

中华人民共和国行业标准

# 水运工程模拟试验技术规范

**JTS/T 231—2021**

主编单位:交通运输部天津水运工程科学研究所

批准部门:中华人民共和国交通运输部

施行日期:2021年7月1日

人民交通出版社股份有限公司

2021·北京

# 交通运输部关于发布 《水运工程模拟试验技术规范》的公告

2021 年第 31 号

现发布《水运工程模拟试验技术规范》(以下简称《规范》)。《规范》为水运工程建设推荐性行业标准,标准代码为 JTS/T 231—2021,自 2021 年 7 月 1 日起施行。《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTS/T 231—4—2018)、《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》(JTS/T 231—2—2010)、《通航建筑物水力学模拟技术规程》(JTJ/T 235—2003)和《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234—2001)同时废止。

《规范》由交通运输部水运局负责管理和解释,实施过程中具体使用问题的咨询,由主编单位交通运输部天津水运工程科学研究所答复。《规范》文本可在交通运输部政府网站水路运输建设综合管理信息系统“水运工程行业标准”专栏([mwtis.mot.gov.cn/syportal/sybz](http://mwtis.mot.gov.cn/syportal/sybz))查询和下载。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部  
2021 年 5 月 18 日



## 制定说明

为统一水运工程模拟试验技术要求,近年来交通运输部先后发布施行了《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTS/T 231—4—2018)、《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》(JTS/T 231—2—2010)、《通航建筑物水力学模拟技术规程》(JTJ/T 235—2003)和《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234—2001),在解决重大工程技术问题等方面发挥了重要作用,对我国水运工程模拟试验方法和模拟操作程序起到了良好的规范作用。随着我国水运工程建设的快速发展,工程模拟试验技术领域出现了一批新技术和新方法,为进一步规范和统一水运工程模拟试验方法,提高水运工程模拟试验技术水平,交通运输部水运局组织交通运输部天津水运工程科学研究所等单位,在充分归纳总结现行相关规范使用情况和实践经验的基础上,通过深入调查研究、广泛征求意见和反复修改完善,制定完成《水运工程模拟试验技术规范》。

本规范共分11章11个附录,并附条文说明,主要包括内河水动力模型试验、潮流水动力模型试验、波浪水动力模型试验、通航建筑物水动力模型试验、泥沙模型试验、船舶模拟试验、试验设备和测量仪器、数值模拟等技术内容。

本规范主编单位为交通运输部天津水运工程科学研究所,参编单位为南京水利科学研究院。主要编写人员分工如下:

- 1 总则:李旺生 李一兵
  - 2 术语:李旺生 李一兵
  - 3 基本规定:李旺生 曹民雄 康苏海
  - 4 内河水动力模型试验:曹民雄 李旺生 张明进 杨燕华
  - 5 潮流水动力模型试验:杨 华 李一兵 张慈珩 赵洪波
  - 6 波浪水动力模型试验:王登婷 陈汉宝 高 峰 琚烈红
  - 7 通航建筑物水动力模型试验:胡亚安 李一兵 李 君
  - 8 泥沙模型试验:乐培九 李一兵 杨 华 赵洪波 王建军
  - 9 船舶模拟试验:李一兵 曹民雄
  - 10 试验设备与测量仪器:李华国 胡亚安 杨 华 陈汉宝
  - 11 数值模拟:张华庆 曹民雄 胡亚安 陈汉宝 张明进
- 附录A:曹民雄  
 附录B:王登婷 陈汉宝  
 附录C:高 峰 王登婷  
 附录D:张慈珩 王登婷  
 附录E:陈汉宝 王登婷

附录 F :王登婷 高 峰

附录 G :胡亚安

附录 H :胡亚安

附录 J :张华庆

附录 K :张华庆

附录 L :王建军

本规范于2019年6月17日通过部审,2021年5月18日发布,自2021年7月1日起施行。

本规范由交通运输部水运局负责管理和解释。各单位在执行过程发现的问题和意见,请及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街11号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码:100736)和本规范管理组(地址:天津市滨海新区塘沽新港二号路2618号,交通运输部天津水运工程科学研究所,邮政编码:300456),以便修订时参考。

## 目 次

1	总则	(1)
2	术语	(2)
3	基本规定	(6)
3.1	一般规定	(6)
3.2	研究大纲	(7)
3.3	物理模型制作精度	(8)
3.4	试验资料记录及整理	(8)
3.5	报告编写、审查及资料归档	(8)
4	内河水动力模型试验	(10)
4.1	基本资料	(10)
4.2	模型设计	(11)
4.3	模型制作	(13)
4.4	模型验证试验	(14)
4.5	水流运动试验	(14)
5	潮流水动力模型试验	(16)
5.1	基本资料	(16)
5.2	模型设计	(16)
5.3	模型制作	(18)
5.4	模型验证试验	(19)
5.5	潮流运动试验	(19)
6	波浪水动力模型试验	(21)
6.1	基本资料	(21)
6.2	模型设计	(21)
6.3	模型制作	(25)
6.4	模型率定试验	(26)
6.5	波浪运动试验	(27)
7	通航建筑物水动力模型试验	(33)
7.1	基本资料	(33)
7.2	模型设计	(34)
7.3	模型制作	(36)
7.4	枢纽通航整体模型试验	(37)

7.5	船闸水力学模型试验	(38)
7.6	升船机水力学模型试验	(40)
7.7	中间渠道通航水力学模型试验	(41)
<b>8</b>	<b>泥沙模型试验</b>	<b>(42)</b>
8.1	基本资料	(42)
8.2	模型设计	(43)
8.3	模型制作	(53)
8.4	模型验证试验	(53)
8.5	内河泥沙模型试验	(56)
8.6	潮流泥沙模型试验	(58)
8.7	波浪潮流泥沙模型试验	(58)
8.8	波浪沿岸输沙模型试验	(59)
<b>9</b>	<b>船舶模拟试验</b>	<b>(60)</b>
9.1	基本资料	(60)
9.2	模型设计	(60)
9.3	模型制作	(61)
9.4	模型验证与率定	(62)
9.5	船模航行试验	(63)
9.6	船模泊稳试验	(65)
<b>10</b>	<b>试验设备和测量仪器</b>	<b>(66)</b>
10.1	一般规定	(66)
10.2	供水与控制设备	(66)
10.3	专用水槽和设备	(68)
10.4	水动力模型试验仪器设备	(69)
10.5	泥沙模型试验仪器设备	(70)
<b>11</b>	<b>数值模拟</b>	<b>(72)</b>
11.1	一般规定	(72)
11.2	水流运动数值模拟	(73)
11.3	波浪运动数值模拟	(76)
11.4	泥沙数值模拟	(78)
11.5	船舶操纵数值模拟	(83)
11.6	船闸输水水力特性数值模拟	(83)
11.7	模拟验证	(85)
11.8	方案模拟计算及成果分析	(86)
<b>附录 A</b>	<b>模型加糙方法</b>	<b>(88)</b>
<b>附录 B</b>	<b>波浪试验数据采集和处理</b>	<b>(89)</b>
<b>附录 C</b>	<b>单向波合成多向波模型试验</b>	<b>(92)</b>

---

附录 D	不规则波试验数据统计分析 .....	(94)
附录 E	随机数据时间序列的谱分析 .....	(97)
附录 F	随机数据时间序列的互谱分析 .....	(100)
附录 G	水弹性相似比尺关系 .....	(103)
附录 H	常用材料糙率值 .....	(105)
附录 J	推移质输沙率公式 .....	(106)
附录 K	悬移质分组挟沙力及挟沙力级配 .....	(109)
附录 L	本规范用词说明 .....	(112)
引用标准名录	.....	(113)
附加说明	本规范主编单位、参编单位、主要起草人、主要审查人、总校人员 和管理组人员名单 .....	(114)
条文说明	.....	(117)





## 1 总 则

**1.0.1** 为统一水运工程模拟试验的主要技术要求,提高水运工程模拟试验技术水平,制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于河流、湖泊、运河、水库、潮汐河口、海岸及近海水运工程涉及的水动力、泥沙和船舶模拟试验。

**1.0.3** 水运工程模拟试验除应按本规范执行外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 水运工程模拟试验 Modelling Test for Port and Waterway Engineering

水运工程模拟试验通过物理模型试验或数值模拟计算,复演和预报水运工程建成前后水动力、泥沙输移、河床或海床演变以及船舶航行条件等的方法和手段,包括物理模型试验和数值模拟计算。

### 2.0.2 物理模型 Physical Model

将研究对象按一定相似条件或相似准则缩制而成的实体模型。

### 2.0.3 数值模拟 Numerical Simulation

通过数值求解径流或潮流、波浪、泥沙、船舶的运动方程,研究和预测水运工程引起的水流、泥沙、船舶运动变化、床面冲淤变化等工程效果的计算方法,又称为数学模型。

### 2.0.4 整体模型 Whole Model

以原型整体为研究对象的模型。

### 2.0.5 局部模型 Local Model

以原型局部整体为研究对象的模型。

### 2.0.6 断面模型 Sectional Model

以原型断面为研究对象的模型。

### 2.0.7 正态模型 Undistorted Model

平面与垂直几何尺度都按同一比尺缩制的物理模型。

### 2.0.8 变态模型 Distorted Model

平面与垂直几何尺度采用不同比尺缩制的物理模型。

### 2.0.9 模型变率 Model Distortion Ratio

模型平面几何比尺与垂直几何比尺的比值。

### 2.0.10 定床模型 Fixed Bed Model

在床面固化不变形条件下,模拟研究径流、潮流、波浪运动的模型。

### 2.0.11 动床模型 Movable Bed Model

在河床或海床铺设模型沙条件下,模拟研究在径流、潮流、波浪动力作用河床或海床发生冲淤变形的模型。

### 2.0.12 重力相似 Gravity Similarity

原型与物理模型水流的惯性力与重力的比值相等,又称为弗劳德(Froude)相似。

### 2.0.13 阻力相似 Resistance Similarity

原型与物理模型的水流惯性力与阻力的比值相等,又称为雷诺(Reynolds)相似。

#### 2.0.14 运动相似 Kinematic Similarity

原型与模型的相应质点运动轨迹几何相似,且质点运动经过相应轨迹所需的时间保持固定的比例关系,即速度场的几何相似。

#### 2.0.15 弹性相似 Elasticity Similarity

模型与原型的惯性力与弹性力的比值相等。

#### 2.0.16 内河水动力模型试验 Modelling Test for River Hydrodynamics

依照相似条件,将研究河段或水库、运河、湖泊研究区域及相关工程建筑物缩制成一定比尺的定床模型,模拟研究河流、水库、运河、湖泊水动力特性及其变化的试验,又称为水流定床模型试验。

#### 2.0.17 潮流水动力模型试验 Modelling Test for Tide Hydrodynamics

依照相似条件,将研究潮流河段、河口、海岸或近海及相关工程建筑物缩制成一定比尺的定床模型,模拟研究潮流或径潮流水动力特性及其变化的试验,又称为潮流定床模型试验。

#### 2.0.18 波浪水动力模型试验 Modelling Test for Wave Dynamics

依据相似条件,将研究河口、海岸或海域及相关工程建筑物缩制成一定比尺的定床模型,模拟波浪为主要动力因素及其与建筑物、岸滩等相互作用的试验。

#### 2.0.19 通航建筑物水动力模型试验 Modelling Test for Hydrodynamics of Navigation Structures

依据相似准则,将通航建筑物及其上下游附近范围的河道整体缩制成一定比尺的定床模型,或将通航建筑物缩制成一定比尺的整体模型或局部模型,研究通航建筑物水动力特性及其变化、通航建筑物上下游河段水动力特性及其变化、船舶航行与停泊条件的试验。

#### 2.0.20 泥沙模型试验 Modelling Test for Sediment

依照相似条件,将研究河段、水库、湖泊、河口、海岸或近海及相关工程建筑物缩制成一定比尺的动床或定床模型,模拟研究内河水动力、潮流动力或波浪动力作用下泥沙输移状态、河床或海床冲淤变化、工程效果的试验。

#### 2.0.21 船模航行试验 Ship Navigation Modelling Test

依据相似条件,将船舶或船队缩制成一定比尺的模型,在相同比尺的物理模型中,通过遥控自航,研究工程实施效果和船舶航行条件的试验。

#### 2.0.22 河工模型试验 River Engineering Model Test

依据相似条件,将研究河段及相关工程建筑物缩制成一定比尺的物理模型,并在模型中研究水流与泥沙输移、河床冲淤变化及工程效果的试验。

#### 2.0.23 潮流泥沙模型试验 Tide-current and Sediment Model Test

依据相似条件,将研究潮流河段、河口、海岸、近海及相关工程建筑物缩制成一定比尺的定床模型,其中局部区域按需要制作为动床,研究在径潮流动力作用下泥沙输移状态、河床或海床冲淤变化及工程效果的试验。

#### 2.0.24 波浪沿岸输沙模型试验 Modelling Test for Longshore Sediment Transport

依据相似条件,将研究海域的岸滩及相关工程建筑物缩制成一定比尺的动床模型,研

究波浪动力作用下沿岸输沙的试验。

**2.0.25 床沙 Bed Material**

河床泥沙和海床泥沙统一称为床沙。

**2.0.26 模型沙 Model Sand**

物理模型中按照相似条件模拟原型泥沙的固体颗粒状材料。

**2.0.27 推移质泥沙模型 Bed Load Model**

模拟原型以推移质泥沙输移为主的模型。

**2.0.28 悬移质泥沙模型 Suspended Load Model**

模拟原型以悬移质泥沙输移为主的模型。

**2.0.29 模型加糙 Calibration of Model Roughness**

调整物理模型床面的粗糙程度,以满足水流阻力相似要求的方法。

**2.0.30 模型验证试验 Model Validation Test**

检验模型水流、泥沙输移和床面冲淤变化与原型相似程度的试验。

**2.0.31 缩尺效应 Scale Effect**

物理模型试验受缩尺影响不能同时满足全部相似条件,而造成模型值与原型值之间偏差的现象。

**2.0.32 船模操纵性 Ship Model Maneuverability**

船模在航行中,受遥控操作者控制而保持或改变航速、航向和位置的性能。

**2.0.33 Z形试验 Zigzag Test**

一种判定船舶操纵性的方法,又称为标准操纵性试验。操纵船舶按“Z”形航线进行试验,以求取船舶的操纵性指数 $K$ 、 $T$ ,从而全面评判船舶的旋回性、追随性和航向稳定性等性能的试验方法。

**2.0.34 边界条件 Boundary Conditions**

物理模型或数值模拟中边界上水位、流速、波浪和泥沙等控制条件。

**2.0.35 初始条件 Initial Conditions**

模型试验或数值模拟起始时刻的水位、流速、波浪和泥沙等条件。

**2.0.36 通航水流条件 Navigation Flow Conditions**

与船舶通航有关的水流条件,包括水面比降、流速、流向、流态和波浪等要素。

**2.0.37 减压模型试验 Model Test on Decompression**

利用减压设备研究水工建筑物在高速水流作用下水流空化现象的物理模型试验。

**2.0.38 潮流数值模拟 Tidal Current Numerical Simulation**

研究潮流河段、河口、海岸和近海潮流运动的数学模型,包括二维和三维数学模型。

**2.0.39 通航水力学数值模拟 Navigable Hydraulics Numerical Simulation**

研究枢纽、通航建筑物、中间渠道等与通航有关的水流运动数学模型,包括二维和三维数学模型。

**2.0.40 波浪运动数值模拟 Wave Motion Numerical Simulation**

研究波浪传播的数学模型。

**2.0.41 泥沙数值模拟 Sediment Numerical Simulation**

研究径流、潮流或波浪动力作用下的泥沙输移和床面变形的数学模型,包括河流一维、二维、三维水沙数学模型,潮流二维、三维泥沙数学模型,波浪潮流泥沙数学模型、波浪沿岸输沙数学模型。

**2.0.42 船舶操纵数值模拟 Ship Maneuvering Numerical Simulation**

研究船舶操纵运动的数学模型。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 水运工程模拟试验应根据水运工程项目的技术需要选用物理模型试验或数值模拟计算,必要时应同时进行物理模型试验和数值模拟计算。

**3.1.2** 物理模型试验可分为水动力模型试验、泥沙模型试验和船舶模拟试验。应根据下列不同研究内容选用相应模型试验。

**3.1.2.1** 研究内河、湖泊、运河、水库中港口工程、航道工程、桥渡工程平面布置及其对水流条件和河床冲淤变化影响时,应采用河工模型试验,必要时应同时进行船模航行试验,并宜按下列原则选用:

- (1) 研究工程对水流运动影响时,采用内河水动力模型试验;
- (2) 研究以推移质泥沙输移为主的河床冲淤变化时,采用内河推移质泥沙模型试验;
- (3) 研究以悬移质泥沙输移为主的河床变化时,根据淤积和冲刷的特性,选择内河悬移质泥沙定床模型或动床模型试验;
- (4) 研究推移质泥沙、悬移质泥沙引起的河床变化时,采用内河全沙动床模型试验。

**3.1.2.2** 研究潮流河段、河口、海岸和近海各种工程措施对工程区域及其附近水域的潮位、流场、海床影响的模型试验,宜按下列规定选用:

- (1) 研究工程对径、潮流运动影响时,采用潮流水动力模型试验;
- (2) 研究潮流作用下的悬移质泥沙输移淤积问题时,采用潮流悬移质泥沙定床模型试验;
- (3) 研究径、潮流作用下的海床或河床冲淤变化时,采用潮流泥沙模型试验;
- (4) 研究波浪潮流作用下的海床或河床冲淤变化时,采用波浪潮流泥沙模型试验;
- (5) 研究波浪作用下的沙质海岸岸滩演变时,采用波浪沿岸输沙模型试验。

**3.1.2.3** 研究波浪传播与变形及其对建筑物的作用,应采用波浪模型,并宜按下列原则选用:

- (1) 研究波浪传播与变形、港内水域平稳度和船行波,或研究斜向波、多向波和船行波等对建筑物作用时,采用整体模型试验;
- (2) 研究波浪对斜坡式、直墙式建筑物的正向作用时,采用断面模型试验;
- (3) 研究桩基、墩柱建筑物、水下管线、浮式建筑物和船舶系泊等在波浪作用下的稳定及受力问题时,采用建筑物断面模型或建筑物局部模型、建筑物整体模型试验。

**3.1.2.4** 研究通航建筑物水动力学特性时,应采用通航建筑物水动力模型试验,并宜按下列原则选用:

(1) 研究枢纽平面布置、运行和施工对通航水流条件的影响时,采用枢纽通航整体模型试验,必要时同时进行船模航行试验;

(2) 研究船闸输水系统水力学特性、船舶停泊条件时,采用船闸水力学整体模型试验;研究整体模型难以解决的输水系统局部问题时,采用船闸水力学局部模型试验;研究输水阀门工作条件时,采用输水阀门水力学模型试验,输水阀门水力学模型分为非恒定流常压模型、恒定流减压模型、非恒定流减压模型和门楣切片模型;研究工作闸门运行阻力及启闭机运行方式时,采用工作闸门水力学模型试验;

(3) 研究升船机水力特性、运行特性和船舶停泊与航行条件时,采用升船机水力学模型试验;

(4) 研究中间渠道通航水力特性、断面优化和研究水流或波浪对岸坡稳定的影响时,采用中间渠道通航水力学模型试验,必要时同时进行船模试验。

**3.1.2.5** 研究船舶航行条件、船舶泊稳条件时应采用船舶模拟试验,并宜按下列原则选用:

(1) 研究船舶航行条件时,采用船模航行试验;

(2) 研究船闸闸室泊稳条件、船闸引航道泊稳条件、船舶靠离泊条件时,采用船模泊稳试验。

**3.1.3** 数值模拟计算可分为径流、潮流、波浪及泥沙数值模拟计算和枢纽通航水力学数值模拟、船闸输水水力特性数值模拟、船舶操纵数值模拟计算等,应根据水流运动特征、工程特性等选用。

## 3.2 研究大纲

**3.2.1** 物理模型试验和数值模拟计算应根据研究任务的目的和要求,编制相应的研究大纲。

**3.2.2** 物理模型试验研究大纲应包括下列主要内容:

- (1) 项目概况、研究目的与要求、研究内容和技术路线;
- (2) 所需各项基本资料;
- (3) 研究河段或海域自然条件分析;
- (4) 模型设计与验证;
- (5) 试验的边界条件及其代表性分析;
- (6) 试验的方案及组次安排;
- (7) 主要研究人员、试验仪器设备;
- (8) 研究工作进度计划、预期目标和预期提交的成果;
- (9) 研究经费预算。

**3.2.3** 数值模拟计算研究大纲应包括下列主要内容:

- (1) 项目概况、研究目的和要求、研究内容和技术路线;
- (2) 所需各项基本资料;
- (3) 研究河段或海域自然条件分析;



- (4)模型建立与验证;
- (5)计算的边界条件及其代表性分析;
- (6)计算方案及组次安排;
- (7)主要研究人员;
- (8)研究进度计划、预期目标和预期提交的成果;
- (9)研究经费预算。

### 3.3 物理模型制作精度

#### 3.3.1 地形制作精度的控制应符合下列要求:

- (1)高程控制设置一个或多个水准点,多个水准点的高程允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ;
- (2)模型地形和模型中各工程的高程允许偏差为 $\pm 1.0\text{mm}$ ;
- (3)模型地形的平面位置允许偏差为 $\pm 10\text{mm}$ 。

#### 3.3.2 水工建筑物模型制作精度根据试验要求、建筑物尺度和加工材料的不同,应符合下列规定:

- (1)波浪试验中的建筑物加工尺寸允许偏差为 $\pm 1.0\text{mm}$ ,其他水工建筑物加工尺寸允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ;
- (2)各部分高程允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ;
- (3)轴线允许偏差为 $\pm 0.1^\circ$ ,且平面位置允许偏差为 $\pm 10\text{mm}$ 。

#### 3.3.3 船模制作精度控制应符合下列规定:

- (1)单船长度允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ ,宽度允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ,水线刻度允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ;
- (2)船队编队后的尺度允许偏差为 $\pm 1\%$ ;
- (3)船模重心位置允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ 。

### 3.4 试验资料记录及整理

#### 3.4.1 试验人员应严格执行操作规程。

3.4.2 试验应做好记录,并做到随测随记,记录值发生错误时应杠改。试验资料应及时整理、校核和装订成册。

3.4.3 采用计算机控制、采集和数据处理的试验记录,应根据试验要求和内容将试验过程中间成果和最终成果分别保存或按照一定表格形式输出打印,并形成数据档案备份文件。

3.4.4 当发现试验资料有问题和差错时应重测,资料的整理必须真实、完整。

3.4.5 试验的主要成果宜绘制成相关图表或拟合为经验公式。

### 3.5 报告编写、审查及资料归档

3.5.1 报告的编写应完整描述相关的自然条件、研究手段、计算或试验条件、方案计算或试验成果、试验结论等。

**3.5.2** 报告完成后,宜对成果报告进行审查验收或鉴定。

**3.5.3** 模拟研究工作结束后,研究所用的原型资料和模型试验的主要资料、分析计算成果、研究报告、项目合同、报告审批表、审查验收或鉴定意见书等应按国家科技档案规定及档案管理规定整理归档。

## 4 内河水动力模型试验

### 4.1 基本资料

4.1.1 内河水动力模型试验的基本资料应满足试验要求,主要资料应包括制模地形图、相关的水文资料、分析资料、工程设计方案等。

4.1.2 制模地形图宜满足下列要求:

(1)测图范围包括工程段及其进、出口调节段,当进、出口调节段为弯道时将范围加长至完整的弯道河段;

(2)地形图为近期在接近设计最低通航水位时施测,陆上地形测至常年洪水位以上;

(3)测图比例根据河流大小、研究问题性质等确定,一般采用1:1000~1:10000;山区河流礁石群等复杂地形区域采用1:500,港口、桥梁、枢纽工程等拟建处地形采用1:500~1:1000,地形特别复杂处局部采用1:200;测图换算成统一的基准面和坐标系。

4.1.3 水文资料的收集、观测与分析除应符合现行行业标准《水运工程水文观测规范》(JTS 132)、《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定外,尚应满足下列要求。

4.1.3.1 水位观测资料宜包括下列内容:

(1)试验河段内有5个以上测点的水位观测资料,其中试验河段最下游和入汇支流河口内有固定测点的水位观测资料;

(2)同一水文年内接近设计最小通航流量、多年平均流量及常年洪水流量的瞬时水面线资料,其中接近设计流量的水位资料与制模地形资料同期观测;

(3)固定测点水位观测时段根据滩性而定,浅滩河段观测时段包括一个水文年内的枯、中、洪水期,急滩河段观测时段包括成滩期至消滩,险滩河段观测时段包括出险期至消滩。

4.1.3.2 流速、流态观测资料宜包括下列内容:

(1)与水位观测同期的3个以上断面流速分布与流向资料,其中工程处至少有1个断面、工程上下游各有1个断面;

(2)以改善水流条件为目的的工程研究河段,工程区域适当增加出现碍航水位时的流速分布、表面流迹线及流态资料;

(3)分汊河段主汊与各支汊断面的流速分布与流向资料。

4.1.3.3 宜收集相邻水文站与制模地形测量同一水文年的流量、水位资料。

4.1.3.4 宜收集试验河段近期典型部位的滩、槽河床质泥沙级配曲线资料。

4.1.4 工程设计方案有关资料宜包括下列内容:

(1)航道工程资料包括工程方案平面布置图、航道尺度、航行允许的流速和比降、设

计参数等；

(2) 桥梁工程资料包括桥位布置及桥型方案等；

(3) 港口工程资料包括工程方案平面布置图、建筑物结构图，码头设计高水位、设计低水位、施工水位和码头前沿设计高程及设计水深等。

4.1.5 分析资料宜包括试验河段历年河道地形图，已建建筑物引起的局部冲淤变化、汉道分流分沙等有关资料。

## 4.2 模型设计

4.2.1 模型应满足下列相似条件：

几何相似

$$\lambda_l = l_p / l_m \quad \text{及} \quad \lambda_h = h_p / h_m \quad (4.2.1-1)$$

水流连续性相似

$$\lambda_{t_1} = \frac{\lambda_l}{\lambda_h^{1/2}} \quad (4.2.1-2)$$

重力相似

$$\lambda_v = \lambda_h^{1/2} \quad (4.2.1-3)$$

阻力相似

$$\lambda_n = \lambda_h^{7/6} / \lambda_v \lambda_l^{1/2} \quad \text{或} \quad \lambda_n = \lambda_h^{2/3} / \lambda_l^{1/2} \quad (4.2.1-4)$$

式中  $\lambda_l$ ——平面几何比尺；

$l_p$ ——原型平面几何尺度；

$l_m$ ——模型平面几何尺度；

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺；

$h_p$ ——原型垂直几何尺度；

$h_m$ ——模型垂直几何尺度；

$\lambda_{t_1}$ ——水流时间比尺；

$\lambda_v$ ——流速比尺；

$\lambda_n$ ——糙率比尺。

4.2.2 模型的流量比尺应按下式计算：

$$\lambda_Q = \lambda_l \lambda_h^{3/2} \quad (4.2.2)$$

式中  $\lambda_Q$ ——流量比尺；

$\lambda_l$ ——平面几何比尺；

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺。

4.2.3 对于桩基码头，尚宜满足桩群阻力的相似条件：

$$\lambda_{C_0} \lambda_{A/A_0} = 1 \quad (4.2.3)$$

式中  $\lambda_{C_0}$ ——桩群阻力系数比尺，其中  $C_0$  为阻力系数；

$\lambda_{A/A_0}$ ——桩群阻水面积比比尺，其中， $A$  为垂直于水流方向平面上各单桩投影面积之和 ( $\text{m}^2$ )、 $A_0$  为垂直于水流方向平面上桩群外包线的面积 ( $\text{m}^2$ )。

#### 4.2.4 模型设计的限制条件应满足下列规定。

##### 4.2.4.1 垂直几何比尺宜满足下列公式的要求：

$$\lambda_h \leq 4.22 \left( \frac{V_p h_p}{\nu} \right)^{2/11} \xi_p^{8/11} \lambda_1^{8/11} \quad (4.2.4-1)$$

$$\xi_p = 2gn_p^2/h_p^{1/3} \quad (4.2.4-2)$$

式中  $\lambda_h$ ——垂直几何比尺；  
 $V_p$ ——原型平均流速(m/s)；  
 $h_p$ ——原型平均水深(m)；  
 $\nu$ ——运动黏滞系数( $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ )；  
 $\xi_p$ ——原型阻力系数；  
 $\lambda_1$ ——平面几何比尺；  
 $g$ ——重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )；  
 $n_p$ ——曼宁糙率系数。

4.2.4.2 当垂直几何比尺不满足第4.2.4.1款的规定时,断面平均的水流雷诺数应大于1000。

4.2.4.3 模型试验段内的浅滩段低水位下的水深不宜小于0.03m。

4.2.4.4 模型糙率宜控制在0.012~0.030。

4.2.4.5 变态模型的模型变率宜为2~5,宽深比小的河段取小值,反之取大值;河床窄深、河道弯曲、地形复杂,水流急险、紊乱的碍航河段或枢纽河段宜按正态模型设计。

4.2.4.6 开展非恒定流试验的模型,其垂直几何比尺不宜过大,且模型重力相似不得偏离。

#### 4.2.5 模型范围应符合下列规定。

4.2.5.1 模型试验段范围应根据试验目的、要求,并结合水文条件、河道情况和工程建筑物对上、下游河道影响范围确定。

4.2.5.2 模型除试验段外,还宜包括进、出口调节水流的非试验段,非试验段长度宜取2倍~3倍试验段洪水河宽。

4.2.5.3 当进口段为弯道时,模型应延长至弯道以上的顺直河段,顺直段长度宜取3倍~5倍的洪水河宽。

4.2.5.4 有重要支流入汇的河段,模型宜包括支流10m~15m河道地形。

#### 4.2.6 模型几何比尺的确定应满足下列要求：

- (1)根据试验河段特点、滩险特性和研究目的,选择正态模型或变态模型;
- (2)根据试验目的与要求、模型范围、试验场地、动力设备、供水条件等确定平面几何比尺;
- (3)根据第4.2.1条和第4.2.4条的规定确定垂直几何比尺;
- (4)当模型需进行泥沙试验时,垂直几何比尺需兼顾模型沙的选择。

#### 4.2.7 模型糙率与加糙方式宜满足下列要求：

- (1)选择试验河段中河床较规则的区段,分别计算各级流量的原型糙率,并由

式(4.2.1-4)的糙率比尺初定模型糙率;

(2)模型加糙颗粒的大小及排列方式,由要求的模型糙率值,按附录 A 经验公式求得,或由水槽试验确定;

(3)变态模型采用颗粒密排或有间距的方式加糙;模型试验段平均水深小于4cm时,采用密排或其他不影响近底流态的方式加糙,也可以在航槽中或枯水河床内采用颗粒密排加糙,其他部位采用有间距加糙;

(4)山区河流模型,当一种加糙方式难于使各级流量的水面线达到相似时,各级流量间的床面采用不同或多种加糙方式;

(5)平原顺直河段的模型,采用一种加糙方式,使对工程起重要作用的试验流量级的水面线达到相似,允许其他流量级的重力相似有所偏离,但允许偏差为 $\pm 30\%$ ,并保证模型与原型水流流态相同;

(6)模型加糙不影响枯水水深、过水断面面积与天然相似;

(7)同时进行船模航行试验时,模型加糙物不妨碍船模航行。

**4.2.8** 模型设计应绘制模型平面布置总图,总图中宜包括模型河段范围,导线网,模型进、出口段,模型供水、回水及排水系统等布置。

### 4.3 模型制作

**4.3.1** 制模应采用导线网进行平面控制,导线网布设宜满足下列要求:

(1)顺直河段采用直导线控制;

(2)弯曲、分汊型河段采用三角形导线网控制;

(3)主导线布设在河道地形中部,两侧至少各设一条与之平行的辅助导线,特别宽的河段加设辅助导线。

**4.3.2** 模型地形控制应满足下列要求:

(1)制模断面布置要控制原型地形的特征及其变化,模型断面间距取50cm~80cm,地形复杂处需加密,特殊地形、微地形按等高线制作;

(2)断面各点高程的量读采用实测数值,对断面线未经过实测点的部位,采用等高线或实测点高程内插求得;

(3)采用不易变形的制模断面板。

**4.3.3** 模型制作宜满足下列要求:

(1)在制模场地先进行主导导线放样、量放断面位置,并砌筑模型边墙,边墙高于试验最高水位10cm;

(2)模型断面安装后用填充材料填实;当采用密排加糙时,填实面至断面口预留水泥粉面的厚度不小于加糙物2倍粒径;

(3)模型粉面前,对断面位置和高程进行校核;模型粉面时,按两断面的等高点平刮水泥砂浆,并按地形图制作微地形;

(4)模型粉面完成后,选择重点断面复核高程和特征地形。

**4.3.4** 根据模型设计初定的糙率,应按第4.2.7条的规定对模型进行加糙。

4.3.5 桩基码头应按桩群阻力相似要求加工制作。

4.3.6 试验设备、量测仪器的安装及调试应符合下列规定：

(1)根据模型试验要求、模型流量、试验场地，选择供水系统及量水设备，并进行制作、安装及调试；

(2)根据模型试验要求，选择水位、流速、流向等测量仪器，并进行安装及调试；在模型边墙上安装水平轨道与架设流速、流向专用测桥。

#### 4.4 模型验证试验

4.4.1 模型水面线应通过糙率调整进行验证，并应符合下列规定。

4.4.1.1 宜验证洪、中、枯三级流量的水面线，山区河流的水位允许偏差为原型水位 $\pm 0.10\text{m}$ ，平原河流的水位允许偏差为原型水位 $\pm 0.05\text{m}$ ；水面比降和落差应与原型一致。

4.4.1.2 平原河流水面线验证时，如糙率调整有困难，可调整流量比尺，使水面线达到相似，但模型重力相似的偏离值应符合第4.2.7条第(5)项的规定。

4.4.2 模型验证断面的流速分布应与原型基本一致，流量允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

4.4.3 泡漩水、回流等位置和范围应与原型相似，有条件时可验证泡高及回流速度，表面流迹线应与原型分布规律基本一致。

4.4.4 分汊河段应验证各汊分流量，主汊流量允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

#### 4.5 水流运动试验

4.5.1 工程前水流特性试验的流量级应选择包括设计最小通航流量至设计最大通航流量在内的多级流量；观测内容应根据滩险特性和工程性质等确定。

4.5.2 工程方案试验应先进行设计方案试验，再进行修改方案试验。

4.5.3 急滩整治方案试验应满足下列要求。

4.5.3.1 应以成滩期最汹水位与设计水位的流量为重点进行试验，应观测水位、滩口上、中、下及其上、下游等处流速分布，有需要时尚应观测滩段航线代表船舶或船队长度的局部比降及分布、横向流速、回流及泡漩水等。

4.5.3.2 严重碍航的急滩整治宜结合船模航行试验进行方案优化。

4.5.4 险滩整治工程方案试验应满足下列要求。

4.5.4.1 应按险滩成滩期最汹水位与设计水位的流量为重点进行试验，宜在滩区及其上、下游布设若干断面，观测流速分布、流态及沿程水位。

4.5.4.2 严重碍航的险滩整治宜结合船模航行试验进行方案优化。

4.5.5 沙卵石浅滩应以整治流量为重点进行试验，石质浅滩应以设计流量为重点进行试验，应观测工程区及其上、下游河段若干个断面流速分布和沿程水位。

4.5.6 湖区航道整治时，采用整治建筑物整治的试验应按第4.5.5条的规定执行；工程以疏浚为主的应按整治流量和设计最小通航流量为重点进行试验。

4.5.7 水库变动回水区及常年回水区末端航道整治工程设计方案试验应按坝前最低通航水位进行；应观测沿程各站的水位、工程区段及其上、下游若干个断面流速分布及流态。

**4.5.8** 枢纽下泄非恒定流条件试验应以电站日调节和大坝泄洪、切机最不利方式为重点进行试验,应观测坝下游河段沿程若干断面的水位、比降、流速、流态随时间的变化过程及传递规律。

**4.5.9** 桥渡通航水流条件工程方案试验应以包括最大通航流量、最小通航流量以及最不利通航流量等在内的特征流量为重点进行,应观测桥位及上、下游若干个断面表面流速分布,表面流向线、流态及沿程水位。当设计方案不能满足要求时,可调整桥位、桥型布置或采用整治工程进行修改方案试验。

**4.5.10** 港口水流条件试验应以设计高水位、设计低水位对应的流量为主进行,在港区及上、下河段布设若干断面,观测流速分布、流向及沿程水位。对于受枢纽下泄非恒定流影响较大的港口,还应观测枢纽日调节最不利方式时港区的水位、流速过程及变幅,以及船舶的系缆力和撞击力。

**4.5.11** 推荐方案应在工程方案试验成果的比较、分析基础上,结合工程量、施工条件等,经综合论证后提出。



## 5 潮流水动力模型试验

### 5.1 基本资料

5.1.1 潮流水动力模型试验的基本资料应视研究问题性质而有所侧重,主要包括水深地形图、水文资料、分析资料、工程方案以及满足试验要求的其他有关资料。

5.1.2 水深地形图资料宜符合下列规定。

5.1.2.1 制模应采用近期有代表性的水深测图资料,用图范围应超出研究区域。

5.1.2.2 制模测图时间宜与水文测验时间相近;地形相对稳定的研究水域,时间间隔可适当放宽。

5.1.2.3 制模测图比例应根据拟研究工程规模、研究问题性质等确定,一般应采用1:5000~1:25000;试验区测图比例宜采用1:2000~1:10000;测图应换算为统一的高程基准面和坐标系。

5.1.3 水文泥沙资料宜符合下列规定。

5.1.3.1 水文测点垂线和潮位站布置、观测内容、方法和要求以及使用的仪器设备按试验研究要求确定,应满足现行行业标准《水运工程水文观测规范》(JTS 132)、《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定。全潮同步水文测验资料应满足下列要求:

(1)模型试验范围内有不少于5条水文测点垂线,重要控制水域断面上有不少于3条水文测点垂线的水文泥沙资料;

(2)水文测点垂线包括洪、枯季或代表性季节大、中、小全潮的水文泥沙资料;

(3)模型试验范围内潮位站不少于2个,潮位观测时间与全潮水文测验同步。

5.1.3.2 邻近河口或河口有径流汇入的模型应包括河道洪水期在内的水文泥沙资料 and 与全潮水文测验期同步的径流量、输沙量资料。

5.1.3.3 在河口或海域有水流分汊时,模型试验范围内应有断面流量及流量分配资料,并应有大潮或中潮期的涨、落潮流路和相应的潮位观测资料。

5.1.4 工程方案资料应有工程方案平面布置图、建筑物结构图、设计高水位、设计低水位及其说明等。

5.1.5 分析资料宜包括试验研究工程区域在内的历次测图、海图和水文观测的历史资料以及气象、潮汐、波浪、潮流、含沙量、盐度、底质等观测资料。

### 5.2 模型设计

5.2.1 模型的相似条件应符合第4.2.1条的规定,流量比尺应符合第4.2.2条的规定,潮量比尺应按下式计算:

## 潮量比尺

$$\lambda_w = \lambda_l^2 \lambda_h \quad (5.2.1)$$

式中  $\lambda_w$ ——潮量比尺；  
 $\lambda_l$ ——平面几何比尺；  
 $\lambda_h$ ——垂直几何比尺。

**5.2.2** 模型设计的限制条件应符合第4.2.4.1款~第4.2.4.4款的规定。

**5.2.3** 模型范围应符合下列规定。

**5.2.3.1** 模型试验段周围应设置过渡段。在单边界或双边界生潮模型中,试验段两侧均应设置过渡段;在四周以敞开海域作为边界时,四周均应设置过渡段。过渡段宽度和长度应保证试验段水流运动相似。

**5.2.3.2** 模型试验段范围应根据试验目的、要求和原型潮流流场确定,其范围应包括工程及其可能影响到的区域。当试验段有建筑物时,岸滩范围的宽度和长度宜大于3倍建筑物的凸出部分长度。

**5.2.4** 模型几何比尺的确定应符合下列规定。

**5.2.4.1** 模型可采用变态模型,模型变率可取3~10。

**5.2.4.2** 模型平面几何比尺应根据模型范围、试验目的和要求、试验场地大小和布置确定,模型平面几何比尺宜在1000以内。

**5.2.4.3** 模型垂直几何比尺应满足第4.2.1条和第5.2.2条的规定,结合生潮设备生潮能力、径流设备供水能力和水库蓄水量等因素综合确定。当模型需进行泥沙试验时,垂直几何比尺应兼顾模型沙的选择。

**5.2.5** 模型糙率应满足阻力相似的要求,通过原型床面糙率和由式(4.2.1-4)的糙率比尺计算初定;当模型床面材料糙率达不到要求而需要加糙时,宜采用有间距加糙或密排加糙方法,可根据要求的模型糙率值,按附录A经验公式求得,或通过水槽试验确定。

**5.2.6** 模型平面布置和潮汐控制方式应符合下列规定。

**5.2.6.1** 模型边界条件应与天然潮流情况相吻合,生潮应根据工程要求、现场潮流方向、边界情况和模型试验场地、试验设备等具体情况采用单边、双边或多边的控制方式。

**5.2.6.2** 在有径流汇入的河口和海岸,模型下边界宜采用潮位控制,上边界可采用扭曲河段模拟纳潮量,并在扭曲河段末端施放径流,也可控制其潮流量过程。

**5.2.6.3** 当模型范围仅为河口一段或靠岸一侧,涨、落潮流为往复流时,应采用双边界生潮控制。

**5.2.6.4** 当模型试验范围处于海岸或河口的开敞部分且流态复杂时,应扩大模型范围或进行三面边界流量调节模拟控制。

**5.2.6.5** 当模型试验范围处于海域中,且水流状况较复杂时,模型应按涨、落潮主流向方向布置,两端采用流量或水位控制,模型两侧进行边界流量调节模拟控制。

**5.2.6.6** 在河口潮流模型中,试验段较短时,下边界宜采用潮位控制,上边界宜采用流量控制。

**5.2.6.7** 工程试验区域有旋转流时,下边界宜采用流量控制,上边界宜采用流量或潮

位控制。

**5.2.6.8** 在模型生潮进出口处和河口边界处应满足模型进出口段水流平顺、潮位变化连续的要求。模型生潮方向应与天然涨、落潮潮流方向基本一致,不一致时可采用人工方法进行调整,调整角度不宜大于 $15^{\circ}$ 。

**5.2.6.9** 当模型中有径流下泄或余流较强时,在模型边界外应配置水量平衡调配管路和控制系统。

**5.2.7** 模型设计应绘制模型平面布置总图,总图应包括模型海域、河段范围,导线网,模型生潮设备、供水循环系统等的布置。

### 5.3 模型制作

**5.3.1** 制模应采用导线进行平面控制,断面或桩点放样应在主辅导线间进行。

**5.3.2** 模型地形控制根据地形变化复杂程度,可采用断面法、桩点法或等高线法,也可几种方法组合使用。地形的控制应符合下列规定。

**5.3.2.1** 变化剧烈、滩槽交错、坡度较大的地形应采用断面法控制,断面布设宜垂直于主、辅导线,断面间距宜采用 $0.5\text{m} \sim 1.0\text{m}$ ;地形复杂处可适当加密。

**5.3.2.2** 较规则、起伏变化不大、岸线较平顺的地形可采用桩点法控制,桩点间距宜采用 $1.0\text{m}$ 。

**5.3.2.3** 断面或桩点间的特殊地形可采用等高线法控制。

**5.3.2.4** 断面或桩点应按放样位置架设固定,其高程应采用水准测量控制。

**5.3.3** 模型边墙应按模型设计的边界砌筑,并应高于模型最高潮位 $10\text{cm} \sim 15\text{cm}$ 。

**5.3.4** 模型宜采用易密实的材料充填并压实,按断面或桩点高程预留水泥砂浆粉面及加糙厚度。

**5.3.5** 断面或桩点的位置、高程应在模型刮制粗模后进行复核,微地形应符合测图,断面或桩点的位置、高程应在制模完成后进行校核,并有完整的记录。

**5.3.6** 根据模型设计初定的糙率,应按第5.2.5条的规定对模型进行加糙。

**5.3.7** 潮流模型试验主要试验设备和量测仪器应包括生潮系统、供水循环系统和微机控制、采集及处理系统,潮位、流速、流向和表面流场测量仪器等。试验设备、量测仪器的安装及调试应符合下列规定。

**5.3.7.1** 模型生潮系统应根据试验场地固定设备状况、模型边界条件与布置要求选择,采用一种或多种形式组合使用。生潮系统的生潮能力和供水量应满足模型中涨、落潮最大流速变化和最大潮量的要求。

**5.3.7.2** 供水循环系统应满足模型或水槽试验用水量和循环的要求,并有一定的富裕量;有双边界或多边界生潮时,潮流模型应设置水量循环调配系统。

**5.3.7.3** 模型应根据试验要求配备微机控制、采集及处理系统。模型生潮系统应采用计算机自动控制,生潮控制潮位站应设置在靠近生潮设备处。

**5.3.7.4** 潮位仪、流速仪或流速流向仪应根据原型潮位、潮流站观测位置进行设置。

**5.3.7.5** 供水系统和流量控制方式应根据模型径流量、潮量大小和场地布置情况选

择。供水系统供水流量应大于模型生潮流量,并设置适当的集水系统。

**5.3.7.6** 仪器设备应在安装完毕、单独检查和调试后联合调试运转。

#### 5.4 模型验证试验

**5.4.1** 模型生潮控制站应有边界潮汐水位过程或流量过程。当缺乏此类资料时,可采用邻近站位资料推算或数值模拟计算资料。

**5.4.2** 模型应根据原型观测资料进行潮位、流速、流向、表面流迹线和局部流态验证。

**5.4.3** 模型验证试验有效测次应重复进行2次,以平均值作为验证试验成果并以图、表等形式表示。

**5.4.4** 模型验证试验偏差换算成原型数值应满足下列精度要求:

(1) 高低潮时间的相位允许偏差为 $\pm 0.5\text{h}$ ,最高、最低潮位值允许偏差为 $\pm 0.1\text{m}$ ;

(2) 憩流时间和最大流速出现的时间允许偏差为 $\pm 0.5\text{h}$ ,流速过程线的形态基本一致;

(3) 测点涨、落潮时段平均流速允许偏差为 $\pm 10\%$ ;试验水域流速较小时,涨、落急时段平均流速允许偏差为 $\pm 10\%$ ;

(4) 往复流时,测站主流流向允许偏差为 $\pm 10^\circ$ ,平均流向允许偏差为 $\pm 10^\circ$ ;旋转流时测站流向允许偏差为 $\pm 15^\circ$ ;

(5) 流路与原型观测资料趋向一致;

(6) 断面潮量允许偏差为 $\pm 10\%$ 。

**5.4.5** 当模型验证试验个别测站流速、流向、潮位结果超出允许偏差时,应对比原型实测资料,分析产生偏差的原因,并采取相应的措施。当模型范围较大,验证测站较多,自然条件较复杂时,模型验证超出允许偏差的测站不应超过总验证测站的20%,且其位置不应集中在试验研究的关键部位。

#### 5.5 潮流运动试验

**5.5.1** 工程前潮流特性试验的测站布置应符合下列规定。

**5.5.1.1** 潮位、流速、流向观测站应根据试验要求布设。

**5.5.1.2** 拟建港池、航道、整治工程等工程区域及上、下游断面应布设流速测站,其位置和数量应能反映工程影响范围。

**5.5.1.3** 工程区上、下游不同地点应设置潮位站。

**5.5.2** 工程前潮流特性试验宜选用实测的代表潮型作为边界控制条件或选用特征流量和实测代表潮型的组合作为边界控制条件,观测内容宜包括潮位、流速、流向、表面流迹线、流态等。

**5.5.3** 工程前潮流特性试验必须重复进行2次~3次,并应取有效测次的平均值作为试验结果,且高、低潮位允许偏差应为 $\pm 0.10\text{m}$ ,潮段平均流速允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

**5.5.4** 方案试验应按工程设计方案、代表潮型和径流组合依次进行,并根据试验结果进行调整、优化。

**5.5.5** 方案试验观测的内容和方法应符合第 5.5.1 条 ~ 第 5.5.3 条的规定。测站的数量可随方案的位置适当增减。

**5.5.6** 方案试验的成果应包括下列内容：

(1) 海岸、河口及河道水域各潮位站潮位变化,包括最高、最低潮位的变化量,潮汐相位的变化;

(2) 各测站流速、流向的变化,包括各方案涨、落潮潮段平均流速值和变化量,流向变化量,涨、落潮最大流速及变化量、历时和平面分布图;

(3) 流路及流态的变化,包括主要方案工程附近流路、流态的变化;

(4) 工程引起潮量变化时,增加各方案潮量或流量的变化。

**5.5.7** 在调整、优化方案的基础上,应进行推荐方案试验。推荐方案应符合第 4.5.11 条的规定。

## 6 波浪水动力模型试验

### 6.1 基本资料

- 6.1.1 波浪水动力模型试验的基本资料主要应包括地形、水文、工程设计方案和其他有关资料。
- 6.1.2 水深地形图资料应符合下列规定。
- 6.1.2.1 制模应采用近期有代表性的水深测图资料,其范围应大于研究区域。
- 6.1.2.2 制模地形图比例不宜小于1:5000,测图应采用统一的基准面和坐标系。
- 6.1.3 研究区域应包括试验所需的设计水位和其他特征水位。
- 6.1.4 研究区域应包括模型入射边界处各级水位对应的设计波浪要素、波谱等资料。
- 6.1.5 工程方案资料应有工程概况描述,设计方案布置图、建筑结构图及其说明等。

### 6.2 模型设计

6.2.1 波浪水动力模型应采用正态模型,当整体模型的试验条件受到限制时,可采用变态模型。正态模型设计应根据波浪等动力因素及其与建筑物、岸滩等相互作用的特点,采用不同的相似准则,并应符合下列规定。

6.2.1.1 波浪运动、波浪与水流及其与建筑物、岸滩等相互作用的模型设计,应满足几何相似、重力相似条件和其他相关比尺的要求,其比尺关系按下列公式确定:

几何相似

$$\lambda_l = \lambda_h = l_p / l_m = h_p / h_m \quad (6.2.1-1)$$

重力相似

$$\lambda_g = \lambda_h^{1/2} \quad (6.2.1-2)$$

其他相关比尺

$$\lambda_t = \lambda_r = \lambda_h^{1/2} \quad (6.2.1-3)$$

$$\lambda_f = \lambda_h^{-1/2} \quad (6.2.1-4)$$

$$\lambda_p = \lambda_h \quad (6.2.1-5)$$

$$\lambda_s = \lambda_h^3 \quad (6.2.1-6)$$

$$\lambda_Q = \lambda_h^{5/2} \quad (6.2.1-7)$$

$$\lambda_q = \lambda_h^{3/2} \quad (6.2.1-8)$$

$$\lambda_E = \lambda_h^4 \quad (6.2.1-9)$$

式中  $\lambda_l$ ——平面几何比尺;

- $\lambda_h$ ——垂直几何比尺；
- $l_p$ ——原型长度(m)；
- $l_m$ ——模型长度(m)；
- $h_p$ ——原型垂直几何尺度；
- $h_m$ ——模型垂直几何尺度；
- $\lambda_v$ ——速度比尺；
- $\lambda_t$ ——时间比尺；
- $\lambda_T$ ——波周期比尺；
- $\lambda_f$ ——频率比尺；
- $\lambda_p$ ——压强比尺；
- $\lambda_l$ ——力比尺；
- $\lambda_Q$ ——流量比尺；
- $\lambda_q$ ——单宽流量比尺；
- $\lambda_E$ ——能量比尺。

**6.2.1.2** 斜坡式和直墙式建筑物断面模型设计,应符合第 6.2.1.1 款的规定;与建筑物构件稳定性有关的模型试验设计,尚应满足质量、重心位置相似的要求。当需要检验斜坡式建筑物护面块体的强度时,宜模拟护面块体的抗弯强度。

**6.2.1.3** 浮式建筑物、系泊船舶的模型设计,除应符合第 6.2.1.1 款的规定外,尚应符合下列规定:

- (1) 浮式建筑物和船舶的惯性矩和自摇周期相似;
- (2) 锚系结构满足长度、质量和弹性相似;模型锚链弹性的模拟按下列公式计算:

$$\Delta L_m = \frac{T_m L'_m}{(EA)_m} \quad (6.2.1-10)$$

$$(EA)_m = \frac{(EA)_p}{\lambda^3} \quad (6.2.1-11)$$

$$(EA)_p = \frac{1}{2} E_p \pi d_p^2 \quad (6.2.1-12)$$

式中  $\Delta L_m$ ——模型锚链伸长(m);

$T_m$ ——模型锚链拉力(N);

$L'_m$ ——模型锚链长度(m);

$(EA)_m$ ——模型锚链的抗拉刚度(N);

$(EA)_p$ ——原型锚链的抗拉刚度(N);

$\lambda$ ——模型长度比尺;

$E_p$ ——原型锚链的有效弹性模量(Pa);

$d_p$ ——原型链环杆的直径(m);

(3) 模型锚链设计成环扣,只承受轴向拉力,锚链的初拉力与原型相似;

(4) 浮式建筑物模型试验采用不规则波,必要时考虑风、波群和二阶长波的影响;

(5) 柔性浮式防波堤的消浪浮体模型还需考虑浮体的弹性和表面糙率对消浪的影响。

**6.2.1.4** 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型中的船舶模型,除应符合第 6.2.1.1 款的规定外,尚应符合下列规定:

(1) 船舶模型对码头挤靠点的个数和护舷位置与原型相对应;

(2) 船舶模型系缆点个数、缆绳根数、缆绳弹性、缆绳质量、缆绳长度和缆绳初拉力等系缆条件均与原型相似;

(3) 船舶模型的缆绳弹性模量有原型缆绳实测值时,按实测值模拟;当无实测值时,模型缆绳拉力按下式计算:

$$T_m = \frac{C_p d_p^2 (\Delta S/S)^n}{\lambda^3} \quad (6.2.1-13)$$

式中  $T_m$ ——模型缆绳拉力(N);

$C_p$ ——原型缆绳弹性系数,无实测值时,钢缆可取  $26.97 \times 10^4$  MPa,尼龙缆可取  $1.540 \times 10^4$  MPa;

$d_p$ ——原型缆绳直径(m);

$\Delta S/S$ ——原型缆绳相对伸长;

$n$ ——指数,钢缆可取 1.5,尼龙缆可取 3;

$\lambda$ ——模型长度比尺;

(4) 模型缆绳质量按下式计算:

$$W = \frac{C_p d_p^2}{\lambda^2} \quad (6.2.1-14)$$

式中  $W$ ——模型缆绳单位长度质量(kg/m);

$C_p$ ——空气中原型缆绳质量比例系数,钢缆可取  $3670 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ,尼龙缆可取  $670 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ;

$d_p$ ——原型缆绳直径(m);

$\lambda$ ——模型长度比尺。

**6.2.1.5** 波浪与桩基、墩柱建筑物和水下管线相互作用的建筑物及其构件的模型设计,除应符合第 6.2.1.1 款的规定外,当速度力起主要作用时,宜分析雷诺数的影响;当桩和水下管线模型刚度较小时,宜计入弹性影响。模拟弹性相似的桩和管线模型应具有足够的刚度和平直度;必要时,应模拟桩和管线表面的糙率。水下管线模型还宜满足管线两端和底部边界等环境条件与原型相似。

**6.2.1.6** 波浪作用下系泊船舶对码头撞击力的护舷模型设计,除应符合第 6.2.1.1 款的规定外,还应满足弹性相似。

**6.2.2** 变态整体模型设计应满足下列要求:

(1) 以波浪折射为主时,波长、波周期和时间比尺按下列公式确定:

$$\lambda_l = \lambda_h \quad (6.2.2-1)$$

$$\lambda_T = \lambda_h^{1/2} = \lambda_l^{1/2} \quad (6.2.2-2)$$



$$\lambda_t = \lambda_T \quad (6.2.2-3)$$

式中  $\lambda_{li}$ ——波长比尺；  
 $\lambda_h$ ——垂直几何比尺；  
 $\lambda_T$ ——波周期比尺；  
 $\lambda_t$ ——时间比尺；

(2) 以波浪绕射为主时,波长、波周期和时间比尺按下列公式确定:

$$\lambda_{li} = \lambda_l \quad (6.2.2-4)$$

$$\lambda_T = \left[ \frac{\lambda_{li}}{\lambda \left( \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)} \right]^{1/2} \quad (6.2.2-5)$$

$$\lambda_t = \lambda_T \quad (6.2.2-6)$$

式中  $\lambda_{li}$ ——波长比尺；  
 $\lambda_l$ ——平面几何比尺；  
 $\lambda_T$ ——波周期比尺；

$\lambda \left( \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$ ——原型与模型的  $\tanh \frac{2\pi h}{L}$  之比,其中  $h$  为水深, $L$  为波长;

$\lambda_t$ ——时间比尺;

(3) 研究波浪反射时,建筑物模型和边界的反射系数与原型一致。

**6.2.3** 变态整体模型设计,应根据现场资料和试验要求进行分析,满足重力相似等主要相似条件,合理选择比尺,模型变率不应大于 5。

**6.2.4** 几何比尺及模型的原始入射波、模型试验段的最小水深应满足下列要求。

**6.2.4.1** 整体模型几何比尺不应大于 150,当进行结构物稳定性试验时几何比尺不宜大于 60。当有船舶模型置于其中时,几何比尺不应大于 80。船行波试验时,几何比尺不宜大于 30。

**6.2.4.2** 斜坡式、直墙式、水下管线断面模型几何比尺不宜大于 40;桩基、墩柱式建筑物、浮式建筑物模型的几何比尺不宜大于 60。

**6.2.4.3** 模型的原始入射波,规则波波高不应小于 2cm,波周期不应小于 0.5s;不规则波有效波高不应小于 2cm,谱峰值周期不应小于 0.8s。

**6.2.4.4** 模型试验段的最小水深应符合第 4.2.4.3 款的规定。

**6.2.5** 整体模型范围及布置应符合下列规定。

**6.2.5.1** 整体模型试验宜在室内进行。在室外进行时,应避免因风引起的涟波或小波的影响。

**6.2.5.2** 整体模型试验的范围,应包括试验要求研究的区域和对研究区域波浪要素有影响的水域。

**6.2.5.3** 整体模型的比尺选择应根据试验水池和建筑物结构的尺度、波浪等动力因素和试验仪器测量精度确定,并应充分利用试验条件,采用较小的模型比尺。

**6.2.5.4** 试验水池中造波机与建筑物模型的间距应大于 6 倍平均波长。模型中设有防波堤堤头时,堤头与水池边界的间距应大于 3 倍平均波长,单突堤堤头与水池边界的距

离应大于 5 倍平均波长,并应在水池边界设消浪装置,减小反射影响。进行多向不规则波试验时,研究区域应位于多向波的有效范围内。

**6.2.5.5** 浮式建筑物波浪模型试验应采用建筑物整体模型。模型试验水池壁应进行消浪处理;浮式建筑物模型与试验水池壁的间距不宜小于 3 倍圆形浮式建筑物模型的直径或 4 倍非圆形浮式建筑物模型长度在波峰线上的投影,且不宜小于 5 倍平均波长。

**6.2.5.6** 波浪传播与变形的整体模型设计尚应考虑底摩阻的影响。

**6.2.6** 波浪对斜坡式、直墙式建筑物的正向作用的断面模型布置和相关要求应符合下列规定。

**6.2.6.1** 断面模型比尺的选择应根据试验水槽和建筑物结构尺度、波浪等动力因素及试验仪器测量精度确定,尽可能采用较小的模型比尺。

**6.2.6.2** 当水深条件限制,建筑物模型处不能产生要求的波浪要素时,可在建筑物模型前加大地形底坡坡度,加大后的坡度不宜陡于 1:15。

**6.2.6.3** 建筑物模型与造波机间的距离应大于 6 倍平均波长。要求测量建筑物后的波要素时,建筑物模型与试验水槽尾部消波器间的距离应大于 2 倍平均波长。

**6.2.6.4** 斜坡式、直墙式建筑物的稳定性、越浪、爬高和波浪力试验应采用不规则波,模型中不规则波应不少于 1000 个连续波浪。

**6.2.7** 桩基、墩柱建筑物和 underwater 管线模型布置和相关要求应符合下列规定。

**6.2.7.1** 桩和墩柱模型与试验水槽或水池壁的间距不宜小于 3 倍桩、墩柱模型直径或 4 倍非圆形桩、墩柱模型宽度在波峰线上的投影,并不应小于 15cm。

**6.2.7.2** 桩基、墩柱和 underwater 管线模型试验宜采用不规则波。必要时,应模拟波群、天然波列和方向谱。

**6.2.7.3** 波浪与水流共同作用时,桩基、墩柱建筑物和 underwater 管线模型应放置在波浪和水流平稳的区域。

**6.2.7.4** 置于槽沟中的管线模型,其槽沟两侧的底床应具有足够宽度。

**6.2.8** 模型平面布置图应根据模型设计绘制,图中宜包括生潮设备、供水循环系统、造波系统等。

### 6.3 模型制作

**6.3.1** 模型的地形制作要求应符合第 5.3 节的相关规定。

**6.3.2** 建筑物及其构件有重心和质量相似要求的,其重心位置允许偏差应为  $\pm 2\text{mm}$ ,质量允许偏差应为  $\pm 3\%$ ,其中浮式建筑物允许偏差为  $\pm 2\%$ 。单个护面块体、垫层、棱体、基床和护底块石质量允许偏差应为  $\pm 5\%$ 。

**6.3.3** 斜坡式建筑物护面块体的模拟,当需要检验护面块体的强度时,抗弯强度的允许偏差应为  $\pm 10\%$ 。

**6.3.4** 宽肩台式抛石防波堤护面层块石和堤心石应严格挑选。护面层不同级配的块石质量允许偏差应为  $\pm 10\%$ 。

**6.3.5** 桩基、墩柱建筑物、underwater 管线、浮式建筑物等结构物宜采用适宜的材料制作。测力

模型部分,宜用轻质、刚劲的材料制作。

## 6.4 模型率定试验

**6.4.1** 波浪率定试验时,应对模拟的波浪特征及其变化进行分析、比较和判断,确认合理后进行正式试验。率定试验条件应与被率定的波浪所要求水位、位置、方向等条件一致。

**6.4.2** 波浪宜模拟单向不规则波。必要时,应模拟多向不规则波。波浪率定试验应满足下列要求。

**6.4.2.1** 单向和多向不规则波宜模拟工程水域的实测波谱。无实测波谱时,可采用现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)中规定的波谱或其他合适的波谱。必要时,应模拟波列及波群。

**6.4.2.2** 单向不规则波模拟的允许偏差应满足下列要求:

- (1) 波能谱总能量的允许偏差为  $\pm 10\%$ ;
- (2) 峰频模拟值的允许偏差为  $\pm 5\%$ ;
- (3) 在谱密度大于或等于 0.5 倍谱密度峰值的范围内,谱密度分布的允许偏差为  $\pm 15\%$ ;
- (4) 有效波高、有效波周期或谱峰周期的允许偏差为  $\pm 5\%$ ;
- (5) 模拟的波列中 1% 累积频率波高、有效波高与平均波高比值的允许偏差为  $\pm 15\%$ 。

**6.4.2.3** 多向不规则波宜按频率对应法、方向对应法模拟波面,并按下列公式进行模拟:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I a_{mi} \cos[\omega_{mi}t - k_{mi}(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) + \varepsilon_{mi}] \quad (6.4.2-1)$$

$$a_{mi} = \sqrt{2S(\omega_m, \theta_i) \Delta \omega \Delta \theta} \quad (6.4.2-2)$$

$$\omega_m = \omega_l + \left(m - \frac{1}{2}\right) \Delta \omega \quad (6.4.2-3)$$

$$\Delta \omega = \frac{\omega_{l1} - \omega_l}{M} \quad (6.4.2-4)$$

$$\theta_i = \theta_{\min} + \left(i + \frac{1}{2}\right) \Delta \theta \quad (6.4.2-5)$$

$$\Delta \theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{I} \quad (6.4.2-6)$$

$$\omega_{mi} = \omega_m - \frac{1}{2} \Delta \omega + \frac{(i-1 + R_{mi}) \Delta \omega}{I} \quad (6.4.2-7)$$

式中  $\eta(x, y, t)$ ——波动水面相对于静水面的瞬时高度(m),其中  $x, y, t$  分别为波动水面的水平位置(m)和时间(s);

$M$ ——频域分割数,通常取 50~100;

$I$ ——方向等分数,通常取 20;

$a_{mi}$ ——第  $m$  个频率、第  $i$  个方向的组成波振幅(m);

- $\omega_{mi}, k_{mi}$ ——第  $m$  个频率、第  $i$  个方向的组成波圆频率(rad/s)和波数(rad/m)；  
 $\theta_i$ ——第  $i$  个组成波的方向角(rad)；  
 $\varepsilon_{mi}$ ——第  $m$  个频率、第  $i$  个方向的组成波初相位,在  $(0, 2\pi)$  域内均布的随机数(rad)；  
 $S(\omega_m, \theta_i)$ ——圆频率为  $\omega_m$ 、方向为  $\theta_i$  的方向谱密度 [ $\text{m}^2/(\text{Hz} \cdot \text{rad})$ ]；  
 $\Delta\omega$ ——圆频率分割点间隔(rad/s)；  
 $\Delta\theta$ ——方向等分点间隔(rad)；  
 $\omega_{11}, \omega_{1l}$ ——频谱的最高、最低圆频率(rad/s)；  
 $\theta_{\max}, \theta_{\min}$ ——方向谱的最大、最小方向角(rad)；  
 $R_{mi}$ ——第  $m$  个频率、第  $i$  个方向的组成波在  $(0, 1)$  域内均布的随机数。

**6.4.2.4** 当波浪模型试验采用规则波时,规则波平均波高和波周期的允许偏差应为  $\pm 5\%$ 。

**6.4.2.5** 模拟风对越浪量和波浪爬高的影响时,模拟的平均风速允许偏差应为  $\pm 5\%$ 。

**6.4.2.6** 若波浪试验中还需模拟水流,水流的模拟应包括流速和流向的模拟。水流平均流速的允许偏差应为  $\pm 5\%$ 。模型区的水流应保持平稳,流向应与原型一致。波浪和水流共同作用时,可按下列方法进行模拟:

(1) 在试验水槽或水池放置建筑物模型前,在研究区域先模拟水流的流速和流向,再模拟无流时的波浪,并进行合成;

(2) 方案试验时,先模拟水流,再模拟水流中的波浪。

## 6.5 波浪运动试验

### 波浪运动试验的数据采集和处理

**6.5.1** 波浪运动试验的数据采集和处理应符合下列规定。

**6.5.1.1** 波浪每组试验应至少重复 3 次,并取其平均值作为代表值。

**6.5.1.2** 水流模拟的测点流速的测量应重复 2 次~3 次,取其平均值作为代表值。

**6.5.1.3** 波浪试验数据的采集和处理应根据试验要求按附录 B 的规定执行。

### 波浪传播运动试验

**6.5.2** 研究波浪传播与变形的整体模型试验应符合下列规定。

**6.5.2.1** 模型应根据试验要求布置测波点。原始入射波测点应设在水深较大、波形平稳处,对重点研究和波浪变化明显的水域应加密测点。

**6.5.2.2** 试验结果可采用波高或比波高表示。对不规则波,可采用与原始入射波同一累积率的特征波高或特征比波高表示。

**6.5.2.3** 采用合成法进行多向波模型试验,可按附录 C 的方法进行。

**6.5.3** 研究波浪影响的港内水域平稳度整体模型试验应符合下列规定。

**6.5.3.1** 港内水域平稳度模型试验应在港内水域外不受建筑物影响的水域,布置

1个~2个波浪监测点。

**6.5.3.2** 港内水域测波点的布置应符合第6.5.2.1款的规定,并应在每个码头泊位前1/2船宽处增设不少于1个测波点。试验为规则波且建筑物为直墙式时,增设的测波点应布置在波腹处。

**6.5.3.3** 试验结果可采用波高或比波高表示。必要时,应绘制波高或比波高等值线图。通过船舶运动检测港内水域平稳度时,应测定船舶运动量。

**6.5.3.4** 港内水域面积小、入射波周期较大时,应考虑长周期波及波群在港内水域引起共振的影响。

**6.5.3.5** 研究波浪对取、排水工程的影响时,除应符合第6.5.3.1款~第6.5.3.4款的有关规定外,尚应在取、排水口的头部布置测波点,分析时应考虑长周期波的影响。

**6.5.3.6** 采用合成法进行多向波模型试验,可按附录C的方法进行。

**6.5.4** 研究船行波对港内水域平稳度影响的整体模型试验应符合下列规定。

**6.5.4.1** 船行波模型试验宜采用拖拽船舶或自航船舶模型产生船行波,其航线、航速与原型相似。研究船行波对护岸建筑物作用时,也可采用造波机产生船行波。

**6.5.4.2** 船行波模型试验中测波点的布置应能测得近船处和近岸处的最大波高和波向。研究船行波对护岸建筑物作用时,应在护岸建筑物的前沿布置测波点。

**6.5.4.3** 研究船行波对护岸建筑物的作用时,模拟船行波的作用时间应根据试验要求、船舶通过密度和护岸建筑物的使用要求确定。

**6.5.4.4** 研究船行波对港内水域平稳度的影响时,重点研究的水域应加密测点。试验结果可采用波高或波高等值线表示。

#### 斜坡式和直墙式建筑物断面模型试验

**6.5.5** 研究波浪对斜坡式、直墙式建筑物的正向作用的断面模型需测量建筑物前的反射波波高时,应在建筑物模型前1倍有效波长外设置多个波高仪,并根据测得的波面过程进行入射波和反射波分离,分别求出入射波和反射波的能量或波高,按附录B的有关公式计算反射系数。

**6.5.6** 斜坡式建筑物断面模型试验应满足下列要求。

**6.5.6.1** 斜坡式建筑物护面块体的稳定性试验应满足下列要求:

(1) 护面块体抛放数量和抛放方式符合现行行业标准《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)中的有关规定;

(2) 正式试验前,用小波连续作用一段时间;

(3) 根据暴风浪的持续时间确定模型波浪作用的累计时间,模拟的原型波作用时间不少于2h;

(4) 护面块体的稳定性试验,每组至少重复3次,当3次试验的失稳率差别较大时,增加重复次数,每次试验护面块体均重新摆放。

**6.5.6.2** 斜坡式建筑物护面块体的失稳判别标准应符合下列规定:

(1) 在波浪作用下,随机抛放的护面块体累积位移超过单个块体的最大几何尺度时

即失稳;强度起控制作用的大型护面块体,其累积位移超过块体最大几何尺度一半时即失稳;

(2)在波浪作用下,单层铺砌的护面块体,其累积位移超过单个块体的厚度时即失稳;单层随机抛放的护面块体,其位移后产生的缝隙宽度超过块体最大几何尺度一半时即失稳;

(3)斜坡式建筑物抛石棱体和块石护底的表面明显变形即失稳。

#### 6.5.6.3 斜坡式建筑物护面块体失稳率的统计应符合下列规定:

(1)护面块体的失稳率按下式计算:

$$n = \frac{n_d}{N_1} \times 100\% \quad (6.5.6)$$

式中  $n$ ——失稳率;

$n_d$ ——静水位上、下各 1 倍设计波高范围内护面块体的失稳数;

$N_1$ ——静水位上、下各 1 倍设计波高范围内的护面块体总数。

(2)斜坡式潜堤稳定性试验,其前、后坡及堤顶护面的失稳率,分别以各自部位的块体总数来计算;

(3)逐级加大波高进行护面块体稳定性试验时,累积计算失稳率。

#### 6.5.6.4 斜坡式建筑物波压力试验测点布置应符合下列规定:

(1)测量斜坡式建筑物顶部胸墙波压力分布的测点数根据胸墙的尺度和设计要求确定,但胸墙迎浪面及墙底面的测点数均不少于 3 个;

(2)测量斜坡式建筑物坡面上的波压力分布时,在坡面上布置 1 个测点测量最大波压力,由该测点至坡顶,布置测点不少于 2 个,由该测点至坡脚,布置测点不少于 3 个,并计算各测点上的最大压力分布。

#### 6.5.7 宽肩台式抛石防波堤断面模型试验应符合下列规定。

6.5.7.1 宽肩台式抛石防波堤断面稳定性试验应采用不规则波,并应往复进行不同水位及相应波浪作用下较长时间的试验,确定在设计抛石块质量及不同级配条件下的最终动力稳定断面。

6.5.7.2 在不同水位及相应波浪作用下,宽肩台式抛石防波堤的堤心石外露时应判定为失稳。

6.5.7.3 宽肩台式抛石防波堤稳定性的重复试验,应按设计断面重新铺放护面层块石。

6.5.7.4 宽肩台式抛石防波堤的反射系数与透射系数、波浪爬高和越浪量,应在最终动力稳定断面形成时进行测定。

#### 6.5.8 直墙式建筑物断面模型试验应符合下列规定。

6.5.8.1 直墙式建筑物的稳定性试验和失稳标准应符合下列规定:

(1)进行直墙式建筑物稳定性试验时,需测量直墙底与基床间的摩擦系数;

(2)置于抛石基床上的半圆形和大圆筒防波堤,其稳定性试验与直墙式建筑物相同;

(3)直墙式建筑物,当观测到堤身发生明显滑动、倾斜、建筑物的基床和护底块石表

面明显变形时判定为失稳。

**6.5.8.2** 直墙式建筑物的墙面波压力和底部上托力试验的测点布置宜符合下列规定：

(1) 测量墙面波压力分布时,在静水位处和墙脚各布置 1 个测点;静水位至墙顶及静水位至墙脚之间各布置测点不少于 2 个;

(2) 测量墙底部上托力分布时,在墙底的前、后趾各布置 1 个测点,前、后趾间布置测点不少于 2 个;

(3) 测量开孔沉箱、大圆筒和半圆形防波堤的波压力分布时,根据要求加密测点;开孔沉箱箱室、大圆筒防波堤连接处、半圆形防波堤拱圈的内外壁及底板上、下均需布置测点。

**6.5.8.3** 总水平力最大时的同步压力分布、总垂直力最大时的同步压力分布、建筑物滑动稳定安全系数最小时的同步压力分布、各测点的最大压力分布可由墙面波压力和墙底部上托力测量结果计算确定。

**6.5.8.4** 测量直墙式建筑物墙面上水面壅高的波高仪应靠近墙面。

**6.5.9** 越浪量和波浪爬高试验应符合下列规定。

**6.5.9.1** 建筑物越浪量试验宜采用不规则波。可采用称重法测出 1 个波列作用下的总越浪水量,单宽平均越浪量按下式计算:

$$q = \frac{\nu}{bt} \quad (6.5.9)$$

式中  $q$ ——单宽平均越浪量 [ $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ ];

$\nu$ ——1 个波列作用下的总越浪水量 ( $\text{m}^3$ );

$b$ ——收集越浪量的接水宽度 ( $\text{m}$ );

$t$ ——1 个波列作用的持续时间 ( $\text{s}$ )。

**6.5.9.2** 测量不规则波的单波越浪水量时,应测得建筑物顶部每个波的越浪水量,计算单波的单宽最大越浪水量及其他统计特征值。

**6.5.9.3** 越浪量试验的波浪作用时间宜按第 6.5.6.1 款的有关规定执行,波列应有足够的长度,不得用短波列的重复试验结果累计计算越浪量。

**6.5.9.4** 建筑物上的波浪爬高试验宜采用不规则波,并采用电测法测量爬高和落深。采用规则波时,也可目测爬高和落深。

#### 桩基和墩柱建筑物及水下管线模型试验

**6.5.10** 桩基和墩柱建筑物模型试验应符合下列规定。

**6.5.10.1** 桩基建筑物模型试验应测定桩的正向水平力,必要时,应测定横向水平力,并求出其合力。孤立式桩基建筑物和群桩效应较大的群桩结构,宜测定整段建筑物的受力、倾覆力矩和处于不利位置的桩的受力。

**6.5.10.2** 墩柱建筑物模型试验宜测定墩柱的正向水平力、上托力和整个墩柱的倾覆力矩。

**6.5.10.3** 测量桩基和墩柱建筑物上波浪力时可在水槽或水池内进行,模型同一断面

处设置波高仪测量波面;当波高仪与模型不在同一断面时,应对波面与测力值的相位差进行修正。

**6.5.10.4** 重力墩式建筑物应对基床护面和护底进行模拟,并观测其稳定性,确定护面和护底块石或块体的稳定质量。

**6.5.10.5** 桩基、墩柱建筑物模型试验可分别进行下列分析和计算:

(1)按附录 D 计算波要素及波浪力峰值的平均值、1/3 大值平均值、1/10 大值平均值和最大值等统计特征值;

(2)按附录 E 和附录 F 对波要素和波浪力进行谱分析和互谱分析;计算波谱、力谱、波力传递函数、谱的主峰频和谱的零、二阶矩;必要时,计算谱的四阶矩;

(3)计算多向不规则波的方向分布宽度、波力的方向分布宽度及其平均方向;

(4)计算桩和墩柱上波浪力系数;桩、墩柱的惯性力系数和桩的速度力系数按现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)中的公式计算,桩的横向力系数和合力系数按下列公式计算;找规范核实

$$C_{l_t} = \frac{2gF_{l_t}}{\gamma D \int_0^{h+\eta_{\max}} u_{\max}^2(z) dz} \quad (6.5.10-1)$$

$$C_{R_t} = \frac{2gF_{R_t}}{\gamma D \int_0^{h+\eta_{\max}} u_{\max}^2(z) dz} \quad (6.5.10-2)$$

式中  $C_{l_t}$ ——横向力系数;

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ );

$F_{l_t}$ ——试验中测得桩的横向水平力的 1/10 大峰值平均值(kN);

$\gamma$ ——水的重度( $kN/m^3$ );

$D$ ——桩的直径(m);

$h$ ——水深(m);

$\eta_{\max}$ ——1/10 大波的最大波面高度(m);

$u_{\max}(z)$ ——水底面上高度  $z$  处 1/10 大波水质点轨道运动的最大水平速度( $m/s$ );

$C_{R_t}$ ——合力系数;

$F_{R_t}$ ——试验中测得桩上合力的 1/10 大峰值平均值(kN);

(5)必要时,分析不规则波的波群特性。

**6.5.11** 带梁板透空建筑物模型试验应符合下列规定。

**6.5.11.1** 带梁板透空建筑物的梁板位于波浪作用范围内时,应按第 6.5.10 条的规定测定梁板下部的桩和墩柱上的波浪力,且应测定梁板上的水平力和上托力分布,也可测定一段建筑物上的总水平力和总上托力。

**6.5.11.2** 测定梁板的上托力分布时,应考虑梁板上泄压孔的影响。

**6.5.11.3** 测量带梁板透空建筑物对波浪的影响时,测量内容应包括:建筑物前的波浪壅高,建筑物后的 1 倍波长外的透射波高,并计算透射系数;测定建筑物前 1 倍波长外的



综合波高,并计算反射系数。必要时,应测定梁板下波面变化情况。

**6.5.11.4** 带梁板透空建筑物下部的接岸结构为斜坡时,应按第6.5.5条和第6.5.6条的规定模拟斜坡护面,并观测其稳定性。

**6.5.12** 水下管线模型试验宜测定在波浪、波浪与水流共同作用下管线的水平力及上升力,并观测其稳定性,同步测定管轴线上方的波面过程。

#### 浮式建筑物模型试验

**6.5.13** 浮式防波堤模型试验应符合下列规定。

**6.5.13.1** 测量线位移和角位移的仪器,应放置在浮式建筑物重心处,测角位移的仪器转动轴应与浮式建筑物的转动轴平行,并应减小或避免测量仪器对浮式建筑物运动的影响。

**6.5.13.2** 测量锚链和缆绳拉力的仪器宜放在靠近浮式建筑物的一端。系缆点的位置应与原型相对应。

**6.5.13.3** 浮式防波堤模型试验,宜测定防波堤在波浪、波浪与水流和波浪与风作用下的波浪反射系数、透射系数和防波堤的横摇、纵摇、垂荡等运动量及锚链拉力、缆绳拉力和锚碇力等。

**6.5.13.4** 计算浮式防波堤的波浪透射系数时,透射波波高应为防波堤后1倍波长外波浪平稳处的波高。

**6.5.13.5** 采用不规则波进行试验时,每组试验应重复3次~5次。根据要求,可进行防波堤运动量和锚链拉力等特征值统计和谱分析。

**6.5.13.6** 采用规则波进行试验时,试验应重复多次,累计波浪个数不宜少于100个。根据要求,可进行防波堤的运动量和锚链力的平均值、1/3大值平均值和最大值等特征值的计算。

**6.5.14** 系泊船舶运动量、撞击力和系缆力模型试验除应符合第6.5.13.5款和6.5.13.6款的规定外,宜测定系泊船舶在波浪、波浪与水流和波浪与风作用下,船舶的横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡等运动量和缆绳拉力、撞击力等。根据要求,可测定船舶对码头的挤靠能量。

## 7 通航建筑物水动力模型试验

### 7.1 基本资料

**7.1.1** 枢纽通航整体模型试验的基本资料应满足模型制作和试验要求,主要应包括地形资料、水文、枢纽工程设计和运行资料等,并应符合下列规定。

**7.1.1.1** 内河枢纽通航整体模型地形资料和水文资料应符合第4.1节的有关规定。

**7.1.1.2** 入海河口地区枢纽通航整体模型地形资料和水文资料应符合第4.1节和第5.1节的有关规定。

**7.1.1.3** 枢纽建设与运行期的水文、运行资料应包括下列内容:

- (1) 施工通航各级水位和流量;
- (2) 枢纽上下游各级水位和流量及其组合;
- (3) 电站机组运行方式和引用流量;
- (4) 泄水闸门开启调度方式和流量;
- (5) 电站日调节时增荷与减荷的流量变化;
- (6) 船闸运行水位,船闸灌泄水位、流量与时间关系曲线;
- (7) 施工期通航方案。

**7.1.1.4** 枢纽工程设计资料应包括枢纽总体布置图、电站厂房布置图、泄水建筑物布置图、通航建筑物布置图、施工通航设施布置图等。

**7.1.2** 船闸水力学模型试验的基本资料应包括船闸总体布置资料、船闸输水系统、阀门和工作闸门设计资料、水文及船闸运行资料等。基本资料应满足模型制作和试验的要求,并应符合下列规定。

**7.1.2.1** 船闸总体布置资料应包括船闸主体、引航道及与船闸相关的枢纽设施布置资料。

**7.1.2.2** 船闸输水系统、阀门和工作闸门设计资料应包括下列内容:

- (1) 输水系统平面布置图、纵横剖面图、消能工和进出水口等细部大样图;
- (2) 输水阀门和工作闸门结构图;
- (3) 输水阀门和工作闸门启闭系统布置图。

**7.1.2.3** 水文资料应包括上下游通航水位及其组合等资料。当船闸采用旁侧取水或泄水时,尚应包括船闸取水口和泄水口处的水位资料。

**7.1.2.4** 船闸运行资料应包括输水系统输水时间、阀门和工作闸门启闭方式等设计资料。

**7.1.3** 升船机水力学模型试验的基本资料应满足模型制作和试验的要求,应包括升船机

布置和结构设计资料、升船机运行资料、水文资料等,并应符合下列规定。

**7.1.3.1** 升船机布置和结构设计资料应包括下列内容:

- (1)升船机总体布置图;
- (2)船厢池、承船厢和闸门结构设计图。

**7.1.3.2** 升船机运行资料应包括下列内容:

- (1)船厢闸门启闭系统及启闭方式;
- (2)船舶进出船厢航行方式及速度;
- (3)船厢正常运行速度图、安全装置和制动方式;
- (4)船厢下水方案的船厢出入水运行速度图。

**7.1.3.3** 水文资料应包括上下游通航水位及组合、水位变幅及变率。

**7.1.4** 中间渠道通航水力学模型试验的基本资料应包括上下游通航建筑物相关资料、中间渠道布置和结构设计资料、水文与通航建筑物运行资料等,并应符合下列规定。

**7.1.4.1** 船闸资料应符合第7.1.2条的规定。

**7.1.4.2** 升船机资料应符合第7.1.3条的规定。

**7.1.4.3** 水文与运行资料应包括最高及最低通航水位,以及与中间渠道有关的通航建筑物运行方式及相关水力特性。

**7.1.4.4** 地形资料应符合第4.1.2条的规定。

**7.1.5** 通航建筑物水动力模型试验应收集有关船舶资料。

## 7.2 模型设计

**7.2.1** 通航建筑物水动力模型应采用正态模型。模型应满足几何相似、重力相似和阻力相似条件,其比尺按下列公式确定:

几何相似

$$\lambda_l = \lambda_h = l_p / l_m = h_p / h_m \quad (7.2.1-1)$$

重力相似

$$\lambda_g = \lambda_h^{1/2} \quad (7.2.1-2)$$

阻力相似

$$\lambda_r = \lambda_l^{1/6} \quad (7.2.1-3)$$

相关比尺

$$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2} \quad (7.2.1-4)$$

$$\lambda_T = \lambda_l^{1/2} \quad (7.2.1-5)$$

$$\lambda_t = \lambda_l^3 \quad (7.2.1-6)$$

$$\lambda_p = \lambda_l \quad (7.2.1-7)$$

式中  $\lambda_l, \lambda_h$ ——平面几何比尺和垂直几何比尺;

$l_p$ ——原型的平面几何尺度;

$l_m$ ——模型的平面几何尺度;

- $h_p$ ——原型的垂直几何尺度;  
 $h_m$ ——模型的垂直几何尺度;  
 $\lambda_v$ ——流速比尺;  
 $\lambda_n$ ——糙率比尺;  
 $\lambda_Q$ ——流量比尺;  
 $\lambda_T$ ——时间比尺;  
 $\lambda_F$ ——力比尺;  
 $\lambda_p$ ——压强比尺。

**7.2.2 通航建筑物水动力模型的几何比尺应符合下列规定。**

**7.2.2.1** 枢纽通航整体模型几何比尺不宜大于 125,模型设计应符合第 4.2.4.1 款 ~ 第 4.2.4.4 款规定的有关限制条件。

**7.2.2.2** 船闸水力学整体模型几何比尺宜为 20 ~ 30;船闸水力学局部模型几何比尺宜为 10 ~ 20。

**7.2.2.3** 输水阀门水力学模型几何比尺宜为 10 ~ 20;输水阀门门楣切片模型几何比尺应为 1。工作闸门水力学模型几何比尺宜为 10 ~ 30。

**7.2.2.4** 引航道水力学模型几何比尺宜为 30 ~ 80。

**7.2.2.5** 升船机水力学整体模型几何比尺宜为 10 ~ 20。

**7.2.2.6** 中间渠道通航水力学模型几何比尺,大型工程宜为 20 ~ 80,中小型工程宜为 10 ~ 50。

**7.2.3 船闸水力学模型设计除应符合第 7.2.1 条的规定外,尚应符合下列规定。**

**7.2.3.1** 分散输水系统模型出水孔缝隙宽度宜大于 6mm。

**7.2.3.2** 输水阀门水力学模型应满足阀门运动与原型相似。研究输水阀门流激振动问题时,应满足水弹性相似,其相似比尺关系可按附录 G 确定。研究阀门后水流掺气问题时,模型水流流速应大于 7m/s。研究阀门空化问题时,应满足水流空化数相等的要求,水流空化数应符合现行行业标准《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定。研究阀门启闭力时,阀门应满足质量分布相似及启闭机运动相似。

**7.2.3.3** 工作闸门启闭力模型应满足门体质量分布相似和启闭机运动相似。研究闸门应力变形问题时,还应满足水弹性相似,其相似比尺关系可按附录 G 确定。

**7.2.4 升船机水力学模型设计除应符合第 7.2.1 条的规定外,尚应符合下列规定。**

**7.2.4.1** 船厢运动应满足运行速度图相似。

**7.2.4.2** 研究船厢钢丝绳的提升力和变形对船厢运行速度及厢中水力条件的影响时,应满足钢丝绳弹性相似。弹性系数比尺可按下式计算:

$$\lambda_k = \lambda_l^2 \quad (7.2.4)$$

式中  $\lambda_k$ ——弹性系数比尺;

$\lambda_l$ ——几何比尺。

**7.2.4.3** 船厢对接过程水力学试验应满足船厢闸门启闭方式相似。

**7.2.5 枢纽通航整体模型范围应符合第 4.2.5 条的有关规定;需研究电站日调节影响**

时,模型的长度应考虑反射波的影响。

**7.2.6 船闸水力学整体模型范围的确定应符合下列规定。**

**7.2.6.1** 研究输水系统布置时,模型范围应包括上下闸首、闸室、进水口和出水口及附近水域。

**7.2.6.2** 研究船闸输水引起的引航道或中间渠道往复流、船舶的停泊和航行条件时,模型范围应延长至口门外 $1/4 \sim 1/3$ 引航道长度的水域,闸室输水系统布置可简化。

**7.2.7 船闸水力学局部模型范围的确定应符合下列规定。**

**7.2.7.1** 研究集中输水系统上下闸首及消能工布置时,模型范围应包括闸首及相邻的6倍以上闸首口门宽度的闸室、引航道段。

**7.2.7.2** 研究分散输水系统上闸首进水口或下闸首出水口布置时,模型范围应包括闸首及相邻的6倍以上闸首口门宽度的闸室、引航道段。

**7.2.7.3** 研究分散输水系统分流口或分支廊道断面尺度及出水口布置时,模型范围应包括分流口及前后10倍以上廊道宽度的廊道段或分支廊道前10倍以上分支廊道宽度的廊道段。

**7.2.8** 输水阀门水力学模型制作范围应包括阀门段及前后10倍以上阀门处廊道高度的输水廊道。研究非恒定流的阀门水力学模型,其阀门前后的廊道换算长度和通过该阀门输水的闸室水域面积应与原型相似。门楣切片模型的切片宽度可取5倍的门楣最小缝隙尺寸,模型进口和出口段应具有足够的长度,保证进出水流平顺。

**7.2.9** 工作闸门水力学模型制作范围应包括闸首及上下游5倍以上闸首口门宽度的水域。

**7.2.10 升船机水力学模型范围的确定应符合下列规定。**

**7.2.10.1** 垂直升船机船厢出入水模型试验,模型范围应包括船厢池、下闸首和下游引航道。

**7.2.10.2** 船舶进出船厢和厢内外有水位差时的闸门启闭试验,模型范围应包括船厢、闸首和引航道。

**7.2.11** 中间渠道通航水力学模型制作范围应包括渠道,上、下游船闸或升船机船厢水池段。中间渠道内有取排水口、溪沟入汇等时,还应包括取排水口、溪沟入汇的布置。

**7.2.12** 枢纽通航整体模型、船闸引航道和中间渠道模型可简化船闸输水系统,但应保证输水过程流量变化相似。

**7.2.13** 模型布置图应根据模型设计绘制,包括模型总体布置图、结构物模型详图、船模拖拽设备布置图、测点布置图和模型供水回水系统布置图等。

### 7.3 模型制作

**7.3.1** 通航建筑物水动力模型中的建筑物模型可根据材料特性与加工便利性,选取合适的材料制作,其中常用材料糙率值可参照附录H。

**7.3.2** 通航建筑物水动力模型中的河道模型制作应符合第4.3节的有关规定。

**7.3.3 船闸水力学模型制作及安装应符合下列规定。**

**7.3.3.1** 船闸输水系统出水孔缝和阀门门楣等特殊部位的加工尺寸允许偏差应

为  $\pm 0.2\text{mm}$ 。

**7.3.3.2** 上、下游引航道边墙顶和闸室顶应高出试验最高水位 10cm。

**7.3.3.3** 模型制作应满足强度和刚度要求。

**7.3.3.4** 压力测点的孔口应与结构物表面齐平并垂直。

**7.3.3.5** 研究阀门启闭力及振动的模型不应设置阀门侧向止水。

**7.3.3.6** 试验前应向闸室充水,对闸室及输水廊道进行变形及水密性检验,若变形、漏水影响试验精度,必须进行校正和加固。

**7.3.4** 升船机水力学模型制作及安装应符合下列规定。

**7.3.4.1** 船厢应具有足够的刚度,并严禁漏水。

**7.3.4.2** 应设置供排水管,引航道末端应有水位调节设备和消波设施。

**7.3.5** 中间渠道通航水力学模型中的通航建筑物的制作及安装除应符合第 7.3.3 条和第 7.3.4 条的有关规定外,尚应符合下列规定。

**7.3.5.1** 中间渠道水力学模型在进行船模直航试验时宜设置船模的导向设施。

**7.3.5.2** 在保证中间渠道两端船闸闸室面积和输水系统阻力相似条件下,可简化船闸输水系统布置和闸室平面布置。

**7.3.6** 无动力船模外形轮廓制作应符合方形系数相等和线型相似、几何相似、排水量相似要求;系缆力测试仪的开孔位置,应与原型船舶系船柱的位置相对应。

**7.3.7** 模型制作安装完成后,必须进行检查和校核,当达不到要求的精度后,应进行改制或重新安装,直至符合精度要求。

## 7.4 枢纽通航整体模型试验

**7.4.1** 枢纽通航整体模型试验应包括下列内容:

- (1) 验证试验;
- (2) 枢纽通航水流条件试验;
- (3) 必要时开展施工通航水流条件试验。

**7.4.2** 模型验证试验应包括工程前验证试验和枢纽泄流特性率定试验,并应符合下列规定。

**7.4.2.1** 模型验证试验应符合第 4.4 节或第 5.4 节的有关规定。

**7.4.2.2** 枢纽泄流特性率定应包括泄水闸泄流特性率定和电站出流特性率定。应根据枢纽上下游各级水位和流量及其组合,率定泄水闸门开启方式及下泄流量和电站机组运行方式及引出流量。

**7.4.3** 枢纽通航水流条件试验应包括枢纽通航建筑物不同布置方案的通航水流条件、枢纽泄洪和电站不同运行方式的通航水流条件。必要时,尚宜包括电站日调节的通航水流条件、船闸灌泄水的通航水流条件以及枢纽泄洪、船闸灌泄水和电站日调节不同组合时的通航水流条件。

**7.4.4** 枢纽通航整体模型试验工况的选择应符合下列规定。

**7.4.4.1** 研究枢纽上、下游通航水流条件时,应结合枢纽水库和电站运行方式及泄水

闸闸门开启方式,选择至少包含设计最大通航流量、设计最小通航流量和最不利工况时的通航流量等作为试验工况。对于入海河口地区枢纽通航整体模型,还应考虑最不利径流和潮流的组合。

**7.4.4.2** 模拟电站日调节非恒定流时,试验时长应至少包含2个日调节周期,并以第二个周期观测的资料为准进行分析;相同日调节工况应至少重复2次试验;模型出口断面的水位过程可由经验证的数学模型计算成果提供。

**7.4.4.3** 船模航行试验应包含最不利通航水流条件相应的工况。

**7.4.5** 枢纽通航水流条件试验的观测应包括下列内容:

(1)通航建筑物上下游引航道、口门区及连接段的流速、流向、流态、回流、水位和水面比降等;

(2)船闸闸门、靠船建筑物、隔流堤堤头、引航道口门区等附近水域的水面波动;

(3)引航道内往复流的周期和强度。

**7.4.6** 枢纽通航水流条件试验测点布置应满足下列要求:

(1)在引航道、口门区及连接段,每隔0.5m~1.0m布置一个测流断面,每个断面布置5个~10个测点。

(2)在引航道内布置5个以上水位测点。

(3)在口门区和连接段分别布置2个以上水位测点。

**7.4.7** 枢纽下泄非恒定流条件试验应以电站日调节最不利方式为重点进行试验,并应观测坝下游长河段沿程若干断面的水位、比降、流速、流态随时间的变化过程及传递规律。

**7.4.8** 枢纽施工通航水流条件试验应包括下列内容:

(1)束窄河床和导流明渠的通航水流条件;

(2)束窄河床和导流明渠范围内的航线选择;

(3)导流明渠进出口的通航水流条件;

(4)临时通航建筑物的通航水流条件。

**7.4.9** 枢纽施工通航水流条件试验应对通航范围内的流速、流向、流态、回流、水位和纵横向水面比降进行观测。

**7.4.10** 在论证通航水流条件和航线选择时宜进行船模航行试验。

**7.4.11** 当工程方案不满足设计要求时,应进行优化方案或改善措施研究。推荐方案应符合第4.5.11条的规定。

## 7.5 船闸水力学模型试验

**7.5.1** 船闸水力学整体模型试验应包括下列内容:

(1)测定闸室灌泄水水力特性;

(2)测定闸室和引航道停泊段船舶的系缆力及分散输水船舶停于闸室内不系缆时的自由漂移情况;

(3)测定下游引航道和集中输水系统闸室内最不利时段的流速分布及消能段的最大壅高;

- (4) 测定输水廊道和封闭消能设施的压力分布；
- (5) 观测闸室、输水系统进出口和阀门段廊道的水流流态。

#### 7.5.2 船闸水力学整体模型试验方法应符合下列规定。

7.5.2.1 试验前应校核平水槽高程和溢水量,上游平水槽溢水量应大于闸室灌水的最大流量,下游平水槽宜保持有少量溢水。船闸灌泄水过程中,上、下游平水槽水位的变化不宜大于5mm。

7.5.2.2 模型试验应在恒定流条件下,测定输水阀门单边和双边全开时的流量,计算灌泄水流量系数,测定输水系统特征部位压力,计算输水系统各区段的阻力系数。

7.5.2.3 测定船舶系缆力时,缆绳拉力仪的位置宜与船舶或船队首尾系船柱位置相对应。船舶的首尾吃水应保持一致,缆绳拉力仪应水平放置,测杆应垂直。当船舶较小时,应分别测试不同停泊位置的系缆力。

#### 7.5.3 船闸水力学局部模型试验内容和方法应符合下列规定。

7.5.3.1 依据不同的研究目的,试验内容可包括对输水系统进水口、出水口、分流口、闸室支廊道和出水支孔及消能设施等布置和型式的研究。

7.5.3.2 试验依据的上下游水位、闸室水位、压力、流量和阀门开度等条件,应通过船闸水力学整体模型试验或数值模拟计算确定。

7.5.3.3 流速、流量、流态和压力的测定应在恒定流情况下进行。

7.5.3.4 若边界条件由船闸水力学整体模型试验提供,宜对缩尺效应可能带来的偏差进行敏感性试验和分析。

#### 7.5.4 输水阀门水力学模型试验内容和方法应符合下列规定。

7.5.4.1 阀门非恒定流常压模型试验应满足下列要求:

(1) 试验内容包括测定不同阀门启闭方式下的启闭力、阀门段廊道及门体各部位的动水压力、阀门自振及流激振动特性、反弧门支较力和流量等,记录阀门启闭过程中的流态及特征;

(2) 试验时测量门体自重,校正阀门前后输水廊道的阻力系数,调定阀门启闭速度,标定测量仪器。

7.5.4.2 阀门恒定流减压模型试验应满足下列要求:

(1) 在阀门开启速度较慢或廊道长度较短情况下,研究阀门的空化及改善措施;

(2) 测量阀门各开度时的气压、水温、压力、空化噪声和流量,观测水流空化部位及形态,确定阀门水流空化初生和消失的水力条件;

(3) 试验前需在常压状态下校正阀门前后输水廊道的阻力系数,保持阀门段压坡线和流量与整体模型一致;

(4) 减压箱设备达到要求的真空度,水质透明、含气量少且稳定,水听器设置在底缘、门槽和门楣等可能发生空化的部位;必要时对测量信号进行相干分析;

(5) 采用变化真空度、加大工作水头或降低下游水位的方法观测空化初生和消失的过程及条件。根据空化程度采取加大阀门淹没水深、改变阀门开启方式、优化阀门后廊道段及门槽体型和通气等措施,进行减弱或消除阀门空化的试验。



**7.5.4.3** 阀门非恒定流减压模型试验应满足下列要求:

- (1) 在阀门开启速度较快或廊道长度较长情况下,研究阀门的空化及改善措施;
- (2) 试验内容和方法符合第 7.5.4.1 款和第 7.5.4.2 款的有关规定。

**7.5.4.4** 阀门门楣切片模型可用于研究阀门门楣处高速水流产生的空化现象及改善措施。试验时应改变门楣上下游压力,测量气压、水温、压力、流量和空化噪声。在无通气设施条件下,应观测水流空化初生和消失的过程及条件;在有通气设施条件下,应观测通气量的大小及对空化的抑制程度。

**7.5.4.5** 输水阀门水力学模型所需的水力学边界条件可通过船闸水力学整体模型试验确定。

**7.5.5** 工作闸门水力学模型试验内容和方法应符合下列规定。

**7.5.5.1** 试验内容应包括测定不同水位、启闭时间和启闭方式下的启闭力过程线及主要锚固件的应力变化。

**7.5.5.2** 当闸门为人字门或三角门时,应保证双扇闸门同步运行;当闸门为平面闸门、卧倒闸门或弧形闸门时,应保证各启闭点同步运行。

**7.5.5.3** 试验时应以闸门启闭杆或锚固件静态受力明确的位置作为基准。

**7.5.6** 每组试验至少应重复 3 次,同一组次的试验数据重复性较好时,可取其平均值作为代表值;同一组次的试验数据重复性较差时,应增加试验次数。

**7.5.7** 当船闸输水系统输水水力特性、闸阀门工作条件不能满足设计要求时,应进行优化方案试验,经综合比选后,提出推荐方案。

## 7.6 升船机水力学模型试验

**7.6.1** 升船机水力学模型试验应包括下列内容:

- (1) 船舶进出船厢的水体波动、船舶下沉量、船底富裕水深、船舶航行速度、航行阻力、对接锁定装置受力和引航道波流情况;
- (2) 船厢闸门启闭时水体波动和船舶系缆力;
- (3) 船厢在正常运行和事故制动情况下运行速度、加速度、钢丝绳受力、船厢倾斜量、厢内水体波动、船舶运动和系缆力;
- (4) 船厢出入水时运行速度、加速度、船厢倾斜量、船厢与船厢池水体波动、船舶系缆力、钢丝绳受力、厢底的吸附力和动水压力;
- (5) 船厢补、排水时船厢内的水力条件和船舶系缆力。

**7.6.2** 升船机水力学模型测点布置及试验方法应满足下列要求:

- (1) 在船厢、船厢池和引航道的一侧边壁分别布置 5 个~7 个水位波动测点;在船厢两端各设一个测量船厢入水深度的传感器;在船厢池口门处布置 2 个~3 个流速测点;
- (2) 在船厢底部布置 5 个~10 个测量动水压力的传感器;
- (3) 船厢内船舶系缆力的测试要求符合第 7.5.2.3 款的规定;
- (4) 在船厢内外不同水位差情况下进行船厢闸门启闭对水体波动和船舶系缆力影响的试验;

(5) 在船厢上设置测速装置,测定船厢运行速度及变化过程;

(6) 对不下水垂直升船机,在船厢底部设置称重传感器,测量船舶进出船厢过程船厢重量变化;

(7) 在船厢提升钢丝绳上设置拉力传感器,测定钢丝绳受力变化;

(8) 进行船舶进出船厢试验时,船模采用牵引方式,且牵引速度可控;

(9) 将阻力仪置于船模重心处,保持船模直航,观测航行阻力和船模升沉情况。

**7.6.3** 重复性试验要求应符合第 7.5.6 条的规定。

**7.6.4** 通过对设计方案试验资料的综合分析,应根据存在的问题进行修改方案试验,经综合比选后,提出推荐方案。

## 7.7 中间渠道通航水力学模型试验

**7.7.1** 船闸灌泄水和升船机船厢出入水时中间渠道通航水流条件模型试验内容和方法应满足下列要求:

(1) 测定渠道内水位波动、比降和流速流向;

(2) 测定渠道两端闸门内外的瞬时水位;

(3) 测定船舶系缆力;

(4) 观测船模的航速、航行阻力和航态;

(5) 在渠道沿程布置水位测点,并在渠道两端、停泊段和断面变化较大处设置流速观测断面;

(6) 模型试验观测到渠道内水面趋于平静为止。

**7.7.2** 中间渠道断面尺度模型试验内容和方法应满足下列要求:

(1) 观测不同断面尺度渠道内水位波动、比降、流速和流态;

(2) 测定船模的航速、航行阻力、船体下沉和纵倾;

(3) 测定不同航线船模的航行参数;

(4) 阻力仪置于船模重心处。

**7.7.3** 中间渠道船行波模型试验内容和方法应满足下列要求:

(1) 在渠道内设置船模航速测定标记、船行波测点和岸坡流速测点,船行波测波点布置能测得近岸处的最大波高;

(2) 观测船模航行时各测点水位波动、船行波的爬高和下落、岸边回流速度;

(3) 测定船模航速,观察船模航态;

(4) 船行波作用下护坡结构稳定性试验按第 6 章的有关规定执行。

**7.7.4** 中间渠道内取排水对通航水流条件的影响模型试验内容和方法应满足下列要求:

(1) 在取排水影响范围内观测流速、流向、流态、波动和水面比降;

(2) 对取排水口位置、布置形式和取排水量进行研究。

**7.7.5** 重复性试验要求应符合第 7.5.6 条的规定。

**7.7.6** 通过对设计方案的水力参数和船舶航行参数等资料的综合分析,应根据存在的问题进行修改方案试验,经综合比选后,提出推荐方案。

## 8 泥沙模型试验

### 8.1 基本资料

**8.1.1** 泥沙模型试验所需要的地形资料、水文资料、分析资料、工程设计方案等应符合第4.1节、第5.1节、第6.1节和第7.1节的有关规定。

**8.1.2** 内河泥沙模型试验资料还应包括下列内容。

**8.1.2.1** 提供模型验证的地形图,应能反映同一水文年内的冲、淤变化特性,对于冲刷、淤积幅度大的滩段,宜有汛期与汛后各一次地形图。测图应符合第4.1.2条的规定。

**8.1.2.2** 内河推移质泥沙模型试验的水文、泥沙资料除应符合第4.1节的有关规定外,还宜包括下列内容:

(1) 验证时段、典型水文年或系列水文年模型进口流量过程、推移质输沙率过程及其级配资料,以及模型出口相应的水位过程资料;

(2) 试验河段深槽、洲滩、河岸等特征位置的床沙级配资料;

(3) 影响较大的支流床沙级配、推移质泥沙输沙率及级配资料;

(4) 床沙与推移质泥沙的密度、淤积物干重度的实测资料;

(5) 床沙覆盖层厚度较薄且冲刷幅度可能较大时的床沙级配垂向分布资料。

**8.1.2.3** 内河悬移质泥沙模型试验的水文、泥沙资料除符合第4.1节的有关规定外,还宜包括下列内容:

(1) 试验河段验证时段的悬移质含沙量及其颗粒级配资料,悬移质泥沙重率和淤积物干重度资料;

(2) 试验河段邻近水文站验证时段的悬移质含沙量及其级配资料;

(3) 典型水文年或系列水文年的悬移质含沙量及其级配资料;

(4) 床沙资料按第8.1.2.2款的有关规定执行。

**8.1.2.4** 内河全沙动床模型试验的水文、泥沙资料应符合第8.1.2.2款和第8.1.2.3款的规定。

**8.1.2.5** 内河泥沙模型试验宜具有试验河段河床演变观测资料与分析成果,以及工程设计方案有关资料。

**8.1.2.6** 典型水文年和系列水文年的选取应满足下列要求:

(1) 根据试验河段河床演变特征、碍航特性分析和水文计算,选择不利水文年作为典型水文年;

(2) 根据试验河段多年水、沙过程资料和研究问题,选取不利的水沙年组合作为系列水文年,系列水文年包含丰水丰沙、中水中沙和小水少沙等特征水文年。

**8.1.2.7** 水库悬移质泥沙淤积对航道影响的试验,除应符合第8.1.2.1款~第8.1.2.6款的有关规定外,尚宜有试验河段进口断面长系列水文年的水位、流量过程与悬移质含沙量过程资料,以及出口断面相应的水位、流量过程资料。

**8.1.3** 潮流泥沙模型试验的水文、泥沙资料除应符合第5.1.3条的规定外,还应包括下列内容。

**8.1.3.1** 泥沙资料宜包括下列内容:

- (1) 研究区域与水文全潮测验同步的各站分层含沙量观测资料;
- (2) 研究区域每个控制性水边界至少有一个测站与试验区水文全潮洪、枯季的大、中、小潮潮流和含沙量同步观测资料;
- (3) 河口及邻近河口水域河道多年的各月径流量及输沙量资料;
- (4) 研究区域洪、枯季或夏、冬季床沙和悬移质泥沙级配资料和床沙级配分布资料;
- (5) 研究区域床沙、悬移质泥沙的沉降速度和起动流速等资料;
- (6) 研究区域内已建港池、航道的泥沙淤积资料。

**8.1.3.2** 研究区域内至少应有2次有代表性的水下地形图资料。在地形变化较明显的区域或部位,宜补充多测次固定断面测量资料。测图应符合第5.1.2条的规定。

**8.1.3.3** 河口区域应收集不同季节、不同潮型盐度分布资料;近海区域宜收集不同季节、不同潮型盐度分布资料。

**8.1.3.4** 应收集工程区域气象及波浪分析、计算成果资料,包括多年平均波要素、不同波向频率及波高波向频率,不同重现期、不同方向的设计波要素和风暴潮资料等。

**8.1.4** 波浪潮流泥沙模型的水文、泥沙资料除应符合第8.1.3条的有关规定外,还应包括下列内容。

**8.1.4.1** 研究区域宜有一年以上气象和波浪观测资料;当研究区域缺乏长年实测气象、波浪资料时,应有临时气象站和测波站连续3个月实测气象和波浪资料及相邻海域长期气象和波浪观测资料。

**8.1.4.2** 研究区域宜有不同风况和波浪条件下实测的含沙量分布资料。

**8.1.4.3** 工程区域应有不同年份与季节的水深测量或断面资料,并宜有台风、寒潮大风等恶劣气象条件下海区含沙量和相应海床冲淤地形变化的测量资料。

**8.1.5** 波浪沿岸输沙模型试验的水文、泥沙资料除应符合第8.1.4条的有关规定外,还应包括下列内容。

**8.1.5.1** 宜收集工程建筑物附近的岸线变化和海岸演变的历史资料,以及已建及拟建其他海岸工程的资料。

**8.1.5.2** 研究区域应有岸滩和床沙粒径分布、级配等资料;宜有研究区域的沿岸流流速、流向和破波带范围的资料;宜有现场实测沿岸输沙率资料。

## 8.2 模型设计

### 内河推移质泥沙模型设计

**8.2.1** 内河推移质泥沙模型的相似条件除应符合第4.2节的规定外,还应满足下列相似

条件:

起动相似

$$\lambda_{v_0} = \lambda_v \quad (8.2.1-1)$$

输沙率相似

$$\lambda_p = \lambda_{p_*} \quad (8.2.1-2)$$

河床变形相似

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_1 \lambda_h}{\lambda_p} \quad (8.2.1-3)$$

式中  $\lambda_{v_0}$ ——起动流速比尺;  
 $\lambda_v$ ——流速比尺;  
 $\lambda_p$ ——推移质输沙率比尺;  
 $\lambda_{p_*}$ ——推移质输沙能力比尺;  
 $\lambda_{t_2}$ ——推移质泥沙冲淤时间比尺;  
 $\lambda_{\gamma_0}$ ——泥沙干重度比尺;  
 $\lambda_1$ ——平面几何比尺;  
 $\lambda_h$ ——垂直几何比尺。

### 8.2.2 内河推移质泥沙模型的模型沙选择应满足下列要求。

**8.2.2.1** 模型沙宜使模型各流量级的起动流速和糙率同时满足阻力相似和重力相似条件;当各流量级难以同时满足时,对工程起主要作用的流量级应满足阻力相似和重力相似要求;其他流量级应在满足阻力相似的前提下,允许重力相似偏离 $\pm 30\%$ 。

**8.2.2.2** 模型沙材料的颗粒形状、级配、力学性能应保持稳定,无黏性、不板结;当选用含有机质轻质材料作模型沙时,宜进行脱脂防腐处理。

**8.2.2.3** 模型沙的级配曲线宜与原型沙级配曲线相平行。

**8.2.2.4** 沙质推移质泥沙模型宜采用轻质沙,卵石推移质泥沙模型可采用轻质沙或天然沙。

**8.2.2.5** 当推移质泥沙粒径与悬移质中的床沙质相近时,应按内河悬移质泥沙模型选择模型沙。

### 8.2.3 确定内河推移质泥沙模型比尺的预备工作应包括下列内容:

- (1) 根据试验河段河床演变特性确定模型类别;
- (2) 计算各流量级原型糙率,绘制糙率与流量关系曲线;
- (3) 模型沙的重度、干重度、淤积物干重度、级配的测定方法,按现行国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123)的有关规定执行;
- (4) 拟用模型沙的沙粒糙率、沙波糙率、起动流速和推移质输沙率等,由水槽试验测定或由计算确定。

### 8.2.4 内河推移质泥沙模型比尺的确定除应符合第 8.2.1 条的规定外,尚应符合下列规定。

**8.2.4.1** 轻质沙变态模型的模型变率宜满足下列条件:

$$\eta = \lambda \frac{\lambda^{2/3}}{\gamma} \sim \lambda \frac{\lambda^{1/2}}{\gamma} \quad (8.2.4-1)$$

式中  $\eta$ ——模型变率;

$\lambda \frac{\lambda^{2/3}}{\gamma}$ ——泥沙颗粒相对重度比尺。

#### 8.2.4.2 内河推移质泥沙模型的粒径比尺确定宜满足下列要求:

(1)粗颗粒泥沙模型,模型沙和原型沙均选择散粒体泥沙起动流速公式,联解式(4.2.1-2)和式(8.2.1-1),确定模型沙粒径比尺;天然沙几何变态模型采用起动切应力相似确定模型沙粒径比尺,粒径比尺按下式计算:

$$\lambda_d = \frac{\lambda_h}{\eta} \quad (8.2.4-2)$$

式中  $\lambda_d$ ——粒径比尺;

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺;

$\eta$ ——模型变率;

(2)细颗粒泥沙模型,模型沙起动流速采用水槽试验测定结果,原型沙起动流速根据泥沙的粒径选用合适的起动流速公式计算,确定模型沙粒径比尺;细颗粒推移质泥沙模型的原型沙无合适的起动流速公式时,收集试验河段实测流速  $V$  与推移质输沙率  $g_b$  资料,点绘两者关系曲线并外延至推移质输沙率趋于零,以确定原型沙的起动流速;

(3)宽级配沙卵石河床推移质泥沙模型,分别按粗颗粒推移质泥沙和细颗粒推移质泥沙确定粒径比尺,粗、细颗粒间按变粒径比尺方法确定粒径比尺。

**8.2.4.3** 内河推移质泥沙模型输沙率比尺、冲淤时间比尺,可按输沙率公式及式(8.2.1-3)初定,通过验证试验确定。

#### 8.2.5 内河推移质泥沙模型的模型沙配制应符合下列规定。

**8.2.5.1** 河床质、推移质模型沙应按第8.2.2条的规定配制。

**8.2.5.2** 当原型卵石推移质无实测级配资料时,宜按试验河段典型年洪水流量,由粗颗粒起动流速公式,反求河床质能起动的最大粒径,小于该粒径的河床质级配可作为原型推移质泥沙级配。

#### 8.2.6 内河推移质泥沙模型加糙应符合下列规定。

**8.2.6.1** 当糙率随水位变化较小时,应结合岸壁、洲滩加糙,合理调整糙率,使各流量级达到水流和泥沙输移相似。

**8.2.6.2** 当糙率随水位变化较大时,不宜在推移质输移带加糙,可采用水面、水中加糙以达到水流与泥沙输移相似。

**8.2.6.3** 模型加糙有困难或加糙对水、沙运动有影响时,可按第8.2.2.1款的规定执行。

**8.2.7** 内河推移质泥沙模型设计平面布置总图除应符合第4.2.8条的规定外,还应包括动床段与加沙、集沙系统等布置。

### 内河悬移质泥沙模型设计

**8.2.8** 内河悬移质泥沙模型设计除应符合第4.2节的有关规定外,还应满足下列相似

条件:

泥沙沉降相似

$$\lambda_{\omega} = \lambda_v \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \quad (8.2.8-1)$$

泥沙悬浮相似

$$\lambda_{\omega} = \lambda_v \left( \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \right)^{1/2} \quad (8.2.8-2)$$

泥沙起动相似

$$\lambda_{v_0} = \lambda_v \quad (8.2.8-3)$$

水流挟沙力相似

$$\lambda_{s_*} = \lambda_s \quad (8.2.8-4)$$

河床冲淤变形时间相似

$$\lambda_{t_s} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_l}{\lambda_v \lambda_s} \quad (8.2.8-5)$$

异重流运动发生条件相似

$$\lambda_{v_c} = \lambda_v \quad (8.2.8-6)$$

式中  $\lambda_{\omega}$ ——泥沙沉降速度比尺;

$\lambda_v$ ——流速比尺;

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺;

$\lambda_l$ ——平面几何比尺;

$\lambda_{v_0}$ ——泥沙起动流速比尺;

$\lambda_{s_*}$ ——水流挟沙力比尺;

$\lambda_s$ ——含沙量比尺;

$\lambda_{t_s}$ ——悬移质泥沙冲淤时间比尺;

$\lambda_{\gamma_0}$ ——泥沙干重度比尺;

$\lambda_{v_c}$ ——异重流运动速度比尺。

### 8.2.9 模型沙选择应满足下列要求。

**8.2.9.1** 模型沙选择应满足水流运动的阻力相似。当悬移质泥沙输移以沉降淤积为主时应满足沉降相似,可允许泥沙起动相似有所偏离;以冲刷为主时,应同时满足泥沙沉降相似和悬浮相似,模型变率宜满足下列约束条件:

$$\eta = \frac{\lambda_h^{1/6}}{\lambda_{n_h}} \quad (8.2.9)$$

式中  $\eta$ ——模型变率;

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺;

$\lambda_{n_h}$ ——沙粒阻力比尺。

**8.2.9.2** 模型沙材料的颗粒形状、级配及力学性能等应符合第 8.2.2.2 款和第 8.2.2.3 款的规定。

8.2.9.3 极细颗粒的泥沙,应按絮凝当量粒径为模型设计的泥沙粒径。

8.2.10 确定模型比尺的预备工作除符合第8.2.3条的规定外,还应测定模型沙的沉降速度。

8.2.11 内河悬移质泥沙模型比尺的确定除应符合第8.2.8条的规定外,尚应符合下列规定。

8.2.11.1 悬移质泥沙沉速比尺的确定应满足下列要求:

(1) 以沉降相似为主时,沉速比尺按下式计算:

$$\lambda_w = \lambda_v (\lambda_h / \lambda_l) \quad (8.2.11-1)$$

(2) 以悬浮相似为主时,沉速比尺按下式计算:

$$\lambda_w = \lambda_v (\lambda_h / \lambda_l)^{1/2} \quad (8.2.11-2)$$

(3) 以冲刷为主但不满足式(8.2.9)或悬浮和沉降相似需同时考虑时,沉速比尺按下式计算:

$$\lambda_w = \lambda_v (\lambda_h / \lambda_l)^m \quad (8.2.11-3)$$

$$m = \begin{cases} 0.102Z_{..p}^2 - 0.248Z_{..p} + 0.758 & (Z_{..p} < 1) \\ 0.612Z_{..p}^{-0.4772} & (Z_{..p} \geq 1) \end{cases} \quad (8.2.11-4)$$

$$Z_{..p} = \frac{\omega_p}{\kappa u_{..p}} \quad (8.2.11-5)$$

式中  $\lambda_w$ ——泥沙沉降速度比尺;

$\lambda_v$ ——流速比尺;

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺;

$\lambda_l$ ——平面几何比尺;

$m$ ——指数,介于1/2~1之间,一般取3/4,或按式(8.2.11-4)计算;

$Z_{..p}$ ——原型悬移质泥沙悬浮指标,按式(8.2.11-5)计算;

$\omega_p$ ——原型悬移质泥沙沉速(m/s);

$\kappa$ ——卡门常数;

$u_{..p}$ ——原型摩阻流速(m/s)。

8.2.11.2 悬移质泥沙粒径比尺的确定宜符合下列规定:

(1) 沉速位于滞流区时,泥沙粒径比尺按下列公式计算:

以沉降相似为主时

$$\lambda_d = \lambda_h^{3/4} \lambda_v^{1/2} \lambda_{\frac{v_s}{\lambda}}^{1/2} \lambda_l^{1/2} \quad (8.2.11-6)$$

以悬浮相似为主时

$$\lambda_d = \lambda_h^{1/2} \lambda_v^{1/2} \lambda_{\frac{v_s}{\lambda}}^{1/2} \lambda_l^{1/4} \quad (8.2.11-7)$$

悬浮和沉降相似需同时考虑时

$$\lambda_d = \lambda_h^{\frac{1-2m}{4}} \lambda_v^{1/2} \lambda_{\frac{v_s}{\lambda}}^{1/2} \lambda_l^{1/2} \quad (8.2.11-8)$$

式中  $\lambda_d$ ——泥沙粒径比尺;

$\lambda_h$ ——垂直几何比尺;



- $\lambda_v$ ——流速比尺；
- $\lambda_{\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}}$ ——泥沙相对重度比尺；
- $\lambda_l$ ——平面几何比尺；
- $m$ ——指数,按第8.2.11.1款的规定取值；

(2)当沉速位于过渡区时,选用合适的公式计算原型沙的沉速,根据第8.2.11.2款的规定可得模型沙沉速,并选用合适的公式反算出模型沙粒径,确定泥沙粒径比尺。有条件时实验测定原型沙和模型沙沉速,确定泥沙粒径比尺。

**8.2.11.3** 水流挟沙力比尺可按式计算：

$$\lambda_{s_*} = \lambda_k \lambda_{\gamma_s} / \lambda_{\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}} \quad (8.2.11-9)$$

- 式中  $\lambda_{s_*}$ ——水流挟沙力比尺；
- $\lambda_k$ ——水流挟沙力系数比尺,由验证试验确定；
  - $\lambda_{\gamma_s}$ ——泥沙重度比尺；
  - $\lambda_{\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}}$ ——泥沙相对重度比尺。

**8.2.11.4** 水流挟沙力比尺、泥沙冲淤时间比尺,可分别按式(8.2.11-7)、式(8.2.8-5)计算初定,通过地形冲淤验证试验调整。

**8.2.11.5** 模拟沙质推移质运动、悬移质运动的内河全沙动床模型试验,推移质的河床冲淤时间比尺和悬移质的河床冲淤时间比尺应一致;当不一致时,应选择对应悬移质泥沙输移的河床冲淤时间比尺。

**8.2.11.6** 悬移质泥沙定床模型应按泥沙起动相似、泥沙沉降相似、水流挟沙力相似和河床冲淤变形时间相似条件确定模型沙粒径比尺、水流挟沙力比尺,初定河床冲淤变形时间比尺,并可根据预备试验适当调整河床冲淤变形时间比尺。

**8.2.12** 模型床沙的配制,应按第8.2.5条的有关规定执行。悬移质模型沙的配制,宜根据原型悬移质泥沙和床沙粒径级配及其变化情况,区分悬移质泥沙中的冲泻质和床沙质,仅考虑配制床沙质部分,模型沙与原型床沙质级配曲线相平行。

**8.2.13** 悬移质泥沙模型不宜加糙。模拟床沙质为主的模型试验需加糙时,可按第8.2.6条的有关规定执行。

**8.2.14** 内河悬移质泥沙动床模型设计平面布置总图应符合第8.2.7条的规定。内河悬移质泥沙定床模型设计平面布置总图除按第4.2.8条的规定执行外,还应包括加沙、集沙系统等布置。

#### 潮流泥沙模型设计

**8.2.15** 潮流泥沙模型设计除应符合第5.2节的有关规定外,其泥沙输移及床面变形应根据试验要求满足下列相似条件：

泥沙起动相似

$$\lambda_{v_0} = \lambda_v \quad (8.2.15-1)$$

泥沙沉降相似

$$\lambda_{\omega} = \lambda_v \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \quad (8.2.15-2)$$

泥沙悬浮相似

$$\lambda_{\omega} = \lambda_v \left( \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \right)^{1/2} \quad (8.2.15-3)$$

挟沙力相似

$$\lambda_s = \lambda_{s*} \quad (8.2.15-4)$$

推移质单宽输沙率相似

$$\lambda_C = \lambda_{C*} \quad (8.2.15-5)$$

悬移质泥沙床面变形相似

$$\lambda_{t_3} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s} \lambda_{t_1} \quad (8.2.15-6)$$

推移质泥沙床面变形相似

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_l \lambda_h}{\lambda_p} \quad (8.2.15-7)$$

式中  $\lambda_{v_0}$ ——泥沙起动流速比尺；  
 $\lambda_v$ ——流速比尺；  
 $\lambda_{\omega}$ ——泥沙沉降速度比尺；  
 $\lambda_l$ ——平面几何比尺；  
 $\lambda_h$ ——垂直几何比尺；  
 $\lambda_s$ ——含沙量比尺；  
 $\lambda_{s*}$ ——挟沙力比尺；  
 $\lambda_p$ ——推移质输沙率比尺；  
 $\lambda_{C*}$ ——推移质输沙力比尺；  
 $\lambda_{t_3}$ ——悬移质泥沙冲淤时间比尺；  
 $\lambda_{\gamma_0}$ ——泥沙干重度比尺；  
 $\lambda_{t_1}$ ——水流时间比尺；  
 $\lambda_{t_2}$ ——推移质泥沙冲淤时间比尺。

**8.2.16** 潮流泥沙模型的泥沙输移及床面变形相似应根据研究要求选择不同的相似条件,相似条件的选择应符合下列规定。

**8.2.16.1** 潮流悬移质泥沙定床模型相似应满足泥沙沉降相似、水流挟沙力相似和悬移质泥沙床面变形相似。

**8.2.16.2** 潮流悬移质泥沙动床模型应满足泥沙起动相似、泥沙沉降相似和泥沙悬浮相似、水流挟沙力相似和悬移质泥沙床面变形相似,其中泥沙沉降相似和泥沙悬浮相似条件的选择应按第8.2.11.2款的规定执行。

**8.2.16.3** 包括悬移质泥沙和推移质泥沙的全沙模型的泥沙输移及输移相似宜满足第8.2.15条的规定,并应根据研究问题的性质有所侧重。

- 8.2.17** 模型沙应根据原型泥沙级配、水力特性、挟沙能力或输沙率等特征,按模型比尺、试验要求和第8.2.16条的规定执行。
- 8.2.18** 模型沙的密度、重度、级配和沉降速度、起动流速等性能指标应通过预备试验测定。原型沙的沉速、起动流速宜采用现场床沙表层泥样通过试验测定,有经验时也可采用合适的公式计算确定。
- 8.2.19** 模型沙的级配曲线宜与原型沙级配曲线相平行。模型沙的颗粒形状、级配、力学性能应符合第8.2.2.2款的规定。
- 8.2.20** 全沙模型的推移质泥沙、悬移质泥沙的冲淤时间比尺应一致;当不一致时,应选择起主要作用的泥沙冲淤时间比尺进行试验。
- 8.2.21** 模型中水流挟沙力比尺和冲淤时间比尺可按地形验证情况进行调整。
- 8.2.22** 模型平面布置图除应符合第5.2.7条的规定外,还宜包括动床范围、加沙和集沙系统等。

#### 波浪潮流泥沙模型设计

- 8.2.23** 波浪潮流泥沙模型设计除应符合第5.2节和第8.2.15条的有关规定外,尚应满足下列相似条件:

波浪折射、波浪陡度、波浪传播速度相似

$$\lambda_{l_r} = \lambda_{ll} = \lambda_h \quad (8.2.23-1)$$

$$\lambda_{C_w} = \lambda_{l_r}^{1/2} = \lambda_h^{1/2} \quad (8.2.23-2)$$

$$\lambda_T = \lambda_h^{1/2} \quad (8.2.23-3)$$

$$\lambda_{v_w} = \lambda_h^{1/2} \quad (8.2.23-4)$$

$$\lambda_{u_r} = \lambda_{C_w} = \lambda_h^{1/2} \quad (8.2.23-5)$$

波浪绕射、波浪反射相似

$$\lambda_{l_r} = \lambda_1 = \lambda_h \quad (8.2.23-6)$$

波浪破波水深与破波波高相似

$$\lambda_{ll_h} = \lambda_{h_h} = \lambda_h \quad (8.2.23-7)$$

波浪沿岸流相似

$$\lambda_{m_l} = \lambda_h^{1/2} \quad (8.2.23-8)$$

波浪破波类型相似

$$I_r = \frac{\tan\beta}{(H_0/L_0)^{1/2}} \quad (8.2.23-9)$$

式中  $\lambda_{l_r}$ 、 $\lambda_{ll}$ 、 $\lambda_h$ ——波长、波高和水深几何比尺;

$\lambda_{C_w}$ ——波浪传播速度比尺;

$\lambda_T$ ——波周期比尺;

$\lambda_{v_w}$ ——波质点运动速度比尺;

$\lambda_{u_r}$ ——波浪传质速度比尺;

$\lambda_1$ ——平面几何比尺；

$\lambda_{H_b}$ 、 $\lambda_{h_b}$ ——波浪破碎波高和破碎水深比尺；

$\lambda_{v_0}$ ——沿岸流流速比尺；

$I_r$ ——波浪破波波型判别数,当  $I_r < 0.5$  时为崩破波波型,当  $0.5 \leq I_r \leq 3.3$  时为卷破波波型,当  $I_r > 3.3$  时为激破波波型；

$\tan\beta$ 、 $H_0$  和  $L_0$ ——岸滩坡角正切值、深水波高和波长。

**8.2.24** 波浪潮流泥沙模型,在满足模型沙选择的条件下,模型变率宜在 3~6 之间,岸滩坡度较平坦的海域模型可选择较大值。模型垂直几何比尺应满足模型波高大于 2.0cm,波周期大于 0.5s 的要求。

**8.2.25** 模型沙应根据研究区域的床沙分布状况和研究问题的性质,按泥沙沉降相似和泥沙起动相似选择粒径,并应符合第 8.2.2.2 款、第 8.2.17 条和第 8.2.18 条的规定。

**8.2.26** 模型冲淤时间比尺应根据式(8.2.15-6)或式(8.2.15-7)计算初定,并应根据现场实测含沙量或输沙率资料,在确定其含沙量或输沙率比尺的情况下经地形冲淤验证,按达到与原形相似的时间要求确定。

**8.2.27** 模型边界条件、平面布置和模型平面布置图等应符合下列规定。

**8.2.27.1** 模型中造波机造波的方向应按年平均代表波向和强波向分别布置,当年平均代表波向和强波向基本一致时可按强波向方向布置。

**8.2.27.2** 造波机造波范围应覆盖模型中试验研究的工程区,并包含邻近水域的动床部分。

**8.2.27.3** 造波机距工程区的距离应大于 6 倍波长,且不影响模型中潮流运动和流场变化。模型中垂直边壁应进行消波处理。

**8.2.27.4** 模型平面布置图除应符合第 6.2.8 条的规定外,还应包括动床范围、加沙、集沙系统等。

#### 波浪沿岸输沙模型设计

**8.2.28** 波浪沿岸输沙模型设计除应满足第 6.2 节有关规定外,尚应满足下列相似条件:

浅水波底部轨迹速度、沿岸流速度相似

$$\lambda_{m_1} = \lambda_{v_1} = \lambda_h^{1/2} \quad (8.2.28-1)$$

泥沙沉降速度相似

$$\lambda_w = \lambda_h^{3/2} / \lambda_1 \quad (8.2.28-2)$$

泥沙起动相似

$$\lambda_{v_0} = \lambda_m \quad (8.2.28-3)$$

沿岸输沙量相似

$$\lambda_{Q_T} = \frac{(Q_T)_p}{(Q_T)_m} \quad (8.2.28-4)$$

床面冲淤变化相似

$$\lambda_{\omega} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_l^2 \lambda_h}{\lambda_{QT}} \quad (8.2.28-5)$$

式中  $\lambda_{m_1}$ 、 $\lambda_{m_2}$ ——波质点运动速度比尺和沿岸流流速比尺；

$\lambda_h$ ——水深比尺；

$\lambda_{\omega}$ ——泥沙沉降速度比尺；

$\lambda_l$ ——模型水平长度比尺；

$\lambda_{v_0}$ ——泥沙起动流速比尺；

$\lambda_{QT}$ ——沿岸输沙量比尺；

$(Q_T)_p$ ——原型沿岸输沙量；

$(Q_T)_m$ ——模型沿岸输沙量；

$\lambda_{\omega}$ ——海岸床面冲淤时间比尺；

$\lambda_{\gamma_0}$ ——泥沙干重度比尺；

$\lambda_l$ 、 $\lambda_H$ 、 $\lambda_h$ ——波长、波高和水深比尺。

**8.2.29** 波浪沿岸输沙模型试验宜采用正态模型,当试验条件受限时也可采用变态模型。模型几何比尺应符合下列规定。

**8.2.29.1** 模型平面几何比尺应根据模拟的范围、试验目的和要求以及试验场地的大小确定,平面几何比尺不宜大于300。

**8.2.29.2** 模型变率不应大于3。

**8.2.29.3** 模型垂直几何比尺可通过波浪槽岸滩平衡剖面预备试验确定。

**8.2.30** 泥沙起动波高、起动水深和沿岸输沙量宜通过预备试验确定,也可通过经验公式确定。

**8.2.31** 模型沙粒径比尺、沿岸输沙量比尺和冲淤时间比尺应根据第8.2.29条的有关公式计算初定,以满足地形冲淤变化相似为主要条件,合理地选取。

**8.2.32** 模型沙应按泥沙输移或岸滩冲淤变形相似要求选用天然沙或轻质沙。轻质模型沙的相关要求应符合第8.2.2.2款、第8.2.17条和第8.2.18条的规定。

**8.2.33** 模型平面布置、边界条件和模型平面布置图应符合下列规定。

**8.2.33.1** 模型试验的范围应根据现场实测资料和研究目的确定;模型输沙方向首、尾端应有过渡段,其长度应大于5倍波长。

**8.2.33.2** 模型动床范围应根据波浪作用下泥沙起动水深确定。

**8.2.33.3** 造波机应按试验采用的代表波向布置,与工程建筑物及岸滩的距离不宜小于6倍波长。

**8.2.33.4** 消波装置应设置在波浪水池尾部和两侧,与建筑物及岸滩的距离应大于2倍波长。模型四周可设置回流槽。

**8.2.33.5** 集沙槽或集沙盒应设置在试验段尾部,基本垂直于岸线;集沙槽或集沙盒在满足拦截全部沿岸输沙的前提下形状应窄浅。

**8.2.33.6** 模型平面布置图应符合第8.2.27.4款的规定。

### 8.3 模型制作

**8.3.1** 模型制作除应符合第4.3节、第5.3节、第6.3节或第7.3节的有关规定外,动床部分制作还应符合下列规定。

**8.3.1.1** 河床或海床可动部分铺沙厚度应大于预计河床或海床可能出现的最大冲刷深度5cm~10cm。

**8.3.1.2** 河床或海床覆盖层厚度较薄且冲刷幅度可能较大时,宜根据床沙级配垂向分布分层铺沙。

**8.3.1.3** 模型动床的范围应覆盖工程需要的范围,定床与动床之间应设置过渡带。动、定床交界面应平顺连接,铺垫不能起动的粗颗粒模型沙过渡至动床。

**8.3.1.4** 深槽应设进、排水管,管口上层设反滤层。

**8.3.1.5** 动床部分可采用断面法控制地形,断面间距宜为40cm~80cm,变化剧烈的局部地形应增加断面,断面板宜由不变形的材料制作。

**8.3.1.6** 模型沙应浸泡密实后方可刮制,刮制后应对断面板进行复测,若偏差超过允许值应重新刮制,取出断面板时不应扰动与破坏动床地形。

**8.3.2** 波浪潮流泥沙模型中造波机位置处应设置沟槽,面向造波方向沟槽应做成斜坡,两侧应设置透空导墙,背侧应设置消波材料。

**8.3.3** 波浪沿岸输沙变态模型中防波堤、码头等对反射影响较大的建筑物,宜按正态模型制作,当采用变态的模型建筑物时可在模型建筑物表面增加糙度或采取增加孔隙率的消能措施。

**8.3.4** 建筑物模型应采用浸水后不变形的适宜材料制作。

### 8.4 模型验证试验

#### 内河推移质泥沙模型验证试验

**8.4.1** 内河推移质泥沙模型试验应在水动力模型试验基础上进行。推移质泥沙模型的水流运动验证试验应符合第4.4节的有关规定。

**8.4.2** 河床变形验证和比尺的调整应符合下列规定。

**8.4.2.1** 宜选择近期河床变形显著的时段进行验证试验,起始地形应按该时段前实测河床地形图铺制,验证地形应采用该时段末实测河床地形图。

**8.4.2.2** 验证时段的流量、输沙量过程应进行分级同步概化,每个流量级概化前后的水量、输沙量应相等,概化时段不宜小于水流流经模型历时的3倍。

**8.4.2.3** 验证试验放水、停水操作应保持动床地形不遭破坏。

**8.4.2.4** 模型输沙率比尺和冲淤时间比尺的调整,应满足下列要求:

(1) 按初定的输沙率比尺和相应的冲淤时间比尺确定模型加沙量及放水时间,并进行首次冲淤地形验证;

(2) 当验证结果不满足要求时,调整输沙率比尺和相应的冲淤时间比尺,确定模型加

沙量及放水时间,再进行试验;

(3)当模型与原型地形的冲淤部位的平面形状、厚度及变化过程基本相似,全河段冲淤总量的偏差在 $\pm 20\%$ 以内时,验证试验得到的输沙率比尺和冲淤时间比尺作为正式试验比尺。

**8.4.2.5** 当一次验证试验获得模型的冲淤地形和冲淤量与原型基本相似时,模型应进行重复试验,两次试验冲淤量的允许偏差为 $\pm 10\%$ 。

**8.4.3** 河床冲淤验证试验完成后,应建立流量与加沙量关系曲线,作为正式试验的依据。

#### 内河悬移质泥沙模型验证试验

**8.4.4** 内河悬移质泥沙模型试验、内河全沙动床模型试验应在水动力模型试验基础上进行。悬移质泥沙模型的水流运动验证试验,应按第4.4节的有关规定执行。

**8.4.5** 内河悬移质泥沙定床模型试验的含沙量率定、内河悬移质泥沙动床模型试验、内河全沙动床模型试验的河床变形验证和比尺的调整除应符合第8.4.2条的规定外,还应符合下列规定。

**8.4.5.1** 当模型沙中有小于 $0.025\text{mm}$ 的粒径时,宜采集水样进行絮凝试验,如有絮凝应加分散剂等措施解决。

**8.4.5.2** 在试验进行过程中宜进行水温测量,根据水温变化调整加沙粒径。

**8.4.5.3** 验证试验时应在模型进口取样检验悬移质泥沙含沙量和粒径,允许偏差为 $\pm 10\%$ ,尾门水位应保持稳定,允许偏差为 $\pm 3\text{mm}$ 。当其中任何一项超过这一规定时,应随时进行调整或重新进行试验。

**8.4.6** 内河悬移质泥沙动床模型试验的正式试验的流量与加沙量关系曲线应按第8.4.3条的规定执行。内河悬移质泥沙定床模型试验的流量与加沙量关系曲线应由实测资料或数模计算确定。

#### 潮流泥沙模型验证试验

**8.4.7** 潮流泥沙模型试验应在潮流定床模型试验的基础上进行,潮流验证试验应符合第5.4节的有关规定。

**8.4.8** 验证试验应根据原型泥沙输移情况合理设置加沙断面,加沙断面应距试验段有一定距离。

**8.4.9** 验证试验潮型和试验时间控制应满足下列要求:

(1)验证试验选择合适的大、中、小潮或混合潮作为代表潮型;

(2)验证试验按水流时间比尺控制潮流过程,按泥沙冲淤时间比尺控制泥沙试验时间。

**8.4.10** 海床变形验证和比尺的调整应符合下列规定。

**8.4.10.1** 验证试验放水、停水操作应符合第8.4.2.3款的规定。

**8.4.10.2** 模型验证试验应随时测定模型中含沙量及相应的有关参数。

**8.4.10.3** 模型含沙量比尺或输沙率比尺和冲淤时间比尺的调整,应满足第8.4.2.4

款的规定。

**8.4.10.4** 对于单纯淤积的模型,模型的淤积部位和淤积厚度分布应与原型基本符合,总淤积量允许偏差应为 $\pm 15\%$ 。

**8.4.10.5** 重复性验证试验要求应符合第8.4.2.5款的规定。

**8.4.11** 冲淤验证试验完成后,应建立加沙断面的加沙量时间关系曲线,作为正式试验的依据。

#### 波浪潮流泥沙模型验证试验

**8.4.12** 波浪潮流泥沙模型率定、验证试验应符合第6.4节和第8.4.7条~第8.4.11条的有关规定。

**8.4.13** 试验中的波浪应采用工程区水域的代表波浪要素,并进行固定潮位下的模型率定。代表波浪要素可按第8.4.17条的有关规定选择。

**8.4.14** 进行正常情况下的波浪潮流泥沙冲淤验证时,验证试验宜分为代表潮型下潮流作用的泥沙试验和与代表波高、波向下波流共同作用的泥沙试验两种工况组合穿插进行。试验时间和含沙量还应符合下列规定。

**8.4.14.1** 代表潮型下潮流作用的泥沙试验时间应按试验工程海域波浪有效波高小于或等于0.5m出现的频率计算,试验含沙量应按工程海域相应波浪条件下观测的含沙量控制。

**8.4.14.2** 波流共同作用下的泥沙试验时间应按试验工程海域波浪有效波高大于0.5m出现的频率计算,试验含沙量应按有效波高大于0.5m各级波高出现的频率与相应的含沙量加权平均值控制。

**8.4.14.3** 验证试验时间应按模型冲淤试验计算或按调整的时间控制。

**8.4.14.4** 两种试验工况的平均含沙量应通过试验含沙量与时长加权平均计算。

**8.4.15** 强浪下的泥沙冲淤验证宜进行代表潮型下潮流与短时强浪组合的试验,其历时应按原型强浪可出现的历时为1天~3天控制,并不少于1个完整潮型,试验含沙量应采用强浪时实测的含沙量或推算值控制。

#### 波浪沿岸输沙模型验证试验

**8.4.16** 波浪沿岸输沙模型的验证试验应主要包括波浪要素、沿岸流速、岸滩剖面、沿岸输沙量等的验证。

**8.4.17** 模型验证试验和方案试验宜采用不规则波;条件不具备时,可采用规则波。试验波要素及试验水位应符合下列规定。

**8.4.17.1** 代表波向可采用下式计算:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sum P_i H_i^2 T_i \sin 2\alpha_i}{\sum P_i H_i^2 T_i} \quad (8.4.17-1)$$

式中  $\bar{\alpha}$ ——代表波向;

$H_i$ 、 $T_i$ 、 $P_i$ 、 $\alpha_i$ ——大于泥沙起动的第*i*级有效波高及其所对应的波周期及出现频率与波



向角。

8.4.17.2 代表波高可采用下式计算：

$$\bar{H} = \left( \frac{\sum H_i^2 P_i}{\sum P_i} \right)^{1/2} \quad (8.4.17-2)$$

式中  $\bar{H}$ ——代表波高(m)；

$H_i$ ——大于泥沙起动的第*i*级有效波高(m)；

$P_i$ ——对应  $H_i$  波级的频率(%)。

8.4.17.3 代表波周期可选用与代表波高相对应的周期。

8.4.17.4 试验水位可按下列规定选取：

(1) 潮差不大的海域取年、季或其他特征时段的平均潮位；

(2) 潮差较大的海域取平均高潮位、平均潮位和平均低潮位，试验按其所占的历时比例依次进行。

8.4.17.5 在有明显的两个方向输沙时，宜以岸线的垂线为界划分两个方向并分别确定两个方向的代表波向、波高及其他相应的波要素进行试验。

8.4.18 海域波况的验证应符合下列规定。

8.4.18.1 原始波控制点宜设在水深不小于0.5倍波长，且海底地形较平缓的水域。

8.4.18.2 破波带水域沿岸线方向应布置不少于三个垂直岸线的测量断面、每一断面布置不少于三个不同水深的测波点；未放置工程建筑物模型条件下，拟建港池口门、航道及堤后波影区等工程建筑物附近应布置测波点。

8.4.18.3 控制点处原始波要素应取试验水位条件下，未放置工程建筑物模型时三次测量的平均值，三次测量的允许偏差为±5%。

8.4.18.4 各控制点的波高平均值与模型试验要求的波高值的允许偏差应为±5%。

8.4.19 破波带位置应与原型基本相似。各测点破碎波波高和破波角验证时，模型与原型的允许偏差应为±10%。

8.4.20 沿岸流速验证时，流速允许偏差应为±10%。

8.4.21 岸滩剖面验证试验应按岸滩形态相似调整和确定模型波浪要素比尺或模型加沙量。对海岸的长期演变和因风暴引起的短期变化，应分别验证。

8.4.22 沿岸输沙量应在岸滩形态基本相似、上游加沙点和下游集沙点之间岸滩形态基本稳定、加沙量接近于集沙量的情况下进行测定。

8.4.23 冲淤时间比尺应根据验证后得到的输沙量比尺按式(8.2.29-5)计算确定。

## 8.5 内河泥沙模型试验

### 内河推移质泥沙模型试验

8.5.1 模型试验应包括无工程方案试验和工程方案试验。无工程方案试验，宜选择典型水文年和系列水文年的水沙过程进行试验。工程方案试验应先进行定床优化方案试验。

8.5.2 推移质泥沙模型试验应以验证试验所确定的冲淤时间比尺和输沙量比尺计算得

到的水、沙量放水、加沙进行试验,观测典型水文年或系列水文年特征流量级的水位、流速、分流比、流态和泥沙输移带以及年内或年际河床冲淤变化。

**8.5.3 浅滩整治动床工程方案试验应满足下列要求。**

**8.5.3.1** 沙质浅滩与沙卵石浅滩,应选择对航道维护不利,即落水期短的一个或两个水文年,按水、沙过程同步分级概化进行试验;应在工程区及其上、下游布设若干断面,以整治流量或设计流量级为重点观测流速分布、流态、水位和滩脊水深;放水结束后应观测动床区地形。

**8.5.3.2** 当方案不能满足工程设计要求时,应提出修改方案并继续进行试验,最终形成动床优化方案。

**8.5.4 拟建水库变动回水区推移质泥沙淤积对航道影响及改善措施的模型试验应满足下列要求。**

**8.5.4.1** 应选择有代表性的水文系列年,按水、沙过程分级同步概化进行试验,进、出口的水、沙过程可由实测资料或数值模拟计算提供;应在重点滩段设置断面,观测特征流量下流速分布、沿程水位及滩脊水深;放水结束后观测动床区地形。

**8.5.4.2** 当泥沙淤积影响航道水深时,应进行治理工程方案试验;当工程方案不能满足设计要求时,应进行修改方案试验。

**8.5.5 拟建水库下游河床冲刷对航道影响及改善措施的模型试验应满足下列要求。**

**8.5.5.1** 由数值模拟提供水文系列年组合,并按水、沙过程同步分级概化进行试验,出口水位可按数值模拟计算成果控制;应根据滩段及工程情况布设若干断面,观测流速、流态、水位、重点河段河床冲淤过程,不同年份汛末宜进行河床质取样分析。

**8.5.5.2** 当河床冲淤变化影响航道水深时,应进行治理工程方案试验。当工程方案不能满足设计要求时,应进行修改方案试验。

**8.5.6 桥渡河段推移质泥沙试验应满足下列要求。**

**8.5.6.1** 应选择典型水文年和含有设计最大通航流量级的特征洪水年,按水、沙过程同步概化进行试验;应在桥位上、下游设置若干断面,观测特征流量下流速分布、流向和水位,放水结束后应观测河道地形。

**8.5.6.2** 当桥梁工程布置及河床变形影响船舶或船队安全航行时,可调整桥位、桥型或采取工程措施进行修改方案试验。

**8.5.7 工程方案试验成果应进行分析、对比,并结合类似河流已建工程的实践经验以及工程量、施工条件等,经综合分析研究后提出推荐方案。**

#### 内河悬移质泥沙模型试验

**8.5.8 无工程方案试验和工程方案试验应符合第8.5.1条的规定。**

**8.5.9 浅滩航道整治悬移质泥沙动床模型的工程方案试验应符合下列规定。**

**8.5.9.1** 应选择对浅滩不利的典型水文年进行试验。应选择枯、中、洪水不同流量级,观测浅滩段若干个断面流速、流态和悬移质泥沙淤积量、冲刷量以及相应的沿程水位。

**8.5.9.2** 当工程方案不能满足设计要求时,应提出修改方案,继续进行试验,并形成动

床优化方案。

**8.5.9.3** 宜进行动床优化方案的长系列水文年试验,观测分析河床冲淤变化规律及发展趋势。

**8.5.10** 水库变动回水区航道治理及改善的悬移质泥沙动床模型试验应符合下列规定。

**8.5.10.1** 模型进、口水沙过程可由实测资料或数值模拟计算提供;宜在航道浅区设置测点,观测不同水位、流量下的流速、航深、沿程水位及淤积物组成。

**8.5.10.2** 可采用优化水库调度或采取整治工程进行不同方案的对比试验,研究航道泥沙淤积改善措施。

**8.5.11** 水利枢纽和通航枢纽坝区泥沙淤积及治理措施的悬移质泥沙定床模型试验应符合下列规定。

**8.5.11.1** 进口水、沙过程应由数值模拟提供,并同步分级概化,枢纽下泄流量和坝前水位应按枢纽设计运用方式或枢纽实际运行方式控制。

**8.5.11.2** 宜在上、下游引航道口门区与连接段设置若干断面,观测不同流量下的流速分布、流态、年末泥沙淤积高程。当通航条件不能满足要求时,应提出改善措施进行优化方案试验。

**8.5.12** 桥渡河段悬移质泥沙动床模型试验除应符合第8.5.6.1款、第8.5.6.2款的规定外,还宜进行工程后长系列水文年试验,观测分析河床冲淤变化规律及发展趋势。

**8.5.13** 工程方案试验成果分析要求应符合第8.5.7条的规定。

## 8.6 潮流泥沙模型试验

**8.6.1** 方案试验应按验证试验确定的水、沙条件进行比选和优化。推荐方案应进行不同水沙组合试验。

**8.6.2** 潮汐河口的不同水沙条件应包括中水年、枯水年、丰水年及其组合,重要的工程还宜包括特大洪水和风暴潮的影响。

**8.6.3** 河口及邻近河口区域,泥沙淤积形态为河道径流输沙时,可将泥沙动床改变为定床铺沙,观测在动力作用下泥沙的冲淤变化,定性比较各方案的优劣。

**8.6.4** 模型试验应记录潮位、流量、沙量控制的状态,并应观察水流与泥沙输移状态受工程建筑物影响的情况。

**8.6.5** 方案试验的测量方法和精度控制应与验证试验相同,试验出现异常数据应进行重复试验。推荐方案应进行重复试验。

**8.6.6** 试验成果分析和推荐方案确定应符合下列规定。

**8.6.6.1** 方案试验应分析泥沙的冲淤变化、各部位冲淤量、平均冲淤厚度和最大冲淤厚度,并比较各工程方案的优劣。

**8.6.6.2** 推荐方案应从水动力、泥沙输移、地形冲淤变化等方面进行综合分析后确定。

## 8.7 波浪潮流泥沙模型试验

**8.7.1** 方案试验应按验证试验确定的代表潮型与代表波浪组合下的时间、含沙量进行。

推荐方案应进行不同水沙组合试验。

**8.7.2** 正常情况下的波浪潮流泥沙冲淤方案试验,宜分为代表潮型下潮流作用的泥沙试验和与代表波高、波向下波流共同作用的泥沙试验两种工况组合进行。试验含沙量控制要求应符合第8.4.14.1款、第8.4.14.2款和第8.4.14.4款的规定。

**8.7.3** 强浪下的泥沙冲淤方案试验宜进行代表潮型下潮流与短时强浪组合的试验。

**8.7.4** 方案试验观测中出现异常数据时应进行重复试验。推荐方案应进行重复试验。

**8.7.5** 试验成果分析和推荐方案确定应符合第8.6.6条的规定。

## 8.8 波浪沿岸输沙模型试验

**8.8.1** 方案试验应按验证试验确定的特征水位与代表波浪组合下的时间、输沙量进行。

**8.8.2** 试验应分别测取工程研究区域代表波作用下不同年限和强浪作用下的地形,并计算地形冲淤变化、冲淤量、冲淤强度和沿岸输沙量。

**8.8.3** 各方案试验应进行两次或两次以上,其试验结果的允许偏差应为 $\pm 20\%$ ,并应取有效试验结果的平均值作为试验结果。

**8.8.4** 模型试验成果分析应符合下列规定。

**8.8.4.1** 试验成果应包括研究区域不同年限冲淤地形图,不同年限冲淤量、冲淤强度和冲淤变化趋势图,强浪下工程区域地形冲淤分布、冲淤量和冲淤强度,波浪场等主要内容。

**8.8.4.2** 应阐明各方案的特点,对各方案的波浪场分布和地形冲淤变化等进行综合比较,提出推荐方案。

## 9 船舶模拟试验

### 9.1 基本资料

9.1.1 船舶模拟试验应在内河、潮流、波浪和通航建筑物水动力模拟试验的基础上进行,船舶模拟试验所需基本资料应包括水动力模拟试验和船舶模拟试验两部分资料。水动力模拟试验所需资料应分别符合第4.1节、第5.1节、第6.1节或第7.1节的有关规定。

9.1.2 船舶模拟试验采用的船型应根据设计船型确定,所需资料应符合下列规定。

9.1.2.1 船模制造应具备下列资料:

- (1) 试验船舶实船的型值参数、型线图、总布置图;
- (2) 螺旋桨桨叶及其安装图,舵叶图和舵系布置图等;
- (3) 试验船舶实船空载和满载时的排水量及相应的吃水深度、静水力曲线图等。

9.1.2.2 船模率定应包括下列资料:

- (1) 试验船队实船编队型式、主尺度及各船的载量和首尾吃水;
- (2) 试验船舶或船队实船在不同工况时的静水航速;
- (3) 试验船舶或船队实船操纵性试验资料或实船航行资料。

9.1.3 需要模拟风对船舶航行和停靠泊影响的试验,还应收集试验区域内多年风况资料和船体上部结构、货物堆放等其他资料。

### 9.2 模型设计

9.2.1 开展船舶模拟试验的内河、潮流、波浪、通航建筑物等水动力模型与船模均应设计成正态模型,并保持几何比尺一致。水动力模型的设计应分别符合第4.2节、第5.2节、第6.2节或第7.2节的有关规定。对于只进行工程效果定性对比的船舶模拟试验,当水动力模型不能设计成几何正态时,可设计为几何变态,但水动力模型的变率不宜大于3。

9.2.2 船模比尺的确定还应兼顾船模配载的要求,缩尺后的船模设计总重量应大于船模船体和各种设备的总重量。

9.2.3 船模与实船应满足几何相似和重力相似条件,并按下列规定确定相应比尺。

9.2.3.1 船模航行试验和船舶泊稳试验应按下列公式计算几何比尺和排水量比尺:

几何比尺

$$\lambda_{l_s} = \frac{L_{s_m}}{L_{s_n}} \quad (9.2.3-1)$$

$$\lambda_{11_s} = \frac{H_{s_m}}{H_{s_n}} \quad (9.2.3-2)$$

排水量比尺

$$\lambda_{w_s} = \lambda_{l_s}^2 \lambda_{H_s} \quad (9.2.3-3)$$

式中  $\lambda_{l_s}$ ——船模平面几何比尺；

$L_{s_n}$ ——实船长度或宽度；

$L_{s_m}$ ——船模长度或宽度；

$\lambda_{H_s}$ ——船模垂直几何比尺；

$H_{s_n}$ ——实船高度或深度；

$H_{s_m}$ ——船模高度或深度；

$\lambda_{w_s}$ ——船模排水量比尺。

**9.2.3.2** 船模航行试验除按第9.2.3.1款规定外,还应按下列公式计算运动时间比尺和航速比尺:

运动时间比尺

$$\lambda_{t_s} = \lambda_{l_s} / \lambda_{H_s}^{1/2} \quad (9.2.3-4)$$

航速比尺

$$\lambda_{v_s} = \lambda_{H_s}^{1/2} \quad (9.2.3-5)$$

式中  $\lambda_{t_s}$ ——船模运动时间比尺；

$\lambda_{l_s}$ ——船模平面几何比尺；

$\lambda_{H_s}$ ——船模垂直几何比尺；

$\lambda_{v_s}$ ——船模航速比尺。

**9.2.4** 模拟风对船舶航行试验和船舶泊稳试验的船模,除满足第9.2.3条的规定外,还应满足式(9.2.4)的压力相似条件。

$$\lambda_{v_w} = \lambda_1^{1/2} \quad (9.2.4)$$

式中  $\lambda_{v_w}$ ——风速比尺；

$\lambda_1$ ——模型平面几何比尺。

### 9.3 模型制作

**9.3.1** 船舶模拟试验的内河、潮流、波浪、通航建筑物等水动力模型的制作应分别符合第4.3节、第5.3节、第6.3节或第7.3节的有关规定。水动力模型需加糙时,加糙物不得妨碍船模航行。

**9.3.2** 船模的制作应符合下列规定。

**9.3.2.1** 船模设计吃水线以下船体应与实船几何相似,其他部位可根据需要制作。模拟风对船舶航行和靠泊、离泊影响试验的船模,除设计吃水线以下船体与实船几何相似外,设计吃水线以上的主要建筑物和货物堆放也应与实船几何相似。

**9.3.2.2** 船模的船体应表面光滑,成型后应不易变形。

**9.3.2.3** 船模螺旋桨应按平面几何比尺设计制作,其桨叶形状、直径、安装位置和安装角等应与实船基本相似。

9.3.2.4 船模舵的安装位置应与实船保持一致;当实船的舵为襟翼舵时,可简化为平板舵型式。

9.3.3 船模的遥控装置应符合下列规定。

9.3.3.1 遥控装置在通航试验范围内应具有良好的稳定性和抗干扰性。

9.3.3.2 船模的遥控设备应满足准确执行驾引操纵指令、准确控制舵角和主机工况等试验测试要求。

9.3.3.3 船模舵机应运转自如,操舵角允许偏差为 $\pm 0.5^\circ$ ;满舵操舵范围应与实船一致,满舵舵角允许偏差为 $\pm 1.0^\circ$ ;转舵速度应与实船基本相似。

9.3.4 模型中造风设备应根据试验要求选择,并按风况和试验区域进行安装和调试。设备的安装不应破坏流场、风场。

## 9.4 模型验证与率定

9.4.1 开展船舶模拟试验的内河、潮流、波浪、通航建筑物等水动力模型的验证或率定应分别符合第4.4节、第5.4节、第6.4节或第7.4节的有关规定。

9.4.2 船模率定应包括吃水、航速及操纵性能率定,并应符合下列规定。

9.4.2.1 船模吃水率定应满足下列要求:

- (1)用于急、险滩整治试验的船模,排水量与吃水同时满足相似要求;
- (2)用于其他试验的船模,不能同时满足排水量与吃水相似要求时,优先满足排水量相似要求;
- (3)量测吃水深度需消除表面张力造成的读数偏差;船模吃水允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ;
- (4)船模配载后,船模的重心平面、垂直位置和水平转动惯量与实船接近。

9.4.2.2 船模的航速率定与操纵性率定试验应满足下列要求:

(1)静水池长度大于船模长度的15倍,宽度大于静水池长度的1/3,水深大于10倍船模吃水深度;

(2)船模航速率定需在静水池无风条件下进行,船模直航稳定,重复性能良好,压舵角不大于 $3^\circ$ ,航速允许偏差为 $\pm 5\%$ ;

(3)船模操纵性试验按Z形试验方法进行;

(4)船模应舵性指数和回转性指数根据Z形试验的结果确定,并按下列船舶操纵运动一阶微分方程进行船模操纵性相似分析:

$$T \frac{d\varphi'}{dt} + \varphi' = K\delta + K\delta_r \quad (9.4.2-1)$$

$$K' = K(L_s/V_s) \quad (9.4.2-2)$$

$$T' = T(V_s/L_s) \quad (9.4.2-3)$$

式中  $T$ ——应舵性指数(s);

$\varphi'$ ——船舶转首角速度( $^\circ/\text{s}$ );

$t$ ——时间(s);

$K$ ——回转性指数( $1/\text{s}$ );

- $\delta$ ——舵角( $^{\circ}$ );  
 $\delta_r$ ——舵角修正项( $^{\circ}$ );  
 $K'$ ——回转性指数无因次值;  
 $L_s$ ——实船或船模长度(m);  
 $V_s$ ——实船或船模试验航速(m/s);  
 $T'$ ——应舵性指数无因次值。

#### 9.4.3 船模缩尺效应的修正应符合下列规定。

9.4.3.1 船模航速的缩尺效应采取加大螺旋桨转速的方法修正。

9.4.3.2 船模操纵性的缩尺效应采用减小舵面积的方法修正。

9.4.3.3 船模操纵性指数  $T'$  值宜大于实船操纵性指数  $T'$  值,允许偏差为 +5%;  $K'$  值的允许偏差为  $\pm 20\%$ 。当以总操纵性指数  $P \approx \frac{1}{2}K'/T'$  衡准时,船模  $P_m$  与实船  $P_s$  的允许偏差为  $\pm 20\%$ 。

9.4.4 当缺少实船操纵性试验资料时,可根据实船航行试验资料,按“航行复演法”的要求进行船模的缩尺效应修正。当缺少实船航行试验资料时,可按类似比尺和尺度的船模缩尺效应的修正结果进行修正。

9.4.5 模型风场的率定应包括风速和风向率定,并应满足下列要求:

- (1) 船模航行区域内的风速需基本相同,并与原型风速相似,风速允许偏差为  $\pm 5\%$ ;
- (2) 船模航行区域内的风向与原型风向一致;
- (3) 模型中风速测点的高度与原型风测点的高度相似。

### 9.5 船模航行试验

9.5.1 进行船模航行试验前应开展相应的内河、潮流、波浪和通航建筑物等水动力特性试验。内河和潮流等水动力特性试验应分别符合第4.5节或第5.5节的有关规定。枢纽通航整体模型和中间渠道通航水力学模型的水动力特性试验应分别符合第7.4节或第7.7节的有关规定。

9.5.2 船模航行试验应根据试验目的和要求确定试验流量或试验流量与代表潮型组合,并应遵循下列原则。

9.5.2.1 内河和枢纽通航整体模型水动力特性试验与船模航行试验流量应包括最大通航流量、最小通航流量,并应根据试验目的和要求增加若干特征流量。特征流量宜选用实测的代表流量。

9.5.2.2 潮流水动力特性试验与船模航行试验的代表潮型应包括设计大潮、设计小潮,并应根据试验目的和要求增加若干特征潮型。特征潮型宜选用实测的代表潮型。对于河口模型,还应考虑最不利径流和潮流的组合。

9.5.3 船模航行试验时应先试航,在试验过程中应校正静水航速,冬季试验还应记录水温。

9.5.4 船模航行试验中应根据试验要求测定船位、对岸航速、航迹线、舵角、漂角、漂位移



等船模航行参数。

**9.5.5 开展航道整治工程方案研究的船模航行试验应符合下列规定。**

**9.5.5.1 内河航道急滩、险滩整治工程船模航行试验应满足下列要求：**

(1)根据水流特性试验结果,以成滩流量为重点,进行设计方案船模上滩航行试验;不允许助推或绞滩的急滩段,船模自航上滩的对岸航速小于换算后的原型航速 $0.5\text{m/s}$ 时,进行修改方案试验;险滩段船模操纵困难且航行状态不符合安全要求时,进行修改方案试验;

(2)修改方案能满足航行要求后,进行特征流量下不同航线的船模上滩航行试验,并分析上滩能力,选择最佳航线,经综合分析后提出推荐工程方案。

**9.5.5.2 桥渡工程船模航行试验应满足下列要求：**

(1)根据试验目的和水流特性试验结果,选择特征流量、特征潮位或两者的不利组合,进行设计方案船模上行和下行通过通航孔试验,船模航行参数超过规定限值、船模航行状态不符合安全要求时,进行修改方案试验;

(2)新建桥梁的修改方案试验通过调整桥位、桥轴线走向、通航孔的跨度以及桥墩的位置等进行,已有桥梁通过改善通航水流条件的工程措施进行研究试验,经综合分析后提出推荐方案。

**9.5.5.3 港口工程平面布置方案船模航行试验应根据试验目的和水流特性试验结果,选择特征流量、特征潮位或两者的不利组合,进行设计方案船模进出港区航行试验,船模航行参数超过规定限值、船模航行状态不符合安全要求时,应进行修改方案试验,经综合分析后提出推荐方案。**

**9.5.5.4 预报滑坡崩岸对航道影响的试验应包括下列的内容：**

(1)观测涌浪的初始高度、沿程衰减及历时、涌浪爬坡高度、涌浪波形,分析对船舶航行及停泊安全的影响,危岩不同方量入江冲力产生涌浪破坏烈度等;

(2)观测危岩入江堆积体对航道水流条件的影响,利用船模航行试验确定碍航的临界入江方量和临界碍航流量。

**9.5.5.5 枢纽通航整体模型的船模航行试验应满足下列要求：**

(1)根据试验目的和水流特性试验结果,选择特征流量、特征潮位或两者的不利组合,进行设计方案船模进出通航建筑物上下游引航道、口门区和连接段航道的试验,船模航行参数超过规定限值、船模航行状态不符合安全要求时,进行修改方案试验;

(2)修改方案满足要求后,进行泄水闸不同开启方式条件下船模航行优化方案试验;设计有要求时,进行船闸灌泄水、水库日调节等非恒定流对口门区航行影响试验,经综合分析后提出推荐方案。

**9.5.5.6 枢纽施工期通航船模航行试验应满足下列要求：**

(1)利用束窄河床或施工导流明渠通航时,结合枢纽施工通航水流条件试验结果,选择包括上游特征流量、下游特征水位或潮位的最不利组合,进行船模进出束窄河床或施工导流明渠的航行试验,船模航行参数超过规定限值、船模航行状态不符合安全要求时,进行修改方案试验;

(2)利用临时通航建筑物通航时,结合通航水流条件试验结果,选择上游特征流量、下游特征水位或潮位的最不利组合,进行船模进出通航建筑物上下游引航道、口门区和连接段航道的试验;船模航行参数超过规定限值、船模航行状态不符合安全要求时,进行修改方案试验,经综合分析后提出推荐方案。

**9.5.5.7 中间渠道船行波模型试验内容和方法应满足下列要求:**

- (1)在渠道内设置船模航速测定标记、船行波测点和岸坡流速测点,船行波测波点布置能测得近岸处的最大波高;
- (2)观测船模航行时各测点水位波动、船行波的爬高和下落、岸边回流速度;
- (3)测定船模航速,观察船模航态;
- (4)船行波作用下护坡结构稳定性试验按第6.5.4.2款和第6.5.4.3款的有关规定执行。

## 9.6 船模泊稳试验

**9.6.1 船舶泊稳试验**可分为船闸闸室泊稳条件试验、船闸引航道泊稳条件试验、船舶靠泊试验、船舶离泊试验。

**9.6.2 船闸闸室和引航道泊稳条件试验**宜在船闸水力学整体模型中进行。

**9.6.3 船舶靠泊试验、船舶离泊试验**宜在内河、潮流或波浪水动力学模型中进行。

**9.6.4 船闸闸室、引航道泊稳条件试验**应满足下列要求:

(1)闸室泊稳条件试验观测船闸灌水和泄水在闸室内产生的水面波动、水面比降、流速等;船闸引航道泊稳条件试验观测船闸灌水和泄水、电站日调节、大坝泄水等不利组合在引航道内产生的水面波动、水面比降、流速以及船行波、风产生的水面波动;各测点间距不大于 $1/2$ 船长;

(2)观测船舶的系缆力和六个自由度运动等;测定船舶系缆力时,船舶首尾吃水保持一致,缆绳拉力仪水平放置,测杆垂直;当船舶较小时,分别测试不同停泊位置的系缆力;对分散输水系统船闸,测定输水过程中船舶在闸室内不同停泊位置的自由漂移情况;

(3)通过水流特征值、船舶系缆力和船舶运动状态等的分析,对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

**9.6.5 船舶靠泊、离泊试验**应满足下列要求:

(1)观测各种不利水文组合条件下码头前沿水域的水面波动和流速,各测点间距不大于 $1/2$ 船长;

(2)船舶靠泊条件试验观测船舶靠泊过程中船舶操纵性、护舷受力状况、拖轮作用力和船舶六个自由度运动等;

(3)船舶离泊条件试验观测船舶离泊过程中拖轮作用力、船舶操纵性和船舶六个自由度运动等;

(4)对于受风作用明显的河口和沿海港口,尚需观测风对船舶靠泊、离泊的影响;

(5)通过试验数据的分析,对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

## 10 试验设备和测量仪器

### 10.1 一般规定

- 10.1.1 供水、生潮、造波、加沙、率定和预备试验所需水槽等试验设备,应根据试验要求选择。
- 10.1.2 测量水位、流速、流向、流量、波高、泥沙颗粒级配、含沙量、温度、盐度、地形、流场、拉压力、风速、应力应变、速度与加速度、空化噪声等参数的测量仪器,应根据试验要求、测量精度、模型布置确定测量仪器的种类、型式和数量。
- 10.1.3 试验设备和测量仪器应通过检验和率定,技术指标应满足试验精度和稳定性的要求。
- 10.1.4 选用各单位自行研制的非国标定型仪器设备,首次使用时必须先进行校验,确认其性能满足要求后方可使用;在试验过程中应定期校验。
- 10.1.5 仪器设备的传感器不应破坏流场、波形和地形。
- 10.1.6 仪器设备应在安装完毕、单独检查和调试后进行联合调试运转;模型应根据试验要求配备计算机控制、采集及处理系统。

### 10.2 供水与控制设备

10.2.1 循环式供水系统可由蓄水池、水泵、平水系统、输水管道、闸阀门和回水管道或渠道组成,并应满足下列要求:

- (1)蓄水池的容量除满足循环系统中最大用水量的要求外,池中需保持一定余留水量;
- (2)根据试验室用水总量及部分用水需求确定水泵型号与数量、电动机功率与组数以及配套设备;
- (3)平水系统需根据试验供水需求,采用单一式配水方式或集中式配水方式;
- (4)输水管道需安装控制闸阀门,并采取必要的防冻措施;输水管道按1级~2级网络布置;
- (5)回水系统的回水总管或回水槽的断面面积按能自流排泄试验室总流量计算确定,管道或渠底坡度大于1:200,并加设拦污栅和集水井;
- (6)循环式供水系统和流量控制方式需根据模型流量大小和场地具体布置情况选择,满足模型或水槽试验用水量和循环的要求,并留有富裕量。

10.2.2 生潮系统应符合下列规定。

- 10.2.2.1 应根据试验场地固定设备状况、模型边界条件与布置要求,选择采用一种或

多种形式组合的生潮系统;生潮能力应满足模型中涨落潮最大流速变化和最大潮流量的要求。

**10.2.2.2** 有双边或多边界生潮时,模型应设置水量循环调配系统;供水系统供水流量应大于模型生潮流量,并设置适当的集水系统。

**10.2.2.3** 生潮系统应配置相应的生潮设备、潮水箱或水库;生潮设备的生潮能力、潮水箱或水库的贮水量可分别按下列公式估算:

$$Q_m > (V_{\max})_m \cdot (h_{\max})_m \cdot B_m + Q_0 \quad (10.2.2-1)$$

$$W > B_m \cdot l_m \cdot [(h_{\max})_m - (h_{\min})_m] + W_0 \quad (10.2.2-2)$$

式中  $Q_m$ ——模型中流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$(V_{\max})_m$ ——模型中最大流速( $\text{m}/\text{s}$ );

$(h_{\max})_m$ ——模型中最大水深( $\text{m}$ );

$B_m$ ——模型过水断面宽度( $\text{m}$ );

$Q_0$ ——使生潮尾门或潮水箱阀门处于正常状态而需要的富裕泄水量( $\text{m}^3$ );

$W$ ——潮水箱或水库的贮水量( $\text{m}^3$ );

$l_m$ ——模型长度( $\text{m}$ );

$(h_{\min})_m$ ——模型最小水深( $\text{m}$ );

$W_0$ ——潮水箱或水库与供水、回水系统容积的富裕量( $\text{m}^3$ )。

**10.2.2.4** 生潮控制潮位站应设置在靠近生潮设备处。

**10.2.2.5** 模型生潮系统应采用计算机自动控制。

**10.2.3** 波浪模型试验的造波和造流等设备应满足下列要求。

**10.2.3.1** 造波设备应根据试验场地状况、模型造波边界条件与布置采用一台或多台设备;造波系统的造波能力应满足模型中最大波高和最大波周期的要求。

**10.2.3.2** 造波设备所产生的波形应平稳、重复性好。

**10.2.3.3** 波浪模型的造流设备不得影响造波设备的布置,试验采用可移动式造波设备时,应充分考虑不同波向更换造波机位置时的影响。

**10.2.3.4** 造流设备产生的水流应平稳,造流能力应满足模型中可能的最大流速要求。

**10.2.3.5** 有双边或多边界造流时,模型应设置水量循环调配系统。供水系统能力应满足模型循环水流量、水位的要求。

**10.2.4** 量水设备可采用量水堰、电磁流量计或超声波流量计。量水堰的选择应符合下列规定。

**10.2.4.1** 模型流量较大时,宜采用矩形堰,并应按下列公式计算流量:

$$Q = \left( 1.782 + 0.24 \frac{h}{P} \right) BH^{3/2} \quad (10.2.4-1)$$

$$H = h + 0.0011 \quad (10.2.4-2)$$

式中  $Q$ ——流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$h$ ——堰上水深( $\text{m}$ );

$P$ ——堰高( $\text{m}$ );

$B$ ——堰宽(m)；

$H$ ——堰上水头(m)。

**10.2.4.2** 模型流量较小时,宜采用三角堰,并按下式计算流量:

$$Q = Ch^n \quad (10.2.4-3)$$

式中  $Q$ ——流量( $m^3/s$ )；

$C$ ——流量系数,为 1.343 ~ 1.400；

$h$ ——堰上水深(m)；

$n$ ——指数,为 2.47 ~ 2.50。

**10.2.4.3** 模型流量变化大时,应采用复式堰。

**10.2.5** 水沙混合运行系统宜包括浑水池、清水池、水泵、量水设备、配水管路、回水槽等设备,并应满足下列要求:

(1) 浑水池设有充水和搅沙设备,浑水池容积按整个模型循环用水和稀释含沙量用水之和进行估算;

(2) 清水池容量按需稀释的含沙量与相应流量的过程估算;

(3) 根据含沙量选用水泵离心泵和泥浆泵,当含沙量大于  $10kg/m^3$  时,选用泥浆泵,供水量需大于模型最大用水量的 1.5 倍;

(4) 根据管径和流量选择量水设备;

(5) 配水管路、回水渠槽满足施放各级流量的要求,管道和回水渠槽内流速均不低于模型沙起动流速的 5 倍。

### 10.3 专用水槽和设备

**10.3.1** 专用水槽包括流速仪率定水槽、环形水槽、长直水槽、变坡水槽和波浪水槽,水槽应设置必要的控制系统和测量系统。

**10.3.2** 校正流速仪宜用流速仪率定水槽,流速仪率定水槽应符合下列规定。

**10.3.2.1** 流速仪率定水槽应包括长直水流槽、拖曳式或自推进式率定车、率定车轨道、数据处理系统、安全系统和供排水系统等。

**10.3.2.2** 水槽的尺度应根据率定流速仪的类型、大小和最大率定速度等确定。

**10.3.2.3** 率定车自动调速系统应保证车速稳定。

**10.3.3** 泥沙起动、输移和糙率等预备试验,宜采用长直水槽或变坡水槽进行试验,并应符合下列规定。

**10.3.3.1** 水槽的有效长度和宽度应满足试验段水流平稳、流速分布合理的要求。有效试验段长度不应小于 30m,水槽宽度宜大于 0.5m。

**10.3.3.2** 水槽底板、槽壁宜采用钢化玻璃。

**10.3.3.3** 水槽两侧壁与水槽中轴线距离允许偏差应为  $\pm 1mm$ ,每平方米凸凹不应大于  $\pm 0.2mm$ 。

**10.3.3.4** 变坡水槽首尾端的升降速度不宜大于  $1cm/min$ 。

**10.3.3.5** 水槽量水制备应满足第 10.2.4 条的规定,流量应保持稳定,相对误差应小

于  $\pm 2\%$ 。

**10.3.3.6** 水槽进水口应设置消能设备,尾门前应设置接沙设备。

**10.3.4** 测定淤泥质泥沙、细沙及粉沙在不同流速下的沉降速度宜采用环形水槽,并应符合下列规定。

**10.3.4.1** 环形水流槽应由环形槽、剪力环、驱使环形槽和剪力环转动的驱动系统等组成。

**10.3.4.2** 选用的环形水流槽应具备稳定、可控的造流功能。

**10.3.4.3** 应调节环形槽、剪力环转速生成试验所需的水流条件。

**10.3.5** 波浪水槽应符合下列规定。

**10.3.5.1** 水槽的有效段长度应大于 10 倍波长,水槽宽度宜大于 0.5m。

**10.3.5.2** 水槽两侧壁与水槽中轴线距离允许偏差应符合第 10.3.3.3 款的规定。

**10.3.5.3** 水槽和水池的首尾两端应设消浪装置,且尾部消浪装置应能消除 90% 以上的反射波,并应采取措施消除或减小造波机二次反射波的影响。当存在斜向波浪反射时,水池两侧宜设消浪装置。

**10.3.6** 船闸水力学模型试验应根据试验要求,设置升降式平水槽、恒定流和非恒定流减压箱、阀门门楣切片模型试验设备、输水阀门和工作闸门启闭机及控制系统等专用设备。

**10.3.7** 船闸水力学模型试验专用设备应满足下列要求:

(1) 升降式平水槽的升降幅度满足上、下游通航水位变化的要求;溢流长度满足船闸灌泄水过程中上、下游水域水位变化不大于升降式平的要求;

(2) 阀门启闭系统能满足变速开启、间歇开启等不同开启方式的要求;

(3) 非恒定流试验的减压箱在上下游水位变化过程中,箱体各部位真空度保持不变;

(4) 阀门门楣切片模型试验设备满足高压和高流速的要求。

## 10.4 水动力模型试验仪器设备

**10.4.1** 水位测量仪器应按下列条件选用:

(1) 水位计的选型满足量程范围和响应频率的要求,并与二次仪表匹配;

(2) 恒定流水位测量选用测针、自动跟踪式水位计或超声波水位计;

(3) 非恒定流水位测量选用自动跟踪式水位计、超声波水位计或压力传感器等。

**10.4.2** 流速流向测量仪可按下列条件选用:

(1) 根据试验目的和流速范围选用旋桨流速仪、超声多普勒流速仪、粒子成像流速仪或激光流速仪等测量流速设备;

(2) 大面积表面流速、流态测量选用流场测量系统;

(3) 流速、流向测量仪器的选型满足量程和精度要求。

**10.4.3** 波浪模型试验测量仪器应满足下列要求:

(1) 测量系统满足灵敏度和稳定性的要求,在满量程条件下 2h 内的零漂允许偏差为  $\pm 5\%$ ,波高仪线性允许偏差为  $\pm 2\%$ ,总力仪、波压仪和波动流速仪的线性允许偏差为  $\pm 5\%$ ;

(2)测波浪力时,测力系统的自振频率不小于测力频率的6倍,不规则波的测力频率宜取高频一侧力谱能量为总能量30%处的频率,当不能满足要求时,按下列公式修正:

$$F = \mu F_i \quad (10.4.3-1)$$

$$\mu = \left[ \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \left( 2\varepsilon - \frac{\omega}{\omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10.4.3-2)$$

式中  $F$ ——修正后的力(N);

$\mu$ ——修正系数;

$F_i$ ——实测的力(N);

$\omega$ ——作用力的圆频率(rad/s);

$\omega_0$ ——未考虑阻尼时测力系统的自振圆频率(rad/s);

$\varepsilon$ ——测力系统阻尼系数( $s^{-1}$ )。

**10.4.4** 船闸水力学模型试验的测量仪器宜根据试验要求,配置拉压力测量仪、速度及加速度传感器、应变传感器、位移传感器、水听器和空化噪声测量系统等仪器。

**10.4.5** 升船机水力学模型试验的测量仪器宜根据试验要求,配置测定航速、船舶纵倾、船底富裕水深和航行阻力等仪器。

**10.4.6** 升船机水力学模型船厢驱动、闸门启闭和船模曳引等主要试验设备,应满足调速要求,并宜配有测速装置。

**10.4.7** 船模运动坐标和航行动态参数测量所采用的实时定位测量系统宜包括舵角遥测接收系统、船位测量系统、计算机采集处理系统等。该系统宜具有对船模的航行轨迹、舵角、漂角等航行参数进行同步采集和快速计算处理的能力。实时定位系统的定位允许偏差应为 $\pm 20\text{mm}$ 。

## 10.5 泥沙模型试验仪器设备

**10.5.1** 泥沙模型试验应设置水沙混合运行系统,并应配备测沙仪、泥沙颗粒分析仪、地形仪和其他的淤积量测量设备等。

**10.5.2** 波浪潮流泥沙模型试验应配备造波系统和波浪测量系统。研究波浪运动、泥沙或模型沙在波浪作用下起动、岸滩平衡剖面时,尚应配备波浪水流槽等设备。

**10.5.3** 水沙分离运行系统应符合下列规定。

**10.5.3.1** 清水供水设备应按第10.2.1条的规定执行。

**10.5.3.2** 浑水供水、供沙设备应满足下列要求:

(1)浑水池或浑水罐的容积按最大加沙量设计,含沙浓度在 $150\text{kg/m}^3 \sim 300\text{kg/m}^3$ ,允许偏差为 $\pm 10\%$ ;

(2)孔口箱和管孔需保持内部压力稳定,允许偏差为 $\pm 10\%$ ;

(3)模型进口含沙量由下式确定:

$$S_m = \frac{Q_1 S_1}{Q_0 + Q_1} \quad (10.5.3)$$

式中  $S_m$ ——模型进口含沙量( $\text{kg/m}^3$ );

$Q_1$ ——由孔口箱或管孔送入模型前池的浑水流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$S_1$ ——搅拌池内含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$Q_0$ ——模型前池清水流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

(4) 沉沙池采用自然沉淀或强迫沉淀方式分离水沙;采用强迫沉淀方式时,使用泥浆泵将沉沙经回沙管返回至配沙池,回沙管内流速高于起动流速的5倍。

**10.5.4** 推移质泥沙加沙机的加沙速度应能适应模型最大和最小加沙数量的要求,相对误差不得大于 $\pm 10\%$ 。

**10.5.5** 模型中含沙量的测量方法可采用烘干称重法、浊度仪法或光电测沙仪法等,并应满足下列要求:

(1) 烘干称重法按现行国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123)的有关规定执行;

(2) 浊度仪或光电测沙仪法在每次试验前用确定的模型沙和试验用水,感量为0.001g电子天平以烘干称重法为准进行率定;选择合适的测量容器,调节率定场所的环境光照条件,使之与测量现场的光照条件及颜色保持一致。

**10.5.6** 颗粒分析可采用人工分析法、激光粒度分析仪法或光电颗粒仪法,并应满足下列要求:

(1) 人工分析法按现行国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123)的有关规定执行;

(2) 激光粒度分析仪法或光电颗粒仪法在每次试验前用标准沙样进行率定并用模型沙进行对比试验,允许偏差为 $\pm 1\%$ 。

**10.5.7** 地形测量仪的选用应满足下列要求:

(1) 测点较少的地形测量选用测针;测量精度为 $\pm 0.3\text{mm}$ ;

(2) 淤积面较平整的地形测量,选用超声波地形仪,进行非接触测量;

(3) 非良导体模型沙,含沙量小于 $40\text{kg}/\text{m}^3$ 的浑水模型地形测量,选用电阻式地形仪,测量精度为 $\pm 1.0\text{mm}$ ;

(4) 测量淤积界面反光强弱差别较大的河床选用光电式地形仪,测量精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ ;

(5) 各种电子地形测量仪器校检符合第10.1.3条和第10.1.4条规定。

**10.5.8** 采用地形仪观测地形冲淤变化时,模型试验段的两侧宜安置水平导轨。



## 11 数值模拟

### 11.1 一般规定

11.1.1 研究内河水流、泥沙输移与河床冲淤变化等工程问题,应根据水流运动、泥沙输移特点和工程性质采用一维、二维或三维数值模拟计算,并按下列原则选用。

11.1.1.1 长河段航道整治和河床变形研究,应根据工程需要选用一维、平面二维水流泥沙数值模拟,或一维、二维嵌套水流泥沙数值模拟。

11.1.1.2 滩险、桥渡和港口水域的水流条件和河床变形研究,宜选用平面二维水流数值模拟或平面二维水流泥沙数值模拟。

11.1.1.3 水流泥沙输移变化复杂的航道工程建筑物、桥渡和港口等局部水域研究,宜选用三维水流泥沙数值模拟。

11.1.1.4 急滩、险滩、通航建筑物上下游引航道及其连接段和桥渡航道等通航条件复杂河段,可选用平面二维水流数值模拟,必要时应配合选用船舶操纵数值模拟。

11.1.2 潮流数值模拟或潮流泥沙数值模拟应根据工程性质、技术要求和工程区域潮流、径流、波浪、盐度等具体情况,可采用平面二维数值模拟或三维数值模拟,并应符合下列规定。

11.1.2.1 在考虑大、中、小潮作用时,潮流河段、河口及其附近海域潮流数值模拟应同时考虑与不同频率径流的组合作用。

11.1.2.2 根据工程性质、技术要求和工程区域潮流、径流和波浪动力及泥沙输移具体情况,可采用考虑波浪与不考虑波浪作用的泥沙数值模拟。

11.1.3 波浪运动数值模拟应根据工程区域水动力特征、水下地形、计算水域范围、建筑物特征、工程特点和要求,采用开敞水域波浪传播数值模拟或港内水域波浪传播数值模拟。

11.1.4 由波浪作用引起的沙质海岸岸滩演变和工程泥沙冲淤变化宜采用波浪沿岸输沙数值模拟。

11.1.5 船闸输水系统水力特性研究可采用船闸输水水力特性数值模拟。

11.1.6 研究枢纽通航建筑物布置,坝区及引航道、口门区和连接段的通航水流条件,施工通航水流条件时,可选用枢纽通航水力学数值模拟。

11.1.7 地形和水流运动变化复杂,需要了解详细的流场、流速、压强分布、紊动能、耗散率分布等,可选用三维水流或潮流数值模拟。

11.1.8 研究船舶航行条件为主的工程问题可采用船舶操纵数值模拟。

## 11.2 水流运动数值模拟

11.2.1 水流数值模拟基本资料应符合下列要求。

11.2.1.1 内河水流数值模拟基本资料应符合第4.1节的有关规定。

11.2.1.2 潮流数值模拟基本资料应符合第5.1节、第6.1节的有关规定。

11.2.1.3 枢纽通航水力学数值模拟基本资料应符合第7.1节的有关规定。

11.2.2 水流和潮流数值模拟基本方程应符合下列规定。

11.2.2.1 一维水流数值模拟可按下列方程控制：

连续方程

$$B \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(BHV) = q_0 \quad (11.2.2-1)$$

运动方程

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{V^2}{c^2 R} = 0 \quad (11.2.2-2)$$

式中  $B$ ——河宽(m)；

$\zeta_1$ ——水位(m)；

$t$ ——时间(s)；

$x$ ——水流纵向距离(m)；

$H$ ——断面平均水深(m)；

$V$ ——断面平均流速(m/s)；

$q_0$ ——区间单宽来流量(m<sup>2</sup>/s)；

$g$ ——重力加速度(m/s<sup>2</sup>)；

$c$ ——谢才系数(m<sup>1/2</sup>/s)；

$R$ ——水力半径(m)，宽浅河流取断面平均水深  $H$ 。

11.2.2.2 平面二维水流或潮流、波浪潮流数值模拟可按下列方程控制：

连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)v]}{\partial y} = q_0 \quad (11.2.2-3)$$

$X$ 方向运动方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho(h + \zeta)} + \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) - g \frac{u \sqrt{(u^2 + v^2)}}{c^2 (h + \zeta)} + fv + \frac{\tau_{wx}}{\rho(h + \zeta)} \end{aligned} \quad (11.2.2-4)$$

$Y$ 方向运动方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho(h + \zeta)} + \frac{1}{\rho(h + \zeta)} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) - g \frac{v \sqrt{(u^2 + v^2)}}{c^2 (h + \zeta)} - fu + \frac{\tau_{wy}}{\rho(h + \zeta)} \end{aligned} \quad (11.2.2-5)$$

式中  $\zeta$ ——相对于  $xoy$  坐标平面的水位(m);  
 $t$ ——时间(s);  
 $h$ ——相对于  $xoy$  坐标平面的静水深(m);  
 $u, v$ ——流速矢量  $\dot{V}$  沿  $X, Y$  方向的分量(m/s);  
 $x, y$ ——原点  $o$  置于某一水平基面的直角坐标系纵向和垂向坐标(m);  
 $q_0$ ——区间单宽来流量( $m^3/s$ );  
 $g$ ——重力加速度( $m/s^2$ );  
 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ ——波浪、潮流共同作用下的底部切应力矢量沿  $X, Y$  方向的分量( $N/m^2$ );  
 $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ ——波浪辐射应力张量的四个分量( $N/m$ );  
 $N_x, N_y$ —— $X, Y$  向水流紊动黏性系数( $m^2/s$ );  
 $c$ ——谢才系数( $m^{1/2}/s$ );  
 $f$ ——科氏参量( $s^{-1}$ ),  $f = 2\omega \sin\varphi$ ,  $\omega$  为地球自转角速度,  $\varphi$  为地理纬度;  
 $\tau_{wx}, \tau_{wy}$ ——风应力矢量沿  $X, Y$  方向的分量( $N/m^2$ );  
 $\rho$ ——水密度( $kg/m^3$ )。

**11.2.2.3** 三维水流或潮流数值模拟可按式(11.2.2-6)~式(11.2.2-9)控制,当流速变化远小于重力加速度的影响时,可忽略垂向流速的影响, $Z$  向运动方程采用式(11.2.2-10)。

连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11.2.2-6)$$

$X$  向运动方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (11.2.2-7)$$

$Y$  向运动方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (11.2.2-8)$$

$Z$  向运动方程

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \quad (11.2.2-9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (11.2.2-10)$$

式中  $t$ ——时间(s);

$u, v, w$ ——空间流速矢量  $\dot{V}$  沿  $X, Y, Z$  方向的速度分量(m/s);  
 $x, y, z$ ——原点  $o$  置于某一水平基面,  $Z$  轴垂直向上的直角坐标系坐标;

- $f$ ——科氏参量( $s^{-1}$ );  
 $\rho$ ——水密度( $kg/m^3$ );  
 $P$ ——水压强( $N/m^2$ );  
 $N_x, N_y, N_z$ —— $X, Y, Z$  向水流紊动黏性系数( $m^2/s$ );  
 $g$ ——重力加速度( $m/s^2$ )。

#### 11.2.2.4 模拟方程中的基本参数、分量等可按下列规定确定:

(1) 运动方程式中的谢才系数由下式确定:

$$c = \frac{1}{n} (h + \zeta)^{\frac{1}{6}} \quad (11.2.2-11)$$

式中  $n$ ——曼宁糙率系数;

$h$ ——相对于  $xoy$  坐标平面的水深(m);

$\zeta$ ——相对于  $xoy$  坐标平面的水位(m);

(2) 曼宁糙率系数由实测水位流量资料确定,需考虑滩地植被、河床组成变化、沙波等因素引起的糙率平面分布不同,以及峡谷型河段岸壁的影响;

(3) 水流紊动黏性系数根据流态确定;当水流平顺、紊动较弱时,水流紊动黏性系数取  $0m^2/s \sim 100m^2/s$ ;对于回流影响较小的区域,水流紊动黏性系数采用零方程模型确定;当局部流态较复杂时,水流紊动黏性系数采用紊流模型确定;

(4) 波浪、潮流共同作用下的底部切应力分量按下列公式确定:

$$\tau_{bx} = \frac{g}{c^2} \rho \left| \dot{V} \right| u + \frac{\pi}{8} \rho f_w \left| \dot{V}_w \right| u_w + \frac{B\rho}{\pi} \left( \frac{2gf_w}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \dot{V} \right| u_w \quad (11.2.2-12)$$

$$\tau_{by} = \frac{g}{c^2} \rho \left| \dot{V} \right| v + \frac{\pi}{8} \rho f_w \left| \dot{V}_w \right| v_w + \frac{B\rho}{\pi} \left( \frac{2gf_w}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \dot{V} \right| v_w \quad (11.2.2-13)$$

式中  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ ——波浪、潮流共同作用下的底部切应力矢量沿  $X, Y$  方向的分量( $N/m^2$ );

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ );

$c$ ——谢才系数( $m^{1/2}/s$ );

$\rho$ ——水密度( $kg/m^3$ );

$\dot{V}$ ——流速矢量( $m/s$ );

$u, v$ ——流速矢量  $\dot{V}$  沿  $X, Y$  方向的分量( $m/s$ );

$f_w$ ——波浪底摩阻系数,通常取值为  $0.01 \sim 0.02$ ,或通过试算确定;

$\dot{V}_w$ ——波浪底部水质点最大速度矢量( $m/s$ );

$u_w, v_w$ —— $\dot{V}_w$  沿  $X, Y$  方向的分量( $m/s$ );

$B$ ——波、流相互作用系数;当波流同向时,  $B = 0.917$ ;当波流相互垂直时,  $B = -0.1983$ ;当波、流夹角为其他角度时,  $B = 0.359$ ;

(5) 风应力按下列公式确定:

$$\tau_{wx} = C_w \rho_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (11.2.2-14)$$

$$\tau_{wy} = C_w \rho_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (11.2.2-15)$$

式中  $\tau_{wx}$ 、 $\tau_{wy}$ ——X、Y方向的风切应力(N/m<sup>2</sup>)；

$C_w$ ——为风应力系数,取0.0015；

$\rho_a$ ——空气密度(kg/m<sup>3</sup>),取1.2；

$W_x$ 、 $W_y$ ——水面上10m处风速矢量沿X、Y方向的分量(m/s)。

**11.2.2.5** 数值模拟基本方程中的科氏力、波浪应力、风应力应根据研究问题的对象和要求取舍；研究内河水流工程问题时,可不考虑科氏力、波浪应力、风应力的影响；潮流数值模拟中,应根据研究的需要确定是否考虑波浪应力、风应力的影响。

**11.2.3** 网格可选用非结构化网格或矩形网格、贴体曲线网格等结构化网格。网格形式应根据边界的特点和计算模式的需要确定,并应符合下列规定。

**11.2.3.1** 网格尺度应能反映水下实际地形和工程后地形的变化。

**11.2.3.2** 重点研究部位网格应加密,网格疏密过渡应合理。

**11.2.3.3** 网格密度应能概化出岸边界和不同工程、建筑物的边界,工程区最小的网格尺度应小于建筑物的顶面最小尺度。

**11.2.3.4** 三维水流或潮流数值模拟垂向网格分层数应能反映垂向水流变化特性和建筑物的边界,并与水平网格尺度相匹配。

**11.2.4** 方程离散格式必须满足相容性、收敛性和稳定性要求。方程的离散求解方法,一维水流模拟宜采用有限差分法或有限体积法离散方程；二维、三维水流或潮流数值模拟宜采用有限体积法、有限差分法或有限元法离散方程。

**11.2.5** 边界条件和动边界处理应满足下列要求。

**11.2.5.1** 计算域内引起上下游边界上水力条件不连续时,不连续区域的上下游断面必须同时满足水流质量守恒和动量守恒两个条件。

**11.2.5.2** 一维水流数值模拟上游边界宜给定流量过程,下游边界宜给定水位过程或水位流量关系。

**11.2.5.3** 平面二维水流或潮流、波浪潮流数值模拟边界条件应满足下列要求：

(1) 水流模拟给出计算水边界上水位或流速随时间的变化过程,当水边界仅给出水位过程时,假定边界上流速的法向梯度为零；

(2) 岸边界上的速度矢量及水位沿边界外法线方向的梯度为零。

**11.2.5.4** 三维水流或潮流数值模拟边界条件应满足下列要求：

(1) 沿固边界法向流速为零；

(2) 入流开边界条件给定入流流速分布或流量和紊动量；出流开边界条件给定水位或水位流量关系。

**11.2.5.5** 当水边线或固边界变化时,宜采用动边界模拟技术。

### 11.3 波浪运动数值模拟

**11.3.1** 波浪运动数值模拟所需要的基本资料应符合第6.1节的有关规定。

11.3.2 开敞水域波浪传播数值模拟应符合下列规定。

11.3.2.1 研究波浪由特定水深向近岸或工程区传播中的浅水效应、折射、绕射、反射、底摩擦、波浪破碎、波浪非线性及流与波、风与波、波与波的相互作用等引起的变形时,应进行开敞水域波浪传播数值模拟。

11.3.2.2 开敞水域波浪传播数值模拟应根据要求和工程特点,可选用下列波浪传播数值模拟:

(1) 大水域波浪场的模拟采用缓坡方程的抛物型近似模型,基本方程如下:

$$\Phi = \Phi^+ + \Phi^- \quad (11.3.2-1)$$

$$C_g A_x + i(\bar{k} - a_0 k) C_g A + \frac{1}{2} (C_g)_x A + \frac{i}{\omega} \left( a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \right) (CC_g A_y)_y - \frac{b_1}{\omega k} (CC_g A_y)_{yx} + \frac{b_1}{\omega} \left[ \frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2kC_g} \right] (CC_g A_y)_y + \frac{i\omega k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{f_r}{2} A + F_w = 0 \quad (11.3.2-2)$$

式中  $\Phi$ ——波浪势函数;

$\Phi^+$ 、 $\Phi^-$ ——前进波势和反射波势;

$A(x, y)$ 、 $A_x$ 、 $A_y$ ——波振幅(复数)、 $X$ 方向的波振幅、 $Y$ 方向的波振幅;

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ ——常系数与入射角度有关;

$C_g$ ——群速度(m/s);

$C$ ——波速(m/s);

$i$ ——虚数单位;

$\omega$ ——圆频率;

$k$ ——波数;

$\bar{k}$ ——特征波数,一般取  $k(x, y)$  沿  $Y$  方向的平均值;

$D$ ——非线性影响因子;

$f_r$ ——底摩擦损耗因子;

$F_w$ ——风能输入因子;

(2) 近岸波浪非线性影响较大时,根据不同相对水深采用 Boussinesq 型方程的数值模拟,基本方程如下:

$$S_t + P_x + Q_y = 0 \quad (11.3.2-3)$$

$$P_t + \left( \frac{P^2}{d} \right)_x + \left( \frac{PQ}{d} \right)_y + gdS_x + \psi_1 = 0 \quad (11.3.2-4)$$

$$Q_t + \left( \frac{Q^2}{d} \right)_y + \left( \frac{PQ}{d} \right)_x + gdS_y + \psi_2 = 0 \quad (11.3.2-5)$$

$$\psi_1 = - \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 (P_{xxt} + Q_{yyt}) - Bgh^3 (S_{xxx} + S_{yyy}) - hh_x \left( \frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + 2BghS_{xx} + BghS_{yy} \right) - hh_y \left( \frac{1}{6} Q_{xt} + BghS_{xy} \right) \quad (11.3.2-6)$$

$$\psi_2 = - \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 ( Q_{yyt} + P_{xyt} ) - Bgh^3 ( S_{yyy} + S_{xxy} ) -$$

$$hh_x \left( \frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + 2BghS_{yy} + BghS_{xy} \right) - hh_x \left( \frac{1}{6} P_{yt} + BghS_{xy} \right) \quad (11.3.2-7)$$

式中  $P$ 、 $Q$ —— $X$ 、 $Y$  方向流速沿水深的积分；

$d$ ——全水深(m)；

$h$ ——静水深(m)；

$S$ ——波面高度(m)；

$B$ ——深水修正系数,取为 1/15；

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ )；

$t$ 、 $x$ 、 $y$ ——下角,物理量对时间  $t$ 、方向  $X$  和方向  $Y$  的偏导数；

(3) 水下地形等深线较为平直且水域内无障碍物时,采用波浪折射数值模拟。

**11.3.2.3** 对工程起控制作用的计算点处的波要素,应根据该点及其附近点的波要素计算值综合分析确定。

**11.3.3** 研究港内水域的波浪反射、折射和绕射等的变形时,应进行港内水域波浪传播数值模拟。港内水域波浪传播数值模拟应符合下列规定。

**11.3.3.1** 港内水域波浪传播数值模拟应根据要求和工程特点,可采用缓坡方程或 Boussinesq 型方程数值模拟,也可用两种模型的简化形式。

**11.3.3.2** 进行港内水域波浪传播数值模拟时,模型的边界应根据建筑物对波浪的反射情况按全反射、部分反射或全透射边界处理。

**11.3.3.3** 用港内水域波浪传播数值模拟计算港内水域的波要素时,可建立港口内、外水域联立求解的数值模拟。当口门附近的反射波对港内水域工程区域的波浪影响较小时,可将口门处的波浪作为入射条件,港内水域作为求解域。

**11.3.3.4** 模拟大型港内水域的波要素时,应计入底摩阻影响。必要时,应计入局部风成浪的影响。

**11.3.3.5** 模拟港外航道至口门处的波要素时,应采用同时反映波浪反射、折射和绕射的数值模拟,并应计入港内航道对波浪场的影响。口门局部应考虑反射影响。

**11.3.4** 波浪运动数值模拟的范围应包括对工程区域波浪有影响的水域。

**11.3.5** 波浪运动数值模拟的网格划分,应能反映计算水域的水下地形、建筑物和波要素等特征的要求。

**11.3.6** 波浪运动数值模拟应根据入射波况和模拟水域特点确定边界条件。当进行非定常数值模拟时,应确定初始及边界条件。

## 11.4 泥沙数值模拟

**11.4.1** 泥沙数值模拟所需要的基本资料应符合第 8.1 节的有关规定。

**11.4.2** 泥沙数值模拟基本方程应符合下列规定。

**11.4.2.1** 一维水流泥沙数值模拟的基本方程除应包括式(11.2.2-1)和式

(11.2.2-2)外,还应包括下列方程:

悬沙输移扩散方程

$$B \frac{\partial}{\partial t}(HS) + \frac{\partial}{\partial x}(BHVS) = -\alpha B\omega(S - S_{..}) \quad (11.4.2-1)$$

床面变形方程

$$\gamma_0 B \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Bq_b) = \alpha B\omega(S - S_{..}) \quad (11.4.2-2)$$

式中  $B$ ——河宽(m);

$t$ ——时间(s);

$H$ ——断面平均水深(m);

$S$ ——悬移质断面平均含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$x$ ——水流纵向距离(m);

$V$ ——断面平均流速(m/s);

$\alpha$ ——含沙量恢复饱和综合系数,由实测床面变形资料率定;

$\omega$ ——悬移质泥沙沉降速度(m/s);

$S_{..}$ ——悬移质水流挟沙能力( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\gamma_0$ ——泥沙干重度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$Z_b$ ——断面平均床面高程(m);

$q_b$ ——推移质单宽输沙率[ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ]。

11.4.2.2 平面二维水流或潮流、波浪潮流泥沙数值模拟的基本方程除应包括式(11.2.2-3)~式(11.2.2-5)外,还应包括下列方程:

悬沙输移扩散方程

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{F_s}{h + \zeta} \quad (11.4.2-3)$$

床面变形方程

$$\gamma_0 \frac{\partial \Delta h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)us] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \zeta)vs] + \frac{\partial}{\partial x} (q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y) + \frac{\partial}{\partial t} [(h + \zeta)s] = 0 \quad (11.4.2-4)$$

式中  $s$ ——水体含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$t$ ——时间(s);

$u, v$ ——流速矢量沿  $X, Y$  方向的分量(m/s);

$x, y$ ——原点  $o$  置于某一水平基面的直角坐标系坐标;

$D_x, D_y$ —— $X, Y$  向悬沙紊动扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$F_s$ ——泥沙源汇函数或泥沙冲淤函数[ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];

$h$ ——相对于  $xoy$  坐标平面的水深(m);

$\zeta$ ——相对于  $xoy$  坐标平面的水位(m);

$\gamma_0$ ——泥沙干重度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );



$\Delta h$ ——冲淤厚度(m);

$q_x$ ——X向底沙单宽输沙率[ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ];

$q_y$ ——Y向底沙单宽输沙率[ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ];

**11.4.2.3** 三维水流或潮流泥沙数值模拟的基本方程除应包括式(11.2.2-6)~式(11.2.2-8)、式(11.2.2-9)或(11.2.2-10)外,还应包括下列方程:

悬沙输移扩散方程

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \omega \frac{\partial s}{\partial z} \quad (11.4.2-5)$$

床面变形方程

$$\gamma_0 \frac{\partial \Delta h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - \omega s = D_z \frac{\partial s}{\partial z} \quad (11.4.2-6)$$

式中  $s$ ——水体含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$t$ ——时间(s);

$u, v, w$ ——空间流速矢量沿 X、Y、Z 方向的速度分量(m/s);

$x, y, z$ ——原点  $o$  置于某一水平基面,  $z$  轴垂直向上的直角坐标系坐标;

$D_x, D_y, D_z$ ——泥沙沿 X、Y、Z 方向的紊动扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\omega$ ——泥沙沉降速度(m/s);

$\gamma_0$ ——泥沙干重度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\Delta h$ ——床面冲淤厚度(m);

$q_x$ ——X 向的底沙单宽输沙率[ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ];

$q_y$ ——Y 向的底沙单宽输沙率[ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ];

**11.4.2.4** 泥沙数值模拟方程中的基本参数、分量的确定除应满足第 11.2.2.4 款的规定外,也可按下列规定确定:

(1) 悬移质水流挟沙力按下列公式或其他经过验证的公式确定:

一维

$$S_{..} = K_s \left( \frac{V^3}{gR\omega} \right)^m \quad (11.4.2-7)$$

二维

$$S_{..} = K_s \left[ \frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{gR\omega} \right]^m \quad (11.4.2-8)$$

式中  $S_{..}$ ——悬移质水流挟沙力( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$K_s$ ——经验系数,由实测资料确定;

$V$ ——断面平均流速(m/s);

$g$ ——重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$R$ ——水力半径(m),宽浅河流取断面平均水深;

$\omega$ ——泥沙沉降速度(m/s);

$m$ ——经验系数,由实测资料确定;

$u, v$ ——空间流速矢量沿  $x, y$  方向的速度分量(m/s);

(2) 一维水流泥沙数值模拟的推移质单宽输沙率  $q_b$  按附录 J 选用; 二维水流或潮流泥沙数值模拟的推移质单宽输沙率由下式或其他经过验证的公式确定:

$$q_x = \frac{q_b u}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \quad (11.4.2-9)$$

$$q_y = \frac{q_b v}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \quad (11.4.2-10)$$

式中  $q_x$ ——X 向推移质单宽输沙率 [kg/(m·s)];

$q_y$ ——Y 向推移质单宽输沙率 [kg/(m·s)];

$u, v$ ——空间流速矢量沿 X、Y 方向的速度分量 (m/s);

(3) 非均匀沙的冲淤模拟分为当量粒径法和分组粒径法;

(4) 当量粒径法有平均粒径或中值粒径法, 床沙质的平均沉速法和当量沉速法, 当量沉速由下式确定:

$$\omega = \left( \sum_{i=1}^n P_i \omega_i^m \right)^{1/m} \quad (11.4.2-11)$$

式中  $\omega$ ——泥沙沉降速度 (m/s);

$n$ ——床沙质级配的分级数目;

$P_i$ ——床沙质级配, 即床沙质中粒径为  $d_i$  的第  $i$  级泥沙占总量的重量百分数;

$\omega_i$ ——床沙质中粒径为  $d_i$  的第  $i$  级泥沙沉降速度;

$m$ ——经验系数, 由实测资料确定;

(5) 分组粒径法将非均匀沙级配分成  $n$  级, 各级皆分别按均匀沙处理, 悬移质分组挟沙力和挟沙力级配按附录 K 确定; 推移质分组单宽输沙率按下式确定:

$$q_{bi} = P_{bi} q_b(d_i) \quad (11.4.2-12)$$

式中  $q_{bi}$ ——推移质分组单宽输沙率;

$P_{bi}$ ——床沙级配;

$q_b(d_i)$ ——粒径为  $d_i$  的均匀沙单宽输沙率;

(6) 床沙级配的调整按下列方式处理:

淤积时段末床沙级配

$$P_{bi} = \Delta Z_i / \Delta Z \quad (11.4.2-13)$$

冲刷时段末床沙级配

$$P_{bi} \approx [(E_m - \Delta Z) P_{obi} + \Delta Z_i] / E_m \quad (11.4.2-14)$$

式中  $P_{bi}$ ——淤积时段末、冲刷时段末床沙级配;

$\Delta Z_i$ ——粒径为  $d_i$  的泥沙淤积、冲刷厚度, 冲刷时为负值;

$\Delta Z$ ——本时段床面淤积、冲刷总厚度, 冲刷时为负值;

$E_m$ ——床面可动层厚度;

$P_{obi}$ ——时段初床沙级配;

(7) 泥沙源汇函数按下列方法确定:

挟沙能力法

$$F_s = \alpha \omega (S_{..} - S) \quad (11.4.2-15)$$

底部切应力法

当  $\tau_b < \tau_d$  时水中泥沙处于落淤状态

$$F_s = \alpha \omega S \left( \frac{\tau}{\tau_d} - 1 \right) \quad (11.4.2-16)$$

当  $\tau_d \leq \tau_b \leq \tau_c$  时床面处于不冲不淤状态

$$F_s = 0 \quad (11.4.2-17)$$

当  $\tau_b > \tau_c$  时床面泥沙起动

$$F_s = M \left( \frac{\tau_b}{\tau_c} - 1 \right) \quad (11.4.2-18)$$

式中  $F_s$ ——泥沙源汇函数或泥沙冲淤函数[ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];

$\alpha$ ——泥沙沉降几率;

$\omega$ ——泥沙沉降速度( $\text{m}/\text{s}$ );

$S_s$ ——水流挟沙能力( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),采用式(11.4.2-7)或式(11.4.2-8)确定,或采用其他经验公式确定;

$S$ ——含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\tau_b$ ——底部切应力( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$\tau_d$ ——临界淤积切应力( $\text{N}/\text{m}^2$ ),由试验确定,或通过验证计算确定;

$\tau$ ——切应力( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$\tau_c$ ——临界冲刷切应力( $\text{N}/\text{m}^2$ ),由试验确定,或通过验证计算确定;

$M$ ——冲刷系数[ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ],由试验确定,或通过验证计算确定;

(8) 悬沙紊动扩散系数采用试验或经验公式确定,或取与相应的水流紊动黏性系数相同数值;

(9) 临界淤积切应力、临界冲刷切应力和冲刷系数与底质密实度、底质粒径等因素有关,由试验确定;缺乏试验资料时根据经验选取,并经验证计算确定。

**11.4.3 方程的离散求解方法应符合下列规定。**

**11.4.3.1** 一维水流泥沙数值模拟方程依据求解问题的性质可选用 Lax 格式、蛙步格式、迎风格式或 Preismann 格式方程离散一般采用有限体积法,也可采用有限元法或有限差分法。

**11.4.3.2** 二维、三维水流或潮流泥沙数值模拟方程求解宜采用隐式格式,根据求解问题的性质也可采用显示格式。

**11.4.3.3** 泥沙数值模拟中的水流离散方程和泥沙离散方程可采用耦合解或非耦合解。

**11.4.4 边界条件和边界处理应符合下列规定。**

**11.4.4.1** 一维水流泥沙数值模拟边界条件,除应按第 11.2.5.2 款的规定执行外,入流断面还应包括来沙过程及泥沙级配。

**11.4.4.2** 平面二维水流或潮流、波浪潮流泥沙数值模拟边界条件,除应按 11.2.5.3 款的规定执行外,还应给出入流边界来沙过程及其颗粒级配,出流边界设定含沙量和推移

质输沙率的纵向梯度为零;岸边界应设定含沙量的法向梯度为零。

11.4.4.3 三维水流或潮流泥沙数值模拟边界条件,除应按 11.2.5.4 款的规定执行外,还应给出入流边界来沙过程及其颗粒级配;岸边界应设定含沙量的法向梯度为零。

## 11.5 船舶操纵数值模拟

11.5.1 船舶操纵数值模拟应包括下列基本方程:

船舶操纵运动方程

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)(\dot{u}-vr) &= X_{11}+X_p+X_R+X_{WD}+X_c \\ (m+m_y)(\dot{v}+ur) &= Y_{11}+Y_p+Y_R+Y_{WD}+Y_c \\ (I_x+J_z)\dot{r} &= N_{11}+N_p+N_R+N_{WD}+N_c \end{aligned} \right\} \quad (11.5.1-1)$$

舵机特性控制方程

$$T_E\dot{\delta}=\delta_c-\delta \quad (11.5.1-2)$$

式中

$m$ ——船舶质量(kg);

$m_x, m_y$ ——船舶  $X$  方向和  $Y$  方向的附加质量(kg);

$x, y, z$ ——原点位于船舶重心上的直角坐标系,  $X$  轴指向船首,  $Y$  轴指向右舷,  $Z$  轴指向龙骨;

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ ——船舶  $u, v, r$  对时间的导数;

$u, v$ ——船舶沿  $X, Y$  方向的速度分量(m/s);

$X_{11}, X_p, X_R, X_{WD}, X_c$ ——船体黏性水动力、螺旋桨力、舵力、风力、水流的作用力在  $X$  方向的分力(N);

$Y_{11}, Y_p, Y_R, Y_{WD}, Y_c$ ——船体黏性水动力、螺旋桨力、舵力、风力、水流的作用力在  $Y$  方向的分力(N);

$I_x, J_z$ ——船舶绕  $Z$  轴的惯性矩和附加惯性矩( $m^4$ );

$r$ ——转首角速度( $^\circ/s$ );

$N_{11}, N_p, N_R, N_{WD}, N_c$ ——船体黏性水动力、螺旋桨力、舵力、风力、水流的作用力绕  $Z$  轴的力矩( $N \cdot m$ );

$T_E$ ——舵机时间常数(s);

$\dot{\delta}$ ——实际舵角对时间的导数( $^\circ/s$ );

$\delta_c$ ——命令舵角( $^\circ$ );

$\delta$ ——实际舵角( $^\circ$ )。

11.5.2 船舶操纵运动方程宜采用四阶龙格-库塔法数值求解。

11.5.3 船舶操纵数值模拟定解应给出横移速度、前进速度、转首角速度和舵角等初始条件。

## 11.6 船闸输水水力特性数值模拟

11.6.1 船闸输水水力特性数值模拟所需要的基本资料应符合第 4.1 节、第 7.1 节的有

关规定。

**11.6.2** 船闸输水水力特性数值模拟可采用下列基本方程：

连续方程

$$A_1 \frac{dh}{dt} = -NA_c v \quad (11.6.2-1)$$

能量方程

$$\frac{L_{np}}{g} \frac{dv}{dt} + \xi \frac{v^2}{2g} - h = 0 \quad (11.6.2-2)$$

式中  $A_1$ ——闸室水域平面面积( $m^2$ )；

$h$ ——船闸水头(m)；

$t$ ——时间(s)；

$N$ ——输水廊道支数；

$A_c$ ——输水廊道控制断面面积( $m^2$ )；

$v$ ——输水廊道控制断面平均流速(m/s)；

$L_{np}$ ——输水廊道换算长度(m)；

$g$ ——重力加速度( $m/s^2$ )；

$\xi$ ——输水系统阻力系数。

**11.6.3** 船闸输水水力特性数值模拟基本方程中输水系统阻力系数和输水廊道换算长度的确定应符合下列规定：

(1) 输水系统阻力系数由船闸水力学模型试验的恒定流流量系数按下式计算：

$$\xi = \frac{1}{\mu_n^2} \quad (11.6.3-1)$$

式中  $\xi$ ——输水系统阻力系数,当开度等于零时, $\xi$ 值为10000；

$\mu_n$ ——阀门不同开度时输水系统的流量系数；

(2) 输水系统阻力系数按现行行业标准《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定进行计算,或参照类似船闸取值；

(3) 计算原型水力特性时,采用模型缩尺影响校正后的恒定流流量系数或输水系统阻力系数；

(4) 船闸串联输水廊道的换算长度按下式计算：

$$L_{np} = \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{v} l_i \quad (11.6.3-2)$$

式中  $L_{np}$ ——廊道换算长度(m),对出水孔数大于15的出水支孔段廊道取该段廊道长度的1/2；

$v_i$ ——第*i*段廊道断面平均流速(m/s)；

$v$ ——输水阀门段廊道断面平均流速(m/s)；

$l_i$ ——第*i*段廊道的长度(m)；

(5) 船闸并联输水廊道的换算长度输水廊道换算长度按下式计算：

$$L_{np} = \sum_{i=1}^n \frac{v_i l_i Q_i}{v Q} \quad (11.6.3-3)$$

式中  $L_{np}$ ——廊道换算长度(m),对出水孔数大于15的出水支孔段廊道取该段廊道长度的1/2;

$v_i$ ——第*i*段廊道断面平均流速(m/s);

$v$ ——输水阀门段廊道断面平均流速(m/s);

$l_i$ ——第*i*段廊道的长度(m);

$Q_i, Q$ ——第*i*个支廊道和主廊道的流量( $m^3/s$ )。

**11.6.4** 船闸输水水力特性数值模拟基本方程可选用 Lax 格式、蛙步格式或迎风格式求解。

**11.6.5** 边界条件和边界处理应符合下列规定。

**11.6.5.1** 船闸输水水力特性数值模拟的边界条件应包括船闸及输水系统的几何尺寸、输水廊道的换算长度、输水阀门的开启方式和时间等。

**11.6.5.2** 船闸输水水力特性数值模拟的初始条件应包括上、下游水位和闸室初始水深。

**11.6.5.3** 船闸输水水力特性数值模拟的时间步长应根据稳定性和输水阀门的开启方式进行选择,时间步长不宜大于1s。

**11.6.6** 船闸水力学三维数值模拟可按第11.2节有关规定执行。

## 11.7 模拟验证

**11.7.1** 验证工作宜包括率定和验证计算,模型的相关参数应通过率定确定,并符合下列规定。

**11.7.1.1** 验证阶段应按率定阶段确定的模拟参数进行计算,当验证结果不满足要求时应重新率定。

**11.7.1.2** 率定和验证应采用不同的水流或潮流、波浪、泥沙条件进行。

**11.7.1.3** 泥沙数值模拟率定和验证宜采用近期河床或海床变形显著的不同时段进行。

**11.7.2** 水流或潮流数值模拟和泥沙数值模拟验证计算的内容应符合下列规定。

**11.7.2.1** 一维水流泥沙数值模拟验证计算应包括水位、流速、含沙量过程和床面冲淤变化等内容。

**11.7.2.2** 平面二维水流或潮流数值模拟验证计算应包括水位或潮位、流速、流向等内容。

**11.7.2.3** 平面二维水流泥沙或潮流泥沙数值模拟除应符合第11.7.2.2款的规定外,还应包括含沙量过程和床面冲淤变化等内容。

**11.7.2.4** 平面二维波浪潮流泥沙数值模拟除应符合第11.7.2.2款的规定外,还应包括波浪要素、含沙量过程和床面冲淤变化等内容。

**11.7.2.5** 三维水流或潮流数值模拟除应符合第11.7.2.2款的规定外,还应增加分

层流速、流向的验证等内容。

**11.7.2.6** 三维水流泥沙或潮流泥沙数值模拟、波浪潮流泥沙数值模拟除应符合第11.7.2.2款~第11.7.2.5款的规定外,还应增加分层含沙量验证内容。

**11.7.2.7** 波浪水动力数值模拟的率定计算应符合第6.4.1条和第6.4.2条的规定。

**11.7.3** 数值模拟的精度应符合下列规定。

**11.7.3.1** 内河水流数值模拟,水位、流速、流向、分流比的验证内容和验证计算精度应符合第4.4节的有关规定。

**11.7.3.2** 内河水流泥沙数值模拟,水位、流速、流向、分流比、含沙量、冲淤量、冲淤部位的验证内容和精度应符合第4.4节、第8.4.2条的有关规定。

**11.7.3.3** 潮流数值模拟的潮位、流速、流向的验证内容和精度应符合第5.4节的有关规定。

**11.7.3.4** 潮流泥沙数值模拟的潮位、流速、流向、含沙量、冲淤量、冲淤部位的验证内容和精度应符合第5.4节、第8.4.7条~第8.4.11条的有关规定。

**11.7.3.5** 波浪潮流泥沙数值模拟的潮位、流速、流向、含沙量、冲淤量、冲淤部位的验证计算精度应符合第8.4.12条~第8.4.14条的有关规定。

**11.7.3.6** 波浪水动力数值模拟的潮位、流速、流向、波浪的验证计算精度除应符合第6.4节的有关规定外,波浪水动力数值模拟的可靠性还宜采用现场实测资料、试验资料或理论解进行验证。

**11.7.3.7** 船舶操纵数值模拟的旋回、操纵性及倒车制动等验证试验结果与实测资料允许偏差应为 $\pm 20\%$ 。

**11.7.3.8** 船闸输水水力特性数值模拟的阻力系数或流量系数可采用物理模型试验结果或经验数值,并应进行验证,验证的允许偏差应满足下列要求:

- (1) 输水时间允许偏差为 $\pm 3\%$ ;
- (2) 最大输水流量允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

## 11.8 方案模拟计算及成果分析

**11.8.1** 方案模拟计算中所采用的参数应与相关验证计算结果相同。

**11.8.2** 方案模拟计算应按验证确定的模拟计算模式进行,其边界条件应根据方案要求确定。

**11.8.3** 方案模拟计算与分析应符合下列规定。

**11.8.3.1** 水流或潮流数值模拟除应符合第4.5节或第5.5节的相关规定外,还应符合下列规定:

(1) 方案计算给出水位、流速、流向变化等结果,并以相应图表表示。根据工程方案前后水位、流场等方面的变化论证方案优劣,通过综合分析提出推荐方案;

(2) 航行水流条件数值模拟需分析主航线附近的水位和流速变化过程及特征值。

**11.8.3.2** 波浪运动数值模拟除应符合第6.5节的有关规定外,还应符合下列规定:

(1) 有无工程的波浪计算给出各特征点位的设计波浪要素,包括:波向、不同累计频

率的波高、波周期、波长等结果,并以相应图表表示;根据工程方案前后波高变化论证方案优劣,通过综合分析提出推荐方案;

(2)破碎带内设计波浪要素采用破碎极限波高控制,破碎指标采用现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)中相关规定计算;

(3)港区泊稳条件数值模拟根据码头前设计高水位2年一遇 $H_{4\%}$ 波高结果与对应船舶停靠作业标准判断是否满足船舶作业要求,并根据分频分级结果分析各泊位的年损失作业天数。

**11.8.3.3** 泥沙数值模拟除应符合第8.5节、第8.6节、第8.7节的有关规定外,还宜给出含沙量及床面冲淤强度和分布,分析床面冲淤变形对已建工程的影响;内河泥沙数值模拟还宜预报计算未来河床的演变趋势。

**11.8.3.4** 船舶操纵模拟除应符合第9.5节的有关规定外,还应给出各方案航迹线图,分析靠离泊、航行试验失败原因。

**11.8.3.5** 船闸输水水力特性数值模拟除应符合第7.5节的有关规定外,还应包括下列内容:

(1)船闸水头或闸室水位过程线;流量过程线;必要的能量和比能过程线、惯性超高或超降、输水阀门后的廊道压力过程线和水流空化数等;

(2)绘制船闸输水水力特性数值模拟计算成果图表,并对主要特征参数进行分析。

**11.8.4** 三维模拟计算除应符合第11.8.3条的有关规定外,还应给出流速、流向或含沙量的垂向分布。

**11.8.5** 重要工程的数值模拟计算成果宜可视化动态显示。



## 附录 A 模型加糙方法

**A.0.1** 模型加糙可采用水泥砂浆拉毛法。当水泥砂浆拉毛的糙率不满足要求时,可采用颗粒平铺密排加糙方法或颗粒有间距加糙方法。加糙颗粒粒度的计算应符合下列规定。

**A.0.1.1** 平铺密排加糙粒径可按下列式计算:

$$n = 0.015d^{\frac{1}{5}} \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中  $n$ ——模型糙率;

$d$ ——加糙粒径(mm)。

**A.0.1.2** 梅花形排列或正方形排列的有间距加糙粒径可按下列式计算:

$$n = cd^{\frac{1}{5}} \quad (\text{A.0.1-2})$$

式中  $c$ ——系数,可根据加糙颗粒间距  $L_0$  与加糙粒径  $d$  之比,按图 A.0.1 确定。

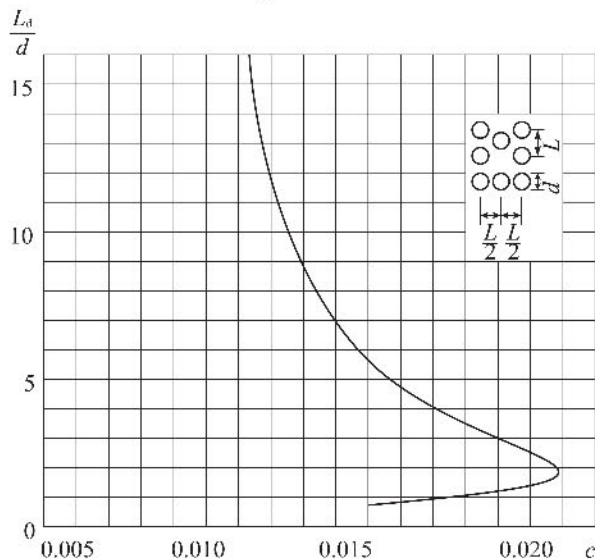


图 A.0.1  $c$  与  $L_0/d$  关系曲线

**A.0.2** 根据模型试验需要,可采用水泥砂浆拉毛、平铺密排和有间距组合加糙方法,也可以选择其他加糙材料覆盖模型表面进行加糙,其糙率应通过水槽预备试验确定。

## 附录 B 波浪试验数据采集和处理

**B.0.1** 波浪数据采集和处理应符合下列规定。

**B.0.1.1** 不规则波试验的波浪数据采集时间间隔应小于有效波周期的 1/10, 且不宜大于高频截止频率对应周期的 1/4, 在波浪平稳条件下, 连续采集的波浪个数不应少于 100 个, 多向不规则波不应少于 300 个, 并按附录 D 计算波高和波周期的统计特征值, 必要时, 可按附录 D 计算波高、波周期的经验频率分布, 按附录 E 和附录 F 进行谱分析。

**B.0.1.2** 规则波试验的波浪数据采集时间间隔应小于平均波周期的 1/20。在波浪稳定条件下, 连续采集的波浪个数不应少于 10 个, 并取其平均值作为代表值。

**B.0.1.3** 波高和波周期分析应采用跨零点法, 并应设阈值。

**B.0.1.4** 试验数据处理前, 应进行数据可靠性检查, 并去除异常值。数据的取值应与仪器测量精度相匹配, 并按有效数字运算。

**B.0.2** 多向不规则波试验的数据测量和处理尚应符合下列规定。

**B.0.2.1** 应由多个波高仪或流速仪组成阵列, 同步测量多点波面或多个波动量变化过程, 可采用参量化法、最大似然法、贝叶斯法等分析多向不规则波的方向谱。采用波高仪阵列时, 同步测量的波高仪不宜少于 4 个, 波高仪之间的最小距离宜小于谱峰周期对应波长的 3/10。

**B.0.2.2** 多向不规则波平均波向、综合平均波向、方向分布宽度和综合方向分布宽度等参数, 可分别按下列公式计算:

$$\theta_m = \arctan \frac{\int_0^{2\pi} G(f, \theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} G(f, \theta) \cos \theta d\theta} \quad (\text{B.0.2-1})$$

$$\bar{\theta} = \arg \left[ \int_{f_1}^{f_2} \frac{S(f)}{m_0} \exp(i\theta_m) df \right] \quad (\text{B.0.2-2})$$

$$\sigma_0(f) = \left[ \int_{\theta_n - \pi}^{\theta_n + \pi} G(f, \theta) (\theta - \theta_m)^2 d\theta \right]^{1/2} \quad (\text{B.0.2-3})$$

$$\bar{\sigma}_0 = \int_{f_1}^{f_2} \frac{S(f) \sigma(f)}{m_0} df \quad (\text{B.0.2-4})$$

式中  $\theta_m$ ——平均波向(rad);

$G(f, \theta)$ ——方向分布函数( $\text{rad}^{-1}$ ), 其中  $f$  为频率(Hz)、 $\theta$  为波向(rad);

- $\bar{\theta}$ ——综合平均波向(rad)；
- $S(f)$ ——频率谱密度( $\text{m}^2/\text{Hz}$ )；
- $m_0$ ——波浪频率谱的零阶矩( $\text{m}^2$ )；
- $f_1, f_2$ ——波能分布的频率范围(Hz)；
- $\sigma_0(f)$ ——方向分布宽度(rad)；
- $\bar{\sigma}_0$ ——综合方向分布宽度(rad)。

**B.0.2.3** 当多向不规则波遇有建筑物反射时,在建筑物前同步测定的波动量不宜少于5个,并将入射波和反射波分离,确定建筑物的反射系数,计算多向入射波和反射波参数。

**B.0.3** 波浪爬高和落深数据采集和处理,应在静水位处设阈值,并以静水位为界,按波浪的数据采集和处理方法进行。

**B.0.4** 作用于建筑物上波浪力的数据采集和处理应符合下列规定。

**B.0.4.1** 波浪力的数据采集时间间隔应小于波浪数据采集的时间间隔,破波冲击力采集时间间隔应更小,避免漏掉压力峰值,并可根据所测力的最高频率和建筑物频率响应特征选定的截止频率进行滤波处理。

**B.0.4.2** 不规则波应连续采集1000个以上波浪所对应的波浪力峰值,并按附录D计算波浪力的平均值、1/3大值平均值、1/10大值平均值和最大值,必要时,应按附录E和附录F进行谱和互谱分析。

**B.0.4.3** 规则波应连续采集10个以上波浪所对应的波浪力峰值,取其连续10个的平均值作为代表值。破波冲击力,应重复测量多次,累计波浪力个数不宜少于100个,除应计算平均值外,尚应按附录D计算波浪力的1/3大值平均值、1/10大值平均值和最大值等统计特征值。

**B.0.5** 波浪作用于建筑物的反射系数可按下列公式计算:

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (\text{B.0.5-1})$$

$$K'_R = \frac{H_R}{H_I} \quad (\text{B.0.5-2})$$

式中  $K_R$ ——不规则波综合反射系数;

$E_R$ ——反射波总能量( $\text{J}/\text{m}^2$ );

$E_I$ ——入射波总能量( $\text{J}/\text{m}^2$ );

$K'_R$ ——规则波反射系数;

$H_R$ ——反射波波高(m);

$H_I$ ——入射波波高(m)。

**B.0.6** 波浪的透射系数可按下列公式计算:

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} \quad (\text{B.0.6})$$

式中  $K_r$ ——波浪透射系数;  
 $H_r$ ——建筑物后的波高(m);  
 $H_i$ ——入射波波高(m)。

**B.0.7** 不规则波作用下建筑物的动力响应和港湾共振影响的研究,宜进行波群特性分析,并可采用下列参数表示:

(1)用群高因子表示波群的高度特征:

$$GFH = \frac{\sqrt{2}\sigma_A}{\bar{A}} \quad (\text{B.0.7})$$

式中  $GFH$ ——波群的群高因子,其变化范围为0~1;

$\sigma_A$ ——波包线的标准差(m);

$\bar{A}$ ——波包线  $A(t)$  的均值(m),波包线  $A(t)$  可采用 Hilbert 变换技术由波面记录算得;

(2)用平均连长表示波群的长度特征。

## 附录 C 单向波合成多向波模型试验

**C.0.1** 采用单向波合成法进行多向不规则波传播与变形、港内水域平稳度模型试验,可按下列步骤进行:

(1) 将  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$  范围内组成波波向按 16 个或 8 个方位划分,各波向波能比的累加值按下列公式计算:

$$P_E(\theta) = \frac{1}{m_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (\text{C.0.1-1})$$

$$m_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} S(f, \theta) df d\theta \quad (\text{C.0.1-2})$$

式中  $P_E(\theta)$ ——各波向波能比累加值;

$m_0$ ——各波向组成波的总能量( $\text{m}^2$ );

$S(f, \theta)$ ——方向谱密度 [ $\text{m}^2/(\text{Hz} \cdot \text{rad})$ ],可采用现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)规定的或其他合适的方向谱密度;

$f, \theta$ ——分别为频率(Hz)和波向(rad);

(2) 按表 C.0.1 计算各波向组成波的能量比  $D_j$ ;

表 C.0.1 不同波向组成波能量比  $D_j$

组成波波向	按 16 个方位划分	按 8 个方位划分
67.5°	$P_E\left(\frac{\pi}{2}\right) - P_E\left(\frac{5\pi}{16}\right)$	—
45.0°	$P_E\left(\frac{5\pi}{16}\right) - P_E\left(\frac{3\pi}{16}\right)$	$P_E\left(\frac{\pi}{2}\right) - P_E\left(\frac{\pi}{4}\right)$
22.5°	$P_E\left(\frac{3\pi}{16}\right) - P_E\left(\frac{\pi}{16}\right)$	—
0°	$P_E\left(\frac{\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{16}\right)$	$P_E\left(\frac{\pi}{4}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{4}\right)$
-22.5°	$P_E\left(-\frac{\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{3\pi}{16}\right)$	—
-45.0°	$P_E\left(-\frac{3\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{5\pi}{16}\right)$	$P_E\left(-\frac{\pi}{4}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{2}\right)$
67.5°	$P_E\left(-\frac{5\pi}{16}\right) - P_E\left(-\frac{\pi}{2}\right)$	—

- (3) 采用单向不规则波,逐一进行各波向模型试验,测量各点波高,计算比波高;  
(4) 各测点合成后的综合比波高按下式计算:

$$K_{\text{eff}} = \left( \frac{\sum K_j^2 D_j}{\sum D_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.0.1-3})$$

式中  $K_{\text{eff}}$ ——考虑了波向分布特点的综合比波高;  
 $K_j$ ——测点处第  $j$  个波向入射波时的比波高;  
 $D_j$ ——不同波向组成波能量。

## 附录 D 不规则波试验数据统计分析

**D.0.1** 波浪模型试验采集的波高、波周期、波浪力、波浪爬高等不规则波试验数据的统计特征值,应分别按下列公式计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{D.0.1-1})$$

$$x_{1/3} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} x_i \quad (\text{D.0.1-2})$$

$$x_{1/10} = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^{N/10} x_i \quad (\text{D.0.1-3})$$

$$x_{1/100} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^{N/100} x_i \quad (\text{D.0.1-4})$$

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (\text{D.0.1-5})$$

$$m_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^n, \dots, n=1, 2, 3, 4 \quad (\text{D.0.1-6})$$

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^n, \dots, n=1, 2, 3, 4 \quad (\text{D.0.1-7})$$

$$\sigma_x = \mu_2^{1/2} \quad (\text{D.0.1-8})$$

$$c_v = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \quad (\text{D.0.1-9})$$

$$c_s = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} \quad (\text{D.0.1-10})$$

$$c_k = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3 \quad (\text{D.0.1-11})$$

式中  $\bar{x}$ ——平均值;

$x_{1/3}$ —— $\frac{1}{3}$ 大值平均值;

$x_{1/10}$ —— $\frac{1}{10}$ 大值平均值;

$x_{1/100}$ —— $\frac{1}{100}$ 大值平均值;

$x_{\text{rms}}$ ——均方根值;

$m_n$ —— $n$ 阶原点矩;

$\mu_n$ —— $n$ 阶中心矩;

$\sigma_x$ ——均方差;  
 $c_v$ ——离差系数;  
 $c_s$ ——偏态系数;  
 $c_k$ ——峰度系数。

**D.0.2** 波高、波周期、波浪力、波浪爬高和越浪量等不规则波试验数据的经验分布应按下列方法计算:

(1) 对任一随机数据序列的一元经验分布按下列公式计算:

对总数为  $N$  的数据序列  $x_i$ ; 以间隔  $\Delta x$  划分区间, 且总区间数  $J$  不少于 10 个, 则有

$$p_j = \frac{n_j}{N}, j=1, 2, \dots, J \quad (\text{D.0.2-1})$$

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^j n_i}{N}, j=1, 2, \dots, J \quad (\text{D.0.2-2})$$

$$f_j = \frac{P_j}{\Delta x} \quad (\text{D.0.2-3})$$

式中  $p_j$ ——频率;  
 $n_j$ —— $x_i$  落入第  $j$  区间的个数;  
 $N$ ——样本总数;  
 $P_j$ ——累积频率;  
 $f_j$ ——频率密度。

(2) 对任意两个随机数据序列的二元经验分布按下列公式计算:

对总数为  $N$  的两个随机数据序列  $x_i$  和  $y_i$  以间隔  $\Delta x$  和  $\Delta y$  划分区间, 则有

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{N} \quad (\text{D.0.2-4})$$

$$f(i, j) = \frac{P_{ij}}{\Delta x \Delta y} \quad (\text{D.0.2-5})$$

$$f_i = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ij}}{\Delta x} \quad (\text{D.0.2-6})$$

$$f_j = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ij}}{\Delta x} \quad (\text{D.0.2-7})$$

$$f(j|i) = \frac{f(i, j)}{f_i} \quad (\text{D.0.2-8})$$

$$f(i|j) = \frac{f(i, j)}{f_j} \quad (\text{D.0.2-9})$$

$$\left. \begin{aligned} P(1, 1) &= \Delta x \Delta y f(1, 1), i=1, j=1 \\ P(i, 1) &= P(i-1, 1) + \Delta x \Delta y f(i, 1), i \geq 2, j=1 \\ P(1, j) &= P(1, j-1) + \Delta x \Delta y f(1, j), i=1, j \geq 2 \\ P(i, j) &= P(i-1, j) + P(i, j-1) - P(i-1, j-1) + \\ &\Delta x \Delta y f(i, j), i \geq 2, j \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{D.0.2-10})$$



式中  $P_{ij}$ ——频率；  
 $n_{ij}$ —— $x_i, y_i$  同时落入第 $(i, j)$ 区间的个数,  $M, L$  分别为  $x_i, y_i$  的划分区间总数；  
 $f(i, j)$ ——频率密度；  
 $f_i, f_j$ ——边际频率密度；  
 $f(j|i), f(i|j)$ ——条件频率密度；  
 $P(i, j)$ ——累积频率。

**D.0.3** 随机数据序列  $x_i, y_i$  的相关系数应按下式计算：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{D.0.3})$$

式中  $\rho$ ——相关系数；  
 $N$ —— $x_i, y_i$  的样本总数；  
 $\bar{x}, \bar{y}$ —— $x_i, y_i$  的平均值。

**D.0.4** 当需要对随机数据序列  $x_i$  和  $y_i$  标准化后再进行统计分析时,可按下式标准化：

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (\text{D.0.4-1})$$

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (\text{D.0.4-2})$$

式中  $x'_i, y'_i$ —— $x_i, y_i$  标准化后的值；  
 $\bar{x}, \bar{y}$ —— $x_i, y_i$  的平均值；  
 $\sigma_x, \sigma_y$ —— $x_i, y_i$  的均方差。

## 附录 E 随机数据时间序列的谱分析

**E.0.1** 波浪模型试验中,采集的波高、波浪力等随机数据时间序列  $x(t)$ ,可按下列方法进行谱分析。

**E.0.1.1** 相关函数法进行谱分析可按下列步骤进行:

- (1) 对随机数据时间序列中心化;
- (2) 按下式计算相关函数:

$$R(v\Delta t) = \frac{1}{N-v} \sum_{n=1}^{N-v} x(t_n)x(t_n+v\Delta t) \quad (\text{E.0.1-1})$$

式中  $R(v\Delta t)$ ——相关函数;

$v$ ——滞后数,  $v=0,1,2,\dots,m$ ;其中,  $m$  为最大滞后数,  $m = \frac{N}{15 \sim 20}$ ;

$\Delta t$ ——采样时间间隔,  $t_n = n\Delta t, n=1,2,3,\dots,N$ ;

$N$ ——样本总数,  $N = \frac{T}{\Delta t}$ ;其中,  $T$  为总的采样时间;

$x(t_n)$ ——波高、波浪力等随机数据时间序列;

$x$ ——波高、波浪力等随机数据;

- (3) 按下式计算粗谱值:

$$\hat{S}(\omega_k) = \frac{2\Delta t}{\pi} \left[ \frac{1}{2}R(0) + \sum_{v=1}^{m-1} R(v\Delta t) \cos\left(\frac{\pi vk}{m}\right) + \frac{1}{2}R(m\Delta t) \cos(\pi k) \right], k=0,1,2,3,\dots,m \quad (\text{E.0.1-2})$$

式中  $\hat{S}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗谱密度;

$\Delta t$ ——采样时间间隔;

$R(0)$ ——相关函数的某个定值;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率,  $\omega_k = \frac{\pi k}{m\Delta t}$ ;

$v$ ——滞后数,  $v=0,1,2,\dots,m$ ;

$m$ ——最大滞后数;

- (4) 对粗谱进行平滑,当采用 Hanning 或 Hamming 窗平滑时,则有:

$$\underline{S}(\omega_k) = \alpha \hat{S}_{k+1} + (1-2\alpha) \hat{S}_k + \alpha \hat{S}_{k-1}, k=0,1,2,3,\dots,m-1 \quad (\text{E.0.1-3})$$

$$\underline{S}(\omega_0) = (1-2\alpha) \hat{S}_0 + 2\alpha \hat{S}_1 \quad (\text{E.0.1-4})$$

$$\underline{S}(\omega_m) = 2\alpha \hat{S}_{m-1} + (1-2\alpha) \hat{S}_m \quad (\text{E.0.1-5})$$

式中  $\underline{S}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的平滑后的谱密度;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率;

$\alpha$ ——Hanning 和 Hamming 窗系数,分别为 0.25 和 0.23;

$\omega_0, \omega_m$ ——起始和最后两端点的圆频率;

$\hat{S}_k$ ——对应  $\omega_k$  的粗谱密度;

(5)按下式计算谱的置信区间:

$$p \left\{ \frac{K}{b} \underline{S}(\omega) \leq S(\omega) \leq \frac{K}{a} \underline{S}(\omega) \right\} = \beta \quad (\text{E.0.1-6})$$

式中  $p \{ \quad \}$ ——估计的谱密度值落入所给区间的概率;

$K$ ——自由度,  $K = 2 \left( \frac{N}{m} - \frac{1}{4} \right)$ ;其中,  $N$  为样本总数,  $m$  为最大滞后数;

$a, b$ ——按  $\chi^2$  分布求出的两个正整数,并满足:

$$p \{ \chi^2(K) \geq b \} = \frac{1-\beta}{2}$$

$$p \{ \chi^2(K) \geq a \} = \frac{1+\beta}{2}$$

$\beta$ ——给定的置信水平。

**E.0.1.2** 快速 Fourier 变换(FFT)法进行谱分析可按下列步骤进行:

(1)截断数据时间序列或增加零,使每个序列有  $N = 2^n$  数据,  $n$  为正整数;

(2)对数据时间序列中心化,并用余弦坡度函数法等削尖数据时间序列;

(3)调用 FFT 子程序,按下式计算削尖后的数据时间序列  $x_j$  的 Fourier 变换:

$$X_k = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i \frac{2\pi k j}{N}}, k = 0, 1, 2, \dots, \frac{\pi}{2} \quad (\text{E.0.1-7})$$

式中  $\Delta t$ ——采样时间间隔;

$N$ ——样本总数;

(4)按下式计算粗谱:

$$\hat{S}(\omega_k) = \frac{1}{2\pi N \Delta t} X_k^* X_k \quad (\text{E.0.1-8})$$

式中  $\hat{S}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗谱密度;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率,  $\omega_k = \frac{2\pi k}{N \Delta t}$ ;

$N$ ——样本总数;

$\Delta t$ ——采样时间间隔;

$X_k^*$ —— $X_k$  的共轭复数;

(5)对粗谱进行修正:

$$\bar{S}(\omega_k) = \hat{S}(\omega_k) \frac{N}{\sum_{n=0}^N b^2(n)} \quad (\text{E.0.1-9})$$

式中  $\bar{S}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的修正后的谱密度;

$\hat{S}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗谱密度;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率;

$N$ ——样本总数;

$b(n)$ ——修正函数,采用余弦坡度函数法削尖数据时间序列时,有:

$$b(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{n\pi}{l} \right) & 0 \leq n < l \\ 1 & l \leq n \leq N-l \\ \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \frac{(N-n)\pi}{l} \right] & N-l < n \leq N \end{cases}$$

$l = 0.1N$

(6) 对修正后的粗谱进行平滑,当采用矩形窗平滑时,则有:

$$\underline{S}(\omega_k) = \frac{1}{2p+1} \sum_{i=-p}^p \bar{S}(\omega_{k+i}), \text{取 } p = \frac{N}{80} \sim \frac{N}{160} \quad (\text{E.0.1-10})$$

式中  $\underline{S}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  平滑后的谱密度;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率;

$\bar{S}(\omega_{k+i})$ ——对应  $\omega_{k+i}$  修正后的粗谱密度;

$N$ ——样本总数;

(7) 按  $\chi^2$  分布计算谱的置信区间,此时的自由度  $K \approx 4p$ 。

**E.0.2** 谱矩及相应参数可按下列公式计算:

$$m_r = \int_0^{\infty} \omega^r S(\omega) d\omega \quad (\text{E.0.2-1})$$

$$\omega_{pq} = \left( \frac{m_p}{m_q} \right)^{\frac{1}{p-q}}, p=2,1,0; q=0,1,2 \quad (\text{E.0.2-2})$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} \omega S^2(\omega) d\omega \quad (\text{E.0.2-3})$$

式中  $m_r$ ——谱的  $r$  阶矩,  $r=0,1,2,3,4$ ;

$\omega$ ——圆频率;

$S(\omega)$ ——频率谱密度;

$\omega_{pq}$ ——由谱的  $p$  阶和  $q$  阶矩组合的圆频率;

$m_p, m_q$ ——谱的  $p$  阶矩和  $q$  阶矩;

$Q_p$ ——谱尖度;

$m_0$ ——谱的 0 阶矩。

## 附录 F 随机数据时间序列的互谱分析

**F.0.1** 研究任意两个随机数据时间序列对应的相互关系时,可计算互相关函数、互谱及传递函数。

**F.0.2** 经中心化后任意两个随机数据时间序列  $x(t)$  和  $y(t)$  的互相关函数可按下列公式计算:

$$\hat{R}_{xy}(v\Delta t) = \frac{1}{N-v} \sum_{n=1}^{N-v} x(t_n) y(t_n + v\Delta t) \quad (\text{F.0.2-1})$$

$$\hat{R}_{yx}(v\Delta t) = \frac{1}{N-v} \sum_{n=1}^{N-v} x(t_n + v\Delta t) y(t_n) \quad (\text{F.0.2-2})$$

式中  $\hat{R}_{xy}(v\Delta t), \hat{R}_{yx}(v\Delta t)$ ——互相关函数;

$v$ ——滞后数,  $v=0, 1, 2, \dots, m$ ;

$m$ ——最大滞后数,  $m = \frac{N}{15 \sim 20}$ ;

$N$ ——样本总个数,  $N = \frac{T}{\Delta t}$ ;

$T$ ——总的采样时间;

$\Delta t$ ——采样时间间隔,  $t_n = n\Delta t, n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

**F.0.3** 任意两个随机数据时间序列的互谱分析可按下列方法进行。

**F.0.3.1** 相关函数法进行互谱分析可按下列步骤进行:

- (1) 按式(F.0.2-1)和式(F.0.2-2)计算任意两个随机数据时间序列的互相关函数;
- (2) 令

$$\hat{A}_{xy}(v\Delta t) = \frac{1}{2} [\hat{R}_{xy}(v\Delta t) + \hat{R}_{yx}(v\Delta t)] \quad (\text{F.0.3-1})$$

$$\hat{B}_{xy}(v\Delta t) = \frac{1}{2} [\hat{R}_{xy}(v\Delta t) - \hat{R}_{yx}(v\Delta t)] \quad (\text{F.0.3-2})$$

并按下列公式分别计算粗同相谱、粗异相谱和粗互谱:

$$\hat{C}_{xy}(\omega_k) = \frac{2\Delta t}{\pi} \left[ \hat{A}_{xy}(0) + 2 \sum_{v=1}^{m-1} \hat{A}_{xy}(v\Delta t) \cos\left(\frac{\pi v k}{m}\right) + (-1)^k \hat{A}_{xy}(m\Delta t) \right], k=0, 1, 2, 3, \dots, m \quad (\text{F.0.3-3})$$

$$\hat{Q}_{xy}(\omega_k) = \frac{4\Delta t}{\pi} \sum_{v=1}^{m-1} \hat{B}_{xy}(v\Delta t) \sin\left(\frac{\pi v k}{m}\right) \quad (\text{F.0.3-4})$$

$$\hat{S}_{xy}(\omega_k) = \hat{C}_{xy}(\omega_k) - i\hat{Q}_{xy}(\omega_k) \quad (\text{F.0.3-5})$$

式中  $\hat{R}_{xy}(v\Delta t), \hat{R}_{yx}(v\Delta t)$ ——互相关函数;

$\hat{C}_{xy}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗同相谱密度;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率  $\omega_k = \frac{\pi k}{M\Delta t}$ ;

$v$ ——滞后数,  $v = 0, 1, 2, \dots, m$ ;

$m$ ——最大滞后数;

$\Delta t$ ——采样时间间隔;

$\hat{Q}_{xy}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗异相谱密度;

$\hat{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗互谱密度;

(3) 对粗谱进行平滑, 当采用 Hanning 或 Hamming 窗平滑时, 则有

$$\underline{S}_{xy}(\omega_k) = a\hat{S}_{xy}(\omega_{k+1}) + (1-2a)\hat{S}_{xy}(\omega_k) + a\hat{S}_{xy}(\omega_{k-1}), k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (\text{F. 0. 3-6})$$

$$\underline{S}_{xy}(\omega_0) = (1-2a)\hat{S}_{xy}(\omega_0) + 2a\hat{S}_{xy}(\omega_1) \quad (\text{F. 0. 3-7})$$

$$\underline{S}_{xy}(\omega_m) = 2a\hat{S}_{xy}(\omega_{m-1}) + (1-2a)\hat{S}_{xy}(\omega_m) \quad (\text{F. 0. 3-8})$$

$\underline{S}_{xy}(\omega_k)$ 、 $\underline{S}_{xy}(\omega_0)$  和  $\underline{S}_{xy}(\omega_m)$  亦按上述相同步骤计算;

式中  $\underline{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的平滑后的互谱密度;

$\hat{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗互谱密度;

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率;

$\omega_0, \omega_m$ ——起始和最后两端点的圆频率;

$m$ ——最大滞后数;

$a$ ——Hanning 和 Hamming 窗系数, 分别为 0.25 和 0.23。

**F. 0. 3. 2** FFT 法进行互谱分析应按下列步骤进行:

(1) 截断两随机数据时间序列或增加零, 使每个序列具有  $N = 2^n$  个数据,  $n$  为正整数;

(2) 对数据时间序列中心化, 并用余弦幅度函数法等削尖两个随机数据时间序列;

(3) 把削尖后的随机数据时间序列  $x_j$  和  $y_j$ ; 分别贮存在  $z_j = x_j + iy_j$  的实部和虚部中,  $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ;

(4) 调用 FFT 子程序, 按下列公式分别计算  $Z_k$ , 以及  $x_j$  和  $y_j$  的 Fourier 变换:

$$Z_k = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} z_j e^{-i\frac{2\pi k j}{N}}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (\text{F. 0. 3-9})$$

$$X_k = \frac{Z_k + Z_{N-k}^*}{2} \quad (\text{F. 0. 3-10})$$

$$Y_k = \frac{Z_k - Z_{N-k}^*}{2} \quad (\text{F. 0. 3-11})$$

式中  $\Delta t$ ——采样时间间隔;

$N$ ——样本总数;

$Z_{N-k}^*$ —— $Z_{N-k}$  的共轭复数;

(5) 粗互谱按下式计算：

$$\hat{S}_{xy}(\omega_k) = x \frac{1}{2\pi N \Delta t} X_k^* Y_k \quad (\text{F.0.3-12})$$

式中  $\hat{S}_{xy}(\omega_k)$ ——对应  $\omega_k$  的粗互谱密度；

$\omega_k$ ——对应  $k$  的圆频率,  $\omega_k = \frac{\pi k}{N \Delta t}$ ；

$N$ ——样本总数；

$\Delta t$ ——采样时间间隔；

$X_k^*$ —— $X_k$  的共轭复数；

(6) 按附录 E 的第 E.0.1 条有关规定的对粗谱进行修正和平滑。

**F.0.4** 传递函数可按下式计算：

设两个随机数据时间序列  $x(t)$  和  $y(t)$  分别为线性系统的输入、输出函数, 则传递函数为：

$$T_{xy}(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (\text{F.0.4})$$

式中  $T_{xy}(\omega)$ ——由  $x(t)$  到  $y(t)$  的传递函数；

$\omega$ ——圆频率；

$S_{xy}(\omega)$ —— $x(t)$  和  $y(t)$  的互谱密度；

$S_{xx}(\omega)$ —— $x(t)$  的谱密度。

## 附录 G 水弹性相似比尺关系

**G.0.1** 研究船闸输水阀门流激振动时,应同时满足水流的重力相似、结构动力相似和水流与结构耦合运动相似,即水弹性相似。

**G.0.2** 水弹性相似应符合下列规定。

**G.0.2.1** 相似比尺关系应按下列公式确定:

$$\lambda_l = \lambda_{l_s} = \lambda_{l_w} \quad (\text{G.0.2-1})$$

$$\lambda_t = \lambda_{t_s} = \lambda_{t_w} = \lambda_{l_s}^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{G.0.2-2})$$

$$\lambda_0 = \lambda_{\rho_s} = \lambda_{\rho_w} = \lambda_{\mu} = \lambda_{\epsilon} = 1 \quad (\text{G.0.2-3})$$

$$\lambda_{\tau} = \lambda_{\sigma} = \lambda_{E_s} = \lambda_{E_w} = \lambda_{l_s} \quad (\text{G.0.2-4})$$

$$\lambda_G = \lambda_{l_s}^{\frac{5}{2}} \quad (\text{G.0.2-5})$$

$$\lambda_{v_s} = \lambda_{v_w} = \lambda_{l_s}^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{G.0.2-6})$$

$$\lambda_{f_s} = \lambda_{f_w} = \lambda_{l_s}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{G.0.2-7})$$

式中  $\lambda_l$ ——固相几何比尺;  
 $\lambda_{l_s}$ ——液相几何比尺;  
 $\lambda_{l_w}$ ——线变位比尺;  
 $\lambda_t$ ——固相时间比尺;  
 $\lambda_{t_s}$ ——液相时间比尺;  
 $\lambda_{t_w}$ ——角变位比尺;  
 $\lambda_0$ ——固相材料密度比尺;  
 $\lambda_{\rho_s}$ ——液相密度比尺;  
 $\lambda_{\rho_w}$ ——泊桑系数比尺;  
 $\lambda_{\mu}$ ——线应变比尺;  
 $\lambda_{\epsilon}$ ——切应力比尺;  
 $\lambda_{\tau}$ ——正应力比尺;  
 $\lambda_{\sigma}$ ——弹性模量比尺;  
 $\lambda_{E_s}$ ——压力脉动幅值比尺;  
 $\lambda_{E_w}$ ——阻尼系数比尺;  
 $\lambda_G$ ——固相速度比尺;  
 $\lambda_{v_s}$ ——液相速度比尺;  
 $\lambda_{v_w}$ ——固相频率比尺;  
 $\lambda_{f_s}$ ——液相频率比尺。



**G.0.2.2** 当模型采用的流体为水时,模型结构材料的密度应和原型相同,模型结构材料的其他物理力学特性比尺应满足下列公式的要求:

$$\lambda_E = \lambda_l \quad (\text{G.0.2-8})$$

$$\lambda_\mu = 1 \quad (\text{G.0.2-9})$$

$$\lambda_G = \lambda_l^{\frac{5}{2}} \quad (\text{G.0.2-10})$$

式中  $\lambda_E$ ——弹性模量比尺;  
 $\lambda_l$ ——水的几何比尺;  
 $\lambda_\mu$ ——泊桑系数比尺;  
 $\lambda_G$ ——阻尼系数比尺。

## 附录 H 常用材料糙率值

**H.0.1** 材料的糙率应通过实测资料分析计算确定,无实测资料时,可按表 H.0.1 取值。

**表 H.0.1 材料糙率值表**

序 号	材 料	糙 率 值
1	铜	0.006
2	光滑有机玻璃板	0.007 ~ 0.009
3	加工良好表面烫蜡的木板	0.0085
4	普通水泥砂浆抹面压光	0.010
5	加工良好木板	0.010
6	新铁皮	0.011
7	新熟铁管	0.011
8	钢管	0.012
9	混凝土管和钢筋混凝土管	0.012 ~ 0.014
10	普通水泥砂浆抹面拉毛	0.013 ~ 0.017

## 附录 J 推移质输沙率公式

具有代表性的推移质输沙率公式(表 J.0.1)可根据实际情况选用。

**表 J.0.1 推移质输沙率公式**

序号	公式结构	参 数
1	Einstein 公式 $1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-0.143\psi-2}^{0.143\psi-2} \exp(-t^2) dt = \frac{43.5\phi}{1 + 43.5\phi}$	$\phi = \frac{g_{h1}}{\gamma_s} \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{gd^3} \right)^{1/2}; \psi = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{R_{h1} J}$
2	Meyer-Peter 公式 $g_{h1} = 8\gamma_s d \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} gd \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{3/2} \theta - \theta_c \right]^{3/2}$	$n' = \frac{d^{1/6}}{26}; \theta = \frac{\gamma H J}{(\gamma_s - \gamma) d}; \theta_c = 0.047$
3	Bagnold 公式 $g_{h1} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{V_* - V_{*c}}{V_*} \left( \frac{1}{gd^3} \right)^{1/2} \frac{\tau_{01} V}{\tan \alpha}$ $\left[ 1 - \frac{5.75 V_* \lg \left( \frac{0.4H}{md} \right) + \omega}{V} \right]$	$\tau_{01} = \rho V_*^2; m = K \left( \frac{V_*}{V_{*c}} \right)^{0.6}$
4	Engelund 公式 $g_{h1} = 11.6\gamma_s d \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} gd (\theta - \theta_c) (\sqrt{\theta} - 0.7\sqrt{\theta_c})$	$\theta_c = 0.046$
5	Yalin 公式 $g_{h1} = 0.635\gamma_s s d V_* \left[ 1 - \frac{1}{as} \ln(1 + as) \right]$	$s = \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c}; a = 2.45 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} \right)^{0.4} \sqrt{\theta_c}$
6	Ackers-White 公式 $\phi = 2.02 \log \left( \frac{16.5}{J} \theta \right) \sqrt{\theta} (\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_c})^{1.5}$ (床面平整时)	$\theta_c = 0.029; \phi = \frac{g_{h1}}{\gamma_s} \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{gd^3} \right)^{1/2}$

续表 J.0.1

序号	公式结构	参数
7	宾国仁公式 $s_b = \frac{K_b}{C_b^2} \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} (V - V_c) \frac{V^3}{g\omega}$	$C_b = 2.5 \ln \left( 11 \frac{H}{k_s} \right); K_b = 0.1$ $k_s = \begin{cases} 1.0 \text{ mm}, d < 0.5 \text{ mm} \\ 2d, 0.5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm} \\ 2d^{1/2} d^{1/2}, d > 10 \text{ mm} \end{cases}$ $V_c = k' \ln \left( 11 \frac{H}{k_s} \right) \left( \frac{d'}{d_*} \right)^{1/6}$ $\sqrt{3.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + \left( \frac{\gamma_{0*}}{\gamma_{0*}} \right)^{5/2} \left( \frac{s_b + g h \delta (\delta + d)^{1/2}}{d} \right)}$ $d' = \begin{cases} 0.5 \text{ mm}, d \leq 0.5 \text{ mm} \\ d, 0.5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm}, d \geq 10 \text{ mm} \end{cases}$ $\gamma_{0*} = 0.68 \gamma_s (d/d_{0*})^n$ $n = 0.080 + 0.014 (d/d_{25})$
8	沙莫夫公式 $s_b = 0.95 \sqrt{d} \left[ \frac{V}{\left( \frac{V_c}{1.2} \right)} \right]^3 \left( V - \frac{V_c}{1.2} \right) \left( \frac{d}{H} \right)^{1/4}$	$V_c = 3.83 d^{1/3} H^{1/6}$
9	列维公式 $s_b = 2 \left( \frac{V}{\sqrt{gd}} \right)^3 \left( V - \frac{V_c}{1.2} \right) \left( \frac{d}{H} \right)^{1/4}$	—
10	岗恰洛夫公式 $s_b = (3.0 \sim 5.3) (1 + \zeta) \left[ \frac{V^3}{\left( \frac{V_c}{1.4} \right)^3} - 1 \right] \left( V - \frac{V_c}{1.4} \right)$	$\zeta = \begin{cases} 1, d > 1.5 \text{ mm} \\ \frac{1}{\beta} \left( \frac{\rho \mu}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/3} \left( \frac{2g}{1.75 \gamma d} \right)^{1/2}, 0.15 \text{ mm} < d < 1.5 \text{ mm} \\ \frac{33.8}{\left[ 1.75 \rho (\gamma_s - \gamma) d^3 \right]^{1/2}}, d < 0.15 \text{ mm} \end{cases}$ $\beta = 0.081 \lg \left[ 83 \left( \frac{3.7 d}{d_{0*}} \right)^{1-0.037d} \right]$ $d_{0*} = 0.15 \text{ cm}$
11	陆永军公式 $s_b = K \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \tau_{0*} u_* \left[ 1 - \frac{0.7 \sum \sqrt{\tau_{0i}} P_{0i} (1 - q_i)}{\sqrt{\tau_{0*}} \sum P_{0i} (1 - q_i)} \right]$ $\sum P_{0i} (1 - q_i)$	$q_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\tau_{0*} - \tau_{0i}}{\sigma}} \exp \left( -\frac{t^2}{2\sigma^2} \right) dt$ $\tau_{0*} = 0.031 \zeta (\gamma_s - \gamma) d_i$ $\zeta = \begin{cases} 1.0, & \theta > 0.06 \\ 10^{(0.881k_1^2(d/d_{0*}) - 0.341k_1(d/d_{0*}) - 0.112)}, d_i \leq 0.5 d_{0*}, & \theta \leq 0.06 \\ 0.895 (d_i/d_{0*})^{-0.16}, d_i > 0.5 d_{0*}, & \theta \leq 0.06 \end{cases}$ $K = \begin{cases} 11.6, \theta > 0.25 \\ 10^{(0.2286 - 2.5441k_1\theta - 1.8961k_1^2\theta)}, 0.06 < \theta \leq 0.25 \\ 10^{(2.8719 - 0.11319\theta)}, \theta \leq 0.06 \end{cases}$ $\theta = \frac{\gamma R J}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}}$

续表 J.0.1

序号	公式结构	参 数
12	秦荣显公式 $\xi_{1i} = KP_{0i}VH\left(\frac{V}{V_c}\right)^3\left(\frac{d}{H}\right)^{1/6}$	$K = \begin{cases} 0.3, d_{0i} \leq d_{\max} \\ 0.4, d_{0i} > d_{\max} \end{cases}$ $V_c = 0.786 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g(2.5md_{0i})} + d_{0i} \left(\frac{h}{d_{0i}}\right)^{1/6}$
13	刘兴年公式 $\xi_{1i} = \phi_i P_i \gamma_s \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{1/2} (gd_i^3) \zeta_i^{1/2}$	$\phi_i = 11.2 \left(\frac{1}{\psi_i} - 0.03\right)^{4.4} \psi_i^{0.5}$ $\phi_i = \frac{\xi_{1i}}{\gamma_s P_i} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{gd_i^3}\right)^{1/2} \zeta_i^{1/2}$ $\psi_i = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d_i}{hJ} \zeta_i; \zeta_i = 1 + A \frac{d_a - d_i}{d_i};$ $d_a = \begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i d_i, d_c^* \geq d_{\max} \\ \sum_{i=1}^m P_i d_i + \sum_{i=m+1}^n P_i d_c^*, d_c^* < d_{\max} \end{cases}$

## 附录 K 悬移质分组挟沙力及挟沙力级配

### K.0.1 悬移质分组挟沙力

#### K.0.1.1 床沙质模式

将非均匀沙分成  $n$  组, 每组均可视为均匀沙, 其挟沙能力可沿用均匀沙公式, 其第  $i$  组挟沙能力为

$$S_{..i} = p_i'' S_{..}(\omega_i) \quad (\text{K.0.1-1})$$

床沙质组合挟沙力为

$$S_{..}(\omega_i) = K \left( \frac{U^3}{gh\omega_i} \right)^m \quad (\text{K.0.1-2})$$

$$\omega_{..} = \left( \sum_{i=1}^n p_i'' \omega_i^m \right)^{1/m} \quad (\text{K.0.1-3})$$

#### K.0.1.2 全沙模式

(1) 单纯淤积

判别条件

$$S_b > (1 - S_w/\rho_w) S_b; \quad S_{..} < \rho_b$$

分组挟沙力

$$S_{..i} = p_{w,i} P_w S + \left( 1 - \frac{S_w}{\rho_w} \right) p_{b,i} P_b \rho_b \quad (\text{K.0.1-4})$$

(2) 单纯冲刷

判别条件

$$S_b < \left( 1 - \frac{S_w}{\rho_w} \right) \rho_b; \quad \rho_{..} < \rho_b$$

分组挟沙力

$$S_{..i} = p_i S + \left( 1 - \frac{S}{\rho} \right) P_i p_{b,i}'' S_{..} \quad (\text{K.0.1-5})$$

(3) 淤粗冲细

判别条件

$$S_{..} > \rho_b$$

分组挟沙力

$$S_{..i} = p_{w,i} P_w S + \left( 1 - \frac{S_w}{\rho_w} \right) p_{b,i}'' \rho_{..} \quad (\text{K.0.1-6})$$

$$P_w = \sum_{i=1}^k p_i, \quad p_{w,i} = \begin{cases} \frac{p_i}{P_w} & (i \leq k) \\ 0 & (i > k) \end{cases}$$

$$P_b = \sum_{i=k+1}^n p_i, \quad p_{b,i} = \begin{cases} \frac{p_i}{P_b} & (i > k) \\ 0 & (i \leq k) \end{cases}$$

$$\rho_w = K \left( \frac{U^3}{gH\omega_w} \right)^m, \quad \omega_w = \left( \sum_{i=1}^k p_i \omega_i^m / P_w \right)^{1/m}$$

$$\rho_b = K \left( \frac{V^3}{gH\omega_b} \right)^m, \quad \omega_b = \left( \sum_{i=k+1}^n p_i \omega_i^m / P_b \right)^{1/m}$$

$$\rho = K \left( \frac{V^3}{gH\omega} \right)^m, \quad \omega = \left( \sum_{i=1}^n p_i \omega_i^m \right)^{1/m}$$

$$\rho_{..} = K \left( \frac{V^3}{gH\omega_{..}} \right)^m, \quad \omega_{..} = \left( \sum_{i=k+1}^n p_{b,i} \omega_i^m \right)^{1/m}$$

$$p_{b,i}^{..} = (i_0 / \omega_i^m) / \sum_{i=k+1}^n (i_0 / \omega_i^m)$$

**K.0.2 挟沙力级配**

**K.0.2.1 床沙质模式**

(1) 公式一

$$p_i^{..} = (i_0 / \omega_i^m) / \sum_{i=1}^n (i_0 / \omega_i^m) \tag{K.0.2-1}$$

(2) 公式二

$$p_i^{..} = \frac{i_0 \frac{1-A_i}{\omega_i} (1 - e^{-6Z_*})}{\sum_{i=1}^n i_0 \frac{1-A_i}{\omega_i} (1 - e^{-6Z_*})} \tag{K.0.2-2}$$

$$A_i = \omega_i / \left[ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\omega_i}{\sigma} \right)^2} + \omega_i \Phi \left( \frac{\omega_i}{\sigma} \right) \right]$$

$$Z_{..} = \frac{\omega_i}{\kappa u_{..}}$$

**K.0.2.2 全沙模式**

(1) 单纯淤积

$$p_i^{..} = p_{b,i} + (p_{w,i} - p_{b,i}) S_w / S_{..} \tag{K.0.2-3}$$

$$S_{..} = S_w + \left( 1 - \frac{S_w}{\rho_w} \right) \rho_b$$

(2) 单纯冲刷

$$p_i^{..} = p_{b,i}^{..} + (p_i - p_{b,i}^{..}) S / S_{..} \tag{K.0.2-4}$$

$$S_{..} = S + \left( 1 - \frac{S}{\rho} \right) P \rho_{..}$$

(3) 淤粗冲细

$$p_i^{..} = p_{b,i}^{..} + (p_{w,i} - p_{b,i}^{..}) S_w / S_{..} \tag{K.0.2-5}$$

$$S_{..} = S_{..} + \left( 1 - \frac{S_w}{\rho_w} \right) \rho_{..}$$

**K.0.3** 床沙级配的调整

第  $n$  时段床面掺混层级配可表达为：

$$i_0(n) = i_0(n-1) + [i_0(0) - p_i''(n)] \frac{\Delta h''(n)}{E_m} - [i_0(0) - p_i'(n)] \frac{\Delta h'(n)}{E_m} \quad (\text{K.0.3})$$



## 附录 L 本规范用词说明

为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

- (1)表示很严格,非这样做不可的,正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- (2)表示严格,在正常情况下均应这样做的,正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- (3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的,正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- (4)表示允许选择,在一定条件下可以这样做的采用“可”。

## 引用标准名录

1. 《土工试验方法标准》(GB/T 50123)
2. 《水运工程水文观测规范》(JTS 132)
3. 《港口与航道水文规范》(JTS 145)
4. 《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)
5. 《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)

## 附加说明

# 本规范主编单位、参编单位、主要起草人、 主要审查人、总校人员和管理组人员名单

主编单位:交通运输部天津水运工程科学研究所

参编单位:南京水利科学研究院

主要起草人:李旺生(交通运输部天津水运工程科学研究所)

李一兵(交通运输部天津水运工程科学研究所)

曹民雄(南京水利科学研究院)

(以下按姓氏笔画为序)

王建军(交通运输部天津水运工程科学研究所)

王登婷(南京水利科学研究院)

乐培九(交通运输部天津水运工程科学研究所)

李君(南京水利科学研究院)

李华国(交通运输部天津水运工程科学研究所)

杨华(交通运输部天津水运工程科学研究所)

杨燕华(交通运输部天津水运工程科学研究所)

张华庆(交通运输部天津水运工程科学研究所)

张明进(交通运输部天津水运工程科学研究所)

张慈珩(交通运输部天津水运工程科学研究所)

陈汉宝(交通运输部天津水运工程科学研究所)

赵洪波(交通运输部天津水运工程科学研究所)

胡亚安(南京水利科学研究院)

高峰(交通运输部天津水运工程科学研究所)

康苏海(交通运输部天津水运工程科学研究所)

琚烈红(南京水利科学研究院)

主要审查人:仇伯强

(以下按姓氏笔画为序)

刘子琪、刘兴年、李文全、张玮、张绪进、陈明栋、邵守良

总校人员:刘国辉、李荣庆、吴敦龙、孟乙民、董方、曹民雄、刘本芹、

陈允约、杨华、李旺生、高峰、王建军、杨阳、张慈珩、

许海勇

管理组人员:冯小香(交通运输部天津水运工程科学研究所)

张明进(交通运输部天津水运工程科学研究所)

王建军(交通运输部天津水运工程科学研究所)

曹民雄(南京水利科学研究院)

李 君(南京水利科学研究院)



中华人民共和国行业标准

# 水运工程模拟试验技术规范

JTS/T 231—2021

条文说明



## 目 次

<b>1</b>	<b>总则</b> .....	(121)
<b>3</b>	<b>基本规定</b> .....	(122)
3.1	一般规定 .....	(122)
3.3	物理模型制作精度 .....	(122)
<b>4</b>	<b>内河水动力模型试验</b> .....	(123)
4.1	基本资料 .....	(123)
4.2	模型设计 .....	(123)
4.3	模型制作 .....	(124)
4.4	模型验证试验 .....	(124)
4.5	水流运动试验 .....	(124)
<b>5</b>	<b>潮流水动力模型试验</b> .....	(125)
5.2	模型设计 .....	(125)
5.5	潮流运动试验 .....	(125)
<b>6</b>	<b>波浪水动力模型试验</b> .....	(126)
6.2	模型设计 .....	(126)
6.4	模型率定试验 .....	(126)
6.5	波浪运动试验 .....	(127)
<b>7</b>	<b>通航建筑物水动力模型试验</b> .....	(129)
7.2	模型设计 .....	(129)
7.3	模型制作 .....	(129)
7.4	枢纽通航整体模型试验 .....	(129)
7.5	船闸水力学模型试验 .....	(130)
7.6	升船机水力学模型试验 .....	(131)
7.7	中间渠道通航水力学模型试验 .....	(131)
<b>8</b>	<b>泥沙模型试验</b> .....	(132)
8.1	基本资料 .....	(132)
8.2	模型设计 .....	(132)
8.3	模型制作 .....	(134)
8.4	模型验证试验 .....	(134)
8.5	内河泥沙模型试验 .....	(134)
<b>9</b>	<b>船舶模拟试验</b> .....	(137)
9.1	基本资料 .....	(137)



9.2	模型设计	(137)
9.3	模型制作	(137)
9.4	模型验证与率定	(138)
9.5	船模航行试验	(138)
9.6	船模泊稳试验	(139)
<b>10</b>	<b>试验设备和测量仪器</b>	<b>(140)</b>
10.1	一般规定	(140)
10.2	供水与控制设备	(140)
10.3	专用水槽和设备	(140)
10.4	水动力模型试验仪器设备	(141)
10.5	泥沙模型试验仪器设备	(141)
<b>11</b>	<b>数值模拟</b>	<b>(142)</b>
11.1	一般规定	(142)
11.2	水流运动数值模拟	(142)
11.3	波浪运动数值模拟	(143)
11.4	泥沙数值模拟	(143)
11.5	船舶操纵数据模拟	(144)
11.7	模拟验证	(144)

# 1 总 则

**1.0.2** 本规范水动力主要指径流动力、潮流动力和波浪动力。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 传统上模拟研究是以物理模型为主的,因为它比较直观,能较好反映复杂的边界条件和水流泥沙条件的影响。数值模拟对解决一些重复量大、模拟水域大的工作时效率高。在应用时要根据工程的需要采取不同的模拟手段,对重要工程可以采取两种模拟手段,互相补充、验证,发挥各自的特长。

### 3.3 物理模型制作精度

物理模型制作精度包括地形制作精度、水工建筑物模型制作精度和船模制作精度,本节中的水工建筑物不包括各种堤坝,堤坝的制作精度要求同地形的精度一致。对于有特殊要求的水工建筑物模型其制作精度要求在本规范其他条款中另行规定。

## 4 内河水动力模型试验

### 4.1 基本资料

4.1.2 地形图的陆上地形包括常年洪水位以下能淹没到的道路、房屋、沿江等跨临河设施的平面位置与高程。常年洪水位是指经常发生的洪水水位。

4.1.5 已建的建筑物引起的局部冲淤资料主要指研究河段已有建筑物条件下局部冲淤地形图及有关的水文泥沙等资料,也包括拟建的建筑物局部冲刷专项研究成果。

### 4.2 模型设计

4.2.3 对于桩基码头,若以模型几何比尺缩小桩柱,则由于模型雷诺数的减小而导致模型与原型桩群阻力系数不相等,使模型与原型之间桩柱阻力不相似。式(4.2.3)是满足桩群阻力的相似条件。

4.2.4 本条是内河水动力模型设计需符合的限制条件。

4.2.4.1 垂直几何比尺  $\lambda_n$  的限制条件是模型满足阻力平方区的要求。

4.2.4.2 要求模型水流的雷诺数应大于 1000,是保证模型水流处于紊流状态,避免模型与原型无法做到水动力相似。

4.2.4.3 本款规定旨在消除表面张力的影响。模型的最小水深需大于 0.015m,考虑模型加糙物的影响和流速测量的要求,规定模型航槽中的水深不宜小于 0.03m。

4.2.4.4 一般情况下,制作模型材料采用水泥浆粉面压光拉毛或模型床面铺上模型沙时模型糙率约为 0.014;当在床面采用密排或有间距加糙时,模型糙率最大约为 0.030。

4.2.4.5 关于变率界限值问题,目前尚难通过理论分析作出明确规定,所建议的界限值是以国内大量内河航道及港口的模型试验经验所确定,就模型的发展而言,变率有变小的趋势。

4.2.5 模型进口非试验段的长度与其上游段的河势有关,一般情况下,规定非试验段为水流的自动调节段,以保证工程区的水沙运动与原型相似。出口段受尾门的影响,同样也需要有一定的长度消除其影响。其长度的规定是根据上述原则并总结大量河工模型试验经验所确定。

4.2.7 本条第 1 项规定原型各级流量的糙率是根据实测的水位和流量,按稳定渐变流方程式试算求得。

本条第 6 项规定模型加糙后,需保证枯水水深及过水断面面积与原型相似,在采用无间距加糙时,用加糙颗粒填铺并与两断面齐平,则能保证模型水深及过水断面面积与原型相似;当采用有间距加糙时,目前尚无可靠的计算方法确定所占模型水深和过水面积,所

以一般采取在航槽中或枯水主槽河床内以颗粒密排加糙,其他部分以有间距加糙。

### 4.3 模型制作

4.3.1 制模导线网布设的技术要求,主要根据各有关单位多年的实践经验而提出。模型一般采用断面板法制作,三角导线网控制平面位置,相对水准系统控制高程。

### 4.4 模型验证试验

4.4.1 山区河流一般滩段落差较大,水位允许偏差大于平原河流。

4.4.2 模型与原型水流都具有紊动和不规则性,有时个别点的偏差较大,难于定出合适的范围。模型试验实践经验表明,断面垂线平均流速分布曲线的形态需要与原型相近,实测流量偏差的规定是以原型测量的精度为依据。

4.4.4 根据汊道河段试验的经验,通常因支汊的分流量所占百分数很小,一般在10%以内,尽管测量误差不大,但仍会导致分流比有较大的误差,所以本规范只规定主汊的精度,而未规定支汊的分流比量测精度。

### 4.5 水流运动试验

本节系根据多年来对长江、川江、西江、松花江、赣江、闽江、乌江等河流滩险整治、港口工程和桥渡等工程的试验研究经验制定。由于工程方案试验牵涉的问题较多,本节仅按滩险特性,整治工程的作用,通航工程的设计要求及运用条件,规定了三类工程的试验流量、观测内容的一般原则等。

4.5.7 20世纪60年代以来,我国在通航河流上修建了一批水利枢纽,如葛洲坝、西津、丹江口等工程,本条是根据枢纽工程大量的模型试验和工程实践经验制定的,试验中除需注意常年回水区碍航问题的治理外,还需特别重视库尾变动回水区航道的治理措施的研究。

4.5.8 枢纽运行对下游河段航道的影响,主要考虑枢纽电站日调节调峰运行下泄不稳定水流,会使下游航道水量频繁变动,一天内水位变幅较大,航道水深多变,船舶难以正常行驶,常易造成冲漂和搁浅等事故,对航行船舶带来安全隐患,故需以电站日调节最不利方式为重点进行试验。

枢纽下泄非恒定流对坝下河段的影响范围主要与电站运行方式、下泄流量及出流过程、河道形态等多个因素有关,难以定量表达。本条的坝下河段是指枢纽下泄非恒定流后,引起枢纽下游流速增减和水位波动幅度较大,影响船舶安全航行的河段。

4.5.9 近年来,桥渡工程模型试验的主要目的是为桥渡工程通航安全影响论证提供依据,重点要求观测桥区河段工程前后的流速及其分布、流向、流态等资料,用于分析桥位和桥跨布置的合理性。对于某些斜流强度大、流态紊乱的河段,仅凭水流资料的观测和分析难于对桥跨布置的合理性作出正确的判断时,需要结合船模进行试验研究。

本条的最不利通航流量是指对船舶航行影响最大的流量,一般根据现场调研、模型水流特性试验结果综合分析确定。

## 5 潮流水动力模型试验

### 5.2 模型设计

**5.2.3** 本条为确定模型范围的原则。

**5.2.3.1** 在模型水流进出口与试验段中间规定加过渡段,使模型水流经过过渡段调整到试验段,能保证模型试验段水流运动相似。根据模型选择的生潮方式、模型潮流进出口段宽度及扩展程度、模型生潮方向与潮流间夹角大小等多种因素综合确定过渡段长度。在开敞式海域模型,边界人为处理较多,为便于模型边界情况的调整过渡段需要长一些。

**5.2.3.2** 模型试验段的范围与模型试验方案的范围、设计工程对水流影响的程度、模型流速、工程附近的自然条件等因素有关,本款规定是按试验影响范围最小的原则确定的,使用时需按具体情况确定。

**5.2.4** 本条为确定模型几何比尺的原则。

**5.2.4.1** 海岸与河口潮流模型要求试验范围都很大,而水深较小,一般要求水平比尺都很大,如采用正态模型,则模型水深就很小,难以保证模型水流流态和流场的相似,因此模型一般做成变态。模型变率随研究问题的性质、研究范围大小、模型加糙的可能性等因素确定。根据国内外经验,局部模型变率较小,整体模型变率较大,有的河口海域模型变率超过10,因此,本款规定定床模型的变率为3~10。

**5.2.4.2** 根据实践经验,局部模型平面几何比尺一般不大于600,整体模型平面几何比尺一般在1000以内。

### 5.5 潮流运动试验

**5.5.2** 大潮潮差大,相对水流动力强,工程前后差异较大,较易反映流场和地形对潮流的响应特性,因此推荐选用实测大潮潮型作为代表潮型。对于潮差大的地区或某些重要工程,增加实测中、小潮潮型作为代表潮型;在河口段的重要工程采用洪、枯季实测大、中、小潮潮型作试验的代表潮型,以反映不同季节不同潮型的潮流场变化。

**5.5.3** 为避免水流脉动的影响和观测误差,提高试验结果的可靠程度,条文规定每组试验需重复观测2次,当2次测验结果误差大于10%或超出观测误差范围时,要进行第3次重复测验,并分析产生偏差的原因,取接近的2次结果的平均值作为测验结果。

## 6 波浪水动力模型试验

### 6.2 模型设计

**6.2.1** 波浪物理模型试验选用正态模型的规定,是为满足模型与原型的几何、运动、动力和边界等条件相似所要求的。

**6.2.4** 本条是波浪水动力几何比尺及模型的原始入射波需满足的要求。

**6.2.4.2** 为保证模型试验成果的可靠性、减少试验模型的缩尺影响,设计模型时尽量采用较小的模型比尺。条文中对不同试验内容给出了模型比尺的限值。当选择的模型比尺过大时,模拟的原始入射波高和波周期过小,水的黏滞力和表面张力将起显著作用,不能满足重力相似准则,同时也会严重影响试验的测量精度,故 6.2.4.3 款对波浪模型试验中的原始入射波高和波周期给出了限值。

**6.2.6.4** 模型波浪作用时间需要由风暴浪持续时间来确定,我国沿海主要大浪产生的原因主要为冬季风和夏季台风,冬季风持续时间通常为几天,而台风持续时间一般为一至两天,其中大浪过程一般为 2h 左右。根据我国各海洋站重现期波浪周期特征,模拟 1000 个波基本满足原型作用时间不少于 2h。同时,根据试验观察和现场资料分析产生结构破坏及较大越浪通常由波列中个别大波产生,而最大波浪的出现概率及量值大小与模拟波个数有一定关系,直接影响到结构稳定性和越浪爬高结果,由于不重复的随机波列的波个数会直接影响试验结果,因此模拟波列不少 1000 个波。

### 6.4 模型率定试验

**6.4.2** 波高分布相似性对试验结果有明显影响,故波高分布也要与原型相似。条文中的 1% 累积频率波高、有效波高与平均波高之比的允许偏差,是对波高分布相似的基本要求而规定的。

国内外多采用线性叠加法模拟多向不规则波。大连理工大学的研究表明,一般的双叠加法所得波浪在空间上不均匀,且不符合各态历经性的要求。单叠加法基本上能满足空间均匀性和各态历经性的要求,而频率方向对应法所得波浪的空间均匀性好,故在多向不规则波数值模拟和制作造波机的驱动信号时,建议采用频率方向对应法,也可以采用单叠加法。

工程设计中,一般认为波浪方向可分布在主波向两侧各  $90^\circ$  的范围内。但当波浪方向分布较窄或某些方向受到陆地等掩护时,需恰当地选定波浪分布的范围  $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$ ,还需把无波能传来的方向排除。

条文中频域分割数  $M$  和方向分割数  $I$ ,依据的是大连理工大学的研究结果。条文中

的频域,也可以采用不等量分割。

## 6.5 波浪运动试验

**6.5.2** 本条是波浪传播与变形整体模型试验需满足的要求。

**6.5.2.1** 原始入射波的测波点需放在水深较大、波形较平稳处。若模型较宽、沿横断面上波高不均匀时,多设测波点,取各点实测波高的平均值代表原始波高。为避免各波高传感器的相互干扰,故对测点间距作了限制。

**6.5.2.2** 本条所指的比波高为测点波高和原始入射波高之比,对于不规则波,则为同一累积率的测点波高与原始入射波高之比。

**6.5.2.3** 采用单向波合成法进行多向波模型试验,是在没有多向不规则波造波机设备,而又需进行多向不规则波的传播与变形等试验的情况下提出的一种替代办法。附录 C 指的是用单向不规则波进行多向波合成模型试验,若采用规则波,除划分不同波向外,每一波向还需划分不同频率进行试验,然后合成。

**6.5.3** 本条是波浪影响的港内水域平稳度整体模型试验需满足的要求。

**6.5.3.2** 试验中采用规则波时,当波浪传至直墙式建筑物处,会产生反射波,入、反射波叠加后波面振幅在波腹处最大,波节处最小,故要求增设的测波点放在波腹处测最大波高。

**6.5.3.4** 长周期波以及波群在港域内引起共振时,船舶的泊稳条件将急剧恶化,试验中要注意观测,并研究避免产生共振的措施。

**6.5.4** 船行波属于重力波范畴的一种水面波动,故其模型按重力相似进行设计。天然水域中船行波波高一般较小,为了保证试验精度,其模型比尺不能取得太大。南京水利科学研究院在研究运河中船行波时取模型比尺为 25。为研究其比尺影响曾对特定船型进行了对比试验,认为比尺为 15、25 时所得结果基本一致,而比尺为 50 时结果偏小过多。美国海岸工程研究中心以及荷兰 Delft 水工试验室等单位研究船行波对护岸建筑物作用试验的模型比尺取 10~25。

研究船行波对护岸建筑物的作用时,如采用拖曳或自航船产生的船行波很小、试验存在困难时,可采用造波机产生船行波。

**6.5.6** 本条是斜坡式建筑物断面模型试验需满足的要求。

**6.5.6.1** 波浪对建筑物累计作用时间是根据我国沿海暴风浪或一个台风过程的持续时间定出的。

**6.5.6.4** 测量斜坡面上的波压力主要是为建筑物结构设计提供波浪荷载,故需给出沿坡面各测点的最大压力分布。

**6.5.7** 宽肩台式抛石防波堤设计断面稳定性试验,需从高水位到低水位,又从低水位到高水位往复进行。每一水位情况下的波浪作用时间,以防波堤断面的变形不再发展为准。

**6.5.8** 在分析直墙上的波压力和墙底上托力时,视试验要求给出结果。为校核直墙的稳定性时,给出水平力最大时同步压力以及建筑物滑动稳定安全系数最小时的同步压力分布;当墙身结构设计需要时,给出各点最大压力分布。



**6.5.9** 本条是越浪量和波浪爬高试验需满足的要求。

**6.5.9.2** 研究表明,单个波的单宽最大越浪水量( $\text{m}^3/\text{m}$ )对建筑物结构的安全至关重要,有条件时,需进行单个波的越浪水量的测量。

**6.5.10** 测量桩基、墩柱式建筑物上波浪力时,为了分析波浪力,需在水槽或水池中模型同一断面处测定波面。

**6.5.11** 设计带梁板透空建筑物时,遇到的主要问题是确定波浪对梁板的上托力,为了使梁板和波面之间空腔中的压缩空气有个出路以减小上托力,常在面板上开设泄压孔,试验中要予以模拟。但如直接按几何比尺模拟,每个孔的尺度可能很小,其泄压效果难与原型相似,需根据具体情况加以处理。

## 7 通航建筑物水动力模型试验

### 7.2 模型设计

**7.2.2** 本条是通航建筑物水动力模型几何比尺需满足的要求。

**7.2.2.1** 模型几何比尺的选择,是根据国内外已建成并做过整体模型试验的 20 余座有通航建筑物的枢纽工程试验资料统计分析而得。

**7.2.2.2~7.2.2.4** 此三款所列的各类模型比尺的范围,是根据国内外已有的船闸水力学各类模型试验资料统计而得。近百年的船闸建设历史表明,这些比尺范围的模型试验成果均被原型船闸证明是可信的。

**7.2.2.5** 推荐的模型几何比尺是根据国内外升船机水力学模型试验总结出来的。

**7.2.2.6** 根据国内外中间渠道模型试验经验,考虑到船闸输水廊道模型尺度及船模要求,提出对大型工程几何比尺为 20~80,中小型工程取 10~50。

**7.2.4** 本条是升船机水动力模型设计需满足的要求。

**7.2.4.2** 由虎克定律可知,在符合重力相似准则情况下,变形量比尺为模型几何比尺  $\lambda_L$ ,力的比尺为  $\lambda_F$ ,所以弹性系数比尺  $\lambda_K = \lambda_F / \lambda_L = \lambda_L^2$ 。由作用力和弹性系数可得钢丝绳变形量,根据求得的变形量即可按弹簧或弹性构件变形公式设计弹簧或弹性构件。

**7.2.5** 电站日调节时,正、负波在原型河道中的衰减很慢,可以传递上百公里。而枢纽通航模型的上下游河段不可能做得很长,模型的进出口将会对波动产生反射,进而影响测试结果。因此,当调峰时间短时,需要在反射波到达试验段之前结束测试;当调峰时间较长时,在模型的进、出口设置消波措施。

**7.2.6** 本条是根据国内有关单位进行模型试验的经验总结出来的。引航道中往复波流的影响要超过引航道的长度,因此规定口门外水域要有一定的长度以免影响流态。

### 7.3 模型制作

**7.3.4** 规定进行阀门启闭力及流激振动的局部模型不能设置侧向止水,是因为止水的摩阻力与原型不相似,增加止水后的振动特性也与原型不相似,为了减小漏水影响,阀门两侧与廊道边壁都要精加工,使其缝隙尽量小。

### 7.4 枢纽通航整体模型试验

**7.4.4~7.4.6** 条文中的试验内容是根据国内枢纽通航工程整体模型试验总结出来的,具体内容根据实际工程的需要而定。

(1) 枢纽中通航建筑物不同布置方案是指,如左右岸布置,即使在同一岸有通航建筑

物轴线与坝轴线交角和导航堤型式不同等,都会造成通航建筑物的进出口河道水流收缩或扩大,使水流弯曲变形,产生流速梯度,形成斜向水流。由于斜向水流的作用,产生回流,横流和回流使航行船舶或船队产生横漂和扭转,影响通航,因此要对通航建筑物在枢纽中的布置进行通航水流条件的试验;

(2) 枢纽泄洪通航水流条件试验是指,研究不同泄洪流量和闸门不同开启方式对通航水流条件的影响;闸门的开启方式有集中开启、分散开启和均匀开启等多种组合;

(3) 由于电站日调节时流量变率较大,产生的长波向上游或下游方向传递,传递速度快、衰减慢和距离长;在传递过程中水面的降落和增高及产生横流将影响通航水流条件,因此要进行试验;

(4) 船闸灌泄水时流量变化在引航道中产生往复波流运动,这种波流运动影响引航道和口门区的通航水流条件,同时会对船闸闸门产生反向水头,影响闸门运转;船闸灌泄水有多种水位组合,一般取最大水位差的水位组合进行试验;

(5) 枢纽的运行方式中,枢纽泄洪、船闸灌泄水和电站日调节可以有多种组合。当电站日调节与船闸灌泄水同时运行时,各自产生的长波运动,会造成波的叠加;当枢纽泄洪与电站日调节联合运行时,会增加或减小口门区及连接段的水流流速和水面比降,往复波流和长波也会叠加,有可能比单独运行更危险,所以要进行不同组合的试验。

**7.4.10** 枢纽通航中船舶的航行条件,采用遥控自航船模试验能更直观地反映航道水流条件和边界条件对船舶航行的综合影响,并能反映船舶与水流的相互作用。通过船模航行参数的观测,可以分析航行状态和航行条件的优劣,能衡量工程设计方案是否符合要求。目前国内的大、中型的枢纽通航工程模型试验中,作为衡量通航水流条件的一种方法和试验手段,遥控自航船模已得到广泛应用。

## 7.5 船闸水力学模型试验

**7.5.1 ~ 7.5.5** 船闸水力学模型试验的内容和方法是根据国内外有关科研单位多年模型试验总结出来的,有以下几点:

(1) 闸室灌泄水水力特性曲线是指阀门开度、流量系数、闸室及阀门井水位、流量和能量等随时间的变化曲线,如为集中输水系统则还有比能及闸室断面平均流速随时间的变化曲线;

(2) 进水口流态是指进水口处水面的局部降低和漩涡情况,出水口流态是指出水口处水面壅高、旋滚和回流情况等;

(3) 由于进水口水流流态在一定的边界条件下与流量和进水口淹没水深有关,因此规定了除在设计最大水位差外,还要在淹没水深最小的上游最低通航水位条件下进行试验。由于漩涡水流模型与原型存在缩尺影响且模型结果偏于不安全,因此除进行非恒定流试验外,还要在最大流量的恒定流条件下进行试验;

(4) 当船闸原型阀门开启时间在 4min 以上,阀门开启速度较慢,流量增率较小,或输水系统廊道长度较短时,此时惯性影响不大,故可以采用恒定流减压模型试验;

(5) 阀门非恒定流减压模型能真实反映阀门动水启闭过程中所产生的廊道水流惯性

作用,正确模拟阀门的水流流态及空化现象,是一种较先进的模型,但其设备比较复杂;

(6)人字及三角闸门处在全开位时推拉杆受力为零,因此以此位置为基线。

## 7.6 升船机水力学模型试验

**7.6.1** 升船机水力学模型试验内容系根据国内外试验研究经验制定的。执行时注意以下几点:

(1)对于双面斜坡船厢连续运转通过坝顶时,由于卷扬机和链条机或摩擦机构之间衔接存在误差及其他原因,致使船厢运行速度突然变化,导致厢中水体波动和船舶系缆力增大,所以需对船厢连续过坝顶问题进行试验;

(2)升船机在运行中如突然发生事故紧急制动,致使厢中水体波动和船舶系缆力过大,因此要通过试验确定合理的事事故制动减速度。

**7.6.2** 本条是升船机水力学模型试验方法需满足的要求:

(1)厢底沿纵轴线和厢一侧布置测点是根据船厢或厢池中水力参数以纵轴线为对称的特性确定的;

(2)运行中的船厢内水体波动、船舶系缆力与起制动加减速度和速度变化有关,牵引机构速度的变化与船厢的实际运行速度有时会有差异,因此规定在船厢上安设测速装置,是为了准确测定船厢实际运行速度及其变化。

## 7.7 中间渠道通航水力学模型试验

**7.7.1** 本条是船闸灌泄水和升船机船厢出入水时中间渠道通航水流条件模型试验需满足的要求。

(1)中间渠道是连接两座通航建筑物的限制性航道,当升船机船厢出入水或船闸灌泄水时将在中间渠道内引起波动,影响船舶的航行和停泊条件;如国外某双线双级船闸,在某些运行工况下渠道内产生的波动最大振幅达0.6m,有时使停泊于码头的船舶缆绳断裂;渠道内水体波动造成人字闸门处出现正向或反向水头,使闸门有时不能开启或自动打开;因此,有必要对中间渠道存在的水力学问题进行试验研究;

(2)中间渠道内水体波动呈周期性往复运动,波动需较长时间衰减才能达到水面趋于平静;因此在试验中船闸输水结束或船厢出入水停稳后,还要继续观测一段时间。

**7.7.3** 观察船模航态是指波动对船模航向、航速的影响和船模触底情况,船行波试验中发现,当浅水、高速边航时,船首波呈横向推进,冲刷岸坡,反射波使船模横倾并被推向河心,操纵困难,影响船模航速,有时还会发生船模碰底现象。

## 8 泥沙模型试验

### 8.1 基本资料

**8.1.3** 海岸与河口天然泥沙输移复杂,有悬沙输移、底沙输移或两者兼有,底沙又包括推移质与悬移质中的床沙质。悬沙和底沙运动是海岸与河口在潮流、波浪作用下常见的泥沙输移形式。研究的问题如港口布置、航道淤积、河口及拦门沙整治、海岸的防护等都会遇到不同的泥沙问题,故需根据泥沙输移的性质与需解决问题的实际情况,搜集与测量相关的资料。

### 8.2 模型设计

**8.2.1** 20世纪50年代后期,南京水利实验处通过长江浦口河段推移质动床模型试验,对推移质泥沙输移相似,进行了全面的研究,得到较为完善的推移质泥沙输移的相似条件。自此以后,为解决川江、湘江、汉江、西江、松花江及闽江等河流航道整治,葛洲坝与三峡工程的航运泥沙问题,进行了大量的推移质泥沙模型试验,于此推移质泥沙输移相似准则又得以进一步完善,并积累了丰富的实践经验。本条规定是以这些成果的概括为依据。

**8.2.2** 选择模型沙时尽可能使起动流速和糙率同时满足阻力相似和重力相似条件。然而动床模型中对于不同流量级要使两者同时满足往往是困难的,因而需针对实际问题进行考虑。对航道整治工程、防洪工程需分别使中枯水、洪水流量满足阻力相似和重力相似条件,对其他流量级可通过调整流速比尺使得阻力相似得到满足,而重力相似有所偏离。为了使模型沙各粒径的泥沙起动流速与原型沙相似,尽可能使模型沙级配曲线与原型沙相平行。但当原型沙、模型沙起动特征不同,或宽级配床沙中粗颗粒、细颗粒泥沙由于起动特征不同时,原型沙与模型沙级配曲线不能“平行”处理。

**8.2.4** 细颗粒推移质粒径比尺 $\lambda_d$ 确定的方法,是以国内各研究单位进行大量的推移质泥沙动床模型试验实践为依据。粗颗粒泥沙模型,模型沙粒径比尺由起动流速相似条件

确定,一般选择粗颗粒泥沙起动流速一般表达式: $V_0 = K \left( \frac{h}{d} \right)^y \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d}$ ,并写成比尺关系,

联解式(4.2.1-3)及式(8.2.1-1),便可确定模型沙粒径比尺 $\lambda_{d_0}$ 。对于细颗粒泥沙,模型与原型难于用同一起动流速公式所表达,可分别选用合适公式计算 $V_{0p}$ 与 $V_{0m}$ ;当原型沙无合适公式计算 $V_{0p}$ 时,一般收集原型流速与输沙率资料,采用输沙率延伸法确定 $V_{0p}$ ,由此得到 $\lambda_{v_0}$ ,并需同时满足式(8.2.1-1)和式(4.2.1-3),否则需调整模型沙重率 $\gamma_m$ 进行试算,直至满足要求为止,模型沙粒径比尺 $\lambda_d$ 则可确定;当难以找到模型沙重率 $\gamma_m$ 同时满足式(8.2.1-1)和式(4.2.1-3)时,一般允许起动相似稍有偏离,粗、细颗粒间的模型

沙粒径比尺  $\lambda_d$  采用插值处理,以保证模型沙颗粒大小的连续性。

**8.2.5** 当原型推移质为卵石夹沙时,其粒径范围很广,工程试验河段一般无实测资料,本条规定的处理方法,是国内众多研究单位在沙卵石推移质动床模型试验中常用的方法,实践证明其能基本反映实际情况。

**8.2.6** 川江王家滩、小南海—渣角浅滩航道整治及三峡工程变动回水区洛碛—长寿河段卵石推移质泥沙动床模型试验中,定床岸壁和露出枯水面的边滩部分,分别采用颗粒有间距与无间距排列加糙,调整模型综合糙率,成功地兼顾高、中、低各级流量。对沙质推移质泥沙模型,如松花江三姓浅滩、绥滨浅滩、西江龙圩水道等,其糙率随水位变化较小,在岸壁、洲滩及岛屿固定部分仍采用上述方法加糙调整综合糙率,各流量级的水面线验证均获得成功。当某些平原河流糙率随水位变化较大时需考虑工程的主要要求进行设计,如防洪问题的模型试验以洪水为主,航道整治问题以整治流量进行模型设计,其他流量级允许重力相似条件有所偏离,获得了较为满意的工程效果,所以本条规定以此为由而定。

**8.2.9 ~ 8.2.11** 此三条规定了悬移质模型沙的选择原则和基本方法,在执行时需注意下列的问题:

(1) 模型沙的重率为已知,一般先按沉速相似的要求得出模型沙的粒径( $d_m$ ),并选择有黏结力作用的起动流速公式计算原型各级流量的起动流速,考虑起动流速比尺  $\lambda_{v_0} = \lambda_v = \lambda_{11}^{\frac{1}{2}}$  的要求可求得模型沙要求的起动流速( $V'_{om}$ ),再由沉速相似选用的模型沙,以合适的起动流速公式计算模型相应流量级的  $V''_{om}$ ,如  $V'_{om} \approx V''_{om}$  时,则选用的模型沙需满足沉速和起动相似的要求;反之,另选择模型沙进行反复计算直至达到相似要求为止;此时所确定的模型沙,结合模型岸壁加糙,近似地满足模型综合糙率( $n_m$ )的要求;

(2) 细颗粒泥沙之间相互受吸引的作用而凝聚到一起,呈团粒状态,称为絮凝;其沉速增大,故条文规定模型设计需以絮凝粒径为依据;

(3) 泥沙沉速比尺由研究的具体问题来确定;根据有关研究,一般依据泥沙扩散理论,按原型沙悬浮指标确定:

当悬浮指标  $\omega/Ku_{*c} < 1/16$  时,模型主要满足沉降相似式(8.2.11-1),考虑重力相似条件,以此式确定沉速比尺  $\lambda_{\omega}$ ;

当  $\omega/Ku_{*c} > 1$  时,主要满足悬浮相似式(8.2.11-2),并以此式确定沉降比尺  $\lambda_{\omega}$ ;

当  $1/16 < \omega/Ku_{*c} < 1$  时,主要满足相似条件式(8.2.11-3)的要求,按该式确定沉速比尺  $\lambda_{\omega}$ ,指数  $m$  可取  $3/4$ ;

(4) 低水头水利枢纽和通航枢纽为径流式枢纽的引航道、挖入式港池和盲肠运河港池等处的泥沙淤积为异重流和回流所造成,从淤积物的取样分析结果可知,异重流淤积多为冲泻质所形成,回流的淤积多为床沙质。根据这种实际情况和模型试验结果,故条文规定此类泥沙模型试验需进行悬移质和推移质的内河全沙动床模型试验。若冲淤时间比尺难于统一时,需以悬移质泥沙冲淤时间比尺进行放水试验。

**8.2.15 ~ 8.2.21** 潮流泥沙模型设计与试验是运用泥沙输移理论,合理分析原型床面演变规律与泥沙输移形态,正确选择模型沙以及良好的运行操作的综合过程。模型先按已掌握的资料、知识和必要的辅助试验进行初步设计,在验证过程中允许有修改,完成验证

即完成最后的设计。

**8.2.23 ~ 8.2.27** 波浪潮流泥沙物理模型与潮流泥沙物理模型相比增加了波浪动力,该波浪动力的作用是掀起床面泥沙并使之参加潮流运动,使工程水域水体含沙量增加,引起泥沙冲淤的变化。如何在变态的潮汐模型中模拟波浪动力条件以及波浪对建筑物的作用不致因模型变态而使局部水域地形发生失真,是模型设计的关键。

波浪潮流泥沙物理模型中,为保持波浪的正态,令波浪的波长比尺等于波高比尺,其波高比尺与其水深比尺相等,使得模型中波浪的波动速度、波浪传质速度、波浪产生的沿堤流速度、破波水深等均与潮汐水流动力条件、模型垂直几何比尺保持相同的关系。使波浪的动力条件能在潮流泥沙模型中复演,达到两者一致的目的。为减小模型中建筑物对波浪的反射、折射作用,按不同部位对建筑物的边坡进行调整,或采用消能材料处理。

### 8.3 模型制作

**8.3.1** 在执行本条规定时需注意:根据历年实测地形资料或水力计算估算工程对河床或海床最大冲刷深度,模型槽底高程需低于最大冲刷深度 5cm ~ 10cm。动床模型制作完成后,为了提高模型预测精度,需对刮制的地形进行复测,因而提出了动床地形的控制精度,其精度要求与定床一致。

### 8.4 模型验证试验

**8.4.4 ~ 8.4.6** 悬沙定、动床验证试验条文的规定,是根据国内各研究单位和高等院校进行模型验证试验的小结和概括,包括验证资料的选用、试验的内容和要求,以及试验和步骤都作了具体的规定。认真按规定的要求做好验证试验,既是确定模型水流运动、河床冲淤与原型相似的依据,又是做好水流特性和工程方案试验的前提条件。

**8.4.9** 模型潮型采用大、中、小潮的组合,模型试验时间较长。根据若干潮汐河口泥沙模型试验的经验,小潮造床的作用微弱,可以忽略。选用大潮或者大潮与中潮的组合也可达到冲淤地形变化的相似,故模型可选用大、中潮的组合,但此时要估算一个大潮、中潮的组合相当于多少个平均潮的作用,以便决定模型冲淤变形的试验时间。决定冲淤时间后,计算试验的加沙量。每次试验结束后,测量模型地形,并与原型实测数值比较,如果符合第 8.4.10.4 条要求,则模型动床验证完成。

### 8.5 内河泥沙模型试验

**8.5.3** 本条根据 60 多年来我国在众多河流浅滩整治方面的实践和试验研究经验而制定。对浅滩整治工程方案动床模型试验有关的问题说明如下:

(1) 对于沙质浅滩的整治工程试验,重点是研究枯水整治建筑物布置,加强落水期冲刷作用。对于一些卵石或沙卵石浅滩,因其结构紧密,不易冲刷,需结合疏浚措施,以建筑物防淤维护航深;

(2) 浅滩整治工程实践经验表明,由于工程对沙质河床、卵石及沙卵石河床的冲刷平衡完成的时间不同,所以沙质浅滩与卵石浅滩需分别选择一个和两个枯水水文年的水沙

过程进行放水试验,才能得到冲刷平衡时的航深;

(3) 整治建筑物调整水流冲刷河床之作用以整治水位(流量)级为最强,故浅滩整治工程方案试验以此级流量为重点,设计流量级是判断浅滩整治效果的关键流量级,也需作为重点。

**8.5.4** 本条规定是以葛洲坝、三峡工程及丹江口库尾推移质泥沙淤积对航道的影晌试验研究成果为依据,试验需注意的问题说明如下:

(1) 变动回水区的上段,泥沙淤积以卵石推移质为主;条文规定需进行动床模型试验,才能使卵石运动保持连续性并得以及时补给,使河床冲淤达到相似;

(2) 变动回水区的浅滩因水库汛末蓄水,破坏了自然情况汛后落水冲刷的规律,待来年汛前水库水位消落时才发生冲刷,此时入库流量小,冲刷不力,从而造成变动回水区上段卵石推移质呈缓慢地累积性淤积,对航道造成影响,试验时需根据水库运用的具体情况选用水文系列年进行放水、加沙;

(3) 库尾卵石动床模型做正态模型放水试验时间太长,选沙也有困难,故需作变态模型,其模型沙的选择也较为方便,放水历时较短,才有可能完成长系列水文年的试验任务;

(4) 水库回水变动区上段卵石浅滩整治工程方案试验方法,同一般浅滩。

**8.5.5** 执行本条规定时需注意的问题说明如下:

(1) 坝下游河段冲刷,逐渐向下发展,历时长、影响距离远,需在长河段、长历时数值模拟冲淤变形计算成果基础上选取对航道有严重影响的河段进行模型试验;

(2) 动床模型需按建库前的河床地形及覆盖物制模,铺沙厚度按实测资料分析确定;

(3) 近坝河段河床覆盖层多为沙卵石所组成,如研究冲刷对航道的影晌,需以卵石的冲淤时间比尺放水试验。而宽级配泥沙模型试验问题复杂,目前尚未得到统一的认识,有待于进一步研究。

**8.5.6** 通航河流上建桥后会直接影响其上、下游河段的水流与河床冲淤变形。对此,需按定床模型试验优化的一种桥位和1~2种桥式方案进行动床模型试验。研究建桥后其上、下游河段冲淤对航道的影晌,并采取整治工程措施使航道满足通航尺度要求。

**8.5.9** 一些山区河流和山前河段,洪、枯水主流摆动幅度大的汊流河段或边滩宽低的河段,因枯期水流坐弯,洪期水流取直,此时弯槽为回流缓流区而淤沙。汛后因水位降落很快,而淤沙得不到及时冲刷,洪水航槽水深又不足,造成洪、枯水航槽不能及时衔接而出现短期碍航的局面。由整治经验表明,只要掌握年内水流及泥沙冲淤呈周期性变化的规律,河床地形及其组成物的特点,在试验时采取使汛后落水提早走弯的工程措施,即可使问题得到解决。

**8.5.10** 本条文的规定,是国内已建和拟建水库泥沙模型试验经验的概括。在长系列水文年的试验中需注意下列问题:

(1) 有些大型水库泥沙淤积,需几十年或上百年才能达到平衡,当研究变动回水区泥沙淤积过程对航道的影晌问题时,为缩短试验时间,采用跳跃式放水试验,即开始按水文系列年连续施放水、沙20年后,就跳到30多年又连续进行5个水文年的试验,再跳至40多年再连续做几年试验,以此类推直至准平衡时为止;即可得出建库后变动回水区因泥沙



淤积调整河势的情况;对航道淤积的影响,需作出初步预报;经综合分析比较后,再考虑适当发展并留有余地,确定合理的坝高和蓄水水位的方案;

(2)当蓄水水位确定后,变动回水区的泥沙模型试验需按水文系列逐年施放水沙过程至水库运用初期、中期和准平衡时的后期;

(3)变动回水区泥沙淤积对航道影响及改善措施的条文规定,是以长江葛洲坝和三峡水利枢纽工程泥沙模型试验的经验为依据。由于葛洲坝水利枢纽工程的回水变动区,泥沙淤积对航道的影晌不大。三峡工程回水变动区泥沙淤积对航道影响则较为严重,采用推迟蓄水虽有一定的效果,但还不能使问题得到解决。采用高水整治经试验结果表明,可使航道的泥沙淤积基本得到解决,但尚需进一步研究。

#### 8.5.11 执行本条规定时需注意下列问题:

(1)枢纽上游的试验河段需有足够的长度,包括直段和弯段,试验结果表明,如试验河段过短,坝上淤积后河势的相似性差别较大,对此,在模型设计时需做充分的研究并确定试验河段的范围;

(2)通航建筑物轴线布置比较试验,是指不同通航线路的比较试验;

(3)有些高坝形成河道型水库,回水长达数百公里,进入坝区河段悬移质的颗粒很细,多为冲泻质转化;

(4)在水库运用初期,从已做的正态模型试验结果来看,由于使用的模型沙比要求值为粗,各年的淤积量有所增多,可缩短试验年限,以模型试验结果与数值模拟的淤积量和分布基本相同后,由此年开始,逐年进行试验。实践表明,水库运用初期,试验淤积的总量可达到与数值模拟成果相似,但淤积分布仍会有一定差别。因此在模型设计时,需充分考虑这些问题,最好不用变通的方法。

## 9 船舶模拟试验

### 9.1 基本资料

**9.1.2** 在船模率定所需资料中,船舶的工况是指主机功率及其相应的挡位。一般需要正常运行(即常车挡)的静水航速、一两个增或减挡的航速和允许最大功率挡的航速资料。

我国现有海轮大多都有实船标准操纵性试验资料、回转性能试验资料。而内河船舶的标准化程度低、船型多,多数船舶、船队缺乏实船的标准操纵性试验资料。当试验需要对船模进行操纵性率定时,根据实船试验资料,按“航行复演法”进行,并制定实船试验原型观测的工作计划。

**9.1.3** 风对船舶航行的影响表现为风对船舶吃水线以上船体、货物等产生风压力,从而影响船舶的操纵及其航行状态。为保证船模所受风压力与实船相似,要求船模与实船吃水线以上受风作用的面积及风压力分布相似,因此需要收集风况资料和船体上部结构、线型和甲板上货物堆放等资料的要求。

### 9.2 模型设计

**9.2.1** 由于几何变态的船模与实船的几何、动力及操纵性能相似程度较低,试验数据失真度高,如用于定量研究工程布置及其效果,可能会因与实际偏差较大而造成工程失败,因此要求船模需设计为几何正态。对于仅用船模开展方案定性对比的试验,如果相应的水动力定床模型只能设计成几何变态,则要求变率不大于3,变态太大会造成船模试验结果的失真度太高而不能采用。

**9.2.2** 船模总重量是限制船模比尺的重要因素。船模制作完成后,需要安装驱动设备和操作控制设备,有些船模还需安装遥测设备。如果比尺确定不当,有可能使得设备安装好后船模超重,无法满足排水量和吃水相似要求。因此船模比尺需根据船模和必须安装的各种设备的总重量确定。另外,要达到船模的吃水相似,还需要一定的配载,因此按照排水量比尺计算的船模总重需大于船模船体和各种设备的总重量,以便为配载留出一定的空间。

**9.2.4** 风对船舶的作用力主要表现为风压力,模拟风作用的相似主要是风压力的相似。压力相似即模型与原型的欧拉数  $E_n = Lg/U^2$  相似。按压力相似准则,即可得出式(9.2.4)。

### 9.3 模型制作

**9.3.2** 执行本条规定需注意以下问题:

(1)在风力和风向一定的前提下,风对船舶航行影响的大小取决于船舶的风阻面积;

因此在制作船模时,尽可能将船体水线以上所有建筑物和货物均制作出来,使船模与实船的风阻面积相似;

(2)几何变态的船模由于平面几何比尺与垂直几何比尺相差较大,使得平面尺度比垂直尺度相对要小;船舶的螺旋桨在垂直面作圆周运动,无法按几何变态比尺设计制作,只能设计制作成正态,比尺可选平面几何比尺 $\lambda_l$ 和垂直几何比尺 $\lambda_h$ 中的一种;由于内河船舶多为双桨,甚至三机三桨,轴与轴之间的距离由平面几何比尺确定,如果按照垂直几何比尺设计制作螺旋桨,则因螺旋桨的尺度相对较大而无法安装;因此规定船模螺旋桨需按平面几何比尺设计制作;尤其对具有隧道式尾型和蜗式尾型的内河船舶,螺旋桨只能按平面几何比尺设计。

## 9.4 模型验证与率定

**9.4.2** 船模航行试验重点研究的是船模的平面运动情况,要求船模操纵性达到相似,其中的回转性能是重要的相似指标,因此要求船模的水平转动惯量与实船接近。船模泊稳试验除研究平面运动外,还需要研究船舶的纵倾(摇)、横倾(摇),所以除要求船模的水平转动惯量与实船接近外,还要求船模的纵向和横向转动惯量与实船接近。需要在吃水率定配载时加以注意。

**9.4.3** 船模航行试验的相似条件主要以重力相似为依据,只能做到航速相似和操纵性能的基本相似。这类船模受尺度效应的影响,阻力系数偏大。为达到航速相似,需提高螺旋桨转速,继而又导致船模舵受力增大,舵效明显优于实船。船模操纵性的变化易使航行试验的结果偏于不安全。为减小尺度效应对通航船模操纵性的影响,一般采用减小舵面积的方法予以修正。目前常用的内河通航船模的舵面积需减小为原舵面积的0.6倍~0.8倍。

**9.4.4** 我国内河航道船型多,编队队型复杂,这些船舶或船队往往缺乏实船操纵性试验资料供船模率定。若为此组织实船进行标准的操纵性试验,耗资巨额,一般的工程项目无力承受,从而也影响了船模航行试验技术的开拓应用。对此,需要安排代表船舶或船队在通过研究河段时进行实船试验,观测航行过程中的船位、航速、舵角、主机工况等,然后在模型中采用“航行复演法”对船模进行尺度效应修正和操纵性率定。这种方法中的实船试验需要在船舶营运过程中间进行,耗资少、便于操作,有较好的实用价值。另外,我国近20多年来开展了大量的船模试验,从实践经验看,几何比尺和尺度类似的船模的尺度效应修正结果差别不大。对于既缺乏实船标准操纵性试验资料,又缺乏实船航行试验资料的船模,其尺度效应也可以按已有类似比尺和尺度船模的尺度效应修正方法修正。

**9.4.5** 原型的地面风是指离地平面10m~12m高的风,模型中风速测点的高度需与此高度相似。

## 9.5 船模航行试验

**9.5.1** 水动力特性试验是船模航行试验的基础,可以让船模操纵者了解试验区域的通航水流条件,更好地操控船模,提高试验的精度和重复性。另外,也可以通过水动力的变化,

判断工程实施前后对通航水流条件的影响以及工程效果的好坏。

**9.5.2** 这里所说的特征流量或特征潮型,是指不利于船模航行的流量或潮型。实际上,不利流量或潮型并不一定是最大通航流量或设计高潮,也不一定是最小通航流量或设计低潮,而是介于其中并具有一定范围的流量或潮位。这些特征流量或潮型是试验的重点。如内河航道的滩险整治试验通常以碍航流量为重点,而通航建筑物、港口工程和桥渡工程的通航条件试验则以产生最大斜向流的最不利流量为重点。因此需根据不同的试验目的选取不同的特征流量或特征潮型进行试验研究。而河口既有径流又有潮流,需要进行径流和潮流不利组合的试验研究。

**9.5.3** 船模航速不仅受船载电源和机械磨损的影响,还受试验水温的影响,因此,当温差变化较大时,需随时注意校验船模的静水航速。

**9.5.5** 由于影响船舶航行的因素众多,在进行工程方案船模航行试验时,需对河道或海床地形及其变化、水文条件及其变化、船舶航行情况、工程设计要点进行综合分析,合理概化试验条件,以提高试验研究成果的水平。为改善船舶航行条件,提高通航能力,除常规的改进工程设计外,还可以从船舶航行方式入手来探讨通航条件的改进方法,如航线的选择、驾引要领的改进、航速的调整等等。充分体现船模航行试验技术在研究航道、水流、船舶三者的相互影响、相互作用方面具有独到之处。

《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTS/T 231—4—2018)中,内河航道急滩、险滩整治工程船模航行试验时,对于不允许助推或绞滩的急滩段,规定如船模自航上滩的对岸航速小于换算后的原型航速 $0.3\text{m/s}$ 时,进行修改方案试验,多家模型试验单位反映, $0.3\text{m/s}$ 过小,通常采用 $0.5\text{m/s}$ 控制,为此本规范进行了修改。

## 9.6 船模泊稳试验

**9.6.4** 船舶六个自由度运动是指船舶的横摇、纵摇、艏摇、横荡、纵荡、垂荡称为船舶六个自由度运动。

## 10 试验设备和测量仪器

### 10.1 一般规定

10.1.1 针对不同的试验研究采用相应的基本设备和仪器。

10.1.3 模型试验选用的仪器需是正规生产厂家定型产品。如是研制产品,需通过相关部门的鉴定验收方可使用。在我国,水运工程专用仪器和设备一般批量不大,通常为某一单位生产或自制,并随研究的深入不断地改进。为不限制其发展,提出了试验仪器需经率定,其技术指标需满足试验精度和稳定性的要求,又能确保试验成果的质量。

### 10.2 供水与控制设备

10.2.1 本条循环供水系统主要用在试验厅及试验场地集中的区域内,修建永久性供水设备,通过平水塔稳定水压,泵房及数条管路配水,能够满足多个模型试验和供水的需求。

10.2.4 物理模型常用量水堰为矩形堰和三角堰,其计算公式在各教科书中均有阐述。执行本条规定时,需注意下列问题:

- (1) 堰高  $P$  与堰宽根据流量大小而定,堰顶水头在  $3\text{cm}$  至  $1/2 P$  之间;
- (2) 引水槽必须等宽,堰板垂直,顶部水平,堰板锐缘厚度不得大于  $1\text{cm}$  并与堰背呈  $30^\circ$ ;
- (3) 在堰板与水舌之间设置通气孔,下游尾水与堰顶高差需大于  $7\text{cm}$ ,可保证为自由流;
- (4) 消浪栅设置在堰板上游  $10$  倍最大堰顶水头以远处,使来水平稳无波动;
- (5) 测针孔需设置在  $6$  倍最大堰顶水头处,并连通至测针筒内,测读水位。

### 10.3 专用水槽和设备

10.3.1 目前国内的流速仪率定水槽分为上下两层,上层装量水堰板,下层装标准管嘴,总长为  $15\text{m} \sim 20\text{m}$ 。标准管嘴管径为  $20\text{cm}$ ,材料为铸铜,加工制造时必须保证加工精度及表面粗糙度。

10.3.5 执行本条时需注意下列问题:

- (1) 对试验水槽或水池的建造质量需严格把关,使其不致影响造波质量;
- (2) 在水槽或水池中进行波浪对建筑物作用的试验时,来自水槽或水池边界和建筑物模型的反射波传至造波机会产生二次反射波,它与造波机产生的波叠加,必将改变试验所要求的波浪条件。因此,试验中要采取措施消除或减小二次反射波的影响。

为消除和减小二次反射波的影响,对规则波采用间断造波法,即当造波机的二次反射

波将传至建筑物模型前就停止测试。对不规则波,通常把试验水槽隔成两条或三条的窄水槽,用一侧或中间窄水槽做模型试验。并在水槽中相对于造波机的另一端设 1:10 ~ 1:15 的缓坡,以消减波能,减小二次反射波。显然,设置反射波吸收器或安装无反射造波机等当是最有效的方法。

#### 10.4 水动力模型试验仪器设备

**10.4.2** 旋桨流速仪要求水质清洁,否则水中的发丝或青苔类纤维状污物将缠绕叶轮影响使用,根据使用经验,该仪器易受外界条件影响,故需定期在专用设备中进行率定。电磁流速仪抗干扰能力较差,要求水体中无漏电,探头附近无气泡流速流向测量仪需按下列条件选用。

**10.4.3** 作用于建筑物上的波浪力是动荷载,而波压力及总力传感器的率定,常是以静荷载为条件进行的。分析表明,只有当波浪传感器的自振频率大于被测力的自振频率 4 倍 ~6 倍时,所引起的误差才是可以忽略的。

#### 10.5 泥沙模型试验仪器设备

本节条文的规定主要根据国内科研院所、大专院校泥沙试验室资料及模型试验实践经验总结,并参照《泥沙手册》而制定。

**10.5.6** 光电测沙仪适用于泥沙粒径变化不大的场合,使用时必须首先进行颗分,再用试验用水及待测泥沙作为沙样标定曲线方可使用。

**10.5.7** 使用测针测定淤积高程时要注意放掉测点存水,并在地形下陷前迅速完成测量。超声波地形仪、电阻式地形仪、光电式地形仪,现已广泛应用,当淤积界面不清时,需首先设定以某一浓度作为淤积面调整好仪器,再进行测量。

# 11 数值模拟

## 11.1 一般规定

11.1.3 各种波浪数值模型均有一定的适用范围。当计算水域可划分为具有不同特点、适用于不同数值模型的几个区域时,在各区域内选用各自适合的数值模型,使获得更为合理的计算结果,多种数值模型嵌套使用时,需注意数值模型在各区域边界处的协调。

## 11.2 水流运动数值模拟

11.2.2 执行本条时需注意以下问题:

(1) 枢纽通航、河流、潮流水流数值模拟均可采用统一形式的水流运动控制方程进行模拟,即式(11.2.2.1-1)、式(11.2.2.1-2)、式(11.2.2.2-1)、式(11.2.2.2-2)、式(11.2.2.2-3)、式(11.2.2.3-1)、式(11.2.2.3-2)、式(11.2.2.3-3)、式(11.2.2.3-4);

(2) 在海岸与河口潮流中,垂向流速  $w$  相对于水平方向的流速  $u$ 、 $v$  一般很小,其时间和空间的微分量级要比水平方向流速的微分量级小得多,可以忽略其影响,即假定潮流运动服从静水压强分布,这一假定在三维潮流数值模拟中被广泛采用;

(3) 整治建筑物周边、弯曲河道水流模拟需采用动水压强对压力项进行求解,大范围长距离河段三维水流模拟可采用静压假设;

(4) 在式(11.2.2.4-2)、式(11.2.2.4-3)、式(11.2.2.4-4)、式(11.2.2.4-5)、式(11.2.2.4-6)和式(11.2.2.4-7)中,通过波浪辐射应力、波浪、潮流共同作用下的底部剪切应力和波浪挟沙能力反映波浪对潮流运动和泥沙输移的影响,这种处理方法不关心波浪运动的瞬时变化,只考虑波浪场作用下产生的动力要素对潮流和泥沙输移的影响。

11.2.3 平面二维工程问题中的固边界常常是不规则的,网格结点能否正确地拟合边界直接影响数值模拟的精度。精确地拟合边界常常是困难的,本款所列举的方法仅是多种近似方法中的几种:

(1) 矩形网格拟合方法,拟合简捷但误差较大,在有些情况下冗余网格很多;另一种是镜像法,该方法计算精度较高,稳定性较好,但废网格数同样较多;

(2) 三角形网格拟合法,三角形网格可随意加密计算结点,可以较准确地拟合复杂边界,亦可根据计算部位的重要性调整网格的疏密,需要注意的是三角形网格在边界附近采用中心差分其计算稳定性较差,而有限体积法求解时计算稳定性较好,模型精度较高;

(3) 拟合坐标法,可以选择适宜的坐标系,使坐标网格较贴体地拟合边界形状。如用正交曲线网格可以较好地模拟蜿蜒河流的边界,又使废网格大大减少,拟合坐标变换,使方程复杂化,但能够使方程标准化,以简化程序。

**11.2.4** 方程离散模式种类很多,按差分网格形状分有三角形、正方形、矩形、四边形、曲线坐标网格及各种形状网格组合等;按计算方法分,有显式、全隐式、半隐半显式;按模拟格式分有 ADI 法、三角元法、破开算子法、贴体坐标变换法和体积元法等。各种模式均有其实用条件和优缺点,根据其稳定性、收敛性、精度和实用效果选用。

**11.2.5** 由于水深变化而引起边界等地形出现出入水的变化,计算域的改变通过固定计算域法和变动计算域法完成。变动计算域法通过计算点水深来决定网格点的取舍。固定计算域法是使边界位置固定而通过边界一定水量的进出以达到相似。

### 11.3 波浪运动数值模拟

**11.3.2** 执行此条时需注意以下问题:

缓坡方程是基于缓坡和小振幅波假定基础上建立的。Booij 的研究表明,当水下地形的底坡坡度缓于 1:3 时,采用缓坡方程计算结果和三维势流方程计算结果符合良好。缓坡方程及其数值解法仍在不断改进,以使其能考虑非线性影响和用于范围较大的计算水域。

经典的 Boussinesq 方程仅适用于水深较浅的波浪传播计算,为使该方程能用于较大水深,近年已提出了多种改进的 Boussinesq 型方程;Boussinesq 型方程大多不做缓坡假定,计及了非线性影响,适合水下地形底坡较陡的波浪传播计算。

抛物型缓坡方程是在椭圆型缓坡方程基础上,忽略与波浪传播相反方向的反射波,并假定传播过程中波向变化不大而获得的;与椭圆型缓坡方程和 Boussinesq 型方程相比较,其计算效率高,适合于大范围开敞水域的波浪传播计算。根据 Kirby 的研究,考虑波浪的非线性影响,波浪传播可允许在  $\pm 45^\circ$  范围内变化。

缓坡方程及 Boussinesq 型方程均为二维波浪场模型,沿水深的波能分布均采用一定的假设条件,在水深陡变条件下,如深水航道开挖、水下结构物等,需要对其假定条件适用性进行分析。

**11.3.3.4** 计算大型港域内波要素时,如局部风成波影响显著,需计及风成波的影响。

**11.3.3.5** 波浪在有航道的水域内传播,其传播方向与航道的轴线方向斜交时,航道对波浪的折射及绕射均有影响,与航道轴线方向交角较大时,其影响尤为显著。因此,只有用同时反映波浪折射及绕射的数学模型才能正确模拟有航道时的波浪场。

### 11.4 泥沙数值模拟

**11.4.2** 水流泥沙数值模拟均可采用统一形式的泥沙输移控制方程进行模拟,即式(11.4.2.1-1)、式(11.4.2.1-2)、式(11.4.2.2-1)、式(11.4.2.2-2)、式(11.4.2.3-1)、式(11.4.2.3-2)。

**11.4.2.4** 确定  $S_{*c}$ 、 $g_b$  都带有很大经验性,公式的种类很多,而且多是由均匀沙在均匀流的条件下获得的,使用时需用实测资料加以率定和检验。

推移质输沙率是泥沙问题中解决得较差的课题之一,公式很多,立论基础各异,计算结果差别较大,附录 C 中仅列举了若干有一定代表性的均匀沙公式。



这些公式一般都是以室内水槽试验资料为依据,其中 No. 4 公式与试验资料吻合较好, No. 2 公式有较广泛的粗沙和卵石试验资料作为基础; No. 6 公式是通过广泛的室内资料的回归分析获得。对于天然河流,特别是山区河流,由于床沙粒配范围广,推移质补给条件多变,且床面及河道形态复杂,这些公式能否反映实际,仍然是个较大问题,因此在应用时需经实测资料检验和做必要的修正。

悬移质恢复饱和系数  $\alpha$  是一个受多种因素影响的综合系数。二维问题的  $\alpha$  一般大于一维问题,  $\alpha$  的最后确定需通过数值试验,不同的河段  $\alpha$  可以不一样。

当量粒径法计算简便,适用于泥沙粒径变化范围不大、河床冲刷幅度不大、河床冲淤交替等对河床级配改变不大,或河床呈累积性淤积等情况。

分组粒径法是目前国内比较流行的模式,但是由于问题的复杂性,对很多问题的认识还远不充分,采用不同的假定和近似便可得到不同的模式,因而模式种类较多。附录 D 列举了两类分组挟沙力及其级配计算模式,第一类为床沙质模式,认为在平衡条件下,挟沙力级配只与床沙级配有关,来沙的影响可间接通过河床冲淤变形导致床沙级配调整来反映;第二类为全沙模式,认为水流挟沙力及其级配不仅与床沙级配有关,而且还与来沙(包括冲泻质)及来沙级配有关。

源汇函数  $F_s$  的确定,是悬沙输移扩散计算的关键,由泥沙沉降和起动机理所决定,有多种形式表示和多种方法确定,条文中所列的两种方法是目前应用较广的方法。

**11.4.3.1** 有限体积法(也称为控制体积法)是将计算域分成一系列控制体积,将待解的微分方程对每一个控制体积积分,得出一组以网格结点上因变量为未知数的离散方程,该方法有着明确的物理意义,离散格式具有守恒性,为全隐式格式。

**11.4.3.2** 河道泥沙问题计算一般采用恒定流模型,一维水流、泥沙方程的离散采用显格式,水面线推求由下向上,泥沙计算则由上向下。

## 11.5 船舶操纵数值模拟

**11.5.1** 船舶运动为六个自由度的刚体运动,但实际工作中,通常只需模拟船舶平面三个自由度的运动状态就可符合工程要求。本规范列出的式(11.5.1-1)是目前通用的船舶操纵运动方程,主要表征了船舶在平面上沿  $x$ 、 $y$  方向的运动以及绕  $z$  轴的转动等三个自由度的刚体运动。

## 11.7 模拟验证

**11.7.1** 水流、泥沙模拟在现场实测资料丰富时包含率定和验证两部分,当现场资料不足时,率定和验证可合二为一。

**11.7.3.6** 条文中的试验资料系指已被验证过的波浪物理模型试验成果,或被验证过的、公认的波浪数值模拟成果资料。

**11.7.3.8** 船闸输水水力特性数值模拟验证允许偏差是指采用模型试验系数时,计算结果与模型试验值之间的偏差;如采用原型观测系数时,是指计算结果与原型观测值之间的偏差。