

# 基于案例与规则推理的故障诊断专家系统

江志农, 王 慧, 魏中青

(北京化工大学诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

**摘 要:** 设计并实现基于案例的推理(CBR)与基于规则的推理(RBR)的故障旋转机械诊断专家系统。采用 CBR 与 RBR 串行方式进行推理, 优先通过案例匹配方式寻求诊断结果, 在不适用情况下转入通用性规则推理, 并将诊断结果反馈给知识库进行优化。应用结果表明, 该系统诊断结果与实际相符合, 且诊断速度快、针对性强。

**关键词:** 旋转机械故障诊断; 基于案例的推理; 基于规则的推理

## Faults Diagnosis Expert System Based on Case Reasoning and Rule Reasoning

JIANG Zhi-nong, WANG Hui, WEI Zhong-qing

(Diagnosis and Self-recovery Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**【Abstract】** This paper designs and realizes a rotating machine faults diagnosis expert system based on Case Based Reasoning(CBR) and Rule Based Reasoning(RBR). It goes on reasoning by combining CBR and RBR serial manner. CBR is a priority to search diagnosis result by matching cases. It turns to the general RBR to get the result when failed, and gives feedback to the repository to optimize it. Application results show that the Diagnosis results of this system conforms with situation, and it is faster and has more pertinence.

**【Key words】** rotating machine faults diagnosis; Case Based Reasoning(CBR); Rule Based Reasoning(RBR)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.01.082

目前, 工程实践中运用的专家系统, 如基于案例的推理(Case Based Reasoning, CBR)与基于规则的推理(Rule Based Reasoning, RBR)各自发挥了不同优势, 有一些学者将两者结合起来用于实践<sup>[1]</sup>, 也取得了较好的效果。本文针对旋转机械故障专家系统, 探讨 CBR 与 RBR 相结合的推理方式。

### 1 概述

本文采用 CBR 与 RBR 串行的方式进行推理, 由于案例的特殊性, 因此属性特征值也较有限, 若能进行检索匹配可很快地得出诊断结论, 提高推理效率, 而当没有匹配的案例时, 采取具有通用性的规则推理, 并将经证实准确性的规则推理结论作为该案例的诊断结果, 成为新案例添加到案例知识库中, 同时向规则知识库提供反馈, 记录规则诊断的正误, 为规则库的修改与维护提供参考, 串行推理流程见图 1。

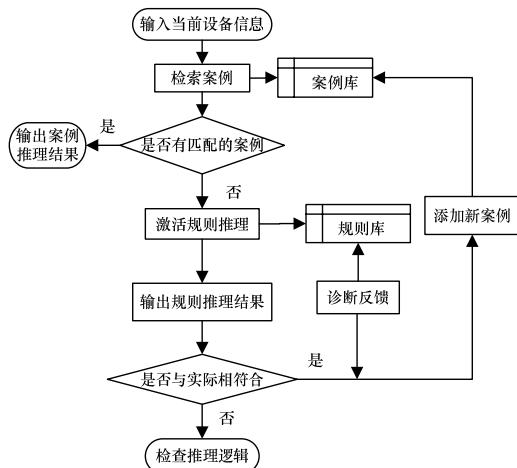


图 1 CBR 与 RBR 串行推理流程

### 2 基于 CBR 的设计

基于 CBR 的故障诊断专家系统设计分为: 输入模块, 推理模块及管理维护模块。CBR 流程如图 2 所示。

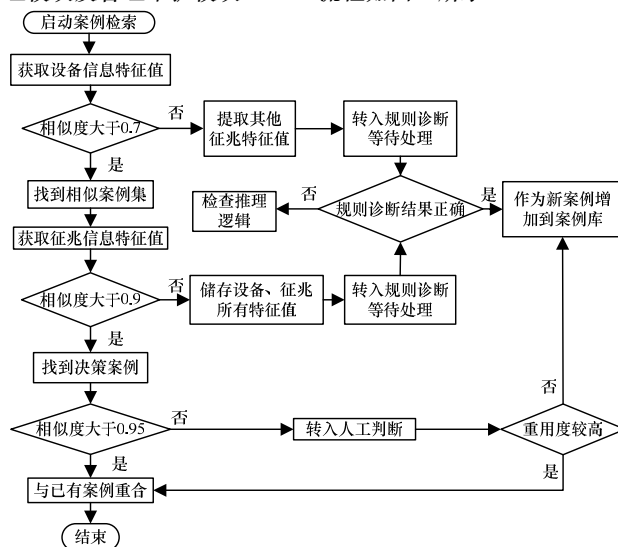


图 2 CBR 流程

#### 2.1 输入模块

案例的组织采取结构化储存方式, 其组织形式决定了案

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(2007AA04Z433); 国家自然科学基金资助重点项目(50635010)

**作者简介:** 江志农(1967—), 男, 教授、博士, 主研方向: 设备故障诊断, 数字信号处理; 王 慧, 助教、硕士研究生; 魏中青, 助教、博士研究生

收稿日期: 2010-05-27

E-mail: sunshinehui@126.com



如表 4 所示。

表 4 ID 的含义

模块	A	B	C	D
任务	T 表示任务	诊断大类英文缩写	人机(M)/自动(A)	-
属性	P 表示属性	属性内容英文缩写	属性类型(枚举等)	-
事实	S 表示征兆	诊断大类英文缩写	事实内容英文缩写	如需要可添加数字
规则	R 表示规则	诊断大类英文缩写	一次诊断英文缩写	规则内容英文缩写
故障	F 表示故障	诊断大类英文缩写	故障大类英文缩写	在故障大类中编号

其中,涉及英文缩写的部分,一般为 2 个单词组成,每个单词的首字母大写,每个单词不超过 4 个时使用全拼,超过 4 个取前 3 个字母作为缩写,也可为一个不超过 8 个字母的单词。

### 实例

(1)T-CC-M:表示任务,离心压缩机,人机对话诊断。

(2)P-SealType-E:表示属性,密封形式,枚举型(E 为枚举, B 为布尔, I 为整型, F 为浮点)。

(3)S-CC-SealType:表示事实,离心压缩机,密封类型。

(4)R-CC-BF-AxiVib:表示规则,离心压缩机,精确同频,轴向振动。

(5)F-CC-BF-1:表示故障,离心压缩机,精确同频,编号为 1(质量偏心)。

### 3.2 推理模块

推理模块包括初步诊断、一次诊断与二次诊断<sup>[4]</sup>。其中,初步诊断用于根据所选机械类型、部件、参数排除一部分故障,并对规则加以限定;一次诊断用于对故障大类进行区分;二次诊断用于进一步区分相似故障。需注意的是,故障诊断是建立在传感器获取信号的基础上,因此首先必须排除传感器故障,如采用免疫网与相关性识别技术<sup>[5]</sup>等,在此假设传感器故障已排除。

每种故障都有自己的振动特征,根据的多年工程经验,将旋转机械常见的 30 多种故障的特征总结成表<sup>[6]</sup>,作为规则的基础,再归纳出一次诊断的决策因子,分别为振动主导频率、进动方向、轴心轨迹形状和其他频率。对每个诊断决策因子又分别定义几个值作为诊断的规则,如主导频率决策因子下有精确同频、精确倍频、精确分频等 11 个值。

一次诊断基本能够将故障范围限定在 4 个以内,以精确倍频为例,如图 4 所示。

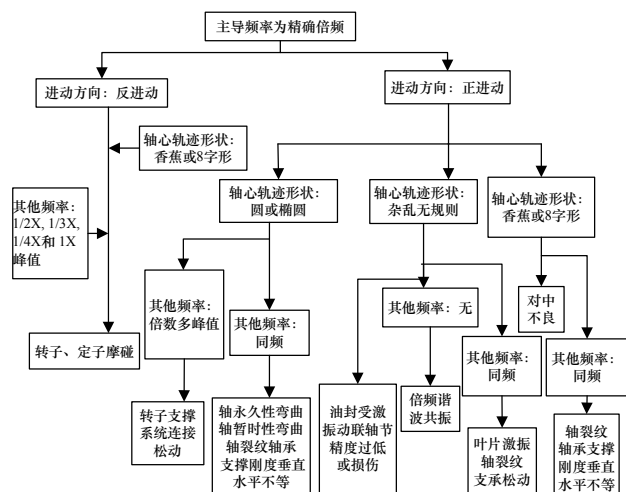


图 4 精确倍频的一次诊断逻辑图

二次诊断可用于半自动诊断,其决策因子更有针对性,主要是为了区分相似故障,选取相对灵活,受传感器、采集条件的约束也相对较小。对于以上例子,一次诊断若做出如下选择:主导频率(精确倍频)→进动方向(正进动)→轴心轨迹形状(圆或椭圆)→其他频率(同频),诊断结果为 4 种故障:轴永久性弯曲,轴暂时性弯曲,轴裂纹,轴支撑刚度垂直水平不等。通过二次诊断决策因子:转速变化-振动变化情况,暖机-振动变化情况,负荷-振动变化情况,振动稳定性可将故障做进一步排除。如选择二次诊断决策因子值为振动不随负荷发生变化时,排除其他 3 种故障,得出诊断结论为轴永久性弯曲。

### 3.3 管理维护模块

管理维护模块包括规则库的编辑修改、浏览查询、生成拓扑图及评价功能。

编辑修改包括新规则的添加及现有规则的删除可在各输入模块中实现。与案例库管理维护模块类似,浏览查询功能可通过控制 ID 实现,同时给出相关联的选项。对于选定的规则,可通过点击生成拓扑图直观的查看推理过程。另外,应提供规则的评价功能,每调用一次规则诊断,用户可根据实际情况对诊断结果进行评价,如非常准确、较准确、一般、不准确、非常不准确,分别赋予一定的分数 1.00、0.75、0.50、0.25、0.00,并反馈给规则评价系统,为规则库的维护与修改提供参考,对累积评价最低的规则进行重点关注。

### 4 实际应用

旋转机械故障诊断专家系统既可作为单独的软件使用,也可根据需要将其嵌入到在线诊断系统平台中,对现场实际机组进行诊断。如北京博华信智科技发展有限公司开发的实时监测与诊断平台嵌入了专家系统功能模块,在实际应用中取得了较理想的结果。图 5 在未找到案例集的情况下启动规则推理诊断,得到自动诊断结论。

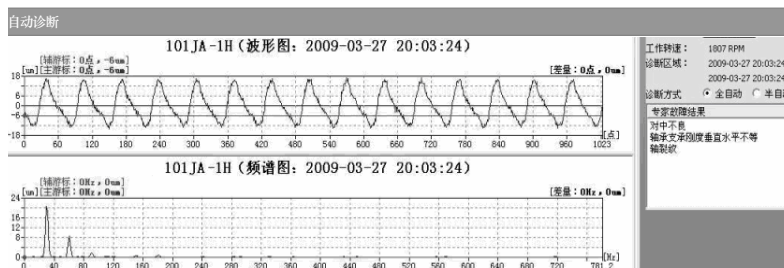


图 5 自动诊断界面

系统内部算法判断,主导频率为 1 倍频,且小于通频值 95%,常伴频率为 2 倍频且轴心轨迹形状为香蕉或 8 字形,得到 3 种故障,对中不良,轴承支撑刚度垂直水平不等,轴裂纹。选择半自动进行人机对话进行更精确地诊断,见图 6。

图 6 人机对话界面

人机对话选择振动稳定(排除轴裂纹、轴承支撑刚度垂直水平不等),振动与暖机时间无关,存在轴向振动(排除轴承支撑刚度垂直水平不等)。在人机对话后,专家诊断结果栏仅

(下转第 243 页)

和单元操作关系集合  $r_i$  定义:

$$B_i = \{u_i, r_i\} \quad (4)$$

其中,  $u_i = \{u_{ij} | j=1, 2, \dots, N_{ui}\}$ ,  $N_{ui}$  为实例  $C_i$  中的单元操作数目;  
 $r_i = \{r_{ij} | j=1, 2, \dots, N_{ri}\}$ ,  $N_{ri}$  为实例  $C_i$  中的单元操作关系的数目。

单元操作  $u_{ij}$  定义为单元操作名称  $\delta_{ij}$ 、输入零件列表  $UI_{ij}$ 、输出零件列表  $UO_{ij}$ 、单元加工时间  $t_{ij}$ 、机床  $MT_{ij}$ 、单元操作的工艺程序  $NS_{ij}$  和单元操作的虚拟模型  $VS_{ij}$  等, 如式(5)所示:

$$u_{ij} = \{\delta_{ij}, UI_{ij}, UO_{ij}, t_{ij}, MT_{ij}, NS_{ij}, VS_{ij}\} \quad (5)$$

其中, 机床  $MT_{ij}$  可以是主要加工设备或者辅助加工设备。

因此, 装配过程设计函数可以定义为  $M=d(F)$ , 表示如何由功能需求  $F$  获取设计解  $M$ 。

### 3.4 实例获取

CBR 系统的成功取决于从实例库获取实例的能力。装配过程设计的相似性主要受输入零件和操作类型的影响。因此, 定义装配过程设计的相似性系数  $\sigma_{ij}$  为零件相似性系数  $\sigma_{pij}$  和操作相似性系数  $\sigma_{wij}$  的乘积, 如式(6)所示:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{pij} \cdot \sigma_{wij} \quad (6)$$

其中, 零件相似性系数主要考虑两实例输入零件列表中相同零件类型的数目及其权重, 如式(7)所示:

$$\sigma_{pij} = \frac{(I_i \cap I_j) + \xi(I_i \cap I_j)^T}{I_i \cup I_j} \quad (7)$$

其中,  $\xi$  为相同零件类型的权重系数;  $(I_i \cap I_j)^T$  为输入零件列表  $I_i$  和  $I_j$  中相同类型零件的数目。

操作相似性系数主要考虑两实例的单元操作属于相同类型的数目及其权重, 如式(8)所示:

$$\sigma_{wij} = s(\alpha_i, \alpha_j) \frac{u_i \cap u_j}{u_i \cup u_j} \quad (8)$$

其中,  $s(\alpha_i, \alpha_j)$  为相同操作类型的权重系数。

### 3.5 实例优化

进行实例检索时, 搜索到的可行相似实例往往不止一个, 因此, 需要对多个可行实例进行评估, 以选择最优实例。本文采用基于层次分析法的模糊评价原理对多个相似实例进行评价, 通过选择适当的模糊合成运算, 得出最优策略, 从而筛选出最接近的装配过程设计实例并提交。基于模糊评价方

法的模糊综合评价决策的建模求解过程见文献[4]。

### 3.6 实例评估

本文把虚拟模型输入到 Technomatix 公司的商业虚拟制造建模软件 eM-Workplace 中实现实例评估。评估的基本原理是在满足产品的形状和功能需求约束的条件下最小化装配成本, 评价和验证装配过程可行性和过程性能, 选择最优的过程设计并更新机床数据库。

### 4 实例运行

基于上述方法, 使用 Visual C++ 6.0 和 Microsoft SQL 7.0 开发了装配过程设计的原型系统, 所开发的系统已经在具体实例问题中得到应用。利用输入零件序列和过程名字从数据库获取过程设计的功能需求, 应用基于实例的推理技术获取相似实例。

### 5 结束语

本文应用 CBR 技术, 研究装配过程设计实例的描述方法和实例获取算法, 以输入零件类型和操作类型为主要索引要素, 计算实例相似性系数, 最后开发了原型系统并用实例证明了该方法的有效性。本文的研究成果可以提高装配过程设计的效率, 并促进装配线配置的自动化, 提高装配线设计的成功率。

### 参考文献

- [1] 丁 博, 孙立铸. 基于语义特征造型的虚拟装配[J]. 计算机工程, 2009, 35(12): 8-10.
- [2] Seo Y, Sheen D, Kim T. Block Assembly Planning in Shipbuilding Using Case-Based Reasoning[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(1): 245-253.
- [3] Zha X F, Du H J, Qiu J H. Knowledge-based Approach and System for Assembly Oriented Design, Part I: The Approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 14(1): 61-75.
- [4] 孟秀丽, 韩向东, 曹 杰. 机床协同设计中基于实例的冲突消解[J]. 中国制造业信息化, 2005, 34(10): 109-112.

编辑 张 帆

(上接第 240 页)

有对中不良故障。诊断结果与实际相符合, 证明该推理逻辑切实可行。

### 5 结束语

本文提出基于案例与规则推理的旋转机械故障诊断专家系统的设计与实现, 其检索速度快、针对性强, 能够诊断不熟悉故障问题的同时又不失一般性, 通过反馈与自学习交互性机制, 使得案例库和规则库不断完善, 推理更加严密, 诊断结果更可靠。今后将优化案例的检索算法和耦合故障的规则判断。

### 参考文献

- [1] 胡中豫, 申 涛, 李高峰, 等. 基于案例与规则推理的干扰查找专家系统[J]. 计算机工程, 2009, 35(18): 185-190.

- [2] 李小全, 刘安心, 程 懿. 基于案例推理的工程机械故障诊断智能化研究[J]. 电力技术与自动化, 2005, 35(1): 115-118.
- [3] 沈庆根, 郑水英. 设备故障诊断[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] 马 波, 高金吉, 江志农, 等. 旋转机械故障诊断专家系统[J]. 机电工程技术, 2005, 34(12): 30-32.
- [5] 谷吉海, 金向阳. 基于免疫网与相关性识别的传感器故障诊断[J]. 计算机工程, 2010, 36(1): 203-205.
- [6] 高金吉. 旋转机械故障原因及识别特征研究[J]. 振动、测试与诊断, 1995, 15(3): 1-8.

编辑 陆燕菲