

瘦型船浅水阻力及主机功率的一种实用计算方法

海军大连舰艇学院 刘 炜 应荣熔 闻 虎 石爱国

内容提要:船舶大型化、高速化导致原本可视为深水的航道也可能有浅水效应,浅水阻力计算日益重要。此文基于 ALM 法和阿普赫金法探索了一种浅水阻力及主机功率的计算方法,并编写了计算机软件,能较快、较准确地得出船舶浅水航行时的阻力及主机功率。

关键词:船舶 浅水航行 阻力 主机功率 计算方法

0 引言

由于浅水效应,浅水区域船舶航行阻力增加。

这时,船舶不外乎两种选择:一是加大主机负荷保持航速;一是保持主机负荷降低航速。

对于所有的船舶,选择并不困难,一般都是避免超负荷损坏主机和消耗过多燃料,大不了推迟到港时间。特殊情况下,尤其是瘦型船,则必须考虑主机的超负荷能力,事先计算航行阻力增加多少、航速降低多少、航行时间增加多少等,才能准确地作出航行计划。

计算船舶航行阻力,通常使用经过实践检验和被普遍使用的阿法纳西耶夫公式(以下简称阿氏公式)——已知船长 L 、排水量 D 、船宽 B 、垂线间长 L_{pp} 、额定航速 V_{max} 、额定主机功率 P_e 、额定航速下螺旋桨转速 n_0 ; K 为附加阻力系数(一般取 0.004),设船舶深水航行阻力 R_0 ,则

$$R_0 = 1.1643 \cdot K \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{D}{L}\right)^2 \cdot B \cdot v^7}$$

阿氏公式适用于本文讨论的瘦型船(方形系数 0.40~0.55),但限于低速($v \leq 8$ kn)和深水(水深大于 40 m)。关键是如何突破低速限制和水深限制。

目前,计算瘦型船浅水航行阻力,还缺少既有一定精度又简单易行的方法。

为此,本文拟:

- 以阿氏公式为基础;
- 利用经过实践检验和被普遍使用的拉普公式计算螺旋桨总效率,以数学方法拟合出中间值公式,突破阿氏公式的低速限制;
- 以经过实践检验和被普遍使用的水深影响船舶航速的阿普赫金图谱为基础,以数学拟合方法扩展,突破阿氏公式的水深限制;
- 形成完整的计算方法,并编成计算机软件。

1 使用中间值公式突破阿氏公式的低速限制

为计算船舶中、高航速($v > 8$ kn)的阻力,突破阿法纳西耶夫航行阻力公式仅适用于低速($v \leq 8$ kn)的限制,本文提出使用中间值公式。

中间值公式,使用船舶计算中常用的回归方法求得,即根据几条典型船舶的航行阻力曲线拟合出来的

船舶航行阻力,普遍适用于与典型船舶类似的船舶(典型船舶选择瘦型船,拟合出来的中间值公式就适用于类似的瘦型船;典型船舶选择肥大型船,拟合出来的中间值公式就适用于类似的肥大型船),误差小于 10%,满足工程计算需要的精度。

本文根据拟合的中间值公式得到速度大于 8 kn 的阻力公式为:

$$R_i = R_0 \cdot \left(\frac{v_i}{v_0}\right)^{\frac{\lg(R_{max}/R_0)}{\lg(v_{max}/v_0)}}$$

式中:

v_{max} 为设计航速;

v_0 为 8 kn;

v_i 为中间任意速度;

R_i 为对应于 v_i 的阻力;

R_0 为用阿氏公式(航速 8 kn 左右)算出的阻力最大值;

R_{max} 是按设计航速及对应功率借助 η 推算出的阻力值, $R_{max} = P_e \cdot \eta / v_{max}$; P_e 是额定功率; η 是螺旋桨总效率,可据拉普公式 $\eta = (0.985 - 0.00115 \cdot n \cdot \sqrt{L_{pp}})$ 求得。

这样就突破了阿氏公式的低速限制。

2 扩展应用阿普赫金法突破阿氏公式的深水限制

2.1 阿普赫金法^[1]

阿普赫金图谱,是根据不同 h/T 情况下的试验结果,绘制成不同船速损失比 $(v_\infty - v_h) / v_\infty = \Delta v_{sh} / v_\infty$ 与浅水傅汝德数 Fr_h 之间的关系曲线图谱。其中:

h 为航行水域的水深;

T 为吃水;

v_∞ 为深水航速;

v_h 为浅水航速;

Δv_{sh} 为浅水影响造成的航速损失;

浅水傅汝德数 $Fr_h = \frac{v_\infty}{\sqrt{g \cdot h}}$ 。

图 1 所示阿普赫金图谱,是根据比较尖瘦船舶的浅水模型按阿普赫金法试验结果得到的,精度较高,且适用于各种速度。

借助阿普赫金图谱求解船舶浅水航行阻力的步骤如下:

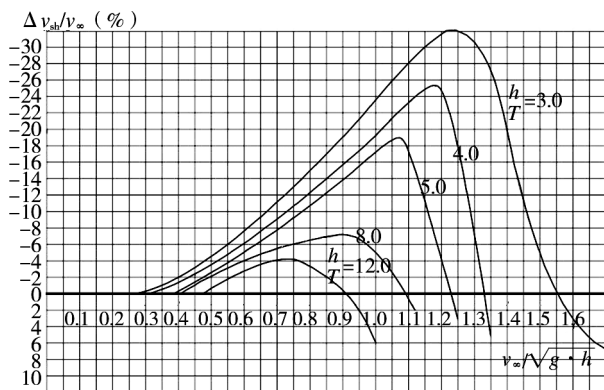


图1 阿普赫金法估算浅水阻力图谱示意图

- ① 根据船舶吃水 T 和航行水域水深 h 计算 h/T , 再根据深水航速 v_∞ , 计算 $Fr_h = v_\infty / \sqrt{g \cdot h}$ 值
- ② 据 h/T 和 Fr_h 值, 由阿普赫金浅水失速图谱查得 $\Delta v_{sh}/v_\infty$ 值。
- ③ 计算得到与 v_∞ 相同阻力的浅水航速 v_h ($v_h = v_\infty - \Delta v_{sh}$)。
- ④ 据本船深水阻力曲线求得相应 $v_\infty = v_h + \Delta v_{sh}$ 时的深水阻力 R_∞ , 即为阿普赫金法估算的浅水速度 v_h 所对应的阻力值。

重复使用上述方法, 可得该条件下的船舶浅水阻力曲线, 见图2。

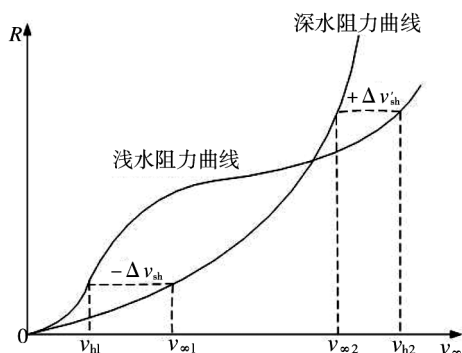


图2 阿普赫金法确定浅水阻力

2.2 阿普赫金法的扩展应用

但是, 阿普赫金法图谱只给出了若干水深吃水比的曲线, 水深吃水比藉于图示曲线之间的情况, 只能近似估算失速与深水速度比值。

为精确求解, 需要:

- 将阿普赫金法图谱上的曲线拟合为可计算的数学公式, 以便于计算出图谱上各曲线以外的其它水深吃水比所对应的失速与深水速度比值;
- 至少增补 h/T 为 1.5 和 2.0 的两条不同船速损失比 ($v_\infty - v_h$) / $v_\infty = \Delta v_{sh}/v_\infty$ 与傅汝德数 Fr_h 关系的曲线, 以适应本文讨论的瘦体船的需要。

(1) 图谱转化为数学公式

阿普赫金图谱上船速损失比 $\Delta v_{sh}/v_\infty$ 与傅汝德数 Fr_h 之间的关系曲线, 可大致分为上升曲线、峰值区和

下降曲线等三段 ($h/T = 3.0$ 和 4.0 的曲线见图3), 可分别按上升段和下降段拟合出数学公式:

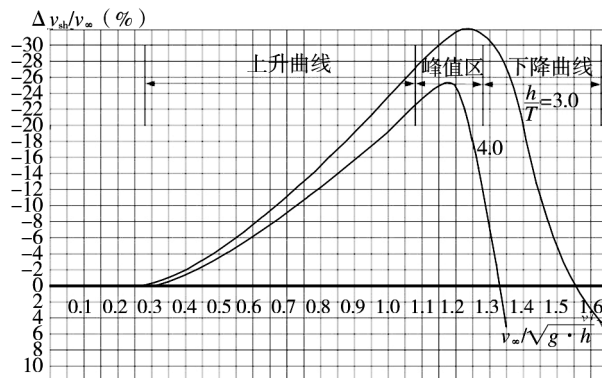


图3 曲线分段示意图

上升段——

$$\Delta v_{sh}/v_\infty = [a_3(Fr_h)^3 + a_2(Fr_h)^2 + a_1 \cdot Fr_h + a_0]/100$$

下降段——

$$\Delta v_{sh}/v_\infty = [b_4(Fr_h)^4 + b_3(Fr_h)^3 + b_2(Fr_h)^2 + b_1 \cdot Fr_h + b_0]$$

各段曲线数学公式的系数值, 分别见表1和表2。

表1 系数 a 的数值

h/T (深吃水比)	a_3	a_2	a_1	a_0
3.0	27.2	-77.4	32.5	-3.82
3.14	35.5	-96	46.74	-6.6
3.8	25.36	-72.65	31.2	-3.2
4.0	27.7	-76.4	34	-3.6
4.4	24.1	-71.1	32.8	-3.5
5.0	17.5	-54.8	22	-1.2
6.0	26.7	-68.2	29.3	-2.4
6.5	10.6	-37.8	12.4	-0.8
7.0	26.5	-64.4	28.48	-2.4
8.0	52.74	-106	51.35	-6.7
9.5	35.832	-68.164	26.241	-1.359
10	76.68	-148.75	79.8	-12.6
12	95.14	-166.28	80.92	-10.95

表2 系数 b 的数值

h/T (深吃水)	Fr_0	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
3.0	1.3	124.5	-754.1	1705	-1705.4	636.2
3.14	1.3	382	-2178	464.7	-439.4	1553
3.8	1.2	251	-1362	2761	-2479	831.9
4.0	1.2	476.7	-2515	4965	-4345.6	1422.2
4.4	1.1	289.7	-1473	2801	-2360.1	742.9
5.0	1.1	423.8	-2041	3679	-2939.3	877.9
6.0	1.0	164.2	-770.9	1351	-1048	303
6.5	1.0	162.2	-724.3	1210	-894.9	247.04
7.0	1.0	199.4	-864.4	1401	-1006.7	270
8.0	0.9	-13.4	38.177	-32.82	5.45	2.567
9.5	0.8	39.21	-165.7	261.2	-181.47	46.77
10	0.8	0	-12.31	36.14	-34.66	10.86
12	0.8	0	-9.943	28.42	-26.366	7.955

利用各段曲线的数学表达式,就可方便地得到各种水深吃水比(h/T)的失速与深水速度比值 $\Delta v_{sh}/v_{\infty}$ 。上升段与下降段之间分界点即最高点为 Fr_0 。

(2)增补 h/T 为 1.5 和 2.0 的两条不同船速损失比 $(v_{\infty} - v_h)/v_{\infty} = \Delta v_{sh}/v_{\infty}$ 与傅汝德数 Fr_h 的关系曲线

按上一段的数学公式,可计算得出 h/T 为 1.5 和 2.0 时不同船速损失比 $(v_{\infty} - v_h)/v_{\infty} = \Delta v_{sh}/v_{\infty}$ (上升段)与傅汝德数 Fr_h 关系:

$$h/T=1.5 \text{ 曲线的上升段, } \Delta v_{sh}/v_{\infty} = [17.65(Fr_h)^3 - 49.65(Fr_h)^2 + 5.954Fr_h + 0.67] / 100$$

$$h/T=2.0 \text{ 曲线的上升段, } \Delta v_{sh}/v_{\infty} = [19.9(Fr_h)^3 - 55.97(Fr_h)^2 + 11.9Fr_h - 0.065] / 100$$

增补的 h/T 为 1.5 和 2.0 的两条不同船速损失比 $(v_{\infty} - v_h)/v_{\infty} = \Delta v_{sh}/v_{\infty}$ 与傅汝德数 Fr_h 关系曲线见图 4。

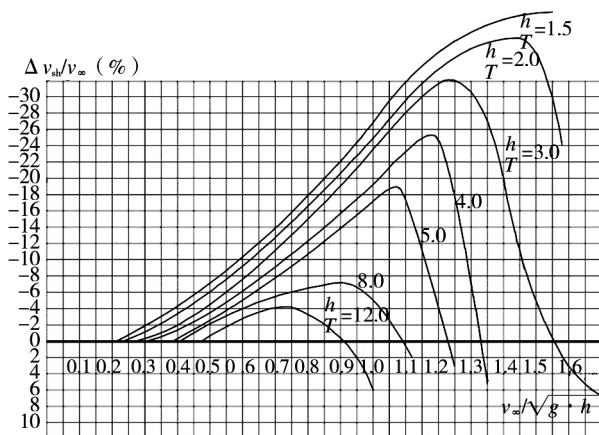


图 4 阿普赫金法估算浅水阻力图谱增补曲线示意图

(3)内插的方法

各段分别按比例内插法计算,方法如下。

设所求曲线深吃水比为 x ,其失速值为 y ,所求曲线的水深吃水比,位于水深吃水比为 x_0 与水深吃水比为 x_1 两条曲线之间,两条曲线对应的失速值分别为 y_0 与 y_1 ,则: $y = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} (y_1 - y_0)$

这样就消除了阿法纳西耶夫公式的水深限制。

3 编制计算机软件和引入方型系数

笔者已经将上述计算方法编成计算机软件,对话框见图 5。

这样,只需输入船长、船宽、排水量、吃水、浅水水深、浅水中的航速、主机额定功率、额定航速、额定航速对应的螺旋桨转速等,即可方便快速地得到航行阻力。

本文对比了一条瘦型船的试验值与软件的计算值,结果见表 3,误差不超过 2.04%。

本方法主要针对瘦型船。编制该软件时引入方型系数来限制船型,若方型系数超过一定范围,软件将拒绝计算,不输出结果。

图 5 软件对话框

表 3 某瘦型船的试验值与软件的计算值对比

	计算值(kgf)	试验值(kgf)	误差
$h=8 \text{ m}, V=8.158 \text{ 9 kn}$	3 803.73	3 885.45	-2.15%
$h=8 \text{ m}, V=13.082 \text{ kn}$	17 718.36	18 077.01	-2.02%
$h=18 \text{ m}, V=12.6 \text{ kn}$	7 824.03	7 855.64	-0.4%
$h=18 \text{ m}, V=22.494 \text{ kn}$	78 063.07	76 470.54	2.04%

4 主机功率安全性判定

船舶浅水航行时,驾驶员设定的航速 v_0 和相应的螺旋桨转速 n_0 是否超出主机许用功率,判定步骤如下。

① 根据有关规章及经验,确定船舶在特殊工况下航行的主机最大允许功率 P_{max} 。

② 将船舶及浅水水域的有关数据及一组航速 v_i 输入计算软件,可得一组浅水阻力值 R_i ,据此绘出浅水域 $R-v$ 曲线如图 6。

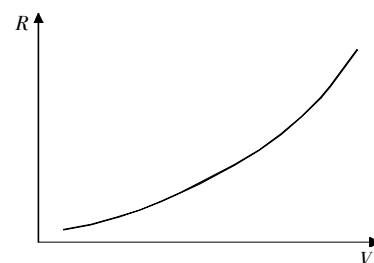


图 6 浅水阻力速度曲线

③ 参照航速—螺旋桨转速对照表,设定浅水航行航速 v_0 。

④ 借助前述拉普公式可得到螺旋桨效率 $\eta = (0.985 - 0.001 \cdot 15 \cdot n \cdot \sqrt{L_{pp}}) \cdot \eta_s$, η_s 是当时航行条件的螺旋桨效率。使用下式可求得所需主机功率 P_{s0} :

$$P_{s0} \cdot \eta_s = \frac{R_0}{(1-t)} \cdot v_0 \cdot (1-\eta)$$

等号右边是螺旋桨消耗的功率; R_0 是由 v_0 从图 6 中查得的浅水阻力值;螺旋桨推力在转变为船舶推力过程中有一定损失称为推力减额 t ,所以螺旋桨推力是 $R_0 / (1-t)$; v_0 是准备使用的航速即船对水速度;螺旋桨对水流的速度受伴流影响,故有一个伴流分数 ω ,所以螺旋桨对水速度要用 $(1-\omega)$ 修正,成为 $v_0 \cdot (1-\omega)$ 。推力减额、伴流分数、轴系传输效率等,均可使用工程应用值来满足计算需要,推力减额 t 取 0.96,伴流分数 ω

取 0.2;轴系传输效率 η_s 取 0.97。

⑤ 比较 P_{s0} 与 P_{max} :

a) 若 $P_{s0} \geq P_{max}$, 主机可能超负荷, 需另设定航速并计算;

b) 若 $P_{s0} < P_{max}$, 则可继续下列步骤:

- 在已知的船舶主机外特性曲线(例如图 7)上, 按 P_{s0} 查得此次浅水航行不超负荷的螺旋桨转速 n_0' 。

- 按下式可计算此次浅水航行最大允许阻力值 R_0' 。

$$P_{s0} \cdot \eta_0' = \frac{R_0'}{(1-t)} \cdot v_0 \cdot (1-\omega)$$

- 根据 R_0' , 再查 $R-v$ 曲线, 可得修正的此次浅水航行主机不超负荷的最大允许航速 v_0' 。

5 结束语

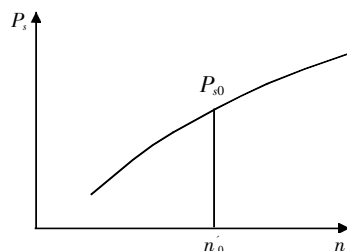


图 7 P_{s0} 在主机外特性曲线上对应的主机转速

本文计算浅水航行阻力的方法和浅水航行时主机的功率安全性判定, 为紧急情况下计算瘦型船舶浅水航行时间, 提供了既有一定精度又简单易行的方法。文中没有包括肥大型船浅水阻力的计算, 也没有涉及船舶浅水航行的另一重要问题——下沉量的计算, 有待完善。

* 作者: 刘 炜, 海军大连舰艇学院 硕士研究生 从事船舶操纵性方向研究. 地址: 海军大连舰艇学院研究生二队 (116018). E-mail: ly55553@126.com

参考文献

- 1 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海交通大学出版社, 2003. 9:301-304.
- 2 古文贤. 船舶操纵[M]. 大连: 大连海运学院出版社, 2003. 7:129.
- 3 宋永军. 浅窄航道船舶兴波阻力数值计算[J]. 武汉理工大学, 2005. 4.
- 4 吴秀恒, 刘祖源, 施生达, 冯学知. 船舶操纵性[M]. 国防工业出版社, 2005.9.
- 5 Sv.AA.哈瓦尔特(丹麦)著, 黄鼎良等译. 船舶阻力与推进[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.