

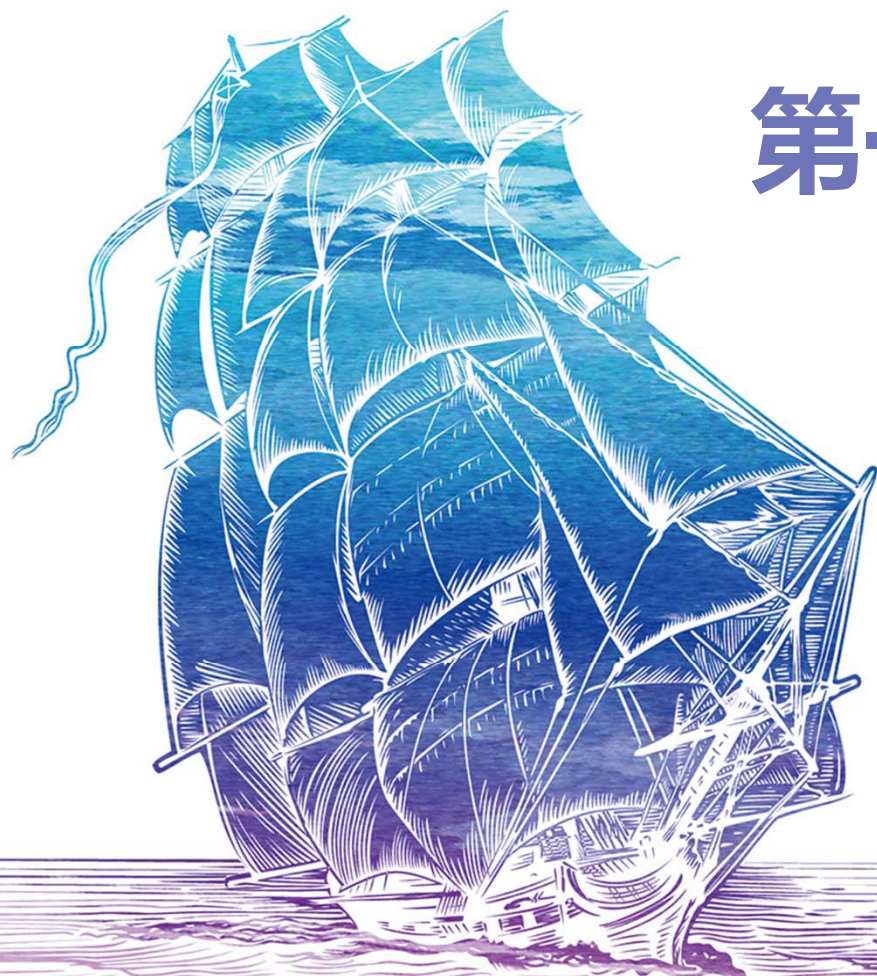


香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

# 第一课 帆船结构及原理

CUHK(SZ)

2019年7月





香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

# Contents

## 目录

01 帆船历史

02 帆船结构

03 帆船与人工智能前言

04 帆船原理

05 帆船操作技巧





01

帆船历史

02

帆船结构

03

帆船与人工智能前言

04

帆船原理

05

帆船操作技巧

# 1. 帆船历史



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

帆船是利用**风力**前进的船，是继舟、筏之后的一种古老的**水上交通工具**



古埃及风帆船：公元前3100年



郑和下西洋：15世纪



哥伦布：15世纪末



# 1. 帆船历史



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

## 帆船在人类文明探索与战争的应用



西班牙和英国贸易



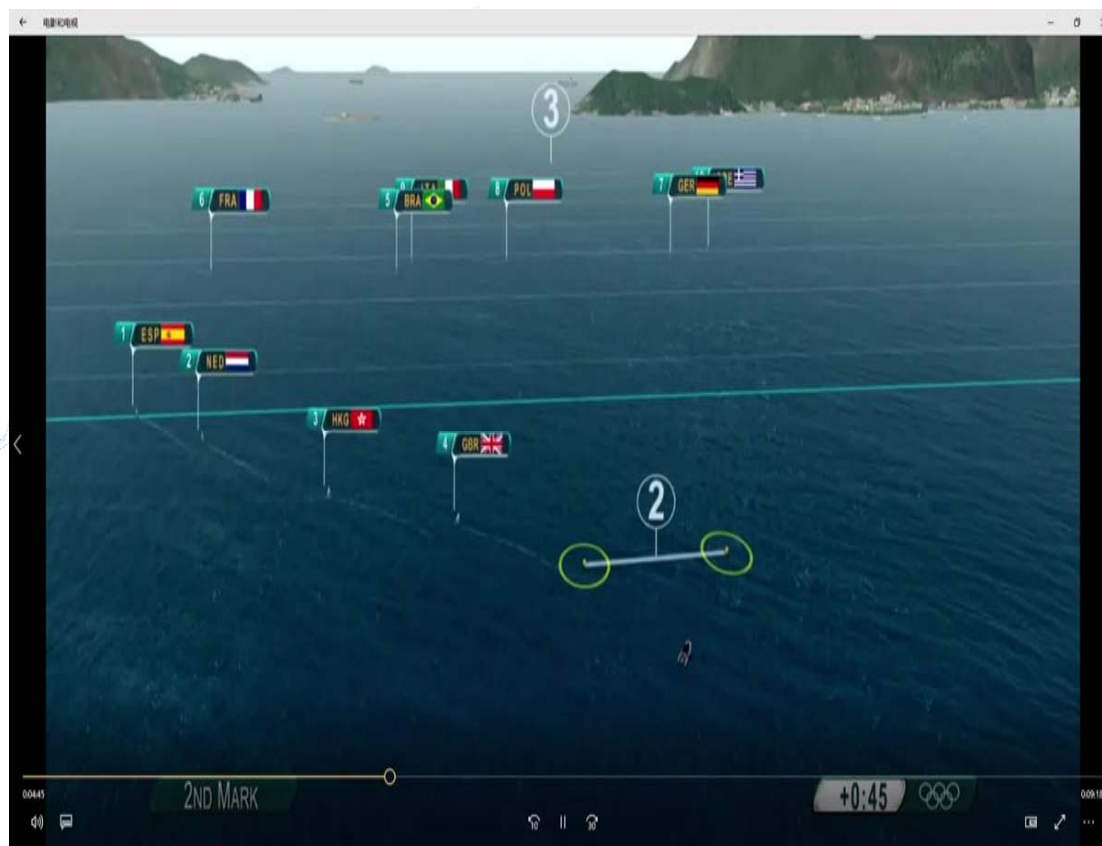
特拉法尔加海战

# 1. 帆船历史



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

帆船逐步演变为一项体育运动



青岛奥帆赛



# 1. 帆船历史



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

## 无人帆船比赛



跨大西洋机器人航海挑战赛



世界机器人帆船锦标赛



01

帆船历史



02

帆船结构

03

帆船与人工智能前言

04

帆船原理

05

帆船操作技巧

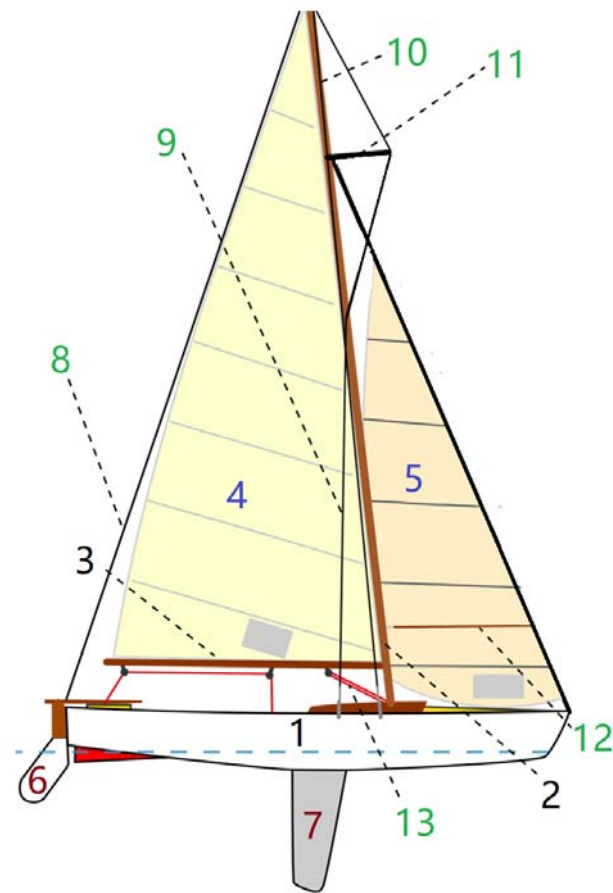


## 2. 帆船结构



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

- 1 为船体，在无人帆船中，他需要是一个密封舱，用以存放电子设备。
  - 2 为桅杆，它直立于船体之上，是支撑帆的垂直高杆。
  - 3 为横杆，它与桅杆一起用以支撑帆。
  - 4 为主帆，装在帆船桅杆上，是帆船将风力转化为航行动力的重要载体。
  - 5 为前帆，安装于帆船前端，相对主帆要小，主要目的为减少主帆背风侧的湍流来提高性能和整体稳定性。
  - 6 为方向舵，用以控制帆船航行方向。龙骨的支撑 侧支索 前桅支索 下拉索
  - 7 为龙骨，用以平衡帆船侧向力，同时提供压舱物。
- 还有很多如：支索，吊索等辅助结构。

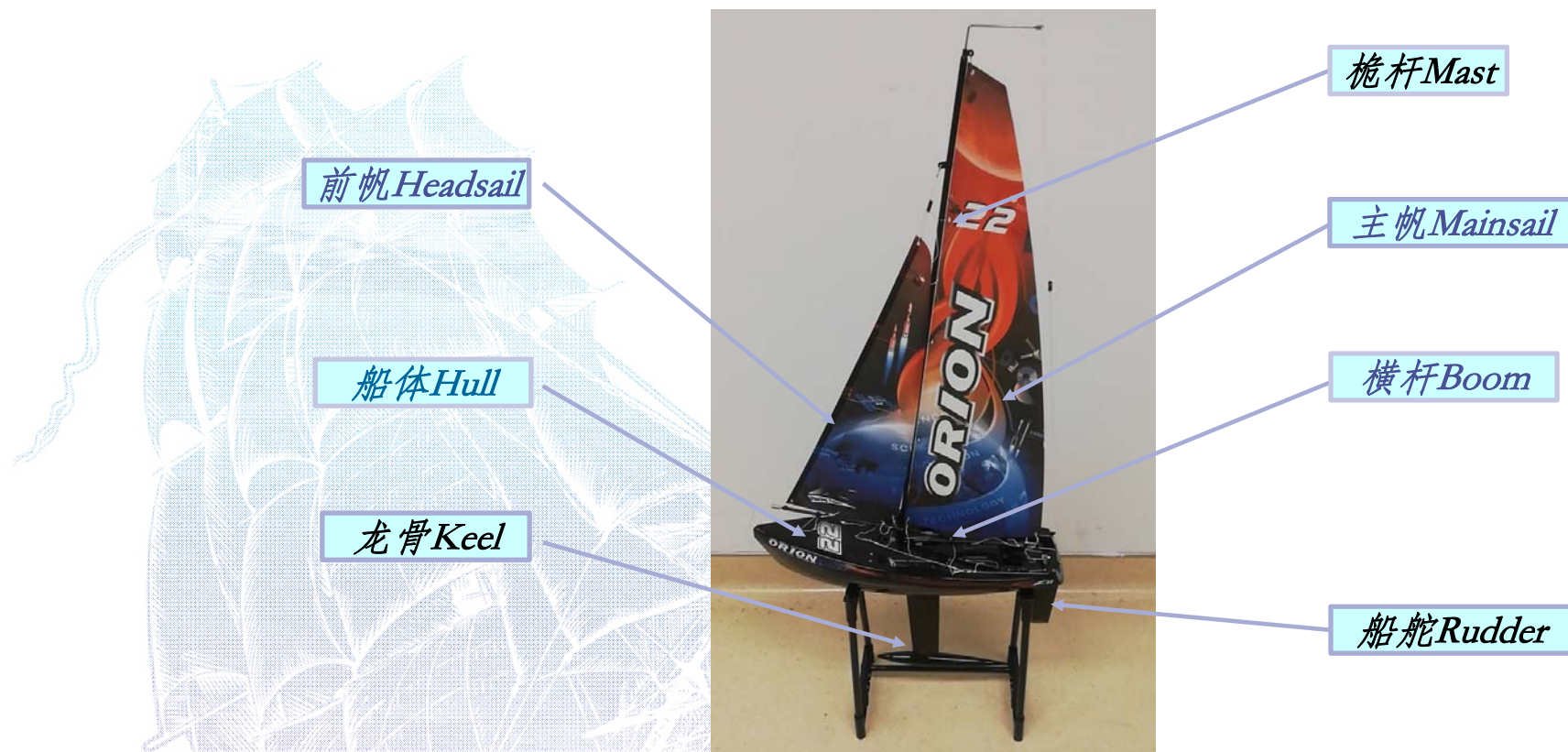


帆船结构示意图

## 2. 帆船结构



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen



帆船结构



## 2. 帆船结构——分类



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

根据桅杆与帆分类：

单桅杆帆船、单桅艇、双桅帆船、高低桅帆船、多桅帆船、多桅方帆帆船



单桅帆船(sloop)



Puma号帆船

## 2. 帆船结构——分类



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

根据桅杆与帆分类：

单桅杆帆船、**单桅艇**、双桅帆船、高低桅帆船、多桅帆船、多桅方帆帆船



单桅艇

**异同：**桅杆在船里的位置极为靠前，几乎就在船头上，因此可以有空间装一面帆脚很长的主帆

**优点：**帆的易操控性，如在迎风换舷（tacking）时，不用去管前帆



## 2. 帆船结构——分类



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

根据桅杆与帆分类：

单桅杆帆船、单桅艇、**双桅帆船**、**高低桅帆船**、多桅帆船、多桅方帆帆船



双桅帆船



高低桅帆船

## 2. 帆船结构——分类



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

根据桅杆与帆分类：

单桅杆帆船、单桅艇、双桅帆船、高低桅帆船、**多桅帆船**、**多桅方帆帆船**



多桅帆船



多桅方帆帆船



## 2. 帆船结构——分类



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

根据船体分类：

单体船、双体船、三体船



单体船

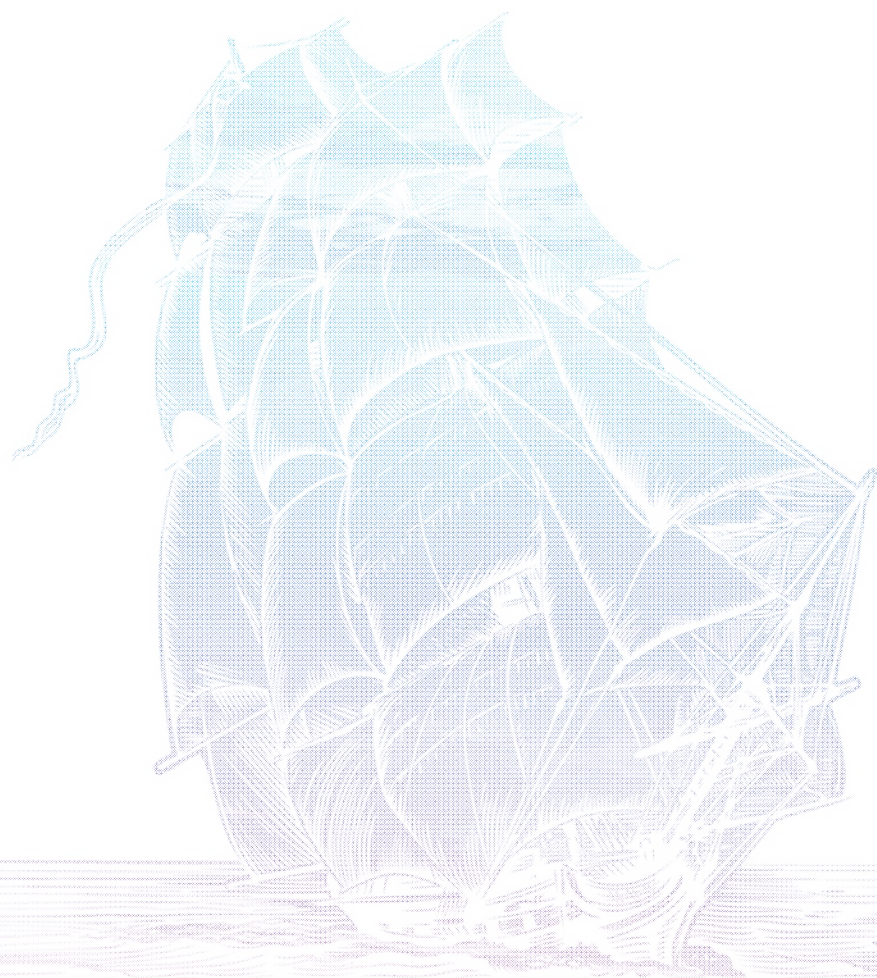


双体船

## 2. 帆船结构——分类



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen







01

帆船历史

02

帆船结构

03

帆船与人工智能

04

帆船原理

05

帆船操作技巧

### 3. 帆船与人工智能——无人船发展现状



香港中文大学(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

无人帆船是一种以海洋环境能源为驱动，可以胜任远海作业、具有实时数据传输功能和实时定位功能、低运营成本的多用途新型海气界面移动观测平台。

2001 年美国加利福尼亚大学 ELKAIM 设计并测试了风力驱动**无人双体船 Atlantis**。

2015 年西班牙拉斯帕尔马省大加那利岛大学在 A-Tirma 无人帆船的基础上推出了 **A-TirmaG2** (图 g)，船长 1.985 m，宽 0.37 m，质量 43 kg

2018年挪威 Offshore Sensing AS 自动驾驶帆船公司推出了 Sailbuoy 无人帆船，其 SB Met 号(图 e)于当年8月26日实现了无人帆船**首次横跨大西洋**的目标，期间共航行了 80 d，5100 km。

**现状：**尚未有一艘无人帆船具备可覆盖全球海域的航行能力。

**需求：**长续航力、低功耗的优点，又能实现航行安全与精细观测作业。





### 3. 帆船与人工智能



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

按照任务优先级和良好的逻辑决策流程图执行**观测**、**避障**、**返港**等任务使命；具有一定的独立性，以快速响应海洋中动态环境的变化。

#### 方法：

葡萄牙新里斯本大学提出了三层结构控制器设计方案，顶层是**任务分配**策略，中间层是**导航**策略，底层是基于模糊控制的**舵和帆控制**

#### 顶层：

优化任务分配

#### 中间层：

中间层根据无人帆船感知到的风向、坐标、目标点信息等选择正确的路径，并且通过局部路径规划确定下一个航行点的位置。

- 路径规划：A\*算法、分枝情景树、势场法等进被用于无人帆船的路径规划
- 静态避障：基于复合矢量场的方法、区间分析法、基于光线投影的方法、代价函数法
- 动态避障：基于接收自动识别系统数据目标识别法、热成像与雷达技术组合识别动态障碍物

### 3. 帆船与人工智能



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

#### 底层控制：控制算法与执行机构

对于底层帆和舵的控制，现阶段大多采用帆和舵分离控制方案，

- 帆控制的输入量包括风向和船的方向夹角，输出量是帆的转角；
- 舵控制的输入量包括当前速度矢量和路径方向之间的夹角(航向角误差)、当前位置与预定航线之间的垂直距离，输出量是舵的转角。

#### □ 控制算法：

- WANG 开发了基于通用规则帆控制器和模糊逻辑理论舵控制器相结合的无人帆船轨迹跟踪控制器。
- 英国蒙德福特大学也建立了基于 Mamdani 算法的模糊控制系统，将水手的经验转化为 Mamdani 模糊推理系统，该系统也是对帆和舵进行分别控制，在对帆进行控制时考虑了船的横倾，并描述了视风和帆船横倾的关系

#### □ 执行机构：

- 葡萄牙波尔图大学研制的无人帆船 FAST 通过直流电机和带有自锁功能减速器对帆进行控制，减低电机能耗。
- 奥兰应用科学大学和法国航空工业大学也分别对软帆无人帆船的建模与控制进行了研究



### 3. 帆船与人工智能——无人船驱动技术



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

在**混合驱动**状态下，帆主要用于降低推进器的功耗，具体实践中，以混合驱动的所需电力总功率最低为目标，对航行路径进行优化、控制翼帆的转角，最大限度地降低推进器功耗

在**航速低于预期值**或者**无法使用风帆**获取推力以及需要进行区域精细观测时可以依靠**辅助推进装置**实现推进航行。目前常用的辅助推进装置主要有**喷水推进系统**和**可折叠螺旋桨推进系统**。

例：

- a) CUHK (SZ) 太阳能电池板获取能量；
- b) 法国巴黎第六大学提出了在无人帆船甲板上安装垂直轴风力发电机(50 W-12 V) 辅助获取电能的方案，在 10 km风速下可获得 10 W 发电功率。



### 3. 帆船与人工智能——发展趋势与展望



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

#### 帆船发展趋势

低成本长航程目标的实现, 风帆-螺旋桨混合驱动观测模式的实现.

##### ➤ 帆船结构设计

风帆快速收放技术、新型船型的应用与降阻增速技术;

##### ➤ 无人帆船高速巡航

- a. 基于环境感知的无人帆船自主航行控制技术;
- b. 基于**机器学习**的帆-舵控制技术,更好地提升无人帆船航速和航迹保持能力。(AlphaGo)

##### ➤ 控制策略与系通管理

- a. 风帆-螺旋桨(喷水)**混合驱动控制**策略;
- b. 高效能源获取与管理技术。



## 4. 帆船原理——真风、船风、相对风



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

01

帆船历史

02

帆船结构

03

帆船与人工智能前言

04

帆船原理

05

帆船操作技巧

## 4. 帆船原理——真风、船风、相对风



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

**思考：**帆船依靠风航行，船和帆怎样的方向航行会跑得最快？



在船舶运行中，存在三种风：真风、船风、相对风

**真风：**船舶在海上静止不动时观测到的风；

**船风：**船舶行进时，因周围静止空气与船舶作相对运动而形成的风，风速和航速相同，方向相反；

**相对风：**也叫“合成风”，船舶航行在有风海面上所测得的风速，由船风和真风的风速合成而得；



## 4. 帆船原理——真风、船风、相对风



香港中文大学(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

已知在船舶运行中，存在三种风：真风、船风、相对风。

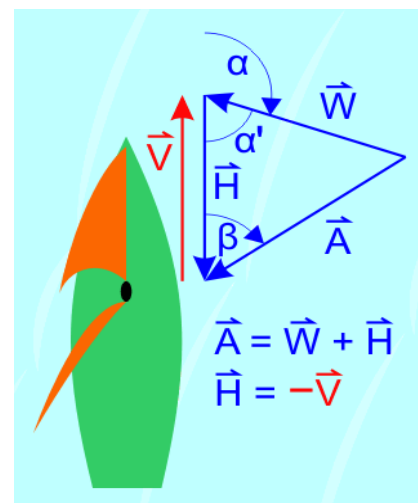
$\vec{W}$ 为真风风速风向， $\vec{V}$ 为船速船向， $\vec{H}$ 与 $\vec{V}$ 大小相等，方向相反，即为船风风速风向。

$\vec{A}$ 由真风、船风合成所得，即为相对风风速风向。

帆船的推进力与相对风速大小的平方成正比。

顺风时，帆船航行方向与风向一致，合成后的相对风速大小反而较小；

横风时，真风风向与帆船航行方向成比较大角度，合成后相对风速大小较大。



相对风速合成

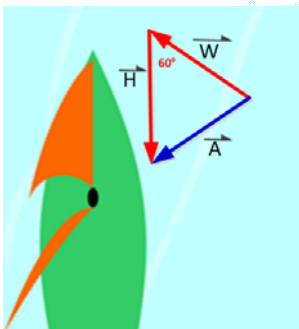
## 4. 帆船原理——真风、船风、相对风



香港中文大学(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

设：真风5m/s，航向为竖直向前，船风为5m/s， $\alpha$ 为 $60^\circ$ （ $W$ 为真风风速， $V$ 为船速， $H$ 与 $V$ 大小相等，方向相反， $A$ 为相对风风速）

**题1：**求此时相对风大小及方向



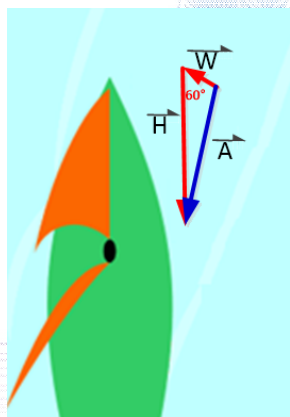
解

$$\text{由 } \vec{A} = \vec{H} + \vec{W}$$

$\vec{A}$  与  $\vec{H}$  成 $60^\circ$ ，大小为5m/s

**题2：** $\alpha$ 与真风不变，当船风由5m/s降低为1m/s,求此时相对风大小及方向？

船风由大变小的过程中，相对风会出现何种变化？



解

$$\text{由 } \vec{A} = \vec{H} + \vec{W}$$

经余弦定理求得

$\vec{A}$  与  $\vec{H}$  成 $10.9^\circ$ ，大小为4.6m/s



## 4. 帆船原理——升力、阻力



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

**思考：**逆风航行，想要开往前方，能不能实现？

$V_a$ 为相对风，在相对风的作用下，帆会受到一个力 $F_t$ 。这个力可以分解到两个方向：与 $V_a$ 方向一致的力，即为**阻力**，与 $V_a$ 方向垂直的力，即为**升力**。

虚线为帆弦，虚线与 $V_a$ 所成的角度 $\alpha$ 称为攻角，或叫**迎角**。

在帆船中，升力、阻力有以下计算公式：

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V_A^2 A$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V_A^2 A$$

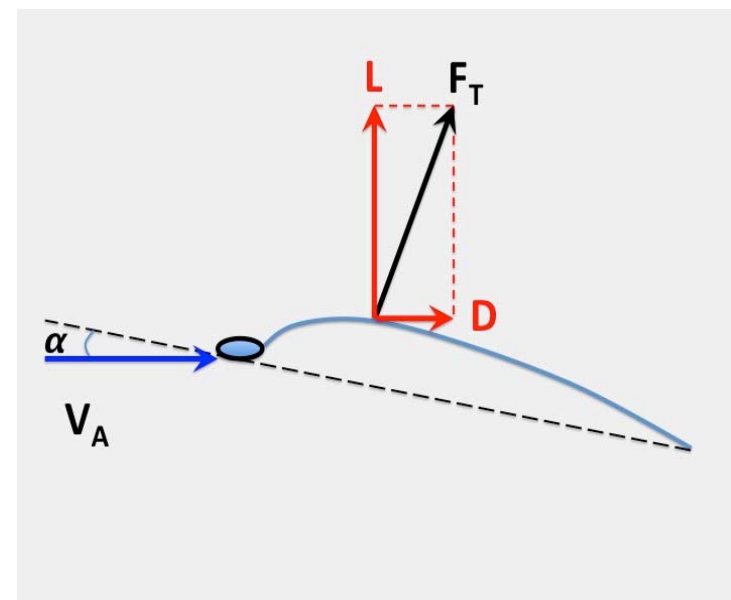
其中：

$C_L$  为升力系数；

$C_D$  为阻力系数；

$V_A$  为阻力系数；

$A$  为风帆面积

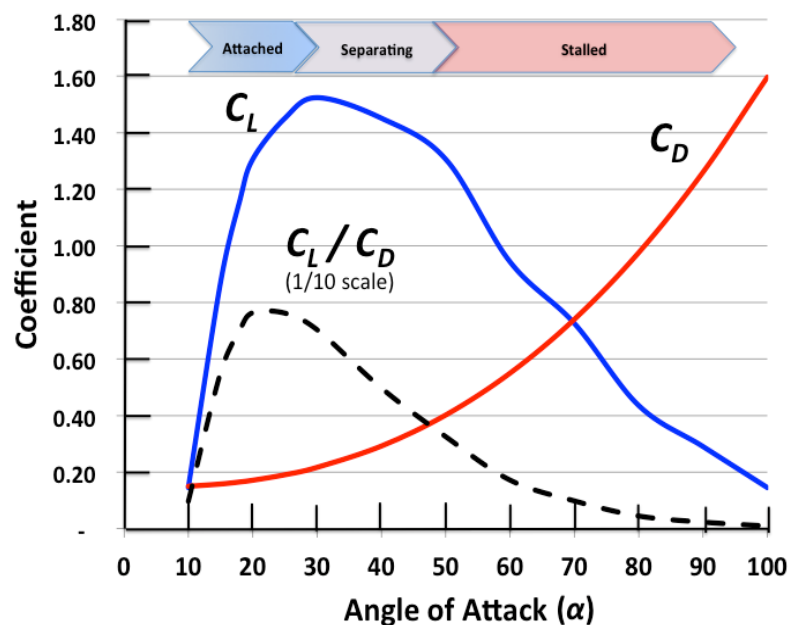


升力和阻力

## 4. 帆船原理——升力、阻力



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen



升力系数、阻力系数与迎角关系

这是实际实验获得的帆船升力和阻力曲线。

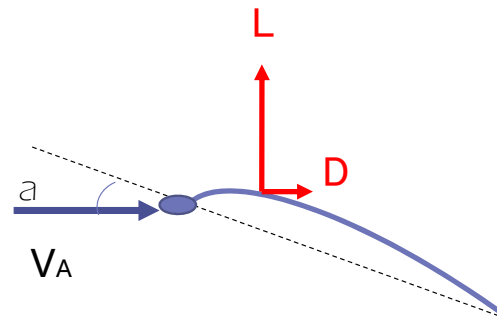
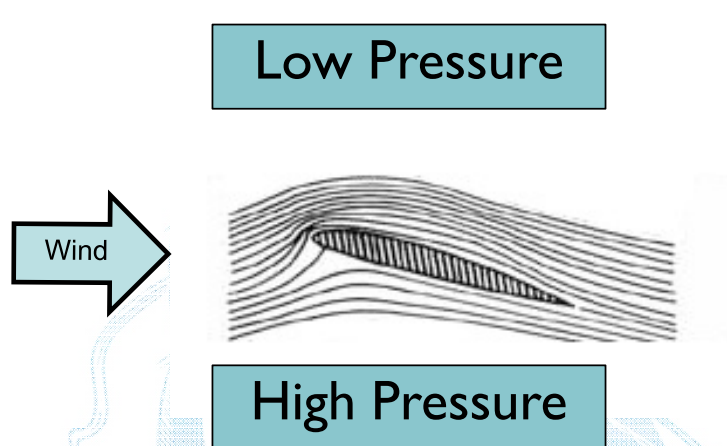
- 阻力系数 $C_D$ 随着迎角增大逐渐增大，升力系数 $C_L$ 随着迎角先升后降。
- 阻力系数的变化容易理解，升力系数 $C_L$ 为什么会先生后降呢？



## 4. 帆船原理——升力、阻力

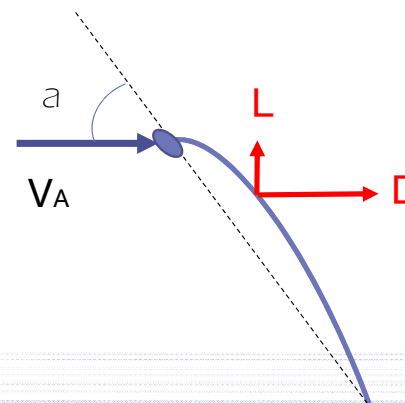
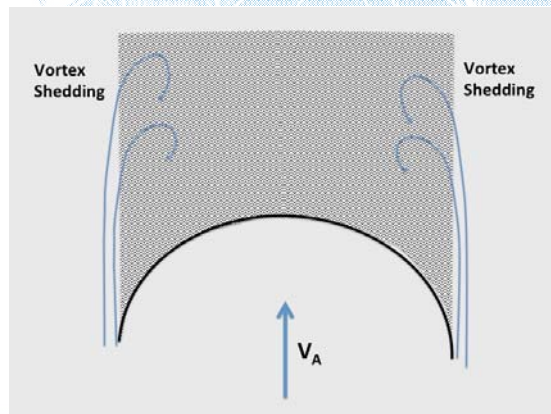


香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen



$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V_A^2 A$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V_A^2 A$$



其中:

$C_L$  为升力系数;

$C_D$  为阻力系数;

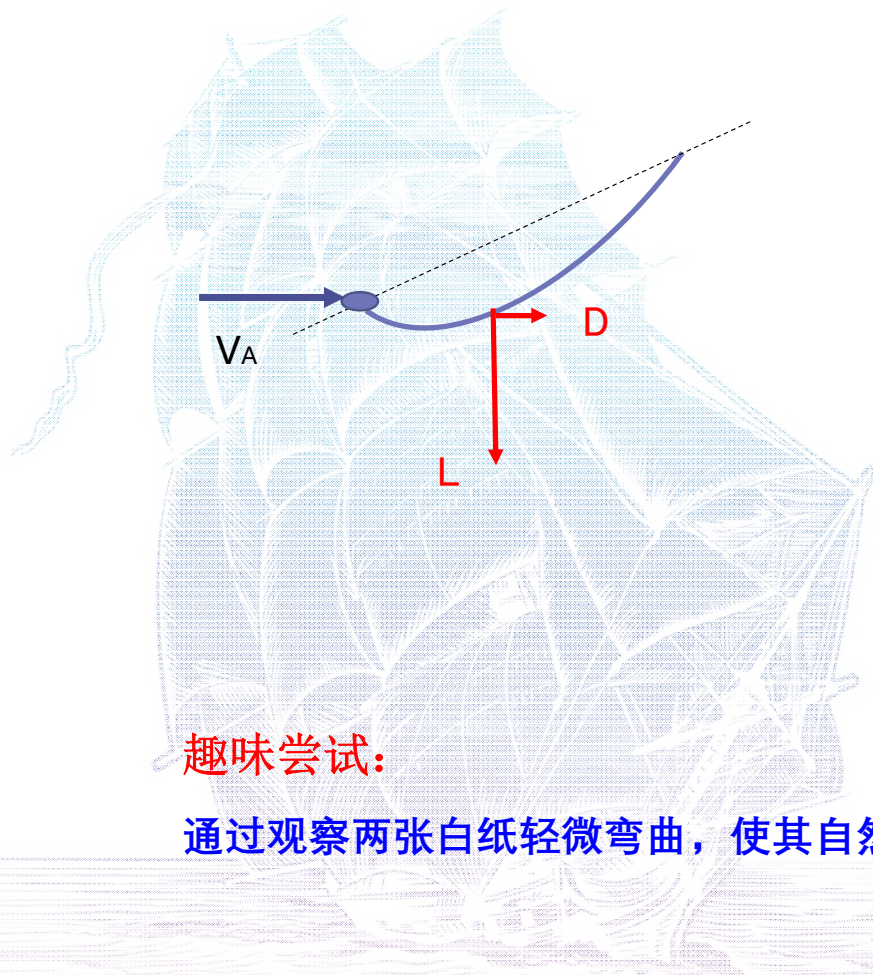
$V_A$  为阻力系数;

$A$  为风帆面积

## 4. 帆船原理——升力、阻力

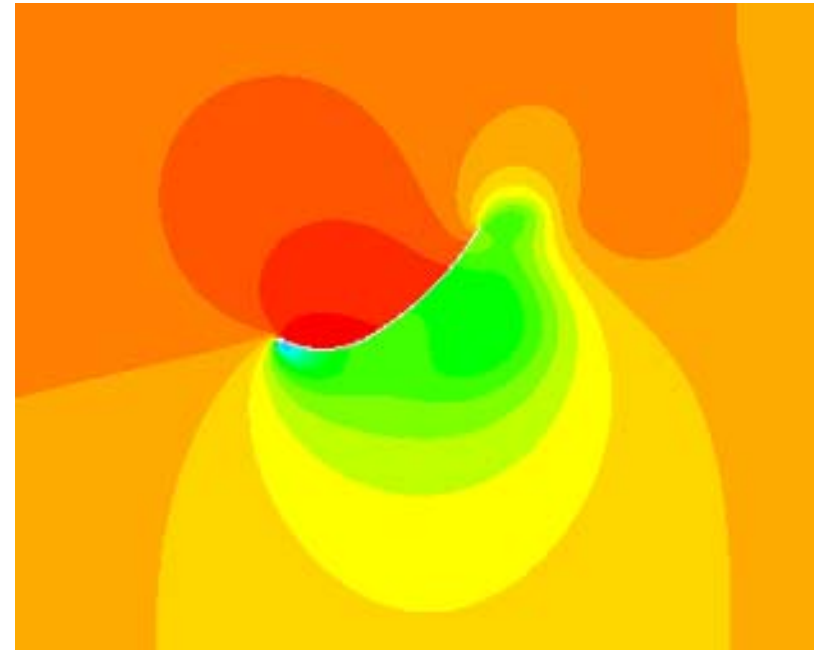


香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen



趣味尝试:

通过观察两张白纸轻微弯曲，使其自然下垂，后对其中间吹气，观察现象。



迎角为30°的数值模拟

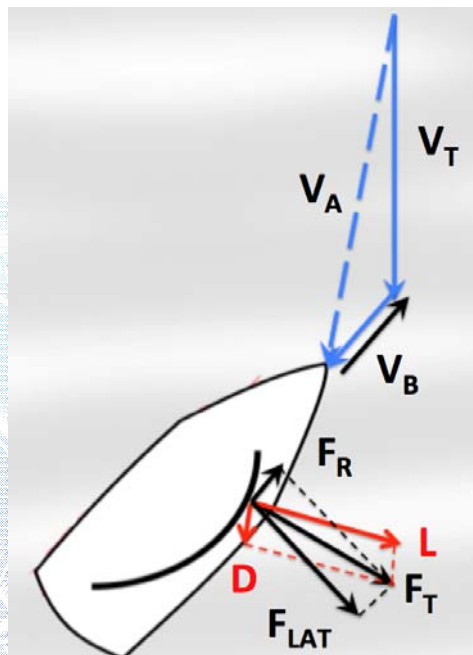


## 4. 帆船原理——升力、阻力



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

**思考：**迎角较小时，船受到的侧向力远大于前向力，为何船还能朝船头方向行驶？



帆船行进受力示意图



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

01

帆船历史

02

帆船结构

03

帆船与人工智能前言

04

帆船原理

05

帆船操作技巧

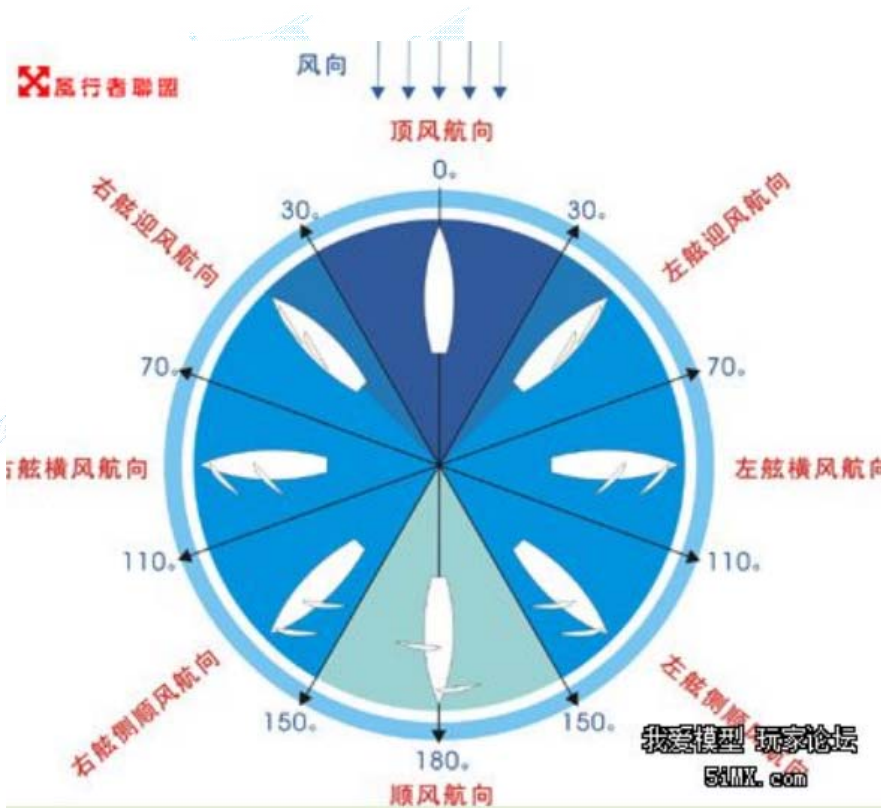




## 5. 帆船操作技巧



香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen



航向图

航向	角度 (°)
顶风航向 (a)	0-30°
迎风航向 (b)	30°-70°
横风航向 (c)	70°-110°
侧顺风航向 (d)	110°-150°
顺风航向 (e)	150°-180°

0 ~ 30°为禁航区，该区域内帆船无法获得前进推力；

## 5. 帆船操作技巧——横风行驶

### 起始:

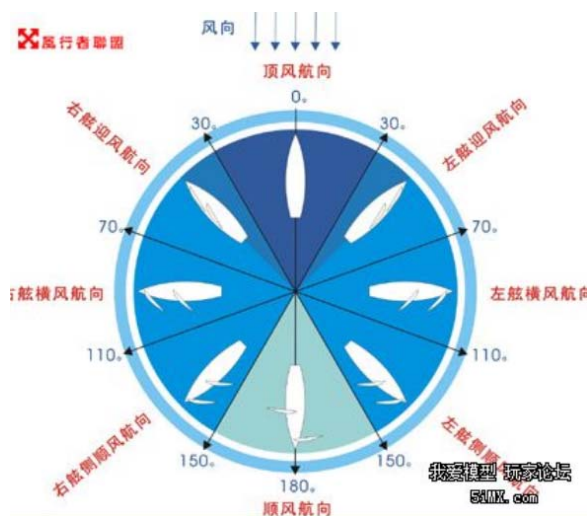
横风行驶时，风吹动水面波浪的纹路与船的航向近似于平行，风向角约为 $70 \sim 110^\circ$ ，帆角可先调整到 $45 \sim 60^\circ$ ，然后根据航行情况再作调整。

### 注意事项:

在横风航向上行驶最容易出现的失误是把帆的缭绳拉得过紧。这样做看上去帆不发飘，像是吃满了风，但实际产生的推进力不大，风帆侧向力却较大，导致航行速度不快却产生较大的横倾和抢上风力矩。

### 操作要领:

应当试着放开一些缭绳，适当增大帆角，只要帆不发飘，船有速度且不会自行改变航行方向即可。





## 5. 帆船操作技巧——迎风行驶



香港中文大学(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

### 起始:

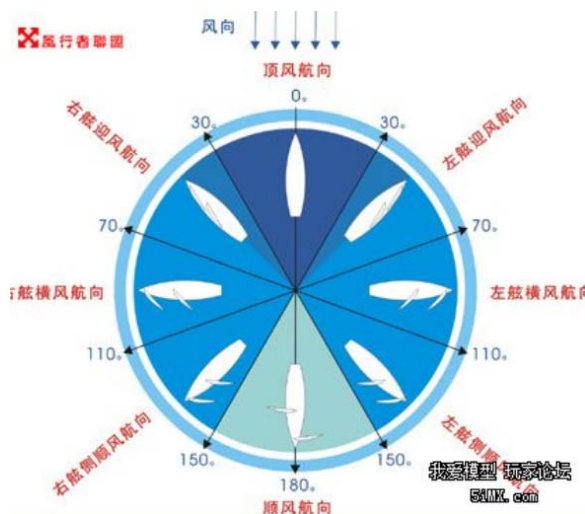
30° ~ 70°的风向角称为迎风航向, 30° ~ 45°风向角为前迎风。开始练习迎风行驶时, 可先把主帆角度放在20°左右, 在较大的迎风角度上练起。

### 注意事项:

迎风航行, 在没有操舵的情况下, 当风向角增大或风速增大时, 帆船模型会向上风方向偏转; 反之则向下风方向偏转。

### 操作要领

要适当拉紧缭绳, 收小帆角, 保持理想的帆型, 使帆有较高的效率。前帆角度应该比主帆稍大3 ~ 5°, 以充分发挥主帆效率。



## 5. 帆船操作技巧——顺风行驶



### 起始:

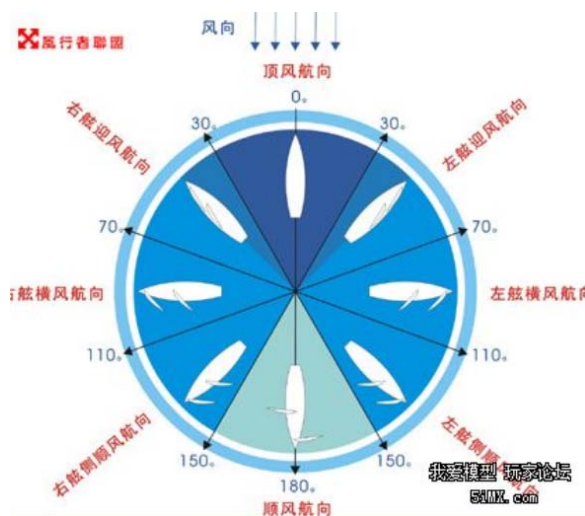
110°~180°的风向角划为顺风航向, 110°~150°为侧顺风航行, 150°~180°为正顺风航行。在中等风速下, 侧顺风船好操纵, 反应灵活, 帆、舵配合好, 可直线航行, 也能任意作迎风和顺风偏转或转向。

### 注意事项:

当风速较大或突然遭遇强阵风时, 船的横倾会突然增大, 产生强大的抢上风力矩, 船会骤然偏离原来的航向, 急剧转向上风而难于控制, 在失去控制的情况下会顶向上风而失速。

### 操作要领

侧顺风操纵时要练好模型急剧转向上风的关键技术







香港中文大學(深圳)  
The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen

谢谢聆听

