

LNG 船舶系泊力计算分析及系泊安全保障研究

黄华

(中石化天津液化天然气有限责任公司, 天津 300450)

摘要: 系泊状态下, 受不利气象、海况等条件影响, 液化天然气(LNG)船舶一旦突发断缆等安全事故, 引发船舶失控、泄漏、火灾、爆炸将对码头生产作业安全造成巨大影响, 因此, 全面保障 LNG 船舶的系泊作业安全是码头运营单位关注的重点。本文以 LNG 船舶系泊安全为研究内容, 基于规范理论计算模型, 探究自然条件因素对 LNG 船舶系泊缆绳受力的影响, 进而提出 LNG 船舶系泊安全保障措施, 为 LNG 船舶系泊作业安全提供指导。

关键词: 液化天然气(LNG)船舶; 理论计算; 系泊安全; 保障措施

中图分类号: U698

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973(2022)01—0038—03

LNG 船舶属于特殊危险品船, 在系泊状态下, LNG 船舶直接系靠码头, 系缆作为 LNG 船与岸站终端的连接方式, 对实现 LNG 在船舶与岸站之间的安全输送有着至关重要的作用。在恶劣天气状况或突发意外情况下, LNG 船舶一旦突发断缆等安全事故, 引发船舶失控、泄漏、火灾、爆炸将对码头生产作业安全和人员安全造成巨大影响。首先, 是发生事故船舶上的船员和设备将直接受到火焰和爆炸冲击的伤害, 其次, 是事故现场周围的码头作业人员和港口设备会遭受强烈的热辐射危害, 处于 LNG 池火、闪火影响区域内或接近池火范围的人员都会因

火焰燃烧和热辐射而遭受不同程度的伤害。因此, 全面保障 LNG 船舶的系泊作业安全是码头运营单位关注的焦点, 也是保证 LNG “产、供、储、销”安全有序进行的重要环节。

本文以大型 LNG 运输船系缆力计算和系泊安全保障为主要研究内容, 聚焦 LNG 船舶生产作业关键环节, 以天津南港中石化液化天然气(LNG)接收站工程为例, 采用基于《港口工程荷载规范》的理论计算模型, 探究风、浪、流等自然条件对 LNG 船舶系泊缆绳受力的影响, 确定 LNG 船舶系泊安全风力限制条件, 并提出具有针对性的 LNG 船舶系泊安全保障方案, 能够为保障 LNG 船舶系泊作业安全提供一定指导。

1 LNG 船舶系缆力计算方法

本文的计算参数选取主要从船舶和环境两个方面考虑。不同设计尺度的船舶在不同的工况下的系缆力是不同的, 船舶装载状态亦是影响船舶系缆力大小重要因

素, 因此, 选取当前最大运营船型一艘 26.6 万方 LNG 船为研究对象, 载况为满载、压载。环境因素包括风、浪、流等设计工况条件会对 LNG 船舶系缆力计算产生显著影响, 因此在研究过程中需要进行综合考虑。同时, 本文的计算模型将基于《港口工程荷载规范》的相关要求进行建立。

1.1 风荷载计算

根据《港口工程荷载规范》, 风荷载计算公式为:

$$F_{xw} = 73.6 \times 10^{-5} A_{xw} V_x^2 \xi_1 \xi_2$$

$$F_{yw} = 49.0 \times 10^{-5} A_{yw} V_y^2 \xi_1 \xi_2$$

式中: F_{xw} 、 F_{yw} 分别为作用在船舶上的风压力的横向和纵向分力; A_{xw} 、 A_{yw} 分别为船体水面以上横向和纵向受风面积 (m^2); V_x 、 V_y 分别为设计风速的横向和纵向分量 (m/s); ξ_1 为风压不均匀折减系数, 取 0.6; ξ_2 为风压高度变化修正系数, 根据 LNG 船舶实际干舷高度取值 1.54。

1.2 流荷载计算

对于船体受水流力, 根据《港口工程荷载规范》对于水流力的计算, 可按式(1)进行计算:

1.2.1 流压角小于 15° 或大于 165° 时

水流作用在船舶上的计算流荷载的横向分力分为两部分, 即水流力船首横向分力和船尾横向分力, 按下式计算:

$$F_{xsc} = c_{xsc} \frac{\rho}{2} V^2 B'$$

$$F_{xmc} = c_{xmc} \frac{\rho}{2} V^2 B'$$

式中: F_{xc} 为水流对船舶作用产生水流力的横向分

力； F_{xsc} 、 F_{xmc} 分别为水流对船首横向分力和船尾横向分力，kN； C_{xsc} 、 C_{xmc} 分别为水流对船首横向分力系数和船尾横向分力系数； V 为水流速度，m/s； B' 一船舶吃水线以下的横向投影面积， m^2 ； ρ 为水的密度， t/m^3 ，对海水为 $1025kg/m^3$ 。

水流纵向分力系数计算公式：

$$F_{yc} = c_{yc} \frac{\rho}{2} V^2 S$$

式中： C_{yc} 为水流纵向分力系数； S 为水线下面积。

船舶吃水线以下的表面积 S 可按下式确定：

$$S = 1.7LD + C_b LB$$

水流纵向分力系数可按式确定：

$$c_{yc} = 0.046 Re^{-0.134} + b$$

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

式中： Re 为水流对船舶作用的雷诺数； b 为系数，根据规范取 0.05； L 为船舶吃水线长度； ν 为水的运动粘性系数， m^2/s ，在规范中利用插值法取 1.19。

1.2.2 流压角为 $15^\circ \sim 165^\circ$ 时

作用在船舶上的计算风荷载的平行于码头前沿线的纵向分力和垂直于码头前沿线的横向分力按下式计算：

$$F_{xc} = c_{xc} \frac{\rho}{2} V^2 A_{yc}$$

$$F_{yc} = c_{yc} \frac{\rho}{2} V^2 A_{xc}$$

式中： A_{xc} 和 A_{yc} 分别为相应装载情况下的船舶水下部分平行和垂直水流方向的投影面积， m^2 。

水流横向分力系数 C_{xc} 和纵向分力系数 C_{yc} 按下式计算：

$$c_{xc} = a_1 \frac{\pi\theta}{180} + b_1$$

$$c_{yc} = a_2 \frac{\pi\theta}{180} + b_2$$

式中： a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为系数，可参照规范求取；

θ 为流向角。

1.3 系缆力标准值计算

船舶码头系泊时在横、纵向上受到的风、浪、流作用的合力计算为：

$$\Sigma F_x = F_w + F_x + F_d$$

$$\Sigma F_y = F_w + F_y + F_d$$

系缆力标准值可按规范中下式计算：

$$N = \frac{K}{n} \left[\frac{\Sigma F_x}{\sin \alpha \cos \beta} + \frac{\Sigma F_y}{\cos \alpha \cos \beta} \right]$$

式中： N 为系缆力标准值，kN； ΣF_x 为风和水流对船舶作用产生的横向分力总和； ΣF_y 为风和水流对船舶作用产生的纵向分力总和； n 为本工程码头使用的是快速脱钩装置，每个系一根缆绳； K 为系船柱受力分布不均匀系数，一般取 1.3； α 为系船缆的水平投影与码头前沿线所成的夹角（规范取 30° ）； β 为系船缆与水平面之间的夹角（规范取 15° ）。

2 工况条件设计

本文以天津南港中石化液化天然气（LNG）接收站一期工程为例进行研究。该码头前沿线平行于陆域坡顶线，顺流布置，方位角为 $90^\circ \sim 270^\circ$ 。LNG 码头采用墩式蝶形布置，长 402m，由 1 个工作平台、4 个靠船墩和 6 个系缆墩组成。

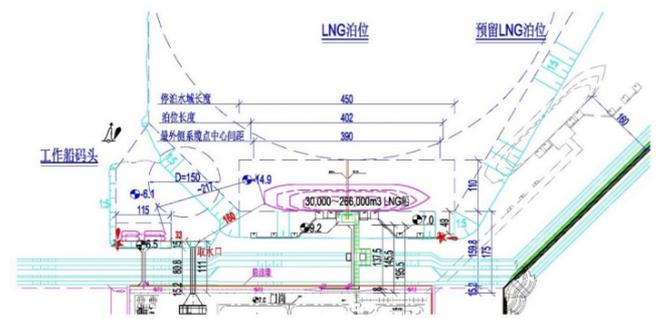


图 1 码头总平面布置图

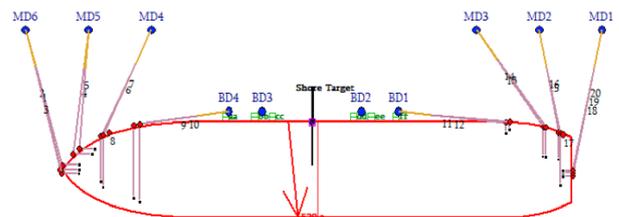


图 2 船舶系泊方式图

考虑到风、流来向和大小的不确定性，本文在研究过程中根据目标水域实际工况条件进行设定，其中：计算风向选取 S（90 度）、NE（45 度）、ENE（22.5 度）三个代表方向，风级大小选取 7 级（17.1m/s）、8 级（20.7m/s）、9 级（24.4m/s）、10 级（28.4m/s）四个等级。计算流速选取数值模拟最大值 0.23m/s。船舶缆绳材质为迪尼玛，计算最大张力时采用不大于缆绳破断力的 50%（68.5 吨）。以压载状态为例，系缆力计算如表 1 所示。

表1 26.6 万方 LNG 船舶系缆力计算表 (压载)

风况		风舷角°	横向风力荷载 (KN)	纵向风力荷载 (KN)	横向水流荷载 (KN)	纵向水流荷载 (KN)	单缆受力 (t)	单缆破断力 50% (t)
风级	风速 m/s							
7	13.9~17.1	22.5	239.9	228.8	17.9	7.3	6.5	68.5
		45	819.2	134.0	17.9	7.3	19.4	68.5
		90	1638.5	0	17.9	7.3	27.9	68.5
8	17.2~20.7	22.5	351.6	335.3	17.9	7.3	9.4	68.5
		45	1200.5	196.4	17.9	7.3	22.3	68.5
		90	2401.1	0	17.9	7.3	40.7	68.5
9	20.8~24.4	22.5	488.5	465.9	17.9	7.3	13.0	68.5
		45	1668.1	272.9	17.9	7.3	31.0	68.5
		90	3336.2	0	17.9	7.3	56.6	68.5
10	24.5~28.4	22.5	661.9	631.1	17.9	7.3	17.5	68.5
		45	2259.8	369.7	17.9	7.3	41.9	68.5
		90	4550.7	0	17.9	7.3	77.0	68.5

3 计算结果分析

对于 26.6 万方 LNG 船, 以单缆破断强度的 50% (68.5t) 作为系泊力临界值。其在满载状态下, 当风力增大到 10 级时, 单缆受力标准值均不超过系泊力临界值; 其在压载状态下, 受风影响更为显著, 当风力增大到 10 级时, 单缆受力标准值将超过系泊力临界值, 此时无法满足船舶安全系泊要求。因此, 26.6 万方 LNG 船系泊风力临界条件为 9 级。

4 安全保障建议

4.1 保证系缆数量充足

船舶泊稳条件需要根据环境条件、缆绳配备、绞车等多种因素确定, 需要综合考虑船舶和码头系缆的配合。由于在系泊期间, 风、流影响存在不对称性, 导致船舶各部位系缆受力不一致, 例如: 在不考虑风的影响条件下, 落潮时尾缆和前倒缆的受力会比首缆和尾倒缆受力大, 反过来, 涨潮时首缆和尾倒缆受力比尾缆和前倒缆大。代表船型系缆数量应按照要求配备缆绳, 不论天气、海况如何, 船舶应在靠泊时应系足通常情况下可

用的所有缆绳。

4.2 确保系缆受力状态良好

在系缆管理不到位的条件下, 即使在风、流速度较小也可能会发生断缆事故。因此, 系缆在不同工况下的受力计算和试验数据只能提供一个在系缆受力管理良好条件下的基本判断, 加强系缆和系泊的安全管理, 保持系缆受力适度和各系缆受力基本均衡仍然是保障泊稳安全最重要的保证措施, 并且这一措施应贯穿船舶接卸货过程的始终。

4.3 保证船舶和码头系泊设备的技术状态良好

船舶系泊设备的技术状态, 特别是系缆的实际强度、有无磨损、锈蚀和老化等情况, 绞缆机刹车制动力大小、刹车的可靠性等直接关系到船舶系泊安全与否。码头运营单位应注意核查靠泊本码头船舶系泊设备的技术条件, 按要求进行保养和维护。

4.4 维持船舶系泊状态稳定

船舶运动包括纵移、横移、升沉、首摇、纵摇、横摇等运动, LNG 船舶停靠码头期间系泊应处于稳定状态, 船舷贴靠码头, 保证船舶没有明显的摇荡运动, 没有纵移、横移等运动。船舶在泊受涌浪影响运动明显, 威胁到系泊安全时, 应停止作业, 必要时调集离泊时所需的拖轮力量协助紧急离泊。

4.5 合理安排码头值班人员

LNG 船舶靠泊期间, 本工程泊位安排有经验的现场值班人员不少于 2 人, 并安排一名值班班长。实测风力达到 7 级以上时, 按大风天气值班要求增配值班人员至 3 人。值班期间, 分解岗位责任, 并保持对靠泊船舶泊稳状态的监控。

参考文献:

- [1] 孙英广, 朱利翔, 谷文强. 码头结构系缆力标准值计算方法研究 [J]. 港工技术, 2017, 54(4): 39-45.
- [2] 叶银苗. 码头设计中船舶风荷载中英规范标准研究 [J]. 水运工程, 2014(7): 46-50.
- [3] 李宜伦, 阎如坤, 李杰. 码头系缆不可掉以轻心 [J]. 中国水运, 2002(11).
- [4] 杨兴晏, 刘进生. 大型液化天然气码头的系缆力分析 [J]. 港工技术, 2009(03).
- [5] 舒斌, 焦磊. 超大型船舶系泊试验时系缆力分析 [J]. 中国水运 (下半月), 2012(12).