

LNG运输船舶通航风险 定量评价方法及应用

文元桥 周春辉 邹春明 张帆 著



科学出版社

LNG 运输船舶通航风险 定量评价方法及应用

文元桥 周春辉 邹春明 张帆 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据液化天然气(LNG)的理化特性,LNG 散装运输船舶(LNGC)的结构特点、操纵特性和通航安全性需求,基于现代风险分析理论和方法,详细介绍 LNGC 通航风险的定量与定性评估理论与方法。主要包括 LNG 海上运输过程及风险因素分析,LNGC 通航风险识别与估计,LNGC 通航风险可接受标准的界定,LNGC 通航风险定量评价模型,基于风险定量评估的 LNGC 安全区设置方法、LNGC 锚泊安全区设置与安全航速控制方法等。

本书可作为航海科学与技术、交通信息工程及控制、交通运输工程、风险管理与控制等相关专业研究生的教材,也可作为从事 LNG 船舶通航安全管理、LNG 风险管理、水上交通管理、LNG 储运等领域的科研、设计、管理和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

LNG 运输船舶通航风险定量评价方法及应用/文元桥等著. —北京:科学出版社,2018. 6

ISBN 978-7-03-056820-5

I. ①L… II. ①文… III. ①液化天然气-天然气运输-运输船-通航-风险评估 IV. ①TE835

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 048752 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 6 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:274 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

经济的发展带动了能源需求的不断攀升,解决能源带来的环境问题逐渐成为人们追求的核心目标。当前液化天然气(LNG)已经成为公认的清洁、高效、廉价的首选能源,其衍生的 LNG 运输产业正处于快速发展时期。LNG 散装运输船舶(LNGC)是目前 LNG 水上运输的主要载体,我国对 LNGC 的管理还有很大的发展空间,为适应我国 LNG 水上运输发展需求,评估 LNGC 通航风险对完善 LNGC 科学化管理具有重要的指导意义。

本书作者在国家海事局“中国沿海 LNG 船舶通航作业标准研究”和“长江中下游江海小型 LNG 船舶锚地设置研究”等多个科研项目的持续支持下,在 LNGC 通航风险评估方面取得了一系列研究成果和进展。部分研究的阶段性成果已在国内外期刊发表,应用研究成果已根据项目需求获得采纳和验收,反映出 LNGC 通航风险从定性分析到量化计算的完整研究过程,根据风险评估结果具有系统性和完整性。因此,希望将这些研究成果梳理,尽快介绍给读者,以期服务于当前我国 LNGC 运输行业。

国内外已针对 LNG 风险展开一系列研究并取得阶段性进展,本书的特色在于将目前较成熟的研究方法进行总结,针对当前国内 LNGC 运输环境,研究提出 LNGC 通航风险定量评价方法,并应用于设置适于我国 LNGC 运输的风险管理标准。

本书主要内容在研究和出版过程中得到国家自然科学基金项目(51579204,51679180)的支持。全书由文元桥、周春辉、邹春明、张帆、肖长诗、杨雪、王乐撰写。在前期从事项目研究中,以及本书资料整理过程中得到了浙江海事局、中海石油气电集团有限责任公司的大力支持。同时,还得到了吴博、杨君兰、杜磊、甘浪雄、刘敬贤等的热情帮助,在此一并感谢!

LNG 船舶的通航安全保障是当前 LNG 海上运输研究的热点之一,希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用。

由于相关的理论和技术还在不断地完善和更新中,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 LNG 海上运输	1
1.2 国际 LNG 海上运输发展现状	2
1.3 国内 LNG 海上运输发展现状	4
第 2 章 LNG 与 LNGC	6
2.1 LNG 简介	6
2.1.1 LNG 的理化特性	6
2.1.2 LNG 的危险性	7
2.2 LNGC 简介	9
2.2.1 LNGC 分类	10
2.2.2 LNGC 动力系统	16
2.2.3 LNGC 货舱的围护结构	17
2.2.4 LNGC 结构特点	19
2.2.5 LNGC 发展趋势	22
第 3 章 LNGC 通航特性及通航要求分析	24
3.1 LNGC 操纵特性分析	24
3.1.1 大型 LNGC 操纵特性	24
3.1.2 小型 LNGC 操纵特性	26
3.2 LNGC 通航安全性分析	27
3.2.1 LNGC 危险区	27
3.2.2 LNGC 事故统计分析	27
3.2.3 LNGC 事故原因分析	31
3.2.4 LNGC 事故典型案例	31
3.3 LNGC 通航要求	38

3.3.1	国际规范和习惯做法	39
3.3.2	国内规范和习惯做法	43
第4章	LNG 海上运输流程及影响资质因素分析	49
4.1	LNG 海上运输流程	49
4.1.1	天然气液化站	50
4.1.2	LNG 海上运输	50
4.1.3	LNG 接收站	51
4.2	影响 LNG 海上运输安全的因素分析	52
4.2.1	LNG 自身性质因素	52
4.2.2	船舶因素	53
4.2.3	LNG 装卸码头因素	54
4.2.4	人为因素	54
4.2.5	安全管理因素	54
4.2.6	自然环境因素	55
第5章	LNGC 通航风险识别与估计	56
5.1	风险识别的方法简介	56
5.1.1	风险及其分类	56
5.1.2	风险识别方法	56
5.2	LNGC 航行过程主要风险识别	57
5.3	LNGC 作业过程主要风险识别	57
5.4	LNGC 锚泊过程主要风险识别	57
5.5	风险估计方法	59
5.6	航行过程风险估计	61
5.7	作业过程风险估计	62
5.8	锚泊过程风险估计	62
第6章	LNGC 通航风险可接受标准的界定	64
6.1	风险评价标准形式	64
6.1.1	个人风险	64
6.1.2	社会风险	65
6.1.3	个人风险与社会风险的比较	65

6.2 风险可接受标准的界定原则	65
6.2.1 现有风险标准界定原则	66
6.2.2 界定风险评价标准应注意的问题	66
6.2.3 风险可接受标准界定原则	67
6.3 风险评价标准界定方法简介	68
6.3.1 主观意愿类	68
6.3.2 实际风险类	68
6.3.3 协调平衡类	69
6.4 风险评价标准界定方法的理论依据	70
6.4.1 ALARP 原则	70
6.4.2 FN 曲线	71
6.4.3 风险矩阵	73
6.4.4 经济优化分析	73
6.5 个人风险评价标准界定方法的研究	74
6.5.1 基准值协商法	74
6.5.2 效用函数法	75
6.5.3 意愿系数法	77
6.5.4 修正系数法	77
6.5.5 风险控制因子法	78
6.6 社会风险评价标准制定方法的研究	78
6.6.1 分段折线法	78
6.6.2 线性回归法	79
6.6.3 曲线下移法	80
6.6.4 经验公式法	80
6.7 LNGC 个人风险评价标准的界定	81
6.8 LNGC 社会风险评价标准的界定	82
第 7 章 LNGC 通航风险定量评价模型	83
7.1 LNGC 通航风险计算模型	83
7.2 LNGC 事故概率计算模型	84
7.2.1 碰撞事故概率计算模型	84

7.2.2	撞击概率计算模型	85
7.2.3	火灾事故概率计算模型	85
7.3	LNGC 事故后果计算模型	87
7.3.1	船舶碰撞损害计算模型	87
7.3.2	LNG 泄漏与燃烧后果计算模型	91
7.3.3	LNG 火灾伤亡后果计算模型	97
7.3.4	模型算法流程	98
第 8 章	基于风险定量评估的 LNGC 安全区设置研究	109
8.1	LNGC 移动安全区设置标准	109
8.1.1	移动安全区的定义	109
8.1.2	移动安全区设置范围定量计算方法	109
8.1.3	移动安全区范围设置	113
8.2	LNGC 停泊安全区设置标准	115
8.2.1	停泊安全区的定义	115
8.2.2	停泊安全区设置范围定量计算方法	116
8.2.3	停泊安全区范围设置	117
第 9 章	基于风险定量评估的 LNGC 锚泊安全区与安全航速控制研究	118
9.1	LNGC 锚地选址要求	118
9.1.1	LNGC 锚地功能属性特点	118
9.1.2	LNGC 锚地设置的基本原则	119
9.1.3	LNGC 锚地设置参数选取	122
9.2	LNGC 锚泊事故风险计算模型	123
9.2.1	走锚漂移方向概率模型	123
9.2.2	他船碰撞锚泊 LNGC 事故后果模型	132
9.3	LNGC 锚泊风险计算	133
9.3.1	走锚 LNGC 漂移距离计算	133
9.3.2	他船碰撞锚泊 LNGC 风险计算	135
9.4	LNGC 进出港航速控制	139
9.4.1	航速对 LNGC 进出港航行安全的影响	139

9.4.2 LNGC 进出港航速影响因素分析·····	140
9.4.3 安全航速控制模型·····	141
9.4.4 LNGC 进出港航行安全航速算例·····	143
第 10 章 基于风险定量评估的 LNGC 进出港航道通航尺度研究 ·····	145
10.1 LNGC 进出港航道宽度控制·····	145
10.2 基于风险可接受标准的双向通航航道有效宽度·····	146
参考文献 ·····	148
附录 ·····	151

第 1 章 概 述

1.1 LNG 海上运输

经济的迅猛发展促使能源的需求不断攀升,20 世纪以来,石油与煤炭一直是我国主要能源,此类能源的使用带来的环境问题逐渐严重,人们的环保意识不断提高。天然气作为一种公认的清洁、高效、廉价能源,引起公众的广泛关注。

由于天然气资源分布不均匀,天然气运输就成为保证天然气贸易发展的重要前提。因此,在整个天然气产业链中,运输是一个非常重要的环节。将天然气从产地运往市场的方法主要有管道运输和船舶运输。目前世界上约 70% 的天然气通过管道运输,但管道运输具有路线固定、费用昂贵的特点。统计表明,用长距离输气管将天然气送往用户,管道长度在 1600~3300km 才有经济效益。各大陆相距遥远,海下铺设管道难度大且成本高,因此成为制约天然气管道运输的一个重要因素。

在远距离的天然气运输中,以船舶为运输载体的海上运输是一种主要的形式。为了适应天然气的船舶运输,需将天然气经过低温冷却后形成具有低温性质的液态混合物,称为液化天然气(liquefied natural gas,LNG)。专门用于运输 LNG 的船舶称为 LNG 运输船舶(liquefied natural gas carrier,LNGC)。

LNGC 是实现天然气远距离保障的专用海上运输工具,这种方式具有很高的经济性。相对管道运输,LNGC 更加方便灵活,更适应多变的市场,被誉为“浮动的管道”。据统计,当运输距离超过 1600km 时,采用船舶运输比压力管道运输从安全性和经济性上具有更高的优越性^[1]。在目前跨洋、跨海域的 LNG 贸易格局中,海上运输已成为运输主力。

LNG 的运输包括液化站、海上运输和接收站(再气化),这些环节密切相连、相互影响、相互协同建设、同步投产,称为 LNG 海上运输链。天然气液化站是液化天然气的场所,典型的天然气液化站包括液化和 LNG 装船码头。LNGC 是 LNG 海上运输的主要载体,是实现天然气远距离运输的专用海上运输工具。LNG 接收站是接卸、储存和再输送天然气的场所,是 LNG 海上运输链的最后一个环节。在这里,LNGC 经过升温、再气化后,经输气管道送至各用户终端。接收站通常由一个专用接卸码头和后方站区组成。接卸码头是为 LNG 船舶提供锚泊、进出港、靠离泊和装卸作业的港口设施。后方站区由工艺部分、公用工程部分及辅助部分组成。

1.2 国际 LNG 海上运输发展现状

国际 LNG 海上运输发展走向是全球 LNG 经济发展的风向标。2013 年,在全球 19 个主要 LNG 出口国和地区中,卡塔尔、马来西亚、澳大利亚、印度尼西亚、尼日利亚是前五大 LNG 出口国,在 18 个主要 LNG 进口国和地区中,日本、韩国、中国、印度位居前四^[2]。根据国际天然气联盟(International Gas Union, IGU)和伍德麦肯兹等机构统计数据^[3,4]显示,2014 年全球 LNG 贸易供应量为 2.46 亿吨,较 2013 年的 2.41 亿吨增长 2.1%。据 BG Group 有关 LNG 贸易展望报告,2014 年 LNG 交付量达到了 2.43 亿吨,连续第三年达到有效平衡。虽然亚洲进口 LNG 增长低于预期,受季节性需求疲软和经济增长放缓的影响,进口量仍有所增加。即便如此,对于现期船货的竞争很有可能减少,这将导致 LNG 现货价格下降。

图 1.1 显示 2014 年亚洲与拉丁美洲的 LNG 需求增加,并超过供应,但由于需求疲软,影响现货市场价格,低于 2013 年。

图 1.2 显示欧洲 LNG 进口量经过连续三年的下跌后,低于去年同期 33 万吨。这仍是自 2004 年以来进口量的最低值,与 2011 年的峰值相差 66 万吨。

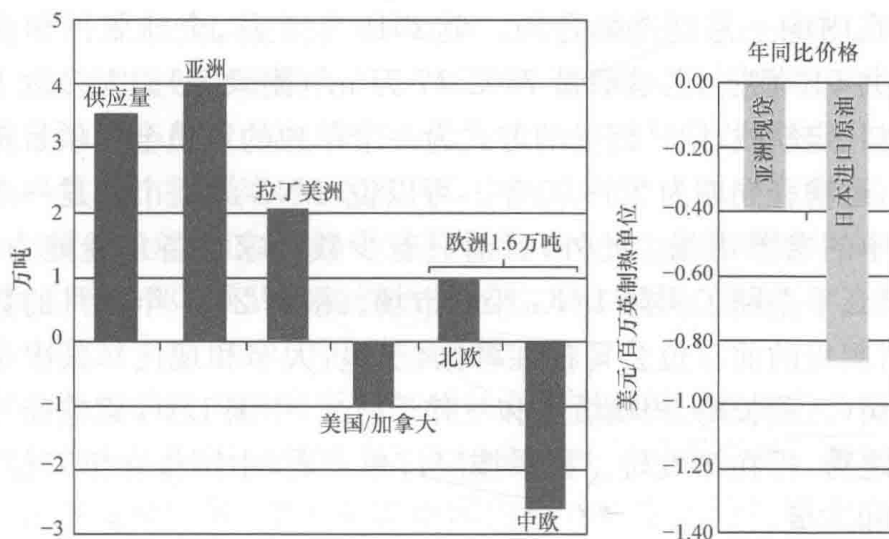


图 1.1 2013 年与 2014 年全球 LNG 贸易对比情况

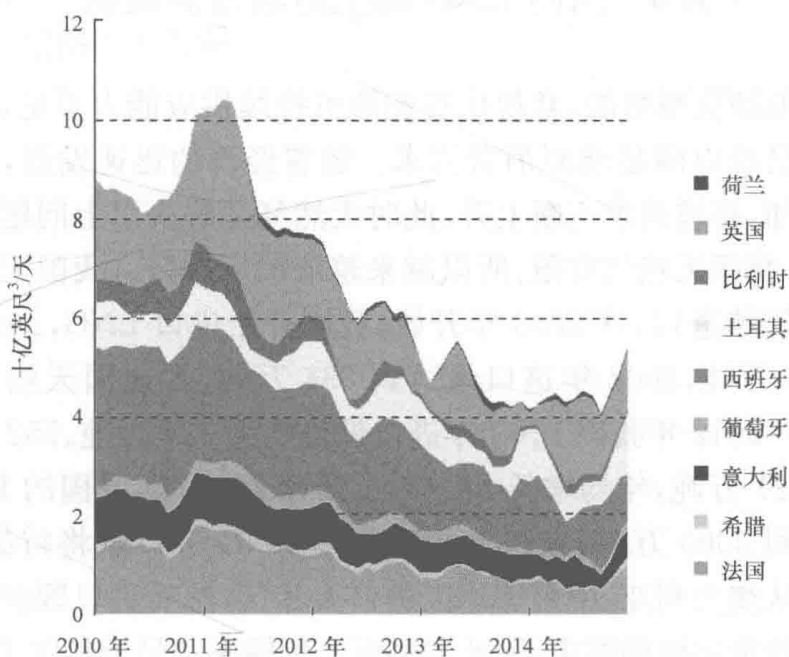


图 1.2 2010~2014 年欧洲 LNG 进口情况对比

(1 英尺=30.48 厘米)

从海上运输角度看,市场对美国未来数年将大规模出口 LNG 的预期,使相关 LNGC 建造合同创下历史纪录。尽管行业内 LNGC 的租船费率有所降低,但仍有 67 艘 LNGC 在 2014 年签署造船合同,其中韩国大宇海洋造船会社收获最大,获得包括亚马尔 LNG 项目 15 艘破冰

LNGC 在内的一系列造船合同。至 2015 年 5 月,全球服役和在建的 LNGC 共 510 艘^[5],总装载量 7602.47 万 m³(附录 A)。大多数 LNGC 以定港口、定航线、定计划量的方式为一个单独的贸易合同项目提供海运服务,运输合同期为 20~50 年。可以说,LNG 海运市场是一个完全没有竞争的垄断市场。此外,目前只有少数国家具备承造能力,而日本、韩国几乎垄断了国际 LNG 船舶市场。根据 2015 年 5 月的数据显示,交付服役的前三位公司都在韩国(三星、大宇和现代),其次是日本三家公司(三菱长崎、川崎坂出和三井千叶)。中国 LNG 运输船建造属于后起之秀,排在第九位。如果按照订单来看,中国排在第三位,仅次于大宇和三星。

1.3 国内 LNG 海上运输发展现状

我国能源资源短缺,常规化石能源可持续供应能力不足,国内供应能力显然已难以满足能源消费需求。随着经济的迅速发展,能源消耗量不断增加,环境要求不断上升,此时天然气是解决以上问题的重要能源。然而,我国天然气有限,所以越来越依赖于进口。我国天然气供应 30%以上依赖进口,从 2006 年开始,我国开始进口 LNG,2006 年进口量仅为 69 万吨,2008 年进口量达到 334 万吨,占全国天然气消费的 5%,2009~2012 年我国 LNG 年进口量分别为 334 万吨、552 万吨、936 万吨和 1221 万吨,年均增长 53.4%。预计 2020 年,我国的 LNG 年进口量将达到 3000 万吨,在未来短时间内 LNG 进口量将持续增长^[6]。我国主要从澳大利亚、中东等地区进口天然气,然而进口国的距离遥远无法满足管道运输的要求,因此需要海上运输来满足天然气需求。

我国 LNG 海上运输仍处于发展初期,LNG 运输船队规模尚小,自主运输能力有待进一步提高。LNG 海上运输在 LNG 产业链中扮演至关重要的角色,起着连接上游资源与下游用户间桥梁与纽带的作用,是 LNG 产业链中极其重要的环节。

目前我国已在多个沿海城市建立 LNG 接收站,截至 2016 年 5 月,主要建设情况详见附录 B。LNG 在中国能源消费中仅占 4%,与亚洲

的平均水平 8.8%，以及世界平均水平 24% 相比，处于远远落后的位置，而在“十二五”规划中要求在 2020 年天然气消费要占总消费的 12%，所以在未来的 7 年里 40% 左右的天然气依赖于进口，LNG 海上运输具有重大战略意义。据预测，到 2020 年，中国或将形成一个拥有 30 艘以上大型 LNG 运输船舶的船队，若按照每艘 LNG 运输船舶每年 18 航次计算，中国自有 LNG 船队将能够承担超过 3300 万吨的 LNG 进口量，或将满足中国绝大部分的 LNG 进口需求。

作为能源消费大国和天然气增长最快的国家，能源安全是实现我国现代化的基本保证，确保 LNG 运输安全处于首要位置。我国政府高度重视能源安全问题，要求采用由国内买方负责运输的船上交货贸易方式进口 LNG，同时还要求各 LNG 项目以我国航运企业为主进行 LNG 船舶投资和运输管理，国内船厂承担 LNG 船舶建造，国内船级社参与船级、船检技术服务。

第 2 章 LNG 与 LNGC

2.1 LNG 简介

LNG 是天然气在经净化及超低温状态下(-161.5°C 、一个大气压)冷却液化的产物。 1 m^3 LNG 气化后可得约 600 m^3 天然气,其液体密度约相当于水密度的 45%,燃点约为 450°C ,是一种非常清洁的能源。天然气已经成为世界的主要能源之一,它与石油、煤炭一同称为当代世界能源的三大支柱。

2.1.1 LNG 的理化特性

LNG 的主要成分是甲烷,另含少量的乙烷、丙烷、丁烷,以及少量硫化物、水和其他非烃类杂质。按照欧洲标准 BS EN 1160—1997 的规定,LNG 的甲烷含量应高于 75%,氮含量应低于 5%^[7]。LNG 的产地不同,其成分也不同,如表 2.1 所示。

表 2.1 各国 LNG 中甲烷体积分数

产地	荷兰	文莱	阿尔及利亚	澳大利亚
甲烷体积分数/%	81.7	88.0	86.5	91.5

甲烷的理化性质如下。

- ① 气态比重:在标准状态下气态密度为 $0.717\text{kg}/\text{m}^3$ 。
- ② LNG 密度:密度取决于其组分,通常为 $430\sim 470\text{kg}/\text{m}^3$,甲烷含量越高,密度越小。密度变化与液体温度呈一定函数关系,温度越高,密度越小,变化梯度为 $1.35\text{kg}/\text{m}^3$ 。
- ③ 既能在临界温度以下加压液化,也能在常压下降温液化,在标准大气压下的沸点为 -161.5°C 。
- ④ 易燃易爆:LNG 蒸气在空气中的爆炸浓度约为 5.3%~14.0%。
- ⑤ 气化潜热大,热值高,约为 $510.25\text{kJ}/\text{kg}$ 。

- ⑥ 无色、无味、无毒,溶于油,但基本不溶于水,对橡胶软化性强。
- ⑦ 化学性质稳定:与空气、水和其他液化气货品无危险反应。

2.1.2 LNG 的危险性

为方便船舶运输,一般将天然气冷却至约 -161.5°C ,天然气由气态变成液态,其体积约为同量气态天然气的 $1/600$ 。在LNG的海上运输过程中,LNG的危险性主要体现在如下方面。

(1) 易燃和易爆

天然气不论是气态还是液态,均属于高度易燃易爆的物质。天然气在空气中浓度达到 $5\%\sim 15\%$ 时,遇到明火可发生爆燃。LNG闪点极低,闪点在 -175°C ,沸点是 -160°C ,极易蒸发,爆炸下限为 $3.6\%\sim 6.5\%$,上限为 $3\%\sim 17\%$ 。引燃所需要的点火能量也非常低,通常小于 1MJ ,而且LNG在燃烧时很可能伴随爆炸的发生。当气态烃化物与有氧气按照一定的比例混合后形成爆炸性气体,遇到明火就有可能发生爆炸,并形成蒸气云爆炸(vapor cloud explosion, VCE)。LNG爆炸极限的上限会随着压力的升高而有明显的提高,使爆炸范围增大,并产生“爆轰”现象。LNG火焰的传播速度快;质量燃烧速率非常大,为汽油的2倍左右;火焰的温度高,易形成较大面积火灾;具有复爆性、难于扑灭的特点^[2]。

LNG海上泄漏会形成一个LNG液体池,其挥发时会形成一个比空气重的蒸气云。如果没有立即点火,可燃性气体云会随风飘移,在海面扩散,甚至飘进周边的陆地区域。当在它的最高和最低可燃性范围内(体积比 $5\%\sim 15\%$)遇到火源时,蒸气云会迅速燃烧形成闪火。火焰会回燃到LNG液体池,并在LNG泄漏点附近造成池火。处于闪火内或接近池火的人会因为燃烧和热辐射而受伤,甚至死亡^[3]。

此外,LNG一旦泄漏就会立即沸腾气化,与空气混合形成可燃性云雾,当这种云雾的浓度处于 $5.3\%\sim 14.0\%$ 爆炸范围时,遇到火源将发生爆炸,产生冲击波,对周围的人员和设施造成一定的损伤或破坏,即蒸气云爆炸。同时,蒸气云爆炸后,极可能造成其余的LNG储罐内低温深冷储存的液化天然气突然瞬态大量泄漏,遇到正在燃烧的火源发