

中 国 船 级 社

船舶综合安全评估应用指南

中国船级社

2015 年 3 月

目 录

前 言 iii
第 1 章 通 则 1
1.1 应用 FSA 的目的 1
1.2 适用范围 1
1.3 术语和定义 2
第 2 章 FSA 的实施准备 3
2.1 FSA 应用前的准备 3
2.2 信息和数据 4
2.3 专家判断 5
2.4 筛选方法 5
2.5 人为因素的考虑 6
2.6 通用模型 6
第 3 章 FSA 评估流程 8
3.1 FSA 的步骤 8
3.2 FSA 第 1 步——危险识别 9
3.3 FSA 第 2 步——风险分析 11
3.4 FSA 第 3 步——风险控制方案 12
3.5 FSA 第 4 步——成本效益评估 15
3.6 FSA 第 5 步——决策建议 17
第 4 章 FSA 报告及其标准格式 19
4.1 提交 FSA 结果 19
4.2 报告标准格式 19
附录 1 危险识别及危险示例 22
1 危险识别流程 22
2 危险识别方法 23
3 对识别危险的排序 27
4 船上危险示例 31
附录 2 风险评估方法及其示例 34
1 概述 34

2 常用的风险评估方法 34
3 不确定性及敏感性分析 43
4 风险评估技术的适用性 44
附录 3 风险的度量与可接受衡准 46
1 风险的度量 46
2 风险的可接受衡准 48
3 建议的风险评估衡准 51
4 已有案例的计算结果 53
附录 4 风险控制措施的属性 55
1 A 类属性 55
2 B 类属性 55
3 C 类属性 55
附录 5 人因可靠性分析 57
1 通则 57
2 HRA 的步骤 59
3 任务分析概述 62
4 人为错误分析技术概述 64
5 与人有关的危险示例 66
6 风险控制方案示例 67
附录 6 FSA 应用举例——原油船的 FSA 评估 69
1 概要 69
2 步骤 1：危险识别 69
3 步骤 2：风险分析 73
4 步骤 3：确定风险控制方案 77
5 步骤 4：成本效益评估 78
6 步骤 5：决策建议 85
附录 7 FSA 基本术语表 94
1 概述 94
2 术语 94

前 言

国际海事组织（IMO）提出了在海事界引入和应用综合安全评估（简称 FSA）。作为一项战略，FSA 已逐步在制定海上安全和海洋环保公约和规则中，在船舶的安全营运管理以及船舶设计中得到越来越广泛的应用。

FSA 是一种结构化和系统化的方法，在规则和规范制定中应用这一方法，目的是要全面地、综合地考虑影响安全的诸方面因素，通过风险评估和成本效益评估，提出合理的并能有效地控制风险的技术要求，从而不断改进和提高船舶的安全水平。

海上安全委员会在其第91届会议和海上环境保护委员会在其第65届会议上，批准了《经修订的在 IMO 规则制定过程中使用综合安全评估（FSA）指南》（MSC-MEPC.2/Circ.12）。为更好地配合该通函的实施，提升我社在规范和规则制定中应用 FSA 的能力，在我社《综合安全评估应用指南》（1999）的基础上，对 FSA 的评估流程和风险评估方法等进行了研究，编制了本指南。

本指南的目的旨在使有关的管理人员和技术人员都能够理解 FSA 的理念，建立起全面综合考虑问题和基于风险意识的新观念，并逐步参与和开展各专业领域的 FSA 应用，包括船舶的安全营运管理和船舶设计等领域，从而推动 FSA 在我国的应用。

第 1 章　通 则

1.1 应用 FSA 的目的

1.1.1 综合安全评估（Formal Safety Assessment，简称 FSA）是一种结构化和系统化的方法，旨在通过使用风险分析和成本效益评估提升海上安全，包括保护人命、健康、海上环境和财产。

1.1.2 FSA 作为一种工具，可帮助评估有关海上安全和海上环境保护的新规定，或对现有的和可能改进的规定进行比较，以在各种技术和操作问题（包括人的因素），以及在投入成本和产出效益之间达到平衡。FSA 的研究结果可以作为规则和规范制定或修改的背景资料，并能对本社规范的制定和修改提供必要的支持，从而提高本社规范的水平。

1.1.3 在规则和规范制定或修改过程中，可以通过 FSA 对所建议修改的规范进行评价，评估其是否会对本社和对受其影响的各方在利益（例如：人命损失或污染的预期减少）和发生的相关费用方面产生影响，从而对该规范的制定或修改是否达到预期的要求能够做出决策。通过应用 FSA，使得规范的制定和修改对各方都一样公正，从而有助于达成一致意见。

1.1.4 为保持 FSA 应用的一致性，并确保 FSA 评估过程的透明性，应采用统一的、系统的方式对评估过程提交正式报告（见本指南第 4 章）。该报告应能被各方面人员理解。

1.2 适用范围

1.2.1 本指南旨在对可在规则和规范制定和修改过程中作为一种工具使用的 FSA 方法进行介绍，该原理方法可用于：

（1）参与国际国内海事立法（公约、规则等）；

（2）本社规范（规范、指导性文件等）的制定和修改；

（3）船舶与海洋工程中与安全、环保相关的技术设计的评估；

（4）船舶等效和替代设计中的风险评估；

（5）航运管理体系中对于与保障船舶安全营运有关的，特别是涉及人为因素的管理（如规章制度、人员组织、使用与培训，船舶维护与保养等）的评估；

（6）本社船舶图纸审查中的等效和免除措施。

1.2.2 在制定新规范或修改现有规范时，应考虑：

1.2.2.1 尽可能遵循 FSA 的原则对所有技术要求的规定进行分析，特别是当制定特殊的或新型的船舶规范时或者为特定作业制定安全检验规定时；

1.2.2.2 尽可能应用 FSA 方法对经修改的规范要求与原有的规范要求进行比较，以便使规范技术人员对规范修改的有效性和所产生的效益有较为明确的了解。

1.2.3 FSA 并不是在所有的情况下都适合，对于可能在费用、执法和监管等方面产生重

大影响的建议，或确实有必要降低风险水平，但所需要采取的措施并不明确的情况，应当应用 FSA 予以评估。

1.2.4 可根据实际情况，应用 FSA 方法的全部步骤或其中的某个或几个步骤。

1.3 术语和定义

1.3.1 FSA 涉及到的有关术语和定义详见本指南附录 7。

第 2 章　FSA 的实施准备

2.1 FSA 应用前的准备

2.1.1 进行 FSA 评估之前，应首先由决策者确定待评估的问题以及有关的边界条件或限定条件。这些信息应提供给将开展 FSA 评估的工作组。如果需要进行额外工作，则需修改问题说明或边界条件或限定条件，并重新提交给评估工作组，根据需要可重复评估过程。

2.1.2 成立 FSA 评估工作组。工作组的主持人或协调人一般应有相关经验，负责做好准备工作，促成专家以团队形式开展工作，并能发挥每个专家的特长。工作组成员可以包括 FSA 评估所需的安全、设计或操作等方面的专家，例如：船舶设计师、结构工程师、机械工程师、验船师、海事官员、人为因素专家、辅助员和记录员等。小组成员根据所分析的问题组成，其专业技术水平应与所要进行 FSA 评估的复杂程度相适应，以能反映出待解决问题的影响范围和性质。

2.1.3 准备阶段的工作

2.1.3.1 需要研究的问题的确定：目的是界定分析范围，以便确定FSA评估的深度和广度。对问题进行界定时应考虑到所有相关方面，并与操作经验和现行要求一致。对于船舶，界定范围举例如下：

（1）船舶类型（例如：船型、船长或总吨位的范围、新船或现有船、货物类型）；

（2）船舶系统或功能（例如：总体布置、分舱、推进装置类型），设备操作和船员技能；

（3）船舶作业（例如：在远海、近海、内河或港区，和/或航行中作业）；

（4）外部对船舶的影响（例如：船舶交通系统、气象预报、报告制度、航线安排）；

（5）事故类别（例如：碰撞、搁浅、火灾、爆炸）；和

（6）风险的后果类别，例如乘客和船员受伤和/或死亡、对环境的污染、船舶或港口设施受损、或船舶营运方面的影响。

2.1.3.2 数据和相关信息的准备：为在 FSA 评估中包括以往的经验，有必要收集相关事故和事件的统计数据，以及系统和设备的可靠性数据。原则上，数据和信息应尽可能多。只有当数据不足的时候，才转而尝试专家判断、模型试验、数值模拟等方法。因此，如何准备数据、准备怎样的数据成为了 FSA 准备阶段，甚至于整个评估的关键环节。对于缺少相关经验和事故统计数据的新颖问题，可考虑是否在其它行业里有数据和信息可供借鉴和应用；对于已有经验的问题，可考虑利用事故、事件等统计数据来获取有关故障信息。这类信息可包括：

（1）功能要求；

（2）船舶总体布置；

（3）船舶/系统的图纸；

（4）设备的说明书；

（5）船上操作说明和清单；

（6）任务描述；

（7）作业流程图；和

（8）相关的事故、事件和故障数据。

2.1.3.3 风险分析方法的确定：应根据研究问题的范围和性质，已有的数据资料以及需要得到的结果，考虑采用定性或定量的方法评定危险属性和风险水平。在分析中，一般应既有定性分析，又有定量分析，即既有定性的叙述，又有通过数学方法得出的量化结果。

2.1.3.4 在 FSA 中必须对所识别风险的可接受性进行评估，以便为减少风险的措施提供参考依据，所以必须明确规定风险的可接受衡准。应该注意到，目前国际上还没有普遍接受的风险可接受衡准。然而，只要 FSA 研究的可接受衡准得到明确并载入文件，以这些衡准为基础所作的决策就可以追溯到最近的阶段。

2.2 信息和数据

2.2.1 收集 FSA 过程中每一步所需的合适数据对于制定更为平衡、积极和费效比高的规则非常重要。FSA 评估过程中最重要的是真实准确的客观数据。客观数据可以通过现场观测、调查统计和数据库等途径获取。当缺少客观数据时，可通过专家判断、物理模型、数值模拟等来获得有价值的结果，以对客观数据进行补充。

2.2.2 FSA 评估所需的数据可包括事故的人员伤亡数据，事件/未遂事件和操作故障的可靠性数据、维修工作单和运行记录、内部报告文件以及行业公告等。

2.2.3 事故数据库是评估船舶安全性非常重要的工具，通过研究和分析历史数据，可以确定操作过程的薄弱环节及设计存在的问题，可以为制定规范和预防措施提供参考。目前有许多历史数据库，最常用到的数据库为 IHS-Fairplay 数据库，提供了目前世界上 100GT 及以上商船队伍最全面的信息。其他海事数据库见表 2.2.3。

表 2.2.3 海事数据库

数据库	可用性	数据类型	人的因素
Global Integrated Shipping Information System（GISIS）	公开	统计	无
Lloyd’s Maritime Information Service（LMIS）	公开	统计	无
Marine Accident Reporting Scheme（MARS）	公开	叙述	部分
Marine Accident Investigation Branch（MAIB）	公开	叙述、部分统计	部分
Marine Incident Investigation Unit（MIIU）	公开	叙述	部分
Marine Investingations Module	非公开	叙述、统计	部分

（MINMOD）			
Data Management International（DAMA）	公开	叙述、部分统计	无
Safety and Improvement Reporting System（SAFIR）	非公开	叙述、统计	有

2.2.4 在 FSA 评估中，最理想的是使用同类型船舶的数据，但往往这些数据可能受限制或者难以获得，因此数据范围根据需要可以扩展，例如将客滚船数据扩展应用到邮轮。此外，如果判断可行的话，也可以使用其它行业的相关数据。

2.2.5 必须对所引用的数据进行客观评估，并对其可靠性、不确定性和有效性进行评估和报告。同时还须说明这些数据中的各种假设和限定条件，例如故障和事故类别，船舶类型等。

2.2.6 对于历史统计数据不足的稀有事件的评估，可以通过故障的概率模型和建立事故场景来达成，也可将一个稀有事件分解成多个具有更多经验数据的多发事件（例如，根据组件故障数据来评估系统故障）。

2.2.7 此外，还应考虑历史统计数据可能会影响现有风险的有效性的情况，即对现有规范条款的分析应建立在对现有条款状况下的船舶事故统计数据基础上。

2.3 专家判断

2.3.1 在 FSA 评估中，需要专家依据各自的经验进行专家判断，这尤其在缺少相关统计数据的情况下更显重要。通过专家判断对统计数据进行进一步的评估从而提高数据的有效性。

2.3.2 FSA 在应用专家判断时，应提供涉及不同领域的所有必要的专家。各专家的观点也不尽相同。多数情况下各专家在具体问题上的会存在分歧，此时最好能形成一定的共识。因此，需要对 FSA 中专家判断的一致性进行报告。可以通过使用判断矩阵或其他方法来分析专家判断一致性是否符合要求，详见本指南附录 1.3 节。

2.3.3 在 FSA 评估的各个阶段都有可能需要专家判断，例如危险识别，风险控制方案的提出以及费效分析等。

2.4 筛选方法

2.4.1 根据所考虑问题的性质和重要性来确定 FSA 评估应用的深度或广度。一般的，应明确 FSA 的评估对象，并将重点放在需要详细分析的领域。因此建议对相关船型或危险类型进行一次初步的粗略定性分析，以便能涵盖欲分析问题的所有方面。一旦有不确定的地方，例如在数据或专家判断方面，应对这些不确定因素的重要性进行评估。

2.4.2 对危险和风险的界定应既定性又定量，即采用描述性方法又要采用数学方法， 并与可用数据一致，还应足够广泛以能将多种降低风险的选项包括在内。

2.4.3 可采用层次筛选方法。即采用简单工具进行初始分析，以确保不会进行过度分析。

其结果可用于支持决策（如果支持度足够）或用于划定/构建更详细的分析（如果支持度不够）。因此，初始分析主要是定性的，并在后续分析中视必要增加细节和量化程度。

2.4.4　一般地，通用的风险评估方法应包含故障树、事件树以及连接这两者的风险贡献树。研究事故场景实际上是分析事件进展的序列，首先分析研究系统可能发生的初始故障，将其定为故障树的“基本事件”，这些基本事件将引起系统的响应，成为故障树的“顶事件”，一些顶事件可能是事故严重化的原因，以顶事件为初始状态，基于因果关系进行逻辑演绎，可以形成一个完整的事件树。

2.4.5　在进行详细分析前，可对历史统计数据进行分析。对此可采用损失矩阵，如下表 2.4.5 所示。

表 2.4.5 损失矩阵示例

船舶事故损失（£/船年）					
事故类别	**事故费用 £**	**环境破坏和清理 £/吨×吨数**	**人命风险 死亡数×£X m**	**伤害和健康风险 DALY×£Y**	**总费用 £**
碰撞 触碰 沉没 火灾/爆炸 船体损坏 轮机损坏 战争损失 搁浅 其他船舶事故 其他溢油事故 人员事故					
总计					

DALY = 伤残调整生命年（世界健康报告 2000，www.who.int）

2.5 人为因素的考虑

2.5.1　人为因素是引起事故和避免事故发生的最重要的因素之一。据统计，高达 80%的船舶事故是受人为因素影响或直接导致。在 FSA 评估中应系统考虑人为因素，将其与事故的发生频率、深层原因和影响联系起来。可采用人因可靠性分析（HRA）将人为因素纳入 FSA 过程。人因可靠性分析详见本指南附录 5。

2.6 通用模型

2.6.1　为应用FSA，一般应规定一个通用模型对某种船型的所有船舶或对考虑问题所共有的功能、特点、特性、属性进行描述。

2.6.2　一般地，对所考虑的问题可由一系列功能来确定。例如，当问题与某种船型相关

时，这些功能包括有效载运量、通信、应急响应、操纵性等。而当与某种危险相关时，例如火灾，则这些功能包括防火、探火、报警、围护、逃生、灭火等。

2.6.3　通用模型不应视为孤立的一艘船舶，而应视为各种系统的组合，包括构成所定义功能的组织、管理、操作、人员、电子系统和硬件设备等各方面。可将功能和系统分解为适当的更细的层次。应考虑功能和系统的相互作用以及其变化的范围。

2.6.4 从整体上看，受自然法则决定的船舶技术和工程系统是整个系统的中心。技术和工程系统与乘客和船员密不可分，即与人的行为相关。乘客和船员与组织和管理基础以及有关船舶和船队营运、维护和管理人员相互影响。这些系统与外部环境状况有关，而外部环境状况受到来自所有航运利益相关方和公众的压力和影响的支配。系统中的每一方面都受到其他方面的动态影响。图 2.6.4 为完整的系统构成。

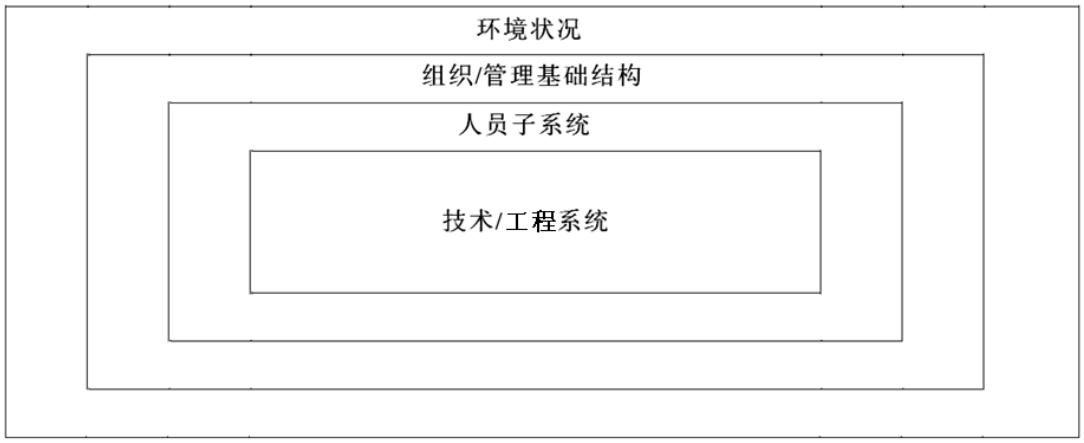


图 2.6.4 完整系统的构成

第 3 章　FSA 评估流程

3.1 FSA 的步骤

3.1.1 FSA 是一种以风险为基础由五个内在相关步骤组成的方法，见图 3.1.1 所示。五个步骤如下：

（1）危险识别；

（2）风险分析；

（3）风险控制方案；

（4）成本与效益评估；和

（5）决策建议。

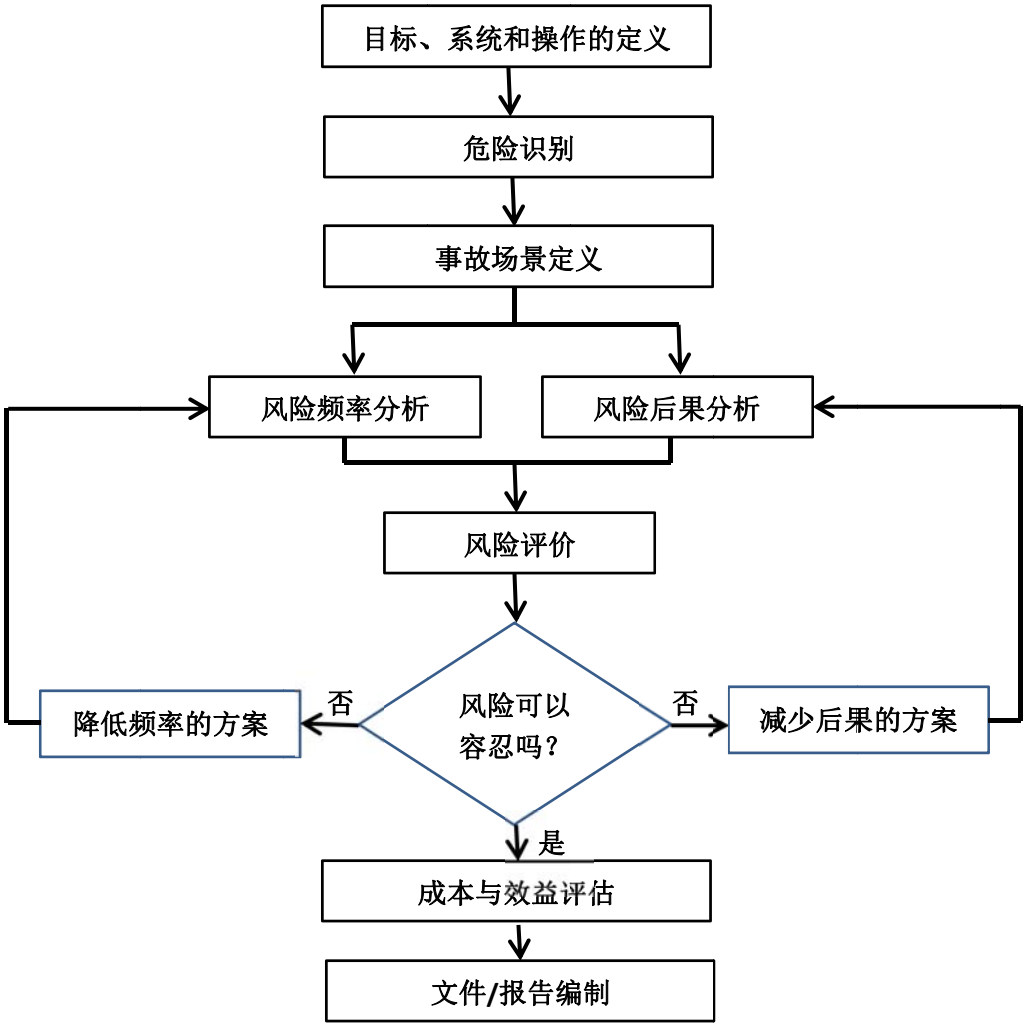


图 3.1.1 FSA 评估步骤

3.1.2 在 FSA 方法中，5 个步骤根据实际情况和需要，可以相互联系，重复进行。图 3.1.2 为 FSA 方法的流程图。可以看出，步骤 5 与其他每一步骤相互联系，最终形成决策建议。

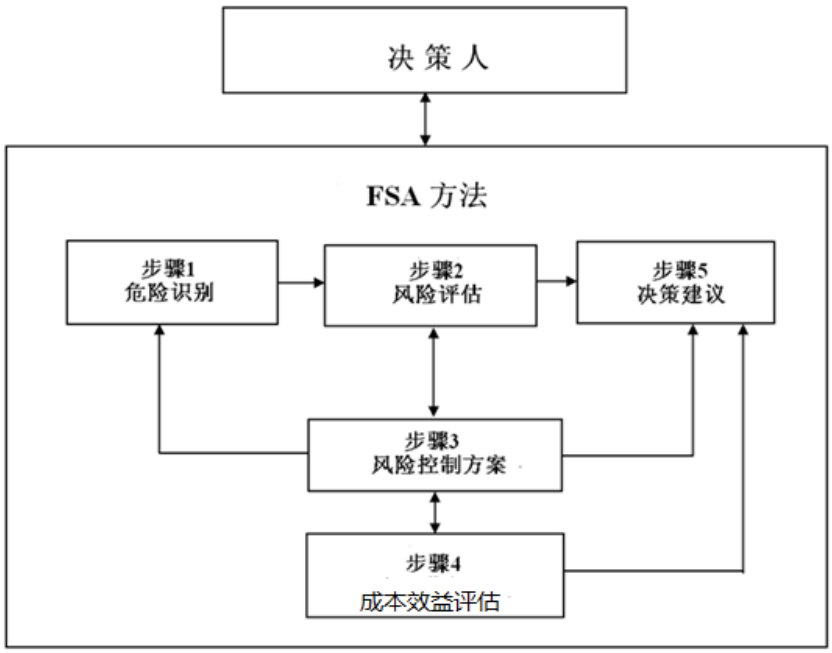


图 3.1.2 FSA 方法的流程图

3.1.3 FSA 应用人员通过对某个方面相关的（如特定的操作）风险的估算来对其安全性进行分析，并把最终的分析结果作为制定新的规范或修改现有规范的技术支持或参考依据。

3.2 FSA 第 1 步——危险识别

3.2.1 目的和范围

3.2.1.1 危险识别（HAZID）的目的是对各种危险及其相关场景进行识别，并按其相对于所考虑问题的风险水平进行排序，以便对主要危险进一步分析和提出相应的风险控制方案。

3.2.1.2 可以通过标准分析技术，根据事故类型和基本模式识别导致事故发生的所有危险，并利用已有的历史数据和专家判断进行评价，最后将这些危险排序。

3.2.1.3 可以通过评议 2.6 所列通用模型，就所考虑的船型或问题的基本功能和系统（即根据 2.6 确定的功能和系统）进行危险识别。

3.2.2 识别方法

3.2.2.1 危险识别所用的方法一般包括头脑风暴和标准分析技术相结合，以便尽可能识别所有相关危险。头脑风暴在于保证识别过程是积极的，并不仅限于过去有事故记录的危险。特别是应该建立一个有经验的小组来完成这项工作，以便找出事故和有关危险的原因和产生的影响。小组成员应尽可能由各方面的专家组成，一般由具有代表性的 7-10 人组成，包括船舶设计和操作、帮助危险识别过程的专家，必要时还应包括人为因素的专家。在分析时，应适当考虑以往的经验，可利用一些典型的背景资料（例如，适用的规范、有关事故的统计数据、以及对人的危险、危险物质、火源等的一览表等）。

3.2.2.2 在进行危险识别时，对每种危险的可能产生原因、初始事件和后果可先用某些

标准技术进行粗略分析。常用的分析方法包括检查表法、假设分析技术、故障模式和影响分析（FMEA）、危险与可操作性研究（HAZOP）与危险预分析（PHA）等。详见本指南附录1的介绍。

3.2.2.3 根据分析问题的类型选择适当的危险识别初步分析危险的潜在原因、发展过程、影响因素、最终后果等，并与 FSA 的范围一致。一般情况下，当可利用的数据和信息不多时，可采用假设分析技术；当有较详细的设计信息等可利用时，可采用 FMEA 和 HAZOP；特殊情况下，例如需要详细分析人员行为时，可采用任务分析方法。需要强调的是，没有一种标准技术可以保证能进行彻底的危险识别，只能依赖于良好的工程判断力和丰富的实践经验相结合。

3.2.3 实施过程

3.2.3.1 在已确定的分析范围内，根据通用模型所定义的船舶和系统功能，对搜集到的资料进行整理。例如，确定适用的公约、规则、规范、规定等；根据已知的事故、事故统计资料或其他相关的引起事故的信息（例如，技术失误、操作或人为失误等）整理形成危险列表和粗略的危险分类。

3.2.3.2 组织召集有关方面专家参加的危险识别会（或以调研、座谈等其他形式），通过头脑风暴系统地对危险进行识别。应由懂得 FSA 方法的人组织危险识别会，并指定专人记录会议的内容和过程。不同的危险识别方法，记录的危险识别表有所差异，详见本指南附录1的介绍。危险识别会一般不超过 3 天，每天不超过 5-6 小时。

3.2.3.3 对识别的危险进行排序（详见本指南附录 1）。HAZID 可能会识别出大量的危险场景，而由于受到经费预算、技术能力以及时间等限制条件，难以全部处理。因此需要确认哪些场景最重要，以在后续 FSA 步骤中进一步详细分析。因此需要根据场景的风险水平（人员、财产或环境风险）对识别的危险进行排序：

（1）根据事故统计数据和专家判断对各类事故的后果及其出现频率进行评估，去掉经评价认为不重要的情况；

（2）根据频率值和可能的后果按照严重程度从高到低进行排列；

（3）可采用风险矩阵对危险（RI）排序。应用风险矩阵时，对频率（FI）和后果严重性（SI）的分类和定义应根据分析的问题和可用数据的情况决定；

（4）选取 RI 值相对较高的危险（有时也选取 SI 值非常高的危险），以便进一步开展风险分析。

3.2.3.4 对将要在 FSA 步骤 2 中作进一步评估的危险，对其从开始发生到最终结果的过程应该有所描述。

3.2.4 输出结果

第 1 步的输出结果应为按危险程度排列的危险一览表，包括：

（1） 危险原因；

（2） 对危险场景从初始事件发展至最终后果的初步说明；

（3） 危险发生频率和后果严重性的估计；

（4） 危险的风险排序。

3.3 FSA 第 2 步——风险分析

3.3.1 目的和范围

3.3.1.1 风险分析目的是对步骤 1 中识别的相对重要的事故场景的原因和初始事件及后果进行详细调查，确定风险的分布，并识别和评估影响风险水平的因素。这样可使注意力集中在高风险区域和影响风险水平的主要因素方面。同时找出规范体系与出现事故和事故后果之间的关系，以便能对规范进行适当的修改以减少风险。

3.3.1.2 应根据所评估问题的情况考虑不同风险类型，通过分析和评估以便将与风险相关的措施或活动控制在风险可接受范围内。

3.3.2 风险类型和风险度量单位

对不同类型的问题，可能需要考虑各种不同的风险，例如对人员的风险（包括个人风险和社会风险）、对环境造成的风险、或导致经济损失的风险等。对于不同的风险应该采用适当的风险度量单位来表示。一项研究中可能需要分别对几种风险进行分析。（见本指南附录 3）

3.3.3 风险模型和假定

可通过以往的事故统计数据、模型试验或数值模拟，或专家的经验判断建立风险模型和设定假定条件。风险模型和假定条件可能会直接影响分析结果，因此应尽可能符合实际。

3.3.4 风险分析方法

进行风险分析有几种方法/工具可供使用。FSA 的范围、步骤 1 中识别的风险类别、以及现有的故障数据水平都会影响到具体应用时采用哪种方法/工具最佳。本指南附录 2 概述了不同类型的风险分析方法/工具。

3.3.5 风险贡献树

进行风险分析时，可用风险贡献树来表明不同类别的事故及其子事故中的风险分布。风险贡献树是一种有用的工具，由故障树和事件树结合而成的逻辑图。该方法利用故障树分析事故的原因，利用事件树分析事故进一步可能造成的不同程度的损失，较为全面地对风险进行分析。

3.3.6 风险的可接受衡准

由分析得到的风险水平应通过与风险标准比较以确定现行的规范是否合理，是否需要制定新的规范降低风险。为了确定风险是否在可容忍的范围内（见本指南附录 3），需要选择适当的、合理的风险标准作为判别准则。一般来说，不应根据某一单独的可接受风险标准做出决定，而应使用按范围划分的标准。例如，个人风险或社会风险等。当缺少可用的可接受风险标准时，可参考选用其他行业的适用标准。

3.3.7 敏感性分析和不确定性分析

3.3.7.1 在风险评估中应考虑进行敏感性分析和不确定性分析，并且应将结果连同量化数据和对所用模型的说明一同报告。敏感性分析和不确定性分析方法依赖于所用的风险分析方法和风险模型。

3.3.7.2 敏感性分析是研究如何将模型输出中的不确定性分摊到模型输入时的不确定性来源中，即估计输入参数的不确定性对模型输出结果不确定性的贡献程度。与其关联的一个做法是进行不确定性分析，后者更关注于量化模型输出中的不确定性。理想状态下，不确定性和敏感性分析应先后进行。

3.3.7.3 不确定性分析研究决策问题中变量的不确定性。不确定性因素包括随机不确定性（事物行为的随机性，例如船舶与海洋工程结构物在一定时期内可能遭遇到的波浪载荷极值的概率分布、火灾发生位置与规模等）和认识不确定性（表达知识的不完备性，例如极端环境下人员行为、结构疲劳机理等）。不确定性分析的目的是通过对相关变量的不确定性进行量化以对决策做出技术贡献。

3.3.8 实施过程

（1）确定要分析的风险类型和风险的度量单位；

（2）建立风险模型和相关基本假定。可根据具体情况采用风险贡献树、FTA 、ETA 或其他形式的风险模型；

（3）通过量化风险贡献树或通过事故数据统计分析确定各种事故类型风险的分布和影响风险的各种因素。用于分析的事故统计数据应与所分析的问题范围相对应并具有代表性；

（4）识别和评估高风险区和影响风险的主要因素的同时，分析现行规范对高风险区和影响风险的主要因素的作用和有效性；

（5）用适当的方法计算各种风险值。一般常用潜在人命损失（PLL）和 FN 曲线表示对人员的社会风险；一般常用事故死亡率（FAR）表示个人风险；

（6）选用适当的风险标准进行比较，评价说明所分析的风险结果所属范围，即“可以忽略”、“不可容忍”、“ALARP 区域”。

3.3.9 输出结果

第 2 步的输出结果应该包括：

（1）确定需要考虑的高风险区域；

（2）识别影响风险水平的主要因素；

（3）说明所分析的风险结果所属范围；

（4）对风险模型的说明；

（5）必要时，对第 3 步提出的风险控制方案的风险重新评估的结果。

3.4 FSA 第 3 步——风险控制方案

3.4.1 目的和范围

3.4.1.1 步骤 3 的目的主要是在危险识别和风险评估的基础上，有针对性地提出有效可行的降低风险的风险控制措施（RCM），从而将其组合形成实际可行的风险控制方案（RCO）。

3.4.1.2 提出的风险控制方案既要解决原存在的风险，也要考虑由于新技术或更新的操作方法所带来的新风险。

3.4.2 实施过程

（1）确定需要风险控制的区域；

（2）识别出可能的风险控制措施；

（3）重新进行第 2 步，评估风险控制措施在降低风险方面的效果；

（4）将风险控制措施组合成实际可用的风险控制方案，即形成规范要求或规范修改方案；

（5）识别出受所选风险控制方案影响的有关利益方。

3.4.3 确定需要风险控制的区域

应通过对第 2 步结果的筛选，集中考虑最需要控制其风险的区域。评估时应主要考虑：

（1）概率，找出风险贡献树中发生概率最高的区域，此时不考虑后果的严重性；

（2）严重性，找出风险贡献树中事故发生后果最为严重的区域，此时不考虑事故发生的概率；

（3）风险水平，考虑事故发生的频率和后果的严重程度。其风险水平为“不可接受”的事故即成为注意点；

（4）不确定性，识别风险模型在风险、后果严重性或概率上有相当不确定性的区域。对这些不确定区域应予以处理。

3.4.4 风险控制措施

3.4.4.1 通过采用结构化的审议技术，为现有措施尚不能完全控制的风险找到新的 RCM。这种技术不但鼓励提出适当的措施，而且包含了风险属性和因果链。其中风险属性关系到这些措施如何控制风险，因果链则关系到在“从初始事件到最终事故后果”这一事件序列中哪些地方可以引入风险控制措施。

3.4.4.2 风险控制措施（以及其后的风险控制方案）有各种属性，这些属性可以根据附录 4 中所给的例子分类。一般情况下，预防性 RCM 优于减缓性的（预防火灾的发生总是好于减轻火灾后果）；被动性的 RCM 通常比主动性的可靠性好（例如，固定式防火墙与水幕）。

3.4.4.3 划分风险控制措施属性的主要目的是有利于进行结构化的思考过程，帮助理解风险控制措施如何起到作用，如何应用以及如何操作。风险控制措施的属性还可认为能对选用不同的风险控制措施提供指导。许多风险是复杂的事件链和多种原因的综合结果，对于这样的风险，可以借助于绘制因果链发现风险控制措施，事故链可以表达为：

起因 ——> 故障 ——> 情况 ——> 事故 ——>后果

3.4.4.4 一般地，风险控制措施应能够达到下述目的：

（1）通过改进设计、程序优化、组织合理化、加强培训等措施减少事故发生的频率；

（2）减轻故障的影响，预防事故发生；

（3）改善可能发生事故的环境条件，以避免事故发生；

（4）减轻事故造成的后果。

3.4.5 风险控制方案

3.4.5.1 这一步的目的是把风险控制措施组成有限数量的、经过周密思考的、可实际应用的风险控制方案（规范方案）。有许多可用的方法把单个的风险控制措施组合为风险控制方案。下述两种减少发生频率和减轻造成的后果的方法可供考虑：

（1）“一般方法”，通过控制事故发生的可能性达到风险控制，这种方法对预防几个不同的事故序列可能有效；

（2）“补充法”，控制事故升级以及影响到其他事故（可能是无关的其他事故）接着升级的可能性。

3.4.5.2 形成风险控制方案时，应确定可能受到所建议的措施影响的各利益相关方。

3.4.5.3 有些 RCM/RCO 会导致新的或额外的危险产生，在这种情况下应重新开展 FSA 步骤 1、2 和 3，并酌情做出修改。

3.4.5.4 在通过一个尚未经定量评估其综合影响的 RCO 组合之前，应先对 RCO 之间的相互依赖关系进行定性评估。这一评估可采用下表所示的矩阵形式：

表 3.4.5 各 RCO 的相互依赖关系

RCO	1	2	3	4
1		强	无	弱
2	弱		弱	无
3	无	弱		无
4	弱	无	无	
注：表示 RCO 各列对 RCO 各行的依赖程度。				

上述矩阵表将 RCO 按横向和纵向列出。横向看，表中第一排列出了 RCO 1 和所提议的其他 RCO（2 至 4）之间的任何依赖关系。例如，表中的这个例子说明，如果实施 RCO1，则对于强烈依赖于 RCO1 的 RCO 2，需要在其与 RCO 1 一同采纳前进行重新评估。另一方面，RCO 3 不依赖于 RCO 1，因此采纳 RCO 1 不会改变其成本效用。RCO 4 对 RCO 1 的依赖性很弱，因此可无需进行重新评估。原则上，可将成本、效益和风险降低列在一个依赖性表格中。上述矩阵中的相互依赖关系可能是对称的，也可能不是。

3.4.5.5 如果建议同时实施 1 个以上 RCO，应评估这样的组合在降低风险方面的效果。

3.4.5.6 在分析 RCM 和 RCO 的有效性时应考虑敏感性分析和不确定性分析，并对敏感性分析和不确定性分析的结果应予以报告。

3.4.6 输出结果

第 3 步的输出结果应该包括：

（1）各种风险控制方案；

（2）这些方案对减少风险的有效性；

（3）受所确定的风险控制方案影响的各利益相关方。

3.5 FSA 第 4 步——成本效益评估

3.5.1 目的

第 4 步的目的是估算和评价由第 3 步识别和确定的每种风险控制方案所产生的成本、效益和降低的风险。

3.5.2 成本、效益和风险降低

3.5.2.1 成本 ΔC，是指由于采取相关风险控制方案而增加的成本，可用整个生命周期内的费用表示，包括初始成本、营运成本以及报废成本等。一般的，RCO 的成本可包括：

（1）购买新设备的费用（投资成本）；

（2）重新设计和建造的费用；

（3）发证费用；

（4）培训费用；

（5）检验、维护和演习的费用；

（6）审核的费用；

（7）停业所造成的损失；

（8）操作限制所造成的费用。

在计算成本时，还应考虑折扣率（一般约 5%）和一些商业因素的影响，例如随着一些 RCO 成熟并且建立起较大规模的市场，有助于减少最初的高成本；突然性的大量的更新需求可能由于打破供求平衡而增加成本；同样的 RCO 应用于新造船和已有船，成本可能也不尽相同。在 FSA 评估中，考虑上述所有因素后采用一个合理的平均值，根据需要可对重要的成本因素进行敏感性分析。

3.5.2.2 效益 ΔB，是指减少风险后获得的相应收益，包括减少人员死伤、减轻财产损失、降低环境破坏、减少向第三方责任赔偿、以及延长船舶平均寿命等方面的收益，不包括降低的保险费用。

3.5.2.3 风险降低ΔR，是指采取风险控制方案后风险的减小（例如人员伤亡的减少 ΔPLL、财产损失的减少或环境破坏的减少），可以理解为风险降低率。

3.5.2.4 成本 ΔC 和效益 ΔB 要分摊到船舶整个生命周期内，一般假定生命周期为 25 年。一些控制措施的成本花费可能是每年一次，而另外一些成本可能是只在一段特定的时间内才存在，所以需要针对成本或效益计算净现值（Net Present Value，NPV），有如下的公式：

$$\mathrm{NPV} = \mathrm{A} + \frac{X}{(1+\mathrm{r})} + \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{2}} + \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{3}} + \cdots + \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{T}} = A + \sum_{t=1}^{T} \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{t}}$$

式中，X 为控制措施在某一特定年份的成本或效益；A 为实施风险控制措施的初始成本（计算收益时，取 0）；r 为折扣率，一般取值为 5%。

3.5.3 利益相关方

3.5.3.1 通常利益相关方可定义为受某一事故或所提议的新规定的费用效果直接或间接影响的个人、组织、公司和船旗国等。在应用 FSA 方法和确定政策制定建议时，可将利益相似的不同利益相关方归组在一起。

3.5.3.2 可采用各种方法和技术对上述成本和效益进行评估。这一评估过程应针对全局开展并对受所考虑问题影响最大的那些利益相关方开展。

3.5.4 成本有效性评估原则

3.5.4.1 当仅考虑财产损失或环境污染时，可采用下述原则，并且费用/效益比越低，越优先采用：

$$\Delta C < \Delta B$$

3.5.4.2 当考虑人员生命安全时，将人命损失/伤害转化为货币是有争议的，因此并不合适采用上述原则作为评判衡准。此时成本有效性评估的通用衡准为 GCAF 和 NCAF：

（1）减少单位风险所产生的总费用 GCAF：

$$GCAF = \Delta C/\Delta R$$

（2）减少单位风险所产生的净费用 NCAF：

$$NCAF = （\Delta C - \Delta B）/\Delta R$$

3.5.4.3 在仅考虑溢油造成的环境风险的情况下，评估 RCO 的成本有效性时可采用下述原则：

$$\Delta C < \Delta SC$$

式中，ΔC 为 RCO 的投入成本；ΔSC 为实施 RCO 获得的收益，即实施 RCO 前的处理溢油成本减去实施 RCO 后的处理溢油成本，具体计算方法见本指南附录 3 的介绍。

当既考虑溢油，又考虑人命安全的情况下，评估 RCO 的成本有效性时可采用下述原则：

$$NCAF = (\Delta C - \Delta SC) / \Delta PLL$$

式中，ΔC 为 RCO 的投入成本；ΔSC 为实施 RCO 获得处理溢油成本收益；ΔPLL 为实施 RCO 减少的人命损失。

当考虑经济效益 ΔB 时，采用 ΔC-ΔB 代替 ΔC。

3.5.4.4 原则上，可以使用 GCAF 和 NCAF 这两种衡准中的一种，但建议首先考虑 GCAF。理由是 NCAF 还考虑到所计及的 RCO 的经济效益。这在某些情况下可能会被滥用于推行某些 RCO，对所偏好的 RCO 的经济效益的考虑多于其他 RCO。如果 RCO 的成本效用在衡准范围内，也可采用 NCAF。最近的 FSA 研究提出的一些 RCO 的 NCAF 为负值，假定 RCO 降低风险的潜力 ΔR 为正值（即降低风险），则 NCAF 负值系指以货币单位计的效益高于 RCO 的成本。

3.5.4.5 通过考虑相关社会指标，FSA 指南给出的 GCAF 和 NCAF 衡准建议值为 300 万美元/每避免一人死亡。此值自 2000 年（基于 1998 年统计数据）以后还没有更新，由于通货膨胀等原因，此值已过时，建议采用更新的数值。更新的数值可能在 400 至 700 万美元之间。每个 FSA 报告应明确给出衡准值。

3.5.4.6 对于计算得到的各 RCO（RCM）的 GCAF 和 NCAF，

（1）对于 NCAF<0，表明 RCO 在经济效益上有成本有效性；

（2）对于 GCAF<衡准值，表明 RCO 在人命安全上有成本有效性；

（3）对于 0<NCAF<衡准值，表明 RCO 综合考虑人命安全和经济效益，具有成本有效性；

（4）对于 NCAF>衡准值，表明 RCO 不具备成本有效性。

3.5.4.7 在成本效益分析和费用效果中应考虑进行敏感性分析和不确定性分析，并应对结果进行报告。

3.5.5 实施过程

3.5.5.1 通过发生频率和后果，对步骤 2 中评估的风险结果界定出所考虑问题的风险水平，也就是确定出未实施风险控制方案前的基准风险。

3.5.5.2 估计实施每一种风险控制方案使风险降低的程度，将结果与基准情况进行比较。

3.5.5.3 估算每一种风险控制方案的相关的费用。应该考虑直接的费用（例如有关检验费用）和间接的费用（例如有关操作、培训、规定适应性的费用）。

3.5.5.4 估算每一种风险控制方案的受益情况。如有可能，列出受风险控制方案影响最大的利益方的受益。

3.5.5.5 估算每项控制方案的成本有效性（费效比），即减少每单位风险所需总费用和净费用，并对每一控制方案的费效比进行比较。

3.5.5.6 根据费效比对风险控制方案的实用性进行排序，以便在第 5 步提出合理的决策建议（例如筛除成本有效性差的或实际不可行的方案）。

3.5.6 输出结果

第 4 步的输出结果应包括：

（1）从整体角度考虑第 3 步确定的每种风险控制方案的成本和效益，并用减少单位风险所需费用来表示（即费效比）；

（2）受所考虑问题影响最大的利益相关方的成本和效益；

（3）比较所有控制方案的结果，对风险控制方案进行排列。

3.6 FSA 第 5 步——决策建议

3.6.1 目的

第 5 步的目的是提出建议案。这些建议案应基于对危险和潜在原因的比较和排序；对经成本效益评估过的风险控制方案的比较和排序；并保证建议后的风险在实际合理的可接受的

低风险区域。

3.6.2 实施过程

3.6.2.1 对前 4 步的结果从对风险控制的有效性和成本效益有效性角度进行系统和客观的比较和评估；

3.6.2.2 对每一方案进行风险平衡分析识别出一个或几个费效比好的方案；

3.6.2.3 从费效比好的方案入手，分析执行新方案后对各利益方的影响程度，尽量考虑各利益方付出和回报的平衡；

3.6.2.4 在考虑控制方案有效性并顾及各方利益均衡的情况下，提出合理的建议案。

3.6.3 输出结果

（1）基于可能的风险降低和成本有效性，对各种方案进行客观比较。

（2）所建议的实际可行的风险控制方案，或者对制定或修改的规范提出具体的选择建议。建议案编写的繁简或深浅程度视决策层次和需要而异，同时建议案应能为所有各方理解。

（3）呈交 FSA 结果：FSA 结束后应提交的报告及其格式详见第 4 章。

第 4 章　FSA 报告及其标准格式

4.1 提交 FSA 结果

4.1.1 FSA 评估应用结束后，应提交一份清楚简明的报告。该报告应包含有 FSA 过程的重要结果，这些结果应能使不具有风险评估技术应用经验的其他人员或组织理解。

4.1.2 报告应包括执行概要及下述内容：问题的限定、背景资料、工作方法、每一步骤的结果介绍、根据 FSA 所产生的最终建议。报告的详细程度应取决于考虑问题的情况。

4.1.3 报告中应列出评估过程中识别的主要危险、采取风险控制方案前后的风险、采取风险控制方案的费用和效益；对最终建议进行清楚的阐述，并按可审查和可追溯的方式进行论述。

4.1.4 对决策过程中的评估或建议、危险识别和风险分析、风险控制选项和成本效益分析中所使用或依赖的重要假设、限定条件、不确定性、数据模型、方法和推论的依据进行解释，并对报告中参考的有关信息或数据，应公开其来源以便必要时进行核查。

4.1.5 说明与评估或决策建议相关的重大不确定性的来源、程度和大小。

4.1.6 根据需要，所有支持性文件资料还可以附录的形式附于报告后，详见 4.2.8。

4.1.7 为使所提交的 FSA 评估报告具有统一的形式，报告应按 4.2 所述的标准格式进行编写。

4.2 报告标准格式

4.2.1 标题

（1）应明确指明应用的问题。

（2）应反映 FSA 应用的范围，如果仅是 FSA 部分步骤的应用，则应标明应用的某一步骤或某些步骤。

4.2.2 开始与结尾格式

（1）报告的第 1 部分应给出 FSA 的执行概要，包括应用的范围、评估的对象、遵循的依据、重要的假设和限定，以及得出的结果。

（2）报告正文的最后部分应为建议或要求采取的行动，包括：要求采取行动的类型（例如，作为资料文件或作为提出修改的依据），以及最终建议的简要介绍。

（3）报告正文后应以附录形式列出参考文件及所有支持性文件资料。

4.2.3　问题的限定

（1）应确定所要考虑的有关要进行评估的问题的定义。

（2）有关需要制定或修改所涉及到的规范或相关文件（用一附件列出）。

（3）FSA 应用中所用模型的定义（例如，与考虑的问题有关的对所涉及到的船舶类型都共同具有的功能、性能、特性或特征）。

4.2.4 背景资料

（1）建仪引入的措施用于类似问题而得到的经验（如有时）。

（2）与所考虑问题相关的事故统计，包括数据分析（例加，船舶类型或事故类别）。

（3）数据和资料的来源。

4.2.5 工作方法

（1）确认参与 FSA 应用的人员组成和经验水平（列表列出入员所在单位、部门、专业和职称等）。

（2）对如何进行评估加以介绍，例如召开的各种会议、工作组及决策方法等。

（3）评估开始和完成日期。

4.2.6 步骤简述

对每一步骤，应简述：

（1）进行评估的方法和技术；

（2）假定或限制条件（如有时），或不确定性及其依据；和

（3）FSA 方法每一步骤的结果，包括

步骤 1——危险识别：经排序的危险清单，并说明其相关场景；识别的重大事故情况，包括原因和初始事件。

步骤 2——风险分析：风险类型（例如：个人风险、社会风险、环境风险、业务中断风险）；根据考虑的问题给出风险分布；识别的重大风险；影响风险的主要因素；事故来源及可靠性统计。

步骤 3——风险控制方案：现行规范覆盖了哪些风险；确定风险控制方案；评估各控制方案对减少风险的有效性。

步骤 4——成本效益评估：识别每一风险控制方案涉及的成本和效益的形式；对受每一方案影响的各方产生的成本效益评估；以降低单位风险所需总/净费用来表示成本的有效性。

步骤 5——供决策的建议：各种方案的客观比较；关于决策者应如何实施建议的讨论。

4.2.7 供决策的最终建议

以可审核和可追溯的方式列出最终的建议，并说明理由。从目前提交的 IMO 报告来看，最终结果的陈述格式不尽相同。IACS 建议最终结果的陈述格式应标准化，举例如下：

表 4.2.7 最终结果的标准格式（MSC/78/19/1）

RCO	描述	PLL （生命周期）	ΔB （生命周期）	ΔC （生命周期）	ΔPLL （生命周期）	GCAF	NCAF
1							
2							

4.2.8 附录（按需要）

（1）说明每位专家的背景（例如简历）和选用专家的依据；

（2）参考文献；

（3）数据来源；

（4）事故统计；

（5）技术支持材料（例如，调研报告、内部资料、图纸资料和专家意见等）；和

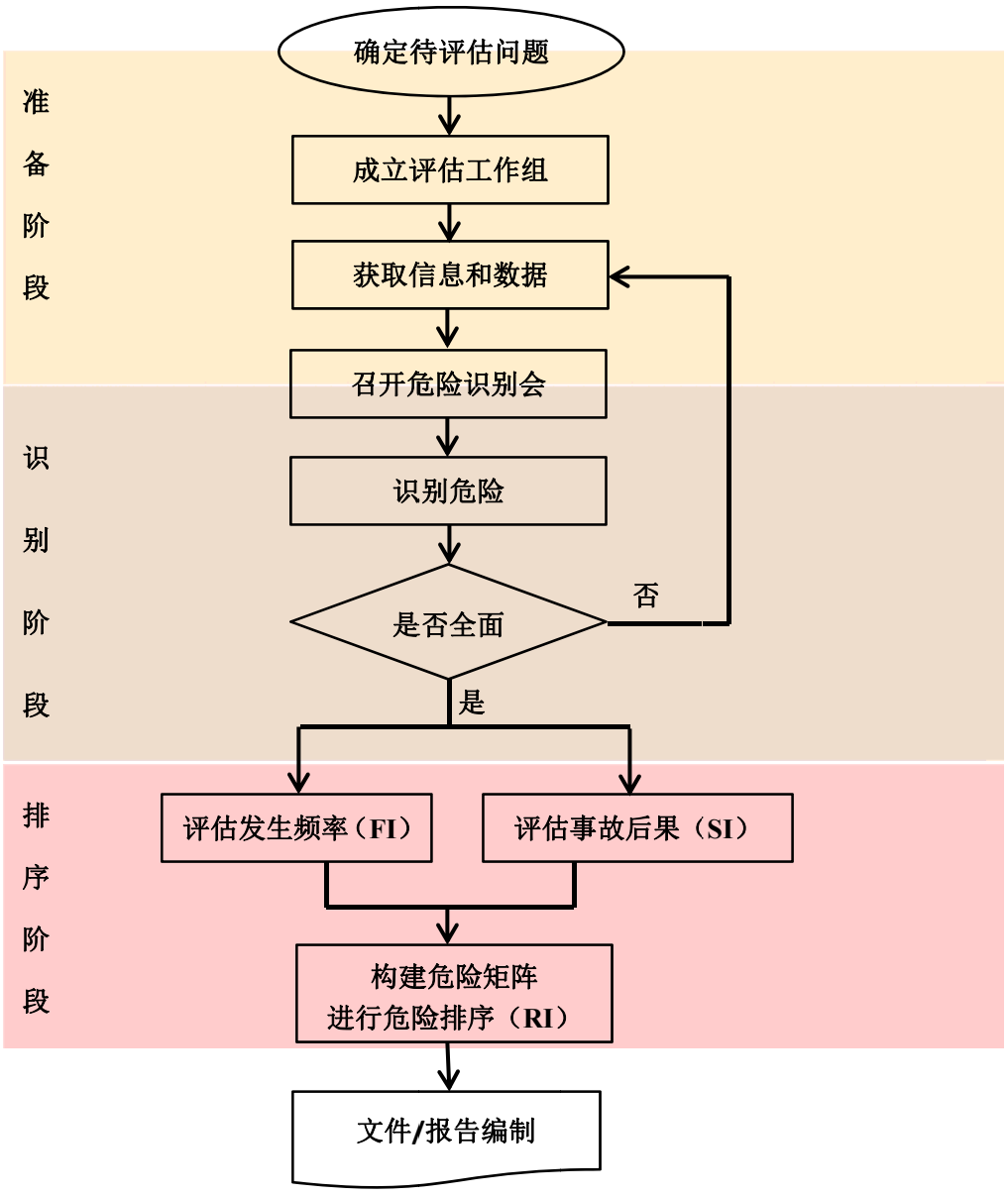
（6）其它信息资料。

附录 1　危险识别及危险示例

1 危险识别流程

危险是指可能导致事故发生，从而造成人员伤亡、财产损失或环境污染的潜在可能。事故的发生具有随机性，但有其发生、发展的规律性，需要我们运用科学理论和方法认识它的规律性。预防事故的发生就是识别和控制危险。

危险识别是利用一定的危险识别方法，确定可能存在的所有危险，找出事故发生的原因和有可能导致的后果，同时确定每一类危险的等级并将危险进行排序，以便在后续步骤中对主要危险进一步风险分析和提出相应的风险控制方案。危险识别的流程图如下图所示：



附图 1.1　危险识别流程图

危险识别是对某个问题开展 FSA 评估过程的开始，应辨识出该评估问题所涉及的所有潜在危险。对此最基本的理解就是：哪些地方有可能出错？

在开展危险识别时，提出的典型问题包括：什么地方可能会出错？事故是怎么发生的？如果有地方可能会发生事故：为什么？事故发生的原因是什么？发生事故的频率如何？事故导致的后果怎么样？有什么影响？是否有措施来防止事故的发生或者减轻事故后果？通过回答这些问题，能有助于专家对潜在事故的可能原因和后果有很全面的了解和识别。

2 危险识别方法

目前 IMO 推荐和较为常用的危险识别方法主要有检查表法，假设分析技术（What If），失效模式和影响分析（Failure Mode and Effect Analysis，FMEA），危险与可操作性分析（Hazard and Operability，HAZOP）。

2.1 检查表法

检查表（Check-lists）是危险、风险或控制故障的清单，这些清单通常凭专家经验（根据以前的风险评估结果，或是因为过去的故障）进行编制。检查表法可用来识别危险或者评估风险控制效果，可用于船舶或相关系统的生命周期的任何阶段。它们可以结合其他风险评估技术同时使用，最主要的用途是检查在运用了旨在识别新问题的更富想象力的技术之后，是否还有遗漏问题。

检查表法的具体步骤如下：

（1）确定活动范围；

（2）选择一个能充分涵盖整个范围的检查表。为此，应仔细选择检查表。例如，不可使用标准控制的检查表来识别新的危险或风险。

（3）使用检查表的人员或团队应熟悉过程或系统的各个因素，同时审查检查表上的项目是否有缺失。

检查表法的输出结果取决于应用该结果的风险控制过程的阶段。例如，输出结构可以是不全面的控制清单或是风险清单。

检查表的优点包括：

（1）非专家人士可以使用；

（2）如果编制精良，它们将各种专业知识纳入到了便于使用的系统中；

（3）有助于确保常见问题不会遗忘。

检查表的局限包括：

（1）限制风险识别过程中的想象力；

（2）论证了“已知的已知因素”，而不是“已知的未知因素”或是“未知的未知因素”；

（3）鼓励“在方框内画勾”的习惯；

（4）往往基于已观察到的情况，因此会错过还没有被观察到的问题。

2.2 假设分析技术

假设分析技术是一种分析可能导致不利结果的意外事件的非结构化方法，该方法通过“如果-则”的方式，来得到可能发生的后果。提出的假设要有一定的实际性，建立在专家们丰富的实际经验上，否则会导致一些实际不可能出现的场景。

假设分析技术是一种适合在危险识别会议上使用的方法。首先，讨论系统、功能、操作等各方面细节。由相关专家说明其运作原理及可能的故障。由相关专家说明其运作原理及可能的故障。接着，提出操作失误、设备故障、维修保养等各种“如果-则”假设，并参照历史数据对假设进行补充。针对各种假设，考虑后果及相互的影响。最后，在会议上达成共识并形成报告。

假设分析技术可以用在方案的设计、修改以及运营阶段，最后的结果表达是一个可能导致危险的表单以及为减轻危险所带来的后果而应采取的方法和改进措施。假设分析技术经常与检查表法联合使用，即假设分析-检查表法（SWIFT）。

例如，对某个压载水系统开展 SWIFT 分析：

（一）SWIFT 先定义相关的操作，然后开展头脑风暴：

（1）如果压载水系统设计不足，则会怎样？

（2）如果某阀发生故障，则会怎样？

（3）如果某泵发生故障，则会怎样？

（4）如果某管路故障，则会怎样？

（5）如果水罐的压力过高，则会怎样？

（6）如果遥控系统操作故障，则会怎样？

（7）如果电源故障，则会怎样？

……

（二）建立一个检查表来帮助识别额外的危险：

（1）操作失误和其他人员因素；

（2）测量错误；

（3）设备/仪器故障；

（4）维护保养；

（5）完整性丧失或失去密闭性

（6）应急操作；

（7）外部因素或影响。

……

（三）按照逻辑顺序排列的危险识别工作表：

附表 1.1 危险识别工作表

序号	如果-则	原因	后果	措施	建议
1	系统设计缺陷	船厂缺乏经验；缺乏规范要求；设计过程或质量检测欠佳；资金紧张	泵的排量太低；压载效率不足	船级社/IMO 规范，计划审批流程	
2	系统故障	泵、阀、管路等的故障；吸水管堵塞	压载能力不足或降低，不能正确横倾	冗余设计，维护	压载系统应开展操作检验和性能试验
3	操作流程的缺陷	缺乏培训；时间不够；天气误报	导致压载操作错误	培训程序	应在培训中强调压载的危险
4	系统的误操作	没有按照压载计划进行；压载程序不清楚；阀的误操作；阀的操作顺序错误；缺乏培训；时间不够	不利的横倾/纵倾/抽水	培训程序，计划监控	压载程序中应包括监控的要求

2.3 危险与可操作性分析方法

HAZOP 通过综合多位专家的意见找寻系统过程或状态的偏差，分析原因及可能的后果，从而提出具有针对性的预防措施。该方法用来分析系统由概念到实施，不断发展的各个阶段中存在的危险。其目标是将潜在危险消除或减到最少。危险与可操作性研究的实施步骤如下：

（1）根据研究对象成立一个由操作、管理、技术、设计、监察等各方面专家组成的分析小组，并指定负责人；

（2）针对分析对象广泛收集相关信息、资料；

（3）将研究对象划分成若干单元，明确各单元的功能并说明其运行状态和过程；

（4）定义 HAZOP 的关键词，以此为基础逐一分析各单元可能出现的偏差；

（5）分析产生偏差的原因及其后果；

（6）制定相应的对策措施。

对各种可能出现的偏差状况，定义 HAZOP 的关键词：

附表 1.2 HAZOP 的关键词

关键词	偏差
无或没有	无电源，无燃油流动，货油舱没有清洗
多、高	管道压力过大，燃油温度过高
少、小	燃油喷射压力太小，燃油舱也为太低
以及、而且	排放清洁水以及含油水至海洋
相反	流动
其它	正常操作
……	……

通过 HAZOP，列出识别出的危险、操作性问题及其潜在后果，给出进一步分析的建议。典型的 HAZOP 工作表如下：

附表 1.3 HAZOP 工作表

团队：_____ 图纸编号：_____ 会议时间：_____ 修订编号：_____					
序号	偏差	原因	后果	风险控制措施	采取行动
1					
2					
3					

2.4 失效模式和影响分析方法

FMEA 是一种从功能和硬件方面对系统进行分析的技术。系统中的每一个部件都被分为不同的层次并进行分析。发生故障时，某一部件的失效对其所在层和更高层的影响将被分析，以确定整个系统故障的严重程度。在全面考虑任何可以消除或减轻故障的条件之后，提出降低故障严重程度建议。该危险识别方法显示了元件故障模式可能导致系统故障。

FMEA 的基本步骤：

（1）明确系统及系统功能的定义、绘制功能框图；

（2）分析故障模式，即故障的表现形式；

（3）分析故障原因；

（4）分析故障影响，即故障导致的各种后果，包括对部件自身的影响、对系统的影响、对总体（船舶）的影响；

（5）探寻故障检测方法；

（6）提出可能的预防改进措施；

（7）填写 FMEA 工作表、编制 FMEA 报告。

通过 FMEA，列出识别的失效模式，及其原因和可能的影响，列出进一步分析的建议。典型的 FMEA 工作表如下：

附表 1.4 FMEA 工作表

时间：_____ 页数：_____ of _____ 船舶：_____ 系统：_____ 参考文献：_____ 团队成员：_____						
设备	功能	失效模式	原因	影响	风险控制措施	建议采取的行动

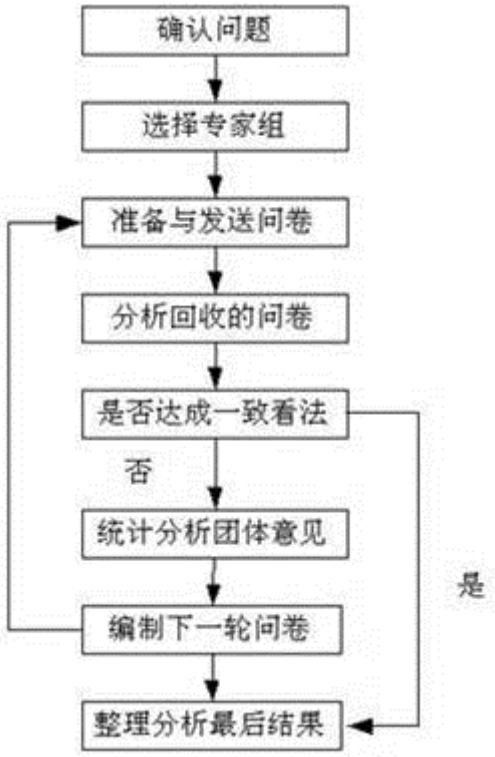
2.5 德尔菲法

德尔菲法（Delphi method），是采用背对背的通信方式征询专家会议成员的预测意见，

经过几轮征询，使专家会议的预测意见趋于集中，最后做出符合实际规律的预测结论。德尔菲法可对各类任务和问题进行专家调查，尤其适用于缺少历史数据的情况，所以又名专家意见法或专家函询调查法。

德尔菲法是依据系统的程序，采用匿名发表意见的方式，即团队成员之间不得互相讨论，不发生横向联系，只能与调查人员发生关系，以反复的填写问卷，以集结问卷填写人的共识及搜集各方意见，可用来构造团队沟通流程，应对复杂任务难题的管理技术。

该方法主要是由调查者拟定调查表，按照既定程序，以函件的方式分别向专家组成员进行征询；而专家组成员又以匿名的方式（函件）提交意见。经过几次反复征询和反馈，专家组成员的意见逐步趋于集中，最后获得具有很高准确率的集体判断结果。该方法通常与层次分析法联合使用。



附图 1.2 德尔菲法流程图

3 对识别危险的排序

在识别潜在的危险后，应对危险进行排序并对场景进行定级。对危险进行排序时，应根据所考虑的风险类型，分别列出每种风险类别下的危险排序。

排序的方法主要是根据历史统计数据和专家判断进行，IMO 推荐风险矩阵法和专家排序法。

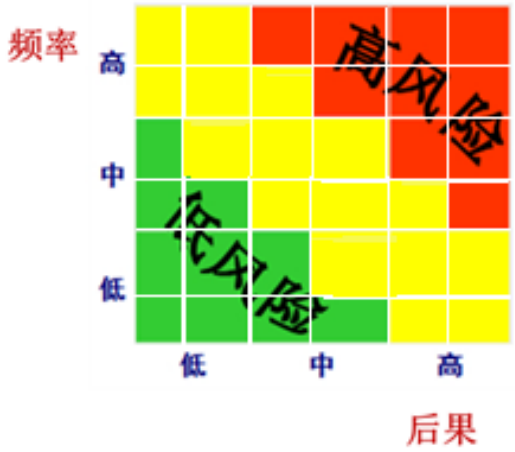
（1）风险矩阵法。建议采用对数形式来定义事故发生频率和严重性（后果）。

风险 = 频率×后果

log(风险) = log (频率) + log (后果)

风险指数（RI）=频率指数（FI）+严重度指数（SI）

将发生频率和严重程度分为几个等级，随后将频率和相应的后果置于一个矩阵中，该矩阵即为风险矩阵。一般当历史统计数据和相关信息足够时，可选用该方法。风险矩阵可分为三个区域：高风险区域，低风险区域，以及两者之间的临界区域，见下图所示：



附图 1.3 风险矩阵

下表举例说明了用对数表示的概率/频率指数的定义和取值（摘自MSC-MEPC.2/Circ.12）：

附表 1.5 概率/频率指数的定义和取值

频率指数			
FI	频率	定义	F（每船年）
7	频繁	1艘船每月可能发生一次	10
5	相当可能发生	10艘船的船队每年可能发生一次，即：在船舶的生命周期里可能发生几次	0.1
3	少见	1000艘船的船队每年可能发生一次，即在几艘类似船舶的总计生命周期里可能发生	10^{-3}
1	罕见	在5000艘船的船队的生命周期（20年）里可能发生一次	10^{-5}

下表举例说明了以对数方式表示的海上事故的严重性指数的定义和取值（摘自MSC-MEPC.2/Circ.12）。如果考虑到环境问题或客船，则需要进行额外或不同分类。

附表 1.6 严重性指数的定义和取值

严重性指数				
SI	严重程度	对人员安全的影响	对船舶的影响	S（等效死亡）
1	轻	单一或轻微伤害	局部设备损坏	0.01
2	重	多个或严重伤害	非严重性船舶损坏	0.1
3	严重	单一死亡或多个严重伤害	严重损坏	1
4	灾难性	多个死亡	全部灭失	10

在防止船舶溢油的FSA分析中，可使用下述严重性指数（摘自MSC-MEPC.2/Circ.12）。

附表 1.7 溢油事故的严重性指数的定义和取值

严重性指数		
SI	严重程度	定义
1	1级	溢油量 ＜1吨
2	2级	溢油量在1-10吨之间
3	3级	溢油量在10-100吨之间
4	4级	溢油量在100-1,000吨之间
5	5级	溢油量在1,000-10,000吨之间
6	6级	溢油量 ＞10,000吨

下表给出了基于以上各表的风险矩阵。

附表 1.8 风险指数的取值

风险指数					
FI	频率	严重性（SI）			
		1	2	3	4
		轻	重	严重	灾难性
7	频繁	8	9	10	11
6		7	8	9	10
5	相当可能发生	6	7	8	9
4		5	6	7	8
3	少见	4	5	6	7
2		3	4	5	6
1	罕见	2	3	4	5

例如，某一事件被定为频率“低”（FI=3），严重程度为“重”（SI=2），则其风险指数应为 RI= FI + SI =5。

在实际应用中，有时也将严重性指数高的危险同时列入严重级别。

（2）专家排序法：由一组专家分别对识别出来的一系列危险进行比较，每位专家都按照自己的判断，按照风险等级由高到低对危险进行排序。最后，针对每一个危险，将所有专家对其排出的名次求和，按照总数由小到大的顺序排列，即得到最终排序结果。一般在事故数据和相关信息不足时，可选用该方法。

专家依据各自的经验和理解对各种危险进行比较排序，有的习惯按事故场景对风险排序，有的按危险的频率或严重性排序。这是一种主观排序，每个专家均可制定一份事故场景排序单，将最严重者置于首位。专家对于问题的了解程度和其知识背景等因素的限制，必然导致在评估意见中产生分歧。因此，为增强所得结果的透明度，应当针对各个专家排序的结果进行一致性分析。所得排序应附有一个一致性系数，用以表明专家之间的共识程度。

假定指派若干专家（总计 J 位专家）用自然数（1、2、3…I）对若干事故场景（I 个场

景）排序。专家“j”在排序时将场景“i”排为x_{ij}。一致性系数“W”可按下式计算：

$$\mathrm{W}=\frac{12\sum_{i=1}^{i=I}[\sum_{j=1}^{j=J}x_{ij}-\frac{1}{2}J(I+1)]^2}{J^2(I^3-I)}$$

系数W在0至1之间变动。$W=0$表示专家对于场景如何排序没有共识。$W=1$表示所有专家意见完全相符，均按给定属性对场景同样排序。

共识程度的特征见下表所示：

表 1.9 一致性系数

W	>0.7	共识大
W	0.5 – 0.7	共识中等
W	<0.5	共识少

以表1.10至表1.12为示例。每一示例均有6个专家（J = 6）对10个场景（I = 10）排序。为表明一致性系数的作用，三组专家用的最终组合均为Σx_{ij}，危险的重要性采用1~10的标度。表1.9至表1.11清楚表明不同程度的一致性如何形成。

一致性系数意义的评估取决于参数Z：

$$\mathrm{Z}=\frac{1}{2}ln\frac{(J-1)W}{1-W}$$

其Fisher分布的自由度为$v_1=I-1-\frac{2}{J}$和$v_2=(J-1)v_1$。如果I>7，则可采用Pearson衡准χ^2，自由度为$v=I-1$的χ^2分布的取值为$J\,(I-1)\,W$。

附表 1.10 共识程度高的专家组

危险 / 专家	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	3	4	2	5	6	8	10	7	9
2	2	3	1	5	4	6	7	8	9	10
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	2	1	4	3	6	5	7	8	10	9
5	2	3	1	4	5	6	8	10	9	7
6	1	2	4	3	5	7	6	8	9	10
$\sum x_{ij}$	9	14	17	21	30	36	43	52	53	55
*数字对应于危险的初始排列										

基于附表1.10的计算得出$W=0.909$；$\chi^2=J\,(I-1)\,W=47.5$；概率置信度$\alpha=0.999$。

附表 1.11 共识程度中等的专家组

危险 / 专家	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	6	8	4	2	3	5	7	9	10
2	2	3	1	5	6	4	7	8	10	9
3	3	4	1	2	5	8	9	10	6	7
4	4	5	6	1	8	2	3	10	7	9
5	4	3	1	9	2	5	7	10	6	8
6	5	1	7	4	3	9	8	2	10	6
$\sum x_{ij}$	19	23	24	25	26	31	39	47	48	49

基于附表1.11的计算得出$W = 0.413$；$\chi^2 = 25.4$；$\alpha = 0.999$。

附表 1.12 共识程度低的专家组

危险 / 专家	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	9	3	8	2	1	7	10	6	4
2	1	5	7	4	8	9	3	6	2	10
3	6	2	8	3	9	10	4	1	5	7
4	1	4	3	2	7	5	9	6	10	8
5	6	1	3	5	2	8	4	9	7	10
6	3	7	5	8	4	2	10	6	9	1
$\sum x_{ij}$	22	28	29	30	32	35	37	38	39	40

基于附表1.12的计算得出$W = 0.102$；$\chi^2 = 5.4$；$\alpha = 0.20$。

4 船上危险示例

4.1 船上对人员造成的危险

（1）吸入石棉；

（2）腐蚀性液体和酸液灼伤；

（3）电击和触电；

（4）落水；和

（5）引航员梯/引航员升降装置操作。

4.2 船上危险物质

4.2.1 起居区域：

（1）易燃装饰物；

（2）储藏室中的清洗材料；和

（3）厨房设备里的油/油脂；

4.2.2 甲板区域：

（1）货物；和

（2）甲板储藏室里的油漆、油料、油脂等；和

4.2.3 机器处所：

（1）电缆；

（2）发动机、锅炉和焚烧炉所用燃油和柴油；

（3）舱底、集油盘等中的燃油、润滑油和液压油；

（4）制冷剂；和

（5）货油加热系统。

4.3 潜在着火源

4.3.1 一般的：

（1）电弧；

（2）摩擦；

（3）热表面；

（4）引燃火花；

（5）明火；和

（6）无线电波；

4.3.2 起居区域（包括驾驶台）：

（1）电子导航设备；和

（2）洗衣设备——熨斗、洗衣机、滚筒式烘衣机等。

4.3.3 甲板区域：

（1）甲板照明；

（2）烟囱废气排放；和

（3）热作业火花；和

4.3.4 机器处所：

（1）空压机组；和

（2）发电机的发动机排气总管。

4.4 船舶外部危险

（1）风暴；

（2）闪电；

（3）海图上未标示的水下物体；和

（4）其他船舶。

附录 2　风险评估方法及其示例

1 概述

风险评估方法的种类很多，大体可分为定性分析方法、半定量分析方法和定量分析方法三大类。引进“量”的概念是进行分析和比较的基础，严格的定量分析应当以基于统计方法的事故概率计算和基于数值模拟的事故后果计算为基础。但由于事故数据资料的缺乏以及时间、费用等方面的限制，准确计算事故的概率和后果是困难的，而且在相当多的场合根本无法得到这种概率和后果。定性分析方法对分析对象的危险状况进行系统、细致的检查，根据检查结果对其危险性做出大致的评价。半定量分析方法则将对象的危险状况表示为某种形式的分度值，从而区分出不同对象的危险程度。

究竟是采用定性方法还是定量方法，主要取决于风险分析过程中信息量的多少。一般在 FSA 步骤 1 的危险识别阶段采用定性和半定量的分析方法，以此选出一些重要的危险进行进一步的详细分析，在 FSA 步骤 2 的风险分析阶段采用定量分析方法。

风险评价研究在航运领域的应用相对起步较晚，随着航运业地位的不断提升，自上世纪 90 年代中期开始各种传统的风险分析方法也得到了广泛应用。目前在 FSA 评估中常用的方法包括事件树分析（ETA）、故障树分析（FTA）、风险贡献树（RCT）、失效模式和影响分析（FMEA）、危险与可操作性研究（HAZOP）等。

2 常用的风险评估方法

2.1 事件树分析方法

事件树分析方法是一套探究事故、故障或非期望事件的发展和演化的方法。按照事故的发展顺序，分阶段，一步一步地进行分析，每一步都从成功和失败两种可能后果考虑，直到识别出最终的结果。所分析的情况用树枝状图表示，所以称为事件树。通过事件树，可以定性地了解整个事件的动态变化过程，又可以定量计算出各阶段的概率，最终评估每项后果的发生概率（可能性）

事件树分析的基本程序，可概况如下四个步骤：

（1）确定系统及其构成因素，也就是明确所要的对象和范围，找出系统的组成要素(子系统)，以便展开分析，

（2）分析各要素的因果关系及成功与失败的两种状态。

（3）从系统的起始状态或诱发事件开始，按照系统构成要素的排列次序，从左向右逐步编制与展开事件树。

（4）根据需要，可标示出各节点的成功与失败的概率值，进行定量计算，求出因失败而造成事故的“发生概率”。

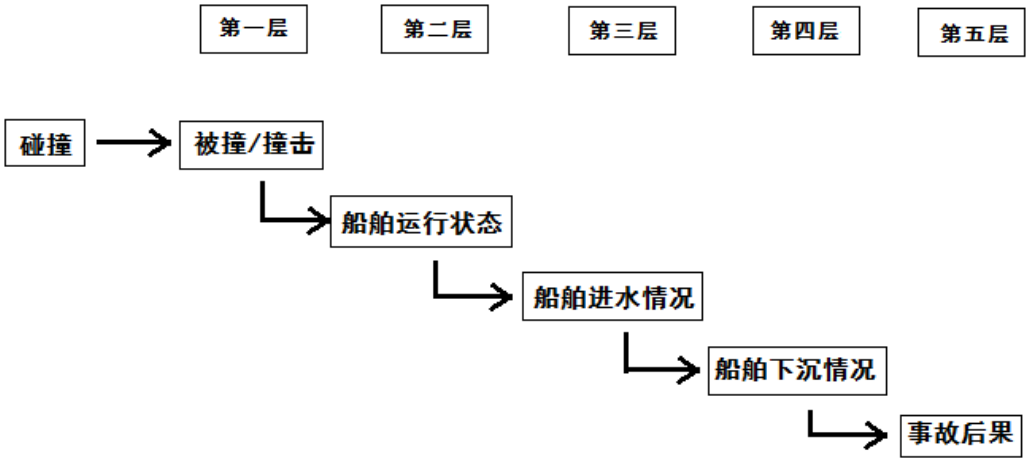
事件树中的初始事件：导致危险或者事故发生的事件序列中的第一个事件。它是人们不

希望发生的导致船舶损坏或人员伤亡的事件，初始事件通常在 FSA 步骤 1 中进行识别。每个初始事件发展出一个单独的事件树，例如，碰撞事件树，火灾事件树等。

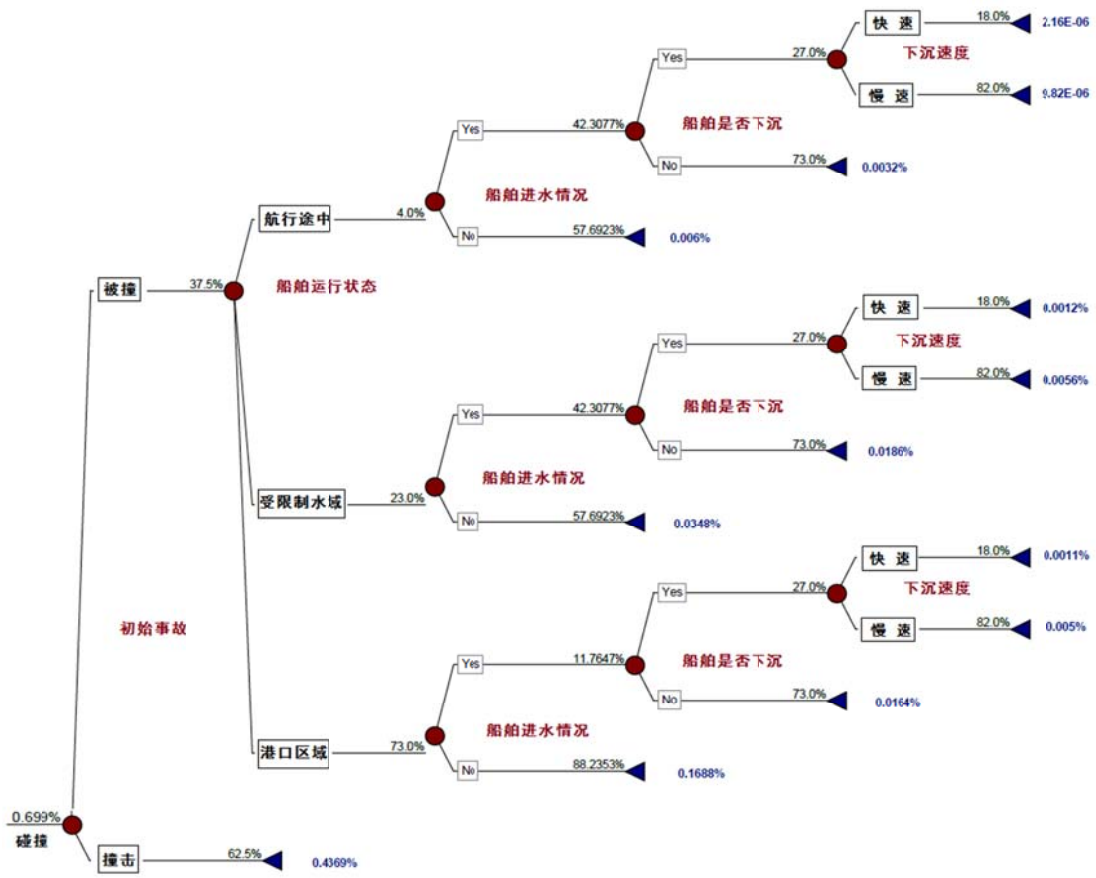
事件树中的后果：事件树中每个可能的结果设定为一种场景（最终状态），场景后果的确定可借助于某些专业软件，例如：破损稳性，CFD 计算，火灾模拟，烟气扩散，人员撤离模拟和强度计算等。

事件树中的概率：事件序列中每一步的成功和失败的概率可根据事故数据统计、系统的可靠性、专家判断等手段获得，最终场景的发生频率由各分支事件的概率与初始事件的发生概率相乘而获得。

碰撞事件树举例如下（摘自欧盟 GOALDS 项目，SLF 55/INF.9）。构建碰撞事件树时考虑了船舶碰撞事故发生后 5 个层次的后续事件序列，并在此基础上构建了如附图 2.2 所示的碰撞事件树，其中独立的概率值基于事故统计报告给出。



附图 2.1 碰撞事故中的后续事件序列



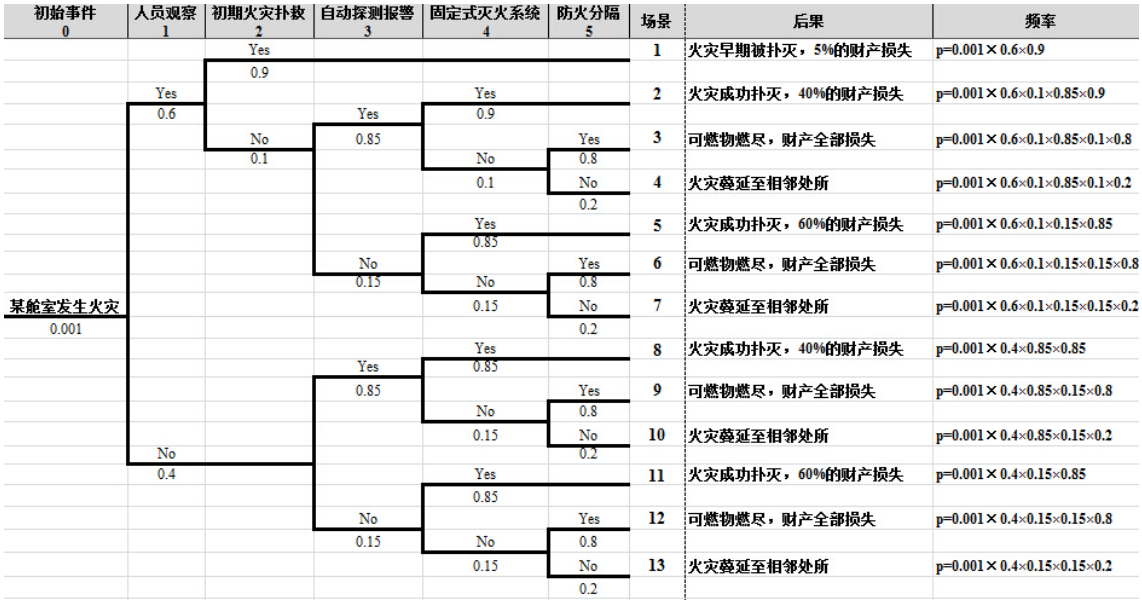
附图 2.2 船舶碰撞事件树举例

触碰事件树举例如下（摘自 SAFEDOR 项目，MSC83/INF.8）：

初始事件概率 0	两个或两个以上货舱受损 1	双层底受损 2	货舱内部区域受损 3	货物捆绑松开 4	无法主动冲滩 5	快速沉没 6	频率（计算所得）	场景
f =6.84E-03	yes p=0.3	yes p=0.22	yes p=0.7	yes p=0.31	yes p=0.84	yes p=0.5	4.12E-05	1
						no p=0.5	4.12E-05	2
					no p=0.16		1.57E-05	3
				no p=0.69			2.18E-04	4
			no p=0.3	yes p=0.31	yes p=0.84	yes p=0.5	1.76E-05	5
						no p=0.5	1.76E-05	6
					no p=0.16		6.72E-06	7
				no p=0.69			9.35E-05	8
		no p=0.78					1.60E-03	9
	no p=0.7						4.79E-03	10

附图 2.3 船舶触碰事件树示例

船舶舱室火灾事件树举例如下：



附图 2.4 船舶火灾事件树示例

2.2 故障树分析方法

故障树分析方法（又叫事故树分析方法）是具体运用运筹学原理对事故原因和结果进行逻辑分析的方法。故障树分析方法先从事故开始，逐层次向下演绎，将全部出现的事件，用逻辑关系联成整体，将能导致事故的各种因素及相互关系，作出全面、系统、简明和形象的描述。

故障树分析是一种灵活的工具，既能适用于定量分析，也能适用于定性分析，而且易于使用和理解。事故分析是一种自上而下的工作过程：假设系统发生事故，然后试图找出事故原因。这是通过逆操作过程试图确定什么事件的合理组合有可能会导致事故，于是，系统事故就成为了故障树的顶事件，个体部件故障形成了基本事件，它们都使用逻辑门的网络组合起来，如“与”和“或”，显示事故与其起因之间的关系。顶事件一般是某种类型的事故或意外的危险。基本事件通常是系统正常运行中会发生的故障或预期发生的事件。对故障树分析包括两部分：定性（逻辑）分析和定量（概率）分析。定性分析是通过将故障树表示的逻辑表达式简化至最小割集来完成的，这是引起主要事件事故所需的最小可能组合。定量分析是通过已知的基本事件发生的概率来计算主要事件的发生概率。

应用故障树分析方法，经过中间联系环节，能将潜在原因和最终事故联系起来，这样可以查清事故责任，也为采取整改措施提供依据。通过对原因的逻辑分析，可以分清导致事故原因的主次，原因组合单元，这样控制住有限得几个关键原因，就能有效地防止重大事故发生，提高管理的有效性，节约人力物力。

故障树分析的基本程序，可概况如下五个步骤：

（1）定义被分析的系统。定义系统的目的就是明确研究对象，包括定义系统的功能、组成、系统的边界及故障模式。

（2）选择系统最严重的故障模式作为顶事件。系统的故障模式可能不止一个，每种故障模式对系统造成的影响也不同。因此，要选择对系统影响最严重的故障模式进行故障树分析。

（3）构建故障树。对顶事件进行分析，首先找出导致顶事件发生的直接原因，把直接原因作为导致顶事件发生的二级事件，再进行向下的更细分析，一直到系统的下边界，此时即可得出导致顶事件发生的各底事件。

（4）对故障树进行定性和定量分析。对故障树进行定性分析的目的就是找出故障树的最小割集。最小割集可能是几个底事件的组合，也可能由单一底事件构成。根据最小割集中元素的个数确定最小割集的阶数。阶数越小，说明此最小割集越重要，应首先对其进行下一步研究。对故障树进行定量分析，就是依据底事件的发生概率，根据故障树的结构函数来计算顶事件的发生概率以及各底事件的重要度。然后依据重要度大小，对底事件进行排序。

（5）研究应采取的弥补措施。

故障树中的逻辑门：逻辑门决定了对概率（假定事件 A、B 和 C 互相独立）进行相加还是相乘以得到顶层事件的概率值。主要有“与”门和“或”门两种：



附图 2.5 故障树中的逻辑门

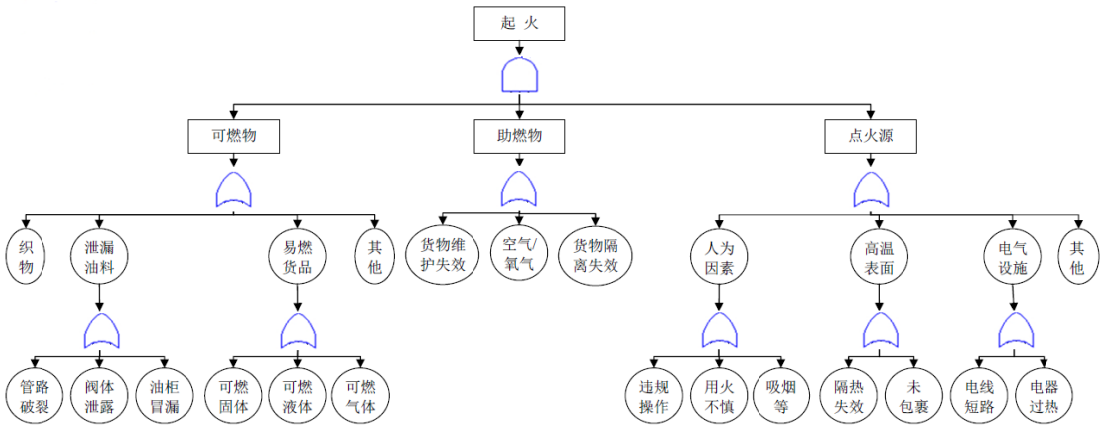
.1“与”门：表示符号下方的各分支事件同时发生导致符号上方事件发生。如果需要两个或以上低级别事件的发生从而导致下一个更高一级事件的发生，则采用一个逻辑上的“与”门表示。

$$P(\text{与门}) = P(a) \times P(b|a) \times P(c|a,b) = P(a) \times P(b) \times P(c)$$

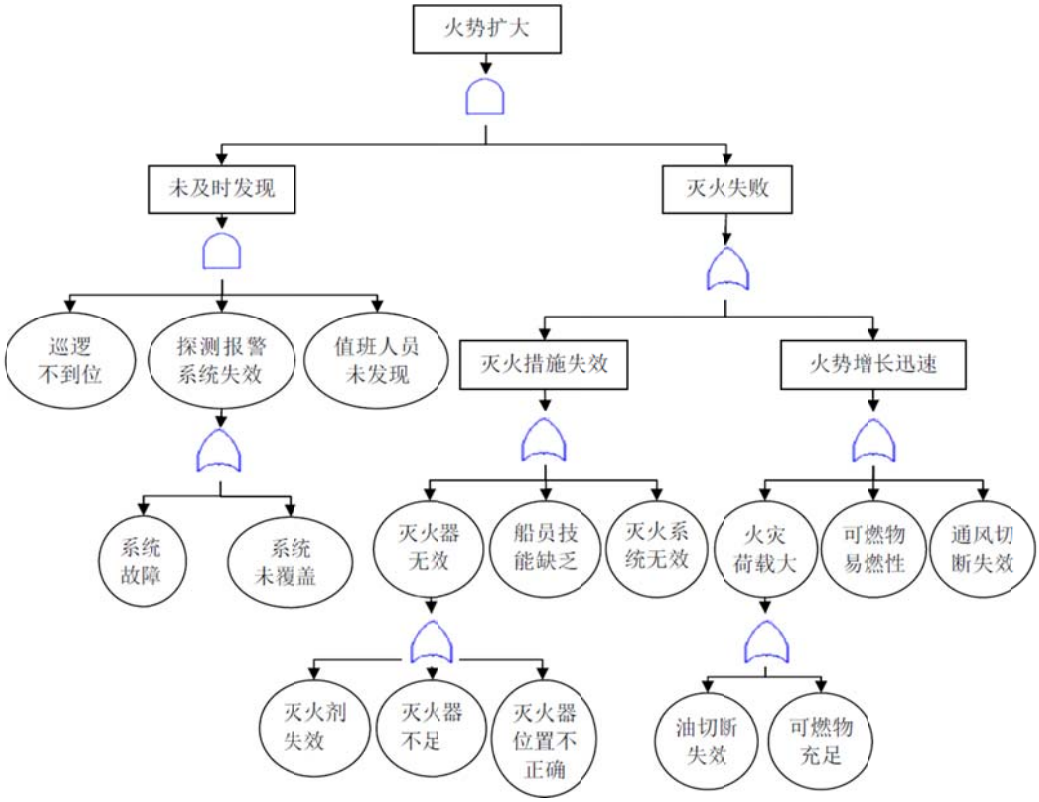
.2“或”门：表示符号下方的各分支事件之一发生导致符号上方事件发生。如果两个或以上低级别事件中的任意一个都可导致下一个更高一级事件的发生，则采用逻辑上的“或”门表示。

$$P(\text{或门}) = P(a) + P(b) - P(a,b) = P(a) + P(b)$$

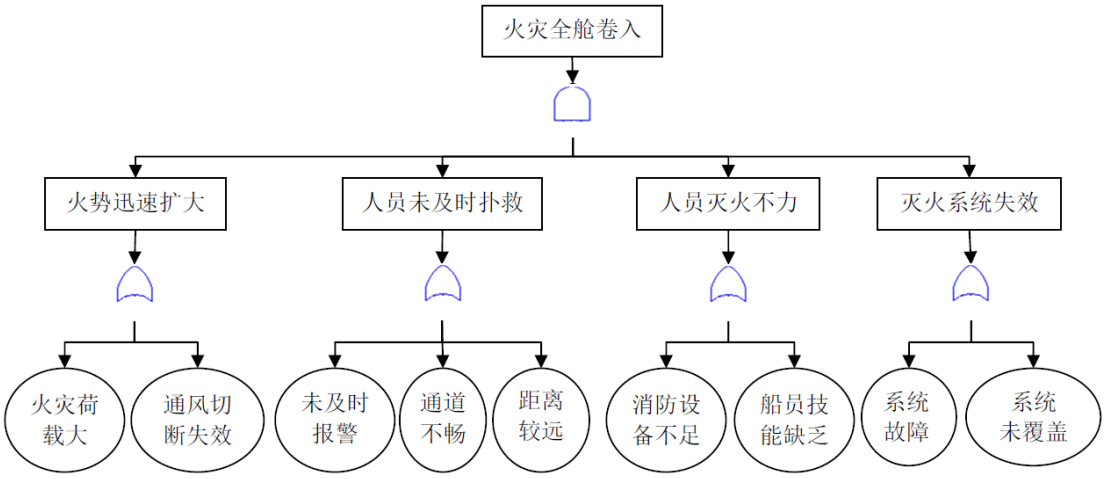
船舶舱室火灾故障树举例如下：



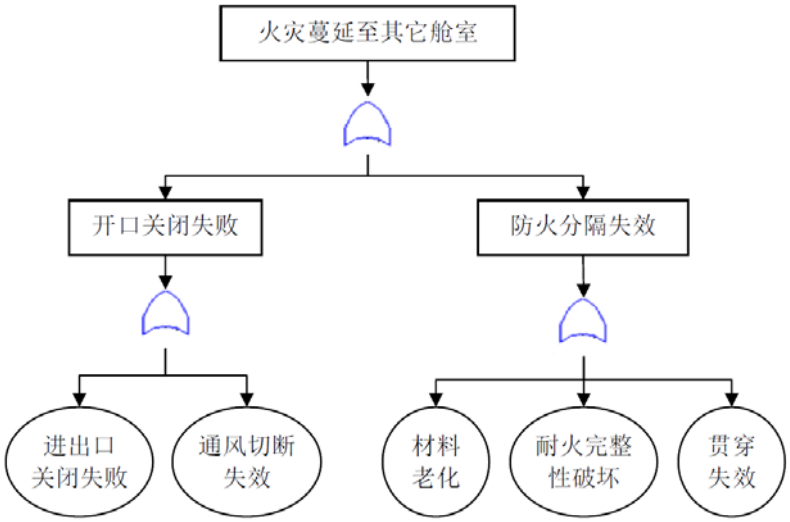
附图 2.6 舱室火灾的发生



附图 2.7 舱室火势扩大



附图 2.8 舱室火灾全舱卷入



附图 2.9 火灾蔓延至其它舱室

2.3 风险贡献树（RCT）

RCT 为通过图解法显示不同类别事故其子事故的风险分布的一种方式，见下图所示。按事故类别开始建树，如果现有数据允许且出于逻辑需要，可将这些事故再划分子事故。可基于识别的危险建立初步故障树和事件树，以说明事故直接原因如何产生并组合在一起导致事故的发生（使用故障树），并说明事故如何进一步发展从而导致不同程度的损失（使用事件树）。尽管示例中使用的是故障树和事件树技术，也可使用其他合适的成熟方法。

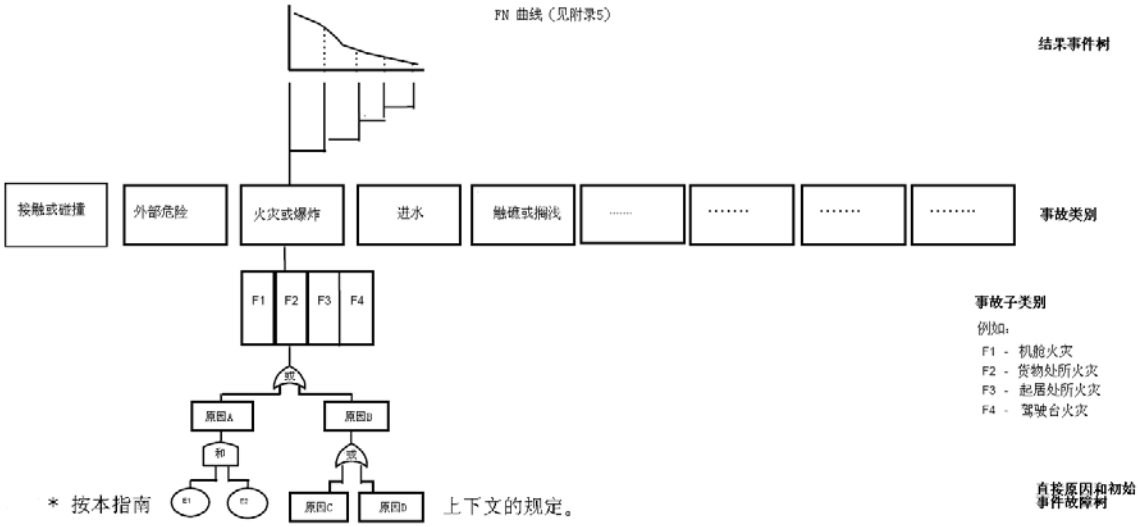
一般使用现有的事故统计数据对 RCT 进行量化，分 3 个阶段进行：

（1）按事故发生频率对事故及其子事故进行量化；

（2）按量级和重要性对事故后果的严重程度进行量化；和

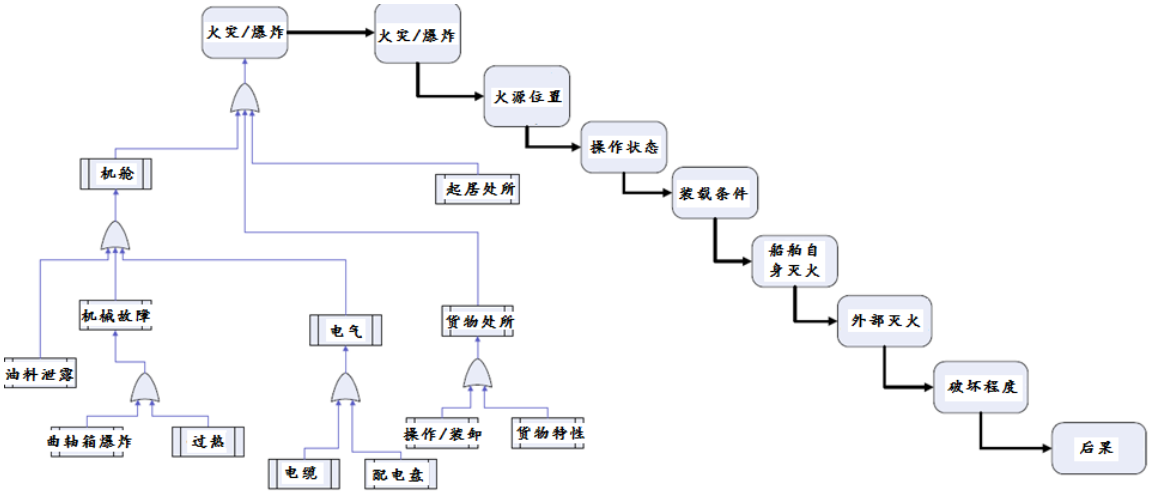
（3）事故及其子事故的风险可基于事故发生频率和结果的严重程度用 FN 曲线（见本指南附录 3 的介绍）或潜在人命损失（PLL）表示。因此，通过所有子事故的风险分布确定

各类事故的风险贡献。



附图 2.10 风险贡献树示例

IACS 在杂货船综合安全评估（MSC87/INF4）中给出的船舶火灾/爆炸的风险模型如下：



附图 2.11 火灾/爆炸风险模型示例

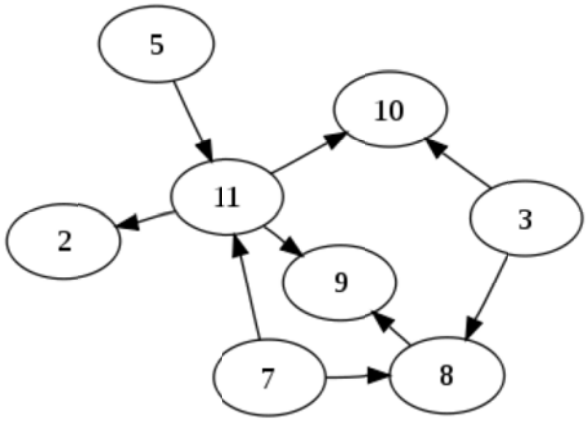
2.4 影响示意图

影响示意图方法的目的是对某一事件的影响网络进行建模。这些影响将操作层面的故障及其直接原因和深层次的组织和管理影响联系起来。影响示意图方法来源于决策分析，基于专家判断，在没有或较少经验数据的情况下特别有用。因此该方法能够识别所有影响关系（以及深层的因果信息）以有助于解释船舶风险状况在某些方面（或甚至船舶类型）显示高风险等级，而在另外一些方面显示低风险等级。由于影响示意图认识到风险状况受到例如人员、组织和管理因素的影响，因此其可使人们整理了解以层次方式表示的问题。

2.5 贝叶斯网络

在风险的定量分析方法中，除了已经技术化的故障树分析法和事件树这两种树分析法之外，还有网状结构的贝叶斯网络分析法。树结构与网结构相比，具有较多局限性，树结构适于表达系统的层次结构，但是树结构不能表达同一层之间的元素之间的关系，而网结构可以做到这一点。

贝叶斯网络是一种由有向无环图（DAG，见下图）表示的概率模型（一种统计模型），由节点及连接这些节点有向边构成。节点代表随机变量，节点间的有向边代表了节点间的互相关系。在有向无环图中，给定某个节点的父节点，这个节点独立于它的非后继节点。局部概率分布是与每个变量关联的局部概率分布的集合，局部概率分布中的元素是给定每个变量的父节点，该节点取不同值的条件概率表（CPT），CPT 体现了领域知识定量方面的特征。



附图 2.12 贝叶斯网络示意图

贝叶斯网络建模的主要任务包括确定网络的拓扑结构和确定网络中各个节点的条件概率分布。网络中所有节点的条件概率分布统称为网络的概率参数。贝叶斯网络建模包括一个定性过程（确定拓扑结构）和一个定量阶段（确定概率参数）。

贝叶斯网络推理的主要依据就是贝叶斯公式:

$$P_A = \sum_{i=1,2,\ldots,n} P(\mathrm{A} \mid \mathrm{B_i}) P(\mathrm{B_i})$$

$$P(\mathrm{A} \mid \mathrm{B}) = \mathrm{P}(\mathrm{B} \mid \mathrm{A}) \times \mathrm{P}(\mathrm{A}) / \mathrm{P}(\mathrm{B})$$

贝叶斯网络的推理任务主要包括单个变量的边际概率，变量集合的联合概率分布，节点的条件概率，模型的最可能解释，最大后验概率，灵敏度分析等。根据证据变量和查询变量所扮演的因果角色的不同，概率推理有以下 4 种不同类型。人们常说的概率推理指的就是后验概率问题。

（1）从结果到原因的诊断推理；

（2）从原因到结果的预测推理；

（3）在同一结果的不同原因之间的原因关联推理；

（4）包含多种上述类型的混合推理。

贝叶斯网络的优点：

（1）直观易懂，方便人们讨论交流和建立模型。贝叶斯网络提供了人脑推理过程的一个模型，因为依赖和独立关系是人们日常推理的基本依据。而且人类知识的基本结构也可以用依赖图来表达。贝叶斯网络以图形来表示各个因素，能明确揭示模型中变量集与信息流之间概率相依性。既简洁又直观，强调变量之间关系，并表明全部问题概率描述。

（2）具有双向推理能力，已有很成熟的算法融合新加入的证据，通过后验概率预测各原因对结果的重要性，不仅可以迅速地进行安全性决策，实施安全性措施，同时可用于寻找系统薄弱环节，为复杂系统安全性措施的制定提供可靠的依据。

（3）多状态系统。故障树分析只能处理二态系统，即正常和故障两种状态。但贝叶斯网络不受此限制。当系统或部件呈现多态性时，只需修改相应的节点属性。

（4）相关失效。网结构可以很好描述节点之间的相关性和相关失效。

（5）严格的数据理论。适合于计算机处理便于更新。

贝叶斯网络的缺点：

（1）需要将随机变量状态空间限定为独立状态。

（2）随着分析规模的扩大，则需要输入的先验概率数据量越大，在数据缺乏的情况下只能利用专家的主观概率来作为先验概率。

（3）随着父节点的增多，条件概率表的规模会增加，使得推理计算过程很复杂。

（4）不能表达认知不全即带有部分信度的数据。

3 不确定性及敏感性分析

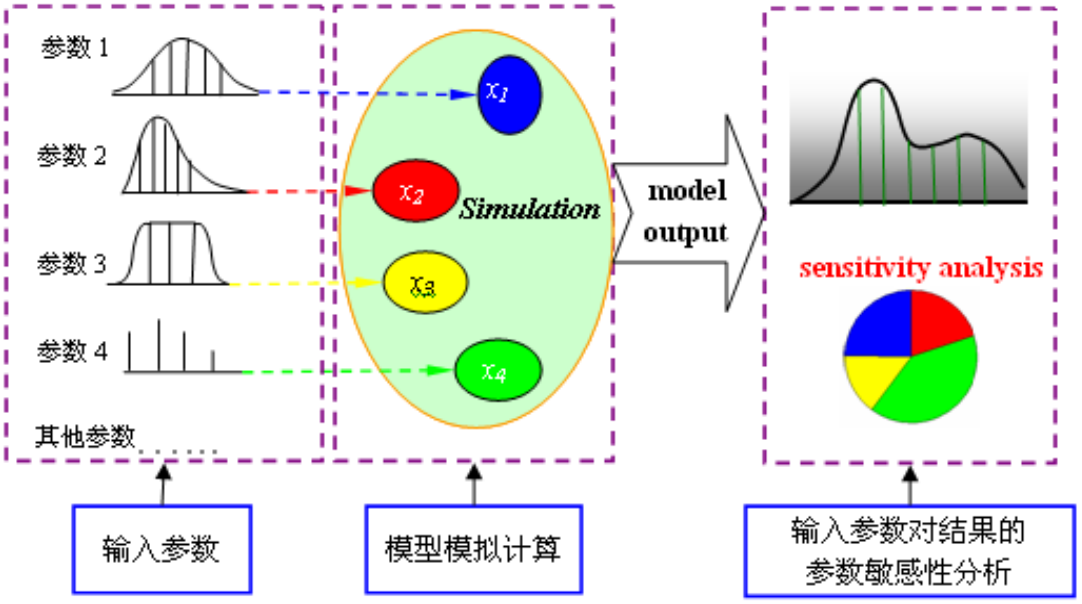
在风险分析中，我们常用一个确定的数值来描述事件或事故发生的概率和后果，但这往往是不精确的，因为事件的发生具有一定的随机性。在风险模型中给每个基本事件分配一个概率分布，随机不确定因此能通过逻辑模型来传播。因此，通过不确定性分析和敏感性分析可对风险模型的可靠性进行调查。理想状态下，不确定性和敏感性分析应先后进行。

不确定性分析研究决策问题中变量的不确定性，在此决策问题中由观察和模型代表知识基础。不确定性因素分析涉及到对风险分析结果的方差或偏离性进行明确。换言之，不确定性分析的目的是通过对相关变量中的不确定性进行量化以对决策做出技术贡献。不确定性的因素包括随机不确定性和认识不确定性。随机不确定性（Aleatory Uncertainty）是指事物行为本身的随机性。例如船舶与海洋工程结构物在一定时期内可能遭遇到的波浪载荷极值的概率分布、火灾发生位置、规模等。认识不确定性（Epistemic Uncertainty)是指表达知识的不完备性。例如极端环境下人员行为、结构疲劳机理等。

蒙特卡罗（Monte Carlo）模拟法是目前用于定量风险分析中参数不确定性研究的最常用方法之一。蒙特卡罗模拟方法首先对数学模型中每个存在不确定性的输入参数构造概率密度函数，对每个输入参数在概率密度函数基础上产生大量随机数，同时将每个随机数代入模型中产生大量输出值，对输出值进行统计分析得出结论。

与不确定性因素分析密切相关的是敏感性分析。敏感性分析是确定某个参数输入的改变

对风险等级影响的程度和显著性，即研究如何将（数值或其他）模型输出中的不确定性分摊到模型输入时的不确定性来源中，以估计不确定性影响因素对结果不确定性的贡献程度，并找出结果不确定性的主要贡献因素，从而更应确保其准确性。



附图 2.13 敏感性分析

在 FSA 评估过程中，所使用的数据具有一定的不确定性。例如，各类事故的发生概率及成本效益评估中的有关费用具有不确定性，如船舶修理费用与事故后果紧密相关。一般的，可以对以下内容进行敏感性分析：

1） 各项风险控制措施费用的最大和最小值的差异；

2） 各类事故发生频率的高低界限；

3） 各项风险控制方案风险降低情况的最大和最小值。

4 风险评估技术的适用性

在 FSA 危险识别和风险分析过程中，各类评估技术的适用性被描述为非常适用、适用或者不适用，具体见下表所示：

附表 2.1 各类评估技术的适用性

工具及技术	风险评估过程				
	危险识别（步骤 1）	风险分析（步骤 2）			风险评价
		后果	可能性	风险等级	
头脑风暴法	非常适用	适用	适用	适用	适用
德尔菲法	非常适用	适用	适用	适用	适用
检查表	非常适用	不适用	不适用	不适用	不适用
预先危险分析	非常适用	不适用	不适用	不适用	不适用
失效模式和效应分析	非常适用	不适用	不适用	不适用	不适用
危险与可操作性分析	非常适用	非常适用	不适用	不适用	非常适用

结构化假设分析	非常适用	非常适用	非常适用	非常适用	非常适用
风险矩阵	非常适用	非常适用	非常适用	非常适用	适用
人因可靠性分析	非常适用	非常适用	非常适用	非常适用	适用
故障树分析	不适用	适用	适用	适用	适用
事件树分析	不适用	非常适用	非常适用	适用	不适用
FN 曲线	适用	非常适用	非常适用	适用	非常适用
贝叶斯分析	不适用	不适用	非常适用	不适用	非常适用

附录 3　风险的度量与可接受衡准

1 风险的度量

风险的基本表达式为：

$$R = \sum_i (P_i \times \mathrm{C_i})$$

式中：P_i 表示单个事件的发生概率；C_i 表示该事件产生的预期后果。

一般的，衡量风险时主要考虑以下三种后果类型：（1）人员风险；（2）财产风险；（3）环境风险。

不同分析目的需要考虑不同的风险类型，同时应采用相应的风险度量单位。一项研究中可能需要同时对几种风险进行分析。

1.1 人员风险

人员风险是指个人和/或一群人所经受的死亡、伤害和不健康风险。风险这一概念综合了频率和所识别的伤害水平。通常将伤害水平的范围缩小到人命损失，因而风险通常以频率和死亡数量来表示。换言之，人员风险一般指人命丧失的风险，通常表示为每年的死亡人数。

人员风险最常用的两种风险度量是：个人风险和社会风险。

1.1.1 个人风险

个人风险（IR）是指个人在某一给定位置，例如船上的船员或乘客、或可能受船舶事故影响的第三方人员，所经受的死亡、伤害和不健康风险。通常IR系指死亡风险，并根据最大程度暴露的个人来确定。个人风险依具体人员和位置而定。

$$IR_{人员\mathrm{Y}} = F_{意外事件} \times P_{人员\mathrm{Y}} \times E_{人员\mathrm{Y}}$$

式中：F表示意外事件的发生频率；P表示导致伤亡的概率；E表示该风险下的暴露程度。

计算个人风险的目的是为确保可能受船舶事故影响的个人不暴露在过度风险之下。当需要评估某一事故对在某一给定位置上的某一具体个人的风险时使用这种风险表达方式。个人风险不仅考虑事故发生频率和后果（此处指死亡或伤害），还考虑该风险下的个人暴露程度，即该个人在事故发生时处于该给定位置的概率。举例说明：一个人在港口区域因液货船爆炸致死或受伤的风险，随着距离爆炸地点越近风险越高，随着该人在爆炸发生时处于该地点可能性越大风险越高。因此，在爆炸附近的工人的个人风险将高于在港口码头周边的居住者。

1.1.2 社会风险

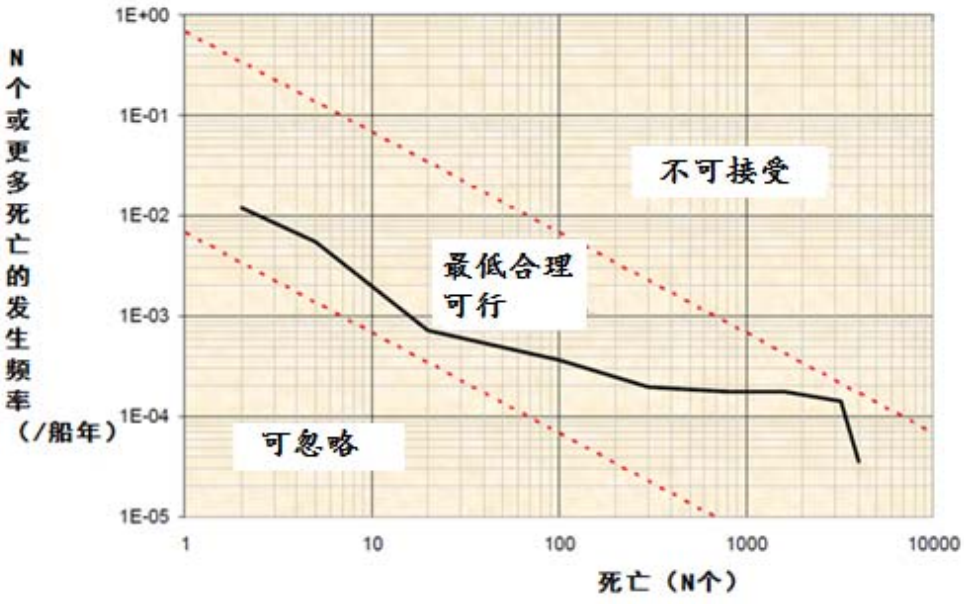
社会风险是指暴露于某一事故场景的一群人（例如船员、港口雇员或整个社会）经受的平均死亡风险。实际上，人们往往更关心事故对整个社会造成的后果，即事故对整个社会的总影响，这需要用社会风险来度量。社会风险是一种考虑多人死亡的风险，不仅要考虑非期望事件发生的概率，还要考虑处于危险状况的人员的数目。这里人员是一个群体概念，而不考虑群体中的独立个体。通常社会风险系为死亡风险，并通常用FN曲线或潜在人命损失

（PLL，人/船年）表示。

社会风险用于估算影响到多人的事故风险，例如：灾难，并且认识到风险规避或风险中立态度。社会风险包括对每一个人的风险，即使这个人仅有一次短暂的暴露在该风险下。在评估对一大群人受影响的风险时，建议使用社会风险，因为个人风险不足以评估对大量人群造成的风险。可生成对每一类型事故（例如碰撞）的社会风险，或可通过将所有事故组合在一起（例如：碰撞、搁浅、火灾）获得对某一船型的一个总体社会风险。

（1）**FN曲线**：清楚显示事故的累积频率和死亡数量之间的关系。一般社会对导致多人伤亡事故具有强烈的反感。显然人们的观念是一个导致1000人死亡的事故比1000个每个导致死亡1人的事故更坏。由FN曲线表示的社会风险显示了某一事故发生频率和死亡数量之间的关系（见附图3.1），其中纵坐标代表N个或更多死亡事故的累积频率分布，横坐标代表后果（N个死亡）。

FN曲线能表示各种死亡事件的累积分布，因此常用于表示社会风险。分别考虑每一个危险或事故场景，然后估算出死亡数量，从而建立FN曲线。根据所估算的事故场景的发生频率，可以计算并以FN曲线形式绘制出一个等于或超出所给定的死亡数量的总频率。



附图3.1　FN曲线

（2）潜在人命损失（PLL）：度量社会风险的另一个简单方法是PLL，其定义为每年死亡数量的预期值。PLL 是一种风险积分，即用后果和频率的乘积来表示的风险总和。积分表示包括了所有可能发生的不期望事件。

与FN曲线相比，这种方法不能显示高频率/低后果事故和低频率/高后果事故之间的区别：所有死亡均以同等重要性对待，无论其是发生在高死亡率事故还是低死亡率事故中。与FN曲线相比，PLL是一种更为简单的社会风险模式。PLL典型的度量方式是以每船每年的死亡

数来度量（人/船年）。

1.1.3 社会风险与个人风险的比较

以FN曲线表示的社会风险提供了比个人风险更为全面的风险概况。FN曲线使人们不仅可对平均死亡数进行评估，还可对一次性造成多人死亡的灾难性事故进行评估。

但是，与个人风险不同，FN曲线和PLL值都不显示某一特定风险的区域分布。社会风险代表了对一（大）群人的风险。在这群体中，对每个人的风险可能各不相同，这取决于例如在事故发生时每个人所处的不同位置。因此社会风险代表了一种平均风险。社会上普遍认为：仅仅获得一个最小的平均风险是不够的。还必需降低对暴露最厉害的个人的风险。因此适当的做法是既考虑社会风险也考虑个人风险，以获得对风险的全面了解。

社会风险难以应用于减少风险的目的，因为它是多维的。

1.1.4 风险等价概念

通常，对于工业中一个给定的活动，在事故导致的死亡和不同严重程度的伤害之间会有一定的关系。进一步说，降低死亡发生的措施也能减少伤害的比例。有一些意外事故各后果之间的比例研究的文献，例如：伯德和杰尔曼（1966）。MSC 68/INF.6文件中介绍了一种简明方法，建议在死亡、重伤和轻伤之间建立一种等价比：

（1）1个死亡等于10个重伤；和

（2）1个重伤等于10个轻伤。

2 风险的可接受衡准

风险可接受衡准（也叫风险可容忍度），表示在规定的时间内或某一行为阶段可接受的总体风险等级，它为风险分析以及制定减小风险的措施提供了参考依据，因此应在进行风险评估之前预先给出。此外，风险可接受衡准应尽可能地反映安全目标以及行为特征。风险可接受衡准的提出过程需注意以下几点：

（1）明确已定义的风险评估项目范围；

（2）必须确定风险比较的可度量参数；

（3）必须为待评估系统性能有效性提供输入。

衡量风险的方法有定性和定量两种方式，风险可接受衡准的表达方式应与之适应。但无论是定量表达还是定性表达，都必须包括以下几点：

（1）风险可接受衡准的制定应满足工程中的安全性要求；

（2）公认的行业标准；

（3）偶发事件及其效应的知识积累；

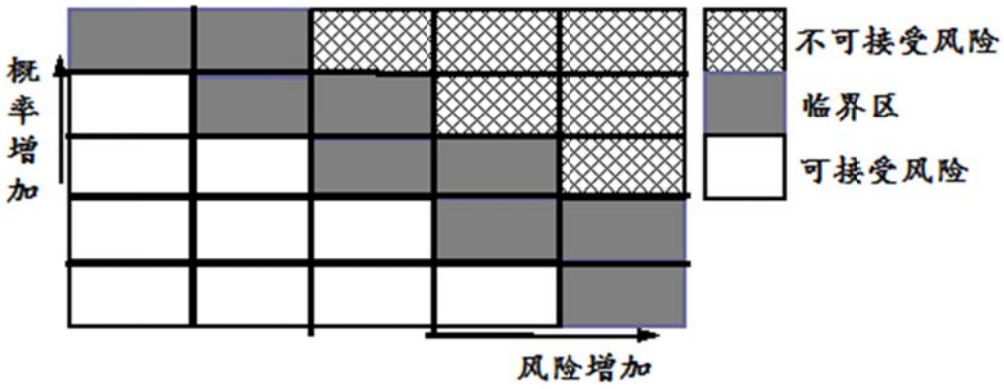
（4）从自身活动和相关事故中得到的经验。

2.1 风险矩阵

将事故发生的概率和相应的后果置于一个矩阵中，该矩阵即为风险矩阵，如附图3.2所

示。风险矩阵分为以下三个区域：（1）不可接受的风险；（2）可接受的风险；（3）不可接受的风险和可接受的风险之间的临界区域。临界区域需要进行风险评估以决定究竟是否应该采取措施减小风险，或是否需要预先做进一步的研究。

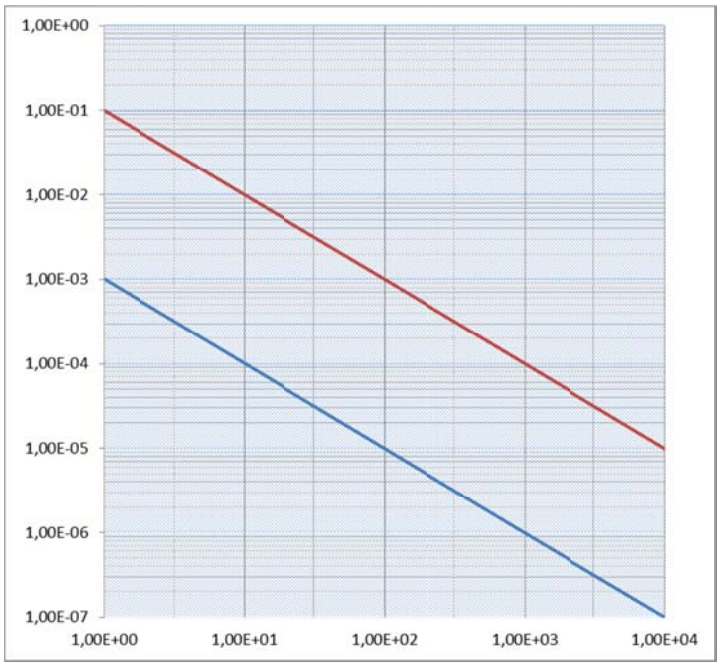
可接受的风险极限值通过在矩阵中定义可接受和不可接受风险区域来设定。风险矩阵可用于定性或定量的风险评估。若将概率粗略地以稀少和频繁。后果以小、中和灾难分类，可由风险矩阵表示定性表示定性分析的结果。定性分析中的分类标准是至关重要的。



附图 3.2　风险矩阵

2.2 FN曲线

FN曲线显示了某一事故发生频率和死亡数量之间的关系，其中纵坐标代表N个或更多死亡事故的累积频率分布，横坐标代表后果（N个死亡）。



附图3.3　FN曲线的上下限

FN曲线中的不可接受下限和可忽略上限的log-log斜线的斜率为-1，反映了对风险的喜恶

态度。其中不可接受下限为高于平均可接受风险（基准值）一个数量级，可忽略上限为低于平均可接受风险（基准值）一个数量级。（详见MSC-MEPC.2/Circ.12附录5的5.2节）

2.2 ALARP原则

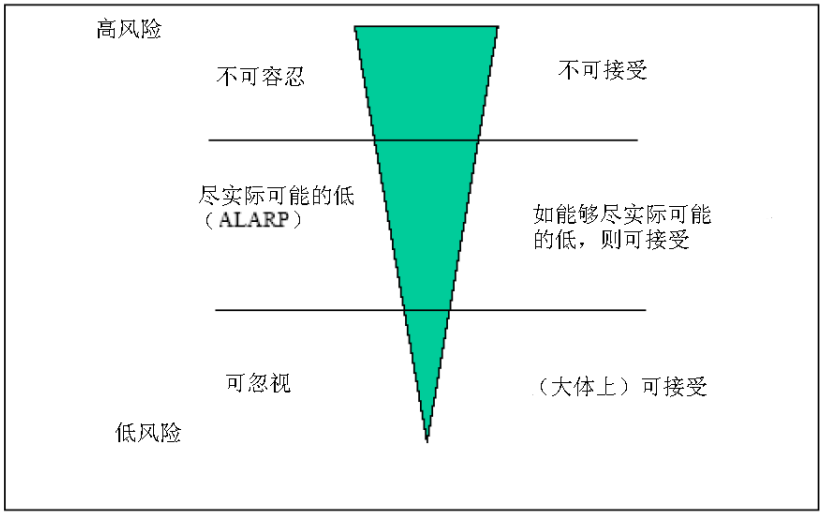
ALARP（最低合理可行）原则：系指一种根据风险水平判断是否需要采取风险控制措施的原则，对介于可忽略线和不可容忍线之间的危害，应在合理可行的前提下尽可能将风险降至最低。位于ALARP区域内的风险水平既非低到可以忽视也非高到不可接受，合理可行的前提主要是指采用成本效益分析来识别具有费效比的风险控制方案。

ALARP实际上是一项风险属性，其不能作为为减少风险而进行进一步资源投入的理由。ALARP原则用于风险评估程序，其要求尽可能降低风险。这意味着除非所获得效益与费用不成比例，否则必须减少属于该区域事件的风险。

通过不同形式的风险表示方式，可建立满足不同原则要求的风险衡准。普遍接受的原则是ALARP原则。风险衡准用于将风险水平转换成价值判断。

FSA的目的是将风险降低至可容忍的水平。在规则的制定与修改方面，如果建议的技术措施所花费的成本与其效益不成比例，则将会使该技术措施的制定降低竞争力。这在ALARP原则中得以实现，见附图3.4。

ALARP原则表明，在某一上限以上的风险水平是不可容忍的。在该区域内的风险没有任何理由让其存在，必须不计成本予以降低。该原则还表明，在某一下限以下的风险水平是“大体上可接受的”。在这个区域内的风险是可忽视的，无需提出额外措施以降低风险。如果风险水平位于该上限和下限之间，即在ALARP区域，应降低风险至满足经济性要求：应将风险降低至尽实际可能低的水平。“最低合理可行”一词解释为系指费效比高。风险降低措施应在技术上可行，且相关费用不应与所获得的效益不成比例。这点将在成本效益分析中予以审查。



附图3.4　ALARP原则

3 建议的风险评估衡准

3.1 个人风险

对于危险活动涉及的个人风险，经常使用其他行业现已接受的风险水平作为个人风险衡准。某一风险水平对于个人来说能否接受取决于两个方面：

（1）该风险是自愿承担还是非自愿承担的；和

（2）该个人能否控制该风险。

如果一个人自愿暴露于风险下且/或对风险有一定的控制，则所接受的风险水平高于非自愿暴露于该风险下或不能控制该风险的情况。例如：游船上的一名乘客或住在港口附近的一名居民对其所面临的来自于船舶和/或港口活动的风险很少能控制或无法控制。而船上的一名船员是自愿选择了其工作场所，并因其掌握的技能和培训，对其在工作场所中面临的风险有一定的控制。

可接受衡准的风险水平会大大低于日常生活中所经历的所有事故风险之和，但可能与其他非自愿来源所接受的风险相似。

附表3.1所列的风险接受衡准的上限和下限仅用于说明的目的，应在FSA研究中酌情选择具体值。

3.2 社会风险/FN曲线

对于一个给定的活动，通过考虑该活动的经济价值和其与国民生产总值的关系，确定一个平均可接受的潜在人命损失值（PLL）。这可针对船员/工人、乘客和其他第三方确定。如果某一风险高于平均可接受风险一个量级以上，则被定义为不可容忍，如果风险低于平均可接受风险一个量级，则该风险是可忽视的（大体上可接受）。这些上限和下限代表了ALARP区域，该区域因而跨越了两个量级，这与所公布的其他社会风险接受衡准一致。

建议采用该方法对不同船型和/或海事活动的社会风险接受衡准进行定义，因为该方法在确定社会风险的接受衡准时更加透明。在MSC72/16文件中，针对不同船型用该方法确立了社会风险衡准并用FN曲线表示。

3.3 风险接受衡准示例

3.3.1 人员风险

下列衡准广泛用于其他行业并已经在HSE（2001）中公布。

风险接受衡准总是系指对个人和/或一群人的总体风险。总体风险系指所有风险的总和，例如一个人在船上所面临的。因此总体风险包括诸如火灾、碰撞等风险。目前尚无衡准来确定具体危险的可接受性。因此，上述衡准可用于评估例如客船上总体风险的可接受性，但不能用于评估客船上因火灾而死亡的风险。

附表3.1　人员风险可接受衡准

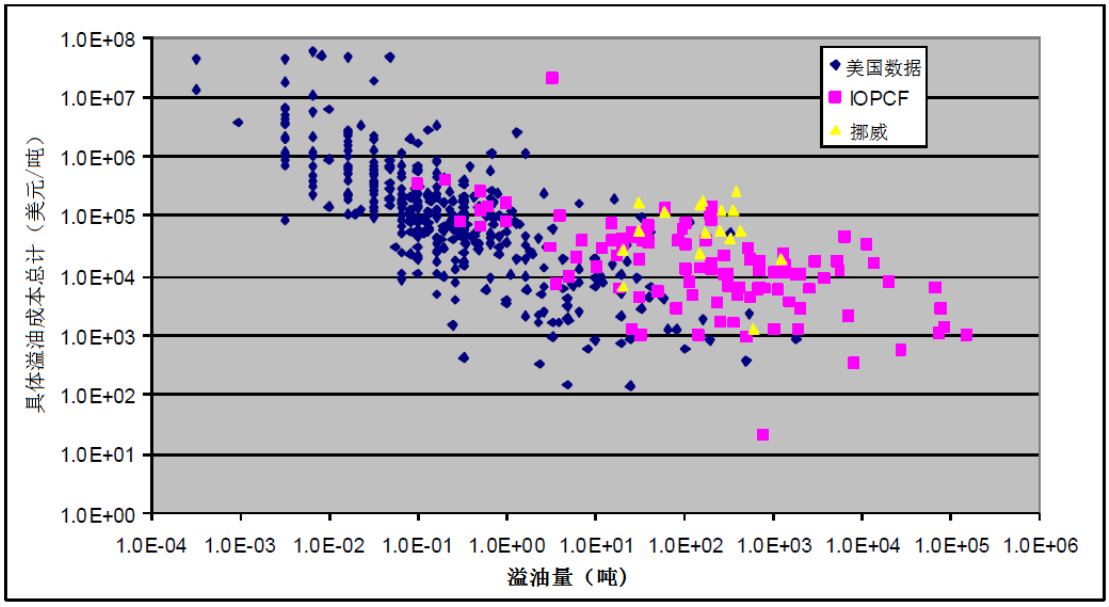
决策参数		接受衡准	
		ALARP区域的下限	ALARP区域的上限
		可忽略（大体上可接受）的死亡风险/年	最大可容忍的死亡风险/年
个人风险	对船员	10^{-6}	10^{-3}
	对乘客	10^{-6}	10^{-4}
	对第三方、岸上的公众	10^{-6}	10^{-4}
	对新船的目标值*)	10^{-6}	上述值应降低一个量级
社会风险	对上述人员群体	按MSC 72/16采用经济参数推导得出	

*)虽然建议上述个人风险的最大可容忍衡准适用于所有船舶，但按MSC 72/16文件，建议对新船的FSA研究设置更为严格的目标。

3.3.2 环境风险

当需要考虑由于溢油而引发的环境风险时，本小节提供了应遵循的一般方式。

溢油的赔偿成本可通过现有的一些溢油数据库获取。附图3.5为溢油数据库的每吨溢油具体成本的数据（摘自MEPC 62/INF.24文件的图5）。FSA评估人员可以用新的溢油数据修正该数据库，但所作修正应做明确记录。



附图3.5　2009年所有具体溢油成本数据（每吨溢油成本，以美元计）

附表3.2概括了从溢油数据库得出的一些回归公式，式中V为溢油量，以吨计。

附表3.2　从溢油数据库得出的回归公式

溢油量	F(V) = 溢油总成本（TSC） （2009年美元币值）	参照资料
所有溢油	$62{,}275\ V^{0.5893}$	MEPC 62/INF.24
V > 0.1吨	$42{,}301V^{0.7233}$	MEPC 62/18[1]

只要是有据可查的数据，FSA分析可以自由使用其他回归公式。例如，如果FSA只针对小规模溢油，提交者可以对数据进行筛选，并自己进行回归分析。

建议FSA分析使用下述公式估算溢油成本（SC）：

$$SC(V) = F_{Assurance} \times F_{uncertainty} \times f(V)$$

式中：

系数$F_{Assurance}$：表示社会花钱防止事故的意愿，$F_{assurance} \geq 1$；

系数$F_{Uncertainty}$：表示所发生溢油事故的成本信息不确定性，$F_{uncertainty} \geq 1$；

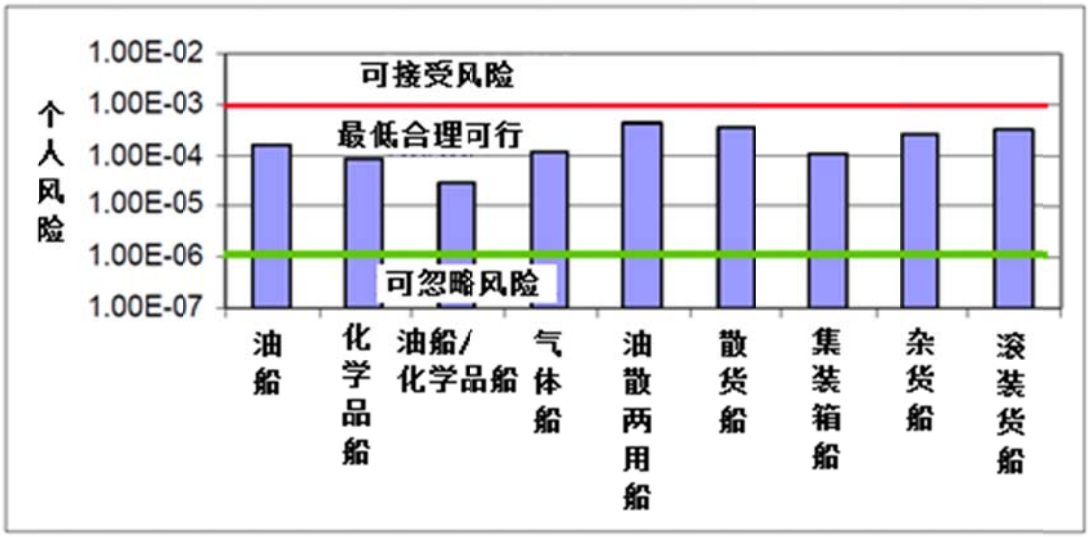
溢油量决定的总成本函数$f(V)$：表示溢油的单位成本随溢油量下降（以美元/吨计）。

在FSA评估报告中应对$F_{Assurance}$和$F_{Uncertainty}$的取值做出详细说明。溢油事故的发生频率（每船年）设为f_i，则最终溢油成本（每船年）为：

$$PSC = \sum_i f_i \times SC(V_i)$$

4 已有案例的计算结果

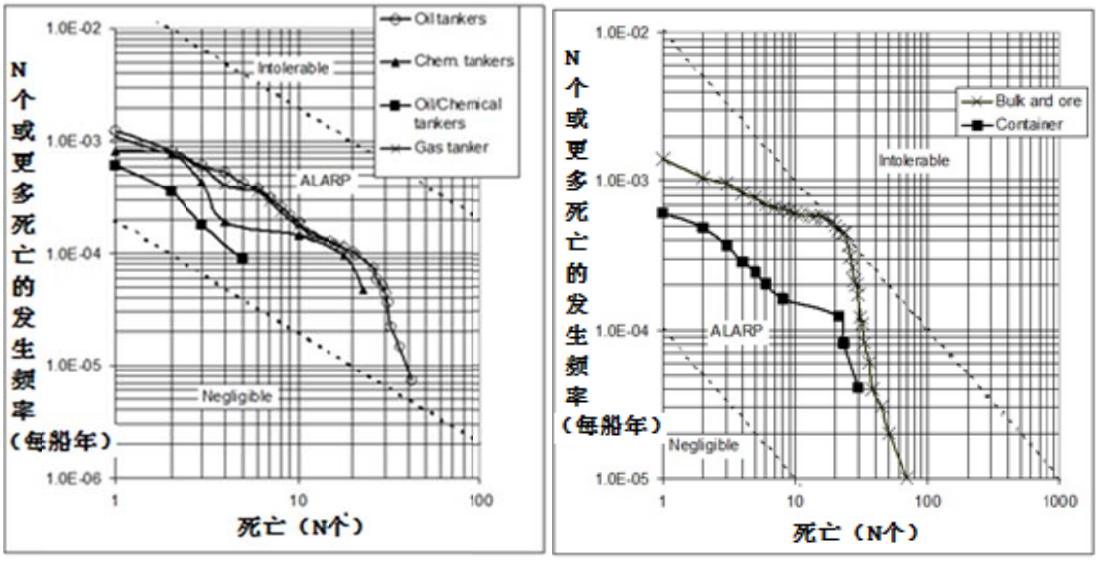
现有船舶的个人风险的计算结果示例：



附图 3.6 不同类型船舶的个人风险（摘自 MSC72/16）

[1] 在最新数据集基础上进行回归。

一些船舶的社会风险的计算结果示例：



附图 3.7 不同类型船舶的社会风险（摘自 MSC72/16）

已有的一些 FSA 应用案例结果表明：多数类型船舶的风险在 ALARP 区域，因此费效比或成本有效性是判断是否采纳建议的基础。针对某类型船舶的一个 FSA 评估，没有必要分析所有类型的事故场景，因此船舶的总风险可能仍是未知。决策建议以 RCO 的成本有效性为基础，例如，ECDIS 的建议只基于搁浅事故风险的降低。而风险的可接受衡准采用 ALARP 原则。

附录 4　风险控制措施的属性

1 A 类属性

1.1　**预防性风险控制**是指由风险控制措施减少事件发生的概率。

1.2　**减缓性风险控制**是指由风险控制措施减轻事件或后续事件（如发生）后果的严重性。

2 B 类属性

2.1　**工程性风险控制**系指在设计中纳入安全装置（内置或外加的），这类安全装置是保证安全的关键装置。如果缺少这一装置，将导致风险达到不可接受的水平。

2.2　**内在风险控制**系指在最高层方案设计时作出限制潜在风险水平的选择。

2.3　**程序性风险控制**系依靠操作人员通过按照规定的程序行事来控制风险。

3 C 类属性

3.1　**分散风险控制**系将控制以不同方式分布于系统的各方面。集中风险控制系将控制以类似方式遍及系统的各方面。

3.2　**冗余风险控制**系风险控制能承受风险控制的失效，而单一风险控制系风险控制难以承受风险控制的失效。

3.3　**被动风险控制**系不需采取行动来实施风险控制措施，而主动风险控制系通过安全设备或操作人员的动作来进行风险控制。

3.4　**独立性风险控制**系风险控制措施对其他要素没有影响。

3.5　**依赖性风险控制**系风险控制措施可能对风险贡献树的其他要素产生影响。

3.6　**有关人为因素**系需要人为行动来控制风险，但人为动作的失误本身不会造成事故或使某一事故继续发展。

3.7　**关键性人为因素**系指人为行动对控制风险有重大作用，即人为行动的失误将直接造成事故或使事故继续发展。一当确定为关键性人为因素，应在风险控制措施中对人为行动（或关键性任务）作出明确规定。

3.8　**可审核或不可审核**表示风险控制措施能被审核或不能被审核。

3.9　**定性或定量**表示风险控制措施是基于定性或定量风险评估。

3.10　**常规或新颖**表示风险控制措施是否系现有海上技术或操作的延伸，新颖表示该措施是新的。不同阶段判定是否新颖可能不同，例如某一措施对航运界可能是新的，但对其他工业界却是常规的，或对航运和其他工业界都是新颖的。

3.11 **成熟或不成熟**表示风险控制措施所依据的技术在有效性和基本成本方面是否都已成熟。不成熟即或者技术尚不成熟但预期将发展成熟，或者预计基本成本可能在给定的时间内降低。考虑这一属性的目的是希望提出和产生有远见的方法和方案。

附录 5 人因可靠性分析

1 通则

1.1 目的

1.1.1 人因可靠性分析用于评估人为因素对系统性能（故障）的影响，特别是在定量风险评估系统故障发生频率时。在船上，人具有较大的自由度来影响系统性能，因此在 FSA 的开始阶段就需要考虑进行顶层任务分析。

1.1.2 根据 FSA 评估要求，HRA 可开展定性或定量分析。HRA 过程通常包括下列各阶段：

（1） 识别关键任务；

（2） 对关键任务进行任务分析；

（3）人为错误识别；

（4） 人为错误分析；

（5） 人因可靠性的定量化。

1.1.3 如需采用全面量化的 FSA 方法，则可使用人因可靠性分析建立一套人为错误概率（HEP）以嵌入概率风险评估。但是，HRA 有可能会被过度强调。有实践经验的人承认，在任务分析和人为错误识别的早期定性阶段反而可获得更大的效益。在这些领域耗费的精力会获得收益，是因为 HRA 仅在为调查研究选择了正确的关注区域方能成功（像 FSA 研究一样）。

1.1.4 还有必要牢记，对于最后一阶段的 HRA，即：对人的可靠性进行量化，目前的可用数据是有限的。尽管已建立了几个人为错误数据库，但其中包含的数据对海事行业来说还是太少了。在有些情况下，当 FSA 需要来自 HRA 的定量结果时，专家判断可能是获得合适数据的最适当的方法。

1.2 HRA 的应用范围

1.2.1 如果某一系统中涉及影响系统性能的人的行动或干预，则只要对该系统实施 FSA，就应使用 HRA 导则。

1.2.2 附图 5.1 说明了如何将 HRA 纳入 FSA 过程。

1.2.3 与 FSA 一样，HRA 可应用于船舶设计、建造、维护和操作。

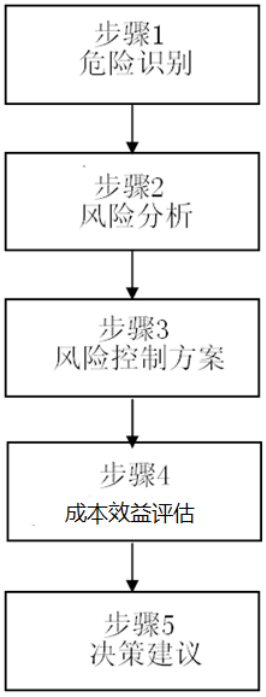
1.3 基本术语

错误产生条件：能对人的行为产生负面影响的因素。

人为错误：个人或一组人员对于可接受的或可取做法的偏移，从而导致不可接受或不期望出现的结果出现。

人为错误补救：本人或其他人在出现不期望出现的后果之前补救错误的可能性。

人为错误后果：人为错误产生的不期望出现的后果。

FSA 过程	纳入 HRA 所需的任务
	与人有关的危险（附录 5-2.1.2） 顶层任务分析（附录 5-2.1.2） 结果初步描述（附录 5-2.1.3） 对关键任务的详细任务分析（附录 5-2.2.2） 人为错误分析（附录 5-2.2.3） 人为错误量化（附录 5-2.2.4） 针对人为因素的风险控制方案（附录 5-2.3.2）

附图 5.1 将 HRA 纳入 FSA 过程

人为错误概率：定义如下：

$$\text{人为错误概率} = \frac{\text{人为错误的已发生量}}{\text{人为错误的可能发生量}}$$

人的可靠性：一个人（1）在要求的时间段内（如果时间是一个限制因素）正确开展系统所要求的活动和（2）不会开展有害于系统的额外活动的概率。人的不可靠性与这个定义相反。

行为形成因素： 对人的行为会有正面或负面影响的因素。

任务分析：用于比较系统要求和操作者能力的技术综合，通常目的是为了改进操作， 例如，通过减少错误实现这一目的。

1.4 方法

可通过下列几种方式将 HRA 纳入整个 FSA 过程：

（1） 与步骤 1 一致，识别关键的人的任务；

（2） 与步骤 2 一致，进行风险评估，包括详细任务分析、人为错误分析和对人的可靠性进行量化；和

（3） 与步骤 3 一致，制定风险控制方案。

1.5 问题界定

在对问题进行界定时可额外考虑如下人为因素：

（1） 个人因素， 例如压力、疲劳；

（2） 组织和领导因素， 例如定员；

（3） 任务特征，例如任务复杂性；和

（4） 船上工作条件，例如人机界面。

2 HRA 的步骤

2.1 步骤 1——危险识别

2.1.1 范围

2.1.1.1 本步骤的目的是识别关键的潜在人的作用，如果其未正确发挥作用，会导致系统故障。这是一个广泛的范围界定，目的是识别需要进一步调查的关注区域（例如整个任务和大型子任务）。

2.1.1.2 识别人的危险系指对人为错误在正常和紧急操作中如何促成事故发生进行系统性识别。可通过 HAZOP、FMEA 等方法进行识别，此外建议进行高层功能任务分析。本节讨论的是专门处理和识别人的危险的相关技术和方法。

2.1.2 危险识别方法

2.1.2.1 为进行人的危险分析，首先必须对系统进行建模，以识别船员从事的正常和应急操作任务。可通过高层任务分析（见本附录第 3 节）实现这一点，该方法对作为作业目的的主要人的任务进行识别。开展一项任务分析需要搜集相关数据和信息，例如：访谈、观察、关键事件，这些方法中的许多都可以用来直接识别关键任务。此外，还有其他许多信息源可以参考，包括设计信息、以往经验、正常和应急操作程序等。

2.1.2.2 本阶段目的是识别那些需要进一步关注的关键的人的作用。因此一旦列出主要任务、子任务和其相关目标，就需要对每一任务识别可能导致人为错误发生的因素以及随之产生的潜在危险。有许多技术可用于这一目的，包括 HAZOP、危险检查表等。与人有关的风险示例见本附录的第 5 节，其中列出了各种导致不符合标准行为产生的因素。

2.1.2.3 对所识别的每项任务和子任务的相关危险及其相关场景应按严重程度进行定级，定级方式同本指南附录 1 的第 3 节所述。

2.1.3 结果

步骤 1 的输出是系列活动（任务和子任务）以及每项活动相关的风险定级表。该定级表需要与 FSA 过程中生成的其他列表结合使用，因此应按通用模式编制。只需对关键任务的少数几个最严重的危险进行风险评估，对次关键任务无需进行进一步检查。

2.2 步骤 2——风险分析

2.2.1 范围

步骤 2 的目的是识别人为因素对系统安全造成高风险的区域，并对影响风险等级的因素进行评估。

2.2.2 详细任务分析

2.2.2.1 在这一阶段，应对关键任务进行详细任务分析。如果任务涉及的决策多于行动时，则更适合进行认知任务分析。本附录第 3 节总结了用于分析决策型任务的扩展任务分析。

2.2.2.2 任务分析应在所有重要子任务已经识别后才进行。所应达到的细节水平应视所调查的操作的重要程度而定。一个较好的通用规则是：所需的细节量应足以提供与 FSA 其他环节所提供的信息同样程度的信息。

2.2.3 人为错误分析

2.2.3.1 人为错误分析的目的是生成潜在人为错误列表，这些潜在人为错误会导致所关注的不期望出现的后果产生。为了帮助进行这一过程，附表 5.1 列出了一些典型的人为错误示例。

2.2.3.2 一旦识别了所有潜在错误，通常按下列标准对其进行分类。通过这种分类能够识别出必须解决的人为错误关键子集：

（1） 导致人为错误产生的原因；

（2） 操作者或其他人补救错误的可能性（其中包括考虑某单一人为错误是否会导致不期望出现的后果产生）；和

（3） 错误的潜在后果。

2.2.3.3 通常进行定性分析就已足够。可使用附表 5.2 所述的补救/后果矩阵进行简单的定性分析。如有必要，可通过对可能产生的后果和补救水平进行评分建立更详细的矩阵。

2.2.4 人为错误量化

2.2.4.1 当定量 FSA 中需要输入人为错误概率（HEP）时，要对人为错误进行量化。进行人为错误量化有许多种方式。

2.2.4.2 在有些情况下，由于难于获得可靠的海事行业人为错误数据，因此可能需要使用专家判断技术来得出人为错误概率。专家判断技术可以分为 4 类：

（1） 成对比较；

（2） 排序和评级程序；

（3） 直接数值估算；

（4） 间接数值估算。

向各专家提供全面透彻的任务定义，这点尤为重要。定义不充分会不可避免地导致估算不充分。

2.2.4.3 绝对概率判断（APJ）是一个很好的直接方法。它可以以各种形式使用，从单一专家评估到对多组人员的估算进行数学上的合计。其他以各种专家判断为中心的技术包括：

头脑风暴、共识决策、德尔菲法、以及名义群体技术。

2.2.4.4 可以通过获取历史数据和通用错误概率来替代专家观点。HRA 的两种主要方法是人为错误率预测技术（THERP）和人为错误评估和减少技术（HEART）（见本附录第 4 节），这两种方法都含有人为错误概率数据库（主要针对核工业）。

2.2.4.5 人为错误率预测技术（THERP）

THERP 是桑迪亚国家实验室的斯旺和古特曼（1983）为美国核管理委员会开发的，并已成为最广泛使用的人为错误定量预测技术。THERP 既是一项人的可靠性技术也是一个人为错误数据库。其使用概率树和依赖关系模型对人为错误建模，但也考虑到了行为形成因素（PSF）对行动的影响。该技术主要依赖于其人为错误概率数据库。该技术被视为对高度程序化活动中的错误进行量化特别有效。

2.2.4.6 人为错误评估和减少技术（HEART）

HEART 是由威廉姆斯（1985）开发的一项技术，其考虑到了特定的人体工程学、任务和环境因素对行为的负面影响。其对每个因素单独对行为的影响程度进行量化，并按对某一特定任务所识别出的各个因素发生概率的乘积来计算人为错误概率。

2.2.4.7 HEART 提供了有关人为错误补救性风险控制选项的具体信息。其关注于导致人为错误的 5 种特别原因和促成因素：系统知识缺陷、响应时间不足、系统反馈薄弱或模糊、需要操作者做出重大判断、以及对任务、健康欠佳或环境的警觉水平。

2.2.4.8 在应用人为错误定量技术时，重要的是考虑到以下几个方面：

（1） 人为错误的量级针对大多数应用情况是足够的。对人为错误的量级进行“粗略”估计就已足够。建模和定量的不确定性会使 HEP 出现偏差。应进行最终的敏感性分析以说明不确定性对所估算的风险的影响。

（2） 如果人为错误定量技术用以进行比较分析而非精确量化则会非常有效。人为错误定量技术可用于支持对各种风险控制选项的评估。

（3） 定量分析的细节应与 FSA 模型的细节水平保持一致。HRA 不应比 FSA 的各项技术要素更加详细。应基于活动对所分析的风险、系统或操作的贡献来选择细节水平。

（4） 所选的人为错误定量工具应适合分析的需要。目前可用的人为错误定量技术非常多。选用技术时应评估其一致性、可用性、结果的有效性、有用性、是否能有效使用 HRA 的资源以及该技术的成熟度。

2.2.5 结果

2.2.5.1 本步骤的输出包括：

（1） 对关键任务的分析；

（2） 识别与这些任务有关的人为错误；和

（3） 评估人为错误概率（可选项）。

3.5.2 然后应将这些结果与 FSA 步骤 2 其他地方识别出的高风险区域结合考虑。

2.3 步骤 3——风险控制方案

2.3.1 范围

步骤 3 的目的是考虑在评估技术、人、工作环境、人员和管理相关的风险控制方案时如何将人为因素纳入考量。

2.3.2 应用

2.3.2.1 针对人与系统的相互影响方面的风险控制可采用与制定其他风险控制措施所用方式同样的方式。所制定的措施应能：

（1） 减少故障发生频率；

（2） 减轻故障的影响；

（3） 缓解故障发生的环境；和

（4） 减轻事故后果。

2.3.2.2 正确应用 HRA 会发现技术创新也会带来问题，这些问题在仅对技术因素进行 FSA 评估时会被忽略。典型的例子是：采用高度自动化会导致长时间的低工作量，这从而会导致当有需要时，无能力作出正确响应，或甚至为使工作变得更有趣采取“冒险行为”。

2.3.2.3 在进行涉及人的活动的风险控制时，重要的是认识到可能有必要采取不止一种级别的风险控制措施。这是因为人的活动涉及范围很广，从日常操作直到高层管理。第二，还必须强调，需要关注系统是否按人体工程学和人为因素原则进行了很好的设计，以提高操作安全和性能水平。

2.3.2.4 与本指南的图 2.6.4 一致，对人的作用的风险控制措施可分为如下 4 个领域：（1）技术/工程子系统、（2）工作环境、（3）人员子系统和（4）组织/管理子系统。

2.3.2.5 一旦初步规定了风险控制措施，重要的是对人对系统的干预进行重新评估，以评估是否产生了新的危险。例如，如果采取了一项使某项任务自动化的决定，则对该新任务将需要重新评估。

2.3.3 结果

本步骤的输出为上述 4 个领域的风险控制方案，从而便于将与人有关的风险纳入 FSA 步骤 3。

2.4 步骤 4——成本效益评估

对本节无需具体的 HRA 导则。

2.5 步骤 5——决策建议

正确使用 HRA 研究结果会有助于在整个 FSA 研究中做出一套平衡的决定和建议。

3 任务分析概述

3.1 顶层任务分析

3.1.1 在这里顶层任务分析系指一种任务分析类型，其能使分析者获得对完成某一特定任务所需执行的主要功能的一个全面但浅显的了解。

3.1.2 可按如下方式进行顶层任务分析：

（1） 根据任务所需达到的具体操作目标来描述系统内的所有操作；和

（2） 将目标与一般操作、应急程序、维护和补救措施联系起来考虑。

7.1.3 用分级形式或表格形式对该分析进行记录。

3.2 详细任务分析

3.2.1 详细任务分析的目的是为识别：

（1） 所完成的总体任务（或工作）；

（2） 子任务；

（3） 所有对该任务有贡献的人员及其作用；

（4） 工作是如何开展的，即在正常和紧急情况下的工作方式；

（5） 所采用的任何控制、显示方式、工具等；和

（6） 影响行为的因素。

3.2.2 有很多任务分析技术——柯文和安斯沃斯（1992）中列出了 20 多种。他们认为，可将最广泛使用的分级任务分析（HTA）作为应用其他技术的框架：

（1） 数据收集技术，例如：活动采样、关键事件、问卷调查；

（2） 任务说明技术，例如：图表和网络技术、表格式任务分析；

（3） 任务模拟方法，例如：计算机建模和模拟；

（5） 任务行为评定方法， 例如：管理和失察风险树；和

（6） 任务要求评估方法，例如：人体工程学检查表。

3.3 扩展任务分析（XTA）

3.3.1 传统任务分析的设计是为调查手动操作任务，而对分析思维判断任务，如航行决策，不是十分有用。如果关注点更多的放在理解为什么做出这样的决定而非开展了哪些行动，可采用扩展任务分析或其他认知任务分析（见安内特和斯坦顿，1998）。

3.3.2 XTA 用于找出支撑所研究任务决策过程的逻辑基础。对包含 XTA 技术的活动的描述见约翰逊和约翰逊（1987）。这些活动可归纳为：

（1） 访谈。访谈者询问哪些情况会导致某一行动能够或无法履行，以及情况的变化会如何影响决定。访谈者对该个人的意图进行审查，以确保该局面的所有相关方面均已得到考虑。这能让分析人员很好地了解该个人正在做什么和为什么这样做，以及在不同情况下其行为会如何变化。

（2） 数据定性分析。对访谈进行录音、誊写和后续分析。社会科学中已建立了完善的定性数据分析方法，并且近来更多的在安全工程中使用。该技术（称为扎根理论）详见皮金

等人（1991）。

（3） 用适当的格式来呈现分析。XTA 中使用的呈现格式称作系统语法网络——这是联想网络的一种形式——见约翰逊和约翰逊（1987）。

（4） 验证活动，例如观察、假设。

4 人为错误分析技术概述

本节概述了两种主要的 HRA 定量技术（HEART 和 THERP）。CORE-DATA 提供了有关通用概率的数据。由于所有这些数据来源都是基于非海事行业的数据，使用时应谨慎。使用专家判断是一个很好的替代方法，可采用绝对概率判断技术来进行专家判断。

4.1 绝对概率判断（APJ）

4.1.1 APJ 系指使用专家判断来获得人为错误概率（HEP）的一组技术，详见柯文（1994）和李斯（1996）。当针对所考虑的情况现无相关数据，而只能采用某种直接数值估算形式来获得 HEP 值时，可采用这些技术。

4.1.2 现有很多技术可用，这使分析人员在进行不同类型的分析时有一定的灵活性。大多数技术避免了潜在的群体不利影响，例如群体偏见。使用的典型技术包括：德尔菲技术、名义群体技术和成对比较。使用过程中需要参与的专家数量和类型与 HAZOP 等危险识别技术所需的相似。

4.1.3 成对比较是一种重要的专家判断技术。使用这项技术时，每个人对任务做出一系列判断。然后对每个人的结果进行分析并推导出该任务 HEP 的相对值。使用这项技术取决于能否对至少两项任务进行比对并得出其 HEP。CORE-DATA 以及来自其他行业的数据可能会有用。

4.1.4 近年来这些技术的普及性已经有所下降，原因可能是这需要把相关的专家都聚集在一起。但不管怎样，这些技术非常适合在海事行业使用。

4.2 人为错误率预测技术（THERP）

4.2.1 THERP 是最著名和最常用的人的可靠性分析技术之一。由于所提供的信息量巨大，对这项技术的第一印象会使人望而却步。因为这项技术是一项涵盖任务分析、人为错误识别、人为错误建模和人为错误量化的综合性方法。但是其最为著名的是在人为错误量化方面，其包含了一系列人为错误概率（HEP）数据表和数据，这些数据对各种行为形成因素（PSF）的影响进行了量化。所给数据通常都很细节化，因此不是很容易转移到海洋环境下使用。

4.2.2 THERP 包含了一个依赖关系模型，用于模拟各错误之间的依赖关系。例如，该模型可用来评估犯错的舵手和注意到该错误的驾驶台高级船员之间的依赖关系。操作经验确实表明，在各人员之间以及在各任务之间存在相互依赖性的影响。虽然该模型是唯一的此类人为错误模型，但其尚未得到全面验证。

4.2.3 出于正确使用该技术所需的细节水平，进行全面的 THERP 分析会需要非常密集的资源。但是采用这一技术会促使分析人员对该系统以及潜在的人为错误进行更详细的了解。THERP 对人的建模方式同于 FSA 建模过程中的任何其他子系统。其步骤如下：

（1） 识别所有正在运行的受人的操作影响的系统；

（2） 将其列出并进行详细任务分析以分析所有影响系统运行的人的操作；

（3） 通过错误发生频次数据和专家判断以及经验确定人为错误概率；和

（4） 通过将人为错误纳入 PRA 建模程序来确定人为错误影响。

4.2.4 THERP 包括了一整套影响操作者层面上人为错误的行为形成因素（PSF）。这些行为形成因素包括经验、环境压力因素、工作环境、个人动机和人机界面。PSF 被用作估算人为错误的标称值和取值范围的基础。

4.2.5 使用 THERP 有如下好处。第一，它是进行相对风险比较的一个良好的工具。在进行 FSA 时可用它来衡量人为错误的影响，并可按风险的大小而不一定是按风险的概率或频次对风险控制选项进行评估。THERP 还可与 FSA 分析人员有时青睐的标准事件树/故障树建模法结合在一起使用。THERP 是一种透明的技术，它提供了一种评估技术系统中人为错误影响的系统性、有完好文件记录的方法。在系统分析的整个过程中都可使用 THERP 数据库或插入外部人为错误数据（如有时）。

4.3 人为错误评估减少技术（HEART）

4.3.1 HEART 作为能获得人为错误概率（HEP）的一种相对简单的方式而著名。构成该技术的基础是一个包括了对 9 种通用技术描述的数据库和一个相关的人为错误概率。分析人员将通用任务描述与所评估的任务进行匹配，然后根据所规定的错误产生条件（EPC）的存在与否和其强度修改通用人为错误概率。EPC 系指提高错误发生频次或概率测量值量级的条件，其与 THERP 中的行为形成因素（PSF）概念相似。已经提供了有关各 EPC 的列表作为该技术的一部分，但对所分析问题的影响强度由分析员来确定。

4.3.2 尽管 HEART 中的通用数据主要来自于核工业，仍可对 HEART 进行修正并在其他行业内应用。可通过增加新的 EPC，例如天气，来对该技术进行修改以适应海洋环境。但应用时应仔细，以避免最终对人为错误概率（HEP）的估算过于保守。

4.4 CORE-DATA（核心数据库）

4.4.1 CORE-DATA 是一个人为错误概率数据库。可通过英国的伯明翰大学访问该数据库。该数据库是由英国健康和安全执行委员会赞助开发的，并得到了来自核能、铁路、化学、航空和近海行业的支持，该数据库到 1999 年 1 月为止包含了近 300 个记录。

4.4.2 每一条记录都是对下述信息的综合，如：任务概述、起源行业、起源国家、采用的数据收集类型、数据库质量评级、操作描述、行为形成因素、样本大小和人为错误概率（HEP）。

4.4.3 对于来自其他行业的所有数据，将其转移到海事行业时需要仔细。有些近海数据可能最为有用。

5 与人有关的危险示例

当船员的能力不足以成功完成任务时，船上就会发生人为错误。尽管这可能是缺乏能力造成的，但更常见的情况是因为现有能力受到不利条件的限制。本小节举例（并非详尽）说明了对最佳操作会造成危险的个人因素和不利条件。应对所有与人有关的风险进行综合检查。在“设计阶段”该检查应主要关注于任务特征和船上作业条件，将其作为潜在的与人有关的危险。

5.1 个人因素

（1） 能力降低，例如；视力和听力减退。

（2） 缺乏动力，例如：因为缺少认真工作的动机；

（3） 缺乏能力，例如：缺乏航海技术、不熟悉船舶、不能流利使用船上所用的语言；

（4） 疲劳，例如：因为缺少睡眠或休息，就餐不规则；和

（5） 压力。

5.2 组织和领导因素

（1） 船舶管理不到位，例如：工作监督不到位、对工作缺乏协调、缺乏领导力；

（2） 船东管理不到位，例如：日常规章和程序不到位、缺乏维护资源、缺乏安全操作资源、对船舶组织的跟踪不到位；

（3） 配员不到位，例如：船员太少、船员未受过培训；和

（4） 日常规章不到位，例如：对航行、机舱操作、货物装卸、维护、应急准备的规定。

5.3 任务特征

（1） 任务复杂性和任务量，即：任务太复杂太多导致不能舒适地完成任务，或任务太简单太少导致产生厌倦；

（2） 对任务不熟悉；

（3） 任务目标不明确；和

（4） 不同的任务分散了注意力。

5.4 船上作业条件

（1） 例如噪音、振动、船体运动、气候、温度、有毒物质、极端环境载荷和夜间值班等因素造成的生理压力；

（2） 人体工程学条件，例如：工具不到位、照明不到位、信息不足或模糊、人机界面设计很差；

（3） 社会氛围，例如：交流不到位、缺乏合作；和

（4） 环境条件，例如：视线受限、交通过度密集、航道受限。

6 风险控制方案示例

6.1 技术/工程子系统

（1） 设备和工作处所的人体工程学设计

（2） 驾驶台、机器处所的良好布局

（3） 人-机器界面/人-计算机界面的人体工程学设计

（4） 对船员执行其任务的信息要求规定

（5） 对船舶系统和控制/通信设备操作的清楚标识和说明

6.2 工作环境

（1） 船舶稳性、纵摇和横摇情况下对作业中船员的影响

（2） 天气影响，包括雾，特别是对值班或户外任务

（3） 船舶位置、远海、接近港口等

（4） 对操作和维护任务以及对白天和夜间作业的适当水平的照明

（5） 考虑噪声水平（特别是对通信造成的影响）

（6） 考虑温度和湿度对执行任务时的影响

（7） 考虑振动对执行任务时的影响

6.3 人员子系统

（1） 为船员制定合适的培训

（2） 船员水平和构成

（3） 语言和文化因素

（4） 工作量评估（工作量太大和太少都会带来问题）

（5） 激励和领导因素

6.4 组织/管理子系统

（1） 制定有关招聘、选择、培训、船员水平和构成、能力评估等方面的组织方针

（2） 制定操作和应急程序（包括对拖船和救助服务的规定）

（3） 采用安全管理体系

（4） 提供天气预报/航线服务

附表 5.1 典型人为错误

手动操作错误	思维判断错误
遗漏的行动	缺乏对系统/情况的了解
过多/过少行动	注意力不集中
行动方向错误	不能记住程序
行动时间不对	沟通失败
行动对象错误	计算错误

附表 5.2 补救/后果矩阵

后果	补救：高	补救：低
高	可能需要考虑	必须考虑
低	无需考虑	可能需要考虑

附录 6 FSA 应用举例——原油船的 FSA 评估

1 概要

丹麦于 2008 年的 IMO MEPC 58 会议上提交了关于原油船的 FSA 研究报告（MEPC 58/INF.2）。该报告作为欧盟 SAFEDOR 项目研究的一部分，依据 IMO 综合安全评估指南，对原油船进行了较为完整的 FSA 评估，包括危险识别、风险分析、提出风险控制方案以及成本效益评估。本指南摘录该报告作为 FSA 应用举例。

2 步骤 1：危险识别

2.1 方式和方法

2.1.1 事故数据库

为进行风险分析，本评估发展建立了新的事故数据库 POP&C，该数据库主要是基于事件树和故障树理论，对 LRFP（Lloyds Register Fairplay）（该数据库现为 IHS Fairplay）和 LMIU（Lloyds Maritime Intelligent Unit）数据库进行修改得到。随着风险评估的深化，NTUA-SDL 对事故数据库 POP&C 进行了补充，使之有更多详细数据（主要为事故情况及其后果）来支撑风险评估。本评估应用最新版本的 NTUA-SDL 事故数据库进行历史数据的统计分析。

2.1.2 风险评估方法

本评估使用了事件树等方法来分析事件发生的原因和造成的后果。为确定事件发生的频率，使用了各种不同的方法，如故障树方法、基于历史数据的分析调查法、估算与模拟方法、类似船型的比较分析类推法以及专家意见法等。

2.1.3 范围界定

进行油船风险评估时首先要进行危险识别，以确定那些可能导致船体丧失水密完整性的危险，主要包括：

1）碰撞：在航行过程中，被撞或撞击其他船只，同时包括在抛锚时被其他船只撞击；

2）触碰：除了碰撞和搁浅以外可能发生的撞击浮式或固定的物体；

3）搁浅：触礁、碰撞海岸或者水下的物体；

4）火灾：火灾作为初始诱因可能发生的事故；

5）爆炸：爆炸作为初始诱因可能发生的事故；和

6）非事故性结构失效：船体结构出现裂纹甚至折断，影响船舶适航性。

本评估不考虑船体部件失效或机械故障引起的事故，同时也不考虑可能的海盗或战争造成的事故。

对大型油船进行综合安全评估时，涵盖的油船的载重量应大于 60000 吨。因此，本评估考察对象包括 PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX、VLCC 和 ULCC 等双壳船型。在分

析研究历史数据时，单壳的大型油船也在考虑的范围之内。

本评估主要考虑事故造成的环境破坏和人员伤亡。人员主要考虑对船员造成健康影响和伤亡风险。在碰撞风险评估时，考虑的是被撞船上船员伤亡，而撞击船的船员与乘客的伤亡风险不在考虑的范围之内。同时，如果船体结构破坏没有造成人员伤亡，则不考虑结构破坏造成的财产损失。

本评估不考虑遭遇恐怖袭击或导弹袭击的风险，同时特种环境条件下可能造成的职业病甚至是人员伤亡也不在考虑的范围之内。本评估主要考虑油船生命周期内处于营运阶段的风险，不考虑船在船坞时可能发生的风险。

不同的航道条件和港口环境条件，可能造成不同的事件序列。因此，在建立事件树模型时必须考虑船舶所处的环境。

本评估定义了四种不同的船舶运营环境，分别对应四种不同的速度范围，除此之外也考虑了船舶处于船坞或者干船坞时的状态。船舶处在不同的环境中，一旦发生事故，营救行动所需的条件以及可能造成的环境污染都是有差别的。主要的五种状态为：

1）“终端区域”（港口、抛锚处或者船舶靠港的过程中）：在船舶靠港过程中，船舶的速度非常低，即便发生事故造成的后果相对不那么严重；

2）拥挤的水域（12 海里范围内的近海）：拥挤水域船舶的交通密度往往很大；

3）远海航行（离海岸线的距离大于 12 海里的广阔海域）：船舶可以全速航行；

4）狭小的水域（河流、海峡或内陆水域）；和

5）船坞。

为计算船体出现破裂的概率，当数据库没有明确指出水密完整性是否丧失时，本评估对此作了一些假定以判断是否发生水密完整性的丧失。

2.1.4 一般假设

选取四种具有代表性的大型油船 PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX、VLCC 和 ULCC 作为研究对象，同时针对每种船型，分别选取尺度参数比较典型的船进行分析。

2.2 危险识别

2.2.1 危险识别过程

危险识别包括两个阶段：首先是分析统计资料，结合经验判断可能发生的主要危险；随后根据专家意见对识别的危险进行排序。基于 FMECA 分析方法，专家会议可给出关于危险的专家意见。本评估在利用 FMECA 进行分析时，对以下四种过程进行研究：

1）装载或卸载，包括油舱清洗和原油洗舱；

2）远海船船间的油转移；

3）近海和限制性海域的操作，包括处于领航的情况；

4）维修保养期间的操作。

主要是识别可能造成人员伤亡和环境破坏的危险，同时分析危险发生的原因和后果的严

重程度。分析结果以事故发生频率和后果严重性两个方面给出，其中评估后果时将人员伤亡与环境破坏分开考虑。为建立统一的参照标准，定义了频率指数（FI）和严重性指数（SI）：

附表 6.1 频率指数 FI 的定义与分级

FI	定义	频率（每船年）
8	1 艘船一周发生 1 次或 2 次	100
7	1 艘船每月发生 1 次	10
6	1 艘船每年发生 1 次	1
5	10 艘规模船队每年发生 1 次	0.1
4	100 艘规模船队每年发生 1 次	0.01
3	1000 艘规模船队每年发生 1 次	0.001
2	10000 艘规模船队每年发生 1 次	0.0001
1	5000 艘规模船队生命周期内（20 年）发生 1 次	0.00001

附表 6.2 严重性指数 SI 的定义与分级

SI	人员安全	环境破坏	财产损失（$）	死亡人数
1	1 人受伤	可忽略的泄露，无污染，无言中的环境或公共健康影响	30000	0.01
2	多人严重受伤	轻微泄露、可察觉的环境破坏	300000	0.1
3	1 人死亡或多人严重受伤	较大的泄露，生态系统短期破坏	3M	1
4	多人死亡	严重污染，生态系统一定时间内的破坏	30M	10
5	大量的人死亡	不可控制的污染，生态系统的长期破坏	300M	100

2.2.2 危险识别结果

根据油船所处的操作状态，专家确定了共有 81 种危险情况，分别为：航行状态下：36 个；装载/卸载状态下：30 个；船船之间油转移：8 个；维修状态下：7 个。

根据所定义的频率指数 FI 和严重性指数 SI，分别给出每种危险的 FI 值和 SI 值，从而确定了其风险指数 RI，其中最大值为 8。同时，定义 RI 大于等于 6，或者/同时 SI 大于等于 4 的危险为严重级别。

在造成人员伤亡的所有危险中，排列靠前的危险包括：

1） 停靠在港口的船舶在装载/卸载时发生爆炸；

2） 在航行过程中，由于沟通问题导致碰撞而后发生火灾/爆炸；

3） 油船在抛锚处遭受到漂浮船舶的撞击导致管道破裂而后发生火灾/爆炸；

4） 在船舶装载或卸载时，由于蒸汽控制系统失效或未安装该系统导致火灾/爆炸；

5） 在焊接修补时，由于没有足够的管道清理导致发生火灾/爆炸。

在造成环境破坏的所有危险中，排列靠前的危险包括：

1）停靠在港口的船舶在装载/卸载时发生爆炸；

2）由于人员沟通问题导致碰撞，高能量的冲击造成油泄露；

3）由于技术通信问题导致碰撞，高能量的冲击造成油泄露；

4）压载时，压力阀卡住导致油舱破裂；

5）在准备船船转运油时，碰撞导致燃油舱损坏。

2.2.3 一般事故场景

基于危险识别的结果，同时结合 1980 至 2007 年间 60000 载重吨以上油船的事故数据，确定需要考虑的事故主要有：碰撞、触碰、搁浅、火灾、爆炸和非事故性结构失效。

2.3 事故发生频率

本评估仅研究造成结构丧失水密完整性的事故。

2.3.1 历史数据分析

结合大型油船历史事故数据，分析确定不同事故种类的发生频率。统计 1980 年至 2007 年间共发生了 2033 起油船事故，分析了不同类型事故的数量分布和发生频率。1980 至 2007 年间，统计所有 60000 载重吨以上的双壳油船和非双壳油船，得到总船年为 N=38211.20。结合历史数据资料可以得到各类事故造成的人员受伤和死亡情况，计算得到事故发生的频率见下表所示：

附表 6.3 1980-2007 间各类事故造成的人员伤亡

事故种类	频率（次/船年）		受伤数目		死亡数目	
	所有事故	造成环境污染的事故	受伤人数	事故数	死亡/失踪人数	事故数
碰撞	1.59 E-02	1.02 E-03	2	3	55	7
触碰	7.04 E-03	6.80 E-04	0	0	0	0
搁浅	1.11 E-02	1.05 E-03	0	0	1	1
火灾	5.89 E-03	1.05 E-04	100	16	61	19
爆炸	3.01 E-03	1.57 E-04	30	10	119	31
结构失效	1.03E-02	1.33 E-03	0	0	8	2
总数			132		244	

2.3.2 事故发生频率

考虑到每类事故的发生频率随年份变化呈下降趋势，特别是 1990 年以后事故发生率下降趋势很明显。因此本评估中，取 1990 至 2007 年间的平均事故发生率作为每类事故的事故发生频率。

2.3.3 事件树模型中的输入频率

在建立事件树模型时，需要分别输入 6 类事故的发生频率。在确定碰撞、搁浅、触碰、火灾以及爆炸等事故的发生频率时，不需要考虑油船类型（单壳或双壳）。而在确定结构失效事故的频率时，由于壳型一定意义上决定了油船的内部结构，所以需要额外考虑双壳油船结构失效的频率。

结合大历史事故数据的分析，可以确定不同种类事故的发生频率。在 1990 年至 2007 年间，共发生了 845 起油船事故。通过分析可以确定这 6 类事故对应的事件树模型的输入频率，如下表所示：

附表 6.4 1990-2007 间各类事故的发生频率

可能发生危险的所有船=25780.22 船年（Na） 可能发生危险的双壳船=10377.87 船年（Nd）			
事故种类	发生次数	事件树输入频率（次/船年）	双壳船发生事故的频率（次/船年）
碰撞	265	1.03E-02	-
碰撞浮体或固定结构	96	3.72E-03	-
搁浅	193	7.49E-03	-
火灾	94	3.65E-03	-
爆炸	49	1.90E-03	-
非事故性结构失效	148	5.74E-03	1.93E-03
总数	845	3.28E-02	1.93E-03

2.4 后果评估

油船的总风险等于 6 类事故风险的总和，而其他事故造成的风险忽略不计。

2.4.1 船员死亡风险

通常以潜在人命损失（PLL，每船年）来衡量人员的死亡风险。在假定船员配置为 30 人的基础上，结合历史数据可以计算得出 PLL 值。

2.4.2 环境破坏风险

考虑到油船发生事故后可能会发生溢油，通常以预期的溢油量来衡量造成的环境破坏程度。分别通过统计四类油船的单个油舱室装载量以及这四类船的典型尺寸参数（按照 98% 装载量计），分别得到油船在载运时发生内壳破裂但未发生整船倾覆，和油船在载运时发生事故且整船沉没时，溢油量分别为 10726 吨和 152191 吨。并在事件树模型中将该两个溢油量数值作为输入值，以确定事故造成的后果。

2.4.3 经济损失

通过下表所示的油船和油价的典型价格数值，对油船沉没或造成的损失进行后果评估。

附表 6.5 油船和油价的典型价格数值

船型	油船价格（$）（假定船龄 5 年）	油价（$/吨）（2008 年 3 月时的值）
PANAMAX	50,000,000	923
AFRAMAX	65,000,000	
SUEZMAX	85,000,000	
VLCC	130,000,000	
平均值	82,500,000	

3 步骤 2：风险分析

3.1 构建事件树模型

不同的航道条件和港口环境条件，会造成初始事故发生后的后续事件序列的不同。构建

事件树模型时必须考虑油船所处的操作状态或水域环境，其对应油船四种不同的速度范围，除此之外还考虑了船舶处于船坞或者干船坞时的状态。

船舶处于不同装载状态时，发生事故后造成的后果是不同的，若发生原油泄露，预期的溢油量相差很大。所以构建事件树模型时必须考虑船舶装载状态的情况。

油船遭受撞击或油船撞击其他船只，都属于油船的碰撞事故，但是事故发生后造成后果是不一样的，构建事件树模型时需要分别考虑。

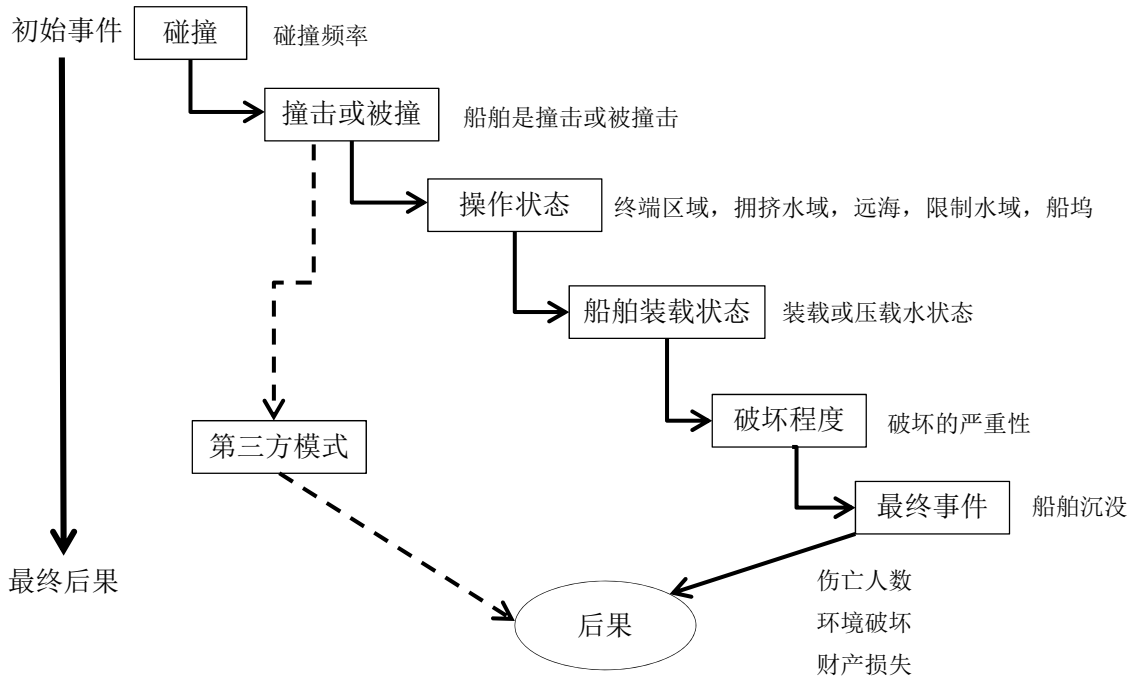
对于火灾来说，可能存在不同的火源情况；而对于爆炸来说，发生爆炸的位置不同造成后果也有差别。

2.4 风险模型——碰撞

碰撞事故包括两种情况：撞击其他船只和被其他船只撞击。在分别针对两条船单独统计分析时，一次碰撞事故可认为是两起事故。如果油船和其他类型船发生碰撞，那么针对油船进行分析时，可认为仅发生了一起油船事故。当两条油船发生碰撞，在针对其中的一条油船计算频率时要将原碰撞频率除以某一个值，以反映出撞击他船或被其他船撞击的概率是不同的。

在 1990 年至 2007 年间，根据 LRFP/LMIU 数据库，32%的油船事故是碰撞引起的，共发生了 265 起碰撞事故，其中后果比较严重的事故有 64 起，后果相对较轻的事故有 191 起，还有 10 起事故的后果情况数据库没有明确描述。有 8 起事故，造成了 2 人受伤、39 人失踪和 16 人死亡。另外，有 27 起事故发生了油料泄露，有 126532t 的溢油量。265 起事故中有 11 起在事故发生后又发生了火灾。

3.2.1 定性分析



附图 6.1 碰撞事件模型图

根据资料，大多数碰撞事故发生在交通拥挤水域、船舶航线有交叉和船速较大的时候。将碰撞事故作为事件树模型中的初始事件，结合碰撞的具体情况可以逻辑演绎出事件树的多个分支结构，主要考虑：撞击或被撞击，油船的装载状态以及所处的水域环境，油船的内壳是否发生破裂，如果发生破裂是否发生火灾爆炸等。由此建立的碰撞事故的风险模型如上面附图 6.1 所示。

3.2.2 定量分析

1）碰撞发生的频率

根据历史资料，涉及到油船的碰撞事故共有 265 起，计算得到的发生频率为 1.03E-2/船年。其中 24 起事故是两条油船发生碰撞，也即如果单考虑碰撞次数，事故共有 241 起，碰撞发生的频率为 9.35E-03/船年。

2）被撞或撞击他船的概率

有文献计算得到一艘船遭遇油船碰撞的概率为 0.252，并认为同一类型的船发生碰撞的可能性更大，因为他们可能在同一条航线上。考虑到油船的航速相对较低，油船遭遇碰撞的概率应该大于撞击其他船的概率。通过专家讨论，确定本评估中油船遭遇碰撞和撞击他船的概率分别为 0.8 和 0.2。而当油船撞击他船时，可以认为油船不会发生较严重的损坏。

3）操作状态或所处水域环境

基于历史数据，得到不同操作状态下发生碰撞的概率如下：

附表 6.6 不同操作状态下的碰撞概率

操作状态	发生碰撞的概率
港口码头等区域	0.30
拥挤水域	0.37
远海航行	0.26
限制水域	0.07
船坞	0.00

4）船舶装载状态

综合分析 LRFP 数据库资料，及考虑到非载运时船舶的操纵性更好，专家给出了事件树中负载和非负载对应的概率分别为 0.6 和 0.4。

5）船体外壳破裂

基于历史数据，计算得到船体外壳发生破裂的概率分别为

附表 6.7 船体外壳发生破裂的概率

操作状态	发生破裂的概率
港口码头等区域	0.46
拥挤水域	0.36
远海航行	0.46
限制水域	0.42

6） 穿透深度

根据文献关于油船破坏尺寸模型化研究结果，及基于破坏尺寸和穿透深度的相关性，计算得到船体内壳发生破裂的概率为 0.22。

7）损坏的严重程度

损坏严重或不严重是指某操作状态下船舶发生事故后丧失水密完整性或未丧失水密完整性，其概率值的确定依据 LRFP 和 LMIU 的数据。各种操作状态下的水密完整性丧失的概率为：

附表 6.8 各种操作状态下的水密完整性丧失的概率

操作状态	碰撞后发生火灾/爆炸且丧失水密完整性	碰撞后发生火灾/爆炸且未丧失水密完整性
港口码头等区域	0.03	0.00
拥挤水域	0.06	0.00
远海航行	0.23	0.03
限制水域	0.00	0.00

8）结果事件

对于船舶本身来说，发生碰撞后的后果为：船未沉没，仍漂浮在水面，可自航或实施拖航；被撞船完全沉没。

对于人员安全来说，基于历史数据，碰撞可能造成的伤亡情况为：

附表 6.9 碰撞事故造成的伤亡

船员人数=30	
碰撞	预期的人员死亡（船员人数的%）
发生火灾整船沉没	44%
发生火灾且船舶严重受损	14%
未发生火灾船舶严重受损	7%
没有严重的破坏	0
船舶未丧失水密完整性	0

对于环境破坏，主要是计算原油泄露后预期的溢油量。三种事故状态下的溢油量分别为：油船运载时发生内壳破裂但未发生整船倾覆，10726 吨；油船运载时发生事故且油船整体沉没，152191 吨；船发生轻微破坏，184.6 吨。

对于事故造成的经济损失，如果油船整体沉没，则经济损失即为油船的价格，去平均值为 82500000$；当油船发生严重事故但未整船沉没，假定造成的经济损失为油船价格的 5%，为 4125000$。

3.2.3 事件树模型

在定性分析碰撞事故的事件序列，以及定量分析各分支对应的频率，可以得到：

造成的船员死亡为：

$PLL_{碰撞}$=4.91E-03 人/船年

造成的环境破坏为：

$PLC_{碰撞}$=1.30E+01 吨/船年

最终建立的碰撞事件树见本附录后的图所示。

同理，对事故触碰、搁浅、火灾、爆炸、非事故性结构失效（NASF）以及船坞事故建立风险模型，在此限于篇幅不一一举例给出。

3.3 风险总和

基于对各类事故风险模型的计算结果，得到油船的总风险如下表所示：

附表 6.10 油船的总风险

事件	频率（次/船年）	PLL（人/船年）	PLC（吨/船年）
碰撞-被撞	8.24 E-03	4.91 E-03	1.30 E+01
碰撞-撞击他船	2.06 E-03		
和固定装置碰撞	2.43 E-03		1.09 E+00
和浮式结构物碰撞	1.19 E-03		3.17E-01
有动力搁浅	6.22 E-03	1.32 E-04	1.86 E+01
漂移搁浅	1.27 E-03		6.16E+00
内部火源导致火灾	2.86 E-03	2.34 E-03	2.35 E+01
外部火源导致火灾	3.65 E-05		
闪电导致火灾	7.29 E-05		
船坞中发生火灾	6.43 E-04		
航行过程中爆炸	1.48 E-03	5.07 E-03	1.23 E+01
船坞中发生爆炸	4.18 E-04		
非事故性结构失效	1.93E-03	1.94 E-04	1.44 E+00
总和		1.26E-02	7.63 E+01

通过上述风险分析，确定可能造成较严重人员伤亡的风险区域或事故场景为：1）油船遭遇其它船碰撞；2）内部火源引发火灾；3）爆炸。可能造成较严重溢油事故的风险区域或事故场景为：1）油船遭遇其它船碰撞；2）有动力搁浅；3）内部火源引发火灾；4）爆炸。

4 步骤 3：确定风险控制方案

通过头脑风暴的方法初步确定可能的风险控制措施，分别选出可以降低事故发生频率和减轻事故后果的措施，最终形成一个包含了所有控制措施的清单。随后进行风险控制措施的筛选，以确定一定数量的适用的风险控制措施。

本评估中，针对油船最初确定的控制措施有 79 项，依据 IMO 的准则初步确定那些费效比结果最不可能满足要求的措施并将其剔除（初步评估），然后针对相对数量比较少的措施进行更全面分析，最后项目组进一步将措施进行精简。在进行控制措施筛选是需要进行有效的排序，主要依据以下原则：1）预防性措施由于减缓性措施；2）设计措施优先于可操作性措施；3）被动系统优先于主动系统。

最终，本项目筛选确定了 9 项控制措施，如下表所示：

附表 6.11 提出的风险控制措施

	控制措施
RCO3	主动的操舵装置
RCO4	电子海图显示和信息系统
RCO5	速度传感器（辅助进坞）
RCO6	航行声呐系统
RCO7	改进设计以降低碰撞、搁浅的风险
RCO8	更加规范热加工过程
RCO9	轮机舱低压燃油管路的双套管保护
RCO11	机舱控制室增加紧急出口
RCO12	船体应力和疲劳检测系统

5 步骤 4：成本效益评估

5.1 降低的风险

对每一项风险控制措施进行单独分析，以确定降低的风险值。

（1）主动的操舵装置

为降低碰撞和搁浅的风险，针对操舵控制系统设置泵或者发动机的自动转换开关。咨询船舶控制系统领域的专家，可以确定在宽阔水域航行的船舶，用于操舵的泵/发动机仅有一个处于工作状态，而在窄小的水域或坐坞时通常有 2 个都处于工作状态。在窄小的水域或码头港口等区域，一旦发生泵/发动机失效或者电子设备故障，另外的一个泵可以正常工作，依然可以有效地控制操舵装置。

在宽阔水域航行的船舶，一旦发生泵或电子设备故障，视觉警报或者其它报警使领航员手动开启另外一个泵。也即通过实施该项风险控制措施，可以降低应急反应时间并降低发生人为失误的可能性，自动转换开关可以降低风险。

专家组通过德尔菲技术确定降低的风险，考虑到并不是所有的有动力搁浅都是操舵装置故障引起的，针对宽阔水域航行的船舶，通过设置主动的操舵装置，人员死亡的风险可以降低 10%。当油船撞击他船时，可以确定油船未发生人员伤亡。所以主要针对搁浅，利用搁浅事件树，重新计算风险值。计算方法如下：

分析事件树可以发现，有两种情况存在人员伤亡：1）拥挤水域的有动力搁浅；2）宽阔水域的有动力搁浅。采取的措施主要是针对宽阔水域的有动力搁浅，也就是说可以认为拥挤水域的有动力搁浅造成的人员伤亡并没有发生变化。对于搁浅来说，最严重的情况下人员死亡为 1，如果风险降低了 10%，那么事件树中宽阔水域有动力搁浅造成的人员死亡即为 0.9。计算过程见下表：

附表 6.12 提出的风险控制措施

平均值 （吨/次）	采取措施前 （人/船年）	采取措施后 （人/船年）	降低的风险 （人/船年）	降低的 风险值总和 （人/船年）	降低的风险 （25 年）
拥挤水域有动力搁浅	8.41E-05	8.41E-05	0	4.76E-06	1.19E-04
宽阔水域有动力搁浅	4.76E-05	4.28E-05	4.76E-06		

分析搁浅事件树可以发现发生溢油的事故场景相对比较多，但实施主动操作装置主要降低的是宽阔水域有动力搁浅的溢油风险，所以对应地进行计算，如下：

采取控制措施之前的溢油风险：6.233E+00 吨/船年；

采取控制措施之后的溢油风险：5.609E+00 吨/船年；

降低的风险值：6.233E-01 吨/船年；

25 年内降低的总的风险为：1.558E+01 吨/船

（2）电子海图显示和信息系统

专家意见认为采取风险控制措施后，对于有动力搁浅造成的风险可以降低 36%。针对搁浅，利用事件树计算降低的风险，有如下结果：

对人员伤亡风险来说，降低的风险为 4.7E-05 人/船年，在船 25 年的生命周期内降低的总的风险为 1.2E-03 人/船。对于溢油风险来说，实施控制措施降低的风险为 6.7E+00 吨/船年，在船的 25 年生命周期内降低的风险为 1.7E+02 吨/船。

（3）速度传感器（辅助进坞）

船舶坐坞辅助系统主要有三种类型：多普勒系统、船/陆地定位系统和岸边激光/雷达。分析触碰事故发现船舶在港口码头等区域发生触碰事故不会造成人员伤亡，所以无需考虑人员伤亡风险的降低。对于溢油风险来说，实施控制措施降低的风险为 1.4E-01 吨/船年，在船的 25 年生命周期内降低的风险为 4.0E+00 吨/船。

（4）航行声呐

航行声呐系统在游轮和一些小船上的应用已经有一段时间，但是对于一些大型油船，如 VLCC，在确认存在搁浅危险时，声呐系统可以提高其应对能力。

专家组利用德尔菲技术确定实施控制措施后，有动力搁浅事故造成的风险可以降低 15%。针对搁浅，利用事件树计算降低的风险，有如下结果：对人员伤亡风险来说，降低的风险为 2.0E-05 人/船年，在船 25 年的生命周期内降低的总的风险为 4.9E-04 人/船。对于溢油风险来说，实施控制措施降低的风险为 2.8E+00 吨/船年，在船的 25 年生命周期内降低的风险为 7.0E+01 吨/船。

（5）改进设计

为改进设计，相应地又可以细化风险控制措施：

i）RCO7.1 增加油舱分舱：对于 PANAMAX、AFRAMAX 来说，主要的油舱构造为 6

×2，SUEZMAX 的油舱构造为 6 个横向的舱壁和横中位置的 1 个纵向舱壁，共有 12 个油舱，而 VLCC 的油舱构造为 5 个横向舱壁和 2 个纵向舱壁，共 15 个油舱。实施风险控制措施后，对于 PANAMAX、AFRAMAX 以及 SUEZMAX 来说将增加一个纵向舱壁，而 VLCC 将增加一个横向舱壁，这样所有油船的油舱构造将为 6×3。

ii）RCO7.2 增加双层底高度：四种船型 PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX 以及 VLCC 典型的双层底高度分别为 2.04m、2.30m、2.80m 和 3.00m。考虑将油舱构造为 6×2 的 PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX 三种类型的油船和 VLCC 的双层底的高度增加 0.50m 和 1.00m。针对搁浅计算降低的风险。

iii）RCO7.3 增加舷侧油舱的宽度：四种船型 PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX 以及 VLCC 典型的舷侧边舱的宽度分别为 2.075m、2.18m、2.50m 和 3.38m。考虑将油舱构造为 6×2 的 PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX 三种类型的油船和 VLCC 的舷侧边油舱的宽度增加 0.40m 和 0.80m。针对碰撞和触碰计算降低的风险。

这些措施主要是降低发生碰撞、触碰和搁浅事故后油污染环境的风险，需要分别针对碰撞事件树、触碰事件树以及搁浅事件树计算溢油风险的降低。实施这些控制措施后降低的人员伤亡风险可以忽略，所以不予考虑。

RCO7.1 增加油舱分舱

增加分舱以后，四种船型对应的参数发生变化的为油舱的平均尺寸，从而改变了事故发生后的溢油量。也就是说对于碰撞、触碰以及搁浅事故来说，在利用事件树进行重新计算时，一旦油船在负载时发生内壳破裂但未发生整船倾覆，预期的泄漏量将产生变化。

附表 6.13 采取 RCO7.1 前后的 ΔPLC（吨/船年）

PANAMAX	AFRAMAX	SUEZMAX	VLCC
[6×2→6×3]	[6×2→6×3]	[6×2→6×3]	[6×2→6×3]
1.41	2.32	2.49	1.17

上表结果表明，这四种船型的油船，碰撞、触碰和搁浅事故导致的溢油量在采取 RCO7.1 后减少的 PLC 分别为 16%，17%，17%和 7%。

RCO7.2 增加双层底高度

双层底高度增加，同时钢材的重量会增加，相应导致吃水增加，可以认为增加的值为可忽略的小量。PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX 三种类型的油船油舱构造为 6×2，而 VLCC 的油舱构造为 5×3。考虑将双层底的高度分别增加 0.5m 和 1.0m。利用搁浅事件树计算采取控制措施降低的风险。

当双层底高度发生改变时，穿透内壳的概率将发生改变，也就说事件树中的内壳穿透的概率和为穿透的概率将发生变化，基于新的概率值，可以计算得到新的风险值，进而确定降低的风险。

最终计算得到采取 RCO7.2 后，搁浅事故造成的 PLC 风险降低情况为：

PANAMAX：双层底的高度增加 0.5m：减少风险 4.9%；双层底的高度增加 1.0m：减少风险 9%；

AFRAMAX：双层底的高度增加 0.5m：减少风险 4.6%；双层底的高度增加 1.0m：减少风险 8.9%；

SUEZMAX：双层底的高度增加 0.5m：减少风险 4.2%；双层底的高度增加 1.0m：减少风险 8.2%；

VLCC：双层底的高度增加 0.5m：减少风险 2.4%；双层底的高度增加 1.0m：减少风险 5%。

RCO7.3 增加舷侧油舱的宽度

PANAMAX、AFRAMAX、SUEZMAX 三种类型的油船油舱构造为 6×2，而 VLCC 的油舱构造为 5×3。利用碰撞和触碰事件树进行计算分析，事件树初始事件的频率不同于风险分析时使用的数据，在宽度增加以后，舷侧内壳破裂、舷侧内壳未破裂的概率值都将发生变化。

通过计算，得到采取 RCO7.3 后，由于碰撞和触碰事故造成的 PLC 风险值降低情况如下：

增加舷侧油舱的宽度 0.4m：这四种类型船舶 PLC 风险减少值分别为 11.6%，10.1%，8.6%和 5.7%。

增加舷侧油舱的宽度 0.8m：这四种类型船舶 PLC 风险减少值分别为 20.2%，18.4%，15.9%和 10.5%。

（6）热加工作业培训

有研究调查指出热加工作业的培训一般应一年举办两次，这也是风险控制措施的要求之一。专家利用德尔菲方法确定降低的风险，可以确定如果对有经验的热加工作业的员工进行适当的培训，那么由于热加工导致的火灾或爆炸事故造成的风险将降低 43%。

利用火灾事件树和爆炸事件树重新计算风险，有如下结果：对人员伤亡风险来说，降低的风险为 7.8E-04 人/船年，在船 25 年的生命周期内降低的总风险为 1.9E-02 人/船。对于溢油风险来说，实施控制措施降低的风险为 7.1E-01 吨/船年，在船的 25 年生命周期内降低的风险为 1.8E+01 吨/船。

（7）轮机舱中燃料油管线的双套管保护

专家指出虽然要求所有的热表面都必须有隔热层，但是实际上只有约 75%是完好的。由于设备维修等原因，隔热层会遭受一定程度的破坏。通过安装低压燃油管的双套管保护可以降低风险。专家调查发现 56%的机舱火灾是由于燃油接触到热表面引起的。专家会议利用德尔菲法确定该风险控制方案可以降低由于燃油接触高温热表面而引发火灾风险的 55%。

利用事件树进行重新计算，有如下结果：对人员伤亡风险来说，降低的风险为 5.7E-04 人/船年，在船 25 年的生命周期内降低的总风险为 1.4E-02 人/船。对于溢油风险来说，实施控

制措施后降低的风险为 6.2E+00 吨/船年，在船的 25 年生命周期内降低的风险为 1.5E+02 吨/船。

（8）机舱控制室增加紧急出口

该风险控制措施是指增加一个连接机舱控制室和上层建筑的紧急出口。专家利用德尔菲技术确定降低的风险。在实施风险控制措施后，紧急情况下机舱发生事故造成的风险可以降低 21%。假定一个船员有 30%的时间在机舱，这是基于正常的操作流程确定的。事实上，一旦发生紧急情况，将有几个船员进入机舱来试图控制危险，在此条件下再实施撤离，增加的紧急出口将是一个影响 PLL 的重要因素。

利用火灾事件树重新计算风险，有如下的计算结果：对人员伤亡风险来说，降低的风险为 1.7E-04 人/船年，在船 25 年的生命周期内降低的总风险为 4.4E-03 人/船。

（9）船体应力和疲劳监测系统

疲劳可能导致形成局部裂纹，如果不及时维修将可能导致结构更加严重破坏，基于此提出了该控制措施，即设置船体应力和疲劳监测系统（HMS）。HMS 可以发挥两方面的作用：1）发现由于恶劣天气导致过载进而造成的结构破坏；2）发现由于疲劳引起的结构破坏。专家利用德尔菲技术确定实施控制措施后结构失效的风险可以降低 11%。

利用 NASF 事件树进行重新计算，考虑双壳油船的情况，有如下的计算结果：对人员伤亡风险来说，降低的风险为 2.1E-05 人/船年，在船 25 年的生命周期内降低的总风险为 5.3E-04 人/船。对于溢油风险来说，实施控制措施后降低的风险为 1.6E-01 吨/船年，在船的 25 年生命周期内降低的风险为 4.0E+00 吨/船。

5.2 风险控制措施的成本

（1）主动操舵装置

引入主动操舵装置的成本相对较少，为了进行准确分析，可以确定初始购置成本为$2000，平均每年的维修费用计为$200。25 年的时间内，可以计算得到净现值为$4800。计算方法如下：

$$\mathrm{NPV} = 2000 + \sum_{t=1}^{25} \frac{200}{(1+5\%)^{t}} = \$4819$$

（2）电子海图显示和航海系统

电子海图显示和航海系统的净现值为$75000，其中最初的购置费和安装费为$32000，配套装置$20000，每年的维修费用为$150，最初的培训费为$6000，每年的培训费为$750。计算时：

$$\mathrm{NPV} = \mathrm{A} + \frac{X}{(1+\mathrm{r})} + \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{2}} + \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{3}} + \cdots + \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{T}} = \mathrm{A} + \sum_{t=1}^{T} \frac{X}{(1+\mathrm{r})^{t}}$$

式中，A=32000+20000+6000；X=750+150

（3）速度传感器（辅助进坞）

实施风险控制措施时需要多普勒类型的坐坞系统，最初的购置费为$70000，每 5 年支出$4000 用于维护保养，每年$400 用于维修，计算得到净现值为$85840。 计算方法：

$$\mathrm{NPV} = 70000 + \sum_{t=1}^{25} \frac{400}{(1+5\%)^t} + \frac{4000}{(1+5\%)^5} + \frac{4000}{(1+5\%)^{10}} + \frac{4000}{(1+5\%)^{15}} + \frac{4000}{(1+5\%)^{20}} + \frac{4000}{(1+5\%)^{25}} = \$85840$$

（4）航行声呐

0.5nm 系统的初始购置费为$150000，每 5 年支出$10000 用于维护保养，每年的维修费用为$1500，可以计算得到净现值为$196650。

（5）改进船体设计

实施风险控制措施的成本主要包括建造费用（增加的钢材费用等）、维修保养费用以及燃油消耗。计算时，取船的生命周期为 25 年，折扣率为 5%。

RCO7.1 增加油舱分舱

增加舱壁会导致钢材的重量的增加。参考相关文献可以确定增加一个纵舱壁，对 PANAMAX、AFEAMAX 以及 SUEZMAX 三种船型来说，增加重量分别为 500 吨，600 吨和 950 吨，而对 VLCC 来说增加一个横舱壁增加的重量为 350 吨。在中国钢材的费用为$2.2 每千克，这些花费同时包括人工成本，但是不包括分段运输和涂装。基于钢材价格，可以得出对于 ANAMAX、AFEAMAX、SUEZMAX 以及 VLCC 来说增加的建造成本分别为$1.1M、$1.3M、$2.1M 和$0.77M。每年维修保养的费用是建造成本的 1%。

同时运营的成本也会增加。满载和部分负载时的燃油消耗也会增加。钢材重量增加会导致吃水增加，通过以满载状态做补偿的形式而忽略不计吃水增加的影响。假定船每年运营的时间约为 340 天。对于 ANAMAX 来说，满载状态和部分负载状态每天消耗的重油分别为 45 吨和 35 吨，AFEAMAX 为 60 吨和 45 吨，SUEZMAX 为 75 吨和 58 吨，VLCC 为 85 吨和 65 吨。燃油的价格为$500 每吨。

可以计算得到 ANAMAX、AFEAMAX、SUEZMAX 以及 VLCC 增加的成本△C 分别为（$）1472602、1723185、2731930 和 956843。

RCO7.2 增加双层底高度

经过计算得到增加的成本为：

附表 6.14 采取 RCO7.2 的增加成本

船型	尺寸	成本（$）	船型	尺寸	成本（$）
PANAMAX	2.54×20.3	273928	SUEZMAX	3.30×23.6	357999
	3.04×20.8	547856		3.80×24.1	717984
AFRAMAX	2.80×21.5	293938	VLCC	3.50×31.75	451087
	3.30×22.0	587862		4.00×32.25	902160

RCO7.3 增加舷侧油舱的宽度

经过计算得到增加的成本为：

附表 6.15 采取 RCO7.3 的增加成本

船型	尺寸	成本（$）	船型	尺寸	成本（$）
PANAMAX	2.475×33.0	235646	SUEZMAX	2.90×48.8	309310
	2.875×33.8	471277		3.30×49.6	618606
AFRAMAX	2.58×43.8	250283	VLCC	3.78×58.8	393668
	2.98×44.6	500566		4.18×59.6	787337

（6）热加工作业的培训

在船上举办的热加工作业培训的成本约为$1000/船，培训次数为每年两次，也就是说每年的费用为$2000/船，由于在船上培训，不考虑交通费和生活费。计算可以得到净现值为$28000。

（7）机舱低压燃油管路的双套管保护

双套管保护的低压燃油管的价格为：直径为 350mm 的为$420/m，直径为 250mm 的$350/m，包含材料费和劳工费。采取风险控制措施时，直径 350mm 的使用 30m，直径 250mm 的使用 10m，一次性的费用为$16100；25 年总共的维修保养费用为$40000，如果考虑折扣率，可以计算得到对应的 NPV 为$23000，所以总共成本约为$39000。

（8）机舱控制室增加紧急出口

增加紧急出口后增加的成本主要包括钢材材料成本、隔热材料、门、阶梯以及人工成本。分别参考文献得到成本费用为$13280 和$14400，然后取平均值为$13840。

（9）船体应力和疲劳检测系统

约需要 12 个传感器，总共的费用约为$117000，维护保养的费用为$20000，如果考虑折扣，对应的 NPV=$11000，所以总的成本为$128000。

5.3 风险控制措施的效益

5.3.1 以“主动操舵装置”为例说明

实施风险控制措施后的收益主要是指搁浅后人员伤亡减少、环境和财产等带来的收益。风险减少带来的收益为：油泄露减少使得每船年的收益为$378000，财产损失减少以获得的收益为$392，总的收益的净现值为$530000。

有如下计算结果：

$$\mathrm{GCAF}=\frac{\Delta C}{\Delta R_S}=\frac{4819}{1.19\mathrm{E}-04}=\$40495798$$

$$\mathrm{NCAF}=\frac{\Delta C-\Delta B}{\Delta R_S}=\frac{4819-530000}{1.19\mathrm{E}-04}=-\$4413285714$$

5.4 成本效益评估

可以计算得到每项控制方案对应的 GCAF、NCAF 和 CATS。计算结果见下表所示：

附表 6.16 各项风险控制的成本效益评估结果

	降低的人员风险 ΔR_S	降低的溢油风险 ΔR_E	成本 ΔC	效益 ΔB	GCAF $=\frac{\Delta C}{\Delta R_S}$	CATS $=\frac{\Delta C}{\Delta R_E}$	NCAF $=\frac{\Delta C-\Delta B}{\Delta R_S}$
	人	吨	$	$	$	$	$
RCO3:主动操舵装置	1.2E-04	16	4,800	530,000	40,000,000	300	-4,377,000,000
RCO4：电子海图显示和信息系统	1.2E-03	170	75,000	5,667,000	62,500,000	440	-4,660,000,000
RCO5：速度传感器（辅助进坞）	N /A	4	86,000	119,000	N/A	21,500	N/A
RCO6：航行声呐系统	4.9E-04	70	196,500	2,361,000	401,000,000	2,800	-4,417,000,000
RCO8：热加工过程的规范化	1.9E-02	45	28,000	2,200,000	1,450,000	450	-111,000,000
RCO9：轮机舱中燃料油管线的双套管保护	1.4E-02	154	39,000	5,300,000	2,700,000	250	-371,000,000
RCO11：机舱控制室增加紧急出口	4.4E-03	N/A	13,840	N/A	3,169,000	N/A	3,169,000
RCO12：船体应力和疲劳监测系统	5.3E-04	4	128,000	134,000	241,000,000	32,000	-10,200,000
假设：1）每艘船的船龄为 25 年；2）包括每年 5%的 NPV							

由上表结果可以看出，RCO8、RCO9 以及 RCO11 的 GCAF 值相对较小，而 RCO3、RCO4 以及 RCO6 的 GCAF 值相对比较大。如果 GCAF 的值小于$3M，认为该项风险控制措施可以实施。同时结合 NACAF 可以确定风险控制措施带来的效益，可以看出 3、4、6、8、9、12 控制措施对应的 NCAF 的值均为负值，也就是说有相当可观的经济效益。

6 步骤 5：决策建议

根据 IMO FSA 的指南，如果一项风险控制措施的 GCAF 小于$3M，认为该风险控制措施符合费效比要求。如果风险控制措施的 NCAF 小于$3M 或者为负值，同样可以认为符合要求。如果 NCAF 为负值就意味着实施控制措施后带来的收益要大于实施措施耗费的成本。从 PLC 的观点来看，如果 CATS 的值小于$60000，同样可以认为风险控制措施是符合要求的。本文中的风险控制措施，除了 RCO7 外，其他的控制措施对应 CATS 均满足要求。经

过分析可以做出决策建议。

对于 RCO8 来说，GCAF=$1.45M<$3M，而 NCAF<0，RCO8 为建议采用的风险控制措施，也是风险控制措施中最好的一项。

对于 RCO3、RCO4、RCO6 来说有如下分析：

附表 6.17 风险控制方案的建议

	GCAF（$）	CATS（$）	NCAF（$）	分析说明
RCO3:主动操舵装置	40,000,000	300	-4,377,000,000	GCAF>$3M，但 CATS<60000，同时 NCAF<0
RCO4：电子海图显示和信息系统	62,500,000	440	-4,660,000,000	GCAF>$3M，但 CATS<60000，同时 NCAF<0
RCO6：航行声呐系统	401,000,000	2,800	-4,417,000,000	GCAF>$3M，但 CATS<60000，同时 NCAF<0

对于 RCO3、RCO4、RCO6 来说，所有的 GCAF 都比$3M 大很多，但是从 NCAF 和 CATS 均满足要求。推荐这三项实施的原因是在计算降低风险时，主要得到了 PLC 和 PLP 的风险降低，而 PLL 的降低相对较小，分别为 1.2E-04、1.2E-03、4.9E-04。

对于 RCO9 来说，GCAF=$2700000=$2.7M<$3M，GCAF 的值略小于 3M，而 CATS<60000，GCAF<0，虽然 GCAF 没有超过 3M，但是相对来说，其值算是较大。与此同时，实施控制措施后 PLL 降低的值为 1.4E-02，相对比较大。可以推荐使用。

对于 RCO11 来说，GCAF=$3169000>＄3M，GCAF 的值略大于 3M，而 GCAF 的值也是略大于 3M，已经未能满足准则要求，但是由于最初的成本很小同时不存在维护保养的费用 ，而 GCAF 也没有严重的不满足。所以认为该项控制措施可以考虑使用。

RCO5 和 RCO12 均不推荐使用。尽管 CATS 的值均小于 60000，但是收益和成本的比值太小，RCO5 的成本是收益的 72%，而 RCO12 的成本是收益的 96%。

附图 6.2 碰撞事件树

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
碰撞	被撞击	终端水域	装载	没有破损		否	严重	没有沉没									
1.03E-02	0.8	0.3	0.6	0.54			0.07		1	5.68E-05	1.5						
							不严重	没有沉没									
							0.93		2	7.54E-04	19.4						
				破损	没有破损	是	严重	沉没									
				0.46	0.78	0.03	1	0.5	3	8.08E-06	0.2	13.33	152191	82,500,000	1.08E-04	1.23E+00	6.67E+02
								没有沉没									
								0.5	4	8.08E-06	0.2	4.33		4,125,000	3.50E-05		3.34E+01
						否	严重	沉没									
						0.97	0.29	0	5	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	6	1.52E-04	3.9	2.02		4,125,000	3.06E-04		6.25E+02
							不严重	没有沉没									
							0.71		7	3.71E-04	9.6						
					破损	是	严重	沉没									
					0.22	0.03	1	0.5	8	2.28E-06	0.1	13.33	152191	82,500,000	3.04E-05	3.47E-01	1.88E+02
								没有沉没									
								0.5	9	2.28E-06	0.1	4.33	10726	4,125,000	9.88E-06	2.45E-02	9.41E+00
						否	严重	沉没									
						0.97	0.29	0	10	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	11	4.28E-05	1.1	2.02	10726	4,125,000	8.64E-05	4.59E-01	1.76E+02
							不严重	没有沉没									
							0.71		12	1.05E-04	2.7		184.6			1.93E-02	
			压载水	没有破损		否	严重	没有沉没									
			0.4	0.54			0.07		13	3.79E-05	1						
							不严重	没有沉没									
							0.93		14	5.03E-04	13						
				破损	没有破损	是	严重	沉没									
				0.46	0.78	0.03	1	0.5	15	5.39E-06	0.1	13.33		82,500,000	7.19E-05		4.45E+02

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
								没有沉没									
								0.5	16	5.39E-06	0.1	4.33		4,125,000	2.34E-05		2.22E+01
						否	严重	沉没									
						0.97	0.29	0	17	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	18	1.01E-04	2.6	2.02		4,125,000	2.04E-04		4.17E+02
							不严重	没有沉没									
							0.71		19	2.47E-04	6.4						
					破损	是	严重	沉没									
					0.22	0.03	1	0.5	20	1.52E-06	0	13.33		82,500,000	2.03E-05		1.25E+02
								没有沉没									
								0.5	21	1.52E-06	0	4.33		4,125,000	6.59E-06		6.27E+00
						否	严重	沉没									
						0.97	0.29	0	22	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	23	2.85E-05	0.7	2.02		4,125,000	5.76E-05		1.18E+02
							不严重	没有沉没									
							0.71		24	6.98E-05	1.8						
		拥挤水域	装载	没有破损		否	严重	没有沉没									
		0.37	0.6	0.64			0.03		25	3.47E-05	0.9						
							不严重	没有沉没									
							0.97		26	1.12E-03	28.9						
				破损	没有破损	是	严重	沉没									
				0.36	0.78	0.06	1	0.5	27	1.52E-05	0.4	13.33	152191	82,500,000	2.03E-04	2.32E+00	1.26E+03
								没有沉没									
								0.5	28	1.52E-05	0.4	4.33		4,125,000	6.59E-05		6.28E+01
						否	严重	沉没									
						0.94	0.59	0.05	29	1.41E-05	0.4	2.02	152191	82,500,000	2.84E-05	2.14E+00	1.16E+03

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
								没有沉没									
								0.95	30	2.67E-04	6.9	2.02		4,125,000	5.40E-04		1.10E+03
							不严重	没有沉没									
							0.41		31	1.95E-04	5						
					破损	是	严重	沉没									
					0.22	0.06	1	0.5	32	4.29E-06	0.1	13.33	152191	82,500,000	5.72E-05	6.53E-01	3.54E+02
								没有沉没									
								0.5	33	4.29E-06	0.1	4.33	10726	4,125,000	1.86E-05	4.60E-02	1.77E+01
						否	严重	沉没									
						0.94	0.59	0.05	34	3.97E-06	0.1	2.02	152191	82,500,000	8.01E-06	6.04E-01	3.27E+02
								没有沉没									
								0.95	35	7.54E-05	1.9	2.02	10726	4,125,000	1.52E-04	8.09E-01	3.11E+02
							不严重	没有沉没									
							0.41		36	5.51E-05	1.4		184.6			1.02E-02	
			压载水	没有破损		否	严重	没有沉没									
			0.4	0.64			0.03		37	2.31E-05	0.6						
							不严重	没有沉没									
							0.97		38	7.48E-04	19.3						
				破损	没有破损	是	严重	沉没									
				0.36	0.78	0.06	1	0.5	39	1.01E-05	0.3	13.33		82,500,000	1.35E-04		8.37E+02
								没有沉没									
								0.5	40	1.01E-05	0.3	4.33		4,125,000	4.40E-05		4.18E+01
						否	严重	沉没									
						0.94	0.59	0	41	9.38E-06	0.2	2.02		82,500,000	1.89E-05		7.74E+02
								没有沉没									
								1	42	1.78E-04	4.6	2.02		4,125,000	3.06E-04		7.35E+02
							不严重	没有沉没									
							0.41		43	1.30E-04	3.4						
					破损	是	严重	沉没									
					0.22	0.06	1	0.5	44	2.86E-06	0.1	13.33		82,500,000	3.82E-05		2.36E+02

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
								没有沉没									
								0.5	45	2.86E-06	0.1	4.33		4,125,000	1.24E-05		1.18E+01
						否	严重	沉没									
						0.94	0.59	0.05	46	2.64E-06	0.1	2.02		82,500,000	5.34E-06		2.18E+02
								没有沉没									
								0.95	47	5.03E-05	1.3	2.02		4,125,000	1.02E-04		2.07E+02
							不严重	没有沉没									
							0.41		48	3.68E-05	0.9						
		开放水域	装载	没有破损		是	严重	沉没									
		0.28	0.6	0.54		0.03	1	0	49	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	50	2.06E-05	0.5						
						否	严重	沉没									
						0.97	0.1	0	51	0							
								没有沉没									
								1	52	6.67E-05	1.7						
							不严重	没有沉没									
							0.9		53	6.01E-04	15.5						
				破损	没有破损	是	严重	沉没									
				0.46	0.78	0.23	0.83	0.2	54	1.75E-05	0.4	13.33	152191	82,500,000	2.33E-04	2.66E+00	1.44E+03
								没有沉没									
								0.8	55	6.98E-05	1.8	4.33		4,125,000	3.03E-04		2.88E+02
							不严重	没有沉没									
							0.17		56	1.79E-05	0.5						
						否	严重	沉没									
						0.77	0.5	0	57	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	58	1.76E-04	4.5	2.02		4,125,000	3.56E-04		7.26E+02

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
							不严重	没有沉没									
							0.5		59	1.76E-04	4.5						
					破损	是	严重	沉没									
					0.22	0.23	0.83	0.2	60	4.92E-06	0.1	13.33	152191	82,500,000	6.56E-05	7.49E-01	4.06E+02
								没有沉没									
								0.8	61	1.97E-05	0.5	4.33	10726	4,125,000	8.53E-05	2.11E-01	8.12E+01
							不严重	没有沉没									
							0.17		62	5.04E-06	0.1		184.6			9.31E-04	
						否	严重	沉没									
						0.77	0.5	0	63	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	64	4.96E-05	1.3	2.02	10726	4,125,000	1.00E-04	5.32E-01	2.05E+02
							不严重	没有沉没									
							0.5		65	4.96E-05	1.3		184.6			9.17E-03	
			压载水	没有破损		是	严重	沉没									
			0.4	0.54		0.03	1	0	66	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	67	1.38E-05	0.4						
						否	严重	沉没									
						0.97	0.1	0	68	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	69	4.45E-05	1.1						
							不严重	没有沉没									
							0.9		70	4.00E-04	10.3						
				破损	没有破损	是	严重	沉没									
				0.46	0.78	0.23	0.83	0.2	71	1.16E-05	0.3	13.33		82,500,000	1.55E-04		9.60E+02
								没有沉没									
								0.8	72	4.65E-05	1.2	4.33		4,125,000	2.02E-04		1.92E+02
							不严重	没有沉没									
							0.17		73	1.19E-05	0.3						

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
						否	严重	沉没									
						0.77	0.5	0	74	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	75	1.17E-04	3	2.02		4,125,000	2.37E-04		4.84E+02
							不严重	没有沉没									
							0.5		76	1.17E-04	3						
					破损	是	严重	沉没									
					0.22	0.23	0.83	0.2	77	3.28E-06	0.1	13.33		82,500,000	4.38E-05		2.71E+02
								没有沉没									
								0.8	78	1.31E-05	0.3	4.33		4,125,000	5.69E-05		5.41E+01
							不严重	没有沉没									
							0.17		79	3.36E-06	0.1						
						否	严重	沉没									
						0.77	0.5	0	80	0.00E+00							
								没有沉没									
								1	81	3.31E-05	0.9	2.02		4,125,000	6.68E-05		1.37E+02
							不严重	没有沉没									
							0.5		82	3.31E-05	0.9						
		限制水域	装载	没有破损		否	严重	没有沉没									
		0.07	0.6	0.58			0.3		83	6.29E-05	1.6						
							不严重	没有沉没									
							0.7		84	1.47E-04	3.8						
				破损	没有破损	否	严重	沉没									
				0.42	0.78		0.5	0	85	0							
								没有沉没									
								1	86	5.92E-05	1.5	2.02		4,125,000	1.20E-04		2.44E+02
							不严重	没有沉没									
							0.5		87	5.92E-05	1.5						

		操作状态	装载状态	船体破损	内舱壁破损	火灾/爆炸	破坏严重性	船舶沉没	场景编号	频率	事故数	人命损失	环境损失	财产损失	风险结果（PLL）	风险结果（PLC）	风险结果（PLP）
					破损	否	严重	沉没									
					0.22		0.5	0	88	0							
								没有沉没									
								1	89	1.67E-05	0.4	2.02	10726	4,125,000	3.37E-05	1.79E-01	6.89E+01
							不严重	没有沉没									
							0.5		90	1.67E-05	0.4		184.6			3.08E-03	
			压载水	没有破损		否	严重	没有沉没									
			0.4	0.58			0.3		91	4.19E-05	1.1						
							不严重	没有沉没									
							0.7		92	9.78E-05	2.5						
				破损	没有破损	否	严重	沉没									
				0.42	0.78		0.5	0	93	0							
								没有沉没									
								1	94	3.95E-05	1	2.02		4,125,000	7.97E-05		1.63E+02
							不严重	没有沉没									
							0.5		95	3.95E-05	1						
					破损	否	严重	沉没									
					0.22			0	96	0							
								没有沉没									
								1	97	1.11E-05	0.3	2.02		4,125,000	2.25E-05		4.59E+01
							不严重	没有沉没									
							0.5		98	1.11E-05	0.3						
		船厂															
		0															
	撞击他船	结束															
	0.2																

附录 7　FSA 基本术语表

1 概述

本术语表给出了与 FSA 有关的基本术语，有助于专业人员对 FSA 基本问题的理解，使用者还可进一步参考有关文献和专著。

2 术语

（1）**事故**（Accident）：涉及死亡、受伤、船舶灭失或损坏，其他财产或损坏，或环境破坏的意外事件。

（2）**事故类别**（Accident category）：根据性质划分的事故种类，如火灾、碰撞和搁浅等。例如：

碰撞（Collision）：不论是否在航行中、锚泊或系泊，撞击或被另外的船只撞击（该类情况并不包括撞击水下的失事船只）。

搁浅（Grounding）：触礁或撞击/触及岸沿或海底或水下物体（如失事船只等）。

触碰（Contact）：撞击任何固定或浮动的物体而不包括上述“碰撞”或“搁浅”。

火灾或爆炸（Fire / Explosion）：发生火灾或爆炸事故时最初的事件。

灭失（Loss）：船舶的毁灭是由未确定因素引起的，在相当长的一段时间内无法接收到有关其状况和位置的任何信息。

机械（Machinery）：因机械故障导致的事故。

结构完整性的丧失（Hull damage）：结构的破坏会导致水的浸入和/或强度的丧失和/或稳性的丧失。

浸水（Founder）：水的浸入会导致船舶的沉没或下沉。

沉没（Sink）：由于恶劣的气候，裂缝的渗漏，断成两部分等引起的下沉。

其他各种情况：不包括在上述各类情况中所发生的事故。

（3）**ALARP（最低合理可行）区域**：指的是介于可忽略线和不可容忍线之间的风险区域，在此范围内，应尽可能地采用合理可行的方法来降低风险，一般可采用成本效益分析来判断风险控制方案的合理性。

（4）**有效性**（Availability）：如果 1 个项目在规定的瞬间或一段时间内完成了其所需功能的能力。

（5）**头脑风暴**（Brainstorming）：通过讨论或争辩，激发人们的思想，达到集思广益的目的，以发现解决问题的可能方案和潜在的改进机会。头脑风暴是一项技巧，它可以发现一些有创造性的思想从而形成并澄清一系列的思想、问题和争端。在头脑风暴时，会涉及到两个阶段：

① 形成阶段

首先，促进者审查了有关头脑风暴和其目的的指南，然后小组成员就形成了一系列的思想。这个阶段的目标就是形成尽可能多的思想。

② 澄清阶段

小组审查了一系列的思想以确信每一个人都理解了所有的思想。当头脑风暴结束的时候，就会有了评估思想的产生。

用于头脑风暴的指南包括：

促进者是可以识别的；

头脑风暴的目的是明确规定的；

每一个小组成员依次提出自己的想法；

如有可能，小组成员应考虑其他人的想法；

在此阶段，对每个想法既不作评论也不作讨论；

继续该过程直到没有更多的想法产生；并且

所有的想法为了明确起见应进行审查。

（6）**灾害**（Casualty）：对人员生命、健康或环境的破坏。

（7）**检查表分析法**（Check List）：用一张或多张检查表来系统地评估可能的危害。

（8）**后果**（Consequence）：某一个事故的结果。

定性表示安全程度的例子是高速船国际安全规则——HSC 规则：

轻微（Minor）：由于某一失误、事件或错误引起，能够容易由船员校正。

显著的（Significant）：产生下述情况的后果

明显增加船员的操作责任或者增加操作困难，如果同时没有其他重大影响发生，该责任是在 1 个能胜任的船员能力之间，或者；

操作特性显著降低，或者；

大幅度修改允许的操作条件，但不会去掉完成安全航行而不损害操作船员正常技能的能力。

严重的（Severe）：具有下述影响的后果

增加船员操作职责到一个危险程度或在进行其操作时非常困难，不可能要求他们处理这些情况，很可能需要外界的帮助，或者；

操作特性降低到危险程度，或者；

船舶强度降低到危险程度，或者；

对船上人员伤害到一临界状态，或者；

非常需要外界的援助。

灾难性的（Catastrophic）：导致船舶灭失和/或人员伤亡的后果。

一个定性分析结果的例子如下：

从安全的角度考虑：

轻　微　　单个或较少的伤害；

显著的　　多倍的伤害；

严重的　　单个或少量的死亡，如少于 10 个；

灾难性的　大量的同时发生的死亡，加多于 10 个。

从环境污染的角度考虑：

轻　微　家庭废弃物的排放,如食物或未经处理污水,或者少量油或油类混合物的渗出；

显著的　油、油类混合物或化学品的中途溢出；

严重的　大量的油、油类混合物或化学品的溢出，如大容量油柜的部分排放，引发较长时期的破坏；

灾难性的　大部分的油、油类混合物或化学品的溢出，如大容量油柜的整个排放，引发显著的长期的破坏。

从商业损失的角度考虑：

轻　微　　较少的破坏，可能是 10000 英镑或更少的损失；

显著的　　需要海岸支持或修理的损坏, 其损失可能在 100000 英镑左右；

严重的　　需要船舶拖引帮助或干坞或漫长修理的损坏，其损失可能在 1 百万英镑左右；

灾难性的　整个财产的损失，如船舶的灭失包括结构损坏或大约 1 千万英镑或更多的损坏。

（9）**成本效益分析**（Cost Benefit Analysis）：一种合理的和系统性的框架，该框架用直接可比较的衡量单位，来评价各种降低风险方案优缺点。

（10）**错误**（Error）：一种与元件或系统合理或预期运行相背离的而导致的不合理的或意外的结果。

（11）**事件树分析**（Event Tree Analysis，ETA）：一套探究事故、失效或非需求事件的发展和演化的方法，该方法通过图表的形式，从初始事件开始，在每一个具有控制或调节措施的影响点处进行分枝直到识别出最终的结果。指出这些措施成功的概率或频率，以便评估每项后果的可能性。

（12）**失效**（Failure）：系统一部分或大部分出现了停止执行所需功能的事件。

（13）**失效模式和影响分析**（Failure Mode & Effect Analysis，FMEA）：识别危险的一种过程，在此过程中所有预期的有关系统的部件或特性的失效模式都可以依次加以考虑，并且还要注意到非预期的结果。

（14）**失效模式，效用和临界状态分析**（Failure Mode Effect and Criticality Analysis，FMECA）：一种通过估计失效的严重性和可能性来额外评估失效模式或失效原因临界状态的 FMEA 方法。严重性和可能性都表示在每一个排列图中。临界状态就是这些排列图的组合（它们的输出结果和总和取决于模式）。

（15）**故障树分析**（Fault Tree Analysis，FTA）：表明事件之间因果关系的逻辑图，这些事件单—或组合的发生会引起高一层事件的发生。这种方法常用来确定“顶层事件”频率，“顶层事件”可以是某一类型的事故或某一非预期发生的危险结果。

（16）**综合安全评估**（Formal Safety Assessment，FSA）：一种用于制定合理的规则和提供可能的风险控制的综合性、结构化和系统性的风险分析方法。

（17）**FSA 应用人员**：系指具有一定资质和相关经验的专业人员，其专业领域和经验应与进行 FSA 应用时欲分析的问题所涉及的范围和性质相适应。这些专业人员可以是规范或工程技术人员、船舶或工程设计人员，也可以是管理人员或检验人员等。

（18）**频率**（Frequency）：单位时间内（通常为每年）某事件发生的次数。

（IMO 高速船国际安全规则——HSC 规则中频率排序的例子：

经常的（Frequent）：可能经常发生在特别船舶的营运周期内。

适当概率（Reasonably probable）：在特别船舶的营运周期内，不可能经常发生但可能有几次。

很少的（Remote）：在一定量同一类型船舶的整个营运周期内，不可能每一条船都发生但少量的某一类船舶可能发生。

极少的（Extremely remote）：考虑了一定量同一类型船舶的整个营运周期时不可能发生，但还认为有这种可能性。

极不可能（Extremely improbable）：概率小到没有发生的可能性。）

（19）**功能**（Function）：系统预期目的/任务的一种表现。

（20）**综合性功能模式**（Generalized Functional Model）：描述总体系统，包括与所考虑的项目相同的人为因素，说明在其所考虑的问题中共有的特点、性质和属性，例如从事国际贸易的某种类型的所有船舶或者受特定危险影响的所有系统等。

（21）**危险**（Hazard）：威胁人的生命、健康、财产或环境的潜在威胁。

（22）**危险状况**（Hazardous Situation）：一种实际的具有潜在成胁人的生命、健康、财产或环境的状况。

（23）**危险和可操作性研究**（Hazard and Operability Study，HAZOP）：一项通过应用引导词确定偏离某一系统预计功能的研究，这些偏高对安全和操作性有不好的起因和影响。

（24）**危险识别**（Hazard Identification，HAZID）：发现、确认和描述危险的过程。

（25）**人为错误**（Human Error）：相对于可接受的或所要求的人的实施或操作的偏离，从而导致了不可接受的或不合乎要求的结果的出现。

（26）**人为要素**（Human Element）：人为要素涉及到人与组织因素之间合理的关系，后者会影响航海系统的安全和设计、建造、维护和操作。

（27）**人为因素**（Human Factors）：这门学科包括人类科学和工业工程，还涉及到人们与他们的工作行为和工作环境之间关系的优化技术。

（28）**人因可靠性评估**（Human Reliability Assessment，HRA）：这项评估涉及到定性和/或定量的方法，用来决定由特殊操作人员执行特殊任务时的发生错误的可能性和潜在后果。

运用 HRA 技术的例子如下：

任务分析： 是一个全球通用的有关收集任务信息的各种各样专用技术的术语，通过组织、利用可以作出各种各样的判断和设计决策。

人为错误和人类可靠性分析：是一项人为要素贡献的对风险进行定性与定量的评估。定性研究包括潜在的人为错误和其后果以及其他人为因素（例如：在紧急状态人类行为的模拟和为逃生、撤离和营救分析提供输入）的识别。人为错误可能性的定量化是通过利用有关的人类可靠性数据（只要存在这样的数据），采用综合性的 HRA 技术来达到的。

（29）**差错**（Incident）：一种具有潜在成为事故可能的未预计或未预料的事件，但在该事件中的人员受伤和/或对船舶或环境的损害不会有大的损失。

（30）**初始事件**（Initiating Event）：导致危险情况或事故发生的一系列事件中的第 1 个事件。

（31）**潜在人命损失**（Potential for Loss of Life，PLL，人/船年）指每年死亡人数的预期值，考虑了所有潜在事故的总体风险，是一种测算社会风险的简单方法。

（32）**概率**（Probability）（客观/频率论）：用发生次数与可能发生的总次数之比表示的某一事件将会发生的相对频率。

（33）**概率**（Probability）（主观/贝叶斯定理）：事件发生的置信度，衡量标准为从 0 至 1。概率为 0 的事件系指相信该事件不可能发生；概率为 1 的事件系指相信事件肯定发生。

（34）**风险**（Risk）：—频率和后果严重性的组合乘积。（这可能要用到定性和定量的分析方法。）

（35）**风险贡献树**（Risk Contribution Tree）：构成风险模型的所有事故树和事件树的组合，通常以图解法来表示不同类别事故及子事故的风险分布。

（36）**风险控制措施**（Risk Control Measure，RCM）：控制某一个风险因素的方法。典型地，风险控制通过降低后果或频率或者两者的组合来达到。

（37）**风险控制方案**（Risk Control Option，RCO）：风险控制措施的适当组合。

（38）**风险评价衡准**（Risk evaluation criteria）：用于评估风险的可接受度/可容忍度的衡准。

（39）**风险矩阵**（Risk Matrix）：由所有危害发生的概率和相应的后果构成的矩阵，用来对危害进行排序。

（40）**风险可容忍度**（Risk Tolerance）：表示在规定的时间内或某一行为阶段可容忍的总体风险等级，为风险分析及制定风险控制措施提供依据。

（41）**敏感性分析**（Sensitivity Analysis）：研究模型输入变化对模型输出结果的影响。

（42）**不确定性分析**（Uncertainty Analysis）：研究模型输入不确定性对模型输出结果的

影响。不确定性指数据、变量、参数或模型等系统或随机误差的量化，或未认识到的相关因素的量化。

（43）**假设分析技术**（What－if Analysis）：一种集思广益的方法，由一组专家通过不断提出的“如果出现什么情况，该怎么样”的问题，找出与某一船舶功能/或系统有关的危险、其后果、安全性及可能的降低风险的措施。