Doi:10.11840/j.issn.1001-6392.2024.02.007

新型旋转减冲装置对桩基局部冲刷防护试验研究

张竞¹,程永舟^{1,2},程海洋¹,郑余伟¹,吕行¹ (1.长沙理工大学 水利与环境工程学院,湖南 长沙 410114; 2.水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘 要:为减轻海上风电单桩基础周围局部冲刷对其结构安全的影响,本文提出了一种新型旋转减冲装置。在波 流水槽中开展物理模型试验,改变波流条件、装置安装高度、安装距离,记录桩周冲刷发展历时,运用激光地形 仪扫描冲刷坑形态,分析各工况下冲刷坑形态差异,验证装置不同安装距离、安装高度下的冲刷防护效果,提出 了不同安装位置下的防护效率公式。结果表明:新型旋转减冲装置具有较好的冲刷防护效果,本试验工况下,桩 周最大冲刷深度可减小44%左右。装置安装距离对冲刷防护效果影响较小,波流作用下的冲刷防护效果受装置安 装高度影响显著,冲刷防护效果随装置安装高度的增加而减弱。

Experimental study on local scour protection of pile foundations by a new rotary scour guard

ZHANG Jing¹, CHENG Yongzhou^{1,2}, CHENG Haiyang¹, ZHENG Yuwei¹, LYU Xing¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water–Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to mitigate the effects of local scouring around offshore wind monopile foundations on their structural safety, a new rotary scour guard is proposed. Physical model tests were carried out in the wave flow flume. The development of the scour process and scour depth around the pile were recorded under various waves, flow velocities, different installation heights and distances. A laser scanner was used to measure the topography of the scour hole. The differences in scour pit patterns under various operating conditions were analyzed to verify the scour protection effect of the device at different installation distances and heights. The results show that the new rotating scour guard has a good protective effect and the maximum scour depth around the pile can be reduced by about 44% under the present test conditions. The installation distance of the device has little influence on the erosion protection effect. The anti–scouring effect of the combined wave and current action is strongly influenced by the installation height of the equipment, which decreases as the installation height increases.

Keywords: combined waves and current action; scour protection; pile foundations; scour depth; scour reduction devices

桩柱结构已被广泛应用于桥梁、码头及海上 平台等水工建筑的基础结构。波浪和水流作用于 结构物桩基础产生的局部冲刷,减小了桩柱入土 深度,会造成桩基失去稳定,对结构安全造成严 重威胁^[1]。大量学者已对水流、波浪作用下的桩柱 周围局部冲刷特性开展了研究,为创新冲刷防护

收稿日期: 2022-10-23; 修订日期: 2023-01-13

基金项目:国家自然科学基金(52071031);湖南省水利科技项目(XSKJ2021000-44);大连理工大学海岸和近海工程国家 重点实验室开发基金(LP21V3)

作者简介: 张竞(1997—), 硕士研究生, 主要从事海洋工程方面研究, 电子邮箱: 1315539753@qq.com

通信作者:程永舟,博士,教授,主要从事河流海岸动力学及泥沙方面研究,电子邮箱: chengyongzhou@163.com

形式提供了大量理论依据^[2-3]。

Chiew 等^[4]将防冲措施归结为两大类,一类是 通过布置在桩柱底部周围床面以提高床面抗冲能 力;另一类是通过布置在桩柱周围或者改变桩柱 的形状来削弱造成冲刷的水力要素。在此之后, Deng 等^[5-6]将这两类措施分别称作床面加强措施和 水流控制措施。

常见的床面加强措施有抛石、沉排、石笼等 多种类型。Zarrati等^[7]对抛石和独立护圈及连续护 圈组合下的防护效果进行研究,结果表明在两个 桥墩成一条直线的情况下,连续护圈和抛石的组 合使前后桥墩的冲刷减少最显著。Pagliara等^[8]对 使用抛石和石笼防护且桥墩存在堆积物情况下的 防护效果进行研究,发现此时石笼相对无防护的 情况,能有效减缓冲刷过程。Deng等^[9]提出了一 种类似于椰子树根的新型海洋结构基础,并验证 了其波流条件下的防护效果。Zhang等^[10]使用灌浆 工艺来提高海床抗冲能力,分析了灌浆后土体微 观特征的变化,并与护圈防护及抛石防护进行了 对比。罗巍等^[11]通过物理模型试验,探究了波流 作用下影响套筒冲刷防护效果的主要因素。

水流控制措施主要通过扰乱来流,减少马蹄 涡等引起冲刷的水力要素来达到防护目的。高柱 等[12] 对单一四面体框架结构流场进行模拟,确定 了其阻力系数与雷诺数的关系,有助于理解四面 体框架结构冲刷防护机理。Yang 等^[13]提出了一种 具有弧形表面轮廓的中空喇叭状防护装置,用于 减弱马蹄涡对冲刷的影响,该装置对减小海床剪 应力、缓解海床冲刷有明显效果。Valela等[14]对三 种类型的防冲圈进行研究,结果表明下潜水流被 防冲圈控制后,最大冲刷深度和冲刷面积分别减 少了 69.7% 和 75.7%。Kumar 等[15] 对桩身开槽和防 冲圈组合使用的情况进行研究,提出了该防护条 件下圆形桥墩周围最大冲刷深度的预测公式。 Melville 等^[16]通过大量研究,提出了减冲桩防护方 法的影响因素,主要有减冲桩数量、桩头露出水 面长度等。姜松等印对减冲桩的直径比、减冲桩 与桩柱间距、减冲桩淹没程度及来流角度对防护 效果的影响进行数值模拟研究,得出大直径非淹 没桩柱布置在桩前1~1.5倍桩柱直径的位置可取 得较好的防护效果。Yang等^[18]将水平轴潮流涡轮 机用于海上风电机组单桩基础的冲刷防护,验证 了该方式在纯流条件下的防护效果,并优化了安 装位置。由此可见,现有的冲刷保护措施均可有 效减小桩周冲刷深度,但各类措施的应用也受到 环境因素限制,例如抛石防护措施难以应用在河 流条件下,在恶劣的海洋环境下更加难以应用, 而牺牲桩、轴环等基本只适用于水流恒定的河流 环境。

1 新型旋转减冲装置的基本机制

对于水流作用下的桩周局部冲刷,其主要受 桩前下潜水流与桩壁附近分离的边界层流相互作 用形成的马蹄涡影响,马蹄涡不断侵蚀床面,扰 动并带走桩周床面的泥沙,同时桩后形成成对的 反向旋涡,将悬浮的泥沙带走,最终在桩后形成 对称的冲刷坑。波流共同作用下的桩周局部冲刷 主要受周期性增大的流速及波浪渗流力的影响, 使得床面更易受到冲刷,流速的周期性变化会加 强桩后的涡脱落,加快了泥沙的输运^[19]。显然, 水流速度越快,在水流作用及波流共同作用下的 床面越易造成冲刷。因此,在水流流经桩前时削 弱水流的动能,降低马蹄涡的能量,就可以减小 桩周床面冲刷。

本文提出了一种易于安装、能适应潮流、波 流条件下的新型旋转减冲装置。新型旋转减冲装 置与垂直轴水轮机具有相似的结构,由于垂直轴 水轮机尾流场存在明显的低速区域[20],即对于新 型旋转防冲刷装置而言,有利于减小桩柱局部冲 刷。其转子可吸收水流动能、干扰来流结构,减 小来流强度,既减弱了前向水流的能量,也改变 了水流原有的流向与水力特性,同时可削弱和减 小桩前下潜水流速度及桩周马蹄涡能量,最终达 到降低床面剪切应力,减轻冲刷的效果。如图1、 图2所示,新型旋转减冲装置采用典型的三叶片 形式,其叶片为NACA0018翼型,叶片长度为1, 弦长为c, 半径为R, 安装距离为L, 安装高度为 h。新型旋转减冲装置可根据不同波流条件进行布 置,对于单向波流、潮流可参考图2(a)、图2(b) 在来流侧布置装置,旋转流条件下可使用图2(c) 所示带导流板的旋转平台进行布置,以保证减冲 装置始终面对潮流方向。本文基于波流水槽实验, 对纯流及波流作用下新型旋转减冲装置的局部冲

刷特性及防冲性能进行了探究,以期为后续研究 提供参考。



波流方向、



2 试验布置与方案

2.1 试验布置

本试验在长沙理工大学水利实验中心波流水 槽中进行,水槽长60m,宽1.5m,高1.8m,两 边壁为透明玻璃板。水槽前端设有造波造流系统, 末端设有消能网。波流水槽中段底部设置有斜坡 形成的沙槽(长宽高: 4.5 m×1.5 m×0.6 m), 在沙 槽中选用中值粒径 dso=0.33 mm 原型沙,沙槽正中 央埋放直径D=0.2 m的模型圆柱, 桩前采用图2方 式一布置新型旋转减冲装置(以下简称装置),装 置由主轴垂直固定于床面, 主轴直径10 mm。装 置采用3D打印技术制作,试验时装置由顶部的直 流电机驱动,转速保持恒定。波高标定采用 WG50型浪高仪, 流速测量采用三维点式声学多普 勒流速仪 (Acoustic Doppler Velocimetry, ADV), 地形测量采用ULS-100型水下激光三维扫描仪, 分辨率为0.018°,能精确测量床面形态。装置具 体试验布置见图3。

2.2 试验方案

为研究装置不同安装距离L及安装高度h下的 防护效果,对比分析各试验条件下冲刷过程、冲刷 坑形态的差异,设置无防护的垂直桩作为对照组。

参考垂直轴水轮机相关研究成果,合理的叶 尖速比(Tip Speed Ratio, TSR)与密实度 σ 能够 保证涡轮转子的水动力性能。其中,密实度 σ 及 叶尖速比(TSR) λ 计算式如下:

$$\sigma = Nc/R \tag{1}$$

$$\lambda = \omega R/U \tag{2}$$

式中: σ为密实度, N为叶片数量, c为叶片弦长 (m), R为转子半径(m), λ为叶尖速比, ω为转 速(rad/s), U为来流平均流速(m/s)。当密实度 σ处于1.09~1.64范围内时, 垂直轴水轮机具有很 高的能量提取效率^[21]。同时, TSR 是影响垂直轴 水轮机水动力性能的一个重要的无量纲数, 因此 装置转速对其自身冲刷及防护效果影响较大,本 试验模型采用叶尖速比相似准则,取TSR 值与 Lam 等^[21]一致, 以保证模型具有足够的能量提取 效率。本试验模型具体参数见表1。

对于本试验,分析波流参数对冲刷深度的影 响非本文重点,故仅对相同波流参数下的防护效





果进行对比。试验前对水流流速、波浪波高和周 期进行标定,通过计算机控制水槽造流及造波。 每组试验前先将装置布置于相应位置,整平沙床, 调整水槽水位至试验水深1.1 m,桩前来流水深H。 为0.5 m。采用规则波和恒定流作为入射波流,间 歇造波,保证波浪稳定性。

表1 模型具体参数

<i>l</i> /m	N	c/m	<i>R</i> /m	ω / (rad·s ⁻¹)	σ	λ
0.2	3	0.05	0.1	4.5	1.5	2.81

定义η为桩周最大冲刷深度减小率,计算公 式为:

$$\eta = \left(S - S_0\right)/S \tag{3}$$

式中: *S*为无防护下桩周最大冲刷深度; *S*₀为防护 条件下桩周最大冲刷深度。波流共同作用下的希 尔兹数*θ*和临界希尔兹数*θ*_{er}定义为^[22]:

$$\theta = \frac{U_{\rm f}^2}{g(\rho_{\rm s}/\rho_{\rm w} - 1)d_{\rm 50}} \tag{4}$$

$$U_{\rm f} = \sqrt{\frac{f}{2}} U_0 \tag{5}$$

$$\theta_{\rm er} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055 \left[1 - \exp(-0.02D_*) \right] (6)$$

$$D_* = d_{50} \Big[(s - 1) g \nu^2 \Big]^{1/3} \tag{7}$$

式中: U_{r} 为波流共同作用下的最大摩阻流速;g为 重力加速度; ρ_{s} 和 ρ_{w} 分别为泥沙和水的密度; d_{50} 为原型沙中值粒径;f为波流共存时的摩阻系数; U_{0} 为波流共存时的流速; D_{s} 为沙粒量纲粒度; ν 为运动黏滞系数;s为沙水密度比,本试验用沙s= 2.65。临界希尔兹数为0.037,当 $\theta/\theta_{cr} > 1$ 时为动 床冲刷,其余为清水冲刷。具体试验工况见表2。

3 试验结果分析

3.1 冲刷发展过程

Melville 等^[23]提出在室内的小型实验中,若要 达到冲刷平衡,需要数天的时间。由于冲刷过程 前期发展迅速,后期冲刷深度变化缓慢,本试验 主要验证装置的防护可行性, 故取冲刷时间为 120 min。图4为纯流条件下,不同安装距离和安 装高度的最大冲刷深度发展曲线。桩周最大冲刷 深度在30min内发展迅速,各组工况冲刷深度随 时间发展的趋势基本一致。由图4(a)(固定安装 高度,调整安装距离)可知,冲刷过程前10min, 防护条件下冲刷发展速率基本与无防护条件下一 致, 桩前床面首先发生冲刷, 泥沙在桩后侧沉积。 10 min 后,随着装置对桩前水流流动强度及下潜 水流的削弱,冲刷发展速率逐渐变缓。60 min 后冲 深发展速率持续减少,冲刷深度接近平衡冲刷深 度。由图4(b)(固定安装距离,调整安装高度)可 知,冲刷前10min,冲刷发展极为迅速。当安装 高度 h=0.75D 时,由于装置自身的压缩效应,转 子下方与床面间的区域流速增加,加快了初期冲 刷速率,使其大于无防护情况。60 min 后随着桩 周冲刷深度的增加,断面过流能力增加,桩周涡 旋挟沙能力减弱,冲刷深度接近平衡冲刷深度。

由图 5 可知,波流冲刷过程各工况前 20 min 发展较快。对于图 5(a)(固定安装高度,调整安装 距离),在最小安装距离(*L*=1*D*)时,由于波浪作 用及装置自身叶片和主轴的阻挡作用,装置附近湍 流流动强烈,该安装位置前期冲刷发展速度最快。 对于图 5(b)(固定安装距离,调整安装高度),在

工况	<i>L</i> /m	h/m	<i>H</i> /m	T/s	$U/(\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	θ	$\theta/ heta_{ m cr}$	S/cm	S_0/cm	S_0/D	η /%	Fr _a
1	-	-	-	-	0.16	0.008 0	0.216	3.6		0.175	-	0.11
2	-	-	0.08	1.4	0.16	0.030 9	0.835	5.8	-	0.290	-	0.17
3	-	-	0.11	1.4	0.16	0.044 9	1.214	6.8	-	0.340	-	0.20
4	-	-	0.14	1.4	0.16	0.061 3		7.3	-	0.360	-	0.22
5	0.3	0.1	-	-	0.16	0.008 0	0.216	-	2.3	0.115	36.11	0.11
6	0.3	0.15	-	-	0.16	0.008 0	0.216	-	2.7	0.140	22.22	0.11
7	0.3	0.2	-	-	0.16	0.008 0	0.216	-	2.9	0.145	19.44	0.11
8	0.2	0.1	-	-	0.16	0.008 0	0.216	-	2.5	0.125	30.56	0.11
9	0.4	0.1	-	-	0.16	0.008 0	0.216	-	2.4	0.120	33.33	0.11
10	0.3	0.1	0.14	1.4	0.16	0.061 3	1.657	-	4.0	0.200	44.44	0.22
11	0.3	0.15	0.14	1.4	0.16	0.061 3	1.657	-	5.1	0.255	29.17	0.22
12	0.3	0.2	0.14	1.4	0.16	0.061 3	1.657	-	6.2	0.310	13.89	0.22
13	0.2	0.1	0.14	1.4	0.16	0.061 3	1.657	-	5.0	0.250	30.56	0.22
14	0.4	0.1	0.14	1.4	0.16	0.061 3	1.657	-	4.3	0.215	40.28	0.22
15	0.5	0.1	0.14	1.4	0.16	0.061 3	1.657	-	4.2	0.210	41.67	0.22
16	0.3	0.1	0.08	1.4	0.16	0.030 9	0.835	-	4.2	0.21	27.59	0.17
17	0.3	0.1	0.11	1.4	0.16	0.044 9	1.214	-	4.8	0.24	29.41	0.20

表2 试验工况

注:表中L为安装距离,h为安装高度。H为波高,T为周期,U为平均流速, $\theta 和 \theta_{er}$ 分别为希尔兹数和临界希尔兹数。 η 为桩周最大冲刷深度减小率,S为无防护条件下桩周最大冲刷深度,S₀为防护条件下桩周最大冲刷深度,Fr_a为波流环境下的弗劳德数(Fr_a = U_a/ \sqrt{gD});U_a为波流作用下参考点1/4周期水质点速度)。





最大安装高度(*h*=1*D*)时,由于安装高度离床面 较远,装置对波浪及水流的阻挡及干扰作用有限, 无法有效削弱桩柱周围马蹄涡及尾涡强度,从而 导致前期冲刷速率较快。20 min后,防护条件下 的桩周冲刷速率逐渐减小,冲刷深度增长缓慢。

3.2 防护效果分析

3.2.1 纯流作用下的防护效果

在多组纯流作用下的装置防护试验工况中,

选取代表性的试验结果(工况5)讨论装置的防护可行性。图6为有无防护工况下的桩周冲刷坑地形。对比无防护下的冲刷坑地形图可知,防护条件下,由于装置叶片与主轴阻挡作用,装置后方速度分布变得紊乱,导致桩柱周围马蹄涡发展不规律,因此后方淤积在水流方向上具有不对称性。防护条件下,冲刷坑整体范围显著减小,冲刷坑未形成完整闭合的圆环,桩后淤积沙丘位置



图6 有无防护下的冲刷坑地形 (纯流冲刷)

发生改变,由桩后前移至桩柱侧后方,沙丘高度 及沙丘面积较小。纯流作用下,装置有效减少了 桩周冲刷坑范围及冲刷坑深度,由表2可知,工 况5条件下,桩周最大冲刷深度减小率为36%左 右,装置具有良好的防护效果。

3.2.2 波流作用下的防护效果

图 7 为波流作用下无防护条件与代表性试验 结果(工况10)的冲刷坑地形图。防护条件下, 桩周冲刷坑沿水流方向基本呈不对称分布,桩后 沙丘高度分布较为随机,床面沙纹分布较无防护 时差异较大,装置支撑桩所产生的桩后沙丘明显。 与纯流作用下结果相似,波流作用下,装置防护 下的冲刷坑范围及冲刷深度均明显减小,桩后淤 积的沙丘高度与沙丘面积较小,减冲效果明显。 由表2可知,工况5条件下,桩周最大冲刷深度减 小率为44%左右,防护效果较好。 3.2.3 不同安装高度下的防护效果

图 8 为装置安装距离 L=1.5D 时,不同安装高 度的最大冲刷深度曲线图,图 9 为不同安装高度 下的最大冲刷深度减小率。纯流条件下,安装高 度的变化对桩周最大冲刷深度的影响较小,主要 原因是纯流作用下装置对桩前来流影响显著,桩 前下降水流受到削弱,减小了床面剪应力,致使 桩周最大冲刷深度受安装高度变化影响较小。如 图 9 所示,纯流作用下的最大冲刷深度减小率随 高度变化较小,装置的减冲效果对安装高度的适 应性较好。波流条件下,桩周最大冲刷深度随着安 装高度的增加而增加。由于波流冲刷条件下桩周 泥沙受马蹄涡及波浪上扬力共同作用,更容易达 到起动条件,致使桩周最大冲刷深度对安装高度 的变化更为敏感。波流作用下的最大冲刷深度减



小率随安装高度减小明显,此时为保证减冲效果, 对安装高度有较高要求。



3.2.4 不同安装距离下的防护效果

图 10 为装置安装高度 h=0.5D 时,不同安装距 离的最大冲刷深度曲线图,图 11 为不同安装高度 下的最大冲刷深度减小率。在纯流冲刷及波流冲 刷条件下,较近的安装距离甚至会增加桩周的最 大冲刷深度。主要原因是在较低的安装高度与较 近的安装位置下,装置旋转过程中自身的泄流与 支撑桩的扰流对桩前流场影响较大,相较于其他 安装距离,桩前的流动强度有所增加,导致桩周 最大冲刷深度增大。由图 11 可知,除较近的安装 距离外,本试验工况中,纯流冲刷及波流冲刷条 件下各安装距离均有较好的防护效果,纯流冲刷 下的减冲效果均可达到 30% 以上,波流冲刷下的 减冲效果可达到 40% 以上。由图 10、图 11 可知,





2期



本试验工况下,装置安装距离对减冲效果影响较小,纯流作用下安装距离L为1~2D、波流作用下 安装距离L为1~2.5D时装置具有良好的减冲效果。 3.2.5 不同 Fr_a下的减冲效果

波流条件下, *Fr*_a与桩周马蹄涡和尾涡等流动 结构密切相关,对桩周冲刷深度的影响关键^[24-26]。 由图 12 可知,在本试验的四种流动强度下,安装 于同一位置的装置对桩周最大冲刷深度的减小率 均大于 27%,最大值为44%。装置在本试验的四 种流动强度下减冲效果明显,当0.11<*Fr*_a<0.22时, 装置对桩基的保护有效。





3.2.6 不同安装位置防护效果分析

为合理预测不同安装位置下的防护效果,讨 论不同安装位置对防护效果的影响,本文采用回 归分析的方法,结合现有试验数据,拟合得到新 型旋转减冲装置不同安装位置下的防护效率计算 公式。针对本试验工况,考虑防护效率的影响因 素与装置安装高度h及安装距离L相关,并对其进 行无量纲化提出装置防护效率η与无量纲安装高 度h/H_c、无量纲安装距离L/D的函数关系式:

$$\eta = \frac{\left(S - S_0\right)}{S} = a \left(\frac{h}{H_c}\right)^b \left(\frac{L}{D}\right)^c \tag{8}$$

式中: *a*、*b*、*c*均为常系数。对纯流及波流作用下的试验数据进行回归分析, 拟合参数结果见表3。

表3 式(8) 拟合参数

工况	a	b	с	R^2
纯流作用	7.968	-0.856	0.134	0.936
波流作用	5.740	-1.118	0.252	0.852

将式(8)预测值与试验结果实测数据进行对 比,对不同安装位置下的防护效率计算公式进行 验证,验证结果如图13所示,公式计算值与试验 值基本位于直线 y=x 附近,且大部分位于±25%误 差范围内,可见式(8)在一定范围内的精度较好。





4 结论

本文提出了一种新型旋转减冲装置,对其开 展了纯流及波流作用下的桩周局部冲刷试验研究, 探究了防护条件下的局部冲刷特性,验证了新型 旋转减冲装置在不同安装高度、安装距离下的防 护性能。本试验工况下的主要结论如下:

(1)新型旋转减冲装置在纯流、波流清水和 波流动床条件下均能有效减小桩周最大冲刷深度。 本试验工况下,桩周最大冲刷深度可减少40%左

http://hytb.ijournals.cn

右。安装位置为*h*=0.5*D*,*L*=1.5*D*时,装置总体防 护效果最好,此时纯流条件下最大冲深减小率 η 为 36.11%,波流条件下最大冲深减小率为 44.44%,基本满足防护要求。

(2)本试验工况下,装置安装距离L对纯流 及波流作用下的防护效果影响较小。安装高度h 不变,安装距离L<1.5D时,相较于其他安装距 离,防护效果较差。当安装高度为1D时,波流冲 刷下的最大冲刷深度与无防护时相比仅减小 13.89%。波流条件下,防护效果受装置安装高度 h影响显著,最大冲刷深度随装置安装高度增大 而增大。

为进一步优化新型旋转减冲装置防护性能, 其在不同水流、波流条件下的最佳转速、流场特 性、最佳安装位置、叶片参数等仍需进一步深入 研究,为后期应用提供参考。

参考文献

- 孔德森,张杰,巩越.波浪荷载作用下近海风电单桩 基础受力变形特性影响因素分析[J].海洋通报,2020, 39(5):632-640.
- [2] 程永舟, 吕行, 王文森, 等. 波流作用下大直径淹没圆柱局部冲刷试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 872-881.
- [3] 袁春光, 王义刚, 杨华, 等. 波、流及其共同作用下桩墩 局部冲刷问题试验研究现状[J]. 海洋通报, 2019, 38(2): 121-131+140.
- [4] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(9): 1260.
- [5] DENG L, CAI C S. Bridge scour: prediction, modeling, monitoring, and countermeasures—review[J]. Practice Periodical on Structural Design & Construction, 2010, 15(2): 125–134.
- [6] TAFAROJNORUZ A, GAUDIO R, DEY S. Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review [J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(4): 125–134.
- [7] ZARRATI A R, NAZARIHA M, MASHAHIR M B. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(2): 154–162.
- [8] PAGLIARA S, CARNACINA I, CIGNI F. Sills and gabions as countermeasures at bridge pier in presence of debris accumulations[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(6): 764–774.
- [9] DENG X, HE S, CAO Z. Numerical investigation of the local scour around a coconut tree root foundation under

wave-current joint actions[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110563.

- [10] ZHANG F, CHEN X, FENG T, et al. Experimental study of grouting protection against local scouring of monopile foundations for offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111798.
- [11] 罗巍, 程永舟, 黄筱云, 等. 套筒对波流作用下桩基局 部冲刷防护试验研究[J]. 海洋通报, 2022, 41(1): 102-113.
- [12] 高柱, 殷杰, 唐洪武, 等. 单一贴壁四面体框架绕流场三 维数值模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 161-166.
- [13] YANG W, TIAN W. Concept research of a countermeasure device for preventing scour around the monopile foundations of offshore wind turbines[J]. Energies, 2018, 11(10): 1–16.
- [14] VALELA C, RENNIE C D, NISTOR I. Improved bridge pier collar for reducing scour[J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(1): 37–46.
- [15] KUMAR V, RAJU K G R, VITTAL N. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(12): 1302–1305.
- [16] Melville B W, Hadfield A C. Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(11):1221-1224.
- [17] 姜松,张智,程永舟,等.单根减冲桩对墩柱局部冲刷影 响的数值模拟 [J].水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(1): 122-130.
- [18] YANG B, WEI K X, YANG W X, et al. A feasibility study of reducing scour around monopile foundation using a tidal current turbine[J]. Ocean Engineering, 2020, 220: 108396.
- [19] QI W, GAO F, HAN X, et al. Local scour and pore-water pressure around a monopile foundation under combined waves and currents[C]. In: Proceeding of 2012 International offshore and polar engineering conference. Greece. 2012–06.
- [20] 张玉超,李晔,毋晓妮.并列式垂直轴水轮机尾流场的 干扰特性研究[J].可再生能源,2019,37(11):1732-1738.
- [21] DAI Y M, LAN W H. Numerical study of straight-bladed Darrieus-type tidal turbine[J]. Energy, 2009, 162(2): 67– 76.
- [22] SOULSBY R L. Dynamics of marine sand[M]. London: Thomas Telford Ltd, 1998.
- [23] MELVILLE B W, CHIEW Y-M. Time scale for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(1): 59-65.
- [24] OLSEN N R, KJELLESVIG H M. Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local

(下转第274页)