

基于HTEM系统的多激励源脉冲发射电路研究

梁彪,张一鸣,张栋,李根,王旭红

(北京工业大学 电控学院,北京 100124)

摘要:随着我国对复杂地形条件下地质勘探需求的增加,直升机瞬变电磁系统(HTEM)的发展越来越受到重视。针对直升机瞬变电磁系统发射信号的需求,提出了一种多激励源脉冲电流发射电路,详细分析了该电路的运行原理和电路模式,并给出了详细的电路仿真参数和仿真结果。研制完成一套原理样机,该样机半正弦波峰值发射电流达到800 A,最大发射磁矩 ≥ 120 万 $\text{A}\cdot\text{m}^2$,梯形波最大峰值发射电流达到70 A。提出的多激励源脉冲发射电路能够有效提高直升机瞬变电磁系统对深部资源和浅部资源探测能力,对直升机瞬变电磁发射机的设计具有一定的参考意义。

关键词:直升机瞬变电磁系统;多激励源脉冲;电路仿真;电力电子

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22935

Study on Pulse Transmitting Circuit of Multi-excitation Sources Based on HTEM System

LIANG Biao, ZHANG Yiming, ZHANG Dong, LI Gen, WANG Xuhong

(Department of Informatics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: With the increasing demand for geological exploration in complicated terrain in China, the development of helicopter transient electromagnetic system (HTEM) has been paid more and more attention. A pulse current transmitting circuit with multi-excitation sources was proposed to meet the demand of transmitting signals of HTEM system. The operation principle and circuit modes of the circuit were analyzed in detail, and the detailed circuit simulation parameters and simulation results were given. A set of principle prototype was developed, and the peak emission current of the prototype was 800 A, the maximum emission magnetic moment was more than 1.2 million $\text{A}\cdot\text{m}^2$, and the maximum peak current of the trapezoidal wave was 70 A. The multi-excitation source pulse transmitting circuit proposed can effectively improve the detecting ability of helicopter transient electromagnetic system to deep and shallow resources, which has a certain reference significance for the design of helicopter transient electromagnetic transmitter.

Key words: helicopter transient electromagnetic system(HTEM); multi-excitation source pulses; circuit simulation; power electronic

近年来,随着我国经济社会的高速发展,对矿产资源的需求急剧增加,而我国地形环境复杂。为应对我国复杂地质条件下的资源勘探需求,航空电磁勘探技术由于其受地形条件约束小、探测范围广等优点越来越得到重视^[1]。其中,直升机瞬变电磁系统(helicopter transient electromagnetic system, HTEM)采用直升机搭载发射电路和发射线圈,具有机动灵活、飞行高度低、收发距较小等优点^[2]。采用多激励源脉冲电流发射技术的直升机瞬变电磁探测系统,同时具有较好的深部资源探测能力和地表浅层分辨能力,成为目前航空电

磁探测技术发展的主流趋势^[3]。

1 直升机瞬变电磁探测技术工作原理

直升机瞬变电磁发射系统采用发射线圈发射电磁信号,通过接收线圈接收经空气传播的一次场信号和经地下介质感应产生的二次场信号^[4]。当地下不存在电性不均匀体时与存在电性不均匀体时,接收线圈接收到的二次场信号存在差异,通过分析地下介质感应产生的电磁场,可以得到地下电性结构的分布信息^[5],从而反演出地下的矿藏分布情况,原理示意如图1所示。

基金项目:中国科学院科技先导项目专项(A类)(XDA14020403)

作者简介:梁彪(1994—),男,硕士,Email:biao_liang010@163.com

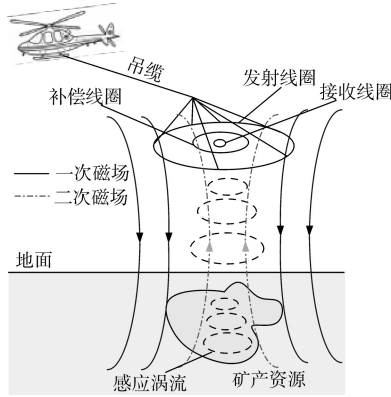


图1 直升机瞬变电磁系统探测原理

Fig.1 Principle of HTEM detection

直升机瞬变电磁发射机采用直升机机载28 V稳压直流电源作为输入电源,最大输入电流100 A,经过DC/DC升压电路、滤波电路、谐振电容充电电路、多激励源脉冲发射电路,调制成为多激励源脉冲发射电流。该系统能够实现最大发射磁矩 ≥ 120 万 $\text{A} \cdot \text{m}^2$ 、半正弦波峰值电流400~800 A、梯形波峰值电流30~70 A,发射电流波形及时序如图2所示。

本文提出的直升机瞬变电磁发射机发射波形为半正弦波和小梯形波组成的组合发射波形,每个发射周期为40 ms,由正半周期和负半周期两部分组成,这两部分的控制方式类似。在每半个周期内,主脉冲为半正弦波,半波周期为4 ms,最大峰值电流 I_{peak} 为800 A,该低频大磁矩脉冲可以有效穿透地层,并产生足够强度的感应磁场,主要用于对地下深部资源的探测;次脉冲为梯形波,最大峰值电流 I_{trap} 为70 A,要求关断时间短,具有能量较高的高频信号成分,从而增强浅部资

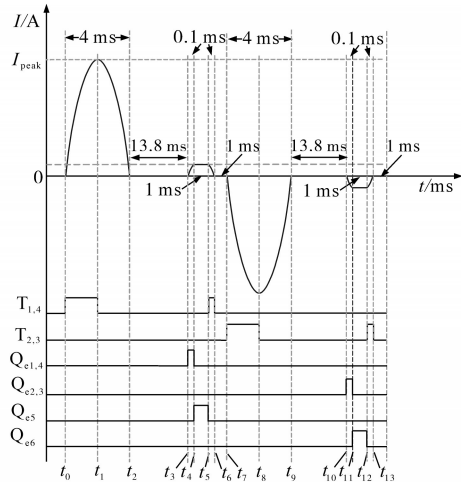


图2 发射电流波形时序图

Fig.2 Timing diagram of emission current waveforms

源的探测能力,提高浅部资源的探测分辨率。

2 多激励源脉冲发射电路工作原理及模态分析

本文提出的多激励源脉冲发射电路包含机载电路和线圈电路两个部分,如图3所示。机载电路由DC/DC升压电路和谐振电容充电电路组成;线圈电路为多激励源脉冲发射电路,两部分电路相对距离为80 m,通过电力传输线进行能量的输送。由于直升机载重的限制和飞机操控的要求,需要电力传输线的线径尽可能小,所以首先通过DC/DC升压电路进行高变比升压,减小输电电流,从而减小电力传输线线径和重量^[6-7]。谐振电容充电电路为全桥电路,采用PWM调制的方式控制储能电容到谐振电容的充电速度和充电方向,以补充每次电流脉冲发射后的能量损失。

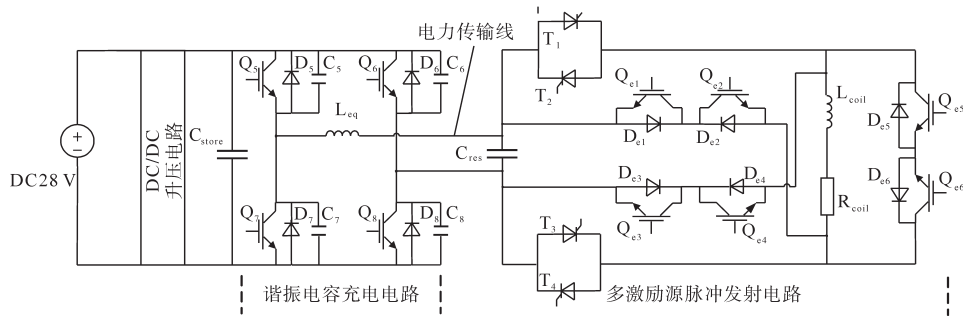


图3 多激励源脉冲发射电路

Fig.3 Multi-excitation source pulse transmitting circuit

多激励源脉冲调制电路通过对晶闸管和IGBT在不同的时间点进行开通和关断,控制谐振电容和发射线圈之间的能量流动,并且对发射线圈的能量进行回收,调制生成半正弦波和梯形波的发射电流,完成电磁波的发射,下面对正半周期

电流的发射进行详细的模态分析。

工作模态1($t_0 < t \leq t_2$):在 t_0 时刻前,谐振电容 C_{res} 被充电至电压 U_{res} ,充电电路断开。此时开通 T_1 和 T_4 ,使谐振电容 C_{res} 与发射线圈形成回路,发射半正弦电流波形,如图4所示。

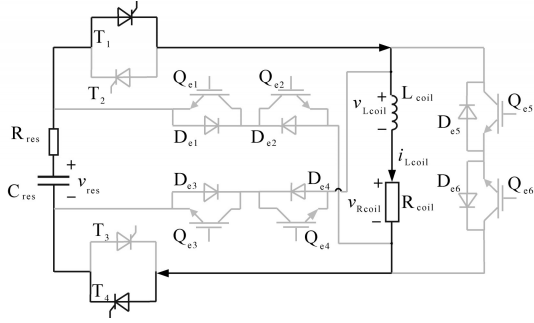


图4 电路工作模式1

Fig.4 Circuit operating mode 1

应用KVL方程和电容的VCR得到:

$$L_{\text{coil}} C_{\text{res}} \frac{d^2 v_{\text{res}}}{dt^2} + R_{\text{res}} C_{\text{res}} \frac{dv_{\text{res}}}{dt} + v_{\text{res}} = 0 \quad (1)$$

电感电流表达式为

$$i_{L_{\text{coil}}} = -C_{\text{res}} \frac{dv_{\text{res}}}{dt} \quad (2)$$

在本文中, R_{res} 为谐振电容等效串联电阻, R_{coil} 为发射线圈内阻, 发射线圈为采用高电导率的材料, 所以满足如下关系式:

$$R_{\text{res}} + R_{\text{coil}} < 2\sqrt{L_{\text{coil}}/C_{\text{res}}} \quad (3)$$

发射电路初始条件如下:

$$\begin{cases} i_{L_{\text{coil}}} \frac{di_{L_{\text{coil}}}(t)}{dt} \Big|_{t=0} = -v_{\text{res}} \\ i_{\text{coil}}(0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由发射电路二阶微分方程和初始条件, 可以得到发射半正弦电流波形表达式:

$$i_{\text{coil}} = \frac{v_{\text{res}}}{\omega L_{\text{coil}}} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (5)$$

其中

$$\delta = \frac{R_{\text{res}} + R_{\text{coil}}}{2L_{\text{coil}}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{coil}} C_{\text{res}}} - \left(\frac{R_{\text{res}} + R_{\text{coil}}}{2L_{\text{coil}}}\right)^2}$$

由发射电流表达式可知, 发射电流为峰值沿包络线 $y = v_{\text{res}} e^{-\delta t} / (\omega L_{\text{coil}})$ 衰减的正弦波形, 由于当晶闸管流过电流为0时, 晶闸管会自动关断, 所以第1个半正弦波即为发射电流, 发射电流峰值在 $\omega t = \pi/2$ 时取得, 发射电流峰值表达式为

$$y = \frac{v_{\text{res}}}{\omega L_{\text{coil}}} e^{-\delta \frac{\pi}{2\omega}} \quad (6)$$

工作模式2 ($t_2 < t \leq t_3$): 当发射半正弦波电流为0时, 晶闸管 T_1 和 T_4 自动关断, 发射电路停止工作, 由于发射电路存在内阻 ($R_{\text{res}} + R_{\text{coil}}$), 所以在发射过程中会有一部分电能转化为热能, 产生电能损失, 电能损失表达式如下式:

$$W = \int_{t_0}^{t_2} \frac{v_{\text{res}}}{\omega L_{\text{coil}}} e^{-\delta t} \sin(\omega t) dt \quad (7)$$

此时需要对谐振电容充电, 以满足负半周期电流的发射要求。前级储能电容通过充电电路为谐振电容充电, 当满足发射要求时停止充电, 充电回路如图5所示。

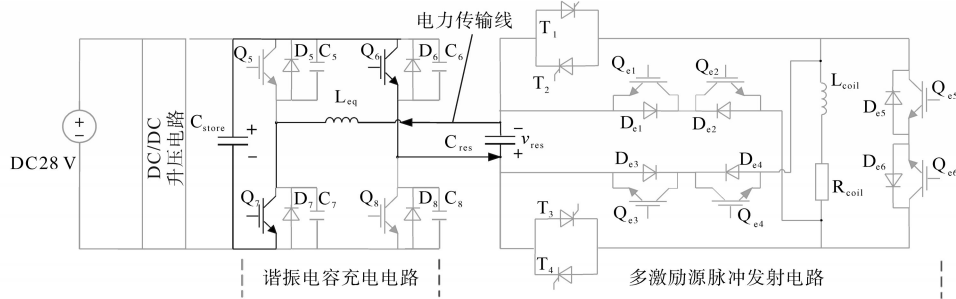


图5 电路工作模式2

Fig.5 Circuit operating mode 2

工作模式3 ($t_3 < t \leq t_4$): 在 t_3 时刻, 谐振电容充电电压已达到发射要求, 此时进行梯形波电流的发射, 梯形波电流的发射分为3个阶段: 上升沿阶段、续流阶段和下降沿阶段。上升沿阶段的电流回路如图6所示。

由于经过发射线圈馈能后, 谐振电容的极性发生了变化, 此时不可以直接使谐振电容在发射线圈上放电, 否则发射波形极性会相反。需要经过由 Q_{e1} 到 Q_{e4} 组成的换向回路, 使谐振电容对发

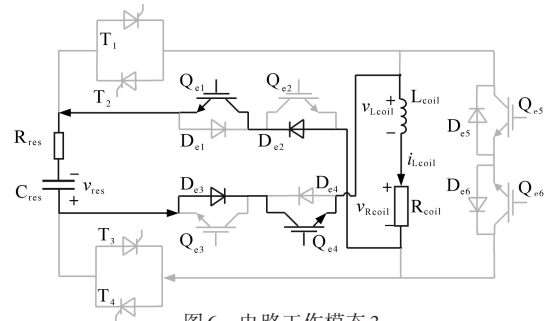


图6 电路工作模式3

Fig.6 Circuit operating mode 3

射线圈反向放电,以保证发射梯形波极性的正确。由模式1可知,发射电流的表达式为

$$i_{\text{coil}} = \frac{v_{\text{res}}}{\omega L_{\text{coil}}} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (8)$$

该梯形波上升沿即为正弦波上升波形的一部分,由于半正弦周期为4 ms,梯形波上升沿为0.1 ms,远低于半正弦周期,可以近似认为梯形波上升沿是线性的。当 $t = 0.1 \text{ ms}$ 时,达到梯形波峰值,峰值表达式为

$$i_{\text{coil}} = \frac{v_{\text{res}}}{\omega L_{\text{coil}}} \sqrt{\frac{1}{L_{\text{coil}} C_{\text{res}} - \left(\frac{R_{\text{res}} + R_{\text{coil}}}{2L_{\text{coil}}}\right)^2}} e^{-\delta \frac{R_{\text{res}} + R_{\text{coil}}}{2\omega L_{\text{coil}}}} \quad (9)$$

工作模式4($t_4 < t \leq t_5$):根据发射要求,当梯形波达到峰值后,需要维持峰值电流1 ms,在 t_4 时刻,关闭IGBT管 Q_{e1} 和 Q_{e4} ,开通IGBT管 Q_{e6} ,此时线圈内电流经 Q_{e6} 和 D_{e5} 形成闭合回路,由于发射线圈内阻和IGBT导通电阻很低,所以发射电流近似维持不变,此时电流回路如图7所示。

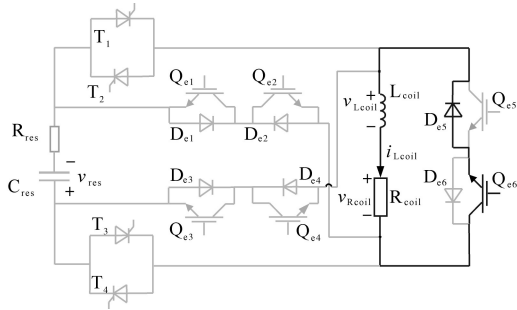


图7 电路工作模式4

Fig.7 Circuit operating mode 4

工作模式5($t_5 < t \leq t_6$):在 t_5 时刻,关闭IGBT管 Q_{e6} ,开通晶闸管 T_1 和 T_4 ,发射线圈电流经 T_1 和 T_4 向谐振电容进行馈能,当线圈电流降为0时,电流回路自然关断,等待负半周期发射波形的发射,发射回路如图8所示。

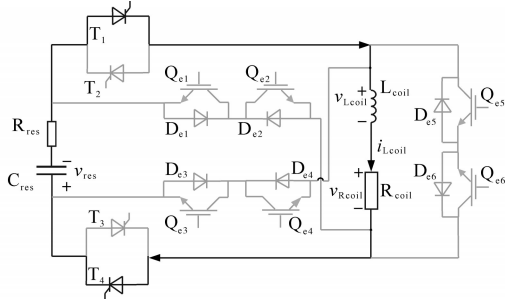


图8 电路工作模式5

Fig.8 Circuit operating mode 5

由于发射负半周期电流时电路工作模式与正半周期相似,电流极性相反,在此便不再赘述。

3 多激励源脉冲发射电路仿真验证

为了验证本文提出的多激励源脉冲发射电路的有效性,在软件Simulink中搭建了发射机的DC/DC升压电路、谐振电容充电电路、多激励源脉冲发射电路等进行仿真验证。仿真电路的主要元件参数如下:输入电压 $V_{\text{in}} = 28 \text{ V}$,输入电流 $I_{\text{in}} = 100 \text{ A}$,储能电容 $C_{\text{store}} = 20 \text{ mF}$,谐振电容 $C_{\text{res}} = 2 \text{ mF}$,发射线圈电感 $L_{\text{coil}} = 800 \mu\text{H}$,发射线圈内阻 $R_{\text{coil}} = 28 \text{ m}\Omega$,发射基频 $f_{\text{base}} = 25 \text{ Hz}$,半正弦波电流峰值 $I_{\text{peak}} = 800 \text{ A}$,梯形波电流峰值 $I_{\text{trap}} = 70 \text{ A}$ 。图9为发射线圈电流仿真波形,发射半正弦波最大电流峰值为800 A,发射梯形波最大电流峰值为70 A,发射电流峰值和时序与设计要求的吻合。图10为谐振电容电压仿真波形,谐振电容电压最大为570 V,在每次发射完成后电压值降为500 V,通过谐振电容充电电路将电压充到570 V,进行下一次发射。

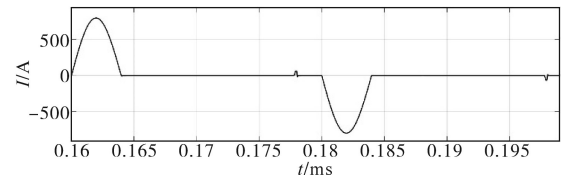


图9 发射电流仿真图

Fig.9 Emission current simulation diagram

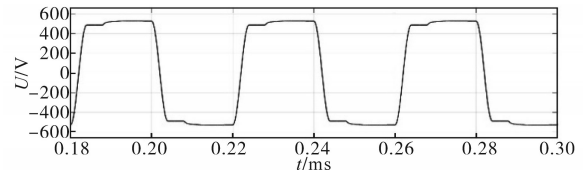


图10 谐振电容电压仿真图

Fig.10 Resonant capacitor voltage simulation diagram

4 实验验证

为了验证本文提出的电路拓扑,搭建了直升机瞬变电磁发射机电路,采用TI公司数字信号处理芯片DSP TMS320F28335作为主控制器,产生精准的触发脉冲,经驱动电路驱动晶闸管和IGBT,控制功率电路的电能转换。图11为搭建的原理样机电路。

图12所示为示波器原理样机的发射电流正半周期波形,半正弦波峰值电流800 A,半波周期为4 ms,梯形波峰值电流66 A,半波周期为1.2 ms,发射电流值和时序均满足发射要求。

图13中,通道2为谐振电容的电压波形,通道3为谐振电容充电电流波形,通道4为前级母

线电压。谐振电压初始电压值约为570 V,每次电流发射后电压值降为500 V左右,随后经谐振电容充电电路充电,达到570 V后,进行下一次波形的发射。

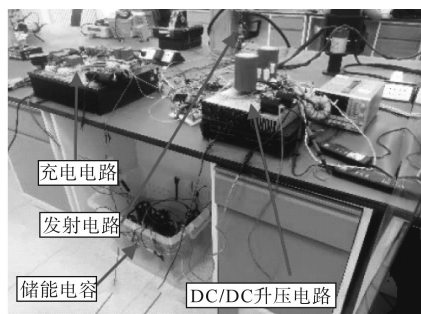


图11 原理样机电路

Fig.11 Principle prototype circuit

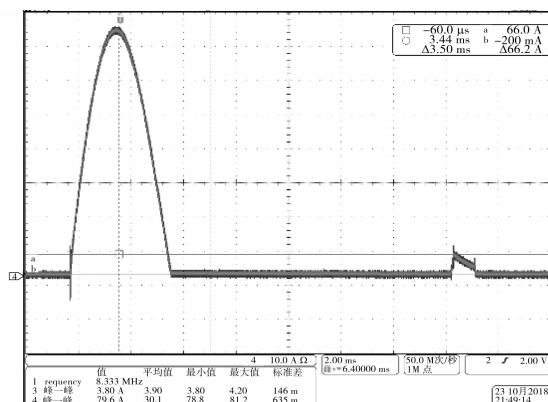


图12 发射电流波形

Fig.12 Emission current waveform

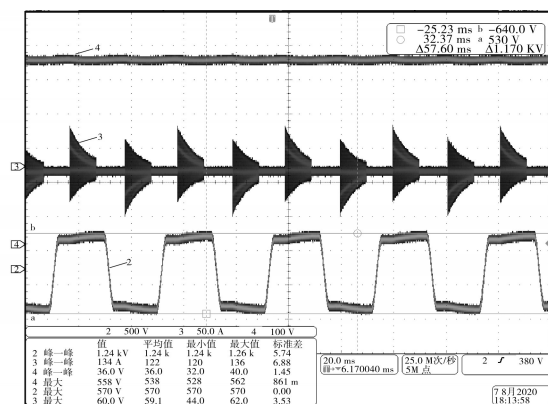


图13 谐振电容电压、充电电流波形

Fig.13 Waveforms of resonant capacitor voltage and charging current

5 结论

本文针对直升机瞬变电磁发射机的电磁脉冲发射需求,提出了一种新型的多激励源脉冲发射电路,将直升机搭载的28 V稳压直流电源通过

DC/DC升压电路、滤波电路、谐振电容充电电路以及多激励源脉冲发射电路进行电能转换,调制生成基频为25 Hz,由半正弦波和梯形波组成的组合脉冲发射电路,同时满足了直升机瞬变电磁探测系统针对深部资源和浅部资源的发射电流脉冲要求。

本文对该电路进行了详细的模态分析,通过仿真验证了该电路拓扑的有效性,并给出了关键元件参数,最后搭建了原理样机电路,通过实验波形验证电路的功能。

参考文献

- [1] 赵越,许枫,李貅. 时间域航空电磁系统回顾及其应用前景[J]. 地球物理学进展,2017,32(6):2709-2716.
Zhao Yue, Xu Feng, Li Xiu. Review on time-domain AEM system and applied potential[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2709-2716.
- [2] 殷长春,张博,刘云鹤,等. 航空电磁勘查技术发展现状及展望[J]. 地球物理学报,2015,58(8):2637-2653.
Yin Changchun, Zhang Bo, Liu Yunhe, et al. Review on airborne EM technology and developments[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2637-2653.
- [3] 韩雪,殷长春,任秀艳,等. 时间域航空电磁系统探测深度研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2019,49(5):1448-1456.
Han Xue, Yin Changchun, Ren Xiuyan, et al. Research on exploration depth of time-domain airborne EM system[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(5): 1448-1456.
- [4] Zhu Kaiguang, Zhang Qiong, Peng Cong, et al. Airborne electromagnetic data levelling based on inequality-constrained polynomial fitting[J]. Exploration Geophysics, 2020, 51(5): 79-81.
- [5] Kellett R. A geophysical facies description of quaternary channels in northern Alberta[J]. CSEG Recorder, 2007, 32(10): 49-55.
- [6] 应鸿,游锋,林琳,等. 高频隔离型B-PSFB变换器模块优化设计[J]. 电气传动,2020,50(9):60-65.
Ying Hong, You Feng, Lin Lin, et al. High-frequency isolated bidirectional PSFB (B-PSFB) converter optimal design[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 60-65.
- [7] 白敬彩,王国柱,范峥,等. 适应宽电压输入的两级式DC/DC变换器[J]. 电气传动,2020,50(7):42-46.
Bai Jingcai, Wang Guozhu, Fan Zheng, et al. Two-stage DC/DC converter with wide voltage input[J]. Electric Drive, 2020, 50(7): 42-46.

收稿日期:2021-01-09

修改稿日期:2021-02-21