

7. 湍流流动—传热耦合计算的数值方法

胡 茂 彬

<http://staff.ustc.edu.cn/~humaobin/>
humaobin@ustc.edu.cn

7.1 湍流的复杂性和数值方法 概述

7.1.1 湍流的复杂性

-既非确定，又非随机

- **湍流**：由各种不同尺度的大小漩涡构成的三维非稳态的无规流动
- **湍流**：各种物理量都呈现出随时间和空间的随机变化
- 成因：流过固壁时的摩擦作用(固壁湍流)，不同速度流体层之间的相互作用(自由湍流)

A. K-H (Kelvin-Helmholtz) 不稳定性

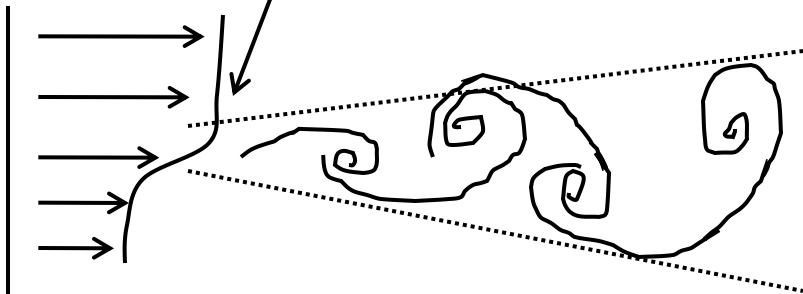
— 自由剪切流的无粘不稳定性

稳定性基本概念:

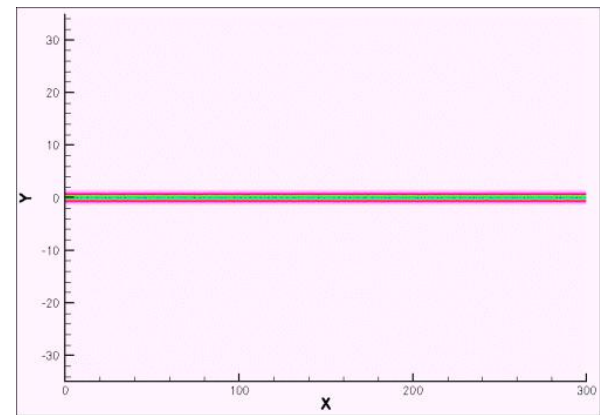
已知某运动状态；在此基础上施加微小扰动；
如扰动随时间（或空间）衰减，则称系统稳定，否则不稳定

流体不禁搓，
一搓搓出涡

K-H不稳定性的关键：
速度剖面有拐点



K-H不稳定性



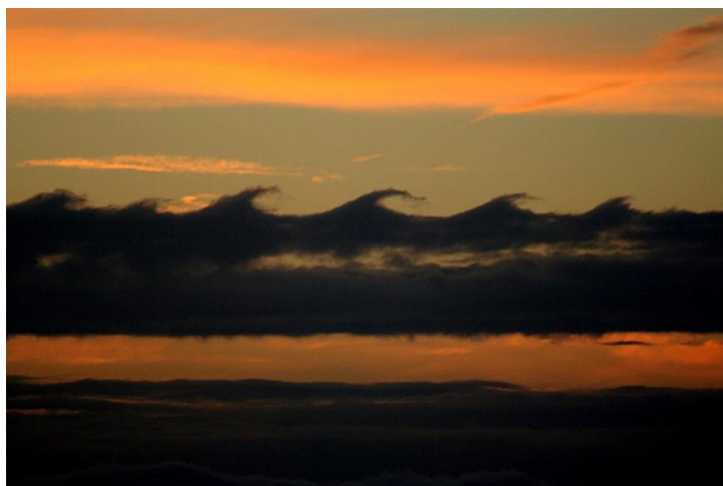
混合层——K-H不稳定性

Lee-Lin: 速度剖面的拐点是无粘不稳定性的必要条件

自然界中 K-H不稳定性图片



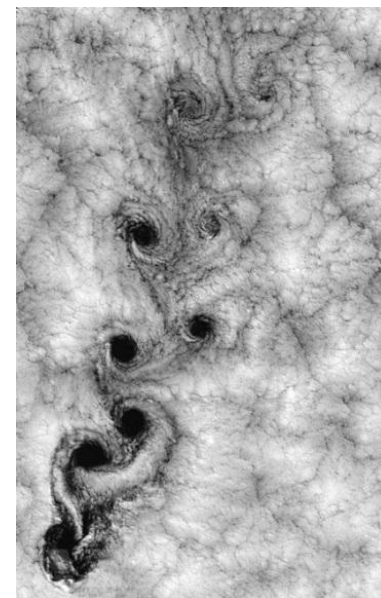
澳大利亚Duval山上空的云



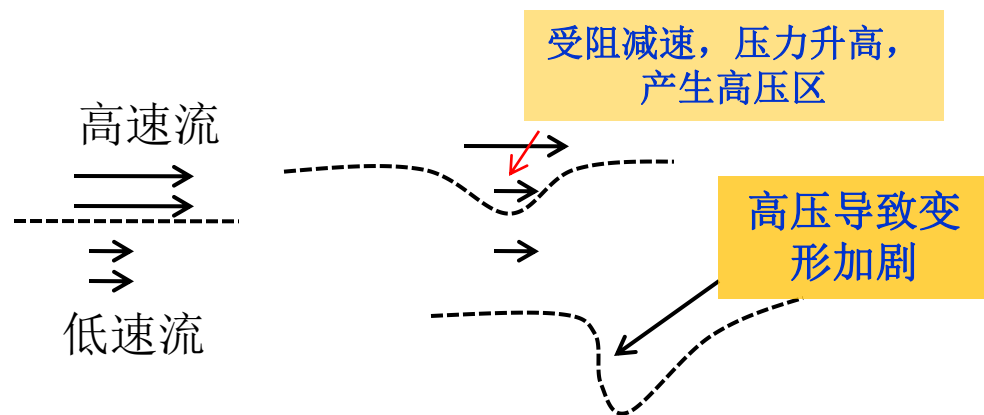
旧金山上空的云



佛兰格尔岛周围的卡门涡街

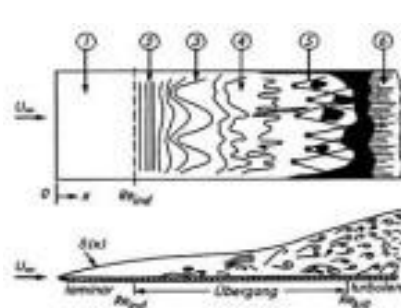
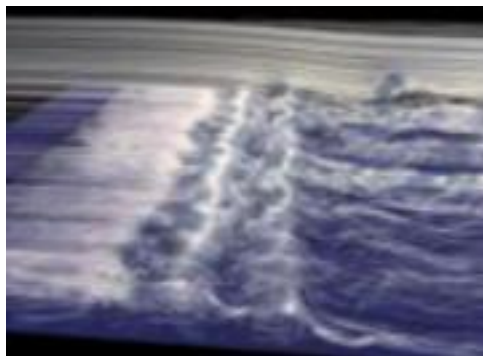


智利塞尔扣克岛的卡门涡街

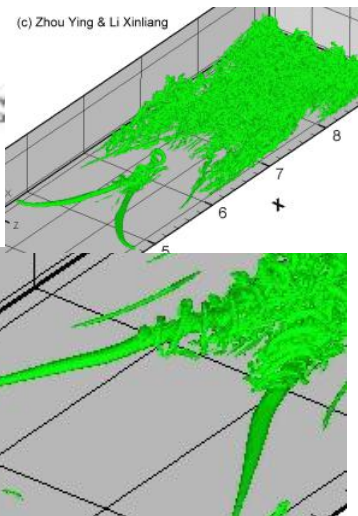


自由剪切层受到扰动界面变形后的情况
K-H不稳定性的产生机理

B. T-S (Tollmien-Schlichting) 不稳定性 ——不可压 壁面剪切流的粘性不稳定性



- (1) stable laminar flow
- (2) unstable Tollmien-Schlichting waves
- (3) 3-dimensional waves and lambda-vortices
- (4) Break down of lambda-vortices
- (5) Formation of turbulent spots
- (6) fully turbulent flow



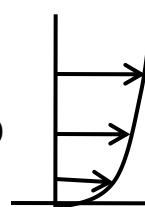
Mack 不稳定性——超声速壁面剪切流的不稳定性

不可压缩无粘不稳定性——需存在拐点

可压缩无粘不稳定性——需存在广义拐点

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$$

$$\frac{d}{dy} \left(\rho \frac{du}{dy} \right) = 0$$



不可压边界层速度剖面 (Blasius解) —— 无拐点

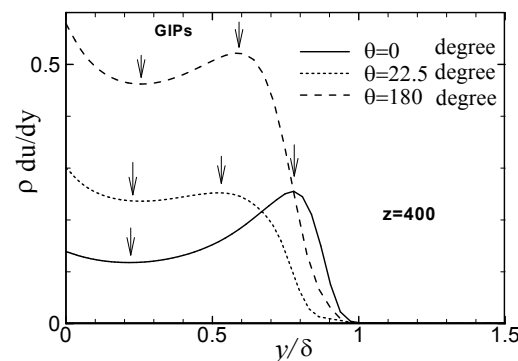
可压缩情况——Mach数足够高时会出现广义拐点
—— 出现无粘不稳定性

超音速平板边界层的不稳定波



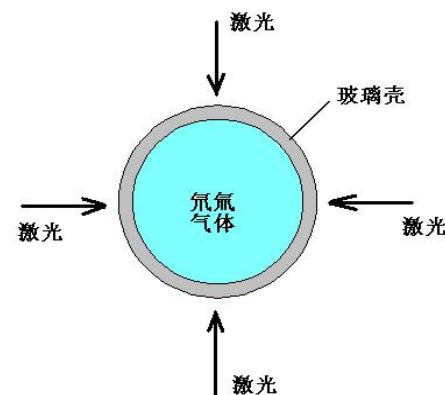
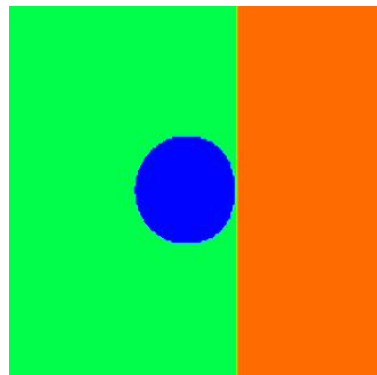
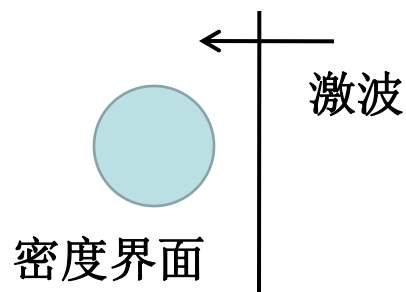
第1模态 (T-S波)

第2模态 (Mack模态)



Mach 6 钝锥 (1° 攻角)
不同子午面 $\rho \frac{du}{dy}$ 的分布

C. R-M (Richtmyer-Meshkov)不稳定性 — 激波与密度界面作用的斜压效应



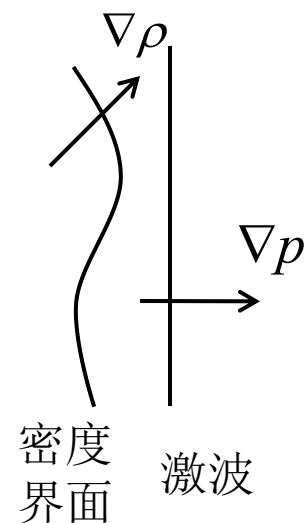
惯性约束聚变 (ICF)
示意图

小知识— 涡的产生机制：
粘性、斜压、有旋的外力

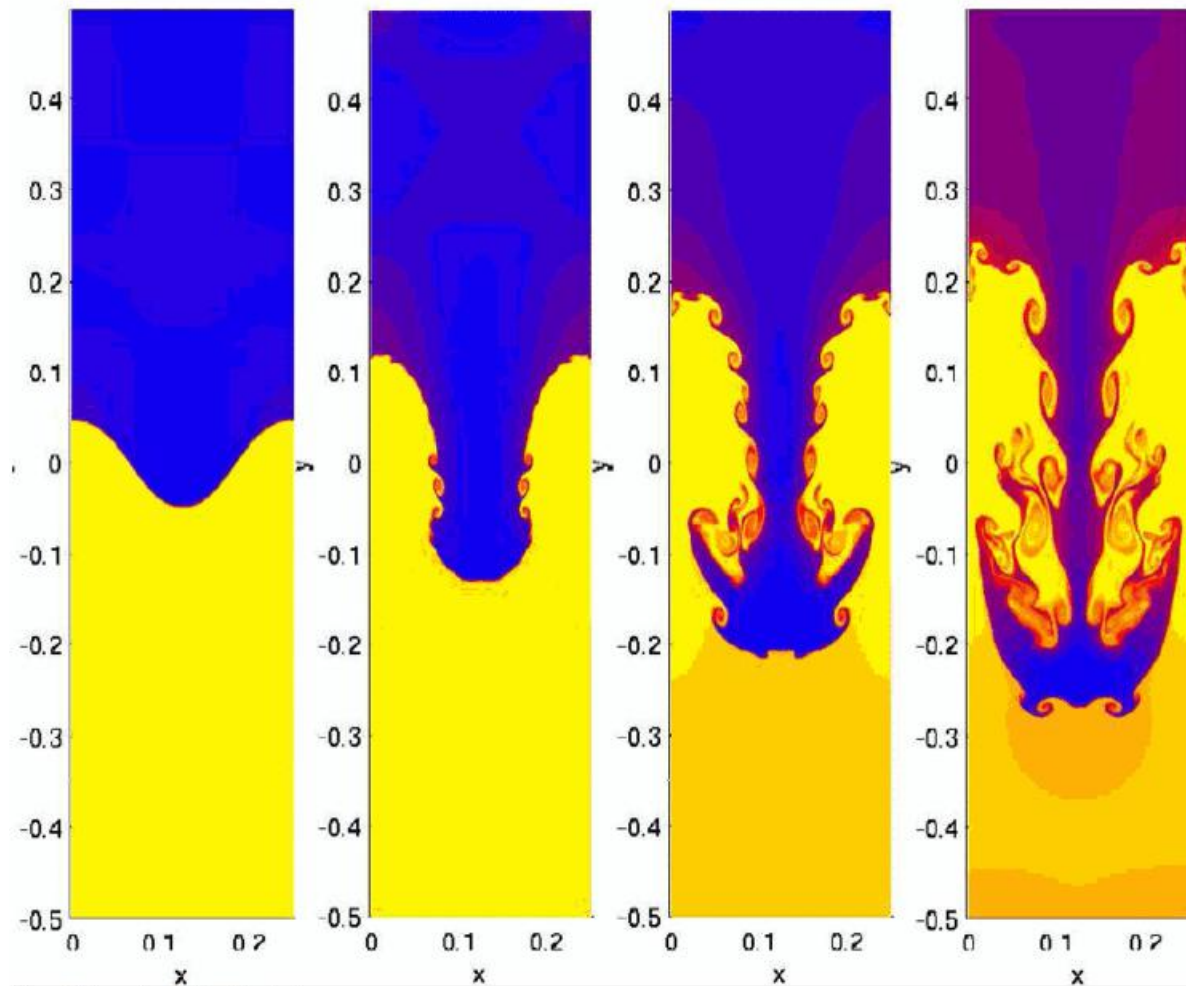
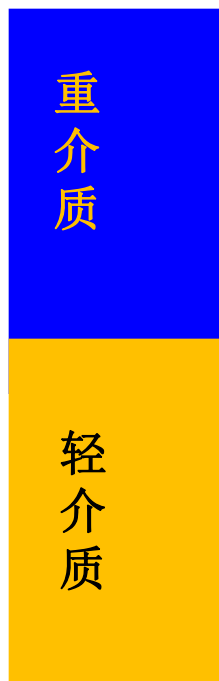
$$\nabla p \times \nabla \rho \neq 0$$

斜压项

$$\frac{d\Omega}{dt} - (\Omega \cdot \nabla)\mathbf{v} + \Omega(\nabla \cdot \mathbf{v}) = \nabla \times \mathbf{F} + \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \nabla p + \nabla \times (\nu \Delta \mathbf{v}) + \frac{1}{3} \nabla \times (\nu \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}))$$



D. R-T (Reyleigh-Taylor)不稳定性 — 重力带来的不稳定性



R-T (Reyleigh-Taylor)不稳定性

(E) Barnard 热对流不稳定性

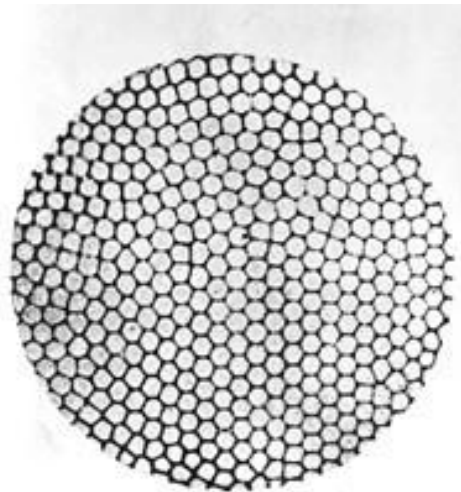
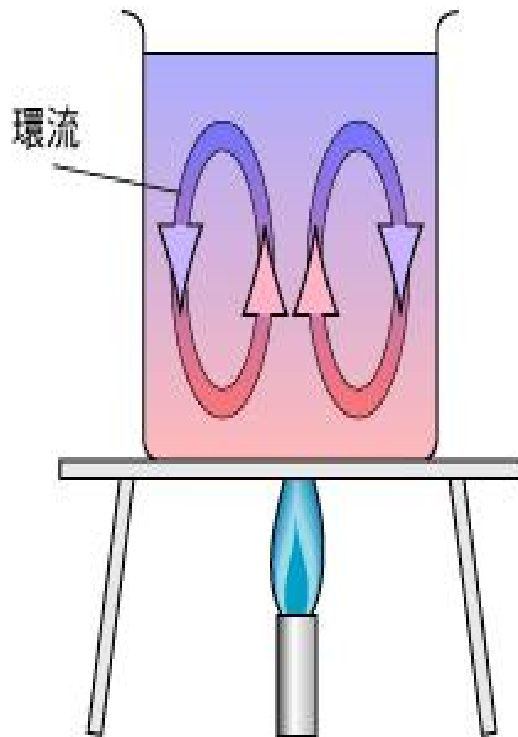
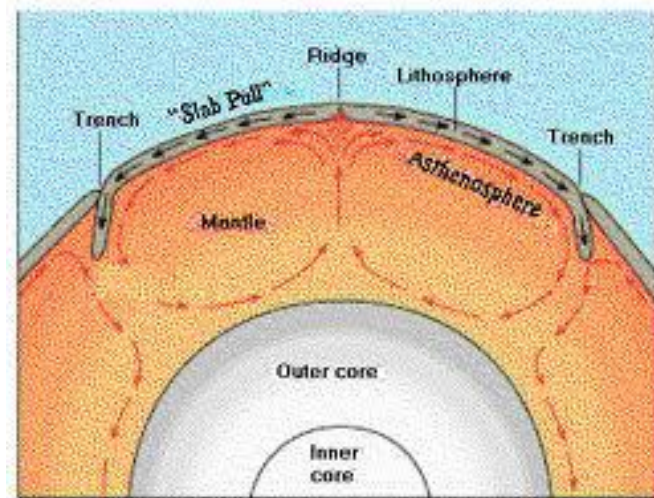


FIG. 1. Bénard cells in spermaceti. A reproduction of one of Bénard's original photographs.

DATANG.NET

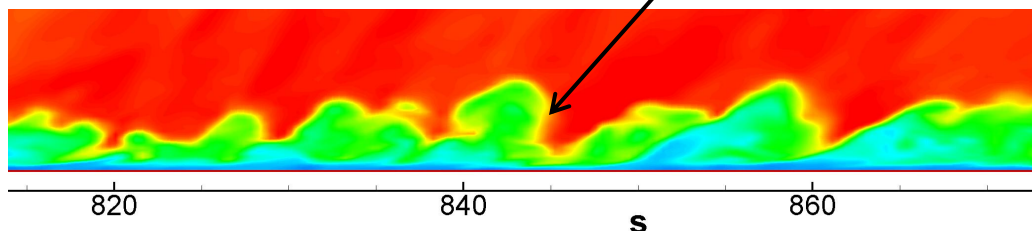


Barnard 热对流的胞格结构



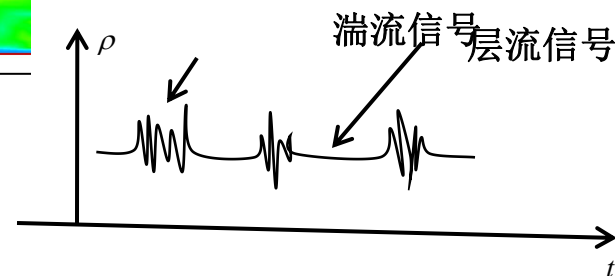
常识：湍流的间歇性

外间歇性：层流及湍流交替出现

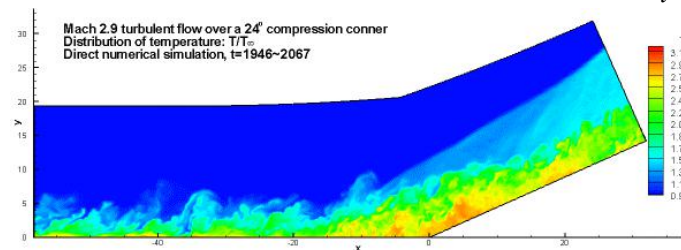
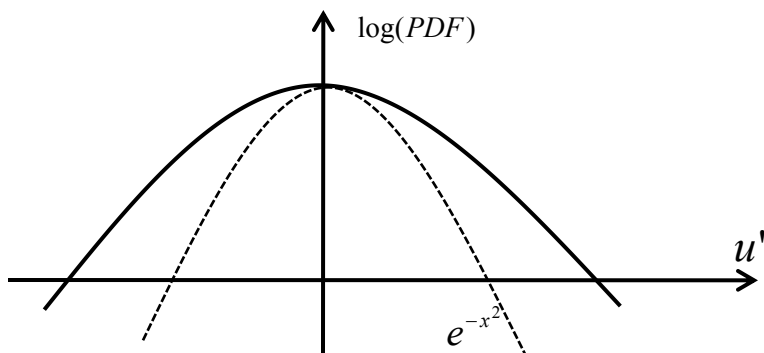


Mach 6 钝锥边界层的密度分布 (Li et al. PoF 22, 2010)

边界层有清晰锐利的界面（层流区、湍流区“泾渭分明”）



内间歇性：湍流脉动的概率密度分布偏离Gauss分布（随机分布）

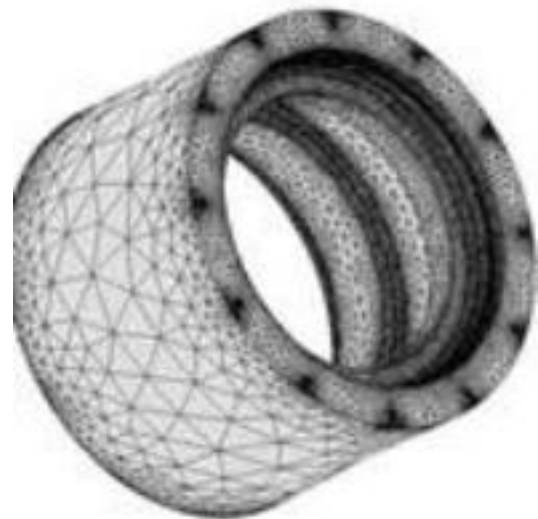
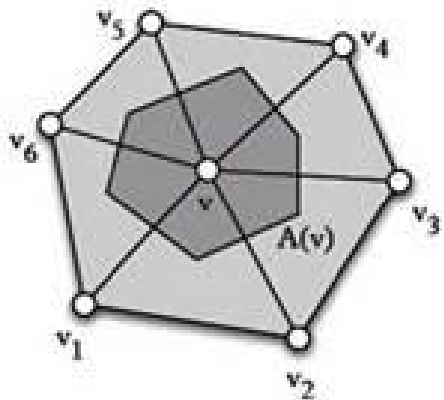


概率论（中心极限定理）——独立随机事件满足Gauss分布
偏离Gauss分布——湍流不是完全随机的

既非确定，又非随机——湍流的复杂性

7.1.2 湍流的数值方法 概述

计算流体和传热中困难最多，
研究最活跃领域之一



1. 湍流直接模拟

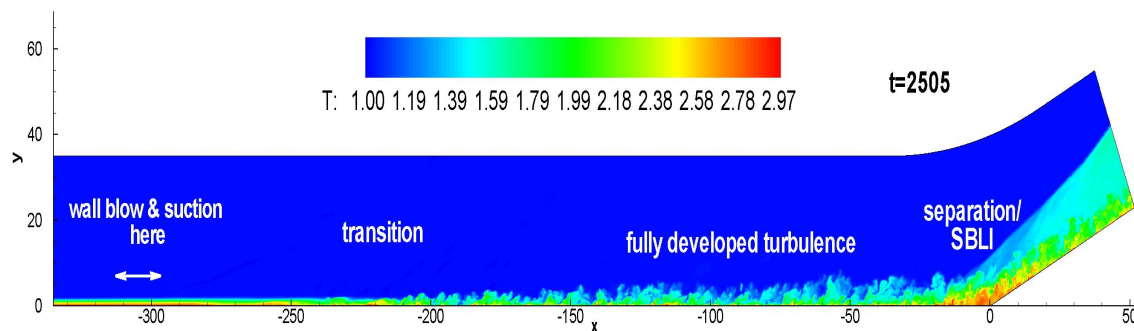
DNS - Direct Numerical Simulation

- 应用3维非稳态 **Navier-Stokes** 方程对湍流进行直接的数值模拟
- 若 $Re = 10^5$ ，小尺度漩涡尺寸大约为0.02cm
- 若体系尺度0.2m, 将含有 10^9 个小漩涡，网格节点数将超过 10^{11} 个

DNS 湍流直接模拟

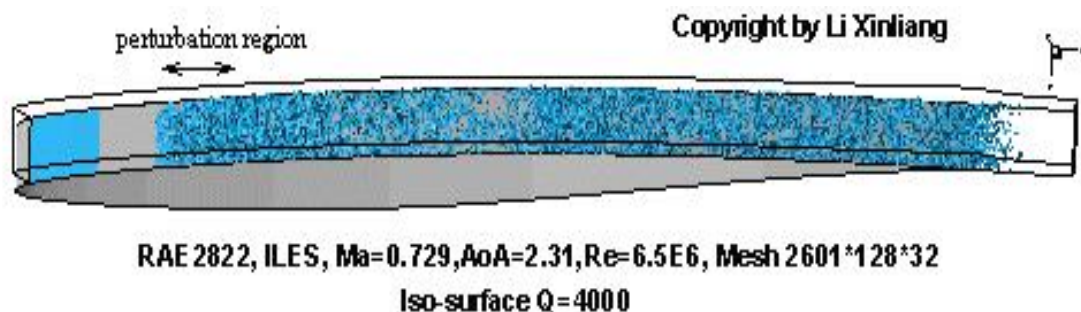
N-S方程适用于湍流，但其解过于复杂
如果网格分辨率不够，数值解误差较大

例1 压缩折角流动：如果网格分辨率不足，且不用湍流模型，则分离区过大



压缩折角流动

例2 有攻角机翼流动：如果网格分辨率不足，且不用湍流模型，则造成“非物理分离”



翼型绕流

2. 湍流的大涡模拟

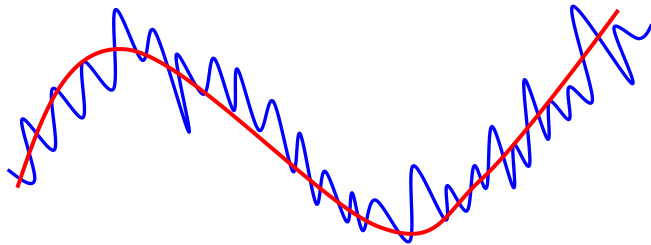
LES - Large Eddy Simulation

- 用三维非稳态的 **Navier-Stokes** 方程直接模拟大涡运动
- 不直接计算小涡，小涡对大涡的影响通过亚格子Reynolds应力来考虑
- PC机上可以适用，近年应用越来越广泛

3. 湍流Reynolds时均方程模拟

RANS - Reynolds Average Numerical Simulation

- 瞬态物理量 = 平均量 + 脉动量



$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i$$

- 方程个数 < 未知数个数：方程组不封闭
- 湍流模型：把未知的更高阶的时间平均值表示为较低阶计算可确定量之函数

