

LNG 动力船两种冷能发电系统方案对比分析

姚寿广, 赵倩, 冯国增

(江苏科技大学 能源与动力工程学院 212003)

摘要: 本文以气化量 5t/h 的大型 LNG 燃料动力船为对象, 应用 HYSYS 软件对以 R290 为循环工质的联合法, 以及低温级循环工质为 R170, 高温级循环工质为 R290 的两级低温朗肯循环系统进行模拟对比分析。结果表明, 若以船舶工作海域平均海水温度 20℃, 船舶每天航行 10 小时作为分析的基础, 并以工业用电价格 $0.75 \text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 计算。联合法的年发电收益将比两级低温朗肯循环多 11.7 万元, 以此可以作为两种循环系统的经济性分析的基础。

关键词: LNG 动力船; 冷能; 联合法; 两级低温朗肯循环; 焓效率

0 引言

LNG 作为一种高效、清洁的燃料, 其自身携带有大量的冷能。若液化工厂需生产一吨 LNG, 将消耗大约为 3060000kJ 的动力^[1], 接收站每气化一千克 LNG 释放出约为 830kJ 的冷能。如果将这部分冷能完全转化为动力, 那么 1 吨 LNG 释放的冷能相当于 864000kJ^[2]。以 LNG 年进口量为 300 万吨计算, 每年可利用的冷能为 27000 亿 kJ^[3]。此外, 利用 LNG 冷能获得动力时, 对天然气本身并无额外消耗, 且不会产生附加的排放物污染, LNG 冷能利用对节能减排及能源高效利用具有重大意义。

LNG 冷能发电系统, 具有产业链短, 受外界因素干扰小等优点, 因此受到广泛推行^[4]。目前, 常用的发电系统有直接膨胀法, 有机朗肯循环法, 联合法等。其中直接膨胀法, 利用高压泵加压 LNG, 气化得到的高压天然气至透平膨胀机做功、发电, 低压气体再由海水调温后外输至管网。该方法系统简单、初投资少, 但是 LNG 冷能利用率低, 其总体冷能利用率约 24%^[5]。有机朗肯循环法, 即以 LNG 为冷源、海水或余热为热源, 一般以低沸点烃类或者其混合物为循环工质。该方法 LNG 冷能利用率较高, 使用混合工质可高达 36%, 缺点是流程较复杂, 且高于冷凝温度的天然气冷能未得到利用^[6]。而有机朗肯循环与直接膨胀法相结合的联合发电法, LNG 通过 LNG 泵提高到一定压力, 在冷凝器中与循环工质换热, 使工质完成整个循环对外做功, 经过冷凝器的 LNG 气化为 NG, 进入膨胀机膨胀做功, 其冷能利用率可达 50%^[7]。其优点是同时利用了 LNG 的低温焓和

压力焓，且工艺简单，工程造价低，缺点是焓损失较大。In-Hwan Choi^[8]等人提出一种新型的多级有机朗肯循环。流程模拟表明净输出功及焓效率均随着级数的增大而增大，且这两个参数受工质热力学特性影响明显。经分析比较得出，以C₃H₈为工质的三级循环效率最好。Yanni Liu^[9]等人提出了一种新型低温发电循环，该循环采用的是二元混合冷媒，同时又结合了一个蒸气吸收过程，在此循环中，以CF₄和C₃H₈为冷媒。经模拟分析得出，该循环与朗肯循环相比，发电量能够提高 66.3%，而且 LNG 回收温度从-75℃增至-59.6℃。

目前 LNG 冷能利用的研究主要围绕陆上 LNG 接受站展开，而针对 LNG 燃料动力船舶冷能利用的研究还很少见报道。文献[10]提出一种针对 LNG 运输船的直接膨胀法的冷能发电系统。通过对进出膨胀机的压力和温度进行模拟对比，得出膨胀的压力和温度越高，其发电功率就越大，焓效率越高。文献[11]利用 ASPEN PLUS 流程模拟软件在 LNG 双燃料动力船上低品位热源与 LNG 冷源之间建立了一种改进的直接膨胀法发电系统流程。通过模拟分析得出在相同的膨胀机入口温度下，由于出口压力的确定，随着入口压力的增大，出口的温度下降。随着膨胀机入口温度的提高，不同压力下平均的烟气出口温度下降。文献[12]是在文献[11]的基础上，利用 ASPEN PLUS 流程模拟软件，采用有机朗肯循环系统来回收 LNG 动力船上的 LNG 冷能和烟气余热。通过模拟分析得出在相同条件下，乙烷工质的发电功率远远高于其他工质，膨胀机入口压力约为 15 MPa 时，发电功率达到最大值 75.836 kW。

本文以气化量 5t/h 的大型 LNG 燃料动力船为对象，针对两级低温朗肯循环系统以及朗肯循环结合天然气直接膨胀的联合法两种发电工艺，应用 HYSYS 软件对两种流程进行了系统模拟与对比分析，为 LNG 燃料动力船冷能的利用方案选择提供依据。

1 两种冷能发电系统方案构成

两种冷能发电系统方案分别如图 1、图 2 所示。

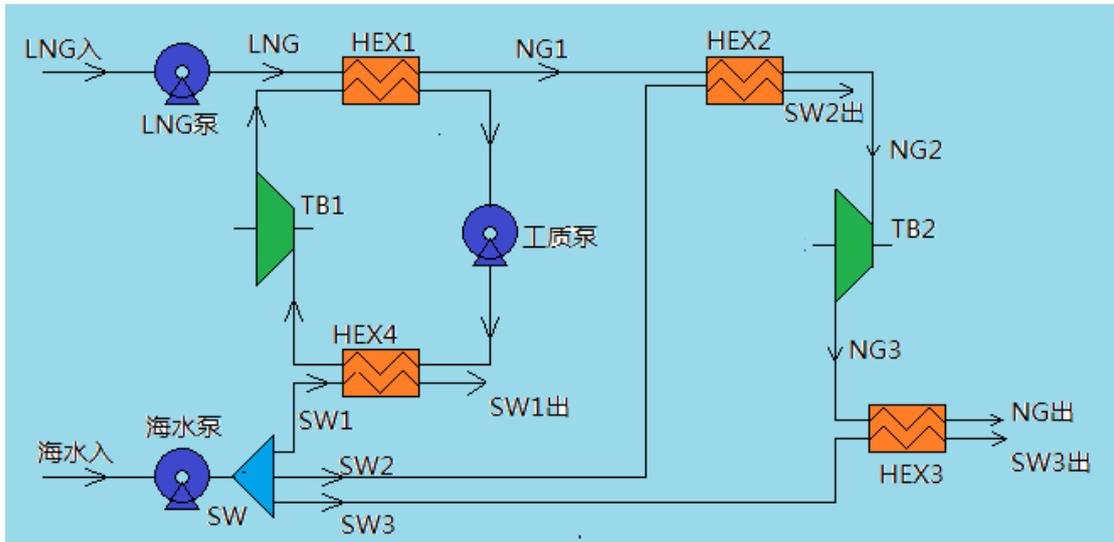


图 1 联合发电流程

联合发电系统如图 1 所示，系统的工作过程如下：LNG 首先被高压泵加压后作为有机朗肯循环的低温源，吸收循环工质丙烷的热量后气化成高压低温 NG，再由海水加热至一定温度后进入透平膨胀机膨胀至低温低压 NG，最后再用海水加热调温，传输至发动机供气管网。以丙烷为工质的有机朗肯循环工作在高温热源间完成循环过程由透平带动发电机发电。

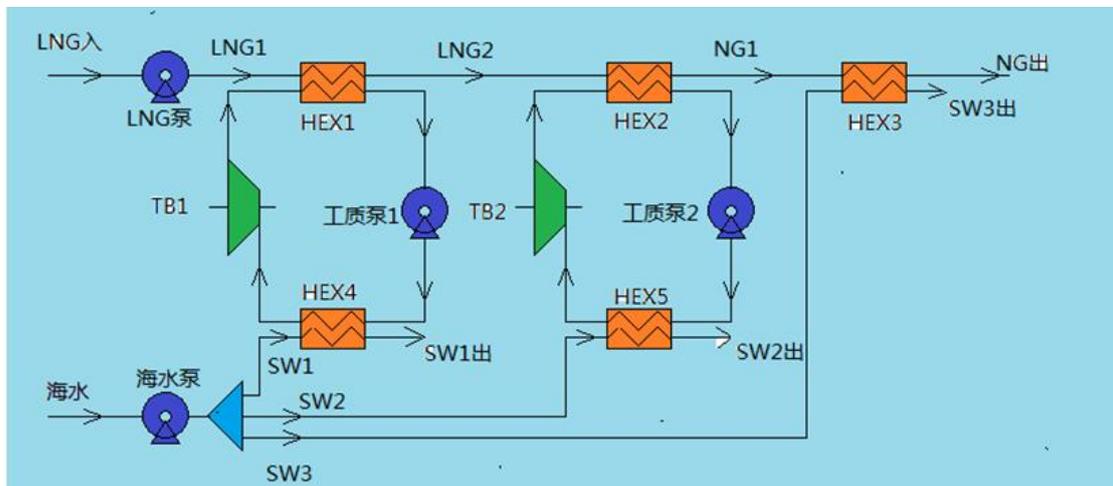


图 2 两级低温朗肯循环发电流程

两级低温朗肯循环发电系统如图 2 所示，系统的工作过程如下：LNG 由增压泵加压后经 LNG 加热器 (HEX1) 升温，此时 LNG 在 HEX1 出口处保持液态，再经 LNG 气化器 (HEX2) 气化成低温 NG 后进入 NG 加热器 (HEX3)，由海水加热调温，传输至发动机供气管网。

2 两种冷能发电系统焓分析与比较

2.1 两种冷能发电系统模拟分析模型

采用 HYSYS 软件模拟时，联合法发电系统与两级低温朗肯循环发电系统分析模型分别如图 3、4 所示。

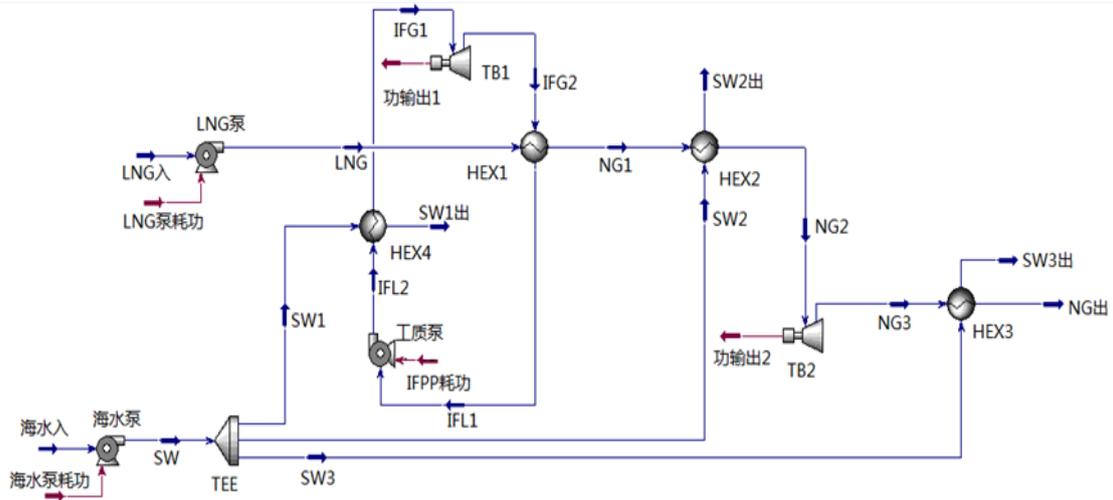


图 3 联合法发电系统模拟分析模型

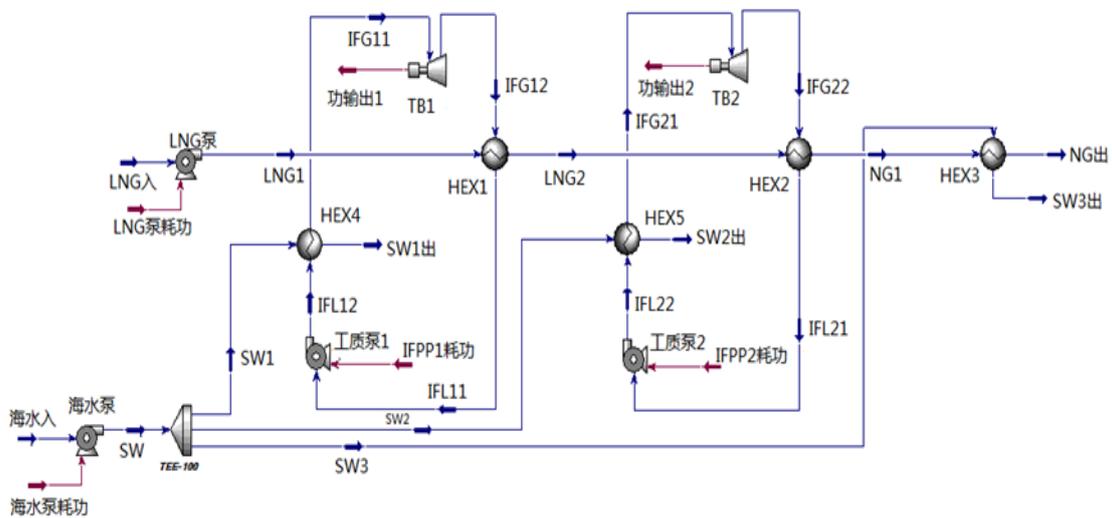


图 4 两级低温朗肯循环发电系统模拟分析模型

模拟计算时做如下设定：

- (1) 循环工质冷凝压力取 0.11MPa ；
- (2) LNG 气化器出口工质过冷度取 2°C ；
- (3) 各换热器最小端差取 5°C ，忽略换热器漏热损失；
- (4) 透平膨胀机入口工质为饱和态；
- (5) 透平膨胀机和泵的效率分别取 80% 和 75% 。

联合法热源海水与 LNG 相关参数如表 1 所示：

表 1 联合法循环系统海水和 LNG 基本参数

项目 & 物流	温度 (°C)	压力 (MPa)	气相分数	流量 (kg/h)
LNG 入	-162	0.5	0	5000
LNG	-160	4	0	5000
NG 1	----	4	1	5000
NG 出	20	1	1	5000
海水入	20	0.15	0	----
SW 1/2/3	20.05	0.75	0	----
SW 1/2/3 出	15	0.75	0	----

两级低温朗肯循环系统热源海水与 LNG 相关参数如表 2 所示：

表 2 两级低温朗肯循环系统海水和 LNG 基本参数

项目 & 物流	温度 (°C)	压力 (MPa)	气相分数	流量 (kg/h)
LNG 入	-162	0.5	0	5000
LNG 1	-161.7	1	0	5000
NG 1	----	1	1	5000
NG 出	20	1	1	5000
海水入	20	0.15	0	----
SW 1/2/3	20.05	0.75	0	----
SW 1/2/3 出	15	0.75	0	----

2.2 两种冷能发电系统焓值计算与分析

定义各设备焓效率与焓损率，见表 3

表 3 各设备焓损失和焓效率定义

设备	耗费焓	收益焓	焓损失	焓效率
泵	P_b	$Ex_{out,b}$ $- Ex_{in,b}$	$P_b - Ex_{out,b} + Ex_{in,b}$	$\frac{Ex_{out,b} - Ex_{in,b}}{P_b}$
换热器	$Ex_{in,h}$ $- Ex_{out,h}$	$Ex_{out,h1}$ $- Ex_{in,h2}$	$Ex_{in,h} - Ex_{out,h}$ $- Ex_{out,h1} + Ex_{in,h2}$	$\frac{E_{h,2} - E_{h,1}}{Ex_{in,h} - Ex_{out,h}}$

$$\text{透平} \quad \frac{Ex_{in,t} - Ex_{out,t}}{P_t} \quad Ex_{in,t} - Ex_{out,t} - P_t \quad \frac{P_t}{Ex_{in,t} - Ex_{out,t}}$$

说明： $Ex_{in,b}$ 、 $Ex_{out,b}$ 、 P_b 分别代表泵的进出口焓以及泵的耗功；

$Ex_{in,h}$ 、 $Ex_{out,h}$ 、 $Ex_{in,h2}$ 、 $Ex_{out,h1}$ 分别代表换热器中两种工质的进出口焓；

$Ex_{in,t}$ 、 $Ex_{out,t}$ 、 P_t 分别代表透平膨胀机的进出口焓以及透平膨胀机的输出功。

两种冷能发电系统各设备耗费焓及收益焓模拟结果见表 4

表 4 各设备耗费焓及收益焓模拟结果

设备	联合法		两级低温朗肯循环	
	耗费焓 (kW)	收益焓 (kW)	耗费焓 (kW)	收益焓 (kW)
LNG 泵	15.27	1.77	2.18	0.24
工质泵 1			16.80	8.42
工质泵 2	3.14	1.95	0.51	0.32
海水泵	55.88	49.75	54.34	48.37
HEX1	671.89	241.93	886.07	504.31
HEX2	31.85	1.77	67.67	39.24
HEX3	39.11	1.95	26.79	1.65
HEX4	51.53	8.62	152.82	8.96
HEX5			8.36	1.40
TB1	192.35	146.28	359.91	258.19
TB2	239.22	176.94	31.20	23.72

两种冷能发电系统各设备焓损失及焓效率模拟结果见表 5

表 5 各设备焓损失及焓效率模拟结果

设备	联合法		两级低温朗肯循环	
	焓损失 (kW)	焓效率	焓损失 (kW)	焓效率
LNG 泵	13.50	11.62%	1.94	11.01%
工质泵 1			8.38	50.12%
工质泵 2	1.19	62.13%	0.19	62.75%
海水泵	6.13	89.02%	5.96	89.03%
HEX1	429.96	36.01%	381.76	56.92%
HEX2	30.08	5.57%	28.43	57.99%
HEX3	37.15	4.99%	25.14	6.16%
HEX4	42.91	16.73%	143.86	5.86%
HEX5			6.94	16.79%
TB1	46.07	76.05%	101.72	71.74%
TB2	62.28	73.97%	7.48	76.02%

表 6 两种系统模拟结果对比表

比较内容	联合法	两级低温朗肯循环
系统总焓损	669.27	711.80
系统总输出功	250.7	207.99
系统焓效率	30.7%	26.7%

结合系统图，从表 4、表 5 可以发现，联合法的低温朗肯循环段在 HEX1 中由于换热温差过大，导致焓损较大；两级低温朗肯循环中，由于在单级低温朗肯循环系统的基础上增设了低温级循环，减小了换热温差，且低温级循环工质 R170 在 110kPa 下的冷凝温度比循环工质 R290 的冷凝温度低，与低温的 LNG 温度更为匹配，从而降低了焓损，提高了焓效率。而联合法中冷凝器 HEX2、HEX3 和 HEX4 中，工质直接与高温海水换热，其冷热流温差大，因此焓损较大；两级低温朗肯循环系统中的 HEX3、HEX4 和 HEX5 焓损较大的原因亦是如此。但由于两级低温朗肯循环系统增设了一台泵和一台换热器，最终导致系统的总焓损和焓效率低于联合法发电系统。

根据计算结果，当 LNG 的蒸发量为 5000kg/h 时，联合法冷能发电系统透平可以产生 323.22kW 的功率，LNG 泵功率为 13.5 kW，循环工质泵功率为 3.14kW，海水泵的总功率为 55.88kW，由此得到本循环的净发电功率可以达到 250.7kW。LNG 冷量焓为 980.29kW，系统焓效率为 30.7%。而两级低温朗肯循环发电系统中透平可以产生 281.91kW 的功率，LNG 泵功率为 2.18kW，循环工质泵功率为 17.31kW，海水泵的总功率为 54.43kW，由此得到本循环的净发电功率可以达到 207.99kW。而 LNG 冷量焓为 980.29kW，系统焓效率为 26.7%。

3 结论

探讨了联合法和两级低温朗肯循环发电回收 LNG 冷能的方法。通过对比获知，当两种循环具有相同的 LNG 储存条件和蒸发量时，联合法的净发电功率为 250.7kW，系统焓效率为 30.7%，而两级低温朗肯循环的净发电功率为 207.99kW，系统焓效率为 26.7%。若船舶平均每天航行 10 小时，即全年航行 3650 小时，以工业用电价格 $0.75 \text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 计算，则使用联合法的全年单艘船舶系统冷能发电量价值约为 68.6 万元，而使用两级低温朗肯循环的全年单艘船舶系统冷能发电量价值约为 56.9 万元。

从流程的复杂程度来看，联合法与两级低温朗肯循环差距不大。但从冷能发电收益来看，联合法的年发电收益将比两级低温朗肯循环多 11.7 万元，且焓效率也比两级低温朗肯循环高，以此可以作为两种循环系统的经济性分析的基础。

参考文献

- [1] 顾安忠, 鲁雪生, 汪荣顺, 等. 液化天然气技术[M].机械工业出版社, 2004: 1-338.
- [2] 王静玲, 马国光, 余洋, 等. LNG 卫星站冷量利用方案选择[J].石油化工应用, 2012, 31 (9): 22-25.
- [3] 王威, 张娜, 蔡睿贤. LNG 冷焓动力系统的工质选择及系统分析方法[J].燃气轮机技术, 2001, 14 (3): 17-20.
- [4] 陈晖, 邓青, 贾士栋. LNG 冷能发电技术研究进展[J].应用能源技术, 2013, 23 (5): 22-24.
- [5] 贺红明, 林文胜. 基于 LNG 能的发电技术[J].低温技术, 2006, 34(6): 432-436.
- [6] 王坤, 鲁雪生, 顾安忠. 液化天然气冷能利用发电技术浅析[J].低温工程, 2005, (1): 54-58.
- [7] 陈利琼, 许培林, 孙磊, 董文浩, 马凯. LNG 冷能发电技术现状分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(6): 39-43.
- [8] In-Hwan Choi, Sangick Lee, Yutaek Seo, Daejun Chang. Analysis and Optimization of Cascade Rankine Cycle for Liquefied Natural Gas Cold Energy Recovery [J]. Energy, 2013, 61 (5): 179-195.
- [9] Liu Y, Guo K. A Novel Cryogenic Power Cycle for LNG Cold Energy Recovery [J]. Energy, 2011, 36(5): 2828-2833.
- [10] 李博洋, 张运秋, 张晓荣, 田东方, 于成龙. LNG 运输船冷能发电技术[J]. 中国航海, 2016,39 (1): 92-98.
- [11] 胡选哲, 孙文哲, 顾骁勇, 侯龙, 冯梦娇. LNG 动力船冷能发电系统的模拟优化研究[J]. 船舶工程, 2015,37 (2): 50-53.
- [12] 胡选哲, 孙文哲, 顾骁勇, 侯龙, 冯梦娇. LNG 动力船冷能和余热发电系统的模拟优化[J]. 中国航海, 2016,39 (2): 20-23.