

船舶阻力

姜次平 编



国防工业出版社

船舶阻力

姜次平 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书对有关船舶阻力的种类和成因、各种阻力的特性尤其是与速度的关系、船模试验、船形对阻力的影响、估计阻力的近似方法、船在限制航道中的阻力和浅水的阻力等内容作了较扼要的介绍。

本书可作为高等工业院校船舶设计与制造专业教材，也可供船舶工程技术人员及流体力学方面研究人员阅读。

船 舶 阻 力

姜 次 平 编

国防工业出版社 出版

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

787×1092¹/₁₆ 印张11⁵/₈ 267千字

1978年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数：0,001—2,060册

统一书号：N15034·1963 定价：1.25元

前 言

本书系根据 1978 年 5 月全国造船专业统编教材会议通过的“船舶阻力”大纲编写的，可作为高等工业院校船舶设计与制造专业教材用。

实践告诉我们，船在水中航行总会遇到阻力。船舶主机通过推进器发出推力来克服阻力，船才能以一定的航速在水中前进。这就是说，一定的航速是推力和阻力这一对矛盾在一定条件下平衡的结果。要提高航速无非是两种办法：一是增大推力；二是减小阻力。在这里，我们先从阻力这个方面着手研究。研究这个问题的目的是提高对阻力客观规律的认识从而指出如何减小阻力的途径，以使船装置同等功率主机的条件下提高航速，或消耗较小机器功率达到同等航速。在船舶设计中，这不仅是为了保证设计技术任务书所要求的航速指标，而且也是提高船舶经济性能的重要环节。

船舶阻力是研究船舶航行时所产生的各种阻力的原因，各种阻力的特性，决定阻力的方法，影响阻力的各种因素以及减小阻力的途径等问题。数学分析方法目前还没有发展到对特定的设计问题足以给出肯定的数字答案。所以本教材以反映直接根据科学试验方法所获得的阻力知识为主。

本教材第一章为引言，讲述船舶阻力在船舶快速性中的地位 and 船模试验对能较快而又具体地解决造船工程领域中提出的实际问题的重要性。接着，分船舶阻力的基本概念，船舶阻力的详细讨论和近似估计以及影响阻力的其他因素三部分讲述。

第二章是船舶阻力的基本概念。由环绕船体的流动现象可见其复杂性，今先从作用于船体上的力出发，将阻力分类，以便研究，进而说明产生阻力的原因。由船模试验时全相似条件实际上不可能实现，转入傅汝德假定。

自第三章至第八章对船舶阻力作详细讨论。由较详细的讲述流动现象出发，分别说明各种阻力的成因及其与速度的关系。对兴波阻力，重点放在从船舶设计角度出发的一些主要问题，也就是船波系的干扰和兴波阻力与速度的高次方成正比的关系。对于坦谷波理论一节虽非教学大纲要求，因与兴波阻力关系密切，在这里用偏于物理概念的方式提出，使兴波阻力一章的系统性可较完整。兴波阻力的数学分析一节也非大纲要求，这里仅作简单介绍。对摩擦阻力，重点在于分析各种光滑平板摩擦阻力公式并说明其如何应用于船体。对粘压阻力，重点在探讨不同于傅汝德提出的三次换算方法。对破波阻力，重点在这一新颖阻力成分的概念并进而对总阻力的含义作补充说明。在第七章船模试验中，重点在讨论分别从设计和研究观点来表达船模阻力数据的方法。第八章是附加阻力，讲述附体、空气和汹涛阻力的特性和估计方法。第十章是估计阻力的近似方法，介绍各种近似估计方法供船舶初步设计时应用，并重点说明应用的范围。

影响阻力的其他因素也就是船体的形状、限制航道和滑行三者分别在第九、第十一和第十二章中讲述。第九章是船形对阻力的影响。首先提出最佳船形视船速而异的基本概念。接着讲述研究船形的基本方法也就是船模系列试验。最后讨论各种船形参数对阻力的影响，

目的在于说明不同速度时优良船形应具有的特点。第十一章是船在限制航道中的阻力，重点在限制航道对阻力的影响和限制航道中阻力与深水中阻力的关系。第十二章是快艇的阻力，重点在滑行艇的水动力性能和艇体形状的特点。最后是附录。

在本教材编写过程中，许多同志给予很大帮助。特别是华南工学院造船系李干洛、袁毅之、胡志安和张年方同志详细地审阅了本教材的初稿，提出了许多宝贵的意见。在此一并致以深切的谢意。

由于编者水平所限，本教材的缺点一定很多，希望批评指正。

编 者

一九七九年六月于上海交通大学

目 录

<p>第一章 船舶快速性 1</p> <p> § 1-1 研究的对象 1</p> <p> § 1-2 研究的方法 1</p> <p>第二章 阻力的基本概念 2</p> <p> § 2-1 阻力的种类 2</p> <p> § 2-2 阻力的相似理论 3</p> <p> § 2-3 傅汝德的假定 7</p> <p>第三章 兴波阻力 9</p> <p> § 3-1 坦谷波理论 9</p> <p> § 3-2 船波的成因和船波系 14</p> <p> § 3-3 兴波阻力的数学分析和波型阻力 18</p> <p> § 3-4 兴波阻力的特性 21</p> <p> § 3-5 波阻峰点和波阻谷点的预测方法 25</p> <p>第四章 粘性阻力之一(摩擦阻力) 30</p> <p> § 4-1 船运动时所生的边界层 30</p> <p> § 4-2 光滑平板摩擦阻力公式 33</p> <p> § 4-3 船体表面弯曲的影响 40</p> <p> § 4-4 船体表面粗糙度的影响 43</p> <p> § 4-5 污底 50</p> <p> § 4-6 摩擦阻力的计算步骤 51</p> <p>第五章 粘性阻力之二(粘压阻力) 55</p> <p> § 5-1 一般物体的粘压阻力 55</p> <p> § 5-2 船体的粘压阻力 58</p> <p> § 5-3 船舶阻力的三因次换算方法 64</p> <p> § 5-4 计算粘性阻力的测量尾流法 65</p> <p>第六章 破波阻力 68</p> <p> § 6-1 破波阻力的成因和特性 68</p> <p> § 6-2 总阻力含义的补充说明 69</p> <p>第七章 船模试验 71</p> <p> § 7-1 船模试验池 71</p> <p> § 7-2 人工激流法 73</p> <p> § 7-3 船模阻力数据表达式 75</p> <p> § 7-4 形似船模组的阻力数据表达式 78</p> <p>第八章 附加阻力 80</p> <p> § 8-1 附体阻力 80</p> <p> § 8-2 空气阻力 82</p> <p> § 8-3 汹涛阻力 87</p>	<p>第九章 船形对阻力的影响 89</p> <p> § 9-1 基本概念 89</p> <p> § 9-2 船模系列试验 90</p> <p> § 9-3 排水量长度系数 92</p> <p> § 9-4 棱形系数、方形系数和中横剖面系数 95</p> <p> § 9-5 宽度吃水比 99</p> <p> § 9-6 浮心纵向位置 100</p> <p> § 9-7 平行中体、最大剖面位置和横剖面面积曲线两端的形式 103</p> <p> § 9-8 满载水线和横剖面的形式 104</p> <p> § 9-9 船首和船尾的形式 105</p> <p> § 9-10 特式船形 108</p> <p> § 9-11 小结 109</p> <p>第十章 估计阻力的近似方法 111</p> <p> § 10-1 根据分析整套船模系列试验结果 111</p> <p> § 10-2 根据分析船模试验和实船试验结果 123</p> <p> § 10-3 根据母船数据 135</p> <p>第十一章 船在限制航道中的阻力 141</p> <p> § 11-1 浅水的影响 141</p> <p> § 11-2 狭水道的的影响 146</p> <p> § 11-3 试验池的池壁干扰 148</p> <p> § 11-4 长江船型 150</p> <p>第十二章 快艇的阻力 153</p> <p> § 12-1 滑行原理 153</p> <p> § 12-2 滑行平板的水动力性能及其系数 154</p> <p> § 12-3 滑行艇的形状 158</p> <p> § 12-4 快艇阻力的近似估计 161</p> <p> § 12-5 水翼艇 165</p> <p>附表 167</p> <p> 附表-1 1957 I.T.T.C.公式 167</p> <p> 附表-2 桑海公式 170</p> <p> 附表-3 柏兰特和许立汀公式 173</p> <p> 附表-4 水的运动粘性系数 ν 和质量密度 ρ (据十届 I.T.T.C.) 175</p> <p> 附表-5 船模静水船性计算表 176</p> <p> 附表-6 有效马力计算表 178</p> <p>参考文献 179</p>
--	---

第一章 船舶快速性

“船舶快速性”包括“船舶阻力”和“船舶推进”两门学科。本章作为引言，先给出其定义并说明其研究的对象，然后讨论研究的方法。

§ 1-1 研究的对象

当船在水中运动时产生阻力，要使船维持以一定速度航行，必须对船供给推力以克服阻力。一般船舶的推力由推进器供给，推进器的能量来自船舶主机。船舶快速性是研究船舶消耗较小机器功率以维持一定航行速度的能力的科学。换句话说，若机器功率一定，船舶以较快的速度航行的能力，所以叫“快速性”。

远在帆船时代，快速性方面的发展非常缓慢。轮船问世后，以蒸汽机带动明轮或螺旋推进器代替了风帆，促进了这门科学的发展。其原因是由于在船舶设计时，为了保证一定的航速，要求决定所需的较小的机器功率和相应的优良船形及其推进器。

为研究方便起见，船舶快速性分为“船舶阻力”和“船舶推进”两部分：

- (1) 船舶阻力：研究船体在运动时所生的阻力；
- (2) 船舶推进：研究克服阻力的推进器及其与船体间的交互作用。

§ 1-2 研究的方法

研究船舶快速性的方法有：(1)理论分析；(2)船模试验；(3)实船试验三种，它们是彼此区别而又互相密切联系的。

1. 理论分析

它的实质是根据实际现象的观察并进行力学抽象，从流体力学的基本原理出发，通过逻辑的推理方法以得出船舶阻力和推进问题的规律。虽然在这方面近年来有很大进展，但有的问题因情况复杂分析时难以应用数学工具；有的问题为简化分析起见而作了一些必要的假定，但与实际情况有一定距离，因此所得的结果难以准确；也有的问题常需要对用理论分析所给出的结果加以修正，方可比较接近实际。一般说来，能采用理论分析而得出结论虽在量的方面与实际存在差距，但常可在质的方面用以解释现象，因而指出改进的方向。因此理论分析仍不失为重要的研究手段之一。

2. 船模试验

虽然近年来在分析方面有很大进展，但为快而具体地回答工程领域中提出的问题，特别是要求提供定量的结果时，需要进行小尺寸的船模试验。这种缩尺试验能较可靠地预示船舶的实际航行情况和最佳的船体形状及其推进器。实际上进行任何船舶设计，甚至在初步设计阶段，总是利用在这方面的系统研究的结果。目前，很少看到一些较重要的船舶在事前未作船模试验而就建造的。

3. 实船试验

实船试验是用来鉴定船舶的性能并验证根据船模试验结果以预测实际船舶航行情况的准确性，也就是研究船模与实船之间的联系问题。因实船试验在经济上花费较大，所以除了新船例行试航外，其他不常专门进行试验。

第二章 阻力的基本概念

当船在水中航行时，环绕着船体的流动情况是十分复杂的。首先有波浪发生；并在靠近船体表面上有一薄层水（称为边界层）随伴船体；在船的尾部产生旋涡。本章先从水作用于船体上的力出发，将阻力分类，以便研究，然后讨论阻力的相似理论和傅汝德假定。

§ 2-1 阻力的种类

当船船在水中航行时，水被带动而得到加速度，因此船体与水接触的湿表面受到水的反作用力。这时垂直于湿表面的压力沿船体分布情况与静浮时不同；而且由于水的粘性，在切线方向发生切力（摩擦力）。

在湿表面上取一微湿面积 dS ，见图 2-1，则作用于 dS 上的力有法向力 $p dS$ 和切向力 τdS 。这里 p 为压力， τ 为切应力。由于船形对称于其中纵剖面，则上述法向力和切向力对称地分布于船体湿表面上。因此，其合力 P' 必位于中纵剖面上。在船的重心 G 处加上方向相反而大小等于 P' 的力 P 和一个力偶 $P'P''$ 。这个力偶由因船的纵倾而产生的纵向稳定力矩所平衡。

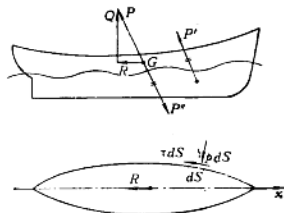


图 2-1

P 的垂向分力 Q ，叫支持力，由船的重量所平衡。对于速度较低的一般船舶， Q 中绝大部分由水的静压力组成，其合力就是浮力。对于高速度的滑行艇， Q 中水的动压力占重要成分（详见第十二章）。 P 的横向分力 R 即为与船运动方向相反的水阻力，或简称阻力。

由作用于船体湿表面上切向摩擦力所造成的阻力部分叫摩擦阻力 R_f 。作用于微湿面积 dS 上的微切向力在运动方向的分力等于 $\tau \cos(\tau, x) dS$ ，这些微力的和可用积分表示：

$$R_f = \int_S \tau \cos(\tau, x) dS \quad (2-1)$$

摩擦阻力系因水的粘性造成船体表面摩擦而生，克服摩擦阻力的功耗散为边界层中水的能量。

由作用于船体湿表面上法向压力所造成的阻力部分叫压阻力 R_p 。作用于微湿面积 dS 上的微法向力在运动方向的分力等于 $p \cos(p, x) dS$ ，这些微力的和也可用积分表示：

$$R_p = \int_S p \cos(p, x) dS \quad (2-2)$$

为研究方便，可将压阻力用理想流体和粘性流体的流体力学方法分为兴波阻力 R_w 和粘压阻力 R_{pv} 两类。

在船体曲面骤变之处，尤其是在肥满的船尾部，常发生旋涡。有旋涡处的压力降低，因而改变沿船体表面的压力分布情况而生阻力，叫粘压阻力。克服粘压阻力的功耗散为旋涡的能量。粘压阻力习惯上也叫旋涡阻力。

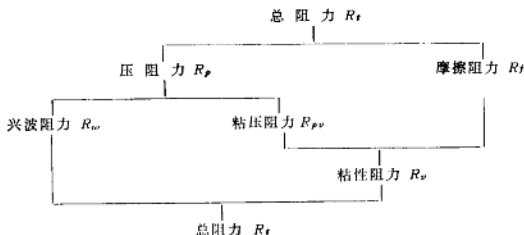
当船航行于水面之上，产生波浪，因而改变沿船体表面的压力分布情况而生阻力，叫兴波阻力。克服兴波阻力的功耗散为波浪的能量。

必须指出，兴波阻力与摩擦阻力和粘压阻力两者之间有根本性差别；兴波阻力在理想流体中仍将产生；但摩擦阻力和粘压阻力两者都因水的粘性而生，所以在理想流体中均将消失，这就是著名的达兰贝尔矛盾。摩擦阻力和粘压阻力两者习惯上合并为粘性阻力 R_v 。

因此，船的总阻力 R_t 可以用摩擦阻力 R_f 、粘压阻力 R_{pv} 及兴波阻力 R_w 三者的和来表示：

$$R_t = R_f + R_{pv} + R_w \quad (2-3)$$

总阻力与各种阻力成分间的关系如下：



若已知船在某速度 V 时的阻力 R ，则拖曳此船沿一直线等速前进所需的功率叫有效马力 EHP。所以

$$EHP = \frac{Rv}{75} \quad (2-4)$$

其中 R 为阻力(公斤)， v 为船速 (*/*)。

§ 2-2 阻力的相似理论

在流体力学的目前情况下，仅根据理论分析还不能确定船在水中航行的阻力。实际上常需进行船模试验，并将船模试验结果通过相似理论换算到实船的阻力。

1. 雷诺定律

若两几何相似的薄平板顺其平面方向在深水中运动，因离水面很远，不致发生波浪；且其形状又不致产生旋涡，所以其阻力纯为摩擦阻力。假定其摩擦阻力 R_f 是与水的质量密度 ρ 、平板的长度 L 、平板的速度 v 和水的动力粘性系数 μ 有关，而写作：

$$\begin{aligned} R_f &= f(\rho, L, v, \mu) \\ &= \Sigma k \rho^a L^b v^c \mu^d \end{aligned} \quad (2-5)$$

其中 k 、 a 、 b 、 c 和 d 都是无因次常数。

式(2-5)中的物理量的因次都可用三种基本因次即质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 和时间 $[T]$ 来

表示。根据因次理论，任何物理公式左右两边的因次必须一致。若对某物理量不知其为何种函数，常可利用这种原理，列出其因次方程式，比较基本因次的指数，以找到无因次参数。式(2-5)的因次方程式如下：

$$\left[\frac{ML}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^a (L)^b \left[\frac{L}{T} \right]^c \left[\frac{M}{LT} \right]^d \quad (2-6)$$

比较式(2-6)中三基本因次的指数，得下列联立方程式：

$$\begin{cases} [M]: 1 = a + d \\ [L]: 1 = -3a + b + c - d \\ [T]: -2 = -c - d \end{cases} \quad (2-7)$$

解式(2-7)，得 $a = 1 - d$ ， $b = 2 - d$ ， $c = 2 - d$ 。代入式(2-5)，得

$$R_f = \Sigma k \rho^{1-d} L^{2-d} v^{2-d} \mu^d = \rho L^2 v^2 \Sigma k \left(\frac{\nu L}{v} \right)^{-d}$$

其中 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，叫水的运动粘性系数。现尚不知 d 为何数，但可写作：

$$\frac{R_f}{\rho L^2 v^2} = f \left(\frac{\nu L}{v} \right) \quad (2-8)$$

式(2-8)中 $\frac{R_f}{\rho L^2 v^2}$ 和 $\frac{\nu L}{v}$ 都无因次。因 L^2 与平板湿面积 S 的因次相同，通常用 S 代替。 ρv^2 常改为 $\frac{1}{2} \rho v^2$ ，相当于水的动压力，这样 $\frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho S v^2}$ 代表单位湿面积的摩擦阻力与动压力的比，叫摩擦阻力系数 C_f 。 $\frac{\nu L}{v}$ 是雷诺数，常简写为 R_n 。

$$\therefore \frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho S v^2} = C_f = f(R_n) \quad (2-9)$$

这就是雷诺定律。

2. 傅汝德定律

若两几何形状相似的船叫形似船在水面进行，产生波浪，变更水面高度。忽视水粘性的影响，则其阻力纯为兴波阻力。假定其兴波阻力 R_w 是与水的质量密度 ρ 、船的长度 L 、船的速度 v 和重力加速度 g 有关，而写作：

$$\begin{aligned} R_w &= f(\rho, L, v, g) \\ &= \Sigma k \rho^a L^b v^c g^d \end{aligned} \quad (2-10)$$

其中 k 、 a 、 b 、 c 和 d 都是无因次常数。

式(2-10)的因次方程式如下：

$$\left[\frac{ML}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^a (L)^b \left[\frac{L}{T} \right]^c \left[\frac{L}{T^2} \right]^d \quad (2-11)$$

比较式(2-11)中三基本因次的指数，得下列联立方程式：

$$\begin{cases} [M]: 1 = a \\ [L]: 1 = -3a + b + c + d \\ [T]: -2 = -c - 2d \end{cases} \quad (2-12)$$

解式(2-12), 得 $a=1$, $b=2+d$, $c=2-2d$ 。代入式(2-10), 得

$$R_w = \sum k \rho L^{2+d} v^{2+2d} g^d = \rho L^2 v^2 \sum k \left(\frac{v^2}{gL} \right)^{2+d}$$

现尚不知 d 为何数, 但可写作:

$$\frac{R_w}{\rho L^2 v^2} = f \left(\frac{v^2}{gL} \right) \quad (2-13)$$

式(2-13)中的 $\frac{R_w}{\rho L^2 v^2}$ 也常改写为 $\frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho S v^2}$, 叫兴波阻力系数, 其中 S 是船的湿面积。

无因次的 $\frac{v^2}{gL}$ 是傅汝德数, 常简称为 F_n 。

$$\therefore \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho S v^2} = C_w = f(F_n) \quad (2-14)$$

这就是傅汝德定律。

两大小不同的形似船或船与其船模, 其速度 v 各与其 gL 的平方根成相同的比叫相应速度。换句话说, 在相应速度时, 两船的傅汝德数相同, 其兴波阻力系数为一常数。因重力加速度 g 为一常数, 傅汝德数在有些国家常用 $\frac{V}{L}$ 代替, 其中 V 以每小时海里计 (每小时海里数常简称节数), L 以英尺计, $\frac{V}{L}$ 叫速长比。傅汝德数与速长比间的关系如下:

$$F_n = 0.2977 \frac{V}{\sqrt{L}} \quad (2-15)$$

$$\text{或} \quad \frac{V}{\sqrt{L}} = 3.355 F_n \quad (2-15a)$$

注意 1 海里 = 1852 米, 英制为 1 海里 = 6080 英尺, 1 米 = 3.28 英尺, $g = 9.81 \text{ 米/秒}^2$, 英制为 $g = 32.2 \text{ 英尺/秒}^2$ 。

因在形似船, 湿面积 $S \propto L^2$; 又若速度相应, 傅汝德数为一常数, $v^2 \propto gL$, 所以由式(2-14)可知,

$$\begin{aligned} R_w &\propto \rho g L^3 \\ &\propto \gamma L^3 \end{aligned}$$

也就是

$$R_w \propto \Delta$$

或

$$\frac{R_w}{\Delta} = \text{常数} \quad (2-16)$$

这里 γ 为水的重度, Δ 为船的排水量。

所以形似船在相应速度时, 其兴波阻力与其排水量成正比, 也就是其单位排水量的兴波阻力为一常数。这是傅汝德定律的另一形式。傅汝德定律也叫傅汝德比较定律。

3. 全相似定律

若两形似船浮于水面, 又行动于实际流体之中。设其总阻力为 R , 假定其与水的质量

密度 ρ 、船的长度 L 、船的速度 v 、水的动力粘性系数 μ 和重力加速度 g 有关，而写作：

$$\begin{aligned} R_t &= f(\rho, L, v, \mu, g) \\ &= \Sigma k \rho^a L^b v^c \mu^d g^e \end{aligned} \quad (2-17)$$

其中 k 、 a 、 b 、 c 、 d 和 e 都是无因次常数。

式(2-17)的因次方程式如下：

$$\left[\frac{ML}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^a [L]^b \left[\frac{L}{T} \right]^c \left[\frac{M}{LT} \right]^d \left[\frac{L}{T^2} \right]^e \quad (2-18)$$

比较式(2-18)中三基本因次的指数，得下列联立方程式：

$$\begin{cases} [M]: & 1 = a + d \\ [L]: & 1 = -3a + b + c - d + e \\ [T]: & -2 = -c - d - 2e \end{cases} \quad (2-19)$$

解式(2-19)，得 $a = 1 - d$ ， $b = 2 - d + e$ ， $c = 2 - d - 2e$ 。代入式(2-17)，则得：

$$R_t = \Sigma k \rho^{1-d} L^{2-d+e} v^{2-d-2e} \mu^d g^e = k \rho L^2 v^3 \Sigma \left(\frac{vL}{\nu} \right)^{-d} \left(\frac{v^2}{gL} \right)^{-e}$$

其中 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 。现尚不知 d 和 e 为何数，但可写作：

$$\frac{R_t}{\rho L^2 v^3} = f \left(\frac{vL}{\nu}, \frac{v^2}{gL} \right) \quad (2-20)$$

式(2-20)中的 $\frac{R_t}{\rho L^2 v^3}$ 也常改写为 $\frac{R_t}{\frac{1}{2} \rho S v^2}$ ，叫总阻力系数 C_t ，其中 S 是船的湿面积。

$$\therefore C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2} \rho S v^2} = f(R_n, F_n) \quad (2-21)$$

这就是全相似定律。

由式(2-21)可见，若能使船和船模的雷诺数和傅汝德数同时相等，则其总阻力系数为一常数，这样就可根据由船模试验测得的总阻力系数以计算船的总阻力。但实际上全相似不可能实现。

因傅汝德数相等时，则

$$\frac{v_s^2}{gL_s} = \frac{v_m^2}{gL_m}, \quad v_m^2 = \frac{v_s^2 L_m}{L_s}$$

而雷诺数相等时，则

$$\frac{v_s L_s}{\nu_s} = \frac{v_m L_m}{\nu_m}, \quad v_m^2 = \frac{v_s^2 L_s^2}{L_m^2} \left(\frac{\nu_m}{\nu_s} \right)^2$$

若雷诺数和傅汝德数同时相等时，则

$$\frac{v_s^2 L_m}{L_s} = \frac{v_s^2 L_s^2}{L_m^2} \left(\frac{\nu_m}{\nu_s} \right)^2$$

或

$$v_m = v_s \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^{3/2} \quad (2-22)$$

这里在符号的右下角加注“s”和“m”字样分别代表其为实船和船模。设船对船模的尺

度比为:

$$\alpha = \frac{L_s}{L_m} = 36$$

则由式(2-22)则得:

$$v_m = v_s \left(\frac{1}{36} \right)^{3/2} = \frac{v_s}{216}$$

要满足此式在实际上还存在困难。因为水的运动粘性系数变差不大, 如船模在水银试验池内进行试验, 全相似有可能达到, 但这是不切合实用的。

§ 2-3 傅汝德的假定

因为全相似到今天在实际上还难以实现, 所以不可能根据由船模试验结果计得的总阻力系数直接求得船的总阻力。为此, 傅汝德曾作出下列两项假定:

(1) 傅汝德假定船的总阻力可分为两部分: 一为摩擦阻力, 只与雷诺数有关; 一为剩余阻力, 只与傅汝德数有关, 所以:

$$R_t = R_f + R_r \quad (2-23)$$

其中剩余阻力 R_r 包括兴波阻力 R_w 和粘压阻力 R_{pv} , 因两者不易分开, 又粘压阻力约略与速度平方成正比, 与兴波阻力的比较定律相近, 所以将其合并计算, 适用比较定律。

(2) 傅汝德又假定船的摩擦阻力与同速度同长度同湿面积的平板摩擦阻力相等。

按照上述两项假定, 即可根据船模试验结果计算船的阻力。现今

R_{tm} = 由船模试验量得的船模总阻力;

R_{fm} = 由平板公式计得的船模摩擦阻力;

$R_{rm} = R_{tm} - R_{fm}$ = 船模的剩余阻力;

R_{fs} = 由平板公式计得的船的摩擦阻力;

R_{ts} = 船的总阻力 = $R_{fs} + R_{rs}$ 。

其中 R_{rs} 根据傅汝德比较定律当船和船模的速度相应时应为:

$$R_{rs} = R_{rm} \cdot \frac{\Delta_s}{\Delta_m}$$

其中 Δ_s 和 Δ_m 分别为船和船模的排水量。因船模试验都在淡水中进行而大多数船舶在海水中航行, 所以

$$\frac{\Delta_s}{\Delta_m} = \frac{\gamma_s L_s^3}{\gamma_m L_m^3} = \frac{\gamma_s}{\gamma_m} \cdot \alpha^3$$

其中 γ_s 和 γ_m 分别为海水和淡水的重度, α 为船对船模的尺度比。

$$\therefore R_{ts} = R_{fs} + R_{rm} \cdot \frac{\Delta_s}{\Delta_m} = R_{fs} + (R_{tm} - R_{fm}) \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_m} \cdot \alpha^3 \quad (2-24)$$

若将式(2-23)左右两边都除以 $\frac{1}{2} \rho S v^2$, 可得其无因次形式如下:

$$\frac{R_t}{\frac{1}{2} \rho S v^2} = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho S v^2} + \frac{R_r}{\frac{1}{2} \rho S v^2}$$

或

$$C_t = C_f + C_r \quad (2-25)$$

其中 C_r 叫剩余阻力系数。

因在相应速度时，

$$\begin{aligned} C_{r2} &= C_{r1} \\ \therefore C_{r2} - C_{r1} &= C_{r2m} - C_{r1m} \\ C_{r2} &= (C_{r2m} - C_{r1m}) + C_{r1} \end{aligned} \quad (2-26)$$

$$\therefore R_{r2} = C_{r2} \cdot \frac{1}{2} \rho_s S_r v_2^2 \quad (2-27)$$

式(2-26)也可由式(2-24)将其左右两边都除以 $\frac{1}{2} \rho_s S_r v_2^2$ 后求得。

几十年来，上述傅汝德提出的换算方法在世界各国试验池中曾被广泛采用，直到现在仍在继续采用。其原因在于用傅汝德假定来进行计算，所得结果一般与实际相当接近；而要建立更完善更合理的假定实有很多困难。严格地讲，傅汝德假定是既不完善也是不合理的。

首先傅汝德把船的阻力机械地分成两个独立部分，一个仅与重力或傅汝德数有关，一个仅与粘性或雷诺数有关，但忽略其间的相互影响。事实上，这种影响是存在的。一方面，粘性不断消耗着波能，同时因粘性而生的边界层改变了流线的形状，尤其在船尾部更为显著，结果兴波阻力受影响。另一方面，兴波作用改变了湿面积的形状及其大小；又因水质点的轨圆运动，改变了水与船体的相对速度，在波峰处较小，在波谷处则较大，因之影响了粘性阻力。所以严格地讲，船的总阻力应为：

$$R_r = R_g(R_g, F_n) + R_w(F_w, R_g) \quad (2-28)$$

$$\text{或} \quad R_r = R_g + R_w + R_{gw} + R_{wg} \quad (2-28a)$$

其中 R_{gw} 是波浪对粘性阻力的影响， R_{wg} 是粘性对兴波阻力的影响。对此相互影响问题研究得还是较少，一般认为影响较小，而且目前尚难以作可靠计算，所以不计。

其次，傅汝德把兴波阻力和粘压阻力两者统称为剩余阻力，一并根据兴波阻力的比较定律处理。因兴波阻力是傅汝德数的函数，而粘压阻力是雷诺数的函数；一为重力作用，一为粘性作用；将这两种性质不同的阻力合并处理，在理论上也不恰当。近年来不少人建议把粘压阻力与摩擦阻力合并为粘性阻力处理，详细将在 § 5-3 和 § 5-4 中加以讨论。

最后，船体的三因次流动和平板的二因次流动之间显然有一定差别。其阻力是否相等，有待论证。详细将在 § 4-3 中加以讨论。

例题：某船模长 6 米，在淡水中试验测得其在 $V_m = 5$ 海里/小时时的阻力为 8 公斤，其时的摩擦阻力由计算已知为 5 公斤。试计算尺度比为 16 的海船在相应速度时的有效马力，假定其时海船的摩擦阻力已知为 13000 公斤。

$$V_m = 5 \text{ 海里/小时, 尺度比 } \alpha = 16$$

$$V_r = V_m \cdot \sqrt{\alpha} = 5 \cdot \sqrt{16} = 5 \times 4 = 20 \text{ 海里/小时}$$

$$R_{r1} = 8 \text{ 公斤, } R_{f1} = 5 \text{ 公斤, } R_{f2} = 13000 \text{ 公斤}$$

$$\therefore R_{r2} = R_{r1} + (R_{f2} - R_{f1}) \cdot \frac{Y_r}{Y_m} \cdot \alpha^3 = 13000 + (8 - 5) \times 1.025 \times 16^3$$

$$= 13000 + 12600 = 25600 \text{ (公斤)}$$

$$\text{EHP} = \frac{R \cdot v}{75} = \frac{25600 \times 20 \times 1852}{75 \times 60 \times 60} = 3510 \text{ (马力)}$$

第三章 兴波阻力

前面一章是对整个阻力问题作一总的概述，今后各章将对阻力的各种组成部分分章作较详细的讨论。本章重点放在从船舶设计角度出发的一些阻力的主要问题，也就是船波系的干扰和兴波阻力与速度的高次方成正比的关系。

§ 3-1 坦谷波理论

1. 理论基础

从实际观察，水质点不是随波浪前进，而仅在固定的圆叫轨圆上作等速旋转运动，这事实是坦谷波理论的基础。所生的力有重力 $dm \cdot g$ 和离心力 $dm \cdot \omega^2 r$ ，合成力 NP ，如图 3-1 所示。这里 dm 是水质点 P 的质量， g 是重力加速度， ω 是角速度， r 是轨圆半径， NP 是合力。假定水是理想流体，不能承受切向力，则合力 NP 必垂直于波面。

图 3-2(a) 显示一个水质点在其轨圆上不同位置 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 处时的合力分别为 NP_0 、 NP_1 、 NP_2 、 NP_3 和 NP_4 。现将图 3-2(a) 重复再绘制五次，其间距相等，则得图 3-2(b)。假定各个水质点所处的相角均匀地相差一个等角，也就是轨圆中心为 O_0 的水质点在 P_0 处时，轨圆中心为 O_1 的在 P_1 处，轨圆中心为 O_2 的在 P_2 处，余类推，于是形成波浪。当各个水质点作逆时针等速旋转运动时，波浪的外形向左推进。这种波形可以用数学中的坦谷曲线表示，所以叫坦谷波。

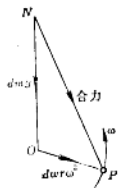


图 3-1

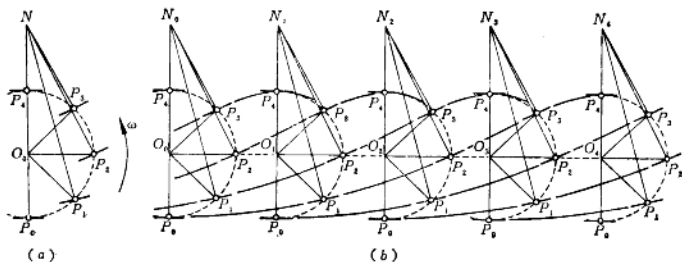


图 3-2

如图 3-3 所示，设半径为 R 的圆盘沿导线 xx 向右滚动，在盘上距盘心 r 处一点 P 所描绘的轨迹就是坦谷曲线。当 P 在最低位置时通过 P 和圆盘中心绘一垂直线为 yy 轴。回

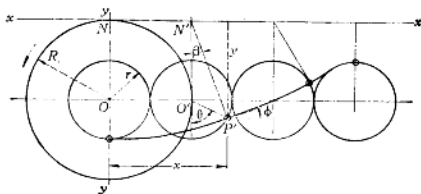


图 3-3

盘转 θ 角时, P 点到达 P' 。令 $\lambda (= 2\pi R)$ 为波长, $H (= 2r)$ 为波高, 所以坦谷曲线的坐标是:

$$\begin{cases} x = R\theta + r\sin\theta = \frac{\lambda}{2\pi}\theta + \frac{H}{2}\sin\theta \\ y = R + r\cos\theta = \frac{\lambda}{2\pi} + \frac{H}{2}\cos\theta \end{cases} \quad (3-1)$$

若取上坡向右的为正号, 因正号 y 是向下量的, 所以坦谷曲线的坡度是 $-\frac{dy}{dx}$, 所以有:

$$\operatorname{tg}\phi = -\frac{dy}{dx} = -\frac{r\sin\theta}{R+r\cos\theta} \quad (3-2)$$

由图 3-3 可见,

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{r\sin\theta}{R+r\cos\theta}$$

所以

$$\phi = \beta$$

也就是 $N'P'$ 垂直于坦谷曲线 P' 点处。因在 P' 处所生的合力必垂直于波面, 所以其方向与 $N'P'$ 相同; 离心力和重力的方向也分别与 $O'P'$ 和 $N'O'$ 相同, 可见图 3-1 中的 $\triangle NOP$ 与图 3-3 中的 $\triangle N'O'P'$ 相似, 因此:

$$\begin{aligned} \frac{R}{r} &= \frac{dm \cdot g}{dm \cdot \omega^2 r} \\ \omega^2 &= \frac{g}{R} \end{aligned} \quad (3-3)$$

2. 波长波速关系

式 (3-1) 仅为坦谷曲线的数学方程式, 不代表水质点的实际运动。实际水质点各在一定的轨圆上旋转, 轨圆中心并不移动。当水质点在其轨圆上旋转一周, 波形向前推进一个波长距离。令 c 为波形前进速度, 则向前推进一个波长距离的时间叫周期 T 是:

$$\frac{2\pi R}{C} = \frac{2\pi}{\omega}$$

所以

$$C = \omega R$$

在式 (3-3) 中 $\omega^2 = \frac{g}{R}$ ，又 $R = \frac{\lambda}{2\pi}$ ，

所以

$$C^2 = \omega^2 R^2 = \frac{g}{R} \cdot R^2 = gR = \frac{g\lambda}{2\pi}$$

或

$$C = \sqrt{\frac{8\lambda}{2\pi}} \approx 1.25\sqrt{\lambda} \quad (3-4)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \approx 0.8\sqrt{\lambda} \quad (3-5)$$

3. 静水面的高度

坦谷波的波峰较尖锐，波谷较平坦，所以轨圆中心线较静水面为高。如图 3-4 所示，坦谷波外形与 x 轴间的面积是：

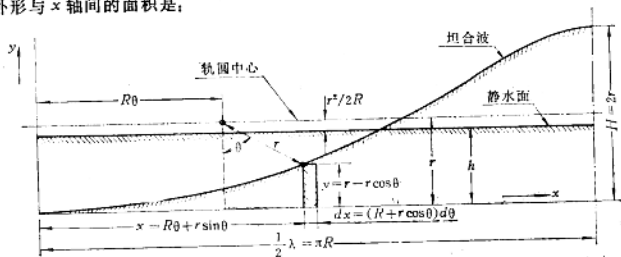


图 3-4

$$\int_0^{\pi R} y \cdot dx = \pi R \left(r - \frac{r^2}{2R} \right) \quad (3-6)$$

由式 (3-6) 可计算静水面在 x 轴以上的高度 h 。

因

$$\pi R \cdot h = \pi R \left(r - \frac{r^2}{2R} \right)$$

所以

$$h = r - \frac{r^2}{2R}$$

或

$$r - h = \frac{r^2}{2R} \quad (3-7)$$

由式 (3-7) 可见，静水面在轨圆中心线以下的距离是 $\frac{r^2}{2R}$ 。

4. 次波面的轨圆半径

以上都是关于坦谷波表面的情形，静止时表面下原来是水平的面也生波动，叫次波面。