

LNG 接收站贸易交接在线取样技术

张 奕 艾绍平 王 浩 安 娜

中石油京唐液化天然气有限公司, 河北 唐山 063000

摘 要:为在 LNG 接收站卸船过程中获得接卸 LNG 的热值,需在接卸期间进行精确的在线取样,这是准确进行贸易交接的先决条件。通过对贸易交接计量流程和在线取样工艺流程以及在线取样系统的分析,对取样过程的关键工艺技术进行了研究,提出取样系统的控制要求。经过综合研究和分析得出:在线取样应在气质均匀的过渡流状态且卸货速率和压力稳定的全速卸货过程中进行,以保证取样具有代表性;LNG 样品进入汽化器前必须保持过冷状态,防止汽化分馏,而经过汽化器需在超临界状态全部充分汽化且不会凝析来保持与原样品组分比例一致,这是取样的关键控制因素,并以实例进行了过冷度计算;整个取样过程中应对关键工艺参数进行实时的密切监控。因此,取样时间段的选择很重要,对取样系统设备性能要求很高。

关键词:LNG 接收站;计量;在线取样;分馏;过冷度;探头;汽化器;超临界

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.02.009

0 前言

在长期的船运贸易发展中,LNG 计量交接已形成了一套统一的国际标准化流程,目前普遍采取的交易方式是 LNG 目的港船上交货(DES)的贸易形式^[1-2]。LNG 运输船到达接收站码头后连接卸料臂,LNG 通过卸料臂和卸船总管输送到接收站的储罐内。国际 LNG 贸易交接采用能量(热值)计量方式,它不是通过直接计量的方法(如流量计量设备和压力、温度计等),而是将 LNG 汽化为 NG,在线连续取样,然后利用气相色谱仪分析天然气的组成,结合卸货温度、压力和卸货体积计算出 LNG 密度,

从而获得卸货 LNG 的能量热值。因此,精确的取样是用于精密分析的先决条件。取样分析结果的准确与否,将直接影响 LNG 贸易交接计量的具体数量及质量判定,所以在 LNG 卸载过程中取到有代表性的 LNG 样品,是 LNG 准确计量过程中非常关键的一步^[3]。

1 计量与在线取样工艺流程

1.1 贸易交接计量流程

LNG 接收站贸易交接计量流程见图 1。LNG 船到港后通过卸料臂进行船岸连接,卸货前后在船上使用

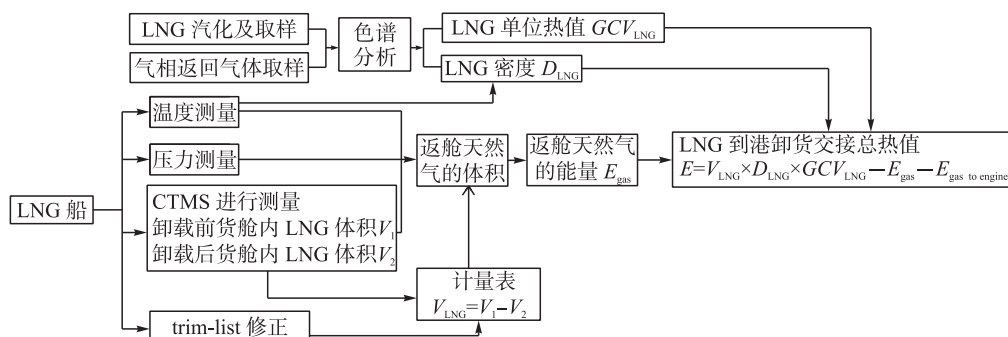


图 1 LNG 接收站贸易交接计量流程图

收稿日期:2014-08-05

作者简介:张 奕(1986-),女,河南洛阳人,工程师,硕士,主要从事LNG接收站生产运营工作。

CTMS 系统分别进行首次计量和末次计量,测量卸货前液位和卸货后液位以及相应条件下的温度和压力,同时考虑纵倾和横倾修正对液位的影响,从而确定卸货前的舱内 LNG 体积 V_1 和卸货后 LNG 体积 V_2 ,故卸载的 LNG 体积 $V_{LNG}=V_1-V_2$ 。全速卸料期间进行卸船总管内 LNG 汽化取样收集。LNG 经汽化后收集在储气罐内,取样结束后采取部分样品到取样钢瓶内并带回化验室利用色谱进行组分分析,从而确定天然气(质量或体积)单位热值和 LNG 密度。可根据买卖双方的计量合同认为是纯甲烷气体或在气相返回管线上取样分析气体组分来确定返舱天然气的能量热值 E_{gas} 。卸船期间需记录船上对天然气的消耗量,这部分热值应在总热值中扣除。最终 LNG 到港卸货交接总热值 $E=V_{LNG} \times D_{LNG} \times GCV_{LNG} - E_{gas} - E_{gas\ to\ engine}$ 。

1.2 取样方式

LNG 取样可分为连续取样和间歇取样。连续取样是在全速卸料的稳定过程中,将 LNG 从卸船管线连续不断地取出汽化并进行取样分析的方式。间歇取样是按预定的时间间隔或预定流量间隔取样的方式^[4-5]。但无论是连续取样还是间歇取样,都是通过取样探头将卸船总管内的 LNG 取出后通过汽化器汽化进行收集取样的,收集完后盛装于取样钢瓶中用于离线色谱分析。目前接收站均采用连续取样方式进行卸船取样收集。

1.3 在线取样工艺流程

LNG 卸货在线取样工艺流程(连续取样)见图 2。打开 V1,LNG 通过插入卸船总管的取样探头进入汽化器汽化为 NG,经过缓冲罐稳定,经调压后通过流量计 F1 计量进入取样管线的天然气量,汽化后的 NG 一部分进入在线分析仪表,如在线气相色谱仪、硫化氢/总硫分析仪和水露点分析仪等,进行在线分析;一部分 NG 通过打开 V2 和 V3 并同时关闭 V4 来向储气罐内充装 NG 样品。当储气罐收集满后(一般收集过程贯穿于整个全速卸料过程)关闭 V2,打开 V3 和 V4 向取样钢瓶中填充样品,先进行数次吹扫,然后同时盛装 NG 样品,随后带到化验室进行离线组分分析。取样钢瓶盛装完后,多余的 NG 气体可排至 BOG 管线中。间歇式取样则不经过储气罐而直接依次进入取样钢瓶,这样取样不具有同时性,

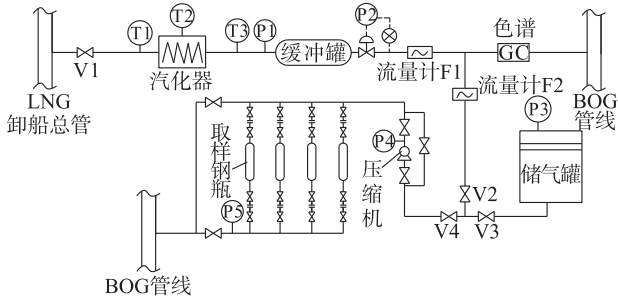
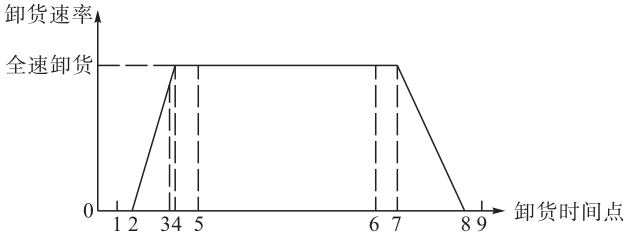


图 2 LNG 卸货在线取样工艺流程 (连续取样)

精度差,样品代表性不强。

要取到具有代表性的样品,需保证卸船管线中 LNG 的流速稳定、压力稳定、气质均匀、LNG 充满卸船管线,且液体流态不能为层流也不能为紊流,需是过渡流状态(流体的流线出现波浪状的摆动,摆动的频率及振幅随流速的增加而增加的状态,雷诺数 $Re=2\ 100\sim4\ 000$)^[6-7]。由于在启泵增速阶段和停泵减速阶段流速和压力不稳定,气质不均匀,各组分变化很大,所以一般 LNG 取样过程在全速卸货的阶段进行,此时船上的卸货泵已全部开启,卸货的压力和流速较稳定。卸货速度与卸货时间点的关系见图 3。5~6 阶段即在线取样阶段,根据 LNG 运输船卸货量的大小,取样时间一般为 10~18 h。



1. 首次计量; 2. 船上第一台卸货泵启动; 3. 船上最后一台卸货泵启动;
4. 达到全速卸货; 5. 开始在线取样; 6. 停止在线取样; 7. 船上第一台卸货泵停止; 8. 卸货停止; 9. 末次计量。

图 3 卸货速度与卸货时间点的关系

2 在线取样系统的组成

在线取样系统由取样探头、汽化器、储气系统(输气管线、储气罐、仪表控制系统、取样钢瓶)、在线分析仪表、DCS 控制系统等组成。

2.1 取样探头

取样点应尽可能靠近贸易交接点(可设于卸料臂法兰处、船上汇管或接收站卸船总管)以减少外界热传递对 LNG 品质的改变。一般将取样探头安装在卸船总管上,并且安装在直管段上,防止弯管产生涡流而局部汽化,直管段的长度一般是 5~10 D。如为多条管线时则应安装在汇集后的总管上,否则就在每根管线上设置取样点,探头中心线应和探头所在处卸船总管的轴线垂直。取样探头的材质一般为不锈钢,为保证 LNG 汽化前的品质,需对探头部分做一些保冷措施,使其不产生汽化分馏。探头保冷措施见图 4,图 4-a)是将取样探头外加套管采用抽真空的隔热方法进行保冷,图 4-b)是在取样探头外加套管采用 LNG 在套管间循环保冷^[8]。

取样管线直径和长度的设计应不会产生共振,取样探头的插入深度应考虑液体流动对探头产生的涡激振动而引发的风险,取样探头可能折断,造成 LNG 泄漏或损坏正在运转的设备。漩涡脱落频率可用无量纲参数斯特劳哈尔数 S_t 来表示^[9],探头插入最大长度需满足在避

免产生漩涡脱落频率的范围内,一般插入长度为卸船总管的 $1/3 \sim 1/2 D$ 深度范围内。

2.2 汽化器

LNG 样品进入汽化器前不能够分馏,汽化器入口温

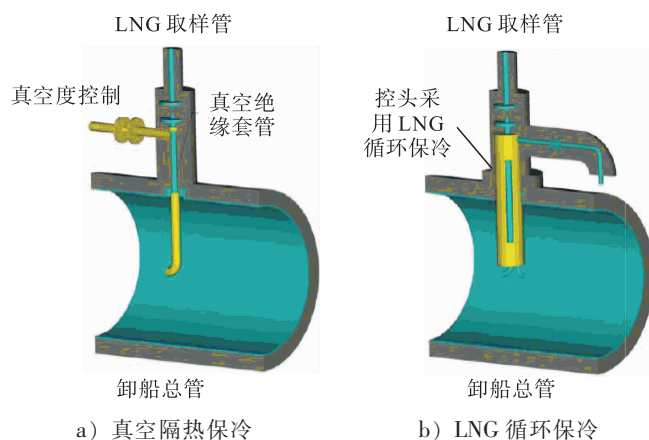


图 4 探头保冷措施

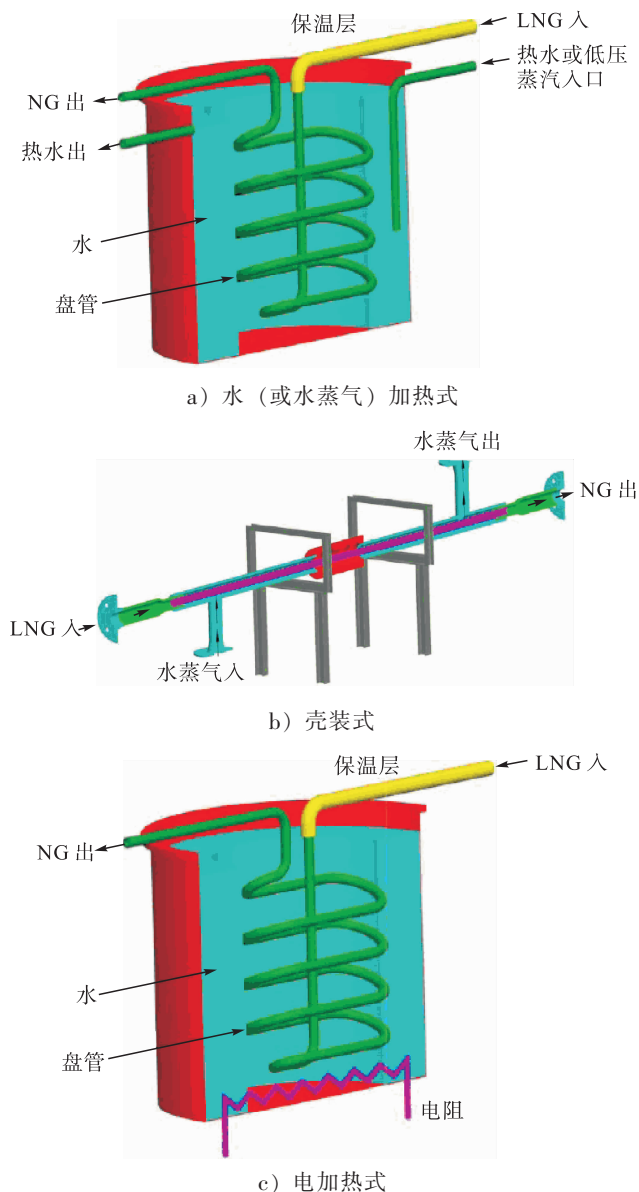


图 5 汽化器的类型

度要足够低,而进入汽化器则需要完全汽化,且不存留在汽化器内,这要求汽化器的温度设定足够高,高于所有组分的沸点,使所有存在的重组分都汽化,防止凝结在出口处,这个温度至少是 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。汽化器的电加热器功率要满足汽化系统对从主管道内采到的 LNG 样品进行汽化后不会产生凝析所需的热量。

汽化器的类型可分为水(或水蒸气)加热式、壳装式、电加热式,其结构原理见图 5。水(或水蒸气)加热式是将 LNG 通过不锈钢盘管,在盘管外利用热水(或低压蒸汽)加热汽化 LNG。壳装式则是将弯管变为直管,这种汽化方式较为传统。电加热式是利用电阻通电产生热量来加热 LNG 盘管外的水,从而汽化 LNG,这种加热方式还可以将 LNG 盘管缠绕在电加热丝或加热棒上进行汽化,也可以将传热的水以其他介质替代,例如铜粉。目前较常用的是电加热式。

汽化器的汽化应满足在超临界状态范围内,汽化后气液两相不能同时存在。LNG 气液相态见图 6。由图 6 可知,当汽化器内的压力和温度使 LNG 在高压(约 8 MPa)状态才能达到超临界状态,液相瞬间汽化为气相,不会出现气液共存的状态。

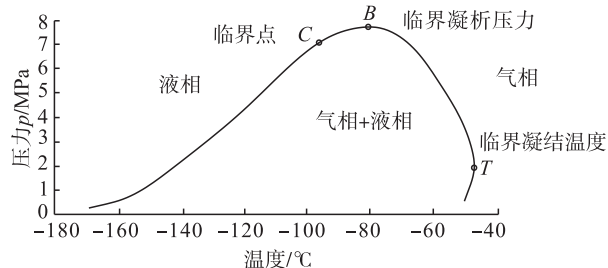


图 6 LNG 气液相态

为使汽化系统更加安全,在汽化器前段需加设一些辅助装置:1)止回阀,防止有汽化了的 LNG 组分倒流回卸船总管中;2)节流孔板;3)过滤器;4)截止阀,紧急或维修状态时可关闭阀门切断 LNG 流通;5)汽化器前、本体和汽化器出口都设置温度计,以对加热温度进行监测,尤其是汽化后的温度,由此来判断加热温度是否足以使 LNG 汽化充分。

2.3 储气系统

储气系统是从汽化器到取样钢瓶的部分,包括输气管线、储气罐、仪表控制系统和取样钢瓶。

输气管线上应设置一些仪表:1)汽化器后设置流量计或压力调节器,来控制取样的流速恒定而不受卸船总管流速的影响;2)汽化器后管线上设置一个缓冲罐,以吸收压力脉冲,保持气体混合均质;3)取样管线上、储气罐和取样钢瓶出/入口管线上安装压力表,以监测取样压力是否稳定;4)从汽化器到储存系统的管线上应做保温(如电伴热),温度控制应使天然气样品中所有组分不会凝析。

常见储气罐的类型有两种,一种是圆顶水封式,一种是无水活塞式,见图 7。圆顶水封式是在储气罐内外罐之间用水做密封防止气体泄漏,样品收集满后充至取样钢瓶;无水活塞式是在储气罐中加装活塞,活塞上部可填充惰性气体(最好是样品气中没有的组分),活塞下部可充罐样气。控制惰性气体的压力,当样气压力大于惰性气体压力,则进行取样;当样气压力小于惰性气体压力,则进行样气充装取样钢瓶,但这种方式需严格确认活塞的密封性要好,活塞上下气体会不会相互渗透。

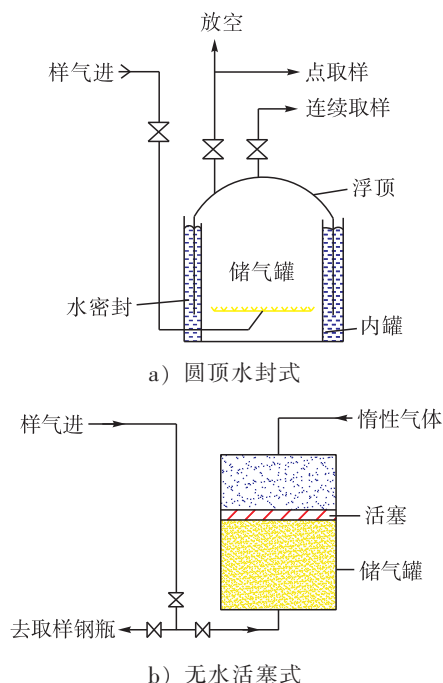


图 7 储气罐的类型

取样钢瓶用于在储气罐收集样气后,将样气充至钢瓶内送至化验室进行组分分析。一般是不锈钢材质,样品储存压力范围约为 0.4~0.7 MPa,常用的钢瓶体积是 300~1 000 mL。若进行硫组分的分析,则需将取样钢瓶进行硫钝化或硅烷化处理,防止硫组分的吸附,影响分析结果。钢瓶两端的针阀可关闭保存样品,快速接头用于和取样系统管线连接。取样钢瓶至少设置 3 个,分别用于返回卖方(如买卖双方合同有要求)、样品留存和离线分析。各取样钢瓶的充样过程应同时进行而不能依次进行,以此保证每个钢瓶中样品的一致性。

2.4 在线分析仪表

汽化器开启时,即可启动在线分析仪表进行在线分析。仪表主要包括在线气相色谱仪、硫化氢/总硫分析仪、烃水露点分析仪等,以在线监测卸载天然气的品质。在线仪表需在卸船前进行标定,达到相关分析方法对分析结果重复性和再现性的要求。

2.5 DCS 控制系统

为便于参数的监控和系统操作,取样系统的重要工

艺参数以及系统的启停操作控制均远传至 DCS 控制系统,重要的工艺参数包括:汽化器本体和入/出口温度、取样流量、取样管线压力、储气罐液位、取样时间、在线分析数据(组分、露点、硫含量等)以及相关的热值和密度的计算。对这些数值设置上下限控制,保证采集样品的品质。如取样管线压力过低,代表卸船管线压力有波动,样品品质就会有变化,应及时切断采样截止阀,使已采样品不受影响。在取样过程中应严密监控工艺参数的变化,并及时记录和留存,取样过程参数如有异常变化或取样因故异常中断都应及时和相关利益方协商沟通,参数的记录可作为依据,以便双方参考确定处理方案。

3 在线取样的控制要求

LNG 在全液体状态下的温度一般为 -162°C ,而在标准状态下的沸点是 -161.52°C ,它是过冷的液体混合物且极易汽化,压力和温度的变化都很容易导致其快速汽化,所以要使获得的样品天然气混合物组分比例和卸船管线内流动的 LNG 混合物组分比例一致就有很大的难度。因此,ISO 8943-2007《冷冻轻烃流体—液化天然气的取样—连续法》对 LNG 取样有明确的要求:LNG 样品在汽化前必须保持过冷状态,即全液体状态,温度始终低于其沸点,不能有任何组分的汽化分馏发生^[5]。饱和液体的焓见图 8。

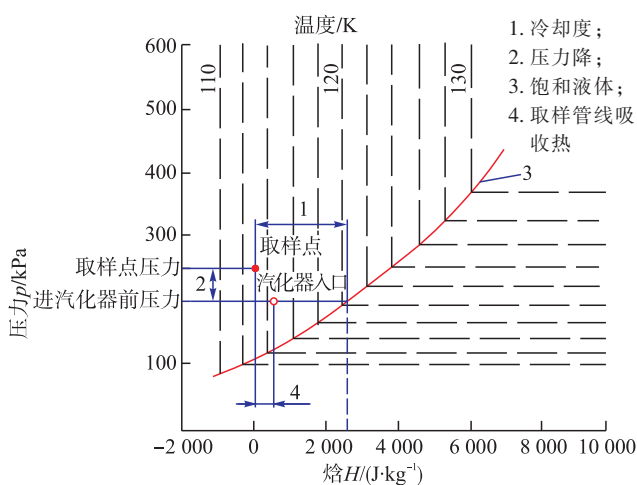


图 8 饱和液体的焓

取样点的过冷度应通过该点 LNG 的组分、温度和压力,将该温度和相同压力下的沸点相比较而确定。过冷度的计算见式(1)~(2),计算示例见表 1。计算得知 $\Delta H < 27\,000\text{ J/kg}$ (由图 8 可知 200 kPa 下饱和液体的过冷度),所以在取样管线中不会发生分馏。

$$Q = \frac{\pi(T_a - T_s)}{\frac{1}{h_a \cdot D_o} + \frac{1}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i}} \cdot L \quad (1)$$

$$\Delta H = \frac{Q \cdot 3\,600}{F} \quad (2)$$

式中: Q 为吸收热, W ; π 为圆周率; T_a 为大气温度, K ; T_s 为 LNG 温度, K ; h_a 为热传递表面系数, $W/m^2 \cdot K$; D_o 为隔热层外径, m ; D_i 为隔热层内径, m ; k 为隔热层材料单位长度热导率, $W/m^2 \cdot K$; L 为取样点到汽化器前管线长度, m ; F 为流量, kg/h ; ΔH 为焓增量, J/kg 。

表 1 过冷度计算示例

参数	示例及结果
T/K	310.15
T_s/K	111.15
$h_a/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	8.14
D_o/m	0.078
D_i/m	0.003
$k/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	0.018
L/m	1
$F/(kg \cdot h^{-1})$	3
Q/W	6.786
$\Delta H/(J \cdot kg^{-1})$	8 143.46
取样点压力 /kPa	240
取样点到汽化器的压力降 /kPa	40
LNG 密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	440
隔热层厚度 /m	0.08
汽化器进口压力下的过冷度 $/(J \cdot kg^{-1})$	27 000

4 结论

1) LNG 在线取样是 LNG 贸易交接的重要步骤,精确取样是获得卸货 LNG 的能量热值的决定因素。

2) 通过对连续取样工艺流程的介绍和对取样时间及卸货速率关系的分析,取样时间需选择在全速卸货的过程中进行,卸货速率和压力应稳定,保证取得的样品具有代表性。

3) LNG 取样时要求在汽化前保证 LNG 不能汽化分馏,取样装置的设计应满足过冷度要求,使汽化器前端管线内 LNG 的焓增量小于汽化器入口压力下的过冷度。

4) 取样探头及连接汽化器的取样管线需做好保冷且探头插入深度不会产生较大振动;汽化器及其辅助装置应保证汽化的安全并达到超临界状态,保证样品经过汽化器后可以完全汽化且不再凝析;储气罐要保持其密封性好,样品不被外界气体污染。

5) 严密监控在线取样工艺参数,对取样过程实时监测分析,对异常情况及时处理。

参考文献:

- [1] 邢 辉,张荣旺. 船运 LNG 到港计量交接作业及常见问题的解决措施[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 96-100.
Xing Hui, Zhang Rongwang. LNG Custody Transfer Measurement for Shipping Arrival [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 96-100.
- [2] 梁尚煊,叶东升. LNG 贸易计量与交接[J]. 化工学报, 2009, 60(增刊): 118-121.
Liang Shangxuan, Ye Dongsheng. LNG Measurement and Custody Transfer [J]. Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China, 2009, 60(Suppl): 118-121.
- [3] 张福元,王劲松,孙青峰,等. 液化天然气的计量方法及其标准化[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(2): 157-161.
Zhang Fuyuan, Wang Jinsong, Sun Qingfeng, et al. Measurement Method and Its Standardization for Liquefied Natural Gas [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2007, 36 (2): 157-161.
- [4] BG/T 20603-2006, 冷冻轻烃液体—液化天然气的取样—连续法[S].
BG/T 20603-2006, Refrigerated Light Hydrocarbon Fluids—Sampling of Liquefied Natural Gas—Continuous Method [S].
- [5] ISO 8943-2007, 冷冻轻烃液体—液化天然气的取样—连续和间歇法[S].
ISO 8943-2007, Refrigerated Light Hydrocarbon Fluids—Sampling of Liquefied Natural Gas—Continuous and Intermittent Methods [S].
- [6] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 87-90.
Yuan Enxi. Engineering Fluid Mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 87-90.
- [7] 蔡一全,宫 敬. 水力光滑圆管临界雷诺数的确定[J]. 油气储运, 2004, 23(9): 23-25.
Cai Yiquan, Gong Jing. The Determination on the Critical Reynolds Number of the Smooth Pipe [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2004, 23(9): 23-25.
- [8] GIIGNL. LNG Custody Transfer Handbook [M]. 3rd ed. Paris: International Group of Liquefied Natural Gas Importers. 2011.
- [9] 房建党. 涡激振动研究方法的探讨[J]. 科技信息, 2013, (9): 216-217.
Fang Jiandang. Discussion on the Vortex Induced Vibration Study Method [J]. Science & Technology Information, 2013, (9): 216-217.