

文章编号:1009-3486(2005)02-0043-06

高速三体船研究综述

卢晓平, 郇 云, 董祖舜

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 从水动力理论、模型试验和船型优化等方面对高速三体船的研究进展进行了综述, 阐述了高速三体船的应用前景, 归纳评述了有关的研究成果和尚存在的问题, 并提出了关于这种新船型的若干研究方向。

关键词: 船舶水动力; 三体船; 模型试验; 船型优化

中图分类号: U674.951

文献标识码: A

A research summary on high speed trimaran

LU Xiao-ping, LI Yun, DONG Zu-shun

(College of Naval Architecture and Power, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A summary on the research progress of the high speed trimaran is made, which contains 3 parts such as the hydrodynamic research, model test and ship form optimization, and some research subjects about this new ship form are put forward.

Key words: ship hydrodynamics; trimaran; ship model test; ship form optimization

近年来,特种排水型高性能船型的研究趋于活跃,如深 V 型船、小水线面双体船以及穿浪双体船等都是研究和实用较多的船型,还有一种新船型高速三体船引起了人们很大的关注。高速三体船水下部分由中体(主船体)和两个小侧体(辅船体)组成,3 个船体均为细长片体,中体比普通单体船更加瘦长(L/B 大约在 12 到 18 之间),侧体排水量不超过中体排水量的 10%,连接桥将侧体与中体连接成一体。这种船型构造使高速三体船的兴波阻力小,2 个侧体又能提供足够的稳性,连接桥还具有提高总纵强度的功能,同时还有利于形成宽阔甲板面,为设备布置提供更大空间。此外,该船型也具有优良的耐波性,尤其是可避免双体船的“扭摇”(横摇与纵摇的耦合摇摆)与“急摇”(短周期的横摇),并可明显减小纵摇和升沉。高速三体船用作军船还有防护能力、破损稳性以及隐蔽性好,利于武器系统分散布置、模块化设计和直升机操作等优点。尽管高速三体船与常规单体船相比也有制造工艺复杂、制造成本高的缺点,但鉴于在主要技战术性能方面的优势,该船型适合用作多种水面舰船,如高速护卫舰、驱逐舰、导弹艇、猎潜艇等,甚至有人认为高速三体船是未来航母的潜在船型,其应用前景相当广阔。

20 世纪 70 年代原苏联就对三体船的深、浅水阻力进行了理论研究,随后国外又发表了一些三体船方案分析和模型试验的文献。90 年代这种新船型开始得到厂商的青睐,有少量实船付诸营运,如爱尔兰的三体船“冒险家”号。从 90 年代中期开始,该船型受到国外军方重视,美、英及北约其它成员国的海军对该船型都产生了兴趣。英国在此期间开始投入了大量资金对军用三体船进行研究与设计论证,于 2000 年建造出了 98.7 m 长的三体试验舰“RV 特里顿”号(“海神”号)(见图 1)。该试验舰是按护卫舰的概念以 2/3 的比例缩小设计建造的,下水后进行了广泛的实船试验,目前实船试验仍在进行。英国“未来水面舰船(FSC)计划”将三体船作为第一候选船型,并计划到 2013 年以 FSC 替代 22 型、23 型护卫舰。

收稿日期:2004-10-06; 修订日期:2004-10-30

作者简介:卢晓平(1957-),男,教授,博士。

此外,意大利对高速三体船也进行了较为系统的理论计算和模型试验研究,研究内容包括片体布局优化、兴波阻力特性、波浪中的运动特性以及船体结构强度等。北朝鲜则对 2 500 t 级的高速三体船的片体布局和快速性进行了研究,采用了模型试验、理论计算与分析的方法,研究船型与护卫舰相近。美国军方则提出了 47.7 kn 航速“蓝骑士”号巡逻艇、30 kn 以上航速驱护舰,以及 32 kn 航速 25 700 t 的“海妖”号大型战舰构想,并长期派员参与英国“海神”号实船试验。法国、日本、加拿大也表现出了对三体船的兴趣。

在国内,近几年高速三体船的研究也开始受到重视。20 世纪 90 年代末至本世纪初哈尔滨工程大学、海军工程大学、上海船舶科学研究所和上海交通大学几乎同时对高速三体船的船型与水动力进行了研究,初步了解到其兴波阻力、耐波性方面具有较大优越性。

当代三体船的研究已有 20 多年的历程,直到 90 年代中期以后高速三体船的研究才取得了较大发展。这期间国内外高速三体船的研究主要集中在水动力理论、模型试验、船型优化以及概念设计等方面,也有少量关于结构强度方面的文献,如文献[1]根据一系列假设,将双体船的剪力和扭摇力矩公式作适当变换使之适合于三体船的强度计算,通过计算实例指出三体船的扭摇力矩可以忽略,剪力和弯矩是成比例的。

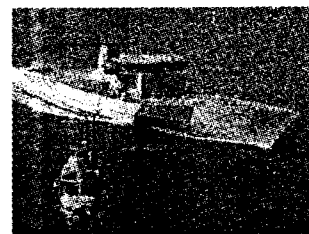


图 1 “RV 特里顿”号
三体试验舰

1 高速三体船水动力理论研究进展

近 10 年来,以单体船水动力理论研究方法为基础的高速三体船水动力理论研究有了一定的进展,主要集中在阻力计算方法、耐波性以及稳性计算方法建立等方面。

1.1 阻力计算方法研究

高速三体船由于各片体长宽比 L/B 较大,线性兴波阻力理论用于高速三体船可望获得较好的效果。而摩擦阻力可利用 ITTC-57 公式计算确定,形状阻力采用“1+K”法确定。除兴波阻力倾向于采用理论方法计算外,其它阻力处理方法总的来说与常规船型是类似的。目前,较多应用于高速三体船中的线性兴波阻力理论有薄船理论和细长体理论,计算兴波阻力的算例主要是片体为数学船型的三体船,如 Wigley 船型、OHF 船型、日本学者 Takatada 等提出的卵型船^[2~4],这或许是研究者考虑到片体形状设计的复杂性,以及为了便于和试验资料进行对比的缘故。文献[4]根据薄船理论的单体船兴波阻力计算公式,利用科钦函数的线性叠加原理,推导了三体船的兴波阻力计算公式,如以下各式所示:

$$R_w = \frac{8\rho g^2}{\pi U^2} \left(\frac{BT}{2}\right)^2 \int_0^\infty [(I_0 + I_1 + I_2)^2 + (J_0 + J_1 + J_2)^2] \frac{(u^2 + 1)^2}{\sqrt{u^2 + 2}} du = R_{w_0} + 2R_{w_1} + R_{w_{012}} + R_{w_{12}} \quad (1)$$

$$R_{w_0} = \frac{8\rho g^2}{\pi U^2} \left(\frac{BT}{2}\right)^2 \int_0^\infty (I_0^2 + J_0^2) \frac{(u^2 + 1)^2}{\sqrt{u^2 + 2}} du \quad (2)$$

$$R_{w_1} = R_{w_2} = \frac{8\rho g^2}{\pi U^2} \left(\frac{BT}{2}\right)^2 \int_0^\infty (I_1^2 + J_1^2) \frac{(u^2 + 1)^2}{\sqrt{u^2 + 2}} du = \int_0^\infty (I_2^2 + J_2^2) \frac{(u^2 + 1)^2}{\sqrt{u^2 + 2}} du \quad (3)$$

$$R_{w_{012}} = \frac{8\rho g^2}{\pi U^2} \left(\frac{BT}{2}\right)^2 \int_0^\infty 2(I_0 I_1 + J_0 J_1) \frac{(u^2 + 1)^2}{\sqrt{u^2 + 2}} du \quad (4)$$

$$R_{w_{12}} = \frac{8\rho g^2}{\pi U^2} \left(\frac{BT}{2}\right)^2 \int_0^\infty (I_1 I_2 + J_1 J_2) \frac{(u^2 + 1)^2}{\sqrt{u^2 + 2}} du \quad (5)$$

式中: R_{w_0} 表示主船体自身的兴波阻力; R_{w_1} ($=R_{w_2}$) 表示各侧体自身的兴波阻力; $R_{w_{012}}$ 表示各侧与主船体相互干扰产生的兴波阻力; $R_{w_{12}}$ 则表示两侧体相互干扰产生的兴波阻力; I_0 、 J_0 、 I_1 、 J_1 以及 I_2 、 J_2 则

表示 3 个船体各自的科钦函数。

此外,文献[5]还通过薄船理论求解主体和侧体的波谱函数进而获得三体船的兴波阻力。文献[6]则基于 Noblesse 的新细长体理论^[7]保留水线积分,且引入限制系数保证基元波波陡有上限。除上述线性兴波阻力理论外,国外也有人采用非线性理论方法处理三体船兴波问题,其中大都采用是 Rankine 源方法,如文献[8,9]分别用 Kim 提出的改进的 Dawson 型^[10]方法对 20 000 t 和 2 500 t 的概念设计船进行计算,结果与试验资料大体一致。也有文献[11]采用波形分析中的纵切法计算高速三体船的波形阻力。

上述各方法所得计算结果偏差不大,但其准确性尚有待进一步验证。作者认为从算法结构上说,线性兴波阻力理论计算公式较为简洁,便于发展为船型优化方法,而阻力的预报则可考虑采用非线性兴波阻力理论方法,并按“1+K”法计算粘性阻力,而 K 的确定方法有待深入研究,其影响因素似乎比单体船复杂。

1.2 耐波性研究

国内外高速三体船耐波性理论研究的文献还不多见。意大利对高速三体船的横摇运动理论计算模型进行了研究^[12],其片体取为 Wigley 船型,理论模型是假设在高速三体船横摇过程中主船体如单体船一样作横摇运动,而两小侧体则伴随着作升沉运动。从物理概念上说这种理论模型与高速三体船实际的横摇运动是较为接近的,其理论计算结果与模型试验结果的比较亦在一定程度上验证了该理论模型的有效性。英国对高速三体船在波浪中的运动与波浪载荷进行了理论研究^[13],采用了三维脉动源、三维移动脉动源、三维脉动源与水弹性理论结合等 3 种理论模型进行了数值计算,据称数值计算结果的比较表明,三维移动脉动源方法更适用于高速三体船。在国内,上海船舶科学研究所与上海交通大学对三体船的耐波性进行了理论研究。从定性上来讲,与单体船相比三体船侧体的存在可以增大横摇阻尼,以有效地控制三体船的横摇幅值,国内的研究结果也证明了这一点。此外,文献[14]以模型横摇试验得到的衰减曲线为基础,根据 Bass 和 Haddara 提出的线性加平方的能量法估算横摇阻尼系数,并用于对三体船的横摇运动特征的分析 and 预报,通过理论分析和计算对比表明,在摇幅很小和高速运动状态下,用线性方法进行三体船横摇运动预报是可行的。与国外文献[13]的研究方向相近,本文作者在文献[15]中进行了将三维移动脉动源方法用于高速三体船纵摇与升沉理论预报的探讨,数值计算中采用的片体形状为几何相似的双向抛物线船形(一种 Wegley 船形),坐标系与试算单元划分如图 2、3 所示,计算结果初步验证了三维移动脉动源方法用于高速三体船纵摇与升沉理论预报的可行性。国内还有文献[16]将 2.5 维方法用于高速三体船的耐波性预报,并将计算结果与切片法和试验结果进行了比较,表明 2.5 维方法对在规则波(正弦波)中高速迎浪运动的多体船可获得满意的结果。所谓 2.5 维方法,如文献[16]所述,就是采用三维自由面条件与二维控制方程作为数学模型的理论方法。如前所述,定性上说高速三体船可以避免双体船的“扭摇”与“急摇”现象,但高速三体船与双体船耐波性对比研究的文献还不多见,这方面的研究有待于加强。

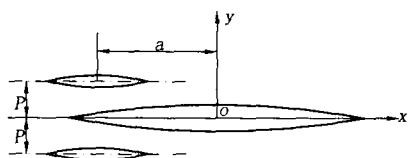


图 2 双向抛物线船型坐标系



图 3 单元划分

总的来说高速三体船的耐波性具有优势,但高速三体船的耐波性理论研究应进一步加强,需研究的问题包括高速三体船与双体船和单体船耐波性的比较,以及耐波性理论计算方法的研究,本文认为计入非线性影响的三维面元法用于高速三体船耐波性计算较为适宜,可视为发展方向。

1.3 稳性研究

三体船的稳性由侧体带来的水线面惯性矩增加来保证。文献[17]推导了三体船的复原力矩计算公式,研究表明三体船的横稳性主要受到侧体跨距和排水量的影响,一个远离中体的侧体与一个靠近中体

的较大侧体对稳性的影响是一致的,应当通过改变侧体尺度和横向跨度的调节以满足初稳性高和大倾角稳性的要求,并要采用合适的侧体设计以避免因横摇时一侧片体出水面而引起静稳性曲线突变. 研究结果还显示,三体船能够在克服双体船横摇性能不好的缺陷的同时获得较大初稳性,而增大跨距对改善初稳性起决定作用. 尽管如此,三体船的稳性研究总的来说还较为薄弱,作者认为,各种三体船稳性规律及其计算方法研究和计算程序的设计是需要进一步研究的课题.

2 高速三体船模型试验研究进展

模型试验方法本身是研究船型及其水动力问题的一种重要方法. 此外,三体船作为一种新船型,理论方法的计算结果要与模型试验或实船试验结果互相比较验证. 从国内外至今发表的文献看,高速三体船的模型试验主要集中在阻力试验和耐波性试验研究 2 个方面.

文献[18,19]通过研究指出,三体船主体和侧体之间的散波干扰较为明显,主体和侧体之间的狭窄水域内的水波多次反射、叠加,因此船波相当复杂,使得兴波干扰情况也比较复杂. 通过模型试验可以对片体之间的兴波干扰情况进行研究,将总阻力分解为“无干扰阻力”和“干扰阻力”2 部分. “无干扰阻力”即为主体和 2 个侧体的单体阻力总和;总阻力通过模型试验得到. 根据 Froude 换算法,阻力分为摩擦阻力和剩余阻力 2 部分,将总阻力和“无干扰阻力”中的试验值扣除相应的摩擦阻力成分,再进行无因次化和对比分析就可以得到干扰阻力系数. 对某一片体形状三体船模型试验研究表明,不同侧体位置干扰阻力系数的趋势有所不同^[4,18,20]. 另外,一般的研究表明模型试验得到的片体干扰阻力规律总体上与理论计算结果具有可对比性.

据高速三体船模型阻力预报实船总阻力可以采用工程中常用的 Froude 法和 ITTC-78 法. 文献[21]显示,对高速三体船而言,当 $F_n = 0.7 \sim 1.0$ 时, Froude 法要比 ITTC-78 法为优,因为在该范围内,前者几乎不存在尺度效应问题,而后者缩尺比为 10 的船模要比缩尺比为 20 的船模的兴波阻力大 10%;而当 $F_n < 0.6$ 时,则有相反结论,因为 Froude 法在该范围内有较大尺度效应,而采用 ITTC-78 法可以消除部分尺度效应. 作者认为这 2 种换算方法可以统一表示为“ $1+K$ ”法,只不过其中的形状因子 K 应取为与 F_n 有关的参数,事实上 Froude 法即相应于在“ $1+K$ ”法中 K 取为 1,不难推知 K 的数值应随 F_n 增大而减小.

众所周知,根据静水中的自由横摇试验记录的自由横摇衰减曲线可以得到三体船的线性横摇衰减系数,进而求出横摇阻尼系数;通过船模在规则波中的零速横摇试验和迎浪试验的测量数据可以换算得到实船在规则波中的横摇、纵摇、垂荡和阻力增加频率响应曲线. 基于上述耐波性试验的基本原理,国内文献[14]的高速三体船模型耐波性试验研究得出了如下初步结论:在三体船自由横摇初始时,非线性阻尼项为阻尼主要成分,随着横摇逐渐衰减,非线性项逐渐减小;在低速时,阻尼非线性较明显,随着航速增加,阻尼非线性作用逐渐减弱,线性阻尼成为主要成分;非线性方法等效线性化和线性方法的计算结果同试验结果都比较吻合;侧体横向位置对横摇阻尼有明显影响,横向间距增大时,横摇阻尼也随之迅速增大,横摇衰减加快;布置在侧体内侧舭部的舭龙骨对横摇阻尼有显著影响(见表 1);随着航速增加,横摇阻尼显著增大,横摇幅显著减小. 另外,国内文献[22]的研究则表明,高速三体船的纵摇与升沉幅值也可以得到显著减小. 国外文献[11,12]也对高速三体船的耐波性进行了初步的、常规的模型试验研究,国外这方面的工作还可见文献[19]的报导. 在高速三体船耐波性模型试验研究方面国内外的研究进展相差并不显著.

表 1 三体船零速横摇运动统计特性

波长/m	单位波高有义横摇/(°)·m ⁻¹		横摇角减小幅度/(°)
	有舭龙骨	无舭龙骨	
39.0	9.561	12.525	23.7
56.1	8.742	11.534	24.2
76.4	7.276	9.610	24.3

作者认为高速三体船阻力和耐波性的模型试验研究有待于进一步加强,一方面目前的阻力和耐波

性理论计算结果要与模型试验结果比较以相互验证各自的有效性;另一方面片体布局与船形优化得到的降阻减摇效果也有待于模型试验结果进一步验证.至于船模阻力到实船阻力的换算方法,本来就是常规船型阻力理论中未完全解决的问题,对高速三体船而言,这个问题更有待于进一步研究.当高速三体船处于超高速航行状态(实船航速大于 45~60 kn)时,会出现新的阻力成分,如喷溅阻力,这种喷溅阻力与滑艇的喷溅阻力规律将有所不同,需通过模型试验与理论研究相结合的方法对这种阻力进行系统的研究.

3 高速三体船片体布局优化研究进展

一般来说,通过合理的侧体布置,可减阻或减小片体干扰带来的阻力增加,但要通过片体间有利的兴波干扰来实现大幅度的降阻是比较困难的.从目前的研究文献看,片体布局优化的目标主要是减阻,且大都是采用线性兴波阻力理论方法,也有采用模型试验方法的,该领域的研究相对较多.高速三体船船型优化的内容主要包括侧体的位置优化、侧体的主尺度选择、侧体船型优化以及与侧体排水体积比例确定等.也有文献[20]研究了侧体纵向位置不对称布置对兴波阻力的影响,结果表明这种侧体位置并不能带来阻力性能上的优势,再考虑到设计和建造上的难度,作者建议不采用这种设计.

对高速三体船而言,侧体的偏移位置包括纵、横 2 个方向的位置.纵向位置有利的取值范围通常是从船舭到尾部.片体横向间距取值范围应当适中,取值过小,片体之间多为不利干扰,且不利于充分发挥三体船的优势;取值过大,在舰船建造与使用上也会受到限制.当前已采用过的片体布局优化算法有枚举法和遗传算法.遗传算法收敛较快,在参数较多、搜索空间较大时,具有较大优越性;文献[4]在枚举法计算结果基础上绘制等值线图,反映了兴波阻力整个侧体位置范围内的分布情况,从而给出使兴波阻力小的侧体位置范围,取得了不错的效果,其中一高速三体船方案在 $F_n = 0.5$ 时的兴波阻力等值线图如图 4 所示.另有研究表明,不同 F_n 下三体船侧体最优位置差别较大,且在低 F_n 下具有较好兴波阻力性能三体船在高 F_n 时兴波阻力性能可能会恶化;反之,在高 F_n 下具有较好兴波阻力性能三体船在低 F_n 时兴波阻力性能一般却不会恶化,因此建议设计时采用高 F_n 下的最优侧体布局.而对主船体波形、侧体纵向位置以及高速三体船剩余阻力(兴波阻力)曲线间关系的研究则显示出,侧体恰当的纵向位置位于主船体兴波的波谷附近,例如有研究显示,超高超($F_n \geq 0.72$)时,当侧体位于主船体舭部时产生有利干扰而使兴波阻力相对较小^[8,19];当兴波阻力出现峰值($F_n = 0.4 \sim 0.5$ 附近)时,侧体最优位置在主船体艉部^[20].表 2 给出了某三体船模型的 F_n 、侧体纵向位置与剩余阻力系数的关系,从中可看出侧体纵向位置对剩余阻力系数有不小的影响,且这种影响又与 F_n 显著相关^[18],其中 b 是主船体的中纵剖面到侧体的中纵剖面的距离, l 为主船体的舭横剖面到侧体的舭横剖面的距离.

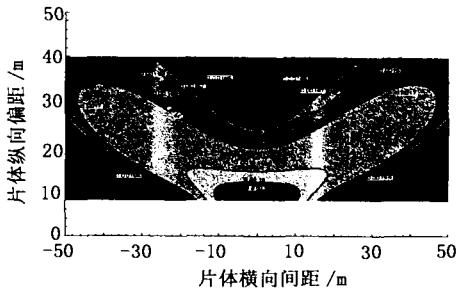


图 4 $F_n = 0.5$ 时的兴波阻力等值线图

表 2 某三体船模型剩余阻力系数(船模水线长 $L_m = 3.25$ m, 横向间距 $b = 0.238$ m)

F_n	$C_r \times 10^3$	
	纵向位置 $l = 0.331$ m	纵向位置 $l = 0.981$ m
0.34	1.093	0.921
0.48	1.811	1.511
0.61	1.633	1.280
0.73	1.565	1.078

侧体的主尺度主要包括长度和排水量等.文献[20]指出,对船形参数与主船体相近的侧体,若侧体长度小于主船体长度 1/10,侧体对三体船兴波阻力影响可以忽略;若侧体长度增大到主船体长度 1/3 以上,低速阶段阻力性能会显著变差.所以,在综合了位置优化的作用之后,还需考虑侧体排水量、排水

量长度系数和宽吃水比等参数的影响. 综合侧体各几何参数的影响可知: 侧体排水量长度系数、宽吃水比以及纵向位置对阻力性能有较大影响, 设计时应综合考虑; 随着 F_n 的增大, 经位置优化后的侧体排水量长度系数逐渐减小, 但宽吃水比保持在 0.4 左右. 需说明的是, 文献[20]所得上述初步定性结果计入了侧体主尺度的变化会对摩擦阻力的影响.

至于侧体形状的优化问题, 文献[9]在对内凸(inboard)、对称(symmetry)和外凸(outboard)3 种形状下的阻力性能研究后发现对称形状的侧体阻力性能最优. 此外, 关于侧体形状优化设计的文献就不多见了.

总而言之, 国内外在高速三体船片体布局的优化方面做了一定的工作, 而各片体船型优化的研究就显得薄弱了. 作者认为片体布局与片体船形的优化研究都是值得继续深入研究的课题, 可以将当今兴波阻力理论研究成果与当今工程优化理论相结合建立高速三体船船型优化设计方法.

4 结论与展望

4.1 结论

高速三体船近 10 年来备受关注, 一般认为在相同排水量时其总体性能优于单体船和双体船, 有广阔的军用、民用前景, 本文主要结论如下:

(1) 在低速段三体船阻力性能并没有优势; 但在高速段($F_n=0.6\sim 1.0$)时, 高速三体船相对单体船或双体船具有明显优势.

(2) 在耐波性和稳性方面高速三体船一般也有较大优势, 尤其是高速三体船能够避免双体船的“摇摆”与“急摇”.

4.2 展望

为促进高速三体船的实际应用, 也有不少课题需进一步研究, 如:

- (1) 开展对相应于 45~60 kn 实船航速的超高速三体船研究;
- (2) 采用已有的或新的工程优化方法对高速三体船进行片体布局与船型优化研究;
- (3) 以三维面元法开展高速三体船在波浪中的运动研究, 并进一步开展高速三体船兴波阻力以及粘性阻力计算方法的研究;
- (4) 展开高速三体船的军事应用、船体结构和总布置方面的研究.

参考文献:

- [1] Coppola T. The design of trimaran ships: general review and practical structural analysis [A]. PRADS [C]. Shanghai: Elsevier Science Ltd., 2001.
- [2] Yang C, Noblesse F, Lohner R, *et al.* Practical CFD applications to design of wave cancellation multihull ship [A]. 23th Symposium on Naval Hydrodynamics [C]. De Reuil, 2000.
- [3] Takarada N. R&D of a displacement type high speed ship (parts 2, resistance and propulsion) [A]. Fast'93 [C]. Yokohama, 1993.
- [4] 卢晓平, 潘雨村. 高速三体船兴波阻力与片体布局优化研究 [J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2004, 19(3): 347—354.
- [5] 李培勇, 袁泳铭, 顾敏童, 等. 超细长三体船阻力计算研究 [J]. 舰船工程, 2002, (11): 10—12.
- [6] 韩开佳, 黄德波. 三体船的兴波阻力计算 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(2): 6—10.
- [7] Noblesse F. A slender-ship theory of wave resistance [J]. Journal of Ship Research, 1987, 27: 13—33.
- [8] 张亚萍译, 严保兴校. 三体船型的功率特性 [J]. 国外舰船工程, 2002, (4): 1—5.
- [9] Kang K J. Hull form development and powering performance characteristics for a 2500 ton class trimaran [A]. PRADS [C]. Shanghai: Elsevier Science Ltd., 2001.

(下转第 52 页)

3 结束语

简化模型与三维有限元模型所计算出的“门形”振动模态与固有频率值非常接近,“门形”振动是 SWATH 最重要的总振动模态.因此,本文的算例证实文中所建立的简化模型能方便地求出 SWATH 的总振动模态.其方法简便,计算工作量不大,适合在船舶的初步设计阶段使用.

参考文献:

- [1] 顾敏童. 船舶设计原理 [M]. 上海:上海交通大学出版社,2001.
- [2] 金咸定,赵德有. 船体振动学 [M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
- [3] 陈志坚,袁建红. 小水线面固有总振动与强度 [A]. 第八届中国国际船艇展暨高性能船学术报告会论文集 [C]. 上海:英国皇家造船师学会,上海船舶工业行业协会,2003.
- [4] 杨传武,陈志坚. 用混合有限元模型分析船体振动问题研究 [J]. 海军工程大学学报,2004,16(2):79—82.
- [5] 斯曼斯基 Ю А. 船舶结构力学手册(第 3 卷) [M]. 孙海涛 译. 上海:上海科学技术出版社,1980.

(上接第 48 页)

- [10] 卢晓平,程明道. 高速方尾水面舰船兴波问题计算方法研究 [J]. 海军工程大学学报,2002,14(5):8—15.
- [11] Bertorello C. Trimaran model test results and comparison with different high speed craft [A]. PRADS [C]. Shanghai:Elsevier Science Ltd., 2001.
- [12] Francescutto A. On the roll motion of a trimaran in beam waves [A]. The 11th International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE 2001) (Vol. III) [C]. Stavanger,2001.
- [13] Bingham A E, Hampshire J K, Miao J K, *et al.* Motions and loads of a trimaran travelling in regular waves [A]. 6th International Conference on Fast Sea Transportation [C]. Southampton,2001.
- [14] 李培勇,冯铁城,裘泳铭. 三体船横摇运动 [J]. 中国造船,2003,44(3):25—30.
- [15] 卢晓平. 高速三体船在波浪中的纵向运动研究 [A]. 第九届中国国际船艇展暨高性能船舶学术报告会论文集 [C]. 上海:英国皇家造船师学会,上海船舶工业行业协会,2004.
- [16] Duan W Y, Huang D B, Hudson D, *et al.* Comparison of two seakeeping prediction methods for high speed multi-hull vessels [A]. 6th International Conference on Fast Sea Transportation [C]. Southampton,2001.
- [17] 李培勇,裘泳铭,顾敏童,等. 多体船型完整稳性计算 [J]. 上海交通大学学报,2002,36(11):1222—1225.
- [18] 李培勇,裘泳铭,顾敏童,等. 三体船阻力模型试验 [J]. 上海交通大学学报,2003,37(8):6—12.
- [19] 李若虹,华煜群. 系列多体船的最优船体间距 [J]. 国外舰船工程,1999,(9):10—15.
- [20] 李江华,黄德波. 三体船构型与兴波阻力关系研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报,2002,23(2):26—32.
- [21] Begovic E. Calm water experimental research on geosims of trimaran: hydrodynamic characteristics and model-ship correlation [A]. PRADS [C]. Shanghai: Elsevier Science Ltd, 2001.
- [22] 李培勇,裘泳铭,顾敏童,等. 超细长三体船耐波性试验研究 [J]. 海洋工程,2002,20(4):1—10.