

船舶海上交通事故人因致因因素分析方法研究

李成海¹, 刘杰¹, 胡甚平², 崔建辉³

(1. 山东交通职业学院, 山东 潍坊 261206; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306;

3. 天津理工大学 海运学院, 天津 300191)

摘要: 为克服模糊故障树分析模型计算过程专家人员需求量大, 参评专家众多时, 定量量化过程复杂及缺少随机性的问题, 采用蒙特卡罗法建立模糊故障树分析模型, 使用计算机运作生成随机数, 并以船舶海上交通事故调查报告中的3个基本事故最小割集进行定量分析。结果表明, 蒙特卡罗模型法结合使用计算机生成随机数可以解决模糊故障树分析模型对事故随机性分析结果不准确的问题, 实现了在参评专家人员众多情形下简化计算过程的目标。最后通过案例验证了该模型法具有很强的针对性和实用性。

关键词: 海上交通事故; 人因致因因素; 模糊故障树; 蒙特卡罗模型; 定量分析

中图分类号: U698.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 02-0116-05

目前, 船舶海上交通事故人因致因因素分析大多采用故障树分析模型等序列模型方法。此模型具有简单且实用的特性, 可进行定性和定量分析, 且分析结果具有可操作性, 有利于为海事主管部门、船公司和船舶制订应急预案提供理论支持。但是, 故障树模型存在建树技术要求高、过程复杂和依据单个系统构建的故障树不一定是其唯一缺点等问题, 因此模型的完善程度决定了影响因素分析的准确程度。由于存在实际观测数据不详和数据不足等原因, 可导致事故人因致因因素概率分析结果与实际不符, 为此研究人员利用专家评估和模糊故障树模型, 通过专家评估结果来解决实际观测数据不足的缺点。虽然这一故障树分析法能够克服专家评估带来的结果模糊性难题, 但也无法解决事故可能具有发生随机性的问题。为此, 本文考虑引入针对性模型法来解决模糊故障树模型分析不足的缺点, 达到在参评专家人数众多的情形下, 最大程度地简化计算过程的目标。

1 事故故障树分析

事故故障树分析法基于事故致因因素的定性和定量分析, 运用逻辑图展示引发事故致因因素

及其各因素之间的关系^[1]。事故故障树分析的核心问题是通过故障树的最小路集及最小割集结构函数来找到故障树最小割集。

1.1 事故故障树模型构建

故障树分析包括对顶事件(Top Event, TE)发生的可能性进行定量分析^[2], 以及对最基本底事件事故发生概率的定量分析及对引发事故发生的概率和结构重要性进行计算。

在假设故障树事件具有相互独立性且可用概率表示的前提下, 事故故障树分析有两种情况, 即重复和不重复的事故故障树。重复事故的故障发生概率可通过求解最小割集(Minimum Cut Set, MCS)取得, 不重复事故的故障树中顶事件(TE)发生概率可通过求解故障树基本事故概率求取^[3]。最小割集是由多个基本事故组成的集合, 如果集合中任一事故不发生, 则没有顶事件的发生, 但如果集合中有基本事故发生, 那么顶事件就一定发生。假如一个故障树割集用 $MD_j (j=1, 2, \dots, N_d)$ 表示, 则只要一个故障树割集存在, 事故故障树顶事件一定存在。事故故障树割集集合一般用 Z 表示:

$$Z = MD_1 + MD_2 + \dots + MD_{N_d} = \bigcup_{j=1}^{N_d} MD_j, \quad (1)$$

收稿日期: 2021-05-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2801000)。

第一作者: 李成海(1965-), 男, 山东青岛人, 高级船长/副教授, 主要研究方向: 海上航行安全. E-mail: lichenghai@163.com

则顶事件存在的概率为:

$$F(K_z) = F(MD_1 \cup MD_2 \cup \dots \cup MD_m). \quad (2)$$

1.2 模糊语义评估

对事故故障树的分析评估可采用模糊故障树分析法(Fuzzy Fault Tree Analysis, FFTA),该方法需要实际数字来分析失效概率,但实际操作中因为缺乏实际观测数据,所以导致系统中某部分失效概率的评估缺乏准确性^[4].为获取更多观测数据,业内专家将基本事故概率用语义评估形式表示,其评估结果分为5个级别,并对应5组模糊数,以方便语义评估到模糊数的转化(表1).

表1 模糊语义评估级别

级别	代码	模糊向量
最低级	VL	(0.2, 0.1, 0, 0)
低级	L	(0.4, 0.25, 0.25, 0.1)
中级	M	(0.7, 0.5, 0.5, 0.3)
高级	H	(0.9, 0.75, 0.75, 0.6)
最高级	VH	(1, 1, 0.9, 0.8)

某一基本事故概率的语义评估准确性与参与评估的专家数量和业务水平密切相关,特别是参评专家数量影响更为显著,参评专家太少则缺乏可信度,参评专家数量较多时,在提高可信度的同时,也增加了定性评估到定量分析的计算工作量,为此可利用简单定量法对基本事故概率进行语义评估.另外,语义评估只是解决了评估中的事故模糊性,但不能解决事故随机性,此时可利用既能减少计算工作量,又能解决随机性的方法——蒙特卡罗(Monte Carlo)模型^[5].在缺乏实际观测数据条件下,蒙特卡罗模型能对基本事故概率进行模拟,可避免主观评估结果的低效性,提高对基本事故概率评估的准确性.

2 随机概率实验

如上所述,为解决观测数据缺乏的问题,可利用蒙特卡罗模型产生统计数据,通过随机数模拟事故发生的随机现象,建立一个和原来问题没有关联的概率过程^[6-7],进而获得统计结果.

为此,将随机数作为事故的随机概率对随机现象进行模拟实验,运行步骤如下:(1)求解模拟事故概率;(2)计算概率总数;(3)将概率总数转换成随机概率;(4)指定任一随机数作为始点,对随机逐一

模拟.

运用蒙特卡罗模型模拟产生的随机数,这些随机数具有周期长和随机性好的优点,在实际操作中,为保证模拟准确性,常使用计算机运作生成随机数.本文选取的一组随机数如表2所示.

表2 随机数一览表

次序	随机数
1	81, 86, 13, 57, 49, 90, 11, 12, 95, 97
2	02, 13, 22, 39, 58, 24, 91, 75, 92, 02
3	60, 67, 63, 96, 89, 16, 99, 14, 67, 80
4	60, 67, 63, 49, 15, 32, 57, 72, 24, 66
5	46, 79, 23, 77, 12, 72, 28, 20, 76, 96

3 相似度聚合结果

对各位专家就某一基本事故的语义评估模糊数聚合后,形成对该事故概率的模糊评估结果.

3.1 模糊向量相似度

在专家评估模糊相似度时,选取 $E_{uv}(V_u, V_w)$ 代表专家 G_u 和专家 G_w 之间相似度^[8-10], $E_{uv}(V_u, V_w) \in [0, 1]$.假设两组模糊向量 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$,其相似度为:

$$E(B, A) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 |b_j - a_j|. \quad (3)$$

$E_{uv}(V_u, V_w)$ 增大,则表示模糊数向量 A 和 B 的相似度增大.

3.2 计算平均模糊相似度

专家语义评估的平均模糊相似度为:

$$BB(G_u) = \frac{1}{N-1} \sum_{w=1, w \neq u}^N E(V_u, V_w). \quad (4)$$

3.3 计算对应模糊相似度

专家语义评估的对应模糊相似度为:

$$VB(G_u) = \frac{BB(G_u)}{\sum_{u=1}^N BB(G_u)}. \quad (5)$$

3.4 计算相似度系数

相似度系数为:

$$DD(G_u) = \alpha BB(G_u) + (1 - \alpha) VB(G_u), \quad (6)$$

式中, $DD(G_u)$ 表示相似度系数,取值范围0~1; $\alpha \in [0, 1]$ 表示松弛因子,用于调整专家评估值的权重.当 $\alpha = 0$ 时,专家权重结果为0;当 $\alpha = 1$ 时,专家得到的重要性权重结果和专家评估的相似度高度一致.

3.5 相似度结果

加权平均相似度结果:

$$\widehat{V}_{BS} = DD(G_1) \times \widehat{V}_1 + DD(G_2) \times \widehat{V}_2 + \cdots + DD(G_n) \times \widehat{V}_n, \quad (7)$$

式中, $\widehat{V}_n$ 表示第 n 个专家的模糊向量.

4 实际概率值

在实际操作过程中需要对基本事故模糊失效能隶属度(PF_e)转换为模糊失效能概率(PF_v)^[11], 其中, $PF_e = (b_1, b_2, b_3, b_4)$, $PF_v = (a_1, a_2, a_3, a_4)$. PF_e 表示最小割集基本事故模糊向量点乘.

基本事故模糊概率为:

$$PF_v = \begin{cases} \frac{1}{10^h}, & PF_e \neq 0, \\ 0, & PF_e = 0, \end{cases} \quad (8)$$

式中, $h = \left(\frac{1 - PF_e}{PF_e} \right)^{1/3} \times 2.301$.

对每个基本事故模糊概率计算后, 进行去模糊化处理, 求取实际概率:

$$X^* = \frac{\int u_j(x)xcx}{\int u_j(x)cx}, \quad (9)$$

式中, $u_j(x)$ 表示模糊隶属度.

5 计算案例验证

文中假设某一事故致因影响因素的最小割集含有 3 个基本因素, 即当值人员观察来船失当、夜间当值人员安排不当和没有正规瞭望^[12]. 如下的表 3~表 5 分别表示根据对商船船长、航海院校教师和航运企业高管及海事部门 VTS 人员调查问卷得出的三大基本事件概率语义评估汇总结果.

为保证模拟准确性, 使用计算机运作生成随机数. 以表 5 为例, 在表 2 中选取任一随机数作为

表 3 当值人员观察来船失当概率

事件一	次数	分别概率	随机概率	概率总计
VL	3	0.04	0.0~0.03	0.04
L	14	0.23	0.04~0.27	0.28
M	17	0.28	0.28~0.56	0.57
H	20	0.33	0.57~0.90	0.91
VH	5	0.07	0.91~0.98	0.99

注: 事件一为当值人员观察来船失当, 下同.

表 4 夜间当值人员安排不当概率

事件二	次数	分别概率	随机概率	概率总计
VL	5	0.07	0.0~0.06	0.07
L	17	0.28	0.07~0.35	0.36
M	17	0.28	0.36~0.64	0.65
H	19	0.31	0.65~0.96	0.97
VH	1	0.01	0.97~0.98	0.99

注: 事件二为夜间当值人员有一人不具有值班资格, 下同.

表 5 没有正规瞭望概率

事件三	次数	分别概率	随机概率	概率总计
VL	0	0.0	0.0~0.0	0.0
L	1	0.01	0.0~0.01	0.01
M	6	0.09	0.01~0.10	0.11
H	21	0.35	0.11~0.46	0.47
VH	31	0.51	0.47~0.98	0.99

注: 事件三为没有正规瞭望, 下同.

始点开始模拟, 例如从第 2 行第 6 个数值“24”作为开始点进行模拟, 按照就近原则取值, 表中的“24”处于随机数 0.11~0.46 之间, 其没有正规瞭望概率评判值为最大. 其次, 第 2 行第 5 个数值“58”处于随机数 0.47~0.98 之间, 其没有正规瞭望概率评判值最大. 假设总计进行 10 起没有正规瞭望概率模拟, 则 10 个模拟数和对应的没有正规瞭望概率模拟结果见表 6. 另外 2 个因素随机数概率表(表 7、表 8)的模拟形成过程与表 6 相同.

表 6 随机数的没有正规瞭望概率

项目	随机数									
	98	13	66	79	01	12	21	38	57	23
事件三	VH	H	VH	VH	M	H	H	H	VH	H

表 7 随机数的当值人员观察来船失当概率

项目	随机数									
	98	13	66	79	01	12	21	38	57	23
事件一	VH	L	H	H	VL	L	M	H	M	L

表 8 随机数的夜间当值人员一人不具有值班资格概率

项目	随机数									
	98	13	66	79	01	12	21	38	57	23
事件二	VH	L	H	H	VL	L	M	H	M	L

在实际调查问卷中, 参与语义评估的专家人数超过 59 人, 则经过随机性的蒙特卡罗模拟后, 将参与语义评估专家减少至 10 人^[13-14], 以解决减

少专家数和专家语义评估随机性问题。其次,用模糊运算过程计算得到表6、表7和表8中3个基本事故的概率。

文中以表6为例,对“没有正规瞭望”基本事故语义评估模糊过程进行计算转换,得到表9的10名专家的语义模糊评估结果。并根据表9,列示出10名专家对“没有正规瞭望”基本事故模糊评估中相似度的计算结果(表10)。

表9 专家语义模糊评估值

G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}
0.70	0.50	0.70	0.70	0.20	0.50	0.50	0.50	0.70	0.50
0.80	0.65	0.80	0.80	0.40	0.65	0.65	0.65	0.80	0.65
0.99	0.65	0.99	0.99	0.40	0.65	0.65	0.65	0.99	0.65
0.99	0.80	0.99	0.99	0.60	0.80	0.80	0.80	0.99	0.80

表10 没有正规瞭望模糊相似度计算值

BC	结果	CD	结果	VCB	结果
BC(G_1)	0.893	CD(G_1)	0.103	VCB(G_1)	0.103
BC(G_2)	0.855	CD(G_2)	0.999	VCB(G_2)	0.999
BC(G_3)	0.893	CD(G_3)	0.103	VCB(G_3)	0.103
BC(G_4)	0.893	CD(G_4)	0.103	VCB(G_4)	0.103
BC(G_5)	0.893	CD(G_5)	0.103	VCB(G_5)	0.103
BC(G_6)	0.671	CD(G_6)	0.077	VCB(G_6)	0.077
BC(G_7)	0.855	CD(G_7)	0.999	VCB(G_7)	0.999
BC(G_8)	0.855	CD(G_8)	0.999	VCB(G_8)	0.999
BC(G_9)	0.893	CD(G_9)	0.103	VCB(G_9)	0.103
BC(G_{10})	0.855	CD(G_{10})	0.999	VCB(G_{10})	0.999

同理,对其他2个基本事故的专家评估进行模糊相似度计算,并利用式(7)求得3个基本事故模糊结果(表11)。

表11 3个基本事故模糊计算结果

BS_1	BS_2	BS_3
0.277 264	0.315 877	0.277 264
0.421 745	0.454 813	0.421 745
0.437 396	0.470 860	0.437 396
0.583 525	0.610 641	0.583 525

根据表11的计算结果,使用计算机运作克服蒙特卡洛仿真随机数据影响评估结果准确性而生成的随机数,再进行最小割集的模糊失效能概率 PF_e 计算^[15],然后用式(8)转换为模糊失效能概率 PF_v ,最后运用式(9)进行去模糊化处理,求得最小

割集实际失效能概率(表12)。由表可见,案例中最小割集失效能概率为0.03%。依照此理,对任一故障树的每个最小割集进行计算,可求得各最小割集实际的失效能概率。然后,依据式(2)计算求得顶事件的概率结果。进行各最小割集重要程度的计算,以确认某个最小割集是发生顶事件的关键。

表12 PF_e 转化成 PF_v 及去模糊化处理结果

PF_e	PF_v	模糊化处理
0.057 4	0.000 0	0.0003
0.151 5	0.000 0	—
0.170 9	0.000 1	—
0.329 2	0.001 1	—

注:“—”表示数据无穷小。

上述结果表明,通过运用本文方法,实现了将评估专家从59人减少到10人,解决了专家数和语义评估随机性难题。在模糊运算过程中,计算得到表6~表8的基本事故概率值,并最终得出此案例中最小割集失效能概率0.03%的结果,进而计算出各最小割集重要度,最大程度地简化了分析某最小割集引发顶事件的过程。

6 结语

基于模糊故障树人因致因因素分析模型,对事故调查报告中人因致因因素进行定量分析,以确认基本事故概率,求取各最小割集影响顶事件发生的重要程度。

人因致因定量分析模型最关键的是专家语义评估运用了主观评判,这种评判水平与参评专家的业务水平和参评专家数有关。本研究运用蒙特卡罗模拟法,使用计算机运作生成随机数,将专家评估的随机性和模糊性有机结合,使分析过程更加简化,既减少计算量,又保证模拟准确性,更符合事故随机性的特性。计算案例结果表明,此模型分析法行之有效,分析结果可为海事主管部门、船公司和船舶制定相应的事故预防策略提供理论依据。

参考文献:

[1] 王海燕,刘清.水上船舶交通事故人为因素致因机理[J].中国航海,2016,39(3):41-44;72.
[2] 马建斌.基于改进Apriori算法的海事事故关联分析[D].大连:大连海事大学,2018.

- [3] 朱德通. 事故致因模型在海事调查分析中的应用[J]. 世界海运, 2019, 42(7):16-20.
- [4] 牛佳伟, 李连博, 陈昌源, 等. 加权灰色关联理论模型在辽宁海上交通事故分析与预测中的应用[J]. 上海海事大学学报, 2016, 37(1):65-69; 102.
- [5] 肖仲明, 王新建, 章文俊. 基于贝叶斯网络模型的船舶搁浅事故分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2):418-421.
- [6] 李连博, 刘军坡, 牛佳伟, 等. 辽宁水域海上交通事故的加权灰色关联分析及预测[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(6):605-609.
- [7] 李若哲. 综合安全评估方法在船舶碰撞事故中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [8] 聂细亮, 刘强, 李国帅, 等. LNG 船舶海上运输安全研究现状及进展[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(5):87-92.
- [9] 赵军鹏, 张培军, 周水华, 等. 气象海洋环境条件下救助船舶南海海上搜救风险评估[J]. 中国航海, 2021, 44(2):120-125.
- [10] 白世真. 构建海上风险评估系统框架的设想[J]. 航海, 2021(3):53-55.
- [11] 汪恒. 基于熵权模糊综合评价的泉州湾水域船舶航行环境风险评估[J]. 物流工程与管理, 2020, 42(5):163-165.
- [12] 陈毕伍, 沙正荣, 吴建生, 等. 基于船舶领域的珠江口通航风险评估[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(1):29-38.
- [13] 刘家国, 崔进, 周欢, 等. 基于 HHM-RFRM 的船舶航行风险评估方法研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(5):174-183.
- [14] 李若哲, 唐文勇, 李晓冬. 船舶风险控制方案的层次分析——模糊综合评价[J]. 中国航海, 2019, 42(1):68-72.
- [15] 关忠河, 胡甚平. 大型船舶进出上海港航行风险分析[J]. 中国航海, 2018, 41(4):90-93; 111.

On analysis method of human factors in marine traffic accidents

LI Chenghai¹, LIU Jie¹, HU Shenping², CUI Jianhui³

(1.Shandong Vocational College of Communications, Weifang 261206, China;

2.Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

3.School of Navigation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to meet the demand of large number of experts for the analytical calculation of the fuzzy fault tree modeling process, addressing issues with the complexity and lack of randomness in the quantitative quantification process of evaluation by experts in large numbers, this study proposes using Monte Carlo method to establish fuzzy fault tree analysis model. Computer simulation is used to generate random numbers, and three basic accident minimum cut sets in the marine traffic accident investigation report are used for quantitative analysis. The analysis results show that the Monte Carlo model method with generated random numbers solves the problem to which the fuzzy fault tree analysis model could not get accurate outcomes, and achieves the goal of simplifying the calculation process for the cases where a large number of experts are required. Finally, the calculation results from the specified cases show that the proposed model method features in strong particularity and practicability.

Key words: maritime traffic accidents; human factors; fuzzy fault tree; Monte Carlo model; quantitative analysis

(责任编辑 章践立)