

# 滑 行 艇 和 航 海 快 艇 拖 曳 阻 力 計 算

---

П. А. 阿普赫金、О. В. 杜勃罗文著



國防工業出版社

# 滑 行 艇 和 航 海 快 艇 拖 曳 阻 力 計 算

П. А. 阿普赫金、О. В. 杜勃罗文著

韓 德 賢 譯

祝子來、顧小霖、李慧敏 校



1963

## 內 容 簡 介

本书系苏联列宁格勒造船学院内部教材。书中系统地阐述了滑行艇和航海快艇的基本计算方法，并引用了最必要的图表和数据等方面资料；同时，亦列举了计算实例。可供船舶方面的大专师生和设计滑行艇及小船的工程技术人员参考。

ГЛИССИРУЮЩИЕ И МОРЕХОДНЫЕ КАТЕРА  
(РАСЧЕТЫ БУКСИРОВОУЮЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ)

П. А. АПУХТИН, О. В. ДУБРОВИН

ЛЕНИНГРАДСКИЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

\*

滑行艇和航海快艇拖曳阻力计算

韓 德 賢 譯

祝子来 顾小霖 李慧敏校

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 内部发行

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 2<sup>4</sup>/<sub>16</sub> 55 千字

1963年9月第一版 1963年9月第一次印刷 印数：001—700册

统一书号：N15034·674 定价：0.70元

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 前 言 .....                       | 4  |
| 第一章 滑行艇 .....                   | 5  |
| § 1 滑行的物理基础 .....               | 5  |
| § 2 滑行艇阻力的近似计算 .....            | 13 |
| 1. 平底艇的阻力计算 .....               | 13 |
| 2. 无断级尖艉斜升艇的阻力计算 .....          | 17 |
| 3. 断级艇的阻力计算 (C. Д. 邱金诺夫法) ..... | 22 |
| 第二章 航海快艇 .....                  | 31 |
| § 1 航海快艇阻力的近似计算 .....           | 32 |
| 1. H. C. 沃洛金法 .....             | 32 |
| 2. 海恩施凯图表 .....                 | 34 |
| 图表 .....                        | 39 |

## 前 言

这本滑行艇和航海快艇拖曳阻力计算系供列宁格勒造船学院学生作毕业设计，以及完成船舶原理课程的课外作业参考用。

作者的任务是阐明滑行艇和小船快速性计算方面的必需资料，使学生不必花费许多时间即能完全理解其物理性质和将其用于计算中。为此，本书提供了滑行理论中最必需的知識，并列举了计算例题。

编写本书时，作者还考虑到目前尚缺乏系统介绍滑行艇和航海快艇基本计算方法的教材。

本书亦可供设计室设计滑行艇和小船时使用。

# 第一章 滑行艇

## §1 滑行的物理基础

滑行艇有許多特点与排水船不同。其基本特点之一是滑行艇在水的自由表面上运动时，仅部分艇底与水面接触。同时，阿基米德浮力几乎完全被流体动力所代替，从而支承面和浸湿面积随速度增长而减少。由于上述原因，当进行滑行状态的計算时，計算排水船拖曳阻力的普通方法，对滑行艇已不适用。

在排水航行时可以根据浮态条件取滑行艇的浸湿面积，并应用对排水船所采用的任一种方法計算拖曳阻力。

在过渡状态，当速度开始超过  $v = 2\sqrt{g\frac{D}{V}}$  (式中  $V = \frac{D}{\gamma}$ ) 时，艏纵倾将比普通船大得多；艇底以相当大的冲角与水流相遇，流体动力的垂向分力（其值与速度之平方成正比增长）开始将艇抬出水面；吃水显著地减少，因而浸湿面积也减小。

摩擦阻力的减少与浸湿面积的减少成正比，而艇阻力的急剧增长主要是由于噴濺阻力和兴波阻力增加的结果。

若浸湿面积較静态时减少3%以上，則严格地說，阻力計算应当采用与排水船不同的計算方法。

当运动速度达到  $v \geq 3\sqrt{g\frac{D}{V}}$  时，艇在垂向流体动力的作用下脱离水面，并开始沿水面滑动——滑行。同时艏纵倾减少，阻力梯度<sup>●</sup>和阻力本身剧烈减小，因为除摩擦阻力减小外，兴波阻力也减小了。在該状态下，艇的运动总阻力中噴濺阻力占有相当大的部分，而消耗于克服該阻力的功轉化成为艇在运动时所形成的噴濺动能。

因此，在滑行状态时，艇的运动阻力的本质并不同于我們在船舶浮行状态运动时所观察到的那种阻力。由于这种区别，我們

● 阻力梯度即阻力随速度的增长率——校者注。

应当为滑行驶选择比较恰当的纵倾角，以保证比较容易的进入滑行，和有稳定的运动状态。这点可以通过相应的沿艇长的重心布置和相应的线型来实现。

现研究长为  $L$  宽为  $B$  的矩形平板的滑行，其载荷为  $D$ ，与水平线成某一角度  $\alpha$  (图 1)。

作用在平板上的压力和摩擦力合成流体动力  $R$ ，将  $R$  力按平行于平板和垂直于平板的运动方向分解，得到与运动方向相反的水平分力 (即平板运动的阻力  $R_x$ ) 及垂直分力 (即流体动举力  $R_z$ )。此外，作用于平板的还有阿基米德力的合力  $R_{sa}$ 。

将上述之力和重力投影于垂直轴线上，得出等式

$$D = R_z + R_{sa},$$

该等式表明，平板载荷 (重力)  $D$  被流体动举力  $R_z$  和阿基米德的净力  $R_{sa}$  所平衡；但正如开始时所指出的，后面一种力很小。

将力  $R_x$ 、 $R_z + R_{sa}$  投影到平板的平面上，得出摩擦力的值：

$$R_{rp} = R_x \cos \alpha - (R_z + R_{sa}) \sin \alpha,$$

由此确定平板总阻力的值：

$$R_s = (R_x + R_{rp}) \operatorname{tg} \alpha + \frac{R_{rp}}{\cos \alpha}.$$

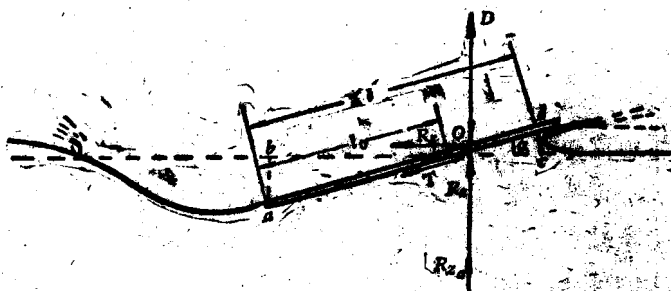


图 1

由于冲角很小， $\cos \alpha$  接近于 1，则

$$\frac{R_{rp}}{\cos \alpha} \approx R_{rp}$$

总阻力以等式

$$R_x = D \cdot \operatorname{tg} \alpha + R_{rp} \quad (1)$$

表示。

滑行效果采用滑行系数  $\frac{R_x}{D} = \varepsilon$  来評定。在某冲角下,  $\varepsilon$  愈小則滑行效果愈好。

由于滑行物体的浸湿面积  $\Omega$  随速度  $v$ 、冲角  $\alpha$  和载荷  $D$  而变化, 所以浸湿长度  $L$  对滑行艇來說, 不像排水船那样把它当做相对速度的特征尺度。因此, 对滑行艇來說, 取不随速度变化而改变的浸湿寬度  $B$  来代替  $L$  作特征尺度, 并用它表示的相对速度如下:

$$\operatorname{Fr}_B = \frac{v}{\sqrt{gB}}.$$

此外, 計算滑行物体时, 引入平板浸湿长寬比的概念

$$\lambda = \frac{l}{B}$$

和以下式表示浸湿面积

$$\Omega = Bl = B^2 \lambda,$$

式中  $l$  为假定浸湿长度, 等于从平板后緣到与扰动面側面相切的那条平板表面法綫間的距离 (图 1)。

用动負荷系数

$$C_B = \frac{D}{\rho \frac{v^3}{2} B^2}$$

和靜負荷系数

$$C_D = \frac{D}{\gamma B^3}$$

表示平板举力或載荷的特征。

$C_B$  和  $C_D$  之間存在着由下列关系式所导出的簡單关系

$$D = C_B \frac{\rho v^3}{2} B^2 = C_D \gamma B^3,$$

由此

$$C_B = 2C_D \frac{\gamma}{\rho} \cdot \frac{B}{v^3} = 2C_D g \frac{B}{v^3}$$

或者



$$C_B = \frac{2C_D}{Fr_B^2}$$

計算滑行物体的阻力时，必須知道称为压力中心的流体动力合力  $R$  的作用点。如果已知流体动力对物体后緣（对艉板）的力矩  $M$ ，則压力中心可以定出，此处的力矩乃是  $R_x$ 、 $R_y$  和  $R_z$  的力矩总和。如果  $M$  值在小冲角时算出，那么  $R_x$  的力矩可以忽略。

用力矩系数

$$m_D = \frac{M}{DB}$$

表示流体动力力矩的特点。

对于平板而言，力矩  $M$  不取决于摩擦力；液体粘度很少影响压力沿平板滑行面的分布，并且滑行时沒有发现界层的脱离。根据这一事实，可以把液体当作理想流体，并在研究滑行时应用势流理論。

平面物体滑行状态的运动水阻力計算式，是从研究平板沿理想流体表面滑行的观点得出的。

Г. Е. 巴甫連柯教授在 1929 年第一次解决了以小冲角沿理想液体表面滑动的无限展长平板的举力和阻力問題。后来，他又研究出有限展长平板的滑行理論，并研究出把滑行艇船模試驗結果換算至实船的方法。

計算式是从滑板沿理想液体表面运动的物理概念中导出来的。当平板以某种冲角沿液体表面滑动时，如經驗所証明的那样，沿平板展长的压力变化不大，而沿运动方向具有大的压力梯度。在平板前部与水綫接触处，即在具有最大压力梯度的地方沿平板的运动方向形成噴濺水流由此产生附加的力即噴濺阻力。該力是水流反作用力在运动方向上的投影，其方向与平板运动方向相反。

如果忽略重力，則可应用动量定律而較容易地得出平板阻力的表示式。設想有一个无限展长的固定平板，理想流体以均速  $v$  流过，并假定液体深度为  $h$ （图 2）。

根据动量定律，通过选定的封闭面 $ABCDEF$ 的流体动量，等于作用在该体积上的外力主向量。考虑到沿自由表面的压力不变，因此，沿表面的流速和喷溅流中的流速同为常数 $v$ ，通过 $AB$ 和 $CD$ 段的动量差将等于 $\rho v Q$ ，此处 $Q = v\delta$ 为喷溅流中的液体消耗（ $\delta$ ——喷溅流厚度）。

将通过 $ABCDEF$ 的流体动量和作用于平板的外力主向量投影到 $OX$ 轴上，得：

$$R_x = \rho v Q (1 + \cos \alpha);$$

垂直于平板的总反作用力 $R$ 等于

$$R = \frac{R_x}{\sin \alpha} = \rho v Q \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} = \rho v Q \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}。$$

在所研究的情形中 $R_x$ 值等于平板的喷溅阻力 $R_0$ 。

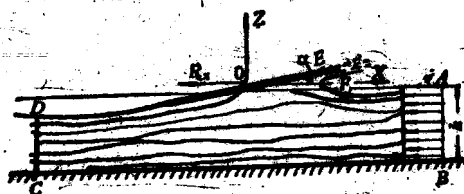


图 2

用 $v\delta$ 代替 $Q$ 后，得出计算无限展长平板沿具有任意深度的无重量理想液体表面和以任意冲角滑行的喷溅阻力 $R_0$ 和总水动力作用力 $R$ 的

的影响。图3示出了举力随 $\frac{l}{h}$ 和 $\alpha$ 而变化的关系，此处 $l$ ——平板浸湿长度； $h$ ——水深； $\alpha$ ——冲角。由图3得出，当速度固定时，平板举力随深度 $h$ 减少而增加。

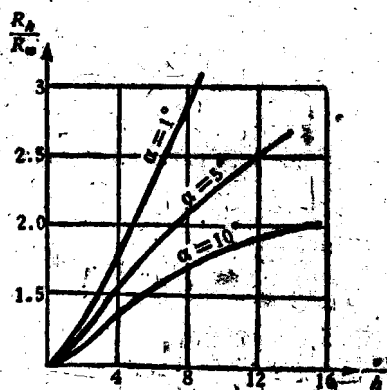


图 3

至于航道宽度的影响，当航道宽度 $b$ 对平板宽度 $B$ 的比，即 $b:B < 7$ 时，作用于平板上的流体动力增加；当 $b:B > 7$ 时，壁的影响减少，但是这种减少不大，并无限制的水比较仅在2%的范围内。换言之，滑行时航道壁的影响

比深度的影响要小得多。

与机翼相类似，有限展长平板必须考虑从后缘和从平板两端流下来的自由旋涡的影响。流下来的旋涡在水流中引起附加的所谓诱导速度 $v_i$ ，该速度在接近平板处形成下洗角为 $\Delta\alpha$ 的斜流。斜流引起冲角的减小和相应于角 $\Delta\alpha$ 的举力偏差。

由机翼和平板下部水流的相似，得出滑行平板下洗角的计算公式

$$\Delta\alpha \approx \frac{4R}{\pi\rho v^2 B^2}。$$

有限展长平板滑行时所产生的举力，在大佛氏数 $Fr$ 时，可以按下式近似地计算：

$$R = \frac{\pi\rho v^2 l}{2} (\alpha - \Delta\alpha)。 \quad (5)$$

代入 $\Delta\alpha$ 数值后，得计算公式：

$$R = \frac{\pi \frac{l}{B} \alpha}{1 + 2 \frac{l}{B}} \cdot \frac{\rho v^2 B^2}{2}，$$

或者将考虑角 $\alpha$ 对水动举力影响的乘数 $k$ ，以及表示平板浸湿长

度概念的  $\lambda = \frac{l}{B}$  代入公式(5), 最后得:

$$R = \frac{k\pi\lambda\alpha}{1+2k\lambda} \cdot \frac{\rho v^2 B^2}{2} \quad (6)$$

考虑了平板展长有限性的负荷系数  $C_B$  为

$$C_B = \frac{R}{\rho \frac{v^2}{2} B^2} = \frac{k\pi\lambda\alpha}{1+2k\lambda} \quad (7)$$

此外, 还应当考虑静负荷值, 即由图 1 确定的阿基米德的浮力:

$$R_{ao} = \gamma (V_{abo} - V_{odc})$$

在小冲角  $\alpha$  情况下, 体积差可以按下列公式计算:

$$\begin{aligned} V_{abo} - V_{odc} &= B \frac{\alpha}{2} [l_0^2 - (l - l_0)^2] = B \frac{\alpha}{2} l^2 \left( 2 \frac{l_0}{l} - 1 \right) \\ &= B \alpha l^3 \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) \end{aligned}$$

因而

$$R_{ao} = \gamma B \alpha l^3 \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right)$$

阿基米德举力值也可以按一般的流体动力的表示形式写出:

$$R_{ao} = C_{ao} \frac{\rho v^2}{2} B^2,$$

那么, 显然

$$R_{ao} = C_{ao} \frac{\rho v^2}{2} B^2 = \gamma B l^3 \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) \quad (8)$$

由此确定阿基米德力的系数

$$C_{ao} = \frac{\gamma B \alpha l^3}{\frac{\rho v^2}{2} B^2} \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) = \frac{2gB}{v^2} \alpha \frac{l^3}{B^2} \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right)$$

或者

$$C_{ao} = 2 \frac{\alpha \lambda^2}{Fr_B^2} \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) \quad (9)$$

比值  $\frac{l_0}{l}$  用实验方法确定。

总支持力等于流体动力和流体静力的总和

$$R = \frac{k\pi\lambda\alpha}{1+2k\lambda} \cdot \frac{\rho v^2 B^2}{2} + 2 \frac{\alpha \lambda^2}{Fr_B^2} \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) \cdot \frac{\rho v^2 B^2}{2} \quad (10)$$

式中  $k_1$ ——經驗修正系数。

总負荷系数等于●

$$C_B = \frac{R}{\frac{\rho v^2}{2} B^2} = \alpha \left[ \frac{k_1 \pi \lambda}{1 + 2k_1 k \lambda} + 2 \frac{\lambda^2}{Fr_B^2} \left( \frac{l_0}{l} - 0.5 \right) \right]. \quad (11)$$

計算滑行平板时应用公式(11)。

整理了在水池中进行的平板試驗結果后, 得出确定比值  $\frac{l_0}{l}$  的經驗公式:

$$\frac{l_0}{l} = \frac{1}{1 + \frac{0.4}{\lambda}},$$

同时精确公式 (11) 可以給出更方便的計算形式:

$$C_B = \alpha \left( \frac{0.7 \pi \lambda}{1 + 1.4 \lambda} + \lambda^2 \frac{\lambda - 0.4}{\lambda + 0.4} \cdot \frac{1}{Fr_B^2} \right). \quad (12)$$

上面已經指出滑行效果是借助于滑行系数  $s = \frac{R_x}{D}$  来評定。

因为按 (1)

$$R_x = D \operatorname{tg} \alpha + R_{rp},$$

則

$$s = \operatorname{tg} \alpha + \frac{R_{rp}}{D}.$$

将平板摩擦力的表示式写成  $R_{rp} = \zeta_{rp} \frac{\rho v^2}{2} l B$  的形式, 又已知  $D = C_B \frac{\rho v^2}{2} B^2$ , 然后把  $R_{rp}$  和  $D$  代入, 得  $s = \operatorname{tg} \alpha + \frac{\zeta_{rp} \lambda}{C_B}$ 。

这样, 为了确定滑行系数  $s$ , 就必须知道平板的摩擦阻力系数  $\zeta_{rp}$ 。 $\zeta_{rp}$  值不能用普通方法計算, 因为在平板的前部, 噴洒水流以及平板該部分的切向力是沿运动方向的。因此, 平板阻力在粘性液体中比在理想液体中为小。

此外, 滑行平板上很大的压力梯度也影响到切向力值。

鉴于上述原因, 滑行平板的阻力系数可以粗略地根据現有公式中的一个公式計算, 例如按公式  $\zeta_{rp} = \frac{0.465}{(\log Re)^{1/4}}$ , 式中雷諾数像排水量船一样按平板浸湿长度計算, 即  $Re = \frac{v l}{\nu}$ , 对于要求

● 原文为总动負荷系数, 在此改为总負荷系数較為适当——校者注。

精确性較高的摩擦阻力計算，每一种速度的浸湿长度都应用实验方法确定。

平板表面粗糙度的影响像对排水量船計算时一样考虑，即粗糙度的附加系数取为常数：

$$\zeta_{\text{ш}} = \text{const}$$

最后指出，为平板所得之无因次系数可以推广到型面，因为从有效的流体动力和力矩观点出发，平板和型面之間并没有质的区别。因此，允許在滑行艇的实际計算中，采用平板的流体动力特性。然而应当考虑，对滑行艇的平底特性有重要影响的是平板的平面形状、纵向曲度和舳板。正如理論研究所証明，将平板的寬度沿舳板方向减小，并使有纵向曲度，以及合理地装置舳板，都可以使平板（平底）的滑行系数明显地降低，从而提高流体动力性能。纵向曲度可保証所謂平板与水流无冲击；舳板可减少流体沿幅向的濺流，从而使水流尽量接近平流。

底部的橫向弯曲（斜升）增加浸湿表面和形成噴濺。如經驗所証明，斜升角的增加导致按直綫比例的举力降低和阻力升高。

根据上述所研究的平板滑行的物理概念，并应用滑行理論和經驗数据，下面列出了滑行艇拖曳阻力的实际計算方法。

## § 2 滑行艇阻力的近似計算

### 1 平底艇的阻力計算

平底艇的拖曳阻力計算最接近平板計算，因此也最簡單。它的計算是建立在滑行的平板和斜升平板的理論和实验研究数据的基础上。

計算时应当知道：

$D$ ——艇的排水量（載荷），吨；

$\xi$ ——艇重心至舳板距离，米；

$B_{\text{ор}} = \frac{B_{\text{мид}} + B_{\text{тр}}}{2}$ ——艇底滑行部分的平均寬度，米，

式中  $B_{\text{мид}}$ ——船艏部的艇底寬，米；

$B_{rp}$ ——艧板处的艇底寬，米。

在規定的速度  $v$  变化范圍內以下列次序进行計算：

1) 确定流体动力矩系数

$$m_D = \frac{\xi}{B_{cp}}。$$

2) 确定相对速度

$$Fr_B^2 = \frac{v}{\sqrt{g B_{cp}}}。$$

3) 用計算值  $Fr_B$  和  $m_D$  按曲綫  $\frac{1}{Fr_B^2} = f(m_D, \lambda)$  (圖4) 确定相对浸湿长度的数值

$$\lambda = f(Fr_B, m_D)。$$

4) 根据所求得之  $\lambda$ ，按曲綫  $\frac{2}{Fr_B^2} = f\left(\frac{C_B}{2\alpha}, \lambda\right)$  确定  $\frac{C_B}{2\alpha} = f(Fr_B, \lambda)。$

5) 計算負荷系数

$$C_B = \frac{D}{\frac{\rho v^2}{2} B_{cp}^2}。$$

6) 根据求得之数值  $C_B$  和  $\frac{C_B}{2\alpha}$  确定纵傾角  $\alpha。$

7) 确定艇的平均浸湿长度

$$l_{op} = \lambda B_{cp}。$$

8) 按下式确定摩擦阻力系数值

$$\xi_{rp} = \frac{0.455}{(\log Re)^{1.58}}，$$

式中

$$Re = \frac{l_{op} v}{\nu}。$$

9) 按下式确定艇的总阻力

$$R_x = D \tan \alpha + (\xi_{rp} + \xi_{mop}) \frac{\rho v^2}{2} l_{op} B_{cp}。$$

拖曳阻力用表格方法計算 (見表1)。

平底艇阻力計算的实例

已知：

$$D = 27.2 \text{ 吨；}$$

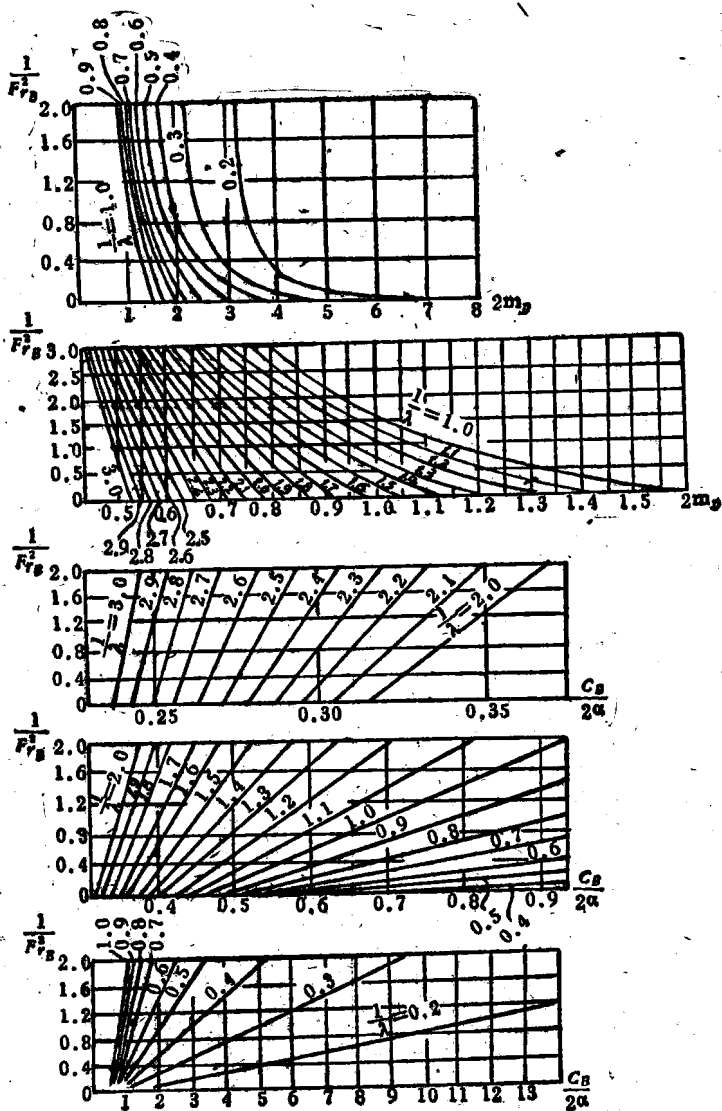


图 4 ●

●  $\lambda$  应改为  $1/\lambda$  原书有誤——譯者。



$$B_{\text{мид}} = 4.84 \text{ 米};$$

$$B_{\text{тр}} = 3.58 \text{ 米};$$

$$\xi = 8.23 \text{ 米};$$

$$v_s = 38 \sim 42 \text{ 节}.$$

計算:

$$B_{\text{ср}} = \frac{B_{\text{мид}} + B_{\text{тр}}}{2} = \frac{4.84 + 3.58}{2} = 4.21 \text{ 米};$$

$$m_D = \frac{\xi}{B_{\text{ср}}} = \frac{8.23}{4.21} = 1.95; \quad 2m_D = 3.9;$$

$$\rho = 104.5 \text{ 公斤-秒}^2/\text{米}^4; \quad v = 1.57 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}.$$

表 1 ① 艇的拖曳阻力計算

| 序<br>号 | 計<br>算<br>值                                                                                           | 計 算 方 案               |                       |                       |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|        |                                                                                                       | 1                     | 2                     | 3                     |
| 1      | $v_s$ , 节                                                                                             | 38                    | 40                    | 42                    |
| 2      | $v$ , 米/秒                                                                                             | 19.6                  | 20.6                  | 21.6                  |
| 3      | $Fr_B = \frac{v}{\sqrt{gB_{\text{ср}}}}$                                                              | 3.06                  | 3.21                  | 3.37                  |
| 4      | $Fr_B^2$                                                                                              | 9.4                   | 10.3                  | 11.4                  |
| 5      | $\frac{1}{Fr_B^2}$                                                                                    | 0.106                 | 0.097                 | 0.088                 |
| 6      | $1/\lambda$ (取自图 4)                                                                                   | 1.58                  | 1.59                  | 1.60                  |
| 7      | $\frac{C_B}{2\alpha}$ (取自图 4)                                                                         | 0.365                 | 0.360                 | 0.355                 |
| 8      | $C_B = \frac{D}{\rho \frac{v^2}{2} B_{\text{ср}}^2}$                                                  | 0.076                 | 0.069                 | 0.0625                |
| 9      | $\alpha$                                                                                              | $5^\circ 57'$         | $5^\circ 30'$         | $5^\circ 5'$          |
| 10     | $l_{\text{ср}} = \lambda B_{\text{ср}}$                                                               | 6.66                  | 6.7                   | 6.74                  |
| 11     | $Re = \frac{l_{\text{ср}} v}{\nu}$                                                                    | $8.3 \times 10^7$     | $8.9 \times 10^7$     | $9.25 \times 10^7$    |
| 12     | $\xi_{\text{rp}} = f(Re)$                                                                             | $2.19 \times 10^{-3}$ | $2.19 \times 10^{-3}$ | $2.15 \times 10^{-3}$ |
| 13     | $\xi_{\text{rp}} + \xi_{\text{мер}} (\xi_{\text{мер}} = 0.5 \times 10^{-3})$                          | $2.69 \times 10^{-3}$ | $2.67 \times 10^{-3}$ | $2.65 \times 10^{-3}$ |
| 14     | $R_{\text{rp}} = (\xi_{\text{rp}} + \xi_{\text{мер}}) \frac{\rho v^2}{2} l_{\text{ср}} B_{\text{ср}}$ | 15.0                  | 1650                  | 1820                  |
| 15     | $\text{tg } \alpha$                                                                                   | 0.104                 | 0.096                 | 0.071                 |
| 16     | $D \text{tg } \alpha$                                                                                 | 2830                  | 2610                  | 2080                  |
| 17     | $R_x = D \text{tg } \alpha + R_{\text{rp}}$                                                           | 4350                  | 4260                  | 3900                  |

① 原书的表中公式与数字有缺——译者注。