

迎向“十二五”中国 LNG 的新发展

顾安忠

上海交通大学

顾安忠. 迎向“十二五”中国 LNG 的新发展. 天然气工业, 2011, 31(6): 1-11.

摘要 LNG 国际贸易已成为全球能源市场的一个热点, 经过近 10 年的加速发展, 我国小型 LNG 产业链不断完善, 小型 LNG 项目在我国天然气供应和使用中的作用尤为突出、地位日益提升。为此, 综述了迎向“十二五”中国 LNG 的新发展: ①首先根据国内外的市场现状与发展趋势, 论述了向天然气转型已是世界潮流, 同时认为未来一段时间中国无论是管道天然气还是沿海 LNG 接收站的天然气供应量都会大幅度增长, 中国 LNG 产业前景光明; ②进而剖析了我国小型 LNG 产业的构架, 汇总了中国现有的小型 LNG 工厂——其多建在小规模气源所在地且以本国或本地区用户为主要客户对象, 比较我国小型 LNG 物流模式后认为, 采用罐式集装箱用于铁路、公路、海上运输的联运, 可以充分发挥各种方式的优点; ③还分析了我国小型 LNG 的市场状况, 目前 LNG 多被用作城镇应急调峰储备、运输工具的替代燃料、城镇居民燃气以及一些工业领域(分布式能源系统、工业炉窑、焊接切割); ④最后对“十二五”期间我国小型 LNG 产业发展进行了展望: 继续发展小型天然气液化厂、建设一批中小型 LNG 应急储备设施、建立数个小型 LNG 接收站。结论认为: 小型 LNG 在我国天然气供应格局中的定位应是作为管道天然气的有益补充, 实现与管道天然气供应方式的优势互补, 以最大限度的满足国内市场对天然气的使用需求。

关键词 中国 LNG 产业链 小型 LNG 产业 储备调峰 清洁燃料 工业应用 分布式能源系统 展望

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.06.001

由于进口 LNG 有助于能源消费国实现能源供应的多元化, 保障能源安全; 而出口 LNG 有助于天然气资源国有效开发生产天然气, 增加收入, 促进国民经济的发展。因此 LNG 国际贸易已成为全球能源市场的一个热点, 其贸易量也连年高速增长, LNG 已成为全球增长最迅猛的能源产业之一。

就全球 LNG 产业而言, 大型 LNG 项目基本都建在沿海地区, 并以大宗出口为主要客户对象, 形成以基地生产型的大型 LNG 工厂和进口 LNG 接收站为主要环节的产业链; 而小型 LNG 项目则主要建在小规模气源所在地, 以本国或本地区用户为主要客户对象。小型液化天然气厂分为生产型和调峰型两种。小型 LNG 储备站(可带液化设施, 也可不带)是天然气事故调峰的重要手段, 对保障能源供应安全具有重要意义。

我国能源中长期发展规划明确指出: “十二五”期间, 大力发展天然气, 2030 年天然气将占到一次能源的 10%, 成为我国能源发展战略中的一个亮点和绿色能源支柱之一。在我国, 作为对管道天然气的有益补充, 液化天然气产业的发展在优化国家能源结构、促进经济持续健康发展、实现节能减排和保护环境方面都发挥着重要作用。

经过近 10 年的加速发展, 我国小型 LNG 产业链不断完善、商业运营模式日趋成熟、应用领域不断扩大、市场需求量快速增长、商业投资和商业推广应用活动日趋活跃, 由此在改善偏远地区居民生活燃料结构、提高居民生活质量、降低车辆燃料成本、缓解城市空气污染、保障城市能源安全稳定供应等方面取得了立竿见影的效果。小型 LNG 项目在我国天然气供应和使

作者简介 顾安忠, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 享受政府特殊津贴; 1962 年毕业于上海交通大学并留校, 在制冷专业任教 44 年; 兼任中国制冷学会理事, 上海市制冷学会常务理事、低温专业委员会主任, 曾担任上海交通大学制冷工程研究所副所长、工程热物理和能源研究所副所长、制冷与低温工程系主任、国际制冷学会 A3 委员会委员等职务, 现任上海交通大学液化天然气与新能源技术发展中心主任, 发表文章 250 篇, 出版专著 15 本。地址: (200240) 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学。E-mail: azgu@sjtu.edu.cn

用中的作用尤为突出,其地位日益提升。

近两三年来,很多非常规的 LNG 装置,包括一些使用非常规天然气资源(页岩气、煤层气等)的装置和建造在海上的浮式 LNG 装置项目都正在筹划中。这些项目大多采用小型 LNG 装置,以适应分散的非常规天然气资源以及海上平台有限的空间。随着全球经济的不断复苏以及近年来对非常规天然气的逐步重视,相信这些小型 LNG 装置也将会很快发展起来。

1 向天然气转型是世界潮流

全球 LNG 容量的变化情况如图 1 所示^[1]。从图 1 中可看出,全球 LNG 工业发展始于 20 世纪 70 年代,在当时的能源危机中由日本所驱动,年增长率相对平稳(2.5%)。到了 21 世纪初,由于环保的原因,全球 LNG 容量年增长率介于 4%~5%,在美国,缘于其大力推进联合循环发电,使得天然气需求量大增。

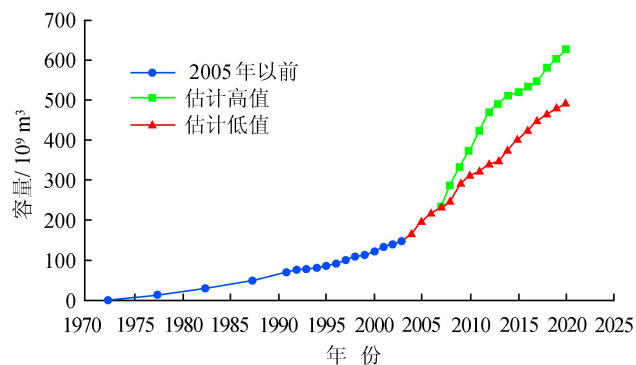


图 1 全球 LNG 容量的变化情况图

2003 年全球天然气消费量为 $2.6 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$,至 2006 年持续以 1.8% 的比例增加,其后又以每年 2.8% 的比例增长,预计 2025 年全球天然气消费量将达 $5.1 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$ 。在天然气贸易量中有 7% 是通过 LNG 的方式来进行的,表 1 反映了世界 LNG 进出口国家和地区的进出口量^[1]。

日本是目前世界最大的天然气进口国,2010 年 6 月,日本近 3 年来首次更新能源战略计划,重新定义了国家能源政策核心目标,其中包括减少温室效应气体排放的目标。新修订的计划着重提到天然气的优点,天然气被确定为快速建设低碳社会的重要能源构成,强调加快向天然气的转型。具体表现为对城市燃气产业提出了 5 个关键措施^[2]:①以燃气作为能源的燃料电池系统的推广应用,对民用住宅同时供电和供热;②在商业设施中燃气空调系统的推广应用;③在工业生产中天然气作为替代燃料的推广应用;④大力推广

表 1 LNG 的进、出口量汇总表(2005 年)

序号	出口国家和地区	容量/ 10^9 m^3	容量/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$
1	印度尼西亚	29.26	23.493
2	马来西亚	26.87	21.846
3	卡塔尔	25.63	20.720
4	阿尔及利亚	23.44	18.657
5	澳大利亚	13.37	11.411
6	特立尼达和多巴哥	13.32	9.869
7	尼日尔	11.43	9.245
8	文莱	8.49	6.942
9	阿曼	8.13	6.791
10	阿拉伯联合酋长国	6.75	5.567
11	埃及	6.83	5.014
12	美国	1.75	1.256
13	利比亚	0.83	0.716
14	其他	0.26	0.208
总计		176.36	141.735
序号	进口国家和地区	容量/ 10^9 m^3	容量/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$
1	日本	71.51	58.113
2	韩国	27.66	22.490
3	西班牙	21.40	17.032
4	美国	16.94	12.719
5	波多黎各	0.63	0.470
6	法国	12.19	9.701
7	中国台湾省	8.89	7.194
8	印度	5.68	4.595
9	土耳其	4.26	3.404
10	比利时	2.51	1.991
11	意大利	2.27	1.803
12	葡萄牙	1.63	1.323
13	英国	0.48	0.379
14	希腊	0.42	0.333
15	多米尼加	0.26	0.192
总计		176.73	141.739

热电联产系统;⑤实现 IT 集中能源管理系统。

2010 年末在台北举行的 GASEX2010 会议上,西太平洋地区以日本为首的多国都提出“向天然气转型”的能源目标。

美国是目前世界上最大的天然气消费国,每年消耗世界上 1/4 的天然气产量。上世纪除了国内生产的天然气外,加上从加拿大管线进口的天然气,供需基本持平;但进入本世纪,情况则发生了变化,供应量跟不上需求量的增长速度,不得不考虑从北非、中东进口部

分 LNG,以满足其 20% 的需求量。美国从天然气少量出口国变为了进口国,计划要建的 LNG 接收站多达 50 个。上世纪 LNG 产业仅限于调峰,相对规模较小。随着基地型应用进口 LNG,所有的商业机会将被打开,每个接收站年税收额达 45 亿美元。美国至今约有 100 个调峰 LNG 装置,大多建在天然气消费中心的附近,它们提供了必不可少的储存功能^[1]。

美国的小型 LNG 装置多用于为高峰时期供气,液化装置生产出的 LNG 被储存在大的 LNG 储罐中。当供气不足时(例如在冬天),就将储罐中的 LNG 气化并提供给用户。这些装置的液化能力介于 $15 \times 10^4 \sim 60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,储罐内的 LNG 能满足 150~200 d 的供气需求。

美国近些年在非常规天然气(页岩气、煤层气和致密砂岩气)的开发利用上显示出突飞猛进的态势,据报道 2010 年其产量已占全国燃气消耗量的 20%,预测 2011 年将有可能达到 40%。

我国将天然气发展视为一项能源结构调整和大气环境改善的重要举措。中国城市燃气进入了天然气阶段,20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,中国建设了一批天然气输送工程,推动了城市燃气的发展——城市燃气普及率提高、燃气结构发生了很大变化(表 2)^[3]。

表 2 中国燃气结构表

年份	人工煤气/ 10^8 m^3	LPG/ 10^4 t	天然气/ 10^8 m^3
1988	66.79	173.03	57.40
2000	152.36	1 057.71	82.15
2005	255.83	1 222.01	210.50
2009	382.40	1 208.71	405.90

未来的一段时间里,将是中国城市燃气产业的大发展阶段,并逐渐从大城市往小型城镇发展转移,同时人们将特别关注燃气的供应保障和安全供应。目前在天然气供应保障中的主要问题包括:①天然气供应量不足,仍未解决季节调峰问题;②单管网—单气源的供应方式,输送风险很大;③缺乏完善的配套储存设施,没有应急气源。这些都是必须引起高度关注和需要逐步解决的问题。

2 我国小型 LNG 产业的构架

2.1 我国的小型液化天然气工厂

2.1.1 LNG 工厂的气源概况

我国已建 LNG 液化厂主要气源来自于国内陆上和海上零散的小型气田、煤层气以及新兴的煤制气。

以小型气田为气源的有新疆广汇 LNG、中原油田 LNG、新奥燃气涠洲岛 LNG;以海洋天然气为气源的有福山 LNG 和珠海海油 LNG;以煤层气为气源的有山西晋城港华 LNG、阳城煤层气 LNG 等。

我国煤炭资源丰富,随着煤制气工艺技术的逐步提高,“十二五”期间在新疆、内蒙古、山西、陕西、辽宁、山东等煤炭资源丰富省区将陆续上马多个煤制气项目。2015 年煤制气液化能力将达到 $140 \times 10^4 \sim 280 \times 10^4 \text{ t/a}$,2020 年有可能达到 $220 \times 10^4 \sim 700 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。与此同时,我国的煤层气也将得到进一步开发和利用,页岩气将被重视,开发和利用的前景被看好。这些非常规天然气将为小型 LNG 工厂提供丰富的气源。

2.1.2 LNG 工厂建设概况

中国 LNG 工厂,从上世纪末开始经历了一个从无到有、从小到大、艰难曲折的发展过程。首先由上海引进了法国索菲公司技术,建成了一座生产规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的 LNG 工厂,它以海上气田生产的天然气为气源,只作为城市调峰。2001 年 9 月,国内首座商业化运行的 LNG 工厂——河南中原液化天然气工厂试投产运行,生产规模 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,LNG 年产量为 $4 \times 10^4 \text{ t}$ 。2004 年 9 月,新疆广汇 LNG 工厂投产,年产 LNG $40 \times 10^4 \text{ t}$,是目前国内投产的生产规模最大的 LNG 工厂。

近年来我国小型 LNG 工厂发展迅速,截止到 2010 年 1 月,我国已经运营的小型 LNG 装置有 30 多座。这些小型 LNG 工厂分布在新疆、四川、江苏、山东、山西、广东、内蒙古等省区,总规模近 $1 000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,年产量超过 $260 \times 10^4 \text{ t}$ 。国内 LNG 工厂一览表如表 3、4 所示^[4]。

另外,在建和拟建设的 LNG 液化项目还有 30 座左右,近一两年将陆续投入运行,而且单座容量都有增大的趋势,设计规模介于 $200 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.1.3 LNG 工厂工艺技术和装备现状

我国的 LNG 产业从无到有,在液化工艺技术、相关装置和设备等方面都取得了长足进步,我国参照国外的专利技术还开发了自己的液化天然流程。但较之于国外技术,国内在流程优化方面还有所欠缺,尤其是效率相对较低、设备的可靠性也不高。此外,利用管道天然气自身膨胀液化生产 LNG 适合于压差较大的调压站,我国也已经有了多个应用实践,工艺成熟。

2.1.3.1 LNG 工厂的工艺

我国已建成投产的 LNG 工厂中,一部分采用了国外的流程工艺技术,如美国的 B&V、Salof、ACPI,

表 3 国内已投产的小型天然气液化装置生产规模及年产量统计表

序号	生产装置名称	地点	生产规模/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	投产时间	年产量/ 10^4 t
1	上海浦东五号沟	上海浦东	10	2000年2月	2.67
2	河南中原绿能	河南濮阳	15	2001年11月	4.00
3	新疆广汇	新疆鄯善	150	2005年8月	40.00
4	四川犍为	四川犍为	4	2005年11月	1.07
5	新奥燃气涠洲岛	广西北海	15	2006年3月	4.00
6	海南海燃	海南福山	25	2006年3月	6.67
7	江阴天力	江苏江阴	5	2006年10月	1.33
8	四川泸州	四川泸州	5	2007年3月	1.33
9	辽宁沈阳	辽宁沈阳	2	2007年9月	0.53
10	江苏苏州华锋	江苏苏州	7	2007年11月	1.87
11	大庆 LNG 实验装置	黑龙江大庆	2	2007年12月	0.53
12	青海西宁(一期)	青海西宁	6	2008年1月	1.60
13	山东泰安	山东泰安	15	2008年3月	4.00
14	四川龙泉驿	四川成都	10	2008年8月	2.67
15	青海西宁(二期)	青海西宁	20	2008年8月	5.33
16	中海油珠海	广东珠海	60	2008年10月	16.00
17	山西晋城	山西晋城	25	2008年10月	6.67
18	山西顺泰	山西晋城	50	2008年11月	13.33
19	鄂尔多斯(1)	内蒙古鄂尔多斯	100	2008年12月	26.67
20	重庆民生黄水	重庆黄水	12	2008年12月	3.20
21	四川星能能源	四川达州	100	2009年	26.67
22	重庆民生璧山	重庆璧山	5	2009年	1.33
23	河南安阳	河南安阳	10	2009年2月	2.67
24	内蒙古时泰	内蒙古鄂托克前旗	60	2009年4月	16.00
25	新奥燃气山西沁水	山西沁水	15	2009年4月	4.00
26	安徽合肥	安徽合肥	8	2009年5月	2.13
27	鄂尔多斯(2)	内蒙古鄂尔多斯	15	2009年6月	4.00
28	青海西宁(三期)	青海西宁	20	2009年6月	5.33
29	山西晋城(二期)	山西晋城	60	2009年9月	16.00
30	宁夏 LNG	宁夏银川	30	2009年10月	8.00
31	山西 SK	山西沁水	50	2010年	13.33
32	陕西西安西蓝天然气	山西靖边	50	2010年	13.33
33	甘肃兰州燃气集团	甘肃兰州	30	2010年5月	8.00
总 计			991		264.26

表 4 国内具代表性的在建液化天然气项目一览表

序号	项目名称	设计规模/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	开工时间	液化流程工艺
1	新疆广汇阿勒泰	200	2007年6月	美国 BV 混合制冷
2	宁夏哈纳斯	150	2009年3月	美国 APCI 混合制冷
3	华油四川广安	100	2009年10月	美国 BV 混合制冷
4	华油安塞	200	2009年4月	中石油寰球混合制冷
5	新疆吉木乃	150~200	2010年5月	德国 Linde 混合制冷
6	陕西延长	50,100	2009年3月	中原绿能混合制冷

法国的 Sofe, 德国的 Linde 等;另一部分则采用了国内自行开发的技术,如河南中原绿能高科有限责任公司、成都深冷空分设备工程有限公司、中国科学院理化技术研究所等的流程工艺。目前,国产液化工艺包日趋成熟,单条生产线的规模可达 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (LNG 年产量为 $16 \times 10^4 \text{ t}$)。国内已投产的小型天然气液化装置的工艺流程技术统计情况如表 5 所示^[4]。

表 5 国内已投产的小型天然气液化装置的工艺流程技术统计表

序号	名称	生产规模/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	工艺流程技术
1	上海浦东五号沟	10	法国索菲 CII
2	河南中原绿能	15	国产级联式
3	新疆广汇	150	德国林德混冷
4	四川犍为	4	国产直接膨胀
5	新奥燃气涠洲岛	15	美国 Salof 氮—甲烷膨胀
6	海南海燃	25	加拿大 Propak 氮膨胀
7	江阴天力	5	国产直接膨胀
8	四川泸州	5	国产直接膨胀
9	江苏苏州华锋	7	国产直接膨胀
10	青海西宁(一期)	6	国产直接膨胀
11	山东泰安	15	国产氮膨胀
12	四川龙泉驿	10	国产氮膨胀
13	青海西宁(二期)	20	国产氮膨胀
14	中海油珠海	60	美国 BV 混冷
15	山西晋城	25	国产混冷
16	山西顺泰	50	国产氮甲烷膨胀
17	内蒙古鄂尔多斯	100	美国 BV 混冷
18	重庆民生黄水	12	俄罗斯高压射流
19	四川星星能源	100	美国 BV 混冷
20	重庆民生璧山	5	俄罗斯高压射流
21	河南安阳	10	国产直接膨胀
22	内蒙古时泰	60	国产氮甲烷膨胀
23	新奥燃气山西沁水	15	国产氮膨胀
24	安徽合肥 LNG 工厂	8	国产氮甲烷膨胀
25	山西晋城(二期)	60	国产混冷
26	宁夏 LNG 工厂	30	国产氮甲烷膨胀
27	陕西西安西蓝天然气	50	美国 BV 混冷
28	甘肃兰州燃气集团	30	美国 BV 混冷
总计		902	

2.1.3.2 LNG 工厂的设备

国内已建和拟建的小型 LNG 液化工厂,有些工厂的配套设备国产化率已达到 60%。处理规模为 30

$\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 及以下生产线的液化厂,从工艺包到有关设备选择的集成技术可以完全实现国产化。根据具体情况,还可以采用国产设备和进口设备相结合的方式。

目前,在液化厂主要设备中,离心式压缩机基本上靠进口,活塞式压缩机一般采用国产设备;冷箱以从国外引进为主;膨胀机一部分采用国产设备,另一部分则靠进口;低温泵,尤其是大型潜液泵,主要依靠进口;容量 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下的储罐以国产为主,而容量 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的大型储罐,国内尚未突破关键技术,基本上仍采用国外技术。

另外,国内企业和研究机构在设计和建设符合国情的、效率更高的小型 LNG 站方面已取得了新的理论和实践成果,已有多家设计院能承担小型 LNG 项目工程的设计工作,上海交通大学、中国科学院等研究机构已取得能应用于工程的研究成果。其中前者在液化流程工艺优化方面拥有独到的优势和经验,已为多个工程项目提供了帮助。

2.2 我国小型 LNG 物流模式

小型 LNG 的运营模式是把液化厂生产的 LNG 或由接收站进口的 LNG 通过专用汽车、火车或内河沿海的小型船舶运输到使用天然气的末端用户。

2.2.1 公路运输

我国小型 LNG 工厂大都建于内陆地区,LNG 主要靠陆路运输,运输设备为 LNG 罐式集装箱和运输槽车。随着小型 LNG 行业的持续发展,LNG 运输需求也在不断增加。目前我国正在运行的 LNG 运输车约 1 300 辆,其中以新疆广汇、新奥燃气、内蒙古鄂尔多斯运输车辆最多(均超过 100 辆),车型以北方奔驰、陕西重汽、东风天龙居多。

由于公路运输 LNG 成本高,运输半径有限,对市场开拓影响较大。使用公路运输 LNG,全国没有统一标准,甚至部分高速公路对 LNG 车辆禁行,造成运输成本升高、运输效率降低。公路运输作为短途运输中比较经济的运输方式,其在小型 LNG 的运输环节是无法替代的——即使铁路运输和内河运输大行其道,公路运输作为上述二者的有效补充仍不可或缺。随着我国天然气管网数量的不断增加和海气上岸规模不断扩大,公路运输仍有较大的市场需求量。

2.2.2 铁路运输

铁路运输的优点在于运输成本较低、运送能力大,几乎不受天气影响,计划性强,安全准时。当运输规模较大时,采用铁路运输可有效降低公路槽车的密度、增加公路的安全性。考虑到铁路运输相对于公路运输的成本优势,在铁路较发达而又不具备管道运输条件的

地区,用铁路运输 LNG 是一个很好的选择。

铁路运输 LNG 的缺点:①初始建投资大、建设时间长;②始发与到站作业时间长,不利于近距离的运输业务;③受轨道限制,灵活性较差;④路基、站场等建筑工程投资大。另外由于铁路一次运载量大,其危险性也高,这对安全系统提出了较高的要求。基于以上原因,新疆广汇在本世纪初曾经作过较大努力,希望改变这一格局,但结果还是未能如愿。

国外已有使用铁路运输 LNG 的先例:日本在 2000 年就开始采用火车输送 LNG,2003 年勇浮工厂开始采用公路、铁路配送 LNG 集装箱系统,2004 年大阪煤气集团开发了应用于铁路运输的罐式集装箱;挪威 MARINTEK 公司在 2003 年提出了一种小规模 LNG 的分配方案——小型 LNG 输送船、小型储存设施、LNG 铁路公路输送网络成为 LNG 分销链的关键环节;澳大利亚 CNGI 公司在其 LNG 铁路配送环节中使用专用列车进行输送。

2.2.3 内河和近海船舶运输

国外已有使用内河和近海船舶运输 LNG 的先例:2003 年,日本建造了第一艘容量为 2 500 m³ 的小型 LNG 船,目前日本已拥有 3 艘容量在 10×10⁴ m³ 以下的小型 LNG 船;德国乔特波公司设计了可以装载 LPG、液态乙烯或者 LNG 的液舱支持系统;而荷兰和波兰则分别建造了船容为 1 100 m³ 和 7 500 m³ 的小型 LNG 船。目前,我国也开始了对小型 LNG 船舶的研究和开发,例如江苏圣汇、浙江台州船厂受挪威斯考根公司的委托就已建和在建多艘万方级的小型 LNG 运输船舶,但均为出口产品。

现阶段在国内开展内河和近海船舶运输 LNG 仍存在很多制约因素:①根据《液化天然气码头设计规范》(JTS 165-5—2009),LNG 接收站码头选址、建设要求较高,规范复杂,而且建造成本也高;②小型 LNG 船舶受吃水限制、航道要求,运输范围较小,而且对船的前后间距、与其他船的运输间距都有严格要求;③小型 LNG 船对现有大中型 LNG 接收站停靠的适用性,需要船和码头的设计单位进行技术论证;④目前国内的 LNG 接收站不具有装船功能,如果要进行 LNG 分销转运,则需要进行装船功能改造;⑤ LNG 船是易燃易爆的危险介质,属于特殊类船只,营运受海事部门的严格监管,管理较为复杂。

由于 LNG 工业的迅速发展、海上油气田的开发及 LNG 物流范围的拓展,LNG 内河和近海运输的需求开始出现。我国天然气消费市场主要集中在沿海、沿江城市,而这些城市恰恰离天然气气源较远,也是天

然气管网无法覆盖的盲区。凭借国内天然的航道,利用小型 LNG 船在近海和内河进行 LNG 水运,运输量大、成本低,是较为理想的新型 LNG 物流模式。同时小型 LNG 船也可用于回收海上油田伴生气的输运。

国外的实践经验证明,采用液化天然气船运输 LNG 可以从不同的产地装货,具有更自由、灵活的特点。今后从沿海的 LNG 接收站,用小型 LNG 船向沿海中小城市或内河沿江城市输送 LNG,将是一种很有前途的发展方向。

2.2.4 各种运输方式的比较

2.2.4.1 经济运输规模

借鉴 LPG 运输的数据进行推算,当电价为 0.5 元/kWh,管道单位建造费(万元/t)与电价(万元/10⁴ kWh)之比为 3 时,相比于管道运输,公路、铁路和船舶 3 种 LNG 运输方式在一定的运输成本下的经济运输规模如表 6 所示^[4]。

表 6 各种 LNG 运输方式的经济运输规模表

运输方式	公路	铁路	船舶
规模运输成本/元·(t·km) ⁻¹	0.6	0.3	0.2
经济输运规模/10 ⁴ t·a ⁻¹	≤8.0	≤15.0	≤70.0

2.2.4.2 合理运输半径

根据相关资料,在公路、铁路与船舶 3 种 LNG 运输方式可实现联运的情况下,各种运输方式的合理运距如表 7 所示^[4]。

表 7 各种运输方式的合理运距表

运输方式	公路	铁路	船舶
经济输运半径/km	500	500~1 000	≥1 000

2.2.4.3 运输能耗

根据相关资料测算,得到各种运输方式在不同运输距离下,输送单位质量 LNG 的一次能源(换算成天然气)消耗量如表 8 所示^[4]。

表 8 各运输方式的单位能耗表

运输距离/km	500	2 000	4 000
公路/MJ·kg ⁻¹	5.771/0.839	7.723/3.355	11.64 /6.710
铁路/MJ·kg ⁻¹	5.513/0.221	5.816/0.884	6.700/1.768
船舶/MJ·kg ⁻¹	5.072/0.140	5.494/0.562	6.055/1.123
管道/MJ·kg ⁻¹	2.520/0.428	3.805/1.714	5.515/3.424

注:公路、铁路与船舶的能耗,“/”前后分别为包含和不包含液化能耗;管道能耗,“/”前后分别为包含和不包含初始压缩能耗。

结合上面的分析结果认为:若采用罐式集装箱用于铁路、公路、海上运输的联运,可以充分发挥各种方式的优点;与低温液体槽车相比,罐式集装箱具有更好的机动性;同时,罐式集装箱具有结实可靠的框架结构,对低温液体储罐具有良好的保护作用,使储罐避免受到直接的撞击而发生意外,提高了低温液体运输的可靠性。

2.3 我国的小型 LNG 市场

低碳经济正成为国人关注的焦点,而作为优质清洁能源,天然气将是发展低碳经济、优化能源结构的必然选择。LNG 产业前景一片光明。

2.3.1 用于城镇应急调峰储备

目前我国天然气应急调峰储备方式主要有两种:

①地下储气库方式;②LNG 储存。

2.3.1.1 地下储气库方式

目前,中国石油天然气集团公司在天津大港拥有国内已建成的最大规模的地下储气库——大港储气库群,包含 6 个储气库,设计总库容为 $30.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.3.1.2 利用 LNG 作为城市应急调峰储备气源

应根据其供气规模、运输距离,选择其储存天数,一般小型 LNG 应急调峰储备站的储存天数为 5~7 d。截至目前,我国已投入运行的大型 LNG 储备、应急项目主要有上海五号沟 LNG 安全应急项目和深圳 LNG 应急储备项目;城市自建天然气液化装置的储存应急项目有南京 LNG 项目和合肥 LNG 项目。另外,我国已有 30 多个城市在规划或建设 LNG 储存气化项目。这类 LNG 储备应急站具有如下功能:①当门站发生异常现象并造成城市天然气供应不足时,提供应急供气;②当次高压管线发生事故工况下,为城市补充应急供气;③满足城市天然气小时调峰的需要,保证稳定供气;④具备装车功能,可通过汽车槽车为城市其他独立组团、LNG 汽车加气站或小型 LNG 气化站提供非管道运输供气服务。

小型 LNG 用于调峰有较强的灵活性,不仅适用于季节性调峰,也适用于日调峰。而且它对选址没有太多的限制,可根据供气调峰和应急供气的需要建在供气管网的合适位置。小型 LNG 特别适用于城市调峰的各项要求,城市有了自主的小型 LNG,就有了调控优势和储备优势,可以变被动为主动,同时也减轻了天然气供应商的压力和责任。

目前我国小型 LNG 用于天然气应急调峰还处于初级阶段,制约因素很多:①在小型 LNG 来源方面,

对一些大城市、特大城市要获得较大的 LNG 调峰能力,能否建设自主 LNG 接收装置尚存在制约;②在储备模式上,推荐的储备模式为政府储备与商业储备相结合;③在储备调峰气价上,LNG 的价格应该维持在比管道气稍高的基础上,只有多元化的 LNG 来源才能有利于价格的降低;④在投资渠道上,储备建设的资金来源应以政府投资为主,但政府部门和企业间很难磋商,往往因此而搁浅;⑤缺乏有关小型 LNG 利用的法规和标准。这些因素都对小型 LNG 用于天然气应急调峰有所制约。

小型 LNG 用于天然气应急调峰储备是缓解城市天然气安全供气的重要途径。应争取在近几年内使建设的储气库工作容量保持在国内天然气总消费量的 10%~15%,使之达到或超过国际平均容量 11% 的水平。尤其在一些特大或大型城市的附近,应适当建立必要的安全应急战略储备气库。小型 LNG 的灵活性对城市日调峰能起到关键性的作用。

2.3.2 LNG 作为运输工具的替代燃料

在国内,以 LNG 为燃料的汽车及相应的加气站已初具规模,而火车与船舶尚无以 LNG 作为燃料的商业化运行实例。

2.3.2.1 LNG 用作汽车燃料

LNG 被公认为理想的清洁能源替代燃料之一。与柴油相比,有以下两大优势:

1) 环保优势。LNG 发动机排放的氮氧化物只有柴油发动机排放的 25%,碳氢化合物和碳氧化物分别只有 32% 和 12%,颗粒物的排放几乎为零,LNG 发动机的声功率只有柴油发动机的 36%;据有关资料介绍,使用 LNG 作发动机燃料,尾气中有害物质的含量比使用燃油燃料其二氧化碳、二氧化氮含量分别降低 98% 和 30%,更有利于环保。

2) 经济优势。相同功率的发动机,基于目前市场上的柴油及 LNG 价格计算,使用 LNG 燃料比使用柴油可节省燃料费用 30%。因此将 LNG 作为替代燃料应用在汽车、船舶等交通运输领域,对国家实现节能减排战略目标具有重要意义。

近年来,我国 LNG 燃料汽车已进入了快速发展通道,在短短的 3 年时间内,国内已经有新疆、山西、内蒙古等地的 LNG 重型卡车及北京、杭州、深圳、乌鲁木齐、昆明、海口、湛江、张家口等城市 LNG 公交相继投入了运行,而且这一城市群体还在迅速扩大,充分说明了 LNG 燃料汽车的技术已经完全成熟、节能减排优

势明显。表9、10分别反映了最近3年内国内LNG燃料汽车的发展情况及未来3年汽车市场需求情况^[5]。

表9 最近3年内国内LNG燃料汽车的发展情况统计表

汽车分类	全国发展总数/台		
	2008年	2009年	2010年
LNG客车	50	250	2 830
LNG重卡	0	1 000	2 952

表10 未来3年内国内LNG燃料汽车市场需求情况统计表

汽车分类	发展数量/台		
	2011年	2012年	2013年
LNG客车	6 000	12 000	18 000
LNG重卡	25 000	30 000	45 000

为了实现“十二五”节能减排的战略目标。国家已经规划在“十二五”期间重点发展清洁能源汽车,以逐步替代现有的燃油汽车。国家工业和信息化部装备工业公司在《节能与新能源汽车产业发展规划(2011—2020)》中明确了2015年的阶段目标:“车用燃料结构得到优化,替代燃料占车用燃料消耗的比例达到10%以上,天然气汽车推广规模达到150万辆以上……”

对LNG燃料汽车发展进度影响最大的是配套LNG加气站的建设。目前,我国3大能源企业(中石油、中石化、中海油)及新疆广汇、新奥燃气、中国港华燃气、华润燃气等一批公司相继进入了LNG替代汽柴油用于新能源汽车的研究领域,并相应作出了3~5年建设LNG汽车加气站、生产LNG公交汽车和重型卡车的规划。表11、12分别是最近3年内国内LNG加气站的发展情况及未来3年的市场需求情况统计^[5]。

表11 最近3年内国内LNG加气站的发展情况统计表

年 份	2008年	2009年	2010年
全国发展总数/套	0	25	101

表12 未来3年内国内LNG加气站市场需求情况统计表

年 份	2011年	2012年	2013年
发展数量/套	380	680	980

2.3.2.2 LNG用作火车燃料

1993年,美国莫里森—努逊(MK)公司推出了首台完全以LNG为燃料的调车机车。据测定,该机车

是在相同功率等级机车中,NO_x的排放量最低——仅为0.3 mg/kJ。在给定的同一运行条件,该机车性能较之在其他功率较大内燃调车机车的性能高出不少。随后GM下属的EMD公司及GE公司分别开发了LNG和传统燃料的双燃料的干线机车。

与作为汽车的替代燃料相同,用LNG替代铁路内燃机车燃料的优势主要体现在LNG价格及环保方面。用LNG作为内燃机车的燃料,可以节省大量的燃料费,还能大量减少有害气体、CO₂、微粒等污染物的排放量。

然而,电气化的铁路网络制约了LNG机车的应用规模,为了少量的LNG机车新建一批加气站是不经济的。由于LNG密度小且储罐需要良好的隔热措施,因此其体积会比原来的燃料箱大许多,这对机车的改装提出了较高的要求。以东风4D型内燃机车为例,其燃料箱容量为9 m³,若改为纯LNG机车,则需搭载约16 m³ LNG,而实际储罐的体积还会更大。

因此,列车机车采用LNG作为燃料的前景尚不明朗。

2.3.2.3 LNG用作船舶燃料

2000年1月,挪威生产了世界上第一艘以LNG为燃料的渡轮,也是世界上环保性能最好的船舶之一。此船的造价约比传统的以柴油为燃料的渡轮高出30%。尽管建造费用很高,但如果能实现批量制造,由其带来的环境效益将非常显著,同时造价也可相应降低。

内河船舶用LNG替代燃料的优势也主要体现在经济性与环保性两个方面:①经济性,天然气价格要比传统燃料低很多,若再考虑到天然气良好的燃烧性,其效率较高,则可节约更多的燃料成本;②环保性,据分析,纯LNG驱动船舶与传统燃料的船舶相比,CO₂排放量减少约20%、氮氧化物排放量减少约90%、颗粒排放可以忽略不计、硫含量为零,而且采用LNG作为船舶燃料在水体保护、降噪等方面也有一定的作用。

然而,LNG船舶的经济性会受到当地天然气价格的影响,其用户规模会受航道沿线加注站密度的制约。我国LNG船舶的发展尚处于起步阶段,尚未建立LNG船舶加注站,这在一定程度上制约了LNG船舶的发展。鉴于此,我国可先在小型渔船和载重船舶上推广LNG燃料。由于渔船大都集中停泊在相对固定的港口,因此只需建设少量的加注站即可满足较大区域的LNG船舶的燃料需求;对于载重船舶,其燃料一般只用于提供推进动力,因此其一次加注的行驶距离大,对LNG加注站的密度要求相对较低。另外,LNG还可作为小型旅游船只、游艇的替代燃料。这种船只

的工作区域一般为环境相对脆弱的公园湖泊,采用 LNG 作为燃料正好发挥了 LNG 在环保方面的巨大优势,而且旅游景点的船只非常集中,加之其价格承受能力也较强。

2009 年 4 月,全球首套 LNG 船用燃料储存供气系统由张家港富瑞特种装备股份有限公司下属的控股子

公司张家港韩中深冷科技有限公司研发试制成功并顺利交付客户挪威汉姆沃斯公司。同时,在国内 LNG 船舶油改气项目也有了长足的发展。截至目前,已经先后有湖北西篮、北京油陆、桂林新奥燃气、新疆广汇、福建中闽等多家能源企业为了抢占 LNG 在船舶领域的应用市场而开展了船舶燃料油改气示范项目的运作(表 13)。

表 13 国内已经开展的 LNG 在船舶上的应用项目统计表

序号	项目实施单位	示范船舶名称	用途	水域	项目进展情况
1	湖北西篮天然气有限公司	武轮渡拖 302 号轮	拖轮	长江	已改造完成并投入示范运行
2	北京油陆集团	苏宿货 1260 号船	运输	大运河	已改造完成并投入示范运行
3	桂林新奥燃气有限公司	山水 34 号	游船	漓江	已完成改造工作,目前正在试验阶段
4	新疆广汇集团	522 kW 渔政船	渔政	东海	目前正在进行船舶的改造设计
5	福建中闽物流有限公司	待定	运输	闽江	项目可研已完成,正在等政府审批

2.3.3 城镇居民燃气化的应用

近 10 多年来,我国城镇化进程不断加快,城镇居民数量不断增加。1990 年,我国城镇人口仅有 3 亿,占全国人口总数的 26%;到 2000 年城镇人口比重已经达到 36.2%;到 2009 年,我国城镇人口数量已经超过 6.2 亿,城镇人口比重也达到 46.6%;城市人口比重平均每年增加 1 个百分点,如果这个增长速度继续保持 10 年,可以预见,到 2020 年我国的城市化水平将可能达到 58%。而目前我国城市平均气化率程度仅为 30%,管道天然气普及率就更低了,有些地区还不到 10%,市场远未饱和。可见,今后随着我国城镇化进程的加速和城市家庭构成的小型化趋势,城市用天然气的人口和人均天然气消费量还将不断增加,特别是二线城市的城镇化和工业化。这对大力发展天然气提出了更高的要求。

根据小型 LNG 的特点,对于居民气化,主要适用于以下 3 种情况:①在气源地附近,或可在因地制宜、配送方便、价格经济的地区优先气化;②对于距离城市较远、不能通过城市管道输送天然气的乡镇、新城市的气化;③对管网已覆盖的地区用作调峰和管网气化的补充用气。

可见,城镇居民尤其是偏远地区居民选择小型 LNG 的供气模式是适合的,也是经济可行的。中国天然气需求潜力巨大,LNG 气化站以其灵活性强的优点今后将继续为中国的天然气市场培育作出贡献,发展前景光明。

2.3.4 LNG 的工业应用

小型 LNG 项目应用于工业方面主要在燃气空调和分布式能源供应方面发挥着重要作用。

2.3.4.1 分布式能源系统

分布式能源系统,是相对于能源集中生产(主要代表形式是大电厂十大电网)而言的,它主要是通过外部输入的一种或几种一次能源,然后将生产得到的二次能源(电、热、冷)分散输送到一个相对独立的区域(如企业、社区、学校、医院等)。其能源利用率远远高于多数国家依靠大型主要电站将电力从发电厂向终端用户单向传输的集中供电系统。城市内分布式能源系统主要以天然气为燃料。推广利用分布式能源系统的目的是改善区域环境、提高人民生活水平、节约水资源、增强电网调峰能力。

据国际分布式能源联盟的统计结果,截至 2004 年底,美国分布式供能系统装机容量占国内总装机容量的 7.8%。欧洲分布式供能发展水平世界领先,尤其是丹麦、荷兰、芬兰等国,其分布式供能发电量分别占到国内总发电量的 52%、38%、36%,远远高于世界平均水平。在日本能源供应领域中,热电(冷)联产系统是仅次于燃气、电力的第三大公益事业。

与发达国家相比,我国分布式供能技术尚处于起步阶段,差距较大。我国在技术、经济、政策法规等方面还存在诸多需要完善之处。近几年在上海、广州和北京已经建成了 10 多座分布式供能系统,用于医院、机场、商业中心等场合。但我国的分布式能源系统普遍存在微小型燃气轮机依赖进口、动力余热缺乏高效的利用手段、低温余热利用不充分、节能率不高、经济性不够理想等问题。

由于分布式能源系统的初期投资大,所以首先要用好燃料;同时要有比较稳定的冷、热、电用户——主要是第三产业和住宅用户;另外还要求具有较好的环

保性能等,因此其在我国比较适合应用的地区显然是经济较发达地区。其他地方,例如在天然气产地附近、天然气价格特别便宜的地方,分布式能源系统的应用也可能是适合的。分布式能源系统是能源利用的一个新的发展方向,但在可预见的较长一段时间内,大电厂与大电网仍是我国电力供应的主力。

2.3.4.2 工业炉窑

工业炉窑是指以燃气作为能源,用于熔炼、加热、热处理、焙烧、干燥等工艺过程的工业化应用,比如天然气制陶瓷等。通常,工业炉窑采用的能源有4种:电、煤、油、气。以电为能源的工业炉窑,其加热方式是将电能转换成热能来实现的;以煤、油、气为能源的工业炉窑,其加热方式是将煤、油、气作为燃料,使燃烧产生的火焰和高温烟气对物料进行加热来实现的。主要设备有天然气热处理炉、天然气锻造加热炉、天然气陶瓷窑、天然气铜铝熔化炉和天然气热风机等。

为保证陶瓷质量,清洁能源是其首选燃料。在LPG价格居高不下的情况下(正常情况下比天然气价格高30%),LNG就成了高档陶瓷工业的唯一选择,其提高了陶瓷产品的综合竞争能力。目前陶瓷工业相对集中,单窑用气量大(一般每日用气量在5 000~8 000 m³)且建设费用低、周期短。

2.3.4.3 焊接切割

切割与焊接是各行各业广泛采用的金属加工形式。其中,气割与气焊是利用可燃气体燃烧时所放出的热量加热金属或进一步实现对金属进行切割或焊接的一种气体火焰加工方法。由于气割和气焊具有设备简单、使用灵活方便、比其他焊割方式(如机械切割)效率高、能在各种部位实现焊割作业等优点,目前应用十分普遍,特别是广泛用于钢板下料、铸件冒口切割、较薄工件及熔点较低有色金属的焊接。在气体焊、割中,传统的氧—乙炔焰切割与焊接技术目前在我国还占据着90%以上的市场,但是由于乙炔是由电石与水反应所生成的,而生产电石要消耗大量电能和其他一些贵重工业原料,加之乙炔还是重要的化工原料,可以进一步合成多种化工产品,因此将乙炔作为工业燃气烧掉不仅对资源是一种浪费,而且对环境也有着严重污染。因此,如果能用天然气代替乙炔进行火焰切割和焊接,不仅切割质量更高、节约能源、降低成本(80%以上),而且还有利于资源的合理利用和环境保护,也更加安全可靠。不久的将来,天然气将逐步替代乙炔和液化石油气作为切割或焊接气,并广泛应用于油田、铸造、

机械、建筑等行业的大批量切割或焊接加工。

3 迎向中国小型 LNG 的新发展

3.1 充分认识小型 LNG(行业)在我国天然气供应格局中的作用和地位

1)为了改善国内能源结构、缓解国内能源供应紧张局面、确保国家能源供应安全,近些年,国家加大了跨国天然气管道和沿海进口 LNG 接收站的规划建设规模。因此,未来5年,中国无论是管道天然气还是沿海 LNG 接收站的天然气供应量都会有大幅度的增长。

2)与此不相适应的是,受经济性和建设进度等因素限制,管道天然气和进口 LNG 接收站供应的目标市场现在还主要集中在管道沿线和接收站周围的大中型城市,能覆盖的区域和人口数量极为有限。而我国多数城市天然气储备调峰等基础设施都没有得到配套同步建设,随着管道天然气用量的扩大,城市天然气季节性调峰问题也表现得愈发突出。另外在我国中西部广大偏远地区,许多县市、乡镇以及管道天然气覆盖不到的居民聚居点,还处于无气可用的局面。这不仅影响到人民生活水平的提高,也不利于当地社会的和谐稳定。

3)小型 LNG 与管道天然气相比,在建设方面,具有占地少、投资小、建设周期短、受地形条件限制少的特点;在应用方面,具有贮存运输便捷、供应灵活、使用方便、经济适用、适宜中小规模用户使用的特点。这些特点恰好弥补了管道天然气的不足,既可以作为临时性过渡方案,也可以作为长期性解决方案,满足管道天然气暂时无法通达的偏远县市、乡镇的居民用气和工业用气问题,也可以满足管道天然气的城市调峰应急需要,还可以替代汽油、柴油,发展天然气汽车和船舶。

4)另外,对于规划中管道天然气计划通达的中小城镇,也可以把小型 LNG 作为过渡性方案,先用小型 LNG 开发培育燃气用户市场,等到管道天然气通达,再把小型 LNG 供气方式转为管道天然气供应方式。当大、中、小城市都实现了天然气供气一体化时,小型 LNG 气化站又可作为天然气管网供气高峰负荷和事故调峰的备用气源站。这样,既满足了市场迫切的用气需求,又提高了未来天然气供应的保障水平,同时还不会造成未来小型 LNG 资产的闲置浪费。

5)总之,小型 LNG 在我国天然气供应格局中的定位应是作为管道天然气的有益补充,实现与管道天

然气供应方式的优势互补,最大限度满足国内市场对天然气的使用需求。小型 LNG 能为改善人民生活条件,实现经济又好又快发展,促进节能减排、保护环境作出贡献;而且小型 LNG 市场的繁荣,有助于带动我国机械制造业、汽车工业以及低温制造业、钢铁工业和物流运输业的发展,加速我国能源经济建设和环保革命的进程,促进经济持续健康发展。

3.2 “十二五”期间我国小型 LNG 产业发展展望

3.2.1 继续发展小型天然气液化厂

以解决陆上边际气田、海上小气田以及小规模的气田、煤层气等零散天然气资源的利用和外输为目标,因地制宜、科学规划,在气源富集地适度发展小型 LNG 液化厂,提高天然气回收利用效率。

在“十二五”期间,我国 LNG 总液化能力将达到 $430 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4$ t/a;其中,煤层气液化能力“十二五”期间将达到 140×10^4 t/a(约合 500×10^4 m³/d);煤制气液化能力在“十二五”期间达到 $200 \times 10^4 \sim 280 \times 10^4$ t/a(约合 $500 \times 10^4 \sim 1\,000 \times 10^4$ m³/d)。

3.2.2 建设一批中小型 LNG 应急储备设施

以市场需求为基础,调峰与战略并重,国家储备与企业储备结合,全面布局与重点建设统筹,近期任务与长远目标兼顾,重点解决主要城市、区域的应急调峰问题,提高国际应对突发供气中断事件的综合能力,保障天然气稳定供应和确保安全。

“十二五”期间,我国将集中建设 3 个国家级储备基地,满足中部、南部调峰、应急需求,新建 LNG 储备 150×10^4 t/a;结合中东部重点城市用气情况,在广州、潮汕、南京、安庆、武汉、胶东、天津等沿江沿海城市和地区布置一批中小 LNG 应急储罐,合计规模在 25×10^4 t 左右。

到 2020 年,新建 LNG 储备规模达 300×10^4 t,分散建设 44 个 16×10^4 m³ LNG 大型储罐。根据城市用气情况,结合 LNG 大型储罐建设,灵活建设一批中小型 LNG 城市应急储罐,新增 LNG 规模 50×10^4 t 左右。

3.2.3 建立数个小型 LNG 接收站

依托大型 LNG 接收站资源,在沿海沿江经济比较发达、天然气市场需求较大、运输条件方便、管线难

以到达地区,开展建设小型 LNG 接收站试点,待条件成熟,可扩建成大型 LNG 接收站。

在“十二五”期间,在广东省及其周边、长江三角洲、环渤海地区开展小型 LNG 试点工作,拟布置多个小型 LNG 接收站,每个接收站规模为 5×10^4 t/a,增加储存能力和补充市场。

3.3 创建小型 LNG 物流运输的新模式

小型 LNG 公路、铁路和船舶 3 种主要运输方式在经济运输规模、合理运输半径和运输能耗方面各有优势。因此,在运输条件比较好、选择比较多的情况下,可采用罐式集装箱用于 3 种运输方式的联运,以充分发挥各自的优点。

同时,小型 LNG 浮式液化天然气接收及储存终端(FSRU)作为大型 LNG 浮式终端的一种补充,其技术在国际上已很成熟,具有较好的安全可靠性和经济可行性。浮式终端具有建设费用低、建设周期短、能在不同的地点多次利用、接收储存成本低、终端操作人员少、对当地环境无负面影响、易扩容及改造、环境敏感度低等优点,比较适合于缺乏天然港口或港口规划不易变更的地区。

参 考 文 献

- [1] HUANG STANLEY, CHIU CHEN-HWA, ELLIOT DOUG. LNG: basics of liquefied natural gas[M]. Austin: The University of Texas, 2007.
- [2] Anon. Japan - shift to natural gas[C]//Pursuing Cooperative Paradigm on Energy, Environment and Economy Proceedings. Taipei: GASEX2010.
- [3] WANG Tianxi. China - the prospect of city gas development in China[C]//Pursuing Cooperative Paradigm on Energy, Environment and Economy Proceedings. Taipei: GASEX2010.
- [4] 国家油气“十二五”规划前期研究项目组. 国家油气“十二五”规划前期研究报告[R]. 北京: [出版者不详], 2010.
- [5] 富瑞特装工程技术中心. 中国 LNG 燃料汽车及船舶的发展趋势[R]. 上海: 上海交通大学—张家港富瑞特装工程技术中心, 2011.

(收稿日期 2011-05-01 编辑 居维清)