

2024 年《船舶阻力》复习提纲

(2024 年 10 月 16 日更新)

1. 总论

1.1 船舶快速性及其在船舶设计中的地位

(1) 船舶快速性的概念

船舶阻力的概念；船舶能达到的航速的高低的影响因素；船舶快速性的概念；船舶阻力与推进的关系及各自研究范围；

(2) 船舶阻力研究在船舶设计中的地位

快速性优劣对民船、军船的影响；船舶阻力研究的主要问题；

(3) 研究方法

船舶阻力的研究方法（试验方法、理论研究、数值模拟）；

1.2 船舶阻力的成因及分类

(1) 船舶航行中的阻力

船舶总阻力按流体种类划分（空气阻力、水阻力）；水阻力划分（静水阻力、汹涛阻力）；静水阻力划分（裸船体阻力、附体阻力）；阻力分类的框架图；

(2) 船体受力分析

按方向分类（压力、切向力）；船体受力引起的运动姿态与受力；由压力和切向力计算总阻力；

(3) 船体阻力的成因与分类

摩擦阻力的定义与成因；压阻力的成因与分类（黏压阻力、兴波阻力）；黏压阻力（漩涡阻力）的定义与成因；兴波阻力的定义与成因；各种阻力成分之间的关系框架图及表达公式；各种阻力成分与航速的量级关系；不同航速船舶的阻力成分比例；

(4) 阻力、有效功率曲线与航速及船型的关系

影响船体阻力的因素（航速、船型、外界条件）；阻力曲线的定义与含义；有效功率；有效功率曲线与阻力曲线的关系；

1.3 阻力相似定律

(1) 阻力及相关因素的量纲分析

常用速度单位的换算；

(2) 黏性阻力相似定律——雷诺定律

雷诺数的公式；黏性阻力系数的含义；黏性阻力系数与雷诺数的关系；摩擦阻力系数；雷诺定律；

(3) 兴波阻力相似定律——付如德定律

付如德数的公式；兴波阻力系数的含义；兴波阻力系数与付如德数的关系；付如德定律；船模和实船的速度相似关系；付如德比较定律；

1.4 船模阻力试验

(2) 船模阻力试验的依据

实现全相似的条件；试验只能实现部分相似的原因；试验时雷诺数不相似的处理方法；

(3) 付如德换算法——二因次法

付如德假定；总阻力的划分（摩擦阻力、剩余阻力）及相关因素；相当平板假设；付如德换算关系；剩余阻力系数；付如德法的不足之处；

2. 黏性阻力

2.1 黏性阻力的组成与船体边界层

叠模法的原理；

(1) 黏性阻力的组成

黏性阻力的组成（摩擦阻力、黏压阻力）及其产生原因；

(2) 船体边界层

船体周围的三维边界层与平板的二维边界层的差异；

2.2 平板边界层与摩擦阻力

(1) 平板边界层

边界层；边界层厚度；边界层边界；边界层厚度的影响因素；局部雷诺数；两种流动状态（层流、紊流）的定义和特征；边界层理论的重要意义；层流底层；

(2) 摩擦阻力的成因及主要特性

局部摩擦阻力系数；平均摩擦阻力系数；摩擦阻力与流态的关系；边界层内的速度分布；雷诺数对摩擦阻力的影响；摩擦阻力与平板湿面积的关系；

2.3 平板摩擦阻力系数的计算公式

（此部分的摩擦阻力系数计算公式不要求完全记住，但应知道各种公式的适用范围和使用方法）；1957ITTC 公式；相当平板假定（如何利用平板摩擦阻力计算船体摩擦阻力）；尺度效应；相当平板假设的缺陷（忽略了船体表面弯曲度和粗糙度）；

2.4 船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响

（1）船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响

船体纵向弯曲的影响；船体表面与水流的相对速度与船速的大小关系（不同位置处的关系）；船体横向弯曲的影响；形状效应；

（2）船体形状效应的修正

由于表面弯曲所增加的摩擦阻力与相当平板摩擦阻力的百分比与雷诺数的关系；形状效应修正因子；考虑形状效应修正因子的船体表面摩擦阻力的计算公式；

2.5 船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响

船体表面粗糙度的分类（普通粗糙度、局部粗糙度）；

（1）普通粗糙度

漆面粗糙度的含义及表征方式；摩擦阻力系数随雷诺数变化的三个阶段（水力光滑阶段、过渡阶段、完全粗糙阶段）；

（2）结构粗糙度

局部粗糙度对船体表面摩擦阻力影响的计算方法；三条典型结论；

（3）船体粗糙表面摩擦阻力计算的处理方法

粗糙度补贴系数；包括表面粗糙度影响的船体摩擦阻力计算公式；

（4）污底

污底概念及形成原因；污底造成船速下降的原因；真实污底与船体腐蚀的概念；

2.6 船体摩擦阻力的计算步骤

摩擦阻力的计算公式；具体计算步骤和方法；

2.7 减小摩擦阻力的方法

船体设计本身考虑；减小表面粗糙度；新型减阻技术（边界层控制、聚合物溶液降阻剂、气泡减阻、仿生学方法等）；

2.8 黏压阻力的成因及特性

（1）船体黏压阻力产生的原因

船体周围流场的流场、速度、压力分布情况（理想流体、黏性流体对比）；达朗贝尔疑题；边界层分离；分离点；旋涡；

（2）黏压阻力特性

黏压阻力与后体形状的关系；船后体的设计注意点（后体长度，后体收缩缓和）；前体形状对黏压阻力的影响；艏涡及其特性；艏涡对阻力的影响；船首底升高的球鼻艏的降阻机理；边界层内流动状态对黏压阻力的影响；

（3）降低黏压阻力的船型要求

注意船的后体形状（去流段长度要求）；避免船体曲率变化过大；前体线型适当注意；

（4）船体黏压阻力处理方法

二因次法和三因次法的原理和步骤；

3. 兴波阻力

3.1 船行波的形成和开尔文波系

（1）兴波阻力的组成

船行波和破波的概念及特征；

（2）平面进行波的特征

波形；波幅；波高；波长；周期；波速；色散关系；波能（动能、位能）；波能传播速度；船行自由波；

（3）船行波形成的原因

船体周围流场的压头曲线、压力曲线、速度分布曲线；伯努利方程；理论情况下各点处的波面升高规律；实际的船体周围船行波的水面高度情况及原因；

（4）压力点的兴波图形

凯尔文压力点兴波理论；凯尔文波系的兴波图形；压力点；两个波系（横波、散波）；尖点线；凯尔文角；凯尔文波；

3.2 船的首尾波系及其干扰

（1）船行波图形及组成

首波系与尾波系；横波系与散波系；

（2）船行波的主要特性

四种波系（船首横波、船首散波、船尾横波、船尾散波）；船波系分布范围；船首横波与船尾横波的位置；各波系之间的干扰情况；合成横波；船行波的传播速度；肩波；肩波对阻力的影响；

（3）首尾横波的干扰

兴波干扰；不利干扰；有利干扰；影响首尾横波干扰的因素；兴波长度；兴波长度与波长关系的公式；兴波干扰结果（不利干扰；有利干扰；一般干扰）；变化平行中体长度的试验结果规律图及其分析；

3.3 兴波阻力特性

（1）兴波阻力与波浪参数的关系

兴波阻力的公式（与波高、波宽的关系）；

（2）船体兴波阻力的表达式

船体兴波阻力的三个分区；确定各部分波浪的参数及其波能；整个船体兴波阻力；

（3）船体兴波阻力特性

兴波阻力系数与付汝德数的比例关系；兴波阻力与航速的比例关系；兴波阻力在不同船型中所占比例；自然兴波阻力；首尾横波干扰后的兴波阻力；波阻峰点现象及其成因；波阻谷点现象及其成因；不同船型的兴波阻力差异；

3.4 兴波阻力与船型关系及干扰预测

（1）船型对兴波阻力的影响

四条规律说明；有利船长；不利船长；

（2）P 理论预测兴波干扰

兴波长度表达式；有利干扰和不利干扰时的表达式；P 等值图谱；

（3）应用傅汝德数预测波阻峰点和谷点

预测原理；前肩波；前肩波系干扰；

3.5 确定兴波阻力的方法

（1）船模试验法

采用船模试验确定兴波阻力的方法和原理；二因次法；三因次法；

3.6 减小兴波阻力的方法

（1）减小常规船型兴波阻力的方法

选择合理的船型参数（船长、棱形系数、进流段长度）；设计良好的首尾形状；造

成有利的波系干扰；球鼻艏的减阻原理；前伸型球鼻艏的减阻原理；消波水翼的原理；压浪板；

(2) 应用不同设计概念减小兴波阻力

双体船和多体船；使船体抬出水面；船体下潜设计概念；复合设计概念

3.7 破波阻力

破波阻力的测量方法（尾流测量）；

(1) 破波阻力的成因

发生破波阻力船体周围波浪的四个发展阶段；破波阻力的形成原因；波浪破碎的方式（翻卷式、溢出式）；破波阻力的实船换算方式（依据付如德比较定律）；

(2) 破波阻力的测定

尾流测量法；主尾流区；次尾流区；次尾流区的宽度影响因素；

(3) 破波阻力的特性

五条规律特性；

4. 阻力的综合分析

4.1 阻力分类的比较与说明

(1) 基于不同观点的总阻力分类

付如德观点；力的观点；能量耗散观点；静水中船体总阻力分类表；

5. 附加阻力

附加阻力的定义；

5.1 附体阻力

附体阻力的定义；附体阻力的主要成分（摩擦阻力、黏压阻力）；各类典型附体构件（轴支架、舵龙骨、轴包套）的附体阻力成分；

(1) 确定附体阻力的方法

船舶初步设计阶段，应用已有资料或经验公式求取附体阻力的两种方法；附体系数（附体阻力百分数）的定义；计及附体后的实船有效功率计算公式；附体阻力系数的定义和计算公式；有模型换算实船的附体阻力的两种方法（附体阻力系数相等、附体系数相等）；

(2) 附体设计应注意的事项

减小附体阻力的三种设计方法(沿流线方向设置、减小湿表面积、流线型对称剖面);

5.2 空气阻力

空气阻力的计算公式; 空气阻力试验的两种方法(风洞试验、上层建筑船模倒置拖曳试验); 空气阻力系数定义和计算公式; 空气阻力百分数的含义; 已知附体阻力和空气阻力的实船有效功率计算公式;

5.3 波浪中的阻力增值

汹涛阻力的定义, 及其影响因素;

(1) 在波浪中引起阻力增加的主要原因

引起船舶阻力增加的各运动自由度及影响程度(纵摇、升沉、横摇、艏摇); 船体对波浪的绕射作用;

(2) 影响波浪中阻力增值的因素

影响因素概括(船型、波浪); 波浪对增阻的影响因素(波高、波浪诱导船体运动、波长); 方形系数对增阻的影响;

(3) 波浪中阻力增值的处理与储备功率

失速的概念; 储备功率的概念; 储备功率百分数的概念; 计及波浪增阻的实际有效功率与静水有效功率的关系式; 试航速度; 服务速度;

6. 船型对阻力的影响

船型参数选择应顾及的方面(总体布置、工艺结构、快速性、耐波性、稳性、航区和经济性);

6.1 船型对阻力影响的基本概念

(1) 船型、航速与阻力性能之间的关系

优良船型的概念; 按照傅汝德数的船舶分类(低、中、高速船); 低、中、高速船的阻力成分比例及原理;

(2) 确定影响阻力的船型参数

船型参数的分类(主尺度比、船型系数、船体形状); 主尺度比(长宽比、宽度吃水比); 船型系数(方形系数、棱形系数、船中横剖面系数、排水体积长度系数); 四个独立参数; 船体形状(横剖面面积曲线形状、满载水线面形状、首尾形状);

(3) 船型对阻力影响问题的研究方法

船模系列试验方法的原理；派生系列船模改变船型的方法（仿射变化、改变线型特征）；

6.2 船体主尺度的影响

(1) 排水量长度系数对阻力的影响

增大船长对摩擦阻力、剩余阻力、总阻力的影响（低速、高速情况）；增大排水量对摩擦阻力、剩余阻力、总阻力的影响（低速、高速情况）；

(2) 宽度吃水比的影响

B/T 对摩擦阻力、剩余阻力、总阻力的影响；

6.3 主要船型系数的影响

(1) 棱形系数的影响

棱形系数对摩擦阻力的影响；棱形系数对剩余阻力的影响（低、中、高速情况）；最近棱形系数曲线（理论最佳、实际最佳）；

(2) 船中横剖面系数的影响

C_m 对阻力的影响（不大）；中低高速船 C_m 的选取；

(3) 方形系数的影响

方形系数的主要影响的研究对象（中低速民船）；方形系数对摩擦阻力、剩余阻力的影响；临界方形系数；

6.4 横剖面面积曲线形状的影响

(1) 浮心纵向位置的影响

浮心纵向位置对摩擦阻力的影响；浮心纵向位置对剩余阻力的影响（变化引起的船型、黏压阻力、兴波阻力规律）；低、中、高速船 x_c 值的选择；最佳浮心位置曲线；

(2) 平行中体长度和位置的影响

平行中体的概念；平行中体对中低速、高速船舶阻力的影响；平行中体长度和位置随航速、方形系数的变化规律；

(3) 横剖面面积曲线两端形状的影响

三种形状（凹形、微凹形、直线形）；不同航速船舶的横剖面面积曲线两端形状（低、中、高速船）；

6.5 满载水线形状的影响

表征满载水线形状的因素（满载水线面面积、平行中段长度、首尾端形状、首部半进角）；

6.6 首尾端形状的影响

横剖面形状的形式（U 形、V 形）；球鼻艏的减阻机理（兴波、舳涡、破波阻力三方面）；

7. 阻力的近似估算方法

近似估算方法的依据（即把阻力表达为船型系数和速度的函数）；

7.1 根据船模系列试验资料估算阻力

（1）应用图谱估算阻力

泰洛法阻力估算的具体步骤；选取参数类型；湿面积系数的图谱确定方法；剩余阻力系数的图谱确定方法；如果湿面积系数实际值与估算值不同时的修正方法；

7.3 根据母型船数据估算

（1）海军系数法

前提条件（母型船与设计船的主尺度比等参数接近）；基础假设（设计船与母型船在相同 Fr 数时的海军系数相等）；海军系数的定义和表达公式；设计船的有效功率和机器功率的计算公式；

（2）引申比较定律法

新船与母型船的航速、阻力、主机功率的比值关系式；设计步骤和方法；

（3）母型船剩余阻力修正法

摩擦阻力计算方法（有关平板公式）；剩余阻力修正方法（基尔斯提出的影响系数）；基尔斯提出的影响系数（纵向棱形系数、长度排水量系数、宽度吃水比）；剩余阻力系数的修正公式；基尔斯影响系数（ K_1 、 K_2 、 K_3 ）的查表确定方法；设计新船及其母型船都与基尔斯标准船不一致时的设计新船的剩余阻力系数确定方法；

8. 船在限制航道中的阻力

航道分类（深水航道、限制航道）；限制航道的分类（浅水道、狭窄水道）；

8.1 浅水对阻力的影响

浅水对阻力的影响方面（船体周围流场、兴波情况）；

(1) 浅水对流场及黏性阻力的影响

回流速度定义；船在三种流体中的回流速度（深水理想流体、浅水理想流体、浅水实际流体）关系及原理；浅水阻塞效应的定义；船在浅水中的航态变化（吃水、纵倾）；对黏性阻力的影响（摩擦阻力、黏压阻力两方面）；

(2) 浅水对兴波及兴波阻力的影响

水深傅汝德数的定义与公式；浅水对兴波影响的表现（波浪参数、兴波图形）；深水与浅水中波速关系式；极限波速的定义与公式；浅水引起的波浪参数改变（深水、浅水、水深极浅情况）；波速损失；浅水与深水中兴波阻力的对比判断；根据船速与极限波速的相对大小的船速划分区（亚临界速度、临界速度、超临界速度区）；浅水引起的波浪图形变化（四种情况）及兴波阻力、船体浮态变化规律；浅水中船体浮态变化、阻力增加曲线图；

(3) 浅水阻力曲线的特点

浅水效应的概念；浅水与深水中阻力曲线的趋势规律；四种航速范围的阻力曲线特点；

(4) 不影响阻力的水深条件

从航速角度；从船型角度；ITTC 最小水深公式；

8.2 确定浅水阻力的方法

(1) 许立汀中间速度法

浅水对兴波、流场影响的体现（波速损失、回流速度）；两个假定；相应速度关系表；由图谱确定 Δc 和 Δv 的方法；浅水阻力曲线的作法（步骤和方法）；许立汀中间速度法的适用航速范围；

(2) 阿普赫金法

阿普赫金法的适用航速范围；浅水阻力曲线的作法（步骤和方法）；

8.3 狭水道对阻力的影响

(1) 船舶在狭水道和浅水中航行时的主要差别

表征参数（水深吃水比、相对宽度、断面系数）；回流和兴波情况；阻力曲线的特点；

(2) 船在狭水道中运动的特点

船速 V_s 与水流与船体相对速度 V_m 的方程关系式；阻塞系数；第一、第二临界速

度的含义；三个速度区域（亚临界速度、临界速度、超临界速度区域）的划分方式；各速度区域的船体阻力与航行浮态规律特点；狭水道中航速限制公式；

（3）狭水道阻力的估算

将许立汀中间速度法引申用于狭水道阻力估算的方法；水力半径；