

沼气混合制冷剂循环液化流程与设备焓分析*

周淑霞¹ 董玉平¹ 张玉林² 王维振¹ 郭飞强¹ 张彤辉¹

(1. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061; 2. 山东绿能燃气实业有限责任公司, 菏泽 274000)

【摘要】 以天然气液化设备为模型,利用 Aspen HYSYS 软件,设计小型混合制冷剂液化沼气流程,对该流程进行数值模拟,根据 PR 方程计算出沼气的泡点与露点以及液化率、能耗等。在热力学分析的基础上,计算流程各设备焓损失,分析产生设备焓损失的原因,提出降低设备焓损失的方法。依据模拟结果,建立实验平台对降低焓损失方法进行验证,结果表明:小型混合制冷剂液化沼气流程具有可行性,液化过程中能耗和焓损失最大的设备是压缩机,利用储液罐上端的闪蒸气预冷混合制冷剂的方法可使压缩机和冷却器的焓损失分别减少 12.2% 和 27.2%。

关键词: 沼气 液化 混合制冷剂 Aspen HYSYS 焓损失
中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0138-05

Exergy Analysis of Mixed-refrigerant Cycle Liquefaction
Process of Biogas

Zhou Shuxia¹ Dong Yuping¹ Zhang Yulin² Wang Weizhen¹ Guo Feiqiang¹ Zhang Tonghui¹

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China 2. Shandong Green Energy Gas Industrial Co., Ltd., Heze 274000, China)

Abstract

The pint-sized gas mixed-refrigerant liquefaction process was designed to analyze the exergy loss by using Aspen HYSYS software. The temperature and the pressure of bubble point and the dew-point were obtained from the PR equation, and the liquefied rate and energy consumption was calculated. Subsequently, the exergy loss was calculated via the thermodynamic analysis, and the methodology for reducing exergy loss was approached. An experiment was conducted to measure the exergy loss. The results showed that small gas mixed-refrigerant liquefaction process was feasible, while the largest exergy loss in the liquefaction process was compressor. With flash evaporation pre-cooled freezing medium on the top of storage tank, the reduction of exergy loss for compressor and chiller were 12.2% and 27.2%, respectively.

Key words Biogas, Liquefaction, Mixed-refrigerant, Aspen HYSYS, Exergy loss

引言

沼气是有机生物物质在厌氧微生物降解过程中产生的含甲烷的混合气体^[1-3]。沼气主要成分与天然气的特性相似,沼气纯化可提高成分中甲烷的含量,是替代石化燃气的可再生能源^[4-7]。但是沼气产业

具有“偏、散、小”的特点,制约着沼气产业化发展。目前,小型可移动液化装置^[8]已经应用在天然气领域,利用小型可移动液化装置将沼气集中液化,像天然气和压缩天然气一样,由管道或气罐装运和输送,是沼气产业化的有效途径。

近几年,国内外专家对天然气的液化流程进行

收稿日期: 2011-02-24 修回日期: 2011-03-11
* 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009EZ001)
作者简介: 周淑霞, 博士生, 主要从事生物物质能开发及利用研究, E-mail: zhoushx9414@126.com
通讯作者: 董玉平, 教授, 博士生导师, 主要从事生物物质能开发及利用研究, E-mail: dongyp@sdu.edu.cn

了设计、模拟与评价工作^[9-12]。Shell 公司模拟计算了级联式、混合制冷剂和氮气膨胀液化流程,并分析了其优劣。曹文胜等进行了撬装型天然气液化装置流程比较分析^[13-14]。沼气流程设计为沼气液化提供了模型基础。

本文在天然气液化装置的基础上,根据沼气与天然气成分和压力的不同,基于流体热力学原理,对小型沼气液化流程进行数值模拟,依据流程分析得出设备的性能参数。根据模拟结果,并通过实验对沼气流程的可行性进行验证。最后在此基础上,分析设备产生焓损失的原因,提出减少设备焓损失的方法。

1 计算模型

常用的状态方程主要有维里型状态方程和立方型状态方程。维里型状态方程用于描述气相和液相性质,不适用于极性混合物,而且方程缺乏精确的体积数据来确定高次项维里系数,一般很难应用到高压范围,且维里方程和单独一套维里系数又不能同时描述气、液两相。立方型状态方程是能展开成体积 3 次幂多项式的真实流体状态方程,能够解析求根,因此应用较多。

利用 PR (Peng - Robinson) 方程在 Aspen HYSYS 软件中对甲烷和二氧化碳气体状态进行模拟,模拟结果与文献[15]数据基本吻合。因此在计算沼气和混合制冷剂气液相平衡中,采用立方型状态方程的 PR 状态方程。

1.1 PR 计算方程

PR 状态方程为

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \tag{1}$$

式中 p ——压力 R ——气体常数
 T ——温度 V ——比体积
 a, b ——与气体种类有关的常数

PR 方程的压缩因子为

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0 \tag{2}$$

式中 Z ——压缩因子
 A, B ——与气体状态参数有关的系数
逸度系数计算公式为

$$\ln \Phi_i = \frac{B_i}{B} (Z-1) - \ln (Z-B) + \frac{A}{2.828B} \left[\frac{B_i}{B} - \frac{2}{a\alpha} \sum_j Z_j (a\alpha)_{ij} \right] \ln \frac{Z+2.414B}{Z-0.414B} \tag{3}$$

式中参数含意见文献[15]。

1.2 沼气的泡点和露点

由表 1 中沼气成分,利用状态方程计算相平衡,

利用 Aspen HYSYS,采用 PR 物性包和 COMThermo 数据库进行沼气泡点和露点的模拟计算,计算结果如图 1 所示。

表 1 组分的摩尔百分数

Tab.1 Mole fractions of componentnts							%
成分	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂	O ₂
MRC	38	26	12	17	7	0	0
沼气样品	82	0	0	0	0	16	10

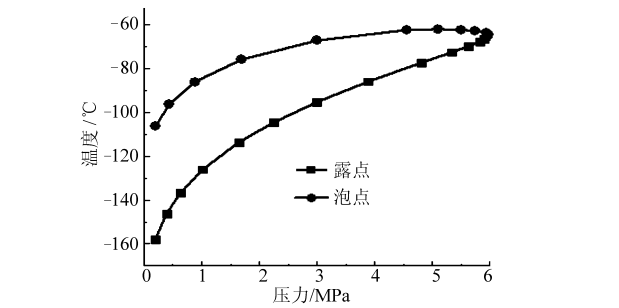


图 1 沼气泡点和露点的温度与压力曲线
Fig.1 Temperature and pressure of bubble point and dew point of biogas

由图 1 可见,沼气泡点温度在 -110 ~ -60℃ 之间,压力在 0.2 ~ 5.9 MPa 之间。沼气露点温度在 -160 ~ -67℃ 之间,压力在 0.2 ~ 5.9 MPa 之间。

以沼气泡点和露点的温度和压力范围为依据,利用 Aspen HYSYS 软件,设计小型混合制冷剂液化沼气流程。

2 沼气混合制冷剂循环液化流程

2.1 液化流程

天然气液化流程有级联式液化流程、混合制冷剂液化流程和带膨胀机的液化流程^[15-16]。级联式液化流程是上一级流程给下一级流程提供冷量,它的缺点是流程设备多、流程复杂、投资大,因此这种流程应用少;带膨胀机的液化流程中使用的压缩机和氮气膨胀机能耗较高;混合制冷剂液化流程具有流程简单、机组设备少、投资少、能耗低的特点,目前应用最广泛。根据混合制冷剂液化流程特点和图 1 所示原料沼气泡点和露点的温度和压力关系,设计小型混合制冷剂液化流程,如图 2 所示。

由图 2 可见,流程由制冷循环和液化循环两部分组成,混合制冷剂由甲烷、乙烷、丙烷、正戊烷和氮气组成。制冷循环如下:低压制冷剂进入 K-100 低压压缩机压缩,经 E-100 冷却器冷却后,进入 V-100 气液分离器,将气体和液体分开,气体经过 K-101 压缩机压缩增压,液体经过 QP100 泵加压,然后在 MIX-100 混合器中混合,进入 E-101 冷却器进行冷却,进入多股流换热器中,然后沼气和混合

制冷剂 9 作为热源,混合制冷剂 12-1 为低温制冷剂作为冷源,液体 12-1 在换热器中吸收热量,发生气液相转换,液态 12-1 吸热变成气态 15 后循环回到 K-100 压缩机中。沼气液化循环如下:净化后

沼气通过多股流换热器降到一定温度,经过 VLV-102 节流阀发生相变,转换成气液共存状态,在气液分离器中,气体和液体分开,气体 16 可继续循环,液体 17 装至储液罐。

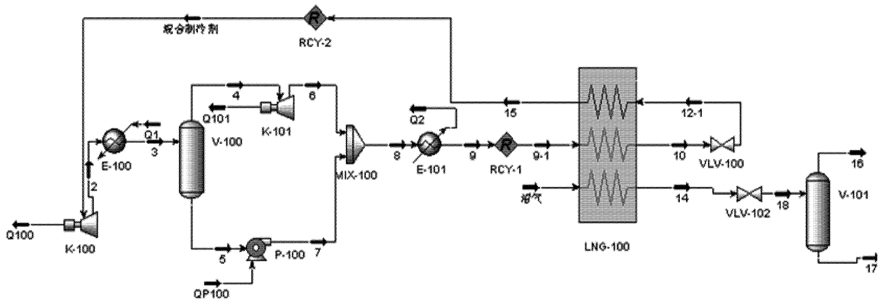


图 2 混合制冷剂循环液化沼气流程图
Fig. 2 Chart of mixed-refrigerant cycle liquefaction process of biogas

2.2 液化流程参数设定

沼气的流量是 4 m³/h,需要设定的参数如表 2 所示。

表 2 混合制冷液化沼气流程的温度和压力

Tab.2 Specified pressure and temperature for mixed-refrigerant cycle liquefaction process of biogas

参数	沼气	低压制冷剂	高压制冷剂	储存沼气
压力/MPa	2.65	0.85	6.50	0.25
温度/℃	32	25	35	-152

2.3 流程热力学模拟结果

根据表 1 和表 2 中的参数,利用 Aspen HYSYS 对混合制冷剂循环液化沼气流程进行模拟计算,得到的模拟结果为:制冷剂流量为 4.26 mol/L,压缩机功耗为 13.56 kW,制冷剂提供的冷量为 20.6 kW,沼气消耗的功耗是 15.6 kW,冷却水功耗 5.65 kW,沼气的液化率为 0.83。

3 液化设备的焓分析

混合制冷剂循环液化沼气流程需要的设备较多,包括多股流换热器、压缩机、水冷却器、气液分离器、混合器、节流阀等。在混合制冷剂循环液化沼气流程热力学模拟分析的基础上,对流程进行焓分析,计算流程中各设备的焓损失,分析产生焓损失的原因以及降低焓损失的方法^[17-19]。

3.1 分析模型

忽略工质的动能和位能,稳流工质的焓、焓可表示为

$$e = H - H_0 - T_0 (S - S_0)$$

式中 e ——工质的焓 H_0 ——工质初始焓
 H ——工质的焓 S_0 ——工质初始熵
 S ——工质的熵 T_0 ——工质初始温度

（4）

(1) 压缩机焓损失^[18]

压缩机焓损失表达式为

$$\Delta E_{cx} = (H_2 - H_1) (1/\eta_m - 1) + T_0 (S_{C2} - S_{C1})$$

（5）

式中 ΔE_{cx} ——压缩机焓损失

H_2, H_1 ——单位工质压缩前、后焓值

η_m ——压缩机效率

S_{C1}, S_{C2} ——单位工质压缩前、后熵值

(2) 节流阀焓损失

由于绝热节流焓值不变, $H_2 = H_1$, 节流阀的焓损失可表示为

$$\Delta E_{jx} = T_0 (S_{j2} - S_{j1})$$

（6）

式中 ΔE_{jx} ——节流阀焓损失

S_{j1}, S_{j2} ——单位工质节流前、后熵值

(3) 物流混合器焓损失

物流混合器焓损失表达式为

$$\Delta E_{mx} = T_0 (S_3 - S_1 - S_2)$$

（7）

式中 ΔE_{mx} ——混合焓损失

S_1, S_2 ——两股物流混合前熵值

S_3 ——物流混合后熵值

(4) 多股流换热器焓损失

多股流换热器焓损失表达式为

$$\Delta E_{hx} = T_0 \left(\sum S_{hout} - \sum S_{hin} \right)$$

（8）

式中 ΔE_{hx} ——换热器焓损失

S_{hout}, S_{hin} ——流出和流入多股物流的熵值

(5) 水冷却焓损失

水冷却焓损失表达式为

$$\Delta E_{lx} = T_0 (S_{lout} - S_{lin}) - T_0 \left(\frac{Q}{\Delta T} \ln \frac{T_{wout}}{T_{win}} \right)$$

（9）

式中 ΔE_{lx} ——冷却器焓损失

S_{lin}, S_{lout} ——冷却液体进入和离开冷却器的熵值

Q ——换热量

T_{win} 、 T_{wout} ——冷却水进入和离开换热器温度

3.2 焓损失的计算结果

根据表 1 和表 2 中的参数和流程热力学分析结果,利用 Aspen HYSYS 中各个设备的焓熵值,计算各设备损失如图 3 所示。

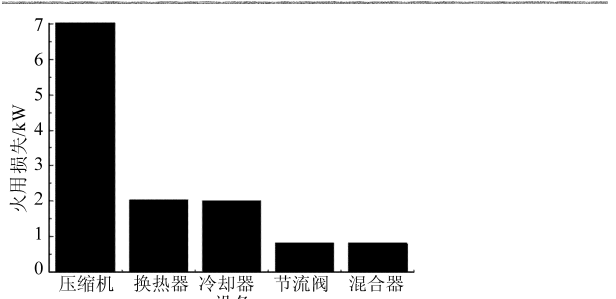


图 3 混合制冷剂循环液化沼气中设备焓损失
Fig.3 Exergy loss of equipment in mixed-refrigerant cycle liquefaction process of biogas

由图 3 可见,在混合制冷剂循环液化沼气流程中,压缩机焓损失在整个流程焓损失中占主导地位,其次是换热器和冷却器的焓损失,最后是节流阀和混合器,虽然此混合制冷系统采用两级压缩、级间冷却的方法,但是压缩机的焓损失占液化流程中总焓损失的 53% 左右。一方面可选择高效压缩机,减少压缩机的焓损失;另一方面系统中要充分利用冷量,若将闪蒸气体 16 冷量用于冷却压缩机的进气温度,能起到降低压缩机功耗、减少压缩机焓损失的作用。

4 实验

基于混合制冷剂循环液化沼气流程,利用山东绿能燃气实业有限责任公司实验平台进行实验。主要实验设备有压缩机 2 台、气液分离器 2 个、多相流

换热器 1 台、冷却箱 1 个、泵 1 个、气液混合器 1 个和减压阀 2 个。

在实验装置的测试系统中,压力采用日本横河 EJA-430A 型压力变送器测量,精度为 $\pm 0.04\%$;流量采用美国 EMERSON 公司生产的 CMF025M300NWBAMZZZ 型质量流量计测量,测量气体流量的精度为 $\pm 0.35\%$;温度采用西安天虹仪表有限公司生产的精度为 $\pm (0.15 + 0.002t)$ 的 WZPB-Pt100 型电阻测温仪测量;压缩机功耗测试采用 AWE2101 型功率分析仪。

先根据图 2 的流程图设计实验装置,进行实验。实验流程:沼气首先经过干燥过滤器,脱除水分及其他杂质,再进入换热器,与混合制冷剂换热,然后由节流阀进入气液分离器,最后液体部分进入储液罐。低压制冷剂先进入低压压缩机内加压,再冷却,经过气液分离器,液体部分经过泵加压,气体部分由压缩机加压,加压以后在混合器中混合,再进入换热器。

测试系统中有:低压压缩机的出气部位设置低压表、温度计以及流量计,高压压缩机的出气部位安装高压表、温度计和流量计;沼气进入换热器以前设置压力表和温度计;在沼气进入储液罐之前测量压力和温度,初始压力稳定以后,开始记录结果。

由设备功率表得出压缩机、冷凝器等设备功耗,由测试系统得出流量、压力和温度,主要数据如表 3 所示。

在第 1 次实验的基础上,采用闪蒸气体预冷压缩机混合制冷剂的方法做第 2 次实验。测试系统不变,设备流程做如下变动:冷却器 E-100 换成热交换器,储液罐上端的气体作为冷气对低压压缩机出来的混合制冷剂进行预冷却,设备流程如图 4 所示。

表 3 实验数据

Tab.3 Experimental data

	压缩机功耗	冷却器功耗	沼气液化率	沼气储存压力	温度/℃	压缩机焓损失	冷却器焓损失
	/kW	/kW		/MPa		/kW	/kW
实验 1	14.8	6.20	0.83	0.3	-153	6.89	2.2
实验 2	13.7	5.78	0.85	0.3	-153	6.05	1.6

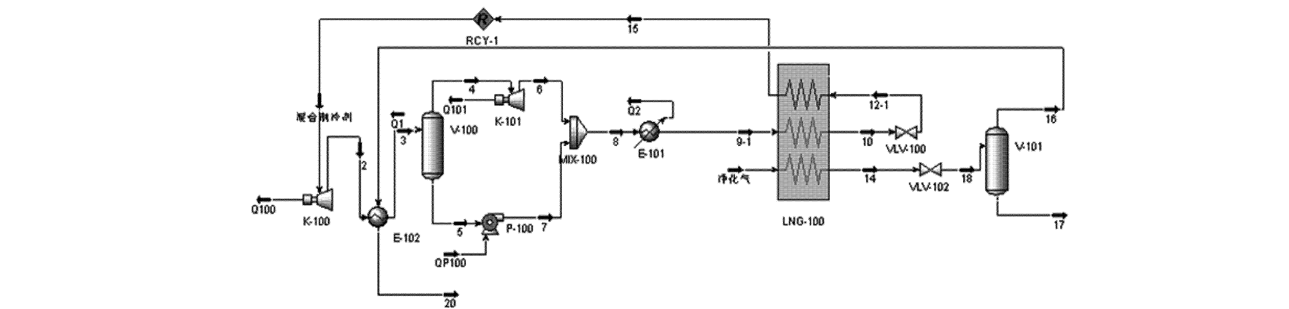


图 4 第 2 次实验中混合制冷剂循环液化沼气流程图
Fig.4 Mixed-refrigerant cycle liquefaction process of biogas in the second experiment

由表3可以看出,充分利用闪蒸气体预冷混合制冷剂能减少压缩机和冷却器功耗,从而减少压缩机和冷却器的焓损失。压缩机的焓损失减少12.2%,冷却器的焓损失减少27.2%。

5 结论

(1)在 Aspen HYSYS 软件中,利用 COMThermo 数据库对沼气进行泡点和露点模拟计算,得到了沼气泡点与露点的温度与压力范围。沼气泡点温度在 $-110 \sim -60^{\circ}\text{C}$ 之间,压力在 $0.2 \sim 5.9 \text{ MPa}$ 之间。沼气露点温度在 $-160 \sim -67^{\circ}\text{C}$ 之间,压力在 $0.2 \sim 5.9 \text{ MPa}$ 之间。

(2)以混合制冷剂液化天然气流程为模型,根据沼气成分泡点与露点,设计了小型混合制冷剂循环液化沼气流程。

(3)对小型混合制冷剂液化沼气流程中设备进行焓损失计算,得出了最大的焓损失是压缩机的焓损失,其次是换热器和冷却器的焓损失。减少压缩机焓损失的措施有:选择高效压缩机;闪蒸气体的冷量用于冷却压缩机的进气温度。

(4)利用小型实验平台对混合制冷剂液化沼气流程进行对比实验,结果表明采用闪蒸气体预冷压缩机混合制冷剂的方法,压缩机的焓损失减少12.2%,冷却器的焓损失减少27.2%。

参 考 文 献

- 罗涛. 德国新能源和可再生能源立法模式及其对我国的启示[J]. 中外能源,2010,15(1):34~45.
Luo Tao. German legislating practice for new and renewable energy and enlightenment to China [J]. Sino-Global Energy, 2010,15(1): 34~45. (in Chinese)
- Kapdi S S, Vijay V K, Rajesh S K, et al. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context[J]. Renewable Energy, 2005,30(8):1 195~1 202.
- Guendouz J, Buffiere P, Cacho J, et al. High-solids anaerobic digestion: comparison of three pilot scales[J]. Water Science and Technology, 2008,58(9):1 757~1 763.
- 王海涛,黄福川,马奎,等. 沼气净化压缩罐装的实验研究[J]. 中国沼气,2009,27(1):24~26.
Wang Haitao, Huang Fuchuan, Ma Kui, et al. A study on canning of compressed biogas[J]. China Biogas, 2009,27(1): 24~26. (in Chinese)
- 宋灿辉,肖波,史晓燕,等. 沼气净化技术现状[J]. 中国沼气,2007,25(4):23~27.
Song Canhui, Xiao Bo, Shi Xiaoyan, et al. Review on biogas upgrading technology [J]. China Biogas, 2007,25(4):23~27. (in Chinese)
- Burak D, Paul S. Bio-methanization of energy crops through mono-digestion for continuous production of renewable biogas [J]. Renewable Energy, 2009,34(12): 2 940~2 945.
- Parawira W, Read J S, Mattiasson D, et al. Energy production from agricultural residues: high methane yields in pilot-scale two stage anaerobic digestion[J]. Biomass and Bioenergy,2008,32(1): 44~50.
- 李素燕,马彩凤,刘政委,等. 小型氮膨胀天然气液化流程的设计及优化分析[J]. 低温工程,2009(2):47~51.
Li Suyan, Ma Caifeng, Liu Zhengwei, et al. Optimal design and analysis on small-scale natural gas liquefaction in nitrogen expander cycle[J]. Cryogenics,2009(2): 47~51. (in Chinese)
- 蒲亮,孙善秀,程向华,等. 几种典型的煤层气液化流程计算及分析比较[J]. 化学工程,2008,36(2):54~58.
Pu Liang, Sun Shanxiu, Cheng Xianghua, et al. Calculations and exergy analysis on several kinds of liquefaction processes of natural gas[J]. Chemical Engineer,2008,36(2):54~58. (in Chinese)
- 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(上)[J]. 天然气工业,2004,24(2):88~90.
Shi Yumei, Wang Rongshun, Gu Anzhong. Influence of parameters on C3/MRC process performance of natural gas liquefaction(1)[J]. Natural Gas Industry,2004,24(2):88~90. (in Chinese)
- 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(下)[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(2)[J]. Natural Gas Industry,2004,24(3):111~114. (in Chinese)
- 顾安忠,鲁雪生,王荣顺,等. 液化天然气技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- 曹文胜,鲁雪生,顾安忠,等. 小型撬装式 LNG 装置的流程模拟[J]. 化工学报,2006,57(6):1 290~1 295.
Cao Wensheng, Lu Xuesheng, Gu Anzhong, et al. Simulation of small-scale natural gas liquefaction flows in skid-mounted package[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(6):1 290~1 295. (in Chinese)

对比分析,计算了系统采集一幅农田图像平均所用运行,无丢帧现象,传输速率满足数据上传的实时性时间为 5.42 s。试验表明,该系统能够稳定可靠地要求。

参 考 文 献

1

Georg Steinberger, Matthias Rothmund, Matthias Rothmund,et al. Mobile farm equipment as a data source in an agricultural service architecture[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2009,65(2):238~246.

2

Bullock D S, Kitchen N R, Bullock D G. Multi-disciplinary teams—a necessity for research in precision agriculture systems [J]. Crop Sci.,2007,47(5):1 765~1 769.

3

Lam Y, Slaughter D C, Wallender WW, et al. Computer vision system for automatic control of precision furrow irrigation system[C]//2006 ASABE Annual Meeting, Paper No.062078, 2006.

4

熊迎军,沈明霞,孙玉文,等. 农田图像采集与无线传输系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(3):184~187.
Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Sun Yuwen, et al. Design on system of acquisition and wireless transmission for farmland image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):184~187. (in Chinese)

5

沈明霞,丛静华,张祥甫,等. 基于 ARM 和 DSP 的农田信息实时采集终端设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):147~152.
Shen Mingxia, Cong Jinghua, Zhang Xiangfu, et al. Design and implementation of terminal for agricultural data real-time acquisition based on ARM and DSP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):147~152. (in Chinese)

6

武永峰,宫志宏,刘布春,等. 基于远程监控的农业气象自动采集系统设计[J]. 农业机械学报,2010,41(10):174~179.
Wu Yongfeng,Gong Zhihong,Liu Buchun, et al. Automatic collecting system of agro-meteorology information based on remote monitoring technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):174~179. (in Chinese)

7

杨玮,李民赞,王秀. 农田信息传输方式现状及研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(5):297~301.
Yang Wei, Li Minzan, Wang Xiu. Status quo and progress of data transmission and communication technology in field information acquisition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(5):297~301. (in Chinese)

8

Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. 2nd ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2006.

9

贺军. 基于 FPGA 的 JPEG 图像压缩芯片设计[D]. 成都:电子科技大学,2003.

10

Guimaraes A A, Saraiva A M. Analysis of the ISO11783 CAN-bus based protocol: its interpretation and usage on a precision farming application [C] // Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and other Precision Resources Management,2004.

(上接第 142 页)

14

曹文胜,吴集迎,鲁雪生,等. 撬装型混合制冷剂液化天然气流程的热力学分析[J]. 化工学报,2008,59(增刊2):53~59.
Cao Wensheng,Wu Jiying,Lu Xuesheng,et al. Thermodynamic analysis on mixed refrigerant cycle of small scale natural gas liquefaction process in skid-mounted package[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008,59(Supp.2):53~59. (in Chinese)

15

陈国邦,包锐,黄永华. 低温工程技术·数据[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

16

赵敏,厉彦忠. 丙烷预冷混合制冷剂液化流程中原料气与制冷剂匹配研究[J]. 西安交通大学学报,2010,44(2):108~112.
Zhao Min, Li Yanzhong. Analysis for selecting mixed refrigerant composition based on raw natural gas in propane pre-cooled mixed refrigerant liquefaction process[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2010,44(2):108~112. (in Chinese)

17

尹全森,李红艳,季中敏,等. 混合制冷剂循环的级数对制冷性能的影响[J]. 化工学报,2009,60(11):2 689~2 693.
Yin Quansen, Li Hongyan, Ji Zhongmin, et al. Effect of number of stages of mixed refrigerant cycle on refrigeration performanc[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009,60(11):2 689~2 693. (in Chinese)

18

石玉美,汪荣顺,顾安忠,等. 混合制冷剂循环液化天然气流程焓分析[J]. 工程热物理学报,2003,24(4):564~566.
Shi Yumei, Wang Rongshun, Gu Anzhong, et al. Exergy analysis of mixed refrigerant cycle to liquefy the natural gas[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003,24(4):564~566. (in Chinese)

19

Remeljeja C W, Hoaldley A F A. An exergy analysis of small-scale liquefied natural gas (LNG)liquefaction processes[J]. Energy,2006,31(12):2 005~2 019.