

# 船舶机舱火灾事故人为因素分析

王建涛, 李成海

(山东交通职业学院 航海系, 山东 潍坊 261200)

**摘要:**为预防或杜绝船舶机舱火灾事故发生,对已发生的船舶机舱火灾事故及不安全动作和不安全情形进行全面深入分析。运用故障树分析法对引发船舶机舱火灾事故的原因进行初步关联分析,从定量的角度描绘各影响因素间的相互关系,为综合评估引发船舶机舱火灾事故人为因素的影响程度以及采取正确预防措施确保船舶航行安全,提供了重要的理论参考依据。结果表明,该方法具有很强的实用价值。

**关键词:**水路运输;船舶航行安全;机舱火灾事故;故障树分析

**中图分类号:**U663.82

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-9891(2021)2-0060-04

## 0 引言

研究海上交通事故的人为影响因素,对预防和减少海上交通事故的发生具有理论意义和现实意义。目前,国外学者关于机舱火灾的人为因素对海上交通事故影响的最新研究<sup>[1-2]</sup>,主要采用分类树模型和粗糙集理论两种方法<sup>[3-4]</sup>,重点研究的是受限水域海上交通安全问题。我国研究人员主要进行了海上船舶机损事故人为因素、船舶驾驶人员适任评价、船舶操纵人员驾驶行为、船舶碰撞风险评价和海上交通事故人为因素关联性研究。<sup>[5-10]</sup>故障树分析法(Fault Tree Analysis,简称“FTA”)由美国贝尔电话公司的 H·A·沃森和 A·B 莫恩斯于 1962 年首先提出,最早仅用于美国民兵式导弹发射系统的可靠性研究。故障树理论分析不仅能定量确定事故的发生概率,而且能对事故做出定量分析,这对维护海上交通安全有积极作用<sup>[11]267</sup>。目前,海上船舶机舱火灾事故频发的原因较多,在考虑硬件故障和人为致因因素的基础上,建立人为致因因素对顶事件发生产生影响的机舱火灾故障树,构建船舶安全管理体制,提出船舶安全技术分类准则及船舶检测检验规则,为预防和杜绝船舶机舱火灾事故提供理论依据。

## 1 建立故障树

### 1.1 选择顶事件

顶事件是导致出现重大险情或灾难事故等最不希望发生的事故,通常选择最可能引发人员伤亡、重大经济损失的事件。综合考虑船舶航行安全影响因素,笔者认为“船舶机舱火灾事故”是可能或最可能发生并引发重大灾难的事故,因此选取“船舶机舱火灾事故”为故障树中的顶事件。

### 1.2 设定边界条件

合理设定边界条件,便于明确构建故障树的界限,包括清晰界定系统初始状态过程、不需考虑的小概率事件和一定条件诱发的必定重大事件。通常,故障事件分三种类型:违章进行电气焊等由人为因素引发的事件;报警系统失效等由系统硬件引起的事件;海上船舶碰撞等由环境引发的事件。首先选取由系统硬件故障和人为因素引发的基本故障事件作为研究对象。假定分系统仅包括工作正常和故障两种情形,即假定分系统各组成部分的基本故障事件是互相独立的,且考虑可忽略的由不可抗力因素和系统环境所引发的事件。

### 1.3 建立故障树

采用手工建立故障树的方法,沿顶事件顺序寻找各层次引发事件的原因,并对底事件按先后顺序依次分解,建立图 1 所示的故障树。图中,X1 为未采取措施,X2 为监测报警系统故障,X3 为抽烟,X4 为电焊,X5

收稿日期:2020-11-23

作者简介:王建涛(1974—),男,山东潍坊人,山东交通职业学院航海系副教授,高级轮机长。

为其他人为火源, X6 为油污、油渍, X7 为装备或管道滴漏燃油, X8 为通风系统故障, X9 为电气设备短路, X10 为电气系统引发的静电电弧或火花, X11 为电气系统设备绝缘破坏, X12 为运行设备产生的热光面, X13 为大功率照明灯发热, X14 为电流过大引发的设备和线路超常发热, X15 为不明原因引发的热光面。

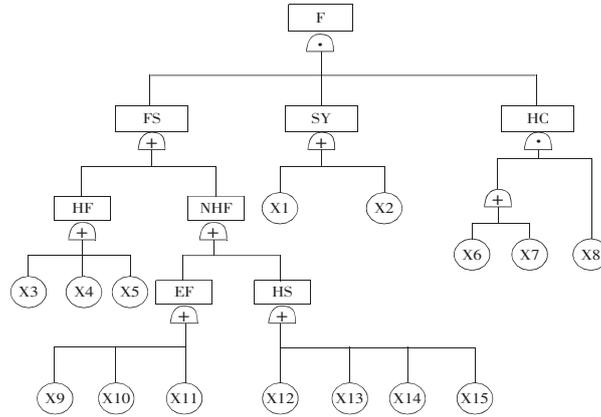


图 1 机舱火灾故障树

## 2 风险评价

### 2.1 定性分析

为建立包括全部最小割集的故障树, 本文采用定性分析方法。运用富塞尔理论可取得机舱火灾故障树全部最小割集, 如: {X1, X3, X6, X8}; {X1, X4, X6, X8}; {X1, X5, X6, X8}; {X1, X3, X7, X8}; {X1, X4, X7, X8}; {X1, X5, X7, X8}; {X2, X3, X6, X8}; {X2, X4, X6, X8}; {X2, X5, X6, X8}; {X2, X3, X7, X8}; {X2, X4, X7, X8}; {X2, X5, X7, X8}; {X1, X6, X8, X9}; {X1, X6, X8, X10}; {X1, X6, X8, X11}; {X1, X6, X8, X12}; {X1, X6, X8, X13}; {X1, X6, X8, X14}; {X1, X6, X8, X15}; {X1, X7, X8, X9}; {X1, X7, X8, X10}; {X1, X7, X8, X11}; {X1, X7, X8, X12}; {X1, X7, X8, X13}; {X1, X7, X8, X14}; {X1, X7, X8, X15}; {X2, X6, X8, X9}; {X2, X6, X8, X10}; {X2, X6, X8, X11}; {X2, X6, X8, X12}; {X2, X6, X8, X13}; {X2, X6, X8, X14}; {X2, X6, X8, X15}; {X2, X7, X8, X9}; {X2, X7, X8, X10}; {X2, X7, X8, X11}; {X2, X7, X8, X12}; {X2, X7, X8, X13}; {X2, X7, X8, X14}; {X2, X7, X8, X15}。

若以上 40 组最小割集中的一个发生, 必定引发顶事件的发生, 则可找到事故发生的一般规律, 为提高预险功能提供科学而全面的信息, 对防止危险事故发生或降低事故损失具有鲜明的重要意义。

### 2.2 定量分析

定量分析是运用故障树逻辑模型图对顶事件发生概率进行预测, 并对系统的可靠性、安全性进行综合评判, 量化诱发顶事件发生的各底事件的重要程度, 为制定应急预案提供科学的理论依据。鉴于底事件较多, 特别是人为致因影响程度具有复杂性和模糊性, 从方便研究故障树对底事件重要性的角度出发, 只对底事件结构性重要度进行量化分析。采用故障树最小割集求取底事件梯次重要程度  $I_{\varphi}(i)$  的计算公式, 如:

$$I_{\varphi}(i) = D \sum_{i \in N_{kj}} \frac{2}{2_j^r - 1} \tag{1}$$

式中,  $i$  为基本事件的序号,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $j$  为最小割集的序号,  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ ;  $D$  为最小割集的序数,  $D = 1/NK$ ,  $NK$  为最小割集数;  $r$  为基本事件所在最小割集的阶级。

经计算得到:

$$I_{\varphi}(1) = I_{\varphi}(2) = I_{\varphi}(6) = I_{\varphi}(7) = 0.067$$

$$I_{\varphi}(3) = I_{\varphi}(4) = I_{\varphi}(5) = I_{\varphi}(9) = I_{\varphi}(10) = I_{\varphi}(11) = I_{\varphi}(12) = I_{\varphi}(13) = I_{\varphi}(14) = I_{\varphi}(15) = 0.017$$

$$I_{\varphi}(8) = 0.133$$

排列顺序为:

$$I_{\varphi}(8) > I_{\varphi}(1) = I_{\varphi}(2) = I_{\varphi}(6) = I_{\varphi}(7) > I_{\varphi}(3) = I_{\varphi}(4) = I_{\varphi}(5) = I_{\varphi}(9) = I_{\varphi}(10) = I_{\varphi}(11) = I_{\varphi}(12) = I_{\varphi}(13) = I_{\varphi}(14) = I_{\varphi}(15)$$

### 3 顶事件发生的人为致因归纳

#### 3.1 人为致因的概念和分类

人为致因指人为因素综合关联的科研主体,包括但不限于人员选拔、晋升标准及人为致因工程领域的运用、人员行为评估、操作辅助形式和生命环境支持等。人为致因导致系统故障或者机能缺失的事件称为人为致因失误。目前,世界各国公认的人为致因失误有五大方面:(1)技能方面,包括船舶图纸设计、智能工程、装备制造、设备安装、装备结构、设备认证、装备修理、设备改造、设备维护保养、设备换新等;(2)员工方面,包括海上任职资历、船员技能、最低配员、船员组成、船员受教育程度、船员素质、船员体魄的心理素质状况等;(3)教育方面,包括船员基本安全培训、业务提升训练、知识更新学习、航海技术水平、船上应急训练、上船前业务熟悉和评估培训等;(4)管理方面,包括海上法律法规、船舶安全理念、工作目标、安全和环境保护方针、船舶保安方针、安保措施、职责、管理计划、应急计划、应急措施、管理手册、就业协议、工作程序、检查制度等;(5)工作条件和环境,包括环境污染、工作场所舒适度、噪音影响、大风浪天气影响、温度、湿度、照明、人员防护、休息时间、语言环境、心理健康、身体伤害、疲劳、文化生活、餐饮、人一机界面等。

#### 3.2 机舱火灾事故中人为因素归纳

机舱火灾事故人为因素分析采用了五类归纳分析法,将15个引发顶事件的基本事件人为致因因素归纳在表1中,其中Y1为技能方面,Y2为员工方面,Y3为教育方面,Y4为管理方面,Y5为员工工作条件和环境,1为相互发生关系,0为相互不发生关系。

表1 基本事件与人为致因因素关系表

基本事件	人为致因因素	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
X1	易燃物未处理	1	0	0	1	0
X2	报警系统故障	1	0	1	1	1
X3	抽烟	0	0	1	1	1
X4	电焊	0	0	1	1	1
X5	撞击摩擦产生火花	0	0	1	1	1
X6	油污处理	1	0	1	1	0
X7	燃油滴漏	1	0	0	1	0
X8	通风系统故障	1	0	0	1	0
X9	电气短路	1	1	0	1	0
X10	电气火花	1	0	1	1	0
X11	绝缘失效	1	1	1	1	0
X12	设备发热	1	0	0	0	0
X13	灯泡发热	1	0	0	0	0
X14	过流发热	1	1	1	1	0
X15	其他发热	1	0	0	0	0

### 4 故障树分析结论

#### 4.1 引发顶级事件

引发顶级事件(机舱失火)的15个基本事件还可以进一步分解为由人为致因因素引发的39个基本事件。其中,技能方面因素12项,占比达到31%;员工状况因素3项,占比7.6%;教育方面因素8项,占比21%;管理因素12项,占比31%;员工工作条件和工作环境因素4项,占比10%。

#### 4.2 通风系统故障

在重要程度综合分析中,X8通风系统故障为最重要环节,涉及的人为致因因素包括但不限于:技能方面因素,如船舶图纸设计、智能工程、设备安装、设备维护保养;管理方面因素,如海上法律法规、工作目标、工作程序、职责、应急计划、应急措施、管理手册、检查制度及安全第一理念。

#### 4.3 监测报警系统故障

在重要性程度综合分析中X2监测报警系统故障仅次于X8通风系统故障,涉及的人为致因因素包括但

不限于:技能方面因素,如船舶图纸设计、设备安装、装备结构、设备维护保养等;教育方面因素,如船员业务提升训练、知识更新;管理方面因素,如保障系统的安全和环境保护方针、应急计划、应急措施、检查制度及船员安全理念;工作条件和环境方面因素,如最大限度满足人一机界面要求和人类与工程学的基本原理。

## 5 结束语

关于船舶机舱火灾人为因素造成的海上交通事故,国内外学者多有研究,但缺乏深层次的机舱火灾事故原因剖析。本研究基于故障树理论建立了“机舱火灾故障树”,运用富塞尔理论取得“机舱火灾故障树”全部最小割集,探索事故发生的一般规律;采用故障树最小割集求取底事件梯次重要程度并计算出排列顺序,提出了基本事件与人为致因因素的关系,认为提高船员技能、完善通风系统和监测报警系统是预防和杜绝机舱火灾事故的根本性措施。该分析方法和结论对船公司和船舶有针对性健全防火安全体系,预防或杜绝机舱火灾事故具有现实的指导意义。

## 参考文献:

- [1]SCHRÖDER-HINRICHS J U,BALDAUF M,GHIRXI K T.Accident investigation reporting deficiencies related to organizational factors in machinery space fires and explosions[J].Accident Anal & Prevention,2011(3):1187-1196.
- [2]LENNÉ M G,SALMON P M,Liu C C,et al.A systems approach to accident causation in mining:an application of the HFACS method [J].Accident Anal & Prevention,2012(48):111-117.
- [3]KOKOTOS D X,LINARDATOS D S.An application of data mining tools for the study of shipping safety in restricted waters[J].Safety Sci,2011(2):192-197.
- [4]PAWLAK Z.Rough set[J].Int J Comput & Inform Sci,1982(5):341-356.
- [5]邹建军,胡以怀.船舶机损事故中人为失误的分析[J].上海海运学院学报,2003(2):119-123.
- [6]徐东华,吴兆麟.基于粗糙集数据约简的海事事故致因研究[J].大连海事大学学报,2009(3):37-39.
- [7]郑滨,金永兴.基于属性约简的海事人为失误致因分析[J].上海海事大学学报,2010(1):91-94.
- [8]刘茹茹,胡勤友.一种主观的船舶碰撞危险度评价模型[J].上海海事大学学报,2012(1):41-44.
- [9]刘正江,吴兆麟.基于船舶碰撞事故调查报告的人为因素数据挖掘[J].中国航海,2004(2):1-6.
- [10]闫化然.基于粗糙集的船舶碰撞受损的影响因素分析研究[D].大连:大连海事大学,2011.
- [11]史定华,王松瑞.故障树分析技术—方法和理论[M].北京:北京师范大学出版社,1993.

(责任编辑:张 利)

# Analytical Research on Human Factors of Fire Accidents in a Ship's Engine Room

WANG Jian-tao, LI Cheng-hai

(Nautical Department, Shandong Transport Vocational College, Weifang 261200, China)

**Abstract:** In order to prevent or eliminate the occurrence of fire accidents in a ship's engine room, a comprehensive in-depth analysis of the fire accidents that have occurred, unsafe actions and unsafe situations in the engine room is carried out. A preliminary correlative analysis on the cause of the fire accident in the engine room is carried out by using the fault tree analysis method, and from a quantitative perspective, it describes the interrelationship between various influencing factors, in order to provide important theoretical reference for comprehensively evaluating the level of the impact of the human factors on fire accidents in the ship's engine room, and taking correct preventive measures to ensure ship's safe navigation. The results show that this method has significant practical value.

**Key words:** waterway transportation; ship's navigation safety; engine room fire accident; fault tree analysis