

双体船的静水阻力估算^①

邵世明 周旭芳 王云才

(上海交通大学)

提 要

根据 $Fr < 0.38$ 的 9 条具有对称片体的双体船的阻力试验资料, 探讨了船型对剩余阻力系数 C_R 的影响, 应用归纳方法得到 C_R 的峰、谷值及对应的傅汝德数的表达式, 所有估算表达式均以参数: 相对片体间距 k/b 、宽度吃水比 b/T 、棱形系数 C_p 和排水体积长度系数 C_v 的函数形式表示。

按本文提出的双体船阻力估算方法所得结果与模型试验的吻合比较满意。

关键词: 双体船, 船舶阻力, 剩余阻力, 回归分析

(一) 引 言

双体船由于具有较宽的甲板, 良好的稳性等优点, 近几十年来, 作为一种现代船型受到运输部门的关注。同时, 双体船水动力性能的研究, 特别是准确地估算双体船的阻力, 是设计部门和使用部门关心的重要课题。目前常用的简单方法是把相近船型的阻力作为片体阻力, 再选取片体间的干扰阻力, 从而得到双体船的总阻力。这种方法的缺陷是准确性难以把握。这是因为船型不但对片体本身的阻力影响颇大, 而且对双体船片体间的干扰作用相当敏感。这样, 在预报快速性过程中, 不仅片体阻力有差别, 而且干扰阻力更缺乏准确的依据。为此, 探索准确地预报双体船阻力是有实际意义的。

本文根据 9 条实际建造的常规对称双体船模型试验资料, 探讨了双体船的阻力问题, 同时应用分析归纳方法提出了估算双体船阻力的方法, 以供初步设计应用。

(二) 双体船的阻力性能

如果按通常处理船体阻力的方法, 将双体船船体总阻力亦分为摩擦阻力和剩余阻力两部分, 其摩擦阻力按单体船相同的方法计算, 则剩余阻力主要取决于兴波阻力及片体间的干扰阻力。这部分阻力因受船型参数影响很大, 故双体船的阻力研究的重点实际上是如何

① 收稿日期: 1992-12-23 修改稿收稿日期: 1993-02-16

确定剩余阻力。

1. 双体船剩余阻力曲线的峰谷值

为了探讨双体船的阻力, 收集了九条双体船船模试验资料, 其片体的主要船型参数如表 1 所列。

表 1 双体船片体主要参数

序号	船名	L/b	b/L	C_B	C_P	C_V	设计 Fr	资料
1	Hai-J	13.06	1.500	0.682	0.712	2.566		[2]
2	6502	8.18	1.667	0.613	0.645	5.490	0.28	[3]
3	Qin-Lu	10.25	2.353	0.604	0.636	2.350	0.36	[4]
4	Gan-P	9.75	1.540	0.519	0.603	3.492		[5]
5	7824	10.61	1.737	0.502	0.557	2.571	0.37	[6]
6	7082	13.00	1.481	0.461	0.611	1.841	0.40	[6]
7	7081	11.28	1.600	0.555	0.638	2.725	0.33	[6]
8	Chu-F	10.25	2.151	0.475	0.589	2.065		[7]
9	7910	8.05	3.077	0.523	0.564	2.626	0.37	[6]

综观表 1 的船模试验结果, 可以发现双体船的剩余阻力曲线存在峰谷点, 称为不利干扰和有利干扰现象, 它们不仅是片体本身的兴波干扰, 而且还由于片体之间的兴波干扰所致, 其中亦包括散波干扰综合影响的结果。如按剩余阻力系数 C_R 曲线上的峰谷显著程度的不同, 大致有两类:

第一类为在 $Fr=0.25\sim 0.40$ 之间, 存在明显的峰谷点, 而且峰点与谷点所对应的 C_R 值相差很大, 甚至可达 50%, 如图 1 所示。

第二类为 C_R 曲线虽有峰谷趋势, 但并不明显, 有较平坦的区域, 如图 2 所示。

双体船 C_R 曲线的峰谷问题, 对船型设计和快速性估算具有重要的意义。根据九条双体船船模 C_R 曲线分析认为: 当参数 $Q_{cr} = C_P \cdot C_V / \sqrt{b/T} < 0.85$ 时, 一般情况下趋于第二类 C_R 曲线的形式。

2. 影响双体船剩余阻力主要船型参数

根据试验和分析研究认为^[1], 除航速 (或 Fr 数) 外, 片体棱形系数 C_P , 宽度吃水比 b/T , 排水体积长度系数 $C_V = V / (0.1L)^3$ 和片体间距比 k/b 是影响剩余阻力的重要参数, 这里 k 是两片体内侧在舭处的间距。

(1) 棱形系数 C_P 不同表明船型的差别, 特别是首尾的肥瘦程度, 因而将对兴波阻力产生影响。

(2) 船体宽度与吃水的变化将分别影响航行中的散波与横波。双体船除与单体船一样会发生横波干扰外, 还存在散波干扰问题。因此, b/T 对阻力的影响将较单体船敏感

得多。

(3) 据阻力理论可知, 排水体积长度系数是影响阻力的重要参数, 特别对航速较高的船, C_v 值的变化对阻力的影响更为明显。

(4) 双体船片体内侧间距不但直接影响两片体的横波、散波之间的相互干扰, 而且也影响两片体内侧“狭水道”内的流动情况。一般而言, k/b 减小, “狭水道”影响严重, 内侧流速增加, 波高增大, 兴波阻力增大。

(三) $k/b=1.0$ 时剩余阻力系数峰、谷点的 Fr 及 C_R 值

实用上双体船的 k/b 值, 很多处于 1.0 左右。为此, 首先探讨 $k/b=1.0$ 时的剩余阻力系数的峰、谷位置及其所对应的 C_R 值。

1. 峰谷点对应的傅汝德数

根据 7 条船模在 $k/b=1.0$ 时 C_R 曲线的分析^[1], 其峰、谷点所对应的 C_R 值与船型参数有关。图 3 为各船模剩余阻力系数峰点的傅汝德数 Fr_h 与棱形系数 C_p 的对应关系, 其中因 No.1, No.5, No.7 三条船模的 C_v 及 b/T 比较相近。因此可以认为, 它们相应的 Fr_h 值主要是由于 C_p 不同所致, 由此确定了 Fr_h 与 C_p 的基本关系线。由图知, Fr_h 值随 C_p 增大而增大。图中的离散点及其他点(如 No.2)的 Fr_h 值, 主要是由于 b/T 及 C_v 两参数影响所引起的。

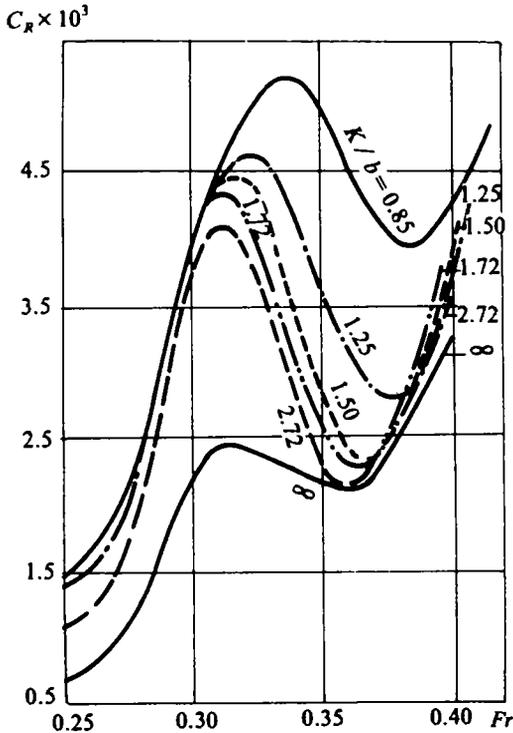


图1 No.1 双体船的 C_R 曲线

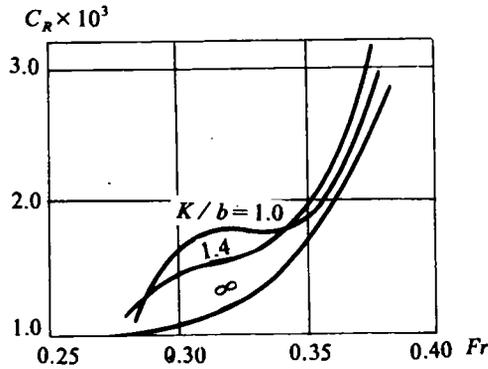


图2 No.9 双体船的 C_R 曲线

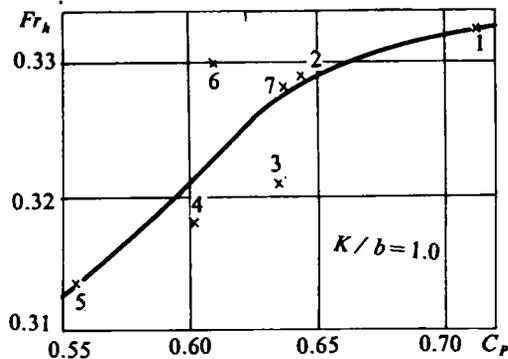


图3 7 条船 Fr_h 与 C_p 的对应关系

由于 No.3, No.7 两船模的 C_p 和 C_v 值基本接近, 因而由两者 b/T 的差别可以判定 b/T 值对 Fr_h 的影响。由表 1 可知, No.3 船模的 b/T 较 No.7 船模要大得多, 这说明增大 b/T , 相应的 Fr_h 下降, 可使剩余阻力峰值往较小的 Fr 移动。

为了分析 C_v 对 Fr_h 的影响, 可以比较 C_p 、 b/T 值相近的两组船模情况: A 组为 No.2 和 No.7 船模; B 组为 No.4 和 No.6 船模。两组船模的 C_p 值相差较大, A 组的 C_p 值大, 而 B 组却较小, 但两组的 b/T 值基本接近。由图 3 知, A 组船模的 Fr_h 值与 Fr_h-C_p 基本关系线相当接近。因此, 可以认为 C_p 值较大的船, 其 Fr_h 主要取决于 C_p 值, 而 C_v 的影响很小。B 组船模的 C_p 值均较小, 因此认为 Fr_h 与 C_v 关系甚大。

据上分析, 经归纳可得在 $k/b=1.0$ 情况下, 峰谷点对应的傅汝德数。

(1) 峰点对应的傅汝德数的表达式

$$Fr_h = f_{11} \times f_{12} (-0.0137 + 0.9434C_p - 0.6414C_p^2) \quad (1)$$

其中, f_{11} 为 C_v 对 Fr_h 的影响系数。当 $C_p > 0.63$ 时, $f_{11} = 1.0$; 当 $C_p < 0.63$ 时,

$$f_{11} = 0.978 + 0.0222e^{(2.55-C_v)} \quad f_{12} \text{ 为 } b/T \text{ 对 } fr_h \text{ 的影响系数 } f_{12} = 1.039 - 0.0244b/T.$$

(2) 谷点对应的傅汝德数

应用类似的分析方法, 可以得到在 $k/b=1.0$ 情况下剩余阻力系数谷点所对应的傅汝德数:

$$Fr_v = f_{21} \times (0.5254 - 0.75C_p + 0.773C_p^2) \quad (2)$$

其中 f_{21} 为 C_v 对 Fr_v 的影响系数,

$$f_{21} = 0.98 + 0.02e^{2(2.55-C_v)}$$

2. $k/b=1.0$ 时峰、谷点对应的剩余力阻力系数值

图 4 给出了在 $k/b=1.0$ 时 7 条双体船模剩余阻力系数峰、谷值 C_{Rh} 、 C_{Rv} 与 C_p 的基本关系曲线。图中同时给出了峰谷点不太明显的 No.8、No.9 两船模按前述方法确定 Fr_h 、 Fr_v 后, 所得的对应剩余阻力系数 C_{Rh} 和 C_{Rv} 值。由图可知, 棱形系数 C_p 对 C_{Rh} 、 C_{Rv} 影响较大, 总趋势是 C_p 越大的船, 所对应的 C_{Rh} 、 C_{Rv} 值亦大。

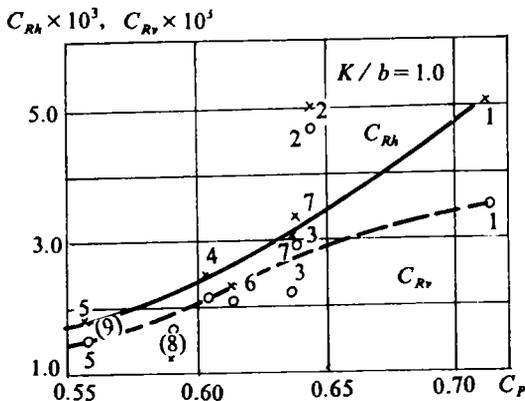


图 4 C_{Rh} 、 C_{Rv} 与 C_p 的对应关系

与前述类似, 首先建立 C_{Rh} , C_{Rv} 与 C_p 的基本关系曲线, 其它离散点的离散程度认为是由于参数 b/T 和 C_v 不同而引起的。最终经分析归纳可得到峰、谷点的剩余阻力系数数值与诸船型参数之间的关系。

(1) 峰点的剩余阻力系数值的表达式

$$C_{Rh} = f_{31} f_{32} (15.944 - 62.25C_p + 66.2C_p^2) \quad (3)$$

其中: f_{31} 为 C_v 对 C_{Rh} 的影响系数,

如 $C_p < 0.61$, $C_v > 2.5$ 时, $f_{31} = 0$

如 $C_p > 0.61$, $\begin{cases} C_v > 2.5 \text{ 时, } f_{31} = 0.575 + 0.17C_v \\ C_v < 2.5 \text{ 时, } f_{31} = 0.40 + 0.24C_v \end{cases}$

f_{32} 为 b/T 对 C_{Rh} 的影响系数,

当 $C_p > 0.63$ 时, $f_{32} = 1.0$

$C_p < 0.63$ 时, $f_{32} = 1.64 - 0.4b/T$ (如 $b/T > 2.0$ 则以 $b/T = 2.0$ 计算)

(2) 谷点剩余阻力系数值的表达式

$$C_{Rv} = f_{41} \times f_{42} \times (-15.818 + 46.21C_p - 26.9C_p^2) \quad (4)$$

其中: f_{41} 为 C_v 对 C_{Rv} 的影响系数,

如果 $C_p < 0.61$, 且 $C_v > 2.5$ 时, $f_{41} = 1.0$; 否则, $f_{41} = 0.5 + 0.20C_v$

f_{42} 为 b/T 对 C_{Rv} 的影响系数,

如 $C_p > 0.63$, 则 $f_{42} = 1.32 - 0.2b/T$

如 $C_p < 0.63$, 则 $f_{42} = 1.0 + 2.0(C_p - 0.53)(1.60 - b/T)$

(四) 确定 $k/b \neq 1.0$ 时的剩余阻力系数峰谷值及相应的傅汝德数

现在讨论双体船在 $k/b \neq 1.0$ 时的剩余阻力系数峰谷值及其对应傅汝德数的计算方法。

1. 剩余阻力峰谷点的 Fr 值随 k/b 的变化规律

图5给出了各船模在不同 k/b 情况下所对应的峰点傅汝德数 Fr_h , 谷点傅汝德数 Fr_v 与 k/b 的对应关系有类似的趋势。

由图可知, 由于诸船的参数各异, 因此即使在相同 k/b 时, Fr_h 值各不相同, 但是各船的 $Fr_h - k/b$ 曲线具有相同的趋势。据此可以归纳得当 $k/b \neq 1.0$ 时的峰谷点的傅汝德数与 $k/b = 1.0$ 时相应变化值 ΔFr_h 及 ΔFr_v 的表达式:

$$\Delta Fr_h = -0.02[1.8(\bar{k} - 1) - 0.782(\bar{k} - 1)^2] \quad (5)$$

$$\Delta Fr_v = -0.02[H_3(\bar{k} - 1) + H_4(\bar{k} - 1)^2] \quad (6)$$

式中, $\bar{k} = k/b \neq 1.0$ 为一般情况下的相对片体间距;

H_3 , H_4 为与船型参数有关的参数, 通过分析归纳得:

$$H_3 = (0.567 + 1.01e^x + 0.187e^{2x})(1.027 - 0.017b/T)$$

$$H_4 = -(0.188 + 0.257e^x + 0.347e^{2x})$$

其中, $x = 2.5 - C_v$

2. 剩余阻力系数的峰、谷值随 k/b 变化规律

图 6 表示了诸船在不同 k/b 时, 剩余阻力系数峰值 C_{Rh} 的变化规律。谷点的剩余阻力系数值 C_{Rv} 随 k/b 的变化趋势也基本类同。

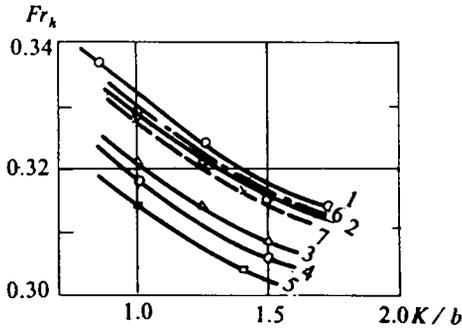


图 5 Fr_h 与 k/b 的对应关系

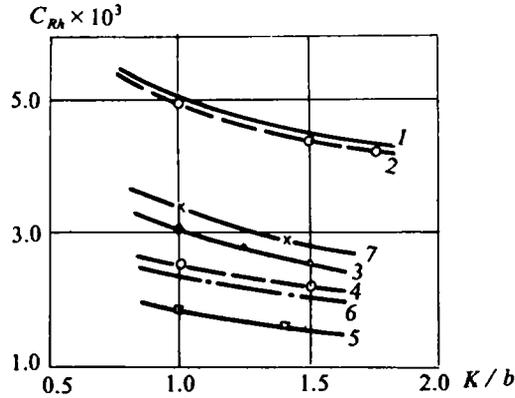


图 6 诸船的 C_{Rh} 随 k/b 的变化

不同双体船当 $k/b \neq 1.0$ 时的剩余阻力峰、谷值与 $k/b = 1.0$ 时的差值 ΔC_{Rh} 和 ΔC_{Rv} 却不尽相同, 显见这种变化量除与 k/b 有关外, 还受船型参数的影响, 经归纳得:

$$\Delta C_{Rh} = H_5(\bar{k} - 1) + H_6(\bar{k} - 1)^2 \tag{7}$$

$$\Delta C_{Rv} = H_7(\bar{k} - 1) + H_8(\bar{k} - 1)^2 \tag{8}$$

式中

a. 船型影响系数 H_5, H_6 可由下式表达:

如 $C_p > 0.63$, 则

$$H_5 = -1.636 + 0.08b/T - 0.05C_p$$

$$H_6 = 0.604 + 0.05b/T + 0.05C_p$$

如果 $C_p < 0.63$, 则

$$H_5 = -H_{5C} \times [1.1 - 6.03(C_p - 0.55) + 122.3(C_p - 0.55)^2]$$

$$H_6 = -H_{6C} \times (0.1 - 1.33C_p)$$

其中, H_{5C} 及 H_{6C} 为 C_v 对 H_5, H_6 的影响系数,

当 $C_v > 2.55$ 时, $H_{5C} = H_{6C} = 1.0$

当 $C_v < 2.55$ 时, $H_{5C} = 0.02 + 0.385C_v$

$$H_{6C} = 0.27 + 0.288C_v$$

b. 船型影响系数 H_7, H_8 可由下式表达:

$$H_7 = -H_{7C} \times H_{7h/T} \times [1.193 + 4.866(C_p - 0.55) + 52.16(C_p - 0.55)^2]$$

$$H_8 = H_{8C} \times H_{8h/T} \times [0.5834 + 7.542(C_p - 0.55) + 7.3(C_p - 0.55)^2]$$

其中, H_{7C} , H_{8C} 为 C_v 对 H_7 , H_8 的影响系数,

当 $C_p < 0.63$, 且 $C_v > 2.55$ 时, 则 $H_{7C} = H_{8C} = 1.0$; 否则 $H_{7C} = 1.36 - 0.34e^x$,
 $H_{8C} = 1.20 - 0.316e^x$;

式中, $x = 2.5 - C_v$

$H_{7h/T}$, $H_{8h/T}$ 为 b/T 对 H_7 , H_8 的影响系数,

$$H_{7h/T} = 1.36 - 30.227b/T; \quad H_{8h/T} = 1.0$$

(五) 确定谷点附近的剩余阻力系数曲线

实用上, 双体船的设计速度应该在谷点附近, 为此确定谷点附近的剩余阻力系数曲线有其实际意义。

1. 剩余阻力曲线的表达形式

双体船的 $C_R - Fr$ 曲线形状一般如图7所示, 由两部分组成:

(1) 对于 Fr 在 $Fr_h - Fr_v$ 之间, C_R 曲线可用余弦曲线表示:

$$C_R = (C_{Rh} + C_{Rv}) + (1/2)(C_{Rh} - C_{Rv}) \cdot \cos n\pi \quad (9)$$

(2) 当 $Fr > Fr_v$ 范围内, C_R 曲线可用二次曲线表示:

$$C_R = C_{Rv} + (C_{Rh} - C_{Rv}) \times [(Fr - Fr_v) / (Fr_c - Fr_v)]^2 \quad (10)$$

式中, $n = (Fr - Fr_h) / (Fr_v - Fr_h)$; Fr_c 称为相当峰值的傅汝德数, 即在 $Fr > Fr_v$ 范围内, 其剩余阻力系数 $C_R = C_{Rh}$ 时的傅汝德数。

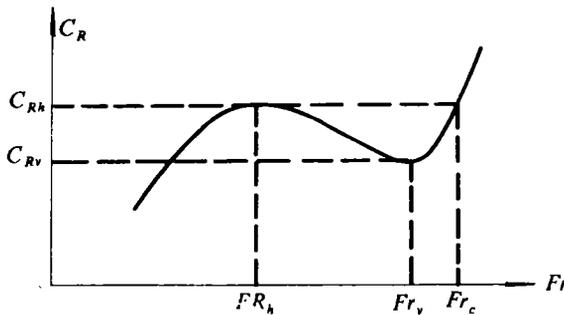
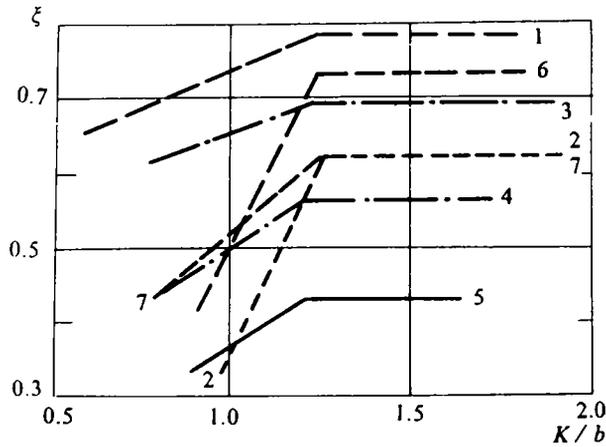


图7 双体船 C_R 曲线示意图

2. Fr_c 的确定方法

设 $\xi = (Fr_c - Fr_v) / (Fr_v - Fr_h)$, 显然, 如能确定 ξ 值, 即意味着求得 Fr_c 值。图8所示为各船的 ξ 与 k/b 的对应关系。该相应关系虽随船型而异, 但由图发现:

- (1) 当 $0.85 < k/b < 1.25$ 时 ξ 与 k/b 值成线性关系;
- (2) 当 $k/b > 1.25$ 时, ξ 趋于常数。

图8 诸船 ξ 值与 k/b 的关系

因此, 只要得到 $k/b=1.0$ 及 1.25 时的 $\xi_{1.0}$ 和 $\xi_{1.25}$ 值, 就可得任意 k/b 时的 ξ_k 值。同样, 根据这些船的资料归纳得:

$$\xi_{1.0} = -0.9154 + 2.2C_p + 0.144b/T - 0.07C_v \quad (11)$$

$$\xi_{1.25} = 0.53 + 2.4(C_p - 0.6) + 0.09(b/T - 1.6) + f_{cV}(C_v - 2.5) \quad (12)$$

其中 f_{cV} 为 C_v 对 $\xi_{1.25}$ 的影响系数, 其值分别取:

$$f_{cV} = \begin{cases} 0 & (\text{当 } C_v > 2.5) \\ -0.257 & (\text{当 } C_v < 2.5) \end{cases}$$

显然, k/b 为任意值时的 ξ_k 值为:

$$\text{当 } k/b < 1.25 \text{ 时, } \xi_k = \xi_{1.25} - 4(1.25 - k/b)(\xi_{1.25} - 1.0)$$

$$\text{当 } k/b > 1.25 \text{ 时, } \xi_k = \xi_{1.25}$$

(六) 试验结果与本文估算方法的比较

按照本文提出的方法, 对所统计的七条双体船的试验资料, 进行全面校核, 所得结果比较满意, Fr_h 与 Fr_v 的误差在 $1\% \sim 2\%$, C_{Rh} 与 C_{Rv} 的误差在 $3.2\% \sim 6.5\%$ 。

参 考 文 献

- 1 周旭芳. 双体船阻力及横摇性能研究: [硕士论文]. 上海: 上海交通大学, 1990.
- 2 沿海 350 客位双体船模型试验报告. 上海: 上海交通大学船模试验池, 1986.
- 3 蒋慰昌. 双体船阻力的模型试验和理论计算. 中国造船, 1965(3).
- 4 300 客位双体交通船(青浏)船模试验报告. 上海: 上海交通大学船模试验池, 1989.
- 5 300 客位双体交通船(港鹏)船模试验报告. 上海: 上海交通大学船模试验池, 1987.
- 6 张素荣, 黄武林. 船型对双体船阻力影响的统计分析. 中国造船, 1987(1).
- 7 350 客位双体交通船(春风)船模试验报告. 上海: 上海交通大学船模试验池, 1986.

PREDICTION OF CATAMARAN RESISTANCE IN CALM WATER

SHAO Shiming, ZHOU Xufang and WANG Yuncai
(Shanghai Jiao Tong University)

Abstract

Based on the regression analysis of resistance of nine models tested at $Fr < 0.38$, the effect of hull forms of catamaran on residual resistance coefficient C_R is investigated. The expressions for residual resistance coefficient C_{Rh} and C_{Rv} at the hump and hollow, and those for corresponding Froude number Fr_h , Fr_v are given respectively. These expressions which may be used for predicting the resistance of catamaran are shown as functions of demihull spacing ratio k/b , ratio of beam to draft b/T , prismatic coefficient C_p and displacement-length coefficient C_v , etc. A comparison of the proposed prediction method with experimental data indicates good agreement. The errors for C_{Rh} and C_{Rv} are 3.2% to 7.0%, while those for Fr_h , Fr_v corresponding to the residual resistance coefficient at hump and hollow are only 1% to 2%.

Key words: Catamaran, Ship resistance, Residual resistance, Regression analysis