

文章编号: 1000-4882(2008) 03-0104-008

小水线面双体船波浪设计载荷估算方法

林吉如, 石理国, 尤国红, 钱家玉
(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要

以中国船舶科学研究中心开展的200t至3500t多艘SWATH船模试验结果和美国的15艘从3000t至30000t小水线面双体船波浪载荷模型试验资料为基础,给出了小水线面双体船波浪设计载荷估算公式。用该估算公式算得的小于3000t的小水线面双体船的波浪设计载荷的估算值更加接近模型试验结果,而小于目前常用的ABS公式估算值,从而可较大地减轻结构质量和建造成本。

根据小水线面双体船受力特点,还提出了小水线面双体船在进行横向强度、扭转强度、总纵强度校核时各种载荷的组合方案和施加方式,供结构设计人员全面、合理地进行强度分析参考。

关键词: 船舶、舰船工程;小水线面双体船;波浪载荷;横向波浪力;水平扭转力矩;纵摇扭转力矩;载荷组合

中图分类号: U661.4 **文献标识码:** A

1 引言

小水线面双体船与常规单体船相比较具有优越的耐波性能(在风浪中运动量最小,失速不严重)和宽广的甲板面积,引起了造船界和船东的极大兴趣。美国、日本等国更掀起了建造小水线面双体船的热潮,从20世纪70年代开始建造了40多艘用于海洋考察、水声监听、车客摆渡以及旅游观光的小水线面双体船。我国从1994年开始开展了小水线面双体船的实用设计研究,2001年建成了第一艘200t级的海关监管艇,随后又陆续设计并正在建造最高吨位达到2500t可在全球航行的小水线面双体船,开创了我国造船界一个崭新的领域。

小水线面双体船波浪中载荷不同于单体船,此时,其主要波浪载荷为横向波浪载荷,而总纵波浪载荷下降为次要载荷。由于小水线面双体船具有较大的表面积,因此结构质量占总排水量的比例较大,通常为总质量的50%左右。而且其水线面较小,吃水对质量的变化较敏感。质量增大,吃水越深,横向载荷就越大,而且桥体底部的砰击越严重,这对于结构都是非常不利的。因此合理确定横向波浪载荷是其结构设计和校核的关键之一。

美国是最早开始研制小水线面双体船的国家,也是建造小水线面双体船最多的国家(达到20多艘),在研制过程中进行了大量的、系统的有关波浪载荷的船模试验和理论计算分析工作,以合理确定小水线面双体船的横向波浪载荷和砰击压力的量值和分布规律^[1-3]。在此基础上,美国船级社编制了小水线面双体船建造和入级指南(American bureau of shipping: guide for building and classing SWATH vessels 1990/1999简写成ABS(1999))。

中国船舶科学研究中心长期致力于小水线面双体船的理论 and 试验研究,从1994年开始先后开展了200t、600t、800t、1600t、2500t、3500t级6艘小水线面双体船的横向波浪载荷及砰击压力模型试验研

究,用于指导 200t 级海关监管艇、1600t 级沿海测量船、2500t 级远洋科学考察船 3 型实船的结构设计,积累了丰富的经验和资料^[4~9]。

在小水线面双体船设计中基本上用两种方法确定横向波浪载荷:一是运用考虑左右两个船体之间流体动力相互干扰作用的切片理论或源汇分布法来计算。但是,由于在汹涛中横向载荷和浪高之间强烈的非线性关系,在这种情况下,用上述理论方法进行预报,会使预报精度难以确定。因而通常这种预报方法只适用于在沿海或中低海情中航行的的小水线面双体船。二是针对所设计的船进行模型试验,以模型试验结果为基础进行计算。

作者以 ABS(1999)关于小水线面双体船指南为基础,以中国船舶科学研究中心开展的船模试验资料为依据,对小水线面双体船波浪载荷的估算提出了有效和合理的方法。

2 波浪载荷的确定

2.1 横向波浪力

2.1.1 横向波浪力特性

横向波浪力是小水线面双体船的主要波浪载荷,它的量值大小主要取决于船的排水量、吃水、支柱体的长度和波浪的波高、周期、浪向以及航速。

模型试验^[1,3,4,6~9]和理论计算^[2,5]结果表明:

(1) 横向波浪力与浪向的关系

横向波浪力和横向弯矩的最大值发生在零速横浪工况,并按横浪 顺斜浪 顶斜浪 迎浪/顺浪顺序递减。在顺斜浪/顶斜浪时其量值只有横浪时的一半左右,而顺浪/迎浪时其量值降到不到横浪时的 10%^[8]。

(2) 横向波浪力与浪级的关系

在低浪级时(有义波高 $< 2.5\text{m}$),横向波浪力与波高基本上呈线性递增关系,随着浪级增大,长波长的波浪成分所占的比例也越来越大,横向波浪力不再随波高线性递增,而是呈缓慢上升趋势,并且在有义波高为 $5\text{m} \sim 6\text{m}$ 时达到峰值,在这之后随着波高增加,横向波浪力和横向弯矩反而呈下降趋势(见图 1)。

(3) 横向波浪力与航速关系

不管是什么浪向,零航速时的横向波浪力均大于有航速时该航向角下的横向波浪力。

(4) 横向波浪力合力位置

横浪时横向波浪力合力作用位置大约在一半吃水位置,并假定横向波浪力从船基线至吃水线呈均匀分布。

(5) 横向波浪力沿船长分布

横向波浪力沿船长并非均匀分布,因此首尾连接桥受到的横向波浪力并不相等,它们之差构成了水平扭转力矩,即首摇分离力矩(yaw splitting moment)。

文献[1]分别采用三种横向波浪力分布形式(均匀分布、梯形分布、正弦分布),进行小水线面双体船全船结构强度分析,结果表明其对结构应力量值的影响不超过 10%。建议采用梯形分布进行全船结构强度分析,可同时计及横向波浪力和水平扭矩,并应考虑各种可能的作用方向,见图 2。

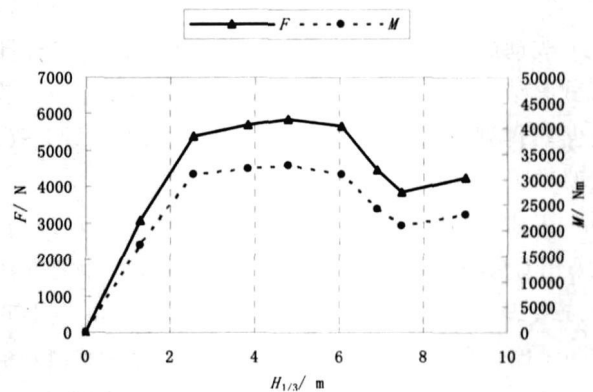


图 1 波浪载荷随有义波高变化曲线

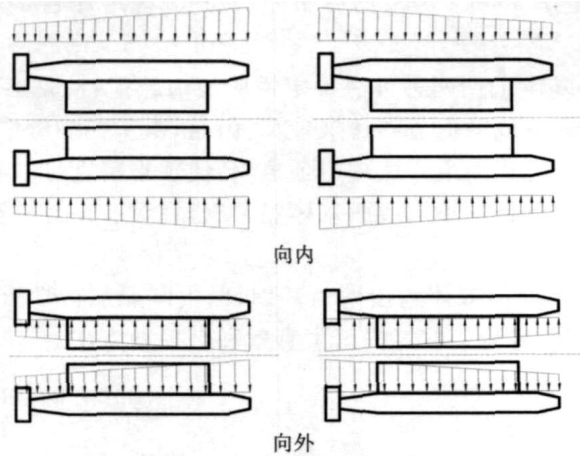


图2 小水线面双体船下体横向波浪力分布

2.1.2 小水线面双体船横向波浪力模型试验值和建议算式

按照中国船舶科学研究中心6艘小水线面双体船模型试验数据,结合美国15艘小水线面双体船横向波浪力模型试验结果,参照ABS表达形式,给出小水线面双体船横向波浪力设计值 F_s 的计算公式:

$$F_s = 9.81 D T L \Delta \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

式中

$$D = 3.2376 - 0.5452 \text{Log} \Delta \quad (2)$$

Δ 为排水量(t), $T = 1.754 \frac{d}{\Delta^{1/3}}$, d 为设计吃水(m); $L = 0.75 + 0.35 \tanh(\frac{1.65l_s}{\Delta^{1/3}} - 6.0)$; l_s 为支柱体水线长度(m),对于多支柱体小水线面双体船, l_s 是支柱体水线长度之和。

式(1)称为CSSRC(China Ship Science Research Center)估算式,与ABS(1999)估算式相比,仅仅在横向波浪力的计算中对尺度效应系数 D 的表达式作了改动,ABS(1999)尺度效应系数 D 的表达式如下:

$$\begin{aligned} D &= 1.55 - 0.75 \text{th} \left[\frac{\Delta}{11177} \right] && \text{当 } \Delta \geq 2400 \text{ t} \\ D &= 4.480 - 0.913 \log(\Delta) && \text{当 } \Delta < 2400 \text{ t} \end{aligned} \quad (3)$$

改动的指导思想是:根据小水线面双体船船模试验结果,小排水量小水线面双体船的横向波浪力船模试验结果要比按ABS(1999)计算结果要小。综合中国船舶科学研究中心和美国的船模试验结果,重新回归得到尺度效应系数 D 的表达式,替代ABS(1999)使用的二个表达式,使得计算结果更接近船模试验结果,并使计算公式更为简练。

用式(1)和ABS(1999)计算式算得横向波浪力与排水量之比 ρ 与模型试验结果示于图3和表1、表2为用CSSRC估算式估算的横向波浪力与ABS(1999)估算式算得的相应值之比。

从表2可知,排水量在1500t至10000t之间时两者差别不大于5%,基本相符。当排水量小于1500t时,式(1)得到的横向波浪力要比ABS(1999)的小,排水量越小,两者之间差别越大。式(1)算得值更接近模型试验值,且更为合理可靠。因此,采用CSSRC公式计算结果进行小排水量SWATH结构设计,可以较大地减轻结构质量,从而降低建造成本。

小水线面双体船生存海况为4级至5级浪,在这种海浪中由于遭遇危险工况的概率较小,且可调整航向以减小波浪载荷,因此应用式(1)计算横向波浪力时,可酌情将其计算结果乘以不小于0.80的系数,但必须经模型试验验证。

2.2 横向弯矩

根据小水线面双体船船模试验结果,横向波浪力合力作用位置大约在三分之一吃水处,因此当计算

点位于吃水线以上时,由横向波浪力 F_s 产生的对任一位置的横向弯矩 M_F 可表达成:

$$M_F = F_s \left(dz - \frac{d}{2} \right) \quad (4)$$

当计算点位于吃水线以上时,横向弯矩为:

$$M_F = \frac{qs}{2} dz^2 \quad (5)$$

式中 dz 为从基线至计算点的垂向距离(m), qs 为作用在支柱体和下潜体上的均布载荷(kN/m), $qs = F_s/d$ 。

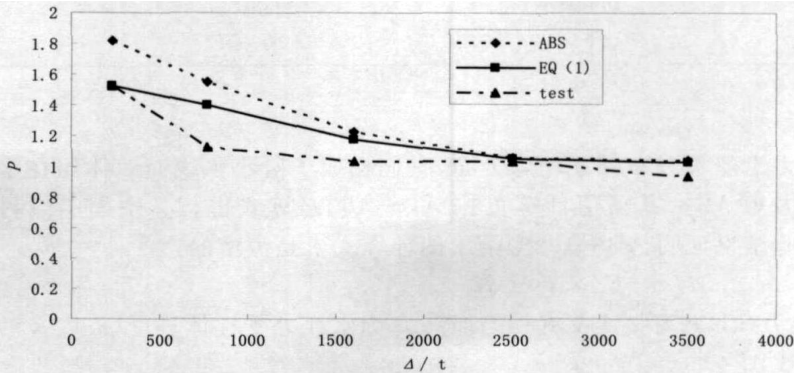


图3 横向波浪力随排水量变化

表1 SWATH 模型试验横向波浪力与 CSSRC 和 ABS(1999) 计算值的比较

船名	排水量/ t	吃水/ m	支柱体长度/ m	横向波浪力/ 排水量			计算值/ 试验值		
				模型试验	CSSRC	ABS	CSSRC	ABS	
(中国)A 船	772	4.000	54.000	1.128	1.399	1.551	1.240	1.375	
(中国)B 船	1608	5.000	52.000	1.037	1.175	1.225	1.133	1.181	
(中国)C 船	2501	6.500	53.320	1.032	1.061	1.054	1.028	1.021	
(中国)D 船	3500	8.010	57.910	0.932	1.026	1.040	1.101	1.116	
单	(美)Dav. Lab. N	3000	9.276	60.005	1.476	1.503	1.496	1.018	1.014
	(美)Dav. Lab. W	3000	9.276	60.005	1.623	1.503	1.496	0.926	0.922
支	(美)DT RC-A	3046	8.306	48.248	0.865	0.788	0.778	0.911	0.899
	(美)DT RC-81	3400	8.892	56.237	1.239	1.101	1.090	0.889	0.880
柱	(美)T-Agos 19	3500	7.543	57.940	0.896	0.968	0.960	1.080	1.071
	(美)NUC-single	3900	8.636	80.026	1.157	1.348	1.356	1.165	1.172
	(美)DT RC- N	4000	8.467	69.286	1.086	1.242	1.244	1.144	1.145
	(美)DT RC- T	4000	9.870	69.286	1.525	1.447	1.451	0.949	0.951
	(美)DTRC-I	22000	12.042	133.490	0.644	0.625	0.671	0.970	1.042
(美)DT RC-CV W	30000	14.206	152.954	0.674	0.696	0.701	1.033	1.040	
(美)DTRC-CV N	30000	14.206	152.954	0.823	0.696	0.701	0.846	0.852	
(中国)E 船	228.4	2.800	25.050	1.528	1.528	1.821	1.000	1.192	
双	(美)Kaimalino 放大型	3000	11.605	38.509	0.814	0.810	0.809	0.995	0.994
	(美)Dav. Lab. 2	3000	9.276	47.345	0.892	0.857	0.844	0.961	0.946
支	(美)Marine Ace 放大型	3000	8.528	37.322	0.533	0.586	0.586	1.099	1.099
	(美)NUC-Tandem	3900	8.636	43.947	0.464	0.543	0.544	1.170	1.172
斜支柱	(中国)F 船	570	4.400	40.386	1.743	1.758	1.856	1.099	1.065

表2 横向波浪力 CSSRC 估算值与 ABS(1999) 估算值之比

排水量/ t	横向波浪力 $\frac{CSSRC}{ABS}$ 比值	排水量/ t	横向波浪力 $\frac{CSSRC}{ABS}$ 比值
50	0.7892	1500	0.9530
100	0.8090	2400	0.9999
200	0.8335	3000	0.9915
400	0.8644	5000	0.9884
800	0.9045	7500	1.0127
1200	0.9341	10000	1.0415

2.3 水平扭矩

由于横向波浪力沿船长分布并非均匀分布,它们构成了对小水线面双体船在水线面内的水平扭转力矩,即首摇分离力矩 M_{xy} ,其量值计算可按 ABS(1999) 算式进行。中国船舶科学研究中心 1600t SWATH 船模型试验结果证明 ABS(1999) 给出的计算式子是可信的^[7]。

$$M_{xy} = F_s \times l_s \times K_t \quad (6)$$

式中 F_s 为横向波浪力(kN),可按本文式(1)计算; l_s 为水线处支柱体长度(m); K_t 为扭臂系数,见 ABS(1999) 图B.3 或本文图4。

2.4 纵向弯矩

可按 ABS(1999) 方法估算总体纵向弯矩。

中拱状态下纵向弯矩 $M_{L(HOG)}$ 可按下式计算:

$$M_{L(HOG)} = M_W + M_{SW} \quad (7)$$

中垂状态下纵向弯矩 $M_{L(SAG)}$ 可按下式计算:

$$M_{L(SAG)} = M_W - M_{SW} \quad (8)$$

式中: M_W 为纵向波浪诱导弯矩, $M_W = 0.167552 C_{WP}^{2.5} l_s^{2.5} B_s$ (kN·m); C_{WP} 为小水线面双体船的水线面系数; l_s 为支柱体长度(m); B_s 为支柱体宽度(m); M_{SW} 为静水中的纵向弯矩(kN·m),若无详细资料,可取为 $0.20M_W$ 。

2.5 纵摇扭矩

小水线面双体船左右两个片体之间不同步纵摇运动产生了对横向轴的纵摇扭矩 M_P ,其量值参考 CCS《海上高速船入级与建造规范》:

$$M_P = 0.125 \Delta a_{cg} L \quad (kN \cdot m) \quad (9)$$

式中: Δ 为排水量(t); L 为船的水线长度(m); a_{cg} 为质心处垂向加速度(m/s^2),可根据船模试验或理论计算求得,但取值不小于 $0.35g$, g 为重力加速度。

根据 DNV(1999) 规定,当 $V/\bar{L} < 3$ 时,重心处垂向加速度可按下式计算:

$$a_{cg} = 6 \frac{H_{1/3}}{L} \left[0.85 + 0.35 \frac{V}{L} \right] g \quad (m/s^2) \quad (10)$$

式中 $H_{1/3}$ 为有义波高; V 为该有义波高下船的最大航速(kn); g 为重力加速度, $g = 9.81(m/s^2)$ 。

M_P 可用均布载荷 P 下的等效值,见图5。

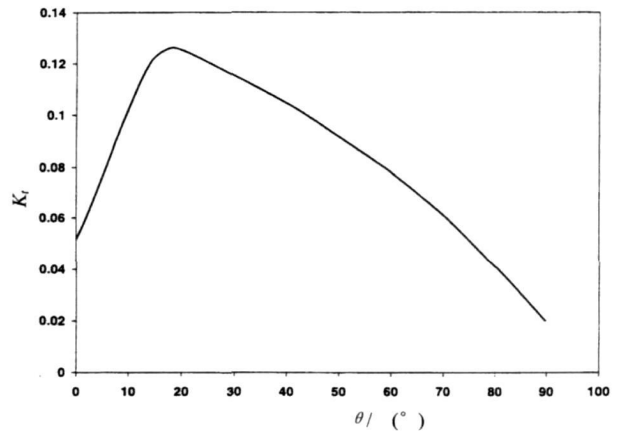


图4 小水线双体船水平扭矩扭臂系数

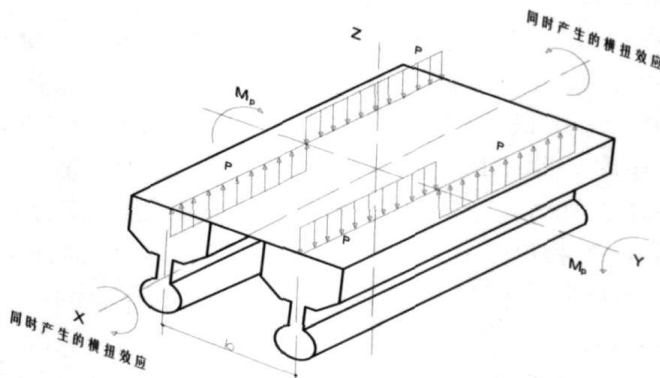


图 5 小水线双体船不对称纵摇扭矩等效均布荷载分布

3 载荷组合工况

小水线面双体船结构强度校核时载荷组合工况及加载方式见表 3。

3.1 横向强度校核时的载荷组合

横向强度是小水线面双体船最为关键的结构强度校核工况,作者选取 90° 横浪时的载荷作为校核载荷是基于零速横浪时横向波浪力最大,此时结构应力处于最危险的状态。

在横向强度校核时,除了对结构施加 100% 横向波浪力外还要施加重力、浮力以及惯性力。

表 3 载荷组合工况

强度校核工况	航向角	载荷组合	加载方式
横向强度校核	90°	1) 横向力 F_s (向内压缩) 2) 0.16 水平扭矩 M_{xy} 3) 0.65 浮力 4) 0.65 静载	1) 横向力呈梯形分布,同时生成水平扭矩; 2) 施加静水压力生成浮力; 3) 根据结构、设备实际分布情况施加体积力和节点力形成静载;
		1) 横向力 F_s (向外张开) 2) 0.16 水平扭矩 M_{xy} 3) 1.35 浮力 4) 1.35 静载	1) 横向力呈梯形分布,同时生成水平扭矩; 2) 施加静水压力生成浮力; 3) 根据具体情况施加体积力和节点力形成静载;
扭转强度校核	135°/45°	1) 0.60 横向力 F_s (向内压缩) 2) 0.80 水平扭矩 M_{xy} 3) 0.80 纵摇扭矩 M_p 4) 0.80 横摇扭矩	1) 横向力呈梯形分布,同时生成水平扭矩; 2) 纵摇扭矩用均布载荷 P 等效,同时产生横摇扭矩。
		1) 0.60 横向力 F_s (向外张开) 2) 0.80 水平扭矩 M_{xy} 3) 0.80 纵摇扭矩 M_p 4) 0.80 横摇扭矩 t	1) 横向力呈梯形分布,同时生成水平扭矩; 2) 纵摇扭矩用均布载荷 P 等效,同时产生横摇扭矩。
纵向强度校核	180°/0°	1) 波浪诱导弯矩(中拱) M_w 2) 静水弯矩 M_{sw}	根据具体情况施加节点力或压力,并保持平衡。
		1) 波浪诱导弯矩(中垂) M_w 2) 静水弯矩 M_{sw}	根据具体情况施加节点力或压力,并保持平衡。

3.2 扭转强度校核时的载荷组合

当小水线面双体船出于斜浪状态时,它不仅受到横向波浪力和水平扭矩作用,而且由于二个片体摇摆运动的不同步,还会受到纵摇扭矩和横摇扭矩。在 ABS(1999)中只考虑横向波浪力和水平扭矩,而 DNV 双体船结构强度校核中则考虑横摇和纵摇扭矩。把 ABS 和 DNV 两者结合起来,同时考虑上述横向波浪力和三个扭矩的联合作用。鉴于横向波浪力起主导作用,为了减少计算工作量,本文在扭转强度校核时不选取水平扭矩最大时的航向角 18° ;也不选取纵摇扭矩最大时的 60° ;而是选取 45° 航向角进行扭转强度校核,此时水平扭矩和纵摇扭矩均为最大值的 80%,横向波浪力为最大值的 60%。218t、1600t、2500t 三艘小水线面双体船扭转强度校核表明这种取法是合适的,不会对扭转强度构成低估。

3.3 纵向强度校核时的载荷组合

由于小水线面双体船船长与船宽之比较单体船小得多,纵向强度不会太突出。对于船长小于 50m 的小水线面双体船通常不必进行总纵强度校核,对于大于 50m 的小水线面双体船,则需对纵向强度进行校核。

4 结 论

本文根据国内外 21 艘从 200t 至 30000t 小水线面双体船模型试验资料,给出了小水线面双体船波浪设计载荷计算公式及强度校核时载荷组合工况,为合理、可靠地进行结构设计提供了科学的依据。

参考文献:

- [1] SIKORA J P and DINSENBACHER A L. SWATH structure: navy research and development application[J]. Marine Technology, 1990, 27(4): 211-220.
- [2] REILLY E T, SHIN Y S, KOTTE E H. A prediction of structural load and response of a SWATH ship in waves [J]. Naval Engineers Journal, May 1998: 251-264.
- [3] SIKORA J P. Design algorithms for primary and secondary loads on SWATH ships[J]. Naval Engineers Journal, May 1995, 121-127.
- [4] 林吉如,钱家玉,石理国. 海上石油交通船波浪载荷模型试验[R]. CSSRC 科技报告, 1994.
- [5] 钱家玉,林吉如,李琪华. SWATH 船在波浪中的波浪载荷及运动分析[A]. 第二届海事技术会议研讨会文集[C], 2000. 6, (8): 1-7.
- [6] 石理国,钱家玉,林吉如. 228t 海关监管船波浪载荷模型试验[R]. CSSRC 科技报告, 2000.
- [7] 钱家玉,林吉如. 斜支柱小水线面双体船波浪载荷模型试验[R]. CSSRC 科技报告, 2001.
- [8] 林吉如,钱家玉,尤国红,周德才. 1600t 小水线面双体船波浪载荷模型试验和分析应用[R]. CSSRC 科技报告, 2004. 6.
- [9] 林吉如,钱家玉,尤国红,周德才. 2500t 小水线面双体船波浪载荷模型试验[R]. CSSRC 科技报告, 2004. 6.

The Method for Evaluating the Design Wave Loads on SWATH Ship

LIN Ji-ru, SHI Li-guo, YOU Guo-hong, QIAN Jia-yu
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract

formula was provided in this paper to evaluate the design wave load of SWATH ship. The formula gives more accurate design wave load which is close to the model test results in the case of lower displacement less than 3000t. Consequently the hull structure weight and fabrication cost will be reduced greatly.

Based on the mechanical characteristic of SWATH ship, load combinations and loading manners are also presented in this paper for transverse strength analysis, torsion strength analysis and overall longitudinal strength analysis of SWATH ship.

Key words: ship engineering; SWATH; wave-induced loads; lateral force; horizontal moment; pitching connection moment; loads combination

作者简介

林吉如 男, 1939 年生, 研究员。主要从事船舶与海洋结构物设计与制造方面的研究工作。

石理国 男, 1938 年生, 研究员。主要从事船舶与海洋结构物设计与制造方面的研究工作。

尤国红 男, 1969 年生, 高级工程师。主要从事船舶与海洋结构物设计与制造方面的研究工作。

钱家玉 女, 1944 年生, 高级工程师。主要从事船舶与海洋结构物设计与制造方面的研究工作。