

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.013

# PCB 工艺规则表示方法

姜建国, 刘永青, 臧明相, 王甜甜, 尚海豹

(西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 利用谓词逻辑能表示确定性知识与模糊逻辑中隶属函数能表示不确定性知识的特点,提出了一种新的谓词隶属逻辑表示法,即通过隶属函数的谓词逻辑对二值和多值逻辑规则进行归一化表示,得到了印制电路板(PCB)规则工艺知识库,实现了基于该方法的知识推理,为后续实现PCB的智能审查提供了审查依据及数据支持.

**关键词:** 印制电路板;工艺规则;谓词逻辑;隶属函数;智能审查

**中图分类号:** TP182 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)01-0068-08

## Research on the representation method of PCB technique rules

JIANG Jianguo, LIU Yongqing, ZANG Mingxiang,

WANG Tiantian, SHANG Haibao

(School of Computer Science and Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A new method named the predicate-membership logic representation method is proposed in this paper, which is based on the facts that the predicate logic can represent certain knowledge and the membership function in the fuzzy logic can represent the uncertain part. The knowledge base of PCB technique rules and the knowledge reasoning model are achieved by normalizing two-valued and multi-valued logical rules with the predicate logic of the membership function. Meanwhile, they provide the examination basis and data support for the intelligent examination of PCB.

**Key Words:** printed circuit board (PCB); technique rules; predicate logic; membership function; intelligent examination

印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)是电子产品的关键互联件.随着科学技术的发展,各类产品的电子信息化处理的需求逐步增强,新兴的电子产品不断涌现,PCB产品的用途和市场也不断扩展.因此,为避免在制造PCB时才发现因设计错误而导致的电子产品开发周期长、质量低、返工率高等问题,在设计后和加工前对电路板进行智能审查具有重要意义.

现有的电子辅助设计软件侧重于设计功能,很少涉及到对设计结果的审查,更缺少对其可加工性的检验.目前对于PCB设计的审核,还停留在以人工为主的阶段,存在着主观性大、可靠性差、效率偏低等问题.因此,采用一定方法并利用计算机对设计和加工文件中的数据实现智能、高效的审查显得尤为重要.这是提高PCB生产质量、缩短研产周期和降低返工率的一种有效途径<sup>[1]</sup>.而利用计算机进行智能审查的首要困难就是PCB工艺规则表示方法的选择,并且该问题能否很好地解决,将直接影响PCB审查结果的正确性、审查效率的高效性以及人机交互的方便性.故如何把专家知识总结出来,并表示成现有计算机可以接受、运用和处理的形式是实现PCB智能审查的一个关键问题.

针对PCB工艺规则的特点,笔者提出了一种新的谓词隶属逻辑表示法.利用该方法实现了PCB工艺中

收稿日期:2011-09-16

网络出版时间:2012-09-25

基金项目:国家部委基础科研计划资助项目(D1120060967)

作者简介:姜建国(1956-),男,教授, E-mail: jgjiang@mail.xidian.edu.cn.

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20120925.1056.201301.85.013.html>

二值和多值逻辑规则的归一化表示,并在其基础上,完成了知识的获取、存储和推理,为后续利用计算机实现智能审查提供了审查依据及数据支持,减轻了设计人员的工作负担,提高了 PCB 设计的效率和可靠性。

## 1 传统知识表示方法比较

知识是概念之间的连结,知识表示的难点在于其中隐含有确定性和不确定性的知识<sup>[2]</sup>,这导致了在某些知识表示领域中几种传统知识表示方法均不能很好地解决知识表示的问题.知识表示与推理是各种知识库系统建立的核心问题<sup>[3]</sup>,建立知识库应根据知识的特点选择相应的知识表示方式,所选择的表示方法要有足够强的知识表示能力,并且良好的知识结构可有效提高智能性、灵活性、继承性和扩展性.几种传统知识表示方法在表示能力、可利用性、可实现性等方面各有优缺点,如表 1 所示<sup>[4]</sup>.

表 1 传统知识表示方法优缺点比较

方法	定义	优点	缺点
产生式表示法	用“IF A THEN B”的产生式规则形式来表示事物或者知识因果关系	自然、灵活、模块性好、通用性强,有利于表示启发式知识;允许利用领域知识直接指导演绎过程	效率低,表达能力不强
语义网络表示法	采用网络形式表示人类知识的方法	自然、直接;体现了联想思维过程	不能保证推论的严格性和有效性;不便于表达判断性知识与深层知识
框架表示法	把某一特殊事件或对象的所有知识存储在一起的一种复杂的数据结构	由浅入深地表达事物细节;框架的特性继承性	对新的情况不易适应;多重继承可能产生多义性
谓词逻辑表示法	谓词逻辑基本组成部分是谓词符号、变量和函数,简单形式为 $P(A_1, A_2, \dots)$ , 其中, $P$ 为谓词符号,表示 $A_1, A_2, \dots$ 之间的关系	简单、精确、灵活、模块性好;推理方法严格、完备、通用	难以表达和加入启发性知识及元知识;推理方法在事实较多时易于出现“组合爆炸”,且效率低
面向对象表示法	客观世界是由各种“对象”组成的,复杂事物是由若干个简单对象组成的,所有对象都被分成各种对象“类”	较好地描述了事物的结构模型;将知识对象进行封装,便于知识库的维护和修正	表示方式抽象;类的惟一对外接口是消息模式
人工神经网络法	通过大量神经元之间具有一定强度的广泛联接来隐式表达形象知识,并将知识的表示、获取、学习过程结合为一体的方法	具有很高的容错性;能自组织、自适应学习	处理过程封闭,类似于黑箱;需要大量的训练数据
粗糙集表示法	把知识看做是关于论域的划分,知识的不精确性是由于组成论域知识的颗粒大引起的	客观描述了不确定性知识;支持并行运算	模糊边界难以正确清晰的确定;应用范围狭窄

PCB 工艺知识来自众多专家在其长期工作实践和领域研究中的理论概括和经验总结,很难表示为确定性规则<sup>[5]</sup>.目前存在的知识表示法还不能满足 PCB 审查规则知识所呈现的类型多、知识间关联性强、确定性与不确定性并存等特点.比如工艺规范中的元器件属性,采用框架描述比较合适;对于布局布线等不确定知识,一般用产生式表示;而对于设计知识中的参数,还涉及到图表信息的表示问题<sup>[6]</sup>.所以,需要寻找一种统一的知识表示方法来对 PCB 审查规则进行描述.

为此,笔者利用谓词逻辑能表达确定性知识与模糊逻辑中隶属函数能表示不确定性知识的特点,提出了一种谓词隶属逻辑表示法,解决了 PCB 规则中确定性与不确定性知识的统一表示问题.

## 2 谓词隶属逻辑表示法

谓词隶属逻辑表示法即采用带隶属函数的谓词逻辑对 PCB 规则中二值和多值逻辑知识进行归一化表示。

### 2.1 表示步骤的描述

谓词隶属逻辑表示法的知识表示过程为:

(1) 确定知识的类型. 若无不确定性语言, 则是二值逻辑知识, 对应的隶属函数形式为,  $\mu_A(\alpha) =$

$\begin{cases} 1, & \alpha \in \text{区间 } 1 \\ 0, & \alpha \in \text{区间 } 2 \end{cases}$ , 隶属函数的值域为  $\{0, 1\}$ ,  $A = \text{区间 } 1 \cup \text{区间 } 2$ ; 反之, 则是多值逻辑知识, 对应的隶属

函数形式为,  $\mu_A(\alpha) = \begin{cases} \text{表达式 } 1, & \alpha \in \text{区间 } 1 \\ \dots & \\ \text{表达式 } n, & \alpha \in \text{区间 } n \end{cases}$ , 其值域为  $[0, 1]$ ,  $A = \text{区间 } 1 \cup \dots \cup \text{区间 } n$ .  $A$  是隶属函数

对应知识的相关集合,  $\alpha$  为集合  $A$  中的某个元素. 例如, 审查规则“元器件不能与 PCB 边缘距离太近”的隶属函数中,  $A$  表示距离集合,  $\alpha$  为某一距离值. 将  $\alpha$  代入相应隶属函数  $\mu_A(\alpha)$ , 即可求得相应函数值, 该值表示元器件与 PCB 边缘的距离远近程度.

(2) 定义该方法的第 1 部分. 定义个体常量、个体变量及谓词, 确定它们的确切含义后, 用适当的连接符号将各个谓词连接起来, 并用符号“ $\Rightarrow$ ”连接知识前提和知识结论.

(3) 定义该方法的第 2 部分. 根据所要描述的知识内容, 给相应知识的隶属函数赋予特定的值, 包括区间的划分、表达式的确定等.

综合以上步骤, 根据工艺知识的语义, 将谓词隶属逻辑表示法表示为: 知识前提  $\Rightarrow$  知识结论, 隶属函数.

### 2.2 隶属函数的确定

PCB 审查规则中, 专家经验值收集困难, 且难以确定. 而隶属函数的形式越简单越好, 故给出两种确定方法: 区间划分法和专家经验历史值期望法. 下面以“元器件不能与 PCB 边缘距离太近”为例, 介绍两种方法.

#### 2.2.1 区间划分法

假设用“太近”、“比较近”、“有点近”3 个等级表示元器件与 PCB 边缘的远近程度, 取集合  $A = [0, 5]$  (单位为 mm) 为两者的距离集合, 则“太近”、“比较近”、“有点近”分别对应  $A$  上的 3 个子集  $[0, 0.5)$ 、 $[0.5, 3)$ 、 $[3, 5]$ , 其隶属函数描述为

$$\mu_A(\alpha) = \frac{5-\alpha}{5} = \begin{cases} [1, 0.9) & , \alpha \in [0, 0.5) \\ [0.9, 0.4) & , \alpha \in [0.5, 3) \\ [0.4, 0] & , \alpha \in [3, 5] \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  越接近 0, 表示元器件与 PCB 边缘越近, 则  $\mu_A(\alpha)$  越接近 1; 反之, 表示距离不是“太近”. 如图 1 所示.

#### 2.2.2 专家经验历史值期望法

在不方便使用区间划分法来确定隶属函数的情况下, 可采用专家经验历史值期望法<sup>[7]</sup> 计算出一个值作为判断是否“太近”的界定值, 进而确定隶属函数.

若一次操作过程中, 界定值分别被设置为多个值, 则本次操作设定的所有值可作为一组历史界定值. 该方法的计算步骤如下.

假设一组历史界定值为:  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , 则其加权平均值为  $\chi = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$ , 标准差为  $\sigma_x =$

$\left[ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \chi)^2 \right]^{1/2}$ . 因此,  $n$  组历史界定值的最佳估计值计算方法为

$$\text{第 } 1 \text{ 组: } \chi_1 = \frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} x_i, \quad \sigma_1 = \left[ \frac{1}{m_1-1} \sum_{i=1}^{m_1} (x_i - \chi)^2 \right]^{1/2}, \quad \sigma_{x_1} = \frac{\sigma_1}{m_1^{1/2}},$$

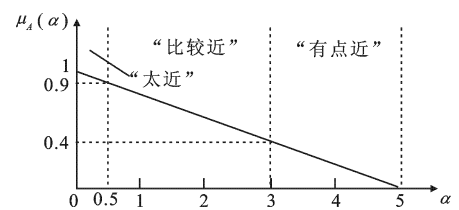


图 1 隶属函数的区间划分法示例

...

$$\text{第 } n \text{ 组: } \chi_n = \frac{1}{m_n} \sum_{i=1}^{m_n} x_i, \quad \sigma_n = \left[ \frac{1}{m_n - 1} \sum_{i=1}^{m_n} (x_i - \chi)^2 \right]^{1/2}, \quad \sigma_{x_n} = \frac{\sigma_n}{m_n^{1/2}} .$$

取  $k = \max(\sigma_{\chi_1}^2, \dots, \sigma_{\chi_n}^2)$ , 则比例常数  $p_1 = k/\sigma_{\chi_1}^2, \dots, p_n = k/\sigma_{\chi_n}^2$ . 由此得最佳估计值为  $\bar{\chi} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \sum_{i=1}^n p_i \chi_i$ , 即

$\bar{\chi}$  是根据该方法计算得到的最佳估计值. 在无历史值的情况下, 可由专家或操作人员灵活设置一个合理的数值  $\bar{\chi}$  作为界定值. 因此, PCB 审查规则“元器件不能与 PCB 边缘距离太近”的隶属函数可表示为

$$\mu_A(\alpha) = \frac{5 - \alpha}{5} = \begin{cases} \left[ 1, \frac{5 - \bar{\chi}}{5} \right) & , \quad \alpha \in [0, \bar{\chi}) \\ \left[ \frac{5 - \bar{\chi}}{5}, 0 \right] & , \quad \alpha \in [\bar{\chi}, 5] \end{cases} \quad (2)$$

其中, 若距离  $\alpha$  小于等于  $\bar{\chi}$ , 则表示距离“太近”; 反之, 则不“太近”. 如图 2 所示.

区间划分法和专家经验历史值期望法是相辅相成的, 当历史值期望法的  $\bar{\chi}$  是由专家或操作人员直接设置的, 而不是按上述方法计算所得时, 历史期望法就演变为区间划分法.

审查规则中二值逻辑知识隶属函数的确定方法, 实质是上述两种隶属函数确定法的特例. 此时, 给定集合中的任意元素  $\alpha$  均有确定的真假值, 即  $\mu_A(\alpha)$  只有 0 和 1 两个隶属度.

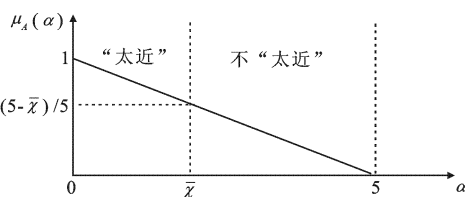


图 2 隶属函数的专家经验历史值期望法示例

### 2.3 二值逻辑规则的表达

二值逻辑中命题的逻辑值域为  $\{0, 1\}$ , 即命题非真即假, 非假即真. 二值逻辑规则的详细表示步骤如下:

(1) 确定隶属函数:  $\mu_A(\alpha) \rightarrow \{0, 1\}$ .

(2) 分解命题. 将命题分解为个体词和谓词两部分, 用小写英文字母  $a, b, c, x, y, z$  等表示个体变量, 用  $P, Q, R$  等大写英文字母或 Distance 等具有特定意义的英文单词表示谓词名.

(3) 用连接符号  $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$  等将谓词连接. 在谓词逻辑中常用的连接符号有 4 个:  $\neg$ (非)、 $\wedge$ (合取)、 $\vee$ (析取)、 $\rightarrow$ (蕴涵), 而连接符号的优先级依  $\rightarrow, \wedge, \vee, \neg$  的顺序递增<sup>[8]</sup>.

(4) 量化. 使用量词  $\forall$  表示个体域中所有个体, 量词  $\exists$  表示个体域中某些个体.

综合以上步骤, 将该规则表示成谓词隶属逻辑形式为: 知识前提  $\Rightarrow$  知识结论, 隶属函数.

例如二值审查规则“过孔孔径必须大于 0”, 该规则的谓词隶属逻辑法表示如下:

(1) 确定隶属函数: 若孔径大于 0, 则逻辑值为真; 否则, 逻辑值为假. 对应的隶属函数为

$$\mu_A(\alpha) = \begin{cases} 0 & , \quad \alpha \leq 0 \\ 1 & , \quad \alpha > 0 \end{cases} \quad (3)$$

(2) 分解命题: 用个体变量  $x$  表示过孔, 谓词  $P(x)$  表示过孔  $x$  的孔径, 则  $\mu_A(P(x))$  表示过孔孔径  $P(x)$  的隶属函数值.

(3) 命题公式化:  $P(x) \Rightarrow \mu_A(P(x))$ , 将过孔孔径作为变量代入隶属函数, 判断该过孔孔径是否大于 0.

(4) 公式量化:  $\forall x P(x) \Rightarrow \mu_A(P(x))$  表示对于个体域“过孔”中的所有个体都应大于 0.

综合以上步骤, 该规则的谓词隶属逻辑法表示为

$$\forall x P(x) \Rightarrow \mu_A(P(x)), \quad \mu_A(\alpha) = \begin{cases} 0 & , \quad \alpha \leq 0 \\ 1 & , \quad \alpha > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\mu_A(\alpha)$  为该规则相应的隶属函数,  $\alpha$  表示集合  $A$  中的某一元素.

### 2.4 多值逻辑规则的表达

不确定性知识广泛存在于社会及自然科学中, 最常见的就是与人密切相关的语言知识的不确定性, 诸如



常见的语言概念、语言知识推理等<sup>[9]</sup>. PCB 审查规则中存在大量的不确定性知识,二值逻辑表示方法已无法满足其要求.而数据关联问题本身的不确定性或称模糊性,是模糊逻辑研究的对象,应用模糊逻辑可快速建立目标特征空间与关联度之间的关系模型<sup>[10]</sup>.故可利用模糊逻辑中隶属函数能表示不确定性知识的特点,采用多值逻辑表示方法对该类知识进行合理描述.

多值逻辑中仅用 0 和 1 两个逻辑值是不够的,需在 0 和 1 之间采用多个逻辑值来表示不同的真值,其逻辑值域为 $[0, 1]$ 闭区间的连续值逻辑.如命题“元器件不能与 PCB 边缘距离太近”中存在不确定性词“太近”,无确定的真假值,故对其进行知识表示时,不能简单地用真或假来给出逻辑值,只能通过一定方法给出其接近“真”或接近“假”的程度.谓词隶属逻辑表示法通过设定隶属函数为 $\mu_A(\alpha) \rightarrow [0, 1]$ 来描述不确定性事物,而隶属函数的具体表达形式可根据区间划分法或专家经验历史值期望法进行确定.多值逻辑知识与二值逻辑知识的表示形式是一样的,只不过隶属函数的取值范围不再只有 0 和 1 两种情况.多值逻辑知识的详细表示步骤如下:

(1) 确定隶属函数: $\mu_A(\alpha) \rightarrow [0, 1]$ .

(2) 分解命题,命题公式化,公式量化.

综合以上步骤,将规则表示成谓词隶属逻辑表示形式:知识前提 $\Rightarrow$ 知识结论,隶属函数.

例如“元器件不能与 PCB 边缘距离太近”的谓词隶属逻辑表示如下:

(1) 根据专家经验历史值期望法确定隶属函数如式(2)所示.

(2) 分解命题:首先,用变量 $x$ 表示元器件, $y$ 表示板框, $z$ 表示距离,用谓词 $\text{Distance}(x, y, z)$ 表示求出 $x$ 与 $y$ 的距离,并将其赋给 $z$ ;然后,将命题公式化为 $\text{Distance}(x, y, z) \Rightarrow \mu_A(z)$ ,其中, $\mu_A(z)$ 表示 $z$ 的隶属函数值,它是元器件与 PCB 边缘距离远近的判断结论;最后,将公式量化为 $\forall x \exists y \exists z \text{Distance}(x, y, z) \Rightarrow \mu_A(z)$ .

综合以上步骤,该规则的谓词隶属逻辑表示形式为

$$\forall x \exists y \exists z \text{Distance}(x, y, z) \Rightarrow \mu_A(z) \quad , \quad \mu_A(\alpha) = \begin{cases} \left[ 1, \frac{5-\bar{\chi}}{5} \right) & , \quad \alpha \in [0, \bar{\chi}) \quad , \\ \left[ \frac{5-\bar{\chi}}{5}, 0 \right] & , \quad \alpha \in [\bar{\chi}, 5] \quad . \end{cases} \quad (5)$$

### 3 知识库的设计

PCB 工艺规则的存储是实现 PCB 智能审查的基础.若将审查规则以语句的形式存储于程序或文本中,则不能直观地表达相互之间的逻辑关系,也不便于知识库的维护<sup>[11]</sup>.近年来国内外有不少专家提出了用数据库构建知识库的思想.作为人工智能和数据库两项技术结合的产物,知识库系统已越来越受到人们的关注.它是利用人们已有的各种知识进行知识获取、组织和检索查询的计算机信息系统.在研究知识库系统时,其中很重要的问题是知识库的逻辑基础<sup>[12]</sup>.

在知识库的开发阶段,可采用非自动型知识获取方式来获取知识,通过与专家座谈或者搜集整理文献、标准等方法,总结出 PCB 设计的普遍标准和规则,并将知识转换成谓词隶属逻辑表示法描述的文档,保存在知识库中;在知识库的运行维护阶段,应给具备一定权限的设计人员和审查人员提供操作接口,通过半自动化的方式,更新和维护数据库中的内容.

知识库是审查 PCB 数据的核心,良好的知识库设计能极大地提高审查的智能程度<sup>[13]</sup>.知识库的设计主要解决知识库的结构问题,即知识的组织形式. PCB 审查规则知识的约简是必要的,也是必需的,在大量冗余信息的情况下,如果不进行约简,将会严重影响知识的清晰度<sup>[14]</sup>. PCB 设计审查知识作为知识的一部分,具有普通知识的共性,但同时又具有涉及学科范围广、知识类型多、结构复杂等特点.随着知识量的增加,传统知识库的应用将受到限制,而关系数据库的数据管理功能十分强大,不仅可以方便知识的设计与管理,而且其优化的查询匹配能力能更好地执行知识的推理过程<sup>[15]</sup>.笔者采用关系数据库存储量化后的 PCB 审查规则知识,该知识的逻辑表示按知识表示前提和加工要求两部分分别存储在数据库的知识表示表和加工要

求表中,两个表通过惟一的知识号进行关联.其中知识表示表是存储知识的前提,加工要求表是存储知识的推理结果.

知识表示表的结构如表 2 所示.其中字段 ID 为知识前提的惟一标识;RuleID(知识号)记录知识前提的知识号,若某条审查规则在知识表示前提表中需多行存储,则该规则对应的多行记录的知识号应相同;Operator(操作符)存储连接谓词的符号,如 $\neg$ 、 $\wedge$ 、 $\vee$ 、 $\rightarrow$ 等;Predicate(谓词)存储参与运算的谓词公式.

表 2 知识表示表

名称	数据类型	大小	是否为空	是否关键字
ID	int	4	否	是
RuleID	int	4	否	否
Operator	varchar	50	是	否
Predicate	varchar	50	是	否

表 3 加工要求表

名称	数据类型	大小	是否为空	是否关键字
ID	int	4	否	是
RuleID	int	4	否	否
Result	varchar	50	否	否
MemFun	varchar	200	否	否

加工要求表的结构如表 3 所示.其中字段 ID 为该知识推理结果的惟一标识;RuleID 记录与规则前提相应的知识号;Result(结果)存储知识表示中的结果表达式;MemFun 为该规则对应的隶属函数.

以“元器件不能与 PCB 边缘距离太近”规则为例,其隶属函数采用专家经验历史值期望法确定.规则量化后如式(6)所示,则其知识前提在表 2 中的各字段值依次为:20,4,null,Distance(x,y,z),其推理结果在表

$$\mu_A(z) = \frac{5-\alpha}{5} = \begin{cases} \left[1, \frac{5-\bar{\chi}}{5}\right], & \alpha \in [0, \bar{\chi}] \\ \left[\frac{5-\bar{\chi}}{5}, 0\right], & \alpha \in [\bar{\chi}, 5] \end{cases}$$

### 4 知识推理

输入 PCB 加工制造数据,针对二值逻辑规则和多值逻辑规则分别进行如下操作:提取运算因子,实例化并进行谓词逻辑运算,运用方法库中相应算法对 PCB 加工制造数据进行推理,所得运算结果(result)与知识库中知识结论(conclusion)相比较(compare),给出推理结论,如图 3 所示.

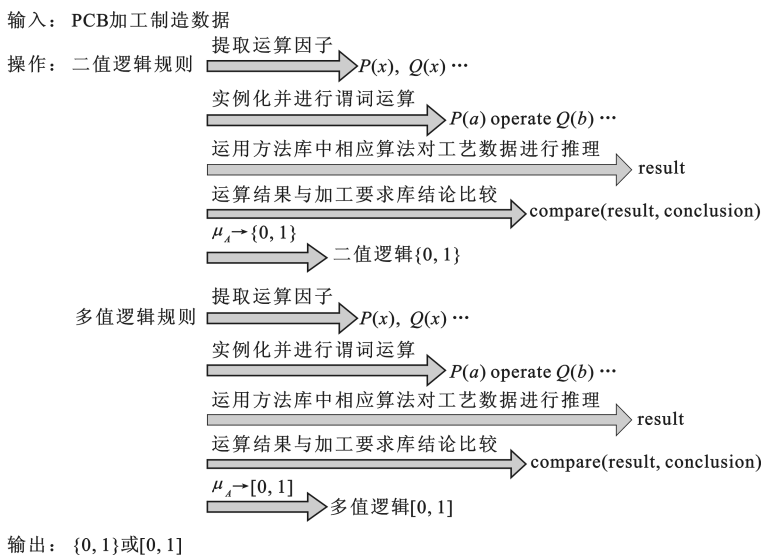


图 3 知识推理模型

### 5 结束语

针对 PCB 审查规则表示问题,提出了一种谓词隶属逻辑表示法,并详细叙述了该方法的原理、存储及推

理机制. 采用文中描述的知识表示法,能很好地解决 PCB 审查规则中确定性与不确定性知识的归一化表示问题,实现了对现有常用 PCB 审查规则的量化.同时建立了完备的知识库,并实现了其上的推理机制,为后续利用计算机实现 PCB 的智能审查提供了审查依据及数据支持.该方法可行、可用,具有一定的灵活性、自适应性和可扩充性,而且稍加改进,还可适用于其他工艺知识表示领域.

但是文中采用的知识表示主要针对单条审查规则,即知识库中各条知识相互独立,没有充分考虑多条知识之间的演绎推理.因此该方法还有待进一步研究,以提高知识表示能力,克服知识库管理困难等问题.

#### 参考文献:

- [1] Zang Mingxiang, Wang Tiantian, Huang Zhanwu. The Automatic Checkup Method for PCB Processing Data Based on Knowledge[C]//2010 the 2nd International Conference on Future Computer and Communication: Vol 1. Shanghai: IEEE, 2010: 538-542.
- [2] Hai Zhuge, Luo Xiangfeng. Knowledge Map: Mathematical Model and Dynamic Behaviors[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2005, 20(3): 289-295.
- [3] 许文艳,刘三阳. 基于可计算性逻辑的知识表示与推理[J]. 吉林大学学报(理学版), 2009, 47(6):1230-1236.  
Xu Wenyan, Liu Sanyang. Knowledge Representation and Reasoning Based on Computability Logic[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2009, 47(6): 1230-1236.
- [4] 张科杰,袁国华,彭颖红. 知识表示及其在机械工程设计中的应用探讨[J]. 机械设计, 2004, 21(6): 4-6.  
Zhang Kejie, Yuan Guohua, Peng Yinghong. Approach to Knowledge Expression and Its Application in Mechanical Engineering Design[J]. Journal of Machine Design, 2004, 21(6): 4-6.
- [5] 詹振飞,王伟明,胡洁,等. 不确定性工艺知识的模糊粗糙隶属度函数表示方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2): 475-477.  
Zhan Zhenfei, Wang Weiming, Hu Jie, et al. Fuzzy-rough Set Membership Function Based on Uncertainty Process Knowledge Representation[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(2): 475-477.
- [6] 卢靓妮,姜建国,张楠. 基于知识的 PCB 设计数据审查[J]. 微计算机信息, 2009, 25(21): 19-21.  
Lu Liangni, Jiang Jianguo, Zhang Nan. The PCB Design Data Review Based on Knowledge[J]. Control & Automation, 2009, 25(21): 19-21.
- [7] 陶靖轩. 正权组合预测的最佳估计及其精度[J]. 中国计量学院学报, 2000, 11(2): 91-95.  
Tao Jingxuan. Best Estimation of Combinatorial Prediction by Positive Weights and Its Precision[J]. Journal of China Institute of Metrology, 2000, 11(2): 91-95.
- [8] 冀英伟,杨海峰,张继福. 一种基于谓词逻辑的分类规则约简方法[J]. 太原科技大学学报, 2010, 31(1): 59-64.  
Ji Yingwei, Yang Haifeng, Zhang Jifu. A Reduction Method of Classification Rules Based on Predicate Logic[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2010, 31(1): 59-64.
- [9] 杜国宁. 随机值 II-型模糊集及其不确定性知识表示[J]. 模糊系统与数学, 2011, 25(1): 89-95.  
Du Guoning. Stochastic Type-2 Fuzzy Set and Its Uncertain Knowledge Presentation [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2011, 25(1): 89-95.
- [10] 刘源,谢维信,杜文吉,等. 模糊-概率交互作用的数据关联算法[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(2): 154-159.  
Liu Yuan, Xie Weixin, Du Wenji, et al. Fuzzy-probability Interacting Data Association Algorithm[J]. Journal of Xidian University, 1999, 26(2): 154-159.
- [11] 刘宏伟,姚寿广. 数据库技术在专家系统知识表示中的应用[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2007, 21(3): 50-53.  
Liu Hongwei, Yao Shouguang. Application of Database Technique in Expert System Knowledge Representation [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2007, 21(3): 50-53.
- [12] 许文艳,刘三阳. 知识库系统的逻辑基础[J]. 计算机学报, 2009, 32(11): 2123-2129.  
Xu Wenyan, Liu Sanyang. Logic for Knowledgebase Systems[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(11): 2123-2129.
- [13] Tang Zhijie, Yang Baoan, Zhang Kejing. Design of Multi-attribute Knowledge Base Based on Hybrid Knowledge Representation[J]. Journal of Donghua University (Eng ED), 2006, 23(6): 62-66.

- [14] 刘金璐, 于冬, 高璇. 基于 Rough 集理论的城市信息系统知识获取方法[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版), 2004, 14(4):103-107.
- Liu Jinlu, Yu Dong, Gao Xuan. Method of Knowledge Acquisition in Urban Information System Based on Rough-Set Theory[J]. Journal of Xidian University(Social Science Edition), 2004, 14(4): 103-107.
- [15] 黄福玉, 冯玉强, 王龙, 等. 基于关系模型的不确定性知识表示与推理及其在 KMS 中的应用[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(5): 653-656.
- Huang Fuyu, Feng Yuqiang, Wang Long, et al. Relation-model-based Indefinite Knowledge Representation and Inference Technology and Its Application in KMS[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(5): 653-656.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第 67 页)

双频点近似的谐振腔传输线模型和 MRA 的传输线模型比较, Padé 逼近的谐振腔传输线模型在仿真较短传输线时具有更高效率和更好的精度. 最后, 通过与 HFSS 频域和时域的仿真结果相比较, 证明了 Padé 逼近的谐振腔传输线模型的有效性.

#### 参考文献:

- [1] Paul C R. Analysis of Multiconductor Transmission Lines [M]. 2nd Edition. New York: Wiley, 2008.
- [2] Ferranti F, Antonini G. Physics-Based Passivity-Preserving Parameterized Model Order Reduction for PEEC Circuit Analysis [J]. IEEE Trans on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2011, 1(3): 399-409.
- [3] Yeung L K, Wu K L. Generalized Partial Element Equivalent Circuit Modeling With Radiation Effect [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(10): 2377-2384.
- [4] Lelarsmee E, Ruehli A, Sangiovanni-Vincentelli A L. The Waveform Relaxation Method for the Time-domain Analysis of Large Scale Integrated Circuits [J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design, 1982, 1(8): 131-145.
- [5] Nakhla N, Ruehli A E, Nakhla M S, et al. Waveform Relaxation Techniques for Simulation of Coupled Interconnects with Frequency-Dependent Parameters [J]. IEEE Trans on Adv Packag, 2007, 30(2): 257-269.
- [6] Dounavis A, Achar R, Nakhla M S. Efficient Passive Circuit Models for Distributed Networks with Frequency-dependent Parameters [J]. IEEE Trans on Adv Packag, 2000, 23(3): 382-392.
- [7] Roy S, Dounavis A. Closed-form Delay and Crosstalk Models for RLC on-Chip Interconnects Using a Matrix Rational Approximation [J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2009, 28(10): 1481-1492.
- [8] Beygi A, Dounavis A. Sensivity Analysis of Lossy Multiconductor Transmission Lines Based on the Passive Method of Characteristics Macromodel [J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2010, 29(8): 1290-1294.
- [9] Talocia S G, Huang H M, Ruehli A E, et al. Transient Analysis of Lossy Transmission Lines: An Efficient Approach Based on the Method of Characteristics [J]. IEEE Trans on Adv Packag, 2004, 27(1): 45-56.
- [10] Lu Jianmin, Li Yushan, Zhang Mushui. An Efficient Spice-Compatible Cavity Resonant Model for Microstrip Lines [J]. IEEE Trans on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2011, 1(4): 574-585.
- [11] Dounavis A, Achar R, and Nakhla M S. Efficient Passive Circuit Models for Distributed Networks with Frequency-dependent Parameters [J]. IEEE Trans on Adv Packag, 2000, 23(3): 382-392.

(编辑: 高西全)