

基于案例推理的压力容器故障维修方法

郁 鹏¹, 吉卫喜^{1,2}, 钱陈豪^{1,2}, 张国祥¹

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:针对目前压力容器故障维修依赖经验知识的程度高,智能知识库利用率低的问题,提出基于案例推理的压力容器故障维修方法。通过定义对应故障特征关键词字典,优化案例库案例存储与索引机制,对故障案例信息进行结构化和知识化;并采用结合最近相邻法和灰色关联度算法的案例相似度匹配方法,提高案例匹配精度。经应用实例验证,从案例库中匹配相似案例速度快、可靠度高,可供原故障案例参考。因此,该方法在实际使用中有效降低了经验知识的依赖程度,较好地利用智能知识库,为压力容器全生命周期的维护、修理和操作(MRO)提供便利。

关 键 词:压力容器故障,案例推理,最近相邻法,灰色关联度

中图分类号:TP207;TH49

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)02-0091-05

Fault Maintenance Method of Pressure Vessels Based on Case Reasoning

YU Peng¹, JI Weixi^{1,2}, QIAN Chenhao^{1,2}, ZHANG Guoxiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advance Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: By the problems of pressure vessels fault with high dependence on empirical knowledge and low utilization ratio of intelligent knowledge base, the method of pressure vessels fault was put forward based on case-based reasoning. According to the definition of fault characteristics keywords dictionary and the optimization of case storage and indexing mechanism, the case information was structured and better educated. And using a combination of nearest-neighbor method and gray case similarity algorithm to improve the accuracy of case matching, it was better for giving the similar pressure vessel fault a reference. Verified by the application examples, it was faster and more reliable to match the similar cases from the case base, and it could be used for reference to the original fault case. The method effectively reduces the dependence on empirical knowledge, and better uses the intelligent knowledge base, which provides convenience for the whole life cycle of the pressure vessel MRO.

Keywords: pressure vessels fault; case-based reasoning(CBR); nearest-neighbor method; ray case similarity algorithm

压力容器一般是指能够承受一定压力的一种密闭容器,在化工机械行业中应用十分广泛。据统计,截止2015年末,国内压力容器保有量已达到350万台。近十年,压力容器在不断地增加,而相配套的全生命周期的维护、修理和操作的(maintenance, repair & operations, MRO)管理工作却没有那么完善,而且目前

企业的压力容器维修工程一般都承包给第三方公司进行管理,这些公司中专业技能全面的人员不多,导致压力容器故障的维修与管理很难得到保证。而且,由于其故障种类繁多,表现形式复杂,原因不明确等因素,使其维修过程过于依赖经验知识,不能形成结构化的智能知识库。随着网络信息技术的迅速发展,维修方

收稿日期:2016-08-09;修回日期:2016-09-28

基金项目:江苏省产学研联合创新基金(BY2014023-30);江南大学自主科研计划-青年基金理工类(JUSRP116027)。

第一作者简介:郁鹏(1993),男,江苏省宜兴人,硕士研究生,主要研究方向为先进制造、数字化管理与全生命周期 MRO。E-mail:yupeng666891@163.com

案的验证和存储已得到广泛运用,不存在知识获取的瓶颈,但是如何迅速地提取有用的信息供故障维修人员使用和参考,让知识库更具有实际操作意义,又是压力容器故障维修信息化的一大难题。为此,本文基于全生命周期 MRO 管理的思想,采用智能知识库与案例匹配的方法,设计了基于 CBR (case-based reasoning) 方法的压力容器故障维修系统,可以更快地、高效地得到与目标故障案例相似的维修方案^[1-3]。

1 案例推理模型的设计和简述

1.1 案例推理基本原理

案例推理^[4]是目前人工智能(AI)领域使用较为频繁的一种推理模式,其基本推理过程可归纳为“4R”循环:检索(retrieve),重用(reuse),修改(revise),存储(retain)。首先根据当前故障的各项特征属性参数,在知识库中寻找与当前故障最相似的历史案例,按照匹配条件做适当修改或者不修改,最后生成当前故障的维修方案,并保存至知识库中。CBR 的核心是借鉴以往故障案例的解决方法来解决现有故障的问题。

1.2 案例推理模型建立

本文基于案例推理的基本原理,在一个新的故障案例出现后,将它抽象的当做一个新案例,根据不同的属性特征对其进行简要分析,经过案例索引的建立和相似性的度量,从案例库中搜索出和新案例最相似的旧案例,参考其维修方案,必要时做适当修改后将其作为新案例的维修方案,并将修改后的案例作为一个新的经验案例保存至案例库中,为日后出现故障进行案例检索作参考。其关键性的步骤主要有 2 点:①如何保存故障案例并及时更新、检索;②建立故障案例相互之间的联系机制,包括案例解决方案的考评机制^[5]。结合压力容器故障特点,建立了基于 CBR 的故障案例

匹配模型,如图 1 所示。

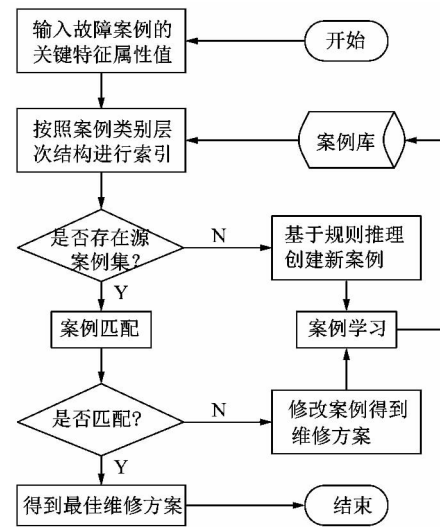


图 1 CBR 案例匹配模型

Figure 1 CBR matching model

2 故障案例库的索引机制设计

2.1 故障案例的定义与表示

此次采用一个六元数组^[6] $C_{\text{case}} = \langle I, N, T, F, M, E \rangle$ 来分别表示故障案例的定义,从而更好地规划故障案例的结构。其中, I 表示故障的编号,用作故障案例的唯一标识码,便于检索和存储; N 表示故障压力容器的类型,如压力容器的型号、相似分类; T 表示压力容器的使用时间; $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 表示压力容器故障的现象、征兆等,是一个有限非空集合; M 表示压力容器故障的结论,如故障部位、故障原因等; E 表示压力容器故障的一些辅助信息,如设备参数、检修次数、相关标准等,其总体结构如表 1 所示。

表 1 故障案例结构

Table 1 Structure of fault case

故障 编号 I	设备 型号 N	运行 时间 T/a	故障 特征 F	故障结论 M				故障辅助信息 E					
				故障 部位	故障 原因	故障 后果	解决 方案	相关 标准	规格/ mm	材质	工作压 力/MPa	工作温 度/℃	介质
R00012	预变 换炉	3	运行中炉 体监控测 温点保温 铁皮的搭 接处出现 气体泄漏	炉体下部 第 2 节筒 体距上环 缝 480 mm	喷凝装置 移位, 炉 内耐火层 在冷却水 的冲刷下 耐火砖脱 落、炉体 局部发生 腐蚀减薄	筒节腐蚀 穿孔, 孔 径 30 mm	挖补法对 腐蚀减薄 部位进行 修理; 对 耐火层实 施修补; 校正喷凝 装置。	《固定式 压力容器 安全技术 监察规 程》、《压 力容器产 品质量证 明书》等	直 径 1 600, 壁 厚 14, 高 度 13 604	16MnR	1.0	500	水 煤 气、水 蒸气

2.2 故障案例库索引机制的设计

实现案例的快速精准检索,最重要的就是设计对应的案例存储与索引机制^[7]。根据上述故障案例的组织结构,参照压力容器的故障特点,对比不同类型的压力容器维修案例,采用分层索引机制,对已有故障案例库进行多层次分组,以压力容器关键特征属性进行索引。按照故障案例的类型规划分类,组成树状层次结构,构件案例库的分层多级索引树,如图2所示。首先,根据压力容器在生产工艺过程中的作用原理,将压力容器分成反应压力容器(代号R)、换热压力容器(代号E)、分离压力容器(代号S)和储存压力容器(代号C),作为第一级索引;然后在对应第一级索引下对案例进行归类,形成具有代表的完整案例,作为第二索引;再对二级索引的完整案例进行划分,形成零部件故障子案例库,存储各个子案例。采用这样的层次分类模型进行案例检索时,通过不断的缩小搜索范围,直至最终匹配案例,从而减少全局盲目搜索的时间,进而提高搜索效率,增强了实用性。

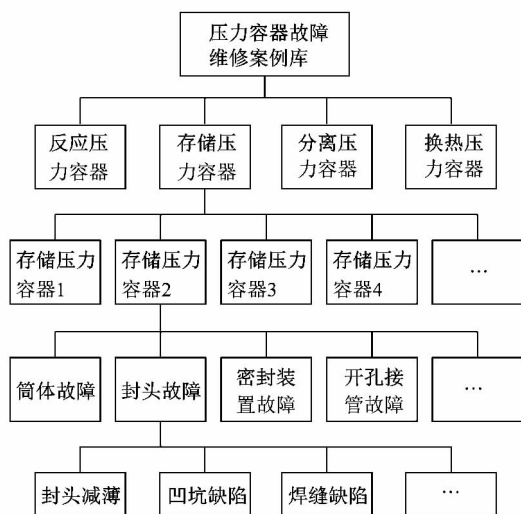


图2 案例库的分层结构

Figure 2 Hierarchical structure of case library

3 故障案例库搜索的研究

3.1 局部相似度的计算

CBR的核心在于怎样建立案例的检索模型,而案例检索的关键除了上述索引机制的建立,还有检索算法的设计。目前案例检索算法应用最为广泛的主要有3大类:最近相邻算法、灰色关联度计算方法以及余弦函数相似度计算方法。余弦函数计算方法对故障征兆向量及其重要程度的确定比较困难,很难获取其合适的权重向量;最近相邻法由于不容易确定指标取值范

围,容易造成故障间相似性之差较小,分辨率较低,而改进的欧几里得距离算法得到的相似度差值会比较大,能够更好地区分不相似的案例,有较高的分辨率;灰色关联度是将指标的局部相似度加权平均得到总体相似度,从而反映相似案例的重要程度。这些算法各有优缺点,因此,此次采用综合算法的形式,避免单一检索方法的不足^[8-10]。

案例的检索主要是通过相似性的比较来获取最优解,检索的正确率在一定程度需要依靠相似度的计算来得到保证。相似度的定义关系到检索结果的好坏,若定义不详,则检索结果不理想,若过定义,又会失去人工智能检索的意义。对于压力容器而言,实例的特征属性主要有2种:模糊语义型和精确数值型。如表2所示,其相似度的计算方式有所不同,后面章节介绍2种特征属性的相似度计算模型。

表2 压力容器案例表达的主要特征属性

Table 2 Main characteristics of expression of pressure vessel

实例特征	特征值	特征属性
设备型号	反应压力容器	模糊语义
工作压力	1.0 MPa	精确数值
工作温度	500 ℃	精确数值
材质	16MnR	模糊语义
故障现象	超温、超压、泄露等	模糊语义
故障部位	筒体、封头、密封装置等	模糊语义
故障原因	喷凝装置移位、炉体局部腐蚀减薄、裂缝缺陷等	模糊语义

3.1.1 精确数值型的相似度计算

部分案例的特征属性的取值为数值型,如检测得到的规格、工作压力、工作温度等,该类相似度 $S(x_{ij}, y_j)$ 计算时利用公式(1)或(2)。假设 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, X 代表源案例,是一个非空有限集合,则第 i 个实例 X_i 的 m 个属性构成的属性集为 $X_{ij} = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$,其中 x_{ij} 则表示第 i 个案例的第 j 个属性;同样,设 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, Y 代表目标案例,其表示方式同 X , $y_j (1 \leq j \leq m)$ 则表示目标故障案例的第 j 个特征值。

$$S(x_{ij}, y_j) = \begin{cases} 1 - d_{ij} & (\text{当 } d_{ij} \in [0, 1]) \\ \frac{1}{1 + d_{ij}} & (\text{当 } d_{ij} \in [0, +\infty]) \end{cases} \quad (1)$$

式中 d_{ij} 是目标案例和源案例的对应属性间的欧式距离^[11],其中

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_j - x_{ij})^2} \quad (2)$$

3.1.2 模糊语义相似度的计算

由于案例中大部分内容是以语言形式来表示,没有数值型那样的精确,欧几里得距离算法不再适用,因此,本文借鉴单汉字的字面相似度计算算法^[12]。假设词语 A 和 B 的相似度为 $S(A, B)$; $|A|$ 和 $|B|$ 分别表示 A 和 B 所包含的字数; A_i, B_i 表示词语中第 i 个语素; $s(A, B)$ 表示 A 和 B 中都含有的相同语素的集合; 同样 $|s(A, B)|$ 则表示该集合中语素的个数; $w(A, i)$ 表示词语 A 中第 i 个语素的权值: 若 $A_i \in s(A, B), w(A, i) = i$, 否则 $w(A, i) = 0$ 。位置系数 d 则表示词语 A 和 B 的语素总数比, 即:

$$d = \min \left\{ \frac{|A|}{|B|}, \frac{|B|}{|A|} \right\} \quad (3)$$

根据影响词语间相似度的关键因素, 即词语 A 和 B 之间相同语素的个数及其位置系数, 按公式(4)计算出词语 A 和 B 之间的相似度 $S(A, B)$:

$$S(A, B) = \alpha \times \left(\frac{|s(A, B)|}{|A|} + \frac{|s(A, B)|}{|B|} \right) / 2 + \beta \times d \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{|A|} w(A, i)}{\sum_{i=1}^{|A|} i} + \frac{\sum_{j=1}^{|B|} w(B, j)}{\sum_{j=1}^{|B|} j} \right) / 2 \quad (4)$$

式中, α 和 β 分别表示相同语素个数与位置关系的权重系数, 且 $\alpha + \beta = 1$ 。

3.2 全局相似度计算

在得到目标案例与源案例的相似度之后, 就需要确定不同特征属性在全局相似度中的重要程度, 即权重系数 W_i , 进而得到最终的全局相似度。此次使用层次分析法来获取不同特征属性的权重系数, 首先将特征属性间的相对重要系数组成判断矩阵 P (例如属性 1 比属性 2 重要 2 倍, 则 $u_{12} = 2, u_{21} = 1/2$), 然后计算该矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$, 其对应的特征向量 w , 再经过归一化处理就能够得到各特征属性的权重系数了, 具体计算过程如下:

1) 步骤 1。构建判断矩阵 P , 如式(5)所示。

$$P = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1j} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2j} \\ \cdots & & & \\ u_{j1} & u_{j2} & \cdots & u_{jj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: u_{mn} 表示第 m 个属性 u_m 对第 n 个属性 u_n 的相对重要程度量化后的数值。

2) 步骤 2。计算各特征属性权重顺序, 即求出最大特征根 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量 w , 然后对求得的特征

向量 w 归一化处理, 得到目标特征属性权重顺序为

$$P_w = \lambda_{\max} w \quad (6)$$

3) 步骤 3。一致性检验, 对步骤 2 计算出属性权重的顺序是否满足一致性要求进行合理判断。

$$C_{CR} = C_{CI} / C_{RI} \quad (7)$$

$$C_{CI} = (\lambda_{\max} - j) / (j - 1) \quad (8)$$

式中: $j = (1, 2, \dots, n)$, C_{CR} 为判断矩阵 P 的随机一致性比例, C_{CI} 为判断矩阵 P 的一般一致性指标。 C_{RI} 表示的则是判断矩阵 P 的平均一致性指标, 其参考值见表 3。

经过上述 3 个步骤求得第 j 个特征属性的权重系数 W_j , 结合目标案例和源案例之间的相似度, 就可以计算出该案例与目标案例的综合相似度 S_j 了, 其计算公式如下:

$$S_j = \sum_{j=1}^n W_j S_{ij} \quad (9)$$

表 3 平均一致性参考值

Table 3 Reference value of average consistency

j	C_{RI}
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

4 应用举例

某化工企业一台聚合釜在生产运作过程中发生内漏故障, 经磁粉探伤发现底部喷料法兰与釜体间有裂纹。聚合釜一般由锅体、锅盖、搅拌器、电加热油夹管、支承及传动装置、轴封装置、溢油槽等组成, 并配有电加热棒及测温、测压表。按照 2.1 的故障案例定义的要求, 得到该压力容器的故障特征信息; 再经过 2.2 对数据库的分层索引, 得到了一些较为相似的案例, 如表 4 所示。

采用上述方法, 根据公式(1)~(4)计算出源案例各特征属性与目标案例的相似度, 结果如表 5 所示。

接着根据专家经验确定各特征属性间的相对重要程度, 如表 6 所示。

再根据公式(5)~(8), 可以求得各特征属性经过归一化处理的相对重要程度, 即各特征属性的权重系数 W_j 分别为 (0.060 1, 0.102 3, 0.051 8, 0.040 3, 0.210 8, 0.231 0, 0.303 7), 最后经过式(9)加权计算

表4 源案例与目标案例属性值

Table 4 Attribute value of source case and target case

故障编号	设备类型	材质	工作压力/MPa	工作温度/℃	故障现象	故障部位	故障原因
R00002	聚合釜	Q235R	2.5	100	超温	内冷管	水管内壁生锈,锈斑堵住水管
R00010	反应釜	S11306	1.2	120	泄露	釜底,盘根箱	轴与填料之间有间隙
R00012	聚合釜	S11306	2.0	90	震动	搅拌器	电机故障
R00019	聚合釜	Q235R	2.5	120	泄露	釜体中部,纵焊缝	未焊透,有裂缝缺陷
R00021	聚合釜	Q235R	3.0	90	泄露	下热偶套夹套	夹套有裂缝缺陷
目标	聚合釜	Q235R	2.6	83	泄露	釜体下部,环焊缝	法兰与夹套焊缝有裂缝缺陷

表5 源案例与目标案例相似度计算值

Table 5 Calculation value of similarity between source case and target case

故障编号	设备类型	材质	工作压力/MPa	工作温度/℃	故障现象	故障部位	故障原因
R00002	1.00	1.00	0.95	0.83	0.00	0.00	0.00
R00010	0.00	0.18	0.30	0.63	1.00	0.19	0.23
R00012	1.00	0.18	0.70	0.93	0.00	0.00	0.00
R00019	1.00	1.00	0.90	0.63	1.00	0.71	0.27
R00021	1.00	1.00	0.80	0.93	1.00	0.15	0.31

表6 各属性间相对重要程度

Table 6 Relative importance of each attribute

判断矩阵	设备类型	材质	工作压力	工作温度	故障现象	故障部位	故障原因
设备类型	1	3	1/2	1/5	1	4	5
材质	1/3	1	1/6	1/15	1/3	4/3	5/3
工作压力	2	6	1	2/5	2	8	10
工作温度	5	15	5/2	1	5	20	25
故障现象	1	3	1/2	1/5	1	4	5
故障部位	1/4	3/4	1/8	1/20	1/4	1	5/4
故障原因	1/5	3/5	1/10	1/25	1/5	4/5	1

得到了源案例与目标案例的综合相似度,分别为(0.245 0,0.383 8,0.152 3,0.691 2,0.580 9)。经比较,可知编号 R00019 的案例与目标案例相似度最高,再根据专家经验判断该案例的维修方案是否能够匹配使用,若不能完全使用,需进行部分调整,确定最终维修方案,并生成新的案例存入案例库中。

5 结论

此次笔者采用案例推理 CBR 的思想,通过建立故障案例库索引机制,将故障的特征属性按层次分类,缩小案例搜索的范围,从而提高案例检索效率;其次采用相似故障案例匹配的方法,参考相似度最高的故障案

例的维修方案,从而更快地得到目标故障的维修方案,解决了因专业知识匮乏导致经验判断不准确、无法及时维修等问题。结合相关经验知识,为进一步压力容器的全生命周期 MRO 管理做好了准备。

参考文献:

- [1] 何富其. 机械企业压力容器缺陷的维修和管理[J]. 煤炭技术, 2009,28(7):10-12.
- [2] 任明仑,杨旭,付杰. 面向运维服务的装备 MRO 知识管理系统研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(12):1505-1512.
- [3] 赵洋. 压力容器使用维修检验与安全管理措施探讨[J]. 有色金属文摘,2016,31(1):156-157.
- [4] 刘丽娟. 压力容器的常见故障、处理方法及管理方法分析[J]. 化工管理,2013(18):203.
- [5] 姜明辉,许佩,韩旂桐,等. 基于优化 CBR 的个人信用评分研究[J]. 中国软科学,2014(12):148-156.
- [6] 杨星,吉卫喜,王煜. 钢球测量器具的选配及测量系统可靠性研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(6):99-102.
- [7] 王学恩,韩崇昭,韩德强,等. 粗糙集研究综述[J]. 控制工程,2013,20(1):1-8.
- [8] 张耀辉,李浩,李林宏,等. 基于案例推理的装甲装备故障诊断方法[J]. 兵工自动化,2014,33(9):21-22.
- [9] 韩敏,王心哲,李洋,等. 基于贝叶斯粗糙集和混合专家模型的 CBR 系统[J]. 控制与决策,2013,28(1):157-160.
- [10] 董传恒,马俊勇,于鸿峰. 基于案例的推理在导航装备故障案例库系统中的应用[J]. 电子设计工程,2013,21(5):191-193.
- [11] 刘仁涛,郭亮,姜继平,等. 环境污染应急处治技术的 CBR-MADM 两步筛选法模型[J]. 中国环境科学,2015,35(3):943-952.
- [12] 唐瑞春,张肖南,郭双乐,等. 一种基于粗糙集和欧式距离的手机故障案例匹配算法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(12):125-130.
- [13] 郜强. 基于语义词语相似度计算模型的研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2011:11-12.