



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7章 水波基本理论

内容：7.7 船舶兴波阻力



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

船舶兴波阻力



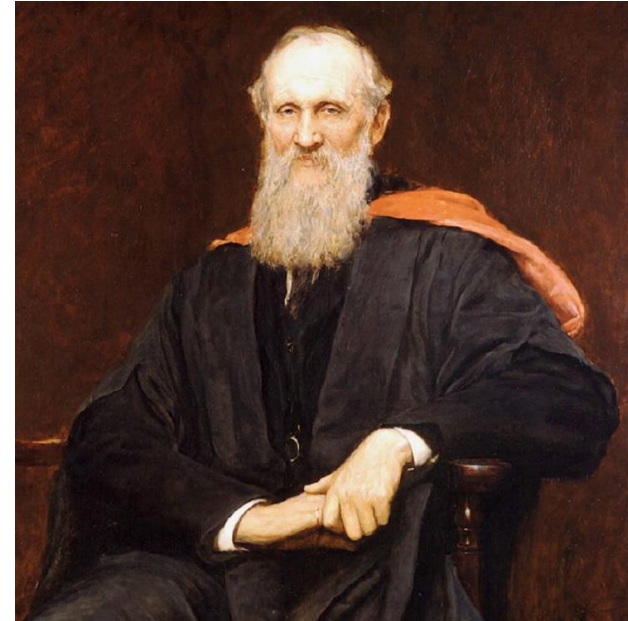
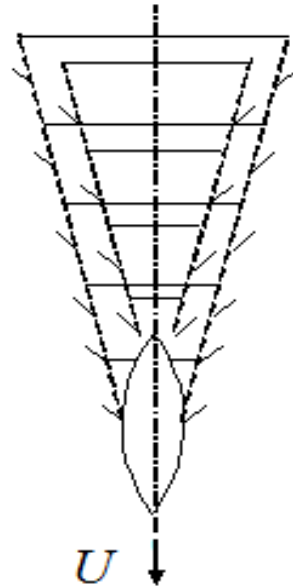


上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

船舶兴波阻力

Kelvin波：压力点兴波理论



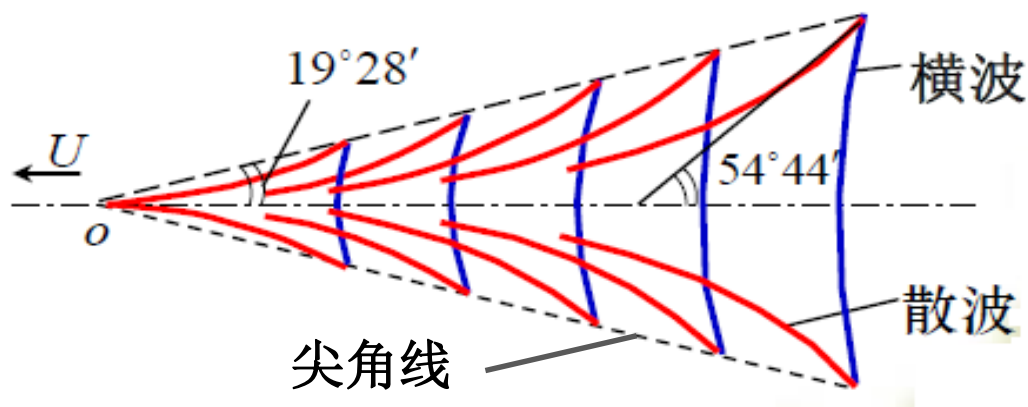
William Thomson
(Lord Kelvin, 1824-1907)

船 —— 压力点

船波 —— 运动压力点源的兴波，
不同方向波叠加组成



船舶兴波阻力



匀速运动压力点源的兴波，整个波系分成两组：

- 1) 横波系
- 2) 散波系

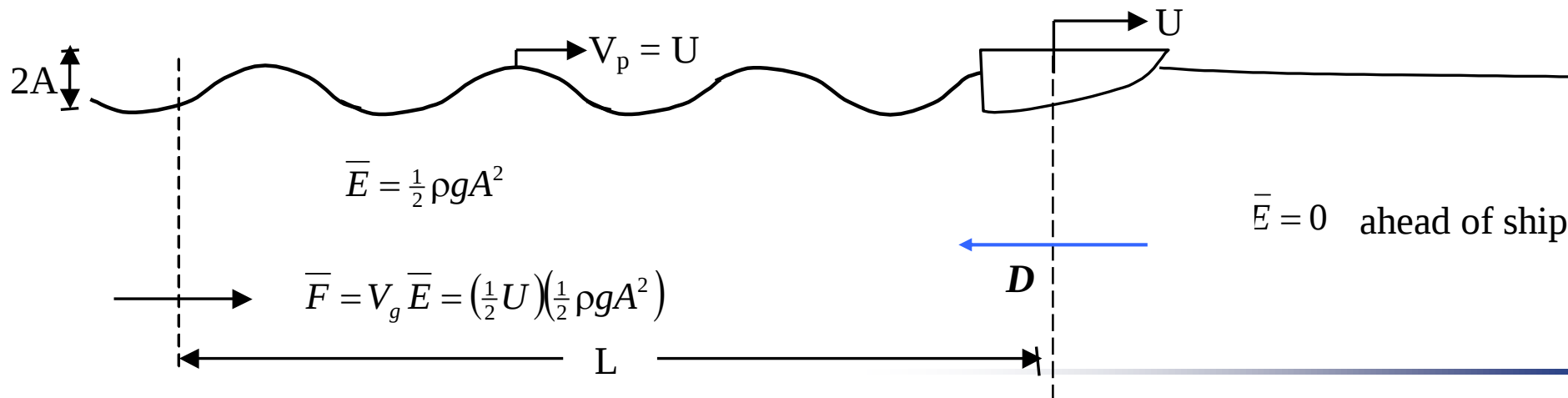
在船波传播过程中，横波系和散波系相互干涉，并同压力点一起前进。横波系和散波系相交形成尖角。尖角与压力点间的连线称为**尖角线**。尖角线与压力点运动方向的夹角为： **$19^\circ 28'$** ，因而称为：**Kelvin角**。船波就在顶角为 $2 \times 19^\circ 28'$ 对应的扇形范围内。



船舶兴波阻力

当船在水面航行，船后将兴起波浪，这些波浪的能量将由船舶航行时克服兴波阻力所做的功来提供。

在船后 L 处取一与波速方向相垂直的固定平面。设船的兴波阻力为 D ，船舶航速为 U ，波幅为 A ，单位长度所兴起的波浪能量为 $\bar{E}$ 。

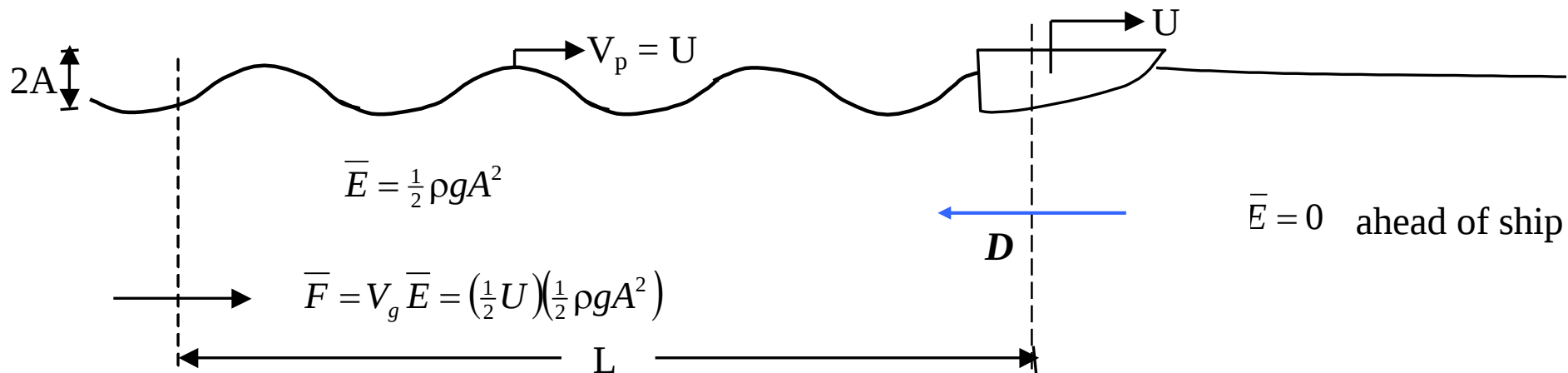




船舶兴波阻力

对于所选的船后控制区域，外力做功等于波能的变化率：

$$D \cdot U + \bar{F} = \frac{d(\bar{E} \cdot L)}{dt} = \bar{E} \cdot U$$





船舶兴波阻力

因此
$$D = \frac{1}{U} (\bar{E} \cdot U - \bar{F}) = \frac{1}{U} (\bar{E} \cdot U - V_g \cdot \bar{E})$$

对于深水线性波(Airy波), 我们知道有 $V_g = \frac{1}{2} V_p$ 。

船舶在定常航行时, 船波的波形与船体是相对静止的, 因此船波波形的前进速度(即波速)应等于船航行速度, 即: $V_p = U$

所以有:

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{U} (\bar{E} \cdot U - V_g \cdot \bar{E}) = \frac{1}{U} \left(\bar{E} \cdot U - \frac{1}{2} V_p \cdot \bar{E} \right) \\ &= \frac{1}{U} \left(\bar{E} \cdot U - \frac{1}{2} U \cdot \bar{E} \right) = \frac{1}{2} \bar{E} = \frac{1}{4} \rho g A^2 \end{aligned}$$



船舶兴波阻力

即船的兴波阻力为：

$$D = \frac{1}{2} \bar{E} = \frac{1}{4} \rho g A^2$$

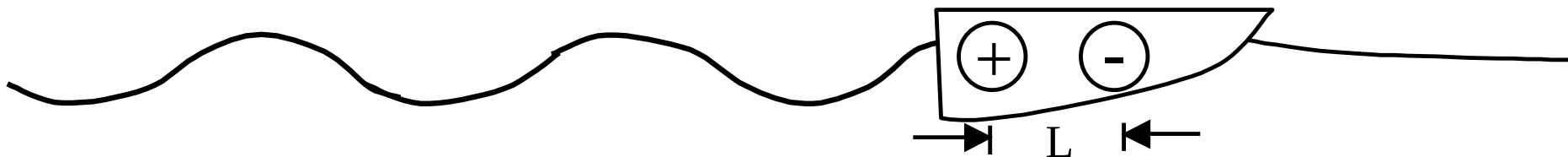
也就是说船的兴波阻力等于单位长度波能的一半。

可以看到，船的兴波阻力与船后的波浪的波幅 A 的平方成正比。显然，波幅 A 与船航行速度、船的形状有关。



船舶兴波阻力

求波幅 A :



为了简化问题，认为船后的波 η_T 是由一系列船首的兴波 (bow wave) 和一系列船尾的兴波 (stern wave) 的线性叠加构成的。船长为 L 。现考虑船后的波浪由一个船首波 η_b 和一个船尾波 η_s 组成，它们都是线性Airy波，距离为 l ，这样有：

$$\eta_b = a \cos(kx - \omega t), \quad \eta_s = -a \cos(k(x + l) - \omega t)$$

$$\eta_T = \eta_b + \eta_s, \quad l \leq L$$



因此可以得到：

$$A = |\eta_T|_{\max} = 2a \left| \sin \left(\frac{1}{2} kl \right) \right|$$

从而可以得到船的兴波阻力：

$$D = \frac{1}{4} \rho g A^2 = \rho g a^2 \sin^2 \left(\frac{1}{2} kl \right)$$



由于： $U = V_p$

(对深水) $U = V_p = \sqrt{\frac{g}{k}} \Rightarrow k = \frac{g}{U^2}$

所以，深水情况下：

$$D = \rho g a^2 \sin^2 \left(\frac{1}{2} \frac{gl}{U^2} \right)$$



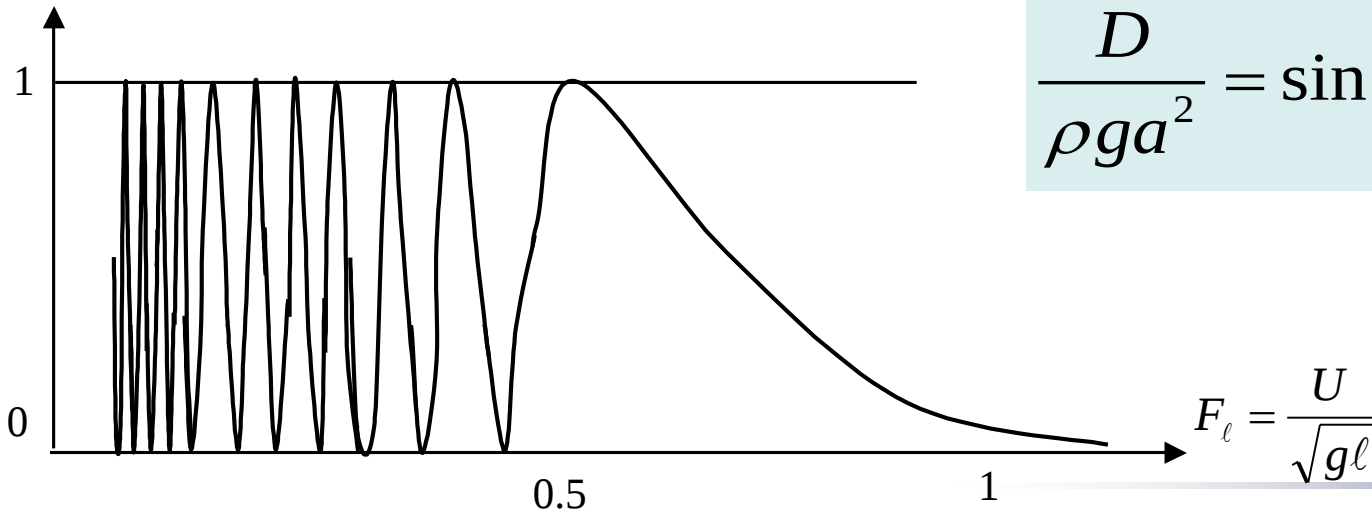
船舶兴波阻力

定义一个参数: $F_l = \frac{U}{\sqrt{gl}}$

所以船的兴波阻力可表示为:

$$D = \rho g a^2 \sin^2 \left(\frac{1}{2F_l^2} \right)$$

$$\frac{D}{\rho g a^2}$$



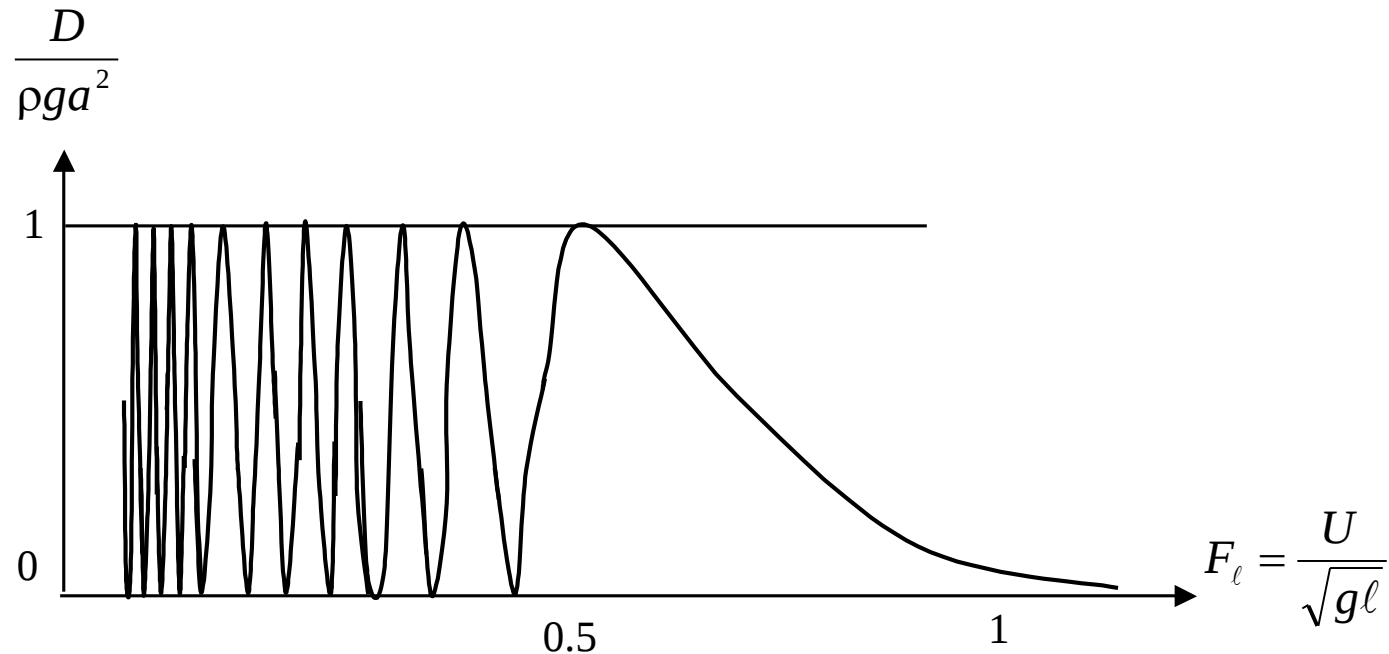
$$\frac{D}{\rho g a^2} = \sin^2 \left(\frac{1}{2F_l^2} \right)$$

where $\ell \leq \text{ship length}$



船舶兴波阻力

从曲线图可以看到，当船航行速度较小时，如果船型设计的好，许多船首波和船尾波可以相互抵消，因而船舶兴波阻力很小。但当船航行速度较大时，船的兴波阻力将不可避免。



where $\ell \leq \text{ship length}$



船舶兴波阻力

$$\frac{1}{2F_l^2} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow F_l = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \approx 0.56$$

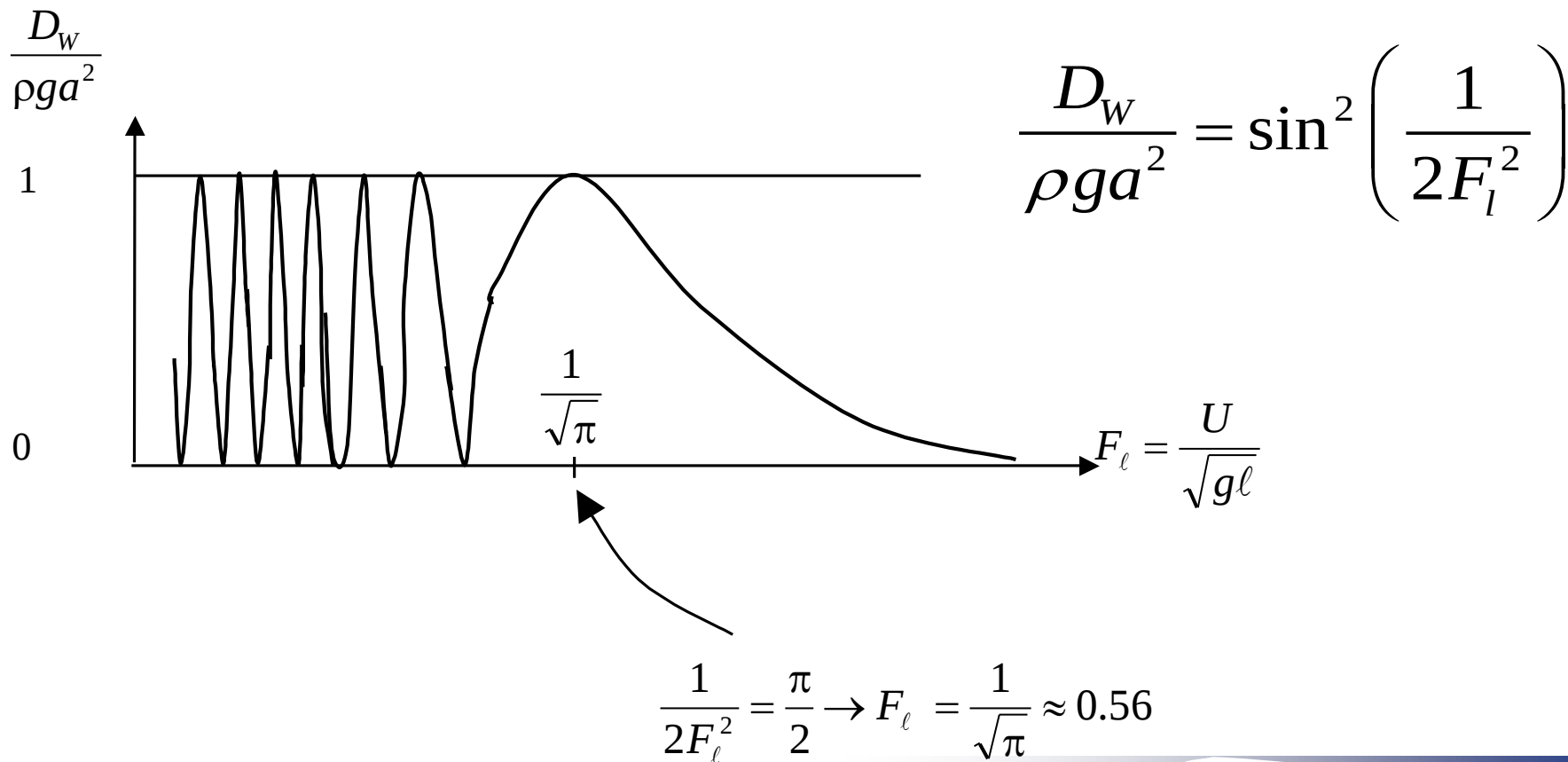
$$\Rightarrow U \approx 0.56\sqrt{gl} \cong 0.56\sqrt{gL}$$

如果船航行速度 U 大于这个条件时，船首波和船尾波不能相互抵消，将产生船的兴波阻力。



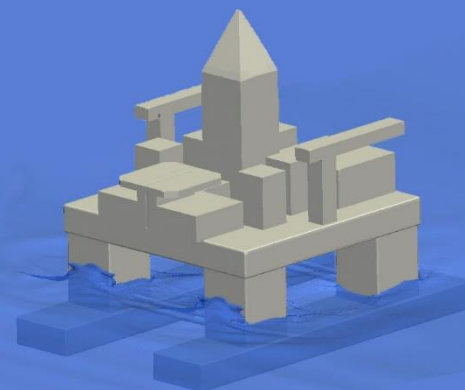
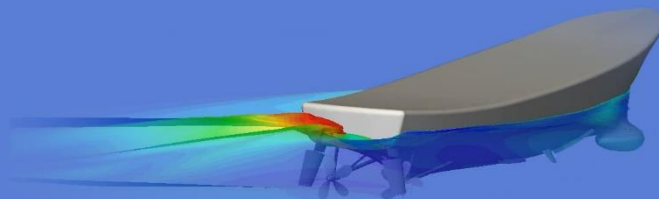
船舶兴波阻力

即当船航行速度 $U \geq 0.56\sqrt{gL}$ 时，船首波和船尾波不能相互抵消，将产生船的兴波阻力。



CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

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



*部分素材来源于网络