脉冲 TIG 焊熔宽动态过程模糊推理——神经网络控制方法*

陈善本 吴林 王其隆 刘玉池**
(哈尔滨工业大学)

摘 要 对脉冲 TIG 焊工艺中焊接电流—正面熔宽动态过程提出了一种模糊神经网络控制方法,并研究了利用人工神经网络直接对过程建模的控制仿真,从而回避了经典方法对过程建模与控制的困难。将上述方法用于实际脉冲 TIG 焊过程控制,结果表明模糊神经网络控制方案有效。

关键词: 模糊神经网络 熔宽控制 脉冲 TIG 焊

0 序 言

由于脉冲 TIG 焊的输入热源和焊丝可分别控制,因而热输入容易调节,可进行各种位置的焊接,也是实现单面焊双面成型的理想方法。长期以来,为了实现高水平的焊接工艺自动化,焊接界和控制界对脉冲 TIG 焊的质量控制作了大量探索研究。然而,由于焊接熔池动态变化过程是一个高度非线性,多变量耦合作用,同时具有大量随机不确定因素的复杂过程,决定了对脉冲 TIG 焊的熔宽、熔透和焊缝成型等质量控制是非常困难的。经典的常规控制手段几乎无法有效地应用到焊接动态过程,这是因为经典控制理论基于对象的数学建模。由于焊接过程的复杂性决定了经典的对象建模方法不可能得到有效的可控制模型,这也就是长期以来焊接过程控制成为困扰焊接界和控制界的一大难题的主要原因。当然,焊接过程的动态特性实时检测也是一个难点。

另外,注意到熟练焊工的手工操作往往能较好地把握焊接时的熔宽、熔透及焊缝成型等质量。如果能设计出充分模拟熟练焊工经验操作的控制器,也即使控制器具有仿人的功能以应变地处理更为复杂的过程变化。这使我们想到用模糊推理来描述焊工的操作并与人工神经网络结合设计控制器,可望使控制系统的智能大大加强。这也是从原理上提高控制系统智能行为的一个很有前途的方向,对于从根本上提高焊接过程控制智能化具有重要意义。

目前国内外已有相当多的学者投入模糊逻辑和人工神经网络与焊接工艺结合的研究[1~6]。已有文献报导较多的是在焊接工艺的静态参数优化中的应用,如焊缝跟踪,规范参数选择和焊后缺陷检查分析等。对于焊接熔池的动态变化过程的实时控制的有效研究结果尚不多见。目前正处于研究探索阶段。然而,有效地控制焊接熔池的动态变化过程恰是提高焊接自动化的关键,本文将主要针对脉冲 TIG 焊熔池正面熔宽动态过程提出模糊神经网络控制方案的初步研究结果。

1 脉冲 TIG 焊熔宽模糊神经网络控制器设计及系统方案

通过对脉冲 TIG 焊的试验测试分析可知:在确定的母材及工艺参数规范下,主要影响 TIG 焊

* 国家自然科学基金资助项目, No. 59575057, No. 59635160。
** 刘玉池现在北京航空航天大学工作。

熔宽变化的因素是焊接速度和焊接电流。另外,考虑到一般情况下 TIG 焊工艺操作是将焊速固定而调节焊接电流,这主要因为调节电流相对容易实现的缘故。因此在本文的初步方案中,作者也只选控制焊接电流—正面熔宽的单入单出系统作为研究对象。对电流熔宽作阶跃响应试验显示了熔宽随电流变化过程具有明显的非线性特性,依试验数据并考虑焊工经验归纳出如表 1 所示模糊规则对电流—熔宽过程调节基本有效。

表 1 脉冲 TIG 焊熔宽模糊控制规则

Table 1 Fuzzy rules for pulsed TIG welding

EE \ E	PB	PM	PS	0	NS	NM	NB
P	NB	NB	NM	NS	0	PM	PM
0	NB	NB	NM	0	PM	PB	PB
N	NM	NM	0	PS	PM	PB	PB

表中 E, EE 为误差 e 和误差变化 ee 的模糊量, P, N 表示正负; B, M, S, 0 分别表示大, 中, 小, 零的模糊语义; 规则表示的是焊接电流调节的模糊量 U。在设计中我们采用人工神经网络来记忆上述规则实现模糊神经网络控制系统功能框图如下:

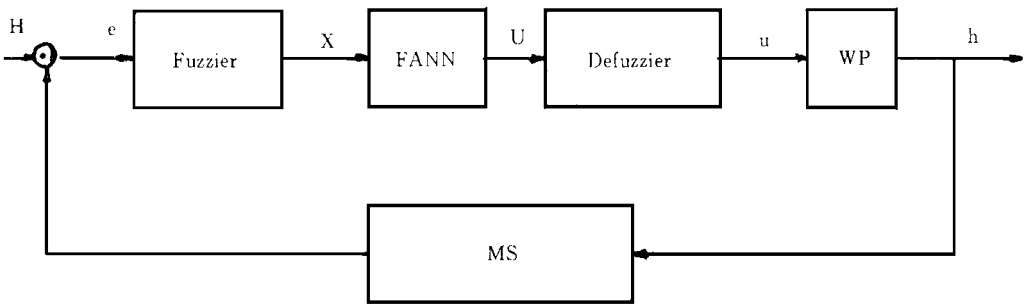

图 1 脉冲 TIG 焊熔宽模糊神经网络控制系统

Fig. 1 Scheme of fuzzy neural control of bead— width of pulsed TIG welding

图 1 中 Fuzzier 将误差 e 和误差的变化量 ee 限幅并模糊化为模糊神经网的输入变量 E, EE, 共 14 个输入节点, e 对应 9 个, ee 对应 5 个。FANN 是用于记忆表 1 的模糊规则的 3 层 BP 网络, 其节点数 N_1, N_2, N_3 分别为 14, 25, 11, 其输出是控制电流的模糊相量 U, 对应 11 个节点, 经 Defuzzier 清晰化得到焊接电流调节量的实际值 u。网络的输入输出节点分别代表它对应变量论域的一个名义值, 如输出节点代表焊接电流从−5 到+5 的一个整数值。与某一逻辑变量对应的一组节点上的数值表示一个"概念"[7], 每个节点上是[0, 1] 区间的某个数, 它可以表示其名义值的神经元的兴奋程度, 是其节点的名义值在此"概念"所对应的模糊量隶属度。"概念"所对应的模糊量的隶属度函数取为高斯函数

$$g(N, u, d) = \exp[-(N-u)^2/d]$$

u 和 d 为均值和方差。本文对各变量的隶属函数定义如下:

$$E: \quad GE = \{g(n, xe, de)\}, n = -4, \ldots, +4, de = 2.5$$

$$CE: \quad GCE = \{g(m, xc, dc)\}, m = -2, \ldots, +2, dc = 2.0$$

$$U: \quad GU = \{g(k, xu, du)\}, k = -5, \ldots, +5, du = 2.5$$

依上式便可将模糊经验规则转化为神经网络的一组输入输出样本, 对网络训练使之实现表 1 的控制规则映射。

网络 FANN 结构图及网络函数如图 2 所示。

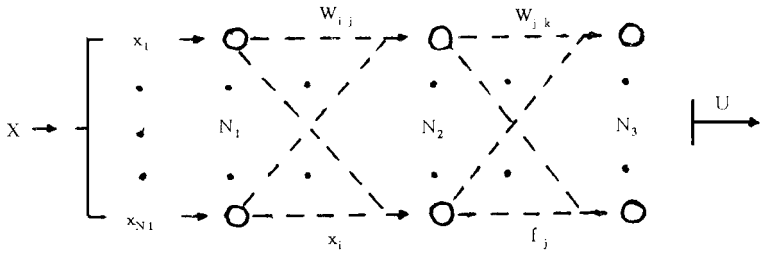

图 2　模糊神经网控制模型

Fig. 2　Controller model of fuzzy neural networks

网络函数为:

$$X=[GE, GCE]^T=[x_1, \cdots\cdots, x_{N1}]^T$$

$$f_j=1/\{1+\exp[-(\sum_{i=1}^{N_1} W_{ij}X_i+q_j)]\}, \qquad j=1, \cdots, N_2$$

$$U=\{U_k\}=1/\{1+\exp[-(\sum_{j=1}^{N2} W_{jk}f_j+q_K)]\}, \qquad k=1, \cdots, N_3$$

在 Fuzzier 和 Defuzzier 中对变换因子等作了统一考虑。WP 为焊接熔宽过程, MS 为检测及图象处理环节。

2　控制方案的仿真结果

为了考察上述设计对于实际脉冲 TIG 焊熔宽过程控制, 作者首先采用如下方法对过程控制作计算机仿真调试。仿真用焊接电流—正面熔宽的过程模型采用输入输出测量数据对熔宽过程 WP 和测量环节 MS 建立如下神经网络模型, 模型由四层 BP 网实现, 节点数 N_1, N_2, N_3, N_4 分别为 5, 15, 10, 1, 实现的映射关系为

$$h(t+1)=f_m(u(t), u(t-1), \ldots, u(t-d); h(t), h(t-1), \ldots(h(t-n))$$

定义　　$X^T=[x_1, \cdots, x_{N1}]^T=[u(t), \ldots, u(t-d); h(t), \ldots, h(t-n)]^T$

在本文讨论的过程中, 取 d=2, n=1, 网络结构示意图 3。

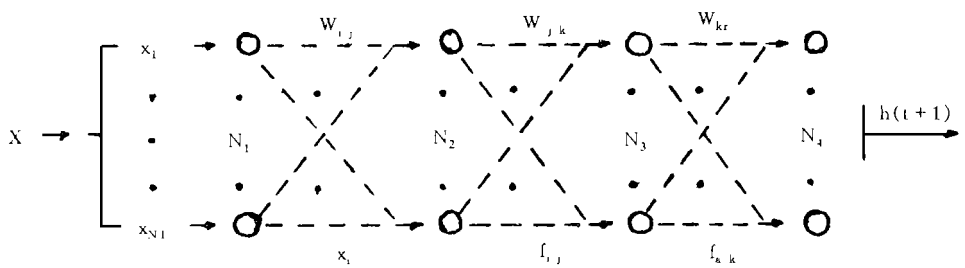

图 3　熔宽过程神经网模型

Fig. 3　Neural network mordel for welding bead— width process

网络函数为:

$$f_{1j}=1/\{1+\exp[-(\sum_{i=1}^{N1}w_{ij}x_i+q_j)]\},\qquad j=1,\ \ldots,\ N_2$$

$$f_{2K}=1/\{1+\exp[-(\sum_{j=1}^{N2}w_{jK}f_{1j}+q_K)]\},\qquad k=1,\ \ldots,\ N_3$$

$$h(t+1)=1/\{1+\exp[-(\sum_{K=1}^{N3}w_{kr}f_{2k}+q_r)]\}\qquad r=1$$

$$=f_m(f_{2k}(f_{1j}(X)))$$

离线学习满足精度要求后作为过程模型与前节设计的模糊神经网络控制器按图 1 系统连接,其仿真结果如图 4。

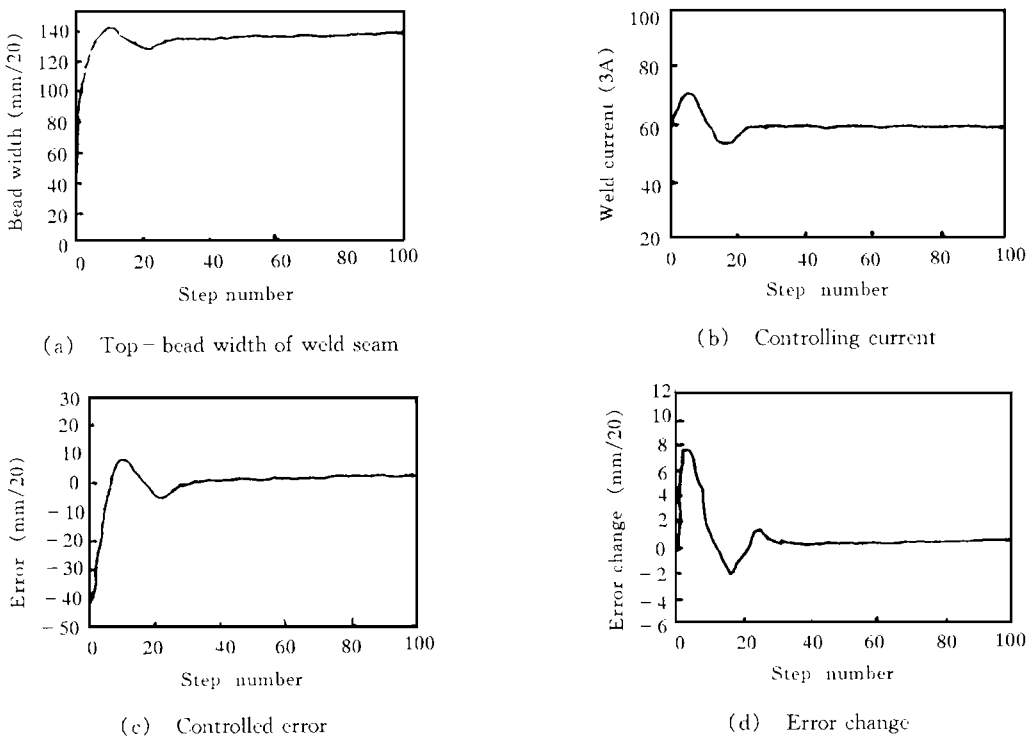

图 4 控制方案的仿真结果

Fig. 4 Simulating results of control scheme

系统仿真结果表明理论算法及方案的可行性。

3 系统实现及试验结果

本文提出的脉冲 TIG 焊正面熔宽动态过程模糊神经网络控制系统实现的硬件框图如图 5。

图 5 中视觉传感采用的是日本 National 公司生产的硅靶面工业摄象机,焊接电流采用日本大板变压器公司的 COMPAQ－500 型交、直流钨极氩弧焊电源,焊接工作台采用 8031 单片机系统控制。模糊神经网络控制算法由 PC 机实现。

关于正面熔宽信息的检测说明如下:按焊接质量控制的要求,准确实时地检测焊接熔池的动态变化信息是至关重要的。在实焊条件下,由于焊接过程中的弧光干扰及过程控制的实时性[1]要求使

得熔池区域的图象实时检测处理十分困难，时序选择显得非常关键。对于脉冲 TIG 焊，试验发现，在焊接电流由峰值向基值转换的某一时刻，弧光将焊接熔池区照射恰好清晰，此时通知主机启动摄象机拍摄熔池区图象，而后进行图象处理及控制比较合适。通过时序计算和试验，作者确定如图 6 的图象采集处理和控制时序。

图中一组合适的选择值为 T_g = 60ms，I_{vg} = 30A。硬件接口电路及软件设计也采取了一些特殊的处理[6]。这里只以正面熔宽控制效果说明模糊神经网的控制方案的可行性。

在如下试验条件下，作者在上述系统做了堆焊试验。控制曲线如图 7 所示。

材料：Q235 钢；

板厚：2mm；

梯形试件，上底× 下底× 高＝12mm ×70mm×255mm；

电极：钍钨极，直径 3.0mm；

氩气流量：8L/ min；

电弧电压：12 ~ 15V；

焊接速度：95 ~ 105m m/ min。

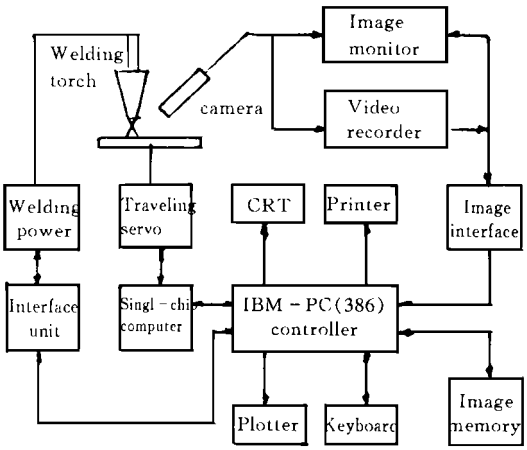

图 5　试验系统硬件框图

Fig. 5　Hardware scheme of experiment systems

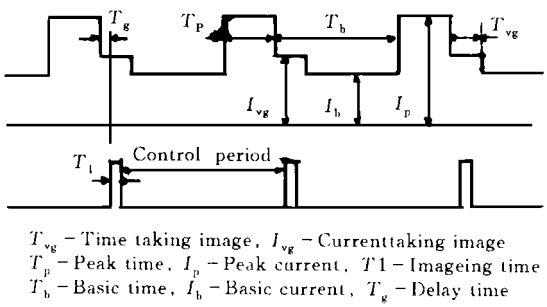

图 6　图象采集处理和控制时序

Fig. 6　Time sequence for control and image processing

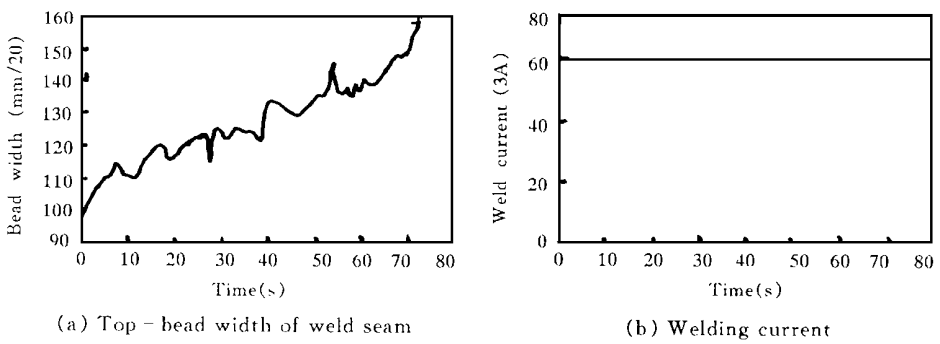

图 7　恒定规范焊接

Fig. 7　Welding with constant normal

试验结果分析：

(1)对变散热条件试件的实焊控制效果表明本文提出的模糊神经网络控制方案对 TIG 焊熔宽动态过程控制有效，比较图 7 和图 8 的焊接电流调节变化说明与人的经验认识一致。

(2)控制算法和图象处理的周期偏长影响控制效果。这有赖于神经网络的并行处理实现以提高运算速度。

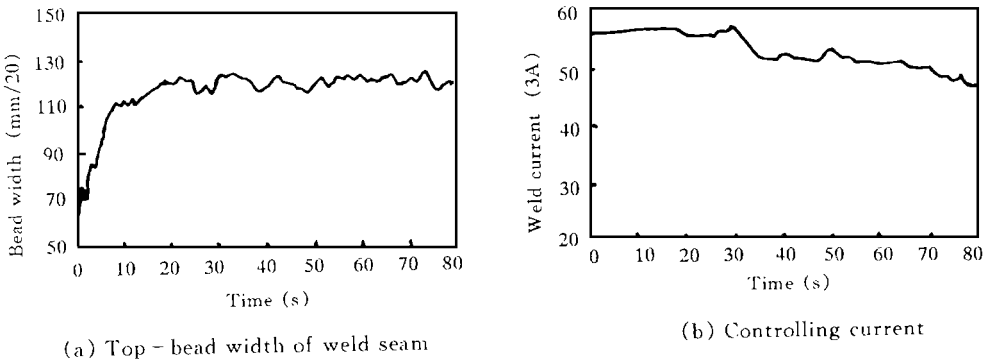

图 8 模糊神经网控制结果

Fig. 8 Experiment results with fuzzy neural controller

4 结 束 语

本文对 TIG 焊熔宽动态过程控制设计了模糊神经网络控制系统。模糊控制器是采用神经网络来记忆抽象的焊工操作经验规则,比通常直接应用模糊推理规则更符合人的认识模式,当采用复杂作用条件的经验规则时,只须规定网络的输入输出节点的含意而无须改变整个控制器的结构和算法,通常的模糊逻辑控制器当经验规则增加时计算量将随之增加,而本文的神经网控制器只须增加一些离线训练的次数并不增加控制器设计的复杂性。而且,神经网控制器作用于系统时其计算量与经验知识的多少并没有关系,网络对经验规则的容错性和鲁棒性也比直接应用经验规则推理好。因此,模糊神经网控制器比常用的模糊推理控制器具有更广泛的通用性和应用前景。

对应用模糊神经网控制方案设计的脉冲 TIG 焊正面熔宽过程控制系统进行的实焊试验结果表明控制方案可行。有待改进的尝试包括模糊神经网络的自学习功能[8],神经网络的并行处理实现以及加入控制焊速等多变量调节以期得到更理想的控制效果,这方面工作正在进行之中。

(1994-07-01 收到初稿,1997-05-30 收到修改稿)

参 考 文 献

1 Stroud R R, Marris T J. Neural Networks in a Weld Control System. Proc. AIANN, 1990.
2 Ohshima K et al. Fuzzy Expert System for Robotic Arc Welding. Welding and Jointing Process ASME, 1991, PED51: 85~90
3 陈强,潘际銮,大岛健司. 焊接过程的模糊控制. 第七届全国焊接学术会议论文集, 1993, 6: 61~65
4 李迪,黄石生,宋永伦. 用神经网络技术对焊接质量的直接控制. 第七届全国焊接学术会议论文集, 1993, 3: 280~284
5 陈善本,吴林,王其隆. 人工神经网络及其在焊接过程控制中的应用. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26: 80~84
6 刘玉池. 计算机视觉脉冲 TIG 焊正面实时检测与熔宽控制的研究. 哈尔滨工业大学研究生学位论文, 1994.
7 应行仁,曾南. 采用 BP 神经网络记忆模糊规则的控制. 自动化学报, 1991, 17: 63~67
8 Chen S B(陈善本), Wu L(吴林), Wang Q L(王其隆) Liu Y C(刘玉池). Self-learning fuzzy neural networks and computer vision for control of pulsed GTAW, Wedling J., 1997, 76: 201s~209s

A Fuzzy Inference—neural Network Control of Dynamic Process of Weld Bead Width in Pulse TIG Welding

Chen Shanben, *Wu Lin*, *Wang Qilong*, *Liu Yuchi*
(*Harbin Institute of Technology*)

Abstract A fuzzy inference—artificial neural network control approach to the dynamic process of welding current—top bead width in the pulse TIG welding is presented in this paper. Using artificial neural networks for modelling the process, the design of the fuzzy control system is simulated so that the difficulties of modelling and control of the pulse TIG welding in classic control methods are avoided. The results of experiment on the pulse TIG welding process show that the fuzzy inference—neural network control scheme presented in this paper is effective.

Key words fuzzy inference, neural networks, control bead width, pulse TIG welding