

# 圆舳双体船的阻力计算

柳卫东

(上海交通大学)

朱美琪 董元胜

(武汉交通科技大学)

**提 要** 本文根据对称片体圆舳型双体船的阻力试验资料,探讨了船型对双体船摩擦阻力和剩余阻力的影响机理,并运用多元线性回归分析方法,研究双体船剩余阻力系数  $C_r$  随傅汝德数  $F_n$  的变化规律,提出了剩余阻力系数曲线 ( $C_r-F_n$  曲线)的表达方法。用本文提出的方法计算圆舳双体船的剩余阻力系数,在 95% 的概率下,误差小于 7%。

**主题词** 双体船 摩擦阻力 剩余阻力 计算

## 1 引言

双体船的使用有着悠久的历史,甚至可以追溯到远古时期。直到本世纪五六十年代,日、美等一些发达国家陆续建造了一大批双体船以后,这一船型才有了较大的发展,并以其宽阔的甲板面积,极好的稳性和良好的操纵性受到人们的普遍重视,在内河以及近海航运中得到了广泛的应用。

目前常用的双体船阻力估算方法是把阻力分成两部分——摩擦阻力和剩余阻力。摩擦阻力近似地

54°(两端各多开曲槽 30°,共开曲槽 252°),见图 2。经计算,当油门总杆不受操纵手轮控制且处在油门零位位置(图 3)时,伺服电机通过传动机构作用于油门总杆的最小轴向驱动力为 145.50N。此时通过该传动机构,伺服电机输出轴受到了油门总杆弹簧力产生的逆向最大转矩——0.58Nm,约为伺服电机最小输出转矩的 7%。

实际设计数据大大优于技术要求。

## 3 台架试验

等速螺旋线曲槽由数控机床线切割加工而成,曲槽侧面经磨光处理,实船使用时镀铬。传动机构投入使用之际,采用了常规的油脂润滑、轴线导向、径向限位等措施,又针对该调速装置的特点,另外添设了

取两倍的片体摩擦阻力,而剩余阻力取两倍的片体剩余阻力再乘以一个干扰系数。由于两片体间狭水道的作用,片体间水流速度加大,双体船的摩擦阻力通常比两倍的片体摩擦阻力要大,即存在粘性干扰的问题;另外,由于双体船两片体兴波干扰非常复杂,其数值难以准确测量,剩余阻力干扰系数往往也难以精确确定。

本文根据以往的试验资料,用回归分析的方法对双体船的粘性干扰和兴波干扰作了较系统、全面的分析、整理,提出了一套较精确的双体船静水阻力计算方法,以供初步设计应用。

## 2 船型参数对双体船阻力的影响

### 2.1 双体船阻力的划分

一般认为,双体船阻力的划分基本上可按单体船阻力的划分方法进行<sup>[1][2][3]</sup>。本文根据实际情况,将双体船总阻力划分为:

$$R_t = 2R_{t0} + \Delta R_t + R_r \quad (1)$$

即将双体船的总阻力分为两倍的片体摩擦阻力、摩

油门总杆油门零位锁定装置,以便柴油机全面实现遥控操纵。

台架试验过程中,包括柴油机突加、突减负荷试验、低速稳定运转试验,超速飞车保护试验……并特意进行相对快速地作增、减油门的试验,该传动机构始终平稳自如,十分出色地胜任工作,这一颇具特色而非常有效的机械传动机械得到了肯定。

## 4 参考文献

- 1 《简明数学手册》编写组. 简明数学手册. 新 1 版. 上海: 上海教育出版社, 1978. 2-1~3-256
- 2 陈绍纲. 轮机工程手册(上册). 北京: 人民交通出版社, 1992. 1~195

擦干扰阻力和剩余阻力三部分,相应的总阻力系数可分为:

$$C_t = C_{t1} + C_{t2} = K_1 C_{t0} + C_{t2} \quad (2)$$

## 2.2 船型参数对双体船摩擦阻力的影响

船舶的粘性阻力包括摩擦阻力和粘压阻力,对双体船来说亦然。但双体船片体瘦削,长宽比通常在8~15之间,艏部型线收缩缓和,一般可保证不发生尾流分离,其粘压阻力主要是边界层的排挤阻力,此数值通常也较小<sup>[1]</sup>,因此双体船的粘压阻力较小,粘压阻力占粘性阻力的比例更小,船型参数对双体船粘性阻力的影响即可认为是摩擦阻力的影响。

从以往的文献<sup>[3]</sup>可以看出,双体船的粘性阻力总是大于两倍的片体粘性阻力,即双体船的粘性干扰阻力总是正的。为了解释这一现象,日本的Masaru Miyazawa对双体船周围的流场进行了分析<sup>[4]</sup>,结果表明,双体船粘性阻力的增大,主要是由双体船周围流体速度的增大引起的,与各单体周围纵向水流速度 $V_x$ 的非对称性关系不大。亦即船型参数对双体船摩擦干扰阻力的影响,主要表现在两片体周围水流速度的增加上,而间距比 $K/b$ 又是影响两片体周围水流速度的决定因素,其他船型参数对此则影响不大。故此,本文仅把间距比 $K/b$ 作为影响双体船摩擦干扰阻力的参数,其他参数的微小影响则忽略不计。

## 2.3 船型参数对双体船剩余阻力的影响

### 2.3.1 双体船剩余阻力系数曲线的特点

双体船 $C_r-F_a$ 曲线可分为两类:

第一类: $C_r-F_a$ 曲线存在明显的峰谷点,即谷点的 $C_r$ 值比峰点的 $C_r$ 值小很多;

第二类: $C_r-F_a$ 曲线存在一个不出现明显峰谷点的较平坦的区域,在此区域内, $C_r$ 值随 $F_a$ 的增加而无多大变化。

### 2.3.2 船型参数对双体船剩余阻力的影响

(1)棱形系数 $C_p$ 的影响。棱形系数 $C_p$ 是船型系数中十分重要的参数之一。它表征排水量沿船长方向的分布情况。根据阻力理论<sup>[1][2]</sup>可知:

棱形系数不同,表明船舶艏艉肥瘦程度不同,因此不同的航速下的兴波情况不同;

棱形系数不同,表明船体表面水压力大小不同,因此会影响波峰、波谷的所在位置,使艏艉波峰的相位差不同,影响兴波干扰。

(2)瘦长度系数 $C_a$ 的影响。瘦长度系数 $C_a(= \nabla / (0.1L_{wl})^3)$ 的物理意义是,在一定的船长情况

下,排水体积分布的多少。该系数大者,意味着在同样的长度范围内分布有更多的排水量,或者把同样的排水量分配在较短的船长范围内,因此表示船体肥而短;相反,该系数小,则表示船体瘦长。

当傅汝德数 $F_a > 0.3$ 时,单体船正处于剩余阻力主峰上坡区, $C_a$ 从来都是影响剩余阻力的主要参数,它既考虑船长的影响,又考虑船体纤瘦程度,这一点同样适用于各速度段的双体船。 $C_a$ 减小,船体瘦削,会使兴波阻力和粘压阻力均下降;反之,则使其上升。这说明瘦长度系数 $C_a$ 对片体剩余阻力有相当大的影响。

(3)片体宽度吃水比 $b/T$ 的影响。片体宽度吃水比 $b/T$ 对双体船剩余阻力的影响要看 $b$ 和 $T$ 分别影响的大小而定:一般认为,船宽 $b$ 增大时,船体的散波波高增加;而吃水 $T$ 增大时横波的波高增加<sup>[2]</sup>。 $b/T$ 的变化,是由 $b$ 、 $T$ 两者的变化引起的。对粘压阻力而言, $b/T$ 增加,片体长宽比 $L/b$ 减小,将使后体型线纵向倾斜程度增大,从而会使粘压阻力增大;对兴波阻力而言, $b/T$ 增大意味着排水体积比较集中于临近水面之处,且 $L/b$ 减小意味着纵向曲度增加,两者均将使兴波现象加强,从而增加兴波阻力。

由以上的分析可知, $b/T$ 对双体船剩余阻力有一定的影响。但双体船的片体宽度 $b$ 通常是在满足机舱布置的前提下尽可能取小值,以保证最佳片体间距比 $K/b$ 的选取和片体长宽比 $L/b$ 的加大。它对阻力影响主要表现在片体的摩擦阻力上。因此,可以认为片体宽度吃水比 $b/T$ 对双体船剩余阻力的影响不大,是次要影响参数。

(4)片体长宽比 $L/b$ 的影响。一般都认为长宽比 $L/b$ 是影响船舶阻力的重要参数,但它对剩余阻力的影响基本上同于瘦长度系数 $C_a$ 的情况,往往两者取其一。由于双体船片体很窄, $L/b=8\sim 15$ ,甚至更大,艏部水线几乎呈直线,片体水线进流角很小,使 $L/b$ 的变化对散波和横波的影响已趋平缓。因此,片体长宽比 $L/b$ 对双体船剩余阻力的影响较次要,可以不予考虑。

(5)片体间距比 $K/b$ 的影响。片体间距比 $K/b$ 是影响双体船反射波干扰阻力的关键参数,其大小直接影响反射波纵向干扰位置,进而影响双体船剩余干扰阻力的大小。

一般认为,片体间距比 $K/b$ 越大,或航速越高,则艏艉散波波峰驻点和反射波波峰驻点位置就越向

船艏移动。当间距比大到使艏散波波峰驻点超过船艏,片体不再对散波起反射作用,则反射波消失,反射波干扰不存在,双体船剩余阻力将等于两个片体剩余阻力之和。

由此可见,片体间距比  $K/b$  对双体船剩余干扰阻力起着决定性的作用,在设计双体船时,应根据具体的船型,选取适当的  $K/b$ ,使双体船剩余干扰阻力尽量减小。

### 3 回归方法的选取

回归分析的方法有许多种,常用的有多元线性回归分析、逐步回归分析等。逐步回归分析是一种从与因变量有关的自变量中选取对因变量有显著影响的自变量来建立回归方程的一种算法,从理论上讲是一种很好的回归方法。但是从大量的试算结果来看,该方法只有在原始数据量相当大的情况下才会得出满意的结果,而对本文这种原始数据并不很多的情况,却适得其反。根据各种方法的特点以及大量的试算,本文决定把多元线性回归分析作为推导双体船阻力系数的基本数学模型。

## 4 双体船阻力系数的回归分析及结论

### 4.1 双体船摩擦阻力干扰系数的回归分析

由船型参数对双体船摩擦阻力的影响的分析可知,影响双体船摩擦阻力干扰系数  $K_f$  的参数主要是片体间距比  $K/b$ ,因此在回归双体船摩擦阻力干扰系数  $K_f$  时,仅选此一参数进行回归分析。结果如式(3)所示<sup>[5]</sup>。

$$K_f = 0.023305/(K/b) - 0.014826K/b + 1.042445 \quad (3)$$

### 4.2 双体船剩余阻力系数的回归分析

#### 4.2.1 双体船剩余阻力系数曲线的表达方法

(1)双体船剩余阻力系数曲线有无峰谷点的判别。为了判别双体船剩余阻力系数曲线的峰谷现象,定义出现峰谷现象的衡准数<sup>[6]</sup>为:

$$H_{\alpha} = C_p C_d / \sqrt{b/T} \quad (4)$$

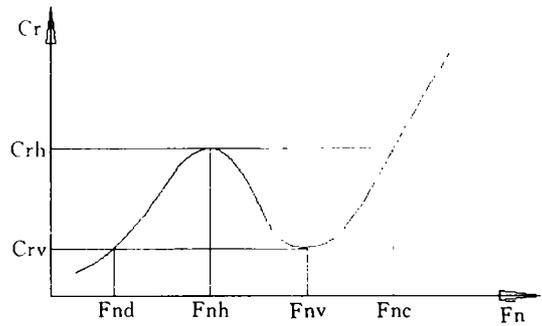
根据收集到的双体船数据,由统计得出,当

$$H_{\alpha} \geq 0.85 \quad (5)$$

时,双体船剩余阻力系数曲线有峰谷现象。本文根据实际情况,仅对有此现象的双体船剩余阻力系数进行回归分析。

(2)双体船剩余阻力系数曲线的表达方法。下图

为满足(5)式的双体船剩余阻力系数曲线示意图,曲线的表达可分为以下三段进行<sup>[5]</sup>。



双体船剩余阻力系数曲线示意图

①  $F_n \in [F_{nd}, F_{nh}]$  范围的  $C_r$  曲线,可用二次抛物线表达:

$$C_r = C_{rh} - (C_{rh} - C_{rv}) \cdot [(F_n - F_{nh}) / (F_{nd} - F_{nh})]^2 \quad (6)$$

②  $F_n \in [F_{nh}, F_{nv}]$  范围的  $C_r$  曲线,可用余弦曲线表达:

$$C_r = (C_{rh} + C_{rv}) / 2 + [(C_{rh} - C_{rv}) / 2] \cdot \cos[(F_n - F_{nh}) / (F_{nv} - F_{nh})] \pi \quad (7)$$

③  $F_n \in [F_{nv}, F_{nc}]$  范围的  $C_r$  曲线,用二次抛物线表达:

$$C_r = C_{rv} + (C_{rh} - C_{rv}) [(F_n - F_{nv}) / (F_{nc} - F_{nv})]^2 \quad (8)$$

#### 4.2.2 回归参数的选取

据前分析,并参考双体船剩余阻力系数曲线的表达方法,回归参数的选取分以下三类进行。

(1)影响  $F_{nd}$ 、 $F_{nh}$ 、 $F_{nv}$ 、 $F_{nc}$  的参数。该四个参数是双体船剩余阻力系数曲线上四个关键点所对应的傅汝德数(其具体意义见图)。它们表征的是这四个关键点出现时的航速。根据前面对双体船波系特性以及船型参数影响双体船剩余阻力规律的分析,可以得出结论:棱形系数  $C_p$ 、间距船长比  $K/L$ 、片体长宽比  $L/b$ 、片体宽吃水比  $b/T$  将会对此四个傅汝德数产生较大的影响,而其他参数的影响则较次要,可以忽略不计。

(2)影响  $C_{rh}$ 、 $C_{rv}$  的参数为棱形系数  $C_p$ 、片体瘦长度系数  $C_d$ 、片体间距比  $K/b$  三个。

#### 4.2.3 双体船剩余阻力系数回归结果及适用范围

将前述各参数组合成不同的耦合形式,运用多元线性回归方法,得出的回归结果见(9)~(14)式<sup>[5]</sup>。

$$F_{nd} = 12.783325C_p - 0.404884K/L + 0.151836L/b + 1.555691b/T$$

$$\begin{aligned}
 & -0.248706C_p L/b - 3.658409C_p b/T \\
 & -8.181259C_p^2 + 0.62039(K/L)^2 \\
 & + 0.192031(b/T)^2 - 5.693373 \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{nh} &= 0.363066C_p + 0.034313L/b \\
 & - 0.521371C_p K/L - 0.567C_p L/b \\
 & - 0.015196C_p b/T + 0.500373(K/L)^2 \\
 & - 0.162404 \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{nv} &= 1.04911e^{K/L} + 0.78526L/b \\
 & - 1.134018C_p e^{K/L} - 0.123459C_p L/b \\
 & - 0.225389e^{K/L} b/T + 2.224583C_p^2 \\
 & + 0.064178(b/T)^2 - 0.072138 \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{nc} &= -4.183802C_p + 0.707822e^{K/L} \\
 & - 0.069228C_p L/b + 0.841815C_p b/T \\
 & - 0.459632e^{K/L} b/T + 3.023676C_p^2 \\
 & + 0.002229(L/b)^2 + 1.196466 \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{rh} &= -73.210436C_p + 66.461841C_p^2 \\
 & - 0.694093C_d^2 + 4.222824C_p C_d \\
 & - 0.634517C_p K/b + 6.073331C_d^3 \\
 & + 0.037109(K/b)^3 - 0.306686C_p C_d K/b \\
 & + 19.99503 \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{rv} &= 24.52627C_p + 16.137053K/b \\
 & - 21.61169C_p K/b - 2.981565C_d K/b \\
 & + 1.840867(K/b)^3 + 6.138144C_d^2 \\
 & + 4.054583C_p C_d K/b - 3.358132e^{K/b} \\
 & + 0.01993e^{2K/b} - 8.280488 \quad (14)
 \end{aligned}$$

以上公式适用的船型参数范围见表1。

表1 船型参数的范围

$L_{wl}/b$	$b/T$	$C_p$	$C_d$	$K/b$
8.0~13.0	1.4~2.4	0.55~0.72	1.8~5.5	0.5~3.0

### 4.3 双体船阻力计算

#### 4.3.1 双体船摩擦阻力的计算

(1) 片体摩擦阻力系数  $C_{fo}$ , 按 1957 年八届 ITTC 公式计算:

$$C_{fo} = 0.075 / (1.47R_n - 2)^2$$

(2) 摩擦阻力干扰系数  $K_f$ , 按式(3)计算:

(3) 双体船摩擦阻力系数  $C_f$ , 按下式计算:

$$C_f = K_f C_{fo}$$

(4) 双体船摩擦阻力  $R_f$ , 按下式计算:

$$R_f = 0.5 \cdot \rho S v^2 (C_f + \Delta C_f)$$

式中  $\Delta C_f$ ——实船粗糙补贴,  $\Delta C_f = 0.4 \times 10^{-3}$ 。

#### 4.3.2 双体船剩余阻力的计算

该部分要求所计算之双体船片体为对称圆艏型,且应满足式(5)。

(1) 按式(9)~(14)计算  $F_{nd}$ 、 $F_{nb}$ 、 $F_{nv}$ 、 $F_{nc}$ 、 $C_{rh}$ 、 $C_{rv}$  的数值;

(2) 根据傅汝德数  $F_n$  的大小,按式(6)~(8)计算双体船剩余阻力系数  $C_r$ ;

(3) 按式(15)计算双体船剩余阻力  $R_r$ 。

$$R_r = 0.5 \rho S v^2 C_r \quad (15)$$

### 4.3.3 实例

表2 双体船  $C_r$  计算表

航速 $V_s$ (m/s)	傅汝德数 $F_n$	$C_r \times 10^3$			误差(%)	
		试验值	文献[6]法	本文法	文献[6]法	本文法
6.01	0.28	2.26	—	2.41	—	6.64
6.44	0.30	3.89	—	3.78	—	-2.83
6.87	0.32	4.45	4.61	4.55	3.60	2.25
7.30	0.34	3.50	3.80	3.82	8.57	9.14
7.73	0.36	2.43	2.58	2.59	6.17	6.58
8.16	0.38	2.62	2.52	2.60	-3.82	-0.76
8.59	0.40	3.89	3.63	3.91	-6.68	0.51

某双体船主要参数:

$$L_{wl}/b = 13.06$$

$$b/T = 1.50$$

$$C_p = 0.712$$

$$C_d = 2.566$$

$$K/b = 1.50$$

$$L_{wl} = 47.0 \text{ m}$$

用本方法计算该船的剩余阻力系数  $C_r$ , 如表2所示。表中同时列出试验值及文献[6]的计算结果供对照。

由表2可以看出,本文提出的双体船剩余阻力计算方法使用范围广、精度高,具有相当的实用价值。

### 5 结束语

阻力计算是船舶设计的一个重要环节,其结果直接影响到方案选择、主机选配、航速预报等工作。目前双体船阻力计算方法也有许多种,但都有不尽如人意之处。本文所提出的双体船阻力计算方法,容纳了以往的各种方法,计算步骤简便,计算精度较

[下转第9页]

(3)航行期间的正常调定状态。液压泵站的压力表约指示在 0.5MPa 位置上,泄放球阀全部关闭,控制箱的电源开关接通,电源指示灯为白色,高低压开关选在“高压”位置,泵的选择开关选在“自动”位置。1号泵运行,其运行指示灯为绿色,滤油器的机械压差指示绿色部位,滤器后压力比泵站稍低,各液压缸处的压力应为 0.5~1.7MPa。

### 5.3 由本地控制进行操作

(1)首先给液压泵站的报警装置以及电磁阀通电。若此电源开关断开,则主机运行期间,顶推液压缸不起任何作用,也没有报警信号。因此,电源开关必须接通,此时利用高/低压开关,可以控制安全阀块上的电磁阀,从而控制低压卸荷阀的工作状态,即选择“高压”时,各缸安全阀块上的电磁阀全部断电,顶推液压缸中的压力可以高达 1.7MPa,处于工作状态;选择“低压”时,电磁阀全被通电,液压缸中的压力油会经过低压卸荷阀泄至约 0.2MPa,此时则认为液压顶推不起作用。

(2)泵的开关有三种选择:“1号泵”形式;“自动”形式;“2号泵”形式。

“1号泵”形式决定了在系统启用时,只有1号泵工作。系统中油压的建立允许有一定的延时,但若超过 60s 而压力开关处的压力值仍达不到 0.14MPa 的话,那么1号泵将自动停止,同时本地控制箱上会出现红色报警灯信号,并且接通集控室内的红色报警指示灯。

“自动”形式决定了在系统起动时,首选1号泵进行工作,如果1号泵在 60s 内不能使系统油压超过 0.14MPa 的话,则其自动停止,同时2号泵被启动,投入工作。若2号泵启动后的 60s 内仍建立不起来高于 0.14MPa 的压力,则2号泵也会自动停止,此时本地出现报警信号,同时集控室内也报警。另外,在1号泵的正常工作时,如果系统压力连续下

降,当低于 0.09MPa 时,它就会自动停止,同时启动2号泵,并按上述延时程序执行。但若2号泵也无法满足要求,则只有停止并报警,而不能再同时自动启动1号泵。

“2号泵”形式只用2号泵,情形与“1号泵”形式完全类似。利用本地起动或停止按钮可以起动或停止泵。起动后,该泵的指示灯为绿色,系统中的油压的高低取决于高低压选择开关。“复位”按钮的功能可使“自动”状态下的两次延时复位,同时取消本地和遥控报警信号。

海上航行期间,在“自动”运行状态下,若主机的转速超过了设定值 116r/min 时,则转速控制箱同样会给电磁阀通电,使顶推液压系统不起作用。

## 6 维护

重要的是应保持液压缸的活塞位置指针指在绿色带上。可能会因船只载重及热膨胀变化而有所偏移,所以当船只为非正常装载情况时,指针处于绿色和红色条带之间是可以接受的。重载时,由于船体变形压缩液压缸,使其活塞位置指针移向船体侧;轻载时,它又会移向主机侧。但是,无论如何,绝对不允许指针处于红色带时继续工作,否则,液压缸将受到损坏而无法工作。

建议在系统安装完投入使用后的短时期内,主机为热态并且船只载重正常时,对整个液压顶推装置重新进行一次检查调整,以确保其日后能正常工作。另外,在新船上采用此种液压顶推装置时,行之有效的办法就是,将主机侧的长梁结构支座在主机上船安装前首先与主机焊装,顶推液压缸和船体侧的支座一并上船,置于安装位置附近,待进度条件许可,即主机定位后可及时全部施工安装就位。这样既省掉了繁重的搬运劳动,又为后续工序打下了良好基础。

〔上接第 18 页〕

高,剩余阻力系数误差在 95% 概率下小于 7%,基本可以满足目前双体船设计的需要。

## 6 参考文献

- 1 李世谟. 船舶阻力. 北京:人民交通出版社,1989.
- 2 姜次平,邵世明. 船舶阻力. 上海:上海交通大学出版社,1985.
- 3 杨春勤. 双体船阻力的尾流波型测量和理论计算:[硕士学位论文].

学位论文]. 上海:上海船舶运输科学研究所,1989.

- 4 Miyazawa M. A Study on the flow around a catamaran. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1979, 145:46.
- 5 柳卫东. 双体船型阻力计算研究:[硕士学位论文]. 武汉:武汉交通科技大学船舶及海洋工程系,1997.
- 6 周旭芳. 双体船阻力及横摇性能研究:[硕士学位论文]. 上海:上海交通大学船舶与海洋工程学院,1990.