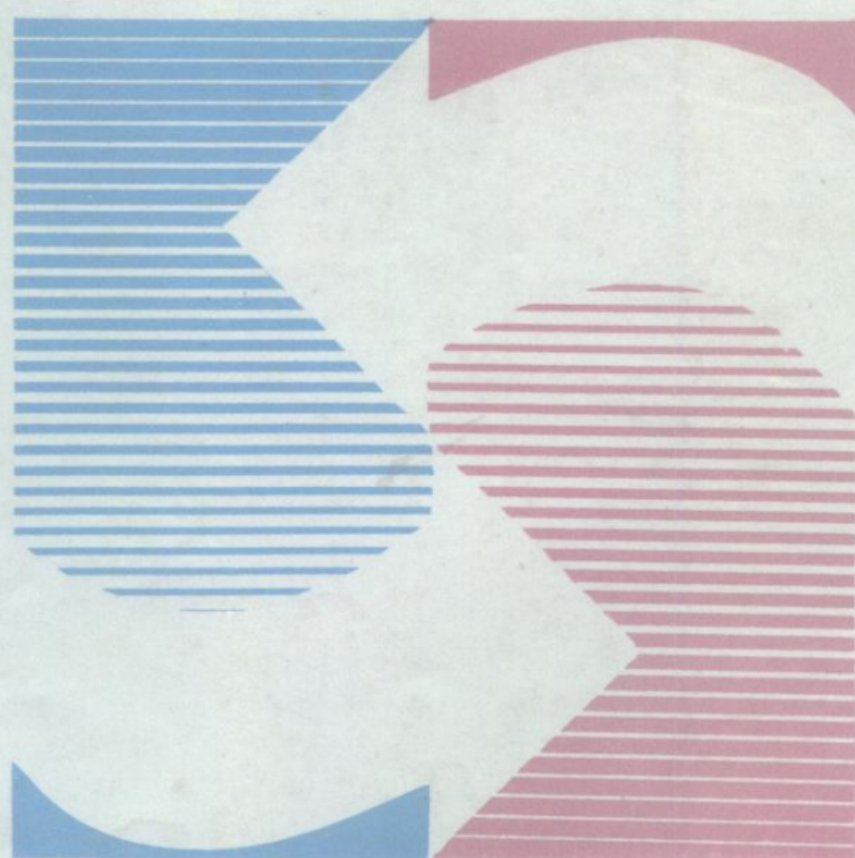


高等学校教材

chuan bo
zhuli yu tuijin

CZT 船舶阻力 与推进

〔丹麦〕Sv. Aa. 哈瓦尔特 著
黄鼎良 张忠业 王言英 译



U661.3
H106

425330

高等学校教材

船舶阻力与推进

〔丹麦〕 Sv. Aa. 哈瓦尔特 著

黄鼎良 张忠业 王言英 译

大连理工大学出版社

田宝荣

内 容 提 要

本书着重从船舶设计需要角度介绍了船舶快速性的主要内容。包括：阻力和推进的原理，模型试验方法，阻力计算，螺旋桨计算和设计，船、机、桨配合，船模-实船相关以及实船功率预报等，并附有大量试验测量资料、计算公式和图表及有关算例。

本书可作为船舶工程和海洋工程专业的大学生的教学参考用书。对于从事船舶设计和性能研究的工程技术人员、研究人员以及教师，本书也有其实用和参考价值。

本书根据 1983 年 John Wiley & Sons 公司出版的 Sv. AA. HARVALD 所著《Resistance and propulsion of Ships》翻译。

高等学校教材

船 舶 阻 力 与 推 进

Chuanbo Zuli Yu Tuijin

黄鼎良 张忠业 王言英 译

大连理工大学出版社出版（大连市凌水河）

辽宁省新华书店经销 大连船舶生产服务公司印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：26¹/₂ 字数：627千字

1989年3月第1版

1989年3月第1次印刷

印数：0001—1000

责任编辑：王世连 李 鸽 封面设计：葛 明

责任校对：杜祖诚

ISBN 7-5611-0113-9/U·3 定价：5.53 元

译 者 序

《船舶阻力与推进》(Resistance and Propulsion of Ships)一书是美国海军研究院 M. E. MCCORMICK 博士主编的由 Wiley 公司出版的一套(12卷)海洋工程丛书中的一卷。作者是丹麦技术大学海洋工程系的SV.AA.HARVALD教授。

本书的特点是将常规排水量船的阻力和推进——船的快速性的两个主要内容部分——合并在一起,从工程实用角度出发,对有关的基础理论、试验设备和测量技术、阻力计算、推进器设计,实船试航和实船-船模相关等问题做了历史的、全面的介绍和论述。书中只引用了流体力学的部分基本知识,所占篇幅也不大,但是提供了大量有实用价值的船模(包括螺旋桨模型)试验测量结果和很多对设计计算工作有用的方法和数据资料。所以,本书不但能作为刚开始学习船舶性能课程的船舶设计与制造专业的大学生的教学参考书,而且也将对造船界的技术人员有参考价值。为此,译者将本书译成中文,推荐给我国的读者,希望能为我国造船界的同行所采用。

参加本书翻译的人员有:黄鼎良(序言、第一至五章,附录 A、B、C),张忠业(第六、七章,附录D),王言英(第八至十章)。由姜际升教授作总校阅。本书的翻译和出版过程中,大连理工大学的蔡大明教授给予了宝贵的帮助和支持。译者在此谨表示深切的谢忱。

由于译者水平有限,时间仓促,本书译文虽数经校审,但还难免有缺点和错误。译者希望造船界的专家和广大读者提出批评和指正。

译者 一九八八年七月 于大连

原 序

在介绍新建造商船的说明书的第一页上，常常可看到“满载试航（在主机最大持续输出功率和型吃水条件下）航速达到如何如何”或某些类似的话。这样的一句话常给设计者带来很大的困惑。船、推进器和主机对于试航状态，同样也对于服务状态，都必须被设计得达到系统的最高效率。

本书论述与船的阻力和推进有关的一系列问题的某几个部分。目的在于为大学生和在海洋工程方面没有受过专门训练和缺少经验的工程师在新船设计和选用推进装置时提供实用计算的一个综合方法。但帆船、高速军用快艇——小水线面双体船、半排水式圆舳型艇、折角线型滑行艇——以及全浸式或割划水面水翼的水翼船、潜艇、战舰和特殊形状的船舰的有关问题不属本书内容。

尽管目前几乎所有类型的设计计算都可以应用计算机来完成，本书还是提供了很多设计图谱。这样可以使设计人员应用简单的方法来表达船的不同参数对其推进状态的影响。

本书包含了所有重要的变量和术语。各章和大多数的节是按下述方法安排的。即可不需预先阅读前面的各章而就能直接阅读它们。此外，我希望本书能为造船工程师在预估船的功率、安排船模试验、分析模型试验结果、分析试航数据和营运结果以及建立估算船的功率用数据库时采用。为了说明某些概念和方法，本书还包括了一些适当的例题。除了有时使用“马力”作为功率单位和使用“节”作为速度单位外，本书采用法定的国际单位制（SI）。英制单位和早期的公制单位之间的换算因子已在附录中给出。在附录中还给出了水和空气的物理特性。

作为统一的符号，本书应用1976年ITTC（国际船模试验池会议）的标准符号（英国造船研究协会技术备忘录第500号，1976年5月）和ITTC船舶流体力学词汇（皇家造船工程师协会海事专题第6号，1978年）。

我谨向本书参考文献目录中列出的论文和著作的作者们表示感谢。正是他们为我撰写本书提供了很多重要的材料。我特别感谢美国Annapolis海军学院的R. Bhattaryya教授，没有他的鼓励和提倡本书是不可能写成的。Bhattaryya教授还为作者完成手稿始终提供帮助。我也对我的妻子 Inge，为她卓越的打字、秘书工作和其它自始至终的帮助表示感谢。我也对Lyngby的丹麦工业大学海洋工程系（ISH）参加本书写作工作的教职员表示感谢。

Sv. A. 哈瓦尔特 于丹麦Lyngby 1983年5月

目 录

译者序

序 言

第一章 前言	(1)
第二章 数学模型	(3)
2.1 引言	(3)
2.2 物体的运动	(3)
2.3 作用在物体上的力和力矩	(6)
2.3.1 船的特征	(7)
2.3.2 运动特性	(7)
2.3.3 水的特性	(8)
2.3.4 测量单位	(8)
2.3.5 无量纲模型	(8)
2.3.6 力	(9)
2.3.7 无量纲比	(9)
2.4 速度势和流函数	(11)
2.5 无旋流动	(13)
2.6 旋涡流动	(14)
2.7 源和汇	(17)
2.8 船形物体的绕流	(20)
2.8.1 二维源汇	(20)
2.8.2 三维源汇	(22)
2.8.3 保角变换	(24)
2.8.4 Laplace 方程	(25)
2.9 发展现状	(29)
第三章 物理模型	(30)
3.1 引言	(30)
3.2 拖曳水池	(31)
3.3 空泡水筒	(39)
3.4 风洞	(43)
3.5 测试设备	(44)

3.5.1	阻力仪	(44)
3.5.2	纵倾测量仪	(45)
3.5.3	速度记录器	(45)
3.5.4	螺旋桨转速记录器	(45)
3.5.5	螺旋桨动力仪	(45)
3.5.6	其它测量设备	(47)
3.6	相似定律	(47)
3.6.1	几何相似	(48)
3.6.2	运动相似	(48)
3.6.3	动力相似	(49)
3.7	发展现状	(52)
第四章	船的阻力	(53)
4.1	引言	(53)
4.2	摩擦阻力	(55)
4.2.1	引言	(55)
4.2.2	层流和湍流	(56)
4.2.3	边界层	(57)
4.2.4	分离	(61)
4.2.5	摩擦阻力系数	(63)
4.2.6	湍流激励 (激流)	(69)
4.2.7	粗糙度	(71)
4.3	兴波阻力	(75)
4.3.1	引言	(75)
4.3.2	深水波	(75)
4.3.3	船波系	(79)
4.3.4	波系间的干扰	(83)
4.3.5	兴波阻力的计算	(85)
4.4	剩余阻力	(85)
4.5	空气阻力	(85)
4.6	限制航道和浅水中的阻力	(91)
4.7	阻塞和阻塞修正	(98)
4.8	船型和阻力的关系	(101)
4.9	装载状态对阻力的影响	(110)
第五章	船舶阻力的确定	(112)
5.1	引言	(112)
5.2	模型试验	(112)
5.2.1	引言	(112)

5.2.2	傅汝德法	(113)
5.2.3	Telfer 方法	(115)
5.2.4	ITTC 1957 年方法	(118)
5.2.5	Hughes方法	(120)
5.2.6	Prohaska 方法	(122)
5.2.7	1978年ITTC单桨船性能预报方法	(124)
5.2.8	对各种方法的评价	(126)
5.3	标准系列	(126)
5.4	统计方法的应用	(131)
5.4.1	引言	(131)
5.4.2	回归分析	(131)
5.4.3	2^k -因素试验	(135)
5.5	阻力图谱的应用	(136)
5.5.1	引言	(136)
5.5.2	Taylor和Gertler图谱	(136)
5.5.3	Lap图谱	(137)
5.5.4	Guldhammer和Harvald图谱	(139)
第六章	船舶推进	(158)
6.1	引言	(158)
6.2	定义	(158)
6.3	螺旋桨	(160)
6.3.1	引言	(160)
6.3.2	几何学	(161)
6.3.3	材料	(165)
6.3.4	敞水试验	(165)
6.3.5	螺旋桨图谱	(169)
6.4	伴流和伴流分布	(180)
6.4.1	引言	(180)
6.4.2	伴流分数的测量和确定	(182)
6.4.3	势伴流	(183)
6.4.4	摩擦伴流	(186)
6.4.5	波浪伴流	(188)
6.4.6	伴流对各种要素的依赖关系	(191)
6.4.7	伴流分数的预估	(200)
6.4.8	伴流径向分布	(203)
6.4.9	伴流分布	(206)
6.5	推力减额分数	(217)

6.5.1	引言	(217)
6.5.2	推力减额分数的确定	(218)
6.5.3	推力减额分数的各分量	(218)
6.5.4	推力减额对各种要素的依赖关系	(219)
6.5.5	推力减额分数的预估	(222)
6.6	空化	(224)
6.6.1	引言	(224)
6.6.2	空化流	(224)
6.6.3	螺旋桨空化类型	(227)
6.6.4	空化的有害影响	(229)
6.6.5	空泡水筒中模型试验方法	(231)
6.6.6	防止空化的衡准	(234)
6.7	螺旋桨设计理论	(237)
6.7.1	引言	(237)
6.7.2	螺旋桨作用的简单理论	(238)
6.7.3	螺旋桨的动量理论	(239)
6.7.4	螺旋桨的叶元体理论	(242)
6.7.5	环流理论	(243)
6.7.6	升力面理论	(251)
6.7.7	螺旋桨桨叶强度理论	(252)
6.7.8	螺旋桨理论应用	(255)
6.8	特种推进器和螺旋桨布置	(256)
6.8.1	引言	(256)
6.8.2	双螺旋桨布置	(256)
6.8.3	可调螺距螺旋桨	(259)
6.8.4	导管螺旋桨	(260)
6.8.5	明轮推进	(263)
6.8.6	平旋推进器	(264)
6.8.7	喷水推进器	(267)
6.9	模型试验	(268)
第七章	船-机-桨相互作用	(275)
7.1	引言	(275)
7.2	推进主机	(276)
7.3	船体-螺旋桨相互作用	(283)
7.3.1	引言	(283)
7.3.2	船舶状态的影响	(295)
7.3.3	桨叶数的影响	(295)

7.3.4	螺旋桨直径的影响	(295)
7.3.5	螺旋桨盘面比 A_E/A_0 的影响	(295)
7.3.6	螺旋桨螺距比 P/D 的影响	(295)
7.3.7	营运状态的影响	(295)
7.3.8	伴流和推力减额的影响	(296)
7.3.9	极限螺旋桨载荷下船-桨相互作用	(296)
7.4	船-机-桨相互作用	(299)
7.4.1	引言	(299)
7.4.2	航速、功率和转速的技术要求	(299)
7.4.3	N 、 P_B 的选择	(300)
7.4.4	螺旋桨的选择	(300)
7.4.5	功率曲线的转换	(301)
7.5	船舶试航	(304)
7.6	加速和减速	(311)
第八章	船模-实船相关分析	(316)
8.1	引言	(316)
8.2	1978年ITTC性能预报方法	(318)
8.3	波浪的影响	(323)
8.4	相关问题	(324)
8.5	造船厂需要的船模试验	(326)
8.5.1	引言	(326)
8.5.2	造船厂的要求	(327)
8.5.3	船模试验	(328)
8.5.4	有关船模试验的说明	(333)
第九章	实船功率预报	(335)
9.1	引言	(335)
9.2	所需功率	(335)
9.3	母型船法和统计法	(349)
9.4	功率预报的基本参数	(350)
9.5	预报功率图谱	(352)
9.6	功率预报的修正方法	(360)
9.6.1	船的尺度	(360)
9.6.2	船型资料	(360)
9.6.3	阻力	(361)
9.6.4	主机	(361)
9.6.5	螺旋桨	(362)
9.6.6	船-机-桨的相互作用	(362)

9.6.7 空化	(363)
9.6.8 航行水域	(363)
9.6.9 最优化	(363)
9.7 确定推进功率的方法	(365)
9.7.1 概算	(365)
9.7.2 估算	(365)
9.7.3 计算	(365)
9.7.4 根据早期模型试验结果计算	(366)
9.7.5 根据模型试验的预报	(367)
9.7.6 功率估算的控制	(367)
第十章 功率预报的举例	(368)
10.1 引言	(368)
10.2 拖网渔船的推进	(368)
10.3 多用途货船的推进	(377)
10.4 散装货船的推进	(387)
附录 A 测量单位	(401)
附录 B SI单位的换算因子	(403)
附录 C 物理常数	(404)
附录 D 符号	(407)

第一章 前言

设计出能以低阻力在水中航行的船型是造船工程师的任务。船的推进系统由推力源、动力装置和船体（图1.1.1）所组成，它必须是最有效的，即推动船所需的能量应尽可能地小。推力源通常是指推进器，而主动力装置可能是蒸汽锅炉和涡轮机，燃气轮机，柴油机或者是一座核动力装置。风帆也可能是推进装置的一部分。推进系统中的各个部分必须尽可能完善

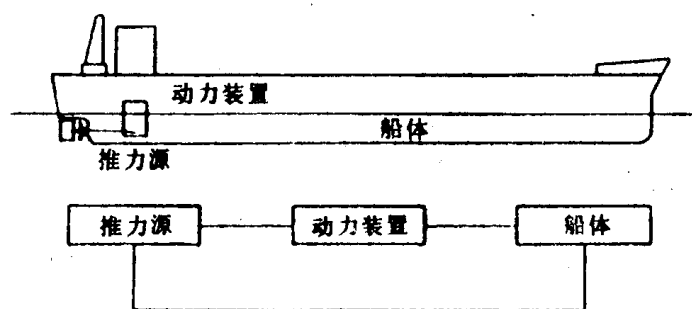


图1.1.1 推进系统

地配合。同时，船必须具有优良的操纵性能和航海性能。

在造船工程师提出第一个方案之前，应能将预计的作用在新船上的力及新船的响应作为船体主尺度、几何形状和船体结构的函数予以估算。当然，克服设计中的许多问题有很多办法和途径，但是对造船工程师来说，要找到“最优解”，至今仍然是很困难的。

解决方法可分为三类：

1. 直接应用对现有船的观测和记录；
2. 应用数学模型及相应的数值计算（数值模型）；
3. 应用物理模型。

从前，所有船的设计都以经验为基础，即以方法1为基础。然而，要在一艘实船上进行完善的观测和记录是十分困难的，并耗费时间和金钱。而要系统地改变重要的船舶设计参数也是不可能的。

当前，数学和物理模型已被应用于船的水动力设计。精良的计算机已使一些庞大而复杂的数学模型用于设计工作成为可能。但是，将应用各种模型所求得的结果与实船进行比较仍然是必须的。图1.1.2 给出了如何将不同的模型互相配合并和实船联系起来的观念。

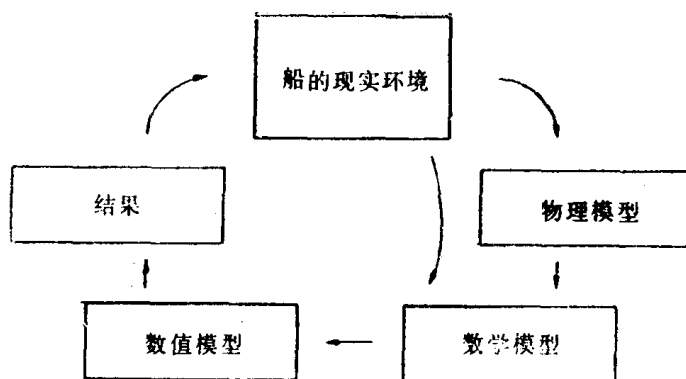


图1.1.2 各种模型和实船之间的联系

很多年以来，数学模型和物理模型已被用来预报船在良好天气下试航时要求达到一定航速所需要的功率。在这个领域内，已有很多研究工作者工作过，但是这里只提出船模试验研究工作的一位先驱者——W.傅汝德（1810—1879），他是第一个成功地将船模应用于水动力设计的人。在他之前，很多优秀的造船师曾以下述语言表达了他们对模型试验的看法：“你将在小尺度比的基础上有一系列美好而有趣的小试验，但这与任何大尺度的实际结果间的距离是遥远的”。

今天，两种形式的模型在设计过程中能被有效地应用。但是，在有关的新船方案决定之前，必须对模型结果以特定的方法加以分析。

第二章 数学模型

2.1 引言

很多自然现象可以简单地用一个数学方程式或一个数学方程组加以描述。这样的数学方程就称为“数学模型”，它们代表了真实的物理现象。

牛顿第二定律：

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad \text{或} \quad F = ma \quad (2.1.1)$$

便是数学模型的一个例子。式中 F 为力， m 为质量， v 是速度， t 是时间，而 a 是加速度。该方程的意义是：当质量为常数时，力等于质量与加速度之积。

类似地，阿基米德原理可以被表达成：

$$F_A = \rho \nabla g \quad (2.1.2)$$

式中 F_A 为浮力， ρ 为流体的密度， ∇ 为排水体积，而 g 为重力加速度。这是造船学中广泛应用的数学模型。

本章将讨论与阻力和推进有关的一些重要的数学模型。

绕船体的流动是三维流动，其数学模型必须表达这种流动。通常，要提出一个准确而可用的三维流动的数学模型是十分困难的，往往是不可能的。在这种情况下，如假定流动只存在于平面层中，并且某层中的流体不影响相邻层中的流动，那末，二维模型就能被有效地应用。因此，二维流动和三维流动的例子将一起给出。

2.2 物体的运动

为了建立物体在流体中运动的数学模型，必须设置一个坐标轴系。通常采用右手直角坐标轴系。所有船舶均是细长的，即它们的长度要大于它们的宽度和吃水。此外，所有船舶都有一个对称面，它在绝大多数情况下都垂直于地球表面。因此，通常都按下述方式规定三个相互垂直的坐标轴 x ， y 和 z ：坐标原点和船的重心或和该对称面中别的某个便于应用的点相重合， x 轴和 z 轴就在这个对称面中。由于船没有水平对称面， x 轴除了处于这个垂直对称面中，还应指向前方并和设计水线面平行。当 x 轴通过重心时，它和船的纵向惯性轴近似地重合。 y 轴指向右舷。由于 x ， y 和 z 轴是被固定于船上，当船改变方位时，它们的原点和方向将相对于地球随时间变化。为了描述这个现象，需要第二个直角坐标系 x_0 ， y_0 和 z_0 。 x_0 和 y_0 组成的平面与地球表面或静水面上的任意点相切。 x_0 和 y_0 的方向可任取，但一般 x_0 的方向是与船的初始运动方向一致的。 z_0 轴垂直指向下方。这个坐标系的原点和方向不随时间

变化, 而固定于船上的 x , y 和 z 的方向和原点是变化的。两组坐标轴系示于图 2.2.1。沿 x , y 和 z 轴的单位向量可分别用 i , j 和 k 表示。

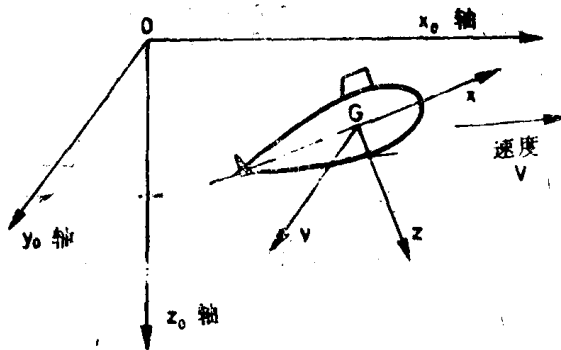


图2.2.1 固定坐标系和运动坐标系

为表达船的运动, 要应用刚体动力学的基本原理, 当坐标系的原点被取在重心上时, 牛顿第二定理可表达成如下形式:

$$F = m \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} (\text{动量}) \quad (2.2.1)$$

$$M = I \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d}{dt} (\text{角动量}) \quad (2.2.2)$$

F 是作用在船上的力向量, 它沿 x , y 和 z 轴的分量分别是 X , Y 和 Z , 于是,

$$F = Xi + Yj + Zk \quad (2.2.3)$$

M 是作用于船上的力矩向量, 其沿 x , y 和 z 轴的分量分别为 K , M 和 N , 于是,

$$M = Ki + Mj + Nk \quad (2.2.4)$$

V 是线速度向量, 具有分量 u , v 和 w , 于是,

$$V = ui + vj + wk \quad (2.2.5)$$

m 是船的质量。由于燃油和备品随时间的消耗率可以被忽略, 船的质量完全可以看作不随时间变化的常数。在我们采用的符号中, t 是时间, $\frac{d}{dt}$ 是对时间求导数。 Ω 是角速度向量,

其在 x , y 和 z 轴上的分量分别是 p , q 和 r , 则有

$$\Omega = pi + qj + rk \quad (2.2.6)$$

I 是惯性矩。

角动量可被表达成

$$\text{角动量} = \begin{pmatrix} I_{xx} - I_{yy} - I_{zz} \\ -I_{yx} & I_{yy} - I_{yz} \\ -I_{zx} - I_{xy} & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (2.2.7)$$

式中 I_{xy} , I_{xz} 等是惯性积。如果坐标原点选在重心上, 并且坐标轴与主惯性轴重合, 则这些惯性积为零, 于是

$$\text{角动量} = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} \quad (2.2.8)$$

或者

$$\text{角动量} = I_{xx}\dot{p}\mathbf{i} + I_{yy}\dot{q}\mathbf{j} + I_{zz}\dot{r}\mathbf{k} \quad (2.2.9)$$

应用方程 (2.2.1) ~ (2.2.9)，可以求得一个描述船运动的方程组：

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{u} + qw - rv) \\ Y &= m(\dot{v} + ru - pw) \end{aligned} \quad (2.2.10a)$$

$$\begin{aligned} Z &= m(\dot{w} + pv - qu) \\ K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\ M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \\ N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \end{aligned} \quad (2.2.10b)$$

上述诸式中，上方有一点的量表示该量对时间的导数。关于这个方程组的推导，可参考有关作者的工作，例如 Abkowitz (1964, P1-13, 或 1969, P1-1-13) 的著作。

如果坐标系原点与重心不重合，并且重心坐标为 (x_G, y_G, z_G) ，于是运动方程式将略为复杂些：

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} + qw - rv - x_G(\dot{q}^2 + \dot{r}^2) \\ &\quad + y_G(\dot{p}\dot{q} - \dot{r}) + z_G(\dot{p}\dot{r} + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} + ru - pw - y_G(\dot{r}^2 + \dot{p}^2) \\ &\quad + z_G(\dot{q}\dot{r} - \dot{p}) + x_G(\dot{q}\dot{p} + \dot{r})] \end{aligned} \quad (2.2.11a)$$

$$\begin{aligned} Z &= m[\dot{w} + pv - qu - z_G(\dot{p}^2 + \dot{q}^2) \\ &\quad + x_G(\dot{r}\dot{p} - \dot{q}) + y_G(\dot{r}\dot{q} + \dot{p})] \\ K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\ &\quad + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] \\ M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \\ &\quad + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu)] \end{aligned} \quad (2.2.11b)$$

$$\begin{aligned} N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \\ &\quad + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)] \end{aligned}$$

在 (2.1.11) 方程组中，前三个方程 (2.1.11a) 表达了沿坐标轴的平动，而后三个方程 (2.1.11b) 表达了绕坐标轴的转动。

讨论船在海上的运动状态时，必须应用这六个方程。当讨论常规船的操纵性和机动性问

题时，一般应用下述简化的方程组：

$$\begin{aligned} X &= m(\dot{u} - rv) \\ Y &= m(\dot{v} + ru) \\ N &= I_{xx}\dot{r} \end{aligned} \quad (2.2.12)$$

此外，如讨论阻力和推进问题，下述方程是重要的：

$$X = m\dot{u} \quad (2.2.13)$$

换句话说，船舶运动的数学模型的方程组中，仅有少数几个是有用的。

2.3 作用在物体上的力和力矩

每一艘船上作用着四类独立的力，他们是由下述因素引起的：

地球的引力，它对船和其周围的水都产生作用；

速度 V ，是船相对于水和空气的速度，或相对于水——船在其中运动——的速度；

船本身的推力源的作用。

这四种力可用下述方式加以描述：

1. 重力，它等于质量乘以重力加速度，即 mg ；
2. 水静压力或浮力 F_A ，它与 mg 一样总是与 Z_0 轴平行；
3. 水动力合力 F ，它是由于船在水中运动引起的水对船的作用力，可分成举力 L 和阻力 R （或 D ）两部分。 L 垂直于船的速度， R （或 D ）与 V 平行；
4. 推力 T ，它是水对船上的推进器的作用，通常，它与 R 方向相反。

如果各个力的和以及各个力对任意点的矩之和均为零，于是船的速度为常数而且没有转动。在最一般的情况下，运动是水平的，即 V 平行于 x_0 轴并且 F 和 T 仅有平行于 V 的分量。 T 与 R 相等但方向相反， R 是水动力合力的水平分量。（即图 2.3.1 中的总水动力）

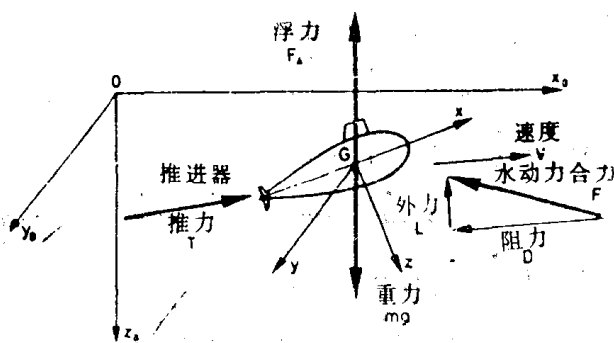


图2.3.1 作用于船上的力

水动力合力是由很多因素决定的，可以表达成：