

# 小水线面双体船的耐波性研究和提高

史一鸣

[摘要]文章介绍了小水线面油田交通双体船有关提升其耐波性能研究设计过程,分析了小水线面双体船与常规单体船在此方面的差异,探索解决方法,并介绍了实船航行状况。

[关键词]小水线面双体船;耐波性;零航速运动特性

[中图分类号]U661.32

[文献标识码]A

[文章编号]1001-4624(2006)02-0036-08

## Research & improvement of SWATH seakeeping capability

Shi Yiming

**Abstract:** The paper introduces the process of research and improvement of oil field transportation SWATH's sea keeping capability and analyzes the different properties of SWATH from the general monohull ships. It also aims at exploring the solution and revealing the actual navigation performance.

**Keywords:** SWATH; seakeeping capability; zero velocity

### 0 前言

随着海上运输方式的多样化以及人类对海洋资源的积极开发,对船舶性能的要求也逐渐发生变化。就海上运输来说,由过去只注重载荷性能和静水中快速性能而一味追求大型化和高速化的倾向,转为注重提高船舶在波浪中的性能。这就导致了对耐波性优良的新型船舶的研制。

小水线面双体船(SWATH-Small Waterplane Area Twin Hull)是将上部船体通过若干个呈流线型的支柱支承在两个鱼雷形状的潜体(下面称作“下潜体”)上,在上世纪70年代发展起来的一种新概念高性能船型,被列为当今世界四大发展船型之一。因其水线面比单、双体船都小很多。航行中受到的波浪力较常规船型要小得多,所以具有良好的航行耐波性能,波浪中失速小。甲板面积相当宽敞,可以完成多种使命,满足各种航海要求,被称为“全天候”的不晕船舶,用途非常广泛。

实践和研究表明,在零航速附近工作时,小水线面双体船的耐波性能往往比不上普通单体多用途工作船,特别是船舶的升沉性能。在零航速下,船舶在风浪中的升沉性能对于海上油田交通船接送工人安全上下石油平台非常重要,在小水线面双体油田交通船设计中,我们对小水线面双体船的耐波性能做了多方案设计、进行了较深入的波浪中的船舶运动理论分析,计算和模型试验研究,最终满足了船东的苛刻的设计要求。

### 1 两种支柱形式的耐波性能比较

为了确定支柱形式对船舶的耐波性影响,我们首先设计了360 t排水量,同下潜体、同水线面面积单支柱和双支柱两种支柱形式的小水线面船(见图1),进行耐波性能比较研究。360 t同水线面面积单支柱和双支柱两种支柱形式的耐波性能比较试验是委托702所进行,直接模拟不规则波所得的试验结果如表1、表2。

[收稿日期]2006-10-15

[作者简介]史一鸣(1950-),男,高级工程师,长期从事船舶总体性能的设计工作。

从试验结果分析得出:

在设计航速时,两种支柱形式的船舶均有优异的耐波性能。

同排水量,同水线面面积两种支柱形式的研究中,两种支柱形式的耐波性能差异不大,双支柱形式横浪时稍好,但迎浪时较单支柱形式略差。这与理论分析相同:因为单支柱船舶的水线面积集中在中部,水线面的纵向惯性矩较小,波浪对船舶的纵向作用力矩也较小,所以船舶的纵摇角度也较小。而双支柱船舶的前后支柱间有空隙,船舶垂向运动阻尼系数略大于单支柱船舶,故其在遭遇横向波浪时性能要优于单支柱船舶。

试验中,没有发生首部上浪和明显拍击现象。

之后又深入设计了 390 t 排水量单支柱和双支柱两种支柱形式的小水线面船,作耐波性能比较分析研究,探讨改善途径。

在航行中,小水线面双体船有优良的耐波性,所以零航速下的船舶耐波性是研究的重点。

390 t 单支柱和双支柱两种支柱形式的耐波性能比较试验在上海交通大学进行,船型主要数据见表 3。

表 3 中,单支柱较双支柱水线面积约大 9%。零航速试验中单、双支柱的垂荡响应曲线见图 2,图 3。双支柱的垂荡幅度低于单支柱。

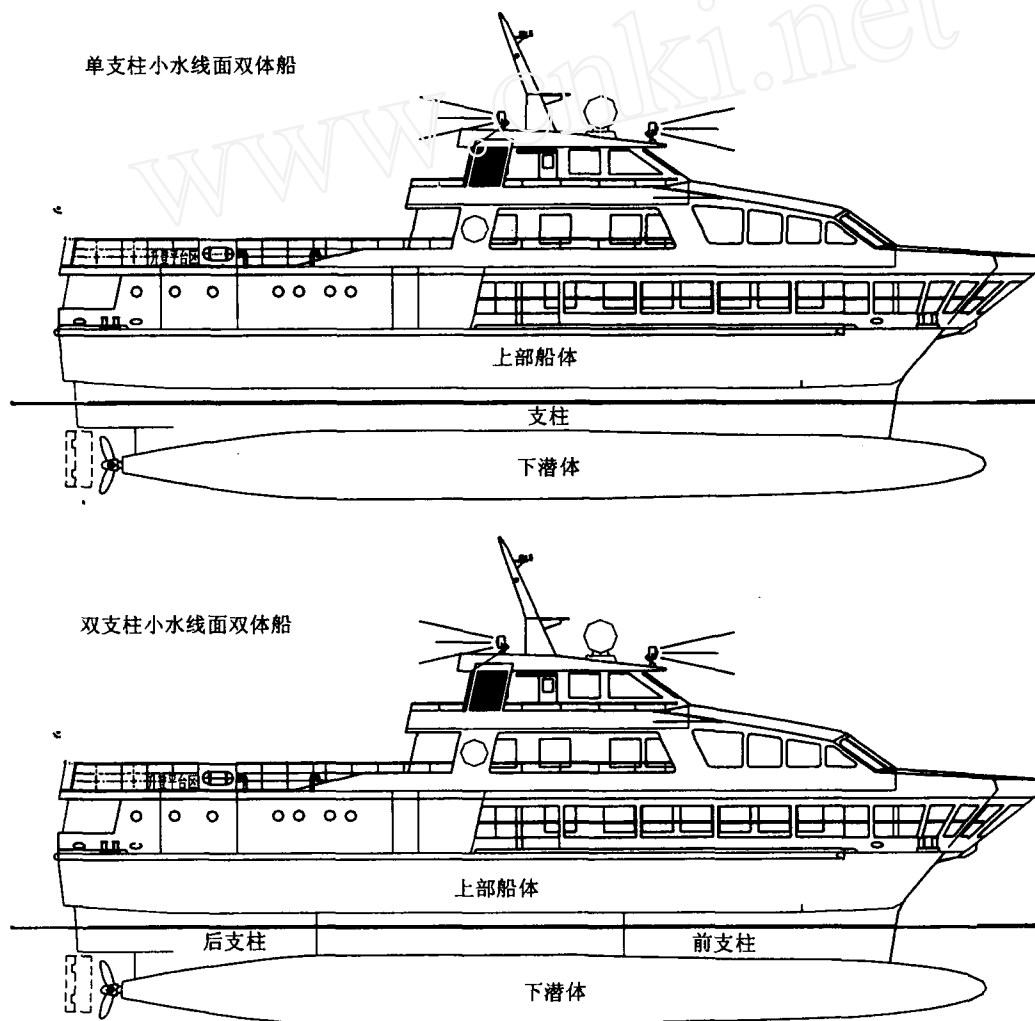


图 1 单支柱、双支柱小水线面双体船支柱差异

表1 360 t级单支柱小水线面油田交通船在不规则波中试验结果(单幅有义值)

浪向 $\mu$	( $^{\circ}$ )	180	135	90	45	180	135	90	45	180
航速 $V_s$	kn	0				0				17.1
风速 $V_w$	kn	30.5				0				0
有义波高 $H_{1/3}$	m	3.5				2.0				2.0
波浪平均周期 $\bar{T}$	s	7.8				6.1				6.1
船舶遭遇周期 $T_E$	s	8.5	8.0	8.5	8.0	6.5	6.6	6.4	6.6	3.5
横摇 $\varphi_{1/3}$	( $^{\circ}$ )	1.2	5.1	8.8	5.4	0.6	2.4	6.0	3.3	/
纵摇 $\theta_{1/3}$	( $^{\circ}$ )	3.3	2.8	1.7	3.9	2.2	2.0	1.1	2.1	1.6
垂荡 $Z_{1/3}$	m	1.83	1.86	1.91	1.81	0.75	0.80	0.86	0.75	0.5
首部20站垂向加速度 $AF_{1/3}$	$m/s^2$	0.90	0.92	1.02	1.04	0.56	0.48	0.63	0.64	1.19
重心处垂向加速度 $AG_{1/3}$	$m/s^2$	0.91	0.99	1.10	0.95	0.49	0.53	0.74	0.50	0.80
尾部1站垂向加速度 $AA_{1/3}$	$m/s^2$	1.31	1.28	1.25	0.87	0.94	0.89	0.90	0.66	1.44

表2 360 t级双支柱小水线面油田交通船在不规则波中试验结果(单幅有义值)

浪向 $\mu$	( $^{\circ}$ )	180	135	90	45	180	135	90	45	180
航速 $V_s$	kn	0				0				17.1
风速 $V_w$	kn	30.5				0				0
有义波高 $H_{1/3}$	m	3.5				2.0				2.0
波浪平均周期 $\bar{T}$	s	7.8				6.1				6.1
船舶遭遇周期 $T_E$	s	8.5	7.9	8.4	8.0	6.4	6.6	6.4	6.6	3.3
横摇 $\varphi_{1/3}$	( $^{\circ}$ )	1.6	4.4	7.3	4.7	0.9	2.3	4.9	2.5	/
纵摇 $\theta_{1/3}$	( $^{\circ}$ )	5.4	4.0	1.6	3.9	2.7	1.6	1.0	2.2	1.7
垂荡 $Z_{1/3}$	m	1.74	1.69	1.87	1.72	0.74	0.64	0.91	0.65	0.44
首部20站垂向加速度 $AF_{1/3}$	$m/s^2$	1.33	1.26	1.12	1.08	0.85	0.60	0.68	0.62	1.48
重心处垂向加速度 $AG_{1/3}$	$m/s^2$	0.88	0.91	1.05	0.92	0.58	0.47	0.70	0.48	0.82
尾部1站垂向加速度 $AA_{1/3}$	$m/s^2$	0.95	0.93	1.10	1.17	0.67	0.58	0.78	0.75	1.29

表3 小水线面双体船实船与模型

名称		实船	模型
总长	$L_{OA}$	35.30 m	3.209 m
垂线间长	$L_{WP}$	28.00 m	1.545 m
总宽	$B_{WL}$	4.80 m	1.345 m
设计吃水	$T$	3.50 m	0.318 m
排水量	$\Delta$	357.06 t	268.260 kg
重心高度	$Z_g$	4.84 m	0.440 m
横摇固有周期(单支柱)	$T_{\phi}$	12.27 s	3.700 s
横摇固有周期(双支柱)	$T_{\phi}$	13.27 s	4.000 s
重心纵向位置	$X_g$	+1.82 m	+0.165 m
片体中心间距	$Y$	11.00 m	1.000 m
水线面积(单支柱)	$A_{WS}$	54.82 $m^2$	
水线面积(双支柱)	$A_{WD}$	50.10 $m^2$	

在垂荡中,双支柱的垂荡固有周期长于单支柱的垂荡固有周期,固有周期下的谐振峰值也低于单支柱。

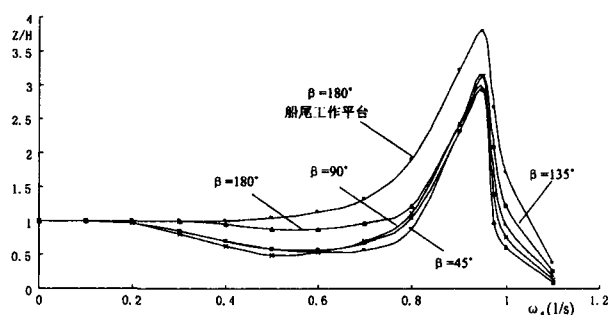


图2 小水线面双体船不同浪向角时船中的零速垂荡运动频率响应曲线(单支柱)

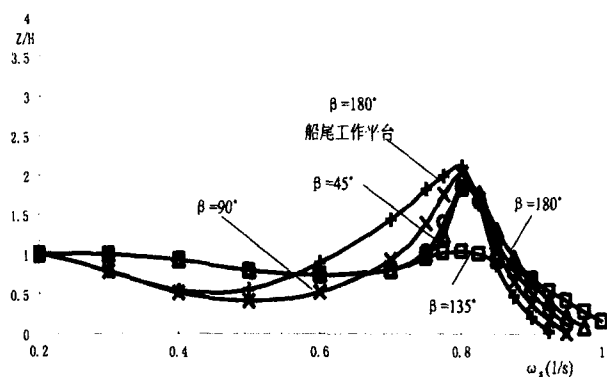


图3 小水线面双体船不同浪角时船中的零速垂荡运动频率响应曲线(双支柱)

## 2 小水线面双体船与常规单体船耐波性能比较分析

为了比较分析小水线面双体船与常规单体船耐波性能差异,进一步提升小水线面双体船的耐波性能,我们委托上海交通大学进行390 t单支柱和双支柱两种支柱形式的耐波性能比较试验同时做了1484 t单体货船和现场用作接送平台上下班员工的2600 hp(1 hp=0.7457 kW)拖船、3800 hp拖船耐波性试验。其中以3800 hp拖船运行中耐波性最为优异,其船型主要数据见表4。不规则波中小水线面双体船及3800 hp拖船性能比较预报见表5~表8。

表4 3800 hp拖船及船模主尺度

参 数		实船	船模
水 线 长 $L_{WL}$	m	51.6	2.580
船 宽 $B$	m	11.00	0.55
平均吃水 $T$	m	3.38	0.169
排水体积 $\nabla_s$	m <sup>3</sup>	1 336	162.926 kg
方形系数 $C_b$	—	0.719	
横摇自摇周期 $T_\phi$	s	6.08	1.36
重心竖向高度 $Z_g$	m	3.42	0.171
重心纵向位置 $X_g$	m	1.24	0.062
纵向质量惯性矩 $I_{yy}$	t·m·s <sup>2</sup>	20 992	6.56×10 <sup>-3</sup>

表5  $\beta=90^\circ$ 时零速横摇运动统计特性  $\varphi_{1/3}$

单位:°

形 式	周期 $T$	波 高 $H_{1/3}$			单位波高的有义横摇
		1.0 m	2.0 m	3.0 m	
单支柱	4 s	0.004	0.008	0.012	0.004 °/m
	5 s	0.114	0.228	0.342	0.114 °/m
	6 s	0.525	1.050	1.575	0.525 °/m
	7 s	1.070	2.140	3.211	1.070 °/m
	8 s	1.442	2.883	4.325	1.442 °/m
双支柱	4 s	0.000	0.001	0.001	0.000 °/m
	5 s	0.022	0.044	0.066	0.022 °/m
	6 s	0.104	0.209	0.313	0.104 °/m
	7 s	0.222	0.222	0.666	0.222 °/m
	8 s	0.321	0.642	0.963	0.321 °/m
3800 hp拖船	4 s	5.103	10.205	15.308	5.103 °/m
	5 s	5.462	12.924	19.386	6.462 °/m
	6 s	5.967	11.935	17.902	5.967 °/m
	7 s	5.045	10.089	15.134	5.045 °/m
	8 s	4.179	8.358	12.538	4.179 °/m

表6  $\beta=180^\circ$ 时零速纵摇运动统计特性  $\theta_{1/3}$

单位:°

形 式	周期 $T$	波 高 $H_{1/3}$			单位波高的有义纵摇
		1.0 m	2.0 m	3.0 m	
单支柱	3 s	0.000	0.000	0.000	0.000 °/m
	4 s	0.020	0.040	0.059	0.020 °/m
	5 s	0.218	0.436	0.654	0.218 °/m
	6 s	0.703	1.045	2.108	0.703 °/m
	7 s	1.100	2.199	3.300	1.100 °/m
	8 s	1.264	2.528	3.792	1.264 °/m
双支柱	3 s	0.019	0.039	0.058	0.019 °/m
	4 s	0.569	1.137	1.706	0.569 °/m
	5 s	1.545	3.309	4.635	1.545 °/m
	6 s	1.892	3.785	5.676	1.892 °/m
	7 s	1.805	3.611	5.416	1.805 °/m
	8 s	1.582	3.164	4.745	1.582 °/m
3800 hp拖船	3 s	0.313	0.627	0.940	0.313 °/m
	4 s	0.941	1.881	2.822	0.941 °/m
	5 s	1.325	2.651	3.976	1.325 °/m
	6 s	1.420	2.840	4.260	1.420 °/m
	7 s	1.367	2.734	4.101	1.367 °/m
	8 s	1.262	2.525	3.787	1.262 °/m

表7  $\beta=90^\circ$ 时零速时船重心处垂荡运动统计特性  $Z_{1/3}$

单位:m

形式	周期 $T$	波高 $H_{1/3}$			单位波高的 有义垂荡
		1.0 m	2.0 m	3.0 m	
单支柱	3 s	0.052	0.104	0.155	0.052 m/m
	4 s	0.373	0.745	1.119	0.373 m/m
	5 s	0.544	1.088	1.632	0.544 m/m
	6 s	0.532	1.064	1.595	0.532 m/m
	7 s	0.469	0.937	1.406	0.469 m/m
	8 s	0.407	0.814	1.220	0.407 m/m
双支柱	3 s	0.004	0.007	0.011	0.004 m/m
	4 s	0.121	0.241	0.362	0.121 m/m
	5 s	0.312	0.625	0.937	0.312 m/m
	6 s	0.384	0.769	1.153	0.384 m/m
	7 s	0.375	0.751	1.126	0.375 m/m
	8 s	0.342	0.684	1.026	0.342 m/m
3 800 hp 拖船	3 s	0.200	0.400	0.600	0.200 m/m
	4 s	0.432	0.865	1.297	0.432 m/m
	5 s	0.592	1.057	1.586	0.592 m/m
	6 s	0.549	1.097	1.645	0.549 m/m
	7 s	0.516	1.033	1.549	0.516 m/m
	8 s	0.499	0.998	1.498	0.499 m/m

注:小水线面双体船耐波性试验中,没安装首鳍。安装首鳍后垂荡幅度还会减小

表8  $\beta=180^\circ$ 时零速时船重心垂荡运动统计特性  $Z_{1/3}$

单位:m

形式	周期 $T$	波高 $H_{1/3}$			单位波高的 有义垂荡
		1.0 m	2.0 m	3.0 m	
单支柱	3 s	0.047	0.095	0.142	0.047 m/m
	4 s	0.357	0.715	1.032	0.357 m/m
	5 s	0.538	1.076	1.614	0.538 m/m
	6 s	0.548	1.096	1.644	0.548 m/m
	7 s	0.511	1.022	1.532	0.511 m/m
	8 s	0.473	0.947	1.419	0.473 m/m
双支柱	3 s	0.003	0.005	0.008	0.003 m/m
	4 s	0.103	0.205	0.308	0.103 m/m
	5 s	0.267	0.535	0.803	0.267 m/m
	6 s	0.339	0.678	1.018	0.339 m/m
	7 s	0.355	0.710	1.065	0.355 m/m
	8 s	0.357	0.714	1.071	0.357 m/m
3 800 hp 拖船	3 s	0.074	0.148	0.222	0.074 m/m
	4 s	0.132	0.263	0.395	0.132 m/m
	5 s	0.206	0.413	0.619	0.206 m/m
	6 s	0.288	0.577	0.865	0.288 m/m
	7 s	0.355	0.710	1.066	0.355 m/m
	8 s	0.400	0.799	1.199	0.400 m/m

分析试验结果和船模——实船结果换算方法可知:常规船型的固有周期较短,如1 500 t级的货船垂荡周期约3 s~4 s,(周期  $T$  与  $\omega$  的关系为: $T=2\pi/\omega$ ),3 800 hp 拖船的垂荡周期约5.4 s(浪向角  $90^\circ$ )。海洋中较大的波高对应较长的主周期,就渤海湾而言,1.5 m 波高的浪的主周期一般在4 s~5 s,2 m 波高的浪的主周期一般在5 s~6 s。一般改善耐波性能的主要方法是错开自振周期与波浪周期,和增大自身阻尼。常规单体船很难通过减小水线面积和加大附连质量来大幅度增加固有垂荡周期:因为减小水线面积将使水线面惯性矩较快减小,影响船舶的稳性;船体线型的改变在影响附连质量的同时,也改变了船舶的阻力和布置性能。所以常规单体船的自振周期较难改变。

而390 t方案的小水线面双体船单支柱的垂荡固有周期~7 s,双支柱的垂荡固有周期~7.8 s。双支柱在2 m 波高(主周期5 s~6 s)的垂荡运动幅值(~0.6)远小于单支柱的垂荡运动幅值(~1.08)。

小水线面双体船型首先可通过减小水线面面积以减小波浪激励力,增大船舶固有周期以错开航行海域大波的主周期。船舶的稳性与船舶的水线面惯性矩有关,在双体船片体距离不变时减小水线面面积将使船舶初稳性高降低。为了保证必要的船舶横稳性,此时可以通过增加支柱间的宽度来提高船舶的水线面惯性矩,保证船舶的稳性,此措施对船舶的快速性有利,但对船舶的横向刚度和强度不利;其次对其水下主体可采取措施以增大船舶的附连水质量和阻尼,错开船舶频率相应曲线(如图4)峰值频率与波浪谱峰值频率,减小船舶运动响应曲线幅值。后者实施时,可能会使水下主体局部有棱角折线或过大的曲率,中高速时此处流体易于发生分离,对小水线面双体船的快速性有不利影响。

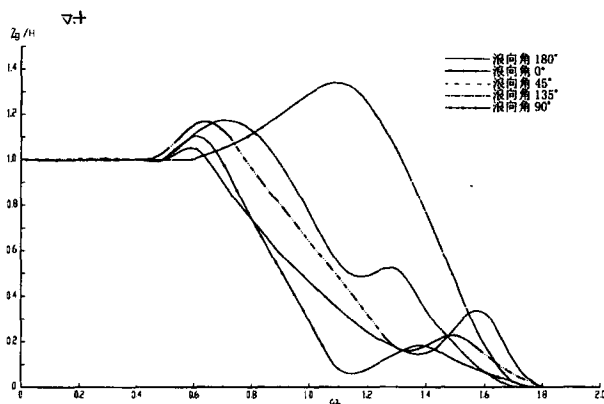


图4 3 800 hp 拖船实船重心垂荡运动频率响应曲线

比 390 t 小水线面双体船的垂荡响应曲线峰值处的幅值放大系数单支柱形式在 3 以上,双支柱形式在 2 左右,阻尼良好的 3 800 hp 拖船垂荡响应曲线峰值处的幅值放大系数仅 ~1.3。分析其原因,3 800 hp 拖船具有较同类吨位船有更大的平底是增大阻尼的关键。

小水线面双体船具有较大的船体湿面积。为了提高其快速性能,其下体一般采用湿面积较小的椭圆横剖面以减小摩擦阻力,提高船舶的快速性能和经济性能。垂荡时此种船型是流线型,垂荡阻尼很小,故其垂荡响应曲线峰值处的幅值放大系数远大于常规平底船型。为了增大小水线面双体船的垂荡阻尼,下体横剖面可采用形状。例如美国海军小水线面海洋科学考察监测船 AGOR26 (2 500 t)(见图 5)具有较大的垂荡阻尼。

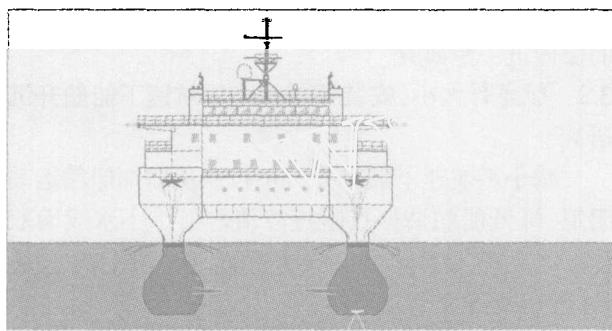


图 5 小水线面海洋科学考察监测船 AGOR26

我们设计了许多试验研究方案,在大连理工大学对小水线面双体船快速性、耐波性能进行了许多深入系统研究,包含采用附加设施改善零航速下的船舶耐波性可行性研究(见第 3 章)。

经过多次试验和理论探索,结合资料分析研究,目前使本项目依托工程“小水线面双体油田交通船”的耐波性能有了较大的进步。首制船“新世纪 1 号”的最终线型是与大连理工大学合作完成,典型横剖面参见图 6,其与 2 600 hp,3 800 hp 拖船耐波性能比较(零速)见表 9。

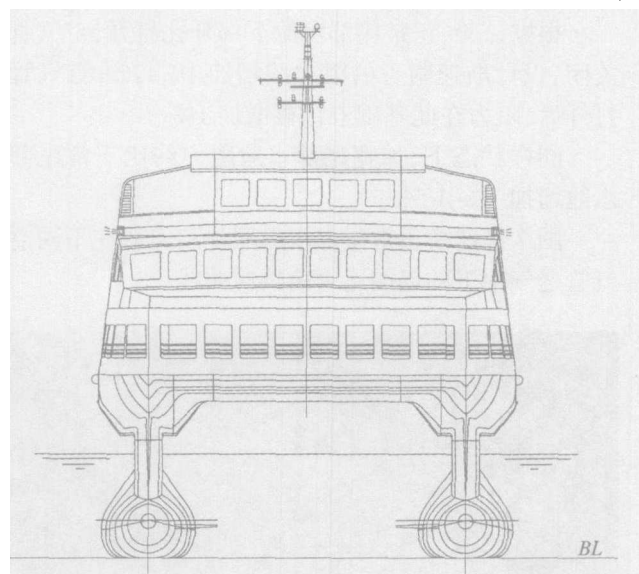


图 6 “新世纪一号”典型横剖面

表 9 “新世纪一号”与 2 600 hp,3 800 hp 拖船耐波性能比较(零速)

船名	波高 m	浪向 (°)	运动单幅有义值 (SSA)				排水量 t
			横摇 (°)	纵摇 (°)	吊笼处 垂荡 m	吊笼处垂 荡加速度 m/s <sup>2</sup>	
新世纪 一号	2	180	/	0.9	0.587	0.5	440
	2	90	3.2	/	0.731	0.68	
	2	45	1.3	0.9	0.683	0.57	
	2	135	1.3	1.1	0.644	0.52	
2 600 hp	2	180	/	3.25	0.658	0.597	1 472
	2	90	22.54	/	1.108	1.379	
	2	45	12.77	3.97	0.953	0.93	
	2	135	7.7	2.55	0.997	1.3	
3 800 hp	2	180	/	2.62	0.951	1.1	1 380
	2	90	12.92	/	1.039	1.0	
	2	45	5.924	2.281	0.903	1.37	
	2	135	5.726	2.355	0.910	1.29	

### 3 其它减小零航速下船舶升沉措施的研究

#### 3.1 减荡水舱减小零航速下船舶升沉研究

对减荡水舱减小零航速下船舶升沉研究作了两轮研究。第一轮研究减荡水舱可能的效果,减荡水舱设在支柱的前端,第二轮减荡水舱设在支柱尾端。

支柱总长 31.8 m, 正常尾部水舱水线长 3 m, 水线面积(单只)为 2.427 m<sup>2</sup>。加宽尾部水舱水线面积为 2.79 m<sup>2</sup>, 尾端部较正常尾加宽 100 mm, 加长 400 mm。

水舱开孔 400 mm×250 mm×4 个。船模缩尺比 0.1, 船模空气管内径  $\phi 25$  mm。

根据试验,正常尾部水舱下部开孔打开,空气管关闭,设计航速附近的阻力约增加1%~2%;空气管打开后,阻力在此基础上约再增加1%。

同样状态下,加宽尾部水舱阻力约比正常尾部水舱增加1%~1.5%。

图7是船模正常尾部水舱照片和实船在不同空气管透气率下的船舶尾垂荡响应曲线。

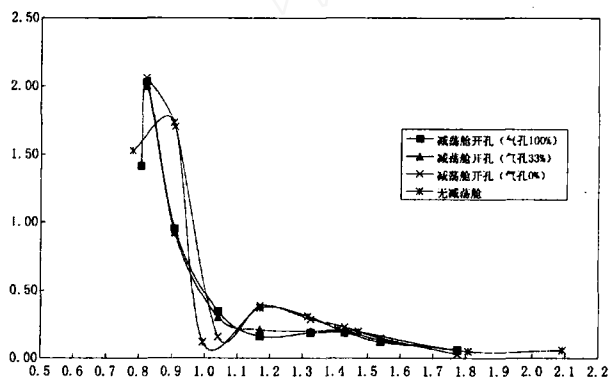
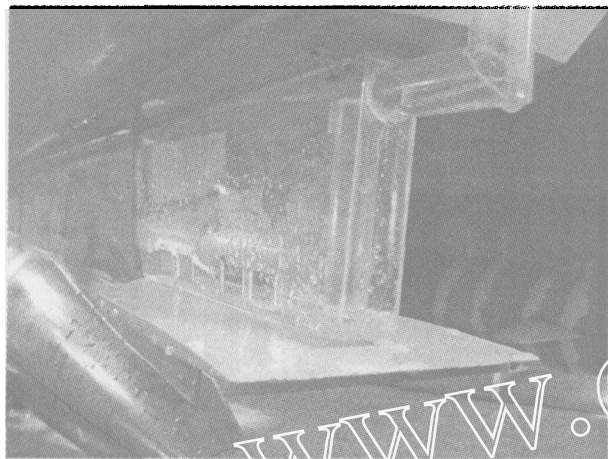


图7 频响曲线

### 试验结果分析

研究表明适当地控制减荡水舱的通气量,控制减荡水舱内水流相位,可以降低零航速下船舶升沉相应曲线幅值,从而减小船舶升沉。试验同时也表明,用简单调节空气管透气率来减小船舶尾垂荡响应幅度是有缺陷的,因为船舶遭遇波浪频率丰富,不完善的调节有可能使船舶谐振峰值点相应增大,降低船舶减荡效果。

减荡水舱设在支柱尾部,减小船舶支柱尾部水线面积,可增长船舶谐振峰值点对应周期,降低船舶在短主周期波浪下运动预报幅度。(本船去除减荡水舱后,按12届ITTC双参数方法预报:在1/3有

义波高2.0 m,主周期为5 s时,船尾垂荡幅度约可小0.1 m)

小水线面双体船在波浪中的运动幅度较小,因此用依赖于船体运动幅度的被动式减荡水舱减摇、减荡效果有限。虽然试验表明,被动式减荡水舱有可能进一步降低船舶垂荡响应幅度,但必须具有恰当的控制方法和方式,不恰当的控制有可能危害原有性能。在没有解决有效控制前,为减荡人为增长或增宽船尾减荡水舱,对船舶零航速耐波性能无益。

基于研究分析,采用半主动式减荡水舱(减荡水舱流体部分流动阶段采用动力引导)是进一步降低船舶在波浪中运动幅度的一种可行方法。相对于主动式减荡水舱(减荡水舱流体流动全过程采用动力引导),半主动式减荡水舱所需功率小,又可随意控制减荡水舱内流体流动相位,减低或抵消船舶所受波浪外力。此方案因船东要求此船只采用成熟技术而没做进一步研究。

### 3.2 舳龙骨大小,安装位置减小零航速下船舶升沉研究

减小零航速下船舶升沉也可以从增加船舶运动阻尼,降低船舶谐振点附近峰值取得。小水线面双体船的运动阻尼远小于普通船舶,其谐振点附近峰值/波幅比远大于1。

我们试图在船舶中后部的下潜体设置水平向的舳龙骨来降低船舶谐振点附近响应峰值。标准舳龙骨大小和设置位置见图8,中舳龙骨为舳龙骨装在下体最宽处。试验结果见图9和图10。

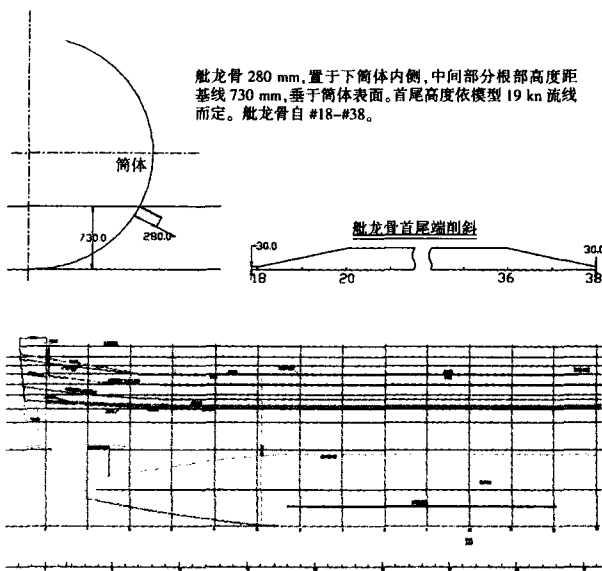
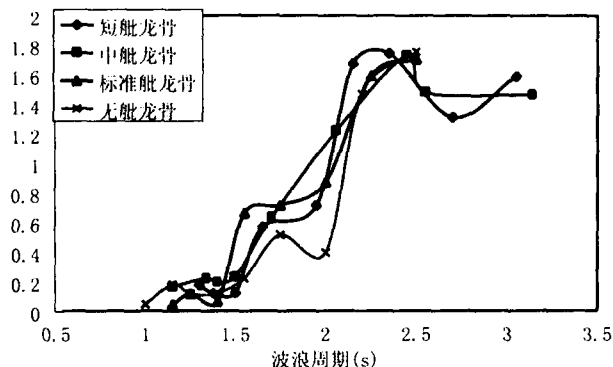
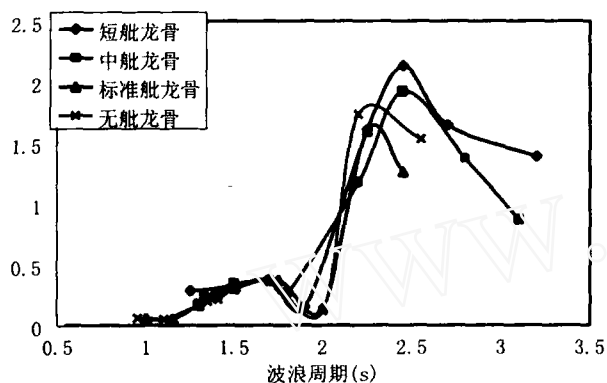


图8 标准舳龙骨大小和设置位置图

图9  $\beta=90^\circ$ 时船模升沉响应图10  $\beta=180^\circ$ 时船模升沉响应

分析上述船模升沉响应曲线,表明零航速升沉时,船舶下潜体中后部流动非常复杂。设置舦龙骨可能降低船舶迎浪时的升沉峰值比,却增加了船舶横浪时的升沉峰值比。

试验表明:船舶横浪时,下潜体中后部设置舦龙骨处局部流体流动幅度大于船舶运动幅度,更高于波幅,且相位与船舶运动方向相同。

设置上述舦龙骨约使船舶阻力增加2%左右。

#### 4 首制船“新世纪一号”实航状况

“新世纪一号”总长39.78 m,型宽15.00 m,型深6.60 m,排水量439.64 t,船舶线型中部局部做了平底处理并对其进行了优化。采用首尾两对鳍作船舶姿态自动控制。

满载试航速度为18.03 kn,单机满功率可保证直航。船舶营运航速16 kn~17 kn。经受过多次9级以上大风考验,运行情况良好。当船舶承受9级顶风航行时(波高5 m~6 m),航速仍能达到13.5 kn。

到目前为止没有因浪向不同(如尾随浪)影响船舶操纵的现象反馈。

按设计任务书要求,该船能在5级海况、7级风、波高3.5 m时安全航行;6级风、2.0 m波高时能安全进行吊笼作业。实际情况均超过了任务书的要求。船员反映:在正常航行时,横倾不大于 $5^\circ$ ,纵摇、升沉均很小;满舵全速廻转时,船舶横倾 $\sim 5^\circ$ ;当受6级~7级横风作用时,横倾角 $12^\circ\sim 13^\circ$ ;当横风达到9级时,最大横倾角为 $17^\circ$ ;船舶升沉很小,船东满意。

目前船员反映的大风浪中唯一问题是:当横向风力大于6级,船舶以营运速度16 kn~17 kn航行时,有时尾部会发生较高频率的水平筛动(横向振动)。如遇到波长 $\sim 100$  m涌浪,筛动加剧。具体表现是船员端饭菜出厨房(位于船舶后部)时站不稳,但在船中前部没有站不稳情况。

从运动分析来说是发生了横荡、垂荡和首摇的耦合运动。从有相关文献研究报导分析:在高海况下的船舶(单体船、双体船包括穿浪船)都会发生此类运动。对本船产生此耦合运动的外力成因作如下分析:

对应100 m波长的深海海浪(涌浪)主周期约8 s,船舶以16 kn~17 kn速度, $60^\circ\sim 120^\circ$ 浪向角运行时,遭遇周期约5 s( $120^\circ$ 迎浪), $\sim 12$  s( $60^\circ$ 随浪)。从波浪理论得知,在横浪作用下,表面水流除升降速度外,还有横向往复摆动,其幅值正比于波高,因此船舶必然产生相应的横荡运动,其运动幅值与船舶遭受的横向流体力、船舶质量含附连水质量(质量分布)、船舶航速有关。在压力中心与质量中心一致时,理论上不产生附加的摇首力矩。事实上,船在上述波向中行驶时,船舶两片体相当于短翼,其两片体上遭遇的波浪相位不同,并同一片体上的波浪相位也不一致,故会产生使船舶摇首的力矩。因此船舶在高海况下有筛动现象是不可避免的。如何控制和减小船舶在高海况下的筛动是今后研究课题。

从发生较高频率的水平筛动现象分析,有可能是频率较低的波浪的激励力引发了船舶结构局部振动,如果真实如此,提高结构横向刚度可能会减小筛动不适影响。

#### [参考文献]

- [1] 冯铁城.船舶摇摆与操纵[M].北京:国防工业出版社,1980.