

20 kHz 脉冲偏压控制系统设计*

王 壮¹, 许海鹰¹, 桑兴华¹, 杨 波¹, 张 伟²

(1. 中国航空制造技术研究院 高能束流发生器实验室, 北京 100024;

2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 为提高电子束熔丝增材的成形质量, 基于偏压调节束流的原理, 开发了一种 20 kHz 脉冲偏压控制系统。通过对其工作环境深入分析, 选取高速 DSP 数字处理芯片实现脉冲束流基值、峰值向偏压基值、峰值的转化, 根据输入脉冲频率、占空比, 可以调节脉冲束流的输出; 并通过 PWM 发生芯片, 输出 100 kHz 以上的基波, 由 DSP 输出脉冲合成的模式, 再经由大功率运放、基值、峰值串联整流电路可以获得脉冲偏压输出, 继而实现对脉冲束流输出的调控, 从而获得一熔滴一脉冲的熔丝成形效果。

关键词: 熔丝增材制造; 偏压电源; 脉冲束流

中图分类号: TN78; TG439.9

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201274

中文引用格式: 王壮, 许海鹰, 桑兴华, 等. 20 kHz 脉冲偏压控制系统设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 96-100, 110.

英文引用格式: Wang Zhuang, Xu Haiying, Sang Xinghua, et al. The design of 20 kHz pulse bias voltage control system[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 96-100, 110.

The design of 20 kHz pulse bias voltage control system

Wang Zhuang¹, Xu Haiying¹, Sang Xinghua¹, Yang Bo¹, Zhang Wei²

(1. Science and Technology on Power Beam Generator Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to improve the molding quality of the electron beam fuse additive, a 20 kHz pulsed bias voltage control system was developed based on the principle of the bias voltage to adjust the beam current. Through in-depth analysis of its working environment, it selects high-speed DSP digital processing chip to realize the conversion of pulse beam base value, peak value to bias voltage base value and peak value. According to the input pulse frequency and duty cycle, the pulse beam output can be adjusted; and through the PWM generator chip, the fundamental wave above 100 kHz is output, and the DSP outputs the pulse synthesis mode, and then through the high-power operational amplifier, the base value, and the peak value series rectifier circuit, the pulse bias output can be obtained, and then the pulse beam output is regulated, so as to achieve a drop-by-pulse control mode.

Key words: fuse additive manufacturing; bias voltage power supply; pulse beam current

0 引言

电子束熔丝增材制造技术是最近几十年发展起来的三维一体化制造技术, 以高能量密度的电子束为热源, 在真空环境下将金属丝材同步传送入熔池熔化, 按照规划的加工路径逐层沉积^[1-3]。该加工工艺过程简单、功率大、材料利用率高、制造周期短, 且在真空环境中进行, 对金属保护作用优良, 能实现大型复杂零件的“近净”成形, 特别适合航空航天领域钛合金复杂部件的制造^[4-5]。

脉冲电子束最早用于高能电磁波辐射实验工作, 20 世纪 80 年代后在工业中应用于改善表面质量和焊接^[6-10]。目前, 脉冲电子束技术已经在焊接领域得到初步应用, 脉冲电子束可以减少热输入, 减小变形^[11-15], 将脉冲电

子束应用于电子束熔丝增材制造领域, 实现一熔滴一脉冲的控制模式, 将能显著提高成形质量, 改善工件性能。由于束流调节是通过调节偏压来实现, 因此将偏压设计成脉冲输出模式, 可以根据工作要求获得脉冲束流。本文设计了 20 kHz 脉冲偏压控制系统, 通过选择高速 DSP 数字处理芯片、高速运放对脉冲偏压系统进行硬件和软件设计, 通过时序控制电路, 调节其 PWM 波形, 实现对偏压电源脉冲频率、幅值、占空比的调节。

1 脉冲偏压控制系统设计

1.1 脉冲偏压设计原理

脉冲偏压设计原理图如图 1 所示。图中 I_{pg} 为峰值束流给定, I_{bg} 为基值束流给定, T_1 为脉冲束流周期, t_1 为峰值束流作用时间, t_2 为基值束流作用时间, 在 T_1 周期内, t_1 峰值束流作用时间内, 峰值束流值等于 I_{pg} 与 I_{bg} 的和;

* 基金项目: 军工双百工艺攻关(JCKY2018205B027); 广东省重点领域研发计划项目资助(2018B090904004)

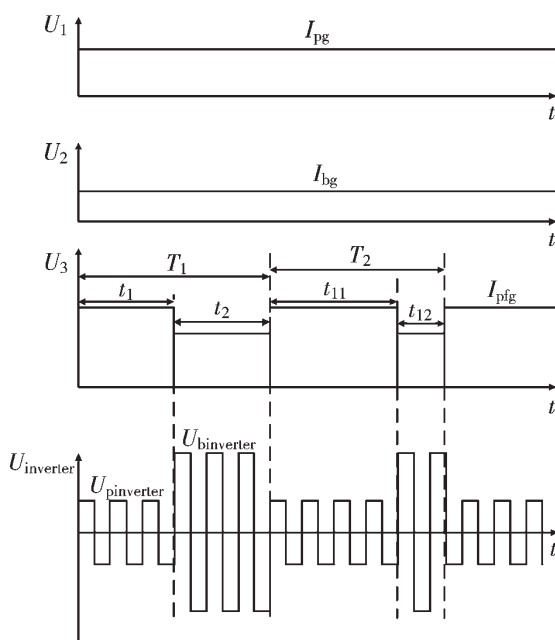


图1 脉冲偏压设计原理图

在 t_2 基值束流作用时间内,基值束流为 I_{bg} 。 T_2 为脉冲束流的其他周期, t_{11} 、 t_{12} 分别为峰值束流、基值束流的作用时间。

由于脉冲束流大小与偏压输出成反比,反映到偏压变压器的输入,在 T_1 周期内, t_1 峰值束流作用时间内,其偏压逆变输入为 $U_{pinverter}$;在 T_1 周期内, t_2 基值束流作用时间内,其偏压逆变输入为 $U_{binverter}$ 。 $U_{binverter}$ 的幅值大于 $U_{pinverter}$ 幅值电压。

设计思路: U_{pg} 、 U_{bg} 、峰值脉冲频率、占空比由 DSP 确

定,逆变 PWM 由 SG3525A 给定,PWM 频率大于 100 kHz,峰值脉冲束流频率、占空比通过在 100 kHz 载波上叠加获得,基值逆变频率为 100 kHz,逆变功率器件采用 PB50。

脉冲频率 0~20 kHz,在 DSP 中进行设定;峰值束流与基值束流可以在 DSP 中计算出对应的偏压电压值,再输出与 SG3525A 输出的 100 kHz 载波进行合成。20 kHz 脉冲偏压控制系统的框图如图 2 所示。

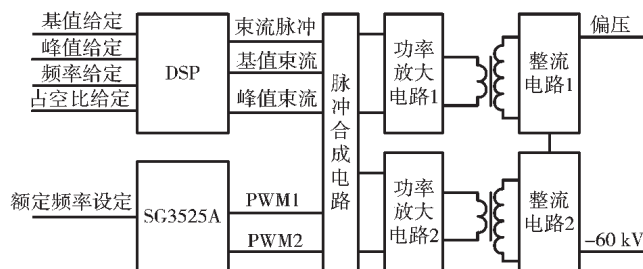


图2 20 kHz 脉冲偏压控制系统的框图

1.2 DSP 的选型及接口设计

选择 DSPic30F4012 作为主控 DSP 芯片,是一种高性能 16 位数字信号控制器,工作电压 2.5~5.5 V,C 编译器优化的指令集,16 位宽数据总线,24 位宽指令,16 个 16 位通用寄存器,最多 54 个可编程数字 I/O 引脚,最多 45 个外部中断源,5 个外部中断,7 个可编程优先级。设计 DSPic30F4012 管脚接线图如图 3 所示。

1.3 PWM 芯片的选型及设计

选择 SG3525A 作为 PWM 发生芯片,SG3525A 通过内部振荡器产生锯齿波电压作为载波信号,反馈电压和参考电压通过内部的误差放大器比较并输出误差电压,

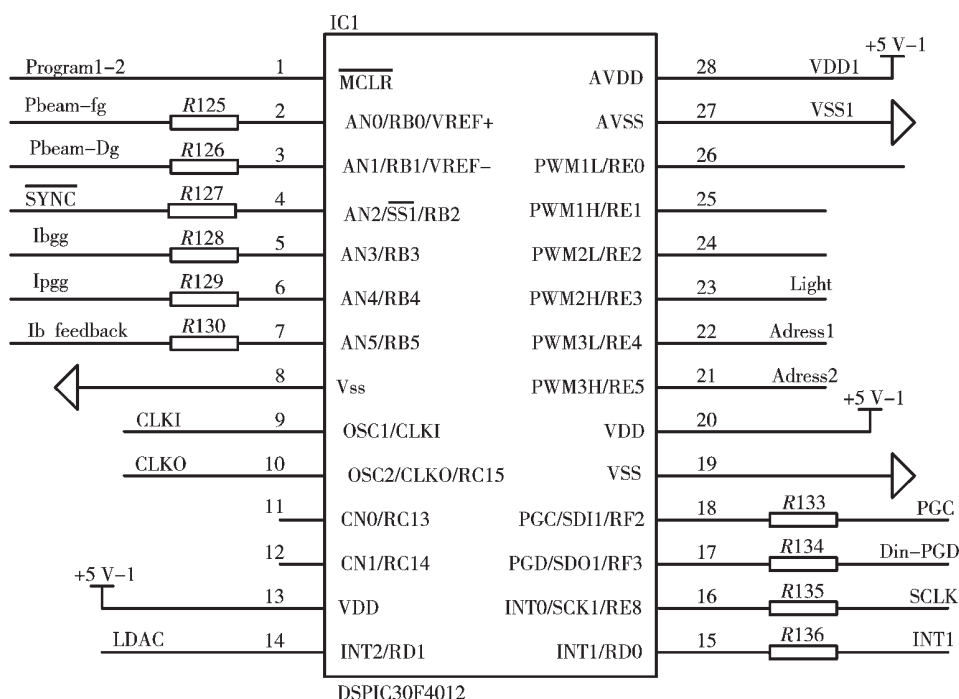


图3 DSP 的管脚接线图

此误差电压作为调制信号,载波信号和调制信号叠加用于确定脉宽调制波的占空比。反馈电压越高,输出脉冲的占空比越小,反之则越大。当交流输入电压波动或负载变化引起输出电压变化时,由于系统的负反馈作用,PWM 输出脉冲宽度自动调整,从而实现稳压。SG3525 内部的基准源为 5.11 V,将脚 16 输出的基准电压经分压后加至同相输入端脚 2,将电压反馈信号加至反相输入端脚 1,通过调整 R_8 的大小可以设定死区时间的宽度, R_8 越大死区越宽。根据系统的动、静态要求,可在脚 9 与脚 1 之间接入适当的补偿网络。由于电路刚启动时输出电压还未建立,此时内部误差比较器输出电压高,PWM 信号脉宽很大,输出电压被抬高,在脚 8 软启动脚外接电容 C_5 ,在上电的初始阶段,通过电容充电使占空比由零逐渐增大,实现软启动功能,避免了输出电压在启动初期的过调制现象。在脚 10 可加故障保护信号,一旦输出电流传感器的电流取样电压高于设定电压时,会立即封锁输出脉冲信号。当外部封锁信号撤去后,SG3525 也要经过一次软启动过程才能重新开始工作。

所设计的 SG3525A 的外围电路如图 4 所示。图中 PWM 频率的计算可以通过式(1)求得:

$$f = \frac{1}{(0.7R_1 + 3R_D)} \quad (1)$$

SG3525A 的第二脚+V 给定的电压为参考电压 5.1 V,第一脚-V 输入为 2.5 V,要求 PWM 以最大占空比输出,在第 11 脚、第 14 脚输出一组与设定频率相同的相位互补的 PWM 波形。

1.4 逆变功率器件的选型及设计

采用频率不变、幅值可调的电路实现逆变变压器原边电压可调,要求逆变功率器件不仅能够高频变化,而且电压可以线性调节。

选择 PB50 作为逆变功率器件,其金属壳外观封装,

方便整体安装在散热器上,有助于长期工作于大功率输出场合。PB50 的工作电压为 $\pm 30 \text{ V} \sim \pm 100 \text{ V}$,可以获得连续 2 A 的直流电流输出,具有电压和电流增益,高电压变化率,可以达到 $50 \text{ V}/\mu\text{s}$,电流输出限流可以编程,工作频率可以达到 160 kHz,电流精度可以达到 12 mA。基于 PB50 的逆变电路如图 5 所示。

1.5 偏压整流电路设计及器件选型

设计的偏压直流最大达到 2 000 V,变压器变比 1:45,变比匝数增加,是为了防止变压器漏感造成的带载能力下降。所设计的整流电路如图 6 所示。

整流二极管选用 10 000 V/0.5 A 的高速二极管,为了保护整流电路,在输出端串联几个功率电阻限流,如图中 R_3 、 R_4 、 R_5 所示。在偏压输出端和 -60 kV 之间并联 2 只串联的 1 000 V 压敏电阻,防止放电的过压尖峰;输出端并联的二极管 D3 与整流二极管同型号,是为了抑制灯丝和偏压杯之间放电产生的尖峰。并联在整流电路两端两组串联的 200 k Ω /5 W 电路,是为了给整流电源提供一个假负载。由于逆变频率很高,达到 100 kHz,采用较小电容即可获得稳定直流输出,因此,滤波电容选择纳法级电容,最低耐压达到 3 000 V。

HV1 端输入的是基值逆变交流电压信号;HV2 输入的是峰值逆变交流电信号,D11、D12、D13、D14 组成的整流电路与 D21、D22、D23、D24 组成的整流电路在 U_{p1} 串联在一起, U_p 端连接偏压杯。

2 20 kHz 脉冲偏压控制系统性能测试

经试验测试,所设计的 20 kHz 脉冲偏压控制系统性能可达到如下指标:(1)偏压基值:0~2001 V;(2)偏压峰值:0~2002 V;(3)脉冲频率:0~20.8 kHz 可调;(4)占空比:0~80%可调;(5)偏压电源工作频率最大可达到 127.4 kHz。

在峰值束流没有时,检测基值束流给定时,偏压整

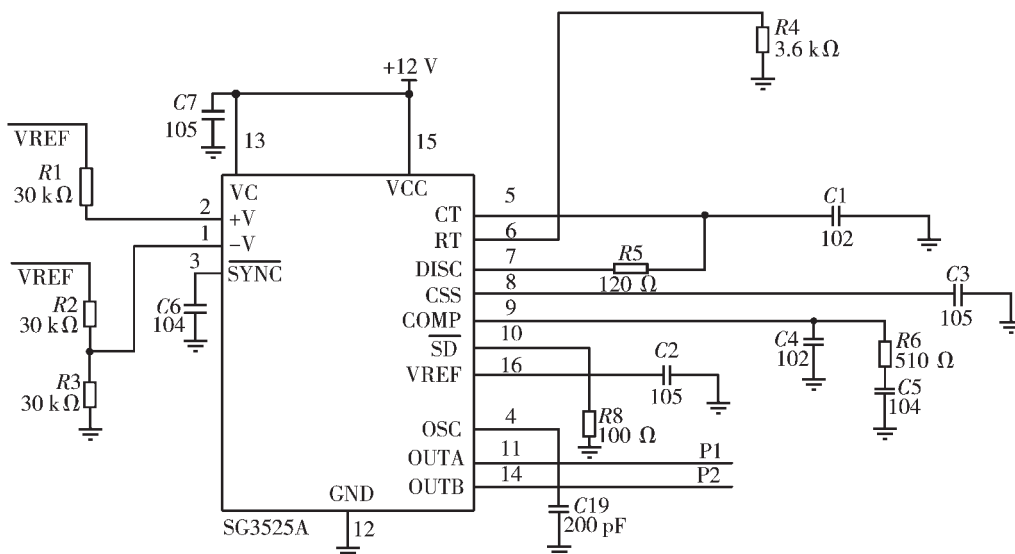


图 4 SG3525A 外围电路

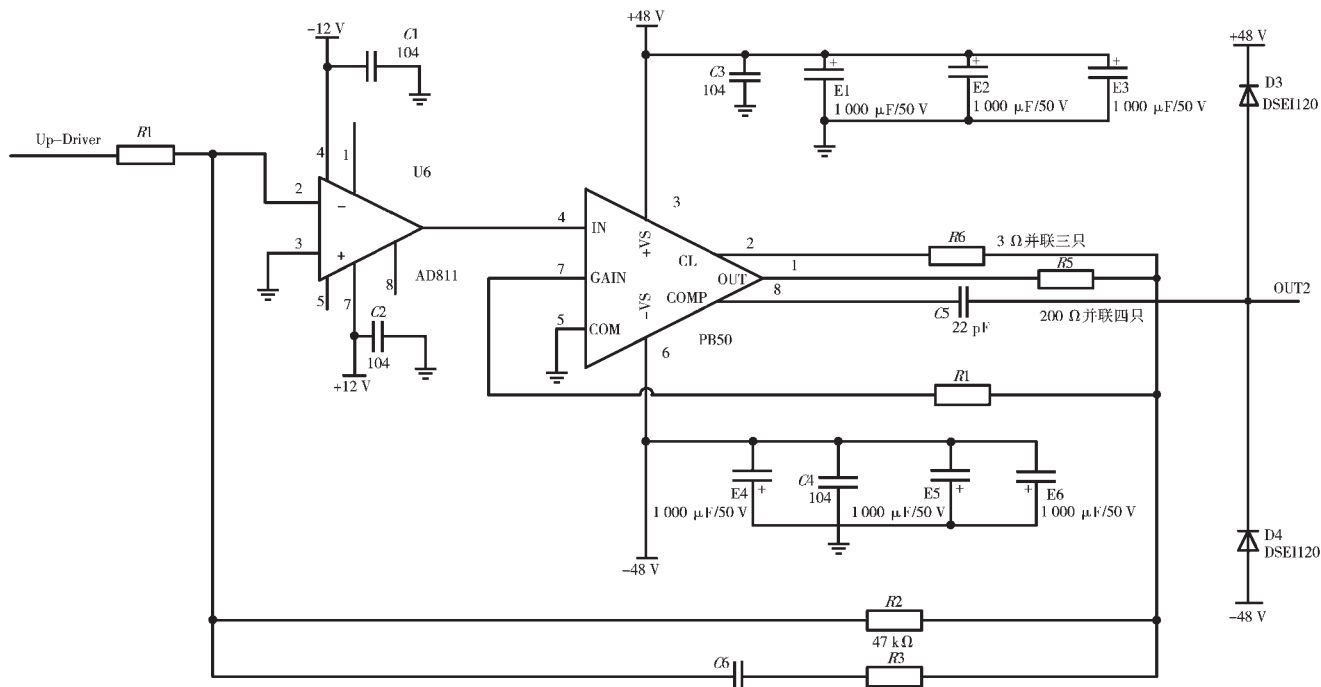


图 5 基于 PB50 的逆变电路

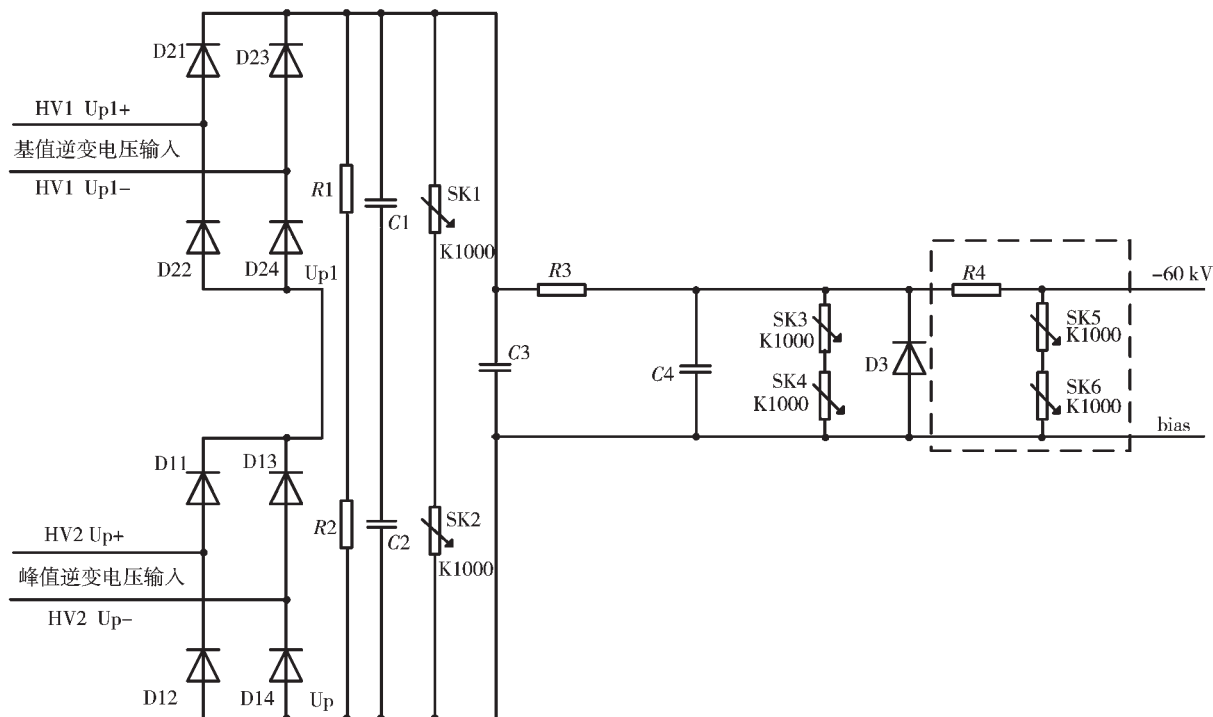


图 6 偏压整流电路

流电路输出端电压,检测结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,束流给定较小时,偏压输出最大,达到 $-2\ 001\text{ V}$,随着束流给定增大,偏压输出逐渐减小。

从表 1 中还可以看出,在束流输出前存在一段死区(偏压调节无束流输出),保障无束流给定信号时,偏压输出能够将束流封住。

采用研制的脉冲偏压控制系统脉冲调节部分,连接

电压互补整流电路。

图 7 是基值束流设定 10 mA 时,基值偏压变压器副边输出波形。输出频率与原边设定频率一致,幅值达到 $1\ 000\text{ V}$ 。

图 8 是在 1 kHz , 占空比 50% , 设定束流 10 mA 经过整流电路的脉冲偏压峰值波形,可以看出脉冲偏压具有明显的脉冲特征。

表 1 偏压对应束流输出检测

序号	基值束流给定/mA	基值偏压输出/V
1	0	-2001
2	5	-1050
3	10	-1010
4	15	-950
5	20	-850
6	25	-710
7	30	-680
8	35	-650
9	40	-610
10	45	-580
11	50	-558
12	55	-530
13	60	-495
14	65	-460
15	70	-455
16	75	-450
17	80	-437
18	85	-416
19	90	-400
20	95	-380
21	100	-372

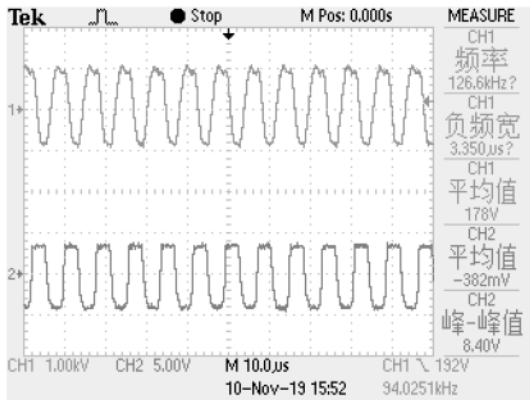


图 7 基值设定 10 mA 的基值偏压变压器副边输出检测

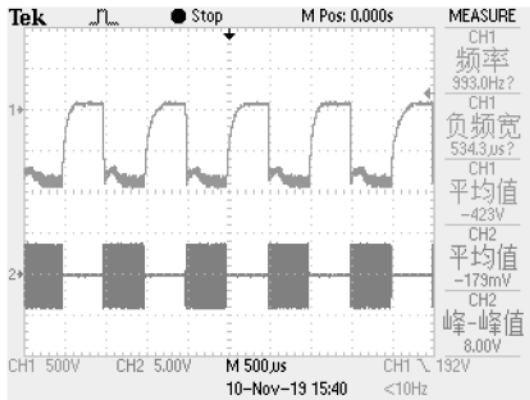
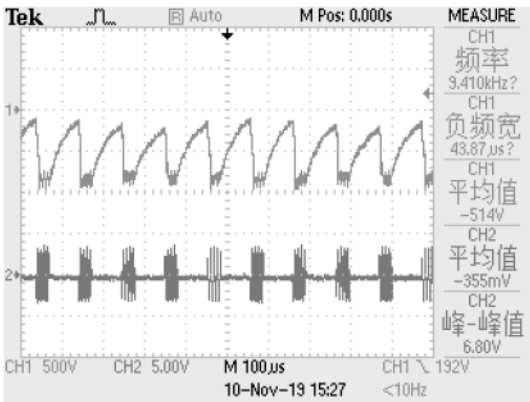
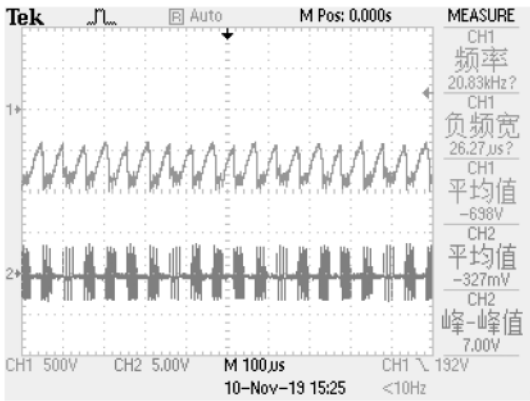


图 8 1 kHz 脉冲偏压波形

图 9 是峰值束流设定 10 mA，在脉冲峰值频率 10 kHz



(a) 10 kHz，占空比 80%



(b) 20 kHz，占空比 50%

图 9 偏压峰值检测

和 20 kHz 时检测的整流电路输出波形，从图中可以看出，整流后的电压存在直流分量，脉冲波形上升沿变化较缓慢，这与偏压变压器的绕制工艺有很大关系，变压器存在的寄生电感和电容导致脉冲波形畸变。需要在后续研究工作中优化电路参数，改善脉冲波形。存在的直流分量，将导致输出束流变小，可以通过优化工艺参数进行改善，不会影响脉冲束流输出。

将所研制的脉冲偏压整流电路安装于高压油箱中，高压电缆不连接电子枪，高压油箱与逆变电源连接，逆变电源的直流输入逐渐增大，每次增加 20 V，检测高压反馈，同时检测悬浮于负高压端的脉冲偏压整流电路是否有放电现象，在最大耐受电压条件下，可连续稳定工作 1 小时，说明脉冲偏压整流电路达到设计要求。

偏压电源输出端连接功率 8 kΩ 电阻，该电阻由 3.2 kΩ/100 W 功率电阻两并六串组成，在最大偏压输出时，电压为 2 001 V，检测输出电流为 250 mA，功率达到 500.5 W。

3 结论

本文针对 20 kHz 脉冲偏压控制系统设计要求，对其工作环境进行深入分析，选择高速 DSP 数字处理芯片、高速运放、自主知识产权的偏压变压器结构对脉冲偏压

(下转第 110 页)

- [3] 韩萍,王浩,方澄,等.基于 WiFi 数据的实时高效定位分析系统设计[J].现代电子技术,2020(4):43-47.
- [4] 宋丽萍.基于 RSSI 的室内定位算法研究[J].太原师范学院学报(自然科学版),2019,18(2):49-52.
- [5] 赵红梅,赵杰磊.超宽带室内定位算法综述[J].电信科学,2018,34(9):130-142.
- [6] HWANG S S, KWON G R, PYUN J Y, et al. AOA selection algorithm for multiple GPS signals[C]//2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2013: 481-485.
- [7] 葛丽丽.基于 UWB 的高精度室内定位及时钟同步算法的研究[D].北京:北京邮电大学,2019.
- [8] 朱振海.超宽带精准实时定位系统的 TDOA 定位算法研究[D].海口:海南大学,2019.
- [9] WU Y C, CHAUDHARI Q, SERPEDIN E. Clock synchronization of wireless sensor networks[J]. IEEE Signal Processing, 2011, 28(1): 124-128.
- [10] YOU B, LI X, LIU W. A Kalman-filter-based wireless clock synchronization method in indoor localization[C]// Eighth International Conference on Digital Image Process-

ing(ICDIP 2016), International Society for Optics and Photonics, 2016: 10033. DOI: 10.1117/12.2243983.

- [11] 朱振海,沈重.一种基于人工智能-深度学习的无线时钟同步算法[J].海南大学学报(自然科学版),2018,36(4):311-316.
- [12] MCELROY C, NEIRYNCK D, MCLAUGHLIN M. Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems[C]//2014 IEEE International Conference on Communications Workshops(ICC). IEEE, 2014: 157-162.
- [13] 鲁丹宇,高春利,刘浩然.基于无线时钟同步的超宽带 TDOA 定位系统设计[J].节能,2017(1):66-68,76.

(收稿日期:2021-03-22)

作者简介:

冯帆(1993-),女,硕士,工程师,主要研究方向:物联网室内定位。

王军(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:物联网建设和智能化控制。

陈小磊(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:物联网室定位。



扫码下载电子文档

(上接第 100 页)

系统进行设计,并进行大量试验,获得达到设计要求的脉冲偏压控制系统,为脉冲束流的调控奠定技术基础。

(1)采用 DSPIC30F4012 实现了脉冲束流基值、峰值向偏压基值、峰值的转化,根据输入脉冲频率、占空比,可以调节脉冲束流的输出;

(2)采用 SG3525A 输出 100 kHz 以上的基波,由 DSP 输出脉冲合成的模式,再经由大功率运放、基值、峰值串联整流电路可以获得脉冲偏压输出,继而实现对脉冲束流输出的调控。

参考文献

- [1] 陈国庆,树西,张秉刚,等.国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J].焊接学报,2018,39(8):123-128,134.
- [2] 熊进辉,李士凯,耿永亮,等.电子束熔丝沉积快速制造技术研究现状[J].电焊机,2016,46(2):7-11.
- [3] 齐铂金,范霖康,刘方军.脉冲束流电子束焊接技术综述[J].航空制造技术,2015(1):26-30.
- [4] 周成候,李蝉,吴王平,等.金属材料增材制造技术[J].金属加工(冷加工),2016(s1):879-883.
- [5] 张洪波,刘方军,左从进.一种新型脉冲电子束焊接用 PWM 逆变式栅偏压电源系统设计[J].航空制造技术,2004(增刊):188-191.
- [6] American Welding Society. Recommended practices for electron beam welding[M]. Miami: Global Engineering Documents, 1999.
- [7] 韦寿祺,莫金海,何少佳.大功率电子束轰击炉电子枪电源控制策略[J].真空科学与技术报,2008,28(2):58-62.
- [8] 王泽庭.高压电子束焊机电源的研究与实现[D].北京:北

方工业大学,2011.

- [9] ZHANG Y M, LI P, CHEN Y, et al. Automated system for welding based rapid prototyping[J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 37-53.
- [10] 莫金海,韦寿祺,何少佳,等.新型 PWM-BUCK 电子束焊机稳定高压电源的设计[J].焊接学报,2009,30(6):34-38.
- [11] 杜慧聪,刘方军,张伟,等.150kV 高压逆变电源倍压整流电路仿真[J].北京航空航天大学学报,2014,40(10):1001-1005.
- [12] 莫力林,韦寿祺.大型电子束轰击炉束功率控制系统的设计[J].硬质合金,2009,26(4):240-245.
- [13] 齐铂金,徐国宁,刘方军.新型脉冲电子束焊接偏压电源设计[J].北京航空航天大学学报,2012,38(10):1311-1316.
- [14] 许海鹰,余伟,左从进.高压脉冲电子束的控制及其对焊缝形貌影响[J].北京航空航天大学学报,2011,37(8):1044-1048.
- [15] 齐铂金,徐国宁,肖攀.脉冲电子束焊接技术研究[J].上海交通大学学报,2012,16(S):141-144.

(收稿日期:2021-01-05)

作者简介:

王壮(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:高能束流加工技术。

许海鹰(1973-),通信作者,男,博士,研究员,主要研究方向:高能束流加工技术, E-mail: xhyxy@126.com。

桑兴华(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:高能束流加工技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所