基于案例推理方法在飞机故障诊断中的应用

李 青 史雅琴 周 扬

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：基于案例推理(CBR，Case-Based Reasoning)方法是一种基于经验知识进行推理的求解方法，适合于经验丰富的领域.针对飞机售后服务过程中积累的大量故障诊断和维修经验，将CBR方法应用于飞机故障诊断和维修决策支持.从飞机维修的需求出发，分析了CBR飞机故障诊断方法的基本过程；讨论了飞机故障案例库的构建、案例表达、案例检索、匹配、案例修改和维护等关键技术；重点研究了故障案例的知识表达，应用字符型字段匹配和K-近邻方法(KNN，K-Nearest Neighbor)相结合的检索模型实现了案例检索和匹配；提出了辅助飞机故障诊断系统的结构，开发了原型系统并给出应用实例.

关 键 词：基于案例的推理；飞机维修；故障诊断；K-近邻策略

中图分类号：V 267

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)05-0622-05

CBR methodology application in fault diagnosis of aircraft

Li Qing Shi Yaqin Zhou Yang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: CBR(case-based reasoning) is a problem solving technique of using previous experience and cases to find a solution to new problems, which is suitable for those areas of experience-rich. CBR methodology was applied to the fault diagnosis and maintenance decision support of aircraft due to the abundant repair experience accumulated in after-service of aircraft. According to the requirement of aircraft maintenance, the research into the method of aircraft fault diagnosis using CBR was conducted and key techniques, including the case base development, case representation, case retrieval, adaptation and retain, were investigated. The case representation was discussed in detail, and a case retrieval model of combining the character field match with the KNN(K-nearest neighbor) method was established and applied. A framework of aircraft fault diagnosis system was proposed. The prototype system was developed and an application example was given.

Key words: case-based reasoning; aircraft maintenance; fault diagnosis; KNN strategy

现代军用飞机是集机械、电子、计算机及自动控制等多学科先进技术为一体的高精尖产品，结构和技术状态复杂，部件之间相互关联、紧密耦合，导致了故障类型和故障成因复杂多变，故障诊断分析困难；因此，如何为维修人员的故障诊断提供技术支持、提高飞机的完好率和安全系数是目前飞机综合保障的一项重要研究内容.

基于案例推理(CBR，Case-Based Reasoning)是一种基于经验知识的推理方法，适用于没有完整、精确的数学模型，而有丰富经验和大量历史记录的领域，如设计、诊断等[1-2]，尤其对于复杂的、非结构化的决策问题具有显著优势[3].飞机等大型装备的结构复杂，许多故障现象难以用结构化数据进行表达[1]，使规则的提炼变得相当困难，采用基于规则推理(RBR，Rule-Based Reasoning)的故障诊断方法难度较大；由于飞机制造公司在售后服务过程中记录了大量排故案例，积累了丰富的维修经验，因此，将CBR方法应用于飞机故障

收稿日期：2006-12-25

基金项目：数字化设计与制造北京市重点实验室资助项目(JD100060516)

作者简介：李 青(1961—)，女，湖北黄梅人，副教授，liqing@buaa.edu.cn.

诊断和维护,可以避开规则难以提取、知识获取困难的瓶颈;同时,将历史记录中难以规则化的知识和经验隐含在案例中,以案例形式表达,直观、容易理解,能够反映故障的总体概貌,有利于现场人员参考.本文针对飞机售后服务过程中的故障诊断和维修,通过讨论故障案例库的构建、案例的检索匹配及案例的修改与维护等关键问题,逐步实现 CBR 的故障分析方法和诊断原型系统.

1　CBR 故障诊断基本过程

CBR 故障诊断方法核心思想是借鉴以前求解的经验来解决新的问题[2],为新的故障分析提供参考和依据.故障诊断基本过程如图 1 所示,包括案例表示、案例检索、案例匹配、添加新的案例等主要步骤,具体描述如下:

1) 案例表示.采用一定的知识表示方法描述当前故障的环境状态和具体内容,形成目标案例.

2) 案例检索与匹配.从案例库中检索出与当前案例在特征属性上相似、并对当前故障的诊断有启发和指导意义的案例,形成候选案例集;分别计算候选案例与当前案例的相似度,同时参考飞机结构信息、零部件特征等相关信息选择出最有参考价值的案例.

3) 案例调整与修改.通过运用专家经验知识和人为干预对检索得出的案例进行调整、修改,形成适合于当前故障的案例,得出诊断结论.

4) 案例添加.将新案例的诊断过程、评价结果添加到案例库中.

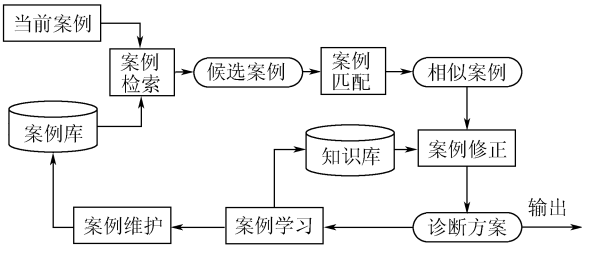


图 1　CBR 的故障诊断过程模型

2　CBR 飞机故障诊断方法

在飞机故障诊断过程中,故障常以个案的方式处理,一个故障案例就是一次故障现象完整的解决方案,案例是 CBR 系统的核心要素,丰富的案例是实现案例推理的基础和前提.因此,CBR 方法用于飞机故障诊断的效果很大程度上取决于案例库的规模和质量.

2.1　故障案例库的构建

2.1.1　故障案例的搜集和提取

本文涉及的飞机故障诊断系统是以飞机售后服务系统为支撑的,案例主要来源于服务过程中的排故和维修记录,通过对某型号飞机 3 年的故障维修记录进行收集、整理、知识提取,获取了典型飞机故障案例.收集、整理历史记录过程中,针对故障信息的分散和缺失,通过由飞机维修领域专家建立故障信息和维修信息的关联,增加飞机部件的结构信息、环境信息和状态信息等方法,对原始信息进行补充和提炼,提高案例的完整性和可靠性.

2.1.2　故障案例的表达

案例表示是案例推理的数据基础,案例的表达要遵循一定的规则,形成规范的结构.合理的案例表示方法有助于提高案例检索的精度和速度.一个案例是一个具体问题求解的完整表达,是对具体问题以及问题相关的环境、状态、解决方案的描述,是导致一定结果的一组属性集合.

故障案例的知识表示就是特征属性提取的过程,是对故障发生的具体情况尽可能详尽的描述,以便获得完整的故障信息.通过对该型号飞机故障情况的分析,确定飞机故障案例由 2 部分组成:故障描述和故障解决方案,具体内容如下[4]:①故障描述属性,包括故障机型、故障现象或代码、发生时间、发生位置等等;②解决方案属性,包括解决方案编号、相关描述、故障原因、故障排除方法、解释、参考经验.

通过以上的特征属性,可以针对获取的飞机典型故障记录建立故障案例库.以某个发动机为例,案例详细描述如图 2 所示,其中包括了案例的主要特征.

由于飞机故障案例各个特征属性的重要程度不同,在提取特征属性并逐个表达案例后,通过为各属性设置权重来表达不同属性对故障的影响程度.对于案例检索而言,重要的特征属性是故障现象或代码.

2.1.3　故障案例的索引和存储

案例库索引策略的合理与否直接影响到案例的检索效率,合理的索引结构可以缩小搜索范围,提高检索效率.根据飞机故障特点和售后服务过程中的维修经验以及专家建议,本文对飞机维修案例库采用以下 2 类索引结构.

1) 基本信息类:按照飞机的基本信息和故障信息(如机型、机号、使用部队编号、故障部件、故障类、发生地点等)建立索引.

2) 结构信息类:故障通常发生于飞机的某个部件或组件,因此可根据飞机的层次结构(如液压



图2 案例描述实例

系统、燃油系统等)建立索引.

本文采用关系数据库存储案例,利用关系数据库强大的数据管理功能,实现案例检索,案例添加、编辑、删除等操作.数据库结构由案例特征属性和相关辅助信息构成,一个记录对应一个案例,特征属性映射为数据库中的字段.

2.2 故障案例的检索与匹配

案例检索的目的就是从案例库中寻找一个或多个与当前问题“最相似”的案例.案例检索的效率与案例的索引结构和匹配算法密切相关,如何准确、快速地获得案例的解决方案是评价CBR系统的一个重要方面.

飞机故障案例的检索分初步检索、案例匹配2个阶段进行.初步检索是根据待求解故障的突出特征,如故障类型或故障部件等,从案例库中检索出与之相关的一类案例;案例匹配是在初步筛选的一类案例基础上,全面比较所筛选出的案例与目标案例的相似性.因此,设计合理的案例匹配方法是CBR技术的关键之一[5].

2.2.1 故障案例的检索

案例检索是从案例库中找出与待处理故障相近的一类案例作为候选案例.案例的相似具体表现为特征属性的相似,检索相似案例实质上是将2个案例的特征属性进行比较,如果对应的特征属性相互匹配度很高,则说明2个案例是相似的.因此,如何计算特征属性的匹配度成为解决问题的关键.由于案例的特征属性通常是文字性描述,在计算机系统中表现形式为字符串,鉴于维修记录中案例描述缺乏统一的规范,相同故障的描述很难完全一致,使案例匹配不可能依赖于2个字符串的完全匹配,例如“2号发动机的推力钢缆磨损断裂”与“右发推力钢索断裂”所描述的故障在语义上完全相同,但2个字符串的表达方式不完全一样,直接按字符串匹配处理无法得出二者相同的结论.因此按照中文字段匹配方法[6],需要对字符串先进行分词和替换处理,再通过将2个字符串所包含的实词进行比较来计算2个字符串的匹配度,实现方法分3个步骤,如图3所示.①分词处理,即首先将字符串分解为单个词,并去掉虚词,例如,A=“2号发动机的推力钢缆磨损断裂”,分词后为A=“2号发动机~推力钢缆~磨损~断裂”;②替换处理,用标准词典中的词条替换分词处理后的词条,如“2号发动机”用“右发”替换,“推力钢缆”用“推力钢索”替换,目的是使语义相同的词具有相同的表达,其中,标准词典是为了统一描述而建立的,包含了飞机专业术语和相对规范的表达形式;③字段匹配,即计算匹配度,匹配度定义为2个要进行匹配的字符串中相互匹配的单词个数除以2个字符串平均单词个数[4],即

$$\mathrm{sim}=2K/(N_A+N_B) \tag{1}$$

其中,N_A和N_B分别表示字符串A和B中的单词个数;K表示A和B中相互匹配的单词个数.

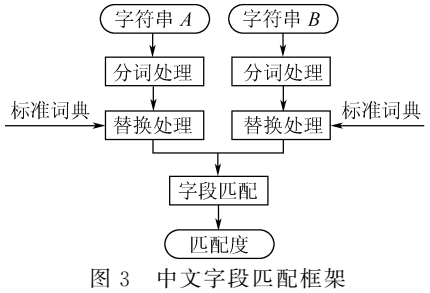


图3 中文字段匹配框架

如上所述,经过分词、替换处理后,A=“右发~推力钢索~磨损~断裂”,B=“右发~推力钢索~断裂”,则$N_A=4$,$N_B=3$,$K=3$,则按式(1)计算A与B的匹配度为0.86.按照这一匹配算法可以得到故障案例每个特征属性的匹配度,然

后采用目前应用最广泛的案例匹配算法——K-近邻方法(K-Nearest Neighbor)计算故障案例的匹配度.

2.2.2　故障案例的匹配

按照上一节的方法可以计算出任意 2 个案例每个特征属性的匹配度,对特征属性的匹配度进行加权计算可得到 2 个案例的相似度,应用 KNN 法计算相似性度函数为[4]

$$\mathrm{SIM}(s,d)=\sum_{i=1}^{n}\omega_i \mathrm{sim}(f_i^s,f_i^d) \qquad (2)$$

其中,ω_i 为案例第 i 个特征属性的权重;$\mathrm{sim}(f_i^s,f_i^d)$为目标案例 d 与候选案例 s 第 i 个特征属性之间的匹配度,即在 2.2.1 节中计算的字符匹配度.通常情况下,特征属性的权重首先人为设定,即由有经验的专家确定权重初值,然后在案例使用中不断调整、检验,逐渐趋于合理.

假设一个待解决的故障有 3 个特征属性:故障现象、发生时间和发生位置.其中,故障现象为"2 号发动机 N2 指示摆动",发生时间为"空中",发生位置为"2 号发动机 N2 表",经过案例索引,检索到案例的故障现象为"右发 N2 传感器插头晃动导致 N2 指示摆动",发生时间为"地面",发生位置为"右发 N2 传感器".根据专家经验,故障现象、发生时间、发生位置 3 种特征属性的权值分别设置为 0.75,0.05,0.2.根据字符串匹配算法,计算 3 个特征属性的匹配度分别为 0.67,0,0.67,则按照式(2)计算 2 个案例的相似度为 SIM=0.75×0.67+0.05×0+0.2×0.67 = 0.64.同理,可以计算出所有候选案例与目标案例的相似度,按照相似度将候选案例由高到低排序,相似度越高参考价值越大.

2.3　故障案例的调整和添加

通过案例检索和匹配,得到了按相似度降序排列的候选案例集,维修人员可以选择相似度高的一个或几个案例作为参考.但是所选出的排故案例与待解决的问题案例之间很难完全一致,通常存在或多或少的差异,可能无法直接应用,需要适当的调整.由于系统很难实现对案例内容自动修改,因此案例调整通常由人工完成[2].作为飞机外场排故,从大量的历史维修记录中找到最相似的排故方案,对维修人员具有很高的参考价值,维修人员可根据自身的知识在候选案例中选择最适合的案例辅助维修,并根据实际应用效果确定是否将此次排故过程作为一个新的案例添加到案例库.通过 CBR 系统的运行,不断丰富案例库,提高系统推理的准确性,促进经验、知识的学习.

2.4　故障案例的维护

随着新案例的加入和旧案例的删除,案例库不断完善和丰富,求解能力也逐渐增强.为避免案例库的无限膨胀和求解效率的下降,需要对案例库进行维护.案例库维护的主要问题就是使案例的增加和删除更加科学、合理,而案例增加和删除策略的核心在于如何保持案例库的适当规模,即以最小的案例数量获取最大的案例覆盖集[6].本文中案例维护策略如下:

1) 案例相似度决定增删策略.系统中设定相似度阈值为 0.9 和 0.4,即相似度大于 0.9 时,删除新案例;相似度小于 0.4 时,保留新案例;相似度在两者之间的案例由专家确定.

2) 案例使用率决定增删.系统对案例库中的每个案例均设置一个字段记录案例的使用情况,当案例的使用率小于阈值 0.1 时,表示案例很少被重用,可根据当前案例库的案例数确定将该案例转移到临时案例库或直接删除等处理.

在以上增删策略中,阈值可以在系统使用过程中根据案例库规模、应用情况以及专家建议等因素进行动态调整,以适应实际需求.

3　应用实例

基于 CBR 方法,应用 Web 开发工具实现了飞机故障诊断支持原型系统.系统主要由基础信息管理及知识表达模块、案例库管理模块、诊断推理模块、用户界面和诊断报告模块组成,系统总体结构见图 4.以该系统目前的飞机故障案例库为例,对一个新故障的诊断流程描述如下:

1) 问题案例输入.输入新故障已知的特征属性,包括故障现象或代码、发生时间和发生位置等.

2) 初步检索.根据索引策略,以"ATA 各系统"为例,查出其所在的 ATA 号;根据 ATA 号,检索出对应的相似案例集.

3) 案例匹配.按照飞机维修专家经验,确定每个特征属性的权值;计算问题案例与候选案例各特征属性的相似度;根据 KNN 法计算问题案例与候选案例总的相似度.检索得到的候选案例匹配结果如图 5 所示.

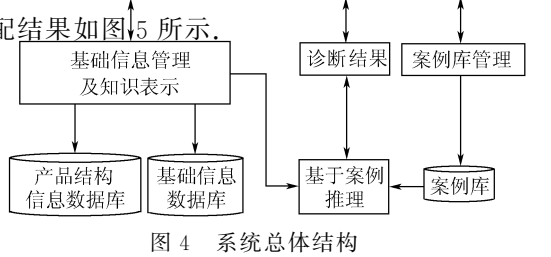


图 4　系统总体结构

结果返回 初步检索 案例匹配

	案例编号	故障现象	故障原因	诊断步骤	相似度
	10-01-C01001	发动机在巡航或大车状态下引气压力不一致。	13级引气压力调节器或13级引气活门。	更换13级压力调节器或13级引气活门。	0.87
	10-01-C01002	发动机在慢车状态下左右的引气压力不一致，起...	与450F恒温器连接的软管破裂漏气。	更换与450F恒温器相连的软管	0.84
4	10-01-C01003	在地面，发动机供气，组件工作一会儿后就自动...	发动机工作在慢车状态，涡轮冷却风扇的轴...		0.78

图5 案例检索结果界面

4）案例选择和重用.根据得到的案例匹配度排序结果，结合故障发生背景和实际情况，选用合适的案例作为排故的参考.

4 结束语

针对飞机结构复杂，故障树难以建立和维护的特点，利用飞机售后服务积累的维护记录和诊断经验，将CBR方法应用于飞机故障诊断和维修.探讨了CBR的辅助故障诊断系统的结构，以及案例表示、案例检索和匹配等CBR方法的关键技术，基于Web开发工具实现了原型系统，并在某航空企业进行了实例验证.

参考文献（References）

[1] 杨叔子，丁洪，史铁林，等.基于知识的诊断推理[M].北京：清华大学出版社，1993
Yang Shuzi，Ding Hong，Shi Tielin，et al. Knowledge-based diagnostic reasoning [M]. Beijing：Tsinghua University Press，1993(in Chinese)

[2] Chen Wei-Chou，Tseng Shian-Shyong，Chen Jin-Huei，et al. Framework of features selection for the case-based reasoning [C]//Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern. Piscataway，NJ：IEEE，2000，1：1－5

[3] Chiu C，Chiu N-H，Hsu C-I. Intelligent aircraft maintenance support system using genetic algorithm and case-based reasoning[J]. Int J Adv Manuf Technol，2004，24(5/6)：440－446

[4] 李永平.基于CBR方法的飞机排故支持技术研究与应用[D].南京：南京航空航天大学民航学院，2006
Li Yongping. Research and application of aircraft trouble-shooting support technology based on CBR[D]. Nanjing：Civil Aviation College，Nanjing University of Aeronautics and Astronaotics，2006(in Chinese)

[5] Yan Li，Shiu Simon C K，Pal Sankar K. Combining feature reduction and case，selection in building CBR classifiers[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering，2006，18(3)：415－429

[6] 陈挺，郭颖，刘云超.中文字段匹配算法[J].计算机工程，2003，29(13)：118－119，124
Chen Ting，Guo Ying，Liu Yunchao. Chinese field matching algorithm[J]. Computer Engineering，2003，29(13)：118－119，124(in Chinese)

（责任编辑：文丽芳）