

文章编号: 1000-8241(2013)06-0583-04

# LNG 接收站开架式气化器的最大操作负载

周华 田士章 朱乾壮 王旭东 宫明 胡文江 陈帅

中石油大连液化天然气有限公司, 辽宁大连 116600

**摘要:** 开架式气化器(ORV)是广泛应用于LNG接收站并逐渐成为主流的气化器类型,其诸多使用优势备受关注。为了最大限度地使用ORV,发挥其优越性,更好地服务生产,分析了影响ORV最大操作负载的3个主要因素:海水流量、海水温度及操作压力,依据其性能曲线及机械限制条件,利用非线性曲线拟合工具1stOpt建立了计算最大操作负载的数学模型,通过对比和误差分析,验证了该模型的准确性和实用性。结果表明:当操作条件变化时,可根据此模型快速计算出当前条件下的最大操作负载,为用户最大限度地使用ORV提供理论依据。(表2,图8,参6)

**关键词:** 开架式气化器;最大操作负载;性能曲线;ORV的机械限制

中图分类号: TE89

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.06.003

## Max operating load of open rack vaporizer in a LNG receiving terminal

Zhou Hua, Tian Shizhang, Zhu Qianzhuang, Wang Xudong, Gong Ming, Hu Wenjiang, Chen Shuai

PetroChina Dalian LNG Co. Ltd., Dalian, Liaoning, 116600

**Abstract:** Open rack vaporizer (ORV) is a popular model widely used in LNG receiving terminals and highly regarded for its advantages. In order to make full use of ORV, three factors related to the max ORV operating load are analyzed, i.e. sea water flow rate, sea water temperature and operating pressure. Based on their performance curves and mechanical constraints, a mathematical model for max operating load estimation is established with 1stOpt, a non-linear curve fitting tool, which is proved to be accurate and practical through correlation and error analysis. Results show that the model can be used to rapidly estimate the maximum operating load under existing operating conditions, which could be used as a theoretical and mathematical reference for uses in ORV application. (2 Tables, 8 Figures, 6 References)

**Key words:** open rack vaporizer, ORV, max operating load, performance curve, ORV mechanical constraints

随着我国沿海接收站——深圳大鹏、福建莆田、上海洋山、江苏如东和大连新港的相继建成投产,我国LNG工业迎来了快速发展的高潮<sup>[1]</sup>。开架式气化器(Open-Rack Vaporizer, ORV)是广泛应用于LNG接收站并逐渐成为主流的气化器类型,与其他类型气化器相比,具有两大优势<sup>[2-3]</sup>:工艺简单,运行可靠,耐用性和安全性较高;成本效益明显,世界上大部分LNG接收站均建在沿海或离海较近的海滩,ORV使用的海水可以就地取材,成本较低且资源充足。此外,ORV运行时只有海水泵消耗电能,而浸没燃烧式气化器(Submerged Combustion Vaporizer, SCV)除了风机和循环水泵消耗电能外,还需要消耗燃料气,因此,ORV的使用对于接收站节能降耗至关重要。由于ORV的

诸多优点,越来越多的用户和专家意识到使用ORV的优越性,在冬季最大限度地使用ORV,可以降低能耗和生产风险,因此具有良好的经济效益和社会效益。为此,以ORV性能曲线为基础,建立数学模型,帮助用户快速计算当前条件ORV的最大操作负载,以便最大限度地利用ORV,发挥其使用优越性。

## 1 开架式气化器结构与工艺

### 1.1 ORV 结构<sup>[4-5]</sup>

ORV是一种以海水为热媒气化LNG的热交换器,最初由英国Marston Excelsior开发,首个ORV安装在英国的Canvey Island。随后,日本东京燃气与住

友精密工业株式会社合作,开发出更高性能的 ORV。目前,ORV 的最大处理能力为 250 t/h,气化器可在 0~100% 的负荷范围内安全运行,并且可以根据需求变化,通过流量控制阀调节操作负载。整个气化器利用铝合金支架固定安装,其基本组成单元为换热管,面板由平行分布的约 80 根连接上下总管的换热管组成,5~6 块面板组合在一起形成一个模块,组成面板的翅片管为星状翅形。管内安装了传热加速器以提高传热系数,管外表面喷有一层含锌 1% 的铝合金涂层,作为避免海水腐蚀基底金属的牺牲阳极。气化器顶部具有海水喷淋装置,用于制造在面板表面流下的海水薄膜,其依靠重力的作用自上而下流动,喷淋装置最重要的功能是实现海水的均匀性、连续性流动。LNG 在换热管内自下而上流动,上升过程中连续换热气化并过热化,在 NG 总管中汇集并输出<sup>[6]</sup>(图 1)。

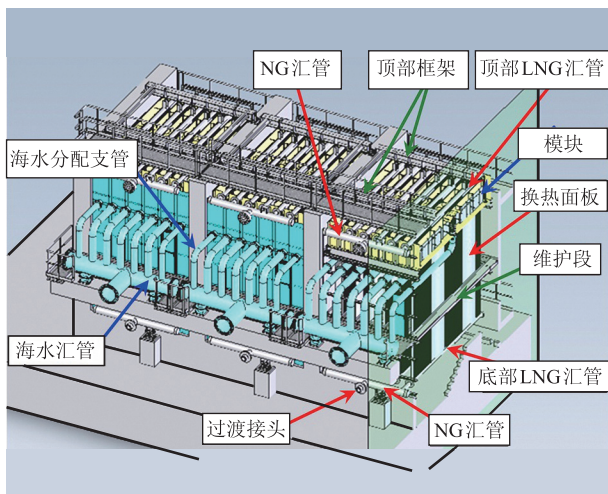


图 1 开架式气化器结构示意图

### 1.2 ORV 工艺流程

某接收站一期采用 3 台 ORV 进行 LNG 气化外输(图 2)。LNG 管道采用文丘里流量计 FE1 监测 LNG 流量,使用流量控制阀 FCV 调节操作负载,PT1 和 PT2 用于监测操作压力,PT1 具有报警功能,PT2 具有连锁功能。海水管道采用两台超声波流量计 FE1 和 FE2 监测海水流量,通过 HCV 控制阀调节海水流量,PT3 用于监测海水 HCV 阀后压力,TT 用于监测海水温度。当海水流量 FE1 和 FE2 低于 7 350 t/h 时,将产生流量低报警,当低于 5 510 t/h 时,将出现流量低低报警,并且连锁关闭 LNG 管道入口切断阀 XV1 和流控阀 FCV,防止 ORV 海水出现问题时造成结构损坏。

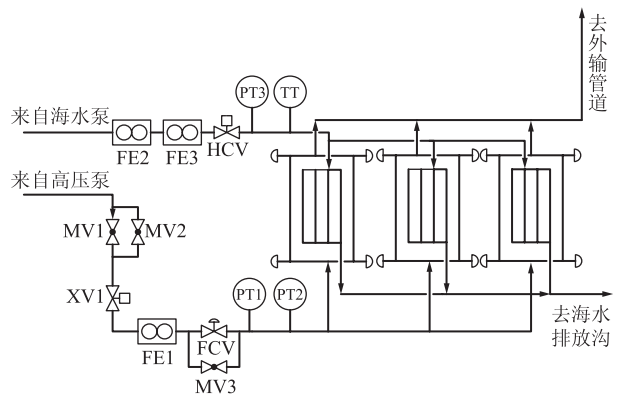


图 2 某接收站开架式气化器工艺流程图

## 2 影响 ORV 最大操作负载的主要因素

### 2.1 ORV 机械限制

ORV 机械限制是指 ORV 在完全满足海水热媒时,在一定操作压力下,ORV 设备结构、传热及材质所能承受的最大 LNG 流量。操作压力不同,ORV 机械限制所允许的最大 LNG 流量也有所差异(图 3):当操作压力从 4 MPa 变化至 6 MPa 时,ORV 的机械限制曲线近似呈线性关系;当操作压力变化范围为 6~10.36 MPa 时,机械限制维持 250 t/h 不变。

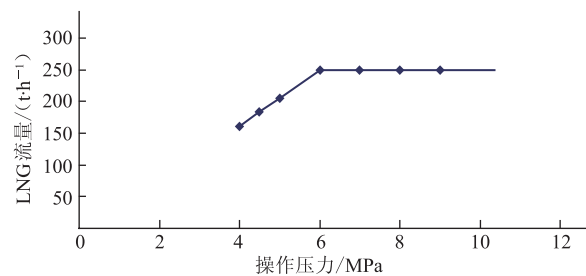


图 3 某 LNG 接收站 ORV 机械限制曲线

### 2.2 海水流量

海水经海水泵增压至约 0.2 MPa 后进入 ORV 面板的表面层,其入口处装有超声波流量计,用于监测进入 ORV 的海水流量。假设海水温度和操作压力不变,取海水温度为 5.5 °C,操作压力为 5 MPa,根据性能曲线(由设备厂商 Sumitomo Precision Products Co. Ltd. 提供)可以得出海水流量与最大操作负载之间的关系(图 4):两者近似呈线性关系,操作负载随海水流量的增大而不断增大,当海水流量增大至一定程度时,最大操作负载会受到设备本身机械限制的影响;当海水流量不低于 9 837 t/h 时,受机械限制的影响,最大操作负载维持 205.6 t/h 不变。

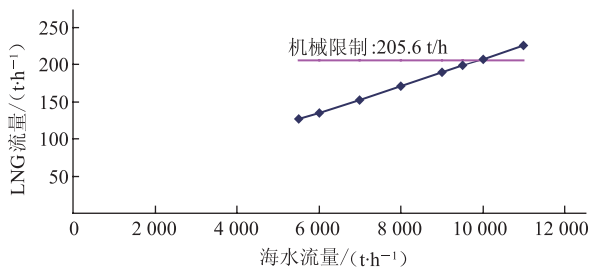


图4 海水流量与 ORV 最大操作负载关系曲线

### 2.3 海水温度

在 ORV 海水入口管道处设置温感探头,用以测量海水温度。假设海水流量为设计点 9 180 t/h,操作压力 10.36 MPa,海水温度与 ORV 最大操作负载之间为单调递增函数关系,并受 ORV 机械限制的影响;当海水温度不低于 27 °C 时,最大操作负载保持 250 t/h 不变(图 5)。

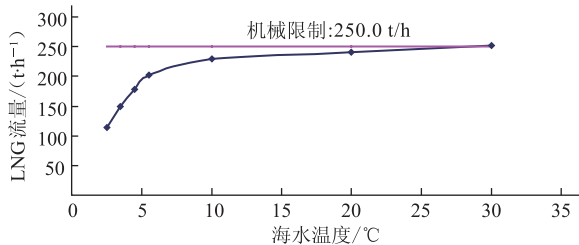


图5 海水温度与 ORV 最大操作负载关系曲线

### 2.4 操作压力

ORV 入口 LNG 管道流控阀后侧设有两块压力表,用于监控 ORV 的操作压力(图 2)。操作压力在一定程度上受到外输干线压力的影响。依据性能曲线,假设海水管道流量和温度分别为 9 180 t/h 和 5.5 °C,最大操作负载与操作压力之间呈递增函数关系(图 6)。

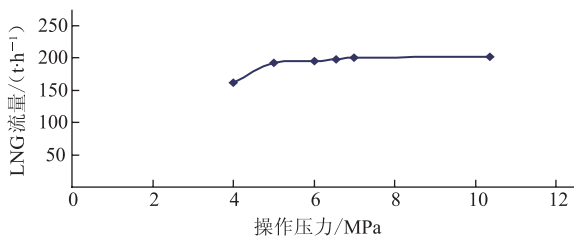


图6 操作压力与 ORV 最大操作负载关系曲线

## 3 ORV 最大操作负载

### 3.1 模型建立

性能曲线满足的设计要求:进入 ORV 的 LNG 温度应高于 -170 °C,气化后 NG 温度高于 0 °C,曲线结合 ORV 的机械限制,通过查图可以得到当前运行条件下设备的最大操作负载。模型的建立基于 ORV 厂

商提供的性能曲线,由曲线抽取关键点数据,通过一系列数据拟合函数而成。自变量为影响最大操作负载的 3 个主要因素:海水流量、海水温度和操作压力,因变量为该条件下 ORV 的最大操作负载。用户只需输入 3 个自变量值,考虑 ORV 的机械限制,便可由函数计算出该条件下的最大操作负载值,正确调节运行中 ORV 的 LNG 流量。

假设海水流量为常量,其值为设计点 9 180 t/h,由性能曲线抽取其最大操作负载,得到充分考虑 ORV 机械限制的影响,在不同操作压力及海水温度下所对应的 ORV 最大操作负载曲线(图 7)。

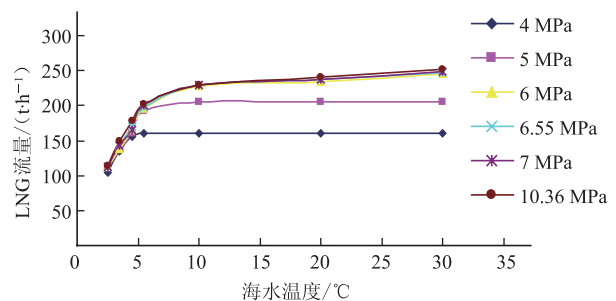


图7 不同操作压力及海水温度所对应的 ORV 最大操作负载曲线

设自变量  $x$  为海水温度,  $y$  为操作压力,因变量  $f(x, y)$  为不同海水温度和操作压力下所对应的 ORV 最大操作负载值。当  $y=10.36$  MPa,且海水温度由 2.5 °C 变化至 30 °C 时,利用已知数据点进行函数的多项式拟合(图 8),函数  $f(x)$  为四次多项式,拟合函数包含 7 个数据点,相关系数  $0.999\ 5 > 0.99$ 。根据海水温度与最大操作负载的关系,该函数关系在整个区间内单调递增,然而拟合函数并非在所有区间内均是单调增函数,在部分区间表现为减函数,与实际情况不符。因此,采取分段拟合法,以  $x=10$  为分界线分别进行函数拟合,采用非线性曲线拟合、综合优化分析计算软件平台 1stOpt 通用全局优化法(Universal Global Optimization, UGO)进行迭代计算。

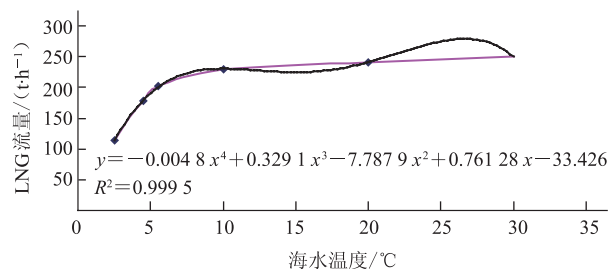


图8 操作压力 10.36 MPa 时操作负载随海水温度变化数据点拟合曲线

3.1.1 第一阶段数据拟合

$x$  为  $5 \times 1$  矩阵,  $y$  为  $1 \times 6$  矩阵,  $f_1(x, y)$  为  $5 \times 6$  矩阵, 即:

$$x = [2.5; 3.5; 4.5; 5.5; 10]; y = [4 \ 5 \ 6 \ 6.55 \ 7 \ 10.36]$$

$$f_1(x, y) = [105 \ 111 \ 112 \ 112 \ 113 \ 114; 134 \ 136 \ 138 \ 142 \ 142 \ 150; 155 \ 160 \ 165 \ 170 \ 165 \ 178; 161.2 \ 192 \ 195 \ 198 \ 201 \ 202; 161.2 \ 205.6 \ 228 \ 230 \ 230 \ 230]$$

拟合函数为:

$$f_1(x, y) = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + gx^3 + hy^3 + kxy + lx^2y + mxy^2 \quad (1)$$

式中:  $2.5 \leq x \leq 10; 4 \leq y \leq 10.36; a = -7.514; b = -19.811; c = 48.675; d = 3.419; e = -9.755; g = -0.331; h = 0.539; k = 9.91; l = -0.049; m = -0.566$ 。

3.1.2 第二阶段数据拟合

$x$  为  $3 \times 1$  矩阵,  $y$  为  $1 \times 6$  矩阵,  $f_1(x, y)$  为  $3 \times 6$  矩阵, 即:

$$x = [10; 20; 30]; y = [4 \ 5 \ 6 \ 6.55 \ 7 \ 10.36]$$

$$f_2(x, y) = [161.2 \ 205.6 \ 228 \ 230 \ 230 \ 230; 161.2 \ 205.6 \ 235 \ 237 \ 238 \ 241; 161.2 \ 205.6 \ 245 \ 247 \ 248 \ 250]$$

拟合函数为:

$$f_2(x, y) = a' + (b' + c'x^2 + d'xy) / [1 + \exp(e'y + g'y^2 + h'xy)] \quad (2)$$

式中:  $10 \leq x \leq 30; 4 \leq y \leq 10.36; a' = 153.330; b' = 71.437; c' = 0.014; d' = 0.051; e' = 3.138; g' = -0.670; h' = 0.005$ 。

将各项参数代入式(1)和式(2)后,可以得到  $f(x, y)$  与海水温度和操作压力之间的函数关系式:

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) & 2.5 \leq x < 10, 4 \leq y < 10.36 \\ f_2(x, y) & 10 \leq x \leq 30, 4 \leq y < 10.36 \end{cases} \quad (3)$$

设  $z$  为海水流量,  $F(x, y, z)$  为 ORV 的最大操作负载,可以得到:

$$F(x, y, z) = f(x, y)z / 9180 \quad (4)$$

将式(1)~式(3)代入式(4),可以得到:

$$F(x, y, z) = \begin{cases} (-7.514 - 19.811x + 48.675y + 3.419x^2 - 9.755y^2 - 0.331x^3 + 0.539y^3 + 9.91xy - 0.049x^2y - 0.566xy^2) \cdot z / 9180 & (2.5 \leq x < 10, 4 \leq y < 10.36, 5150 < z \leq 9180) \\ [153.33 + (71.437 + 0.014x^2 + 0.051xy)] / [1 + \exp(3.138y - 0.67y^2 + 0.005xy)] \cdot z / 9180 & (10 \leq x \leq 30, 4 \leq y < 10.36, 5150 < z \leq 9180) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)即为 ORV 最大操作负载与海水温度、操作压力和海水流量之间的函数关系式。利用该式计算时,应注意各参数的定义域区间,另外,海水温度和操作压力涵盖范围较广,海水流量以设计点 9180 t/h 为基准,因此,当海水流量大于设计点时,应按 9180 t/h 计算。此外,若海水流量增大,则海水泵压力降低,海水流量也会受到一定影响。

3.2 误差分析

当海水流量为设计点 9180 t/h 时,利用分段函数模型对图 7 数据进行重新计算,并对分段函数进行误差分析(表 1、表 2)。第一阶段函数:当海水的温度为 5.5 °C,压力为 5.0 MPa 时,最大负误差为 -6.1 t/h;压力为 4.0 MPa 时,最大正误差为 6.0 t/h,其他点误差较小。第二阶段函数:最大正误差为 3.2 t/h,最大负误差为 -0.6 t/h,其他点误差较小。第一阶段函数相关系数  $R_2 = 0.9923$ ,第二阶段函数相关系数  $R_2 = 0.9996$ ,说明拟合分段函数能够较好地解释、涵盖实测数据,具有一定的普遍性,可以作为标准曲线对其他数据点进行计算。

表 1 利用分段函数模型计算的 ORV 最大操作负载数据

操作压力 /MPa	最大操作负载 / (t·h <sup>-1</sup> )						
	2.5 °C	3.5 °C	4.5 °C	5.5 °C	10 °C	20 °C	30 °C
4.0	107.5	128.6	149.1	167.2	162.0	161.2	160.6
5.0	112.9	138.5	163.5	185.9	205.5	205.6	206.2
6.0	112.2	141.2	169.5	195.1	228.7	235.7	245.4
6.55	110.4	140.7	170.3	197.2	229.5	237.0	247.3
7.0	108.6	139.8	170.2	197.8	229.7	237.5	248.1
10.36	117.0	147.5	176.9	203.1	231.5	240.9	253.2

表 2 分段函数误差分析结果

误差分析参数	优化算法	均方差 RMSE	相关系数 R	相关系数平方和 R <sup>2</sup>	决定系数 DC
第一阶段拟合函数	通用全局优化法 (UG01)	3.410 7	0.996 1	0.992 3	0.992 3
第二阶段拟合函数	通用全局优化法 (UG01)	0.629 1	0.999 8	0.999 6	0.999 6

(下转第 593 页)

## 参考文献:

- [1] 曲慎扬. 油气管道可靠性评价指标及其计算[J]. 油气储运, 1996, 15(4): 8-10.
- [2] 帅健, 许葵. 埋地输油管道的断裂失效概率评估[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 87-90.
- [3] 罗金恒, 赵新伟, 韩晓毅, 等. 西气东输管道可靠度预评估[J]. 焊管, 2005, 28(3): 62-65.
- [4] British Standards Institution. BS 7910-1999 Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures[S]. London: British Standards Institution, 1999.
- [5] Milne I, Ainsworth R A, Dowling A R, et al. Assessment of the integrity of structures containing defects: Central electricity generating board report[J]. Pressure Vessels and Piping, 1988, 32(2): 103-104.
- [6] British Standards Institution. BSI PD 6493-1991 Guidelines on method for assessment of the acceptability of flaws in fusion welding structures[S]. London: British Standards Institution, 1991.
- [7] American Petroleum Institute. API 579-1997 Recommended practice for fitness for service[S]. Washington D C: API, 1997.
- [8] Budden P J, Sharples J K, Dowling A R. The R6 procedure: recent developments and comparison with alternative approaches[J]. International Journal of Pressure Vessel and Piping, 2000, 77: 895-903.
- [9] Ahammed M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(4): 321-329.

(收稿日期: 2013-04-07; 编辑: 关中原)

**基金项目:** 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”, 2011ZX05030003-003。

**作者简介:** 陈岑, 在读博士生, 1982年生, 2010年硕士毕业于长江大学地球化学专业, 现主要从事石油天然气开发相关技术的研究工作。

电话: 18651055073; Email: rossoeric@qq.com

Chen Cen, MS.D, born in 1982, graduated from Yangtze University, geochemistry, in 2010, engaged in the research of oil and gas exploration technology.

Tel: 18651055073, Email: rossoeric@qq.com

(上接第 586 页)

## 4 结论

ORV 使用的优越性正在被越来越多的用户认可和重视, 更大限度地使用 ORV, 成为接收站降低能耗的关键。研究建立的计算 ORV 最大操作负载的数学模型, 在依据 ORV 性能曲线的基础上, 分析了海水流量、海水温度和操作压力 3 个关键因素对 ORV 最大操作负载的影响, 并充分考虑了 ORV 的机械限制。通过误差分析, 证明了该模型的正确性、实用性和普遍性, 可为用户最大限度地使用 ORV 提供理论和数学依据, 使其更好地为生产服务。

## 参考文献:

- [1] 陈雪, 马国光, 付志林, 等. 我国 LNG 接收终端的现状与发展新动向[J]. 煤气与热力, 2007, 27(8): 63-66.
- [2] 吕俊, 王蕾. 浙江 LNG 接收站项目气化器选型及系统优化[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 132-135.
- [3] 王彦, 冷绪林, 简朝明, 等. LNG 接收站气化器的选择[J]. 油气

储运, 2008, 27(3): 47-49.

[4] 赵楠. 液化天然气(LNG)接收站重要设备材料手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 27-56.

[5] 张立希, 陈慧芳. LNG 接受终端的工艺系统及设备[J]. 石油与天然气化工, 1999, 28(3): 163-166.

[6] 陈永东, 陈学东. LNG 成套装置换热器关键技术分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 96-100.

(收稿日期: 2012-07-31; 编辑: 孙伶)

**作者简介:** 周华, 工程师, 1982年生, 2010年硕士毕业于中国石油大学(北京)控制理论与控制工程专业, 现主要从事 LNG 接收站的生产运行工作。

电话: 15998595253; Email: 49051690@qq.com

Zhou Hua, MS.D, engineer, born in 1982, graduated from China University of Petroleum (Beijing), control theory and control engineering, in 2010, engaged in the production operation of LNG receiving terminal.

Tel: 15998595253, Email: 49051690@qq.com