

基于 STM32 微控制器的高频脉宽调制器的设计

温亮^{1,2}, 郭钟宁^{1,3}, 陈朝大^{1,2}, 陈晓磊^{1,2}

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广州市非传统制造技术及装备重点实验室, 广州 510006; 3. 佛山市铭维科技有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要: 高频脉冲电源对提高微细电解加工的工艺性有着重要的作用, 而脉宽调制器经驱动电路生成 IGBT 控制信号决定着高频高压脉冲电源的输出频率及占空比; 针对电解加工工艺的特殊性, 创新性地提出基于 32 位微型控制器芯片 STM32F103RCT6 为核心的调频调占空比的方案; 根据脉冲频率、占空比可调的要求, 完成了脉宽调制器的软硬件设计, 通过编译运行程序代码进行一系列的调频、调占空比实验并利用示波器采集两路输出的 PWM 波形; 实验表明, 自行研制的脉宽调制器能稳定地调节两路 PWM 控制信号的频率及占空比, 验证了装置及设计的合理性。

关键词: 脉冲电源; 微控制器; PWM 控制芯片; 频率调制器

Design of High-frequency Pulse Width Modulator Based on STM32 Microcontroller

Wen Liang^{1,2}, Guo Zhongning^{1,3}, Chen Chaoda^{1,2}, Chen Xiaolei^{1,2}

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. Guangzhou Key Laboratory of Nontraditional Machining and Equipment, Guangzhou 510006, China;
3. Foshan Gewei Technology Co., Ltd., Foshan 528225, China)

Abstract: The high-frequency pulse power supply plays an important role in improving the manufacturability of the micro electrochemical machining. The pulse width modulator generates the IGBT control signal through the drive circuit to determine the output frequency and duty cycle of the high-frequency and high-voltage pulse power source. In view of the particularity of the electrochemical machining, a innovational solution based on the 32-bit microcontroller chip STM32F103RCT6 as the core to regulate the frequency and the duty cycle, was proposed. According to the requirement of regulating the pulse frequency and duty cycle, it has already completed the hardware and software design of the pulse width modulator in the study. A series of regulating the frequency and the duty cycle experiments were performed by compiling and running the program code, and the PWM waveforms of the two outputs were collected by an oscilloscope. Experiments show that the self-developed pulse width modulator can stably regulate the frequency and duty cycle of the two PWM control signals, verifying the rationality of the device and design.

Keywords: pulse power supply; microcontroller; PWM control chip; frequency modulator

0 引言

电解加工是利用金属在电解液中进行阳极溶解的电化学原理来加工金属材料, 具有工具电极无损耗、无宏观切削力、材料以离子形式去除等工艺特点, 因而在微型机械零部件、表面功能结构、难加工材料以及薄壁零件的加工制造领域有着“得天独厚”的优势。基于电解加工工艺的特殊性, 如何进一步提高加工定域性、减小杂散腐蚀成为这项加工工艺能否广泛运用于精密零部件及微纳米尺度表面功能结构制造领域的关键因素。研究表明, 利用高频脉冲电源进行电解加工有利于在间隙内产生与脉冲电流同步的脉冲压力波, 加强了对电解液流场的搅拌作用, 使得间

隙内的流场分布趋于均匀, 并改善间隙内散热条件, 使得脉冲电解加工的加工间隙大为减小, 提高了加工的定域性, 故利用高频脉冲电源进行电解加工是提高电解加工精度、减小杂散腐蚀的有效途径^[1-2]。

基于高频脉冲电源对频率、占空比稳定调节的要求, 研制了一款高频脉宽调制器。它是以 32 位微型控制器芯片 STM32F103RCT6 为核心, 通过 STM32 内部的定时器构建脉宽调制模块输出 PWM 信号经驱动电路生成 IGBT 控制信号。STM32 是基于 ARM 内核的 32 位 MCU, 其内核芯片分为 F1 和 F4 系列芯片^[3]。STM32F103RCT6 内核芯片采用 32 位高性能 ARM Cortex-M3 处理器, 内置 4 个通用定时器、2 个基本定时器、2 个高级定时器, 且每个高级及通用定时器带有 4 个相互独立的通道, 内部时钟频率高达 72 MHz, 硬件资源丰富, 完全能满足高频脉宽调制器对芯片硬件资源的开发需求。本课题来源于国家自然科学基金项目, 本文对高频脉冲电源的脉宽调制器的设计进行了研究。

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-06-26。

基金项目: 国家自然科学基金—广东省联合基金项目(U1601201); 国家自然科学基金项目(51575113)。

作者简介: 温亮(1993-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事电解加工技术及装备、计算机仿真分析方向的研究。

1 脉宽调制原理

在电源主电路中，三相 380 V/220 V 交流输入经大功率整流二极管得到直流电压后，经过滤波电容得到较平滑的直流电压。直流电压经过 IGBT 全桥逆变后变成交流电^[4-5]。脉宽调制是 IGBT 逆变电路的核心部分，通过 ARM 输出 PWM 信号并改变脉冲信号的占空比及频率经驱动电路提升驱动电压后控制逆变电源的输出。IGBT 逆变电路中，桥臂 IGBT₁ 和 IGBT₄ 作为一对，桥臂 IGBT₂ 和 IGBT₃ 作为一对，成对的两个桥臂同时导通，两对交替各导通 180°，故只需两路 PWM 信号就能控制全桥逆变电路的交替通断。由定时器 TIM₁ 的通道 CH1、通道 CH2 产生两路 180°互补的脉冲信号 PWM₁ 和 PWM₂ 来控制桥臂 IGBT₁ 和 IGBT₂ 的导通与关断。因为成对的两个桥臂是同时导通或关断的，所以定时器 TIM₁ 产生的两路互补的脉冲信号 PWM₁ 和 PWM₂ 同时也能控制桥臂 IGBT₄ 和 IGBT₃ 的导通与关断^[6-7]。

本文提出的脉宽调制方案是通过 STM32 内置的高级定时器 TIM₁ 构建 PWM 脉冲信号输出模块，改变脉冲信号的占空比及频率并经驱动电路提高驱动电压来控制功率开关管 IGBT₁~IGBT₄ 的交替通断及通断频率。脉冲信号的输出频率与高级定时器 TIM₁ 内部计数器的时钟频率 (CK_CNT) 及自动重装载值 (ARR) 有关，分别由定时器 TIM₁ 的计数器寄存器 (TIM₁_CNT) 及对应的自动重装载寄存器 (TIM₁_ARR) 控制，时钟频率计算方法如图 1 所示。

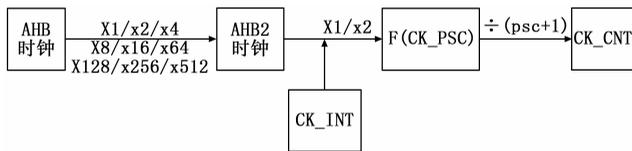


图 1 定时器 1 时钟频率

本文设定定时器 1 的时钟来源为内部定时器 (CK_INT) 且从 APB2 时钟倍频而来。如图 1 所示，AHB 时钟可经过 9 种分频因子分频后送给 APB2 时钟使用，除非 APB2 时钟由 AHB 时钟 1 倍频所得，定时器 1 的时钟 (CK_PSC) 就等于 APB2 的时钟，否则定时器 1 的时钟是 APB2 时钟的两倍^[8-9]。利用式 (1) 计算定时器 1 的计数器时钟 (CK_CNT) 频率。

$$f_{(CK_CNT)} = \frac{F_{(CK_PSC)}}{psc + 1} \quad (1)$$

$f_{(CK_CNT)}$ 为计数器时钟频率； $F_{(CK_PSC)}$ 为定时器 1 的时钟频率； psc 为预分频系数；

确定好定时器 1 的计数器时钟频率及自动重装载值 (ARR) 后，定时器 1 的计数器将按设定好的计数频率自动从 0 计数到自动重装载值，通过设置计数器的时钟频率及自动重装载值控制脉冲信号的输出频率。

定时器 1 有 4 个独立的输出通道，通过设置捕获/比较模式寄存器 (TIM₁_CCMR₁)、捕获/比较寄存器 1、2 (TIM₁_CCR₁、TIM₁_CCR₂) 等寄存器使定时器 1 的通道

1 和通道 2 输出两路 180°互补的脉冲信号，其 PWM 工作过程如图 2 所示^[10-11]。

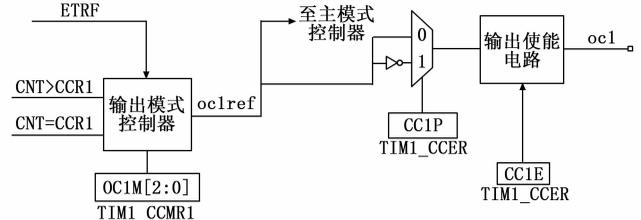


图 2 PWM 脉宽调制工作过程

如图 2 所示，以定时器 1 的通道 1 为例，通过操作定时器 1 的捕获/比较寄存器 1 (TIM₁_CCR1) 设置计数器的比较值 (CCR1)，同时为了防止两路互补的脉冲信号直接导通，两路输出必需留有死区时间，故通道 2 的计数器的比较值 (CCR2) 可设置为 ARR 减去 CCR1。捕获/比较模式寄存器 1 (TIM₁_CCMR1) 控制通道 1 与通道 2 的输出比较模式，而本文的目的是通过定时器 1 的通道 1 和通道 2 输出两路 180°互补的脉冲信号，然后经驱动电路提高驱动电压后控制全桥逆变电路中 IGBT 管的交替通断，最终达到调节高频脉冲电源输出电压占空比的目的，故可将通道 1 的输出比较模式设置为当计数器向上计数时，一旦计数器的计数值小于通道 1 的计数比较值 (CCR1) 时通道 1 为有效电平，否则为无效电平；当计数器向下计数时，一旦计数器的计数值大于通道 1 的计数比较值时通道 1 为无效电平，否则为有效电平；通道 2 的输出比较模式的设置方法与通道 1 的输出比较模式相反。通过操作定时器 1 的捕获/比较使能寄存器 (TIM1_CCER) 设定通道 1、通道 2 的输出极性为低电平有效并打开相应通道的输出使能。因为定时器 1 为高级定时器，所以必须打开主输出使能，开启 OC 和 OCN 输出，PWM 生产原理如图 3 所示。

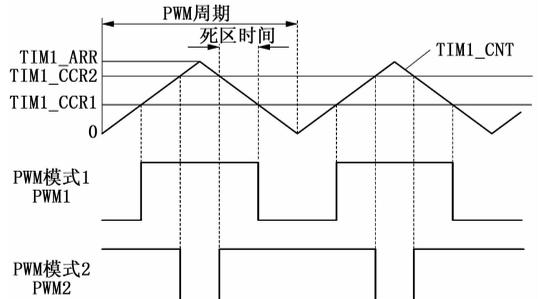


图 3 PWM 生成原理

如图 3 所示，定时器 1 的计数器选择交替地向上和向下计数，通过设定自动重装载值 (ARR)、通道 1 和通道 2 的计数器比较值 (CCR1/CCR2) 及对应通道的输出比较模式、输出电平的极性等，使定时器 1 的通道 1、通道 2 分别输出两路 180°互补的脉冲信号^[10]。

2 脉宽调制器的软硬件设计

2.1 脉宽调制器的硬件设计

为了实现对脉冲信号的频率及占空比的调节，控制系

统采用 ST 公司的 STM32F103RCT6 芯片, 其芯片内置 8 个定时器且每个高级定时器及通用定时器均有 4 个相互独立的捕获/比较通道, 定时器的计数器时钟频率最高可达 72 MHz, 完全可以达到脉冲信号的高频输出以及占空比稳定调节的要求。

计数器的时钟可以由内部时钟 (CK_INT)、外部输入 (TIx)、外部触发输入 (ETR)、内部触发输入 (ITRx) 提供, 本文设定定时器 1 的计数器时钟由内部时钟提供, 最高可达 72 MHz, 可根据式 (2) 计算定时器 1 的通道 1、通道 2 输出的脉冲频率。

$$f_{out} = \frac{T_{clk}}{(arr + 1) \times (psc + 1)} \quad (2)$$

f_{out} 为脉冲输出频率; T_{clk} 为定时器的输入时钟频率; arr 为自动重装载值; psc 为预分频系数;

通过操作时钟配置寄存器 (RCC_CFGR) 设定定时器的输入时钟频率 T_{clk} 为 36 MHz, 为了保证在调节脉冲信号的输出频率时 PWM 信号的占空比保持不变, 设定自动重装载值 (arr) 不变, 改变预分频系数 (psc) 的值调节脉冲信号的输出频率。同理可通过修改计数器的计数比较值 ($CCR1$ 、 $CCR2$) 控制两路 PWM 信号的占空比。

基于 STM32 研制的脉宽调制器输出的 PWM 信号为 3.3 V 的低电压信号, 而逆变电路中 IGBT 管的驱动电压为 24 V, 故由高频脉宽调制器输出的 PWM 信号不能直接驱动 IGBT 管的通断, 需要经过驱动电路提高驱动电压后再送 IGBT 管, 进而控制 IGBT 管的交替通断及通断频率。为了保证高频脉冲电源稳定、可靠地工作, 驱动电路需满足开关速度快、抗干扰能力强、输出阻抗低且驱动电压高的要求, 鉴于驱动电路的工作特性, 多采用 TLP250 光耦合器驱动 IGBT 管, 驱动电路如图 4 所示^[12]。

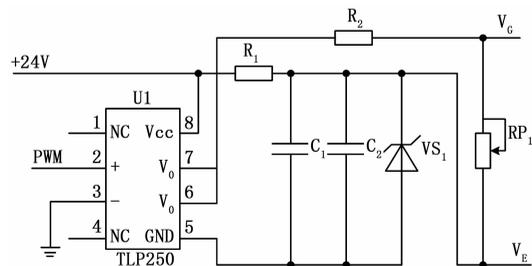


图 4 驱动电路

TLP250 光耦合器内置一个 GaAlAs 光发射二极管和一个集成光探测器, 采用 8 脚双列封装结构, 带光隔离和驱动输出。如图 4 所示, 将高频脉宽调制器输出的 PWM 信号输入到 TLP250 光耦合器中, 光耦合器外接一个 7.5 V 的稳压管, 当 PWM 信号向光耦合器的输入引脚 (2、3 引脚) 输入高电平时, 光耦合器的输出引脚 (6、7 引脚) 的输出电压被内置的上拉电阻拉高到 24 V。此时, 外围电路 V_G 引脚的电势为 24 V; 当 PWM 信号向光耦合器的输入引脚输入低电平时, 光耦合器的输出引脚输出 0 V, 外围电路 V_G 引脚的电势为 0 V。由于外接稳压管的作用, 外围电路 V_E

引脚的电势始终为 7.5 V, 故采用 TLP250 光耦合器构建的驱动电路其正向导通的阈值电压为 +16.5 V, 反向关断的阈值电压为 -7.5 V, 将 24 V 供电电压转换成 IGBT 管的驱动电压, 从而使 PWM 信号经驱动电路生成 IGBT 控制信号, 从而达到控制 IGBT 管交替通断及通断频率的目标。

2.2 脉宽调制器的软件设计

STM32F103RCT6 芯片采用 ARMv7 架构的 Cortex-M3 内核处理器, 其配套的开发工具为 MDK5。通过改变自动重装载值、预分频系数、计数器计数比较值及计数器时钟频率调节 PWM 信号的输出频率及占空比, 系统程序设计如图 5 所示。

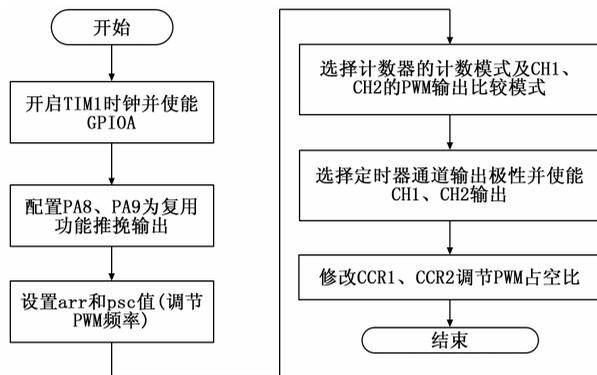


图 5 系统程序设计流程

本文提出的基于 STM32 微型控制器的脉宽调制器通过将控制器中 GPIOA 的 PA8、PA9 配置为复用功能推挽输出, 使其输出两路 180° 互补的 PWM 信号, 经驱动电路提高驱动电压后送电源主电路的全桥逆变电路控制 IGBT 管的通断, 从而达到调节高频脉冲电源输出频率及占空比的目的。如图 5 所示, 开启定时器 1 的时钟并使能对应 IO 口, 配置 IO 口的输出模式及输出速度, 通过操作 STM32 内置的对应寄存器设置计数器的计数模式、通道的输出比较模式及极性并使能对应通道输出, 修改自动重装载值 (arr)、预分频系数 (psc)、计数比较值 (CCR_1 、 CCR_2) 调节两路 PWM 信号的频率及占空比。

3 实验结果与分析

研究表明, 采用脉冲电源进行电解加工改善了极间流场的理化特性, 极间流场性质的变化导致加工中极间间隙变小, 极大地提高了电解加工精度及加工质量。基于电解加工的特殊工艺需求, 设计了一款 0~50 kHz 连续可调的脉宽调制器用于调节脉冲电源的输出频率及占空比。通过修改自动重装载值 (arr)、计数比较值 (CCR_1 、 CCR_2) 调节两路 PWM 信号的输出频率及占空比, 为了留有死区时间防止两路直接导通造成短路, 烧坏元器件, 需要确保 CCR_1 小于 ($arr - CCR_2$)。将 STM32 的 GPIOA 中的 PA8、PA9 设置为复用功能推挽输出并利用示波器采集两个通道的输出波形, 测得波形如图 6 所示。

如图 6 所示, 通过设置计数比较值使脉冲信号的占空

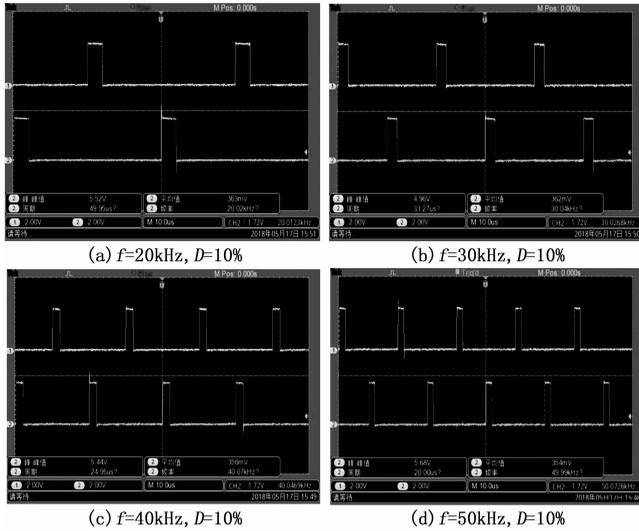


图 6 不同频率的 PWM 波形

比保持 10%，修改自动重装载值 (arr) 调节脉冲信号的输出频率。因为脉冲信号输出的是 3.3 V 电压且占空比为 10%，所以电压的理论平均值约为 0.33 V，其实际测得的电压平均值为 0.353 V，实际测量值与理论计算值相差不大且不同频率下的 PWM 波形稳定，达到了调节脉冲信号频率的目的。修改计数比较值 ($CCR_$) 控制两路 PWM 信号的占空比，利用示波器采集通道 2 输出方波的平均电压值，其测量结果如图 7 所示。

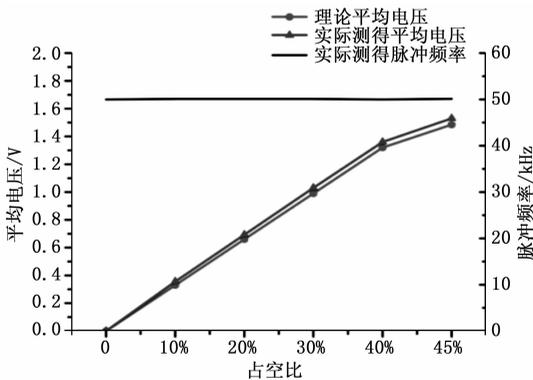


图 7 不同占空比下输出的电压均值

如图 7 所示，通过修改计数比较值调节脉冲信号的占空比，使得通道 2 脉冲信号的占空比由 0 逐渐增大到 50%，但是为了留有死区时间，一路 PWM 信号输出的占空比最大只能达到 4*%，加上死区时间 (50% - 4*%)，两路输出加起来是 100%。随着通道 2 输出的 PWM 信号的占空比增大，示波器实时检测到的平均电压逐渐增大且与理论计算值相差不大，精准地调节了脉冲信号的占空比。同时，通过分析测量结果发现：在调节占空比的过程中，脉冲信号能在高频下保证波形不失真，保持以 50 kHz 的频率稳定地输出 PWM 信号，验证了该脉宽调制器的可靠性且达到了预定设计目标。

4 结束语

基于高频脉冲电解加工的特殊工艺需求，研制一款 0~50 kHz 连续可调的高频脉冲电解加工电源，脉宽调制器作为高频脉冲电源的控制部分调节脉冲电源的输出频率及占空比。本文提出采用 STM32F103RCT6 芯片为核心研制一款频率及占空比连续可调的高频脉宽调制器。通过内置的高级定时器 TMI_1 构建外围电路，通过修改寄存器中的自动重装载值 (arr)、计数比较值 ($CCR_$) 并将 GPIOA 的 PA8、PA9 引脚配置为复用功能推挽输出，输出两路 180° 互补的脉冲信号经驱动电路提高驱动电压后送脉冲电源主电路的全桥逆变电路控制 IGBT 管的交替通断及通断频率，达到调节高频脉冲电源输出频率及占空比的目的。

通过分析实验结果发现：1) 当计数器的时钟频率一定时，修改自动重装载值 (arr) 调节 PWM 信号的输出频率，使 STM32F103RCT6 芯片的 PA8、PA9 引脚输出两路 180° 互补的脉冲信号且脉冲频率在 0~50 kHz 范围内连续可调；2) 通过修改计数比较值 ($CCR_$) 精准地控制脉冲信号的占空比且在高频输出下波形不发生失真；3) 本文研制的脉宽调制器能有效地调节脉冲信号的占空比且在保证波形不失真的情况下频率在 0~50 kHz 连续可调，下一步将利用本文研制的脉宽调制器配合驱动电路对脉冲电解加工电源的 IGBT 管进行高频、高压下的通断实验，实现脉冲电解加工电源的高频、高压输出及占空比的调节。

参考文献：

- [1] 孙立忠, 王振龙, 朱保国. 超短脉冲微细电解加工实验研究 [J]. 航空精密制造技术, 2007, 43 (6): 34-7.
- [2] Kim B H, Na C W, Lee Y S, et al. Micro electrochemical machining of 3D micro structure using dilute sulfuric acid [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54 (1): 191-4.
- [3] 王永虹, 徐 炜, 郝立平. STM32 系列 ARM Cortex-M3 微控制器原理与实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [4] 李洪文, 李元春. 经纬仪伺服系统功率开关电源及控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (1): 78-81.
- [5] 李远波, 张永俊, 周慧峰, 等. 基于 DSP 的软开关逆变器脉冲电源 [J]. 电力电子技术, 2009, 43 (11): 59-60.
- [6] 石必利, 张永俊, 罗红平. 带软开关和能量释放功能的脉冲电源的研制 [J]. 电加工与模具, 2015 (3): 40-2.
- [7] 许志永, 张永俊, 陈柱春. 新型高频窄脉冲电解电源的研制 [J]. 电加工与模具, 2007 (2): 58-61.
- [8] 荆海霞. STM32 系列微控制器的时钟系统分析 [J]. 科技信息, 2008 (33): 517.
- [9] 张淑清. 嵌入式单片机 STM32 设计及应用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [10] 廉佐政, 王海珍. 基于 STM32 的 PWM 输出实验设计 [J]. 实验技术与管理, 2017, 34 (8): 137-40.
- [11] 崔 琳, 朱 磊, 白 璐. 基于 STM32 的参数可调 PWM 波形发生器设计 [J]. 信息通信, 2018 (1): 129-31.
- [12] 陈 龙, 李远波, 曹 阳, 等. 双金属带锯条精密焊接电源的研制 [J]. 电焊机, 2018, 48 (4): 52-56.