文章编号:1001-5078(2020)10-1228-05　　·光电技术与系统·

新型便携式多模态无损检测热激励源的设计

赵柳权[1],武　丽[1],朱玉玉[1,2]
(1. 西南科技大学信息工程学院,四川 绵阳 621010;2. 电子科技大学自动化工程学院,四川 成都 610054)

摘　要:随着红外热成像技术在无损检测领域广泛应用,作为其应用研究基础之一的热激励技术受到广泛关注。针对传统大功率热激励设备工作模式单一、体积过大、不便于携带的缺点,对传统热激励源进行设计改造,设计开发了一种新型便携式多模态无损检测热激励源,能够实现锁相模式、锁相多频模式和脉冲模式三种激励模式,并且模式参数可调。该热激励源采用 24 V 锂电池供电方式,输出功率达到 1000 W,具有操作灵活、便于携带、多模态等特点,满足红外热成像无损检测需求。

关键词:红外热成像;无损检测;热激励;多模态
中图分类号:TN219　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.10.013

The design of a new portable multi-mode nondestructive testing thermal excitation source

ZHAO Liu-quan[1], WU Li[1], ZHU Yu-yu[1,2]
(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: With the extensive application of infrared thermography in the field of nondestructive testing, the thermal excitation technology, as one of the basis of its application research, has attracted extensive attention. In view of the disadvantages of the traditional high-power thermal excitation equipment, such as single working mode, large volume and not easy to carry, the traditional thermal excitation source is designed and reformed, and a new portable multi-mode non-destructive testing thermal excitation source is designed and developed, which can realize three excitation modules: lock-in module, lock-in multi-frequency module and pulse module, and module parameters can be adjusted. The thermal excitation source is powered by 24 V lithium battery with the output power up to 1000 W. It has the characteristics of flexible operation, easy to carry and multi-mode, which can meet the requirements of non-destructive testing of infrared thermography.

Keywords: infrared thermography; non-destructive testing; excitation source; multi-mode

1　引　言

主动式红外热成像检测技术是一门融合多学科、多种应用技术的实用型工程技术,在无损检测领域得到广泛应用,该技术具有检测精度高、检测速度快及非接触等优点。该技术是采用主动控制的热激励方式,激励热源对检测试件加热,然后通过热像仪检测分析试件的热学信息变化。作为红外热成像检测技术的主要组成部分,热激励技术的研究对红外

作者简介:赵柳权(1995 -),男,硕士研究生,主要研究方向为控制系统集成,电力电子技术。E-mail: zlqspurs@foxmail.com
收稿日期:2019-12-02

热成像检测效果有着直接影响[1-5]。

目前,在热激励技术应用方面,国外多采用信号发生器和功率放大器组合对卤素灯进行激励,但功率放大器体积大、效率低;国内对红外热成像技术的各方面研究起步晚,陶胜杰等研制了一种基于市电电压数字功率控制的锁相激励源,激励源核心组成仍是功率放大器[6];刘俊岩等采用了线性调频热激励方式应用在红外热波成像检测[7]。韦浩等设计了基于 FPGA 的闪光灯激励源,但体积过大且电压要满足 200 V 以上的要求,仅适用于大型闪光灯,不便于携带[8]。

本文针对激励设备体积大、不易携带和工作模式单一等问题,在文献[8]的基础上,设计改造一种以 TMS320F28335 数字控制器为核心,使用容量为 60 Ah 的 24 V 锂电池组供电的新型便携式多模态无损检测热激励源,该激励源输出功率可达 1000 W 左右,功率密度大,且具有三种激励模式,如锁相激励、锁相多频激励和脉冲模式,模式切换电路中使用半导体器件替代单刀双掷开关或继电器,有效减小设备体积,集成度高,便于携带。

2　系统方案总体设计

如图 1 所示,红外热成像激励电源系统主要由功率电路、DSP 控制电路、辅助电源三部分组成。功率电路部分主要包括半桥电路、全桥电路以及模式切换电路等部分,该部分是激励卤素灯负载多模式工作的核心部分;DSP 控制电路部分主要由 TMS320F28335 芯片及其外围电路组成,主要实现对半桥电路和全桥电路的驱动控制和保护功能控制以及产生激励电源的模式切换信号;辅助电源部分主要对各个部分芯片提供正常供电。

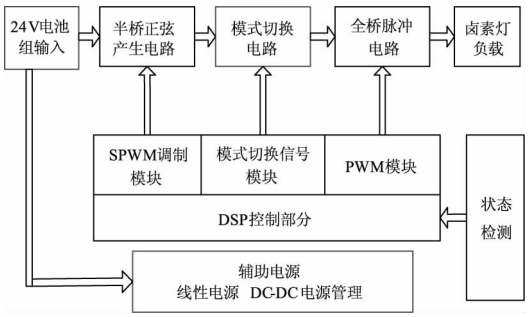

图 1　激励源系统框图

Fig. 1 Block diagram of excitation system

3　激励电源系统硬件设计

3.1　功率电路拓扑组成

功率电路部分主要包括半桥电路拓扑、全桥电路拓扑、模式切换电路。其主电路拓扑图如图 2 所示,V_{DC}是激励电源系统直流输入电压,采用 24 V 电池组产生,前级由输入电容 C_1、开关管 $Q_1 \sim Q_2$ 和输出 LC 滤波器组成半桥低频正弦产生电路,中间级由开关管 $Q_3 \sim Q_4$ 构成模式切换电路,后级由滤波电容 C_2 和开关管 $Q_5 \sim Q_8$ 组成全桥脉冲电路。

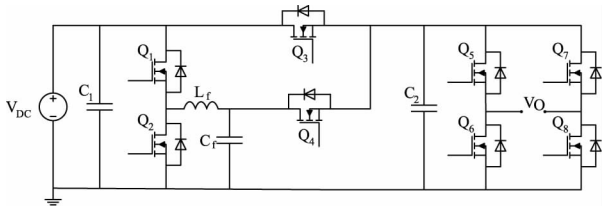

图 2　功率主电路拓扑图

Fig. 2 Power main circuit topology

3.2　激励源电路工作原理分析

半桥电路部分采用了正弦脉宽调制(SPWM)技术对开关管 $Q_1 \sim Q_2$ 进行驱动控制。为简化分析,取 t 时刻驱动半桥的 PWM 占空比为 $D(t)$,半桥电路工作过程如下:开关周期为 T_S,在一个开关周期内根据开关管的状态可分为 T_{ON} 和 T_{OFF} 两个阶段。当处于 T_{ON} 阶段,开关管 Q_1 为导通状态,开关管 Q_2 为关断状态,电感电流处于上升阶段,电感处于蓄能状态;当处于 T_{OFF} 阶段,开关管 Q_1 为关断状态,开关管 Q_2 为导通状态,电感电流会通过开关管 Q_2 续流,继续为电容和负载释放能量,电感电流处于衰减阶段。

为保证半桥电路工作在连续导电模式,一般需要考虑滤波电感 L_f 和滤波电容 C_f 的取值。电感 L_f 的取值和电感纹波电流的最大值有关。电感的具体分析计算如下:

电感两端电压为:

$$W_{L_f} = L_f \frac{di}{dt} \tag{1}$$

对于半桥电路,公式(1)可以等效写成如下表达式:

$$(V_{DC} - V_M) = L_f \frac{\Delta i_{pp}}{DT_s} \tag{2}$$

SPWM 每个开关周期为 T_S,假设正弦波的调制系数为 M,则驱动半桥电路的占空比为:

$$D(t) = M\sin(wt) \tag{3}$$

半桥电路输出电压与对应时刻的占空比有关，其计算值为：

$$V_M = V_{DC} \times D(t) \tag{4}$$

综合公式(1)~(4)，整理得出：

$$\Delta i_{pp} = \frac{V_{DC} \times T_s \times M\sin(wt)(1 - M\sin(wt))}{L_f} \tag{5}$$

对公式(5)进行一阶求导，并令导数为零，最后得出：

$$\sin(wt) = \frac{1}{2M} \tag{6}$$

给定最大调制系数 $M = 1$，将式(6)代入公式(5)，求得电感纹波电流最大值为：

$$\Delta i_{pp}|\max = \frac{V_{DC} \times T_s}{4Li_f} \tag{7}$$

假定电感纹波电流最大值为输出电流的 20 %，驱动半桥电路的 SPWM 周期为 20 μs，直流输入电压为 24 V，输出电流 40 A 左右，则所需滤波电感 L_f 最小值为 15 μH。考虑工程应用因素，选择滤波电感 L_f 的感值为 47 μH，根据 LC 滤波器的截止频率得到滤波电容的容值为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \tag{8}$$

截止频率设定为 2200 Hz，根据公式(8)得到电容容值为 110 μF。工程上滤波电容采用多层瓷片电容，滤波效果好。

中间级模式切换电路是对激励源工作模式进行控制，激励源工作模式包括锁相模式、锁相多频模式和脉冲模式，当 Q_3 导通，Q_4 关断时，激励源工作在脉冲模式，当 Q_3 关断，Q_4 导通时，激励源工作在锁相模式，锁相多频模式是锁相模式的扩展，在锁相模式的基础上，可以设置模式参数来实现。

后级全桥脉冲电路本质是方波逆变电路，开关管 Q_5 ~ Q_8 由周期为 20 μs，占空比为 50 % 的方波驱动控制，从而产生幅值正负交替的方波。

3.3 模式切换电路设计

如图 3 所示，中间级由开关管 Q_3 ~ Q_4 并联构成模式切换电路，开关管 Q_3 ~ Q_4 的漏极分别连接输入 24 V 和半桥低频正弦输出，通过控制开关管 Q_3 ~ Q_4 的开关状态，从而实现模式的切换功能。

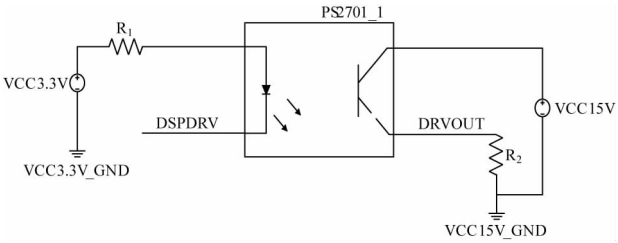

图 3 光耦驱动电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of optocoupler drive circuit

控制器 TMS320F28335 输出的模式切换信号功率很小，无法直接控制开关 MOS 管，因此必须设计外围驱动电路实现对开关 MOS 管的控制。本文采用 PS2701 系列的光耦芯片，设计了光耦驱动电路，如图 3 所示，DSPDRV 信号由控制器 TMS320F28335 产生，DRVOUT 为输出信号，驱动原理为：当 DSPDRV 信号为低电平时，经过光耦 PS2701 后，输出信号 DRVOUT 为高电平，则 MOSFET 导通，反之，则 MOSFET 关断，此设计实现控制信号的光电隔离，保证系统的安全可靠运行。

4 激励源系统软件设计

激励源控制系统软件部分主要有串口通信、SPWM 生成、模式切换信号和 PWM 信号等模块组成，主要功能包括实现上位机和下位机的串口通信、激励源工作模式的选择、输出参数的设置和状态检测保护等功能，激励源控制系统程序流程图如图 4 所示。

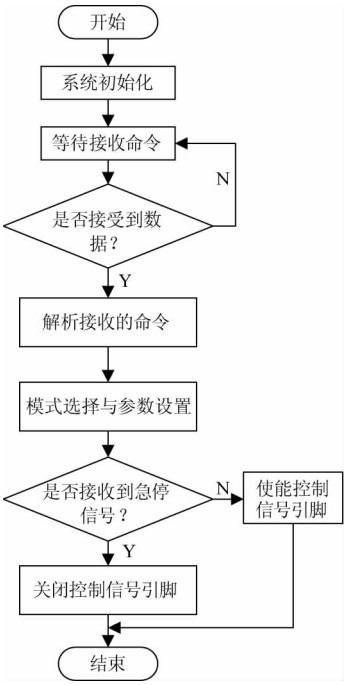

图 4 控制系统程序流程图

Fig. 4 Control system program flow chart

5　系统测试结果与分析

按照图 1 所示系统框图搭建激励源实物，负载为六个额定功率为 150 W 的德国欧司朗卤素灯，整个实验平台如图 5 所示。图 6 中的手持式检测设备包括卤素灯阵列，中心为红外热像仪，示意图如图 6 所示。图 5 中的热激源系统为本文设计研发的实物形式，其外形尺寸为 32 cm × 15 cm × 12 cm，与传统热激励设备相比体积大大缩小，而且整个实验平台重量仅为 10 kg 左右，满足便于携带的要求。

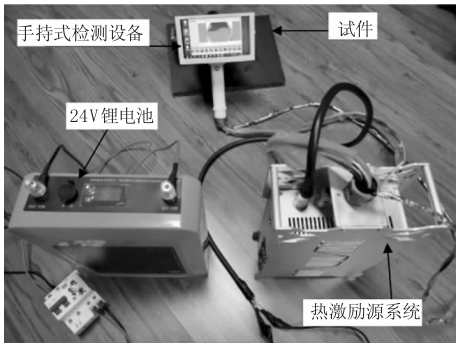

图 5　实验平台

Fig. 5 Experimental platform

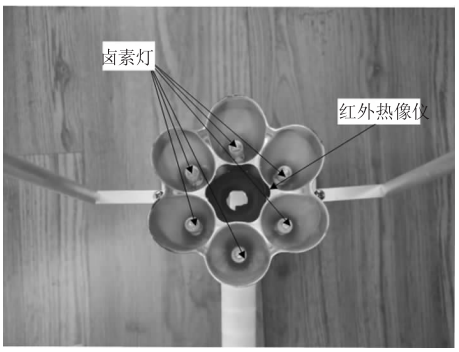

图 6　手持式检测设备示意图

Fig. 6 Schematic diagram of handheld testing equipment

在锂电池电压为 25.2 V 的测试条件下，对热激励源的锁相多频模式和脉冲模式进行实验，利用实验室示波器对系统的输出电压波形捕获，图 7 为锁相多频模式下，设置输出频率为 0.1 Hz、0.2 Hz 和 0.4 Hz 的电压波形，纵向栅格为 10 V/格，可以看出无明显畸变，图 8 为脉冲模式下，设置加热时间为 2 s，冷却时间为 1 s，波形显示无明显过电压振荡，处于系统安全电压 36 V 以下。

热激励源工作在脉冲模式下，对碳钎维复合材料试件进行热激励，复合材料试件的人为缺陷位置示意图如图 9 所示，缺陷深度为 1 mm，使用主成分分析法对检测的图像进行处理，图像处理结果如图 10 所示，由于 5 号缺陷和 10 号缺陷直径偏小，5 号缺陷未能检测到，10 号缺陷检测效果也不明显，但是整体有效检测正确率达到 90 %。

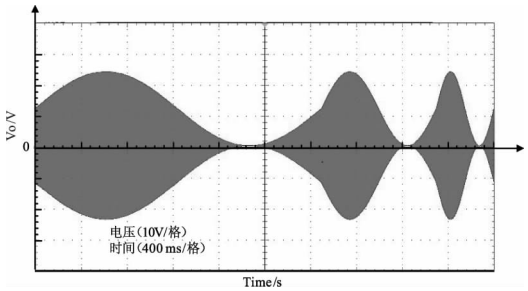

图 7　锁相多频模式输出电压波形

Fig. 7 Lock-in multi-frequency module output voltage waveform

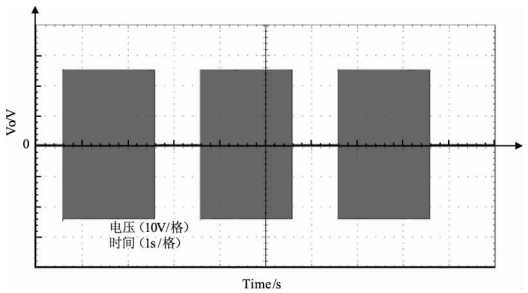

图 8　脉冲模式输出电压波形

Fig. 8 Pulse module output voltage waveform

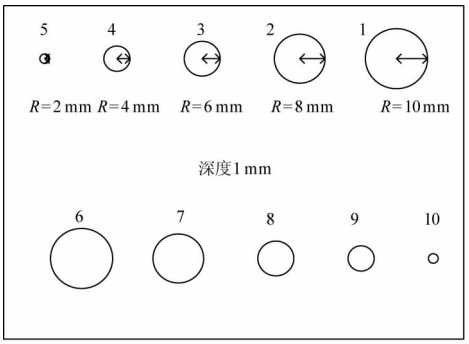

图 9　试件缺陷位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of specimen defect location

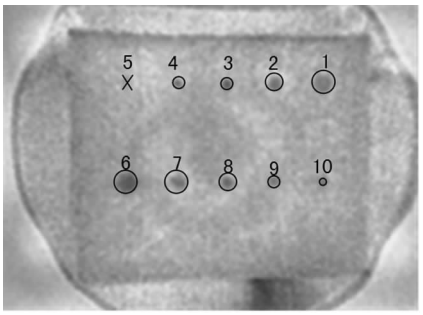

图 10　试件检测图像处理结果图

Fig. 10 Test specimen image processing results

6 结 论

本文结合电力电子技术,设计了一种以 TMS320F28335 为核心的新型便携式多模态无损检测热激励源,该激励源利用 MOSFET 电路实现 1000 W 功率输出和多模式切换,具有体积小、易携带、操作灵活、功率密度高等特点,解决了传统热激励设备的工作模式单一和体积过大问题,满足了红外热成像无损检测领域的现场定点检测需求和小型试件检测需求,提高了诊断效率。

参考文献:

[1] Zheng Kai, Jiang Haijun, Chen Li. Infrared thermography NDT and its development[J]. Infrared Technology, 2018, 40(5): 401 – 411. (in Chinese)
郑凯,江海军,陈力. 红外热波无损检测技术的研究现状与进展[J]. 红外技术,2018,40(5):401 – 411.

[2] Jiang Haijun, Chen Li. Infrared flash thermography nondestructive testing and its development[J]. Infrared Technology. 2018, 40(10): 946 – 951, 965. (in Chinese)
江海军,陈力. 脉冲红外无损检测技术研究现状与发展趋势[J]. 红外技术,2018,40(10):946 – 951,965.

[3] Feng Lichun, Tao Ning, Xu Chuan. Lock-in thermography and its application in nondestructive evaluation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1120 – 1123. (in Chinese)
冯立春,陶宁,徐川. 锁相热像技术及其在无损检测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1120 – 1123.

[4] Mo Zhaoxia, Chen Yuanjiang. Research and prospects of the domestic infrared thermography technology. [J]. Laser & Infrared. 2014, 44(12): 1300 – 1305. (in Chinese)
莫朝霞,陈沅江. 我国红外热像检测技术的研究及发展展望[J]. 激光与红外,2014,44(12):1300 – 1305.

[5] Chen Fei, Jiang Haijun, Chen Li. Lock-in thermography base on optical chopper[J]. Non-destructive Testing, 2018, 40(5): 68 – 71, 75. (in Chinese)
陈飞,江海军,陈力. 基于光学斩波的锁相热波成像技术[J]. 无损检测,2018,40(5):68 – 71,75.

[6] Tao Shengjie, Yang Zhengwei, Tian Gan, et al. Infrared lock-in excitation technology base on digital power control [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2057 – 2063. (in Chinese)
陶胜杰,杨正伟,田干,等. 基于数字功率控制的红外锁相激励技术[J]. 红外与激光工程,2015,44(7):2057 – 2063.

[7] Liu Junyan, Liu Xun, Wang Yang. Technology of linear frequency modulation infrared thermal-wave imaging for nondestructive testing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1416 – 1422. (in Chinese)
刘俊岩,刘勋,王扬. 线性调频激励的红外热波成像检测技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1416 – 1422.

[8] Wei Hao, Wu Li, Zhu Yuyu. The excitation source for the infrared thermography based on FPGA[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 1300 – 1305. (in Chinese)
韦浩,武丽,朱玉玉. 基于 FPGA 的红外热成像闪光灯激励电源[J]. 激光与红外,2019,49(6):731 – 736.