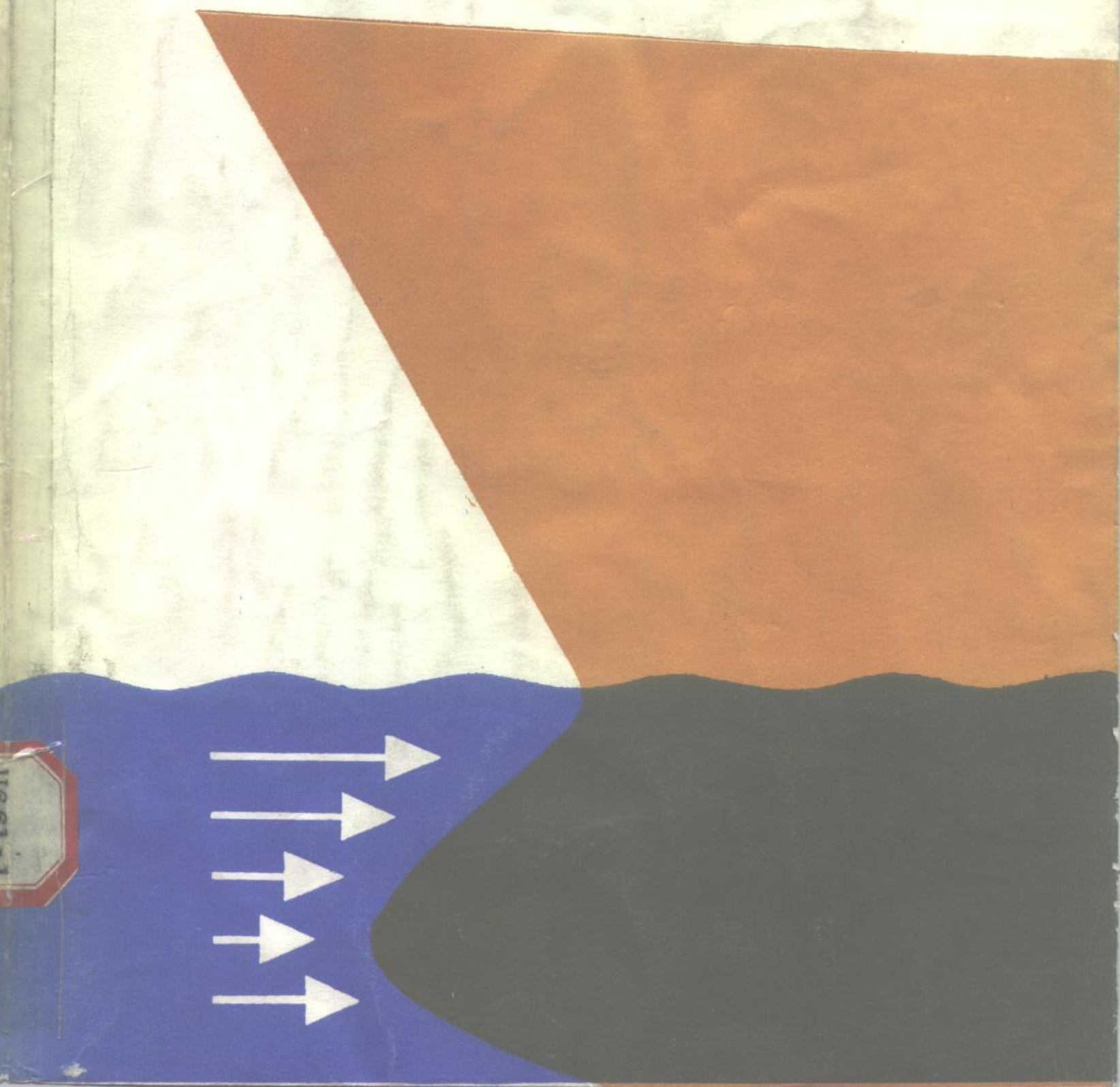


# 船舶阻力

CHUANBO ZULI

姜次平 邵世明 编

上海交通大学出版社



2661-1  
J42-2

239902

# 船舶阻力

姜次平 邵世明 编



上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书系根据全国造船专业《船舶阻力》课程的教学大纲编写而成的。全书共十二章。本书主要内容在于阐述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；船型对阻力的影响以及确定船舶阻力的方法，包括船模试验方法和近似估算方法等。此外，对船在限制航道中的阻力和快艇阻力等内容分别作了适当的介绍。

本书可以作为高等工业院校船舶和海洋工程专业的教材或其他有关专业的教学参考书。此外，本书也可供船舶设计及研究部门的技术人员参考之用。

DV97/25



## 船 舶 阻 力

※

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

江苏常熟文化印刷厂排版、印装

---

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16.5 字数 407000

1985年11月第1版 1986年3月第一次印刷

印数 1—2,500

统一书号：13324·41 科技书目：117-229

---

定价：3.10 元

## 前 言

本书系根据全国造船专业统编教材会议制定的《船舶阻力》课程教学大纲编写而成的。

船舶快速性是船舶的重要性能之一,在船舶设计和建造中,达到快速性指标不仅可满足设计任务书所提出的航速要求,而且亦可保证船舶的经济效益。

研究船舶航行过程中的阻力问题对改善船舶快速性具有重大作用。《船舶阻力》课程是船舶和海洋工程专业,特别是对船舶设计和制造专业学生来说,是一门极为重要的专业课。本课程着重研究船舶航行时所受到阻力的产生原因,各种阻力的特性,决定阻力的方法,影响阻力的因素以及减小阻力的途径等问题。

本书第一章为绪论,讲述快速性的研究对象和本课程的性质、内容;同时介绍研究快速性的方法,特别强调船模试验方法是目前解决造船工程实际问题的重要手段。

第二章是船舶阻力的基本概念。首先从物理现象着手,简要说明阻力成因及其分类;进而阐述各种阻力成分的基本规律;最后,由于不能实现船模试验的全相似条件,引入造船工程上广为应用的傅汝德假定。

船舶阻力的各种阻力成分分别在第三至第八章予以详细讨论。而且各章一般遵循:“阻力成因、主要特性、确定阻力方法和减小阻力途径”,这一程序进行讨论。

第九章是船型对阻力的影响。首先提出“优良船型”与航速的关系,然后简要介绍研究船型问题的基本方法,即船模系列试验方法。最后详细讨论各种船型参数对阻力性能的影响,其目的在于说明各类优良船型应该具有的特点,以及在实际船舶设计过程中应予以注意的问题。

第十章归纳了各种近似估算船舶阻力的方法,并说明相应的适用范围,以供船舶初步设计时应用。

第十一、十二章分别阐述了船舶在限制航道中的阻力问题和快艇阻力。前者重点介绍了浅水阻力问题;后者主要说明高速排水型艇(又称圆艉艇)和滑行艇的阻力问题。

最后的附录中给出了某些计算数据、公式以及部分图表,以便供学生做习题时应用。

本书在编写过程中考虑到船舶阻力学科的发展情况以及教学实践中提出的要求,特别是遵循教学改革的精神,因此本教材在满足教学大纲要求的前提下,努力注意到如下几方面:

(1) 力求讲清基本概念、基本理论和基本技能;并注意到本课程的理论性、实践性和系统性。

(2) 注意到与前置课,诸如与流体力学等课程的关系,既不过多重复,又要过渡适当。

(3) 本学科近年来有所发展的内容能在本教材中有一定的反映,如兴波理论、波型分析法、三因次换算法、粘性阻力尾流测量法、破波阻力以及某些新船型等有关内容均占有一定篇幅。

(4) 《船舶阻力》课程是一门实践性较强的学科,在本教材中注重了造船工程实际的应用情况以及较多地反映了国内外有关试验研究成果。

(5) 考虑到目前国内外快艇设计、建造的需要,因而对快艇阻力部分有较多的阐述,以供各校在具体教学过程中根据不同需要取舍。

根据上述编写原则,因此以 79 年出版的姜次平同志编写的《船舶阻力》一书为基础,进行了系统的、全面的改编和充实。

本书由邵世明同志执笔。姜次平、吴善勤同志对全书进行了审阅。最后由大连工学院孟宪钦同志主审。在编写过程中许多同志给予很大帮助和支持。在此对刘应中教授给予的指导以及其他院校有关同志提出的许多宝贵意见,致以深切谢意。

由于编者水平所限,本书的缺点和错误在所难免,希望批评指正。

编 者

一九八四年八月于上海交通大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
§1-1 研究对象.....	(1)
一、快速性.....	(1)
二、“船舶阻力”课程的内容和任务.....	(1)
§1-2 研究方法.....	(1)
一、理论分析法.....	(2)
二、船模试验.....	(2)
三、实船试验.....	(2)
<b>第二章 船舶阻力基本概念</b> .....	(3)
§2-1 船舶阻力的成因及分类.....	(3)
一、船舶运动过程中的受力概述.....	(3)
二、船体阻力的成因及分类.....	(3)
三、阻力曲线和有效马力曲线.....	(5)
四、关于速度参数的表示.....	(7)
§2-2 船舶阻力的基本规律.....	(7)
一、摩擦阻力的基本规律——雷诺定律.....	(7)
二、兴波阻力的基本规律——傅汝德定律.....	(8)
三、船体总阻力的基本规律——全相似定律.....	(9)
§2-3 傅汝德假定.....	(10)
一、实现全相似的条件.....	(10)
二、傅汝德假定.....	(11)
三、几何相似船模组的试验研究.....	(12)
<b>第三章 兴波阻力</b> .....	(14)
§3-1 船行波的形成和特征.....	(14)
一、船行波的形成.....	(14)
二、船行波的组成和图形.....	(16)
三、船行波的波浪要素.....	(19)
§3-2 船体兴波阻力特性.....	(22)
一、兴波阻力与波浪要素的关系.....	(23)
二、船体兴波阻力表达式.....	(23)
三、船体兴波阻力特性.....	(26)
§3-3 兴波干扰的预测方法.....	(28)
一、兴波长度、船型参数与波阻峰点、谷点的关系.....	(28)
二、 $\Phi$ 理论.....	(29)

三、应用傅汝德数预测波阻峰点和谷点	(30)
§3-4 确定兴波阻力的方法	(31)
一、船模试验方法确定兴波阻力	(31)
二、兴波阻力的理论计算方法	(32)
§3-5 确定波型阻力的波型分析法	(36)
一、波型分析法原理	(37)
二、截断修正问题	(38)
§3-6 减小兴波阻力的方法	(38)
一、常规船减小兴波阻力的方法	(39)
二、降低兴波阻力的特殊船型	(40)
<b>第四章 摩擦阻力</b>	(42)
§4-1 边界层的概念	(42)
一、平板边界层	(42)
二、船体边界层	(44)
§4-2 摩擦阻力系数计算公式	(45)
一、光滑平板层流摩擦阻力系数公式	(45)
二、光滑平板紊流摩擦阻力系数公式	(46)
三、1957年国际船模试验池会议实船—船模换算公式(简称1957ITTC公式)	(50)
四、过渡流平板摩擦阻力系数公式	(51)
五、船体摩擦阻力计算的处理方法	(51)
§4-3 船体表面弯曲对摩擦阻力的影响	(52)
一、船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响	(52)
二、船体形状效应的修正	(52)
§4-4 船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响	(54)
一、粗糙表面的摩擦阻力计算方法	(54)
二、污底问题	(59)
§4-5 减小摩擦阻力的方法	(59)
§4-6 船体摩擦阻力的计算步骤	(60)
<b>第五章 粘压阻力</b>	(64)
§5-1 船体粘压阻力的成因及其与船型的关系	(64)
一、船体粘压阻力产生的原因	(64)
二、粘压阻力与船型的关系	(65)
三、降低粘压阻力的船型要求	(70)
§5-2 船体粘压阻力处理方法之一——傅汝德法	(70)
§5-3 船体粘压阻力处理方法之二——三因次换算法	(72)
一、三因次换算法的内容	(72)
二、形状因子(1+k)值的确定	(73)
三、不同换算方法应用的比较	(75)
§5-4 确定粘性阻力的尾流测量法	(77)

一、尾流测量法的基本原理	(78)
二、尾流测量法的具体方法	(80)
<b>第六章 破波阻力</b>	(81)
§6-1 破波阻力的成因和特性	(81)
一、破波的成因	(81)
二、破波阻力的测定	(81)
三、破波阻力的特性	(83)
§6-2 船体总阻力含义的补充说明	(84)
<b>第七章 船模试验</b>	(86)
§7-1 船模试验池和船模阻力试验	(86)
一、船模试验池	(86)
二、船模阻力试验方法和内容	(88)
§7-2 船模阻力数据表达法	(90)
一、表达法的目的和要求	(91)
二、介绍两种阻力数据表达法	(91)
<b>第八章 附加阻力</b>	(97)
§8-1 附体阻力	(97)
一、确定附体阻力的方法	(97)
二、减小附体阻力的措施	(99)
§8-2 空气阻力	(100)
一、确定空气阻力的方法	(100)
二、影响空气阻力的因素	(102)
§8-3 汹涛阻力	(104)
一、在波浪中引起阻力增加的主要原因	(104)
二、影响汹涛阻力的因素	(105)
三、汹涛阻力的处理与贮备马力	(106)
<b>第九章 船型对阻力的影响</b>	(107)
§9-1 船型对阻力影响的基本概念	(107)
一、船型、航速与阻力性能之间的关系	(107)
二、船型对阻力影响问题的研究方法	(108)
三、确定影响阻力的船型参数	(108)
四、系列试验的方法	(109)
§9-2 排水量长度系数的影响	(111)
一、由船长变化,讨论 $\frac{\Delta}{(0.01L)^3}$ 的影响	(111)
二、由排水量变化,讨论 $\frac{\Delta}{(0.01L)^3}$ 的影响	(114)
三、不同船舶的 $\frac{\Delta}{(0.01L)^3}$ 选取	(116)
§9-3 宽度吃水比的影响	(117)



§9-4	主要船型系数的影响	(119)
一、	棱形系数的影响	(119)
二、	船中横剖面系数的影响	(122)
三、	方形系数的影响	(123)
§9-5	横剖面面积曲线形状的影响	(125)
一、	浮心纵向位置的影响	(125)
二、	平行中体长度和位置的影响	(128)
三、	横剖面面积曲线两端形状的影响	(130)
§9-6	满载水线形状的影响	(131)
§9-7	横剖面和船首尾形状的影响	(132)
一、	横剖面形状的影响	(132)
二、	船首尾形状的影响	(133)
三、	球鼻船首对阻力的影响	(136)
四、	球鼻型船尾	(140)
五、	双尾鳍 (Twin Skeg)	(141)
§9-8	各类船舶应具有的要害	(142)
<b>第十章</b>	<b>船舶阻力的近似估算方法</b>	<b>(144)</b>
§10-1	应用船模系列试验结果估算阻力	(144)
一、	泰洛 (Taylor) 法	(144)
二、	陶德 (Todd) 法	(152)
§10-2	根据分析船模和实船试验资料估算法	(156)
一、	艾亚 (Ayre) 法 (或称爱尔法)	(157)
二、	兰泼-凯勒 (Lap-keller) 法	(163)
三、	陶斯脱法	(167)
§10-3	母型船数据估算法	(169)
一、	海军系数法	(169)
二、	引伸比较定律法	(170)
三、	修正母型船阻力法	(171)
<b>第十一章</b>	<b>船在限制航道中的阻力</b>	<b>(173)</b>
§11-1	浅水阻力问题	(173)
一、	浅水对流场的影响	(173)
二、	浅水对兴波情况的影响	(174)
三、	浅水阻力曲线的特点	(177)
§11-2	确定浅水阻力的方法	(179)
一、	许立汀中间速度法	(179)
二、	阿普赫金法	(182)
三、	浅水影响的衡准	(183)
§11-3	狭水道对阻力的影响	(184)
一、	船舶在狭水道和浅水中航行时的主要差别	(184)

二、船舶在狭水道中运动时的特点·····	(184)
三、狭水道阻力的估算·····	(186)
§11-4 试验池的池壁干扰·····	(187)
一、阻塞作用修正的基本思想·····	(187)
二、计算阻塞作用下的回流速度·····	(187)
<b>第十二章 快艇阻力</b> ·····	(190)
§12-1 快艇的分类和特点·····	(190)
一、快艇分类·····	(190)
二、快艇的特点·····	(191)
三、水面快艇的阻力曲线比较·····	(193)
§12-2 过渡型快艇的阻力估算·····	(193)
一、应用系列资料估算过渡型快艇的阻力·····	(194)
二、应用回归分析法估算过渡型快艇的阻力·····	(198)
§12-3 滑行艇的阻力估算·····	(200)
一、应用滑行平板资料估算滑行艇的阻力·····	(201)
二、应用系列试验资料估算滑行艇的阻力·····	(209)
§12-4 艇型因素对快艇阻力的影响·····	(212)
一、影响过渡型快艇阻力的艇型因素·····	(212)
二、影响滑行艇阻力性能的主要因素·····	(213)
§12-5 水翼艇、气垫船和小水线面船·····	(215)
一、水翼艇·····	(215)
二、气垫船·····	(220)
三、小水线面船·····	(222)

# 第一章 绪 论

“船舶快速性”包括“船舶阻力”和“船舶推进”两门课程。本章作为引言,先给出其定义,说明课程的内容和研究的目的,然后介绍研究的方法。

## § 1-1 研究 对象

### 一、快速性

船舶在水中航行时会受到阻力,为了使船舶维持一定的速度航行,必须对船舶提供推力以克服阻力。一般船舶航行过程中由主机供给能量,通过推进器(常用的是螺旋桨)转换为推动船舶前进的推力。船舶快速性就是研究船舶尽可能消耗较小的机器功率以维持一定航行速度的能力的科学。或者说,船舶快速性是在给定主机功率时,表征船舶航行速度快慢的一种性能。

快速性是船舶诸性能中(如浮性、稳性、不沉性、快速性、耐波性、操纵性等)的重要性能之一。快速性的优劣,对民用船舶来说将在一定程度上决定船舶的使用性和经济性,对军用舰艇而言,快速性与提高舰艇的作战性能密切相关。因此,几乎每一艘船舶,在设计初始阶段就给定明确的快速性指标。当船舶建成后,测定是否达到原快速性设计指标是交船试航的一个重要内容。

显然,根据快速性的含义,快速性的优劣不但与船舶航行过程中的阻力性能有关,而且还与该船的推进效率等有关系。因而为了研究方便起见,船舶快速性分为“船舶阻力”和“船舶推进”两部分:

船舶阻力: 研究船体在运动过程中所受到的各种阻力问题;

船舶推进: 研究克服船体阻力的推进器及其与船体间的相互干扰与匹配问题。

### 二、“船舶阻力”课程的内容和任务

“船舶阻力”是与造船工程实际密切联系的一门课程,其研究的主要问题包括:

船舶以一定速度在水中航行时所遭受的各种阻力的成因及其性质;

阻力随航速、船型和外界条件的变化规律;

研究减少各种阻力的方法,寻求设计低阻力的优良船型;

以及如何较准确地估算船舶阻力的大小,作为决定主机功率、设计推进器(螺旋桨)的依据。

## § 1-2 研究 方法

研究船舶快速性的方法有: 理论分析法、船舶模型试验和实船试验等三种,它们彼此间既有区别又有密切联系。

### 一、理论分析法

它是根据观察实际现象,进行力学抽象,从而利用流体力学的基本理论和数学工具来分析、研究和计算船舶阻力问题和推进问题。这种方法近年来虽有很大的进展,但目前尚未被普遍用到船舶设计和制造中去,原因在于:一是船体形状及其运动情况极为复杂,难以应用数学工具;二是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出入,因此所得的结果准确性差。

但是应该指出:理论研究方法虽然在定量方面存在差距,但常用来解释现象,指出研究方向。近年来流体力学、数学,特别是计算技术的发展,有力地推动了理论研究工作的开展,因而理论分析法仍不失为重要的研究手段之一。

### 二、船模试验

这是目前研究船舶快速性的主要方法。它是将实船按一定比尺缩小,制作成船模和桨模,而后通过船模和桨模在试验池中进行试验,从而分析研究船舶阻力和推进问题。很多优良船型几乎都是通过大量模型试验而得到的。

应用船模和桨模试验研究船舶快速性的优点在于:它不但简单、经济而且可以为造船工程提供定量数据。实际上任何船舶在进行设计时,即使在初步设计阶段,总要利用这方面的系统研究所取得的结果。船模试验目前在国内外应用得较为广泛,一些较重要的船舶几乎没有未作船模试验而就直接进行建造的。

### 三、实船试验

实船试验的目的是鉴定船舶的各种性能是否达到设计要求;并验证根据船模试验结果所预测的实船航行情况的准确性,也就是研究船模与实船之间的相关问题。但因实船试验在经济上化费较大,所以除了新船进行例行试航外,通常很少进行。

## 第二章 船舶阻力基本概念

船舶在水中航行时，船体周围的流动情况十分复杂。本章首先根据船体周围的流动现象分析阻力成因及分类；然后讨论阻力的基本规律，并提出造船工程上应用较广的傅汝德假定。

### § 2-1 船舶阻力的成因及分类

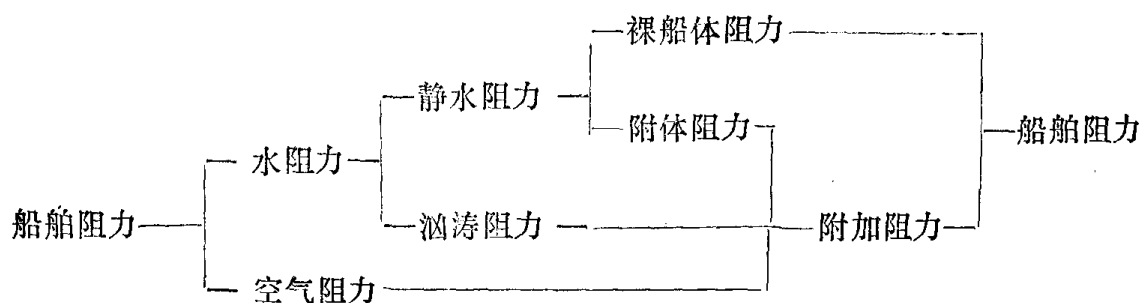
#### 一、船舶运动过程中的受力概述

当船舶在水面上航行时，船体处于空气和水两种流体介质中运动，必然遭受空气和水对船体的反作用力。这种与船舶运动方向相反的流体作用力称为船舶阻力。

为研究方便起见，船体总阻力按流体种类而分成空气阻力和水阻力。空气阻力是指空气对船体水上部分的反作用力。而水阻力是水对船体水下部分的反作用力。实际研究中进一步把水阻力分成船体在静水中航行时的静水阻力和波浪中的汹涛阻力，亦称为波浪中阻力增值两部分。

静水阻力通常分成裸船体阻力和附体阻力两部分。所谓附体阻力是指突出于裸船体之外的附属体如舵、舳龙骨、轴支架等所增加的阻力值。

根据这种处理方法，船舶在水中航行时所受到的阻力通常可分为两大部分，一是裸船体在静水中所受到的阻力，这是船舶阻力中的主要部分，亦是要着重研究的内容，裸船体阻力往往简称为“船体阻力”，而另一部分阻力包括空气阻力、汹涛阻力和附体阻力，统称为附加阻力。



因此实际船体阻力可按照裸船体阻力和附加阻力两部分开进行研究。下面将先讨论船舶阻力中的主要部分，即“裸船体阻力”的成因及其组成，而附加阻力部分在以后有关章节予以讨论。为了便于叙述起见，“裸船体阻力”简称“船体阻力”。

#### 二、船体阻力的成因及分类

##### 1. 船体阻力的成因

船体在静水中运动时所受到的阻力是与船体周围的流动现象密切有关。根据观察，船体周围的流动情况是相当复杂的。但主要有三种现象：

首先,船体周围的水因船的运动而形成波浪。由于波浪产生,改变了船体表面的压力分布情况。如图 2-1 示,船首的波峰使首部压力增加,而船尾的波谷使尾部压力降低,于是产生首尾流体动压力差。这种由于波浪而引起压力分布改变所产生的阻力称为兴波阻力。一般用  $R_w$  表示。从能量观点看,船体掀起的波浪具有一定的能量,这能量必然由船体供给。由于船体运动过程中不断产生波浪,就不断耗散能量,从而形成兴波阻力。

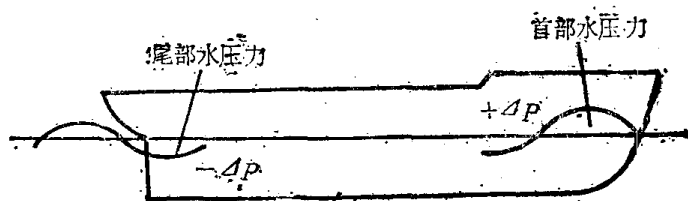


图 2-1 兴波改变船体压力分布

其次,当船体运动时,船体周围有一薄层水随船一起前进,这一薄层的水称为边界层。边界层的产生是由于水的粘性所引起的,因而船体运动过程中受到切应力作用,亦即船体与水之间产生了摩擦力,它在运动方向的合力便是船体摩擦阻力,用  $R_F$  表示。

另外,在船体曲度骤变处,特别是较丰满船的尾部常会产生旋涡。旋涡的产生其根本原因也是由于水具有粘性。旋涡处的水压力下降,从而改变了沿船体表面的压力分布情况。这种由船体前后压力不对称而产生的阻力称为粘压阻力,用  $R_{PV}$  表示。从能量观点来看,克服粘压阻力所作的功耗散为旋涡的能量。粘压阻力习惯上也叫旋涡阻力。

## 2. 船体阻力的分类

船体阻力如按船舶周围流动现象和产生的原因来分类,则船体总阻力  $R_T$  由兴波阻力  $R_w$ 、摩擦阻力  $R_F$  和粘压阻力  $R_{PV}$  三者组成,式示为:

$$R_T = R_w + R_F + R_{PV} \quad (2-1)$$

船体阻力亦可按作用在船体表面上的流体作用力的方向来分类。船体在实际流体中运动时,一方面受到垂直于船体表面的压力作用,而这种压力是由兴波和旋涡等所引起的,且与静浮状态是完全不同的;另一方面,又受到水质点沿着船体表面切向力的作用,即水的摩擦阻力作用。

由于船体形状对称于纵中剖面,因此,切向力和压力都对称分布于船体湿表面,其合力必位于纵中剖面上。在船的重心  $G$  处加上一对大小等于合力  $P_1$ , 方向相反的力  $P$  和  $P_2$ , 如图 2-2 所示。于是船体可以被看作在重心  $G$  处受到一个  $P$  作用力和由  $P_1$ ,  $P_2$  组成力偶的

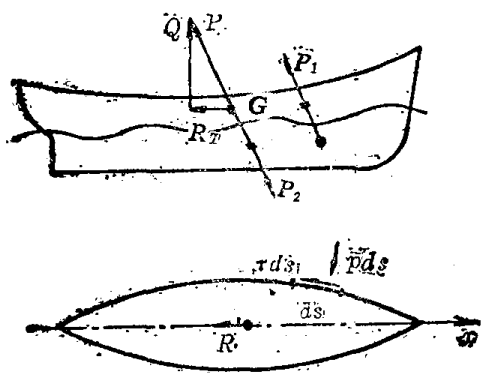


图 2-2 船体受力情况示意图

作用,该力偶将造成船体纵倾。作用力  $P$  的垂向分力  $Q$ , 支持船体重量,称为支持力。对于速度较低的一般船舶,  $Q$  中极大部分是由水的静压力组成,即是静浮力,对于高速快艇,特别是滑行艇,其中流体动压力占主要部分。这在快艇阻力部分将予以讨论。 $P$  的水平分力  $R_T$  即为与船体运动方向相反的总阻力。

由以上分析知,船体运动中所受的总阻力  $R_T$  就是所有流体作用力沿运动方向的合力,亦即船体表面上所有微面积  $ds$  上切向力  $\tau$  和压力  $p$  在运动方向的合

力, 式示:

$$R_T = \int_S \tau \cos(\tau, x) ds + \int_S p \cos(p, x) ds \quad (2-2)$$

其中,  $S$  为整个船体湿表面积。

(2-2) 式中, 前一项积分表示由作用在船体表面上切向力所造成的阻力, 称为摩擦阻力, 式示:

$$R_F = \int_S \tau \cos(\tau, x) ds \quad (2-3a)$$

第二项积分表示由作用在船体表面上的压力所造成的阻力, 称为压阻力  $R_P$ , 式示:

$$R_P = \int_S p \cos(p, x) ds \quad (2-3b)$$

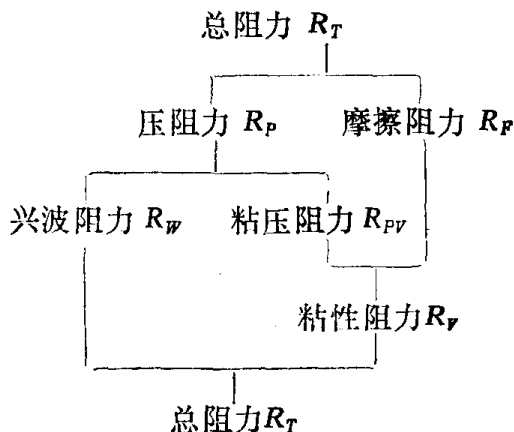
因此(2-2)式可表示为:

$$R_T = R_F + R_P \quad (2-4)$$

应该注意的是, 压阻力包含有粘压阻力和兴波阻力两类不同性质的力。兴波阻力即使在理想流体中仍然存在, 而摩擦阻力和粘压阻力两者都是由于水的粘性而产生的。在理想流体中均不存在。习惯上把此两者合并称为粘性阻力  $R_V$ 。为此总阻力又可按流体性质分类为:

$$R_T = R_W + R_V, \quad \text{其中} \quad R_V = R_{PV} + R_F \quad (2-5)$$

显然, 船体总阻力与各种阻力成分间的关系可以表示如下:



还需指出: 各种阻力成分在总阻力中所占比重对不同航速的船是不相同的, 对于低速船来说, 摩擦阻力  $R_F$  占总阻力的 70~80%, 粘压阻力  $R_{PV}$  约等于或大于 10%, 而兴波阻力成分很小; 对于高速船,  $R_F$  约占总阻力的 40~50%, 而兴波阻力  $R_W$  却可达 50% 左右, 粘压阻力  $R_{PV}$  仅占 5% 左右。由于粘压阻力一般所占比重不大, 且实际上亦难以同兴波阻力分开, 故通常把粘压阻力与兴波阻力合并在一起称为剩余阻力  $R_R$ , 式示:

$$R_R = R_{PV} + R_W \quad (2-6)$$

这样船体总阻力又可分为摩擦阻力和剩余阻力两部分, 它们在总阻力中所占的比重随不同航速而不同, 如速度参数取  $F_N = \frac{v_s}{\sqrt{gL}}$  (其中  $v_s$ ,  $L$  分别为船速和船长,  $g$  为重力加速度), 则两部分阻力所占比重如图(2-3)所示。

### 三、阻力曲线和有效马力曲线

影响船体阻力的因素很多, 但主要的有三个: 首先是航速。航速对阻力的影响较

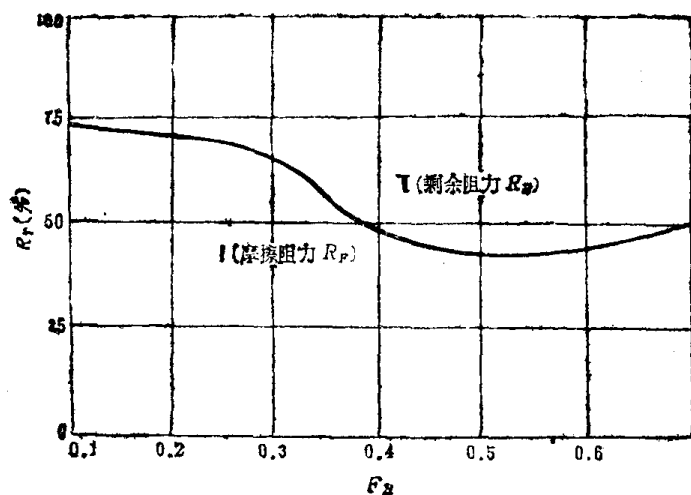


图 2-3 摩擦阻力和剩余阻力所占比重

大,随着航速增加,阻力的增长十分显著。其次是船型,不同的船型参数往往会导致阻力性能的变化,再次是外界条件。船舶在不同的航区中航行,由于外界条件,诸如流体介质和温度等不同,对阻力也会有影响。显然,对于给定的船型,且在一定的外界条件下,船体阻力仅仅是航速的函数,式示为:

$$R_T = f_1(v_s) \quad (2-7)$$

这种阻力随航速而变化的曲线称为阻力曲线。不同的船型应该对应有不同的阻力曲线,如图(2-4a)示。

若船速为  $v_s$  时,船体总阻力为  $R_T$ , 此时,如以  $v_s$  拖曳船前进,则直接用于克服船体阻力所需的功率,称为有效马力或有效功率,以  $P_E$  示之,其数值为:

$$P_E = \frac{R_T v_s}{75} \quad (2-8)$$

或者,

$$P_E = \frac{R_T V_s}{145.8} \quad (2-9)$$

式中:  $P_E$  单位为公制马力,  $R_T$  单位为公斤,  $v_s$  单位为米/秒,  $V_s$  单位为浬/时(节)。

考虑到船舶主机在功率传递过程中将有一部分损失于轴系的传递,再有一部分损失于螺旋桨的扭矩转换推力的过程中,因此有效马力只是主机功率的一部分。

对于一定的船型,考虑到(2-8)式,  $P_E$  亦是速度  $v_s$  的函数,  $P_E$  随  $v_s$  的变化曲线称为有效马力曲线。如图 2-4(b) 示。比较(2-8)与(2-9)式可知:有效马力  $P_E$  曲线较之阻力  $R_T$  曲线是  $v_s$  的高一次函数曲线。

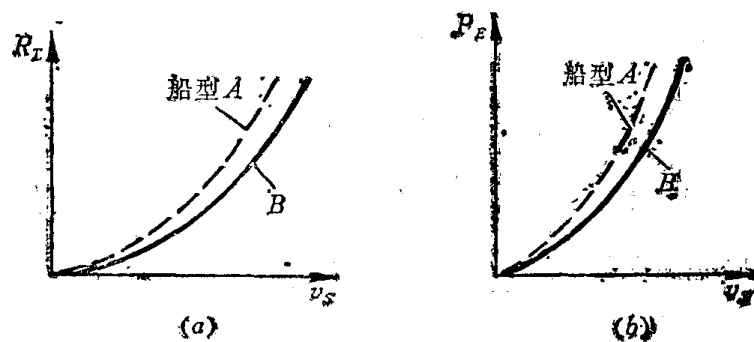


图 2-4 阻力曲线和有效马力曲线

(a)——阻力曲线 (b)——有效马力曲线



#### 四、关于速度参数的表示

在研究船舶快速性中常常要用到船速,而船速在实用上是以“节”为单位。1节=1浬/时,而1浬=1852米,或为6080呎,所以1节=0.5144米/秒。

在船舶工程研究中,一般应用无量纲速度参数,常用的主要有傅汝德数和雷诺数。

傅汝德数定义为:

$$F_N = \frac{v_s}{\sqrt{gL}}$$

因为重力加速度  $g$  为一常数 ( $g = 9.8$  米/秒<sup>2</sup>),所以在有些国家常用速长比  $\frac{V_s}{\sqrt{L}}$  代替傅汝德数,但其中  $V_s$  以“节”计,  $L$  以呎计,傅汝德数与速长比的关系为:

$$F_N = 0.2977 \frac{V_s}{\sqrt{L}} \quad (2-10a)$$

或

$$\frac{V_s}{\sqrt{L}} = 3.355 F_N \quad (2-10b)$$

雷诺数的定义为:

$$R_N = \frac{v_s L}{\nu} \quad (2-11)$$

式中,  $v_s$  是航速(米/秒),  $L$  是船长(米),  $\nu$  是水的运动粘性系数(米<sup>2</sup>/秒)。雷诺数在研究船的粘性阻力时有重要意义。

造船工程研究中有时还要应用到其他形式的速度参数,这里不作详细介绍。

## § 2-2 船舶阻力的基本规律

经过观察、分析、研究发现:航行于水面的船舶,其阻力常和船体几何尺度(以长度  $L$  为代表)、航速  $v_s$ 、水的运动粘性系数  $\nu$ 、水的运动密度系数  $\rho$ 、以及重力加速度  $g$  等有关。船体阻力与这些物理量的函数关系,亦即船舶阻力的表示形式及其基本规律是我们所需探求的。

解决船舶阻力的表示形式问题,可以采用流体力学中的量纲分析法。这种方法可简单地归纳为:首先确定研究的对象,根据已有的试验、分析,引入与研究问题有关物理量;然后建立物理方程式(或不等式),进而应用量纲分析法中的  $\pi$  定理,列出无量纲参数表示式;最后可以得到所研究问题的函数关系。

下面应用量纲分析法探求船舶阻力的基本规律。

### 一、摩擦阻力的基本规律——雷诺定律

选取的研究对象是深水中顺着本身平面运动的一块极薄的平板。由于它在深水中运动,所以不会引起波浪,又因它是极薄平板,故也不致产生旋涡,因此,其阻力纯粹为摩擦阻力。根据分析,认为其摩擦阻力  $R_F$  与水的质量密度  $\rho$ , 平板长度  $L$ , 平板速度  $v$ , 水的运动粘性系数  $\nu$  有关,可以写成:

$$R_F = \varphi(\rho, L, v, \nu) \quad (2-12)$$

(2-12)式中有五个有量纲物理量,取  $\rho, L, v$  三个量作为基本量。按照流体力学量纲分析法的  $\pi$  定理知,(2-12)式用无量纲变数表示时,无量纲数减少为两个:  $\pi_1, \pi_2$ 。