

高速双体船阻力特征及其应用^①

汪 诚 仪

(中国船舶及海洋工程设计研究院)

提 要

双体船的阻力特点是片体波系间相互有干扰。当处于有利干扰时,双体船的阻力小于两个单独片体的阻力之和。干扰的实质是片体间波系的横波干扰。

作者根据三种不同横剖面形状的高速双体船在不同间距比和排水量长度系数下的阻力试验资料,分析船型、间距比、排水量长度系数对阻力的影响,得到高速双体船的有利干扰起始点 Fr_0 和片体间流动阻塞时的 Fr_R 。根据本文推荐的 Fr_0 和 Fr_R 计算公式,可以选择恰当的航速、间距比和排水量长度系数以满足 $Fr_0 < Fr < Fr_R$,使高速双体船处于低阻的有利干扰状态。

关键词: 高速双体船, 片体干扰, 阻力试验, 计算公式

(一) 高速双体船模型阻力试验

在第一阶段试验中,选择了圆艏形、尖艏形和不对称圆艏形三种横剖面方案,见图1、2、3。

三种方案的船模主尺度都相同。船长 $L_{pp}=2\text{m}$, 片体宽 $b=0.19\text{m}$, 吃水 $T=0.08\text{m}$, 方形系数 $C_b=0.5$, 棱形系数 $C_p=0.629$, 双体排水体积 $\nabla=30.4\times 10^{-3}\text{m}^3$ 。船模材料为硬质泡沫塑料,表面油漆光滑,船首 $5\%L$ 处各有直径为 1mm 的激流丝。圆艏形和不对称圆艏形的首部防溅条宽度为 8mm , 船模无其它附件。

三种方案的双体船,在 Fr 为 $0.4\sim 1.1$ 和 5 个不同间距比 $k/b=6、3.2、2.6、2.0、1.6$ (片体中心距/片体宽)下测试阻力。试验结果见图4~图6。

第二阶段试验选择圆艏双体船,研究 $\nabla/(0.1L)^3$ 对阻力的影响。圆艏双体船的尺度比和船型系数列于表1。与美国64系列^[1]比较,表明片体船型是高速排水量船型。

^①收稿日期: 1993-01-06

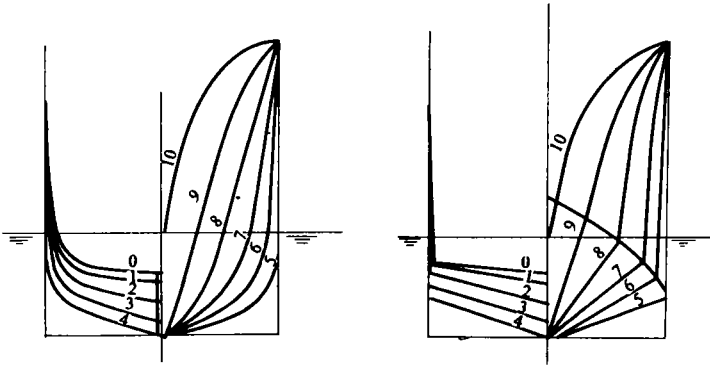


图1 圆艏双体船横剖面图

图2 尖艏双体船横剖面图

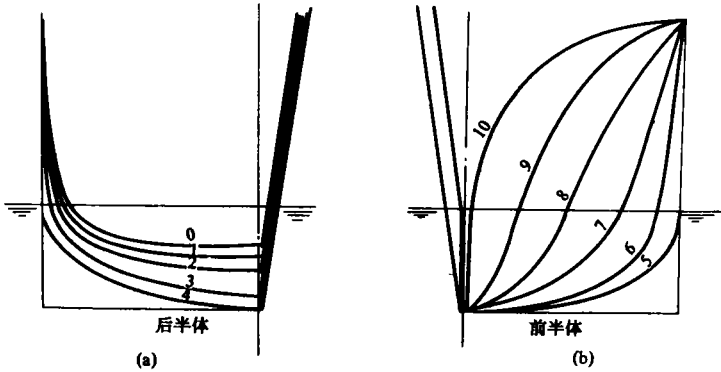


图3 不对称片体双体船横剖面图

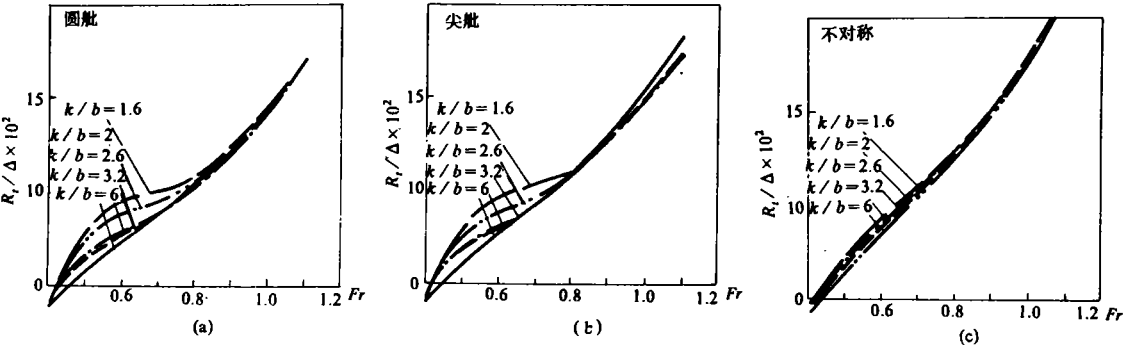


图4 间距比对双体船阻力的影响

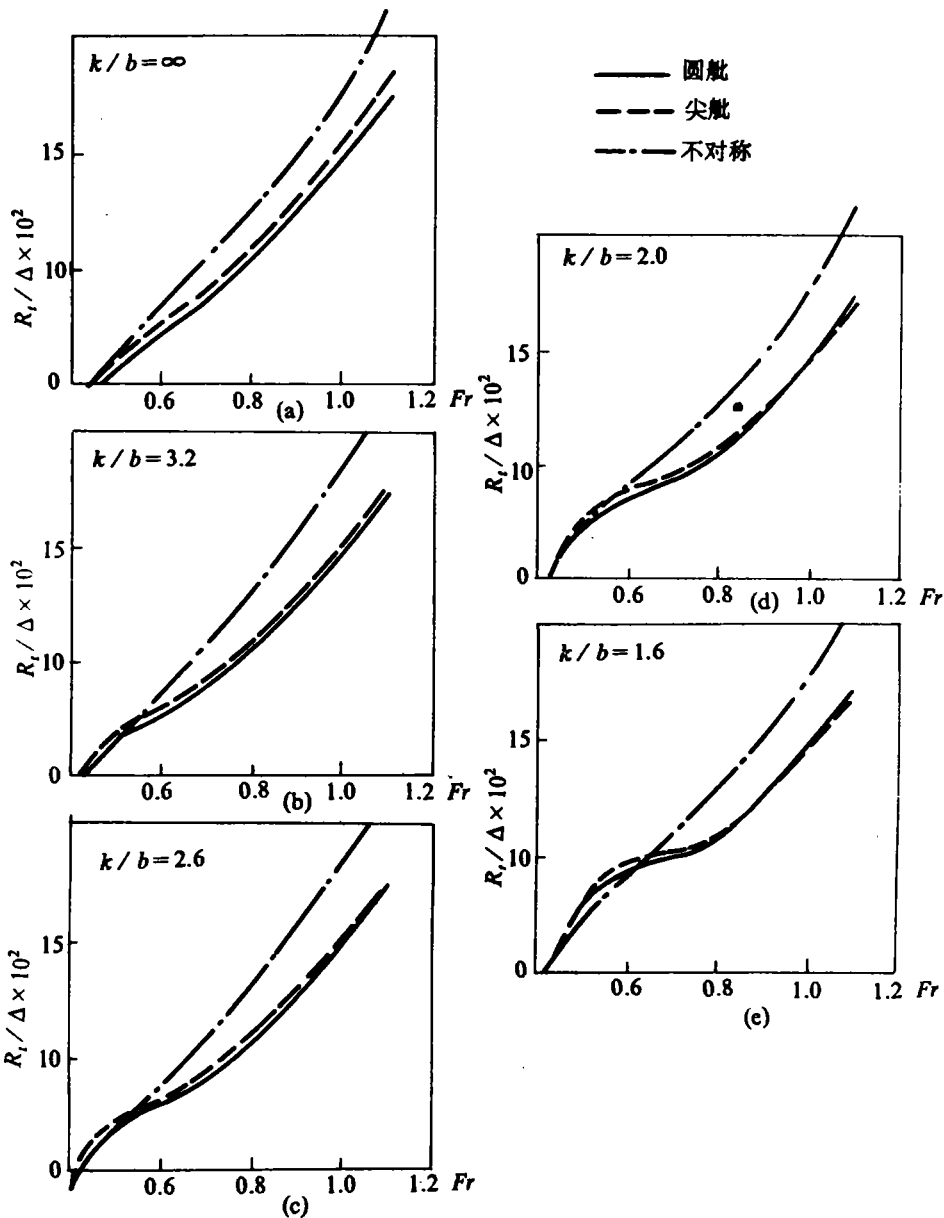


图5 船型对双体船阻力的影响

对于这类船型，文献[2]~[5]都认为 $\nabla / (0.1L)^3$ 对剩余阻力最有影响。因此第二阶段试验以 $\nabla / (0.1L)^3$ 作为主要因素来研究。

由于 B/T 对圆舦船的剩余阻力影响不大，本试验以改变吃水的方法来改变 $\nabla / (0.1L)^3$ 。试验结果见图7~图9。船模排水量为38.33kg、30.33kg、25.33kg， k/b 为6、2。

表1 圆艏高速双体船的主要参数与64系列比较

		L/B	B/T	C_p	$\nabla/(0.1L)^3$	Fr
高速双体船	超载	10.53	2.036	0.657	2.396	1.1
	设计排水量	10.53	2.375	0.629	1.896	1.1
	轻载	10.53	2.664	0.606	1.585	1.1
美国64系列		8.45~18.26	2~4	0.63	0.529~1.93	0.1~1.5

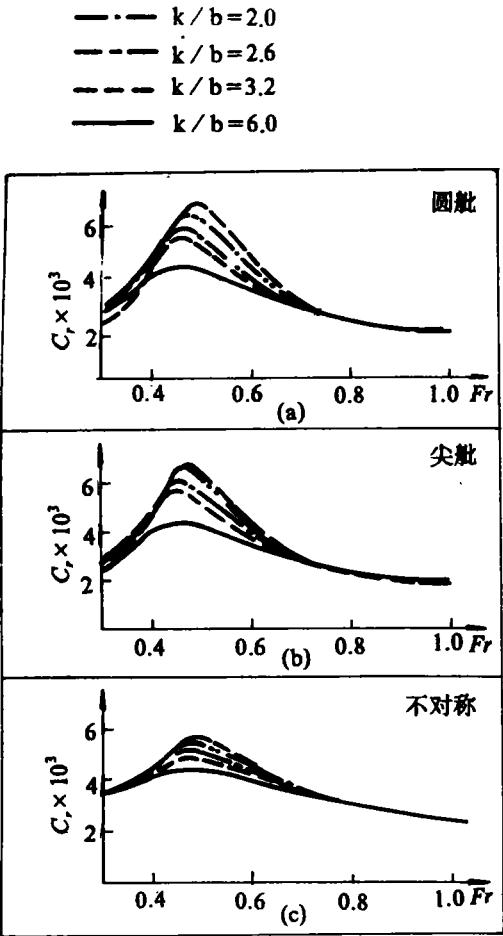


图6 间距比对双体船剩余阻力系数的影响

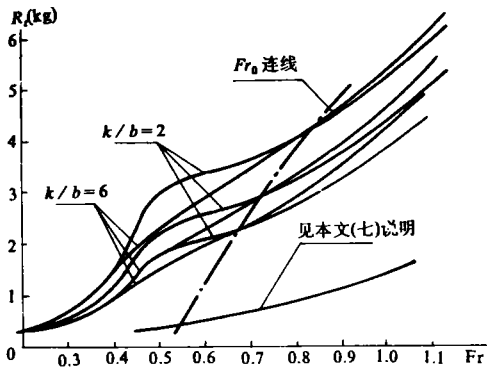


图7 圆艏高速双体船模型试验阻力曲线

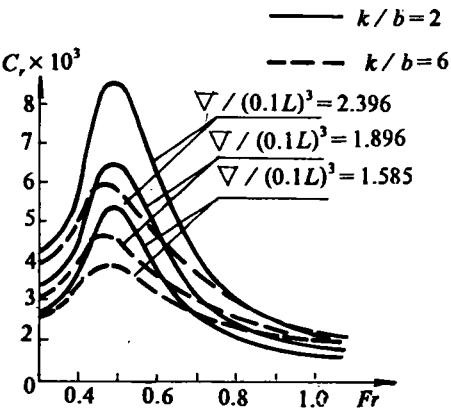


图8 圆艏高速双体船的剩余阻力系数 C_r 曲线

(二) 高速双体船的阻力特征

双体船的阻力，除了具有片体作为单体船时的摩擦阻力 R_f 和两个片体自身的剩余阻力 R_r 外，还有片体间波系干扰所引起的剩余阻力增值 ΔR_r 。

单个片体的波系干扰，如同常规单体船一样，仅发生于自身的首横波和尾横波之间。当首、尾横波的相位相同，则阻力增加，称不利干扰。反之，当首、尾横波的相位相反，则阻力减少，称有利干扰。首尾横波的干扰使阻力—速度曲线有凸起和凹陷。

双体船除了片体自身首尾横波间干扰外，两片体各自产生的横波也会相互发生干扰，这种情况即为片体间波系干扰。

两个片体波系的干扰也可以用图形来描述。本文所用的波系用 Kelvin 波表示。

因为两片体分别产生的横波相位一致，所以高速双体船片体间有利干扰或不利干扰发生的相位与片体本身首、尾横波干扰的相位趋于一致，并且前者的干扰程度比后者激烈。片体间波系干扰的结果加大了阻力曲线的凹凸，见图 10。

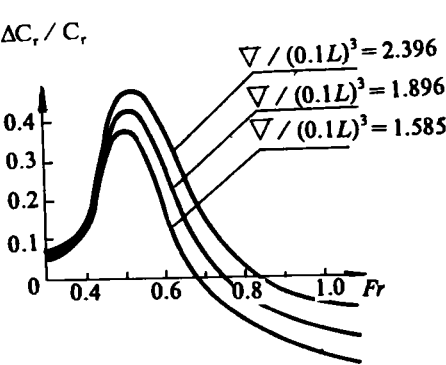


图 9 圆舢高速双体船的干扰系数 $\frac{\Delta C_r}{C_r}$ 曲线

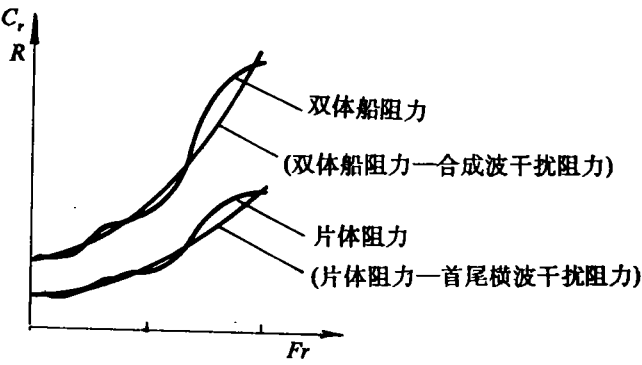


图 10 片体相互干扰加大了阻力曲线的凹凸

(三) 对称片体和不对称片体

就单个片体而言，不对称片体的阻力比对称片体的阻力高得多。

不对称双体船船中一侧表面平直，直壁侧的兴波远小于另一侧，所以片体间波系干扰小，不利干扰和有利干扰均小于对称剖面双体船，见图 11。

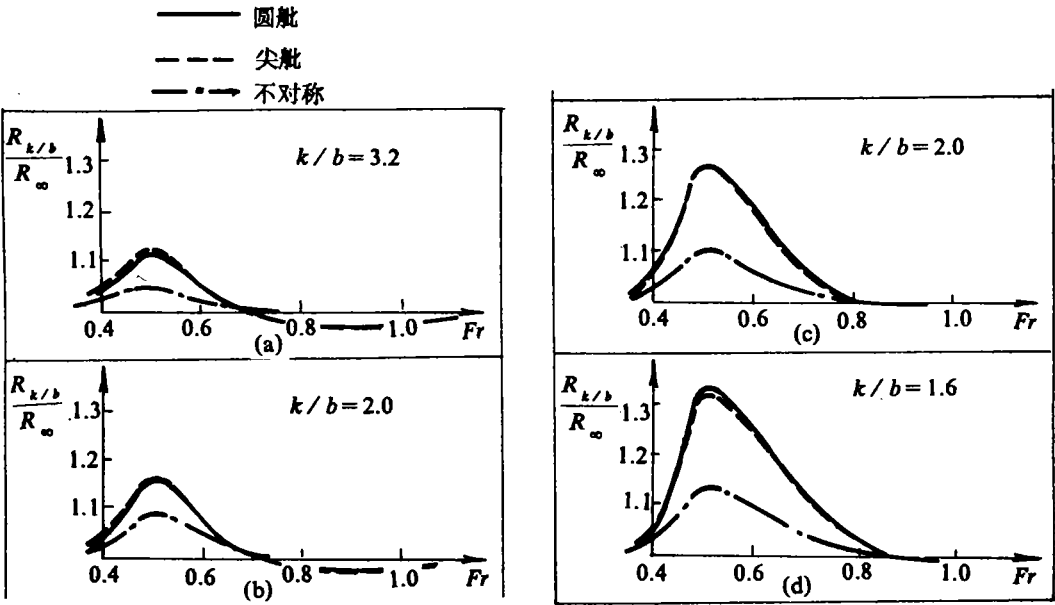


图 11 船型对阻力干扰系数 $R_{k/b} / R_{\infty}$ 的影响

虽然不对称剖面的片体阻力大于对称片体的阻力，但在 $Fr=0.5$ 附近时，前者的不利干扰远小于后者，此时不对称双体船的阻力反小于对称剖面双体船，见图 5。

从图 5、图 11 来看，尖艏和圆艏的差别只影响片体阻力，而阻力干扰系数大致相同。

(四) 片体间距与波系干扰

片体间波系干扰的程度与片体间距有关。片体间距决定了两片体 Kelvin 波系图形的重合程度，重合越多，片体间干扰越大。从波系图来看，可以认为一个片体的横波的端点到达另一个片体的中心线时，片体间波系的相互干扰开始对双体船阻力的改变产生实际影响，因此最小无干扰间距 k_{cp} 等于波系图的半宽。

$$k_{cp} = 0.384\lambda = 0.384\frac{2\pi}{g}v^2 = 2.4LFr^2 \tag{1}$$

当 $Fr=0.5$ 时，片体自身首尾横波干扰最大。因此在同样片体间距下， $Fr=0.5$ 时的两片体间波系干扰也最大。所以式(1)取 $Fr=0.5$ 。

根据式(1)来确定圆艏双体船的片体无干扰临界间距:

船模长 $l=2\text{m}$ ，片体宽 $b=0.19\text{m}$
无干扰临界间距 $k_{cp}=2.4\times 2\times 0.5^2=1.2\text{m}$

间距比 $\frac{k_{cp}}{b} = \frac{1.2}{0.19} = 6.3$

阻力试验结果显示了片体阻力曲线与 $k/b=6$ 时的双体船阻力曲线之半重合。当 $k/b<6$, 阻力曲线就逐渐发生变化, 因此 $k/b=6$ 是最小无干扰间距, 与式(1)计算结果相当接近。

当片体间距在无干扰临界间距之内时, 双体船的间距越小, 片体间波系干扰越强烈, 见图 4, 片体间干扰系数 $\Delta C_r/C_r$ 越大。特别在 $Fr=0.5$ 时, 间距对阻力峰的影响更大。

(五) 片体间流动阻塞的预报

当双体船片体间距相对小, 船速相对高时, 片体间水流出现阻塞现象, 称为“片体间流动阻塞”。它的表现形式是阻塞处水面隆起, 并伴有激烈的飞溅。根据圆艏和尖艏两种船型的船模试验, 当满足下列衡准式时

$$\frac{v^2}{gb} \left[\left(\frac{k}{k-C_p b} \right)^2 - 1 \right] \geq 10 \tag{2}$$

流动阻塞对阻力产生较明显的影响。其中 k 为两片体的中心距, b 为片体宽, C_p 为片体的纵向棱形系数, v 为判别流动阻塞有否对阻力产生明显影响的衡准速度。间距越小或速度越高, 则流动阻塞发生得越早。

根据式(2)可以算得 $k/b=1.6、2.0、2.6$ 的双体船模速度分别达到 $3.30、4.07、5.05\text{m/s}$ 时, 流动阻塞对阻力产生明显的影响, 这一结果与船模试验观察和测试的数据十分符合。

由式(2)可以得到流动阻塞时的 Fr_B

$$Fr_B = \sqrt{\frac{10}{\frac{l}{b} \left[\left(\frac{k}{k-4b} \right)^2 - 1 \right]}} \tag{3}$$

片体间流动阻塞现象的存在, 大大增加了双体船的浸湿面积, 片体间飞溅甚至能达到双体船桥楼的底部, 增加了船的摩擦阻力。随着片体间距减少或速度增加, 片体间流动阻塞现象加剧, 从而阻力也增加。

(六) 排水量长度系数 $\nabla/(0.1L)^3$ 对阻力的影响

从图 7 可看到 $Fr=0.5$ 附近的阻力峰区, $\nabla/(0.1L)^3$ 越大, 阻力峰越大。因为 $\nabla/(0.1L)^3$ 是影响片体剩余阻力最重要的因素, $\nabla/(0.1L)^3$ 越大, 片体本身的剩余阻力增加(如图 8 示), 而且, $\nabla/(0.1L)^3$ 增加也使阻力峰区的干扰系数 $\Delta C_r/C_r$ 显著加大(见图 9 示)。上述两个因素使阻力峰随 $\nabla/(0.1L)^3$ 增加而显著加大。这表明以 $\nabla/(0.1L)^3$ 作为高速双体船片体的主要参数是恰当的。

(七) 有利干扰的起始点 Fr_0

船模试验表明, 高速双体船不论 $\nabla / (0.1L)^3$ 和 k/b 为多少, 当 Fr 大于 0.5 以后, 不利干扰都会逐渐向有利干扰过渡。用首、尾横波干扰的观点来解释: 当首横波上半波形在船长范围内, 为不利干扰; 当上半波形超越船长时为有利干扰; 当上半波形末点位于船尾时, 干扰效果为零, 同时片体间波系干扰亦为零。图 7 所示相同 $\nabla / (0.1L)^3$ 的 $k/b=2$ 和 $k/b=\infty$ 的两条阻力曲线的交点就是干扰效果为零的情况, 这一交点的 Fr 称为有利干扰起始点或无效干扰点 Fr_0 。当 $Fr=Fr_0$ 时, $k/b=2$ 与 $k/b=\infty$ 的阻力是相同的。当 $Fr>Fr_0$ 时, $k/b=2$ 的阻力小于 $k/b=\infty$ 的阻力, 进入有利干扰阶段。

低速船首、尾横波的干扰作用, 可用 P 理论来确定。但当 $Fr>0.5$ 时, 由于高速船首波系横波的第一个波峰后移, 另一方面, 第一波峰也随 $\nabla / (0.1L)^3$ 增大而前移, 所以 P 理论不再适用, Fr_0 也无法用 P 理论来确定。

阻力试验可以确定片体间无效干扰 Fr_0 。从船模阻力试验曲线来看, $k/b=2$ 的三种不同 $\nabla / (0.1L)^3$ 状态的 Fr_0 点在图 7 中近似一条直线, $\nabla / (0.1L)^3$ 越小, Fr_0 发生得越早, 具有较强的规律性。这一规律性并不是指图 7 所示 Fr_0 连线上阻力与 Fr 成近似线性关系这一现象, 而是揭示了 Fr_0 与 $\nabla / (0.1L)^3$ 有关这一实验规律。

寻求 Fr_0 与 $\nabla / (0.1L)^3$ 的关系, 使片体间波系干扰进入有利干扰区, 对于高速双体船的设计, 选择合适的排水量和 Fr 具有较大的实用价值。

图 7 表明, 当 ∇ 减少时, Fr_0 也减少。当 ∇ 趋近于零时, Fr_0 必趋近于某极限。此极限求法: 按三种试验状态的湿面积和摩擦阻力的变化规律, 求 ∇ 趋近于零时的湿面积和摩擦阻力, 根据三种不同的 $\nabla / (0.1L)^3$ 状态下的船模摩擦阻力外插到 ∇ 趋近于零时的船模摩擦阻力。因 ∇ 趋近于零时, 剩余阻力趋近于零, 摩擦阻力即为总阻力。将该阻力绘在图 7 上, 这曲线与 Fr_0 连线的延伸线相交于一点, 这一点 $Fr_0=0.55$, 即为 ∇ 趋近于零时的 Fr_0 。至此可得到四个无效干扰点 Fr_0 及与其对应的四个 $\nabla / (0.1L)^3$, 如表 2 所示。

表 2 无效干扰点 Fr_0 及其相应的 $\nabla / (0.1L)^3$

Fr_0	0.55	0.675	0.727	0.835
$\frac{\nabla}{(0.1L)^3}$	0	1.583	1.895	2.396
$\left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3}\right]^2$	0	2.506	3.593	5.739

在图 12 中, 无效干扰点 Fr_0 与 $\left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3}\right]^2$ 呈如下关系式:

$$Fr_0 = 0.55 + 0.05 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3}\right]^2 \tag{4}$$

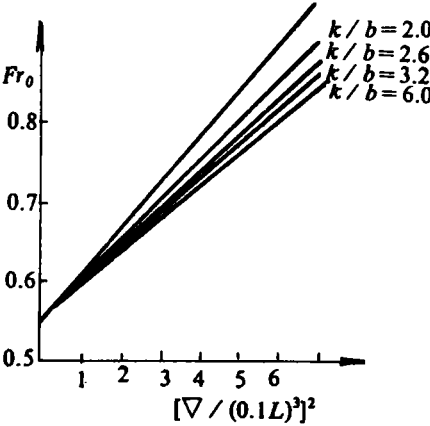


图 12 Fr_0 随 $\nabla / (0.1L)^3$ 和 k/b 的变化曲线

对于其它片体形状的高速双体船, 无效干扰点 Fr_0 的连线的斜率可能不是 0.05, 但截距 0.55 是不变的. 如果船模试验仅测得某 $-k/b$ 和 $\nabla_1 / (0.1L)^3$ 时的 $Fr_0^{\nabla_1} / r_0$, 则同 $-k/b$ 、不同 $\nabla / (0.1L)^3$ 的 Fr_0 为

$$Fr_0 = 0.55 + \left\{ \left[Fr_0^{\nabla_1} - 0.55 \right] / \left[\frac{\nabla_1}{(0.1L)^3} \right]^2 \right\} \cdot \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2 \tag{5}$$

应该指出, 本文只是根据三个实用吃水时的摩擦阻力的变化规律外插, 求得 ∇ 趋近于零时的阻力曲线和 ∇ 趋近于零时的 Fr_0 , 然后导出式(4). 这三个实用吃水都是远离横剖面艏部圆弧之上, 而实际上, 当吃水在艏部圆弧处的船模摩擦阻力并不按上述关系变化, 并且 ∇ 趋近于零时的阻力为零, 因此式(4)仅适用于实用吃水范围, 而对非实用的极浅吃水并不适用。

(八) k/b 对 Fr_0 的影响

式(4)是 $k/b=2$ 时的 Fr_0 计算式, 不同 k/b 时的 Fr_0 是不同的. 文献[6]中所述的试验结果表明, k/b 越小, 有利干扰来得越迟, 即 Fr_0 越大. 这是因为 k/b 变小后使首横波第一个波峰前移, 使 Fr_0 变大, 这与 $\nabla / (0.1L)^3$ 增大的结果相同. 因此说 k/b 小, 相当于 $\nabla / (0.1L)^3$ 增大。

对于不同的 $\frac{k}{b}$, Fr_0 计算式如下式:

$Fr_0 \Big|_{\left(\frac{k}{b}=1.6\right)} = 0.55 + 0.057 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2$

$Fr_0 \Big|_{\left(\frac{k}{b}=2\right)} = 0.55 + 0.050 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2$

$Fr_0 \Big|_{\left(\frac{k}{b}=2.6\right)} = 0.55 + 0.046 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2$

$Fr_0 \Big|_{\left(\frac{k}{b}=3.2\right)} = 0.55 + 0.044 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2$

$Fr_0 \Big|_{\left(\frac{k}{b}=6\right)} = 0.55 + 0.042 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2$

(6)

对于任意 k/b

$$Fr_0 = 0.55 + 0.042 \left[\frac{\nabla}{(0.1L)^3} \right]^2 \left[\frac{0.166}{\left(\frac{k}{b} - 4\right)^{7/4}} + 1 \right]^2$$

(7)

当 $k/b=6$ 时, 片体间波系已不干扰, 双体船阻力等于两个片体阻力之和, 阻力曲线与 $k/b=\infty$ 时的阻力曲线相重合。因此 $k/b=6$ 时的 Fr_0 并非说明实际存在一个有利干扰起始点, 而是指 $\lim_{\frac{k}{b} \rightarrow \infty} Fr_0$ 。

作者有根据说明大部分高速双体船的 Fr 都大于按式(7)得到的 Fr_0 (见表3), 航速选择在有利干扰区域内, 表明本文提供的 Fr_0 计算式的实用性。

表3 一些高速双体船的 Fr 与 Fr_0

来源	参考文献[8]		参考文献[10]				收集	
船名	MXA1700	AZ100	Shuman	Double Eagle	Double Eagle II	H& Speed Twin	甬兴	IETCAT
$\nabla/(0.1L)^3$	3.47	2.83	2.912	2.350	2.421	2.035	1.25	1.77
Fr_0	1.114	0.928	0.936	0.805	0.820	0.743	0.632	0.704
Fr	1.272	1.088	0.930	0.820	0.912	0.775	0.918	0.941

(九) 片体间距的无因次表达式

对于相同船长和片体宽度、不同船形或不同片体间距的双体船, k/b 足以表征片体间距对阻力的影响, 因此本文都用 k/b 来表示片体间距。当片体间距较小时, 片体间流动阻塞取决于船宽, 这种情况也宜用 k/b 来表示。 k/b 的数值用个位数和一位小数表示, 形象比较直观。

然而 k/b 没有考虑到船长对阻力的影响, 实际上船长 L 是双体船干扰阻力的一个主要参数。Michell 薄船理论表示的干扰兴波阻力即为 Fr 和 k/L 的函数。本文所述片体间临界干扰间距(见式(1))也是 L 的函数。因此对于不同 L 的双体船宜在相同的 k/L 下比较其阻力。参考文献[10]用 $(w-2b)/L$ 表示间距比, w 为双体船总宽, 用来比较不对称片体双体船与对称双体船。

(十) 结 论

1. 高速双体船片体间有利干扰和不利干扰的实质是片体间波系的横波干扰。
2. 有利干扰和不利干扰发生的相位与片体本身首尾横波干扰的相位趋于一致, 并且前者的干扰程度比后者激烈。
3. 片体间波系干扰程度与片体间距有关。片体间无干扰临界间距 $k_{cp} = 2.4LFr^2$ 。片体间距减小, 则片体间波系干扰加剧。
4. $Fr = 0.5$ 附近为不利干扰区。
5. 直壁靠船中的不对称片体双体船的片体间波系干扰小于对称片体双体船的情况, 因此不对称剖面宜用于设计 Fr 在 0.5 附近的双体船。
6. 航速和片体间距受到片体间流动阻塞的制约, 判别流动阻塞的 Fr_B 主要取决于航速和间距比。为避免流动阻塞, 应选择 $Fr < Fr_B$ 。
7. $\nabla / (0.1L)^3$ 增加, 片体间波系干扰加剧。
8. 高速双体船在 Fr 大于 0.5 以后, 不利干扰向有利干扰过渡。有利干扰的起始点为 Fr_0 。高双体船航速应选择 $Fr > Fr_0$ 为宜。
9. Fr_0 取决于 $\nabla / (0.1L)^3$ 和 k/b 。 $\nabla / (0.1L)^3$ 增大或 k/b 减小, 使 Fr_0 增大。

参 考 文 献

- 1 Hugh Y. H. Yeh. Series 64 resistance experiment on high speed displacement form, Marine Technology, July, 1965.
- 2 De Groote, Resistance and propulsion of Motorboats. I.S.P., 1955, 2(6).
- 3 Nordstrom HF. Some tests with models of small vessels, Swedish Tank Publication, No.19, 1951.
- 4 金平仲, 苏拔英. 圆艏快艇主尺度系数对静水阻力的影响. 中国造船, 1980(3).
- 5 秦士元. 高速排水型艇的阻力和有效功率的一种估算方法. 船舶工程, 1979(2).
- 6 汪诚仪. 高速双体船模型阻力试验及片体间波系干扰分析方法的应用. 中国造船, 1989(3).

- 7 Narita S. Some research on the wave resistance of a trimaran. Proceedings of International Seminar on Wave Resistance, 1976.
- 8 Jane's high-speed marine craft and air cushion vehicles, Nineteenth Edition, 1986.
- 9 汪诚仪. 排水量长度系数和片体间距比对高速双体船阻力的影响. 舰船科学技术, 1990(5).
- 10 Fry ED & Graul T. Design and application of modern high-speed catamarans. Marine Technology, 1972, 9(3).

RESISTANCE CHARACTERISTIC OF HIGH-SPEED CATAMARAN AND ITS APPLICATION

WANG Chengyi

(Marine Design and Research Institute of China)

Abstract

The interference of wave system between demihulls of catamaran is analysed. It is proved that the demihulls interact on each other with positive or negative interferences. Only in negative interference condition, the catamaran resistance is lower than that of two separate demihulls due to the advantageous transverse waves generated by two demihulls.

Based on the resistance test data of high-speed catamaran with three different forms at varying spacing ratio k/b and displacement-length ratio $\nabla / (0.1L)^3$, the influences of $\nabla / (0.1L)^3$, k/b and ship form on the resistance of catamaran are discussed, and the formulas for calculating Fr_0 (the Froude number of starting point of negative interference, above which the negative interference will occur) and Fr_B (the Froude number with flow blockage between demihulls, above which the resistance of catamaran will greatly increase) are also given. By using the calculation formulas, the appropriate speed, k/b and $\nabla / (0.1L)^3$ can be found to satisfy $Fr_0 < Fr < Fr_B$, and the catamaran will thus operate at a lower resistance in negative interference condition.

Key Words: High-speed catamaran, Transverse wave interference, Resistance test, Calculation formula.