

# 液化天然气接收站取排水工程冷排水影响预测与分析

吴时强, 周 杰, 吴修锋

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 采用沿水深平均的平面二维水流温度场数学模型和大、小区域嵌套的方法对液化天然气(LNG)接收站加热气化后的排水问题进行了数值模拟研究. 在模型验证和参数率定的基础上, 针对接收站不同设计方案, 计算分析了典型水文条件下接收站远期运行后温度场分布, 从冷排水对环境水体影响范围和取水降温程度提出了工程推荐方案.

**关 键 词:** LNG 接收站; 取排水工程; 冷排水; 数学模型; 温度场

**中图分类号:** TV137

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2007)03-0038-06

## Effect prediction of cool water discharged from LNG terminal

WU Shi-qiang, ZHOU Jie, WU Xiu-feng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A two-dimensional depth-averaged flow and heat transport numerical model with nested meshes is applied to simulate cool water discharged from a liquefied natural gas (LNG) terminal. Analysis of environmental water body temperature change with different LNG terminal schemes under typical hydrological conditions is carried out with the calibrated numerical model. Based on effect extension, a recommended project scheme is proposed.

**Key words:** liquefied natural gas (LNG) terminal; water intake and drainage project; cool water; mathematical model; temperature field

液化天然气(LNG)接收站生产过程中使用海水作为加热介质, 换热后海水温度有所降低, 并含有一定量的氯, 这将对附近水域水生生态环境造成一定的影响. 为控制水温变化对一定区域内海洋生态环境的影响, 要求海水气化器出水温度与当地海水的温差控制在 $5^{\circ}\text{C}$ 以内, 氯含量控制在 $0.2\text{ mg/l}$ 以内.

冷排水与温排水对环境影响均表现为接纳水体温度变化, 冷排水降低自然水温, 温排水则相反. 由于水温变化对接纳水体环境及生态均有一定的影响, 因此, 需要了解 LNG 接收站冷排水对水环境的影响.

数值模拟方法在电厂温排水研究中得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>, 解决了大区域温排水影响问题, 满足电厂环境影响评价和水资源论证要求, 初步论证取排水工程布置方案, 为物理模型试验研究提供边界条件. 目前, 温排水数值模拟方法主要采用平面二维数值模型, 数值方法有有限差分法、有限体积法以及复合方法(如分步法、剖开算子法等), 各类方法均取得了良好的效果. 冷排水的数值模拟方法类同于温排水, 主要区别在于水面综合热量交换作用, 目前尚不多见.

收稿日期: 2007-01-17

作者简介: 吴时强(1964-), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事计算水力学、环境水力学和水工水力学研究. E-mail: sqwu@nhri.cn

本文结合某 LNG 接收站取排水工程,建立基于剖开算子法的冷排水数值模型,预测该接收站冷排水影响范围,初步优化取、排水口布置方案,并提出减轻冷排水影响的技术措施。

## 1 平面二维水流温度场数学模型

### 1.1 基本方程

针对 LNG 接收站工程所在南海海域的地形及水流特征,选用沿水深平均的平面二维水流数学模型,其基本方程为:

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{\partial uuH}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t H \frac{\partial u}{\partial y} \right) - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} + fvH \quad (2)$$

$$\frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{\partial uvH}{\partial x} + \frac{\partial vvH}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t H \frac{\partial v}{\partial y} \right) - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - fuH \quad (3)$$

$$\text{温度输运方程:} \quad \frac{\partial HT}{\partial t} + \frac{\partial uHT}{\partial x} + \frac{\partial vHT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y H \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{k(T_c - T)}{\rho C_p} \quad (4)$$

式中: $Z$ 和 $H$ 分别为水位和水深(m); $u$ 、 $v$ 分别为 $x$ 、 $y$ 向的流速(m/s); $\nu_t$ 为紊动粘性系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );谢才系数 $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ , $R$ 为水力半径(m), $n$ 为海床糙率;柯氏力系数 $f = 2\omega \sin \varphi$ , $\omega$ 为地球自转角速度, $\varphi$ 为计算水域所在地理纬度; $T$ 为海域水体温度; $E_x$ 、 $E_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 向扩散系数; $\rho C_p$ 为水体定压比热通量;水面综合热交换系数 $k = 15.7 + (\beta + 0.26) W_f$ , $\beta$ 为水汽压与温度曲线的斜率, $\beta = (E_s - E)/(T_A - T_D)$ , $E_s$ 为饱和水汽压, $E$ 为实际水汽压, $T_A$ 为气温, $T_D$ 为露点温度, $W_f$ 为与蒸发有关的风函数;自然水温度 $T_c = T_D + \beta_1 H_s/k$ , $\beta_1$ 为水体表面对太阳辐射的吸收系数, $H_s$ 为到达水面的太阳净辐射。

### 1.2 定解条件

初始条件:

$$\begin{cases} Z(x, y, 0) = Z_0(x, y) \\ U(x, y, 0) = u_0(x, y) \\ V(x, y, 0) = v_0(x, y) \\ T(x, y, 0) = T_0(x, y) \end{cases}$$

边界条件:开边界水流计算均以潮位过程线作为其边界条件,温度场计算入流边界给定水温,出流边界采用 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ( $n$ 为出流边界法向单位矢量);固定边界采用可滑动边界条件,即 $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$ ( $U$ 为边界水流合速度, $n$ 为固定边界法向单位矢量),对于两岸边滩,则按动边界处理。为了反映取水水温对排放水温的影响,计及水体热量的回归作用,计算中将降温量加上取水温度作为排水水温。

### 1.3 数值方法

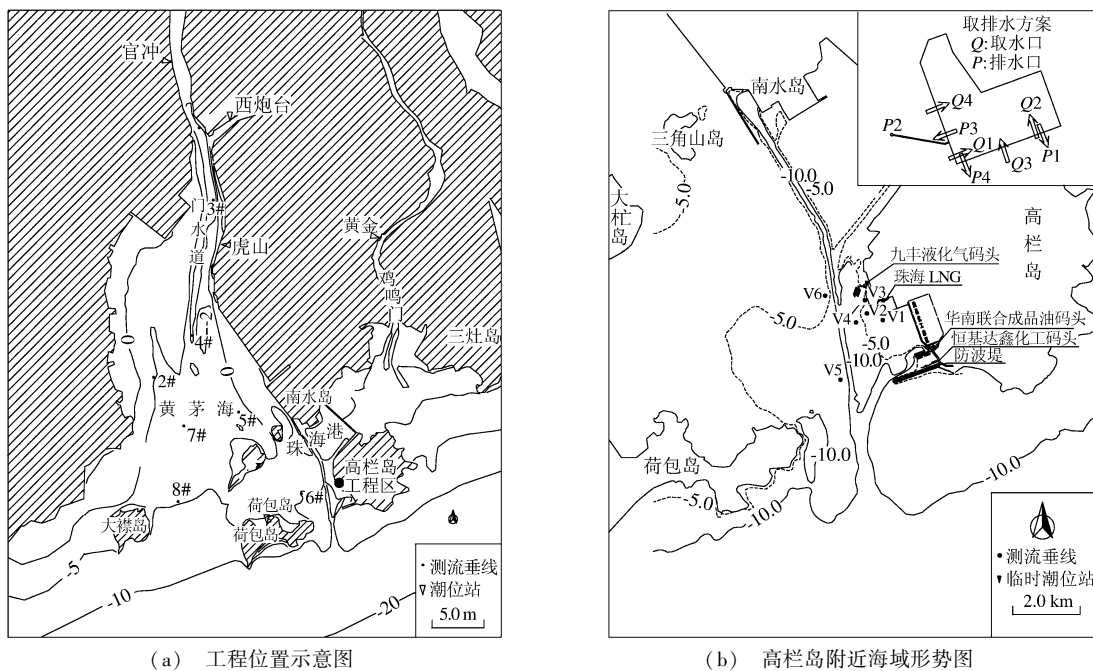
(1)~(4)式组成的水流温度场数学模型基本方程中含有非线性混合算子,可采用剖开算子法进行离散求解。这一数值方法既可以根据方程所含算子的不同特性将方程剖分为几个不同的子算子方程,又能有效地解决方程的非线性和自由表面确定问题,具有良好的计算稳定性和较高的计算精度。该方程组的详细求解过程见参考文献[1-3]。

## 2 液化天然气(LNG)接收站概况及计算条件确定

### 2.1 液化天然气接收站概况

某液化天然气接收站位于珠海市高栏港平排山,地处黄茅海外列岛高栏岛和荷包岛形成的海域内。接收

站生产过程中使用海水作为加热介质,其水质未受污染.冷却水排放采用直排方式,取排水工程设计方案如图 1(a)所示.工程海区由高栏岛、南水岛、大杜岛、三角山岛和荷包岛所环抱,属于珠江河口主要分流(磨刀门、鸡鸣门等)的下风下水侧.海区动力环境处于潮汐、沿岸径流、高盐陆架区和波浪等 4 种动力体系作用之下,且主要受潮流和径流两种动力的控制,水域水流状态较为复杂,工程所在海域如图 1(b)所示.



(1#~8#为 2003 年测流垂线, V1~V6 为 2005 年测流垂线)

图 1 LNG 接收站位置示意图

Fig. 1 Location of the LNG terminal

据官冲水位站资料统计,黄茅海海域潮汐属非正规半日混合潮型,日潮不等现象较为明显.由于受喇叭型地形收缩影响及上游径流顶托作用,进入黄茅海的潮波发生变形,由湾口至湾顶,涨潮历时沿程缩短,落潮历时沿程增加,潮差呈湾顶附近最大,在上、下游逐渐趋减的分布状况.黄茅海潮流主要为南北方向往复流,但在湾腰以南的拦门沙浅水区,水流分散形成东、西两条主流带,落潮流速由湾顶向湾口递减;涨潮流速由湾口向湾顶递增,潮波具驻波性质.工程附近海域流态平顺,南口门外为南海西南向沿岸流,南口门中部、东部为流向  $330^{\circ} \sim 140^{\circ}$  的往复流,南口门西部由于受海域西口门的影响呈流向  $300^{\circ} \sim 120^{\circ}$  的往复流.从南口门~北口门的流速来看,北口门流速最大,南口门次之,中间水域最小.

## 2.2 计算条件确定

为了提高模拟精度,本文采用大、小区域嵌套方法进行计算.利用大区域水流数学模型对黄茅海水域水流进行计算分析,为小区域计算提供潮位、流速等边界条件.利用小区域计算 LNG 接收站冷排水影响,论证该工程取、排水工程设计方案的合理性.大、小区域计算范围及网格剖分见图 2.计算水文条件包括数学模型验证和冷排水影响预测计算所需的典型水文条件.选取 2005 年 5 月 4 日~10 日实测潮位过程(见图 3)以及 2003 年 4 月 10 日~30 日的水文资料作为模型验证水文条件.典型水文条件为影响冷排水的不利水文条件,根据三灶站近几年潮位资料的统计分析,选择最低潮位过程、多年平均潮差过程和最大潮差过程作为典型水文条件.

计算组次由该接收站建设工期、计算水文条件、布置方案等组合而成.建设分三期,一期海水排水量  $10.83 \text{ m}^3/\text{s}$ ,二期海水排水量  $21.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ,远期海水排水量  $43.33 \text{ m}^3/\text{s}$ .水流温度场数学模型计算参数参照珠江三角洲海域海床的情况及以往研究资料加以选定,并通过模型验证计算进行调整确定.

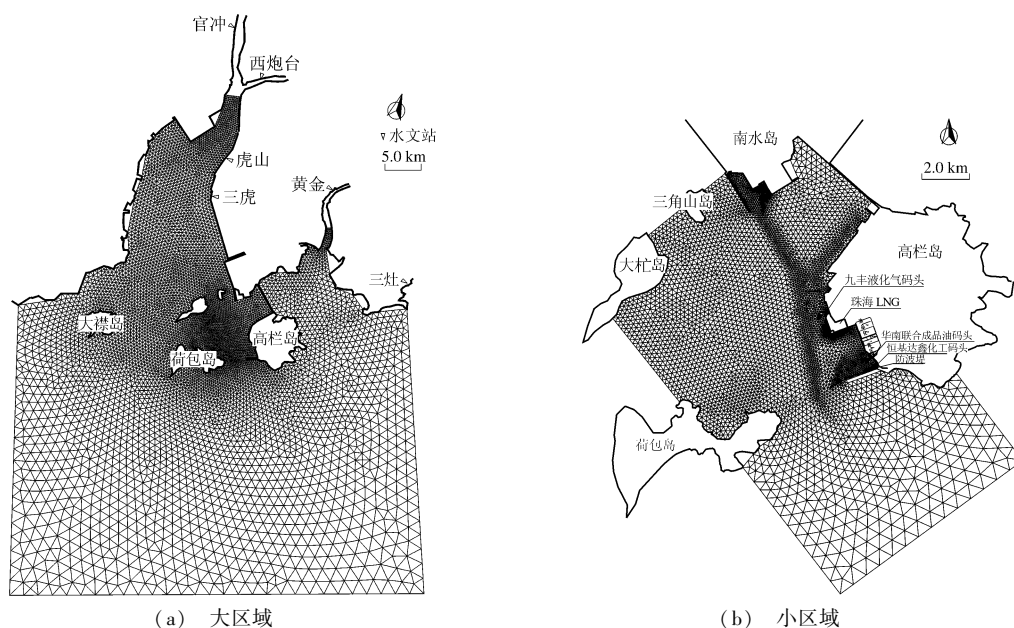


图2 计算网格剖分图

Fig.2 Calculation meshes

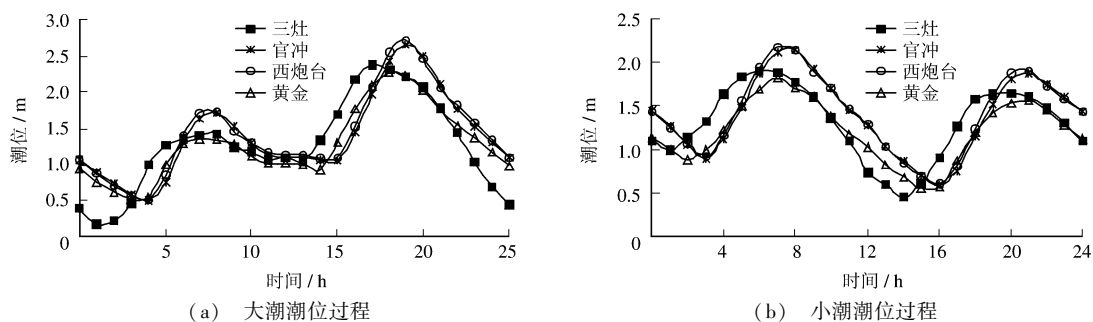


图3 各潮位站实测潮位过程

Fig.3 Curves of the measured tidal level

### 3 数学模型验证计算

黄茅海海域水文测量值与计算值验证结果见图4和图5.可见,无论是潮流潮向还是潮位,均吻合较好.表明所建立的潮流数值模型及选用的计算参数合理,可以真实反映该海域潮流流动状况,可用于工程方案的论证计算.

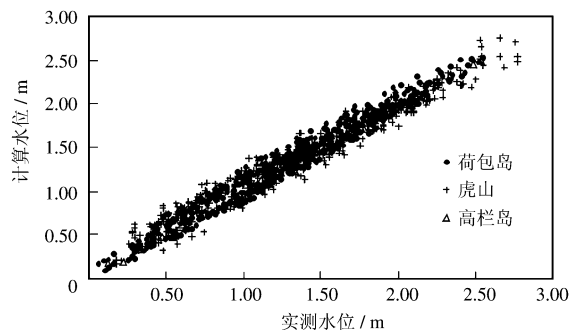


图4 潮位验证结果

Fig.4 Validation of the tidal level



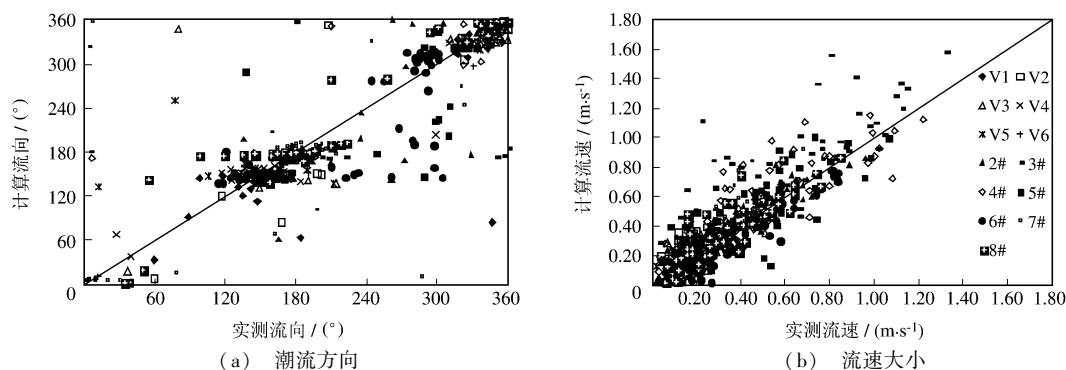


图 5 潮流方向及流速验证

Fig. 5 Validation of the tidal direction and velocity

#### 4 潮流场计算成果分析

由于该接收站附近海域潮流流场分布直接影响到排水口温度的输运扩散,因此对 LNG 接收站附近海域潮流场的认识有助于更好地分析温度场的分布规律.

计算海域潮流场主要受外海潮汐影响,以实测大潮水文条件为例,典型瞬时潮流场如图 6 所示.可见,低平潮瞬时,计算海域潮流流速很小,LNG 接收站附近水域水流先于水道中部涨潮,附近水域未发现回流;随着潮位升高,涨潮流逐渐增强,受防波堤影响,接收站以南湾内形成较大回流区;当到达高平潮瞬时,计算海域已经转变为落潮流,回流区消失;在落急瞬时,接收站附近水域流速方向基本与岸线平行,接收站以南湾内水流未发现明显回流. LNG 接收站附近海域流态复杂,潮位变化与潮流变化不同步,潮流变化滞后于潮位变化,涨潮流速明显大于落潮流速,故在接收站附近海域发育着较为成熟的涨潮槽,是崖门水道的主要涨潮通道.工程建成后,由于接收站对湾内水流掩护作用较为明显,在落急时,湾内将产生较明显的回流,不利于冷排水掺混输运.

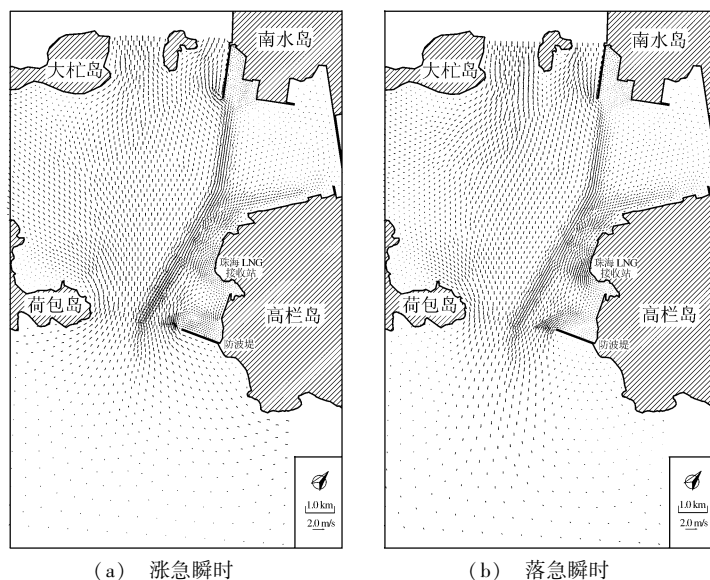


图 6 实测大潮水文条件下典型瞬时潮流场

Fig. 6 Typical instantaneous tidal field

## 5 冷排水方案比选及推荐方案计算结果分析

4个布置方案冷排水影响计算结果见图7.可见,工程规划情况下取排水工程布置方案对周围环境的影响范围优劣排序为方案2、方案4、方案3和方案1.方案2在影响范围及取水水温降低值均优于其它方案,对该海域生态环境影响最小.因此,推荐方案2为该接收站冷排水布置方案.

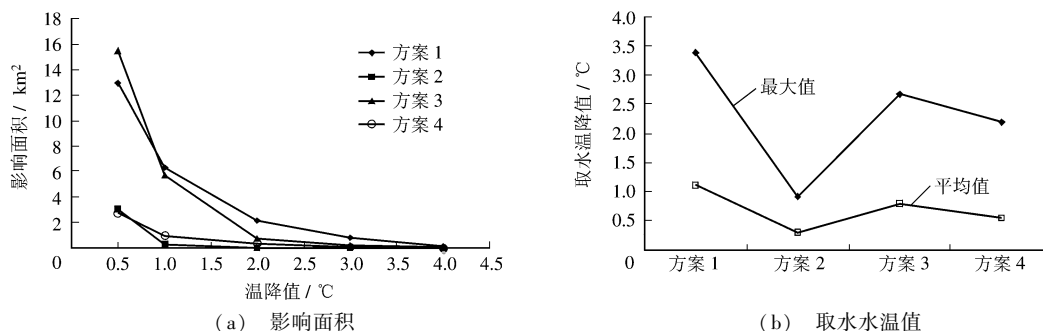


图7 方案比选计算结果

Fig. 7 Results of scheme comparison

典型水文条件下推荐方案计算结果表明,由于接收站附近海域潮流为往复流,因此冷排水对排水口左、右两侧水域均有一定的影响,其分布范围主要集中在排水口附近近岸水域,呈扁长状沿岸低温带.

## 6 结 语

针对某液化天然气接收站取排水工程问题,建立了一个基于剖开算子法的平面潮流温度场数学模型.在潮位、潮流验证结果良好的前提下,采用大、小区域嵌套的计算方法,论证该接收站冷排水工程布置方案,从冷排水对生态环境影响角度,建议方案2为该接收站取排水工程推荐方案.

## 参 考 文 献:

- [1] Ding Daoyang, Philip L-F Liu. An operator-splitting algorithm for two-dimensional convection dispersion reaction problems [C]//H Niki M. **Proc of Int Conf on Computational Methods in Flow Analysis**. Kawahara Tokoyo, 1998: 1101-1108.
- [2] 吴时强,丁道扬. 剖开算子法解具有自由表面的平面紊流速度场[J]. 水利水运科学研究, 1992, (1): 39-48.
- [3] 吴时强,丁道扬,吴碧君,等. 平面二维动态水质数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 1996, (6): 31-37.
- [4] 吴修锋,吴时强. 上海漕泾燃气电厂 16×390MW 机组工程温排水数值模拟研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.
- [5] 吴修锋,吴时强. 上海临港燃气电厂 16×390MW 机组工程温排水数值模拟研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.