

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0001.003

# 中频直流点焊机恒流控制方法研究与仿真

李玉鑫, 王 宾

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232000)

**摘要:**针对电阻点焊过程存在的负载电阻非线性变化而导致焊接电流不稳定的问题,提出了模糊控制和 PI 控制二者相结合的控制算法。利用模糊控制设计了比例系数和积分系数可以实时在线整定的 PI 控制器,构建了中频直流点焊电源的系统模型,使 PI 控制输出量通过 PWM 发生器产生 4 路占空比恒定而移相角实时变化的 PWM 波,实现对全桥逆变器的移相调压,并通过 Simulink 仿真比较 PI 控制和模糊 PI 控制的焊接电流的动态特性。仿真结果表明:在达到电流给定之前,PI 控制的负载电流超调大、波形出现振荡;而模糊 PI 控制的电流几乎没有超调、波形很平稳、调节速度快;当负载电阻变化时,PI 控制的负载电流发生振荡、系统鲁棒性差;模糊 PI 算法的负载电流波动很小、恢复到给定值的时间短。由此,模糊 PI 算法能有效地提高焊接电流的稳定性和系统的动态性能。

**关键词:**模糊 PI 控制;全桥逆变器;移相调压;Simulink 仿真

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-058X(2022)01-0019-07

## 0 引 言

电阻点焊是利用大电流通过处在电极压力作用下的被焊工件,在短时间内产生大量的焦耳热,使工件之间的接触点熔化后形成焊点,从而将它们焊接起来。电阻点焊具备的优点是:生产效益高、成本低、易于实现自动化,如今被广泛应用于材料、医疗、电气设备、机械制造等场合。PI 控制作为一种经典的控制方法,因其具有良好的控制性能,被广泛应用于工业控制的诸多场合。而对于点焊机系统而言,负载电阻随时间非线性变化、变压器线圈之间存在耦合,这些因素导致无法对系统建立精确的数学模型。因此,仅采用 PI 控制满足不了实际焊接的需求。

近些年,人工智能技术的发展较为迅速,大量的智能算法不断涌现,模糊控制就是其中之一,它的典

型特征是可以灵活地应用于没有精确数学模型的系统。文献[1]设计了模糊积分控制算法对点焊机的输出电流进行控制,引入积分环节在很大程度上减小了焊接电流的稳态误差,改善了系统的动态性能。文献[2]提出了基于模糊神经网络的 PID 算法,利用模糊神经网络对 PID 3 个参数进行在线整定,提高了系统的鲁棒性。文献[3]通过设计系统的硬件电路和软件算法,准确产生 PWM 信号,实现了对焊接电流的恒峰值控制,确保焊接电流的对称性。文献[4]为了减小逆变器开关管的功率损耗,对全桥 ZVZCS 逆变主电路进行仿真,实现了超前桥臂的 ZVS 和滞后桥臂的 ZCS。文献[5]从减小变压器一次侧电流尖峰和磁饱和的角度,提出了超前磁滞控制,使焊接电流在最大值和最小值之间变动,并且控制磁通也在一定的范围内,从而避免了一次侧电流尖峰的产生。但是上述方法中,没有考虑焊接过程中负载电阻变化的情况,并且操作复杂,电路设

收稿日期:2020-12-15;修回日期:2021-03-12.

作者简介:李玉鑫(1997—),女,安徽颍上人,硕士研究生,从事点焊机及电能变换研究.

计成本高。

为了提高焊接电流的稳定性,设计了模糊控制与 PI 控制二者相结合的控制算法。当负载电阻变化时,模糊控制器可以对 PI 参数实时进行在线整定,从而实现系统的恒电流输出。与 PI 控制相比,模糊 PI 控制的输出电流超调小、调节速度快、系统鲁棒性好。

### 1 系统结构组成与设计

#### 1.1 系统结构

中频直流点焊机系统的结构如图 1 所示,它包括了由三相桥式整流电路、滤波电路、全桥逆变电路、中频变压器、次级单相全波整流电路以及负载电路组成的主电路和 32 位 TMS320F28335 DSP 数字控制器、PWM 驱动电路、外部输入电路以及电流采样电路构成的控制电路。其中,DSP 的输入信号是焊接电流的采样值和设定值,二者的偏差经过一系列的运算处理后,输出使逆变器工作的驱动信号。

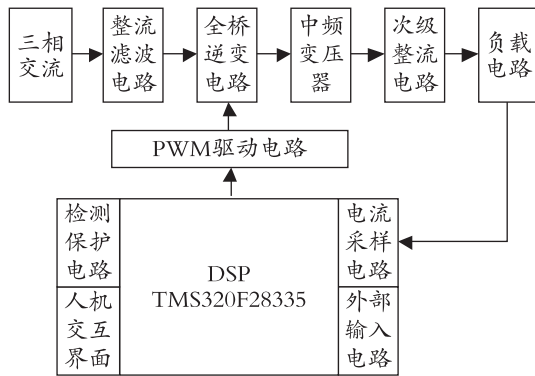


图 1 中频直流点焊机系统结构框图

Fig. 1 System structure block diagram of medium frequency DC spot welding machine

逆变电路是主电路设计的核心,逆变器的结构通常有以下 3 种:单端双管正激式、半桥式和全桥式。单端双管正激式的结构比较简单,不会出现因为电路不对称而带来的变压器偏磁现象,这样就有效地避免了一次侧电流尖峰的产生,但是它对变压器铁芯的利用率不高,只有半桥和全桥的一半。半桥逆变器和全桥逆变器在结构上的区别在于,前者由两个开关管构成,只有一个桥臂。因此,在直流电压相同的前提下,其输出电压幅值只有全桥的一

半,大多用在几千瓦以下的小功率场合。另外,全桥逆变器的一个显著优点是,它能工作在双向激励的模式下,在很大程度上减小了中频变压器的体积,从而缩小了点焊机的体积。通过以上比较,选用全桥逆变器作为点焊机系统的逆变电源,如图 2 所示。其中,全桥逆变器由 4 个 IGBT 开关管  $V_1 \sim V_4$  和各自反并联续流二极管  $VD_1 \sim VD_4$  构成,其功能是将直流电压  $U_d$  逆变成频率为  $1kHz$  的交流方波信号,之后经变压器  $T$  降压和  $VD_5、VD_6$  整流,给负载电阻  $R$  提供直流电。

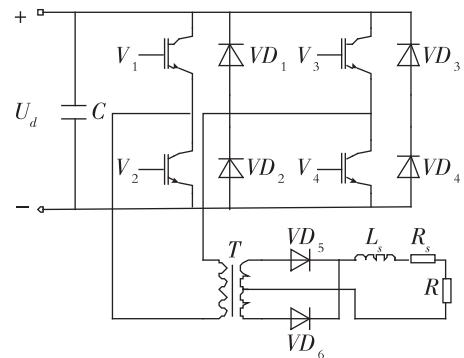


图 2 逆变主电路

Fig. 2 Inverter main circuit

为了减小逆变器开关器件的功率损耗,PWM 波的生成方式采用移相法,如图 3 所示。4 路 PWM 波的占空比都为 0.5,在导通时间上, $V_1$  和  $V_2$  相差半个周期, $V_3$  和  $V_4$  相差半个周期,而上桥臂的两个开关管  $V_1$  和  $V_3$  的相位相差  $\theta$  角, $\theta$  也就是模糊 PI 控制器的输出。另外,为了避免同一桥臂的开关管同时导通而导致电路短路,烧坏器件,必须要设置一定的死区时间  $\beta$ 。

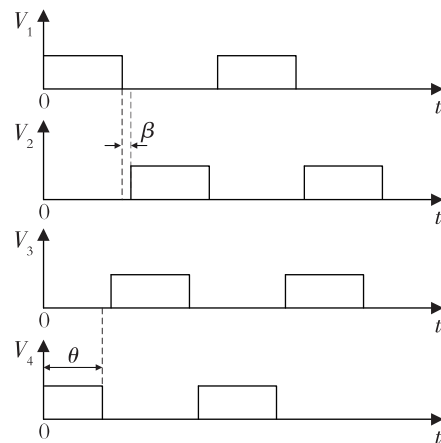


图 3 移相 PWM 波

Fig. 3 Phase shifted PWM wave

### 1.2 负载电阻曲线

焊接开始前,电极以预定的压力压在工件的对侧,如图 4 所示,负载电阻可表示为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (1)$$

其中, $R_1$ 、 $R_5$ 分别是上下电极的电阻, $R_2$ 、 $R_4$ 是电极与工件的接触电阻, $R_3$ 是上下工件的电阻之和。

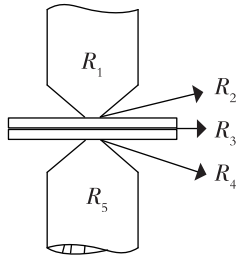


图 4 电阻点焊示意图

Fig. 4 Schematic diagram of resistance spot welding

在焊接过程中,负载电阻是随时间非线性变化的,其变化趋势与焊接工件的材料有关。为了更直观地观察负载电阻的变化情况,选用高温合金材料进行焊接实验,经过多次试验,拟合出图 5 所示的电阻曲线。可以看出,焊接开始时,负载电阻很大;一段时间后,随着焊接温度的升高,负载电阻迅速减小;同时焊核体积也在不断增大,限制了动态电阻的变化,使得  $R$  最终趋于稳定。

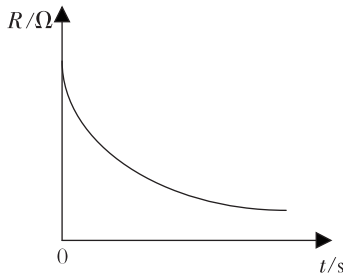


图 5 高温合金的电阻变化曲线

Fig. 5 Resistance curve of superalloy

### 1.3 模糊 PI 控制器的设计

对于点焊机系统而言,焊接电流是反映焊接质量的重要指标之一。由于一维的模糊控制器的输入仅仅是电流的偏差,很难反映焊接电流的动态特性品质,而三维的模糊控制器的运算过程太过于复杂,实际中用得较少。因此,结合对系统的实际控制需求,设计中采用两输入两输出的模糊控制器,其输入是焊接电流设定值  $I^*$  与实际输出电流  $I$  的差值  $I_c$  以及差值的微分  $dI_c/dt$ ,输出是比例系数和积分系数的整定值  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$ ,原理图如图 6 所示,则修正后

的 PI 控制器参数可用式(2)表示。在焊接过程中,当负载电阻改变时,用修正后的参数对焊接电流进行控制,从而确保输出电流能稳定在给定值附近,这样在很大程度上提高了焊接质量。

$$\begin{aligned} K_p &= P_0 + \Delta k_p \\ K_i &= I_0 + \Delta k_i \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $P_0$ 、 $I_0$ 是 PI 控制器的初始比例系数和积分系数; $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 是比例系数和积分系数的修正值。

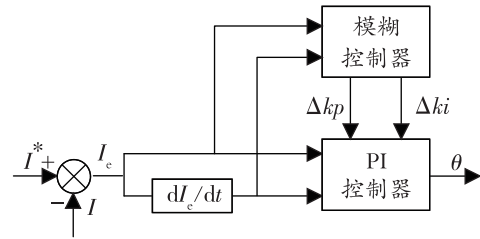


图 6 PI 控制器参数的整定原理图

Fig. 6 Schematic diagram of parameter setting of PI controller

式(2)中, $P_0$ 和  $I_0$ 的确定至关重要,它们相当于控制焊接电流的大信号,对整个系统的影响较大,而  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  只相当于小信号,小信号通过对大信号进行一定范围内的调整,使系统达到更好的性能。

#### 1.3.1 $P_0$ 和 $I_0$ 的确定

在 Matlab 中搭建点焊机系统基于常规 PI 控制的电流闭环模型,设置给定电流为最大电流(10 kA)的 70% (7 kA)。第一步,在纯比例控制的情况下,确定比例系数  $P$ 。从 0 开始逐渐加大  $P$ ,直到焊接电流出现振荡;再将此时的  $P$  值反向减小,直至振荡消失,设定  $P_0$  为当前值的 65%。确定积分系数  $I$  的方法与上述方法类似,区别在于, $I$  不是从 0 开始增加,而是先设定一个较大的  $I$ ,在输出电流不振荡的情况下,逐渐减小  $I$ ;一旦系统振荡,则将此时的  $I$  值反向加大,直到振荡消失,设置  $I_0$  为当前值的 1.6 倍。通过不断调节,最终确定  $P_0 = 0.6, I_0 = 7$ 。

#### 1.3.2 模糊控制器的设计

系统中,模糊控制器的外部接口和内部结构如图 7 所示,核心是模糊化、模糊推理以及清晰化这三个部分。

图 7 中, $E$ 、 $EC$  表示电流误差和误差变化率的模糊量, $K_p$ 、 $K_i$ 是比例系数和积分系数修正值的模糊量, $K_e$ 、 $K_{ec}$ 分别是  $E$ 、 $EC$  的量化因子, $G_p$ 、 $G_i$ 分别是  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 的比例因子。

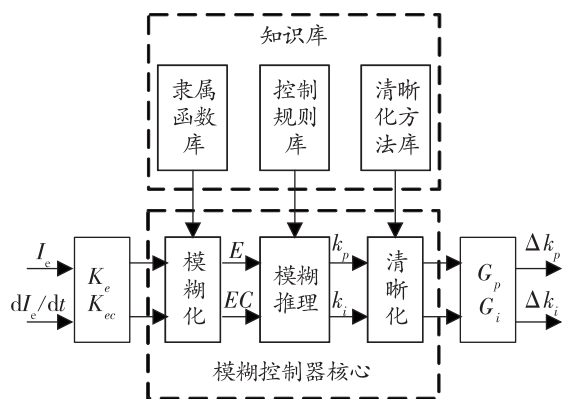


图 7 二维模糊控制器

Fig. 7 Two dimensional fuzzy controller

在实际焊接过程中,由于焊接电流的偏差  $I_e$  和偏差变化率  $dI_e/dt$  会随着负载电阻的变化而变化。此时,为了使  $E$  和  $EC$  的模糊论域保持不变,可以通过调节量化因子  $K_e$  和  $K_{ec}$ ,即将变化后的  $I_e$  和  $dI_e/dt$  映射到开始设置的模糊论域中。因此,  $E$  和  $EC$  的模糊论域选择没有具体的要求,这里都设置为  $[-3, 3]$ 。同理,  $K_p$ 、 $K_i$  经清晰化以后,通过调节比例因子  $G_p$ 、 $G_i$ ,就可以得到物理论域中比例系数和积分系数的修正量,这里选取  $K_p$ 、 $K_i$  的模糊论域均为  $[-6, 6]$ 。

假设模糊控制器输入量的实际变化范围是  $[a, b]$ , 其对应的模糊论域为  $[-N, N]$ ; 输出量的物理论域是  $[c, d]$ , 其对应的模糊论域是  $[-M, M]$ 。

则该输入量的量化因子可表示为

$$K = \frac{2N}{b-a} \quad (3)$$

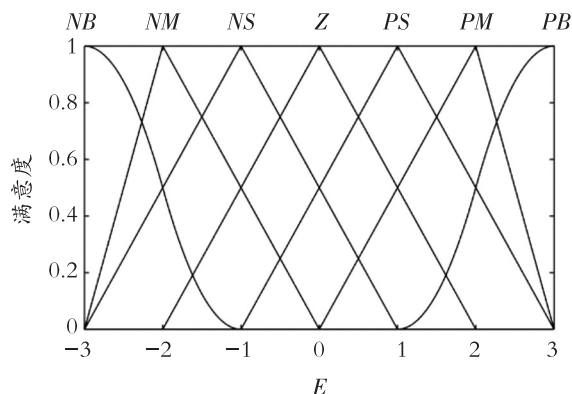
输出量的比例因子表达式为

$$G = \frac{d-c}{2M} \quad (4)$$

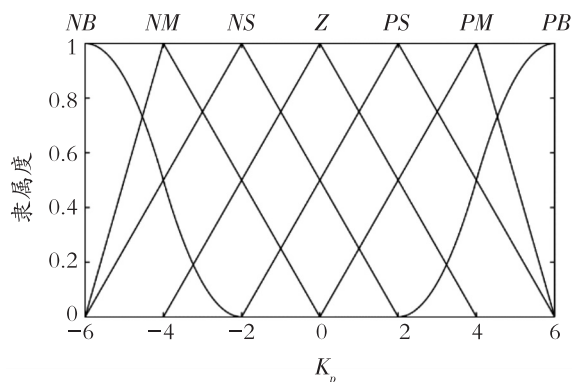
根据式 (3) 可求得量化因子初值  $K_e = 6/420 = 0.014$ 、 $K_{ec} = 6/21 = 0.286$ , 根据式 (4) 可求得比例因子初值  $G_p = 0.108/12 = 0.005$ 、 $G_i = 1.26/12 = 0.105$ 。仿真时还需要对这些参数不断修改,以确定最优参数。

为了使任意时刻输入的  $I_e$  和  $dI_e/dt$  都能被模糊化,在覆盖  $E$  和  $EC$  的模糊论域  $[-3, 3]$  上用 7 个模糊子集: 负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (Z)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB) 来表示。根据系统的特点并结合隶属函数的性质,输入量和输出量的模糊论域左边界、中间、右边界的模糊子集隶属函数,分别选取 zmf 型、trimf 型和 smf 型,隶属函数分

布曲线如图 8 所示。



(a) E 的隶属函数分布



(b)  $K_p$  的隶属函数分布

图 8 隶属函数分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of membership function

模糊逻辑推理的结果是输出量的模糊集合,需要把它等效成一个清晰值并经过比例变换后,才能得到控制 PWM 移相角的实际量,这里采用 centroid 清晰化方法。

归纳总结对点焊机系统的实际操作经验,寻找  $K_p$ 、 $K_i$  与  $E$ 、 $EC$  之间的模糊关系,进而建立合适的模糊控制规则表,是设计模糊控制器的核心。在建立控制规则时,应该以  $K_p$ 、 $K_i$  对系统的调节作用和消除  $E$ 、 $EC$  的主次性为原则:当误差  $E$  较大时,此时应以消除误差为主,因此,取较大的  $K_p$ ,快速减小误差。但是  $K_p$  的取值不能太大,这样会导致焊接电流产生超调和振荡。当  $E$  和  $EC$  适中时,此时应适当减小  $K_p$ ,并取适当的  $K_i$ ,同时兼顾  $E$  和  $EC$  的变化。当  $E$  较小时,为了尽可能减小焊接电流的稳态误差,在电流稳定的前提下,此时要适当增加  $K_i$ 。基于以上的控制规律并结合实际输出电流的波形特点,总结出了  $K_p$  和  $K_i$  的模糊控制规则,分别如表 1 和表 2 所示。



表 1  $K_p$  的控制规则表  
Table 1 Control rules of  $K_p$

EC	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 2  $K_i$  的控制规则表  
Table 2 Control rules of  $K_i$

EC	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

## 2 系统仿真与结果分析

为了验证所得结论的正确性,利用仿真软件 Matlab/Simulink 搭建了中频直流点焊机系统的仿真模型,电路的参数设置见表 3 所示。

### 2.1 搭建仿真模型

图 9 是基于模糊自适应 PI 控制的系统仿真模型,其中,上半部分是主电路,下半部分是控制电路。仿真时间设为 0.2 s。在焊接过程中,为了模拟负载电阻变化对焊接电流的影响,在 0.1 s 时,通过 Breaker 模块接入电阻  $R_1$ ,使其与  $R$  并联,即可以使

负载电阻减小。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

变量名称	数值/单位
母线电压 $U_{in}$	570 V
开关频率 $f_s$	1 kHz
给定电流 $I^*$	7 kA
等效电阻 $R_s$	2 m $\Omega$
等效电感 $L_s$	30 $\mu$ H
负载电阻 $R$	10 m $\Omega$
变压器匝数比	50 : 1 : 1

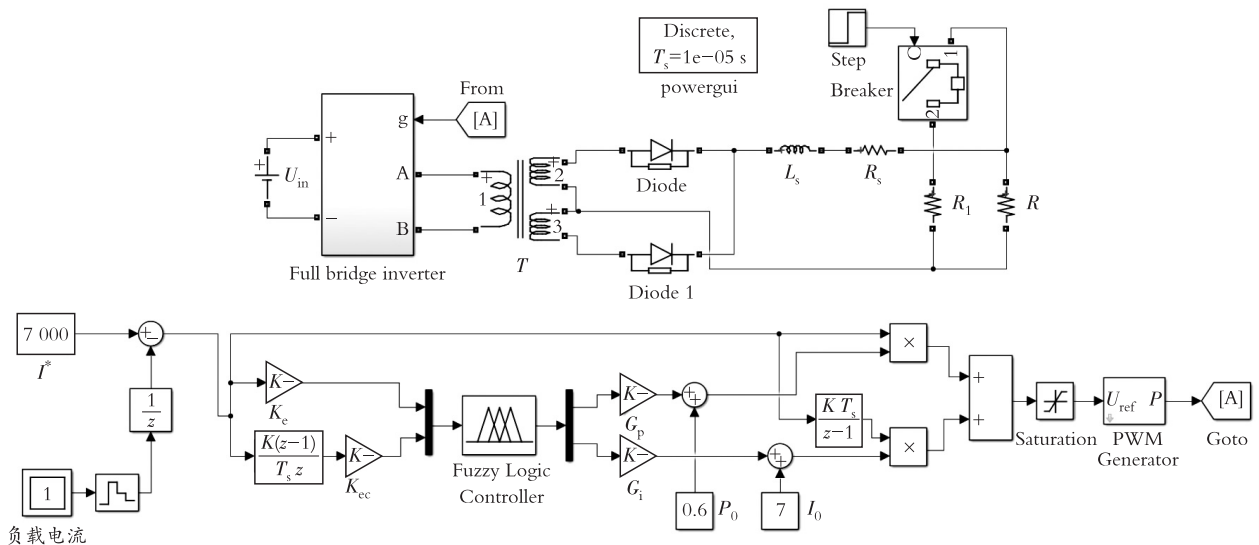


图 9 系统仿真模型

Fig. 9 System simulation model

## 2.2 结果分析

设置给定的焊接电流为 7 kA,图 10 是焊接电流在上升阶段的波形。可以看出,在稳态之前,PI 控制的电流波形发生了振荡和超调,最大超调量约 400 A,上升速度较模糊 PI 控制缓慢,波形在 0.06 s 时才稳定。而模糊 PI 控制的电流波形很平滑,几乎没有超调,0.025 s 就达到稳态,系统的响应速度得到了明显提升。

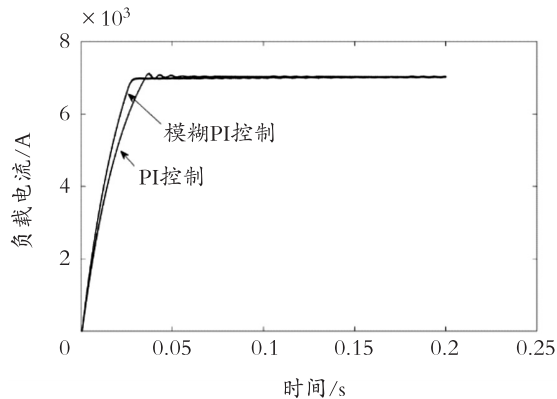


图 10 负载电流上升阶段波形

Fig. 10 Waveform of load current rising stage

在 0.1 s 时,负载电阻发生突减。图 11 是负载电阻变化时,两种控制方法下的焊接电流波形。可以看出,在开始的一段时间内,PI 控制的负载电流在 6 800 A ~ 7 200 A 波动,之后波动范围逐渐减小。而模糊 PI 控制的电流始终没有发生振荡,只是在电阻突变后的 5 ms 内,电流略微增加,但是很快就调节至电流给定,提高了系统的鲁棒性。

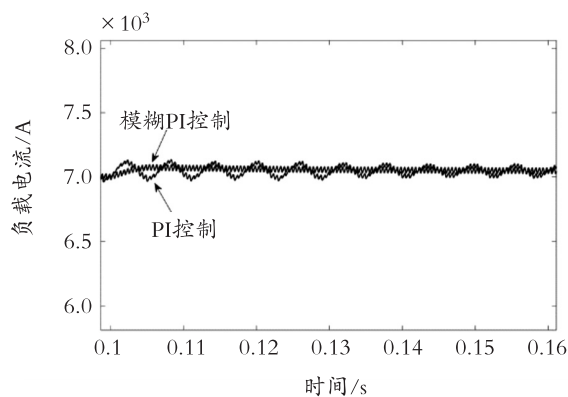


图 11 负载电阻变化时负载电流波形

Fig. 11 Load current waveform when load resistance changes

## 3 结束语

针对电阻点焊过程的非线性、强耦合等特点,设

计了一种基于模糊 PI 的中频直流点焊机恒流控制方法。利用模糊控制器对 PI 控制器的比例系数和积分系数进行在线修正,从而使系统获得比常规 PI 控制时更好的动态性能。为了验证结论的正确性,对两种控制方法作用下的系统进行 Simulink 建模仿真。仿真结果表明,模糊 PI 控制相对于常规 PI 控制而言,在电流上升阶段,其输出电流超调小、波形平稳、调节速度快;当负载电阻变化时,其输出电流波动小、恢复到给定的时间短、抗扰动能力强。

## 参考文献 (References):

- [1] 丁礼健, 闵华松. 中频逆变电阻点焊控制系统的设计与仿真[J]. 点焊机, 2015, 45(12): 26—31.  
DING Li-jian, MIN Hua-song. Design and simulation of intermediate frequency inverter resistance spot welding control system [J]. Spot Welding Machine, 2015, 45 (12): 26—31.
- [2] 周玉燕, 李峰. 基于模糊神经网络的电阻焊机恒电流控制研究[J]. 点焊机, 2012, 42(1): 14—17.  
ZHOU Yu-yan, LI Feng. Study on constant current control of resistance welding machine based on fuzzy neural network [J]. Spot Welding Machine, 2012, 42 (1): 14—17.
- [3] 张勇, 方飞, 李慧敏, 等. 点焊逆变电源的恒峰值电流控制方法研究[J]. 测控技术, 2012, 31(3): 54—58.  
ZHANG Yong, FANG Fei, LI Hui-min, et al. Study on constant peak current control method of spot welding inverter power supply [J]. Measurement and Control Technology, 2012, 31(3): 54—58.
- [4] 常云龙, 邢进. 软开关逆变电阻焊电流拓扑及参数仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 613—616.  
CHANG Yun-long, XING Jin. Current topology and parameter simulation of soft switching inverter resistance welding [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21 (2): 613—616.
- [5] KLOPCIC B, DOLINAR D, STUMBERGER G. Advanced control of a resistance spot welding system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 144—152.
- [6] 赵文春, 王博, 刘胜道, 等. 模糊自适应 PID 控制的移相全桥变换器设计与仿真[J]. 现代电子技术, 2015, 38(19): 110—113.  
ZHAO Wen-chun, WANG Bo, LIU Sheng-dao, et al. Design and simulation of phase shifted full bridge converter with fuzzy adaptive PID control [J]. Modern Electronic Technology, 2015, 38(19): 110—113.

- [7] 夏裕俊,李永兵,楼铭,等.电阻点焊质量监控技术研究进展与分析[J].中国机械工程,2020,31(1):100—125.  
XIA Yu-jun, LI Yong-bin, LOU Ming, et al. Research progress and analysis of resistance spot welding quality control technology [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 100—125.
- [8] 石辛民,郝整清.模糊控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.  
SHI Xin-min, HAO Zheng-qing. Fuzzy control and its matlab simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 罗景荣,曾敏,陈广辉.逆变电阻点焊电源研究现状与趋势[J].点焊机,2010,40(7):7—13.  
LUO Jing-rong, ZENG Min, CHEN Guang-hui. Research status and trend of inverter resistance spot welding power supply[J]. Spot Welding Machine, 2010, 40(7): 7—13.
- [10] 曹神抚,李彬.基于双环控制的点焊机逆变器的实现研究[J].电力电子技术,2011,45(9):105—107.  
CAO Shen-fu, LI Bin. Research on realization of spot welding inverter based on double loop control[J]. Power Electronics Technology, 2011, 45(9): 105—107.
- [11] LEE H, YU J. Development of fuzzy controller for inverter DC resistance spot welding using system identification [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(8): 3961—3968.

## Research and Simulation of Constant Current Control Method for Medium Frequency DC Spot Welding Machine

LI Yu-xin, WANG Bin

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232000, China)

**Abstract:** Aiming at the instability of welding current caused by nonlinear change of load resistance in resistance spot welding process, a control algorithm combining fuzzy control and PI control is proposed. A PI controller with proportional coefficient and integral coefficient which is liable to real-time and online control is designed by using fuzzy control. The system model of medium frequency DC spot welding power supply is constructed. The PI control output can generate four PWM waves with constant duty cycle and real-time change of phase shift angle through PWM generator. The phase-shifting voltage regulation of full bridge inverter is realized. The welding of PI control and fuzzy PI control is compared by Simulink simulation. The simulation results show that before reaching the given current, the load current overshoot of PI control is large and the waveform oscillates; while the current of fuzzy PI control is almost no overshoot, the waveform is very stable and the adjustment speed is fast. When the load resistance changes, the load current of PI control oscillates and the system robustness is poor; the load current fluctuation of fuzzy PI algorithm is very small and the time to recover to the given value is short. Therefore, the fuzzy PI algorithm can effectively improve the stability of welding current and the dynamic performance of the system.

**Key words:** fuzzy PI control; full bridge inverter; phase shift voltage regulation; Simulink simulation

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

李玉鑫,王宾.中频直流点焊机恒流控制方法研究与仿真[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2022,39(1):19—25.

LI Yu-xin, WANG Bin. Research and Simulation of Constant Current Control Method for Medium Frequency DC Spot Welding Machine[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 19—25.