

基于混合推理的枪械故障诊断

李圆圆, 王亚平, 王家浩

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要: **目的** 提高枪械研制过程中的故障诊断效率与正确率, 针对现场排除难度大、单一诊断方法准确率低且操作过程复杂等问题, 建立 RBR-CBR 混合推理模型, 实现枪械故障的快速准确诊断。**方法** 针对枪械故障因果关系复杂、随机性大和迭代更新快等特点, 提出以 RBR 为主、CBR 为辅的推理模式。采用 RETE 算法进行 RBR 推理, 提高规则匹配的效率; 采用可拓方法, 建立枪械故障实例的物元模型; 对数值型和区间型不同组合形式的局部相似度进行准确表征; 基于最近邻近法进行实例相似度分析。**结果** 基于 RBR 和 CBR 的混合推理方法, 开发了枪械故障诊断专家系统。此专家系统可有效指导研制过程中枪械故障问题的诊断和排除。**结论** 利用混合推理方法, 在保证枪械故障诊断速度的前提下, 提高了故障诊断准确率, 证明了基于 RBR 和 CBR 的混合推理方法的有效性和此专家系统的高效性。

关键词: 枪械故障诊断; RBR; CBR; RETE 算法; 物元模型; 专家系统

中图分类号: TJ206

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0026-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.005

Firearm Fault Diagnosis Based on RBR and CBR Hybrid Inference Methods

LI Yuan-yuan, WANG Ya-ping, WANG Jia-hao

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: In order to improve the efficiency and accuracy of firearm fault diagnosis, the RBR-CBR hybrid inference model is established for such problems as difficult manual site elimination, low accuracy of single diagnostic method and complex operation process, achieving rapid and accurate diagnosis of gun faults. Aiming at the characteristics of complex causal relationship, large randomness and fast iterative update of firearm faults, a reasoning mode with RBR as the core and CBR as the supplement is proposed. RBR inference is carried out by RETE algorithm to improve the efficiency of rule matching; the matter-element model of gun failure examples is established by extended method; the local similarity of different combinations of numerical and interval types is accurately characterized; and the similarity of examples is analyzed based on the nearest neighboring method. Based on the hybrid inference methods of RBR and CBR, an expert system for firearm fault diagnosis is developed. This expert system effectively guides maintenance support personnel in firearm troubleshooting. The hybrid inference method is used to improve the accuracy of fault diagnosis under the premise of ensuring the speed of firearm fault diagnosis, and the effectiveness of the RBR and CBR-based hybrid reasoning method and the high efficiency of this expert system are

收稿日期: 2022-04-30; 修订日期: 2022-06-06

Received: 2022-04-30; Revised: 2022-06-06

作者简介: 李圆圆 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为枪械可靠性分析。

Biography: LI Yuan-yuan (1998-), Female, Postgraduate, Research focus: firearm reliability.

通讯作者: 王亚平 (1975—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为枪械可靠性设计与分析。

Corresponding author: WANG Ya-ping (1975-), Female, Doctor, Associate researcher, Research focus: firearm reliability.

引文格式: 李圆圆, 王亚平, 王家浩. 基于混合推理的枪械故障诊断[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 026-034.

LI Yuan-yuan, WANG Ya-ping, WANG Jia-hao. Firearm Fault Diagnosis Based on RBR and CBR Hybrid Inference Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 026-034.

verified.

KEY WORDS: firearm fault diagnosis; RBR; CBR; RETE; matter-model; expert system

枪械是近距离作战时的单兵手持式军械,使用过程中一旦出现故障,不仅拖延战机,影响战斗成功,还会危及到战士的人身安全,因此枪械产品对可靠性的要求非常高。枪械是由枪管、发射机构、复进机构、闭锁机构等组成的复杂机械系统,这些机构共同配合,完成自动循环动作,时序上既有串联又有并联,而且为了减轻质量、缩小尺寸,枪械机构中大量采用碰撞的形式进行运动和力的传递。同时,枪械的使用环境复杂多变,要满足高温、低温、沙尘、雨水、盐雾、河水等使用环境下的可靠性要求。因此,在枪械研制过程中,枪械出现故障后很难快速地作出判断,故障诊断的正确性与及时性,对于设计者的知识水平和经验程度有很大的依赖性。

枪械故障具有如下特点: 1) 因果关系复杂,存在交叉性,同一故障可能由多种原因叠加而成。如卡弹故障,可能是由于自动复进速度低、弹匣口部变形、枪机推弹凸笋磨损等原因造成的。1 个故障源可能引起多个故障现象,如自动机后坐能量不足,可能造成卡壳、空膛、卡弹等故障。2) 故障影响因素具有随机性,枪械使用过程中会受到多种多样的随机因素的影响,包括环境因素(温度、腐蚀等)、载荷因素(火药气体力、磨损、润滑等)、制造因素(尺寸、装配质量等)等。

目前枪械的故障诊断方法有定性分析法和定量分析法。定性分析法主要是故障树分析法,根据故障现象和枪械工作原理进行逻辑分析,按照自动机机构的执行顺序,逐项检查,结合已有的检查结果和现象,排除其他因素,逐渐逼近,最终找到故障原因^[1-4]。定量分析法主要是采用建模仿真手段,建立枪械机构可靠性分析模型,通过调整影响因素取值,使得故障再现^[5-8]。故障树分析法虽然实用性强、结构简单,但由于枪械结构的特殊性,目前建立故障树的通用性较差,导致推导结果不准确。另外,随着新结构、新原理枪械的不断出现,故障树也会越来越庞大,常规的顺序推理需要对事件进行逐一遍历,推理效率低。可靠性建模仿真方法具有机理清晰的优点,但是由于枪械故障是小概率故障,需要采用大量的仿真分析样本,才能实现故障的再现,且在影响因素的选择上,仍然要依靠分析人员的经验,存在耗时长、效率低的问题。

为了提高枪械故障诊断的准确性和推理效率,本文提出基于规则(RBR)和实例(CBR)混合推理^[9-11]的枪械故障诊断方法。基于 RETA 算法进行 RBR 推理,采用可拓方法建立枪械故障实例物元模型,对数值型和区间型不同组合形式的局部相似度进行准确表征。采用最近邻近法进行实例相似度计算,并研

制开发了枪械故障诊断专家系统。本文研究可为枪械故障分析提供手段,对于提高枪械的可靠性具有应用价值。

1 基于混合推理的枪械故障诊断原理

基于规则的推理(RBR)知识表达简洁明了、容易理解、可解释性强^[11],但是由于枪械故障推理规则是由枪械历史故障归纳总结得到的,规则整理与表达专业性较强,其扩展性差。基于实例的推理(CBR)将已有的大量诊断实例、可能发生的故障和排除方案作为知识来源,通过数据关系的匹配,寻找相似问题解的方法。实例建模过程简单,其推理能力随着实例的增多而增强,并能够应用在规则难以获取的领域,其缺点是解释性差^[12]。本文针对枪械故障因果关系复杂、随机性大和迭代更新快等特点,采用以 RBR 为主、CBR 为辅的推理模式,充分结合两者的优点,提高枪械故障诊断的准确性和推理效率。

提出的基于混合推理的枪械故障诊断流程(见图 1)如下:

1) 用户输入枪械基本信息、可获得的故障现象和数据。

2) 首先进入 RBR 推理模块,利用 RETE 算法进行规则筛选与匹配,检查所得节点是否为唯一底事件。若是,则查询对应维修意见,将故障原因与维修意见输出给用户;若所得节点不是为唯一底事件,则进入 CBR 推理模块。用户确认故障原因是否正确,若正确,将此问题存入实例库中,推理结束;若不是此故障原因,则进入 CBR 推理模块。

3) 进入 CBR 推理阶段,利用可拓学物元模型和最近邻近法,计算问题与实例的相似度,保留并以表格的形式输出相似度 $\geq 85\%$ 的实例,供用户选择查看。

4) 用户选择相关实例查看细节、故障原因与维修建议,确认是否正确。若正确,则将此问题保存至实例库,推理结束;若不正确,则选择下一条相关实例,直至找到正确的故障原因。

5) 若选择完所有相似实例仍未找到正确故障原因,则人工排除故障,并将此问题存入实例库中。

2 关键技术实现

2.1 面向对象的故障树知识表达

知识表示的好坏对于推理机的推理效率和知识库的可维护性有着直接影响。知识的表达有很多形式,如谓词逻辑表示法^[13]、产生式表示法^[14]、框架

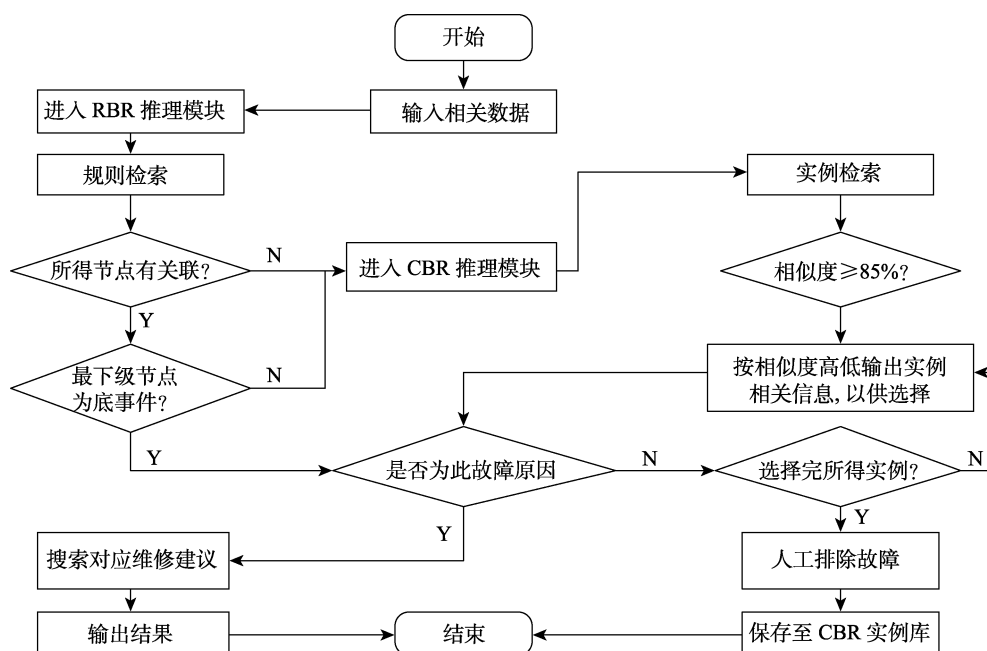


图1 混合推理流程

Fig.1 Mixed inference processes

表示法^[15]、Petri网表示法^[16]、面向对象表示法^[17]等。本文采用故障树的形式进行规则建模，故障树层次结构清晰，利于以图形化建模的方式进行构建。采用面向对象的知识表示方式对基于故障树形成的规则进行表达，面向对象的知识表示方式具有可准确高效地表达知识、便于对知识库进行操作（修改、添加、删减和搜索等）、对故障原因有准确的定位等优点。以步枪“卡弹”故障为例，建立的故障树如图2所示。由于篇幅原因，本文仅给出“供弹路线不合理”子故障面向对象的表示方式，如图3所示。

2.2 基于 RETE 算法的规则推理

为提高规则匹配算法的执行效率，本文采用

RETE 算法进行规则推理。RETE 算法的基本思想是充分利用之前匹配过程中的信息（规则、规则模式、事实、匹配情况等），以空间为代价，降低匹配过程中的计算量，提高推理机的匹配效率^[18]，其原理如图4所示。对事实和规则进行规则匹配的过程称为模式匹配，产生式内存区（Production Memory）中存放着被访问的规则，工作存储区（Working Memory）中存放需要被推理机匹配的数据。

按故障树各节点间的逻辑关系，将不同节点储存在 RETE 网络中。卡弹故障树部分节点的 RETE 网络分布如图5所示，包括 Alpha 网络和 Beta 网络。Alpha 网络用于储存规则前提，即用户可观测到的故障征兆；Beta 网络用于储存不同规则前提组合所得结果。

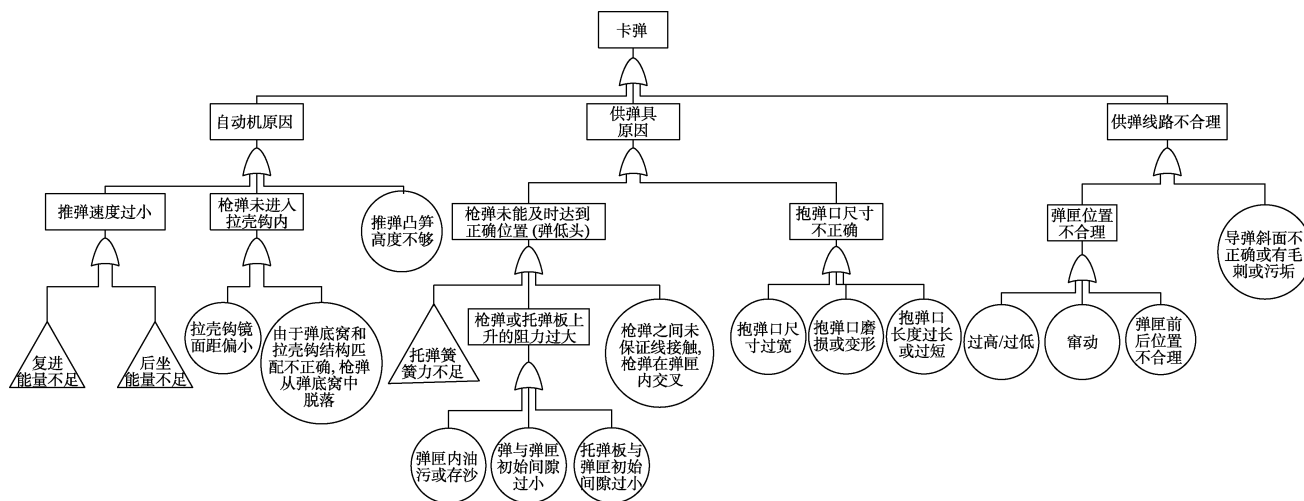


图2 步枪卡弹故障树

Fig.2 Rifle jam fault tree

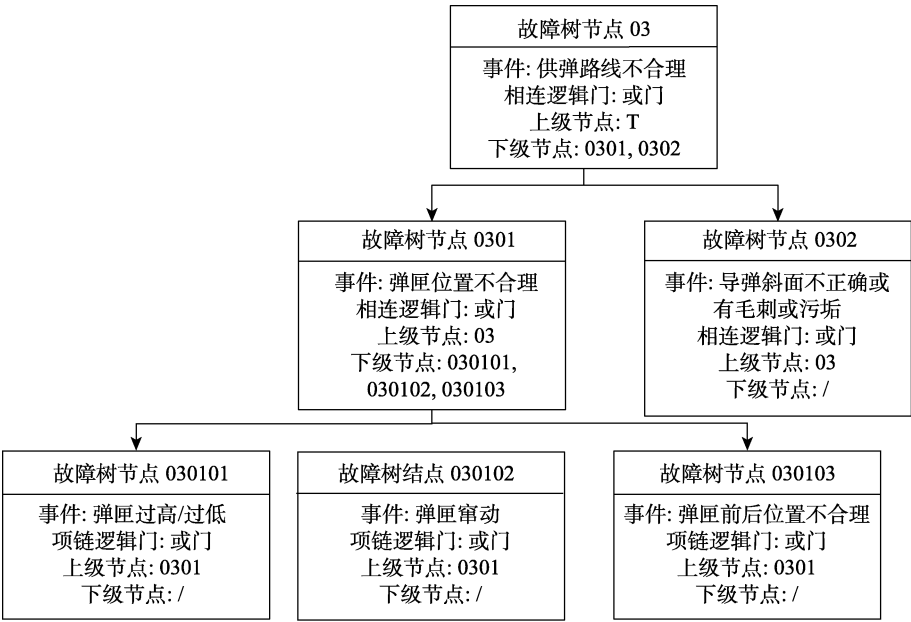


图 3 面向对象的故障树知识表达
Fig.3 Schematic diagram of object-oriented fault tree knowledge expression

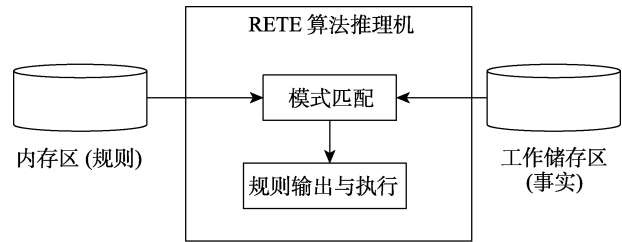


图 4 RETE 算法原理
Fig.4 RETE inference flowchart

其推理流程为：

- 1) 检查用户输入数据的类型模式，不同的类型进入不同结点进行后续筛选，提高匹配效率。
- 2) 检查是否完成所有 Alpha 结点筛选，若筛选完成，则进入下一步；若未完成，则返回步骤 1) 继续筛选。
- 3) 组合 Beta 结点。根据步骤 2) 中所得 Alpha 结点，在 Beta 网络中查找是否有组合结果。
- 4) 若有组合结果，则将所得结果 Beta 结点 n 输

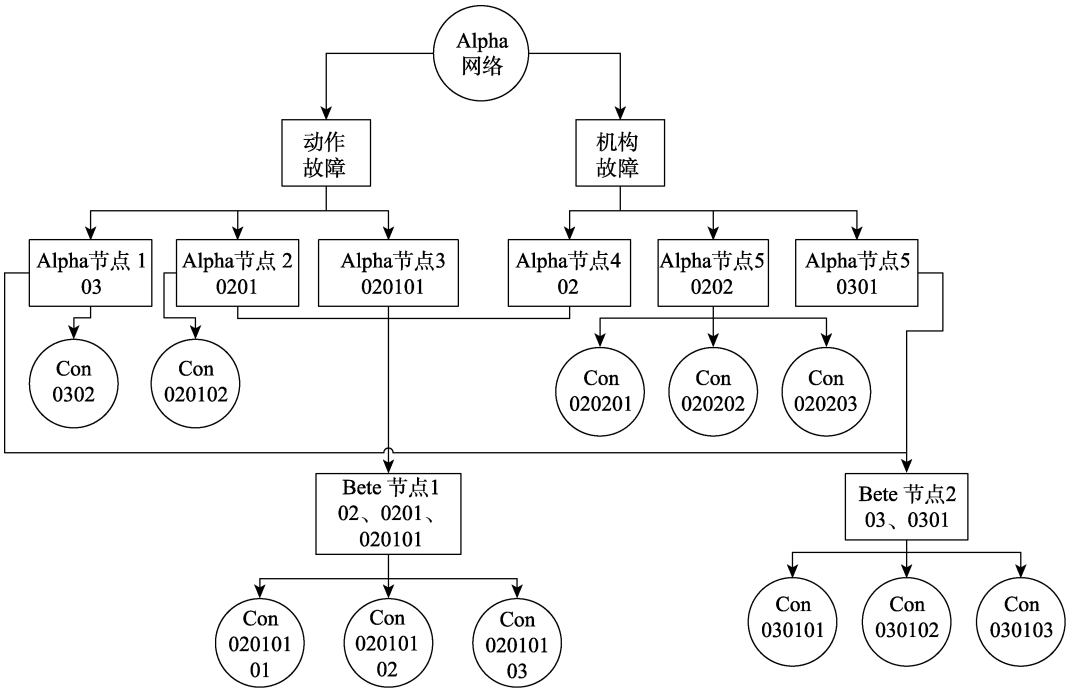


图 5 卡弹故障树部分节点 RETE 网络分布
Fig.5 RETE network distribution

出给用户。

2.3 基于物元模型的实例知识表达

本文收集了大量枪械研制过程中故障分析和处理实例,这些实例既有定性描述,又有定量描述,难以用结构化数据表达,且通常1个表象故障都对应着多个引发故障。实例知识表达是基于普通知识表示方法的一种抽象表达,其实现方式也与现有的知识表达方式(如谓词逻辑表示、面向对象表示等)一样,但这些知识表达方式通常是利用向量特征来描述实例的定量特征,缺乏定性定量相结合的表示方式,而物元模型将实例中定量特征与定性特征结合描述。因此,本文采用基于可拓方法中的物元模型^[19-21]来对枪械故障实例知识进行表达。

物元模型以物 O_m 为对象, C_m 为 O_m 的特征, V_m 为 C_m 的量值,将这三者构成一个有序的三元组: $M=(O_m, C_m, V_m)$ 。 M 作为描述物的一个基本元,称为一维物元, O_m 、 C_m 、 V_m 三者称为物元 M 的三要素,其中 C_m 与 V_m 构成的二元组 (C_m, V_m) 表示物元 O_m 的特征。

当某一物 O_m 以 n 个特征 $C_{m1}, C_{m2}, C_{m3}, \dots, C_{mi}$ 及 O_m 关于 $C_{mi}(i=1,2,3, \dots, n)$ 对应的量值 $V_{mi}(i=1,2,3, \dots, n)$ 来描述,则物元 O_m 可表示为:

$$M=(O_m, C_m, V_m)=\begin{bmatrix} C_{m1} & V_{m1} \\ O_m & C_{m2} & V_{m2} \\ & C_{m3} & V_{m3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

本文将枪械故障实例特征分2类,第一类为枪械说明特征,反映枪械具体的性能指标、结构参数与使用环境;第二类为枪械故障特征,反映枪械故障原因与维修方法。实例库模型为:

$$C_{case}=\langle O_m, M_f \cup M_d \rangle = \langle O_m, (C_f, V_f) \cup O_m, (C_d, V_d) \rangle \quad (2)$$

式中: $M_f=(C_f, V_f)$ 为实例的说明特征集; $M_d=(C_d, V_d)$ 为实例的故障特征集。

在枪械故障实例库模型的基础上,建立一个模型 P 用于实例推理。 P 由 G 和 L 组成,其中 G 是目标, L 是条件。

$$P=\begin{cases} G=(C_g, V_g), & V_g \in R^n \\ L=\langle (u, s) \rangle, & u \in O_m \end{cases} \quad (3)$$

式中:目标 G 描述了实例推理的目标需求; C_g 为枪械说明性信息特征,且 $C_g=C_f$; V_g 是目标特征对应的取值;条件 L 描述了实例库中实例的特征与目标特征元 G 的相符程度; u 是实例库中各特征的索引; s 描述了实例与目标特征 G 的相似程度。

因此,实例推理的知识表达系统为:

$$s=\begin{cases} C_{case}=\langle O_m, (C_f, V_f) \cup O_m, (C_d, V_d) \rangle \\ P=\langle G, L \rangle \end{cases} \quad (4)$$

以95式自动步枪为例,根据战技指标和结构特性,选取以下说明特征:使用口径、自动方式、供弹方式、有效射程、平均最大膛压、容弹量、供弹方式、理论射速、枪械使用环境,其说明特征集物元表示为:

$$G=\begin{bmatrix} \text{口径} & 5.8 \text{ mm} \\ \text{自动方式} & \text{导气活塞式} \\ \text{供弹方式} & \text{弹匣供弹} \\ \text{有效射程} & 400 \text{ m} \\ \text{95式自动步枪} & \text{平均最大膛压} & 284 \text{ MPa} \\ & \text{容弹量} & 30 \\ & \text{单双排} & \text{双排单进} \\ & \text{理论射速} & 600 \text{ r/min} \\ & \text{枪械使用环境} & \text{出厂试验} \end{bmatrix}$$

2.4 基于最近相邻法的实例推理

实例的检索方法决定着模型的推理效率与准确率,检索方法通常有知识引导法、神经网络法、归纳索引法和最近邻法^[22]。考虑到枪械说明性信息的独立性,本文采用最近邻法来进行实例检索。实例推理过程基本循环如图6所示。

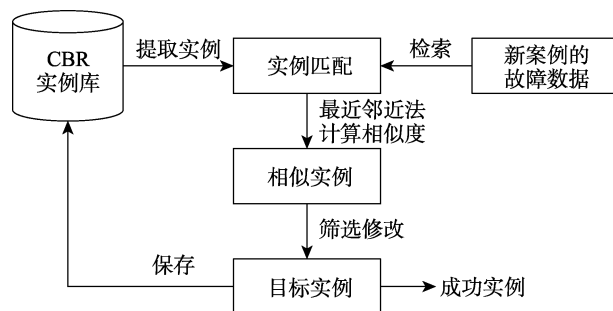


图6 基于最近相邻法的实例推理流程
Fig.6 Case Reasoning Based on Nearest Neighbor Method

推理系统若以物元模型来表达实例,则相似度是通过计算实例库中每个实例的特征元和目标特征元的接近程度来确定的。对于枪械实例模型,首先计算说明信息特征集 M_f 之间相似度,定位到具体枪械实例,再对应故障特征集 M_d 进行关键词匹配,完成检索。相似度的计算公式为:

$$S_{sim}=\sum_{k=1}^n w_k \cdot S_{es_k} \quad (5)$$

式中: w_k 为第 k 个属性的权重, $\sum_{k=1}^n w_k=1$; S_{es_k} 表示第 k 个特征元与目标特征元的相似程度,且 $S_{es_k} \in [0,1]$ 。实例对应特征相似程度越大, S_{es_k} 越大,则此实例对应故障原因为问题故障原因的可能性越大。

特征元取值类型分为确定数值和区间2种,其组合类型见表1。

表 1 组合类型
Tab.1 Combination types

Serial number	v_{gk}	v_{fk}
1	Number	Number
2	Number	Section
3	Section	Number
4	Section	Section

不同组合类型, S_{es_k} 的计算公式不同。

1) v_{gk} 与 v_{fk} 均为确定数值时:

$$S_{es_k} = 1 - \frac{|v_{fk} - v_{gk}|}{\max_m(v_{fk}) - \min_m(v_{fk})} \quad (6)$$

式中: v_{fk} 为某一实例的第 k 个特征元的特征值;
 v_{gk} 为目标问题的第 k 个目标特征元的特征值;
 $\max_m(v_{fk})$ 和 $\min_m(v_{fk})$ 所有实例中的第 k 个特征元的
最大值与最小值。

2) v_{gk} 与 v_{fk} 均为区间值时:

$$S_{es_k} = 1 - \frac{\left| \frac{v_{f1} + v_{f2}}{2} - \frac{v_{g1} + v_{g2}}{2} \right| + \left| \frac{v_{g2} - v_{g1}}{2} - \frac{v_{f1} + v_{f2}}{2} \right|}{\max_m(v_{fk}) - \min_m(v_{fk})} \quad (7)$$

3) v_{gk} 为区间值、 v_{fk} 为确定取值时:

$$S_{es_k} = 1 - \frac{|v_{fk} - v_0| + \left| v_0 - \frac{v_1 + v_2}{2} \right| - \frac{v_2 - v_1}{2}}{\max_m(v_{fk}) - \min_m(v_{fk})} = \begin{cases} 1 - \frac{|v_{fk} - v_0| + v_0 - \frac{v_2 - v_1}{2}}{\max_m(v_{fk}) - \min_m(v_{fk})}, v_0 \geq \frac{v_2 + v_1}{2} \\ 1 - \frac{|v_{fk} - v_0| + v_0 - v_1}{\max_m(v_{fk}) - \min_m(v_{fk})}, v_0 \leq \frac{v_2 + v_1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

对于 v_0 一般取区间中值点, 即 $v_0 = \frac{v_2 + v_1}{2}$, 则式
(8) 变为:

$$S_{es_k} = 1 - \frac{\left| v_{fk} - \frac{v_2 + v_1}{2} \right| + \frac{v_2 - v_1}{2}}{\max_m(v_{fk}) - \min_m(v_{fk})} \quad (9)$$

4) v_{gk} 为确定取值、 v_{fk} 为区间值时, 在实际中一般不存在此种情况, 若出现, 按照式 (9) 计算。

以某枪械故障问题数据为例, 将其与 95 式自动步枪、03 式自动步枪、56 式自动步枪、CQ 5.56mm 自动步枪实例进行相似度对比计算。目标数据、权重以及实例数据取值见表 2。其中特征权重采用基于层次分析法的专家打分法获得。

表 2 问题与实例取值
Tab.2 Questions and example values

特征	枪弹型号/mm	自动方式	供弹方式	有效射程/m	平均最大膛压 P_{max} /MPa	容弹量/r	供弹方式	理论射速 (RPM)	故障时使用环境
问题值	6.8	导气活塞式	弹匣供弹	450	220	20	双排双进	700	工厂试验
95 式自动步枪	5.8	导气活塞式	弹匣供弹	400	284	30	双排单进	600	工厂试验
03 式自动步枪	5.8	导气活塞式	弹匣供弹	400	284	30	双排单进	620	工厂试验
56 式自动步枪	7.62	导气活塞式	弹匣供弹	400	280	30	双排单进	600	鉴定试验
CQ5.56 mm 自动步枪	5.56	导气活塞式	弹匣供弹	400	365	20	双排单进	850	工厂试验
权重	0.15	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.05	0.15	0.1

对于无法转换为具体实数的特征值, 例如自动方式 (枪管短后坐、半自由枪机式和自由枪机式)、供弹方式 (单排、双排单进和双排双进), 当两者特征值描述完全一样时, S_{es_k} 取 1, 反之则取 0。根据不同组合类型公式和表中取值, 可以计算得到各特征元之间的相似度 S_{es_k} 。

3 枪械故障诊断专家系统开发

本文结合枪械故障机理与提出的混合推理故障诊断方法, 研制开发了枪械故障诊断专家系统。为了

满足测试系统日后的维护和升级需要, 本系统软件采用模块化设计理念, 整个系统主要由登录模块、基础信息管理、故障模型管理模块、故障诊断模块和帮助模块 5 个部分。其中基础信息管理模块包括故障现象管理、故障原因管理、维修建议管理、用户权限管理、用户信息管理; 故障诊断模块包含枪械故障诊断与维修建议; 故障模型管理模块包括故障树诊断模型的查看与更新、实例模型的查看。

采用枪械历史故障数据作为测试数据, 对所设计的专家系统进行试操作。具体步骤如下。

1) 挑选一条枪械历史故障数据, 在输入界面输

入枪械相关信息,如图7所示。

2) 点击“开始诊断”,得到的诊断结果如图8所示。

由推理过程可得,在RBR推理阶段未能得到唯一底事件(即故障原因),系统自动进入CBR推理阶

段,并给出相似度由高到低3个枪械实例的故障原因,分别为“弹匣晃动”、“弹匣过高”和“弹下前后位置不合理”。由历史故障数据可知,此枪械故障原因为“弹匣晃动”。由此可知,该专家系统准确度较高。

图7 用户输入界面
Fig.7 User input interface

实例序号	实例名称	故障原因	相似度
1	03式自动步枪	弹匣晃动	89.9%
2	95式自动步枪	弹匣过高	86.9%
3	CQ56式自动步枪	弹匣前后位置不合理	85.5%

图8 诊断结果界面
Fig.8 Diagnosis result interface

4 结论

本文对于枪械故障因果关系复杂、随机性大和迭代更新快等特点,提出了一种基于RBR和CBR混合推理方法。得出如下结论。

1) 将RETA算法引入RBR推理模块,提高了推理效率。

2) 采用可拓方法建立枪械故障实例物元模型,将枪械实例的定性特征与定量特征有机结合起来,使实例的知识表达更为简洁明确。

3) 利用Visual Basic语言和MySQL数据库编写构建枪械故障诊断专家系统,为枪械故障分析提供手段,对于提高枪械的可靠性具有应用价值。

由于采用基于最近相邻法的实例推理过程中特征权重的确定对于相似性计算非常重要,本文采用了基于层次分析法的专家打分法,但这种方法的主观性较强,后续工作中可进一步探索客观赋权方法的应用。

参考文献:

- [1] 刘延友, 徐万和, 李忠新. 枪械机构故障可靠性分析方法研究[J]. 军械工程学院学报, 2013, 25(3): 19-22.
LIU Yan-you, XU Wan-he, LI Zhong-xin. Reliability Analysis Method of Gun's Mechanism Fault[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2013, 25(3): 19-22.
- [2] 张世隆. 内能源转管武器可靠性分析[D]. 太原: 中北

- 大学, 2011.
- ZHANG Shi-long. Reliability Analysis of Self-Sufficiency Gatling Gun[D]. Taiyuan: North University of China, 2011.
- [3] 蔡伟, 王瑞林, 李涛. 基于模糊故障树的某型步枪卡弹故障机理分析[J]. 科技通报, 2013, 29(6): 50-52.
- CAI Wei, WANG Rui-lin, LI Tao. Jamming of Cartridge of Certain Rifle Mechanism Analysis Based on Fuzzy Fault Tree[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(6): 50-52.
- [4] 余家武. 某型自动步枪可靠性分析[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(3): 39-43.
- YU Jia-wu. Reliability Analysis of an Automatic Rifle[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2009, 30(3): 39-43.
- [5] 王亚平, 徐诚, 宋梅利. 机构变参数设计与动作可靠性分析的一种新方法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2002, 26(5): 449-452.
- WANG Ya-ping, XU Cheng, SONG Mei-li. A New Method of the Variant Parametric Design and the Motion Reliability Analysis of the Mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(5): 449-452.
- [6] 袁克斌, 方峻. 考虑环境因素影响下某机枪抛壳可靠性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 80-85.
- YUAN Ke-bin, FANG Jun. Reliability Analysis of a Machine Gun Catridge Case Ejection Considering Environmental Factors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 80-85.
- [7] 黄玲, 张丽平, 方峻. 考虑尺寸链约束的枪械典型机构动作可靠性优化[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 35-39.
- HUANG Ling, ZHANG Li-ping, FANG Jun. Action Reliability Optimization of Typical Automatic Weapons Mechanism Considering Chain Constrains[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(9): 35-39.
- [8] 邹衍, 徐诚, 罗少敏, 等. 自动步枪刚性抛壳可靠性分析与设计方法研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 209-217.
- ZOU Yan, XU Cheng, LUO Shao-min, et al. Study of Rigid Ejection Reliability Analysis and Design Method of Automatic Rifle[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 209-217.
- [9] 江山青. 基于规则和案例 D-S 证据融合的坦克火控系统故障诊断专家系统的研究与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- JIANG Shan-qing. Redesrch and Application of Tank Fire Control System Fault Diagnosis Expert System Based on Rule and Case D-S Evidence Fusion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [10] 张强, 剡昌锋, 王慧滨, 等. 基于规则与案例推理的汽轮发电机组故障诊断专家系统[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(6): 52-59.
- ZHANG Qiang, YAN Chang-feng, WANG Hui-bin, et al. Fault Diagnosis Expert System of Turbine Generator Based on Rule Reasoning and Case Reasoning[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(6): 52-59.
- [11] 郜斐, 林元, 赵锋锐. 一种基于故障树和案例推理的故障诊断模型[J]. 电子技术与软件工程, 2015(16): 209-211.
- GAO Fei, LIN Yuan, ZHAO Feng-rui. A Fault Diagnosis Model Based on Fault Tree and Case-Based Reasoning[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2015(16): 209-211.
- [12] 柳玉, 贲可荣. 案例推理的故障诊断技术研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2011, 5(10): 865-879.
- LIU Yu, BEN Ke-rong. Survey of Fault Diagnosis Based on Case Reasoning[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2011, 5(10): 865-879.
- [13] 宋志航, 徐小力. 基于逻辑推理的转子故障诊断专家系统[J]. 微计算机信息, 2010, 26(1): 99-101.
- SONG Zhi-hang, XU Xiao-li. Diagnosis Expert System Based on Inference Control[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(1): 99-101.
- [14] 彭华亮, 沈暑龙, 李军, 等. 基于故障树的故障诊断专家系统设计[J]. 控制工程, 2019, 26(3): 584-588.
- PENG Hua-liang, SHEN Shu-long, LI Jun, et al. Design of Diagnostic Expert System for Launch Vehicles Based on FTA[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(3): 584-588.
- [15] 胡良明, 徐诚, 李万平. 基于案例推理的自行火炮故障诊断专家系统[J]. 火炮发射与控制学报, 2006, 27(2): 53-57.
- HU Liang-ming, XU Cheng, LI Wan-ping. Self-Propelled Gun Fault Diagnosis Expert System Based on Case Reasoning[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2006, 27(2): 53-57.
- [16] 张银图. 基于感知模糊 Petri 网的自动装弹机故障诊断系统的研究与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- ZHANG Yin-tu. Research and Application of Fault Diagnosis Method for Automatic Loader Based on Perceptual Fuzzy Petri Net Imageencryption[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [17] 苏健, 陈玉强, 陈军伟, 等. 基于故障树分析的火控系统故障诊断专家系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(11): 3008-3010.
- SU Jian, CHEN Yu-qiang, CHEN Jun-wei, et al. Design of Expert System of Fault Diagnosis Based on Fault Tree Analysis Method Applied for Fire Control System[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(11): 3008-3010.
- [18] 郝天宇, 李英顺, 石阳, 等. 基于 Rete 算法的自动装填系统故障诊断系统设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(21): 38-41.
- HAO Tian-yu, LI Ying-shun, SHI Yang, et al. Design of Fault Diagnosis System of Automatic Loading System Based on Rete Algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(21): 38-41.
- [19] 雷兵, 张龙, 吴荣真, 等. 滚动轴承故障时序可拓智能诊断方法[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5): 88-93.
- LEI Bing, ZHANG Long, WU Rong-zhen, et al. Fault

- Diagnosis of Rolling Bearings Based on Extended AR Model[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(5): 88-93.
- [20] 刘胤, 王慧忠, 姜周曙, 等. 基于可拓物元模型的故障诊断研究与应用[J]. 测控技术, 2018, 37(9): 72-76.
LIU Yin, WANG Hui-zhong, JIANG Zhou-shu, et al. Research and Application of Fault Diagnosis Based on Extension Matter-Element Model[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(9): 72-76.
- [21] 文天柱, 许爱强, 王怡苹. 基于可拓规则推理的故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3): 506-513.
- WEN Tian-zhu, XU Ai-qiang, WANG Yi-ping. Fault Diagnosis Method Based on Extension Rule-Based Reasoning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(3): 506-513.
- [22] 杜亮, 关凯楠, 张禹, 等. 基于 CBR-RBR 模型的焊接工程信息一体化研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(12): 79-83.
DU Liang, GUAN Kai-nan, ZHANG Yu, et al. Research on Welding Engineering Information Integration Based on CBR-RBR Model[J]. Welding Technology, 2021, 50(12): 79-83.

责任编辑: 刘世忠