

船舶阻力

伊绍琳 编

国防工业出版社

阅过本书并提出宝贵意见；海军工程学院船舶工程系及有关单位和同志曾给予大力支持和帮助；在此一并致以衷心的感谢。

限于编者水平，书中缺点和错误在所难免，诚恳希望读者批评指正。

编 者

于哈尔滨船舶工程学院

内 容 简 介

本书主要叙述船舶各种阻力成分的成因、特性、计算方法与减小途径和船模试验技术、阻力近似计算方法及船型对阻力的影响。对船舶附加阻力、船在限制航道中的阻力特性和各式快艇阻力亦作了简要介绍。每章之后附有习题。

本书可作为高等工科院校船舶设计与制造专业教材；亦可供从事船舶设计和科研工作的工程技术人员参考。

船 舶 阻 力

伊 绍 琳 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张18¹/₄ 422千字

1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数：0,001—2525册

统一书号：15034·3011 定价：3.75元

前 言

本书按照 1981 年 11 月广州教材会议和 1982 年 5 月船舶工程类教材编审小组会议精神,在 1979 年初稿和初稿审查意见基础上,结合几年来的教学使用情况和国内外有关教材及全国有关院校《船舶阻力》教学大纲编写而成。1984 年 3 月船舶工程类教材编审小组武昌会议审评为高等工科院校船舶设计与制造专业教材。

本书在编写中注意了如下几点:

1. 内容取舍及深广度:根据阻力学科的发展,着重从工程应用出发给出船舶设计与制造专业本科大学生所必需的基本知识、基本方法和基本技能;为此本书在精练有关传统内容的同时,适当引入了现时工程上已较普遍使用的新概念和新方法,如船型因子概念、休斯假设及相应的船模-实船阻力三因次换算方法、尾流测量法、波型分析法及相应的破波阻力、波型阻力等新的阻力成分概念及有关优化船型的基本思想等。基于问题必要的完整性和为更好理解大纲中所要求的内容之考虑,本书适当编写一些供自学的材料,全书有:对数速度分布律的平板摩擦阻力公式推导、边界层控制、局部粗糙度和球型首的半经验半理论设计方法四项,以*号在相应内容前标出。

2. 课程体系:全书以“各阻力成分的成因、特性、计算方法、减小途径”为线贯穿,以傅汝德假设和休斯假设为桥梁联系书中基本理论和实际工程应用;本书即以此为体系构成整体。

3. 章节安排和叙述方式:在根据各内容间的内在联系考虑全书有较好的科学性和系统性的同时,适当地将有关内容相对独立构成章节,以便于自学和适应不同教学时数的需要。叙述中注意采用“由工程实践提出问题、根据现象观察和典型试验结果展开叙述、落实到工程应用”的方法;说明中注意问题的物理含义与工程处理方法相协调。

4. 为提高学习效果和便于自学,每章之后附有习题。

全书共十三章,前五章着重讲述摩擦阻力、粘压阻力、兴波阻力等各阻力成分的成因、特性、计算方法与减小途径;叙述中注意与工程应用相呼应。第八至十二章,讲述船模试验技术、阻力近似计算方法和船型对阻力的影响;叙述中注意启发从工程应用角度研究和处理问题的思想和方法。第六、七和十三章,分别对船舶附加阻力、船在限制航道中的阻力特性和快艇阻力作了简要介绍,其中快艇阻力部分重点是滑行艇和水翼艇。

本书由海军工程学院邵仲立、董祖舜同志主审。在本书编写过程中,曾得到许多单位和同志的支持。邵仲立、董祖舜同志,武汉水运工程学院李世谟教授和哈尔滨船舶工程学院许维德教授,在繁忙中曾审阅过本书各阶段稿本并提出具体修改意见;海军工程学院郝亚平副教授,华中工学院程天柱教授、许汉珍、韩红双同志,武汉水运工程学院王德珣副教授、周俊麟同志,上海交通大学姜次平副教授,天津大学王旭、孟昭寅同志,大连工学院孟宪钦、黄鼎良同志,华南工学院胡志安副教授,镇江船舶学院龚益华副教授,哈尔滨船舶工程学院朱典明副教授、赵联恩、朱念昌、杨春林同志等曾仔细审

目 录

第一章 引论..... 1	§ 4-2 船波成因及其图形特征69
§ 1-1 船舶快速性 1	§ 4-3 兴波阻力成因及其量值 确定73
§ 1-2 阻力划分和分类 2	§ 4-4 兴波阻力特性76
§ 1-3 阻力相似定律 6	§ 4-5 兴波干扰及预测81
§ 1-4 阻力一般表达式 9	§ 4-6 减小兴波阻力途径85
§ 1-5 船舶航态及划分10	§ 4-7 波型分析法简介87
复习题.....12	复习题.....93
第二章 摩擦阻力和粘压阻力.....13	第五章 破波阻力.....95
§ 2-1 船体绕流区域划分及船 舶粘性阻力处理方法13	§ 5-1 破波阻力95
§ 2-2 摩擦阻力成因、特性15	§ 5-2 阻力分类补充98
§ 2-3 光滑平板摩擦阻力计 算公式18	复习题100
§ 2-4 船体曲率对摩擦阻力 的影响26	第六章 附加阻力101
§ 2-5 船体粗糙度对摩擦阻力的 影响29	§ 6-1 附体阻力.....101
§ 2-6 船体摩擦阻力计算37	§ 6-2 流水孔阻力.....106
§ 2-7 污底43	§ 6-3 空气阻力.....107
§ 2-8 物体形状阻力成因、 特性43	§ 6-4 波浪中阻力增值.....109
§ 2-9 船舶粘压阻力特性及 确定46	复习题109
§ 2-10 从减小粘压阻力出发型线 设计时应注意的原则.....54	第七章 限制航道对阻力的影响110
§ 2-11 减小粘性阻力的途径.....55	§ 7-1 浅水对阻力的影响.....110
复习题.....59	§ 7-2 浅水阻力近似计算.....114
第三章 尾流测量法.....61	§ 7-3 狭航道对阻力的影响.....118
§ 3-1 物体粘性阻力的一般计算 公式61	复习题119
§ 3-2 尾流测量法63	第八章 船模阻力试验120
复习题.....67	§ 8-1 傅汝德假设及相应的船模- 实船阻力换算方法.....120
第四章 兴波阻力.....68	§ 8-2 船模试验池和船模.....122
§ 4-1 概述68	§ 8-3 尺度效应和池壁干扰.....128
	§ 8-4 船模-实船阻力换算方法 综述.....131
	§ 8-5 潜艇模型试验.....135
	复习题139
	第九章 阻力近似计算141
	§ 9-1 概述.....141

§ 9-2	近似计算剩余阻力方法	141	§ 12-1	内河船船型特点	207
§ 9-3	近似计算总阻力方法	160	§ 12-2	两种变换船型方法	209
§ 9-4	母型法	167	§ 12-3	船模系列的编制	212
§ 9-5	潜艇水下状态阻力近似 计算	168	复习题		214
§ 9-6	内河船阻力近似计算	168	第十三章	快艇阻力	215
复习题		169	§ 13-1	滑行平板水动性能	215
第十章	水面船船型对阻力的影响	171	§ 13-2	滑行艇阻力计算	221
§ 10-1	概述	171	§ 13-3	滑行艇艇型对阻力的 影响	234
§ 10-2	主尺度及主尺度比	173	§ 13-4	水翼艇特点	239
§ 10-3	船型系数 C_p 、 C_B 、 C_M	176	§ 13-5	水翼的水动性能	240
§ 10-4	横剖面面积曲线形状	179	§ 13-6	水翼艇阻力计算	246
§ 10-5	设计水线形状	182	§ 13-7	排水式快艇特点	248
§ 10-6	横剖面形状	184	§ 13-8	排水式快艇阻力计算	253
§ 10-7	首尾端形状	185	§ 13-9	排水式快艇艇型对阻力的 影响	267
§ 10-8	方尾	186	§ 13-10	气垫船原理及分类	269
§ 10-9	球型首	190	§ 13-11	气垫船阻力特性	271
复习题		198	复习题		274
第十一章	潜艇艇型对阻力的影响	199	附录		275
§ 11-1	修长度	199	附表-1	暂时与国际单位制并用 的一些单位	275
§ 11-2	菱形系数 C_p	201	附表-2	ITTC-57公式	275
§ 11-3	平行中体长度	202	附表-3	桑海公式	278
§ 11-4	横向尺度比和横剖面形状 及最大横截面位置	203	附表-4	普朗特-施里希廷公式	281
§ 11-5	首尾端部形状	203	附表-5	水的运动粘性系数 ν 和 密度 ρ (ITTC-10th)	283
复习题		206	参考文献		284
第十二章	内河船船型特点及船 模系列之编制	207			

第一章 引 论

§ 1-1 船舶快速性

(一) 快速性概念

船航行时受到流体（水和空气）对其运动的阻滞作用，流体作用于船体阻挡船前进的力称为船的阻力，记为 R （参见图1-1）。

为克服阻力，船舶都装有推进器，以将主机功率转换成推进器前进的力，此力称为推力，记为 T 。

显然，船产生推力大小的能力取决于主机功率大小和推进器转换主机功率为推船前进功率的效率（称为推进效率）的高低。

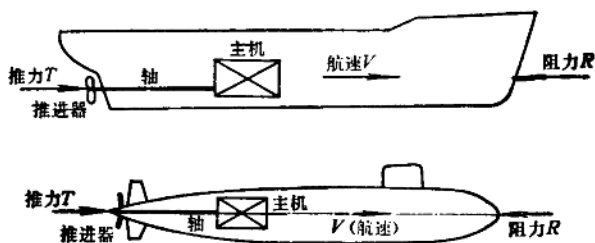


图1-1 快速性概念示意图

因此，一条船能达到航速高低的能力将取决于它所受到阻力的大小、主机功率的大小和推进效率高低这三个因素。

为了描述一条船能达到航速高低的能力，造船学中引入“船舶快速性”这一概念。其含义是：一定排水量的船，在一定的主机功率消耗条件下所能达到的航速之高低，航速高者谓之快速性好，反之则差。与此相仿，船舶快速性的含义也可这样表述：一定排水量的船，为维持一定航速所需主机功率的大小，所需功率小谓之快速性好，反之则差。显然，说一条船的快速性能如何单是看其航速高低是不全面的。

如上所述，一条船快速性的优劣取决于其阻力和推进性能。即取决于船型阻力的大小和推进效率的高低。船的推进性能由“船舶推进”课程研究，本课程研究船航行时的阻力性能。

(二) 课程对象、目的、意义

如上所述，本课程的研究对象是船航行时遭受到的阻力 R ；具体是：研究船舶阻力形成的物理原因、它与船型及航速的关系、它的计算方法及减小途径。

研究的目的是，为了在给定船型时能分析其阻力性能的优劣并计算出其阻力；在进行船舶设计时能设计出在规定条件下阻力尽量小的船型。

课程意义：由上述快速性概念的含义不难理解：如果船舶的快速性能好，则可使船舶在同样排水量、同样主机功率情况下有更高的航速；或是在给定主机功率及航速要求情况下，可使船有更大的排水量。不言而喻，航速的提高对船舶（尤其是军舰）使命的完成有极重要的意义；而排水量的增大，意味着对运输船舶可增加货物载运量，对战斗

舰艇可增加武备、弹药或燃油的装载量，显然，都使船舶的使用效能相对提高。因此使船舶具有尽量高的快速性能（低阻船型、高效推进器及它们之间的最佳配合），是设计师在设计各种类型船舶时都努力追求的目标。因此有关船舶快速性能的研究和知识在船舶设计实践中是十分重要的。

（三）研究方法

本课程和其它工程学科一样，亦是采用理论和试验两种研究方法。

对本课程，理论研究方法，就是以流体力学某些理论为基础，借助数学工具，通过建立并求解阻力与船型及航速间的函数关系，找出阻力与船型及航速的关系，得出阻力的计算方法，从而可在总的设计思想指导下设计出相应的低阻力船型。

试验方法，就是对实船和模型进行试验研究。实船试验，由于耗费人力物力大，且受水流、风浪等自然条件的限制和影响，因此除特殊需要外（如对船模-实船换算方法进行必要的校核等），一般不使用。船模试验，是试验方法的主要手段。即通过一定比尺的模型试验预报实船的阻力性能、明确阻力与船型参数间的关系及验证理论结果的正确程度等。

由于用数学公式表达实际船型的困难和真实船体绕流的复杂性，致使在用理论方法求解问题时必需引进一些近似假设，从而使某些问题的理论结果与实际偏离较大。现在，关于船舶阻力的计算和船型参数的确定，基本上仍是依靠船模试验。但必需明确，试验是在理论指导下进行的。因此理论研究和试验研究两者是相互依存相互促进的。事实上，阻力学科的成果和进展，正是两者相辅相成的结果。近二十年来，理论方法和试验技术都有显著进展。

§ 1-2 阻力划分和分类

为便于问题研究和处理，本课程常依具体问题的需要而将船的总阻力值划分成几个部分，谓之阻力划分；对各部分阻力，又根据其物理力学特性而将它们归成几类，谓之阻力分类。本节以一般排水式水面船舶为对象给出近代船舶阻力的划分和分类。

（一）阻力划分

船舶的总阻力值，常依问题研究和处理的需要而有如下几种划分：

1. 空气阻力和水阻力

船是在水和空气两种介质中运动的，因此其总阻力值(R_t)可分为空气阻力(R_{aa})和水阻力(R_*)两部分，即

$$R_t = R_{aa} + R_* \quad (1-1)$$

因为空气密度约仅为水的 $1/800$ ，故对一般船舶而言，空气阻力约仅为水阻力的 $2 \sim 5\%$ 。本课程主要是研究水阻力。

2. 静水阻力和波浪中阻力增值

实际船舶是在有波浪的水面上运动的。但直接研究船在这种情况下的阻力是十分困难的。因此本课程至今仍是以船在静水中作匀速直线运动时所受阻力（称为静水阻力，记为 R ）为基本研究状况。对波浪中真实阻力(R_*)则采用静水阻力与波浪中阻力增值

(R_{aw})来描述。称船在波浪中的阻力与船在静水中的阻力之差为波浪中阻力增值(亦称汹涛阻力)。故

$$R_{\Sigma} = R + R_{aw} \quad (1-2)$$

静水阻力是本课程的基本研究对象。

3. 裸体阻力和附体阻力

将真实船体划分成主船体和附体两部分。附体,对水面船舶而言包括舵、轴、轴支架及舳龙骨等设计水线以下突出在船体型线以外的部件;对潜艇,则包括指挥台围壳、首尾水平舵、尾垂直舵、水平和垂直稳定翼等突出于艇体型线以外的部件。这样,船之静水阻力可分成主船体所受阻力和附体所受阻力两部分;相应地称为裸体阻力(R_L)和附体阻力(R_{ap})。规定带附体时的静水阻力与裸体阻力之差为附体阻力。故

$$R = R_L + R_{ap} \quad (1-3)$$

注意,螺旋桨不计入附体,它的存在和工作所引起的阻力不在本课程中计入,此部分阻力在船舶推进课程中给予处理。

由上述,船舶总阻力值可分为静水阻力、汹涛阻力和空气阻力三部分或裸体阻力、附体阻力、汹涛阻力和空气阻力四部分,即

$$R_t = R + R_{aw} + R_{aa} = R_L + R_{ap} + R_{aw} + R_{aa} \quad (1-4)$$

本课程中,常把附体阻力、汹涛阻力和空气阻力合在一起而统称为附加阻力($R_{附加}$)。

以上划分整理如下:

$$\text{总阻力值 } R_t \left\{ \begin{array}{l} \text{水阻力 } R_w \\ \text{空气阻力 } R_{aa} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{静水阻力 } R \\ \text{汹涛阻力 } R_{aw} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{裸体阻力 } R_L \\ \text{附体阻力 } R_{ap} \end{array} \right\} \text{附加阻力 } R_{附加}$$

(二) 阻力分类

为便于研究,将上述各部分阻力归纳为几种不同类型的阻力成分。这种分类通常是根据形成阻力的力在船体表面上的作用方向,或是形成阻力的物理原因,或是对应观察到的船体绕流现象(如出现兴波和尾伴流)等来进行的。本节主要从力在船体表面上的作用方向和产生阻力的物理原因两个方面来给出近代船舶阻力成分的基本分类,以后在第五章将给出较完整的补充。

1. 按力在船体表面上的作用方向划分

取固定于船的坐标系如图1-2(a)所示: x 轴沿船舶运动反方向, y 轴指向右舷, z 轴垂直向上,坐标原点为船舶中部横剖面、对称面与静水面之交点。

称相应计算状态下与水相接触的船体表面为浸湿表面,其面积记为 S 。

取微元湿表面 ds ,设其中心点处的水动力应力为 \vec{p} (参见图1-2(b)),则整个船体水动力主矢量为

$$\vec{R} = \int_S \vec{p} ds \quad (1-5)$$

此矢量在 x 轴方向的分量为水阻力 R :

$$R = \int_S |\vec{p}| \cos(\vec{p}, \vec{x}) ds \quad (1-6)$$

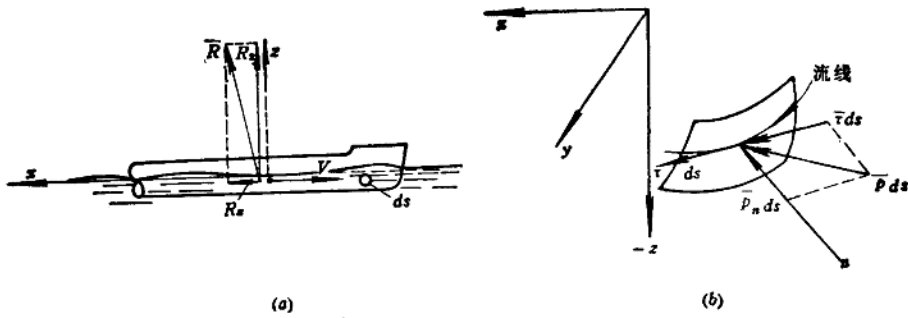


图1-2 坐标系及船体表面流体动力元

(a) 固定于船相的坐标系; (b) 船体表面流体动力元。

将 \bar{p} 分解成沿 ds 法线方向的压应力 \bar{p}_n 和沿着通过 ds 中心点之流线的切线方向的切应力 $\bar{\tau}_0$, 即

$$\bar{p} = \bar{p}_n + \bar{\tau}_0 \quad (1-7)$$

则依式 (1-6) 得

$$R = \int_S |\bar{p}_n| \cos(\bar{p}_n, x) ds + \int_S |\bar{\tau}_0| \cos(\bar{\tau}_0, x) ds \quad (1-8)$$

上式右端第一项, 是压应力在 x 轴上的投影沿整个船体浸湿表面上的积分, 称此部分阻力为压差阻力或压阻力, 记为 R_p ; 第二项是切应力在 x 轴上的投影沿整个浸湿表面上的积分, 称此部分阻力为摩擦阻力, 记为 R_f 。

可见, 依水动力在船体表面上的作用方向, 可将船舶总阻力分为摩擦阻力和压阻力两种成分, 即

$$R = R_f + R_p \quad (1-9)$$

在以后进一步的叙述中将知道, 压阻力 R_p 是由因流体粘性而产生的粘压阻力 (记为 R_{pv}) 和因流体有重量且存在自由液面时而形成的兴波阻力 (记为 R_w) 两部分组成; 其中粘压阻力又分为形状阻力 (记为 R_s) 和诱导阻力 (记为 R_i) 两部分。所谓形状阻力, 是因船体边界层的存在 (离体或不离体) 所引起的压差阻力; 诱导阻力, 是船体表面 (舭部) 产生沿流向涡旋所引起的压差阻力 (近年研究表明, 当船体舭部圆角过小时, 则可在前体舭部产生弱的外旋涡——由尾向首看旋涡上部向外旋, 而在后体舭部产生强的内旋涡——由尾向首看旋涡上部向内旋, 这些首尾涡迹在尾部引起水流下洗而形成压差阻力。但对一般尖瘦的排水式水面舰船, 此项阻力不大, 因此本书对一般排水式水面舰船的粘压阻力的研究, 将主要就形状阻力来讨论)。

由上述, 根据力在船体表面上的作用方向, 可认为裸船体静水总阻力由下式表达:

$$R = R_f + R_p = R_f + R_{pv} + R_w = R_f + R_s + R_i + R_w \quad (1-10)$$

2. 按产生阻力的物理本质划分

在船舶阻力问题研究中, 仅计入水的粘性和重量两个物理力学特性。因此, 水对船舶产生的总阻力可以划分为因水的粘性所致阻力和因水有重量所致阻力两部分; 相应称为粘性阻力 (R_v) 和兴波阻力 (R_w), 即

$$R = R_v + R_w \quad (1-11)$$

显然, 前述摩擦阻力和粘压阻力属粘性阻力, 即

$$R_v = R_f + R_{pv} \quad (1-12)$$

以上从两个方面对裸船体静水总阻力进行了分类。显然，这种划分对附体阻力等原则上是同样成立的。故船舶阻力成分之分类可整理如下：

$$\text{总阻力 } R_t \left\{ \begin{array}{l} \text{摩擦阻力 } R_f \\ \text{压阻力 } R_p \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{粘压阻力 } R_{pv} \\ \text{兴波阻力 } R_w \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{形状阻力 } R_e \\ \text{诱导阻力 } R_i \end{array} \right\} \text{—粘性阻力 } R_v$$

之所以这样划分，是因为在不同场合，按相应划分可给问题的研究或处理带来方便。如进行理论研究时，按式(1-11)将总阻力分为粘性阻力和兴波阻力两部分，则便于应用流体力学的边界层理论和兴波理论；而按式(1-10)，则便于对阻力进行实测研究。

在实际确定船舶阻力时，通常是按式(1-4)将总阻力分成裸船体阻力、附体阻力、汹涛阻力和空气阻力四个部分。其中裸体阻力按式(1-10)分为摩擦阻力、粘性阻力和兴波阻力三部分或按式(1-11)分为粘性阻力和兴波阻力两部分来计算，而对附体阻力、汹涛阻力和空气阻力则由试验逐一给出或以附加阻力一并给出，即

$$R_t = R_{fL} + R_{pvL} + R_{wL} + R_{ap} + R_{aa} + R_{aw} \quad (1-13)$$

或

$$R_t = R_{vL} + R_{wL} + R_{ap} + R_{aa} + R_{aw} \quad (1-14)$$

对排水式水面船舶，其阻力构成基本如式(1-13)。而对其它船舶，则情况不尽相同，如潜艇深潜航行时将没有 R_w 、 R_{aa} 和 R_{aw} ；同样，式(1-13)亦并不包括所有各类型船舶的所有阻力成分，如滑行艇的飞溅阻力、气垫船的动量阻力等。对这些，将在以后的具体问题中再详述。

最后要说明：各个阻力成分在总阻力中所占的比重是不同的，并且这种比重是随船型和航速的不同而不同的。表1-1是几类船舶在设计航速时的各个阻力成分所占总阻力比重的大致情形；图1-3是某高速护卫舰各阻力成分占总阻力的百分比随航速的变化情形。

表 1-1

各阻力成分占总阻力之百分比(%)	船舶种类	水面舰艇			潜 艇		运输船
		各种辅助舰艇	扫雷舰等中速舰艇	驱逐舰等高速舰艇	水面航行状态	水下航行状态	典型油槽船 散装货船
裸体阻力(R_L)	摩擦阻力(R_f)	70	55	35	60	90	70
	粘压阻力(R_{pv})	10	10	10	10	10	25
	兴波阻力(R_w)	20	35	55	30	无	5
附体阻力(R_{ap}/R_L)		10~20	10~15	10~15	10	30~50 或更多	10~15
空气阻力(R_{aa}/R_L)		<2	≈2	2~4	可不计	无	2~4

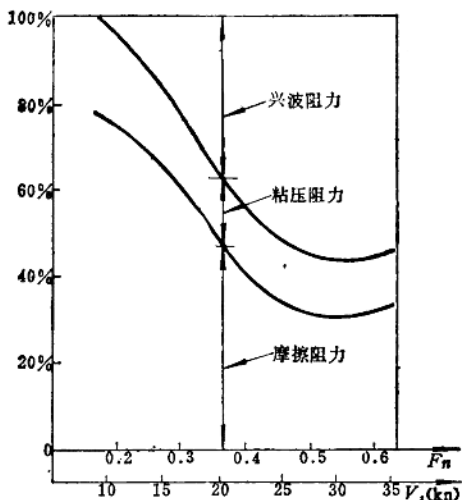


图1-3 某护卫舰各阻力成分占总阻力的比重随航速之变化

§ 1-3 阻力相似定律

本章开头已说明，船模试验是阻力问题研究的重要手段。因此必然需要回答：①模型试验应在什么条件下进行？②试验结果如何换算到实船？这些问题的回答，实际是流体力学的相似理论在本课程中的具体应用。

本节首先运用因次分析法给出船模或实船总阻力的无因次方程的一般形式，然后根据流体力学相似理论给出船模与实船实现动力相似的条件和将船模试验结果换算到实船的根据。

(一) 阻力的无因次方程的一般形式

大量试验结果的分析表明：在船体形状一定的情况下，影响船模或实船阻力的主要因素是水的粘性 μ 、重度 γ ($=\rho g$)、船长 L 和船速 V 。即总阻力 R_t 可由下式表达：

$$R_t = f(\rho, \mu, g, L, V) \quad (1-15)$$

改上式为如下形式：

$$R_t = \sum_i k_i \rho^{a_i} L^{b_i} V^{c_i} \mu^{d_i} g^{e_i} \quad (1-16)$$

式中 $k_i, a_i, b_i, c_i, d_i, e_i$ 均为无因次常数。依物理等式两端因次的齐次性，可知式(1-16)右端任何一项都必需与左端阻力 R 因次相同。取力(R)、长度(L)和时间(T)为基本物理量，则依式(1-16)得因次方程为

$$[R] = \left[\frac{RT^2}{L^4} \right]^{a_i} [L]^{b_i} \left[\frac{L}{T} \right]^{c_i} \left[\frac{RT}{L^2} \right]^{d_i} \left[\frac{L}{T^2} \right]^{e_i} \quad (1-17)$$

比较式(1-17)两端基本因次的指数，得

$$\left. \begin{aligned} [R]: & 1 = a_i + d_i \\ [L]: & 0 = -4a_i + b_i + c_i - 2d_i + e_i \\ [T]: & 0 = 2a_i - c_i + d_i - 2e_i \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

解之, 得

$$\left. \begin{aligned} a_i &= 1 - d_i \\ b_i &= 2 - d_i + e_i \\ c_i &= 2 - d_i - 2e_i \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

将式 (1-19) 代入式 (1-16), 有

$$R_t = \sum_i k_i \rho^{1-d_i} L^{2-d_i+e_i} V^{2-d_i-2e_i} \mu^{d_i} g^{e_i} = \rho L^2 V^2 \sum_i k_i (\mu / \rho V L)^{d_i} (Lg/V^2)^{e_i} \quad (1-20)$$

根据流体力学, $\mu / \rho = \nu$ 为水运动粘性系数, 记为

$$Rn = VL / \nu \quad (1-21)$$

$$Fn = V / \sqrt{gL} \quad (1-22)$$

显然上式中 Rn 和 Fn 即分别为雷诺数和傅汝德数。

这样, 虽然式 (1-20) 中 d_i 、 e_i 尚未知, 但显然有下式成立:

$$R_t = \rho L^2 V^2 \cdot f(Rn, Fn) \quad (1-23)$$

定义:

$$C_t = R_t / \frac{1}{2} \rho L^2 V^2 \quad (1-24)$$

为船模或实船总阻力系数, 它为无因次数。式中 L^2 是面积因次, 实用上常依问题需要而用湿面积 S 或中部剖面面积 A_m 或排水体积的 $2/3$ 次方 $\nabla^{2/3}$ 来代替; 加 $1/2$, 是为了与伯努利方程中的 $-\frac{1}{2} \rho V^2$ 项相对应。

由此, 依式 (1-23) 得到:

$$C_t = f(Rn, Fn) \quad (1-25)$$

即船模或实船的总阻力系数是雷诺数和傅汝德数的函数。

式 (1-25) 即为船模或实船总阻力的无因次方程的一般形式。

(二) 阻力相似定律

1. 粘性相似定律

当船舶阻力仅与流体粘性有关 (如潜艇深潜航行时) 或不计流体重力对粘性的影响时, 则粘性阻力可由下式表达:

$$R_v = f(\rho, \mu, L, V) \quad (1-26)$$

式中符号含义同前。

则与获得式 (1-25) 的推导过程相同, 可得

$$C_v = f(Rn) \quad (1-27)$$

式中

$$C_t = R_t / \frac{1}{2} \rho V^2 L^2 \quad (1-28)$$

为粘性阻力系数, Rn 为雷诺数。

式 (1-27) 即为不存在或不计流体重力影响时船模或实船粘性阻力的无因次方程的一般形式。

式 (1-27) 表明: 在仅计及流体粘性情况下, 影响粘性阻力的各因素可用雷诺数来

表示。

流体力学已说明：①雷诺数是流体惯性力与粘性力之比值，有关流体粘性所引起的各力学特征（如边界层和尾流的特性及相应粘性力）可用雷诺数来表示。②当模型与实物两流场仅与流体粘性有关时，则在模型与实物满足几何相似、运动相似条件下，若两者雷诺数亦相等，则模型与实物实现粘性动力相似；此时模型与实物有相同的无因次粘性力系数。

显然，由上述讨论可得：在船模与实船满足几何相似、运动相似条件下，若两者雷诺数亦相等，则船模与实船实现粘性动力相似；此时船模与实船有相同的粘性阻力系数，即

$$C_{v_m} = C_{v_r} \quad (1-29)$$

我们称上述结论为粘性相似定律。

由于船模总是力求型线加工准确（从而可认为船模与实船满足几何相似）；试验时总是力求保证静水和使船模与实船保持航态一致（从而在本课程中可认为船模与实船满足运动相似），因此实现船模与实船粘性动力相似的关键是船模与实船雷诺数相等。

称 $Rn_m = Rn_r$ 为粘性动力相似条件（相似判据）；称 Rn 为粘性相似准数。

2. 重力相似定律

当不计粘性对流动的影响时（视流体为理想流体），船舶兴波阻力可由下式表达：

$$R_w = f(\rho, g, L, V) \quad (1-30)$$

则与获得粘性相似定律的推导过程相同，可得：

①兴波阻力无因次方程的一般形式是：

$$C_w = f(Fn) \quad (1-31)$$

式中

$$C_w = R_w / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 L^2 \right) \quad (1-32)$$

为兴波阻力系数， Fn 为傅汝德数。

②在船模和实船满足几何相似、运动相似条件下，当两者傅汝德数亦相等，则船模与实船实现重力相似；此时船模与实船有相同的兴波阻力系数，即

$$C_{w_m} = C_{w_r} \quad (1-33)$$

我们称此结论为重力相似定律。

称 $Fn_m = Fn_r$ 为船模与实船重力相似条件；称 Fn 为重力相似准数。

3. 完全动力相似定律

上节已导出式（1-25）是船模或实船总阻力无因次方程的一般形式；该式表明：对固定船型，影响船之总阻力系数的各因素可用雷诺数和傅汝德数来表示。显然，根据上述获得船模与实船实现粘性及重力相似的推导可得出：在船模与实船满足几何相似、运动相似条件下，若船模与实船的雷诺数和傅汝德数亦分别相等，则船模与实船实现粘性及重力相似。对船舶阻力问题，即实现了船模与实船间的总阻力相似，此时船模与实船有相同的总阻力系数，即

$$C_{r_m} = C_{r_r} \quad (1-34)$$

在船舶阻力课程中，称总阻力相似为完全动力相似。

由上述得结论：船模试验必须在船模与实船间满足动力相似条件下进行；即船模与实

船间在满足几何相似、运动相似条件下, 若

①满足 $Rn_m = Rn_s$, 则船模与实船实现粘性相似, 此时船模与实船有相同的粘性阻力系数值, 即 $C_{v_m} = C_{v_s}$ 。

②满足 $Fn_m = Fn_s$, 则船模与实船实现重力相似, 此时船模与实船有相同的兴波阻力系数值, 即 $C_{w_m} = C_{w_s}$ 。

③同时满足 $Rn_m = Rn_s$ 及 $Fn_m = Fn_s$, 则船模与实船实现总阻力相似 (全相似), 此时船模与实船有相同的总阻力系数值, 即 $C_{t_m} = C_{t_s}$ 。

由此可知:

①船模试验时应测量构成相似准数 $Rn = VL/\nu$ 和 $Fn = V/\sqrt{gL}$ 之船长 L 、船速 V 和水温 t °C (给出流体运动粘性系数 ν) 等各物理量。

②试验结果应整理成阻力无因次方程形式, 即 $C_v = f(Rn)$, $C_w = f(Fn)$ 或 $C_t = f(Rn, Fn)$ 形式; 此时可在满足动力相似条件下直接依模型试验结果得到相应阻力系数, 进而可算得阻力。

实际上, 实现船模与实船完全动力相似是不可能的, 因此实际船模试验的进行和试验结果的换算是在一定具体条件下进行的。这将在船模试验一章中详细叙述。

§ 1-4 阻力一般表达式

由上节知: 式 (1-25), 即 $C_t = f(Rn, Fn)$ 是对船模和实船都成立的船舶总阻力系数的一般表达形式。本节将根据前述的阻力分类, 将式 (1-25) 变化成由各阻力成分来表达的形式, 即所谓阻力的一般表达式。

应该明确, 流体在对船舶形成阻力时, 其粘性和重力是相互影响的。如边界层和尾流影响兴波, 从而影响兴波阻力值; 而兴波又影响边界层和尾流的内部流动, 从而重力亦影响粘性。由此, 根据前述阻力分类, 式 (1-25) 可表成如下形式:

$$\begin{aligned} C_t &= C_f(Rn, Fn) + C_{pv}(Rn, Fn) + C_w(Rn, Fn) \\ &= C_v(Rn, Fn) + C_w(Rn, Fn) \end{aligned} \quad (1-35)$$

即各阻力系数应同时是雷诺数和傅汝德数的函数。

从数量关系考虑, 式 (1-25) 可表达成如下形式:

$$\begin{aligned} C_t &= C_f(Rn) + C_{pv}(Rn) + C_w(Fn) + C_{fv}(Rn, Fn) \\ &\quad + C_{pww}(Rn, Fn) + C_{wv}(Rn, Fn) \\ &= C_v(Rn) + C_w(Fn) + C_{vw}(Rn, Fn) \\ &\quad + C_{wv}(Rn, Fn) \end{aligned} \quad (1-36)$$

式中 $C_v(Rn)$ ——不计重力影响之粘性阻力系数;

$C_w(Fn)$ ——不计粘性影响之兴波阻力系数;

$C_{vw}(Rn, Fn)$ ——兴波对粘性阻力系数的影响;

$C_{wv}(Rn, Fn)$ ——粘性对兴波阻力系数的影响。

直到现在, 对 C_{vw} 和 C_{wv} 的研究尚很不充分, 很难进行可靠计算。但认为不计这种影响时, 所得结果已可足够满足一般工程精度要求。因此在实际工程使用和一般问题研究中通常假设 $C_{vw} = 0$ 和 $C_{wv} = 0$ (称为粘性与重力互不相关假设)。引入此假设后, 式 (1-35) 和式 (1-36) 均变为如下形式:

$$C_r = C_f(Rn) + C_{pv}(Rn) + C_w(Fn) = C_v(Rn) + C_w(Fn) \quad (1-37)$$

式(1-37)为引入粘性与重力互不相关假设后船舶总阻力系数的一般表达式。本课程以后将主要就式(1-37)来逐一讨论相应各阻力成分。

这里要说明,引入或继续保留粘性与重力互不相关假设,并不等于说粘性与重力相互关联对阻力问题不重要,恰恰相反,深入的阻力问题研究,必须计及两者的相互影响。然而,一则这些问题迄今尚未搞确切,再之,迄今为止,在计及这种影响时,处理的方式仍基本是以“修正”的形式出现,即问题的研究仍是以粘性或重力为出发点,然后将相应影响或在中间过程或在最后结果进行修正。因此本课程至今仍继续保留此项假设。

§ 1-5 船舶航态及划分

船舶航行时的状态与其静浮时的状态是不相同的,并且航态是随航速的不同而变化的。这里就船舶航行时其首尾吃水和平均吃水的变化来讨论。

船舶静浮时,其重量由静浮力来平衡,即

$$D = \gamma \nabla \quad (\text{tf}) \quad (1-38)$$

式中 ∇ ——船排水容积 (m^3);

γ ——水的重度 (tf/m^3)。

船舶航行时,其重量由水动力主矢量 \bar{R} 在垂向的投影来平衡(参见图1-2(a)),即

$$D = R_z = \int_S |\bar{p}| \cos(\bar{p}, \bar{z}) ds = D \quad (1-39)$$

将水动应力 \bar{p} 分解成流体静压力 \bar{p}_0 和过剩水动应力 $\Delta\bar{p}$ 两部分并定义 $\Delta\bar{p} = \bar{p} - \bar{p}_0$,则式(1-39)变为

$$\begin{aligned} R_z &= \int_S |\bar{p}_0| \cos(\bar{p}_0, \bar{z}) ds + \int_S |\Delta\bar{p}| \cos(\Delta\bar{p}, \bar{z}) ds \\ &= \gamma \nabla' + L = D \end{aligned} \quad (1-40)$$

其中 ∇' 为船舶运动时之排水容积,称 $\gamma \nabla'$ 为静浮力;称

$$L = \int_S |\Delta\bar{p}| \cos(\Delta\bar{p}, \bar{z}) ds \quad (1-41)$$

为动浮力或升力。

可见,船舶航行时其浮力由静浮力 $\gamma \nabla'$ 和动浮力 L 两部分构成。

由流体力学知,产生 $\Delta\bar{p}$ 的原因是物体相对于流体有运动。因不同速度时物体表面压力 \bar{p} 的大小和分布情况不同,因此 $\Delta\bar{p} = \bar{p} - \bar{p}_0$ 将随船的航速的不同而不同。由此,依式(1-41)可见,对应不同航速,船舶将有大小和作用点位置不同的动浮力 L 。

当 $L > 0$ 时,将使船平均吃水减小,船体上抬;而依 L 作用点的不同,将使船首尾吃水相应发生不同的变化。 L 作用在船重心之前,则船将抬首而出现尾倾,反之将出现首倾。

由上述可见:船舶航行时的状态是由相应产生的动浮力 L 的大小和作用点位置所决定的。

理论分析和实测结果表明:船舶处于不同航行状态时,其阻力的构成及特性是不同的(参见图1-4)。实际上船舶的稳性、耐波性、操纵性等各个航海性能亦是随船的航态

的不同而变化的。事实上，每一艘船都是根据其实际使用的航态下各个航海性能的特点来设计的，因此对于船舶各个航海性能的研究，原则上都是对应船舶的不同航态范围来

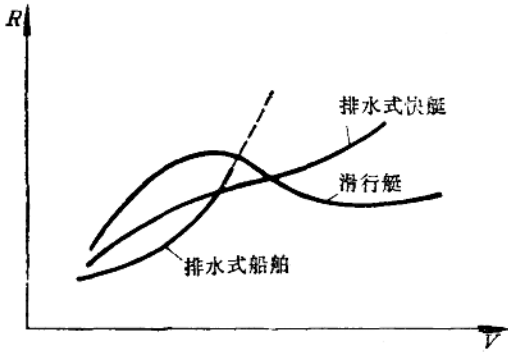


图1-4 各航态范围船舶之阻力曲线

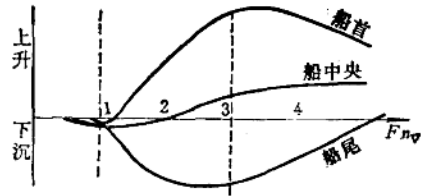


图1-5 船运动时首、尾及船中之吃水变化

讨论的。

通常依动浮力 L 的产生情况 (L/D 数值的大小和 L 之作用点) 将船舶航态大致分成三种状态:

①排水航行状态: 此状态动浮力占总浮力的比重极小, 船重基本完全由静浮力支持。即 $L/D \rightarrow 0$, $D \approx \gamma \nabla$ 。船舶阻力课程中认为处于这种航态范围之船舶, 其阻力的形成过程和量值规律原则上不受船之航态变化的影响。因为在此航态范围内船重基本上完全由静浮力支持, 故亦称此状态为静力航行状态。各式民用客货船 (水翼客船除外) 及军用护卫舰、驱逐舰等大都属于此航行状态内之船舶。

②滑行状态: 船沿水面滑行, 静浮力很小, 船重几乎完全由动浮力 L 来支持, 即 $L \approx D$ 而 $\nabla' \rightarrow 0$ 。滑行状态亦称为动力航行状态。滑行艇即属此种航行状态之船舶。

③过渡状态: 介于排水航行状态与滑行状态之间的航态范围。此状态下, 动浮力占总浮力的比重不可忽视, 动浮力 L 已明显影响船之航态, 即 $D = \gamma \nabla' + L$ 而 $\nabla' \neq \nabla$ 。如高速炮艇、巡逻艇等排水式快艇即属此种航态范围内之船舶。

Г. Е 巴甫连柯 (Павленко) 曾根据试验结果给出如图1-5所示之船舶运动时首、尾及船中升沉变化的典型情形, 提出可用 $F_{n_v} = V / \sqrt{g \nabla^{1/3}}$ 数值来估计船舶运动时所处的航态范围:

①排水航行状态: $F_{n_v} < 1$

②滑行状态: $F_{n_v} > 3$

③过渡状态: $1 \leq F_{n_v} \leq 3$

称 $F_{n_v} = V / \sqrt{g \nabla^{1/3}}$ 为排水容积傅氏数或巴甫连柯数, 其中 V 为船速 (m/s), g 为重力加速度 (m/s^2), ∇ 为船静浮时排水容积 (m^3)。

对图1-5曲线可定性解释如下: 低速时船体相对下沉且略有首倾, 原因是此时船底压力较静浮时为低, 故靠增加吃水以平衡船重。因船舶通常首部比尾部尖瘦, 故相对下沉大些而略有首倾。随船速提高, 首部水压力增强而使船首上升, 此时动浮力开始支持船重并形成尾倾。当船速继续提高 (F_{n_v} 数接近2.0时), 动浮力逐渐成为支持船重的主要因素, 因此船平均吃水开始逐渐减小。因为首部水压力的增长较尾部快, 故船首继续