



基于相似修正关系推理的焊接工艺决策

冯志强, 韩峻峰, 黄伟铭, 柳存根, 甘露, 韩翔希, 焦自权

引用本文:

冯志强, 韩峻峰, 黄伟铭, 等. 基于相似修正关系推理的焊接工艺决策[J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 880–887.

FENG Zhiqiang, HAN Junfeng, HUANG Weiming, et al. Decision-making for welding process based on similarity-modified relation inference[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(5): 880–887.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201901005>

您可能感兴趣的其他文章

基于自适应神经模糊推理系统的船舶航向自抗扰控制

Active disturbance rejection control of ship course based on adaptive-network-based fuzzy inference system

智能系统学报. 2020, 15(2): 255–263 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809047>

基于位置-文本关系的空间对象top-k查询与排序方法

A location-text correlation-based top-k query and ranking approach for spatial objects

智能系统学报. 2020, 15(2): 235–242 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201808011>

基于改进规则激活率的扩展置信规则库推理方法

Extended belief rule-based reasoning method based on an improved rule activation rate

智能系统学报. 2019, 14(6): 1179–1188 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201906046>

基于NSGA-II的扩展置信规则库激活规则多目标优化方法

NSGA-II-based EBRB rules activation multi-objective optimization

智能系统学报. 2018, 13(3): 422–430 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201710012>

融合语义信息的矩阵分解词向量学习模型

Word representation learning model using matrix factorization to incorporate semantic information

智能系统学报. 2017, 12(5): 661–667 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201706012>

SCADA安全因素神经元的云推理机研究与仿真

Study and simulation of the SCADA security factors neuron's cloud inference engine

智能系统学报. 2016, 11(5): 688–695 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201509020>

微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201901005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20200324.1456.013.html>

基于相似修正关系推理的焊接工艺决策

冯志强¹, 韩峻峰^{1,2}, 黄伟铭², 柳存根^{1,3}, 甘露⁴, 韩翔希¹, 焦自权¹

(1. 北部湾大学 机械与船舶海洋工程学院, 广西 钦州 535011; 2. 广西科技大学 电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006; 3. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 4. 上海船舶工艺研究所 先进连接技术与自动化装备研究室, 上海 200032)

摘要: 针对基于相似度的推理和合成关系推理存在的不足, 本文提供一种将相似度量与贴近方向相结合, 生成修正或诱导模糊关系的近似推理模式。通过引入模糊概念间贴近方向函数, 构造扩展型和缩减型 2 类修正函数, 由此导出推理模型的一般表达形式, 并对几个修正算子和构造条件关系的模糊转化算子进行了分析比较。基于该推理模式构建焊接工艺决策模型, 由给定熔深来确定合理的焊接规范参数, 结果表明: 模型可达到较高的计算精度, 从而解决了近似推理中输出结果不能对输入事实的每一变化作出准确响应的问题。

关键词: 近似推理; 相似度量; 贴近方向; 剩余蕴涵; t -范数; 修正关系; 转化算子; 焊接规范参数

中图分类号: TP181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)05-0880-08

中文引用格式: 冯志强, 韩峻峰, 黄伟铭, 等. 基于相似修正关系推理的焊接工艺决策 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 880-887.

英文引用格式: FENG Zhiqiang, HAN Junfeng, HUANG Weiming, et al. Decision-making for welding process based on similarity-modified relation inference[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(5): 880-887.

Decision-making for welding process based on similarity-modified relation inference

FENG Zhiqiang¹, HAN Junfeng^{1,2}, HUANG Weiming², LIU Cungen^{1,3},
GAN Lu⁴, HAN Xiangxi¹, JIAO Ziquan¹

(1. College of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Advanced Connection Technology and Automation Equipment Research Laboratory, Shanghai Institute of Shipbuilding Technology, Shanghai 200032, China)

Abstract: Based on the analysis of the characteristics of compositional relation inference and existing similarity reasoning, an approximate reasoning pattern is proposed, which combines the similarity measure and nearness direction to generate a modified (or induced) fuzzy relation. By introducing the function of nearness direction between fuzzy concepts, expansion-typed and reduction-typed modification operators are constructed. Accordingly, a general expression of the reasoning model is given, and the selection of some modification and translation operators for constructing fuzzy relations is discussed. The proposed method is applied to the decision-making of welding process parameters and determining reasonable parameters of welding codes with a given penetration depth. The experimental results show that the reasoning model has high computational accuracy, which will help in the accurate output results of approximate reasoning to every change in the input fact.

Keywords: approximate reasoning; similarity measure; nearness direction; modified relation; t -norm; modification relationship; translation operator; welding code parameters

收稿日期: 2019-01-06. 网络出版日期: 2020-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51969001); 广西科技重大专项 (桂科 AA17292003); 广西自然科学基金项目 (2016GXNSFAA380188, 2018GXNSFAA138080).

通信作者: 冯志强. E-mail: fzqsjtu@163.com.

工业过程控制领域中一些具有模糊性和随机性的复杂非线性系统, 采用二值逻辑或多值逻辑难以对其精确描述, 对于这些不确定控制对象, 较

有效的处理手段是模仿人对非确定概念的判断和思维方式,通过综合决策和似然推理来解决模糊信息处理的问题。在模糊推理领域,Zadeh等^[1-5]率先给出基于合成关系的推理模式(compositional rules of inference, CRI),之后经多位学者的充实与完善,在工业领域获得成功应用。该方法虽简便易行,但它欠缺严格的公理化证明,推理结果不可还原,并在一些应用中存在输出结果与现实情况不吻合的问题^[6-7]。由此,一些学者根据给定事实与规则前提的相似性,提出一种与CRI有显著差异的推理模式-基于相似度的近似推理(similarity-based approximate reasoning, SAR)^[8-9]。在该算法的基础上,Chen等^[10-11]讨论了相似性推理中规则后件的调整问题,给出多种调整函数的表示形式;何映思等^[12]提出一种具有可还原性的多维模糊推理算法;针对模糊拒取式(fuzzy modus tollens, FMT)问题,Mondal等^[13]给出3种基于相似度的逆向推理算法;Raha等^[14]结合模糊关系,构造基于相似度的模糊推理算法;Li等^[15]进一步讨论分析了Raha推理模型的相关性质。另一方面,研究人员将SAR推理方法拓展到区间值模糊(也称为vague或直觉模糊)环境中。Chen等^[16]讨论了区间值模糊集之间的相似性度量,提出一种新的双向近似推理方法;李凡等^[17]改进了区间值模糊集的相似性度量,探讨一种基于相似性的多规则模糊推理方法;石玉强等^[18]针对区间值模糊集距离测度中存在的缺陷,给出基于区间值模糊集距离的双向近似推理算法;Feng等^[19-20]将相似度量引入区间值模糊关系的构造,提出一种基于约简型修正关系的近似推理模式;王毅等^[21]通过引入包含函数来定义区间值模糊相似度,并将其应用于近似推理算法的构造。

基于相似度的推理机制是根据输入变量与前件之间的相似程度,按照一定的算法对后件进行修正来导出推理结果。修正计算的目的,是使得输出结果对输入事实和规则前提中的任意变化能作出准确的响应。本文在分析CRI与SAR推理模式不合理之处的基础上,通过定义模糊概念之间的贴近方向函数,提出一种基于相似修正关系的近似推理算法。给出包括扩展与缩减2种类型的修正计算方案,探讨用于转化条件命题(构造模糊关系)的转化算子,进而给出该方法在焊接工艺决策中的应用。

1 相似修正关系推理

1.1 CRI与SAR推理

设 $A \in \mathcal{F}(U)$ 和 $B \in \mathcal{F}(V)$ 为条件命题 $A \rightarrow B$ 的

前、后件, $A' \in \mathcal{F}(U)$ 为给定事实。关于模糊假言推理(FMP)的合成关系算法(CRI)可表示为

$$B'(v) = \sup_{u \in U} T(A'(u), R(u, v)) = \sup_{u \in U} T(A'(u), R_T(A(u), B(v))) \quad (1)$$

式中: T 为 t -范数; R 为由规则 $A \rightarrow B$ 转化的 $U \times V$ 上的模糊关系; R_T 为转化算子。取 T 为取小运算 \min , R_T 为Mamdani算子,则:

$$B'(v) = \sup_{u \in U} \min(A'(u), \min(A(u), B(v))) = \min(\sup_{u \in U} \min(A'(u), A(u)), B(v)) \quad (2)$$

由式(2),给定前件 A ,若 $\sup_u \min\{A'(u), A(u)\}$ (又称适配度)为一常量,则无论输入 A' 如何变化,输出结果 B' 将保持不变。例如,令 $A = \{1, 0.7, 0.5, 0.2\}$,分别取 A' 为 $\{1, 0.5, 0.2\}$ 、 $\{1, 0.2\}$ 、 $\{1, 0.9, 0.7, 0.4\}$ 、 $\{1, 1, 0.8, 0.6\}$ 等。可见,由于CRI未考虑输入与前件间的相似性匹配,导致其在一定条件下得出的推理结论与实际明显不符。

对于基于相似度的近似推理(SAR),该算法一般可表示为

$$B'(v) = M(S(A', A), B(v)) \quad (3)$$

式中: $S(A', A)$ 为事实与前件间的相似度; $M: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ 为修正函数(修正算子),表示相似度 $S(A', A)$ 对于后件 B 的修正关系。显然,由于相似性测度的交换性,当 A' 和 A 互换时,推理结果将保持不变,即输出未能响应推理系统中发生的变化。由此可知,因SAR对前、后件的内在关联没有给予重视,导致出现上述不合理的推理结论。

1.2 贴近方向函数

考察近似推理中相似度量的定义对推理结论的影响。设前件 $A = \{1, 0.6, 0.3\}$,给定事实变量 $A_1 = \text{“有点 } A\text{”} = \{1, 0.8, 0.5\}$, $A_2 = \text{“很 } A\text{”} = \{1, 0.4, 0.1\}$ 。若相似度量由常用的距离函数定义,为

$$S(A', A) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A'(u_i) - A(u_i)|$$

由式(3)有 $B_1 = B_2$ 。类似地,令 $A = \{0.8, 0.6, 0.3, 0.1\}$, $A_1 = \{1, 0.8, 0.6, 0.3\}$, $A_2 = \{0.6, 0.4, 0.2, 0\}$,且事实与前件的相似性由黎曼贴近度定义,为

$$S(A', A) = \frac{\sum_{u_i \in U} \min(A'(u_i), A(u_i))}{\sum_{u_i \in U} \max(A'(u_i), A(u_i))}$$

则由式(3)同样得 $B_1 = B_2$ 。换言之,当输入变量间有显著差异时,推理结果仍维持不变,这样的结论显然不符合一般的直觉思维。

事实上,在现有基于相似度的近似推理模式中,相似匹配仅对输入事实与规则前件间的接近程度进行计算,无法反映概念间隶属函数变化的趋向,如“high”、“more or less high”、“minus high”、“plus high”、“very high”等,为此引入一个模糊概念间贴近方向函数的定义。

定义1 设 $N_D: \mathcal{F}(U)^2 \rightarrow [-1, 1]$ 满足 $\forall A, A' \in \mathcal{F}(U)$, 均有:

$$N_D(A', A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A'(u_i) - A(u_i)) \quad (4)$$

称 N_D 为 $\mathcal{F}(U)^2$ 上的一个贴近方向函数。若 $\alpha_D(A', A) \in [0, 1]$, 称 A' 由正向贴近 A , 否则称 A' 由负向贴近 A 。例如, 给定自然数论域上的 3 个模糊子集 $A, A', A'' \in \mathcal{F}(N)$:

$$A = \text{"little"} = \{(1, 1), (2, 0.8), (3, 0.5), (4, 0.3), (5, 0.1)\}$$

$$A' = \text{"plus little"} = \{(1, 1), (2, 0.8), (3, 0.4), (4, 0.2)\}$$

$$A'' = \text{"minus little"} = \{(1, 1), (2, 0.8), (3, 0.6), (4, 0.4), (5, 0.2)\}$$

由式 (4) 得: $N_D(A', A) = -0.06$, $N_D(A'', A) = 0.06$ 。即 A' 和 A'' 分别由负、正方向贴近 A 。这意味着 A' 相对 A 是缩减的 (即 $A' \subseteq A$), 而 A'' 相对 A 是扩展的 (即 $A'' \supseteq A$)。

1.3 近似推理中的相似修正关系计算

根据上述讨论, 本节在现有 SAR 推理模式的基础上, 结合 CRI 转化计算的特点, 通过引入贴近方向函数, 提出一种依据输入与前提的相似性对模糊关系进行修正的推理方法, 即相似修正关系推理 (similarity-modified relation inference, SMRI)。

SMRI 算法:

1) 根据事实 A' 与前件 A 间的相似度 $S(A', A)$ 和贴近方向 $N_D(A', A)$ 进行匹配计算;

2) 运用转化算子 R_T 将条件命题 $A \rightarrow B$ 转化为模糊关系 R ;

3) 根据 $S(A', A)$ 和 $N_D(A', A)$ 对 R 进行修正计算, 生成修正关系 R' (也称诱导关系);

4) 由修正关系 R' 的取大投影计算导出结论 B' 。

近似推理是由非精确前提中得出潜在非精确结论的决策过程。在人们直觉思维中推理过程往往是近似的, 例如, 据条件命题“如果苹果红了, 那么苹果熟了”和 2 个给定的事实“苹果很红”、“苹果有点红”, 可分别得出结论“苹果很熟”、“苹果有点熟”, 由此可以推断出:

$$A' \subseteq A \Rightarrow B' \subseteq B \quad (\text{缩减式})$$

$$A' \supseteq A \Rightarrow B' \supseteq B \quad (\text{扩展式})$$

1.4 修正计算方案

设 A' 由正向贴近 A , 则按上述扩展式推理的假设可知: 若 $A' = A$, 则 $B' = B$; 若 A' 增加且与 A 的相似度降低, 则 B' 将随之增加, 同时与 B 的相似度也相应降低。因 SMRI 算法的结果 B' 是由 R' 的取大计算导得, 故修正关系 R' 应随 $S(A', A)$ 降低而增加, 因此当 $N_D(A', A) \geq 0$, R' 随 $S(A', A)$ 变化应满足:

1) 若 $S(A', A) = 1$, 则 $R'(u, v) = R(u, v)$;

2) 若 $S(A', A) = 0$, 则 $R'(u, v) = 1$;

3) 若 $S(A', A)$ 从 1 降至 0, 则 $R'(u, v)$ 从 $R(u, v)$ 增至 1。

按照缩减式推理的假设, 当 A' 负向贴近 A , 若 A' 减少且 $S(A', A)$ 相应降低, 则 R' 相应减少, 由此, 当 $N_D(A', A) < 0$, R' 随 $S(A', A)$ 变化应满足:

4) 若 $S(A', A) = 1$, 则 $R'(u, v) = R(u, v)$;

5) 若 $S(A', A) = 0$, 则 $R'(u, v) = 0$;

6) 若 $S(A', A)$ 从 1 降至 0, 则 $R'(u, v)$ 从 $R(u, v)$ 减至 0。

根据性质 1)、4), 若 A' 等于 A , 则 R' 无需修正。由 2)、5), 若 A' 与 A 完全不同, 则当 $N_D(A', A) \geq 0$, 有 $R' = U \times V$, $B' = V$, 即结论完全不确定; 当 $N_D(A', A) < 0$, 有 $R' = \phi$, $B' = \phi$, 即结论完全未知。由 3)、6), 当 A' 分别由正向、负向贴近 A 时, R' 将随 $S(A', A)$ 降低而相应增、减, 并且在 $S(A', A)$ 值域内 R' 从确定状态分别转化到不确定及未知状态。

简记 $S(A', A) = s$, $N_D(A', A) = n_D$, $R(u, v) = r$, $R'(u, v) = r'$, 记 s 子集为 \tilde{S} 。

定义2 设 $M: \tilde{S} \times R \rightarrow R'$ 满足 $\forall s, s_1, s_2 \in \tilde{S}$, $\forall r, r_1, r_2 \in R$, 均有:

1) $M(1, r) = r$;

2) $r_1 \leq r_2 \Rightarrow M(s, r_1) \leq M(s, r_2)$;

3) $n_D \geq 0 \Rightarrow M(0, r) = 1$;

4) $n_D \geq 0$ 且 $s_1 \leq s_2 \Rightarrow M(s_1, r) \geq M(s_2, r)$;

称 M 为扩展型修正算子; 若满足 1)、2) 并且:

5) $n_D < 0 \Rightarrow M(0, r) = 0$;

6) $n_D < 0$ 且 $s_1 \leq s_2 \Rightarrow M(s_1, r) \leq M(s_2, r)$;

称 M 为缩减型修正算子, 记 $r' = M(s, r)$ 。

由定义 2, 考察模糊逻辑中的剩余蕴涵 (R -蕴涵) $I: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$, $\forall x, y \in [0, 1]$, $I(x, y) = \{z \in [0, 1] : \sup T(x, z) \leq y\}$, 且 $\forall a, b, c \in [0, 1]$, 均有:

7) $a \leq c \Rightarrow I(a, b) \geq I(c, b)$;

8) $b \leq c \Rightarrow I(a, b) \leq I(a, c)$;

9) $I(1, b) = b$;

10) $I(0, b) = 1$;

由 7)~10), 剩余蕴涵满足扩展型修正算子的性质 1)~4), 主要有 I_G (Goguen 算子)、 I_G (Gödel 算子)、 I_L (Lukasiewicz 算子) 等, 其强弱顺序为 $I_G(a, b) \leq I_G(a, b) \leq I_L(a, b)$ 。

另一方面, 考察 t -范数 $T: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$, $\forall a, b, c \in [0, 1]$, 均满足:

11) $a \leq c \Rightarrow T(a, b) \leq T(c, b)$;

12) $b \leq c \Rightarrow T(a, b) \leq T(a, c)$;

$$13) T(1, b) = b;$$

$$14) T(0, b) = 0。$$

由 11)~14), t -范数可满足缩减型修正算子的性质 1)、2)、5) 和 6), 主要有 T_M 、 T_P 、 T_L 等, 且有 $T_L(a, b) \leq T_P(a, b) \leq T_M(a, b)$ 。

定义 3 设 $M: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ 为修正算子, I 、 T 分别表示剩余蕴涵及 t -范数, 则修正关系 r' 可表达为

$$r' = M(s, r) = \begin{cases} I(s, r), & n_D \geq 0 \\ T(s, r), & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 给出修正关系 R' 的计算方案, 据 SMRI 算法, 由 R' 投影计算得到的推理结果为

$$B'(v) = \begin{cases} \sup_{u \in U} I(s, R(u, v)), & n_D \geq 0 \\ \sup_{u \in U} T(s, R(u, v)), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

就推理机制而言, SMRI 算法与 CRI、Turksen 的 SAR 有显著差别。令 $R(B|A)$ 表示条件命题, CRI 和 SAR 推理过程可分别表示为

$$A' \wedge R(B|A) \Rightarrow B'$$

$$BS(A', A) \Rightarrow B' \text{ 或 } B/S(A', A) \Rightarrow B'$$

对本文的算法, 有:

$$S(A', A) \rightarrow R(B|A) \Rightarrow B' \quad (\text{扩展式})$$

$$S(A', A) \wedge R(B|A) \Rightarrow B' \quad (\text{缩减式})$$

式中: \rightarrow 为剩余蕴涵; \wedge 为 t -范数。

1.5 近似推理中的转化算子

在 SMRI 方法的步骤 2) 中, 通过合适的转化算子 R_T 将条件命题转化为模糊关系 R 。根据 CRI 的推理模式, R_T 主要分成两类^[5]: 1) 递增的模糊算子, 对应于“与”运算, 它包括 T_M 、 T_P 、 T_B 、 T_D (强烈算子) 等; 2) 左递减且右递增的模糊算子, 对应于“蕴涵”运算, 如 I_{KD} 、 I_{G_0} 、 I_L 、 I_G 等。

命题 1 令 $A \in \mathcal{F}(U)$ 为正规且非充分覆盖 U , 给定 $s = 1$ 。

1) 如转化算子 R_T 递增, 有 $B' = B$;

2) 如转化算子 R_T 左递减, 有 $B' = V$ 。

证明 1) 由修正算子 M 的右递增性, 据式 (6) 有:

$$\begin{aligned} B'(v) &= \sup_{u \in U} M(s, R(u, v)) = \\ &= \sup_{u \in U} M(s, R_T(A(u), B(v))) = \\ &= M(s, \sup_{u \in U} R_T(A(u), B(v))) \end{aligned}$$

由 R_T 递增及 A 正规, 若给定 $s = 1$, 则:

$$\begin{aligned} B'(v) &= M(s, R_T(\sup_{u \in U} A(u), B(v))) = \\ &= M(s, R_T(1, B(v))) = M(s, B(v)) = \\ &= M(1, B(v)) = B(v) \end{aligned}$$

2) 由 R_T 左递减, 有:

$$\begin{aligned} B'(v) &= \sup_{u \in U} M(s, R_T(A(u), B(v))) = \\ &= M(s, R_T(\inf_{u \in U} A(u), B(v))) \end{aligned}$$

据 $B'_{I_{G_0}, \Phi_M}$ 非充分覆盖 B'_{I_L, Φ_M} , 得 $\inf_{u \in U} A(u) = 0$, 若给定 B'_{T_P, Φ_M} , 则:

$$\begin{aligned} B'(v) &= M(s, R_T(\inf_{u \in U} A(u), B(v))) = \\ &= M(1, R_T(0, B(v))) = \\ &= M(1, 1) = 1 \end{aligned}$$

故有 $B' = V$ 。证毕。

据命题 1 中性质 1), 若转化算子 R_T 递增, 则对于正规前件 A 结论 B' 可还原, 又因

$$B'(v) = \begin{cases} I(s, B(v)), & n_D \geq 0 \\ T(s, B(v)), & \text{其他} \end{cases}$$

若扩展型和缩减型修正算子分别为 I_{G_0} 、 T_P 时, 则:

$$B'(v) = \begin{cases} \min\{1, B(v)/s\}, & n_D \geq 0 \\ sB(v), & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式 (8) 正是文献 [8-9] 中 Turksen 的“扩展”与“缩减”推理形式。任给 $A \in \mathcal{F}(U)$, 由 SMRI 算法可得:

$$B'(v) = \begin{cases} I(s, R_T(\sup_{u \in U} A(u), B(v))), & n_D \geq 0 \\ T(s, R_T(\sup_{u \in U} A(u), B(v))), & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

据命题 1 的性质 2), 若转化算子 R_T 左递减, 当 $A' = A$ 并且 A 未完全覆盖 U , 结论为其论域自身, 相当于“ B' is any”的非确定状态。由此可知, 将 II 类模糊算子用作转化算子不满足实际应用要求。

定义 4 设 $R_T: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ 满足 $\forall a, b, c \in [0, 1]$, 均有:

$$1) R_T(1, b) = b;$$

$$2) a \leq c \Rightarrow R_T(a, b) \leq R_T(c, b);$$

$$3) b \leq c \Rightarrow R_T(a, b) \leq R_T(a, c);$$

$$4) R_T(R_T(a, b), c) = R_T(R_T(b, c), a);$$

$$5) R_T(a, 0) = 0;$$

$$6) R_T(a, b) \leq \min(a, b);$$

称 R_T 为 $[0, 1]^2$ 上的一个转化算子, 记 $r = R_T(a, b)$ 。

命题 2 令 $A \in \mathcal{F}(U)$ 为正规子集。 $\forall A' \in \mathcal{F}(U)$, 若 $n_D \geq 0$, 则 $B' \supseteq B$; 否则 $B' \subset B$ 。

证明 据式 (8), 若 $n_D \geq 0$, 则 $\forall v \in V$ 有:

$$\begin{aligned} B'(v) &= I(s, R_T(\sup_{u \in U} A(u), B(v))) = \\ &= I(s, R_T(1, B(v))) \geq \\ &= I(1, R_T(1, B(v))) = R_T(1, B(v)) = B(v) \end{aligned}$$

即 $B' \supseteq B$ 。若 $n_D < 0$, 则 $\forall v \in V$ 有:

$$\begin{aligned} B'(v) &= T(s, R_T(\sup_{u \in U} A(u), B(v))) = \\ &= T(s, R_T(1, B(v))) < \\ &= T(1, R_T(1, B(v))) = R_T(1, B(v)) = B(v) \end{aligned}$$

故 $B' \subset B$ 。证毕。

命题 2 表明, 若 A 正规, 推断结果 B' 的“扩展”或“缩减”取决于 A' 对 A 的贴近方向, 并且 SMRI 算法具有还原性。

SMRI 算法中,修正及转化算子的选用对计算结果有直接影响。为使输出结果对系统相关变量的任意变化作出明显的响应,对于扩展式可取强

蕴涵和较强的 t -范数,而对于缩减式,则取较弱的 t -范数作为操作算子。表1为几种修正算子与转化算子的组合情况。

表1 修正算子与转化算子的组合

Table 1 Combination of modification operators and translation operators

计算结果	扩展修正			缩减修正		
	I_G	I_{G_0}	I_L	T_M	T_P	T_L
T_M	B'_{I_G, T_M}	$B'_{I_{G_0}, T_M}$	B'_{I_L, T_M}	B'_{T_M, T_M}	B'_{T_P, T_M}	B'_{T_L, T_M}
T_P	B'_{I_G, T_P}	$B'_{I_{G_0}, T_P}$	B'_{I_L, T_P}	B'_{T_M, T_P}	B'_{T_P, T_P}	B'_{T_L, T_P}
T_B	B'_{I_G, T_B}	$B'_{I_{G_0}, T_B}$	B'_{I_L, T_B}	B'_{T_M, T_B}	B'_{T_P, T_B}	B'_{T_L, T_B}

据式(8),因修正算子和转化算子为右递增,且 $I_G \leq I_{G_0} \leq I_L, T_L \leq T_P \leq T_M, T_B \leq T_P \leq T_M$,故对扩展式,有:

$$B'_{I_G, T_B} \subseteq B'_{I_L, T} \subseteq B'_{I_L, T_M}$$

对缩减式,有:

$$B'_{T_L, T_B} \subseteq B'_{T, T} \subseteq B'_{T_M, T_M}$$

算例1 设 $A = \{1, 0.75, 0.5, 0.25\}$, $B = \{0.25, 0.5, 0.75, 1\}$, $A'_1 = \{1, 0.56, 0.25, 0.06\}$, $A'_2 = \{1, 0.87, 0.71, 0.5\}$,按合成推理和 SMRI 算法分别给出结果。

据 CRI 方法,取转化算子和 t -范数均为取小运算 T_M ,由 $A'_1 = \{1, 0.56, 0.25, 0.06\}$,得:

$$B'_1(v_1) = 0.25, B'_1(v_2) = 0.5, B'_1(v_3) = 0.75, B'_1(v_4) = 1$$

即 $B'_1 = B$ 。同样可得 $B'_2 = B$,故 $B'_1 = B'_2 = B$ 。

据 SMRI 算法,计算 A' 与 A 间的相似度和贴近方向:

$$S(A'_1, A) = 1 - \frac{0.19 + 0.25 + 0.19}{4} = 0.84$$

$$N_D(A'_1, A) = -\frac{0.19 + 0.25 + 0.19}{4} = -0.16$$

$$S(A'_2, A) = 1 - \frac{0.12 + 0.21 + 0.25}{4} = 0.86$$

$$N_D(A'_2, A) = \frac{0.12 + 0.21 + 0.25}{4} = 0.14$$

由 $N_D(A'_1, A) < 0$,据式(8),取修正算子和转化算子为 T_L, T_B ,有:

$$B'_1(v_1) = \max(S(A'_1, A) + \max_{u \in U} Au + Bv_1 - 1, 0) - 1,$$

$$0) = \max(0.84 + \max(1 + 0.25 - 1, 0) - 1, 0) = 0.09$$

依次计算得:

$$B'_1(v_2) = 0.34, B'_1(v_3) = 0.59, B'_1(v_4) = 0.84$$

由 $N_D(A'_2, A) > 0$,据式(8),取修正算子和转化

算子为 I_L, T_M ,有:

$$B'_2(v_1) = \min\left(1 - S(A'_1, A) + \min_{u \in U} A(u), B(v_1)\right), 1) = \min(1 - 0.86 + \min(1, 0.25), 1) = 0.39$$

依次可得:

$$B'_2(v_2) = 0.64, B'_2(v_3) = 0.89, B'_2(v_4) = 1$$

即 $B'_1 \neq B'_2$ 。由此可见,对比 CRI 方法,SMRI 计算结果可对输入事实的变化和趋向作出响应。

2 基于近似推理的焊接工艺参数决策

气体保护焊以其高效作业、低成本、操作方便等特点在船舶、机械、石化、车辆等制造业有广泛应用。焊接规范参数的选取是焊接质量控制的关键环节之一,为获得规范参数与焊缝形态之间关系的数学模型,往往需进行大量的工艺试验,但焊接过程的复杂性使构建精确的模型通常不易实现。理论已证明模糊逻辑作为一种万能逼近器,能以任意精度逼近非线性对象或过程^[5],所以模糊建模在焊接领域具有较好的应用前景,下面给出 SMRI 算法在 CO₂ 焊接工艺决策方面的应用。

2.1 焊接参数决策的推理模型

焊接熔深是焊缝接头质量的最重要指标,在与之相关的诸多焊接工艺参数中,焊接电流和焊速为主要因素,为此可构建一个在不同焊速下,以焊缝熔深 D_w 和焊接电流 I_w 分别作为输入和输出变量的模糊推理模型,其论域分别为 X 和 Y 。

由 CO₂ 焊接试验总结出 3 种焊速下熔深与电流之间关系的工艺规则,如表2所示。

表2 焊缝熔深与电流之间的工艺规则

Table 2 Process rules between weld depth and welding current

焊接速度/(mm·min ⁻¹)									
		130		180		220			
焊缝深度(前件)	深(D)	中等(M)	中浅(SM)	较深(RD)	较浅(RS)	浅(S)	中等(M)	较浅(RS)	浅(S)
焊接电流(后件)	大(L)	中等(M)	小(S)	大(L)	中等(M)	小(S)	大(L)	中等(M)	小(S)

简明起见,各模糊变量的隶属函数取三角形或梯形, D_w 和 I_w 的隶属函数分别如图1、图2所示。

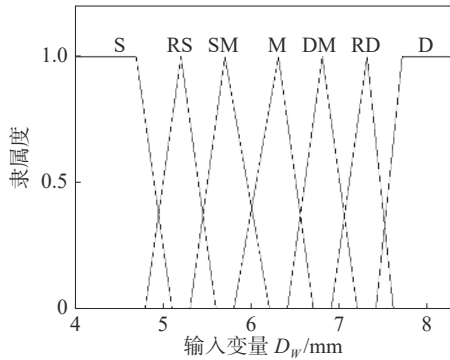


图1 焊缝熔深的隶属函数

Fig. 1 Membership functions of weld depth

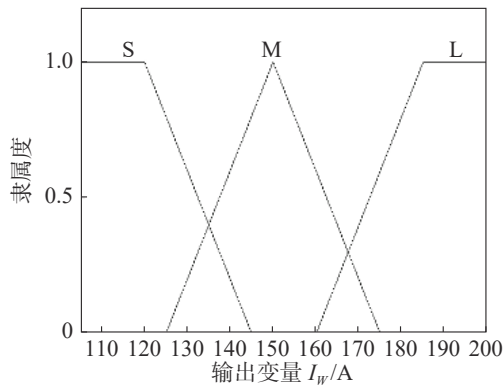


图2 焊接电流的隶属函数

Fig. 2 Membership functions of welding current

基于SMRI方法实现焊接电流决策的主要步骤如下:

1) 输入精确量的模糊化。设输入精确值 x' 对应于变量 A' ,则该模糊变量的构造可以表示为 $A'(x) = A(x + (x_0 - x'))$,如图3所示。

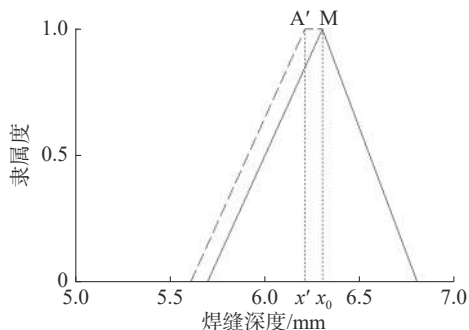


图3 输入精确值 x' 的模糊化

Fig. 3 Fuzzification of input exact value x'

2) 计算输入与前件间的相似度和贴近方向。

$$S(A', A) = \frac{\int_X \min\{A'(x), A(x)\} dx}{\int_X \max\{A'(x), A(x)\} dx}$$

$$N_D(A', A) = \int_X (A'(x) - A(x)) dx / \int_X dx$$

3) 修正关系及投影计算。据式(8),有:

$$B'(y) = M(S(A', A), R_T(\sup_{x \in X} A(x), B(y)))$$

因 A 为正规子集,由定义4得:

$$B'(y) = M(S(A', A), B(y))$$

这里,若 $N_D(A', A) \geq 0$, M 取 I_L ,否则取 T_L 。

4) 输出解模糊。按最大隶属原则,输出量 y' 可由 $B'(y) = \sup_{y \in Y} B'(y) = 1$ 进行计算,如图4所示。

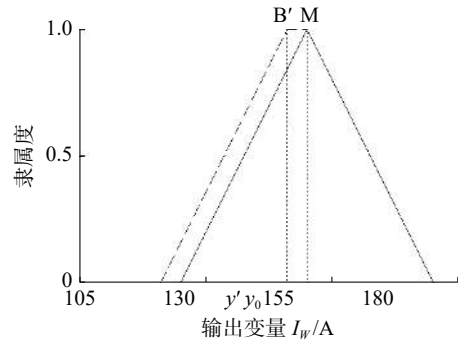


图4 输出变量精确值的计算

Fig. 4 Computation of output exact value

按以上步骤,通过MATLAB编程建立基于SMRI的焊接规范参数决策模型,模型运行界面如图5所示。

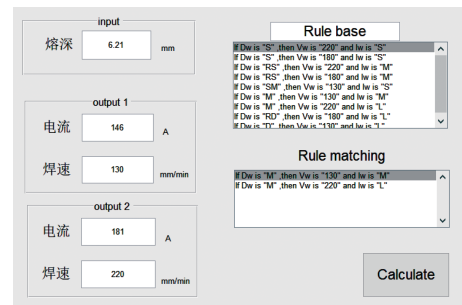


图5 基于SMRI的焊接规范参数计算

Fig. 5 Calculation of welding specification parameters based on SMRI

2.2 推理模型的验证

根据给定的焊缝熔深,通过SMRI模型推理获得焊接电流和焊速后实施焊接,试验条件为:逆变NB-500焊机,焊接母材AH36船用高强钢,对接平焊,焊丝直径1.0 mm,焊接电压 21 ± 2 V。焊后切取焊缝的横截面并测量焊缝深度。模型推理和实验结果如表3所示,其中 h_P 为板厚, D'_w 、 D_w 分别为焊缝深的期望值和实测值, I'_w 、 V'_w 分别为电流和焊速决策模型的计算值。焊缝熔深期望值与实测值的吻合情况如图6所示,最大误差为1.99%,平均误差为1.24%,这说明焊接参数决策模型达到了较高的推算精度,完全可以满足工程实际应用的要求。

表3 焊接参数决策工艺试验
Table 3 Experiments for welding parameter decision

序号	h_p/mm	D'_w/mm	I'_w/A	$V'_w/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	D_w/mm
1	5	4.52	115	180	4.63
2	6	5.58	115	130	5.63
3	7	6.41	190	220	6.37
4	5	7.53	180	130	7.64

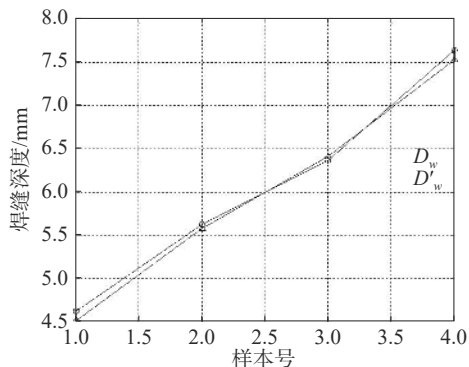


图6 理论值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison of theoretical and measured values

3 结束语

在 SAR 推理模式的基础上, 引入贴近方向函数作为匹配计算的一个环节, 可以更准确地反映模糊概念中隶属度的变化趋向。CRI 的推理过程可以看作由给定事实直接对模糊关系进行修正计算, 其修正函数对应于合成运算。对于本文的 SMRI 算法, 计算修正关系是通过事实和前提的相似匹配来达成, 由此事实与前提中的任意变化(包括扩展和缩减变化)都可整合到修正关系之中, 这不仅改进了 Turksen 等人提出的基于相似度的近似推理模式, 而且有助于解决 CRI 的推理结论在某些情况下与实际不符的问题。

在近似推理中有多种模糊算子可选择, 本文对 SMRI 模式中的转化算子和修正算子的选择方案进行了探讨。例如, 当要求推理结论对输入事实和规则的变化作出显著响应时, 可以分别选择较强和较弱的模糊算子进行扩展及缩减计算。工程化应用是近似推理算法研究的目标之一, 本文给出 SMRI 算法在焊接工艺参数决策的实例, 下步将研究修正算子和转化算子的性质, 并将该算法应用到焊接模糊控制方面。

参考文献:

- [1] ZADEH L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1973, SMC-3(1): 28–44.
- [2] MAMDANI E H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic Synthesis[J]. *IEEE transactions on computers*, 1977, 26(12): 1182–1191.
- [3] MIZUMOTO M, FUKAMI S, TANAKA K. Some methods of fuzzy reasoning, in: advances in fuzzy set theory and applications[M]. New York: North-Holland, 1979.
- [4] BACZYŃSKI M, JAYARAM B. Fuzzy implications[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [5] 侯健, 苑飞. 模糊推理方法及模糊系统的逼近性能 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2009.
- [6] 李洪兴. 模糊控制的插值机理 [J]. *中国科学 (E 辑)*, 1998, 41(3): 312–320.
LI Hongxing. Interpolation mechanism of fuzzy control[J]. *Science in China series E: technological sciences*, 1998, 41(3): 312–320.
- [7] 王国俊. 模糊推理的全蕴涵三 I 算法 [J]. *中国科学(E 辑)*, 1999, 29(1): 43–53.
WANG Guojun. Full implication triple I algorithm of fuzzy reasoning[J]. *Science in China (series E)*, 1999, 29(1): 43–53.
- [8] TURKSEN I B, ZHONG Zhao. An approximate analogical reasoning approach based on similarity measures[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1988, 18(6): 1049–1056.
- [9] TURKSEN I B, ZHONG Zhao. An approximate analogical reasoning schema based on similarity measures and interval-valued fuzzy sets[J]. *Fuzzy sets and systems*, 1990, 34(3): 323–346.
- [10] CHEN S M. A weighted fuzzy reasoning algorithm for medical diagnosis[J]. *Decision support systems*, 1994, 11(1): 37–43.
- [11] YEUNG D S, TSANG E C C. A comparative study on similarity-based fuzzy reasoning methods[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, Part B (cybernetics)*, 1997, 27(2): 216–227.
- [12] 何映思, 全海金, 邓辉文. 具有还原性的多重多维模糊推理算法 [J]. *计算机科学*, 2007, 34(4): 145–148.
HE Yingsi, QUAN Haijin, DENG Huiwen. An algorithm

- of general fuzzy inference with the reductive property[J]. *Computer science*, 2007, 34(4): 145–148.
- [13] MONDAL B, RAHA S. Similarity-based inverse approximate reasoning[J]. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 2011, 19(6): 1058–1071.
- [14] RAHA S, HOSSAIN A, GHOSH S. Similarity based approximate reasoning: fuzzy control[J]. *Journal of applied logic*, 2008, 6(1): 47–71.
- [15] LI Yingfang, QIN Keyun, HE Xingxing, et al. Properties of Raha's similarity-based approximate reasoning method[J]. *Fuzzy sets and systems*, 2016, 294: 48–62.
- [16] CHEN S M, HSIAO W H, JONG W T. Bidirectional approximate reasoning based on interval-valued fuzzy sets[J]. *Fuzzy sets and systems*, 1997, 91(3): 339–353.
- [17] 李凡, 田应忠, 吕泽华. 基于 Vague 集的近似推理方法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 44–46.
- LI Fan, TIAN Yingzhong, LU Zehua. An approximate reasoning approach based on the measures of similarity between Vague sets[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (nature science edition)*, 2004, 32(4): 44–46.
- [18] 石玉强, 王鸿绪. 一种基于 Vague 集间距离的双向近似推理方法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2007, 28(4): 661–665.
- SHI Yuqiang, WANG Hongxu. Bidirectional approximate reasoning based on distances of vague set[J]. *Journal of Chinese computer systems*, 2007, 28(4): 661–665.
- [19] FENG Zhiqiang, LIU Cungen. On similarity-based approximate reasoning in interval-valued fuzzy environments[J]. *Informatica*, 2012, 36(3): 255–262.
- [20] FENG Zhiqiang, LIU Cungen, HUANG Hu. Knowledge modeling based on interval-valued fuzzy rough set and similarity inference: prediction of welding distortion[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, 15(8): 636–650.
- [21] 王毅, 刘三阳, 张文, 等. 基于包含度的直觉模糊相似度量推理方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(3): 494–500.
- WANG Yi, LIU Sanyang, ZHANG Wen, et al. Intuitionistic fuzzy similarity measures reasoning method based on inclusion degrees[J]. *Systems engineering and electronics*, 2014, 36(3): 494–500.

作者简介:



冯志强, 教授, 博士, 担任中国造船工程学会计算机应用学术委员会委员、《Transactions on Intelligent Welding Manufacturing》助编 (AE), 主要研究方向为数字化造船、先进制造技术。主持国家自然科学基金项目、广西省自然科学基金项目、海洋工程国家重点实验室开放基金项目、水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金等 6 项。发表学术论文 13 篇。

家重点实验室开放基金项目、水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金等 6 项。发表学术论文 13 篇。



韩峻峰, 教授, 博士, 担任中国高等教育学会仪器科学及测控技术专业委员会委员、广西自动化学会副理事长, 主要研究方向为智能控制、智能信息处理。主持广西省自然科学基金项目、国家中小企业创新基金项目、广西省科技重大专项等多项。发表学术论文 40 余篇。

文 40 余篇。



黄伟铭, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制、智能信息处理。