

研究生风险类论文有关中间事件非独立问题案件研究

陈蜀皓^{1a}, 蒋依涵^{1a}, 朱联钟^{1a}

(武汉理工大学 a. 航运学院, 武汉 430063)

【摘要】在船舶安全风险评估领域中研究发现, 传统 FTA 基于事件独立性假设建立的逻辑模型, 与船舶通航系统中普遍存在的耦合性风险因素产生根本性矛盾——以船速干扰水平、减速服务水平间之间的动态关联为例, 其二者既非严格独立事件, 亦非简单的线性关系, 这种隐性依赖将导致传统模型产生系统性误差。针对上述缺陷, 本研究提出基于逻辑优化的复合型事故树建模框架, 并面向研究生风险类论文中的共性难题, 即中间事件非独立性展开针对性改进。本研究不仅拓展了 FTA 方法在风险研究系统中的应用边界, 更为风险类研究生论文的模型构建、逻辑论证及实证分析提供了解决方案, 有效提升水上交通风险评价的科学性和有效性, 旨在帮助研究生提升风险评价论文的质量, 从而提高其学术水平和研究效果。

关键词: 事故树分析; 风险分析; 研究生论文; 案例研究

1. 引言

全球航运业的快速发展使船舶通航效率及其安全性成为影响航运经济效益与海上航行安全的重要议题。在船舶安全风险评估中, 很多传统方法假设各个事件之间是独立的, 而实际情况是事件之间往往存在复杂的依赖关系^[1], 忽视这些依赖关系可能导致风险评估结果的偏差。

复合型事故树分析方法作为一种系统化的风险分析方法, 通过结构化的方式将事件之间的依赖关系清晰地展示出来^[2], 能够有效优化传统模型中的独立性假设。本文以一篇研究生论文中的船舶通航效率影响案例为基础, 通过事故树分析方法, 优化其中的中间事件非独立性问题, 改进其船舶安全风险评估模型。

本论文的研究目标是通过事故树模型的引入, 证实并优化该案例中的事件非独立性, 确保模型更加符合实际航运中存在的复杂依赖关系, 为船舶通航效率提供更准确的评估并通过逻辑优化的复合型事故树建模框架的构建、逻辑论证与实证分析的有机结合, 有效提升水上交通风险评价的科学性和有效性, 帮助研究生在风险管理领域形成更加严谨、系统的写作思路和方法论, 从而促进其学术水平的提升。

2. 事故树分析法

2.1 事故树基本结构及数学原理

事故树分析法能够直观展现独立或组合事件之间的关联性和影响路径^[3]。

在事故树模型中, 顶上事件为待分析的事件, 由中间事件、基本事件或二者共同作用组成。中间事件是作为中间桥梁连接顶上事件与基本事件; 基本事件是造成顶上事件发生的最基本原因。不同事件之间的因果关系用逻辑门“与门”和“或门”两种形式表示。

事故树分析是一种结合数学逻辑理论与系统工程的严谨方法论^[4], 它将复杂的物理系统分解为层级化

的逻辑图结构。该方法借助精细化的故障树绘制, 逐级梳理顶级事件以下各级原因与事件^[5]。在事故树中, 各基本事件均具备“发生”和“不发生”两种状态。

若假设事故树存在数量的基本事件, 顶上事件的状态以表示, 当各基本事件处于不同状态时, 顶上事件的状态也会随之改变。各基本事件与的结构函数公式为:

$$f(T) = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

“与门”结构函数是指基本事件到同时发生时, 顶上事件才会发生。基本事件间为乘法关系, 其函数公式为:

$$f(T) = \prod_{i=1}^n X_i = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$$

“或门”结构函数是指基本事件到至少一个发生, 顶上事件就会发生。基本事件间为加法关系, 其函数公式为:

$$f(T) = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

2.2 事故树分析法缺陷性

在事故树分析框架中, 为简化事件组合概率的计算, 多数人都会默认基本事件之间相互独立。然而, 水上通航安全系统作为一个高度集成的复杂工程体系, 其中的多系统、多部件和多人员协同作业, 往往导致基本事件之间存在显著的统计相关性、条件依赖以及因果耦合。这种事件间依赖性统称为“非独立性”, 如果在风险模型中忽略它, 将直接引起顶事件概率计算的系统性偏差, 从而影响风险评估的可靠性和决策的有效性。

非独立性原理的核心, 在于认识和刻画事件之间的统计相关性、因果关联和条件概率依赖。在概率论中, 若事件 A 的发生增加或减少了事件 B 发生的概率, 则这两个事件存在条件依赖关系, 应采用条件概率或

联合分布的形式表达其关系。

3. 案例

3.1 事件定义与模型构建

本研究基于某研究生论文的内容进行分析。该论文根据船舶减速行为对后序船舶的影响构建了以船速干扰水平、减速服务水平为核心指标的单线航道船舶通航效率表征模型。^[6] 本研究基于复杂系统风险评估理论，构建船舶航行风险多级传导体系。顶事件 T 定义为船舶航行效率降低，其中间事件分别为船速干扰水平，减速服务水平。中间事件船速干扰水平 (M1) 越高，代表单线航道内船舶受相邻船速干扰的影响越大，通航效率越低。中间事件减速服务水平 (M2) 越高，单线航道内船舶等待时间相对通航时间越长，通航效率越低。

底事件集合构成风险演化的最小独立单元，如下表所示：

表 3-1 致因事故树底事件表

底事件	描述	符号	初始概率假设
X1 风浪干扰	影响船速稳定性	P(X1)	0.15
X2 航道拥堵	影响船速及减速决策	P(X2)	0.10
X3 船速异常	船体控制基准参数	P(X3)	0.20
X4 船舶操纵问题	舵效或人为操作误差	P(X4)	0.12
X5 设备故障	减速系统失效	P(X5)	0.08

3.2. 事故树逻辑优化

3.2.1 原始结构

在传统事故树框架下，中间事件 M1 与 M2 的逻辑模型基于事件独立性假设构建，具体结构如下图所示：

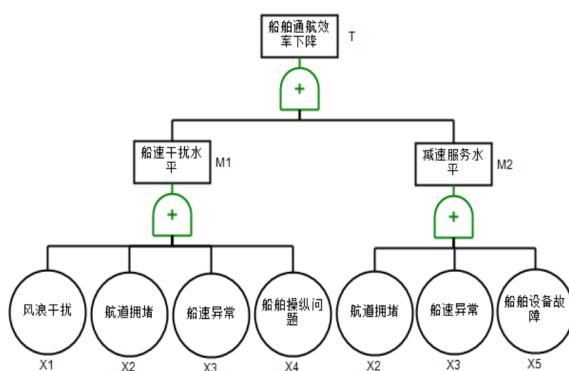


图 3-1 致因事故树

3.2.2 优化后结构

针对事件非独立性问题，本研究提出复合型事故树模型，通过引入动态逻辑门与共因修正机制，优化结构如下：

中间事件 M1 的优化逻辑模型的逻辑门调整为保留“或”门连接 X1、X2、X3、X4，但引入条件概率修正项，反映 X1-X3、X2-X3 的耦合效应。

表达式修正：

$$P(M1) = P(X1 \cup X2 \cup X3 \cup X4) | \text{Morr}(X1, X3), \text{Morr}(X2, X3)$$

风险计算：

$$P(M1) = \sum P(X_i) - \sum P(X_i \cap X_j) \quad (j, j \in \{1, 2, 3\})$$

中间事件 M2 的优化逻辑模型的逻辑门调整为保留“或”门连接 X2、X3、X5，但引入条件概率修正项，反映 X2-X3、X2-X5、X3-X5 的耦合效应。

表达式修正：

$$P(M2) = P(X2 \cup X3 \cup X5) | \text{Morr}(X2, X3), \text{Morr}(X2, X5), \text{Morr}(X3, X5)$$

风险计算：

$$P(M2) = \sum P(X_i) - \sum P(X_i \cap X_j) \quad (j, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\})$$

3.3 非独立性关联分析

3.3.1 假设系数事故

表 3-2 底事件关联程度

事件对	相关系数 (ρ)	影响分析
X1-X3	0.5	恶劣天气导致 AIS 信号不稳定
X2-X4	0.3	机械故障增加计算负载
X3-X4	0.4	AIS 数据处理依赖算力

其中， ρ 为事件相关系数，取值范围 $[-1, 1]$ 。

$\rho > 0$: 正相关，联合概率高于独立概率。

$\rho < 0$: 负相关，联合概率低于独立概率。

相关系数：

$$\rho = \frac{\text{Cov}(\beta_1, \beta_2)}{\sqrt{\text{Var}(\beta_1)\text{Var}(\beta_2)}}$$

协方差： $\text{Cov}(\beta_1, \beta_2) = P(\beta_1 \cap \beta_2) - P(\beta_1)P(\beta_2)$

对于二元事件，方差为 $P(\beta_i)(1 - P(\beta_i))$ ，因此：

$$\sqrt{\text{Var}(\beta_1)\text{Var}(\beta_2)} = \sqrt{P(\beta_1)(1 - P(\beta_1))P(\beta_2)(1 - P(\beta_2))}$$

3.3.2 联合概率计算

(1) 船速干扰 M1 的概率：

$$P(M1) = P(X1 \cup X2 \cup X3 \cup X4)$$

考虑相关性后：

$$P(X1 \cap X3) = P(X1)P(X3) + \rho\sqrt{[P(X1)(1 - P(X1))P(X3)(1 - P(X3))]} \approx 0.087$$

同理计算其他联合概率：

$$P(X2 \cap X3) = P(X2)P(X3) + \rho\sqrt{[P(X2)(1 - P(X2))P(X3)(1 - P(X3))]} \approx 0.046$$

最终：

$$P(M1) = P(X1) + P(X2) + P(X3) + P(X4) - P(X1 \cap X3) - P(X2 \cap X3) \approx 0.437$$

(2) 减速服务 M2 的概率：

$$P(M2) = P(X2 \cup X3 \cup X5)$$

考虑相关性后：

$$P(X2 \cap X3) = P(X2)P(X3) + \rho\sqrt{[P(X2)(1 - P(X2))P(X3)(1 - P(X3))]} \approx 0.046$$

同理计算其他联合概率：

$$P(X2 \cap X5) = P(X2)P(X5) + \rho\sqrt{[P(X2)(1 - P(X2))P(X5)(1 - P(X5))]} \approx 0.024$$

$$P(X3 \cap X5) = P(X3)P(X5) + \rho\sqrt{[P(X3)(1 - P(X3))P(X5)(1 - P(X5))]} \approx 0.071$$

最终：

$$P(M2) = P(X2) + P(X3) + P(X5) - P(X2 \cap X3) - P(X2 \cap X5) - P(X3 \cap X5) \approx 0.239$$

3.4 模型验证及优化

3.4.1 顶事件总概率

$$P(T) = 1 - (1 - P(M1))(1 - P(M2)) \approx 0.572$$

3.4.2 对比独立性假设

若考虑 M1 独立，则：

$$P(M1) = P(X1 \cup X2 \cup X3 \cup X4) = 1 - (1 - P(X1))(1 - P(X2))(1 - P(X3))(1 - P(X4)) \approx 0.462$$

若考虑 M2 独立，则：

$$P(M2) = P(X2 \cup X3 \cup X5) = 1 - (1 - P(X2))(1 - P(X3))(1 - P(X5)) \approx 0.338$$

则顶事件的发生概率为：

$$P(T) = 1 - (1 - P(M1))(1 - P(M2)) \approx 0.641$$

本研究通过相关性修正分析揭示了系统总风险值 $P(T)$ 的关键变化：在原始独立假设条件下计算得到的风险概率为 0.641，而经过非独立性修正后显著降至 0.572，降幅达 10.8%。

这一量化结果证实了传统事故树分析在独立假设下的系统性偏差问题。具体而言，风险值的实质性降低可能源于一下三个层面：首先，在底事件层面， $X3$ 与 $X2$ 之间存在的正相关关系，形成了风险传导放大器效应，这使得传统独立模型高估了路径 $X2 \rightarrow M1$ 与 $X3 \rightarrow M1$ 的线性叠加效应；其次，在中间事件层面， $M1$ 与 $M2$ 通过共享底事件 $X2$ 、 $X3$ 形成网络化耦合结构，其联合概率需采用条件概率公式进行精确计算；最后，在系统层面，主导性风险路径 $X3 \rightarrow X5$ 的灵敏度分析揭示出船舶动力系统的非线性响应特征，该路径的相关系数表明设备故障概率与船速异常具有显著的条件依赖性。

4. 总结

本研究针对传统事故树分析法在船舶通航效率评

估中事件独立性假设的局限性，提出了一种基于逻辑优化的复合型事故树建模框架，针对性地解决了中间事件非独立性导致的模型偏差问题。通过引入事件相关性修正机制，研究取得了以下核心成果，即通过量化分析底事件间的耦合关系，重构了船舶通航效率风险传导模型。这一改进不仅克服了传统 FTA 高估风险的缺陷，更为复杂系统中风险叠加效应的动态解析提供了方法论支持。提出的复合型 FTA 框架，通过引入协方差矩阵，实现了对事件相关性的量化，突破了传统方法在复杂系统中的适用瓶颈。为研究生风险类论文的模型构建、逻辑论证及实证分析提供了可复用的技术路径。

希望能提升研究生在风险管理领域的研究水平和论文质量，研究生需要培养发现理论缺陷、设计解决方案并进行科学验证的系统性思维能力。通过本研究的方法论引导，希望研究生能够在风险评价领域建立更加严谨的学术规范，实现从简单应用已有方法到创新发展评估技术的学术能力的提升。

参考文献

- [1] 杨虹霞, 孙有仙. 事故树定性分析法在实际运用中存在的问题 [J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(9): 203-206.
- [2] 张宇鹏. 事故树分析法在抽水蓄能电站工程风险分析中的应用研究 [C] // 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集 2020. 中国水利水电出版社, 2020: 540-546.
- [3] 印桂生, 孙颖, 杨东梅, 等. 船舶安全事故典型案例分析与研究 [J]. 船舶, 2021, 32(04): 1-14.
- [4] 邱文钦, 唐存宝, 唐强荣. 不确定条件下内河航道通航环境风险评价 [J]. 中国航海, 2019, 42(01): 52-55+67.
- [5] 马可. 基于事故树分析的船舶火灾危险性评价和防治研究 [J]. 船舶标准化与质量, 2024, (05): 39-43+50.
- [6] 杨旭刚. 基于船速特征的单线航道船舶分组调度算法研究 [D]. 武汉理工大学, 2018.
- [7] 课题: 课题: 研究生风险类论文深度研究及案例库建设, 课题编号: 35400000

作者简介: 陈蜀喆 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事交通安全与环境、交通信息工程及控制研究。