



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

第一讲：总论 (4学时)

焦甲龙 主讲
船舶与海洋工程系
2023年8月



华南理工大学
South China University of Technology

目录

第一讲：总论

- 1 本课程的教学安排
- 2 船舶快速性及其在船舶设计中的地位
- 3 船舶阻力的成因及分类
- 4 阻力相似定律
- 5 船模阻力试验的依据
- 6 船模阻力试验



1 本课程教学安排

课程性质：必修课

学时：32学时（1~10周的周五下午，共10-11次课，每次3课时）；

QQ群：915491957，交通大楼513

考核方式：期末考试，闭卷，

其中：

期末考试 70-100%，关键决定性；

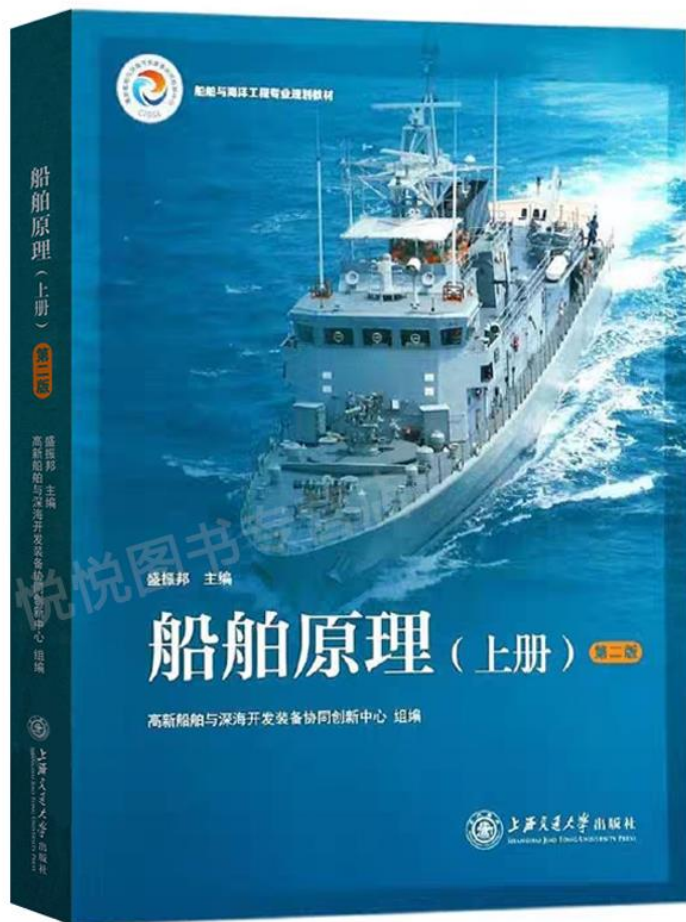
课堂表现及平时成绩占30%，但仅作为参考。



1 本课程教学安排

教材：

盛振邦，船舶原理（上册），上海交通大学出版社



学习内容:

1	总论	Overview
2	粘性阻力	Viscous Resistance
3	兴波阻力	Wave-making Resistance
4	附加阻力	Additional Resistance
5	船模阻力实验	Model Tests
6	船型对阻力的影响	Effects of Hull form on Resistance
7	阻力的近似估算	Approximate Estimation
8	限制航道阻力	Resistance in Restricted Channels



国际能源署：2020 交通运输业

- 交通运输业的碳排放占世界总量的24%；
- 国际航运业的每年排放近8亿吨的温室气体。





习近平主席在第七十五届联合国大会上提出：“中国二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**，努力争取**2060年前实现碳中和**”，并于2021年中央财经委员会第九次会议上强调：“**要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局**”

- 船舶工业是为水上交通、海洋开发及国防建设提供技术装备的现代综合性产业，被誉为“综合工业之冠”；
- 我国既是航运大国也是造船大国，造船量居世界第一位；
- 航运业占全球运输总量的80%，是我国经济贸易的重要支撑行业。

船舶碳中和是我国实现“碳中和”不可或缺的重要组成部分

船舶碳中和是我国“海洋强国”战略的重要举措



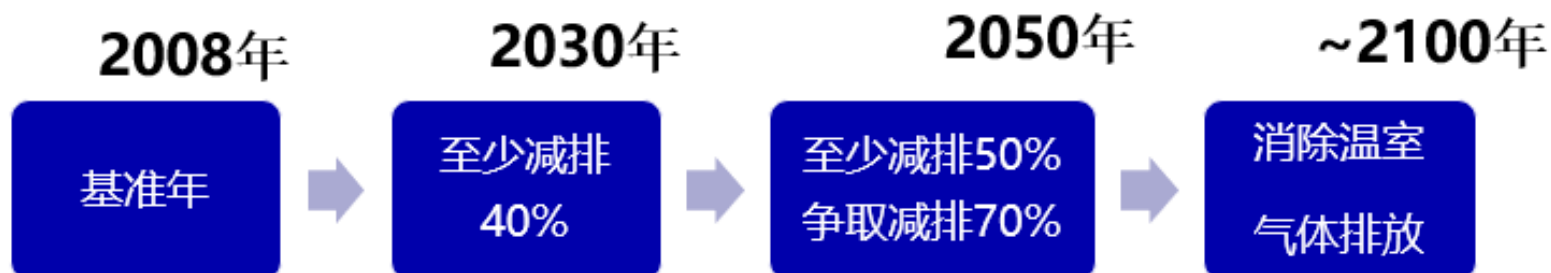


国际海事组织（IMO）2018年通过《减少船舶温室气体排放的初步战略》

最终目标

在**21世纪内（100年内）**消除国际航运的温室气体排放

阶段目标



减排举措

【短期】2018-2023年 【中期】2023-2030年 【长期】2030年以后

- 低硫油
- 提升推进效率
- 余热利用等节能技术
- LNG、甲醇等低碳燃料
- 可再生能源
- 碳捕集
- 零碳燃料

实施原则

- 对所有船舶均采取强制性措施，考虑举措对各个国家的不同影响，循证决策



近期船舶碳减排的法规形势



正

“低碳船舶”绝非口号，减排目标→减排法规→减排技术

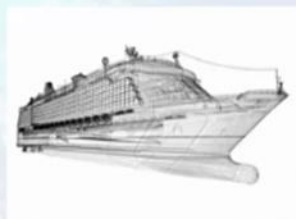
EEDI是IMO实现温室气体减排减略的重要手段，旨在降低新船能耗。该指数已被写入MAPPOL公约，2015年开始强制执行。目前中国造船业三大主力船型中的散货船、油船EEDI降低空间小，履约压力大。

$$EEDI = \frac{\text{CO2排放}}{\text{载重} \times \text{航速}}$$

=

$$\frac{\begin{aligned} &\text{主机排放} && \text{辅机排放} && \text{轴系/其他马达排放} && \text{节能装置} \\ &\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{IME(i)} - SFC_{ME(i)} \right) + && (P_{AE} \cdot C_{IME} - SFC_{AE}) + && \left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nFTI} P_{FTI(i)} - \sum_{i=1}^{nFTI} f_{FTI(i)} \cdot P_{AE(i)} \right) C_{IME} - SFC_{AE} && - \left(\sum_{i=1}^{nEFF} f_{EFF(i)} \cdot P_{AE(i)} \cdot C_{IME} - SFC_{ME} \right) \end{aligned}}{f_i \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_{ref}}$$

航速×载重吨



EEDI

对象：新船
类别：设计能效
时间：2015~
折减率：每5年折减10%



EEXI

对象：旧船/现有船
类别：设计能效
时间：2023~
折减率：与最新EEDI保持一致



CII

对象：所有营运船舶
类别：营运能效
时间：2023~
总目标：2030年碳强度降低40%

$$CII = \frac{\text{CO2排放}}{\text{载重} \times \text{航程}}$$



2 船舶快速性及其在船舶设计中的地位

船舶快速性的概念

1、定义

船舶快速性是研究船舶尽可能消耗较小的主机功率以维持一定航行速度的能力的学科。

船舶快速性是在给定主机功率时，表征船舶航行速度快慢的一种性能。

2、船舶快速性研究所包含的两部分内容

- (1) **船舶阻力**：研究船体在运动过程中所受到的各种阻力问题。
- (2) **船舶推进**：研究克服船体阻力的推进器及其与船体间的相互干扰及船、机、桨的匹配问题。



航行于水面的船舶主要受到4种外力作用：

(1) 地球引力；

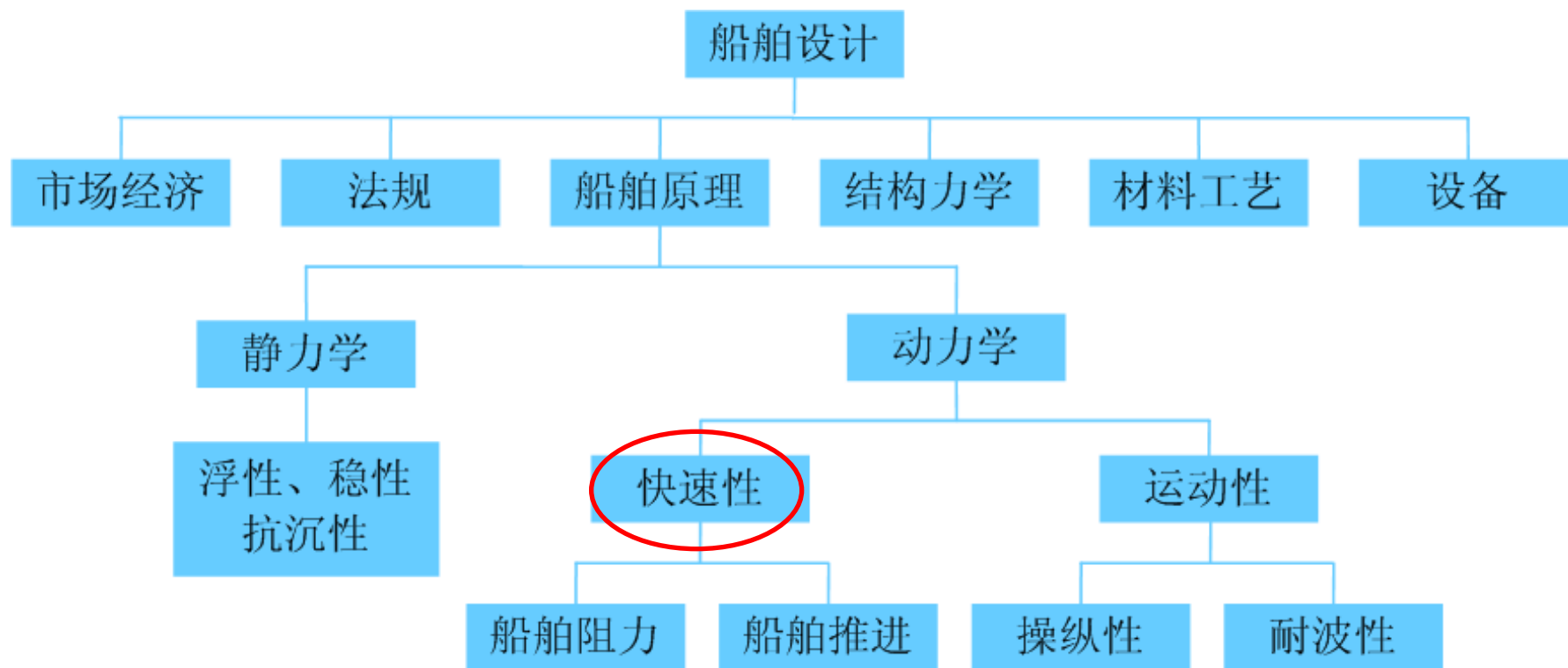
(2) 水的浮力；

(3) 流体（空气和水）作用力；

(4) 推进器提供的推力。



船舶阻力研究在船舶设计中的地位



船舶原理：

{浮性、稳性、抗沉性、**快速性**、耐波性、操纵性}



❖ 船舶快速性指标：设计任务书明确指定快速性指标。

■ 航速指标：静水速度（试航速度）

平均海况航速（服务速度）

■ 其他设计指标：民用船舶——使用性；经济性

军用舰艇——作战性能

❖ 快速性的两个方面：阻力小；推进性能高（螺旋桨效率高）

❖ 船型仍是竞争的关键之一

几乎每一艘船舶，在设计任务书中就明确给定快速性指标。当船舶建成后，测定是否达到规定的快速性是交船试航的一项重要内容。



❖ 船舶阻力课程的主要内容:

- ① 各种阻力的成因及其性质
- ② 阻力随航速、船型和外界条件的变化规律
- ③ 减小阻力的方法，寻找优良船型
- ④ 估算船舶阻力，为推进器设计提供依据



船舶阻力研究方法

船舶阻力的研究方法包括：

- 1) 理论方法（成本低、准确性需验证）；
- 2) 数值模拟（简单方便）；
- 3) 试验方法（真实可靠、成本高）。

- 理论研究建立数学模型，以解析的形式计算；
- 数值模拟可以发现试验中难以发现的现象。
- 理论研究和数值模拟可为试验研究提供理论指导；
- 试验研究证明理论计算的结果；

总之，上述三种方法相辅相成，缺一不可。



(1) 理论方法

应用流体力学的理论，建立解决问题的基本数学模型，将一些复杂问题简化为简单的模型，抓出问题的本质，给出一些指导性的定性结果。

目前理论方法中均引入了一些假设和简化，导致计算结果与实际结果存在一定的偏差。但是理论方法仍是船舶阻力研究中不可缺少的方法。

例如，米契尔积分所计算的兴波阻力虽与实际存在偏差，但其计算出的阻力趋势是正确的，这对于指导船型优化等有很大帮助。

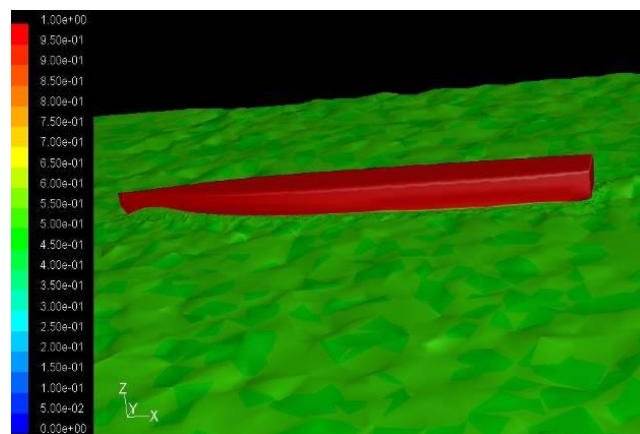
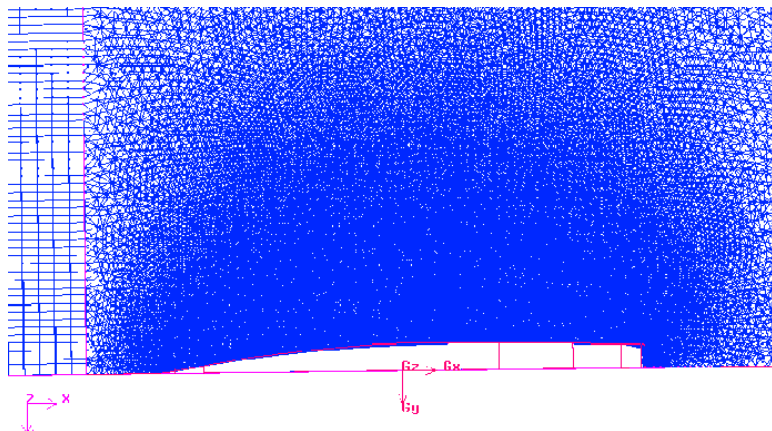


(2) 数值模拟

随着计算流体力学的不断完善，计算机硬件、软件技术的不断提高，各种新的计算方法不断出现，数值模拟已成为船舶阻力研究不可缺少的方法。

基本原理：有限体积法、有限差分法

常用CFD软件：CFX、FLUENT、STARCD、FLOW-3D



• CFD技术

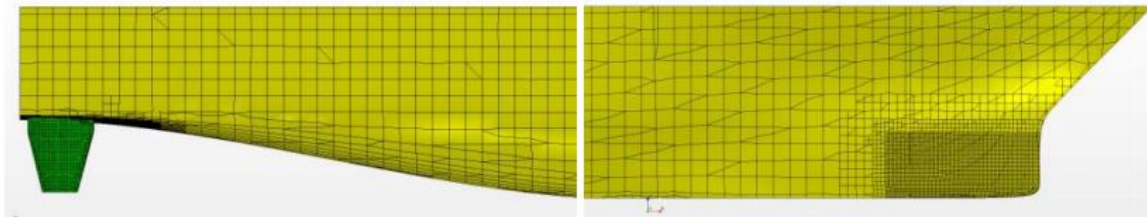
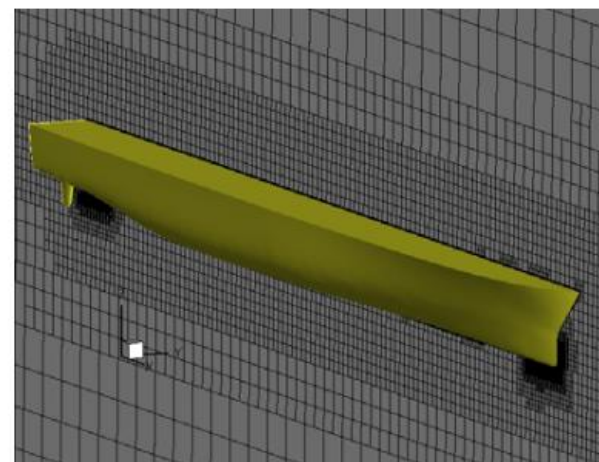
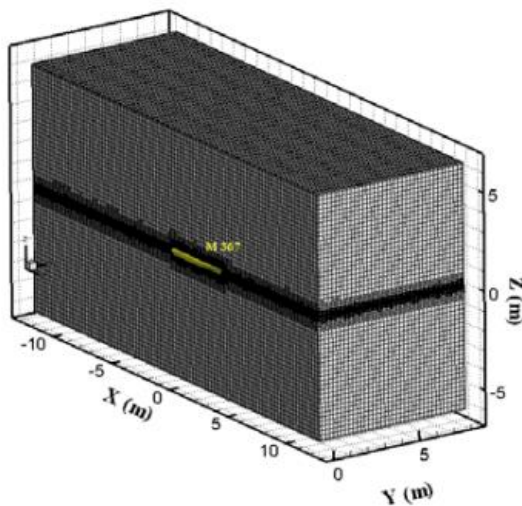
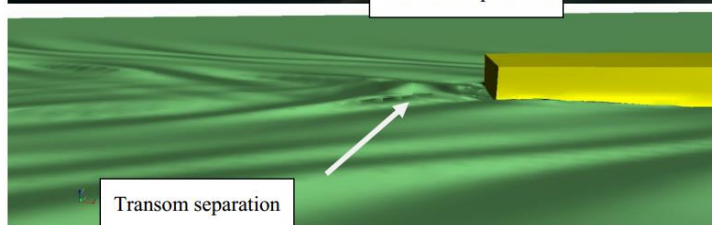
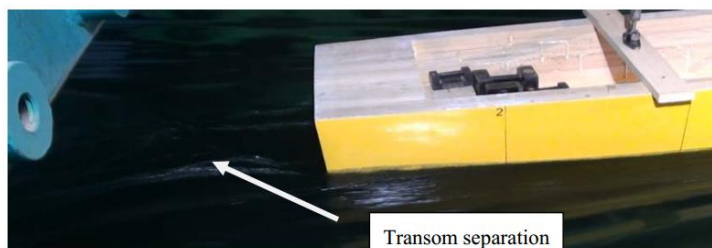
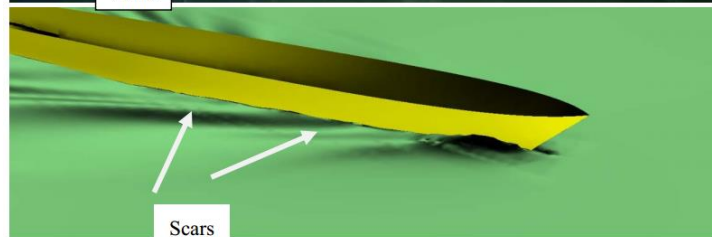


Fig. 6 Computational grids at the ship's forehead and aft end



(3) 试验方法

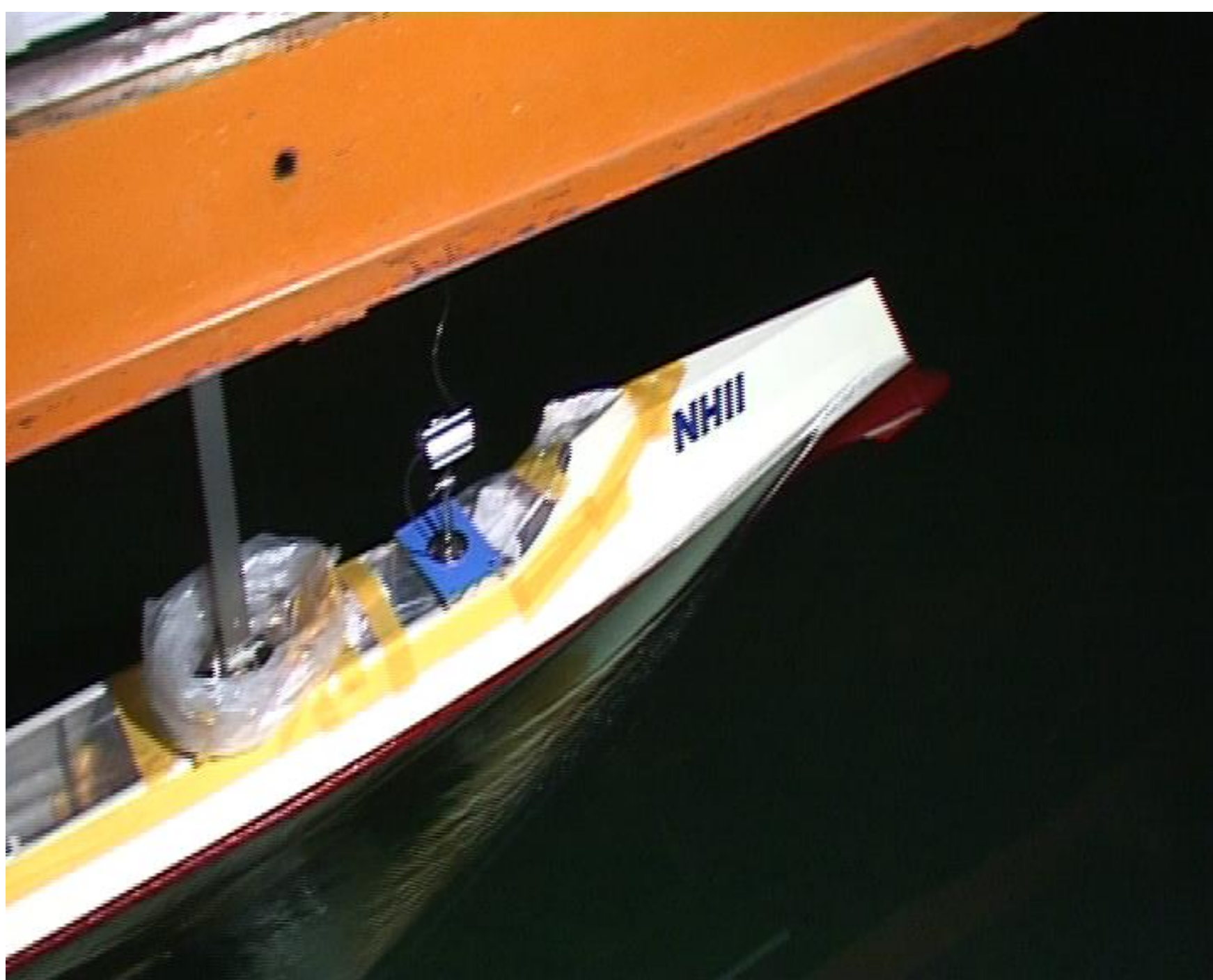
(a) 模型试验: 长期以来船模水池试验是研究船舶阻力的主要手段。至今, 凡重要船舶设计、新船型的研发都必须进行。

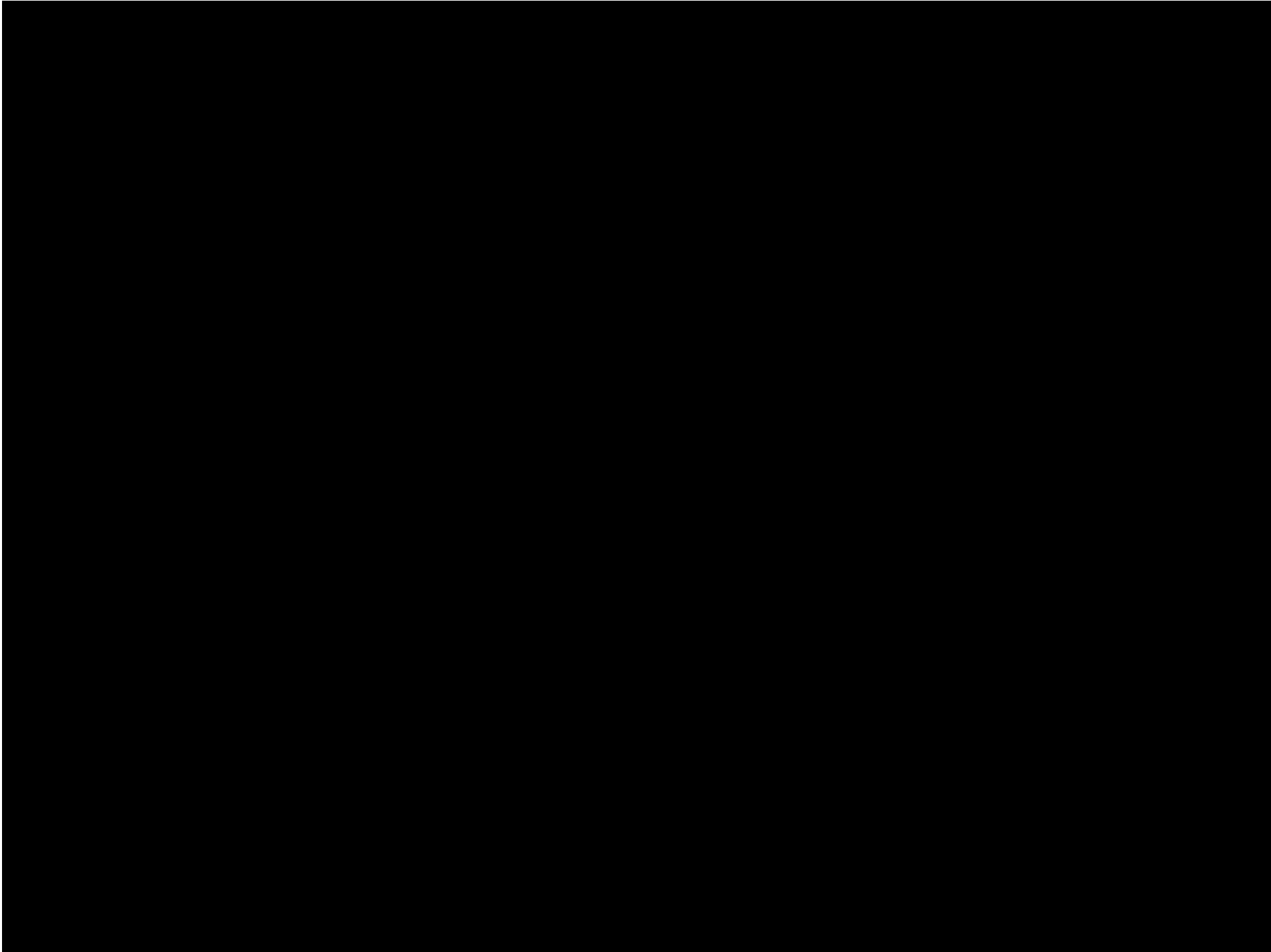
优点: 不受外界环境限制、人力物力及成本花费较少。

(b) 实船试验: 鉴定船舶的各种性能是否达到设计要求, 并同船模试验比较, 分析尺度效应的影响, 验证船模试验结果的准确性。但是由于经济原因和测试的困难, 除新船试验外很少进行。

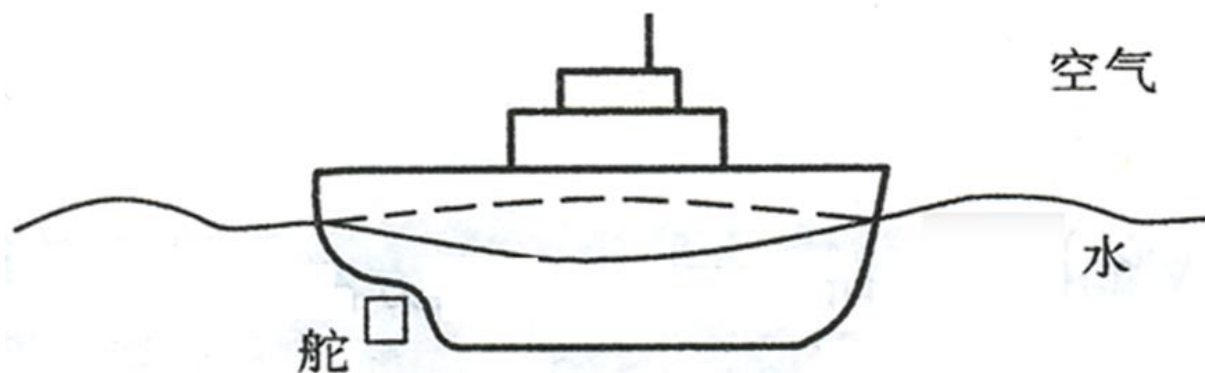
优点: 数据最真实、不存在尺度效应。







3 船舶阻力的成因及分类



船舶在水面上航行，船体处于水和空气两种流体介质中，必然遭受到**水和空气两种不同流体介质**的反作用力：

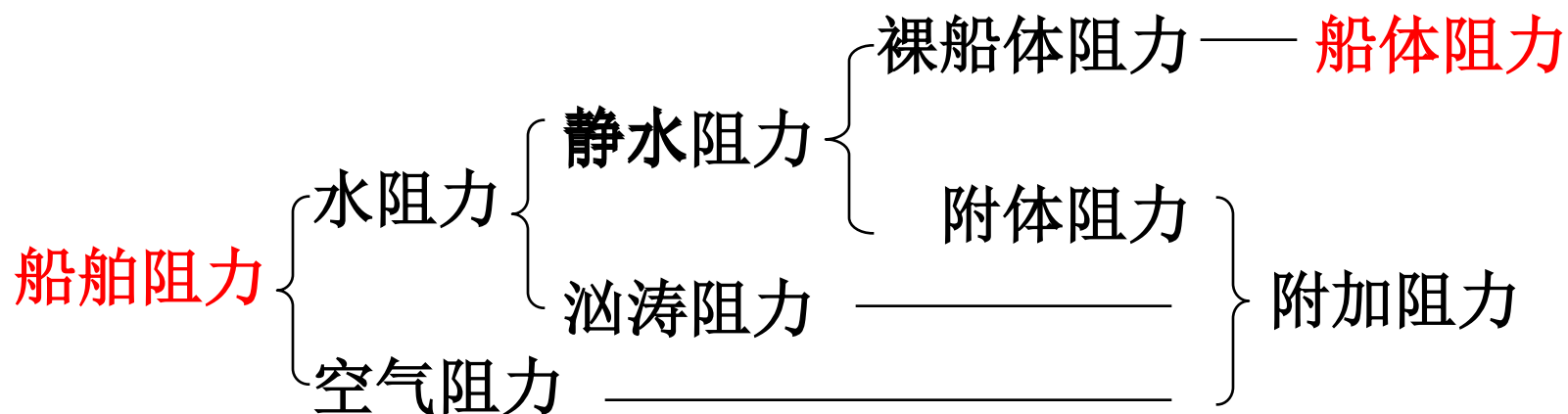
空气阻力：空气对水面以上的船体部分和上层建筑的作用力。

水阻力：水对水下的船体部分作用力，可分为**静水阻力**和**汹涛阻力**(波浪增阻)。

★ **静水阻力**：船舶在**静止水面**上航行时受到的水阻力。

汹涛阻力：由于水面上**波浪作用**而产生的相对于静水阻力的增量，也称为波浪中的阻力增额。

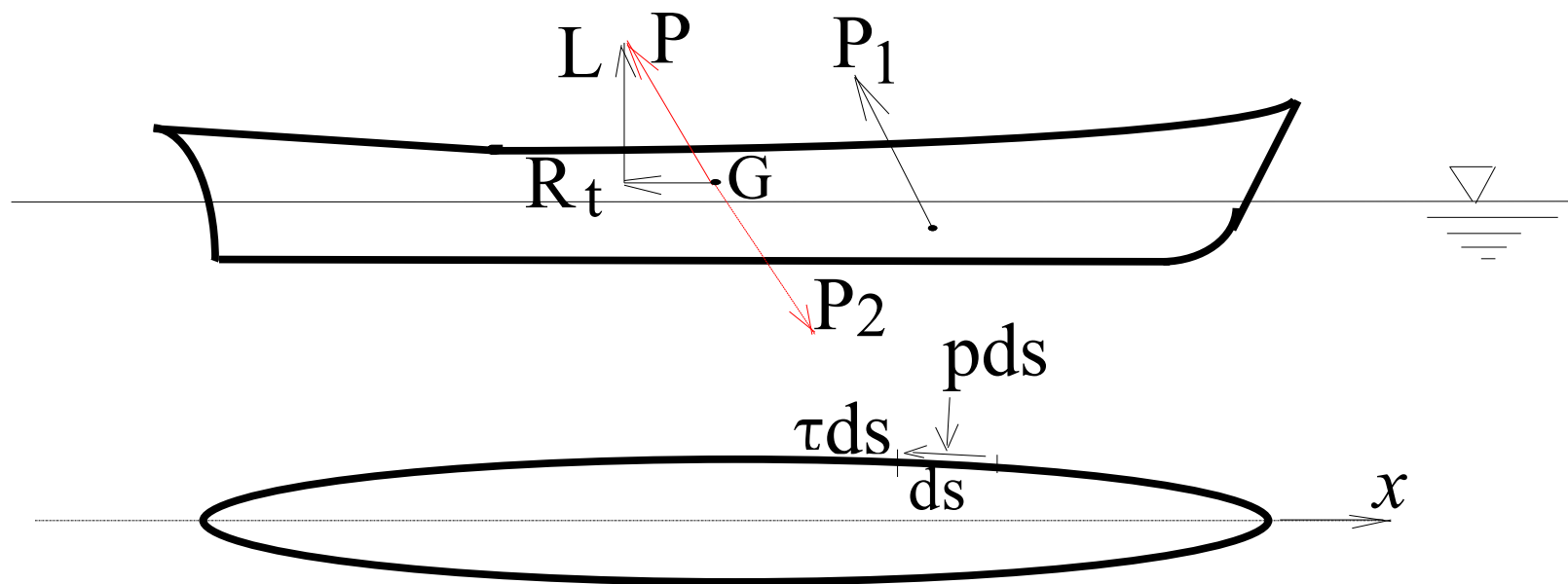
(1) 船舶阻力的划分



因空气密度是水密度 $1/800$ ，故空气阻力远小于水阻力，水阻力中的船体阻力是本课程重点研究内容。



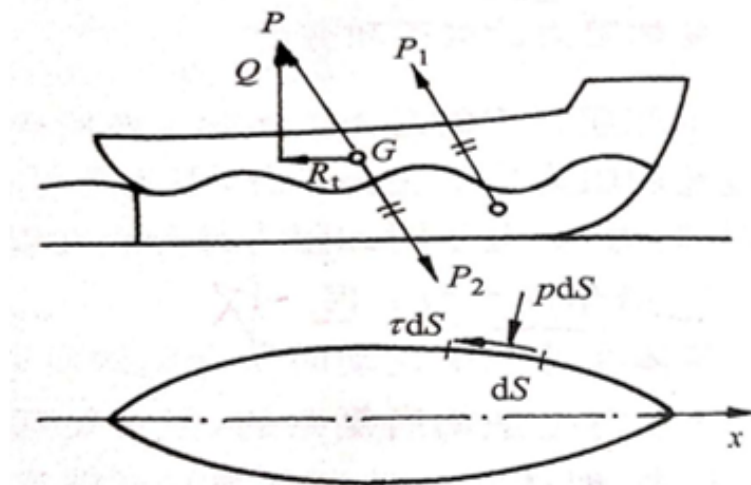
船体受力分析





按作用力的方向分类

船体运动中所受到的**总阻力 R_t** 就是所有流体作用力沿运动方向的合力，亦即船体表面上所有微面积 ds 上切向力 τ 和压力 p 在运动方向上的合力：



船体表面应力作用示意图

$$R_t = -\int_S \tau \cos(\tau, x) ds - \int_S p \cos(p, x) ds$$

式中 S 为整个船体湿表面积，负号表示该作用力与船体运动方向相反，是阻力。

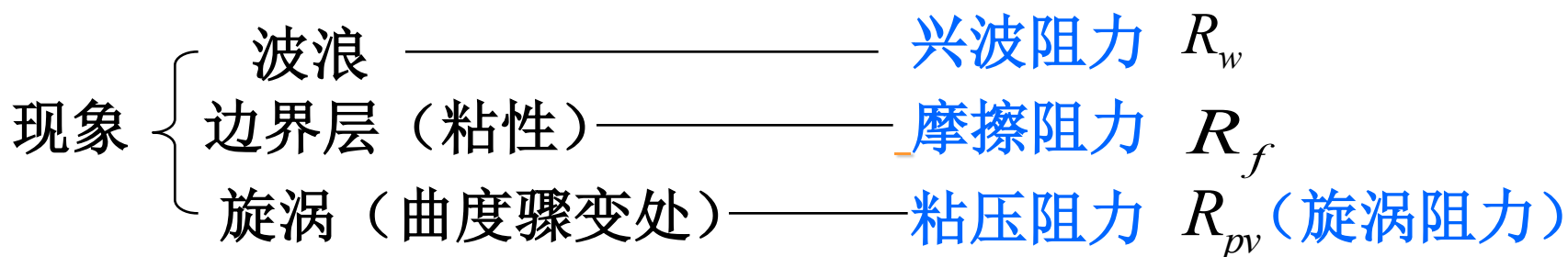
上式中，前一项积分表示由作用在船体表面上**切向力**所造成的阻力，称为摩擦阻力 R_f 。第二项积分表示由作用在船体**表面上压力**所造成的阻力，称为压阻力 R_p ，即：

$$R_t = R_f + R_p$$



(2) 船体阻力的划分

1、船体阻力的成因

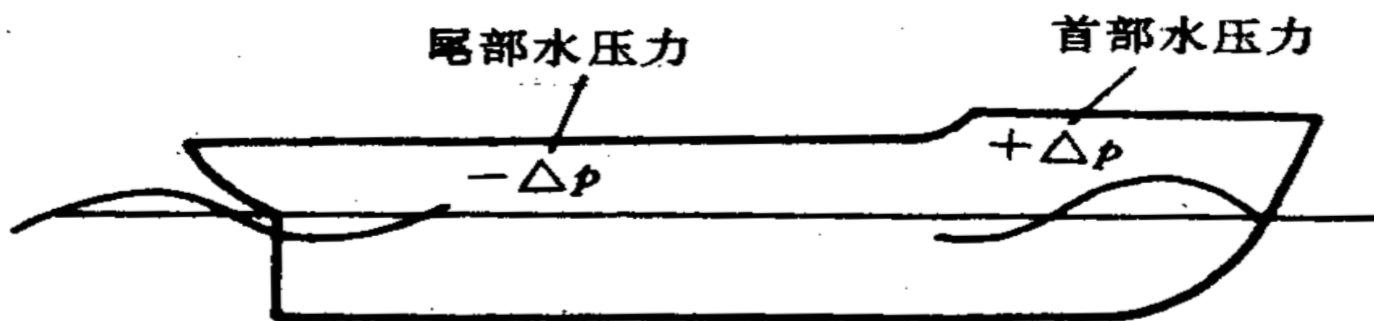


兴波阻力：船体在运动过程中兴起波浪，由于波浪产生，改变了船体表面的压力分布情况。

摩擦阻力：由于水存在粘性、在船体周围形成“边界层”，使船体运动过程中受到粘性切应力作用，亦即表现为船体表面产生了摩擦力，其在运动方向的合力为摩擦阻力。



粘压阻力：由于水的粘性和船体曲度变化，在曲度骤变处，会产生旋涡、边界层等情况改变了沿船体表面压力分布，引起船体前后压力不平衡而产生的阻力为粘压阻力。从能量观点来看，克服粘压阻力所做的功耗散为漩涡的能量。



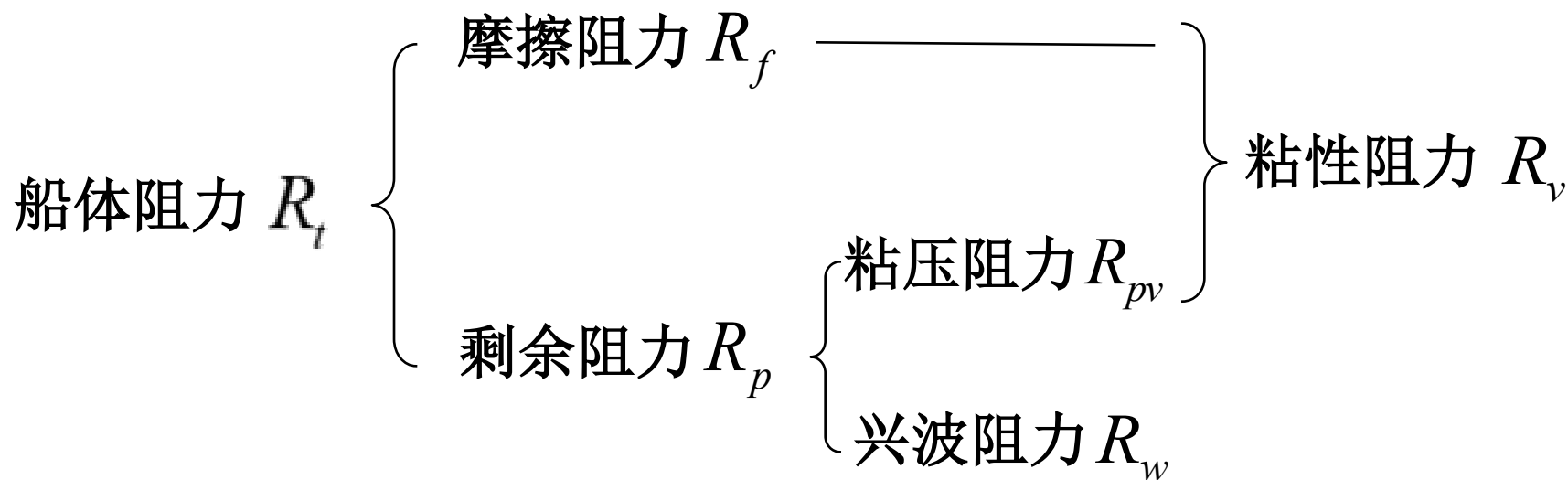
应该注意的是：

压阻力=粘压阻力+兴波阻力，是两类不同性质的力。

兴波阻力即使在理想流体中仍然存在。

摩擦阻力和粘压阻力两者都是由于水的粘性而产生的，在理想流体中均不存在。

习惯上把摩擦阻力和粘压阻力合并为粘性阻力。



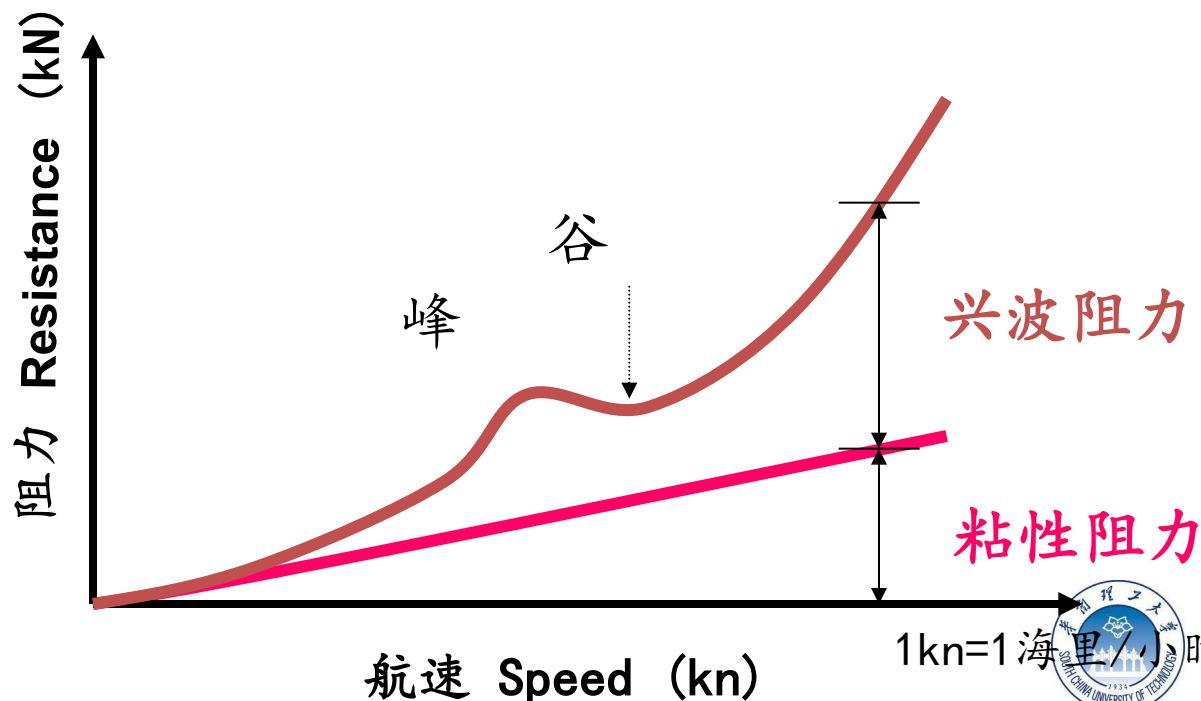
■ 阻力各成分随速度变化的速度不同，从而总阻力中各成分的比例随速度的不同而不同 $R_f \sim V^{1.83}; R_{pv} \sim V^2; R_w \sim V^{4\sim6}$

	低速船	高速船
摩擦阻力	70~80%	40~50%
粘压阻力	~10%	~5%
兴波阻力	10~20%	~50%

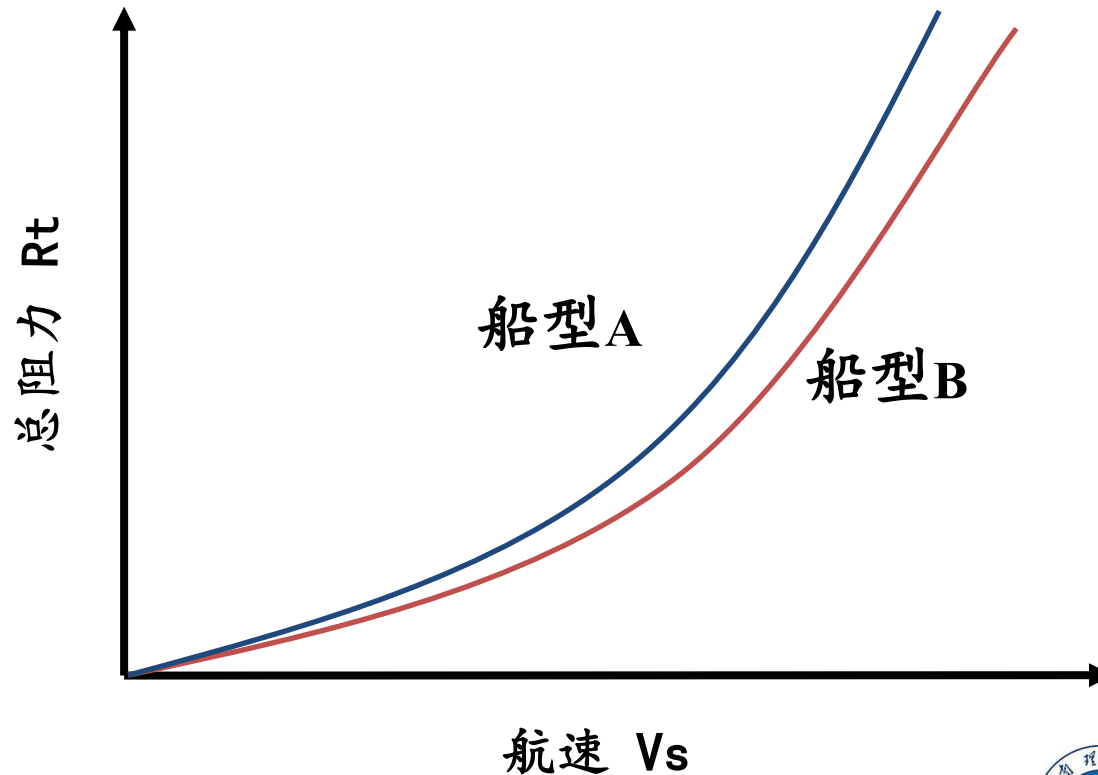


❖ 阻力成分的主要特性：

- 低速船 ($Fr < 0.2$) : 粘性阻力 R_v (R_f 70%-80% ; R_{pv} 10%以上, 丰满船型增加)
- 高速船 ($Fr > 0.3$) : 兴波阻力 R_w (40%-50% R_w ; R_f 50%; R_{pv} 5%)
- 峰谷位置：是船长和航速的函数



■ 船型给定时，外界条件不变（流体参数一定）的前提下，船体阻力可以看做仅仅是船速 V_s 的函数： $R_t = f(V_s)$



常用的速度单位:

海里/小时 (节、knot)、m/s、km/h

换算关系:

$$1\text{kn}=1.852\text{km/h}=0.5144\text{m/s}$$

$$1\text{m/s}=3.6\text{km/h}=1.942\text{kn}$$



船舶运动航态:

随着航速的提高, 船舶航态会因流体动支持力的比重不同而发生变化。
船体航行时船体沿垂直方向上的力平衡关系:

$$\Delta = \rho g \nabla_1 + L$$

讨论航态与航速的关系时不宜使用长度傅氏数来作为船舶的相对速度,
通常用与船舶重量相关的容积傅氏数: $Fr_{\nabla} = V / \sqrt{g \nabla^{1/3}}$

根据船体所受流体动支持力 L 的大小, 可以把船舶的运动大致划分为三种典型的航态:

- (1) 排水航行状态: $Fr_{\nabla} < 1.0$, $\nabla_1 \approx \nabla$, 排水型船。
- (2) 过渡(半滑行)状态: $1.0 < Fr_{\nabla} < 3.0$, 尾倾明显, ∇_1 明显小于 ∇ , L 比重不可忽视, 高速排水式船(护卫舰、巡逻艇、高速双体船、深V快艇)
- (3) 滑行状态: $Fr_{\nabla} > 3.0$, 船体被托起, $L \approx \Delta$,



常规水面排水型船舶分类：

- (1) 低速船： $Fr_{\nabla} < 0.2$;
- (2) 中速船： $0.2 < Fr_{\nabla} < 0.3$;
- (3) 高速船： $Fr_{\nabla} > 0.3$ 。

一般而言，民船多属于中低速船舶，军船属于高速船。



高性能船舶（高速船）：



穿浪双体船



小水线面双体船



滑行艇



三体船



水翼艇



全垫升式气垫船





小结

(一)

物理现象分类

兴波阻力

摩擦阻力

粘压阻力

(二)

作用方向分类

摩擦阻力

压阻力

(三)

流体性质分类

粘性阻力

兴波阻力

阻力的分类是为了更好的研究和处理基于不同出发点的问题



■ ■ 影响船舶阻力的因素

- **船型**：以相同航速在同一航道和海况下航行的不同船型所受到的阻力是不同的；
- **航速**：同一艘船舶在同一航道和海况下以不同航速航行时所受到的阻力是不同的；
- **航行环境**（航道、波浪等）：同一艘船舶以同一航速在不同航道或海况下航行时所受到的阻力也是不同的。

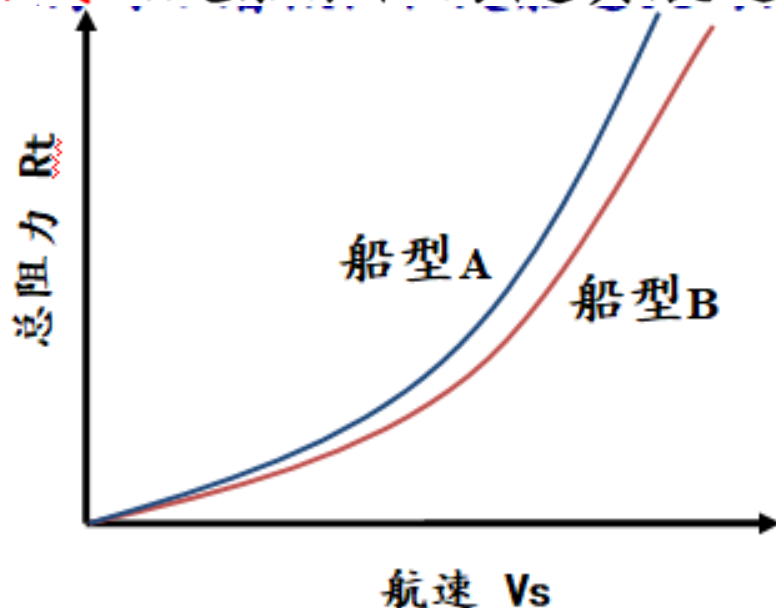




船舶阻力曲线和有效功率曲线

研究船舶阻力问题通常离不开“船舶阻力曲线”和“有效功率曲线”。

船舶阻力曲线就是船舶阻力随其航速变化的关系曲线。



在同一航速（相同航行条件）下，阻力越小，则船舶的阻力性能越好。



有效功率（有效马力）：

表示船舶在给定航速下航行时，为了克服流体对其的阻力作用所需消耗的功率，表示为：

$$P_e = R \cdot U$$

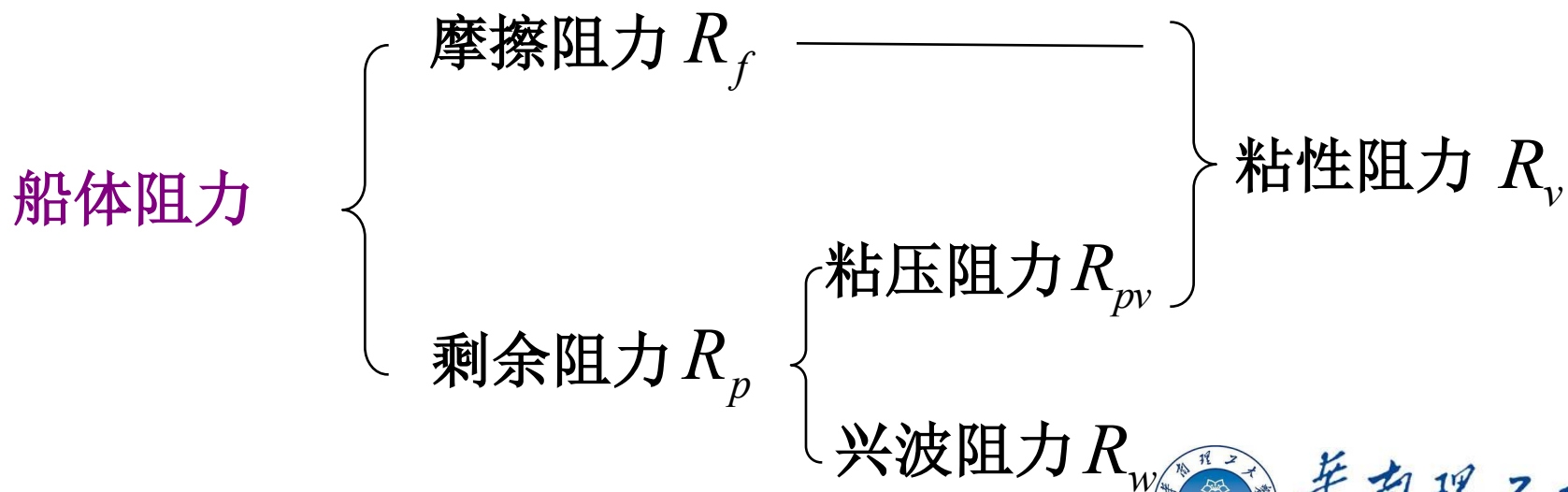
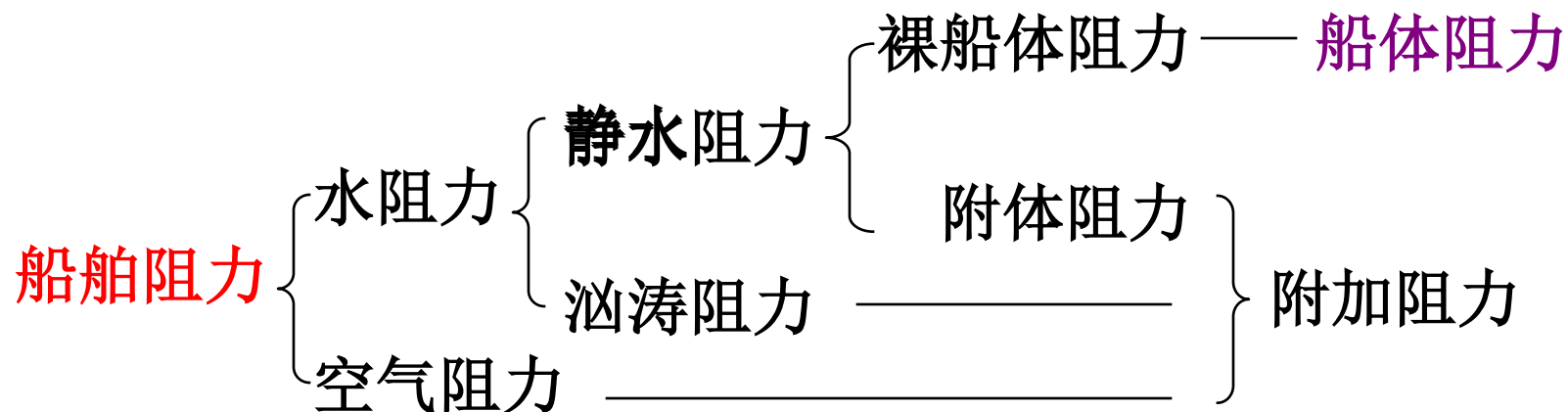
其中：R为船舶的阻力，U为船舶的航速。

有效功率的单位通常用千瓦（KW）或马力（hp）来表示，有效功率也常被称为有效马力。

在船舶设计中，在确定了船舶阻力曲线以后通常要给出有效功率曲线。

有效功率曲线也是螺旋桨设计的重要依据。

船舶阻力的划分



4 阻力相似定律

一、粘性阻力相似定律（雷诺定律）

根据分析,认为粘性阻力 R_v 与水的质量密度 ρ , 物体长度 L , 速度 v , 水的运动粘性系数 ν 有关, 可以写成:

$$R_v = \varphi(\rho, L, v, \nu)$$

上式共有5个有量纲的物理量



根据流体力学定律，取密度、长度、速度三个量作为基本物理量，则其它两个物理量的量纲表达式为：

$$[R_v] = [\rho][v^2][L^2]$$

$$[\nu] = [L][v]$$

根据量纲表示式，组成无量纲数 π_1, π_2 ：

$$\pi_1 = \frac{R_v}{\rho v^2 L^2} \quad \pi_2 = \frac{\nu}{Lv} = \frac{1}{Lv/\nu} = \frac{1}{Re}$$



$Re = \frac{Lv}{\nu}$, 称为雷诺数。

$\frac{R_v}{\rho v^2 L^2}$ 可改写成 $\frac{R_v}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$, 称为粘性阻力系数 C_v

$$C_v = \frac{R_v}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} = \Phi\left(\frac{1}{Re}\right)$$

$$C_v = f(Re)$$

结论：对于一定形状的物体，粘性阻力系数仅与雷诺数有关，当雷诺数相等时，两形似物体的粘性阻力系数必相等，称为**雷诺定律**。

二、兴波阻力相似定律（傅汝德定律）

根据研究分析认为,影响兴波阻力的物理量是 ρ 、 L 、 v 和重力加速度 g ,因而可写成:

$$R_w = \varphi(\rho, L, v, g)$$

上式共有5个有量纲的物理量。根据流体力学定律,取质密度、长度、速度三个量作为基本物理量,则其它两个物理量的量纲表达式为:



$$[R_w] = [\rho][L^2][v^2]$$

$$[T] = [L][v^{-1}]$$

$$[g] = [v][T^{-1}] = [v^2][L^{-1}]$$

根据量纲表示式,组成无量纲数 π_1, π_2 :

$$\pi_1 = \frac{R_w}{\rho v^2 L^2} \quad \pi_2 = \frac{g}{v^2/L} = \frac{gL}{v^2} = \frac{1}{Fr}$$



$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \text{ 称为傅汝德数}$$

$$\frac{R_w}{\rho v^2 L^2} \text{ 改写成 } \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} \text{ 称为兴波阻力系数 } C_w$$


$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} = \Phi\left(\frac{1}{Fr^2}\right)$$

$$C_w = f(Fr)$$



结论：对于给定船型的兴波阻力系数仅是傅汝德数的函数，当两形似船的傅汝德数相等时，兴波阻力系数必相等，这称为傅汝德定律。

对于实船和船模，由于它们船型相似，要求傅汝德数相等，故它们的兴波阻力系数必相等，可表示为：

$$\frac{R_{ws}}{\frac{1}{2}\rho_s v_s^2 S_s} = \frac{R_{wm}}{\frac{1}{2}\rho_m v_m^2 S_m}$$



$$\frac{R_{ws}}{\frac{1}{2}\rho_s v_s^2 S_s} = \frac{R_{wm}}{\frac{1}{2}\rho_m v_m^2 S_m} \quad \rightarrow$$

$$R_{ws} = R_{wm} \frac{\rho_s}{\rho_m} \alpha^3 = R_{wm} \frac{\rho_s}{\rho_m} \frac{\nabla_s}{\nabla_m}$$

$$\rightarrow R_{ws} = R_{wm} \frac{\Delta_s}{\Delta_m} \quad \rightarrow \frac{R_{ws}}{\Delta_s} = \frac{R_{wm}}{\Delta_m}$$

结论：形似船在相同的傅汝德数时，单位排水量兴波阻力必相等。这称为**傅汝德比较定律**。由此可知，试验求得船模的兴波阻力后，就可以得到相应速度时的实船兴波阻力。

三、船体总阻力相似定律（全相似定律）

船体总阻力 R_t 应是 ρ 、 L 、 ν 、 v 和 g 的函数，可写作：

$$R_t = \varphi(\rho, L, \nu, v, g)$$

上式共有6个有量纲的物理量。根据流体力学定律，取密度、长度、速度三个量作为基本物理量，则其它两个物理量的量纲表达式为：



$$[R_1] = [\rho][L^2][v^2]$$

$$[T] = [L][v^{-1}]$$

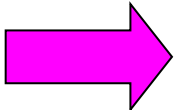
$$[\nu] = [L][v]$$

$$[g] = [v][T^{-1}] = [v^2][L^{-1}]$$

根据量纲式,组成无量纲数 π_1 、 π_2 、 π_3 :

$$\pi_1 = \frac{R_1}{\rho v^2 L^2} \quad \pi_2 = \frac{\nu}{Lv} = \frac{1}{Re} \quad \pi_3 = \frac{g}{v^2/L} = \frac{gL}{v^2}$$




$$C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} = \Phi\left(\frac{1}{Re}, \frac{1}{Fr^2}\right)$$


$$C_t = f(Re, Fr)$$

结论：水面舰船的总阻力系数是雷诺数和傅汝德数的函数；若能使实船和船模的雷诺数和傅汝德数同时相等，就称为全相似。在满足全相似的条件条件下，实船和船模的总阻力系数为一常数，故称为**全相似定律**。

5 船模阻力试验的依据

船模阻力试验的相似定律

粘性阻力相似定律——雷诺定律

当物体在粘性流体中运动时，其粘性阻力 R_v 与水的密度 ρ 、物体长度 L 、速度 U 、水的运动粘性系数 ν 有关，

$$R_v = (\rho, L, U, \nu) \quad C_v = \frac{R_v}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} = f(Re)$$

对一定形状的物体，粘性阻力系数 C_v 仅与雷诺数有关，当雷诺数相同时，则粘性阻力系数必然相等。

作为特例，在深水中顺着本身平面运动的极薄的平板所受阻力仅为摩擦阻力 R_f ，则

$$C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} = f(Re)$$

平板摩擦阻力系数 C_f 仅仅是雷诺数的函数，当雷诺数相同时，摩擦阻力系数必相等。

以上两式的函数关系，称为雷诺定律。



兴波阻力相似定律——弗汝德定律

影响兴波的物理量有：水的密度 ρ 、物体长度 L 、速度 U 、重力加速度 g

$$R_w = (\rho, L, U, g) \quad C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} = f(Fr)$$

对于给定船型的兴波阻力系数仅是弗汝德数 Fr 的函数，当两船的 Fr 相等时，兴波阻力系数必然相等，称为弗汝德定律。

由于实船与船模的船型是相同的，且在相应速度时，他们的弗汝德数也是相等的，故它们的兴波阻力系数必相等。

形似船在相应速度时（或相同 Fr 数），单位排水兴波阻力必相等，这称为弗汝德比较定律。由此可知，试验求得船模的兴波阻力后，就可得到相应速度时的实船兴波阻力。



船体总阻力相似定律——全相似定律

研究对象是在实际水面上航行的某给定船舶，由于既存在水面兴波，又要考虑水的粘性，所以船体总阻力 R_t 应是 ρ, L, U, ν, g 的函数

$$R_t = (\rho, L, U, \nu, g) \quad C_t = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} = f(Re, Fr)$$

由此可知，水面船舶的总阻力系数是雷诺数和弗汝德数的函数

。

若能使实船和船模的雷诺数和弗汝德数同时相等，就成为全相似。

满足全相似条件下，实船和船模的总阻力系数为一常数，故称为全相似定律。

如果船模试验能在满足与实船全相似的条件下进行，则可以将试验中测得的船模总阻力十分方便地求得实船的总阻力。但实践表



船模阻力试验的相似定律

船模和实船必须满足几何相似要求，如果实船和船模的线性缩尺比为 λ ，则实船和船模相应的线性尺度之间都是 λ 的关系，例如

$$\frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} = \lambda$$

式中，L、B、T分别为船长、船宽、吃水，下标s表示实船，m表示船模。

相应的面积之间都是 λ 的平方关系，例如

$$\frac{S_s}{S_m} = \frac{A_s}{A_m} = \lambda^2$$

式中，S、A分别为船体湿表面积和横剖面面积。



船模要保持实船和船模的阻力全相似，必须做到粘性力和重力相似，

即同时满足两者之间的雷诺数 $Re = \frac{UL}{\nu}$ 及弗汝德数 $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$ 相等。

若满足弗汝德数相等，则有： $\frac{U_s}{\sqrt{gL_s}} = \frac{U_m}{\sqrt{gL_m}}$

若满足雷诺数相等，则有： $\frac{U_s L_s}{\nu_s} = \frac{U_m L_m}{\nu_m}$

若同时满足弗汝德数和雷诺数相等，则有： $U_m = U_s \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^{\frac{3}{2}}$

假设，缩尺比为36，则有： $U_m = \frac{U_s}{216}$

显然，满足全相似条件是不现实的，只能满足部分相似。



前面已说明船模和实船无法实现全相似条件，只能满足部分相似。实际上，只能满足弗汝德数 Fr 相等，而不能满足粘性相似，即不能满足雷诺数相似。

因为，若使 $Re_m = Re_s$

$$\text{则必有：} \frac{U_m L_m}{\nu_m} = \frac{U_s L_s}{\nu_s} \quad \text{即：} U_m = \lambda \cdot U_s \cdot \frac{\nu_m}{\nu_s}$$

由于船模和实船所处的介质的运动粘性系数两者数值接近，若假定 $\nu_m = \nu_s$ ，则： $U_m = \lambda \cdot U_s$

由于船模比实船一般缩小几十倍以上，这就要求船模的速度较实船速度要大上几十倍，甚至达到超音速情况下进行试验，显然是不现实的。



因此，船模阻力试验，对于水面舰船来说，实际上都是在满足**弗汝德数Fr相等**的情况下进行的。

由于试验是在部分相似条件下所得的船模阻力值，因此必须借助于某些假设，诸如**弗汝德假定**、**休斯假定**等才能得到相应的实船总阻力。这里需要特别注意的是：船模阻力试验虽无法满足与实船的雷诺数相等，但**并不等于对船模试验的雷诺数 Re_m 没有任何要求**。实船雷诺数的量级是 10^9 ，实船船体周围边界层中的水流都是出于**紊流**状态，因而要求船模试验时边界层中的水流也要处于紊流状态。因此，船模试验的雷诺数，必须保证在**临界雷诺数 10^6** 以上，并且在船首安装**激流装置**，才能满足船模边界层中的水流处于紊流状态。否则，船模阻力试验的结果，会因层流影响而不能正确的换算至实船总阻力。



实船阻力外推方法

船模阻力试验的目的主要是把实验得到的船模阻力换算到实船的静水总阻力或有效功率。具体的换算方法有二因次换算法（Froude法）和三因次换算法（1978年15届ITTC会议推荐）。

一、弗汝德换算法

弗汝德换算法又称二因次换算法，在20世纪60年代前作为标准方法为世界各国试验水池采用，目前很多试验池仍然采用该种换算法。

二、休斯换算法

休斯换算法又称三因次换算法和 $(1+k)$ 法，由休斯在20世纪50年代提出，该法经过20余年的发展完善，在1978年的ITTC会议上被推荐为标准换算法。



(1) 弗汝德换算法

1、弗汝德假定

由于船模试验无法同时满足弗汝德数与雷诺数相等，试验中仅保证弗汝德数相同。为从船模试验结果求得实船阻力，弗汝德提出了下列假定：

(1)假定船体总阻力 R_t 可分为独立的两部分：摩擦阻力 R_f 与剩余阻力 R_r 。摩擦阻力 R_f 只与雷诺数有关；剩余阻力 R_r 由粘压阻力 R_{pv} 与兴波阻力 R_w 合并得来，只与弗汝德数有关，且适用比较定律。

$$R_t(Re, Fr) = R_f(Re) + R_r(Fr)$$

$$R_r = R_{pv} + R_w$$

$$R_t = R_f + R_r = R_f + (R_{pv} + R_w)$$

$$C_t = C_f + C_r = C_f + (C_{pv} + C_w)$$

(2)假定船体的摩擦阻力等于同速度、同长度、同湿面积的平板摩擦阻力。因此可用**平板摩擦阻力公式**计算船体的摩擦阻力，称为**相当平板假定**。



2、弗汝德法的换算关系

按佛汝德观点，船模试验应按照佛汝德数 $F_{rm}=F_{rs}$ 进行。其中：

$$\frac{U_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} = \frac{U_s}{\sqrt{g \cdot L_s}} \quad \text{下标m和s分别代表模型和实船。}$$

由佛汝德数相等可得船模与实船对应速度之间的关系：

$$U_m = U_s \cdot \sqrt{\frac{L_m}{L_s}}$$

通过模型试验可以得到船模在速度 U_m 下的总阻力 R_{tm} ，进而求出模型的总阻力系数 C_{tm} ：

$$C_{tm} = \frac{R_{tm}}{\frac{1}{2} \rho_m \cdot U_m^2 \cdot S_m}$$

船模的摩擦阻力系数按照ITTC-1957公式进行计算：

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2}$$

船模的剩余阻力系数 C_{rm} 按下式计算： $C_{rm} = C_{tm} - C_{fm}$



2、弗汝德法的换算关系

在流态不变的情况下，粘压阻力系数 C_{pv} 值基本上与 Re 无关，而主要取决于物体的形状。特别需要指出的是，当 Re 超过临界雷诺数后，粘压阻力系数 C_{pv} 几乎是常数，也就是粘压阻力近似与速度的平方成比例。这意味着，在这一区域范围内，实船和船模尽管雷诺数不同，但粘压阻力系数必然相等。 $C_{pvm}=C_{pvs}$

根据弗汝德定律，形似船在相应速度时（或 Fr 相同时），兴波阻力系数相等。 $C_{wm}=C_{ws}$

所以： $C_{rm}=C_{rs}$

实船的摩擦阻力系数按照ITTC-1957公式进行计算： $C_f = \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2}$

实船的总阻力系数 C_{ts} 按下式计算： $C_{ts}=C_{fs}+C_{rs}+\Delta C_f$

则实船的总阻力 R_{ts} 为： $R_{ts} = C_{ts} \cdot \frac{1}{2} \rho_s \cdot U_s^2 \cdot S_s$

实船的有效功率： $P_E = \frac{R_{ts} \cdot U_s}{75}$



3、弗汝德法的合理之处

- ◆ 使用该方法预报实船阻力与**实际值基本吻合**，能够较准确地满足实际工程上的需要；
- ◆ 后来由边界层理论解释了其合理之处：首先，与 Re 有关的**摩擦阻力只在物体近表面的边界层内才有意义**，界层以外可以看作是无粘性的理想流体，或者说边界层以外没有较大的速度梯度；其次，物面曲率半径较边界层厚度大得多时，就边界层的形成原因而言，受物面曲率的影响较小，所以摩擦阻力可以按照相当平板公式进行计算。
- ◆ **粘压阻力在船舶总阻力中的比重较小**，且其与 Re 数的关系也不大，将其并入剩余阻力系数并适用比较定律，也不致产生明显的误差。



4、弗汝德法的不足之处

严格地讲，弗汝德假定既不完善，也不合理。

首先，弗汝德将船体阻力分成互不相关的两个独立部分，一部分仅与重力及弗汝德数有关，另一部分仅与粘性及雷诺数有关，忽略了两者的相互影响。

其次，弗汝德将兴波阻力与粘压阻力这两种不同性质的阻力成分合并为剩余阻力，并认为符合弗汝德比较定律，这在理论上并不妥当。

最后，船体形状是复杂的三因次物体，其周围流动与平板相比显然有一定差别，因此用相当平板的摩擦阻力来代替船体摩擦阻力，必然存在误差。

弗汝德假定虽有其欠妥之处存在，但仍能较好地满足实际工程上的需要，所以根据弗汝德假定所得出的船模阻力换算法一直沿用至今。



(2) 休斯观点

一、休斯观点及实船阻力表示式

三因次换算法的基本思想

(1) 粘压阻力与摩擦阻力合并为粘性阻力并与雷诺数有关。

(2) 兴波阻力与弗汝德数有关。

(3) 根据船模试验结果，认为粘压阻力系数 C_{pv} 与摩擦阻力系数 C_f 之比是一常数

$$k = \frac{C_{pv}}{C_f} \qquad 1 + k = \frac{C_v}{C_f}$$

$$R_t = R_f + R_{pv} + R_w$$

$$R_t = (1 + k)R_f + R_w$$

$$C_t = (1 + k)C_f + C_w$$



问题：通过试验测量得到船模总阻力系数 C_{tm} ，如何推算实船总阻力系数 C_{ts} ？

对于船模：

$$C_{wm} = C_{tm} - (1+k)C_{fm}$$

考虑粗糙度修成后的实船总阻力系数：

$$C_{ts} = C_{tm} - (1+k)(C_{fm} - C_{fs}) + \Delta C_f$$

休斯观点引入了形状因子以照顾船舶的三因次流动，所以也称为**三因次换算法**，或**(1+k)法**。



15届ITTC推荐的三因次计算公式为：

$$\text{无舦龙骨时 } C_{ts} = C_{tm} - (1+k)(C_{fm} - C_{fs}) + \Delta C_f + C_{aa}$$

$$\text{有舦龙骨时 } C_{ts} = \frac{S + S_{bk}}{S} [(1+k)C_{fs} + \Delta C_f] + C_{wm} + C_{aa}$$

上式中， ΔC_f 及 C_{aa} 分别表示粗糙度补贴系数及空气阻力系数； S 及 S_{bk} 分别为实船湿表面积和舦龙骨面积。



二、形状因子的确定方法

- 1) 低速船模试验法;
- 2) 普鲁哈斯卡 (Prohaska) 方法;
- 3) 15届ITTC推荐方法。



1. 低速船模试验法

休斯建议，采用低速船模试验的方法确定船体形状因子 $(1+k)$ 。因为在极低速条件下 $(Fr \rightarrow 0)$ ，船舶的兴波阻力近似为零，此时船模的总阻力近似等于粘性阻力，即：

$$R_{tm} \approx (1+k)R_{fm}$$

由此可知，在船模实验测得船模总阻力 R_{tm} 后，应用相当平板理论求得 R_{fm} ，即可得到船体形状因子 $(1+k)$ 。



缺点：该方法理论正确，但实施困难。

1) 低速时船模阻力本身就很很小，故测得的阻力值相对误差较大；

2) 低速时船模的雷诺数较低，存在较严重的层流影响，船模与实船周围流动之间存在较大的尺度效应，所得到的船体形状因子 $(1+k)$ 值可能与实船存在较大的偏差。

尺度效应：由于模型与实船之间的绝对尺寸不同，二者流动无法保证完全的力学相似，因而引起某些力甚至流态等的差别，造成由模型试验结果换算至实船时发生偏差。

正因为如此，休斯观点提出后很长一段时间未得到重视和使用。



2. 普鲁哈斯卡 (Prohaska) 方法

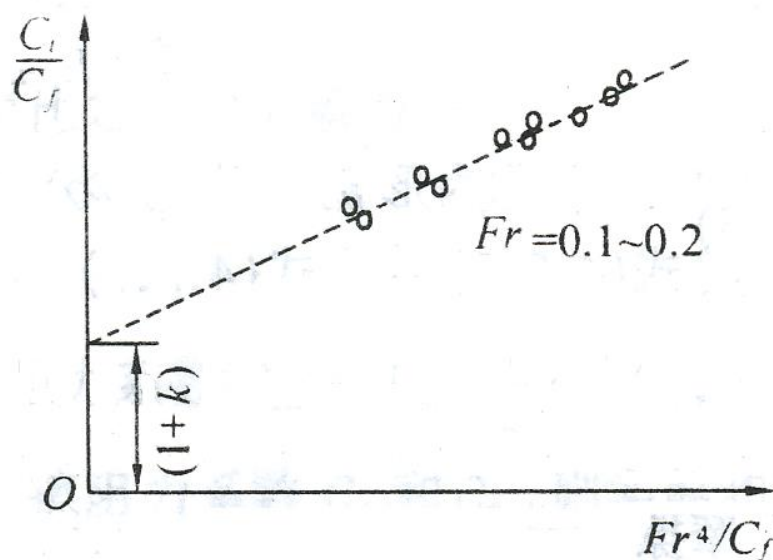
在1966年第11届ITTC会议上，普鲁哈斯卡提出了一种确定 $(1+k)$ 的新方法：在 $Fr=0.1\sim0.2$ 范围内，可以假定船舶兴波阻力系数 C_w 与佛汝德数 Fr 的四次方成正比，即： $C_w = yFr^4$ 。船体的总阻力系数可以表示为：

$$C_t = (1+k)C_f + yFr^4$$

进一步整理可得：

$$\frac{C_t}{C_f} = (1+k) + y \frac{Fr^4}{C_f}$$

作图如图示。试验线的斜率为 y ，截距即为 $(1+k)$ 。



普鲁哈斯卡法



华南理工大学

South China University of Technology

3.第15届ITTC推荐方法

在1978年第15届ITTC会议上，根据普鲁哈斯卡思想，并参照许多实验结果，给出了更一般的兴波阻力系数表示式，即： $C_w = yFr^m$ ，船体的总阻力系数可以表示为：

$$C_t = (1+k)C_f + yFr^m$$

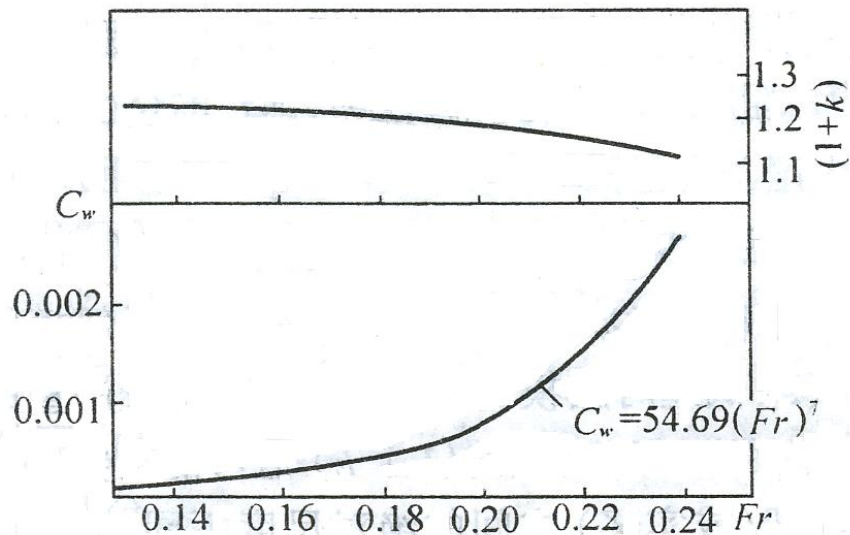
指数 m 视船型而定，通常变化范围为2~6范围内的整数；由最小二乘法确定 $(1+k)$ 、 y 、 m 三个未知数。

会议还同时建议摩擦阻力系数按照ITTC—1957公式计算，粗糙度补贴系数 ΔC_f 可按照前述公式计算。



4. 普鲁哈斯卡 (Prohaska) 方法和第15届ITTC推荐方法的比较

低速时 $(1+k)$ 近似
为一常数，在航速较高时
($Fr > 0.16$)，随 Fr 的增大而
减小。其他很多船的实验也
证明了这一点，这与休斯假
设 $(1+k)$ 为常数存在偏差。



24 000 t 油轮的兴波阻力系数及 $(1+k)$ 值

同时，由图中可见，兴波阻力系数曲线近似为 Fr 的 7 次方函数，这与普鲁哈斯卡方法假设的兴波阻力系数近似为 Fr 的 4 次方也是有差距的。



针对该船（24000t油轮），人们制作了五条不同尺寸的几何相似船模，根据模型试验结果分别应用普鲁哈斯卡方法和15届ITTC方法进行分析计算，并将得到的 $(1+k)$ 值列于表中进行比较。

(1 + k) 值的分析结果

	SM - 54	SM - 47	SM - 40	SM - 33	SM - 26
普鲁哈斯卡法	1.165 7	1.173 7	1.181 4	1.155 5	1.176 9
ITTC 推荐法	1.192 9	1.194 0	1.194 8	1.192 9	1.198 3



5. 二因次换算法与三因次换算方法比较

二因次和三因次法换算的实船总阻力系数

航速 /kn	方法	船 模				
		SM - 54	SM - 47	SM - 40	SM - 33	SM - 26
		实船总阻力系数 $C_t \times 10^3$				
13.178	二因次法	2.969	2.918	2.881	2.883	2.885
	ITTC 三因次法	2.527	2.506	2.520	2.545	2.549
14.538	二因次法	3.105	3.058	3.004	2.985	2.919
	ITTC 三因次法	2.674	2.656	2.652	2.654	2.648
15.771	二因次法	3.319	3.277	3.227	3.216	3.171
	ITTC 三因次法	2.896	2.882	2.881	2.891	2.876

表中为前述五条船模的二因次和三因次换算方法得到的实船总阻力系数对比情况。



6 船模阻力试验

实验目的

通过试验的方法，得到船模阻力与航速之间的关系曲线，学会由模型试验结果推算实船阻力性能的方法，并根据船模阻力曲线预报实船在指定航速时所需的有效功率。



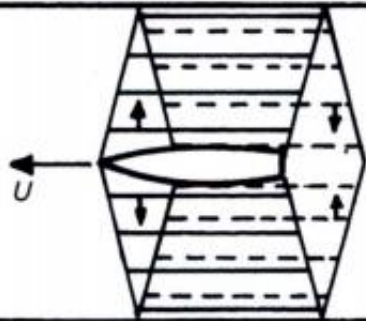
模型设计与制作加工

依据付如德Froude相似条件设计模型，需要考虑：

- 1) 模型尺度；
- 2) 加工成本；
- 3) 尺度效应；
- 4) 水池长度、宽度（池壁效应、阻塞效应）及拖车航速能力。



池壁效应 (Tank wall effects)



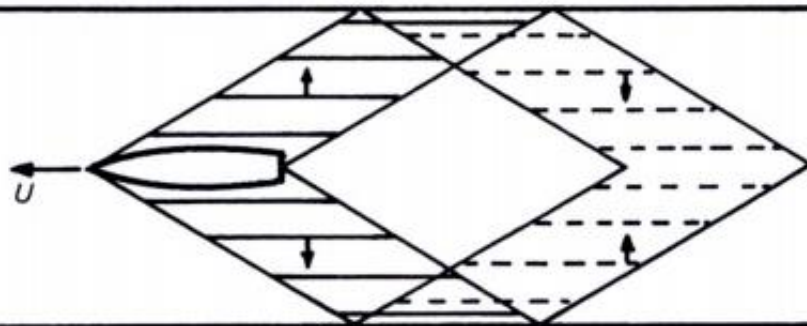
(a) $U < U_{crit}$: interference

Radiated waves=created by model motions

Diffracted waves=incoming waves reflected by the model

Wave group speed: $c_g = \frac{g}{2\omega_e}$

$$U_{crit} = \frac{L_M}{t_w} = \frac{L_M \cdot c_g}{B} = \frac{L_M \cdot g}{B \cdot 2 \cdot \omega_e}$$



(b) $U > U_{crit}$: no interference

Tank wall interference: ——— radiated waves; - - - - reflected waves.

This is why you should not run zero speed tests in a towing tank!

模型设计与制作加工

制作方法一般分两种：

1) 玻璃钢（翻模法）

2) 木质（雕刻）；



阳模



阴模



玻璃钢模型



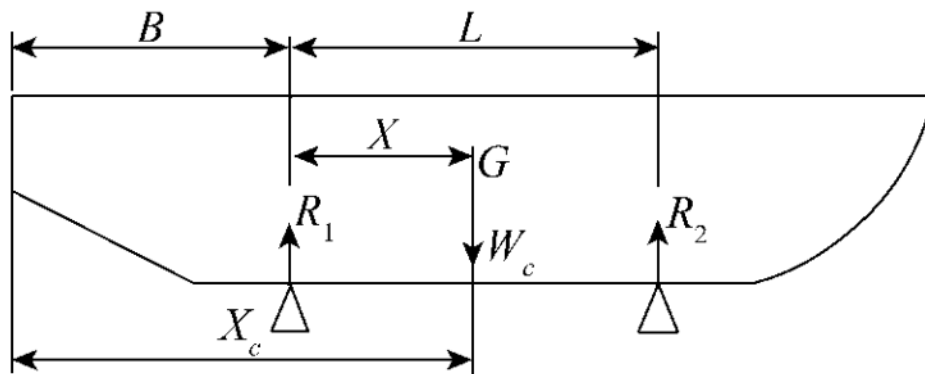
木制雕刻模型

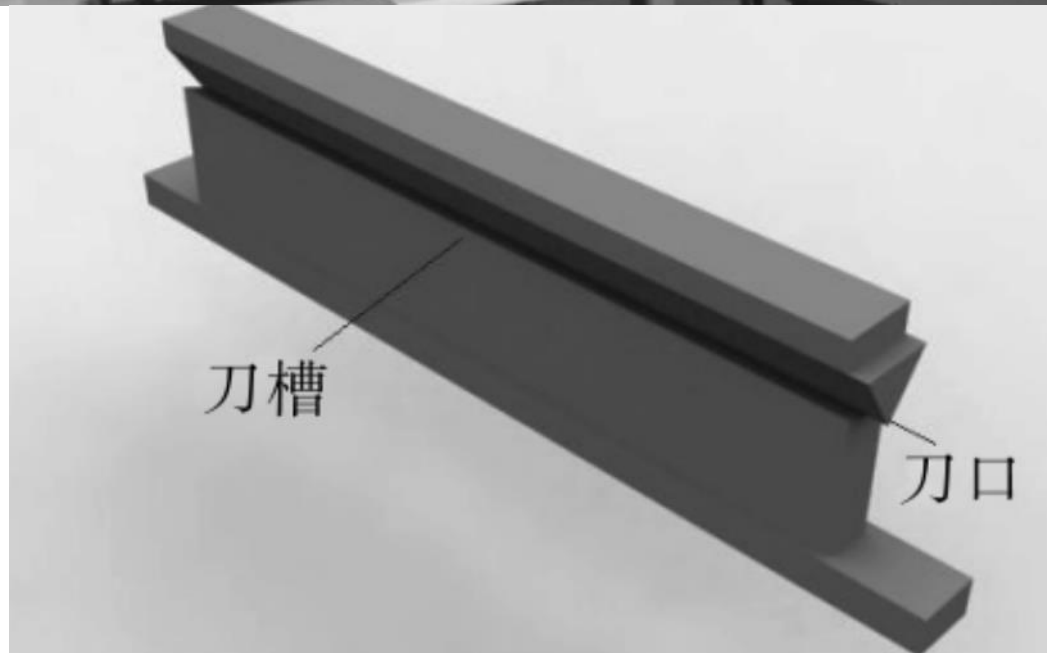
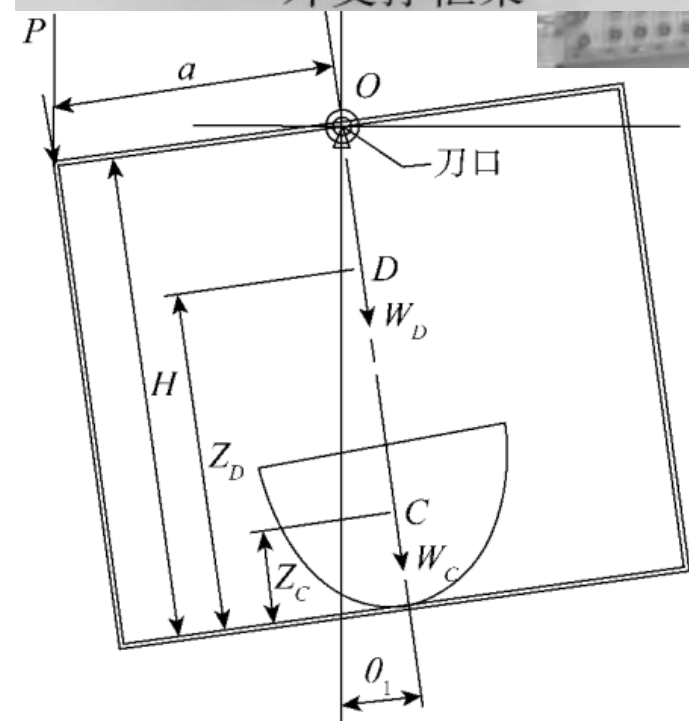
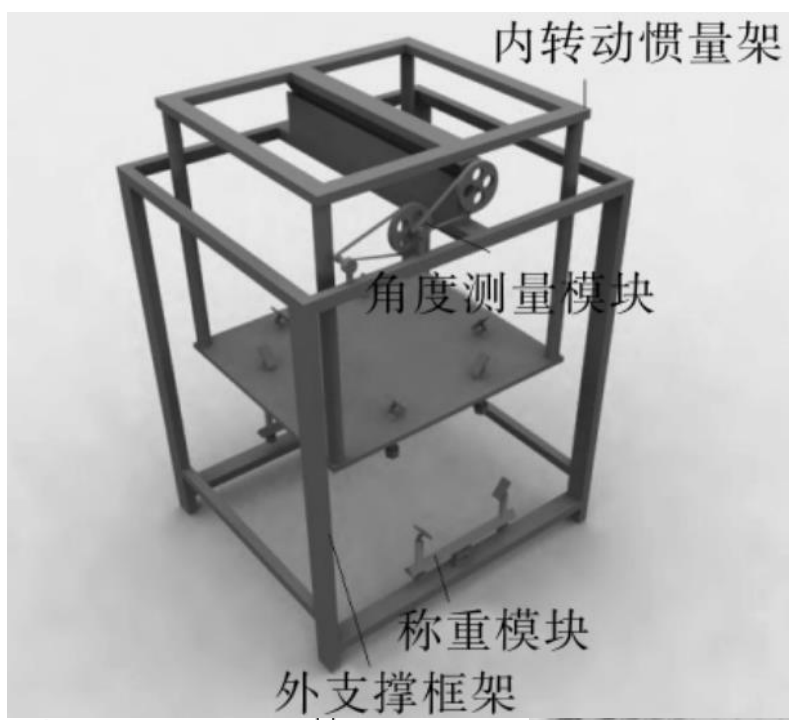


模型调试

调试内容包括：

- 1) 放置压载块；
- 2) 重心纵向位置（用电子秤杠杆法）；
- 3) 重心垂向位置（转动惯量架）；
- 4) 浮态及水线调整（下水后）；
- 5) 测力天平安装；
- 6) 安装激流丝。

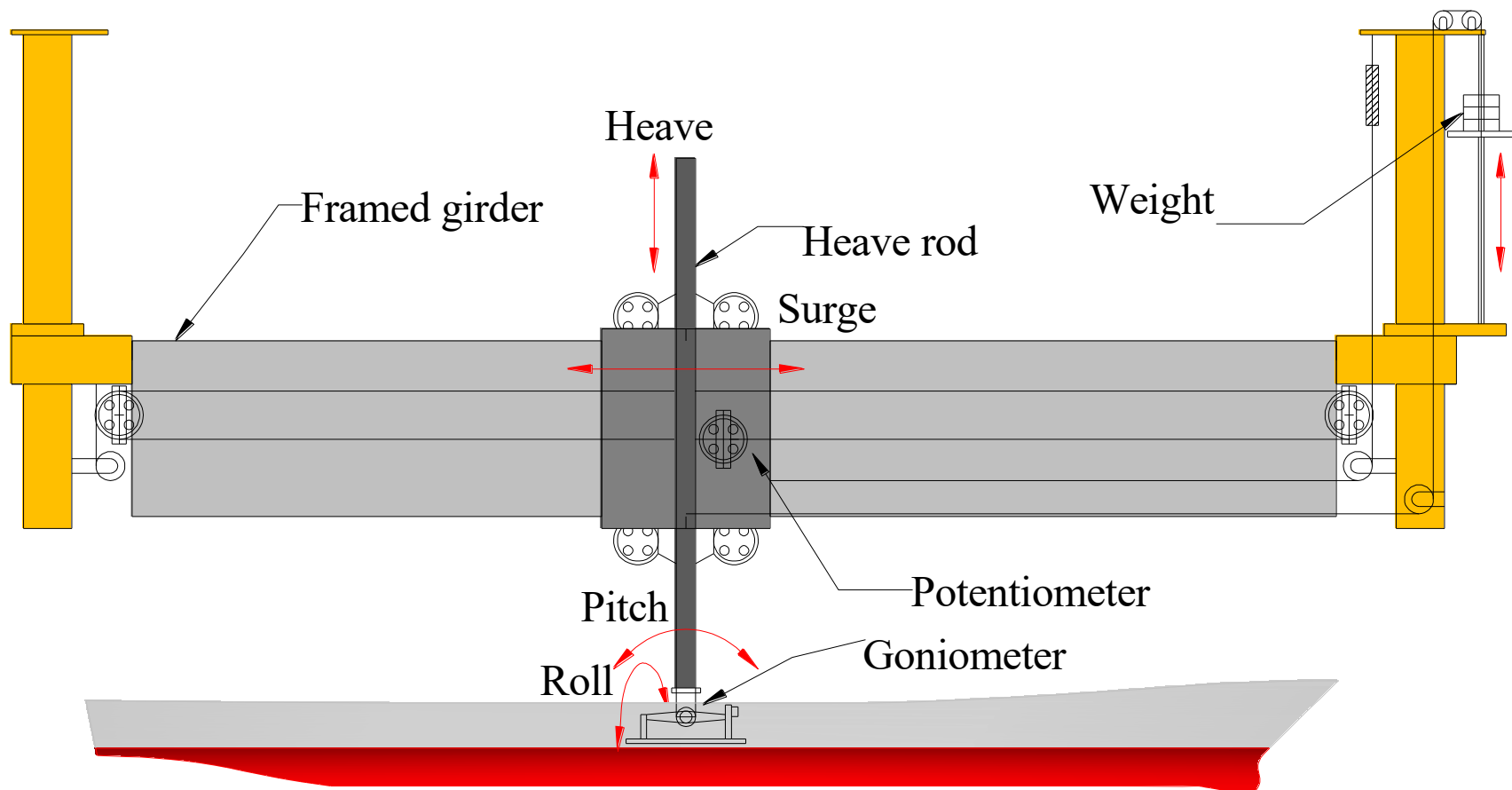




船体阻力水池试验所需仪器设备

- 1、水池及拖车；
- 2、船模阻力仪（或适航仪），含测力天平；
- 3、数据采集与分析处理器；
- 4、导向杆；
- 5、船模（包括压载块）。







试验前准备工作

- 1) 对拖车调速系统进行检查，保证其工作的稳定性；
- 2) 检查拖车轨道的表面是否清洁，不允许有杂物和水、油滴等。如有，则用干布拭去；
- 3) 检查池水表面是否清洁无灰尘、油污，如有，则需去除（刮水面）；
- 4) 对所使用的仪器、设备如阻力仪、适航仪等进行标定检验，检验数据采集与处理器工作稳定性；



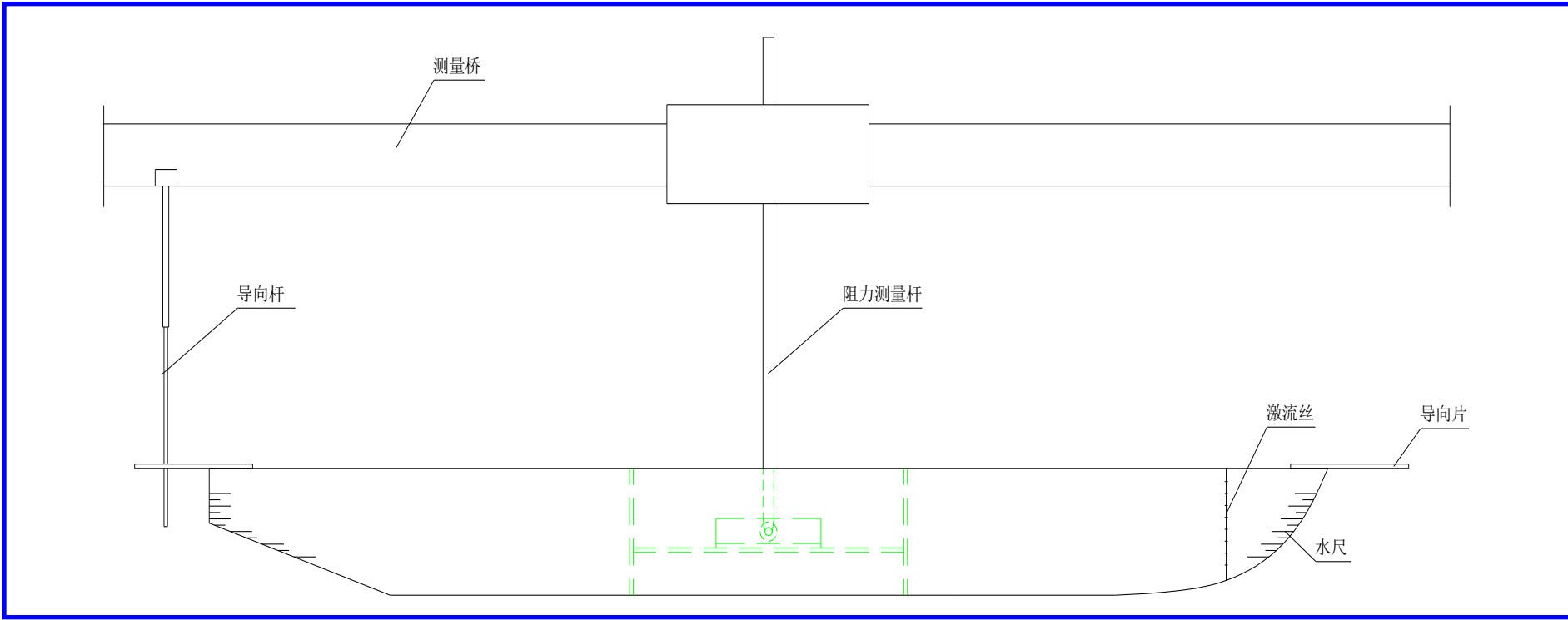
5) 检查水温测量装置工作是否正常，并记录水池水温（在水深方向的温差应小于 2°C ）；

6) 调整船模的排水量、重心位置、浮态，使其符合试验要求，同时船模在水下部分的表面上应无气泡；

7) 激流丝的安装要正确，导向器的安装应灵活可靠，参见下图；

8) 拖点的位置以及拖力的方向要与实船一致，对于一般的排水量船，通常拖点高度就取在重心处。

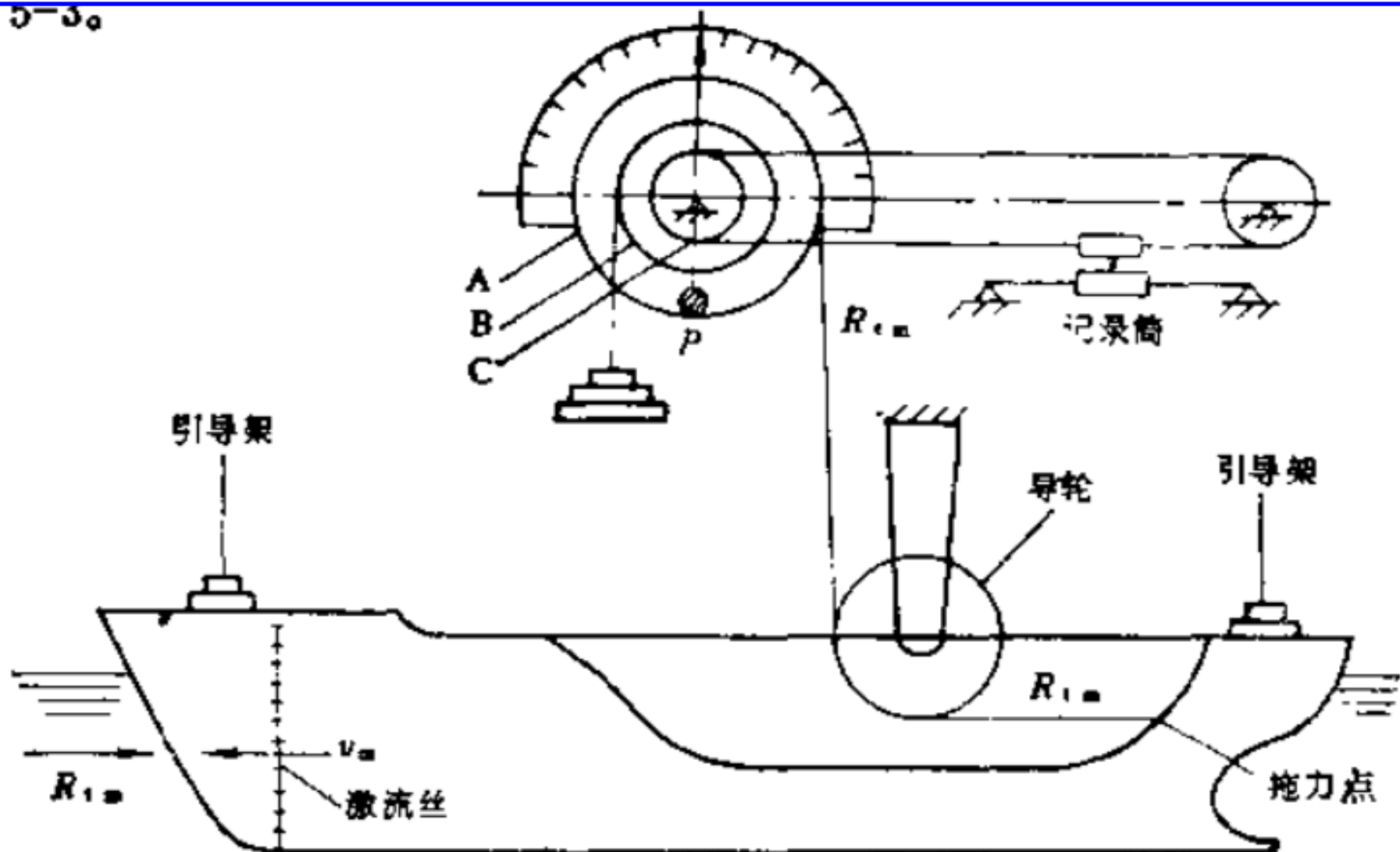




模型安装示意图



5-50



船模阻力试验程序

按照事先拟定的试验速度启动拖车，待拖车到达稳速状态后释放船模制动器，开始测量船模阻力和相应的前进速度。阻力测量的误差一般应小于 $\pm 50\text{mN}$ ，速度误差应小于 0.1% 。在拖车稳速段即将结束前（或者在测量已经完成时）停止记录，制动船模，再使拖车减速直到停止。然后以低速将拖车退回到试验起始位置，等待水面平静后（等水）再做下一航次试验。

。



为提高试验精度和重复性，注意以下事项：

- 1) 先用中等速度（1.0m/s左右）将船模拖行一次（破水），不进行测量，目的是造成水面有一定的初始紊流度；
- 2) 各航次试验的间隔（等水时间）应不少于10分钟，高速航次的时间间隔应更长些；
- 3) 如可能，高速点与低速点航次应穿插进行，而不是由低速至高速或者由高速至低速依次递增（递减），目的是使各航次试验的初始紊流度大体相同；
- 4) 试验过程中，将每个速度所对应的船模阻力值点绘在坐标纸上，以便随时检查阻力曲线的光顺程度，判断试验结果是否可信。对于有疑问的试验点应及时重做，或在其附近增加试验点；
- 5) 记录水池水温。



试验数据记录

定常过程中，测量内容包括：阻力（**resistance**）、纵倾角（**trim**）、沉深（**sinkage**）、摄像。

将船模阻力试验结果绘制成阻力与速度的关系曲线，如图2所示；然后按照光顺后的曲线，重新选取航速与阻力值对应点，再进行换算出实船有效功率，并绘制出实船有效马力—航速之关系曲线图。如果实验水池的阻塞比过大，还应对试验结果进行阻塞修正，然后再换算到实船。



试验数据分析

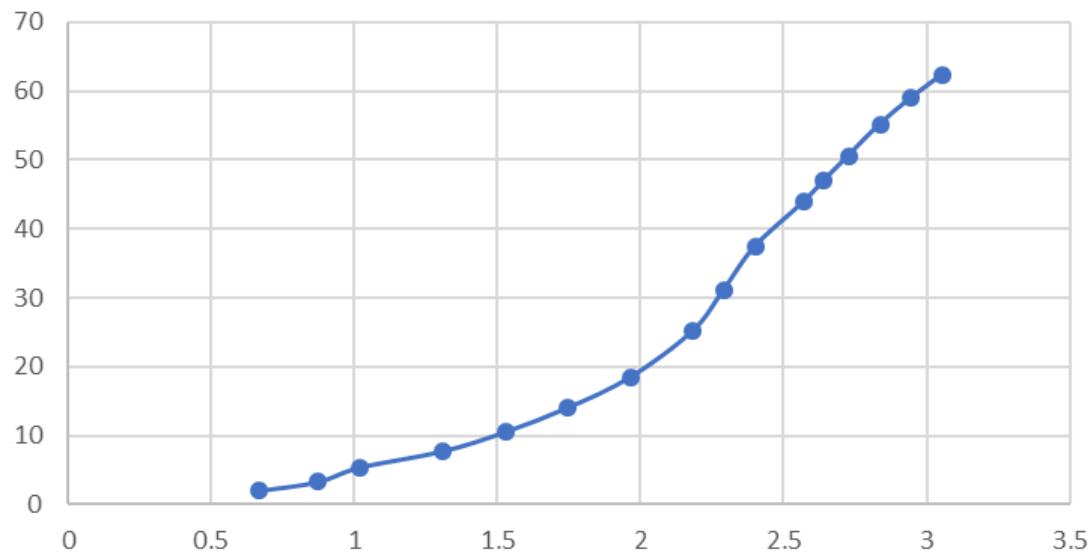
Time [s]	Al 0 - -resist [N]	Al 2 - -hh [mm]	Al 3 - -pitch [d]
0	0.067186892	0.097407229	0.002793228
0.01	0.079393923	0.10961426	0.0037087554
0.02	0.073290408	0.10961426	0.002793228
0.03	0.091600955	0.11571778	0.0041665188
0.04	0.054979857	0.079096682	0.00096217328
0.05	0.10380799	0.12182129	0.0046242825
0.06	0.067186892	0.085200198	0.001419937
0.07	0.085497439	0.10961426	0.0023354643
0.08	0.048876341	0.079096682	-0.00086888141
0.09	0.067186892	0.097407229	0.0005044096
0.1	0.054979857	0.085200198	-0.00086888141
0.11	0.091600955	0.10961426	0.0005044096
0.12	0.067186892	0.097407229	-0.00041111774
0.13	0.073290408	0.085200198	-0.001326645
0.14	0.03666931	0.048579108	-0.0040732273
0.15	0.061083373	0.079096682	-0.0017844087
0.16	0.054979857	0.060786139	-0.0031576997
0.17	0.067186892	0.066889651	-0.0017844087
0.18	0.03666931	0.036372077	-0.0049887546
0.19	0.09770447	0.097407229	0.0005044096
0.2	0.03666931	0.048579108	-0.0040732273

船模阻力试验结果记录表

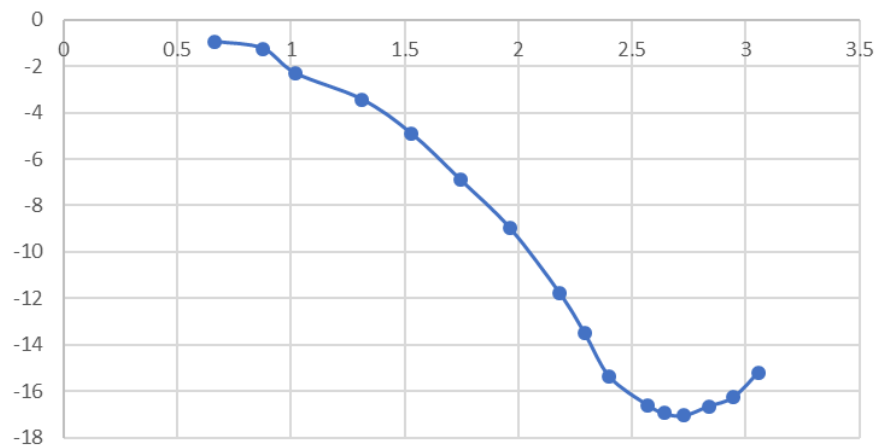
实船航速 U_s (kn)	船模速度 U_m (m/s)	阻力 R (N)	重心升沉 Z (mm)	纵倾角(deg)
9	0.665	2.017	-0.95	0.0080
12	0.873	3.312	-1.2399	-0.0149
15	1.019	5.407	-2.3137	-0.027
18	1.309	7.772	-3.4283	-0.0371
21	1.527	10.538	-4.889	-0.0446
24	1.746	14.069	-6.9058	-0.0177
27	1.964	18.483	-8.991	0.0013
30	2.182	25.173	-11.78	0.133
31.5	2.292	31.207	-13.502	0.279
33	2.401	37.508	-15.369	0.477
34.5	2.57	43.895	-16.600	0.881
36	2.641	47.004	-16.950	0.979
37.5	2.728	50.640	-17.055	1.182
39	2.837	55.180	-16.647	1.361
40.5	2.946	58.971	-16.261	1.504
42	3.055	62.347	-15.194	1.610



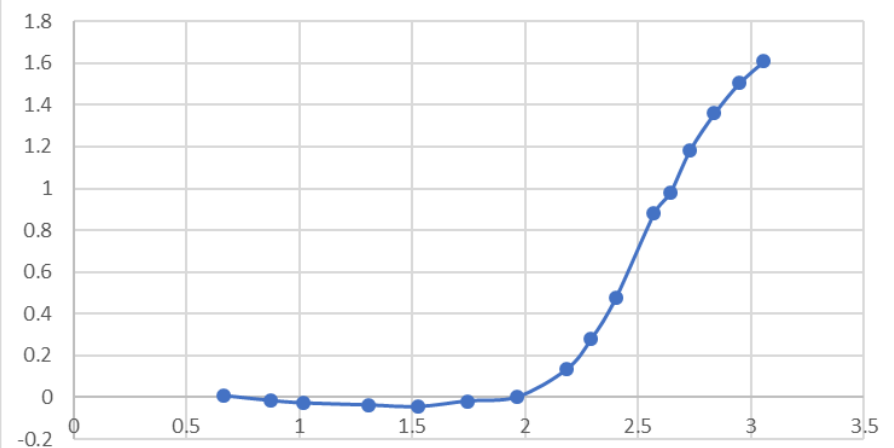
阻力 $R(N)$



重心升沉 $Z(mm)$



纵倾角(deg)



误差分析

- 试验本身的一些影响因素
 - 池壁影响；
 - 尺度效应；
 - 拖车速度（加速度、平稳度）；
 - 轨道平直；
 - 消波（等水平静后再开始下次试验）；
 - 人员走动振动干扰；
 - 测量仪器本身的误差；
 - 试验不确定性。



End



华南理工大学
South China University of Technology