

文章编号: 1000-8241(2013)07-0780-05

ASPEN PLUS 对天然气运输船再液化流程的模拟与优化

王伟¹ 方江敏¹ 李敏¹ 曹光贵²

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东广州 510640; 2. 佛山市华禅能燃气设计有限公司, 广东佛山 528000

摘要: 为了降低 LNG 船 BOG 再液化流程的功耗, 在 ASPEN PLUS 中选择合适的热力学方法和设备模块对 LNG 船 BOG 再液化装置进行建模。通过对丙烯的预冷换热器出口温度、压缩机出口压力、节流阀出口压力以及 BOG 压缩机出口压力等工艺设备运行参数的模拟计算, 得到各参数对 BOG 再液化流程功耗的影响规律。以工艺系统最低功耗为优化目标, 采用变量轮换法对优化参数进行优化计算, 得出在一定海水温度和液货舱 BOG 压力变化范围内, BOG 再液化系统中重要节点的相关参数、压缩机和换热器最优化性能参数和设备设计参数, 优化后流程总功耗比优化前降低了 8.82%。(表 9, 图 5, 参 8)

关键词: LNG 船; BOG 再液化; ASPEN PLUS; 模拟; 优化; 功耗

中图分类号: TB657.8; TB662 文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.07.020

ASPEN PLUS simulation and optimization on the process flow of reliquefaction in LNG carrier

Wang wei¹, Fang Jiangmin¹, Li Min¹, Cao Guanggui²

1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510640;

2. Foshan Huachanneng Fuel Gas Design Limited, Foshan, Guangdong, 528000

Abstract: To reduce the power consumption in the BOG reliquefaction process of a LNG carrier, appropriate thermodynamic method and equipment modules are selected by means of ASPEN PLUS for modeling of BOG reliquefaction process in a LNG carrier. Through simulation calculation of operating parameters of the process equipment, including outlet temperature of propylene pre-cooling exchanger, outlet pressure of compressor, outlet pressure of throttle valve and outlet pressure of BOG compressor, the rules of parameter impact upon power consumption of BOG reliquefaction process have been obtained. Targeting at the process system optimization, the optimized parameters are calculated for optimization by use of cyclic variable method. As a result, the relevant parameters at the key nodes of the BOG reliquefaction system, the parameters for optimized performances of compressors and heat exchangers and parameters for equipment design at certain sea water temperature in given range of BOG pressure in the cargo tank have been obtained. The total power consumption post optimization is reduced by 8.82% than that prior to optimization. (9 Tables, 5 Figures, 8 References)

Key words: LNG carrier, BOG reliquefaction, ASPEN PLUS, simulation, optimization, power consumption

在天然气工业链中, 液化天然气运输船发挥着重要作用。为了解决沿海 LNG 子母站的过驳运输难题, 小型 LNG 船的需求量不断增加。目前, 大部分液化天然气船将 LNG 汽化产生的大量蒸发气体 (Boil Off Gas, BOG) 用作动力燃料, 剩余 BOG 直接排放至大气。这种做法既不经济也不环保, 同时也存在一定的安全隐患^[1], 而 BOG 再液化是解决该问题的途径之一。BOG 再液化系统主要将 LNG 液货舱中 BOG 重新冷凝液化后再送回液货舱内, 以保证液货舱内货物

的温度、压力处在合适的范围内^[2], 相关学者对 BOG 再液化装置的再液化方法、制冷循环方式、工艺参数等进行了研究^[3-4]。由于目前 LNG 船的 BOG 再液化装置在能量利用和能耗方面存在不足, 其主要依靠压缩机制冷提供冷量, 工艺耗能较大。因此, 针对容积为 10 000 m³ 的小型 LNG 船 BOG 再液化装置进行模拟优化研究, 以期液化天然气船的设计和制造提供理论依据与技术支持。该 LNG 船货舱操作压力为 0.110 1~0.114 64 MPa, 日蒸发率为 0.22%。

1 BOG 再液化流程

BOG 再液化流程(图 1, 其中 CPR_1 、 CPR_2 、 CPR_3 分别为 BOG、丙烯、混合制冷剂的压缩机, HX_3 为混合制冷剂换热器, $C_1 \sim C_3$ 为海水换热器, $V_1 \sim V_3$ 为节流阀, $X_1 \sim X_3$ 、 $Y_1 \sim Y_6$ 、 $H_1 \sim H_8$ 等矩形框内的符号代表设备进出口的节点号)由一个以液货 BOG 为制冷介质的开式循环和两个分别采用丙烯(C_3H_6-R)、混合制冷剂(MIXER)的闭式制冷循环组成。在 LNG 液货舱中蒸发产生的 BOG 依次经过回热器(HX_1)换热、BOG 压缩机升温、海水冷却器 1(C_1)冷却、丙烯预冷多股流换热器(HX_2)预冷、BOG 深冷多股流换热器深冷(HX_4)、BOG 节流阀(V_1)节流并降温, 最后经气

液分离器(SEP)将液化天然气直接返回液货舱, 剩余 BOG 则与 LNG 液货舱中的 BOG 汇合再次通过该流程进行再液化。

该流程的优点在于能够有效利用冷能: 设置了回热器, 利用 BOG 进入再液化系统时夹带 LNG 所含的大量冷量为混合制冷剂降温, 同时使 BOG 完全汽化进入 BOG 压缩机; 采用多股流换热器代替多个双股流换热器, 能够有效利用冷量, 提高各制冷循环的有效能利用率。BOG 再液化流程的 BOG 处理量为 825 kg/h, 由蒸发率、充装系数、储存压力和传热等参数计算得到, 由停机至开机的 40 h 内, 液货舱温度处于 $-162.5 \sim -160$ °C, 当液货舱温度回升至 -160 °C 后再次开机。

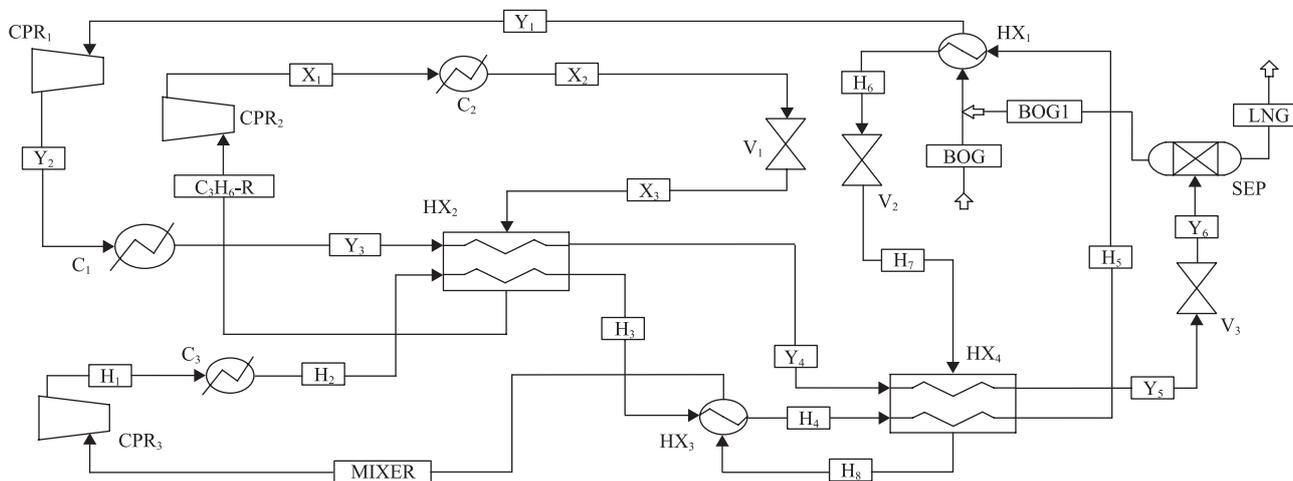


图 1 LNG-BOG 再液化计算模拟流程图

2 模型的建立

2.1 热力学方法的选取

在化工工艺流程模拟中, 热力学方法的选取至关重要。由于在 BOG 再液化系统中, 天然气和混合制冷剂为多元混合物, 在不同的温度和压力下分别呈气态、气液平衡态和液态, 因此, 在进行流程模拟时, 选用范围广、准确性好、复杂性高的三次型方程 SRK 方程计算天然气与混合制冷剂的相平衡特性, LKP 方程作为天然气和混合制冷剂的焓熵计算方程。

2.2 换热器模块的选择

由于再液化工艺流程中涉及的设备较多且流程复杂, 为了方便工艺流程的模拟, 需将所涉及的设备进行分类。选择 ASPEN 中 LNG-BOG 再液化流程模拟相关设备的 6 个模块类型^[5]: 海水换热器 (Heater 模块)、双物流换热器 (HeatX 模块)、多物流换热器 (MHeatX

模块)、节流阀 (Valve 模块)、压缩机 (Compr 模块) 及气液分离器模块 (FSplit)。

3 工艺流程模拟与分析

LNG 船 BOG 再液化流程中, 影响流程的可行性、压缩机功耗、再液化效率的参数较多^[6], 如丙烯预冷换热器出口温度、丙烯压缩机出口压力、丙烯节流阀 1 出口压力和 BOG 压缩机出口压力等。通过对各参数值进行模拟计算, 即在工艺流程中设备运行参数变动的极限范围内改变参数值, 其余参数值不变, 从热力学角度分析上述部分参数对再液化系统中各压缩机功耗的影响, 确定各变量的优化方向。

3.1 丙烯预冷换热器出口温度的影响

丙烯预冷流换热器出口温度对应图 1 中节点 H_3 、 Y_4 的温度 ($-38.7 \sim -33.3$ °C), 模拟计算时, 假定两个

节点的温度相同,得到其对流程中各压缩机功耗的模拟结果(表1)和影响情况(图2)。随着丙烯预冷换热器出口温度的降低,BOG制冷循环和混合制冷剂制冷循环压缩机功耗均有所降低,而丙烯制冷循环中的压缩机功耗增大。整个工艺过程的总功耗减少1.61%,故必须尽量降低丙烯预冷换热器出口的温度。

表1 丙烯预冷换热器出口温度对流程中各压缩机功耗的模拟结果

节点温度/ °C	功耗/kW			总功耗变化率/ %
	BOG 压缩机	丙烯压缩机	混合制冷剂 压缩机	
-33.3	74.938	147.413	204.660	-1.61
-38.7	74.938	155.727	189.467	

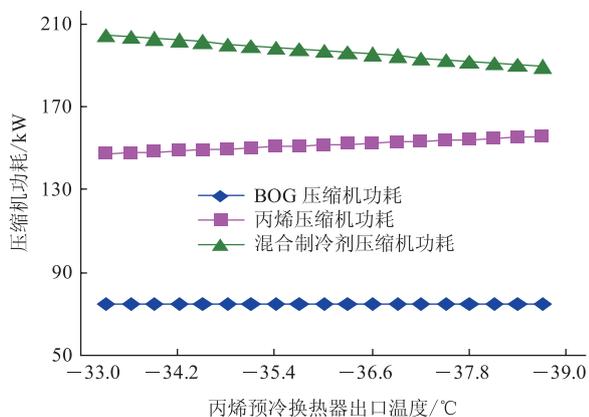


图2 丙烯预冷换热器出口温度对压缩机功耗的影响

3.2 丙烯制冷节流阀出口压力的影响

丙烯制冷节流阀出口压力对应图1中节点 X_3 的压力(0.1~0.175 MPa),模拟计算得到其对流程中各压缩机功耗的模拟结果(表2)和影响情况(图3)。随着出口压力的增大,BOG制冷循环和混合制冷剂制冷循环压缩机功耗均不受影响,而丙烯制冷循环的压缩机功耗减小,整个工艺过程的总功耗减少了8.16%。由于降低节流阀出口压力能够使节流后的制冷剂达到更低的温度,因此,丙烯节流阀出口压力应结合丙烯压缩机的出口压力共同调节,以达到制冷循环的制冷要求。

表2 丙烯制冷节流阀出口压力对流程中各压缩机功耗的模拟结果

节点压力/ MPa	功耗/kW			总功耗降低率/ %
	BOG 压缩机	丙烯压缩机	混合制冷剂 压缩机	
0.100	74.938	177.071	199.868	8.16
0.175	74.938	140.160	199.868	

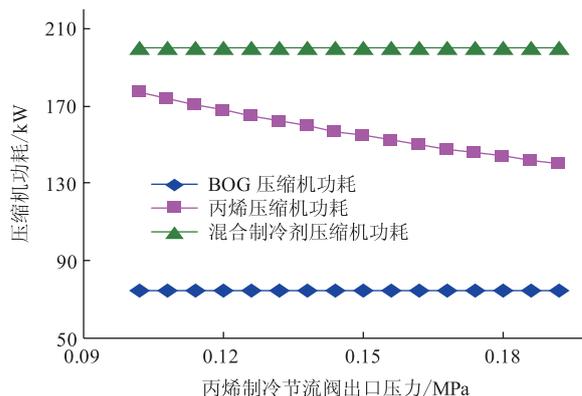


图3 丙烯制冷节流阀出口压力对压缩机功耗的影响

3.3 丙烯压缩机出口压力的影响

丙烯压缩机出口压力对应图1中节点 X_1 的压力(1.5~3.6 MPa),模拟计算得到其对流程中各压缩机功耗的模拟结果(表3)和影响情况(图4)。丙烯压缩机出口压力升高,BOG压缩机和混合制冷剂压缩机功耗均不受影响,但大幅增加了丙烯压缩机功耗,整个工艺过程的总功耗增加了12%。因此,在满足节流后工质冷量换热要求的前提下,应尽量降低丙烯压缩机出口压力,避免冷量的浪费。

表3 丙烯压缩机出口压力对流程中各压缩机功耗的模拟结果

节点压力/ MPa	功耗/kW			总功耗增加率/ %
	BOG 压缩机	丙烯压缩机	混合制冷剂 压缩机	
1.5	74.938	113.217	199.877	12
3.6	74.938	159.774	199.868	

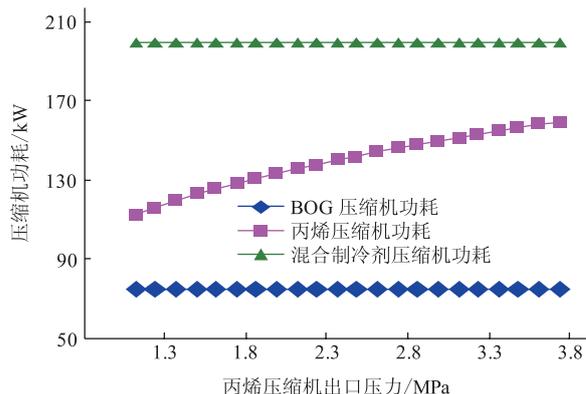


图4 丙烯压缩机出口压力对压缩机功耗的影响

3.4 BOG压缩机出口压力的影响

BOG压缩机出口压力对应模拟流程中 Y_2 的压力(0.7~1.6 MPa),模拟计算得到其对流程中各压缩机功耗的模拟结果(表4)和影响情况(图5)。随着BOG压缩机出口压力的增大,BOG压缩机的功耗大幅增加,而丙烯制冷循环、混合制冷剂制冷循环影响较小,

整个工艺过程的总功耗增加了 8.37%。因此,在满足液化率与温度要求的情况下,应尽量降低 BOG 压缩机的出口压力。

表 4 BOG 压缩机出口压力对流程中各压缩机功耗的模拟结果

节点压力 /MPa	功耗/kW			总功耗变化率 %
	BOG 压缩机	丙烯压缩机	混合制冷剂压缩机	
0.7	59.686	149.828	201.374	8.37
1.6	97.160	150.654	197.456	

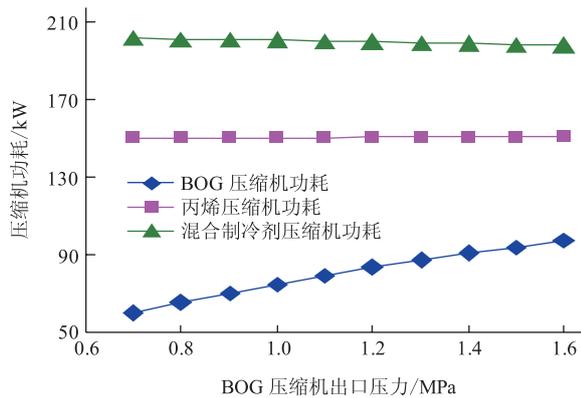


图 5 BOG 压缩机出口压力对压缩机功耗的影响

4 工艺流程优化

4.1 优化目标及参数

优化 BOG 再液化工艺能耗的关键是降低压缩机功耗^[7]。根据上述模拟计算与分析结果,以 BOG 压缩机出口压力、丙烯压缩机出口压力、丙烯预冷多股流换

热器出口温度、丙烯制冷节流阀出口压力作为优化变量,以再液化装置最低功耗为优化目标函数,对 LNG-BOG 再液化流程压缩机总功耗进行优化计算。通过变量轮换法^[8]对优化目标函数进行求解,计算得到优化变量的最佳值。

4.2 操作条件

LNG 船航行海域海水温度和液货舱中 BOG 压力的变化对再液化流程中的工艺参数均有影响。因此,再液化工艺流程优化后的设备参数必须根据海水温度和 BOG 压力的变化范围进行选定。设定操作条件为:液货舱 BOG 再液化系统启动压力为 0.114 6 MPa、关闭压力为 0.110 1 MPa, LNG 船航行的海水温度为 30~35 °C。

4.3 优化结果

采用 ASPEN PLUS 模拟软件进行优化计算,得到工艺流程最低功耗状态下的节点参数(表 5),从而计算出所需要的重要性能参数(表 6~表 8)。

表 5 主要工艺流程模拟节点参数

节点	温度/°C	压力/MPa	流量/(kg·s ⁻¹)
Y ₁	-107.295	0.114 6	0.229
Y ₂	44.439	0.900 0	0.229
Y ₃	35.000	0.900 0	0.229
X ₁	146.912	1.500 0	0.611
X ₂	35.000	1.500 0	0.611
C ₃ H ₆ -R	5.462	0.110 0	0.611
H ₁	202.731	4.400 0	0.382
H ₂	35.000	4.400 0	0.382
H ₃	-40.000	4.400 0	0.382
MIXER	-50.680	0.110 0	0.382

表 6 再液化系统压力开启与关闭时 BOG 制冷循环的最优化性能参数

温度/°C	BOG 压力 /MPa	CPR ₁ 功率 /kW	CPR ₁ 理论输气量 /(m ³ ·s ⁻¹)	换热器负荷/kW				
				HX ₁	C ₁	HX ₂ 的 LNG 端	HX ₄ 的 LNG 端	
30	压力关闭	0.110 1	71.935	0.170	24.596	6.192	37.009	149.490
	压力开启	0.114 6	70.347	0.164	24.596	4.787	37.009	149.490
35	压力关闭	0.110 1	71.935	0.170	24.596	3.662	39.540	149.490
	压力开启	0.114 6	70.347	0.164	24.596	2.257	39.540	149.490

表 7 再液化系统压力开启与关闭时丙烯制冷循环的最优化性能参数

温度/°C	CPR ₂ 功率 /kW	CPR ₂ 理论输气量 /(m ³ ·s ⁻¹)	换热器负荷/kW		
			C ₂	HX ₂	
30	压力关闭	138.268	0.031	327.216	188.947
	压力开启	138.268	0.031	327.216	188.947
35	压力关闭	155.004	0.030	351.244	196.241
	压力开启	155.004	0.030	351.244	196.241

表8 再液化系统压力开启与关闭时混合制冷剂制冷循环的最优化性能参数

温度/℃	CPR ₃ 功率/kW	CPR ₃ 理论输气量/(m ³ ·s ⁻¹)	换热器负荷/kW					
			C ₃	HX ₃ 的 LNG 端	HX ₃	HX ₄ 的 MIX 端	HX ₄	
30	关闭压力	183.940	0.012	156.896	151.938	46.589	30.470	179.958
	开启压力	183.940	0.012	156.896	151.938	46.589	30.470	179.958
35	关闭压力	183.940	0.012	152.133	156.701	46.589	30.470	179.958
	开启压力	183.940	0.012	152.133	156.701	46.589	30.470	179.958

在海水换热器出口温度为 30 ℃、35 ℃ 和液货舱压力为 0.110 MPa、0.114 6 MPa 的 4 种状态(表 6~表 8)下,最优化性能的参数值均不同,为了能够最大程度的满足 BOG 再液化的要求,在设计中必须以 4 种状态中最优化性能参数的最大值为设备的设计参数。根据优化结果,结合再液化系统中各设备的工质进出口状态,可以确定设备的设计参数。

通过对 BOG 再液化流程进行优化,流程总功耗由优化前的 447.099 kW 降低至 410.879 kW,优化后的总功耗比优化前降低 8.82%(表 9)。可见,在一定程度上达到了降低再液化流程功耗的目标。

表9 工艺流程优化前后压缩机功耗对比

对比项目	功耗/kW			总功耗降低率/%
	BOG 压缩机	丙烯压缩机	混合制冷剂压缩机	
优化前	62.384	163.812	220.903	8.82
优化后	71.935	155.004	183.940	

5 结论

(1) LNG 船 BOG 再液化系统装置流程较为复杂,设备较多,运用 ASPEN PLUS 软件对主要设备的运行参数进行模拟计算,得出不同的设备运行参数对流程总功耗具有不同的影响程度。

(2) 以 BOG 再液化系统流程最低功耗为优化目标,在液货舱压力为 0.110 1~0.114 6 MPa、海水换热器出口温度为 30~35 ℃ 的条件下,对再液化流程主要设备运行参数进行多变量优化计算,得到再液化流程中压缩机和换热器的最优性能参数,为再液化工艺流程设备优化设计与选型提供所需的工艺参数。对比再液化装置优化前后的压缩机功耗,流程总功耗降低了 8.82%。

参考文献:

- [1] 李博洋,陈爱玲,王瑞宣. 液化天然气船舶再液化技术应用分析[J]. 航海工程,2009(1): 107-110.
- [2] 黄海波. LNG 船舶配置再液化装置可行性分析[J]. 船舶,2009(1): 9-11.
- [3] 丁立勋,李斌. 液化天然气船蒸发气再液化方法分析[J]. 青岛远洋船员学院学报,2009,30(2): 51-54.
- [4] 陈雪,马国光. 流程参数对 LNG 接收终端蒸发气再冷凝工艺流程性能的影响[J]. 石油与天然气化工,2008,37(2): 100-104.
- [5] 屈一新. 化工过程数值模拟及软件[M]. 北京: 化学工业出版社,2006: 15-35.
- [6] 黎志昌,方江敏,马四朋. LPG 船用 BOG 再装置工艺流程模拟与优化[J]. 低温工程,2010(4): 62-66.
- [7] 黎志昌. LNG 船 BOG 再液化工艺流程模拟与优化的研究[D]. 广州: 华南理工大学,2011.
- [8] 杨志国,李亚军. 液化天然气接收站蒸发气体再冷凝工艺的优化[J]. 化工学报,2009(11): 2 876-2 881.

(收稿日期:2012-10-10; 编辑: 孙伶)

作者简介: 王伟,在读硕士生,1988 年生,2010 年毕业于合肥工业大学过程装备与控制工程专业,现主要从事油气储运工艺及装备的研究。

电话: 13416104379; Email: w_wei_d@163.com

Wang Wei, reading master, born in 1988, graduated from Hefei Industrial University, process equipment & control engineering, in 2010, engaged in the research of oil & gas storage and transportation process and equipment.

Tel: 13416104379, Email: w_wei_d@163.com