文章编号:1673-5005(2013)04-0155-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.04.026

FLNG 液化系统动态特性分析

林日亿[1], 李小明[1], 李 健[2], 喻西崇[3], 李玉星[1], 孙兴科[4]

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院,山东青岛 266580; 2. 中石化天津液化天然气有限责任公司,天津 300457; 3. 中海油研究总院技术研发中心深水工程重点实验室,北京 100027; 4. 陕西金山电器有限公司,陕西咸阳 712000)

摘要:对浮式液化天然气(FLNG)液化系统中丙烷预冷氮膨胀制冷循环的主要设备建立动态模型,以模拟的液化流程参数为初始参数,对丙烷预冷氮膨胀制冷循环在不同扰动形式下进行动态模拟。结果表明:FLNG 制冷系统具有很强的惯性特性,并且对海洋晃动的反应非常明显;对同样信号形式,丙烷预冷剂扰动对 LNG 出口温度响应强度较小、跟踪误差大,同时响应时间比氮气扰动时响应时间短。

关键词:浮式液化天然气; 开环响应系统; 动态分析; 特性

中图分类号:TE 951; TE 626.7 **文献标志码**:A

Dynamic characteristics analysis of FLNG liquefaction systems

LIN Ri-yi[1], LI Xiao-ming[1], LI Jian[2], YU Xi-chong[3], LI Yu-xing[1], SUN Xing-ke[4]

(1. *College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *SINOPEC Tianjin Liquefied Natural Gas Limited Company*, *Tianjin* 300457, *China*;
3. *CNOOC Research Institute Deepwater Engineering Key Laboratory*, *Beijing* 100027, *China*;
4. *Shanxi Jinshan Electric Appliances LTD*, *Xianyang* 712000, *China*)

Abstract: The major equipments' dynamic models of the propane precooling and nitrogen expansion refrigeration cycle in FLNG liquefaction system were established. Taking the parameters of simulated liquefaction process as the initial parameters, dynamic simulation on the propane precooling and nitrogen expansion refrigeration cycle under the different forms of disturbance was done. The results show that FLNG refrigeration system has strong inertia, and reacts to ocean shake obviously. For the same signal form, propane refrigerant disturbance has a small response to the outlet temperature of LNG, and has large tracking error. Otherwise, the response time is shorter than the response time of nitrogen disturbance.

Key words: floating liquefied natural gas; open loop response system; dynamic analysis; characteristics

天然气广泛应用于发电、居民生活、工业原料和汽车燃料等行业[1]。中国因大型天然气气田较少,国产天然气不能满足实际需求,迫切需要发展高度集成的 FLNG 船技术。但是,FLNG 制冷系统在实际运行中天然气物性参数和外界环境等都会随时间变化,同时由于受到海洋环境中波浪、潮汐以及深海低温冷却水的影响,液化系统处于动态变化过程。因此,对 FLNG 液化系统的动态特性研究对于提高制冷循环的运行效率,指导实际生产具有重要的意义。笔者对 FLNG 液化系统中丙烷预冷氮膨胀制冷循环的主要设备建立动态模型,以模拟的液化流程参数为初始参数,对丙烷预冷氮膨胀制冷循环在不同扰动形式下进行动态模拟。

1 天然气液化系统响应模型

天然气液化系统主要由压缩机、阀门、换热器及调节器等组成,设备多,流程复杂。

在一个动态控制系统过程中,根据其特点分为两类:开环响应系统和闭环响应系统[2]。开环控制方式是指控制装置与被控对象之间没有反馈的控制

收稿日期:2012-11-22

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05026-006-07)

作者简介:林日亿(1973-),男,副教授,博士,从事热力采油和热能利用的教学与科研工作。E-mail:linry@upc.edu.cn。

过程,当系统受到外界扰动时,被控对象的响应结果完全依照系统自身的动态特性,不反馈执行,因此系统没有自动修正偏差能力,抗扰动能力差。天然气液化系统即开环控制系统,被控对象多,结构复杂,换热器的温度控制是制冷过程中的重要环节。

图 1 为 FLNG 液化系统的开环响应框图。系统由三级换热器(丙烷预冷换热器、氮气一级膨胀冷凝换热器和氮气二级膨胀过冷换热器)串联组成,换热器入口参数为各扰动来源,根据不同扰动类型分为不同的扰动通道。图中,换热器为被控对象,换热器的输出 LNG 温度为被控参数,作用于换热器上的所有参数(各股物流的温度、压力、流量的变化)均为系统的内外扰动。通过对不同扰动的分析,例如第 i 扰动,获得系统的 i 通道的动态响应结果。

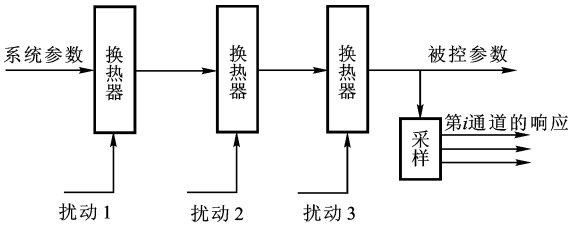

图 1　FLNG 液化温度开环响应框图

Fig. 1　Open loop response block diagram for FLNG temperature

2　动态模型

在质量守恒、能量守恒和动量守恒定律基础上建立各设备的动态模型,便于整个系统的动态分析。

2.1　压缩机

在天然气液化系统中,压缩机是整个系统的动力源。为研究天然气液化的动态响应,可根据模拟的实际需要先进行相应的简化,建立压缩机参数模型。将压缩过程看作是稳态过程,同时压缩机的扰动结果用压缩机与冷却器组成的反馈调节系统控制,获得稳定的 N_2 流与 C_3H_8 流。为分析反馈系统的动态特性,建立压缩机的动态特性模型:

$$w_c = \frac{\kappa}{(\kappa-1)\eta}(p_2v_2 - p_1v_1) = \frac{\kappa}{(\kappa-1)\eta}R_gT_2\left[1-\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right], \tag{1}$$

$$T_2 = \eta w_c\frac{(\kappa-1)}{\kappa R_g}\frac{1}{\left[1-\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}. \tag{2}$$

式中,p_1、p_2 分别为压缩机进出口压力,Pa;v_1、v_2 分别为压缩机进出口比容,m^3/kg;T_1、T_2 分别为流体进出口温度,℃;w_c 为压缩机耗功,W;η 为压缩机机械效率,%;κ 为天然气绝热指数;R_g 为通用气体常数,$J\cdot(mol\cdot K)^{-1}$。

2.2　阀　门

丙烷预冷氮膨胀制冷循环中,经压缩机压缩后的制冷工质(丙烷及氮气)分别通过节流阀实现降压和降温。制冷剂经过节流阀的工作过程可近似为等焓过程,节流阀的动态变化与其他设备相比要小很多,可将其作为准稳态部件。

常用的 4 种阀门特性方程为线性阀门、快开阀门、抛物线阀门和百分比阀门。在液化系统动态模拟过程中选择线性阀门,其特性方程为 $V = P$。其中,V 为阀门当前开度下流量系数与最大开度下流量系数的比值;P 为阀门当前开度与最大开度的比值。

阀门在系统中的作用集中体现在系统作用时间上的延迟性。工质在通过阀门时,温度等被控参数的改变表现为一个延迟作用时间,此作用时间与被控对象的改变强度、节流阀的分辨率有关。一般可根据实际节流阀特性选择滞后时间常数。

2.3　换热器

对于研究板翅式换热器的动态过程,如果采用非稳态的三维数学模型,需要很高的计算条件,整个制冷循环的动态模拟计算时间过长,使得研究整个制冷循环的动态特性变得困难[3]。由于换热器调节主要集中于流量与温度的调节,其他作为系统的结构参数处理。因此,对板翅式换热器的动态特性研究采用降维的简化模型。换热器为逆流操作,两种流体的进、出口处的温差分别为 $\Delta t_2 = T_1 - t_2$、$\Delta t_1 = T_2 - t_1$,据文献[4]~[7]可推导得到单台换热器的静态特性方程为

$$\frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{1}{\frac{W_2c_{p2}}{KA} + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{W_2c_{p2}}{W_1c_{p1}}\right)}. \tag{3}$$

式中,t_1、t_2 分别为流体的进、出口温度,℃;W_1、W_2 分别为换热器两种流体的流量,kg/s;c_p 为流体质量定压热容,J/(kg·K);K 为换热器换热系数,$W/(m^2\cdot K)$;A 为换热器换热总面积,m^2。

将式(3)对 W_1 和 W_2 求导可得被控参数与输入参数的关系,即为 $t_2 - W_1$ 以及 $t_2 - W_2$ 通道放大特性关系。

$$\frac{dt_2}{dW_2} = \frac{-(T_1 - t_1)}{\left[\frac{W_2c_{p_2}}{KA} + \frac{1}{2}\left(\frac{W_2c_{p_2}}{W_1c_{p_1}} + 1\right)\right]^2}\left(\frac{c_{p_2}}{KA} + \frac{c_{p_2}}{2W_1c_{p_1}}\right), \tag{4}$$

$$H=\frac{\mathrm{d}t_2}{\mathrm{d}W_1}=\frac{T_1-t_1}{2\left[\frac{W_2c_{p_2}}{KA}+\frac{1}{2}\left(1+\frac{W_2c_{p_2}}{W_1c_{p_1}}\right)\right]^2}\frac{W_2c_{p_2}}{W_1^2c_{p_1}}.$$

式中,H 为 t_2-W_1 通道放大系数。

表 1 为 t_2-W_1 系统特性。由表 1 可以看出,换热器 t_2-W_1 通道的静态放大系数均小于 1,这是换热器的特性,当 $\Delta t_2\geqslant 2\Delta t_1$ 时,系统的静态放大系数会大于 1,这种情况在系统的模拟过程中是不允许的,会出现系统的震荡。通过对热容流量的加权平均,得出温度的等效值,可以求得 t_2-W_2 通道的放大倍数为0.375;对于氮气制冷 t_2-W_1 通道及丙烷 t_2-W_1 通道的放大倍数分别为 −0.564 和 −0.037。

表 1　t_2-W_1 系统特性

Table 1　Characteristics of t_2-W_1 system

$\frac{W_2c_{p2}}{KA}$	W_1c_{p1}/KA				
	1	2	3	4	∞
1	0.500	0.571	0.600	0.615	0.667
2	0.286	0.333	0.353	0.346	0.400
3	0.200	0.235	0.250	0.258	0.286
4	0.154	0.182	0.194	0.200	0.222

制冷循环由丙烷预冷换热器、天然气冷却换热器与天然气深冷换热器串联而成,单台换热器的动态特性为二阶系统,因此丙烷预冷与氮膨胀工艺的动态特性为 3 个二阶系统串联组成的 6 阶系统。考虑节流阀的延迟特性,将系统的执行时间延迟,得到系统的 t_2-W_1 执行开环控制模型[8]。

$$C=\frac{\Delta T_{\mathrm{out}}(s)}{\Delta G(s)}=\sum\frac{H_i(\tau_{\mathrm{a}i}s+1)}{\tau_{\mathrm{p}i}^2s^2+2\xi_i\tau_{\mathrm{p}i}s+1}\exp(\tau_{\mathrm{d}}s).\tag{5}$$

式中,s 为拉普拉斯对时间变换的复变数;$\Delta T_{\mathrm{out}}(s)$ 为系统出口温度的拉普拉斯变换;$\Delta G(s)$ 为系统入口流量的拉普拉斯变换;τ_{d} 为时间常数,s^{-1};τ_{a} 为微分时间,s;τ_{p} 为迟滞时间,s;ξ 为阻尼系数,与放大系数和迟滞时间有关。

式(5) 表明系统是带有矫正装置的模型,在多台换热器进行级联时,矫正参数的选取直接影响系统的稳定性,且多级串联的矫正模型使控制系统的阶数大大增大,导致系统的响应分析困难,增加系统的不稳定因素。因此,为分析系统的扰动响应,取消系统矫正,得到控制系统模型。

$$C=\frac{\Delta T_{\mathrm{out}}(s)}{\Delta G(s)}=\sum\frac{H_i}{\tau_{\mathrm{p}i}s+1}\exp(\tau_{\mathrm{d}}s).\tag{6}$$

3　系统的动态响应结果

3.1　典型的外部作用

采用脉冲信号、阶跃信号、周期信号和斜坡信号作为动态模拟扰动信号源。

3.2　天然气入口参数的响应特性

在系统实际运行中,其延迟时间受到系统流程及阀门响应因素等的影响。在模拟过程中,由于结构与阀门的安装特性都会对模拟结果产生影响,但是相对于流速,系统的延迟特性很小,因此动态模拟过程不考虑系统的延迟特性。

3.2.1　入口流量发生扰动时的响应

当入口流量突然阶跃上升 1% 时,经过一定响应时间后,换热器出口温度将不再发生变化,建立了新平衡(图 2)。从调节开始到重新稳定,出口温度上升了 0.359%,系统的放大倍数为 0.359,系统的响应时间为 3 700 s。此系统不存在超调现象,系统工作状态稳定。

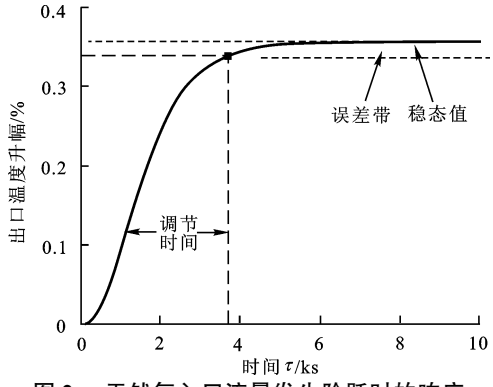

图 2　天然气入口流量发生阶跃时的响应

Fig. 2　Step response to gas inlet flow disturbance

当系统的入口流量以斜坡信号形式出现时,系统的响应特性如图 3 所示。由图 3 可以看出,LNG 制冷系统对斜坡信号的响应是发散且不稳定的;且系统始终存在跟随误差,即从响应开始后输出量与输入量之间响应强度存在误差,误差随时间增大。当时间达到一定数值后,误差随着时间增大逐渐变为时间的线性函数。可见,LNG 制冷系统的惯性较大,斜坡信号响应不能达到稳定状态。

系统由于误操作或者入口气源不稳定,入口流量突然增大或减小后又恢复原值,此时系统的扰动信号可以用脉冲信号表示。图 4 为系统在流量发生脉冲扰动时的响应结果,可以看出,当系统在经历一个脉冲宽度为 0.05 的扰动信号后,系统经过 3 100 s 的调节时间达到新的平衡;当脉冲宽度为 0.1 时系统的调节时间延长为 4 100 s。说明当脉冲宽度发生

变化时,系统的响应时间增大。

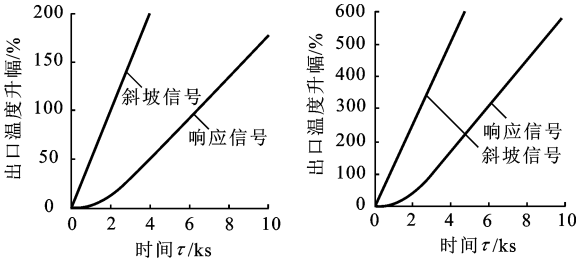

图 3　系统对斜坡信号的响应

Fig. 3　Response to ramp signal

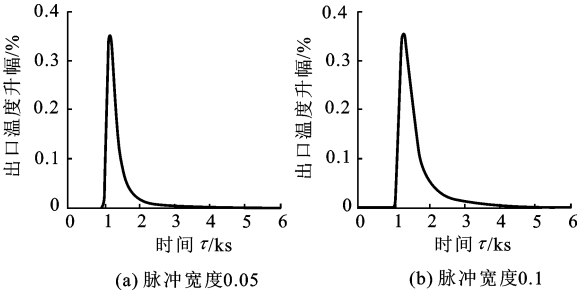

图 4　不同脉冲宽度时的动态响应

Fig. 4　Dynamic response to different pulse width

3.2.2　入口温度发生扰动时的响应

把系统的静态特性方程式(3) 对入口温度 t_1 求导数,可得

$$\frac{\mathrm{d}t_2}{\mathrm{d}t_1} = 1 - \frac{1}{\dfrac{W_2 c_{p_2}}{KA} + \dfrac{1}{2}\left(1 + \dfrac{W_2 c_{p_2}}{W_1 c_{p_1}}\right)}. \tag{7}$$

当入口温度 t_1 突然阶跃上升 1% 时,系统经过一定响应时间建立新平衡(图 5)。从调节开始到重新稳定,出口温度 t_2 上升了 64.9%,可见 $t_2 - t_1$ 通道的放大系数为 0.649,相对较大。换热器的惯性特性与流量和换热系数有关,在换热系数不变时系统的惯性特性改变很小,系统的响应时间为 3 400 s。

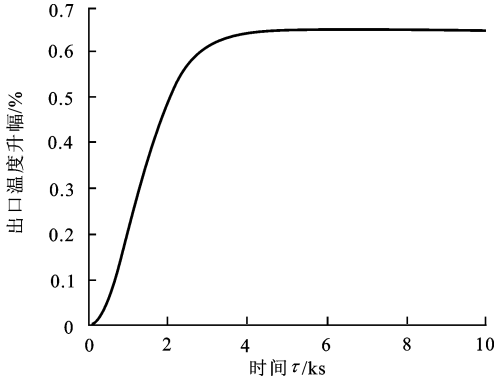

图 5　$t_2 - t_1$ 通道阶跃响应

Fig. 5　Step response to $t_2 - t_1$ channel

图 6 为 t_2-t_1 通道在脉冲信号(脉冲宽度 0.1)及斜坡信号扰动时系统的响应。可以看出,图 6(a)中系统温度脉冲响应的放大特性比图 4(b)中的流量脉冲扰动时更大,响应时间更短,脉冲的响应时间为 900 s。表明系统对入口温度比入口流量反应灵敏,响应更快。由于制冷系统的流量相对较大,改变一个单位的流量对系统的影响相对较小,而单位温度的变化对系统影响相对明显。

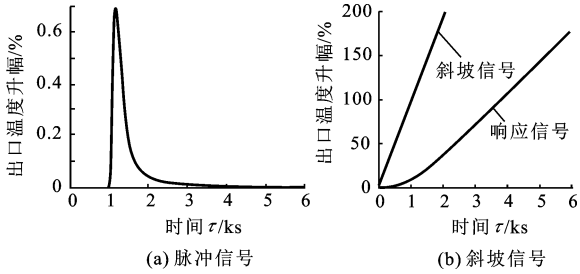

图 6　t_2-t_1 通道在脉冲信号及斜坡信号扰动时系统的响应

Fig. 6　System response to pulse or ramp signals at t_2-t_1 channel

由于系统结构没有改变,系统仍然存在很强的惯性特征(图 6(b)),斜坡信号不能达到稳定状态,跟随误差随着时间逐渐被放大。因此在调整系统过程中,若输入为斜坡响应,要控制对斜坡响应的时间,在不改变系统结构的前提下,尽量缩短调节时间。

3.3　预冷剂与制冷剂参数扰动时的动态响应

在实际运行中,由于 LNG 冷凝过程由预冷循环、冷凝过程与过冷循环组成,当压缩机工况变化、电压波动等对预冷剂的工艺参数产生干扰时,系统做出相应的响应。图 7 为制冷剂丙烷与氮气在流量、温度的阶跃变化时 LNG 出口温度的响应。

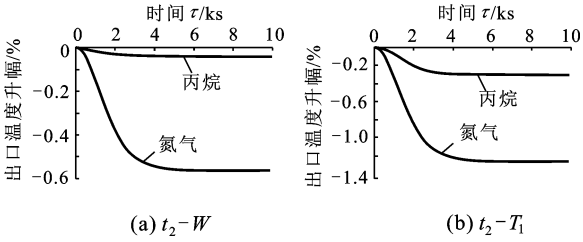

图 7　氮气与丙烷流量、温度的阶跃响应

Fig. 7　Step response to flow and temperature disturbance of nitrogen and propane

由图 7(a)可以看出,系统的放大特性为负值,当氮气或者丙烷的流量增加时,LNG 的出口温度会相应地降低。即制冷剂或者预冷剂的流量改变使系统的换热量相应地发生变化,导致 LNG 出口温度发生变化。当系统发生阶跃变化时,氮气流量阶跃变化 1% 的响应灵敏度高于丙烷流量阶跃变化 1% 引

起的响应,丙烷阶跃扰动的响应时间为 3000 s,氮气阶跃扰动的响应时间为 4100 s,这反映系统对氮气流量变化的响应灵敏度高,惯性大。由于制冷量中氮气制冷量占主要地位,而丙烷预冷量较少,因此氮气的惯性强,调节时间也相对较长。

由图 7(b)可以看出,丙烷和氮气的温度发生阶跃变化时,响应仍然为负值,这与丙烷、氮气流量的响应原理一致,但是丙烷与氮气的放大系数绝对值增加,表明制冷剂温度比制冷剂流量对换热器出口温度响应灵敏。由于小幅温度变化不会影响制冷系统的惯性特性,因此系统温度发生阶跃扰动的响应时间不会改变。

3.4　FLNG 系统对晃动的动态响应

由于 FLNG 系统是在海上工作,会因波浪的影响导致船体晃荡和摆动,可用正弦波来模拟其波动情况。用正弦波的频率模拟系统摆动频率,用正弦波的振幅模拟摆动扰动的强度[9]。图 8 为 FLNG 温度随不同频率下入口流量正弦扰动的动态响应,其中扰动正弦波的振幅为 1%。

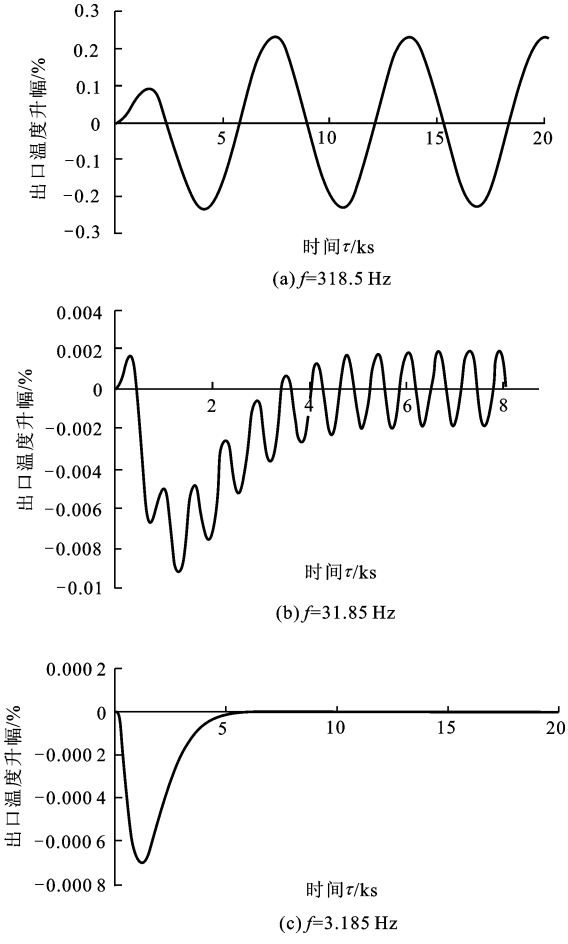

图 8　系统对不同频率正弦波动的响应

Fig. 8　Response to sinusoidal singal at different frequency

由图 8 可以看出,当频率为 318.5 Hz 时,FLNG 温度随着入口流量的波动而出现波动;在 2 200 s 时,系统随着输入信号的波动呈现相同周期的波动,波动幅度稳定为 0.238。随着扰动频率减小,经过系统后的波动明显变小,最大振幅减小,系统前期波动受到了初相位影响;同时系统达到稳定的时间变长。可见,FLNG 系统具有高频通过、低频阻断效应。因此,船体在海洋航行过程中发生晃动时,必须控制晃动频率,使其处于低频阻断区,防止 FLNG 温度受到晃动影响。

4　结　论

(1)FLNG 制冷系统具有很强的惯性特性;在系统对不同通道的阶跃信号、脉冲信号、斜坡信号响应过程中,存在放大系数与追踪误差,系统对不同扰动强度(阶跃信号的阶跃强度、斜坡信号的斜率)的响应也不同。

(2)在相同输入信号下,相对于氮气,丙烷对 LNG 出口温度响应强度小、追踪误差大,同时响应时间比氮气扰动时响应时间短。

(3)系统具有高频通过、低频阻断的特性,同时扰动强度随着晃动周期的增大而迅速减小。

参考文献:

[1]　薛四敏,朱万美,李连星,等. 合理利用天然气的途径[J]. 煤气和热力,2006,26(9):27-30.
XUE Si-min, ZHU Wan-mei, LI Lian-xing, et al. Way of reasonable utilization of natural gas[J]. Gas & Heat, 2006,26(9):37-30.

[2]　刘佩茹. 化工过程与设备[M]. 北京:中国轻工业出版社,1994:150-159.

[3]　关欣,罗行,李美玲,等. 板翅式换热器的动态特性分析解[J]. 工程热物理学报,2003,24(4):688-690.
GUAN Xin, LUO Xing, LI Mei-ling, et al. Analytical solution of dynamic behavior for plate-fin heat exchangers [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24 (4):688-690.

[4]　王鸣. 一种换热器的变 PID 参数的整定方法及其实现[J]. 自动化仪表,2001,22(5):18-20.
WANG Ming. The tuning method for PID parameters of heat exchanger and its implementation [J]. Process Automation Instrumentation,2001,22(5):18-20.

[5]　徐益峰,蔡祖恢. 平行流多流体板翅式换热器的动态数学模型[J]. 化工学报,1998,49(6):721-724.
XU Yi-feng, CAI Zu-hui. Research on dynamic model of multi-fluid plate-fin heat exchangers [J]. Journal of

Chemical Industry and Engineering, 1998, 49(6): 721-724.

[6] 曲乐,贾林祥. 相变换热混合工质板翅式换热器流动与传热数值模拟[J]. 低温与超导,2008,36(4):23-25.
QU Le, JIA Lin-xiang. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer of refrigerant mixture for plate-fin exchanger with phase change [J]. Cryogenics and Superconductivity,2008,36(4):23-25.

[7] 刘剑,杨勇,邱庆刚. 基于神经网络的热力站换热器系统的预测控制[J]. 节能,2007,12:28-30.
LIU Jian, YANG Yong, QIU Qing-gang. Prediction control simulation of heat substation system based on neural networks[J]. Energy Conservation,2007,12:28-30.

[8] 叶东晖,徐益峰,伍贻文. 多股流换热器传递函数系数的理论确定方法[J]. 上海理工大学学报,1998,20(3):215-218.
YE Dong-hui, XU Yi-feng, WU Yi-wen. The theoretical determination of the coefficients of transfer function for a multistream heat exchanger[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 1998,20(3):215-218.

[9] 陈海阳,李玉星,孙法峰,等. LNG FPSO 液舱内储液晃动特性的数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(4):134-143.
CHEN Hai-yang, LI Yu-xing, SUN Fa-feng, et al. Numerical simulation of liquid sloshing characteristics in LNG FPSO containers[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 134-143.

(编辑 沈玉英)

(上接第 154 页)

[5] 王栋,林益,林宗虎. 取样管型分流分相式气液两相流体流量计[J]. 工程热物理学报,2002,23(2):235-237.
WANG Dong, LIN Yi, LIN Zong-hu. A ESM type gas-liquid two-phase flow meter with sampler tubes as distributor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002,23(2):235-237.

[6] 梁法春. 气液两相流体取样分配器及其在流量测量中的应用[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2006. LIANG Fa-chun. Samplers of gas-liquid two-phase flow and their applications in flow metering[D]. Xi'an: School of Energy and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University,2006.

[7] 梁法春,王栋,林宗虎. 水平管气液环状流在新型分配器中的分配研究[J]. 西安交通大学学报, 2006,40(1):106-110.
LIANG Fa-chun, WANG Dong, LIN Zong-hu. Phase split of horizontal gas-liquid annular flow in a novel distributor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1):106-110.

[8] 梁法春,王栋,林宗虎. 基于管壁取样的气液两相流量测量[J]. 西安交通大学学报, 2008,42(1):52-55.
LIANG Fa-chun, WANG Dong, LIN Zong-hu. Gas-liquid two-phase flow metering with pipe wall sampler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(1):52-55.

[9] 王栋,梁法春,张炳东,等. 多相流体流量测量的采样分流方法[J]. 西安交通大学学报, 2009,43(1):103-107.
WANG Dong, LIANG Fa-chun, ZHANG Bing-dong, et al. Multiphase flow measurements by flow sampling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009,43(1):103-107.

[10] 张炳东,刘丹,王栋. 分相式气液两相流体等干度分配方法[J]. 西安交通大学学报, 2010,44(5):106-110.
ZHANG Bing-dong, LIU Dan, WANG Dong. Equal quality distribution of gas-liquid two-phase flow using phase separation method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(5):106-110.

[11] 曹学文, 吴梁红, 宗媛,等. 旋流型管壁分配器取样孔分流特性[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011,35(1):119-123.
CAO Xue-wen, WU Liang-hong, ZONG Yuan, et al. Extracting characteristics of pipe wall sampling hole in swirled distributor[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(1): 119-123.

[12] POPE S B. Turbulent flows[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

(编辑 沈玉英)