

基于不确定推理的风电塔筒焊接工艺

陈昌荣,张子旺,江吉彬,练国富,汪草宏

(福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

摘要:为实现海上风电塔筒焊接工艺的高效规划,以其大厚板、大直径的特点,分析了焊接工艺文件,根据工艺编制流程分出基础与核心工艺,并使用不确定性产生式规则表示为焊接知识,围绕该知识设计了其焊接工艺推理算法,运用多元线性回归对应各核心参数之间的关系,建立了其焊接工艺知识库。结果表明,采用修改后的不确定性产生式规则表示法构建的焊接工艺设计推理算法,能快速推导出相应的焊接工艺文件及核心参数。

关键词: 焊接工艺;产生式表示法;推理算法;专家系统;知识库

中图分类号: TG4;TP182

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0237-07

Welding process of wind power tower based on uncertainty inference

CHEN Changrong, ZHANG Ziwan, JIANG Jibin, LIAN Guofu, WANG Caohong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The purpose of the study is to realize the efficient planning of the welding process of offshore wind power tower. Based on the characteristics of its large thick plate and large diameter, the welding process documents were analyzed, and the basic and core processes were separated according to the process compilation process, and expressed as welding knowledge using uncertainty production rules. The welding process inference algorithm was designed around this knowledge, and the welding process knowledge base was established by using multiple linear regression to correspond to the relationship between each core parameter. Results show that the welding process design inference algorithm constructed by the modified uncertainty production rule representation can quickly deduce the corresponding welding process documents and core parameters.

Keywords: welding process; production representation; inference algorithm; expert system; knowledge base

塔筒是海上风电机组的重要装置^[1],直径超过5 m,高度可达60 m。塔筒分段加工增加了焊接工作量,也对生产质量与生产效率提出了考验,即在不同焊接质量的要求下,能快速编制焊接工艺文件^[2]。实际焊接工艺文件编写时,需要针对各个焊接工艺参数的关系,确定具体的编写流程,包括生产车间环境、人员技能熟练度、材料设备等,进行大量的焊接试验以保证质量,造成人力与物力的大量消耗^[3]。

早期焊接工艺推理主要通过CAPP设计焊接

工艺决策系统实现^[4-5],后经过与人工智能结合确定了焊接专家系统(expert system)。罗怡等^[6]直接提取CO₂焊接工艺核心参数,以核心参数为输出建立了BP神经网络,解决了工艺数据的拟合问题。卓宏明^[7]利用萤火虫算法为BP神经网络寻找全局较优的初始权重。郭温^[8]引入层次分析法,计算出影响因素的相似度以确定PQR为焊接指导文件。冯志强等^[9]提出一种基于合成规则的相似性推理方法,并以CO₂焊接规范参数设计为例构建模糊推理系统。马国辉等^[10]将模

收稿日期:2023-03-01

基金项目:福建省自然科学基金项目(2020J01873);福建省科技重大专项(2020HZ03018)

第一作者简介:陈昌荣(1986—),男,福建泉州人,副教授,博士,研究方向:模具等高附加值产品的金属增材制造与再制造研究。

糊推理建模和本体知识表示方法结合以解决知识概念类间属性关系的定义、共享及重用。凡天梯等^[11]以本体为基础建立知识,并根据实体及语义关系构建知识图谱,将知识推理的范围扩大。

可见,现有焊接工艺系统会产生知识表示结构的复杂度平衡问题或仅仅局限于某部分工艺。本文提出了一种基于不确定性产生式推理方的焊

接工艺知识库,融合产生式表示与其他知识表示的特点,将知识适用范围和灵活性扩大,提高了文件编写效率,并扩大了作用域。

1 系统设计

风电塔筒的焊接工艺推理系统主要由焊接工艺知识的预处理、推理和生成组成,具体见图 1。

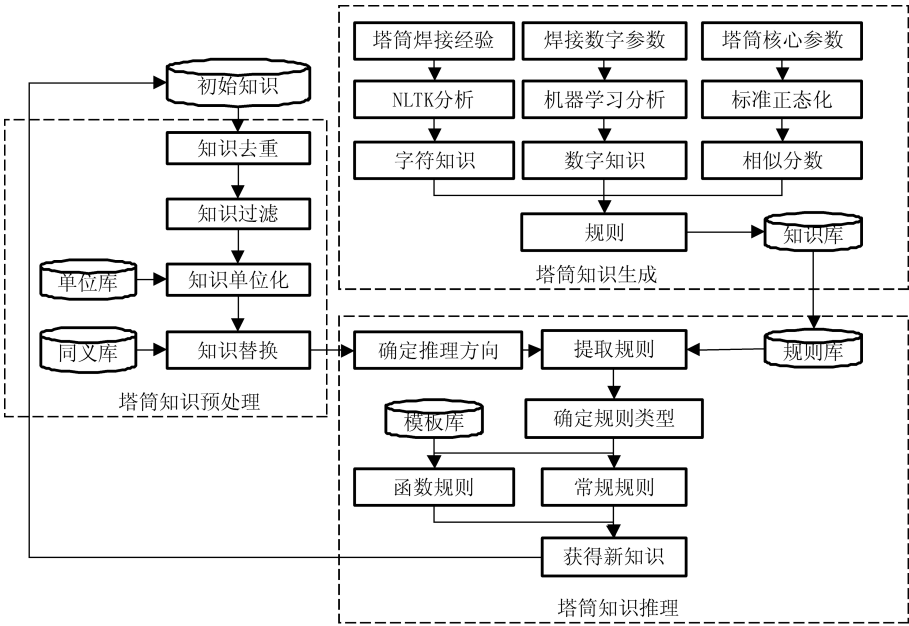


图 1 总体架构设计
Fig.1 Overall framework design

(1) 焊接工艺知识预处理主要包括知识去重、过滤、单位化和替换。知识去重是将重复的知识和规则剔除;知识过滤是通过设置条件并获得满足条件的知识和规则;知识单位化是将不同数据的计量单位统一;知识替换是将相似知识进行转换并匹配推理规则。

(2) 知识推理主要包括推理方向、规则类型和新知识的确定。推理方向为正向或反向推理,不包括混合推理;规则类型包括常规和函数,其中常规规则直接调用知识库的内容进行推理,函数规则由训练好的数据模型确定;新的知识由知识集对规则库进行循环处理获得。

(3) 知识生成主要针对字符串、数字及核心参数分析。字符串分析使用 NLTK 库将焊接相关信息进行语句分析并获得语法树;数字分析使用机器学习确定数据集的训练模型。核心参数分析作为数字分析的典型,添加了历史焊接工艺文件的相似分数计算。

2 知识构成及表示

2.1 焊接工艺编制

无论使用程序计算还是人工编制焊接工艺文件,都需要大量的原始数据作为文件编制的依据,包括 pWPS、WPQR、WPS 及执行标准等。图 2 为 WPS 文件模版。

图 2 将焊接工艺分为初始工艺、基础工艺和核心工艺 3 部分,初始工艺包括焊接接头、母材及其厚度;基础工艺为坡口设计与焊材选择;核心工艺包括焊道、电流种类、焊接电流、电弧电压、焊接速度、热输入和气体流量。焊接工艺文件的编制受焊接位置、焊接接头、母材种类及厚度等因素的影响,其中母材的选用极大程度决定了工艺编写的方向。

塔筒焊接工艺推理需要对历史焊接工艺评定报告(WPQR)进行整理,具体步骤为:

焊接工艺规程				WPS 编号			页码	
							版本	
执行标准					焊接工艺评定记录号			
焊接方法								
焊接位置					接头型式			
坡口型式					衬垫型号			
坡口型式					清根方法			
母材					厚度			
焊材类别					母材最大碳当量			
焊丝干伸长度					保护气体及纯度			
					焊剂烘焙要求			
焊接接头示意图								
坡口准备				焊接道序草图				
焊接参数								
层数	焊接方法	焊丝直径	焊接电流	电弧电压	极性	焊接速度	热输入量	气体流量
内1								
外1								
内n								
外n								
工艺说明								
预热及层间温度								
预热温度及方法					层间温度			
焊后热处理								
温度				保温时间				冷却速率
				审核日期				批准日期

图 2 WPS 模版

Fig.2 WPS model

- (1)确定执行标准,查询当前母材或与其材质、力学性能相似的工艺文件。
- (2)提取文件信息,以获取焊丝或焊剂牌号、坡口及核心参数等重要参数。
- (3)对筛选出的焊接参数进行分析,总结编写 pWPS 文件,并对焊接的核心工艺参数进行试验修正,生成 PQR 文件。
- (4)通过 PQR 验证后编制 WPS 文件。

2.2 焊接工艺的知识表示及内容分类

焊接工艺的知识表示包括产生式规则^[12]、框架^[13]及语义网络表示法^[14]。产生式规则表示法通过蕴含的方式能够直观地确定知识之间的关系;框架表示法具有树的数据结构特征,通常需要多个框架结合表达,信息较为丰富,但无法表示过程性知识;语义网络表示法主要使用三元组表达两对象之间的复杂关系,其中知识图谱就是源于此方法,但图类数据检索的计算量较大。本研究

采取不确定性产生式表示法表示焊接工艺知识和规则,例如与 DH36 有关的规则可以表达为:IF 母材= DH36 THEN 碳当量= 0.43,用途类型= 结构钢,碳含类型= 低碳。焊接工艺参数需要参考焊接标准文件和经验,使用产生式更适合推理,并且该表达方式对塔筒焊接的规则推理效率较高。

焊接工艺根据知识内容类型分为:数值型、区间型和无序型。数值型包括母材厚度,焊丝直径等参数;区间型包括焊接电流、焊接电压、焊接速度、热输入量、焊丝干伸长度及气体流量、预热与层间温度等参数;无序型包括焊接方法和牌号等参数。

3 知识库及推理算法设计

3.1 知识库设计

焊接工艺知识库由知识、规则、单位及近义模型组成。

知识模型包括 ID、对象、属性名、行为、属性值、单位、属性值类型、来源、置信度、作者及日

期,其中行为具有 is 与 have 两种值分别对应单值和区间值,单位为确定数字型参数,存储类型具有字符串与数值两种属性。该模型设计思

路:将知识表示与知识关系分开设计,并以塔筒焊接为对象,确定不同属性作为知识编写的参考,详见表 1。

表 1 知识模型
Tab.1 Knowledge model

ID	对象	属性名	行为	值	单位	存储类型	来源	置信度	作者	日期
1	母材	名称	is	DH36	无	string	1	1.0	张子旺	2023/1/1

规则主要由知识构成,模型则包括 ID、原因集、结果集、函数、前推置信度(使用公式 1)及后推置信度(使用公式 2),其中前推置信度和条件知识之间为相互独立进行计算,后推置信度通过结果的最低置信度获得,函数为推理时使用的模型名称。由于常规推理不涉及函数,所以设置为无,详见表 2。

表 2 规则模型
Tab.2 Rule model

ID	原因	结果	函数	前推率	后推率
1	1_2	3	无	1.0	0.8

$$P_{\text{forward}} = \bigcap_{i=1}^N P_i \tag{1}$$

$$P_{\text{backward}} = \bigcap_{i=1}^N P_i \tag{2}$$

公式(1)和(2)为规则推理时需要的置信度计算,而知识则需要使用近义模型进行相似替换。

近义模型包括 ID、类型、主对象、次对象及相似度,其中类型代表主次对象的关系,一般为同级并设置为无。此模型便于字符串类型数据之间计算相似度,扩大了计算范围,并提高规则空间利用率。近义模型类似于语义网络的节点,与语义网络不同之处在于将知识独立出来,即可以通过近义模型获取更多的信息,或不使用该模型推理获得小范围的信息,由此,可以选择推理的内容和计算量来达到预期的结果,详见表 3。

表 3 近义模型
Tab.3 Near-synonym model

ID	类型	主对象	次对象	值
1	无	是	yes	1.0

单位模型包括 ID、名称和值,值表示当前单位与国际单位的转换值,详见表 4。

表 4 单位模型
Tab.4 Unit model

ID	名称	值
1	cm	0.01

焊接工艺知识库建立流程如下:

- (1)通过人工收集焊接经验、指导书以及其他相关信息。
- (2)将资料转换为字符串型与数值型。
- (3)将数据转换为焊接知识、词语及近义词模型的内容。
- (4)根据单位模型对知识模型规范化。
- (5)人工编制或模型训练得出规则模型内容。

3.2 推理算法设计

一般推理算法包括推理、冲突消解、执行规则和检查推理终止条件 4 个部分。图 3 为知识推理流程图。

3.2.1 推理

按某种既定的策略从规则中筛选出与数据库相似的条件进行匹配。不确定性产生式规则推理,主要通过逻辑推理的方式,以字符串及数值为信息材料,对每次推理结果不断提取与递进,递进采用全局推导的方式,以尽可能获得所有解,最后焊接工艺设计师根据需求或概率筛选出理想结果,推理使用公式(3)。

$$P \rightarrow Q \tag{3}$$

其中, P 为前件, Q 为结论。

3.2.2 冲突消解

如果匹配成功的规则不止一条,称为“发生了冲突”。优先确定规则的置信度上限,然后通过推理程序推理结果,以获得最高概率的同名知识。

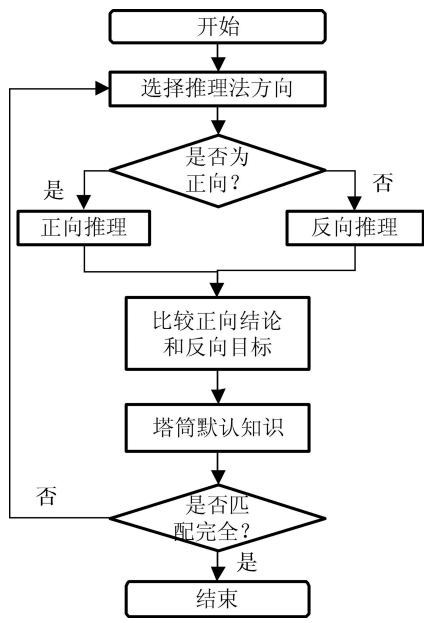


图3 知识推理流程图

Fig.3 Knowledge inference flow chart

3.2.3 执行规则

确定规则后,将相应结论加入处理数据库。对于不确定性知识,在执行每一条规则时还要按一定的算法计算结论的不确定性程度。通过公式(1)和(2)可以计算出对应概率知识。

3.2.4 检查推理终止条件

检查程序是否包含了所需的结果,决定是否停止推理,同时以不再产生新知识为最后结束标志。

3.3 核心功能实现

塔筒焊接工艺推理系统的实现主要依靠正反向和核心参数推理算法。

3.3.1 正反向推理算法的实现

主要包括3部分:初始条件读取、中间知识获取及返回结果。依据图1设计的焊接工艺推理数据流程图可确定具体步骤。

步骤1:初始化推理方向、置信度下限、扫描位置、扫描计数及加载规则库与初始知识。

步骤2:读取当前扫描位置下的规则。

步骤3:对初始知识与对应方向的知识集使用相似函数计算,若计算结果大于等于置信度,则将中间结果加入初始知识集,否则将扫描位置移至下一条规则并转步骤2。

步骤4:若扫描位置为尾部规则,则确定扫描计数是否为规则集的大小,若是,则推理结束,否则初始化扫描位置并转步骤2。

步骤5:返回初始知识集。

相似函数 (similar) 根据知识类型处理,分别为字符串型、单值型和区间型。

3.3.2 核心参数推理算法实现

为计算训练生成后的核心焊接工艺参数与原文件对应内容的相似度,由文件加载、预处理、模型训练、正态化和相似度组成算法,其中预处理使用标准化处理,模型训练使用线性模型,具体步骤为:

- 步骤1:加载源数据集及输入参数。
- 步骤2:对初始条件预处理。
- 步骤3:根据源数据下的训练模型计算出预测后的输出参数。
- 步骤4:将输出参数正态化。
- 步骤5:计算正态化的输出参数与源文件的相似度。

线性模型的使用确定了输入输出的线性情况,其中焊接电流最符合线性关系。为此,其他参数可以通过经验或其他公式转换计算。由于核心参数是区间型数据,所以将模型分为上、中、下训练,并将历史数据正态化后,确定训练后的数据与历史文件的相似度,公式(4)和(5)分别为正态计算公式和相似度计算公式。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \mu)^2, \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \tag{4}$$

式中, x 为输入值, p 为正态分布下的概率密度, σ 为数据集的方差, μ 为数据集的均值。

$$\text{score} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p(x_i)}{\max(p)}, \tag{5}$$
$$p(x) = [p(x_1), p(x_2), p(x_3)]$$

式中, x_i 为第 i 个输入向量,score 为工艺相似度。

4 运行实例

知识库试验数据来源于风电塔筒历史焊接工艺文件,包括执行标准、焊接方法与接头、母材与焊材参数、热输入与处理等工艺参数。本次试验包括工艺正向、反向推理以及核心工艺参数相似度计算,设置置信度为0.5。知识提取及推理实验的环境为:解释器 Python3.6;集成开发环境 PyCharm CE;Qt 框架 Pyside2 ;CPU i5-8257U;GPU Intel Iris Plus Graphics 645;内存 16GB。程序演示

结果如图 4、5、6 所示。

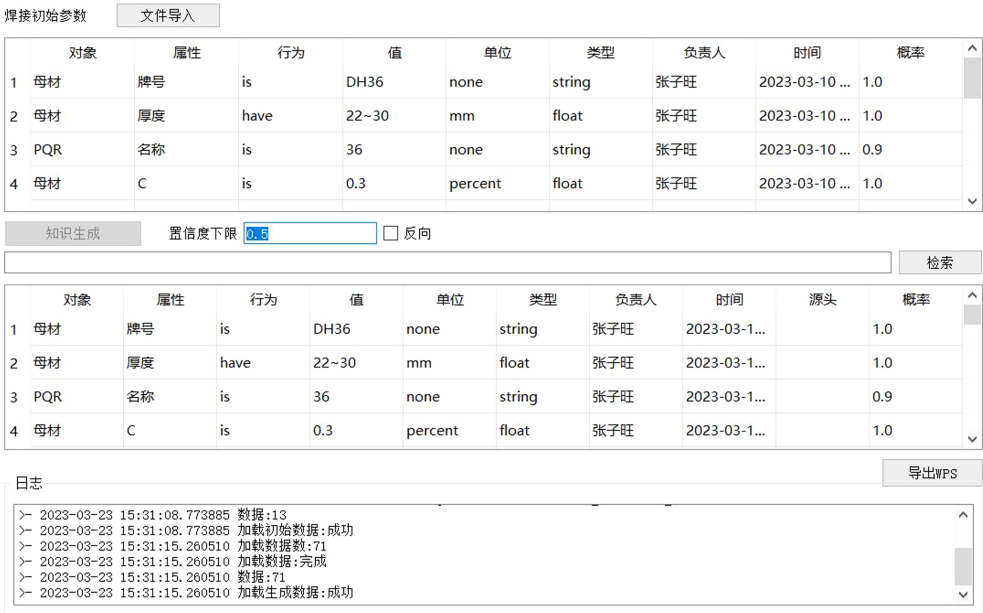


图 4 正向推理实例

Fig.4 Examples of forward inference

由图 4 可知,在使用知识生成后,生成结果多 则,并在一定程度上提高了结果的可解释性。出了“源头”属性,帮助用户追溯生成该知识的规



图 5 反向推理实例

Fig.5 Examples of reverse inference

由图 5 可知,正向和反向推理虽然使用相同的初始条件,但由于目的不同,生成的知识量有很大区别。pWPS 中采用了 115 个样本,使用多元线性回归模型,设置训练集 80%、测试集 10% 与验证集 10%。以焊接电流作为输出,训练出的 R^2 值根据 pWPS 右、PQR 与 pWPS 左参数分别为 0.87、0.9

和 0.91。根据公式(4)(5)可得不同输出工艺对 应的相似度分数。

输入

母材Ceq0.5%

母材厚度47mm

焊丝直径4mm

焊接方法121

生成核心参数

输出

焊接电流536~663A

电弧电压27~32V

焊接速度44~47cm/min

热输入量13~37KJ/cm

分析

结果

输入:
母材碳当量:0.5%
母材厚度:47mm
焊丝直径:4mm
焊接方法:121

输出:
焊接电流:536~663A
电弧电压:27~32V
焊接速度:44~47cm/min
热输入量:13~37KJ/cm

相似分数:52.46

相似分数:55.26

相似分数:48.55

相似分数:62.86

图 6 核心参数及相似计算

Fig.6 Core parameter and similarity computation

由图 6 可知,输入、输出与历史文件设置的参数差别较大,其准确度取决于训练模型本身的 R^2 。在模型不过拟合的情况下,使用优质的模型更能发掘出新的焊接工艺。

5 结论

1) 正向或反向推理使用的推理逻辑相似,使用近义模型既扩大了检索范围又提供了不同推理时间复杂度的选择,并针对具有计量单位的知识

进行归一化修正。

2) 核心参数为焊接工艺编制的重中之重,需要通过不同的模型进行拟合,而本文训练使用的样本数量不足,为此需要更多的数据以支持复杂的数据模型,这是系统性能提升的方向之一。核心参数与历史文件的相似计算发现,大多情况下其相似度在 60 左右徘徊。由于风电塔筒焊接较其他类型作业电流高等特点,需要通过其他文件对实际公式进行修正。

参考文献:

[1] 陈琨. 风电塔筒生产中埋弧自动焊的应用研究[J]. 中国设备工程,2021(12):238-240.

[2] 张淑枝,解金波,王健. 风电塔筒厚钢板焊接工艺参数分析[J]. 山东工业技术,2014(18):32-33.

[3] 张永红. 风电塔筒焊接工艺的改进措施[J]. 科技资讯,2008,6(30):76.

[4] 吴叶军,魏艳红. 智能化焊接 CAPP 的分析与开发[J]. 焊接学报,2015,36(7):109-112,118.

[5] 郑德宏,张家诚,黄旭,等. 基于 BIM 技术的钢结构焊接 CAPP 系统[J]. 科技与创新,2022(10):58-60,67.

[6] 罗怡,伍光凤,李春天. CO₂ 焊接工艺参数优化的人工神经网络设计[J]. 热加工工艺,2008,37(5):93-95.

[7] 卓宏明,陈倩清,何海华. 基于萤火虫神经网络的焊接工艺专家系统开发[J]. 机电技术,2020,43(4):27-29.

[8] 郭温. 基于实例推理的船舶焊接工艺设计研究[J]. 铸造技术,2012,33(1):100-102.

[9] 冯志强,柳存根. 基于合成规则的相似性推理及其在焊接参数设计中的应用[J]. 数学的实践与认识,2016,46(2):155-164.

[10] 马国辉,田凌,刘思超,等. 基于知识工程的船体焊接工艺研究[J]. 图学学报,2020,41(3):430-437.

[11] 凡天梯,景旭文,肖志建,等. 基于本体的船舶焊接工艺知识图谱构建[J]. 电焊机,2019,49(12):8-13.

[12] 王林,马飞英,刘全稳,等. 基于产生式系统的煤层气井排采异常识别技术[J]. 煤田地质与勘探,2017,45(3):72-76.

[13] 陈栋,吴保国,刘建成,等. 基于框架表示法的森林经营知识服务系统设计与实现[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(3):491-500.

[14] 宋杰,徐洁,周德生,等. 基于语义网的智能变电站运维专家系统可扩展建模与应用[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(22):144-151.

(责任编辑:陈雯)