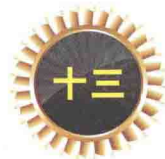


国外油气勘探开发新进展丛书

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



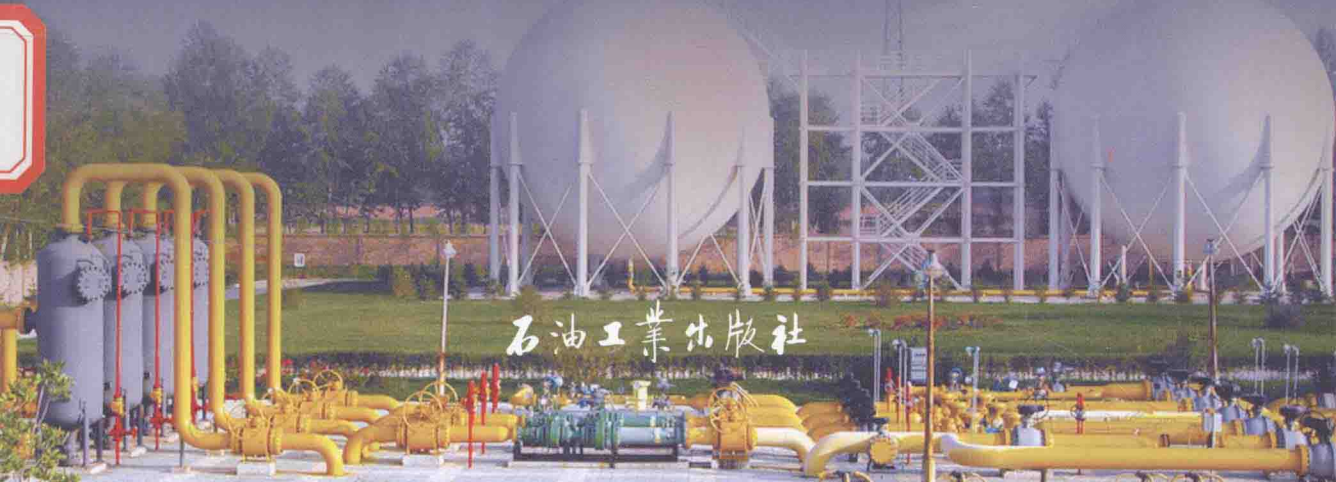
HANDBOOK OF LIQUEFIED NATURAL GAS

液化天然气手册

【加】 SAEID MOKHATAB 【美】 JOHN Y. MAK 著
【美】 JALEEL V. VALAPPIL 【英】 DAVID A. WOOD

中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心 译

石油工业出版社



国外油气勘探开发新进展丛书 (十三)

HANDBOOK OF LIQUEFIED NATURAL GAS

液化天然气手册

[加] SAEID MOKHATAB [美] JOHN Y. MAK 著
[美] JALEEL V. VALAPPIL [英] DAVID A. WOOD

中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心 译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书论述了 LNG 生产、加工、运输、销售等在内的 LNG 全产业链的各个环节,系统介绍了 LNG 生产过程、产业基础、工程设计以及全球化贸易等各个方面。本书对 LNG 产业进行了简要的综述,并根据不同主题详细展开,覆盖了 LNG 行业各种技术问题。

本书可供液化厂设计师、工程师、运营商和贸易商参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

液化天然气手册/ (加) 莫克哈塔布 (Mokhatab, S.) 等著; 中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心译. —北京: 石油工业出版社, 2016. 1

(国外油气勘探开发新进展丛书; 13)

书名原文: Handbook of Liquefied Natural Gas

ISBN 978-7-5183-1046-3

I. 液…

II. ①莫…②中…

III. 液化天然气-技术手册

IV. TE64-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 311374 号

Handbook of Liquefied Natural Gas

Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David A. Wood

ISBN: 978-0-12-404585-9

Copyright © 2014 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2015 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

All rights reserved.

Published in China by Petroleum Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予石油工业出版社有限公司在中国大陆地区 (不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2015-6807

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523712 图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 28.5

字数: 720 千字

定价: 158.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《国外油气勘探开发新进展丛书（十三）》

编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：（按姓氏笔画排序）

刘德来 杨 帆 单彤文 周家尧

赵章明 侯玉芳 贾 旭 曹砚锋

章卫兵

《液化天然气手册》编译组

组 长：单彤文

副组长：毕晓星 屈长龙 陈 杰

审 核：陈文煜 林春宇 赵 烨

成 员：（按姓氏笔画）

王亚群 王 沛 王 洁 王 超 王寰宇 尹全森

刘 冰 刘 洋 刘家桢 汤 竑 安东雨 许佳伟

花亦怀 李欣欣 李秋英 李恩道 杨文刚 杨宏伟

杨春艳 杨 亮 吴健宏 何 涛 邹默寒 宋 涛

张 丹 张 晨 张博超 陈 峰 邵晓亮 明红芳

罗婷婷 周 婵 赵思思 胡苏阳 胡献文 高 放

浦 晖 常心洁 崔艳菲 鹿来运 盖小刚 密晓光

隋朝霞 曾伟平 窦 星 翟 博

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

从2001年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了11辑60多本专著。在这套系列丛书中，有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟需。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大科研管理人员和师生的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关技术人员的手中。同时中国石油天然气集团公司也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书，列入“千万图书下基层，百万员工品书香”书目，配发到中国石油所属的4万余个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可，三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，形成了规模品牌，获得了很好的社会效益。

2016年在前12辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的6本专著，即《油气藏勘探与评价》《石油工程手册——可持续生产》《完井设计》《海洋结构物设计、建造与维护》《液化天然气手册》《天然气脱硫与处理手册》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校工作，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气集团公司副总经理

译者前言

天然气是一种洁净环保的优质能源，在工业、发电、交通等领域有极其广阔的发展空间。近年来，随着世界天然气产业的迅猛发展，液化天然气（LNG）已成为国际天然气贸易的重要部分。LNG 产业是一个新兴产业，贯穿天然气产业上游、中游、下游整个过程，包含勘探、开发、净化、分离、液化、储存、装载、运输、供应等众多环节。中国 LNG 行业虽然起步较晚，但经过十余年的发展，已经取得了较大进步。中国海油作为中国 LNG 行业的领军企业，在资源获取、市场开拓、项目建设、生产经营等方面取得了不菲的成绩，为推动中国 LNG 行业的发展做出了不懈的努力。

作为中国海油唯一的 LNG 产业链核心技术专业研发机构，中海石油气电集团技术研发中心，自成立以来，创造出数项中国 LNG 技术领域的第一，专业设置基本覆盖 LNG 产业链各个环节，已累计完成核心知识产权成果近百项，编制完成 LNG 方面的技术标准三十余项，获多项国家及行业技术进步及管理类奖项，省部级奖项十余项，其他奖项数十项，以雄厚的技术力量为中国海油在 LNG 清洁能源产业的领军地位奠定了坚实基础。

面对国内 LNG 行业专著不多的情况，中海石油气电集团技术研发中心在海外众多 LNG 论著中选择此书进行编译，希望能够为国内 LNG 行业的发展提供一些技术理论支持。在本书的编译过程中，中海石油气电集团技术研发中心成立了专门的编译小组，多位技术带头人、首席工程师、专业技术人员参与此书的编译。编译小组结合工程和技术经验，历时一年，数易其稿，精益求精，终于完成此书的编译工作。

由于译者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请专家、读者批评指正。

原书致谢

我们非常有幸能够汇集到全球众多专家参与这本手册的编写工作。他们秉持“学以致用”的精神，这正是理论界和商业界所必需的。感谢来自众多公司、机构、大学对我们工作的支持，书中正文和每章节后的参考文献都附有他们的名字。我们要特别感谢福陆公司、贝克特尔公司、DWA 能源有限公司、贝克工程及风险顾问公司、伊利诺伊大学香槟分校、马里兰大学、墨西哥石油学院、保加利亚科学院。同时，我们也要感谢我们的家庭、朋友和身边人的支持，他们的耐心、激励和鼓舞让这项工作变得十分愉快。最后，我们还要感谢来自各个领域的技术顾问多年来对技术研发和创新的鼓励。谢谢你们！

与伟大的思想同处一个时代是最好的教育。

John Buchanan

原书前言

在开创可再生能源的新世纪之前，天然气无疑是帮助我们渡过能源缺口期的可靠选择。作为一种公认的安全环保的燃料，天然气能够使世界很多地区实现减排。液化天然气（LNG）呈液态，密度更大，可通过 LNG 船或者槽车进行长线运输，运输和存储较天然气更为经济。LNG 在全球天然气贸易中的占比持续呈现逐年上涨的趋势，是能源行业增长最快的板块之一。

LNG 供应链从上游生产开始，经过液化厂、船舶运输、存储和再气化，一直延伸到管道气销售和电厂用户供气。LNG 生产属资本密集型投资，而近期高昂的生产成本让众多投资者打消了念头，未来 LNG 厂的业主必须重新评估现有的技术，使其更加适用于以降低整个生命周期成本为目标的设计。

本书详细描述了从液化到再气化的完整 LNG 供应链，可作为液化厂设计师、工程师和操作人员以及 LNG 项目开发商和管理者的参考书。本书对 LNG 产业基础和工程设计原则进行了概述，可作为石油化工课程的教科书，也可作为工程公司和运营公司的参考指南。本书第一章开宗明义地说明了 LNG 从液化到再气化的基本知识和 LNG 贸易，之后的章节逐步深入，涵盖液化循环优化、控制和自动化、安全防护和 LNG 创新等主题。我们认为本书是一套独一无二的资料集，阐述了覆盖整个 LNG 供应链的各种技术问题。

本书援引的资料源于不同的出处，包括今年以来的优秀论文和出版物，一些研究机构发布的标准和推荐性做法，以及参与编写的作者们本身的研究论文。参考文献列于各章节文后，供读者了解学习更多相关内容。感谢各章节作者为本书所做的贡献，也感谢 Elsevier 科学与技术出版社编辑部全体人员的耐心和协助。最后，对我们的家人和朋友表示衷心的感谢，感谢他们在本书筹备期间所给予的全力支持和耐心陪伴。

我们明白，LNG 技术日新月异，LNG 贸易也不断壮大。也许本书的内容不尽完美，但在天然气已成为最热门话题的今天，我们相信本书的出版恰逢其会。我们希望随着 LNG 行业进入到一个新的黄金时代，将会有更新更好的技术革新来刷新本书的内容。

Saeid Mokhatab

John Y. Mak

Jaleel V. Valappil

David A. Wood

作者简介

Saeid Mokhatab

Saeid Mokhatab 是天然气行业最知名的专家之一，专于中游技术领域。为全球多个石油和能源咨询公司国际咨询委员会成员，并一直积极参与多个大型气田开发项目，尤其专注于液化处理厂的设计、调试和开车等方面。发表有 200 多部技术著作与论文，包括《天然气输送与处理手册》，该手册由荷兰知名的国际化多媒体出版集团 Elsevier 出版社出版，受到全球天然气行业专家和学界的一致好评。创立了 Elsevier 同行评审期刊《天然气科学与工程》，在烃加工、LNG 行业的多个著名期刊、图书出版公司任编辑一职，是多个世界的专业协会和著名的天然气大会的技术委员会成员。鉴于其在天然气行业的出色表现，荣获了多项国际大奖，包括爱因斯坦荣誉金奖、Chilingar 无国界科学家金奖、卡皮查荣誉金奖，以及 Golomb-Chilingar “科学与工程巨人”荣誉金奖，并被收入多本世界名人名录。

John Y. Mak

John Y. Mak 是美国福陆（Fluor）公司的高级研究员兼技术总监，是引领能源化工领域技术和设计发展的领军人物。在天然气处理、排放控制、天然气凝液回收、碳捕捉、天然气液化和再气化、发电和煤气化等方面做出了卓越贡献，发表了 50 余篇相关文章，作为主要发明者拥有 80 余项授权和正在审批的专利。在其整个职业生涯中，参与了不同地区的 100 余个油气能源项目的开发，并通过创新设计为许多客户实现了降本增效和减排。率先在 LNG 接收站利用 LNG 冷能发电技术，实现了整体地增效和减排。同时，任中国煤炭论坛和一些中国技术公司咨询委员会的委员。

Jaleel V. Valappil

Jaleel V. Valappil 是位于美国得克萨斯州休斯顿的柏克德（Bechtel）公司油气和化工高级仿真团队的资深工程专家。多年来从事 LNG 及其他多种工艺的流程模拟、先进控制及流程优化，经验丰富。在加入柏克德公司之前，曾任 ASPEN 技术公司先进控制服务团队资深咨询工程师，负责为各种工艺开发和调配先进控制和流程优化解决方案。过去多年间，在开发和利用工艺仿真模型方面做了大量深入研究，并将其用于柏克德公司和康菲公司合作建设的 LNG 工厂的设计、工程和运营中。其认识到了 LNG 工厂全生命周期模型的优点，适用于

液化厂的设计、可行性及可控性研究、开车模拟、操作工培训模拟器、多线程的 LNG 工厂瓶颈问题的解决和运行排查。Valappil 博士还开发和调配了专门用于工程设计和生产运营阶段液化厂的 LNG 工艺先进控制技术。曾在行业会议和期刊上发表过多篇关于 LNG 工厂仿真和控制的论文，拥有多项关于 LNG 工厂控制和透平机械操作的专利。

David A. Wood

David A. Wood 已从事国际油气开发工作三十余年，涉足勘探生产的技术和商业运作、中下游项目、合同评估和高级企业管理等领域。早期曾供职于菲利普斯、阿莫科、伦丁等石油公司，也在全球范围内独立承揽过一些工作，现职为独立国际咨询师、培训讲师和专家鉴定师。发表的大量论文涉猎领域甚广，包括国际能源市场、油气财政政策规划、液化天然气、天然气合成油（GTL）、天然气存储和供应等。定期在《世界石油杂志》发表有关全球液化天然气行业形势和发展状况的文章。通过其所在的咨询公司 DWA 能源有限公司，为政府和企业提供 LNG 行业技术和商业方面的咨询服务。Wood 博士活跃于研究、出版和培训领域，并兼任《天然气科学与工程》杂志的总编助理。他是油气专业网上 MBA 项目的开发者与主要参与者，主要针对液化天然气和全球天然气供应链进行研究。

参与编著者简介

Hanfei Tuo

美国伊利诺伊大学香槟分校

编纂本书第四章“天然气液化循环的能效和焓分析”

Yunho Hwang, Abdullah Al-AbulKarem, Amir Mortazavi 和 Reinhard Radermacher

美国马里兰大学 (University of Maryland),

共同编撰本书第五章“天然气液化循环优化”

John L. Woodward

美国贝克工程和风险顾问公司

编撰本书第九章“LNG 安全和保障方面”

Blanca E. García-Flores, Jacinto Águila-Hernández, Fernando García-Sánchez (墨西哥石油学院) 和 Roumiana P. Stateva (保加利亚科学院化工工程学院)

共同编撰附录 2 “液化天然气体体系相行为的模型化”

荐 言

“对于液化天然气工业的各个领域来说，这本书都是一部优秀的人门书籍。我强烈推荐那些对 LNG 产业全面概况感兴趣的人阅读此书。这本书集中了我们一直在搜寻的关键信息，并且突出介绍了需在在建 LNG 项目重点考虑的关键问题。”

Tom Phalen

美国福陆公司上游项目运营副总裁

“从事 LNG 商务、技术或运营的各类人员将会乐于将本书收入囊中。即使简单浏览一下目录也让人眼前一亮，该书涵盖了所有 LNG 行业人士想要了解和钻研的新领域，让人不知道从哪儿读起。我强烈推荐这本有价值的读物。”

David Messersmith

Bechtel 油气化工 LNG 技术集团高级研究员兼经理

“本书包含合同谈判、设计、总承包执行、开车运行等相关内容，内容涉及 LNG 产业的各个方面，内容之完善使其成为许多技术类图书馆的热门之选。此外，这本书还对一些很少在其他文献中被提及或查找到的专题进行了研究，并用简洁明了的话语阐明了 LNG 产业中的复杂问题，因此这本书吸引了全球 LNG 业务相关各方的关注。”

Philip Hunter

Bechtel 公司资深 LNG 咨询师

“从概念设计到调试运行，本书首次填补了 LNG 完整供应链解决方案的所有空白。只要是 LNG 行业的专业从业人员，不管是从事哪个具体工作，都应人手一本。我强烈推荐用此书作为全球天然气专业的研究生教科书。”

Dr. Suresh C. Sharma

ONEOK 燃气公司首席教授兼美国俄克拉荷马州大学天然气工程及管理系主任

“该书是在同类书籍中唯一一本涵盖 LNG 供应链各方面细节的书。我强烈推荐此书作为所有从事 LNG 行业工作的专业人士、工程师和科技工作者的参考用书和燃气工程专业的研

究生教科书。”

Dr. Brian F. Towler

美国怀俄明州立大学化工和石油工程教授兼 CEAS 烃类能源高级研究员

“这本书是关于新兴能源的关键领域的一部重要著作，完整覆盖了 LNG 供应链的所有关键问题。书中对一些如 LNG 安全等富有争议的话题的描述也沿用了整本书全面、精确和易于理解的语言风格。该书为一些设计指南和运行程序提供了指导，可单独作为 LNG 专业人士的参考书，是一本代表本专业最高水准的研究生教科书。”

Dr. Valerio Cozzani

意大利博洛尼亚大学化学工程教授兼油气工艺设计专业研究生院主任

“这是第一本关于液化天然气供应链管理的书，给出了目前液化天然气产业的精准定位，是一本高质量的综合性著作。这本书涉及了很多别的著作忽略的研究领域，能够让业内人士更好地理解 LNG 工厂设计和运行的注意事项。这本书极具价值，可作为业内工程师和技术专家的案头参考书，也可作为该领域本科和研究生教学的极佳教材。”

Dr. Faisal Khan

加拿大纽芬兰纪念大学教授，安全与风险工程研究会主席

“鉴于 LNG 是目前全球增长最快的能源板块，且 LNG 技术的应用也朝着更广泛的领域发展，像本书这样涵盖整个 LNG 供应链中设计、运营和安全等诸多问题的操作手册，更能赢得 LNG 行业的设计人员、工程师和操作人员的青睐。当然，书中部分内容也可作为天然气处理专业极好的研究生教材和参考资料。”

Dr. Truls Gundersen

挪威科技大学能源与工艺工程教授

“这是一本内容严谨的综合性指导手册，能够为从事 LNG 行业的专业人士提供实践指导，我认为设有天然气工程课程的研究院校应该考虑将此书用作教材。恭喜本书所有作者写出了一本有价值、高质量的手册。”

Dr. Kenneth R. Hall

美国得克萨斯 A&M 大学 Jack E. & Frances Brown 主席，化学工程教授；
得克萨斯 A&M 大学卡塔尔分校研究生院副院长

目 录

第 1 章 LNG 概述	(1)
1.1 简介	(1)
1.2 搁置气商业化	(1)
1.3 LNG 特性	(2)
1.4 传统 LNG 供应链	(4)
1.5 海上 LNG 供应链	(38)
1.6 LNG 环境特征	(51)
1.7 LNG 设施的成本和经济意义	(56)
1.8 LNG 合同与项目开发	(60)
1.9 LNG 贸易	(67)
参考文献	(76)
第 2 章 天然气处理及凝析油回收技术	(82)
2.1 简介	(82)
2.2 液化天然气生产工厂	(82)
参考文献	(110)
第 3 章 天然气液化	(113)
3.1 简介	(113)
3.2 天然气液化技术	(113)
3.3 海上天然气液化	(128)
参考文献	(136)
第 4 章 天然气液化循环的能效和焓分析	(141)
4.1 简介	(141)
4.2 制冷/液化循环原理	(142)
4.3 制冷剂选择	(149)
4.4 能效和焓分析基本原理	(151)
4.5 天然气液化循环能效和焓分析	(162)
参考文献	(170)

第 5 章 天然气液化循环优化	(172)
5.1 简介	(172)
5.2 天然气液化循环改进类型	(172)
5.3 回收工艺损失和废热的能耗优化措施	(173)
5.4 优化概述	(177)
5.5 优化液化循环	(182)
5.6 驱动循环优化	(188)
5.7 移动 LNG 装置的优化设计挑战	(190)
参考文献	(190)
第 6 章 LNG 工厂和接收终端过程控制及自动化	(192)
6.1 简介	(192)
6.2 工厂自动化的目标	(192)
6.3 LNG 工厂过程控制/自动化建设与功能	(193)
6.4 LNG 工厂关键单元过程控制	(199)
6.5 LNG 工厂先进过程控制与优化	(207)
6.6 LNG 接收站的过程控制及自动化	(211)
6.7 案例 1: APCI C3MR 液化工艺的先进控制	(213)
参考文献	(217)
第 7 章 液化天然气工厂和再气化终端操作	(220)
7.1 简介	(220)
7.2 液化天然气工厂正常运行	(220)
7.3 常规启动顺序	(228)
7.4 LNG 工厂启动	(231)
7.5 LNG 工厂关停	(234)
7.6 性能和验收测试	(235)
7.7 LNG 再气化终端的正常操作	(235)
7.8 LNG 再气化终端启动	(237)
7.9 LNG 再气化终端关停	(239)
参考文献	(239)
第 8 章 LNG 工厂和接收终端动态模拟与优化	(240)
8.1 简介	(240)

8.2	LNG 工厂和接收终端生命周期的动态仿真	(241)
8.3	LNG 工厂的动态模型	(242)
8.4	动态模拟在 LNG 中的应用	(249)
8.5	LNG 接收站动态模拟	(262)
	参考文献	(265)
第 9 章	LNG 安全	(268)
9.1	简介	(268)
9.2	LNG 工厂的相关危害	(268)
9.3	LNG 设施的安全特性	(272)
9.4	LNG 的风险分析和控制	(275)
9.5	LNG 安全	(316)
	参考文献	(322)
第 10 章	LNG 工业的进步与创新	(330)
10.1	简介	(330)
10.2	LNG 液化的创新	(330)
10.3	LNG 的再气化	(343)
	参考文献	(350)
第 11 章	LNG 项目管理	(352)
11.1	简介	(352)
11.2	项目管理过程	(352)
11.3	成功的工程设计	(353)
11.4	业主与承包商关系	(354)
11.5	商务及项目目标	(354)
11.6	项目章程	(355)
11.7	项目风险评估及风险管理计划	(356)
11.8	Pre-FEED 或概念设计风险	(357)
11.9	LNG 项目管理关键因素	(359)
11.10	基于场景的风险评估	(359)
11.11	技术和重大风险 (工程设计)	(361)
11.12	危险和可操作性 (HAZOP) 研究	(361)
11.13	项目执行风险	(362)