

# 方尾艇滑行前的阻力 (摘译)

作者: John A. Mercier, Daniel Savitsky

## 摘 要

本文提出方尾艇在非滑行区——体积佛氏数小于 2.0 时的阻力估算方法。此方法是对七个方尾艇系列共 118 个船模的静水阻力数据回归分析而得。

统计分析的相关方程是排水量长度比、船宽负荷、进水角、方尾面积与最大剖面面积比和佛氏数的函数。可用于设计初始阶段估算滑行船型在低佛氏数时阻力。

## 引 言

小的、高速的(体积佛氏数大约在 2.0 以上)海上小艇被设计成滑行船型。在正常的情况滑行艇具有方尾和折角线以使水流能较早的从方尾和折角线分离,具有平直的后部纵剖面以产生正的动压力,负荷和重心位置的配合使能产生正的纵倾和在滑行时首部完全抬起等特点。在上述情况下, Savitsky 和 Hadler 对棱柱形船形的估算方法可以用于估算在静水中的性能。事实上这种方法可以用于确定开始滑行的速度。此时,因为船头从水中抬起,计算的龙骨浸湿长度小于船体的水线长。

每艘滑行艇都必然要经过船头仍然浸于水中的非滑行速度区域。还有,虽然原来设计的是一艘成功的滑行艇,有时装载增加,因而不再能够达到滑行速度。同样的,在某些军用艇上强迫限制最大吃水,船宽或船长,往往艇太小、装载多,因而整个航速范围内船头都不脱离水面。对这些“非滑行”情况,缺乏估算静水中性能的方法和对选择最佳船型尺度、比例系数的设计指导。在初步设计中只能依靠船模试验或者依靠船型系列的资料。

本文的目的是发表一个能够预估方尾船型在非滑行区域(对体积佛氏数等于或小于 2.0 时)流本动力阻力的方法。对更高的速度可以应用文献 1 中的滑行公式。

对七个方尾船型系列的 118 个船形的静水阻力资料进行回归分析,分析推导出一个以船的排水量长度比,船宽负荷,水线进角,方尾面积与最大剖面面积比为函数的相关方程式。非滑行状态的阻力用此方程式预估。这个方程式可用于设计的初始阶段估算系列外船形的阻力。每一个体积佛氏数有一个单独的计算公式。

本文完整地介绍了这 118 个船模所属的七个方尾船型系列的特征,包括它们的横剖面、首尾型,设计水线进角和阻力特性。同时发表了重心对阻力影响的简单分析。列举了几艘系列以外船形采用这个估算方法的例子。船形参数的改变对阻力的影响也加以说明。最后讨论了这个方的统计误差。

## 滑行船体在静水中的流体动力现象

为对所研究结果有一概括的认识,对方尾船体在一个很广的速度范围内静水中的流体动力现

象作一个叙述。

a) 从零速到低速, 滑艇即为排水型艇, 其升力全由浮力而得。

b) 速度增加至速度系数  $C_V = V/\sqrt{gB_T} \approx 0.50$  (以方尾宽表示), 看到了动力效应对尾流形状影响的第一个迹象。发生了方尾全部脱水的现象, 这与艏部斜度, 纵倾或船体长度等这些参数的特征值无关。同时, 如同文献 1 所指出, 与完全由吃水和纵倾来决定的静升力相比存在着合成流体动力升力的损失。在此速度, 船头下沉, 总的流体动力阻力增加了。

c) 当速度系数在 0.5 到 1.5 之间, 虽然动力效应产生一个正的升力, 在大多数情况下尚不足以造成重心的显著升高或船头的抬起。一般说来, 水流仅从折角线的前部稍有分离, 因而舷侧皆是浸湿的。在这个速度范围内, 从本质上来讲是一艘高速排水型艇。船头仍然是浸于水中, 大部分舷侧是浸湿的, 缺少一个合适的阻力估算的分析方法。这是本文所研究的速度区域。

d) 当速度系数约大于 1.5, 一个设计良好的滑艇将会产生很大的动升力, 使重心明显上升, 有一些正的纵倾, 船头抬起, 而水流从折角线分离。流体动力的阻力由船底压力的水平分力和船底水流摩擦分量所组成, 船首不产生阻力。从折角线分离的水流(对某一个  $C_V$ 、 $\beta$ 、 $\tau$  和平均浸湿长宽比入的组合)依附于方尾前面一段距离的棱柱形船体的舷侧上。

图 1 上给出一个经验公式和经试验资料证实的舷侧浸湿区域。通过这些试验数据的直线斜率为:

$$\lambda_{01} - \lambda_{02} = C_V^2 \sin \tau \quad (1)$$

折角线是干燥的条件是  $\lambda_{02}$  应为零。从文献 1 所给的浸湿面积的关系式, 可表示为:

$$\lambda_{01} = \lambda - \frac{1}{2\pi} \frac{\tan \beta}{\tan \tau} \quad (2)$$

于是, 棱柱形船体滑行折角线干燥必须是:

$$C_V^2 = \frac{\lambda - 0.16 \tan \beta / \tan \tau}{3 \sin \tau} \quad (3)$$

这个公式对典型的滑艇来讲是保守的, 典型的船型方尾宽小于最大宽, 舷侧不象棱柱形船模那样是垂直的, 而是具有内倾的。

滑艇在速度系数近于 1.5 到 2.0 时常常纵倾达到最大值, 所谓“纵倾峰”。随着速度的增加, 纵倾再次减少而龙骨浸湿长度增加。当速度系数十分高的时候, 根据艇的负荷和重心纵向位置, 船头可能再次浸入水中。文献 1 中的滑行方程式可用以确定船头再次浸入水中的速度和负荷情况。在此高速情况, 船头阻力增加值比较小, 因为艇的重心升高很大, 船头入水很少。使用文献 1 中关于滑行性能的预估, 在此高速度时可获得满意的结果。

e) 概况 图 2 表示上述滑行和非滑行性能的定量介绍。文献 3 系列 62 滑艇船型  $L/B = 2$  船模 (4665 船模) 的静水阻力和纵倾, 以体积佛氏数 ( $F_{nV} = V/\sqrt{g\nabla^{1/3}}$ ) 表示。以  $F_{nV}$  为座标是因为此速度系速 Clement 和 Blount 在文献 3 中采用。在此情况  $F_{nV} \sim 1.5C_V$ 。

图上未打点的区域表示船模试验时量得的龙骨浸湿长度小于设计水线。圆圈点代表用文献 1 的滑行公式计算的纵倾和阻力。在  $L_K < L_{WL}$  的速度区域, 船头基本抬出水面, 计算结果与实测很吻合。对  $F_{nV}$  约小于 2.0 时,  $L_K > L_{WL}$ , 船头下沉。测得的阻力值大大超过用滑行公式估算的值, 这说明船头下沉有很大的影响。当重心纵向位置较前时, 影响更为明显, 因它加大了船头的下沉。

当  $F_{nV}$  大于 4 左右,  $L_K$  再次比  $L_{WL}$  为大, 计算和实测的阻力又吻合了。这表示在这个速度

范围船头稍有下沉, 对阻力影响不严重。当  $F_{nv} \geq 2.0$  时滑行区域实测和计算的纵倾角是吻合的。

如要在全部速度范围内分析估算性能, 则必须进行方尾滑行船体在  $F_{nv} \leq 2.0$  时的阻力预估工作。按完全在滑行区域最大航速设计的艇所需的功率比在  $F_{nv} \leq 2.0$  时要大的多。但是小型军用艇的常用巡航速度是在  $F_{nv} \leq 2.0$  范围。而一艘艇的大部分使用期在此速度范围内。因此, 要求合理的设计指导, 使达到低的阻力, 燃油最经济或用以选择与高速推进主机分开的巡航主机。

下面部分就是介绍在非滑行区估算阻力的分析方法。

## 所用系列的简介

以几个方尾艇系列的阻力试验结果为基础推导了阻力估算公式。使用系列试验结果的优点是它比从大量个别的试验结果能更容易地获得船型特征等情况。分析中主要使用一些比较小的无分水踵的快速艇, 某些系列中包括的一些大型中速船就不加以考虑。

七个系列的几何特征列于表 1, 其剖面形状及首尾外形见图 3~9, 以作比较。

模型试验结果换算实船在 59°F 海水,  $C_A = 0$  时 100,000 磅艇的每磅排水量的阻力值(磅)。船模换算成实船时使用 1947 年 ATTC (桑海公式) 摩擦阻力系数。只有 SSPA 系列 Lindgren 和 Willianss 发表时用 1957 年 ITTC 摩擦阻力系数。在所研究的整个速度范围, 用 ITTC 计算摩擦阻力系数比用 ATTC 计算摩擦阻力系数使剩余阻力系数约低 2.5%, 对总阻力的影响很小。

## 阻力公式的推导

对七个方尾艇系列 118 个船模阻力结果进行分析, 以推导一个统计分析的相关方程式, 用于设计初始阶段估算系列外船的阻力。

### 以前的分析情况

Doust 第一个用拖网渔船船形的阻力数据进行统计分析, 使用英国国家物理研究所第一水池所有的拖网渔船船模试验资料。剩余阻力系数在四种速长比  $\frac{V}{\sqrt{L}} = 0.80, 0.90, 1.0$  和  $1.1$  时用曲线加以光滑。用最小二乘方方法导出方程式, 将阻力表示为六个船型参数 ( $L/B, B/T, C_M, C_F, L_{OB}/L_{PP} \%$  和  $i_s$ ) 的函数。在每一种速度参数时公式中包含有 30 个系数。用推导出来的方程式与船模试验结果比较十分吻合。“测得的和计算得的阻力系数之间的差别 (对  $L_{PP} = 200$  英尺的船  $C_{TL} = R_{TL}/\Delta V^3$ ) 除  $V/\sqrt{L} = 1.0$  外, 在 95% 的情况下小于 3%。在  $V/\sqrt{L} = 1.0$  时  $C_{TL}$  随  $V/\sqrt{L}$  的变化率十分高, 在 85% 的情况下误差在 5% 以内”。

Doust 还用最小二乘方的方法分析拖网渔船的推进资料<sup>[12]</sup>, <sup>[13]</sup> 和各种类型高速商船的阻力和推进数据<sup>[14]</sup>。Sabit 也采用这种分析方法分析系列 60<sup>[15]</sup> 和英国船舶协会系列的商船船型。

荷兰船模试验池 Van Oortmerssen<sup>[17]</sup> 作了很有意义的分析, 他将阻力和航速的关系化为 Havelock<sup>[18]</sup> 所提出的兴波阻力公式中的一些关系式。用这个方法在所有速度范围内推导出一个简单的公式, 而 Doust 的方法对每一个速度有一个单独的公式。另一个优点是超出速度范围也能外插, 因为在方程式中速度的关系是用理论推导的。这个方法中采用的是一些小船, 如拖网渔船。

拖船等杂乱的资料。由其导出的方程式估算，比 Doust 所公布的精确性要差。计算与实测的误差在 90% 情况下为 12%。

本文中采用 Doust 的分析方法，每一个速度参数有一个单独的方程式，不如 Van Oortmerssen 的方法好。因为方尾艇速度与兴波阻力的关系没有象常规船尾那样可从理论分析得到满意的结果。

本文分析中包括了阻力峰区，它一般对应于兴波阻力和佛氏数关系曲线的最后一个和最大峰处。该曲线在较低速区域有显著的峰与谷。在高于此速度时艇将达到滑行状态或处于具有较大峰值为小的固定的兴波阻力系数的排水型情况。

在这个速度范围内对小型方尾艇的阻力分析最有用的指导意见是 Nordstrom<sup>[7]</sup> 所提出经 Clement<sup>[8]</sup> 评论并加以引伸的意见。Nordstrom 认为在这个速度范围，在一给定的体积佛氏数  $F_{np} = V/\sqrt{g\nabla^{1/3}}$  时每磅排水量的阻力与船长排水体积比  $L/\nabla^{1/3}$  的关系最为密切，即对峰点阻力来讲是一个最重要的参数。本文中除对  $L/\nabla^{1/3}$  的关系作更全面的说明外，还确定一些其他参数的关系。

## 本文分析中所用的资料和公式

计算出七个系列 118 船模在十一个佛氏数  $F_{np} = 1.0, 1.1, \dots, 2.0$  时每磅排水量的总阻力，以推导阻力方程式。

所采用的较短较丰满的船型（例如系列 62, 63）剩余阻力占总阻力的大部分，有些情况占总阻力 95%。而较长较瘦船型（例如系列 64）摩擦阻力占主要部分，有些情况占总阻力 75%。因为对这些瘦的船型  $R_R/\Delta$  特别小，因而很难找到一个曲线方程式，使其很接近较瘦船型  $R_R/\Delta$  值。在这种情况下用  $R_T/\Delta$  曲线求得的方程式与实测的结果就十分接近。因为  $R_T/\Delta$  值是对于在海水中水温 59°F,  $C_A = 0.0$  的 100,000 磅的船。对其他情况的排水量， $C_A$  等应进行修正。因为它与船体浸湿面积有关。

估算浸湿面积和进行修正的方法将在后面述及，除特别瘦的船外，这种修正往往并不十分重要。

在阻力估算公式中选用四个参数：

1.  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ ——因为 Nordstrom 指出它很重要。
2.  $C_A = \Delta/WB_x^3 = \Delta/B_x^3$ ——因为滑行性能（特别是在波浪中的性能）与这个参数的关系很大，它对高的过渡滑行速度也很重要。
3.  $i_e$ ——水线半进角，因为初步的图表修正认为这个参数比  $L/B$  为好。
4.  $A_r/A_x$ ——方尾面积与最大剖面积之比。从流体静力和流体动力考虑，水流在方尾处分离将产生一个阻力增量（空泡阻力），因此包括此参数。

由于一些特殊的原因，另外一些参数在某些速度范围内已经知道对阻力有实际的影响但被忽略。本分析中使用的系列，重心纵向位置一般均未变化。但对不同系列中有几条船模进行变重心纵向位置的试验，并提出了最佳的或接近于最佳的重心纵向位置的条件。附录中发表了重心纵向位置不同时估算阻力的近似修正方法。此方法是根据系列 62 折角船模（文献 3）和系列 63 圆艏船型试验结果得出。另一些参数如艏升角、折角线和圆艏形状，对滑行速度都是重要的，但对较低速度范围就没有那么重要。对这 118 船模的船形参数之间的关系和推导公式的使用范围将在另一部分中进行讨论。

实际上,  $\nabla^{1/3}/L_{WL}$  被用于这个分析中是使导出的方程式减少项数并与数据更吻合。与 Nordstron 认为的  $R_T/\Delta$ ——常数/ $(L_{WL}/\nabla^{1/3})$  的关系十分接近。水线半进角  $i_0$  在公式中用原来图表分析中建议采用的  $\sqrt{2i_0}$  的形式。

推导公式中采用的符号为:

$$\begin{aligned} X &= \nabla^{1/3}/L_{WL} \\ Z &= \nabla/B_X^3 \\ U &= \sqrt{2i_0} \\ W &= A_T/A_X \end{aligned} \quad (4)$$

这些系数中所用的尺度都是相当于静水 ( $V = 0$ ) 的吃水和纵倾从线型图上相应水线量得。 $B_X$  和  $A_X$  分别是最大水线宽和最大剖面面积, 一般并不就在中剖面处。

采用最小二乘方的方法, 起初求得一个有 27 项的公式:

$$\begin{aligned} R_T/\Delta &= A_1 + A_2X + A_3Z + A_4U + A_5W + A_6XZ + A_7XU + A_8XW + A_9ZU + A_{10}ZW \\ &+ A_{11}UW + A_{12}X^2 + A_{13}Z^2 + A_{14}U^2 + A_{15}W^2 + A_{16}XZ^2 + A_{17}XU^2 + A_{18}XW^2 \\ &+ A_{19}ZX^2 + A_{20}ZU^2 + A_{21}ZW^2 + A_{22}UX^2 + A_{23}UZ^2 + A_{24}UW^2 + A_{25}WX^2 \\ &+ A_{26}WZ^2 + A_{27}WU^2 \end{aligned} \quad (5)$$

略去一些次要项, 直到进一步简化将使吻合程度将严重下降为止。判断的依据是: a) 阻力测量和计算值之间平均绝对差值的百分数; b) 差值平方和的平方根。图 10 表示在  $F_{nV} = 1.5$  时以方程式中项数为座标的这些差值的变化情况。采用二种计算方案: 第一种用最小二乘方方法使实测和计算阻力之间的差别量为最小, 第二种采用这个方法使差值的百分数最小。这二种情况略去的项数使简化了的方程式中余下的项数相同, 但系数却有少许不同。在不少于十项的条件下, 当  $F_{nV} = 1.5$  时减少项数对公式的吻合程度影响很小。

### 最后的估算公式 ( $\Delta = 100,000$ 磅)

求出一个具有较少项数的方程式有二个原因: a) 项数较多时, 方程式与数据的吻合当然可以更好一些, 但是用于某种特殊情况的外插性却是不好的, 因为一般说来项数较多时参数的关系不“和谐”, b) 采用的公式很容易的可以使用现代的台式电子计算机(具有记忆装置则更好)代替程序计算机进行计算。对十一个  $F_{nV}$  值选用 14 项的方程式:

$$\begin{aligned} R_T/\Delta &= A_1 + A_2X + A_4U + A_5W + A_6XZ + A_7XU + A_8XW + A_9ZU \\ &+ A_{10}ZW + A_{15}W^2 + A_{18}XW^2 + A_{19}ZX^2 + A_{24}UW^2 + A_{27}WU^2 \end{aligned} \quad (6)$$

系数值列于表 2 (对 100,000 磅排水量)。在每一种情况 14 项中有一些项是略去的, 没有一种情况超过 13 项。这些方程式和系数都是根据使实测和计算的阻力之间的差别趋于最小求得。

### 适用范围

一个经验的阻力方程式可用于估算艇的阻力, 这些艇的特征应在推导方程式时所使用的阻力资料的船模特征范围内。如欲估算阻力的艇没有上述这个特点, 则必须冒一些或大或小的风险。推导经验的阻力估算方程式的作者都提出这样的警告。特别在小艇上应用, 因为设计师常常采用“非正统”的线型。

表 1 船 模 几 何 要 素

系 列	$\frac{L_{WL}}{\nabla^{1/3}}$	$C_A$	$i_0$ (度)	$C_B$	$C_P$	$C_{WP}$	$L_{WL}/B_X$	$B_X/T$	$A_T/A_X$	$B_T/B_X$	$T_T/T_X$	$\frac{LCG}{LPP}$
NPL	4.5, 5.0	0.134	11				3.33	1.69				
	5.5, 6.0	到	12.5	0.397	0.693	0.753	4.55	到	0.52	0.815	0.513	更后 0.064
	6.5, 7.0	到	16.1				5.41	9.83				
	7.5, 8.0 和 8.5	1.468	及 20.5				及 6.25					
NORd-STROM	5.65	0.518	15.1	0.373	0.576	0.725	4.83	3.57	0	0	0	更后 0.0179
	到	到	到	0.390	0.589	到	到	3.34	0.06	0.66	0.10	0.0249
	7.72	0.877	22.5	0.410	0.599	0.761	6.94	3.16	0.13	0.72	0.15	0.0288
DEGROOT	5.23	0.550	13.5	0.421	0.650	0.787	4.55	3.57	0.17	0.75	0.18	更后 0.016
	到	到	到	0.437	0.661	到	到	3.34	0.23	0.78	0.24	0.025
	7.75	1.039	22.4	0.457	0.677	0.796	7.39	3.16	0.30	0.79	0.29	0.0264
SSPA	6	0.616	8.24	0.40	0.68	0.73	4.623	3	0.42	0.77	0.41	更后 0.0415
	7	到	到				到	3.5				
	8	0.821	14.4				8.213	4				
系列 64	8.04	0.740	3.7	0.35	0.63	0.761	8.454	2	0.405	0.86	0.44	
	到	到	到	0.45			到	3			0.37	更后 0.0656
	12.4	4.877	7.8	0.55			18.264	4			0.29	
系列 63	4.5	0.061	16.9	0.383	0.577	0.775	2.524	2.891	0.03	0.26	0.065	更后 0.058
	到	到	到	到	到	到	到	到	到	到	到	到
	6.4	1.204	28.6	0.636	0.774	0.815	5.750	9.503	0.74	0.91	0.770	更前 0.003
系列 62	3.07	0.090	32.2	0.44	0.80	0.795	1.87	3.25	0.755	0.69		更后 0.052
	到	到	到	到	到	到	到	到	到	到	≈1.0	0.058
	8.53	0.869	65.6	0.605	0.81	0.825	6.72	8.00	0.985	0.87		0.065

表 2 估算阻力方程式 (6) 的系数

$$X = \nabla^{1/3} / L_{wL} \quad U = \sqrt{2i_0} \quad Z = C_4 = \nabla / R_4^3 \quad W = A_T / A_x$$

系数	乘相项	$F_{np}=1.0$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$A_1$	1	0.06473	0.10776	0.09483	0.03475	0.03013	0.03163	0.03194	0.04343	0.05036	0.05612	0.05967
$A_2$	X	-0.48680	-0.88787	-0.63720	0	0	0	0	0	0	0	0
$A_4$	U	-0.01030	-0.01634	-0.01540	-0.00978	-0.00664	0	0	0	0	0	0
$A_5$	W	-0.06490	-0.13444	-0.13580	-0.05097	-0.05540	-0.10543	-0.08599	-0.13289	-0.15597	-0.18661	-0.19756
$A_6$	XZ	0	0	-0.16046	-0.21880	-0.19359	-0.20540	-0.19442	-0.18062	-0.17813	-0.18288	-0.20152
$A_7$	XU	0.10628	0.18186	0.16803	0.10430	0.09612	0.06007	0.06191	0.05487	0.05099	0.04744	0.04645
$A_8$	XW	0.97310	1.83080	1.55972	0.43510	0.51820	0.58230	0.52049	0.78195	0.92859	1.18569	1.30026
$A_9$	ZU	-0.00272	-0.00389	-0.00309	-0.00198	-0.00215	-0.00372	-0.00360	-0.00332	-0.00308	-0.00244	-0.00212
$A_{10}$	ZW	0.01089	0.01467	0.03481	0.04113	0.03901	0.04794	0.04436	0.04187	0.04111	0.04124	0.04343
$A_{15}$	W <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0.08317	0.07366	0.12147	0.14928	0.18090	0.19763
$A_{18}$	XW <sup>2</sup>	-1.40962	-2.46696	-2.15556	-0.92663	-0.95276	-0.70895	-0.72057	-0.95929	-1.12178	-1.38644	-1.55127
$A_{19}$	ZX <sup>2</sup>	0.29136	0.47305	1.029992	1.06392	0.97757	1.19737	1.18119	1.01562	0.93144	0.78414	0.78282
$A_{24}$	UW <sup>2</sup>	0.02971	0.05877	0.05198	0.02209	0.02413	0	0	0	0	0	0
$A_{27}$	WU <sup>2</sup>	-0.00150	-0.00356	-0.00303	-0.00105	-0.00140	0	0	0	0	0	0
与公式(5)测得的 $R_T/4$ 平均差值		6.0	4.7	4.1	3.8	3.3	3.4	3.5	3.4	3.4	3.6	4.0
$\sqrt{\Sigma(\text{差值})^2}$		0.025	0.033	0.027	0.027	0.028	0.031	0.035	0.037	0.043	0.046	0.049

## 船体比例和负荷参数

推导阻力估算公式所用的船模特征范围见表 1。为了帮助确定一已知船形是否落于推导公式(6)所用的船模的参数范围内,将各种参数的范围绘于图 11—16。

### $i_0$ 与 $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ 的关系

图 11 表示所用系列船模这二个重要参数之间的关系。粗框线表示使用方程式(6)的极限范围。一般说来,对较瘦船( $L_{WL}/\nabla^{1/3} > 8$ )进角将较小,由于包括了系列 62 的资料,较丰满的船型进角将较大。

### $A_T/A_X$ 与 $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ 的关系

$A_T/A_X$  与  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  的关系见图 12。对中等数值的  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  对应的  $A_T/A_X$  不能过低,对较大的  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  对应的  $A_T/A_X$  必须接近于 0.42。如同  $i_0$  一样,较低  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  的区域,系列 62 的  $A_T/A_X$  是极端值。

### $C_A$ 与 $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ 的关系

负荷系数可化为长宽比和  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  二项:

$$C_A = \left(\frac{L_{WL}}{B_X}\right)^3 \left(\frac{\nabla^{1/3}}{L_{WL}}\right)^3 \quad (7)$$

图 13 上有关船模的  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  作为  $L_{WL}/B_X$  的函数表示。

这二个参数可用一简单的关系式表示:

$$L_{WL}/\nabla^{1/3} = 3.5 + 0.50 \left(\frac{L_{WL}}{B_X}\right) \pm 1.5 \quad (8)$$

从此式可以确定某一设计的负荷系数是否落于系列船型所要求极限范围内。

如图 14,用于公式(5)的  $A_T/A_X$  和  $i_0$  的配合如下

$A_T/A_X$	$i_0$
0.41—0.42	4—27.5
0.52	11—27.5
0—0.70	15—27.5
0.70—0.90	$25 + 15 \left[ \left( \frac{A_T}{A_X} - 0.70 \right) \right] \pm 10$

情况特殊的系列 64 和 SSPA 船型 ( $A_T/A_X = 0.41$  及  $0.42$ ) 和 NPL 船模 ( $A_T/A_X = 0.52$ ),  $A_T/A_X$  对应的  $i_0$  范围超出下限,而系列 62 的范围包括了大多数大的方尾面积比及大的水线进角。

### $C_A$ 与 $i_0$ 的关系

由于公式(7)中  $C_A$  与  $(L_{WL}/B_X)(\nabla^{1/3}/L_{WL})$  的关系,图 15 表示成  $L_{WL}/B_X$  与  $i_0$  的关系。粗框线是使用方程式(6)的  $L_{WL}/B_X$  (即  $C_A$ ) 与  $i_0$  的范围。

### $C_A$ 与 $A_T/A_X$ 的关系

图 16 表示用于推导方程式(6)的阻力资料的所有船模  $L_{WL}/B_X$  与  $A_T/A_X$  的关系,粗框线表



示了应用方程式(6)的范围。

单从阻力方程式中的参数,还不足以说明某一个船型是否属于所谓“常规”的。即要可靠的使用阻力方程式还必须进一步参考图上所表示的横剖面 and 首尾形状。从这些图上表示的多种船型说明,要使一个设计在常规要求范围并不是不可伸缩,而是有很大的变动余地。

用方程式(6)估算一些单个船型的阻力并与试验结果相比较,积累了更多的经验之后,就可以修改图 11—16 中所提到的使用极限。目前建议在这些极限内使用,而不要在用于推导方程式(6)的参数范围外进行外插。

## 佛氏数

方程式(6)使用的佛氏数  $F_{nV} = V/\sqrt{g\nabla^{1/3}}$  范围在 1.0 到 2.0 之间。十一个佛氏数 1.0, 1.1 ……2.0 的方程式系数列于表 1。

## 重心纵向位置

图 17 是推导方程式(6)的七个系列船模的作为  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  函数的  $\overline{LCG}/L_{PP}$  值。重心纵向位置位于这个范围(中剖面后 2%—7%  $L_{PP}$ ) 这些船模的阻力接近于最小值,与重心纵向位置的关系很小。

附录中有一个作为  $F_{nV}$ ,  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  和  $i_e$  函数的重心纵向位置变化对阻力影响的简单近似分析。方程式是根据具有丰满首水线进流端和折角线的系列 62<sup>[3]</sup> 船模和具有较瘦首水线进流端和圆艏的一些系列 63 新的资料推导出来的。这些公式采用的数据较方程式(6)为少。因此,估算时可信度较低,但仍可作设计时参考。

## 估算方程式的准确性

在“非滑行”区使用的总的阻力数据在 11 个  $F_{nV}$  值 118 船模共 1285 个(某些船模未在最高速进行试验)。低速阻力估算误差分布见图 18。分布情况近于正态,实测与计算的阻力之间的差别在 90% 情况下不超过 10%。

## 对其他排水量的修正

方程式(6)所给出的结果是在海水中水温 59°F, 采用桑海摩擦阻力系数,粗糙度修正  $C_A = 0.0$  时实艇排水量为 100,000 磅。对其他排水量、水情、 $C_A$  值或摩擦阻力系数,则按下式进行修正:

$$\left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{\text{修正}} = \left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{100,000} + [(C_F' + C_A) - C_{F100,000}] \frac{1}{2} \frac{S}{\nabla^{2/3}} F_{nV}^2 \quad (9)$$

式中  $\left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{\text{修正}}$  = 修正后的  $RT/\Delta$  值。

$\left(\frac{R_T}{\Delta}\right)_{100,000}$  = 由方程式(6)求得  $\Delta = 100,000$  磅海水中的  $R_T/\Delta$  值。

$C_{F100,000}$  = 与雷诺数有关的桑海摩擦系数。雷诺数为:

$$R_n = \frac{F_{nV} \left(\frac{L}{\Delta^{1/3}}\right) \sqrt{32.2 \times \frac{100,000}{64}}}{1.2817 \times 10^{-5}}$$

$C_F'$  = 在修正的排水量、水情等情况下的摩擦系数。

$S$  = 浸湿面积。

上面提到的修正值在许多情况下是较小(或不重要)的。特别是在低的  $L/\nabla^{1/3}$  值时。此时剩余阻力超过摩擦阻力, 在峰阻速度范围也是一样。对低剩余阻力, 比较大的浸湿面积的较瘦长船形这个修正较为重要。具有方尾船模的浸湿面积可以用下面从系列船模静水中的值分析推导而得的方程式来估算。

$$S/\nabla^{2/3} = 2.262 \sqrt{\frac{L_{WL}}{\nabla^{1/3}}} \left[ 1 + 0.046 \frac{B_x}{T} + 0.00287 \left( \frac{B_x}{T} \right)^2 \right] \quad (10)$$

用它估算的  $S$  在 95% 情况下误差在  $\pm 9\%$  以内。

Marwood 和 Silverleaf<sup>[30]</sup> 发表的另一个估算浸湿面积的公式为:

$$S/\nabla^{2/3} = \left( \frac{L_{WL}}{\nabla^{1/3}} \right)^2 \left( 1.7 \frac{B_x}{L_{WL}} \times \frac{T}{B_x} + \frac{B_x}{L_{WL}} CB \right) \quad (11)$$

此式与方形系数有关。

## 应 用

### 系列船模应用

在 1.1、1.5 和 1.9 三种  $F_{np}$  值, NPL 系列计算与实测的阻力值比较, 分别见图 19a、b、c。从图中可见系列中几何特征的变化对阻力的关系, 以及比较结果的吻合情况。等值线表示了等  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  与  $U = \sqrt{2i}$  的关系, 以及等  $U$  与  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  的关系。这与 Nordstrom 原来发表的小艇的相关关系相似。实测与计算阻力之间的相关关系是令人满意的。原来船模数据中的波动情况在计算中没有反应出来。但是阻力与  $U$  (在 NPL 系列中与  $L/B$  有关) 和  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  的依赖关系是显而易见的。

二个系列 62 船模在正常标准重心纵向位置条件下用非滑行方程式计算的阻力结果见图 20a 和 b。图上还表示了整个高速范围用滑行公式计算的结果。当速度范围在  $F_{np} = 2.0$  附近, 二个计算方法是重叠或接近重叠, 有十分良好的连续性(特别见图 20a)。

系列 62 最短的, 最丰满的船模变化重心纵向位置对阻力的影响见图 21。图中表示了用阻力估算方程式并用建议的近似方法(见附录)加以修正的计算结果, 以及用滑行方程式计算的结果。

### 系列外艇的结果

估算了几艘没有用于推导阻力估算方程式(6)的小艇阻力, 与船模试验结果比较见图 22a 到 f。用方程式(6)进行估算并修正到这些艇试验时所具有的条件。这些艇的船形特征和排水量列于表 3。

实测和计算的阻力吻合程度与用于推导方程式的系列船模所期望的结果基本相同。按方程式(6)计算船模 4315 有很大矛盾, 但是这个船模的重心纵向位置与正常“标准”值要明显的偏后。按附录对重心纵向位置的分析对其进行修正, 假定  $\frac{L_{CG}}{L_{PP}} = 0.045$  (中后)与船模 4315 在中后 0.105 作比较进行修正。

NPL 系列母型船模 100-A、短而丰满的系列 62 船模和十分长而瘦的系列 64 船模的船舶大小变化和表面粗糙系数的变化对估算  $R_T/\Delta$  的影响(外插时), 均见图 23a 到 c 中。从图可见较瘦的船湿表面积较大和剩余阻力较低。显示了船舶排水量变化的影响。排水量每增 10 倍在  $F_{np} = 1.5$

表 3 系列外船形阻力实测和计算值比较

名 称	$L_{WL}/\nabla^{1/3}$	$C_A$	$i_e$	$A_T/A_X$	$\Delta$ (磅)	$S/\nabla^{1/3}$	图
Nordstrom30-III <sup>r,1</sup>	5.84	0.972	13.93	0.516	47,400	6.45	22a
Nordstrom44-f <sup>h,1</sup>	7.33	0.491	7.36	0.33	60,300	6.00	22b
DL-1888 <sup>h,2</sup>	5.16	0.228	26.80	0.612	10,000	6.87	22c
DTMB4315 <sup>h,3</sup>	5.50	0.291	18.40	0.65	10,000	7.45	22d
系列 50 <sup>h,4</sup>	7.10	0.208	17.70	0.47	100,000	—	22e
系列 50 <sup>h,4</sup>	6.34	0.171	21.40	0.47	100,000	—	22e
DL-A <sup>h</sup>	6.63	0.436	17.30	0.60	380,800	7.46	22f

注脚:  $r$  —— 圆艏  
 $h$  —— 折角  
 1 —— 文献 7  
 2 —— 从 SNAME 小艇资料图 4  
 3 —— 从 SNAME 小艇资料图 10  
 4 —— 从 DL 档案和文献 23

时,  $R_T/\Delta$  的变化百分数为: NP 船模 100-A ( $L_{WL}/\nabla^{1/3} = 6.585$ ) 为 -5%, 系列 62 船模 4662-III ( $L_{WL}/\Delta^{1/3} = 3.60$ ) 为 -1.2%, 系列 64 船模 4813 ( $L_{WL}/\nabla^{1/3} = 12.40$ ) 为 -12%。粗糙度修正  $C_A$  对估算  $R_T/\Delta$  的影响远较排水量的变化为重要。NPL 船模 100-A 在  $C_A = 0.4 \times 10^{-3}$  (常用值) 约增加 10%, 当  $C_A$  值选定后这个修正就变为十分简单(见方程式 9)。

### 船形参数对阻力的影响

由方程式(6)可以研究  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ 、 $C_A$ 、 $i_e$  和  $A_T/A_X$  变化对阻力的影响。从泰勒展开式的一次项可以求得这些变化对阻力影响的第一近似值。

$$\delta R_T/\Delta = \frac{\partial R_T/\Delta}{\partial y} \cdot \delta y$$

$y$  是船形参数,  $\frac{\partial R_T/\Delta}{\partial y}$  可比较简单的从代数方程式(6) (每一佛氏数一个) 对任一参数  $y$  (例如  $y = L_{WL}/\Delta^{1/3}$ ) 求导而得。这样近似求得的结果用处有限, 因为方程式中大部分的项都不是一次项。要对整个方程式(6)考虑设计参数变化可能产生的影响。当然可从这些方程式导出一个最佳设计的方法, 但这样做法有多大用处还不清楚, 因为滑行前的阻力仅是一艘小艇整个性能中的一个因素而已。推导求最佳值的方法本文中未进行。

用阻力估算方程式来说明 NPL 母型艇船形参数变化的影响。NPL 系列的母型船形的特征列于表 4。

表 4 NPL100A 船型特征  
(计算船型参数变化对  $R_T/\Delta$  影响的实例)

$L_{WL}/\nabla^{1/3} = 6.585$
$C_A = 0.855$
$i_e = 11$ 度
$A_T/A_X = 0.52$

结果见图 24a 到 d, 它表示了变化范围很宽的几个参数变化的影响。根据表 4 所给出的 NPL 船模 100A 的特征, 结合图 11—16 得到的预估应用范围表示于图 24a 到 d。

在滑行前速度范围( $F_{np}$  在 1.0 到 2.0 之间)有以下几点:

1)  $L/\nabla^{1/3}$  增加, 明显的降低静水中的阻力, 这与 Nordstrom<sup>[7]</sup> 指出的一样。  
2) 对这些船形特征,  $C_d$  对阻力影响很小。  $R_r/\Delta$  对  $C_d$  的关系接近方程式 (2) 是线性 (还与  $L/\nabla^{1/3}$ 、 $i_0$  和  $A_r/A_x$  有关)。但  $C_d$  增加根据另几个船型参数的值,  $R_r/\Delta$  可能增加或减少, 但变化值不会很大。

3)  $i_0$  增加, 阻力显著增加。例如在  $F_{np} = 1.5$ ,  $i_0$  增加 4 度达  $15^\circ$  (这并非一个大的水线进角)  $R_r/\Delta$  将增加 8%。这个阻力计算值的增加与图 19—b 这个系列的数据一致。因为没有更小  $i_0$  的船型资料, 因而对这个  $A_r/A_x$  值, 方程式不能用于  $i_0 < 11$  度的情况。

4) 从方程式 (6) 来看, 其他船型参数选定后, 方尾面积与最大剖面面积之比好象将会产生最大的阻力值。但是, 在小的水线进角所限制的方程式使用范围 (图 14) 并不是很宽, 在  $A_r/A_x$  值超过 0.41 到 0.52 范围, 由方程式所求得的  $R_r/\Delta$  的变化范围不会太大。必须指出, 更明确的关于与  $F_{np}$  以及其他船型参数有关的  $A_r/A_x$  对  $R_r/\Delta$  的关系目前尚未能获得。因此建议应进行每一种船型  $R_r/\Delta$  对  $A_r/A_x$  关系的研究。

## 结 论

1. 根据七个方尾船形系列 118 船模的静水阻力资料, 推导出一个统计的相关方程式, 用以估算这种船型在非滑行范围内的阻力。

2. 方程式是以长度排水体积比 ( $L_{WL}/\nabla^{1/3}$ ), 船宽负荷 ( $C_d = \nabla/B_x^3$ ), 水线进流角 ( $i_0$ ), 方尾面积与最大剖面面积比 ( $A_r/A_x$ ), 体积佛氏数 ( $F_{np} = V/\sqrt{g\nabla^{1/3}}$ ) 为函数。这个方程式可用于下述船型参数和佛氏数:

a)  $1.0 < F_{np} < 2.0$

b) 可使用的船型参数和比值, 是根据推导出方程式的 118 个船型的范围而定, 列于图 11—16 中。

c) 中后  $2\% < \overline{LCG}/L_{PP} < 中后 7\%$ 。对重心纵向位置变化很大时, 提出了一些附加的参考意见。

3. 在上述限制范围内, 船型和负荷参数的影响如下:

a)  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  是最重要的参数, 随着  $L_{WL}/\nabla^{1/3}$  增加, 静水中阻力明显的减少。

b)  $C_d$  对阻力影响很小。根据其他船型参数的值  $C_d$  增加  $R_r/\Delta$  可能增加或减少。

c)  $i_0$  减少  $R_r/\Delta$  减少。

d) 根据  $F_{np}$  和其他船型参数,  $A_r/A_x$  增加  $R_r/\Delta$  可能增加或减少。从方程式形式中可以看到, 对某一  $A_r/A_x$  值存在着  $R_r/\Delta$  的极值, 大多数为最大值。  $A_r/A_x$  的影响是重要的, 对每一种情况要研究。

e)  $\overline{LCG}/L_{PP}$  在中后 0.2 到 0.7 之间 (除了一些短的丰满的船型外), 阻力接近于常数。

4. 对  $F_{np} > 2.0$ , 水流从方尾和折角线分离, 船头抬起, 已发表的滑行方程式可以用于估算滑行船体的阻力。

5. 给出了水流完全从方尾和折角线分离的滑行条件。

## 符 号

$A_i$	阻力估算方程式(5)或(6)的第 $i$ 个系数
$A_T$	方尾横截面面积, 英尺 <sup>2</sup>
$A_X$	最大横截面面积, 英尺 <sup>2</sup>
$B$	船宽, 英尺
$B_T$	方尾水线宽, 英尺
$B_X$	最大水线宽, 英尺
$C_A$	粗糙度等对阻力的修正系数
$C_B$	方形系数
$C_F$	摩擦阻力系数(即桑海公式)
$C_M$	中截面系数
$C_P$	纵向棱形系数
$C_{TL}$	Telfer 的阻力系数, $R_T L / \Delta V^3$
$C_V$	速度系数(研究滑行船体用), $V / \sqrt{gB}$
$C_{WP}$	水线面系数
$C_A$	静船宽负荷系数, $\Delta / W B_X^3 = \nabla / B_X^3$
$F_{nL}$	船长佛氏数, $V / \sqrt{gL}$
$F_{nV}$	体积佛氏数, $V / \sqrt{g \nabla^{1/3}}$
$g$	重力加速度, 32.2 英尺/秒 <sup>2</sup>
$i_0$	首部水线半进流角, 度
$L$	船长
$L_R$	龙骨浸湿长度(见图 1), 英尺
$L_{TP}$	垂线间长(设计水线端点距离), 英尺
$L_{WL}$	水线长, 英尺
$\overline{LCB}$	浮心距艏距离, 英尺, 中后为正
$\overline{LCG}$	重心距艏距离, 英尺, 中后为正
$R$	阻力, 磅
$R_T$	艇总阻力, 磅
$R_R$	剩余阻力, 磅
$S$	浸湿面积, 英尺 <sup>2</sup>
$T$	吃水(最大值), 英尺
$U$	$\sqrt{2i_0}$ (阻力估算方程式(6)的参数)
$V$	速度, 英尺/秒
$W$	$A_T / A_X$ (阻力估算方程式(6)的参数)
$w$	水比重, 磅/英尺 <sup>3</sup>
$X$	$\nabla^{1/3} / L_{WL}$ (阻力估算方程式(6)的参数)
$Z$	$C_A$ (阻力估算方程式(6)的参数)

$\alpha$	估算重心纵向位置变化对阻力影响公式的参数(附录 B 公式 B-1)
$\beta$	舰升角, 度
$\beta_1$	估算重心纵向位置变化对阻力影响公式的参数(附录 B 公式 B-1, B-2)
$r_1$	估算重心纵向位置变化对阻力影响公式的参数(附录 B 公式 B-1, B-3)
$\Delta$	艇排水量, 磅
$\delta$	重心纵向位置参数, 见附录 B
$\nabla$	艇排水体积, 英尺 <sup>3</sup>
$\lambda$	平均浸湿长宽比(见图 1)
$\lambda_{c1}$	折角线浸湿长宽比(见图 1)
$\lambda_{c2}$	棱柱船体水流从折角线分离处的浸湿长宽比(见图 1)
$\tau$	滑行面积纵倾角, 度

### 参 考 文 献

- [1] Savitsky, D., "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", Marine Technology, Vol. 1, №1, Oct 1964, pp. 71—95.
- [2] Hadler, J. B., "The Predication of Power Performance on Planing Craft", Transactions Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 74, 1966, pp. 563—610.
- [3] Clement, E. P. and Blount, D., "Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull Forms", Transactions, SNAME, Vol. 71, pp. 491—561, 1963.
- [4] Marwood, W. J. and Bailey, D. "Resign Data for High-Speed Displacement Hulls of Round-Bilge Form", Ship Division, NPL, Report № 99, Feltham, England.
- [5] Marwood, W. J. and Bailey, D. "Transverse Instability of Round-Bottomed High-Speed Graft Underway", Ship Division, NPL, Report № 98, Feltham, England.
- [6] Bailey, D. "Some Model Experiments with Transom Flaps Fitted to Round-Bottom Graft", Ship Division, NPL, Report № 102, Feltham, England, September 1967.
- [7] Nordstrom, H. F., "Some Tests With Models of Small Vessels", Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, Publ. № 19, Göteborg, Sweden, 1951.
- [8] Degroot, D., "Resistance and Propulsion of Motorboats", Netherlands Ship Model Basin, Publ. № 93, Wageningen, The Netherlands (DTMB Translation 244, by W. B. Hinterthan, January 1956).
- [9] Lindgren, H. and Williams, A. "Systematic Tests with Small, Fast Displacement Vessels, Including a Study of the Influence of Spray Strips" Proceedings 1968, Diamond Jubilee Internat'l Mtg, SNAME.
- [10] Yeh, H. Y. H., "Series 64 Resistance Experiments on High-Speed Displacement Forms", Marine Technology, Vol. 2, № 3, July 1965.
- [11] Beys, P. M., "Series 63 Round Bottom Boats", Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology, Report 949, April 1963.
- [12] Doust, D. J. and O'Brien, T. P., "Resistance and Propulsion of Trawlers", Transactions, North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, Vol. 75, 1958—59.
- [13] Doust, D. J., "Optimized Trawler Forms", Transactions, NECIES, Vol. 79, 1962—63.
- [14] Doust, D. J., "An Assessment of N. P. L. Resistance Data on Ocean Going Ships". NPL Report № 47, 1963.
- [15] Sabit, A. S., "A Tabulated Analytical Procedure Based on Regression Analysis for the Determination of the Form Coefficients and EHP for Ships Resigned According to Series 60", European Shipbuilding, Vol. XX, № 2, 1971.
- [16] Sabit, A. S., "Regression Analysis of the Resistance Results of the BSRA Series", International Shipbuilding Progress, Vol. 18, № 197, 1971.

- [17] Van Oortmerssen, G., "A Power Prediction Method and Its Application to Small Ships", International Shipbuilding Progress, Nov. 1971.
- [18] Havelock, T. H., "The Wave-Making Resistance of Ships: A Theoretical and Practical Analysis", Proceedings, Royal Society of London, A, Vol. 82, p. 276, 1909.
- [19] Clement, E. P., "A Critical Review of Several Reports on Round-Bottom Boats", David Taylor Model Basin, Hydromechanics Laboratory Technical Note 40, July, 1963.
- [20] Marwood, W. J. and Silverleaf, A., "Design Data for High Speed Displacement Type Hulls and A Comparison with Hydrofoil Graft", Third Symposium on Naval Hydrodynamics High Performance Ships, ONR-ACR-65, Sept. 1960.
- [21] Fridsma, G. "A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats, Irregular Waves, Part 11", Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology Report 1495, March 1967.
- [22] Savitsky, D., Roper, J. K. and Benan, L., "Hydrodynamic Development of a High-Speed Planing Hull for Rough Water", paper Presented at Ninth ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Paris, August 1972.
- [23] Davidson, K. S. M. and Suarez, A., "Test of Twenty Related Models of V-Bottom Motor Boats-EMB Series 50", DTMB Report R-47, March 1949.

## 附 录

### 重心纵向位置的变化对滑行前阻力的影响

小艇在使用过程中需要可靠的了解重心纵向分布的变化情况,因为它会对阻力产生重要的影响(与航速有关)。对九艘船模具有几种不同的重心纵向位置的试验结果(有几种情况多于一种排水量)进行分析,以推导出一个近似方程式估算重心纵向位置与名义标准位置不同对  $R_r/\Delta$  的变化。这个结果与方程式(6)一起可以估算某一设计在“标准”重心纵向位置和与这个“标准”位置不同时的阻力。必须指出方程式可以引伸用于估算对一已知船形重心纵向位置变化的影响,但不宜用于在设计一新线型时预估其最佳的重心纵向位置。

用于推导方程式(6)的一部分系列62船模(折角线型、水线端部丰满)阻力资料是相应于其重心纵向位置位于折角线下水平投影面积中心后  $4\%L_{PP}$ 。这个标准条件的选定是有些任意的,它接近于  $R_r/\Delta$  最小的最佳位置。但精确的重心纵向最佳位置是随  $F_{np}$  排水量、 $L_{WL}/B_x$  和其他因素而变化。用于推导方程式(6)的系列63船模(圆艏,首部水线端部稍瘦)是取自 Beys<sup>[11]</sup> 的报告,全部是在平吃水的情况。图17表示系列62、系列63以及其他所有系列  $\frac{\overline{LCG}}{L_{PP}}$  离  $\Delta$  的变化范围。

在使用下面的重心纵向位置对阻力变化的近似估算时,必须估算使用方程式(6)时假定的重心纵向位置,然后再使用下面偏离“标准”重心位置的近似方程式。对大部分系列以外的船形,可以简单的假定“标准”重心纵向位置是位于图17所示的中间值。即  $\overline{LCG}/L_{PP} = 4.5\%$  中后,这可认为是接近于最佳值。如设计师掌握了与这个系列以外船形十分相似的试验结果和这方面的知识,认为“标准”重心纵向位置是其他数值并且不是最佳值,那他可以选用另一种方法来对重心纵向位置的变化进行修正。例如:这个船形近似于某一系列62的船模,具有  $L/B \sim 3$ , 假定方程式(6)使用的“标准”重心位置约  $5-3/4\%$  中后较好,但这还不是最佳位置。使用下面所述的式子去估算  $\overline{LCG}/L_{PP}$  不同引起  $R_r/\Delta$  的变化时取  $-0.575$ 。

在这些试验中有用的排水量和重心位置情况下，将系列 62(文献 3) 和系列 63 的数据 ( $R_r/\Delta$  是对应于海水 59 F、 $C_d=0$ 、100,000 磅实艇) 经过光滑后在  $F_{np}=1.1, 1.3, 1.5, 1.7$  和  $1.9$  时列成表格。在 20 个船模——排水量中每一个至少有四个有些有五个重心位置。对 14 个或更多的船模和排水量情况在每一个  $F_{np}$  (某些船模没有延伸到最大的  $F_{np}$  值，因为船模启动或停止时有发生沉没的危险，或由于其他原因)，按照下面方程式，用最小二乘方的方法将这些数据进行回归。

$$\frac{R_r}{\Delta} - \left( \frac{R_r}{\Delta} \right)_{\text{标准}} = \alpha + \beta\delta + \gamma\delta^2 \quad (\text{B-1})$$

式中  $\left( \frac{R_r}{\Delta} \right)_{\text{标准}}$  ——在“标准”重心纵向位置时相应的  $R_r/\Delta$  值。

$$\delta = 100 \times \frac{\overline{LCG}_{\text{标准}} - \overline{LCG}}{L_{PP}} \quad (\text{LCG 在标准 LCG 后 } \delta \text{ 取正值})$$

对  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  等系数进行分析以确定它们在每一个  $F_{np}$  时与船型系数  $L/\nabla^{1/3}$  和  $i_0$  的关系。平均的  $\alpha$  值对所有的  $F_{np}$  值都是较小的，它使  $LCG = \overline{LCG}_{\text{标准}}$  时  $R_r/\Delta = R_r/\Delta_{\text{标准}}$ 。

$\beta$  和  $\gamma$  系数和船形特征的关系接近于下式：

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 X + \beta_3 U + \beta_4 XU + \beta_5 X^2 + \beta_6 U^2 + \beta_7 UX^2 + \beta_8 XU^2 \quad (\text{B-2})$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 X + \gamma_3 U + \gamma_4 XU + \gamma_5 X^2 + \gamma_6 U^2 + \gamma_7 UX^2 + \gamma_8 XU^2 \quad (\text{B-3})$$

式中如同方程式 (6) 一样  $X = \nabla^{1/3}/L_{WL}$ ， $U = \sqrt{2i_0}$ 。在五个佛氏数  $F_{np} = 1.1, 1.3, 1.5, 1.7$  和  $1.9$  时的  $\beta_i$  和  $\alpha_i$  值列于表 B-I 和 B-II。 $\beta_i$  系数的推导只应用了系列 62 船模的数据。对系列 63， $\beta$  值相当小可以忽略。

在系列以外某一船形使用时，建议  $\beta$  系数忽略，即假定“标准”重心纵向位置即为最佳值。这种近似在  $F_{np}$  从 1.0 到 2.0 的大多数情况是可行的。但对系列 62 的船模则不行，尤其是这个系列中最短的船模。

重心纵向位置的不同对阻力的变化认为是由于对剩余阻力的影响，因而与艇的尺度(雷诺数)无关。

对系列 62 船模 4665，试验了一个特定船型，应用这些方程式的结果见图 21。此船模具有  $L_{WL}/\nabla^{1/3} = 3.6$ 。假定“标准” $\delta = LCG/L_{PP} = -0.65$ 。

表 B-I 估算重心纵向位置不同对阻力变化的系数

$$\frac{R_r}{\Delta} - \left( \frac{R_r}{\Delta} \right)_{\text{标准}} = \beta\delta + \gamma\delta^2$$

$\beta$  系数 (仅对系列 62)

$$X = \nabla^{1/3}/L \quad U = \sqrt{2i_0}$$

系数	相乘项	$F_{np}=1.1$	1.3	1.5	1.7	1.9
$\beta_1$	1	0.06266	0.11387	0.26617	-0.03665	-0.17794
$\beta_2$	X	-1.44723	-2.89942	-2.14275	—	-0.22876
$\beta_3$	U	-0.00717	-0.01237	-0.06276	—	0.05139
$\beta_4$	XU	0.28849	0.57726	0.48763	0.22880	—
$\beta_5$	$X^2$	—	—	—	-7.63330	—
$\beta_6$	$U^2$	—	—	0.00412	—	-0.00368
$\beta_7$	$UX^2$	0.02496	0.09913	0.23579	0.73419	—
$\beta_8$	$XU^2$	-0.01443	-0.03025	-0.03469	-0.02065	0.00374



表 B-II 估算重心纵向位置不同对阻力变化的系数

$$\frac{R_r}{\Delta} - \left(\frac{R_r}{\Delta}\right)_{标准} = \beta \delta + r \delta^2$$

r 系数

$$X = \nabla^{1/3} / L \quad U = \sqrt{2i_e}$$

系数	相乘项	$F_{np}=1.1$	1.3	1.5	1.7	1.9
$r_1$	1	-0.01147	-0.02147	-	0.02789	0.05502
$r_2$	X	-	-	-0.12525	-0.32487	-0.15222
$r_3$	U	0.00448	0.00814	0.00337	-0.00308	-0.01430
$r_4$	XU	-0.02294	-0.03942	-0.01197	0.03516	0.04318
$r_5$	X <sup>2</sup>	0.56067	0.98997	0.95193	0.93321	-
$r_6$	U <sup>2</sup>	-0.00035	-0.00064	-0.00037	-	0.00096
$r_7$	UX <sup>2</sup>	-0.06164	-0.11365	-0.10312	-0.09722	0.01656
$r_8$	XU <sup>2</sup>	0.00250	0.00448	0.00278	-	-0.00347

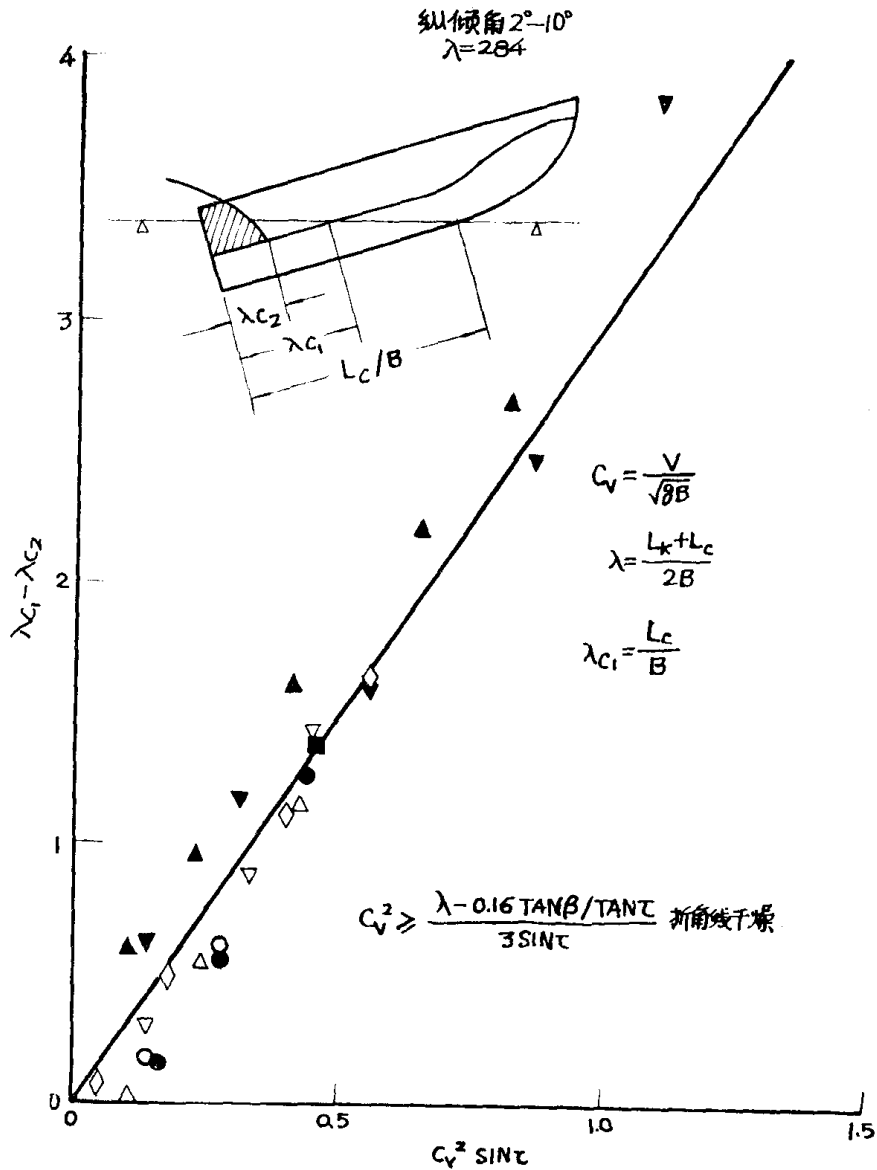


图 1 棱柱舦升船体折角线浸湿的范围