



普通高等教育船舶类规划教材

船舶阻力

邵世明 赵连恩 朱念昌 合编

国防工业出版社



435761

U661.311

S35

船舶阻力

邵世明
赵连恩 合编
朱念昌



00435761



国防工业出版社

·北京·

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

DV97/23

船舶阻力/邵世明等编. —北京:国防工业出版社,1995. 4
ISBN 7-118-01350-1

I. 船… I. 邵… III. 船舶阻力 IV. U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 12208 号



国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 14 316 千字

1995 年 4 月第 1 版 1995 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:8.30 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

出版说明

根据国务院国发(1978)23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”,中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业教材编审、出版的组织工作。

为了做好这一工作,中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组,聘请了有关院校的教授、专家 60 余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的专家组织,其任务是做好高等学校船舶类专业教材的编审工作,为提高教材质量而努力。

在总结前三轮教材编审、出版工作的基础上,根据国家教委对“八·五”规划教材要“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理体制,加强组织领导”的要求,船舶总公司于 1991 年又制定了《1991—1995 年全国高等学校船舶类专业规划教材选题》。列入规划的选题共 107 种。

这批教材由各有关院校推荐,同行专家评阅,教材委员会(小组)评议,完稿后又经主审人审阅,教材委员会(小组)复审,然后分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及有关高等学校的出版社出版。

为了不断地提高教材质量,希望使用教材的单位和广大师生提出宝贵意见。

中国船舶工业总公司教材编审室

1992 年 5 月

前 言

本书系根据全国造船专业教材编审委员会制定的《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,满足设计任务书所提出的航速要求,即快速性指标,是满足船舶的经济性和使用性要求的重要方面。

教学大纲指出:“《船舶阻力》课程是船舶工程专业必修的主干课,是研究船舶快速性的重要组成部分。”同时,要求通过本课程的学习,以期掌握水面排水型船舶航行时所受到的各种阻力成分的性质、决定阻力的方法、船型对阻力的影响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。同时介绍阻力相似定律,并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二章至第六章中予以详细讨论。讨论遵循:“阻力成因、主要特性、确定阻力的方法和减小阻力的途径”这一程序进行。第七章介绍了应用船模试验确定船舶阻力的方法。第八章是船型对阻力的影响。首先对水面排水型船舶按速度分类,然后详细讨论船型参数对水面排水型船舶的阻力性能的影响,其目的在于说明各类船舶应具有的特点,以及在实际设计中应予注意的问题。第九章归纳了各种近似估算的方法,并说明相应的适用范围,以供船舶初步设计时应用。第十章、第十一章分别阐述了船舶在限制航道中的阻力问题和其他船型的阻力特点。前者重点介绍浅水阻力问题;后者简要介绍过渡型快艇、滑翔艇、水翼艇、气垫船、小水线面双体船以及潜艇等各类船舶的阻力特点。

本书在编写过程中既要考虑到船舶阻力学科的发展以及教学实践的要求,又要注意到本教材的篇幅限制,因此,在满足大纲的前提下,努力注意到以下几方面:

(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)既要尽量压缩篇幅,如前置课有关的内容一般不予重复,又要对本学科近年来有所发展的内容在本教材中有一定的反映,如波型分析法、三次换算法、粘性阻力尾流测量、破波阻力以及某些新船型研究等都占有一定篇幅。

(3)本书重点是水面排水型船的阻力问题,但其它船型,特别是考虑到目前国内外各种快艇设计和建造的需要,因此,分别以一定篇幅介绍了它们的阻力特性。

根据上述编写原则,本书由上海交通大学邵世明和哈尔滨工程大学赵连恩、朱念昌共同编写。其中邵世明编写第一、四、八、十一章;赵连恩负责撰写第二、五、七章;朱念昌编写第三、六、九、十章。全书由邵世明和赵连恩统稿。本书由武汉交通科技大学李世谟教授主审。在编写过程中海军工程学院董祖舜教授、大连理工大学孟宪钦教授、华中理工大学石仲堃、程振中教授等仔细审阅了初稿并提出了宝贵意见。上海交通大学刘应中教授、王云

才高级工程师、哈尔滨工程大学夏剑晖副教授和中国船舶工业总公司教材编审室田宝荣副主任都给予很大的帮助和支持,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 船舶快速性及研究方法	1
§ 1-2 船舶阻力的分类及阻力曲线	2
§ 1-3 阻力相似定律	7
§ 1-4 傅汝德假定	10
第二章 兴波阻力	13
§ 2-1 船行波的形成和特征	13
§ 2-2 兴波阻力特性	19
§ 2-3 兴波干扰的预测方法	25
§ 2-4 确定兴波阻力的方法	27
§ 2-5 减小兴波阻力的方法	34
第三章 摩擦阻力	37
§ 3-1 边界层和摩擦阻力	37
§ 3-2 摩擦阻力系数计算公式	41
§ 3-3 船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响	46
§ 3-4 船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响	48
§ 3-5 减小摩擦阻力的方法	54
§ 3-6 船体摩擦阻力的计算步骤	55
第四章 粘压阻力	59
§ 4-1 粘压阻力的成因及特性	59
§ 4-2 船体粘压阻力处理方法	63
§ 4-3 确定粘性阻力的尾流测量法	70
第五章 破波阻力	73
§ 5-1 破波阻力的成因和特性	73
§ 5-2 阻力分类补充说明	77
第六章 附加阻力	79
§ 6-1 附体阻力	79
§ 6-2 空气阻力	82
§ 6-3 波浪中的阻力增值	85
第七章 船模阻力试验	89
§ 7-1 拖曳试验依据、设备和方法	89
§ 7-2 船模阻力数据表达法	95
§ 7-3 影响试验结果的因素	100
第八章 船型对阻力的影响	103
§ 8-1 船型对阻力影响的基本概念	103

§ 8-2	船体主尺度的影响	106
§ 8-3	主要船型系数的影响	113
§ 8-4	横剖面面积曲线形状的影响	118
§ 8-5	满载水线形状的影响	123
§ 8-6	首尾端形状的影响	124
第九章	阻力近似估算方法	137
§ 9-1	应用船模系列试验资料估算阻力	137
§ 9-2	归纳实船和船模资料分析估算法	146
§ 9-3	母型船数据估算法	156
第十章	船在限制航道中的阻力	161
§ 10-1	浅水对阻力的影响	161
§ 10-2	确定浅水阻力的方法	169
§ 10-3	狭水道对阻力的影响	172
§ 10-4	试验水池的池壁干扰	175
第十一章	其它船型的阻力特性	179
§ 11-1	高速排水型艇的艇型和阻力性能	179
§ 11-2	滑行艇的艇型和阻力性能	188
§ 11-3	水翼艇的阻力特性	198
§ 11-4	气垫船的阻力特性	202
§ 11-5	小水线面双体船	207
§ 11-6	潜艇阻力特性	210
附录	水的运动粘性系数 ν 和质量密度 ρ (根据第 10 届 ITTC)	212

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,然后分析船舶在航行中受到阻力的原因及其分类。进而介绍阻力相似定律,并提出造船工程上应用较广的傅汝德(W. Froude)假定。

§ 1-1 船舶快速性及研究方法

一、快速性概念

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、抗沉性、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影响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。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及船、机、桨的匹配问题。

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;研究减小阻力的方法,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,为决定主机功率、设计推进器(螺旋桨)提供依据。

三、研究方法

研究船舶快速性的方法有:理论方法和试验方法。

1. 理论方法

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;二是为简化分析起见有的问题引进一些近似假定,但与实际情况有一定出入,因此所得的结果准确性较差。

应该指出:理论研究方法虽然目前在定量方面存在差距,但常可用来解释现象,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进一步开展,因而理论分析法仍不失为重要的研究手段之一。

2. 试验方法(包括船模试验和实船试验)

船模试验是目前研究船舶快速性的主要方法。它是将实船和螺旋桨按一定比尺缩小,制作成船模和桨模,然后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来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进行建造的。但是船模试验有其局限性,诸如与实船情况不能完全模拟等。

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花费较大,所以除了新船进行例行试航外,通常很少进行。

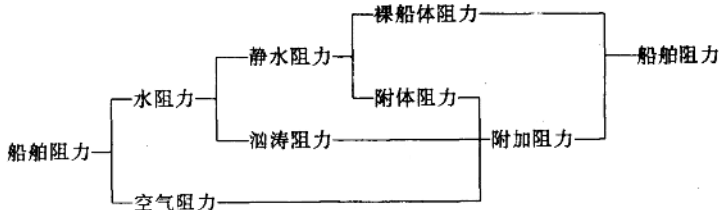
§ 1-2 船舶阻力的分类及阻力曲线

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。这种与船体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可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。水阻力是水对船体水下部分的反作用力。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分别进行研究。下面将先讨论“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”。

一、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与船体周围的流动现象密切相关。根据观察,船体周围的流动情况是相当复杂的。但主要有以下三种现象:

首先,船体在运动过程中兴起波浪。由于波浪产生,改变了船体表面的压力分布情况,如图 1-1 所示。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。这种由兴波引起的压力分布的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。

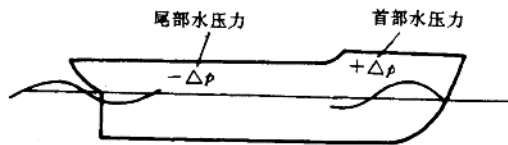


图 1-1 兴波改变船体压力分布

其次,当船体运动时,由于水的粘性,在船体周围形成“边界层”,从而使船体运动过程中受到粘性切应力作用,亦即船体表面产生了摩擦力,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。旋涡产生的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。这种由粘性引起船体前后压力不平衡而产生的阻力称为粘压阻力,用 R_{ν} 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。

应该指出,由于实际流体的粘性作用,即使在不产生分离的情况下,因为边界层在尾部的排挤厚度大,从而使船体前后部分存在压力差,因此同样存在粘压阻力。

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_{ν} 三者组成,其公式为:

$$R_t = R_w + R_f + R_{\nu} \quad (1-1)$$

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,这种压力是由兴波和旋涡等所引起的;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,船体湿表面上的切向力和压力都对称分布于纵中剖面,其合力 P_1 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 1-2 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。 P 的水平分力 R_1 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 τ 和压力 p 在运动方向的合力, 其公式为:

$$R_t = \int_S \tau \cos(\tau, x) ds + \int_S p \cos(p, x) ds \quad (1-2)$$

其中, S 为整个船体湿表面积。

(1-2) 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, 其公式为:

$$R_f = \int_S \tau \cos(\tau, x) ds \quad (1-3a)$$

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 , 其公式为:

$$R_p = \int_S p \cos(p, x) ds \quad (1-3b)$$

因此(1-2)式可表示为:

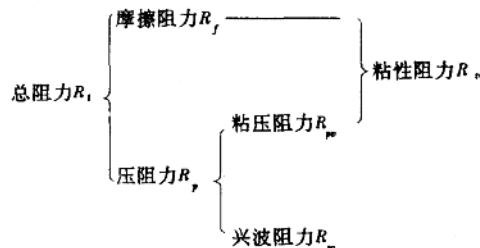
$$R_t = R_f + R_p \quad (1-4)$$

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:

$$R_t = R_v + R_w \quad (1-5)$$

式中 $R_v = R_p + R_f$ 。

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,

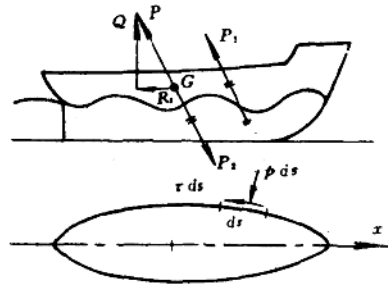


图 1-2 船体受力示意图

粘压阻力 R_p 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 ,这样船体总阻力又可分为摩擦阻力和剩余阻力两部分。

船体总阻力之所以有各种分类方法,主要是便于对不同问题的研究和处理。

二、阻力曲线和有效功率曲线

影响船体阻力的因素很多,但主要有三个方面:首先是航速。航速对阻力的影响较大,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,诸如水深、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,其公式表示为:

$$R_t = f_1(v_s) \quad (1-6)$$

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 1-3(a)所示。

若船速为 v_s 时,船体总阻力为 R_t ,则直接用于克服船体阻力所需的功率,称为有效功率,以 P_e 示之,其数值为:

$$P_e = R_t v_s \quad (1-7)$$

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,另有一部分损失于螺旋桨的扭矩转换推力的过程中,因此有效功率只是主机功率的一部分。

对于一定的船型,考虑到(1-6)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功率曲线。如图 1-3(b)所示。比较(1-6)式与(1-7)式可知:有效功率 P_e 曲线较之阻力 R_t 曲线是 v_s 的高一次函数曲线。

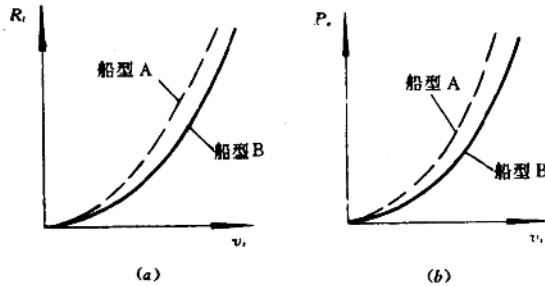


图 1-3 阻力曲线和有效功率曲线

(a)阻力曲线,(b)有效功率曲线。

三、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“kn”为单位。1kn=1n mile/h,而 1n mile=1852m,或 6080ft,所以 1kn=0.5144m/s。

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:

$$Fr = \frac{v_s}{\sqrt{gL}} \quad (1-8)$$

因为重力加速度 g 为一常数 ($g=9.8\text{m/s}^2$), 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“kn”计, L 以“ft”计, 傅汝德数与速长比的关系为:

$$Fr = 0.2977 \frac{V_s}{\sqrt{L}} \quad (1-9)$$

或
$$\frac{V_s}{\sqrt{L}} = 3.355 Fr \quad (1-10)$$

雷诺数的定义为:

$$Re = \frac{v_s L}{\nu} \quad (1-11)$$

式中, v_s 是航速 (m/s), L 是船长 (m), ν 是水的运动粘性系数 (m^2/s)。雷诺数在研究船的粘性阻力时有重要意义。

在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。

四、船舶航行中的航态

有关研究表明, 船舶航行中的航态有时会对阻力特性产生较大的影响。一般说来, 船舶在航行时的航态与静浮状态是不相同的, 而且航态随航速变化而变化。根据已有资料表明: 船舶在航行过程中, 船体各部位的吃水较静浮时将发生变化。图 1-4 是巴甫连柯根据试验给出的船舶在不同速度下, 船首、船尾和重心处的吃水变化情况, 其中速

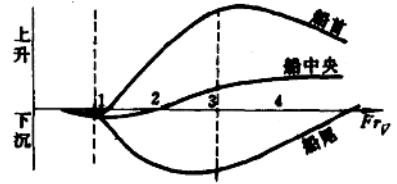


图 1-4 船舶运动中的航态与 Fr_v 的关系

度参数为: $Fr_v = \frac{v_s}{\sqrt{\frac{\nabla}{\rho}}}$ (这里 ∇ 为排水体积, Fr_v 称为体积傅汝德数)。船舶航行过程中, 伴随有航态变化, 即在垂直方向出现运动和位移, 表明其不但受到静力作用, 而且必然存在着流体动力的作用。

设 Δ 为船体排水量, ∇ 为船体静浮时的排水体积, ∇_1 为船体在航行过程中的排水体积, L 为沿垂直方向作用在船体上的流体动力或称升力。则船体在航行时, 沿垂直方向的受力关系为:

$$\Delta = \rho g \nabla_1 + L \quad (1-12)$$

实际航行表明, 根据船舶航速的 Fr_v 值, 所有水面船舶大致可以划分为三种航态:

(1) 排水航行状态: 当 $Fr_v < 1.0$, 此时航速较低, 流体动力所占比重极小, 船体基本上由静浮力支持, 船体航态与静浮时变化不大。因而可以认为 $L/\Delta \rightarrow 0$, $\nabla_1 \approx \nabla$ 。在这个速度范围内的各种船舶, 它们的阻力问题可以认为与航态无关。大多数的民用船, 都是属于这种航态的船舶。所以, 在这一航速范围内的船舶, 又统称为水面排水型船舶。

(2) 过渡状态: 在 $1.0 < Fr_v < 3.0$, 此时随航速增高, 航态较静浮状态有明显的变化, 船首上抬较大, 船尾下沉明显, 整个船体呈现明显的尾倾现象。在这种状态下, 流体动力较排水航行状态明显地增大, 船的排水体积趋于减小, 即 $\nabla_1 < \nabla$ 。在该速度范围内的各种船舶, 它们的阻力特性与航态关系较密切, 如高速炮艇、巡逻艇、交通艇都是这种航态范围的船舶。尽管这些船舶航速较高, 流体动力 L 占支持艇体的总浮力的比重不可忽视。但航态基本上处于排水型状态。故这些船称为高速排水型艇, 或过渡型艇。

(3) 滑行状态: 当 $Fr_v > 3.0$ 时, 此时航速很高, 船首、船尾的吃水变化很大, 而且整个船体被托向水面“滑行”前进, 因此, 当处在这种航态下的船称为滑行艇。滑行艇处在滑行阶段时, 静浮力很小, 艇体几乎完全由流体动力 L 来支持, 即 $L \approx \Delta$, 而 $\nabla_1 \rightarrow 0$ 。高速摩托艇、鱼雷快艇及导弹快艇等均属滑行艇之列, 滑行艇的阻力特性与航态的关系更为密切。

综上所述, 由于船舶所处的航速范围不同, 因此, 航行中的航态情况亦不同。而航态变化往往与阻力特性的变化联系在一起。本书前十章, 主要以排水型船舶为对象, 由于这类船舶处于排水航行状态, 航态变化极小, 所以通常不考虑航态对阻力的影响。但对各种快艇而言, 航态对阻力影响是相当重要的, 这将在第十一章有关部分中予以叙述。

§ 1-3 阻力相似定律

船模试验方法是研究船舶阻力的主要方法, 因此, 除应明确模型试验必须满足的条件外, 为了将模型试验结果换算到实船上, 必须探讨船舶阻力的函数表示形式及其基本特性。

解决船舶阻力的表示形式问题, 可以采用流体力学相似理论中的量纲分析法。

一、粘性阻力相似定律——雷诺定律

当物体在粘性流体中运动时, 且不计流体重力影响, 如潜艇在深潜航行时, 其所受阻力为粘性阻力。根据分析, 认为粘性阻力 R_v 与水的质量密度 ρ , 物体长度 L , 速度 v , 水的运动粘性系数 ν 有关, 可以写成:

$$R_v = \varphi(\rho, L, v, \nu) \quad (1-13)$$

(1-13) 式中有五个有量纲物理量, 取 ρ, L, v 三个量作为基本量。按照流体力学量纲分析法的 π 定理知: (1-13) 式无量纲变数表示时, 无量纲数减少为两个: π_1, π_2 。

现列出除三个基本量外的物理量的量纲表示式:

$$\begin{aligned} [R_v] &= [\rho][v^2][L^2] \\ [v] &= [L][v] \end{aligned}$$

根据量纲表示式, 组成无量纲数 π_1, π_2 :

$$\pi_1 = \frac{R_v}{\rho v^2 L^2}, \pi_2 = \frac{\nu}{Lv} = \frac{1}{Lv/\nu} = \frac{1}{Re}$$

其中 $Re = \frac{Lv}{\nu}$, 称为雷诺数。考虑到湿面积 S 与 L^2 的量纲相同; 用动压力 $\frac{1}{2}\rho v^2$ 代替 ρv^2 , 因此, $\frac{R_v}{\rho v^2 L^2}$ 可改写成 $\frac{R_v}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$, 称为粘性阻力系数 C_v , 表示单位面积的粘性阻力与动压力之比。

据 π 定理, 列出 (1-13) 式的无量纲函数表示式:

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2), \text{ 即可得}$$

$$C_v = \frac{R_v}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} = \Phi\left(\frac{1}{Re}\right)$$

或者

$$C_v = f(Re) \quad (1-14a)$$

(1-14a) 式表明: 对一定形状的物体, 粘性阻力系数仅与雷诺数有关, 当雷诺数相同

时,则粘性阻力系数必相等。

作为特例,在深水中顺着本身平面运动的极薄的平板所受阻力仅为摩擦阻力 R_f ,据分析, R_f 可以表示为(1-13)式相同的函数关系,因此其无量纲表示式为:

$$C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} = f(Re) \quad (1-14b)$$

由(1-14b)式知:平板摩擦阻力系数 C_f 仅仅是雷诺数的函数,当雷诺数相同时,则摩擦阻力系数必相等。

(1-14a)和(1-14b)式的函数关系称为雷诺定律。

二、兴波阻力相似定律——傅汝德定律

研究兴波阻力可选取在理想流体中航行的某给定水面船舶(即船型一定)为研究对象。由于是理想流体,不存在粘性影响,所以既无摩擦阻力又无粘压阻力,仅有由波浪而引起的兴波阻力。根据研究分析认为,影响兴波阻力的物理量是 ρ, L, v 和重力加速度 g ,因而可写成:

$$R_w = \varphi(\rho, L, v, g) \quad (1-15)$$

(1-15)式中有五个有量纲物理量,取 ρ, L, v 三个量为基本量,按照量纲分析法的 π 定理知,(1-15)式用无量纲参数表示时,无量纲参数的数目减少为两个: π_1, π_2 。

现列出除三个基本量之外的物理量的量纲表示式:

$$\begin{aligned} [R_w] &= [\rho][L^2][v^2] \\ [T] &= [L][v^{-1}] \text{ (时间的量纲式)} \\ [g] &= [v][T^{-1}] = [v^2][L^{-1}] \end{aligned}$$

根据量纲表示式,组成无量纲数 π_1, π_2 :

$$\pi_1 = \frac{R_w}{\rho v^2 L^2}, \pi_2 = \frac{g}{v^2/L} = \frac{gL}{v^2} = \frac{1}{Fr^2}$$

其中 $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ 称为傅汝德数。同样,考虑到湿面积 S 与 L^2 量纲相同;用动压力 $\frac{1}{2}\rho v^2$ 代替 ρv^2 ,因此 $\frac{R_w}{\rho v^2 L^2}$ 改写成 $\frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$,称为兴波阻力系数 C_w ,表示为单位面积的兴波阻力与动压力之比。

据 π 定理,列出(1-15)式的无量纲函数表示式为:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \Phi(\pi_2), \text{ 即可得} \\ C_w &= \frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} = \Phi\left(\frac{1}{Fr^2}\right) \end{aligned}$$

因此,对于给定船型必有:

$$C_w = f(Fr) \quad (1-16)$$

由(1-16)式知,对于给定船型的兴波阻力系数仅是傅汝德数的函数,当两船的 Fr 相等时,兴波阻力系数 C_w 必相等,这称为傅汝德定律。

显然,对于不同船型而言,兴波阻力系数 C_w 除与 Fr 数有关外,还将因船型变化而发生变化。

现在来讨论在船舶工程中经常要应用的形似船在相应速度时的傅汝德定律问题。

形似船是指仅大小不同,而形状完全相似的船舶之间的统称,如实船和船模即为形似船。相应速度是指形似船之间,为了保持傅汝德数 Fr 相同,则它们的速度必须满足一定的对应关系。对于船模和实船,要求 $\frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{v_s}{\sqrt{gL_s}}$; 则相应速度关系为:

$$v_m = \frac{v_s}{\sqrt{L_s/L_m}} = \frac{v_s}{\sqrt{\alpha}} \quad (1-17)$$

式中下标 m, s 分别为船模和实船的参数; α 是实船与船模间的缩放比。

由于实船与船模的船型是相同的,且在相应速度时,它们的傅汝德数亦是相等的,故它们的兴波阻力系数必相等,可表示为:

$$\frac{R_{ws}}{\frac{1}{2}\rho_s v_s^2 S_s} = \frac{R_{wm}}{\frac{1}{2}\rho_m v_m^2 S_m}$$

或

$$R_{ws} = R_{wm} \frac{\rho_s v_s^2 S_s}{\rho_m v_m^2 S_m} \quad (1-18)$$

考虑到形似船,且在相应速度,则必有: $S_s/S_m = \alpha^2$ 和 $v_s^2/v_m^2 = \alpha$, 代入(1-18)式得:

$$R_{ws} = R_{wm} \frac{\rho_s}{\rho_m} \cdot \alpha^3 = R_{wm} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_m} \cdot \frac{\nabla_s}{\nabla_m} \quad (1-19)$$

其中 ∇_s, ∇_m 分别为实船和船模的排水体积,如改用相应的排水量,最后得:

$$R_{ws} = R_{wm} \cdot \frac{\Delta_s}{\Delta_m}$$

或

$$\frac{R_{ws}}{\Delta_s} = \frac{R_{wm}}{\Delta_m} = \text{常数} \quad (1-20)$$

由(1-20)式知,形似船在相应速度时(或相同 Fr 数),单位排水量兴波阻力必相等。这称为傅汝德比较定律。由此知,试验求得船模的兴波阻力后,就可得到相应速度时的实船兴波阻力。

三、船体总阻力相似定律——全相似定律

研究对象是在实际水面上航行的某给定船舶(船型一定),由于既存在水面兴波,又要考虑到水的粘性,所以船体总阻力 R_t 应是 ρ, L, v, ν 和 g 的函数,可写作:

$$R_t = \varphi(\rho, L, v, \nu, g) \quad (1-21)$$

(1-21)式中有6个有量纲物理量,取 ρ, L, ν 三个量为基本量,按照量纲分析法的 π 定理知,(1-21)式用无量纲参数表示时,无量纲参数的数目可减少到三个: π_1, π_2, π_3 。

现列出各物理量的量纲式:

$$\begin{aligned} [R_t] &= [\rho][L^2][v^2] \\ [T] &= [L][v^{-1}] \\ [\nu] &= [L][v] \\ [g] &= [v][T^{-1}] = [v^2][L^{-1}] \end{aligned}$$

根据量纲式,组成无量纲数 π_1, π_2, π_3 :

$$\pi_1 = \frac{R_t}{\rho v^2 L^2}, \pi_2 = \frac{\nu}{Lv} = \frac{1}{Re}, \pi_3 = \frac{g}{v^2/L} = \frac{1}{Fr^2}$$

其中 Re 和 Fr 分别为雷诺数和傅汝德数。同样地, $\frac{R_t}{\rho v^2 L^2}$ 可改写成 $\frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$, 称为总阻力系数