

JTJ

中华人民共和国行业标准

JTJ/T 235—2003

通航建筑物水力学模拟技术规程

Technical Regulation of Modelling
for Hydraulics of Navigation Structures

2003 - 11 - 18 发布

2004 - 04 - 01 实施

中华人民共和国交通部发布

中华人民共和国行业标准

通航建筑物水力学模拟技术规程

JTJ/T 235—2003

主编单位:交通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部

施行日期:2004年4月1日

关于发布《通航建筑物水力学模拟 技术规程》(JTJ/T 235—2003)的通知

交水发[2003]494 号

各省、自治区、直辖市交通厅(局、委),长江、珠江航务管理局及有关企事业单位:

由我部组织交通部天津水运工程科学研究所等单位制定的《通航建筑物水力学模拟技术规程》,业经审查通过,现批准为推荐性行业标准,编号为 JTJ/T 235—2003,自 2004 年 4 月 1 日起施行。

本规程由交通部水运司负责管理和解释,由人民交通出版社出版发行。

中华人民共和国交通部

二〇〇三年十一月十八日

制 定 说 明

本规程是在广泛调查研究的基础上,系统总结了我国通航建筑物水力学模拟经验,吸收了国内外有关模拟技术的新成果、新技术,并根据通航建筑物水力学模拟的专业特点和实际情况,借鉴了其他行业的相关标准,充分听取了有关单位和专家意见,经反复修改而成。主要包括枢纽通航整体模型试验、船闸水力学模型试验、升船机水力学模型试验、中间渠道通航水力学模型试验和通航水力学数值模拟等技术内容。

本规程的主编单位为交通部天津水运工程科学研究所,参加单位为南京水利科学研究院和重庆西南水运工程科学研究所。

本规程根据《水运工程建设标准体系表》和《水运工程建设标准编写规定》(JTJ 200—2001)制定。

本规程共分 8 章 39 节和 9 个附录,并附条文说明。本规程编写人员分工如下:

- 1 总则:孙精石
 - 2 术语:孙精石
 - 3 基本规定:孙精石 郑宝友
 - 4 枢纽通航整体模型试验:周华兴 郑宝友 赵世强
 - 5 船闸水力学模型试验:胡亚安 周华兴 郑宝友
 - 6 升船机水力学模型试验:赵德志 李金合
 - 7 中间渠道通航水力学模型试验:李金合 赵德志
 - 8 通航水力学数值模拟:陈汉宝 宣国祥
- 附录 A:孙精石
附录 B:赵德志
附录 C:赵世强

附录 D:胡亚安

附录 E:胡亚安

附录 F:赵德志

附录 G:陈汉宝

附录 H:宣国祥

附录 J:李金合

附加说明:孙精石

本规程于 2003 年 7 月 11 日通过部审,2003 年 11 月 18 日发布,2004 年 4 月 1 日起实施。

本规程由交通部水运司负责管理和解释。请各有关单位在执行过程中将发现的问题和意见及时函告交通部水运司和本规程管理组,以便今后修订时参考。

目 次

1 总则	(1)
2 术语	(2)
3 基本规定	(5)
3.1 一般规定	(5)
3.2 试验研究大纲	(6)
3.3 试验设备和测量仪器	(6)
3.4 物理模型制作精度	(8)
3.5 试验记录和资料整理	(9)
3.6 报告编写	(9)
3.7 报告审查和资料归档	(10)
4 枢纽通航整体模型试验	(11)
4.1 一般规定	(11)
4.2 基本资料	(11)
4.3 模型设计	(12)
4.4 模型制作及安装	(15)
4.5 试验设备和测量仪器	(16)
4.6 试验内容和方法	(17)
4.7 资料整理及分析	(18)
5 船闸水力学模型试验	(20)
5.1 一般规定	(20)
5.2 基本资料	(21)
5.3 模型设计	(21)
5.4 模型制作及安装	(23)
5.5 试验设备和测量仪器	(24)

5.6	试验内容和方法	(25)
5.7	资料整理及分析	(27)
6	升船机水力学模型试验	(31)
6.1	一般规定	(31)
6.2	基本资料	(31)
6.3	模型设计	(31)
6.4	模型制作及安装	(33)
6.5	试验设备和测量仪器	(33)
6.6	试验内容和方法	(34)
6.7	资料整理及分析	(34)
7	中间渠道通航水力学模型试验	(36)
7.1	一般规定	(36)
7.2	基本资料	(36)
7.3	模型设计	(37)
7.4	模型制作及安装	(37)
7.5	试验设备和测量仪器	(38)
7.6	试验内容和方法	(38)
7.7	资料整理及分析	(39)
8	通航水力学数值模拟	(41)
8.1	一般规定	(41)
8.2	基本资料	(42)
8.3	枢纽通航水力学数值模拟	(42)
8.4	船闸输水水力特性数值模拟	(49)
附录 A	量水设备的安装和流量计算	(52)
附录 B	材料糙率值	(55)
附录 C	模型加糙方法	(56)
附录 D	水弹性相似比尺关系	(58)
附录 E	船闸输水系统模型缩尺影响校正方法	(60)
附录 F	船厢内水体波动衰减所需运行长度的计算	(62)
附录 G	ADI 法计算模式	(63)

附录 H 船闸输水廊道换算长度计算	(68)
附录 J 本规程用词用语说明	(69)
附加说明 本规程主编单位、参加单位、主要起草人、 总校人员和管理组人员名单	(70)
附 条文说明	(72)

1 总 则

1.0.1 为统一通航建筑物水力学模拟的技术要求,有效控制模拟研究成果质量,更好地为通航建筑物工程建设提供准确、可靠的科学依据,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于枢纽通航水流条件和船闸、升船机、中间渠道的通航水力学模拟。运河通航水力学模拟可参照执行。

1.0.3 通航建筑物水力学模拟研究成果必须满足试验要求,并具有合理性和可靠性。

1.0.4 通航建筑物水力学模拟除应符合本规程的规定外,尚应符合国家现行标准的有关规定。

2 术 语

2.0.1 通航建筑物水力学模拟

通过物理模型和数值模拟研究通航建筑物水力学问题的方法。

2.0.2 物理模型

将研究对象按相似准则制成的实体模型。

2.0.3 数值模拟

针对研究的问题建立基本方程式,并按定解条件进行数值求解的方法。

2.0.4 复合模型

将物理模型和数值模拟相结合的模型。

2.0.5 整体模型

以原型整体为研究对象的模型。

2.0.6 局部模型

以原型局部为研究对象的模型。

2.0.7 断面模型

以原型断面为研究对象的模型。

2.0.8 正态模型

水平长度比尺与垂直长度比尺相等的模型。

2.0.9 变态模型

水平长度比尺与垂直长度比尺不相等的模型。

2.0.10 模型几何比尺

模型与原型对应线性尺度的比例。

2.0.11 几何相似

模型与原型的对应线性尺度保持固定的比例关系。

2.0.12 重力相似

模型与原型的惯性力与重力的比值相等,又称弗劳德相似。

2.0.13 阻力相似

模型与原型的阻力与惯性力的比值相等。

2.0.14 运动相似

模型与原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 动力相似

模型与原型的相应质点所受性质相同的作用力保持固定的比例关系,即力场的几何相似。

2.0.16 弹性相似

模型与原型的惯性力与弹性力的比值相等。

2.0.17 缩尺效应

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。

2.0.18 缩尺校正

用科学的方法校正模型值,以削减或消除缩尺效应产生的偏差。

2.0.19 通航水流条件

与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。

2.0.20 负波和正波

由于水流条件变化引起的水体波动,水面降低时为负波,水面上升时为正波。

2.0.21 制模断面

控制模型地形高程和位置的断面。

2.0.22 模型加糙

根据糙率比尺调整模型河床表面的粗糙程度。

2.0.23 模型验证

验证模型与原型相似程度的试验或计算。

2.0.24 船模

根据试验要求,按相似条件制作的船舶或船队模型。

2.0.25 自航船模试验

在正态水工模型中,用几何比尺相同的并经过相似性率定的自航船模,通过遥控驾引航行,研究各类通航工程的实施效果和船舶航行状况的试验。

2.0.26 减压模型试验

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模型试验。

2.0.27 流激振动模型试验

研究水流脉动引起的水工建筑物结构振动的模型试验。

2.0.28 平水设备

保持模型试验时上下游水位稳定的设备。

2.0.29 模拟嵌套

将计算域分割为多个相重或不相重的区域,并将一个区域模拟的结果作为其他区域模拟的边界条件或初始条件的模拟方法。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 通航建筑物水力学模拟应根据工程建设的要求,采用物理模型、数值模拟或复合模型。必要时应同时进行物理模型试验和数值模拟计算。

3.1.2 物理模型试验应根据下列研究内容分别选用枢纽通航整体模型试验、船闸水力学模型试验、升船机水力学模型试验或中间渠道通航水力学模型试验。

3.1.2.1 研究枢纽平面布置、运行和施工对通航水流条件的影响时,应采用枢纽通航整体模型试验。

3.1.2.2 研究船闸输水系统水力特性、船舶停泊条件和闸阀门水力特性时,应采用船闸水力学模型试验。

3.1.2.3 研究升船机不同运行情况下的水力特性和船舶停泊条件时,应采用升船机水力学模型试验。

3.1.2.4 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,应采用中间渠道通航水力学模型试验。

3.1.3 枢纽通航水力学数值模拟和船闸水力学数值模拟,应根据具体情况采用一维、二维或三维数值模拟计算。

3.1.4 通航建筑物水力学物理模型试验不得采用变态模型。

3.1.5 通航建筑物水力学物理模型的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。

3.2 试验研究大纲

3.2.1 通航建筑物水力学模拟应根据研究任务的要求编制试验研究大纲。试验研究大纲应包括下列内容：

- (1)项目概况和研究目的；
- (2)依据的技术标准；
- (3)研究内容和技术要求；
- (4)基本资料；
- (5)主要试验设备和测量仪器；
- (6)工作方法和技术措施；
- (7)工作进度计划、预期目标和提交的成果；
- (8)参加人员及职责。

3.2.2 国家重点项目、大型工程项目和基础理论研究项目的研究大纲应包括国内外研究水平和动态的内容。

3.3 试验设备和测量仪器

3.3.1 通航建筑物水力学物理模型试验主要设备应包括供水系统、量水设备、自动控制和数据采集处理系统等。

3.3.2 供水系统应符合下列规定。

3.3.2.1 供水系统宜由蓄水池、水泵、平水塔、输水管道、闸阀门和回水管道或渠道等组成循环式系统。

3.3.2.2 蓄水池蓄水量应满足试验最大用水量要求，蓄水池最高水位宜低于试验地坪，最低水位应保证水泵吸水的浸没深度，蓄水池底部应设置集水槽。

3.3.2.3 水泵总流量应大于试验用水的最大流量，可由一台或多台水泵组合供给。

3.3.2.4 平水塔高度宜在模型地坪面 5m 以上，容积可按最大供水流量乘以 75 ~ 100s 估算。平水塔上应设置溢流槽，溢流槽的深度和宽度不宜小于 0.15m，总长度可按每 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 流量设 20m 计算。当模型单独供水循环时，可采用平水槽代替平水塔。

3.3.2.5 输水管道应安装控制闸阀门,并应采取必要的防冻措施。输水管道可按 1~2 级网络布置。

3.3.2.6 回水管道或渠道应能保证试验用水顺利流回蓄水池,其断面面积应按能自流排泄试验总流量计算,管道或渠底坡度宜大于 1:200,并宜加设拦污栅和集水井。

3.3.3 量水设备应符合下列规定。

3.3.3.1 测量恒定流流量可采用量水堰。当流量较小时可采用三角堰;当流量较大时可采用矩形堰。量水堰的安装要求和流量计算方法见附录 A。

3.3.3.2 测量管道中恒定流流量可采用文丘里水计,其型号应满足流量要求。文丘里水计的安装要求和流量计算方法见附录 A。

3.3.3.3 测量管道中非恒定流流量应采用电磁流量计或超声流量计,其型号应满足流量和精度要求。

3.3.4 自动控制和数据采集处理系统应符合下列规定。

3.3.4.1 自动控制和数据采集处理系统宜由计算机、数据采集元件、A/D 转换装置和伺服机构等组成。

3.3.4.2 自动控制系统应具有灵敏度高、重复性好和体积小的特点,便于组装和操作。

3.3.4.3 数据采集处理系统性能应稳定,精度、速度和容量应满足试验要求。

3.3.5 通航建筑物水力学物理模型试验可采用下列测量仪器。

3.3.5.1 高程测量宜采用精密水准仪。

3.3.5.2 角度测量宜采用经纬仪。

3.3.5.3 水位测量宜采用测针、自动跟踪式水位计、超声波水位计或压力传感器等。

3.3.5.4 流速流向测量宜采用旋桨流速仪、舵叶跟踪式流速流向仪、激光流速仪、粒子成像流速仪、电磁流速仪、超声多普勒流速仪或毕托管等。

3.3.5.5 波动测量宜采用电容式波高仪、电阻式波高仪、跟踪

式波高仪、压差式液位计或超声波水位计等。

3.3.5.6 总力测量宜采用测力天平、缆绳拉力仪、测力环、阻力仪、拉压力传感器或测力杆等。

3.3.5.7 压强测量宜采用测压管、压力传感器、压力表或液柱比压计等。

3.3.6 通航建筑物水力学物理模型试验的主要二次仪表可采用动态应变仪、滤波器、电荷放大器、电压放大器和示波器等。

3.3.7 通航建筑物水力学物理模型试验测量仪器应符合下列规定。

3.3.7.1 测量仪器的选型应满足精度、量程和稳定性的要求。

3.3.7.2 测量仪器应在检定合格后使用。

3.3.7.3 仪器的检定周期,应按国家或行业有关规定执行。测量仪器必须在试验前后进行检查标定。

3.3.8 数值模拟采用的计算机应满足容量和计算速度的要求。

3.4 物理模型制作精度

3.4.1 整体物理模型应采用平面导线网控制模型范围和形状,导线角度的允许偏差应为 $\pm 0.01^\circ$ 。

3.4.2 模型高程应采用一个或多个水准点控制,多个水准点间高程的允许偏差应为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

3.4.3 模型地形制作精度应满足下列要求:

- (1)控制点高程允许偏差为 $\pm 1 \text{ mm}$;
- (2)地形高程允许偏差为 $\pm 2 \text{ mm}$;
- (3)平面位置允许偏差为 $\pm 10 \text{ mm}$ 。

3.4.4 水工建筑物模型制作精度应满足下列要求:

- (1)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 $\pm 0.01^\circ$ 。

3.4.5 船模制作精度应满足下列要求:

- (1)有动力船模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)无动力船模单船长度允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$,宽度允许偏差为 $\pm 1\text{mm}$,水线刻度允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$;

(3)船模重心位置允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$;

(4)船队编队后的尺度允许偏差为 $\pm 1\%$ 。

3.5 试验记录和资料整理

3.5.1 试验记录内容应满足试验要求,并应及时校核。试验过程可在试验日志中记载,试验数据应单独记录,有相同项目内容的可列表格记录。对原始记录值发生错误应划掉重写,不得涂改。计算机内的重要数据应备份。

3.5.2 物理模型试验过程和水流现象应进行录像或照相记录。

3.5.3 试验记录数据有效位数应与精度一致。

3.5.4 试验资料应按试验不同方案和组次及时整理。

3.5.5 根据试验目的和要求,试验资料可整理成图表或经验公式。

3.6 报告编写

3.6.1 试验报告可采用下列编写格式:

(1)封面,包括报告全称、编写单位、参加单位和出版日期;

(2)扉页,包括编写单位法人代表、技术主管、项目负责人、报告编写人和主要参加人;

(3)目次,包括试验报告的章节名称和页码;

(4)摘要,包括试验目的、方法及主要结论;

(5)正文;

(6)参考文献和资料。

3.6.2 试验报告编写应符合下列规定。

3.6.2.1 报告应层次分明、文理清晰、语言精练通顺、用词准确、用字规范和标点符号正确。

3.6.2.2 报告中的符号应进行说明。

3.6.2.3 报告必须使用法定计量单位。

3.6.2.4 插图应标有图名和图号,表格应标有表名和表号。

3.6.2.5 结论和结语应观点明确,不得隐瞒存在的问题,并提出进一步解决问题的方法和建议。

3.6.3 试验报告正文应包括下列内容:

(1)前言,说明研究项目的由来、主要工作概况、起止时间及其他需要说明的问题;

(2)试验研究目的和主要内容;

(3)试验依据和基本资料,包括有关技术标准、自然条件、工程方案、水工建筑物运行方式和代表船型等;

(4)模型设计或数值模拟方法,包括物理模型的设计原则、依据标准、相似条件、比尺、糙率和模型布置等;数值模拟的模拟范围、基本方程、辅助方程、定解条件、求解方法、离散格式、参数选取和计算精度控制等;

(5)模型制作和测量仪器设备,包括模型材料、制作方法、精度控制、主要仪器设备、测点布置、测量内容、测量方法和测量精度等;

(6)试验成果分析;

(7)结论或结语。

3.6.4 进行验证试验或验证计算的项目,其试验报告的正文应包括检验物理模型相似性或数值模拟计算合理性的内容。

3.7 报告审查和资料归档

3.7.1 试验报告应由完成单位审查合格后方可出版。

3.7.2 项目完成后应及时将项目合同、原始资料、试验主要过程资料、试验报告和审查验收意见等整理归档。

3.7.3 资料归档应符合国家科技档案管理的有关规定。

4 枢纽通航整体模型试验

4.1 一般规定

4.1.1 研究枢纽通航建筑物布置和枢纽运行对引航道、口门区及连接段等的通航水流条件影响时,应进行枢纽通航水流条件整体模型试验。

4.1.2 枢纽施工采取束窄河床、导流明渠或临时通航建筑物等措施维持通航时,应进行施工通航水流条件整体模型试验。

4.1.3 在进行枢纽通航整体模型试验时,应进行验证试验。

4.1.4 枢纽通航整体模型试验推荐的工程方案应符合现行国家标准《内河通航标准》(GBJ 139)的有关规定,并应符合现行行业标准《船闸总体设计规范》(JTJ 305)、《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)和《渠化工程枢纽总体布置设计规范》(JTJ 220)的有关规定。

4.2 基本资料

4.2.1 地形资料应符合下列规定。

4.2.1.1 地形范围应包括工程试验河段和模型进出口调节段的近期枯水河道,当进口段为弯道时,范围应延长至弯道以上河段。地形高程应至最高通航水位以上。

4.2.1.2 地形图应为统一的基准面和坐标系,比例宜为 1:1000 ~ 1:2000,地形变化不大的河床可为 1:5000,局部复杂地形宜为 1:200 ~ 1:500。

4.2.1.3 地形图上应标明水尺和测流断面的位置。

4.2.2 建筑物资料应包括下列内容:

(1)枢纽总体布置图;

- (2) 电站厂房结构图;
- (3) 泄水建筑物结构图;
- (4) 通航建筑物结构图;
- (5) 施工通航设施布置图和结构图。

4.2.3 水文资料应符合下列规定。

4.2.3.1 在试验河段应具有同一水文年洪、中、枯期的水面线资料,枯水期水面线应与地形资料同期观测。当有支流入汇时,尚应具有支流的水位流量资料。

4.2.3.2 在试验河段的进出口和坝轴线附近应具有断面的流速流向分布资料。

4.2.3.3 在试验河段出口处应具有连续的水位流量资料。

4.2.4 应具有试验河段的糙率资料。

4.2.5 枢纽的水位和流量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的流量;
- (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) 船闸灌泄水水位、流量与时间关系曲线。

4.2.6 船舶资料应包括下列内容:

- (1) 设计推船或拖船与驳船的吨位、型线图、方形系数、满载和空载的排水量、吃水和重心位置;
- (2) 设计船队的排列方式、平面尺寸、载重量和吃水;
- (3) 推船或拖船功率、螺旋桨桨叶及安装图、舵叶图和舵系布置图;
- (4) 船舶、船队的静水航速和操纵性能;
- (5) 船舶、船队的航行方式和航线等。

4.3 模型设计

4.3.1 枢纽通航整体模型设计相似性应符合下列规定。

4.3.1.1 模型与原型应保持几何相似、水流运动相似和动力相似。

4.3.1.2 模型必须遵循重力相似准则。

4.3.1.3 模型比尺应按下列公式确定：

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (4.3.1-1)$$

$$\lambda_v = \lambda_L^{\frac{1}{2}} \quad (4.3.1-2)$$

$$\lambda_Q = \lambda_L^{\frac{5}{2}} \quad (4.3.1-3)$$

$$\lambda_T = \lambda_L^{\frac{1}{2}} \quad (4.3.1-4)$$

$$\lambda_F = \lambda_L^3 \quad (4.3.1-5)$$

$$\lambda_p = \lambda_L \quad (4.3.1-6)$$

$$\lambda_n = \lambda_L^{\frac{1}{6}} \quad (4.3.1-7)$$

式中 λ_L ——几何比尺；

L_m ——模型的尺度；

L_p ——原型的尺度；

λ_v ——流速比尺；

λ_Q ——流量比尺；

λ_T ——时间比尺；

λ_F ——力比尺；

λ_p ——压强比尺；

λ_n ——糙率比尺。

4.3.2 枢纽通航整体模型设计的限制性条件应符合下列规定。

4.3.2.1 模型水流宜处于阻力平方区，当不能满足时，应保证为紊流流态，水流雷诺数应大于 1000。

4.3.2.2 模型水流应避免表面张力的影响，模型试验段的最小水深不应小于 0.03m。

4.3.2.3 模型地形糙率宜为 0.012 ~ 0.030。

4.3.3 枢纽通航整体模型制作范围应符合下列规定。

4.3.3.1 模型试验河段纵向长度应根据试验目的和要求,并结合水流、河道情况和工程建筑物对上下游河道影响范围确定。

4.3.3.2 模型进口水流调节段可取 8 ~ 12m,模型出口水流调节段可取 6 ~ 10m。

4.3.3.3 当模型进口段为弯道时,制模范围应延长至弯道以上。

4.3.3.4 模型岸边地形应高于试验最高水位 0.10m。

4.3.4 模型几何比尺的确定应符合下列规定。

4.3.4.1 模型几何比尺应根据试验目的及要求、模型范围、试验场地和供水条件确定。

4.3.4.2 模型几何比尺不宜小于 1:125。

4.3.5 模型加糙应符合下列规定。

4.3.5.1 模型糙率应根据原型糙率计算确定,制模材料糙率可按附录 B 选用。当糙率不满足要求时应进行加糙,模型加糙方法见附录 C。

4.3.5.2 当一种加糙方式不满足各级流量的水面线相似时,应采用多种加糙方式。

4.3.5.3 模型加糙物不得妨碍船模航行。

4.3.6 在枢纽通航整体模型上可简化船闸输水系统,但应保证输水过程中流量变化相似。

4.3.7 电站日调节模型的长度应考虑反射波的影响。

4.3.8 船模设计应符合下列规定。

4.3.8.1 有动力船模应符合现行行业标准《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTJ/T 232)的有关规定。

4.3.8.2 无动力船模应按几何相似设计,达到线型、排水量和重心位置相似。

4.3.9 模型设计平面布置总图应包括模型试验范围内枢纽中建筑物、引航道、口门区及连接段,测流断面及测点,模型进出口段,模型供水、回水系统等布置。

4.4 模型制作及安装

4.4.1 模型制作前应绘制供水回水设施和建筑物模型加工图,并应确定制模材料、加工程序和进度。

4.4.2 模型导线网布设应符合下列规定。

4.4.2.1 顺直河段宜采用直导线或折导线控制,主导线放在河道地形中部,两侧至少各设一条与之平行的辅助导线。

4.4.2.2 弯曲河段宜采用三角形导线网控制,导线间夹角应大于 30° ,导线网顶点宜设在坐标交点。

4.4.3 模型地形控制应符合下列规定。

4.4.3.1 制模断面布置必须能控制原地形的特征。

4.4.3.2 模型地形控制可采用断面板法,断面间距宜取 $0.5 \sim 1.0\text{m}$,地形复杂处应加密;在地形变化平缓时也可采用等高线法。

4.4.3.3 当断面间距累积长度与计算距离不一致时,应以计算距离为准进行平差改正。

4.4.3.4 断面各点高程应采用实测数值或内插求得。

4.4.3.5 制模断面板上应标明特征点高程和横向距离数据,并标明主导线和辅助导线位置。

4.4.4 模型制作应符合下列规定。

4.4.4.1 在制模场地应先进行导线放样,量放断面位置。

4.4.4.2 模型边墙应高出试验最高水位 0.2m ,并应进行稳定和强度验算。

4.4.4.3 模型地形制作应预留水泥砂浆粉面或加糙的厚度。

4.4.4.4 模型粉面前应对断面平面位置和高程进行校核。

4.4.4.5 模型粉面时应按两断面的等高点平刮水泥砂浆,并按地形图制作微地形。

4.4.4.6 模型粉面后必须进行养护,并应选择重点断面复核高程和特征地形。

4.4.4.7 模型应按设计要求进行加糙。

4.4.5 建筑物模型可采用木材、水泥、砖、有机玻璃板、塑料板或

镀锌钢板等材料制作。选用木材时,其木质应密实不易变形,并在模型制好后采用浸蜡或涂漆等方法进行防水处理。

4.4.6 模型制作及安装的精度控制应按第 3.4 节的有关规定执行。

4.4.7 船模制作及安装除应按第 3.4.5 条的有关规定执行外,尚应符合下列规定。

4.4.7.1 有动力船模应符合现行行业标准《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTJ/T 232)的有关规定。

4.4.7.2 无动力船模制作应选用镀锌铁皮或玻璃钢等厚度薄、重量轻和强度高的材料制作,船模表面应光滑,成型后不变形、不漏水。

4.4.8 模型校核应符合下列规定。

4.4.8.1 模型安装完毕后,必须进行全面校核,并应具有完整记录。

4.4.8.2 校核完毕后,应进行试水,发现问题应及时采取补救措施。

4.5 试验设备和测量仪器

4.5.1 水位计的选型应满足量程范围和响应频率的要求,并应与二次仪表匹配。

4.5.2 流速流向测量仪器的选用应符合下列规定。

4.5.2.1 流速为 $0.15 \sim 2.50\text{m/s}$ 时,可选用管径为 8mm 的标准毕托管;流速大于 2.50m/s 时,宜选用管径为 2.5mm 的微型毕托管。

4.5.2.2 流速为 $0.015 \sim 1.000\text{m/s}$ 、流向为 $0 \sim 360^\circ$ 时,可选用微型旋桨流速仪;流向变化速率不大时,可选用流速流向仪。

4.5.2.3 流速为 $0 \sim 2.0\text{m/s}$ 、流向为 $0 \sim 360^\circ$ 时,可选用电磁流速仪。

4.5.2.4 表面流向可采用漂浮物测量,河底流向可采用湿木屑、高锰酸钾颗粒或化学合成剂进行示踪测量。

4.5.3 船舶航行状态的模拟和测量应采用遥控自航船模系统。

4.6 试验内容和方法

4.6.1 枢纽通航整体模型验证试验应符合下列规定。

4.6.1.1 洪、中、枯期流量的水面线验证,山区河流的水位允许偏差应分别为原型 $\pm 0.20\text{m}$ 、 $\pm 0.15\text{m}$ 和 $\pm 0.10\text{m}$;平原河流的水位允许偏差应分别为原型 $\pm 0.15\text{m}$ 、 $\pm 0.10\text{m}$ 和 $\pm 0.05\text{m}$ 。

4.6.1.2 断面流速分布规律应与原型基本一致,流量允许偏差应为 $\pm 5\%$ 。

4.6.1.3 验证断面流速分布时,当模型水深不大于 0.05m 时,应采用一点法,测点设置在水面以下 0.6 倍水深处;当模型水深大于 0.05m 时,应采用二点法,测点设置在水面以下 0.2 倍与 0.8 倍水深处。

4.6.1.4 泡漩水和回流的位置及范围应与原型相似。

4.6.2 枢纽通航水流条件整体模型试验应符合下列规定。

4.6.2.1 枢纽通航水流条件整体模型试验应包括下列内容:

- (1)枢纽通航建筑物不同布置方案的通航水流条件;
- (2)枢纽泄洪和电站不同运行方式的通航水流条件;
- (3)电站日调节的通航水流条件;
- (4)船闸灌泄水的通航水流条件;
- (5)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。

4.6.2.2 枢纽通航水流条件整体模型试验的观测应包括下列内容:

- (1)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、靠船建筑物和隔流堤堤头周围的水面波动;
- (3)往复流的周期和强度;
- (4)引航道内停靠船舶的系缆力。

4.6.2.3 枢纽通航水流条件整体模型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 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 布置一个测

流断面,每个断面布置 5~10 个测点;

(2)在引航道长度范围内布置 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。

4.6.3 枢纽施工通航水流条件整体模型试验应符合下列规定。

4.6.3.1 枢纽施工通航水流条件整体模型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。

4.6.3.2 枢纽施工通航水流条件整体模型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。

4.6.4 在论证通航水流条件和航线选择时宜进行遥控自航船模试验,遥控自航船模试验应符合下列规定。

4.6.4.1 遥控自航船模航行参数观测应包括下列内容:

(1)船模静水航速和对岸航速;

(2)航迹线和船位线;

(3)舵角、首向角、航向角和漂角;

(4)漂移距离和会船间距。

4.6.4.2 遥控自航船模试验方法应符合现行行业标准《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTJ/T 232)的有关规定。

4.6.5 对最终推荐的工程方案应进行完整的试验。

4.7 资料整理及分析

4.7.1 枢纽通航整体模型验证试验应整理模型的水面线、断面流速分布和流量资料,并与原型实测资料对比,分析验证结果。

4.7.2 枢纽通航水流条件整体模型试验资料整理及分析应包括下列内容:

(1)整理引航道、口门区及连接段的流速、流向、流态、回流、水位和水面比降资料,绘制相应图表,分析通航水流条件;

(2)整理船闸闸门、靠船建筑物和隔流堤周围的水位波动资

料,分析波动对船闸运行、船舶停泊和航行的影响;

(3)整理引航道、口门区及连接段水位资料,分析往复流周期和强度对通航水流条件、船闸运行、船舶停泊和航行的影响;

(4)整理引航道内停靠船舶的系缆力资料,绘制系缆力过程线,分析船舶的停泊条件;

(5)分析枢纽泄洪、船闸灌泄水、电站运行及相互组合时对通航水流条件的影响;

(6)整理船模试验资料,绘制航态图和相应航行参数变化过程线,分析船舶的航行条件,论证通航水流条件,选择合理的航线。

4.7.3 枢纽施工通航水流条件整体模型试验资料整理及分析应包括下列内容:

(1)整理束窄河床和导流明渠的水位流量关系资料;

(2)整理束窄河床和导流明渠的流速、流向、流态和水面比降资料,分析水力特性和航行条件;

(3)整理临时通航建筑物引航道、口门区及连接段的流速和流向资料,分析通航水流条件;

(4)整理不同施工通航方案的船模航行参数资料,绘制航态图和相应航行参数变化过程线,分析船舶的航行条件,论证通航水流条件,选择合理的航线。

4.7.4 通过不同方案水力参数和航行参数的分析,应对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

5 船闸水力学模型试验

5.1 一般规定

5.1.1 船闸水力学模型试验应根据研究目的和要求进行船闸水力学整体模型、船闸水力学局部模型、输水阀门水力学模型、工作闸门启闭力模型或其他的船闸水力学模型试验。

5.1.2 船闸水力学模型试验类型的选择应符合下列规定。

5.1.2.1 研究船舶过闸安全和输水系统设计的合理性时,应采用船闸水力学整体模型试验。

5.1.2.2 研究输水系统进出水口、分流口和消能设施等输水系统局部体型和难于在整体模型上解决或确定的问题时,可采用船闸水力学局部模型试验。

5.1.2.3 研究输水阀门工作条件时,可采用输水阀门水力学模型。输水阀门水力学模型可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。

5.1.2.4 研究工作闸门运行阻力及启闭机运行方式时,应采用工作闸门启闭力模型。

5.1.3 对分散输水系统船闸水力特性和输水阀门空化特性模型试验结果,应分析和校正模型的缩尺影响。

5.1.4 船闸水力学模型试验推荐的工程方案应符合现行行业标准《船闸总体设计规范》(JTJ 305)、《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)、《船闸闸阀门设计规范》(JTJ 308)和《船闸启闭机设计规范》(JTJ 309)的有关规定。

5.2 基本资料

5.2.1 船闸平面布置资料应包括船闸主体和引航道等布置图。

5.2.2 船闸输水系统和闸阀门及启闭系统的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)输水系统的水力设计资料；

(3)输水阀门和工作闸门结构图；

(4)闸阀门启闭系统布置及结构图。

5.2.3 水文资料应包括船闸各种工况的上下游水位。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。

5.2.4 船闸运行资料应包括要求的灌泄水时间和闸阀门启闭方式等资料。

5.2.5 船舶资料应包括第 4.2.6 条中第(1)、(2)项的有关内容。

5.3 模型设计

5.3.1 船闸水力学模型设计相似性除应符合第 4.3.1 条的有关规定外，尚应符合下列规定。

5.3.1.1 模型中水流宜处于阻力平方区，当不能满足时，应保证为紊流流态；出水孔廊道段水流雷诺数应大于 50000。输水系统廊道边壁的糙率宜与原型相似。

5.3.1.2 输水阀门水力学模型应满足阀门运动与原型相似，当研究输水阀门流激振动时应满足水弹性相似，其相似比尺关系可按附录 D 确定。研究阀门后水流掺气时，模型水流流速应大于 7m/s。

5.3.1.3 输水阀门减压模型应满足水流空化数相等的要求。水流空化数可按现行行业标准《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定进行计算。

5.3.1.4 工作闸门启闭力模型应满足门体重力相似、重心相似和启闭机运动相似。

5.3.2 船闸水力学整体模型制作范围的确定应符合下列规定。

5.3.2.1 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。

5.3.2.2 研究船闸输水引起的引航道往复流、船舶的停泊和航行条件时,模型范围尚应延长至口门外 $1/4 \sim 1/3$ 引航道长度的水域。

5.3.3 船闸水力学局部模型制作范围的确定应符合下列规定。

5.3.3.1 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。

5.3.3.2 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。

5.3.3.3 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。

5.3.4 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。

5.3.5 工作闸门启闭力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。

5.3.6 模型几何比尺的确定应符合下列规定。

5.3.6.1 船闸水力学整体模型几何比尺宜为 $1:20 \sim 1:40$ 。

5.3.6.2 船闸水力学局部模型几何比尺宜为 $1:10 \sim 1:30$ 。

5.3.6.3 输水阀门水力学模型几何比尺宜为 $1:10 \sim 1:30$ 。

5.3.6.4 输水阀门门楣切片模型几何比尺应为 $1:1$ 。

5.3.6.5 工作闸门启闭力模型几何比尺宜为 1:15 ~ 1:30。

5.3.6.6 分散输水系统模型比尺的确定宜使出水孔缝隙宽度大于 6mm。

5.3.7 船闸水力学整体模型进行恒定流试验时,上下闸首的闸门应能拆卸或在闸门上设置可启闭的附加闸门,附加闸门的孔口大小应满足阀门各个开度输水流量的要求。

5.3.8 船模设计应符合下列规定。

5.3.8.1 船模设计应符合第 4.3.8 条的有关规定。

5.3.8.2 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。

5.3.9 模型设计应绘制模型总体布置图、结构物模型详图、测点布置图和模型供水回水系统布置图。

5.4 模型制作及安装

5.4.1 模型制作应绘制平水设备、量水设备、船闸输水系统和闸阀门及启闭设备等模型加工图,并应确定制模材料、加工程序和进度。

5.4.2 制模材料选择应符合下列规定。

5.4.2.1 输水廊道应选择有机玻璃或塑料等不易变形的光滑材料,对要求观测水位变化和水流流态的阀门段廊道及阀门井等部位,应采用透明材料。

5.4.2.2 闸墙可采用钢板、塑料板、钢筋混凝土预制板或砖砌水泥砂浆粉面制作。

5.4.2.3 输水阀门可采用有机玻璃或金属材料制作。阀门启闭杆件宜选择能满足弹性相似和刚度相似的材料制作。

5.4.2.4 上下游引航道可采用水泥砂浆粉面,表面应光滑。

5.4.2.5 局部模型中的支廊道及出水孔,可采用塑料板、有机玻璃或木材制作。

5.4.2.6 阀门流激振动模型中的阀门宜选择能满足水弹性相似要求的材料制作。

5.4.2.7 门楣切片模型两侧及门楣应采用有机玻璃等透明材料制作,面板可采用金属材料制作。

5.4.2.8 工作闸门启闭力模型的闸门可采用金属材料制作。

5.4.3 模型制作及安装应符合下列规定。

5.4.3.1 模型加工精度应符合第 3.4 节的有关规定,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 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

5.4.3.2 上下游引航道边墙顶和闸室顶应高出试验最高水位 0.10m 。

5.4.3.3 用木材制模时,应进行浸蜡或涂漆处理。

5.4.3.4 模型制作应满足强度和刚度要求。

5.4.3.5 压力测点的孔口应与结构物表面齐平并垂直。

5.4.3.6 研究阀门启闭力及振动的模型不应设置阀门侧向止水。

5.4.3.7 船模制作及安装应符合第 4.4.7 条的有关规定。

5.4.4 模型检验应符合下列规定。

5.4.4.1 模型制作安装完成后,应进行检查与校核,并具有完整记录。在输水廊道中不得有遗留物。

5.4.4.2 闸室输水过程中应对模型变形进行检验,若变形影响试验精度,必须进行校正并加固。

5.5 试验设备和测量仪器

5.5.1 船闸水力学模型试验设备除应符合第 3.3.1 条的有关规定外,尚应根据试验要求设置下列专用设备:

- (1)升降式平水槽;
- (2)恒定流和非恒定流减压箱;
- (3)阀门门楣切片模型试验设备;
- (4)输水阀门和工作闸门启闭机及控制系统等。

5.5.2 船闸水力学模型试验专用设备应符合下列规定。

5.5.2.1 升降式平水槽溢流长度应满足船闸灌泄水最大流量

的溢流要求。

5.5.2.2 非恒定流试验的减压箱在上下游水位变化过程中,箱体各部位真空度应保持不变。

5.5.2.3 阀门门楣切片模型试验设备应满足高压和高流速的要求。

5.5.3 船闸水力学模型试验的测量仪器除应符合第 3.3.5 条和第 3.3.6 条的有关规定外,尚应根据试验要求配置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。

5.6 试验内容和方法

5.6.1 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)测定闸室和引航道内船舶的系缆力及闸室内不系缆船舶的自由漂移情况;

(3)测定下游引航道和集中输水系统船闸闸室内的流速分布及消能段的水面壅高;

(4)测定输水廊道和消能设施的壓力分布;

(5)观测闸室、输水系统进出口和阀门段廊道的水流流态。

5.6.2 船闸水力学整体模型试验方法应符合下列规定。

5.6.2.1 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,下游平水槽溢水量宜保持有少量溢水。船闸灌泄水过程中,上下游水位的变化不宜大于 5mm。

5.6.2.2 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,测定分散输水系统各部位压力,计算输水系统各区段的阻力系数。

5.6.2.3 测定船舶系缆力时,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。

5.6.2.4 对分散输水系统船闸,应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。

5.6.2.5 进水口流态和漩涡试验应在船闸设计最大水位差和上游为最低通航水位时进行。

5.6.2.6 对集中输水系统船闸,应在恒定流情况下,对灌水时闸室断面最大平均流速和最大流量两种情况,分别测定消能段至停船区 3 个断面的流速分布和水面壅高。

5.6.2.7 模型试验应在恒定流条件下,对泄水时最大流量情况,分别测定下游导航段 3 个断面流速分布和水面壅高。

5.6.3 船闸水力学局部模型试验内容和方法应符合下列规定。

5.6.3.1 试验内容应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。

5.6.3.2 模型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,可通过船闸水力学整体模型试验或数值模拟确定。

5.6.3.3 模型试验中流速、流量、流态和压力的测定应在恒定流情况下进行。

5.6.4 输水阀门水力学模型试验内容和方法应符合下列规定。

5.6.4.1 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、反弧门支铰力和流量等,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。

5.6.4.2 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)试验时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；

(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。

5.6.4.3 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)试验内容和方法按第 5.6.4.1 款和第 5.6.4.2 款中的(2)、(4)和(5)项的有关规定执行。

5.6.4.4 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。

5.6.4.5 输水阀门水力学模型所需的水力学边界条件可通过整体模型试验确定。

5.6.5 工作闸门启闭力模型试验内容和方法应符合下列规定。

5.6.5.1 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。可采取改变杆件尺寸、启闭时间、运行方式和闸门门龕边界条件等措施减小人字闸门和三角闸门的启闭力。

5.6.5.2 试验时应保证双扇人字闸门或三角闸门同步运行,并以全开位作为测定启闭力的基准。

5.7 资料整理及分析

5.7.1 船闸水力学整体模型试验资料整理及分析应满足下列要求：

(1)整理输水阀门开度、闸室水位、阀门井水位、流量、能量、比

能和闸室流速与时间关系的资料；

(2)整理输水系统水力特征值,包括流量系数、各区段阻力系数、最大流量、惯性超高或超降和闸室水面最大及平均升降速度等资料；

(3)整理输水廊道各测点压力及脉动值和阀门后最低压力随阀门开度变化的资料；

(4)整理闸室输水时间与阀门开启时间关系的资料；

(5)整理船舶系缆力与时间的关系及分散输水系统船闸不系缆船舶的自由飘移距离等资料；

(6)整理下游引航道断面流速分布和水面壅高等资料；

(7)整理船闸进出水口、闸室和阀门段廊道等的水流流态资料；

(8)分析输水时间,船舶停泊条件,输水系统进出口、闸室和引航道的水流条件,阀门工作条件,确定推荐的输水系统布置及阀门开启方式；

(9)对分散输水系统船闸水力特性进行模型缩尺影响校正,校正方法见附录 E。

5.7.2 船闸水力学局部模型试验资料整理及分析应满足下列要求：

(1)进出水口局部模型,整理各支孔进出口处的压力和断面流速分布资料,计算分析各支孔的流量,提出各支孔流量相等的布置方案；

(2)分流口局部模型,整理分流口处的流量分配资料,分析进入闸室各区段支廊道的流量差异；整理各测点的压力和水流流态资料,分析产生空化的可能性,提出改善措施；

(3)闸室出水支廊道的局部模型,整理各出水支孔处廊道的压力、各支孔的流量分配、出水孔段廊道的阻力系数和水流流态资料,计算分析各支孔的流量分布规律,提出各支孔出流均匀的改善措施；

(4)分散输水系统消能设施的局部模型,整理消能设施中的压

力、流量、水流流态和闸室水面的壅高资料,分析消能效果,提出效果较好的消能设施型式和尺寸;

(5)集中输水系统的局部模型,整理流量系数、闸室或下游引航道的流速分布和水流流态资料,计算并绘制输水水力特性曲线,分析船舶所受波浪力和输水阀门后廊道压力或水跃情况,确定消能布置型式和阀门开启方式。

5.7.3 输水阀门水力学模型试验资料整理及分析应符合下列规定。

5.7.3.1 阀门非恒定流常压模型试验资料整理及分析应满足下列要求:

(1)整理阀门启闭过程中门井及门后廊道的流态资料;

(2)绘制阀门各开度的门井水位和流量过程线;

(3)整理各测点的压力资料,分析不同运行工况下门体及门后廊道压力分布和压力脉动特性,论证阀门段廊道体型、淹没水深和阀门开启速度,提出阀门水动力荷载系数和阀门后廊道保护措施;

(4)绘制阀门启闭力及支铰力过程线,分析不同运行工况下阀门启闭力和支铰力的时均和脉动特性,提出合理的启闭机容量;

(5)整理门体振动加速度的时域和频域特性资料,分析阀门结构自振和流激振动特性,提出改善措施。

5.7.3.2 阀门恒定流减压模型试验应整理阀门各开度廊道空化噪声声压级、初生空化数和消失空化数、工作空化数、流态及相应的水力参数资料,分析各种工况下空化源的位置及可能造成的危害,提出抑制水流空化的工程措施和建议。

5.7.3.3 阀门非恒定流减压模型试验资料的整理及分析除应按第 5.7.3.1 款及第 5.7.3.2 款的有关规定执行外,尚应绘制各方案在阀门不同启闭方式下空化强度过程线。

5.7.3.4 阀门减压模型试验成果应采用模型缩尺影响校正后的输水系统水力特性资料,对工作空化数进行校正。

5.7.3.5 阀门门楣切片模型试验资料整理及分析应满足下列要求:

(1)整理缝隙流水力特性、水流流态、门楣工作空化数、初生空化数和消失空化数资料;

(2)整理各开度门楣通气量和平均掺气浓度与掺气坎相对高度关系的资料;

(3)分析门楣通气减免空化效果,提出门楣体型和通气方式。

5.7.4 工作闸门启闭力模型试验资料整理及分析应满足下列要求。

5.7.4.1 人字闸门和三角闸门启闭力模型试验资料整理应包括下列内容:

(1)绘制各种启闭方式的角速度和角加速度与动水阻力矩过程线;

(2)绘制驱动机构为匀速时,动水阻力矩峰值分别与启闭时间、淹没水深、闸门角速度和角加速度的关系曲线;

(3)绘制驱动机构为匀速时闸门前后水面最大壅高与启闭时间关系曲线;

(4)绘制不同水位差开门时的动水阻力矩与闸门开度的关系曲线。

5.7.4.2 其他型式工作闸门启闭力模型试验资料整理应包括下列内容:

(1)绘制不同启闭方式、不同淹没水深和不同水位差时的启闭力过程线;

(2)绘制启闭力峰值与各影响因素的关系曲线。

5.7.4.3 应分析启闭力的影响因素,提出启闭机型式、布置、功率和启闭方式的合理建议。

5.7.5 通过水力特性值、水流流态、船舶系缆力、廊道压力、阀门工作条件和闸门启闭力等的分析,应对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

6 升船机水力学模型试验

6.1 一般规定

6.1.1 研究升船机运行过程中的水力学问题时,应进行升船机水力学模型试验。

6.1.2 升船机水力学模型试验推荐的工程方案中的安全通航技术指标,可参照现行行业标准《船闸总体设计规范》(JTJ 305)和《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定执行。

6.2 基本资料

6.2.1 升船机水力学模型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、推板和闸门结构设计图。

6.2.2 水文资料应包括上下游最高和最低通航水位、水位变幅及变率。

6.2.3 升船机运行资料主要应包括下列内容:

- (1)船厢或坡槽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)船厢或推板正常运行速度图、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;
- (5)斜面或水坡式升船机过坝顶运转方式;
- (6)斜面升船机非自行船厢拖曳系统。

6.2.4 船舶资料应符合第 4.2.6 条的有关规定。

6.3 模型设计

6.3.1 升船机水力学模型设计相似性除应按第 4.3.1 条和第

4.3.2条有关规定执行外,尚应符合下列规定。

6.3.1.1 船厢或推板运动应满足运行速度图相似。

6.3.1.2 当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列式计算:

$$\lambda_K = \lambda_L^2 \quad (6.3.1-1)$$

式中 λ_K ——弹性系数比尺;

λ_L ——几何比尺。

6.3.1.3 船舶进出船厢阻力试验应在船模周边加设激流丝,船模雷诺数宜满足下列式要求:

$$Re = \frac{LV}{\nu} \geq 10^6 \quad (6.3.1-2)$$

式中 Re ——船模雷诺数;

L ——船模长度(m);

V ——船模航速(m/s);

ν ——水的运动粘滞系数(m^2/s)。

6.3.1.4 船厢的入水部位应保持外形相似。

6.3.2 升船机水力学模型制作范围的确定应符合下列规定。

6.3.2.1 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。

6.3.2.2 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。

6.3.2.3 斜面升船机或水坡升船机正常运行的模型范围应包括上下游坡道或坡槽和坝顶过渡段。当斜面升船机船厢匀速运行段大于船厢内水体波动衰减所需运行长度时,匀速运行段可采取波动衰减所需的运行长度,该运行长度可按附录 F 计算。

6.3.2.4 斜面升船机船厢出入水试验,模型范围应包括上游或下游最低通航水位以上一段斜坡道和水下斜坡道、船厢池和引航道。

6.3.2.5 水坡升船机推板出入水试验,模型范围应包括大于推

板前 2.5 倍楔形水体长度的坡槽和引航道。

6.3.3 升船机水力学模型几何比尺应根据试验要求、工程规模和试验场地等条件确定,宜为 1:10~1:25。

6.3.4 模型应设置供排水管,引航道末端应有水位调节设备和消波设施。

6.3.5 船模设计应符合第 5.3.8 条的有关规定。

6.3.6 模型设计平面布置总图应包括试验范围内的水工建筑物、船模拖曳设备、水位调节设备和消波设施,测点布置,模型进出口段和供排水管道等。

6.4 模型制作及安装

6.4.1 模型制作应绘制模型加工图,并应确定制模材料、加工程序和进度。

6.4.2 制模材料选择应符合下列规定。

6.4.2.1 船厢可采用钢材或塑料板,船厢两侧宜采用透明材料。

6.4.2.2 船厢池和引航道可采用水泥砂浆粉面或塑料板,船厢池两侧宜采用透明材料。

6.4.2.3 船厢闸门可采用钢材或塑料板,止水可采用橡皮。

6.4.2.4 轨道可采用轻轨或型钢材料。

6.4.3 模型制作及安装应符合下列规定。

6.4.3.1 船厢应具有足够的刚度,并严禁漏水。

6.4.3.2 斜坡轨道与船厢轮接触面应光滑平整。

6.4.3.3 船模制作及安装应符合第 4.4.7 条的有关规定。

6.4.4 模型制作安装完成后,必须进行检查和校核,并具有完整记录。

6.5 试验设备和测量仪器

6.5.1 船厢或推板驱动、闸门启闭和船模曳引等主要试验设备,应满足调速要求。

6.5.2 升船机水力学模型试验主要测量仪器除应符合第 3.3.5 条和第 3.3.6 条的有关规定外,尚应有测定航速、船舶纵倾、船底富余水深和航行阻力等仪器。

6.5.3 船厢或水坡推板运行速度可采用测速电机或其他测速装置测量。

6.6 试验内容和方法

6.6.1 升船机水力学模型试验应包括下列内容:

(1)船舶进出船厢或坡槽的水体波动、船底富余水深、航行阻力和引航道波流情况;

(2)船厢闸门、坡槽闸门或推板启闭时水体波动和船舶系缆力;

(3)船厢或推板在正常运行和事故制动情况下厢内或坡槽水体波动、船舶运动和系缆力;

(4)船厢或推板出入水时水体波动、船舶系缆力、厢底的吸附力和动水压力。

6.6.2 升船机水力学模型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 5~7 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 2~3 个流速测点;

(2)在船厢底部布置 5~10 个测量动水压力和吸附力的传感器;

(3)在船厢内外有无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;

(4)在船厢或推板行走轮上设置测速装置,测定运行速度及变化过程;

(5)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。

6.7 资料整理及分析

6.7.1 升船机水力学模型试验资料整理及分析应满足下列要求:

(1)整理船厢或推板不同运行方式船厢或坡槽中水体波动、船舶运动和系缆力的资料,分析加减速速度与水体波动、船舶系缆力的关系,提出满足船舶允许系缆力的船厢起制动加减速度和厢门处波高;

(2)整理船舶进出船厢不同航速和水深时厢内纵向瞬时水面线、纵向水体分布、纵倾力矩、偏心距、厢门处最大水位升降、厢内最大增减水量、船底最小水深和航行阻力资料,分析航速、水深与各参数的关系,提出合理的船舶进出船厢速度;

(3)整理船厢闸门不同启闭速度时厢中水体分布、纵倾力矩、偏心距、厢中水体波动和船舶系缆力的资料,分析启闭速度、水位差与各参数的关系,提出合理的闸门启闭方式和厢内外允许水位差;

(4)整理船厢或推板出入水不同速度时的厢池和引航道水体波动、引航道内船舶系缆力、厢底吸附力和动水压力资料,分析出入水速度与各参数的关系,提出合理的船厢出入水速度。

6.7.2 通过对试验资料的综合分析,应对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

7 中间渠道通航水力学模型试验

7.1 一般规定

7.1.1 研究下列工程问题时,应进行中间渠道通航水力学模型试验:

- (1)中间渠道通航水流条件;
- (2)中间渠道断面尺度;
- (3)中间渠道船行波对航行安全和护坡结构稳定性的影响;
- (4)中间渠道内取排水对通航水流条件的影响。

7.1.2 中间渠道通航水力学模型试验推荐的工程方案应符合现行国家标准《内河通航标准》(GBJ 139)和现行行业标准《船闸总体设计规范》(JTJ 305)、《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定。

7.2 基本资料

7.2.1 地形资料应有比例为 1:1000 ~ 1:5000 的中间渠道地形图;复杂地形宜采用比例为 1:500 的地形图。

7.2.2 工程设计资料应包括下列内容:

- (1)工程总平面布置图和纵横剖面图;
- (2)中间渠道内取排水方案布置图;
- (3)中间渠道两端船闸输水系统进出口布置图。

7.2.3 水文资料应包括下列内容:

- (1)中间渠道最高通航水位和最低通航水位;
- (2)中间渠道两端流量资料;
- (3)中间渠道内取排水流量。

7.2.4 船舶资料应符合第 4.2.6 条的有关规定。

7.3 模型设计

7.3.1 中间渠道通航水力学模型试验模型设计应符合第 4.3.1 条和第 4.3.2 条的有关规定。

7.3.2 中间渠道通航水力学模型制作范围应符合下列规定。

7.3.2.1 中间渠道模型应包括渠道上下游船闸或升船机船厢池段。

7.3.2.2 中间渠道模型岸边地形应高于试验最高水位 0.2m 以上。

7.3.3 中间渠道模型几何比尺应根据工程规模和试验场地等条件确定,大型工程不宜小于 1:80,中小型工程可取 1:30 ~ 1:50。

7.3.4 中间渠道水力学模型在进行船模直航试验时应设置船模的导向设施。

7.3.5 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 船模设计应按第 5.3.8 条的有关规定执行。船模直航试验可只考虑航速相似。

7.3.7 模型设计布置总图应包括模型试验段范围内的水工建筑物、测流断面及测点布置、导向设施、模型进出口段和供排水管道等。

7.4 模型制作及安装

7.4.1 模型制作前应绘制模型加工图,并应确定制模材料、加工程序和进度。

7.4.2 制模材料选择应符合下列规定。

7.4.2.1 中间渠道模型材料可采用水泥砂浆粉面或塑料板,观察段可采用透明材料。

7.4.2.2 中间渠道通航建筑物制模材料可按第 5.4.2 条和第 6.4.2 条的有关规定执行。

7.4.3 模型制作及安装应符合下列规定。

7.4.3.1 模型地形制作应按第 4.4 节的有关规定执行。

7.4.3.2 通航建筑物模型制作应按第 5.4.3 条和第 6.4.3 条的有关规定执行。

7.4.3.3 船模制作及安装应符合第 4.4.7 条的有关规定。

7.4.4 模型制作安装完成后,必须进行检查和校核,精度应符合第 3.4 节的有关规定。

7.5 试验设备和测量仪器

7.5.1 中间渠道通航水力学模型试验应具有保持船模直航的导向设施,船模航行设备应运行平稳、航速均匀,并便于调速。

7.5.2 护坡结构稳定性试验,可采用拖曳船模或自航船模产生船行波,尚可采用专用造波设备模拟船行波。

7.5.3 中间渠道通航水力学模型试验的测量仪器应符合第 6.5.2 条的有关规定。

7.6 试验内容和方法

7.6.1 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。

7.6.2 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。

7.6.3 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现行行业标准《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234)的有关规定执行。

7.6.4 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 资料整理及分析

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资料整理及分析应满足下列要求：

(1)整理不同方案和工况条件下各测点水位变化、渠道沿程最高波峰线和最低波谷线资料,分析渠顶和渠底合理高程;

(2)整理渠道两端闸门内外瞬时水位差资料,分析水位差对通航建筑物运行的影响,提出合理的运行方式;

(3)整理水位波动、水面比降和流速过程线资料,确定最大水面比降发生时刻及位置,分析船舶航行和停泊条件,提出改善措施。

7.7.2 中间渠道断面尺度模型试验资料整理及分析应满足下列要求：

(1)整理中间渠道不同断面尺度与船舶航速、航行阻力和水位波动关系资料,分析船舶航行条件;

(2)整理船模不同航线的航行参数资料,分析船舶航行条件,选择合理航线;

(3)整理不同断面形式和断面系数与航速、航行阻力、船体下沉和纵倾之间的关系资料,分析其变化规律,提出合理的断面形式和断面系数。

7.7.3 中间渠道船行波模型试验资料整理及分析应满足下列要求:

(1)整理各工况条件下测点波动过程线和岸边回流速度资料,分析水体波动特性;

(2)整理各工况条件下近岸处的波高、波向、周期、船行波爬高和回落资料,分析船行波对岸坡稳定性的影响;

(3)整理波高水深比、水深与船舶吃水比、航速弗劳德数与断面系数的相互关系资料,论证影响船行波的主要因素,提出减少船行波危害的措施。

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应整理不同方案和工况条件下的流速、流态、波动和水面比降资料,分析取排水口位置、布置形式和取排水量对通航水流条件的影响。

7.7.5 通过对水力参数和船舶航行参数等资料的综合分析,应对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

8 通航水力学数值模拟

8.1 一般规定

8.1.1 研究枢纽通航水流条件、船闸输水水力特性和中间渠道通航水力学等问题,可采用通航水力学数值模拟。

8.1.2 枢纽通航水力学数值模拟可用于船闸灌泄水、枢纽泄洪和电站运行等情况下的通航水流条件研究,也可用于中间渠道通航水流条件的研究。

8.1.3 船闸输水水力特性数值模拟可用于船闸输水系统水力特性等研究。

8.1.4 枢纽通航水力学数值模拟计算参数的选取应进行充分论证,并应根据实测资料进行验证。

8.1.5 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。

8.1.6 通航水力学数值模拟采用的数值计算方法应满足相容性、收敛性和稳定性要求,精度应满足使用要求。

8.1.7 通航水力学数值模拟结果的可靠性应采用理论分析、现场实测资料或物理模型试验资料进行验证和评价。

8.1.8 通航水力学数值模拟应通过水力参数的分析,对原方案和修改方案作出评价,提出合理的方案。

8.1.9 通航水力学数值模拟推荐的工程方案应符合现行国家标准《内河通航标准》(GBJ 139)和现行行业标准《船闸总体设计规范》(JTJ 305)、《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定。

8.2 基本资料

8.2.1 枢纽通航水力学数值模拟基本资料应符合第4.2节的有关规定;中间渠道通航水力学数值模拟基本资料应符合第7.2节的有关规定。

8.2.2 船闸输水水力特性数值模拟基本资料应符合第5.2节的有关规定。

8.3 枢纽通航水力学数值模拟

8.3.1 枢纽通航水力学数值模拟基本方程应符合下列规定。

8.3.1.1 一维水流数值模拟可采用下列基本方程:

(1)连续方程:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(BHV) = 0 \quad (8.3.1-1)$$

(2)运动方程:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{V^2}{C^2 R} = 0 \quad (8.3.1-2)$$

式中 B ——河宽(m);

Z ——水位(m);

t ——时间(s);

H ——断面平均水深(m);

V ——断面平均流速(m/s);

x ——水流纵向距离(m);

g ——重力加速度(m/s²);

C ——谢才系数;

R ——水力半径(m),宽浅河流取断面平均水深。

8.3.1.2 平面二维水流数值模拟可采用下列基本方程:

(1)连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (8.3.1-3)$$

(2) x 方向运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{uW}{C^2 h} = \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (8.3.1-4)$$

(3) y 方向运动方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{vW}{C^2 h} = \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (8.3.1-5)$$

式中 Z ——水位(m);

t ——时间(s);

x, y ——平面直角坐标(m);

u ——垂向平均流速在 x 方向上的分量(m/s);

h ——水深(m);

v ——垂向平均流速在 y 方向上的分量(m/s);

g ——重力加速度(m/s²);

W —— x 和 y 方向的矢量合成流速(m/s);

C ——谢才系数;

ν_t ——水流紊动粘性系数(m²/s)。

8.3.1.3 三维水流数值模拟可采用下列基本方程:

(1) 连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8.3.1-6)$$

(2) x 方向运动方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f_v \end{aligned} \quad (8.3.1-7)$$

(3) y 方向运动方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - fu \quad (8.3.1-8)$$

(4) z 方向运动方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \end{aligned} \quad (8.3.1-9)$$

式中 u, v, w ——沿 x, y, z 方向上的速度分量(m/s);

x, y, z ——三维直角坐标系坐标, z 为垂向(m);

t ——时间(s);

ρ ——水的密度(kg/m³);

p ——水压强(N/m²);

N_x, N_y, N_z ——分别为沿 x, y, z 方向的水流紊动粘性系数(m²/s);

f ——科氏参量(s⁻¹);

g ——重力加速度(m/s²)。

8.3.1.4 在枢纽通航水力学数值模拟中,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,式(8.3.1-9)可简化为式(8.3.1-10)。

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (8.3.1-10)$$

式中 p ——水压强(N/m²);

z ——垂向坐标(m);

ρ ——水的密度(kg/m³);

g ——重力加速度(m/s²)。

8.3.1.5 三维水流数值模拟的水位可按下式计算:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}h}{\partial y} = 0 \quad (8.3.1-11)$$

式中 Z ——水位(m);

t ——时间(s);
 $x、y$ ——平面直角坐标(m);
 $\bar{u}、\bar{v}$ ——平均流速在 $x、y$ 方向上的分量(m/s);
 h ——水深(m)。

8.3.2 枢纽通航水力学数值模拟基本方程的选取应符合下列规定。

8.3.2.1 模拟水位流量变化和断面平均流速时可选用一维方程。

8.3.2.2 模拟平面水流时可选用二维方程。

8.3.2.3 模拟复杂水流时可选用三维方程。

8.3.2.4 根据计算方法的不同,可选用等价的基本方程。

8.3.3 模拟方程中参数的确定应符合下列规定。

8.3.3.1 谢才系数可按下列式计算:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (8.3.3-1)$$

式中 C ——谢才系数;

n ——曼宁系数,又称糙率;工程方案或蓄水对过流断面产生较大影响和水工建筑物可能造成较大水流阻力时,应对曼宁系数进行调整;

R ——水力半径(m)。

8.3.3.2 水流紊动粘性系数可按下列公式计算:

(1)顺直岸线或宽阔水域:

$$\nu_t = 0 \quad (8.3.3-2)$$

(2)回流对工程影响较小时:

$$\nu_t = k u_* h \quad (8.3.3-3)$$

$$u_* = \sqrt{ghJ} \quad (8.3.3-4)$$

(3)回流对工程影响较大时:

$$\nu_t = C_v K^2 / \epsilon \quad (8.3.3-5)$$

式中 ν_t ——水流紊动粘性系数(m^2/s);

k ——系数,取值范围为 0.5 ~ 1.0;

u_* ——摩阻流速(m/s);

h ——水深(m);

g ——重力加速度(m/s^2);

J ——能坡;

C_u ——系数,取 0.09;

K ——紊动动能,由紊动动能的输运方程确定;

ϵ ——紊动动能耗散率,由紊动耗散率的输运方程确定。

8.3.4 枢纽通航水力学数值模拟基本方程的求解方法应符合下列规定。

8.3.4.1 一维模拟根据求解问题的性质可选用拉克斯格式、蛙步格式、迎风格式或普列斯曼格式求解。差分方程稳定性可采用柯郎条件判别。

8.3.4.2 二维模拟求解可选用交替方向隐式法(ADI 法)、三元法、破开算子法或控制体积法。ADI 法的计算模式见附录 G。

8.3.4.3 三维模拟根据计算域地形特征和工程方案要求等情况,可选用垂向坐标变换法、流速分解法、分层二维法、过程分裂法、边值模型法、破开算子法、谱方法或解析法等模式进行计算。

8.3.5 枢纽通航水力学数值模拟定解条件应符合下列规定。

8.3.5.1 一维模拟定解条件应满足下列要求:

(1)水流模拟的边界条件用水位过程、流量过程或水位流量关系表示,缓流用水位过程或流量过程作为出入流断面边界条件,急流用水位过程和流量过程作为入流断面边界条件;

(2)水流模拟的初始条件为计算域的初始沿程水位和初始沿程流量。

8.3.5.2 平面二维模拟定解条件应满足下列要求:

(1)水流模拟的水边界条件为水边界上的水位或流速随时间的变化过程,当边界条件为水位过程时,则假定边界上没有横向流动,纵向流速的法向梯度为零;当水边界条件为流速过程时,则假定边界上水位的法向梯度为零;

(2)水流模拟的固边界条件为固边界上的法向流速为零和水

位沿边界法向的梯度为零；

(3)水流模拟的初始条件为初始水位和初始流速场,初始水位通过推求的水面线确定;初始流速场通过推求的水流平面图确定,或通过出入流边界水位差值和零流速场确定。

8.3.5.3 三维模拟定解条件应满足下列要求:

(1)水流模拟的水边界条件为计算水边界上流速随时间的变化过程,固边界条件取固边界上的法向流速为零和水位沿固边界法向梯度为零;

(2)水流模拟的初始条件为初始水位和初始流速场。

8.3.6 枢纽通航水力学数值模拟边界处理应符合下列规定。

8.3.6.1 数值模拟的边界应能反映建筑物特征、工程特点和水下地形变化,计算域应覆盖对工程有影响的水域,并应适当扩大。

8.3.6.2 不规则固边界根据计算域平面形态和计算模式等具体情况,可选用矩形网格拟合法、三角形网格拟合法或拟合坐标法。

8.3.6.3 当水边线随水位升降变化时,宜采用活动边界模拟方法,可分为水位冻结法、窄缝法和渗透介质法。

8.3.6.4 计算域内水力条件不连续时,不连续区域的上下游断面必须同时满足流量守恒和能量守恒条件。

8.3.6.5 模拟嵌套的连接边界应满足质量和能量守恒条件,嵌套连接边界宜进行平滑处理。

8.3.7 枢纽通航水力学数值模拟计算域、网格和时间步长的确定应符合下列规定。

8.3.7.1 一维模拟断面布置应满足下列要求:

(1)断面间距根据河道形态、糙率特性、枢纽布置和研究问题的需要确定;

(2)重点研究区域和断面几何形态变化较大的部位断面适当加密;

(3)断面与主流方向垂直。

8.3.7.2 计算域的确定应满足下列要求:

(1)能反映模拟区域整体流场特性;

(2)进出口选在顺直河段上,进出口边界上的水力要素不受域内工程方案的影响;

(3)水边界选在流场比较均匀和流线比较顺直的断面。

8.3.7.3 数值模拟应根据计算模式的需要进行计算域网格剖分,网格剖分应满足下列要求:

(1)网格结点水深能反映水下地形特征和工程建设前后水深变化;

(2)能概化岸线边界和建筑物的固定边界;

(3)网格的疏密程度根据计算域内不同部位的工程要求和计算要求确定。

8.3.7.4 时间步长的确定应满足下列要求:

(1)水流计算迭代时间步长满足稳定性条件;

(2)时间步长能反映非恒定流时的水力参数随时间变化的过程。

8.3.8 枢纽通航水力学数值模拟的验证应符合下列规定。

8.3.8.1 通过参数和边界条件的调整,验证计算应达到模拟计算结果与实测结果基本相符的要求。

8.3.8.2 验证计算内容应包括水位、流速和流态。

8.3.8.3 一维模拟验证的允许偏差应满足下列要求:

(1)水位允许偏差为 $\pm 0.15\text{m}$;

(2)流量允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

8.3.8.4 二维和三维模拟验证的允许偏差应满足下列要求:

(1)水位允许偏差为 $\pm 0.2\text{m}$;

(2)流量允许偏差为 $\pm 5\%$;

(3)流速沿断面分布趋势与原型一致;

(4)流态和回流范围与原型基本一致。

8.3.9 工程方案模拟及成果分析应符合下列规定。

8.3.9.1 方案模拟计算的内容应满足第4.6节和第7.6节的有关规定。

8.3.9.2 方案模拟计算中有关参数的选取应与验证计算时相同,当工程建设前后的边界变化较大时,应调整计算域边界,重新进行计算。

8.3.9.3 当工程方案对流场产生较大影响时,宜对有影响边界的水位和流速进行调整,有条件时应采用物理模型试验成果。

8.3.9.4 当由于工程蓄水或其他工程措施使计算域边界条件发生变化时,宜进行理论估算,或引用物理模型试验成果调整边界条件。

8.3.9.5 成果分析应包括下列内容:

(1)绘制工程建设前后各种方案的流场图;

(2)分析主航线和通航建筑物附近的水位和流速变化过程及特征值;

(3)根据工程建设前后流场分布和水位变化,分析通航水流条件,论证各种方案的优劣。

8.3.10 重要工程应通过可视化系统动态显示数值模拟结果。

8.4 船闸输水水力特性数值模拟

8.4.1 船闸输水水力特性数值模拟可采用下列基本方程:

(1)连续方程:

$$A_l \frac{dh}{dt} = -NA_c v \quad (8.4.1-1)$$

(2)能量方程:

$$\frac{L_{np}}{g} \frac{dv}{dt} + \xi \frac{v^2}{2g} - h = 0 \quad (8.4.1-2)$$

式中 A_l ——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);

ξ ——输水系统阻力系数。

8.4.2 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。

8.4.2.1 输水系统阻力系数可通过船闸水力学模型试验的恒定流流量系数按下式计算:

$$\xi = \frac{1}{\mu_n^2} \quad (8.4.2)$$

式中 ξ ——输水系统阻力系数,当开度等于零时, ξ 值为 10000;

μ_n ——阀门不同开度时输水系统的流量系数。

8.4.2.2 输水系统阻力系数可按现行行业标准《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)的有关规定进行计算,也可参照类似船闸取值。

8.4.2.3 计算原型水力特性时,应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。

8.4.2.4 输水廊道换算长度可按附录 H 计算。

8.4.3 船闸输水水力特性数值模拟基本方程可选用拉克斯格式、蛙步格式或迎风格式求解。

8.4.4 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。

8.4.5 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,时间步长可取 2 ~ 10s。当输水阀门开启时间与输水时间之比大于 0.6 时,时间步长可取 10 ~ 20s。

8.4.6 船闸输水水力特性数值模拟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 $\pm 5\%$ 。

8.4.7 船闸输水水力特性数值模拟计算应包括下列内容:

(1)船闸水头或闸室水位过程线;

(2)流量过程线；

(3)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。

8.4.8 船闸输水水力特性数值模拟应绘制模拟计算成果图表,并对主要特征参数进行分析。

附录 A 量水设备的安装和流量计算

A.1 量 水 堰

A.1.1 矩形量水堰的安装应符合下列规定。

A.1.1.1 量水堰的宽度和高度应由模型最大和最小流量计算确定。

A.1.1.2 量水堰堰板高度宜大于堰上最大水头的 2 倍,堰顶水深不应小于 0.03m。

A.1.1.3 量水堰水槽总长度不应小于堰上最大水头的 19 ~ 20 倍,堰板应安装在距水槽末端不小于 1.6 倍最大水头处。

A.1.1.4 堰槽必须等宽,堰板应与堰槽垂直正交,堰口锐缘厚度宜为 1 ~ 2mm,堰顶向下游的倾斜面与堰板顶面之间的夹角不得小于 45°。

A.1.1.5 量水堰水舌下方的槽壁上应设通气孔,位置应高于尾水位,通气孔的直径可按下式计算:

$$\varphi = 0.11HB^{0.5} \quad (\text{A.1.1})$$

式中 φ ——通气孔直径(m);

H ——堰上最大水头(m);

B ——堰板宽度(m)。

A.1.1.6 尾水水位与堰顶高差应大于 0.07m。

A.1.1.7 消浪栅应设置在堰板上游大于 12 倍堰上最大水头处。

A.1.1.8 水位测针孔应设置在堰板上游 6 倍堰上最大水头处。

A.1.1.9 堰口下方不小于 0.1m 范围内不得有突出物,堰板上游表面加工应光滑,粗糙度宜为 $Ra3.2\mu\text{m}$ 。

A.1.2 当矩形量水堰堰上水头为 0.03 ~ 0.75m 时,流量可按下列公式计算:

$$Q = \left(1.7821 + 0.24 \frac{H}{P} \right) B H_e^{\frac{3}{2}} \quad (\text{A.1.2-1})$$

$$H_e = H + 0.0011 \quad (\text{A.1.2-2})$$

式中 Q ——流量(m^3/s);
 H ——堰上水头(m);
 P ——堰板高度(m);
 B ——堰板宽度(m);
 H_e ——修正后的堰上水头(m)。

A.1.3 直角三角量水堰的安装应符合第 A.1.1.1 款、第 A.1.1.4 款、第 A.1.1.6 款和第 A.1.1.9 款的规定外,尚应符合下列规定。

A.1.3.1 量水堰堰板底部高度不应小于 0.1m,堰板宽度应为最大堰上水头的 3 ~ 4 倍,且不应小于 0.5m,堰顶水深不应小于 0.03m。

A.1.3.2 量水堰水槽总长度不应小于堰上最大水头的 12 ~ 14 倍,堰板应安装在水槽末端。

A.1.3.3 水位测针孔应设置在堰板上游 4 倍堰上最大水头处。

A.1.3.4 直角三角量水堰中心线两边各 45°,应以量水堰中心线为准,每侧安装角度的允许偏差为 $\pm 5'$ 。

A.1.3.5 消浪栅应设置在堰板上游大于 9 倍堰上最大水头处。

A.1.4 当直角三角量水堰堰上水头为 0.03 ~ 0.25m 时,流量可按下列公式计算:

$$Q = 1.33 H^{2.465} \quad (\text{A.1.4})$$

式中 Q ——流量(m^3/s);
 H ——堰上水头(m)。

A.2 文丘里水计

A.2.1 文丘里水计的安装应符合下列规定。

A.2.1.1 管道中心线应保持水平。

A.2.1.2 水计上游 10 倍管径和下游 6 倍管径距离内应顺直且无阀门和弯头等配件。

A.2.1.3 管道测压孔应位于上游 0.5 ~ 1.0 倍管径处,喉部测压孔应位于喉部中央。

A.2.1.4 测压断面应均布 4 个测压孔,孔径为 1mm,用均压环串联。

A.2.1.5 测压管内不得存在残余气泡。

A.2.2 流量可按下式计算:

$$Q = C_d a \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2}} \quad (\text{A.2.2})$$

式中 Q ——流量(m^3/s);

C_d ——流量系数,根据率定曲线确定;

a ——喉管断面面积(m^2);

g ——重力加速度(m/s^2);

h ——喉管与上游管路控制断面间的压差(m);

A ——上游管路断面面积(m^2)。

附录 B 材料糙率值

B.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 B.0.1 取值。

材料糙率值

表 B.0.1

序 号	材 料	糙 率 值
1	普通水泥砂浆抹面压光	0.010
2	普通水泥砂浆抹面拉毛	0.013 ~ 0.017
3	新铁皮	0.011
4	光滑有机玻璃板	0.007 ~ 0.009
5	加工良好木板	0.010
6	加工良好表面烫蜡的木板	0.0085
7	铜	0.006
8	新熟铁管	0.011
9	混凝土管和钢筋混凝土管	0.012 ~ 0.014
10	钢管	0.012

附录 C 模型加糙方法

C.0.1 模型加糙可采用颗粒平铺密排加糙方法或颗粒有间距加糙方法。加糙计算应符合下列规定。

C.0.1.1 平铺密排加糙粒径可按下式计算：

$$n = 0.015 d^{\frac{1}{6}} \quad (\text{C.0.1-1})$$

式中 n ——模型糙率；

d ——加糙粒径(mm)。

C.0.1.2 当平铺密排加糙不能满足要求时,可采用梅花形排列或正方形排列的有间距加糙方法。模型加糙粒径和间距可按下式计算：

$$n = c d^{\frac{1}{6}} \quad (\text{C.0.1-2})$$

式中 n ——模型糙率；

c ——系数,可根据颗粒间距与颗粒粒径之比,按图 C.0.1 确定；

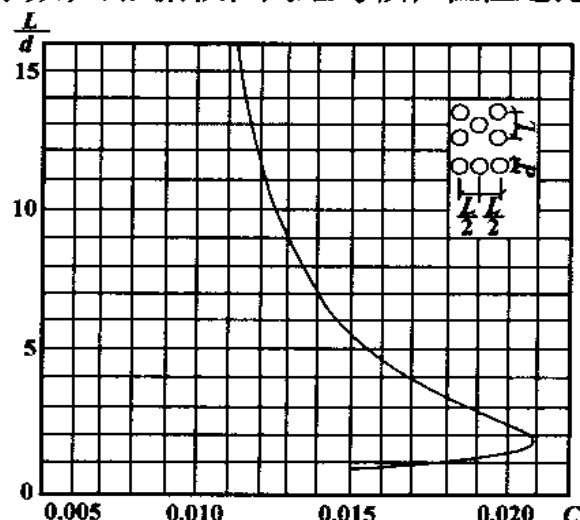


图 C.0.1 c 与 L/d 关系曲线

L ——颗粒间距(mm)

d ——加糙粒径(mm)。

C.0.2 根据模型试验需要,可联合采用平铺密排和有间距加糙方法。

附录 D 水弹性相似比尺关系

D.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。

D.0.2 水弹性相似应符合下列规定。

D.0.2.1 相似比尺关系应按下列公式确定:

$$\lambda_l = \lambda_L = \lambda_\delta \quad (\text{D.0.2-1})$$

$$\lambda_t = \lambda_T = \lambda_L^{\frac{1}{2}} \quad (\text{D.0.2-2})$$

$$\lambda_\theta = \lambda_{\rho_s} = \lambda_{\rho_w} = \lambda_\mu = \lambda_\varepsilon = 1 \quad (\text{D.0.2-3})$$

$$\lambda_\tau = \lambda_\sigma = \lambda_E = \lambda_p = \lambda_L \quad (\text{D.0.2-4})$$

$$\lambda_C = \lambda_L^{\frac{5}{2}} \quad (\text{D.0.2-5})$$

$$\lambda_{V_s} = \lambda_{V_w} = \lambda_L^{\frac{1}{2}} \quad (\text{D.0.2-6})$$

$$\lambda_{f_s} = \lambda_{f_w} = \lambda_L^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{D.0.2-7})$$

式中 λ_l ——固相几何比尺;
 λ_L ——液相几何比尺;
 λ_δ ——线变位比尺;
 λ_t ——固相时间比尺;
 λ_T ——液相时间比尺;
 λ_θ ——角变位比尺;
 λ_{ρ_s} ——固相材料密度比尺;
 λ_{ρ_w} ——液相密度比尺;
 λ_μ ——泊桑系数比尺;

λ_ϵ ——线应变比尺；
 λ_τ ——切应力比尺；
 λ_σ ——正应力比尺；
 λ_E ——弹性模量比尺；
 λ_p ——压力脉动幅值比尺；
 λ_C ——阻尼系数比尺；
 λ_{V_s} ——固相速度比尺；
 λ_{V_w} ——液相速度比尺；
 λ_{f_s} ——固相频率比尺；
 λ_{f_w} ——液相频率比尺。

D.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：

$$\lambda_E = \lambda_L \quad (\text{D.0.2-8})$$

$$\lambda_\mu = 1 \quad (\text{D.0.2-9})$$

$$\lambda_C = \lambda_L^{\frac{5}{2}} \quad (\text{D.0.2-10})$$

式中 λ_E ——弹性模量比尺；
 λ_L ——水的几何比尺；
 λ_μ ——泊桑系数比尺；
 λ_C ——阻尼系数比尺。

附录 E 船闸输水系统模型缩尺影响校正方法

E.0.1 分散输水系统船闸模型缩尺影响,可采用下列输水廊道摩阻系数校正法或水力特征值校正法进行校正。

E.0.1.1 输水廊道摩阻系数校正法,当 $10^{-6} < \Delta/4R < 10^{-2}$, $5 \times 10^3 < Re < 10^8$ 时,可根据模型流量计算原型流量,按式(E.0.1-1)计算模型和原型的雷诺数,并按式(E.0.1-2)分别计算原型和模型的沿程摩阻系数,求出摩阻系数的校正量,根据摩阻系数的校正量,计算修正后的阻力系数和流量系数,再计算修正后的流量,重复上述迭代过程至摩阻系数的校正量接近零为止,得到校正后的原型输水系统水力参数。

$$Re = \frac{u4R}{\nu} \quad (\text{E.0.1-1})$$

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log \left(0.2703 \frac{\Delta}{4R} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{E.0.1-2})$$

式中 Re ——水流雷诺数;

u ——廊道水流流速(m/s);

ν ——水的运动粘滞系数(m^2/s);

λ ——摩阻系数;

Δ ——绝对粗糙度(m),各种边界的绝对粗糙度按表 E.0.1 取值;

R ——廊道水力半径(m)。

E.0.1.2 水力特征值校正法,可根据模型的水力特征值按下列公式进行模型缩尺影响的校正计算:

$$\mu_p = 1.14\mu_m \quad (\text{E.0.1-3})$$

$$T_p = 0.857 T_m \quad (\text{E.0.1-4})$$

$$Q_p = 1.1 Q_m \quad (\text{E.0.1-5})$$

式中 μ_p, μ_m ——原型、模型船闸输水系统流量系数；

T_p, T_m ——原型、模型船闸输水时间(s)；

Q_p, Q_m ——原型、模型船闸输水系统最大流量(m^3/s)。

各种边界的绝对粗糙度 Δ 表 E.0.1

序 号	水流边界材料	$\Delta(\text{mm})$
1	有机玻璃、塑料板	0.030 ~ 0.080
2	镀锌铁皮	0.150
3	新钢管	0.100 ~ 0.200
4	微锈钢管	0.200 ~ 0.300
5	新铸铁管	0.300
6	焊接钢管	0.300 ~ 0.600
7	木槽	0.350 ~ 0.700
8	钢筋混凝土廊道	0.200 ~ 0.600
9	混凝土管	0.600 ~ 1.000
10	旧钢管	0.500 ~ 2.000
11	水泥砂浆抹面槽壁	0.750
12	接缝不抹灰浆的预制混凝土槽壁	1.500
13	混凝土衬砌渠道	1.800 ~ 3.800

附录 F 船厢内水体波动衰减所需运行长度的计算

F.0.1 斜面升船机匀速运行段中船厢内水体波动衰减所需运行长度可按下列公式计算：

$$L = VT \quad (\text{F.0.1-1})$$

$$T = n\tau_0 \quad (\text{F.0.1-2})$$

$$\tau_0 = 1.16 \left(\frac{L_k - L_c}{C_k} + \frac{L_c}{C_c} \right) \quad (\text{F.0.1-3})$$

$$C_k = \sqrt{gh} \quad (\text{F.0.1-4})$$

$$C_c = C_k \sqrt{1 - \frac{\omega_c}{\omega_k}} \quad (\text{F.0.1-5})$$

式中 L ——船厢内水体波动衰减所需运行长度(m)；
 V ——船厢运行速度(m/s)；
 T ——波动衰减时间(s)；
 n ——系数,取 20 ~ 30；
 τ_0 ——船厢内水体波动由一端传递到另一端的时间(s)；
 L_k ——船厢水域长度(m)；
 L_c ——船舶长度(m)；
 C_k ——无船段波速(m/s)；
 C_c ——有船段波速(m/s)；
 g ——重力加速度(m/s²)；
 h ——船厢水深(m)；
 ω_c ——船体最大横断面面积(m²)；
 ω_k ——厢内水体横断面面积(m²)。

附录 G ADI 法计算模式

G.0.1 基本方程离散时,流速、水位和水深在网格中应交错排列。

G.0.2 水流方程的离散和数值求解应按下列步骤进行:

(1) 将一个时间步长 Δt 分为两个半步长,在每半个时间步长内,计算水位和 x 向流速、 y 向流速;

(2) 在 $n\Delta t \rightarrow (n+1/2)\Delta t$ 前半段时间步长内,将水流方程离散为式(G.0.2-1)、式(G.0.2-2)和式(G.0.2-3),计算时先将式(G.0.2-1)与式(G.0.2-2)联立,采用追赶法按 x 方向逐行求解 $u^{n+1/2}$ 和 $h^{n+1/2}$,然后利用式(G.0.2-3)逐点求出 $v^{n+1/2}$ 。

$$AZ_1 u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + BZ_1 h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + CZ_1 u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = DZ_1 \quad (\text{G.0.2-1})$$

$$AU_1 h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + BU_1 u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + CU_1 h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = DU_1 \quad (\text{G.0.2-2})$$

$$v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = FV_1/EV_1 \quad (\text{G.0.2-3})$$

其中 $AZ_1 = -\frac{\Delta t}{2\Delta x} + h_{i-\frac{1}{2},j}^n$

$$BZ_1 = 1$$

$$CZ_1 = \frac{\Delta t}{2\Delta x} + h_{i+\frac{1}{2},j}^n$$

$$DZ_1 = h_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left(h_{i,j+\frac{1}{2}}^n v_{i,j+\frac{1}{2}}^n - h_{i,j-\frac{1}{2}}^n v_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right)$$

$$AU_1 = -\frac{\Delta t}{2\Delta x} g$$

$$BU_1 = 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta x} \left(u_{i+\frac{3}{2},j}^n - u_{i-\frac{1}{2},j}^n \right)$$

$$CU_1 = \frac{\Delta t}{2\Delta x} g$$

$$\begin{aligned} DU_1 = & u_{i+\frac{1}{2},j}^n - \frac{\Delta t}{4\Delta y} \nu_{i+\frac{1}{2},j}^n \left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n \right) \\ & + \Delta t \nu_i \left[\frac{1}{2\Delta x^2} \left(u_{i+\frac{3}{2},j}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2\Delta y^2} \left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n \right) \right] \end{aligned}$$

$$EV_1 = 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \left(\nu_{i,j+\frac{3}{2}}^n - \nu_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right)$$

$$\begin{aligned} FV_1 = & \nu_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \frac{\Delta t}{4\Delta x} u_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \left(\nu_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - \nu_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n \right) \\ & - \frac{\Delta t}{2\Delta y} g \left(h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n \right) \\ & + \Delta t \nu_i \left[\frac{1}{2\Delta x^2} \left(\nu_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - 2\nu_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \nu_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n \right) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2\Delta y^2} \left(\nu_{i,j+\frac{3}{2}}^n - 2\nu_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \nu_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) \right] \end{aligned}$$

$$h_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{1}{2} (h_{i,j}^n + h_{i+1,j}^n)$$

$$h_{i-\frac{1}{2},j}^n = \frac{1}{2} (h_{i-1,j}^n + h_{i,j}^n)$$

$$h_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{2} (h_{i,j}^n + h_{i,j+1}^n)$$

$$h_{i,j-\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{2} (h_{i,j-1}^n + h_{i,j}^n)$$

$$\nu_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{1}{4} \left(\nu_{i,j-\frac{1}{2}}^n + \nu_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n + \nu_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \nu_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n \right)$$

$$u_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4} \left(u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

式中 n ——计算步数;

t ——时间(s);

h ——水深(m);

u ——沿 x 方向的流速(m/s);

v ——沿 y 方向的流速(m/s);

Δx 、 Δy ——矩形网格中沿 x 、 y 方向的步长(m);

g ——重力加速度(m/s²);

ν_t ——水流紊动粘性系数(m²/s);

(3) 在 $(n + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (n + 1)\Delta t$ 后半段时间步长内, 将水流方程离散为式(G.0.2-4)、式(G.0.2-5)和式(G.0.2-6), 计算时先将式(G.0.2-4)和式(G.0.2-5)联立, 采用追赶法按 y 方向逐行求解 v^{n+1} 和 h^{n+1} , 然后利用式(G.0.2-6)逐点求出 u^{n+1} 。

$$AZ_2 v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} + BZ_2 h_{i,j}^{n+1} + CZ_2 v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = DZ_2 \quad (\text{G.0.2-4})$$

$$AV_2 h_{i,j}^{n+1} + BV_2 v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} + CV_2 h_{i,j+1}^{n+1} = DV_2 \quad (\text{G.0.2-5})$$

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = FU_2/EU_2 \quad (\text{G.0.2-6})$$

其中 $AZ_2 = -\frac{\Delta t}{2\Delta y} h_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$

$$BZ_2 = 1$$

$$CZ_2 = \frac{\Delta t}{2\Delta y} h_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$$

$$DZ_2 = h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[h_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right]$$

$$AV_2 = -\frac{\Delta t}{2\Delta y} g$$

$$BV_2 = 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \left(v_{i,j+\frac{3}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

$$CV_2 = \frac{\Delta t}{2\Delta y} g$$

$$\begin{aligned}
DV_2 &= v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{4\Delta x} u_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \left(v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
&\quad + \Delta t \nu_i \left[\frac{1}{2\Delta x^2} \left(v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - 2v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2\Delta y^2} \left(v_{i,j+\frac{3}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - 2v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right] \\
EU_2 &= 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta x} \left(u_{i+\frac{3}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
FU_2 &= u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - \frac{\Delta t}{4\Delta y} v_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i+\frac{1}{2},j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
&\quad - \frac{\Delta t}{2\Delta x} g \left(h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
&\quad + \Delta t \nu_i \left[\frac{1}{2\Delta x^2} \left(u_{i+\frac{3}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2\Delta y^2} \left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right] \\
h_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left(h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
h_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left(h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
h_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left(h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
h_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{2} \left(h_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\
v_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} &= \frac{1}{4} \left(v_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1} + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^{n+1} + v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{n+1} \right) \\
u_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{4} \left(u_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right)
\end{aligned}$$

式中 n ——计算步数;
 t ——时间(s);
 h ——水深(m);
 u ——沿 x 方向的流速(m/s);
 v ——沿 y 方向的流速(m/s);
 $\Delta x, \Delta y$ ——矩形网格中沿 x, y 方向的步长(m);
 g ——重力加速度(m/s^2);
 ν_t ——水流紊动粘性系数 (m^2/s)。

附录 H 船闸输水廊道换算长度计算

H.0.1 船闸串联输水廊道的换算长度可按下式计算:

$$L_{np} = \sum_{i=1}^n \frac{\nu_i}{\nu} l_i \quad (\text{H.0.1})$$

式中 L_{np} ——廊道换算长度(m),对出水孔数大于 15 的出水支孔段廊道可取该段廊道长度的 1/2;

ν_i ——第 i 段廊道断面平均流速(m/s);

ν ——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)。

H.0.2 船闸并联输水廊道的换算长度可按下式计算:

$$L_{np} = \sum_{i=1}^n \frac{\nu_i}{\nu} l_i \frac{Q_i}{Q} \quad (\text{H.0.2})$$

式中 L_{np} ——廊道换算长度(m),对出水孔数大于 15 的出水支孔段廊道可取该段廊道长度的 1/2;

ν_i ——第 i 段廊道断面平均流速(m/s);

ν ——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 ——分别为第 i 个支廊道和主廊道的流量(m^3/s)。

附录 J 本规程用词用语说明

J.0.1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对要求严格程度的用词用语说明如下:

(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)对表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”或“可”;

反面词采用“不宜”。

J.0.2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行时,写法为“应符合……的有关规定”或“应按……执行”。

附加说明

本规程主编单位、参加单位、 主要起草人、总校人员和管理组人员名单

主 编 单 位：交通部天津水运工程科学研究所

参 加 单 位：南京水利科学研究院

重庆西南水运工程科学研究所

主要起草人：孙精石(交通部天津水运工程科学研究所)

胡亚安(南京水利科学研究院)

郑宝友(交通部天津水运工程科学研究所)

(以下按姓氏笔画为序)

李金合(交通部天津水运工程科学研究所)

陈汉宝(交通部天津水运工程科学研究所)

周华兴(交通部天津水运工程科学研究所)

赵德志(交通部天津水运工程科学研究所)

赵世强(重庆西南水运工程科学研究所)

宣国祥(南京水利科学研究院)

总校人员名单：李永恒(交通部水运司)

何文辉(交通部水运司)

须清华(南京水利科学研究院)

宗慕伟(南京水利科学研究院)

吴敦龙(中交水运规划设计院)

张华庆(交通部天津水运工程科学研究所)
李华国(交通部天津水运工程科学研究所)
孙精石(交通部天津水运工程科学研究所)
胡亚安(南京水利科学研究院)
郑宝友(交通部天津水运工程科学研究所)
李金合(交通部天津水运工程科学研究所)
陈汉宝(交通部天津水运工程科学研究所)
周华兴(交通部天津水运工程科学研究所)
赵德志(交通部天津水运工程科学研究所)

管理组人员名单: 孙精石(交通部天津水运工程科学研究所)
郑宝友(交通部天津水运工程科学研究所)
胡亚安(南京水利科学研究院)
陈汉宝(交通部天津水运工程科学研究所)
李华国(交通部天津水运工程科学研究所)

中华人民共和国行业标准

通航建筑物水力学模拟技术规程

JTJ/T 235—2003

条文说明

目 次

1	总则	(77)
3	基本规定	(78)
3.1	一般规定	(78)
3.3	试验设备和测量仪器	(78)
3.4	物理模型制作精度	(79)
4	枢纽通航整体模型试验	(80)
4.1	一般规定	(80)
4.2	基本资料	(80)
4.3	模型设计	(80)
4.4	模型制作及安装	(82)
4.5	试验设备和测量仪器	(82)
4.6	试验内容和方法	(82)
4.7	资料整理及分析	(84)
5	船闸水力学模型试验	(85)
5.1	一般规定	(85)
5.3	模型设计	(85)
5.4	模型制作及安装	(86)
5.6	试验内容和方法	(86)
5.7	资料整理及分析	(87)
6	升船机水力学模型试验	(89)
6.1	一般规定	(89)
6.3	模型设计	(89)
6.6	试验内容和方法	(90)

6.7	资料整理及分析	(90)
7	中间渠道通航水力学模型试验	(91)
7.1	一般规定	(91)
7.3	模型设计	(91)
7.6	试验内容和方法	(91)
7.7	资料整理及分析	(92)
8	通航水力学数值模拟	(93)
8.3	枢纽通航水力学数值模拟	(93)
8.4	船闸输水水力特性数值模拟	(94)
附录 A	量水设备的安装和流量计算	(95)
附录 B	材料糙率值	(96)
附录 C	模型加糙方法	(97)
附录 D	水弹性相似比尺关系	(98)
附录 E	船闸输水系统模型缩尺影响校正方法	(99)
附录 F	船厢内水体波动衰减所需运行长度的计算	(101)
附录 H	船闸输水廊道换算长度计算	(102)

1 总 则

1.0.1 通航建筑物水力学问题,由于边界和水力条件各不相同,单纯用理论分析的方法不可能解决复杂的工程问题,通过类似工程的原型观测又需耗费大量人力、物力、财力和时间,有时还难以捕捉到有代表性的设计情况,因此物理模型和数值模拟已成为解决通航建筑物水力学问题的重要手段。为能更好地运用模拟技术,规范和统一试验方法,提高模拟精度和科学性,使研究成果有可比性,因此制定本规程是十分必要的。

1.0.2 枢纽通航水流条件主要是指枢纽中通航建筑物的引航道、口门区及连接段范围内的通航水流条件。

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条件的影响。数值模拟在通航建筑物水力学研究领域中,对解决一些重复量大的工作如定性的方案对比时效率是很高的,对定量解决复杂问题,特别是反映三维的水流现象是有局限性的。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。

复合模型是近代新发展起来的一种模拟方法,这种方法将数值模拟和物理模型相结合。它可以由数值模拟来提供物理模型的边界条件和初始条件,特别是在边界条件复杂或非恒定流情况下,在模型范围很大时,可以减小物理模型的模拟范围,控制模拟边界条件,提高模拟精度。同时也可以由物理模型提供数值模拟的某些参数,利用数值模拟速度快、变换方案容易和成本相对较低的特点,进行多组次的计算,使数值模拟更加准确和可靠。

3.1.4 迄今为止变态模型在通航建筑物水力学模型试验方面,无论从理论上和实践上尚无成熟的经验,故模型不得采用变态。

3.3 试验设备和测量仪器

3.3.2 平水塔是保障供水管道水压和流量稳定的设备,当供水系统给多个模型供水时,如果没有平水塔,一个模型流量的变化就会影响其他模型的流量,给试验造成困难。当供水系统只为一个模

型供水时,也可以不设平水塔。

3.4 物理模型制作精度

3.4.1 一般模型导线控制范围不会超过 50m,用经纬仪控制角度可以精确到 0.01° ,此时产生的最大误差不会超过 10mm。

3.4.2 水准点是模型高程的重要控制点,因此要求精度较高。误差主要产生于水准尺刻度、仪器水平度及读数视差等。只要操作时注意,这样的精度是可以达到的。

3.4.3 原体水位和水深的测量精度一般为 $0.05 \sim 0.1\text{m}$,一般枢纽整体模型几何比尺为 1:100 左右,据此规定制模精度为 $\pm 1\text{mm}$ 。平面位置偏差对试验结果影响较小,因此允许偏差为 $\pm 10\text{mm}$ 。

3.4.4 主要考虑水工建筑物模型尺寸偏差对试验结果影响较大,因此精度控制要比地形严格。

3.4.5 本条规定是根据国内船模的模拟经验确定的。

4 枢纽通航整体模型试验

4.1 一般规定

4.1.3 验证试验是为了检验和调整模型的水流运动和阻力与原型的相似性,如果相似性不符合要求,就不能保证试验的正确性。因此要对模型进行检验和调整,采取措施如改变糙率等,以满足相似性的要求。

4.1.4 本条是指推荐工程方案布置、通航水流条件限值和停泊标准应符合相关技术规范的规定。

4.2 基本资料

4.2.1 模型中进出口段是试验河段之外上下游的水流调节段。

4.2.6 船舶资料是为试验中模拟船模所用,船模分为无动力和有动力两类。无动力船模为非自航性质的船模,主要用于船舶停泊条件试验;有动力船模即遥控自航船模,主要用于航行条件试验。根据试验目的和要求对船舶资料有所选择。

4.3 模型设计

4.3.2 枢纽模型一般按重力相似准则设计,即模型与原型中惯性力和重力的比值相等。但实际上流体运动时,除惯性力和重力外,还有粘滞力、弹性力、表面张力和离心力等,要使模型达到动力完全相似,几乎是不可能的。为了消除或减少其他作用力影响所产生的偏差,条文中补充了限制条件,现将依据说明如下:

(1)从阻力相似出发,模型至少应该达到紊流,许多试验结果

表明,明渠水流中紊流临界雷诺数的下限为 1000;

(2)为消除表面张力的影响,根据理论计算,要求模型表面波速大于 0.23m/s ,模型的最小水深不应小于 0.015m 。考虑到流速仪测量或模型加糙物影响的要求,规定模型航槽中的水深不应小于 0.03m ;

(3)河道模型一般用水泥砂浆粉面,其糙率约为 $0.012 \sim 0.013$,若模型糙率小于 0.012 ,则制模较困难;一般原型河道的最小糙率为 0.03 左右,模型糙率应当比它小,如果模型糙率大于 0.03 就无法达到相似要求,故有此限制。

4.3.3 水流调节段为水流的自动调节段,用以保证试验段的水流运动与原型相似。模型进口水流调节段的长度与其上游段的河势有关。出口考虑到控制水尺的位置要求及出口段受尾门的影响,同样也需要有一定的模型长度来消除其影响。长度的规定是根据上述原则并总结大量模型实践经验确定的。

4.3.4 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。

4.3.5 根据国内有关研究单位进行枢纽通航工程整体水工模型试验的实践经验,枢纽通航水工模型均采用正态模型,要求的模型糙率较小,一般由水泥砂浆粉面后,压光或进行拉毛处理,就可以使模型的阻力达到相似。若不满足,再根据需要按附录 C 进行颗粒加糙。

4.3.6 枢纽通航整体模型中的船闸,由于受比尺限制,一般无法严格模拟输水系统,因主要是研究灌泄水过程对通航水流条件的影响,而不是研究输水系统本身的水力特性,故可以简化。只要保证船闸输水过程中的流量变化相似就可以了。

4.3.7 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。

4.3.8 无动力船模是指在枢纽整体模型中进行船舶的停泊条件试验时,船舶中驳船不模拟舵,推轮不模拟螺旋桨和舵,均为非自航性质的船舶模型。

4.4 模型制作及安装

4.4.3 根据实践经验,采用断面板控制地形,用导线网控制平面位置,水准点控制高程,是最常见的做法。

4.5 试验设备和测量仪器

4.5.2

(1)根据实践证明毕托管是测量恒定流时均点流速首选的较佳常规仪器,近年已有自动记录的毕托管流速仪。

(2)微型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。

(3)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。

4.6 试验内容和方法

4.6.1

(1)根据有关科研单位验证水面线的实践,提出不同的水位控制允许偏差。主要是因洪水期的地形复杂,观测原型洪水期水位比较困难,误差较大;而中、枯水位原型观测较易进行,此时水深又相对较小,故允许偏差应从严掌握。由大量的模型验证实践表明,验证水面线主要是中、枯水位达到与原型一致。因此对洪、中、枯水位的验证分别提出控制的允许偏差。

(2)根据原型与模型不同的测量方法,原型测取断面的平均流速和相应过流面积的乘积求得流量,公认误差为 $\pm 5\%$,因此模型相应流量的偏差为 $\pm 5\%$,能够满足试验要求。

(3)原型中观测断面上测点的流速分布时,视水深的大小采取一点法至五点法,测量垂线上各点的平均流速,得到全断面平均流速值。鉴于模型水深浅,难于按原型相应的测点进行流速测量,故根据模型水深,以水深小于和大于0.05m,分别按一点法和二点法测量,获得模型的平均流速。

(4)鉴于模型与原型水流都具有紊动和不规律性,根据国内有关科研单位的经验,若某测点水位偏高,则校核该测点附近断面的糙率是否偏大,采取减小模型的糙率;若测点水位偏低,则说明该测点附近的糙率偏小,采取增大模型糙率的措施;除此之外尚需校核测点上下断面之间的局部地形是否符合原地形;若采取措施并经过室内作业各方面的检查,仍不满足要求时,则对原地形和水位观测资料重新审查或重新观测。

4.6.2 本条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,即使在同一岸又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。

4.6.4 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。

4.6.5 枢纽的通航水流条件试验是经过多种方案的优化,从局部到整体,从不够完善到完善的过程。在优化过程中往往是抓主要矛盾,针对水流条件中某个或某几个特定的指标进行反复试验,使其满足标准要求,不一定都要做系统完整的试验,当得到终结布置的推荐方案时,补充尚未做过的其他试验,全面反映推荐方案的各项指标,使其形成一套系统完整的模型试验资料。

4.7 资料整理及分析

4.7.4 对不满足技术标准的工程方案进行优化修改试验所采取的改善措施有改变通航建筑物在枢纽布置中的相对位置;调整船闸纵轴线的位置;调整导航隔流堤的布置形式,改变堤头形式、角度、堤的长短、堤上开孔和堤断面形状,采取筑丁坝、潜坝、扩宽边坡和设挑流墩等辅助建筑物;改变溢流闸门的开启方式、改变船闸运行方式和日调节调峰间隔或方式等。

5 船闸水力学模型试验

5.1 一般规定

5.1.1 其他的船闸水力学模型试验包括事故闸门动水关闭、船舶进出船闸闸室阻力、航态和有闸室减淤要求的输水系统布置等。此外,还有省水、河口入海防咸船闸等特殊类型的船闸水力学模型试验。

5.1.3 大量模型试验和原型观测表明,船闸原型的输水效率比模型高,流量系数大,造成输水时间缩短、流量增加和惯性超高超降增大,使模型试验成果偏于不安全。因此,对模型试验的缩尺影响要给予足够重视。一般认为阻力特别是沿程摩擦阻力不相似是产生原型和模型差异的主要原因,这在分散输水系统的船闸表现尤为明显,它的损失主要以沿程摩擦阻力损失为主。观测结果表明原型比模型阻力系数降低 20% ~ 50%,流量系数则增加 10% ~ 20%。因此要对分散输水系统船闸模型试验成果进行缩尺影响分析和校正。

5.3 模型设计

5.3.1 船闸水力学模型试验模型设计限制条件的原因如下:

(1)为了达到模型水流与原型阻力相似,模型水流需处于阻力平方区。受模型比尺的影响,模型的雷诺数比原型小很多,一般难以达到,为了减小试验误差,使模型水流达到紊流则是最低要求;

(2)根据经验,模型出水孔廊道段水流雷诺数应大于 50000,可忽略雷诺数对局部阻力的影响,多数模型试验资料表明,除在阀门

开启初期及输水末期小部分时段不能满足该要求外,其他大部分主要输水时段均能满足该要求;

(3)根据试验经验,掺气模型试验的水流速度大于 7m/s ,才可保持掺气相似。

5.3.2 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。

5.3.6 该条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。但对于分散输水系统船闸模型的多数出水孔缝,如其宽度小于 6mm ,其缩尺影响将显著增大,目前尚无较好的校正方法。因此选取模型比尺时要考虑该因素。

5.4 模型制作及安装

5.4.2 满足水弹性相似要求的模型材料是一种高重度、低弹模的特殊材料,到目前为止尚没有一种现成的可以应用的天然或人工的合成材料,需专门研制。

5.4.3 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。

5.6 试验内容和方法

5.6.1~5.6.5 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。

5.7 资料整理及分析

5.7.3 由于空化现象的模型缩尺影响较为复杂,目前尚难以对初生空化数进行校正,因此仅能根据校正后的输水系统水力特征值对工作空化数进行校正。

5.7.5 修改方案是指：

(1)当灌泄水时间不满足要求时,采取改变阀门开启速度,或修改输水廊道布置,或加大控制断面的面积等措施；

(2)当闸室和引航道水力条件不满足船舶安全停泊条件时,改变阀门开启方式,或改变输水系统的布置形式；

(3)当廊道转弯处负压超过许可值时,修改廊道转弯曲率半径；

(4)当灌泄水时惯性超高或超降超过规定时,采取平水开启工作闸门和提前关闭输水阀门等措施；

(5)当引航道流速分布不均匀、出现回流和通航水流条件超过限值时,需修改消能措施或改变阀门开启方式；

(6)当开敞式阀门在输水过程中产生远驱式水跃时,采取降低阀门段廊道高程、延长阀门开启时间(或采用阀门变速开启)、增大阀门后阻力或提高廊道段混凝土的抗冲强度等措施;

(7)当阀门底缘工作空化数小于或等于临界空化数时,采取改变阀门开启方式、优化廊道体型、降低阀门段廊道高程、增加门后阻力和通气等措施;当门槽产生空化时,修改门槽体型和加强门槽结构强度等措施;

(8)输水廊道进口产生有害串心吸气漩涡时,视不同的进口形式,采用消涡栅、消涡板、改变支孔喉部面积比、增大进口面积、增加淹没水深或修改边界条件等措施。

6 升船机水力学模型试验

6.1 一般规定

6.1.2 安全通航技术指标是指船舶允许系缆力和通航水流条件的限值。

6.3 模型设计

6.3.1.2 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 λ_L ,力的比尺为 λ_L^3 ,所以弹性系数比尺 $\lambda_K = \lambda_L^3 / \lambda_L = \lambda_L^2$ 。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。

6.3.1.3 船模试验时为消除层流边界层的影响使船模四周的流态与原型相似,即均为紊流,因此一般采用沿船模外表横剖面从船首开始布置 1 根以上激流丝的措施。船舶雷诺数大于 10^6 是根据国内外船模试验经验得到的。

6.3.2.3 斜面升船机船厢按正常运行速度图,有起动加速段、匀速运行段和制动减速段。起动加速段使船厢内产生的水体波动在匀速运行段发生衰减。当匀速运行段很长时,在船厢未制动减速前,厢内波动已完全衰减,因此,对原体很长的匀速运行段,在模型中可以不用全部模拟出来,只模拟船厢内水体波动衰减所需的匀速运行长度。

6.3.3 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。

6.3.5 无动力船模设计要考虑安设测量系统缆力、纵倾和航行阻力等仪器的需要。

6.6 试验内容和方法

6.6.1 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统缆力增大,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,致使厢中或坡槽中水体波动和船舶系统缆力过大,因此要通过试验确定合理的事事故制动减速度。

6.6.2

(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)运行中的船厢或推板内水体波动、船舶系统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或推板的实际运行速度有时会有差异,因此规定在船厢或推板行走轮上安设测速装置,是为了准确测定船厢或推板实际运行速度及其变化。

6.7 资料整理及分析

6.7.2 修改方案是指改变运行速度的试验。斜面升船机船厢和水坡升船机推板是改变起制动加减速速度,根据国内外已有经验,加减速速度有等加减速和变加减速,后者比前者可获得小得多的水体波动和船舶受力。此外,对小型工程一般采取船厢或推板为多级加减速起制动运行方式,通过试验确定所分级数及每级间隔时间,以避免各级起制动引起水体波动叠加。

7 中间渠道通航水力学模型试验

7.1 一般规定

7.1.2 本条是指推荐工程方案布置、通航水流条件限值和停泊标准应符合相关技术规范的规定。

7.3 模型设计

7.3.3 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不宜小于 1:80,中小型工程可取 1:30 ~ 1:50。

7.3.4 中间渠道中岸边船行波波高与船舶航线到岸边的距离有关,为保持距离不变,所以规定设置导向设施,使船模直航。

7.3.6 直航试验以导轨保持航向和航线相似,通过调整螺旋桨转速达到航速相似。

7.6 试验内容和方法

7.6.1

(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。

7.6.3 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。

7.7 资料整理及分析

7.7.3 根据相互关系曲线,对于相应的条件,已知航速、船吃水、水深和断面系数后,可以查得近岸处最大波高,也可得出影响最大波高的主要因素和规律。针对不同岸坡材料和形式提出减小船行波危害的措施。

7.7.5 修改方案是指:

(1)为减小渠道中波动叠加的影响,对上下船闸输水或上下升船机船厢出入水起始时间,采取不同的错开历时;对双线船闸或升船机采用不同的组合运行方式。

(2)修改渠道断面形状及水域面积、在船闸输水进出口地段较大范围内分散布置输水廊道、在闸室或船厢池附近设置调节池和部分旁侧灌泄水等措施。

8 通航水力学数值模拟

8.3 枢纽通航水力学数值模拟

8.3.4

(1)ADI 法兼有显、隐式优点,是目前我国工程界中最先开展并应用较广泛的一种模式。

(2)三角元法原理简单、解法直观、编辑容易和布设随意,易拟合固边界,有较好的稳定性、收敛性和精度,已得到了广泛应用。

8.3.5 枢纽通航水力学数值模拟定解条件中的边界条件是数值模拟成败的关键因素之一,因此在确定边界条件时,需对计算域水流情况和边界特性充分了解,从而正确确定边界条件。

边界条件分固边界和水边界两类。水边界通常根据已知资料来确定,当水边界缺乏实测资料时,一般依据周围已知资料初步选定边界条件,并与计算域内验证点实测资料进行对比,反复调整初选边界,直至域内验证点计算结果与实测结果相吻合为止。

8.3.6 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,本条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,在有些情况下废网格很多;另一种是镜象法,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,但三角形网格在边界附近采用中心差分其计算稳定性

较差。

(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,但可使方程标准化,以简化程序。

(4)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,如窄缝法等。

8.4 船闸输水水力特性数值模拟

8.4.6 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。

附录 A 量水设备的安装和流量计算

本附录主要依据国家现行标准《明渠堰槽计量试行检定规程》(JJG 711)、《水工与河工模型常用仪器校验方法》(SL/T 233)、《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTJ/T 232)以及实际使用经验确定。

关于量水堰流量的计算公式,大多数都是经验公式,它们与堰板尺度和堰槽尺寸、水流条件等都有关系,因此在没有量水校验设备直接率定流量情况下,应用这些计算公式时要注意使用条件。规程中所介绍的公式是常见的,有些公式有多种表达形式,如矩形堰雷伯克(Rehbock)公式,不同年代不同国家均有不同形式,经比较计算各公式之间差异不大,本规程选择了一个比较简捷的计算公式。

附录 B 材料糙率值

B.0.1 表 B.0.1 材料糙率值系根据水力学教科书和有关资料经综合分析比较后选取的。

附录 C 模型加糙方法

C.0.1

(1)式(C.0.1-1)是经验公式,式中 0.015 为经验系数,因各家试验条件不同而略有差异。有的取 0.0166,有的取 0.0138。试验证明,除粒径外,颗粒的形状及排列对糙率也有一定影响。

(2)式(C.0.1-2)和图 C.0.1 是根据有关单位,在水槽中的系列试验和一些河工模型试验中的实例数据拟合出来的,也是经验关系。使用时需根据实际情况适当调整。

(3)对无间距加糙,用加糙颗粒填铺并与模型断面板齐平,就能保证模型水深和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。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。

附录 D 水弹性相似比尺关系

D.0.1、D.0.2 本附录内容系根据现行行业标准《水工建筑物水流压力脉动和流激振动模型试验规程》(SL 156)和有关研究成果的相关内容编写的。

附录 E 船闸输水系统模型缩尺影响校正方法

E.0.1.1 式(E.0.1-2)统一了国外所用的雷诺数校正法和我国以往所用的糙率校正法,同时体现了粗糙度和雷诺数的影响,兼顾了模型和原型在输水过程中所经历的各种流段。由该式可见,当雷诺数较大时分母对数中第2项趋向于零,即相当于糙率校正;当雷诺数较小时,则前面一项相对较小,即相当于雷诺数校正;在其他情况则粗糙度和雷诺数均起作用,该式同时可反映模型比尺的影响,是一种有理论基础的校正方法。校正过程如下:

(1)由于模型和原型的糙率和雷诺数不同,需要进行迭代计算。首先将模型的实测流量按比尺关系得出原型流量,并按式(E.0.1-1)计算得出原型雷诺数;再根据式(E.0.1-2)分别计算得出原型和模型的沿程摩阻系数 λ_p 和 λ_m ,由此得到原型与模型沿程某区段 l_i 摩阻系数的校正值 $\Delta\lambda_i = \lambda_{mi} - \lambda_{pi}$,由 $\Delta\xi_i = \Delta\lambda_i l_i / 4R_i$ 计算得到输水廊道的原型沿程阻力系数的总校正值 $\sum \Delta\xi_p$,由已知的模型总阻力系数 $\sum \xi_m$ 得到校正的原型总阻力系数为 $\sum \xi_p = \sum \xi_m - \sum \Delta\xi_p$,由式 $\mu_p = 1/\sqrt{\sum \xi_p}$ 计算出原型的流量系数,由此能够计算得到近似的原型流量 Q_p ;

(2)根据求出的近似原型流量 Q_p 重复上述的计算过程,再次得到逼近原型的 λ'_p 、 $\sum \xi'_p$ 、 μ'_p 和 Q'_p ,当迭代计算后得到的原型沿程摩阻系数 λ'_p 与迭代前的沿程摩阻系数 λ_p 的值基本相等时,得到的原型 λ'_p 、 $\sum \xi'_p$ 、 μ'_p 和 Q'_p 即为经过模型缩尺校正后的输水系统水力参数;

(3)由于模型或原型输水廊道各区段的断面尺寸不尽相同,在

同一流量下,其水力半径 R 与雷诺数亦不相同,因此要分别对每一区段的沿程摩阻系数值进行计算,然后再分别计算输水廊道每一区段的阻力系数值;

(4)将输水廊道每一区段的阻力系数值换算为相对于阀门处廊道断面(计算断面)的阻力系数,相加后得到输水廊道的原型沿程阻力系数的总校正值。

E.0.1.2 该方法是根据一些不同比尺、不同输水系统型式船闸原型和模型的主要水力特性资料统计点绘的关系曲线而得,因此是一种经验统计的方法,它具有简单方便的优点。它的缺点是对不同模型比尺和输水系统布置形式等对缩尺的影响难以区分,此外由于这种方法难以确定输水系统沿程各区段阻力系数的缩尺影响,因此要准确了解输水系统沿程的水力特性如压力分布等就有一定困难。

附录 F 船厢内水体波动衰减所需运行长度的计算

F.0.1 本附录是根据国内外有关试验资料总结出来的半经验半理论公式。公式中对船厢中无船段波速和有船段波速分别为理论计算值,实际上水体波动由厢的一端经过船体传递到厢的另一端,因受船体及厢底粗糙度等因素影响,波速要减小,传递时间要增大,所以根据经验采用系数 1.16。

附录 H 船闸输水廊道换算长度计算

H.0.1、H.0.2 本附录是根据现行行业标准《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306)附录 E 中的有关内容编写的。