



钢丝绳卷扬垂直提升式升船机 整体物理模型全相似模拟

陈莹颖¹, 胡亚安¹, 李中华¹, 薛 淑^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 升船机设计和建设中, 整体物理模型试验是研究和解决升船机运行中水力学、机电、控制等诸多问题的有效手段。结合前人研究成果, 分别对承船厢、平衡重系统、塔柱结构、机械同步系统等钢丝绳卷扬垂直提升式升船机核心部分在模型设计中需满足的相似准则进行了初步分析, 指出其全相似模拟还需满足的理论条件和设计思路, 并主要对机械同步系统提出了全相似模拟的方法。最后探讨了升船机整体物理模型全相似模拟的可行性和必要性。

关键词: 通航建筑物; 全相似模拟; 整体物理模型; 升船机; 机械同步系统; 同步轴

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0030-06

Full-similar simulation of wire rope winding vertical lifting ship lift's integrated physical model

CHEN Ying-ying¹, HU Ya-an¹, LI Zhong-hua¹, XUE Shu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the design and construction of ship lifts, the integrated physical model test is an effective means to study and solve hydraulics, machinery, electric, control and many other issues during the operation of ship lifts. Combining the previous research results, this paper respectively conducts the preliminary analyses of the similarity criteria that the model design must meet of ship chamber, balance weight system, tower structure, mechanical synchronous system and other core parts of the wire rope winding vertical lifting ship lift, points out the theoretical conditions and design ideas needed in its full-similar simulation, and mainly puts forward a full-similar simulation method of mechanical synchronous system. Finally, this paper discusses the feasibility and necessity of the ship lift's full-similar simulation.

Key words: navigation structure; full-similar simulation; integrated physical model; ship lift; mechanical synchronous system; synchronous shaft

升船机利用机械动力拖动承船厢作上下运动克服航道集中水位落差, 由承船厢、支承结构、提升和安全机构等组成, 依据不同的运行原理可分为垂直、斜面与水坡3种, 其中垂直升船机代表了目前升船机的发展方向。垂直升船机的承船厢沿垂直方向升降, 依据驱动方式的不同, 分为钢丝绳卷扬垂

直提升、齿轮齿条爬升及水力浮动式。在钢丝绳卷扬垂直提升式升船机中, 又有全平衡(船厢不入水)和部分平衡(船厢入水)两种类型。

钢丝绳卷扬垂直提升式升船机采用钢丝绳卷扬机提升系统, 以卷扬机作为驱动设备, 通过卷扬机提升机构的正、反向运转驱使承船厢沿塔柱

收稿日期: 2013-10-14

作者简介: 陈莹颖(1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究通航建筑物模型设计。

升降运行, 承船厢及厢内水体的重力, 由多根钢丝绳悬吊的平衡重块平衡^[1]。

1 升船机整体物理模型设计

升船机的设计和建设涉及到水力学、机电、液压、制造等诸多学科的技术问题, 整体物理模型试验是其主要研究手段。我国于20世纪90年代在闽江水口升船机建设中, 在国际上首次提出并进行了比尺为1:10的集机械、电气、水动力学于一体的升船机高仿真整体物理模型试验, 研究其运行过程中的综合动态效应, 为工程设计和建设提供了重要科学依据; 随后在澜沧江景洪、乌江思林等工程相继开展了相同比尺的整体物理模型试验。

在物理模型试验中, 为保证试验成果的可靠性和准确性, 模型和原型间需满足一定的相似关系。根据升船机各核心部分的受力特性和运行要求及前人的研究成果, 分别探讨承船厢、平衡重系统、塔柱结构、机械同步系统在传统物理模型设计中需满足的相似准则及其全相似模拟需满足的理论相似条件 and 设计思路。

1.1 承船厢

传统的物理模型设计中, 承船厢模型在满足整体水力学模型试验的要求下, 需保证其几何尺寸、流体动力、结构力学等因素与原型相似, 并保证船厢具有足够的结构强度。但在该模拟设计中, 没有考虑到船厢水体晃动引发水中船舶、厢体结构等的动力响应, 无法应用此模型进行水体晃荡对船厢平稳运行的影响及船厢漏水等事故工况导致的升船机运行安全研究。若要对承船厢进行全相似模拟, 还需考虑船厢水弹性相似来设计船厢总体刚度, 研制能反映船厢流固耦合作用的模型材料来满足水体与厢体等的耦合运动相似。现有主要相似条件为:

1) 几何相似。

$$\begin{cases} \lambda_L = L/L_m \\ \lambda_A = \lambda_L^2 \\ \lambda_V = \lambda_L^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: L , A , V 为原型的特征长度、面积和体积; 下标 m 为模型值; λ_L 为整体物理模型几何比尺。

2) 流体动力相似。

研究对象为厢体中具有自由表面的水体, 其满足重力相似准则, 即 $F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}}$ [2], 由此可得:

$$\lambda_v = \lambda_L^{1/2} \quad (2)$$

式中: v 为原型水体的特征速度; L 为原型几何尺寸。

由于流体流动属非定常流, 故有 $S_i = \frac{vT}{L} = \frac{v_m T_m}{L_m}$, 从而可得出周期和频率的模型比尺为:

$$\lambda_T = 1/\lambda_f = \lambda_L^{1/2} \quad (3)$$

式中: T 和 f 分别为周期和频率。

3) 结构力学相似。

由物体质量 m 与体积 V 的关系, 可得 $\lambda_m = \lambda_V = \lambda_L^3$, $\lambda_a = \lambda_v/\lambda_T = 1$, 从而:

$$\lambda_F = \lambda_L^3 \quad (4)$$

式中: a 为提升加速度; T 为周期; F 为系统提升力。

将承船厢简化为一根梁, 其纵向二节点固有频率 $f_2 = \frac{K}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$ 相似, 其中 m 为单位长度船厢质量, K 为钢丝绳刚性系数。根据胡克定律公式 $F = Kx$, 有 $\lambda_K = \lambda_L^2$ [3]。结合上式可得 $EI = f_2^2 L^4 m / K^2$, 故:

$$\lambda_{EI} = \lambda_L^2 \quad (5)$$

式中: EI 为承船厢抗弯刚度。

1.2 平衡重系统

平衡重模型主要满足与原型质量相似和吊点相似。钢丝绳模型在布置上可以有所简化, 但钢丝绳的材料和截面面积须按弹性相似准则确定。现有主要相似条件为:

1) 平衡重质量相似。

$$\lambda_M = \lambda_L^3 \quad (6)$$

式中: M 为平衡重质量。

2) 钢丝绳弹性相似。

$$\lambda_{EA} = \lambda_L^3 \quad (7)$$

式中: E 为钢丝绳弹性模量; A 为钢丝绳截面面积。

1.3 塔柱模型

在以往的模型设计中, 常将塔柱作为绝对刚

性结构来考虑，其不参与系统变形。按此设计的塔柱模型无法体现塔柱在外力和系统作用下的变形，但事实上随着升船机提升高度的增加，提升系统与塔柱间的耦合影响将不可忽略。为了达到塔柱模型的精确，其模型和原型除满足几何相似、结构力学相似外，更应满足提升系统与塔柱间耦合作用的相似。应借鉴以往水弹性和流固耦合试验的模拟经验，研制便于机械加工的高强度、低弹模的模型制作材料，来达到高塔柱结构在荷载作用下的变形和挠度与原型相似。现有主要相似条件为：

- 1) 几何相似。

$$\lambda_L = L/L_m \quad (8)$$

- 2) 结构力学相似。

$$\lambda_F = \lambda_L^3 \quad (9)$$

1.4 机械同步系统模型

在之前的升船机物理模型试验中，机械同步系统通常被局部简化，同步轴、卷筒、定滑轮等满足几何相似，卷筒视为刚性，满足运动相似等。按此设计的机械同步系统无法精确模拟同步轴的扭转变形，无法利用此模型对升船机在各运行工况下同步轴各环节变形以及船厢安全稳定情况进行有效研究，故若要对其进行全相似模拟，需改变同步轴材料和几何相似比尺来使模型扭转变形与原型一致。现有主要相似条件为：

- 1) 几何相似。

$$\begin{cases} \lambda_L = L/L_m = \lambda_L \\ \lambda_D = D/D_m = \lambda_L \end{cases} \quad (10)$$

- 2) 运动相似。

$$\begin{cases} \lambda_v = \lambda_L^{1/2} \\ \lambda_w = \lambda_L^{-1/2} \end{cases} \quad (11)$$

式中： v 为系统提升速度； w 为卷筒转动角速度。

- 3) 结构力学相似。

$$\begin{cases} \lambda_F = \lambda_L^3 \\ \lambda_T = \frac{T}{T_m} = \frac{FD/2}{F_m D_m/2} = \lambda_F \lambda_D = \lambda_L^4 \end{cases} \quad (12)$$

式中： F 为系统提升力； T 为同步轴所受扭矩； D 为同步轴直径。

2 机械同步系统全相似模拟

升船机整体物理模型的全相似模拟，可视为其各核心部分的全相似模拟。在实际模拟中，一些相似条件不能同时满足，故按模拟效果的需求来确定主要相似条件，尽可能使模型和原型在需研究问题上达到完全相似。

2011 年景洪水力浮动式升船机在船厢有水调试过程中，出现了船厢装水后同步轴扭矩增大，船厢逐渐倾斜的现象。原有景洪整体物理模型试验中机械同步系统的相似模拟按文中 1.4 节所述设计，在试验过程中却没有显现同步轴扭转变形导致船厢倾斜的现象，即原模型无法精确模拟同步轴的抗扭变形。而同步轴系统对提高承船厢整体抗倾覆能力的影响十分重大，其安全可靠直接关系到景洪升船机的运行安全。因此，有必要采用新的物理模型模拟方法，精确模拟同步轴抗扭能力，通过物理模型试验，为景洪升船机同步轴改进方案提供试验依据。

2.1 全相似模拟

上文 1.4 节中机械同步系统的相似模拟，设计过程简单，但是无法精确模拟同步轴的抗扭变形，即不能很好地反映提升过程中承船厢的倾斜量，具体推算过程如下：

- 1) 同步轴抗扭刚度 (GI) 公式。

$$GI = G\pi \frac{D^4}{32} \quad (13)$$

式中： G 为材料剪切模量； I 为截面极惯性矩； D 为同步轴直径。

- 2) 同步轴抗扭变形的扭角 (θ) 公式。

$$\theta = \frac{TL}{GI} \quad (14)$$

式中： T 为同步轴所受扭矩； L 为同步轴长度； G 为材料剪切模量； I 为截面极惯性矩。

- 3) 同步轴原型和模型的扭角比尺。

$$\lambda_\theta = \frac{\theta}{\theta_m} = \frac{\lambda_T \lambda_L}{\lambda_G \lambda_I} = \frac{\lambda_L^4 \lambda_L}{\lambda_G \lambda_L^4} = \lambda_L \frac{G_m}{G} \quad (15)$$

式中： θ 为同步轴扭角； T 为同步轴所受扭矩； G 为材料剪切模量； I 为截面极惯性矩； L 和 D 分别为同步轴的长度和直径。

由此可得出, 同步轴模型扭角为 $\theta_m = \frac{\theta}{\lambda_L} \frac{G}{G_m}$ 。

现原型和模型均使用钢材, 其剪切模量 G 和 G_m 相等, 则同步轴模型扭角 $\theta_m = \frac{\theta}{\lambda_L}$ 。

由此可见同步轴原型扭角是模型扭角的 λ_L 倍, 在模型试验中不能精确反映同步轴上产生的抗扭变形及由此引起的承船厢倾斜量, 无法用该模型来分析研究提升过程中承船厢的稳定情况, 而承船厢的稳定情况关系到升船机的运行安全和稳定, 需要在模型中达到精确模拟, 因此, 同步轴原型与模型的扭角相似是机械同步系统全相似模拟的主要相似条件。

故本文根据上述分析提出一种能准确反映垂直升船机机械同步系统同步轴抗扭变形的相似模拟方法, 使机械同步系统达到全相似模拟, 通过相应模型观察研究升船机在各运行工况下船厢水面波动引起的同步轴各环节扭矩、扭转角、变形等特性以及船厢安全稳定情况。具体可以通过改变同步轴材料和几何相似比尺, 使得原型和模型的扭角比尺等于 1 的相似模拟方法来实现, 即:

$$\lambda_\theta = \frac{\theta}{\theta_m} = \frac{\lambda_T \lambda_L}{\lambda_G \lambda_I} = \frac{\lambda_L^4 \lambda_L}{\lambda_G \lambda_D^4} = \frac{\lambda_L^5}{\lambda_G \lambda_D^4} = 1 \quad (16)$$

由此可得同步轴直径几何相似比尺为:

$$\lambda_D = \frac{D}{D_m} = \frac{\lambda_L^{5/4}}{\sqrt[4]{\lambda_G}} = \frac{\lambda_L^{5/4}}{\sqrt[4]{G/G_m}} \quad (17)$$

机械同步系统同步轴模型直径换算公式为:

$$D_m = \frac{D}{\lambda_L^{5/4}} \sqrt[4]{G/G_m} \quad (18)$$

式中: D 为同步轴原型的直径; G 为同步轴原型材料的剪切模量。

该部分的全相似模拟还可通过原型和模型的材料选择来进一步实现:

1) 若原型和模型采用相同的钢材, $G = G_m$,

$$\text{则 } D_m = \frac{D}{\lambda_L^{5/4}} \quad (19)$$

2) 若原型和模型采用不同的材料:

①原型为钢材, 模型为铜, 即 $G = 79 \text{ GPa}$,

$$G_m = 35 \text{ GPa}, \text{ 则 } D_m \approx 1.226 \frac{D}{\lambda_L^{5/4}};$$

②原型为钢材, 模型为有机玻璃, 即 $G =$

$$79 \text{ GPa}, G_m = 3 \text{ GPa}, \text{ 则 } D_m \approx 2.265 \frac{D}{\lambda_L^{5/4}}。$$

2.2 实例

选用景洪升船机机械同步轴系统布置数据, 同步轴外径 $D = 0.355 \text{ m}$, 内径 $d = 0.25 \text{ m}$ 。在船厢 0.4 m 内水面晃动作用下, 同步轴系统承受的最大扭矩为 $240 \text{ kN} \cdot \text{m}$; 船厢倾斜 6 cm 时, 同步轴承受的最大扭矩为 $92 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。景洪升船机整体物理模型几何比尺 $\lambda_L = 10$ 。

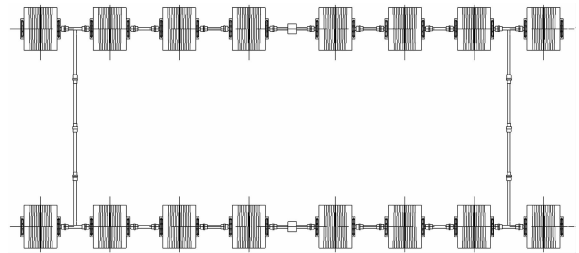
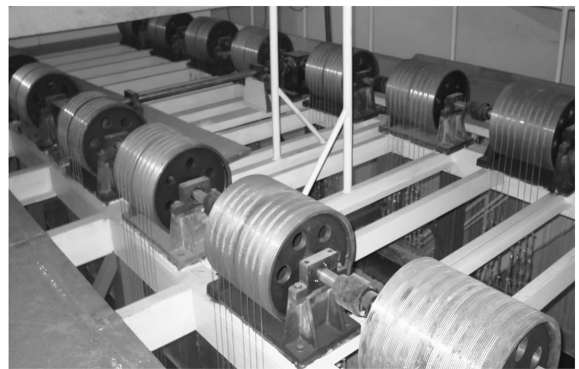


图 1 景洪升船机机械同步系统布置

按上述模拟方法, 改变同步轴直径的几何相似比尺, 使得模型和原型的扭角比尺等于 1, 且为方便制作, 模型中同步轴不采用原型的圆环形式而为实心圆轴, 即:

$$\lambda_\theta = \frac{\theta}{\theta_m} = \frac{\lambda_T \lambda_L}{\lambda_G \lambda_I} = \frac{\lambda_L^4 \lambda_L}{\lambda_G \lambda_I} = \frac{\lambda_L^5}{\lambda_G \lambda_I} = 1 \quad (20)$$

$$\text{同步轴直径相似比尺: } \lambda_D = \frac{D-d}{D_m} \quad (21)$$

同步轴承受的扭矩相似比尺: $\lambda_T = \lambda_L^4$, 即同

$$\text{同步轴模型可承受最大扭矩为 } T_{m\max} = \frac{T_{\max}}{\lambda_L^4} = 24 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

同步轴极惯性矩的相似比尺:

$$\lambda_l = \frac{I}{I_m} = \frac{\frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)}{\frac{\pi}{32}D_m^4} = \frac{D^4 - d^4}{D_m^4} \quad (22)$$

将式(21)和(22)代入式(20)可得机械同步系统同步轴模型直径转换公式为:

$$D_m = \frac{\sqrt[4]{(D^4 - d^4)G/G_m}}{\lambda_L^{5/4}} \quad (23)$$

本全相似模拟还可以通过原型和模型的材料选择来进一步实现:

1) 若原型和模型采用相同的材料 45 号钢, $G = G_m$, 则 $D_m \approx 0.0186$ m。

通过强度计算公式对直径为 0.0186 m 同步轴进行强度校核, 由此可得直径为 0.0186 m 的 45 号钢的承载能力(扭矩)为 354 ~ 483 N·m, 足够承受 24 N·m 的荷载。

2) 若原型和模型采用不同的材料。

①原型为钢材, 模型为铜, 即 $G = 79$ GPa, $G_m = 35$ GPa, 则 $D_m \approx 0.0228$ m。通过强度计算公式对直径为 0.0228 m 同步轴进行强度校核, 由此可得直径为 0.0228 m 的铜的承载能力(扭矩)

为 378 ~ 573 N·m, 足够承受 24 N·m 的荷载。

②原型为钢材, 模型为有机玻璃, 即 $G = 79$ GPa, $G_m = 3$ GPa, 则 $D_m \approx 0.042$ m。通过强度计算公式对直径为 0.042 m 同步轴进行强度校核, 由此可得直径为 0.042 m 的有机玻璃的承载能力(扭矩)为 735 ~ 1131 N·m, 足够承受 24 N·m 的荷载。

根据上述同步轴相似模拟方法, 通过选用不同的模型材料, 可以得到不同的模型尺寸, 以便根据模型制作实况, 合理选择模型材料, 制作相应模型, 降低模型制作难度。比较以上数据, 模型选用和原型不同的铜或有机玻璃, 更利于模型制作。

2.3 模型比尺

上述实例采用的整体模型几何比尺 $\lambda_L = 10$, 按此比尺和上文的模拟方法, 模型中同步轴的尺寸和强度均达到制作要求。若整体模型几何比尺改变, 按以上相似模拟方法可得不同整体模型几何比尺模型同步轴直径及其强度校核(表 1)。

表 1 不同整体模型几何比尺模型同步轴直径及其强度校核

几何比尺	模型材料	同步轴直径/m	最大扭矩/(N·m)	容许承载能力/(N·m)
15	钢	0.0110	4.740	77.4 ~ 105.6
	铜	0.0140	4.740	82.7 ~ 125.2
	有机玻璃	0.0250	4.740	160.6 ~ 247.3
20	钢	0.0080	1.500	26.3 ~ 35.9
	铜	0.0100	1.500	28.1 ~ 42.6
	有机玻璃	0.0180	1.500	54.6 ~ 84.1
25	钢	0.0006	0.614	11.4 ~ 15.5
	铜	0.0007	0.614	12.2 ~ 18.4
	有机玻璃	0.0134	0.614	23.7 ~ 36.4

表 1 数据显示, 随着几何比尺变大, 模型同步轴直径渐小, 虽都通过了强度校核, 但当比尺大到一定地步, 钢制或铜制的同步轴将减小到不利于模型制作的尺寸, 因此, 选择适当的模型比尺在模型设计中是相当重要的。

2.4 分析

传统的升船机整体物理模型不能真实模拟升船机运行的整体特性, 没有完全达到进行物理模

型试验的目的。而通过可以真实反映原型运行状况的全相似物理模型试验, 可解决升船机建设中的技术难题如超高升程升船机运行过程中机械提升系统与塔柱结构间相互耦合影响、高塔柱结构抗震性能、船厢稳定状况等, 能提高升船机整体物理模型模拟技术的准确性和精度, 将更直观地发现原型升船机总体设计方案、设备选型及布置、故障保护和运行方面存在的问题, 保障升船机的

建设和运行安全。因此,研究一种能真正模拟升船机土建、水力学、机械、电气、船舶等多因素的全相似物理模型试验方法是十分必要的。

对于机械同步系统的模拟改变了同步轴材料和几何相似比尺,使模型和原型的扭角比尺等于1,以达到精确模拟升船机运行过程中船厢的倾斜量和抗倾覆能力,这种模拟方法可算是全相似模型试验的一种新方法,可推广到升船机其他核心部件的模拟设计中,针对需要研究的主要问题,研制新材料、制定新的相似比尺使模型尽可能精确地模拟现有整体物理模型中忽视的问题,从而增强升船机整体物理模型的全相似模拟精度。

3 结论

1) 升船机设计和建设中,物理模型试验方法是研究和解决升船机运行中水力学、机电、控制等诸多问题的有效手段。模型相似条件需要综合考虑多方面相似关系,以期尽可能保证物模试验成果的可靠性和准确性。

2) 根据升船机各核心部分自身特性和运行中

受力情况,各部分在模型设计中需满足不同的相似关系。

3) 在升船机机械同步系统模型的相似模拟中,除满足提升高度、提升速度相似,更应满足与原型的扭转变形一致,以便精确模拟升船机提升过程中船厢的稳定状况,进一步实现全相似模拟。同时,通过选用不同的模型材料,可选择更利于制作的模型尺寸,降低模型制作难度。

4) 借鉴机械同步系统模拟的新方法,开展超大船厢超高升程升船机船厢、塔柱结构等部分的全相似模拟研究对提升升船机模型试验基础理论有重要的理论和实用价值。

参考文献:

- [1] 钮新强,宋维邦.船闸与升船机设计[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 左东启.模型试验的理论和方法[M].北京:水利水电出版社,1984.
- [3] 胡亚安.水力浮动式升船机应用基础研究[D].南京:南京水科院,2011.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(上接第29页)

### 参考文献:

- [1] Saville T J R. Laboratory data on wave run-up and overtopping on shore structures[R]. Washington D C: Beach Erosion Board TM-64. US Army Corps of Engineers, 1955.
- [2] Owen M W. Design of seawalls allowing for overtopping[R]. Wallingford: Hydraulics Research Station, 1980.
- [3] De Waal J P, Van der Meer J W. Wave un-up and overtopping on coastal structures [C]//Venice, Italy: Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Coastal Engineer, 1992.
- [4] Schüttrumpf H. Wave overtopping flow on seadikes-experimental and theoretical investigation [D]. Braunschweig: Technical University of Braunschweig, 2001.
- [5] Van Gent M R A. Low-exceedance wave overtopping events: Measurements of velocities and the thickness of water-layers on the crest and inner slope of dikes[R]. the Netherlands: Delft Cluster, 2002.
- [6] Hu K, Mingham C G, Causon D M. Numerical simulation of wave overtopping of coastal structures using the non-linear shallow water equations[J]. Coastal Engineering, 2000, 41(4): 433-465.
- [7] Soliman A. Numerical study of irregular wave overtopping and overflow[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2003.
- [8] Tingqiu Li, Peter Troch, Julien De Rouck. Wave overtopping over a sea dike[J]. Journal of computational physics, 2004, 198: 686-726.
- [9] Lu Yongjin, Liu Hua, Wu Wei, et al. Numerical simulation of two-dimensional overtopping against seawalls armoured with artificial units in regular waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(3): 322-329.
- [10] Jiang Q, An M H, Zhang C K. Numerical analysis of wave attenuation characteristics of four different type permeable breakwaters [C]. Proceedings of 2013 IAHR World Congress, 2013.

(本文编辑 武亚庆)