

# 2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地泊稳条件数值模拟

黄东 郑国栋 黄本胜 赖冠文 张政

(广东省水利水电科学研究院, 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广州 510610)

**摘要:** 根据 2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地水域总平面布置设计方案, 为验证帆船比赛基地港池内的泊稳条件是否满足国际帆船联合会的要求, 确定港池防波堤的平面布置设计方案, 并结合赛后该区域开发利用的设想, 采用数值波浪水池方法, 模拟计算了原设计方案和修改方案比赛基地水域的波高分布规律, 并根据计算结果提出了分析结论。数值模拟结果与波浪物理模型试验结果吻合。

**关键词:** 奥运会 帆船比赛 泊稳条件 数值模拟

## 1 概述

现代奥林匹克运动是促进世界各国人民相互了解、增进友谊、促进文明、维护和平的崇高运动。奥林匹克运动会是当今世界上规模最大、水平最高、影响最广的体育盛会。2001 年 7 月 13 日, 在莫斯科举行的国际奥委会第 112 次全会上, 北京获得 2008 年第 29 届奥运会的主办权。实现了中华民族的百年期盼, 为我国的改革开放、经济发展和社会进步提供了难得的历史机遇, 对奥林匹克运动, 对中国乃至世界都具有积极意义。

2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地和比赛场地位于青岛市浮山湾及其附近海域。为验证帆船比赛基地港湾内的泊稳条件是否满足国际帆船联合会的要求, 确定港池防波堤的平面布置设计方案, 并结合赛后该区域开发利用的设想, 受青岛市建筑设计研究院委托, 根据青岛市建筑设计研究院和山东省航运工程设计院有限公司对该水域的总平面布置设计方案, 广东省水利水电科学研究院对浮山湾及其附近海域波浪采用数学模型方法, 进行了帆船比赛基地泊稳条件数值模拟计算。

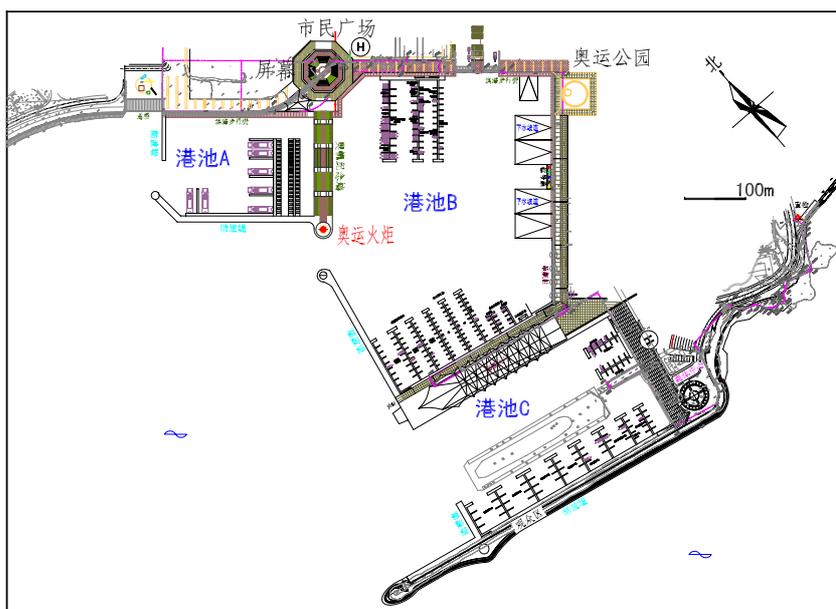


图 1 2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地水域平面布置方案图

稳条件要求防波堤内港池（特别是比赛用帆船停泊的 B 港池，参见图 1）在设计波浪条件下波高小于 0.5m。

## 2 数学模型

本次数值模拟涉及水域地形复杂，计算区域内有防波堤等港工建筑物，数学模型采用了基于 Boussinesq 方程的“数值波浪水池（NWB）”。该模型能模拟水波的折射、绕射、反射和浅化等综合效应，适用于复杂地形上波浪传播和变形的数值模拟。

控制方程采用笛卡儿坐标系  $(x, y, z)$ ，其中  $x$  和  $y$  轴位于静水面上， $z$  方向以静水面向上为正。

控制方程的形式如下：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \quad (2-1a)$$

$$P_t + g(d + \eta)\eta_x + \left[ \frac{P^2}{d + \eta} \right]_x + \left[ \frac{PQ}{d + \eta} \right]_y + \left( \frac{1}{6} - B_2 \right) d^3 \left( \left[ \frac{P}{d} \right]_{txx} + \left( \frac{Q}{d} \right)_{txy} \right) - \left( \frac{1}{2} + B_1 \right) d^2 (P_{txx} + Q_{txy}) - B_2 g d^3 (\eta_{xxx} + \eta_{xyy}) - B_1 g d^2 ([d\eta_x]_{xx} + [d\eta_y]_{xy}) = 0 \quad (2-1b)$$

$$Q_t + g(d + \eta)\eta_y + \left[ \frac{Q^2}{d + \eta} \right]_y + \left[ \frac{PQ}{d + \eta} \right]_x + \left( \frac{1}{6} - B_2 \right) d^3 \left( \left[ \frac{Q}{d} \right]_{yy} + \left( \frac{P}{d} \right)_{txy} \right) - \left( \frac{1}{2} + B_1 \right) d^2 (Q_{yy} + P_{txy}) - B_2 g d^3 (\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) - B_1 g d^2 ([d\eta_y]_{yy} + [d\eta_x]_{xy}) = 0 \quad (2-1c)$$

其中， $P$ 、 $Q$  分别为  $x$ 、 $y$  方向单宽流量， $\eta$  表示自由表面位移， $d$  为静水深，得出  $B_1 = 1/15$ ，

$B_2 \approx 0$  为改善色散性和非线性的最佳因子。

采用在连续方程中加入区域源项的方法造波。源函数表达式为：

$$f(x, y, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int \int D(\lambda, \omega) \exp(-\beta x^2) e^{i(\lambda y - \omega t)} d\omega d\lambda = \exp(-\beta x^2) F(y, t) \quad (2-2)$$

在开边界处采用海绵吸收边界消波，模型中所用衰减因子如下：

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left[\left(2^{-x/\Delta x} - 2^{-x_a/\Delta x}\right) \ln a\right] & 0 \leq x \leq x_a \\ 1 & x > x_a \end{cases} \quad (2-3)$$

数值计算方法方面，在空间交错网格坐标下，用 FTCS 格式差分离散连续性方程(2-1a)，用紧致差分格式离散动量方程(2-1b)和(2-1c)，采用 ADI 法求解。在以上差分方程中，利用泰勒展开对方程进行了修正，保证方程在时间和空间上均达到三阶精度。

计算条件方面，利用了工程拟建区域的水深地形图、浮山湾及附近区域海图、2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地水域平面布置方案图，以及《2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地波浪分析与计算》、《2008 北京奥运会青岛帆船比赛基地潮汐特征和水位计算》等成果设计中的水位以小麦岛潮汐特征值为准，数值计算采用青岛大港基准面。

计算水位采用设计高水位，波浪按不规则波模拟，入射波参数采用小麦岛波浪条件分析计算结果。根据中华人民共和国行业标准 JTJ213-98《海港水文规范》4.1.4 的规定，设计波浪重现期

取两年一遇，波高累积频率取 4%，波浪周期采用平均周期，波长按下式计算：

$$L = gT^2 / 2 \tanh(2\pi d/L) \quad (2-4)$$

数值模拟采用正方形网格系统。根据入射波浪的特征，空间网格尺度确定为 2.5m。修改方案与原方案的区别主要在于修改方案延长了港池 A 的接岸防波堤，并改变了港池 C 防波堤的长度和位置计算中时间步长定为 1/50 倍周期。在整个计算区域的波浪场稳定之后开始采集波高数据。

表 1 泊稳计算水文组合条件（两年一遇）

水文组合	水文 1	水文 2	水文 3
方向	SE	S	SW
H <sub>4%</sub> (m)	3.83	2.18	2.24
T(s)	7.8	5.3	5.3

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 计算结果

图 1~3 以等值线的形式绘出原方案及修改方案港池及附近水域波高分布的计算结果，根据泊稳条件的要求，图中重点标注了 0.5 至 1m 的波高等值线。

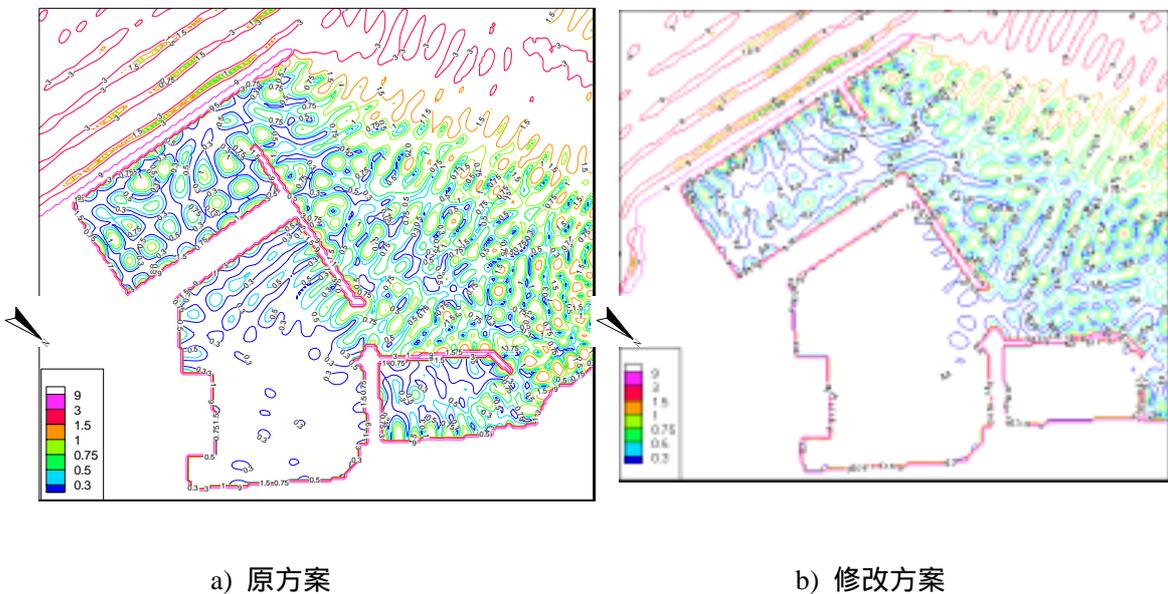
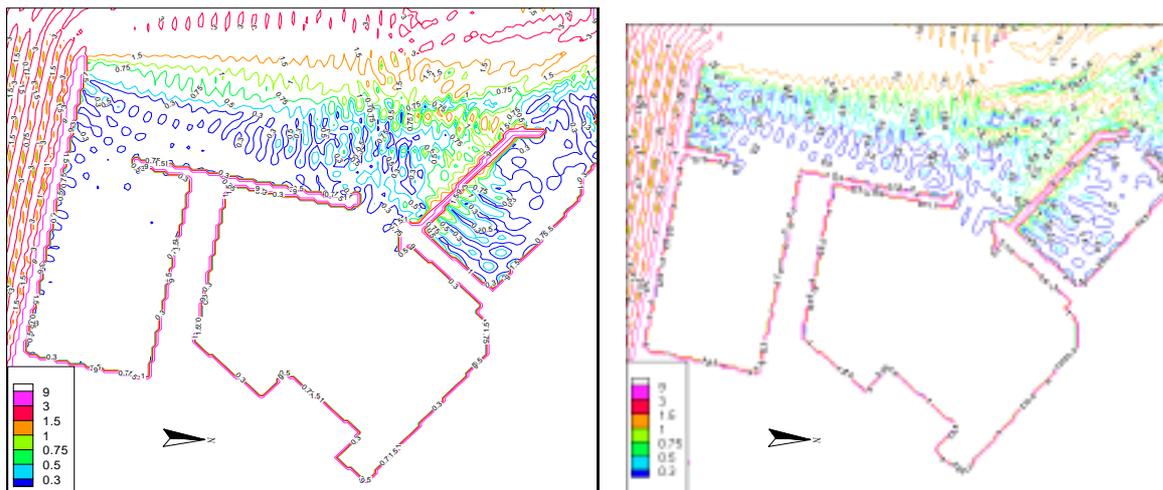


图 2 东南向入射波条件下港池水域波高等值线图

总体上看，在给定的三种入射波浪条件下，原方案 A、B、C 三个港池内的波高基本上都在 1m 以下，其中大部分区域的波高小于 0.5m。在南向波浪入射时，港池内波况最平稳；东南向入射时，波况较为平稳；西南向波浪入射时，港池内波况相对稍差一些。

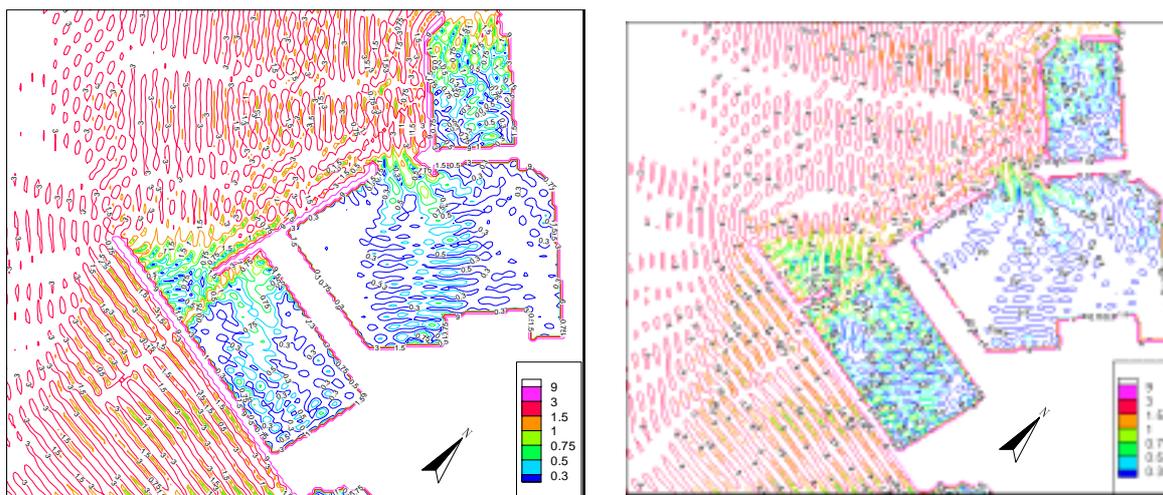
修改方案在给定的三种入射波浪条件下，A、B、C 三个港池内的波况比原方案好些，波高基本在 1m 以下，其中大部分区域的波高小于 0.5m。在南向和东南向波浪入射时，港池内波况都比较平稳；西南向波浪入射时，港池内波况相对稍差一些。



a) 原方案

b) 修改方案

图3 南向入射波条件下港池水域波高等值线图



a) 原方案

b) 修改方案

图4 西南向入射波条件下港池水域波高等值线图

### 3.2 三方向入射波计算结果分析

#### 3.2.1 东南向入射波

东南向入射波波高  $H_{4\%}=3.83\text{m}$ ，波周期  $T=7.8\text{s}$ 。从原方案波高等值线图 2a~4a 可以看出，在该方向的波浪作用下  $\beta$  港池的波高基本上小于  $0.5\text{m}$  而 A 和 C 港池内有部分区域的波高小于  $0.5\text{m}$ ，其余部分的波高介于  $0.5\text{m}$  至  $1\text{m}$  之间。A 港池处由于海岸的反射，部分波浪从口门处进入港池，导致港池内波高较大。C 港池内的波能主要是通过绕射传入，波浪在港池内多次反射，形成类似

驻波的情况，这是造成局部波高较大的主要原因。三种入射波浪条件中，东南向的入射波高最大，也是导致整个计算区域内的波高相对较大的重要原因。

从修改方案波高等值线图 2b~4b 可见，A、B 港池内的波高基本上都小于 0.5m；C 港池内大部分区域波高小于 0.5m，其余部分的波高介于 0.5m 至 1m 之间。C 港池内的波能主要是通过绕射传入，波浪在港区内多次反射，形成类似驻波的情况，是造成局部波高较大的主要原因。由于改变了防波堤平面布置，港池内波况较原方案有明显改善。

### 3.2.2 南向入射波

南向入射波波高  $H_{4\%}=2.18\text{m}$ ，波周期  $T=5.3\text{s}$ 。从原方案波高等值线图 2a~4a 可以看出，三个港池内的波高均较小，B、C 港池内均未出现大于 0.5m 的波高，A 港池内也仅有一小部分区域波高大于 0.5m。这主要是因为 C 港池南端的长防波堤对整个港区起到了明显的掩护作用，而该方向本身的入射波高相对较小也是一个重要的因素。A 港池内东南角部分区域出现的大于 0.5m 的波高主要是波浪的多次反射叠加造成的。

从修改方案波高等值线图 2b~4b 可见，此方向入射波在港区造成的波高最小，B、C 港池内均未出现大于 0.5m 的波高，A 港池内也仅有一小部分区域波高大于 0.5m，较原方案波况要好。

### 3.2.3 西南向入射波

西南向入射波波高为  $H_{4\%}=2.24\text{m}$ ，比南向 2.18m 的入射波高仅大 0.06m，周期与南向入射波相同  $T=5.3\text{s}$ ，但整个港区的波高分布较南向入射情况相对要差一些。从原方案波高等值线图 4-5~6 可看出：A 港池内部分区域波高介于 0.5m 至 1m 之间，其余部分波高小于 0.5m；B 港池的波高基本小于 0.5 米，但在港池中部有部分区域波高介于 0.5m 至 1m 之间；C 港池大部分区域波高小于 0.5m，沿港池西北—东南对角线上部分区域波高介于 0.5m 至 0.8m 之间。港池 A 内波浪主要是由于岸线反射由口门传入的。在 A 港池防波堤的反射波以及口外入射波的共同作用下，致使部分波浪从港池 B 的口门“挤”入港池 B，使得港池 B 内出现了一道比较明显的大波高区域。港池 C 中部水深较大，进入该港池的波浪发生折射，波能在部分区域积聚，是导致部分区域波高较大的主要原因。

从修改方案波高等值线图 2b~4b 可见，因为港池 A 内波浪主要是由于岸线反射由口门传入的，由于修改了防波堤的设计，大部分反射波浪被阻挡在 A 港池外。与原方案相比，港池 C 中驻波的形式不太明显，波高分布也显得杂乱一些。

## 3.3 三港池泊稳条件分析

### 3.3.1 A 港池

由于岸线的反射，在三个方向入射波的作用下，均有波浪从口门进入 A 港池，港池内不同程度地出现了波高大于 0.5m 的区域。相比之下，南向波浪入射时，港池内波况较好，东南和西南向波浪入射时，A 港池内的波况稍差。修改方案延长了接岸防波堤后，A 港池内的波况较原方案有明显的改善。

### 3.3.2 B 港池

总体而言，B 港池受到的掩护最好，其内部的波况是三个港池中最平稳的，波高基本上都小于 0.5m。南向波入射时波高完全小于 0.5m，波况最好。东南向波浪入射时，大部分区域波高小于 0.5m，仅在口门附近较小的区域内出现了介于 0.5m 至 0.8m 的波高。西南向波浪入射时，港池内大部分区域的波高也小于 0.5m。由于口外入射波和来自 A 港池防波堤的反射波的共同作用，西南方向入射时，有部分波能传入 B 港池，在 B 港池内形成了一道比较明显的相对较大波高的区域，不过除了口门附近外，这道相对较大波高区域内的波高基本上都小于 0.7m。修改方案的波况较原方案稍有改善。

### 3.3.3 C 港池

南向波浪入射时，C 港池内未出现大于 0.5m 的波高，波况最好。西南向波浪入射时，由于地

形的折射，港池内部分区域出现了介于 0.5m 至 1m 的波高，波况稍差一些。东南方向波浪入射时，由于多次反射，港池内出现了类似驻波的情况，波高比较有规律地变化，约有一半区域出现了大于 0.5m 的波高，波况相对较差。修改方案 C 港池在东南向入射波时，波况较原方案有明显改善，西南向入射波时驻波的形式不太明显，波高分布显得杂乱了一些。

#### 4 结论及建议

总体来看，按两年一遇设计标准，3 个方向入射波浪条件下的数值计算结果表明，青岛帆船比赛基地港池防波堤的平面布置设计方案基本满足 2008 奥运会比赛用帆船停泊的泊稳条件。修改方案后港池的泊稳条件要好于原设计方案。

在三种入射波浪作用下，南向波浪入射时，波况最好；西南向波浪入射时，港区内波况相对较差；东南向波浪入射时，波况介于以上二者之间。三个港池中，B 港池内的波况最好，波高基本上小于 0.5m，满足泊稳条件要求；A、C 港池内的波况相对稍差一些，均不同程度地出现了大于 0.5m 的波高。另外，港池内的大量浮式栈桥和船舶（计算中未予考虑）会有一定的消波效果，特别是在港池内边壁附近可消减部分波能减小波高。

A 港池原方案防波堤的掩护效果并不明显，建议采用修改方案的防波堤设计以改善港池内的波况。B 港池受到的掩护较好，波况平稳，只是在西南向波浪入射时口门处出现了波能积聚的现象。建议可在 A 港池防波堤的向浪侧（南侧）布置消浪设施，减小西南向入射波传入 B 港池的波能。C 港池内水深变化较大可能导致波能在局部区域积聚，应引起注意。建议采用修改方案以降低港池内出现驻波的机率，改善港池内的波况。

在数值模拟计算的基础上，开展了波浪物理模型试验研究，实验结果与数值计算结果在波高分布规律和数值上表现出了相同的规律，从而验证了数值模拟结果的准确性。