

文章编号: 1000-582X(2011)10-046-08

多元统计在四筒吸力锚平台气浮拖航模型试验中的应用

乐丛欢^{1,2a}, 丁红岩², 董国海¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116023; 2. 天津大学 a. 建筑工程学院;
b. 水利工程仿真与安全国家重点实验室; c. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:以四筒吸力锚平台结构为对象,就波浪方向、波高、波周期、航速、吃水深度、系缆点、拖缆长度、后倾角度的不同组合采用 1:20 的模型进行拖航试验,测定了不同拖航试验组合下吸力锚平台运动加速度、筒内气压力、筒底水压力以及拖缆力,利用谱系聚类分析,对拖航组合进行分类,将拖航方式的优劣组合划分到不同的类。对测试参数进行因子分析,首先得到参数间的相关矩阵,相关矩阵反映了参数间的相互关系。通过因子分析提取占总方差 85% 的前 6 个因子,得到各方案组合的因子得分,找出最危险拖航组合和决定最危险组合的特征力学参数,为实际工程中的拖航提供参考。

关键词:吸力锚平台;气浮拖航;模型试验;多元统计

中图分类号:P752

文献标志码:A

Application of multivariate statistics in model experimental analysis of air cushion towing of 4-suction anchor platform

LE Cong-huan^{1,2a}, DING Hong-yan², DONG Guo-hai¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116023, P. R. China 2. a. School of Civil Engineering; b. State Key Laboratory of Hydranlic Engineering Simulation and Safety; c. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: This paper conducts model tests on a 1:20 scaled model of four-suction anchor platform. The acceleration, the internal air pressure, the bottom water pressure of the suction anchors and towing force of the suction anchor platform are determined in series of towing combinations with different wave direction, wave velocity, wave period, towing velocity, towing points, towline length and tilt angle. Cluster analyses are used to classify the combinations of towing and factor analyses one used to analyze the mechanical characters. The correlative matrix is obtained which can reflect the correlation of mechanical characters. The factor analysis results show that 85% the total variance is attributed to the former six factors, and the factor scores of the towing combinations was obtained to find the most disadvantageous combinations and the mechanical characters which can lead to the disadvantageous results. The analysis results can be used for consulting the practical application.

Key words: suction anchor platform; air cushion towing; model experiment; multivariate statistics

收稿日期: 2011-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50079016); 天津大学自主创新基金资助项目(60302014)。

作者简介: 乐丛欢(1983-), 女, 大连理工大学博士后, 主要从事海洋工程结构设计及海上结构物气浮拖航研究,
(E-mail)leconghuan@163.com。

丁红岩(联系人), 男, 天津大学教授, 博士生导师, 主要从事海洋工程方向研究, (E-mail)dhy_td@163.com。

吸力锚基础作为一种新型的移动式海上基础,与传统海上基础相比具有便于运输、安装方便、可重复使用等特点^[1],浅海地区,其优势尤为突出。浅海区的水深不足,大型施工机具无法通过运输船运到施工地点,吸力锚可以在场地组装下水后,对其充气,借助其自身浮力,利用拖轮牵引将其拖到施工地点,然后放气自沉利用负压沉降完成施工^[2-4]。拖航过程中吸力锚平台的气浮不同于船舶或是普通导管架平台在水中的漂浮,普通浮体相当于具有刚性基础的结构支承于弹性基床上,而吸力锚基础平台,由于气体的可压缩性,相当于具有柔性基础的结构支撑于气垫与水塞耦合的弹簧之上,不能采用普通浮体的方法分析其运动特性。

Goodman 在 20 世纪 60 年代提出研究气浮结构,经过较长时间的理论研究和室内研究阶段,70 年代后期先后进入了现场的小尺度和大尺度试验,Seidl^[5]在 1980 年以实验为基础研究了充气式浮运平台的设计方案,包括由一个大的空气腔支撑的平台和许多小的不连通的空间所支撑的平台。引入了气囊系数来描述压缩气体的压缩能力与浮筒的液体静力稳定性的关系。在 1991 年, Kim 和 Iwata 发展了一种模拟厚壁二维充气结构的模型,该数值模型包括了结构内外的自由表面以及结构的水下部分。后来将方法扩展到了具有二阶波效应的情况。Chakrabarti^[6]在 1995 年使用这种方法研究了大型浮动结构的下水,把底部开口的浮力罐设计成在浅水区下水然后在拖航后沉入水中。这些研究提供了液体静力稳定性的公式,讨论了用实验室模型模拟空气压缩能力的困难。1996 年, Leeetal^[7]又提出了一种基于源分步法的适用于三维厚壁充气结构的方法。Pinkster^[8]通过 1:200 的模型试验,对气浮式移动基础进行了稳性分析,试验得到气浮式移动基础中剖面弯矩及水塞的相对运动,并进一步得到其在静水中拖航阻力。Thiagarajan^[9]就简单底部密封箱和拥有气垫的底部开口箱模型试验分析了水深和结构位移对气垫支撑式结构的影响。

在国外研究发展的同时,国内从 20 世纪 90 年代开始对吸力锚基础的静稳性和动稳性都进行了积极的研究。目前对于吸力锚基础的研究主要集中在气浮静稳性上,主要包括以下几个方面内容:1)气浮结构的静浮态分析^[10],主要是从几何、压强、力学的关系来分析其特点;2)气浮结构的小倾角稳性分

析^[11],分析了气浮结构在小倾角下一些参数特征,如稳心半径、稳性高等;3)气浮结构运动特性研究^[12],按照单自由度刚体弹性体系建立了气浮结构的升沉和摇摆运动方程,进而求气浮结构的固有周期,并对气浮结构的运动特性进行了分析;4)确定了结构升沉的附加水质量系数范围,对结构自由摇摆的附加水质量系数也进行了一些研究^[13-15]。而对在波浪下筒型基础拖航和波浪作用下的运动还相对较少,尚无成熟的理论对其拖航运动特性进行准确的分析计算,模型试验是研究其拖航特性最实用的方法^[16]。

针对影响拖航特性的多个因素,包括系缆点位置、波浪方向、波高、波周期、航速、吃水深度、拖缆长度、后倾角度的不同组合进行拖航试验,并对拖航过程中的力学参数进行了测试。然后利用多元统计的方法对拖航基本力学参数测试结果数据进行分析处理,找出了最危险拖航组合和决定最危险组合的特征力学参数,并对各种工况下的拖航状态进行了分类评级。

1 试验设计

1.1 试验模型

试验以四筒钢质吸力锚平台为原型,平台单筒直径 6.0 m、筒高 7.0 m、筒轴线间距 9.0 m、筒顶与甲板面的距离为 15 m、整体高度 22 m。模型为钢质结构,采用 1:20 比例按重力和惯性力傅汝德相似定律进行相似比尺设计^[17]。试验模型与原型满足总重量、重心位置以及惯性矩相似。根据平台的重量分布,模型配有一定重量的压载以模拟平台上的设备重量。图 1 为试验吸力锚平台模型图。

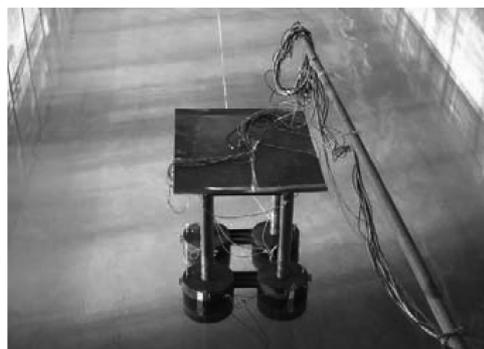


图 1 吸力锚平台模型

1.2 试验场地

试验在中交天津港湾工程研究院的水槽内进行,水槽长 98 m,宽 4 m,高 2 m。水池尺寸以及平台结构的布置满足《波浪模型试验规程》^[18],试验水池设有造波机。



图 2 试验场地

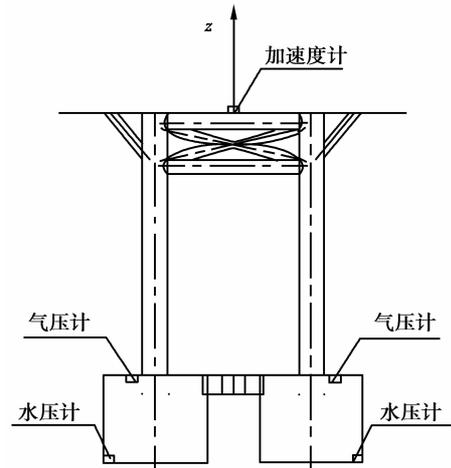
1.3 试验仪器设备

拖航设备:拖车,可以控制拖航速度及拖航距离。拖缆一端系于筒体上,另一端通过固定于拖车上的高出水面 10 cm 的定滑轮与拉力传感器相连,拖缆采用钢缆。

测量设备:包括水压力传感器,气压力传感器、拉力传感器、加速度传感器、摄像系统、波浪率定系统、水温度计以及相应的信号放大器和计算机信息采集系统。所有测量仪器均在水面以及平台结构静止时清零。

1.4 测量仪器布置

图 3 为加速度、水压与气压传感器测量布置图,图 4 为随体坐标系标识与筒体编号图。其中, x 方向与拖航前进方向一致,为平台纵摇运动方向, x 方向加速度反映的是平台拖航时前后摇摆运动幅度; y 方向垂直于拖航方向,为平台横摇运动方向, y 方向加速度反映的是平台拖航时左右摇摆运动幅度; z 方向垂直向上,为平台垂荡运动方向, z 方向加速度反映的是平台拖航时上下升降运动幅度。气压力与水压力传感器分别测量筒内气垫压力与水塞压力变化情况。



(a) 设计图



(b) 实物图

图 3 传感器测量布置图

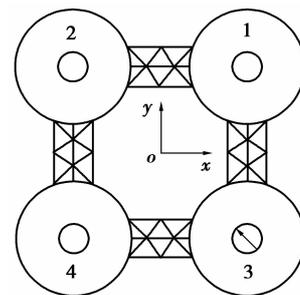


图 4 筒体编号布置图

1.5 试验设计组合方案

试验考虑影响拖航的参数包括波浪方向、波浪周期、波高、航速、吃水深度、系缆点的位置、拖缆长度、后倾角度共 7 个参数。具体见表 1,以下表示中均采用“原型尺度(模型尺度)”形式。其中波浪方向 1 表示顺浪, -1 表示逆浪, 0 表示无浪状态。拖航时 1 号、3 号筒在前,系缆点在筒顶以下 0.8 m (0.04 m) 处。

表 1 拖航试验组合

组合	波浪方向	波高/m	波周期/s	航速/(m·s ⁻¹)	吃水深度/m	拖缆长度/m	后倾角度/(°)	系缆点位置 (筒顶下)/m
1	0(0)	0(0)	0(0)	1.54(0.35)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
2	0(0)	0(0)	0(0)	0.51(0.12)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
3	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	60(3.0)	0(0)	0.8(0.04)
4	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	48(2.4)	0(0)	0.8(0.04)
5	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	5.5(0.275)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
6	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.5(0.325)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
7	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	34(1.7)	1(1)	0.8(0.04)
8	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.54(0.35)	6.0(0.30)	34(1.7)	2(2)	0.8(0.04)
9	1(1)	2.5(0.13)	6.0(1.34)	0.77(0.17)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
10	1(1)	1.0(0.05)	6.0(1.34)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
11	-1(-1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	54(2.7)	0(0)	0.8(0.04)
12	-1(-1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.5(0.325)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
13	-1(-1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	34(1.7)	3(3)	0.8(0.04)
14	-1(-1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	34(1.7)	2(2)	0.8(0.04)
15	-1(-1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	0.51(0.12)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
16	-1(-1)	2.0(0.10)	6.5(1.45)	0.51(0.12)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
17	-1(-1)	2.5(0.13)	6.0(1.34)	0.77(0.17)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.8(0.04)
18	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	0.4(0.02)
19	1(1)	1.0(0.05)	5.0(1.12)	1.03(0.23)	6.0(0.30)	34(1.7)	0(0)	1.2(0.03)

2 试验结果

数据采集系统得到了大量的试验数据,通过数字滤波器中的傅里叶滤波对原始数据进行滤波分析^[19],根据相似理论转化后的平台原型数据,最终得到各参数的实测原型曲线(以组合 1 为例,图 5—图 8 分别为

组合 1 的水压力、气压力、加速度及拖缆力曲线),由曲线得到各参数的峰值。表 2 为各拖航组合测试数据峰值结果,其中 P_{wi} 为第 i 筒的水压力值, $i=1,2,3,4$; P_{ai} 为第 i 筒的气压力值 $i=1,2,3,4$; a_j 为 j 方向的加速度, $j=x,y,z$; T 为拖缆力。

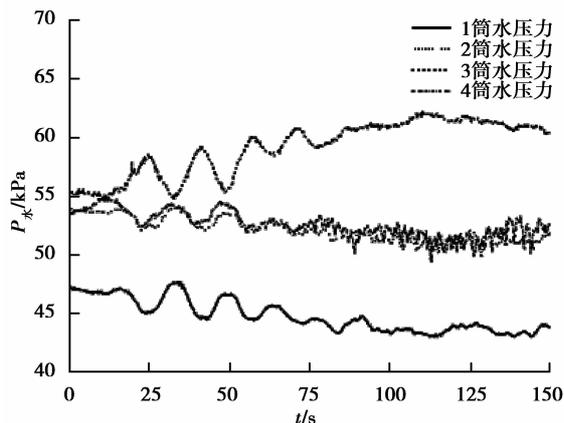


图 5 组合 1 四筒水压力曲线

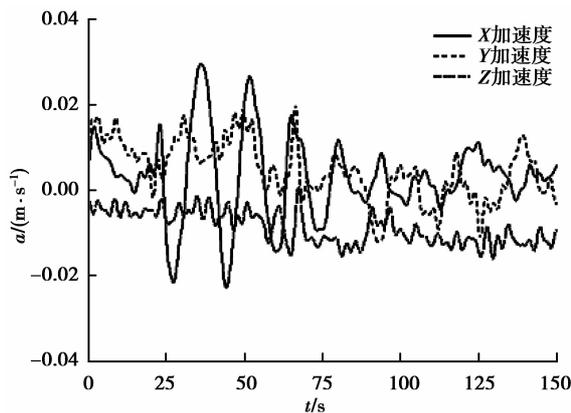


图 7 组合 1 各向加速度曲线

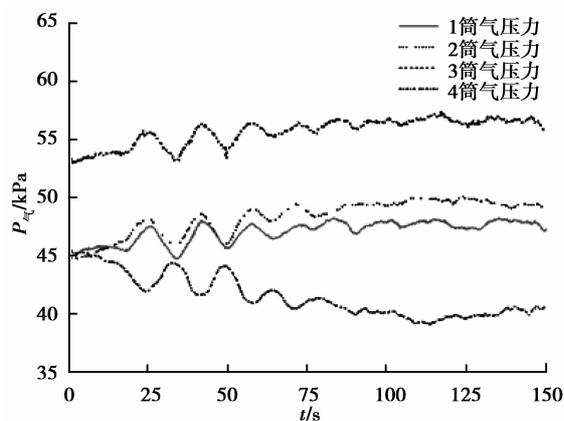


图 6 组合 1 四筒气压力曲线

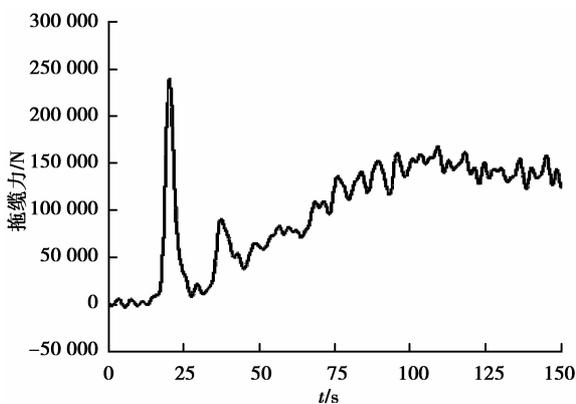


图 8 组合 1 拖缆力曲线

表 2 拖航组合测试数据峰值

组合	P_{w1}/kPa	P_{w2}/kPa	P_{w3}/kPa	P_{w4}/kPa	P_{a1}/kPa	P_{a2}/kPa	P_{a3}/kPa	P_{a4}/kPa	$a_x/(m \cdot s^{-2})$	$P_y/(m \cdot s^{-2})$	$a_z/(m \cdot s^{-2})$	T/kN
1	47.71	54.09	62.33	54.58	48.65	50.06	57.33	44.33	0.02	0.02	0.00	240.08
2	54.16	53.76	55.61	58.48	43.44	47.17	47.47	48.16	0.06	0.16	0.14	101.82
3	65.25	59.38	62.68	61.76	53.25	54.29	50.99	48.95	0.03	0.05	0.05	157.11
4	64.70	58.23	62.20	60.11	52.63	49.30	53.63	48.44	0.34	0.06	0.04	105.02
5	60.11	58.02	59.94	63.19	51.09	52.00	53.71	56.28	0.06	0.04	0.05	315.95
6	68.10	68.38	72.01	71.47	47.17	55.65	54.80	50.05	0.05	0.03	0.05	323.52
7	59.97	57.52	60.83	62.02	50.01	50.87	53.52	54.50	0.05	0.03	0.05	309.70
8	67.46	59.67	60.48	60.85	53.74	51.64	52.75	52.82	0.07	0.04	0.04	301.59
9	67.62	66.61	68.03	80.12	58.59	65.76	55.96	63.30	0.19	0.04	0.55	86.60
10	63.25	60.96	59.90	61.75	54.39	54.93	53.51	53.91	0.09	0.04	0.06	363.16
11	60.45	62.06	61.06	64.71	49.32	51.46	64.71	52.45	0.04	0.18	0.04	220.97
12	65.96	66.79	67.13	70.18	50.17	45.67	51.28	53.51	0.00	0.20	0.06	181.20
13	64.51	67.88	60.27	61.99	51.99	46.95	49.38	50.92	0.08	0.15	0.03	170.12
14	67.46	67.10	62.19	63.37	55.08	49.06	49.48	52.15	0.08	0.12	0.05	160.16
15	61.62	63.29	62.40	65.64	50.88	47.02	62.40	65.64	0.04	0.06	0.08	57.70
16	64.06	66.87	73.75	82.71	51.45	51.73	63.86	66.48	0.08	0.14	0.10	109.15
17	69.43	66.97	78.46	91.96	54.48	53.32	67.59	72.57	0.15	0.15	0.09	173.63
18	63.35	64.53	62.33	65.76	52.11	52.63	51.15	55.42	0.05	0.08	0.06	188.56
19	63.27	67.41	65.93	68.18	49.69	56.58	53.57	50.73	0.08	0.07	0.09	345.04

3 讨论与分析

3.1 聚类分析

对这 19 组拖航数据进行谱系聚类分析^[20],其基本思想是:将 n 个样本作为 n 类,比较类两两之间的距离,将距离最近的 2 类合并成一个新类,计算新类与其他类间的距离,重复进行 2 个距离最近类的合并,每次减少一类,直到所有的变量合并为一类。画出谱系图,决定类的个数和类。以 P_{wi} 、 P_{ai} 、 a_j 、 T ($i=1,2,3,4; j=x,y,z$) 为变量,图 9 为采用最短距离法对 19 组拖航组合样本进行聚类分析的结果。从图 9 可以直观的显示整个聚类过程。当拖航组合聚类分析聚成 3 类时,组合 9 为一类,组合 2 为一类,组合 4 与其他组合为一类,分类的结果与模型试验中观察的吸力锚平台升沉、摇摆的剧烈程度一致。其中组合 9 拖航过程中垂荡运动最为激烈,组合 4 纵摇运动幅度最大,组合 2 横摇和垂荡运动均很激烈。组合 9、组合 2 组合 4 均为拖航不利组合,其余组合拖航稳定。

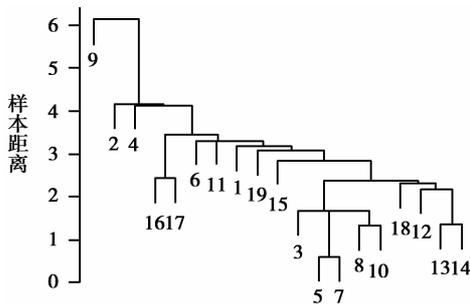


图 9 拖航组合谱系图

3.2 因子分析

因子分析的作用在于将多个变量综合为少数几个因子,以再现原始变量与因子间的相关关系。将 12 个测试参数结果视为变量 x_i , 建立因子分析模型,即:

$$x_i = a_{i1}f_1 + a_{i2}f_2 + \dots + a_{im}f_m + \epsilon_i, \quad (1)$$

式中: f 为对所有 x_i ($i=1,2,\dots,12$) 都起作用的公共因子; a_i 为因子荷载; m 为公共因子数; ϵ_i 为特殊因子。

对试验结果进行因子分析,首先将数据无量纲化,得到参数的相关矩阵,如表 3 所示。从相关矩阵可以清晰看出各参数间的相关关系,如 a_y 与 P_{a2} 、 T 较高程度负相关,这说明, a_y 越大,伴随着 P_{a2} 、 T 越小。

表 4 为选取因子对于原始参量进行总体描述。从表 4 可以看出累积方差贡献率 83.7% 来自于前 6 个因子,选取 6 个指标为主因子,进行综合评定。表 5 为原始参量的因子荷载矩阵。从表 5 可以看出,第 1 个因子与 P_{a3} 、 P_{a4} 高度正相关, T 负相关。第 2 个因子与 P_{w1} 、 P_{w2} 高度正相关, T 高度负相关。第 3 个因子与 a_z 、 P_{a2} 高度正相关, T 负相关。第 4 个因子与 a_y 、 a_z 正相关。表 6 为试验方案组合的因子得分和排名。耐波性参数 a_x 与第 1、2、3 个因子正相关,因此第 1、2、3 因子得分越高, x 方向的加速度越大, a_y 与第 4 个因子高度正相关,第 4 因子得分越高, y 方向的加速度越大,同理, a_z 与第 3 个因子高度正相关,第 3 因子得分越高, Z 方向的加速度越大。综合评定 19 组拖航组合,最优拖航组合为组合 1,其次为组合 7,最不利拖航组合为组合 9,其次为组合 4。

表 3 拖航参数相关矩阵

	P_{w1}	P_{w2}	P_{w3}	P_{w4}	P_{a1}	P_{a2}	P_{a3}	P_{a4}	a_x	a_y	a_z	T
P_{w1}	1.00	0.74	0.51	0.57	0.60	0.32	0.06	0.43	0.31	0.13	0.23	-0.05
P_{w2}	0.74	1.00	0.64	0.66	0.37	0.25	0.20	0.45	0.03	0.33	0.22	-0.08
P_{w3}	0.51	0.64	1.00	0.90	0.25	0.35	0.61	0.63	0.17	0.17	0.22	-0.11
P_{w4}	0.57	0.66	0.90	1.00	0.36	0.42	0.61	0.83	0.21	0.31	0.45	-0.23
P_{a1}	0.60	0.37	0.25	0.36	1.00	0.49	0.12	0.44	0.43	-0.20	0.44	-0.14
P_{a2}	0.32	0.25	0.35	0.42	0.49	1.00	0.15	0.23	0.27	-0.46	0.71	0.19
P_{a3}	0.06	0.20	0.61	0.61	0.12	0.15	1.00	0.68	0.09	0.14	0.06	-0.15
P_{a4}	0.43	0.45	0.63	0.83	0.44	0.23	0.68	1.00	0.14	0.19	0.38	-0.33
a_x	0.31	0.03	0.17	0.21	0.43	0.27	0.09	0.14	1.00	-0.11	0.34	-0.30
a_y	0.13	0.33	0.17	0.31	-0.20	-0.46	0.14	0.19	-0.11	1.00	-0.10	-0.40
a_z	0.23	0.22	0.22	0.45	0.44	0.71	0.06	0.38	0.34	-0.10	1.00	-0.36
T	-0.05	-0.08	-0.11	-0.23	-0.14	0.19	-0.15	-0.33	-0.30	-0.40	-0.36	1.00

表 4 因子分析因子方差和贡献率

因子	总方差	方差贡献率	累积方差贡献率/%
1	2.812	0.234	0.234
2	2.333	0.194	0.429
3	1.884	0.157	0.586
4	1.254	0.104	0.69
5	1.25	0.104	0.794
6	0.517	0.043	0.837

表 5 因子载荷矩阵

变量	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
P_{w1}	0.13	0.98	0.11	—	—	—
P_{w2}	0.32	0.68	0.11	0.26	0.20	—
P_{w3}	0.76	0.39	0.13	0.50	—	—
P_{w4}	0.79	0.43	0.32	0.22	0.17	—
P_{a1}	0.13	0.57	0.33	0.17	-0.24	-0.23
P_{a2}	0.13	0.23	0.85	-0.17	-0.31	0.13
P_{a3}	0.81	—	—	—	—	—
P_{a4}	0.86	0.31	0.16	0.18	-0.32	—
a_x	0.29	0.27	0.35	-0.14	—	—
a_y	0.14	-0.21	0.17	0.95	—	—
a_z	0.14	0.11	0.88	0.31	—	—
T	-0.15	-0.95	-0.24	—	—	—

注:表中“—”表示绝对值小于 0.1 的数

表 6 试验方案组合的因子得分

试验组合	因子 1		因子 2		因子 3		因子 4		因子 5		因子 6	
	得分	排名										
1	0.12	7	-2.94	19	-0.41	13	-0.03	10	-1.11	18	1.61	2
2	-0.94	17	-1.77	18	0.51	3	0.79	5	1.63	3	-0.45	8
3	-1.00	18	0.55	6	0.00	8	0.91	4	-0.78	14	0.67	6
4	-1.04	19	0.49	8	-0.61	16	1.52	2	-0.74	13	0.74	4
5	0.22	5	-0.53	16	0.08	6	-1.18	17	-0.53	12	-1.28	18
6	-0.02	8	1.00	3	-0.04	9	-0.90	15	-0.94	17	2.20	1
7	0.15	6	-0.52	15	-0.18	12	-0.97	16	-0.89	16	-0.78	15
8	-0.72	14	1.06	1	-0.44	14	-0.74	14	-0.80	15	-0.83	16
9	0.22	4	0.46	7	3.54	1	1.21	3	-0.39	10	-0.21	13
10	-0.32	12	0.15	10	0.26	4	-1.61	19	-0.51	11	-1.12	17
11	-0.32	13	-0.54	17	0.05	7	-0.61	13	1.81	1	-0.37	12
12	-0.08	9	0.57	5	-0.86	18	-0.06	11	1.74	2	0.73	5
13	-0.87	16	0.43	9	-0.66	17	0.29	8	0.98	4	-0.29	11
14	-0.86	15	1.01	2	-0.60	15	0.55	6	0.45	7	-0.10	10
15	1.11	3	-0.27	14	-1.20	19	1.69	1	-1.19	19	-1.71	19
16	1.97	2	-0.10	13	-0.15	11	0.64	7	0.56	6	0.52	7
17	2.72	1	0.86	4	-0.10	10	-0.21	12	0.71	5	0.35	9
18	-0.14	10	0.08	11	0.06	5	0.20	9	-0.12	9	-0.44	14
19	-0.20	11	0.01	12	0.75	2	-1.51	18	0.14	8	0.78	3

4 结 论

通过模型试验测定了不同波浪方向、波浪周期、波高、航速、吃水深度、拖缆长度、后倾角度、系缆点位置组合的四筒吸力锚平台气浮拖航运动中的筒底水压力、筒顶气压力、各向加速度、拖缆力等参数。试验结果表明不同参数拖航组合之间的耐波性存在着差异,通过测试数据结果,对这 19 组拖航试验组合进行了谱系聚类分析,将拖航组合方式分类,在此

基础上,根据吸力锚平台耐波性要求,判断拖航方式的优劣组合,通过因子分析得到拖航特征力学参数的相互关系,各参数的因子荷载以及试验方案组合的因子得分,得到最优拖航组合为组合 1(无波浪条件下,航速 3 节,吃水 6 m,缆长 34 m,后倾角 0° ,系缆点筒顶下 0.8 m),其次为组合 7(顺浪波高 1 m 周期 5 s,航速 2 节,吃水 6 m,缆长 34 m,后倾角 1° ,系缆点筒顶下 0.8 m),最不利拖航组合为组合 9(顺浪波高 2.5 m 周期 6 s,航速 1.5 节,吃水 6 m,缆长

34 m,后倾角 0° ,系缆点筒顶下 0.8 m),其次为组合 4(顺浪波高 1 m 周期 5 s,航速 2 节,吃水 6 m,缆长 48 m,后倾角 0° ,系缆点筒顶下 0.8 m)。

模型试验通过对吸力锚平台被拖运动过程中的主要力学参数分析,进一步认识了气垫式结构运动规律。试验分析的难点在于波浪作用下筒内气垫与水塞的相互作用机理以及气弹簧和水弹簧的耦合弹簧对被拖多筒平台运动的影响;模型试验分析结果显示该吸力锚平台完全可以满足工程应用的需要,能够进行现场拖航。

参考文献:

- [1] 乐丛欢,丁红岩,张浦阳,等.筒型基础负压沉贯后筒内水膜现象的试验研究[J].中国港湾建设,2006,25(6):29-32.
LE CONG-HUAN, DING HONG-YAN, ZHANG PU-YANG, et al. Model tests study on phenomenon of water layer in bucket foundation after penetration by suction[J]. China Harbour Engineering, 2006, 25(6): 29-32.
- [2] 丁红岩,杜杰,戚兰,等.吸力锚下沉过程中土塞高度计算[J].天津大学学报,2002,34(4):439-442.
DING HONG-YAN, DU JIE, QI LAN, et al. Height of soil-plug calculation in suction anchor [J]. Journal of Tianjin University, 2002, 34(4): 439-442.
- [3] 丁红岩,张浦阳.多筒系缆平台原型顶升试验研究[J].岩土力学,2008,29(6):1585-1588.
DING HONG-YAN, ZHANG PU-YANG. Prototype tests during pull up processes of a multi-bucket foundation dolphin platform [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1585-1588.
- [4] 李蔚,谭家华,潘斌.桶型基础平台拖航稳性研究[J].海洋工程,1999,17(3):11-16.
LI WEI, TAN JIA-HUA, PAN BIN. Towing stability research of bucket foundation platform [J]. The Ocean Engineering, 1999, 17(3): 11-16.
- [5] SEIDL L H. Development of an air stabilized platform, university of hawaii, department of ocean engineering technical report submitted to US department of commerce[R]. Maritime Administration, 1980, 23-32.
- [6] CHAKRABARTI S K. Scale effects on a unique launch sequence of a gravity-based structure [J]. Applied Ocean Research, 1995, 17(1): 33-41.
- [7] LEE C H, NEWMAN N J, NIELSEN F G. Water interactions with an oscillating water column [C]// Proceedings of 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles; IEEE P ress, 1996, 1: 82-90.
- [8] PINKSTER J A, SCHOLTE E M. The behaviour of a large air-supported MOB at sea [J]. Marine Structures, 2001(14): 163-179.
- [9] THIAGARAJAN K P, MICHAEL T, THOMAS M. Wave-induced motions of an air cushion structure in shallow water [J]. Ocean Engineering, 2006, 33: 1143-1160.
- [10] 丁红岩,王高峰,刘建辉.多筒基础平台自浮拖航系拖点位置试验分析[J].天津大学学报,2007,40(5): 548-553.
DING HONG-YAN, WANG GAO-FENG, LIU JIAN-HUI. Analysis of towing points in towing multi-bucket foundation platform [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(5): 548-553.
- [11] 丁红岩,刘建辉,沈克丽.基于多元统计的筒型基础海洋平台拖航分析[J].天津大学学报,2008,41(7): 783-787.
DING HONG-YAN, LIU JIAN-HUI, SHEN KE-LI. Towing analysis of bucket foundation ocean platform based on multivariate statistics [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(7): 783-787.
- [12] 丁红岩,刘建辉.筒基平台气浮拖航倾斜角模型试验[J].天津大学学报,2008,41(11):1345-1350.
DING HONG-YAN, LIU JIAN-HUI. Experimental research on tilt angle of air cushion supported bucket foundation platform [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(11): 1345-1350.
- [13] 别社安,任增金,李增志.结构气浮的力学特性研究[J].应用力学学报,2004,21(1):68-71.
BIE SHE-AN, REN ZENG-JIN, LI ZENG-ZHI. Mechanical properties of air floating structures [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(1): 68-71.
- [14] 别社安,徐艳杰,王光纶.气浮结构的静稳性分析[J].清华大学学报:自然科学版,2002,42(2):274-277.
BIE SHE-AN, XU YAN-JIE, WANG GUAN-LUN. Static stability analysis of air floated structures [J]. Journal of Tsinghua University: Sci&Tech, 2002, 42(2): 274-277.
- [15] 别社安,赵冲久,及春宁,等.筒型基础海洋平台气浮拖航稳性分析[J].天津大学学报,2002,35(2):221-225.
BIE SHE-AN, ZHAO CHONG-JIU, JI CHUN-NING, et al. Stability analysis of the bucket foundation platform transported by air foliating [J]. Journal of Tianjin University, 2002, 35(2): 221-225.
- [16] PINKSTER J A, SCHOLTE E M. The behaviour of a large air-supported MOB at sea [J]. Marine Structures, 2001, 14: 163-179.
- [17] 巴塔查雅.海洋运载工具动力学[M].邬明川,译.北京:海洋出版社,1982.
- [18] 中华人民共和国交通部. JTJ/T 234-2001 波浪模型试验规程[S].北京:人民交通出版社,2002.
- [19] 元良诚三.船舶与海洋构造物动力学[M].天津:天津大学出版社,1992.
- [20] 朱建平.应用多元统计分析[M].北京:科学出版社,2009.