

高速排水型双体船阻力估算的一种方法

李 炜, 王 青, 杨 洋

(海军装备研究院舰船所, 北京, 100073)

摘 要: 针对片体为圆舭型的高速排水型双体船, 分析了主要船型参数对阻力的影响, 通过回归分析建立了剩余阻力系数和湿面积的估算公式, 可用于初步设计阶段估算这种船型的阻力。

关键词: 船舶原理; 高速双体船; 阻力估算; 回归分析

中图分类号: U661.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2007) 04-0017-04

An evaluational approach of the resistance for high speed displacement type catamarans

LI Wei, WANG Qing, YANG Yang

(Institute of Naval Vessels, Naval Academy of Armament, Beijing 100073, China)

Abstract: Aiming at high speed displacement type catamarans whose demihulls are round-bilge form. The paper analyzes the influence of the parameter of main ship types on the resistance. Through the regression analysis, the evaluational formula of residuary resistance coefficient and wetted surface is set up. The formula can be used in the primary design phase to evaluate the resistance of this ship type.

Key words: theoretical naval architecture; high speed catamaran; resistance estimation; regression analysis

0 引言

由于具有甲板宽敞和阻力小的特点, 因此近二、三十年以来, 世界各国对高速双体船的需求不断增长. 该船型的应用范围已经从车/客运输扩展到海岸巡逻, 其数量居于非常规高速船的首位. 与此相适应, 研究人员努力开发用于该船型设计的阻力计(估)算方法. 本文在分析总结高速双体船阻力研究成果的基础上, 研究确定了影响阻力的主要船型参数, 通过数据回归分析, 提出了能在初步设计阶段估算具有圆舭对称片体的高速排水型双体船阻力的一种实用方法.

1 主要船型参数分析

高速排水型双体船可以看成由 2 个间隔一定距离的细长型高速排水型单体船(片体)组合而成. 这种构成表明, 它的阻力由每个片体各自的阻力和片体间的相互干扰来确定. 因此, 影响其阻力的船型参数应当包含单个片体的船型参数和 2 个片体的关联参数.

长期研究和实践的结果表明, 若干船型参数对高速排水型单体船的阻力有影响, 主要包括: 长度排水

量系数 ($L/\nabla^{1/3}$) 或长宽比 (L/B); 棱形系数 (C_p) 或方形系数 (C_b); 浮心纵向位置 (L_{cb}); 尾板与中剖面面积比 (A_t/A_m) 或宽度比 (B_t/B_m); 宽度吃水比 (B/T); 中剖面面积系数 (C_m); 水线面面积系数 (C_{wp}); 设计水线半角 (i_e); 横剖面形状(圆舭、折角线和混合线型). 两个片体的关联参数主要是间距长度比 (S/L) 或间距宽度比 (S/B).

针对片体为对称圆舭线型的高速排水型双体船的阻力问题已经进行了不少研究工作, 其原因是圆舭线型或混合线型(圆舭短折角线型)适用于傅汝德数小于 1 的高速排水型船. 在阻力研究中, S/L 、 $L/\nabla^{1/3}$ (或 L/B)、 B/T 和 C_p (或 C_b) 是主要船型参数. 通过分析和总结已有的研究成果, 可以得到这些船型参数对阻力, 特别是对干涉成份影响的一些结论^[1-5].

1) 间距长度比 (S/L) 是影响阻力的主要参数之一. 在傅汝德数 F_n 为 0.4~1.0 范围内, 基本趋势是剩余阻力随片体间距增加而减小, 但在高速段 ($F_n > 0.7$) 影响变小. 对粘性阻力, 双体船的形状因子 ($1+k$) 比相应单体船要大. 由于片体间压力场和速度场的变化,

收稿日期: 2006-12-15; 修回日期: 2007-04-27

作者简介: 李炜 (1963-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事舰船总论证和技术研究.

使得粘性的形状影响与相互作用的影响确实存在,且在 $S/L=0.5$ 的实用范围内基本上是恒定值;对兴波阻力,两个片体的波系之间相互作用而产生的兴波干涉基本是不利干涉,随片体间距的增加而减小,大致在 $F_n>0.7$ 的高速段可以忽略不计,且基本与 S/L 和 L/B 无关。

2) 长度排水量系数($L/\nabla^{1/3}$)是影响阻力的另一个主要参数.剩余阻力随 $L/\nabla^{1/3}$ 的增加而降低.对粘性阻力,基本趋势是形状因子 $(1+k)$ 随 $L/\nabla^{1/3}$ 的增加而略有减小;对兴波阻力,兴波干涉出现的时机和大小随 $L/\nabla^{1/3}$ 的变化而变化,在 F_n 较大而 $L/\nabla^{1/3}$ 较小时干涉较大。

3) 宽度吃水比(B/T)对阻力的影响不大.总的来看,在较小的 $L/\nabla^{1/3}$ 范围内, B/T 增加导致剩余阻力增加;在较大的 $L/\nabla^{1/3}$ 范围内则相反. B/T 增加时,形状因子 $(1+k)$ 略有降低或升高;对给定的 S/L , B/T 减小会使兴波干涉和兴波阻力有一定降低。

4) 棱形系数 C_p 在低速时对阻力影响较大,而在高速时相对较小.较大的 C_p 在较低速度时产生较高的剩余阻力.随着 C_p 的增加,形状因子总体上有增加的趋势.此外,较小的 C_p 在低速时有较低的波形阻力,在高速时产生较高的波形阻力。

上述分析表明,对具有圆艏对称片体的高速排水型双体船,影响阻力的主要船型参数包括 S/L 、 $L/\nabla^{1/3}$ 、 B/T 、 C_p ,其中 S/L 和 $L/\nabla^{1/3}$ 最重要。

2 回归分析

回归公式是船舶设计中,特别是初步设计阶段估算阻力的主要方法之一.通常,成功的回归分析取决于以下三个重要因素:准确和足够的试验数据(模型和实船)、恰当的回归公式和恰当的分析方法。

2.1 用于回归公式的船型参数

在初步设计阶段,生成型线图之前需要确定排水量、主尺度(L 、 B 、 T)和船型系数(C_b 、 C_p 、 C_m)。由于准确的阻力预报需建立在型线图基础之上且经常由模型试验获得,因此,阻力估算是比较不同总体方案并确定主要参数的恰当方法.它主要用于确定主尺度和船型系数,而且也需要基于主尺度和船型系数来完成.在上节定义的主要船型参数中, S/L 、 $L/\nabla^{1/3}$ 、 B/T 和 C_p 属于主尺度和船型系数,适用于阻力估算的回归公式。

回归公式中采用的船型参数还取决于能够得到的试验数据.从已掌握的资料来看, L_{cb} 、 A_f/A_m 和 i_e 等基本不作为船型研究的变量来考虑.因此,选择 S/L 、 $L/\nabla^{1/3}$ 、 B/T 和 C_p 为回归公式中的主要船型参数是恰当

的。

2.2 船型参数的适用范围

本文收集和整理了一批模型试验数据和模型参数.从满足回归分析和实用要求出发,经分析后确定船型参数(片体)的适用范围如下:

对称圆艏方尾线型, $L/B=7.0\sim 15.0$; $B/T=1.5\sim 2.5$; $L/\nabla^{1/3}=6.3\sim 9.7$; $S/L=0.2\sim 0.5$; $C_F=0.589\sim 0.733$; $F_n=0.4\sim 1.0$ 。

2.3 回归公式

从实用角度考虑,无因次阻力系数最适合于实船阻力预报.总阻力系数通常用下式表示:

$$C_T=C_F+C_R \quad (1)$$

式中, C_F 为摩擦阻力系数, C_R 为剩余阻力系数.然而在理论上,总阻力系数应当包括粘性阻力系数 C_V (基于雷诺数)和兴波阻力系数 C_W (基于傅汝德数),即:

$$C_T=C_V+C_W=(1+k)C_F+C_W=C_F+(kC_F+C_W) \quad (2)$$

和

$$C_R=kC_F+C_W \quad (3)$$

根据几何相似的模型或母型船的阻力数据计算实船阻力时,由于实船与模型或母型船之间的尺度不同,会出现傅汝德数相同而雷诺数不同的情况.这意味着确定实船阻力时使用了相同的 C_W 和不同的 C_F ,即:

$$C_{T_{\text{实}}} = C_{F_{\text{实}}} + C_{R_{\text{模}}} - k(C_{F_{\text{模}}} - C_{F_{\text{实}}}) \quad (4)$$

式中, $k(C_{F_{\text{模}}} - C_{F_{\text{实}}})$ 被用来修正尺度效应。

形状因子 $(1+k)$ 在修正尺度效应上起关键作用.它可由不同的方法获得:直接测量粘性和兴波阻力;基于几何相似数据的休斯回归;来源于低速试验数据的普鲁哈斯卡法;风洞试验和CFD方法.试验结果表明:形状因子随 F_n 的升高而减小,而且不同分析方法之间有较大差异.因为不能直接测量出每种阻力成份,而且实际上阻力成份之间存在相互作用,所以每种方法都有优点和缺点.目前,在准确估计形状因子方面还有一定程度的不确定性.此外,如果用回归公式估算实船阻力时考虑尺度效应修正,则为了回归分析,模型和实船必须统一长度,阻力数据必须修正.但由于部分模型和实船的形状因子难以得到,达到这一要求十分困难。

如果尺度效应不修正,即如ITTC的建议或傅汝德方法, $1+k=1$,则会存在一些误差.由式(4)可见,因为 $k(C_{F_{\text{模}}} - C_{F_{\text{实}}})$ 是正值,不修正的 $C_{T_{\text{实}}}$ 大于修正后的 $C_{T_{\text{实}}}$,即预计的航速会低于实际航速.同时实船试航和模型试验证明,模型长度增加, C_T 将会减小,说明误差减小.实践经验表明,这种误差在可接受的范围内,而且某种程度上过高估计阻力对实际应用有好处.这就是

傅汝德方法在理论上不合理但仍然广泛应用的原因。同时，回归分析中使用的实船数据也有助于减少尺度效应。

因此，实船裸船体总阻力由下式获得：

$$C_T = C_F + \Delta C_F + C_R \quad (5)$$

$$A_S = 2C_S(\nabla L)^{1/2} \quad (6)$$

$$R_T = C_T \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A_S \quad (7)$$

式中， C_F 由1957 ITTC方法得到； ΔC_F 为粗糙度补贴系数，由1978 ITTC方法得到； C_R 由本文提出的回归公式得到； C_S 为片体的湿面积系数，由本文提出的回归公式得到； ∇ 为片体的排水体积； A_S 为两个片体的湿面积。

剩余阻力系数 C_R 应当是速度和主要船型参数的函数，根据前面定义的主要船型参数，即有：

$$C_R = f(S/L, L/\nabla^{1/3}, B/T, C_p, F_n) \quad (8)$$

根据前面有关船型参数对阻力影响的分析，同时考虑 C_R 随 F_n 波动变化的趋势和较难形成公式的特点，经深入分析后提出 C_R 的回归公式：

对给定的 F_n ，

$$\begin{aligned} C_R \times 10^3 = & a_0 + a_1(S/L) + a_2(L/\nabla^{1/3}) + \\ & a_3(B/T) + a_4C_p + a_5(S/L)^2 + a_6(L/\nabla^{1/3})^2 + \\ & a_7(S/L)(L/\nabla^{1/3}) + a_8(S/L)(L/\nabla^{1/3})^2 + \\ & a_9(S/L)^2(L/\nabla^{1/3}) + a_{10}(S/L)(B/T) + \\ & a_{11}(S/L)C_p + a_{12}(L/\nabla^{1/3})(B/T) \end{aligned} \quad (9)$$

此处 F_n 的取值为， $F_n=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 。

湿面积系数 C_S 也是部分主要船型参数的函数。其回归公式可以定义为：

$$\begin{aligned} C_S = f(L/\nabla^{1/3}, B/T, C_b) = & a_0 + \\ & a_1(L/\nabla^{1/3}) + a_2(B/T) + a_3C_b + \\ & a_4(B/T)C_b + a_5(B/T)^2 + a_6(B/T)^3 \end{aligned} \quad (10)$$

上式相应的船型参数适用范围为：

对称圆舳方尾线型， $L/B=7.0\sim 15.0$ ； $B/T=1.2\sim 2.5$ ； $L/\nabla^{1/3}=6.3\sim 11.0$ ； $C_b=0.397\sim 0.5$ 。

2.4 回归公式系数的求解

回归分析能够确定一组数据（一个或多个自变量）与另一组数据（因变量）之间是否有关系或关联。多重线性回归分析是一种重要的、实用化的回归分析，已被广泛应用。如果假设： Y 表示一个观察的向量， X 表示已知形式的一个矩阵， A 表示 X 系数的一个向量，且相互关系定义为：

$$Y = XA + A$$

那么， A 的估计 B 可由适当的方法，如最小二乘法求得，即：

$$(XX)B = XY$$

$$\text{则 } B = (XX)^{-1}XY$$

公式(9)和(10)是线性的，带有未知系数(a_0, a_1, \dots, a_n)，将用多重线性回归求解这些系数。此时， Y 是 C_R 或 C_S 的一个向量， X 是船型参数($S/L, L/\nabla^{1/3}, B/T$ 等)的一个矩阵。通过软件进行多重线性回归分析，得到了回归公式(9)和(10)中的系数，分别见表1和表2。

表1 C_R 公式(公式9)中的系数

F_n	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
a_0	22.1981	99.0304	73.3740	28.4455	11.2719	4.3351	0.3688
a_1	-9.3077	-85.4385	-93.1281	-0.6763	26.8738	33.5809	42.5485
a_2	-6.09080	-23.0392	-16.0734	-6.3838	-2.9973	-1.7559	-0.9226
a_3	3.4113	4.0119	2.6755	1.7346	1.7359	1.3606	0.9725
a_4	5.9913	14.4957	11.8437	8.0623	7.4150	7.1886	7.5127
a_5	-53.2385	-41.5371	60.4786	21.9582	4.4441	-10.3604	-20.0135
a_6	0.3983	1.2967	0.8309	0.3239	0.1587	0.1020	0.0618
a_7	9.2675	23.0931	17.2062	-0.5764	-4.8896	-4.9210	-5.5646
a_8	-0.7870	-1.4899	-0.6909	0.1401	0.2996	0.2313	0.2194
a_9	5.1023	6.5368	-5.4024	-1.9199	-0.2081	1.1984	2.2482
a_{10}	-0.3380	0.8638	-1.0221	-0.5259	-0.3367	-0.3426	-0.4020
a_{11}	-6.9125	-21.6220	-19.2064	-11.5400	-11.7862	-10.7710	-13.5638
a_{12}	-0.3905	-0.4291	-0.2597	-0.1709	-0.1779	-0.1282	-0.0779

表2 C_S 公式(公式10)中的系数

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
11.92991	-0.00063	-12.56337	-2.54189	0.56847	6.05494	-0.97564

2.5 回归分析的结果

回归公式的精度是回归分析成功与否的判据. 拟合优度系数 R^2 的绝大部分值大于0.96, 仅 $F_n=1.0$ 的 R^2 值略低, 说明两个回归公式的自变量(主要船型参数)

和因变量(C_R 和 C_S)之间建立了良好的关系, 回归分析较好. 为了进一步检验 C_R 公式的精度, 从用于回归的数据中任意选出3组独立数据来比较实际值与预报值的差距. 比较的结果见表3.

表3 比较结果

F_n	4a (S/L=0.5)			5a (S/L=0.4)			6a (S/L=0.4)		
	$C_R \times 10^3$			$C_R \times 10^3$			$C_R \times 10^3$		
	实际值	预报值	误差%	实际值	预报值	误差%	实际值	预报值	误差%
0.4	5.109	5.386	5.42	4.622	4.753	2.84	4.257	4.117	-3.29
0.5	6.140	6.348	3.38	4.632	4.499	-2.86	3.855	3.703	-3.93
0.6	4.981	5.155	3.48	3.504	3.397	-3.06	2.955	2.904	-1.73
0.7	3.911	4.144	5.95	2.759	2.837	2.83	2.505	2.462	-1.70
0.8	3.296	3.492	5.95	2.327	2.527	8.59	2.304	2.244	-2.61
0.9	2.873	3.078	7.15				2.146	2.108	-1.78
1.0	2.558	2.837	10.90				1.976	2.009	1.69

从表中可见, 大部分的误差小于5%, 仅有一个在 $F_n=1.0$ 时达到约10%, 它与 $F_n=1.0$ 时略小的 R^2 值有关, 似乎不可接受. 但是, 剩余阻力是总阻力的一部分, 其相对幅值占总阻力(裸船体)的40%至60%, 且随着速度的提高而降低. 所以, 总阻力的误差会低于剩余阻力的误差. 以 C_R 误差最大的4a (S/L=0.5)为例, 总阻力的误差在2%~4.74%, 在工程上是可以接受的.

3 结语

研究提出实用的回归公式必须充分理解阻力成份与主要船型参数之间的关系, 即主要船型参数对阻力的影响. 考虑到初步设计的特点和已完成阻力研究的双体船船型参数范围, 在本文的回归分析中, 选择 S/L 、 $L/\nabla^{1/3}$ 、 B/T 和 C_p 作为主要船型参数.

从实用观点来看, 剩余阻力系数 C_R 是表达阻力的形式. 在已有数据的基础上, 通过多重线性回归分析确定了 C_R 的回归公式. 同样, 为了计算阻力, 还确定了估算湿面积系数 C_S 的回归公式. 对初步设计而言, 这些估算公式的精度是可以接受的.

在用于回归的数据中, C_p 的变化比较有限. 如果能够获得更多的数据, 不仅回归公式的应用范围能够扩大, 而且通过增加与 C_p 有关的项, 如 $(L/\nabla^{1/3}) C_p$, 还可以进一步提高公式的精度.

参考文献:

- [1] Insel M. and Molland A. F. An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans[J]. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 1992, 134: 1-20.
- [2] Molland A. F., Wellicome J. F. and Courser P. R. Resistance experiments on a systemic series of high speed displacement catamaran forms: variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio[J]. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 1996, 138: 55-71.
- [3] Molland A. F. and Lee A. R. An investigation into the effect of prismatic coefficient on catamaran resistance[J]. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 1997, 139: 157-165.
- [4] Courser P. R., Molland A. F., Armstrong N. A. and Utama I. K. A. P. Calm water powering predictions for high-speed catamarans[A]. Proc. Fourth International Conference on Fast Sea Transportation[C]. FAST 97, Sydney, Australia, 1997.
- [5] Bruzzone D., Cassella P., Pensa C., Scamardella A. and Zotti I. On the hydrodynamic characteristics of a high-speed catamaran with round-bilge hull: wave resistance and wave pattern experimental tests and numerical calculations[A]. Proc. Fourth International Conference on Fast Sea Transportation[C]. FAST 97, Sydney, Australia, 1997.