

面向 CBR 的末段高层反导部署案例库构建与使用

刘启琛¹, 宋文静^{2*}, 商长安¹, 王希^{1,3}

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 西北政法大学, 西安, 710063; 3. 西安卫星测控中心, 西安, 710043)

摘要 为了使基于案例推理(CBR)技术在末段高层反导部署中的应用能更好地提高反导部署的效率,研究了末段高层反导部署案例库的构建与使用问题。首先,研究了案例库的组织与构建问题,主要围绕案例的表达、案例库的组织结构和案例库的构建流程展开;其次,研究了案例库的应用,其核心内容是相似案例的检索匹配,并给出了实例分析;最后,研究了案例库的精简问题。

关键词 基于案例推理;末段高层反导;案例库构建;检索匹配

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.05.009

中图分类号 E072 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)05-0072-08

Construction and Use of the Case Library of the Terminal High-Level Anti-Missile Deployment for CBR

LIU Qichen¹, SONG Wenjing^{2*}, SHANG Chang'an¹, WANG Xi^{1,3}

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Xi'an Satellite Measuring and Controlling Centre, Xi'an, China)

Abstract In order to make a case-based reasoning technology even more effective in the high-level anti-missile deployment at the terminal section, this paper studies construction and use of case library in the high-level anti-missile deployment at the final stage. Firstly, the organization and the construction of the case database are studied, i. e. the expression of cases, the organizational structure of the case database and the construction process of the case database. Secondly, the application of the case database is studied, i. e. core content of which retrieval is done and matching of similar cases is made, and the case analysis are given. Finally, the problem of streamlining the case library is studied. The research content is involved with most of the problems in the process of building and using the case library.

Key words case-based reasoning; terminal high-level anti-missile; construction of case library; retrieval and matching

随着弹道导弹技术的不断更新,反导作战的重要性日益凸显,反导作战的难度也越来越大。为了提高反导效率,末段高层反导系统应运而生,与末段

低层反导系统一起构成了末段反导的主战装备。与末段低层反导系统不同,末段高层反导系统是一种“专职”的反导系统,并不承担反空气动力目标任务,

收稿日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(72071209)

作者简介: 刘启琛(1999-),男,广东佛山人,硕士生,研究方向为防空反导作战运筹。E-mail:90605101715@163.com

通讯作者: 宋文静(1979-),女,湖南常德人,实验师,博士,研究方向为系统建模与仿真。E-mail:811627389@qq.com

引用格式: 刘启琛,宋文静,商长安,等.面向 CBR 的末段高层反导部署案例库构建与使用[J].空军工程大学学报,2023,24(5):72-79. LIU Qichen, SONG Wenjing, SHANG Chang'an, et al. Construction and Use of the Case Library of the Terminal High-Level Anti-Missile Deployment for CBR[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 72-79.

而且掩护的是一个区域内的所有目标,并不用于保卫单个目标或一个小面积的区域。

末段高层反导系统效能的发挥与其部署位置密切相关,如部署不当则不能充分发挥先进装备的效能,从而造成浪费。在反导系统的部署问题上,常采取人机结合反复推演的方式,根据来袭目标的信息以及反导系统的火力范围确定反导系统的部署位置。这样的方式直观形象,但是耗时费力,并不能适应越来越快的战争节奏。由于弹道导弹的飞行轨迹较为稳定,作战过程中的变数较小,所以可以采取基于案例推理技术(case-based reasoning, CBR)解决此问题。

基于案例推理是依据过去解决类似问题积累的案例来求解新问题的推理模式^[1],这一模式与人类学习新知识的过程颇为相似,是人工智能的关键技术之一,采用此方法解决问题首先是要建立与目标问题相关的案例库。在案例库构建研究方面,王琳进行了面向突发事件的粮食应急案例库本体构建研究^[2],陆莹等提出了基于案例推理的地铁运营安全事故案例库构建的方法^[3],陈维义等提出了面向 CBR 的案例库组织与快速检索方法^[4]。本文中的案例库是为了适应案例推理技术解决问题的需要而构建的,库中案例来源于计算机模拟推演中的反导作战行动。本文除了研究案例的表示方法及案例库的组织方法外,还对案例库的具体应用方法即相似案例的检索匹配方法进行了研究。

1 案例库的组织与构建

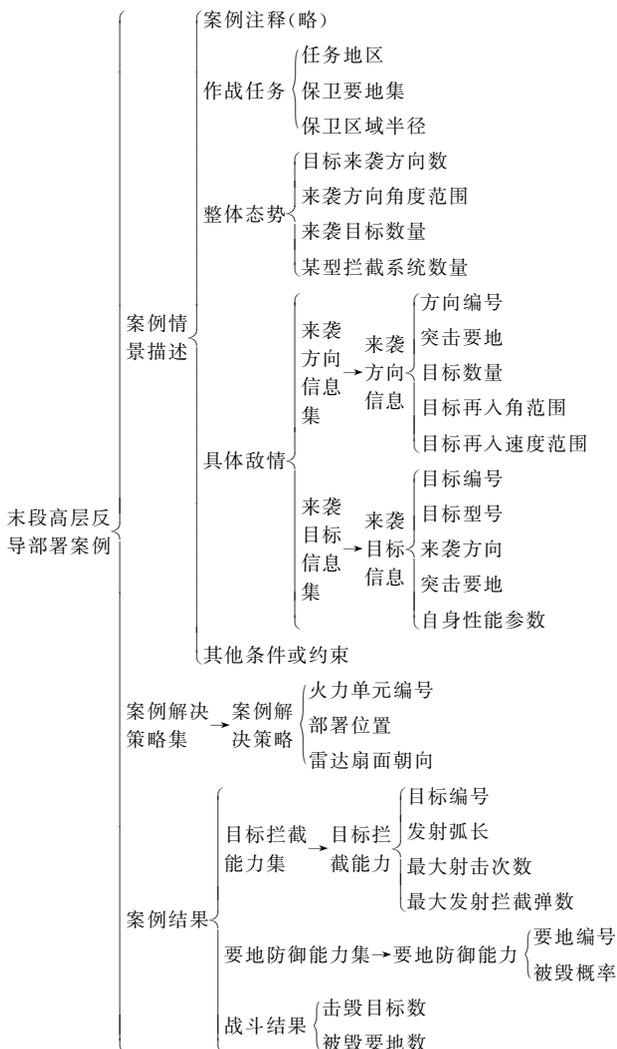
1.1 案例的表示方法

案例库的构成要素是一个个的案例,案例是对一个事物或一个活动的概括性表达。在末段高层反导作战部署案例库中,一个案例代表了一次反导作战行动,包含案例注释、案例情景描述、案例解决策略以及案例结果四部分,每一部分包含若干属性。案例情景描述是进行案例相似性度量的关键部分,案例解决策略是针对案例中具体问题的解决措施,在本文中即为末段高层反导火力单元的部署位置和雷达扇面朝向,案例结果即为相应的解决策略所取得的作战效果,在本文中为对每个来袭目标的射击效果。案例采用(case based markup language, CBML)语言描述,其文档结构形式如图 1 所示。

案例情景描述是一个从整体到局部的过程,既有对整体态势的描述,也有对具体敌情即各来袭方向信息和各来袭目标信息的描述,还明确了与作战任务相关的信息。如果两个案例的案例情景描述部

分较为相似,则它们之间的相似度较高。

为了满足案例表达的需要,我们给每个在战时可能被敌方攻击的重要目标以及在曾经的演习或计算机模拟推演中保卫过的其他要地赋予编号,案例描述中的保卫要地以编号的形式呈现。若在将来解决问题的过程中出现了新的保卫要地,则给予其新的编号。对各保卫要地的重要性需定期进行评估,若某要地的重要性显著降低则不再将其作为保卫要地,并根据不同情况对包含该要地的案例做出保留或剔除的决定。



根据所有已编号的保卫要地在地理空间上的分布情况,可以将各保卫要地聚类,划分为任务地区。若两个保卫要地能处于同一套末段高层反导武器系统的掩护区内,则它们处于同一个任务地区。

在一次末段高层反导作战行动中,能够覆盖该次作战所有保卫要地的最小圆就是保卫区域。在后续的相似性度量中,在任务地区一致的情况下,对于作战任务的相似性度量要综合考虑保卫要地与保卫区域半径的相似性。

从整体态势到具体敌情是一个由浅入深的过程,也是后续检索匹配相似案例时的递进过程。作战任务和整体态势是“类匹配”的考虑因素,目标来袭方向角度为来袭方向与正北方向在顺时针上的夹角。在“细匹配”时,要度量具体敌情的相似性,即来袭方向信息的拟合程度,每个来袭方向信息是对该方向上所有来袭目标的概括性描述。具体的检索匹配方法和相似性度量方法将在后文中叙述。

每个案例解决策略代表一套反导系统的部署情况。考虑到每个任务地区的大小不同,对应案例中拦截系统数量上限也不一样。若在将来解决新问题时出现了更多的拦截系统,则可将一个问题分解为若干小问题,再分别用案例推理的方法解决。

案例结果中的射击效果和要地防御效果是根据敌情和拦截系统性能以及部署位置计算出的结果,战斗结果是在当次反导作战行动中所取得的实际成果。射击效果和要地防御效果是案例结果部分的突出内容,决定了某次反导作战行动是否能被列入案例库。

将案例的文档结构形式转换为内容文档,以案例情景描述部分的整体态势为例,其内容文档用 CBML 语言描述为:

```

<整体态势>
  <来袭目标数>10</来袭目标数>
  <目标来袭方向数>3</目标来袭方向数>
  <来袭方向角度范围>  $\theta > 90$  and  $\theta < 140$  </来袭方向角度范围>
  <某型拦截系统数量>1</某型拦截系统数量>
</整体态势>

```

1.2 案例库的组织结构

案例库中有众多案例,在检索匹配时为了提高效率,需在检索到相似案例的前提下尽量减少遍历的案例数,为此划分了多级子案例库。在进行相似案例的检索匹配时,与“相应的子案例库中的案例”度量相似性,以提高检索匹配的效率。本文中案例库的组织结构是基于树形结构的,如图 2 所示。

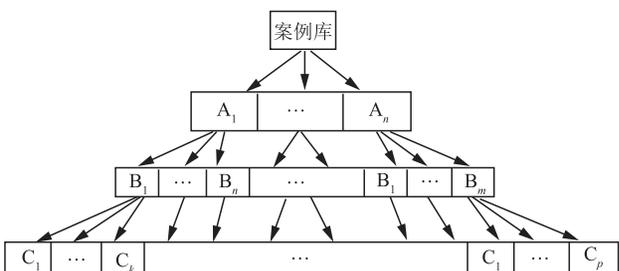


图 2 案例库组织结构

末段高层反导作战部署案例库由三级子案例库组成。第一级按任务地区划分,第二级在第一级子案例库中按反导系统数量划分,第三级在每个第二级子案例库中通过聚类运算形成。第一、二级子案例库根据案例相似性度量中的关键属性划分,第三级子案例库为各第二级子案例库中的案例经过聚类运算形成的。第一级子案例库的划分依据是任务地区,库的数量与任务地区数量相等。在每个第一级子案例库下第二级子案例库的划分依据是拦截系统数量。在每个第二级子案例库中,通过聚类运算,如模糊聚类、k-means 聚类等可将案例分为若干类,即形成了若干第三级子案例库,每个第三级子案例库隶属于对应的第二级子案例库。案例的索引结构与组织结构一致,为三层索引结构,分别为地区码(A)、装备码(B)和聚类码(C)索引,分别对应三级子案例库。案例库中的每个案例都有基于组织结构和索引模式赋予的编号,格式为 $A_x - B_x - C_x - XX$,如某个案例,任务地区代号为 1 号地区,作战时有 2 套拦截系统,属于某二级子案例库下的第二类三级子案例库,则其编号为 $A_1 - B_2 - C_2 - XX$ 。

1.3 案例库的构建流程

在以往的演习和计算机模拟推演中,有相当数量的反导作战行动,为案例库的构建提供了许多素材,但不是所有的反导作战行动都能抽象成案例进入案例库中。根据末段高层反导作战的实际,能进入案例库的末段高层反导部署案例,其案例的结果应为在各来袭方向的导弹同时来袭时,对每个高低两层反导系统均能拦截的来袭目标发射的高层拦截弹数量至少为 1 枚,对每个只有高层反导系统才能拦截的来袭目标发射的高层拦截弹数至少为 2 枚。案例库的构建是一个动态的过程,构建完成后的案例库并不是一成不变的,在将来使用的过程中会不断地调整。案例库的构建流程如图 3 所示。

案例库的构建也是一个循环的过程。每使用案例库一段时间后,库中案例会增多,需定期对案例库进行维护,在维护过程中会进行案例精简,将已不符合实际作战背景的案例和一些高度重复的案例剔除出案例库,并视情对剩余案例重新聚类,即重新划分三级子案例库。这样的过程在案例库的运行中会不断重复,也可以看作对案例库的重新构建。

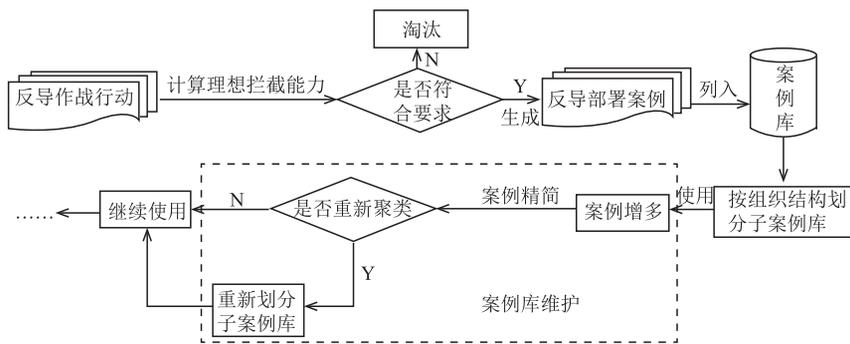


图 3 案例库构建流程

2 案例库的应用

2.1 相似案例的检索匹配

2.1.1 检索匹配步骤

相似案例的检索匹配是一个由“粗”到“细”的过程,按照案例库的组织结构及索引层次,依据目标问题中的关键属性,可以快速找到目标问题对应的二级

子案例库,这一步为“粗选”;其次进行类别排序,即将目标问题中的整体态势与各三级子案例库进行相似性度量,以确定依据目标问题查阅各三级子案例库中的优先级;最后按照类别排序中得出的各三级子案例库的优先级,与每个案例进行具体敌情相似性的度量,度量时设定相似度阈值为 0.7,即“案例匹配”。当目标问题在某三级子案例库中检索到若干相似度超过阈值的案例时,不再查阅后续的三级子案例库中的案例,这一步为“精选”。检索匹配流程如图 4。

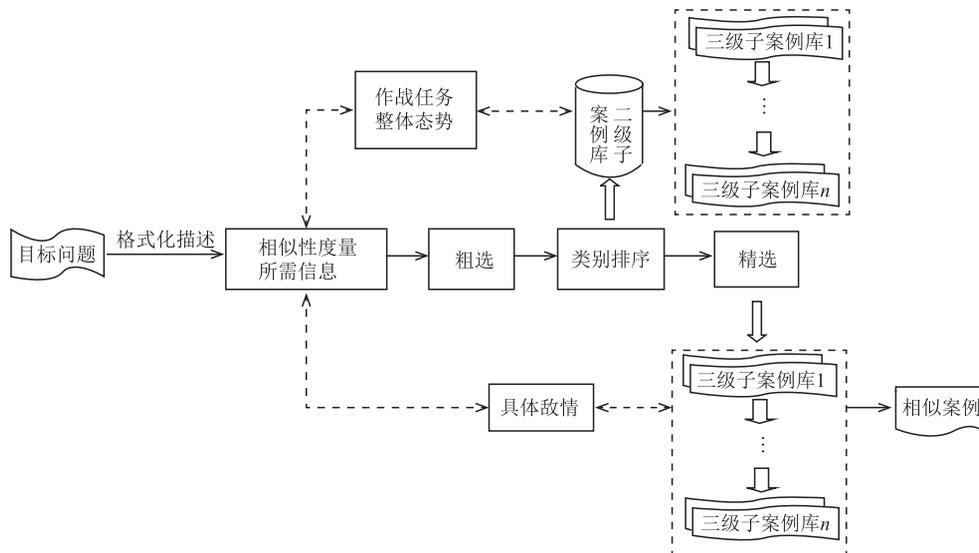


图 4 相似案例检索匹配流程

2.1.2 相似性度量方法

案例库应用的核心问题是相似案例的检索匹配,而检索匹配的关键是案例的相似性度量。本文中度量案例的相似性实际上就是度量案例情景描述部分的相似性,其中,“类别排序”时度量的是作战任务和整体态势的相似性,“案例匹配”时度量的是具体敌情即来袭方向信息的相似性。将案例属性分为关键属性、确定数值属性、区间值属性和集合型属性等,度量时分别对这几类类型的属性进行局部相似性度量,尔后进行全局相似性度量。

1) 关键属性

关键属性对案例具有决定性的作用,关键属性不同的案例,其相似度直接为 0。关键属性为任务地区和某型拦截系统数量。计算公式为:

$$\text{sim}_1(t_k, s_{ik}) = \begin{cases} 1, t_k = s_{ik} & \text{或“属性符合要求”} \\ 0, t_k \neq s_{ik} & \text{或“属性不符合要求”} \end{cases} \quad (1)$$

式中: sim 为属性间的相似度; t_k 指目标问题中第 k 个度量属性的变量; s_{ik} 指第 i 个案例与目标问题相对应的度量属性的变量,下同。

2) 确定数值属性^[5]

对于确定数值属性的度量,一般采用基于兰氏距离的方法,减小数值大小的影响。也可根据数值属性的意义确定度量方法,如角度值可采用基于余弦值的度量方法。确定数值属性的相似度方法为:

$$\text{sim}_2(t_k, s_{ik}) = 1 - \frac{|t_k - s_{ik}|}{t_k + s_{ik}} \quad (2)$$

3) 区间值属性^[6]

区间值属性指存在取值范围的属性,这类属性

在末段高层反导部署案例中主要体现在对目标来袭方向角度、再入角和再入速度的描述上。其度量方法为：

$$\text{sim}_3(T_k, S_{ik}) = \begin{cases} 1 - \frac{|t_k - s_{ik}|}{t_k + s_{ik}}, T_k = [t_k, t_k] \text{ 且 } S_{ik} = [s_{ik}, s_{ik}] \\ \frac{|T_k \cap S_{ik}|}{|T_k \cup S_{ik}|}, \text{ 其余情况} \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_k 指目标问题某区间值属性的区间值； S_{ik} 为案例中对应属性的区间值。

4) 文本型属性

文本型属性中，有些文本是字符的集合，其度量方法一般而言与区间值属性类似，也是基于交集与并集的度量方法。但如果集合中的元素还含有描述信息且每个元素的描述信息组成要素相同，则还可采用考察集合间元素所含信息的拟合程度来度量集合的相似性，此时应首先确定集合间元素的对应关系，通过度量对应元素的信息拟合程度来度量整体的信息拟合程度。具体操作方法如下：

设有文本型(集合)属性 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ，且 $m > n$ ，根据所含元素的某一关键特征确定配对初始矩阵为：

$$U = \{u_{ij}\}$$

矩阵中 u_{ij} 为关键特征的相似度值，其中 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ 。

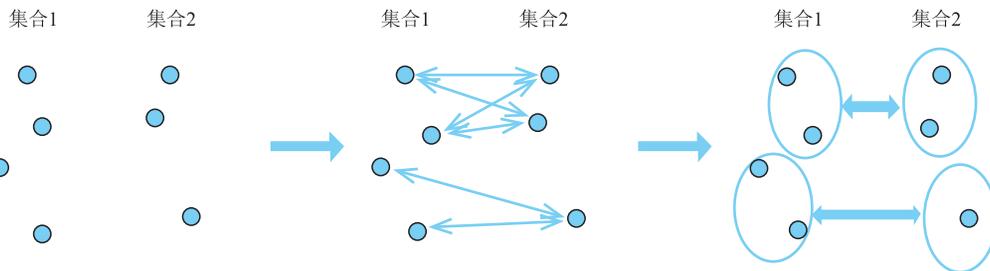


图5 对应元素组确定过程

图5中小圆点代表集合中的元素，细箭头代表元素的对应关系，粗箭头代表元素组的对应关系。

局部相似性度量结束后进行全局相似性度量。“类别排序”时，利用(analytic hierarchy process, AHP)等方法确定各度量一级指标的权重，再确定各一级指标下各度量属性的权重，使用加权求和法最终求出全局相似度^[7]。“案例匹配”时，确定元素所含信息的各度量属性权重，再观察集合间的元素有多少对对应关系，每一对对应元素信息的拟合程度在整体信息拟合程度中权重相等。

在“类别排序”中，与目标问题进行相似性度量的并不是具体的案例，而是每一个三级子案例库的聚类均值点。目标问题离某个聚类均值点越近，则

现借鉴模糊聚类中对模糊等价矩阵的处理方法对配对初始矩阵进行处理。将 u_{ij} 由大到小排列，

从 $\lambda = u_{ij \max}$ 开始依次取值求截阵 U_λ ，当满足 $\sum_{i=1}^n u_{\lambda ij} > 0$ 且 $\sum_{j=1}^m u_{\lambda ij} > 0$ 时即得到初始配对矩阵为：

$$U' = \{u'_{ij}\}$$

对初始配对矩阵的处理如下：

a. 若初始配对矩阵满足 $\sum_{i=1}^n u'_{ij} = 1$ ，则初始配对矩阵即为最终配对矩阵。

b. 若初始配对矩阵中存在 $\sum_{i=1}^n u'_{ij} > 1$ ，则观察其是否能够通过初等列变换中两列相减的方式减少“1”的数量，但要保证变换后的矩阵中满足 $\sum_{i=1}^n u'_{ij} > 1$ 和 $\sum_{j=1}^m u'_{ij} > 0$ 且不改变矩阵的构成元素。如可行，则按此方法得到最终配对矩阵，否则初始配对矩阵也即为最终配对矩阵。

由此确定最终配对矩阵为：

$$U'' = \{u''_{ij}\}$$

此时元素“1”所在的行与列所代表的元素有对应关系，进而确定存在几对对应元素组。将元素组中的元素描述信息合并，按此对应关系计算该类型文本型属性的相似度。对应元素组的确定过程示意图5。

说明目标问题与该三级子案例库中的案例进行相似性度量的优先级越高。聚类均值的计算方法如下：

a. 确定数值属性的均值即为三级子案例库中所有案例的该属性的均值，计算公式为：

$$\bar{s}_{ik} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{ik} \quad (4)$$

b. 区间值属性的均值计算方法要考虑区间的长度与区间中值，区间值属性均值的中值即为该三级子案例库中所有该属性的中值的均值，长度为所有该属性的长度的均值，由此可得出该类属性的均值为 $\bar{S}_{ik} = [\bar{\delta} - \frac{1}{2}\bar{l}, \bar{\delta} + \frac{1}{2}\bar{l}]$ ， $\bar{\delta}$ 为各案例中该属性的中值的均值， \bar{l} 为该属性的长度均值。

c. 文本型属性的均值计算方法主要考虑各案例的该属性中各元素出现的频率,若某元素在多个案例的该属性中都能出现,则其存在于该属性的聚类均值中。将某三级子案例库中各案例的同一文本型属性取并集,文本型属性的均值中的元素满足以下条件:

$$p_k \geq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (5)$$

式中: p_k 为并集中某元素在所有案例的该属性中出现的频率; n 为并集中元素个数; $\sum_{i=1}^n p_i$ 为并集中各元素出现的频率之和。

2.1.3 应用实例分析

现有目标问题:综合各信息源判断,敌方计划使用 15 枚弹道导弹从 3 个方向对我 1 号地区 7 个保卫要地进行打击,经过对各来袭目标的弹道进行预测,得到各目标相关信息见表 1。

表 1 各来袭目标相关信息

目标序号	目标型号	来袭方向序号	来袭角度/(°)	突击要地编号	再入角度/(°)	再入速度/(m/s)
1	A	2	112	16	48	3 600
2	B	2	112	9	30	3 818
3	A	3	201	11	48	3 267
4	C	3	201	3	39	3 786
5	B	2	112	8	30	3 818
6	A	1	87	15	48	3 184
7	C	2	112	9	39	3 206
8	C	3	201	5	39	3 786
9	B	1	87	15	30	3 242
10	C	2	112	16	39	3 206
11	C	2	112	16	39	3 206
12	C	3	201	16	39	3 786
13	A	2	112	3	48	3 600
14	C	1	87	8	39	3 097
15	C	2	112	9	39	3 206

我方现有 2 套某型末段高层反导武器系统,需将其部署至合适的地点以抗击来袭弹道导弹。

将目标问题按案例情景描述部分进行格式化描述后,得出目标问题的“类别排序”度量属性如表 2 所示,各来袭方向信息如表 3 所示。

表 2 “类别排序”度量属性

作战地区编号	保卫要地集	保卫区域半径/km	目标来袭方向数	来袭方向角度范围/(°)	来袭目标数	某型拦截系统数
1	{3,5,8,9,11,15,16}	24	3	[87,201]	15	2

表 3 各来袭方向信息

方向编号	方向角度/(°)	突击要地集	目标数量	再入角度范围/(°)	再入速度范围/(m/s)
1	87	{8,15}	3	[30,48]	[3 097,3 242]
2	112	{3,8,9,16}	8	[30,48]	[3 206,3 818]
3	201	{3,5,11,16}	4	[39,48]	[3 267,3 786]

根据关键属性匹配对应的二级子案例库,该子案例库下的各三级子案例库的聚类均值见表 4。

表 4 备选三级子案例库聚类均值

案例库代号	保卫要地集	保卫区域半径/km	来袭方向数	来袭方向角度范围/(°)	来袭目标数
A ₁ -B ₂ -C ₁	{1,4,5,7,9,10,11,12,13,16}	25	4.0	[29.60,94.35]	17.20
A ₁ -B ₂ -C ₂	{6,11,16,17}	12	3.3	[68.30,213.65]	14.00
A ₁ -B ₂ -C ₃	{2,3,5,8,9,14,15}	25	2.5	[86.75,210.50]	14.25

利用 AHP 法计算得“保卫要地集、保卫区域半径、目标来袭方向数、来袭方向角度范围、来袭目标数”的权重分别为“0.416、0.078、0.167、0.278、0.061”。根据相似性度量方法计算目标问题与各聚类均值的相似度 SIM,匹配相应的三级子案例库:

$$\begin{aligned} \text{SIM}(T, S_{C_1}) &= 0.416 \times \frac{4}{13} + 0.078 \times (1 - \frac{25-24}{25+24}) + \\ & 0.167 \times (1 - \frac{4-3}{4+3}) + 0.278 \times \frac{94.35-87}{201-29.6} + \\ & 0.061 \times (1 - \frac{17.2-15}{17.2+15}) = 0.42 \end{aligned}$$

同理得:

$$\text{SIM}(T, S_{C_2}) = 0.58$$

$$\text{SIM}(T, S_{C_3}) = 0.77$$

根据以上计算结果,查阅各三级子案例库的优先级顺序为 A₁-B₂-C₃、A₁-B₂-C₂、A₁-B₂-C₁。A₁-B₂-C₃ 中各案例来袭方向信息见表 5。

表 5 相应三级子案例库中各案例来袭方向信息

案例编号	来袭方向角度/ (°)	突击要地	目标数量	再入角范围/ (°)	再入速度范围/ (m/s)
A ₁ -B ₂ -C ₃ -1	97	{2,3,5,8,9,15,16,17}	8	[35,56]	[3 687,3 928]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -2	207	{2,5,13}	3	[35,56]	[3 345,3 678]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -3	76	{3,9,14,15}	4	[59,59]	[3 179,3 179]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -4	117	{2,5,7,14}	4	[39,59]	[3 018,3 589]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -5	213	{2,3,5,14,15,16}	9	[35,59]	[3 573,3 881]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -6	84	{3,11,13,15}	4	[32,56]	[3 042,3 597]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -7	125	{8,13,14}	4	[32,56]	[3 055,3 853]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -8	219	{2,3,7,11,13,14}	7	[32,56]	[3 048,3 697]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -9	90	{3,5,9,11,16}	8	[33,50]	[3 075,3 997]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -10	203	{3,4,8,11,14,16}	6	[39,50]	[3 228,3 788]

现进入“案例匹配”阶段,度量目标问题与各案例的具体敌情的相似度,即度量来袭方向信息的相似度。来袭方向信息集是一个文本型属性,依据上文中叙述的文本型属性相似性度量方法,需确定目标问题与案例间来袭方向的对应关系,首先要确定来袭方向的配对矩阵。确定配对初始矩阵时依据的来袭方向的关键特征是来袭方向方位角^[8]。

在本文中,目标问题与对应 3 级子案例库中 4 个案例的角度值相似性矩阵,即配对初始矩阵为:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} 0.98 & 0.97 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.99 \end{bmatrix}, \mathbf{U}_3 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.88 & 0.00 \\ 0.79 & 0.97 & 0.24 \\ 0.00 & 0.00 & 0.95 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} 0.98 & 0.82 & 0.00 \\ 0.87 & 1.00 & 0.10 \\ 0.00 & 0.00 & 0.98 \end{bmatrix}, \mathbf{U}_4 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.93 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

经过处理后,得到最终配对矩阵为:

$$\mathbf{U}'_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{U}'_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}'_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{U}'_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由此可看出目标问题与案例中的弹道导弹来袭方向的对应关系。以案例 A₁-B₂-C₃-1 为例,计算来袭方向信息集的相似度。

通过配对矩阵得知,案例 A₁-B₂-C₃-1 中的方向 1 与目标问题中的方向 1 和方向 2 对应,方向 2 与目标问题中的方向 3 对应,共有 2 对对应元素组。将目标问题的方向 1 和方向 2 相关信息合并,合并后的来袭方向为两方向的角平分线方向,来袭目标数量为两方向相加,其余信息取并集,见表 6。

表 6 合并后的目标问题来袭方向信息

来袭方向角度/(°)	突击要地集	目标数量	再入角范围/(°)	再入速度范围/(m/s)
99.5	{3,8,9,15,16}	11	[30,48]	[3 097,3 818]
201	{3,5,11,16}	4	[39,48]	[3 267,3 786]

运用 AHP 法得出来袭方向描述信息中的来袭方向角度、突击要地集、目标数量、再入角范围和再入速度范围的权重分别为 0.382、0.291、0.054、0.147、0.126,依据上文中各属性相似度计算方法,使用加权求和法得出目标问题与案例的具体敌情相似度:

$$\text{SIM}(T, S_1) = \frac{1}{2} \times [0.382 \times \cos(99.5 - 97) + 0.291 \times \frac{5}{8} + 0.054 \times (1 - \frac{11-8}{11+8}) + 0.147 \times \frac{48-35}{56-30} + 0.126 \times \frac{3\ 818-3\ 687}{3\ 928-3\ 097}] + \frac{1}{2} \times [0.382 \times \cos(207 - 201) + 0.291 \times \frac{1}{6} + 0.054 \times (1 - \frac{4-3}{4+3}) + 0.147 \times \frac{48-39}{56-35} + 0.126 \times \frac{3\ 678-3\ 345}{3\ 786-3\ 267}] = 0.66$$

同理,目标问题与其余 3 个案例的具体敌情相似度为:

$$\text{SIM}(T, S_2) = 0.54$$

$$\text{SIM}(T, S_3) = 0.62$$

$$\text{SIM}(T, S_4) = 0.77$$

检索到该三级子案例库中案例 A₁-B₂-C₃-4 与目标问题的具体敌情相似度大于阈值,所以不再查阅其余 2 个三级子案例库中的案例。基于该案例的解决策略,结合目标问题实际进行修正,即可得到目标问题的解决策略。目标问题解决后可将其转化为案例存储至相应的三级子案例库,丰富案例库。

3 案例库的精简

案例库在使用过程中,随着新问题的解决,库中收录的案例会增多,如果不设置案例数量的上限,会造成子案例库的冗余从而影响后续使用过程中相似案例检索匹配的效率^[9]。案例数量的上限以各三级子案例库为单位,根据实际情况确定。当某三级子案例库中的案例数量超过上限时,需要对库中的案例进行精简^[10]。经过精简后被移除出案例库的案例主要有 2 种:不符合作战需求的案例和高度重复的案例。如前文所述,在某作战区域中,保卫要地的重要性并不是一成不变的,若某保卫要地的重要性显著降低则不再将其作为保卫要地^[11]。如果某案例的保卫要地集中含有大量的已不再作为保卫要地的目标,则将该案例移除出案例库。除此之外,随着武器装备的更新换代,来袭弹道导弹的型号和性能

数据也会发生变化。如果某案例中来袭弹道导弹的相关信息已不符合未来作战过程中可能遭遇的敌情,则该案例也需被移除。不再符合作战需求的案例应优先移除。

在处理完不符合作战需求的案例后,对高度重复的案例进行处理,通过减小每个三级子案例库中案例数量来对案例库进行精简。在每个三级子案例库中,可能会存在若干相似度较高的案例,为了找出这些案例,可以依据具体敌情的相似度对这些案例进行模糊聚类。根据案例库中案例数量的上限,确定需要精简的案例数量,从而确定模糊聚类的相似度阈值。模糊聚类后每一类中的案例只能留下一个存在于案例库中,留下案例的案例生成时间应尽可能晚,以确保案例库的新颖性。

以上文中目标案例对应的三级子案例库为例。若使用一段时间后,该三级子案例库中的案例增至 6 个,新增案例的来袭方向信息如表 7 所示。

表 7 新增案例来袭方向信息

案例编号	来袭方向角度/ (°)	突击要地	目标数量	再入角范围/ (°)	再入速度范围/ (m/s)
A ₁ -B ₂ -C ₃ -5	87	{8,15}	3	[30,48]	[3 097,3 242]
	112	{3,8,9,16}	8	[30,48]	[3 206,3 818]
	201	{3,5,11,16}	4	[39,48]	[3 267,3 786]
A ₁ -B ₂ -C ₃ -6	91	{2,3,11,13}	4	[32,46]	[3 193,3 609]
	203	{2,3,8,11,14,15,16,17}	12	[40,53]	[3 177,3 997]

计算各案例间的相似度,得到相似度矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.66 & 0.67 & 0.63 & 0.66 & 0.55 \\ 0.66 & 1.00 & 0.60 & 0.64 & 0.54 & 0.66 \\ 0.67 & 0.60 & 1.00 & 0.68 & 0.62 & 0.68 \\ 0.63 & 0.64 & 0.68 & 1.00 & 0.77 & 0.72 \\ 0.66 & 0.54 & 0.62 & 0.77 & 1.00 & 0.65 \\ 0.55 & 0.66 & 0.68 & 0.72 & 0.65 & 1.00 \end{bmatrix}$$

根据相似度矩阵画出案例的模糊聚类动态图,如图 6 所示。

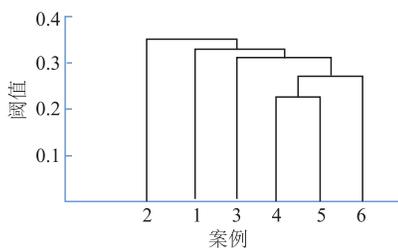


图 6 聚类动态图

现根据案例库实际需要将该三级子案例库中的案例精简为 5 个,由此确定案例相似度阈值为 0.77,根据该阈值案例库中案例分类情况为 {1}、

{2}、{3}、{4,5}、{6}。每一类中最终留下一个案例存在于案例库中,根据案例生成时间的先后,移除出案例库的案例为 A₁-B₂-C₃-4。

4 结语

本文提出了末段高层反导部署案例的表达方法,并从 CBR 技术的核心问题——相似案例的检索匹配入手,分析了末段高层反导部署案例库的组织结构、相似性度量方法以及案例库的精简方法。同时,在案例的相似性度量上,提出了基于所含元素的描述信息的拟合程度的文本型(集合)属性相似性度量方法。在子案例库的划分问题上,采用智能优化算法对案例进行聚类,以更好地发挥案例库在末段高层反导部署中的作用。

参考文献

- [1] 陈延雪. 基于知识推理的突发火灾事件应急响应机制研究[D]. 常州:常州大学,2021.
- [2] 王琳. 面向突发事件的粮食应急案例库本体构建研究[J]. 情报杂志,2020,39(5):162-167.
- [3] 陆莹,李启明. 基于案例推理的地铁运营安全事故案例库构建[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,45(5):990-995.
- [4] 陈维义,王克明,邓万彬. 面向 CBR 的案例库组织与快速检索方法[J]. 舰船科学技术,2014,36(4):126-129.
- [5] 邢清华,范海雄. 反导任务规划技术——基于案例推理[M]. 北京:科学出版社,2019:117-118.
- [6] 林名池,王成宇,唐政. 基于案例推理的舰船计划维修费用预测方法[J]. 中国舰船研究,2021,16(6):72-76.
- [7] 李聪,王勇,唐传林,等. CBR 和 RBR 的无人机自主空战战术决策[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(1):13-19.
- [8] 王君,高晓光,舒培贵. 防空导弹末段反导作战部署模型[J]. 现代防御技术,2011,39(2):22-28.
- [9] YUAN F, XU A, GU M. Development of an Improved CBR Model for Predicting Steel Temperature in Ladle Furnace Refining[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2021(8):1321-1331.
- [10] GUERRERO J I, MIRÓ-AMARANTE G, MARTÍN A. Decision Support System in Health Care Building Design Based on Case-Based Reasoning and Reinforcement Learning[J]. Expert Systems with Applications, 2022,187:116037.
- [11] 丁邦宇. 作战指挥学[M]. 北京:军事科学出版社,2004.

(编辑:刘勇)