

Review on Maritime Transportation Risk Analysis Method

Lei Cheng¹, Zhuoou Chen², Jinfen Zhang³

¹Nantong Maritime Safety Administration, Nantong

²Tianjin Maritime Safety Administration, Tianjin

³Intelligent Transportation System Research Centre, Wuhan University of Technology, Wuhan
Email: zhangjinfen2000@126.com

Received: Jan. 21st, 2013; revised: Feb. 27th, 2013; accepted: Mar. 11th, 2013

Copyright © 2013 Lei Cheng et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Maritime transportation plays an important role in national economic development and world trade. Meanwhile, it also has a great potential risk. It has been of great concern for a long time that how to enhance the safety and security of maritime transportation. The latest research in the filed of maritime risk assessment was classified and evaluated in this paper. The research was divided into direct and indirect risk assessment. The direct risk assessment method of accident statistic, Formal Safety Assessment (FSA), Fault Tree Analysis (FTA) and Bayesian Networks (BNs), and indirect risk assessment method of model-based and simulation-based are discussed in terms of basic principle, the latest study and characteristics. At last, the problems need to solve were discussed and also prospected the future research directions.

Keywords: Maritime Transportation; Accident; Risk Analysis

水上交通风险分析方法国内外研究进展

程 磊¹, 陈卓欧², 张金奋³

¹中华人民共和国南通海事局, 南通

²中华人民共和国天津海事局, 天津

³武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉
Email: zhangjinfen2000@126.com

收稿日期: 2013 年 1 月 21 日; 修回日期: 2013 年 2 月 27 日; 录用日期: 2013 年 3 月 11 日

摘 要: 水路运输在国民经济发展和国际贸易中发挥重要作用的同时, 也存在着巨大的风险。如何有效提高水路运输的安全水平成为人们长期关注的焦点。本文对海事风险评估领域内的最新研究成果进行分类和评价, 将当前的研究分为直接风险评估和间接风险评估方法。并对事故统计、综合安全评估、故障树和贝叶斯网络分析法, 以及基于理论模型和仿真的风险分析方法的基本原理、研究现状、主要特点等方面作了较为全面的论述。最后对当前研究中存在的问题以及未来研究的方向作出了展望。

关键词: 水路运输; 事故; 风险分析

1. 引言

水路运输具有运量大、运费低、污染轻等其它运输方式无法比拟的优势, 在我国经济发展和国际贸易

中发挥极其重要的作用。根据《中国海关统计年鉴》^[1]等统计资料, 1995 年以来海运承担的我国外贸运量一直在 80% 以上, 近年估计达到 90%; 海运完成的外贸

货物, 换算成相应的贸易额, 约占五种运输方式的62%。另外, 我国的内河航运的发展也同样十分迅速。以长江干线为例, 2008年货运量达到了12亿吨, 是美国密西西比河的2倍、欧洲莱茵河的3倍, 早已成为世界上货运量最大的内河河流^[2], 而且还存在很大的上升空间。

水路运输带来巨大经济和社会效益的同时, 也存在着很大的安全风险。船舶碰撞、搁浅、沉没等事故时有发生, 往往会造成巨大的经济财产损失、人员伤亡以及环境污染。根据交通运输部海事局的统计资料^[2], 2009年全国共发生水上交通事故358起, 死亡336人; 2010年1~4月, 水上交通事故为117起, 死亡129人, 沉船84艘。事故的不断发生严重影响了水运业的持续快速健康发展, 因此也引起管理部门和研究人员的持续关注, 提出了一系列风险识别、分析和控制方法, 对有效降低事故发生概率、减少事故造成的损失等方面起到了十分积极的作用。

本文主要对当前国内外对水上交通风险分析方法进行归纳和总结, 重点介绍不同方法的特点、主要研究思路、适用范围、优缺点等方面, 并对未来研究方向做出评价。

2. 风险的定义及其分析方法分类

风险通常被定义为不希望事件发生的概率与事件造成的损失之间的乘积^[3], 即:

$$R = PC \quad (1)$$

其中 R 为风险, P 为事件发生的概率, 通常被定义为单位时间内发生事故的数量, 如每年发生碰撞事故的次数, C 为事件造成的损失, 主要包括经济损失、人员损失和环境损失三个方面。风险分析则是系统地利用现有的各类数据识别出潜在威胁以及可能造成的损失^[4]。

从当前水上交通风险分析的国内外研究来看, 可以分为直接分析方法和间接分析方法。直接分析法是从事故本身特性入手, 根据历史事故数据、专家知识等, 通过分析各种复杂因素及其之间的联系来探寻水上交通事故的现状和发展趋势, 评估某个特定水域的安全形势, 并提出控制方案和建议, 主要方法包括事故统计分析、综合安全评估、故障树等。间接分析法则是从研究交通流的特性入手, 对交通流特性进行理

论分析, 或者采用快速仿真的方法, 首先建立各种模型, 如船舶属性模型、到达规律模型、航线规划模型、碰撞风险模型等来构建仿真平台, 然后通过对仿真结果进行深入分析得到水上交通事故的时空分布规律。

3. 直接风险分析方法

3.1. 综合安全评估(FSA)

国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)于1997年通过了《综合安全评估(Formal Safety Assessment, FSA)技术在IMO规则制定程序中的应用暂行指南》^[5,6], 并逐步被确定为水上安全评估的标准化程序。FSA是一种定性和定量相结合的风险评估方法, 其主要作用是决策者提供决策支持, 它分为5个步骤, 首先是危险识别, 主要从船舶本身、操船者、通航环境和管理水平四个角度识别影响通航安全的因素; 然后通过构建风险贡献树、构建并量化影像图等一系列操作对各种因素进行量化, 找出最关键的因素; 第三步是研究风险控制方法的选择, 可以从风险减少形式、费用, 以及可信度等角度选取风险控制方案; 然后在此基础上对选取的方案实施费用效益评估, 目标是用最小的成本将交通风险降低到可以接受的范围, 最后一步是给出决策建议。FSA方法从被提出以来, 在航运管理、各种类型船舶安全评估等领域得到了广泛的应用^[5], 并取得了很大的成功。

FSA方法面临的挑战主要体现在不确定性问题的处理上, 具体表现为由于信息缺乏导致危险识别不全或系统建模不完整, 可容忍风险水平难以把握等。国内对该方法的研究集中在如何更科学地评估人为因素对通航风险的影响^[7], 以及如何将一些定性的因素进行量化处理。

3.2. 故障树分析法(FTA)

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)^[8]认为事故的发生是由一系列连续的故障或失误共同作用引起的, 基于这一考虑, 将事故看作是一个复合事件, 然后利用逻辑分析的方法逐步分解为若干个简单事件, 最后根据简单事件发生的概率反推事故发生的概率。在事件分解过程中通常要用到“与”门和“或”门, 如图1所示。

其中 Z 为复合事件, 它的发生由事件 A_1, A_2, \dots, A_n

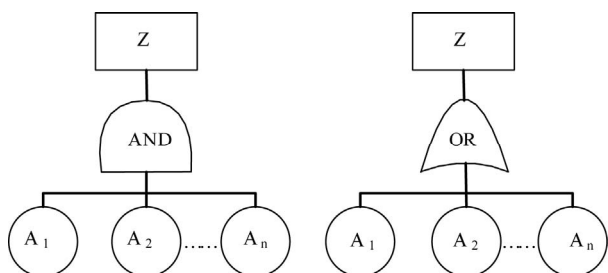


Figure 1. And and OR Gates
图 1. “与”门和“或”门

共同决定。对于与门来说，事件 Z 发生的概率可以用下式计算：

$$P_Z = \prod_{i=1}^n P_{A_i} \quad (2)$$

而对于或门来说，事件 Z 发生的概率为：

$$P_Z = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{A_i}) \quad (3)$$

FTA 方法将复杂的问题逐步分解为相对简单的基本事件，再通过基本事件的合成反推事故概率，这无疑是一种很好的思路。然而，在水上交通事故风险分析中，即使是基本事件也无法确切地直到发生的概率，很多基本事件的概率只能通过语言变量来描述，遇到多状态变量时故障树也无法表达演绎。针对这个问题，有研究者提出模糊故障树(Fuzzy Fault Tree, FFT)^[9]的概念，将语言变量标定在某个概率区间，并通过某个变量的扰动(如将概率增加或降低 3%)来评估模型的敏感程度，该方法很好地解决了对发生概率不确定事件的处理问题。实际上，水上交通是一个十分复杂的系统，即使是基本事件之间也存在着相互影响，从这个意义上讲，FTA 的树状结构并不能很好地描述水上交通风险的本质。

3.3. 贝叶斯网络(BN)

不同于 FTA 的树状结构，利用贝叶斯网络(Bayesian Networks, BN)^[10]进行海事风险评估的主要思路是首先将每个因素看作是一个节点，每个节点可以划分为多种状态，既可以是定量的描述，也可以是定性的描述。然后建立多种因素之间相互影响的网状有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG)，最后通过顶层节点的概率密度函数和节点之间的条件概率表(Conditional Probability Table, CPT)赋值，利用 Bayes

基本原理得到风险的分布情况。BN 分析方法的最大特点是可以将历史数据与专家知识有机结合^[11]，达到现有资源的充分利用。与 FTA 分析方法类似，BN 中许多节点的先验概率也是不确定的，也需要进行模糊化处理，因此有人提出了模糊贝叶斯网络(Fuzzy Bayesian Networks, FBN)的概念，例如文献^[12]将先验概率看作是在某个区间范围内，并提出相应的模糊算法，大大扩展了 BN 的应用范围。BN 除了具有网状结构这一优势外，还可以进行反推运算。这个性质可以让人们清楚地知道影响某种事故发生的关键因素，进而有针对性地实施控制措施。另外，该方法还可以利用 Bayes 理论具有从先验向后验迭代的性质对网络不断更新，甚至可以改变节点的概率密度函数，使预测结果更加接近实际情况。

尽管 BN 方法在水上交通风险分析应用中取得了很大的成功，但是在一些方面仍然有改进的空间。例如，一个含有 11 个节点的贝叶斯网络中可能就需要对 300 个条件概率进行赋值^[6]，历史统计数据往往无法做到，而需要通过领域专家咨询对其赋值，这往往会造成结论的可信度不高。因此，如何有效降低人为因素的影响是需要进一步研究的问题。

总体上讲，直接分析方法在模型上已经较为成熟，目前的研究主要是将模型应用于解决实际问题。目前直接分析法正处在由定性分析转向定量分析逐渐过渡的阶段，在历史数据不充分的情况下，借助于专家经验，实现较为精确的评价。此类方法主要适用于对事件之间的因果关联相对比较明确的风险分析，而在水上交通风险分析中，相当一部分风险的发生和演化是十分复杂的，导致直接分析方法无法适用。

4. 间接风险分析方法

4.1. 基于理论模型的风险分析

基于模型的风险分析方法是在对历史交通流数据统计的基础上，通过建立数学模型，并对模型求解来得到某类水上交通事故发生的概率。其中最为典型的研究是碰撞概率模型。

碰撞模型的基本思想是首先对研究水域某个断面一定时期内的交通流进行统计，得到空间分布的柱状图，然后利用理论概率分布进行拟合，得到一个最优的理论分布函数。

对于顺直航道来说,发生船舶碰撞的概率可以用下式计算^[3]:

$$P_0 = P\left(x \leq \frac{B_1 + B_2}{2}\right) \quad (4)$$

其中 x 为两条船舶之间的距离, B_1 、 B_2 分别为船宽, P 为拟合得到的最优理论分布函数。而对于交叉航道,碰撞事故的概率计算则是基于另一种模型,即:

$$P_0 = N_{\text{crossing}} P_F \quad (5)$$

其中 N_{crossing} 为交叉的两条航道中船舶形成会遇局面的概率, P_F 则为避让失误的概率,它根据不同水域的历史交通流和事故数据确定。

基于理论模型的风险分析方法计算相对简单,可以根据研究结论得到水域的总体安全形势;研究是基于实际交通流数据,不受人为因素的影响,因此得到的结论相对较为可靠。但是这种方法无法全面了解风险的时空分布,例如哪些属于事故易发水域,哪些时间段容易发生事故等,无法有针对性的实施风险控制措施。

4.2. 基于仿真的风险分析

基于仿真的风险分析方法同样依赖于历史的交通流数据,不同之处在于该方法通过对历史数据的分析,建立船舶属性模型、到达规律模型、风险量化模型,并据此对整个交通系统进行快速仿真分析或者 Monte Carlo 模拟^[3,13,14],然后对仿真得到的结果进行分析来评估水域的风险状况。这种研究方法一般需要遵循以下步骤:

1) 船舶产生

产生船舶是仿真能够运行的基础,通常船舶是采用随机的方式产生,产生时需要包含的信息包括船舶类型、船长、船宽、吃水、船速、船旗国等,这些船舶属性数据需要对历史数据的统计分析获取,如果没有任何分布能够很好地描述数据的规律,那么就采用经验分布。

2) 到达规律

尽管在短时间内船舶的到达具有很大的随机性,但是通过对长期船舶到达规律的统计分析发现,一般的船舶到达均服从泊松流^[15,16],即连续到达的两艘船舶之间的时间间隔服从负指数分布:

$$p(x=t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6)$$

其中 λ 为均值。然而进一步的研究发现,船舶的到达在不同的时间内具有不同的规律,例如在白天交通流密度会很大,而到了夜间交通流密度会急剧减少;一个航道内交通密度很大时,相邻航道内的交通密度可能反而会很小,此时静态泊松流模型无法真实反应实际的交通流特性。因此 Floris Goerlandt^[13]提出了一种动态泊松过程模型,对不同时间段的船舶到达规律分别进行统计分析,进而确定船舶到达规律。

3) 航线规划

航线规划的主要目标是使仿真中船舶的航行轨迹尽可能与实际情况相吻合, J. Merrick^[14]在对各个方向来船的断面交通流统计的基础上,设计出若干条固定的航线,每条来船均以相应的概率选择其中一条航线,当船舶转弯时,认为可以立刻转向另一个航向。不同于以上静态航线规划方法, F. Goerlandt^[13]根据速度来计算下一时刻的船舶位置,然后根据统计规律对得到的船舶位置加入一定的随机干扰,最终确定船舶的航行路线。这种模型能够更好地反映交通流的实际情况,但是船舶不会进入相反方向上的航道这一假设与实际情况不符。

4) 风险量化模型

在快速 Monte Carlo 仿真过程中需要对风险比较大的事件进行统计,不同的统计标准会得到不同的结果,对风险分析也会产生直接的影响。以碰撞风险仿真分析为例, Jason R.W. Merrick^[14]在研究渡轮业务增长时的风险变化情况时,通过与专家调研,认为五分钟内会穿越渡轮航线,并且穿越航线时位于渡船首 1 n mile 以内或者船尾 0.5 n mile 以内的所有船舶均是会遇船舶, Floris Goerlandt^[13]则将交通事件定义为两艘船舶的航线有交叉,且船舶到达交叉处的时间窗口有重叠。以上模型均没有考虑船舶的操纵性能, Jakub^[3]则提出一种最小碰撞距离模型(Minimum Distance to Collision, MDTC)的概念,即两艘船舶同时转向可以避免碰撞的最小距离,一旦小于这个距离,则认为碰撞事件发生。模型并未遵循国际海上避碰规则的相关要求:船舶在会遇过程中,其中一艘被认定为让路船,需要进行避碰操作,而另外一艘为直航船,只需要保速保向航行。因此,该模型仍然有进一步改进的空间。

间接风险分析方法主要适用于历史数据较为全

面,对风险发生和演化过程较为复杂的事件进行分析。目前这种评价模型还不够成熟,还有许多问题需要解决,如风险类型的确定、风险的量化、模型的验证等,但是这种方法无疑给水路交通风险评估提供了一种全新的思路,将它与直接分析方法相结合也值得进一步研究。

5. 总结

海事安全问题一直以来都是水路运输研究领域内的热点话题之一,引起了世界各国的持续关注。本文将目前海事风险的研究按照直接分析法和间接分析法分别进行论述。从目前的研究来看,直接风险分析法的本质是从历史事故数据本身出发,探寻影响事故发生的各种因素之间的内在联系;间接风险分析法则从交通流的本身特征出发,通过不同类型事故建模,或者快速仿真的方法准确描述交通流特性,进而研究水域的安全形势。间接风险分析方法作为一种新的研究视角,对于更深入地理解海事风险起到了很大的推动作用,从目前国内外的研究来看,至少在以下几个方面有改进的空间:

1) 从风险定义的角度来看,目前基于仿真的风险研究大多关注于事故概率的研究,往往忽视了对事故造成的后果的研究,严重割裂了二者之间的紧密联系,这可能是仿真分析所面临的最大挑战之一;

2) 多数分析方法依赖专家知识对变量进行赋值,在降低人为因素的影响、提高结论可信度方面的研究较少;

3) 目前仿真中用到的各种模型,如固定的会遇距离、静态泊松分布、确定的船舶航线等能否真正反映交通流的真实特性需要作进一步的验证;

4) 基于仿真的方法虽然可以得到风险的严重程度、时空分布情况,但是如果没有任何类似的研究,很难对模型的结果进行验证。因此,将直接风险分析和间接风险分析方法相结合就显得十分必要。

综上所述,在获取全面的水上交通流数据和相关事故数据的基础上,通过理论和仿真模型相结合的方式研究海事风险问题,有利于更全面地评估水域安全形势,对于改善安全水平将会起到很大的促进作用。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国海关总署《海关统计》编辑部. 中国海关统计年鉴[M]. 北京: 中国海关总署出版社, 1995-2010.
- [2] <http://www.msa.gov.cn/>.
- [3] J. Montewka, T. Hinz, P. Kujala, et al. Probability modeling of vessel collisions. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, 95: 573-589.
- [4] A. Mullai, U. Paulsson. A ground theory model for analysis of marine accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43(4): 1590-1603.
- [5] 黄明. 三峡库区滚装船运输安全评估技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [6] 张笛. 枯水期长江通航风险评价和预测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [7] M. Celik, I. D. Er. Identifying the potential roles of design-based failures on human errors in shipboard operations. 7th Navigational Symposium on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2007: 617-621.
- [8] J. Andrews, T. Moss. *Reliability and risk assessment*. 2nd Edition, London: Professional Engineering Publishing Limited, 2002: 52-54.
- [9] M. Celik, S. M. Lavasani and J. Wang. A risk-based modelling approach to enhance shipping accident investigation. *Safety Science*, 2010, 48(1): 18-27.
- [10] I. Helle, T. Lecklin, A. Jolma, et al. Modeling the effectiveness of oil combating from an ecological perspective: A Bayesian network for the Gulf of Finland, the Baltic Sea. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(1): 182-192.
- [11] J. R. W. Merrick, J. R. Van Dorp. Speaking the truth in maritime risk assessment. *Risk Anal.*, 2006, 26(1): 1-30.
- [12] J. Ren, I. Jenkinson, J. Wang, et al. An offshore risk analysis method using fuzzy Bayesian network. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2009, 131(4): 41101-41112.
- [13] F. Goerlandt, P. Kujala. Traffic simulation based ship collision probability modeling. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(1): 91-107.
- [14] J. R. W. Merrick, J. R. Van Dorp, J. P. Blackford, et al. A traffic density analysis of proposed ferry service expansion in San Francisco Bay using a maritime simulation model. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 81(2): 119-132.
- [15] 刘亮, 刘敬贤, 谭志荣. 荆州长江大桥船舶到达规律分析及检验[J]. *大连海事大学学报*, 2010, 36(4): 8-10.
- [16] P. T. Pedersen. *Collision and grounding mechanics*. Danish Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1995: 125-57.