

Engineering Fluid Mechanics

工程流体力学

第9章 可压缩流体的流动

教学团队：严 岩
韩 煜
吴 泽
李 晓
莫景文
孙东科



东南大学机械工程学院

2023/6/7

9.1 音速与马赫数

马赫数： Ma

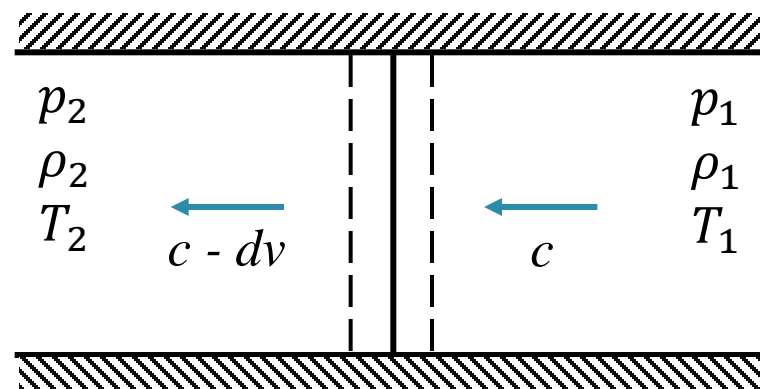
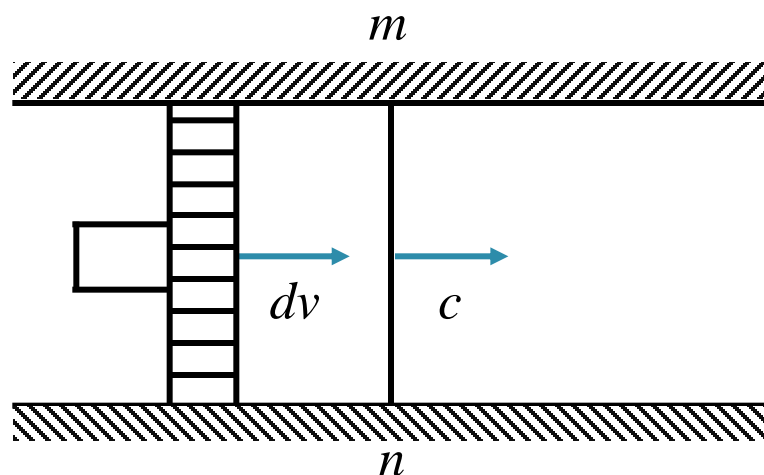
惯性力与弹性力的比值；

当流体的运动速度较低时 ($Ma < 0.3$)，液体压缩效应忽略不计；

当流速较高时 ($Ma > 0.3$)，压缩不能忽略。

9.1 音速与马赫数

音速：是微弱扰动波在弹性介质中的传播速度



活塞以微小速度 dv 向右运动，产生一道微弱压缩波 mn ，波面以速度 c 向右传播

选用与微弱扰动波一起运动的相对坐标系作为参考坐标系，流动转化为气体向左以速度 c 运动，通过活塞后速度为 $c - dv$

9.1 音速与马赫数

音速：是微弱扰动波在弹性介质中的传播速度

由连续方程 $(\rho_1 + d\rho)(c - dv)A - \rho_1 cA = 0$ \rightarrow $cd\rho = \rho_1 dv$ (9-1)

由动量方程 $\rho_1 cA[(c - dv) - c] = [p_1 - (p_1 + dp)]A$ \rightarrow $\rho_1 c dv = dp$ (9-2)

$$p_2 = p_1 + dp$$

$$\rho_2 = \rho_1 + d\rho$$

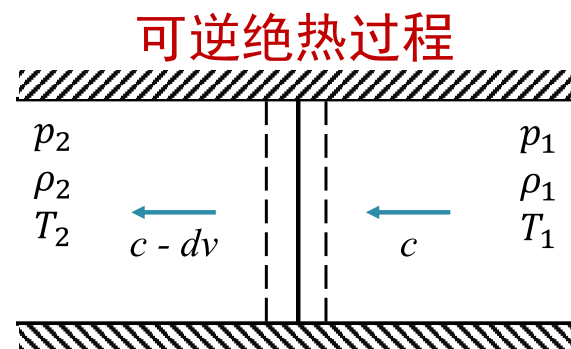
由公式9-1、9-2得 $c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$ **音速公式**

等熵过程关系式： $p / \rho^k = \text{const}$

气体状态方程： $p = \rho RT$

由等熵过程关系式和状态方程可得 $\frac{dp}{d\rho} = \frac{kp}{\rho} = kRT$

代入声速公式得 $c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT}$



9.1 音速与马赫数

声速大小与流动介质的压缩性大小有关，流体越容易压缩，声速越小

空气中的声速： $c = \sqrt{kRT}$

空气物性： $k = 1.4$ $R = 287.1 J/(kg \cdot K)$ $c = 20.05\sqrt{T}$

马赫数：流体流动速度和当地声速的比值 $Ma = v/c$

对于完全气体 $Ma^2 = \frac{v^2}{kRT}$

马赫数通常还用来划分气体的流动状态

$Ma < 1$ 亚声速流

$Ma = 1$ 声速流

$Ma > 1$ 超声速流

$Ma > 3$ 高超声速流



9.1 音速与马赫数

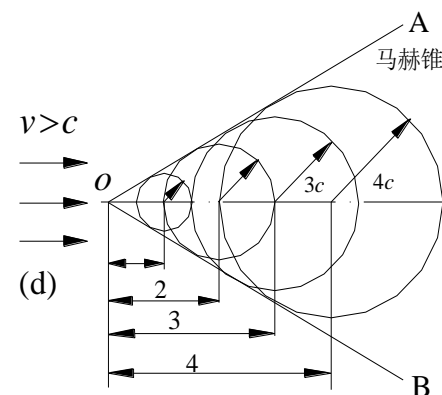
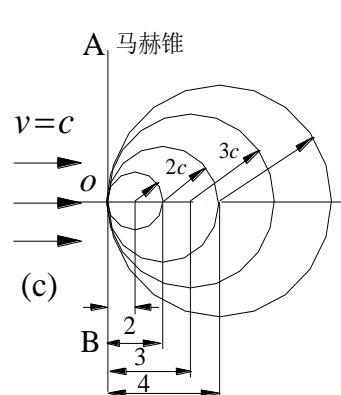
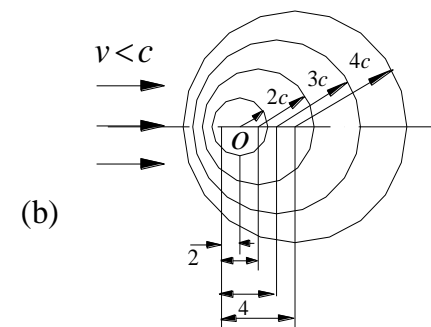
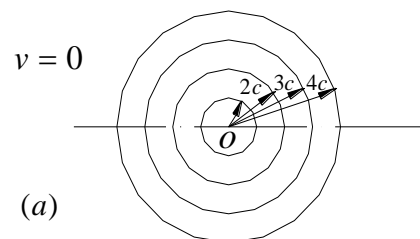
如果在空间的某一点设置一个扰动源，周围无任何限制，则扰动源发出的扰动波将以球面压强波的形式向四面八方传播，其传播速度为声速

分四种情况讨论：

- (a) 气体静止不动
- (b) 气流亚声速流动
- (c) 气流以声速流动
- (d) 气流超声速流动

$$\sin \alpha = \frac{c}{v} = \frac{1}{Ma}$$

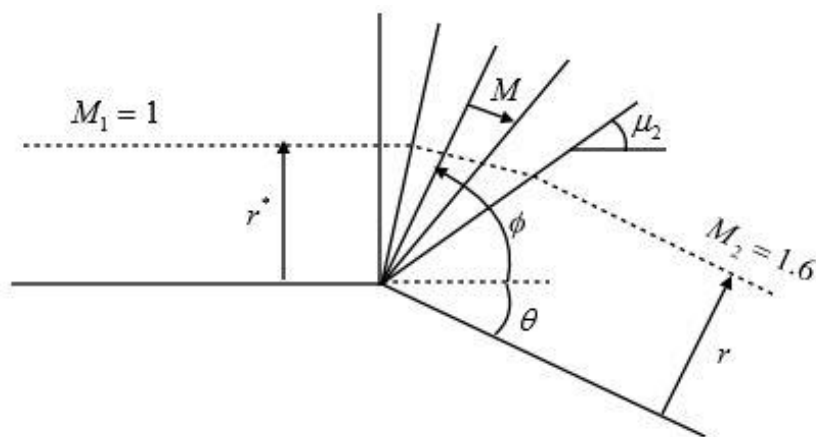
$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{1}{Ma} \right)$$



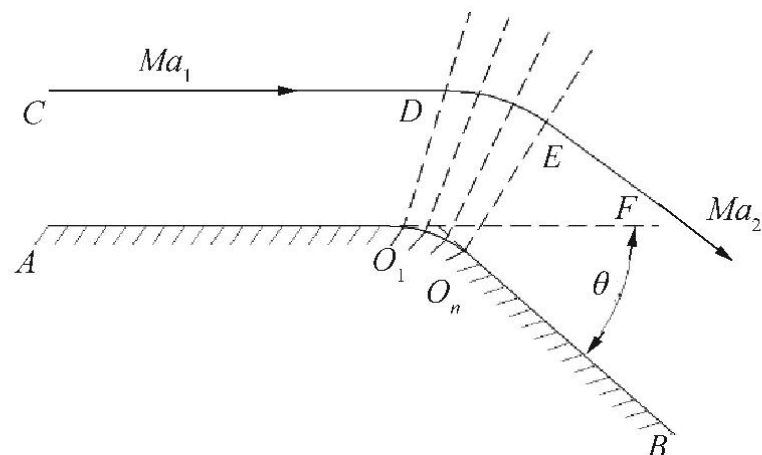
结论：超声速气流中的微弱扰动波不能逆流向上游传播

9.5 超音速气流的绕流与激波的形成 - 膨胀波

当超声速流流过凸曲面或凸折面时，通道面积加大，气流发生膨胀，在膨胀伊始因受扰动而产生马赫波。这种气流受扰后压强将下降，速度将增大情况下的马赫波称为膨胀波。



超声速气流绕外折壁面的流动

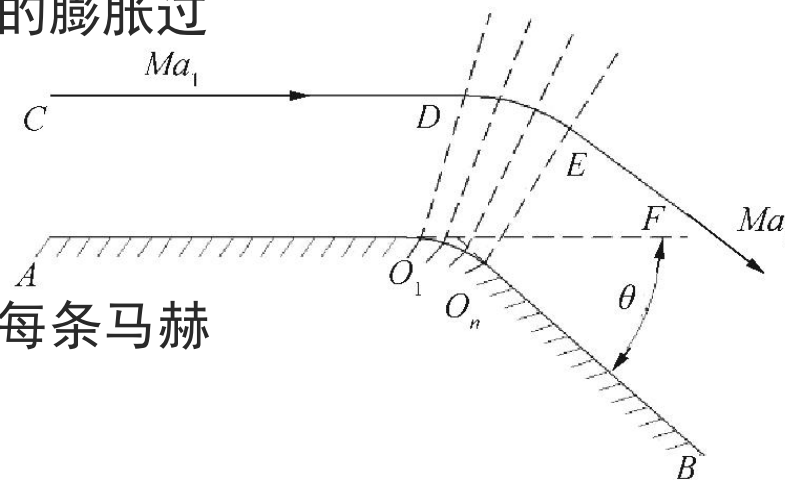


超声速气流绕多次外折壁面的流动

9.5 超音速气流的绕流与激波的形成 - 膨胀波

膨胀波产生的特点:

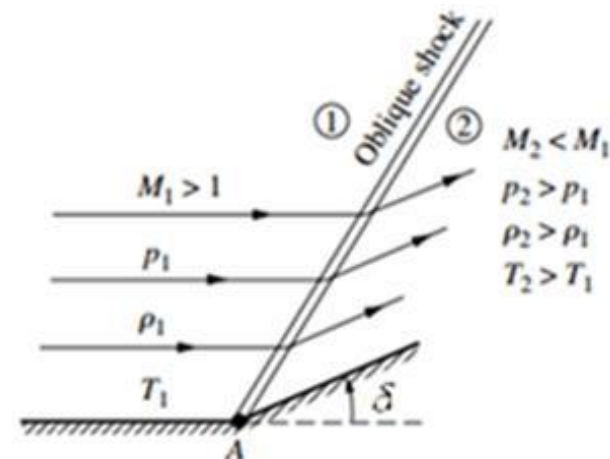
- ① 超声速来流为定常二维流动，在壁面折转处必定产生一扇型膨胀波组，此扇型膨胀波是有无限多的马赫波所组成
- ② 经过膨胀波组时，气流参数是连续变化的，其速度增大，压强、密度和温度相应减小,流动过程为绝热等熵的膨胀过程
- ③ 气流通过膨胀波组后，将平行于壁面OB流动
- ④ 沿膨胀波束的任一条马赫线，气流参数不变，固每条马赫线也是等压线。而且马赫线是一条直线。
- ⑤ 膨胀波束中的任一点的速度大小仅与该点气流方向有关



9.5 超音速气流的绕流与激波的形成 - 激波

激波产生的特点:

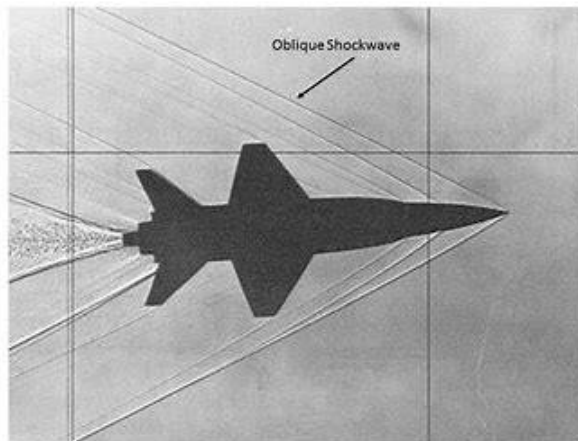
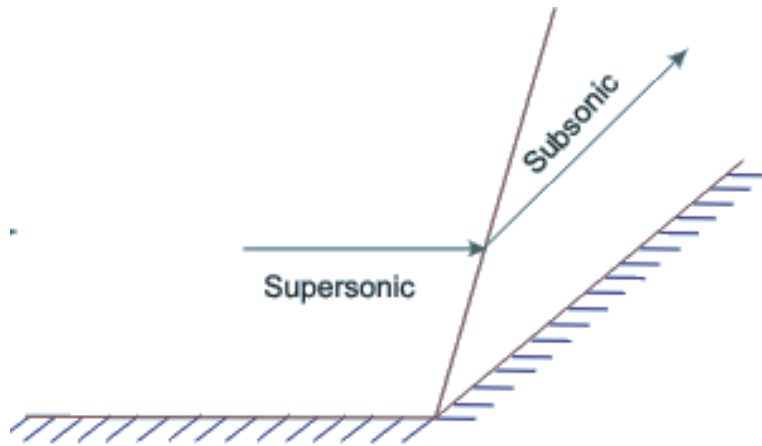
- 气流通过凹面时从A开始通道面逐渐减小，在超声速流情况下，速度就会逐渐减小，压强就会逐渐增大。与此同时，气流的方向也逐渐转向，产生一系列的微弱扰动，从而产生一系列的马赫波,这种马赫波称为**压缩波**。
- 气流沿整个凹曲面的流动，实际上是由这一系列的马赫波汇成一个突跃面。气流经过这个突跃面后，流动参数要发生突跃变化：速度会突跃减小；而压强和密度会突跃增大。这个突跃面是个强间断面，即是**激波面**。



9.5 超音速气流的绕流与激波的形成 - 正激波和斜激波

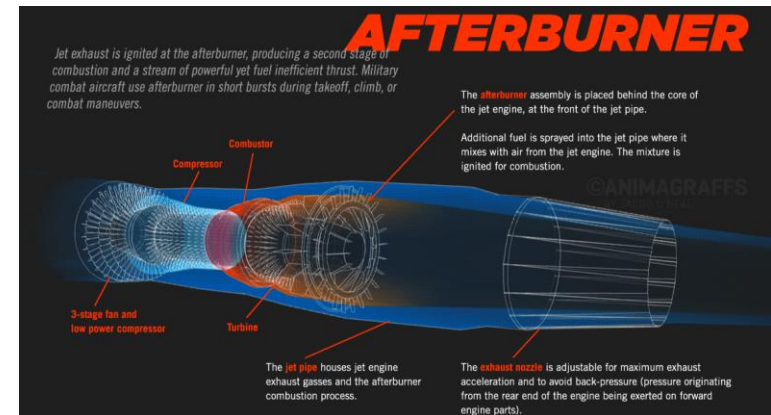
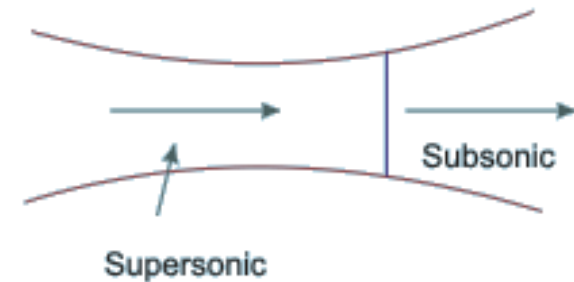
斜激波

(超声速气流经过激波流动方向变化)



正激波

(超声速气流经过激波流动方向不变化)



9.5 超音速气流的绕流与激波的形成 - 正激波和斜激波

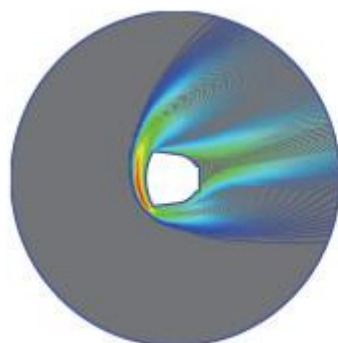
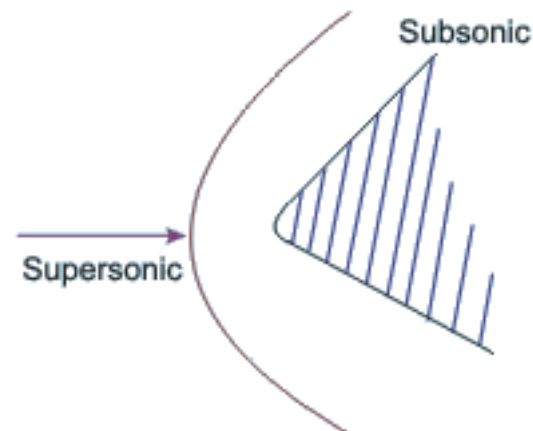
脱体激波

(超声速气流流过钝头物体产生的激波)

激波的流动不能作为等熵流动处理。

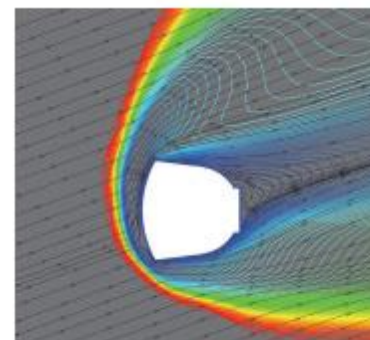
$$Ma < 0.3$$

但是气流经过激波可以看作是绝热过程。



(a) Temperature

$H=80.91\text{km}$
 $M_\infty=12.69$
 $\alpha=20^\circ$
 $Kn_\infty=0.00157$



(b) Flow structure

$H=80.91\text{km}$
 $M_\infty=12.69$
 $\alpha=20^\circ$
 $Kn_\infty=0.00157$

Engineering Fluid Mechanics

工程流体力学

第10章 计算流体力学简介

教学团队：严 岩
韩 煜
吴 泽
李 晓
莫景文
孙东科



东南大学机械工程学院
2023/6/7

计算流体力学概述

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics) 是流体力学的一个新兴的分支，是一个**采用数值方法利用计算机来求解流体流动的控制偏微分方程组，并通过得到的流场和其它物理场来研究流体流动现象以及相关的物理或化学过程的学科。**

研究流动现象就是研究流动参数如速度、压力、温度等的空间分布和时间变化，而流动现象是由一些基本的守恒方程(质量、动量、能量等)控制的，因此，通过求解这些流动控制方程，我们就可以得到流动参数在流场中的分布以及随时间的变化。

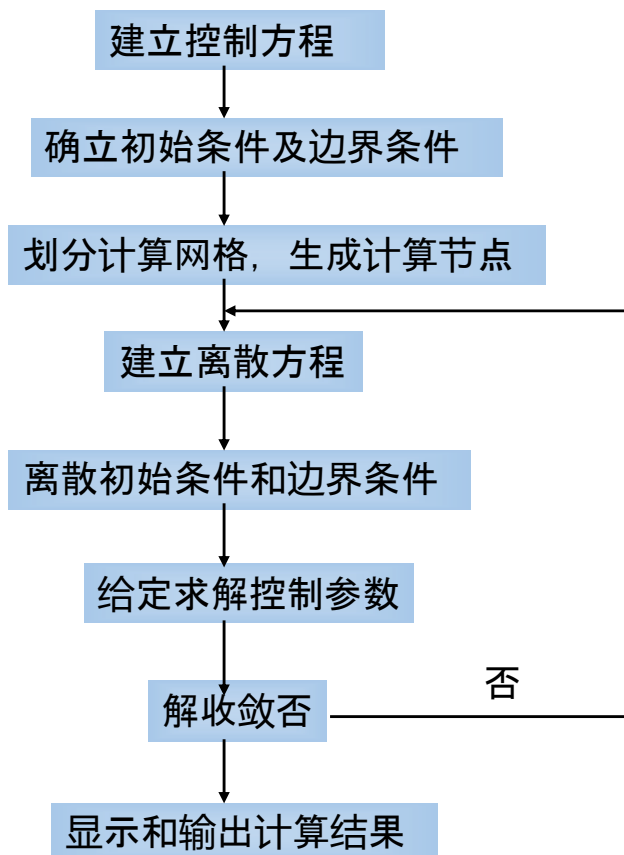
然而，在实际应用中，常见的流动控制方程如**纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes)方程或欧拉 (Euler)方程都是复杂的非线性的偏微分方程组**，以解析方法求解在大多数情况下是不可能的。实际上，对于绝大多数有实际意义的流动，其控制方程的求解通常都只能采用数值方法的求解。因此，**采用 CFD方法在计算机上模拟流体流动现象本质上是流动控制方程(多数情况下是纳维-斯克斯程或欧拉方程)的数值求解。** CFD 软件本质上就是一些求解流动控制方程的计算机程序。

10.1 有限体积法简介 - 计算流体力学概述

- **计算流体力学：**（computational Fluid Dynamics, CFD）是通过计算机数值计算和图像显示，对含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。
- **CFD的基本思想：**把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值。
- **CFD可以看做是在流动基本方程控制下对流动的数值模拟。**通过这种数值模拟，我们可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量（如速度、压力、温度、浓度等）的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定旋涡分布特性、空化特性及脱流区等。还可据此算出相关的其他物理量，如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，与CAD联合，还可进行结构优化设计等。

10.1 有限体积法简介 - 计算流体力学概述

CFD总体步骤



CFD典型应用领域

- ✓ 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动
- ✓ 飞机和航天飞机等飞行器的设计
- ✓ 汽车流线外型对性能的影响
- ✓ 洪水波及河口潮流计算
- ✓ 风载荷对高层建筑物稳定性及结构性能的影响
- ✓ 温室及室内的空气流动及环境分析
- ✓ 电子元器件的冷却
- ✓ 换热器性能分析及换热器片形状的选取
- ✓ 河流中污染物的扩散
- ✓ 汽车尾气对街道环境的污染
- ✓ 食品中细菌的运移
- ✓ ...

10.1 有限体积法简介 - 有限体积法

有限体积法

经过四十多年的发展，CFD出现了多种数值解法。这些方法之间的主要区别在于对控制方程的离散方式。根据离散的原理不同，CFD大体上可分为三个分支：

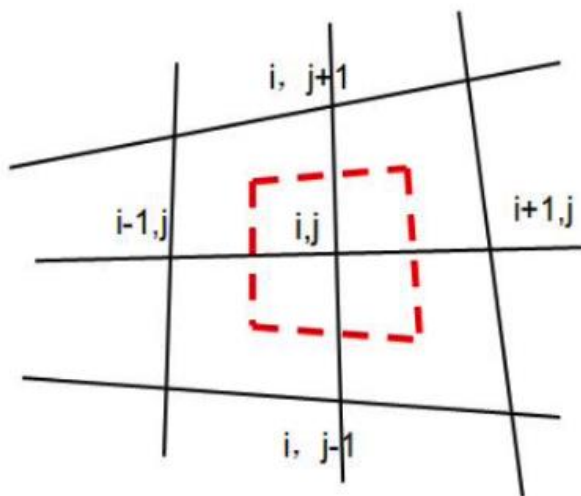
- 有限差分法(Finite Different Method, FDM)
- 有限元法(Finite Element Method, FEM)
- 有限体积法(Finite Volume Method, FVM)

有限体积法将计算区域划分为一系列控制体积，将待解微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。1980年，S.V.Patanker在其专著《Numerical Heat Transfer and Fluid Flow》中对有限体积法作了全面的阐述。此后，该方法得到了广泛应用，是目前CFD应用最广的一种方法。用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性，而且离散方程系数物理意义明确，计算量相对较小。

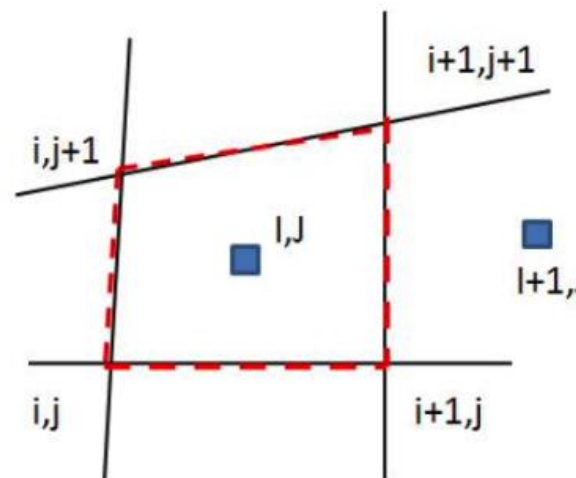
10.1 有限体积法简介 - 有限体积法

控制体积：

节点型控制体与网格型控制体



节点中心型控制体
物理量储存在节点P上



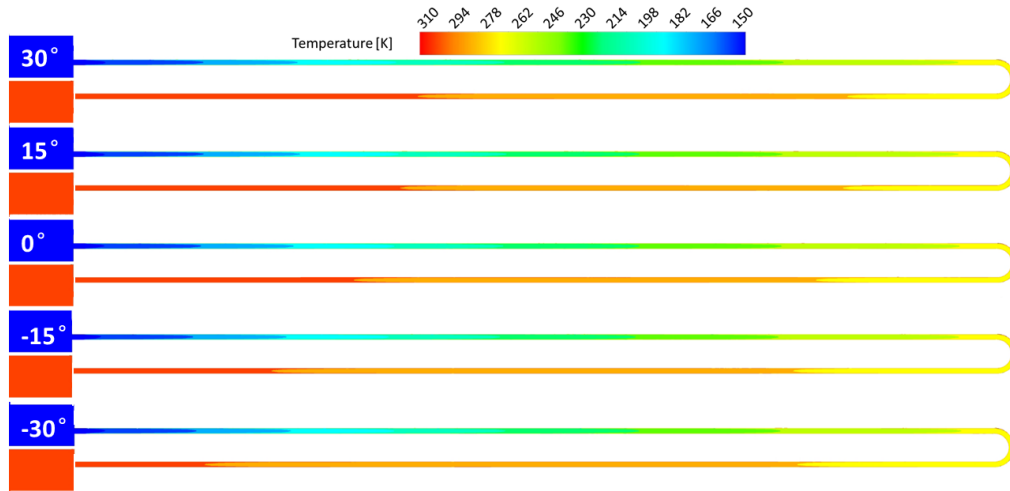
网格中心型控制体
物理量储存在网格中心上

10.3 数据可视化常用方法与工具

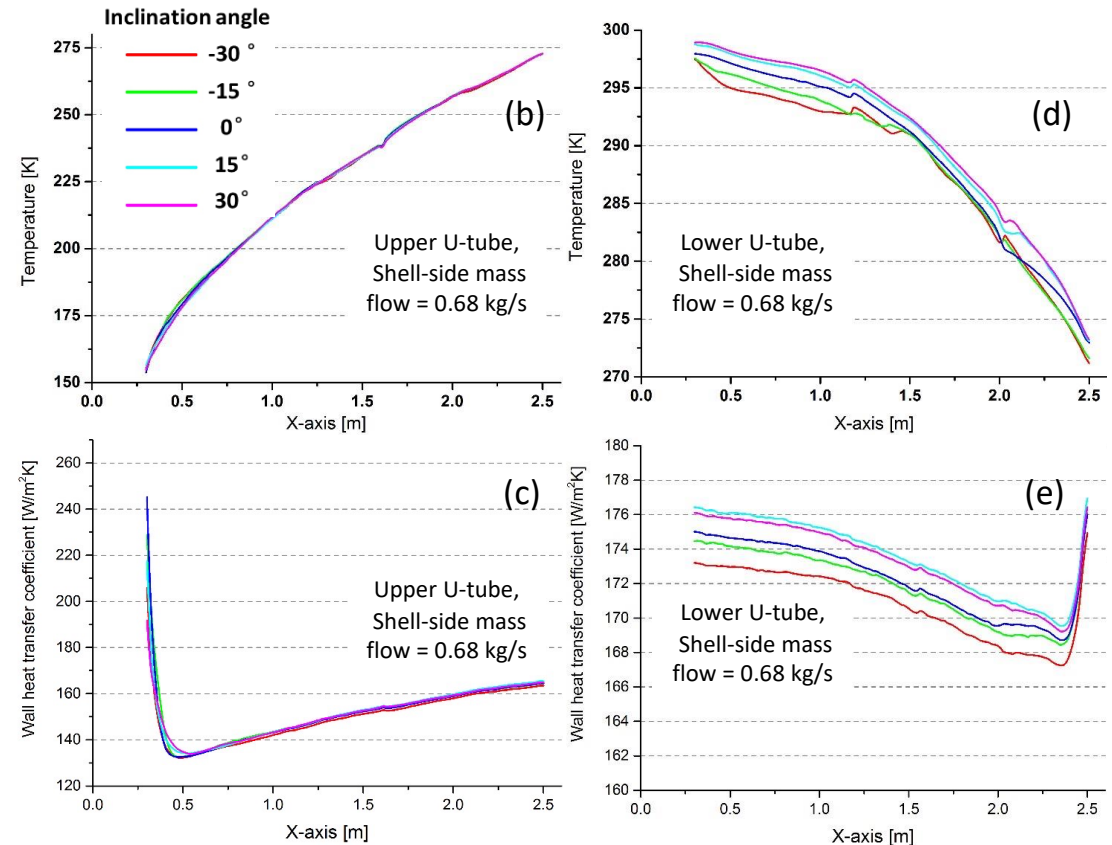
- **线值图**：在二维或三维空间上，将横坐标取为空间长度或时间历程，将纵坐标取为某一物理量，然后用光滑曲线或曲面在坐标系内绘制出某一物理量沿空间或时间的变化情况。
- **矢量图**：直接给出二维或三维空间里矢量（如速度）方向及大小，一般用不同颜色和长度的箭头表示速度矢量。矢量图可以比较容易地让用户发现其中存在的旋涡区。
- **等值线图**：用不同颜色的线条表示相等物理量(如温度)的一条线。
- **流线图**：用不同颜色线条表示质点运动轨迹。
- **云图**：使用渲染的方式，将流场某个截面上的物理量(如压力或温度)用连续变化的颜色块表示其分布。

10.3 数据可视化常用方法与工具

- **线值图**：在二维或三维空间上，将横坐标取为空间长度或时间历程，将纵坐标取为某一物理量，然后用光滑曲线或曲面在坐标系内绘制出某一物理量沿空间或时间的变化情况。



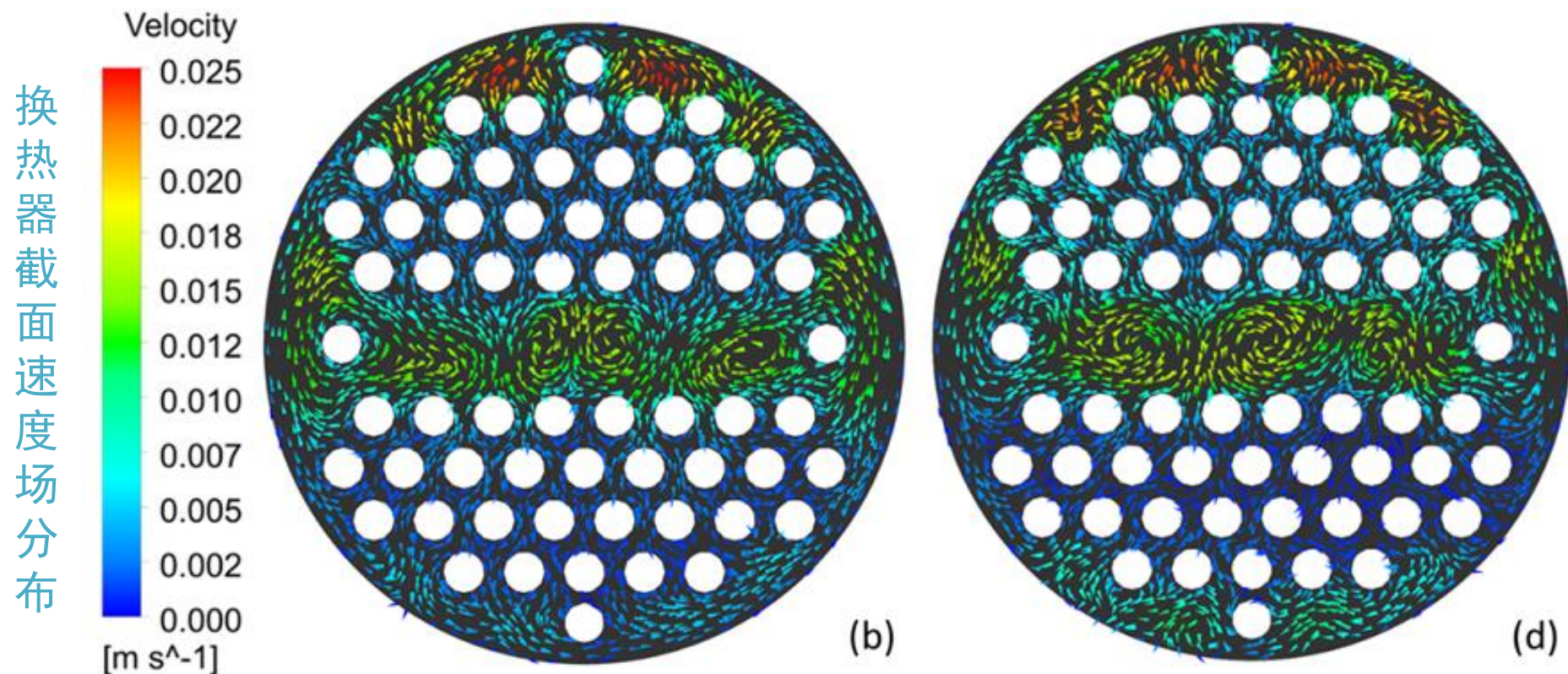
换热器截面温度分布



Yan Yan , Ni Z , Zhi X , et al. Numerical study on thermal performance of a BOG heat exchanger in the inclined condition[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34:616-626.

10.3 数据可视化常用方法与工具

- **矢量图**：直接给出二维或三维空间里矢量（如速度）方向及大小，一般用不同颜色和长度的箭头表示速度矢量。矢量图可以比较容易地让用户发现其中存在的旋涡区。

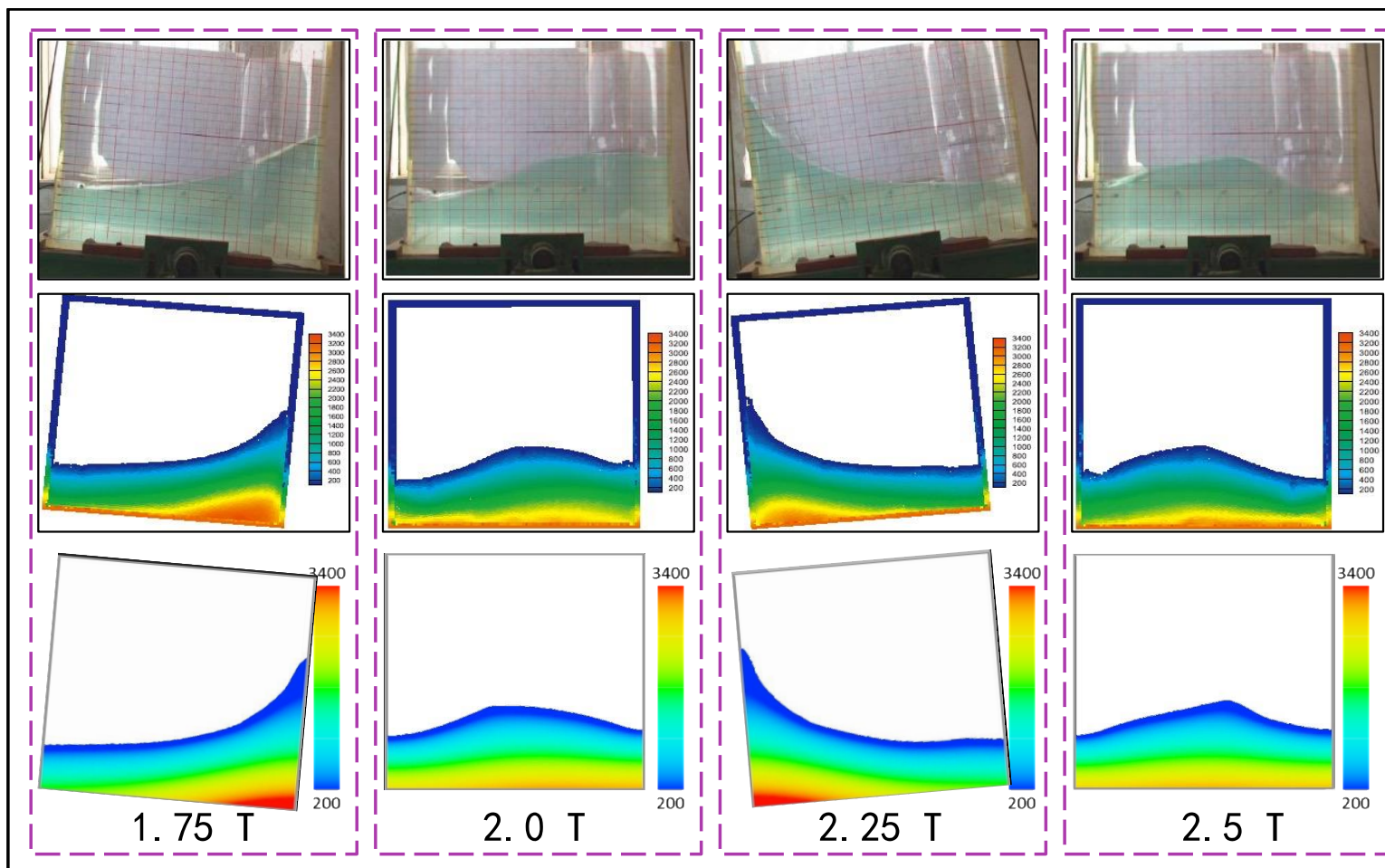


Yan Y , Pfotenhauer J M , Miller F , et al. Numerical study of heat transfer characteristics in BOG heat exchanger[J]. Cryogenics, 2016, 80:97-107.

10.3 数据可视化常用方法与工具

➤ **等值线图**：用不同颜色的线条表示相等物理量(如温度)的一条线。

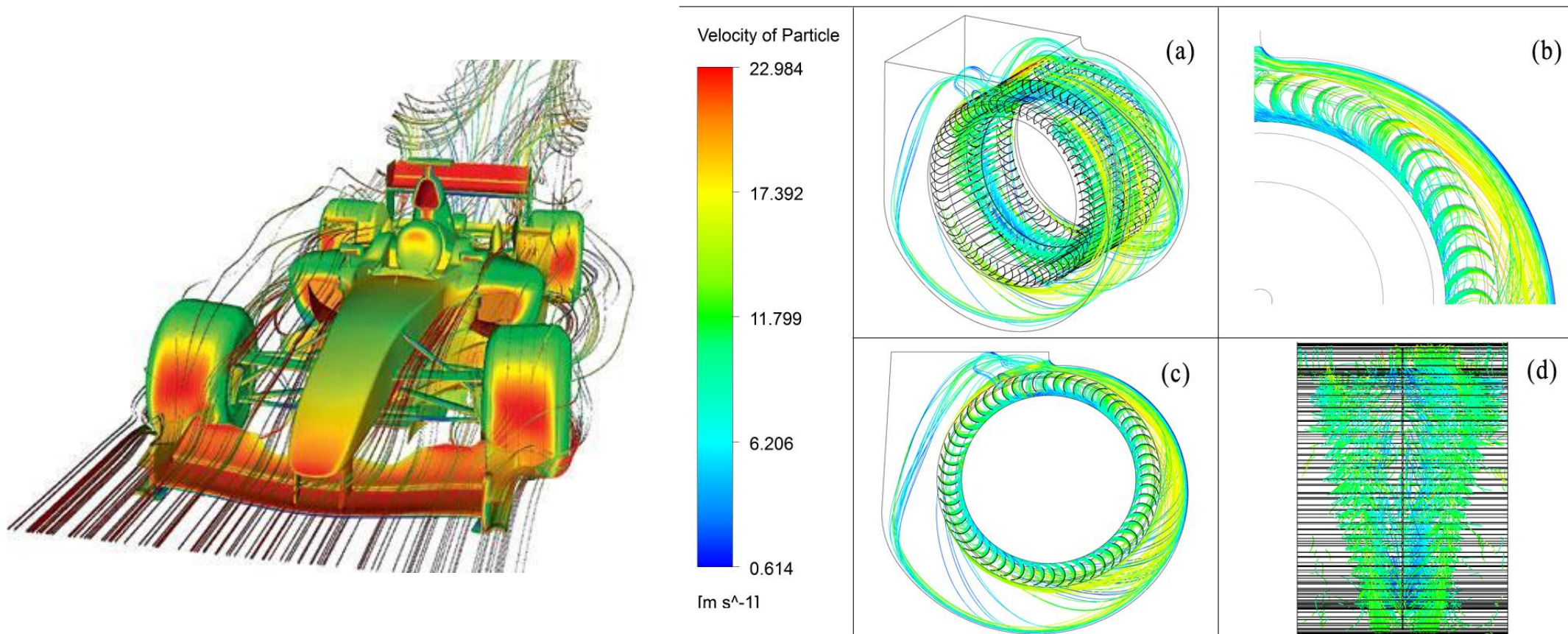
自由液面晃动过程



Yan Yan, J. Pfothenhauer, F. Miller, Z. Ni. Numerical study of free surface flow in a 3-dimensional FLNG tank under coupled rotational - heave excitations. Journal of Marine Science and Technology.

10.3 数据可视化常用方法与工具

➤ **流线图**：用不同颜色线条表示质点运动轨迹。

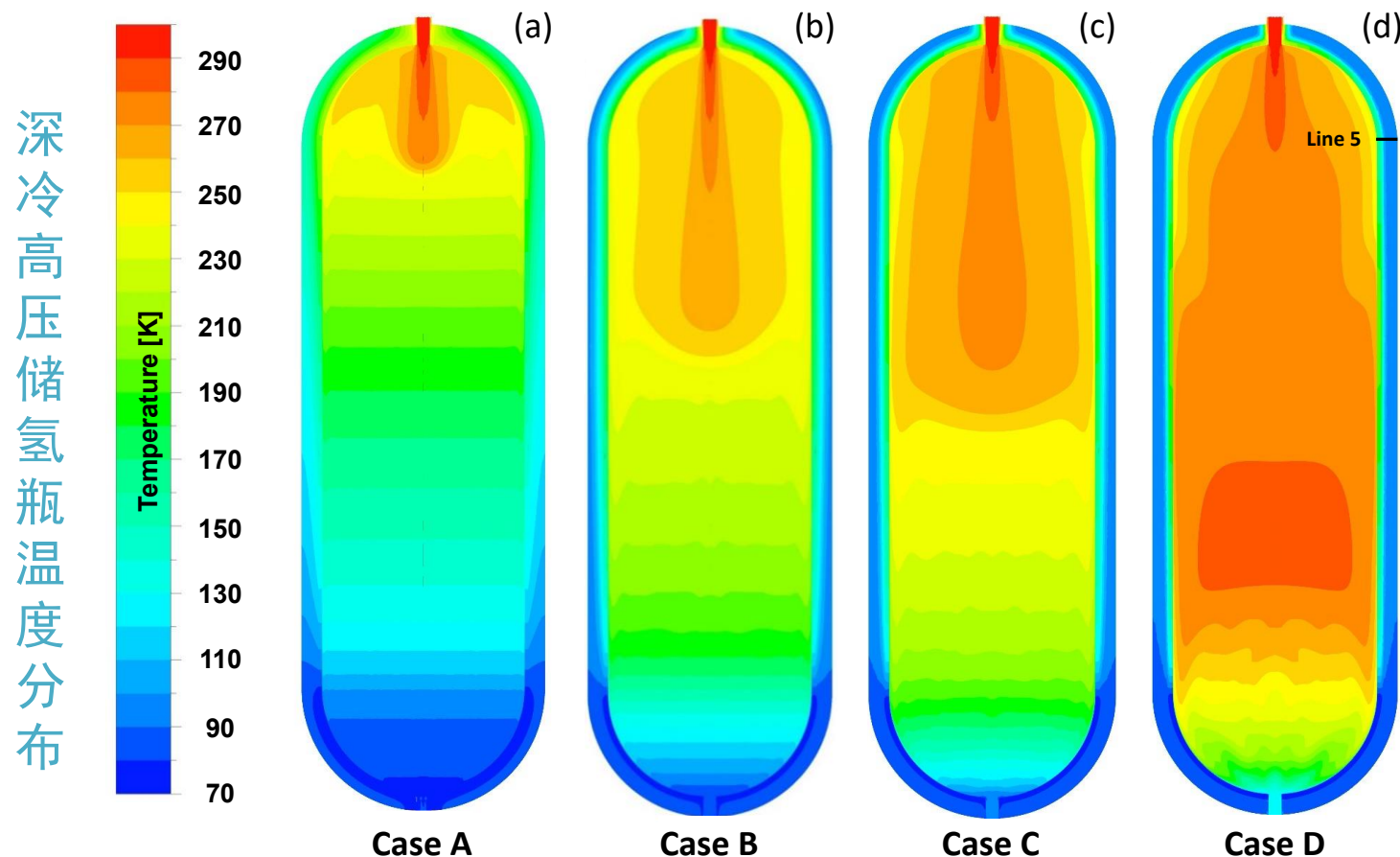


油滴在离心式风机内的轨迹

Yan Yan , Lin Y , Cheng J , et al. Motion behavior research of liquid micro-particles filtration at various locations in a rotational flow field[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2017, 62(2):163-170.

10.3 数据可视化常用方法与工具

- **云图：**使用渲染的方式，将流场某个截面上的物理量（如压力或温度）用连续变化的颜色块表示其分布。

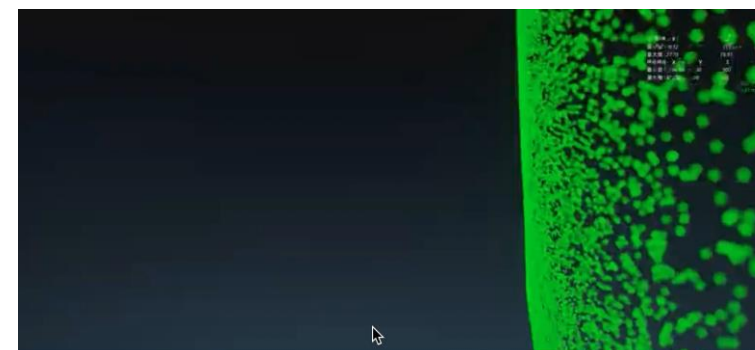
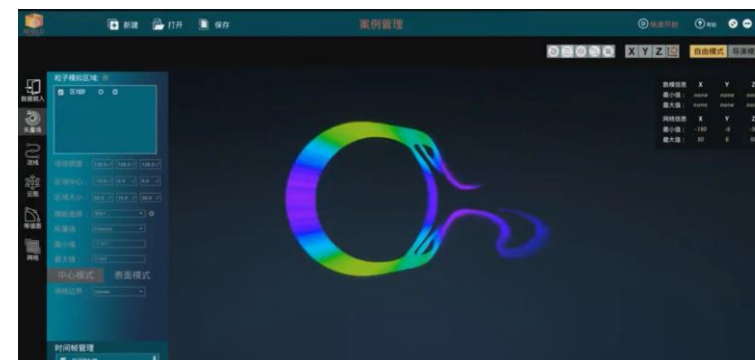
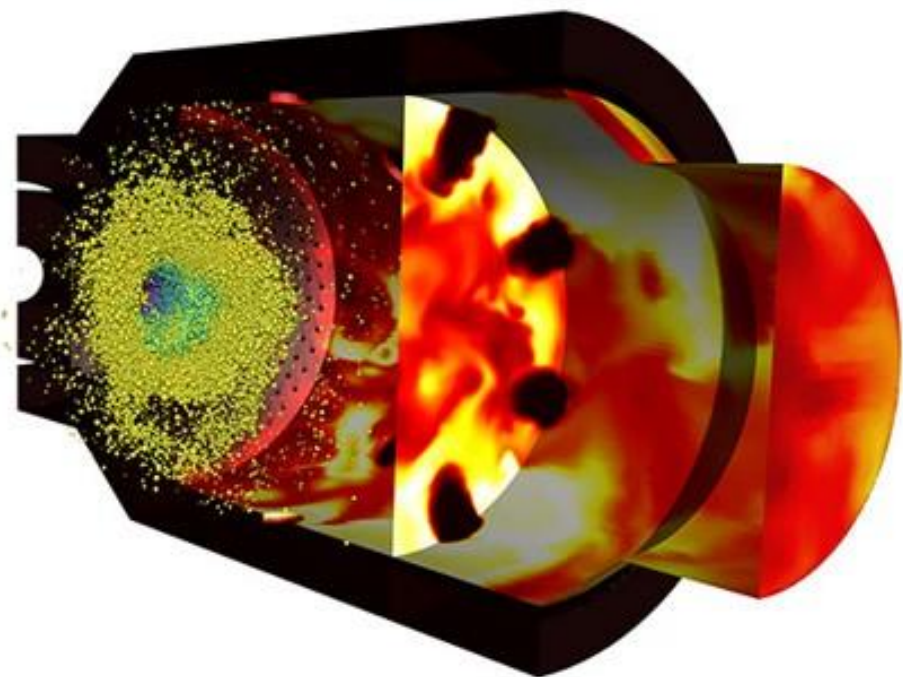


Yan Yan , Zhao X , Xu Z , et al. Loading procedure for testing the cryogenic performance of cryo-compressed vessel for fuel cell vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 183:115798.

10.3 数据可视化常用方法与工具

tecplot®

ROMTEK



总结与思考

- 计算流体力学的基本思想？有哪些方法？
- 计算流体力学基本步骤？
- 计算流体力学在实际工程应用中的意义？

Thanks!

感谢关注 敬请指导