

# 波浪入射角度和周期对系泊船舶运动影响的数值模拟研究

袁治巍, 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:** 基于 MIKE 21 Mooring Analysis 系泊分析软件, 模拟研究在不同周期和入射角度的不规则波作用下系泊船舶运动的变化规律。结果表明, 系泊船舶运动量随波浪入射角度和波浪周期的变化相互影响。在不同周期波浪作用下的系泊船横移、横摇和升沉运动量均随波浪入射角度的增大而增大, 横摇运动的共振效果随着波浪入射角度远离  $90^\circ$  方向逐渐减弱, 升沉运动量在波浪入射角度靠近  $90^\circ$  或  $0^\circ$  方向时基本不变。当入射波浪周期较长时, 纵移和回转运动量随着波浪入射角度的增大先增大后减小, 一般在波浪  $60^\circ$  入射时产生峰值。

**关键词:** 系泊船舶; 运动量; 入射角度; 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)01-0013-06

## Numerical simulation for motion of moored ship under influence of wave incidence angle and period

YUAN Zhi-wei, 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:** Based on MIKE 21 Mooring Analysis software, we study the motion of moored ships subjected to irregular waves with different periods and incident angles. The results show that the variations of motion of the moored ship interact with each other for different wave incident angles and periods. Sway, roll and heave motions of the moored ship increase with the increase of the wave incident angle, and the effect of the roll resonance decreases with the wave incident angle away from the direction of  $90^\circ$ , the heave motion change little when the wave incident angle is close to the direction of  $90^\circ$  or  $0^\circ$ . When the incident wave period is long, the surge motion and yaw motion first increase and then decrease with the increase of the wave incident angle, and generally have a peak value when the wave incident angle is  $60^\circ$ .

**Keywords:** moored ship; ship motion; incident angle; numerical simulation

近些年来, 随着近岸深水岸线的减少以及船舶大型化的发展, 港口建设向外海深水区延伸<sup>[1]</sup>, 大型的开敞式码头建设比例逐步增加。开敞式码头离岸较远、水深偏大、无防波堤掩护, 所在水域存在较为复杂的波浪场, 影响船舶作业。因此, 现阶段在研究开敞式码头前系泊船舶泊稳问题时,

要考虑周期较长波浪、波浪的入射方向与波浪谱的特性等方面的影响。

系泊船的运动量是衡量泊稳的重要指标, 而系泊船的运动响应问题是复杂耦合系统的动力响应问题<sup>[2]</sup>。近些年来, 众多学者对波浪作用下系泊船的运动特性展开深入研究, 沈雨生等<sup>[3]</sup>通过

收稿日期: 2021-03-08

作者简介: 袁治巍(1996—), 男, 硕士研究生, 从事波浪对工程建筑物作用的研究。

通讯作者: 柳淑学(1965—), 男, 博士, 研究员, 从事随机波浪理论及其与建筑物作用的研究。E-mail: liusx@dlut.edu.cn

研究揭示了横摇运动量随着波浪谱峰周期的增大先增大后减小、在波浪谱峰周期接近船舶横摇固有周期时产生峰值的规律；史宪莹等<sup>[4]</sup>的研究表明，当混合浪的能量一定时，低频波浪成分能量越大，系泊船的运动量一般也越大；马小剑等<sup>[5]</sup>的数值计算结果表明，系泊船横移运动量呈现随波浪群高的增大而增大的趋势。迄今为止，在研究波浪作用下的系泊船运动响应问题已有较多成果，但是这些研究大多考虑横浪作用，而实际工程中开敞式码头水域的波浪周期范围较大，且波浪的方向分布较广，须进一步研究不同周期与入射角度的不规则波浪的作用对船舶运动量的影响。目前，各机构开发的如 OPTIMOOR、MOSES、Ship-mooring 等系泊分析软件得到了广泛的应用，在工程计算中能取得较为可靠的结果<sup>[6-8]</sup>。

本文基于 MIKE 21 Mooring Analysis 软件，建立一艘 30 万 t 油船的系泊数值模型，研究不同周期和入射角度波浪作用下系泊船舶的运动特性。

1 计算方法

MIKE 21 Mooring Analysis 是一款动力系泊分析软件，可计算港口内复杂海洋环境下系泊船舶的运动问题<sup>[9]</sup>。软件基于势流理论，采用间接时

域法，通过边界元方法计算频域下系泊船水动力系数，再通过傅里叶变换方法将频域参数转换到时域中，求解船舶运动方程。此外，考虑浅水中波浪的非线性影响，采用改进的 Boussinesq 理论计算入射波浪的波浪场<sup>[10]</sup>：

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

式中： $\mathbf{M}_{ij}$ 为惯性恢复力矩阵； $\mathbf{C}_{ij}$ 为静水恢复力矩阵； $\mathbf{K}_{ij}$ 为迟滞函数矩阵； $t$ 为时间； $\tau$ 为迟滞时间； $\mathbf{m}_{ij}$ 为船体附加水体质量矩阵； $\mathbf{F}_{ej}$ 为缆绳护舷等引起的作用力矩阵； $\mathbf{F}_{wj}$ 为波浪激振力矩阵，采用 Bingham 方法计算<sup>[11]</sup>； $\mathbf{x}_j$ 为笛卡尔坐标系下浮体六自由度运动矩阵。

2 数值模拟船舶模型条件

本文考虑 30 万吨级油码头，如图 1 所示。平面布置形式为开敞式蝶形布置，码头及系缆墩结构形式为桩基结构。泊位长度 394 m，码头面、靠船墩及系缆墩顶高程 6.5 m，设计高水位为 2.5 m，码头前沿底高程为 -23.7 m。30 万 t 油船主要参数为：总长 334 m，型宽 60 m，型深 31.2 m，满载吃水 22.5 m，重心高 20.6 m，排水量 34.565 5 万 t，横摇周期 17.87 s，纵摇周期 13.62 s。

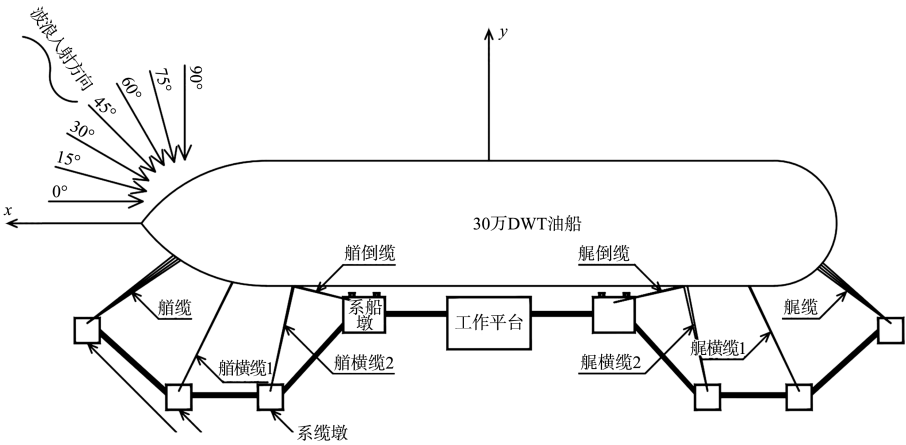


图 1 码头平面布置及系缆方式

船舶系泊缆绳的布置采用 4:2:2:2(船/艏缆:横缆 1:横缆 2:倒缆)方式，共计 20 根。缆绳采用直径 75 mm 尼龙绳，初张力为 100 kN。缆绳受力和

变形关系按 Wilson 公式计算：

$$T = C_e d^2 (\Delta s/s)^n \tag{2}$$

式中： $T$ 为模型缆绳的拉力； $C_e$ 为尼龙缆绳弹性

系数，取 15.4 GPa； $d$  为缆绳直径； $n$  为系数，对于尼龙缆取 3.0； $s$  为缆绳长度； $\Delta s$  为缆绳伸长度。

护舷采用 SC3000H 标准反力型一鼓一板橡胶护舷，四点靠泊。设计压缩相对变形 47.5% 时，最大吸能量为 5 100 kJ，设计反力为 4.4 MN。

3 数值模型的建立与验证

3.1 模型的建立

采用数值方法研究不同周期和入射方向波浪作用下系泊船舶的运动响应，首先通过物理模型试验验证数值模型的有效性。物理模型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1:60。缆绳和护舷的受力-变形模拟结果见图 2。

表 1，波浪平均周期 $\bar{T}$ 的范围为 6~30 s，波浪入射角度  $\theta$  为 90°(横浪)方向。取物理模型和数值模型试验的系泊船舶运动量的最大值进行比较。

表 1 数值模型验证试验的波浪参数		
$H_{1/10}/\text{m}$	$\bar{T}/\text{s}$	$\theta/(\text{°})$
1.2	6、8、10、12、16、20、24、28、30	90

不同周期波浪作用下物模和数模系泊船舶运动量对比见图 3。可以看出，物理模型试验和数值模拟的运动量模拟值是一致的，系泊船运动量的物理模型试验结果和数值模拟结果随周期变化的趋势基本一致。只有纵摇量值二者有一定的差别，但是纵摇运动量的值本身比较小，其绝对差别并不大。因此可以说明所建立的数值模型可以良好地反映出系泊船舶的运动情况，可以利用该模型进行不同周期和入射方向波浪作用时的系泊船运动的计算。

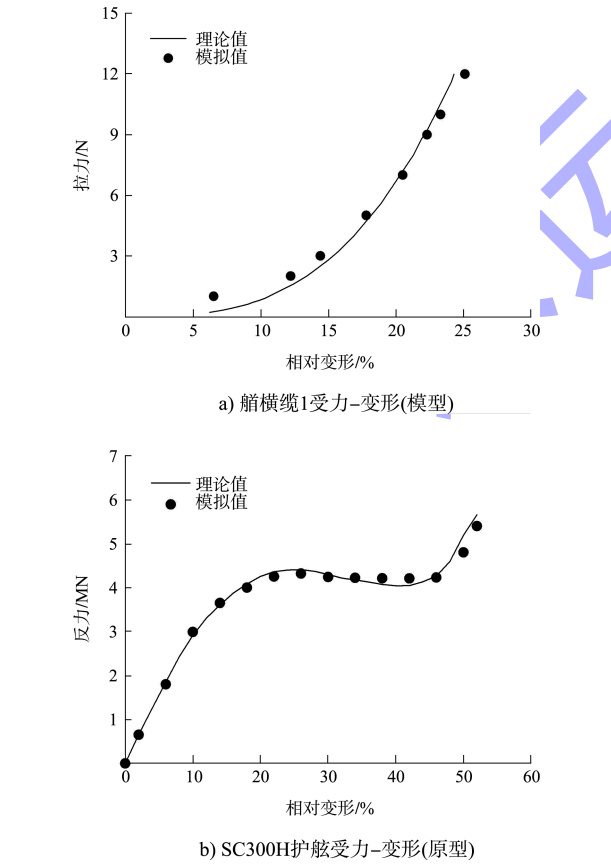
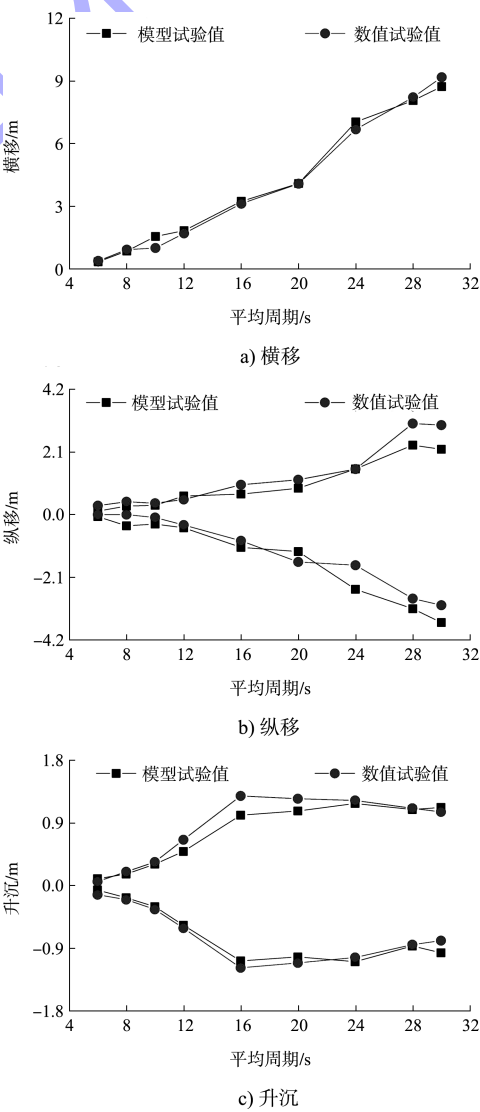


图 2 缆绳和护舷模拟曲线对比

3.2 模型验证

按图 1 的系泊布置建立数值计算模型。考虑船舶满载条件，采用 JONSWAP 谱进行横向不规则波的模拟，谱峰升高因子取为 3.3。波浪参数见



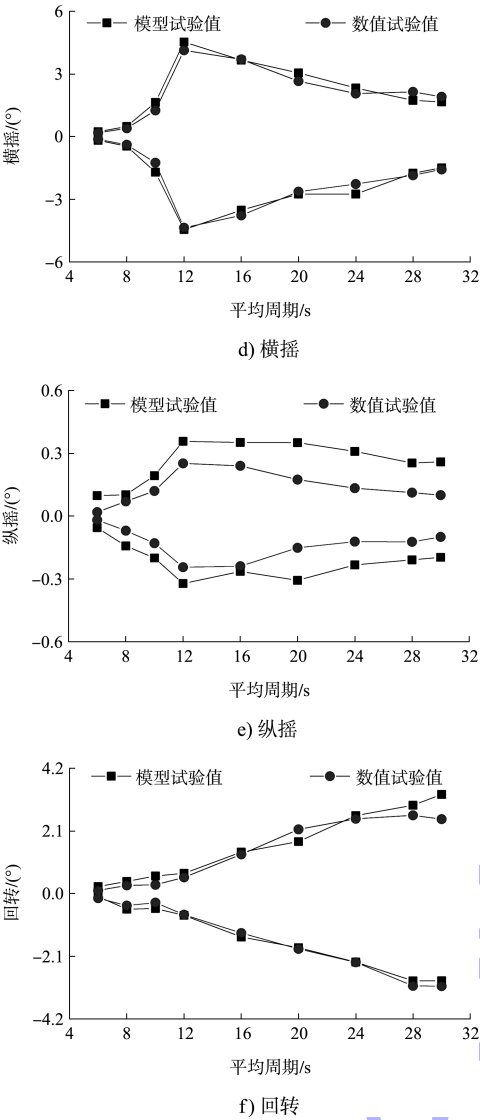


图 3 不同周期波浪作用下物理模型和数值模拟系泊船舶运动量对比

4 不同入射方向和周期波浪对系泊船运动影响数值模拟分析

研究波浪的周期与入射角度对 30 万 t 系泊油船 6 个方向运动量的影响。数值模拟试验的具体波浪参数见表 2，其中  $T_p$  为波浪的谱峰周期，频谱仍采用 JONSWAP 谱； $\theta$  为波浪的入射角，具体参见图 1。需要指出，定义波浪入射角度与船舶纵轴线方向平行时为  $0^\circ$ （顺浪），垂直时为  $90^\circ$ （横浪）。为了更好地反映系泊船运动量规律，本文取各运动量峰值的 1/3 大值进行分析。

表 2 试验的波浪参数

$H_{1/3}/\text{m}$	$T_p/\text{s}$	$\theta/(\circ)$
1.0	6、8、10、12、15、18、20、22、25	0、15、30、45、60、75、90

不同周期和入射角度波浪作用下系泊船横移运动量的变化曲线见图 4。由图 4a) 可看出，不同周期波浪作用下的系泊船横移运动量随着波浪入射角度的增大而增大，横浪作用下的横移运动量最大，在顺浪作用下横移运动量基本为 0 m。由图 4b) 可看出，横移运动量随着波浪谱峰周期的增大而增大，在波浪周期大于 18 s 时， $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  这 3 个波浪入射方向的横移运动量相差不大； $0^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $30^\circ$  这 3 个波浪入射方向的横移运动量随周期增大时差别明显。

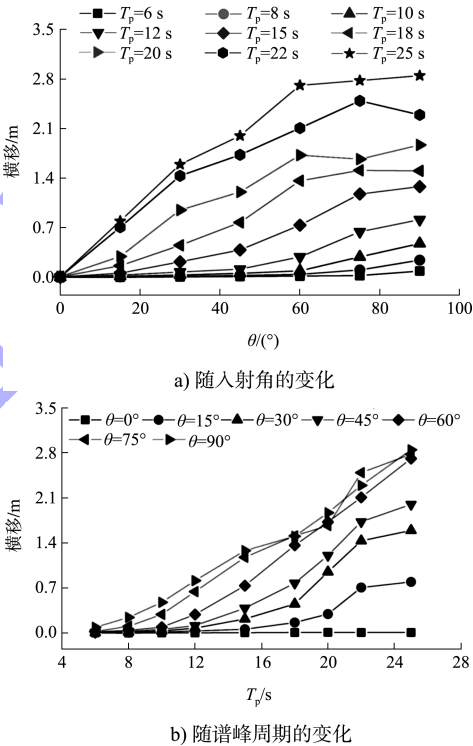
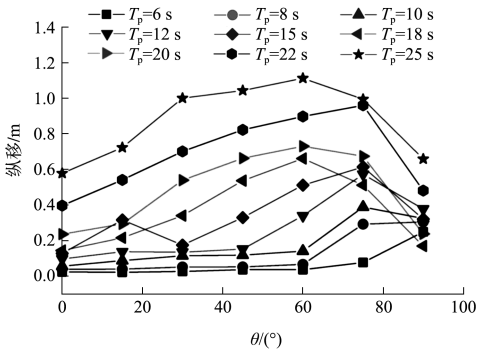


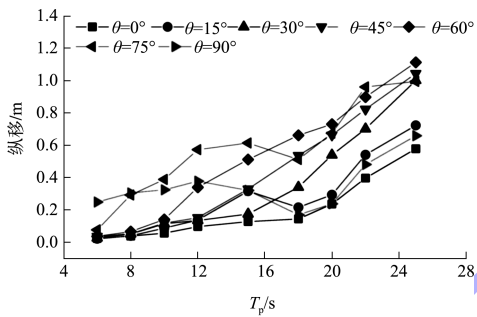
图 4 不同周期与入射角度波浪作用下系泊船横移运动量的变化

不同周期与入射角度波浪作用下系泊船纵移运动量的变化曲线见图 5。由图 5a) 可看出，在不同周期波浪作用下纵移运动量大体上随着波浪入射角的增大而先增大后减小，各周期下纵移运动量在波浪入射角度  $60^\circ$  或  $75^\circ$  时出现峰值，这是因为波浪的入射角度接近横浪时，纵移运动的响应相对减弱，且波浪入射角度接近顺浪时，波浪与船舶的作用面积相对减小，从而导致船舶整体的运动响应减弱。由图 5b) 可看出，纵移运动量基本上随波浪谱峰周期的增大而增大，但波浪入射角度接近横浪方向时，在船舶横摇周期附近纵移运动量突然减小，表现出随周期增大先减小再增

大的现象,这是因为系泊船舶 6 个方向运动量相互影响,发生横摇共振时,船舶横摇运动增强,占主导作用,其他水平方向运动量略有减小。



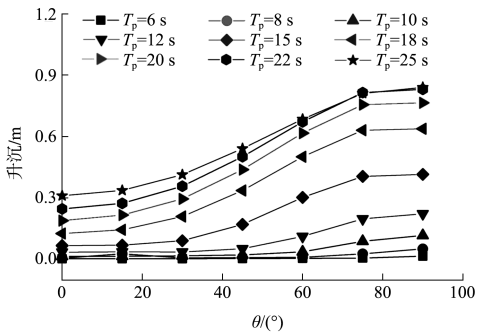
a) 随入射角的变化



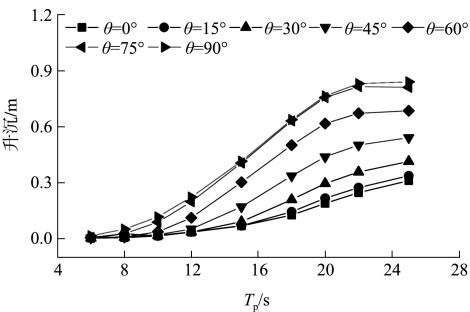
b) 随谱峰周期的变化

图 5 不同周期与入射角度波浪作用下系泊船纵移运动量变化曲线

不同周期与入射角度波浪作用下系泊船升沉运动量的变化曲线见图 6。可以看出,船舶的升沉运动量随着波浪周期和入射角度的增大而增大。波浪周期较小时,升沉运动量随波浪入射角增大时变化的量值较小;波浪周期较大时,升沉运动量在不同入射角度波浪作用下的区分更为明显,当波浪入射方向靠近横浪或顺浪方向附近时,升沉运动量的值基本不变。



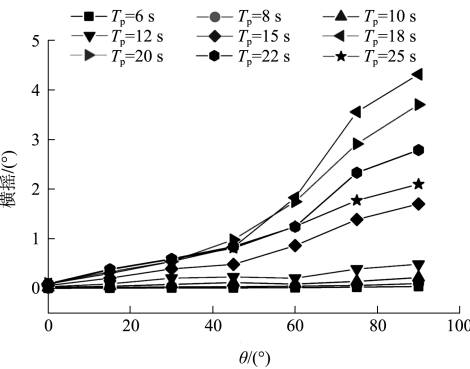
a) 随入射角的变化



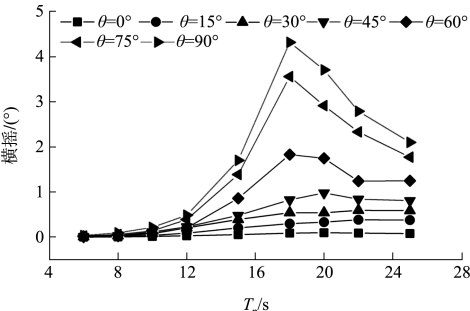
b) 随谱峰周期的变化

图 6 不同周期与入射角度波浪作用下系泊船升沉运动量变化曲线

不同周期与入射角度波浪作用下系泊船横摇运动量的变化曲线见图 7。由图 7a)可知,横摇运动量基本随着波浪入射角的增大而增大,入射方向越接近横浪增大幅度越大。由图 7b)可看出,波浪入射角度接近横浪时横摇运动量随着周期的增大先增大而后减小,当波浪的谱峰周期和船舶的横摇固有周期( $T_0=17.87\text{ s}$ )接近时,在波浪的作用下横摇运动发生共振,且在横浪方向达到峰值。而在波浪入射角度由横浪变化到顺浪时,共振的效果不断减弱。出现这种情况的原因是波浪为横浪时,波浪直接对横摇运动产生影响,当波浪入射角度偏离横浪时,对横摇运动产生影响的波浪分量就会减少。



a) 随入射角的变化



b) 随谱峰周期的变化

图 7 不同周期与入射角度波浪作用下系泊船横摇运动量变化曲线

不同周期与入射角度波浪作用下系泊船纵摇运动量的变化曲线见图 8。可以看出,纵移运动量的量值相对较小。纵摇运动量随波浪入射角的增大表现出先增大后减小的规律,且由图 8a)可知,随着周期的增大,纵摇运动量在不同入射角度波浪作用下的最大值将从横浪方向变化到顺浪方向。在图 8b)中,波浪的入射角度  $\theta \leq 45^\circ$  时,系泊船舶的纵摇运动量随波浪周期的增大而增大;波浪的入射角度  $\theta > 45^\circ$ ,且波浪谱峰周期  $T_p \geq 18$  s 时,系泊船的纵摇运动量基本不发生变化。

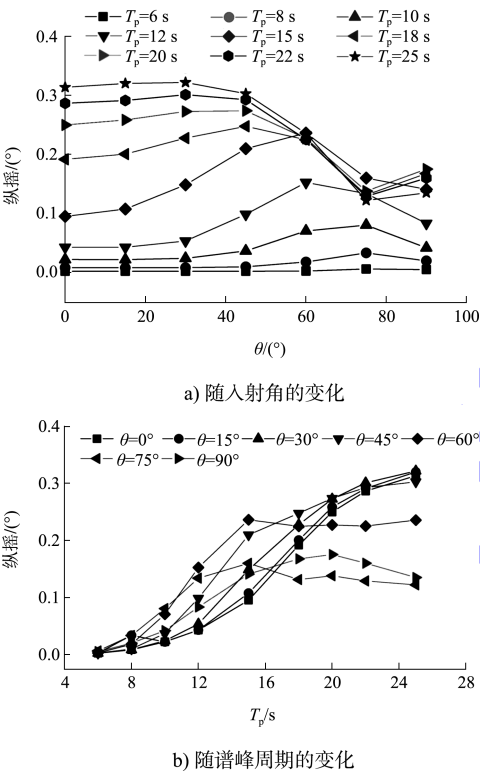


图 8 不同周期与入射角度波浪作用下系泊船纵摇运动量变化曲线

不同周期与入射角度波浪作用下系泊船回转运动量的变化曲线见图 9。由图 9a)可看出,当波浪周期  $T_p < 18$  s 时,回转运动量随着波浪入射角的增大而增大。当  $T_p \geq 18$  s 时,回转运动量基本随着波浪入射角的增大先增大后减小,最大值出现在波浪入射角度为  $60^\circ$  时。这是因为当波浪入射方向与船舶方向存在夹角时,使船舶横向和纵向的受力不均,船舶更容易发生偏转。在图 9b)中,在大部分情况下,回转运动量基本随波浪周期的增大而增大,但在横浪作用下的回转运动量与纵

移运动量类似,在波浪周期接近横摇周期处减小。

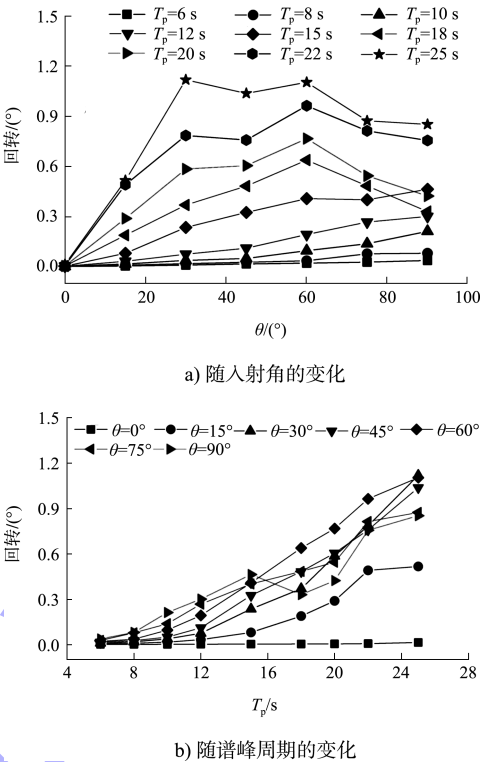


图 9 不同周期与入射角度波浪作用下系泊船回转运动量变化曲线

5 结论

- 1) 系泊船舶运动量随波浪入射角度和波浪谱峰周期变化的规律是相互影响的,在系泊船的纵移、回转和纵摇运动中较为明显。
- 2) 不同波浪周期作用下,系泊船横移、横摇和升沉运动量随着波浪入射角度的增大而增大。当波浪谱峰周期和船舶横摇周期接近时会出现共振现象,横浪作用时横摇运动量会有大幅增加,而随着波浪入射角度偏离横浪方向,共振效果减弱。升沉运动量在波浪入射方向靠近横浪或顺浪方向附近时的值基本不变。
- 3) 当波浪周期较长时,纵移和回转运动量均随着波浪入射角度的增大表现出先增大后减小的变化规律,且一般在波浪入射角度  $60^\circ$  时出现峰值;在波浪周期较短时,回转运动量随着波浪入射角度的增大而增大。

4) 在不同入射角度波浪的作用下,纵摇运动量的峰值随周期的增大,由横浪方向变化到顺浪方向。