

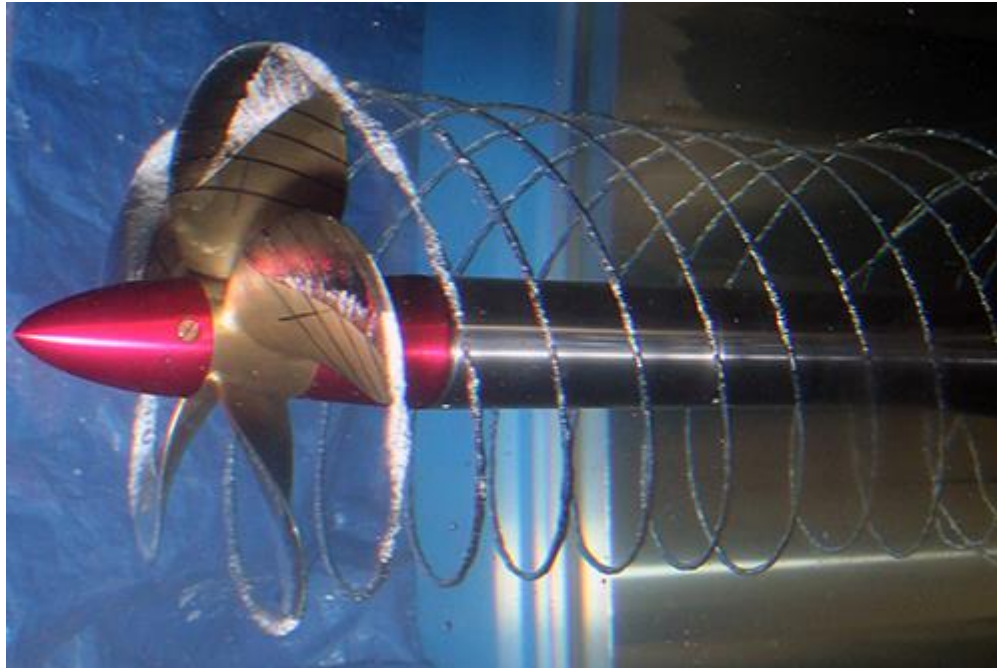


上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

# 第六章

## 螺旋桨的空泡现象





## 螺旋桨空泡现象的认识

- 1754年Euler提出了对空泡可能性的探讨；
- 1859年英国数学家Besant对球形空泡的动力学进行分析
- 1894年英国“勇敢号”驱逐舰，试航时发现达不到预定转速，主机发出总功率比额定功率低7.5%，航速比设计航速低3kn
- 1895年Thornycroft和Barnaby第一次观察到螺旋桨叶背空泡
- 1897年Barnaby在造船工程学会上详细介绍了螺旋桨空泡现象的出现



## 船舶发展的两大趋势

- 军用船舶主机向高转速和大功率方向发展，螺旋桨空泡问题在所难免；
- 船舶大型化和高功率发展，螺旋桨负荷增加，尾部伴流不均匀导致的时生时灭的空泡，造成桨叶剥蚀，伴有强烈振动，空泡问题日益重要。

## 本章需要研究的内容

- 空泡产生的机理是什么？
- 是否存在尺度效应？
- 为什么会产生叶面剥蚀？
- 如何抑制空泡产生？



### 空泡的定义

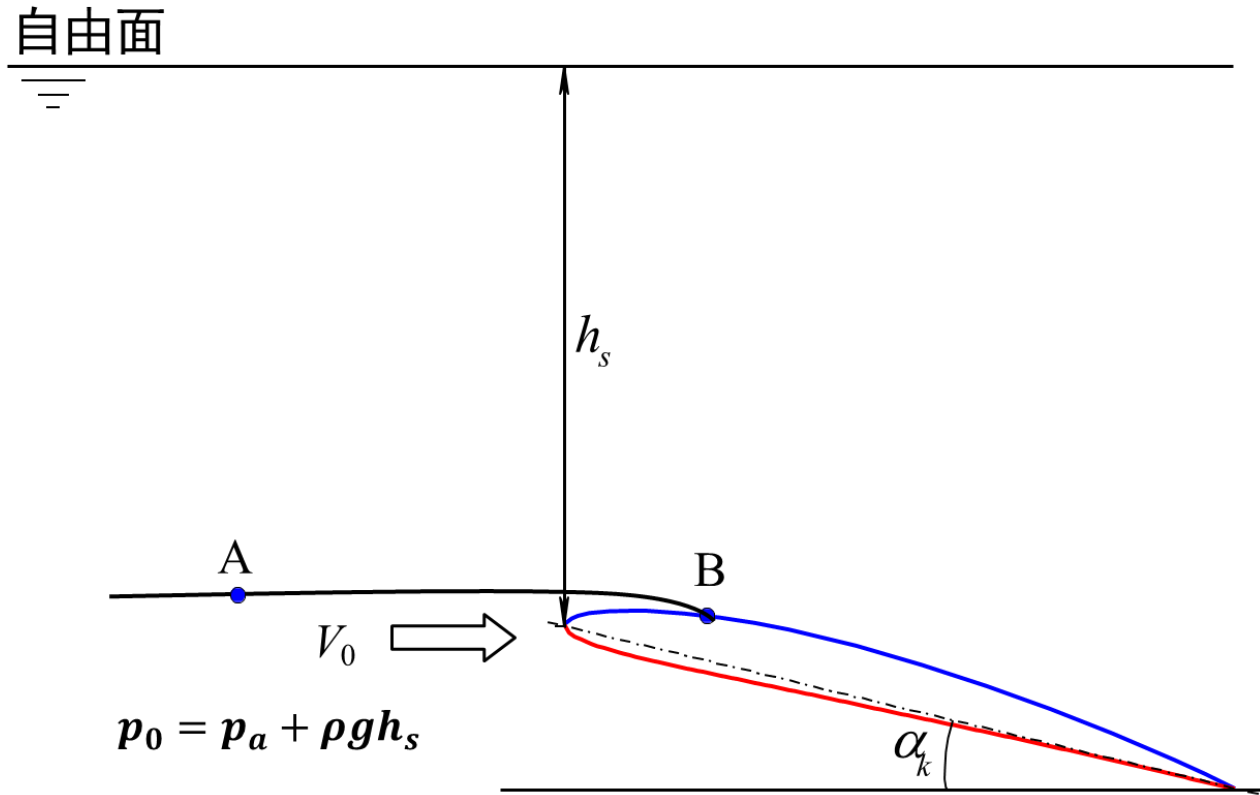
螺旋桨水中工作时，桨叶的叶背压强降低形成吸力面，若某处的压强降至临界值以下时，导致水发生爆发式的汽化，水汽通过界面进入气核使之膨胀，形成气泡，称为**空泡**。

一般认为，压强的临界值即为该温度时水的汽化压强，或称饱和蒸汽压强。



## 空泡的产生的机理分析

螺旋桨水中工作时，以桨叶某半径处切面为例，分析如何产生空泡.





## 空泡的产生的机理分析

远前方A点和叶背B点利用伯努利方程可得：

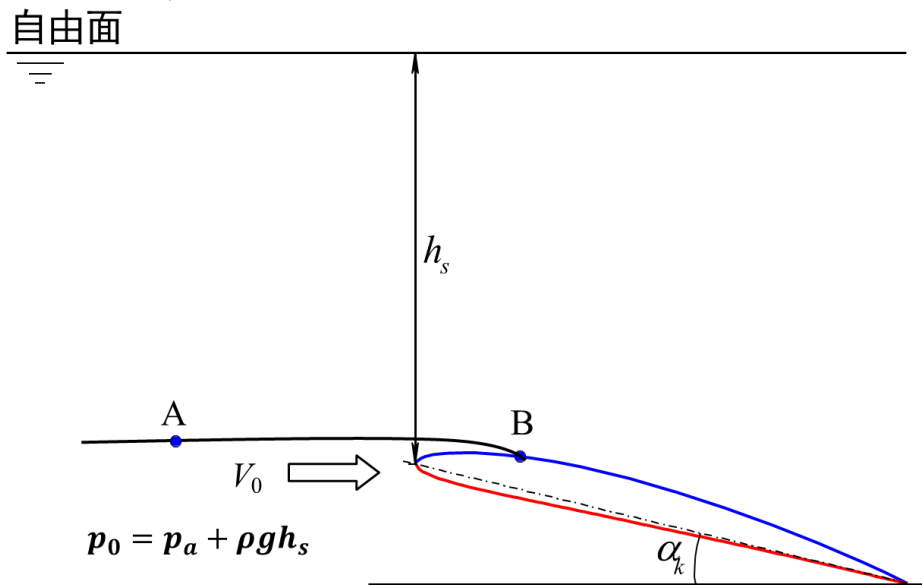
$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p_b + \frac{1}{2} \rho V_b^2$$

$$p_0 - p_b = \frac{1}{2} \rho (V_b^2 - V_0^2)$$

$$\varepsilon = \frac{p_0 - p_b}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = \left( \frac{V_b}{V_0} \right)^2 - 1$$

其中，无因次 $\varepsilon$ 为减压系数。

若 $\varepsilon < 0$ ，表示该处压强增高，反之压强降低。通常认为，当B点压强降至该水温下的汽化压强 $p_v$ 时，即开始出现空泡，故B点出现空泡的条件是 $p_b \leq p_v$





## 空泡的产生的机理分析

$$\text{令 } \sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho V_0^2},$$

若满足  $\varepsilon \geq \sigma$ , 则  $p_b \leq p_v$ ,

该处产生空泡; 反之, 若

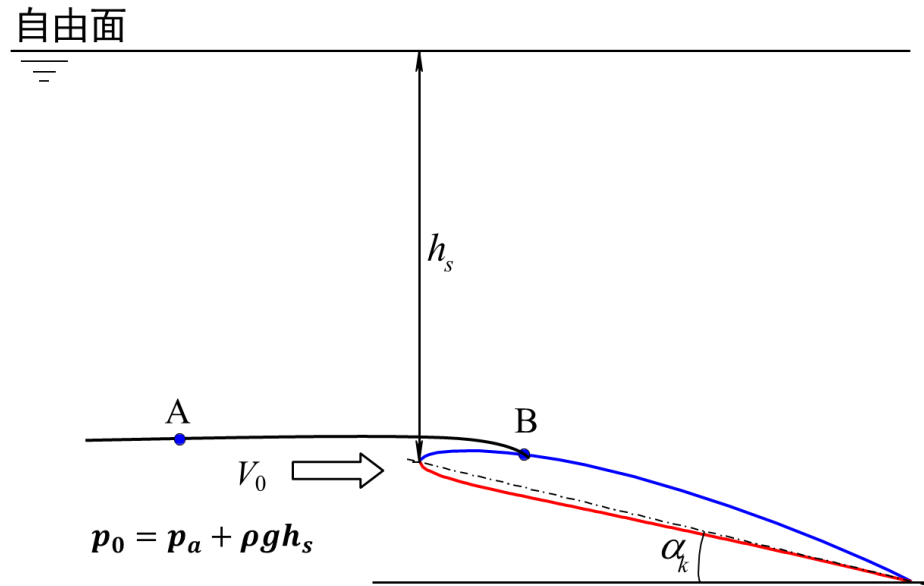
$\varepsilon < \sigma$ , 则  $p_b > p_v$ , 即不产

生空泡。

因此  $\sigma$  可以用来衡量切面上是否产

生空泡, 故  $\sigma$  称为空泡数。产生空

泡的条件为:  $\varepsilon \geq \sigma$





## 空泡的产生的机理分析—— $\varepsilon$ 的影响因素

由空泡产生的判断准则可知，想要不发生空泡，则应设法

减小减压系数 $\varepsilon$ ，增大空泡数 $\sigma$ 。由于 $\varepsilon = \left(\frac{V_b}{V_0}\right)^2 - 1$ ，只与 $\frac{V_b}{V_0}$

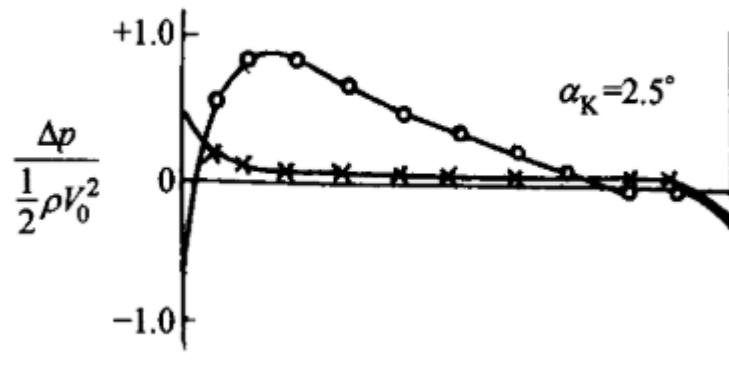
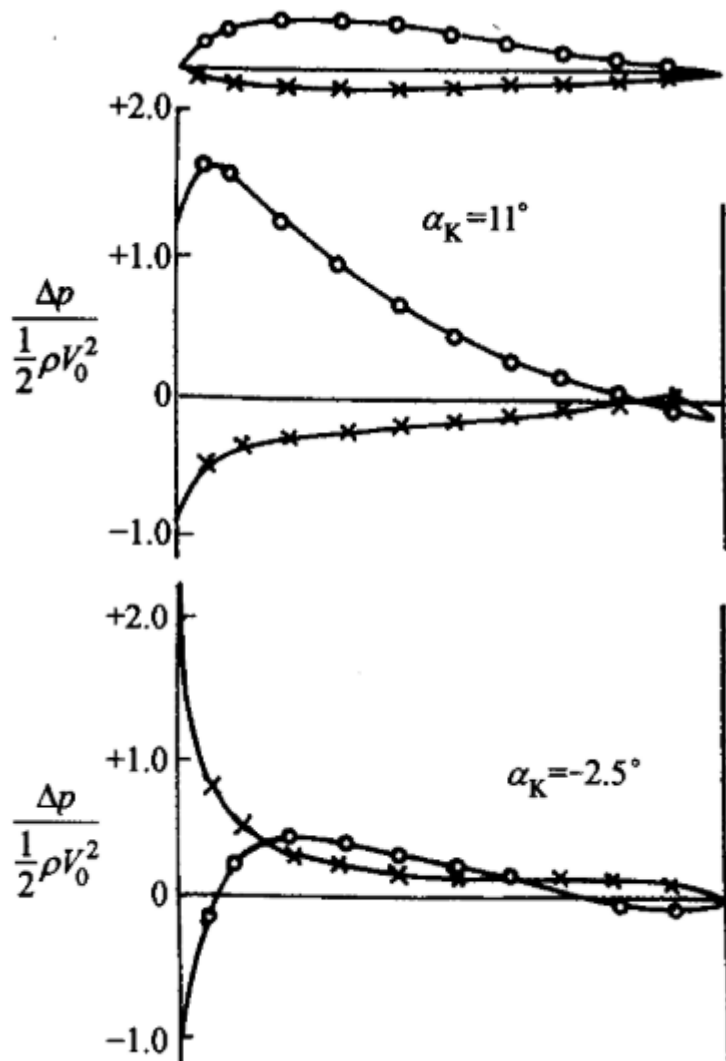
相关。在扰流情况下减压系数随切面形状，入射角 $\alpha_K$ 及B点的位置有关，而与来流速度 $V_0$ 的大小无关。





## 6.1 空泡的成因

翼型切面在不同入射角时的减压系数曲线：



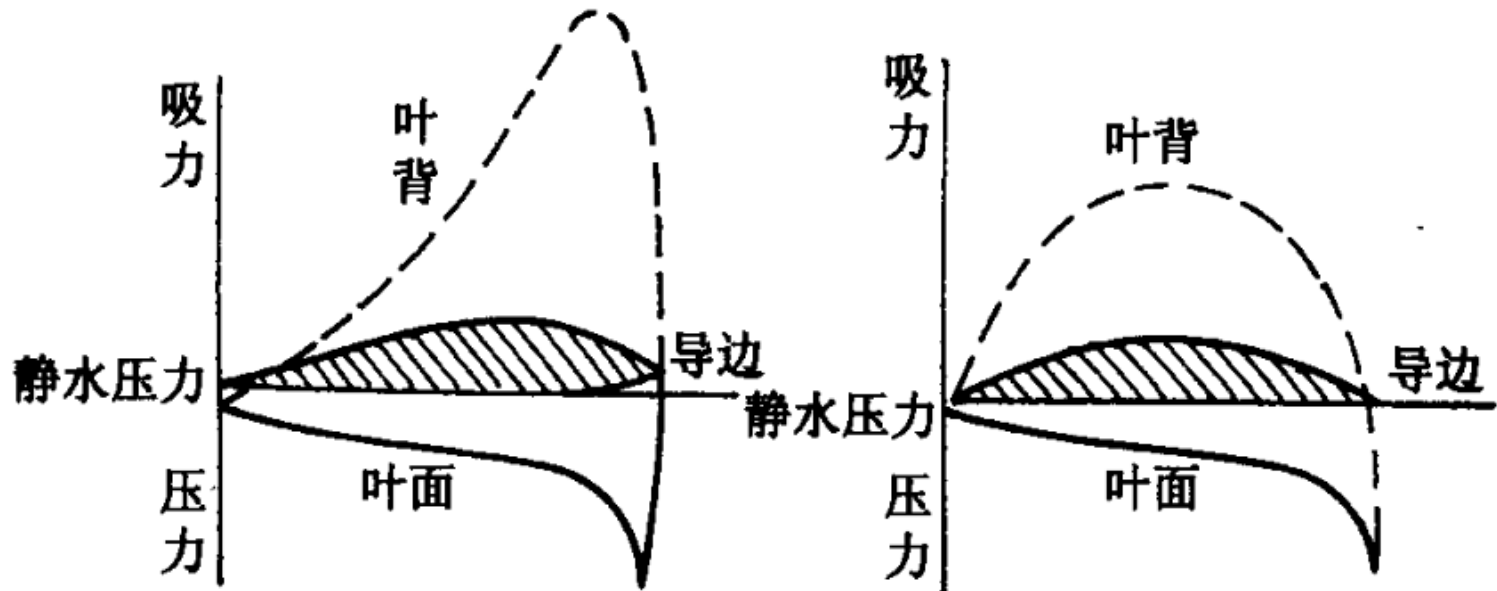
曲线最高点压力最低，对应最大减压系数  $\varepsilon_{max}$ ，增大入射角  $\alpha_K$ ， $\varepsilon_{max}$  亦增大。



## 6.1 空泡的成因

不同切面形状时的压力分布曲线：

统一入射角时，机翼切面的最大减压系数 $\varepsilon_{max}$ 较弓形切面为大。由此可知，改变叶切面上的 $\varepsilon_{max}$ 只能从改变切面形状和入射角 $\alpha_K$ 入手。





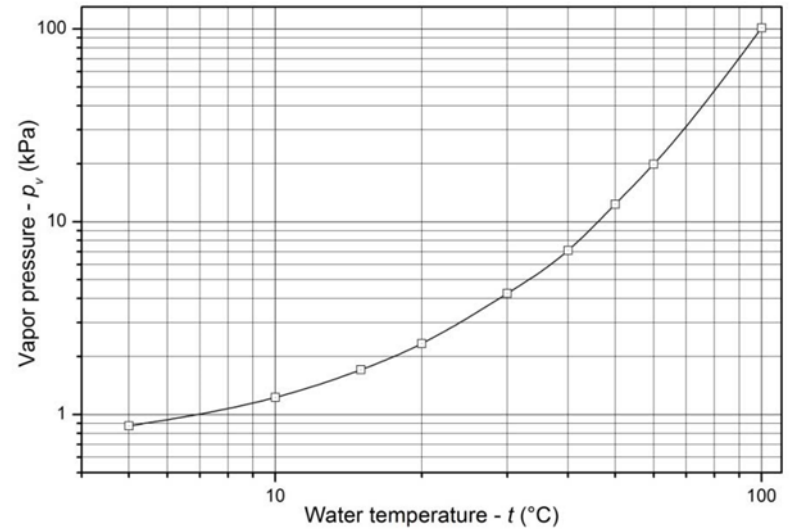
# 6.1 空泡的成因

## 空泡数 $\sigma$ 与变量间的关系

由于空泡数 $\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}$ ，与来流速度 $V_0$ ，水汽化压力 $p_v$ 及静

压力 $p_0$ 有关，而与桨叶切面的几何特征无关。当 $p_0 - p_v$ 一定时，来流速度 $V_0$ 越大空泡数越小。

水的汽化压力 $p_v$ 随温度会发生变化，变化规律如右图所示，在 $p_0$ 和 $V_0$ 一定时，**温度越高， $\sigma$ 越小。**



| 水温 t/°C                                       | 5  | 10  | 15  | 20  | 30  | 40  | 50   | 60   | 100   |
|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|
| 汽化压力 p <sub>v</sub> /(kgf · m <sup>-2</sup> ) | 89 | 125 | 174 | 238 | 433 | 725 | 1258 | 2031 | 10330 |



## 空泡数 $\sigma$ 与变量间的关系

静压力 $p_0 = p_a + \rho g h_s$ , 在大气压 $p_a$ 和入流速度 $V_0$ 一定时, 桨轴沉没深度 $h_s$ 越大, 空泡数 $\sigma$ 越大。

来流速度 $V_0 = \sqrt{(2\pi r n)^2 + V_A^2}$ , 当转速 $n$ 或进速 $V_A$ 较大时,

合成速度 $V_0$ 越大, 因而空泡数 $\sigma$ 越小。

对于叶切面来说,  $\varepsilon_{max}$ 越大越容易发生空泡,  $\sigma$ 越小越容易发生空泡。



## 6.1 空泡的成因

### 极限速度 $V_K$

一定工况下，由某一物体的最大减压系数 $\varepsilon_{max}$ 和空泡数 $\sigma$ 可以决定其不发生空泡的极限速度 $V_K$ 值。

$$\varepsilon_{max} = \sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_K^2} \rightarrow V_K = \sqrt{\frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho \varepsilon_{max}}}$$

物体作高速运动时，若速度超过极限值，则必然发生空泡。



## 6.1 空泡的成因

### 空泡的类型（液体中必须有气核作为媒介）

- 汽化空泡，由于降压导致，本章主要讲的内容
- 气化空泡，由溶解于水中的气体扩散方式形成气核
- 似是空泡，原来的气核在外界压力降低时膨胀可见

### 空泡数的分类

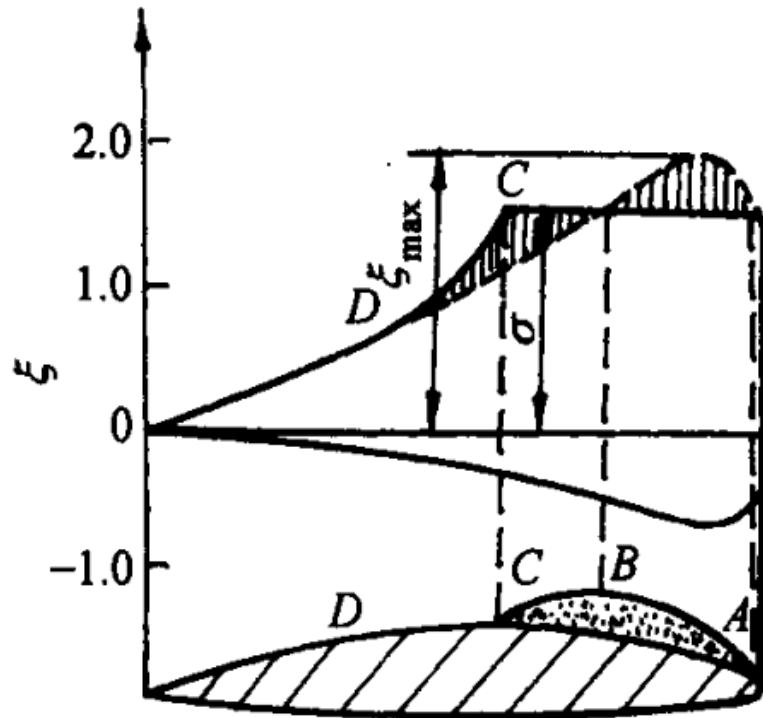
- 初生空泡数 $\sigma_i$ ，物体扰流中保持速度不变，进行减压，直到在初生压力 $p_{0i}$ 下出现空泡为止，初生空泡数 $\sigma_i = \frac{p_{0i} - p_v}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}$
- 消失空泡数 $\sigma_d$ ，在已经产生空泡后，通过加压观察空泡的消失，这时的空泡数为消失空泡数，且 $\sigma_d$ 较 $\sigma_i$ 更为稳定



## 6.2 叶切面空泡及其对性能影响

### 空泡现象的两个阶段

- 第一阶段，发生于叶切面最大减压系数附近，可称为局部空泡。特征为局部产生，对水动力性能影响不明显，但会在叶表面产生剥蚀。

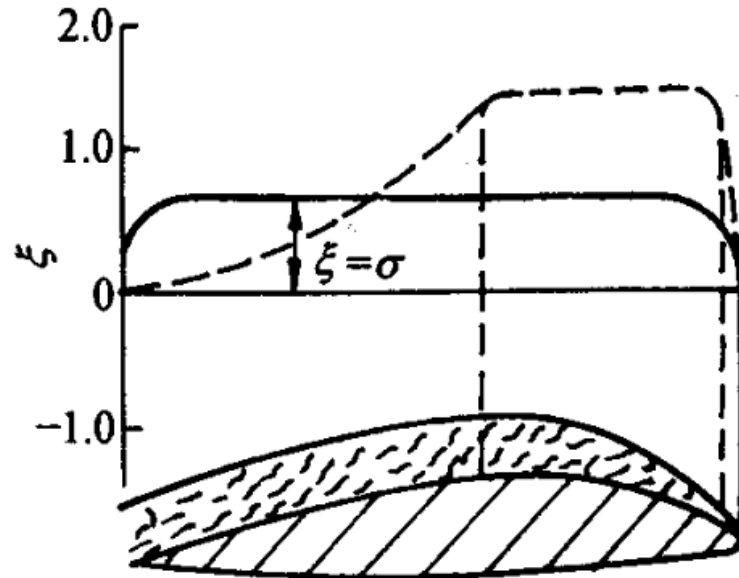




## 6.2 叶切面空泡及其对性能影响

### 空泡现象的两个阶段

- 第二阶段，从根本上改变流动状况，叶背全部被空泡笼罩，各处压力都等于汽化压力，称为片状空泡或全空泡。吸力面升力不再随速度增大而增大，升力和阻力均较无空泡时低，水动力性能恶化。空泡不在叶背溃灭，空泡区域拖至随边以外。特征为**无剥蚀作用，但影响水动力性能。**



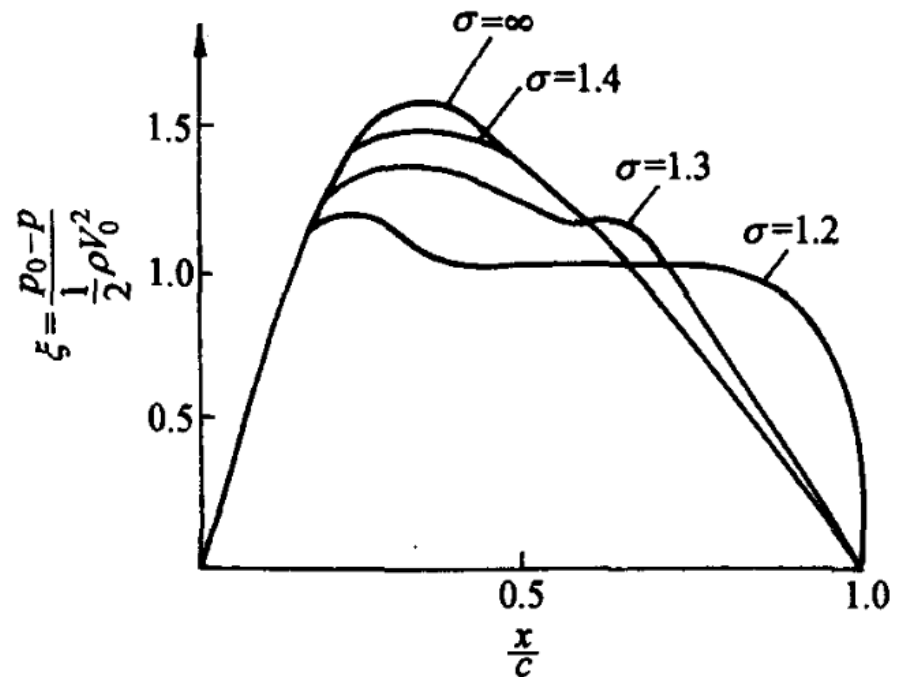
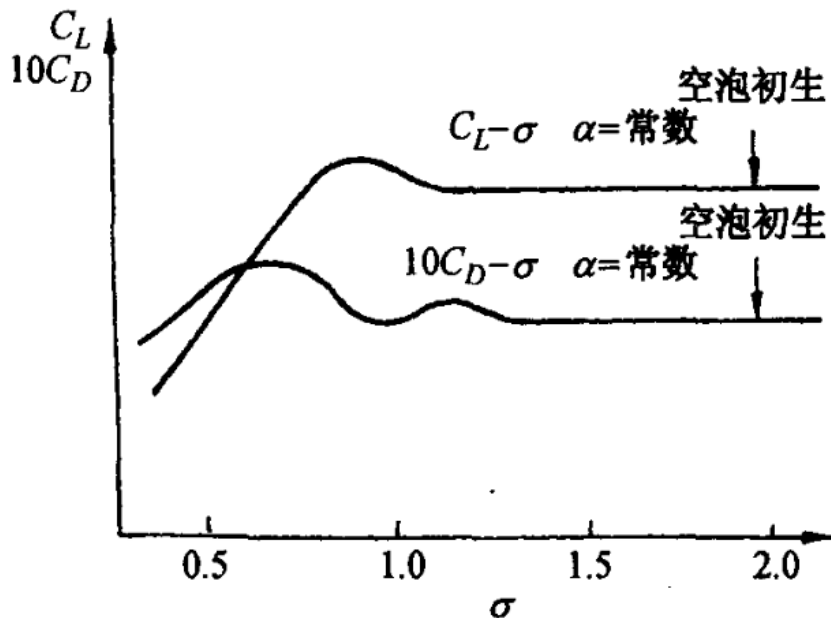




## 6.2 叶切面空泡及其对性能影响

### 空泡发生前后的水动力性能

- 开始发生空泡时，对水动力性能影响较小，随着空泡数的减小，到达第二阶段后会产生较大影响。

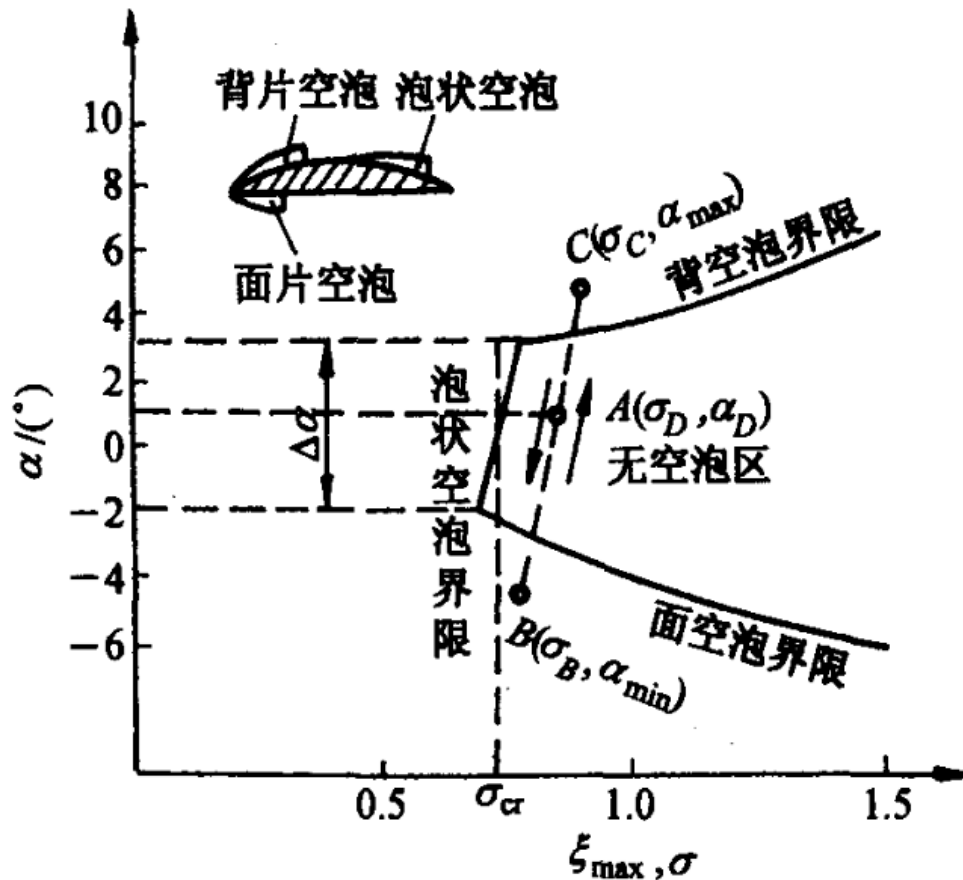




## 6.2 叶切面空泡及其对性能影响

### 空泡斗 (Cavitation Bucket)

- 通过图中的界限线来判断不同攻角下是否发生空泡，产生何种空泡。

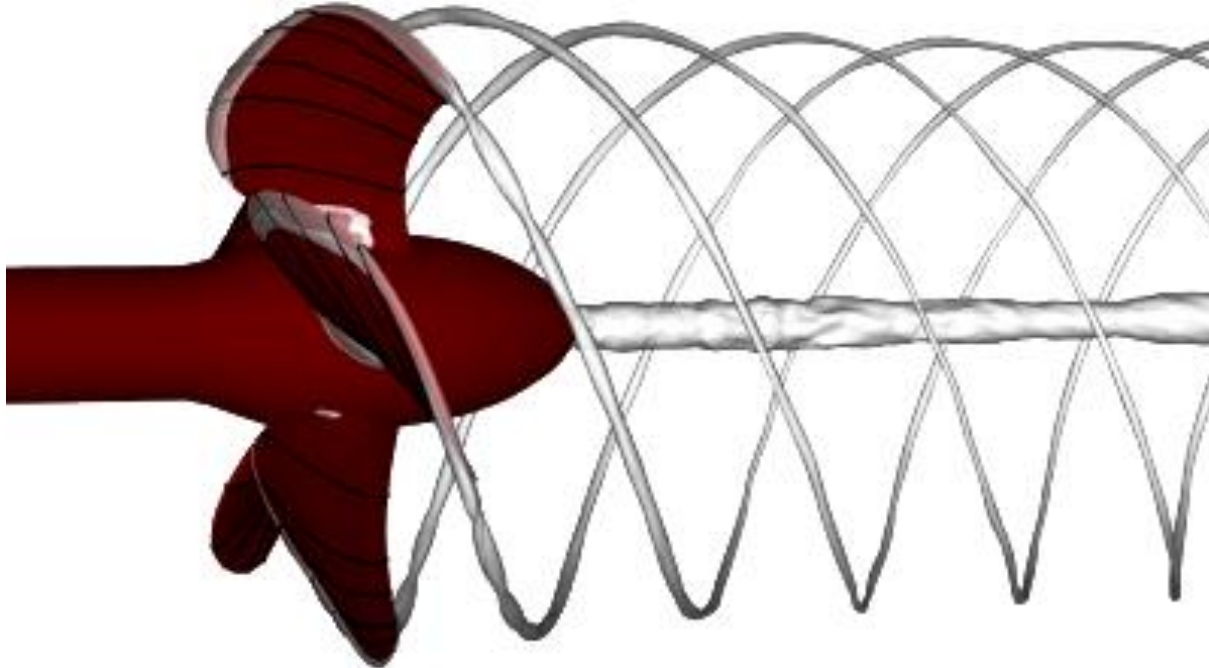




## 6.3 螺旋桨空泡及对性能影响

### 螺旋桨发生的空泡类型

- **涡空泡 (Vortex Cavitation)**，叶梢涡和桨毂涡的涡核中压力低导致，对性能影响不大，可能与桨叶上方稍前船体发生相互作用，产生特有的小块剥蚀区，此外，梢涡空化会使得螺旋桨噪声明显加大

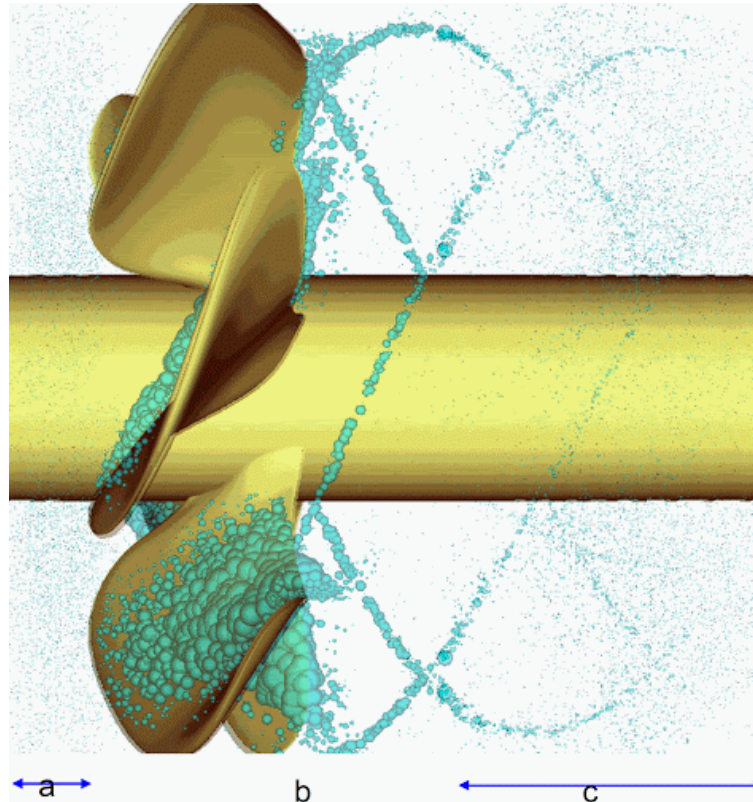




## 6.3 螺旋桨空泡及对性能影响

### 螺旋桨发生的空泡类型

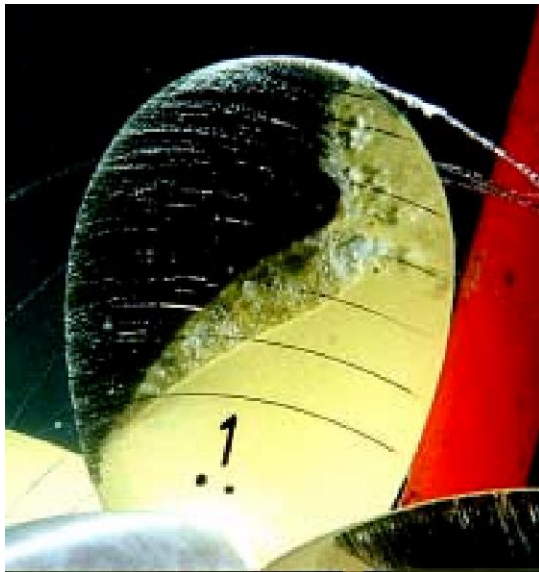
- 泡状空泡 (Bubble Cavitation)，在叶背最大厚度处发生，呈泡沫状，前后压力变化缓和，发生-溃灭-再生-再溃灭-消失，对性能影响不大





### 螺旋桨发生的空泡类型

- 片状空泡 (Sheet Cavitation)，桨叶外半径部分导边附近产生，呈膜片状，长度不一，攻角较大时最易产生。可能为超空泡流动（从导边延伸至随边以外，叶切面全部被空泡覆盖），影响水动力性能；也可能在随边之前结束，为局部空泡，可能产生剥蚀作用。



Propeller with cavitation damage (left) CFD simulation with pink areas showing sheet cavitation (right)





### 螺旋桨发生的空泡类型

- 云雾状空泡（Cloud Cavitation），螺旋桨在不均匀流场中工作时，桨叶切面工作状态发生周期性变化，空泡周期性的产生核消失，对螺旋桨的剥蚀最为严重。时隐时现，消失时被水流冲向后方，形成云雾状。

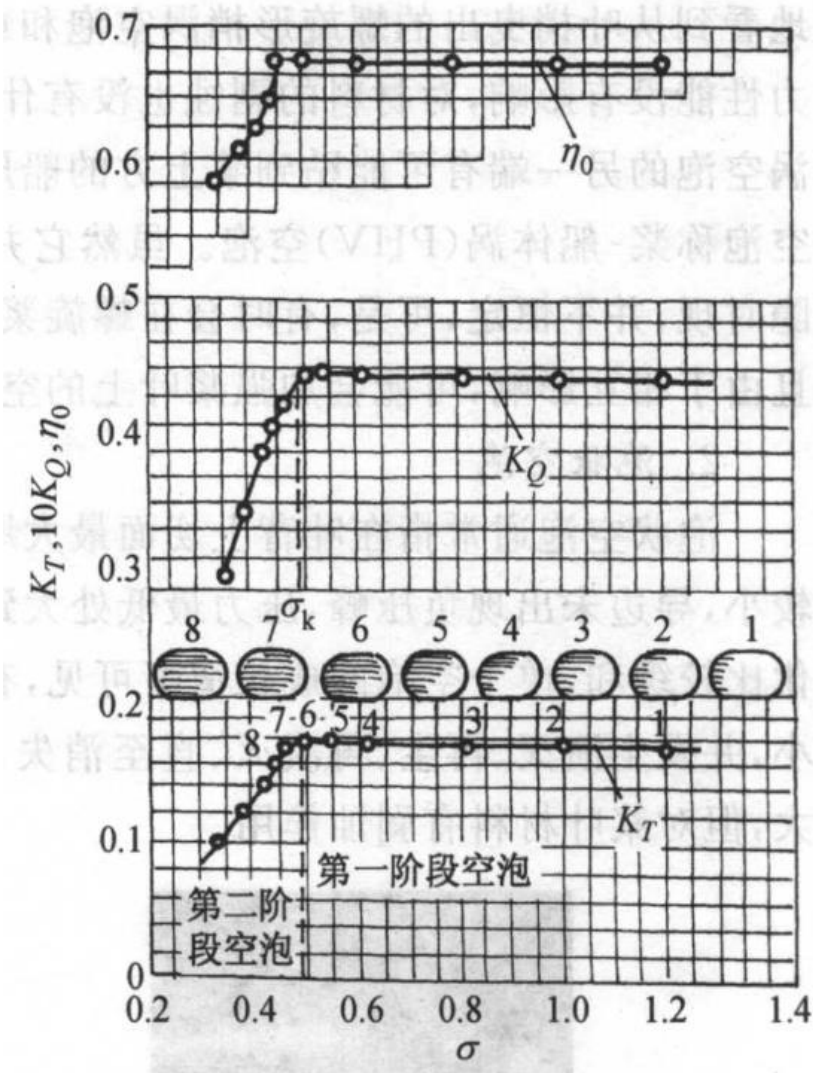




## 6.3 螺旋桨空泡及对性能影响

### 空泡对螺旋桨性能的影响

- 第一阶段，水动力性能不发生影响，但会产生剥蚀。
- 第二阶段，对叶面无剥蚀作用，但会影响水动力性能。这时也可称为全空泡螺旋桨。





### 延缓螺旋桨发生空泡的措施

- 从降低最大减压系数 $\varepsilon_{max}$ 入手
  - 增加盘面比
  - 采用弓形切面或压力分布较均匀的其它切面形式
  - 减小叶跟附近切面的螺距
- 从增大空泡数 $\sigma$ 入手
  - 尽量增加螺旋桨浸没深度
  - 减小螺旋桨转速
- 此外，可以增加平整度；船桨匹配度，减小斜流及伴流不均匀度的影响等





## 相似定理

- 需要满足螺旋桨敞水试验相似条件的基础上，还必须考虑空泡数的因素
- 几何相似的螺旋桨进速系数相等，则对应点处的速度成比例，则减压系数必将对应相等，进一步若能满足空泡数相等，则可满足要求

因此，螺旋桨空泡试验相似的条件为：

$$\begin{cases} J_s = J_m \\ \sigma_s = \sigma_m \end{cases}$$



## 相似定理

由敞水试验可知进速系数相等则满足：

$$\frac{V_{Am}}{V_{As}} = \frac{n_m}{n_s} \cdot \frac{1}{\lambda}$$

满足空泡数相等的条件为：

$$\frac{p_{0s} - p_{vs}}{\frac{1}{2} \rho_s V_{As}^2} = \frac{p_{0m} - p_{vm}}{\frac{1}{2} \rho_m V_{Am}^2}$$

设  $\rho_s = \rho_m$ ，则有

$$\frac{p_{0m} - p_{vm}}{p_{0s} - p_{vs}} = \frac{V_{Am}^2}{V_{As}^2}$$



## 相似定理

模型桨沉没深度与实桨一致，则有 $p_{0m} = p_{0s}$ ，常温下试验时 $p_{vm} = p_{vs}$ ，因此满足空泡数相等只需 $V_{Am} = V_{As}$ ，若同时满足进速系数相等，则 $n_m = \lambda n_s$ 。即需要在同等沉没深度下，满足模型桨转速是实桨转速的 $\lambda$ 倍。

实际情况下很难实现上述条件，因此一般都是在空泡水筒中进行试验，通过借助调压装置满足空泡数相等的条件。



## 模型试验

模型桨沉没深度与实桨一致，则有 $p_{0m} = p_{0s}$ ，常温下试验时 $p_{vm} = p_{vs}$ ，因此满足空泡数相等只需 $V_{Am} = V_{As}$ ，若同时满足进速系数相等，则 $n_m = \lambda n_s$ 。即需要在同等沉没深度下，满足模型桨转速是实桨转速的 $\lambda$ 倍。

实际情况下很难实现上述条件，因此一般都是在空泡水筒中进行试验，通过借助调压装置（降低静压力 $p_{0m}$ ）满足空泡数相等的条件。

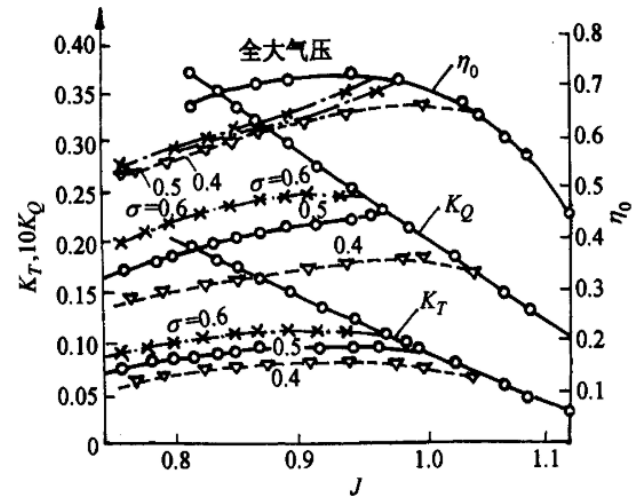
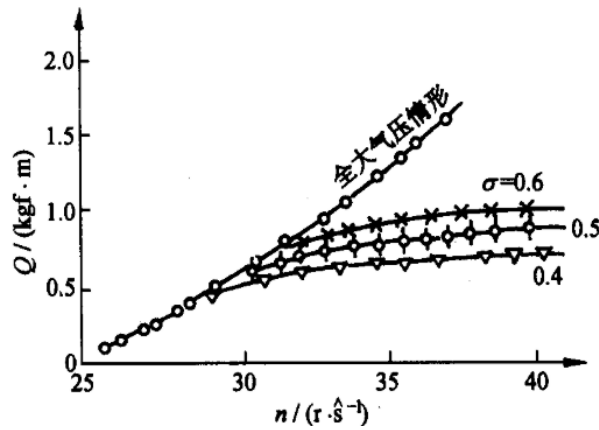
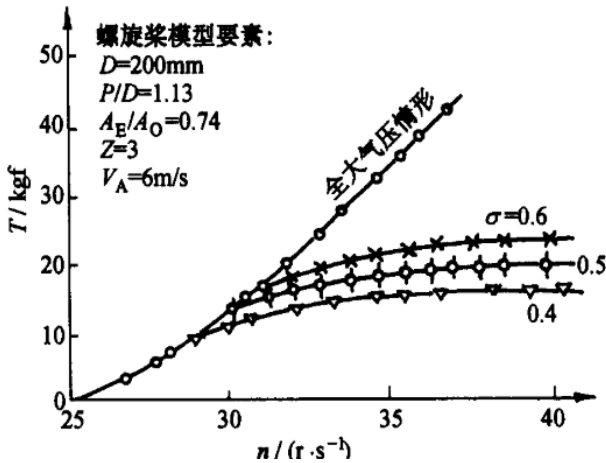


# 6.4 螺旋桨模型空泡试验

## 试验方法及测量数据的表达

空泡水筒中进行模型试验，一般固定筒内水流速度，即进速不变，调节转速得到不同的进速系数，通常将模型分别在不同空泡数和大气压（敞水）进行试验。

可以绘制不同表达形式的模型试验曲线。





## 6.4 螺旋桨模型空泡试验

### 上海交大空泡水筒试验室

徐汇校区的小型空泡水筒和闵行校区的中型空泡水筒（2014年竣工），目前的空泡水筒试验段： $1\text{m} \times 1\text{m}$ ，6m长，水流速度 $0.5\text{-}15.8\text{m/s}$ ，压力 $25\text{-}300\text{kpa}$ 。

