

船舶阻力

〔苏〕Я. И. 沃伊特昆斯基 著

科学出版社

Уб-43
1111

船 舶 阻 力

〔苏〕Я. И. 沃伊特昆斯基 著

哈尔滨船舶工程学院《船舶阻力》翻译组 译

科 学 出 版 社

1 9 7 7

内 容 简 介

本书系根据 Я. И. Войткунский 著 «Сопротивление воды движению судов» 译出。

本书阐明了各类船舶在不同的航行条件下产生阻力的物理过程、对于阻力的理论研究和实验研究、阻力的计算方法、选择各类船舶之外型的原则和降低阻力的措施。

本书可作为工科院校船舶设计与制造专业的教学参考书，亦可用作造船和修船工程技术人员、科研设计人员以及有关专业工作者的参考书。

Я. И. Войткунский

СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДЫ ДВИЖЕНИЮ СУДОВ

Издательство «Судостроение», Ленинград, 1964

船 舶 阻 力

〔苏〕Я. И. 沃伊特昆斯基 著

哈尔滨船舶工程学院《船舶阻力》翻译组 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 5 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1977 年 5 月 第一次印刷 印张：14

印数：0001—5,150 字数：317,000

统一书号：13031·578

本社书号：848·13—2

定 价： 1.45 元

译 者 的 话

本书系根据 Я. И. Войткунский 著 《Сопротивление воды движению судов》译出。

本书阐明了各类船舶在不同的航行条件下产生阻力的物理过程、对于阻力的理论研究和实验研究、阻力的计算方法、选择各类船舶之外型的原则和降低阻力的措施。

本书可作为工科院校“船舶设计与制造”专业的教学参考书,亦可用作造船和修船工程技术人员、科研设计人员以及有关专业工作者的参考书。

本书由王旭、马元生同志翻译,顾懋祥同志校阅了第三、四、五、十章,邓三瑞同志校阅了第一、二、七、八、九章,王旭同志校阅了第六章,最后由王旭同志整理定稿。

著 者 序

在最近十到十五年中,对于水对船舶运动之阻力进行了大力的研究.所获得之结果有助于大大提高船速,以及采用新型船舶——水翼船,气垫船等.实验手段的发展由于应用了电测的及其它的最新测量方法,使得有可能获得关于船舶及其模型运动中所发生的物理过程的更深刻的概念.理论工作也得到了成功的发展,根据其结果可以使旧有的计算方法进一步准确化,同时建立了新的计算方法,并且确定了进一步改善船舶快速性的途径.

但是,概括地与系统地阐述所研究之船舶流体力学学科领域之内的成就的参考书,其中也包括 П. А. 阿普赫京和著者的同名著作(机械出版社,1953),已不能反映学科的现状.

同时,大学生和工程师在使用原先的教科书时对于改善叙述的方法和材料之选择提出了许多意见.因而产生了编著本教科书的必要性,以便总结业已积累的经验 and 给予各类船舶的阻力学,包括确定它们的理论方法和实验方法,以合乎现代水平的叙述.

本书的特点是广泛地利用了将船舶运动阻力分为两个主要组成部分——粘性阻力与兴波阻力的原则.这个原则在现今的研究中已被广泛的采用,并且是一个论据最为充分的原则.

在本书中探讨了关于船舶在波浪中、在冰中、有加速度时和在空泡离体绕流的情形下运动时的阻力问题.对于滑行驶艇、水翼船和气垫船之阻力也给予了很大的注意.书中之材

料应用了流体力学知识且按统一的方法予以叙述。

在编写本书时,著者广泛地利用了国内*研究阻力方面的成就,同时也考虑到了在此领域内的外国的著述。在书中也阐述了由著者或者在他领导下所完成的一些研究工作的结果。如果为了导出理论计算公式需要复杂而大量的中间数学推导,则著者只限于叙述问题的物理基础,同时阐明求解的结果及其实验校核。

因为对于若干问题的详细的理论分析没有列入按“造船与修船”专业培养工程师时的课程大纲,所以书中之内容做了这样的安排,即对于这些大学生并非必要的材料均集中在单独的章节之内: 10, 26, 31, 33, 35, 41, 57, 59, 69 和 12, 19, 62 及 66 的一部分。

由于本书篇幅有限,不可能在书中包括一切所希望之计算实例和某些参考资料。大学生们可以在《船舶原理手册——快速性与操纵性》(造船出版社, 1960) 中找到辅助材料,在其中有足够数量的计算实例。

在本书的末尾列有文献目录,必要时大学生可以选择书籍或杂志以获得个别问题上的辅助知识。

* 指苏联,下同,不另注。——译者注

目 录

译者的话	iv
著者序	v
第一章 船舶阻力引论	1
§ 1 课程的内容和任务	1
§ 2 船舶运动阻力的产生和它的组成	4
§ 3 液流的动力相似准则和阻力的一般表达式	13
§ 4 船舶运动阻力的变化特点	21
§ 5 船舶的拖曳功率	26
§ 6 船舶的浸湿表面和浸湿表面积的计算	29
第二章 粘性阻力	32
§ 7 在大雷诺数情形下绕物体之流动的特点	32
§ 8 粘性阻力的性质	37
§ 9 计算物体粘性阻力的一般公式	44
§ 10 细长体的粘性阻力的理论计算的近似方法	50
§ 11 在片流绕流情形下的平板的阻力	53
§ 12 在边界层内有湍流流动的情况下的平板阻力	58
§ 13 沿平板表面的混合边界层	72
§ 14 曲面的摩擦阻力	75
§ 15 总体粗糙度对于粘性阻力的影响	81
§ 16 局部粗糙度对于粘性阻力的影响	93
§ 17 切口与凹坑的粘性阻力	97
§ 18 船舶及其模型的摩擦阻力的计算	100
§ 19 流线型物体的粘性阻力的计算	104
§ 20 边界层的离体对粘性阻力的影响	110
§ 21 船体外壳板上的丛生物对船舶粘性阻力的影响	112

§ 22	降低粘性阻力的方法	115
§ 23	船舶运动的空气阻力	123
第三章	兴波阻力	133
§ 24	船舶运动时的兴波	133
§ 25	兴波阻力的性质	141
§ 26	考虑到自由液面影响的船舶的和物体的绕流理论	146
§ 27	兴波阻力的计算公式	153
§ 28	船舶的兴波阻力理论之校验和应用	157
§ 29	降低船舶兴波阻力的方法	165
第四章	在浅水中和水道中运动时的阻力	171
§ 30	船舶在浅水中运动时的阻力	171
§ 31	在浅水中运动时阻力之理论研究	176
§ 32	船舶在水道中运动时的特点	183
§ 33	船舶在水道中运动时的阻力之理论研究	190
第五章	在波浪中运动时的阻力	203
§ 34	船舶在波浪条件下运动时的阻力和速度之变化	203
§ 35	波浪中的附加阻力之理论研究	212
第六章	确定船舶运动阻力的实验方法	219
§ 36	试验水池	219
§ 37	在试验水池中试验的模型	231
§ 38	在反向运动中研究阻力	237
§ 39	实船试验	244
§ 40	将船模的阻力换算到实船的方法	247
§ 41	换算方法的精确化	262
第七章	水对船舶运动之阻力的近似计算方法	268
§ 42	阻力计算的近似方法的一般特点	268
§ 43	总阻力的近似计算方法	270
§ 44	剩余阻力的近似计算方法	273
§ 45	用换算母型的方法确定阻力	284
§ 46	有限航道对阻力影响的近似估算	291

§ 47	波浪对船舶运动之阻力的影响的近似估算	295
第八章	水阻力与船体形状之间的关系	299
§ 48	船体形状的选择	299
§ 49	排水量和船体主尺度的变化对阻力的影响	301
§ 50	丰满度系数及其变化对阻力的影响	308
§ 51	海船船体之外型	311
§ 52	内河船舶之船体形状	320
§ 53	船体之突出部分对于船舶阻力的影响	324
第九章	船舶在特殊条件下运动时的阻力	329
§ 54	船舶在水流中运动时的阻力	329
§ 55	驳船队之运动阻力	332
§ 56	在冰中运动时的阻力	339
§ 57	弹性容器之运动阻力	342
§ 58	偏航对于船舶运动阻力的影响	345
§ 59	船舶加速度运动时的水阻力	347
第十章	快速船舶运动之阻力	357
§ 60	滑行艇及其运动阻力	357
§ 61	滑行平面的流体动力特性	362
§ 62	滑行状态的阻力的理论研究	368
§ 63	滑行艇运动阻力之计算	376
§ 64	水翼船及其运动阻力	378
§ 65	水中翼的工作特点	385
§ 66	水中翼流体动力特性的计算	391
§ 67	绕物体的流动和在空泡情形下的阻力	400
§ 68	船舶在水表面之上运动时的阻力	413
§ 69	在自由液面之上运动的船舶之阻力的理论研究	425
参考文献		433

第一章 船舶阻力引论

§ 1 课程的内容和任务

快速性，即在有效的利用动力装置的功率的情况下使船舶发挥一定的航速的能力，是船舶重要的航海性能之一。船舶的快速性依其尺度、结构型式、外型与船体外壳的状况、推进器的类型与主机的功率以及航行条件而定。它与船舶的浮性、稳性、摇摆与操纵性紧密相关。为了评价船舶在各种航行条件下的快速性，必须拥有船舶运动之阻力量的数据以及为使船舶运动而产生拖曳力的推进器或拖曳装置的特性。

在本课程内将研究产生阻力的原因、阻力变化的特点、减少阻力的措施和确定阻力的方法。由计算阻力的结果所获得的资料，以及关于减少阻力的方法方面的建议将在选择船舶的主尺度和外型、计算推进器和动力装置的功率的过程中，即在船舶设计中应用。

目前，在研究船舶运动阻力时应用实验的方法和理论的方法。而船舶阻力的计算则是流体力学中所谓的外部问题之一，用以研究液体绕某一物体流动时的流体动力。

建造各类船舶的经验使得在古代即能选择有比较好的航海性能的船体外型。但在古代或文艺复兴时期的科学发展阶段，对于船舶或某种物体运动时产生阻力的原因都没有实质性的了解。E. 牛顿首先试图分析物体在液体中运动时产生阻力的过程，并且建立了最早的理论计算公式。在1687年出版的《自然哲学的数学原理》一书中，牛顿首次将阻力分解为

独立的成份,从其中分离出了摩擦力。牛顿提出的流体动力与运动速度的平方关系和计算摩擦力的公式在研究绕物体流动的现象时到现在仍被广泛应用。

L. 欧拉是理论流体力学——研究物体运动阻力的基础——的奠基者。他受俄国科学院的委托而著的《船的科学》(1749年)与 П. 布赫著的、于1746年在巴黎出版的《关于船舶的论文,关于船舶的结构与运动》是船舶原理的基础。欧拉提出了考虑船舶各个基素的影响而计算其阻力的关系式,并且首次指出了艏型对形成阻力的作用。

在十八世纪中叶,就试图用实验的手段,特别是用水池来研究船舶的快速性。在1756年拜尔德(英国)曾在长度约为十米的水池中做过船模拖曳试验。根据法国科学院达朗贝尔、包西和孔道西的建议于1775年对于运河船舶进行了第一次系统性的比较性的船模试验,其目的是选择它们的外型。这些试验是在有专门装置的水池中进行的,即用拖绳和下落重物的重力拖带船模运动。按这样的方法拖曳船模的水池称为重力式水池,这种水池现在仍被应用。在帆船时期对于研究船舶阻力没有很大的需求,因为它们的航速在更大的程度上依天气和船员的船艺而定。

蒸汽船队在十九世纪的出现迫使必须确定船舶主机的功率,从而促进了对于船体外型的研究。在这个时期便提出了一个要求,就是制订一种将船模试验结果进行换算以确定实船的运动阻力的方法,这是由于当时的理论流体力学尚不完备而不能给出计算阻力的可靠公式之故。1871年在托尔圭(英国)由B. 弗鲁德主持建造了尺度为 $(85 \times 14 \times 4)$ 米的试验水池,在这里船模是用水池水面之上运动的车架拖曳的。因而,用车架拖曳船模的近代试验水池常被称为弗鲁德型水池。为了验证将船模试验结果换算至实船的方法并使更加精

确，弗鲁德于 1873 年与在水池中试验平板和船模的同时，又对“灰犬”号炮舰进行了实船拖曳试验。通过这些研究使弗鲁德得出了计算平板摩擦阻力的经验公式，并且还证明了他根据重力相似律——其思想是列胡（1844 年）提出的——而提出的将船模运动之阻力换算至实船的方法的可用性。弗鲁德提出的换算方法和计算摩擦阻力的方法一直应用到三十年代而没有本质的变化，某些国外的研究者至今仍在使用。

十九世纪末和廿世纪初，对流体力学的下述重要分支，如波浪理论、边界层理论和机翼理论的有成效地研究，为建立各个阻力成份的理论计算方法提供了有利的条件。

在 1898 年，米契尔根据船舶的“薄性”假设和在它运动时只引起小的兴波波高的假设而得出了船舶在深水中的兴波阻力的理论计算公式，从而为所谓的线性兴波阻力理论奠定了基础。并且以后又有人用另一种方法解决了在浅水中航行的船舶的兴波阻力问题及其合适的外型问题。从 40—50 年代开始发展非线性兴波阻力理论，在其中没有引进任何关于对船舶运动时兴波波高的限制。与此同时对在波浪中航行的船舶的兴波阻力理论也进行了研究，并且还研究了船舶摇摆的流体动力理论。

1904 年普兰德利得出了在边界层区域内液体运动的简化方程式。边界层理论成了计算物体粘性阻力的基本根据。由于边界层理论的发展，特别是平板摩擦阻力的计算公式的改进，使得有可能在 30 年代初期就不再使用弗鲁德公式，而且使船舶及其模型的粘性阻力计算大为准确化，从而改善了由船模试验向实船换算的方法。此后又有人开始研究物体与船舶在考虑其形状和表面状态（粗糙度，波状不平度等）的影响下粘性阻力的理论计算公式，以及降低粘性阻力的措施。

有限翼展机翼理论的发展对于计算高速船艇的阻力有很

大作用。在 50 年代,随着水翼船的广泛使用,有人根据双翼理论、有限翼展机翼理论和兴波阻力理论而提出了水翼的流体动力特性的计算方法。

现阶段研究船舶阻力的特征是大力完善理论计算方法、深入分析形成阻力的物理过程以及引用新的船舶外型及新的运动原则,从而在根本上改变了各个阻力成份的作用与它的总值。

在船舶运动之阻力的研究任务中,具有实际的和科学意义的问题是改进粘性阻力的计算方法与降低粘性阻力的措施、探讨更为准确的兴波阻力理论和减少兴波阻力的措施、将船模试验结果换算至实船的更为准确的方法、研究船舶在波浪中航行时的阻力的计算方法和降低这种阻力的途径,以及发展水翼船、贴水面航行的船舶和其它高速船舶的阻力的计算方法和降阻措施,解决这些问题将会显著地改善船舶的快速性。

§ 2 船舶运动阻力的产生和它的组成

物体在液体中运动时产生的流体动力的大小取决于该液体的密度和粘度。当压力变化时水的密度变化很小,所以在研究船舶的运动问题时,实际上可以认为水是一种不可压缩的和匀质的液体。在比重 γ 和密度 ρ 之间存在着下列关系

$$\gamma = \rho g \quad (1.1)$$

在所有的阻力计算中,重力加速度 g 的值取为常数且等于 9.81 米/秒²。

淡水的密度在水温为 4℃ 时是 102 公斤·秒²/米³;在试验水池做船模试验时和计算船舶在淡水中的快速性时采用此值。当计算船舶在海水中的快速性时,一般取 $\rho = 104$ 公

斤·秒²/米⁴，其相应的 $\gamma = 1020$ 公斤/米³。水温为 4℃ 时，大洋中海水的平均比重 γ 是 1028 公斤/米³，其相应的盐度是 3.5% 及 $\rho = 104.8$ 公斤·秒²/米⁴。

当气温为 15℃ 气压为 760 毫巴时，空气的密度是 0.125 公斤·秒²/米⁴，比水的密度约小 800 倍，这个值通常在计算船舶水上部份的空气动力时使用。

液体的粘度由动力粘性系数 μ 表征，它的大小依液体的性质和温度而定。在舰船流体力学中所遇到的压力变化范围，对水和空气的动力粘性系数实际上没有影响。

计算粘性力时在公式中通常引入量

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2)$$

它称为液体的运动粘性系数。这个系数表示在液体中产生的粘性力加速度。在表 1 中列出的是由第九届国际试验水池会议提出的，在 $\gamma = 1028$ 公斤/米³ 时淡水和海水的系数 ν 的值。

表 1

温 度 (°C)	液体的运动粘性系数 $\nu \cdot 10^4$, 米 ² /秒	
	淡 水	海 水
2.2	1.658	—
3.8	1.571	—
5.0	1.517	1.560
7.2	1.417	1.462
10.0	1.306	1.352
12.2	1.227	1.274
15.0	1.139	1.187
17.2	1.075	1.124
20.0	1.003	1.053
22.2	0.951	1.002
25.0	0.893	0.943
30.0	0.801	0.851

图 1 是淡水和盐度为 3.5% 的海水的密度和运动粘性系数与温度的关系曲线；图 2 是气压为 760 毫巴时空气的运动粘性系数和密度与温度的关系曲线。

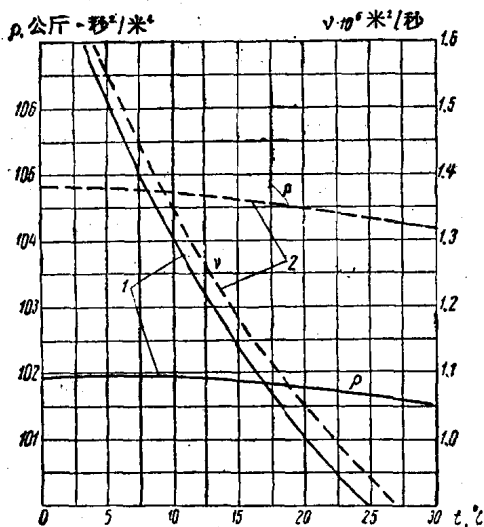


图 1 淡水 1 和海水 2 的密度和运动粘性系数与温度的关系曲线

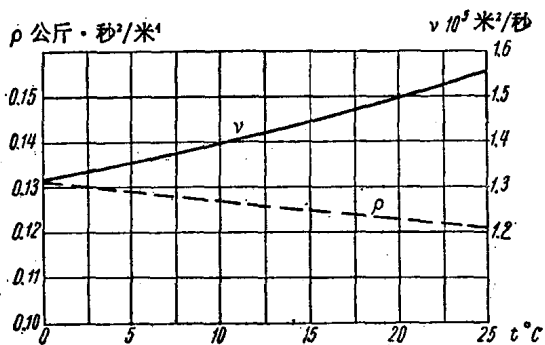


图 2 空气的密度和运动粘性系数与温度的关系曲线

由于船体与液体在其浸湿表面积 Q 上相互作用的结果便产生了连续分布的表面力。在船体表面的每一点上，上述作

用力用表面应力的向量 $\bar{p}_n$ 表示, 所以作用在微面积 $d\Omega$ 上的表面力的大小是 $\bar{p}_n d\Omega$. 向量 $\bar{p}_n$ 在微面积 $d\Omega$ 的外法线方向 $\bar{n}$ 上的投影 p 就是总流体动压力, 而在流线方向上的投影、即在顺船体表面且经过微面积 $d\Omega$ 的重心的某一流线方向上的投影则称为切应力或在此点上的摩擦应力 τ_0 (图 3).

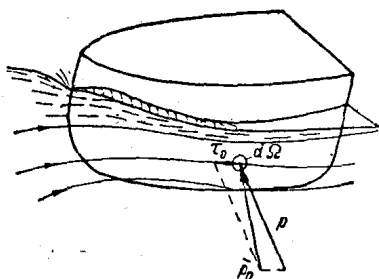


图 3 作用在物体表面上的流体动力元

流体动压力和切应力可以用实验方法求出, 即在物体表面上的每个点上用直接测量的方法求出, 也可以由伯努利方程、牛顿公式或者其它在流体力学中已知的关系式用理论方法求出.

水和空气对于运动中的船舶的作用力, 即水动力和空气动力是作用在船体表面上的各个流体动力元之和. 这些表面力元之力系可以合成为主向量 $\bar{R}$ 和主力矩 $\bar{M}$, 并且以下列各式表示:

$$\bar{R} = \int_{\Omega} \bar{p}_n d\Omega \quad (1.3)$$

$$\bar{M} = \int_{\Omega} (\bar{r} \times \bar{p}_n) d\Omega \quad (1.4)$$

式中 $\bar{r}$ ——微面积 $d\Omega$ 的中心点至参考点的矢径.

在进行水面船舶的快速性计算时, 常采用同船舶附连的坐标系 (图 4), x 轴与运动速度方向相同; y 轴指向右舷; 而 z 轴则垂直向上. 坐标原点在舭剖面、对称面与相应于船舶在静止状态时的水线面的交点上.

若将流体动力主向量按此坐标系投影于各个轴上, 则可得它的三个分向量. R_x 是船舶运动时的阻力, R_y ——横

向流体动力或漂移力, R_x ——举力。

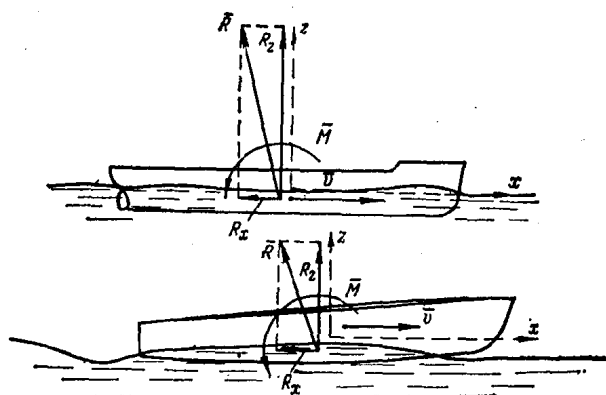


图 4 同船舶相附连的坐标系

船舶运动的阻力就是作用在它的浸湿表面积上的各个流体动力元在运动方向上的总投影。

在本课程中,主要地将以研究船舶在前进运动时产生的阻力为限。如果从总压力中将流体静压力分出来并单独计算它的主向量,则力 R 可以认为是由流体动力的反作用力和流体静力、即阿基米德力所组成。在某些情形下,如在滑行时或者物体沉入液体中时,阿基米德力可以参与运动阻力的形成,因为这时在物体运动速度的方向上将有它的投影。

为了分析产生阻力的可能的原因,从流体动力反作用力的一般表示式 (1.3) 和确定阻力的一般表示式出发较为方便。

若考虑到在船体表面的某一点上作用的流体动力总应力、即向量 $\bar{p}_n$, 如图 3 所示可以分解为两个组成部分——法向力和切向力,则不难得出阻力的下列表示式:

$$R_x = \int_Q [p \cos(p, x) + \tau_0 \cos(\tau_0, x)] dQ \quad (1.5)$$

现在我们研究一下由压力和切应力所引起的各阻力分量