

# 船舶下水安全性评估的模糊故障树方法

黄兴玲<sup>1</sup> 曾广武<sup>2</sup> 黎庆芬<sup>2</sup>

(1 海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033;

2 华中科技大学 交通科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 建立了基于模糊故障树分析的安全性评估模型, 提出船舶下水从最小割集、顶事件发生的概率模糊数及基本事件的模糊重要度三个方面进行分析的安全性评估方法。介绍模糊故障树基本原理, 并以某4300PCTC 船纵向滑道下水过程中某一项事件的模糊故障树分析为例, 作概要阐述。

**关键词:** 模糊数; 故障树分析; 模糊重要度; 船舶下水; 安全评估

中图分类号: U662.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-3185(2006)03-15-05

## Fuzzy Fault-Tree Approach to the Safety Assessment of Ships Launching

Huang Xing-ling<sup>1</sup> Zeng Guang-wu<sup>2</sup> Li Qing-fen<sup>2</sup>

(1 Department of Naval Architecture & Ocean Eng., Naval Univ. of Eng., Hubei Wuhan 430033, China;

2 College of Traffic Sci. & Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Hubei Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A safety assessment model is established based on the analysis of fuzzy fault-tree, and an safety assessment method for ship launching in the following aspects: minimum cut sets analysis, evaluation of failure probability of the top event and fuzzy importance analysis of the basic events. In present paper, the basic principle of fuzzy fault-tree is introduced, and an example of fuzzy fault-tree analysis of one top event in a 4300 PCTC ship launching on longitudinal slide way is given and illuminated.

**Key words:** ship launching; safety assessment; fault-tree analysis; fuzzy number; fuzzy importance

船舶下水是项极为重要的作业, 稍有疏忽就可能造成重大事故。因此, 在船舶下水之前实施安全性评估, 综合考虑影响下水安全的各种因素, 是十分必要的。

故障树分析(FTA)是一种在工程上广泛应用于计算复杂系统可靠性、安全性的系统方法, 1989年即已颁布了故障树分析的国家军用标准(GJB 768)<sup>[1]</sup>, 并已广泛应用于航天工业、石油化工、机械制造等领域的可靠性分析中, 取得了不少成果<sup>[2-4]</sup>。本文从故障树分析的角度提出了一种船舶下水安全性评估的新方法。

在传统的故障树分析中, 构成故障树的基本事件都是用客观不定性因素表示的, 其概率亦按照传统的方法计算。对于船舶下水这类复杂的技术系统, 很多基本事件的发生不仅具有客观原因, 还存在人为的因素, 并且没有大量的数据可供统计, 其概率难以用传统的方法得到。针对这种情况, 采用专家评估团对基本事件发生的可能性的

评估判断值代替其概率统计值, 用模糊数刻画事件发生的概率, 然后进行模糊故障树分析, 将是一种简便有效的方法。本文以某4300车位汽车/卡车运输船(即4300PCTC船)纵向滑道下水过程中, “船舶不能下滑”故障为例, 从最小割集、顶事件发生的概率模糊数以及基本事件的模糊重要度这三个方面进行分析, 探讨了船舶下水安全性评估方法。

## 1 基于模糊集理论的故障树分析方法概要

### 1.1 模糊集基本理论

论域  $U$  上的一个模糊集  $\bar{A}$  定义一个隶属函数:  $\mu_{\bar{A}}(x): U \rightarrow [0, 1], x \in U$ , 它把  $U$  中的元素映射到  $[0, 1]$  中的实数, 记为  $\bar{A} = \int_{x \in U} \mu_{\bar{A}}(x)/x$ , 其中  $\mu_{\bar{A}}(x)$  是隶属度函数, 表示论域  $U$  中的元素  $x$

隶属于模糊集  $\bar{A}$  的程度<sup>[5-7]</sup>。

模糊数是用来处理如“接近 0.5”等不精确信息的,在模糊故障树分析中,基本事件发生的概率用模糊数描述,即称为概率模糊数,其论域  $U$  为  $[0,1]$ 。本文中的概率模糊数均用梯形模糊数  $\bar{q}$  表示,其隶属度函数的表达式为:

$$\mu_{\bar{q}}(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & c \leq x \leq d \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

简记为:

$$\bar{q} = (a, b, c, d) \quad (0 \leq a < b < c < d)。$$

当  $a=b$  (即  $\mu_a = \mu_b = \mu_c = 1$ ) 或  $c=d$  ( $\mu_b = \mu_c = \mu_d = 1$ ) 时,为直角梯形模糊数;当  $b=c$  时,则为三角模糊数。二者均属于特殊的梯形模糊数。

两个梯形模糊数  $\bar{q}_1 = (a_1, b_1, c_1, d_1)$ ,  $\bar{q}_2 = (a_2, b_2, c_2, d_2)$ , ( $a_i \leq b_i \leq c_i \leq d_i, i=1,2$ ), 其加法 ( $\oplus$ )、减法 ( $\ominus$ )、乘法 ( $\otimes$ ) 运算<sup>[6]</sup> 分别为:

$$\bar{q}_1 \oplus \bar{q}_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2)$$

$$\bar{q}_1 \ominus \bar{q}_2 = (a_1 - d_2, b_1 - c_2, c_1 - b_2, d_1 - a_2)$$

$$1 \ominus \bar{q}_1 = (1 - d_1, 1 - c_1, 1 - b_1, 1 - a_1)$$

$$\bar{q}_1 \otimes \bar{q}_2 = (a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2, d_1 d_2)$$

## 1.2 模糊故障树分析方法

与传统的故障树分析相比,模糊故障树分析只是将基本事件、顶事件等事件发生的概率用模糊数来表示,它们分析的程序是相似的。

### 1.2.1 定性分析

定性分析<sup>[1,8]</sup>的目的就是找出故障树所有的最小割集,并对最小割集进行定性比较。最小割集可以用下行法或上行法求得,用  $K_i$  ( $i=1,2,\dots,N_K$ ) 表示,其中  $N_K$  表示最小割集的数量。任一个最小割集中的基本事件全部发生时,则顶事件必然发生。

### 1.2.2 定量分析

#### 1) 模糊故障树分析中的模糊算子

故障树分析中的所有逻辑门均可化为与门、或门及其组合形式。若故障树中基本事件发生概率的梯形模糊数为  $\bar{p}_i = (a_i, b_i, c_i, d_i)$ ,  $a_i \leq b_i \leq c_i \leq d_i$ , 则与门、或门模糊算子可用下面的式子表示<sup>[6]</sup>。

与门模糊算子:  $\bar{p}_{AND} = \Pi \bar{p}_i (\Pi a_i, \Pi b_i, \Pi c_i, \Pi d_i)$ ,  $\Pi$  表示模糊乘法运算;

或门模糊算子:  $\bar{p}_{OR} = 1 \ominus \Pi (1 \ominus \bar{p}_i) = ((1 - \Pi(1 - a_i)), (1 - \Pi(1 - b_i)), (1 - \Pi(1 - c_i)),$

$(1 - \Pi(1 - d_i))$ 。

#### 2) 顶事件发生的概率模糊数计算

故障树中顶事件  $T$  与基本事件  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ,  $n$  表示基本事件的数目) 之间的关系可用结构函数  $\phi(x)$  表示,即  $T = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。传统的故障树方法分析复杂系统时,是通过最小割集  $K_i$  ( $i=1,2,\dots,N_K$ ) 求顶事件发生的概率的<sup>[4,9-10]</sup>。

$$P(T) = \sum_{i=1}^{N_K} P(K_i) - \sum_{i < j=2}^{N_K} P(K_i K_j) + \sum_{i < j < k=3}^{N_K} P(K_i K_j K_k) + \dots + (-1)^{N_K-1} P(K_1, K_2, \dots, K_{N_K})$$

式中,  $P(T)$ ,  $P(K_i)$  分别表示顶事件和最小割集发生的概率。

根据模糊理论的扩展原理,顶事件发生的概率模糊数的隶属度函数为:

$$\mu_{P_T}(t) = \begin{cases} \sup_{i=\phi(s_1, s_2, \dots, s_n)} \min(\mu_{x_1}(s_1), \mu_{x_2}(s_2), \dots, \mu_{x_n}(s_n)) & \text{当 } \phi^{-1}(t) \neq \emptyset \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $\mu_{P_T}(t)$  表示顶事件发生的概率模糊数的隶属度函数,  $\mu_{x_i}(s_i)$  表示基本事件  $x_i$  发生的概率模糊数的隶属度函数。

#### 3) 基本事件的模糊重要度分析

基本事件对顶事件发生的贡献称为基本事件的重要度。按照基本事件的重要度排队,对于系统设计、预防系统故障是十分必要的。利用有界闭模糊数的中值来进行模糊重要度分析<sup>[11,12]</sup>,是一种简捷实用的方法。本文所讨论的概率模糊数均属于梯形模糊数,可利用梯形模糊数的中值进行模糊重要度分析。

对于梯形模糊数  $\bar{q} = (a, b, c, d)$  ( $0 \leq a < b \leq c < d$ ) (图 1),一定存在直线  $x = m$  ( $a < x < d$ ) 使得梯形在直线左右两边的面积相等,则称  $m$  ( $a < m < d$ ) 为梯形模糊数的中位数。

故障树顶事件发生的概率模糊数  $\bar{P}(T)$  可用基本事件发生的概率模糊数  $\bar{P}(x_i)$  表示:  $\bar{P}(T) = \bar{P}(\bar{P}(x_1), \bar{P}(x_2), \dots, \bar{P}(x_n)) = (a_T, b_T, c_T, d_T)$ , 该梯形模糊数的中位数为  $m_T$ 。

当基本事件  $i$  不发生 (即其发生的概率模糊数为  $(0,0,0,0)$ ) 时,故障树顶事件发生的概率模糊数:  $\bar{P}(T) = \bar{P}(\bar{P}(x_1), \bar{P}(x_2), \dots, \bar{P}(x_{i-1}), 0, \bar{P}(x_{i+1}), \dots, \bar{P}(x_n)) = (a_{T_i}, b_{T_i}, c_{T_i}, d_{T_i})$ , 该梯形模糊数的中位数为  $m_{T_i}$ 。

称  $I_i = m_T - m_{T_i} > 0$  为基本事件  $i$  的模糊重要度。如果  $I_i > I_j$ , 则认为基本事件  $i$  比基本事件  $j$  重要,基本事件  $i$  对系统的影响大于基本事件  $j$  对系统的影响。在改进系统,提高系统可靠性时,首先应当考虑基本事件  $i$ 。

## 2 基本事件发生概率模糊数的确定

### 2.1 评估团专家的权值

故障树中基本事件发生的概率,一般用大量数据统计得到。然而,在船舶下水作业中,要想获得大量的数据统计是不现实的。采用领域专家(包括设计、制造及使用等各个方面)评估团的评估判断值来代替基本事件发生的概率精确值,可以解决统计数据不足的问题。

由于评估团中每位专家的学识、工作经验、对所研究领域的了解程度存在差别,他们的评估判断值不能一律对待。本文按上述三个方面,根据专家的具体情况,将评估的权威程度分为五个等级,并分别给出等级分值<sup>[2]</sup>,如表1所示。然后,将每位专家总的权分数 $WS_i (i = 1, 2, \dots, n; n$ 表示评估团专家数)归一化处理后得到其权值 $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,即 $w_i = WS_i / \sum_{i=1}^n WS_i$ 。

表1 评估团中专家的权分数分配表

项目	项目级别	权分数
资质	资深专家	5
	高级设计或使用人员	4
	中级设计或使用人员	3
	一般技术人员	2
	一般操作人员	1
工作经验	30年及以上	5
	20~29年	4
	10~19年	3
	5~9年	2
	5年以下	1
领域的熟悉程度	非常熟悉	5
	熟悉	3

### 2.2 专家评估基本事件发生概率模糊数

可靠性分析中常用一些类似“某某事件发生的可能性高”或“非常高”之类的语言值,来评估事件发生的概率。本文将这种对事件发生概率的评估判断,用一种语言值集合表示为: {很小、小、较小、中等、较大、大、很大},并用对应的符号表示为: {VS, S, FS, M, FL, L, VL}。专家用此语言值集合来评估判断故障树中基本事件发生概率的大小<sup>[2,5,13,14]</sup>。

语言值集合 {VS, S, FS, M, FL, L, VL} 可用图1中的模糊数表示,其隶属度函数:

$$f_{VS} = \begin{cases} 1 & (0 \leq x < 0.1) \\ (0.2 - x)/0.1 & (0.1 \leq x \leq 0.2) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$f_s = \begin{cases} (x - 0.1)/0.1 & (0.1 \leq x < 0.2) \\ (0.3 - x)/0.1 & (0.2 \leq x \leq 0.3) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$f_{FS} = \begin{cases} (x - 0.2)/0.1 & (0.2 \leq x < 0.3) \\ 1 & (0.3 \leq x < 0.4) \\ (0.5 - x)/0.1 & (0.4 \leq x \leq 0.5) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$f_M = \begin{cases} (x - 0.4)/0.1 & (0.4 \leq x < 0.5) \\ (0.6 - x)/0.1 & (0.5 \leq x < 0.6) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$f_{FL}, f_L, f_{VL}$ 也可类似地表示出来。

对于某事件发生的概率, $n$ 位专家评估的语言值,可以按下式加权组合得到评估团集体对该事件评估的语言值模糊数:

$$f_Z(x) = \max \left( \sum_{i=1}^m w_{VS_i} \cdot f_{VS}(x) \wedge \sum_{i=1}^s w_{S_i} \cdot f_S(x) \wedge \sum_{i=1}^t w_{FS_i} \cdot f_{FS}(x) \wedge \sum_{i=1}^u w_{M_i} \cdot f_M(x) \wedge \sum_{i=1}^v w_{FL_i} \cdot f_{FL}(x) \wedge \sum_{i=1}^q w_{L_i} \cdot f_L(x) \wedge \sum_{i=1}^p w_{VL_i} \cdot f_{VL}(x) \right)$$

式中, $m, s, t, u, v, q, p$ 分别表示评估的语言值为“很小”、“小”、“较小”、“中等”、“较大”、“大”、“很大”的专家数,且 $m + s + t + u + v + q + p = n$ ;  $w_{VS_i}, w_{S_i}, w_{FS_i}, w_{M_i}, w_{FL_i}, w_{L_i}, w_{VL_i}$ 分别表示评估值为“很小”、“小”、“较小”、“中等”、“较大”、“大”、“很大”的专家的权值; $f_Z(x)$ 表示加权组合后得到总的评估语言值所对应的模糊数 $Z$ 的隶属度函数,其可根据模糊理论中的 $\alpha$ 截集理论求解<sup>[5]</sup>。

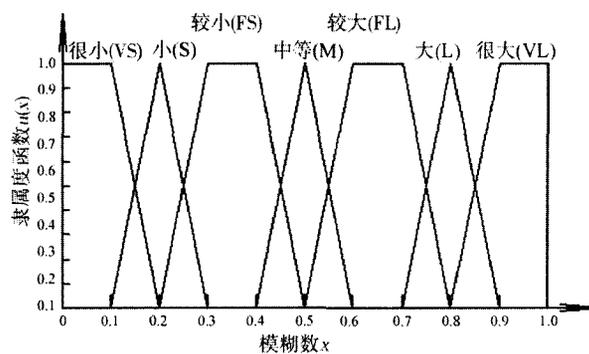


图1 语言值的近似模糊数

### 2.3 概率、模糊数的归一化

在故障树分析中,已知基本事件发生的概率时,直接用其精确概率值表示;基本事件发生的概率不明确时,则须经专家评估团评估,得到其发生的概率模糊数。其发生的概率用该概率模糊数表示。因此,发生概率的表示方式有多种形式,为便于故障树分析,应将它们统一为一种形式,即均化

为梯形模糊数。

对于精确概率值  $p$ , 可将其转化为梯形模糊数  $\tilde{q} = (p, p, p, p)$ 。

对于三角模糊数  $\tilde{q} = (a, b, d)$ , 亦可将其转化为梯形模糊数  $\tilde{q} = (a, b, b, d)$ 。

### 3 船舶下水的模糊故障树分析

船舶下水工艺复杂, 影响因素众多, 其故障发生的形式是多种多样的。本文以某 4300 PCTC 船纵向滑道下水过程中“船舶不能下滑”故障为例, 介绍基于模糊故障树分析的船舶下水安全性评估方法。

某 4300PCTC 船下水过程中“船舶不能下滑”故障的故障树如图 2 所示, 用下行法求出全部最小割集为:  $K_1 = \{x_1\}, K_2 = \{x_2\}, K_3 = \{x_3\}, K_4 = \{x_4, x_5\}, K_5 = \{x_6, x_7\}$ 。任意一个最小割集  $K_i (i = 1, 2, \dots, 5)$  中的事件全部发生时, 将会导致船舶出现不能下滑的情况。因此, 在下水过程中, 应当避免每个最小割集中的事件全部发生, 以确保下水安全。

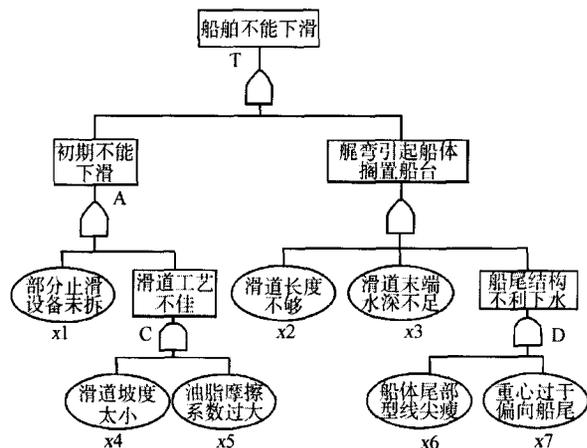


图 2 “船舶不能下滑”故障树

该 4300PCTC 船下水评估团中 10 位专家的信息如表 2 所示, 根据  $w_i = WS_i / \sum_{i=1}^n WS_i$  可得到各专家的权值, 计算结果也列于表 2 中。10 位专家对基本事件  $x_1$  (部分止滑设备未拆) 发生概率的评估值依次为: “中等”、“较小”、“很小”、“中等”、“小”、“较小”、“相当小”、“小”、“相当小”、“很小”。

利用模糊集理论, 将专家评估的语言值加权组合为模糊数:

$$f_z(x) = \max[(w_3 + w_{10}) \cdot f_{15}(x) \wedge (w_5 + w_8) \cdot f_5(x) \wedge (w_2 + w_6 + w_7 + w_9) \cdot f_{FS}(x) \wedge (w_1 + w_4) \cdot f_M(x)] = [(0.082\alpha + 0.180), (0.424 - 0.1\alpha)]$$

隶属度函数可化为:

$$f_z(x) = \begin{cases} (x - 0.180)/0.082 & (0.180 \leq x < 0.262) \\ 1 & (0.262 \leq x < 0.324) \\ (0.424 - x)/0.1 & (0.324 \leq x \leq 0.424) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

简记为 0.180, 0.262, 0.324, 0.424, 即为基本事件  $x_1$  发生的概率模糊数。

经专家评定, 得到其他基本事件发生的概率模糊数(表 3)。根据模糊故障树分析的理论计算出“船舶不能下滑”故障发生的概率模糊数为 (0.879, 0.947, 0.972, 0.993), 该模糊数的重心与语言值“很大”所对应的模糊数的重心最接近。因此, 如果不采取必要的措施, 该 4300 PCTC 船搁置船台不能下滑的可能性很大。

表 2 船舶下水故障评估团专家信息

专家编号	资质	工作经验/年	熟悉程度	总权分数 $WS_i$	权值 $w_i$
1	中级设计人员	10~19	熟悉	9	0.077 6
2	资深专家	10~19	非常熟悉	13	0.112 1
3	一般操作人员	20~29	熟悉	8	0.069 0
4	中级使用人员	20~29	非常熟悉	12	0.103 4
5	高级设计人员	大于 30	非常熟悉	14	0.120 7
6	高级使用人员	20~29	熟悉	11	0.094 8
7	资深专家	大于 30	非常熟悉	15	0.129 3
8	高级设计人员	5~9	熟悉	9	0.077 6
9	高级设计人员	大于 30	熟悉	12	0.103 4
10	高级使用人员	20~29	非常熟悉	13	0.112 1

“船舶不能下滑”故障树中基本事件重要度计算分析结果见表 3 所示。由重要度分析可知, 滑道末端水深不足 ( $x_3$ )、滑道长度不够 ( $x_2$ ) 对船舶在下水过程中能否顺利下滑产生很大的影响, 必须首先采取措施如, 加长滑道等, 改善这两个因素的影响。船舶的尾部型线尖瘦 ( $x_6$ )、重心过于偏向尾部 ( $x_7$ ) 对下水也不利, 也应采取一些措施如, 尾部安装浮筒等, 增加尾部入水的浮力, 确保船舶下水的安全。

表 3 “船舶不能下滑”故障树中基本事件概率模糊数及重要度分析

基本事件编号	概率模糊数	模糊重要度 $I_i$	重要度排序
$x_1$	0.180 0.262 0.324 0.424	0.016 0	4
$x_2$	0.500 0.600 0.700 0.800	0.073 7	2
$x_3$	0.575 0.675 0.715 0.815	0.094 0	1
$x_4$	0.100 0.200 0.200 0.300	0.001 3	5
$x_5$	0.080 0.180 0.235 0.335	0.001 3	5
$x_6$	0.650 0.750 0.804 0.884	0.032 6	3
$x_7$	0.463 0.563 0.612 0.712	0.032 6	3

## 4 结 论

故障树分析方法能够全面、综合地考虑影响系统安全的各个因素。针对船舶下水过程中基本事件发生概率难以精确取值的特点,利用基于模糊集理论的模糊故障树分析方法,能够科学地评估系统发生故障或事故的概率范围及基本事件的重要程度,对明确系统的薄弱环节及预先制定防护措施有极为重要的意义。

### 参考文献

- [1] GJB768. 故障模式、影响及危害性分析程序[S]. 故障树分析实施指南,1994.
- [2] DONG Yuhua, Yu Datao. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, (18): 83 - 88.
- [3] 赵德孜,温卫东,段成美. 关于故障树模糊定量分析的应用[J]. 现代设计与制造,2003,32(6):106 - 110.
- [4] 黄洪钟. 机械系统可靠性分析的模糊故障树方法[J]. 四川工业学院学报,1994,13(2):57 - 65.
- [5] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2003.
- [6] 武庄,石柱等. 基于模糊集合论的故障树分析方法及其应用[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(9):72 - 75.
- [7] 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [8] 曾声奎,赵廷弟等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [9] KIM C E, JU Y J, GENS M. Multilevel fault tree analysis using fuzzy numbeis [J]. Computers & Operations Research, 1996, (23): 695 - 703.
- [10] 王永传,郁文贤,庄钊文. 基于故障率为模糊数的故障树分析方法研究[J]. 系统工程理论与实践,2000, (12): 102 - 107.
- [11] 李青,陆廷金. 模糊重要度分析方法的研究[J]. 模糊系统与数学,2000,14(1):89 - 93.
- [12] YAMASHIRO M. The median for a L - R fuzzy number[J]. Microelectronics and Reliability, 1995, 35(2): 269 - 271.
- [13] Ching-Torng Lin, Mao-Jiun, Wang-Jim. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1997, 58(3): 205 - 213.
- [14] 黄兴玲,黎庆芬,曾广武. 基于模糊逻辑的援潜救生风险评估体系[J]. 中国舰船研究,2006,1(2):66 - 69.