

规则波波浪特征参数对船舶运动的影响分析

周洋^{1,2}, 向阳¹, 张昕宇¹

(1. 武汉理工大学船舶与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063; 2. 广州广电计量检测股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 为了研究在规则波条件下, 不同波浪特征参数对船舶各自由度运动幅值的影响程度, 使用基于势流理论的 AQWA 水动力学软件, 求解某油船在频域内的水动力学参数并计算船体在不同波浪周期、波幅和浪向角下, 横摇、纵摇和垂荡方向的运动响应幅值; 设计正交试验工况并使用极差和方差法分析波浪特征参数的变化对船体运动响应幅值的影响。结果表明: 两种分析方法的结果基本一致, 影响船体横摇、纵摇和垂荡位移响应幅值的因素由大到小依次为, 波幅、浪向角、波浪周期。

关键词: 规则波; 水动力参数; 运动响应; 正交试验

中图分类号: U661.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 12—0032—04

船舶在营运过程中, 常遭遇风浪流等环境载荷作用, 有时会造成严重的海难事故。因此, 各大船级社针对船舶的耐波性试验颁布了行业标准, 以确保船舶的航行安全。

国内外学者针对船舶与海洋工程结构物在波浪下的运动理论开展了大量研究工作, 取得了众多成果。Korvin-Kroukovsky^[1]将船舶与流体力学理论相结合, 提出了适用于船舶运动的切片理论, 可准确地计算普通船型的水动力学参数。但当船舶具有高航速时, 切片理论的求解结果与真实值存在较大偏差^[2]。贺五洲^[3]等将切片理论进行扩展, 研究了在有限水深且顶浪航行条件下, 船体纵向运动和波浪载荷特性, 结果计及湿表面变化对船舶运动和受力产生的影响。张腾^[4]等推导了任意水深下 F-K 力在边界元上的表达式, 分析了不同水深、浪向角和波长对船体上的 Froud-Krylov 力的影响。综上所述, 目前船舶运动理论研究主要是水动力性能方面, 关于规则波波浪特征参数对船体运动响应幅值的影响程度研究涉及较少。

因此, 以某油船为研究对象, 针对其营运海域内规则波特征参数的分布特性, 求解油船的水动力参数和各自由度的运动响应幅值。利用正交试验的极差和方差分析法, 研究规则波波浪特征参数对油船横摇、纵摇和垂荡的影响程度, 为船舶在涌浪航行时路线的选取提供参考。

1 船体水动力学性能分析

1.1 船体水动力建模

本文的研究对象某油船, 其主尺度参数如表 1 所示。AQWA 水动力学软件在求解中是基于边界元法, 关注船体与水接触的部分。因此, 仅考虑建立船体主甲板以下

结构, 如图 1 所示。

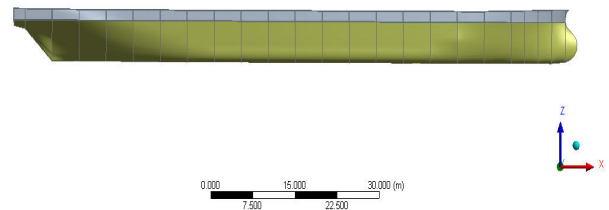


图 1 船体几何模型

其次, 使用近场法和远场法, 计算了网格尺寸分别为 1、2、3 和 4m, 船体纵荡和横荡方向的二阶定常波浪力。当网格尺寸为 1m 时, 两种求解方法得到的结果基本一致。因此, 船体模型的网格尺寸选为 1m。进行水动力分析时, 波浪的最小波长应至少包含 6 个单元^[5], 当波浪的最大分析圆频率为 3.15rad/s 时, 可满足分析要求。船体边界元网格模型如图 2 所示。

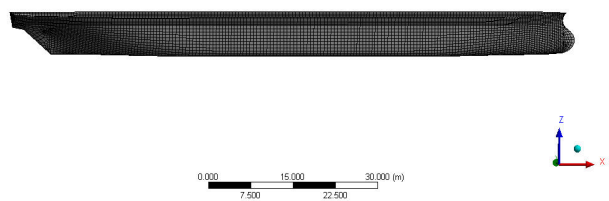


图 2 船体边界元网格模型

表 1 船体主尺度参数

主尺度参数	数值
船长 $L_{0.95}$ /m	101.6
型宽 B /m	14.2
型深 D /m	6.8
设计吃水 T /m	5.4
满载排水量 Δ /t	6159.7
横摇惯性半径 R_{xx} /m	4.8
纵摇惯性半径 R_{yy} /m	25.4
艏摇惯性半径 R_{zz} /m	26.4

1.2 水动力计算结果及分析

使用 AQWA-Line 模块对船体在频域内的水动力特征进行数值模拟求解, 其波频范围为 $0.06\text{--}3.15\text{rad/s}$, 均匀划分为 30 等份; 入射角范围为 $0^\circ\text{--}180^\circ$, 均匀划分为 19 等份。

1.2.1 一阶波浪力

一阶波浪力是船体在受到入射波作用时所受非定常的流体压力, 其由 F-K 力和绕射力线性叠加组成。图 3 为入射角为 90° 时船体各自由度的一阶波浪力变化曲线。船体在纵荡、横荡、横摇和艏摇方向上的一阶波浪力变化趋势相似, 在 $0.75\text{--}1.75\text{rad/s}$ 范围内达到峰值。

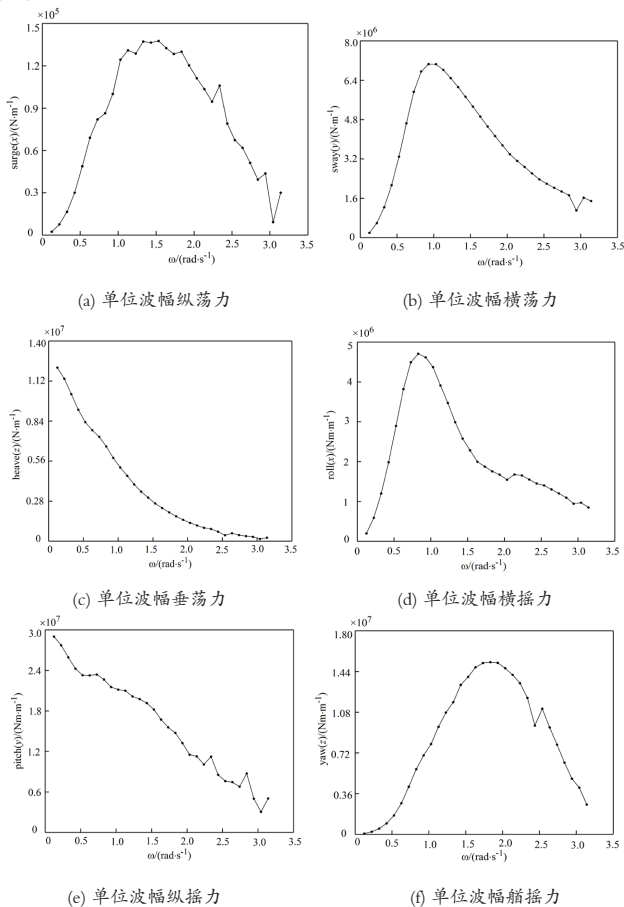


图 3 一阶波浪力变化曲线

1.2.2 响应幅值算子 RAOs

基于线性势流理论的面元法在求解时未考虑黏性阻尼, 为模拟船体真实运动真实, 取 7% 的横摇临界阻尼进行修正。图 4 为不同浪向角下船体的 RAOs。由图 4(a-c) 可知, 船体在纵荡、横荡和垂荡方向上表现出低频效应, 即随频率的增大而减小。由图 4(d-f) 可知, 横摇、纵摇和艏摇方向上的 RAOs 在 $0.06\text{--}1.5\text{rad/s}$ 范围内变化剧烈, 且横摇 RAOs 最为明显, 在浪向角为 90° 时达到峰值 $12.4^\circ/\text{m}$, 周期约为 9s 。

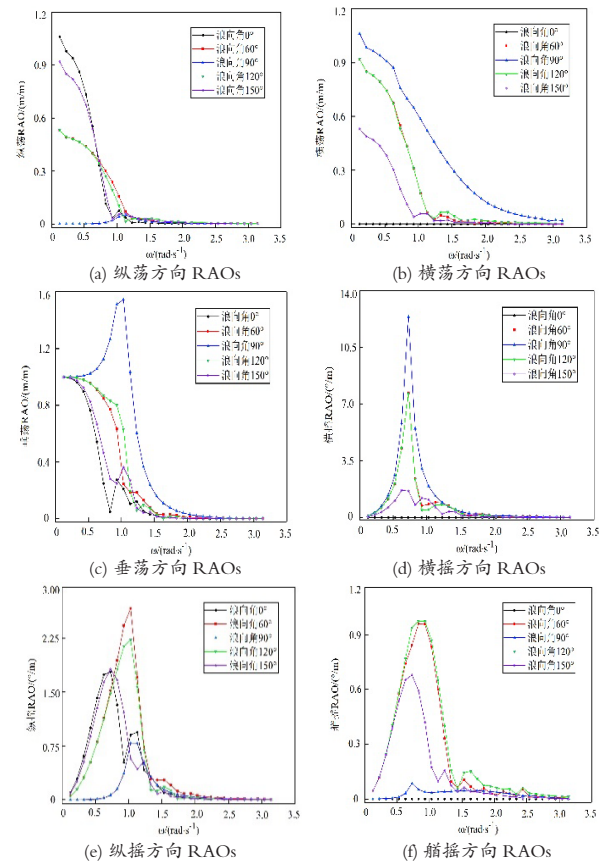


图 4 响应幅值算子 RAOs 变化曲线

2 规则波下船体运动响应分析

2.1 不同波浪周期下的运动响应

中国沿海海域内, 涌浪的周期主要在 $6\text{--}10\text{s}$, 波幅在 $0.5\text{--}4\text{m}$ 。基于水动力结果并考虑沿海涌浪特征, 波浪周期设为 6s 、 7s 、 8s 和 10s , 其他特征参数不变。图 5 为油船重心在横摇、纵摇、垂荡方向的运动响应。

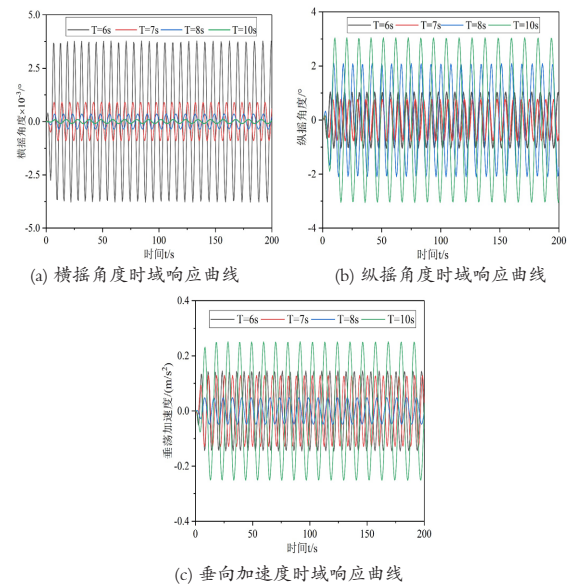


图 5 不同周期规则波下油船运动响应曲线

由图 5(a)可知, 船体横摇幅值随着波浪周期的增大而减小。这是由于波浪频率减小, 水面趋于平静。由图 5(b)可知, 纵摇方向做周期运动, 波浪周期为 10s 时达到峰值。由图 5(c)可知, 当波浪周期为 8s 时, 垂荡加速度幅值仅为 0.048m/s^2 , 这是由于此时波长为 100m, 与船长接近, 油船沿船长方向横跨整个波长, 船体运动特性与波浪传播相似, 即在垂荡方向上的加速度较小。

2.2 不同波幅下的运动响应

波幅设置为 1.5m、2m、2.5m 和 3m, 其他特征参数不变。图 6 为油船重心在横摇、纵摇、垂荡方向的运动响应。

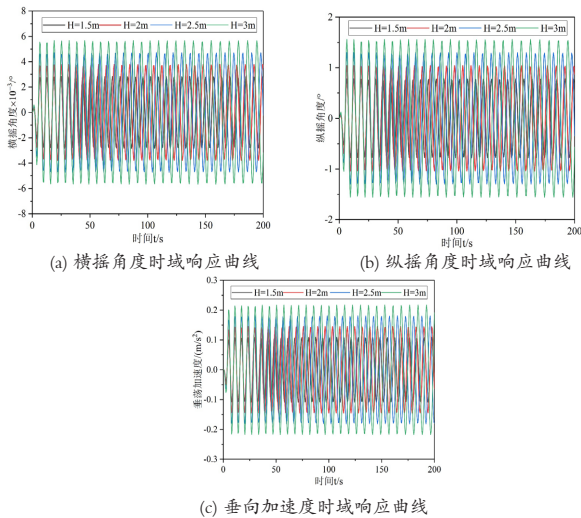


图 6 不同波幅规则波下油船运动响应曲线

由图 6(a-c)可知, 船体在三个自由度方向均做周期运动, 其中船体横摇运动响应较小, 且随波幅的增大, 各自由度的运动响应幅值均增大。

2.3 不同浪向角下的运动响应

波浪入射角范围为 $0^\circ - 180^\circ$, 间隔 10° , 其他特征参数不变。图 7 为油船重心在横摇、纵摇、垂荡方向的运动响应幅值。

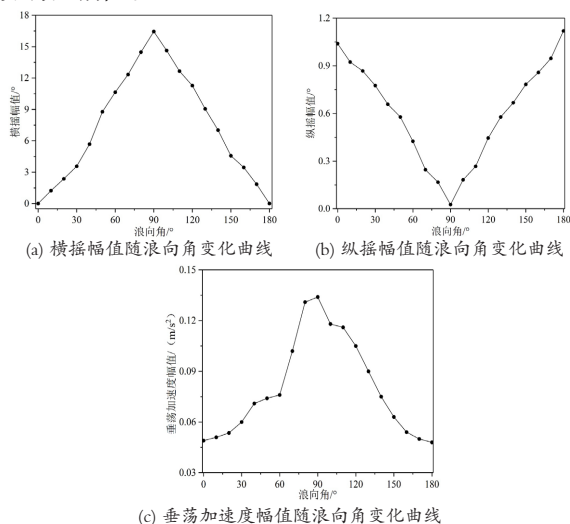


图 7 各浪向角规则波下油船运动幅值响应曲线

由图 7(a)和图 7(c)可知, 随浪向角的增大, 横摇和垂荡幅值先增大后减小, 在浪向角为 90° 时幅值达到峰值, 与横摇 RAOs 计算结果一致。由图 7(b)可知, 随浪向角的增大, 纵摇幅值先减小后增大, 在顺浪和顶浪时, 幅值最大。横浪时, 幅值最小。

3 波浪特征参数对船体运动响应的影响分析

3.1 正交试验设计

只考虑单一变量无法准确得到波浪特征参数对船体运动响应的影响程度。因此设计正交试验, 考虑各因素的分布特性, 各因素及水平如表 2 所示, 其中 A 为波浪周期, B 为波幅, C 为浪向角。

表 2 因素及水平设计表

水平	因素		
	A/s	B/m	C/ $^\circ$
1	6	0.5	0
2	7	1	60
3	8	1.5	90
4	9	2.5	120
5	10	3.5	150

满足仿真设计要求的正交表为 $L_{25}(5^3)$, 基于水动力求解结果, 计算油船在各设计工况下的时域运动响应幅值, 其统计结果如表 3 所示。

表 3 正交试验设计及仿真结果

工况编号	因素及水平			响应幅值		
	A	B	C	横摇/ $^\circ$	纵摇/ $^\circ$	垂荡位移/(m)
1	1	1	1	0	0.265	0.078
2	1	2	2	1.618	1.757	0.378
3	1	3	3	2.831	1.154	2.033
4	1	4	4	0.640	3.387	0.659
5	1	5	5	1.265	0.555	0.468
6	2	1	2	3.644	0.814	0.272
7	2	2	3	3.872	0.435	1.335
8	2	3	4	0.601	3.766	1.883
9	2	4	5	1.106	3.715	0.492
10	2	5	1	0	1.210	0.551
11	3	1	3	5.293	0.184	0.571
12	3	2	4	1.857	1.917	1.116
13	3	3	5	0.335	3.771	1.231
14	3	4	1	0	2.573	0.156
15	3	5	2	19.247	5.205	2.362
16	4	1	4	3.230	0.747	0.504
17	4	2	5	0.795	2.253	0.786
18	4	3	1	0	2.123	0.449
19	4	4	2	10.392	3.375	1.931
20	4	5	3	23.504	1.217	3.722
21	5	1	5	2.796	0.980	0.404
22	5	2	1	0	1.536	0.489
23	5	3	2	4.282	1.813	1.261
24	5	4	3	16.716	0.800	2.583
25	5	5	4	19.133	4.060	3.428

3.2 正交试验结果极差分析

极差分析方法是根据极差 R 的大小, 大致评估不同因素影响程度, 极差 R 愈大, 则对应的因素影响程

度也愈大。表4为横摇、纵摇和垂荡位移幅值的极差分析结果。

表4 各自由度幅值极差分析

列号	横摇/(°)			纵摇/(°)			垂荡位移/(m)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K1	6.345	14.963	0	7.118	2.990	7.707	3.616	1.829	1.723
K2	9.223	8.142	39.183	9.940	7.898	12.964	4.533	4.104	6.204
K3	26.732	8.049	52.216	13.650	12.627	3.790	5.436	6.857	10.244
K4	37.921	28.854	25.461	9.715	13.850	13.877	7.392	5.821	7.590
K5	42.927	63.149	6.297	9.189	12.247	11.274	8.165	10.531	3.381
k1	1.271	2.993	0	1.424	0.598	1.541	0.723	0.366	0.345
k2	1.845	1.628	7.837	1.988	1.580	2.593	0.907	0.821	1.241
k3	5.346	1.610	10.443	2.730	2.525	0.758	1.087	1.371	2.049
k4	7.584	5.771	5.092	1.943	2.770	2.775	1.478	1.164	1.518
k5	8.585	12.630	1.259	1.838	2.449	2.255	1.633	2.106	0.676
极差 R	7.315	11.020	10.443	1.306	2.172	2.017	0.910	1.740	1.704
主次因素	B > C > A			B > C > A			B > C > A		

由表4中极差R的计算结果可知,影响船体横摇、纵摇和垂荡位移响应幅值的因素由大到小依次为:波幅、浪向角、波浪周期。

3.3 正交试验结果方差分析

极差分析法的分析过程相对简便,但无法确定试验过程以及试验结果中存在的误差大小,可能导致所得结论并非准确可靠^[6]。因此,本文采用方差分析法进一步确定规则波特征参数对船体运动响应幅值的影响程度。

由F检验的临界值分布表可知, $F_{\alpha=0.05}(4,12)=3.26$, $F_{\alpha=0.01}(4,12)=5.41$, 其中 α 为显著性水平,当 $F > F_{\alpha}$ 时,若 $\alpha=0.05$,就有 $(1-\alpha)*100\%$,即95%的置信度说明该分布是显著的。为区分各因素的显著性,当 $F > F_{\alpha=0.01}(4,12)$,因素对试验结果有高度显著性影响,记为**;当 $F_{\alpha=0.05}(4,12) < F < F_{\alpha=0.01}(4,12)$,因素对试验结果有显著性影响,记为*;当 $F < F_{\alpha=0.05}(4,12)$,因素对试验结果的影响程度较低。方差法分析结果如表5所示。

由表5可知,波幅和浪向角的变化均对横摇和垂荡运动有高度显著性影响,波浪周期的变化对横摇运动有显著性影响。同理,波幅和浪向角的变化均对纵摇运动有显著性影响,波浪周期的变化对纵摇和垂荡运动影响程度较小。

表5 各自由度幅值方差分析结果

源	因变量	平方和	自由度	均方	F检验	显著性
A	横摇幅值	217.447	4	54.362	4.294	*
	纵摇幅值	4.468	4	1.117	1.106	
	垂荡位移幅值	2.958	4	0.739	2.090	
B	横摇幅值	428.358	4	107.090	8.459	**
	纵摇幅值	16.060	4	4.015	3.974	*
	垂荡位移幅值	8.523	4	2.131	6.023	**
C	横摇幅值	383.241	4	95.810	7.568	**
	纵摇幅值	13.846	4	3.462	3.426	*
	垂荡位移幅值	9.206	4	2.301	6.505	**
误差	横摇幅值	151.915	12	12.660		
	纵摇幅值	12.125	12	1.010		
	垂荡位移幅值	4.245	12	0.354		
总计	横摇幅值	1787.667	25			
	纵摇幅值	144.953	25			
	垂荡位移幅值	59.019	25			

4 结论

本文以某油船为研究对象,求解其水动力性能参数,结合中国沿海涌浪特征参数的分布特性,设计正交试验,计算规则波下船体运动响应。对结果统计分析,确定波浪特征参数对船体运动响应的影响程度。主要结论有:

(1)极差分析和方差分析结果基本一致,波幅和浪向角的变化对横摇和垂荡运动有高度显著性影响,对纵摇运动有显著性影响,波浪周期对横摇运动有显著性影响,但对纵摇和垂荡运动影响程度较低。

(2)RAOs在0.06~1.5rad/s的频域范围内变化剧烈,在航行过程中应避免与船体各自由度固有频率接近的规则波,以及横浪航行的情况。

参考文献:

- [1] Korvin Kroukovsky B V. Investigation of ship motions in regular waves [J]. Trans. SNAME, 1955, 63: 56-68.
- [2] Kim C H, Chou F S, Tien D. Motions and hydrodynamic loads of a ship advancing in oblique wave. Trans SNAME, 1980, 38: 231-243.
- [3] 贺五洲,周正全,程军.水面舰船迎浪航行时大幅运动预报的切片算法[J].中国造船,1988,76(1):103-114.
- [4] 张腾,任俊生,张秀凤,等.规则波中船舶Froude-Krylov力的解析积分计算[J].天津大学学报,2020,53(1):35-42.
- [5] 高巍. ANSYS AQWA 软件入门与提高[M].北京:中国水利水电出版社,2018:40-43.
- [6] 张公绪,孙静.质量工程师手册[M].北京:企业管理出版社,2002:200-22.

基金项目:工业和信息化部高技术船舶项目(MC-201917-C09)

