

航海避碰智能系统

郝燕玲, 刘宇宏, 孙枫, 孙尧

(哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

[摘要] 文章设计了一种智能型航海避碰系统, 即航海智能避碰专家系统。该系统具有多元分层知识库体系结构, 采用框架、产生式规则、过程及神经网络等多种知识表示形式, 实现了航海避碰知识的表示、存储。建立了基于演绎推理、类比推理、换位推理、神经网络复合推理及元级推理的多路推理机制, 克服单一推理的不足。分别建立了碰撞危险度、避让时机及会遇态势分类模型。提出基于层次分析法的多船会遇避让方案选取策略, 建立了最优化数学模型。仿真试验表明: 系统能对各种避碰情况给出正确的避让方案。

[关键词] 避碰; 专家系统; 神经网络; 模糊技术; 多目标优化

1 引言

船舶避碰决策主要是由航海人员依据海上避碰规则^[1]及航海经验, 经过观测、分析、推理和判断等一系列智能活动完成的。开发集自动化、智能化于一体的避碰决策系统, 将使舰船避碰系统上一个新的台阶。

这里开发的航海智能避碰专家系统 (Navigation Intelligence Collision Prevention Expert System 简称 NICPES) 集专家系统技术、智能决策技术、模糊技术及神经网络技术于一体, 是一种新型的航海避碰智能系统^[2,3]。

2 NICPES 结构

NICPES 的总体结构见图 1。

·数据预处理: 对观测数据进行预处理, 解算出目标船的运动参数。

·多元分层知识库: 存储以一定形式表示的各种相关避碰知识。

·多路推理机: 建立多种推理方法实现知识库查询并控制系统运行。

·数据库: 存放初始观测数据、解算结果、推

理过程的中间结果及最后方案、结论等。

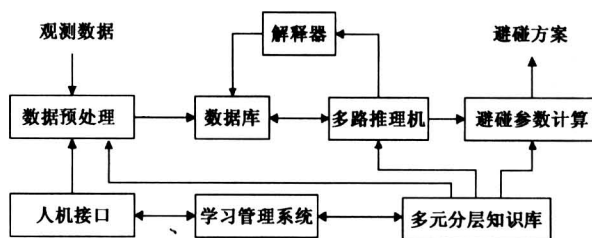


图 1 NICPES 总体结构

Fig. 1 The basic structure of NICPES

·解释器: 说明系统的推理过程, 对避让方案进行解释。

·学习管理系统: 从外部学习新知识, 实现知识库的维护。

·人机接口: 实现操作人员与系统各部分之间的信息交互操作。

·避碰参数计算: 确定避让幅值及恢复原航向、航速的时间等。

3 NICPES 设计

3.1 多元分层知识库体系结构

为了将庞大、复杂的避碰知识“灌输”给 NICPES，基于最佳驱动思想，建立了一种多元分层知识库体系结构。根据航海避碰领域知识的特点，对各类知识建立相应的知识库模型，形成一系列知识元。依据各个知识元之间的关系，形成了系统的多元分层知识库体系结构，见图 2。

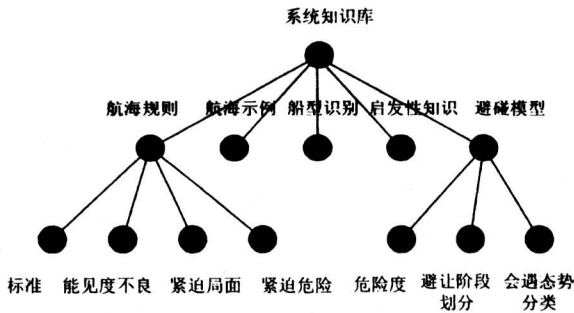


图 2 多元分层知识库体系结构

Fig.2 Multi-unit and layering KB structure

依据多元分层知识库体系结构，建立相应的多元知识表示法。针对不同知识类型及知识库分类，选取最适合的知识表示方法，其中包括：航海示例知识的框架表示法、航海规则的产生式规则表示法、启发性知识和危险度判定知识的过程表示法及船型识别和会遇态势分类知识的神经网络表示法。这不仅使避碰领域大量规则、经验、航海示例及各种相关知识有机地存储在计算机内，增加了系统的智能水平，而且由于对各种知识采用了最佳知识表示方法，使系统维护工作变得简单易行，提高了运行效率。

3.2 多路推理机制

人类在解决某一问题时常采取多种思维模式。因此，为了使 NICPES 能像专家一样进行“思维”，提出并建立了一种多路推理机制。针对不同知识表示方式及避碰决策制定过程中不同阶段解决问题的方法不同，建立相应的推理方法，系统能够根据运行情况自动选取最佳推理方法，并能从一种推理方法平滑地转移到另一种推理方法上，最终求得避让方案。

多路推理机制的关键在于各种推理算法的建立，图 3 为系统具有的推理方法。这里，应用元级推理来实现各种知识库及推理方式的选取。

系统的多种推理方法形式上彼此独立，功能上相互依存，一种推理方法求解问题的结果可作为另

一种推理方法求解问题的条件。各种推理方法相互配合、协调工作，共同完成系统总目标。如以航海示例知识库为例，在求解单船会遇避让方案时，各种推理方法之间的逻辑关系见图 4。

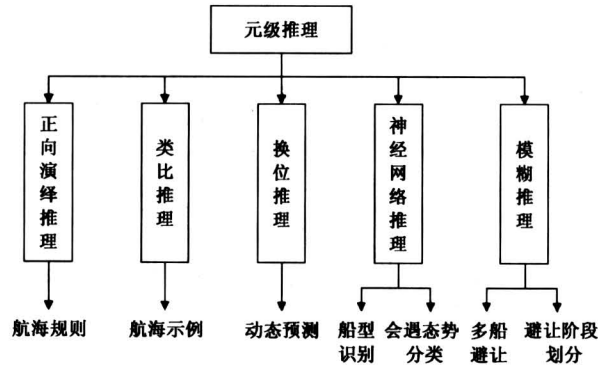


图 3 多路推理机制

Fig.3 Multi-inference system

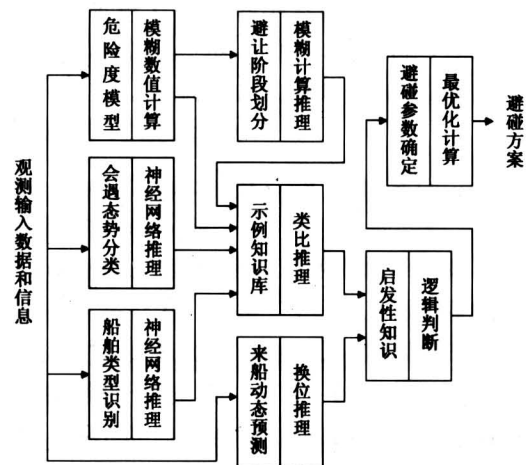


图 4 多路推理机制工作示例逻辑方框图

Fig.4 Logic diagram of a running case based on multi-inference system

3.3 避碰领域相关模型

3.3.1 碰撞危险度模型 船舶间碰撞危险是制定避让决策的依据。NICPES 建立基于模糊原理的碰撞危险度模型。分别建立会遇最近距离 D_{CPA} (Distance of Closest Point of Approach)、到达最近会遇点的时间 T_{CPA} (Predicted Time to Closest Point of Approach) 和两船间距离的隶属函数，如式 (1)、(2) 和 (3)。其中有关参数 (d_1 、 d_2 为会遇最近距离区间， t_1 、 t_2 为到达最近会遇点时间区间， r_1 、 r_2 为两船距离区间) 的确定和选取上，

综合考虑能见度、会遇态势、船舶操纵性能等因素对碰撞危险的影响。

$$\mu(D_{CPA}) = \begin{cases} 1 & D_{CPA} \leq d_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin[\frac{\pi}{d_2 - d_1} (D_{CPA} - \frac{d_1 + d_2}{2})] & d_1 < D_{CPA} \leq d_2 \\ 0 & d_2 < D_{CPA} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu(T_{CPA}) = \begin{cases} 1 & T_{CPA} \leq t_1 \\ \frac{t_2 - T_{CPA}}{t_2 - t_1} & t_1 < T_{CPA} \leq t_2 \\ 0 & t_2 < T_{CPA} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu(R) = \begin{cases} 1 & R \leq r_1 \\ \frac{r_2 - R}{r_2 - r_1} & r_1 < R \leq r_2 \\ 0 & r_2 < R \end{cases} \quad (3)$$

求得 D_{CPA} 、 T_{CPA} 及距离 R 对于碰撞危险度的隶属函数后，再通过式 (4) 求三个隶属度的加权 α_D 、 α_T 、 α_R 和，将其作为确定碰撞危险度 μ 的依据。

$$\mu = \alpha_D \cdot \mu(D_{CPA}) + \alpha_T \cdot \mu(T_{CPA}) + \alpha_R \cdot \mu(R) \quad (4)$$

仿真试验结果表明：该模型能够正确地反映两船间碰撞危险程度。

3.3.2 避让时机决策模型 确定避让时机是正确避让决策不可缺少的一部分。建立基于模糊决策表的避让时机决策模型^[4]，将避让时机的确定转化为对当前所处避让阶段的分类 (A: 判断碰撞危险, B: 采取避让行动, C: 查核, D: 紧迫局面, E: 紧迫危险阶段)，依据航海经验构造避让时机模糊决策表 (见表 1)，建立模糊产生式规则匹配算法，实现模糊决策表的查询，完成决策。

模型综合考虑了距离、时间及海域、天气状况等因素，仿真试验结果表明：该模型对各种情况下避让阶段的划分符合人类判断结果。

3.3.3 会遇态势分类模型 NICPES 对会遇态势分类在避碰决策制定过程中所处的地位给予了足够的重视，建立了基于神经网络的船舶间会遇态势分类模型^[5]。模型的多级网络由三个子网构成 (见图 5)，子网 NN1 和子网 NN2 分别完成对五组连续输入的舷角值和航向交叉角值分类，子网 NN3 完成产生式规则的模糊推理，其输出为会遇态势分

类结果。每个子网由 BP 网络实现。

表 1 避让时机模糊决策表

Table 1 A fuzzy decision table to determine the moment of collision prevention

外界环境	危险度					一定
	没有	很小	较小	较大	很大	
很好	A	A	B	B	C	D
较好	A	A	B	C	C	D
一般	A	B	B	C	D	D
较差	A	B	C	C	D	E
很差	B	C	C	D	D	E

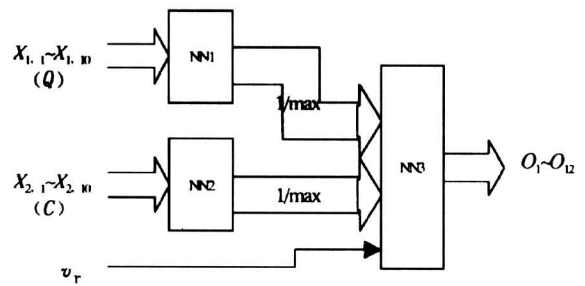


图 5 多级网络模型

Fig.5 Multi-level neural network model

$X_1(Q)$ 为目标船舷角, $X_2(C)$ 为交叉角, v_r 为船速, O 为网络输出

仿真试验表明：该模型能够对船舶间的各种会遇态势作出正确判断，对五组连续观测数据进行并行处理，提高了系统的工作效率。因为不以一次观测数据作为会遇态势分类依据，使分类结果更为细致、合理。另外，模型对观测过程中偶尔出现的不正确数据也有较强的容错性。

3.4 采用层次分析法解决多船避碰问题

多船会遇时，人们通常采取的做法是：从各个危险目标船中选取最危险的一个，对其采用单船避让的方案；该危险局面解除后，再选取当前情况下最危险的目标船，直至与所有目标船的危险局面都消失为止。这种方法并不是最佳的解决问题方式，因此提出并建立了基于层次分析方法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 的多船避碰模型。

3.4.1 多船避碰模型的层次结构 对复杂的多船避碰问题，形成若干与该问题有关的概念，如：危险度、会遇态势、规则库及各种避让方案等，根据这些概念之间的重要性级别、隶属关系，进行上下

分层排列，形成一个递阶层次结构，如图 6 所示。

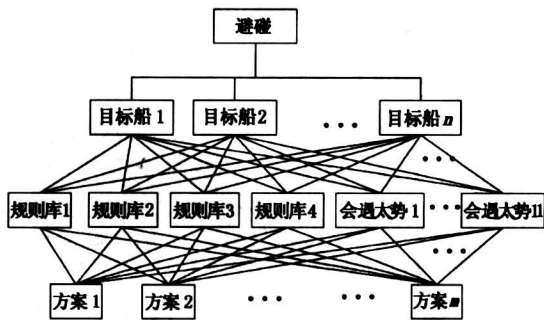


图 6 多船会遇避碰层次结构图

Fig.6 Level structure diagram for multi-ship encountering collision prevention decision making

3.4.2 多船避碰模型的综合算法

- 1) 建立同一层次各元素关于上一层次某一准则的判断矩阵；
- 2) 进行层次单排序，由判断矩阵计算被比较元素对于某一准则的相对权重 $W^{(K)}$ (K 为层数)；
- 3) 一致性检验；
- 4) 层次总排序，计算各层元素对系统目标的合成权重 $P^{(K)}$ 。

在 NICPES 中，取目标船为第一层，规则库及会遇态势为第二层，避让方案为第三层，综合过程如下：

$$W^{(1)} \rightarrow \left. \begin{matrix} P^{(1)} \\ W^{(2)} \end{matrix} \right\} \rightarrow \left. \begin{matrix} P^{(2)} \\ W^{(3)} \end{matrix} \right\} \rightarrow P^{(3)}$$

其中：

$$P^{(K)} = W^{(K)} \cdot P^{(K-1)}. \quad (5)$$

3.5 避让参数的多目标最优化解法

确定单船避让方案参数时，按照重要性程度由大到小依次考虑：

- 转向多大的角度后，两船间的碰撞危险会减至最小；
- 在减小碰撞危险的前提下，尽量使转向角度最小；
- 采取某一转向角度，航行最少时间后，恢复原航向、航速。

建立单船会遇下避让参数的多目标最优化数学模型^[6]：

$$\begin{cases} P_1: \min f^1(\theta) \\ P_2: \min f^2(\theta) \\ P_3: \min f^3(\theta) \\ s.t. \begin{cases} g_1(\theta) = \theta - 30 \geq 0 \\ g_2(\theta) = 180 - \theta \geq 0 \\ g_3(\theta) = D_{an} - f^1(\theta) > 0 \\ g_4(\theta) = f^3(\theta) - 40 > 0 \end{cases} \end{cases}$$

式中：决策变量 θ 为转向角度值； D_{an} 为两船当前碰撞危险度。

目标函数 $f^1(\theta)$ 为转向 θ 以后两船间碰撞危险度计算函数；目标函数 $f^2(\theta) = \theta$ ；目标函数 $f^3(\theta)$ 为本船恢复原航向航速的时间计算函数。

约束函数 $g_1(\theta) = \theta - 30 \geq 0$ 和 $g_2(\theta) = 180 - \theta \geq 0$ 表示每次转向角度要介于 30 度至 180 度之间；约束函数 $g_3(\theta) = D_{an} - f^1(\theta) > 0$ 表示要求转向后两船间的碰撞危险度要小于当前碰撞危险度；约束函数 $g_4(\theta) = f^3(\theta) - 40 > 0$ 表示恢复原航向、航速的时间限制在 40 min 内。

4 航海仿真示例

给出两种避让仿真示例，说明 NICPES 工作过程及解决问题的能力。

4.1 示例 1

·本船初始航向 30° ，航速 20 kn；目标船 T_1 初始方位 40° ，初始距离 2 n mile，航向 33° ，航速 10 kn。

·本船与目标船 T_1 相距约 1.6 n mile 时，NICPES 推荐避让方案：向右转向 71° ，沿新航向航行约 6 min 后，恢复原来航向。整个过程见图 7、8。

4.2 示例 2

·本船初始航向 0° ，航速 10 kn；目标船 T_1 初始方位 30° ，初始距离 5.5 n mile，航向 235° ，航速 15 kn；目标船 T_2 初始方位 160° ，初始距离 3 n mile，航向 355° ，航速 20 kn。

·由多船避碰模型得推荐避让方案：“尽早右转”，最优化方法计算得到最佳转向角度 45° 和航行时间 14 min。整个避让过程见图 9、10。

5 结论

NICPES 是一种集专家系统技术、神经网络技术、模糊技术及最优化方法于一体的智能型避碰系

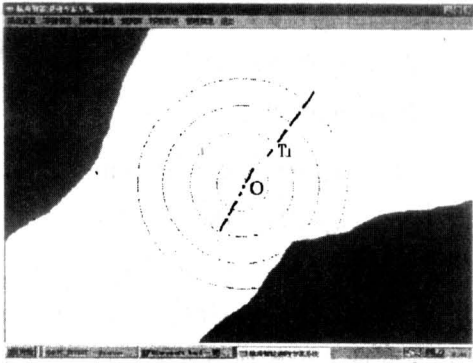


图 7 本船与目标船 T_1 初始会遇情况
Fig.7 Initial encounter situation between own-ship and target-ship T_1

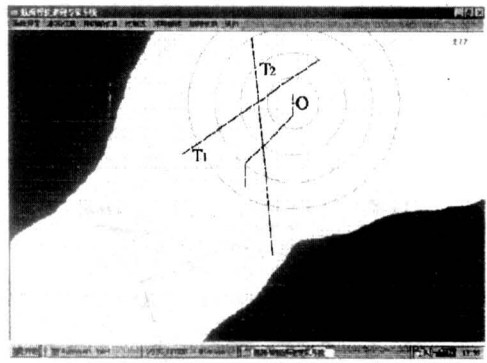


图 10 整个避让过程 ($T_1 T_2$)
Fig.10 The whole collision preventing phase ($T_1 T_2$)

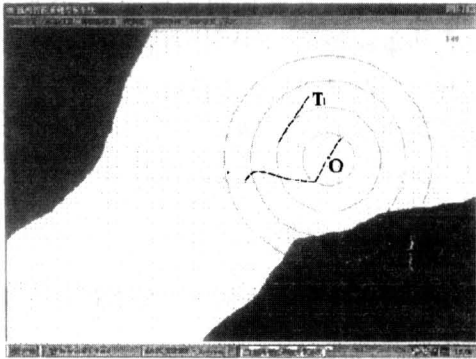


图 8 整个避让过程 (T_1)
Fig.8 The whole collision preventing phase (T_1)

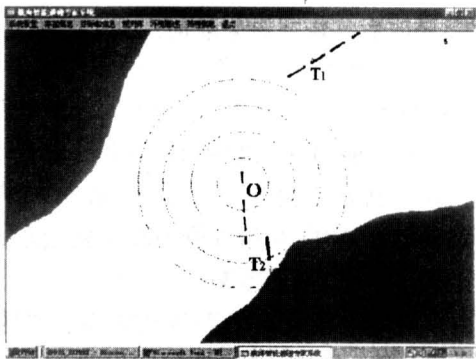


图 9 本船与 T_1 、 T_2 初始会遇情况
Fig.9 Initial encounter situation between own-ship and target-ship T_1 、 T_2

统。系统的多元分层知识库体系结构及其多元知识表示，实现了对模糊数据、模糊描述语言的处理与理解，避免了传统专家系统的“窄台阶”问题。基于多种推理方法的多路推理机制，避免了单线推理不充分、效率低等缺点。避碰问题模型的建立，实现了定性推理与定量计算相结合。基于层次分析法的多船会遇避让方案选取策略，解决了多船避碰问题。最优化数学模型求最佳避让参数，使避让方案更加完整。

仿真试验表明：NICPES 能对各种会遇情况作出正确判断，给出有效的避让决策。该系统还有待海上试验，进一步完善和实用化。

参考文献

- [1] 科克罗夫特 A N, 拉梅杰 J N F. 海上避碰规则指南 [M]. 赵劲松译. 第五版. 北京: 人民交通出版社, 1998. 4~6
- [2] Gilling S P. Collision avoidance, Driver support and safety intervention system [J]. The Journal of Navigation, 1997, 50 (1): 27~32
- [3] Funabashi M, Maeda A, Morooka Y, at al. Fuzzy and neural hybrid expert system: synergetic AI [J]. IEEE Expert, 1995, 13 (1): 32~40
- [4] 何新贵. 模糊知识处理理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 459~504
- [5] 胡守仁. 神经网络应用技术 [M]. 第二版. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.335~412
- [6] 谢可新, 韩立兴, 林友联. 最优化方法 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1997.100~186

An Intelligent System for Navigation Collision Prevention

Hao Yanling, Liu Yuhong, Sun Feng, Sun Yao

(Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

[Abstract] The purpose of this thesis is to developing and exploiting an intelligent system for collision prevention, namely "Intelligent Collision Prevention Expert System for Navigation" (NICPES). The NICPES has a multi-unit and layering Knowledge Base systematic structure and a multi-unit Knowledge Representation (KR) which based on frame KR, production rule KR, procedure KR and neural network KR, to represent and store all kinds of knowledge for navigation collision prevention. The NICPES also builds a multi-inference system, which based on analogy inference, forward illation inference, conversion inference, neural network inference and meta-rule inference, to overcome the shortcoming of unitary inference. For some problems in collision prevention region, the NICPES builds a set of models to solve them. These models comprise the models of judging collision risk, the model of determining collision prevention time and the model of classifying encounter situation. For multi-ship encounter situation, the NICPES puts forward a tactics to choose optimal collision prevention scheme based on Analytic Hierarchy Process (AHP) and builds a mathematical model that will be used to determine the optimal angle and sailing time during ship's tuming for multi and single ship encounter situation. The simulation experiments show that the NICPES can analyze and judge various sailing cases and encounter situation, and offer a reasonable scheme, which settle the collision problem effectively and ensure the sailing safety.

[Key words] collision prevention; expert system; neural network; fuzzy technique; multi-target optimizing

第 28 届国际环境遥感讨论会

第 28 届国际环境遥感讨论会于 2000 年 3 月 27 日 - 31 日在南非共和国开普敦举行, 这是 2000 年遥感领域计划中的重点会议。来自五大洲的约 400 余名代表云集非洲最南端的这一名城, 其中有 Tillmann Mohr (EUMETSAT 总裁), Ghassem Asrar (NASA 局长助理), Antonio Rodata (ESA 总裁), Klaus Topfer (UNEP 执行主席) 以及 D James Baker (国家海洋与大气局, 美国)、国际遥感一流专家参加。代表们通过大会分组会交流了两年来世界范围内遥感研究的最新进展, 收到论文 350 篇涉及以下 10 个方面: 全球变化; 非洲环境遥感状况; 农业与林业; 水资源管理; 非可更新资源的地质应用与管理; 海洋与海岸环境; 灾害管理; 城市与区域规划; 保护环境的呼吁与协议; 突发事件及支持技术。

(赵宪文)