

# 兴波阻力理论及 其在船型设计中的应用

程天柱 石仲堃 编著



华中工学院出版社

# 兴波阻力理论 及其在船型设计中的应用

程天柱 编著  
石仲坚



华中科技大学出版社



# 兴波阻力理论及其在船型设计中的应用

程天柱 编 著  
石仲堃

责任编辑 叶见欣

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所发行

华中工学院出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 12.625 插页1张 字数: 283,000

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印数: 1-1000

ISBN 7-5609-0029-1/U·1

统一书号: 15256-076 定价: 2.10 元

## 内 容 简 介

全书共分六章。第一章叙述了有关数学、流体力学的基本知识；第二、三章叙述了兴波阻力的基本理论；第四、五、六章属于应用部分，各章中都按不同类型介绍了各种船型的设计或改进的方法。

本书内容由浅入深，着重基本原理和计算方法的讲述，以实用为主，可供造船科技工作者和大学生、研究生参考使用。

0207.56



## 前 言

最近二十余年来船舶兴波理论有了极大的发展，现在，已大力开展将其实际应用于船型设计的研究工作。本书是作为造船科技工作者和造船专业的大学生、研究生学习这门学科的导引而编写的。内容着重基本原理和计算方法的讲述，以实用为主。

全书共分六章。虽然假定读者已具有一定的有关船舶原理和大学工科的数学、流体力学的基本知识，但在第一章中仍然叙述了有关这三个方面的若干重点内容，以作为学习其他各章的预备知识。本书对基本公式的推导也尽量给予必要的提示，以便利自学。

第二、三两章属于基本理论部分。第二章包括线性兴波阻力理论和计算方法以及阻力性能分析；第三章包括船波的基本概念和波形分析法的基本原理，有重点地讲述了纵切法和矩阵法两种波形测试技术与分析方法。两章的基本内容着重数学公式与物理现象的联系，在选材上由浅入深，扼要提供了学习以后各章的必要基础知识。

第四、五、六章属于应用部分。各章中都按不同类型介绍了多种船型设计或改进的方法。所以这样做，一方面是这些方法可以互为补充，而更主要的方面是它们各有其优缺点，其适用范围、成效大小都还难作定论。看来，在近期若干年内对这些方法还不会有较一致的评价。多介绍几种方法，便于开拓思路以收集思广益之效，同时也便于结合应用，进一步讲述兴波理论的一些新的概念（如Neumann-Kelvin问题、低速理论、非线性波理论和水表面冲击波设想等）。

本书在编写过程中承蒙刘应中教授审稿并提出许多宝贵的意见，特此致谢。

书中错误和不妥之处在所难免，希望读者提出宝贵意见，以便今后修改。

编 者

一九八五年十二月

# 目 录

|                                            |        |
|--------------------------------------------|--------|
| <b>第一章 绪论</b> .....                        | ( 1 )  |
| § 1.1 研究兴波阻力理论的意义 .....                    | ( 1 )  |
| 1.1.1 目前沿用的船型设计法 .....                     | ( 1 )  |
| 1.1.2 兴波阻力理论的实用意义 .....                    | ( 4 )  |
| § 1.2 阻力分类方法及兴波阻力的定义 .....                 | ( 9 )  |
| 1.2.1 按量纲分析法划分阻力 .....                     | ( 9 )  |
| 1.2.2 按向量分析法划分阻力 .....                     | ( 10 ) |
| 1.2.3 按现象分析法划分阻力 .....                     | ( 14 ) |
| 1.2.4 阻力成分间的干扰 .....                       | ( 14 ) |
| § 1.3 若干数学预备知识 .....                       | ( 16 ) |
| 1.3.1 奇点 .....                             | ( 17 ) |
| 1.3.2 留数 .....                             | ( 18 ) |
| 1.3.3 约当 (Jordan) 引理.....                  | ( 21 ) |
| 1.3.4 用留数求积分的例子 .....                      | ( 22 ) |
| § 1.4 水动力学基础知识 .....                       | ( 27 ) |
| 1.4.1 运动方程及连续方程 .....                      | ( 27 ) |
| 1.4.2 势流和伯努利方程 .....                       | ( 31 ) |
| 1.4.3 奇点的速度势 .....                         | ( 33 ) |
| 1.4.4 点源间的相互作用力——拉盖莱 (Lagally)<br>定理 ..... | ( 37 ) |
| <b>第二章 线性兴波阻力理论</b> .....                  | ( 41 ) |
| § 2.1 基本假设和边界条件 .....                      | ( 41 ) |
| 2.1.1 基本假设 .....                           | ( 41 ) |
| 2.1.2 边界条件 .....                           | ( 43 ) |
| 2.1.3 线性化自由面边界条件 .....                     | ( 45 ) |

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| § 2.2 奇点在自由面下作稳定运动的速度势····· | ( 47 ) |
| 2.2.1 奇点速度势·····            | ( 48 ) |
| 2.2.2 格林 (Green) 函数表达式····· | ( 53 ) |
| 2.2.3 奇点系的速度势·····          | ( 65 ) |
| § 2.3 船在稳定运动中的兴波阻力·····     | ( 66 ) |
| 2.3.1 薄船理论·····             | ( 72 ) |
| 2.3.2 扁船理论·····             | ( 76 ) |
| 2.3.3 细长船理论·····            | ( 81 ) |
| § 2.4 兴波阻力的数值计算方法·····      | ( 94 ) |
| 2.4.1 连续源分布算法·····          | ( 94 ) |
| 2.4.2 离散点源分布算法·····         | ( 99 ) |
| § 2.5 理论计算值与实验结果的比较·····    | (101)  |
| § 2.6 兴波阻力特性分析·····         | (105)  |
| 第三章 船波、波形分析及波形测量·····       | (113)  |
| § 3.1 船波·····               | (113)  |
| 3.1.1 凯尔文 (Kelvin) 波系·····  | (113)  |
| 3.1.2 船波的某些特性·····          | (128)  |
| § 3.2 波形分析·····             | (155)  |
| 3.2.1 波形分析的理论基础·····        | (156)  |
| 3.2.2 波形分析法的基本原理·····       | (165)  |
| § 3.3 波形测量技术与波形阻力的计算方法····· | (181)  |
| 3.3.1 纵切法·····              | (185)  |
| 3.3.2 矩阵法·····              | (196)  |
| 3.3.3 测试技术上存在的问题·····       | (200)  |
| 第四章 兴波阻力理论在船型设计中的应用·····    | (208)  |
| § 4.1 最佳奇点分布·····           | (210)  |
| 4.1.1 积分方程式解法·····          | (213)  |
| 4.1.2 多项式解法·····            | (222)  |
| § 4.2 追踪流线法·····            | (230)  |

|       |                           |       |
|-------|---------------------------|-------|
| § 4.3 | 影响线法 .....                | (237) |
| § 4.4 | 统计分析法 .....               | (242) |
| § 4.5 | 无波分布法 .....               | (250) |
| § 4.6 | 固定后体使总阻力极小法 .....         | (256) |
| § 4.7 | 格鲁顿 (Gulloton) 法 .....    | (261) |
| § 4.8 | 简化二阶理论法 .....             | (276) |
| 第五章   | 用波形分析改进船型 .....           | (284) |
| § 5.1 | 直接法 .....                 | (284) |
| 5.1.1 | 马场法 .....                 | (284) |
| 5.1.2 | 松井法 .....                 | (290) |
| § 5.2 | 间接法 .....                 | (298) |
| 5.2.1 | 舢舨剖面源分布法 .....            | (299) |
| 5.2.2 | 波多野法 .....                | (305) |
| § 5.3 | 小型系列法 .....               | (318) |
| § 5.4 | 球鼻首船型 .....               | (332) |
| 5.4.1 | 圆球型 .....                 | (333) |
| 5.4.2 | 飞艇型 .....                 | (337) |
| 5.4.3 | 波形分析确定法 .....             | (339) |
| 第六章   | 中、低速船型的设计问题 .....         | (342) |
| § 6.1 | 船体表面条件严密化——纽曼-凯尔文问题 ..... | (343) |
| § 6.2 | 低速兴波理论 .....              | (348) |
| § 6.3 | 严密满足船体表面条件的低速兴波理论 .....   | (353) |
| § 6.4 | 非线性兴波理论 .....             | (358) |
| § 6.5 | 水表面冲击波和经验设计法 .....        | (378) |

# 第一章 绪 论

## § 1.1 研究兴波阻力理论的意义

自从佛鲁德 (W. Froude) 1871年建立84.73米的船模拖曳水池以来, 船模试验水池就成为进行船舶性能研究的重要设施, 船舶试验技术从此得到了极大的发展。

兴波阻力的理论研究开始较早, 在1898年密 切 尔 (J. H. Michell) 就导出了薄船在平静无粘水中运动的兴波阻力分析表达式。然而, 其后约半个世纪中除极少数数学家和力学家从事研究外, 兴波阻力理论研究还不为广大造船科技工作者所重视。直到本世纪五十年代末, 局势才大为改观。目前, 兴波阻力理论正在发展成为指导船型试验研究与设计的重要理论之一。这是由于兴波阻力理论的发展缩小了理论计算与实验结果的差距, 同时也由于电子计算机的发展和应用使复杂计算成为可能, 而更重要的还是由于现代化生产的发展和需要。

### 1.1.1 目前沿用的船型设计法

所谓船型它包括两个方面的内容: 一是表征船体形状的特征参数即尺度和系数; 二是船体形状即线型, 它又包括沿船长方向变化的横剖面面积曲线形状、肋骨线型和首尾端轮廓线形状。理论分析和实验表明, 在固定的船体参数条件下, 船型的改变对兴波阻力的影响很显著, 其中影响最大的是横剖面面积曲线形状, 其次是肋骨线型。因此可以说, 船型设计的主要着眼点之一就在于寻求使兴波阻力最小的船型。目前一直沿用的船型设计和预估阻力的方法主要有三种:

## 1. 与母型船对比法

这种方法就是选择一艘与所要设计的船相类似的已知其性能的优秀船作为母型，然后在母型的基础上稍加修改变形，从而完成新的设计，并根据母型预估新船的性能。这种方法的优点是简便易行，缺点是一切依赖于设计人员的经验和直觉判断，对如何提高新设计船的性能没有科学根据。即使通过模型试验证明新船的阻力性能比母型船优越，但也难以判断它是由于尺度系数改变的影响还是由于船型上的改进，至于是否是由于母型船的船型性能太差的结果就更难说了。现举一个例子加以说明，十余年前，日本一家公司曾设计了一艘号称划时代船型的“山城丸”，宣称比它的母型船“山梨丸”阻力降低了25%。英国著名船型学家莫尔 (D.I. Moor) 把它与同类船型进行了分析比较，结果认为，在这25%中不小于18%是由于改变尺度和系数所带来的好处，只有7%是由于线型的改善所致。即使这7%也是由于母型船“山梨丸”的性能较差(其阻力比欧洲同类型船舶的平均水平高3%，比最优水平的高11%)所造成的。这就说明，这种对比方法虽然简便易行但不能得出真正优秀的船型。

## 2. 系列图谱法

该方法就是根据各家船池所公布的同类型船的阻力性能系列图谱来设计船型和估算阻力。它是目前船型设计和预估阻力的主要方法。船型系列图谱有很多，对运输船船型来说，著名的有：美国的泰勒 (Taylor) 和陶德 (Todd) 系列60，英国的BSRA，荷兰的NSMB，瑞典的SSPA和日本的SR45。以其中最具有代表性的泰勒图谱为例，它是系列地变化排水量长度比( $\nabla/L^3$ )、棱形系数( $C_p$ )和宽度吃水比( $B/T$ )后，作出的剩余阻力( $R_R$ )相对速长比( $V/\sqrt{L}$ )的图表。根据图表可以预

估船型阻力，同时也能看出船型主要参数的变化对剩余阻力值的影响。其他系列，如BSRA, SSPA, SR45等增加了纵向浮心位置( $l_{CB}$ )的系列变化参数。因此，图谱中还能反映出给定设计航速下纵向浮心位置的变化对阻力值的影响。

这种方法的优点是对新设计船的参数选定和阻力估算提供较可靠的依据。缺点是仍然依赖于系列母型，它不能反映船形变化对阻力的影响。根据系列图谱法设计出来的船舶在性能上最多只能接近系列母型的水平，而不可能超过母型。当然，系列母型都是从当时正在营运的优秀船型中选定的，但也无法判断它就是最优秀的船型，更不能说它是各种航速都适应的最优秀的船型。同一类型的船舶出现了上述多种系列，也反映了这个问题。同时，目前仅有极少数类型的船舶有可供利用的系列图谱。按照传统的系列试验方法要作出一种船型的阻力性能图谱，需要花费大量的人力物力和时间。

### 3. 回归方程法

这种方法就是通过对大量的船模试验数据作统计分析，找出阻力与确定船型的参数之间的相关关系，并建立回归方程，以预估船型阻力。较早应用这种方法的有多思德(Doust)，海斯(Hayes)及土屋对渔船试验结果的回归分析和萨利特(Salit)建立的系列60和BSRA系列的回归方程。大致说来，这种方法的优点是所选择的参变量较多，因此，在适应船型的范围上与系列图谱法相比有较大的改善。但缺点是选定的参数毕竟是有限的，因此，仍然不能完全反映船型变化对阻力的影响，更何况统计分析所利用的试验资料也是有限的。所以，采用该方法设计的船型在阻力性能上也只能达到统计的平均水平。再则，采用回归方程法也不能明确表示船型的参数变化对兴波阻力的影响。

总之，上述三种设计方法在初步设计阶段，对船型作出概估仍然是有效和可取的。但是，具体到线型设计时，特别是要求设计出高性能的船型时，上述方法就嫌不足了。兴波阻力理论就是在这种形势要求下而发展起来的。

### 1.1.2 兴波阻力理论的实用意义

兴波阻力理论用于船型设计的实用性，表现在造船工作者可能感兴趣的下列问题：

(1) 船型（或横剖面面积曲线）的微小变化对兴波阻力究竟有多大的影响；

(2) 兴波阻力理论能不能反映船型的微小变化对兴波阻力的影响；

(3) 目前的兴波阻力理论水平对降低船体阻力能起多大作用；

(4) 兴波阻力理论对降低现代舰船船型的阻力还有多大潜力。

对上述第一个问题可以日本三菱公司长崎技术研究所1972年公布的M29、M29B两种船型为例进行说明。两船型尺度系数完全相同，其横剖面面积曲线示于图1.1，由试验得出的剩余阻力系数曲线示于图1.2。由图1.1和图1.2可知，两船的横剖面面积曲线变化很小，但两船的兴波阻力值的相对差达68%。这虽只是一个突出的例子，但可以肯定在一般情况下船

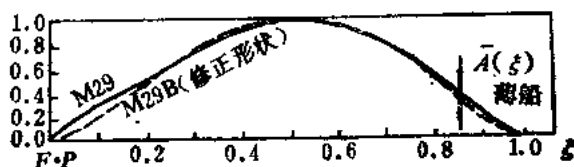


图1.1 M29与M29B的横剖面面积曲线的比较

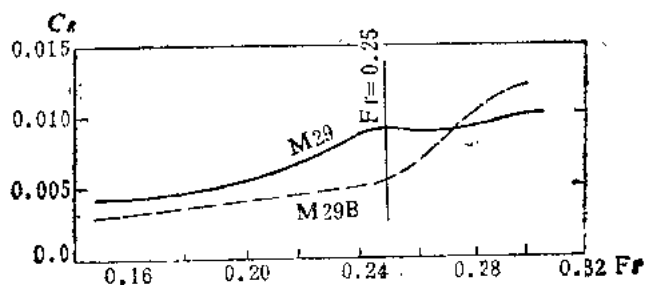


图1.2 M29与M29B拖曳试验结果

$$C_R = R_R / \frac{1}{2} \rho V^2 \nabla^{2/3}$$

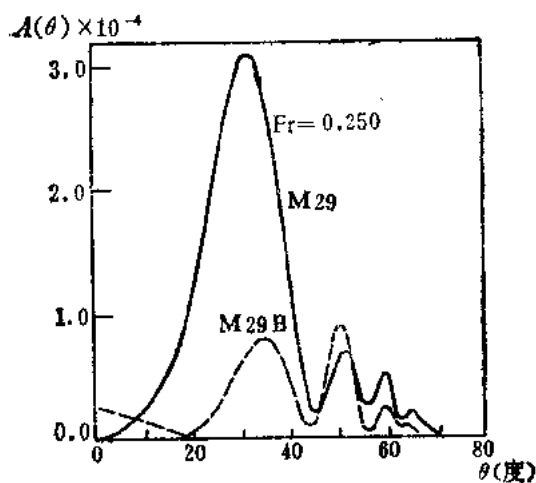


图1.3 M29与M29B的波幅谱的比较

$$A(\theta) = 2\pi \{s^2(\theta) + c^2(\theta)\} \cos^2 \theta$$

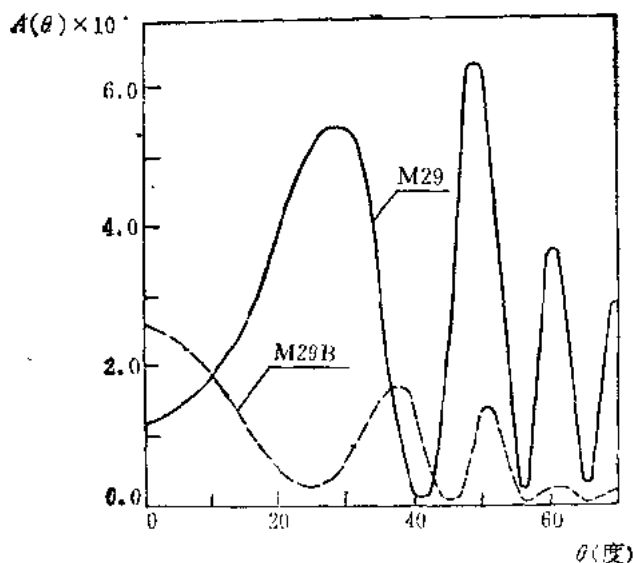


图1.4 由Michelli理论计算出的M29与M29B的波幅谱

$$A(\theta) = 2\pi(s^2(\theta) + c^2(\theta))\cos^2\theta; Fr = 0.250$$

型的微小变化对兴波阻力值会有较大的影响。对于第二个问题，可参见图1.3和1.4。前者是根据波形测量结果用波形分析得出的两船的波幅谱，后者是在同样航速时按密切尔理论计算的两船的波幅谱，试验和理论同样显示了两船波幅谱的差。所以从计算上来说，兴波阻力理论能反映船型的微小变化对兴波阻力的影响。不过，目前理论计算所得的结果在定量上还达不到与实测值相吻合的水平。因此，回答第三个问题就比较复杂，简单地说，根据有关推导，采用兴波阻力理论与水池试验相结合的办法。

法能起到改进船型的作用。例如M29B就是用这种方法对 M29 加以改进所得出的结果。再一个例子是在同一尺度系数的条件下对著名的系列 60 ( $C_B=0.6$ ) 船型用波形分析法加以改进, 结果表明, 于航速  $Fr=0.28$  时总阻力降低 20% (见图 1.5)。关于第四个问题, 由表 I 来看: 表中最后一栏列出了各类舰船满载吃水时剩余阻力与总阻力的比值  $R_R/R_T$ 。剩余阻力的主要成分是兴波阻力 ( $R_W$ )。从理论上来说, 兴波阻力可减少到趋近于零。由此可见, 降低现代舰船的兴波阻力大有潜力可挖。降低阻力意味着提高航速或降低燃料费用。提高航速自然是

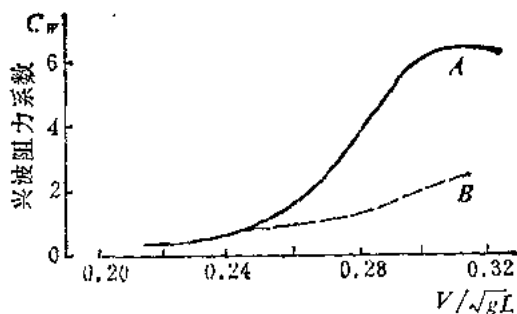


图 1.5 对系列 60 ( $C_B=0.6$ ) 的船型改进结果  
 $C_W = R_W \times 10^3 / \rho V^2 \nabla^{2/3}$ ; A—原船型的; B—改进船型的

目前船型设计所追求的主要性能指标之一。对运输船舶来说, 在当前燃料费用占整个航运费用的 40% 以上的情况下, 降低燃料费用有着更重要的意义。

表 I 各类舰船于满载时剩余阻力( $R_R$ )与总阻力( $R_T$ )的比值

| 舰 船 类 型 | $L_{BP}$ (米) | $\Delta$ (吨) | $C_B$  | $C_P$  | $L/B$ | $B/T$ | $Fr$  | $R_T \Delta$<br>牛顿/吨 | $R_R/R_T$ |
|---------|--------------|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------------|-----------|
| 油 轮     | 407.97       | 628,667      | 0.836  | 0.837  | 6.43  | 2.21  | 0.138 | 5.615                | 0.061     |
| 油 轮     | 309.98       | 241,236      | 0.822  | 0.826  | 6.73  | 2.62  | 0.140 | 6.929                | 0.092     |
| 集装箱船    | 173.3        | 27,263       | 0.624  | 0.632  | 6.42  | 2.97  | 0.233 | 26.940               | 0.220     |
| 滚 装 船   | 82           | 3,019        | 0.565  | 0.62   | 6.04  | 3.18  | 0.250 | 41.650               | 0.240     |
| 货 船     | 140          | 14,887       | 0.617  | 0.636  | 6.67  | 2.82  | 0.262 | 40.993               | 0.190     |
| 货 船     | 134.5        | 13,577       | 0.593  | 0.621  | 6.70  | 2.55  | 0.275 | 57.232               | 0.390     |
| 集装箱船    | 155          | 24,632       | 0.634  | 0.642  | 6.00  | 2.94  | 0.313 | 42.532               | 0.350     |
| 滚 装 船   | 99           | 3,800        | 0.468  | 0.53   | 5.97  | 3.93  | 0.326 | 95.844               | 0.370     |
| 驱 水 渡 轮 | 185          | 13,233       | 0.468  | 0.506  | 8.63  | 3.41  | 0.363 | 144.550              | 0.400     |
| 长江客货轮   | 65           | 1,194        | 0.613  | 0.615  | 5.20  | 5.21  | 0.280 | 63.406               | 0.436     |
| 长江客货轮   | 82.3         | 3,113        | 0.6786 | 0.6978 | 5.40  | 4.17  | 0.260 | 47.040               | 0.432     |
| 直升飞机母舰  | 193          | 16,832       | 0.506  | 0.575  | 7.46  | 3.98  | 0.354 | 150.038              | 0.490     |
| 轻型护卫舰   | 126          | 3,783        | 0.502  | 0.628  | 9.28  | 3.39  | 0.434 | 328.30               | 0.570     |
| 大型驱逐舰   | 86           | 1,194        | 0.481  | 0.617  | 8.72  | 3.46  | 0.553 | 559.972              | 0.580     |
| 巡 逻 艇   | 58.7         | 547          | 0.471  | 0.651  | 7.08  | 3.57  | 0.761 | 714.126              | 0.620     |