



系泊船舶试验中风荷载的模拟

汤本靖¹, 陈德春¹, 周益人², 张金刚¹

(1. 河海大学港口海岸及近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究院河港所, 江苏南京 210024)

摘要: 基于大型LNG船舶系泊物理模型试验, 对2种试验室风荷载模拟实现技术(风机法与挂重法)进行分析与对比。由风压力试验结果得出“风机法模拟风荷载结果与多个常用经验公式计算结果相差不大”的结论。风浪联合作用下的船舶系泊模型试验结果表明:单纯风工况下2种方法测得的系缆力有所差异, 但叠加波浪荷载后这种差异变小且不同位置缆绳受力分配状况也有所改善。对上述结论及其形成原因进行与探讨, 为船舶系泊物理模型试验中风荷载的合理模拟提供借鉴。

关键词: 风荷载; 模拟方法; 船舶系泊; 物理模型; 系缆力

中图分类号: U 661.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0030-05

Wind load simulation in physical model experiment of ship mooring

TANG Ben-jing¹, CHEN De-chun¹, ZHOU Yi-ren², ZHANG Jin-gang¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In the studies of ship mooring physical model experiment, two wind loads simulation methods, Fan-method and Hanging Weight-method, are discussed. The result of the wind force experiment shows that the Fan-method is consistent with the other three empirical formulas. The testing result of the ship mooring experiment with the wind force only shows that the mooring forces have some differences between the two wind loads simulation methods, but the difference is reduced with the stack wave load, and the force distribution condition of the mooring lines is improved. The above conclusions and reasons are discussed, which may serve as reference for the reasonable simulation of wind loads in physical model experiment of ship mooring.

Key words: wind load; simulation method; ship mooring, physical model; mooring force

液化天然气(LNG)作为清洁、高效、储量丰富的新兴能源在我国的能源消费中所占的比重越来越大。作为海上运输LNG主要工具的LNG船是一种危险品运输船, LNG泄露能对周围环境、人员及船舶本身造成巨大的危害, 因此对其在运输及装卸过程中的安全要求都远较其他船型严格^[1]。特别是在LNG船舶港内作业过程中, 必须使其系缆力、船舶运动量及对码头的撞击力在安全范围内^[2-3]。

进行船舶系泊研究主要有物理模型试验和数学模型计算2种方法, 但因影响船舶系泊状态的因素十分复杂, 所以国内多认为前者结果较为

可靠。因LNG船舶尺度大、吃水浅、受风面积很大, 所以风荷载对其影响远较其他船型显著。目前, 系泊试验中风荷载的模拟方法主要有风机法和挂重法2种: 前者通过一组或多组风机组成风阵在模型区域内模拟风场来实现; 后者通过相关公式计算出既定风速条件下原型所受风荷载, 折合成模型风荷载后用挂重物的方式模拟。目前在2种方法的采用上仍存在着差异, 而对此的专门性研究却极少, 这在一定程度上影响了模型试验结果的可信度。进行2种风荷载模拟方法条件下LNG船舶系泊模型试验研究将有助于这一状况的改善。

收稿日期: 2013-03-07

作者简介: 汤本靖(1989—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

1 试验内容与条件

1.1 试验内容

- 1) 在风机形成的风场中, 进行系泊船舶风压力试验;
- 2) 进行风机法和挂重法条件下的单纯风荷载作用系泊船舶模型试验;
- 3) 分别进行风机法和重法条件下的风浪联合作用系泊船舶模型试验。

1.2 试验条件

1.2.1 环境

主要研究风荷载对LNG船舶系缆力的影响, 与水位的关系较小, 只考虑高水位工况; LNG船舶横向受风面积最大, 此时船体所受风压力也最大, 因此仅进行横风及横浪试验。本试验水位及工况组合条件见表1, 表中所示方向角度均以LNG船舶纵向轴线为基准。

1.2.2 船型

试验船型为26.6万m³LNG船舶, 其几何尺度及运动性能参数见表2。

1.2.3 缆绳与护舷

4个靠船墩各布置一套橡胶护舷(型号SUC2250H; 两鼓一板, 标准型R0), 单个护舷的

表1 试验条件与工况组合

条件	试验船型	数值	方向/(°)
水位	设计高水位	4.00 m	
	设计低水位	0.57 m	
风		v=10 m/s, 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s, 30 m/s	90
		H _{4%} =1.5 m; T=5 s	90
波浪	26.6万m ³ LNG船舶	H _{4%} =2.0 m; T=5 s	90
		H _{4%} =2.5 m; T=5 s	90
		H _{4%} =2.0 m; T=7 s	90
		H _{4%} =2.0 m; T=9 s	90
船舶装		压载	
载状况		满载	

表2 26.6万m³LNG船舶船体尺度及基本参数

舱容/ 万m ³	装载度	型长/	型宽/	型深/	固有周期/s		吃水/ m
		m	m	m	横摇	纵摇	
26.6	压载	345	53.8	28	9.75	9.06	8/9.2
	满载				16.37	10.13	12.2

设计吸能为4 944 kJ, 最大吸能为5 234 kJ; 设计反力为5 004 kN, 最大反力为5 318 kN。

缆绳采用20根 $\phi = 44$ mm超高分子量聚乙烯(HMPE)缆绳, 按照3:3:2:2方式布置。单根缆绳伸长率4%, 最小破断力1 370 kN。缆绳及护舷布置见图1。

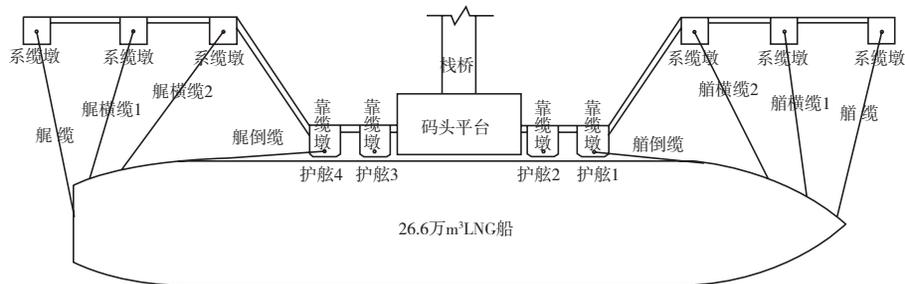


图1 LNG码头平面布置及系缆布置

1.3 模型概况

1.3.1 试验设备

波浪试验港池长50 m, 宽17.5 m, 高1.2 m, 一端设置消浪缓坡, 另一端配有美国MTS公司生产的不规则波造波机, 由计算机控制, 产生试验所要求的波浪要素。港池内布置有10台大型风机, 可产生不同方向及速度的风场。

试验中波高采用电阻式波高仪测量, 由计算机控制采集和分析测量结果。缆绳力采用2008型护舷缆力仪进行测量。

1.3.2 模型设计

模型几何比尺 $\lambda_L=58$, 采用正态模型, 遵循重力相似准则。码头按照几何比尺设计。在满足几何相似、静力相似及动力相似条件下进行26.6万m³LNG船舶模型设计, 使船舶模型在不同装载度情况下满足吃水、质量、重心位置、质量惯性矩和自振周期等与原型相似。对橡胶护舷、缆绳等非刚性结构考虑弹性变形相似。橡胶护舷的模拟采用护舷传感器, 通过模拟橡胶护舷的性能曲线, 确保与原型相似; 缆绳的模拟要求模型

与原型的拉力-伸长关系曲线相似，试验中将同一位置的多条缆绳归并为一根，初始张力为100 kN。

1.3.3 荷载模拟

波浪模拟满足重力相似条件，不规则波波谱采用JONSWAP谱，试验前通过造波机进行波要素的率定，使其满足要求。本次试验采用间歇式生波方式，以消除反射，每组波列波数120个左右，然后停机，待水面平静后继续进行下一组试验。每组试验重复3次，以保证试验数据的可靠性。

风荷载模拟，采用风机法和挂重法2种方法分别进行模拟。前者通过布置于港池中的10台大型风机按照重力相似进行不同风速风场的模拟；通过测量风机法不同风速条件下作用于船体的风压力，按照重力相似准则换算成模型值可得到相应风速条件下的挂重值。这样可以保证两种方法情况下船体所受风压力相等。

2 风压力试验

为探讨风机法模拟风荷载的可靠性，本次试验首先对26.6万m³LNG船舶按照重力相似准则进行横向开风、10~30 m/s风速条件下的风压力测量模型试验，结果见表3。将试验结果与美国国防部系泊统一设施标准公式（UFC4-159-03）、石油公司国际海事论坛（OCIMF）公式及港口工程荷载规范公式（JTS144-1-2010）等较为权威的经验公式^[4-8]计算结果作比较，结果见图2。

表3 LNG船舶横向风压力试验结果

船型/ 万m ³	模拟方法	原型风速/模型风速/ (m·s ⁻¹)		船舶装载度/kN	
		(m·s ⁻¹)	(m·s ⁻¹)	压载	满载
26.6	风机法	10	1.31	605 (310)	527 (270)
		15	1.97	1 497 (767)	1 279 (656)
		20	2.63	2 682 (1 374)	2 296 (1 177)
		25	3.28	4 161 (2 133)	3 482 (1 785)
		30	3.94	5 607 (2 874)	4 745 (2 432)

注：()中数值表示相应工况下挂重法模型挂重质量，单位为g。

可见，试验测得的风压力与多家公式计算得到的结果吻合很好，只是在中间风速时比3家公式计算结果略大，且压载状态下最大误差不超过10%，满载状态时最大误差不超过8%，这个结果还是可以接受的。这说明，风机法得到的风压力

是合理的，那么以此为准进行挂重法试验也是合理的（图2）。

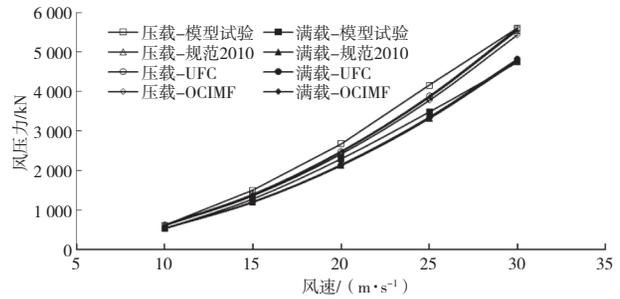
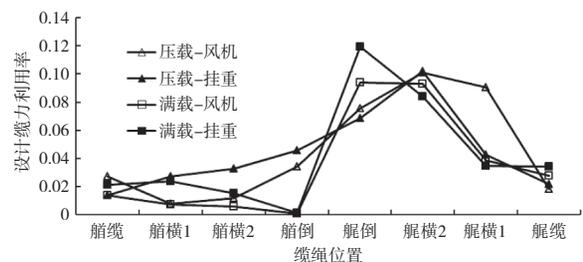


图2 22.6万m³LNG船舶风压力对比

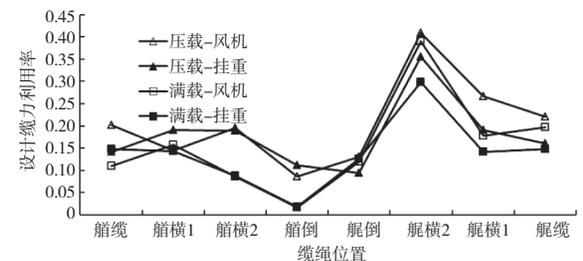
3 船舶系缆力分析

3.1 风荷载作用下船舶系缆力

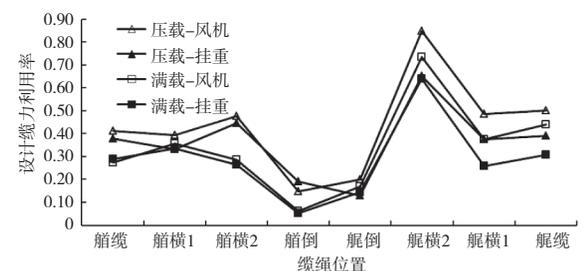
分别进行10~30 m/s风速条件下船舶系泊系缆力模型试验，为使结果可靠，在试验过程中，严格控制船舶初始位置、缆绳初始张力、传感器布置等外部因素完全相同。为便于分析研究，绘制各工况条件下缆绳系缆力分布图，结果见图3；



a) 风速10 m/s



b) 风速20 m/s



c) 风速30 m/s

图3 风荷载作用下系缆力分析

再将风机法得到的最不利缆绳的系缆力最大值及平均值 (F_f) 与挂重法 (F_g) 作对比, 并做出其 (F_f/F_g) 与风速的关系曲线, 结果见图4。

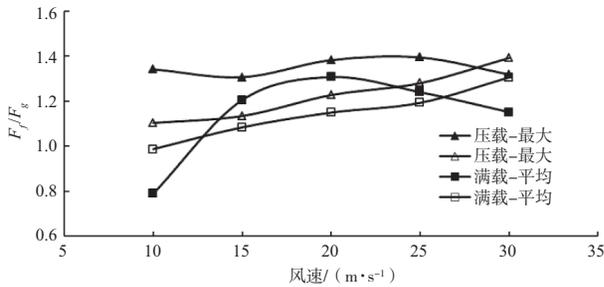


图4 不同风模拟方法系缆力对比

由上述结果可以得出:

1) 系缆力最大值随风速的增大而增大, 且同一风速同一风模拟方法条件下压载大于满载, 这与之前的研究成果是一致的。同一风速条件下, 压载时船体受风面积较满载大, 所受风压力也大, 又因质量轻, 惯性小, 运动更为剧烈, 故可能出现的系缆力最大值也较大。

2) 由图3可以看出, 压载状态下风机法测得的系缆力最大值分布的均匀性比挂重法要好, 满载状态则大致相同。产生这种结果的原因是因为风机法模拟风荷载时的动态作用机制比挂重法的近似静力模拟复杂得多。船舶压载时惯性较小, 受动态风荷载的影响较大, 使得各缆绳上的系缆力分布趋于均匀; 满载时这种效应减弱, 故两种方法的结果相差不大。

3) 由图3、4还可以看出, 同工况条件下风机法测得的系缆力最大值比挂重法大, 二者差异在船舶满载时更为明显。风机法与挂重法模拟风的原理是不同的, 前者按重力相似准则设计取风速比尺 $\lambda_{fv} = \lambda_L^{0.5}$, 利用风机阵在模型中进行模拟; 后者则假定风压力为恒定力, 取作用力比尺 $\lambda_f = \lambda_L^3$ 计算得模型风压力, 再用等重的重物作用于船体进行模拟。模型风荷载对船舶模型的作用既有惯性力也有黏滞力^[9], 且具有一定的脉动性, 它与船舶、码头、缆绳和护舷构成了一个复杂的动力响应机制, 在这种情况下, 系缆力的瞬时值很可能

出现比挂重法大很多的情况。另外, 船舶满载时惯性大, 受脉动性影响也大, 这种差异也较压载时更为明显。本试验中, 风机法测得的最不利缆绳最大和平均系缆力比挂重法大29%和14%左右。

4) 另外, 在各种风速工况下艉横缆受力均最大。这是由于试验船型的上部结构集中于艉部, 受风面积较船艏大出很多, 在吹开风工况下, 船体横向受力不均, 艉横缆承担的风荷载较大的缘故。在实际工程应用中, 应当针对具体工况对相应缆绳予以加强。

3.2 风浪联合作用下系缆力

船舶系泊时, 波浪也是必须考虑的重要荷载之一。为了研究风浪联合作用下不同风模拟方法对大型LNG船舶系泊的影响, 还进行风浪联合作用系泊船舶模型试验。由于数据量繁杂, 限于篇幅, 本文中仅将船舶压载状态风机法和挂重法条件下20 m/s, 30 m/s风叠加不同波浪的系缆力最大值进行对比分析, 结果见图5。另外, 为分析各缆绳系缆力分布状况, 计算出不同风模拟方法各工况条件下各缆绳最大值与平均值比值的均方差并进行对比, 结果见图6。

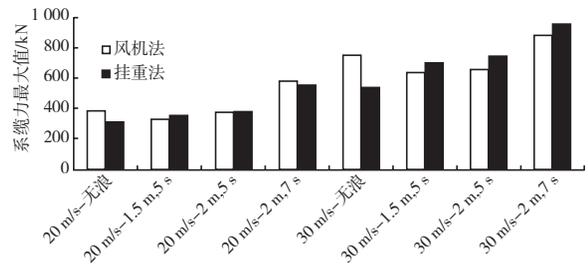


图5 风浪联合作用下系缆力最大值对比

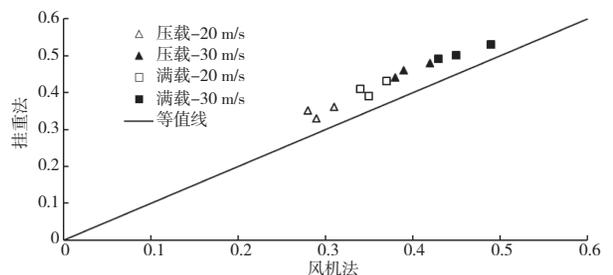


图6 系缆力最大值分布均方差对比

1) 叠加波浪以后, 在20 m/s风速条件下风机法和挂重法测得的系缆力最大值大致相同, 平均差异4%; 在30 m/s风速条件下挂重法测得的系缆力最大值比风机法大9%左右。这个结果远较纯风工况为小, 这是因为叠加波浪作用后, 使得船舶系泊这一多因素动力响应系统变得更加复杂, 这反而使得整个系统的协同作用得到了改善, 各缆绳的受力得以重新合理分配, 削弱了不同风模拟方法造成的影响。

2) 与单纯风工况下风机法系缆力最大值比挂重法大的情况不同, 风浪联合作用时, 挂重法系缆力最大值较风机法略大, 风速越大, 差异也越大。这表明与挂重法相比, 作为动态荷载的风机法能更好地与波浪作用产生协同响应效应, 从而有效地减小了缆绳极端受力状态的发生概率, 并且随着风速的增大, 这种作用也越明显。

3) 与单纯风工况类似, 风浪联合作用时风机法得到的同一工况各缆绳系缆力最大值的分布状况比挂重法更为均匀, 相同风浪条件下压载状态系缆力最大值的分布较满载均匀。从图6中我们还可以看出, 相同波浪、相同装载条件下, 风速越大, 系缆力最大值的分布就越不均匀。因此, 当船舶系泊过程中同时存在风浪作用时, 风速越大, 缆绳发生极端受力状态的可能性也就越大, 在实际工程应用中必须予以重视, 必要时应进行模型试验研究, 以确保安全可靠。

4 结语

缆绳系缆力是一个涉及风浪流等环境荷载、码头长度和形式、缆绳材质和布置以及护舷型号等因素的复杂动力响应问题^[10-12]。本文针对LNG船舶受风荷载的影响较大, 系泊安全要求较高, 而模型试验中关于风荷载模拟方法存在差异的现状, 专门进行了不同风模拟方法条件下风浪联合作用26.6万m³LNG船舶系泊模型试验, 并对系缆力

的试验结果进行分析, 得到了以下几点认识, 希望能对今后相关研究及实际工程应用提供借鉴。

1) 风机法模拟风场作用于船体的风压力与常用经验公式计算结果较为吻合, 10~30 m/s风速范围内最大误差不超过10%, 可认为合理。

2) 单纯风荷载工况下, 风机法测得的系缆力最大值平均比挂重法大23%~35%, 船舶载重大, 差异也越大; 同工况条件下各缆绳受力均匀性表现为风机法优于挂重法, 压载状态优于满载。

3) 风浪联合作用工况下, 风机法测得的系缆力最大值与挂重法相比, 在20 m/s风速条件下基本一致, 30 m/s条件下后者比前者大9%左右, 各缆绳受力状况比单纯风工况时得到改善。

参考文献:

- [1] 祁超忠. LNG船舶港内作业前期研究及风险防范[J]. 航海技术, 2008(6): 2-5.
- [2] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [3] JTS 165-5—2009 液化天然气码头设计规范[S].
- [4] 杨兴晏. 船舶风荷载算法的比较研究[J]. 港工技术, 2006(2): 12-13.
- [5] UFC4-159-03 DESIGN: MOORINGS[S].
- [6] Mooring Equipment Guidelines[M]. 3rd Edition. OCIMF, 2008.
- [7] JTJ144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [8] PIANC. Criteria for movements of moored ships in harbors a practical guide[R]. Brussel: PIANC, 1995.
- [9] 夏运强, 李华军, 唐筱宁, 等. 海洋工程物理模型试验中风场模拟方法研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 28-33.
- [10] 王琳, 谢跃荣, 唐敏, 等. 船舶运动量在确定某LNG泊位装卸作业条件中的应用[J]. 水运工程, 2011(S1): 22-26.
- [11] 李焱, 郑宝友, 陈汉宝, 等. 大型LNG船舶系泊条件试验研究[J]. 中国港湾建设, 2011(6): 21-25.
- [12] 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, 46(3): 5-7.

(本文编辑 郭雪珍)