

# 丙烷预冷双氮膨胀浮式天然气液化中试装置的规模分析研究

刘淼儿, 李恩道, 尹全森, 邵晓亮

(中海石油气电集团技术研发中心, 北京 100028)

**摘要** 以应用于海上的浮式丙烷预冷双氮膨胀液化装置为原型,拟建设一套液化中试装置。为了确定液化中试装置的规模,提出中试装置与原型装置之间宜遵循流程一致性、关键控制方式一致性、运动相似性和流态相似性等四项原则。上述原则中,分析表明,对于除关键控制方式一致性外,流程一致性、运动相似性和流态相似性对中试装置的规模没有直接的影响。为了与原型装置的关键控制方式保持一致,中试装置的设备选型就显得非常重要,其中对于确定规模影响较大的关键设备为制冷剂压缩机,而冷箱、压缩机驱动器、透平膨胀机及丙烷换热器对规模影响不大。因此,建议中试装置中压缩机的型式与浮式天然气液化装置保持一致,冷箱中换热芯体可以考虑采用两台并联的设计方案。

**关键词** 浮式天然气液化装置;中试装置;规模;液化工艺;丙烷预冷;双氮膨胀

中图分类号 TB657.8

文献标志码 A

文章编号: 2095-7297(2015)03-0152-05

## Study on the Pilot Plant's Capacity of Floating Liquefied Natural Gas Processed by Propane Pre-Cooling and Dual-Nitrogen-Expansion Sub-Cooling

LIU Miao-er, LI En-dao, YIN Quan-sen, TAI Xiao-liang

(Research & Development Center of CNOOC Gas & Power Group, Beijing 100028, China)

**Abstract** Based on the propane pre-cooling and dual-nitrogen-expansion sub-cooling (C3-DN2) process used for floating liquefied natural gas production, storage and offloading unit (LNG-FPSO), a pilot unit will be built to test the rationality of process configuration and key control modes, and to study the operability and flexibility of its application in offshore cases. In order to define the capacity, the pilot unit should keep the consistency of process configurations and key control modes, and the similarity of moving and flow regime with LNG-FPSO. The factors affecting the capacity of the pilot unit are further investigated, and the results show that the type of key equipment to keep the consistency of key control mode greatly impacts the capacity, and the other factors have less influence. Among the main devices, the refrigerant compressor should be considered the most carefully when defining the capacity of the pilot unit, and others such as cold box, driver, turbine expander and the heat exchanger for C3 are less important. Therefore, it is better to select the same type of refrigerant compressor in the pilot as that in the LNG-FPSO, and to design two plate-fin heat exchangers in parallel in the cold box.

**Key words** floating liquefied natural gas system; pilot unit; capacity; liquefaction process; propane pre-cooling; dual-nitrogen-expansion sub-cooling

## 0 引言

浮式天然气液化装置(FLNG)是一种集海上天然气的液化、储存、装卸于一体的新型浮式生产储卸装置(FPSO),具有海上气田开采投资成本低、开发

风险小以及便于迁移、安全性高等特点<sup>[1-2]</sup>。目前,得到开发的海上气田一般是较大或近海的天然气田,而远岸的深水气田、中小型气田以及边际气田由于储量不大或者远离天然气供应市场,需要修建很长的海底管线以及相应的岸上处理设施,导致费用

收稿日期:2015-05-16

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-006)

作者简介:刘淼儿(1973—),男,博士,高级工程师,主要从事天然气液化及液化天然气储存、运输与利用方面的研究。

昂贵,难以保证盈利。因此,FLNG 作为开发海上深水油田、中小型气田以及边际油田的有效工具,将成为海上油气勘探领域的一大亮点<sup>[3]</sup>。

从 20 世纪 70 年代早期起,国外就开始对海上液化天然气(LNG)生产进行研究,特别是近十几年来掀起了 FLNG 技术研究热潮,几个主要能源供应商都加快了对 FLNG 的研究<sup>[4-5]</sup>。

国内,中海油从“十一五”开始时就以国家科技重大专项研究课题——“大型 FLNG/FLPG、FDPSO 关键技术研究”课题为契机,开展了与 FLNG 相关的关键技术研究;其中,海上天然气液化工艺是该课题的重要研究内容之一。在对现有天然气液化工艺进行比选研究的基础上,根据海上作业环境的特殊要求,提出了一种适用于我国南海海况条件下的丙烷预冷双氮膨胀液化工艺<sup>[6-8]</sup>。

丙烷预冷技术在天然气处理终端和国际上大型天然气液化工厂中(如丙烷预冷混合冷剂液化工艺流程)都已成功应用,氮膨胀制冷技术在空分行业 and 小型天然气液化工厂中也应用较多,两者都属于成熟的技术。但是课题组提出的丙烷预冷双氮膨胀液化工艺流程,在行业内为首次提出的新工艺,目前还没有工程实例。此前只是从理论上分析了该工艺的可行性,但该液化工艺要走向工程应用须经历中试过程。因此,在“十二五”期间,针对该天然气液化工艺,拟通过建立一套液化中试装置,进行测试验证,为后续工程应用提供可靠依据。

关于中试装置的设计,国内一些学者针对化工装置中试装置设计思路及有关规范开展过探讨与研究<sup>[9-11]</sup>。但是如何来确定天然气液化中试装置的规模,从目前所查到的资料信息来看,尚无明确及成熟的做法可供参考。因此,本文将重点针对丙烷预冷双氮膨胀液化中试装置的规模进行分析。

## 1 建设 FLNG 中试装置的目的

浮式天然气液化装置是在常规天然气液化装置的基础上发展而来的,但与陆上工厂相比,在海上建设浮式天然气液化工厂所面临的技术挑战更加艰巨。国际上浮式天然气液化装置经过几十年的研究,2011 年才开始正式投资建设 FLNG 工程项目。我国的天然气液化技术发展较晚,目前还没有大型的浮式天然气液化装置,在该行业积累的经验有限。因此,我国开发 FLNG 装置没有成熟经验可以借鉴,需要加强理论和试验研究,为建设浮式液化装置奠定基础。

针对新提出的丙烷预冷双氮膨胀液化工艺技术,要能为后续工程应用提供参考依据,至少应达到以下几项目的。

### (1) 验证工艺流程的合理性。

通过中试试验,首先需验证该液化流程的流程结构设计是否合理,其次通过试验数据与理论模拟计算的比较,验证理论模拟的准确性以及流程参数选择的合理性。图 1 所示为该丙烷预冷双氮膨胀液化工艺流程<sup>[6-8]</sup>。

### (2) 验证关键控制方式。

流程的控制方式合理与否是一套装置能否正常运行的关键,中试装置的建立应能验证该流程目前设计的控制方案的合理性,最终确定出合理的控制方案,提高装置的自动化程度。

该流程的主要控制方案包括天然气节流阀的控制、丙烷制冷系统的控制、氮气膨胀和增压系统的控制、氮压缩机控制以及制冷系统和天然气的联动控制。

### (3) 操作程序的经验积累。

天然气液化装置建设完成后能否顺利投产运营,受操作人员的调试能力和运营能力决定。目前国内的天然气液化装置还没有采用丙烷预冷的氮气膨胀流程,缺乏该流程的液化装置的调试和运行经验。要通过该中试装置的调试和运行,积累装置的调试方法,熟悉开停车和变工况的操作程序,为研究浮式液化装置奠定良好基础。

### (4) 海上工况适应性研究。

采用丙烷预冷的氮膨胀流程的液化装置能否适应海上工况,关键在于工艺设备能否适应海上工况,工艺流程布置能否满足浮式液化装置的要求。需要验证的设备主要有液化冷箱、丙烷换热器和丙烷冷凝器,研究在晃动条件下的换热性能以及稳定性,同时验证为保证浮式液化装置的稳定运行而增加的辅助操作和控制手段。

## 2 中试装置规模的缩比原则

为了实现上述试验目的,中试装置与原型装置需在以下几个方面保持相似性或一致性:

### (1) 流程结构一致性。

工艺流程一致是中试装置验证的基础,即中试装置仍然采用丙烷预冷双氮膨胀制冷工艺。由于规模的影响,中试装置中工艺参数的选取和原型装置之间可能会存在一些不同之处,但仍应以不影响原工艺的验证为原则。

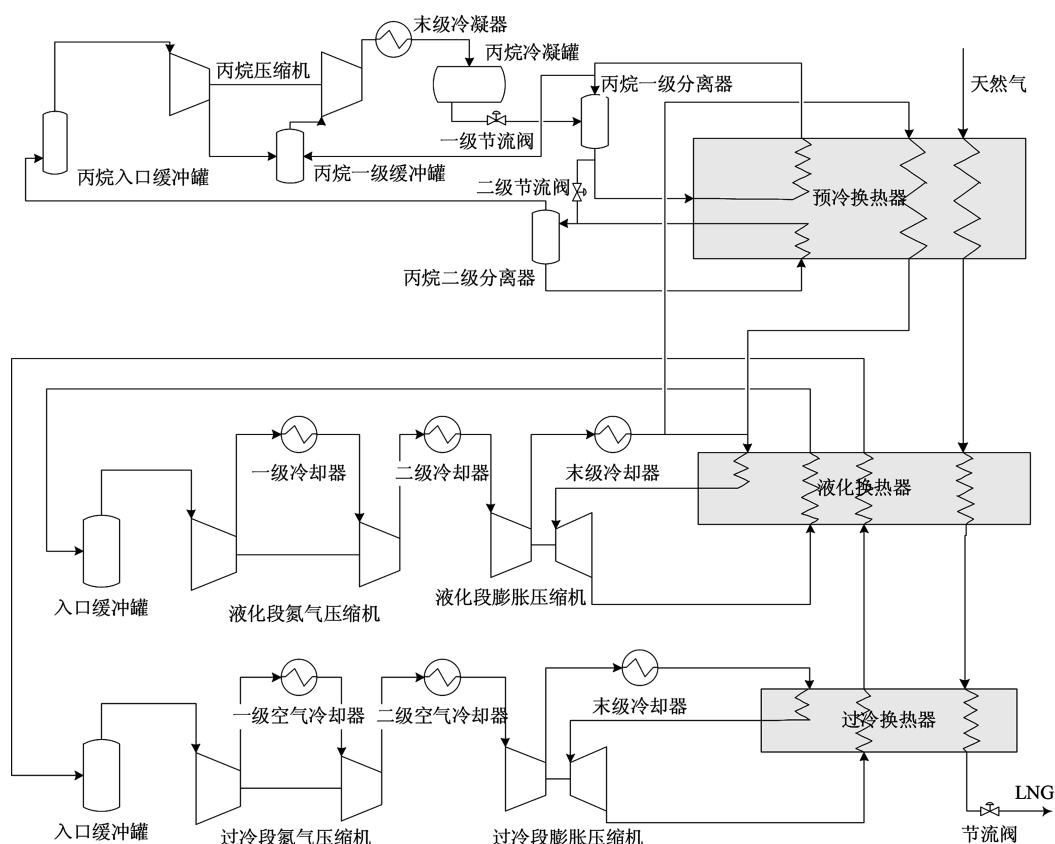


图1 丙烷预冷双氮膨胀液化工艺流程

Fig. 1 Flow chart of the propane pre-cooling and dual-nitrogen-expansion sub-cooling liquefaction process

## (2) 关键控制方式一致性。

对于一套装置来说,控制方式无疑是整个装置的核心所在,它关系到整个装置的安全、稳定运行。因此,为了验证原设计的合理性,应尽量保持中试装置的关键控制方式与原设计一致,这样才能将在中试装置上得到的操作调试经验更好地应用到原型装置上。

## (3) 运动相似性。

浮式装置的运动特性是它与陆上固定装置最大的不同之处。通过试验装置真实恰当地反映实际船舶上部设施运动状况是运动相似缩比原则的关键。

针对模型试验,在相似性原理中已经整理出一套无量纲量即相似准则数,它们代表不同物理量的相似。实际试验中各种相似准则并不同等重要,通常采用起主要作用的相似准则,忽略影响较小的相似准则。在此船体晃荡惯性力是主要的影响因素,因此在船舶相似原理上一般采用弗劳德准则。

## (4) 流态相似性。

流态相似性主要针对管路中或设备中气液两相流的流态。在规模缩比中,由于压力、管径和设备尺寸的变化,维持流态的相似性对于压降和换热判别

具有指导意义。

### 3 影响中试装置规模的因素分析

如果中试装置与原型装置之间满足以上四项缩比原则,则通过中试装置得到研究结果,就基本可达到前面所提出的试验目的。因此,可根据缩比原则,来研究和确定中试装置的合理规模。

#### 3.1 流程结构相似性对规模的影响

流程结构相似,表明两套装置的流程从外形结构上应该保持一致或者相近。原型装置的流程为丙烷预冷双氮膨胀,有三个制冷循环;中试装置也应该与之一致。当然,受气体组分、环境、公用工程配套设施等条件的限制,中试装置一些辅助流程可能与原流程不一致。因此,从流程结构相似性来看,只要中试装置的主体流程与原设计保持一致,就可以满足该原则。从中可以看出该原则对中试装置规模并没有直接的影响。

#### 3.2 流态相似性对规模的影响

在丙烷预冷双氮膨胀循环流程的管路系统中,

丙烷釜式换热器的天然气通道及冷箱中板翅换热器天然气通道存在两相流动,需要考虑流态对流动和换热的影响;其余管道或通道内均为单相流体,无需考虑两相流动问题。

无论是釜式换热器还是板翅式换热器,实际上天然气通道都是由多个通道并联构成的。装置规模的大小主要体现在通道并联的多少。因此,从单个流体通道来看,大、小装置流态完全可以做到一致,甚至雷诺数都可以做到相近。因此,流态相似性并不影响中试装置规模的确定。

### 3.3 运动相似性对规模的影响

对于原型装置 FLNG 来说,装置的工艺性能主要受垂荡、横摇和纵摇三个自由度的影响。其中垂荡主要对含液相(全液相或者两相,气相对加速度不敏感)的非水平管道或者通道(如冷箱内流体通道)有影响,由于船体存在向上或者向下的加速度,从而导致这些管道或通道中的流体运动发生变化,使其工艺参数(如压力变化、截面持液率变化)或性能发生偏离。与之类似,横摇和纵摇则对含液相的非垂直管道或者通道有影响;此外,横摇和纵摇还对那些有自由液面的设备操作有影响,如分离器等设备在晃动工况下液面不稳,可能导致控制系统接收错误的液位信号。

从以上分析可知,运动相似性考察的是中试装置摇摆台的性能是否能准确模拟 FLNG 设备在海况条件下的运动状态,它与装置的液化规模并没有直接关系。

### 3.4 控制方式相似性对规模的影响

控制方式的设计合理性是试验验证的主要内容,因此在中试装置设计中,应尽量保持关键点的控制方式与原设计一致。控制方式与设备型式的关系最为密切。有些设备,其类型不同,则控制方式大不相同,如对压缩机而言,离心式压缩机与往复式压缩机在流量的调节方式和喘振系统的控制要求上就完全不同。当然也有些设备,虽然设备类型不同,但其控制方式基本相似,如空冷换热器和海水换热器。

对于丙烷预冷双氮膨胀液化工艺流程来说,关键控制方式包括:离心压缩机和透平膨胀压缩机的防喘振控制;离心压缩机转速与进出口压力和流量的连锁控制;节流阀等关键流量调节阀开度与温度、压力和流量等参数的连锁控制等。因此,这些设备型式和设备布置应尽量与原设计一致,这样才能有

效验证装置和设备的开停车方式、流程的控制方式、系统能耗性能、冷剂补充方式和装置负荷调整等关键点。

而设备类型与装置的规模密切相关,如制冷剂压缩机,大、中型液化工厂均选用离心压缩机,而一些小型或微型装置就只能选择往复式或者螺杆式压缩机。对于压缩机驱动形式,同样也存在类似的规模与选型上的限制。

综上所述,流程的一致性、运动方式的相似性和流态的相似性对规模选择没有直接限制,只需在实验装置和晃动平台的设计中细致考虑即可,但是控制方式的相似性则对规模选择有直接的影响,具体体现在其中主要设备的选型。下面分析关键设备选型对规模选择的影响。

#### (1) 制冷剂压缩机。

大型液化工艺中,丙烷及两级氮膨胀制冷系统均采用离心式压缩机,如在中试装置中要保持与原型装置类似的型式,则在工艺参数相同的条件下,丙烷及两台氮气压缩机都存在最小处理量,根据压缩机的最小处理量可确定中试装置的最小规模。如对于本中试装置的工艺参数,若丙烷压缩机欲选用离心式压缩机,则装置规模需为  $53 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{d}$  ( $1 \text{ Nm}^3$  即在  $0^\circ\text{C}$ , 1 个标准大气压的标准状态下  $1 \text{ m}^3$ );从氮气压缩机选型来看,液化段压缩机的最小流量对应装置规模为  $2.1 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{d}$ ,过冷段压缩机的最小流量对应装置规模为  $4.9 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{d}$ 。

#### (2) 冷箱。

原型装置中冷箱结构为板翅式换热器。板翅式换热器在国内的技术已很成熟,生产厂家很多,有杭氧、杭州中泰、苏州三川、川空和开空等。限于加工设施,单台板翅式换热器换热面积有限,为了达到换热效果通常采用多台并联的形式,而且每台冷箱内又有多台板翅换热器芯体并联。板翅换热器芯体内流量分配是否均匀是关系到流程可靠性的关键因素,也应该是实验验证的关键点之一。但是在实验装置中不可能设置与原设计同样数量的板翅芯体。为了验证板翅并联在均配方面的性能,需要人为设置至少两台换热芯体进行并联,但是板翅换热器本身不会对规模选择有大的影响。

#### (3) 压缩机驱动设备。

总的来说,目前国产燃气轮机还达不到原设计负荷装置内压缩机组的驱动要求,原型装置拟采用进口燃气轮机。对于小规模的中试装置,驱动设备无法选到合适的燃气轮机,实验方案不得不做出调

整。但是,与压缩机控制方式相比,驱动设备的控制不与流程中的工艺参数直接相关,其控制相对独立,对流程控制方式的影响较小。

#### (4) 透平膨胀压缩机。

原型装置选用国内低温轴流膨胀机(离心式增压机),中试装置的膨胀机选型力求与原设计一致。由于实验装置规模较小,透平膨胀压缩机的最小选型也会影响到装置规模的选择。调查表明, $2 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{d}$  规模的膨胀机从市场上可以获取。

#### (5) 丙烷预冷换热器。

与原型装置一致,中试装置也采用板翅式蒸发式换热器,不影响规模的确定。

## 4 结 语

本文以应用于南海海况下丙烷预冷双氮膨胀液化工艺的 FLNG 为原型,分析了中试装置的试验目的和规模缩比原则,并分析了影响中试装置规模的各种因素,得到结论如下:

(1) 为了合理验证丙烷预冷双氮膨胀液化工艺,中试装置与原型装置之间宜遵守流程一致性、关键控制方式一致性、运动相似性以及流态相似性等原则。

(2) 通过对中试装置规模的影响因素分析表明,流程的相似性、运动相似性和流态相似性对中试装置的规模没有直接的影响,影响中试装置的关键因素在于为了保持关键控制方式一致性方面的设备选型。

(3) 对中试装置规模影响较大的关键设备为制冷剂压缩机,其他设备如冷箱、透平膨胀机、压缩机驱动器和丙烷预冷换热器对规模影响不大。因此,

建议中试装置的制冷剂压缩机与原型装置保持一致,且冷箱中至少采用两个换热芯体并联。

本文虽然仅针对丙烷预冷双氮膨胀液化工艺来分析液化中试装置的规模,但该分析思路也可供类似的化工中试装置的规模研究提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Danielsen H, Andreassen G. Onshore versus offshore LNG import facilities: commercial advantages and limitations[C]. OTC, 2009: 19551.
- [2] Pastoor L W, Lund K, Tveitnes T. The LNG producer: a generic design with great adaptability [C]. OTC, 2009: 19845.
- [3] van Wijngaarden W, Meek H J, Schier M. The generic LNG FPSO: a quick & cost-effective way to monetize stranded gas fields[M]. SPE, 2008: 655-666.
- [4] Gilmour N, Deveney D. Floating LNG: Shell's recent history and current approach [C]. The LNG 16 Conference, 2010: Ps2-3.
- [5] 浦晖,陈杰. LNG-FPSO 液化工艺方案比选研究[J],制冷技术, 2011, 21(4): 31.
- [6] 李玉星,王武昌,朱建鲁,等. 紧凑式天然气液化浮式生产工艺: 中国, 101787314A[P]. 2010-07-28.
- [7] 朱建鲁,李玉星,王武昌,等. 海上天然气液化工艺流程优选[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 98.
- [8] 喻西崇,谢彬,李玉星,等. 南海深水气田 FLNG 装置丙烷预冷双氮膨胀液化工艺流程关键运行参数影响分析[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 138.
- [9] 白辛民. 化工中试装置工艺设计方案的确定[J]. 石化技术与应用, 1997, 5(3): 198.
- [10] 邱红磊,赵东风,孟亦飞. 化工中试装置性能化设计思路探讨[J]. 广州化工, 2010, 38(5): 231.
- [11] 黄以恪. 微型中试装置放大技术在科研开发工作中的应用[J]. 化工进展, 1992(2): 1.

\*\*\*\*\*

• 编辑部声明 •

## 《海洋工程装备与技术》关于网络出版的声明

为适应我国信息化建设的需要,扩大本刊及作者的知识信息交流渠道,本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。我们将免费提供作者文章引用统计分析资料。特此声明。