

船舶运动极端现象— **PARAMETRIC ROLLING**

船舶操纵性和耐波性 (船舶原理3)

浙江大学 海洋学院 海洋结构物及船舶工程研究所

面向海洋工程，大学三年级学生 修完船舶原理I，2 及流体力学方面课程

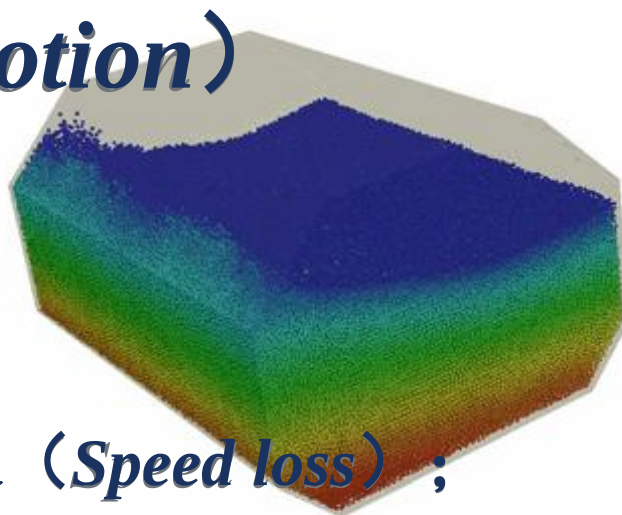
陈振纬 老师

2018.11.12

OUTLINE

- 前言
- 参数横摇运动介绍 (**Parametric rolling**)
- **Problem solving** 理论及计算方法
- 实际计算案例 及 **Homework**
- 教学讨论

风浪作用下 船舶运动及极端现象



➤ 摇荡运动 (*Oscillating motion*)

➤ 摇荡运动之动态效应:

- ◆ 1. 速度、加速度、晕船;
- ◆ 2. 增阻 (*Added resistance*) 与失速 (*Speed loss*);
- ◆ 3. 飞车 (*Propeller Racing*)
- ◆ 4. 甲板上浪 (*Green Water*);
- ◆ 5. 首底砰击 (*Slamming*);
- ◆ 6. 舱液晃荡 (*Sloshing*);



风浪作用下 船舶极端运动现象

■ 7. 骑浪效应

Surf-riding

■ 8. 横甩效应

Broaching

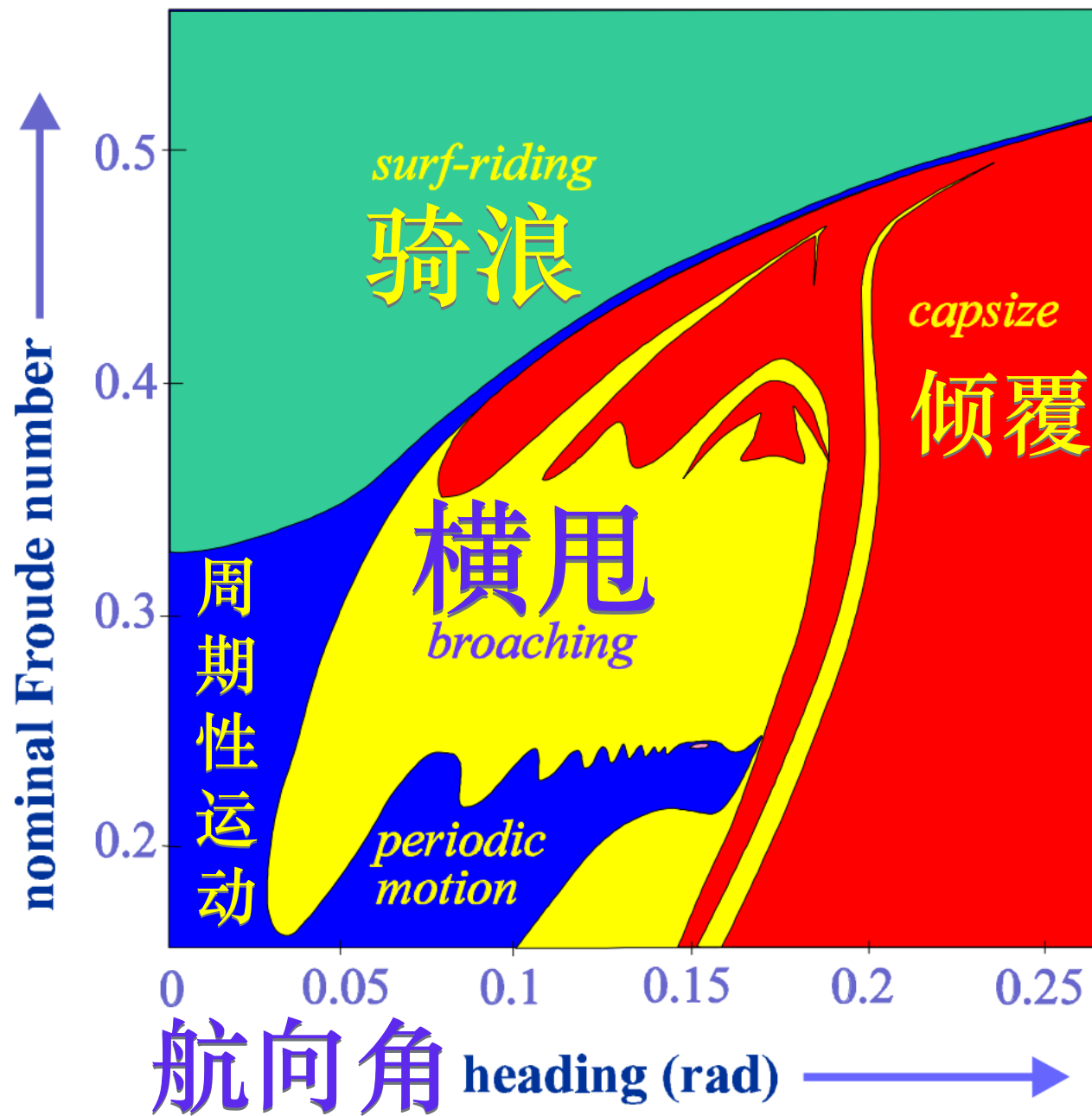
■ 9. 参数横摇

Parametric rolling

大开口集装箱船在迎浪中的非线性横摇依然是研究热点问题



$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$



参数横摇运动介绍

- ▶ 船舶于顶浪或随浪的状况下航行时，大角度的横摇运动常会伴随着剧烈的纵摇运动快速地产生，此种不稳定情况即是所谓的参数横摇 (Parametric Rolling) 现象。
- ▶ 由于横摇与纵摇同时发生，在集装箱船上会造成集装箱及其牢系系统极高的负荷，此种现象在大型的 post-Panamax 集装箱船特别容易发生，导致集装箱的损坏及从船上掉落

船宽
可超过50米

严重危及到船舶运输安全



横浪

艏斜浪

艉斜浪

浪向角 β

随浪

顶浪

0°

75°

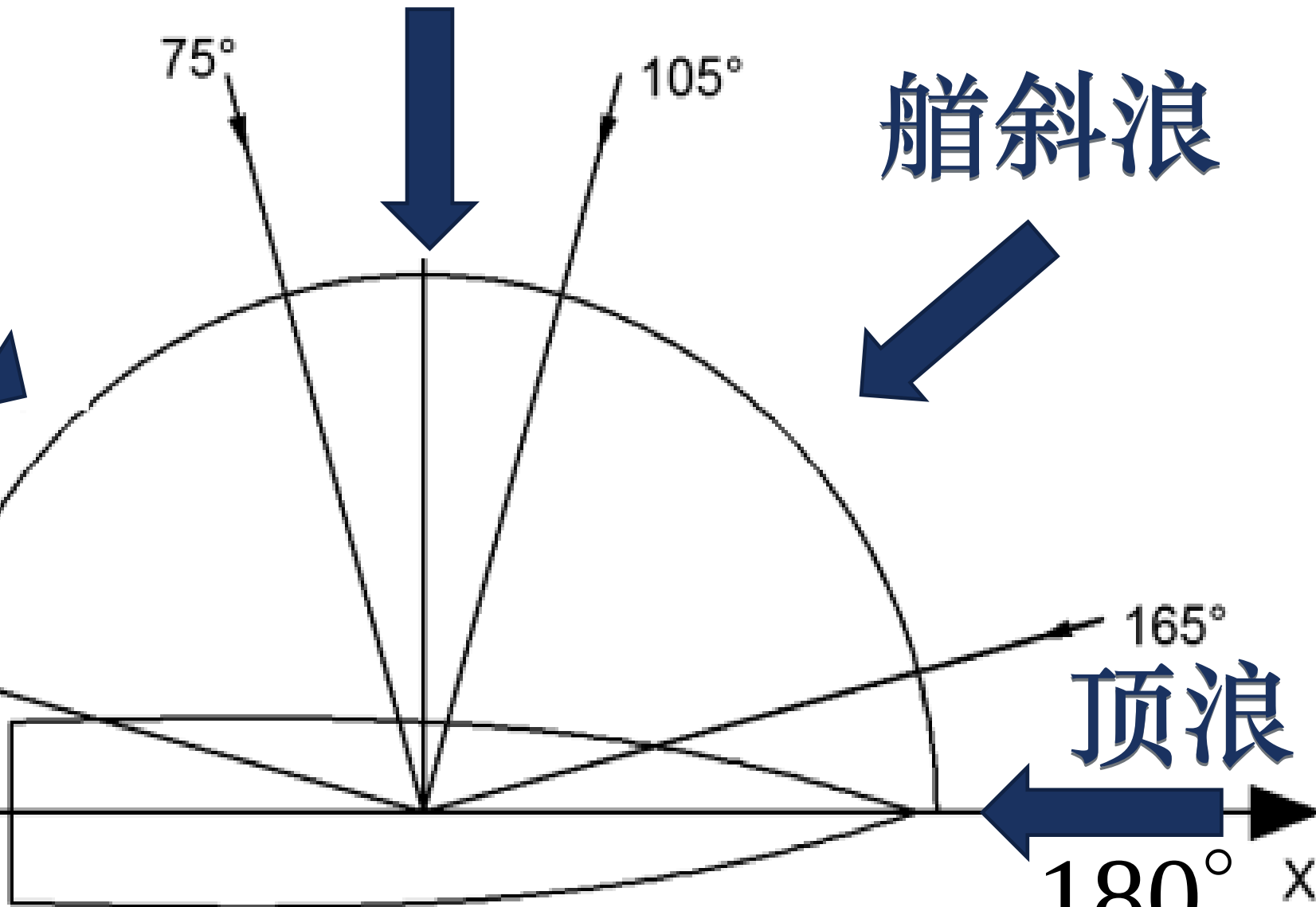
105°

15°

165°

180°

x



参数横摇运动介绍

➤ 相关文献得知，**参数横摇**情形多发生于下列条件：

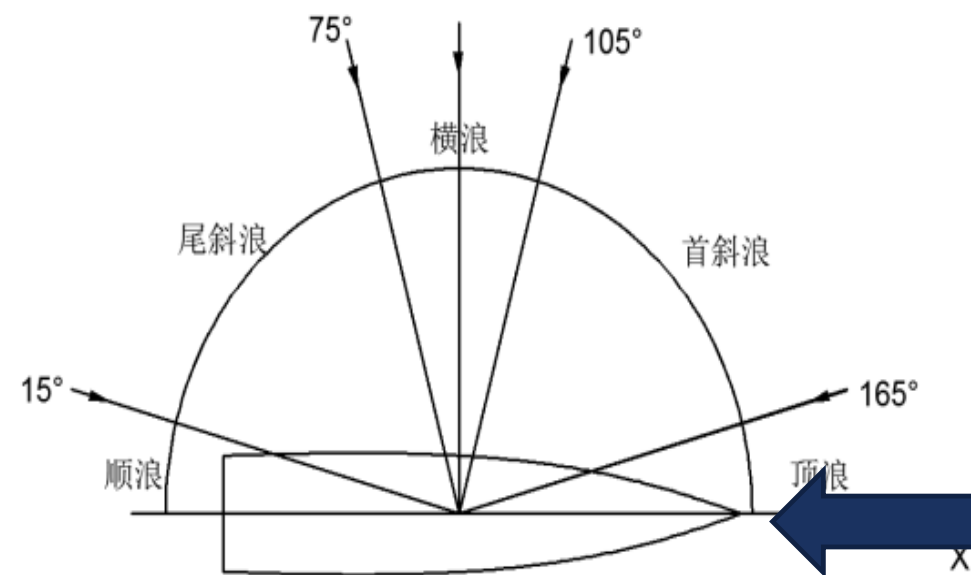
➤ 船舶的**顶浪遭遇周期**(*period of encounter*)约为

自然横摇周期(natural period of roll)的**一半**

➤ **波长**约为船长 L_{PP} 的**0.8~2.0倍**

➤ **波高**超过一临界值

➤ **横摇阻尼**(roll damping)作用低



遭遇周期:

Encounter Period:

$$T_e = \frac{\lambda}{C - V \cos \beta}$$

遭遇频率 Encounter Frequency:

$$\omega_e = \frac{2\pi(C - V \cos \beta)}{\lambda} =$$

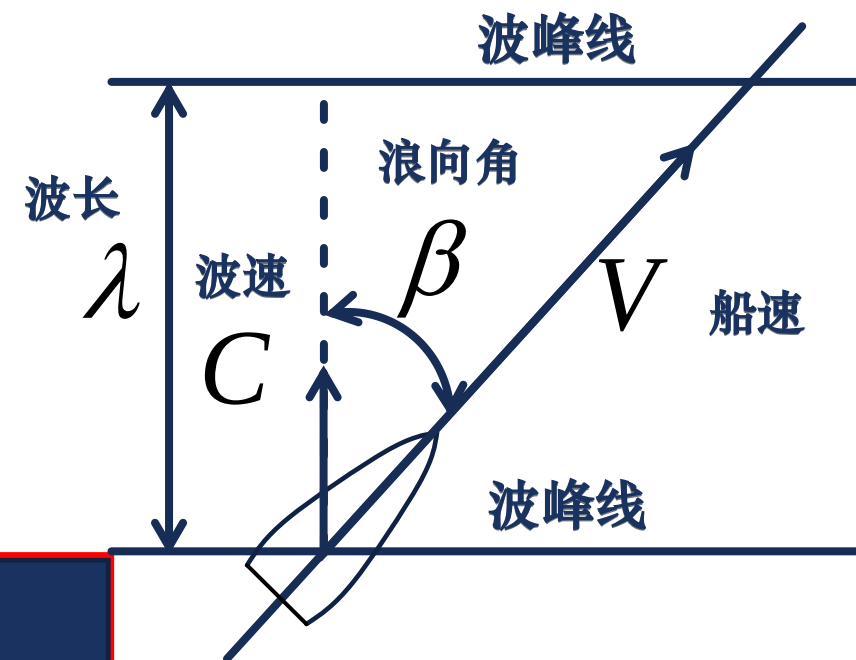
$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V \cos \beta$$

$$\omega = \frac{2\pi C}{\lambda}$$
$$\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g} = k$$

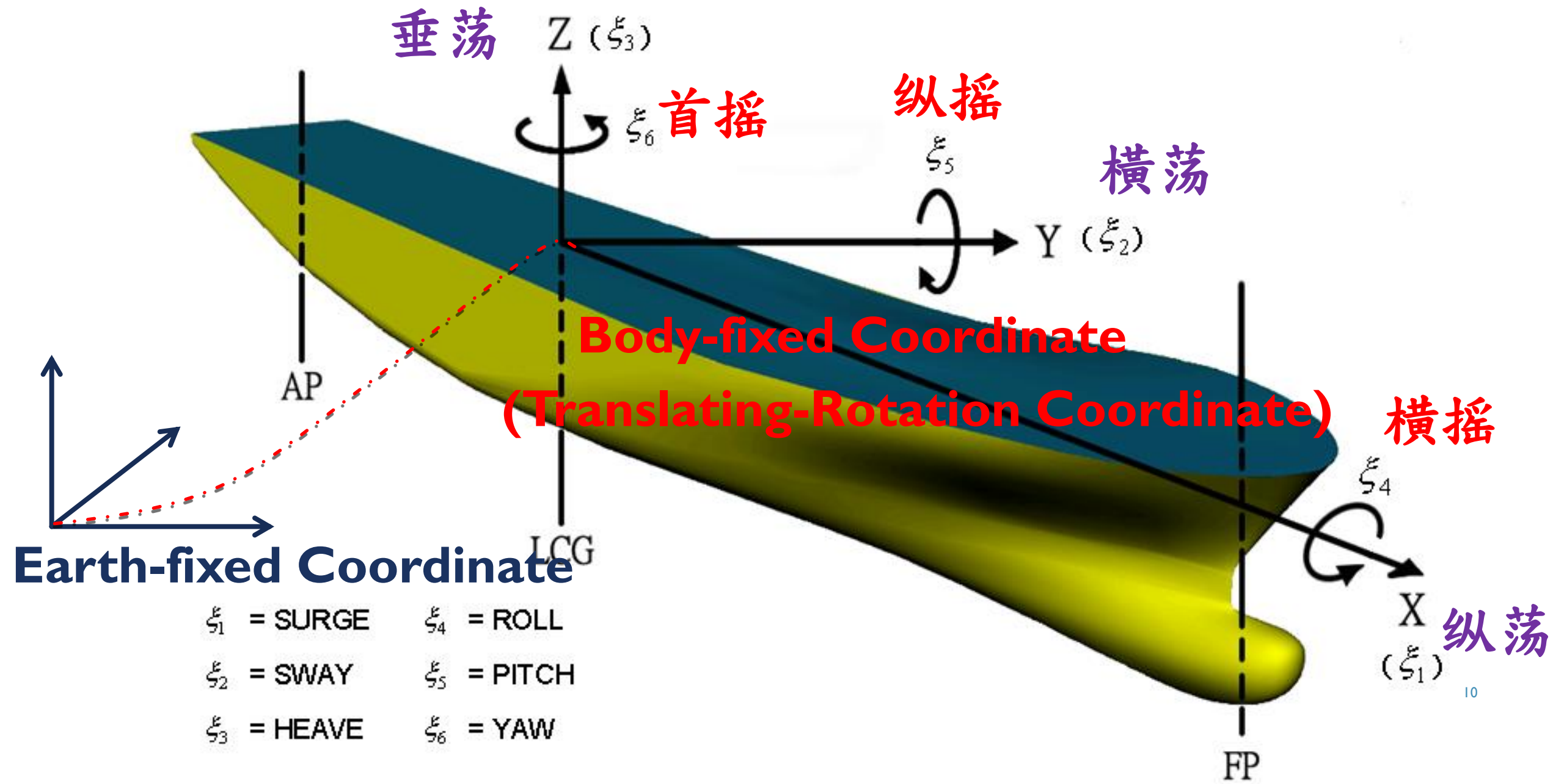
波浪频率

Wave Period

波数

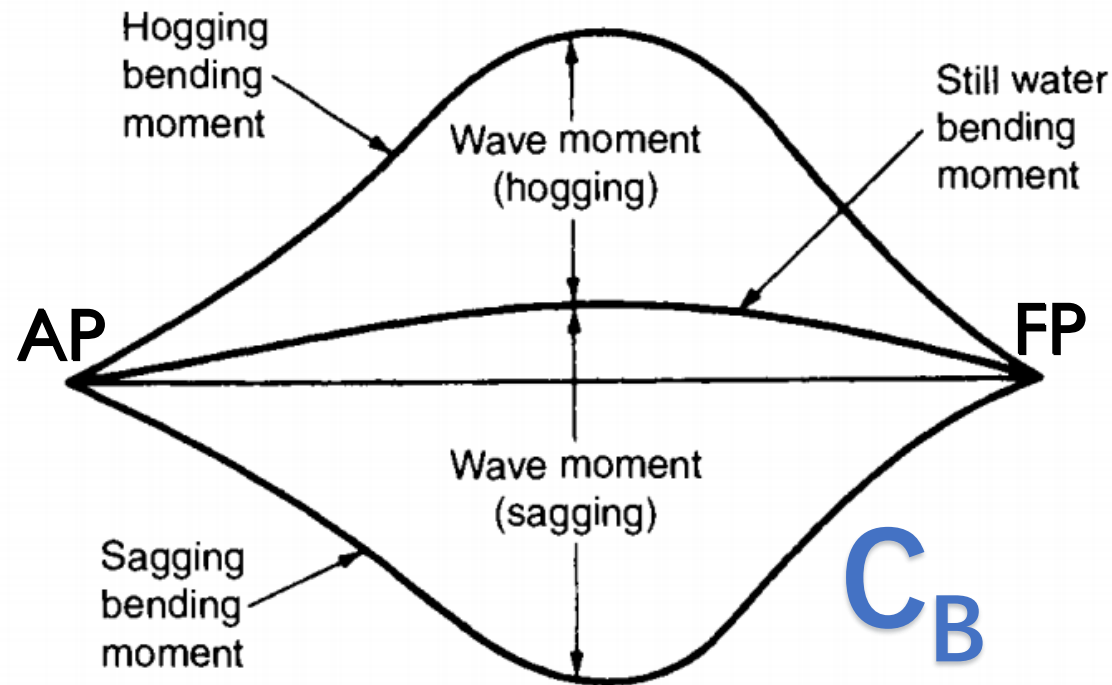


6-DOF COORDINATE SYSTEM

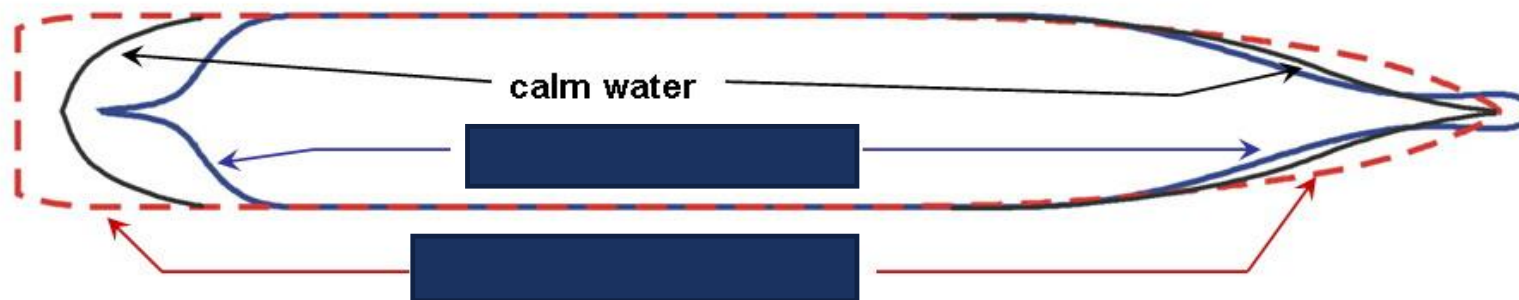


参数横摇运动介绍

- 新近建造的超大型集装箱船为了争取船艏外飘与突出的船艉部为其外观特
- 当其于大波浪中行进时，会因波峰或面积产生剧烈变化，造成船舶 GM 值的快速变化。



侧视图



水线面

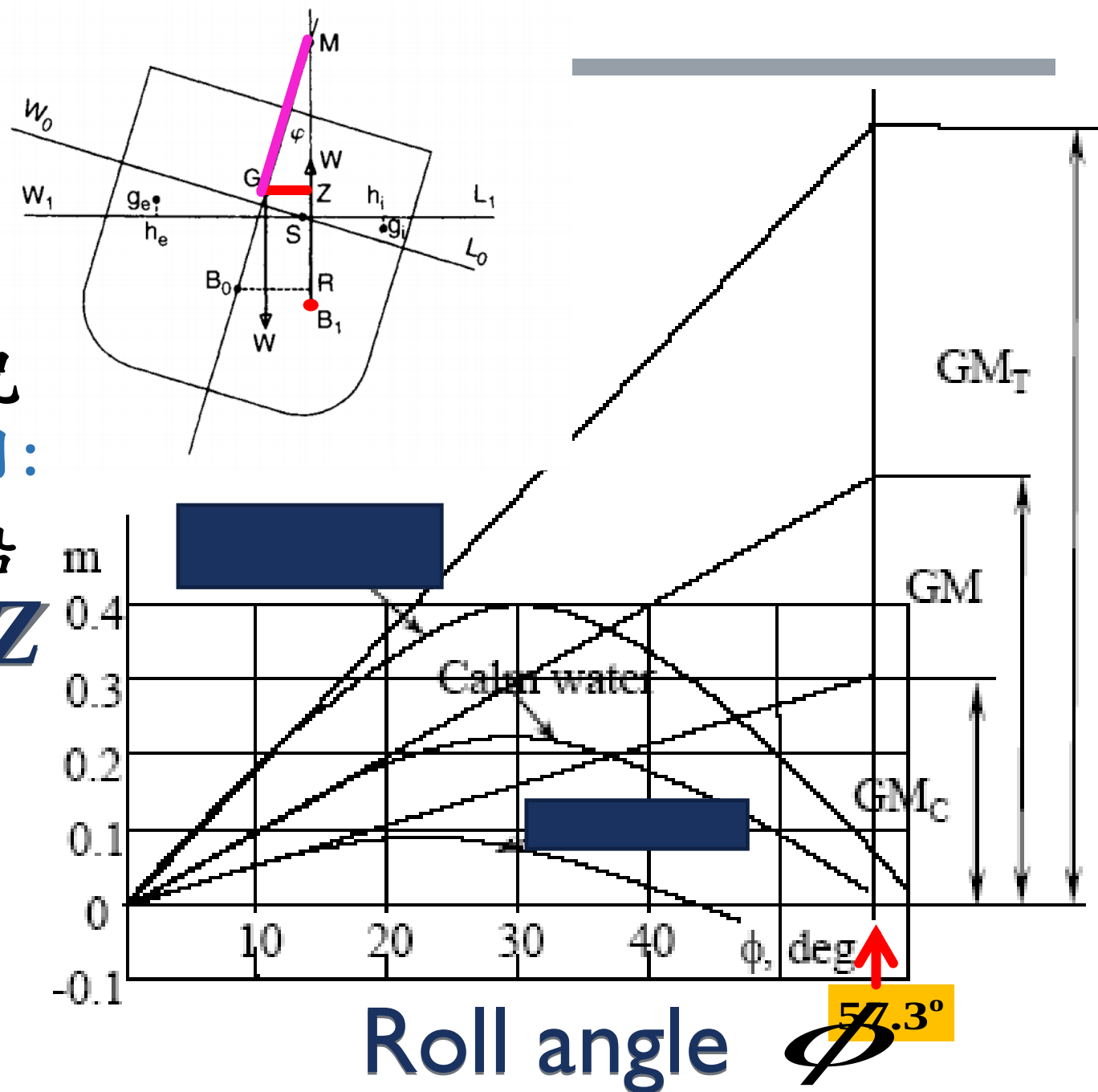
船舶于波浪中水线面积忽大忽小的变化



GM (TIME-VARYING)

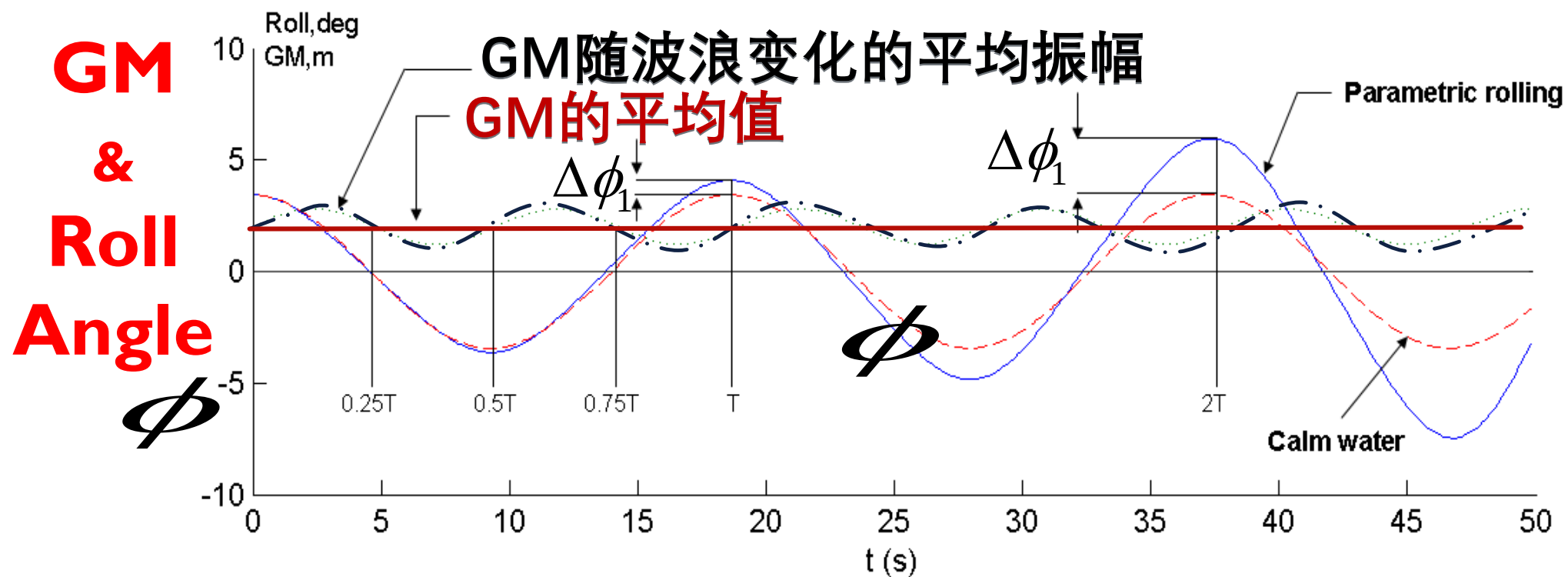
- 当船舶处于顶浪或随浪的情况下导致GM随着时间明显变化原因:
- 波面变化相当于波峰或波谷沿着船体纵向不同位置游走 GZ
- 加上纵摇(pitch)及起伏(heave)运动

实际海况GM变化
将过于复杂



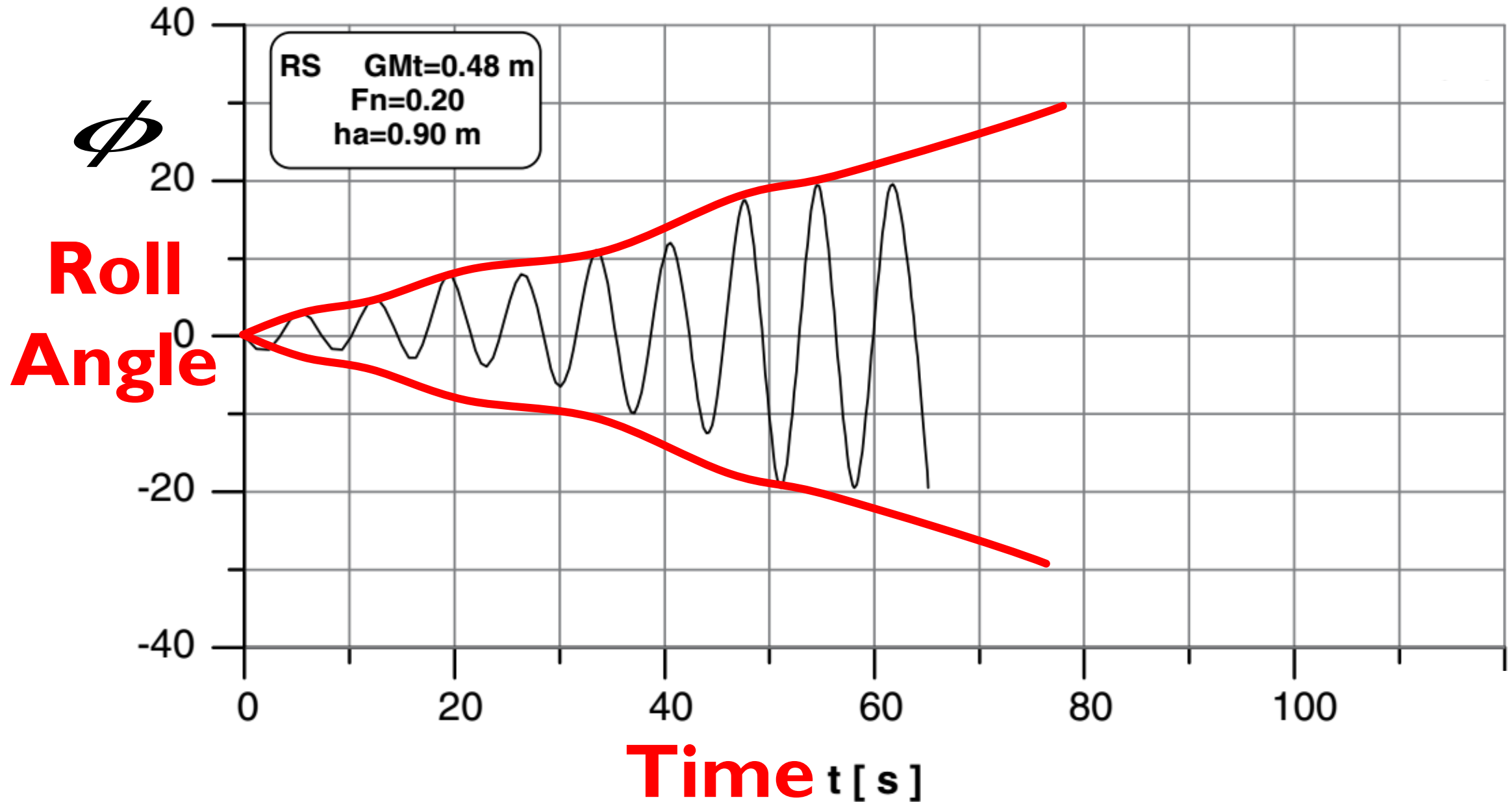
参数横摇运动介绍

- 当此GM值的变化使得船舶的自然横摇周期是船舶的顶浪遭遇周期的2倍
- 船舶横摇角度将因为共振现象而快速增加，进而影响到船舶的航行安全



参数横摇现象发生过程

Parametric Rolling



PROBLEM SOLVING

理论及计算方法

如何预测?
如何避开?

理论及计算方法

- 在**规则波**中扶正力矩随时间的变化大致为一**余弦函数**，在横摇振幅不大的假设下，船舶之定倾高度 $\overline{GM}$ 随时间变化之函数可以下式表示：

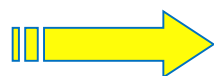
$$\begin{aligned}\overline{GM}(t) &= \overline{GM}_m + \delta \overline{GM}(t) \\ &= \overline{GM}_m + \overline{GM}_a \cos \omega_e t\end{aligned}$$

ω_e = 波浪产生 $\overline{GM}$ 变化量之**遭遇频率**

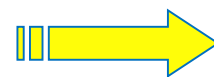
$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V \cos \beta$$

$$\overline{GM}_m = 0.5(\overline{GM}_{\max} + \overline{GM}_{\min})$$

$$\overline{GM}_a = 0.5(\overline{GM}_{\max} - \overline{GM}_{\min})$$



$\overline{GM}$ 的最大值与最小值平均



$\overline{GM}$ 随波浪变化的平均振幅

$\overline{GM}_{\max}$ 为所有 $\overline{GM}$ 值的最大值

$\overline{GM}_{\min}$ 为所有 $\overline{GM}$ 值的最小值

MATHIEU EQUATION数值计算模拟 参数横摇运动

$$I_x \ddot{\phi} + \Delta(\overline{GM})\phi = 0$$

惯性力

回复力

ϕ = 横倾角

Δ = 船舶之排水量

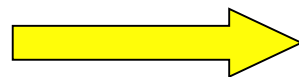
I_x = 船舶质量之绕纵向X轴之横摇惯性矩
(包含横摇运动之附加质量)

Mathieu equation数值计算模拟

$$I_x \ddot{\phi} + \Delta(\overline{GM}_m + \overline{GM}_a \cos \omega_e t) \phi = 0$$

- 利用数学软件工具MATLAB求解，须套用MATLAB里相关系数设定
- 将两边除以 I_x 并将利用 $2\tau = \omega_e t$ 之关系加以转换

$$\frac{d^2 \phi}{d\tau^2} + \frac{4\Delta}{I_x \omega_e^2} (\overline{GM}_m + \overline{GM}_a \cos 2\tau) \phi = 0$$



$$\frac{d^2 \phi}{d\tau^2} + (\delta_1 + \varepsilon_1 \cos 2\tau) \phi = 0$$

$$\varepsilon_1 = \frac{4\Delta \overline{GM}_a}{I_x \omega_e^2} = \frac{4g \overline{GM}_a}{i_x^2 \omega_e^2}$$

自然横摇频率

$$\omega_n = \sqrt{g \overline{GM}_m} / i_x$$

惯性旋转半径

$$i_x = \sqrt{g I_x / \Delta}$$

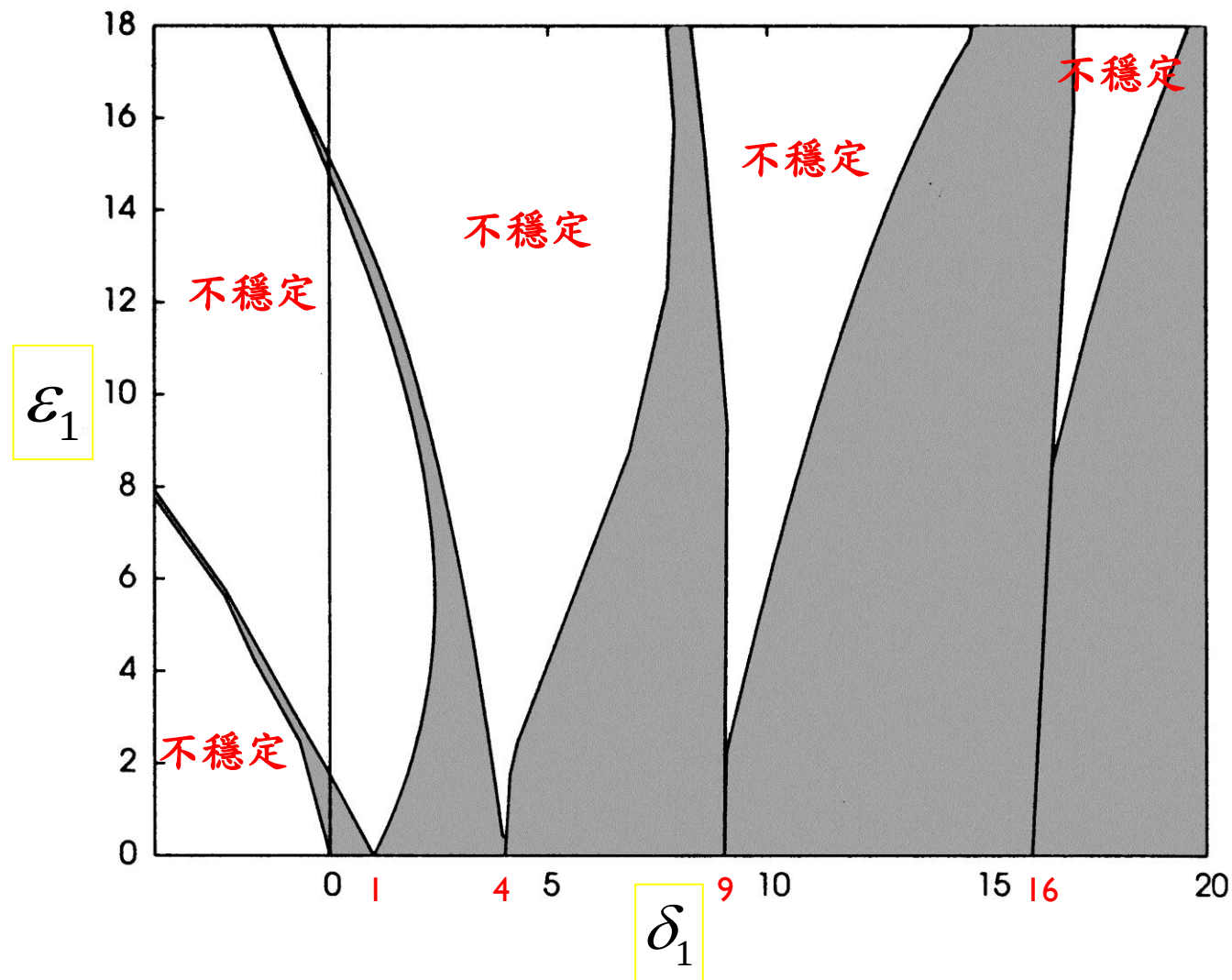
$$\delta_1 = \frac{4\Delta \overline{GM}_m}{I_x \omega_e^2} = \frac{4g \overline{GM}_m}{i_x^2 \omega_e^2} = 4 \frac{\omega_n^2}{\omega_e^2}$$



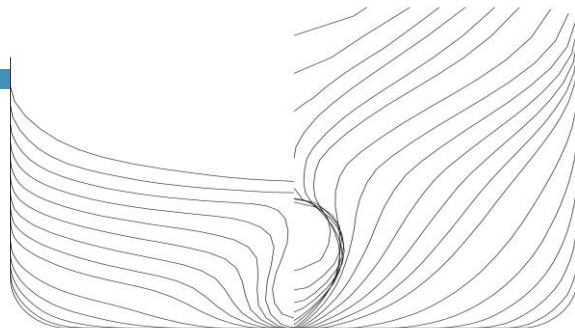
系数对 $(\delta_1, \varepsilon_1)$ 在某些值范围会有不稳定性发生

Mathieu equation 求解之穩定與不穩定分區圖

➤ 白色區域表示不穩定區域（位於 $\delta_1 = 1^2, 2^2, 3^2 \dots$ ）



实际计算案例

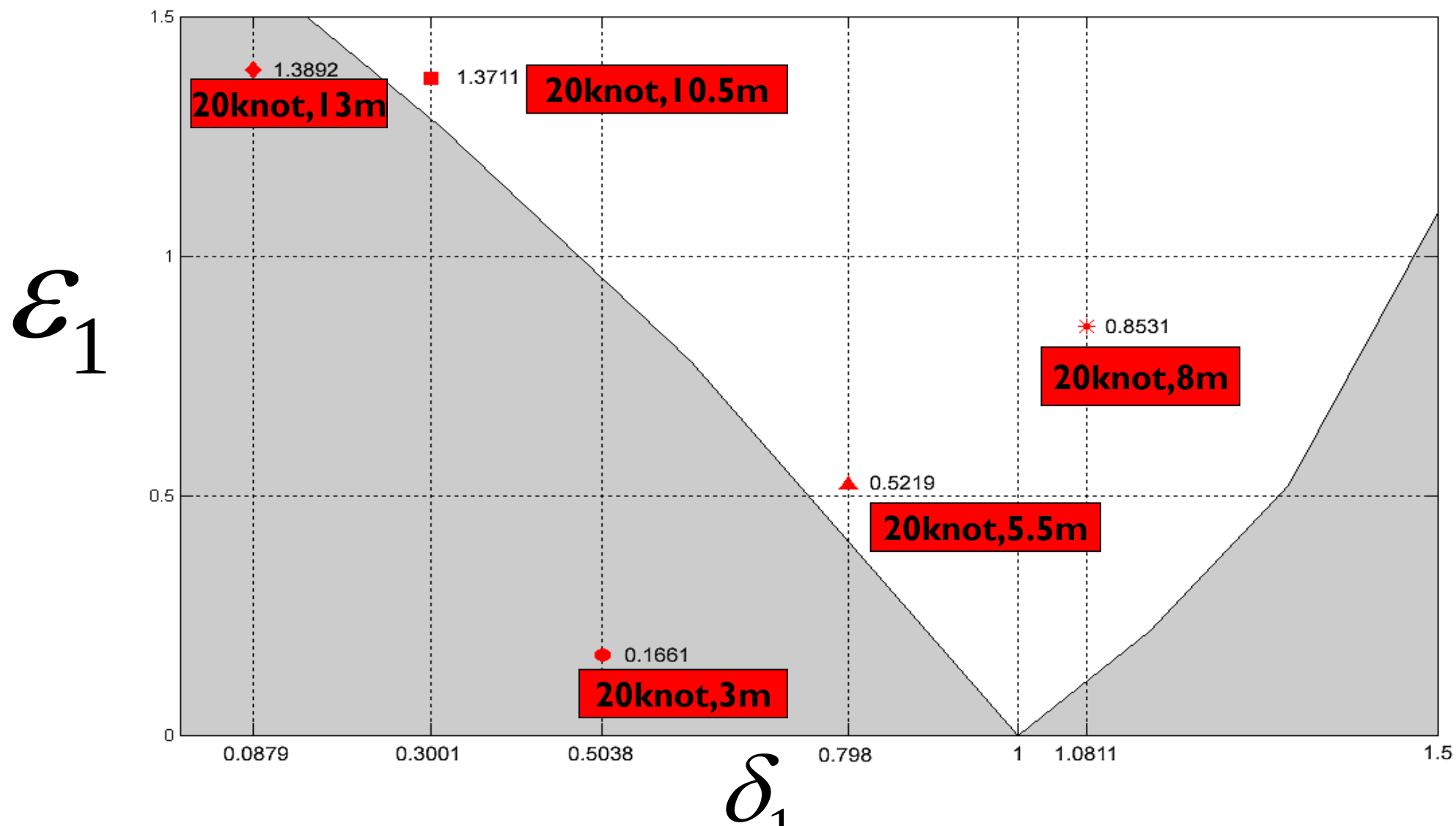


横剖面

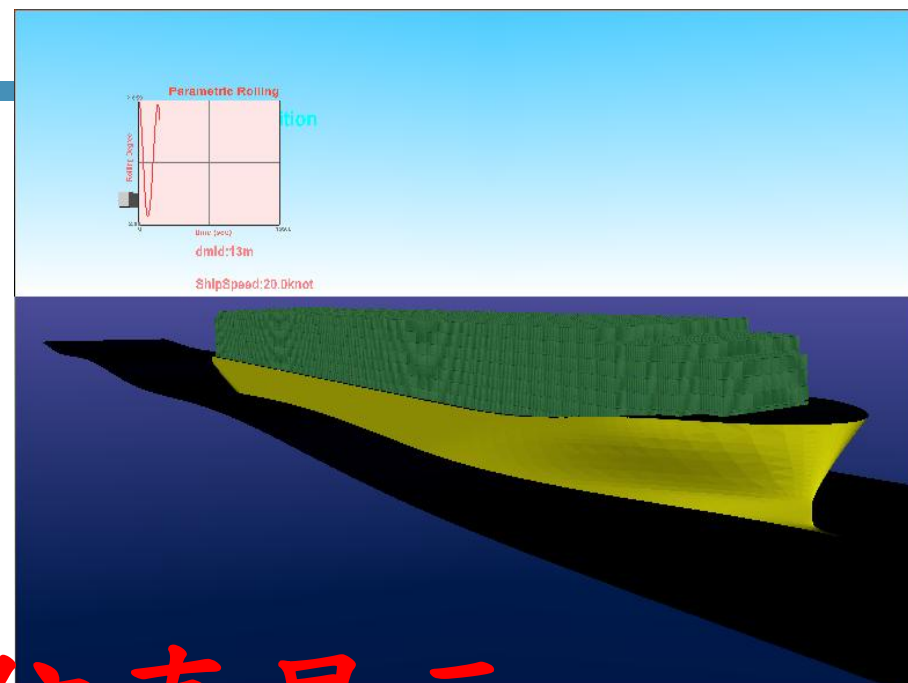
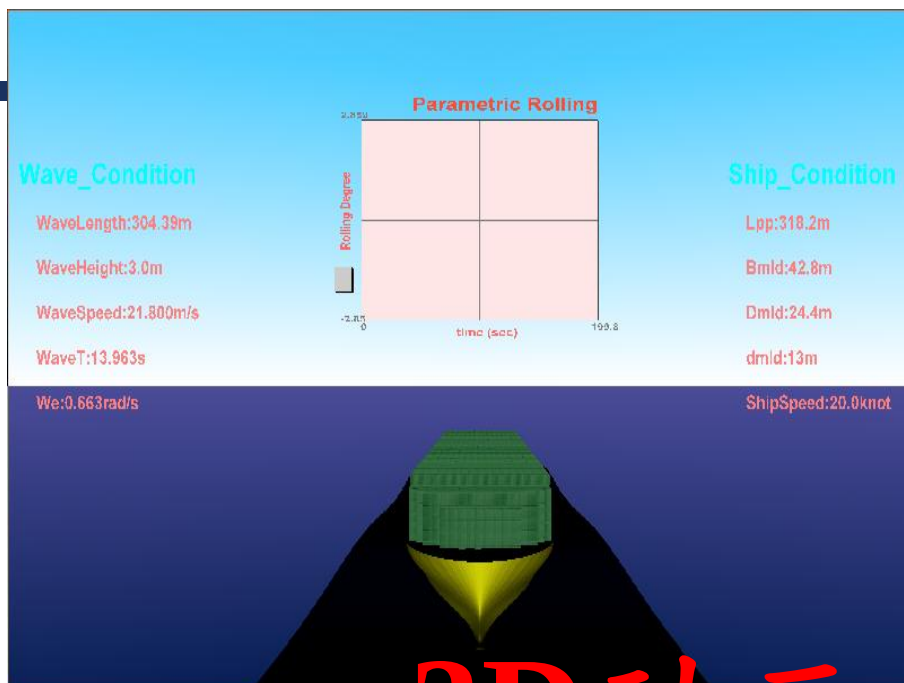


8258teu 货柜船主要尺寸

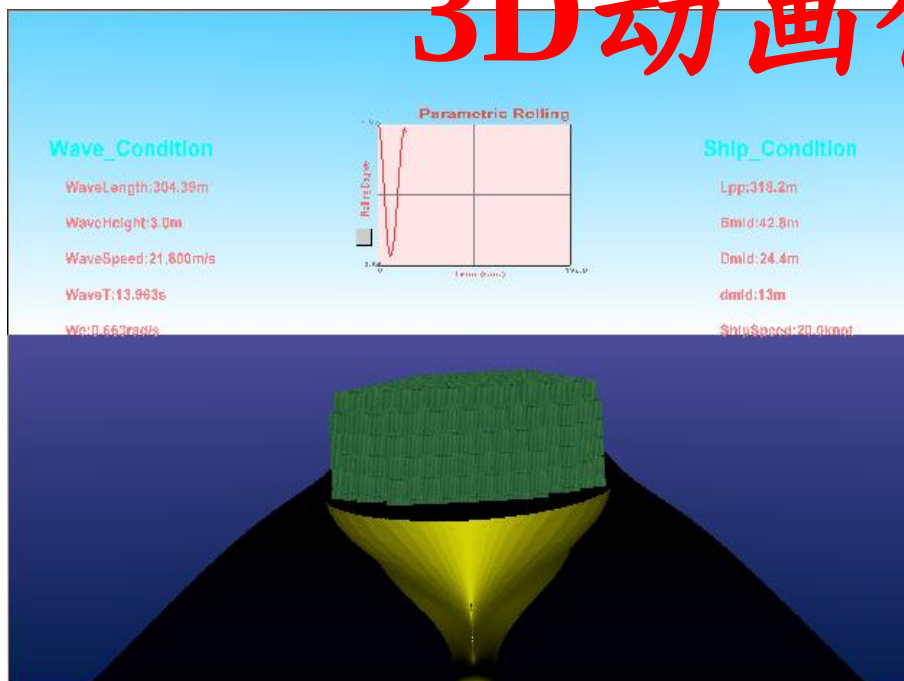
船长 L_{pp}	318.2m
船宽 B_{mld}	42.8m
船深 D_{mld}	24.4m
设计吃水 d_{mld}	13m
垂直重心高度 KG	19.185m
纵向重心位置 LCG	153.7m（从艏垂柱AP算起）



波長 $\lambda = 304.39$ m 狀況下之係數組合 $(\varepsilon_1, \delta_1)$ 分佈圖



3D动画仿真显示



$$\lambda = 304.39 \text{ m} , V=20\text{knots} , H=5.5\text{m}$$

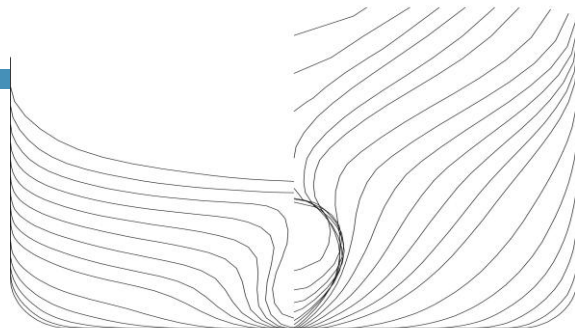
$$\lambda = 304.39 \text{ m} , V=20\text{knots} , H=8.0\text{m}$$

$$\lambda = 304.39 \text{ m} , V=20\text{knots} , H=10.5\text{m}$$

$$\lambda = 304.39 \text{ m} , V=20\text{knots} , H=13.0\text{m}$$

Home Work 4

实际计算案例



横剖面



水线面



纵剖面

8258teu 货柜船主要尺寸

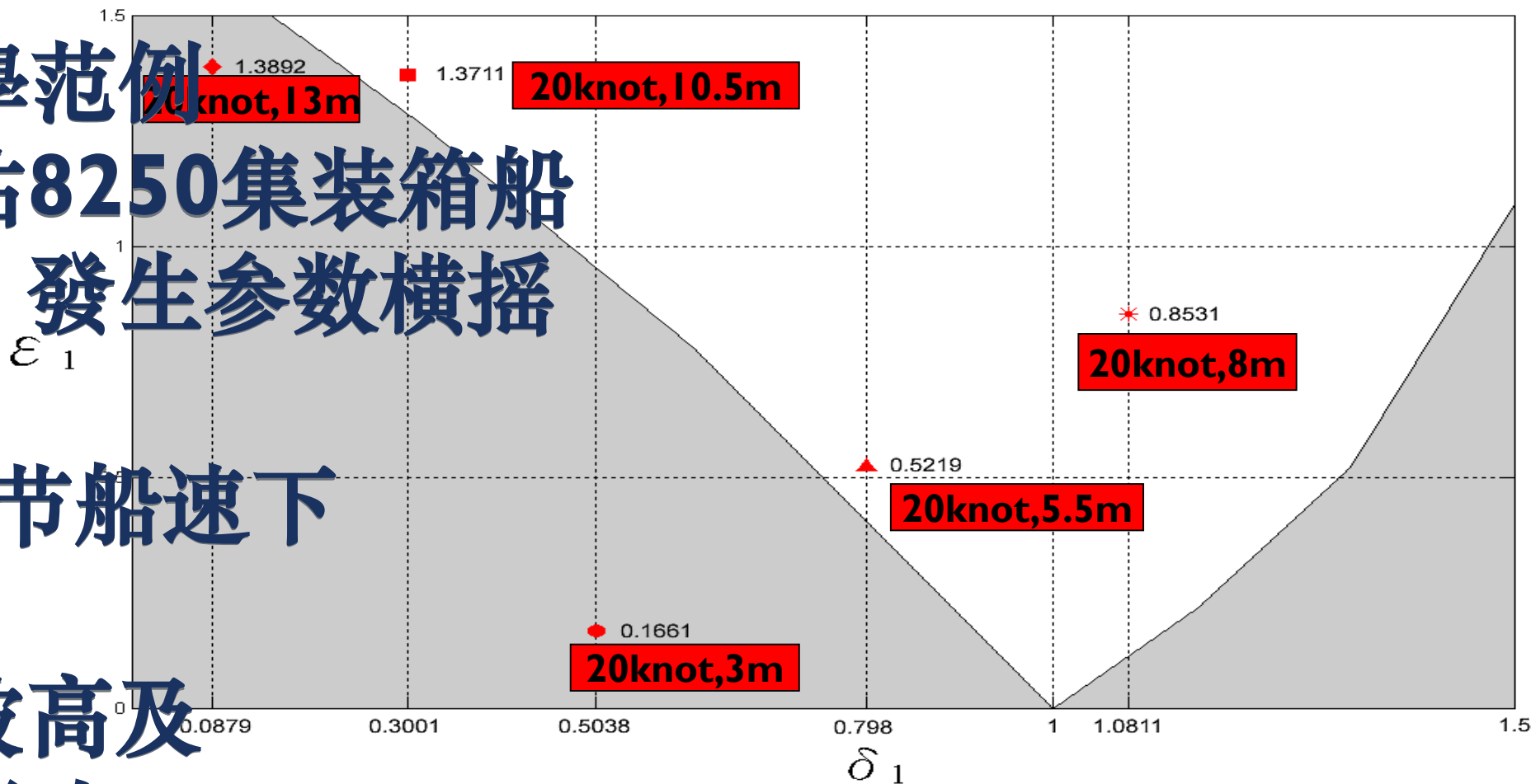
船长 L_{pp}	318.2m
船宽 B_{mld}	42.8m
船深 D_{mld}	24.4m
设计吃水 d_{mld}	13m
垂直重心高度 KG	19.185m
纵向重心位置 LCG	153.7m（从艏垂柱AP算起）

TERM PROJECT (HOMEWORK)

按照PPT教學范例
数值求解评估8250集装箱船
提高航速時，發生参数横摇
的可能性：

1. 计算21-25节船速下的
的 $(\varepsilon_1, \delta_1)$ 图

2. 计算临界波高及
不同波长的影响



波長 $\lambda = 304.39$ m 狀況下之係數組合 $(\varepsilon_1, \delta_1)$ 分佈圖

下次课程介绍

横摇和纵摇及垂荡三自由度耦合的

参数横摇(PARAMETRIC ROLLING)及横甩(BROACHING)建模分析方法

Thank you for your attention!
Q&A



教学设计



教学设计

1. 主题单原深入浅出、强调系统学习
2. 开展抽象的概念和公式具体化学习
3. 系统学习船舶耐波性运动建模分析方法
4. 应用理论方法解决实际问题的方案设计



教学理念



教学理念

1. 主题单原由浅入深、循序渐进
2. 具体呈现抽象的概念和公式
3. 培养学生系统学习理论方法的能力
4. 由理论方法面向解决实际问题的能力

Problem Solving Ability



教学方法



教学方法

1. Interactive Learning 互动式学习
2. Engaging Learning 吸引式学习
3. Problem-based Learning 问题导向学习
4. Project-based Learning 项目导向学习



教学过程



教学过程

博学之，
审问之，
慎思之，
明辨之，
笃行之（《礼记·中庸》）



教学反思



教学反思

目前教学软件 and 材料，全面实现

- Interactive Learning
- Engaging Learning
- Problem-based Learning
- Project-based Learning

仍有较大的不足，需要投入更多的精力和财力

Thank you for your attention!
Q&A