



# Aerodynamics

**典型真实流动**

**SIAE 2014**

***ZhangHong***



## Part1: Kutta —Joukowski 升力定理推广

通过求解有环量的圆柱绕流问题得到：

$$L = \rho V_{\infty} \Gamma$$

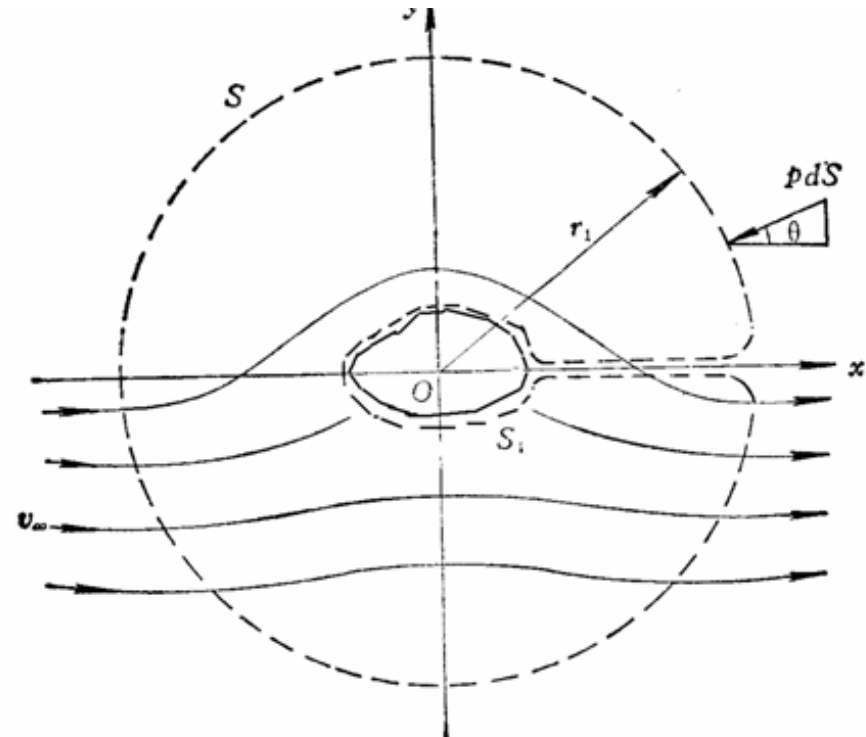
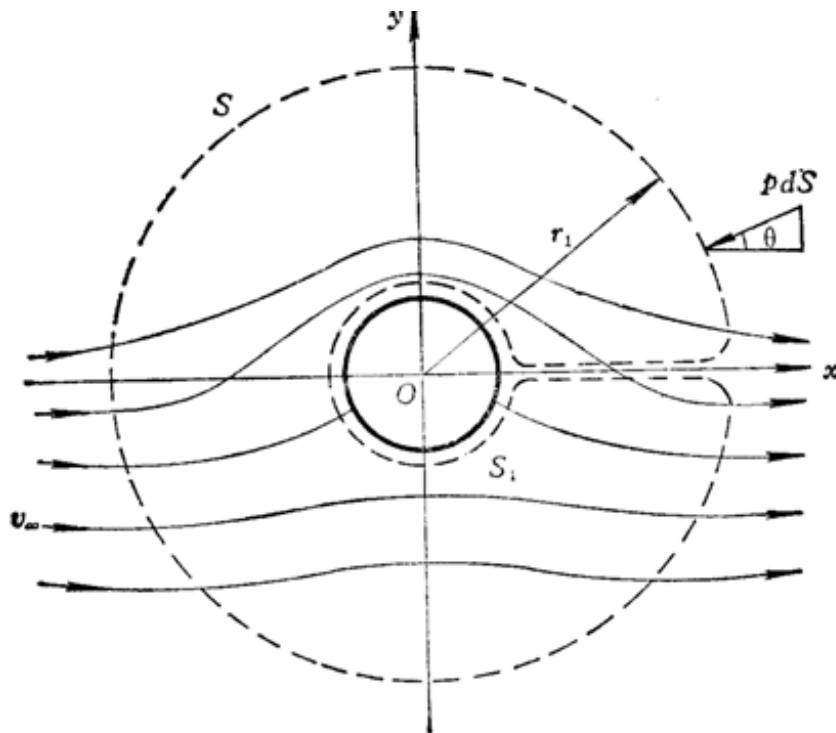
- 上式表明，作用在垂直于纸面单位长度圆柱体上的升力，其大小等于来流的速度乘以流体密度再乘以环量。
- 指向是把来流方向逆着环量的方向旋转90°。
- 这个结果称之为库塔—儒可夫斯基升力定理。



## Part1: Kutta —Joukowski 升力定理推广

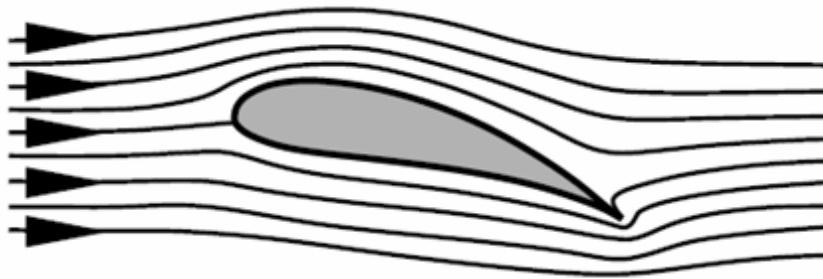
推广到一般形状的封闭物体中去：

对任何形状物体的绕流中，只要存在环量，都会产生升力。单位长度上的升力大小为： $L = \rho V_{\infty} \Gamma$

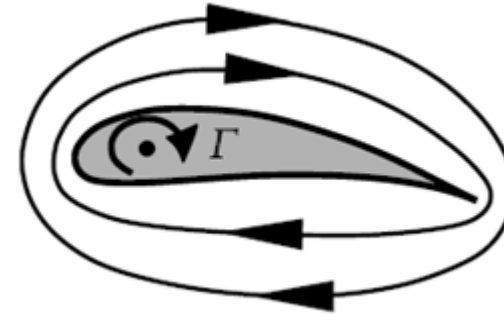




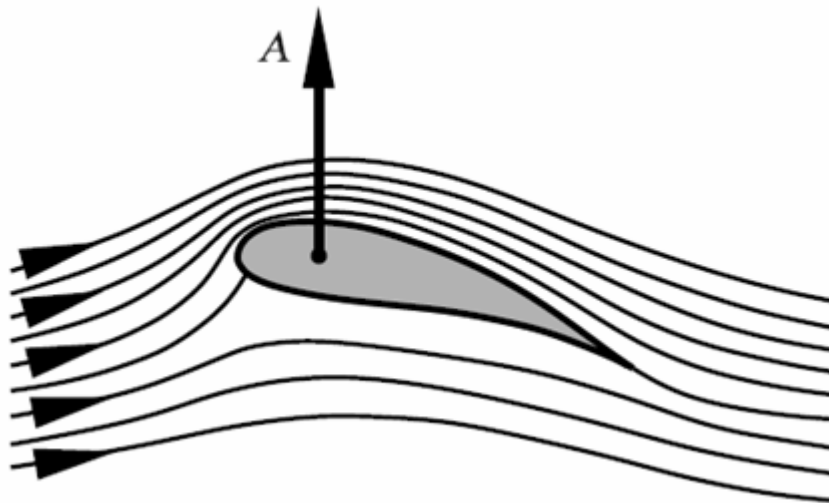
## Part1: Kutta —Joukowski 升力定理推广



without lift



circulation  $\Gamma$



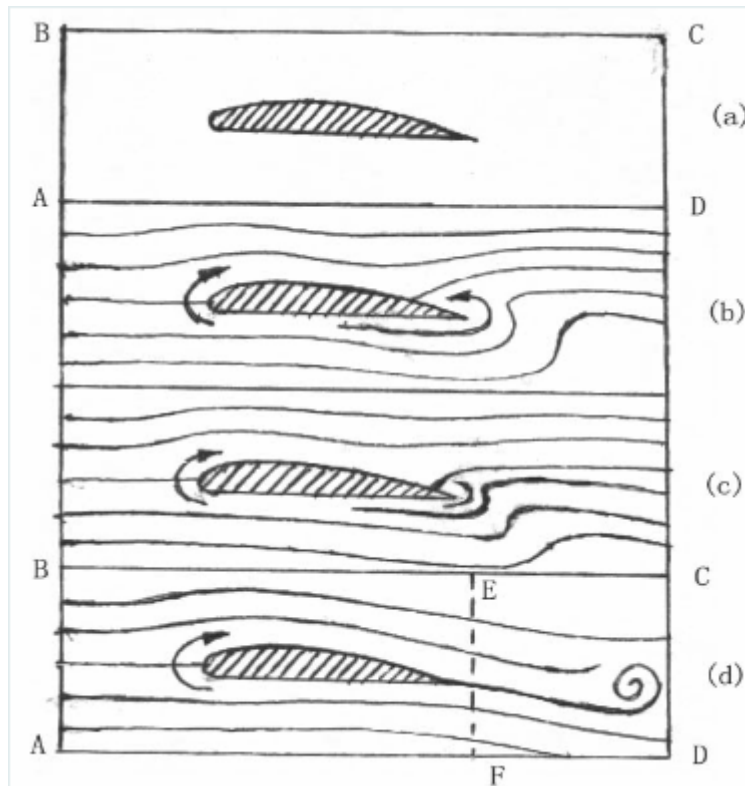
with lift

采用升力公式计算  
飞机翼型及流体机械中的  
叶片上的升力时的关键  
在于如何确定绕翼型的  
环量。



## Part1: Kutta —Joukowski 升力定理推广

### 翼型环量的产生：



- (1) 运动前，沿包围翼型的封闭线 $ABCD$ 的环量为零；
- (2) 起动后，由于上下翼线长度不同，后驻点位于上翼面尾缘之前方。下部流体绕过尖锐尾缘时形成尾部涡量。根据开尔文定理，必在翼型前部产生大小相等方向相反的涡量；
- (3) 在反涡量作用下，后驻点向尾缘点移动。随着涡量之增强，后驻点不断后移，直到后驻点与尾缘点重合，上下速度在此平滑联接为止；
- (4) 尾涡被冲向下游，沿包围翼型的 $ABEF$ 线环量则保留下来。只要翼型速度等条件不变，该环量则保持不变。

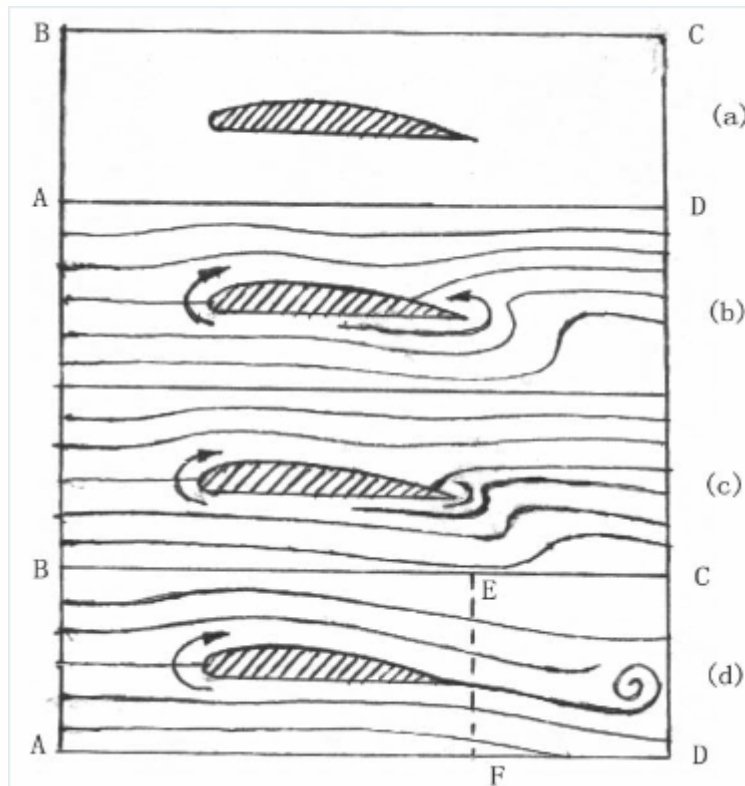
一般认为环量  $\Gamma$  与翼型型线、攻角（翼型与水平线夹角）及尾部形状有关。





## Part1: Kutta —Joukowski 升力定理推广

### 翼型环量的产生：



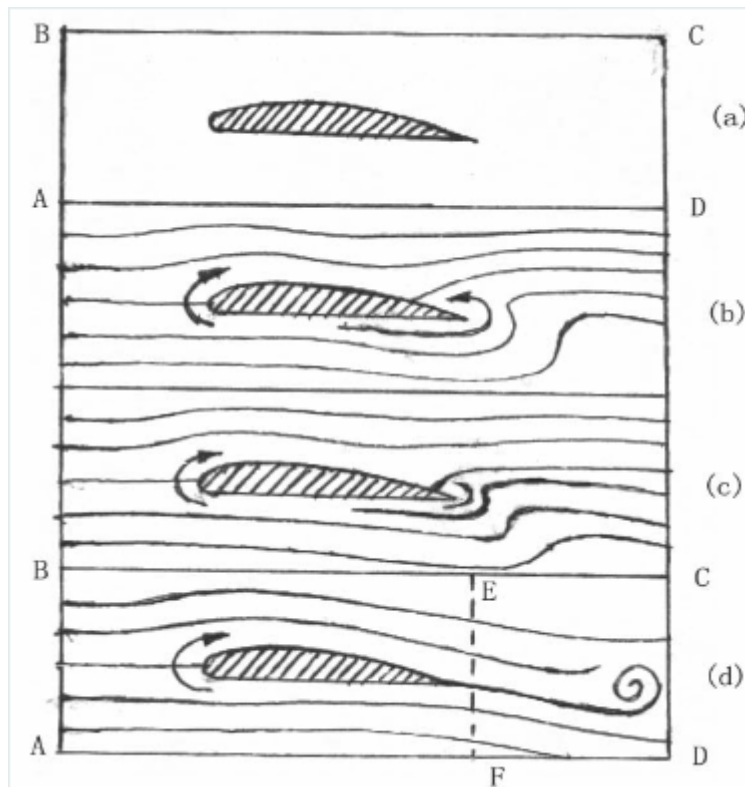
从尾缘脱落的尾涡称为“起动涡”；而保持在翼型上的涡量称为“附着涡”。如果翼型立即停止，附着涡也随即脱落下来形成“停止涡”，并与起动涡构成大小相等方向相反的涡对，以垂直于它们之间的连线运动。则保持不变。

运动翼型上的后驻点与尾缘点重合，沿上下翼面的流动速度在尾缘点平滑衔接是确定翼型绕流环量 $\Gamma$ 的条件，此条件通常称为库塔条件。



## Part2: 圆柱绕流真实流动

### 翼型环量的产生：



从尾缘脱落的尾涡称为“起动涡”；而保持在翼型上的涡量称为“附着涡”。如果翼型立即停止，附着涡也随即脱落下来形成“停止涡”，并与起动涡构成大小相等方向相反的涡对，以垂直于它们之间的连线运动。则保持不变。

运动翼型上的后驻点与尾缘点重合，沿上下翼面的流动速度在尾缘点平滑衔接是确定翼型绕流环量 $\Gamma$ 的条件，此条件通常称为库塔条件。



## Part2: 圆柱绕流真实流动

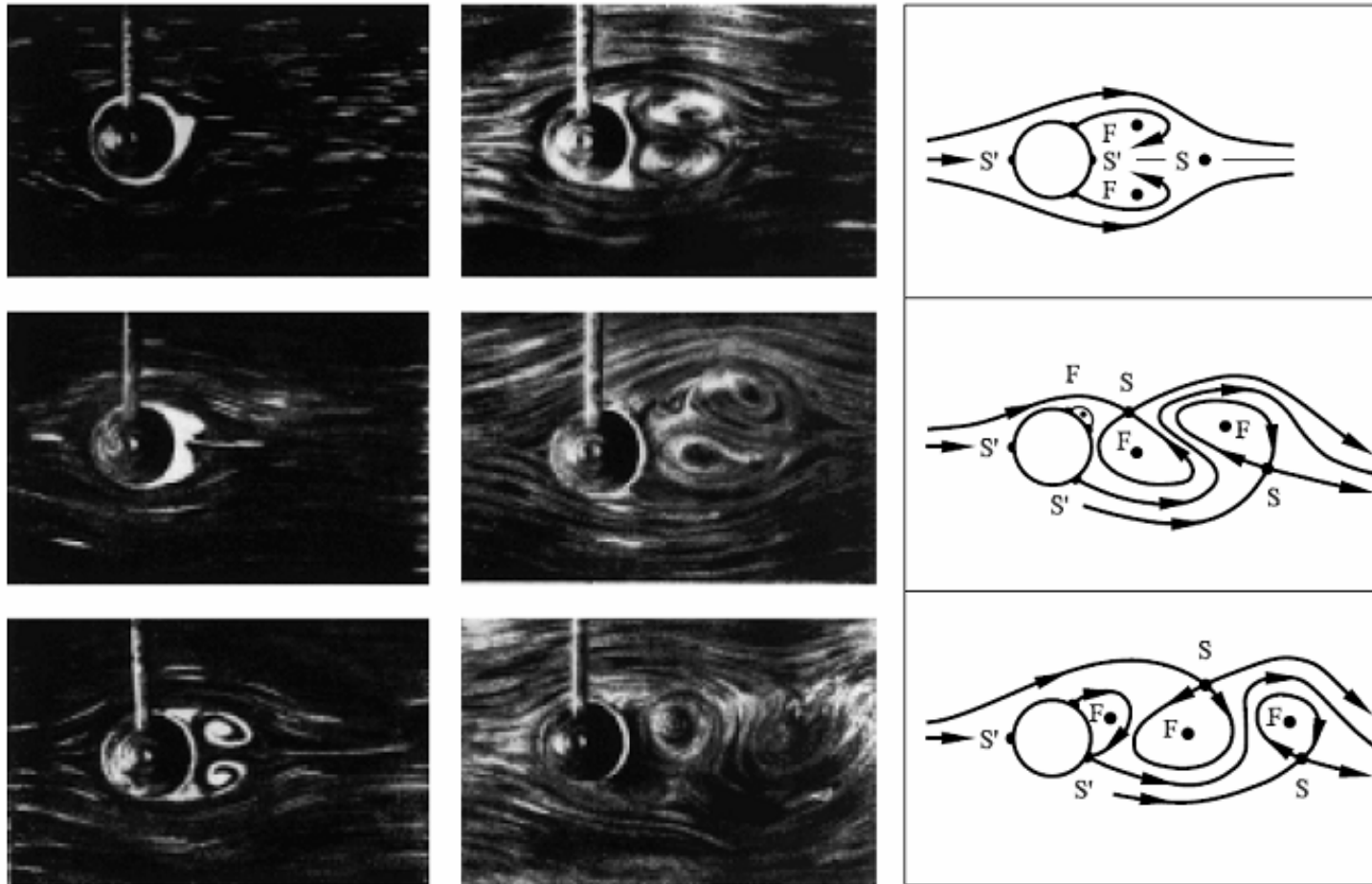


Fig. 4.67. Development of the vortex system behind a nonrotating cylinder



## Part2: 圆柱绕流真实流动

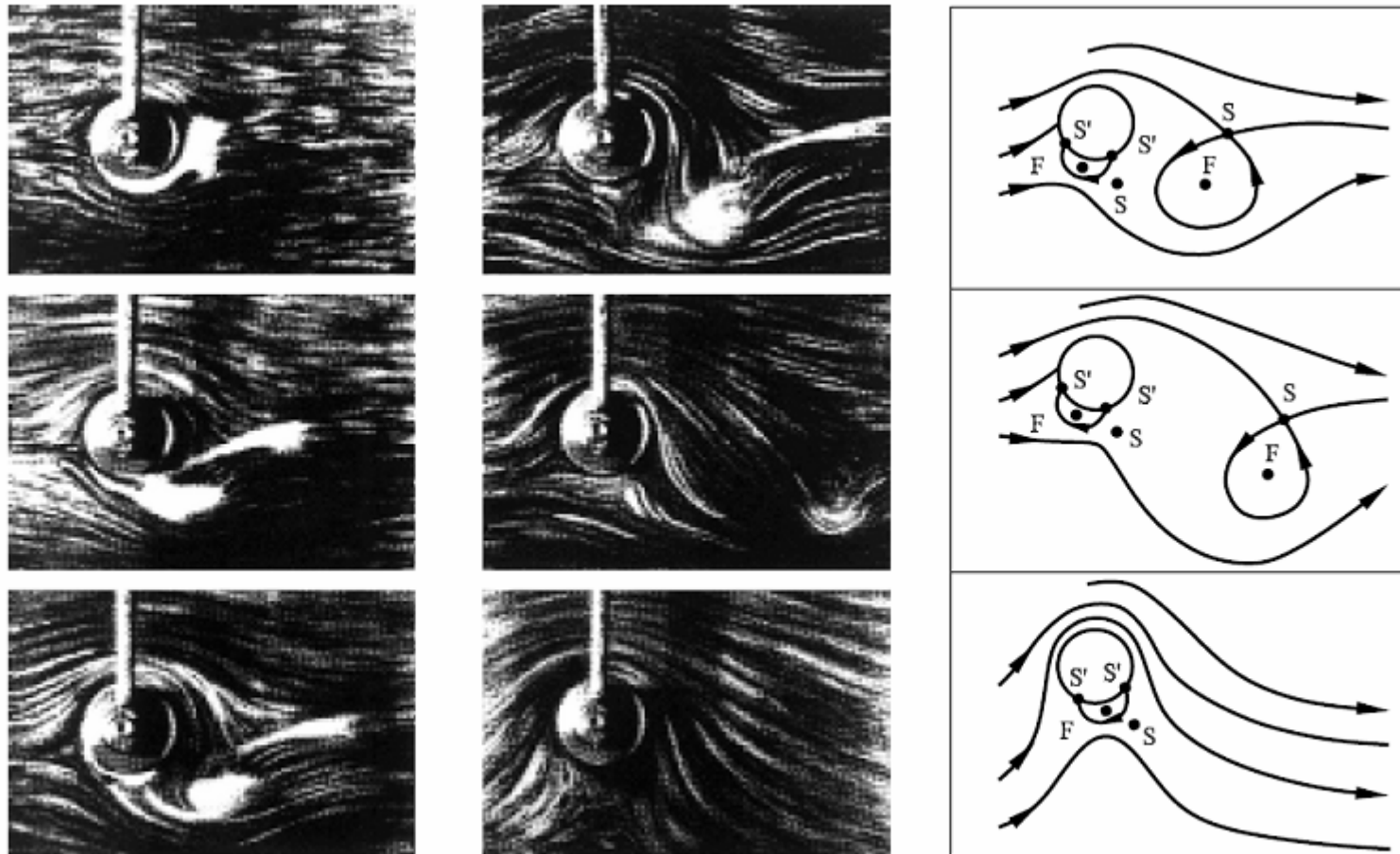


Fig. 4.71. Development of the flow past a rotating cylinder

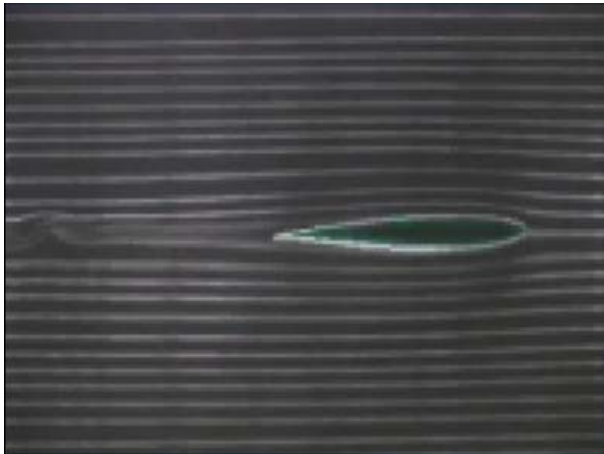


## Part2: 圆柱绕流真实流动

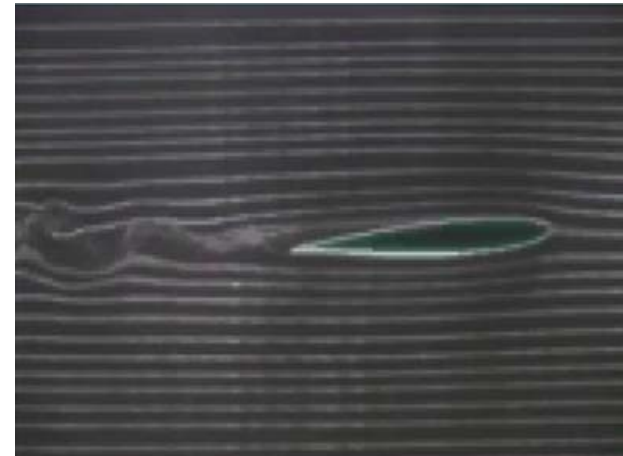
- 根据实验观察，可以发现，在不同的雷诺数范畴，有完全不同的流动形态。
- 在真实流体绕流的情况下，圆柱必然受到流体的作用力。流体的阻力由两部分组成：
  - ✓ 一部分是作用于圆柱表面的切应力在流动方向的分量的积分，称为摩擦阻力。
  - ✓ 另一部分是作用于圆柱表面的压力在流动方向的分量的积分，称为压差阻力。



## Part3: 机翼绕流真实流动



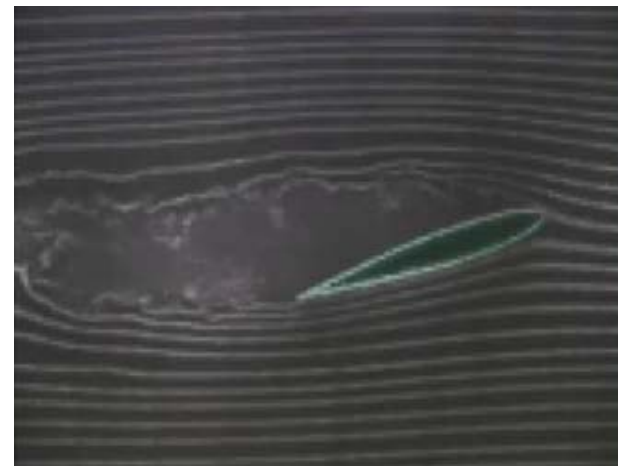
0°迎角绕流



5°迎角绕流



15°迎角绕流



20°迎角绕流



## Part3: 机翼绕流真实流动

- 如果来流攻角（无穷远处速度与翼弦的夹角）不大（比如小于  $10^\circ$ ），流体平滑地绕翼型流动而不发生明显的边界层分离。这时，真实流体效应（粘性）只在紧靠翼型流动而不发生明显的边界层的。
- 由于在上述情况下，边界层和尾迹都是厚度极小的薄层，绕翼型的流场（在边界层和尾迹之外）基本上与理想流体绕同一翼型的流动相同；
- 翼型表面压力分布和翼型升力系数的实测值与理想流体位势理论所得结果非常接近。在这种情况下，翼型所受的阻力主要是摩擦阻力。阻力的实测值虽不为零，但阻力与升力的比值颇小。





## Part3: 机翼绕流真实流动

- 如果来流攻角稍稍增大 ( $\alpha = 10^\circ \sim 15^\circ$ ) 在翼型表面将发生分离现象。
- 对于较厚的翼型，通常在后缘先发生分离；
- 对于较薄的翼型，则通常在前缘形成局部的分离区。如图所示：

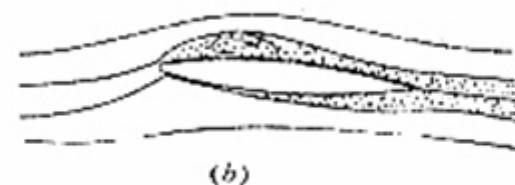


图 1-15 绕二维翼型流动的分离  
( $\alpha = 10^\circ \sim 15^\circ$ )  
(a) 后缘分离 (b) 前缘分离

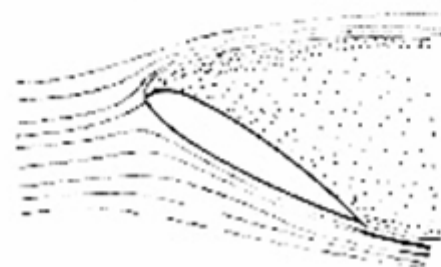


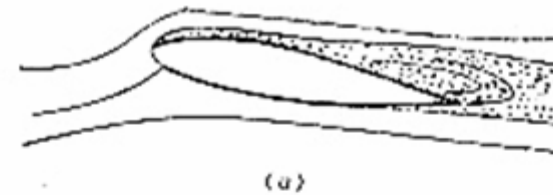
图 1-16 大攻角情况下绕二维翼型流动的分离





## Part3: 机翼绕流真实流动

- 如果来流攻角进一步增大，则无论对于哪种翼型，都会发生从前缘开始的整个翼型表面上的分离。这种分离现象又称为失速。
- 失速发生后，翼型表面的压力分布完全偏离理想流体位势理论所得结果，翼型的升力显著下降，阻力显著增



(a)



(b)

图 1-15 绕二维翼型流动的分离  
( $\alpha = 10^\circ \sim 15^\circ$ )

(a) 后缘分离 (b) 前缘分离

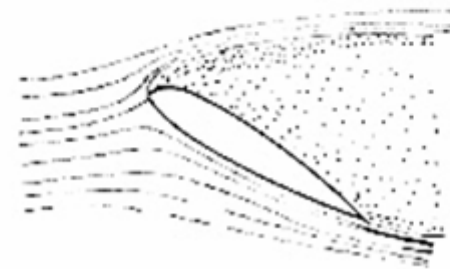


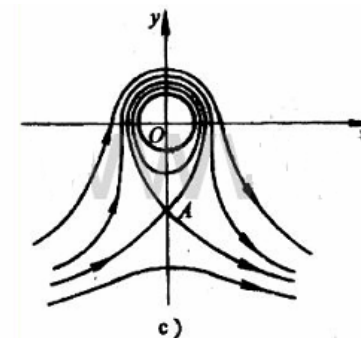
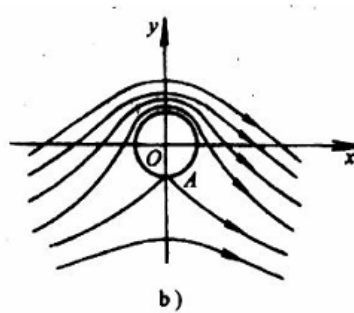
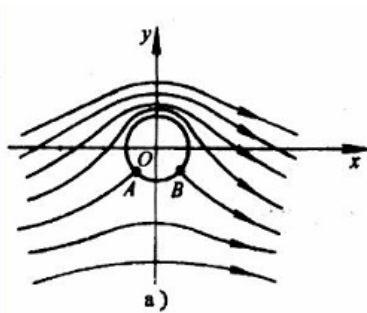
图 1-16 大攻角情况下绕二维翼型流动的分离



## Part4: 翼型环量的确定

### 原理:

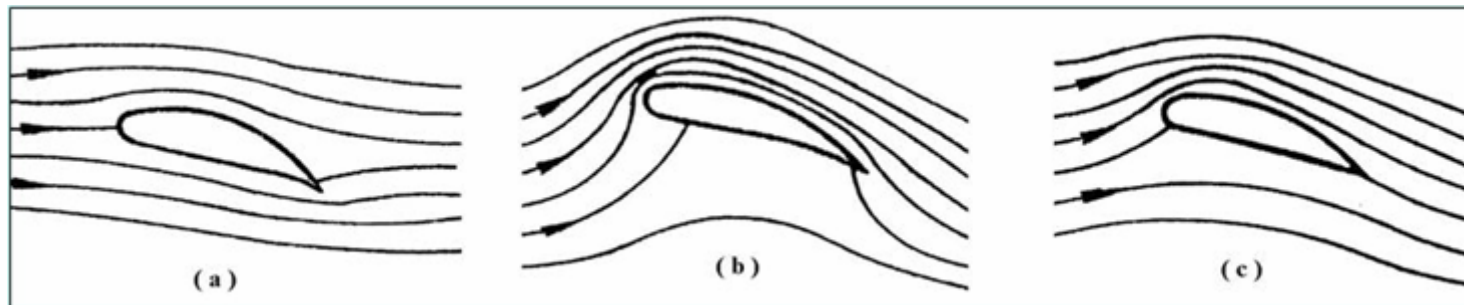
在定常、无粘、不可压缩圆柱绕流中，绕圆柱的速度环量是任意给定的；绕圆柱速度环量值不同，圆柱面上驻点的位置就不同，两者一一对应；即如果能指点驻点在圆柱上的位置，就只有唯一的速度环量值与之对应。





## Part4: 翼型环量的确定

在绕翼型无粘位流中，也有这种情况：对于形状一定的翼型而言，在给定来流密度、速度及迎角条件下，绕翼型的速度环量可以有多个值，均满足翼型表面为流线的边界条件，但环量值不同，后驻点在翼面上的位置不同。



- (a) 后驻点在上翼面，有逆时针后缘绕流；
- (b) 后驻点在下翼面，有顺时针后缘绕流；
- (c) 后驻点在后缘，无后缘绕流。

环量无法确定



## Part4: 翼型环量的确定

### Kutta —Joukowski后缘条件

对给定的翼型和迎角，翼型绕流的速度环量值应恰好是流动平滑流过后缘；

#### (1)尖后缘翼型

后缘角  $\tau > 0$ ，后缘点是后驻点，

$$V_{\text{后上}} = V_{\text{后下}} = 0;$$

后缘角  $\tau = 0$ ，后缘点处流速为有限值，

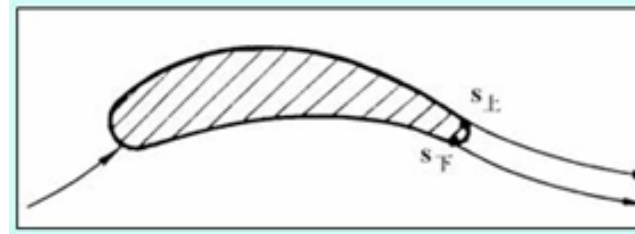
$$V_{\text{后上}} = V_{\text{后下}};$$

#### (2)实际小圆弧后缘翼型（见右图）

$$V_{s\text{上}} = V_{s\text{下}}。$$

简单讲，就是后缘无载荷： $p_{\text{后上}} = p_{\text{后下}}$ 。

确定了无粘位流理论涉及的速度环量的唯一性，这是库塔—儒可夫斯基后缘条件的实质。







## Part4: 翼型环量的确定

### Kutta —Joukowski后缘条件物理含义

后驻点在翼面上而不在后缘时，绕尖后缘的流动流速理论上无穷大、压强负无穷，物理上这是不可能的；只有后驻点在后缘，不出现尖后缘绕流，上下翼面流动在后缘平顺汇合流向下游，后缘处流速为有限值，才合乎一般的物理要求。此时，有唯一的速度环量值与之相对应。

再者，从翼型实际绕流形成过程来看，粘性的作用消除了后缘绕流，上下翼面流动在后缘平顺汇合流向下游，产生了起动涡，使翼型绕流具有了明确的速度环量。





## Part5: 附面层理论

### 基本概念:

自然界中存在的流体都是有粘性的

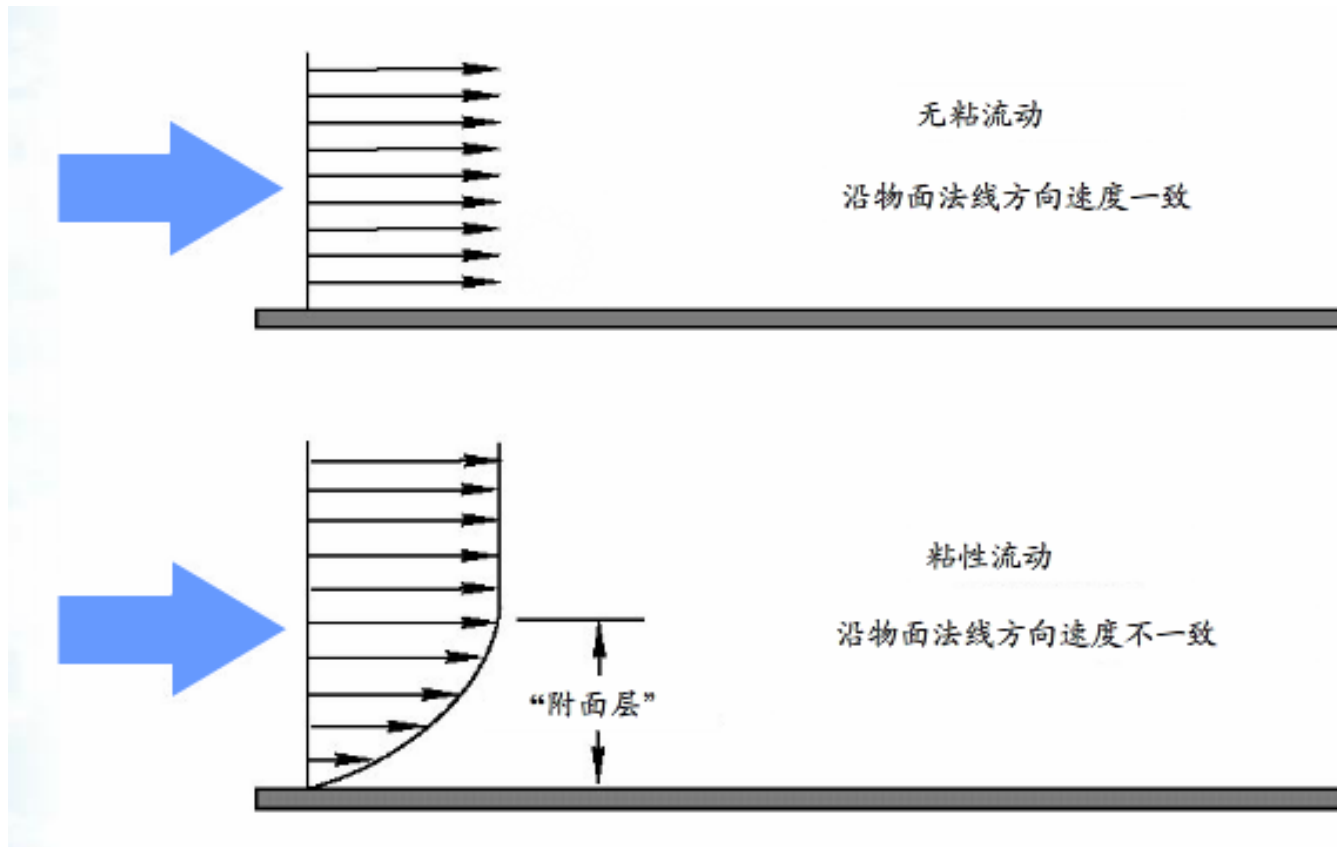
- 附面层或边界层 (boundary layer): 对于空气等粘性很小的流体流过飞行器的流动, 粘性影响显著的区域只限于物体表面处很薄的一层。物面上受粘性影响显著的这一薄层就称为附面层。
- 如果附面层不分离, 粘性的存在对物面压强分布影响很小, 因此可以用理想流体来计算沿飞行器表面的压强分布及由压强分布决定的气动特性。这就是前面着重研究理想流体流动规律的理由。



## Part5: 附面层理论

基本概念:

自然界中存在的流体都是有粘性的





## Part5: 附面层理论

研究意义:

自然界中存在的流体都是有粘性的

- 虽然附面层只占整个流动区域的很小一部分，附面层的存在对物体阻力的形成以及热量向物体的传递起着非常关键的作用。
- 没有阻力是因为忽略了粘性的影响所致，因为这种阻力是由于粘性作用产生的。
- 另外由于附面层内的气流受到粘性的作用，动能产生了不可逆的损失，使飞行器表面压强分布与理想流体有差异。



## Part5: 附面层理论

### 粘性流体的两种状态:

- 粘性流体的流动有**两种显著不同的状态**，即**层流**和**紊流**。层流状态转变为湍流状态称为**转捩**。
- **层流**的特征：流体运动规则，各部分分层流动互不掺混，质点的轨迹是光滑的，而且流场稳定。
- **紊流（湍流）**的特征：流体运动极不规则，各部分激烈掺混，质点的轨迹杂乱无章，而且流场极不稳定。

演示



## Part5: 附面层理论

### 流态判断:

**雷诺数**: 是一无量纲数, 用来度量**惯性力**与**粘性力**的相互关系的准则。其数学表达式为,

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu}$$

光滑管道内流动的临界雷诺数  $R_{ec} = 2300$

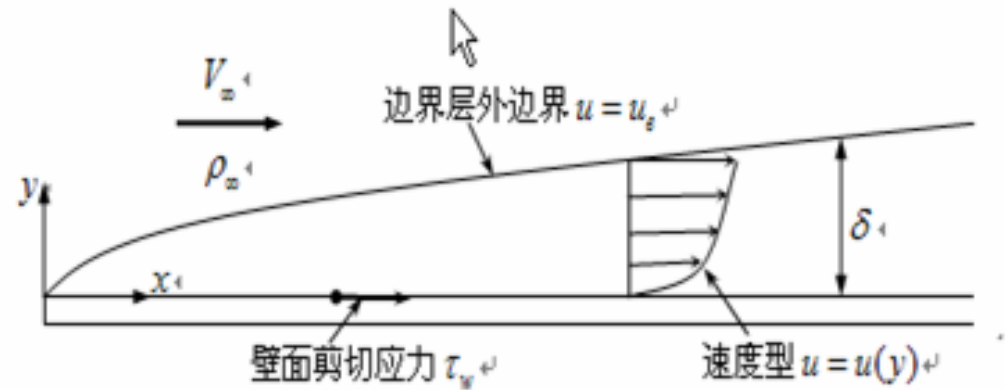
$R_e > R_{ec}$  —湍流     $R_e \leq R_{ec}$  —层流





## Part5: 附面层理论

### 附面层厚度:

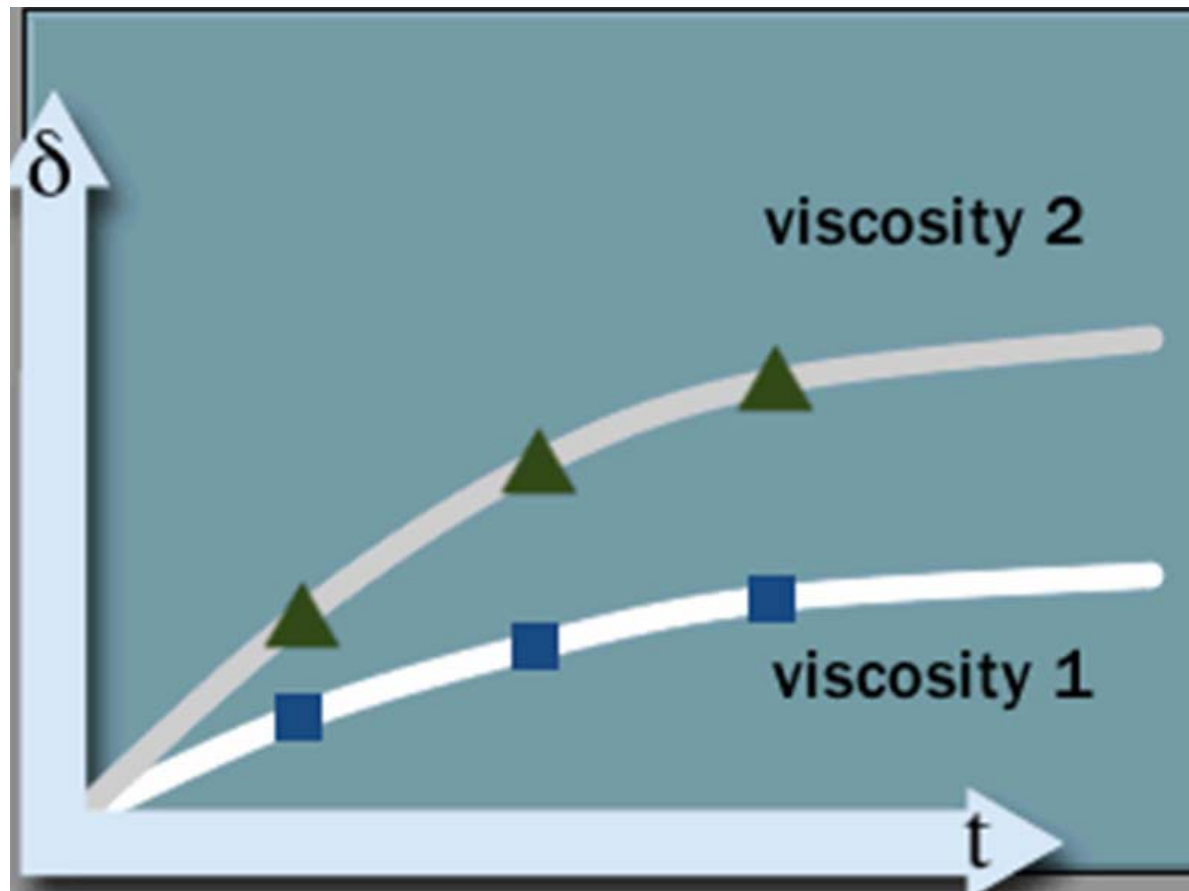


- 物面处流体速度  $u = 0$ ，物面上方  $u$  沿  $y$  方向递增，直到最后等于边界层外边界处的流体速度  $u_e$ ，对于平板流动， $u_e$  等于自由来流速度  $V_\infty$ 。
- 通常规定流速达到  $u = 0.99V_\infty$  处为附面层的外边界，由平板表面到该处的距离称为边界层（附面层）厚度  $\delta(x)$ 。



## Part5: 附面层理论

附面层厚度：



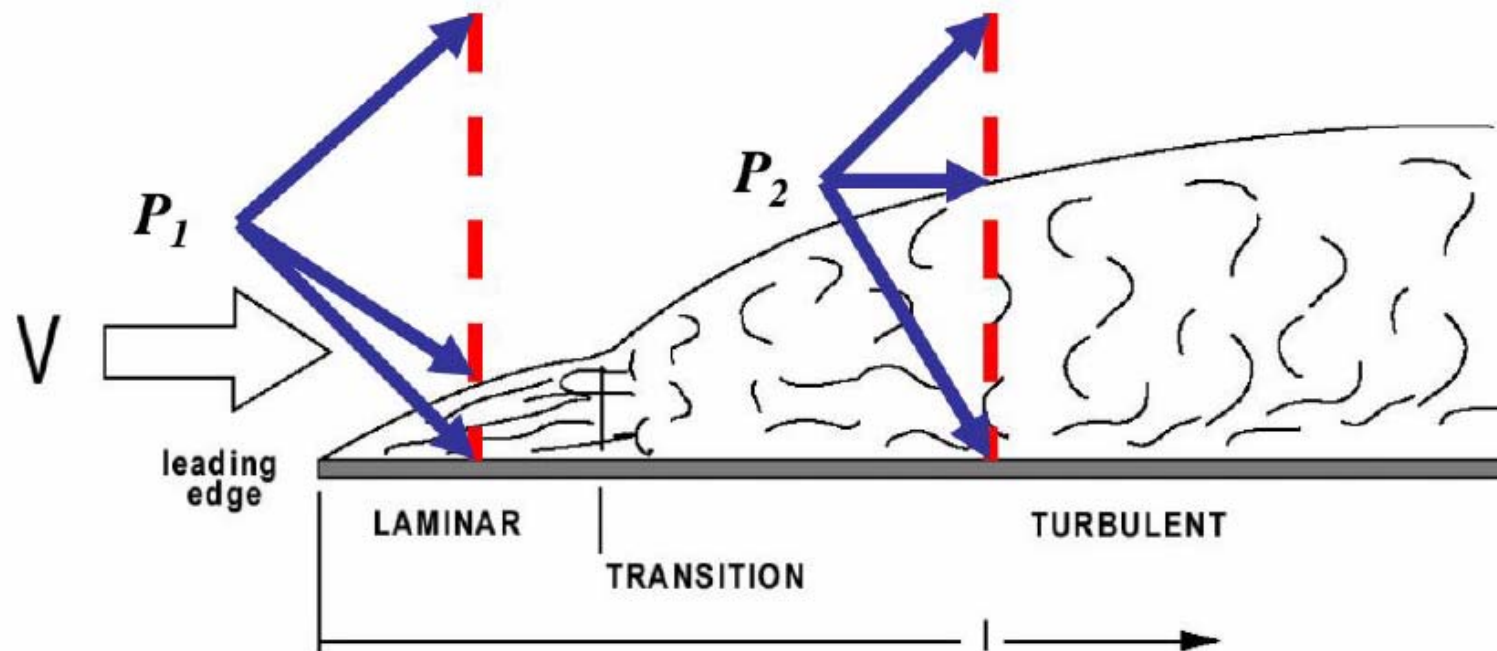
The thickness of the viscous layer, can be plotted as a function of time for fluids of different viscosities.



## Part5: 附面层理论

附面层特点:

(1) 附面层内沿物面法向方向压强不变且等于法线主流压强

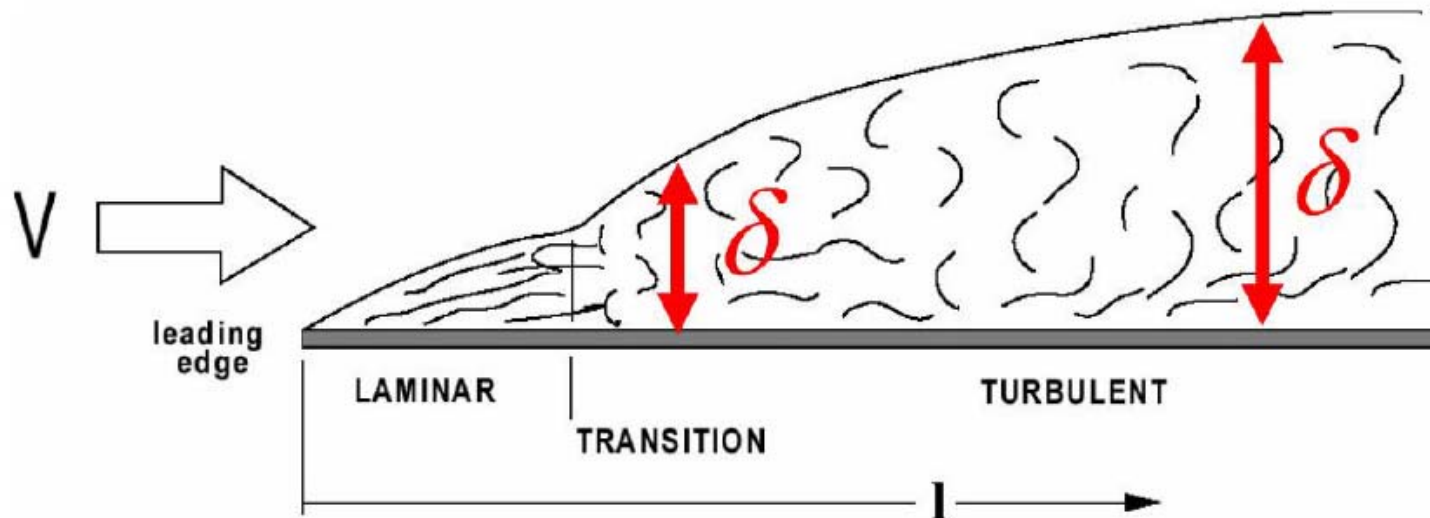




## Part5: 附面层理论

附面层特点:

(2) 附面层厚度随气流流经物面的距离增长而增厚

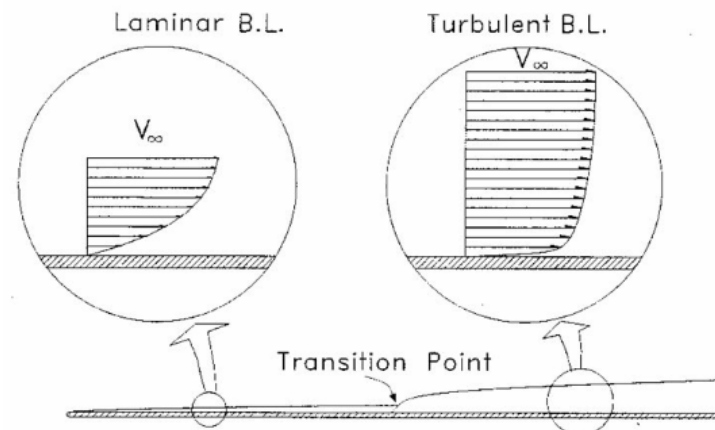
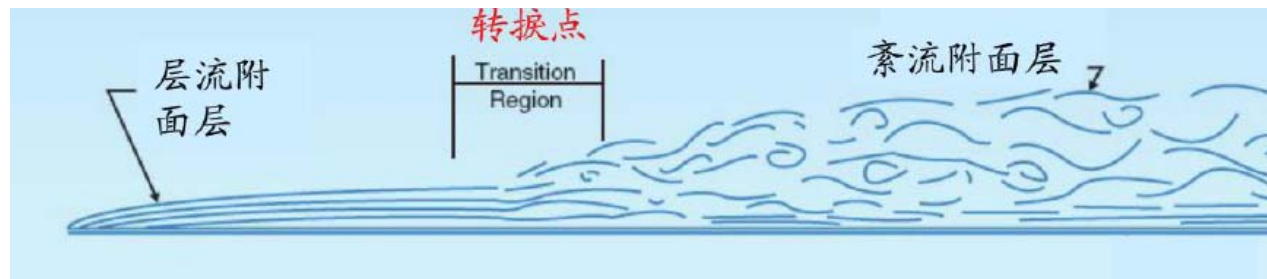




## Part5: 附面层理论

### 附面层特点:

(3) 附面层分为层流附面层和紊流附面层。层流在前，紊流在后。层流与紊流之间的过渡区称为转捩点



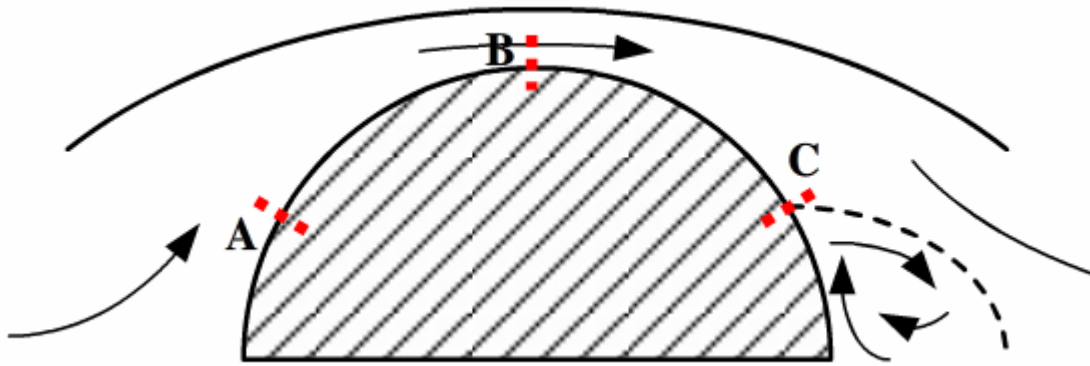




## Part5: 附面层理论

### 附面层分离：

真实的圆柱绕流和机翼绕流问题，附面层可能会出现分离现象。



点A到点B，沿流向速度增加，压力逐渐减小，例如机翼上表面前段。**顺压梯度**  
点B到点C，沿流向速度减少，压力逐渐增加，例如机翼上表面后段。**逆压梯度**

在逆压梯度作用下附面层底层出现倒流与上层顺流相互作用形成漩涡脱离物体表面的现象。



## Part5: 附面层理论

### 附面层分离：

边界层分离又称为流动分离，是指原来紧贴壁面流动的边界层脱离壁面的现象。边界层脱离壁面后的空间通常由后部的倒流流体来填充，形成**涡旋**，因此发生边界层分离的部位一般有涡旋形成。



当流体绕曲壁流动时最容易发生附面层分离。



## Part5: 附面层理论

附面层分离：

附面层分离的内因是粘性，外因是逆压梯度。

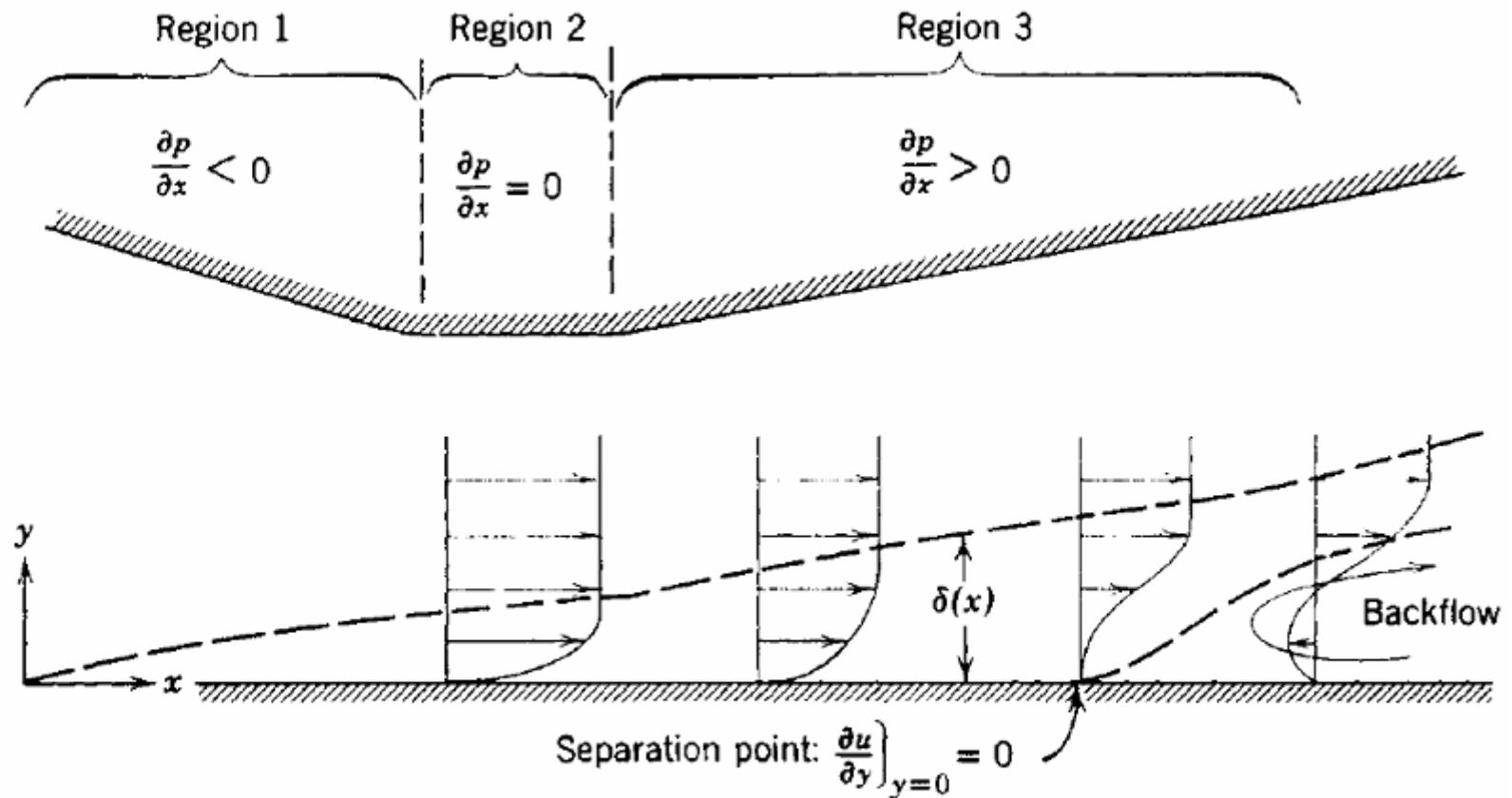
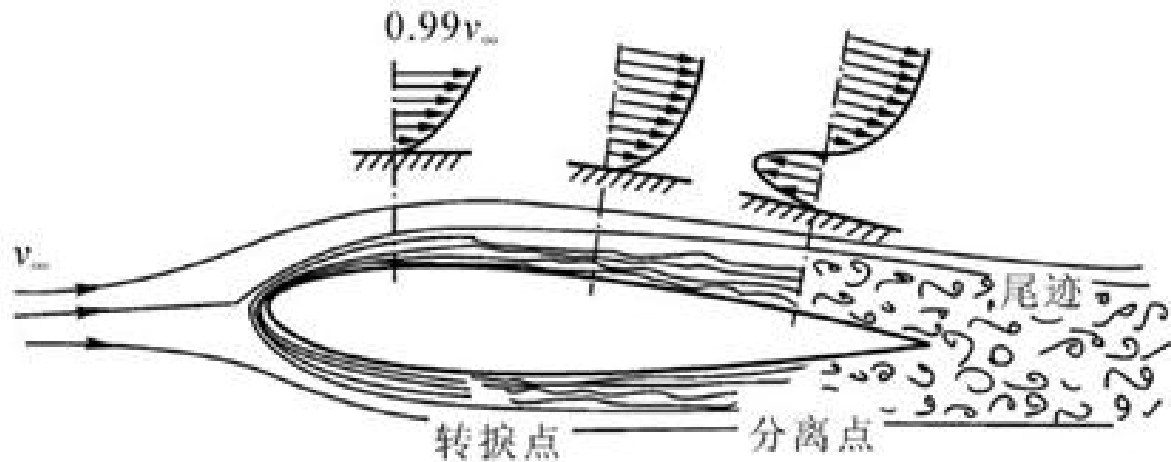


FIGURE 3.6.3 Boundary layer flow with pressure gradient (thickness exaggerated for clarity).



## Part5: 附面层理论

### 附面层分离：



一般翼型大约在最大厚度以前，附面层的气流不相混淆而成层地流动，而且底层的速度梯度较小，这部分叫做层流附面层。在这之后，气流的流动转变成杂乱无章，并且出现了旋涡和横向流动，而且贴近翼面的速度梯度也较大，这部分叫做紊流附面层。层流转变为紊流的那一点称为转捩点。在紊流之后，由于分离，附面层脱离了翼面而形成大量的旋涡，这就是尾迹。





## Part5: 绕流物体阻力

阻力系数:

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

上式中 $D$ 为流体作用于物体上的阻力， $V$ 为流动速度， $A$ 为物体迎风面积。 $C_D$ 是一个无量纲数，不受物体具体尺寸的影响，在工程上普遍用来表示物体运动的阻力特征。

物体在流体中运动时受到两种性质不同的阻力:

摩擦阻力 $D_f$

$$C_{Df} = \frac{D_f}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

压差阻力 $D_p$

$$C_{Dp} = \frac{D_p}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$



## Part5: 绕流物体阻力

### 摩擦阻力 $D_f$

由流体作用在物面上的粘性切应力产生

根据牛顿粘性定律，粘性切应力与流体粘度系数和速度梯度成正比。对同一种流体，物面上不同速度分布产生的粘性切应力不同。

### 压差阻力 $D_p$

流体作用在物面上的压强合力引起的阻力

实际流体绕圆柱等凸壁流动时，在背风面容易发生边界层分离成旋涡，后部的压强不能恢复到与前部相对称的程度，因此圆柱前后产生压强差，这就是压差阻力。

$$C_{Dp} = \frac{D_p}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \frac{\int p \cos \theta dA}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \frac{\int C_p \cos \theta dA}{A}$$

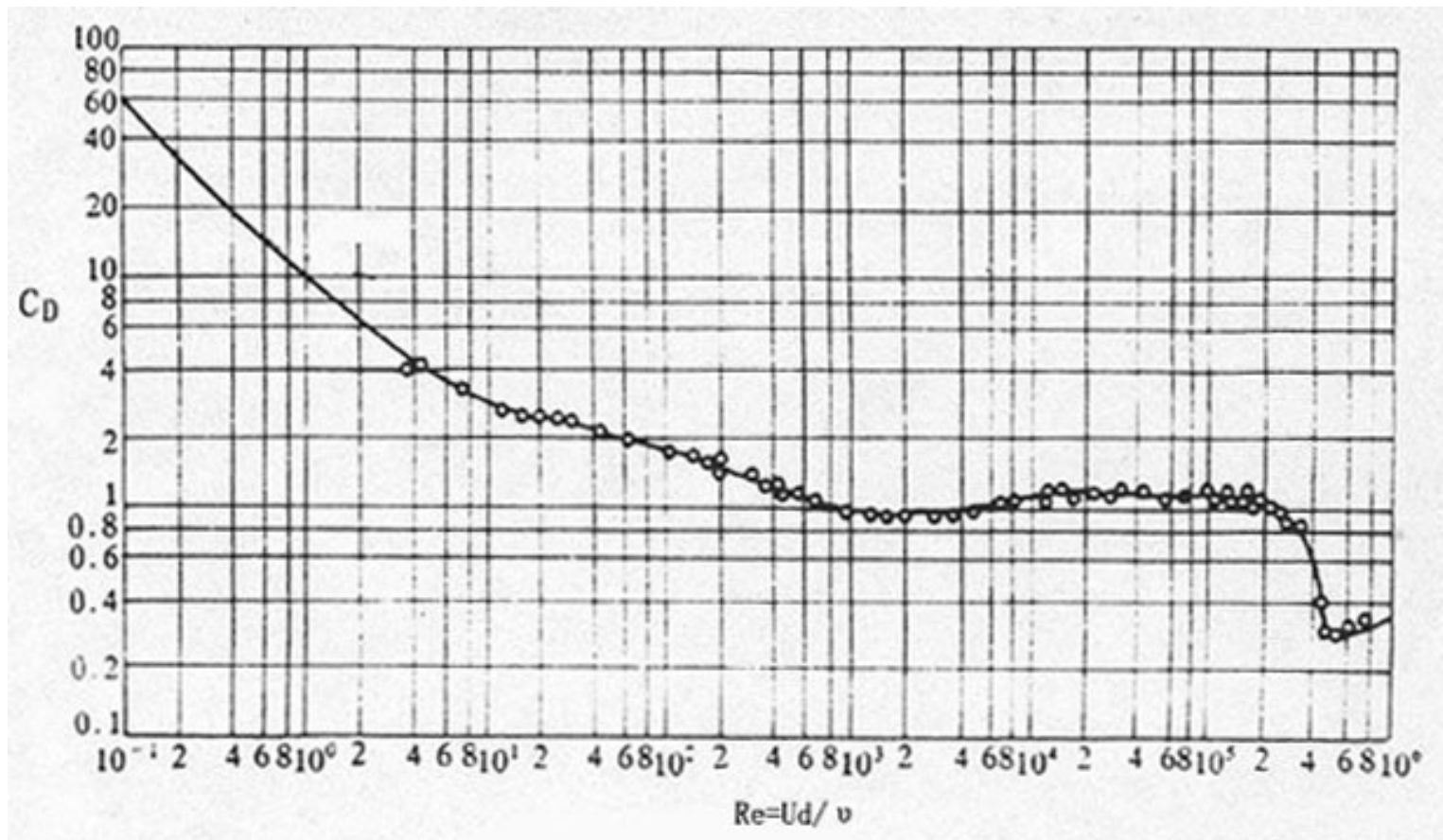


## Part5: 绕流物体阻力

### 阻力系数随雷诺数变化

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = f(R_e)$$

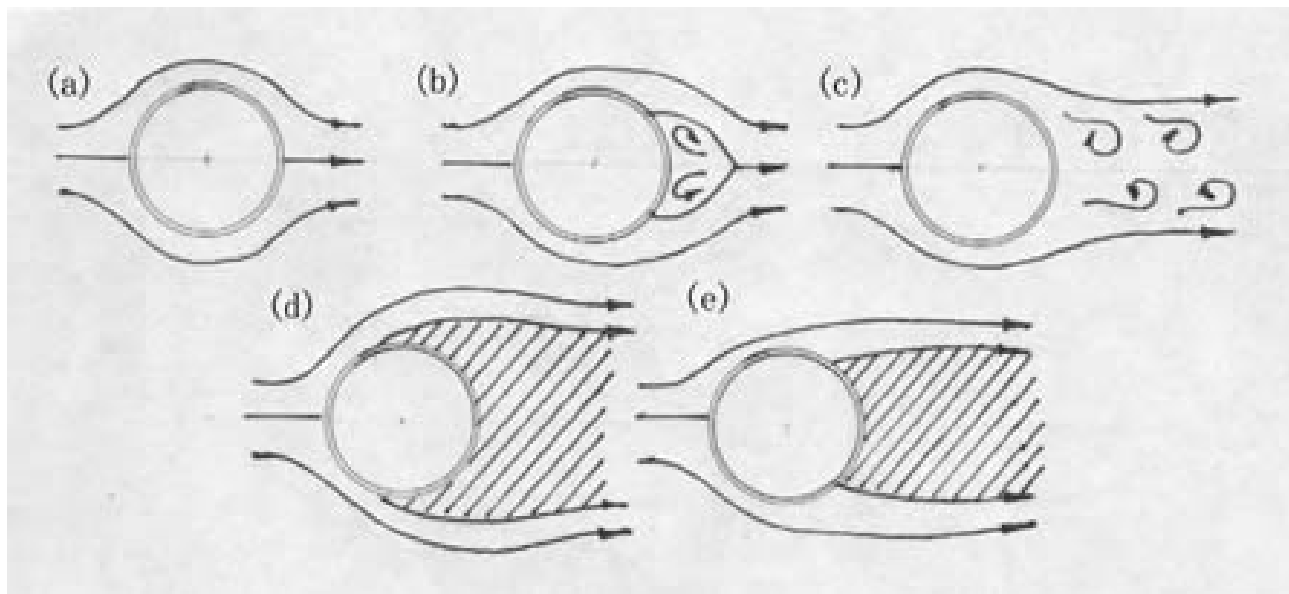
$$R_e = \frac{\rho V d}{\mu}$$





## Part5: 绕流物体阻力

### 卡门涡街



在圆柱绕流实验中发现，大约在 $Re = 40$ 起，圆柱后部的一对旋涡开始出现不稳定地摆动，如图(b)所示，大约到 $Re=70$ 起，旋涡交替地从圆柱上脱落，两边的旋涡旋转方向相反，随流而下，在圆柱后面形成有一定规则的、交叉排列的涡列，称为卡门涡街如图(c)所示。