 针对现有电容器放电开环控制产生的平顶脉冲磁场稳定度难以满足核磁共振要求这一问题, 提出一种平顶磁场闭环连续微调控方案。在脉冲磁体中放置一个补偿线圈, 其由蓄电池供电, 采用前馈控制加反馈控制的策略, 利用 IGBT 有源区对补偿线圈的磁场进行线性调控, 补偿背景磁场的波动, 形成高稳定度平顶磁场。为此, 设计了 IGBT 工作于有源区的驱动电路, 搭建了原型机进行实验, 结果表明, 该方法能够将磁场稳定度提升至  $50 \times 10^{-6}$ , 验证了方案的可行性。

**关键词:** 平顶脉冲磁场; 核磁共振; IGBT 有源区; 前馈控制; PI 控制

中图分类号: TM15

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210468

## Design of continuous micro-control system for flat-top pulsed magnetic field

Wan Hao<sup>1,2</sup>, Zhang Shaozhe<sup>1,2</sup>, Liu Qinying<sup>1,2</sup>, Wei Wenqi<sup>1,2</sup>, Wang Zhenglei<sup>1,2</sup>, Han Xiaotao<sup>1,2</sup>

(1. Wuhan National High Magnetic Field Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the stability of the flat-top pulsed magnetic field generated by open-loop control of capacitor discharge is difficult to meet the requirements of nuclear magnetic resonance, this paper proposes a closed-loop continuous micro-control scheme for the flat-top magnetic field. A compensation coil is placed in the pulse magnet, which is powered by batteries, adopts the strategy of feedforward control and feedback control, uses the IGBT active region to linearly regulate the magnetic field of the compensation coil, compensates for the fluctuation of the background magnetic field, and forms a highly stable flat-top magnetic field. To this end, this paper designs a driving circuit for IGBTs working in the active region, and builds a prototype for experiments. The results show that the method proposed can increase the magnetic field stability to  $50 \times 10^{-6}$ , which verifies the feasibility of the scheme.

**Key words:** flat-top pulsed magnetic field, nuclear magnetic resonance, IGBT active region, feedforward control, PI control

核磁共振 (NMR) 作为一种微观结构解析的手段, 在生物学、凝聚态物理等领域有着广泛应用。NMR 的磁场环境分为稳态磁场和脉冲磁场, 由于 NMR 的分辨率和磁场强度呈正相关, 相较于稳态磁场, 脉冲磁场能够达到更高的场强, 因此发展脉冲场 NMR 成为一个重要方向<sup>[1]</sup>。此外, 高场强下的 NMR 实验为发现物质的奇特物理性质提供了条件, 例如磁场引发的电荷密度波 (CDW) 相<sup>[2]</sup>、高温超导体的低温常态与波动超导性<sup>[3-4]</sup>及量子震荡 dHvA 效应<sup>[5]</sup>等。

由于 NMR 对磁场稳定度要求很高, 一直难以在脉冲场下进行有效应用。运用一定的技术手段, 使脉冲磁场在峰值上保持一段时间形成平顶脉冲磁场, 能够在平顶期内维持较高的稳定度, 因而具备应用于 NMR 实验的前景。平顶脉冲磁场主要有磁场强度、平顶持续时间、磁场稳定度 3 个技术指标。

目前世界各大强磁场已实现多种类型的平顶脉冲磁场, 按照放电电源类型分类, 可分为整流调压型、电容器型、蓄电池型以及组合放电型。整流调压型平顶磁场虽然可以实现较高的场强和较长的平顶持续时间, 但是会不

\* 收稿日期: 2021-11-06; 修订日期: 2021-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52107152, U21A20458, 51821005); 国家重点研发计划项目 (2021YFA1600301)

联系方式: 万 昊, m201971591@hust.edu.cn.

通信作者: 韩小涛, xthan@mail.hust.edu.cn.

可避免地带有较大的整流纹波,不适用于对纹波要求极高的 NMR 实验。电容器型平顶脉冲磁场可以达到很高的场强,武汉强磁场中心于 2014 年提出通过变压器耦合的双电容器组放电产生平顶磁场的方案<sup>[6]</sup>,在 2020 年升级后能够实现 64 T/10 ms/3000×10<sup>-6</sup> 的平顶脉冲磁场<sup>[7]</sup>,但该方案为开环系统,稳定度难以进一步提升。蓄电池型平顶脉冲磁场可以实现较长的平顶调节时间,2018 年,张绍哲、王正磊等人提出了在蓄电池放电回路中添加 IGBT 旁路实现平顶磁场的方案<sup>[8]</sup>,这种方案能够实现 23.370 T/100 ms/64×10<sup>-6</sup> 的平顶磁场,但是蓄电池型平顶磁场的磁场强度难以提高。组合放电型平顶磁场采用多种电源组合放电,可以实现更好的技术指标。2015 年,日本东京大学固体物理研究所的 Y. Kohama 和 K. Kindo 通过在磁体中间内置一个补偿小线圈的方式,实现了 60 T/2 ms/80×10<sup>-6</sup> 的平顶脉冲磁场,该方案用单组电容器对磁体放电,达到设定值时小线圈开始工作,弥补磁体产生磁场的波动,其缺点是平顶持续时间随磁场强度增大而缩短,场强达到 60 T 时平顶持续时间仅有 2 ms<sup>[9]</sup>。

为同时实现高场强与高稳定度,并且在高场强仍保持尽可能长的平顶持续时间,本文提出了一种高稳定度平顶脉冲磁场连续微调方案,在现有双电容器开环平顶脉冲磁场系统的磁体内嵌入补偿线圈,利用 IGBT 有源区对补偿线圈的磁场进行线性调控,补偿背景磁场,二者叠加形成高稳定度平顶磁场。等效实验表明本方案可产生 62 T/9 ms/50×10<sup>-6</sup> 的平顶脉冲磁场,为脉冲场 NMR 实验提供良好的磁场环境。

## 1 平顶磁场的产生

### 1.1 平顶磁场产生原理

本文所提出平顶脉冲磁场方案的原理图如图 1 所示,其分为主放电回路、辅助放电回路、补偿回路和控制系统。

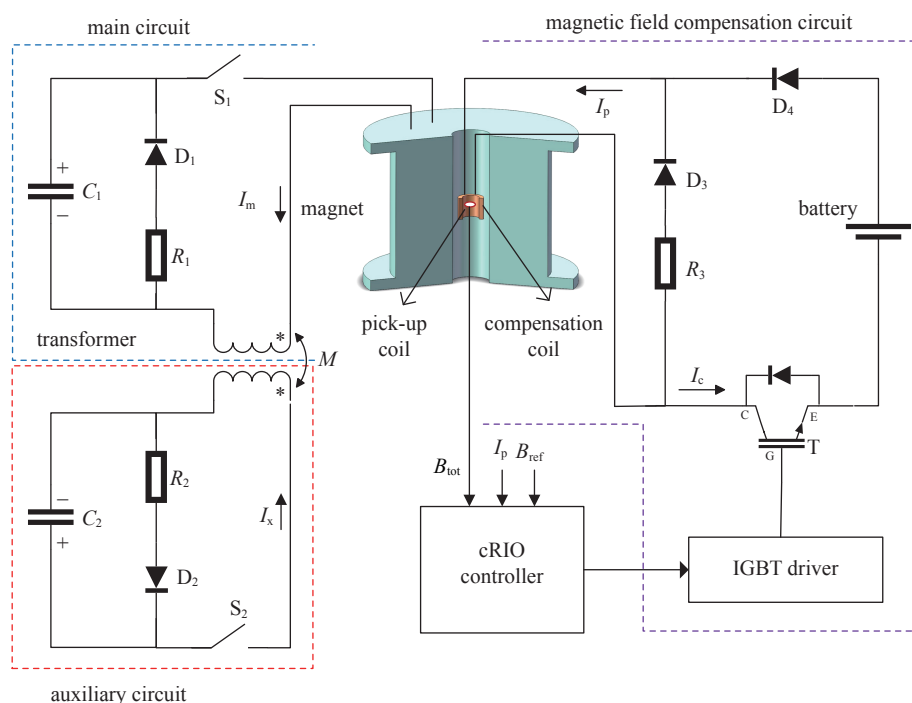


Fig. 1 Schematic diagram of flat-top pulsed magnetic field generation

图 1 平顶脉冲磁场生成原理图

主磁场,即背景磁场由主放电回路和辅助放电回路产生,两个放电回路通过空心变压器耦合在一起<sup>[9]</sup>。主放电回路单独工作时,在磁体中产生的电流是一个典型的正弦半波脉冲波形。设置特定的放电时序和放电电压,使主回路和辅助回路依次放电,在主回路电流上升至一定值时,辅助回路放电,通过耦合变压器在磁体回路产生一个与电容器 $C_1$ 相反的电动势,抑制主回路电流上升,形成一定时间的平顶磁场 $B_b$ ,如图 2(a)所示。为保护电容器,在主回路和辅助回路均设计了续流回路。这种产生平顶磁场方法的关键在于电容

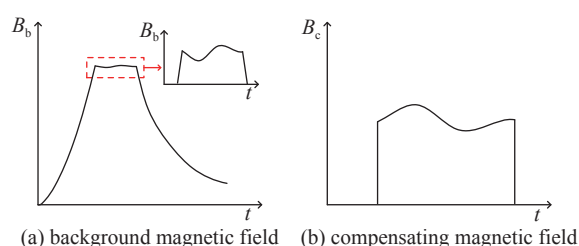


Fig. 2 Background magnetic field and compensating magnetic field waveform

图 2 背景磁场和补偿磁场波形

器组 $C_1$ 、 $C_2$ 的电容值和初始电压的合理配置,以及磁体回路与辅助回路之间恰当的触发时延。该方法属于开环调节,导致产生的平顶磁场稳定度较差,在磁场强度为 64 T 时稳定度为  $3000 \times 10^{-6}$ ,其稳定度亟待进一步提升,以满足脉冲场 NMR 实验的需求。

本文在上述方案的基础上加入磁场补偿回路,在平顶期间对磁场进行闭环线性调控,实现平顶磁场的精准控制。磁场补偿回路主要由蓄电池组、补偿线圈和 IGBT 串联而成。其中,蓄电池组为磁场补偿回路供电;补偿线圈置于磁体中央,其产生的磁场与主磁体产生的磁场相叠加;探测线圈置于补偿线圈中央,测量合成磁场以作为反馈量进行闭环调控;IGBT 工作于有源区,通过其门极电压实现补偿回路电流的线性调控。通过反馈控制系统,当合成磁场减小时,增大 IGBT 门极电压,补偿回路电流随之增加,也即补偿线圈的磁场变大,最终合成磁场趋于参考值;当合成磁场增大时,调节方向相反,合成磁场亦能保持稳定。补偿线圈产生的磁场 $B_c$ 如图 2(b)所示。

IGBT 有源区的输出特性如图 3 所示。

忽略结温的影响,在有源区内 IGBT 的集电极电流 $I_C$ 由门极电压 $V_{GE}$ 决定,与端电压 $V_{CE}$ 无关,其集电极电流表达式近似为<sup>[10]</sup>

$$I_C = (m_0 + m_1 V_{GE} + m_2 V_{GE}^2) \cdot (V_{GE} - V_{GEth})^2 \quad (V_{CE} \geq V_{GE} + V_D - V_{GEth}) \quad (1)$$

式中: $m_0$ 、 $m_1$ 和 $m_2$ 是依赖于 IGBT 器件参数的系数; $V_D$ 是发射极基极结电压; $V_{GEth}$ 为门极发射极阈值电压。

将式(1)在 $V_{GE} = V_{GEth}$ 处进行泰勒级数展开,取展开式的前两项时舍弃误差就已经足够小,化简后的有源区集电极电流方程式为

$$I_C = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{\partial^k I_C}{\partial^k V_{GE}} \Big|_{V_{GE}=V_{GEth}} \times (V_{GE} - V_{GEth})^k \approx g_{m1}(V_{GE} - V_{GEth}) + g_{m2}(V_{GE} - V_{GEth})^2 \quad (2)$$

式中: $g_m$ 为 IGBT 跨导。

利用 IGBT 在有源区的输出特性,将其串联在回路中,通过控制 IGBT 门极电压对补偿线圈产生的磁场进行线性调控。需要注意的是,由于米勒效应的存在,即门极与集电极之间的寄生电容会随 IGBT 端电压发生变化,应避开该寄生电容发生剧烈变化的阶段,否则门极电压会产生波动,从而引起集电极电流的波动。可以通过保持 IGBT 端电压在 10 V 之上避开米勒效应的影响<sup>[11]</sup>。

## 1.2 补偿线圈设计

为有效补偿背景磁场的波动,补偿线圈能够产生的最大磁场应大于背景磁场最大波动量 0.6 T,并且补偿线圈的磁场变化速率应大于背景磁场最大变化速率 0.326 T/ms。

补偿线圈采用线径 0.45 mm 的圆形纯铜导线绕制而成,每层匝数为 80,一共 2 层,线圈内径为 17 mm,外径为 19 mm。补偿线圈电感 $L$ 为 215.15  $\mu$ H, 77 K 温度下电阻 $R$ 为 0.46  $\Omega$ ,电流磁场系数 $K_c$ 为 196 A/T,最高能够产生 1 T 磁场。当补偿线圈上电压突增或突减 $\Delta v$ 时,其磁场变化速率由式(3)得到

$$\frac{dB_c}{dt} = \frac{\Delta v}{K_c L} \quad (3)$$

由式(3)可得,当 $\Delta v=15$  V 时,补偿线圈的磁场变化速率为 0.356 T/ms。在实际放电过程中,可以通过增大蓄电池电压和续流回路电阻的方式,提高 $\Delta v$ 的上限,以满足补偿线圈磁场变化速率的要求。

## 1.3 IGBT 线性驱动方案

有源区内的 IGBT 驱动电压并不是高低电平的形式,而是在一定范围内能够连续变化的电压,有源区内流经 IGBT 的电流对驱动电压十分敏感,为实现良好的电流控制效果,IGBT 驱动需要具备纹波小、响应速度快的特点。此外,需要对放电回路与控制回路隔离。为此自行设计了 IGBT 有源区驱动电路,其基本原理如图 4 所示。

由 cRIO 控制器上的板卡 NI9401 输出 7 路数字信号,包含电压信息以及 IGBT 驱动板上芯片所需要的控制信

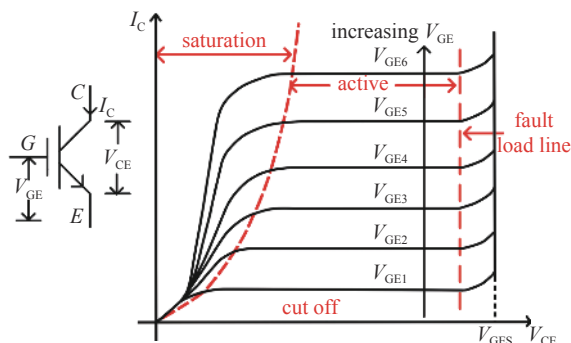


Fig. 3 Output characteristic of IGBT

图 3 IGBT 输出特性

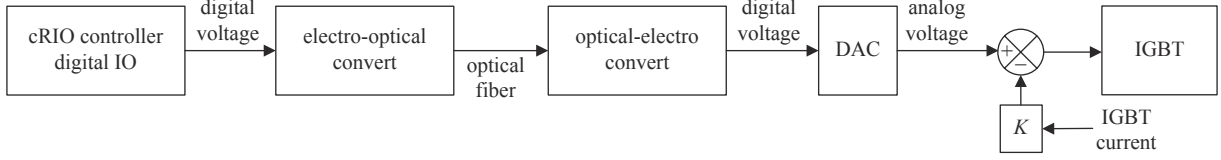


Fig. 4 IGBT drive scheme in active region

图4 有源区内 IGBT 驱动方案

息, 数字信号通过 HFBR1412 转化为光信号传送到驱动板上, 实现了控制器和放电回路的隔离。驱动板上 HFBR2412 将光信号还原为数字信号, 然后输入到 DAC 芯片 AD5546, 由 DAC 芯片输出模拟电压信号, 经过功率放大器 OPA544 驱动 IGBT。

在有源区内流经 IGBT 的电流对驱动电压十分敏感, 呈非线性关系, 微小的电压变化就会造成电流的剧烈变化, 并且非线性进一步增加了后续系统控制的难度。本文采用电流线性反馈措施, 将 DAC 芯片输出的模拟电压减去 IGBT 电流的一定倍数, 从而降低 IGBT 电流对驱动电压的敏感性, 并且将 IGBT 电流和驱动电压之间的非线性关系转变为近似线性关系。

## 2 控制系统

### 2.1 控制方法

本文设计的平顶磁场产生方案, 其控制目标是给定一个磁场设定值, 通过控制补偿磁场回路产生的小磁场, 消除背景磁场的波动, 使合成的磁场稳定在磁场设定值附近。然而, 相较于补偿线圈所能产生的最大磁场, 背景磁场的波动量较大, 对控制系统的干扰十分明显, 采用常规的反馈控制无法实现目标控制效果。为了提高响应速度和抑制背景磁场扰动, 本文在反馈系统中引入前馈补偿。将磁场设定值与背景磁场的差值作为前馈控制器的输入, 此差值是补偿线圈应产生的磁场大小, 与 IGBT 驱动电压近似成线性关系, 因此前馈控制器采用简单的比例环节。前馈控制器的输出与反馈控制器的输出相叠加, 一起形成 IGBT 驱动电压。控制原理图如图 5 所示。

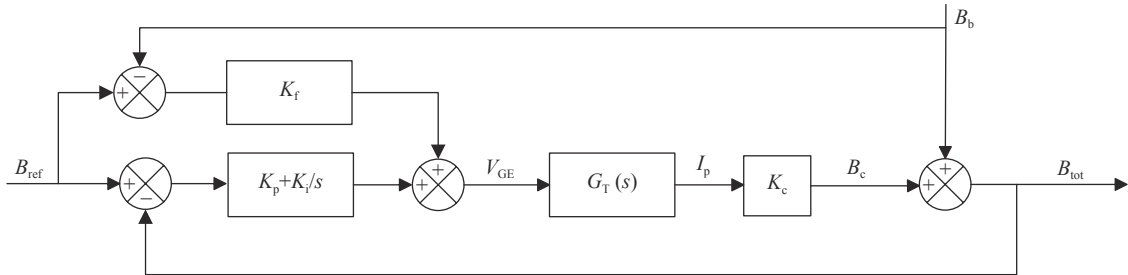


Fig. 5 System control schematic diagram

图5 系统控制原理图

由图 5 可得, 合成磁场  $B_{tot}$  的复频域表达式为

$$B_{tot}(s) = \frac{G_T(s)(K_f + K_p + K_i/s)}{K_c + G_T(s)(K_p + K_i/s)} B_{ref}(s) + \frac{K_c - K_f G_T(s)}{K_c + G_T(s)(K_p + K_i/s)} B_b(s) \quad (4)$$

式中:  $G_T(s)$  为 IGBT 驱动电压  $V_{GE}$  与补偿回路电流  $I_p$  之间的传递函数;  $K_f$  为前馈系数;  $K_p$  和  $K_i$  分别为反馈控制器的比例系数和积分系数;  $K_c$  为补偿线圈的电流磁场系数;  $B_{ref}$  为设定磁场;  $B_b$  为背景磁场。

由式(4)可得, 选取合适的前馈增益  $K_f$  使  $|K_c - K_f G_T(j\omega)|$  接近 0, 能够大大减小背景磁场波动  $B_b$  对合成磁场  $B_{tot}$  的影响。在前馈和反馈补偿的共同作用下, 能满足平顶磁场调控对控制系统响应速度和控制精度的要求。

### 2.2 控制系统程序

控制系统程序基于 LabVIEW 平台开发, 设计了安全状态、手动状态、触发状态和调控状态, 其状态如图 6 所示。安全状态下, IGBT 驱动电压置零, 所有开关保持断开。当检测到 IGBT 电流超过设定阈值、IGBT 温升过高等异常现象时, 系统自动切换至安全状态。在手动状态实现 IGBT 驱动检测、测量 IGBT 输出特性等功能。生成平顶磁场时先进入触发状态, 监测背景磁场场强。当检测到背景磁场达到设定阈值时进入调控状态, 补偿回路开始放电, 启动前馈控制和反馈控制对背景磁场进行补偿, 生成高稳定度的平顶磁场。

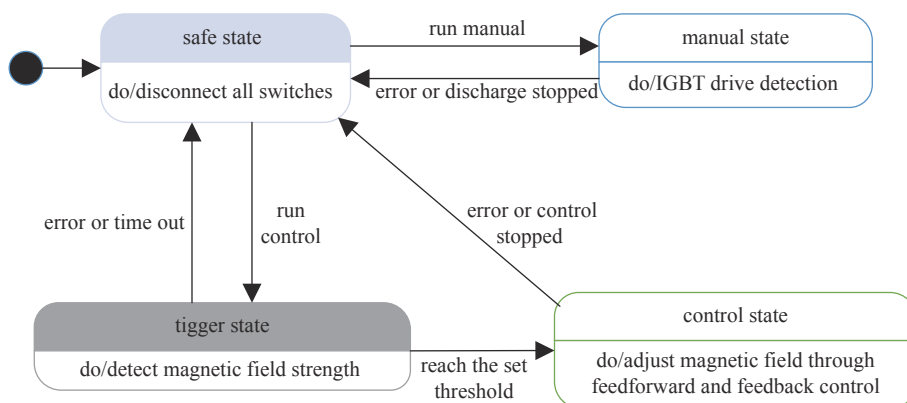


Fig. 6 Statechart diagram of control program

图 6 控制系统状态图

### 3 实验

#### 3.1 3 T 原型机

搭建了生成 3 T 平顶磁场的原型机, 主磁场产生回路仅含有电容器组  $C_1$  所在回路, 没有通过变压器耦合电容器组  $C_2$  所在回路, 产生的背景磁场为单脉波不含平顶的磁场。实验装置实物如图 7 所示。

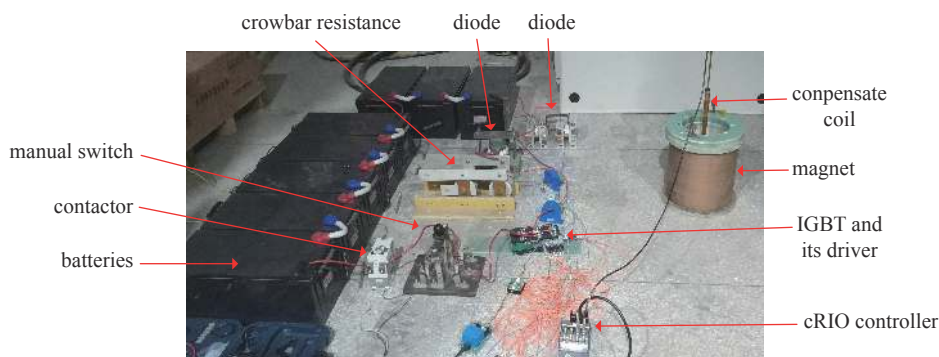


Fig. 7 Physical image of experimental device

图 7 实验装置实物图

主要电路参数如表 1 所示。为满足补偿线圈产生磁场能力、磁场变化速率能力, 以及避开米勒效应的需要, 蓄电池组由 8 个 12 V 蓄电池串联组成。采用的 IGBT 型号为 FZ3600R17KE3-B2, 放电过程中 IGBT 端电压和集电极电流远小于其最大额定值。电容器  $C_1$  初始放电电压设为 6 kV, 前馈控制器增益  $K_f$  为 2.4, PI 控制器增益  $K_p$  为 0.4,  $K_i$  为 0.2。产生的平顶磁场波形如图 8 所示。实验结果表明, 在平顶阶段, 磁场波动量仅有  $\pm 0.003$  T, 稳定度极好。背景磁场波形的不光滑现象由补偿线圈和磁体之间的互感引起, 当补偿线圈电流剧烈变化时, 背景磁场产生轻微波动。

表 1 电路参数

Table 1 Circuit parameters

capacitor/ mF	magnet inductance/mH	magnet resistance/m $\Omega$	crowbar resistance/m $\Omega$	battery voltage/V	compensate coil inductance/ $\mu$ H	compensate coil resistance (298 K)/ $\Omega$	magnet coil constant/(kA $\cdot$ T $^{-1}$ )	compensate coil constant/(A $\cdot$ T $^{-1}$ )
4.8	33.126	819.3	500	96	215.15	2.76	2	196

#### 3.2 62 T 平顶磁场等效实验

由于本实验室高场磁体进行更新换代, 暂不能进行高场强实验。因此, 本文利用以往双电容器平顶磁场系统放电波形数据模拟产生背景磁场, 开展 62 T 高场强平顶磁场等效实验。上位机将模拟的磁场数据传到 cRIO 控制器, 补偿线圈回路放电产生真实的补偿磁场, 调控系统对叠加的合成磁场进行调控以产生高场强、高稳定度平顶磁场。实验结果如图 9 所示, 结果表明, 在高场强下调控系统仍具备足够的调节能力, 可生成场强 62 T、平顶持续时间 9 ms、磁场稳定度  $50 \times 10^{-6}$  的平顶脉冲磁场。

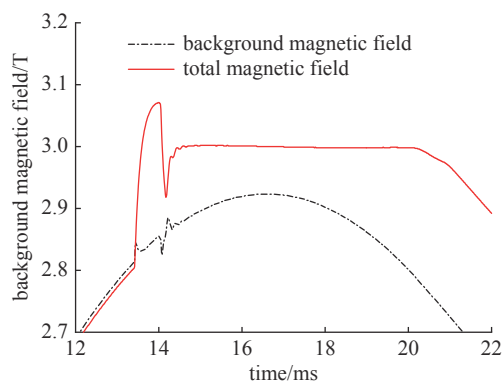


Fig. 8 3 T flat-top pulsed magnetic field prototype experiment result

图 8 3 T 平顶脉冲磁场原型机实验结果

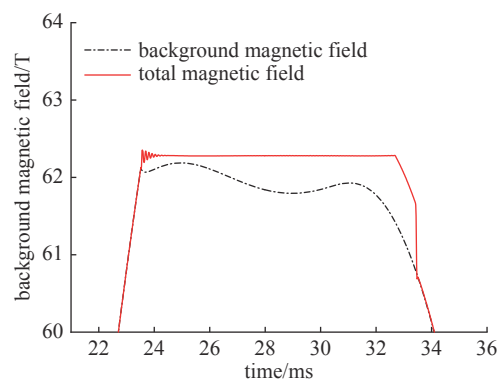


Fig. 9 Result of 62 T flat-top magnetic field equivalent experiment

图 9 62 T 平顶磁场等效实验结果

## 4 结 论

针对脉冲场 NMR 实验的需要, 本文提出了一种平顶脉冲磁场产生方案, 根据磁场叠加原理, 在脉冲磁体中放置补偿线圈, 其磁场通过 IGBT 有源区进行线性调整, 通过调节补偿线圈的磁场消除背景磁场的波动, 形成高稳定度平顶磁场, 为此, 设计了 IGBT 线性驱动电路和前馈补偿和反馈补偿结合的控制策略。最后, 设计了磁场补偿系统原型样机, 并进行 62 T 平顶磁场等效实验, 验证了方案的可行性。

### 参考文献:

- [1] Liu Qinying, Liu Shiyu, Luo Yongkang, et al. Pulsed-field nuclear magnetic resonance: status and prospects[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2021, 6: 024201.
- [2] Wu Tao, Mayaffre H, Krämer S, et al. Magnetic-field-induced charge-stripe order in the high-temperature superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ [J]. *Nature*, 2011, 477(7363): 191-194.
- [3] Goto T, Mori M, Chiba K, Suzuki T, et al. High-field Cu/La-NMR study on high- $T_c$  cuprate  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  ( $x = 0.125$ ) [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2000, 284/288: 657-658.
- [4] Rourke P M C, Mouzopoulou I, Xu Xiaofeng, et al. Phase-fluctuating superconductivity in overdoped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(6): 455-458.
- [5] Sebastian S E, Harrison N, Palm E, et al. A multi-component Fermi surface in the vortex state of an underdoped high- $T_c$  superconductor [J]. *Nature*, 2008, 454(7201): 200-203.
- [6] Jiang Fan, Peng Tao, Xiao Houxiu, et al. Design and test of a flat-top magnetic field system driven by capacitor banks [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 045106.
- [7] Wang Shuang, Peng Tao, Jiang Fan, et al. Upgrade of the pulsed magnetic field system with flat-top at the WHMFC [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30: 4900404.
- [8] Zhang Shaozhe, Wang Zhenglei, Qi Xin, et al. An innovative method for generating high-stability flat-top pulsed magnetic field [C] // Proceedings of 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). 2018: 411-415.
- [9] Kohama Y, Kindo K. Generation of flat-top pulsed magnetic fields with feedback control approach [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86: 104701.
- [10] Linder S. Power semiconductors [M]. Lausanne, Switzerland: EPFL Press, 2006.
- [11] Zhang Shaozhe, Wang Zhenglei, Ding Tonghai, et al. Realization of high-stability flat-top pulsed magnetic fields by a bypass circuit of IGBTs in the active region [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(3): 2436-2444.