

②6-12

第18卷第4期
2000年11月海洋工程
OCEAN ENGINEERINGVol. 18 No. 4
Nov. 2000

文章编号:1005-9865(2000)04-0006-07

海洋工程人因可靠性研究进展

P751

U698

陈刚, 张圣坤

(上海交通大学 船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

摘要:海洋结构物在其生命周期的设计、建筑和工作等阶段中发生的灾害性事故(船舶和海洋平台的碰撞、搁浅、腐蚀疲劳破坏、沉船、火灾、爆炸等)大多与人为错误和组织错误(HOE)有关。据统计,大约60%~90%的事故是由HOE引起,因此海洋工程中进行人因可靠性分析研究很有必要。在全面回顾近年来各国在这一领域的研究现状,分析和总结人因可靠性评估(HRA)研究方法的基础上,重点介绍了失效模式及影响分析(FMEA)、事件树/故障树方法、概率影响图方法以及SAM方法,并展望了目前人因可靠性的研究热点和发展趋势以及当前我国海洋工程人因可靠性研究领域急需解决的一些问题。

关键词:人因可靠性;风险;人和组织失误(HOE), HOE, 海洋结构物,

中图分类号:P751

文献标识码:A

Review of human reliability assessment (HRA) in ocean engineering

CHEN Gang, ZHANG Sheng-kun

(School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Most accidents in the life-cycle, which are related to design, construction, installation, operation of marine structures, for example, collision and grounding, corrosion and fatigue failure, sinking, fire and explosion of ships and platforms, are caused by Human and Organization Errors (HOE). According to statistics, about 60%~90% of the accidents result from HOE, so it is necessary to carry out researches on the human reliability of ocean engineering. In this paper, researches in this field all over the world are reviewed. On the basis of reviewing the analysis methods of HOE, the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Fault Tree/Event Tree Analysis (FTA/ETA), Probability Influence Diagram Analysis (IDA) and System-Action-Management method (SAM) are explained in detail. The trend and the hotspot of HRA research are predicated, and some aspects about HRA that should be studied in China are brought forward.

Key words: human reliability; risk; Human and Organization Error (HOE)

世界经济的迅速发展和国际贸易的不断扩大促进了航运业的繁荣和进步,船舶在数量和吨位不断增加的同时,正朝着大型化、专用化、高速化方向发展,海上交通日趋繁忙。与此同时,各种海损、海难事故(船舶的碰撞、搁浅、腐蚀疲劳破坏、沉船、火灾、爆炸等等)不断发生,其数量之多、损失之大已引起世界各国的广泛关注。1988年Piper Alpha钻井平台的爆炸和1989年Exxon Valdez号巨型油轮搁浅事故的相继发生,引发了海洋工程结构物的风险分析和风险管理的研究^[1]。其中,海洋工程中人和组织错误(Human and Organization Error)HOE的研究是一个重要的研究领域。

把人和组织因素作为系统可靠性的一个重要组成部分来考虑,可追溯到50年代。Williams首先提出了在系统可靠性分析中必须包括人的因素的观点;人为因素必须在系统可靠性中予以考虑,否则预计的系统可靠性不能代表系统真实的可靠性水平。1973年著名的《可靠性汇刊,IEEE》出版了一本专门讨论人因可靠性

收稿日期:2000-03-28

基金项目:船舶工业国防科技应用基础研究基金资助项目(J40.3.3)

作者简介:陈刚(1972-),男,博士生,主要从事船舶可靠性研究。

的专集,可以认为是人因可靠性研究历史上的一个重要的里程碑^[2]。

在海洋工程领域,对结构系统进行分析、定量的概率分析及失效后果分析,可以决定结构是否足够安全。如不安全,应采取什么措施来减小结构风险以保证系统具有足够的安全度。长期以来,由于研究工作过多地集中于结构的潜在失效概率上,而忽视了人的可靠性及风险管理的研究。统计资料显示,海洋结构物在其生命周期的设计、建造和工作等阶段中发生的事故大多与人为错误和组织错误(HOE)有关,超过80%的事故是由HOE引起的,其中,大约80%左右的人为错误发生在结构系统的工作阶段,工作阶段的HOE引发的事故占HOE引发事故总数的64%左右^[3]。IMO HSC 规模特别强调了必须考虑可能的人为错误对结构系统或子系统不同失效模式的影响^[4]。因此,对海洋结构物生命周期中的设计、建筑、工作等各个阶段必须考虑HOE对结构系统行为的影响,确保结构在正常或紧急状态下有足够的可靠性。

另外,以往灾害性事故所造成的后果往往仅局限于事故发生现场附近的地区,现今,某些潜在的危险事故的特性和规模表明:人为错误可能引发的严重后果会造成巨大的经济损失、人员伤亡、环境污染等,甚至对整个地球产生数代的影响(如油轮的事故导致原油泄露直接威胁生态环境)。由此可见,在海洋工程中进行人因可靠性研究很有必要。

本文回顾了近年来海洋工程领域人因可靠性的研究工作,分析了人因可靠性的特点、研究方法等,并将展望今后人因可靠性的研究热点。

1 人因可靠性的特点

Swain 给出的工程中人为错误的定义为:“任何超过一定接受标准——系统正常工作所规定的接受标准或容许范围的人的行为或动作^[5]”。许多大型的事故均表明人为错误对系统行为产生很大的影响。组织错误在根本上也是由于组织中人的认知、管理等错误引发的。

与硬件设备的可靠性相比,海洋工程人因可靠性研究具有如下的特点:

1) 研究人因可靠性不可能象研究硬件的可靠性那样,简单地通过建立失效数据库来确定失效概率。人可以从一系列潜在的输出信息中决定到底应做什么,还可根据人自身想要达到的目的以不同的方式来解释输入的信息。工作环境中诸多相互作用的因素也对人的行为产生影响,而且人的行为还依赖于人的技能、知识结构及决策能力。简单地讲,人永远也不可能与简单的元件相类似,也不能采用相同的方法来处理。另外,对于人因可靠性建立数据库的工作由于涉及的因素较多,往往会遗漏许多与结构系统风险相关的人为因素。目前还没有可靠的海洋结构物的HOE数据库,所以无法提供HOE对系统风险影响的具体量化指标。现有的数据库由于没有考虑人和结构系统的相互作用,所以有可能起到误导作用^[6]。

2) 与硬件的失效不同,人为错误可分为两种类型:直接的和潜在的失效。直接的失效通常是对结构系统产生直接影响的人为错误,而潜在的失效本身可能对结构系统的行为影响不大,但一旦发生直接的人为错误,则可能与其联合发生作用,影响结构系统的可靠性。根据海难事故的分析报告,海洋工程中的事故通常是由操作人直接的错误及结构潜在的设计缺陷所引起的^[7]。

3) 人为错误产生原因非常复杂,与工作人的疲劳、不小心、训练不足、决策失误、工作压力等因素有关^[2]。

人因可靠性分析(HRA)通常属于交叉学科,涉及可靠性、人因工程以及心理学等方面的工作。之所以说HRA属交叉学科是因为:首先,HRA需要正确评价人为错误的性质,这需要借助于基本的心理学基础和不同的人为因素,如人机界面的设计和训练等的研究;其次,HRA要求对系统工程学有一定的了解,以便为潜在的错误和错误后果开发人机交互界面。所以在进行HRA时,需要完整地了解事故发生的原因,各个引发事故发生因素的相互作用以及事故产生的后果。

2 人因可靠性分析(HRA)的流程

尽管HRA经历了三十多年的发展,但HRA技术真正成熟并应用于海洋工程却是在近十年,由于定量的风险评估方法中必定包含量化的HRA,因此HRA主要是朝着如何正确评估执行任务过程中人为错误发生的概率的方向发展,但从HRA本身的特性来看,量化人为错误仅仅是HRA的一个部分。图1列出了HRA的一般流程。

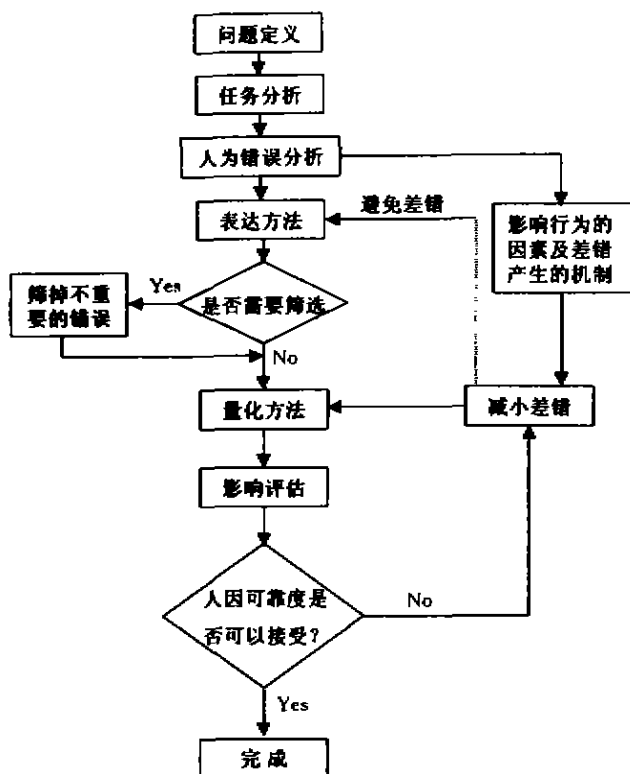


图 1 HRA 的流程图

Fig. 1 Flow chart of HRA

正措施,提高系统冗余能力特别是提高抵御人为错误的能力。

FMEA 可应用于结构全生命周期的各个阶段,为详细的定量分析提供了一个框架以供分析、讨论、修改,操作简单,可随时添加其它重要的事件。作为一种定性分析的工具,FMEA 最先在战斗机操纵系统的设计中得到了应用,NASA 在研制宇航设备和电子设备中也采用了这种方法^[9]。在海洋工程人因可靠性研究领域,FMEA 不仅在定性分析方面应用较多,而且在定性定量混和分析中亦可作为人为错误识别(HEI)的主要工具之一^[3]。

采用 FMEA 分析结构全生命周期中的 HOE 时,借鉴了 FMEA 在硬件分析领域成功的经验。在分析硬件时,FMEA 通常以失效模式中涉及的失效元件的个数来评价系统中元件的危险程度。假如某一失效模式仅涉及一个元件,则该元件可表示为“最危险”,依此类推。通过这种方式,可识别出系统中比较危险的元件,然后对这些危险的元件采取必要的质量保证/质量控制(QA/QC)措施,以保证系统的可靠性。在进行 HRA 时,也采用了这种方式来衡量 HOE 结构失效的影响,从而识别出关键的 HOE。文献[3]对船舶结构在设计、建造过程中的 HOE 进行了详细的分析,即采用了 FMEA 作为识别 HOE 的工具。

FMEA 方法简便适用,避免了详细的定量分析。但是它不能对 QA/QC 措施进行排序,不能确定失效发生的可能性到底有多大。另外,FMEA 不能明确地考虑事件的相关性,也不能识别可能与失效的事件同时发生的低概率事件。海洋工程结构物在设计、建造过程中的质量问题表明,多种初始事件的联合作用是导致海洋结构物失效的主要原因^[7]。

鉴于 FMEA 的上述缺点,人们提出了 FMECA 方法^[4]。FMECA (Failure Mode and Criticality Analysis)扩充了 FMEA 的分析范围,使之可以定量地分析单一失效模式的后果以及发生的概率,并可对分析的结果进行排序以决定哪些高风险的失效模式需要采取减小风险的措施。

对结构全生命周期的 HOE 进行全面的定量评估时,定性分析是十分必要的,因为它可以为定量分析确定分析的重点。

3.2 定量分析方法

对于可能发生低风险、高后果事故或潜在的严重事故的海洋结构物,概率风险评估(PRA)或风险量化

3 人因可靠性的研究方法

不断发展的海洋事故表明有必要建立因人为错误造成风险的正确评估方法,寻求减小系统对人为错误的敏感度的措施,这就是人因可靠性评估(HRA)主要目的。经过近年来的不断发展和完善,吸收了核工程等领域 HRA 的特点,先后提出了定性分析方法、定量分析方法和定性定量混合分析方法,目前的趋势是逐步完善定性定量混合分析方法,几种应用于海洋工程人因可靠性分析方法为:

3.1 定性分析方法

海洋工程结构的 HOE 评估通常以定性分析作为起点。经过近年来的不断发展,产生了多种定性分析方法,可根据不同的结构系统采用不同的方法。经常采用的定性分析方法有失效模式及其影响分析(FMEA)、故障树/事件树(FTA/ETA)、HazOp 方法^[3]。由于 FTA 亦是很好的定量分析工具,所以本节仅详细讨论 FMEA 方法。

FMEA 主要集中于系统及其功能的逻辑分析和潜在事故的后果分析,目的是确定导致不同结构质量的事件、以潜在的后果来评价事件对系统功能或质量的影响;确定检测失效的方法以及可能的修正措施,提高系统冗余能力特别是提高抵御人为错误的能力。

评估(QRA)是常用的定量风险评估方法^[10]。其中,对HOE的量化分析是一个重要的方面^[11]。在对HOE进行定量的分析过程中,HOE的数据收集工作是必不可少的。所以有必要先介绍一下数据收集的方法。

人为错误和组织错误数据的收集比较困难,原因是在多数情况下,数据的收集只能依赖于事故捕捉调查报告,而以前许多事故的调查报告根本没有揭示人为因素在事故发生的各个阶段中所起的作用,而人为错误的数据又是人因可靠性(HRA)量化分析的基础,数据收集不够,可能造成对基本事件规律的认识发生偏差,由于数据收集造成的人为错误对结构的可靠度可能产生很大的影响^[12]。所以近年来人们逐步重视这方面的研究。在核电厂、化学品厂等领域人为错误数据的收集工作取得了很大的成功,如人为错误评估和减小技术(HEART)、人为错误率的预测技术(THERP)等等^[8,11,14]。文献[15]建立了一个简单的核电厂的工作模型,选择了一批实验者进行实验,通过收集有可能导致系统失效的人为失误的次数获得人为错误概率(HEP)。由于行业的不同,在海洋工程领域,离岸结构的风险评估需要确定本行业自身的人为错误概率,文献[16]以救生船撤离平台这一事件为例,通过仿真实验,总结了离岸结构(主要是海洋钻井平台)人为错误概率(HEP)数据收集的三种方法:

1) 直接通过观测进行数据收集

通过记录仿真实验中一段时间内的人为错误总数和执行任务的总数达到获得HEP的目的,通过仿真实验可以得到部分数据,因为有些情况是仿真实验无法模拟的,比如实际撤离过程中人的压力,假定人在实验中的压力与实际过程中的压力相当,可能导致低估HEP。

2) 通过分析事故调查的记录实现。

3) 借助于专家判断

目前有两种比较成熟的专家判断技术:成对比较方法(Paired Comparison, PC)和绝对概率判断方法(Absolute Probability Judgement, APJ)。采用专家判断的方法可以达到两种目的:①产生一些无法通过仿真实验得到的HEP;②利用专家判断修正已收集的数据,使其更具有代表性。

其它的方法还有将贝叶斯(Bayesian)方法和专家判断相结合,得到变量的后验分布等。各种基本事件发生的概率或条件概率确定后,就可采用各种定量的HRA分析方法来确定HOE对结构系统风险的影响。主要的定量分析方法有:

3.2.1 FTA方法

FTA是目前HRA中应用最为普遍的定量分析方法。FTA是一个表示人为错误及其对系统目的影响的标准方法。一个故障树是一个定义不情愿的事件发生(所谓的顶事件)时必须依次发生的事件(人为错误;硬件/软件故障;环境事故)。这些不情愿的事件或结果,通常置于‘树’的顶部,因此称为‘顶事件’。借助于与门和或门,低层次的事件可逐步向上层次推进,直到最后达到顶事件。进行定量分析时,故障树利用事件发生的频率和概率,典型的故障树将输出顶事件发生的频率。假如概率和相对较大(>0.1),就需要修正与门,因为与门下的事件是事件的交集,修正与门使联合概率小于这些事件概率的和。

故障树中一个需要提及的重要概念是割集。割集(或最小割集)包含顶事件发生所必须的最小数目的底事件。通常故障树评估程序将估计每个事件的重要性。评估结果来源于每个事件总的相对贡献,以及所有计算的割集下系统风险总体的级别。显然,当考虑错误减小措施或实施敏感性分析时,这类信息是特别有用的。

故障树方法可用来表示系统失效路径的简单或复杂的状态,可包括与出现的场景有关的人为错误、硬件/软件失效和环境事件。故障树一旦构造后,就可以量化总体的顶事件频率,以及每个错误对不情愿的事件的相对贡献。

FTA是表示系统及其功能的静态图,不能表示系统随时间变化的特征及变化的后果。所以采用FTA处理连续系统及其失效的延伸时非常困难。FTA更易处理二元状态(失效、不失效),而不能考虑局部失效状态。采用FTA可以很好地识别潜在的失效模式、评估导致系统失效的联合事件。

3.2.2 概率影响图方法

传统的风险评估方法在构造复杂系统时,一般难以客观地描述各事件间的复杂关系。因此人们引入了影响图分析方法(IDA),影响图方法适用于表示事件间的相互关系和信息流向,影响图中对于各事件状态的描述可以充分地表示出事件各种可能存在的形式,克服了故障树分析中对于事件的基本状态只能有正常或失效两种方式的假设。概率影响图是影响图的一种特殊形式,它将概率论和影响图理论相结合,专门处理随机

事件间的相互关系,对随机事件进行概率推理,并在推理过程中对事件发生的概率及其依赖其它事件的发生概率做出完整的概率评估。对于人因可靠性分析,由于系统中的人、组织、结构系统等复杂的影响关系,使得有必要采用基于概率影响图的方法进行分析,文献[6]建立了船舶偏离航道造成碰撞或搁浅事故过程中 HOE 的影响图,并计算出不同的 HOE 组合下船舶发生碰撞和搁浅的概率。文献[3]对船舶设计、建造过程中可能发生的 HOE 建立了影响图,并对规范化设计、建造过程提出了改进措施。

作为一种概率模型,IDA 在检测系统中的 HOE 和 HOE 管理措施时具有很大的灵活性。比起故障树和事件树(FTA 和 ETA),IDA 的好处在于:IDA 不需要对所有的节点进行排序。所以可以考虑决策人对影响图中的基本模块取得一致,但对影响图中某一变量的规律认识不同的情况,文献[3]中 IDA 均采用条件概率评估来决定具体目标事件的非条件概率。

需要强调的是 FTA 和 IDA 都是十分有效的方法。出于不同的分析目的,发展出不同的分析细节,FTA 和 IDA 将从不同的角度对系统的 HOE 进行评估。IDA 看起来比较复杂,但却是良好的定量分析工具,应视具体的分析目的采用不同的分析方法。从目前的定量分析工具来看,一般采用 IDA 作为一种总体的建模工具,而对某一细节的 HOE 分析则采用 FTA 方法^[1]。

值得注意的是对 HOE 进行详细的定量分析,其目的并不是得到一组数据,而是提供一个框架,使人们详细了解事故发生的前因后果,并找到减小 HOE 发生的 QA/QC 管理措施。

3.3 混合分析方法

近年来,随着分析的不断深入,人们逐渐认识到了定量的 PRA 的局限性。尽管 PRA 可以考虑与系统失效模式直接相关的操作人员的失误(失效),但 PRA 却不能考虑那些对系统不产生直接影响的操作人员的失误(失效),更不能追溯到失误产生的根源。事故报告指出‘人为错误’是系统发生灾害性失效的直接原因,但却不能确认组织问题是其根本原因。造成这种情况的一个主要原因是目前的 PRA 只注重技术上的改进,而忽略了提高安全管理。结构的失效显然某些时候是由于‘坏运气’引起的,比如设计参数取百年一遇的波浪在第十年就碰到了。但对于类似海洋平台等结构,这种‘坏运气’的成分只占失效总数的 5%左右,其他都与一系列的个人的和组织的决策和行为有关。

混合分析方法是定性和定量的混合分析过程,它将定性分析中的描述性变量以数值型变量表示。Moore 和 Bea(1993 年)结合模糊集的理论,提出了 HESIM(Human Error Safety Index Method)方法,对海洋结构物在操作过程中的 HOE 进行了量化评估^[16]。Pate-Cornell 于 90 年代提出了 SAM(System—Action—Management),先后应用于航空、海洋结构物的风险评估中^[17,18]。SAM 方法也属混合分析方法的一种。

SAM 方法将人的决策及行动作为系统行为和系统行为之间的一个中间变量。对于 SAM 方法而言,最困难的是量化管理因素和人的决策及行动之间的联系,文献[19]是采用条件概率的形式结合专家意见来处理这一联系的。采用 SAM 方法,可模型化与具体系统相联系的风险。图 2 表示了人和组织因素对系统风险的影响。

文献[19]采用概率风险分析(PRA)方法系统地分析了 1988 年 Piper Alpha 事故,扩充了 PRA 的分析范围,考虑了人的决策和行为对上述基本事件的影响,而且还考察了人的决策和行为在组织上的根源,根据预分析的结果可以确定一系列可能减小风险的措施,如技术上增加结构的破损裕度,管理上维护程序的变更等。采用量化的 PRA 可以评估这些安全措施,即对失效模式总体风险的贡献和减小风险的措施对失效概率的影响。可以说,这是 SAM 方法应用于海洋工程 HOE 分析的起点。

SAM 方法的关键是建立一个反映各风险因素对系统影响的概率公式。 $\{in_i\}$ 表示事故序列中可能发生的初始事件集(如火灾、爆炸、波浪载荷、地震碰撞或搁浅等); $\{fist_m\}$ 表示可能的极限状态,采用布尔向量表示不同的元件是否失效; $\{loss_k\}$ 表示可能的损伤水平的分量。概率分布 $p(loss_k)$ 表示年度损失的分量,因此,

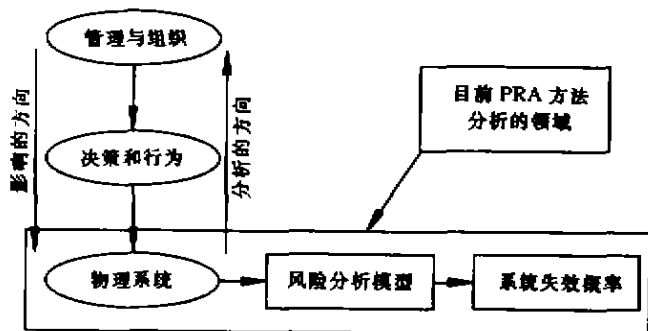


图 2 人和组织因素对系统风险的影响图

Fig. 2 Diagram of HOE's effect on system risk

当采用 $p(in_i)$ 表示初始事件年度发生的概率时,年度损失的风险分析模型可表示为:

$$p(loss_k) = \sum_i \sum_m p(in_i) \times p(fist_m | in_i) \times p(loss_k | fist_m) \quad (1)$$

概率 $p(fist_m | in_i)$ 是事件/故障树的分析结果,表示初始事件的发生、发展及发生失效(或事故序列中的事件的发生)对元件的影响,概率 $p(loss_k | fist_m)$ 与系统中最终的人员和财产损失相关。

为了在分析模型中能够考虑相关的人的决策和行为 $\{A_n\}$ 的影响,引入条件概率函数。向量 $\{A_n\}$ 的分量表示不同水平的决策和行为的结果,则(1)式可进一步表示为:

$$p(loss_k) = \sum_i \sum_m \sum_n p(A_n) \times p(in_i | A_n) \times p(fist_m | in_i, A_n) \times p(loss_k | fist_m, A_n) \quad (2)$$

最后,不同的管理因素集 $\{O_k\}$ 对总体风险的影响可以通过它们对人的决策和行为的概率影响来评估。 $\{O_k\}$ 对(1)式中各个元素的影响是通过影响相应的 $\{A_n\}$ 的发生概率实现的。因此,给定 $\{O_k\}$ 状态下,不同的损伤水平发生的概率为:

$$p(loss_k | O_k) = \sum_i \sum_m \sum_n p(A_n | O_k) \times p(in_i | A_n) \times p(fist_m | in_i, A_n) \times p(loss_k | fist_m, A_n) \quad (3)$$

技术上的改进对底事件发生概率的影响、系统最终状态发生的概率等可以直接由(1)式计算。总体的影响是减小不同损失水平发生的年度概率。

从上述公式可以看出,条件概率的判断对于 SAM 方法的成功应用是十分关键的,目前主要依赖于专家意见处理。

4 HRA 的研究趋势

尽管目前海洋工程领域的 HRA 研究已取得了很大的进展,但欧美国家仍投入了大量的研究经费继续进行研究。美国船舶结构委员会(SSC)1999年和2000年财政年度预算中共提供了数十万美元资助。针对北海地区海洋平台事故,西欧各国多年来一直致力于风险评估和风险管理的研究。在国内,这方面的工作涉及不多,所以应结合国际上 HRA 研究的热点,迎头赶上。下面简要介绍 HRA 中值得进一步研究的问题:

1) 建立大型灾害性事故数据库

海洋结构灾害性事故数据库对于 HOE 的研究是至关重要的,因为它可以用作 HOE 研究的参考,直接指导基于可靠性的结构设计,所以尽管工作量比较大,但必须实施。以美国为例,MIT 在开展船舶搁浅的研究时,直接获取的统计数据(海况、气候、波浪载荷等)来自包括美国海岸警备队、美国海洋局和气象局等多家机构。

2) HOE 的识别技术

许多情况下发生的 HOE,是在结构设计过程中容易忽略的,即使是事故的调查也可能遗漏一些关键的 HOE,相比而言,组织错误比人为错误更难以识别,掌握更加完善的 HEI 技术值得研究。

3) HOE 分析方法的研究

从目前 HOE 研究的趋势看,定性和定量的混合分析方法是发展方向,神经网络和专家系统(基于知识的系统)与模糊集理论相结合的演化方法已提出并应用于许多系统的风险评估中^[10],如何在 HOE 分析中采用值得进一步研究。

4) 碰撞和搁浅事故的 HOE 研究

目前,油轮的碰撞和搁浅事故以及油轮与海洋平台的碰撞事故中的 HOE 研究较多,但事故的不断发生使得有必要进一步发展更加完善的分析方法,找出更好的 QA/QC 措施,以减少这类事故的发生。

5 结 语

通过上面的分析和阐述,可以看出,对海洋结构物开展 HOE 的研究具有非常重要的意义。目前,对 HOE 的研究正处于高潮时期,尚有许多问题需要解决。世界上主要造船国家已开展了相当程度的研究工作,我国也应加紧这方面的研究工作,以制定出详细的 QA/QC 措施,保证海洋结构物全生命周期中的安全性、耐久性等要求。

参考文献:

- [1] Dean M Murphy, M Elisabeth Pate-Cornell. The Sam Framework: Modeling the effects of management factors on human behavior in risk analysis[J]. Risk Analysis, 1996, 16(4):501-515.
- [2] B S 迪隆. 人的可靠性[M]. 牟致忠等译, 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [3] Robert G Bea. The role of human error in design[R]. Construction and Reliability of the Marine Structure, SSC-378, U. S. A. Ship Structure Committee Report, 1994.
- [4] LT Robb Wilcox, P E. Risk-informed regulation of marine systems using FMEA [Z]. U. S. Coast Guard Marine Safety Center, Washinton, D. C. 1998.
- [5] Swain A D. Comparative evaluation of methods for human reliability analysis[Z], ISBN 3-923875-21-5, GRS-71, 1989.
- [6] William H Moore, R G Bea, Kariene H Roberts, Improving the management of human and organization errors (HE) in tanker operations [A]. Ship Structure Symposium '93[C], U. S. Virginia, 1993.
- [7] 13th Ship and Offshore Structure Congress [C]. 1997.
- [8] Barry Kirwan. Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches [J]. Applied Ergonomics, 1992, 23(5):299-318.
- [9] 中国航空学会科普与教育工作委员会. 可靠性工程专题选编[Z]. 1984.
- [10] C Guedes Soares. Risk and reliability marine technology [M]. 1998.
- [11] R G Bea. Human and organization errors in reliability of offshore structures, transatetion of the ASME [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1997, 119:46-52.
- [12] Elishakoff I, Hasofer A M. Detrimental or serendipitous effect of human error on reliability of structures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 129:1-7.
- [13] Barry Kirwan. Human error identification in human reliability assessment. Part I: Detailed comparision of techniques [J]. Applied Ergonomics, 1992, 23(6): 371-381.
- [14] B Kirwan, S Scannali, L Robinson. A case study of a human reliability assessment for an existing nuclear power plant [J]. Applied Ergonomics. 1996, 27(5):289-302.
- [15] Eric M Hermanson. The dependence of human reliability upon task information content[Z]. MIT master thesis, 1994.
- [16] Gurpreet Basra, Barry Kirwan. Collection of offshore human error probablity data [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 61: 77-93.
- [17] M Elisabeth Pate-Cornell. Global risk management [J]. Journal of Risk Uncertainty, 1996, 12:239-255.
- [18] M Elisabeth Pate-Cornell. Dean M Murphy. Human and management factors in probabilistic risk analysis; the SAM approach and observations from recent applications [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 53:115-126.
- [19] M E Pate-Cornell. Risk analysis and risk management for offshore pateforms: Lessons from the piper Alpha accident [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineerint, 1993, 115:179-189.

(上接第 5 页)

- [2] M Määttäen. Ten years of ice-induced vibration isolations in lighthouses[A]. In proceedings, 6th international conference on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE)[C]. Houston, Texas, 1987, 1: 658-665.
- [3] Sodhi D S. Ice-structure interaction during indentation test[A]. Proceedings of IUTAM-IAHR Symposium[C]. Springer-Verlag, Berlin:1991.
- [4] Tuomo Karna. Mitigation of steady-state vibration indeced by ice [A]. Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Osaka, Japan, 1994, I: 534-539.
- [5] Sodhi D S. A theoretical model for ice-structure interaction [J]. OMAE Volume IV, Artic/Polar Technology, ASME, 1994, 29-34.
- [6] H Matlock, W P Dawkins, J J Panak. Analytical model ice-structure interaction[J]. Journal of Engineering mechanics, 1971, 1082-1092