第49卷第3期
2009年5月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol.49, No.3
May 2009

文章编号：1000-8608(2009)03-0396-05

穿浪双体船阻力性能预报与模型实验分析

张晓阳[1]， 李铁骊*[1,2]， 林 焰[1]

（1.大连理工大学 船舶工程学院，辽宁 大连 116024；
2.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：对自行设计开发的大型穿浪双体船WPC96(1 800 t级排水量)的阻力性能进行了理论预报与实验分析研究.将Michell积分推广为一般双体船兴波阻力计算公式，利用Michell积分的复积分形式进行数值编程计算，对该穿浪双体船船型在一定速度范围内的阻力性能有较高理论预报精度.在此基础上，通过改变片体间距，在理论计算和实验观测基础上研究了穿浪双体船两个片体间的兴波干扰.计算所得到的结果与实验数据基本吻合，证明该方法可以应用于穿浪双体船的阻力性能预报.

关键词：穿浪双体船；兴波阻力；模型实验

中图分类号：U674.951 **文献标志码**：A

0 引 言

穿浪船在其发展过程中技术性能经历了多次变化，根据具体要求，其性能不断提高以满足客户要求.1983年INCAT公司最初建造的实验艇实际上相当于将双体船的水线稍上部分削去，并在其上安装两个支柱与上层建筑连接.1986年INCAT对上述方案进行了修改，将每侧前后两支柱改为单片支柱，片体与支柱光顺地连在一起；上层主船体底部改成V形等，使之更适于穿浪航行.后来又在船首部加装自控减摇鳍，将片体与主体在首部的弹性连接改为刚性连接.其他公司如澳大利亚多体船公司AMD在澳大利亚和荷兰水池进行了WPC船型系列实验研究，日本NKK公司开展了薄壁连接桥的WPC船型研究，设计航速达到45 kn[1].

国内对WPC船的研究开始于20世纪80年代末，哈尔滨船舶工程学院开展了WPC船关键技术的研究工作，对该船型快速性、耐波性进行了理论与实验研究，开发出多重性能更优良的新型穿浪船，并对WPC船在军用及民用方面进行了总体方案的可行性论证.90年代，又引进了AMD公司有关WPC船的技术资料进行消化吸收，并承接AMD公司委托的WPC船实验任务[2].近年，大连理工大学也开发了自己的WPC船型并进行了一系列的水动力实验和理论研究.赵连恩等提出用兰金(Rankine)体的波幅函数代替实际船型的波幅函数，以确定双体船片体间的阻力干扰因子，从而计算得到双体船的兴波阻力[3].马健等利用基于面元法的船舶兴波阻力与兴波波形的势流计算方法，将CFD与CAD技术联系在一起，数值计算高速穿浪双体船的兴波阻力与兴波波形[4,5].本文利用Michell积分的复积分形式对穿浪双体船在一定速度范围内的兴波阻力及两片体间兴波干扰进行数值计算，并将计算结果与船模实验数据进行比较分析，以证明该计算方法的精确度.

1 穿浪双体船的阻力性能理论分析

1.1 穿浪双体船船型参数对阻力性能的影响

1.1.1 片体的长度排水体积系数和长宽比　与单体船相比，由于双体船具有比较宽敞的甲板，最小船长的确定往往不是取决于总布置等其他方面的要求，除特殊情况外，一般是从最小阻力的观点来确定最佳船长，因此确定高速双体船的主要尺

收稿日期：2007-04-10； 修回日期：2009-03-10.
基金项目：辽宁省“百千万人才工程”培养经费资助项目(2007186-25).
作者简介：张晓阳(1978-)，男，博士生；李铁骊*(1963-)，女，副教授；林 焰(1963-)，男，教授，博士生导师.

度必须从快速性的要求相应于设计航速的傅氏数 Fr 或 Fr_{∇} 出发，然后再校核其他方面能否满足要求. 在 $Fr_{\nabla}<3.0$ 的过渡状态范围内，长度排水体积系数越大，对阻力性能就越有利，相应的长宽比 L/b_s 就越大. 但是若 L/b_s 太大，湿表面积增大对于摩擦阻力和粘压阻力来说会是不利的. 因此从阻力的观点选择船长时，必须认真考虑长度排水体积系数 ψ，从而取得最佳的船长[6].

1.1.2　艉端形状　穿浪双体船的航速较高，而且通常在艉部安装喷水推进装置，所以它的艉端必须采用方型. 确定方艉主要参数的原则与单体方艉船型是一致的，高速轻型穿浪双体船艉底部横向斜升角 β 可以根据阻力性能和耐波性来确定. 通常采用较小的 β 值，高速时可获得较大的动升力，提高船的快速性，同时也有利于采用喷水推进. 但需要指出的是，这一结论只是对于那些航速较高、排水量非常小的轻型穿浪双体船才是正确的. 因为船舶的排水量与其型线尺度的立方关系成正比，而升力则与型线尺度的平方成正比. 所以，对于航速较低、排水量较大的穿浪双体船，后体过于平坦反而对阻力性能不利，而且会使船的耐波性能恶化，同时会牺牲较好的航向稳定性，使艉部的垂向加速度增大.

1.1.3　艏端形状　片体艏端通常采用极深 V 形的横剖面形状，龙骨可下沉到基线以下，以增加艏部横剖面的深 V 程度，这样可增大船的纵摇阻尼，避免船艏底部出水，从而减小波浪的冲击.

1.1.4　浮心纵向位置　由于穿浪双体船的航速高，浮心纵向位置对船的耐波性能将产生不可忽略的影响. 浮心纵向位置的确定与设计航速有关，Fr 越低，则位置越靠前. 而对于那些使用傅氏数更高的各种小型高速船，其浮心纵向位置可能更靠近艉部. 因此针对不同的速度或傅氏数，都存在一个惟一理想的浮心纵向位置.

1.1.5　片体间距对性能的影响　与高速船相同，片体间距增大会使片体间的兴波与粘性干扰作用减小，对静水阻力和耐波性都有利. 1988 年澳大利亚的双体船公司通过水池模型实验研究了穿浪双体船的片体中心距在不同海况下对横向和垂向加速度的影响，证明了片体间距是影响穿浪双体船耐波性的主要因素，片体间距越大对舰艇在横浪中的运动性能越有利，可使艇的横向和纵向运动加速度明显减小. 但是实验表明，片体中心距一般不大于片体宽度的 10 倍，否则过大的片体间距对艇的阻力运动性能已无明显的好处反而对船的横向强度不利，并使艇的结构重量增加很多[7].

1.2　穿浪双体船兴波阻力的理论计算

穿浪双体船为非常瘦削的船体，利用 Michell 积分作为兴波阻力计算公式能够得到非常真实的结果，也是目前国内外比较常用的计算算法之一. 但在采用这种方法的文献中，较少涉及对方尾、折角线的影响进行处理，而这些影响对处理穿浪双体船兴波阻力计算是必须的.

1.2.1　穿浪双体船兴波阻力计算方法　取图 1 所示坐标系，片体间距 $2b$，由 Lagally 定理可得双体船各阻力分量.

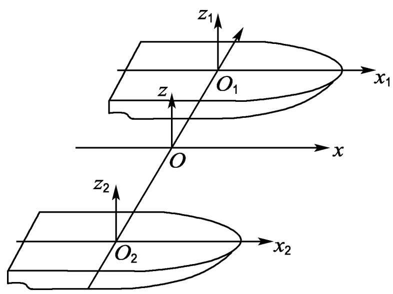

图 1　穿浪双体船坐标系示意图

Fig. 1　Coordinate systems of WPC

左片体兴波阻力：

$$R_{w11}=-4\pi\rho\int_{-T}^{0}\mathrm{d}\zeta\int_{-L/2}^{L/2}\sigma_s(\xi,b,\zeta)\mathrm{d}\xi\times\int_{-T}^{0}\mathrm{d}z\int_{-L/2}^{L/2}\sigma_s(x,b,z)G_{1x}\mathrm{d}x$$

右片体兴波阻力：

$$R_{w22}=-4\pi\rho\int_{-T}^{0}\mathrm{d}\zeta\int_{-L/2}^{L/2}\sigma_s(\xi,-b,\zeta)\mathrm{d}\xi\times\int_{-T}^{0}\mathrm{d}z\int_{-L/2}^{L/2}\sigma_s(x,-b,z)G_{2x}\mathrm{d}x$$

左片体对右片体兴波阻力的影响：

$$R_{w12}=-4\pi\rho\int_{-L/2}^{L/2}\mathrm{d}\xi\int_{-T}^{0}\sigma_s(\xi,b,\zeta)\mathrm{d}\zeta\times\int_{-T}^{0}\mathrm{d}z\int_{-L/2}^{L/2}\sigma_s(\xi,-b,\zeta)G_{1x}\mathrm{d}x$$

右片体对左片体兴波阻力的影响：

$$R_{w21}=-4\pi\rho\int_{-L/2}^{L/2}\mathrm{d}\xi\int_{-T}^{0}\sigma_s(\xi,-b,\zeta)\mathrm{d}\zeta\times\int_{-T}^{0}\mathrm{d}z\int_{-L/2}^{L/2}\sigma_s(\xi,b,\zeta)G_{2x}\mathrm{d}x$$

其中稳定运动的点源格林函数为 $G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta)$，源强为 $\sigma_s=\dfrac{v}{2\pi}f_x$.

根据物理对称性 $R_{w11}=R_{w22}$，$R_{w12}=R_{w21}$，可得穿浪双体船兴波阻力公式：

$$R_w = 2(R_{w11} + R_{w21}) = 16\pi\rho k_0^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sec^3\theta \times (P^2 + Q^2) \cdot [1 + \cos(k_0 \sec^2\theta \times 2b \cdot \sin\theta)] d\theta;$$

$$P = \frac{v}{2\pi} \int_{-T}^{0} \int_{-L/2}^{L/2} f_x(x,z) \exp(k_0 \sec^2\theta \cdot z) \times \sin(k_0 \sec\theta \cdot x) dx dz;$$

$$Q = \frac{v}{2\pi} \int_{-T}^{0} \int_{-L/2}^{L/2} f_x(x,z) \exp(k_0 \sec^2\theta \cdot z) \times \cos(k_0 \sec\theta \cdot x) dx dz \tag{1}$$

式中：θ 为波传播方向角，v 为船速，$f(x,z)$ 为船体函数，$k_0 = g/v^2$.

上式把兴波阻力与船型的几何特征联系了起来，利用已知的船体表面方程 $y = f(x,z)$ 或型值表表示的函数关系，可以用数值方法获取所求的兴波阻力. 令 $\lambda = \sec\theta$，兴波阻力积分公式变形为

$$R_w = \frac{8\rho v^2 k_0^2}{\pi} \int_1^{\infty} |A(\lambda)|^2 \frac{\lambda^2}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} [1 + \cos(2bk_0\lambda\sqrt{\lambda^2 - 1})] d\lambda \tag{2}$$

$$A(\lambda) = -ik_0\lambda \iint_S \exp[k_0\lambda^2(z + ix)] f_x(x,z) dx dz$$

数值计算：

$$R_w = \frac{8\rho v^2 k_0^2}{\pi} \left[|A(1)|^2 \int_1^2 \frac{\omega}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} d\lambda + \int_1^2 \frac{\lambda^2 |A(\lambda)|^2 - |A(1)|^2}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \omega d\lambda + \sum_{n=2}^{\infty} \int_{2^n}^{2^{n+1}} \frac{\lambda^2 |A(\lambda)|^2}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \omega d\lambda \right];$$

$$\omega = 1 + \cos(2bk_0\lambda\sqrt{\lambda^2 - 1}) \tag{3}$$

关于 $A(\lambda)$ 的积分运算利用下列公式：

$$\int_{x_1}^{x_1+2h} \exp(kx) f(x) dx \approx \frac{\exp(kx_1)}{k} \left[\exp(2hk) \left(-\frac{0.5f_1 - 2f_2 + 1.5f_3}{hk} + f_3 + \frac{\Delta^2 f}{(hk)^2} \right) - \frac{1.5f_1 - 2f_2 + 0.5f_3}{hk} - f_1 - \frac{\Delta^2 f}{(hk)^2} \right];$$

$$\begin{cases} f_1 = f(x_1) \\ f_2 = f(x_1 + h) \\ f_3 = f(x_1 + 2h) \\ \Delta^2 f = f_1 - 2f_2 + f_3 \end{cases} \tag{4}$$

$f(x)$ 的近似结果是一个二次多项式，k 可以是实数也可以是复数.

1.2.2 数值计算方法与折角线影响处理方法

首先将辛普森作为数值计算方法，采用有规律地增加水线密度的方法来计入折角线的影响. 然后在穿浪双体船横剖面面积变化曲率较大的位置增加站线数量，从而使兴波阻力理论计算的型值能充分反映出折角线对兴波阻力的影响. 该方法原理虽然简单，但所需水线、站线数目和计算量大为增加[8].

辛普森公式计算积分

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} [f(x_1) + 4f(x_2) + f(x_3)] \tag{5}$$

本公式在实数范围内均适用. a、b 为实数，$f(x)$ 为实值函数. 作为误差评估公式，利用梯形法则积分时需要 2 或 3 个纵坐标. 如果下列 3 个条件均达到要求，那么认为评估误差达到要求[9]：

（1）误差值要小于给定的限定值；

（2）通过计算达到误差要求的次数不能低于 2 次；

（3）实数 a、b 之间的真实差值要小于最大允许间隔的 2 倍.

间隔计算：

$$DX = \frac{X(L-1) + X(L+1)}{2}$$

误差值计算：

$$e = \left| \left(Y(L) - \frac{Y(L+1) + Y(L-1)}{2} \right) \times DX \right|$$

2 理论数值计算与预报

2.1 穿浪双体船阻力预报

按照上述理论进行数值计算可以得到如图 2 所示阻力系数计算曲线.

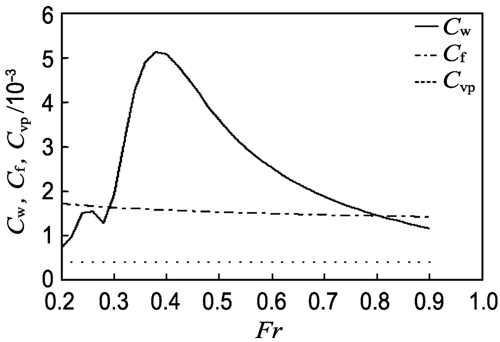

图 2 各阻力系数与傅氏数关系曲线

Fig. 2 Relationship of each resistance coefficient of ship with Fr

2.2 片体间距优化计算

片体间距 $2b$ 是穿浪双体船的重要参数之一，

这个参数的选取应考虑对降低兴波阻力有利.为研究片体间距对穿浪双体船兴波阻力的影响规律,取一组大小系统变化的片体间距,以本文的理论计算方法研究兴波阻力系数随片体间距 $2b$ 以及傅氏数 Fr 变化的规律,计算结果如图 3 所示.

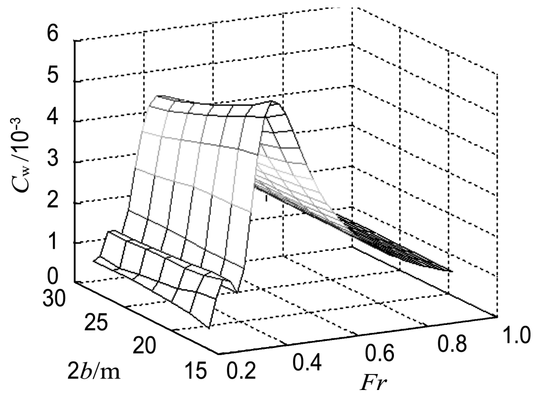

图 3　兴波阻力系数 C_w 与片体间距 $2b$ 和傅氏数 Fr 关系曲线

Fig. 3　Relationship of calculating value of C_w and $2b$ with Fr

由图 3 可见,在 $Fr=0.3$ 附近开始存在一有利干扰区,片体间的干扰使兴波阻力减小;在 $Fr=0.45$ 附近的一个区间内,两片体发生不利干扰使兴波阻力增大;而约在 $Fr>0.6$ 以后,两片体又发生有利干扰且片体间距变化对兴波阻力影响不很明显.

考虑到在主峰值处穿浪双体船的兴波阻力特性更为重要,同时考虑到片体间距过小将使摩擦阻力增大,则应取较大的片体间距以避免片体间的兴波干扰.但片体间距也不宜取得过大使横向强度降低.

3　船模阻力实验分析

3.1　实验模型

图 4 为正在实验中的大型穿浪双体船模型,本实验是在大连理工大学船模实验水池中进行的,共进行了 3 组实验.模型为优化的 WPC96 原型,模型缩尺比 1∶25,模型参数如下:总长 3.81 m,水线长 3.44 m,总宽 1.06 m,片体宽 0.18 m,吃水 0.16 m.

3.2　船模阻力实验结果

本实验船模的换算是在傅汝德假设的基础上进行的,即认为与雷诺数和傅汝德数有关.摩擦阻力按相当平板计算,同时假设傅氏数相同时船模与实船有相同的剩余阻力系数.

图 4　穿浪双体船船模实验照片

Fig. 4　Photo of model experiment of WPC

3.2.1　摩擦阻力的比较分析　按摩擦阻力理论,在引入相当平板概念后,船体的摩擦阻力可以直接利用光滑平板摩擦阻力公式来计算,根据 ITTC-1957公式 $C_f=0.075/(\lg R_n-2)^2$,随着航速的增加,其摩擦阻力逐渐增大,摩擦阻力系数逐渐减小.在本次船模实验中,随着 Fr 的提高,动浮力对船模的航行性能影响比较明显,但对船模的航态影响不大.

3.2.2　兴波阻力的比较分析　兴波阻力系数对比如图 5 所示.可以看出,兴波阻力在 $Fr=0.45$ 附近的区间内存在着一个峰点,在 $Fr<0.6$ 时实验和计算值存在一定误差,在 $Fr>0.6$ 以后,实验兴波阻力系数逐渐衰减并接近兴波阻力系数计算值.

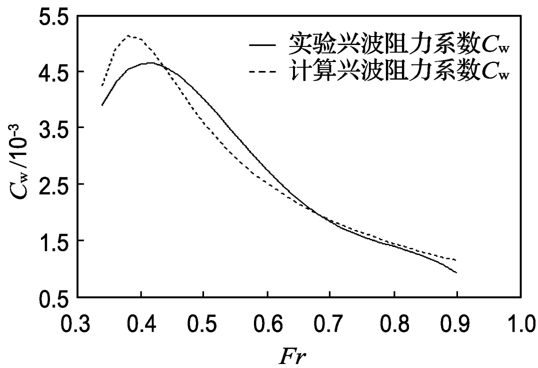

图 5　实验与计算兴波阻力系数比较曲线

Fig. 5　Comparison between experiment and calculation of wave-making resistance coefficient

由于双体船除了片体本身首尾横波间干扰外,两片体各自产生的横波也会相互干扰,根据线性兴波理论,横波所致阻力系数约在 $Fr=0.43$ 时达到最大值,之后随着 Fr 的提高而下降;而散波所致阻力系数约在 $Fr=0.6$ 时仍上升,故两者合成结果使总兴波阻力系数约在 $Fr=0.45$ 时出

现最大值，而且使总兴波阻力系数在 $Fr < 0.45$ 时随 Fr 的提高而上升，在 $Fr > 0.45$ 时随 Fr 的提高而下降.

4 结论与展望

本文采用数值积分方法，根据不同的对象优化出更有实际意义的船型，便于应用计算机辅助设计进行各种性能计算并给出最终优化船型. 将最终船型进行模型实验，通过对该船型理论优化计算与船模阻力实验结果对比分析，证实了所采用的计算方法是可靠的，可用于穿浪双体船的初步设计.

此外本文计算方法还有进一步提高之处，首先兴波现象是非线性问题，而本文所采用的计算是基于线性兴波理论的；其次本文主要采用 Michell 积分函数计算穿浪双体船在理想流体中的兴波阻力，而对于流体的粘压影响没有予以考虑.

参考文献：

[1] 苏红宇. 穿浪船的发展概况[J]. 船舶工业技术经济信息，2004，**226**：6-9

[2] 赵连恩，何 义. 穿浪多体船运动性能研究[J]. 中国造船，1995，**4**：20-28

[3] 赵连恩，杜振煌，应业炬. 基于兴波理论与阻力图谱资料的高速双体船阻力预报方法[J]. 船舶力学，2006，**10**(5)：17-23

[4] 马 健，左文锵. 穿浪双体船兴波阻力数值计算[J]. 中国舰船研究，2007，**2**(1)：52-55

[5] 马 健，高 高. 基于 NURBS 高阶面元法的浅水船舶兴波阻力计算[J]. 武汉理工大学学报，2006，**6**(3)：444-447

[6] 柳卫东，朱美琪，董元胜. 高速双体船的阻力计算[J]. 中国造船，1998，**2**：19-23

[7] 许统铨，谢克振，杨惠忠，等. 高速双体船阻力和兴波特性的实验研究[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报，1994，**17**(2)：16-22

[8] FRY E D，GRUAL T. Design and application of modern high-speed catamarant [J]. **Marine Technology**，1972，**19**(3)：345-357

[9] 刘晓峰. 基于快速性的穿浪船船型开发研究[D]. 大连：大连理工大学，2004

Resistant performance prediction and model experiment analysis of WPC

ZHANG Xiao-yang[1]， LI Tie-li[*1,2]， LIN yan[1]

(1. Department of Naval Architecture，Dalian University of Technology，Dalian 116024，China；
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment，Dalian University of Technology，Dalian 116024，China)

Abstract：The resistant performance of large-scale wave piercing catamaran WPC96 (1 800 t) is researched by theoretical prediction and experimental analysis. In the theoretical method，Michell integration is developed to the calculation for the wave-making resistance of usual catamarans. By the complex integration of Michell the WPC96 is numerically calculated，and the results have a high precision in a certain range of ship speed. Furthermore，by changing the distance of hulls，wave-making interaction of two hulls is studied in theoretical calculation and experimental observation. The calculated results agree well with the experimental data，which shows that this method can be applied to the resistance prediction of WPC.

Key words：wave piercing catamaran (WPC)；wave-making resistance；model experiment