

文章编号:0253 - 4339(2016) 02 - 0053 - 06

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2016. 02. 053

丙烷预冷混合制冷剂液化工艺控制方式优选

潘红宇 李顺利 李玉星 朱建鲁

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院 青岛 266580)

摘要 丙烷预冷混合制冷剂流程是目前最常用的天然气液化流程,该流程结合了级联式液化流程与混合制冷剂流程液化流程的优点,既高效又简单。由于实际情况中存在外界因素的干扰,需要控制器来维持液化装置的稳定,因此需要针对液化工艺的控制系统进行动态仿真分析。通过动态仿真技术分别模拟了液位控制、温度控制和串级控制应用在丙烷预冷混合制冷剂工艺各系统中的适应性,在此基础上通过改变控制器的设定值得出液化工艺系统的响应以及恢复稳定所需要的响应时间,从而得出各个系统最优的控制方式。结果表明:在丙烷预冷混合制冷剂液化工艺中,丙烷预冷系统采用液位控制或串级控制,混合制冷剂系统采用液位控制,天然气系统采用串级控制时系统具有较好的稳定性和较快的响应速度。

关键词 制冷剂;液化工艺;控制;动态仿真

中图分类号:TB61⁺²; TB61⁺¹

文献标识码: A

Optimization in the Control Modes of Propane Pre-cooling and Mixed-refrigerant Process

Pan Hongyu Li Shunli Li Yuxing Zhu Jianlu

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao, 266580, China)

Abstract Propane pre-cooling and mixed-refrigerant process, an efficient and simple process and a combination of cascading liquefaction and mixed-refrigerant liquefaction processes, is the most common natural gas liquefaction process by now. Due to the interference of external factors in the actual situation, it is necessary to maintain the stability of liquefaction plant by the controller. Hence the dynamic simulation analysis for the liquefaction process control system is needed. In this paper, the flexibility of liquid level control, temperature control and cascade control in the systems of propane pre-cooling and mixed-refrigerant process is simulated respectively by dynamic simulation, and then the response of liquefaction process and the responding time to stability can be known by changing the settings of controller. In this way, the optimal control mode of each system has been got. It indicates that the systems have better stability and faster responding speed when the propane pre-cooling system adopts liquid level control or cascade control, mixed refrigerant process applies the liquid level control, and the gas system uses cascade control.

Keywords refrigerant; liquefaction process; control; dynamic simulation

液化天然气^[1] (liquefied natural gas, LNG), 主要成分是甲烷, 体积约为同量气态天然气体积的 1/625, 燃烧后对空气污染非常小, 而且放出的热量大, 所以液化天然气是一种比较先进的能源。液化天然气流程按照制冷方式可分为三大类^[2]: 级联式液化流程、混合制冷剂液化流程、带膨胀机的液化流程。实际生产中, 最常用的是丙烷预冷混合制冷剂液化工艺^[3], 这是因为在该工艺中丙烷制冷剂系统用于对混合制冷剂和天然气预冷, 而混合制冷剂系统用于对天然气深冷、液化和过冷, 丙烷制冷剂系统^[4]所能提

供的冷量占整个系统所提供的总冷量的 1/3 左右, 混合制冷剂压缩机的负荷大大减轻, 增加了单条生产线的生产能力, 且该流程具有较低的比功耗, 适应天然气液化装置大型化的需要, 所以丙烷预冷混合制冷剂液化工艺得到广泛的使用。

天然气液化装置运行时, 外界条件时刻变化, 此时需要控制系统来维持液化装置的稳定, 因此选择合适的控制方式在液化工艺中极为重要, 而动态仿真是验证液化工艺中控制器稳定性的重要方法。国外对液化工艺的动态仿真起步较早, 文献[5-7]中建立

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05026-006-07)资助项目。(The project was supported by the National Science and Technology Major Project of China (No. 2011ZX05026-006-07).)

收稿日期: 2015 年 4 月 20 日

了液化工艺中主要设备的动态模型,并对液化工艺进行了动态仿真,但仅仅局限于液化工艺的动态仿真,并没有就液化工艺中的控制系统进行深入研究,文献 [8-10] 对单级混合制冷剂液化工艺和多级混合制冷剂液化工艺进行了简单的动态仿真。挪威科技大学^[11-13]对混合制冷剂液化工艺的动态仿真做了大量的工作,以挪威建设的大型天然气液化装置为基础,建立了混合制冷剂液化工艺中的主要设备及控制器的动态模型,并对级联式混合制冷剂液化工艺、单级混合制冷剂液化工艺和多级混合制冷剂液化工艺进行了动态仿真和控制方式的研究,但是并没有针对丙烷预冷混合制冷剂液化工艺的控制系统进行动态仿真。相对来说国内对混合制冷剂液化工艺的动态仿真起步较晚,关于液化工艺控制方式方面的研究内容较少,主要集中在上海交通大学、哈尔滨工业大学。

上海交通大学^[14-15]从上世纪 90 年代开始从事天然气液化相关技术的研究,主要采用数值模拟的方法进行液化工艺的分析,哈尔滨工业大学^[16]主要针对混合制冷剂循环进行动态仿真研究、流程操作特性和适应性研究。

图 1 所示为丙烷预冷混合制冷剂液化工艺,在工艺系统中,混合制冷剂和丙烷制冷剂系统均可以采用液位控制、温度控制和串级控制的控制方式,天然气系统可采用温度控制和串级控制的控制方式。但是这些控制方式所适用的工艺和环境不尽相同,当需要改变控制的设定值来对工艺系统进行调节时,控制的稳定性和响应速度对整个液化工艺有重大影响,所以需要对其进行动态仿真。在控制器中,SP 代表设定值, PV 代表实测值, OP 代表控制阀门的开度。

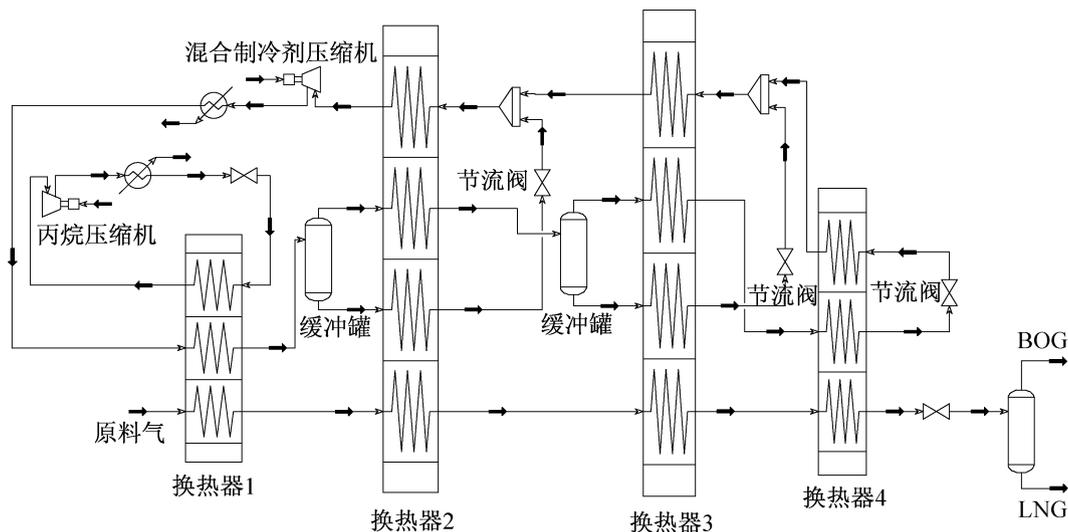


图 1 丙烷预冷混合制冷剂液化工艺流程图

Fig. 1 The flow diagram of propane pre-cooling mixed refrigerant liquefaction process

1 液位控制

液位控制通常是通过节流阀来控制缓冲罐的液位,达到控制工艺系统的一种控制方式,具有非线性、滞后、耦合等特征,能够很好模拟工业过程特征。

在丙烷制冷剂系统中,液位控制通过控制丙烷节流阀的开度来控制丙烷缓冲罐的液位。图 2 所示为液位控制在丙烷预冷混合制冷剂液化工艺中的应用效果,图 2(a)所示为改变丙烷制冷剂液位控制的 SP 时系统的响应,从图中可以看出,10 min 时,将液位控制的 SP 由 60% 降低至 50%,节流阀后缓冲罐的液位经过短时间的波动后,在 15 min 时稳定在 50%,阀门

开度稳定在 37.08%。这是由于液位控制操作节流阀开度减小,从而流量减小,节流阀后缓冲罐的液位波动减小直至稳定。

在混合制冷剂系统中,液位控制通过控制混合制冷剂节流阀的开度来控制混合制冷剂缓冲罐的液位。图 2(b)所示为改变混合制冷剂液位控制的 SP 时系统的响应,从图中可以看出,10 min 时,将液位控制的 SP 由 50% 升至 60%,节流阀前缓冲罐的液位经过短时间的波动后,在 12 min 时稳定在 60%,阀门开度稳定在 50.8%。这是由于液位控制操作节流阀开度增大,从而流量增加,节流阀前缓冲罐的液位波动增加直至稳定。

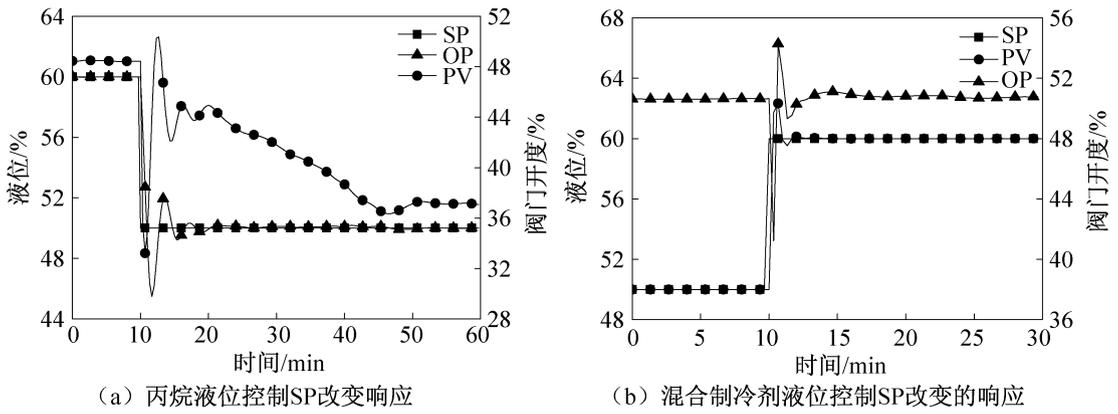


图 2 液位控制

Fig. 2 Level control

2 温度控制

温度控制通常是通过节流阀来控制关键区域的温度,达到控制工艺系统的一种控制方式,具有控制方便、简单和灵活性大的优点。

在丙烷制冷剂系统中,温度控制通过控制丙烷节流阀的开度来控制天然气预冷段出口后的温度。

图 3 所示为温度控制在丙烷预冷混合制冷剂工艺中的应用效果,图 3(a)所示为是改变丙烷制冷剂温度控制的 SP 时系统的响应,从图中可以看出在 10 min 时,将温度控制的 SP 由 5.231 °C 升至 6 °C,换热器出口天然气的温度经过短时间的波动后,在 35 min 时稳定在 6 °C,阀门开度稳定在 46.2%。这是由于温度控制的 SP 增大后,换热器出口天然气温

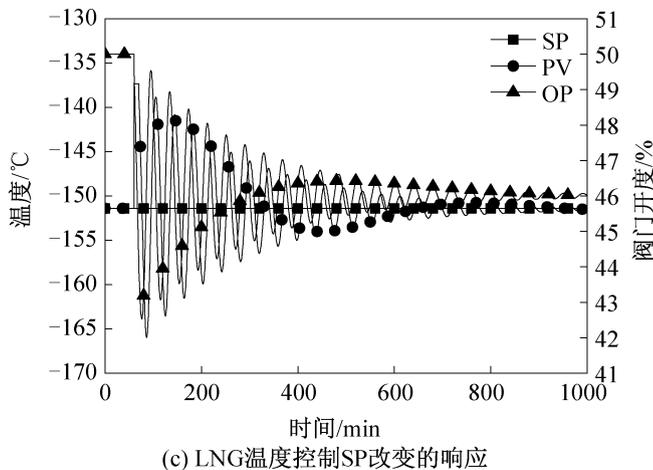
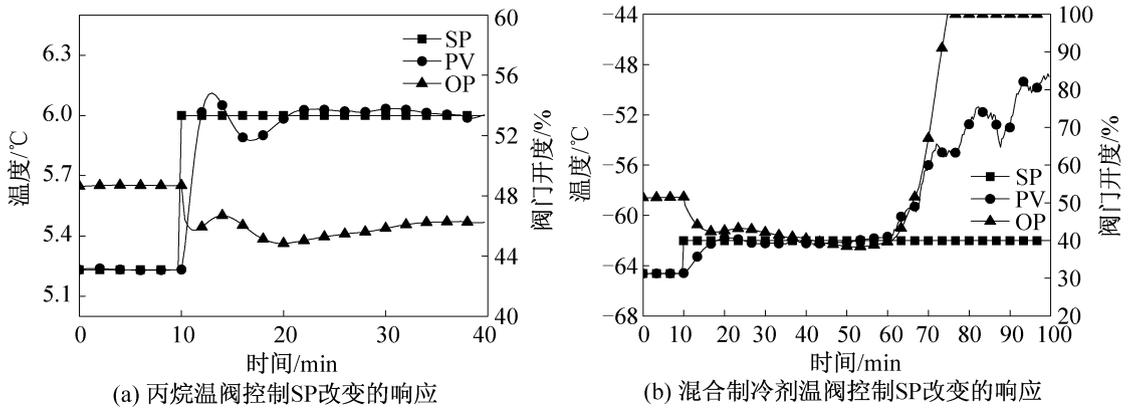


图 3 温度控制

Fig. 3 Temperature control

度上升,换热器的换热量减少,所需丙烷制冷剂的流量减少,所以温度控制调节阀门开度减小,流量减少,系统达到新的平衡。

在混合制冷剂系统中,温度控制通过控制混合制冷剂节流阀的开度来控制天然气出液化段后的温度。图 3(b)所示为改变混合制冷剂温度控制 SP 时系统的响应,从图中可以看出,10 min 时,将温度控制的 SP 由 $-64.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器出口天然气温度在 18 min 时稳定在 $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,但在 60 min 时,天然气温度持续上升,同时阀门开度也持续上升,直至 75 min 时阀门开度达到 100% 并保持不变,此时天然气温度仍然没有达到稳定,控制失效。这说明温度控制对混合制冷剂节流阀系统并不合适。

在天然气系统中,温度控制通过控制 LNG 节流阀的开度来控制天然气出过冷段后的温度。图 3(c)所示为改变 LNG 温度控制 SP 时系统的响应,从图中可以看出,30 min 时,将天然气入口压力由 5000 kPa

升至 6000 kPa, LNG 节流阀前温度会出现长时间的振动,且振幅越来越小,1000 min 时才逐渐稳定在 $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,同时阀门开度稳定在 46%。可以看出温度控制虽然可以控制天然气末端节流阀,但所需时间很长,并不是一种合适的控制方式。

3 串级控制

串级控制通常由两级控制组成,其中一个调节器的输出作为另一个调节器的给定值的控制系统,具有对负荷变化的适应性较强,能迅速克服进入副回路的二次扰动的优点,可有效提高系统的工作频率。

3.1 丙烷串级控制

图 4 所示为串级控制在丙烷系统中的应用效果,其中主控制通过控制预冷段换热器出口天然气温度来控制流量控制的 SP,次级控制是通过控制丙烷制冷剂节流阀开度来控制丙烷流量。

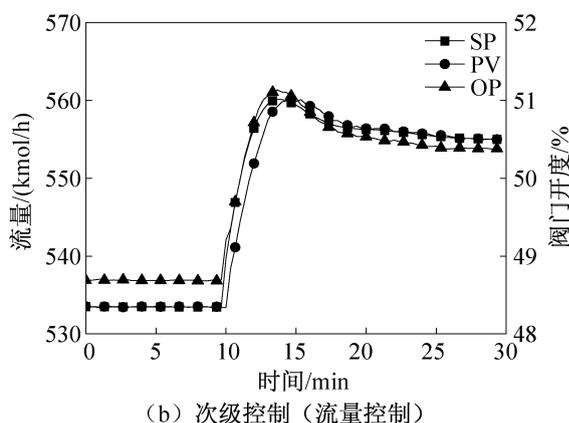
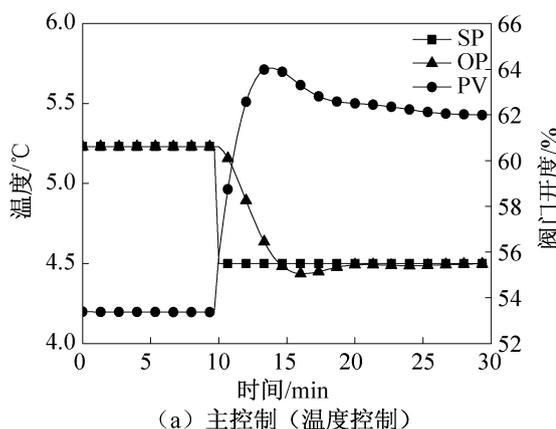


图 4 丙烷制冷剂串级控制 SP 改变的响应

Fig. 4 The response graph to SP changes of propane refrigerant cascade control

从图中可以看出,10 min 时,将温度控制的 SP 从 $5.231\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降为 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,可知系统最初会出现短暂的波动,25 min 时温度控制的换热器出口天然气的温度稳定在 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,阀门开度稳定在 62%,而流量控制的换热器入口丙烷流量稳定在 555 kmol/h ,阀门开度稳定在 50.4%,此时主控制与次级控制均处于稳定。温度控制的 SP 下降导致换热器出口天然气的温度下降,换热器的换热量上升,所需的丙烷流量上升,所以温度控制会调节流量控制 SP 上升,从而调节换热器入口丙烷的流量,使其上升直到达到新的平衡。

3.2 混合制冷剂串级控制

图 5 所示为串级控制在混合制冷剂系统中的应用效果,其中主控制通过控制液化段换热器出口天然气温度来控制流量控制的 SP,次级控制是通过控制

混合制冷剂节流阀开度来控制混合制冷剂流量。

从图中可以看出,10 min 时,将温度控制的 SP 从 $-64.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升为 $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$,可知在 25 min 时温度控制稳定至 $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时换热器入口混合制冷剂流量也基本稳定在 3800 kmol/h 左右,但在 45 min 时换热器出口天然气的温度开始持续波动上升,导致换热器入口混合制冷剂的流量也开始波动下降,58.33 min 时主控制阀门开度达到 100%,86.67 min 时次级控制阀门开度达到 100%,此时换热器出口天然气温度和换热器入口混合制冷剂流量仍然没有稳定,控制失效。所以这种控制并不合适。

3.3 天然气串级控制

图 6 所示为串级控制在天然气系统中的应用效果。其中主控制通过控制过冷段换热器出口天然气

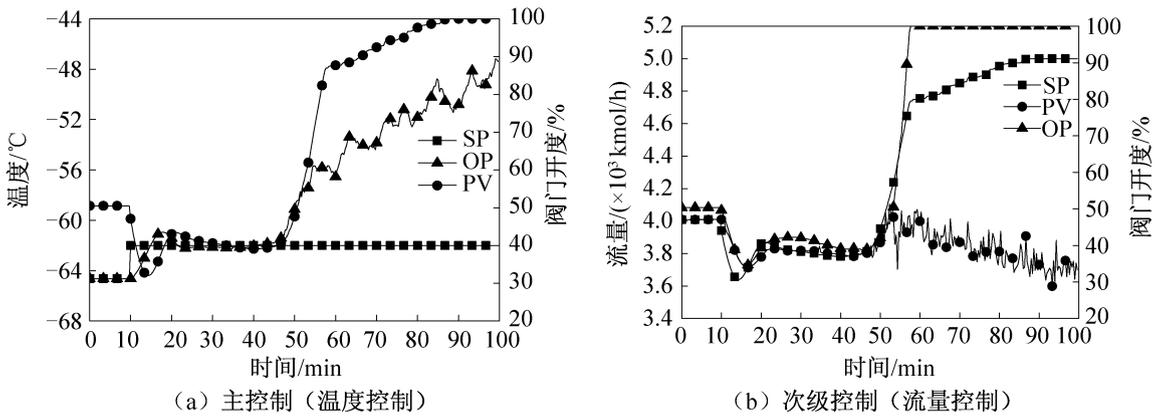


图 5 混合制冷剂串级控制 SP 改变的响应

Fig. 5 The response graph to SP changes of mixed refrigerant cascade control

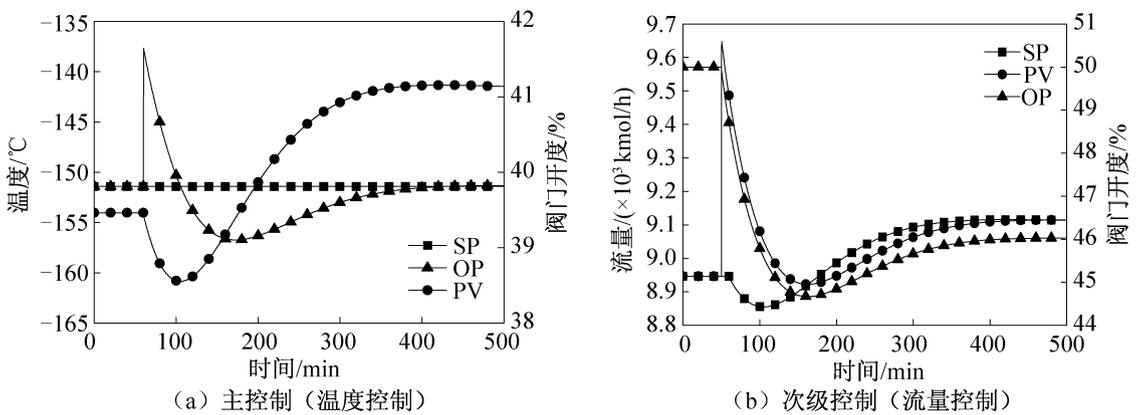


图 6 LNG 串级控制 SP 改变的响应

Fig. 6 The response graph to SP changes of LNG cascade control

温度来控制流量控制的 SP, 次级控制通过控制 LNG 节流阀开度来控制天然气入口流量。

从图中可以看出, 30 min 时, 将天然气入口压力由 5000 kPa 升至 6000 kPa, LNG 节流阀前的温度在经历小幅波动后, 在 383.33 min 才稳定在 -151.33 °C, 阀门开度稳定在 41.14%, 同时天然气流量稳定在 9100 kmol/h, 阀门开度稳定在 46%, 此时系统完全稳定。可知串级控制可以很好的控制 LNG 节流阀, 且所需时间较短, 是一种合适的控制方式。

4 结论

本文采用 Aspen HYSYS 软件对丙烷预冷混合制冷剂液化工艺进行动态仿真, 模拟了液位控制、温度控制和串级控制应用在丙烷预冷混合制冷剂工艺各系统中的适应性, 在此基础上通过改变控制器的设定值, 得出液化工艺系统的响应以及恢复稳定所需的响应时间, 模拟外界因素扰动时的液化工艺装置的响应和稳定时间, 通过比较得出各个系统最优的控制方式。

在丙烷预冷混合制冷剂液化工艺中, 丙烷预冷系统采用液位控制或串级控制, 混合制冷剂系统采用液位控制, 天然气系统采用串级控制时, 系统具有较好的稳定性和较快的响应速度。

参考文献

- [1] Van De Graaf J M, Pek B. The shell PMR process for large capacity LNG trains [C]//AICHE Spring Meeting, New York. USA: LNG Review, 2005: 1-7.
- [2] Pierre-Yves M, Jérôme P, Beatrice F. LNG process selection no easy task [J]. Hydrocarbon Engineering, 2004, 9 (5): 75-79.
- [3] 徐文渊. 小型液化天然气生产装置 [J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(3): 161-164. (XU Wenyuan. Small scale liquefied natural gas production plant [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2005, 34(3): 161-164.)
- [4] 张维江, 石玉美, 汪荣顺. 几种国外新型的小型天然气液化流程分析 [J]. 低温与超导, 2008, 36(5): 15-36. (ZHANG Weijiang, SHI Yumei, WANG Rongshun. Flows analysis on several kinds of foreign new small-scale natural

- gas liquefaction [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2008, 36(5): 15-36.)
- [5] Goldfarb S, Oldhom J. Refrigeration loop dynamic analysis using PROTISS[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, 20(2): 811-816.
- [6] Contreras J, Ferrer J M. Dynamic simulation: a case study [J]. *Hydrocarbon Engineering*, 2005(5): 1-4.
- [7] Rodriguez M, Diaz M S. Dynamic modeling and optimization of cryogenic systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(7): 1182-1190.
- [8] Singh A, Hovd M. Dynamic modeling and control structure design for a liquefied natural gas process[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York, USA, IEEE: 2007: 1347-1352.
- [9] Bezzoi F, Bernardi R, Cremonese G, et al. Using process simulators for steady-state and dynamic plant analysis: an industrial case study[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2004, 82(4): 499-512.
- [10] Singh A, Hovd M. Dynamic modeling and control of the PRICO LNG process[C]//American Institute of Chemical Engineers Annual Meeting. San Francisco, USA, CA: 2006:1-7.
- [11] Jensen J B, Skogestad S. Optimal operation of a simple LNG process[C]//International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes. Gramado, Brazil, IFAC: 2006: 241-246.
- [12] Jensen J B, Skogestad S. Optimal operation of simple refrigeration cycles Part I: degrees of freedom and optimality of sub-cooling[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, 31(5/6): 712-721.
- [13] Jensen J B, Skogestad S. Optimal operation of simple refrigeration cycles Part II: selection of controlled variables [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, 31(12): 1590-1601.
- [14] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 112-122.
- [15] 石玉美, 汪荣顺, 顾安忠. 流程参数对 C₃/MRC 天然气液化流程性能的影响[J]. *天然气工业*, 2004, 24(3): 111-114. (SHI Yumei, WANG Rongshun, GU Anzhong. Influence of parameters on C₃/MRC process performance of natural gas liquefaction[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(3): 111-114.)
- [16] 王坤, 徐风雨, 李红艳, 等. 小型 MRC 天然气液化装置中板翅式换热器动态特性仿真研究[J]. *低温工程*, 2007(3): 44-49. (WANG Kun, XU Fengyu, LI Hongyan, et al. Dynamic performance simulation of plate-fin heat exchangers in small scale MRC-LNG plant[J]. *Cryogenics*, 2007(3): 44-49.)

通信作者简介

潘红宇,男,硕士研究生,中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,15275265020, E-mail: pwsxyppyf@126.com。研究方向:天然气液化工艺。

About the corresponding author

Pan Hongyu, male, master graduate, College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), + 86 15275265020, E-mail: pwsxyppyf@126.com. Research fields: natural gas liquefaction process.