

基于粗糙集理论的焊接过程建模方法

王 兵, 陈善本, 黎文航, 王建军

(上海交通大学 焊接工程研究所, 上海 200030)

摘要: 针对目前焊接建模的状况, 针对一种比较典型的焊接材料和焊接方法——铝合金脉冲钨极电弧(TIG)焊接, 提出一种基于粗糙集理论的建模方法, 并对建模过程的主要步骤和关键问题作了阐述. 实验结果表明, 该模型精度和复杂度可以接受. 该方法拓展了粗糙集理论的应用领域, 并为焊接建模提供了一种新方法, 具有较大的应用潜力.

关键词: 焊接过程建模; 粗糙集; 铝合金脉冲钨极电弧(TIG)焊接

中图分类号: TG409 **文献标识码:** A

Modeling method of the welding process based on rough set theory

WANG Bing, CHEN Shan-ben, LI Wen-hang, WANG Jian-jun

(Institute of Welding Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A new modeling method is proposed that is based on the rough set theory for a typical welding material and welding method—Aluminum alloy pulsed GTAW (gas tungsten arc welding). The main procedure of the method and the key problems were expatiated. The result shows that the precise and complexity of the model is acceptable. So it enlarges the application area of rough set theory and provides a new method for modeling in welding area, and has a large potential of wide application.

Key words: modeling of the welding process; rough set; aluminum alloy pulse TIG (tungsten inert gas) welding

1 引言(Introduction)

焊接是制造业中最重要的工艺技术之一, 广泛应用于机械制造、核工业、航空航天、能源交通、石油化工及建筑和电子等行业中. 随着科学技术的发展, 焊接已经从简单的构件连接方法和毛坯制造手段发展成为制造行业中一项基础工艺和生产尺寸精确的制成品的生产手段. 传统的手工焊接已经不能满足现代高技术产品制造的质量、数量要求. 焊接自动化是焊接技术发展的必然趋势. 焊接过程控制是实现焊接自动化领域学术研究与技术发展前沿中最重要的组成部分, 而焊接过程建模是焊接过程控制系统设计的前提条件, 因此, 焊接过程建模是实现焊接自动化必需要解决的问题. 由于焊接过程涉及到复杂的物理化学变化, 使得该过程本身极为复杂^[1]. 同其他复杂系统一样, 用经典的建模方法很难甚至无法有效获得该过程的系统模型. 近年来, 很多软计算方法被应用在焊接过程建模中, 其中包括神经网络和模糊逻辑, 这些方法同经典方法不同, 是建立在对人

类思维机制研究基础上的, 可以在一定限制条件下, 在一定范围内有效获得焊接过程的系统模型, 实验和应用结果充分显示了软计算方法在焊接过程建模中的应用潜力.

粗糙集方法是新兴的软计算方法, 具有独特的优势, 已经在众多领域得到了应用, 其中也包括焊接过程建模领域. 文献[2]首先在广义模型化概念的指导下, 以粗糙集理论为基础, 构造了模糊系统知识模型的基本理论, 建立了基于知识模型的模糊系统辨识方法; 然后运用该知识模型理论及其辨识方法分析了钢材料的脉冲气体钨极电弧焊接(TIG: tungsten inert gas arc welding)这一具有高度非线性、多变量耦合及不确定因素的复杂过程, 并建立了该过程的模糊模型; 给出了用所建立的模糊模型进行脉冲 TIG 焊背面熔池宽度预测的仿真结果. 从直觉上讲, 该文献介绍的工作主要是利用粗糙集方法对模糊模型进行化简, 在建模过程中模糊辨识方法占主导, 并且最后建立的模型仍是模糊模型, 所以仍不是基于粗糙

集的建模.本文给出了粗糙集建模方法的具体步骤,讨论了建模过程中的关键技术,并利用所给出的方法对铝合金脉冲TIG焊接这一复杂过程进行了建模实验,结合铝合金脉冲TIG焊接过程的特点分析了实验结果,显示了粗糙集建模方法在焊接过程建模中的有效性,拓展了粗糙集理论的应用领域.

2 建模方法(Modeling method)

焊接过程的粗糙集建模方法的基本思想是假设焊接过程的系统模型隐式地包含在充分多的焊接过程实验数据集中,以此为出发点利用粗糙集理论获取知识的能力,将隐式的系统模型提取出来成为显式的系统模型.显然,这种建模的过程是一种知识获取的过程,所得到的系统模型是表现为IF-THEN形式的规则集的知识模型.直觉上,经验丰富的焊接工人的操作经验记录在长年积累的焊接数据中,由于焊接过程的复杂性,数据中存在很多的噪声,这种经验是无法用语言清晰表达的,粗糙集建模的过程的本质就是将这些经验提取出来,并且使得所提取的经验是精简的、无冗余的.焊接过程的粗糙集建模方法的主要步骤如图1所示.

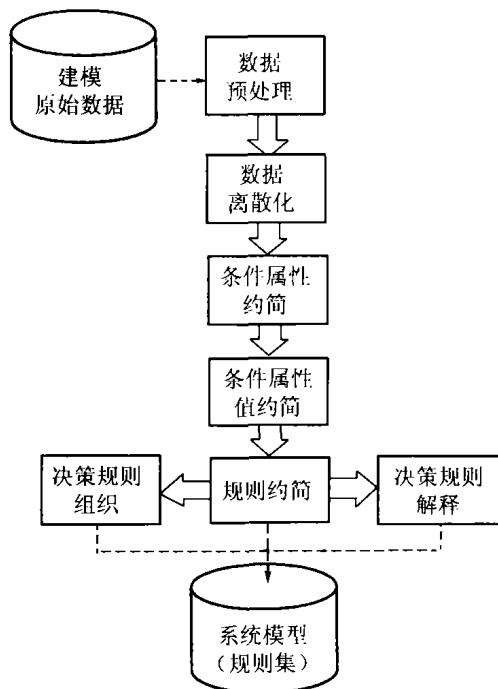


图1 粗糙集建模方法步骤

Fig. 1 Steps of the modeling methodology based on rough sets

2.1 数据预处理(Preprocessing of data)

原始建模数据是多次焊接实验积累的数据,每个焊接数据都反映了焊接过程中系统输入同系统输出间的对应关系.这些数据是通过传感系统实时采集的,考虑到传感系统数据采集过程中的系统误差,以及焊接过程本身的特点并不是所有采得的数据都

用来建模,一些明显的奇异点和每次焊接起弧和收弧的数据需要在预处理阶段首先被排除.

其次,由于焊接过程是一个热积累的过程,每个焊接数据明显同前面几个时刻焊接数据相关,并且影响到后面时刻的焊接数据,所以有必要对数据进行扩展以反映焊接过程的这种热积累特性.设扩展前, t 时刻时,系统的输入为向量

$$X' = [x'_1 \quad x'_2 \quad \cdots \quad x'_N],$$

则扩展后, t 时刻系统的输入为向量

$$Y' = [x_1^{t-k} \quad x_2^{t-k} \quad \cdots \quad x_N^{t-k} \quad x_1^{t-k+1} \quad x_2^{t-k+1} \quad \cdots \quad x_N^{t-k+1} \quad \cdots \quad x_1^{t-1} \quad x_2^{t-1} \quad \cdots \quad x_N^{t-1} \quad x_1^t \quad x_2^t \quad \cdots \quad x_N^t].$$

这里, t, k, N 为非负整数,且有 $t-k \geq 0$ (本文实验中 $k=3$).

最后,在预处理阶段需要完成对建模数据的一些统计工作.

2.2 数据离散化(Discretization of data)

粗糙集理论处理的是符号,而不是数值,但是在很多实际应用中,涉及的大多是数值,需要对之进行符号化,即离散化.在对焊接过程建模中,离散化是必需的,并且离散化方法的选择对建模效果有很大的影响.针对焊接过程中实际数据的特点,先采用等宽法(即等区间离散化方法)进行一次离散化,将一个较大的区间分成较多个小区间,然后再对这些小区间进行合并,最后完成离散化.由于篇幅所限,具体方法可以参阅文献[3].

2.3 条件属性约简(Condition attribute reduction)

基于粗糙集方法的焊接过程建模获得的是IF-THEN规则形式的系统模型,从规则的角度看,条件属性约简的直观作用是缩短规则的条件部分的长度.关于条件属性约简的算法的研究是粗糙集理论研究中的重点问题之一,这方面的工作直接制约着粗糙集理论的实际应用.

求条件属性约简问题的最优解是NP困难的,已经有文献给出的许多约简算法都是启发式算法,只能求得近似解,并且,其中只有一小部分是完备算法.文献[4]中给出了几种完备的属性约简算法.本文给出的建模方法中采用的是文献[5]中的条件属性约简算法,该算法也是完备的.

2.4 条件属性值约简(Condition attribute value reduction)

从规则的角度理解,条件属性值约简也具有缩短规则条件部分长度的直观作用,但是同条件属性约简不同,条件属性值约简的处理对象是每一条件规则,而条件属性约简的处理对象是全部规则,即条件属性约简后所有规则的长度保持一致,但是再经

过条件属性值约简后,规则的长度不能保持一致了,变得长短不一.此外,条件属性约简只要求得一种约简结果即可,但是条件属性值约简通常要求得若干种约简结果,以使得规则约简得以进行,这是规则约简的前提条件.

关于条件属性值约简算法的研究,相对于条件属性约简算法的研究是较少的,很多实际应用中并不涉及到条件属性值约简.从本质上讲,这两类算法连同下面的规则约简算法的本质都是一样的,都可以等价于求某种形式的集合覆盖,因而进行条件属性值约简时可以充分借鉴条件属性约简的算法.关于这方面的讨论参阅文献[6].

2.5 规则约简(Rule reduction)

规则约简并不改变规则条件部分的长度而是减少规则的个数,直观上,可以认为前两种约简是从横向上对规则模型的压缩,而规则约简是从纵向上对规则模型的压缩.规则约简的算法同样可以借鉴属性约简的算法.

2.6 规则的组织 and 解释(Organizing and interpreting of rules)

规则的组织和解释的目的是便于模型的使用、评价及维护.虽然这两个步骤同模型的获取并没有直接的必然联系,但是同样是必不可少的.规则的组织中最重要而且易行的是对组成系统模型的规则的排序.而规则的解释主要为了便于人的理解进而维护.

如果建模原始数据充分多,即能够很好的反映焊接过程的规律,那么利用基于粗糙集的建模方法可以获得精简的焊接过程的系统模型,即模型中不含有冗余规则,并且每条规则中不含有冗余的条件属性.在利用所获得的系统模型进行推理时,可以采用最简单的数据驱动的匹配推理方法,即将新样本同模型中的所有规则的条件部分进行匹配,如果同某种规则的条件部分匹配成功,则相应规则的结论成立,即得到系统的输出.如果不存在可以匹配的规则,则需要采用其他推理策略进行解决,这里不加讨论.

3 焊接过程建模实验(Modeling experiments of welding process)

为了验证基于粗糙集的建模方法对焊接过程建模的有效性,进行了铝合金脉冲 TIG 焊接过程建模实验.

3.1 实验方法(Experiment method)

实验以上海交通大学机器人智能化焊接实验室的视觉传感焊接工艺实验系统^[7]为实验平台,焊接规范见表 1.特别指出,其中的峰值电流是随机变化

的(见图 2).原始数据由 260 个数据样本组成,每个样本数据都反映了系统某一时刻峰值电流 I ,正面熔池宽度 W_T ,正面熔池长度 L_T 同背面熔池宽度 W_B 间的对应关系.这些数据在数据预处理阶段经过扩展后,得到 257 个样本数据(前 3 个样本数据在扩展时被去除了),希望通过基于粗糙集的焊接过程建模方法获得的系统知识模型的输入为 12 个,分别是当前时刻(t 时刻)的, $t-1$ 时刻的, $t-2$ 时刻的, $t-3$ 时刻的峰值电流、正面熔池宽度、正面熔池长度,输出为 1 个,即 t 时刻的背面熔池宽度.为了对模型精度进行评价,从 257 个样本数据中随机抽取了 204 个样本数据用于建模,53 个样本数据用做检验.

表 1 焊接规范

Table 1 Welding conditions

焊接方法	交流脉冲 TIG 焊接
接头形式	平板对接无间隙
焊接材料	锻铝 LD12
工件尺寸	250 mm × 50 mm × 3.5 mm
保护气	氩气(99%)
脉冲频率	50 Hz
基值电流	100 A
基值时间	250 ms
峰值电流	随机变化
峰值时间	250 ms
焊接速度	3.35 mm/s
送丝速度	12 mm/s
弧长	4.5 mm
钨极直径	4 mm
钨极与前进方向夹角	85°
焊丝材料	铝合金
焊丝直径	1.8 mm

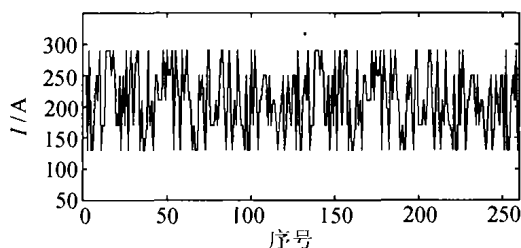


图 2 峰值电流随机信号

Fig. 2 Random signals of peak current

3.2 实验结果(Experiment results)

所获得模型的复杂度可以用下面方法度量,设建模样本数据为 M 个,每个样本数据的系统输入部分是一个 N 维向量,建模后获得的模型由 m 条规则组成,其中第 i ($1 \leq i \leq m$) 条规则包含 a_i 个条件,则模型的复杂度可以定义为

$$C = \sum_{i=1}^m a_i / M \times N.$$

本文实验中 $M = 204, N = 12, m = 149, 1 \leq a_i \leq 7, C = 493/2448 \approx 0.2014$. 直观上, 复杂度越低, 模型的可理解程度相对越高, 系统的输入和输出间的对应关系越简单, 控制系统控制器的设计也越简单, 系统响应越快. 从铝合金焊接过程控制的角度看, $m = 149, \sum_{i=1}^m = 493$, 该模型基本可以满足要求.

所获得模型的精度可以用下面方法度量, 设用于检验的样本数据为 p 个, 第 $i (1 \leq i \leq m)$ 个样本的模型实际输出为 y_i , 该样本的期望输出为 $\bar{y}_i$, 则定义

$$J = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2.$$

J 的值越小, 模型的精度越好. 本文实验中 $J \approx 2.0489$, 考虑到铝合金焊接的复杂性, 该模型的精度也可以满足要求. 事实上, 在本文实验条件下, 根据经验, 焊缝的背面宽度 W_B 应在 7 mm 左右, 直觉上分析, 实验所获得模型的平均误差约为 1.43 mm, 这也是可以满足要求的. 实验的误差曲线如图 3 所示. 由图 3 可知对几个检验数据, 模型的误差接近了 4 mm, 这是由于所选择的建模样本数据没有完全覆盖系统输入空间造成的.

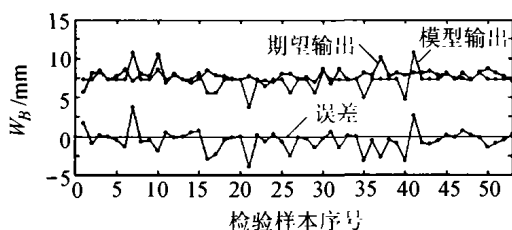


图3 模型误差曲线

Fig. 3 Error curve of the model

4 结论(Conclusions)

针对焊接过程的复杂性, 在对粗糙集知识约简(条件属性约简、条件属性值约简、规则约简)算法进行研究的基础上, 结合焊接过程的特点给出了粗糙集建模方法, 并进行了铝合金脉冲 TIG 焊接过程建模实验, 实验结果表明所给出方法是切实可行的, 为焊接过程的智能控制打下了良好基础, 拓展了粗糙集方法的应用领域.

在建模过程中, 建模数据的获取、离散化方法的选择、知识约简算法的选择仍需要做深入的研究.

参考文献(References):

[1] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

(WU Lin, CHEN Shanben. *Intelligent Technologies for Welding* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.)

[2] 李文. 模糊系统的知识模型与辨识方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.

(LI Wen. *Knowledge model of fuzzy system and identification approach* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.)

[3] 朱国光, 王兵, 林涛. 漏焊智能检测系统中离散化对知识获取的影响[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(增刊): 109-111.

(ZHU Guoguang, WANG Bing, LIN Tao. The influence of discretization on knowledge acquisition in an intelligent lack welding detection system [J]. *J of Shanghai Jiao Tong University*, 2002, 36(suppl.): 109-111.)

[4] WANG Jue, WANG Ju. Reduction algorithms based on discernibility matrix; the ordered attributes method [J]. *J of Computer Science and Technology*, 2001, 16(6): 489-504.

[5] WANG Bing, CHEN Shanben. A complete algorithm for attribute reduction [C]// TARN T J, CHEN Shanben, ZHOU Changjiu. *Proc of Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

[6] 王兵, 陈善本. 约简同集合极小覆盖[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(增刊): 106-108.

(WANG Bing, CHEN Shanben. Reduction and minimal set cover [J]. *J of Shanghai Jiao Tong University*, 2002, 36(suppl.): 106-108.)

[7] 王建军, 林涛, 陈善本. 铝合金 TIG 焊熔池图像的获取与处理[J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 125-129.

(WANG Jianjun, LIN Tao, CHEN Shanben. Image taking and processing of molten pool characters during aluminum alloy of TIG welding [J]. *Chinese J of Mechanical Engineering*, 2003, 39(5): 125-129.)

作者简介:

王兵 (1975—), 男, 上海交通大学材料科学与工程学院博士研究生, 2000年毕业于大连铁道学院计算机应用专业, 获硕士学位, 研究领域包括人工智能, 智能计算, 焊接过程建模, 粗糙集理论, E-mail: bing.wang@cszc.com.cn;

陈善本 (1956—), 男, 博士生导师, 教育部长江学者奖励计划特聘教授, 1991年3月毕业于哈尔滨工业大学控制理论与应用专业, 获博士学位, 曾在哈尔滨工业大学材料科学与工程学科做博士后研究工作, 2000年4月调入上海交通大学焊接研究所, 主要从事机器人焊接智能化技术, 焊接过程智能控制和不确定系统鲁棒控制理论方向及其学科交叉领域的研究;

黎文航 (1978—), 男, 博士研究生, 2002年毕业于哈尔滨工业大学材料加工工程专业, 获硕士学位, 2002年考入上海交通大学材料科学与工程学院, 目前攻读焊接博士学位, 研究领域包括焊接专家系统, 焊接智能控制的知识获取、建模和控制器的设计, E-mail: lwh_jkl@sjtu.edu.cn;

王建军 (1971—), 男, 上海交通大学材料科学与工程学院博士研究生, 2000年毕业于哈尔滨工业大学焊接专业, 获硕士学位, 研究领域为焊接过程质量控制.