

## 逆变焊接电源的离散建模与最少拍控制

朱志明<sup>1,2</sup>, 杨中宇<sup>1</sup>, 汤莹莹<sup>1</sup>, 夏铸亮<sup>1</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 逆变焊接电源所采用的全桥、半桥等功率变换电路可以等效为 Buck 变换器。在对 Buck 变换器离散建模的基础上, 通过直接时域推导, 建立了可用于逆变焊接电源闭环控制的最少拍控制律。所构建的控制算法充分考虑了模型参数与实际参数之间误差的影响。输出滤波电感的变化影响最少拍控制的稳定性和控制效果。稳定条件为模型所用最大电感值不超过实际电感值的 1.67 倍。结果表明, 当模型电感值和实际电感值相等时, 系统为最少拍控制。在模型参数和实际负载参数匹配时, 系统实现了“没有稳态误差、不存在输出纹波、输出幅值受限”的最少拍控制。

**关键词:** 逆变焊接电源; 最少拍控制; Buck 变换器; 离散建模; 稳定性分析

**中图分类号:** TG 434 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)06-0019-04

### 0 序 言

现代制造业的发展带动了电弧焊接技术的进步, 对焊接电源的性能提出了更高的要求。随着信息和电子技术的发展, 数字处理器广泛应用于逆变焊接电源的信息处理和反馈控制<sup>[1]</sup>。然而, 目前国内大部分数字控制的逆变焊接电源仍沿用传统模拟控制的思路, 即对功率变换电路采用平均化建模, 反馈校正采用数字 PID 算法。这种方法可以满足常规直流电弧焊接工艺对电源输出动态特性的要求。但是对于熔化极脉冲焊接、变极性焊接等, 由于存在电源脉冲输出值的阶跃变化, 并伴随有熔滴过渡或变极性输出导致的复杂负载变化, 此时仍沿用基于平均化模型的数字 PID 控制实现动态、快速且稳定的输出, 则显得捉襟见肘。因此, 需要研究新的建模方法, 建立更加有效的传递函数模型, 据此设计合理的反馈控制算法, 使焊接电源的输出特性在实现快速动态响应的同时, 具有良好的稳定鲁棒性。

众所周知, 广泛应用于逆变焊接电源的全桥、半桥等功率变换电路均可等效为 Buck 变换器<sup>[2]</sup>, 因此, 对逆变焊接电源的建模也可以等效为对 Buck 变换器的建模。反馈校正控制追求的目标主要是快速性和稳定性, 在各种离散控制方法中, 最少拍控制具有瞬态响应快、精度高等优点。对 Buck 变换器的传

递函数进行正确建模后, 根据最少拍控制理论设计控制系统, 可以获得良好的控制性能<sup>[3,4]</sup>。文中以 Buck 变换器为研究对象, 从离散时域分析入手, 直接从时域方程导出最少拍控制律, 并对考虑无纹波控制和占空比限制的最少拍控制算法的控制效果和稳定性条件进行了深入分析和仿真验证。

### 1 Buck 变换器开关过程和离散模型

图 1 为分析用等效 Buck 变换器, 工作于连续导通模式时, 控制占空比与输出电压或电流之间存在着良好的线性关系, 相对于其它拓扑结构, 在控制性能上具有一定的优势。图 1 中,  $L$  为输出滤波电感 (包括负载回路寄生电感),  $U_g$  为全桥或半桥功率变换器等效至变压器副边的电压,  $R$  为负载动态电阻,  $U_o$  为负载偏置电压。

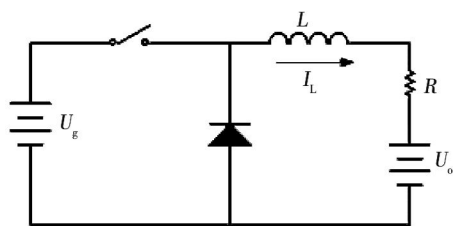


图 1 Buck 变换器

Fig. 1 Buck converter

图 2 为 Buck 变换器的 PWM 控制波形生成原理及输出电流波形, 每个控制周期对应一个三角波。

收稿日期: 2014-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075231); 铁道部科技研究开发计划重大资助项目(2008G001-C); 国家科技重大专项资助项目(2012ZX04012011)

电流采样点在三角波的峰值处,采样后立即进行下一周期的控制占空比计算,也就是确定新的控制电平,然后在三角波的谷底更新控制电平,该电平在每个 PWM 控制周期内保持不变。

下面以恒流输出控制为目标,建立 Buck 变换器的控制占空比  $D$  对输出电流  $I_L$  的离散模型。

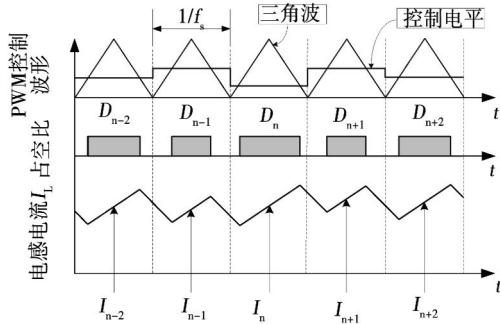


图 2 Buck 变换器的控制波形

Fig. 2 Control waveform of Buck converter

对于图 1 所示 Buck 变换器,图 2 中相邻采样电流值之间的关系可近似表示为

$$\begin{aligned} Lf_s(I_n - I_{n-1}) &= \frac{1}{T_s} \int_{(n-1)T}^{nT} U_L dt \\ &\approx U_g \frac{D_n + D_{n-1}}{2} - (U_o + \frac{I_n + I_{n-1}}{2} R) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f_s$ 为采样频率; $T_s$ 为采样周期; $U_L$ 为电感电压; $\dots n-1, n, n+1 \dots$ 为采样周期序号.例如, $D_n$ 为第  $n$  个周期的控制占空比; $I_n$ 为第  $n$  个周期的  $I_L$  采样电流值.式(1)的  $z$  变换为

$$\begin{aligned} Z[I_n] &= \frac{(1+z)U_g}{R(z+1) + 2L(z-1)f_s} Z[D_n] \\ &\quad - \frac{2z}{R(z+1) + 2L(z-1)f_s} Z[U_o] \end{aligned} \quad (2)$$

式(1),式(2)即是 Buck 变换器控制占空比  $D_n$  对输出电流  $I_n$  的离散模型,相对于平均化模型,该模型不仅明确反映了采样到控制的滞后,而且精确显示了单个周期内的反馈值与控制占空比之间的关系。

## 2 Buck 变换器的最少拍控制律

对于追求快速动态响应的逆变焊接电源来说,最少拍控制是比较合适的方法,可以在有限个、甚至单个周期内快速精确地调节电源输出.然而,若采用传统的离散控制理论,从式(2)出发,进行最少拍控制器设计,不仅需要充分的离散控制理论知识,且设计过程复杂.对于 Buck 变换器这样简单的被控对象,可以直接进行时域分析,设计最少拍控制律。

由式(1)可知,若已知  $n-1$  时刻的电流,要在  $n$  时刻将电源的输出电流调整至设定电流  $I_{set}$ ,只需从方程组(3)中解出  $D_n$  即可。

$$\begin{cases} Lf_s(I_n - I_{n-1}) = U_g \frac{D_n + D_{n-1}}{2} - (U_o + \frac{I_n + I_{n-1}}{2} R) \\ I_n = I_{set} \end{cases} \quad (3)$$

求解式(3),可得

$$D_n = -D_{n-1} + \frac{2f_s(I_{set} - I_{n-1})L + (I_{set} + I_{n-1})R + 2U_o}{U_g} \quad (4)$$

按照式(4)计算  $D_n$  时,需要已知参数  $L, R, U_g, U_o$  的值,如果所用模型参数值与实际电路参数值不一致,则计算获得的  $D_n$  值将使被控电流与设定电流之间产生稳态误差.由于模型参数与实际参数之间的误差是不可避免的,尤其是对电弧这种时变非线性负载来说更是如此.因此,对式(1)进行修正,考虑参数误差对离散模型的影响,增加  $\delta U$  项。

$$Lf_s(I_n - I_{n-1}) = U_g \frac{D_n + D_{n-1}}{2} - (U_o + \frac{I_n + I_{n-1}}{2} R) + \delta U \quad (5)$$

式中: $\delta U$  代表了各种非理想因素和参数误差等造成的模型和实际系统之间的差异。

显然, $\delta U$  不可能事先预测,假设  $\delta U$  的变化速度与电源的开关工作频率相比慢得多,则可以通过增加采样方程的个数,联立求解消除  $\delta U$ . 考虑误差  $\delta U$  的前 2 个采样周期的联立方程组为

$$\begin{cases} Lf_s(I_{n-1} - I_{n-2}) = U_g \frac{D_{n-1} + D_{n-2}}{2} - (U_o + \frac{I_{n-1} + I_{n-2}}{2} R) + \delta U \\ Lf_s(I_n - I_{n-1}) = U_g \frac{D_n + D_{n-1}}{2} - (U_o + \frac{I_n + I_{n-1}}{2} R) + \delta U \\ I_n = I_{set} \end{cases} \quad (6)$$

求解式(6),可得

$$\begin{aligned} D_n &= D_{n-2} + \frac{2f_s L(I_{n-2} - I_{n-1})}{U_g} \\ &\quad + \frac{R(I_{set} - I_{n-2}) + 2f_s L(I_{set} - I_{n-1})}{U_g} \end{aligned} \quad (7)$$

利用式(7)进行 Buck 变换器的最少拍控制时,由于式(2)的离散传递函数中包含一个单位圆上的零点,将出现常见的“纹波问题”。

要得到无纹波的最少拍控制,则需要增加最少拍控制的拍数,增加的拍数等于零点的个数.为此,采取添加方程强约束波动,即添加  $D_{n+1}$  和  $D_{n+2}$  周期内的方程,并强约束  $D_{n+1}$  和  $D_{n+2}$  周期内的电流和占空比不抖动.加入约束后的方程组为

$$\begin{cases} Lf_s(I_{n+1} - I_n) = U_g \frac{D_n + D_{n+1}}{2} - (U_o + \frac{I_{n+1} + I_n}{2}R) + \delta U \\ Lf_s(I_{n+2} - I_{n+1}) = U_g \frac{D_{n+1} + D_{n+2}}{2} - (U_o + \frac{I_{n+2} + I_{n+1}}{2}R) + \delta U \\ I_{n+1} = I_{set}, I_{n+2} = I_{set}, D_{n+1} = D_{n+2} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)与式(6)联立求解,可求得最终的最少拍控制律为

$$\begin{aligned} D_n = & D_{n-1} \left( \frac{1}{4} + \frac{R}{8f_s L} \right) + D_{n-2} \left( \frac{3}{4} - \frac{R}{8f_s L} \right) \\ & + (I_{set} - I_{n-1}) \left( \frac{f_s L}{U_g} + \frac{R}{2U_g} \right) \\ & + (I_{n-1} - I_{n-2}) \left( -\frac{3f_s L}{2U_g} + \frac{R}{U_g} - \frac{R^2}{8f_s L U_g} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

采用式(9)进行占空比计算时,可能会导致占空比大于100%,或者为负值的情况,这显然不符合实际. 实际电路中,综合考虑各方面因素的影响,输出占空比的范围会受到限制. 因此,采用式(9)计算获得占空比之后,必须进行饱和处理,使其最大、最

小值受到限制. 最终的控制框图如图3所示.

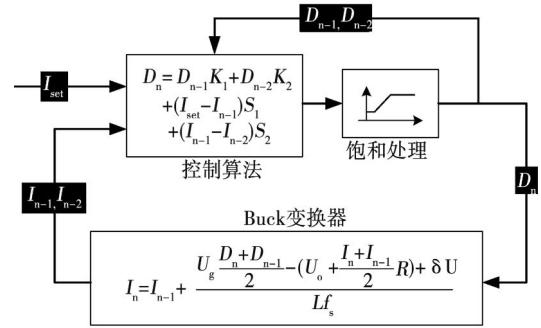


图3 最少拍控制框图

Fig. 3 Block diagram of deadbeat control

图4为负载参数变化时的最少拍控制算法的控制效果. 在模型参数与负载参数匹配时,如图4a所示,实现了“没有稳态误差、不存在输出纹波、输出幅值受限”的最少拍控制. 即使控制算法中所用模型参数与实际负载参数相差较大,该算法仍能获得满意的控制效果,如图4b,c所示.

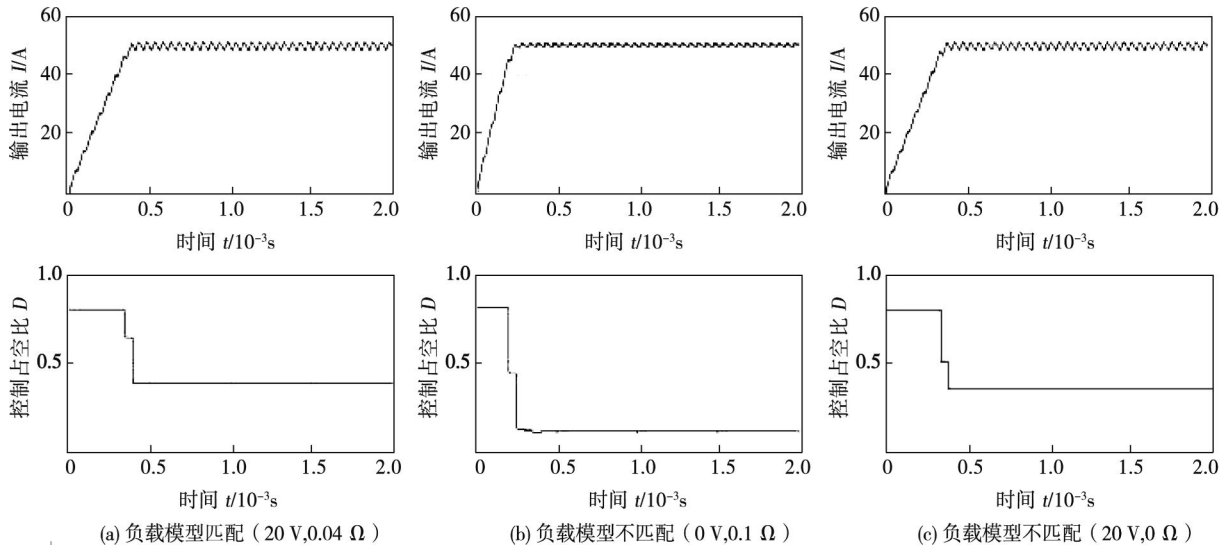


图4 最少拍控制效果的仿真验证 ( $U_g = 60 \text{ V}$ ,  $L = 200 \mu\text{H}$ ,  $f_s = 20 \text{ kHz}$ )

Fig. 4 Simulation verification of deadbeat control effect

### 3 最少拍控制的稳定性分析

对于图3所示占空比受限的 Buck 变换器最少拍控制系统,在进行稳定性分析时,一般假设系统处于线性段,此时饱和处理环节的输出等于输入,从而可以不考虑饱和处理环节. 于是,闭环系统就变成了由两个线性离散环节构成的反馈系统,可以直接

采用离散控制系统的稳定性分析方法.

由式(9)可以看出,最少拍控制算法中的各项系数均不含有可调参数,所有系数完全由电路参数决定,因此其稳定性决定于所用电路参数的精度. 各种电路参数中,输出滤波电感值对稳定性的影响较大,在实际应用中也经常出现模型电感值与实际电感值失配的情况. 因此,假设输入电压  $U_g$ 、电阻  $R$  和开关频率  $f_s$  等电路参数的值都是准确的,只考虑

输出滤波电感对最少拍控制稳定性的影响。

为了简化分析,令负载电阻  $R=0$ 。将模型电感值  $L_m$  代入式(9)给出的最少拍控制算法,将实际电感值  $L$  代入式(1)的离散模型方程,进行  $z$  变换,研究它们构成的闭环传递函数的极点位置,则可获得系统的稳定性条件。

系统闭环传递函数的特征方程为

$$4Lz^3 + (5L_m - 5L)z^2 + (2L_m - 2L)z + (3L - 3L_m) = 0 \quad (10)$$

根据 Jury 代数判据,获得的系统稳定性条件为

$$0 < L_m < 5L/3 \quad (11)$$

式(11)说明,为了保证系统稳定,模型计算所用电感最大值不能超过实际电感值的 1.67 倍。

图 5 所示是模型电感采用不同值情况下的仿真输出结果,可以看出,只有当  $L_m = L$  时,式(9)给出的算法才是最少拍控制。当  $L > L_m$  或  $L < L_m$  时,均会

导致控制性能变差,尤其是稳定性能下降。

实际应用中,实际电感  $L$  和模型电感  $L_m$  经常会出现偏差。例如,变极性焊接电源工作时,输出等效滤波电感 = 焊接电缆寄生电感 + 耦合电感的励磁电感。由于焊接电缆寄生电感大且不断变化,从而会造成等效滤波电感不断变化。在这种情况下,采用固定的模型电感值  $L_m$  进行控制占空比的计算将导致系统性能不能达到理想的最少拍控制效果,甚至影响控制系统的稳定性。

因此,必须采取有效措施增强控制系统的稳定性。方法之一是对等效滤波电感进行实时在线检测,不仅可以保证系统的稳定性,还能提升系统的控制效果。另一种方法是对控制算法进行改进,降低算法对参数的敏感性,即将控制目标由最少拍控制,使系统误差在有限拍数内消除,调整为误差按指数规律衰减,牺牲系统的动态特性来换取稳定性。

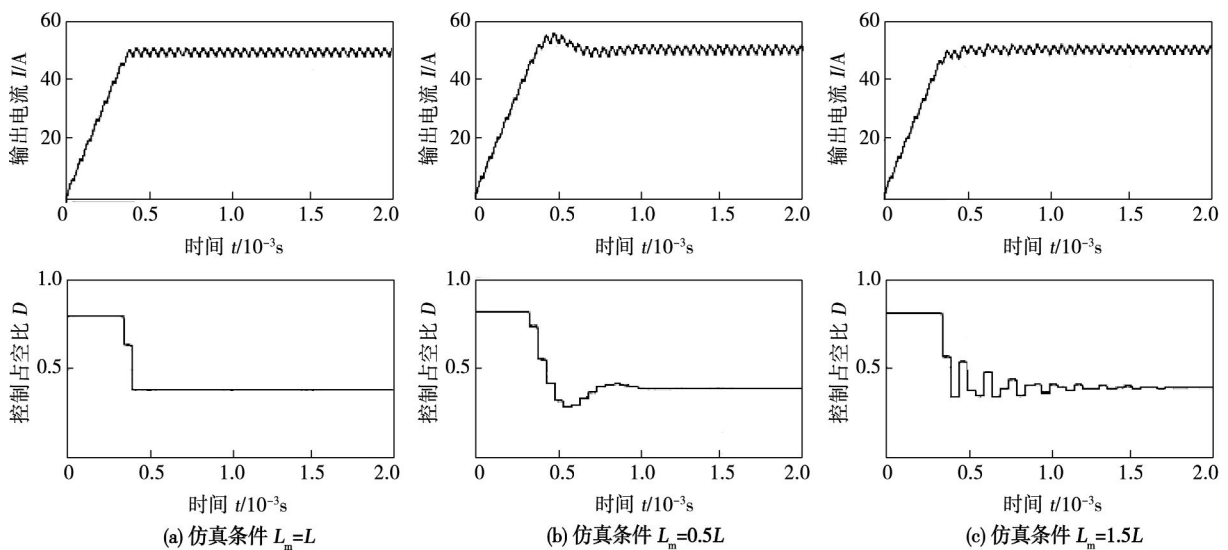


图 5 采用不同电感值时的最少拍控制效果仿真波形 ( $U_g=60\text{ V}$ ,  $L=200\text{ }\mu\text{H}$ ,  $f_s=20\text{ kHz}$ , 负载:  $20\text{ Vdc}+0.04\text{ }\Omega$ )

Fig. 5 Simulation waveforms of deadbeat control effect with different inductance values

## 4 结 论

(1) 对逆变焊接电源的等效电路——Buck 变换器进行了离散建模。该模型不仅明确反映了采样到控制的滞后,而且精确地显示了单个周期内的反馈值与控制占空比之间的关系。

(2) 对离散模型直接进行时域推导,获得了可应用于逆变焊接电源闭环控制的最少拍控制律。所构建的最少拍控制算法充分考虑了模型参数与实际参数之间误差的影响、最少拍控制的纹波问题以及实际最大最小占空比限制,通过添加约束方程,实现

了无纹波的最少拍控制。

(3) 仿真研究表明,模型参数与实际负载参数匹配时,所建立的最少拍控制系统实现了“没有稳态误差、不存在输出纹波、输出幅值受限”的最少拍控制。在模型参数与实际负载参数相差较大时,仍能获得满意的控制效果。

(4) 电源输出滤波电感的变化影响最少拍控制的稳定性及控制效果。稳定条件为模型所用电感值的最大值不能超过实际电感值的 1.67 倍。当  $L_m = L$  时,系统为最少拍控制。

## 4 结 论

(1) 研发了焊接过程在线监测系统、实现管道闪光焊接过程对电流、电压及进给位移等工艺参数的采集和存储。

(2) 设计了  $\times 65$  管道闪光对焊正交试验, 利用获得的各组工艺参数的数据, 优化管道闪光对焊工艺。

(3) 管道闪光焊接过程中焊接电流和进给速度的优化的控制对提高焊缝质量非常重要。

### 参考文献:

- [1] 隋永莉. 长输油气管道高强度管线钢管现场焊接技术[J]. 电焊机, 2014, 44(5): 27-32.  
Sui Yongli. High strength line-pipe girth welding technology of oil and gas transmission pipeline[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(5): 27-32.
- [2] 史耀武. 油田长输管线焊接技术的新发展[J]. 电焊机, 2005, 35(9): 37-42.  
Shi Yaowu. New development of welding technology for long-distance oilgas pipelines[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35

(9): 37-42.

- [3] 夏 欣, 韩翔宇. 闪光焊接技术及其在管道建设中的应用[J]. 油气储运, 2000, 19(6): 23-27.  
Xia Xin, Han Xiangyu. Development of flash butt welding technology and its application in construction of pipeline engineering[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2000, 19(6): 23-27.
- [4] 王治平, 唐 青, 王克争. 500 kW 预热闪光焊机微机控制系统[J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 432-435.  
Wang Zhiping, Tang Qing, Wang Kezheng. Computer system of 500 kW preheat flashing butt welding equipment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(2): 432-435.
- [5] 刘国庆. 基于钢轨闪光焊闪光声音信号的采集与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [6] 戴晓纲, 吕其兵. 钢轨闪光焊高速数据采集系统[J]. 测控技术, 2004, 23(2): 58-59.  
Dai Xiaogang, Lü Qibing. High speed data acquisition system for flash welding of rail[J]. Measurement and Control Technique, 2004, 23(2): 58-59.

**作者简介:** 高世一, 男, 1973 年出生, 博士, 高级工程师. 主要研究方向为焊接装备及自动化. 发表论文 30 余篇. Email: meshiyigao@163.com

[上接第 22 页]

### 参考文献:

- [1] 王振民, 冯允樑, 冯锐杰, 等. 基于 ARM 的全数字多功能方波逆变焊机[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 33-36.  
Wang Zhenmin, Feng Yunliang, Feng Ruijie, et al. Full digital multi-function square wave welding inverter based on ARM[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 33-36.
- [2] Erickson R W, Maksimovic D. Fundamentals of power electronics[M]. Boston, US Springer, 2001.
- [3] Kawamura A, Haneyoshi T, Hoft R G. Deadbeat controlled PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor[J].

IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(2): 118-125.

- [4] 蒋燕君, 杨海波. PWM 逆变器电流补偿无差拍控制研究[J]. 机电工程, 2008, 25(3): 81-83.  
Jiang Yanjun, Yang Haibo. Research on deadbeat control based on current compensation for PWM inverter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(3): 81-83.

**作者简介:** 朱志明, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事焊接过程控制及自动化、现代功率电子技术与电能变换、人工智能与焊接工程软件方面的研究和开发工作. 发表论文 80 余篇. Email: zzmdme@mail.tsinghua.edu.cn