

文章编号:1000-582X(2012)05-035-05

## 高炉故障诊断本体构建方法实证分析

陈国荣<sup>1,2</sup>, 鄢 萍<sup>2</sup>, 陈燕华<sup>3</sup>, 施金良<sup>1</sup>, 邓菊丽<sup>1</sup>

(1. 重庆科技学院 电气与信息工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;  
3. 重庆电力高等专科学校 计算机系, 重庆 400053)

**摘 要:**高炉维修记录中包含很多有用的信息,可为诊断解决类似故障提供参考。针对故障记录提取和利用过程中存在的结构化表示、知识构建及推理难题,提出了一种基于本体的高炉故障知识构建及表示方法。对高炉故障诊断知识本体的特性进行分析,得出故障诊断本体构建的故障部位、故障原因、故障现象、解决方案四要素;定义了高炉本体的故障诊断类、属性、实例、关系、域等本体描述的规范框架和说明;在本体建模工具 protégé 中研究了该高炉本体的具体定义、描述和推理过程。实例研究表明,该方法简单、表述直观、效率高,可为高炉故障诊断提供一种新的思路和解决方案。

**关键词:**诊断;本体;高炉;知识推理

**中图分类号:**TH17

**文献标志码:**A

## Empirical analysis on blast furnace fault diagnosis method based on ontology

CHEN Guo-rong<sup>1,2</sup>, YAN Ping<sup>2</sup>, CHEN Yan-hua<sup>3</sup>, SHI Jin-liang<sup>1</sup>, DENG Ju-li<sup>1</sup>

(1. School of Electronic & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China;

2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

3. School of Computer, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, P. R. China)

**Abstract:** Blast furnaces' maintenance records of mechanical fault contain great amount of information which is useful to identify the similar fault, but the structural representation and the knowledge reasoning problem prevent us to use the records effectively. Aiming at the problem, a blast furnace fault knowledge representation based on ontology is proposed. Blast furnaces' knowledge characteristics, ontology building significance and principle of fault are analyzed, and the four factors of BF-cause, BF-phenomenon, BF-ways, Blast-furnace in blast furnaces' mechanical fault diagnosis are brought out. The fault ontology frame of BFClass, BFProperties, BFIndividuals, BFRelationships, BFDomain are defined and described in detail. The applications of fault diagnosis ontology are studied in protégé. The case study shows that the fault knowledge representation based on ontology is very intuitive and efficient, and it provides a novel way to deal with the blast furnace fault diagnosis problem.

**Key words:** diagnosis; ontology; blast furnaces; knowledge reasoning

**收稿日期:**2011-12-20

**基金项目:**国家“863”重点资助项目(2007AA040701);重庆市科技平台与基地建设资助项目(CSTC, 2011PT-GC70006);重庆市教委成果转化重点项目(KJZH11221);重庆科技学院科研基金重点项目(CK2011B01, CK2010Z10, 2011003)

**作者简介:**陈国荣(1974-),男,重庆科技学院副教授,博士,主要研究方向为系统工程、故障诊断,(E-mail)cwcgr@126.com。

高炉是钢铁生产的重要装备,包括高炉体、送料、送风、喷吹、煤气处理、渣铁处理等子系统。由于系统复杂,高炉的许多故障难于诊断。高炉维修记录中包含很多有用的信息,可为诊断解决类似故障提供线索。不经处理的故障记录虽然也可以使用,但是效率低下,并且许多有潜在价值的重要信息往往被忽略<sup>[1]</sup>。迫切需要对故障记录进行知识挖掘,以最大限度发挥故障记录的作用。在故障知识挖掘中,对故障知识的表示和推理显得非常重要,国内外众多学者也对此进行了大量的研究。例如:利用神经网络、数据挖掘、专家系统等方面的知识建立故障诊断算法,提升历史故障的分析能力<sup>[2-4]</sup>;或者利用故障树方法,对故障现象进行直观描述<sup>[5-7]</sup>;近年来,以语义 Web 为代表的知识工程得到了很快的发展,对知识的描述和结构化表示提供了一种新的方法<sup>[8-9]</sup>。

上述方法在一定程度上解决了故障诊断所需知识的表示问题。但神经网络、数据挖掘、专家系统等方法在故障知识的梳理和快速发现方面较为薄弱,故障词条搜寻的精度严重依赖所选择的关键词;故障树方法表达直观,有助于解决相继故障,但同样存在知识的结构化表示能力较弱的缺点;知识工程方法目前对解决无序数据的有序化处理优势明显,但故障诊断必须面临多层次的依托主体,因而还需要解决主体的层次化表达问题。笔者结合上述方法中的层次树结构和知识结构化表示的优点,提出了一种基于本体的高炉故障知识表示方法,并利用 protégé 作为本体建模工具对其进行了实例研究。

## 1 高炉故障诊断本体特性分析

### 1.1 高炉故障诊断四要素分析

高炉故障诊断过程,实质为基于故障现象搜寻故障原因,确定故障发生部位及解决方案的过程;而高炉故障解决过程,则是依据故障原因,利用故障诊断过程获得的解决方案,对特定故障部位进行处理,消除故障现象的过程,如果忽略故障诊断过程中涉及的其他辅助环节,故障诊断过程和故障解决过程都具有明确的定义域、值域、关系匹配,高炉故障诊断过程通常会涉及以下 4 个要素:

1)故障部位。对设备而言,出问题的部位所在,可能是子系统,也可能是某个零部件。

2)故障原因。发生故障的症结所在,简单故障可能容易找到,对于复杂故障需要专业的故障诊断人员才能获得。

3)故障现象。能看到的表征现象,可通过用户报告或描述获得。

4)解决方案。通常是弄清楚故障原因后才能确定。

上述高炉故障 4 要素关系可由图 1 表示。

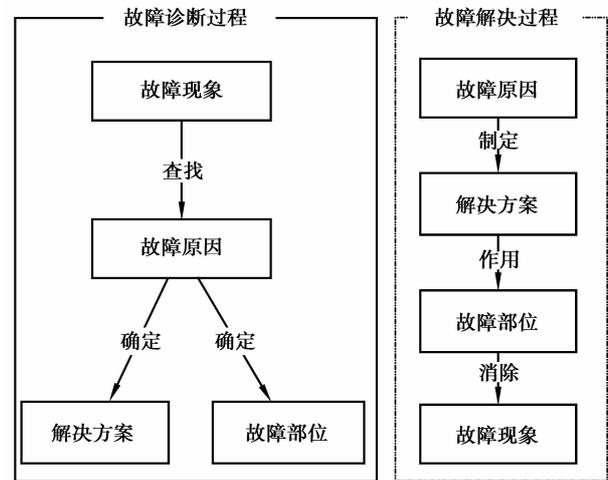


图 1 高炉故障涉及的四要素关系

### 1.2 故障诊断本体的意义和构建原则

高炉故障四要素在进行现场故障诊断时,需要进行形式化定义和描述,形成可被计算机处理的故障诊断本体。Studer 将本体(Ontology)定义为“共享概念模型的、明确的、形式化的规范说明”。即故障诊断本体的构建必须满足以下 4 个条件:

1)明确(Explicit)。明确定义所使用的概念及概念约束条件。

2)抽象模型(Conceptualization)。对现实世界中的具体现象进行抽象,获取相关概念,形成抽象模型;其表达的意思具有高度概括性和环境状态独立性。

3)形式化(Formal)。规范且是计算机可读的表达。

4)共享(Share)。针对的是团体而不是个体,是对客观事物的共同认知。

由此可知,高炉故障诊断本体是一种对于高炉故障知识领域建模的共同认知和理解,它定义该领域共同认可的术语和关系,并以形式化的形式给这些术语及关系做出明确定义。

## 2 高炉故障诊断本体的定义和描述

### 2.1 基本定义

基于高炉故障诊断本体四要素分析及通用本体构造规则,可得出相关基本定义,如下。

定义 1 本体(Ontology)可表示为  $O\_FD = (C, A^c, \leq_C, R, A_R, \leq_R, \sigma, l)$ , 其中:

1)  $R, C$  为构建高炉故障诊断本体的基本集合, 分别代表关系和概念集合。

2)  $A^c$  和  $A^R$  为高炉故障诊断本体的属性集合容器。前者为概念集合容器, 后者为关系属性集合容器, 容器任一元素为一个概念或关系属性集合。

3)  $\leq_c$  为高炉故障诊断本体的概念层次, 表示作用于概念集合  $C$  上的偏序集合。

4)  $\leq_R$  为高炉故障诊断本体的关系层次, 表示作用于关系集合  $R$  上的偏序集合。当  $1 \leq i \leq |\sigma(r_1)|$  且  $r_1 \leq_R r_2$ , 有  $|\sigma(r_1)| = |\sigma(r_2)|$ , 且  $\pi_i(\sigma(r_1)) \leq_c \pi_i(\sigma(r_2))$ 。

5)  $\sigma$  为高炉故障诊断的标识或标签。

6)  $l$  为高炉故障诊断本体的表示逻辑语言,  $O_{GoFD}$  的基于逻辑的公理系统是一个二元组函数  $A:=(AI, a)$ , 其中:  $AI$  为公理标识,  $a: AI \rightarrow l$  为关系映射,  $A:=a(AI)$  中的元素为公理。可使用支持 OWL 或 DAML+OIL 的逻辑语言来表达, 常见的有 TRIPLE、F-Logic 等。

**定义 2** 高炉故障诊断本体类(Class)是将高炉故障诊断所需要素抽象形成的集合或概念性表达, 是与具体内容无关的抽象集合。例如高炉故障诊断本体构建时, 故障现象、故障部位、故障解决方案及设备对象非常重要, 为此可定义类 BFInfo 用以表示设备, 在设备类中还可构件子类来表示该设备下的零部件, 还可继续递归划分, 形成一台设备的完整结构。

**定义 3** 关系(Relationship)指高炉故障诊断领域本体各种交互作用的总称, 常见关系例如整体与部分(part-of)、继承或子类(kind-of)、对类赋予对象或实例化(instance-of)、属性说明(attribute-of)等。

**定义 4** 公理(Axioms)即逻辑关系为真的断言, 例如可认为“高炉是一种冶炼装备”是公理。

**定义 5** 对象(Instances)为类的实例化, 例如构建 BFInfo 的实例“XX 型号高炉”, 就是该类实例化的过程。

**定义 6** 函数(Functions)是一种特殊的关系, 可通过数学方法对其定义域和值域进行明确界定。

## 2.2 高炉本体构建

在上述基本定义上, 可进一步定义高炉本体的类、属性、关系、实例等。

**定义 7** 故障诊断本体  $FD\_of\_Blast\_Furnace$  可定义为

$$FD\_of\_Blast\_Furnace = (BFClass, BFProperties, BFIndividuals, BFRelationships, BFDomain). \quad (1)$$

式中: BFClass 为故障诊断本体类; BFProperties 为属性类; BFIndividuals 为实例类; BFRelationships 为关系类; BFDomain 为值域类。

**定义 8** 故障诊断本体类 BFClass 可定义为

$$BFClass = (Blast\_Furnace, BF\_Phenomenon, BF\_Cause, BF\_ways), \quad (2)$$

式中: Blast\_Furnace 为高炉本体类; BF\_Phenomenon 为故障现象类; BF\_Cause 为故障原因类; BF\_ways 为解决方案类。以上类可以按照继承关系继续划分子类, 最终形成完整的领域本体类定义。

**定义 9** 故障诊断本体值域集合 BFDomain 可定义为一个二元集合, 即有

$$BFDomain = (BFDomain, BFRange), \quad (3)$$

式中: BFDomain 表示定义域的集合; BFRange 表示值域集合。

**定义 10** 故障诊断本体属性类 BFProperties 可表示为一个三元组, 即有

$$BFProperties = (Object\_Properties, Datatype\_Properties, Annotation\_Properties), \quad (4)$$

式中: Object\_Properties 为对象属性类; Datatype\_Properties 为数据属性类; Annotation\_Properties 为注解属性类。

在此基础上, 可对 Object\_Properties 和 Datatype\_Properties 进一步赋值, 即

$$Object\_Properties = (bf\_caused, bf\_happened, bf\_repaired), \quad (5)$$

式中  $bf\_caused, bf\_happened, bf\_repaired$  分别代表“……导致……”、“……发生……”、“……修复……”等对象属性之间的相互作用关系。

$$Datatype\_Properties = (bf\_cause, bf\_phenomenon, bf\_ways), \quad (6)$$

式中  $bf\_cause, bf\_phenomenon, bf\_ways$  分别代表故障原因、故障现象和解决方案等数据属性。

**定义 11** 高炉故障实例 BFIndividuals 可定义为

$$BFIndividuals = (bf\_Instances), \quad (7)$$

式中  $bf\_Instances$  为实例的集合。

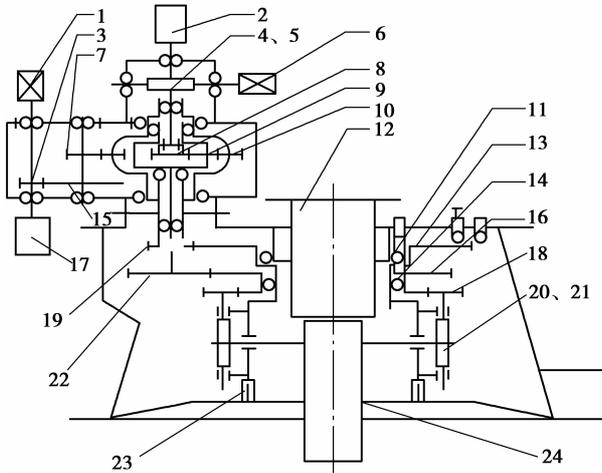
## 3 实例分析

为验证上述高炉本体的应用效果, 以 Protégé 为工具进行了高炉本体的构建。

1) 定义类及子类。

高炉炉顶供料系统的结构如图 2 所示, 高炉类 Blast\_Furnace 包括了高炉的整个组织结构, 而供料系统类 Feeding\_System 作为高炉类 Blast\_Furnace

的子类, 供料系统包括的组建均包含在供料系统类 Feeding\_System 中。构建 BF\_Cause、BF\_Phenomenon、BF\_ways 等类。



1: b 角电机; 2: a 角发讯装置; 3、7、15: 齿轮; 4、5: 涡轮螺杆; 6: a 角电机; 8: 齿轮接轴; 9: 行星齿轮; 10: 太阳齿轮; 11、14: 回转轴承; 13: 大齿轮; 16: 双联齿轮; 17: b 角发讯装置; 18: 倾动齿轮; 19: b 角驱动齿轮; 20、21: 倾动涡轮蜗杆; 22: a 角驱动齿轮; 23: 迷宫密封; 24: 布料溜槽

图 2 供料系统的结构示意图

## 2) 定义类之间的关系。

定义 BF\_Cause、BF\_Phenomenon、BF\_ways、Blast\_Furnace 等类之间存在 disjoint (互斥) 关系。Blast\_Furnace 类与各高炉部件之间存在 (is-a) 父子关系或直接继承关系。

## 3) 定义类的属性。

上述类包括 3 种属性, 分别为 Object Properties、Datatype Properties、Annotation Properties。为表示 BF\_Cause、BF\_Phenomenon、BF\_ways、Blast\_Furnace 等类之间的对象关系, 定义 bf\_caused, bf\_happened, bf\_repaired 等对象属性关系, 分别代表“……导致……”、“……发生……”、“……修复……”关系。则相关定义域和值域分别可表示为

```
BF_Cause bf_caused BF_Phenomenon;
Blast_Furnace bf_happened BF_Cause;
BF_ways bf_repaired BF_Cause.
```

分别定义 bf\_cause, bf\_phenomenon, bf\_ways 等为故障原因、故障现象和解决方案等不同的数据类型。

## 4) 实例化类。

根据故障诊断历史记录, 对 BF\_Cause、BF\_Phenomenon、BF\_ways、Blast\_Furnace 等类及子类进

行实例化, 形成可独立推理的个体。建立 BF\_Cause、BF\_Phenomenon、BF\_ways、Blast\_Furnace 等类的实例之间的关系, 其核心 XML 代码表示如图 3。

```
<? xml version = "1.0" ? >
< owl:Class rdf:ID = "Blast_Furnace" >
  < owl:disjointWith rdf:resource = "#BF_Phenomenon" />
  < owl:disjointWith rdf:resource = "#BF_Cause" />
  < owl:disjointWith rdf:resource = "#BF_ways" />
</owl:Class >
< owl:Class rdf:ID = "Blast_Furnace_Body" >
  < rdfs:subClassOf rdf:resource = "#Blast_Furnace" />
</owl:Class >
< owl:DatatypeProperty rdf:ID = "bf_cause" >
  < rdfs:domain rdf:resource = "#BF_Cause" />
  < rdfs:range rdf:resource = "&xsd:string" />
</owl:DatatypeProperty >
< owl:Class rdf:ID = "Distribution_chute" >
  < rdfs:subClassOf rdf:resource = "#Feeding_System" />
</owl:Class >
< Distribution_chute rdf:ID = "Distribution_chute1" />
< BF_Cause rdf:ID = "Distribution_chute_worn_out" >
  < bf_cause xml:lang = "en"
    > Distribution_chute_worn_out or baddly worn </bf_cause >
  < bf_caused rdf:resource = "#the_air_flow_strong_in_edge_of_
the_furnace,_but_weak_in_meddle" />
  < bf_happened rdf:resource = "#Distribution_chute1" />
  < bf_repaired rdf:resource = "#repalce_it" />
</BF_Cause >
</rdf:RDF >
```

图 3 故障诊断本体的 XML 表示片段

## 5) 基于本体的故障知识推理实现。

图 3 所示的高炉本体知识表示对于知识传输、存储和推理具有明显的优势。图 4 为其推理过程的基本步骤示意图。

例如, 为查找“the air flow strong in edge, but weak in meddle of the furnace”的故障, 系统在得到上述故障现象后, 在 BF\_Phenomenon 类中找到相应实例, 通过分析标记、关系确定读入内容并推理, 得到 BF\_Cause 中具有对应的实例“Distribution\_chute\_worn\_out”, 该实例位于 Blast\_Furnace 类 Feeding\_System 子类的“Distribution\_chute1”实例上, 在 BF\_ways 类中具有对应的“replace”解决方案。由图 1 的故障解决过程流程可知, 采用“replace”方案, 作用于“Distribution\_chute1”, 即可解决“Distribution\_chute\_worn\_out”问题, 消除“the air flow strong in edge, but weak in meddle of the furnace”故障。

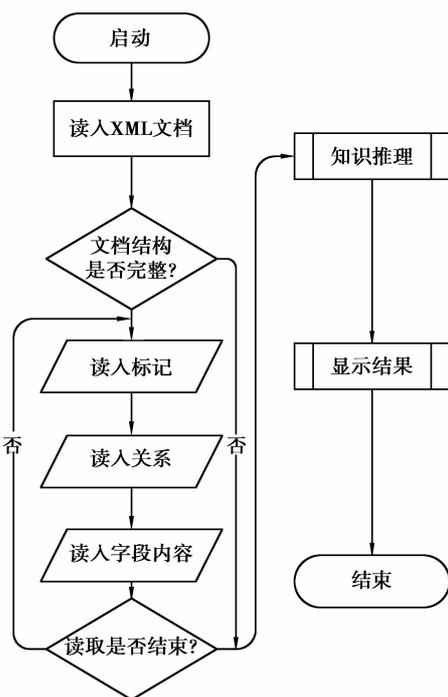


图4 故障推理基本步骤

## 4 结 语

针对高炉故障诊断过程中的结构化表示、知识构建及推理难题,基于故障部位、故障原因、故障现象、解决方案四要素,提出了一种基于本体的高炉故障知识表示和推理方法,分析了高炉故障诊断的特点,定义了高炉故障诊断领域本体,并在 Protégé 中进行了实例分析。案例分析表明该方法表述直观、效率高。

文中只涉及到故障诊断必须的要素,对于故障的维修和处理过程,还需要添加人员、零部件等类,文中对此没有考虑,拟在进一步研究中突破。

### 参考文献:

- [1] KOU G, PENG Y, SHI Y, et al. Privacy-preserving data mining of medical data using data separation-based techniques[J]. *Data Science Journal*, 2007, 6: 429-434.
- [2] SPIELMAN S E, THILL J C. Social area analysis, data mining, and GIS [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32 (2): 110-122.
- [3] BEAUBOUEF T, PETRY F E, LADNER R. Spatial data methods and vague regions: a rough set approach[J]. *Applied Soft Computing*, 2007, 7(1): 425-440.
- [4] DEMSAR U. Investigating visual exploration of geospatial data: an exploratory usability experiment for visual data mining [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2007, 31(5): 551-571.
- [5] LIU Z S, DOU W, WANG D H, et al. Rotating machinery fault diagnosis combination of method based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 227-233.
- [6] YUAN S F, CHU F L, HE Y Y. Multi-fault diagnosis for turbo-pump based on mesh support vector machines [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43 (4): 152-158.
- [7] DAI H Y, LIANG S H. The application of fault Tree analysis in diesel engine remote control system circuit fault diagnosis [J]. *Ship Ocean Engineer*, 2008, 37(2): 67-69.
- [8] CHEN G R, YAN P, LIU F, et al. Networked fault diagnosis expert system of hobbing machine [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(5): 62-71.
- [9] DENG J L, CHEN Y H, CHEN G R. Research on the fault diagnosis knowledge representation and application method based on ontology [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 305: 243-246.
- [10] 顾进广, 陈莘萌. 基于语义的 XML 信息集成技术 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [11] CHEN G R, YAN P, YI R Z, et al. Fault diagnosis method based on system-phenomenon-fault tree [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(3): 466-473.
- [12] BAADER F, CALVANESE D, MCGUINNESS D, et al. The description logic handbook: theory, implementation and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [13] SINTEK M, DECKER S. TRIPLE: a query, inference and transformation language for the semantic Web [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, 2342: 364-378.
- [14] HEYMANS S, KORF R, ERDMANN M, et al. F-logic #: loosely coupling F-Logic rules and ontologies [C] // *Proceedings of 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, Aug. 31-Sept. 3, 2010, Toronto, ON, Canada. [S. l.]: IEEE Press, 2010, 1: 248-255.

(编辑 张 苹)