DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201512092

面向质量问题的可拓知识表达与诊断推理

李金艳[1,2], 余忠华[1], 徐宣国[2]

(1.浙江大学 机械工程学院, 杭州 310027;2.江苏科技大学 经济与管理学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 为使生产过程中检测信息不足的质量问题在最短的时间内得到相对合理的解决方案,针对案例的形式化表示及推理方法的局限性,提出基于可拓知识表达的质量问题案例推理方法. 结合物元模型给出质量问题域的物元特征项和实例模型的知识表达;利用可拓变换对检索、重用、修正以及存储过程中的特征项调整进行相容性求解;结合基于领域知识的分层实例组织形式与最近邻检索策略给出案例推理计算方法;对 608-2RS 球轴承振动问题解决方案的求解表明,该方法实用、可行.

关键词: 质量问题;物元模型;案例推理;可拓变换;可拓算子

中图分类号: TP182 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)07-0152-06

Quality problem oriented extension knowledge representation and diagnostic reasoning

LI Jinyan[1,2], YU Zhonghua[1], XU Xuanguo[2]

(1.Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2.School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: To reasonably and timely solve the quality problem lacking of correlation detection information, a case-based reasoning method was proposed based on extension knowledge representation by taking the limitations of formal representation and reasoning method into consideration. Firstly, the knowledge representations of matter-element characteristic items and instance model in quality problem domain were put forward based on the matter-element model. Secondly, the problems of feature adjustment in the process of case retrieving, reusing, revising and retaining were solved by extension transformation. And then, combining with hierarchical organization form for cases based on domain knowledge and nearest neighbor strategy, the case retrieval algorithm was adapted for quality problems in the production process. With the application in vibration problem of 608-2RS ball bearing, the result indicates that the method has good practicability and feasibility.

Keywords: quality problem; matter-element; case-based reasoning; extension transformation; extension algorithm

产品质量是关系到企业市场竞争能力的重要指标. 在生产加工技术飞速发展的今天,质量问题依然是企业不可忽视的重要部分. 在生产过程中为及时准确定位问题所在,采取适当措施恢复生产,不少学者利用数学模型结合领域知识展开研究,尤其针对信息完备情况下的质量特性识别[1]、工序质量诊断[2]以及误差控制[3]等. 由于生产过程中工艺的复杂性和小批量生产模式的使用,导致无法搜集到足够的信息建立质量问题发生的机理数学模型或借助统计方法描述演变路径,只能通过专业人员根据以往类似问题的处理经验提出解决方案. 这种过程缺乏系统性且过重依赖于人的头脑,一旦人员流失,积累的经验知识便再无法有效地继承和重用. 因此,需要一种方法对过去的经验知识进行系统的梳理和储存,以便遇到类似问题时及时有效地进行知识重用和共享. Roger Schank 于 1982 年提出了基于知识的问题学习和求解方法——案例推理(case-based reasoning, CBR). 该方法将过去积累的经验以案例的形式储存在案例库中,根据索引策略、匹配算法以及相似度计算,从案例库中检索相似案例,经由适配策略修正,获得适合当前问题的解决方案. 文献[4]将 CBR 应用于面向服务的价值链设计,文献[5]则结合 CBR 对竖炉的状态进行了相对准确的持续预测;在机械领域方面,文献[6]进行了面向夹具设计的实例检索研究,文献[7]采用模糊相似优先比算法进行卧式数控机床相似实例的检索. 目前,尚鲜有关于质量问题诊断方面的研究,究其原因主要有以下两个方面:1)缺乏定性与定量相结合的问题描述与知识表达方法;2)缺乏高效的实例检索方法,尤其对案例库达到一定规模时的复杂问题推理.

本文引入可拓学理论中的物元模型进行实例知识表达,在领域知识索引下构建分层案例库,通过可拓推理实现案例的检索、重用、修正以及存储.

收稿日期: 2015-12-29
基金项目: 国家自然科学基金 (71371088)
作者简介: 李金艳(1982—),女,博士研究生;
余忠华(1963—),男,教授,博士生导师
通信作者: 余忠华,caq_221@ zju.edu.cn

1　基于物元模型的知识表达

可拓学[8]基本思想为：变矛盾问题为相容问题，使目标问题得到解决. 物元是可拓理论的基本逻辑单元，由有序三元组 $\boldsymbol{R}=(N,c,v)$ 表示，其中 N 为描述对象，c 和 v 分别为特征项和对应的特征量值. n 维物元可表示为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix}.$$

在案例推理中利用物元进行知识表达，可以把实例、相应特征项以及特征值集中在知识物元中统一表达，形成定性与定量相结合的表示方式. 一般案例知识的构成 $A=\{IP,\boldsymbol{J},\boldsymbol{S},\boldsymbol{F}\}$，其中 IP 为源案例的标识符；$\boldsymbol{J}$ 为检索信息；$\boldsymbol{S}$ 与 $\boldsymbol{F}$ 分别为解决方案与实施结果. 物元知识表示中，以 N 作为案例标识符，特征项 $\boldsymbol{c}=\boldsymbol{J}\cup\boldsymbol{S}\cup\boldsymbol{F}$，结合文献[9]所提出的特征元 $\boldsymbol{M}=(\boldsymbol{c},\boldsymbol{v})$，案例知识库可表示如下：

$$CASE=\{<N,\boldsymbol{M}>\}.$$

目标案例模型

$$GM:\begin{cases}\boldsymbol{G}=<N_C,\boldsymbol{M}_J>,\\ L=<(N,\boldsymbol{\rho})>.\end{cases}$$

式中 $\boldsymbol{G}$ 为目标案例的可拓描述，L 为源案例 N 与目标案例 N_C 的相似性衡量，$\boldsymbol{\rho}$ 为相似量值.

2　可拓变换

可拓学对问题的分析[10]一般首先根据领域知识确定问题物元模型；然后根据上下文信息推导出尚未被发现的事实. 在推理过程中，首先结合可拓知识对目标案例进行描述，然后利用其特征元检索源案例库，获得解决方案. 用产生式规则 If-Then 结构可描述如下：若 $N_i\in CASE$，N_j 为目标案例，

If $(v_{i1},v_{j1})\in S_1\wedge(v_{i2},v_{j2})\in S_2\wedge\cdots\wedge(v_{ik},v_{jk})\in S_k$,

Then $(v_{i(k+1)},v_{j(k+1)})\in S_{k+1}\wedge(v_{i(k+2)},v_{j(k+2)})\in S_{k+2}\wedge\cdots\wedge(v_{ih},v_{jh})\in S_h$.

其中 S_{1-k} 和 $S_{(k+1)-h}$ 分别为特征项 c_J 和 c_S 的判断域. 如果 If 为真，Then 对目标案例 N_j 成立.

$$\boldsymbol{C}(N_i)=\begin{bmatrix} N_i & c_1 & v_{i1} \\ & c_2 & v_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_k & v_{ik} \\ & c_{k+1} & v_{i(k+1)} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_h & v_{ih} \\ & c_{h+1} & v_{i(h+1)} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{in} \end{bmatrix},\ \boldsymbol{G}(N_j)=\begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_k & v_{jk} \end{bmatrix}.$$

2.1　可拓推理

定义 1　若设 $\boldsymbol{R}$ 为目标物元，$\boldsymbol{r}$ 为条件物元，给定问题 $P=\boldsymbol{R}*\boldsymbol{r}$. 如果在条件 $\boldsymbol{r}$ 下，目标物元 $\boldsymbol{R}$ 不能实现，则成 P 为不相容问题，记为 $P=\boldsymbol{R}\uparrow\boldsymbol{r}$，否则为相容问题，记为 $P=\boldsymbol{R}\downarrow\boldsymbol{r}$.

定义 2　如果某种操作可以使物元变换，则称该操作为可拓算子，即若存在 $T_1X_1=Y_1$，$T_2Y_1=Y_2,\cdots,T_nY_{n-1}=Y_n$，则称 $T_1,T_2,\cdots T_n$ 为可拓算子；同时，若 $TX_1=Y_n$ 成立，则可拓算子 $T=\prod_{i=1}^{n}T_i$.

当上下文信息或现实条件 $\boldsymbol{r}$ 无法使目标物元 $\boldsymbol{R}$ 实现时，可通过可拓算子将矛盾问题调整为相容问题，途经有以下 3 种：1）调整目标问题：$P=(T_R:\boldsymbol{C}_J)\downarrow\boldsymbol{r}$；2）改变条件属性 $P=\boldsymbol{R}\downarrow(T_r:\boldsymbol{r})$；3）前两者结合 $P=(T_R:\boldsymbol{C}_J)\downarrow(T_r:\boldsymbol{r})$.

如图 1 所示，案例推理分为案例检索（Retrieve，R）、重用（Ruse，R）、修正（Revise，R）以及存储（Retain，R）4 个环节，也称为 4^R 模型[11].

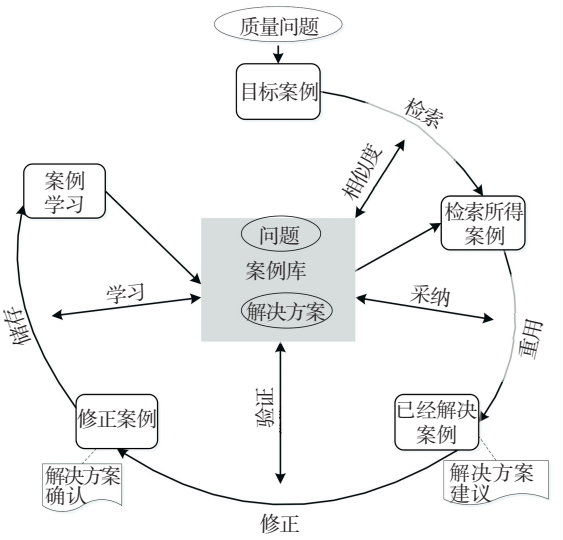


图 1　案例推理的 4^R 模型[11]

Fig.1　4^R model of case-based reasoning

1）案例检索. 从案例库中检索与目标案例相似的源案例. 检索的主要步骤：

Step 1　目标案例描述. 由于描述的精确程度直接影响检索结果的成败，需要通过可拓变换 $P=\boldsymbol{R}\uparrow\boldsymbol{r}\Rightarrow P=(T:c_J)\uparrow r\Rightarrow P=\boldsymbol{R}'\downarrow\boldsymbol{r}$ 不断地对目标案例的特征描述进行调整，其中可拓算子 $T=\{T_1,T_2,T_3,T_4\}=\{$置换，增删，分解，扩缩$\}$.

Step 2　根据目标案例特征元检索相似源案例. 鉴于各检索特征项对最终相似度影响程度的不同，首先确立其影响权值 w，然后进行目标案例与源案例的相似性衡量.

Step 3 根据判断阈值 δ 确定检索结果. 检索终止于如下 3 种情况:(1)检索到 $\rho_i \geqslant \delta,(i=1,2,\cdots,n)$ 的若干源案例,得到相似案例解集,此为理想情况;(2)遍历案例库后, $\forall \rho_i < \delta(i=1,2,\cdots,n)$,则返回 Step 1;(3)若仍无法检索得到相似源案例,则根据专家意见对目标案例进行人为诊断,并对不断试错所得最终解决方案,以新案例的形式补充到案例库中.

2)案例重用. 将检索所得源案例的解集特征元映射至目标案例,即通过可拓传导变换 $T(M_N)\Rightarrow M_G$ 实现案例重用.

3)案例修正. 对由重用案例集得到的解集特征元,根据目标案例的领域知识和相关具体工况记录进行可拓调整,优化解决方案.

4)案例存储. 目标问题得到解决后,若形成了一个可用于将来与之相似问题参考解决的源案例,则需将其存储进案例库中.

2.2 基于映射的推理评估

根据产品工艺结构自顶向下展开:产品物元 $\boldsymbol{R}_d=(d,c_d,v_d)$、组件物元 $\boldsymbol{R}_e=(e,c_e,v_e)$、零件物元 $\boldsymbol{R}_q=(q,c_q,v_q)$,其中:1) $d=e_1\oplus e_2\oplus\cdots\oplus e_i$, 2) $e=q_1\oplus q_2\oplus\cdots\oplus q_j$,过程作为生产的基本单元,若过程物元 $\boldsymbol{R}_b=(b,c_b,v_b)$,则 3) $q=b_1\oplus b_2\oplus\cdots\oplus b_k$.

由 1)~3)得质量问题 $P=\boldsymbol{R}_b\downarrow(T_r:\boldsymbol{r})$,其中条件物元 $\boldsymbol{r}=<m_1,m_2,m_3,m_4,m_5,e>,m_{1-5}$ 与 e 分别为过程影响因素(人、机、料、法、环、测,即 5M1E).结合文献[12]可得

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}=T(r)=T(m_1,m_2,m_3,m_4,m_5,e).$$

式中 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}$ 为产品物元,r 为映射输入域,T 为可拓算子.

假设工艺目标为 $\tilde{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{g}}$,则矛盾问题为 $\Delta\boldsymbol{R}=\tilde{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{g}}-\boldsymbol{R}$. 此时需要调整条件物元 $\boldsymbol{r}$ 使 $\Delta_{\min}\boldsymbol{R}$. 因此根据极值定理对案例推理所得解进行评估,得到目标案例物元模型的 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{F}}$

$$\Delta_{\min}\boldsymbol{R}:\begin{cases}\partial_{\Delta R}/\partial_r=0,\\ \partial^2_{\Delta R}/\partial_{r^2}\geqslant 0.\end{cases}$$

3 案例库的组织与索引策略

可拓理论提供了分析和解决矛盾问题的思维机制,通过可拓知识表达以及可拓变换推理虽已揭示了问题的本质及解决的思路,但尚缺乏解决工程技术领域问题的具体运算方法[13].

3.1 案例推理的组织

以产品工艺结构为载体,以质量特征为核心,以工序活动衔接演化为线索对 CBR 要素组织的结果见图 2.

3.1.1 检索知识界定

检索特征项:$\boldsymbol{c}_J=\{\boldsymbol{c}_L,\boldsymbol{c}_{P'},\boldsymbol{c}_R\}$ //归属类信息,问题特征描述,相关工况条件信息//.

其中:归属类包括发现工序、产品结构子系统归属、该子系统各相关工序或活动;问题特征信息主要指问题特性和具体特征属性描述;工况类信息主要指各相关工序编号、定位基准、加工参数、加工结果等.

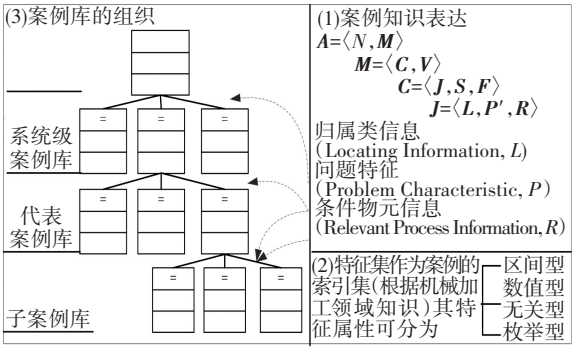


图 2 案例推理组织示意

Fig.2 Case-based reasoning organization diagram

3.1.2 案例库的组织

质量问题案例库主要源于生产过程中已解决问题的收集、整理和知识存储. 随着时间的积累和加工工艺的日渐复杂,案例库的规模迅速膨胀. 若检索过程采用并行处理方式直接遍历,会影响检索的效率和效果. 在故障诊断的相关应用研究中,一般采用确立优先规则的方法提高检索效率. 例如文献[14]以故障征兆权值和历史成功检索次数为依据进行检索优先级的确定. 由于质量问题诊断的参考依据是领域知识和具体工况信息,但不同品种间历史成功检索次数的可借鉴性不高. 为此,根据文献[15]提出的知识库结构有助于案例检索的观点,本文结合基于领域知识的分层案例组织形式,将原始案例库分为系统案例库、代表案例库和子案例库 3 层,如图 2 所示. 其中代表案例库为抽象层,子案例库属于具体层. 检索时,首先,通过归属类特征元定位质量问题的系统级归属;然后,根据问题描述特征元检索最相似的代表案例;最后,在与代表案例相关的子案例库中通过问题描述和相关工况条件信息特征元进行进一步的检索.

3.2 代表案例聚类

根据同一聚类中的对象具有较高的相似度,而不同聚类中的对象差别较大的原则,把源案例库划分成一组聚类

$$C=\{z_1,z_2,\cdots,z_t\},\ \text{且}\ \bigcup_{p=1}^{t}z_p=C,$$

其中 t 为代表案例目标聚类数. 设聚类的目标函

数为

$$f_t = \sum_{p=1}^{t}\sum_{i=1}^{n} u_{ip} d(x_i, z_p).$$

式中：n 为案例库中的案例总数目，z_p 为第 $p(p = 1, 2, \cdots, t, t < n)$ 个聚类的中心，$d(x_i, z_p)$ 为 x_i 到 z_p 的加权欧氏距离. $\boldsymbol{U} = [u_{ip}]_{n\times t}$ 为隶属矩阵，通过数次迭代得到一组聚类中心 $\{z_p \mid 1 \leqslant p \leqslant t, p \in n\}$ 和隶属矩阵 $\boldsymbol{U}$，使得目标函数 f_t 最小. 对于每条案例：

1) $u_{ip} \in [0,1]$，即属于或不属于某一个聚类，二者必居其一；

2) $\sum_{p=1}^{t} u_{ip} = 1$，即每条案例只属于一个聚类；

3) $\sum_{i=1}^{n} u_{ip} > 0$，即每个聚类都是非空的.

3.3　权重确定与最近邻策略

由于质量问题发生机理的模糊性以及相关指标的不确定性，加上处理人员领域知识和经验的局限性，难以对每个指标给出确定性的判断，故在此引入三角模糊数 $\boldsymbol{a}_{ij} = (a_{ij}^l, a_{ij}^m, a_{ij}^u)$ 表达判断信息，a_{ij}^l、a_{ij}^m、a_{ij}^u 分别表示质量问题相关人员给出的目标物元特征项 i 与 j 比较后的保守、最可能以及乐观评价结果.

$\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{a}_{ij})_{m\times m}$ 为形成的三角模糊判断矩阵. 将 $\boldsymbol{A}$ 的行进行归一化得到排序权向量

$$\boldsymbol{w} = (\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_i, \cdots, \boldsymbol{w}_m),$$

其中：

$$\boldsymbol{w}_i = (w_i^l, w_i^m, w_i^u) = \sum_{j=1}^{m} a_{ij} \Big/ \Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_{ij}\Big) a_{ij} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{m} a_{ij}^l}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_{ij}} a_{ij}^u, \frac{\sum_{j=1}^{m} a_{ij}^m}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_{ij}} a_{ij}^m, \frac{\sum_{j=1}^{m} a_{ij}^u}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} a_{ij}} a_{ij}^l\right].$$

由 $\boldsymbol{w}_i = (w_i^l, w_i^m, w_i^u)$，$\boldsymbol{w}_j = (w_j^l, w_j^m, w_j^u)$ 为任意两个三角模糊权向量，则 $\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_j$ 的可能度为

$$p(\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_j) = \begin{cases} \dfrac{|w_i^l - w_j^u|}{|w_j^m - w_j^u| - |w_i^m - w_i^l|}, & \text{当 } w_i^m < w_j^m \text{ 时;} \\ 1, & \text{当 } w_i^m \geqslant w_j^m \text{ 时.} \end{cases}$$

对于 $\boldsymbol{w} = (\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_i, \cdots, \boldsymbol{w}_m)$，任一 $\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_j$ $(i \neq j)$ 的可能度：

$$p(\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_m) = \min\{p(\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_1), p(\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_2), \cdots, p(\boldsymbol{w}_i \geqslant \boldsymbol{w}_m)\},$$

则排序权向量

$$\boldsymbol{w} = (\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_i, \cdots, \boldsymbol{w}_m) = (p(\boldsymbol{w}_1), p(\boldsymbol{w}_2), \cdots, p(\boldsymbol{w}_m))^{\mathrm{T}},$$

经归一化处理，

$$w_i' = p(\boldsymbol{w}_i) \Big/ \sum_{i=1}^{m} p(\boldsymbol{w}_i).$$

基于上述分析，结合表 1 不同数据类型特征项的局部相似度，可得目标案例与各源案例的相似度为

$$sim(A,B) = \Big(\sum_{i=1}^{k} w_i' \times sim_i(v_A, v_B)\Big) \Big/ \sum_{i=1}^{k} w_i'.$$

表 1　局部相似度

Tab.1　Local similarity

特征项类型	特征量	局部相似度
c_A、c_B 为区间类[16]	$v_A = [a_1, a_2]$ $v_B = [b_1, b_2]$	若区间长度用 $L\lvert\cdot\rvert$ 表示，则 $sim_i(c_A, c_B) = \left[\dfrac{\lvert L(v_A \cap v_B)\rvert^2}{\lvert L(v_A)\rvert \lvert L(v_B)\rvert}\right]^{1/2}$
c_A、c_B 为数值类	目标域 $[\max(v_i), \min(v_i)]$，$i = 1, 2, \cdots, k$ $v_A \in [\max(v_i), \min(v_i)]$ $v_B \in [\max(v_i), \min(v_i)]$	$sim_i(c_A, c_B) = 1 - \dfrac{\lvert v_A - v_B\rvert}{\max(v_i) - \min(v_i)}$
c_A、c_B 为无关类	$v_A = v_B$ 或 $v_A \neq v_B$	$sim_i(c_A, c_B) = \begin{cases} 1, & v_A = v_B \text{ 时} \\ 0, & v_A \neq v_B \text{ 时} \end{cases}$
c_A、c_B 为枚举类	若枚举类特征的最大赋值用 K 表示，则 v_A 或 v_B 取值为 $[1, K]$ 内整数	$sim_i(c_A, c_B) = 1 - \dfrac{\lvert v_A - v_B\rvert}{K}$

4　实例应用

以某批次 608-2RS 球轴承在成品抽样时检测出的振动问题为例，结合 2004 年以来累积的深沟球轴承类的 78 例质量问题（信息文档记录）形成源案例库，具体检索步骤如下：

Step 1　识别目标案例. 1) 振动问题 (P) = 轴承 $(\boldsymbol{R}) \uparrow$ 工艺条件 (r)；2) 映射 $\boldsymbol{R}_d = T(\boldsymbol{r}) = T(m_1, m_2, \cdots, m_5, e,)$；3) 寻求使 $P = \boldsymbol{R} \downarrow \boldsymbol{r}$ 的可拓算子 T.

Step 2　根据归属类特征元检索系统层案例库. 1) 以初始归属类物元 $\boldsymbol{M}_L$ 进行检索

$$\boldsymbol{M}_L = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_L & \boldsymbol{v}_L \\ \text{振动速度} & [36,45][22,30][11,15] \\ \text{振动加速度} & [21,36] \\ \text{发现工序} & \text{成品抽样（工序编码：01/09）} \\ \text{结构归属} & \text{内圈、外圈、滚动体（}BOM\text{：011、012、013）} \\ \text{子系统相关工艺活动} & \text{装配工艺（工艺规程编码）} \end{bmatrix}.$$

定位结论为内、外圈以及装配工艺,显然范围太广;

2)对目标问题归属类特征项 $\boldsymbol{c}_L$ 进行增补可拓变换 $P=\boldsymbol{R}\uparrow\boldsymbol{r}\Rightarrow P=(T:\boldsymbol{c}_L)\uparrow\boldsymbol{r}\Rightarrow P=\boldsymbol{R}'\downarrow\boldsymbol{r}$,调整 $\boldsymbol{c}_L'=\boldsymbol{c}_L\cup\boldsymbol{c}_{内圈工艺}\cup\boldsymbol{c}_{外圈工艺}\cup\boldsymbol{c}_{装配工艺}$;

3)检索,定位结论为内圈.

Step 3 问题特征物元 $\boldsymbol{M}_{P'}$ 与内圈 - 磨削案例库中的各代表案例进行匹配,定位为内圈圆度超差问题;其中问题特征物元 $\boldsymbol{M}_{P'}$ 为

$$\boldsymbol{M}_{P'}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{c}_{P'} & \boldsymbol{v}_{P'}\\ 振动速度 & [36,45][22,30][11,15]\\ 振动加速度 & [21,36]\\ 粗糙度\ Ra & [0.102,0.157]\\ 波纹度 & [0.015,0.065]\\ 圆度\ \Delta Cir & 2\sim500\ \text{upr}[0.485,0.737]\\ & 2\sim15\ \text{upr}[0.441,0.801]\\ & 2\sim50\ \text{upr}[0.506,0.862]\\ & 15\sim500\ \text{upr}[0.174,0.322]\end{bmatrix}.$$

检索过程中,根据阈值和人为判断检索结果未达到满意之前,需要不断地对检索特征元利用可拓算子进行置换、增删以及分解等调整.

Step 4 根据内圈磨削相关工艺和问题特征信息特征元对所有深沟球轴承圆度超差问题进行案例检索,得 608-2RS 球轴承振动问题检索的近似案例结果 $L=<(N,\rho)>$;其中内圈磨削相关工艺信息特征元为

$$\boldsymbol{M}_R=\begin{bmatrix}\boldsymbol{c}_R & \boldsymbol{v}_R\\ 工件转速 & 960\\ 精磨时长 & [21,36]\\ 精进给速度 & [16,32]\\ 修正间隔 & 20\\ 圆度\ \Delta Cir & 2\sim500\ \text{upr}[0.485,0.737]\\ & 2\sim15\ \text{upr}[0.441,0.801]\\ & 2\sim50\ \text{upr}[0.506,0.862]\\ & 15\sim500\ \text{upr}[0.174,0.322]\\ (精)砂轮转速 & 48\ 000\\ 粗进给速度 & [56,80]\\ 粗磨量 & 183\\ 精磨量 & 50\end{bmatrix}.$$

以上各物元特征项的权重评估源自品管和生产部门相关人员结合实际给出的保守、最可能以及乐观判断.

Step 5 根据领域知识和相关具体执行情况记录对所得解决措施进行调整.

取阈值 $\delta=90\%$,得表 2 所示可重用案例集.

表 2 可重用案例集

Tab.2 Reusable case set

序号	节点	型号	相似度/%
1	20071001229	608Z 深沟球轴承	96.25
2	20060203526	6305Z 深沟球轴承	92.35
3	20060105385	6305Z 深沟球轴承	90.12

根据可重用案例的解决方案,通过可拓调整得到目标案例解决措施特征元,如表 3 所示 .

表 3 目标案例解决措施特征元

Tab.3 Solution for target case

M_s	措施	内容
	临时措施	①缩短砂轮修整间隔; ②延长超精工序时长.
	长期措施	①临时措施作为日常辅备;②加强套圈材料检测;③加强供应商管理.

由于轴承工艺结构相对简单,内圈方面的质量问题类型较为集中,在该案例推理过程中遍历检索与分层检索区别不是很显著. 为进一步说明基于可拓知识的不同特征项表达与分层检索研究的意义,将其与传统案例检索做了如表 4 所示的对比分析.

表 4 对比分析

Tab.4 Comparative analysis

类型	检索方式	检索时间复杂度	适用范围	限制
基于可拓知识表达的分层检索	不同物元特征项分层检索	$O(\sum_{j=1}^{n_1}L+\sum_{j=1}^{t}P'+\sum_{j=1}^{n_2}R)$ 其中:$k=L+P'+R$;n_1 为各系统级案例库定位特征项数量;t 为代表案例聚类数目;n_2 为具体案例库案例数量值.	①特征项明确、清晰,引导动态和有方向地检索;②适用于工艺结构繁杂且案例库规模较大.	①归纳分析时间复杂度高;②对综合性、整体性问题检索效果不佳.
传统案例检索	整体特征项全局遍历	$O(\sum_{j=1}^{n}k)$ 其中 n 为案例库案例数值.	①目标案例特征界定模糊;②适用于案例库规模小.	①遍历时间复杂度高;②整体特征项检索,结果显著度不高.

5 结　论

1)针对质量问题案例的形式化表示存在的局限性,本文将可拓理论与案例推理相结合,给出了基于物元模型的知识表达结构;

2)通过可拓算子实现了对质量问题特征项在多级索引结构上的相容性求解;

3)结合基于领域知识的分层案例组织形式与最近邻检索策略实现了 608-2RS 深沟球轴承振动问题的求解.

参考文献

[1] 王宁,徐济超,杨剑锋.多级制造过程关键质量特性识别方法[J].计算机集成制造系统,2013,19(4):888-895.DOI:10.13196/j.cims.2013.04.218.wangn.007.
WANG Ning,XU Jichao,YANG Jianfeng.Identifying method of key quality characteristics in multistage manufacturing process[J].Computer Integrated Manufacturing Systems,2013,19(4):888-895.DOI:10.13196/j.cims.2013.04.218.wangn.007.

[2] 牛青,莫蓉,万能.基于二分法的多因素工序质量诊断算法[J].机械工程学报,2014,50(2):202-206.DOI:10.3901/JME.2014.02.202.
NIU Qing,MO Rong,WAN Neng.Algorithm of multi-cause process quality diagnosis based on dichotomy[J].Chinese journal of mechanical engineering,2014,50(2):202-206.DOI:10.3901/JME.2014.02.202.

[3] WANG Pei,ZHANG Dinghua,LI Shan, et al.Machining error control by integrating multivariate statistical process control and stream of variations methodology[J].Chinese Journal of Aeronautics,2012,25(6):937-947.DOI:10.1016/S1000-9361(11)60465-2.

[4] CHEN Yuting, CHIU Mingchuan.A case-based method for service-oriented value chain and sustainable network design [J].Advanced Engineering Informatics,2015 (29): 269-294.DOI:10.1016/j.aei.2015.06.005.

[5] YAN Aijun,WANG Weixian,ZHANG Chunxiao,et al. A fault prediction method that uses improved case-based reasoning to continuously predict the status of a shaft furnace[J].Information Sciences,2014,259(2):269-281.DOI:10.1016/j.ins.2013.04.025.

[6] HASHEMI H, SHAHAROUN AM, SUDIN I. A case-based reasoning approach for design of machining fixture [J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,74:113-124.DOI:10.1007/s00170-014-5930-4.

[7] 张禹,白晓兰,张朝彪,等.基于实例推理的数控车床智能模块组合方法[J].机械工程学报,2014,50(1):120-129.DOI:10.3901/JME.2014.01.120.
ZHANG Yu,BAI Xiaolan,ZHANG Chaobiao,et al.CBR-based intelligent modular combination method for CNC lathe[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2014,50(1):120-129.DOI:10.3901/JME.2014.01.120.

[8] 蔡文,杨春燕,林伟初.可拓工程方法[M].北京:科学出版社,1997:80-81.
CAI Wen, YANG Chunyan, LIN Weichu. Extension engineering method[M].Beijing:Science Press,1997:80-81.

[9] 蔡文.可拓学概述[J].系统工程理论与实践,1998(1):76-84.
CAI Wen.Introduction of Extenics[J].System Engineering Theory and Practice,1998(1):76-84.

[10] 李立希,李嘉.可拓知识库系统及其应用[J].中国工程科学,2001,3(3):61-64.
LI Lixi, LI Jia.Extension knowledge base system and its application [J].Engineering Sciences,2001,3(3):61-64.

[11] AAMODT A,PLAZA E.Case-based reasoning: Foundational issues methodological variations and system approaches [J] .Artificial Intelligence Communications,1994,7 (1):39-59.

[12] 邓军,余忠华.产品质量与过程质量的映射研究[J].中国机械工程,2010,21(17):2070-2074.
DENG Jun, YU Zhonghua.Research on mapping between product quality and process quality based on extension theory[J].China Mechanical Engineering,2010,21(17):2070-2074.

[13] 江帆,杨鹏海.TRIZ 理论与可拓学的融合方法研究[J].广州大学学报(自然科学版),2014,13(6):59-64.
JIANG Fan,YANG Penghai.Study of the combined method based on TRIZ and Extenics [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition),2014,13(6):59-64.

[14] 文天柱,许爱强,孙伟超.基于可拓案例推理的故障诊断方法[J].北京航空航天大学学报,2015,41(11):2124-2130.DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0736.
WEN Tianzhu, XU Aiqiang, SUN Weichao.Fault diagnosis method based on extension case-based reasoning[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2015,41(11):2124-2130.DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0736.

[15] TADRAT J,BOONJING V,PATTARAINTAKOM P.A new similarity measure in formal concept analysis for case-based reasoning[J]. Expert Systems with Applications,2012,39(1):967-972.DOI:10.1016/j.eswa.2011.07.096.

[16] 任凯,浦金云.基于案例属性特征区间相似度的改进算法研究[J].控制与决策,2010,25(2):307-310.DOI:10.13195/j.cd.2010.02.149.renk.026.
REN Kai,PU Jinyun.Research on mended range attributes similarity calculation models of case-based reasoning [J].Control and Decision,2010,25(2):307-310.DOI:10.13195/j.cd.2010.02.149.renk.026.

(编辑　杨　波)