

目 录

涡激运动 VIM 虚拟试验.....	1
一、试验介绍.....	1
1. 功能介绍.....	1
2. 产品特点.....	1
3. 运行环境和效率.....	1
4. 试验精度.....	1
二、典型样例.....	2
1. 样例名称.....	2
2. 样例描述.....	2
3. 试验结果.....	2
4. 重要模型和参数.....	2
5. 部分试验结果展示.....	4
三、操作指南.....	10
1. 试验创建.....	11
2. 参数录入.....	12
3. 求解设置.....	14
4. 结果展示.....	15
四、参考资料.....	17

涡激运动 VIM 虚拟试验

VIM Virtual Test

功能: 本产品开发了用于处理高雷诺数下大分离流动的湍流模拟模块——基于剪切应力输运(Shear Stress Transport, SST)的分离涡模拟(Detached-Eddy Simulation, DES)。结合动边界弹簧网格模块和六自由度运动模块, 可求解平台涡激运动。

特色: SST-DES 是一种混合雷诺平均/大涡模拟 (Hybrid RANS-LES Method), 它在壁面附近求解雷诺平均方程, 在远离壁面的流动分离区域采用大涡模拟方法, 兼具前者计算量小的优点和后者能模拟大分离湍流流动、计算精度高的优势。

一、试验介绍

1. 功能介绍

本产品开发了用于处理高雷诺数下大分离流动的湍流模拟模块——基于剪切应力输运(Shear Stress Transport, SST)的分离涡模拟(Detached-Eddy Simulation, DES)。结合动边界弹簧网格模块和六自由度运动模块。

主要功能有: 可求解平台六自由度涡激运动结果。

2. 产品特点

(1) 可计算高雷诺数分离流动:

SST-DES 是一种混合雷诺平均/大涡模拟 (Hybrid RANS-LES Method), 它在壁面附近求解雷诺平均方程, 在远离壁面的流动分离区域采用大涡模拟方法, 兼具前者计算量小的优点和后者能模拟大分离湍流流动、计算精度高的优势。

(2) 试验结果分析

可提供平台涡激运动横荡、纵荡和首摇运动结果;

试验结果动态展示;

试验报告自动生成;

3. 运行环境和效率

主流 PC 机上即可运行; Windows 操作系统, 高性能计算集群上也可运行。

Windows 操作系统, 采用虚拟化技术, 动态分配资源, 满足计算所需。

计算速度快, PC 机上计算单个频率点耗时约 15 分钟, 大大高于同样精度的粘流模型。

4. 试验精度

平台横向响应的数值结果与模型试验结果的误差在 5%以内, 首摇响应的误

差则在 10%以内，均满足计算极度的要求。

二、典型样例

样例一 半潜式平台涡激运动

1. 样例名称

样例试验-涡激运动-半潜式平台

2. 样例描述

半潜式平台试验。

3. 试验结果

- ① 平台横荡响应曲线；
- ② 平台纵荡响应曲线；
- ③ 平台首摇响应曲线；
- ④ 速度流场云图；
- ⑤ 压力流场云图；
- ⑥ 涡量流场云图；
- ⑦ 三维涡量云图。

4. 重要模型和参数

表 1 平台模型参数

缩尺比/ λ	1:1	1:70
立柱有效直径 D	14m	0.2m
吃水/T	35 m	0.5 m
宽度/(D+S)	70 m	1 m
立柱中心间距/S	56 m	0.8 m
立柱截面尺寸/(D×D)	14 m×14 m	0.2 m×0.2 m
立柱高度/L	24.5 m	0.35 m
浮筒宽度/B	14 m	0.2 m

浮筒高度/H _{pon}	10.5 m	0.15 m
排水量/Δ	53 000 t	0.158 t

表 2 基本数据表

流体密度 (kg/m ³)	流体动力粘度系数	流体速度 X (kg/m ²)	流体速度 Y (kg/m ²)	流体速度 Z (kg/m ²)
1000	1.0E-6	0.0905	0.0	0.0

表 3 浮式平台的物理参数表

平台质量 (kg)	125.15		
重心坐标 X (m)	0.0	转动惯量 X (kg·m ²)	0.0
重心坐标 Y (m)	0.0	转动惯量 Y (kg·m ²)	0.0
重心坐标 Z (m)	-0.33	转动惯量 Z (kg·m ²)	28.849

表 4 系泊系统设置参数表

导缆孔坐标 X (m)	导缆孔坐标 Y (m)	导缆孔坐标 Z (m)	锚泊点坐标 X (m)	锚泊点坐标 Y (m)	锚泊点坐标 Z (m)	弹性系数 (N/m)	预张力 (N)
-0.706	0.0	0.0	-4.5	0.0	0.0	18.086	22.716
0.706	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	18.086	22.716
0.0	-0.706	0.0	0.0	-4.5	0.0	18.086	22.716
0.0	0.706	0.0	0.0	4.5	0.0	18.086	22.716

表 5 求解参数设置表

并行核数	起始时间 (s)	结束时间 (s)	时间步长 (s)	保存时间步间隔
32	0.0	300.0	0.02	0.5

网格是利用 OpenFOAM 自带网格划分工具 blockMesh 和 snappyHexMesh 生成。所计算域的大小为： $-10D \leq x \leq 20D$ ， $-10D \leq y \leq 10D$ ， $-9D \leq z \leq 0$ 。计算域如图 3 所示。之后在景网格中利用 snappyHexMesh 捕捉模型表面并进行局部网格的加密以及边界层的添加。边界层网格数量为 8 层。四种倒角半径模型网格数量如表所示，均在 270 万左右。

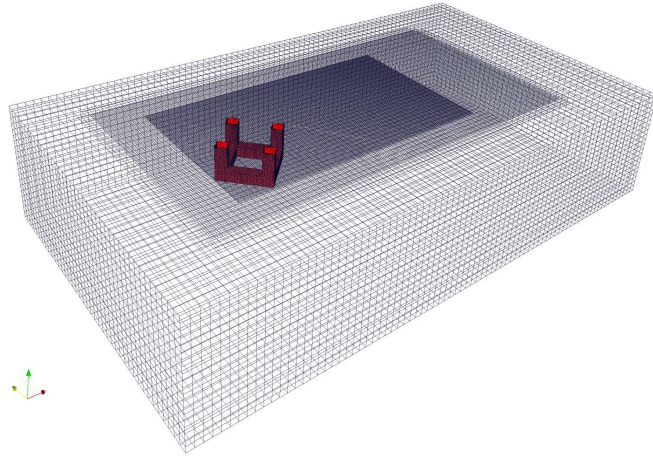


图 1 网格划分示意图

5. 部分试验结果展示

1) 横向运动时历曲线

图 2 是平台总体横向运动的时历图，以平台中心作为统计依据，纵轴的运动位移采用无量纲化处理，其中 A 为平台横向振荡幅值，D 为立柱垂直来流方向的特质长度直径。从图中结果可以获取平台涡激运动的最大横向位移和标称横向位移，这两个参数也是半潜式平台涡激运动中最关注的两个参数。

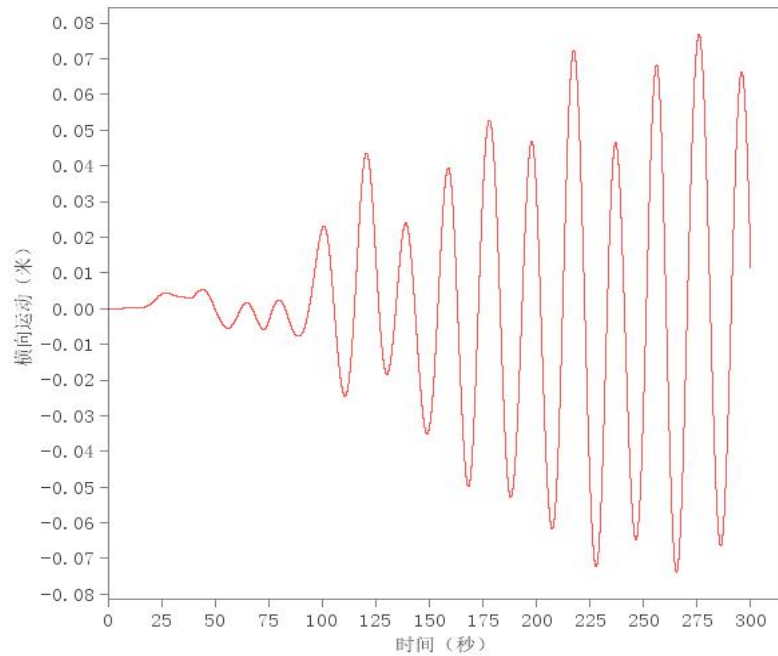


图 2 横向运动时历图

2) 纵向运动时历曲线

图 3 是平台总体流向运动的时历图，同样以平台中心作为统计一句，纵轴也采用了无量纲化处理，但 A 对应的是流向振荡幅值。从图中结果可以看出，平台的位移在来流冲击后会便宜原来平衡位置，并在新的平衡位置做来流振荡运动。

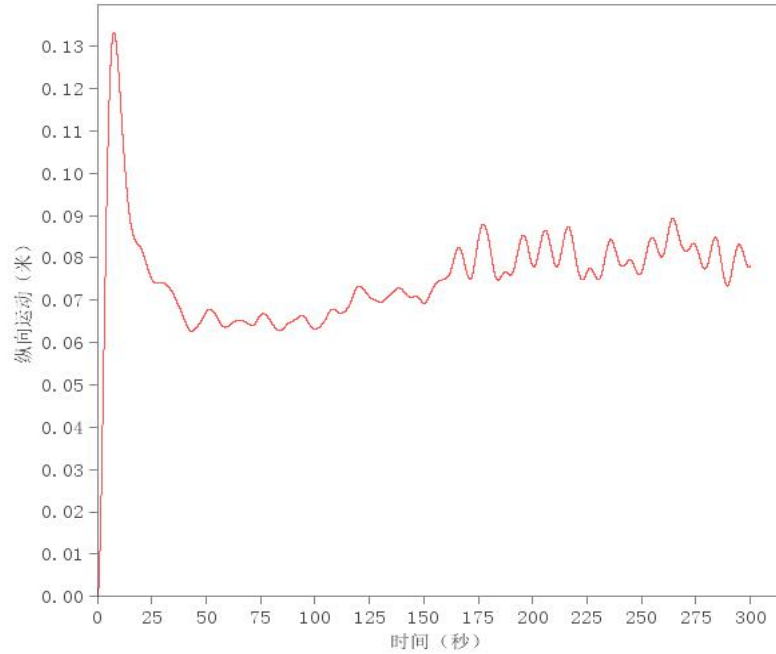


图 3. 纵向运动时历图

3) 首摇运动时历曲线

图 4 是平台首摇运动的时历图，纵轴记录了平台首摇角度。从图中结果可以获取平台最大首摇幅值。

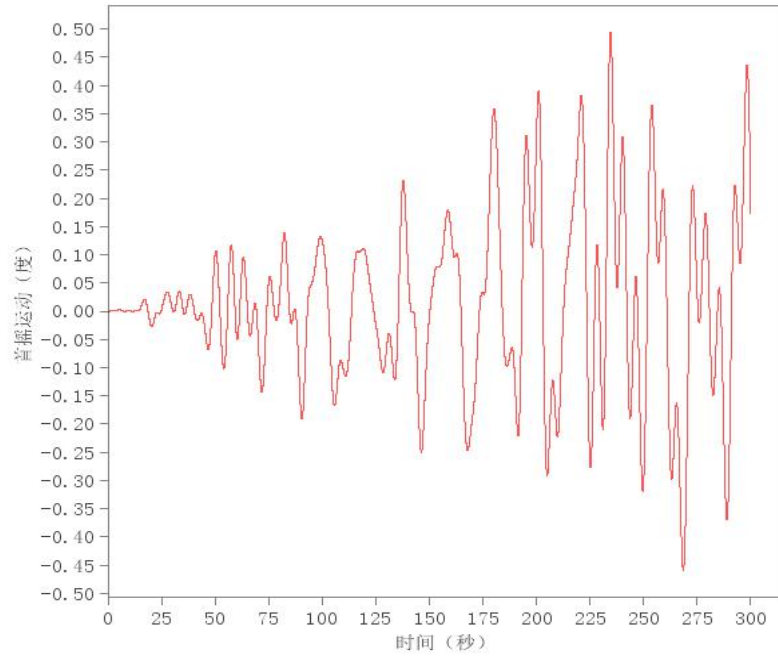


图 4 首摇运动时历图

4) 平面运动轨迹曲线

图 5 记录了平台在水平面上的运动轨迹，横轴表示 X 向，纵轴表示 Y 向。

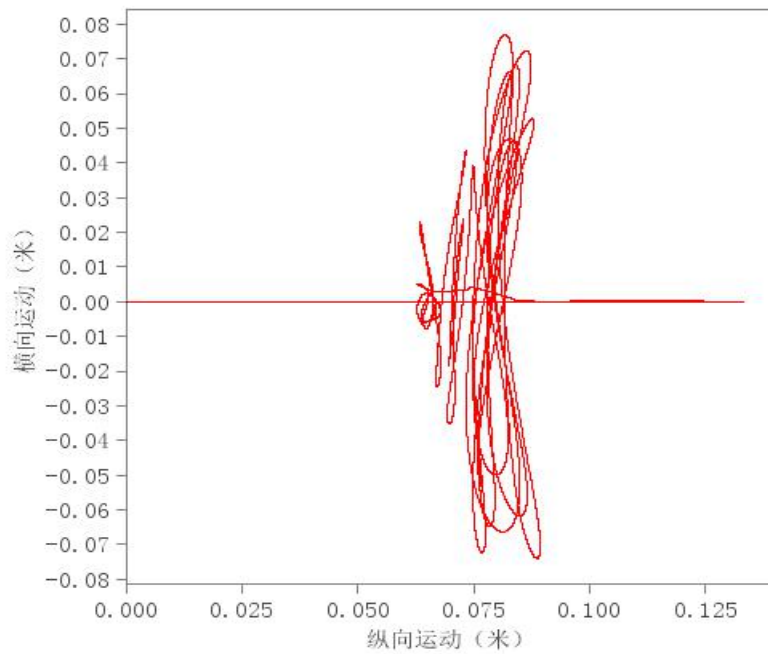


图 5 平台运动轨迹图

5) 横向受力时历曲线

图 6 记录了平台拖曳力系数的时历运动图，纵轴采用了无量纲化处理：

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 D A_w} \quad \text{公式 (3-1)}$$

其中 F_L 为平台升力， ρ 表示流体密度， U 表示来流速度， A_w 表示平台垂直来流方向的湿表面积。横向受力的时历数据可以统计平台受力均方根结果。

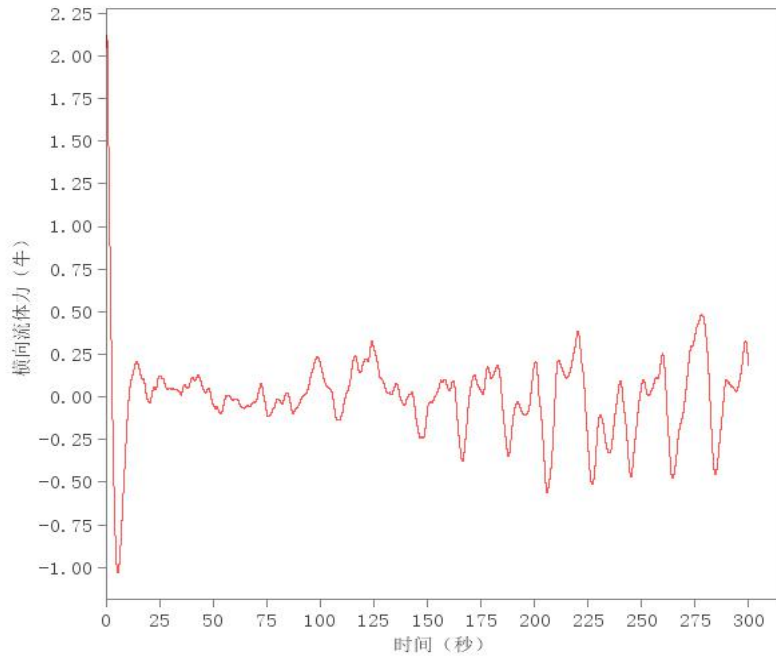


图 6 横向受力时历图

6) 纵向受力时历曲线

图 7 表示纵向受力时历图，纵轴同样采用无量纲化处理：

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 A_w} \quad \text{(公式 3-2)}$$

其中， F_D 为平台拖曳力。纵向受力时历数据可以统计平台拖曳力的平均结果。

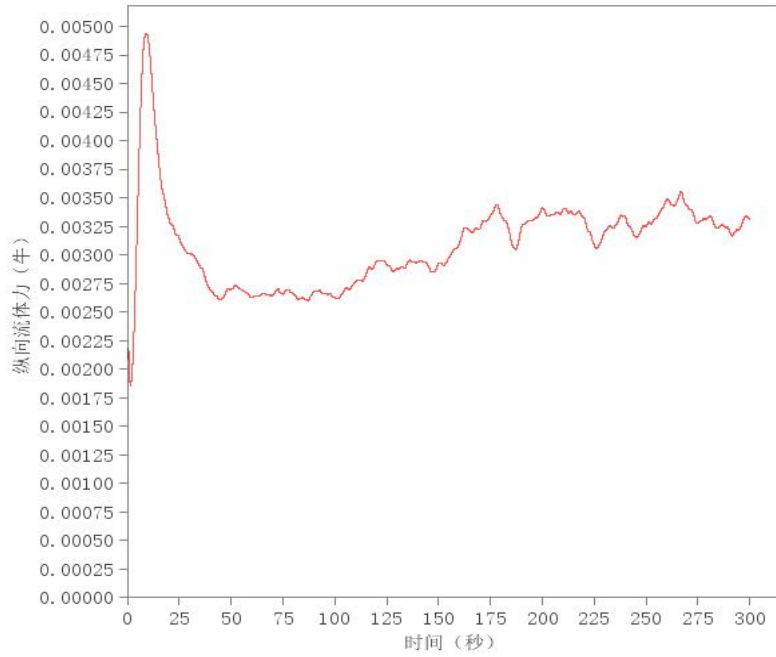


图 7 纵向受力时历图

图 8、9 和 10 分别街区 $Z/H=-0.5$ 的水平面，其中 Z 表示举例 Z 轴的高度， H 表示立柱高度。速度云图中选取了 U 的 x 分量进行表示，涡量图则采用了 ω 的 z 分量进行展示。

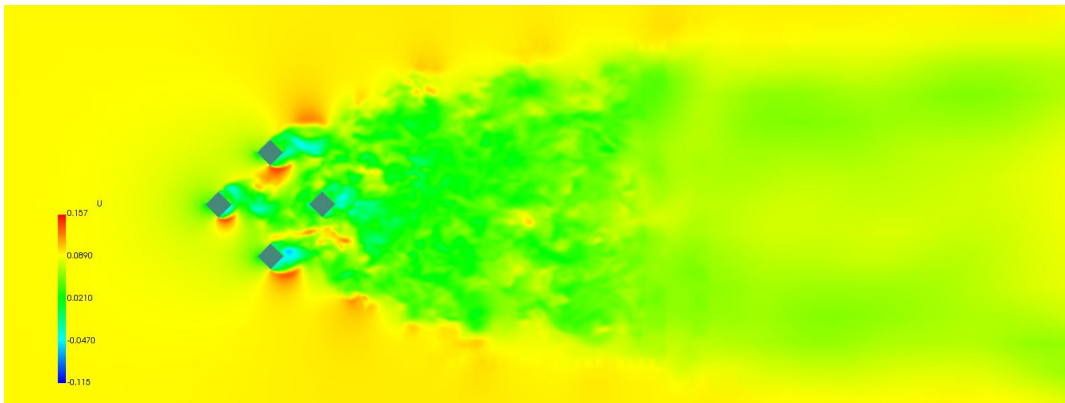


图 3.8 半吃水面速度云图

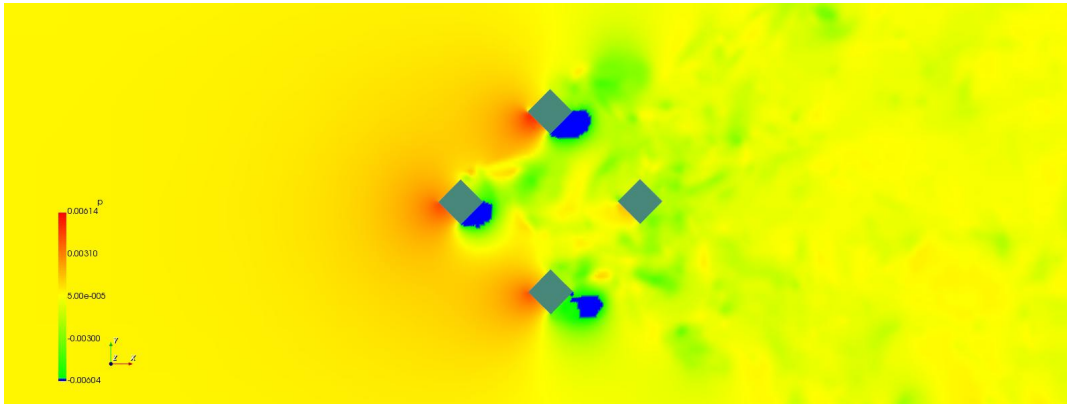


图 3.9 半吃水面压力云图

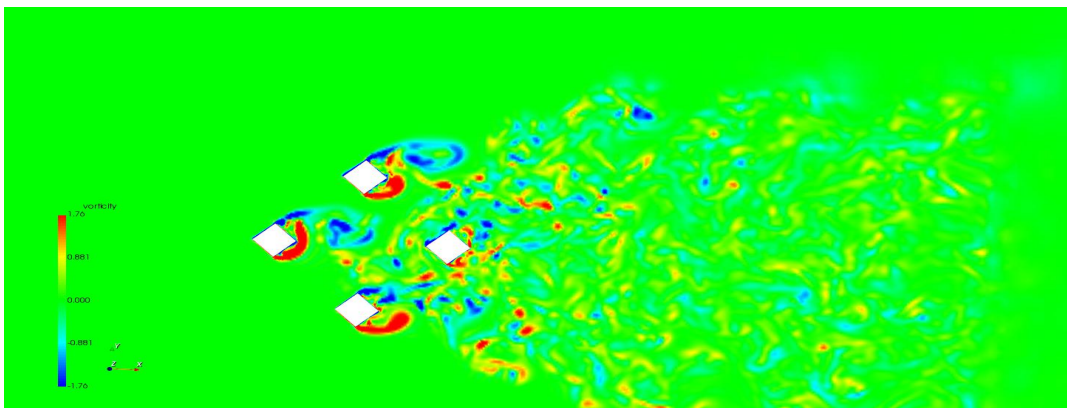


图 3.10 半吃水面涡量云图

三维涡量图展现了立柱泻涡模式的发展，其中三维涡量的计算采用了 Q 准则，云图中显示的是计算得到的 Q 结果。

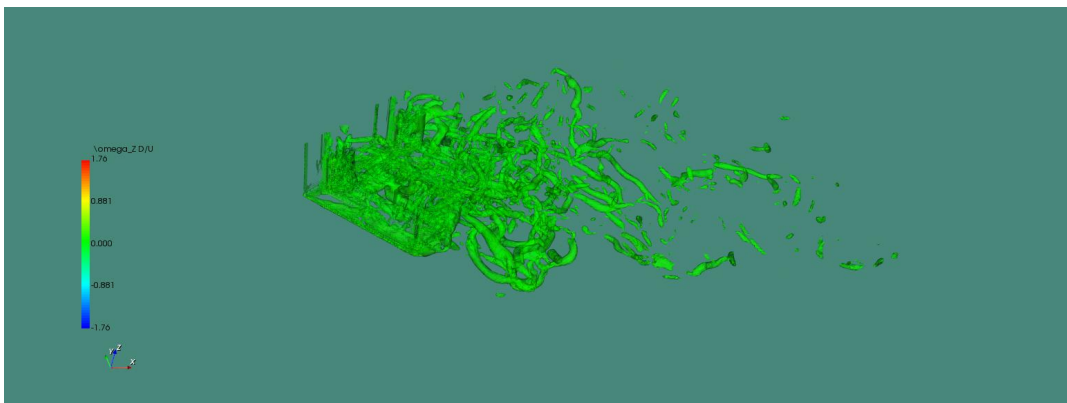
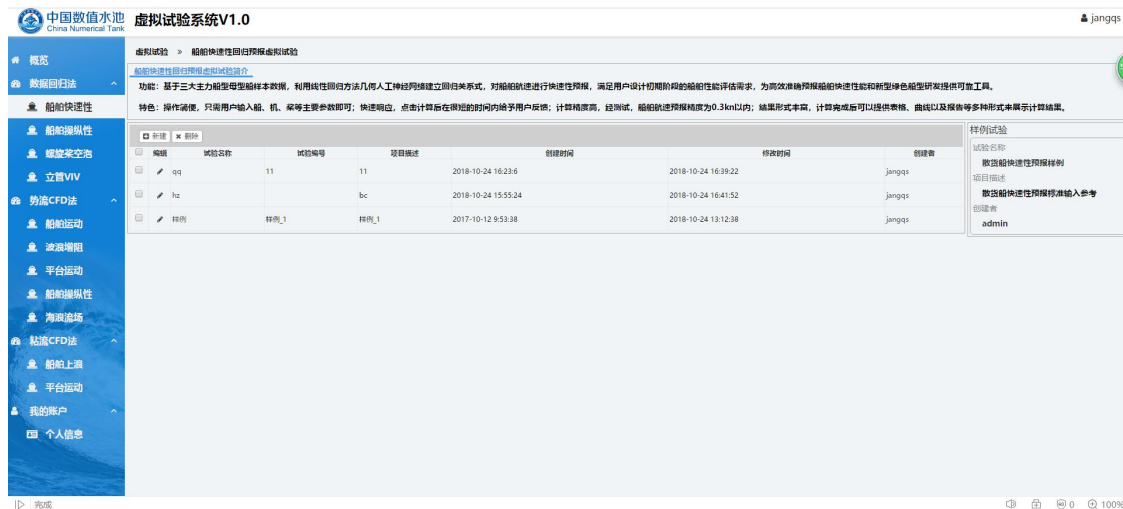


图 3.11 三维涡量云图

三、操作指南

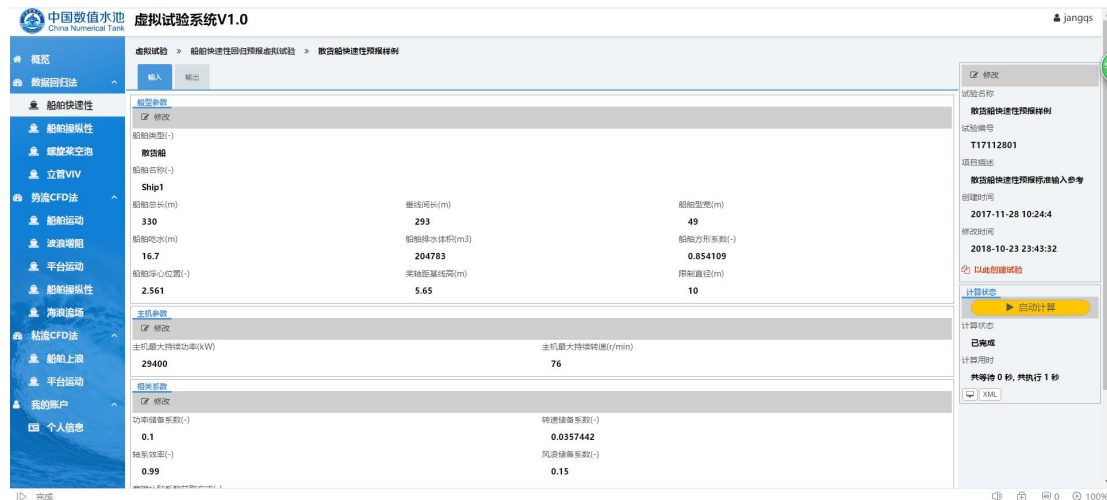
用户登录中国数值水池虚拟试验系统后，可完成系统提供的各类虚拟试验。虽然试验在参数、求解器、计算结果等方面区别很大，但总体上来说操作过程基本相同，主要由四个部分组成：1 试验创建；2 参数录入（前处理）；3 计算求解；4 结果展示（后处理）。

登录系统后，点击页面左侧导航栏中的“涡激运动”，从而进入该试验的管理页面。如下图所示，该页面有关于涡激运动试验的主要功能介绍，以及该虚拟试验的相关特色，其下为“我的试验”。



“我的试验”中给出用户做过的试验列表，该列表以时间顺序排序，可以在看到用户做的每一个虚拟试验的概要信息，如试验名称、编号、描述、创建时间、修改时间等内容，用户可在这里对试验进行创建核删除操作。

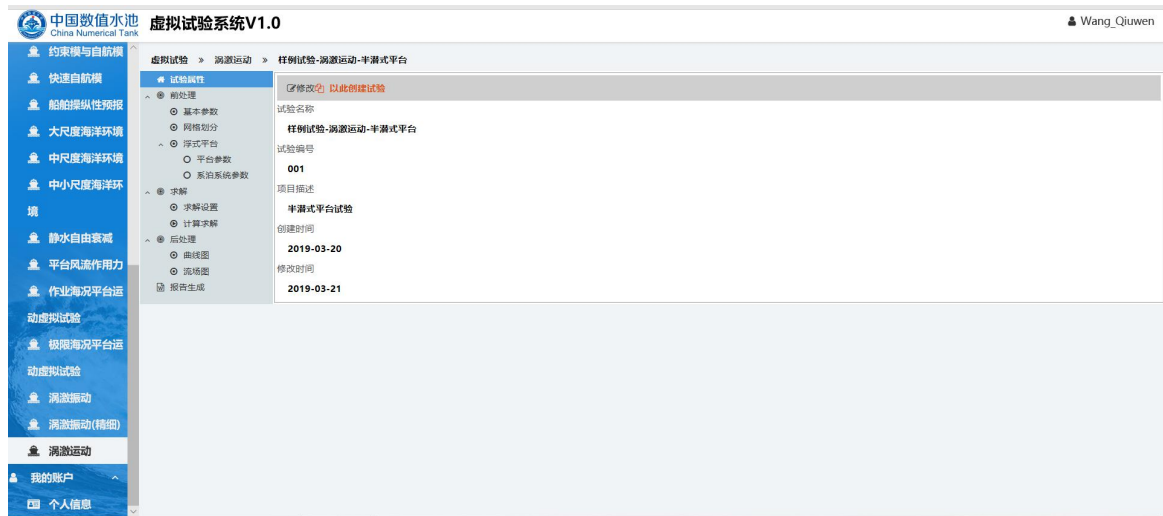
页面的右侧是涡激运动试验的“样例试验”，如下图所示。样例试验是系统提供的已经完成的典型试验，对系统中的所有注册用户开放，可给用户一定的参考，从而更好地完成自己的虚拟试验。



点击“样例试验”后，则进入样例试验的详情界面，可以看到样例试验的参数设置、求解器的执行信息及试验的结果。这里，用户可以查看样例的所有信息，但不可以修改。

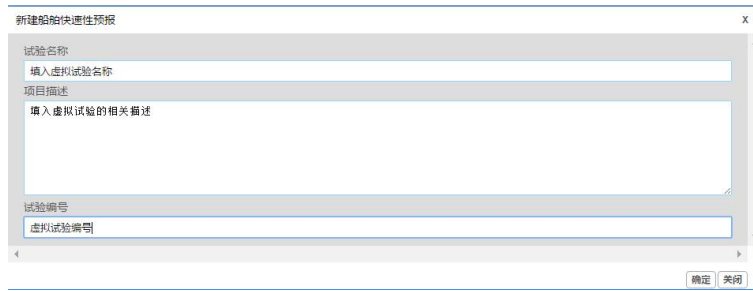
1. 试验创建

系统提供了两种创建虚拟试验的方法，第一种是通过某个虚拟试验为范本来创建虚拟试验。如下图所示，点开某个虚拟试验的详情页面，在这个页面的右侧用红色字体标出的字样“**以此创建试验**”，则弹出创建新试验的对话框，输入适当的试验名称、编号及描述，点击确定即可完成新试验的创建。

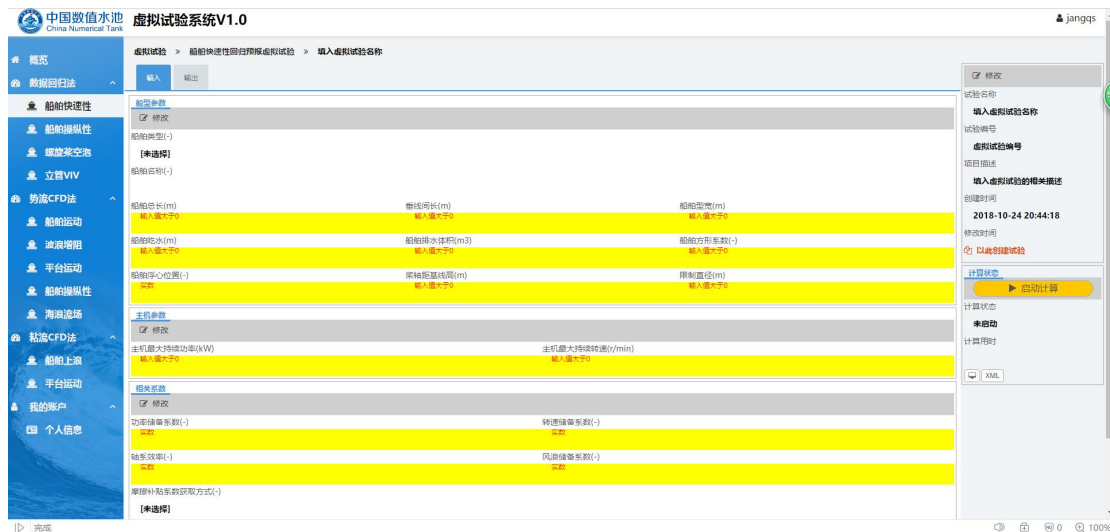


如下图所示，新试验创建后系统自动跳转到该试验的详情页面，可见通过这种方式创建的新试验是样例试验的一个拷贝，其参数与样例试验相同，用户只需按实际情况修改部分参数即可。因此，可将当前虚拟试验看成试验模板，起到初始化设定新试验参数的作用，系统推荐通过这样的方式来创建新的虚拟试验。

第二种创建新试验的方法是创建一个空白试验。如下图所示，通过点击“船舶快速性预报”中虚拟试验列表上方的“新建”按钮，同样会弹出对话框如下图。填入相应的信息，然后点击确定，即可创建一个新的空白试验。



如下图所示，新空白试验创建后，同样会自动跳转到该虚拟试验的详情页面。可见通过该方法创建的所有虚拟试验都是空白，需要用户手动输入所有的必填参数，方可进行计算，该方法适用于有一定经验的用户。

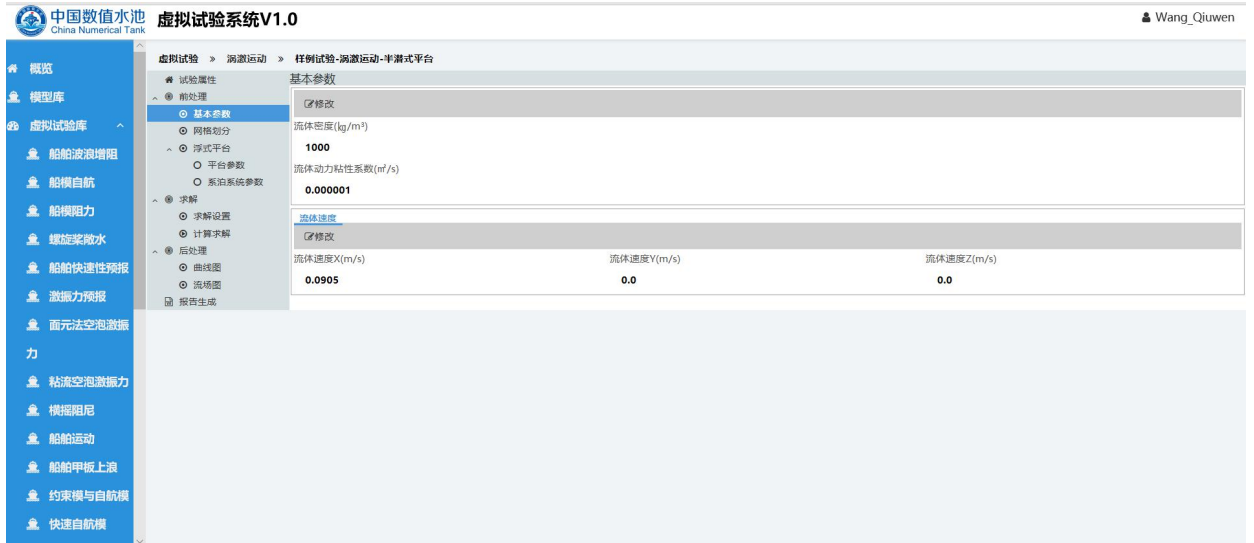


2. 参数录入

当一个新的虚拟试验创建口，用户需要对其参数进行适当的录入或修改，为确保结果的准确，请确认所录入的参数符合实际情况。下面以“涡激运动”为例，介绍一下各种类型参数的录入方式。

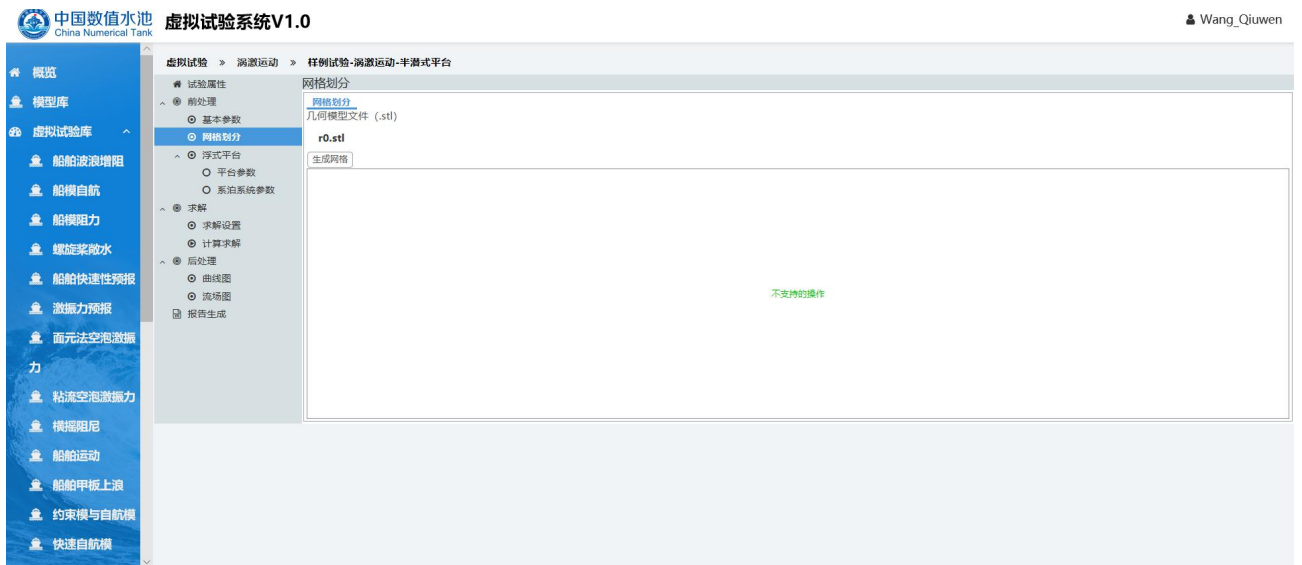
2.1 基本参数

在“输入”标签中，点击“基本参数”小标签下方的“修改”按钮，可进入如下图所示页面，可以进行与流体相关参数的设置。



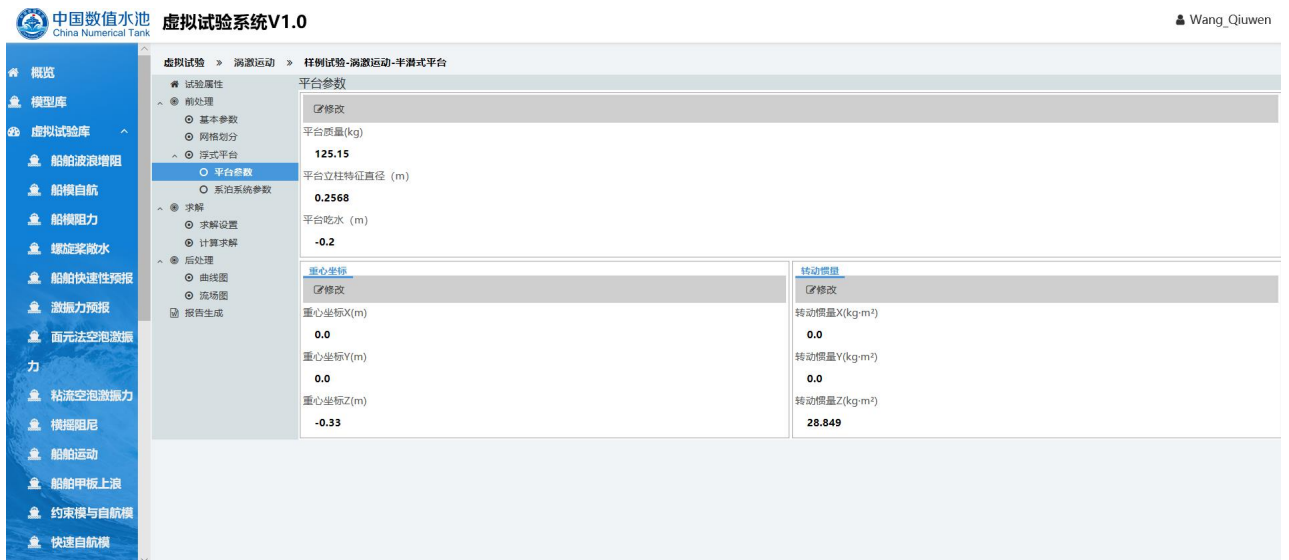
2.2 网格划分

点击“网格划分”小标签下方的“上传文件”按钮，可进入如下图所示页面，上传文件后点击生成网格即可自动生成网格。



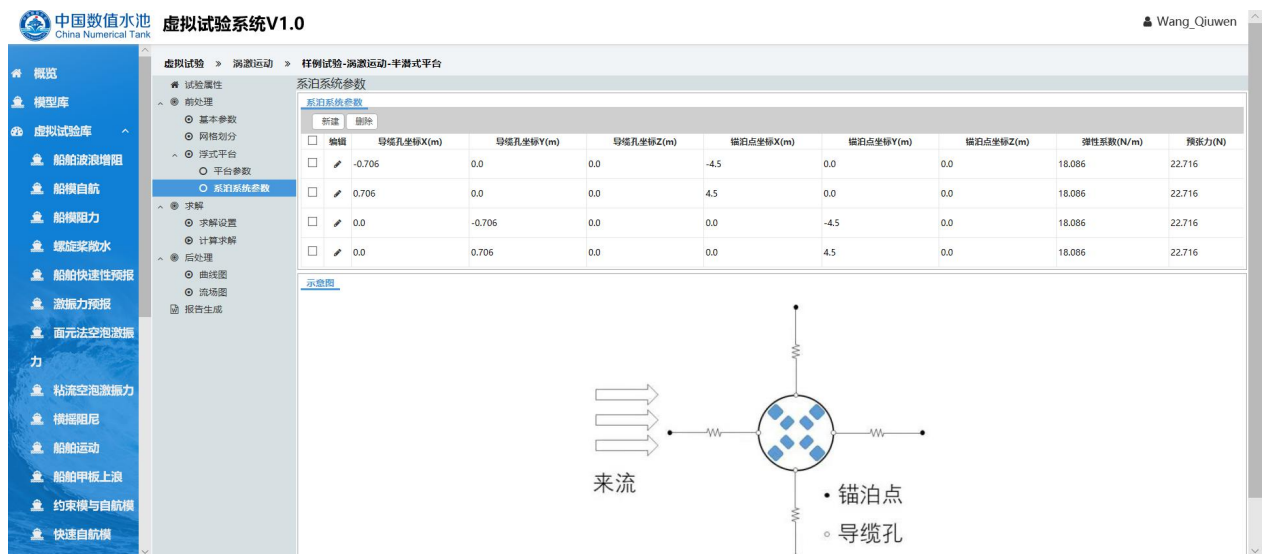
2.3 浮式平台

点击“浮式平台”小标签下方的“修改”按钮，可进入如下图所示页面，可以对相关系数等参数进行设置。



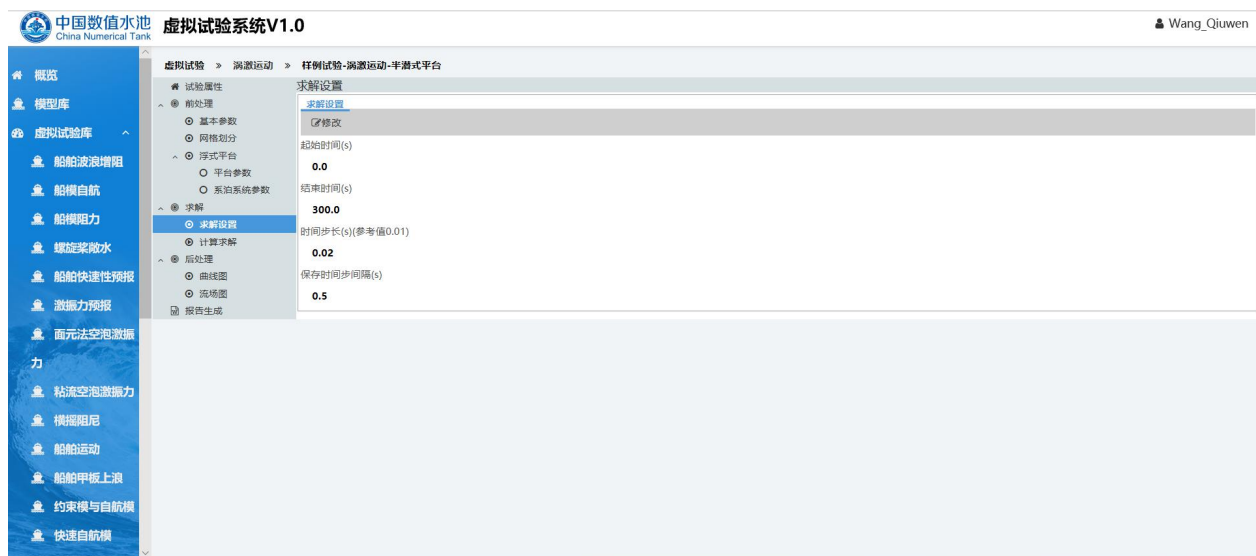
2.4 系泊系统参数

点击“系泊系统参数”小标签下方的“修改”按钮，可进入如下图所示页面，可以对系泊系统参数进行设置。注意这里的系泊系统采用线性弹簧等效刚度进行替代。

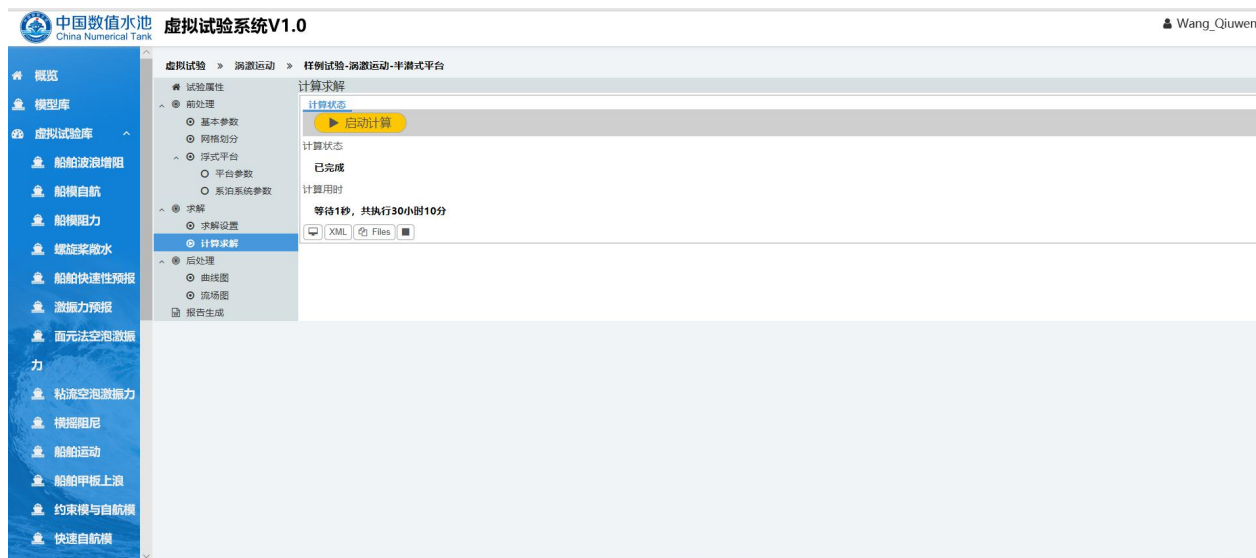


3. 求解设置

全部参数正确设置后，可启动求解器进行计算。如下图所示红色方框内，求解器的启动及计算状态展示在整个页面的右下方。



如下图所示，点击“启动计算”按钮，会弹出启动确认对话框，点击确定按钮即可启动计算。



如果用户录入的参数不符合计算条件时，计算将无法启动，并会弹出对话框进行提示，请用户按照提示的要求来填写相关的参数，以确保试验能够正确，顺利的进行。

4. 结果展示

当求解器执行结束后，可切换到“输出”标签对应的页面来看本次虚拟试验的结果，试验结果可分为曲线类和云图类。曲线类可选中不同自由度的响应幅值进行显示曲线，云图类需要根据入流条件进行相应的显示参数范围设置。最后点击报告生成可以自动生成结果文

档。

中国数值水池 虚拟试验系统V1.0 Wang_Qiuwen

虚拟试验 > 涡激运动 > 杆侧试验-涡激运动-半潜式平台

试验属性

- 前处理
 - 基本参数
 - 网格划分
 - 浮式平台
 - 平台参数
 - 系泊系统参数
- 求解
 - 求解设置
 - 计算求解
- 后处理
 - 曲线图**
 - 流场图
 - 报告生成

曲线图

曲线类型

点击选择输出曲线

中国数值水池 虚拟试验系统V1.0 Wang_Qiuwen

虚拟试验 > 涡激运动 > 杆侧试验-涡激运动-半潜式平台

试验属性

- 前处理
 - 基本参数
 - 网格划分
 - 浮式平台
 - 平台参数
 - 系泊系统参数
- 求解
 - 求解设置
 - 计算求解
- 后处理
 - 流场图**
 - 曲线图
 - 报告生成

流场图

速度云图参数	压力云图参数	涡量云图参数
<input checked="" type="button" value="修改"/>	<input checked="" type="button" value="修改"/>	<input checked="" type="button" value="修改"/>
速度云图色调上限(m/s)	压力云图色调上限(Pa)	涡量云图色调上限(1)
0.0905	0.00614	1.76207
速度云图色调下限(m/s)	压力云图色调下限(Pa)	涡量云图色调下限(1)
-0.04525	-0.00604	-1.76207

云图类型

点击选择输出云图

四、参考资料

VIM 中的流动均发生在高雷诺数下，且伴随大分离湍流流动。准确预报高雷诺数下的流动分离及分离后的流体运动是开发 VIM 虚拟试验的重点，为此我们开发了用于处理高雷诺数下大分离流动的湍流模拟模块——基于剪切应力输运（Shear Stress Transport, SST）的分离涡模拟（Detached-Eddy Simulation, DES）。SST-DES 是一种混合雷诺平均/大涡模拟（Hybrid RANS-LES Method），它在壁面附近求解雷诺平均方程，在远离壁面的流动分离区域采用大涡模拟方法，兼具前者计算量小的优点和后者能模拟大分离湍流流动、计算精度高的优势。

不可压缩粘性流体的控制方程为质量和动量守恒方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

其中， ν 为分子粘度， τ_{ij} 为雷诺应力或亚格子应力张量。根据 Boussinesq 假设， τ_{ij} 可以表示为

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

分离涡方法是 Spalart 等^[3]提出的一种混合雷诺平均（Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS）和大涡模拟（Large-Eddy Simulation, LES）的方法。SST-DDES 方法在近壁面的流动区域采用 SST 模型，而在其他区域采用亚格子模型求解流场。分离涡模拟方法作为一种混合 RANS 和 LES 的方法，其优势在于既可以保证求解的精度，又可以通过减少近壁面处的边界层网格来降低计算量。

在 SST 模型中，湍动能 k 和特定湍流耗散率 ω 的运输方程分别表示为：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) CD_{k\omega}$$

SST 模型中的湍流长度尺度定义为：

$$l_{k-\omega} = \sqrt{k} / (\beta^* \omega)$$

而 SST-DDES 模型中将湍流长度尺度修改为如下形式：

$$l_{DDES} = l_{k-\omega} - f_d \max(0, l_{k-\omega} - C_{DDES} \Delta)$$

其中，

$$C_{DES} = (1 - F_1) C_{DES}^{k-\varepsilon} + F_1 C_{DES}^{k-\omega}$$

$$f_d = 1 - \tanh\left[\left(C_d r_d\right)^{C_{d2}}\right]$$

$$r_d = \frac{v_t + v}{\sqrt{0.5 \cdot (S^2 + \Omega^2) k^2 d^2}}$$

经过这样的修改，SST-DDES 模型通过 l_{DDES} 控制 RANS 和 LES 方法的自动切换。在边界层内部靠近壁面的位置包括对数层， r_d 函数取 1， f_d 为 0，使得 $l_{DDES} = l_{k-\omega}$ ，保证了在此区域内湍流模型退化成雷诺平均模型，延迟了 DES 模型转换为 LES 模型，实现了延迟效果^[4]。

k 方程中的耗散项可以改写为如下形式：

$$D_{DES}^k = \beta^* k \omega = k^{3/2} / l_{DDES}$$

因此可以得到新的 k 方程：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \frac{k^{3/2}}{l_{DDES}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \alpha_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

系泊系统是影响浮式平台 VIM 的重要因素，本求解器采用和水池物理模型试验相同的一套水平弹簧系统去准确模拟平台系泊。建立准确的弹簧系统数学模型是 VIM 虚拟试验系统能够成功预报锁定区间的关键。锁定区间是由于涡流频率接近平台固有周期而引起的一种共振现象。

在以往的对 VIM 的研究中，平台通常被视为一个弹簧质量系统。对于此类系统，其固有频率可以表示为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + M}}$$

式中， k 为弹簧系统提供的有效刚度， m 为平台质量， M 为平台在水中的附加质量。可见弹簧刚度直接影响系统的固有频率，从而影响锁定区间对应的实际来流速度的范围。

同理，扭转固有频率可表示为

$$f_{nt} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{J + J_a}}$$

式中， k_t 为弹簧系统提供的有效扭转刚度， J 为平台转动惯量， J_a 为平台在水中的附加转动惯量。在 VIM 虚拟试验进行之前需要先做静态位移测试和自由衰减测试，以确保弹簧系统的配置能够提供所需的回复刚度和旋转回复刚度。

平台的涡激运动包含横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇六个自由度的耦合，在海洋工程中考虑最多的通常是水平面内的横荡、纵荡和首摇耦合运动。然而，由于涡激运动通常发生在吃水较深的平台中，其运动周期更长且运动幅度更大，具有显著的三维特性。在数值模拟中，如果仅考虑单自由度的运动，会对预报结果的精度造成一定影响。

该求解模块基于 Euler 角表述六自由度运动模型，如上图所示。在这个模型中，共使用

了两个坐标系：大地坐标系和随体坐标系。大地坐标系（Earth system），也称为惯性坐标系，可以固定在地球参考系上，或者以恒定速度相对于大地向前移动。随体坐标系（Local system），也称为非惯性坐标系。该坐标系始终固定在物体上，其原点在旋转中心或者物体重心上。当物体正浮时，随体坐标系的坐标轴方向与大地坐标系相同。随体在大地坐标系中的位移，也就是随体坐标系相对大地坐标系的位置定义为： $\eta = (x_1, x_2, x_3, \varphi, \theta, \psi)$ ，分别代表纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇以及首摇运动。其中 (φ, θ, ψ) 为三个 Euler 角。随体坐标系中的六个自由度的速度定义为 $v = (v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r)$ 。两个坐标系中的速度可以通过基于 Euler 角的转换矩阵来转换。

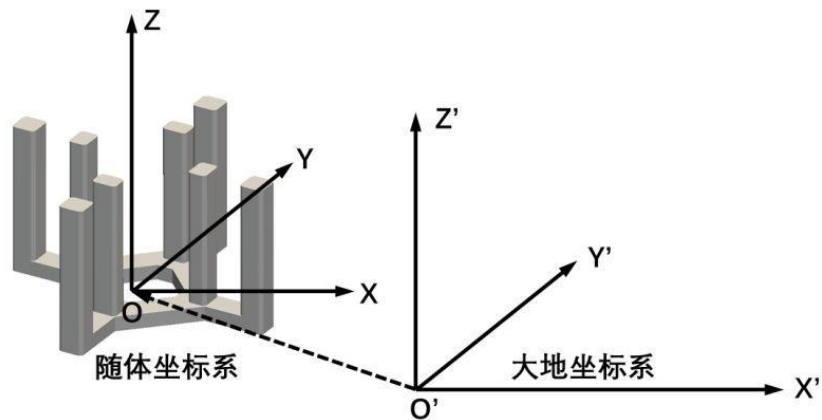


图 2 随体和大地坐标参考系