基于 CBR 的数控设备故障诊断系统知识表示

陈友东 韩美华

（北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191） （北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院，北京 100191）

叶进军

（武汉科技大学 计算机学院，武汉 430065）

摘 要：随着数控设备越来越复杂，对设备故障诊断与维修提出了更高的要求，采用专家系统的方式建立故障诊断系统以实现数控设备的快速诊断和维修. 针对 CBR（Case-Based Reasoning）系统自身的增量学习模式使系统的实例库逐渐增大，系统效能大大降低的缺点. 根据数控系统结构的特点采用分层检索的方法，依据该检索方法采用框架型的知识表示方式，提高了大实例库的检索效率. 将该方法应用于数控设备的故障诊断系统中，提高了故障诊断的诊断效率.

关 键 词：数控系统；故障诊断；实例推理；知识表示

中图分类号：TP 182

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2011)12-1557-05

Knowledge representation for CNC equipment fault diagnosis system based on CBR

Chen Youdong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Han Meihua

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Ye Jinjun

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: As the computer number control (CNC) become more and more complexity, there is a great demand for fault diagnosis and maintenance system to improve the efficiency of failure diagnostics and maintenance. The case-based reasoning (CBR) has been broadly applied in fault diagnosis. However the case base is increasingly large with the incremental learning which results in low solution retrieval efficiency and weak performance. To improve the accuracy of retrieval cases and reduce retrieval time, a method that searches the cases with stratified indexing and feature retrieval was presented in terms of the structure of CNC, and a frame of knowledge representation was detailed by this method. A prototype system was built with the search method and knowledge representation. The experimental results show that this method is effective.

Key words: computer number control; fault diagnosis; case-based reasoning; knowledge representation

随着制造业的蓬勃发展，数控设备得到广泛的应用，相应的对数控设备的故障诊断与维修提出了更高的要求. 建立故障诊断专家系统是快速诊断故障、维修设备的一种行之有效的方法. 影响

收稿日期：2010-07-23；**网络出版时间**：2011-12-21 09:56；**DOI**：CNKI:11-2625/V.20111221.0956.001

网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0956.001.html

基金项目：国家科技重大专项资助项目(2009ZX04009-014-02,2009ZX04013)

作者简介：陈友东(1973－)，男，安徽庐江人，讲师，chenyd@buaa.edu.cn.

故障诊断专家系统效能发挥的关键因素就是系统知识库的完备程度和推理方式的快速有效性. 常用的基于规则推理(RBR,Rule-Based Reasoning)的故障诊断专家系统,存在知识获取困难,系统学习能力差的问题. 数控系统应用过程中积累了丰富的诊断实例,这些诊断实例几乎涵盖了数控系统的所有常见故障类型,如果充分发掘这些诊断实例的价值,应用到故障诊断专家系统中,将明显提高专家系统的效能. 基于实例推理(CBR,Case-Based Reasoning)就是根据以往的诊断案例进行匹配修订解决遇到的新的故障,作为规则推理的有效补充既解决了知识获取的问题又提供了一种系统学习的方法,但是实例推理的增量学习模式使实例库的容量迅速增加,降低了系统的效率[1-3].

本文从基于 CBR 的推理方式出发,结合数控系统故障特点和诊断需求提出了依据数控系统结构模型分层检索的方法,并根据检索方法确定了框架型的知识表示方式,解决了大实例库检索效率低下的问题.

1 实例组织索引方式

基于实例的推理方法是将过去的对典型问题的求解实例,以一定的组织方式存储起来组成实例库,当用户遇到新的问题时,按照特定的方式输入新问题的特征值组成求解案例,再根据实例检索机制从实例库中寻找与待求案例相似的实例解集,根据一定的算法找出最相似的实例,再根据实例与求解案例的相似程度对已有实例的解决办法进行修订而得到问题的解,把案例的解以新的实例的形式存储到实例库中,如图 1 所示. 实例推理的关键技术就是实例的索引和检索,是实例推理系统效率发挥的关键部分.

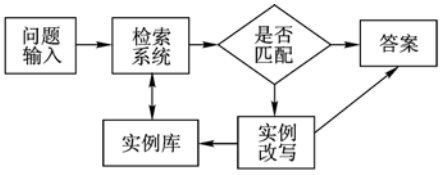

图 1 实例推理系统的基本构成

实例索引,就是以一定的方式组织实例库,并建立实例的索引条件,从而方便实例的检索. 实例检索是采用相应的检索策略,利用索引从实例库中检索出满足推理需求的实例. 常用实例组织索引方式有平板模式、分层模式. 对于大型系统常用分层模式组织实例库以提高系统效率[4-6]. 分层模式的实例组织,一般方法是根据实例间的相似性进行分类,逐级归纳抽象形成层次结构,缺点是实例的添加修订影响分类的结果,实例库的维护变得困难.

数控系统的故障特点是故障种类繁多、表观简单(图 2),大部分都是简单的报警、急停、死机、参数超差等现象,但是实际参数量却很多. 单纯的表观现象不能够充分区分故障实例的确切原因,诊断系统必须调用数控系统的实时监控数据,以获得确定故障原因更多的特征参数. 以西门子 810/820 系统为例[7],系统监控的数据有:①读入②格式③微处理器④串行接口⑤电压⑥温度⑦释放信号⑧位置反馈回路及位置传感器⑨NC(Numerical Control)与 PLC(Programmable Logic Control)之间的数据传送⑩加工的外形轮廓⑪系统程序存储⑫机床数据存储器⑬用户程序存储器⑭主轴功能;每一类又有很多的检测通道,提供了大量的故障特征参数. 这些参数同时加入到故障索引中去,会严重加剧系统的计算量,影响系统的速度,而且一些大量与本实例无关的特征量,客观上提高了实例匹配的错误率.

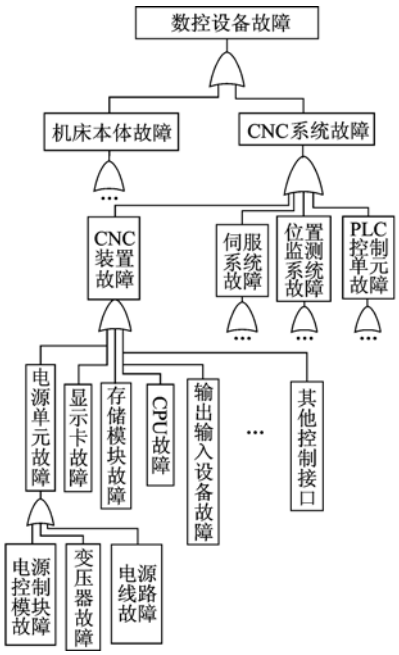

图 2 数控系统的故障结构模型图

根据数控系统故障的特点,采取按照数控系统的结构模型分层组织实例的方法,克服了实例库维护的困难. 根据图 2 数控系统的故障结构模型图,实例的分层组织如图 3 所示. 实例库建立起来后,根据故障实例结构化组织的特点,把结构图中每个节点看作一种类型的实例,每个节点所包含的子类型和实例都有一致的索引条件. 从大量的故障实例中提取在本层次内能够相互区分的关键特征量用于本层次的索引,再逐层归纳上一级

的关键特征,从而构建出实例索引的分层多级索引机制. 分层索引机制减轻了特征量权重分配的难度,减少了实例匹配的计算量,降低了实例匹配计算的错误率.

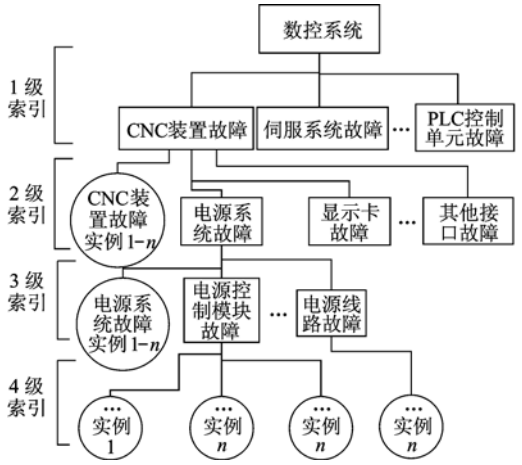

图 3　实例的组织与索引

2　实例检索

2.1　检索策略

实例的检索即搜索匹配实例,目标是以尽可能快的速度从实例库中找出与待求解问题相同或最相似的实例. 根据实例的组织索引形式,采用近邻法和归纳索引法相结合的方式进行实例的检索,总体上采用归纳索引法逐级检索,而在每个层次内部检索的方式是近邻法. 推理时根据索引特征的要求按照图 3 的结构由上往下地逐级检索,每一级都要设定一定的匹配度返回阈值,选取最相似的类型逐级匹配,愈往下搜索相似程度越高,逐层缩小范围,提高匹配程度,最后找到最相似的案例. 如果到最底层找不到符合要求的实例,再逐级返回上层阈值内次匹配的类型向下匹配,直到找到符合要求的案例,每一层次搜索设定相应的阈值,阈值内没有匹配实例则匹配失败,放入待解决问题库,解决后添加实例.

2.2　实例检索的量化

2.2.1　相似度的计算

实例的匹配是计算实例的相似度,用 K-近邻法计算实例间的距离作为相似度的指标. K-近邻法就是将实例间的距离小于一定阈值的实例返回给用户. 设故障实例库的集合 $c=\{c_1,c_2,\cdots,c_i,\cdots,c_m\}$,第 i 个实例的索引特征集 $\{c_i^1,c_i^2,\cdots,c_i^j,\cdots,c_i^n\}$,实例 c_I 和实例库中实例 c_i 的距离为

$$d(c_i,c_I)=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}w_j\left(\frac{c_i^j-c_I^j}{2}\right)^2}$$

相似度定义为

$$s(c_i,c_I)=1-d(c_i,c_I)$$

其中,n 为实例的索引特征量的个数;$w_j\in[0,1]$为第 j 个特征量的权重,$\sum_j^n w_j=1$.

2.2.2　特征量的归一化处理

根据数控机床故障特征的具体情况,大部分特征值都是以离散型的数据或者是文字描述,或者是不同量纲的数据,在进行距离计算时,需要把离散型的数据、特征描述、不同量纲的参数进行归一化处理[8],转化为[-1,1]的实数,例如某指示灯的亮灭、某个报警号的出现与否转化为 1, -1. 压力、温度、距离等连续量采用公式 $c_i^j=f(M_j)=\frac{1-e^{-M_j}}{1+e^{M_j}}$,转化为[-1,1]之间的实数,其中 $M_j=\frac{v_j-v_j'}{v_j'}$,$v_j$ 为第 j 个特征量的值,v_j'为第 j 个特征量的标准值或者平均值.

2.2.3　特征量权重 w 的确定

影响实例检索匹配效果理想程度的关键因素是索引特征量的选择和权重的分配,特征量权值 w 在很大程度上影响了相似度的计算,用层次分析法进行权重计算. 层次分析法部分依靠专家经验的方法,是一种定性与定量分析相结合的多因素决策分析方法. 一般步骤为:①确定实例所在层次;②构造成对比较矩阵;③检验成对比较矩阵的一致性,必要时对成对比较矩阵进行修改;④在符合一致性检验的前提下,计算与成对比较矩阵最大特征值相对应的特征向量,确定每个因素对上一层次该因素的权重. 比较第 i 个元素与第 j 个元素相对上一层某个因素的重要性时,使用数量化的相对权重 a_{ij}来描述. a_{ij}的取值可参考 Satty 的提议,按下述标度进行赋值(见表 1).

表 1　Satty 给出的相对权重

标度	含　义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4	
6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij},那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$.

特征量的权重确定后,根据权重的大小在每一级选择权重较大的 n 个特征量,然后再重新确定每个特征量的权重. 例如:某个实例 c 有 5 个特征量,各个特征量的相对重要性如矩阵 $\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=\begin{array}{c}\begin{matrix}c^1 & c^2 & c^3 & c^4 & c^5\end{matrix}\\ \begin{pmatrix}1 & 2 & 7 & 5 & 5\\ \frac{1}{2} & 1 & 4 & 3 & 3\\ \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3}\\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 2 & 1 & 1\\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 1\end{pmatrix}\end{array}\begin{matrix}c^1\\ c^2\\ c^3\\ c^4\\ c^5\end{matrix}$$

一致性检验合格后,计算的最大特征值对应特征向量,标准化后的 $\boldsymbol{U}=(0.457,0.263,0.051,0.103,0.126)^{\mathrm{T}}$,即特征量 c^1,c^2,c^3,c^4,c^5 的权重分别是:0.457,0.263,0.051,0.103,0.126. 约减特征量时,把权重最小的 c^3(对实例的区分程度最小)删除,剩余特征量再重新计算权重:

$$\boldsymbol{A}'=\begin{array}{c}\begin{matrix}c^1 & c^2 & c^4 & c^5\end{matrix}\\ \begin{pmatrix}1 & 2 & 5 & 5\\ \frac{1}{2} & 1 & 3 & 3\\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1\\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1\end{pmatrix}\end{array}\begin{matrix}c^1\\ c^2\\ c^4\\ c^5\end{matrix}$$

一致性检验后,重新计算矩阵最大特征值特征向量,即剩余特征量权重分别为 $w_1=0.5185$, $w_2=0.2839$, $w_4=0.0989$, $w_5=0.0989$.

3 实例的表示及系统实现

基于以上考虑,数控系统故障诊断专家系统的实例表示必须具备以下内容:①实例编码:每个实例有唯一的编码和地址;②实例之间的关系和所属层次:存储实例所属类型的位置关系;③各层的特征索引:属于不同层次的实例有各自不同的特征索引;④故障描述(现象,原因排除方法,效果评价).

规则、语义网络等知识表示方法难以完备地描述这些内容,而框架知识表示是一种结构化的知识表示形式,适合表示固定的典型的概念、事件和行为. 框架知识表示能以相同的数据结构同时表现描述型和过程型知识,模拟人类分层存储结构,直观自然易于理解. 所以本文采用框架知识表示方式,用面向对象的语言实现. 图 3 中每一个矩形表示成一种知识框架,圆形表示一类实例集合. 当然在数控系统的研制和使用过程中,还形成了大量的数控系统基本组成原理推导出的深层知识,知识之间存在明确的逻辑和因果关系,可以用故障树的形式表示知识结构,根据故障树可以把这些深层知识转化表示成规则知识,每一个故障树存为一个规则集,集内做比较严密的基于规则的推理来完成故障诊断. 为了增强系统的实用性,在实例框架中加入规则集触发条件. 把每个故障树形成的规则集的触发条件存为实例框架的一个成员. 所以故障实例的知识框架设计为图 4 所示,实例类的表示如下:

```
class child_example :public example
{
  public:
    child_example();
    void index_in();          // 索引读入
    void datachang();         // 索引关键词的
                              //归一化处理
  private:
    string exampleNo;         // 编号
    string parentFrame;       // 父框架
    string childFrame;        // 子框架
    string index;             // 索引
    string fault_time;        // 故障时间
    string working_state;     // 工作状态
    string phenomenon;        // 故障现象
    string fault_cause;       // 故障原因
    string solutions;         // 解决方法
    string evaluation;        // 效果评价
}
```

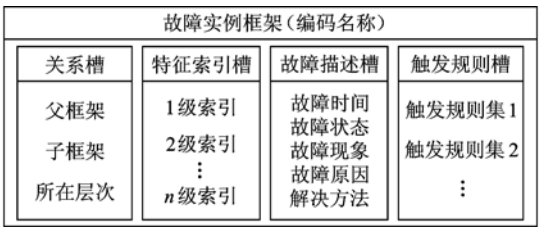

图 4 故障实例知识框架

以采用西门子数控系统 840D 和伺服系统 611D 的国产数控龙门铣为例,3 个有关伺服驱动的故障如表 2 所示[7]. 这几个故障都是给进轴主轴无动作,根据以上故障现象分析,25201 报警和 3xxxxx 报警足以确定故障部位在伺服驱动模块,可以提炼为 1 级索引的特征量,再引入区分 CNC 装置、PLC、位置检测装置的故障特征,便可作为伺服框架的 1 级索引. 而报警号 300504,300508,300607,300608,700010 和重启故障消失等,可作为进一步确定伺服模块内具体位置的故障特征. 故障 2xx1 数据结构如表 3 所示. 2 级索引的 4 个故障特征量的相对权重矩阵如下:

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & 3\\ 2 & 1 & \frac{1}{3} & 3\\ 5 & 3 & 1 & 5\\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1\end{pmatrix}$$

计算最大特征值对应的特征向量标准化后 $\boldsymbol{U}=(0.1290,0.2007,0.6010,0.0693)^{\mathrm{T}}$. 根据数控设备智能故障诊断系统的要求,采用一个跨平台的 C ++图形用户界面应用程序框架 Qt(4.3.4)和一款轻型的数据库 SQLITE(3.6.21)进行开发实现. 图 5 即为本诊断系统的实例诊断部分的截图. 经验证该实例表示方式能够快速有效地提高系统的诊断效率,满足数控系统故障诊断的需要.

表 2　故障列表

故障编号	故障时间	工作状态	故障现象
2xx1	2008-10-11	全闭环控制	X,Y,Z 轴为全闭环控制,移动 Y 轴时出现报警 25201,300504,300508,NC 复位后或重启后故障消失,Y 轴速度大于100 mm/min 故障复现.
2xx2	2009-01-12	全闭环控制	开动工作台 X 轴时,报警现象 25201,300608,700010.
2xx3	2009-06-10	全闭环控制	通电移动 Z 轴时,报警 25201,300607,700010.

表 3　故障实例表示

编号	关系槽	特 征索 引	故 障描 述	触发规则
2xx1	伺服驱动故障(20000)	1 级索引:①是否正常启动;②是否 NC 报警;③是否人机界面报警;④611D报警;⑤是否 PLC 报警.	2008-10-11,全闭环控制,移动 Y 轴时出现报警 25201,300504,300508,NC 复位后或重启后故障消失,Y 轴速度大于 100 mm/min 复现.	
	0	2 级索引:①25201(w_1 =0.1290);②300504(w_2 = 0.2007);③300508(w_3 =0.6010);④NC 复位故障消失(w_4 =0.0693).	首先将备用电动机反馈电缆和 Y 轴电机编码器反馈电缆调换故障依旧,再进行控制模块交换,故障依旧. 确定原因:Y 轴编码器故障.	
	2		更换编码器故障消失	



图 5　实例诊断结果

4　结 束 语

本文对基于 CBR 的系统检索技术、知识表示方式进行了研究,实例库采用分层检索的框架型表示,明显提高了实例检索的效率,将其应用于数控设备的故障诊断中,解决了传统基于规则的专家系统的知识获取的瓶颈. 知识框架中触发规则没有深入涉及,可以结合产生式规则推理不断完善诊断系统的功能.

参考文献(References)

[1] de Mántaras R L, Ramón McSherry D, Bridge D. Reuse, revision and retention in case-based reasoning [J]. Knowledge Engineering Review, 2005, 20(3): 215 – 240

[2] Tung Y H, Tseng S S, Weng J F, et al. A rule-based CBR approach for expert finding and problem diagnosis [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3): 2427 – 2438

[3] Castro J L, Navarro M, Sánchez J M, et al. Loss and gain functions for CBR retrieval [J]. Information Sciences, 2009, 179(11): 1738-1750

[4] 王玉,邢渊,朱莉萍等. 支持重用的层次智能 CBR 检索模型[J]. 机械科学与技术,2000,19(增刊):164 – 169
Wang Yu, Xing Yuan, Zhu Liping, et al. A hierarchical intelligent CBR retrieval model supporting reuse[J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19 (Supplement): 164 – 169 (in Chinese)

[5] 李宏娟. 基于规则和案例的压缩机集成故障诊断专家系统研究[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2008
Li Hongjuan. Research on fault diagnosis expert system of compressor based on RBR and CBR[D]. Changsha: College of Mechanical and Automotive engineering, Hunan University, 2008 (in Chinese)

[6] Watson I, Perera S. A hierarchical case representation using context guided retrieval [J]. Knowledge-Based Systems, 1998, 11(5): 285 – 292

[7] 沈兵,厉承兆. 数控系统故障诊断与维修手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009:258 – 260,316 – 318
Shen Bing, Li Chengzhao. Numerical control system fault diagnosis and maintenance manual [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2009: 258 – 260, 316 – 318 (in Chinese)

[8] 郑佩. 基于案例推理的故障诊断技术研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2008
Zheng Pei. Research on fault diagnosis based on CBR[D]. Wuhan: School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2008 (in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)