

· 港口 ·



## 揭阳港波浪入射角对港内波高影响试验研究

吴月勇<sup>1,2</sup>, 苏丹<sup>1,2</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

**摘要:** 针对有航道海港波浪入射角对港内波高有较大影响的问题, 依托物理模型和波浪数值模型, 系统分析不同波高、周期、航道尺寸下波浪入射角对港内波高的影响规律。结果表明, 波浪入射角 $\theta \leq 30^\circ$ 时, 港内波高随周期的增大而减小, 随航道内水深的减小而增大;  $30^\circ < \theta < 40^\circ$ 时, 港内波高基本不受周期影响; 当 $\theta > 40^\circ$ 时, 港内波高随周期的增大而增大。此外,  $\theta < 40^\circ$ 时, 航道宽度越小、边坡越陡, 港内波高越大;  $\theta \geq 40^\circ$ 时, 航道宽度、边坡对港内波高影响较小。 $\theta < 30^\circ$ 时, 航道内水深越小, 港内波高越大;  $\theta \geq 50^\circ$ 时, 航道内水深越大, 港内波高越大。揭阳港内波高对应的波浪入射角为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时港内波高最大, 应采取相应的工程措施减小该波向对港内船舶泊稳的不利影响。

**关键词:** 波浪数值模型; 航道; 波浪入射角; 波浪折射; 港内波高

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0051-06

### Experimental study on influence of wave incidence angle on wave height inside Jieyang Port

WU Yueyong<sup>1,2</sup>, SU Dan<sup>1,2</sup>

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources(Preparation), Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In response to the problem that the wave incidence angle has a significant impact on the wave height in the harbor in seaports with navigational channels, based on physical models and wave numerical models, the influence of the wave incidence angle on the wave height in the harbor under different wave height, period, and channel size conditions is systematically analyzed. The results show that when wave incidence angle  $\theta \leq 30^\circ$ , the wave height in the harbor decreases with the increase of the period, and increases with the decrease of the water depth in the waterway. When  $30^\circ < \theta < 40^\circ$ , the wave height in the harbor is basically not affected by the period. When  $\theta > 40^\circ$ , the wave height in the harbor increases with the increase of the period. In addition, when  $\theta < 40^\circ$ , the smaller the channel width and the steeper the slope, the greater the wave height in the harbor. When  $\theta \geq 40^\circ$ , channel width and channel slope have little influence on wave height in the harbor. When  $\theta < 30^\circ$ , the smaller the water depth in the channel, the greater the wave height in the harbor. When  $\theta \geq 50^\circ$ , the greater the water depth in the channel, the greater the wave height in the harbor. The wave height inside Jieyang Port is the maximum when the wave incidence Angle is  $30^\circ \sim 40^\circ$ , and corresponding engineering measures should be taken to reduce the adverse impact of this wave direction on the mooring stability of ships in the port.

**Keywords:** wave numerical model; waterway; wave incidence angle; wave refraction; wave height in harbor

航道开挖使得港域的海底地形发生了剧烈变化, 航道区域原有的波浪折射、反射作用也随之改变, 可能会使港池内的波高增大, 威胁船舶的港内泊稳和进港航行条件。国内外众多学者对航

收稿日期: 2024-03-03

作者简介: 吴月勇 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事港工、水工设计及相关研究工作。

道的波浪传播影响规律做了大量研究并取得较多成果，其中 Zwamborn 等<sup>[1]</sup>在 1974 年第十四届国际海岸工程会议上首次正式提出人工航道对波浪传播影响的问题，发现波浪在入射航道过程中会发生明显的折射现象，迎浪侧边坡处波能发生集聚。赵智邦<sup>[2]</sup>、杨宪章等<sup>[3]</sup>、陈汉宝等<sup>[4]</sup>、陈哲准<sup>[5]</sup>、林尚飞等<sup>[6]</sup>结合国内典型港口工程，通过物理模型试验分析航道走向、航道尺寸、波浪入射角度对港内波高的影响，但受场地等因素限制，所模拟的航道长度较短，且物模试验组次较少，未能全面地分析波浪入射角度对长航道海港港内波高的影响规律。林尚飞等<sup>[7]</sup>、吴月勇等<sup>[8]</sup>、钟雄华等<sup>[9]</sup>、刘爱珍<sup>[10]</sup>、董利民等<sup>[11]</sup>、徐俊峰等<sup>[12]</sup>、王冰洁<sup>[13]</sup>、范学平<sup>[14]</sup>通过基于 Boussinesq 方程的波浪数值模型研究了航道尺寸及平面布置对波浪传播变形的影响。

目前关于影响港内泊稳条件对应的不利入射角的系统研究还很少，需要考虑波浪条件和航道尺寸，定性、定量给出不利入射角的范围及其影响因素。本文在数模、物模验证良好的基础上，依托 MIKE21 BW 数值模型，将波浪条件、航道尺

寸与波浪入射角进行组合，探讨揭阳港波浪入射角对港内波高的影响规律。

### 1 物理模型概况

物理模型试验依托揭阳港南海作业区 2# 港池的公共航道和防波堤工程，航道方位角  $N190^{\circ}00' \sim N10^{\circ}00'$ ，沿西南方向出海，航道宽 240 m，边坡 1:7，航道底高程为 -19 m，物理模型模拟范围见图 1。物理模型试验在浙江大学舟山校区  $40 \text{ m} \times 70 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$  (长×宽×高) 大型波浪港池中开展，模型比尺为 1:55。模型为正态模型且遵从重力相似准则，海床地形及防波堤采用断面板法制作，平面及高程误差均控制在  $\pm 2 \text{ mm}$  以内。

物理模型内部共布置 29 个 LG1 型浪高仪，测量精度 0.3 mm，试验波浪采用单向不规则波，波浪谱为 JONSWAP 谱，谱峰升高因子取 3.3。试验时每组波浪复现 3 次，取 3 次波高平均值作为最终结果。由于场地限制，物理模型模拟航道长 1 580 m，航道末端海底地形采用 1:10 的坡度过渡。物理模型试验浪要素见表 1。

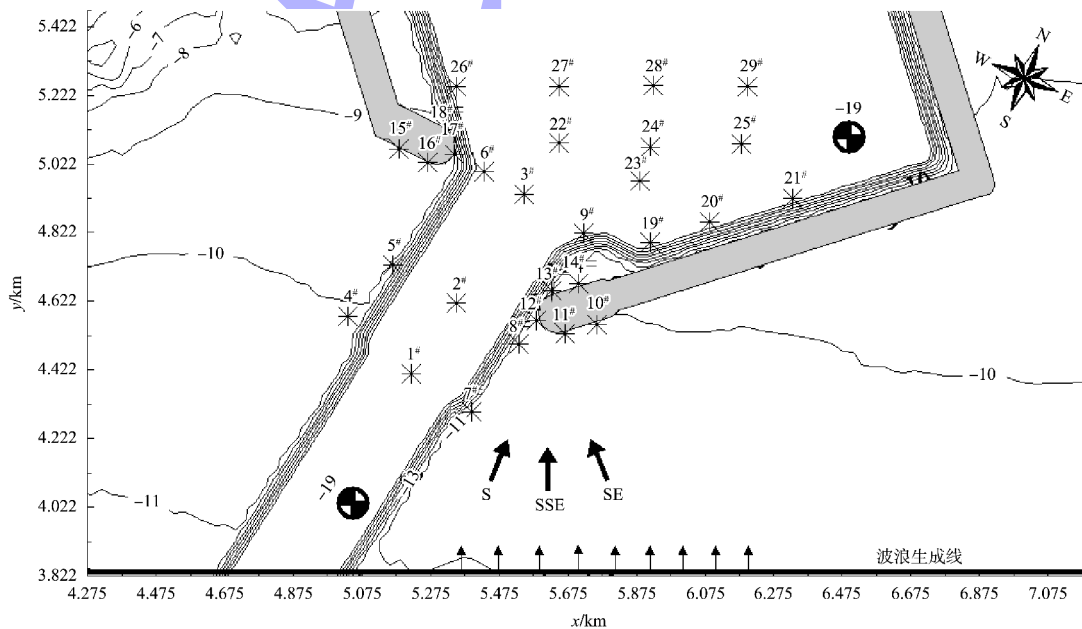


图 1 物理模型模拟范围 (单位: m)

表 1 设计波浪要素

设计水位	波向	有效波高 $H_s/m$	谱峰周期 $T_p/s$	波浪重现期/a
高水位 1.87 m	S	4.04	14.19	50
	SSE	4.76	16.51	50
	SE	4.58	15.87	50
低水位 0.30 m	S	3.99	16.45	50
	SSE	3.64	17.28	50
	SE	4.05	15.90	50
高水位 1.87 m	S	3.11	9.43	2
	SSE	3.54	10.63	2
	SE	3.58	10.10	2

注: 高程基准为揭阳当地理论最低潮面, S、SSE、SE 向波浪与主航道轴线所成的入射角  $\theta$  (相对于航道轴线逆时针方向, 即  $0^\circ$  为沿航道入射波浪) 分别为  $10.5^\circ$ 、 $33.0^\circ$ 、 $55.5^\circ$ 。

## 2 数值模型验证

### 2.1 模型设置

在物理模型试验中发现, 波浪入射航道区域

并向港内传播的过程中发生了肉眼可见的波浪折射作用, 迎浪侧波能发生集聚, 航道内波能则发生明显的衰减。为了更好地研究波浪入射角对揭阳港内波高的影响, 采用 MIKE21 BW 模块建立数值模型。数值模型采用正方形网格, 模拟范围为  $10\ 800\text{ m} \times 7\ 440\text{ m}$ , 空间步长取  $6\text{ m}$ 。

为了更好地与物理模型相验证, 设置航道的模拟长度、波浪类型及参数完全与物理模型相同。港池外部边界区域的反射系数设为  $0.25 \sim 0.40$ , 模拟扭王字护面块体的反射; 港池内边界东、南、西侧反射系数设为  $0.99$ , 模拟直立式码头结构全反射; 港池内边界北侧反射系数设为  $0.15 \sim 0.30$ 。数值模型中采用内部造波源函数法进行造波, 造波线设置在模型底端处深水区域。

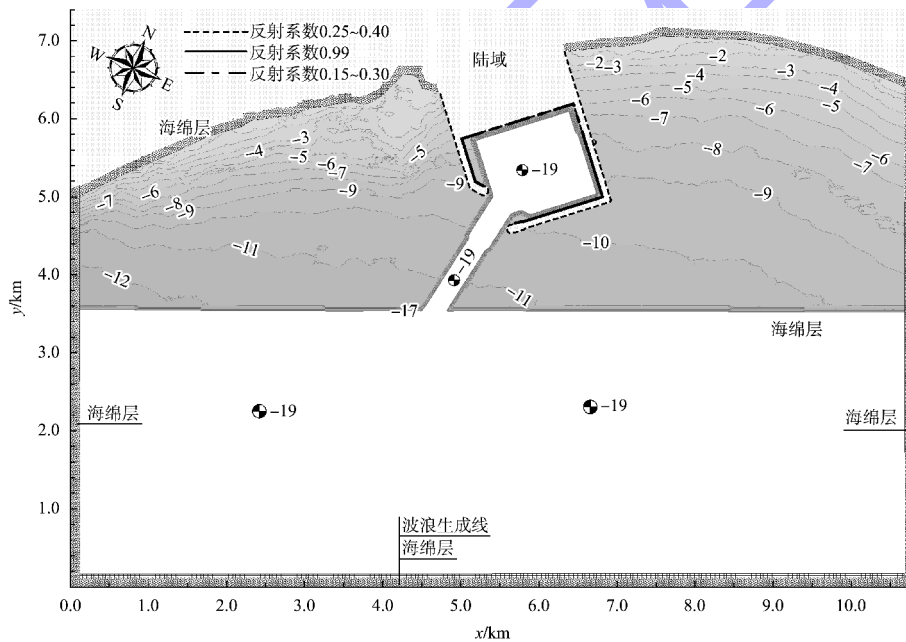


图 2 短航道数值模型平面布置 (单位: m)

### 2.2 验证结果

表 2 为 S、SSE、SE 3 个波向、9 组工况下的物模、数模测点的波高误差统计值, 对比发现, 各波向、各重现期下的物模、数模在各测点的波高吻合良好, 绝大部分工况的平均误差均在 10% 以下, 且最大误差较大的工况均出现在小波高测点处, 波高的绝对误差值并不明显。各测点典型工况的模型验证结果见图 3。

表 2 数模、物模波高相对误差

波向	设计水位	波浪	测点平均 相对误差/%	测点最大 相对误差/%
S	设计高水位	2 a 一遇	0.89	117.66
	设计低水位	50 a 一遇	-43.30	-72.13
	设计高水位	50 a 一遇	-40.98	-66.60
SSE	设计高水位	2 a 一遇	-2.51	-39.04
	设计低水位	50 a 一遇	-6.91	-33.54
	设计高水位	50 a 一遇	-5.29	-45.30
SE	设计高水位	2 a 一遇	-8.38	-64.87
	设计低水位	50 a 一遇	6.53	43.91
	设计高水位	50 a 一遇	-0.03	-32.46

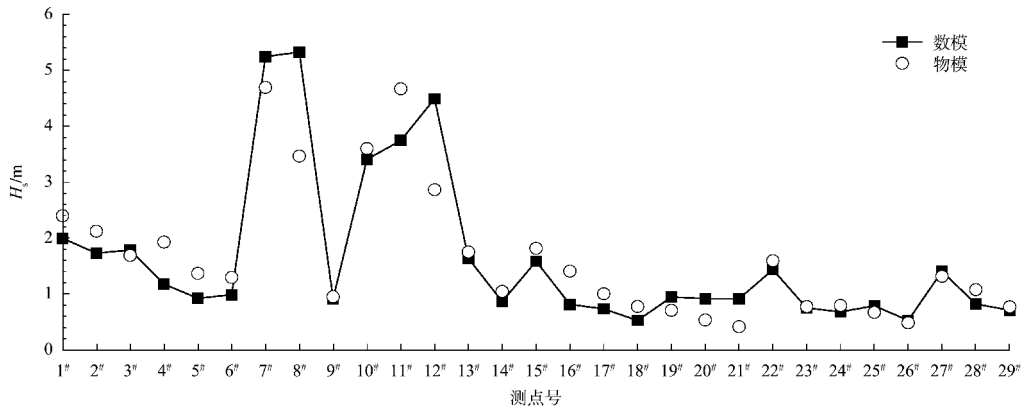


图3 S向、设计高水位、2 a一遇波浪工况下模型验证结果

### 3 波浪入射角对港内波高的影响

#### 3.1 试验工况

在数值模型验证良好的基础上修改模型地形并对航道加长，其余参数均保持不变，航道加长后模型布置见图4。用比波高  $K$  (港内波高与入射波高的比值) 大小反映波浪入射角对港内波浪传播的影响。由航道对波浪的折射、绕射特性可知，

港内波高大值总是出现在港内靠近防波堤口门的位置，而港域内部泊位处的波高对船舶泊稳有着重要的影响，因此以港内比波高特征大值  $K_{50\%}$  (港内所有位置比波高值从大至小累积频率 50% 的特征值) 随波浪入射角  $\theta$  的变化确定对港内泊稳条件不利的波浪入射角范围。表3为各波浪条件、航道尺度与波浪入射角的组合工况。

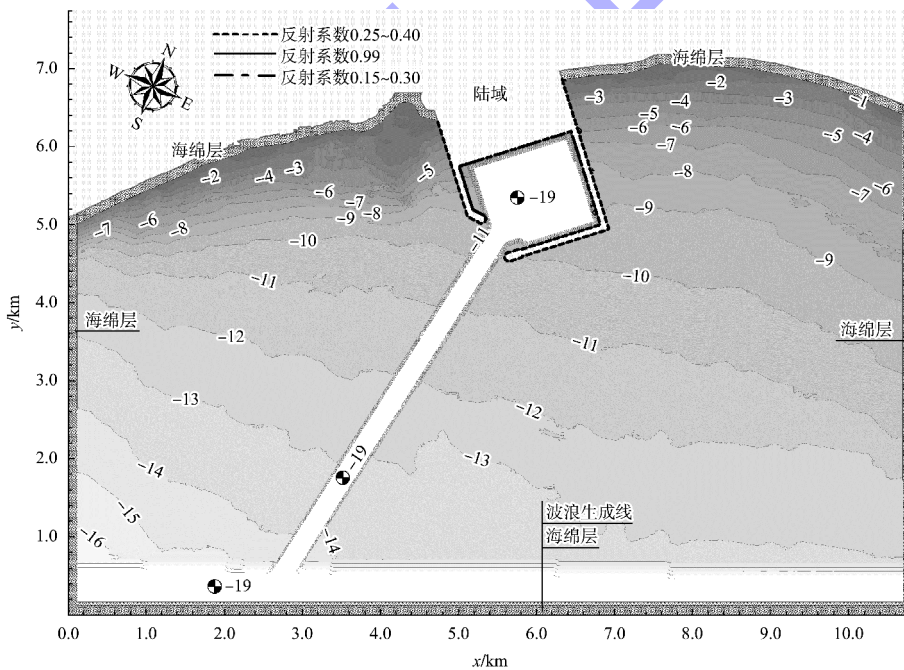


图4 加长航道数值模型平面布置 (单位: m)

表3 波浪条件、航道尺寸与波浪入射角组合工况

$H_s/m$	$T_p/s$	航道宽度 $B/m$	航道水深 $h/m$	航道边坡 $\gamma$	$\theta/(^\circ)$
1,2,3	15	240	20.87	1:7	0,10,20,30,36,40,50,60,80
2	6,9,12,18	240	20.87	1:7	0,10,20,30,36,40,50,60,80
2	15	180,300	20.87	1:7	0,10,20,30,36,40,50,60,80
2	15	240	17.87,23.87	1:7	0,10,20,30,36,40,50,60,80
2	15	240	20.87	1:3,1:10	0,10,20,30,36,40,50,60,80



### 3.2 波高、周期的影响

由图5可知,  $K_{50\%}$  随  $\theta$  呈现先增大再减小的规律, 峰值出现在  $\theta = 36^\circ \sim 40^\circ$ 。各条比波高特征值曲线重合度较高, 波高改变对港内泊稳不利波浪入射角取值没有影响。

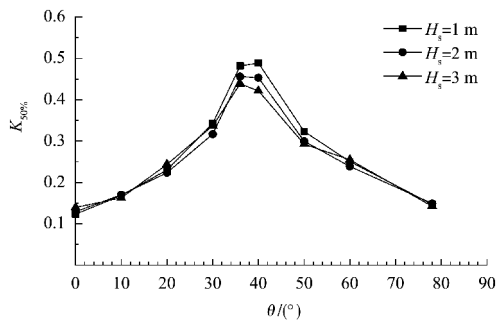


图5 不同波高下  $K_{50\%}$  随  $\theta$  变化

由图6可知, 当  $T_p = 12 \sim 18$  s 时,  $K_{50\%}$  峰值对应的  $\theta = 36^\circ \sim 40^\circ$ 。当  $T_p$  为 6、9 s 时,  $K_{50\%}$  峰值对应的  $\theta$  较长周期工况略小, 为  $30^\circ \sim 36^\circ$ 。各周期组合工况下, 港内泊稳的最不利波浪入射角为  $30^\circ \sim 40^\circ$ 。

此外, 试验中发现,  $\theta < 30^\circ$  时, 航道折射作用较强, 港内波高均较小, 此时港内波高对周期变化的敏感性较强, 随周期的增大而减小;  $\theta = 30^\circ \sim 40^\circ$  时, 波浪传播至航道区域后会在航道内部集聚并沿航槽进入港内, 港内波高较大, 对周期变化的敏感性较弱;  $\theta > 40^\circ$  时, 港内波高主要受波浪绕射作用影响, 随  $T_p$  增大而增大, 而波浪周期越长, 绕射作用也越强, 港内波高越大。

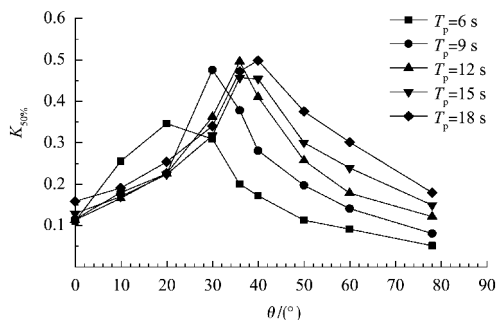


图6 不同周期下  $K_{50\%}$  随  $\theta$  变化

### 3.3 航道宽度的影响

如图7所示, 不同航道宽度下  $K_{50\%}$  呈现随  $\theta$  先增大再减小的规律。 $\theta < 40^\circ$  时, 各  $K_{50\%}$  曲线之间偏差较大, 且有航道宽度越小  $K_{50\%}$  越大的规律。

$\theta \geq 40^\circ$  时, 不同航道宽度下  $K_{50\%}$  曲线之间的偏差则相对较小。这是因为航道宽度对港内波浪的影响主要体现在影响航道的折射效果, 对港内波浪的绕射效果影响并不大, 而航道的折射作用只有当  $\theta$  较小时较为明显。对模型计算采用的双突堤掩护港池来说, 防波堤口门宽度固定不变, 当航道折射作用较强时, 航道宽度与防波堤口门宽度之比越小, 航道迎浪侧集聚的波能更易沿航道边坡进入港内, 造成港内波高增加。

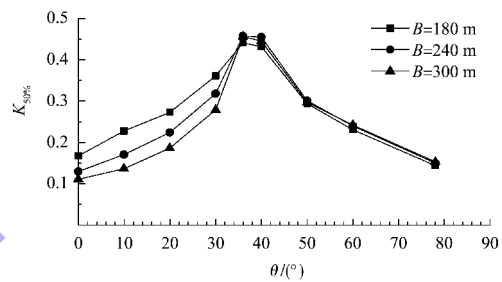


图7 不同航道宽度下  $K_{50\%}$  随  $\theta$  变化

### 3.4 航道水深的影响

由图8可知, 随着  $h$  的增加,  $K_{50\%}$  峰值逐渐向右偏移, 说明随着  $h$  的增加, 港内泊稳对应的不利波浪入射角逐渐增大。不同  $h$  工况下, 最不利  $\theta$  范围为  $30^\circ \sim 50^\circ$ ,  $\theta < 30^\circ$  时,  $h$  越小  $K_{50\%}$  值越大;  $\theta \geq 50^\circ$  时,  $h$  越大, 则  $K_{50\%}$  值越大。

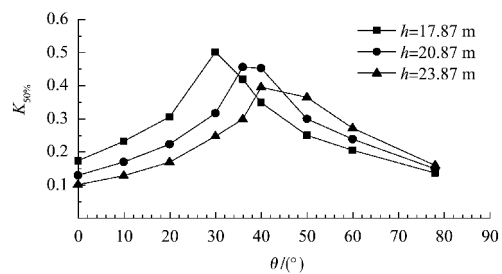


图8 不同航道水深下  $K_{50\%}$  随  $\theta$  变化

### 3.5 航道边坡的影响

由图9可知, 航道边坡和航道宽度的影响情况相似,  $\theta < 40^\circ$  时, 呈现出航道坡度越陡  $K_{50\%}$  越大的规律; 当  $\theta \geq 40^\circ$  时, 3条  $K_{50\%}$  曲线几乎完全重合。这是由于航道的消波作用主要是对波浪的折射,  $\theta < 40^\circ$  时边坡越陡对波浪折射作用越弱, 折射消波作用越小, 故港内波高较大。 $\theta \geq 40^\circ$  时主要是绕射波浪, 航道边坡对绕射基本不起作用。

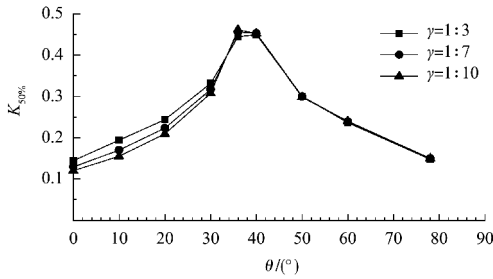


图9 不同航道边坡下  $K_{50\%}$  随  $\theta$  变化

### 3.6 港内不利波浪入射角

上述分析表明，波浪条件和航道尺寸对港内不利波浪入射角的影响程度是不同的，通过对各波浪入射角作用下  $K$  和散点累计频率  $P$  分别进行分析，发现  $K$ 、 $P$  基本成对数关系，将不同  $\theta$  下的  $K$ - $P$  关系曲线用对数坐标绘在图 10 中，可得任意  $P \leq 50\%$  对应的  $K$ 。由图 10 可知，除  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $80^\circ$  时港内各累计频率的  $K$  均较小外，其余  $\theta$  下的  $K_{50}$  均较大。其中，当  $\theta=10^\circ$  时，由于航道对入射波浪的折射能力较强，港内大波高仅出现在东防波堤堤头至迎浪侧边坡的小区域内，港内绝大部分地区的  $K$  很小， $K_{1\%}$  对应的比波高仅在 0.4 左右，此种情况下的港内泊稳条件显然是较好的。基于以上分析结果可知，揭阳港港内大波高值对应的  $\theta$  范围为  $20^\circ \sim 60^\circ$ ，其中  $30^\circ \sim 40^\circ$  入射角范围内的港内及防波堤口门处的波高最大。

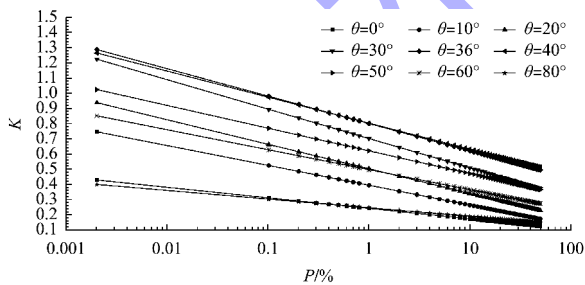


图 10 不同波浪入射角下  $K$ - $P$  关系

### 4 结论

1) 波浪入射角  $\theta \leq 30^\circ$  时，港内波高随周期的增大而减小； $30 < \theta < 40^\circ$  时，港内波高最大，且对周期变化的敏感性较弱； $\theta > 40^\circ$  时，港内波高随周期的增大而增大。

2)  $\theta < 40^\circ$  时，航道宽度越小，港内波高越大； $\theta \geq 40^\circ$  时，航道宽度对港内比波高影响较小。 $\theta < 30^\circ$

时，航道内水深越小，港内波高越大； $\theta \geq 50^\circ$  时，航道内水深越大，港内波高越大。 $\theta < 40^\circ$  时，航道边坡越陡，港内波高越大； $\theta \geq 40^\circ$  时，航道边坡对港内波高基本没有影响。

3) 港内大波高值对应的港内不利波浪入射角范围为  $20^\circ \sim 60^\circ$ ，其中  $30^\circ \sim 40^\circ$  入射角范围内的港内及防波堤口门处的波高最大，应采取相应的工程措施减小该波向对港内船舶泊稳的不利影响。

### 参考文献:

- [1] ZWAMBORN J A, GRIEVE G. Wave attenuation and concentration associated with harbor approach channels[J]. Coastal engineering, 1975(2): 2068-2085.
- [2] 赵智邦. 关于航道对波浪的作用[J]. 港工技术, 1992(1): 1-4, 18.
- [3] 杨宪章, 许振沂, 臧东生. 航道对港内泊稳条件的影响[J]. 港口工程, 1993(3): 45-50.
- [4] 陈汉宝, 孙精石. 航道引起波能集中现象的试验研究[J]. 水道港口, 2000(3): 13-16.
- [5] 陈哲淮. 港口总平面布置中考虑开挖航道港池对波浪的影响分析[J]. 中国港湾建设, 2009(2): 29-32.
- [6] 林尚飞, 陈国平, 严士常, 等. 航道尺度对波高分布的影响[J]. 中国港湾建设, 2013(5): 40-45.
- [7] 林尚飞, 陈国平, 严士常, 等. 不同平面布置方案对港内波浪影响[J]. 水运工程, 2013(3): 61-66, 108.
- [8] 吴月勇, 陈国平, 高晨晨, 等. 航道开挖对波浪传播影响的试验研究[J]. 水运工程, 2017(5): 92-97.
- [9] 钟雄华, 李伟仪, 王科华, 等. 基于波浪数学模型的航道对波浪传播规律影响分析[J]. 水运工程, 2023(7): 25-29, 34.
- [10] 刘爱珍. 航道和双突堤条件下波浪传播变形规律研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [11] 董利民, 刘爱珍. 人工航道对波浪传播规律的影响[J]. 水道港口, 2006, 27(2): 74-78.
- [12] 徐俊锋, 方春明, 黄烈敏, 等. 应用 MIKE21 BW 模型分析航道对波浪传播的影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(4): 292-297.
- [13] 王冰洁. 航道对于多向不规则波传播的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [14] 范学平. 波浪形态及方向分布对港域波浪传播的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 186-190.