

华南理工大学
South China University of Technology

华南理工大学 | 土木与交通学院
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING & TRANSPORTATION
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

船舶阻力

第四讲：附加阻力

（2学时）

焦甲龙 主讲

船舶与海洋工程系

2023年9月

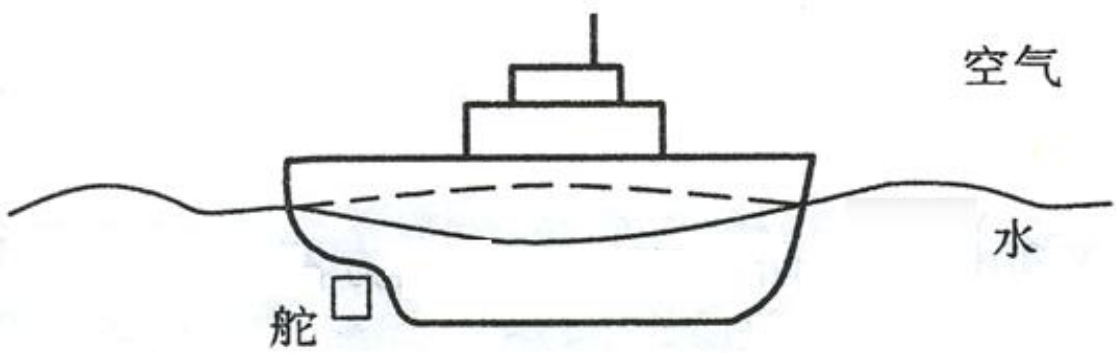
华南理工大学
South China University of Technology

目录

第四讲：附加阻力

- 1 附体阻力
- 2 空气阻力
- 3 波浪中的阻力增值

South China University of Technology



总阻力 R_0

水阻力 $R_{水}$

空气阻力 R_{aa}

静水阻力 R_s

汹涛阻力 R_{aw}

船体阻力 R_t

附体阻力 R_{ap}

污底阻力 ΔR_F

ΔR 附加阻力

华南理工大学
South China University of Technology

排水型船舶在航行时，水下部分除了裸船体受到摩擦阻力、兴波阻力、粘压阻力和破波阻力以外，各种附体也受到水阻力，水面以上的船体会受到空气阻力，风浪亦会造成船的阻力相对静水有一定的增加。这些因素所产生的阻力之和称为附加阻力。

附加阻力的主要组成：

1.附体阻力：

实船附体产生的阻力

2.空气阻力：

水线以上部分船体和上层建筑在航行中所受到的空气阻力

3.汹涛阻力：

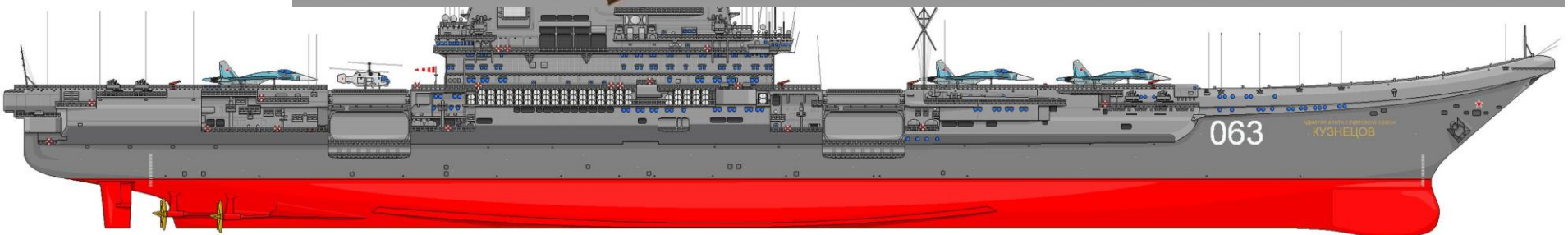
波浪中航行时由于多种因素综合而导致的阻力增值

华南理工大学 South China University of Technology

1 附体阻力

船舶设计水线以下的附属体，如舭龙骨、舵、轴包架、轴和轴支架等，统称为船的附体。由于附体的存在而产生的阻力称为附体阻力。

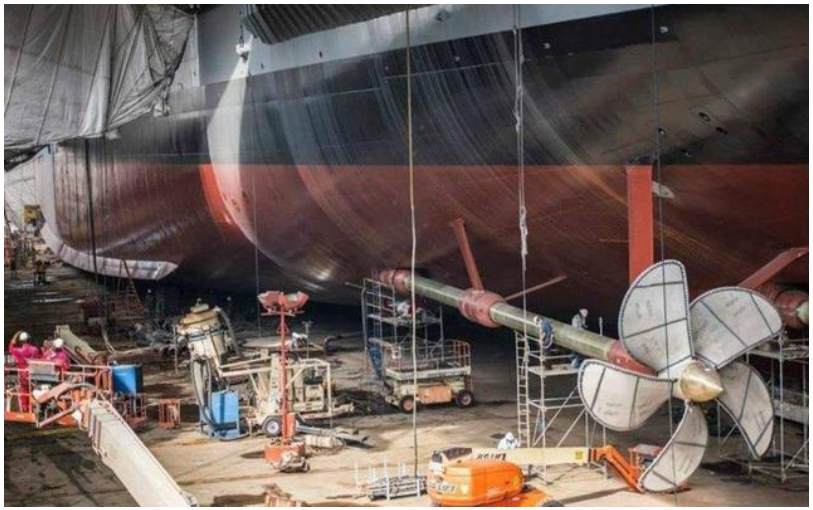




附体阻力主要成分：

由于船的附体通常安装在水线以下较深的位置，且相对尺寸较小，其所引起的兴波阻力较小，因而认为附体阻力的主要成分是粘性阻力（摩擦阻力和粘压阻力）。

其中，舭龙骨、轴包套等尺度较长并且沿流线方向布置的附体阻力成分主要为摩擦阻力；而轴支架、减摇鳍等长度较短的附体，其阻力主要成分是粘压阻力，且认为其阻力系数与航速无关。





华南理工大学
South China University of Technology

1、确定附体阻力的方法

目前要准确预报船舶的附体阻力尚有相当难度，其原因主要有二：

一，附体阻力的复杂性。要精准确定各种附体自身阻力以及与船体之间的干扰和各附体之间的干扰阻力。

二，通过模型试验方法确定附体阻力，由于船模速度低，附体尺度小，存在着较为严重的尺度效应问题。

工程上一般采用近似方法，主要有两种：一种是应用已有资料或经验公式进行估算，另一种是通过模型试验确定附体阻力。

1 经验法

这是一种不通过模型试验求取附体阻力的方法，利用已有资料或经验公式，确定每一个附体阻力值或附体系数的值。

2 模型试验法

通过带有附体的船模和裸船体船模试验得到二者的总阻力差来确定附体阻力。

华南理工大学 South China University of Technology

一、经验法

这是一种不通过模型试验而确定附体阻力的方法，主要用于船舶初步设计阶段。具体应用分为两种：

1）分：分别求出每一种附体阻力，然后进行相加得到总的附体阻力，有关每种附体的阻力估算公式可参阅相关设计手册；

2）总：将各种附体总起来计算，常用附体系数K_{ab}的形式表示，也称为附体阻力百分数，表示船舶安装了全部附体以后较裸船体所增加的有效功率（阻力）与裸船体有效功率（阻力）之比。

$$K_{ap} = \frac{\Delta P_{ap}}{P_{eb}}$$

计及附体后的实船有效功率Pel可由下式计算得到：

$$P_{el} = P_{eb}\left(1 + K_{ap}\right)$$

其中，P_{eb}为裸船体有效功率。

华南理工大学
South China University of Technology

不同类型船的附体系数

船舶种类	附体系数
单螺旋桨民用船	2 ~ 5%
双螺旋桨民用船	7 ~ 13%
双或四螺旋桨高速军舰	8 ~ 15%

中低速船的附体系数与航速关系不大；但对于高速船或军舰来说，兴波阻力占总阻力的主要成分，附体也会影响兴波阻力的增大。若附体的形状特殊，或未按流线方向布置，则附体系数还应适当增大。

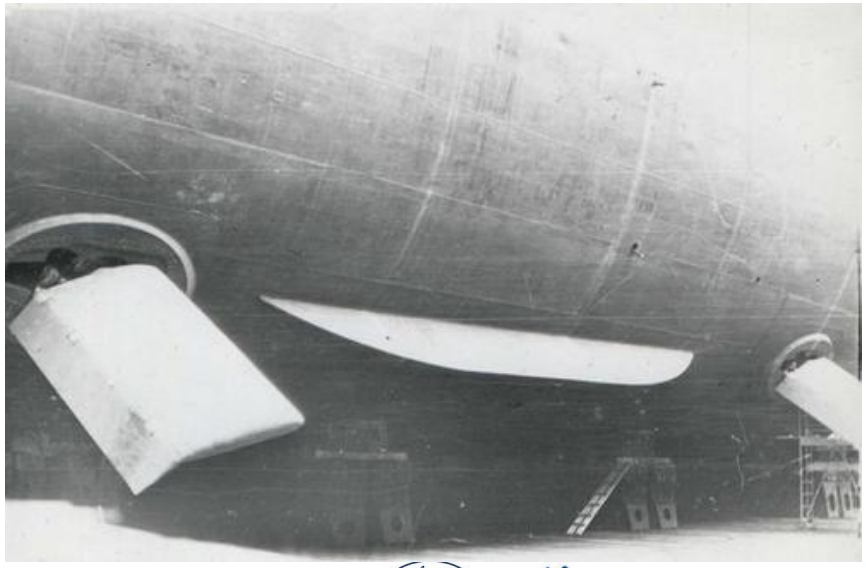
华南理工大学
South China University of Technology

各附件的阻力估算方式：《船舶设计实用手册-总体分册》

1、舭龙骨

舭龙骨应该沿水流方向设置。其长度通常在船长的1/3~1/2之间，具体布置时在船中央以前的长度不宜大于船长的10%。其深度不宜伸至界层边缘以外或龙骨以下，其所增加的阻力大约等于由于湿表面积增加而增加的摩擦阻力，一般不大于裸船体总阻力的1%~3%。若舭龙骨沿对角线设置，则所增加的总阻力可取为其摩擦阻力的5/3倍。





华南理工大学
South China University of Technology

各附件的阻力估算方式：

2、轴包套

一般沿流线方向布置，其纵剖面后端的斜度不宜超过15度，使之不产生涡流，使粘压阻力几乎消失，此时轴包套的阻力主要为摩擦阻力，一般约占裸船体总阻力的2.5%-4.0%，最大可达8%。其湿表面积S_{BS}的估算可参照下图：



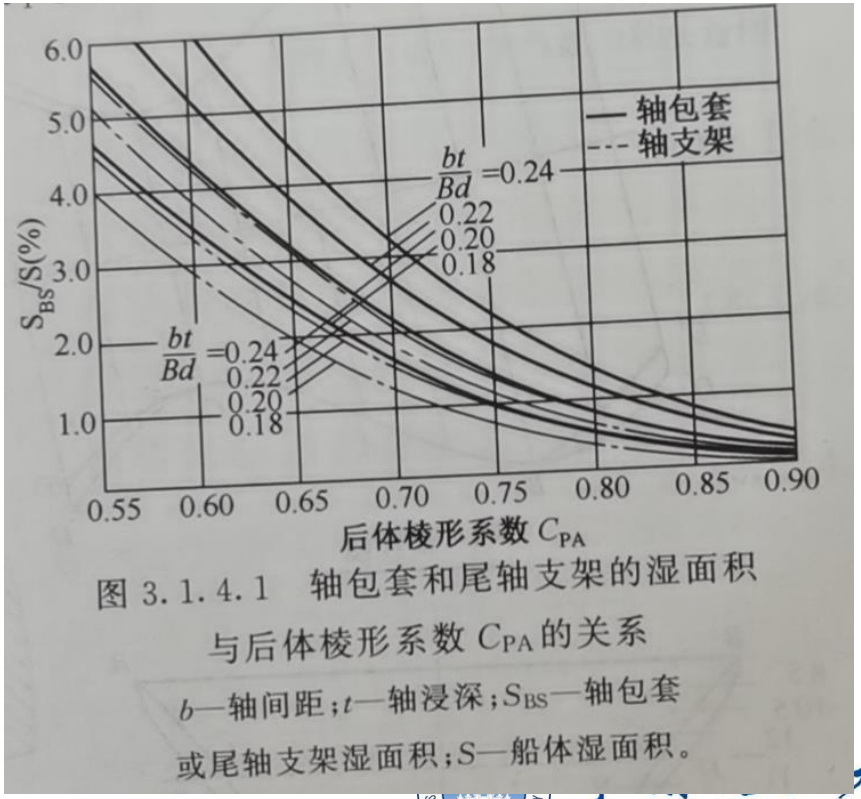


图 3.1.4.1 轴包套和尾轴支架的湿面积与后体棱形系数 C_{PA} 的关系

b—轴间距；t—轴浸深；S_{BS}—轴包套或尾轴支架湿面积；S—船体湿面积。

South China University of Technology

3、舵

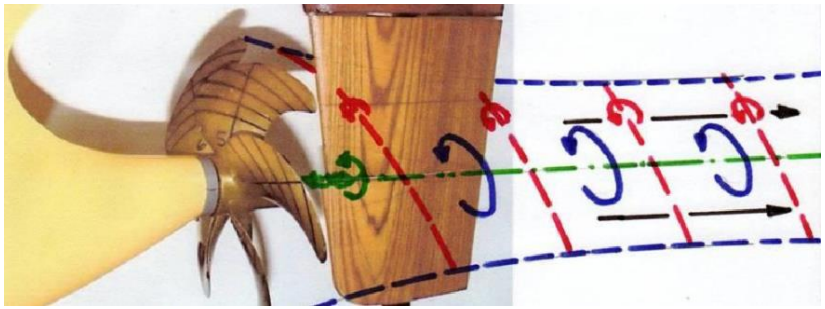
对于不同尾型、舵型及舵的安装位置，所产生的附体阻力也不相同。通常，舵位于螺旋桨后都具有不同程度的整流作用，可或多或少地提高船舶的推进效率，所以常常将舵看做推进装置的一部分。

流线型舵的阻力可取其自身摩擦阻力的1.5倍。

计算舵的摩擦阻力也可按照相当平板计算，其雷诺数中的特征长度取舵本身的弦长，来流速度应对船体伴流及螺旋桨尾流加以修正。对于单螺旋桨船，舵的阻力一般约为裸船体阻力的1%~2%。

对于双螺旋桨船，当采用中舵时，多有相当于增加有效船长的作用，可减小船尾部的粘压阻力。如此，舵的阻力可予以忽略不计。

对于双螺旋桨的双边舵，其阻力值约等于裸船体阻力的3%~5%。





South China University of Technology

4、轴支架

轴支架也称为人字架。其所受到的阻力R_{STR}主要是粘压阻力，所以通常采用流线型剖面，且长度方向沿流线方向布置。一般支架阻力约为裸船体总阻力的4%-8%，也可以按照下式进行估算：

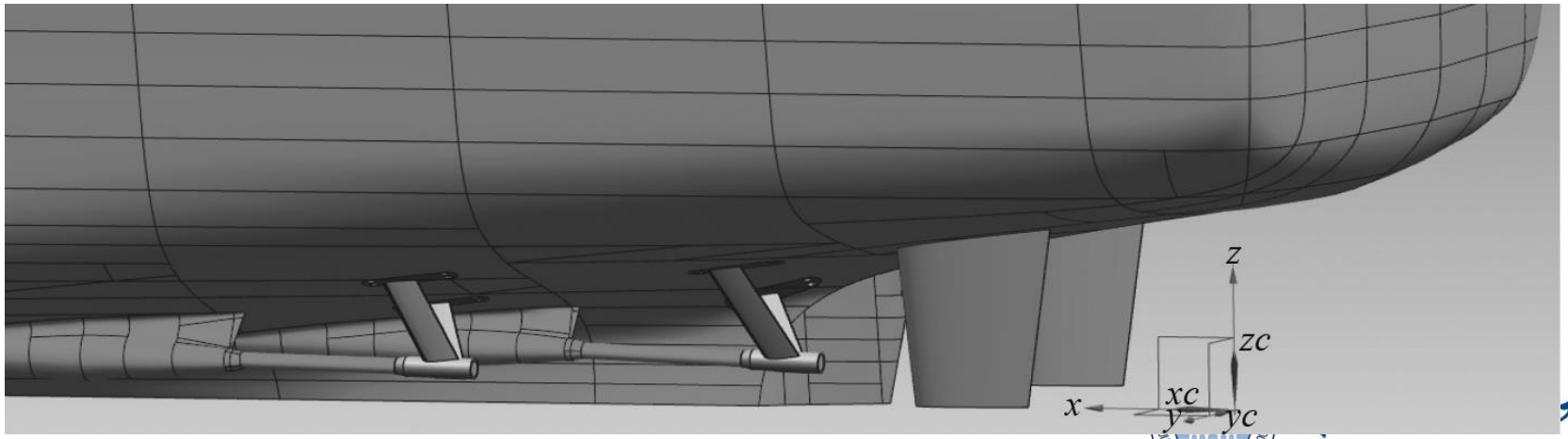
$$R_{STR} = 2.94 l^3 V^2 \quad (1)$$

$$R_{STR} = k S_{STR} V^2 \quad (2)$$

$$R_{STR} = \frac{b^2 V^2}{0.56} \quad (3)$$

式中，l为轴支架臂长，S为轴支架湿表面积，b为螺旋桨处轴与船中纵剖面间的距离（m）；Vs为航速（kn），k为系数。

式（3）仅适用于支柱的总长度为3b，平均厚度为0.05b的情况。对于其他尺度情况，可以按照正比关系换算得到。



5、轴

双桨或多桨船的露出船体表面的尾轴，其阻力可用下式估算：

$$R_{SH}=9.6ld_1\sin\theta V^2$$

R_{SH}

式中，*l*为尾轴伸出船外的长度（m）；

d1为尾轴直径（m）；

V为航速（kn）；

θ 为水流与轴的夹角。



6、锁制螺旋桨

$$R_P=130\frac{A_E}{A_0}(1-w)^2V^2D^2$$

华南理工大学 South China University of Technology

二、模型试验法

目前确定附体阻力比较普遍的方法是采用模型试验。

具体做法：通过带有附体的船模和裸船体船模试验得到二者的总阻力差来确定附体阻力。

为了减小尺度效应，应采用尽可能大的船模进行试验。

设：通过模型试验获得的裸船体船模的总阻力为Rm，加装全部附体后的总阻力为Rm＋△Rm，则模型的附体阻力系数为：

$$C_{apm} = \Delta R_m / \frac{1}{2}\rho_m S_m U_m^2$$

模型的附体系数$K_{apm} = \frac{\Delta R_m}{R_m}$，相应实船的裸船体阻力Rs可通过换算得到，而相应实船的附体阻力可由下面两种方法得到：

华南理工大学 South China University of Technology

（1）认为相应速度下实船的附体阻力系数C_{aps}和船模的附体阻力系数C_{apm}相等，即：

$$\Delta R_s = C_{apm} \cdot \frac{1}{2} \rho_s S_s U_s^2$$

如果不计水密度的差别，由上式可得：

$$\Delta R_s = \lambda^3 \cdot \Delta R_m$$

式中，λ为模型的缩尺比。

由于尺度效应的影响，按照上式计算得到的实船附体阻力往往偏大，为此引入一个附体尺度效应因子β，则修正后的实船附体阻力和阻力系数分别为：

$$\Delta R_s = \beta \cdot \lambda^3 \cdot \Delta R_m \qquad C_{aps} = \beta \cdot C_{apm}$$

式中β的具体数值英国有关部门建议可取0.5或0.6，但尚未为各国广泛采用。

华南理工大学 South China University of Technology

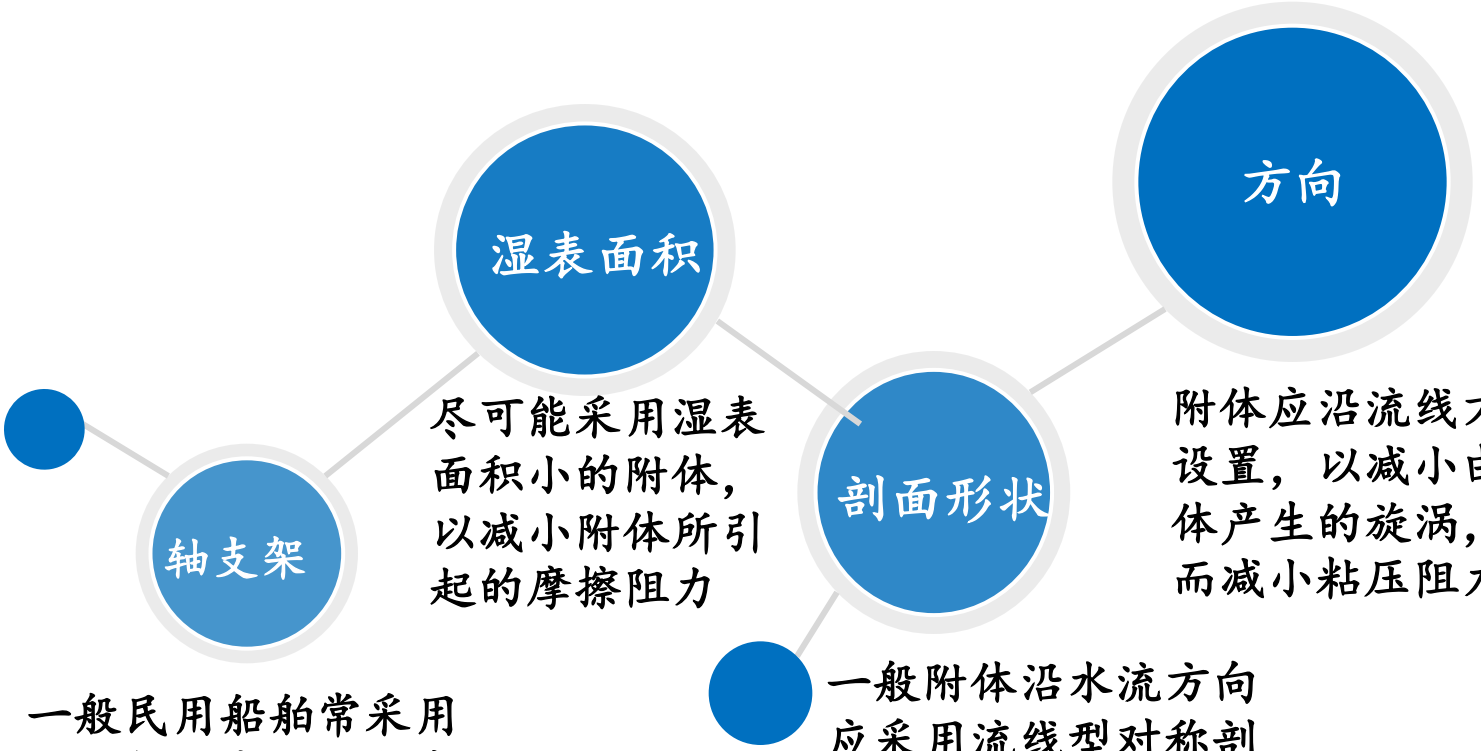
（2）认为实船附体系数K_{aps}和船模附体系数K_{apm}相等,则实船附体阻力为:

$$\Delta R_s = k_{apm} \cdot R_s$$

华南理工大学
South China University of Technology

二、附体设计的注意事项：

附体阻力的主要成分是粘压阻力和摩擦阻力，因此减小附体阻力应主要从减小这两个阻力成分入手。



华南理工大学
South China University of Technology

2 空气阻力

定义：

水线以上部分船体和上层建筑在航行中由于空气所受到的阻力，通常意义上所说的空气阻力是指船舶处于无风或风速小于二级情况下所遭受的空气阻力。

主要成分：

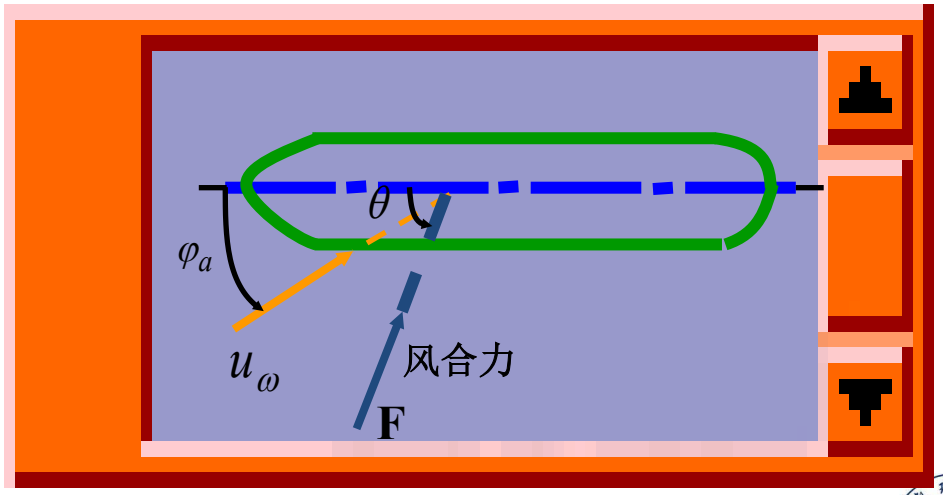
空气阻力包括摩擦阻力与粘压阻力两部分，由于空气的密度和粘性系数均较小，故空气阻力中的摩擦阻力很小，其**主要成分是粘压阻力**。其与船舶水线以上部分的**船体外形以及与风的相对速度和方向**有关，但空气阻力只占船舶总阻力中很小一部分。

华南理工大学 South China University of Technology

一、空气阻力的确定方法：

$$R_{aa} = C_{aa} \cdot \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_T \cdot U_a^2$$

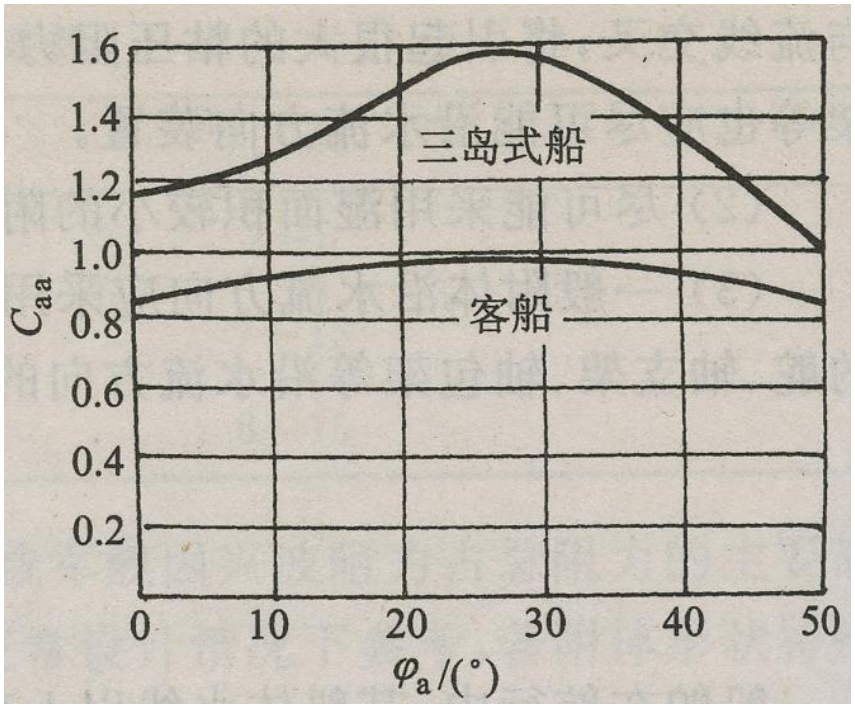
式中，Raa为空气阻力（N)， Caa为空气阻力系数，ρ_a为空气密度，可取1.226kg/m^3，A_T为水线以上船体和上层建筑在横剖面上的投影面积（m^2），Ua为空气对船舶的相对速度（m/s），$Ua=U_0+U_w\cos\varphi_a$，U_0为船舶航速，U_w为风速；φ_a为风速U_w与船速U_0之间的夹角，称为相对风向角，如下图所示。

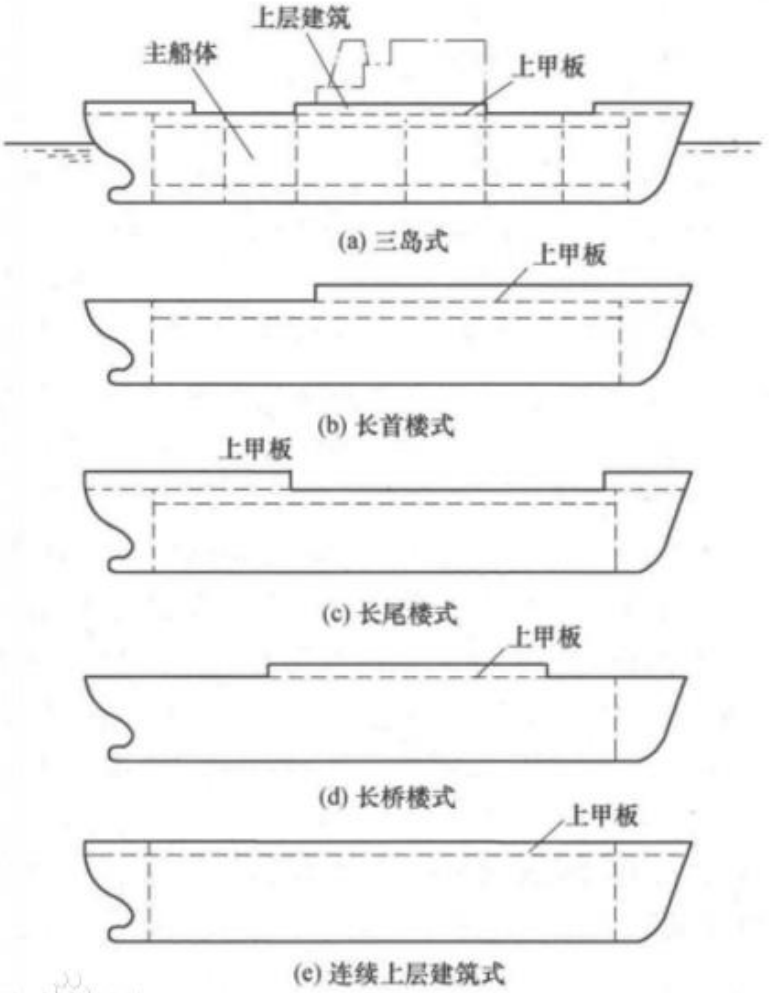


华南理工大学
South China University of Technology

空气阻力系数Caa可以由试验方法或有关试验资料来确定。

常用的试验方法有倒置阻力试验法和风洞试验法两种。





上层建筑的形式

对一般船舶，特别是肥大型船舶可用下式估算空气阻力系数：

$$C_{aa} = R_{aa} \Big/ \frac{1}{2}\rho U^2 S \approx 0.001 A_T / S$$

ρ —— 水的密度（kg / m³）；
S —— 船体湿表面积（m²）；
U —— 船舶航速（m / s）；
A_T —— 船舶水线以上部分在横剖面上的投影面积（m²）。

另外，作为粗略估算，特别是在船舶设计中，常用空气阻力占裸船体阻力的百分数（空气阻力百分数）$k_{aa}=R_{aa}/R_t=\Delta P_{aa}/P_{eb}$来估算空气阻力。则包括附体阻力和空气阻力的实船有效功率P_{et}为：

$$P_{et} = P_{eb} \cdot (1 + K_{ap} + K_{aa})$$

其中P_{eb}为裸船体的静水有效功率。对于一般船舶，在风速不大于2级情况下，空气阻力百分数k_{aa}=2~4%，但是高速军舰则要大得多。

华南理工大学
South China University of Technology

由风洞试验得到的各种船舶的空气阻力系数Caa平均值

普通货船	$C_{aa}=0.1\times10^{-3}$
散装货船	$C_{aa}=0.08\times10^{-3}$
油　　船	$C_{aa}=0.08\times10^{-3}$
超级油船	$C_{aa}=0.04\times10^{-3}$
渔　　船	$C_{aa}=0.13\times10^{-3}$
客　　船	$C_{aa}=0.09\times10^{-3}$
渡　　船	$C_{aa}=0.1\times10^{-3}$
集装箱船	$C_{aa}=0.1\times10^{-3}$（甲板上有集装箱） $C_{aa}=0.08\times10^{-3}$（甲板上无集装箱）

华南理工大学 South China University of Technology

二、影响空气阻力的因素

$$R_{aa} = C_{aa} \cdot \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_T \cdot U_a^2$$

1）与上层建筑的型式及其在船中横剖面上的投影面积有关。

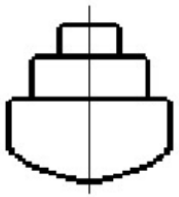
由模型试验结果可知，减小空气阻力的有效方法是：

（1）上层建筑尽可能低而长，可有效减小迎风面积；

（2）桥楼后端依次制成阶梯形；

（3）上层建筑前端设计成流线型；

（4）将短小的上层建筑合并。



2）与相对风向角有关。

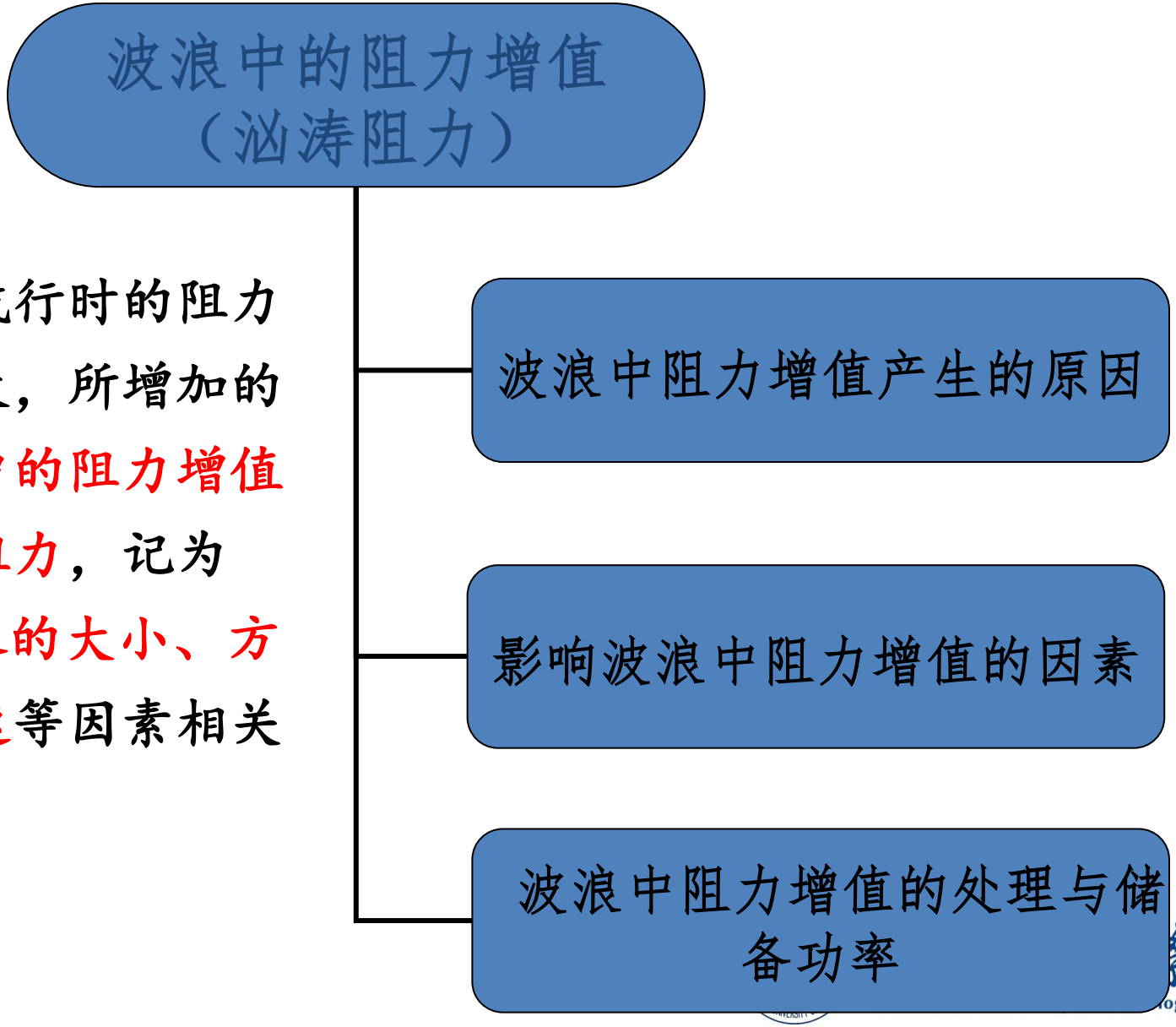
试验表明，当相对风向角Φa＝25°～30°时，空气阻力最大。在顺风情况下所产生的推力可抵消一部分空气阻力，但在强烈的顺风时，所产生的推力虽然较大，但由于海面将产生汹涛，所以总阻力反而增大，船速会降低。

3）空气阻力与相对风速Ua的平方成正比。

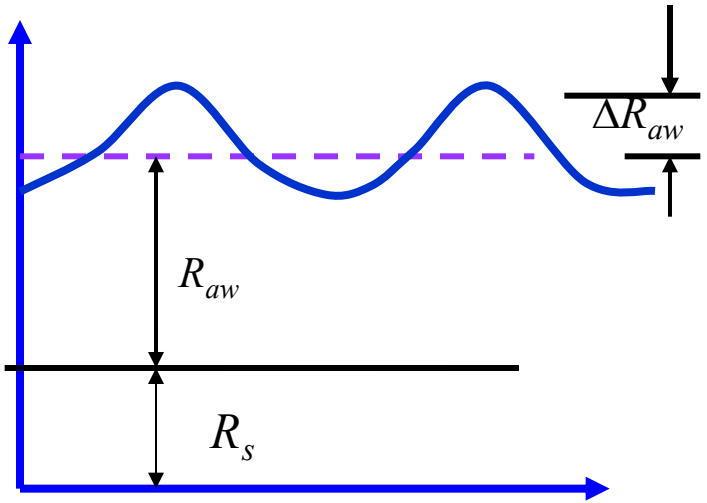
华南理工大学 South China University of Technology

3 波浪中的阻力增值

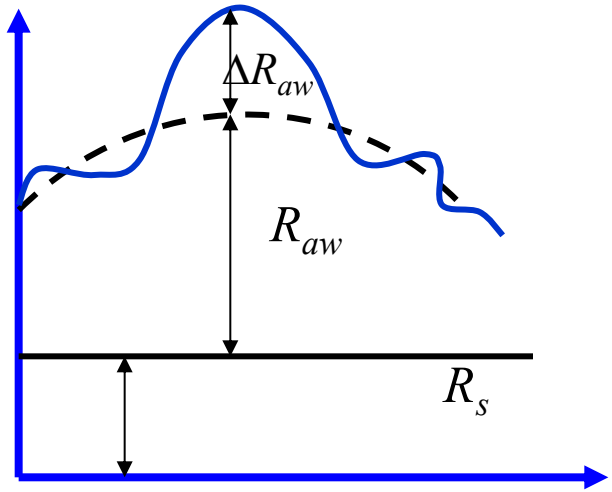
船舶在风浪中航行时的阻力将较静水中为大，所增加的阻力称为**波浪中的阻力增值**，或者为**汹涛阻力**，记为Raw，其与**风浪的大小、方向和船型、船速**等因素相关



下图为某船在规则和不规则波中迎浪航行时的阻力增值曲线示意图，其中Rs为静水阻力，Raw为汹涛阻力平均值。



（a）规则波中

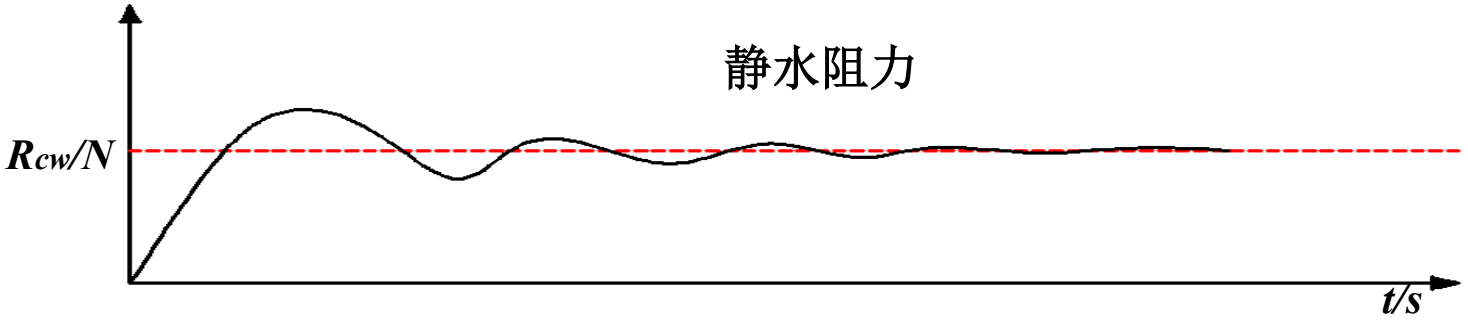


（b）不规则波中

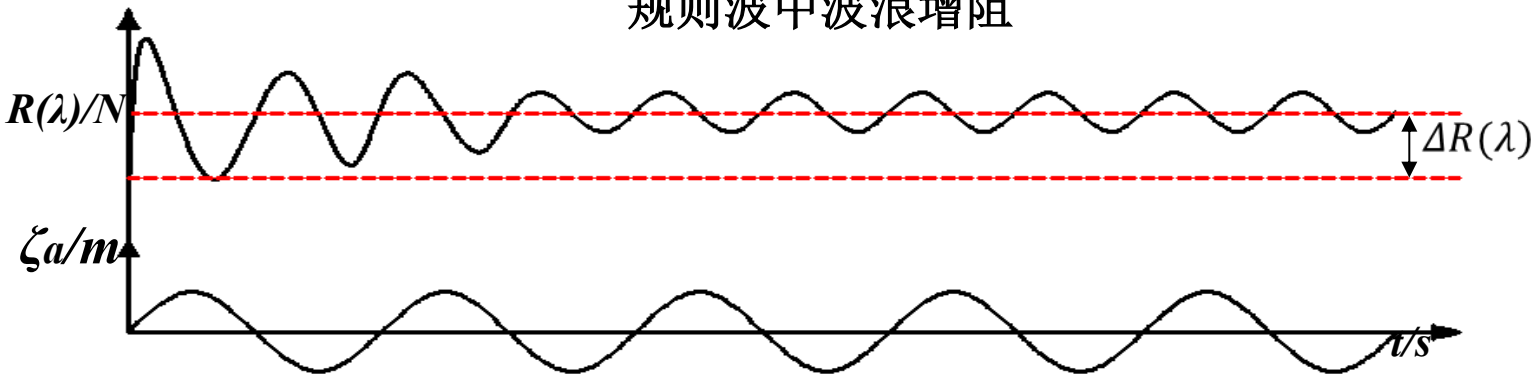
由图中可见，规则波中汹涛阻力的瞬时值与平均值之差△Raw按照船舶与波浪的遭遇周期有规律地变化，平均值Raw不随时间而变。在不规则波中的Raw和△Raw是服从概率正态分布的随机变量。

华南理工大学
South China University of Technology

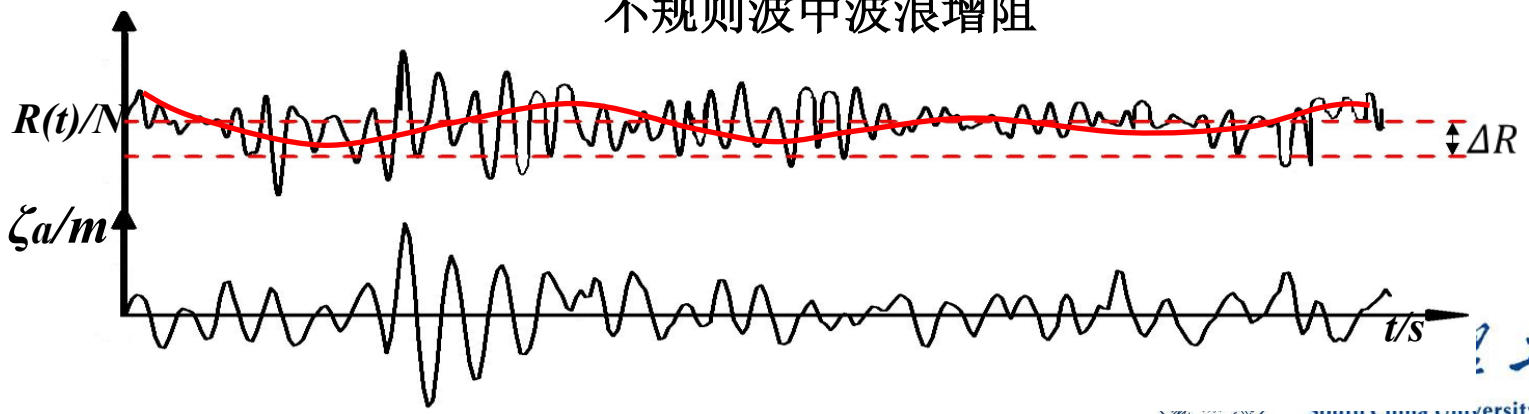
静水阻力



规则波中波浪增阻



不规则波中波浪增阻



South China University of Technology

一、波浪中阻力增值产生的原因

1、船体运动

波浪作用在船舶上会导致船舶做纵摇、升沉、横摇和摇首等各种运动，进而使其阻力增加。一般认为纵摇、升沉运动是引起船舶阻力增加的主要原因，横摇和摇首次之；而且船舶在波浪中所增加的阻力值与船体运动的振幅等参数相关。



低速恶劣海况下的游轮



South China University of Technology

2、船体对波浪的绕射作用

- 波浪遇到船体后会被船体反射，产生反射水波，消耗能量，进而产生阻力增值；
- 波浪作用会引起船体周围的压力产生周期性变化，船舶阻力随之发生变化，亦会引起阻力增大；
- 海浪冲击船首和上层建筑，溅到甲板上的海水改变了其原有的运动状态且随船舶一起运动，以及波浪中船体严重淹湿使其浸湿面积增大等，均会导致船舶阻力增大。



华南理工大学
South China University of Technology

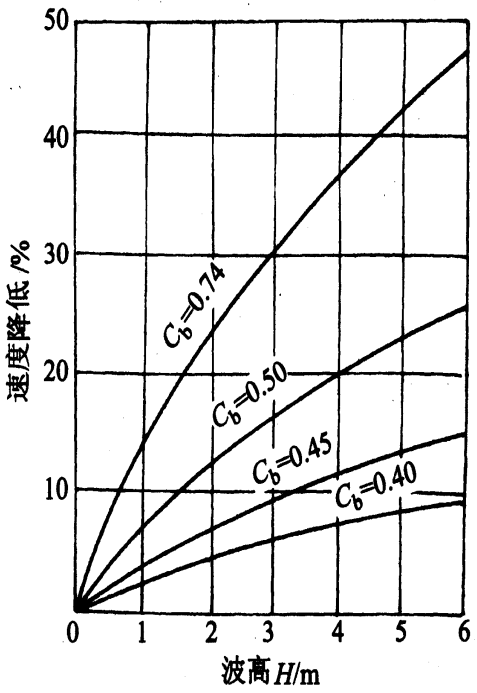
二、影响波浪中阻力增值的因素

波浪中船舶阻力的增加与船体、波浪、船舶推进以及操纵性等很多因素有关。

1.就波浪而言，波高、波长以及波浪周期等均与波浪增阻有关

波高

波浪增阻与波高的平方成正比

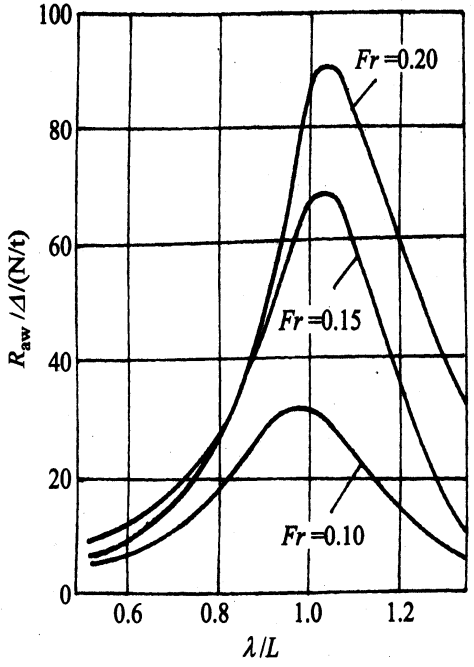


纵摇与升沉

船舶的波浪增阻主要取决于船舶纵摇和升沉运动的强烈程度以及与波浪的相位关系。

波长

若船舶所遭遇波浪的波长在船长的3/4以下，使船舶产生的纵摇和升沉运动会较小，但当波长等于或大于船长时船舶所产生的运动将加剧，汹涛阻力也会显著增大



2. 船型对汹涛阻力的影响。

船长、方形系数以及船首尾剖面形状等都会对船舶的波浪增阻产生影响。

船长

如果经常出现波长与船长之比大于3/4范围的航区，必须对波浪引起的阻力增值予以重视

方形系数

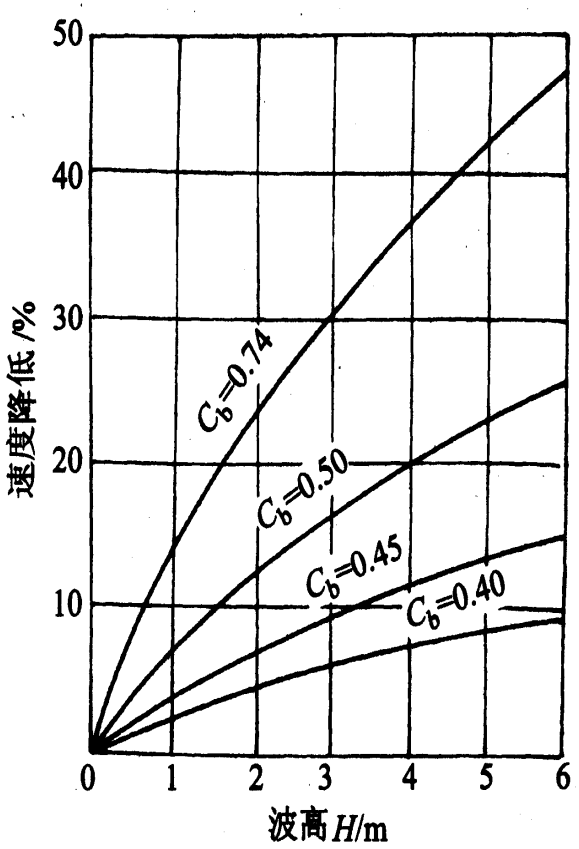
方形系数C_b越大，在同一波高下船舶的航速降低越大

剖面

试验表明，船艏为V型剖面的船舶在波浪中的阻力增值较U型小。

装载状态

在同样风浪下，船舶处于满载状态时的阻力增值较压载状态时小一些，这是因为前者的船体运动较后者小的缘故



船型对船舶在波浪中阻力增值的影响不可忽视。

华南理工大学
South China University of Technology

三、波浪中阻力增值的处理与储备功率

船舶在波浪中航行，由于阻力增加会出现下面两种情况：

●一是如果保持与在静水中相同的功率，则船舶航速会降低，这种航速减小称为速度损失或简称为失速；

●二是如果要维持其在静水中的航速，则必须在原静水中功率的基础上增加主机功率，所增加的功率称为储备功率。

由于波浪具有随机性和复杂性，很难用理论方法来预报波浪增阻Raw，故在船舶设计过程中通常不直接计算波浪增阻值，而是通过确定储备功率的方法综合考虑波浪增阻、强风作用下的空气阻力、污底产生的阻力增值、主机性能下降以及风浪中由于操纵性恶化所引起的阻力增加等

华南理工大学
South China University of Technology

经验公式：

马隆（Malone）提出的船舶在风浪中平均有效功率增加值△Pe(KW)的经验公式。

$$\Delta P_e = 4.594 B \Delta (2\zeta_w + 0.152)^2 \Big/ (T L_{bp}^2)$$

其中，ζ_w为波高，$\zeta_w = 0.02 U_w^2$，其中U_w为风速。

若以L代替垂线间长L_{bp}，则上式可改写为：

$$\Delta P_e = 4.594 (2\zeta_w + 0.152)^2 \frac{C_b}{L/B} B$$

可见，△Pe（储备功率）随方形系数和船宽的增大而增大，随L/B的增大而减小。

华南理工大学 South China University of Technology

下表为某滚装船在不同风浪条件下的功率储备及其占有效功率百分数的计算结果（按照马隆公式计算）

波浪中功率增量计算结果

蒲氏风级	4	5	6	7	8
平均风速 /(m/s)	6.7	9.4	12.3	15.5	19
浪高 /m	0.9	1.77	3	4.8	7.2
ΔP_e/kW	62.7	224.2	622.5	1 564.4	3 483.3
$(\Delta P_e/P_e) \times 100$	0.87	3.12	8.66	21.77	48.5

华南理工大学
South China University of Technology

在船舶设计中常常用储备功率百分数（或称附加数）来表示储备功率的大小。

该百分数为已经计入了附体阻力、空气阻力所需静水航行功率后，再增加的功率百分数，记作k_{aw}。

$$P_{ew} = P_{et}(1 + k_{aw})$$

所以，计及波浪中船舶阻力增值等因素的实际有效功率P_{ew}与静水有效功率P_{et}之间的关系：

$$P_{ew} = P_{eb}(1 + k_{ap} + k_{aa})(1 + k_{aw})$$

华南理工大学
South China University of Technology

船舶建成以后，在所要求的装载情况下，主机以额定功率在平静水域中所能达到的速度称为试航速度。

将船舶以持续功率（约为额定功率的85%~90%）在平均海况下所能达到的航速称为服务航速。

船舶储备功率的选取与船长、船型、航道以及船舶的业务性质有关。

通常由船长、方形系数相近的同型船舶在同样条件下航行的经验来确定，一般取K_{aw}＝15～30%，或者由船模耐波性试验确定。

华南理工大学
South China University of Technology

考虑汹涛阻力的另一种方法是在服务航速的基础上增加0.5～1.0kn作为试航速度，然后以此试航速度为基础来估算功率。上述方法适用于民船。

对于军舰，因对作战能力的特殊需要，有巡航速度和最大航速之分，两者相差很大（50%或更多）。





华南理工大学
South China University of Technology

End

華南理工大學
South China University of Technology