

高等学校教学用书



船舶推进器

B. M. 拉弗林契叶夫著

高等教育出版社

高等学校教学用书



船 舶 推 進 器

B. M. 拉弗林契叶夫著
上海造船学院船舶制造系译

高等教育出版社



本書系根据苏联海运出版社 (Издательство “Морской Транспорт”) 出版、拉弗林契叶夫 (В. М. Лаврентьев) 所著“船舶推进器” (Судовые движители) 1949 年版譯出。原書經苏联海运部学校管理总局审定为高等海运学校船舶机械系与船舶制造系教学参考書。

本書首先叙述水阻力的物理原理并附有必要的試驗資料, 以及决定船的运动阻力的实际方法。其次講解推进器的理論、計算及設計, 其重点放在海船推进器的主要型式——螺旋槳上。最后介紹了提高推进效率的方法, 重点放在导流管和流綫型舵上。

本書可作为高等学校船舶机械、航海各專業的教材, 也可供船舶制造專業学生及船舶設計方面的工程技术人员参考之用。

本書由魏东升譯“序”、“緒論”、第一章及第二章, 桑国光譯第三及第四章, 盛振邦譯第五、第六及第七章, 李永庆譯第八章, 林金銓譯第九章, 李維揚譯第十章, 蔡繩武譯第十一章, 陈家鼎譯第十二章, 罗德濤譯第十三章。最后由王世銓和何友声校訂。

船 舶 推 进 器

B. M. 拉弗林契叶夫著

上海造船学院船舶制造系譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第054号)

商务印书館上海厂印刷 新华书店发行

統一书号 15010·706 开本 850×1168 1/32 印張 8 14/16 插頁 5
字數 212,000 印數 1—1,200 定价 (10) 元 1.50

1958年11月第1版 1958年11月上海第1次印刷

序

本書是供苏联海运部高等航海学校学习船舶宜航性課程用的教学参考書。此外,本書也可用作造船学院的教学参考書。

作者在本書中不仅力求闡明水阻力和推进器作用的物理原理,以及叙述研究它們用的、簡單的分析仪器,而且还提供为解决实际问题所必需的具体資料。

本書第一篇研究船的运动阻力問題。其中第一章到第四章以及第七章扼要叙述水阻力的物理原理并附有必要的試驗資料。

第五章和第六章叙述决定船的运动阻力的实际方法。

第二篇約占全書篇幅的三分之二,講解推进器的理論、計算及設計。其中前三章(第八章到第十章)叙述水力推进器作用的物理原理,重点放在海船推进器的主要型式——螺旋槳上;对其他型式的推进器則仅給以基本概念。作者力求以尽可能通俗、同时又是合乎严格科学性的形式来叙述推进器現代理論的主要原理。这些原理是理解推进器作用和有意識地处理推进器設計、工作分析及推进裝置現代化所必需的。

第十一章叙述螺旋槳的計算方法。这个通用的計算方法是由作者在中央海运科学研究院(ЦНИИМФ)拟制出来的,它以綜合利用螺旋槳的旋渦理論与最新的定序模型試驗結果为基础。按照这个方法計算螺旋槳的各项要素,是在既考虑到最高效率、又考慮到槳叶强度和空泡性能等項要求的情况下、来进行的。

第十二章叙述螺旋槳的構造,第十三章講解提高推进效率的方法,重点放在导流管和流綫型舵上。

作者对于技术科学副博士 B. A. 謝米克副教授不辞辛勞地校訂本書,以及技术科学副博士 A. A. 柯斯久柯夫副教授校閱手稿时所給的許多宝貴指示深表感謝。

对于改善本書的一切指正,作者均將衷心接受。

B. M. 拉弗林契叶夫

目 录

序

緒論	1
----	---

第一篇 船的运动阻力

第一章 基本概念	7
§ 1-1 阻力的組成部分	7
§ 1-2 相似定律	10
a) 有关相似的概念	6) 粘性力
b) 重力相似定律	7) 雷诺相似定律
r) 模拟问题的实际解决	
§ 1-3 阻力的一般公式	21
第二章 摩擦阻力	22
§ 2-1 层流边界层与摩擦阻力	23
§ 2-2 乱流边界层与摩擦阻力	30
a) 由层流运动过渡到乱流运动	
6) 速度脉动与乱流应力。混合长度	
b) 乱流平板阻力	
§ 2-3 光滑平板在各种运动情况下的摩擦阻力	44
§ 2-4 物体表面曲率对于阻力的影响	46
§ 2-5 表面粗糙度对于摩擦阻力的影响	47
§ 2-6 决定船舶湿面积	49
§ 2-7 计算船舶摩擦阻力的步骤	49
第三章 旋渦阻力	50
§ 3-1 边界层的分离及旋渦的形成	50
§ 3-2 旋渦阻力的降低	52
§ 3-3 附屬体阻力	56
第四章 兴波阻力	61
§ 4-1 船的波浪组及兴波阻力的原因	61
§ 4-2 艏及艉横波的干扰	65

§ 4-3 有利的和不利的速度区域	70
§ 4-4 有限深度对兴波阻力的影响	74
第五章 根据船模试验决定船的阻力	76
第六章 船舶阻力的实用计算方法	82
§ 6-1 Э.Э.巴布密尔法	82
§ 6-2 爱尔法	84
§ 6-3 约略估计拖曳功率的公式	87
a) 海军系数公式 б) B.B.达佛欧道夫公式	
§ 6-4 决定浅水中船舶的阻力	90
§ 6-5 船舶的空气阻力	93
第七章 滑行	94
§ 7-1 高速航行的各种状态	94
§ 7-2 滑艇的水动支持力和阻力	96
§ 7-3 滑艇的转型	99

第二篇 船舶推进器

第八章 水力推进器的一般性质	101
§ 8-1 基本概念	101
§ 8-2 水力推进器的作用原理	102
§ 8-3 推进器的型式	104
a) 明轮 б) 螺旋桨 в) 翼轮 г) 喷水推进器	
§ 8-4 理想推进器理论	113
§ 8-5 推进器的实际效率	122
第九章 螺旋桨的几何学	123
§ 9-1 螺旋面的某些几何知识	123
§ 9-2 螺旋桨桨叶的形成	126
§ 9-3 桨叶面积。投射面和伸展面的轮廓的作法	128
§ 9-4 桨叶的侧投影图和限界轮廓的作法	131
§ 9-5 桨叶的展开面	134
§ 9-6 螺旋桨的总图	137
第十章 螺旋桨基本理论	138
§ 10-1 螺旋桨周围水流的特点	138
§ 10-2 在螺旋桨叶原体上的力及感速速度	142
§ 10-3 翼理论的一些知识	147
a) 翼的特性 б) 关于空泡现象的概念	

§ 10-4 叶原理论	155
§ 10-5 整个螺旋桨的推力、力矩及效率。最小诱导损耗的螺旋桨。螺旋桨的诱导效率及结构效率	159
§ 10-6 螺旋桨的无因次动力特性。相似理论	165
§ 10-7 进速系数改变时螺旋桨推力、力矩及效率的变化。水动螺距。滑脱。螺旋桨特性曲线	169
§ 10-8 螺旋桨各因素对其动力特性的影响	173
§ 10-9 螺旋桨沉深对其动力特性的影响	176
§ 10-10 螺旋桨与船体的相互作用	177
a) 伴流 b) 推力减额 B) 螺旋桨的计算速度及推进效率	
第十一章 螺旋桨的计算	189
§ 11-1 螺旋桨计算的目的和主要步骤	189
§ 11-2 螺旋桨计算用的图谱。决定螺旋桨的最有利的转数和直径	190
§ 11-3 螺旋桨桨叶的强度计算	201
§ 11-4 桨叶最有利宽度及厚度的决定。空泡现象的检验	207
§ 11-5 螺距和效率修正值的决定	213
§ 11-6 螺旋桨桨叶剖面及螺旋桨图的绘制。螺旋桨的重量及惯性矩	215
§ 11-7 螺旋桨的计算方案	218
a) 在选择主机功率时的螺旋桨计算	
b) 保证发动机得到最完善利用的螺旋桨的计算	
B) 例题	
§ 11-8 船舶航行特性的计算	233
第十二章 螺旋桨的构造	243
§ 12-1 螺旋桨的结构型式及其材料	243
§ 12-2 桨毂的构造和桨叶的固定	246
§ 12-3 螺旋桨在轴上的固定	249
§ 12-4 螺旋桨的验收和检验	254
第十三章 推进效率的提高方法	257
§ 13-1 在推进器装置中的能量损失及其减低的方法	257
§ 13-2 导流管	261
§ 13-3 反应螺旋桨与流线型舵	271
中俄名词对照表	275

緒 論

船舶的宜航性即為船舶用一種專門裝置(推進器)以最小能量消耗在水中移動的能力,它是船舶最重要的性能之一。

人類從最古的時候起,就設法改變船型以減少船的运动阻力,來使所造的船尽可能航行得輕快些。

在建立船舶宜航性科學的許多世紀以前,古代的俄羅斯人就已經精通建造快速船舶和航海船舶的藝術。他們把所造的船由德涅伯河航行到黑海,到達拜贊庭,然後進入地中海;同時在北海很困難的條件下完成了極艱巨的航行。

1749年在彼得堡出版了彼得堡科學院院士 L. 歐拉幾年前所著的“船舶科學”一書。在這本書里,除了船舶理論的一些其他問題外,首先討論了船的运动阻力和船的合理形狀的問題。歐拉的一切論證都是根據牛頓提出的流体阻力理論而推演出來的,這個流体阻力理論在當時是很流行的,但未經試驗証實。以後,在1761年歐拉在他另一著作“流体摩擦理論的試驗”中得出了有關摩擦阻力的公式。

流体阻力問題是極為複雜的,這就要求將研究出來的理論用試驗來對証。1770年在法國科學家達朗貝爾的指導下曾經作過這類的試驗。這些試驗提供了許多有關船的运动阻力的數據,並且証明阻力在運河內增加很大。這些試驗的結果是根據牛頓的理論加以整理的,並且假設摩擦力在船的运动阻力中作用很小。但是過了25年後,波夫的試驗証明摩擦阻力是不可忽略的。

隨著蒸汽船舶的發展,對於船舶宜航性科學開始提出了許多更高的新要求。設計船舶時,要求決定能保證規定航速所必需的

蒸汽机的功率。作为设计基础的数据是否正确，已有可能用船舶试航时测定机器功率的方法来检验了。每条船的试航都提供了一些可作估计用的资料，根据这些资料得出了许多近似公式。其中应当指出的是 B. H. 阿凡納謝夫 (1892 年) 的卓越的公式，因为它既简单而且在当时大多数实际情况中都是够准确的。

1870 年 B. 傅汝德提议应用牛顿的力学相似定律，借船模试验来推测船的运动阻力。傅汝德在试验池内所作的平板摩擦阻力试验和他的换算到实船上的方法，曾长期成为决定船的运动阻力的主要资料。

1880 年出版了 Д. H. 門捷列也夫的專論“流体阻力与航空”，据俄罗斯航空之父 H. E. 儒可夫斯基說，这篇專論“可以作为学习造船学、航空学和彈道学的主要指南”。在这篇著作内，Д. H. 門捷列也夫对于当时所累积的一切有关流体阻力問題的試驗和理論的材料作了詳尽的分析。他不仅从本質上并且还用方法論的观点給牛顿的阻力理論以严厉的科学的批評。門捷列也夫以这个理論为例，极端令人信服地証明：那些“还没有精确地把握事实”就作出来的空想結論是枉然无用的。門捷列也夫以他一貫的認真态度指出了流体阻力科学发展的正确方向。正是按他所指示的方向，这门科学一直发展着。

門捷列也夫是 1892 年在彼得堡建立的第一个俄国船模試驗池的創始人。这个試驗池在俄罗斯造船业上起了极重大的作用；几乎所有俄国海船都是根据这个試驗池所制定或审定的船型綫图建造的。这个試驗池的第一个主持人是俄国船舶科学奠基者——H. П. 布勃諾夫和 A. H. 克雷洛夫。海軍上將 C. O. 馬卡洛夫曾在这个試驗池中作过破冰船的阻力試驗。

在十九世紀和二十世紀之交，出現了儒可夫斯基和米契尔有关兴波阻力理論的著作，这些著作成为船舶兴波阻力近代理論的

基礎。在儒可夫斯基的著作內解決了淺水中最小興波阻力的船型問題。在同一時期出版了另一位俄羅斯人 B. H. 卡勒貝托夫的著作，其中有他自己對於內河船舶阻力的公式。

尤其在偉大的十月革命以後，蘇聯的流體阻力科學得到了很大的發展。由於 Л. Г. 洛強斯基、К. К. 費加也夫斯基和列寧格勒船模試驗池工作人員的集體研究，摩擦理論在決定船的运动阻力方面獲得了實際的應用。Л. Н. 斯列金斯基、Н. Е. 柯欽、М. В. 克爾賓西和謝道夫發展了儒可夫斯基和米契爾的興波阻力理論，並且創造出滑行的理論。Г. Е. 巴甫連柯擬制出根據已知船型綫圖計算船舶興波阻力的方法，他還解決了深水內最小興波阻力的船型問題。

蘇聯科學家研究的結果使造船技術得以提到更高的水平，保證了船舶航行速度的提高。

在造船技術向尽可能往減小运动阻力的方向發展的同時，還研究了具有最大效率的推進器型式。

按時間來說，推進器最早的型式是槳，它在公元前几千年就已開始應用了。隨着航海業的發展，人們開始採用蓬帆來輔助槳的使用，使船的尺度和載貨量能夠增大。

按發明的先後來說，在槳以後明輪要算第二位。大家知道，歷史上曾提到過採用明輪的事情，遠在公元前兩三百年就有了畜力帶動的明輪。在蒸汽機發明以後明輪才得到廣泛的應用。俄羅斯第一艘明輪船“伊利莎白”(Елизавета) 號建於 1815 年用來溝通彼得堡和克琅施塔特之間的交通。

對於遠洋航行，帆船上裝明輪最初是當作輔助推進器來用的。1819 年備有大量蓬帆并具有輔助蒸汽機的明輪船初次橫渡大西洋，到了 1837 年已經能不用蓬帆就完成這樣的航行了。

最初造的明輪是把槳板固定地裝在輪的周圍的。為了避免槳

板进入水时发生冲击,明輪的直径必須作得很大,且須采用特別低速的蒸汽机。在十九世紀二十年代,裝有活动式槳板的明輪发明后,明輪的直径大为减小,这样就可以采用較高速的蒸汽机了。

必須指出,俄国发明家 И. И. 庫禮賓于 1782 年和 1804 年建造过非常巧妙的“水行机”,它以帶槳板的舷旁明輪作为推进器。槳板自由地悬挂在鉸鏈上,因此也是活动的。

明輪对于海船來說是一种很不完善的推进器。明輪的浸水深度随船的吃水而改变,这对蒸汽机的工作和航向稳定都产生不良的影响;船舶搖摆和波浪打击常使槳板损坏。但是在內河方面,直到現在明輪还十分成功地使用着,尤其是在吃水較淺的拖輪上。苏联內河造船业的实践提出了在經濟价值上无可倫比的一些明輪的标准構造形式。

十九世紀中叶,螺旋槳开始在海船上代替了明輪,螺旋槳与其他推进器相較,具有構造簡單、牢固的特性,同时經濟价值也較高。裝置明輪的远洋輪船于 1874 年完成了最后的一次航行。

彼得堡科学院院士 Л. 柏努利在 1752 年所拟定的螺旋槳設計是世界上最早的一个。柏努利的螺旋槳是双綫螺旋的推进器,发明者最初建議將螺旋槳安裝在排水推进器的管内作为水泵用,以后才裝在船尾。

真正实际采用螺旋槳作为推进器应当算是 1836 年开始的;那时相当成功地把螺旋槳裝在蒸汽机船上了。1848 年造船工程师 H. A. 阿莫索夫制造了俄国第一艘裝有螺旋槳的战艦“阿基米德”号,这艘战艦裝有三百馬力的机器。

推进器制造技术的发展要求人們对有关推进器作用的流体力学作更周詳的研究。

还在 1778 年,Л. 欧拉就在“关于建造与运用船舶的全面推論”的專論內提出了槳的理論,这个理論曾被以后的許多作者用来研

究船舶推进器的作用。例如在 C. A. 布勒且克 (1860 年) 和 M. M. 奧庫涅夫 (1870 年) 有关推进器的著作中都曾經用过这个理論。

蘭金 (1865 年) 認為推进器的推力是所排出流体的反作用力, 他得出了反动式推进器效率的公式。蘭金的不够严格的見解被儒可夫斯基在两篇論文“論流入与流出的流体的反作用力” (1882 年及 1886 年) 中加以发展和严格地証明。这两篇論文的出現真正奠定了理想推进器近代理論的科学基础。理想推进器的理論在儒可夫斯基自己的著作以及他的学生 B. II. 維特契金及 Г. X. 薩賓宁的著作中得到了更进一步的发展。

理想推进器对于研究明輪的作用具有很大的意义。1931 年中央水运科学研究院 (即現在的中央海运科学研究院和中央河运科学研究院) 提出了明輪的研究工作, 进行了世界上最早的明輪模型的定序試驗。这个試驗是利用海运研究試驗所的試驗池来进行的, 并为了这个目的, 特地把这个試驗池按照巴甫連柯所建議的独创图样裝置起来。这个工作創造了設計明輪的科学方法, 并有可能来改善明輪的結構。流綫型槳板与平波器是 H. H. 卡巴欽斯基所建議的, 它們在池中的試驗得到了良好的結果。

1912 到 1918 年, 儒可夫斯基在四篇論文中发展了自己著名的螺旋槳旋渦理論。这些論文同他的学生們的著作 (主要是 B. II. 維特契金的), 奠定了螺旋槳的近代理論的基础。这个理論是偉大的苏联科学家儒可夫斯基和 C. A. 恰普雷金所創造和詳細制定的举力理論及机翼理論的輝煌的应用和发展。

儒可夫斯基学派更进一步改善和发展了螺旋槳理論, 使造船学和航空学获得了許多可貴的成績。苏联科学家們根据这个理論創造了极完善的螺旋槳型式, 研究出了計算螺旋槳的新方法和提高推进器效率的裝置。导流管即为其中最有效的裝置之一, 这种导流管是 1927 年斯傑奇金教授所建議的 (用于飞机螺旋槳), 并为

列宁格勒試驗池、中央海运科学研究院及中央河运科学研究院的工作人员集体研究出来,而將它裝在船上。

最近开始采用具有活动槳叶的螺旋槳,这种螺旋槳可以在各种不同的航行情况下与发动机相适应,能够采用不可逆轉的发动机,并使船的操縱非常容易。

設法利用不可逆轉的发动机并提高船舶操縱性能,是 1930 年出現垂直轉軸式翼輪推进器的原因。

現在苏联的科学家与設計人員正在研究改进推进器,創造新的結構,发展它們的生产技术。苏联船舶采用着最完善的高效率的推进器,使船的燃料消耗大大减低并使船的速度提高。这是提高海船运输能力的方法之一。

第一篇 船的运动阻力

第一章 基本概念

§ 1-1 阻力的組成部分

当部分或全部浸于水中的船舶运动时，水被船带动——即水分子得到加速度，因之，船身受到水的反作用力，这力是分布在船体外表面上的。这时垂直于表面的压力分布情形与流体静水压力分布情形不同。此外，由于流体粘性的緣故，船壳上发生切向力。

在船壳表面（图1）上取出一面积 dS 。作用于这个面积上的諸力是：法向力 $p dS$ 及切向力 τdS 。此处 p 为压力， τ 为切应力^①。

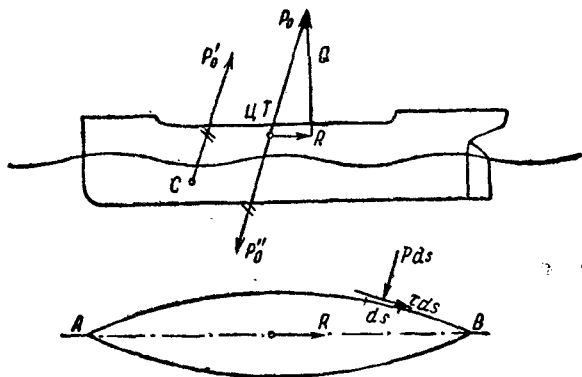


图1. 船舶运动时所受各种力的简图。

① 我們以后将采用工程单位制，即力的单位采用公斤，长度单位采用米，时间单位采用秒。因之， p 与 τ 的量以公斤/米² 計。

若船对称于它的中央縱剖面,而运动速度的方向是水平的,且与中央縱剖面平行,則上述的法向力和切向力將对称地分布于船体表面。大家知道,这样的力系將合成一个在对称平面(即船的中央縱剖面)內的合力 P'_0 。在船的重心上加一个数值为零的力系(图1),則这个合力的作用可化为一个作用于船舶重心的力 P_0 , 和一个力偶 $P'_0 P''_0$ 。使船发生艏傾或艉傾的力偶作用則被其縱向稳定力矩所平衡。

若船靜止时在船壳上水压力 P'_0 的主矢量是垂直向上的,也即在水平面中无分力,因而沒有切向力。可是当船舶运动时,常常会产生一个与船舶运动方向相反的、压力和切向力的主矢量的分力,这个主矢量的分力 R 值称为船的运动阻力,或簡称为水阻力。

在不太快的大船中(貨船,客船),主矢量力的垂直分力 Q 为船舶的重量所平衡,縱傾力偶矩 $P'_0 P''_0$ 与稳性和浮性的靜水力矩相差甚小,以至可以認為船舶运动时的位置与靜止时一样;有几种滑行船在其运动时发生很明显的縱傾,而且吃水大为减少。

为了保持船以等速 v (米/秒)运动,必須对船加上一个方向与阻力 R 相反而大小相等的力;例如繩索的拉力,这个力的功率为(以馬力計):

$$N_R = \frac{Rv}{75}, \quad (1-1)$$

此功率决定了理論上船舶运动所必需的最小功率,它称为拖曳功率或曳引功率。

現在我們来計算由于水压力的法向分力所引起的阻力值 R_p 。作用于面积 dS 上的微法向力在船舶运动方向的分力等于 $p \cos(n, x)$ ①。这些微力的和以积分来表示:

① 这里把向外法綫方向当作法綫的正方向,軸綫 x 的方向与运动方向相反。

$$R_p = - \iint_S p \cdot \cos(n, x) \cdot dS. \quad (1-2)$$

这是压力主矢量在运动方向上的投影，称为压力阻力。此积分应沿船体的全部水下表面面积 S ，即所谓船的湿面积。

现在再求作用在船壳上的切向摩擦力所引起的阻力 R_f 。作用于面积 dS 上的微切向力在船舶运动相反方向的分力等于 $\tau \cos(\tau, x) dS$ 。这些微切向力的和可用积分表示：

$$R_f = \iint_S \tau \cos(\tau, x) dS. \quad (1-3)$$

因之，船舶运动的总阻力（以公斤计）可用下式表示：

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

一般说来，摩擦阻力与压力阻力间的相互关系视物体的速度而定，并且在很大程度上视物体的形状而定。薄的平板是一种最简单的物体，当它运动时分别出现单纯的摩擦阻力或压力阻力；实际上，当平板顺它的平面方向（图 2-a）运动时，法向的水动力在平板运动方向上没有分力， $R_p = 0$ 。在这种情况下只有摩擦阻力 R_f 。当同一平板在它的法向（图 2-b）运动时，则仅发生压力阻力。在这种情形下摩擦阻力变为零，因为各处切向力在运动方向的分力等于零。

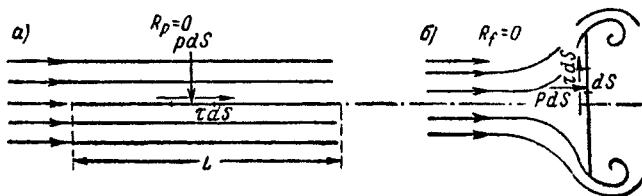


图 2. 摩擦阻力与压力阻力。

通常，细长形的物体较短粗物体具有较小的压力阻力。细长物体较短粗物体具有较大的摩擦阻力。

假如說摩擦阻力完全由流体的粘性决定, 則对于压力阻力就不能这样說。对于高速的水上船舶來說大部分压力阻力 R_p 是由所謂兴波阻力 R_w 組成的 (即船舶运动时因兴起波浪而发生的阻力)。这部分阻力在本質上不由粘性决定, 当物体在理想的 (无粘性) 重流体表面上运动时, 它仍旧发生。压力阻力其余部分的存在也象摩擦阻力 R_f 一样, 与流体的粘性有关。这种压力阻力分量是由于艏部的旋渦分离使表面压力重新分布的結果。所以这种阻力称为旋渦阻力 R_e 。有时这种阻力也称为形状阻力, 这是不精确的, 因为阻力中其余部分也随船的外形而变。

这样, 整个船的运动阻力可以用摩擦阻力 R_f 、旋渦阻力 R_e 和兴波阻力 R_w 三部分的和表示:

$$R = R_f + R_e + R_w. \quad (1-4a)$$

上述論証适用于与中央縱剖面对称、并且平行于此剖面作水平运动的船。在一般情况下, 当船与中央縱剖面成某一偏向角 α 而运动时 (α 为船舶重心的运动速度与中央縱剖面間的角度), 則压力与切向力的主矢量在垂直于重心速度的水平面內产生了分力。这个分力称为偏向力。此外, 在水平面內还产生作用于船上的力矩。偏向力与轉力矩的产生, 对于船在偏舵作用下的运动起着极为重要的作用。

§ 1-2 相似定律

a) 有关相似的概念 在流体力学的目前情况下, 仅根据理論数据还不能确定水的阻力。实际上常常必須采用專門的办法或利用已經进行过的一些实验。

为了准确的把船模試驗的結果換算到实船上去, 必須創造这样的試驗条件, 使船模附近流体的运动和实船周圍流体的运动成为动力相似, 因此必須: