

控制与决策

Control and Decision

基于贝叶斯概率语义网的铝电解槽况知识表示模型与约简方法

陈祖国, 李勇刚, 卢明, 陈超洋, 刘端

引用本文:

陈祖国, 李勇刚, 卢明, 等. 基于贝叶斯概率语义网的铝电解槽况知识表示模型与约简方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(7): 1569–1583.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1460>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于贝叶斯网络的柴油机润滑系统多故障诊断](#)

Diagnosis of multiple faults of diesel engine lubrication system based on Bayesian networks

控制与决策. 2019, 34(6): 1187–1194 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1399>

[基于D-vine Copula理论的贝叶斯分类器设计](#)

Bayesian classifier based on D-vine Copula theory

控制与决策. 2019, 34(6): 1319–1324 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1589>

[柴油机燃油系统多故障的解耦与诊断技术](#)

Decoupling and diagnosis of multi-fault of diesel engine fuel system

控制与决策. 2019, 34(10): 2249–2255 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0264>

[基于证据推理和第3代前景理论的不确定性多属性决策方法](#)

Method for uncertain multi-attribute decision making based on evidential reasoning and third-generation prospect theory

控制与决策. 2016, 31(1): 105–113 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1472>

[一种基于条件证据网络的多源异类知识融合识别方法](#)

A recognition fusion method of multi heterogeneous knowledge based on condition evidential network

控制与决策. 2015, 30(12): 2153–2160 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1495>

基于贝叶斯概率语义网的铝电解槽况 知识表示模型与约简方法

陈祖国¹, 李勇刚², 卢 明^{1†}, 陈超洋¹, 刘 端¹

(1. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 自动化学院, 湖南 湘潭 410083)

摘 要: 铝电解生产过程中的知识具有跨领域、不确定、多源异构等特征, 采用传统知识表示方法将导致组合爆炸、多义性、知识选择困难及可理解性差, 从而降低铝电解槽况判断的效率及准确性. 将贝叶斯条件概率与传统语义网相结合, 提出一种新的可用于铝电解槽况判断的知识表示方法. 该方法分别采用知识元和概率做关联和乘法运算, 可有效解决知识在推理过程中出现多义性和知识选择困难的问题; 同时, 提出基于组合消除的知识约简方法, 旨在解决关联关系矩阵中重复知识因子多、矩阵维数高导致存储和计算困难的问题. 最后通过铝电解槽况判断的案例分析, 验证了贝叶斯概率语义网模型的合理性、可行性和有效性.

关键词: 贝叶斯概率语义网; 知识表示; 知识推理; 知识约简; 铝电解槽况判断

中图分类号: TF355.4

文献标志码: A

Aluminum electrolysis cell condition knowledge representation model and reduction method based on Bayesian probability semantic network

CHEN Zu-guo¹, LI Yong-gang², LU Ming^{1†}, CHEN Chao-yang¹, LIU Duan¹

(1. School of Information Electrical and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The knowledge about aluminum electrolysis production has properties of interdisciplinarity, uncertainty, multi-source and heterogeneity. Using the traditional knowledge representation may give rise to the problems like combination explosion, ambiguity, knowledge selection difficulty, poor understandability and so on, all of which will thereby reduce the efficiency and accuracy of the condition diagnosis of aluminum electrolytic cells. To solve the above problems, a new knowledge representation method that combines Bayesian conditional probability and traditional semantic net is proposed in the paper, and it is named the knowledge representation model based on Bayesian probability semantic network. In this method, the knowledge element and the probability are used for correlation and multiplication respectively, which can solve effectively the problems of ambiguity, knowledge selection difficulty and poor understandability in the process of knowledge reasoning. Meanwhile, knowledge reduction method based on combination elimination is proposed, aiming to solve the storage and calculation problems caused by redundantly repeated knowledge factors and high matrix dimension in the relational matrix. The rationality, feasibility and effectiveness of the Bayesian probability semantic network model are verified by a case study of the aluminum electrolytic cells condition diagnosis.

Keywords: Bayesian probability semantic network; knowledge representation; knowledge reasoning; knowledge reduction; aluminum electrolysis condition diagnose

0 引 言

电解槽是铝电解生产过程的核心组成部分. 电解槽的槽况决定了电解槽的生产效率和能耗, 槽况越好电解效率越高, 及时地获取槽况状态信息对于提高电解槽的电解生产效率至关重要^[1]. 但是, 电解槽正

常工作时处在高温状态, 且其内部的电解质具有强腐蚀性, 目前还不能在线监测电解槽的槽况^[2]. 在铝电解工厂中, 主要依靠人工经验进行判断和调节. 由于工人的经验水平参差不齐, 导致不同工人在同一时刻对同一个电解槽的槽况判断结果不一致. 长期依赖

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2019-03-04.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(61621062); 国家自然科学基金重点项目(61533020); 国家自然科学基金面上项目(61672226, 61903137).

†通讯作者. E-mail: mlu@hnust.edu.cn.

人工经验的判断方法会造成生产过程的不稳定、产品质量一致性差、能源消耗大等问题^[3]。电解槽的各工艺参数都是非线性的,且具有高度的相关性和耦合性,难以建立准确的数学模型对槽况进行判断^[4]。为了解决上述问题,本文提出一种基于知识的槽况表示和判断方法。该方法不需要建立精确的数学模型,主要利用专家经验、工艺机理和数据等知识进行槽况判断^[5],可以实现具有灵活性和准确性的槽况判断智能系统。知识表示是智能系统利用和理解知识的前提,将知识形式化并以机器可理解的方式存储在计算机中,是知识处理过程中非常关键的研究内容之一。

目前经典的知识表示方法主要有语义网表示法^[6]、谓词逻辑表示法^[7]、状态空间表示法^[8]、剧本表示法^[9]、过程表示法^[10]和框架表示法^[11]等。谓词逻辑表示法是采用谓词逻辑公式和谓词演算将一个要解决的问题变成一个有待证明的问题,其能够把数学中的逻辑论证符号化^[12]。但是这种知识表示方法的灵活性差,表示过程比较复杂。状态空间法是一种利用状态空间图表示知识的方法^[13]。由于其需要扩展过多的节点,容易出现“组合爆炸”问题,而只适用于表示比较简单的问题。剧本表示法是用一组槽来描述事件的发生序列,是一种特殊的框架表示法^[9]。剧本表示非常适用于描述顺序性动作或事件,但使用时比框架表示法的灵活性差,其应用范围比框架表示法窄。过程表示法是用程序来描述问题,具有很高的问题求解效率^[14],但由于知识隐含在程序中,对知识的操作困难,适用范围较窄。框架表示法是一种能把陈述性知识与过程性知识相结合的知识表示方法^[15],这种知识表示法的主要不足之处是不善于表达过程性的知识。与上述方法相比而言,语义网表示法更有利于计算机“理解和处理”知识,具有很强的判断和推理能力;能方便地对知识进行检查、增删或修改;能自然地描述问题域内的所有知识,并符合人类的思维规律;能把实体的结构、属性与实体间的因果关系显示、简明地表达出来;与实体相关的事实、特征和关系可以通过相应的节点弧线推导出来。这样便于用联想方式实现对系统的解释^[16]。虽然语义网表示法具有许多其他知识表示法所没有的优点,但用来表示铝电解的槽况知识时凸显出了许多不足之处。主要体现在:

1) 电解槽内部的反应是一个复杂的电化学反应过程,其包含有物理、化学、冶金学和管理学等多领域的知识,因此槽况知识具有跨领域性,采用传统的语义网表示这类知识难以找到不同域对象之间的内在

联系。

2) 电解槽中智能系统所获取的关于槽况的特征信息往往是不完全的,电解槽火眼中某一种特征现象的出现既可能是冷槽特征也可能是热槽特征,因此槽况的相关知识具有不确定性。不确定性知识主要包括随机性、不完全性和不一致性的知识^[17]。知识的随机性主要是指对一个命题的真实性不能完全肯定,只能对其为真的可能性给出某种估计^[18]。在槽况判断过程中,智能系统所获取的关于槽况的特征信息往往是不完全的,因此槽况的相关知识具有不完全性。知识的不完全性是指对某一事物所认识的信息或者知识还不全面、不完整或者不充分^[19]。在铝电解中,不同系列电流的电解槽中同一槽况状态表现出的槽况特征不一样,例如:电解槽发生冷行程时,槽温偏低,如果电解槽持续过冷,并没有得到及时处理,则会导致电解槽的热收入大于热支出,从而导致槽温偏高,因此与槽况的相关知识具有不一致性。知识的不一致性主要是指在推理过程中发生了前后不相容的结论,或者随着时间的推移或者范围的扩大原来一些成立的命题变得不成立^[20]。采用传统的语义网表示这类知识将出现选择难、多义性和可理解性差等问题。

3) 反应电解槽槽况的特征知识包含有槽电压数、阳极电流分布数、火眼图像和槽温等数据知识,因此槽况的特征知识具有多源异构性。采用传统的语义网表示这类知识难以确定某一特征知识映射到某种槽况的权重。

为了解决上述问题,本文提出了贝叶斯概率语义网模型。该模型主要思想是将贝叶斯条件概率与传统语义网相结合,在语义网的节点之间添加置信概率,能有效解决槽况判断中不确定性和多源异构性知识表示的选择难、多义性和确定权重难等问题,增强计算机对知识的可理解性。在知识推理过程中,关联关系矩阵是由知识元和关联概率两种不同属性的因子组成的,其除了要进行符号推演操作外还要进行关联概率计算,因此这种特殊的矩阵难以采用常规的矩阵运算规则进行运算操作。为了解决上述问题,本文提出了关联因子乘法规则。该方法采用知识元关联和概率做乘法运算的策略,可以有效地解决关联关系矩阵的推理问题,为了解决关联关系矩阵重复因子多、矩阵维数多的缺点,本文提出基于组合消除的知识约简方法。该方法借鉴矩阵变换和MapReduce中数据规约的思想将知识的关联关系矩阵进行约简,能有效消除关联关系矩阵中的重复因子和降低矩阵维数。为了让本文提出的贝叶斯概率语义网模型在铝

电解槽况辨识的应用中取得更好的效果,在实验验证部分设计了基于知识反馈的铝电解槽况辨识模型。

1 基于贝叶斯网概率的语义网模型

语义网在知识表示过程中有可理解性好、便于知识的获取、便于搜索和便于推理等优点,一直以来是知识表示研究领域最受欢迎的一种知识表示方法^[21]。语义网是对知识的一种图形表示方法。在语义网络中,个体可以用图的节点表示,节点知识采用一组带有标记的连接弧连结,该连接弧表达了节点之间的语义关系。例如语义基元 (A, R, B) ,其中 A 和 B 分别表示两个语义节点, R 表示 A 与 B 之间的某种语义关系,它所对应的基本单元如图1所示。

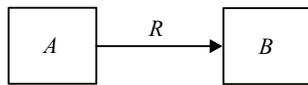


图1 语义网的基本单元

在知识表达领域,语义节点 A 和 B 可以是概念、特征、实体或者特性,语义链 R 可以是所有的语义关系,例如因果、相似和顺序等。

贝叶斯网络是一种有向无环的概率图模型,它包括一个有向无环图和一个条件概率集合,其每一个节点表示随机变量,可以是可观测到的变量,抑或是隐含变量、未知参数等^[22]。连接两个节点的箭头表示两个随机变量之间的依赖关系,若节点中变量间没有箭头相互连接,则称其随机变量彼此间为条件独立。若两个节点间以一个单箭头连接在一起,则两节点便会产生一个条件概率值^[23]。一般来说,有 n 个命题 x_1, x_2, \dots, x_n 之间相互关联的一般知识可用联合概率分布来描述。但是,这样处理使得问题过于复杂。贝叶斯网络的基本单元如图2所示。

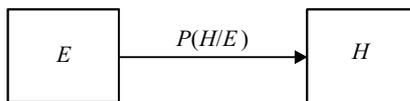


图2 贝叶斯网络的基本单元

Pearl^[24]认为人类在推理过程中,知识并不是以联合概率分布形式表现的,而是以变量之间的相关性和条件相关性表现的,即可以用条件概率表示为

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_n | x_{n-1}, \dots, x_1) P(x_{n-1} | x_{n-2}, \dots, x_1) \dots \times P(x_2 | x_1) P(x_1). \quad (1)$$

传统语义网在知识表示过程中不能将人类的先验知识和后验概率相结合^[25]。当问题域不能适应条件或行为的改变和处理不确定性信息时会出现多义

性和不可理解性^[26]。贝叶斯网络中的弧表示变量间的依赖关系,概率分布表示依赖关系的强弱。这种模型能有效地将先验知识与样本信息相结合和依赖关系与概率表示相结合,不仅具有经典的概率理论基础还拥有较直观的知识表示形式^[27]。因此,许多学者将这两种网络模型相结合提出了基于贝叶斯概率的语义网络模型,并用于解决气象预报、视频标注和网站信息检索等问题,取得了较好的效果^[28-30]。但这些网络模型没有将知识元按不同的属性进行分层,将会增加知识推理的复杂度和不利于知识的约简。为了解决上述问题,本文将贝叶斯条件概率与传统语义网相结合,提出基于贝叶斯概率的语义网模型。贝叶斯概率语义网将人类的先验知识与后验概率进行结合,可以克服语义网等模型仅能表达确定性知识的弱点。该方法将统计数据以条件概率的形式融入模型中,能直接采用有向图将因果知识较直观地表示出来。在问题域的建模过程中,当条件或行为等发生变化时,贝叶斯概率语义网不需要对模型进行修正,可以采用图形化的方式表示随机变量间的联合概率,能够处理随机性、不完全性和不一致性的知识。在知识推理中构造的关联关系矩阵是由知识元和关联概率两种不同属性的因子组成的,因此对这种特殊的矩阵进行运算操作时不适合采用常规的矩阵运算规则。本文提出的贝叶斯概率语义网的推理方法以贝叶斯概率理论为基础,再加上相应的关联运算规则,可有效解决知识在推理过程中出现多义性和知识选择困难的问题。

贝叶斯概率语义网的基本模型如图3所示^[31]。在该模型中组成知识的最小成分为知识元,其代表实体,表示各种事物、概念、情况、属性、状态、事件、动作等。知识元按不同的属性进行分层,即相同属性的知识元放在同一层,如 $(a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,k_m})$ 为一个知识元集, n 表示知识元所在模型中的层次, k_m 表示知识元在相应知识元集中的位置。 P_{n,k_m} 表示知识元关联概率集,其由 j 个概率组成,分别是 $(P_{n,k_m,1}, P_{n,k_m,2}, \dots, P_{n,k_m,j})$, n 表示某一层知识元集关联至其下一层知识元集, k_m 表示该层知识元集某一个知识元关联下一层知识元集, j 表示上一层知识元集中的知识元关联至下一层知识元集中的某一个知识元。 $f_{n,k_m,j}$ 表示相应的语义关系,表示它所连接的两个实体之间的语义联系,其中 n, k_m, j 与上述意义相同。 p_{k_m} 是知识生成概率,知识结果 k_m 表示该知识表示模型所产生的所有知识结果。并不是所有通过该模型产生的知识结果都能应用于工业生产的决策中,

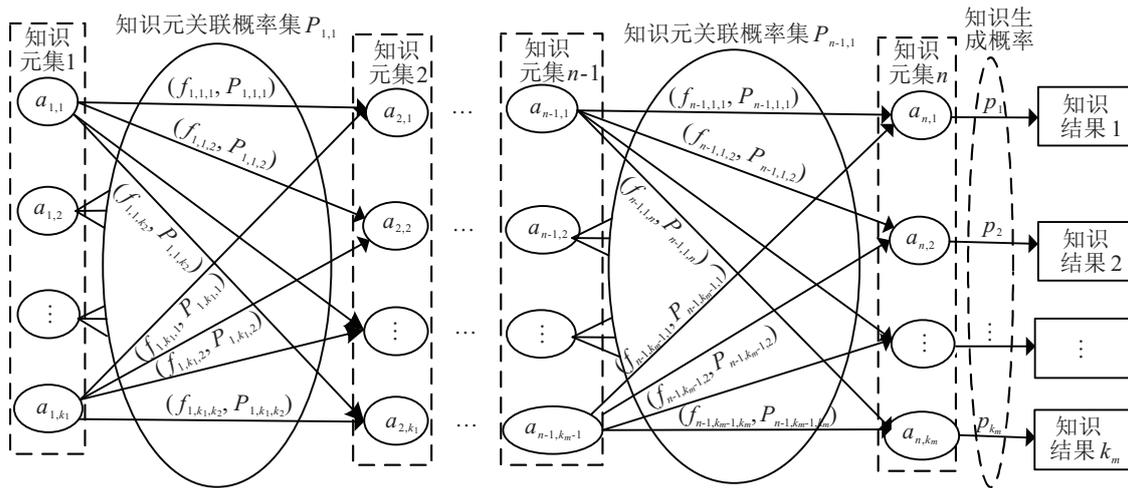


图3 贝叶斯概率语义网的基本模型

表1 贝叶斯概率语义网模型的存储数据结构

语义结点标识		贝叶斯概率语义网的4阵列					
semantic nodes	ID	i	$b_{1,i}$	$b_{2,i}$	$b_{3,i}$	$b_{4,i}$	
$a_{1,1}$	1	1	1	k_1+1	k_1+k_2+1	$p_{1,1,1}$	
$a_{1,2}$	2	2	1	k_1+2	k_1+k_2+2	$p_{1,1,2}$	
$a_{1,3}$	3	3	1	k_1+3	k_1+k_2+3	$p_{1,1,3}$	
\vdots	\vdots	4	1	k_1+4	k_1+k_2+4	$p_{1,1,4}$	
a_{1,k_1}	k_1	5	1	k_1+5	k_1+k_2+5	$p_{1,1,5}$	
$f_{1,1,1}$	k_1+1	6	1	k_1+6	k_1+k_2+6	$p_{1,1,6}$	
$f_{1,1,2}$	k_1+2	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
$f_{1,1,3}$	k_1+3	k_1	1	k_1+k_2	k_1+2k_2	$p_{1,1,k}$	
\vdots	\vdots	k_1+1	2	k_1+2k_2+1	k_1+k_2+1	$p_{2,1,1}$	
$f_{1,1,k_2}$	k_1+k_2	k_1+2	2	k_1+2k_2+2	k_1+k_2+2	$p_{2,1,2}$	
$a_{2,1}$	k_1+k_2+1	k_1+3	2	k_1+2k_2+3	k_1+k_2+3	$p_{2,1,3}$	
$a_{2,2}$	k_1+k_2+2	k_1+4	2	k_1+2k_2+4	k_1+k_2+4	$p_{2,1,4}$	
$a_{2,3}$	k_1+k_2+3	k_1+5	2	k_1+2k_2+5	k_1+k_2+5	$p_{2,1,5}$	
\vdots	\vdots	k_1+6	2	k_1+2k_2+6	k_1+k_2+6	$p_{2,1,6}$	
a_{2,k_2}	k_1+2k_2	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
$f_{2,1,1}$	k_1+2k_2+1	k_1+k_2	2	$k_1+2k_2+k_3$	k_1+2k_2	$p_{2,1,k}$	
$f_{2,1,2}$	k_1+2k_2+2	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
$f_{2,1,3}$	k_1+2k_2+3	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	

需要根据知识生成概率的大小选择最实用的知识应用于工业生产决策,并采用知识效用反馈方法选择出最优的决策知识.

对于知识表示模型,如何将贝叶斯概率语义网存储在一个存储器里是一个很重要的问题.根据语义网模型的结构,采用矩阵能够将贝叶斯概率语义网很直观地进行存储.假设有 n 个概念,建立一个 $n \times n$ 阶的矩阵去存储这些概念之间的语义关系.每一个语义链中有一个权重值,因此这个矩阵的元是双重的(即语义关系和权重).由于贝叶斯概率语义网模型的

特殊结构,本文采用一个基于4列数组的邻接列表来存储贝叶斯概率语义网模型,如表1所示.

在该数据结构表中,为了方便地操作贝叶斯概率语义网中的节点和语义关系,首先给每一个语义节点和语义关系赋一个ID号,在后续的存储操作中只对节点和语义关系的ID号进行操作.第1列 $b_{1,i}$ 存储与箭头尾相连的节点的ID号,第2列 $b_{2,i}$ 存储与第1列节点相连的语义关系的ID号,第3列 $b_{3,i}$ 存储语义关系箭头所指的节点,第4列存储两个节点之间语义关系发生的概率.

2 基于贝叶斯概率语义网模型的知识推理

知识推理是指在计算机或在智能系统中模拟人类的智能推理方法, 依据推理控制策略、形式化的知识进行机器思维和求解问题的过程^[32]. 传统的贝叶斯语义网推理方法是将知识不确定性推理问题转化为贝叶斯网的推理问题^[28-30], 其在信息的呈现方式上只注重于推理结果概率值的变化. 在槽况判断的知识推理过程中没有保留中间过程的语义信息, 这将导致信息格式与人脑中需要的信息格式不匹配, 并且在槽况判断中的观测数据通常包含结构化的信息, 如类别层次结构和数据类型结构等. 传统的贝叶斯语义网表达这类知识能力较差, 将会丢失许多有用的信息, 从而降低贝叶斯语义网推理方法的解释性. 为了解决上述问题, 本文提出一种新的基于贝叶斯概率语义网模型的知识推理方法. 该方法先将结构化的信息进行分层处理, 建立相应的层次贝叶斯概率语义网模型; 然后, 将每一层的知识元以及每层知识元与下一层知识元之间的关联概率组成相应的关联关系矩阵; 最后, 通过定义可对关联关系矩阵进行运算的运算规则对整个贝叶斯概率语义网进行推理. 通过这种方法可以将知识的不确定性推理问题转换为矩阵的运算问题, 即根据矩阵论的相关知识求解知识不确定性问题. 这种方法既可以得到比较完整的语义信息, 也可以对结构化信息进行有效地表达和推理. 该方法在做知识推理计算之前先定义如下几种知识推理的运算规则.

定义1 一个既包含关联的知识元, 又包含知识元之间相互关联的概率的矩阵称为关联关系矩阵, 如 $\{a \ b|p\}$.

定义2 两个关联关系矩阵相乘得到另一个新的关联关系矩阵, 这种运算方式称为因子关联乘法, 用符号 \otimes 表示, 其计算方法如下所示:

$$\{a_1 \ a_2|p_1\} \otimes \{a_2 \ a_3|p_2\} \otimes \dots \otimes \{a_l \ a_{l+1}|p_l\} \rightarrow \left\{ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l \ a_{l+1} \middle| \prod_{\alpha=1}^l p_\alpha \right\}. \quad (2)$$

其中: $1 \leq \alpha \leq l, l = 1, 2, \dots$

定义3 两个关联关系矩阵做因子关联乘法后映射到一个新的关联关系矩阵, 这个映射符号称为等映射符号, 用 \rightarrow 表示.

定义4 一个多行的关联关系矩阵与一个单行的关联关系矩阵做因子关联乘法运算得到一个新的关联关系矩阵, 这种运算方式称为组合因子关联乘法, 用符号 \otimes 表示, 其计算方法如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{c|c} b_{1,1} \ c_1 & p_1 \\ b_{2,1} \ c_1 & p_2 \\ b_{3,1} \ c_1 & p_3 \\ \vdots & \vdots \\ b_{g,1} \ c_1 & p_g \end{array} \right\} \otimes \{c_1 \ c_2 | p\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c|c} b_{1,1} \ c_1 \ c_2 & p_1 \times p \\ b_{2,1} \ c_1 \ c_2 & p_2 \times p \\ b_{3,1} \ c_1 \ c_2 & p_3 \times p \\ \vdots & \vdots \\ b_{g,1} \ c_1 \ c_2 & p_g \times p \end{array} \right\}. \quad (3)$$

其中 $g = 1, 2, \dots$

定义5 一个单行的关联关系矩阵与一个多行的关联关系矩阵做因子关联乘法运算得到一个新的关联关系矩阵, 这种运算方式称为差分因子关联乘法, 用符号 \otimes 表示, 其计算方法如下所示:

$$\{d_1 \ d_2|p\} \otimes \left\{ \begin{array}{c|c} d_2 \ e_{1,1} & p_1 \\ d_2 \ e_{2,1} & p_2 \\ d_2 \ e_{3,1} & p_3 \\ \vdots & \vdots \\ d_2 \ e_{h,1} & p_h \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c|c} d_1 \ d_2 \ e_{1,1} & p \times p_1 \\ d_1 \ d_2 \ e_{2,1} & p \times p_2 \\ d_1 \ d_2 \ e_{3,1} & p \times p_3 \\ \vdots & \vdots \\ d_1 \ d_2 \ e_{h,1} & p \times p_h \end{array} \right\}. \quad (4)$$

其中 $h = 1, 2, \dots$

贝叶斯概率语义网模型可以抽象成简单的3种基本单元: 第1种是因果关系型网; 第2种是共同原因型网; 第3种是共同结果型网, 如图4所示.

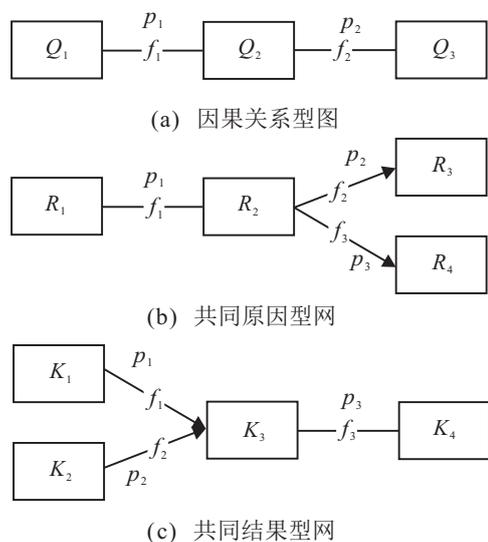


图4 贝叶斯概率语义网模型的基本单元

图4(a)是因果关系型网,其各个知识元连接成一条直线.当 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 是3个相互独立的知识元时,且令 $\{Q_1 \ Q_2 \mid p_1\}$ 和 $\{Q_2 \ Q_3 \mid p_2\}$ 为关联关系乘法因子,这两个因子做因子关联乘法运算后将得到一个新的关联关系矩阵,这种因子关联乘法运算被定义为因果关系型贝叶斯概率语义网的知识推理方式,其主要形式为

$$\begin{aligned} & \{Q_1 \ Q_2 \mid p_1\} \{Q_2 \ Q_3 \mid p_2\} \rightarrow \\ & \{Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \mid p_1 \times p_2\}. \end{aligned} \quad (5)$$

图4(b)是共同原因型网,知识元 R_1 、 R_2 和 R_3 是相互独立的知识元, R_1 、 R_2 和 R_4 也是相互独立的知识元,在这个网络中, R_2 发生后可能导致 R_1 和 R_3 发生,令 $\{R_1 \ R_2 \mid P_1\}$ 和 $\left\{ \begin{array}{l} R_2 \ R_3 \\ R_2 \ R_4 \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_2 \\ p_3 \end{array} \right\}$ 为关联关系乘法因子,这两个关联关系乘法因子做差分因子关联乘法运算后将得到一个新的关联关系矩阵,这种差分因子关联乘法运算被定义为共同原因型贝叶斯概率语义网的知识推理方式,其主要形式为

$$\begin{aligned} & \{R_1 \ R_2 \mid p_1\} \otimes \left\{ \begin{array}{l} R_2 \ R_3 \\ R_2 \ R_4 \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_2 \\ p_3 \end{array} \right\} \rightarrow \\ & \left\{ \begin{array}{l} R_1 \ R_2 \ R_3 \\ R_1 \ R_2 \ R_4 \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_1 \times p_2 \\ p_1 \times p_3 \end{array} \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

图4(c)是共同结果型网,知识元 K_1 、 K_2 和 K_4 相互独立, K_3 、 K_2 和 K_4 也相互独立,在这个网络中 K_1 和 K_3 发生后都可能导致 K_2 发生,令 $\left\{ \begin{array}{l} K_1 \ K_2 \\ K_3 \ K_2 \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_1 \\ p_3 \end{array} \right\}$ 和 $\{K_2 \ K_4 \mid P_3\}$ 为关联关系乘法因子,因子的乘积定义为关联关系乘积,这种关联关系乘法运算被定义为共同原因型网知识生成方式,其主要形式为

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} K_1 \ K_2 \\ K_3 \ K_2 \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_1 \\ p_3 \end{array} \right\} \otimes \{K_2 \ K_4 \mid p_3\} \rightarrow \\ & \left\{ \begin{array}{l} K_1 \ K_2 \ K_4 \\ K_3 \ K_2 \ K_4 \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_1 \times p_3 \\ p_3 \times p_3 \end{array} \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

3 基于组合消除的知识约简方法

在铝电解槽况判断过程中需要用到许多高维知识.如果直接对这些高维的知识进行存储和处理会出现维数灾难的问题,则巨大的计算量将使智能控制系统难以正确而简洁地决策,且需要大量的内存空间.解决这类问题的一般方法是采用某种策略删除不重要的知识,例如图表示下的知识约简^[33],互信息的粗糙集知识约简算法^[34]和变精度粗糙集模型^[35]等.在这些知识约简方法中,没有考虑某条知识在当前的决策中可能是不重要的,但是在将来的决策中或许很重要.如果按照上述方法的思路删除这一当前

时刻不重要的知识,则难以保证决策知识的完备性,从而影响决策结果的准确性.为解决上述问题,本文借鉴矩阵变换和mapreduce中数据规约的思想,提出了组合消除的知识约简方法.该方法的核心思想是根据关联关系矩阵既包含知识元又包含关联概率的特点,定义可对其进行变换的规则;然后,根据所定义的变化规则将关联关系矩阵中的冗余知识元赋值为零;最后,借鉴大数据处理的mapreduce技术中的数据规约的思想^[36],将变换后的关联关系矩阵中知识元全为零的行消除,并在被消除行后面的知识元不全为零的行中增加一列,记录该行上被消除的行数.采用这种方法不仅可以将高维知识空间映射到低维知识空间中,而且还能有效地保证决策知识的完备性.该方法的详细步聚如下所示.

定义6 在关联关系矩阵中,同一列有 n 个相邻的知识元相同时,将前面 $n-1$ 的知识元赋值为0,保留第 n 个知识元,这种消除规则称为一元组合消除规则.

定义7 在关联关系矩阵中,以多个知识元为基本单元,同一列中有 n 个相邻的基本单元相同时,将前面 $n-1$ 个基本单元赋值为0,保留第 n 个基本单元,这种消除规则称为多元组合消除规则.

定义8 将关联关系矩阵拆分成多个新的关联关系矩阵相加的形式,新关联关系矩阵的行数与原矩阵相同,这种计算规则称为分和计算,运算符号用 $\overset{\Delta}{+}$ 表示;其反向过程称为并和计算,这个等式之间用符号 \rightarrow 连接,表示合映射关系符.

定义9 消除关联关系矩阵中知识元全为零的行,然后在被消除行后面的知识元不全为零的行中增加一列,记录该行上被消除的行数,这种运算称为加列降行计算,运算符号用:=表示.

将概率语义网基本模型中的部分网络做关联关系乘法运算,即

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} a_{1,1} \ a_{2,1} \\ a_{1,1} \ a_{2,2} \\ a_{1,2} \ a_{2,1} \\ a_{1,2} \ a_{2,2} \\ a_{1,3} \ a_{2,1} \\ a_{1,3} \ a_{2,2} \\ \vdots \quad \vdots \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_{1,1,1} \\ p_{1,1,2} \\ p_{1,2,1} \\ p_{1,2,2} \\ p_{1,3,1} \\ p_{1,3,2} \\ \vdots \end{array} \right\} \otimes \\ & \left\{ \begin{array}{l} a_{2,1} \ a_{3,1} \\ a_{2,1} \ a_{3,2} \\ a_{2,2} \ a_{3,1} \\ a_{2,2} \ a_{3,2} \\ \vdots \quad \vdots \end{array} \middle| \begin{array}{l} p_{2,1,1} \\ p_{2,1,2} \\ p_{2,2,1} \\ p_{2,2,2} \\ \vdots \end{array} \right\} \leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{ccc|c} a_{1,1} & a_{2,1} & a_{3,1} & p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ a_{1,1} & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ a_{1,1} & a_{2,2} & a_{3,1} & p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,1} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ a_{1,2} & a_{2,1} & a_{3,1} & p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & a_{3,1} & p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ a_{1,3} & a_{2,1} & a_{3,1} & p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ a_{1,3} & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,1} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\}. \quad (8)$$

按上述定义对式(5)的结果进行约简,对关联关系矩阵进行约简时,从一元组合依次到高元组合的方

式进行约简,对关联关系矩阵进行复原时则相反,约简的具体步骤如下.

step 1: 知识元消除. 在式(9)关系关联矩阵的第1列中的 $a_{1,1}$ 有4个相邻,因此将前面3个赋值为0,保留第4个 $a_{1,1}$,其他的依次类推. 在第3列中以 $a_{3,1}$ 和 $a_{3,1}$ 两个元素作为一个消除的基本单元. 按照多元组合消除规则将前5个基本单元赋值为0,保留第6个基本单元.

在式(10)中关系关联矩阵的第2列中以0、 $a_{2,1}$ 、0和 $a_{2,2}$ 四个元素作为一个消除的基本单元. 按照多元组合消除规则将前2个基本单元赋值为0,保留第3个基本单元.

step 2: 按照定义3进行分和计算.

step 3: 借鉴大数据处理的mapreduce技术中的数据规约的思想进行加列降行计算.

$$\left\{ \begin{array}{ccc|c} a_{1,1} & a_{2,1} & a_{3,1} & p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ a_{1,1} & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ a_{1,1} & a_{2,2} & a_{3,1} & p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,1} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ a_{1,2} & a_{2,1} & a_{3,1} & p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ a_{1,2} & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & a_{3,1} & p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ a_{1,3} & a_{2,1} & a_{3,1} & p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ a_{1,3} & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,1} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{一元组合}\{a_{1,1}\}\text{消除}} \left\{ \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,1} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & a_{3,2} & p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{二元组合}\left\{ \begin{array}{c} a_{3,1} \\ a_{3,2} \end{array} \right\}\text{消除}}, \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 0 & p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & 0 & p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,1} & a_{2,2} & 0 & p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & 0 & p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,2} & a_{2,2} & 0 & p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & 0 & p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{4元组合}\left\{ \begin{array}{c} 0 \\ a_{2,1} \\ 0 \\ a_{2,2} \end{array} \right\}\text{消除}} \left\{ \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 0 & p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,1} & 0 & 0 & p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,2} & 0 & 0 & p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & 0 & p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\}, \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 0 & p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,1} & 0 & 0 & p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,2} & 0 & 0 & p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ 0 & 0 & 0 & p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ 0 & a_{2,1} & 0 & p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ 0 & 0 & a_{3,1} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{2,1} & 0 \\ 0 & 0 & a_{3,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \frac{\Delta}{+} \left\{ \begin{array}{c} p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots \end{array} \right\}, \tag{11}$$

$$\left\{ \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ a_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{2,1} & 0 \\ 0 & 0 & a_{3,1} \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \frac{\Delta}{+} \left\{ \begin{array}{c} p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots \end{array} \right\} := \left\{ \begin{array}{cccc} a_{1,1} & 0 & 0 & 3 \\ a_{1,2} & 0 & 0 & 3 \\ 0 & a_{2,1} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{3,1} & 0 \\ a_{1,3} & a_{2,2} & a_{3,2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \frac{\Delta}{+} \left\{ \begin{array}{c} p_{1,1,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,1,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,1,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,1,2} \times p_{2,2,2} \\ p_{1,2,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,2,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,2,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,2,2} \times p_{2,2,2} \\ p_{1,3,1} \times p_{2,1,1} \\ p_{1,3,1} \times p_{2,1,2} \\ p_{1,3,2} \times p_{2,2,1} \\ p_{1,3,2} \times p_{2,2,2} \\ \vdots \end{array} \right\}. \tag{12}$$

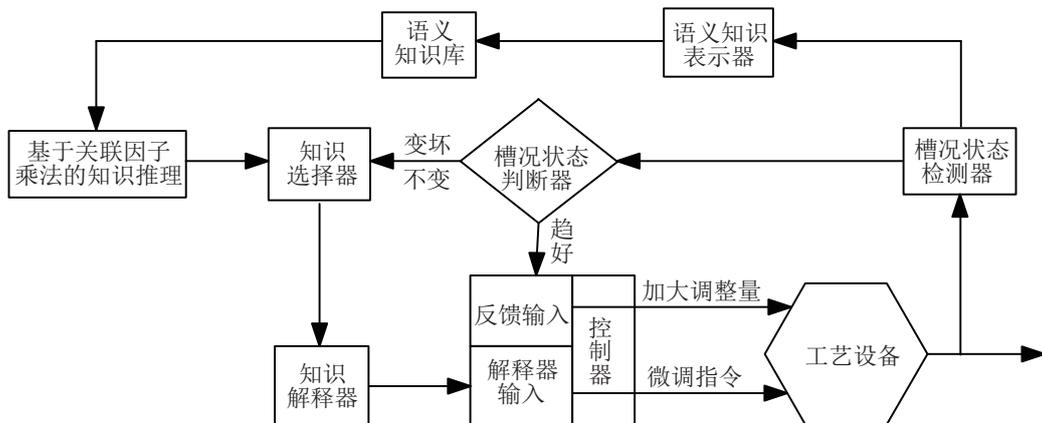


图5 基于知识反馈的槽况判断与控制模型

4 铝电解槽况判断案例分析

目前,铝电解厂主要是依靠人工经验进行槽况的判断和调节.但是,人工经验具有主观性强、随意性大、工人的经验水平参差不齐和难以敏捷地对生

产过程变化等缺陷,长期依赖人工经验判断槽况将导致生产过程的不稳定、产品质量一致性差、能源消耗大等问题.为了提高槽况判断的效率和准确度,迫切需要实现基于知识的槽况判断和调节方法.实现这

项技术的核心是智能机器如何利用经验、机理和数据等知识对槽况类别做准确判断. 知识表示是智能机器运用和理解知识的基础. 为了验证本文中提出的知识表示方法和知识约简方法应用于槽况判断中是可行和有效的, 本文设计基于知识反馈的槽况判断和控制模型. 基于知识反馈的控制决策模型如图5所示.

基于知识反馈的控制系统的工作流程如下:

1) 该模型先将语义知识库中的贝叶斯概率语义网表示成关联关系矩阵; 然后采用关联因子乘法规则的知识推理规则进行知识推理; 最后将推理出的新知识传输给知识选择器.

2) 知识选择器从推理出的新知识中选择有效知识; 然后将有效知识发送给知识解释器, 将有效知识解释成数字信号, 输送给控制器的解释器输入端口.

3) 控制器接收到解释器的数字信号后, 控制器下达微调指令给电解槽的控制设备.

4) 槽况状态观测器检测槽况状态参数的变化, 并将检测信号输送给槽况状态判断器. 其将已经存储的优良的槽况状态参数与当前检测到的槽况状态参数进行比对, 判断槽况状态的变化.

5) 如果槽况状态有变好的趋势, 则槽况状态判断器输出一个反馈信号给控制器的反馈输入端口, 控制器收到反馈信号后, 增大控制器的调整幅度.

6) 槽况状态检测器继续检测槽况状态参数的变化, 如果该参数与已存储优良的槽况状态参数之间的误差在允许范围内, 则停止调整.

7) 如果槽况状态不变或者有变差的趋势, 则槽况状态判断器发送一个反馈信号给知识选择器, 知识选择器收到反馈信号后, 重新从推理出的新知识中选择有效知识.

8) 重复2)~5)的操作, 直到槽况状态出现变好的趋势, 继续重复5)的操作. 当槽况状态参数与已存储优良的槽况状态参数之间的误差达到允许范围内时, 语义知识表示器将工况状态观测器检测出的数据表示成贝叶斯概率语义网, 保存至语义知识库中.

为了得到可信的先验知识和知识元之间的关联概率, 在某铝厂进行调研、观测和统计实验. 关联概率的获取方法是先对各电解槽已发生的槽况进行500次观测实验; 然后统计各种槽况发生时各特征现象出现的次数, 引起每种槽况出现的原因次数和专家给出正确的调节方法次数; 最后计算出上述3种数据统计次数与槽况发生的总次数之比, 即得到相应知识元之间的关联概率. 统计结果如表2~表5所示.

表2 槽况判断知识元之间的关联概率统计表(1)

序号	特征现象	槽况状态	关联概率
x_1	火焰呈蓝白色	冷槽	0.67
x_2	火焰呈蓝白色	热槽	0.14
x_3	火焰呈蓝白色	压槽	0.19
x_4	火焰黄而无力	冷槽	0.17
x_5	火焰黄而无力	热槽	0.62
x_6	火焰黄而无力	压槽	0.21
x_7	槽电压摆动	冷槽	0.21
x_8	槽电压摆动	热槽	0.38
x_9	槽电压摆动	压槽	0.41

表3 槽况判断知识元之间的关联概率统计表(2)

序号	槽况状态	原因	关联概率
x_1	冷槽	系列电流低	0.18
x_2	冷槽	极距过高	0.36
x_3	冷槽	极距过低	0.34
x_4	冷槽	铝水平低	0.12
x_5	热槽	系列电流低	0.18
x_6	热槽	极距过高	0.23
x_7	热槽	极距过低	0.27
x_8	热槽	铝水平低	0.32
x_9	压槽	系列电流低	0.24
x_{10}	压槽	极距过高	0.22
x_{11}	压槽	极距过低	0.38
x_{12}	压槽	铝水平低	0.16

表4 槽况判断知识元之间的关联概率统计表(3)

序号	原因	处理方法	关联概率
x_1	系列电流低	提高系列电流	0.95
x_2	系列电流低	调整极距	0.02
x_3	系列电流低	扒沉淀	0.03
x_4	极距过高	提高系列电流	0.01
x_5	极距过高	调整极距	0.98
x_6	极距过高	扒沉淀	0.01

表5 槽况判断知识元之间的关联概率统计表(4)

序号	原因	处理方法	关联概率
x_1	极距过低	提高系列电流	0.02
x_2	极距过低	调整极距	0.97
x_3	极距过低	扒沉淀	0.01
x_4	铝水平低	提高系列电流	0.02
x_5	铝水平低	调整极距	0.02
x_6	铝水平低	扒沉淀	0.96

将统计表中的知识元和知识元之间的关联概率采用本文提出的概率语义网表示, 如图6所示. 在表示过程中先按照特征现象、槽况状态、原因分析和处理方法4个不同的属性将知识元进行分层; 然后将带有关联属性和关联概率的有向线段将知识元按图7的方式进行连接. 由图6可以看出, 每走完图中的线路都可以得出一个对电解槽槽况进行判断和控制决

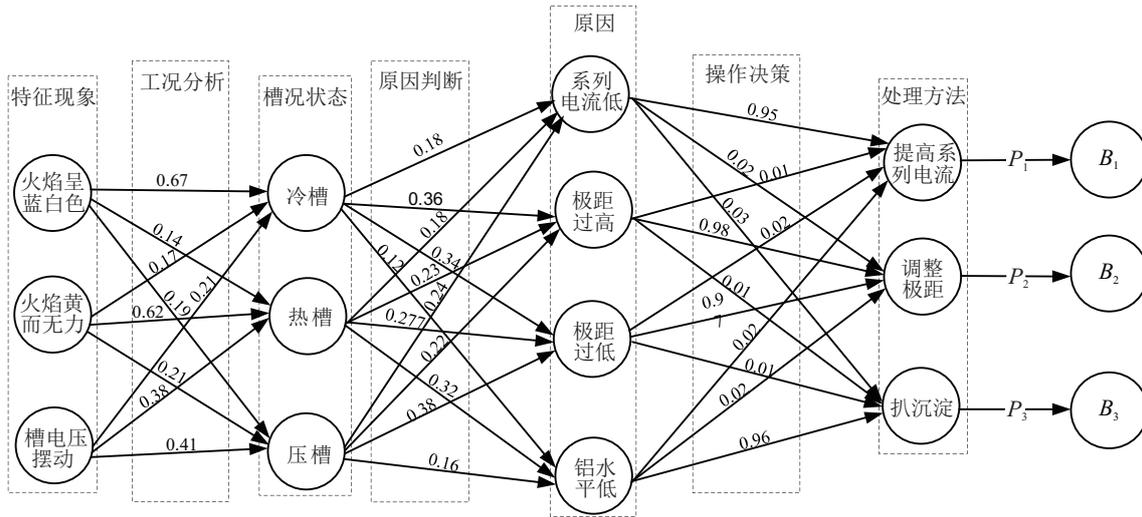


图6 贝叶斯概率语义网表示的槽况知识

<table border="0" style="border: none;"> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">0.67</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">0.14</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">0.19</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">0.17</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">0.62</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">0.21</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">0.21</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">0.38</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">0.41</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> </table>	{	火焰呈蓝白色	冷槽	0.67	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	0.14	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	0.19	}	{	火焰黄而无力	冷槽	0.17	}	{	火焰黄而无力	热槽	0.62	}	{	火焰黄而无力	压槽	0.21	}	{	槽电动摆动	冷槽	0.21	}	{	槽电动摆动	热槽	0.38	}	{	槽电动摆动	压槽	0.41	}	\otimes	<table border="0" style="border: none;"> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.18</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.34</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.36</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.12</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.18</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.23</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.27</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.32</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.24</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.22</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.38</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.16</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> </table>	{	冷槽	系列电流低	0.18	}	{	冷槽	极距过高	0.34	}	{	冷槽	极距过低	0.36	}	{	冷槽	铝水平低	0.12	}	{	热槽	系列电流低	0.18	}	{	热槽	极距过高	0.23	}	{	热槽	极距过低	0.27	}	{	热槽	铝水平低	0.32	}	{	压槽	系列电流低	0.24	}	{	压槽	极距过高	0.22	}	{	压槽	极距过低	0.38	}	{	压槽	铝水平低	0.16	}	\leftrightarrow	<table border="0" style="border: none;"> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.1206</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.2278</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.2412</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0804</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0252</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.0322</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.0378</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0448</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0456</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.0418</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.0722</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0304</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0306</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0336</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0378</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0656</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> </table>	{	火焰呈蓝白色	冷槽	系列电流低	0.1206	}	{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过高	0.2278	}	{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过低	0.2412	}	{	火焰呈蓝白色	冷槽	铝水平低	0.0804	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	系列电流低	0.0252	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过高	0.0322	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过低	0.0378	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	铝水平低	0.0448	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	系列电流低	0.0456	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过高	0.0418	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过低	0.0722	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	铝水平低	0.0304	}	{	火焰黄而无力	冷槽	系列电流低	0.0306	}	{	:	:	:	:	}	{	火焰黄而无力	压槽	铝水平低	0.0336	}	{	槽电动摆动	冷槽	系列电流低	0.0378	}	{	:	:	:	:	}	{	槽电动摆动	压槽	铝水平低	0.0656	}
{	火焰呈蓝白色	冷槽	0.67	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	热槽	0.14	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	压槽	0.19	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰黄而无力	冷槽	0.17	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰黄而无力	热槽	0.62	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰黄而无力	压槽	0.21	}																																																																																																																																																																																																																					
{	槽电动摆动	冷槽	0.21	}																																																																																																																																																																																																																					
{	槽电动摆动	热槽	0.38	}																																																																																																																																																																																																																					
{	槽电动摆动	压槽	0.41	}																																																																																																																																																																																																																					
{	冷槽	系列电流低	0.18	}																																																																																																																																																																																																																					
{	冷槽	极距过高	0.34	}																																																																																																																																																																																																																					
{	冷槽	极距过低	0.36	}																																																																																																																																																																																																																					
{	冷槽	铝水平低	0.12	}																																																																																																																																																																																																																					
{	热槽	系列电流低	0.18	}																																																																																																																																																																																																																					
{	热槽	极距过高	0.23	}																																																																																																																																																																																																																					
{	热槽	极距过低	0.27	}																																																																																																																																																																																																																					
{	热槽	铝水平低	0.32	}																																																																																																																																																																																																																					
{	压槽	系列电流低	0.24	}																																																																																																																																																																																																																					
{	压槽	极距过高	0.22	}																																																																																																																																																																																																																					
{	压槽	极距过低	0.38	}																																																																																																																																																																																																																					
{	压槽	铝水平低	0.16	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	冷槽	系列电流低	0.1206	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过高	0.2278	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过低	0.2412	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	冷槽	铝水平低	0.0804	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	热槽	系列电流低	0.0252	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过高	0.0322	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过低	0.0378	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	热槽	铝水平低	0.0448	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	压槽	系列电流低	0.0456	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过高	0.0418	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过低	0.0722	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰呈蓝白色	压槽	铝水平低	0.0304	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰黄而无力	冷槽	系列电流低	0.0306	}																																																																																																																																																																																																																				
{	:	:	:	:	}																																																																																																																																																																																																																				
{	火焰黄而无力	压槽	铝水平低	0.0336	}																																																																																																																																																																																																																				
{	槽电动摆动	冷槽	系列电流低	0.0378	}																																																																																																																																																																																																																				
{	:	:	:	:	}																																																																																																																																																																																																																				
{	槽电动摆动	压槽	铝水平低	0.0656	}																																																																																																																																																																																																																				

(13)

<table border="0" style="border: none;"> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.1206</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.2278</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.2412</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0804</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0252</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.0322</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.0378</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0448</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0456</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.0418</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.0722</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0304</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0306</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0336</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0378</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0656</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> </table>	{	火焰呈蓝白色	冷槽	系列电流低	0.1206	}	{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过高	0.2278	}	{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过低	0.2412	}	{	火焰呈蓝白色	冷槽	铝水平低	0.0804	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	系列电流低	0.0252	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过高	0.0322	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过低	0.0378	}	{	火焰呈蓝白色	热槽	铝水平低	0.0448	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	系列电流低	0.0456	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过高	0.0418	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过低	0.0722	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	铝水平低	0.0304	}	{	火焰黄而无力	冷槽	系列电流低	0.0306	}	{	:	:	:	:	}	{	火焰黄而无力	压槽	铝水平低	0.0336	}	{	槽电动摆动	冷槽	系列电流低	0.0378	}	{	:	:	:	:	}	{	槽电动摆动	压槽	铝水平低	0.0656	}	$\xrightarrow{\text{3元组合消除}}$	<table border="0" style="border: none;"> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.1206</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.2278</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.2412</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">冷槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0804</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0252</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.0322</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.0378</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">热槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0448</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0456</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">极距过高</td> <td style="border: none;">0.0418</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">极距过低</td> <td style="border: none;">0.0722</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰呈蓝白色</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0304</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0306</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">火焰黄而无力</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0336</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">0</td> <td style="border: none;">系列电流低</td> <td style="border: none;">0.0378</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">:</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> <tr> <td style="border: none;">{</td> <td style="border: none;">槽电动摆动</td> <td style="border: none;">压槽</td> <td style="border: none;">铝水平低</td> <td style="border: none;">0.0656</td> <td style="border: none;">}</td> </tr> </table>	{	0	0	系列电流低	0.1206	}	{	0	0	极距过高	0.2278	}	{	0	0	极距过低	0.2412	}	{	0	冷槽	铝水平低	0.0804	}	{	0	0	系列电流低	0.0252	}	{	0	0	极距过高	0.0322	}	{	0	0	极距过低	0.0378	}	{	0	热槽	铝水平低	0.0448	}	{	0	0	系列电流低	0.0456	}	{	0	0	极距过高	0.0418	}	{	0	0	极距过低	0.0722	}	{	火焰呈蓝白色	压槽	铝水平低	0.0304	}	{	0	0	系列电流低	0.0306	}	{	:	:	:	:	}	{	火焰黄而无力	压槽	铝水平低	0.0336	}	{	0	0	系列电流低	0.0378	}	{	:	:	:	:	}	{	槽电动摆动	压槽	铝水平低	0.0656	}
{	火焰呈蓝白色	冷槽	系列电流低	0.1206	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过高	0.2278	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	冷槽	极距过低	0.2412	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	冷槽	铝水平低	0.0804	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	热槽	系列电流低	0.0252	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过高	0.0322	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	热槽	极距过低	0.0378	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	热槽	铝水平低	0.0448	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	压槽	系列电流低	0.0456	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过高	0.0418	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	压槽	极距过低	0.0722	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	压槽	铝水平低	0.0304	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰黄而无力	冷槽	系列电流低	0.0306	}																																																																																																																																																																																																																					
{	:	:	:	:	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰黄而无力	压槽	铝水平低	0.0336	}																																																																																																																																																																																																																					
{	槽电动摆动	冷槽	系列电流低	0.0378	}																																																																																																																																																																																																																					
{	:	:	:	:	}																																																																																																																																																																																																																					
{	槽电动摆动	压槽	铝水平低	0.0656	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	系列电流低	0.1206	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	极距过高	0.2278	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	极距过低	0.2412	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	冷槽	铝水平低	0.0804	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	系列电流低	0.0252	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	极距过高	0.0322	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	极距过低	0.0378	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	热槽	铝水平低	0.0448	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	系列电流低	0.0456	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	极距过高	0.0418	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	极距过低	0.0722	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰呈蓝白色	压槽	铝水平低	0.0304	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	系列电流低	0.0306	}																																																																																																																																																																																																																					
{	:	:	:	:	}																																																																																																																																																																																																																					
{	火焰黄而无力	压槽	铝水平低	0.0336	}																																																																																																																																																																																																																					
{	0	0	系列电流低	0.0378	}																																																																																																																																																																																																																					
{	:	:	:	:	}																																																																																																																																																																																																																					
{	槽电动摆动	压槽	铝水平低	0.0656	}																																																																																																																																																																																																																					

(14)

$$\begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l} \text{4元组合消除} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{系列电流低} \\ \text{极距过高} \\ \text{极距过低} \\ \text{铝水平低} \end{array} \right\} \end{array} \right\} \rightarrow \left(\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0.1206 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2278 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2412 \\ 0 & \text{冷槽} & 0 & 0.0804 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0252 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0322 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0378 \\ 0 & \text{热槽} & 0 & 0.0448 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0456 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0418 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0722 \\ \text{火焰蓝白色} & \text{压槽} & 0 & 0.0304 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0306 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{火焰黄无力} & \text{压槽} & 0 & 0.0336 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0378 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{槽电动摆动} & \text{压槽} & \text{铝水平低} & 0.0656 \end{array} \right) \xrightarrow{\left. \begin{array}{l} \text{12元组合消除} \\ \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{冷槽} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{热槽} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{压槽} \end{array} \right\}} \left(\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0.1206 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2278 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2412 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0804 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0252 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0322 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0378 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0448 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0456 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0418 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0722 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0304 \\ \text{火焰蓝白色} & 0 & 0 & 0.0306 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{火焰黄无力} & 0 & 0 & 0.0336 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0378 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{槽电动摆动} & \text{压槽} & \text{铝水平低} & 0.0656 \end{array} \right)
 \end{array}
 \tag{15}$$

$$\begin{array}{c}
 := \left(\begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \text{火焰蓝白色} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{火焰黄无力} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{槽电动摆动} & \text{压槽} & \text{铝水平低} \end{array} \right) \xrightarrow{\frac{\Delta}{+}} \left(\begin{array}{c} 0.1206 \\ 0.2278 \\ 0.2412 \\ 0.0804 \\ 0.0252 \\ 0.0322 \\ 0.0378 \\ 0.0448 \\ 0.0456 \\ 0.0418 \\ 0.0722 \\ 0.0304 \\ 0.0306 \\ \vdots \\ 0.0336 \\ 0.0378 \\ \vdots \\ 0.0656 \end{array} \right) := \left(\begin{array}{cccc} \text{火焰蓝白色} & 0 & 0 & 11 \\ \text{火焰黄无力} & 0 & 0 & 11 \\ 0 & \text{冷槽} & 0 & \\ 0 & \text{热槽} & 0 & \\ 0 & 0 & \text{系列电流低} & 0 \\ 0 & 0 & \text{极距过高} & 0 \\ 0 & 0 & \text{极距过低} & 0 \\ \text{压槽} & \text{铝水平低} & 0 & \end{array} \right) \xrightarrow{\frac{\Delta}{+}} \left(\begin{array}{c} 0.1206 \\ 0.2278 \\ 0.2412 \\ 0.0804 \\ 0.0252 \\ 0.0322 \\ 0.0378 \\ 0.0448 \\ 0.0456 \\ 0.0418 \\ 0.0722 \\ 0.0304 \\ 0.0306 \\ \vdots \\ 0.0336 \\ 0.0378 \\ \vdots \\ 0.0656 \end{array} \right)
 \end{array}
 \tag{16}$$

策的完整知识. 例如火焰呈蓝白色属于冷槽特征, 原因是系列电流低, 处理方法为提高系列电流. 由此可以得出该知识表示方法是可行的和有效的.

式(13)是将概率语义网表示出来的电解槽槽况

判断知识用关联关系矩阵表示出来(为了节省篇幅这里只用图4中的前3层), 并进行关联因子乘法运行, 生成关联知识和知识的关联概率. 从式(13)可看出, 这种知识运算方式可以得出完备的关联知识, 且每一

条关联知识都有对应的知识关联概率,这样应用于智能决策控制系统有利于决策知识的选择.

1) 根据定义6对关联关系矩阵做一元组合消除,例如在式(14)左侧的关联关系矩阵的第1列中有12个相同的知识元是“火焰呈蓝白色”,因此根据一元组合消除规则,将前面11个“火焰呈蓝白色”消除,然后保留第12个“火焰呈蓝白色”.其他知识元的消除方法类似.

2) 根据定义7对经过一元组合消除后的关联关系矩阵作多元组合消除,多元组合消除与一元组合消除的差别就是将多个知识元看成一个消除单位.

3) 根据定义8和定义9对经过多元组合消除后的关联关系矩阵依次作分和计算和加列降行计算.

式(14)~(16)是将式(13)中的计算结果进行约简的计算过程,由式(13)可看出,其计算结果是36行×3列的矩阵,通过一元组合消除、四元组合消除和十二元组合消除后变成了8行×4列的矩阵.由此可看出,这种约简方式大大简化了知识的关联关系矩阵.为了证明贝叶斯概率语义网知识表示方法的先进性,本文采用产生式和传统语义网知识表示方法对上述槽况知识进行表示,然后将3种方法的结果进行比较.产生式知识表示方法的基本形式为IF AL THEN BL,AL表示前件,指出该产生式是否可用的

条件;BL表示后件,指出当前件所指示的条件被满足时,应该得出的结论和应该执行的操作.上述槽况知识按照产生式知识表示方法可以表示为以下形式:

- if 火焰呈蓝白色 then 槽况为冷槽;
- if 火焰呈蓝白色 then 槽况为热槽;
- if 火焰呈蓝白色 then 槽况为压槽;
- if 火焰黄而无力 then 槽况为冷槽;
- if 火焰黄而无力 then 槽况为热槽;
- if ... then ...

采用传统语义网表示铝电解槽况知识,如图7所示,产生式和传统语义网都能对槽况知识进行表示,但在推理过程中发现,以上两种方式都会产生歧义,如火焰呈蓝白色时槽况为冷槽也有可能是热槽和压槽.这种语义关系会让计算机难以作出准确的判断,且上述两种知识表示方式都难以进行有效的约简,因此这两种知识表示方式将不利于知识推理且浪费存储空间.在时间效率方面,传统语义网进行推理的时间效率与贝叶斯概率语义网一致,产生式方法推理的时间效率比贝叶斯概率语义网要高.但是,铝电解是一个迟滞缓慢变化的系统,对时间效率要求不高,由此可得本文提出的知识表示方法从推理结果的准确性和存储成本方面,比产生式和传统语义网更适合用于表示铝电解槽况知识.

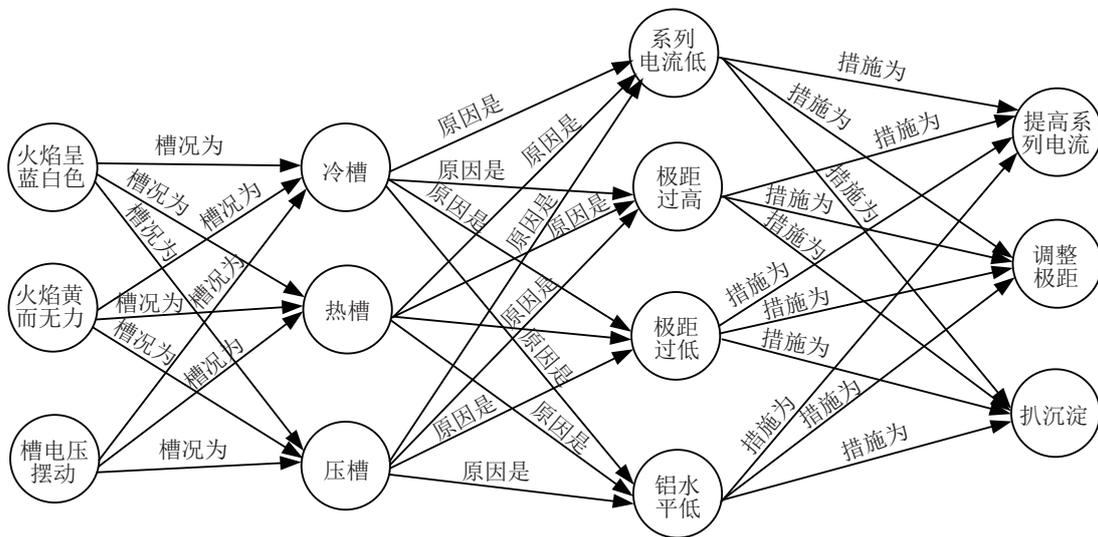


图7 传统语义网表示的槽况知识

为了证明贝叶斯概率语义网应用在槽况判断中所得结果的准确性,将贝叶斯概率语义网的推理结果与工艺专家的判断结果进行比对,计算两个结果吻合率.吻合率的计算方法如下:

$$\text{吻合率} = \frac{\text{槽况判断结果的吻合次数}}{\text{槽况判断的总次数}} \times 100\% \quad (17)$$

实验前假定工艺专家的每次判断结果百分之

百准确.从某厂的某个车间选择10台电解槽进行槽况判断实验,每台电解槽采用本文提出的知识表示和推理方法进行100次槽况判断实验,每次判断结果与工艺专家的判断结果进行比对.表6是采用本文提出的知识表示和推理方法进行槽况判断实验所得结果与工艺专家判断结果的吻合率.可以看出,将贝叶斯概率语义网应用于槽况判断得出的结

果与工艺专家的判断结果的吻合率达到了90%以上. 表7是采用基于知识反馈的槽况判断与控制模型进行槽况判断实验所得结果与工艺专家判断结果的吻合率. 可以看出采用该方法进行槽况判断实验所得结果比单独采用贝叶斯概率语义网的知识表示和推理方法进行槽况判断实验所得结果有明显的改善. 采用基于知识反馈的槽况判断与控制模型进行槽况判断实验所得结果与工艺专家判断结果的吻合率达到95%以上. 表8是采用基于模糊神经网络推理系统的槽况判断结果与工艺专家判断结果的吻合率^[37]. 在模糊神经网络中, 采用非模糊向量 $X^T = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N]$ 和 $Y^T = [y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_N]$ 分别表示输入和输出. 其中 N 表示输入和输出变量的个数, 在本次实验中 N 取4. 输入变量 x_1 表示火焰呈蓝白色、火焰黄而无力和槽电压摆动等语义符号; 输出变量 y_1 表示提高系列

电流、调整极距、扒沉淀等语义符号. 为保证输入和输出的连续性, 将推断出当前时间点的输出向量看作是下一个时间点的输入向量. 在神经网络训练过程中, 每个神经元的最大激活阈值取0.985, 实际输出与期望输出允许的相似程度阈值取0.03, 神经元的输入权重和输出权重的学习效率都取0.01, 当前神经元数量的阈值取50, 神经元的平均激活阈值取0.4. 根据上述设置的参数, 依靠模糊神经网络可以建立模糊认知图. 在实验过程中, 采用上述方法将语言术语引入模糊认知图的输入/输出中, 可以更准确地描述调查系统的状态. 但是, 由表8可以看出, 采用这种方式进行槽况判断时得到的吻合率明显低于前两种方法的吻合率. 上述结果表明, 贝叶斯概率语义网应用在槽况判断中所得结果的准确性以及基于知识反馈的槽况判断与控制模型的准确性比基于模糊神经网络推理系统的槽况判断结果准确性更高.

表6 采用贝叶斯概率语义网进行槽况判断的结果与工艺专家判断结果的吻合率

槽号	201#	202#	203#	204#	205#	206#	207#	208#	209#	210#
槽况判断吻合次数	93	92	94	91	94	93	96	94	92	90
槽况判断总次数	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
吻合率/%	93	92	94	91	94	93	96	94	92	90

表7 基于知识反馈的槽况判断结果与工艺专家判断结果的吻合率

槽号	201#	202#	203#	204#	205#	206#	207#	208#	209#	210#
槽况判断吻合次数	97	95	96	97	98	98	96	99	95	97
槽况判断总次数	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
吻合率/%	97	95	96	97	98	98	96	99	95	97

表8 基于模糊神经网络推理系统的槽况判断结果与工艺专家判断结果的吻合率

槽号	201#	202#	203#	204#	205#	206#	207#	208#	209#	210#
槽况判断吻合次数	76	85	82	77	88	73	79	85	75	84
槽况判断总次数	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
吻合率/%	76	85	82	77	88	73	79	85	75	84

5 结论

本文针对铝电解槽况知识的跨领域、不确定、多源异构等特征, 提出了基于贝叶斯概率语义网的知识表示模型, 将人类的先验知识和后验概率进行结合, 克服了语义网等模型仅能表达确定性知识的弱点, 有效地解决了用传统语义网表示铝电解槽况知识时会出现组合爆炸、多义性、知识选择难和可理解性差的问题. 该方法将统计数据以条件概率的形式融入模型中, 直接用有向图将知识的结构、属性与知识间的因果关系较直观地表示出来. 在槽况问题域的建模过程中, 当工况发生变化时, 贝叶斯概率语义网不

需要对模型结构进行修正, 只需获取当前工况下的槽况特征知识元以及改变知识元之间的关联概率, 便能满足当前槽况辨识的需求. 贝叶斯概率语义网的推理方法以贝叶斯概率理论为基础, 分别采用知识元做关联和概率做乘法运算, 可有效解决知识在推理过程中出现多义性和知识选择困难的问题. 针对关联关系矩阵重复因子多、矩阵维数多导致存储和计算困难的问题, 本文提出了基于组合消除的知识约简方法. 该方法借鉴了矩阵变换和MapReduce中数据规约的思想将知识的关联关系矩阵进行约简, 其能有效消除关联关系矩阵中的重复因子和降低矩阵维

数. 通过铝电解槽况判断的案例分析, 表明了贝叶斯概率语义网模型的合理性、可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Allard F, Désilets M, LeBreux M, et al. The impact of the cavity on the top heat losses in aluminum electrolysis cells[M]. *Light Metals* 2016. Cham: Springer, 2016: 289-294.
- [2] Yi J, Huang D, Fu S Y, et al. Multi-objective bacterial foraging optimization algorithm based on parallel cell entropy for aluminum electrolysis production process[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2488-2500.
- [3] Drengstig T, Ljungquist D, Foss B A. On the AlF₃ and temperature control of an aluminum electrolysis cell[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1998, 6(2): 157-171.
- [4] 李劫, 张红亮, 徐宇杰. 现代大型铝电解槽内复杂物理场的仿真计算与优化[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(10): 2594-2606.
(Li J, Zhang H L, Xu Y J. Simulated computation and optimization of comprehensive physical fields in modern large-scale aluminium reduction cells[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(10): 2594-2606.)
- [5] 万晓琴, 严洪森. 面向航空发动机的知识化制造系统拖期调度与自重构[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 526-534.
(Wan X Q, Yan H S. Tardiness scheduling and self-reconfiguration of knowledgeable manufacturing oriented to aircraft engine[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(3): 526-534.)
- [6] Wang W, De S, Cassar G, Moessner K. Knowledge representation in the internet of things: Semantic modelling and its applications[J]. *Automatika Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 2013, 54(4): 388-400.
- [7] Zhang X F, Li X. A semantic study of the first-order predicate logic with uncertainty involved[J]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2014, 13(4): 357-367.
- [8] Simaan M A, Ferreira A, Chen S, et al. A dynamical state space representation and performance analysis of a feedback-controlled rotary left ventricular assist device[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(1): 15-28.
- [9] Kuipers B J. A frame for frames: Representing knowledge for recognition[C]. *Representation and Understanding*. New York, 1975: 151-184.
- [10] Minville M, Cartier D, Guay C, et al. Improving process representation in conceptual hydrological model calibration using climate simulations[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 5044-5073.
- [11] Chaâri L, Pesquet J C, Tourneret J Y, et al. A hierarchical Bayesian model for frame representation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(11): 5560-5571.
- [12] Kannapan S M, Marshek K M. An algebraic and predicate logic approach to representation and reasoning in machine design[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1990, 25(3): 335-353.
- [13] Gowrisankaran G. Efficient representation of state spaces for some dynamic models[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1999, 23(8): 1077-1098.
- [14] 姜天华, 严洪森, 汪峥. 知识化制造环境下航空发动机装配车间自进化[J]. *控制与决策*, 2014, 29(7): 1217-1225.
(Jiang T H, Yan H S, Wang Z. Self-evolution of aircraft engine assembly workshop in the knowledgeable manufacturing environment[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1217-1225.)
- [15] Kendall E F, Dutra M E. Method and apparatus for frame-based knowledge representation in the unified modeling language (UML)[P]. U.S.: 7424701, 2008-09-09.
- [16] Navigli R, Ponzetto S P. BabelNet: The automatic construction, evaluation and application of a wide-coverage multilingual semantic network[J]. *Artificial Intelligence*, 2012, 193: 217-250.
- [17] 黄国顺, 曾凡智, 文翰. 代数约简的知识粒度表示及其高效算法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(8): 1354-1362.
(Huang G S, Zeng F Z, Wen H. Knowledge granularity representation and efficient algorithm of algebraic reduction[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(8): 1354-1362.)
- [18] Xin J, Yu H K, Ke Y Z. Stock price predicting using SVM optimized by particle swarm optimization based on uncertain knowledge[J]. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 2012, 23(6): 216-221.
- [19] Kong G, Xu D L, Yang J B. Clinical decision support systems: A review on knowledge representation and inference under uncertainties[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2008, 1(2): 159-167.
- [20] Hunter A. A probabilistic approach to modelling uncertain logical arguments[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2013, 54(1): 47-81.
- [21] Tyagi N, Rishi R, Agarwal R P. Semantic structure representation of html document suitable for semantic document retrieval[J]. *Proceedings of International*

- Journal of Computer Applications, 2012, 46(13): 39-43.
- [22] 高晓光, 陈海洋, 史建国. 变结构动态贝叶斯网络的机制研究[J]. 自动化学报, 2011, 37(12): 1435-1444.
(Gao X G, Chen H Y, Shi J G. Study on the mechanism of structure-variable dynamic bayesian networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(12): 1435-1444.)
- [23] Constantinou A C, Fenton N, Marsh W, et al. From complex questionnaire and interviewing data to intelligent Bayesian network models for medical decision support[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2016, 67: 75-93.
- [24] Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference[M]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 2014: 29-39.
- [25] Blomqvist E. The use of semantic web technologies for decision support — A survey[J]. Semantic Web, 2014, 5(3): 177-201.
- [26] Chen Y J. Development of a method for ontology-based empirical knowledge representation and reasoning[J]. Decision Support Systems, 2010, 50(1): 1-20.
- [27] Velikova M, Van Scheltinga J T, Lucas P J, et al. Exploiting causal functional relationships in Bayesian network modelling for personalised healthcare[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2014, 55(1): 59-73.
- [28] Wang F, Xu D, Liu J. Constructing semantic network based on bayesian network[C]. IEEE Symposium on Web Society. Lanzhou, 2009: 51-54.
- [29] Kim K M, Hong J H, Cho S B. A semantic Bayesian network approach to retrieving information with intelligent conversational agents[J]. Information Processing & Management, 2007, 43(1): 225-236.
- [30] Das M, Ghosh S K. semBnet: A semantic Bayesian network for multivariate prediction of meteorological time series data[J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 93(1): 192-201.
- [31] 桂卫华, 陈晓方, 阳春华, 等. 知识自动化及工业应用[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1016-1034.
(Gui W H, Chen X F, Yang C H, et al. Knowledge automation and its industrial application[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8): 1016-1034.)
- [32] Janjua N K, Hussain F K, Hussain O K. Semantic information and knowledge integration through argumentative reasoning to support intelligent decision making[J]. Information Systems Frontiers, 2013, 15(2): 167-192.
- [33] 苗夺谦, 陈玉明, 王睿智, 等. 图表示下的知识约简[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1952-1957.
(Miao D Q, Chen Y M, Wang R Z, et al. Knowledge reduction algorithm under graph view[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1952-1957.)
- [34] 颜艳, 杨慧中. 一种基于互信息的粗糙集知识约简算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(S2): 1903-1906.
(Yan Y, Yang H Z. Knowledge reduction algorithm based on mutual information[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(S2): 1903-1906.)
- [35] Mi J S, Wu W Z, Zhang W X. Approaches to knowledge reduction based on variable precision rough set model[J]. Information Sciences, 2004, 159(3): 255-272.
- [36] Myung J, Shim J, Yeon J, et al. Handling data skew in join algorithms using MapReduce[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 51: 286-299.
- [37] Song H, Miao C, Roel W, et al. Implementation of fuzzy cognitive maps based on fuzzy neural network and application in prediction of time series[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2010, 18(2): 233-250.

作者简介

陈祖国(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事模式识别与智能系统、复杂工业过程建模等研究, E-mail: zuguochen@csu.edu.cn;

李勇刚(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模、优化与控制等研究, E-mail: liyonggang@csu.edu.cn;

卢明(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事模式识别、知识工程研究, E-mail: mlu@hnust.edu.cn;

陈超洋(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂网络建模、优化与控制等研究, E-mail: ouzk@163.com;

刘端(1996—), 女, 硕士生, 从事模式识别、图像处理的研究, E-mail: 761514724@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)