CNT-05-HEU-001

哈尔滨工程大学

平台标模试验验证报告

编制人　：　何协

审核人　：　廖康平

批准人　：　段文洋

哈尔滨工程大学

2019 年 2 月 26

摘 要

本报告针对在作业海况下半潜式平台的运动响应，开展了中国数值水池作业海况虚拟试验与 702 所物理模型实验对比分析，验证数值水池势流理论计算结果与模型试验结果是否接近。

目录

1. 概述 1

1.1 背景和目的 1

2. 标模试验工况 3

2.1 平台模型参数 3

2.2 环境参数 4

3. 网格和计算控制参数 5

3.1 作业海况网格和控制参数总体设置 5

3.3 虚拟试验开展硬件条件 9

4. 结果对比及结论 9

4.1 物理试验和虚拟试验计算结果展示 9

1. 概述

1.1 背景和目的

人类历史发展到 21 世纪的今天，社会文明已高度发达。随着社会文明越来越发达人们对资源的需求也越来越高。在过去的近百年内，陆地上的资源被人们过度开发，日渐枯竭，已远远不能满足人类社会的需求。为了寻求更加丰富的可用资源，人们把目光转向了海洋这座资源的聚宝盆。据统计，仅世界大陆架区就有 1500 万平方千米的盆地含有油气，其中蕴含油气的盆地已发现 800 余个，油气田 1600 余个，石油的地质储藏量高达 1450 亿吨，天然气的地质储藏量高达 140 亿立方米。如此丰富的海洋资源，如果好好加以利用可以极大的缓解世界能源和资源危机。事实上也是如此，在过去的一个世纪里，人们不断研究开发出新的工程装备来开采海洋资源。在一步步的研究和开发过程中，海洋工程装备越来越先进，人们对海洋资源的开发越来越高效。

人类对海洋资源的开发很早以前就已经开始了，最早可以追溯至 19 世纪。1887 年，在美国的加利福尼亚州，为了发掘海底的石油，人们以木桩做基础，建造了世界上第一座海上钻井平台。从那以后人类对海洋石油的开发拉开了序幕。到上个世纪的 1947 年，在美国的墨西哥湾，世界上第一座钢制石油平台诞生了。之后海洋平台的发展越来越迅速，在短短的半个世纪里，海洋平台经历了从导管架式平台到自升式平台，到半潜式平台，到张力腿式平台，再到 Spar 平台的历史变化，海洋平台的应用水深也不断增加，从浅水逐渐走向深水，甚至超深水。

我国是一个两面环海的国家，海岸线长度、大陆架和海域面积居于世界前十，其中蕴含的石油天然气储备也非常丰富，这对于我国的发展是一个非常有利的条件，如果能够充分利用这一优势，对于我国的社会进步必然会是一大助力，恢复中华也不再是痴人说梦。我国的海洋工业起步比较晚，上个世纪的 60 年代末才开始，最先是从渤海湾地区开始，到了上个世纪的 80 年代末期，我国与东南亚诸国开始在南中国海联合开发油气田。进入 21 世纪，中国因为领海问题与南海诸国的争端时有发生。为了保卫我国海洋领土的完整性，同时也为了开发利用海洋资源，近十年来，中国对海洋国土，尤其是南海与东海的重视程度越来越高，对海洋资源的开发也不断加大投入的力量。其中最显著的例子就是，我国自主研发的海洋石油 981 深水半潜式钻井平台于 2012 年在南海投入使用。海洋石油 981 的建成，标志着我国在海

洋工程装备领域已经具备了自主研发的能力和一定的国际竞争力。但是我国与世界强国的差距依然存在，为了追赶上他们的步伐，我们仍需努力。

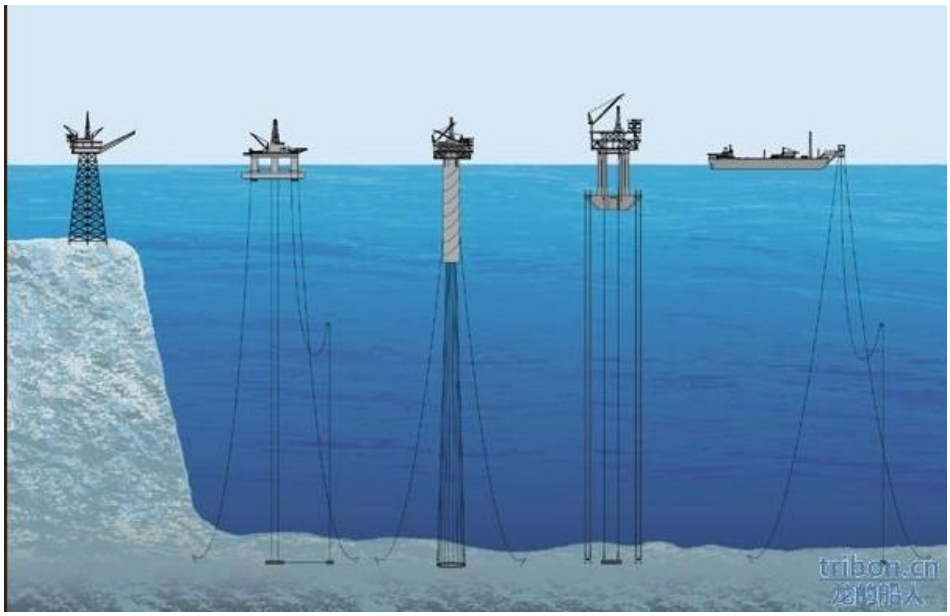

图 1.1 海洋平台的各种形式

图 1.2 半潜式平台

海洋资源开发的主要结构形式是浮式海洋平台。海洋平台的形式多种多样，图 1.1 给出

了几个主要的形式。在海上作业不可避免的是受到风、浪、流载荷的联合作用，因此保护海洋平台免于风、浪、流的破坏，同时也为了保护海洋立管等设备的完整性，系泊系统的作用显得尤为重要。系泊系统一端连着海洋平台，一端连着海底，将海洋平台限制在一定的范围内，使其有一个相对稳定的作业环境。

随着海洋平台作业水深的不断加深，系泊和立管系统对平台的运动影响越来越大，这就要求分析海洋平台运动的同时必须将系泊和立管纳入考虑范围。而传统的准静态法和解耦分析方法并不能得到令人满意的结果，动力耦合分析方法随之诞生。深水平台动力耦合分析方法对海洋平台和系泊及立管系统的耦合运动响应求解准确，能够满足工程实际的需求，因此被广泛采用。

我校开发的作业海况虚拟测试系统采用独创的泰勒展开边界元法和三维势流模型，可进行作业海况下平台水动力系数、六自由度波频摇荡运动、慢漂运动、系泊缆索张力等虚拟试验，满足平台性能优化设计需求。

2. 标模试验工况

首先对平台参数和工况进行介绍。

2.1 平台模型参数

表 2.1.1 主尺度参数

项目	单位	尺寸
浮筒长	m	104.500
浮筒宽	m	16.500
浮筒高	m	10.050
立柱长	m	15.500

立柱宽	m	15.500
立柱高	m	19.500

表 2.1.2 装载工况和状态参数

项　目	单位	作业工况
吃水	m	17.50
重心纵向位置（距尾）	m	53.00
纵向惯性半径	m	34.00
横向惯性半径	m	32.50
艏摇惯性半径	m	37.50

表 2.1.3　关键点位置坐标

No.	位置	X（距船艉，向艏为正）	Y（距中线，向左为正）	Z（距基线，向上为正）
P1	重心	00.000	0.000	21.000
P2	走桥	-19.875	0	45.238
P3	直升飞机甲板	43.438	37.425	47.150
P4	右吊机	-0.687	-33.375	56.050

2.2 环境参数

（1）重力加速度（m/s^2）：9.81；

（2）水密度（kg/m^2）：1025；

（3）谱分析统计参数见下表：

海浪谱类型	浪向角（°）	有义波高（m）	低频截止频率（rad/s）	高频截止频率（rad/s）	离散的海浪数目
ITTC 单参数谱	0	1.25	0.5	1.9	50

表 2.2.1 波浪参数

工况	有义波高 Hs（m）	谱峰周期 Tp（s）	γ	谱型
作业工况	7.50	11.70	2.3	JONSWAP

表 2.2.2 风、流参数

海况	风速(m/s)	表面流速(m/s)
一年一遇	25.2	1.01
百年一遇	55.2	2.49

3. 网格和计算控制参数

3.1 作业海况网格和控制参数总体设置

本次试验采用半潜式平台进行标模，现将平台的相关数据整理如下。网格文件名为“hydroD_mesh.neu”，网格数 5344，网格节点 5090，网格质量如下图：

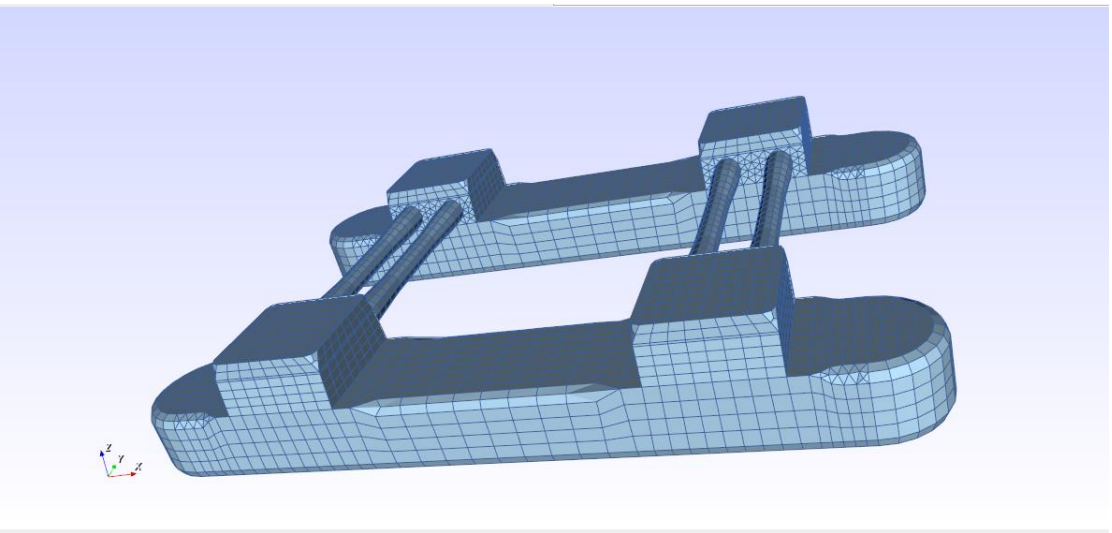

图 3.1.1　平台网格示意图

3.1.1 浮体上细长构件计算参数

构件名称	拖曳力计算等效直径（m）	拖曳力计算等效面积（m^2）	惯性力系数 Ci	附加质量系数 Cm	拖曳力系数 Cd	构件起点坐标（m）	构件重点坐标（m）
M1 中间段	3.2	0	0	0	1	(23.6,6.95,-8.47)	(23.6,-6.95,-8.47)
M2 中间段	3.2	0	0	0	1	(-23.6,6.95,8.47)	(-23.6,-6.95-8.47)
M1 左段 1	3.6	0	0	0	1	(23.6,6.95,-8.47)	(23.6,15,-8.47)
M1 右段 1	3.6	0	0	0	1	(23.6,-6.95,-8.47)	(23.6,-15,-8.47)
M2 左段 1	3.6	0	0	0	1	(-23.6,6.95,-8.47)	(-23.6,15,-8.47)
M2 右段 1	3.6	0	0	0	1	(-23.6,-6.95,-8.47)	(-23.6,-15,-8.47)
M1 左段 2	4	0	0	0	1	(23.6,15,-8.47)	(23.6,19.25,-8.47)

M1 右段 2	4	0	0	0	1	(23.6,-15,-8.47)	(23.6,-19.25,-8.47)
M2 左段 2	4	0	0	0	1	(-23.6,15,-8.47)	(-23.6,19.25,-8.47)
M2 右段 2	4	0	0	0	1	(-23.6,-15,-8.47)	(-23.6,-19.25,-8.47)
M3 中间段	3.2	0	0	0	1	(31.4,6.95,-8.47)	(31.4,-6.95,-8.47)
M4 中间段	3.2	0	0	0	1	(-31.4,6.95,-8.47)	(-31.4,-6.95,-8.47)
M3 左段 1	3.6	0	0	0	1	(31.4,6.95,-8.47)	(31.4,15,-8.47)
M3 右段 1	3.6	0	0	0	1	(31.4,-6.95,-8.47)	(31.4,-15,-8.47)
M4 左段 1	3.6	0	0	0	1	(-31.4,6.95,-8.47)	(-31.4,15,-8.47)
M4 右段 1	3.6	0	0	0	1	(-31.4,-6.95,-8.47)	(-31.4,-15,-8.47)
M3 左段 2	4	0	0	0	1	(31.4,15,-8.47)	(31.4,19.25,-8.47)
M3 右段 2	4	0	0	0	1	(31.4,-15,-8.47)	(31.4,-19.25,-8.47)
M4 左段 2	4	0	0	0	1	(-31.4,15,-8.47)	(-31.4,19.25,-8.47)
M4 右段 2	4	0	0	0	1	(-31.4,-15,-8.47)	(-31.4,-19.25,-8.47)

注：构件坐标是相对于平台重心连体坐标系的。

重力加速度为 9.81m/ s^2，水密度为 1025kg/ m^2，工作水深为 250m，海浪谱参数见下表：

3.1.2 海浪参数

海浪谱类型	浪向角（°）	有义波高（m）	低频截止频率（rad/s）	高频截止频率（rad/s）	谱峰周期（s）	谱峰因子（γ）

JONSWAP 海浪谱	180	7.5	0.2	3	11.7	2.3

注：海浪谱离散的规则波子数为 80，海浪谱离散的数目 300，随机种子数 1。

3.1.3 流剖面测点参数

测点名称	测点深度（m）	测点流速（m/s）
1	-20	1
2	-50	0.7
3	-100	0.4

3.1.4 系泊系统全局参数

静力分析松弛因子	缆索分析步长	海底坐标（m）	单根线离散最大节点数	单根线离散最大单元数	单根线离散最多分段数
1	0.08	-250	61	60	3

3.15 系波缆材料特性

材料	长度（m）	刚度（kn）	湿重（kg/m）	破断强度（kn）	水平跨距（m）
链	900	6312500	1189.02	30000	1100
缆	280	1857937	155.40	29265	
链	20	6312500	189.02	30000	

3.16 系泊系统布置情况（水平跨距 1100m）

缆号	预张力（t）	缆长（m）	系泊点坐标（m）			锚点坐标（m）		
			X	Y	Z	X	Y	Z
1	210.1	1200	30.98	-36.64	13.5	1048.5	-454.5	-250
2	210.1	1200	24.53	-36.64	13.5	445.0	-1053.1	-250
3	210.1	1200	-24.53	-36.64	13.5	-445.0	-1053.1	-250
4	210.1	1200	-30.98	-36.64	13.5	-1048.5	-454.5	-250
5	210.1	1200	-30.98	36.64	13.5	-1048.5	454.5	-250
6	210.1	1200	-24.53	36.64	13.5	-445.0	1053.1	-250
7	210.1	1200	24.53	36.64	13.5	445.0	1053.1	-250
8	210.1	1200	30.98	36.64	13.5	1048.5	454.5	-250

3.3 虚拟试验开展硬件条件

本次测试利用的电脑配置为 Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz 计算机，操作系统为 64 位。

4. 结果对比及结论

4.1 物理试验和虚拟试验计算结果展示

表 4.1.1 浪向 90° 横荡 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（m/m）
30	0.209	1.248	0.933

27	0.233	0.907	0.914
25	0.251	0.938	0.898
22	0.286	0.759	0.863
21	0.299	0.872	0.848
20	0.314	0.761	0.830
19	0.331	0.813	0.809
18	0.349	0.648	0.784
16	0.393	0.695	0.718
14	0.449	0.540	0.620
12	0.524	0.437	0.468
11	0.571	0.408	0.362
10	0.628	0.270	0.221
9	0.698	0.059	0.022
8	0.785	0.168	0.179
7	0.898	0.346	0.317

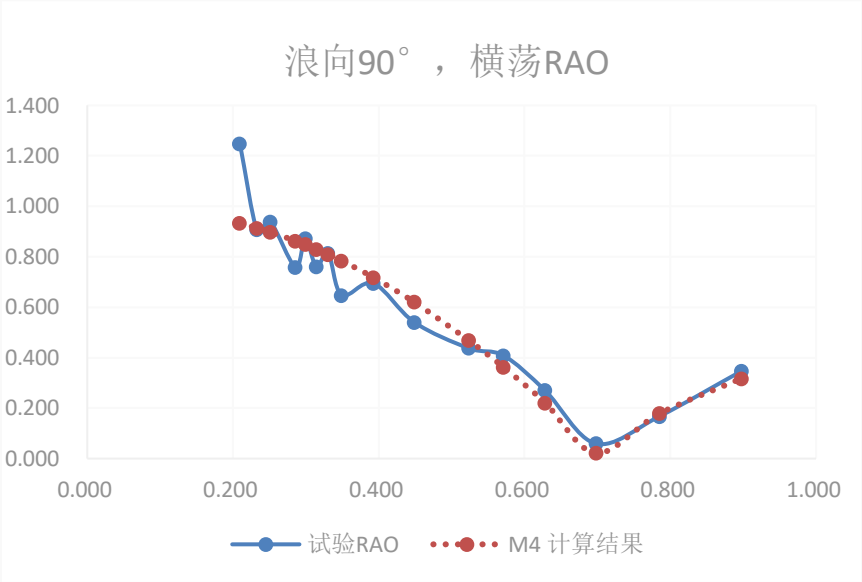

图 4.1.1 浪向 90° 横荡 RAO 对比图

表 4.1.2 浪向 90° 横摇 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（deg/m）
30	0.209	0.127	0.125
27	0.233	0.135	0.164
25	0.251	0.185	0.195
22	0.286	0.203	0.256
21	0.299	0.266	0.279
20	0.314	0.276	0.306
19	0.331	0.324	0.337

18	0.349	0.290	0.369
16	0.393	0.407	0.447
14	0.449	0.447	0.541
12	0.524	0.559	0.646
11	0.571	0.712	0.697
10	0.628	0.752	0.740
9	0.698	0.739	0.707
8	0.785	0.534	0.502
7	0.898	0.242	0.208

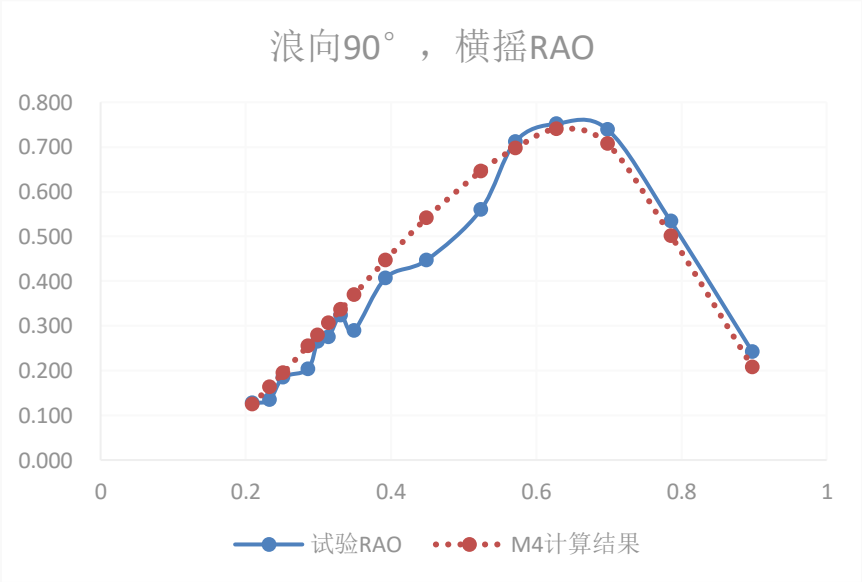

图 4.1.2 浪向 90° 横摇 RAO 对比图

表 4.1.3 浪向 135° 纵荡 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（m/m）
30	0.209	0.739	0.671
27	0.233	0.751	0.661
25	0.251	0.692	0.652
22	0.286	0.675	0.632
21	0.299	0.661	0.623
20	0.314	0.618	0.611
19	0.331	0.600	0.600
18	0.349	0.611	0.586
16	0.393	0.487	0.546
14	0.449	0.490	0.487
12	0.524	0.411	0.396
11	0.571	0.331	0.333
10	0.628	0.214	0.247

9	0.698	0.107	0.117
8	0.785	0.056	0.048
7	0.898	0.069	0.067

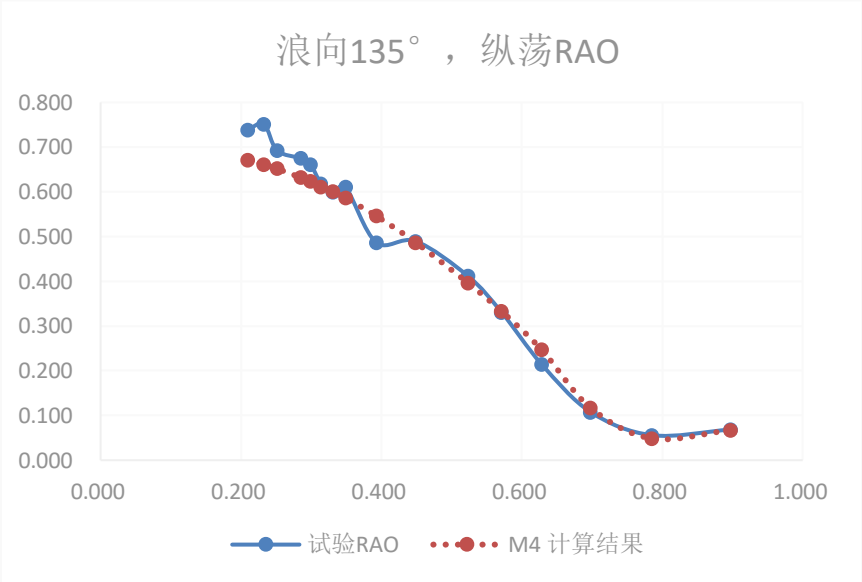

图 4.1.3 浪向 135° 纵荡 RAO 对比图

表 4.1.4 浪向 135° 横荡 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（m/m）
30	0.209	0.859	0.659
27	0.233	0.844	0.646
25	0.251	0.809	0.635

22	0.286	0.716	0.610
21	0.299	0.713	0.599
20	0.314	0.688	0.586
19	0.331	0.669	0.571
18	0.349	0.610	0.554
16	0.393	0.532	0.508
14	0.449	0.508	0.441
12	0.524	0.368	0.342
11	0.571	0.323	0.276
10	0.628	0.174	0.185
9	0.698	0.080	0.016
8	0.785	0.045	0.100
7	0.898	0.036	0.058

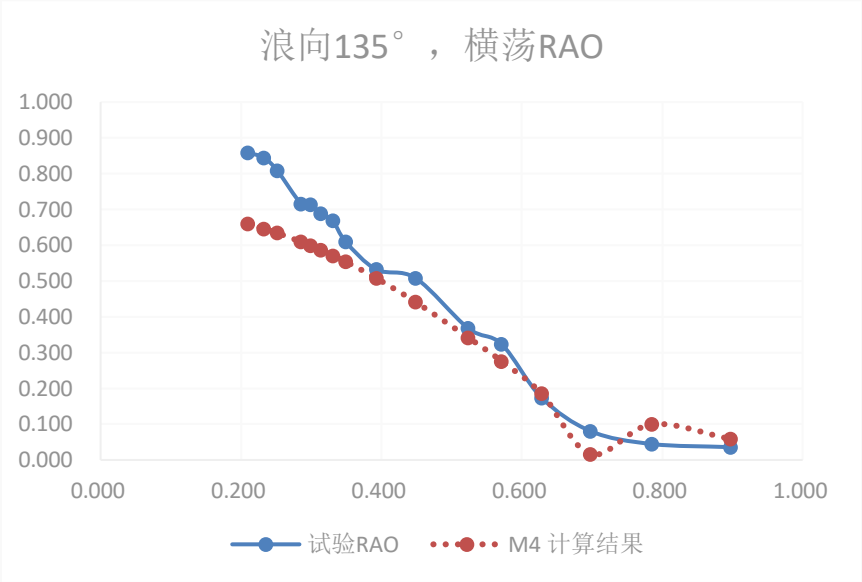

图 4.1.4 浪向 135° 横荡 RAO 对比图

表 4.1.5 浪向 135° 垂荡 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（m/m）
30	0.209	0.830	1.029
27	0.233	1.227	1.059
25	0.251	1.291	1.102
22	0.286	1.715	1.382
21	0.299	1.785	1.838
20	0.314	0.380	0.163
19	0.331	0.354	0.319

18	0.349	0.533	0.532
16	0.393	0.533	0.556
14	0.449	0.483	0.503
12	0.524	0.422	0.422
11	0.571	0.204	0.251
10	0.628	0.078	0.072
9	0.698	0.031	0.022
8	0.785	0.030	0.014
7	0.898	0.830	1.029

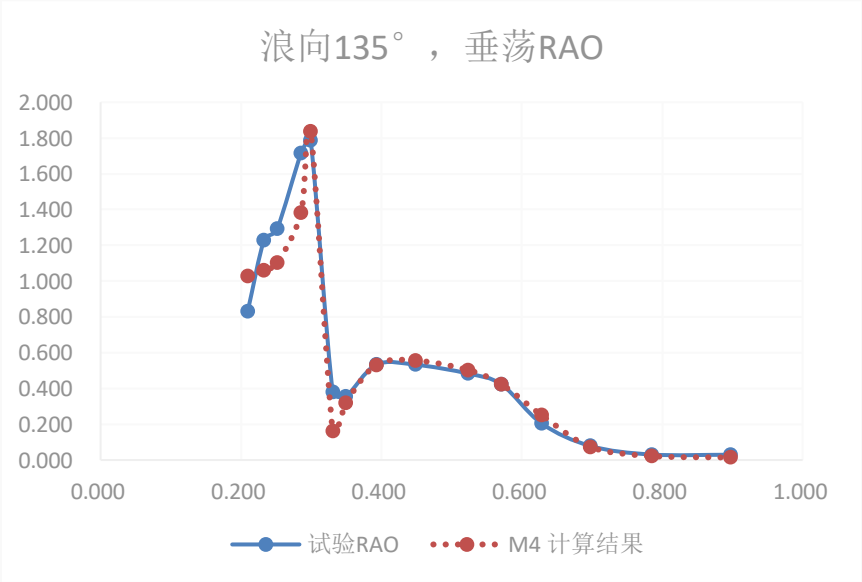

图 4.1.5 浪向 135° 垂荡 RAO 对比图

表 4.1.6 浪向 135° 纵摇 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（deg/m）
30	0.209	0.083	0.094
27	0.233	0.121	0.124
25	0.251	0.159	0.146
22	0.286	0.202	0.192
21	0.299	0.210	0.210
20	0.314	0.202	1.295
19	0.331	0.226	0.255
18	0.349	0.210	0.275
16	0.393	0.285	0.328
14	0.449	0.376	0.385
12	0.524	0.427	0.434
11	0.571	0.404	0.442
10	0.628	0.339	0.415
9	0.698	0.258	0.304

8	0.785	0.061	0.030
7	0.898	0.088	0.095

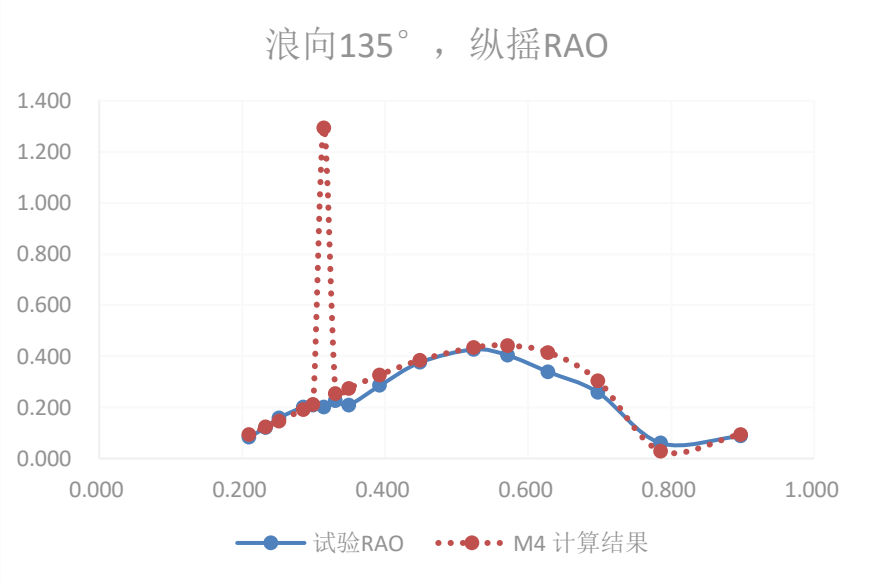

图 4.1.6 浪向 135°纵摇 RAO 对比图

表 4.1.7 浪向 135°横摇 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（deg/m）
30	0.209	0.087	0.089
27	0.233	0.162	0.117
25	0.251	0.160	0.138
22	0.286	0.194	0.182
21	0.299	0.235	0.198

20	0.314	0.247	0.217
19	0.331	0.260	0.238
18	0.349	0.272	0.261
16	0.393	0.313	0.315
14	0.449	0.415	0.377
12	0.524	0.447	0.446
11	0.571	0.522	0.484
10	0.628	0.451	0.531
9	0.698	0.390	0.505
8	0.785	0.095	0.115
7	0.898	0.054	0.066

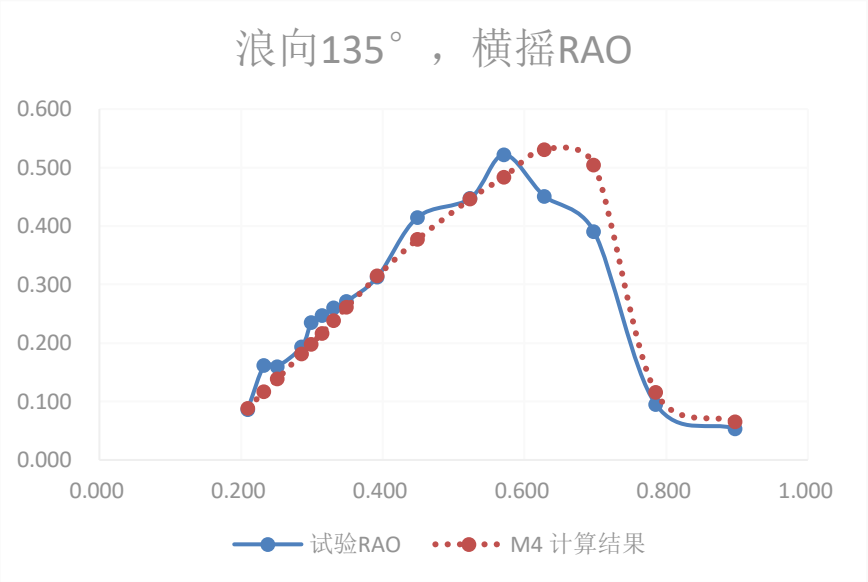

图 4.1.7 浪向 135° 横摇 RAO 对比图

表 4.1.8 浪向 180° 纵摇 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（deg/m）	临界阻尼修正后的 M4 计算结果（deg/m）
30	0.209	0.122	0.128	0.118
27	0.232	0.144	0.170	0.160
25	0.251	0.201	0.202	0.191
22	0.285	0.245	0.265	0.242
21	0.299	0.271	0.290	0.252
20	0.314	0.265	1.313	0.271
19	0.330	0.340	0.346	0.338
18	0.349	0.380	0.376	0.377

16	0.392	0.451	0.447	0.449
14	0.448	0.541	0.521	0.522
12	0.523	0.552	0.575	0.575
11	0.571	0.554	0.572	0.572
10	0.611	0.509	0.540	0.539
10	0.628	0.489	0.518	0.517
9	0.698	0.362	0.385	0.383
8	0.785	0.134	1.11E-01	0.107
7	0.897	0.235	2.47E-01	0.204
6	0.993	0.201	2.08E-01	0.163

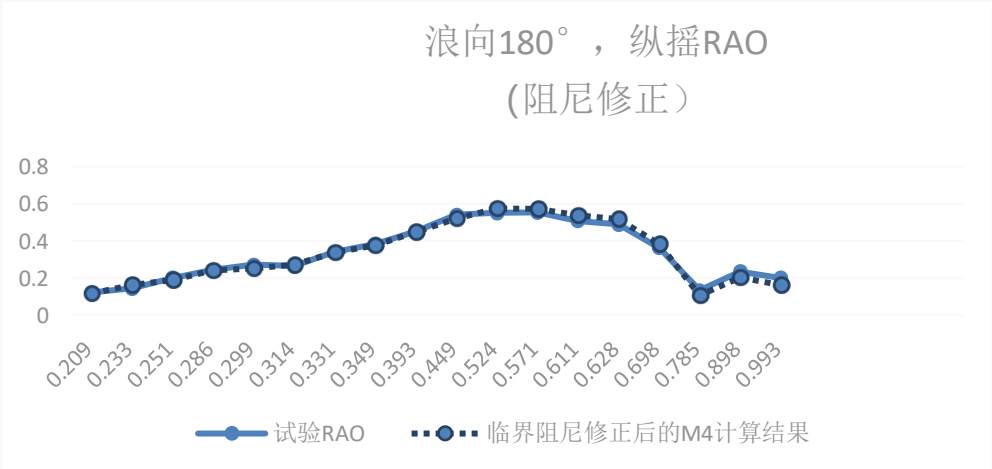

图 4.1.8 浪向 180°纵摇 RAO 对比图

表 4.1.9 浪向 180°垂荡 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（deg/m）	临界阻尼修正后的 M4 计算结果（m/m）
30	0.209	0.867	1.03E+00	1.03E+00
27	0.232	0.986	1.06E+00	1.06E+00
25	0.251	1.220	1.10E+00	1.10E+00
22	0.285	1.640	1.38E+00	1.37E+00
21	0.2991993	1.913	1.84E+00	1.78E+00
20	0.314	1.647	4.56E+00	9.30E-01
19	0.330	0.384	3.35E-02	6.27E-02
18	0.349	0.418	3.16E-01	3.14E-01
16	0.392	0.567	5.31E-01	5.30E-01
14	0.448	0.5459	5.60E-01	5.59E-01
12	0.523	0.501	5.14E-01	5.13E-01
11	0.571	0.434	4.22E-01	4.23E-01
10	0.611	0.303	2.74E-01	2.76E-01
10	0.628	0.219	2.04E-01	2.06E-01
9	0.698	0.071	9.09E-02	9.05E-02

8	0.785	0.037	2.85E-02	2.86E-02
7	0.897	0.055	5.01E-02	5.02E-02
6	0.993	0.082	9.47E-02	9.45E-02

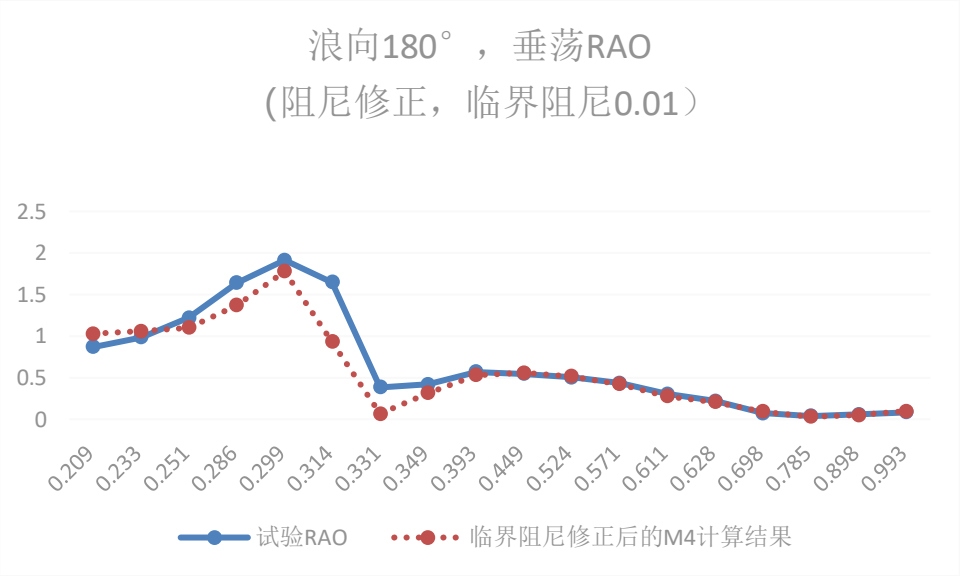

图 4.1.9 浪向 180° 垂荡 RAO 对比图

表 4.1.10 浪向 180° 纵荡 RAO 对比表

入射波周期（s）	入射波频率（rad/s）	试验 RAO	无阻尼修正计算结果（deg/m）
30	0.209	1.131	0.948
27	0.232	0.920	0.933

25	0.251	1.040	0.920
22	0.285	0.946	0.890
21	0.299	0.903	0.877
20	0.314	0.967	0.860
19	0.330	0.921	0.843
18	0.349	0.882	0.821
16	0.392	0.806	0.761
14	0.448	0.734	0.669
12	0.523	0.548	0.523
11	0.571	0.454	0.418
10	0.611	0.351	0.322
10	0.628	0.303	0.280
9	0.698	0.114	0.096
8	0.785	0.124	0.149
7	0.897	0.379	3.84E-01
6	0.993	0.239	2.90E-01

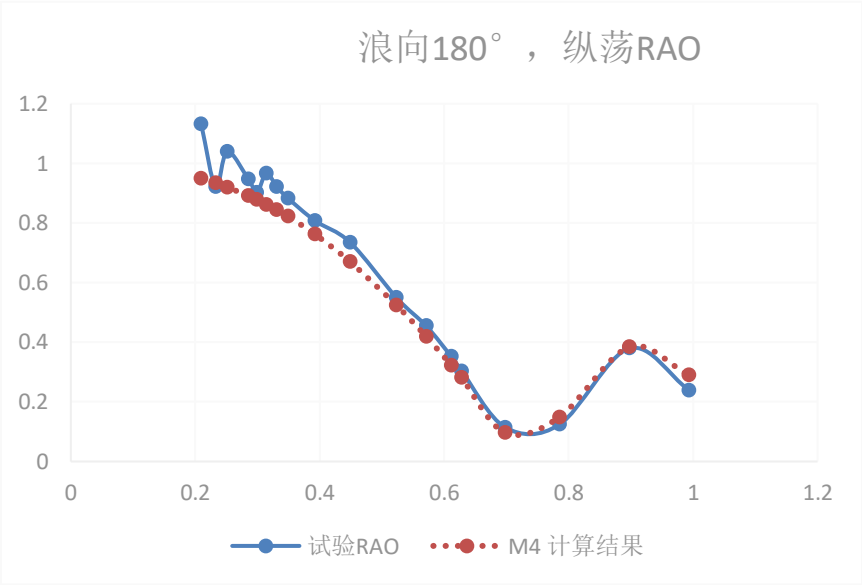

图 4.1.10 浪向 180°纵荡 RAO 对比图

进行虚拟试验时，工况设置为 3 个浪向，每个浪向都包括 18 个频率，，一共计算耗时 31 分 18 秒。模型试验结果和虚拟试验计算结果都在上面的表格中进行了展示，同时也对相对误差进行了计算，观察以上数据和图表可以可以看出运动 RAO 实验值与虚拟实验模拟值十分接近，除个别工况下会出现凸点，考虑到试验误差及无因次化阻尼修正，阻尼修正后误差控制在 10%左右。说明数值水池作业海况求解器精确性及稳定性都很高。