

洪水演进水动力实时模拟技术规程

1 范围

本文件规定了洪水演进水动力实时模拟的技术要求、技术方法和模型数据接口。

本文件适用于山区及平原河流洪水、河口风暴潮洪水、溃（漫）坝洪水、溃（漫）堤洪水演进水动力实时数值模拟。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

JST 231—4 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程

JTST 231—2 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程

SL/T 164 溃坝洪水模拟技术规程

SL 323 实时雨水情数据库表结构与标识符

SL 483 洪水风险图编制导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

洪水演进水动力实时模拟 real—time hydrodynamic simulation for flood routing

基于当前及未来气象、水雨情，以及水利工程当前运行状态及调度方案，运用水动力模型对物理流域洪（潮）水在河道、河口内传播及地表上淹没的过程进行同步仿真计算。

3.2

河口沿海风暴潮模拟 simulation of storm surge in estuaries

运用风暴潮水动力数学模型，计算台风或温带气旋作用下潮水在河口沿海区的运动过程。

3.3

堤坝溃决（漫溢） dam/dike—break or overtopping

坝体、堤防出现溃口或洪水漫顶，包括溃坝、漫坝、溃堤、漫堤。

3.4

洪水风险区 flood risk areas

受洪水威胁、存在洪水淹没风险的区域。

3.5

模型数据接口 model data interface

洪水演进水动力模型与相关业务应用系统进行数据通信的格式与渠道。

4 基本规定

4.1 洪水演进水动力实时模拟应遵循智慧水利、数字孪生水利、防洪“四预”等基本技术要求。

- 4.2 洪水演进水动力实时模拟技术可实现流域尺度洪水过程的快速动态计算，为洪水预报预警、洪灾损失评估、水工程防洪调度、防汛应急抢险等业务提供重要技术支撑。
- 4.3 洪水演进水动力实时模拟应兼顾模拟精度和计算效率。

5 基础资料准备

5.1 基础资料

洪水演进水动力实时模拟所需的基础资料应包括基础地理资料、水文气象资料、工程资料、历史洪水资料。

5.2 基础地理资料内容及要求

5.2.1 基础地理资料主要包括以下内容：

- a) 地形资料，包括河道、河口、湖泊的地形资料，洪水风险区地表地形资料；
- b) 其它基础地理资料，包括交通道路、土地利用、遥感影像、线状阻水/导水建（构）筑物等。

5.2.2 资料精度要求：

- a) 河道水下地形图及河道断面比例尺不宜小于 1：2000，湖泊、河宽大于 1 km 的河道水下地形精度可放宽为不宜小于 1：10000；
- b) 洪水风险区陆域地形资料比例尺不小于 1：10000；
- c) 河口近岸区地形资料比例尺不小于 1：10000；
- d) 遥感影像宜采用分辨率不低于 2 m 的正射影像。

5.3 水文气象资料内容及要求

5.3.1 水文气象资料主要包括降雨、水（潮）位、流量（来水及排水）、台风等实测、调查及设计资料，水文站水位—流量关系等。

5.3.2 实测水文气象数据时间间隔宜小于或等于 1 h。

5.3.3 水文气象资料应满足可靠性、一致性和代表性要求。用于模型参数率定和模型验证时，宜收集与地形资料年份接近的水文气象资料。

5.4 工程资料内容及要求

5.4.1 工程资料主要包括水利工程基础参数和工程调度资料。

5.4.2 水利工程基础参数主要包括：

- a) 水库（水电站）：特征水位、库容曲线、泄流曲线等；
- b) 水闸：闸孔数量、净宽、闸底高程、泄流曲线等；
- c) 泵站：起排水位、止排水位、设计最高外水位、设计抽排流量等；
- d) 堤防：堤顶高程、防洪标准、警戒水位、保证水位、设计水位、安全泄量等；
- e) 桥梁：结构型式、桥墩尺寸、梁底高程、桥面高程等；
- f) 涵洞：结构型式、尺寸、底高程、顶高程等；
- g) 堰坝：类型、尺寸、顶高程等；
- h) 蓄滞洪区：水位—面积—容积曲线。

5.4.3 水利工程调度资料主要包括：

- a) 水库（水电站）、蓄滞洪区、水闸、泵站等调度运用规则等；
- b) 防御洪水方案、洪水调度方案以及各级防洪预案。

5.4.4 工程资料应满足时效性和权威性要求。

5.5 历史洪水资料内容及要求

5.5.1 历史洪水资料包括洪水水文特征和工程调度运行情况。

- a) 洪水水文特征：河道断面洪水流量和水位过程、河道沿程最高洪水位，洪水风险区淹没范围、最大淹没水深、洪水到达时间及淹没历时等。
- b) 工程调度运行情况：堤坝溃决（漫溢）情况、洪水发生当时的工程和工程调度情况等。

5.5.2 历史洪水资料应满足可靠性要求。

5.6 补充测量与测验

当地形、水文资料范围和精度不能满足洪水演进水动力实时模拟建模要求时，应开展补充测量和测验工作。

5.7 基础数据更新

当模拟区域内的地形、土地利用、工程建设及工程调度等发生变化、与已有基础资料不一致时，应补充收集相关资料，并对模型基础数据进行更新。

6 模型及计算方法选择

6.1 模型选择

6.1.1 洪水演进水动力模型应满足下列要求：

- a) 模型稳定性应能适应复杂计算条件；
- b) 模型计算速度应能满足洪水同步仿真计算的时效性要求；
- c) 模型精度应能确保模拟结果能合理反映洪水演进及淹没的实际情况。

6.1.2 洪水演进实时模拟应根据不同对象和不同要求选用不同尺度的水动力模型。其中，湖泊及湖泊型水库调蓄宜采用零维模型；河道及河网洪水模拟可参照附录 A 所列一维水动力模型或附录 B 所列二维水动力模型；河口海域风暴潮模拟可参照附录 C 所列风—浪—流多场耦合二维水动力模型；堤坝溃决（漫溢）洪水模拟可参照附录 D 所列一维—二维耦合水动力模型或附录 B 所列二维水动力模型。

6.1.3 河道及河网水动力模型宜同时适应山区陡峭河道及平原河网，且在任意初始场和边界条件下可快速计算收敛。

6.1.4 洪水风险区水动力模型应适应干湿边界转换和各种局部突变地形，能反映各类下垫面阻、蓄、滞、导水影响。

6.1.5 河口海域风暴潮水动力模型宜考虑风—浪—流多场耦合作用，能合理反映河口海域不规则岸线及地形对潮流及风暴潮增水过程的影响。

6.1.6 堤坝溃决（漫溢）水动力模型宜能同时模拟急流和缓流，且应具备守恒性和激波捕捉能力。

6.1.7 水动力模型宜选用具有自主知识产权、适配国产软硬件环境，并通过实践检验的国产模型或软件。

6.2 计算方法选择

6.2.1 洪水演进水动力模型数值求解方法可选择有限差分法、有限体积法、有限元法等，宜采用计算网格动态调整、计算时间步长动态调整、并行计算等方法提高模型求解速度。

6.2.2 二维水动力模型可根据洪水淹没干湿边界实时变化，动态调整参与计算的网格。

- 6.2.3 二维水动力模型求解计算时间步长可选择全局时间步长和局部时间步长。全局时间步长宜根据计算过程中各网格水深、流速状态自适应动态调整计算时间步长。当网格数量多且存在局部加密网格时，可采用局部时间步长法。
- 6.2.4 一维水动力模型与二维水动力模型耦合求解时，宜采用时间步长自适应匹配方法。
- 6.2.5 一维、二维水动力模型计算模式包括 CPU 串行计算模式、CPU 单机多核并行计算模式、GPU 单机并行模式、基于区域分解技术的分布式并行计算模式等，应根据计算耗时控制选择合适的计算模式。CPU 单机多核并行计算模式可参照附录 E，GPU 单机并行计算模式可参照附录 F，基于区域分解技术的分布式并行计算模式可参照附录 G。
- 6.2.6 并行计算模式设计要求如下：
- a) CPU 多核并行化设计宜运用数组合并、循环交换、关键数据提取、循环合并等方法提升 Cache 命中率；
 - b) GPU 并行化设计应减少 CPU 与 GPU 之间数据传递频次；
 - c) 分布式并行化设计应减少进程间消息传递的等待时间和通信时间。

7 模型构建与应用

7.1 基本要求

洪水演进水动力实时模拟主要技术流程应包括建模范围确定，计算断面和网格剖分，边界条件、运行控制条件及初始条件设置，模型率定验证，计算耗时控制，计算结果分析及合理性分析。

7.2 建模范围确定

7.2.1 洪水演进水动力模型建模范围应包括河道、河网建模范围，河口海域建模范围及洪水风险区建模范围，其要求如下：

- a) 河道、河网建模范围，以研究区域洪水来源河道（或河网）上游具备进行水文预报条件的控制断面或水库坝址为上边界；以研究区域下游水文控制站、控制性水工建筑物、大水体（水库、湖泊、海域等）或具备稳定水位—流量关系的控制断面为下边界；
- b) 河口海域建模范围，以河口水文控制断面、陆域岸线至不受径流影响、具备潮位预报条件的海域计算边界；
- c) 洪水风险区建模范围，可参考防洪区边界确定。

7.2.2 当研究区域具有一种以上的洪水来源时，建模范围以各类洪水建模范围包络的最大范围确定。

7.2.3 当模型用于洪水实时预报预警时，宜根据洪水传播时间和预见期长度综合确定建模范围。

7.3 计算断面和网格剖分

7.3.1 一维河道计算断面设置要求如下：

- a) 一维河道模型的计算断面最大间距宜满足表 1 规定的最大断面间距要求；

表 1 不同河宽河段的一维模型断面间距要求

河段平均河宽 W (m)	≥ 1000	$500 \leq W < 1000$	$100 \leq W < 500$	< 100
最大断面间距 G (m)	与河宽相当，不大于 5000	1000	500	100

- b) 河道顺直河段，断面间距可加大 1~2 倍；

- c) 河道比降超过 1%、河道轴向偏转角大于 30°、相邻断面河宽变化超过较窄断面 50% 等断面形态变化显著河段或重点关注河段应加密计算断面，跨河建筑物及上下游、河道汇流或分流处、率定验证站点处应设置计算断面；
- d) 有堤防河道计算断面横向范围应覆盖堤防；无堤防河道计算断面横向范围应覆盖两岸高程最高点。计算断面应体现河道深槽、浅滩等关键形态特征。

7.3.2 二维网格剖分要求如下：

- a) 按照 SL 483 确定洪水风险区网格剖分控制面积；
- b) 风暴潮模型网格剖分尺度宜满足表 2 规定的最大网格面积要求；

表 2 不同水深河口海域的风暴潮模型最大网格面积要求

平均水深 H (m)	≥ 30	$10 \leq H < 30$	< 10
最大网格面积 (km ²)	1	0.25	0.05

- c) 二维网格剖分单元可采用结构网格和非结构网格。当边界形状不规则时，宜采用非结构网格；
- d) 对洪水演进有影响的、高于地面的道路、铁路、堤防等阻水线状地物，以及河渠、低于两侧地面的道路等排水通道，应沿其边界进行网格剖分，并根据其实际高程概化，反映其阻水（或行洪）作用；
- e) 对于建成区建筑物密集的区域，应合理概化主要建筑群阻水效果和街道行洪能力；
- f) 若选择基于区域分解技术的分布式并行计算模式，在网格剖分时，宜考虑负载平衡，并减少各块之间的数据传递。

7.4 边界条件、运行控制条件及初始条件设置

7.4.1 洪水演进水动力模型边界条件类型包括降雨边界、水位（潮位）边界、流量边界、水位—流量关系边界等。

7.4.2 洪水演进水动力模型应接入水文气象实时预报数据作为其边界条件。洪水演进水动力实时模拟采用的水文预报数据应满足乙级以上精度要求。当无实时水文预报数据时，可采用降雨径流模型进行来水预报。

7.4.3 边界条件设置规定如下：

- a) 河道洪水模拟的入流边界条件为预报流量过程，出流边界宜为出流控制断面的水位—流量关系或实时预报水位；
- b) 河道下游连接非河道型水库工程时，宜采用水库水位作为出流边界；
- c) 河道洪水模拟宜考虑沿程汇入河道的预报流量过程作为区间入流边界；
- d) 风暴潮洪水计算的边界条件为模拟范围海域边界的预报潮位过程及台风预报数据。

7.4.4 运行控制条件设置规定如下：

- a) 研究区域内若存在可能发生堤防（或大坝）溃决的情况，应可实时设定溃口的位置、尺寸、发展过程等参数；
- b) 堰坝、涵洞等水工建筑物应根据其实际结构形式和尺寸，应可通过水力学经验公式计算其过流能力；
- c) 扒口、堵口、临时堤防加高等防洪抢险工程措施，应可在模型中实时设定。

7.4.5 在采用预报数据进行洪水演进水动力实时模拟时，宜采用由实测数据通过模型计算得到的当前时刻水流状态作为模拟的初始场。

7.5 模型率定验证

7.5.1 模型构建期应基于洪水实测和调查资料进行模型参数率定和模型验证。

7.5.2 模型构建期宜选择多场次不同量级的历史实测洪水事件进行模型参数率定和模型验证。在资料条件缺乏时，宜选择至少 3 场以上的历史实测洪水事件，其中不少于 2 场用于参数率定，不少于 1 场用于模型验证。历史实测洪水事件宜优先采用近期洪水资料。

7.5.3 模型构建期的验证精度应满足下列要求：

- a) 对于河道内洪水，平原河网实测与计算最高水位之差小于 0.1 m；山区河道实测与计算最高水位之差小于 0.2 m。实测与计算最大流量相对误差小于 10%；实测与计算最大 1 d、3 d 和 7 d 洪量相对误差小于 5%；实测与计算洪水过程相位差小于洪水历时 5%，同时相位差应小于 1 h；
- b) 对于河口海域风暴潮洪水，验证精度应执行 JTST 231—2 的规定；
- c) 对于淹没区洪水，调查最大淹没范围与计算最大淹没范围相对误差小于 5%；重点关注区域特征点实测或调查水位与计算水位误差小于 20 cm。

7.5.4 模型应用期应结合实测洪水资料，定期对模型参数进行更新率定。

7.6 计算耗时控制

洪水演进水动力实时模拟计算耗时控制应满足下列要求：

- a) 一维河道及河网洪水演进水动力实时模拟模型要求在 5min 以内完成 24h 洪水演进过程模拟；
- b) 二维或一维—二维耦合洪水演进水动力实时模拟模型计算耗时控制要求按二维模拟区域面积划分为以下 3 个等级：
 - 1) 面积小于等于 100 km²，要求在 10 min 以内完成 24 h 洪水演进及淹没过程模拟；
 - 2) 面积 100 km²~1000 km²，要求在 15 min 以内完成 24 h 洪水演进及淹没过程模拟；
 - 3) 面积大于等于 1000 km²，要求在 30 min 以内完成 24 h 洪水演进及淹没过程模拟；

注：以上计算耗时是指可能最大洪水条件下的洪水模拟时间。

7.7 计算结果及合理性分析

7.7.1 洪水演进水动力实时模拟模型输出结果应包含基础要素计算结果及洪水风险要素统计结果。

7.7.2 模型输出的基础要素计算结果应包含以下内容：

- a) 各计算单元的水位、水深、流量、流速、流场变化过程；
- b) 水工建筑物（堰坝、涵洞、闸门、泵站等）调度控制参数和水位、流量过程，堤（坝）溃口尺寸、流量、水位过程，堤（坝）漫溢流量、水位过程。

7.7.3 模型输出的洪水风险要素统计结果应包含研究区域最大淹没范围，重点关注点最大淹没水深、洪水到达时间、最大淹没水深到达时间、淹没历时、最大单宽流量等结果。在进行要素指标统计时，宜在模型计算过程中逐个计算时间步长，并进行统计，避免基于输出结果统计方法可能存在的采样误差。

7.7.4 应对模型计算结果进行合理性检查。若出现不合理处，应查明原因并做相应调整。合理性检查可从以下几个方面进行：

- a) 检查模型的水量平衡；
- b) 检查模型计算是否稳定；
- c) 检查河道水面线是否合理；
- d) 检查溃口流量过程是否合理；

- e) 检查总体流场分布是否合理;
- f) 检查各类特征地物(阻水地物、行洪通道、水工建筑物等)处的局部流场特征;
- g) 检查洪水淹没范围、洪水到达时间分布是否合理。

7.8 洪水演进水动力实时模拟应用

7.8.1 洪水演进水动力实时模拟模型应通过模型数据接口实现在业务系统中的集成应用,应用流程主要包括数据接入、数据转换、滚动计算、实时校正、结果输出五个环节。

7.8.2 数据接入环节,应通过模型数据接口接入水文气象监测、预报数据及用户输入的模型计算控制参数。接入的水文气象监测、预报数据应实时刷新,确保模型计算边界的时效性。

7.8.3 数据转换环节,应将业务系统接入的水文气象实时数据格式转换为模型计算所需的初始条件和边界条件数据格式。

7.8.4 滚动计算环节,应根据实时水、雨、工情监测数据对模型初始条件、边界条件和水利工程调度运行参数进行更新。模型滚动计算频次应根据水文气象实测及预报数据更新频次、模型计算耗时等因素,由业务系统自动确定或者用户自行设置。滚动单次计算时长应根据水文气象预报预见期、洪水传播时间、防汛指挥决策业务需求等综合确定。

7.8.5 实时校正环节,应采用实时水、雨、工情监测数据,对水位、流量等模型计算结果进行实时校正。

7.8.6 结果输出环节,应通过模型数据接口将洪水演进水动力实时模拟计算结果传输至业务系统进行展示,其宜包括以下内容:

- a) 河道断面的水位、流量、流速过程,洪峰、洪量、峰现时间、洪峰历时、最高水位等统计结果及动画展示;
- b) 发生溃(漫)堤的河道位置、长度、溃口(漫堤)流量过程等统计结果及动画展示;
- c) 洪水风险区的淹没面积、最大淹没水深、洪水到达时间、淹没历时、流速、流态、洪水传播过程等统计结果及动画展示。

8 模型数据接口

8.1 通则

8.1.1 洪水演进水动力实时模拟模型数据接口应包括气象水文数据接口、河网结构数据接口、网格地形数据接口、模型参数接口、模拟结果数据接口,内容宜包括数据类型定义和数据格式等。

8.1.2 数据应统一平面投影坐标系、高程基面及计量单位,投影坐标系宜采用 2000 国家大地坐标系(CGCS2000),高程系统可采用国家标准高程系统或地方高程系统。无特殊说明时,水位单位为 m,流量单位为 m^3/s ,长度单位为 m,面积单位为 m^2 ,降雨强度为 mm/h ,时刻单位为 h,时间步长单位为 s。

8.1.3 洪水演进水动力实时模拟模型数据可分为静态数据与动态数据。静态数据主要为模型配置数据,可包含河网结构、网格地形、模型参数数据等。静态数据只有当模型要更新时,才应调用接口进行模型的配置更新;动态数据主要为基于时序的模型输入输出数据、模型运行管理及模型驱动管理数据,其中,模型输入输出数据可包含水文气象数据、溃口设置数据、模拟结果数据。

8.1.4 当洪水演进水动力实时模拟中需要考虑水库、水闸、泵站、蓄滞洪区等防洪工程调度时,可根据实际调度情景进行水利工程调度数据接口的设计与研发。

8.1.5 接口的组织及实现可为文本读写、函数调用、WebService、RESTful API 等形式。接口形式、请求方式、请求参数、输出参数可根据模型及系统研发实际需求而定。当系统端与模型端为网间远程交互时，宜采用微服务的形式进行接口实现。

8.1.6 当业务应用系统与洪水演进水动力实时模拟模型之间的接口数据传输处于网间状态且涉及到涉密数据时，应对系统进行安全保护等级定级。

8.2 数据类型定义

本规程中使用的数据类型有字符串、数值、时间 3 种。数据类型定义应执行 SL 323 的相关规定。

8.3 河网结构接口数据格式

河网结构数据包括河流文件、断面文件、断面高程点文件、汉点文件、边界文件等。河网结构数据为模型的静态配置数据。各类数据接口内容及字段定义可参照附录 H.1。

8.4 网格地形接口数据格式

网格地形数据包括节点文件、单元文件。网格地形数据为模型的静态配置数据。各类数据接口内容及字段定义可参照附录 H.2。

8.5 模型参数接口数据格式

模型参数接口包括河网实时边界、河网糙率、一维水动力模型初始场、河网模型计算参数、二维网格边界、网格糙率、二维水动力模型计算参数、二维水动力模型初始场、一维—二维水动力纵向耦合参数、一维—二维水动力侧向耦合参数、溃口参数、一维—二维水动力耦合模型计算参数等。参数配置数据为模型的静态配置数据。各类数据接口内容及字段定义可参照附录 H.3。

8.6 水文气象接口数据格式

水文气象数据包括水文时间序列、水位—流量关系、台风风场、降雨时间序列数据等。主要为基于时序的动态输入数据。各类数据接口内容及字段定义可参照附录 H.4。

8.7 溃口设置接口数据格式

溃口设置数据包括溃口节点、溃口发展过程数据。溃口设置数据为模型的动态输入数据。各类数据接口内容及字段定义可参照附录 H.5。

8.8 模拟结果接口数据格式

模型结果数据接口包括一维水动力模型模拟结果、二维水动力模型模拟结果、一维—二维水动力纵向耦合界面计算结果、一维—二维水动力侧向耦合界面计算结果。结果的输出时间间隔可在模型参数中进行配置。各类数据接口内容及字段定义可参照附录 H.6。模型结果接口设计宜参照实际业务系统需求进行调整。

8.9 模型运行管理接口数据格式

模型运行管理数据接口包含模型计算方案状态管理方面的内容。接口内容及字段定义可参照附录 H.7。

8.10 模型驱动管理接口数据格式

模型驱动管理数据接口包含模型驱动模式、驱动条件、滚动计算间隔方面的内容。接口内容及字段定义可参照附录 H.8。

附录 A (资料性) 一维水动力模型

A.1 一维水动力模型采用圣维南方程组作为河道非恒定流控制方程，包括水流连续方程和水流运动方程。水流连续方程应按公式 (A.1) 计算，水流运动方程应按公式 (A.2) 计算：

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial L} = \frac{q}{B} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial Z}{\partial L} + \frac{\partial}{\partial L}(\beta u Q) + g \frac{|Q|Q}{c^2 AR} = 0 \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

- L ——里程 (m)；
- t ——时间 (s)；
- Z ——水位 (m)；
- B ——过水断面水面宽度 (m)；
- Q ——流量 (m³/s)；
- q ——侧向单宽流量 (m²/s)，正值表示流入，负值表示流出；
- A ——过水断面面积 (m²)；
- g ——重力加速度 (m/s²)；
- u ——断面平均流速 (m/s)；
- β ——校正系数；
- R ——水力半径；
- c ——谢才系数， $c=R^{2/3}/n$ ， n 为曼宁糙率系数。

A.2 当模拟对象为河网时，应采用汉点连接方程，包括流量衔接条件和动力衔接条件。流量衔接条件应按公式 (A.3) 计算，考虑汉点容积蓄水影响。动力衔接条件应按公式 (A.4) 计算：

$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0 \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

$$Z_1 = Z_2 = \dots = Z_m \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

- Q_i ——汉点第 i 条支流流量，流入为正，流出为负；
- Z_i ——汉点第 i 条支流的断面平均水位；
- m ——汉点处的支流数量。

附录 B
(资料性)
二维水动力模型

二维水动力模型采用守恒形式的二维浅水方程，应按公式 (B.1) ~ 公式 (B.5) 计算：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}^{\text{adv}}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}^{\text{adv}}}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{E}^{\text{diff}}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}^{\text{diff}}}{\partial y} + \mathbf{S} \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu_x \\ hu_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ g(h+b)S_{0x} \\ g(h+b)S_{0y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

$$\mathbf{E}^{\text{adv}} = \begin{bmatrix} hu_x \\ hu_x^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - b^2) \\ hu_x u_y \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}^{\text{adv}} = \begin{bmatrix} hu_y \\ hu_x u_y \\ hu_y^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - b^2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

$$\mathbf{E}^{\text{diff}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2h\nu_t \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ h\nu_t (\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}) \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}^{\text{diff}} = \begin{bmatrix} 0 \\ h\nu_t (\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}) \\ 2h\nu_t \frac{\partial u_y}{\partial y} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

$$S_{0x} = -\frac{\partial b(x,y)}{\partial x} \quad S_{0y} = -\frac{\partial b(x,y)}{\partial y} \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

式中：

- $\mathbf{U}$ ——守恒向量；
- $\mathbf{E}^{\text{adv}}, \mathbf{G}^{\text{adv}}$ —— x 、 y 方向的对流量向量；
- $\mathbf{E}^{\text{diff}}, \mathbf{G}^{\text{diff}}$ —— x 、 y 方向的扩散流量向量，洪水模拟中一般可忽略不计；
- $\mathbf{S}$ ——源项向量。
- H ——水深；
- u_x, u_y ——垂直方向平均流速在 x 、 y 方向的分量；
- b ——底高程；
- ν_t ——紊动粘性系数；
- g ——重力加速度；
- S_{fx}, S_{fy} —— x 、 y 方向的摩阻斜率；
- S_{0x}, S_{0y} —— x 、 y 方向的底坡斜率。

采用 Manning 公式 (B.6) 计算摩阻斜率：

$$S_{fx} = \frac{n^2 u_x \sqrt{u_x^2 + u_y^2}}{h^{4/3}} \quad S_{fy} = \frac{n^2 u_y \sqrt{u_x^2 + u_y^2}}{h^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

n ——Manning 系数，与地形地貌、地表粗糙程度、植被覆盖等下垫面情况有关，一般结合经验给定 Manning 系数值。

采用公式 (B.7) 计算紊动粘性系数：

$$\nu_t = \alpha \kappa u_* h \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

α ——比例系数，一般取 0.1~0.2；

κ ——卡门系数，取 0.4；

u_* ——床面剪切流速。

附录 C

(资料性)

风—浪—流多场耦合二维水动力模型

C.1 采用改进形式的二维浅水方程作为控制方程，并考虑海面气压场、台风场、波浪场的作用，计算公式如下：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}^{\text{adv}}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}^{\text{adv}}}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{E}^{\text{diff}}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}^{\text{diff}}}{\partial y} + \mathbf{S} \quad \text{..... (C.1)}$$

$$\mathbf{U} = [h, hu_x, hu_y]^T \quad \text{..... (C.2)}$$

$$\mathbf{E}^{\text{adv}} = [hu_x, hu_x^2 + 0.5g(h^2 - b^2), hu_x u_y]^T \quad \text{..... (C.3)}$$

$$\mathbf{G}^{\text{adv}} = [hu_y, hu_x u_y, hu_y^2 + 0.5g(h^2 - b^2)]^T \quad \text{..... (C.4)}$$

$$\mathbf{E}^{\text{diff}} = [0, 2hv_t \partial u_x / \partial x, hv_t (\partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x)]^T \quad \text{..... (C.5)}$$

$$\mathbf{G}^{\text{diff}} = [0, hv_t (\partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x), 2hv_t \partial u_y / \partial y]^T \quad \text{..... (C.6)}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ g(h+b)S_{0x} - ghS_{fx} + fhu_y + \tau_x^s + gh \frac{\partial p}{\partial x} - (\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}) \\ g(h+b)S_{0y} - ghS_{fy} - fhu_x + \tau_y^s + gh \frac{\partial p}{\partial y} - (\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}) \end{bmatrix} \quad \text{..... (C.7)}$$

式中：

S_{0x}, S_{0y} —— x 和 y 方向的底坡，其表达式分别为 $S_{0x} = -\partial b / \partial x$ 和 $S_{0y} = -\partial b / \partial y$ ；

S_{fx}, S_{fy} —— x 和 y 方向的摩阻坡降，不考虑波流相互作用时，其表达式分别为

$$S_{fx} = n^2 u_x (u_x^2 + u_y^2)^{1/2} h^{-4/3} \text{ 和 } S_{fy} = n^2 u_y (u_x^2 + u_y^2)^{1/2} h^{-4/3}；$$

u_x, u_y —— x 和 y 方向的垂线平均流速；

b ——河底高程；

n ——糙率；

t ——时间；

g ——重力加速度；

v_t ——水平方向的紊动粘性系数， $v_t = \alpha k u_* h$ ；

α ——比例系数， $\alpha = 0.2$ ；

κ ——卡门系数， $\kappa = 0.4$ ；

u_* ——床面剪切流速；

f ——柯氏力系数， $f = 2w \sin \varphi$ ；

w ——地球自转角速度， $w = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ；

φ ——当地纬度；

τ^s ——水面风应力， $\tau^s = \rho_a / \rho_w C_d |u_{10}|$ ；

p ——由于台风气压变化引起的海面静压升高；

ρ_a, ρ_w ——分别为空气和水体的密度；

C_d ——风应力系数；

u_{10} ——水面 10 m 高处的风速；

S_{xx}, S_{xy} —— x 方向波浪辐射应力；

S_{yx}, S_{yy} —— y 方向波浪辐射应力。

C.2 控制方程中考虑了大气压力、风应力、波浪辐射应力等动力因子，反映了海面气压场、台风场、波浪场对潮流的驱动作用。在潮流模型的基础上增加气压项和风应力项，把天文潮与风暴潮二种长波合在一起，控制方程中保留非线性项，即为天文潮和风暴潮的耦合模型。

C.3 水面风应力拖曳系数 C_d 可取常数值（如 2.6×10^{-3} ）。考虑到阻尼系数随着风速的加大而有一定增大的观测事实，宜表面风应力拖曳系数参数化成如下的线性形式：

$$C_d = 0.001 \times (a + b \sqrt{U_w^2 + V_w^2}) \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

式中：

a, b ——经验系数，取值见表 C，由于观测的资料源不同，得到 a, b 值分散性很大，适用范围也不完全相同，绝大多数公式目前还只适用于 25 m/s 以下的风速范围；

U_w 和 V_w ——代表 x, y 方向上水面 10 m 高处的风速分量，m/s。

表 C.1 水面风应力拖曳系数计算公式的经验系数值

a	b	风速范围	来源	备注
1.300	0.000	[5.5, 7.9]	Rossby 和 Montgomery, 1935	-
2.6	0.000	[5.5, 7.9]	Sverdrup, 1942	-
1.00	0.070	[1.5, 13]	Deacon 和 Webb, 1962	-
0.800	0.065	[7.5, 50]	Wu, 1982	-
0.610	0.063	[5, 22]	Smith, 1980	推荐用于风暴潮数值模拟
0.750	0.067	[4, 21]	Garratt, 1977	-
0.577	0.085	[5, 25]	Geernaert, 1987	-
0.490	0.065	[11, 25]	LargeandPond, 1981	推荐用于浅水湖泊的风生流计算
0.50	0.071	[6, 26]	Yelland 和 Taylor, 1998	-

C.4 采用公式 (C.9) 计算波浪辐射应力：

$$\mathbf{F}_S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = \frac{E}{\rho_w} \begin{bmatrix} \gamma(\cos^2 \alpha + 1) - \frac{1}{2} & \frac{\gamma}{2} \sin(2\alpha) \\ \frac{\gamma}{2} \sin(2\alpha) & \gamma(\sin^2 \alpha + 1) - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

式中：

α ——波浪传播方向与 x 轴的夹角；

E ——单位水柱体一个波周期的平均波能， $E = \rho_w g h^2 / 8$ ；

γ ——波群速度与相速度之比， $\gamma = 0.5[1 + 2kh / \sinh(2kh)]$ ， k 为波数。

C.5 采用两维波作用密度谱平衡方程 (C.10) 作为波浪运动控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

式中：

N ——波作用密度谱， $N = N(\sigma, \theta, x, y, t) = E(\sigma, \theta, x, y, t) / \sigma$ ， $E(\sigma,$

θ, x, y, t) 为能谱密度;
 Σ ——波浪的相对频率 (在随水流运动的坐标系中观测到的频率);
 θ ——波向 (各谱分量中垂直于波峰线的方向);
 C_x, C_y ——波浪传播速度的 x 和 y 向分量;
 C_σ, C_θ —— σ 和 θ 空间的波浪传播速度;
 S ——以谱密度表示的波浪生成、耗散及波波相互作用的源项, 包括风能输入、波与波之间的非线性相互作用和由于底摩擦、白浪、水深变浅引起的波浪破碎等导致的能量耗散。

波浪传播速度均采用线性波理论进行计算, 执行公式 (C.11) ~ (C.14):

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial h} \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - C_g^r k \frac{\partial U}{\partial s} \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + k^r \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad \dots\dots\dots (C.14)$$

式中:

$\vec{k}$ ——波数 $\vec{k} = (k_x, k_y)$;

$\vec{U}$ ——流速 $\vec{U} = (U_x, U_y)$;

S ——沿 θ 方向的空间坐标;

M ——垂直于 S 的坐标; 算子 $\partial/\partial t$ 定义为: $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{C} \cdot \nabla_{x,y}$ 。

波浪模型的右端源项可用公式 (C.15) 表示:

$$S = S_{in} + S_{dsw} + S_{dsb} + S_{dsbr} + S_{nl4} + S_{nl3} \quad \dots\dots\dots (C.15)$$

式中:

S_{in} ——风能输入;

S_{dsw} ——白浪耗散;

S_{dsb} ——底摩擦耗散;

S_{dsbr} ——破碎耗散;

S_{nl4} ——四组分波相互作用;

S_{nl3} ——三组分波相互作用。

C.6 台风理论气压场模型中常用以下 5 种气压公式:

a) V.Bjerknes 模型:

$$p(r) = p_\infty - \frac{\Delta p}{1 + \left(\frac{r}{R_0}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

b) 高桥模型:

$$p(r) = p_{\infty} - \frac{\Delta p}{1 + \frac{r}{R_0}} \dots\dots\dots (C.17)$$

c) 藤田模型:

$$p(r) = p_{\infty} - \frac{\Delta p}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{R_0}\right)^2}} \dots\dots\dots (C.18)$$

d) Myers 模型:

$$p(r) = p_0 - (1 - e^{-\frac{R_0}{r}}) \Delta p \dots\dots\dots (C.19)$$

e) Jelesnianski 模型:

$$\begin{aligned} p(r) &= p_0 - \frac{1}{4} \Delta p \left(\frac{r}{R_0}\right)^3 & r \leq R_0 \\ p(r) &= p_{\infty} - \frac{3}{4} \frac{\Delta p}{\frac{r}{R_0}} & r > R_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (C.20)$$

式中:

R ——计算点至台风中心的距离;

$p(r)$ ——距台风中心 r 距离处的气压;

p_0 ——台风的中心气压;

p_{∞} ——台风的外围气压, 为一常数, 一般取为 1013.3hpa;

Δp ——最大风速半径, $\Delta p = p_{\infty} - p_r$ 。

其中, V.Bjerknes 公式不适用于台风外域的气压计算; 高桥公式不适用于台风中心附近的气压计算; 藤田的公式、Myers 公式和 Jelesnianski 模型在台风内域或外域都能较好地吻合。

示例: 采用 Myers 公式计算台风气压场, 其中最大风速半径 R_0 采用公式 (C.21) (Graham Nunn, 1959) 计算:

$$R_0 = 28.52 \tanh[0.0873(\phi - 28)] + 12.22 / \exp[(p_{\infty} - p_0) / 33.86] + 0.2V_t + 37.22 \dots (C.21)$$

式中:

ϕ ——纬度;

V_t ——移行风风速。

台风风场由气压梯度和台风移动导致的风速合成而成:

$$\begin{aligned} W_x &= C_1 V_{tx} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \frac{r - R_0}{R_0}\right) - C_2 \left\{ -\frac{f}{2} + \sqrt{\frac{f^2}{4} + \frac{(P_{\infty} - P_0)}{\rho_a R_0^2} \left[1 + \left(\frac{r}{R_0}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \dots (C.22) \\ &\quad [(x - x_0) \sin a + (y - y_0) \cos a] \end{aligned}$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/437132013112006032>