



缆绳材质及直径对系泊船舶运动影响的数值模拟

王登辉，柳淑学，李金宣，张昊宸

(大连理工大学，海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024)

摘要：缆绳属性是影响系泊船运动量的重要因素。基于 MIKE 21 Mooring Analysis 数值模拟软件，对一艘 17.7 万 m³ LNG 船进行不规则波横浪作用下的数值系泊试验，通过变化缆绳直径及材质，分析其对系泊船舶运动的影响。结果表明：1) 系泊船运动量会受到缆绳材质及直径的影响，主要是由于缆绳刚度的变化。2) 系泊船的横移、纵移和回转受缆绳变化的影响较大，均随缆绳刚度的增大而减小。3) 升沉主要与入射波浪周期和波高有关，受缆绳刚度影响较小。4) 纵摇因为本身运动量较小，变化不明显。5) 横摇相对于缆绳刚度改变没有明显的变化规律。

关键词：系泊船舶；运动量；系缆力；缆绳刚度；数值模拟

中图分类号：P 753；U 652

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)11-0043-07

Numerical simulation of influence of rope material and diameter on motion of moored ship

WANG Deng-hui, LIU Shu-xue, LI Jin-xuan, ZHANG Hao-chen

(State Key laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The mooring property is an important factor affecting the motion of the mooring ship. Based on the MIKE 21 Mooring Analysis numerical simulation software, a 177,000 m³ LNG ship is subjected to a numerical mooring test under the action of irregular transverse waves, and its influence on the motion of the moored ship is analyzed by changing the diameter and material of the rope. The results show that: 1) The motion of the mooring ship is affected by the material and diameter of the rope, mainly due to the change of the rope stiffness. 2) The sway, surge and yaw movement of the mooring ship are greatly affected by the change of the rope, and all decrease with the increase of the rope stiffness. 3) The heave is mainly related to the incident wave period and wave height, and is less affected by the stiffness of the rope. 4) Pitch has little change due to its small amount of motion. 5) There is no obvious change rule for roll relative to the change of rope stiffness.

Keywords: moored ship; ship motion; mooring force; rope stiffness; numerical simulation

近年来，船舶发展趋向专业化、大型化，离岸深水港码头建设随之增多^[1]。开敞式码头导致系泊船暴露在复杂的风浪流条件下，极易受到较长周期波浪的作用，从而引发断缆事故。系泊缆绳作为船舶系泊安全最主要的设施，成为系泊安全的基础。因此，研究缆绳属性对系泊船运动的

影响，对于解决系泊船的泊稳问题是至关重要的。

国内众多学者研究了缆绳配备对系泊船泊稳的影响，薛丁源等^[2]通过 OPTIMOOR 系泊软件，对比分析了钢缆及聚丙烯 (poly-propylene) 缆对缆绳受力情况及运动量的影响；张鼎等^[3]的研究结果表明，缆绳刚度对系泊系统有重要影响，缆绳

弹性越好则各缆绳受力越小且更易均衡分配；张志等^[4]的研究结果表明，采用不同材质缆绳、增加刚性缆绳尼龙尾缆长度等可以改善船舶的系泊稳定性。而系泊船的泊稳标准与其运动量密切相关^[5]，有关较长周期波浪作用下系泊稳定性问题的研究还较少，因此对较长周期波浪作用下缆绳配备对系泊船运动量的影响进行研究是十分必要的。目前针对缆绳刚度对系泊船运动量及系缆力影响的研究只有定性分析，缺少定量分析。

本文选取一艘 17.7 万 m³ LNG 船建立系泊模型，通过 MIKE 21 系泊分析软件进行数值计算，深入分析较长周期波浪横浪作用下缆绳直径及材质对系泊船舶运动的影响，并提出了运动量及系缆力与缆绳刚度的关系式。

1 计算方法

MIKE 21 中的 Mooring Analysis 水动力计算模块可以计算波浪和结构物的耦合作用，同时考虑风浪流等载荷^[6]。该软件基于势流理论，采用边界元方法及间接时域法求解系泊船水动力系数，从而求解船舶运动控制方程式(1)。此外，采用改进的 Boussinesq 方程计算入射波浪场^[7]：

$$\sum_{j=1}^6 (\mathbf{M}_{ij} + \mathbf{m}_{ij}) \ddot{\mathbf{x}}_j(t) + \int_0^t \mathbf{K}_{ij}(t-\tau) \dot{\mathbf{x}}_j(\tau) d\tau + \mathbf{C}_{ij} \mathbf{x}_j(t) = \mathbf{F}_{wj}(t) + \mathbf{F}_{ej}(t) \quad (1)$$

式中： \mathbf{M}_{ij} 为惯性恢复矩阵； \mathbf{K}_{ij} 为迟滞函数； \mathbf{C}_{ij} 为静水恢复矩阵； t 为时间； τ 为迟滞时间； \mathbf{m}_{ij} 为船体附加质量； \mathbf{F}_{ej} 为系泊系统引起的作用力； \mathbf{F}_{wj} 为波浪引起的激振力，利用 Bingham 方法求解^[8]； \mathbf{x}_j 为船舶 6 自由度分量。

2 系泊模型的建立与验证

2.1 物理模型试验布置条件及数值模型建立

本文为验证数值模型的有效性，开展了 17.7 万 m³ LNG 船系泊运动物模试验。码头平面布置为蝶形，由工作平台、靠船墩及系缆墩组成，总长度 337 m (图 1)。工作平台、靠船墩和系缆墩顶高程均为 6.5 m，采用桩基结构。设计高水位 2.5 m，码头前沿底高程 -13.4 m。17.7 万 m³ LNG 船主要参数为：总长 298.4 m，型宽 46 m，型深 26.8 m，满载吃水 12.3 m，质心高 20.6 m，排水量 11.332 7 万 t，横摇周期 14.77 s，纵摇周期 9.17 s。试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的多功能综合水池中进行，模型采用重力相似准则，比尺为 $\lambda = 1:60$ 。

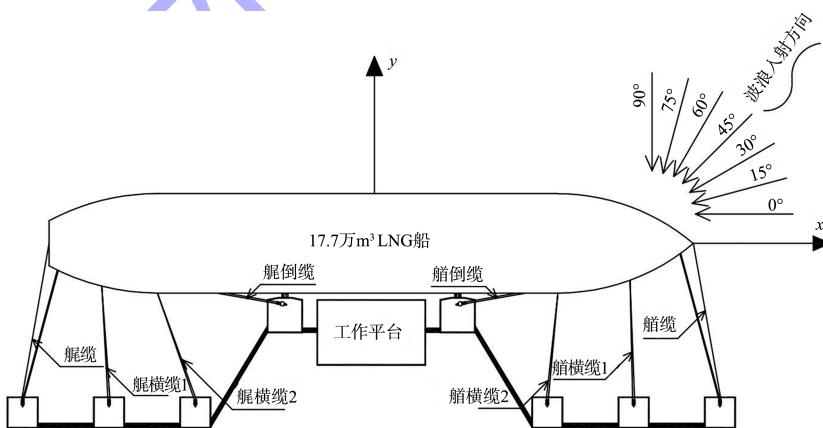


图 1 码头平面布置及系缆布置

船舶系缆方式见图 1，布置为 3:2:2:2 方式，总计 18 根。缆绳采用 75 mm 尼龙缆，缆绳初始力设定为 100 kN。利用 Wilson 公式确定缆绳拉力-变形曲线：

$$T_m = \frac{C_p d_p^2 (\Delta s / s)^n}{\lambda^3} \quad (2)$$

式中： T_m 为模型缆绳受力； C_p 为弹性系数，尼龙缆取 15.4 GPa； d_p 为缆绳直径； n 为系数，尼龙缆取 3.0； s 为缆绳长度， Δs 为缆绳变形量； λ 为模型试验比尺。

护舷采用 SCK2500H 型 1 鼓 1 板标准反力型橡胶护舷，设计压缩变形 52.5% 时吸能量为 3 391 kJ，

设计反力为 3.3 MN。采用 4 点靠泊。物模试验中使用的缆绳及护舷的受力-变形模拟结果见图 2。

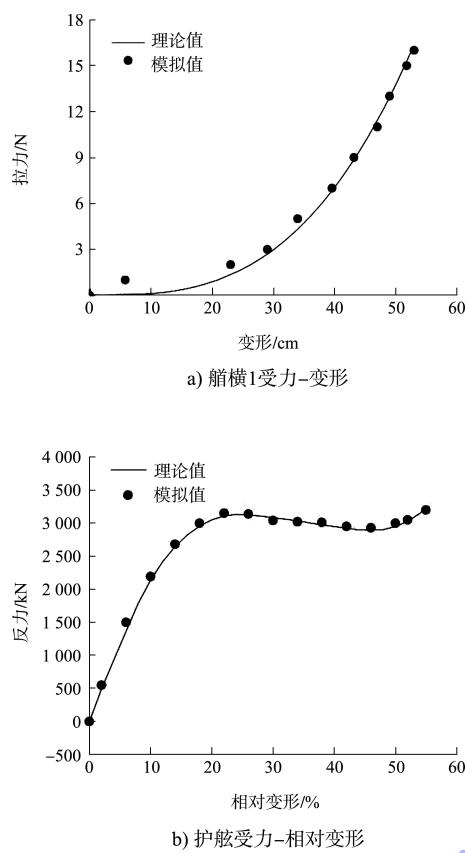


图 2 缆绳及护舷物理模拟曲线对比

根据物模试验的系泊布置建立数值系泊模型, 通过数值试验对横浪作用下采用不同缆绳直径及材质系泊船舶的运动特性进行分析研究。

2.2 模型验证

考虑船舶系泊运动在横浪作用时运动量较大, 因此数值试验采用横浪高水位满载工况。波浪谱型采用 JONSWAP 谱(谱峰升高因子取 3.3), 数值试验工况组合为: $H_{1/10} = 1.2 \text{ m}$, \bar{T} 为 6、8、10、12、16、20、24、28、30 s。对比验证物模试验和数值模拟得到的系泊船运动量最大值。

图 3 为物模试验和数值试验横浪作用下起控制作用的系泊船横移及横摇量的对比。二者得到的运动量对比效果良好, 且随入射波浪周期变化的趋势一致。综上, 已建立的数值模型可以较好地反映系泊船的运动状态, 可以在该模型的基础上改变缆绳直径及材质进行系泊船运动的模拟和计算。

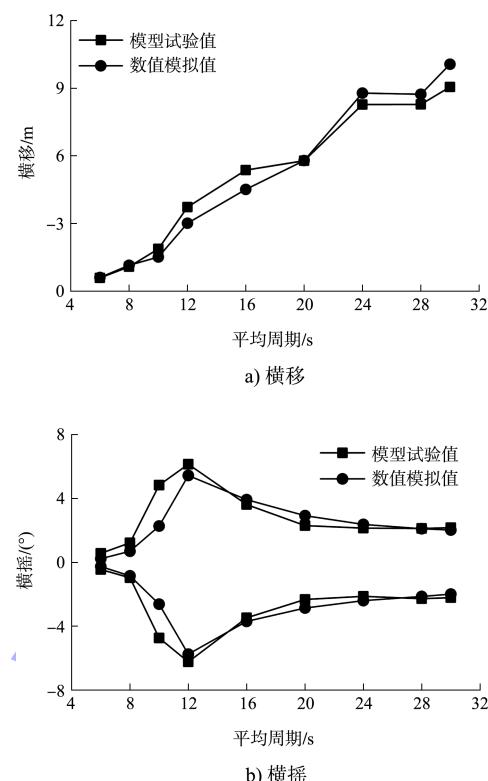


图 3 系泊船运动量对比

3 缆绳直径及材质对系泊船运动影响的数值模拟分析

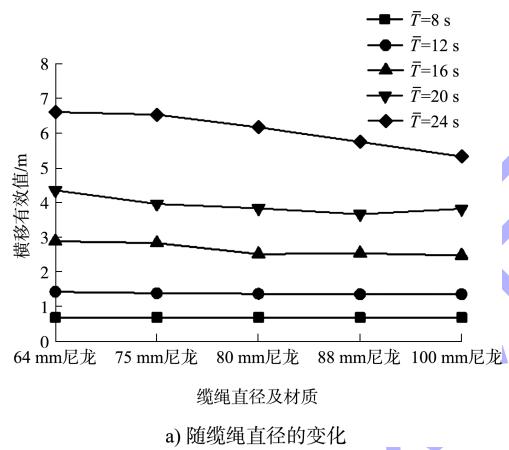
本文主要研究缆绳直径及材质对 17.7 万 m^3 系泊 LNG 船运动量及系统力的影响。数值试验的相关参数为: $H_{1/3} = 1.0 \text{ m}$, \bar{T} 为 8、12、16、20、24 s, 尼龙缆绳直径为 64、75、80、88、100 mm, 钢缆直径为 40 mm, 钢缆尼龙尾缆长 5、11 m。波浪谱型仍采用 JONSWAP 谱。在缆绳直径方面, 以物理模型试验的 75 mm 尼龙缆为基础, 采用其他 4 种缆绳直径进行对比分析; 在缆绳材质方面, 除使用尼龙缆及钢缆外, 还采用钢缆加尼龙尾缆的混合材质。根据石油公司国际海事论坛 (OCIMF) 规定, 尼龙尾缆破断力要比钢缆大 25%, 采用 100 mm 尼龙缆(破断力 1 400 kN)作为 40mm 钢缆(破断力 1 100 kN)的尾缆, 根据相关规范建议, 尾缆长度分别设置为 5、11 m。考虑运动量及系统力的统计值更稳定且规律性更强, 采用其前 1/3 大值的平均值进行分析。

3.1 缆绳直径及材质对系泊船运动量的影响

系泊船运动量中, 升沉主要与入射波浪周期

和波高有关,受缆绳刚度影响较小,改变缆绳直径及材质时,升沉基本不发生变化;纵摇因本身运动量较小,随缆绳改变的变化也不明显;横摇对于缆绳刚度改变也没有明显变化规律。因此本文主要对另外3个运动量,即横移、纵移和回转的变化规律进行分析。

图4为不同缆绳直径及材质时系泊船横移的变化情况。由图4a)可见,横移随缆绳直径的增大而减小,但减小幅度不大;由图4b)可看出,横移随缆绳材质改变的变化较为明显,采用钢缆后横移明显下降,降幅随入射波浪周期增大而增大,最大可降低70%左右;而钢缆增加尼龙尾缆后,由于缆绳刚性减弱,横移有所增加,但与采用纯尼龙缆的横移相比,仍有很大程度减小。



a) 随缆绳直径的变化

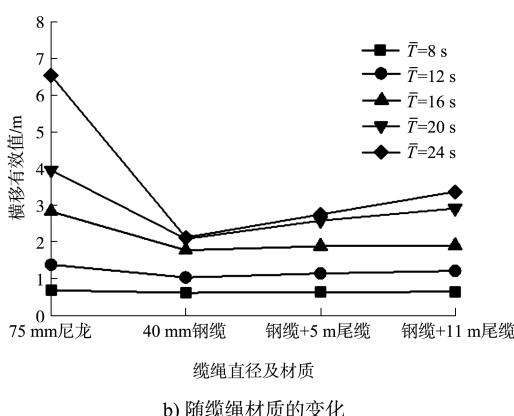


图4 系泊船横移变化

图5为不同缆绳直径及材质时系泊船纵移的变化情况。由图5a)可见,纵移随缆绳直径增大整体呈现下降趋势,但并非完全单调变化。这主要是由于波浪横向入射时,纵移运动响应相对较弱,

因此随缆绳直径改变的规律性不强。由图5b)可看出,纵移随缆绳材质改变的变化规律与横移基本一致,采用钢缆后纵移下降明显,增加尼龙尾缆后纵移略有增加。

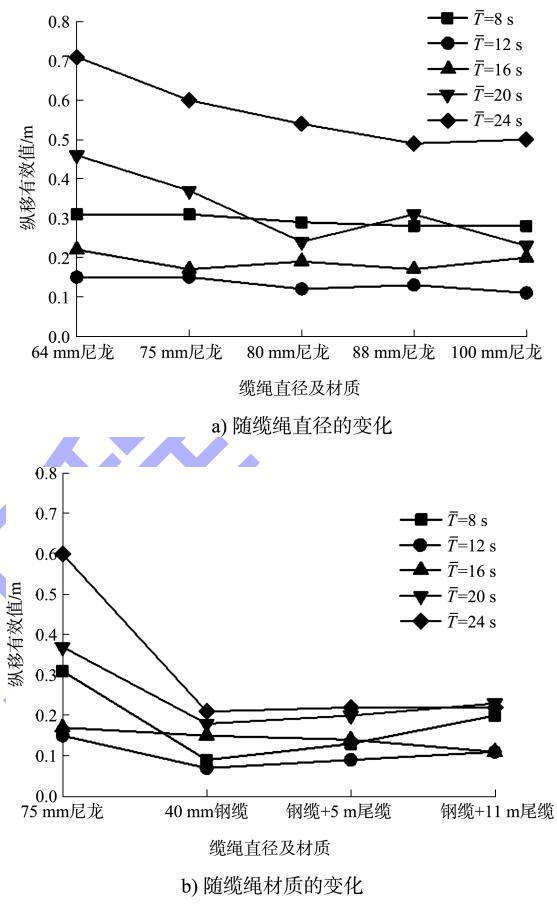
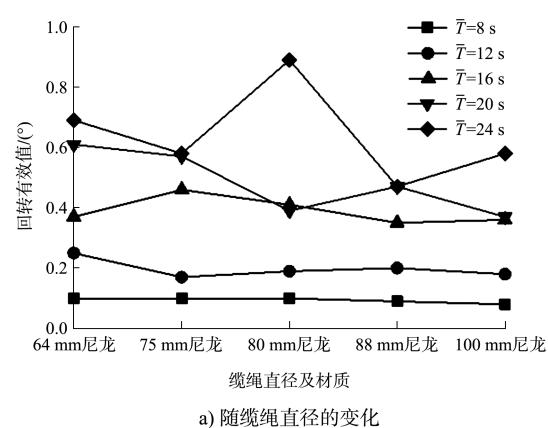
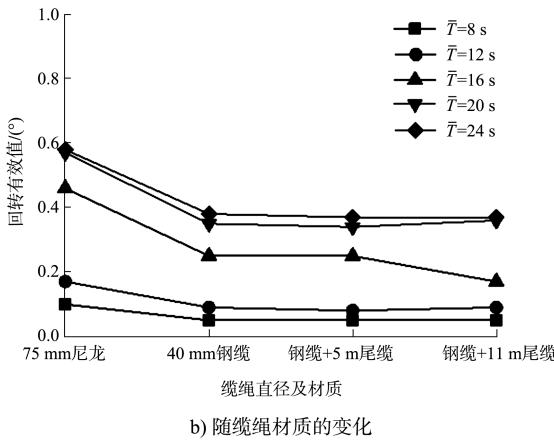


图5 系泊船纵移变化

采用不同缆绳直径及材质时系泊船回转变化见图6。由图6a)可见,回转随缆绳直径改变没有特别明显的规律,与纵移类似,但整体呈现下降趋势;图6b)中,采用钢缆后由于艏艉缆的限制作用增强,回转值有明显下降。



a) 随缆绳直径的变化



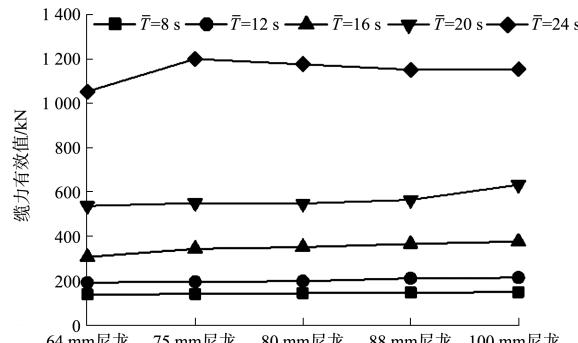
b) 随缆绳材质的变化

图 6 系泊船回转变化

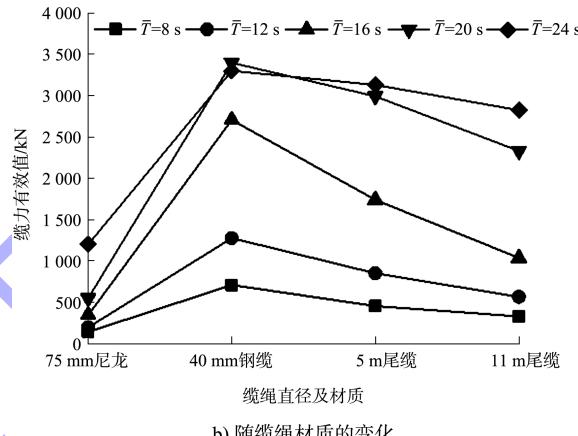
对比改变缆绳直径和材质对运动量的影响可以发现, 由于改变缆绳材质对缆绳刚度的改变幅度更大, 其影响更明显, 尤其在较长周期波浪作用下; 改变缆绳直径对运动量的影响有限, 最大仅可降低 20% 左右, 而改变缆绳材质可将运动量减小 70%。

3.2 缆绳直径及材质对系泊船系缆力的影响

本文取所有缆绳中最大的系统力进行分析, 最大系统力一般出现在长度较短的艏横缆 2 位置处, 采用不同缆绳直径及材质系泊船系缆力的变化见图 7。由图 7a) 可见, 在波浪周期 $\bar{T}=8 \sim 20$ s 时, 系缆力均随缆绳直径增大而增大; 在 $\bar{T}=24$ s 时呈现先增大后趋于平稳的规律, 主要是由于缆绳直径增大使横移减小, 在缆绳变形减小与缆绳刚度增大综合作用下, 使得系缆力基本不变。由图 7b) 可见, 采用钢缆后由于缆绳刚度大幅提升, 系缆力也产生了相当大的增幅, 最大可达 6 倍左右。使用尼龙尾缆在降低系缆力的同时增加了缆绳弹性, 可有效防止缆绳破断现象。



a) 随缆绳直径的变化



b) 随缆绳材质的变化

图 7 系泊船系缆力变化

4 系泊船横移及系缆力与缆绳刚度的关系

从本质上讲, 改变缆绳直径和材质都是通过改变缆绳刚度对系泊船的运动产生影响, 因此将二者进行统一分析并得出对应的规律是有必要的。为统一标准, 取各缆绳达到相应破断力的点在受力变形曲线中所对应的斜率即此时的刚度系数作为衡量缆绳刚度的指标。对于使用尼龙尾缆的钢缆, 类比于弹簧串联原理, 用串联公式计算其复合刚度系数。各缆绳材料的刚度系数见表 1。

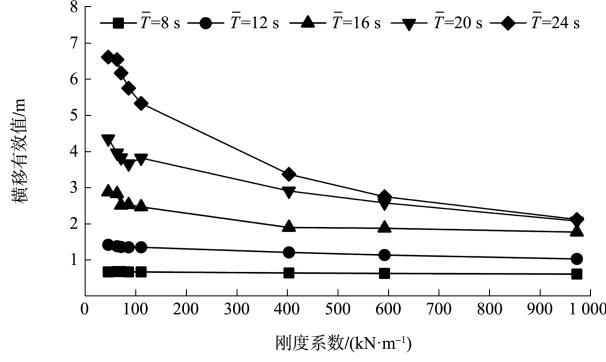
表 1 缆绳刚度系数

缆绳型号	64NL	75NL	80NL	88NL	100NL	40ST(11)	40ST(5)	40ST
刚度系数/(kN·m ⁻¹)	45.68	62.92	71.05	86.03	110.69	403.02	592.21	972.73

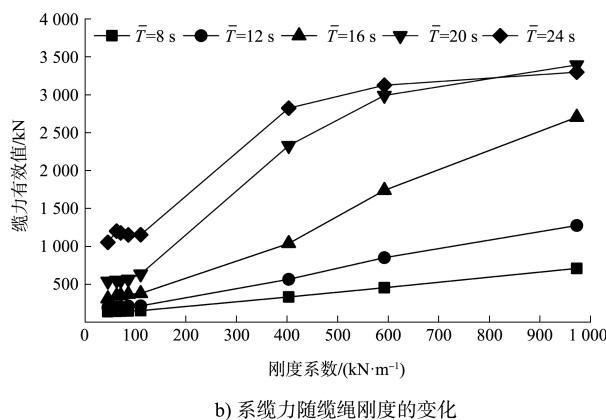
注: NL 表示尼龙缆, ST 表示钢缆, (5) 和 (11) 表示在钢缆基础上附加 5 m 和 11 m 尼龙尾缆。

系泊船横移量及系缆力随缆绳刚度系数的变化规律见图 8。可以看出, 横移随缆绳刚度系数增

大呈现下降趋势, 系缆力则随缆绳刚度增大整体呈现增大趋势。



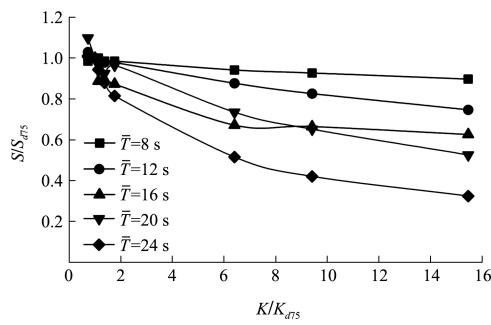
a) 横移随缆绳刚度的变化



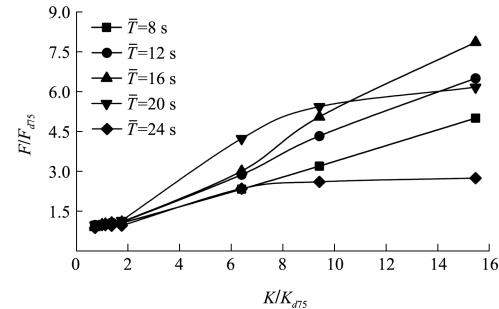
b) 系缆力随缆绳刚度的变化

图 8 系泊船横移值及系缆力变化曲线

进一步以本文物理模型试验中的 75 mm 尼龙缆结果为基本参量, 对不同周期波浪作用时不同缆绳条件下的横移量和系缆力进行无因次化。考虑横移为船舶在横浪作用下的主要运动量, 因此本文主要研究横移量及系缆力相对值与无量纲后刚度系数的关系, 结果见图 9。由图 9 可看出, 无因次横移随无量纲化缆绳刚度系数增大而减小, 而无因次系缆力随无量纲化缆绳刚度系数增大而增大, 但这种变化与波浪周期有关。



a) 横移相对值随缆绳刚度的变化



b) 系缆力相对值随缆绳刚度的变化

图 9 系泊船横移量及系缆力相对值

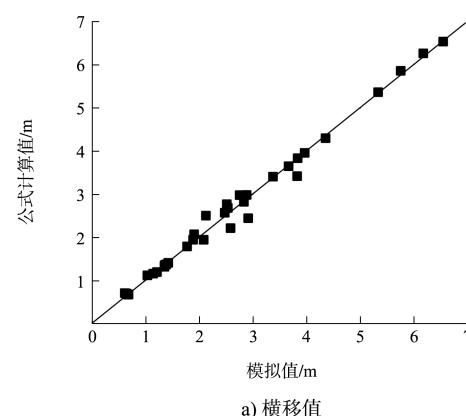
随缆绳刚度变化曲线

以无量纲化的波浪周期和缆绳刚度系数为自变量, 分别对横移量和系缆力进行公式拟合, 可得如下关系式:

$$S_{\text{横}} = \left(\frac{K}{K_{d75}} \right)^{0.201 - 0.339 \frac{T}{T_0}} S_{d75} \quad (3)$$

$$F = \left(\frac{K}{K_{d75}} \right)^{0.593 - 0.018 \frac{T}{T_0}} F_{d75} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{横}}$ 为横移运动量; F 为系缆力; K 为缆绳刚度系数; S_{d75} 、 F_{d75} 、 K_{d75} 分别为直径 75 mm 尼龙缆下的横移量、系缆力及刚度系数; T 为入射波浪平均周期; T_0 为船舶满载时的横摇固有周期。将公式计算值与数值试验模拟值进行对比(图 10), 二者基本一致, 相关系数分别为 0.988 和 0.940。需要说明的是, 考虑超过缆绳破断力后的结果与实际情况存在差异, 因此缆绳拉力拟合只采用小于缆绳破断力的模拟结果。



a) 横移值

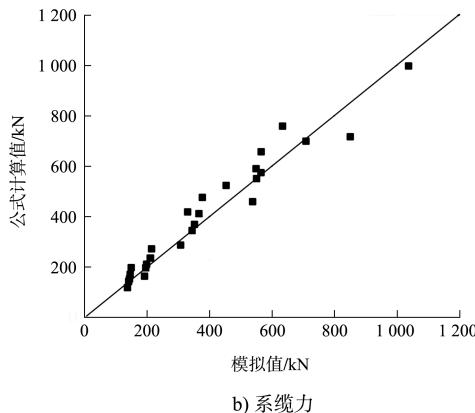


图 10 系泊船横移值及系缆力对比

5 结论

1) 增大缆绳直径和使用钢缆替换尼龙缆都可以降低系泊船舶的横移、纵移和回转运动量, 但改变缆绳材质的效果更加明显, 尤其在长周期波浪作用下, 改变缆绳直径及材质对系泊船的横摇、纵摇和升沉影响不大。

2) 增大缆绳直径和使用钢缆替换尼龙缆增大了缆绳刚度, 使系泊船系缆力增大。使用钢缆后系缆力会大幅增加, 与直径 75 mm 尼龙缆相比, 不同周期下最大可增大 6 倍左右。

3) 使用尼龙缆会导致系泊船运动量较大、系缆力相对较小; 而使用纯钢缆虽然可降低系泊船运动量, 但由于缆绳刚性太大, 系缆力过大易发生断缆事故。使用附加尼龙尾缆的钢缆不仅可以增加缆绳弹性、有效降低系缆力, 同时也可以有

(上接第 28 页)

参考文献:

- [1] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 胡勇, 雷丽萍, 杨进先. 跨海桥梁基础波浪(流)力计算问题探讨[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 101-105.
- [3] 房忱, 李永乐, 秦顺全, 等. 中、美、英规范关于跨海桥梁桩基波浪力的对比[J]. 桥梁建设, 2016, 46(6): 94-99.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [5] AASHTO. Standard specifications for highway bridges: LRFD SI—2007[S]. 4th ed. Washington DC: AASHTO, 2012.
- [6] Department of the Army Corps of Engineers. Coastal

效降低系泊船运动量。

4) 系泊船的横移运动量与缆绳刚度成反比, 刚度越大横移运动量越小; 系泊船系缆力与缆绳刚度成正比, 刚度越大系缆力越大。

参考文献:

- [1] 刘必劲. 开敞式码头系泊船舶运动量、系缆力和撞击能量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [2] 薛丁源, 邵昌浩, 杨婷. 长周期涌浪作用下码头船舶系缆稳定性研究[J]. 水运工程, 2017(3): 80-83.
- [3] 张鼎, 黄维, 俞贊. 大型集装箱船码头系泊及抗台风计算分析[J]. 船舶与海洋工程, 2014(2): 15-19.
- [4] 张志, 孔友南, 程培军. 长周期波浪影响下连片式码头系泊布置优化[J]. 水运工程, 2020(4): 47-52.
- [5] 周丰, 姜俊杰. 离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究[J]. 水运工程, 2011(11): 117-120.
- [6] DHI group. MIKE 21 maritime-frequency response and mooring analysis, scientific documentation [S]. Copenhagen: DHI group, 2019.
- [7] MADSEN P A, MURRAY R, SRENSEN O R. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics [J]. Coastal engineering, 1991, 15(4): 371-388.
- [8] BINGHAM H B. A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship[J]. Coastal engineering, 2000, 40(1): 21-38.

(本文编辑 武亚庆)

engineering manual [M]. Vicksburg: US Army Corps of Engineers, 2002.

- [7] BSI. Maritime Structures part 1: code of practice for general criteria: BS6349-1, 2000 [S]. London: BSI, 2000.
- [8] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力冲击压强试验研究[J]. 海洋工程, 2004(3): 30-40.
- [9] 周益人, 陈国平, 王登婷. 透空式水平板波浪上托力计算方法[J]. 海洋工程, 2004(2): 26-30.
- [10] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪总上托力试验研究[J]. 海洋工程, 2004(4): 43-50.
- [11] 荣传亚, 周益人. 高桩码头上部结构波浪水平力试验研究[J]. 水运工程, 2013(9): 55-59.

(本文编辑 武亚庆)