

PRICO[®] 天然气液化技术在海上浮式装置上的应用

张跃征 盖璟权 江 浩 刘晓刚

博莱克威奇（北京）工程设计有限公司

摘 要 较之于岸上（陆地）天然气液化装置，海上浮式天然气液化（FLNG）装置具有投资低、建设周期短、便于迁移及可重复使用等优点，但也面临着易受海上工况及船体晃动影响等诸多挑战。为此，借助于 PRICO[®] 单循环混合冷剂（SMR）天然气液化工艺技术所具有的较大的灵活性，以及流程简单、易于操作、可满足不同客户的需求、成本更低等优势，运用模块化设计进行了 FLNG 装置的设备布置，针对海上操作环境对部分关键设备进行了改进，研发出了世界上第一个基于该工艺的浮式天然气液化装置——Exmar FLNG，并进行了现场调试及性能考核。应用效果表明：① PRICO[®] 天然气液化技术能够使 FLNG 从概念设计实现工程化，并获得更多的发展空间；② Exmar FLNG 装置集合了天然气处理、天然气液化、LNG 储存和装卸功能，工艺流程简短、装置设备数量少、操作简单，具有较短的开停车时间，能较好适应海上恶劣天气及原料气组成变化大的工况，其设计与建造完全符合船级社的相关规范和规定。结论认为，该技术为海洋石油伴生气处理、边际气田和深海气田开发利用提供了一种新的既安全又经济的解决方案。

关键词 LNG PRICO[®]SMR FLNG Exmar FLNG 单循环混合冷剂 模块化设计 灵活性 制冷剂换热器 性能考核

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.06.015

Application of PRICO[®] liquefaction technology in offshore floating devices

Zhang Yuezheng, Gai Jingquan, Jiang Hao & Liu Xiaogang

(Black & Veatch - Beijing Engineering Design Co., Ltd., Beijing 100022, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 6, pp.115-120, 6/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Floating liquefaction facilities have many advantages over land-based facilities, such as lower cost, shorter construction cycle, easy movement from locations and reuse, but they have to meet such challenges like serious sea conditions, ship sloshing, etc. The Black & Veatch's PRICO[®]SMR LNG technology containing the essential requirements to meet the needs of floating LNG producers promotes the engineering application of FLNG. Simple process and easy operation of PRICO[®]SMR – specifically, the ability to handle a wide range of gas pressures, gas compositions and production rates – provides clients with a wide range of feed gas options and operation flexibility and also reducing the production cost. The Exmar FLNG, a PRICO[®]SMR facility, adopts a modular design and its key equipments have been improved for the offshore operating environment with advantages like simpler flow process, fewer equipment and facilities, simpler and easier operation, shorter start-stop time, more adaptability to bad weather at sea and great variation of feed-gas compositions. It has completed gas trial and performance test as the first floating LNG facility of the world. It provides a new safe and economical solution for the development of offshore associated gas, marginal gas fields and deep-sea gas fields. It also provides guidance for new FLNG facilities. Its design and construction completely confirms the related codes and regulations of all various classification societies.

Keywords: LNG; PRICO[®]SMR; Floating liquefied natural gas (FLNG); Exmar FLNG; Single mixed refrigerant; Module design; Flexibility; Refrigerant exchanger; Performance test

作者简介：张跃征，1982 年生，高级工程师，硕士；主要从事液化天然气项目设计和开车方面的研究工作。地址：（100022）北京市朝阳区建外大街甲 6 号 SK 大厦 15 层。电话：（010）58165850。ORCID: 0000-0003-3403-3954。E-mail: zhangy@bv.com

与陆上天然气液化工厂相比,海上浮式天然气液化 (FLNG) 装置具有建设周期短、便于迁移、可重复使用和投资低等特点而受到越来越多的关注并成为行业热点。笔者通过对博莱克威奇公司 (Black & Veatch) 开发 PRICO[®] 天然气液化技术在 FLNG 装置上应用的介绍,以期为新建的 FLNG 装置提供指导。

1 FLNG 液化工艺

1.1 PRICO[®]SMR 天然气液化技术

天然气液化设备是 FLNG 装置的核心设备,其成本占总安装成本的 30% ~ 50%^[1-2],对整个 FLNG 装置运行的安全性和经济性影响都较大。FLNG 液化装置由于处在海上作业下的特殊环境,首先要实现最基本的天然气液化功能,其次要在占地面积小、工艺流程简易、设备布局紧凑的前体下,达到在海上生产和船体晃动对安全可靠性提出的要求。与相同规模的岸上液化天然气工厂相比,FLNG 的投资将减少 20% 以上,建设工期将缩短 25%^[3-7]。

单循环混合制冷剂液化流程 (SMR) 是目前中小型 LNG 装置广泛采用的天然气液化工艺。PRICO[®]SMR 液化技术以其成熟可靠、流程简单、设备数量少、易于操作等特点使得 FLNG 装置实现了工程化。另外,氮膨胀液化工艺也曾被认为适用于

FLNG 装置,但其相对较低的效率限制了实际应用^[8]。较低的效率不仅体现在对能耗的影响上,同时会明显增加占地面积进而会增加项目成本。

对于大型 LNG 装置采用的基荷型液化工艺,例如丙烷预冷混合制冷剂液化工艺 (C3-MR) 及双循环混合制冷剂 (DMR) 也已经在 FLNG 装置上使用。通常,工艺越复杂、设备越多,占地面积越大。复杂的流程和较高的成本限制了这些技术在中小型 FLNG 上的应用。

PRICO[®]SMR 对于大型装置同样具有优势。多条生产线的配置可以满足对 LNG 产能的要求。采用 PRICO[®]SMR 液化技术的某一大型 LNG 液化装置,目前正处于设计阶段。此装置采用 2 条气体预处理生产线,4 条液化生产线。每条液化生产线的生产能力约为 $150 \times 10^4 \text{ t/a}$,装置总的生产能力为 $600 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。采用多条生产线的配置具有很多优势。当其中一条生产线由于生产设备的原因造成停车后,整个装置的生产能力降低 25%。但是,如果采用一条生产线,整个装置不得不完全停车。另外,多条生产线的设计可采用更小的模块化设计,进一步降低对占地面积的需求。

PRICO[®]SMR 液化工艺不同于上述其他工艺^[9-11],制冷剂为单循环系统。其主要的工艺流程如图 1 所示:低压混合制冷剂通过制冷剂压缩机被压缩到中压,经冷

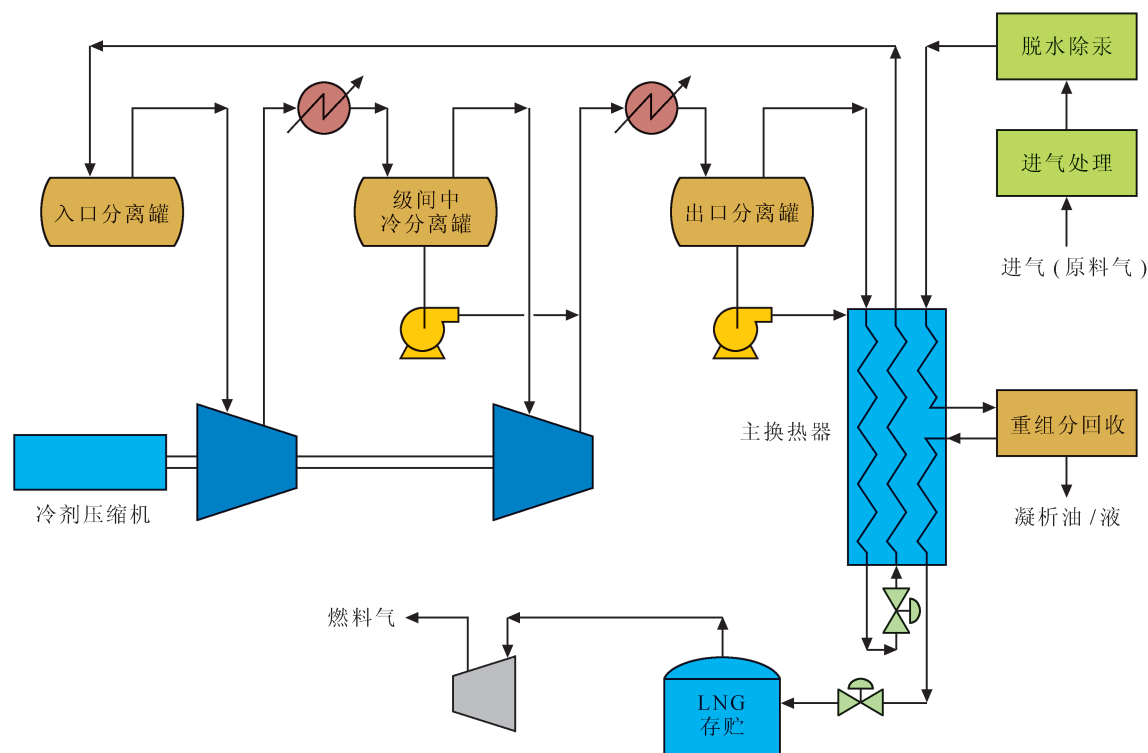


图 1 PRICO[®]SMR 液化工艺流程图

却器冷却降温后，气相冷剂返回冷剂压缩机二段被压缩到高压，液相冷剂由冷剂泵加压后与气相冷剂混合进入致冷剂换热器。高压混合冷剂经致冷剂换热器预冷并节流返回换热器以提供冷量。天然气在致冷剂换热器中被冷却液化，经节流到储存压力后进入 LNG 储罐。

1.2 主要设备

冷箱（制冷剂换热器）是制冷剂系统的一个关键设备^[12-13]。PRICO®SMR 技术采用的冷箱不同于其他技术的冷箱，不含任何其他阀门、设备或非焊接的接口，减小了冷箱内部泄漏的几率。板翅式冷剂换热器已经在广泛的使用过程中证明其在日常使用过程中不需要特别维护，且其在浮式生产储油卸油装置（FPSO）中有十分成熟的应用。

冷剂压缩机是天然气液化装置中另一个关键设备，为两段离心式单体压缩机。与双体压缩机相比，其具有体积小、结构简单的特点。当需要进行维修时，不需要将连接压缩机的管线断开就可将机芯抽出。同时，在 PRICO®SMR 工艺中，设有密封气回收系统以回收冷剂压缩机密封气，减少冷剂损失。同时，在 FLNG 装置上，压缩机采用了轻便的航改型燃气轮机进行驱动，其比工业轮机效率提高了 25%，并在海上有广泛的应用^[14]。

1.3 原料气的灵活性

复杂多样的原料气组成是天然气液化装置所面临的一个主要挑战^[15]。原料气来源有时由多个管网供给并且变化很大，C₅⁺重组分需脱除以免冻堵冷箱。同时，惰性气体如二氧化碳（CO₂）和氮气（N₂）的脱除也应在设计中加以考虑。

相对于岸上天然气液化装置，FLNG 装置具有便于迁移的优势。当被开采气田枯竭或者不再具备开采的价值后，可迁移至下一个气田以提高天然气液化装置建设的经济性，但这同时也对液化工艺对原料气的适应性提出了要求。PRICO®SMR 液化工艺对原料气有较大的适应性，可以根据不同的原料气组

成情况，在其基础工艺上加以改进和辅以其他流程，来处理不同的原料气工况^[16]。表 1 列出了几个典型的 LNG 工厂根据其原料气的特点采用 PRICO® 技术并进行优化以得到解决方案。

1.4 易于操作

PRICO®SMR 液化工艺流程简短、装置设备数量少、操作简单。通过分散控制系统（DCS）控制液相冷剂阀门，改变液相冷剂进入冷箱的流量即可实现对冷剂组分的调节。

海上天气变化要求 FLNG 装置具有较短的开停车时间。当天气影响到海上生产时，要求液化装置能够快速停车，反之则要求液化装置能够快速开车。采用 PRICO®SMR 液化工艺的装置，当液化装置停车时，低温介质能够滞留在冷箱底部内保冷，缩短再次开车的时间。

2 FLNG 装置设备布置

由于 FLNG 液化装置甲板空间有限，建在甲板上的天然气液化装置对设备数量、重量和占地面积要求严格。相对于陆上天然气液化装置，FLNG 装置要求设备数量尽量少，重量尽量轻，占地面积尽量小^[17]。各种天然气液化工艺的设备数量对比如表 2 所示。

PPRICO®SMR 液化工艺可采用单条或多条生产线配置来满足对产能的变化要求。同时，设备布置还会根据气源位置、电力配置、冷却水使用是否有限制、LNG 装卸 / 出口方案等要求的不同而变化（表 3）。FLNG 装置可自建辅助系统或者依靠建在码头上的设施提供。PRICO® 液化工艺在 FLNG 装置的设计上采用了模块化设计，各工艺模块根据质优价廉的原则在全球范围内选择供应商进行建造以缩短项目整体建造安装周期^[19]。

LNG 储存也是 FLNG 装置需要考虑的问题。LNG 储罐可以布置在 FLNG 装置甲板下，然后定期通过 LNG 运输船转运出去。也可以在 FLNG 装置附近停泊 LNG 运输船以接受 FLNG 装置生产的 LNG

表 1 典型 PRICO®LNG 工厂特点及解决方案表

序号	名称	原料气组成	组成特点	流程特点
1	新疆 LNG	H ₂ 体积分数为 55.6%，CH ₄ 体积分数为 19.5%，CO 体积分数为 24.5%	合成气	PRICO®+CO/H ₂ 分离系统
2	内蒙古 LNG	H ₂ 体积分数为 18.7%，N ₂ 体积分数为 8.3%，CH ₄ 体积分数为 73%	焦炉气	PRICO® 脱氮 / 脱氢系统
3	吉林 LNG	N ₂ 体积分数为 5.8%，CH ₄ 体积分数为 89.9%	天然气，氮气含量高	PRICO® 脱氮系统

表 2 各天然气液化工艺的设备数量对比表^[18]

天然气液化工艺		工艺设备数量					
		压缩机	膨胀机	冷却器	预冷换热器	主低温换热器	分离器
MR 工艺	SMR	1		2		1	2
	DMR	2		4		2	4
	C3MR	2		2	1	1	1
	AP-X	3	1	3	2	2	1
阶式工艺	阶式	3		3		3	3
	优化阶式	3	3	3		3	2
	混合流体阶式	3	1	5	1	2	3
膨胀工艺	单级膨胀	2	1	2		2	
	双级膨胀	3	2	3		3	
	预冷膨胀	3	1	3	1	3	1

表 3 FLNG 装置设备布局表

系 统	选 项
液化能力	(50 ~ 140) × 10 ⁴ t/a 单条生产线 (100 ~ 120) × 10 ⁴ t/a 多条生产线
制冷剂压缩机动力	燃气透平 电机
压缩机段间冷却	空冷 海水 / 淡水
蒸发气 (BOG) 压缩	位于浮式装置或储运船上 位于岸上
气体处理及干燥	位于浮式装置或岸上
LNG 储存	位于浮式装置上 (甲板下) 或者 LNG 储运船上 位于岸上
公用工程	位于浮式装置上 位于岸上
电力	位于浮式装置上 来自岸上电网或者发电装置

产品。LNG 储存设施的容量取决于 LNG 的产量、海况条件、运输船的数量及大小，其设计原则是在保证稳定生产的前提下，尽可能提高 LNG 运输船的运营经济性。

3 FLNG 装置——Exmar FLNG

Exmar FLNG 装置为非自航驳船，集合了天然气处理、天然气液化、LNG 储存和装卸功能。由博

莱克威奇公司 (Black & Veatch) 提供 PRICO®SMR 液化工艺专利、上述液化核心装置的设计和采购、现场调试和开车服务。该装置可将 200 × 10⁴ m³/d 天然气转化为液态天然气 (约 500 000 t/a)，并已于 2016 年 9 月完成 72 h 性能考核。Exmar FLNG 工艺流程如图 2 所示。

Exmar FLNG 装置甲板上部工艺装置包含了可将原料气中二氧化碳及水脱除的预处理单元。Exmar FLNG 装置所生产的 LNG 将会被临时储存在甲板下总容积为 16 000 m³ 的 3 个储罐中。LNG 最终将会被 LNG 运输船转运至用户处。LNG 储存及装卸过程中产生的闪蒸气 (BOG) 会被用作燃料气或者根据实际生产情况再液化为 LNG。同时，Exmar FLNG 装置设计有公用工程及制冷剂补充系统。整个 Exmar FLNG 装置的设计与建造完全符合船级社的相关规范和规定。

制冷剂压缩机由燃气轮机驱动，所需燃料由 Exmar FLNG 装置自身的燃料气系统提供。燃料气系统同时也为装置内发电机提供燃料以满足装置电力需求。Exmar FLNG 装置配备了 3 台双燃料发电机为装置提供稳定可靠的电力。

Exmar FLNG 装置根据自身工艺特点，根据脱酸气单元及脱水单元的功能采用了模块化设计，缩短了装置的建设周期，减少了设计及施工中的接口，降低了施工风险。此外，基于 FLNG 装置的特点所做的设计也在本装置中得到应用。例如，为了减少液体在分离设备中剧烈晃动而增加的挡板，酸气脱除单元中采用填料塔代替板式塔以避免板式塔在海上

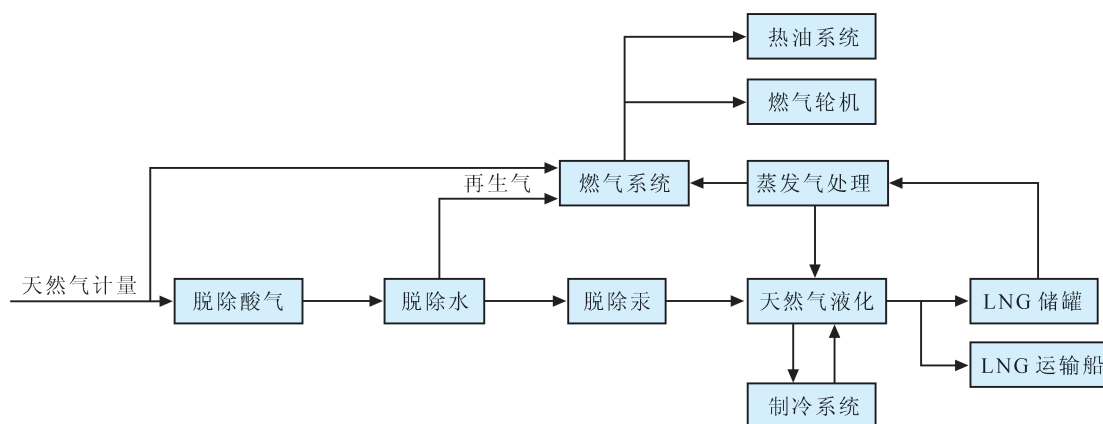


图 2 Exmar FLNG 工艺流程简图

工况中由于晃动而可能产生的气液分布不均现象。

FLNG 装置便于迁移及重复使用的优势，决定了其适用于原料气组成变化大的处理要求。在 Exmar FLNG 装置的性能测试中，原料气中甲烷含量大约为 89%， C_2 及以上组分含量超过了 15%，与设计值甲烷含量为 94% 有较大偏差。通过集中控制系统(DCS)根据原料气组成及压力变化调节冷剂组成配比，而不需要向系统中添加额外冷剂。通过调整装置的运行参数，提高 LNG 产品中乙烷、丙烷及丁烷的含量，避免了由于重烃系统的超负荷而导致的火炬泄放。PRICO[®]SMR 天然气液化工艺的这种灵活处理能力，不需对管道及设备做任何修改。

4 结束语

工艺简单、灵活高效的天然气液化技术使得 FLNG 从概念设计阶段实现了工程化。随着工程化技术的逐渐成熟和岸上 LNG 项目的减少，FLNG 获得了更多的发展空间。PRICO[®]SMR 天然气液化技术凭借其工艺流程简短、装置设备数量少、操作简单等特点走在了 FLNG 的前端，为海洋石油伴生气处理、边际气田和深海气田开发利用提供了一种新的既安全又经济的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 谢彬, 王世圣, 喻西崇, 黄霞. FLNG/FLPG 工程模式及其经济性评价[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 99-102.
Xie Bin, Wang Shisheng, Yu Xichong & Huang Xia. FLNG/FLPG engineering modes and their economy evaluation[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 99-102.
- [2] 夏丹, 郑云萍, 李剑锋, 肖杰. 浮式液化天然气技术综述[J]. 天然气与石油, 2013, 31(3): 9-13.
Xia Dan, Zheng Yunping, Li Jianfeng & Xiao Jie. Review on floating LNG production facility technology[J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(3): 9-13.
- [3] 王春节, 魏林瑞, 张磊. 浮式液化天然气液化工艺综述[J]. 化学工业, 2010, 28(2/3): 27-29.
Wang Chunjie, Wei Linrui & Zhang Lei. Process technology of floating LNG[J]. Chemical Industry, 2010, 28(2/3): 27-29.
- [4] 朱刚, 顾安忠. 用于边际气田开发的浮式液化天然气生产储卸装置[J]. 天然气工业, 2000, 20(4): 83-85.
Zhu Gang & Gu Anzhong. Floating production, storage and off loading of liquefied natural gas for marginal gas field development[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(4): 83-85.
- [5] 薄玉宝. 浮式液化天然气 (FLNG) 技术在中国海上开发应用探讨[J]. 中国海洋平台, 2013, 28(3): 1-5.
Bo Yubao. Floating liquefied natural gas (FLNG) technology in China offshore development application to discussion[J]. China Offshore Platform, 2013, 28(3): 1-5.
- [6] 巨永林, 顾妍, 李秋英. 浮式 LNG 生产储卸装置关键设计技术对比分析[J]. 化工学报, 2009, 60(增刊 1): 27-34.
Ju Yonglin, Gu Yan & Li Qiuying. Comparison analysis on key technologies of LNG-FPSO[J]. CIESC Journal, 2009, 60(S1): 27-34.
- [7] 张春, 唐剑锋, 李玉星, 林日亿, 王盛吉. 海上浮式 LNG 预处理工艺系统适应性分析[J]. 煤气与热力, 2011, 31(2): 5-10.
Zhang Chun, Tang Jianfeng, Li Yuxing, Lin Riyi & Wang Shengji. Adaptability analysis of offshore floating LNG pretreatment process system[J]. Gas & Heat, 2011, 31(2): 5-10.
- [8] Pribe D, Huebel RR & Foglietta JH. LNG floating production, storage, and offloading scheme: US6889552B2[P]. 2005-05-10.
- [9] 计维安, 温冬云. LNG 液化工艺在边远分散井中的应用分析[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(1): 39-43.
Ji Wei'an & Wen Dongyun. Application analysis of LNG liquefaction technology in outlying dispersed well[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(1): 39-43.
- [10] 田士章, 陈帅, 杨波. 液化天然气及天然气物性计算软件设计[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(3): 254-261.
Tian Shizhang, Chen Shuai & Yang Bo. Design of liquefied natu-

- ral gas and natural gas properties calculation software[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(3): 254-261.
- [11] 王元春, 程小姣, 高俊, 王思茜, 曹连进. 阶式双混合制冷剂液化天然气流程的混合制冷剂研究 [J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(3): 50-53.
- Wang Yuanchun, Cheng Xiaojiao, Gao Jun, Wang Siqian & Cao Lianjin. Mixed refrigerant research of LNG process with cascade double mixed refrigerant cycle[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2015, 44(3): 50-53.
- [12] 秦燕, 梁维好, 曲涛. LNG 装置用板翅式换热器的设计 [J]. 深冷技术, 2013(2): 1-5.
- Qin Yan, Liang Weihao & Qu Tao. Design of LNG unit-purpose plate-fin type heat exchanger[J]. Cryogenic Technology, 2013(2): 1-5.
- [13] 陈永东, 周兵, 程沛. LNG 工厂换热技术的研究进展 [J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 80-85.
- Chen Yongdong, Zhou Bing & Cheng Pei. Research progress in heat transfer technology in LNG plants[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 80-85.
- [14] 李恩道, 刘淼儿, 尹全森. FLNG 驱动方式及热介质选型技术研究 [J]. 海洋工程装备与技术, 2015, 2(4): 225-229.
- Li Endao, Liu Miao'er & Yin Quansen. Study on driver and heat medium selection for FLNG[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2015, 2(4): 225-229.
- [15] 李均方, 张瑞春, 夏功科, 刘盛鹏, 干卓凡, 谢仲海. 原料天然气组分变化对 LNG 装置的影响及对策 [J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(3): 262-265.
- Li Junfang, Zhang Ruichun, Xia Gongke, Liu Shengpeng, Gan Zhuofan & Xie Zhonghai. Influence of feed gas components change on LNG plant and countermeasures[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(3): 262-265.
- [16] 罗树林, 盖璟权, 江浩, 张跃征. PRICO® 天然气液化技术及应用实践 [J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(1): 50-58.
- Luo Shulin, Gai Jingquan, Jiang Hao & Zhang Yuezheng. PRICO® natural gas liquefaction technology and practical application[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2015, 44(1): 50-58.
- [17] Barcelay M & Denton N. Selecting offshore LNG processes[J]. LNG Journal, 2005(10): 34-36.
- [18] 浦晖, 陈杰. LNG-FPSO 液化工艺方案比选研究 [J]. 制冷技术, 2015, 31(4): 31-34.
- Pu Hui & Chen Jie. Study on comparative selection of LNG-FPSO liquefaction process schemes[J]. Refrigeration Technology, 2015, 31(4): 31-34.
- [19] 柏锁柱, 赵刚, 薛立林, 许涛. LNG 项目模块化应用实践及对中国模块厂的挑战 [J]. 国际石油经济, 2016, 24(8): 96-100.
- Bo Suozhu, Zhao Gang, Xue Lilin & Xu Tao. Practice of modular applications in LNG project and its influences to domestic modular workshops[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(8): 96-100.
- (修改回稿日期 2018-04-05 编辑 何 明)

东方物探承担全国最大的页岩气三维勘探项目

截至 2018 年 6 月 7 日, 由中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司 (以下简称东方物探) 西南物探分公司承担的川南泸 203 页岩气三维勘探项目采集完成 3 153 炮, 为总工作量的 5.1%。川南泸 203 页岩气三维项目于 2018 年 5 月底启动, 施工面积超过 2 000 km², 是目前全国最大的页岩气三维勘探项目。

近年来, 东方物探充分发挥非常规油气勘探的综合技术优势, 相继在中国石油天然气股份有限公司建立的长宁—威远和昭通两大国家级页岩气示范区承担多个页岩气勘探项目, 通过对南方海相页岩气勘探攻关, 初步形成了以岩石物理分析、宽方位三维地震采集、页岩气“甜点区”预测为核心的配套技术。

2009 年以来, 东方物探配合中国石油浙江油田公司先后在昭通国家级页岩气示范区等有利勘探区域, 实施多个页岩气二维、三维勘探项目, 为浙江油田公司页岩气勘探取得突破进展发挥了重要作用。

川南泸 203 页岩气三维项目是四川页岩气勘探开发有限责任公司按照整体部署、分步实施的思路, 在川渝之间部署的超大面积三维勘探项目, 布设地震测线多达 300 余条, 炮点 9.7 万余个, 接收点有 18 万多处, 激发面积超过 1 200 km², 满覆盖超过 1 000 km², 接收线总长度超过 6 000 km。

目前, 东方物探西南分公司在该项目投入 45 个 GPS 测量小组、230 台各项钻机, 西南物探公司第三钻井工程队正在按照项目运行总体计划紧张施工, 已经完成测量物理点 6.7 万个, 完成钻井 3.6 万余口, 微测井 261 口, 勘探生产安全平稳运行。

(天工 摘编自天然气工业网)