

故障诊断知识标准化描述方法综述

李旭¹, 孟晨¹, 姜会霞¹, 刘京生²

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003;

2. 陆军北京军事代表局, 石家庄 050000)

摘要: 诊断知识是智能诊断系统的核心; 对传统的知识表示、面向对象的知识表示、AI-ESTATE 诊断知识标准化表示、基于 XML 语言和 ATML 标准的诊断知识表示进行比较, 总结了故障诊断知识表示方法的发展趋势, 分析了 ATML 描述 AI-ESTATE 标准定义的各种测试诊断知识的优势与实现困难; 通过对典型的 AI-ESTATE 诊断知识类型转换方法和描述进行举例, 为面向 ATML 标准的 AI-ESTATE 诊断信息标准化描述方法指明了方向; 针对语言定义的不同使得目前的描述还不高效的现状, 对未来标准化描述发展方向做出了展望。

关键词: AI-ESTATE; 诊断知识; 标准化描述

A Review of Standardized Description Methods for Fault Diagnosis Knowledge

Li Xu¹, Meng Chen¹, Jiang Huixia¹, Liu Jingsheng²

(1. Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2. Army Beijing Representative Office, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Diagnostic knowledge is the core of intelligent diagnosis system. Analyzing and comparing among traditional knowledge representation, object-oriented knowledge representation, standardized representation of AI-ESTATE diagnostic knowledge, diagnostic knowledge representation based on XML language and ATML standard, which summarize the development trend of knowledge representation of fault diagnosis and analyze the advantages and difficulties of using ATML to describe AI-ESTATE standard definition on a variety of test diagnosis knowledge. By means of a typical AI-ESTATE diagnostic knowledge type transformation method and description, the orientation is specified for the standardized description of the AI-ESTATE diagnostic knowledge based on the ATML standard. In view of the fact that the different definitions of language make the current description not efficient, it indicates the direction of future standardized description development.

Keywords: AI-ESTATE; diagnosis knowledge; standardized description

0 引言

故障诊断就是指故障检测和故障隔离的过程。近年来, 为了满足复杂系统的诊断要求, 智能化诊断系统走上了历史舞台。诊断知识是智能诊断系统的核心, 如何把诊断知识以一种简洁、灵活、透明的方法表示描述出来, 成为影响智能诊断系统发展的一个重要方面。

1 故障诊断知识的表示方法

故障诊断知识共享主要有两方面的内容: 一是在静态层次上的知识共享和重用, 二是在动态层次上的知识共享。知识的静态共享就是在故障诊断系统的建立和开发过程中利用已有的知识模型, 共享和重用已有的知识。为了实现静态层次上的知识共享和重用, 就需要提供基于知识共享和重用的开发环境、

提供知识的一致性描述手段, 保证数据格式、数据语义的一致性。动态的知识共享和重用就是在诊断过程中多个知识系统协同工作, 通过知识通讯和交换技术支持知识的再生成和应用, 这就要求知识或诊断信息的交换格式要一致^[1]。软件的可移植就需要构建组件式或模块式的诊断系统, 使系统的模块可以在不同的平台间移植。无论是知识的静态共享还是动态共享以及知识的可移植在很大程度上取决于知识的描述方法。

在基于人工智能的故障诊断中, 诊断的效果一方面决定于知识的获取程度、知识的表示方式, 另一方面决定于推理方法的选取。在获取的知识容量一定时, 知识的表示方法及推理策略的优劣对专家系统的性能起着至关重要的作用。有关知识表示的问题一直是人工智能诊断中十分重要的研究课题。随着智能诊断方法在不同领域的不断应用, 诊断知识的表示和管理也得到了迅速的发展, 概括起来主要包括: 传统的知识表示、面向对象的知识表示、AI-ESTATE 诊断知识标准化表示、基于 XML 语言和 ATML 标准的诊断知识表示。

1.1 传统的知识表示方法

传统的知识表示方法包括逻辑表示法、产生式规则表示法、框架表示法、语义网络表示法等。

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-10-30。

作者简介: 李旭 (1990-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事故障诊断, 军用自动测试系统方向的研究。

孟晨 (1963-), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事故障诊断, 军用自动测试系统方向的研究。

逻辑表示法是最早用于人工智能中表示知识的一种方法。其中较常见的是一阶谓词知识表示方法。它采用了接近于自然语言的形式且具有严格的形式定义及推理规则,易于被人接受、语义严密、容易实现。但是谓词逻辑不能表示不确定性的知识,特别是在知识增加时容易产生组合爆炸、推理过程冗长、诊断效率低。随着逻辑表示方法在故障诊断系统的不断应用,针对不同特征系统的新的逻辑表示法也不断出现。文献 [2] 提出了采用时间逻辑的知识表示法,并将其应用到了航天器实时故障诊断专家系统中,为解决实时诊断问题提供了一条途经。文献 [3] 针对传统电机故障诊断专家系统中存在的知识表示能力弱、无法呈现完整的知识等缺陷,提出了基于描述逻辑的知识表示方法,有效地表示了电机故障知识之间的关系。

产生式规则表示法是由美国数学家波斯特首先提出的,它是人工智能专家系统中使用广泛的一种知识表示方法。其优点是表示方式自然、直观,便于进行推理。它既可以表示确定性的知识也可以表示不确定性的知识;它表示的规则同推理机相对独立,便于模块化处理。文献 [4] 针对国家八五攻关项目大型测试系统的故障诊断,提出了采用产生式规则的方法进行知识的表达。文献 [5] 针对运行过程中知识具有的模糊性的问题,提出了采用模糊产生式规则进行知识的表达并应用于火电厂凝汽器运行故障诊断中,结果证明了其方案的有效性。但是产生式规则也存在如下不足:不能表达结构化的知识;推理过程中不能实现事先无法确定的相继关系,必须进行逐步的前后匹配,降低了诊断效率。

框架表示法是以 1975 年美国著名人工智能学者明斯基提出的框架理论为基础发展起来的一种结构化的知识表示方法。它是一种描述所论对象属性的数据结构,现已在多种系统中得到应用。其优点是善于表达结构性的知识,能够把知识的内部结构关系及知识间的联系表示出来;通过槽值的设定可以表示复杂知识间的继承关系。文献 [6] 提出了面向故障树的基于框架和广义规则的混合知识表示。它把每个故障树作为一个对象,有关该树的诊断信息封装在一个独立的框架中,而框架的每个槽对应一条广义规则,从而提高了诊断速度。

知识的语义网络可以表示事实性的知识,也可表示有关事实性之间的复杂联系。与框架表示法一样,语义网络表示法也是一种结构化的知识表示法。其主要优点是灵活性和继承性,缺点是缺乏形式化的表示结构,没有标准规则来使相同的元素和相互关系有确定的表示方式^[7]。

传统的知识表示方法在表示知识和推理能力上有各自的优点和不足。文献 [7] 以采煤机故障诊断专家系统为例讨论了产生式规则表示法、一阶谓词逻辑表示法和“规则框架+规则体”等知识表示方法的优缺点,为这些知识表示法的应用提供了参考依据。构造实际诊断系统时,可以综合运用不同的知识表示方法,扬长避短。文献 [8] 采用了框架结合产生式规则的表示方法构造了 PA6 船用柴油机的故障诊断知识库来实现不同类型知识的表示。

故障诊断系统要求既能表达领域对象的静态特性、行为特征及约束,又要表达专家经验、判断决策等知识,还要有较强的数值计算及过程控制能力。上述传统的知识表示方法均不能

满足这种要求。面向对象的知识表示方法具有这种能力^[9]。

1.2 面向对象的知识表示

文献 [10] 考虑到火控系统结构复杂、系统诊断能力不仅取决于专家知识还考虑到专家对系统结构的认知能力,提出了采用面向对象的方法表示火控系统故障诊断知识。面向对象的知识表示方法以对象为中心,将对象的属性、动态行为特征、相关领域知识和数据处理方法等有关知识“封装”在表达对象的结构中。先首先识别确定对象,然后归类形成底层类,最终形成层次结构。这种知识表达方式构造的知识库具有良好的体系结构,通过对象类和对象的知识表达,实现数据抽象与信息共享,加强了知识的重复使用能力,易于维护,便于专家系统的开发。但是不论是传统的知识表示还是面向对象的知识表示,其知识描述都是不标准、不统一的。

1.3 基于 AI-ESTATE 的诊断知识标准化表示

为了规范智能测试诊断系统的知识表示与服务、确保诊断推理系统相互兼容且独立于测试过程、测试诊断知识可移植和重用,IEEE 制订了全测试环境的人工智能交互和服务 (Artificial Intelligence Exchange and Service Tie to All Test Environments, AI-ESTATE) 标准。AI-ESTATE 采用 EXPRESS 规范了测试诊断域的知识描述,基于 EXPRESS 语言的故障树诊断信息模型、增强型诊断推理信息模型等;为诊断信息的无疑义通信、共享奠定了基础,实现了诊断知识表示的标准化。文献 [11] 依据 AI-ESTATE 采用 EXPRESS 语言描述了故障树诊断知识。但是由于 AI-ESTATE 标准采用的描述语言 EXPRESS 在实际工程中使用较少,编辑 EXPRESS 文件的工具也很少,使得这种标准化的诊断知识描述在实际的诊断系统中使用的并不多。国内仅有东方信标技术有限公司开发的 TADS 软件中采用 EXPRESS 语言描述诊断信息,其它相关资料未见报道。

1.4 基于 XML 语言的 ATML 标准的诊断知识表示

网络技术的发展和故障诊断技术自身发展的需要,使得基于 Internet 的远程设备监测与诊断技术、集成诊断系统得到了快速的发展。在实现过程中,诊断客户与诊断服务之间信息的表示是一个重要的问题。知识的表示方法影响了诊断知识的共享和重用、诊断知识的平台无关性。基于 XML 语言的诊断知识表示可以实现不同操作系统之间的数据交换,为远程故障诊断的实现、诊断数据的共享带来了极大的方便。

可扩展标记语言 (eXtensible Markup Language, XML) 采用文本的方式并且可创建标识,它作为定义标记语言的元语言,常用于特定应用领域的的数据交换。XML 语言表达诊断知识既可以看作是一种知识表示的方法也可以看作是知识存储、管理的方法。XML 文件本身描述的是信息的结构和定义,并不描述信息的显示格式,信息显示格式的定义可以使用样式表附加到 XML 文件上,实现信息的内容和表示相分离。因此 XML 可以将用户界面和结构化数据相分离,允许不同来源的数据无缝集成以及对同一数据的多种处理^{[12][13]}。从数据描述语言的角度看,XML 语言灵活、可扩展,具有良好的数据结构和约束;从数据处理的角度看,它足够简单且易于阅读,同时易于被应用程序处理。文献 [14] 利用 XML 语言有效地表达了液压系统诊断知识,解决了页面显示与业务逻辑的分离,

降低了系统开发的复杂性,缩短了开发周期。文献[15]采用XML语言进行转子系统状态信息和诊断知识的表示,方便了客户间和诊断模块间信息的传递和操作,使得诊断数据实现了更大程度的共享。

利用自动测试标记语言(Automatic Test Markup Language, ATML)是为了使信息的共享、交换、传递更方便制定的,以XML为基础,拥有XML语言运行环境适用性、编程语言交互性等优点,可以实现分布式开放环境下测试诊断信息的无缝交互,是目前最适合描述AI-ESTATE标准定义的各种测试诊断知识的语言。采用ATML可提高测试诊断知识的共享性和可移植性,缩短动态测试的故障定位及隔离时间。

目前AI-ESTATE是测试环境下诊断知识表示的规范,确保了知识描述的一致性和通用性。ATML标准则是ATS中的数据交互标准。如何使诊断知识的描述规范符合ATML描述方式则是诊断信息无缝连接到ATS中的关键。尽管SCC20委员会也建议AI-ESTATE标准进行诊断知识描述的转换,但是由于EXPRESS语言和XML语言的不对称性,目前这项工作尚未进行。

2 AI-ESTATE 诊断知识的标准化描述

AI-ESTATE标准利用EXPRESS语言规范了智能测试诊断系统的知识与服务,确保了测试诊断知识可移植、可重用,诊断推理机相互兼容且独立于测试过程。ATML标准是新一代ATS的数据交换标准,采用ATML标准表达测试诊断信息,将实现分布式开发环境中测试诊断信息的无缝交互。诊断知识的标准化描述是诊断知识共享的重要保证,因此如何使各种诊断信息模型描述既符合AI-ESTATE标准又符合ATML标准描述语言则是ATS诊断域信息描述的一个热点。

公共元素模型(Common Element Model, CEM)规范了诊断域中与诊断相关的各种实体,也是各种诊断信息模型建立的基础,因此要使诊断知识描述符合ATML标准的描述方式,最关键的是CEM的标准化描述。

2.1 信息模型描述语言

目前,由国际化标准组织发布的信息模型描述语言有很多种,如NIAM、IDEF、EXPRESS、XML等。在新一代的ATS中测试诊断信息描述语言主要是EXPRESS语言和XML语言。

2.1.1 EXPRESS语言

EXPRESS语言是STEP标准规定的一种建模语言,其目的是规定一种贯穿产品生命周期、计算机可识别的产品数据的无二义性表达和交换格式,这种格式独立于任何具体的计算机系统。不同编程环境中的数据可以通过产生的EXPRESS语言数据文件进行交互。

EXPRESS语言采用了一种面向对象方法的进行数据及其关系的描述。具有共同性质的一类对象称为实体(Entity)。EXPRESS语言允许将实体分类为其它实体的子类型,这样在实体间建立起层次关系:子类型(Subtype)/超类型(Supertype)。EXPRESS还提供了一系列的数据类型,如简单数据类型、定义数据类型和实体数据类型;它还规定了各种实体属性、算法、内部函数和规则。EXPRESS规定的规则有两种:唯一性规则和域规则。除此之外,EXPRESS语言还有一些内

部的函数、表达式等^[16]。EXPRESS语言通过模式(Schema)将相关实体和其它数据类型、函数、过程等集合定义在一个公共的范围内描述一个对象。

2.1.2 XML语言

XML作为一种与平台无关、简单易用、自描述型的数据描述格式,已经成为Internet上的数据交换的主要标准之一。任何时候当一个程序需要与另一个程序通信时,XML语言都是最合适的交换格式。它让使用不同系统和不同编程语言的人们能够相互交流和分享数据。

XML语法简单,包括标记、元素、属性、注释、声明等。它严谨有效地定义了XML文档文件的结构。而且整个文档采用纯文本撰写且拥有树形的逻辑结构,人们可以轻易的阅读和理解它们。不过XML语言缺乏像关系数据库函数那样的语义约束定义,然而这点并不影响XML成为最适合的数据交换语言^[17]。

2.2 EXPRESS语言与XML语言的匹配规则

如何使AI-ESTATE描述的诊断信息元素和信息模型符合ATML标准描述语言,目前还没有统一的解决方法。最新发布的AI-ESTATE-2010中仍然采用EXPRESS语言对诊断知识和服务进行了标准化的定义。不过在其标准的解释中也明确指出了可以采用STEP21对EXPRESS语言描述的产品和数据进行文本解析实现信息的交互;可以采用STEP28标准实现EXPRESS语言知识描述转换为XML形式。这就为面向ATML标准的AI-ESTATE诊断知识的标准化描述指明了方向。

EXPRESS语言与XML语言的匹配关系应遵循以下规则^[18]:

XML采用能够满足EXPRESS的关键语法并保持与EXPRESS语义表达关键字的一致性;

如果不能满足要求的,则采用扩展的XML定义;

如果一种验证方法不能完全匹配EXPRESS Schema的所有定义,可以考虑采用多种验证方法融合以保证信息的完整性,准确性和互通;

如两者表达方式相同但出现语义冲突时,则以语义匹配为主进行关键词表述的修改;

如果以上皆不满足,则直接将EXPRESS在XML中以原文表达。

EXPRESS语言的标识符对大小写不敏感而XML名称则是区分大小写的。出现在XML Schema定义各声明中的每一个EXPRESS标识符将被匹配为XML的名称或XML名称的本地部分。XML名称和EXPRESS标识符是相同的,除了首字母大写其它字母小写之外。

以下EXPRESS特征是不能基于STEP28被匹配的:

- 规则声明;
- 函数和过程;
- 常数;
- 实体的局部约束WHERE;
- 使用和引用;
- 子类和超类。

2.3 面向ATML标准的AI-ESTATE诊断信息标准化描述方法

2.3.1 常数类型的描述

EXPRESS中可以对一个常数类型数据进行定义。定义中

要对该常数的名称、类型等进行属性信息描述。因此基于 STEP28 标准和语言匹配规则将一个常数转换为元素。

基于 STEP28 改进的常数映射关系如图 1。

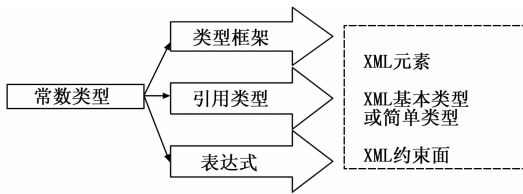


图 1 基于 STEP28 改进的 EXPRESS 常数类型映射关系

其中的基本类型可以是 EXPRESS 的简单类型也可以是定义类型。

典型的 AI-ESTATE 的 NoFault 常数描述如下：

```
<xs:element name="no_fault" type="name_type" fixed="No Fault"/>
<xs:simpleType name="name_type"><xs:annotation>
  <xs:documentation>5.1.6</xs:documentation>
</xs:annotation>
<xs:restriction base="xs:normalizedString"/>
</xs:simpleType>
```

2.3.2 数据类型的描述

AI-ESTATE CEM 中依据 EXPRESS 中基本数据类型扩展了标准中进行诊断知识描述的数据类型，如置信度 confidence_value。confidence_value 类型声明是一个实数型定义数据类型而且其数值还有约束。EXPRESS confidence_value 类型不仅指出了类型的标识符和基本类型 REAL，还通过 WHERE 规则域和 SELF 关键字对类型值进行了约束，其 EXPRESS 描述如下：

```
TYPE confidence_value = REAL;
WHERE
  Range : (0.0<=SELF) AND (SELF<=1.0);
END_TYPE
```

利用前面分析转换匹配结构，在其 XML 描述中要指出标识符、基本类型 xs:double，WHERE 规则与和 SELF 在 XML 中不用进行匹配，而是通过 XML 的限制面进行 EXPRESS 地点子句的功能描述。符合 ATML 标准的 confidence_value 的标准化描述如下：

```
<xs:simpleType name="confidence_value">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>5.1.3</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:restriction base="xs:double">
    <xs:minInclusive value="0"/>
    <xs:maxInclusive value="1"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
```

2.3.3 实体数据类型的描述

在 EXPRESS 语言中，实体是通过实体说明生成的，并说明对它引用的标识符。实体的性质表示为属性和限制。实体间的关系表现为子类型/超类型、继承关系。这类关系可以转换为 XML 语言的复杂类型的扩展派生。典型的诊断结果实体的

XML 描述如图 2 所示。

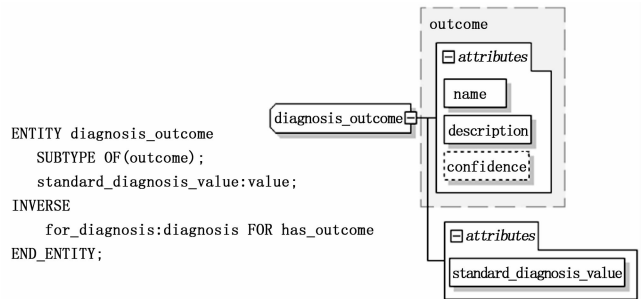


图 2 实体 diagnosis_outcome 的标准化描述 XML Schema

按功能分析，实体 diagnosis 用于表示一系列的诊断结论。最典型的诊断结论是失效和故障。通过将各种诊断结论彼此联系在一个架构中可以实现对诊断单元的划分。diagnosis 实体可以表示任何级别的被测对象的诊断结论，它包含有诊断结果信息、失效效率信息、失效模式信息和故障影响程度信息，并通过 WHERE 域规则对包含的属性进行约束。实体 diagnosis 的 EXPRESS 表示如下：

```
ENTITY diagnosis
  SUPERTYPE OF (ONEOF(failure, fault))
  SUBTYPE OF (hierarchical_element);
  has_outcome : OPTIONAL SET [2:?] OF diagnosis_outcome;
  has_rate : OPTIONAL failure_rate;
  mechanism : OPTIONAL SET [1:?] OF failure_mode;
  severity : OPTIONAL severity_category;
  WHERE
    outcomes_required_for_atomic_diagnosis : (SIZEOF(SELF.members) >
      0) OR EXISTS(has_outcome);
    minimal_outcomes : (NOT(EXISTS(has_outcome))) XOR
      ((SIZEOF(QUERY(tmp < * has_outcome |
        tmp.standard_diagnosis_value = GOOD)) = 1) AND
        (SIZEOF(QUERY(tmp < * has_outcome |
        tmp.standard_diagnosis_value = CANDIDATE)) = 1));
    mechanism_at_leaves : NOT(EXISTS(mechanism)) OR (SIZEOF
      (members) = 0);
    faults_at_leaves : (NOT('AI-ESTATE_COMMON_ELEMENT_MODEL.fault' IN
      TYPEOF(SELF))) OR
      (SIZEOF(members) = 0);
    children_same_type : QUERY(tmp < * SELF.members |
      NOT('AI-ESTATE_COMMON_ELEMENT_MODEL.diagnosis'
      IN TYPEOF(tmp))) = [];
  END_ENTITY;
```

按结构分析，实体 diagnosis 是实体 failure、fault 的超类、hierarchical_element 的子类。diagnosis 除了引用的 hierarchical_element 的属性外还扩展了属性 has_outcome、has_rate、mechanism、severity 和 WHERE 域规则。STEP28 规定对 WHERE 域规则进行直译映射，在此暂不讨论 WHERE 的标准化描述，而只讨论其超类/子类 and 属性说明。

实体 diagnosis 是 hierarchical_element 的子类，因此就和实体 hierarchical_element 映射的复杂类型建立了扩展派生关

系, 实现对其属性的引用。

属性 `has_outcome` 是一个任选属性, 它引用的是实体 `diagnosis_outcome` 的数集聚合, 而且数集的下界为 2。一般的数集可以用元素的最大、最小指示符 `minOccurs`、`maxOccurs` 表示, 因此 `has_outcome` 的 `minOccurs`=2, 但是 `has_outcome` 属性的 `OPTIONAL` 关键字也是通过元素的最小指示符 `minOccurs`=0 实现的, 显然在这种情况下两者的表示方法是矛盾的, 必须进行改造。将数集 `SET [2:?] OF diagnosis_outcome` 仍表示为一个整体, 映射为一个元素 `minOccurs`=2 的 sequence 组, 而 `OPTIONAL` 则通过对该 sequence 组引用 `optional` 实现。采用同样的方法对属性 `mechanism` 进行映射实现其标准化描述。

属性 `has_rate` 引用的是具有 `OPTIONAL` 关键字的实体类型、`severity` 引用的是具有 `OPTIONAL` 关键字的的枚举类型, 通过 `minOccurs`=0 和元素类型引用实现映射, 完成其标准化。根据以上分析, 实体 `diagnosis` 的标准化描述如图 3 所示。

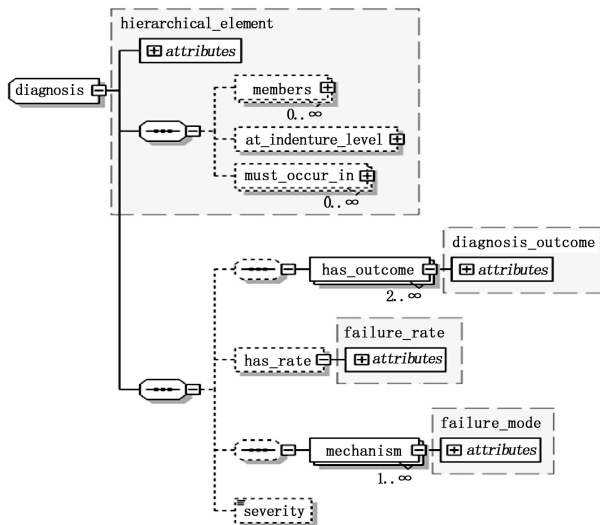


图 3 实体 `diagnosis` 的标准化描述 XML Schema

3 前景展望

AI-ESTTAE 标准对诊断信息的标准化描述和诊断服务的结构定义进行了规范, 为面向服务的远程诊断体系结构、知识共享和服务管理使用提供了良好的基础。但在开放式、信息化、互操作的远程通用性诊断系统开发中以下问题有待于解决:

如何构建符合 AI-ESTATE 标准的诊断实体和数据类型 XML 全信息和约束描述; 如何进行诊断推理机服务的选择和优化; 如何实现诊断对象测试深度的体系化、标准化接口、安全通信。

4 结论

基于 AI-ESTATE 的故障诊断系统的建模和开发是一项复杂的工程。诊断知识的标准定义和描述则是其进行信息交互的前提条件。论文对典型的 AI-ESTATE 诊断知识类型转换方法和描述进行研究。但是由于语言本身定义的不同使得目前

的描述还不高效。未来的方向包括:

解决 EXPRESS 域规则和约束的标准化描述, 提高对数学公式的转换描述的效率;

开发适合 AI-ESTATE 标准及其扩展信息的 EXPRESS 与 XML 的自动转换工具;

寻找保证 AI-ESTATE 诊断信息映射到 ATML 标准描述格式的完整性、一致性和无疑义性的映射方法, 实现了基于 ATML 的 AI-ESTATE CEM 标准化描述, 为各种诊断模型的规范化描述奠定基础;

针对诊断模型标准化发展的现状, 建立符合 ATML 标准描述语言的 AI-ESTATE 诊断信息模型, 对实际工程中采用不同诊断方法的标准化信息描述有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨寅哲. 智能故障诊断标准化技术研究 [J]. 科技创新导报, 2008 (21): 156-158.
- [2] 杜晓辉, 任 章. 基于时间逻辑的知识表示方法分析 [J]. 战术导弹控制技术, 2008, 30 (2): 1-3.
- [3] 牛 强, 夏士雄, 谭国俊, 等. 基于描述逻辑的电机故障诊断知识表示与推理 [J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30 (5): 872-876.
- [4] 徐嵩杰, 郭茜楠, 郭志先. 为测试系统诊断构造基于知识 (规则) 的诊断系统 [J]. 计算机学报, 1997, 20 (8): 753-758.
- [5] 牛玉广, 胡晓艳, 李玉荣. 运行故障知识表达及模糊专家系统诊断 [J]. 控制工程, 2007, 14 (s): 99-101.
- [6] 纪常伟, 荣吉利, 黄文虎. 航天器故障诊断系统开发研究 [J]. 航空学报, 1999, 20 (3): 275-278.
- [7] 朱启建, 叶铁丽, 孙晓伟, 等. 采煤机故障诊断专家系统的 3 种知识表示方法 [J]. 煤矿机械, 1999 (7): 42-45.
- [8] 任长合, 王国治. 船用 PA6 柴油机故障诊断专家系统知识库的设计 [J]. 船海工程, 2010, 39 (1): 75-77.
- [9] 陈传波, 郭天杰. 面向对象的知识表示方法在故障诊断系统中的应用 [J]. 计算机工程与科学, 2006, 28 (12): 121-123.
- [10] 兴娅浪, 何 鑫, 杨润生. 面向对象表示法在火控系统故障诊断知识表示中的应用 [J]. 计算机工程, 2003, 29 (8): 193-194.
- [11] Harris M, Helton A, Bodkin M, et al. Fault tree reuse across multiple reasoning paradigms [Z]. Mark Kaufman, John W. Sheppard. 2006: 496-500.
- [12] 孙 鑫. XML、XML Schema、XSLT2. 0 和 XQuery 开发详解 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [13] 汪 洋, 徐建芬, 王海平. 基于 XML 的自动测试信息交换标准研究综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22 (5): 1-7.
- [14] 周永涛, 陈小虎, 王旭平, 等. 基于 XML 和 XSLT 的液压故障诊断专家系统 [J]. 机床与液压, 2008, 36 (9): 167-169.
- [15] 徐新平, 王志刚, 张荣英, 等. XML 在远程设备监测诊断系统构建中的应用研究 [J]. 高校理科研究, 2005: 74-75.
- [16] GB/T 16656. 11-1996, 工业自动化系统与集成 产品数据表达和交换 第 11 部分: 描述方法: EXPRESS 语言参考手册 [S].
- [17] 高怡新. XML 基础教程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [18] 简峥峰. 基于 XML 的异构产品信息网上交换、检索技术研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.