



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

课程：船舶流体力学

主讲人：万德成

章节：第10章 相似分析

内容：10.6 模型试验设计



模型实验

模型实验是依据相似原理，制成和原型相似的小尺度模型进行实验研究，并以实验的结果测出原型将会发生的流动现象。

实际发生的现象被称为原型现象，模型实验的侧重点是再现流动现象的物理本质；只有保证模型实验和原型中流动现象的物理本质相同，模型实验才是有价值的。

如果只有对其流动现象有充分的认识，并了解支配其现象的主要物理法则，但还不能对其作理论分析或数值模拟的原型，最适合做模型实验。



全面相似实验

按照相似原理，如果要两个流动达到全面相似，就必须使模型和原型两种流动完全满足几何相似、运动相似和动力相似，且具有相似的初始条件和边界条件，即：使所有相似准则（ Re ， Eu ， Fr ， St ）分别相等，且初始条件和边界条件相似，这实际上是困难的，有时甚至是办不到的。

例如对于粘性不可压缩流体定常流动，尽管只有 2 个相似准则 Fr 和 Re ，但也很难满足，这是因为：



模型实验设计

(1) 要满足 $(Re)_p = (Re)_m$ ，即 $\frac{V_p l_p}{\nu_p} = \frac{V_m l_m}{\nu_m}$ ，假设两种流动的介质一样，即 $\nu_p = \nu_m$ ，且模型尺寸为原型尺寸的1/10，即 $C_l = l_p / l_m = 1/10$ ，则应有 $C_V = V_p / V_m = 1 / C_l = 10$ ，即要求模型中的流速应为原型中的 10 倍。

(2) 要满足 $(Fr)_p = (Fr)_m$ ，即 $\frac{g_p l_p}{V_p^2} = \frac{g_m l_m}{V_m^2}$ ，假设 $g_p = g_m$ ，在 $C_l = l_p / l_m = 1/10$ 的情况下，则要求 $C_V = \sqrt{C_l} = 1/3.16 = V_p / V_m$ ，即要求模型中的流速应为原型中流速的 1/3.16。

显然这与第一项的要求是矛盾的。



解决这一矛盾的办法只有在模型中使用与原型中不同粘性系数的流体：假定取 $C_V = 3.16$ ，以满足 Fr 数相等的要求，而同时要满足 Re 数相等的要求，就应使

$$C_v = \frac{\nu_p}{\nu_m} = \frac{V_p}{V_m} \frac{L_p}{L_m} = C_V C_l = 31.6$$

这就是说，模型实验中只有使用运动粘性系数 ν 为原型 $1/31.6$ 的流体，这是很难做到的。



近似相似实验

全面相似实验几乎不可能，为了使模型研究得以进行，就必须对各相似条件逐一分析，对那些主要的、起决定作用的条件，应当尽量加以保证；而对那些次要的条件只需近似满足，甚至忽略，这样不会引起大的误差。这种近似相似实验也是完全可能的。

比如：无压明渠流动中，重力起主导作用，而粘性力则处于次要地位，因此，重力相似准则数 Fr 就是主要相似准则。这在水利工程上得到广泛的应用。



再比如：在圆管内的流动，粘性力决定流动阻力的大小，而重力则处于次要地位，因此雷诺数 Re 成了主要相似准则。这种方法在管内流动、液压技术、流体机械的模化实验中得到广泛应用。

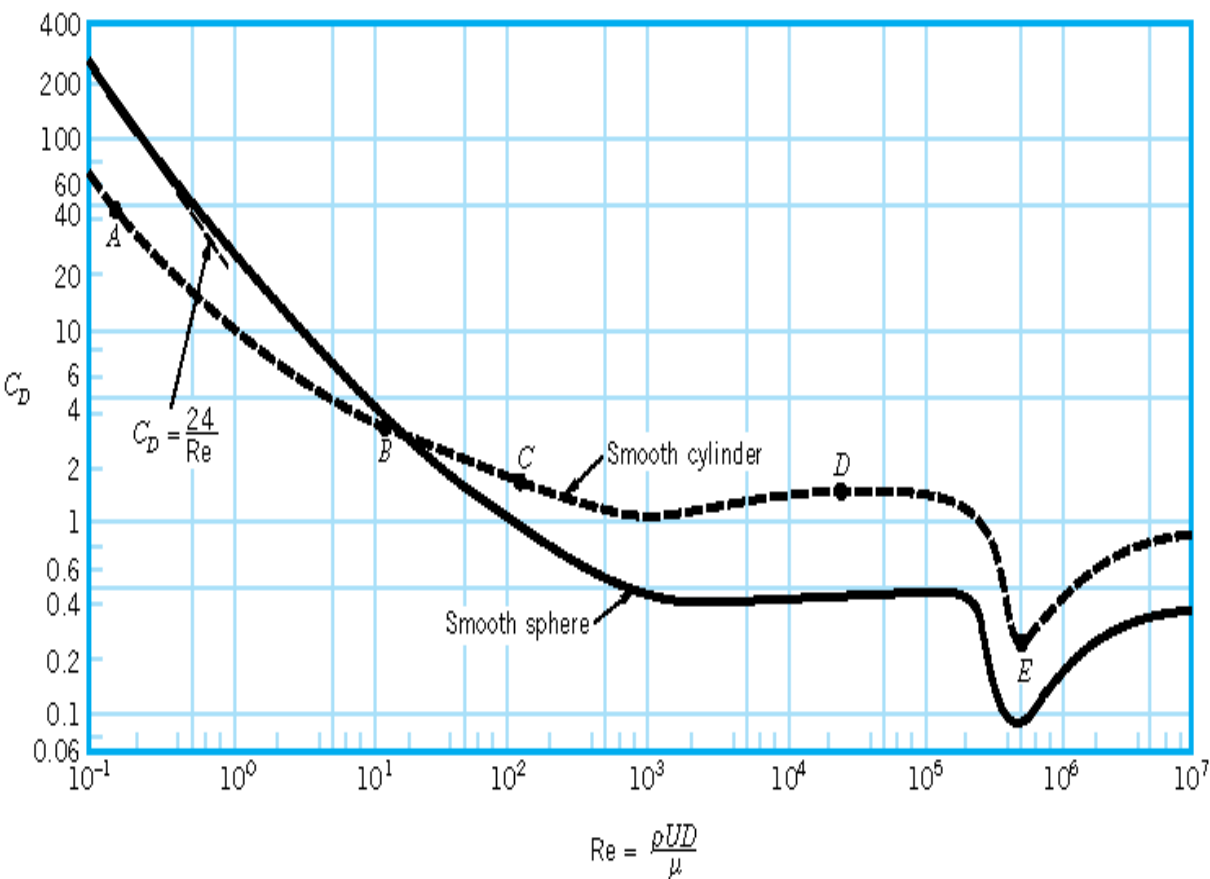
在上述管内流动中， Re 数是主要相似准则，那么，是否一定需要 $Re_m = Re_p$ 呢？假设在小得多的模型实验中使用与原型同样的流体，从 $Re = Vd/\nu$ ，则需要实验流速大大增加；如果流动介质是气体，则高速流动必须考虑流体压缩性的影响。



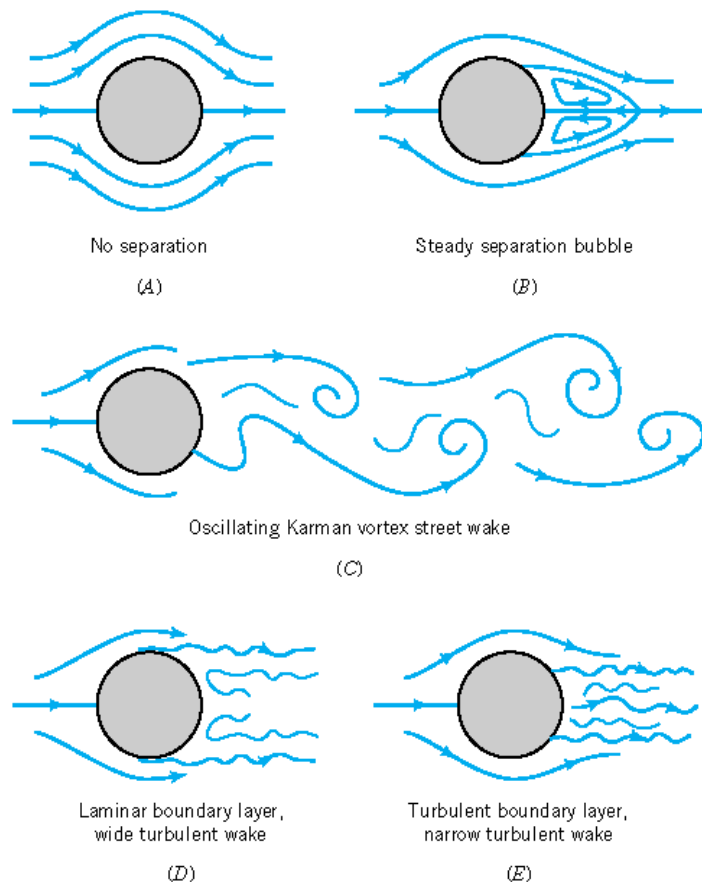
由流动阻力实验知道，当雷诺数 Re 超过某一数值后，阻力系数不随 Re 变化，此时流动阻力的大小与 Re 无关，这个流动范围称为**自模区**。若原型和模型流动都处于自模区，只需几何相似，不需 Re 相等，就自动实现阻力相似。工程上许多明渠水流处于自模区，按 Fr 准则设计的模型，只要模型中的流动进入自模区，便同时满足阻力相似。



绕圆柱流动的阻力系数与雷诺数的关系



(a)



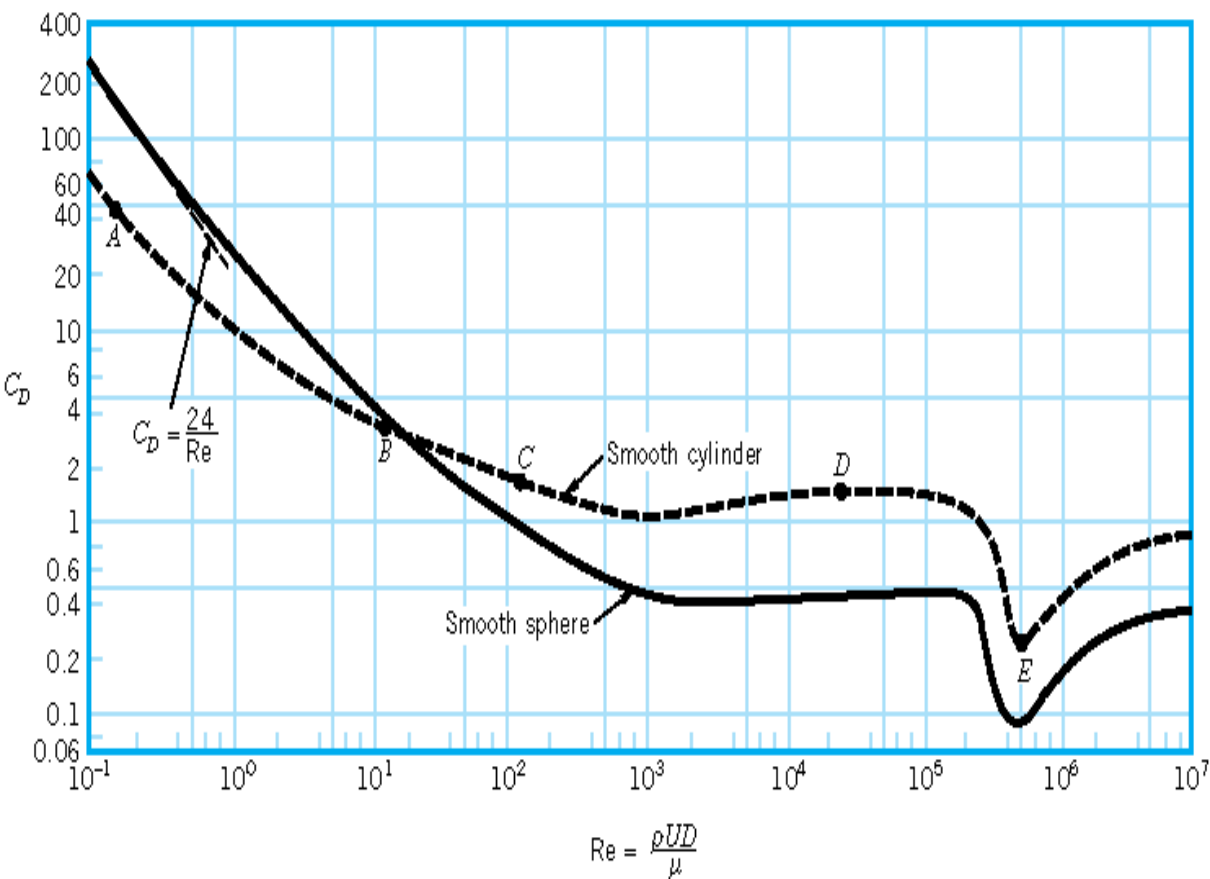
(b)



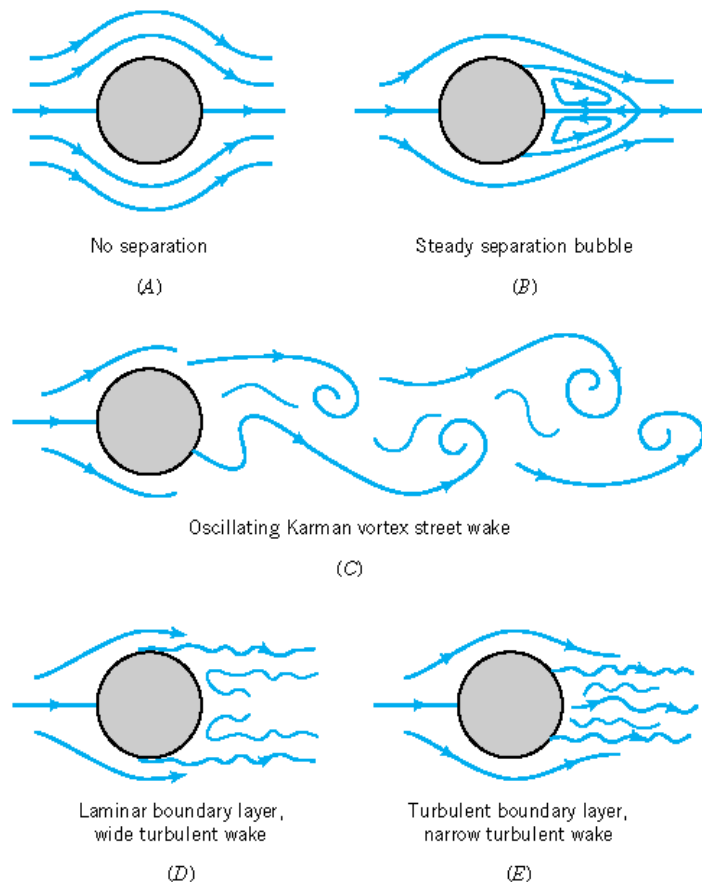
流动的自模性给实验研究带来极大的方便。在圆管流动中，当 Re 数小于某一数值（第一临界值）时，流动处于层流状态。在层流状态范围内，流体的速度分布彼此相似，与 Re 不再有关，即流动**自模性**。



绕圆柱流动的阻力系数与雷诺数的关系



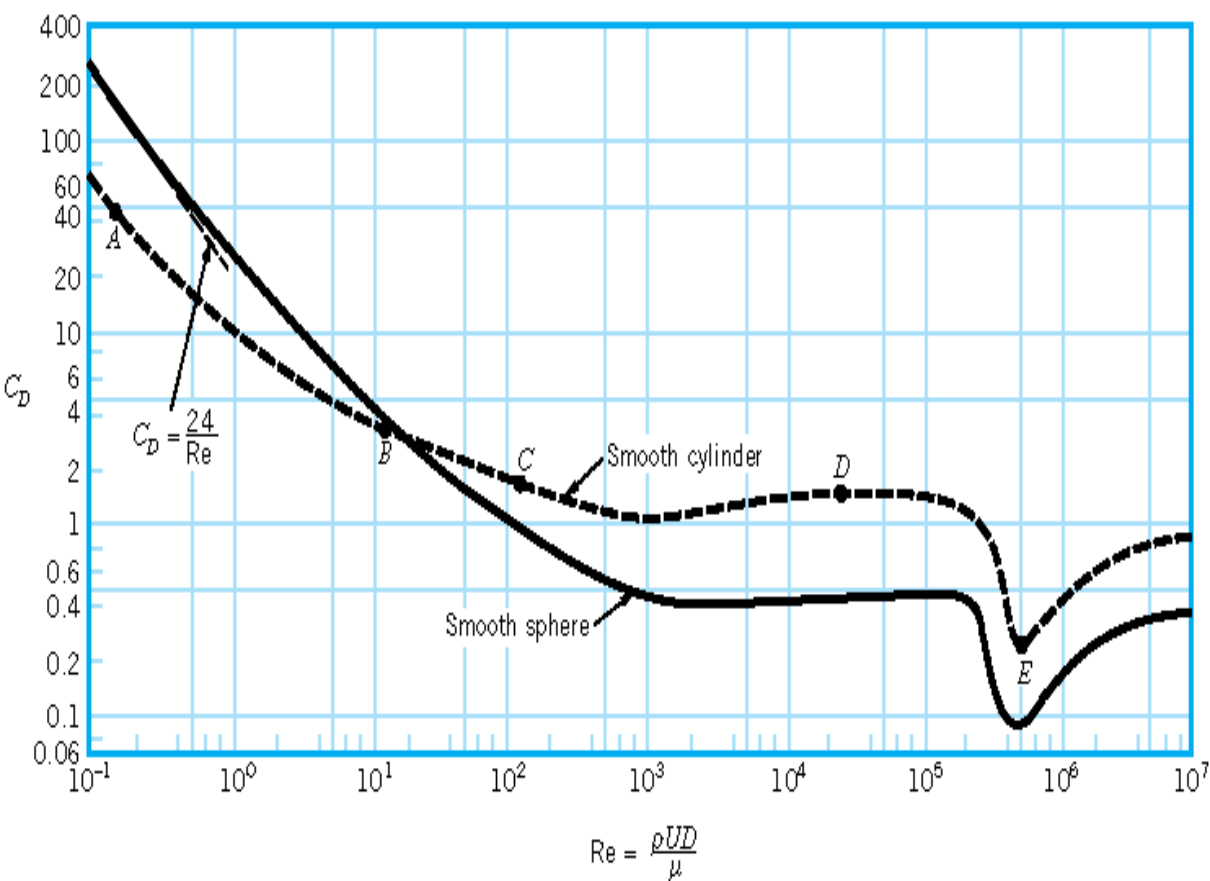
(a)



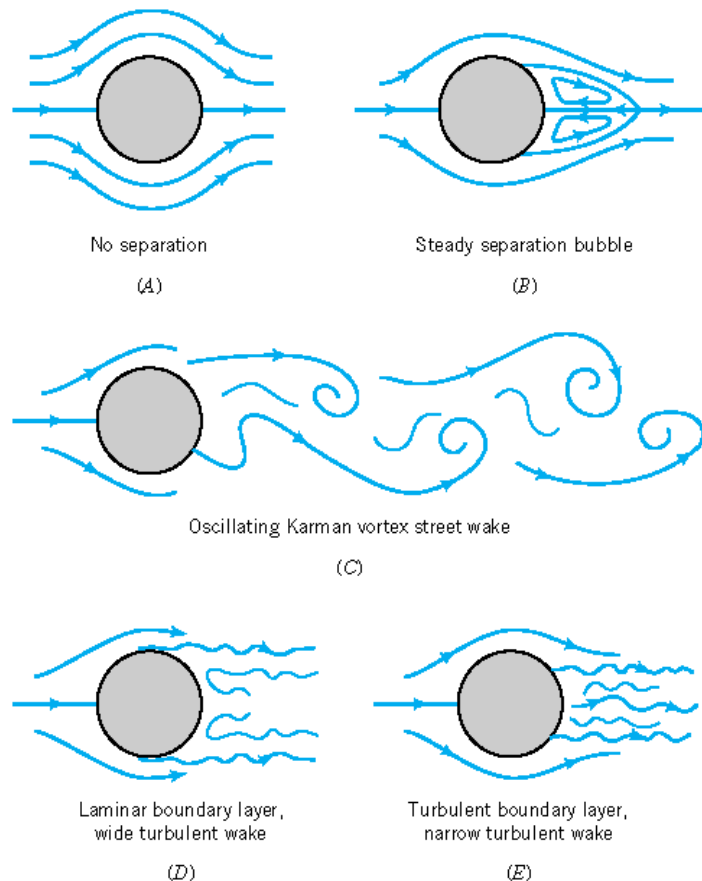
(b)



绕圆柱流动的阻力系数与雷诺数的关系



(a)



(b)



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

模型实验设计

潜艇阻力实验：





$$\text{Re}_m = \text{Re}_p \Rightarrow U_m = U_p \frac{L_p}{L_m} \frac{\nu_m}{\nu_p} = U_p \lambda \frac{\nu_m}{\nu_p}$$

自模拟：实船雷诺数约 10^8 ，模型雷诺数约 10^7 。



模型实验设计

- 1、进行模型实验设计，通常是先根据实验场地，模型制作和测量条件，定出长度比尺 C_l ；
- 2、再以选定的比尺 C_l 缩小原型的几何尺寸，得出模型区的几何边界；
- 3、根据对流动受力情况分析，满足对流动起主要作用的力相似，选择对应的相似准则；
- 4、最后按所选用的相似准则，确定流速比尺及模型的流量等。



实验研究的基本要点

实验研究的理论基础是相似原理，因此在进行实验研究时应注意以下几点：

(1) 所研究问题有几个相似准则？相似准则是控制流动的参数。对于一个具体的实验，首先要分析所研究现象的相似准则，并分清主次，找出决定性准则，忽略次要准则。

(2) 有哪些决定性相似准则？根据决定性相似准则相等的条件设计实验，包括模型设计、实验设备及实验条件的选择，实验中流体介质的选择及运动状态的确定等。



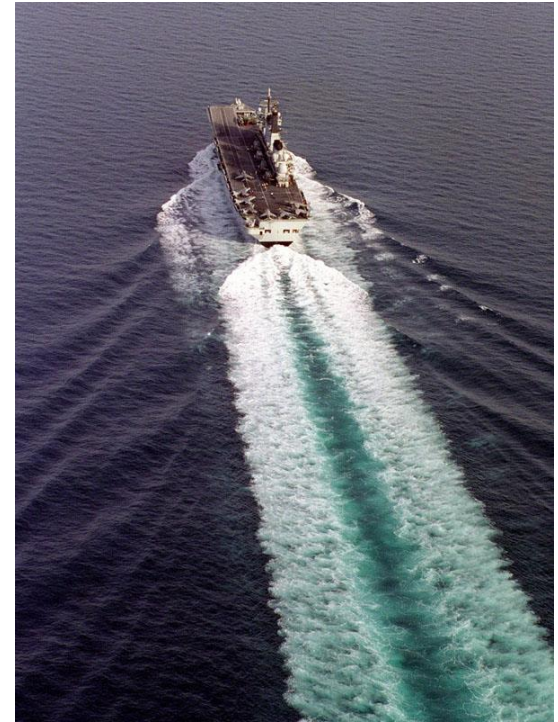
(3) 实验中应测量哪些物理量？ 由于彼此相似的现象必定具有数值相同的相似准则，因此实验中就要测定各个相似准则中所包含的一切物理量。

(4) 怎样整理实验数据？ 所有实验结果必须整理成无量纲量的形式。因为在彼此相似的现象中只有无量纲量的数值才相等，只有这种结果在几何相似的流动中才具有普遍意义。

(5) 怎样将实验结果换算到原型系统中去？ 根据相似原理，在相似准则相等的条件下，将实验得到的无量纲量推广到原型系统中，进而得到所需的有量纲量。



水面船舶阻力试验设计



总阻力: $R_t = f(\underline{U}, \underline{L}, \underline{\rho}, \underline{\nu}, g)$ (几何光滑)

Π 定理: $\frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho U^2 L^2} = f\left(\frac{\nu}{UL}, \frac{g}{U^2/L}\right) \Rightarrow C_t = f(\text{Re}, Fr)$

相似准数: $\frac{U_p L_p}{\nu_p} = \frac{U_m L_m}{\nu_m}, \quad \frac{U_p}{\sqrt{gL_p}} = \frac{U_m}{\sqrt{gL_m}}$



水面船舶阻力试验设计

模型的缩尺比: $\lambda = \frac{L_p}{L_m}$ (由水池尺度确定)

完全相似不可能

$Re_m = Re_p :$ $U_m = U_p \frac{L_p}{L_m} \frac{\nu_m}{\nu_p} = U_p \lambda \frac{\nu_m}{\nu_p}$

$\lambda = 10$

$U_m = 10U_p = 100m/s$ ×

$Fr_m = Fr_p :$ $U_m = U_p \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = U_p \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$

$U_p = 10m/s$

$U_m = U_p / 3.2 = 3.2m/s$ ✓



水面船舶阻力试验设计

部分相似： 船模试验速度由兴波相似决定，

$$Fr_m = Fr_p$$

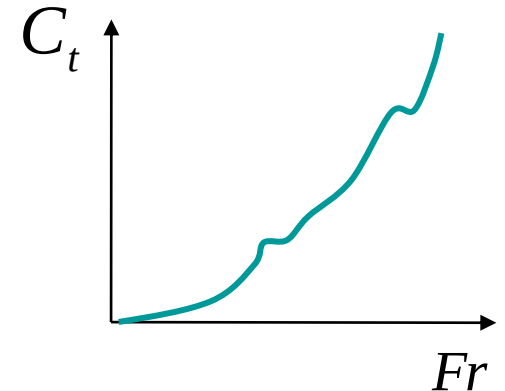
休斯—普罗哈斯卡方法：

船舶总阻力 = 摩擦阻力 + 形状阻力 + 兴波阻力

$$R_t = R_f + R_S + R_w$$

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

$$C_t = (1 + K)C_f(\text{Re}) + C_w(Fr)$$





水面船舶阻力试验设计

1. 总阻力系数:

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

$$\frac{C_t}{C_f} = (1 + K) + \alpha \frac{Fr^4}{C_f}$$

2. 兴波阻力系数（实船与船模相等）:

$$C_w = C_{tm} - (1 + K)C_{fm}$$

$$C_f = \frac{0.067}{(\log_{10} Re - 2)^2}$$

“相当平板”

3. 实船总阻力系数:

$$C_{tp} = (1 + K)C_{fp} + C_w$$

4. 实船总阻力:

$$R_{tp} = C_{tp} \cdot \frac{1}{2} \rho_p U_p^2 S_p$$

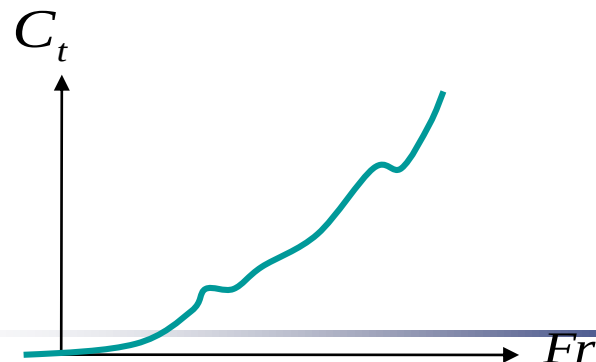


水面船舶阻力试验设计

水面船舶阻力实验步骤：

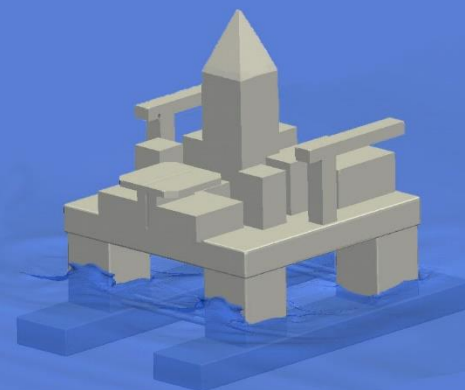
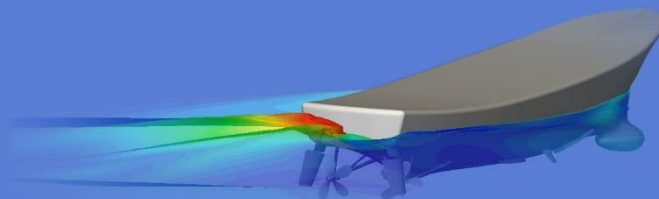
- 根据水池尺寸和拖车速度范围，确定缩尺比，制作模型。
- 根据实船航速按 Fr 决定船模拖曳速度。
- 测定船模的总阻力 R_{tm} 。
- 根据相当平板公式计算船模摩擦阻力 R_{fm} 。
- 根据 Fr 数相等计算实船兴波阻力、总阻力。

$$Fr_m = Fr_p$$



CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

<http://dcwan.sjtu.edu.cn>



*部分素材来源于网络