

# 一种基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统

王 强, 厉彦忠, 陈 曦

(西安交通大学 制冷低温研究所, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 在分析 LNG 物理冷焓的基础上, 提出了一种基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统, 并对影响系统循环效率的相关参数进行了研究。结果表明, 在较低的热源温度下, 系统的热效率和焓效率可以达到 30% 以上; 对影响循环的主要参数分析表明, 二次冷媒的冷凝温度及膨胀机进口压力对循环的效率影响很大。随着冷凝温度的降低及膨胀机进口压力的提高, 循环热效率、焓效率都将有所提高。

**关 键 词:** 低品位热源; LNG; 冷能回收; 动力系统

中图分类号: TQ13; TB657.8 文献标识码: A

## 符号说明

$P$	压力 / Pa;	$T$	温度 / K;
$h$	单位质量工质 的焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;	$m_1$	丙烷的循环流量 / kg
$m_2$	LNG 的循环流量 / kg	$m_3$	低温热源加热介质 的循环流量 / kg;
$s$	熵 / $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ;	$ex$	单位质量焓 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
$EX$	总质量焓 / kJ;	$W$	功 / kJ;
$\eta$	效率 / %;	$\Delta T$	低温热源进出口温差 / K
$z$	压缩因子;		

## 下脚标

th 热	ex 焓	ef 有效	0 环境态
$P_1$ 泵 1	$P_2$ 泵 2	in 进口	out 出口

## 1 引 言

社会经济的持续发展必须以充足的能源作保障。面临能源危机, 人们一方面调整能源结构, 不断加大对新能源的开发利用; 另一方面采用新技术、新工艺, 不断提高能源的利用率, 特别是加强对普遍存在的低品位热源的合理利用(如地热能、太阳能、工业余热等)有一定意义。

由于低品位热源的温度较低, 从卡诺循环效率分析可知, 一般冷源系统的热、焓效率都较低。因此, 构建低温动力系统是高效利用这些低温热源的重要途径。

随着天然气的开发利用, 液化天然气(LNG)以其方便的储运特性, 近几年取得了快速的发展, 世界 LNG

生产年均增长 20%, 年运输与贸易额已达 6 000 多万吨。由于天然气不能在常温下加压液化, 因而必须进行低温处理, 然后将其存储在 110 K 的低温下。以低温热源与 LNG 冷能构建低温动力系统不仅可以经济、高效合理的利用低品位能, 同时又可以充分回收利用天然气液化过程中所消耗的大量能量<sup>[1]</sup>, 这在能源日益紧张的今天具有重要的节能意义和经济效益。

## 2 LNG 冷能分析

采用焓分析方法对 LNG 冷能进行评价是较为合理的。根据焓的定义<sup>[2]</sup>, LNG 物理冷焓包括一定压力  $P$  下, 由温差引起的冷量焓  $ex_T$ (无相变时为显热焓  $ex_s$ ) 以及在环境温度  $T_0$  下, 由压差引起的压力焓  $ex_p$ 。

由温差引起的冷量焓为

$$ex = (1 - \frac{T_0}{T})q \quad (1)$$

其中:  $T_0$  为环境温度,  $T$  为冷源温度,  $q$  为单位质量吸热量。

若换热过程中冷源的温度从  $T_1$  升高到  $T_2$ , 则

$$ex_s = \int_{T_1}^{T_2} (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{q} = \int_{T_1}^{T_2} C_p (1 - \frac{T_0}{T}) dT \quad (2)$$

由压差引起的压力焓为

$$ex_p = T_0 \int_{P_0}^P \frac{1}{\rho T} dp \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为天然气的密度,  $P_0$  为环境压力。

由于 LNG 为低温液体, 其温升的过程中伴有相变传热, 因而, LNG 冷量焓除了包括显热焓  $ex_s$ , 还包括潜热焓  $ex_l$ <sup>[3]</sup>, 即

$$ex_T = ex_s + ex_l \quad (4)$$

假定 LNG 的汽化潜热为  $r$ , 饱和温度为  $T_s$ , 则 LNG 潜热焓为

$$ex_l = (\frac{T_0}{T_s} - 1)r \quad (5)$$

收稿日期: 2002-07-22; 修订日期: 2002-09-14

基金项目: 教育部高等学校骨干教师基金资助项目(200033); 西安交通大学博士基金资助项目(20010134)

作者简介: 王 强(1971-)男, 山东威海人, 西安交通大学博士研究生

$$\text{显热焓用为 } ex_s = \int_{T_0}^{T_s} Cp(1 - \frac{T_0}{T})dT \quad (6)$$

LNG 是低温液体混合物，其主要成分是甲烷(CH<sub>4</sub>)。为分析方便，将纯度较高的 LNG 视作单一组分，由实际气体状态方程

$$pv = zRT \quad (7)$$

$$\text{得 } ex_p = zRT_0 \int_{P_0}^P \frac{dp}{P} = zRT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

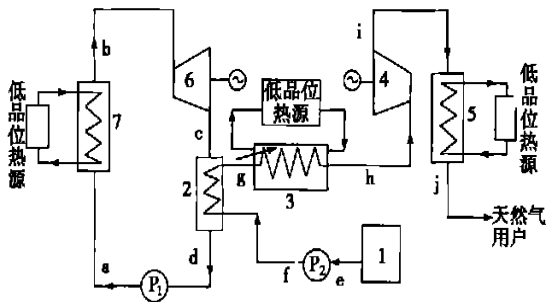
由 CH<sub>4</sub> 物性表查得<sup>[4]</sup>，在温升过程中甲烷定压比热变化不大，为简化分析，确为常数，则

$$ex_T = ex_1 + ex_s = (\frac{T_0}{T_s} - 1)r - Cp(T_0 - T_s) - CpT_0 \ln \frac{T_0}{T_s} \quad (9)$$

由以上 LNG 物理冷焓的分析可以看出，一定压力下的 LNG 具有大量的冷量焓用和压力焓用，对于进行远距离天然气输送的大型 LNG 接受站来说，其蕴含的冷能是相当可观的，若以 100% 的效率转换成电力，则动力输出约为 250 kWh/t 液化天然气。

### 3 基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统

以普遍存在的低品位能(地热能、太阳能、工业余热等)和 LNG 冷能构建中间介质朗肯循环与天然气直接膨胀开式循环的组合低温动力系统进行电力输出，将高效利用低品位能，同时又充分回收利用 LNG 的冷量焓用和压力焓用<sup>[5-6]</sup>。其系统流程如图 1 所示。



1—LNG 储罐; 2—冷凝器; 3—换热器; 4—透平膨胀机;  
5—换热器; 6—透平膨胀机; 7—蒸发器

图 1 基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统

整个低温动力系统包括两部分。其中左半部分是以 LNG 与低品位热源之间温差驱动的二次冷媒动力循环。主要包括透平膨胀机、冷凝器、循环泵、蒸

发器等。循环冷媒为丙烷。低品位热源为朗肯循环的高温热源，LNG 为循环的低温热源，液态丙烷经泵 P<sub>1</sub> 加压后进入蒸发器 7，吸热后气化成高压蒸汽，经透平膨胀机 6 膨胀对外做功后，温度压力降低，进入冷凝器 2 中，被逆流的 LNG 液化，完成一个循环。

装置的右半部分是利用天然气自身压力直接膨胀的开式动力循环。常压下存储的 LNG 经泵 P<sub>2</sub> 加压后进入冷凝器 2 释放出冷量，成为气态。气态的天然气在换热器 3 中进一步加热，进入透平膨胀机 4 膨胀，进行动力输出，压力降至燃气供气压力。此时天然气温度还较低，经换热器 5 进一步加热至常温后，进入供气系统。整个动力系统计算参数如表 1 所示。环境温度 T<sub>0</sub> = 20 °C，环境压力 P<sub>0</sub> = 0.1 MPa。

表 1 LNG 冷能回收低温动力循环计算参数

二次冷媒动力循环		天然气直接膨胀系统	
工质	丙烷	工质	天然气
透平膨胀机效率	0.8	透平膨胀机效率	0.8
泵效率	0.7	泵效率	0.7
蒸发器出口温度 / °C	60 ~ 90	LNG 罐压力 / MPa	0.1
冷凝器出口温度 / °C	-40 ~ -80	天然气供气压力 / MPa	0.4
		透平膨胀机 4 进口压力 / MPa	1.6 ~ 2.0

### 4 低温动力系统能量分析

#### 4.1 热效率分析

对于膨胀机 6

$$W_6 = m_1(h_b - h_c) \quad (10)$$

对于膨胀机 4

$$W_4 = m_2(h_h - h_i) \quad (11)$$

对于泵 P<sub>1</sub>

$$W_{P_1} = m_1(h_a - h_d) \quad (12)$$

对于泵 P<sub>2</sub>

$$W_{P_2} = m_2(h_f - h_e) \quad (13)$$

低品位热源的供热量

$$Q_{in} = \sum cm_3 \Delta T \quad (14)$$

系统循环的热效率

$$\eta_{th} = \frac{(W_6 - W_{P_1}) + (W_4 - W_{P_2})}{Q_{in}} \quad (15)$$

#### 4.2 焓效率分析

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (16)$$

$$EX_{ef} = (EX_6 - EX_{P_1}) + (EX_4 - EX_{P_2}) \quad (17)$$

其中:  $EX_6 = m_1(ex_b - ex_c)$  (18)

$EX_{P_1} = m_1(ex_a - ex_d)$  (19)

$$EX_4 = m_2(ex_h - ex_i) \quad (20)$$

$$EX_{P_2} = m_2(ex_f - ex_e) \quad (21)$$

$$EX_{in} = \sum m_3(ex_{in} - ex_{out}) \quad (22)$$

系统循环的 $\eta$ 用效率

$$\eta_{ex} = \frac{EX_{ef}}{EX_{in}} \quad (23)$$

### 4.3 结果与讨论

为提高整个 LNG 冷能回收动力系统的热效率及 $\eta$ 用效率,对一定热源温度下,不同冷凝温度及 LNG 开式膨胀循环中不同进气压力等工况下循环的热效率及 $\eta$ 用效率进行了分析,结果如下:

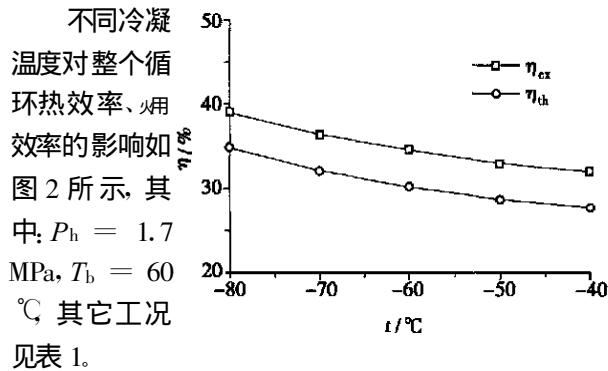


图2 冷凝温度对循环效率的影响

由图2可以看出,在给定工况下,随冷凝温度的降低,循环热效率、 $\eta$ 用效率不断升高。这是因为冷凝温度越低,对应朗肯循环的冷源温度就越低,依据循环热效率分析可知,热效率也越高,此外,冷凝温度越低,闭式循环中膨胀机6的出口压力也就越低,这将直接带来循环有效 $\eta$ 用  $EX_{ef}$  输出的增加,因而循环的 $\eta$ 用效率也就越高。

此外,对于较低品位度的热源,在整个冷凝温度范围内,系统的热、 $\eta$ 用效率基本都保持在30%以上,因而,低温动力系统对于低品位热能的利用是十分经济有效的。

LNG 直接膨胀开式循环中膨胀机4进口压力  $P_h$  对循环热、 $\eta$ 用效率的影响如图3所示,其中,  $T_b = 80$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_d = -50$   $^{\circ}\text{C}$ ,其它工况见表1。

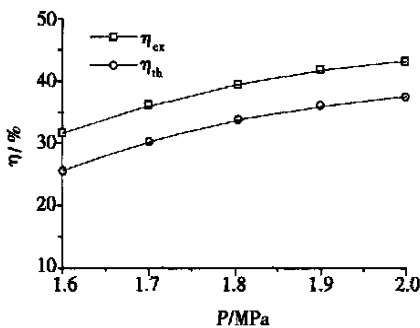


图3 膨胀机5进口压力对循环效率的影响

由图3可以看出,一定天然气供气压力下,随着膨胀机4进口压力的增加,循环的热、 $\eta$ 用效率也将提高,但提高的幅度随压力的增加而减小。这是因为进口压力的提高,有利于膨胀机的动力输出,循环的热、 $\eta$ 用效率也将提高;对于给定的供气压力(0.4 MPa),随着进口压力的提高,压比增幅减小,整个系统热、 $\eta$ 用循环效率的增幅也将减小。

由于系统的高温热源为低品位热,因而为进一步提高循环的热效率和 $\eta$ 用效率,可以采用多级抽气回热循环或再热循环。

## 5 结 论

(1) 在对 LNG 冷能进行分析基础上,以低品位热源与 LNG 构建了一种组合低温动力系统。该系统不仅能经济、高效利用低品位能,同时又能充分地回收利用天然气液化过程中所消耗的大量能量。在较低的热源温度下,系统的热效率和 $\eta$ 用效率可以达到30%以上,这对于能源的节约具有重要的意义。若想进一步提高系统的效率,可以采用抽气回热循环或再热循环,以提高二次冷媒的蒸发温度和蒸发压力。

(2) 对影响循环的主要参数进行了分析,结果表明,二次冷媒的冷凝温度对循环的效率影响很大。一定蒸发温度下随着冷凝温度的降低,循环的热效率、 $\eta$ 用都将提高。因而,强化换热器中流体的换热,提高换热器效率是提高循环效率的重要方法。LNG 直接膨胀开式循环中,膨胀机进出口压比对循环的效率也有一定的影响。对于给定的供气压力,适当提高膨胀机进口压力也能提高循环的热效率和 $\eta$ 用效率。

### 参考文献:

- [1] 王 威,张 娜,蔡睿贤. LNG 冷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.
- [2] 项新耀,李东明.  $\eta$ 用分析节能技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1996.
- [3] HONGTAN LIU, LIXIN YOU. Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas[J]. *Energy Conversion & Management*, 1999(40): 1515-1525.
- [4] 郑德馨,袁秀玲. 低温工质热物性性质表和图[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
- [5] 程文龙,陈则韶,胡 芾. 电站中液化天然气可用冷能的回收利用[J]. 工程热物理论, 2001, 22(2):148-150.
- [6] HISAZUMI Y, YAMASAKI Y, SUGIYAMA S. Proposal for a high efficiency LNG power generation system utilizing waste heat from the combined cycle[J]. *Applied Energy*, 1998(60): 169-182.

( 释 编辑)

fuzzy mathematics

热力系统传感器故障检测的动态神经网络方法 = **A Dynamic Neuron Network Method for Sensor Failure Detection in a Thermodynamic System** [刊, 汉] / MA Tao, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 237 ~ 239

A nonlinear time-dependent thermodynamic system status is analyzed with a fault-detection and diagnostic method being carried out by a dynamic neuron-network status observer. Through the simulation tests conducted on a hot-water boiler model by the use of a time-delay neuron network and dynamic recursive neuron network it is shown that the thermodynamic system sensor detection and diagnostic method based on the above-mentioned observer is feasible. After a comparison of the simulation test results one can see that the time-delay RBF (radial basis function) network has a relatively good potential for further widespread applications. The use of the above method in an automatic control system of Qingdao Gas Co. has confirmed its reliability. **Key words:** dynamic neuron network, failure detection

200 MW 机组运行性能诊断的热经济学方法 = **Thermoeconomic Method for the Performance Diagnosis of a 200MW Power Plant** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-dong, WANG Jia-xuan, WANG Qing-zhao, et al (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 240 ~ 244

On the basis of a thermoeconomics structure theory discussed is a thermoeconomic method for the operation performance diagnosis of a thermodynamic system. With the thermodynamic system calculation model of a 200MW power plant serving as an example the fuel/product relation of constituent elements is expounded and the thermoeconomics production model set up. After a theoretical analysis and practical calculation of the increase in system resource consumption caused by a failure proposed are indexes of relatively high sensibility for failure discrimination. A quantized index for reflecting the impact of failures is also given while analytical computations are performed with regard to some specific cases. **Key words:** thermoeconomics, failure diagnosis, structure theory

一种基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统 = **A Cryogenic Power System for Recovering LNG (Liquefied Natural Gas) Cooling Energy Based on a Low-grade Heat Source** [刊, 汉] / WANG Qiang, LI Yan-zhong, CHEN Xi (Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 245 ~ 247

On the basis of analyzing physical cold exergy of LNG (liquefied natural gas) the authors have proposed a low-grade heat source-based cryogenic power system for recovering LNG cooling energy. An investigation was conducted of the relevant parameters having an impact on the system cycle efficiency. The results of the investigation show that under a relatively low heat-source temperature the thermal and exergy efficiency of the system may attain in excess of 30%. From an analysis of the cycle-influencing main parameters it is ascertained that the condensing temperature of secondary cooling medium exercises a very great influence on the cycle efficiency. With the increase in evaporation temperature and the decrease in condensation temperature there will be an enhancement of both the cycle thermal efficiency and exergy. **Key words:** low-temperature heat source, liquefied natural gas, cooling energy recovery, power system

一种基于联合动力装置的船舶电力推进原动机模块 = **A Combined Power Plant-based Prime-mover Module for Marine Electric Propulsion** [刊, 汉] / JIANG De-song, XIE Chun-ling, SUN Yu-feng (Power Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy