

船 之 阻 力

П. А. АПУХТИН 著
Я. И. ВОЙТКУНСКИЙ
顧 懋 祥 校

中国人民解放军军事工程学院

一九五八年四月

船
之
阻
力

П. А. АПУХТИН Я. Н. ВОЙТКУНСКИЙ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДЫ
ДВИЖЕНИЮ СУДОВ
МАШГИЗ. 1953

船 之 阻 力

顧 懋 祥 校

中国人民解放军军事工程学院出版
军事工程学院印刷厂印刷

3170097 开本: 787×1092 1/25. 14 4/5印張. 298,004字
1958年4月第一版 印数: 1—362册
成本费: 1.35元

說 明

本書系根据原文及中国造船工程学会陈孔嘉等譯的中譯本“船在水中航行之阻力”重新校譯的結果。对第八章中的爱尔法校者根据爱尔近年来所发表的修正图谱对原書內容有所改动。



錄

第一章 阻力的基本概念

§ 1. 物体在流体中运动时所受到的作用力	14
§ 2. 影响阻力的因素	16
§ 3. 确定阻力的方法	20
§ 4. 流体的性質	22
§ 5. 流体的相似原理基础	26
§ 6. 动力相似准则及其实际的应用	31
§ 7. 流体动力公式的一般形式	35
§ 8. 船模試驗时同时实现动力相似条件的实际可能性	38
§ 9. 船舶运动的阻力的成分	39
§ 10. 各个阻力成分的作用	43

第二章 摩擦阻力

§ 11. 粘性液体流过物体的一般流动图形	47
§ 12. 界层内液体流动之特点	51
§ 13. 界层的积分关系式	57
§ 14. 將积分关系式应用于薄板的片流界层	64
§ 15. 对湍流流过薄板的研究	69
§ 16. 片流段的长度对于薄板摩擦阻力的影响	75
§ 17. 物体表面的曲率对于摩擦阻力的影响	77
§ 18. 物体表面的粗糙性对于阻力的影响	81
§ 19. 船壳粗糙性对于船体阻力的影响的計算	89
§ 20. 摩擦阻力的計算	93

第三章 形狀阻力

§ 21. 形狀阻力产生之原因及其特性	96
§ 22. 形狀阻力的近似計算法	107

第四章 兴波阻力

§ 23. 船舶运动时的兴波图形	112
§ 24. 兴波阻力的特点	116
§ 25. 几何相似船舶間兴波阻力的关系	120
§ 26. 深水运动的兴波阻力理論基础	121
§ 27. 解速势的方法	125
§ 28. 兴波阻力的計算公式	129
§ 29. 兴波阻力理論的应用	133
§ 30. 关于船舶运动中的兴波、压力分布及船舶状态变化的研究	142

第五章 用船模試驗法和实船試驗法測定船之阻力

§ 31. 船模試驗池	148
§ 32. 测量仪器和船模一起运动的船模試驗池	149
§ 33. 重力式船模試驗池	155
§ 34. 造波装置和消波装置	159
§ 35. 制造船模	160
§ 36. 在試驗池中試驗船模的方法	162
§ 37. 船模試驗結果換算到实船的方法	166
§ 38. 有关风筒和水槽的一般知識	173
§ 39. 实船的拖曳試驗	176

第六章 附加阻力

§ 40. 突出部件的阻力	183
§ 41. 水面以上部份船体和上层建筑物的空气阻力	188
§ 42. 海浪的附加阻力	192

第七章 船在有限水道中航行时之阻力

§ 43. 流的限制性对位于循环試驗筒中的物体的阻力的影响	194
-------------------------------	-----

§ 44. 船在淺水中的运动	196
§ 45. 船在运河中的运动	201
§ 46. 淺水中航行阻力的理論研究方法, 及其实际运用的結果	207
§ 47. 运河中航行阻力的理論研究	214

第八章 决定船之阻力的近似方法

§ 48. 海軍部系数法	222
§ 49. 巴布米尔法	224
§ 50. 爱尔法	226
§ 51. 杜阿也尔——基尔斯氏法	232
§ 52. 卡巴欽斯基法	236
§ 53. 确定淺水对阻力影响的近似方法	238
§ 54. 确定航海式快艇的有效功率的近似方法 (H.C 窩洛金法)	245

第九章 內河船的阻力

§ 55. 駁船与內河船阻力的近似計算法	248
§ 56. 在計算內河船的阻力时, 如何計算流速和河床傾斜的影响	250
§ 57. 駁队和木筏的阻力	253

第十章 船舶主要尺度和型綫对阻力的影响

§ 58. 基本概念	263
§ 59. 船舶分类以及影响选择型綫图的諸因素	266
§ 60. 排水量对阻力的影响	270
§ 61. 船長对阻力的影响	273
§ 62. 平行中体对阻力的影响	275
§ 63. $L: B$ 对阻力的影响	277
§ 64. $B: T$ 对阻力的影响	278
§ 65. 方形系数对阻力的影响	281
§ 66. 相对長度 ψ 对阻力的影响	282

§ 67. 稜形系数 φ 和縱向浮心位置(UB)对阻力的影响	283
§ 68. 縱向剖面形狀对阻力的影响	288
§ 69. 橫剖面形狀对阻力的影响	290
§ 70. 球形艏	291
§ 71. 馬尤船型	293
§ 72. 航行在狹限水道中的船舶的型綫的特点	294

第十一章 滑行状态的运动

§ 73. 滑行状态的特性	298
§ 74. 滑行表面的流体动力性征	301
§ 75. 滑行的基本理論	304
§ 76. 有限翼展与流体靜支力对于滑行平板特性的影响	313
§ 77. 滑行平板的实驗結果	316
§ 78. 滑行表面的流体动力特性	321
§ 79. 快艇的外型形狀	325
§ 80. 滑行艇的阻力計算	328
§ 81. 水翼艇的运动	332

第十二章 船在非定常运动及正横运动时的阻力

§ 82. 船在非定常运动时的阻力	335
§ 83. 船在正横运动时的阻力	340



錄

第一章 阻力的基本概念

§ 1. 物体在流体中运动时所受到的作用力·····	14
§ 2. 影响阻力的因素·····	16
§ 3. 确定阻力的方法·····	20
§ 4. 流体的性質·····	22
§ 5. 流体的相似原理基础·····	26
§ 6. 动力相似准则及其实际的应用·····	31
§ 7. 流体动力公式的一般形式·····	35
§ 8. 船模試驗时同时实现动力相似条件的实际可能性·····	38
§ 9. 船舶运动的阻力的成分·····	39
§ 10. 各个阻力成分的作用·····	43

第二章 摩擦阻力

§ 11. 粘性液体流过物体的一般流动图形·····	47
§ 12. 界层内液体流动之特点·····	51
§ 13. 界层的积分关系式·····	57
§ 14. 將积分关系式应用于薄板的片流界层·····	64
§ 15. 对湍流流过薄板的研究·····	69
§ 16. 片流段的长度对于薄板摩擦阻力的影响·····	75
§ 17. 物体表面的曲率对于摩擦阻力的影响·····	77
§ 18. 物体表面的粗糙性对于阻力的影响·····	81
§ 19. 船壳粗糙性对于船体阻力的影响的計算·····	89
§ 20. 摩擦阻力的計算·····	93

第三章 形狀阻力

- § 21. 形狀阻力产生之原因及其特性..... 96
- § 22. 形狀阻力的近似計算法..... 107

第四章 兴波阻力

- § 23. 船舶运动时的兴波图形..... 112
- § 24. 兴波阻力的特点..... 116
- § 25. 几何相似船舶間兴波阻力的关系..... 120
- § 26. 深水运动的兴波阻力理論基础..... 121
- § 27. 解速势的方法..... 125
- § 28. 兴波阻力的計算公式..... 129
- § 29. 兴波阻力理論的应用..... 133
- § 30. 关于船舶运动中的兴波、压力分布及船舶状态变化的研究..... 142

第五章 用船模試驗法和实船試驗法測定船之阻力

- § 31. 船模試驗池..... 148
- § 32. 測量仪器和船模一起运动的船模試驗池..... 149
- § 33. 重力式船模試驗池..... 155
- § 34. 造波裝置和消波裝置..... 159
- § 35. 制造船模..... 160
- § 36. 在試驗池中試驗船模的方法..... 162
- § 37. 船模試驗結果換算到实船的方法..... 166
- § 38. 有关风筒和水槽的一般知識..... 173
- § 39. 实船的拖曳試驗..... 176

第六章 附加阻力

- § 40. 突出部件的阻力..... 183
- § 41. 水面以上部份船体和上层建筑物的空气阻力..... 188
- § 42. 海浪的附加阻力..... 192

第七章 船在有限水道中航行时之阻力

- § 43. 流的限制性对位于循环試驗筒中的物体的阻力的影响..... 194

§ 44. 船在淺水中的运动	196
§ 45. 船在运河中的运动	201
§ 46. 淺水中航行阻力的理論研究方法, 及其实际运用的結果	207
§ 47. 运河中航行阻力的理論研究	214

第八章 决定船之阻力的近似方法

§ 48. 海軍部系数法	222
§ 49. 巴布米尔法	224
§ 50. 爱尔法	226
§ 51. 杜阿也尔——基尔斯氏法	232
§ 52. 卡巴欽斯基法	236
§ 53. 确定淺水对阻力影响的近似方法	238
§ 54. 确定航海式快艇的有效功率的近似方法 (H.C 窩洛金法)	245

第九章 內河船的阻力

§ 55. 駁船与內河船阻力的近似計算法	248
§ 56. 在計算內河船的阻力时, 如何計算流速和河床傾斜的影响	250
§ 57. 駁队和木筏的阻力	253

第十章 船舶主要尺度和型綫对阻力的影响

§ 58. 基本概念	263
§ 59. 船舶分类以及影响選擇型綫图的諸因素	266
§ 60. 排水量对阻力的影响	270
§ 61. 船長对阻力的影响	273
§ 62. 平行中体对阻力的影响	275
§ 63. $L:B$ 对阻力的影响	277
§ 64. $B:T$ 对阻力的影响	278
§ 65. 方形系数对阻力的影响	281
§ 66. 相对長度 ψ 对阻力的影响	282

§ 67. 稜形系数 φ 和縱向浮心位置(ЦВ)对阻力的影响	283
§ 68. 縱向剖面形狀对阻力的影响	288
§ 69. 橫剖面形狀对阻力的影响	290
§ 70. 球形艏	291
§ 71. 馬尤船型	293
§ 72. 航行在狹限水道中的船舶的型綫的特点	294

第十一章 滑行状态的运动

§ 73. 滑行状态的特性	298
§ 74. 滑行表面的流体动力性征	301
§ 75. 滑行的基本理論	304
§ 76. 有限翼展与流体靜支力对于滑行平板特性的影响	313
§ 77. 滑行平板的實驗結果	316
§ 78. 滑行表面的流体动力特性	321
§ 79. 快艇的外型形狀	325
§ 80. 滑行艇的阻力計算	328
§ 81. 水翼艇的运动	332

第十二章 船在非定常运动及正横运动时的阻力

§ 82. 船在非定常运动时的阻力	335
§ 83. 船在正横运动时的阻力	340

前 言

实现着建设将来共产主义社会计划的、并且为苏联共产党第十九次代表大会的决议所鼓舞着的苏联人民正在为着社会主义祖国的福利而忘我的劳动着。人们正在以空前的速度向前发展着我国的国民经济，建设着巨大的电力站、新的水道与内海。

在造船工作者面前，如同在其他工业部门的工作者面前一样，生活提出了日新月异的要求。培养新的日益增多的专家队伍是一个经常而迫切的任务。

与此同时，就需要编写有价值的和有高度思想水平的教科书。

到目前为止，已经出版的个别参考书，对于学习“船在水中航行的阻力”这一门课程，不能完全满足在这一科学范围内所提出的日益增长的需要。

本教科书是按照列宁格勒造船学院的“船在水中航行的阻力”的教学大纲而编写的。

根据这个教学大纲，作者们对自己提出这样的任务来叙述必要的内容，即用现代的理论 with 实验数据来加强有关船在水中航行的阻力等问题的学习。因此，作者们引入了边界层的理论和兴波阻力的理论。由于并非全部关于船在水中航行的阻力的问题都能用理论方法来解决，所以本书的一部分内容是根据实验资料来编写的，其中引入了充分的图谱。根据作者们的意见，这样做会促进学者对于所讨论的问题的物理意义的理解，并使本书在船舶设计中便于实际应用。

在编写本教科书时，作者们得到列宁格勒造船学院造船原理教研室的教授与讲师们的很大帮助。K.K. 费佳也夫斯基教授对

于第一、二、三、四、七等章，B. M. 拉夫連且也夫 講師对于第四、七、九等章以及 C. Д. 宋金諾夫工程師对于第十一章，都提供了許多寶貴的指示和意見。作者們謹对参与本教科書工作的教研室成員們致以謝意。

第一、三、四、七、九、十一、十二等章以及第二章中13、14和18等节是由Я. И 沃义特功斯基編写的，其余的章节是由П. А. 阿布赫金編写的。

作者們曾集体地相互校对了內容的正确性与完整性。

序

“船在水中航行的阻力”这一門課是船舶原理課程的一部分；而船舶原理則是研究有关船舶适航性（航海性）的一門科学。在这一門課程里所研究的是船舶在平移运动中流体和船体的相互作用律。

有关这些規律的知識使我們在設計船舶时能够改进船型，选择最有利的尺度以減低船在水中航行的阻力，并且从而減少船舶运行的費用或者提高在同一功率下的航速。

在船舶設計中需要解决的基本問題之一，就是如何确定能够保証給定航速的功率。

在研究水阻力时，广泛地利用了理論流体力学的成果，特别是边界层理論与波浪运动理論。

在採用現代理論流体力学的理論成果的同时，关于船在水中航行的阻力的研究也必須依靠广泛 的船模和实 船的阻力試驗研究。这种理論与实际相結合的原則是遵循着俄国偉大学者 Д. И. 門德列夫的指示的。他在1880年所出版的一本內容包含对水阻力問題的卓越分析的著作“論流体阻力与航空”中，写道：

“从理論上来理解复杂現象的真正道路，在于用长远的、但正确的方法来試驗或者測量复杂現象中的許多个別部份。在实验中一些次要的复杂情况被消除了，而在实验中所进行的測量則提供了驗證假說和在它以后的理論的基本可能性。在研究自然現象的时候，或者涉及某种純粹学識的領域，对它只有少数非应用抽象知識的追求者才感到兴趣的时候，則对于即使研究得极少的現象先構成理論，也非但无害，反而是应当的、有益的；因为，

这样就会組成学派，彼此力求証实或者駁斥过早出現的論断。这种例子在精密知識的范围中是很多的。但是当所涉及的不是一种簡單的、直接的、純粹独立的科学，而是一种涉及于活生生的、具有相当实际用途的业务（例如航海和造船的业务），而这种业务又掌握在应该具有实际和理論知識的人們的手中的时候，則理論的过早形成常会招致損害；因此，了解現代情况的人应该放棄这种做法。这是因为在实际中，容易、并且喜欢接受現成的理論（如果墨守陈規不占統治地位的話），但是採用現成理論的結果却只会得到悲慘、无謂的损失，这就只会証实理論是虛弱无用的觀念，只会証明实际、生活和思維、知識必須分道揚鑣的結論。因此，据我看来，在沒有放棄阿里斯多德式和驕傲學究式的企图把一切未知的复杂現象包括在智慧和分析以內的旧道路以前，应用任何理論于造船工业，以及一般說，介質阻力的問題上，都会遭到相同的命运”。

这个特点——与實驗的联系、与船舶設計和建造实际的联系，保証了我們在水阻力研究方面的有效发展，并且創造了发展理論計算方法的基础。这些理論計算方法特別在最近几年內在我国有显著的进展。

許多学者很早就开始从事于研究物体在流体中运动的阻力問題。

大家知道，里昂諾得、达芳奇在十五世紀末和十六世紀初就曾經研究过物体在液体和空气中的运动，并且肯定了在运动中有阻力存在。但是，他的著作并未被当代人們所知道。

在此以后很久的时期內，阻力的實驗研究基本上是用两种方法来进行的：研究物体在流体中的自由降落和研究物体的摆动，例如摆錘的摆动。在研究了摆錘的摆动以后，伽里略确定了阻力与速度的一次方成比例的規律。

第一个企图創立物体在液体中运动的阻力理論的人是依薩克牛頓。牛頓在其1886年初版的著作“自然哲學的数学原理”中，企图

用把总阻力分为分阻力的方法来求得物体在流体中运动的总阻力。牛頓所提出的划分阻力的原理，可从下列叙述中理解：“被試驗的球体在液体中的阻力，一部分是由于附着现象，一部分是由于摩擦，而另一部分是由于密度。由于液体密度所产生的那一部分阻力，正如向我们所指出的，是与速度的平方成比例，由液体附着现象而产生的第二部分阻力是个常量……”（И.牛頓，自然哲学的数学原理，A.H.克雷洛夫院士译）。

定义第三种成分为液体的摩擦力，牛頓提出了摩擦力与流体层间的相对滑移速度成比例的假说。这个假说称为牛頓假说，到现在在研究粘性流体的片流运动中也被广泛地运用着。

依赖于附着现象和摩擦的阻力成份，牛頓认为不大，并且假定阻力主要是由流体质点冲击物体的前方而引起的，依这一部份阻力的计算公式，平板阻力应与流体的密度、速度的平方、表面相对于流向的倾斜角的正弦的平方以及平板的面积成比例。以后，这个公式曾被学者们所广泛采用，而且附有一系修正系数的这个公式直到现在还作为一个流体动力的普遍公式而得到应用。

现在已经确定流体所作用于平板上的流体动力总反力，与平板相对于流所成的倾斜角的正弦的一次方成比例。

牛頓用摆锤的摇摆和物体的墜落实验验证了自己的理论结论。应该指出，当牛頓推导他的阻力理论公式时，他所采用的基于考察流体个别质点冲击物前方而得出的阻力产生方案，基本上是不正确的；同样错误的是他的关于摩擦力很小的假设。因此，牛頓所创造的并为他的崇高威信所支持的阻力理论，逐渐地失去了它本身的进步作用并开始阻碍人们对于伴随物体在液体中运动而产生的现象的正确理解。

船在水中航行的阻力这一门科学的创始人是俄国科学院院士里昂诺得、欧拉。

Л.欧拉是个非常多方面的学者，长期住在彼得堡；他对于俄国的科学的发展和巩固以及加强当时年青的俄国科学院贡献了很

大的力量。欧拉的工作是創立理論流体力学的科学。他在1749年发表了“船的科学”的著作。1778年他用俄語出版的船舶原理“船舶建造与操縱的全面研究”也成为后来許多論著的基础。在这本书的第二部份，欧拉給阻力的概念下了一个准确的定义“物体一开始运动，則……它將还受到一个与运动方向完全相反的力，称为水阻力”。

在同一本书里，他在阻力依船速平方关系而变的基础上給出了計算船体阻力的公式，同时指出船的阻力与船的長寬有关并且第一个指出船尾的形狀对阻力有影响的事实。这与牛頓所提出的假說相比較已經向前进了很大一步，根据后者，阻力几乎全部是由水質点冲击物体前方而得来的。

第一次用試驗測定各种形狀的物体 在水中运动的阻力是在1775—1778年做的。达蘭貝尔，康多尔斯与蒲寿指出了由牛頓理論而導出的阻力公式的不正确性，但是在这些試驗結果中也还没有說明摩擦阻力的作用。

只有在十八世紀末，由于庫倫用旋轉圓盤与圓柱体在流体中試驗的結果，才确定了流体中摩擦阻力是一个相当大数量的事实。

十八世紀末，杜布阿在研究物体在流体中的运动过程中发现，物体在靜止流体中运动的阻力，較之物体不动而流体以同速流过物体的阻力为小。这个現象，称为“杜布阿佯謬”，在一百多年中未能加以解釋，仅至二十世紀初才由空气动力学的首創人，H. E. 儒可夫斯基教授明确了它的原因。他指出了在兩种情况下流体边界并不对应的事实。在杜布阿的試驗中証實了欧拉关于物体尾部对于运动阻力有作用的预言，这时确定了現象的實質是尾部的压力較首部为低，因此产生了作为作用在船的首尾部的压力的差額的阻力。

由庫倫試驗所指出的关于摩擦阻力在物体平移运动之阻力总平衡中占重大作用的事实，在1791—1798年由蒲福所作的物体和