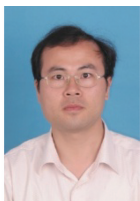


· 综合 ·



## 较长周期波浪作用下系泊船舶装卸作业 波浪标准的试验研究\*

王炜正<sup>1</sup>, 俞武华<sup>1</sup>, 柳淑学<sup>2</sup>, 李金宣<sup>2</sup>, 赵序<sup>1</sup>, 张昊宸<sup>2</sup>

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060;

2. 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:** 针对目前缺乏较长周期波浪作用下系泊船舶装卸作业波浪标准的问题, 进行系统的分析研究。采用物理模型试验方法, 针对一系列油船、LNG船和散货船船型, 考虑较大波浪周期范围, 开展水动力特性的模型试验, 分析船舶运动量随周期的变化规律, 并结合相应规范规定, 提出较长周期波浪作用下船舶作业允许波高随周期变化的折减系数。研究成果可为相关研究和设计提供科学支持。

**关键词:** 较长周期波浪; 系泊船; 运动量; 模型试验; 作业标准

中图分类号: U653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0016-07

### Experimental studies on wave standard for mooring ship operation under longer period wave action

WANG Weizheng<sup>1</sup>, YU Wuhua<sup>1</sup>, LIU Shuxue<sup>2</sup>, LI Jinxuan<sup>2</sup>, ZHAO Xu<sup>1</sup>, ZHANG Haochen<sup>2</sup>

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of operation standards of waves for the handling operations of moored ships under longer period wave action, a systematic analysis and research has been carried out. In this paper, physical model tests on the hydrodynamic characteristics are conducted for a series of oil tankers, LNG vessels and bulk carriers considering a large wave period range. The variations of ship motion with wave period are analyzed, and combined with relevant regulations, the reduction coefficients for the wave height of ship operation under longer period waves action with period variation are proposed. The research results can provide scientific support for relevant research and design.

**Keywords:** longer period wave; mooring ship; ship motion; modelling test; operation standard

较长周期波浪更易造成系泊船舶产生较大运动量, 目前对于其作用下船舶作业允许波高研究成果较少, 也缺乏相应的规范标准, 给港口工程设计及运营带来诸多困难, 成为亟待解决的问题。

目前, 关于长周期波浪对系泊船舶影响的研

究仅有少数学者开展了初步的探索。如杨宪章等<sup>[1]</sup>、刘宇等<sup>[2]</sup>、孟祥玮等<sup>[3]</sup>, 通过物理模型试验, 发现波浪周期、缆绳布置以及船舶运动共振对系泊的影响; 刘必劲<sup>[4]</sup>基于试验数据, 归纳出一套估算不规则波浪横向浪作用下系泊船舶横移、

收稿日期: 2024-04-08

\*基金项目: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司科技创新课题项目 (201301)

作者简介: 王炜正 (1975—), 男, 教授级高工, 从事水运工程勘察设计工作。

横摇、升沉 3 个运动量的公式;张志明等<sup>[5]</sup>针对刘必劲提出的估算公式,推导出一套适用范围更广的多参数系泊船舶 6 个运动分量估算公式。国外一些学者如 Bowers<sup>[6]</sup>、Smallman et al.<sup>[7]</sup>、Mei et al.<sup>[8]</sup>、Van der Molen et al.<sup>[9]</sup>对港内系泊船舶在长周期波浪作用下的运动响应进行了研究;Ligteringen et al.<sup>[10]</sup>提出用以估算系泊船舶在长周期波浪作用下横移、横摇、升沉 3 个运动量的近似公式。

但这些研究仍存在一定局限,还不够系统和完善。本文针对一系列油船、LNG(液化天然气,liquefied natural gas)船和散货船,考虑较大波浪周期范围,进行较长周期波浪对于船舶系泊影响的试验研究,得到了船舶运动量随波浪周期的变化规律,进一步提出在较长周期波作用下,作业允许波高随波浪周期变化的折减系数。不仅为实际工程设计提供了重要的参考依据,也有助于提升船舶在复杂海洋环境中的安全性和

作业效率。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设备

试验在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,该水池有效使用范围为 55.0 m×34.0 m,最大水深为 0.7 m。水池一侧装有多向不规则波造波机。试验采用微机对造波机进行精确控制,并实时采集和分析试验数据。在水池中心线距离造波机 16 m 处布置相关试验装置。

### 1.2 船型与系缆条件

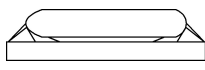
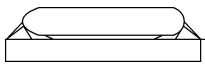
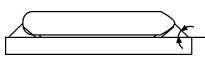
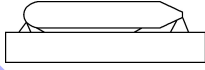
分别采用 4 种吨位的油船、4 种吨位的散货船和 3 种舱容的 LNG 船进行试验,涵盖多种船型。码头均采用高桩结构,缆绳都采用直径 75 mm 的尼龙缆绳,泊位布置、护舷形式、系缆布置见表 1。试验船舶均考虑满载和压载 2 种不同情况。

表 1 试验船型尺度、系泊方式和试验比尺

Tab. 1 Ship dimensions, mooring methods and test scales

船型	船舶吨级	护舷型式	靠泊、缆绳布置方式	系泊示意	试验比尺
油船	30 万吨级	SC3000H 标准反力型	四点靠泊 (4 根首缆,2 根第一横缆, 2 根第二横缆,2 根倒缆)		1:60
	15 万吨级	SC2500H 标准反力型	四点靠泊 (3 根首缆,2 根第一横缆, 1 根第二横缆,2 根倒缆)		1:60
	5 万吨级	SC1450H 标准反力型	四点靠泊 (2 根首缆,2 根横缆, 2 根倒缆)		1:60
	1 万吨级	SC1250H 标准反力型	@ 8 000 mm (2 根首缆,1 根横缆, 2 根倒缆)		1:38
LNG 船	26.6 万 m <sup>3</sup>	SC2250H 低反力型	四点靠泊 (3 根首缆,3 根第一横缆, 2 根第二横缆,2 根倒缆)		1:60
	17.7 万 m <sup>3</sup>	SCK2500H 标准反力型	四点靠泊 (3 根首缆,2 根第一横缆, 2 根第二横缆,2 根倒缆)		1:60
	8 万 m <sup>3</sup>	SC2250H 低反力型	四点靠泊 (3 根首缆,2 根横缆, 2 根倒缆)		1:60

续表1

船型	船舶吨级	护舷型式	靠泊、缆绳布置方式	系泊示意	试验比尺
散货船	30 万吨级	SC2500H 标准反力型	@ 16 000 mm (4 根首缆,2 根横缆, 2 根倒缆)		1:60
	15 万吨级	SC2250H 标准反力型	@ 16 000 mm (3 根首缆,2 根横缆, 2 根倒缆)		1:60
	5 万吨级	SC1450H 标准反力型	@ 16 000 mm (2 根首缆,2 根横缆, 2 根倒缆)		1:38
	1 万吨级	SC1150H 标准反力型	@ 8 000 mm (1 根首缆,1 根横缆, 2 根倒缆)		1:38

1.3 水位和试验波浪条件

试验采用 2 个水位, 即 2.5 m(设计高水位)和 0.0 m(设计低水位)。

试验采用不规则波浪, 频谱采用 JONSWAP 谱, 谱峰升高因子取 3.3。选取波浪平均周期为 6.0~30.0 s 的变化范围。试验中考虑横浪和顺浪 2 种方向波浪作用情况。试验波浪条件见表 2。

表 2 船舶模型试验波浪参数

Tab.2 Wave parameters for ship model tests

T/s	$H_{4\%}/m$
6	0.5、0.8、1.0、1.2、1.4
8	0.5、0.8、1.0、1.2、1.4、1.8、2.0、2.2
10	0.5、0.8、1.0、1.2、1.4、1.8、2.0、2.2
12	0.5、0.8、1.0、1.2、1.4、1.8、2.0、2.2
16	0.5、0.6、0.8、1.2、1.6、2.0
20	0.5、0.6、0.8、1.2、1.6、2.0
24	0.5、0.6、0.8、1.2、1.6
28	0.5、0.6、0.8、1.2、1.6
30	0.5、0.6、0.8、1.2、1.6

1.4 试验设计

模型试验采用重力式相似准则模拟, 根据设备的能力及仪器的测试范围, 确定各试验船舶模型试验的比尺如表 1 所示。

船舶模型与原型之间除了保持几何相似、重力相似, 也满足重心、惯量和横摇(纵摇)周期等动力相似。

系泊缆绳同时满足长度几何相似、重力相似

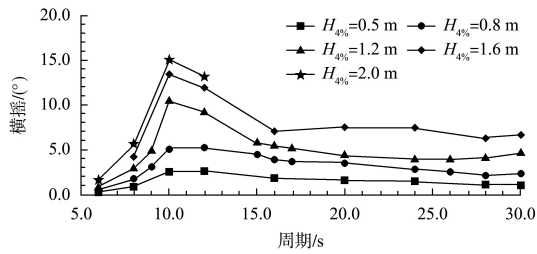
以及弹性相似。护舷满足原型和模型的受力-变形和能量-变形曲线相似。

2 试验结果分析

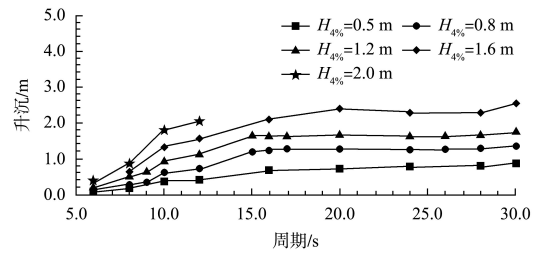
试验测量系泊船舶横移、纵移、升沉、横摇、纵摇和回转 6 个运动量以及缆绳拉力等参数。根据相关规范的规定, 选取单方向幅度值的最大值作为横移指标, 而采用 2 个方向最大幅度值之和作为其他运动量指标。

2.1 波浪周期对船舶运动量的影响

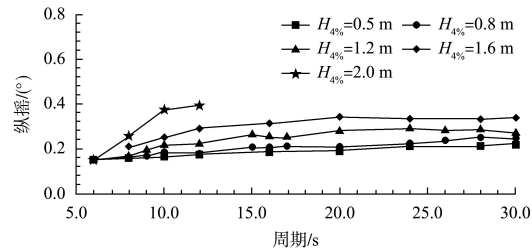
从试验结果可以看出, 不同船舶的运动量受波浪周期的影响规律基本相同。图 1 为横浪作用时 26.6 万 m<sup>3</sup>LNG 船各运动量随波浪周期的变化。横浪作用时, 随着波浪周期的逐渐增大, 船舶的运动量普遍呈增大趋势, 而当波浪周期增大到一定程度后, 增长幅度明显放缓。不同的是, 横摇运动量先增大, 当波浪周期接近船舶横摇周期时, 达到一个峰值, 然后开始减小, 存在明显共振现象。图 2 为在顺浪作用下船舶的运动响应, 各运动量随波高和周期的增大而显著增大, 但对于不同的运动量, 增大的趋势有所差异。与横浪作用下的试验结果比较, 相同波浪顺浪作用时的船舶各运动量, 除纵移和纵摇运动量较大外, 其他运动量均明显小于横浪作用时的船舶各运动量。



a) 横摇

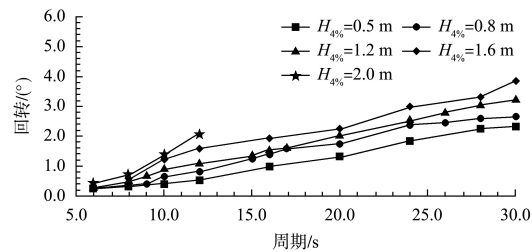


f) 升沉

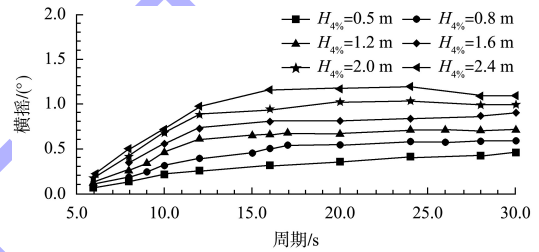


b) 纵摇

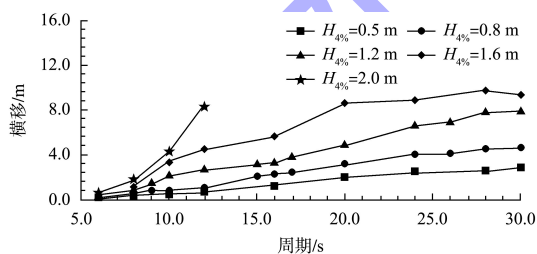
图 1 横浪作用时, 船舶各运动量最大值随周期的变化  
(26.6 万 m<sup>3</sup> LNG 船满载)  
Fig. 1 Variation of maximum values of ship motions with periods under action of transverse waves  
(266, 000 m<sup>3</sup> LNG ship at full load)



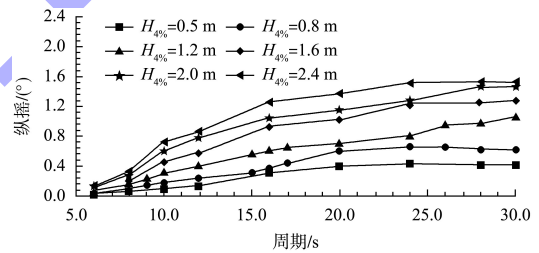
c) 回转



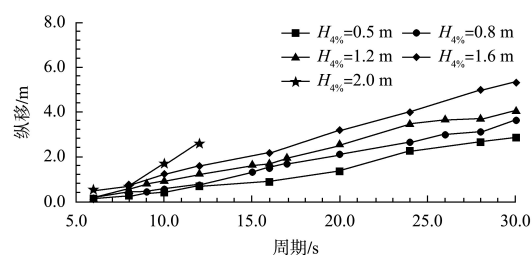
a) 横摇



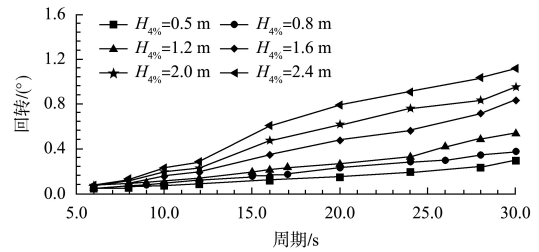
d) 横移



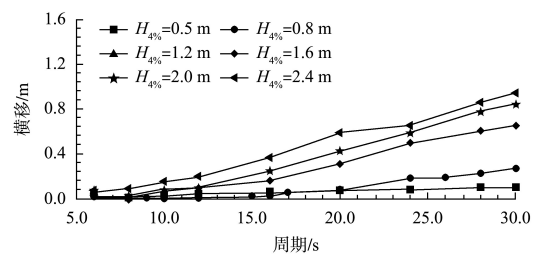
b) 纵摇



e) 纵移



c) 回转



d) 横移

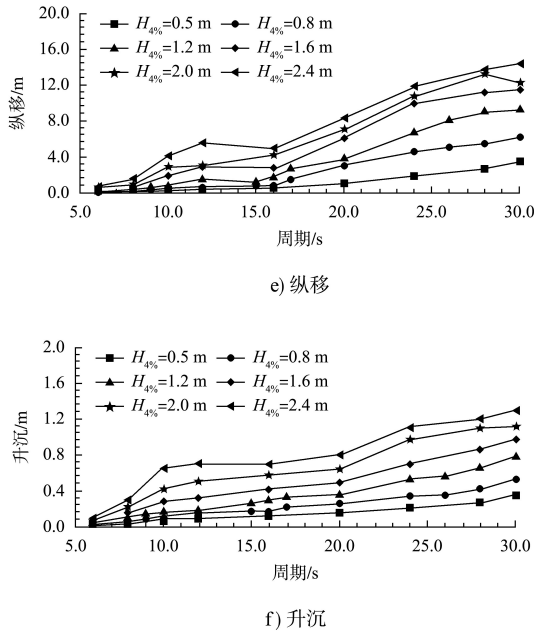


图2 顺浪作用时, 船舶各运动量最大值随周期的变化 (26.6万m<sup>3</sup>LNG船满载)

Fig. 2 Variation of maximum values of ship motions with periods under action of longitudinal waves (266,000 m<sup>3</sup> LNG ship at full load)

2.2 较长周期波浪作用下不同船舶作业波高的折减系数

2.2.1 船舶运动量计算公式的拟合

试验结果表明, 系泊船舶的运动量受到波浪的波高、周期、水深、设计水位、船舶的固有周期与载量(即船舶的吃水深度)等影响。以往大部分的经验公式认为船舶运动量与周期呈幂指数关系, 且幂指数为常数。当波浪周期范围较大时, 这种简单的数学关系并不能精确反映船舶共振现象引起的运动量变化趋势, 因此, 本研究拟合运动量公式时, 引入与周期呈非线性关系的波长参数。

在较长周期波浪作用下, 综合各种船舶的运动特性, 确定纵摇、横摇和回转采用公式:

$$\varphi = C_M \left(\frac{T}{T_N}\right)^a \left(\frac{H}{D_0}\right)^b \left(\frac{\lambda}{N}\right)^c \left(\frac{H}{\lambda}\right)^d \quad (1)$$

横移、纵移和升沉采用公式:

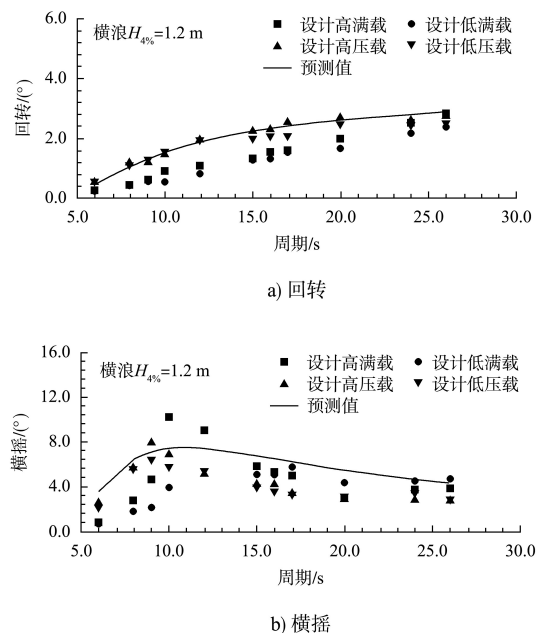
$$S = C_M \left(\frac{T}{T_N}\right)^a \left(\frac{H}{D_0}\right)^b \left(\frac{\lambda}{N}\right)^c H \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  和  $S$  分别为船舶转动和平动的运动量;  $C_M$  和  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为待定的系数和指数;  $T$  为波浪的平均周期,  $T_N$  为船舶的固有周期, 除纵摇和纵

移固有周期选用纵摇固有周期( $T_1$ )外, 其余运动均选用横摇固有周期( $T_0$ );  $H$  为对应累积概率4%特征波高;  $\lambda$  为波长;  $D_0$  为船舶吃水;  $N$  为船舶尺度, 在横浪情况下, 取船舶宽度  $B$ , 即  $N=B$ , 在顺浪情况下, 取船舶柱间长度  $L$ , 即  $N=L$ 。另外考虑载量对于船舶运动的影响, 横浪作用情况下, 选用压载的固有周期  $T_N$  和吃水  $D_0$ ; 顺浪作用情况下, 选用满载的固有周期  $T_N$  和吃水  $D_0$ 。波长按照设计高水位计算。

基于不同工况的试验结果, 采用各工况的包络值, 即相同波浪作用下, 不同水位、不同载量时所测各运动量结果的最大值进行拟合分析, 得到各船舶6个运动量所对应的计算公式。图3为横浪作用下, 拟合所得公式计算值(预测值)与试验结果的对比, 可以看出, 拟合公式准确地计算了各工况船舶运动量的包络值, 能够有效地反映试验结果的变化规律。

特别注意的是拟合所得各船舶运动量在波浪作用时, 其计算公式均基于表1所列特定系泊方式下得到, 如果改变系泊方式, 所得公式中的各参数将发生一定变化, 具体结果可参考文献[11]。但这些公式反映了在试验系泊条件下, 各船舶运动量随周期的变化规律及相对关系, 可用于研究较长周期波浪作用下, 不同船舶作业波高随周期的折减情况。





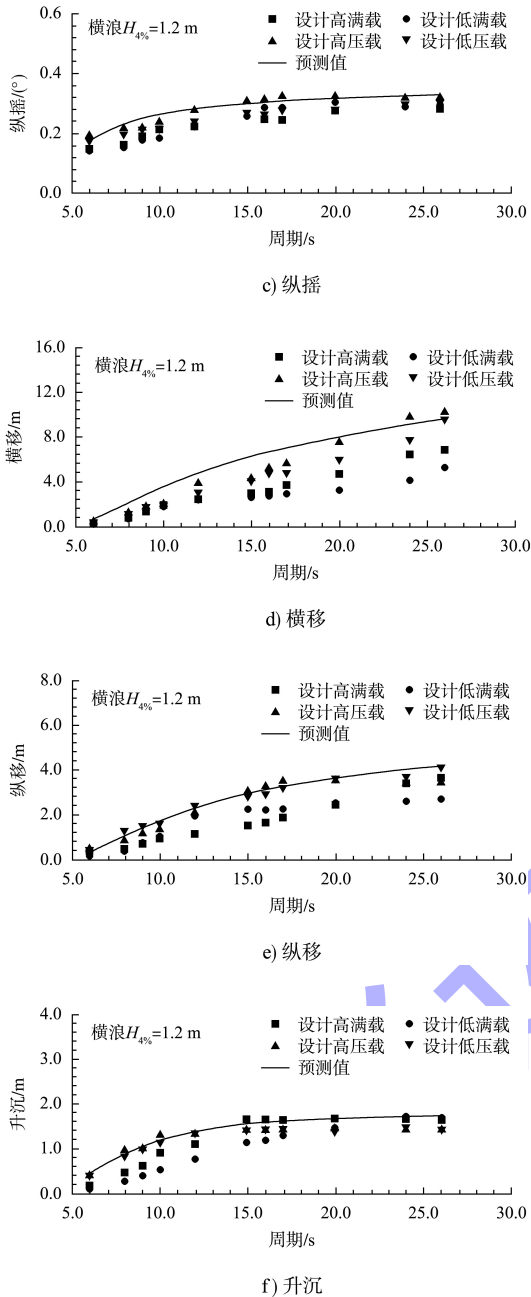


图 3 横浪作用下, 各运动量包络值拟合公式计算值与试验结果比较 (26.6 万 m<sup>3</sup> LNG 船)

Fig. 3 Comparison between calculated values from fitted equations for motion enveloping values and experimental results under transverse waves (266, 000 m<sup>3</sup> LNG ship)

2.2.2 船舶作业允许波高的折减系数

我国 JTS 165—2013《海港总体设计规范》<sup>[12]</sup> 规定了船舶装卸作业允许运动量和允许波高。对于油船和散货船, 船舶 5 万吨级以下允许波高适用的周期 ≤ 6 s, 大于 5 万吨级适用的周期 ≤ 8 s。而

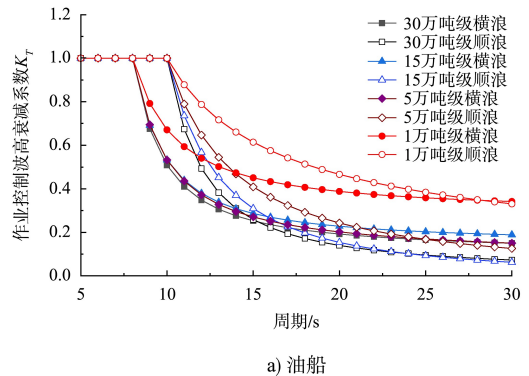
对于 LNG 船, 船舶舱容小于 4 万 m<sup>3</sup> 允许波高适用的周期 ≤ 6 s, 4 万 m<sup>3</sup> 适用的周期 ≤ 7 s。而对于较长周期波浪作用时的允许波高规范没有具体规定。

考虑到不同系泊条件下, 各种船舶的运动特性随周期的变化规律一致, 为将上述成果应用于实际工程设计, 相对于较短周期(目前规范规定的周期范围)时的作业波高, 进一步对较长周期波浪作用时作业波高的折减系数进行分析。

基于上述船舶运动量随周期变化的计算公式, 可以得到不同周期对应的允许作业波高  $H_{4\%}(T)$ , 将该波高与规范作业标准中周期上限对应的允许作业波高  $H_{C4\%}$  的比值定义为作业允许波高折减系数  $K_T$ , 即

$$H_{4\%}(T) = K_T H_{C4\%} \quad (3)$$

对于油船和散货船,  $K_T$  定义为较长周期波浪作用时的允许波高与周期  $T = 8$  s 时的作业允许波高的比值; 对于 LNG 船,  $K_T$  定义为较长周期波浪作用时的允许波高与周期  $T = 7$  s 时的作业允许波高的比值。周期  $T \leq 8$  s (油船和散货船) 或  $\leq 7$  s (LNG 船) 时的  $K_T$  取为 1.0。图 4 为 3 种船型的作业允许波高的折减系数  $K_T$  随周期的变化, 可以看出, 在较小周期情况下, 顺浪作用时的折减系数大于横浪作用时的折减系数; 而随着周期的增大, 顺浪作用时的折减系数减小较快, 小于横浪作用时的折减系数。同时, 船舶吨位越小, 折减系数越大。为方便参考应用, 不同船舶横浪和顺浪作用时的折减系数见表 3。



a) 油船

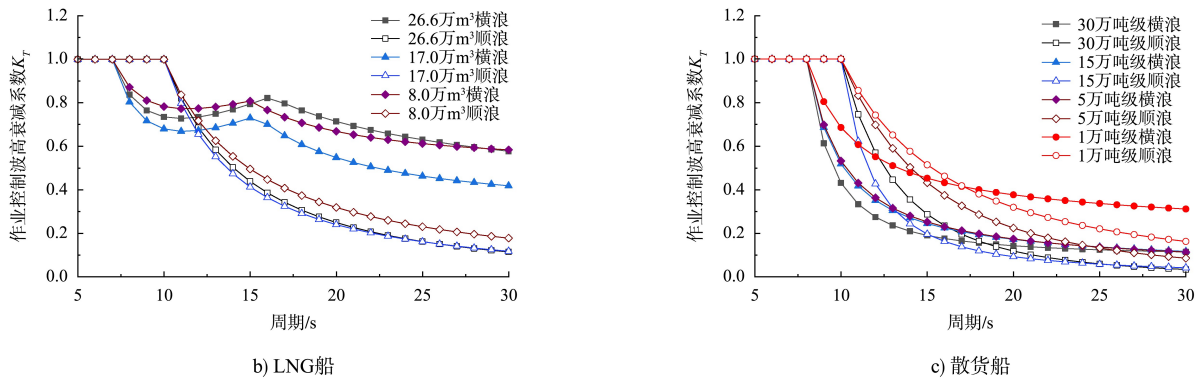


图 4 各种不同吨位船型, 基于运动量控制的作业标准波高折减系数随周期的变化

Fig. 4 Variation of reduction coefficients for limiting operational wave heights with wave period of different vessels

表 3 不同船舶不同周期对应的作业标准波高折减系数

Tab. 3 Reduction coefficients of limiting operational wave heights for different ships with different periods

周期/s	油船		LNG 船	散货船	
	30 万、15 万、5 万吨级	1 万吨级	26.6 万、17 万、8 万 m <sup>3</sup>	30 万、15 万、5 万吨级	1 万吨级
横浪作用	8	1.000	1.000	1.000	1.000
	10	0.524	0.671	0.764	0.494
	12	0.367	0.540	0.723	0.330
	14	0.293	0.473	0.739	0.253
	16	0.252	0.433	0.778	0.210
	18	0.226	0.407	0.727	0.182
	20	0.207	0.388	0.666	0.163
	22	0.194	0.374	0.624	0.149
	26	0.175	0.355	0.568	0.129
	30	0.163	0.342	0.533	0.115
顺浪作用	10	1.000	1.000	1.000	1.000
	12	0.569	0.787	0.686	0.565
	14	0.383	0.661	0.510	0.367
	16	0.282	0.575	0.399	0.257
	18	0.220	0.514	0.323	0.190
	20	0.179	0.466	0.269	0.145
	22	0.150	0.429	0.228	0.114
	26	0.111	0.372	0.172	0.076
	30	0.087	0.331	0.136	0.054

### 3 结论

1) 周期对于不同船舶的运动量影响规律基本一致。随着波浪周期的增大, 船舶的横移、纵移、升沉、纵摇和回转运动量均呈单调增大的趋势。当波浪周期继续增大时, 船舶运动量的增大幅度趋缓。横摇在横浪作用下比较特殊, 呈先增大后减小的规律, 主要由于船舶横摇共振增大了横摇的幅度, 但该现象在顺浪作用时

表现不明显。

2) 基于试验结果, 得到各船舶在试验系泊条件下各运动量的经验计算公式, 揭示了运动量随周期的变化规律。

3) 结合规范中船舶作业运动量标准和允许作业波高和周期的规定, 提出各船型在较长周期波浪作用下允许作业波高的折减系数, 可为实际工程设计提供参考。