

引文格式: 杨波, 许海鹰, 桑兴华, 等. 自适应闭环控制的高频脉冲电子束偏压电路设计[J]. 航空制造技术, 2025, 68(1/2): 90-94.

YANG Bo, XU Haiying, SANG Xinghua, et al. Design of high frequency pulsed electron beam bias circuit with adaptive closed-loop control[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(1/2): 90-94.

自适应闭环控制的高频脉冲电子束偏压电路设计*

杨波, 许海鹰, 桑兴华, 王 壮

(中国航空制造技术研究院高能束流发生器实验室, 北京 100024)

[摘要] 针对脉冲电子束焊接工艺的需求, 以快速可控调节的直流偏压主电路结构设计及束流自适应闭环调节的控制电路设计为核心技术, 实现束流自适应闭环调节的高频脉冲电子束偏压电路设计; 并通过 Cadence 仿真软件对电路参数进行仿真验证, 优化电路参数。在此基础上, 完成高频脉冲电子束偏压电路研制, 并将高频脉冲电子束偏压电路接入电子束焊接系统中进行特性验证, 结果表明, 脉冲电子束流可以实时动态跟随设定信号, 工作频率可达 1 kHz, 束流的上升与下降速度较快, 波形良好, 失真度较小, 可有效满足脉冲电子束工艺的需求。

关键词: 脉冲电子束; 自适应闭环; 快速可控调节; 偏压; Cadence 电路仿真

Design of High Frequency Pulsed Electron Beam Bias Circuit With Adaptive Closed-Loop Control

YANG Bo, XU Haiying, SANG Xinghua, WANG Zhuang

(High Energy Beam Generator Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] According to the requirements of pulsed electron beam welding technology, the design of high-frequency pulsed electron beam bias circuit with adaptive closed-loop adjustment of beam current is realized by taking the structure design of fast controllable DC bias main circuit and the control circuit design of adaptive closed-loop adjustment of beam current as the core technology; The circuit parameters are simulated and verified by Cadence simulation software, and the circuit parameters are optimized. On this basis, a high-frequency pulsed electron beam bias circuit is developed, and its characteristics are verified by connecting it to the electron beam welding system. The results show that the pulsed electron beam can follow the set signal dynamically in real time, the working frequency can reach 1 kHz, the rising and falling speed of the beam is fast, the waveform is good and the distortion is small, which can effectively meet the requirements of the pulsed electron beam process.

Keywords: Pulsed electron beam; Adaptive closed-loop; Quick and controllable adjustment; Bias; Cadence circuit simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.01/02.090

电子束焊接是一种采用汇聚后的高能电子束流作为热源实现零件焊接的特种加工技术, 广泛应用于航空航天等国防军工领域。目前电子束焊接以直流焊接为主, 受现有设备高压及最大功率等参数的制约, 直流电子束焊接在零件焊深以及接头强度等特性上存在一定

的上限, 难以通过工艺参数的改进获得进一步有效的提升。相比之下, 脉冲电子束焊接是将电子束能量以间歇的方式进行输出, 使母材上瞬间获得几倍于直流焊接能量输入的一种特殊的电子束焊接方式。

相关研究表明, 脉冲电子束焊接在焊缝表面成形质

* 基金项目: 军工双百工艺 (JCKY2018205B027)。

量、焊缝晶粒组织及焊深上较直流电子束焊接均有较大的改善^[1-4]。因此,实现脉冲电子束工艺的深入研究,对提升电子束焊接技术的进步以及促进高能束加工技术在国防军工等领域的深层次应用均有着重要的意义。

脉冲电子束工艺的研究与设备息息相关,目前国内在脉冲电子束工艺上的研究以及成果应用均较少,主要是受电子束设备自身特性的制约。一方面老式的电子束设备大多不具备高频脉冲电子束功能;另一方面部分电子束设备厂商新推出的脉冲电子束功能也是基于束流开环的方式设计,并未实现闭环的控制功能。这使得实际焊接工艺过程中束流大小无法得到有效、准确的控制,导致工艺人员难以精确可靠地按所需参数进行工艺研究,这也是制约脉冲电子束工艺进步的关键因素。

本文将针对当前电子束设备无法满足脉冲电子束工艺研究的现状,以快速可控调整的直流偏压主电路设计以及束流自适应快速闭环调节的控制电路设计为关键点,结合 Cadence 电路仿真软件对电路参数进行优化,研制出束流自适应闭环调控的高频脉冲电子束偏压电路。

1 高频脉冲电子束偏压电路设计

1.1 电路设计方案

高频脉冲电子束偏压电路的工作原理图如图 1 所示。该电路的目的在于输出一个快速可控的直流偏压,实现对脉冲电子束流的闭环调节。由于电子束设备工作的特殊性,直流偏压必须悬浮于加速电压上且输出为负值电压才能实现对电子束流的调节。以 60 kV 电子束焊机为例,加速电压对地压差达 -60 kV,因此直流偏压的输出端对地压差将达到 -61 kV 以上。由于对地压差太大,难以对直流偏压的输出值进行直接调节,因此通过对低压电路输出值的调节进行取代,以达到输出直流偏压同步调整的目的。而直流偏压与低压电路之间通过偏压变压器连接,偏压变压器起着绝缘隔离以及升压的作用。偏压变压器的引入,使得直流偏压必然是通过对偏压变压器输出电压进行整流滤波的方式获得。

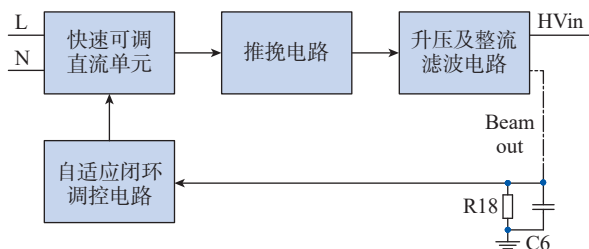


图 1 高频脉冲电子束偏压电路工作原理图

Fig.1 Working schematic diagram of high-frequency pulsed electron beam bias circuit

其中,滤波电容越大可使直流偏压越稳,但会导致偏压调节速度变慢;而滤波电容越小,则偏压调节速度越快,但会导致直流偏压的纹波变大,稳定度变低。另外,直流偏压必须根据束流设定值与束流采样值的情况,实时动态可控地调整输出值,才能实现束流采样信号快速跟随束流设定信号。

综上所述,高频脉冲电子束偏压电路相比常规偏压直流电路存在两处设计难点:(1)对快速可调直流偏压电路的设计;(2)对脉冲电子束动态闭环电路的设计。

如图 1 所示,为了获得闭环可控的高频脉冲电子束流,要求直流偏压能够快速变化并且精确可控。因此,设计了快速可调直流单元获得一个快速可控的直流电压输出,并通过推挽电路将该电压逆变后通过偏压变压器升压并整流滤波的方式获得直流偏压,可达到通过提高推挽电路的工作频率,降低升压及整流滤波电路的滤波电容值。在保持足够高的电压稳定性的前提下,提高直流偏压的调节速度,通过对快速可调直流单元输出值的调控,实现直流偏压实时可控调整。同时,设计了束流自适应闭环调控电路来接收束流给定信号,采用钳位的方式实时调控直流偏压输出值,使束流采样值动态跟随束流给定值,以获得闭环可控的脉冲电子束流波形。

1.2 快速可调直流单元

快速可调直流单元的电路如图 2 所示。其目的是输出一个快速可控的直流电压,通过对该电压的快速调节实现最终输出直流偏压的快速可调。

为了有效提高输出电压的调节速度,采用线性调压的方式进行设计。220 V 工频电压经变压器 T1 降压后由整流桥 BD1 及电容 C1 进行整流滤波获得约 40 V 的直流电压;该电压由晶体管 Q1 进行调压,通过控制 Q1 的 BE (基极 B 与发射极 E) 间导通电流,获得快速可调的直流电压输出。

图 2 中晶体管 Q1 的发射极与闭环调控电路的供电电源 +12V2 连接,基极与闭环调控电路的调控电压连接,实现闭环调控电路对 Q1 导通程度的控制,从而实现输出电压 DC 值的快速调节。

1.3 推挽电路

采用推挽电路对直流单元的输出电压进行高速逆

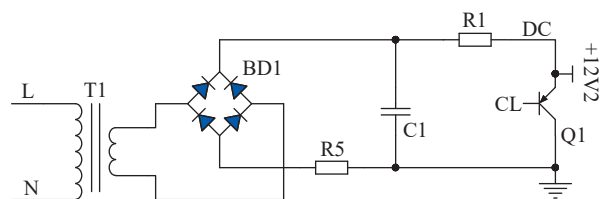


图 2 快速可调直流单元

Fig.2 Fast adjustable DC unit

变,电路如图3所示。采用固定占空比的方式交替开通MOS管Q2与Q3,使得偏压变压器原边绕组TR1A与TR1B上分别获得等值的输入电压。

为实现后级偏压整流滤波电路的快速可调特性,将推挽频率设为100 kHz来模拟后级直流偏压1 kHz的脉冲输出。推挽电路的驱动信号由SG3525控制芯片给出,占空比固定为40%。

1.4 升压及整流滤波电路

升压及整流滤波电路如图4所示,其中HVin为高压引入端,PVout为直流偏压输出端。偏压变压器副边绕组TR1C输出的交流电压经D1~D4组成的整流桥整流成直流后,由滤波电容C2进行滤波形成平稳的-1 kV直流电压。增加了放电电阻R4对电容上电荷进行释放,电容设置为250 pF,电阻设置为200 kΩ,在偏压变压器原边关闭输出后,电容上电荷经过2个RC(R为R4,200 kΩ;C为C2,250 pF)时间常数,即100 μs后基本释放完,此时该电路基本满足1 kHz的工作频率要求。偏

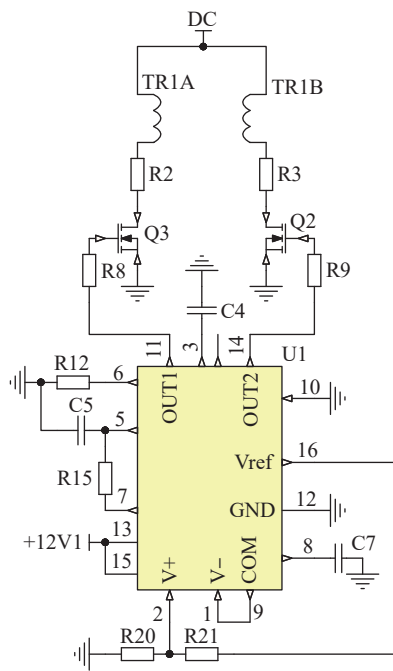


图3 推挽电路
Fig.3 Push-pull circuit

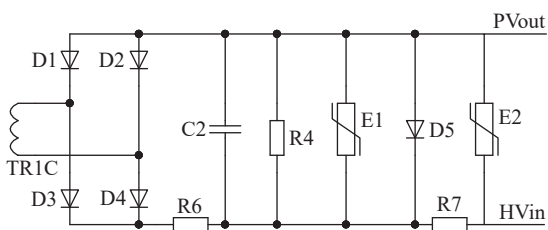


图4 升压及整流滤波电路
Fig.4 Step-up and rectifier filter circuit

压变压器的频率为100 kHz,整流后的频率为200 kHz时,即5 μs对电容充一次电,期间电容释放的电量为9%,可得直流偏压的纹波约为±4.5%,满足要求。

1.5 自适应闭环调控电路设计

自适应闭环调控电路可实现束流采样信号实时跟随束流设定信号。由于输入至闭环调控电路的束流设定信号为1 kHz的高频脉冲信号,因此闭环调控电路的输出值必然会实时快速变化,以保证束流采样值实时受控。由于设定信号、采样信号以及闭环调控信号三者均同时在快速变化,这就导致了常规的比例积分电路PI调节电路时极易产生闭环振荡现象。针对上述情况,设计了自适应闭环调节电路(图5)。

+12V2电压经运算放大器TL084的U2B比例降压后获得补偿电压,束流设定信号Vin由U2A进行1:1反向运算后与补偿电压一起经U2C进行闭环调控,该调控电压经晶体管Q4的BE极后钳位至束流采样电阻R18,Q4的C极通过R20与快速可调直流单元的调节与Q4的B极相连,通过Q4的导通电流来实现对快速可调直流单元的调节,最终达到对直流偏压的调节,其中补偿电压用于补偿Q4的BE间压降。

本节中采用了自适应闭环调控的方式替代了传统的PI调节,存在以下优点:将采样电阻直接接入闭环调控电路中,当给定信号大于采样信号时,Q4的钳位作用使得运放U1C的输出值无法脱离采样电压快速上升,有效减小了系统响应特性不匹配引起的环路振荡。

闭环调控电路中,C3的取值较为关键,它决定了闭环调控电压的上升与下降时间,该时间必须与主电路的响应时间匹配,否则将会引起环路不稳定。同时,C3取值也实现了对束流采样电阻上高频噪声带来的误动作的过滤。当C3取值为2.2 nF,R10与R11取值为10 kΩ时,U2C输出电压的上升及下降时间约为100 μs,该响应时间基本与直流偏压的下降时间接近。

而在实际电路中,束流采样电阻R18上除了有效的束流信号外,还夹杂了大量由高压电场引发的高频噪声,因此在采样电阻上并联滤波电容C6可实现对高频

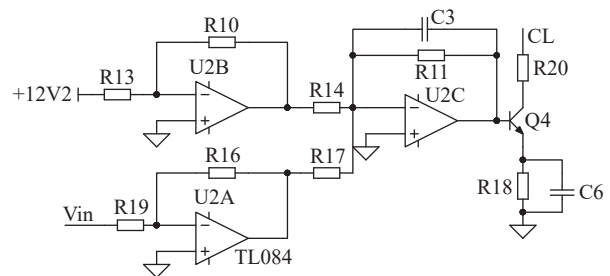


图5 自适应闭环调控电路
Fig.5 Adaptive closed-loop control circuit

噪声的初步过滤,同时选择 TIP41A 作为 Q4 的参数,可起到电路通频带降低的作用,实现对高频噪声信号的过滤。

2 脉冲电子束偏压电路仿真

2.1 三极管等效仿真模型建立

为了实现仿真软件对上述电路的功能验证,首先需要建立有效的仿真模型。偏压对束流的作用特点是偏压为负值,负值越大则束流越小,负值越小则束流越大,其控制方式类似于晶体管的工作方式^[5-6],因此采用图6的仿真模型近似代替束流调节的过程。

图6中,E1为高压加速电源,在回路中输出电子束流;E2为补偿电压,实现在偏压输出最大负值时,晶体管Q5截止,随着偏压逐渐减小,回路中的电流逐渐变大。R31为等效电子束负载;R18为束流采样电阻。

当PVout值逐渐减小时,Q5的基极导通电流逐渐变大,流过R18的电流值也相应变大;反之,当PVout变大时,流过R18的电流变小,以此来模拟直流偏压对电子束流的控制作用。

2.2 高频脉冲电子束偏压电路仿真

采用Cadence SPB 16.6对高频脉冲电子束偏压电路进行电路仿真分析^[7-10],验证上述参数下电路的工作特性,并对电路参数进行优化。在Design Entry CIS环境下编辑测试电路,通过PSpice A/D模块对电路进行仿真计算,设定仿真时长为4ms,每步计算时间为0.1 μ s^[5-8]。

为验证闭环调控电路参数取值的合理性,首先要对偏压主电路电压-时间响应特性进行验证,因此对偏压主电路进行仿真。

在开环无束流采样的模式下,加载1kHz占空比为50%且最大值为9V的束流设定信号,测试升压及整流滤波电路的输出值即直流偏压值的响应特性,如图7所示。

由图7(b)可知,从-1kV降到0所需的时间约为100 μ s,与实际的计算结果基本吻合,从而推断闭环调控电路的参数设计也是与主电路参数相匹配的。

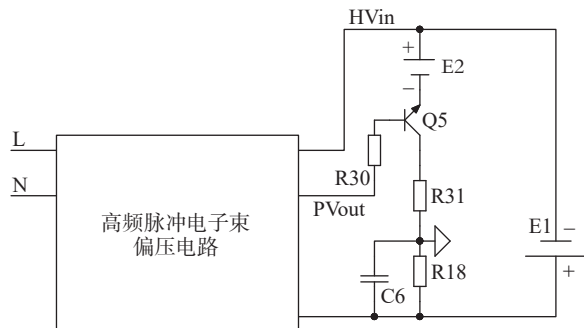


图6 偏压电路仿真模型

Fig.6 Simulation model of bias circuit

接下来进行脉冲束流闭环特性的验证,对图6中的电路进行仿真,束流设定信号仍为1kHz、幅值9V且占空比为50%,仿真结果如图8所示。

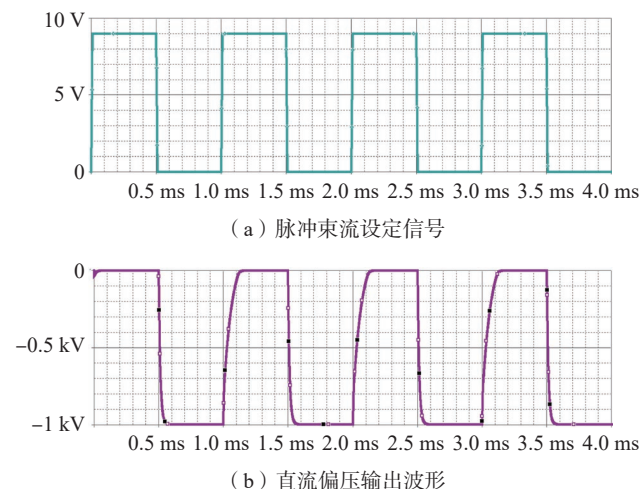


图7 直流偏压输出波形响应特性仿真

Fig.7 Simulation of DC bias output waveform response characteristics

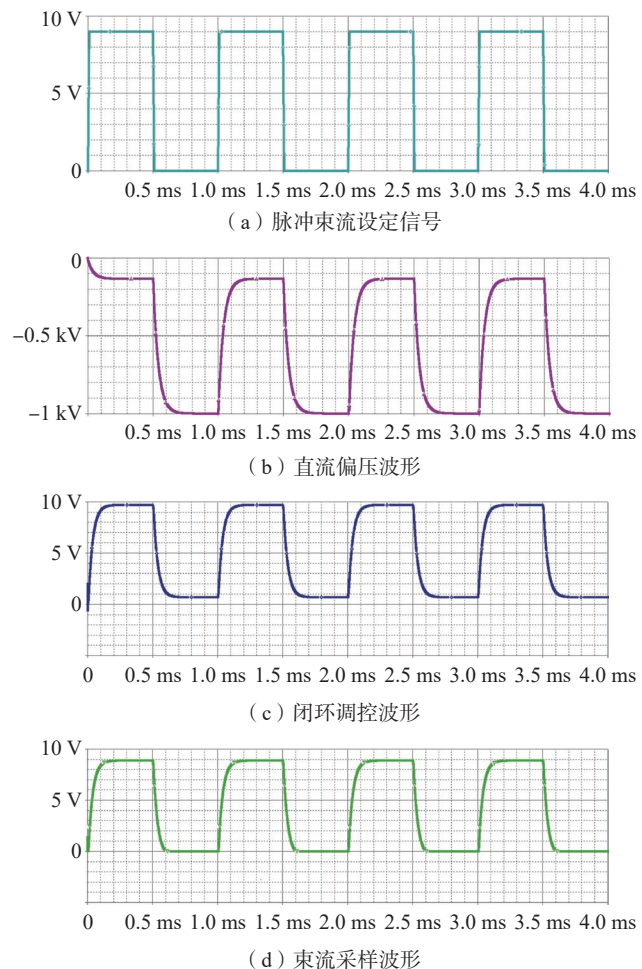


图8 脉冲偏压电路仿真

Fig.8 Simulation of pulse bias circuit

由图8的仿真结果可以看到,在1 kHz方波的束流设定信号作用下,束流采样信号基本上能够有效跟随设定信号,实现脉冲束流输出,束流上升沿与下降沿时间均在100 μs左右,失真度较小,波形整体情况较好。

3 高频脉冲电子束偏压电路研制

结合仿真结果,对高频脉冲电子束偏压电路进行研制,并在此基础上,将其接入现有的电子束焊接系统中,对电路的功能进行实际验证。

将系统的高压加至-60 kV,灯丝电流加至30 A,由函数发生器给出束流给定信号,信号频率为1 kHz,占空比为50%,幅值为9 V;束流采样信号由示波器进行测量,获得波形图如图9所示。

图9中通道A为束流给定信号,通道B为束流采样信号。可见,在1 kHz的脉冲频率下工作时,束流采样波形能够实时闭环跟随给定信号,波形特性良好。

4 结论

本文针对脉冲电子束焊接工艺的需求,设计了高频脉冲电子束偏压电路,并重点突破了脉冲束流自适应闭环调整和直流偏压快速可控调节这两项技术。具体包含以下两项研究工作。

(1)采用比例电路结合钳位电路的方式实现束流采样信号自适应,实时快速跟随束流设定信号,实现脉冲束流快速动态闭环调节。

(2)采用快速可调直流单元串联高频推挽电路并配合偏压变压器升压后整流滤波的方式获得快速可控调节的直流偏压。

在此基础上完成了电路的Cadence软件仿真验证,并实现高频脉冲电子束偏压电路研制。通过实际验证,得出束流可在1 kHz下实时跟随束流设定信号,波形失真度较小,满足脉冲电子束焊接工艺的需求。

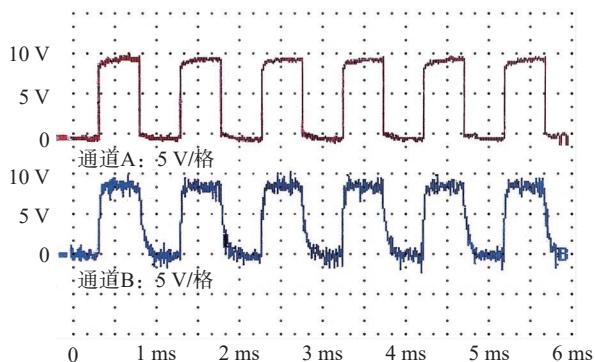


图9 脉冲束流波形

Fig.9 Pulse beam waveform

参考文献

[1] 范霖康, 齐铂金, 李晓鹏, 等. 薄板TC4钛合金脉冲电子束焊接技术研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 4026-4034.
FAN Jikang, QI Bojin, LI Xiaopeng, et al. Research on TC4 titanium alloy sheet welded by pulsed electron beam welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12): 4026-4034.

[2] SCHULTZ H. Electron beam welding[M]. Cambridge: Abington Publishing, 1994.

[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, 58(11): 26-30.
QI Bojin, FAN Jikang, LIU Fangjun. An overview of pulsed electron beam welding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 26-30.

[4] 周吉发. TC2钛合金薄板连续/脉冲电子束焊接数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZHOU Jifa. Numerical simulation of continuous/pulsed electron beam welding of TC2 titanium alloy sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[5] 铃木雅臣. 晶体管电路设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
SUZUKI Y. Transistor circuit design[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[6] 张占松, 张心益. 高频开关变换技术教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
ZHANG Zhansong, ZHANG Xinyi. Course of high frequency switching technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

[7] 周润景, 刘梦男, 苏良昱. Cadence 高速电路板设计与仿真: 原理图与PCB设计[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
ZHOU Runjing, LIU Mengnan, SU Liangyu. Cadence high-speed circuit board design and simulation: Schematic diagram and PCB design[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.

[8] 王超, 胡仁喜, 等. Cadence 16.6 电路设计与仿真从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
WANG Chao, HU Renxi, et al. Cadence 16.6 circuit design and simulation from entry to mastery[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.

[9] 乔思源. 基于Cadence 软件的电路仿真与分析[J]. 信息技术与信息化, 2020(12): 151-154.
QIAO Siyuan. Circuit simulation and analysis based on Cadence software[J]. Information Technology and Informatization, 2020(12): 151-154.

[10] 周楠. 基于Cadence 软件的高速电路信号完整性仿真[D]. 昆明: 云南大学, 2011.
ZHOU Nan. Simulation of signal integrity of high-speed circuit based on Cadence software[D]. Kunming: Yunnan University, 2011.

通信作者: 杨波, 工程师, 研究方向为电子束加工技术。

(责编 晓月)