

● 高等学校试用教材

CHUANBO

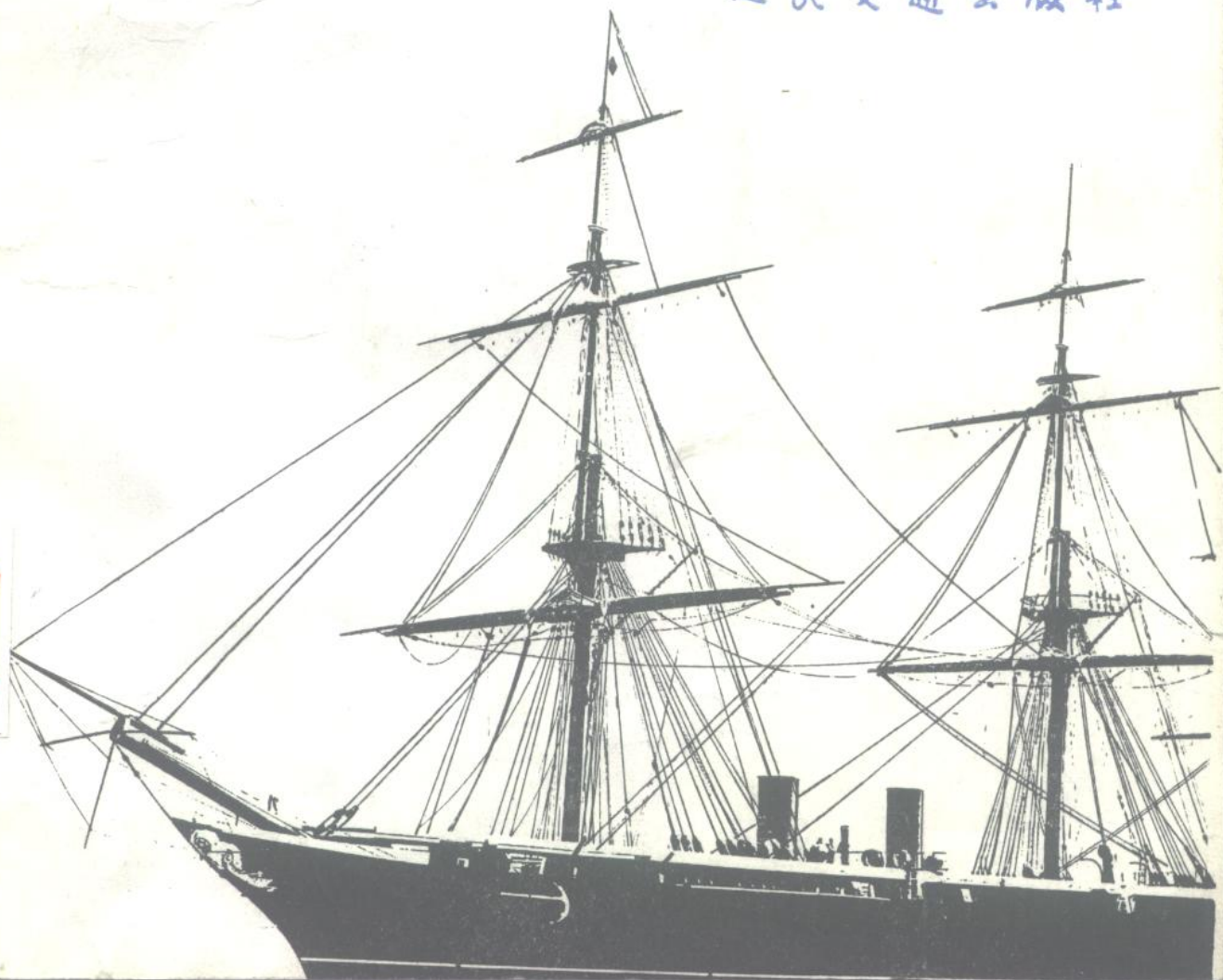
船舶

ZULI

阻力

李世谟 编

人民交通出版社



U661.311

L34

425301

外
文
二

高等学校试用教材

船 舶 阻 力

Chuanbo Zuli

李世谟 编

人民交通出版社

田家瑞

内 容 提 要

全书分绪论、粘性阻力、兴波阻力、船模试验、船型影响、附加阻力、阻力近似计算、船舶在限制航道中的阻力等八章。本书理论与实用并重，阐述了阻力各成分的物理本质和变化规律，以及船型影响的辩证关系；结合历史发展阐述了阻力换算方法；同时介绍了实用的近似估计阻力及浅窄航道影响的方法。本书可供大学相应专业本科生及有关科技人员使用。

D-65/10

船 舶 阻 力

李世谟 编

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：12.5 字数：

1989年12月 第1版

1989年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3400册 定价：2.50元

序

本书第一稿完成于1962年。1984年的第二稿增加了粘性阻力和兴波阻力两章中的理论推导、波形测量及尾流测量原理和方法等内容,并扩大编写了特种船型。这次出版的是第三稿,根据几年来使用第二稿的经验,为了突出概念,把第二、三章中繁难推导的部分移作附录,删去了特种船型一章(因已有专著出版),但增写和改写了粗糙补贴、储备功率、特殊首尾形状等内容。

船舶阻力课程有两个任务:一是决定阻力大小;二是为船型设计打基础。决定阻力大小以试验推算为主,第四章傅汝德方法和三因次外插法为其核心,绪论中的阻力划分、相似条件,以及第二章中的大部可看作是为它作准备并与它一起组成一系统为第一任务服务;船型影响一章是为完成第二个任务编写的,它可以自成系统。以上是本书的主干。第六、七、八章属知识性内容,也是第一任务的补充。

历来教材中关于兴波阻力的内容是非常贫乏的,当然也有不得已的苦衷。本书第三章内容有所增加,阐述了理论概貌,对船波形态、波阻影响因素等从理论上加以分析说明,也为波形测量分析技术作了准备,但讲授和学习可能比较困难,好在本章与其它各章联系不多,如学时不够,可以除第一节以外全部删除。

船舶阻力教材的取材和组织历来是比较困难的。其主要问题在于:目前理论还难于直接解决工程实际问题;对于阻力的本质和规律往往只能粗线条地阐述;很多结论和计算不得不借助于实验结果;刚学完基础课和技术基础课的学生对本课程处理问题的方法不很适应,有的甚至缺少信心。

针对这种情况,看来对某些重要问题处理方法的发展过程要做适当叙述,即简述其历史、现状、存在问题和前途,以帮助学生用历史唯物主义的观点看待这门发展中的学科。本书中对换算方法、摩阻公式、粗糙影响等等内容的叙述都力图这样做。编者认为只介绍当前流行的观点和方法,不谈过去,不讨论存在的问题,是无助于学生正确对待这门课程的。

此外,在应用实验资料时,看来重要的是阐述基本观点,概括共性,指出其局限性和条件性;努力着眼于培养学生用辩证观点对待经常遇到的貌似矛盾的各种资料的能力,力争给猎枪而限于给猎物。本书在船型影响一章中较之传统教材增写了基本概念、船型变化、排水量影响、试验结果的表达等内容,就是意图在以后的具体试验资料讨论中贯彻上述观点。

编者意识到上述两点,心向往之,也力争寓建立基本概念、观点及方法于知识传授之中,但限于水平,也囿于积习,还远不能做到,希望读者和使用此书的同行们不吝赐教,以利今后加以改进。

在第二稿中周俊麟同志编写了第九章特种船型,并对第一稿中六至八章内容有所增改,此次删除了第九章,但仍保留采用了其编写的浅窄航道中能量法、阻力回归公式及失速概念等内容,特此说明并致谢意。本书使用者孙长龙副教授为第三稿提供了很好意见,部教育局及院教材科有关同志为本书出版给予了很大支持,在此一并致谢。

李世谟 1987年8月16日于武汉水运工程学院

目 录

序

第一章 绪论	1
§1-1 本学科的任务和研究方法.....	1
§1-2 阻力成分的划分.....	1
§1-3 相似条件 阻力系数.....	5
第二章 粘性阻力	10
§2-1 平板摩擦阻力公式概述.....	10
§2-2 边界层 界层积分关系 界层内流速分布.....	13
§2-3 平板摩擦阻力系数的导出.....	22
§2-4 粗糙度影响.....	28
§2-5 粘压阻力.....	34
第三章 兴波阻力	39
§3-1 概述.....	39
§3-2 关于波的一般知识.....	42
§3-3 船行波 稳定相原理.....	45
§3-4 从波能导出兴波阻力.....	49
§3-5 兴波阻力理论简介.....	52
第四章 船模试验	56
§4-1 拖曳试验 设备和方法.....	56
§4-2 傅汝德阻力换算方法.....	60
§4-3 特尔弗方法 三向度外插法.....	64
§4-4 船/模换算例.....	68
§4-5 波形测量和分析.....	71
§4-6 尾流测量和计算.....	74
第五章 船型影响	78
§5-1 基本概念.....	78
§5-2 船型变化 船型参数.....	78
§5-3 排水量大小之影响.....	84
§5-4 比较船型质量时试验结果之表达.....	86
§5-5 船长之影响.....	88
§5-6 船宽及吃水之影响.....	92
§5-7 船型系数影响.....	95
§5-8 表征横截面积曲线形状的有关参数.....	101
§5-9 对型线的要求.....	103

§5-10 特殊首尾形状.....	105
第六章 附加阻力.....	110
§6-1 附体阻力.....	110
§6-2 空气阻力.....	112
§6-3 汹涛阻力与船舶的失速.....	116
第七章 阻力近似计算.....	120
§7-1 概述.....	120
§7-2 按图谱进行阻力计算的方法.....	121
§7-3 阻力计算的回归公式方法.....	140
§7-4 船舶阻力的简易计算法.....	147
第八章 船舶在限制航道中的阻力.....	154
§8-1 引言.....	154
§8-2 浅水影响的特点.....	154
§8-3 浅水阻力计算方法.....	161
§8-4 船舶在浅窄航道中航行的特点及分析.....	166
§8-5 浅窄航道阻力的近似计算.....	173
§8-6 船舶在流水中的阻力 驳队阻力.....	175
附录 A 摩擦阻力有关公式推导.....	179
附录 B 兴波阻力理论基本公式推导.....	187
附录 C 水的运动粘性系数 ν 和密度 ρ (据 10 届 ITTC)	193

第一章 绪 论

§1-1 本学科的任务和研究方法

船舶航行时将遭遇阻力，为此需推进器吸收主机功率转化为一定数量的推力以平衡之。船舶在给定航速下主机功率消耗较小，或在给定主机供给功率条件下能达到较高航速之能力称为船舶之快速性。快速性的研究内容包括船舶阻力和推进两个部分。

从工程观点看，船舶阻力学科的研究任务有两个：一为在满足其它工程要求（给定航速、客货载量等）条件下获致阻力较低的优良船型，达到改良船型、减小阻力、提高航速、节约能源、降低运输成本的效果；另一任务为计算船舶阻力的大小，据以作为决定所需功率，或在给定功率下决定可能达到的航速之依据。为了完成此两项任务，我们都需要研究阻力发生的物理本质，研究其变化规律，即研究其随航速、船型、外界条件等因素而变化的关系。

船舶阻力的研究方法可分为：理论方法和试验方法。

所谓理论方法，原则上是以流体力学基本规律为基础；针对所研究的对象建立数学模型，借助数学工具加以推演，获致所需的性质上和数量上的结论。大多数船舶航行于水、气分界面上，将在分界面（或称自由面）上兴起波浪；另一方面，水又具有不可忽视的粘性。因此，用理论方法解决船舶阻力问题既涉及自由液面流体力学问题，又涉及粘性流体力学问题。而这两者都难于得到精确解，加上船舶表面形状为了适应其它方面的要求通常作成很复杂的三维曲面，这就更增加了求解的困难。因此，理论方法与充分解决实际问题之间目前还存在不小的距离。虽然如此，当我们抓住主要矛盾作出适当的简化假定以后，理论方法也能在定性甚至于在定量方面给我们以重要提示。在这方面近二十余年来有长足的进展，当前也仍然有良好的发展趋势。

试验研究可分为船模试验和实船试验两种。长期以来船模试验是研究船舶阻力规律的主要手段，有时甚至是唯一手段。即令时至今日，凡重要船舶的设计，为了掌握其快速性能，几乎无一不经过船模试验。但是船模试验也有其局限性：试验时不能完全模拟实船所处的复杂环境，只能在简化了的典型环境中进行；作为探索阻力变化规律的手段时，影响阻力的参数数目及其变化范围的选取都受到限制；作为探讨具体船舶阻力大小的工具时，由于船模与实船只度相差很大，雷诺数相差很远，所产生的物理现象不尽相同，存在所谓尺度效应，至今仍在探讨中。对于船型参数及其变化受局限这一问题而言，一百多年来已经积累了大量的试验数据和经验，问题在于我们要以辩证的思想予以分析、比较、引用。对于尺度效应问题，除了可以用几何相似的系列船模试验加以研究以外，主要用实船试验寻求船模与实船试验结果之间的相关关系。

§1-2 阻力成分的划分

1. 阻力成分的划分

民用船舶大都在空气与水的分界面上航驶。航驶时将给空气及水两种流体以扰动，流体对船舶之反作用力形成船舶航驶时所遭遇之阻力。为了研究及处理实际问题方便起见，通常将阻力予以划分。

按阻力来自何种流体来划分：船舶阻力可分为其船体水上部分、上层建筑所遭遇的空气阻力和船体水下部分所遭遇的水阻力。空气阻力对于航速不太高的船舶在正常天气（3~4级风）下仅占总阻力的2%~3%。船舶所遭遇的主要是水阻力。

在水阻力中，按船舶承受阻力的部位来分，可分为主体阻力和附体阻力。所谓附体系指舭龙骨、舵、轴支架、轴包架等突出在船舶主体以外的部件。附体阻力占总阻力中的比重也不大，一般在10%左右。船舶所遭遇的主要是主体阻力。其所以要作附体阻力和主体阻力这样的划分，一方面是由于附体阻力所占比重不大，划分后便于对主要部分进行研究；另一方面是因为附体阻力不仅决定其本身之尺度和形状，同时还与其与主体之相对位置及主体之形状有关，而且同一主体可以配置不同数量、大小及形状之附体，不加划分将影响对主体的探讨。

按船舶所处之环境来划分：可分为静深水阻力、浅水阻力、狭航道阻力、流水中阻力及汹涛阻力等等。其中静深水阻力研究得比较多，也比较完善，可以作为与其它环境中阻力相比较之基础，所以本课程中主要讨论这一部分，其它则作为附加部分分别在各章中叙述。

按船舶运动状态来划分：可分为等速直线运动阻力、不等速直线运动阻力及非直线运动阻力，其中等速直线运动又可区分为沿船体对称面和不沿对称面运动等情况。本课程仅限于讨论在对称面上作等速直线运动的情况。这是研究得比较多的，在实用上也是主要的。

现在来按阻力发生的物理本质予以划分。先按流体动力作用的方向来划分，可分为由切于船体表面之切向力 τ 所构成之摩擦阻力 R_f 和由其法线方向之压力 p 所构成之压强阻力 R_p 。按图1-1有：

$$R_f = \int_s \tau \cos(\tau, x) ds$$

$$R_p = \int_s p \cos(p, x) ds$$

$$R = R_f + R_p$$

由于船体左右对称，图1-1中流体力合力 P 一定在对称面上。但由于 τ ， p 不均平行于基面，故 P 一般如图所示与基面呈一角度，由此构成一纵倾力矩及一向上之升力 L 和水平方向之阻力 R 。在中、低速时，流体动力 P 较之排水量为一小量，故通常纵倾力矩和升力不产生显著影响，我们所感兴趣者为阻力 R 。

理想流体是不能承受剪应力的，即是说切应力 τ 是以粘性的存在为其存在的前提的。也就是说摩擦阻力 R_f 是由流体具有粘性而引起的。

至于压强阻力 R_p ，它发生的原因有二：根据著名的达朗贝尔疑题，物体在无限理想流体中匀速运动时其阻力应为零，即 $R_p = 0$ 。但如流体有粘性，在物体附近将形成边界层，愈在流体尾后部分其排挤厚度愈大，致使界层外之势流区速度增大而压力降低，使物面上压力分布与在理想流体中的不同，其后端压力降低形成阻力。这样形成的压强阻力是由粘性引起的，称为粘压阻力，记为 $R_{v,p}$ 。压强阻力发生的另一个原因是由于有自由面的存在。设想流体没有粘性但具有自由面，则物体运动时在自由面上将形成波浪，此时也将导致压强阻力的发

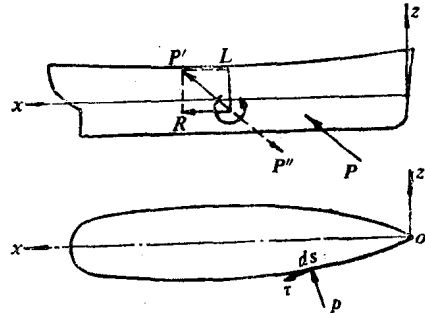


图 1-1

生。此点可从图1-2看出。

在图1-2中考虑深度 y 处一水平断面。其在过2点的垂直线上的静压分布如虚线所示，2点之静压为 $\rho g y$ 。当有绕流时，在2点将产生一动压 Δp 。假若在水面上液面作相应之升降，即 $\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho g}$ ，则不同深度 y 处各水平断面上且与2在同一垂线上之点，其动压力将均为 Δp 。于是，整个物面上的动压分布将与没有自由面之无限流体中的一样，根据达朗贝尔疑题压强阻力应不存在。在实际上由于有惯性，液面上自1点流来之质点到达过2点之垂直线上时只能到达3点，因而实际动压力在过2点之垂直线上之分布如图1-2上实线所示，其在液面附近是与无限流中的分布（虚线）不同的。这说明 R_p 可能不等于零，不能套用达朗贝尔疑题。另外，从波能的观点看，有自由面时绕流物后端遗留有波浪，此波浪能量必来源于物体对流体的作用力，由此可以肯定 R_p 确是不等于零的。波浪是一个重力场中的现象，它是重力存在为前提的，所以说具有自由液面时产生的压强阻力是重力引起的，通常称这种压强阻力为兴波阻力，记为 R_w 。

综上所述，船舶阻力按其发生的本质可分为摩擦阻力、粘压阻力和兴波阻力，即：

$$R = R_f + R_{v,p} + R_w$$

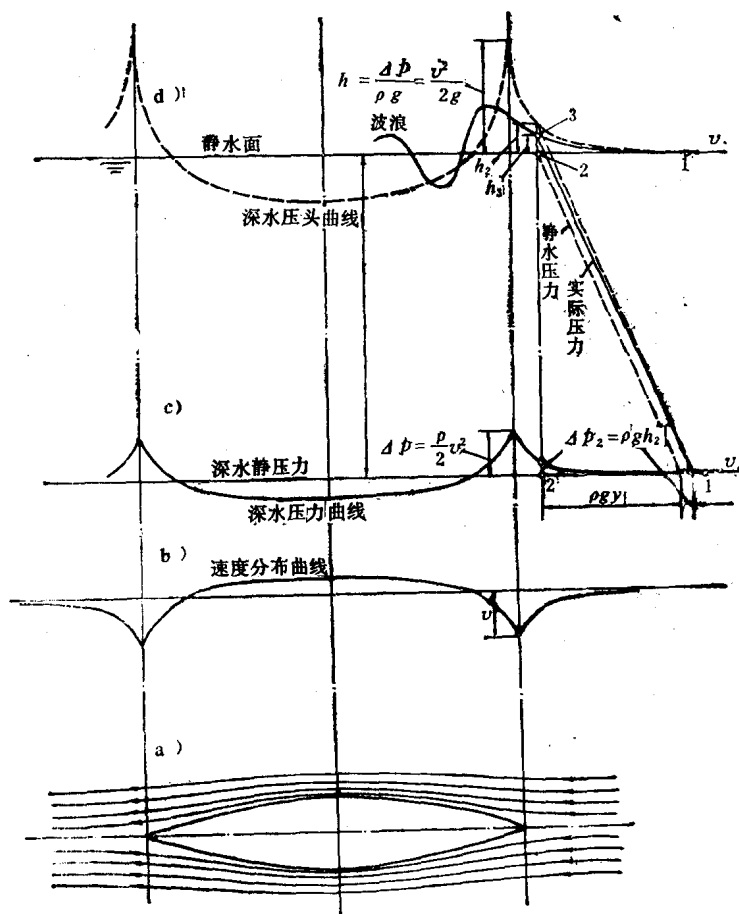


图 1-2

由于摩擦阻力和粘压阻力都是由粘性的存在所引起的，有时也合称为粘性阻力，记为 R_v ，于是：

$$R = R_v + R_w$$

从图 1-3 中可以清楚地看出所提及的各种阻力成分间的关系。

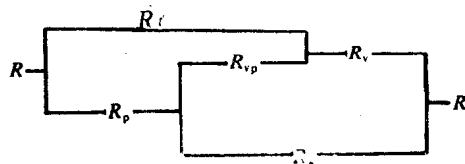


图 1-3

2. 阻力与航速之关系，阻力各成分之比重

阻力是当船体与其周围之流体有相对运动时发生的，相对运动速度愈大则阻力愈大。船舶相对于水之速度称为静水速度。今后如不特别指出则所称航速均为静水速度。应该把静水速度和船舶相对岸壁的速度（称为技术速度）区别开来，逆流和顺流航行的技术速度不同。但只要相对于水的速度一样，则阻力的大小是一样的（假如不计流水坡降的话）。

船舶阻力中的各成分如摩擦阻力、粘压阻力、兴波阻力等均随航速而变化其大小，但变化率各不相同。大体说来，摩擦阻力约比例于航速的1.83次方；粘压阻力约比例于航速的平方；兴波阻力约比例于航速的4~6次方，即：

$$R_f \propto v^{1.83}; R_{vp} \propto v^2; R_w \propto v^{4 \sim 6}$$

各成分占总阻力中的比重是不同的，由于它们随航速的变化率不同，所以各成分所占比重也随航速而变。低速时摩擦阻力所占比重最大，约70%~80%，甚至更多；粘压阻力一般不足10%，优良船型尚可在5%以下，短宽肥大船型此成分所占比重则较大；由于兴波阻力的变化率最大，随航速之增高，其所占比重增大，某些情况下可达50%。

图1-4表示了三种船舶的阻力成分随航速变化的关系。图中横坐标为傅汝德数 $F_n = v / \sqrt{gL}$ ，对于给定船长，它实际上代表速度之变化。

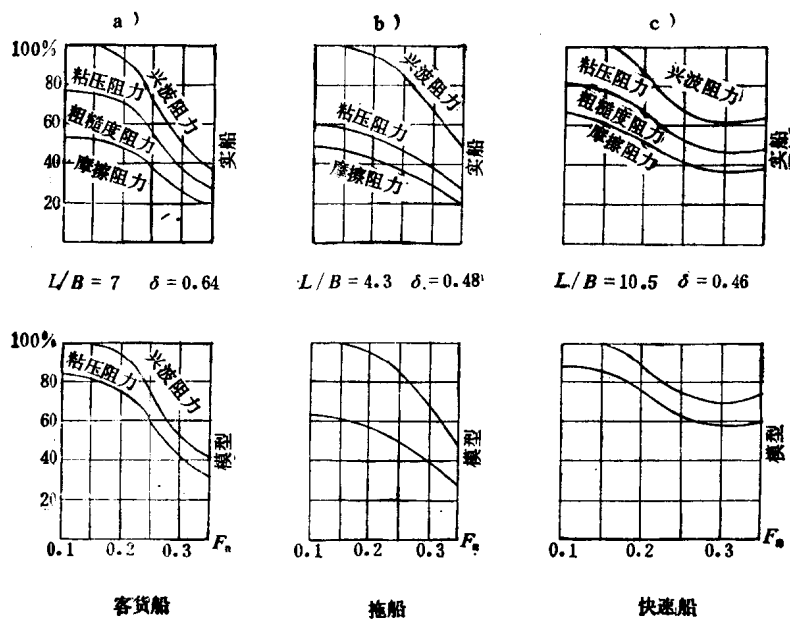


图 1-4

§1-3 相似条件 阻力系数

当用船模试验方法研究阻力而欲将试验结果推广到实船上去时，其先决条件为两物理系统必需满足力学相似。由于本课程中较多地引用试验资料，我们将多次遇到力学相似条件的各种表达形式。为此，我们先回顾一下相似理论。

1. 力学相似 阻力系数

力学相似可以表述为：两物系中任一对对应之力成同一比例。所涉及之力有惯性力、重力、粘性力等等。我们先从惯性力来考查满足力学相似的必要条件及相应的力的比值。

按牛顿第二定律，实物 s 和模型 m 两物系中任意一对对应之惯性力，例如对应流团在 X 轴向之惯性力 df_x 之比值为：

$$\frac{(df_x)_s}{(df_x)_m} = \frac{\left(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{dv_x}{dt}\right)_s}{\left(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{dv_x}{dt}\right)_m} = \frac{\left(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot v_x \frac{dv_x}{dx}\right)_s}{\left(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot v_x \frac{dv_x}{dx}\right)_m}$$

如果这两个物系能满足下列条件：

(1) 几何相似——即任意对应的线性尺度均成同一比例 α_l 。例如对于任意之对应流体微团有：

$$\frac{(dx)_s}{(dx)_m} = \frac{(dy)_s}{(dy)_m} = \frac{(dz)_s}{(dz)_m} = \alpha_l$$

(2) 运动相似——即任意对应的速度成同一比例 α_v 。例如对任意对应流团有：

$$\frac{(v_x)_s}{(v_x)_m} = \frac{(dv_x)_s}{(dv_x)_m} = \alpha_v$$

(3) 任意对应点的密度成同一比例 α_ρ ，即：

$$\frac{\rho_s}{\rho_m} = \alpha_\rho$$

那么，两物系任一对惯性力之比值为：

$$\frac{(df_x)_s}{(df_x)_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^3 \cdot \alpha_v^2$$

当船舶和其模型满足力学相似时，其阻力之比也与此惯性力之比值相同，即：

$$\frac{R_s}{R_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^3 \cdot \alpha_v^2$$

如航速之比值表示为 α_v ，即 $\alpha_v = v_s/v_m$ ；取湿水面积 S 之比值表示 α_l^2 ，即 $\alpha_l^2 = S_s/S_m$ ，则有：

$$\frac{R_s}{R_m} = \frac{\rho_s}{\rho_m} \cdot \frac{S_s}{S_m} \cdot \frac{v_s^2}{v_m^2}$$

$$\left(\frac{R}{\rho S v^2}\right)_s = \left(\frac{R}{\rho S v^2}\right)_m$$

取 C 表示阻力系数，令其定义式为：

$$C = \frac{R}{\frac{1}{2}\rho S v^2}$$

则上述关系表明：虽然两物系阻力的绝对值不相等，但在满足力学相似条件的情况下其阻力系数却是相等的，即：

$$C_s = C_m$$

由此，试验结果通常均以阻力系数形式表出，以便直接应用到实船上去。

注意，随着我们表达 α_l^2 方式之不同，将得到不同定义形式之阻力系数。例如，以排水体积 ∇ 的 $1/3$ 方表线性尺度，可以导得：

$$C_s = \frac{R_s}{\frac{1}{2}\rho_s \nabla_s^{2/3} v_s^2} = \frac{R_m}{\frac{1}{2}\rho_m \nabla_m^{2/3} v_m^2} = C_m$$

以船中横断面积 $\sqrt{\omega}$ 表线性尺度，可以导得：

$$C_s = \frac{R_s}{\frac{1}{2}\rho_s \omega_s v_s^2} = \frac{R_m}{\frac{1}{2}\rho_m \omega_m v_m^2} = C_m$$

同一试验结果可以组成不同定义形式的系数，其数值虽然不同，但对于满足力学相似的实船和船模而言，只要取同一定义式，则两者的系数仍是相等的。今后在引用不同资料时会出现不同定义形式的阻力系数。

2. 傅汝德相似条件 比较律

注意，上述力学相似条件是仅从惯性力导出的，也就是仅从力的后果来看满足力学相似所必需具备的关系，没有考虑不同来源的力是否也满足此条件。

实际上，所谓几何相似不仅包括船舶及其模型本身对应线性尺度成同一比例，也包括流场中任意对应线性尺度，如边界层厚度、兴波波长、流线曲度等等均成同一比例。所谓运动相似也包括流场中任意对应点对应分速度成同一比例。流场中几何相似和运动相似称为流型相似。显然，当流场中对应点的密度成同一比例时，只有当任何种类来源的外力在任何对应方向的分力均成同一比例时才可能存在流型相似。此时，不同来源的外力比值亦将与惯性力比值相同。从此点出发可以导出对应于各种不同来源外力的附加相似条件。

就船模试验而言，我们所感兴趣的外力有粘性力和重力。如果仅有重力存在，对应流团所受重力之比为：

$$\frac{(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot g)_s}{(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot g)_m}$$

此比值应与惯性力之比值相同，即：

$$\frac{(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot g)_s}{(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot g)_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_g^2$$

或

$$\alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_g = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_v^2$$

$$\alpha_g \cdot \alpha_l = \alpha_v^2$$

取实船及船模之长度比 L_s/L_m 表示 α_l ，取航速之比 v_s/v_m 表示 α_v ，则上式可写为：

$$\frac{(gL)_s}{(gL)_m} = \frac{v_s^2}{v_m^2}, \text{ 或 } \left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)_s = \left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)_m$$

式中: v/\sqrt{gL} 称为傅汝德数, 以符号 F_n 表之, 即:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

于是, 当有重力存在时, 力学相似之附加条件为: 实船及船模之傅汝德数相等

$$(F_n)_s = (F_n)_m$$

这个附加条件称为傅汝德相似条件。

随着线性尺度取法不同, 傅汝德数也可以有不同的定义形式。例如取 $\nabla^{\frac{1}{3}}$ 表线性尺度, 可以得到以排水体积定义的傅汝德数 F_{nv}

$$F_{nv} = \frac{v}{\sqrt{g\nabla^{\frac{1}{3}}}}$$

满足傅汝德相似条件意味着实船及船模的速度之间存在一定之关系:

$$\frac{v_s}{v_m} = \frac{(\sqrt{gL})_s}{(\sqrt{gL})_m} = \sqrt{\frac{L_s}{L_m}} = \alpha_l^{\frac{1}{2}}$$

这即是说, 对于具有一定比尺 α_l 之实船和船模, 若只有重力存在时, 不是在任何速度下均能满足力学相似的。如欲满足相似, 必需具有上式所示之速度关系。从上式看, 尺度小之船模其速度亦小, 这在试验时是可以办到的。

兴波阻力是在有重力存在的情况下产生的, 所以实船及船模之兴波阻力系数 C_w 只有在 F_n 相等时才可能相等, 或者说兴波阻力系数是 F_n 的函数, 且仅是 F_n 的函数 (假若不计其它来源外力影响的话)。

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho S v^2} = C_w(F_n)$$

在满足傅汝德相似条件时, 兴波阻力系数可作如下变形:

$$\frac{(R_w)_s}{(R_w)_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_v^2$$

以傅汝德相似条件 $\alpha_g \cdot \alpha_l = \alpha_v^2$ 代入之, 得:

$$\frac{(R_w)_s}{(R_w)_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_g \cdot \alpha_l^2 = \frac{D_s}{D_m}$$

或

$$\left(\frac{R_w}{D}\right)_s = \left(\frac{R_w}{D}\right)_m$$

式中 D 表示排水量。上式可表述为, 在傅汝德数相等时, 实船及船模之单位排水量兴波阻力相等。此关系称为比较律, 在船模实船阻力换算中常用到它。

3. 雷诺相似条件

当流场中有粘性存在时, 任一对粘性力之比也应与惯性力之比相同方能达到力学相似。

按牛顿粘性切应力表达式 $\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial n}$ (式中 μ 为粘性系数), 则某一面积 ds 上之粘性力为

$\mu \frac{\partial v}{\partial n} ds$, 于是, 满足力学相似应有:

$$\frac{\left(\mu \frac{\partial v}{\partial n} ds \right)_s}{\left(\mu \frac{\partial v}{\partial n} ds \right)_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_v^2$$

即 $\alpha_\mu \cdot \alpha_l \cdot \alpha_v = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_v^2$

或 $\alpha_v = \alpha_l \cdot \alpha_\rho$

式中 ν 为运动粘性系数, $\nu = \mu/\rho$ 。

取实船及船模之长度比表示 α_l , 取航速比表示 α_v , 则有,

$$\left(\frac{vL}{\nu} \right)_s = \left(\frac{vL}{\nu} \right)_m$$

式中 $\frac{vL}{\nu}$ 称为雷诺数, 以符号 R_n 表之:

$$R_n = \frac{vL}{\nu}$$

则上式写为:

$$(R_n)_s = (R_n)_m$$

这意味着, 当只有粘性存在时, 满足力学相似之附加条件为实船及船模之雷诺数相等。这个附加条件称为雷诺相似条件。

满足雷诺相似条件时, 实船及船模之速度关系为:

$$v_m = v_s \cdot \alpha_l \cdot \alpha_v^{-1}$$

通常实船及船模均在水中运行, $\alpha_\rho \approx 1$, 于是上式表明船模速度将是实船的 α_l 倍。这在试验技术上是难于办到的。即使能够办到, 将此速度关系 $\alpha_v = \alpha_l^{-1}$ 代入阻力比值表达式中将有:

$$\frac{R_s}{R_m} = \alpha_\rho \cdot \alpha_l^2 \cdot \alpha_v^2 = \alpha_\rho \approx 1$$

这意味着船模将遭受同实船同样大小的阻力。显然这也不是船模所能承受的。因此, 试验时均不能满足雷诺相似条件。

粘性阻力是由粘性的存在引起的, 只有在满足雷诺数相等条件下粘性阻力系数才能相等, 即粘性阻力系数应是 R_n 的函数, 若不考虑其它外力影响, 且仅是 R_n 的函数:

$$C_v = \frac{R_v}{\frac{1}{2} \rho S v^2} = C_v(R_n)$$

4. 全相似

事实上实船及其船模所处之流体既在重力场中又具有粘性, 故如实船及其船模型间满足力学相似, 必须同时满足两者的傅汝德数和雷诺数相等, 或者说实船及船模之总阻力系数 C_t 应同时为 F_n 及 R_n 之函数:

$$C_t = C_t(F_n, R_n)$$

实船及其船模两者的 F_n 及 R_n 均相等称两者全相似。按前述, 全相似是不能达到的。如

欲满足全相似，则实船及船模之速度应同时满足：

$$v_m = v_s \sqrt{\frac{L_m}{L_s}}; \quad v_m = v_s \frac{v_m}{v_s} \frac{L_s}{L_m}$$

即需 $\frac{v_m}{v_s} = \left(\frac{L_m}{L_s}\right)^{\frac{3}{2}}$

这意味着需要船模在运动粘性系数比水小得多的流体中进行试验，这在目前试验技术上是办不到的。

第二章 粘性阻力

§2-1 平板摩擦阻力公式概述

船舶航行时阻力的大小目前还不能用理论方法来进行计算，还不得不借助船模试验，从试验结果设法推算至实船。绪论中指出，船模和实船不能满足全相似，这就使利用船模试验结果推算实船阻力发生了困难。为了解决此问题，傅汝德于1871年提出将总阻力分为摩擦阻力和剩余阻力两部分，摩擦阻力用计算方法来解决，剩余阻力用比较律来推算（此方法将在第四章中讨论），而且提出用相当平板来代替船体表面计算其摩擦阻力。所谓相当平板是指与船体有同样长度和湿面积之平板。平板摩擦阻力的计算历来都是造船界十分关心的问题。

早在1872年至1876年间，傅汝德即用不同长度（自0.30m（1英尺）至15.24m（50英尺）共7种）、不同表面情况之平板进行试验。按试验结果可以归纳出下列形式之经验公式：

$$R_f = f \cdot S \cdot v^n$$

式中： f ——阻力系数，与平板长度及表面情况有关；

n ——与平板长度及表面情况有关之指数；

S ——湿水面积；

v ——平板前进速度。

阻力系数 f 随板长之增加显著减小，而指数 n 则变化不大。1888年傅汝德（W.Froude）之子（R.E.Froude）重新分析父子二人之试验结果，取 n 为常数，且等于1.825。

1935年巴黎第2次国际船模试验所所长会议决议取傅汝德公式作为计算摩擦阻力之标准，并取公式之形式为：

$$R_f = \frac{\gamma}{101.94} \lambda S v^{1.825} \quad (2-1)$$

式中 λ 为阻力系数，当 $t = 15^\circ\text{C}$ 时

$$\lambda = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L} \quad (2-1a)$$

当 t 不同于 15°C 时， λ 应乘以修正系数

$$[1 + 0.0043(15 - t^\circ\text{C})] \quad (2-1b)$$

式中： L ——船长（m）；

γ ——水之重度（ N/m^3 ）；

S ——湿面积（ m^2 ）；

v ——速度（ m/s ）；

R_f ——摩擦阻力（ N ）。

傅汝德公式应用数十年，曾一度被采纳为国际标准，至今仍有时被应用，但其结构是不合理的。按前述，摩擦阻力是由粘性引起的，其阻力系数应该是雷诺数的函数。如将傅汝德

公式用阻力系数形式表示出，可得：

$$C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho S v^2} = \frac{\frac{\gamma}{101.94} \lambda S v^{1.825}}{\frac{1}{2}\rho S v^2} = \frac{g}{50.97} \lambda v^{-0.175}$$

$$= \frac{g}{50.97} \lambda \left(\frac{L}{v}\right)^{0.175} R_n^{-0.175}$$

显然此式并非雷诺数的函数，且意味着在同一雷诺数下随板长之不同将有不同之阻力系数。此点可从图2-1上看出。

不过应当指出，雷诺相似条件发表于1883年，傅汝德总结其结果时当然不可能用到雷诺数这一概念。此外，后继的研究者证明傅汝德的试验做得非常仔细和精确，即使用近代的设备也很难超过，并且实践证明这一经验公式对实船而言可以看作包括了粗糙影响。这些也是它长期被应用的原因。

随着人类认识的发展，1908年布莱修斯 (Blasius) 用理论导出了层流摩擦阻力系数公式：

$$C_f = 1.327 R_n^{-1/2} \quad (2-2)$$

1913年普朗特 (Prandtl) 提出了边界层理论，大约于1921年，普朗特和冯卡曼 (Von Karman) 分别独立地导出了紊流边界层摩擦系数公式：

$$C_f = 0.073 R_n^{-1/5} \quad (2-3)$$

此式是按边界层内流速法向分布为指数关系

$$\frac{v}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}$$

导出的。1927年普朗特修正了其公式使之与威塞伯格 (Wieselsbergor) 在风洞中和格伯斯 (Gebers) 在水池中试验结果符合得更好，修正后的形式为：

$$C_f = 0.074 R_n^{-1/5} \quad (2-3a)$$

普朗特及其同事们尼古拉泽 (Nikuradse)、许立汀 (Schlichting) 在哥廷根风洞实验室继续研究管内高速流动，将其结果用分析方法换算为平板绕流，于1932年发表了著名的普朗特-许立汀公式：

$$C_f = 0.455 (\lg R_n)^{-2.58} \quad (2-4)$$

此式在我国得到广泛的应用。

同时，桑海 (Schoenherr) 也于1932年发表公式：

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_f}} = \lg(R_n \times C_f) \quad (2-5)$$

其主要理论部分是卡曼于1930年应用边界层内流速作对数分布导出的，故又称卡曼-桑海公式。此式中系数是桑海归纳以往各家试验结果决定的，故又称桑海平均线。如图2-2所示，不论在低雷诺数或高雷诺数与各家试验结果均极为接近。

1947年美国船模试验池会议 (American Towing Tank Conference) 曾决议采用桑海公式作为美国各试验池计算摩擦阻力系数之标准，故此式又称为1947ATTC公式。

此式的最大特点为 C_f 对 $\lg R_n$ 绘得曲线之斜率随雷诺数之增大而减小，故在很大范围内均