



液化天然气码头应急锚地 设计环境条件数值计算方法

王建明

(中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442)

摘要: 为确定液化天然气码头应急锚地设计环境条件, 进行数值计算方法研究。采用国际主流规范的相关规定, 系统分析 LNG 船舶环境荷载和锚泊荷载的计算方法, 得出锚地的大型 LNG 船舶在不同等级风速、波高和流速等环境荷载组合工况下的外部环境荷载和在不同底质环境下的锚泊荷载, 初步确定决定 LNG 应急锚地设计环境条件的主要影响因素、不同底质情况下大型 LNG 船舶应急锚地的极限环境标准。论证船锚参数、锚地底质和水深对于应急锚地极限环境标准的重要影响, 提出 LNG 应急锚地的风速上限标准和建议措施。研究方法可用于 LNG 应急锚地的前期选址, 节省试验研究时间和成本。

关键词: 液化天然气码头; 应急锚地; 设计环境条件; 数值计算

中图分类号: U653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0094-05

Numerical calculation method of environmental conditions in emergency anchorage design of liquefied natural gas terminals

WANG Jianming

(CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Survey & Design Institute Co., Ltd.,
Guangzhou 511442, China)

Abstract: A numerical calculation method is studied to determine the environmental conditions for emergency anchorage design of liquefied natural gas terminals. The calculation methods for LNG carrier environmental loads and anchorage loads are systematically analyzed using relevant regulations in international standards. The external environmental loads of large LNG ships anchored in the anchorage are obtained under different levels of wind speed, wave height, and current speed combinations, as well as anchorage loads under different bottom environments. The main influencing factors for determining the environmental conditions of LNG emergency anchorage design and the limit environmental standards for emergency anchorage for large LNG ships under different bottom conditions are preliminarily determined. The important influence of ship anchor parameters, anchorage bottom, and water depth on the limit environmental standards for emergency anchorage is demonstrated, and the wind speed limit standard and recommended measures for LNG emergency anchorage are proposed. The research methods can be applied to the early site selection of LNG emergency anchorage, saving experimental research time and costs.

Keywords: liquefied natural gas terminal; emergency anchorage; designed environmental condition; numerical calculation

根据 JTS 165-5—2021《液化天然气码头设计规范》^[1], 海港液化天然气码头应设置应急锚地。应

急锚地是为了应对突发事件或紧急情况而设立的临时停泊区域, 可对各类突发事件迅速响应, 如

收稿日期: 2024-06-06

作者简介: 王建明 (1966—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

天气恶劣、海上事故、火灾等,也可用于待泊、船舶排污(将船上的污水等排到清污船上运走)等。尽管使用频次不高,但设置应急锚地是必要的。JES/T 177—2021《海港锚地设计规范》^[2]中给出了海港锚地的设计环境条件,其环境条件往往比较复杂,相关的风、浪、流情况与规范给出的设计环境条件标准存在一定差异,如宁波港某些锚地波高不大,但流速非常大。杨坚刚等^[3]在海港液化天然气(liquefied natural gas, LNG)船舶通航方式及应急锚地布置中给出锚地设置数量建议,李顺亮等^[4]在粤东 LNG 码头工程通航安全评估中给出 LNG 应急锚地底质和与航路安全距离建议。谷文强等^[5]在海港锚地最小设计水深计算方法数学模型中给出 LNG 锚地最小水深的计算方法。上述规范和研究均没有给出 LNG 应急锚地设计环境条件的论证方法,在锚地选址的前期阶段可以通过数值计算方法初步评估液化天然气码头应急锚地的设计环境条件。

1 液化天然气码头应急锚地设计环境条件数值计算方法原理

当 LNG 船在应急锚地抛锚时,一般采用单锚系泊,此时会受到风、浪和流等环境荷载的影响, LNG 船通过锚抓力、锚链和海底的摩擦力、悬链锚链自重等抵御所受到的外部环境荷载。当外部环境荷载超过锚泊荷载时,船舶会发生走锚事故。

2 LNG 船舶环境荷载的计算方法

JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[6]中只给出了船舶横向环境荷载的计算方法,而没有给出纵向环境荷载计算方法,可以考虑采用国际上应用比较广泛的石油公司国际海事论坛(Oil Companies International Marine Forum, OCIMF)的 *Mooring Equipment Guidelines*^[7]规范进行计算,但该规范中缺少波浪力的计算方法,可以采用西班牙规范 ROM 0.2-90(1990): *Action in the Design of Maritime*

and Harbour Works^[8]计算船舶受到的纵向波浪力。

2.1 纵向风荷载

根据 *Mooring Equipment Guidelines*, 纵向风力可按式(1)计算:

$$F_{x,w} = C_{x,w} \frac{\rho_a}{7600} A_1 v_w^2 \quad (1)$$

式中: $F_{x,w}$ 为纵向风荷载, kN; $C_{x,w}$ 为纵向风力系数, 对于球罐气体运输船约为 1.0, 对于棱柱形运输船约为 0.9; ρ_a 为空气密度, 20 °C 时为 1.223 kg/m³; A_1 为水面以上横向投影面积, 对于 26.7 万 m³ LNG 船舶, 满载情况下水面以上横向投影面积为 1 839 m², 压载情况下水面以上横向投影面积为 1 960 m²; v_w 为水平面或者地面上 10 m 处的 30 s 平均风速, m/s。

2.2 纵向水流力

根据 *Mooring Equipment Guidelines*, 纵向水流力荷载可按式(2)计算:

$$F_{x,c} = C_{x,c} \frac{\rho_c}{7600} L_{B,p} T v_c^2 \quad (2)$$

式中: $F_{x,c}$ 为纵向水流力, kN; $C_{x,c}$ 为船舶纵向水流力系数, 对于球罐气体运输船约为 1.0, 对于棱柱形运输船约为 0.9; ρ_c 为水体密度, 20 °C 时为 1 025 kg/m³; $L_{B,p}$ 为船舶双垂线长度, m; T 为船舶吃水, m; v_c 为船舶吃水线处水流速, kn。

2.3 纵向波浪力

根据西班牙规范 ROM 0.2-90(1990): *Action in the Design of Maritime and Harbour Works*, LNG 船舶受到的纵向波浪力可按式(3)计算:

$$F_L = C_t C_d \gamma_w H_s^2 D' \cos \alpha \quad (3)$$

式中: F_L 为纵向波浪力, kN; α 为波浪传播方向相对于船舶长度方向的夹角, (°); γ_w 为水体重力密度, 为 10.3 kN/m³; C_t 为水线面系数; C_d 为深度系数; H_s 为有效波高, m, 采用港区最大允许作业波高数值, 该数值可根据区域内波浪传播的方向有所不同; D' 为船舶在波浪方向上的投影长度, m, 在计算纵向波浪力时取值为 LNG 船舶的船宽。

C_t 和 C_d 采用图 1、2 确定。

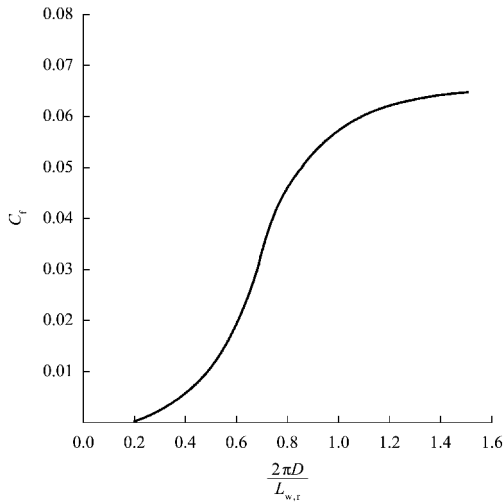


图 1 水线面系数取值

Fig. 1 Value of waterline coefficient

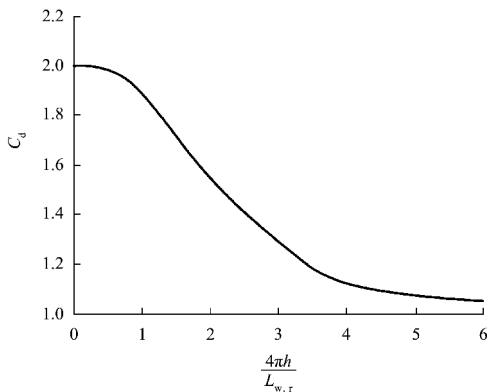


图 2 深度系数取值

Fig. 2 Value of depth coefficient

区域水深处的相对波长 $L_{w,r}$ 可用式(4)计算:

$$L_{w,r} = L_w \frac{T_{w,r}}{T_w} \quad (4)$$

其中:

$$\frac{1}{T_{w,r}} = \frac{1}{T_w} + \frac{v \cos \alpha_{w,b}}{L_w} \quad (5)$$

式中: L_w 为计算区域的水深处的绝对波长, m; T_w 为绝对波浪周期, s; $T_{w,r}$ 为相对波浪周期, s; v 为船速, m/s; $\alpha_{w,b}$ 为船舶前进方向和波浪方向夹角, ($^\circ$)。锚地中船舶速度为 0, 因此相对波长等于绝对波长。

3 LNG 船舶泊荷载的计算方法

3.1 锚泊系统

LNG 船舶通常采用 AC-14 型锚, 安装在

26.7 万 m^3 LNG 船上的 AC-14 超大抓力锚的参数为: 锚质量 18.375 t, 锚链长度 14 节。

3.2 抛锚时的锚链长度

IACS 规范 *Requirements Concerning Mooring, Anchoring and Towing, Section A1 Anchoring*^[9] 指出, 为确保锚杆保持水平, 正常的锚链长度与水深之比为 10, 可接受的最小锚链长度与水深之比为 6。

实际上, 深度应从海床开始测量, 到锚链筒所在处为止, 因此需确定水位线以上锚链筒或锚架的高度。大型船舶如 26.7 万 m^3 LNG 船的锚架特别高, 尤其是船舶向艏倾斜时, 因而不可能达到理论锚链长度与水深比值。此外, 为避免所有环境荷载转移至缆端, 所配置的 14 节锚链一般最多利用 13 节。

根据 JES/T 177—2021《海港锚地设计规范》, 典型 LNG 船配置的锚链长度见表 1。

表 1 典型 LNG 船锚链长度
Tab. 1 Typical anchor chain length of LNG ship

船舶吨级/GT	锚链长度/节	总舱容量/ m^3
1 000(1 000~1 500)	8	$\leq 1 840$
2 000(1 501~2 500)	9	1 841~2 800
3 000(2 501~4 500)	10	2 801~5 000
5 000(4 501~7 500)	11	5 001~9 000
10 000(7 501~12 500)	11	9 001~15 400
20 000(12 501~27 500)	12	15 401~38 000
30 000(27 501~45 000)	13	38 001~79 000
50 000(45 001~65 000)	13	79 001~84 300
70 000(65 001~85 000)	13	84 301~140 000
100 000(85 001~125 000)	14	140 001~155 000
150 000(125 001~175 000)	14	155 001~262 000

3.3 锚抓力

极限锚抓力取决于锚的设计特点以及海床的岩土特性等。如锚是否为超大抓力式或标准无杆式锚; 裸露岩层顶部作为底质时条件通常较差, 因为锚爪锚入海床内深度最小, 而砂、碎石或黏土底质的锚地往往具有良好的锚抓力。

锚抓力 F_M 可按式(6)计算:

$$F_M = C_s W \quad (6)$$

式中: C_s 为海床或效率系数; W 为锚的质量, t。

谷文强等^[10]在锚地选址时的底质影响因素分析中,给出了不同锚地底质的抓重比建议值(即海床或效率系数)。对于大抓力锚,锚地底质条件分为3个等级,分别为良好 ≥ 10 ,中等 $6\sim 9$,较差 <6 。

3.4 卧底锚链阻力和锚链悬链自重力

卧底锚链阻力通常包括埋地锚链阻力和接地锚链阻力两部分,鉴于前者较小且难以估算,可用统一的锚链摩擦力系数进行估算,国内一般取 $0.75\sim 1.50$,对于良好底质可取 1.50 ,中等底质可取 1.00 ,较差底质可取 0.75 。

锚链悬链自重力为从船舶锚链出口至水底的锚链自重力。

4 案例计算及分析

以某海港锚地为例,最大设计船型为 $26.7\text{万 m}^3\text{LNG}$ 船,长 345 m ,宽 55 m ,型深 27 m ,满载吃水 12 m ,压载吃水 9.8 m ,满载横向受风面积 $1\,839\text{ m}^2$,压载横向受风面积 $1\,960\text{ m}^2$,采用AC-14大抓力锚,质量为 18.375 t ,锚链总长 14 节(385 m),锚链直径 122 mm ,锚链每米质量为 345 kg/m 。假定锚地位于水深 20 m 的开敞海域,水流速度在 $11\sim 12$ 级风时取 1.5 m/s , 10 级风及以下时取 1.0 m/s 。风速考虑 7 级(17.1 m/s)、 8 级(20.7 m/s)、 10 级(28.4 m/s)、 11 级(32.6 m/s)和 12 级(36.9 m/s),对应的有效波高分别为 4.5 、 5.0 、 6.0 、 6.8 和 7.5 m 。

不同锚地底质下的锚抓力为:良好 $\geq 1\,840\text{ kN}$,中等 $1\,100\sim 1\,660\text{ kN}$,较差 $< 1\,100\text{ kN}$ 。对于 $26.7\text{万 m}^3\text{LNG}$ 船舶的卧底锚链阻力,考虑 12 节锚链卧在海底面,质量为 113.85 t ,则阻力为 $854\sim 1\,708\text{ kN}$ 。悬链锚链考虑 1 节,锚链自重力 95 kN 。

综上,LNG船舶锚泊荷载为:良好 $\geq 3\,640\text{ kN}$,中等 $2\,330\sim 2\,890\text{ kN}$,较差 $< 2\,050\text{ kN}$ 。

LNG船受到的环境荷载计算如表6所示。

1) 风速 12 级时, $26.7\text{万 m}^3\text{LNG}$ 船即使锚泊在良好底质的锚地,环境荷载仍大于锚泊荷载,从而导

致船舶走锚。2) 风速超过 10 级时, $26.7\text{万 m}^3\text{LNG}$ 船在较差底质一定走锚,在中等底质可能走锚。3) 风速 8 级及以下时, $26.7\text{万 m}^3\text{LNG}$ 船在各类底质锚地均不走锚。4) $26.7\text{万 m}^3\text{LNG}$ 船的锚链较长,使用的超大抓力锚AC-14抓力较大,对于各类底质锚地的适应性均较好。对于其他较小的LNG船,则会随着锚泊荷载减小而对底质适应能力变差,锚泊的环境荷载标准会进一步降低。5) 计算结果与JES/T 177—2021《海港锚地设计规范》中给出的海港锚地的设计环境条件标准基本一致,即风速达到 $8\sim 10$ 级时,船舶走锚的风险大大增加,船舶应采取进车顶风等防止走锚的措施。

表2 26.7万 m^3LNG 船舶锚泊时的环境荷载计算结果

Tab. 2 Calculation results of environmental loads when 267,000 m^3 LNG ship is at anchor

工况	纵向荷载/ kN	纵向水流力/ kN	纵向波浪力/ kN	纵向环境总荷载/ kN	
满载	7级风	520	60	700	1 280
	8级风	760	60	930	1 750
	10级风	1 420	60	1 060	2 540
	11级风	1 870	140	1 320	3 330
	12级风	2 400	140	1 540	4 080
压载	7级风	550	50	440	1 040
	8级风	810	50	520	1 380
	10级风	1 520	50	590	2 160
	11级风	2 000	120	690	2 810
	12级风	2 560	120	760	3 440

5 结论

1) 锚泊荷载与船舶锚的类型、锚质量、锚链长度和质量、锚地底质类型等有关。

2) 液化天然气码头应急锚地的用途之一为应对恶劣环境,锚地尺度应考虑锚地最大设计LNG船舶泊时抛出最长锚链以应对外部环境荷载,并尽量选择底质良好的水域设置应急锚地,以获得较大的锚泊荷载。

3) 卧底锚链阻力在锚泊荷载中占比较大,因此应急锚地的水深不应过大,从而使得抛出锚链更多地卧于海底以获得更大的摩擦力。

4) LNG船水面以上受风面积较大,外部环境

荷载中风荷载占比较大,尤其是在船舶压载状态下,风荷载是主要荷载。

5) 当风速超过 10 级时,应急锚地中的 LNG 船舶走锚风险增大,应离开应急锚地避台。

6) 当风速处于 8~10 级时,大型 LNG 船舶抛出全部锚链,在良好底质环境的应急锚地走锚风险较小,但为了防止因波浪过大引起锚松动而导致锚抓力丧失进而导致走锚,应采取进车顶风等措施。

7) 锚地底质对于锚泊荷载影响非常大,是非常复杂的参数,本文数值计算方法中采用的底质相关系数均为经验系数,在实际锚地选址中,建议通过数学模型和物理模型试验方法确定应急锚地设计环境条件,对底质土力学性能进行勘察分析,通过试验确定设计船型锚在底质中的锚抓力系数及锚链在底质上的摩擦力系数,并通过模拟不同环境荷载条件组合情况下锚泊船舶的走锚情况确定设计环境条件。

参考文献:

[1] 液化天然气码头设计规范: JTS 165-5—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Code for design of liquefied natural gas port and jetty: JTS 165-5-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

[2] 海港锚地设计规范: JTS/T 177—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Design code for anchorage of sea ports: JTS/T 177-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

[3] 杨坚刚, 孙平锋. 海港 LNG 船舶通航方式及应急锚地布置[J]. 水运工程, 2021(9): 49-54.

YANG J G, SUN P F, Navigation mode and emergency anchorage layout of LNG carrier [J]. Port& waterway engineering, 2021(9): 49-54.

[4] 李顺亮, 李清烈. 粤东 LNG 码头工程通航安全评估[J]. 水运工程, 2012(4): 93-97.
LI S L, LI Q L, Navigation safety assessment of Yuedong LNG terminal[J]. Port& waterway engineering, 2012(4): 93-97.

[5] 谷文强, 覃杰, 连石水. 海港锚地最小设计水深计算方法的数学模型[J]. 水运工程, 2020(12): 57-62, 75.
GU W Q, QIN J, LIAN S S. Mathematical model of calculation method for minimum design water depth of seaport anchorage [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 57-62, 75.

[6] 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
Design code of general layout for sea ports: JTS 165-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.

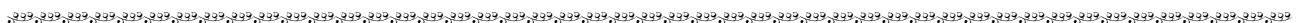
[7] Oil Companies International marine forum, mooring equipment guidelines [M]. 3rd ed. London: Witherbys, 2008.

[8] Puertos del Estado. ROM 0. 2-90 (1990): Action in the design of maritime and harbour Works [S]. English version. Madrid: Ministerio de Obras Publicas, 1990.

[9] International Association of Classification Societies, Requirements Concerning Mooring, Anchoring and Towing[S]. London: The Nautical Institute, 2017.

[10] 谷文强, 马志强. 锚地选址时的底质影响因素分析[J]. 水运工程, 2021(8): 42-46, 66.
GU W Q, MA Z Q, Influence factors of bottom material in anchor site selection [J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 42-46, 66.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 44 页)

[9] 王文华, 邸晓宁, 齐月才, 等. FLNG-LNGC 并靠外输系统参数对双体水动力性能的影响[J]. 船舶力学, 2021, 25(1): 52-64.
WANG W H, QIU X N, QI Y C, et al. Influence of parameters of side-by-side offloading system on hydrodynamic performance of FLNG and LNGC[J]. Journal of ship mechanics, 2021, 25(1): 52-64.

[10] 周珂. 不同浪向下 FLNG 与 LNGC 旁靠作业时的水动力干扰分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
ZHOU K. Analysis on hydrodynamic interactions between side-by-side FLNG and LNGC under different wave directions [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.

(本文编辑 王隽)