焊接设备
WELDING EQUIPMENT

DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2022.03.13

交变磁控电源的设计与仿真

陈克选[1,2]，杜茵茵[1]，陈彦强[1]

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院，甘肃 兰州 730050；
2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，甘肃 兰州 730050

摘 要：为提高大电流GMAW焊接过程的稳定性，进而提高焊接效率，引入了外加间歇纵向交变磁场来控制焊接过程。采用两级逆变拓扑结构，研制出一台输出为方波交流电流，且幅值、频率和占空比均可调的磁控电源。利用可视化仿真软件Simulink建立该磁控电源的仿真模型，分析电路在不同给定参数下的仿真结果，论证了主电路拓扑结构及参数设计的合理性。加入电感负载，测试不同给定参数下磁控电源实际电流输出波形和交变磁场波形，测试结果显示设计的磁控电源能够满足频率、占空比和励磁电流幅值调节的特性。同时得到了与电源输出相匹配的交变磁场，可以用于大电流GMAW磁控焊接技术。

关键词：GMAW；纵向交变磁场；逆变；Simulink仿真

中图分类号：TG434.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-2303(2022)03-0093-06

Design and Simulation of Alternating Magnetron Power Supply

CHEN Kexuan[1,2], DU Yinyin[1], CHEN Yanqiang[1]

1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: In order to improve the stability of the high-current GMAW (gas metal arc welding) process and thus improve the welding efficiency, an intermittent alternating longitudinal magnetic field is introduced to control the welding process. In this paper, a two-level inverter topology is used to develop a magnetron power supply whose output is a square wave AC current with adjustable amplitude, frequency and duty cycle. The simulation model of the magnetron power supply is established by using the visual simulation software Simulink, the simulation results of the circuit under different given parameters are analyzed, and the rationality of the main circuit topology and parameter design is demonstrated. Inductive load is added to test the actual current output waveform and alternating magnetic field waveform of the magnetron power supply under different given parameters. The test results show that the designed magnetron power supply can meet the characteristics of frequency, duty cycle and exciting current amplitude adjustment. At the same time, an alternating magnetic field that matches the output of the power source is obtained, which can be used in high-current GMAW magnetron welding technology.

Keywords: GMAW; alternating longitudinal magnetic field; inverter; Simulink simulation

引用格式：陈克选，杜茵茵，陈彦强. 交变磁控电源的设计与仿真[J]. 电焊机，2022，52(3)：93-98.

Citation: CHEN Kexuan, DU Yinyin, CHEN Yanqiang. Design and Simulation of Alternating Magnetron Power Supply[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 93-98.

* **收稿日期：**2021-04-02 **修回日期：**2021-10-23

基金项目：国家自然科学基金(51775256)

作者简介：陈克选(1962—)，男，教授，主要从事新型弧焊电源及智能控制、焊接过程控制及计算机应用以及电弧增材制造设备等领域的研究。E-mail：ckcs@sina.com。

0 前言

在熔化极气体保护焊中，增大焊接电流和焊丝伸长长度是提高焊接熔敷率的直接途径，但在大电流下，当熔滴过渡转变为旋转射流过渡时，电弧稳定性变差，飞溅增大，且焊接电流增大的同时也显著增加了熔滴和熔池上的电弧作用力，过大的电弧力使熔池表面产生剧烈变形，焊缝成形差。在大电流GMAW焊接过程中引入外部磁场，能够对熔滴过渡形式、焊接电弧行为以及焊接熔池中熔融金属的流动等产生有益影响[1-4]。通过外加间歇纵向交变磁场让电弧收缩，使旋转射流过渡时电弧更稳定，焊接飞溅率降低[5-7]，还可以有效地搅拌焊接熔池，改变熔池金属结晶状况，从而使构件的控形和控性都达到较好的效果[8-9]，具有附加装置简单、投入成本低、效益高等优势，受到了国内外不少学者重视。

磁控电源作为核心设备之一，对磁控焊接过程控制有重要影响。目前应用于大电流GMAW中的磁控电源还存在一定的局限性，以往磁控电源多输出直流电，在焊接过程中引入的磁场多为恒定磁场，未考虑磁场与熔滴过渡的适配问题，即在熔滴过渡的不同阶段施加不同强度或频率的磁场，以降低飞溅、改善成形。此外，焊接过程施加磁场的参数范围较窄，高频强磁场对焊接过程的影响规律尚不清楚。

本研究借助MATLAB/Simulink仿真软件，通过仿真设计和理论计算研制了一台输出电流0~15 A，交变频率0~5 000 Hz的磁控电源。Simulink是基于MATLAB的框图设计环境，可用来对各种动态系统进行建模、分析和仿真[10]。通过仿真结果和实际设计的对照，论证硬件设计的正确性，同时为硬件实验提供进一步的依据和支撑。

1 磁控电源主电路结构

磁控电源主电路采用双逆变拓扑结构，由前级逆变器（直流输出）和后级逆变器（交流方波输出）组成，如图1所示。前级逆变器采用半桥逆变结构，逆变器工作频率20 kHz，通过PWM脉宽调制技术控制前级开关器件IGBT的导通时间，来实现磁控电源恒电流输出特性的调节。为改善功率开关管瞬态工况，IGBT管两端均并联阻容RC吸收电路和箝位二极管来确保逆变器可靠工作。为避免在工作过程中逆变电路变压器发生偏磁，在变压器一次侧串入隔直电容C来消除变压器一次侧电压波形中的直流成分，实践证明效果良好。后级逆变器选择全桥式逆变拓扑结构，由$IGBT_3$~$IGBT_6$组成，两只桥臂开关管交替导通可实现交流方波的频率和占空比调节。该磁控电源的负载是有铁心的电感，安装在与焊丝同轴的保护气罩上，以产生与磁控电源输出相匹配的纵向交变磁场，进而控制焊接过程。

2 磁控电源控制系统

磁控电源控制系统硬件电路设计必须满足以下原则：(1)系统功能丰富；(2)实时性好；(3)使用界面友好；(4)抗干扰能力强。基于上述原则，采用

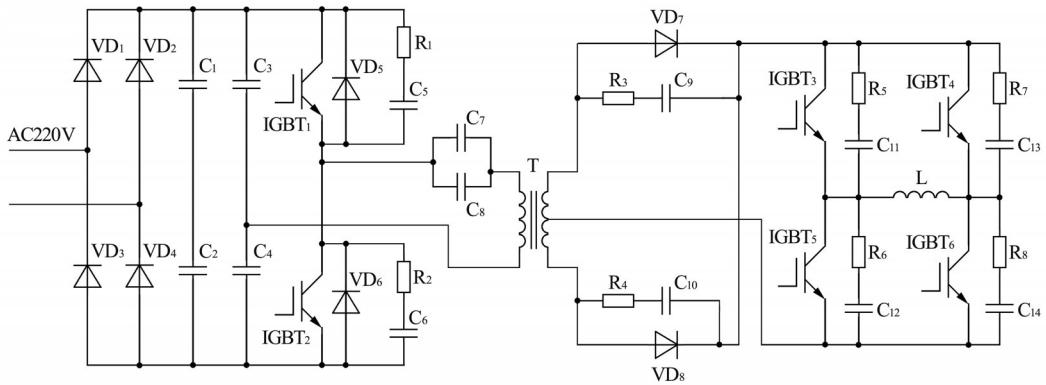


图1 磁控电源主电路拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of main circuit of magnetron power supply

实时性好且芯片功能丰富的80C196KC单片机为控制系统的核心。该芯片是由INTEL公司生产的MCS96系列16位单片机，具有接口丰富、处理能力强、运算速度快、功耗低的特点。针对磁控电源要实现的功能，设计的磁控电源控制系统结构框图如图2所示，硬件电路设计了以微型控制器为核心的单片机最小系统、实现人机交互的参数预置与显示电路、实时采集实际电流信号的恒值反馈采样电流、D/A转换电路、实现磁控电源恒流输出特性的前级逆变驱动系统电路以及满足交变电源频率和占空比独立调节特性的后级逆变驱动系统电路。

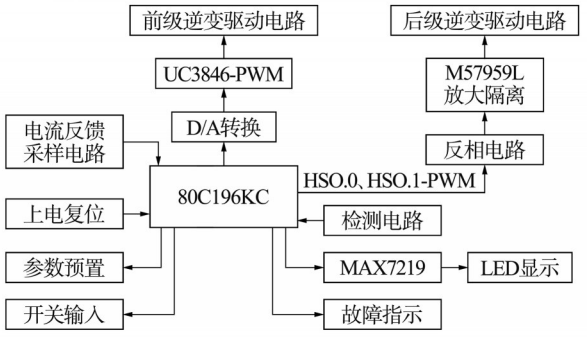


图2　磁控电源控制系统结构

Fig. 2　Structure diagram of magnetron power supply control system

2.1　前级逆变控制系统

磁控电源设计通过控制前级逆变电路开关器件来实现电源恒流输出特性，其控制过程如图3所示。系统采用定频率调脉宽(PWM)控制方式，首先将人机交互界面设置的电流给定值存入单片机内存单元，再将电流反馈采样电路实时采集的励磁电流值与之进行比较，比较得到的误差信号进行PI程序运算后由单片机输出数字控制信号，该信号经D/A转换成模拟信号输入给UC3846脉宽调制芯片，其产生的脉宽信号经放大隔离后实时控制前级逆变电路IGBT的导通时间，使得输出励磁电流值与电流给定值趋于一致，从而实现磁控电源恒流外特性。磁控电源恒流闭环控制过程如图4所示。

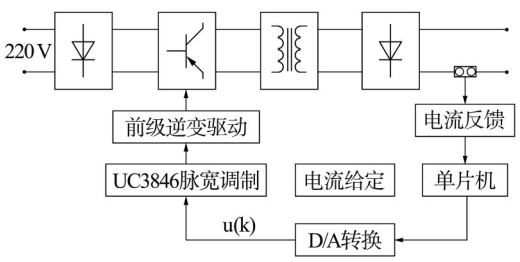


图3　前级逆变电路控制原理

Fig. 3　Control principle diagram of front-stage inverter circuit

2.2　后级逆变控制系统

后级逆变实现交变电流频率和占空比的独立调节，其控制信号的产生是基于80C196KC单片机的两路高速输出口，控制原理如图5所示。首先根据面板设定所需频率及占空比参数，通过程序运算后由HSO.0和HSO.1输出两路相位互补且带有一定死区的脉宽信号，此脉宽信号经过反相器反相后，送入专用于驱动IGBT的厚膜集成芯片M57959L，进行放大隔离后驱动后级IGBT的导通与截止，从而实现对交变电流频率和占空比的调节。

2.3　控制系统软件设计

结合磁控电源工作时序及硬件电路设计，文中采用模块化编程方式来提高软件设计效率。系统软件设计以主程序为框架，主程序控制磁控电源整个工作过程，通过调用实现各个功能的子程序模块(参数设置与显示模块、恒流控制模块、A/D采样模块、后级逆变脉宽输出模块等)，并配合中断服务程序来实现对磁控电源工作过程的控制。此外，为了提高磁控电源在复杂工况下抵御干扰的能力，设计程序时也采用平均值滤波法、指令冗余、设置监视定时器等软件抗干扰技术改进系统软件，进一步提高磁控电源可靠性。设计的主程序流程如图6所示。

磁控电源上电后，首先进行系统的初始化设置，然后根据磁控焊接工艺要求预置励磁电流幅值、频率和占空比，参数预置工作完成后判断磁控开关是否闭合，若闭合则进入磁控电源工作过程控

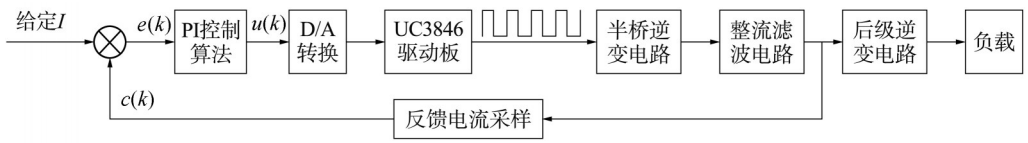


图4　磁控电源恒流闭环控制过程

Fig. 4　Constant current closed loop control process of magnetron power supply

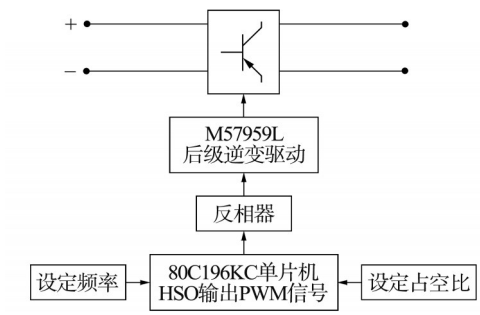


图5 后级逆变电路控制原理

Fig. 5 Control principle diagram of back-stage inverter circuit

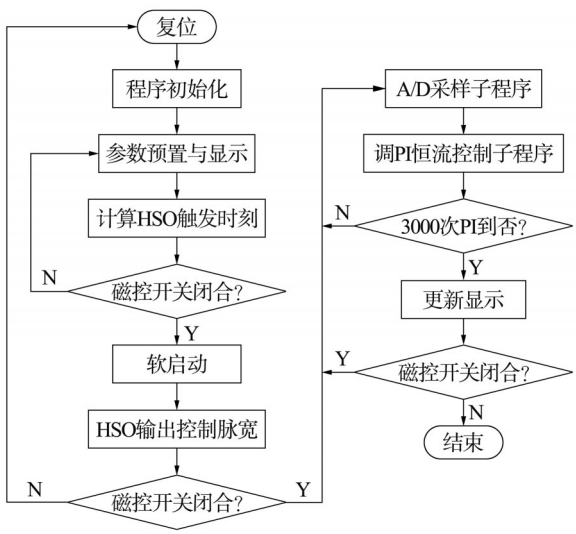


图6 磁控电源主程序流程

Fig. 6 Flow chart of main program of magnetron power supply

制程序，通过软启动程序使励磁电流缓慢上升；当有电流流过负载时，采样电路开始实时采集励磁电流值，且与面板给定电流值比较，得到的误差信号经PI恒流控制程序运算后周而复始地向前级脉宽调制电路发送模拟控制信号。

3 仿真设计及分析

3.1 建立磁控电源仿真模型

文中使用MATLAB/Simullink仿真平台对设计的电路进行建模与仿真，以验证设计电路的合理性，同时为实际试验提供理论依据。磁控电源属于电力电子系统，利用电力电子系统仿真专用的模块库Simscape进行建模。建立磁控电源模型时，在Simscape的PowerSystems子库中寻找需要的模块，拖曳到图形化仿真界面，按照电路原理图连接器件，根据理论计算参数，设置模型参数。模型建好后可以添加Measurements子库中电压表、电流表以及Scope等工具进行测试，能够直观地得到系统仿真结果，建立的磁控电源仿真模型如图7所示。

3.2 仿真结果分析

仿真时加入powergui模块用于配置信号仿真的初始条件和时间条件，同时在配置中调节仿真步长以匹配相应的信号频率，此处仿真步长可设置为9e–2 s。基于图7建立的仿真模型，设置后级逆变脉冲电源驱动激励信号。由于交流磁控电源的负载是一个由自行绕制的带坡莫合金磁心、匝数为160匝的多层螺线管，经测量其电感值为1.78 mH，因此仿真时在输出端添加电感值为1.78 mH的感性负载，分别得到200 Hz和500 Hz下磁控电源仿真电流输出波形如图8所示。

4 励磁电流波形测试和交变磁场测试

按图9所示电路搭建电流和磁感应强度测试系

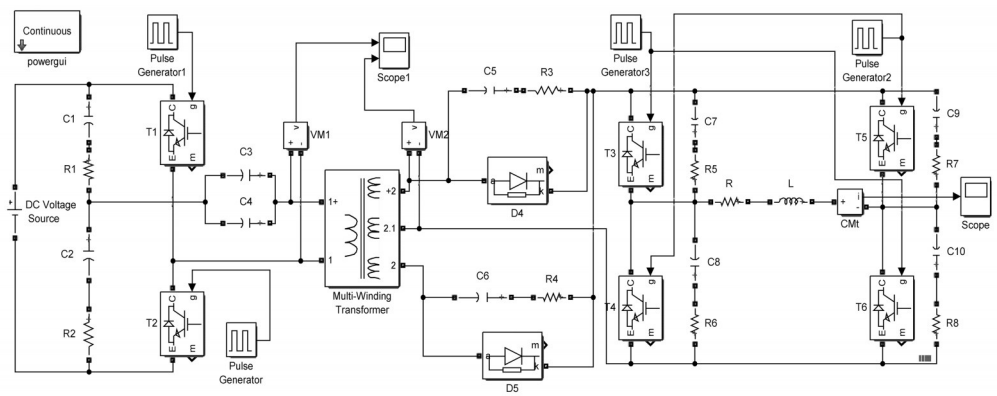
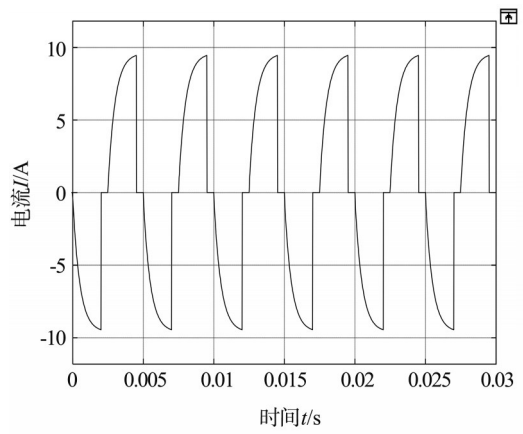
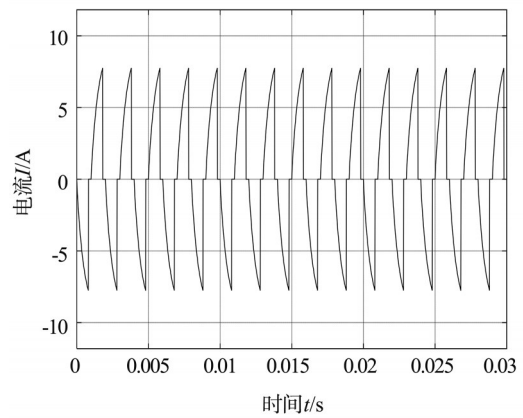


图7 磁控电源仿真模型

Fig. 7 Simulation model of magnetron power supply



（a）200 Hz、80%仿真输出波形



（b）500 Hz、80%仿真输出波形

图 8　磁控电源仿真电流输出波形

Fig. 8　Simulation current output waveform of magnetron power supply

统，测试磁控电源实际输出励磁电流。采用 USB-6215 数据采集卡，结合 LabVIEW 软件所编写的程序，以显示磁控电源实际输出的励磁电流波形。

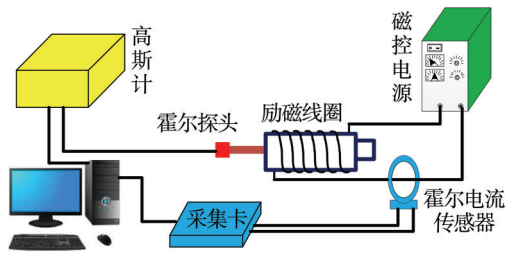
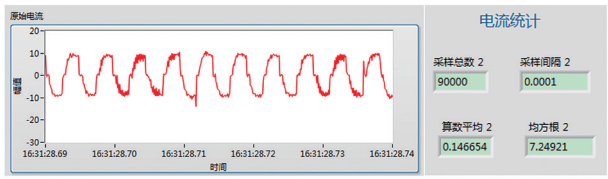


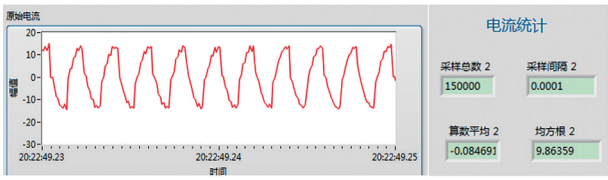
图 9　磁控电源测试系统

Fig. 9　Magnetron power supply test system

实际测得不同给定参数下的磁控电源输出电流波形如图 10 所示。其中图 10a 为测试频率 200 Hz、占空比 80%、电流幅值 6 A 的励磁电流波形；图 10b 为测试频率 500 Hz、占空比 80%、电流幅值 10 A 的励磁电流波形，可以看出设计的磁控电源能够满足频率、占空比和励磁电流幅值调节的特性。从实测电流波形形状看，随着输出频率的提高波形有畸变，与仿真结果一致。这是由于负载为储能元件电感，电流方向改变时电流不能突变造成的。



（a）6 A、200 Hz、80%



（b）10 A、500 Hz、80%

图 10　实测磁控电源输出电流波形

Fig.10　Measured output current waveform of magnetron power supply

当有交流电流过励磁线圈时，即会产生交变磁场，采用 MODL 903 型高斯计来测量励磁线圈产生的磁感应强度。高斯计将采集的数据存储在计算机上，通过 Origin 绘图软件绘制出磁感应强度波形，即可读出磁感应强度大小和交变磁场频率。如图 11 所示，磁控电源给定励磁电流幅值 6 A、频率 200 Hz、占空比 80%时，霍尔探头测得距励磁线圈尾部 20 mm 处的磁感应强度峰值可达 100 Gs，其交变磁场频率与磁控电源设定的频率相同，且磁场强度对称性很好。说明该磁控电源产生的方波交流作用于励磁线圈上，能产生给定频率且一定强度的纵向交变磁场，可以将该磁控电源用于后续的纵向交变磁场作用下的大电流 GMAW 试验中。

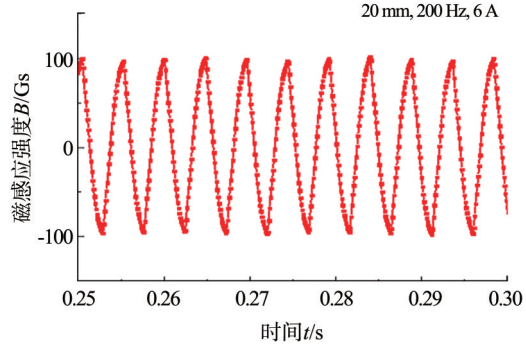


图 11　交变磁场波形

Fig. 11　Alternating magnetic field waveform

5 结论

（1）交变磁控电源主电路采用双逆变拓扑结构，一次逆变相当于恒流源，二次逆变获得所需电流频率、占空比可独立调节的交变电流波形。

（2）借助仿真手段建立磁控电源仿真模型，根据计算参数设置模型参数，对交变磁控电源的仿真输出波形进行分析，论证主电路拓扑结构及参数设计的合理性。

（3）加入电感负载，测试不同给定参数下磁控电源实际电流输出波形，测试结果显示设计的磁控电源能够满足频率、占空比和励磁电流幅值调节的特性。同时也测试了交变磁场，得到了与磁控电源输出相匹配的交变磁场，可用于大电流GMAW磁控焊接技术中。

参考文献：

[1] 马青军，韦晨，方乃文，等. 磁控焊接技术的研究现状[J]. 机械制造文摘（焊接分册），2019，279（01）：14–19，37.
Ma Qingjun，Wei Chen，Fang Naiwen，et al. Research status of magnetic controlled welding technology[J]，Machine Building Abstracts，2019，279(01)：14–19，37.

[2] 邓呈敏，程东海，张华，等. 纵向直流磁场对铝铜熔钎焊接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报，2020，41（10）：23–27，98.
Deng Chengmin，Cheng Donghai，Zhang Hua，et al. Effect of microstructure and mechanical properties on Al-Cu welding-brazing joint assisted by longitudinal DC magnetic field[J]. Transactions of The China Welding Institution，2020，41(10)：23–27，98.

[3] 龙琼，钟云波，余正平，等. 外加磁场下焊接技术的研究现状[J]. 中国材料进展，2020，39(06)：472–479.
Long Qiong，Zhong Yunbo，Yu zhengping，et al. Recent Progress in Welding Technology under External Magnetic Fields[J]. Materials China，2020，39(06)：472–479.

[4] 肖磊，樊丁，黄健康，等. 外加高频纵向磁场作用下的TIG焊电弧数值模拟[J]. 焊接学报，2017，38(02)：66–70.
Xiao Lei，Fan Ding，Huang Jiankang，et al. Numerical simulation of TIG welding arc under the action of external high frequency longitudinal magnetic field[J]. Transactions of The China Welding Institution，2017，38(02)：66–70.

[5] 孙雅杰，常云龙. 磁控电弧焊接过程及新技术研究进展[J]. 材料导报，2020，34(21)：21155–21165.
Sun Yajie，Chang Yunlong. Development of Magnetically Controlled Arc Welding Process and New Technology[J]. Materials Reports，2020，34(21)：21155–21165.

[6] 樊丁，杨文艳，肖磊等. 高频交变磁场对大电流GMAW熔滴过渡和飞溅率的影响[J]. 焊接学报，2019，40(07)：1–5，161.
Fan Ding，Yang Wenyan，Xiao Lei，et al. Effect of high-frequency alternating magnetic field on droplet transfer and spattering rate of high-current GMAW[J]. Transactions of The China Welding Institution，2019，40(07)：1–5，161.

[7] 刘政军，孙景刚，慈宏钢，等. 间歇交变磁场频率对堆焊金属组织及性能的影响[J]. 表面技术，2008，37(01)：19–20，58.
Liu Zhengjun，Sun Jinggang，Ci Honggang，et al. Influence of frequency of intermittent alternative magnetic field on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer[J]. Surface Technology，2008，37(01)：19–20，58.

[8] 常云龙，白金，刘丹，等. 纵向磁场对CO_2焊接电弧及焊缝成形的影响[J]. 沈阳工业大学学报，2016，38(06)：612–617.
Chang Yunlong，Bai Jin，Liu Dan，et al. Influence of longitudinal magnetic field on welding arc and formation of weld bead in CO_2 welding[J]. Journal of Shenyang University of Technology，2016，38(06)：612–617.

[9] 余陈，张宇鹏，徐望辉，等. 厚板TC4钛合金磁控窄间隙TIG焊接工艺[J]. 电焊机，2018，48(01)：52–56.
Yu Chen，Zhang Yupeng，Xu Wanghui，et al. Study on magnetically controlled narrow-gap TIG welding of thick plate TC4 titanium alloy[J]. Electric Welding Machine，2018，48(01)：52–56.

[10] 郭文然，李洋. MATLAB在电力电子电路仿真中的应用[J]. 电子技术，2013，42(11)：26–29.
Guo Wenran，Li Yang. Application of MATLAB in Power Electronic Circuit Simulation[J]. Electronic Technology，2013，42(11)：26–29.