

# 第 1 章

## 流体力学基础

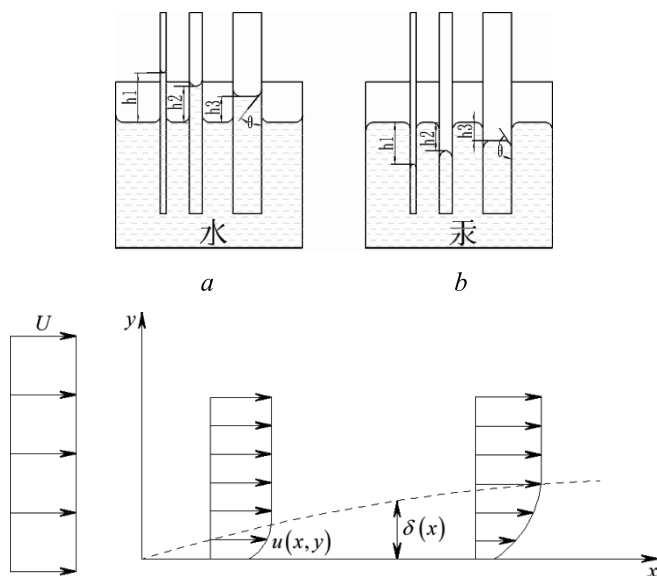
### 内容简介

流体力学是力学的一个重要分支，也是理论性很强的一门学科，涉及很多复杂的理论和公式。本章重点介绍流体力学和流体运动的基本概念，以及流体流动和边界层的基本理论。通过本章的学习，读者能够掌握流体流动和传热的基本控制方程，为后面的软件操作打下理论基础。

### 内容要点

- ✪ 流体力学的基本概念
- ✪ 流体运动的基本概念
- ✪ 边界层理论和物体阻力

### 案例效果



## 1.1 流体力学的基本概念

本节简要介绍流体的连续介质模型、基本概念、基本性质以及研究流体运动的方法。

### 1.1.1 连续介质模型

气体与液体都属于流体。从微观角度讲，无论是气体还是液体，分子间都存在间隙，同时由于分子的随机运动，导致流体的质量不仅在空间上分布不连续，而且在任意空间点上流体物理量相对时间也不连续。但是从宏观的角度考虑，流体的结构和运动又表现出明显的连续性与确定性，而流体力学研究的正是流体的宏观运动。在流体力学中，正是用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。1753年，欧拉首先采用“连续介质”作为宏观流体模型，将流体看作由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质，这个模型称为连续介质模型。

### 1.1.2 基本概念

#### 1. 流体密度

均匀流体的密度定义为：单位体积内所含流体物质质量的多少，公式为：

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1-1)$$


其中， $\rho$  为流体密度，单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $m$  为流体质量； $v$  表示质量为 $m$  的流体所占的体积。

对于非均质流体，流体中任一点的密度定义为：

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow \Delta v_0} \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad (1-2)$$

其中， $\Delta v$  是设想的一个最小体积，在 $\Delta v$  内包含足够多的分子，使得密度的统计平均值（ $\Delta m / \Delta v$ ）有确切的意义； $\Delta v_0$  是流体质点的体积，所以连续介质中某一点的流体密度实质上是流体质点的密度。同样，连续介质中某一点的流体速度，是指在某瞬时质心在该点的流体质点的质心速度。不仅如此，对于空间任意点的流体物理量都是指位于该点的流体质点的物理量。

---

 **注意** 流体的密度是流体本身固有的物理性质，会随着压强和温度的变化而改变。例如，在标准大气压（101235Pa）下，20℃时，空气的密度为 $1.24\text{kg}/\text{m}^3$ ；而在海拔较高的高原地区，由于压强的降低，空气密度也会降低。各流体的具体密度值可以通过查阅相关资料获得。

---

#### 2. 流体重度

流体的重度与流体的密度有一个简单的关系。

(1) 对于均匀流体有：

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

其中,  $g$  为重力加速度, 为一个常数, 其值为  $9.81\text{m/s}^2$ 。流体的重度单位为  $\text{N/m}^3$ 。

(2) 对于非均质流体有:

$$\gamma = \lim_{\Delta v \rightarrow \Delta v_0} \frac{\Delta g}{\Delta v} \quad (1-4)$$

### 3. 质量力

所谓质量力 (或称体积力), 是指作用在体积  $V$  内每一液体质量 (或体积) 上的非接触力, 其大小与流体质量成正比。重力、惯性力、电磁力都属于质量力。质量力是一个矢量, 一般用单位质量所具有的质量力表示, 公式为:

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \quad (1-5)$$

其中,  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  是单位质量力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的分力。

### 4. 表面力

所谓表面力, 是指作用在所取流体体积表面  $S$  上的力, 它是和与这块流体相接触的流体或物体的直接作用而产生的。表面力按其作用方向可以分为两种: 一种是沿表面内法线方向的压力, 称为正压力; 另一种是沿表面切向的摩擦力, 称为切应力。

在流体表面围绕  $M$  点选取一微元面积, 作用在其上的表面力用  $\Delta F_s$  表示, 将  $\Delta F_s$  分解为垂直于微元表面的法向力  $\Delta F_n$  和平行于微元表面的切向力  $\Delta F_t$ 。在静止流体或运动的理想流体中, 表面力只存在垂直于表面上的法向力  $\Delta F_n$ 。这时, 作用在  $M$  点周围单位面积上的法向力就定义为  $M$  点上的流体静压强, 即:

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow \Delta S_0} \frac{\Delta \overline{F}_n}{\Delta S} \quad (1-6)$$

其中,  $\Delta S_0$  是和流体质点的体积具有相比拟尺度的微小面积。

静压强又常称为静压, 流体静压强具有如下两个重要特性:

- (1) 流体静压强的方向总是和作用面相垂直, 并且指向作用面。
- (2) 在静止流体或运动理想流体中, 某一点静压强的大小与所取作用面的方位无关。

对于理想流体流动, 流体质点只受法向力, 没有切向力。对于黏性流体流动, 流体质点所受的作用力既有法向力, 也有切向力。单位面积上所受到的切向力称为切应力。对于一元流动, 切向力由牛顿内摩擦定律求得; 对于多元流动, 切向力由广义牛顿内摩擦定律求得。

### 5. 静压、动压和总压

静止状态下的流体, 只有静压; 而流动状态下的流体, 有静压、动压和总压。

在一条流线上, 流体质点的机械能是守恒的, 符合伯努利方程。对于不可压缩的理想流体, 其公式为:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1-7)$$

其中， $p/\rho g$  为压强水头，也叫压能项； $p$  为静压； $v^2/g$  为速度水头，也叫动能项； $z$  为位置水头，也叫重力势能项。这3项之和就是流体质点的总机械能。 $H$  为总水头高。

在式1-7中，若两边同时乘以  $\rho g$ ，则该公式变为：

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-8)$$

其中， $p$  为静压； $\frac{1}{2}\rho v^2$  为动压； $p + \frac{1}{2}\rho v^2$  为总压。

## 6. 绝对压强、相对压强和真空度

以绝对零压作为起点计算的压强称为绝对压强，其反映的是设备内压强的实际数值，用  $p_s$  表示。通常将760mm汞柱产生的压强称作标准大气压，其值为101325Pa，就是大气的绝对压强，用  $p_{atm}$  表示。如果压强大于标准大气压，则压强大于标准大气压的值称为相对压强，也叫作表压强，用  $p_r$  表示；如果压强小于标准大气压，则压强小于标准大气压的值称为真空度，用  $p_v$  表示。

绝对压强、相对压强和真空度三者的关系为：

$$\begin{aligned} p_r &= p_s - p_{atm} \\ p_v &= p_{atm} - p_s \end{aligned} \quad (1-9)$$

---

**注意** 在流体力学中，压强都用符号  $p$  表示。一般来说，对于液体来说，视液体为不可压缩，压强用相对压强；对于气体来说，由于气体的可压缩性，特别是马赫数大于0.1的流动，应视为可压缩流动，压强用绝对压强。

---

## 1.1.3 流体的基本性质

### 1. 流体的等温压缩性

当温度不变时，流体体积会随着作用于其上的压强的增大而减小，这一特性称为流体的等温压缩性，通常用压缩系数  $\beta$  来度量。它具体定义为：在温度不变时，质量为  $M$ 、体积为  $V$  的流体外部压强发生  $\Delta p$  的变化时，相应地，该流体的体积也会发生  $\Delta V$  的变化，具体公式为：

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-10)$$

式中，负号是考虑到  $\Delta p$  与  $\Delta V$  总是符号相反的缘故； $\beta$  的单位为1/Pa。

由于流体在压缩前后的质量  $M$  保持不变，因此上式还可以写成：

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-11)$$

在研究流体的流动过程中，若考虑到流体的压缩性，则称为可压缩流动，相应地称该流体为可压缩流体，例如相对速度较高的气体流动。若不考虑流体的压缩性，则称为不可压缩流动，相应地称该流体为不可压缩流体，如水、油等液体的流动。

## 2. 流体的等压膨胀性

在等压状态下，流体体积会随温度的升高而增大，这一特性称为流体的膨胀性，通常用膨胀系数 $\alpha$ 来度量。它具体定义为：在压强不变的情况下，质量为 $M$ 、体积为 $V$ 的流体温度发生 $\Delta T$ 的变化时，相应地，该流体的体积也会发生 $\Delta V$ 的变化，具体公式为：

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-12)$$

由于流体在压缩前后的质量 $M$ 保持不变，因此上式还可以写成：

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-13)$$

式中的负号是考虑到随着温度的增高，体积一定增大，密度一定减小的缘故； $\alpha$ 的单位为 $1/K$ 。

一般来说，液体的膨胀系数都很小，通常情况下，工程中不考虑液体的膨胀性。

## 3. 流体的黏性

在进行相对运动的两个流体层的接触面上，存在一对等值且反向的力阻碍两个相邻流体层的相对运动，流体的这种性质叫作流体的黏性，由黏性产生的作用力叫作黏性阻力或内摩擦力。黏性阻力产生的物理原因是存在分子不规则运动的动量交换和分子间的吸引力。根据牛顿内摩擦定律，两层流体间切应力的表达式为：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

其中， $\tau$ 为切应力； $\mu$ 为动力黏度，与流体种类和温度有关； $du/dy$ 为垂直于两层流体接触面上的速度梯度。我们把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。

---

**说明** 牛顿内摩擦定律适用于水、空气、石油等大多数机械工业中的常用流体。凡是符合切应力与速度梯度成正比的流体都叫作牛顿流体，即严格满足牛顿内摩擦定律且 $\mu$ 保持为常数的流体，否则称其为非牛顿流体。例如，淀粉悬浮液、糖浆、牙膏等流体均属于非牛顿流体。

---

非牛顿流体有以下3种不同的类型。

- 塑性流体：例如牙膏等，这种流体有一个保持不产生剪切变形的初始应力 $\tau_0$ ，只有克服了这个初始应力，其切应力才与速度梯度成正比，表达式为：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

- 假塑性流体：例如水泥等，这种流体的切应力和速度梯度的关系为：

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1-16)$$

- 胀塑性流体：例如乳化液等，该种流体的切应力和速度梯度的关系为：

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (n > 1) \quad (1-17)$$

黏度受温度的影响很大，当温度升高时，液体的黏度减小，黏性下降，而气体的黏度增大，黏性增加。在压强不是很高的情况下，黏度受压强的影响很小，只有当压强很高（例如几十兆帕）时，才需要考虑压强对黏度的影响。

当流体的黏性较小（如空气和水的黏性都很小），运动的相对速度也不大时，所产生的黏性应力比起其他类型的力（如惯性力）可忽略不计。此时，我们可以近似地把这种流体看作无黏性的，称为无黏流体，也叫作理想流体；而对于需要考虑黏性的流体，则称为黏性流体。

#### 4. 流体的导热性

当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时，温度高的地方与温度低的地方之间会发生热量传递。热量传递有热传导、热对流、热辐射3种形式。当流体在管内高速流动时，在紧贴壁面的位置会形成层流底层，液体在该处的流速很低，几乎可以认为是零，所以与壁面进行的热量传递形式主要是热传导，而层流以外的区域的热量传递形式主要是热对流。单位时间内，通过单位面积由热传导所传递的热量可按傅里叶导热定律确定：

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-18)$$

其中， $n$  为面积的法线方向； $\frac{\partial T}{\partial n}$  为沿  $n$  方向的温度梯度； $\lambda$  为热导率；负号“-”表示热量传递方向与温度梯度方向相反。

通常情况下，流体与固体壁面间的对流传热量可用下式表达：

$$q = h(T_1 - T_2) \quad (1-19)$$

其中， $h$  为表面传热系数，与流体的物性、流动状态等因素有关，主要是由实验数据得出的经验公式来确定的。

#### 5. 流体的表面张力特性

当液体表面出现自由表面时，液体表面层中的液体分子都受到指向液体内部的拉力，这是分子作用力的一种表现，称为表面张力，其方向和液面相切，并与两个分子之间的分界线相垂直。单位长度上的表面张力用  $\sigma$  表示，称作表面张力系数，单位为N/m。

液体与固体壁面接触时，当液体内聚力小于液体与壁面间的附着力，即液体与壁面浸润，此时液体沿垂直管壁上升，如图1-1(a)所示；当液体内聚力大于液体与壁面间的附着力，即液体与壁面不浸润，此时液体沿垂直管壁下降，如图1-1(b)所示，这一现象被称为毛细现象。

从图1-1中可以看出，水沿管壁上升，汞沿管壁下降，并且管壁直径不同，沿管壁上升或下降的高度也不同。上升的高度有一个公式，如下所示：

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r} \quad (1-20)$$

其中， $\sigma$  为表面张力系数； $\theta$  为接触角； $\rho$  为液体密度； $g$  为重力加速度； $r$  为细管半径。从式中可以看出，当 $\theta < 0$ 时，液面为凹面，液体在细管中上升，且细管半径越小，液面上升高度越大；当 $\theta > 0$ 时，液面为凸面，液体在细管中下降，且细管半径越小，液面下降高度越大。

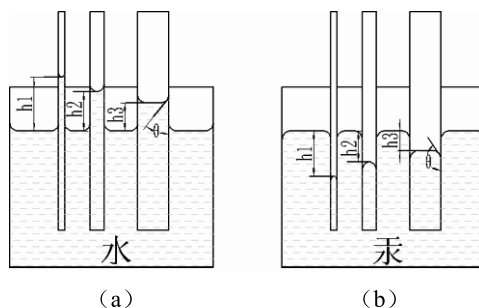


图1-1 毛细现象

### 1.1.4 流动分析方法

在研究流体运动时，有两种不同的方法：拉格朗日法和欧拉法。拉格朗日法是从分析流体各个质点的运动入手，来研究整个流体的运动。欧拉法是从分析流体所占据的空间中各固定点处的流体运动入手，来研究整个流体的运动。

在任意空间点上，流体质点的全部流动参数，例如速度、压强、密度等都不随时间的变化而改变，这种流动称为定常流动；若流体质点的全部或部分流动参数随时间的变化而改变，则称为非定常流动。

人们常用迹线或流线的概念来描述流场。迹线是任何一个流体质点在流场中的运动轨迹，它是某一流体质点在一段时间内所经过的路径，是同一流体质点不同时刻所在位置的连线；流线是某一瞬时各流体质点的运动方向线，在该曲线上各点的速度矢量相切于这条曲线。在定常流动中，流动与时间无关，流线不随时间的改变而改变，流体质点沿着流线运动，流线与迹线重合。对于非定常流动，迹线与流线是不同的。

## 1.2 流体运动的基本概念

### 1.2.1 层流流动与湍流流动

当流体在圆管中流动时，如果管中的流体是一层一层流动的，各层间互不干扰，互不相混，这样的流动状态称为层流流动，如图1-2所示。当流速逐渐增大时，流体质点除了沿管轴

向运动外，还有垂直于管轴向方向的横向流动，即层流流动已被打破，完全处于无规则的乱流状态，这种流动状态称为湍流或紊流，如图1-3所示。湍流是自然界常见的普通现象，而层流则是不常见的特殊情况。我们把流动状态发生变化（例如从层流到湍流）时的流速称为临界速度。



图 1-2 层流现象



图 1-3 湍流现象

大量试验数据与相似理论证实，流动状态不是取决于临界速度，而是由综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数来决定的。雷诺数  $Re$  定义为：

$$Re_{cr} = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1-21)$$

其中， $\rho$  为流体密度； $u$  为平均流速； $d$  为管道直径； $\mu$  为动力黏度。

由层流转变到湍流时，所对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用  $Re'_{cr}$  表示；由湍流转变到层流时，所对应的雷诺数称为下临界雷诺数，用  $Re_{cr}$  表示。通过比较实际流动的雷诺数  $Re$  与临界雷诺数，就可以确定黏性流体的流动状态。

当  $Re < Re_{cr}$  时，流动为层流状态。

当  $Re > Re'_{cr}$  时，流动为湍流状态。

当  $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$  时，可能为层流，也可能为湍流。

在工程应用中，取  $Re_{cr} = 2000$ 。当  $Re < 2000$  时，流动为层流流动；当  $Re > 2000$  时，可认为流动为湍流流动。

实际上，雷诺数反映了惯性力与黏性力之比。雷诺数越小，表明流体黏性力对流体的作用较大，能够削弱引起湍流流动的扰动，保持层流状态；雷诺数越大，表明惯性力对流体的作用更明显，易使流体质点发生湍流流动。

## 1.2.2 有旋流动与无旋流动

有旋流动是指流场中各处的旋度（流体微团的旋转角速度）不等于零的流动。无旋流动是指流场中各处的旋度都为零的流动。流体质点的旋度是一个矢量，用  $\omega$  表示，其表达式为：

$$\omega = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1-22)$$

若 $\omega=0$ ，则流动为无旋流动，否则为有旋流动。

流体运动是有旋流动还是无旋流动，取决于流体微团是否有旋转运动，与流体微团的运动轨迹无关。在流体流动中，如果考虑黏性，由于存在摩擦力，这时流动为有旋流动；如果黏性可以忽略，而流体本身又是无旋流动，如均匀流，这时流动为无旋流动。例如，均匀气流流过平板，在紧靠壁面的附面层内，需要考虑黏性影响，因此附面层内为有旋流动，附面层外的流动，黏性可以忽略，为无旋流动。

### 1.2.3 声速与马赫数

声速是指微弱扰动波在流体介质中的传播速度，它是流体可压缩性的标志，对于确定可压缩流的特性和规律起着重要作用。声速表达式的微分形式为：

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-23)$$

声速在气体中传播时，由于在微弱扰动的传播过程中，气流的压强、密度和温度的变化都是无限小量，若忽略黏性作用，整个过程接近可逆过程，同时该过程进行得很迅速，又接近一个绝热过程，因此微弱扰动的传播可以认为是一个等熵的过程。对于完全气体，声速又可表示为：

$$c = \sqrt{kRT} \quad (1-24)$$

其中， $k$  为比热比； $R$  为气体常数。

以上公式只能用来计算微弱扰动的传播速度。对于强扰动，如激波、爆炸波等，其传播速度比声速大，并随波的强度增大而加快。

流场中某点处气体流速  $V$  与当地声速  $c$  之比为该点处气流的马赫数，用公式表示如下：

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1-25)$$

马赫数表示气体宏观运动的动能与气体内部分子无规则运动的动能（即内能）之比。当  $Ma \leq 0.3$  时，密度的变化可以忽略；当  $Ma > 0.3$  时，就必须考虑气流压缩性的影响。因此，马赫数是研究高速流动的重要参数，是划分高速流动类型的标准。当  $Ma > 1$  时，为超声速流动；当  $Ma < 1$  时，为亚声速流动；当  $Ma = 0.8 \sim 1.2$  时，为跨声速流动。超声速流动与亚声速流动的规律有本质的区别，跨声速流动兼有超声速与亚声速流动的某些特点，是更复杂的流动。

### 1.2.4 膨胀波与激波

膨胀波与激波是超声速气流特有的重要现象，超声速气流在加速时要产生膨胀波，减速时会出现激波。

当超声速气流流经由微小外折角引起的马赫波时，气流加速，压强和密度下降，这种马赫波就是膨胀波。超声速气流沿外凸壁流动的基本微分方程如下：

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\theta}{\sqrt{Ma^2 - 1}} \quad (1-26)$$

当超声速气流绕物体流动时，在流场中往往会出现强压缩波，即激波。气流经过激波后，其压强、温度和密度均突然升高，速度则突然下降。超声速气流被压缩时一般都会产生激波，按照激波的形状，可分为以下3类：

- 正激波：气流方向与波面垂直。
- 斜激波：气流方向与波面不垂直。例如，当超声速气流流过楔形物体时，在物体前缘往往产生斜激波。
- 曲线激波：波形为曲线形。

设激波前的气流速度、压强、温度、密度和马赫数分别为  $v_1$ 、 $p_1$ 、 $T_1$ 、 $\rho_1$ 、 $Ma_1$ ，经过激波后变为  $v_2$ 、 $p_2$ 、 $T_2$ 、 $\rho_2$  和  $Ma_2$ ，则激波前后气流应满足以下方程。

连续性方程：

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (1-27)$$

动量方程：

$$p_1 - p_2 = \rho_1 v_1^2 = \rho_2 v_2^2 \quad (1-28)$$

能量方程（绝热）：

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \times \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \times \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-29)$$

状态方程：

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-30)$$

据此，可得出激波前后参数的关系：

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{2k}{k+1} Ma^2 - \frac{k-1}{k+1} \quad (1-31)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{k-1}{k+1} + \frac{2}{(k+1)Ma^2} \quad (1-32)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\frac{k+1}{k-1} Ma^2}{\frac{2}{k-1} + Ma^2} \quad (1-33)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{2kMa_1^2 - k + 1}{k + 1} \right) \left( \frac{2 + (k-1)Ma_1^2}{(k+1)Ma_1^2} \right) \quad (1-34)$$

$$\left(\frac{Ma_2^2}{Ma_1^2}\right) = \frac{Ma_1^{-2} + \frac{k-1}{2}}{Ma_1^2 - \frac{k-1}{2}} \quad (1-35)$$

## 1.3 边界层理论和物体阻力

### 1.3.1 边界层概念及特征

当黏性较小的流体绕流物体时，黏性的影响仅限于贴近物面的薄层内，在该薄层之外，黏性的影响可以忽略。而在这个薄层内，形成一个从固体壁面速度为零到外流速度的速度梯度区，普朗特把这一薄层称为边界层。

边界层厚度  $\delta$  的定义：如果以  $V_0$  表示外部无粘流速度，则通常把各个截面上速度达到  $V_x = 0.99V$  或  $V_x = 0.995V_0$  值的所有点的连线定义为边界层外边界，而从外边界到物面的垂直距离定义为边界层厚度。

### 1.3.2 边界层微分方程

普朗特根据在大雷诺数下边界层非常薄的前提，对黏性流体的运动方程做了简化，得到了普朗特边界层微分方程，它是处理边界层流动的基本方程。根据附面层概念对黏性流动的基本方程的每一项进行数量级的估计，忽略掉数量级较小的量，这样在保证一定精度的情况下使方程得到简化，得出适用于附面层的基本方程。边界层示意图如图1-4所示。

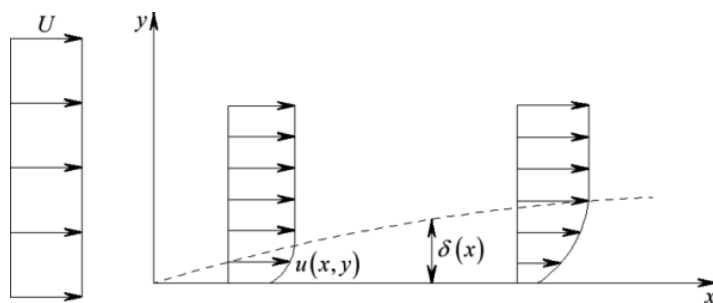


图1-4 边界层示意图

#### 1. 层流边界层方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} &= 0 \\ V_x \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (1-36)$$

上式是平壁面二维附面层方程，适用于平板及楔形物体。

求解的边界条件如下：

在物面上  $y=0$  处，满足无滑移条件， $V_x=0$ ， $V_y=0$ 。

在边界层外边界  $y=\delta$  处， $V_x=V_0(x)$ 。 $V_0(x)$  是附面层外部边界上无黏流的速度，它在无黏流场求解中获得，在计算附面层流动时，为已知参数。

## 2. 湍流附面层方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} &= 0 \\ \bar{V}_x \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + \bar{V}_y \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 \bar{V}_x}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{V'_x V'_y} \end{aligned} \quad (1-37)$$

对于附面层方程，在  $Re$  很高时才有足够的精度，在  $Re$  不比 1 大许多的情况下，附面层方程是不适用的。

### 1.3.3 物体阻力

阻力是由流体绕物体流动所引起的切向应力和压力差造成的，故阻力可分为摩擦阻力和压差阻力两种。

- 摩擦阻力是指作用在物体表面的切向应力在来流方向上的投影的总和，是黏性直接作用的结果。
- 压差阻力又称形状阻力，是因为压差阻力的大小与物体的形状有很大关系。压差阻力是指作用在物体表面的压力在来流方向上的投影的总和，是黏性间接作用的结果，是由于边界层的分离在物体尾部区域产生尾涡而形成的。

摩擦阻力与压差阻力之和称为物体阻力。

物体的阻力系数由下式确定：

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (1-38)$$

其中， $A$  为物体在垂直于运动方向或来流方向的截面积。例如，对于直径为  $d$  的小圆球的低速运动来说，阻力系数为：

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (1-39)$$

其中， $Re = \frac{V_\infty d}{\nu}$ ，在  $Re < 1$  时，计算值与实验值吻合得较好。

# 第 2 章

## Fluent 软件简介及操作使用

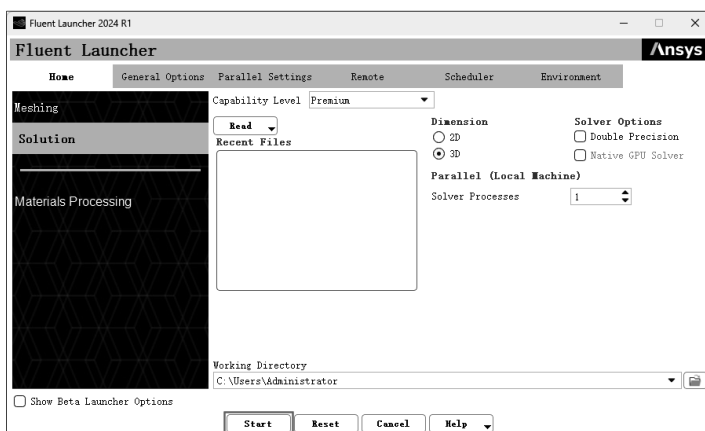
### 内容简介

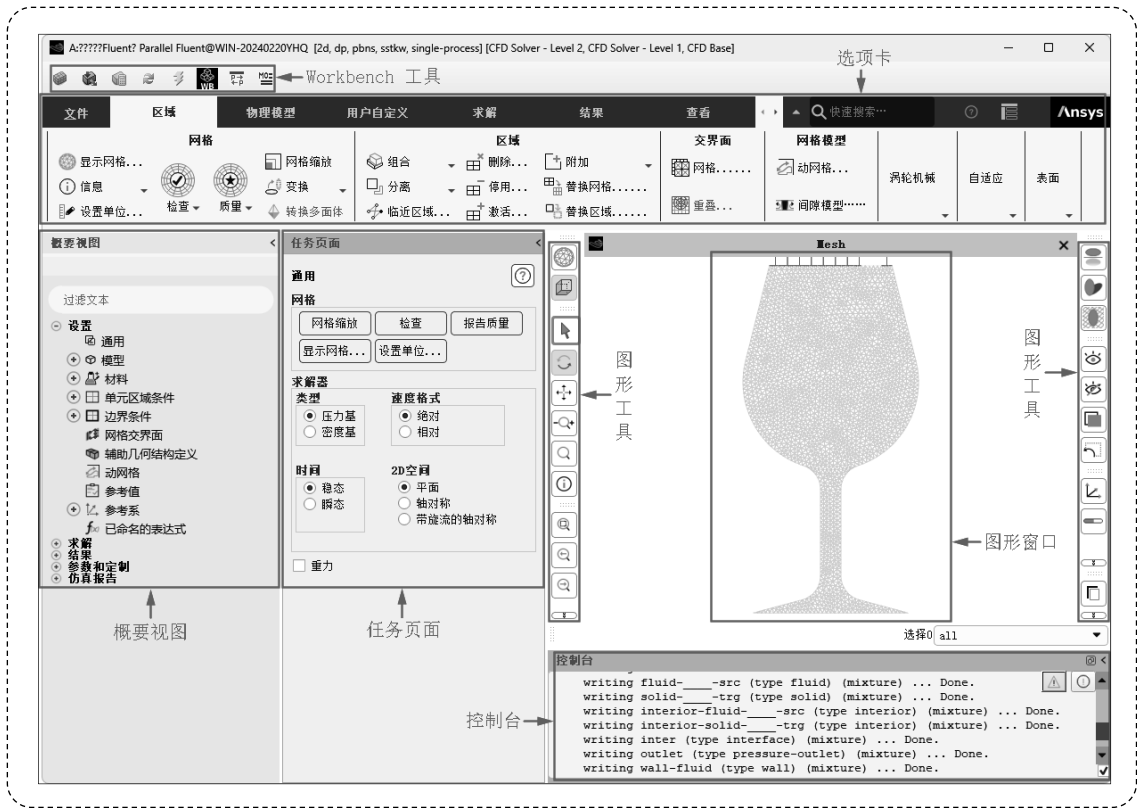
本章主要介绍Fluent软件的基本操作。Fluent软件的法主要分为网格的导入与检查、求解器与计算模型的选择、边界条件的设置、求解计算等几大环节。通过本章的学习，可为读者使用Fluent软件解决问题奠定基础。

### 内容要点

- ✦ Fluent的软件结构
- ✦ Fluent的启动
- ✦ Fluent 2024 R1的用户界面
- ✦ Fluent的求解器类型
- ✦ Fluent的功能特点和应用
- ✦ Fluent的边界条件
- ✦ Fluent的应用

### 案例效果





## 2.1 Fluent 的软件结构

Fluent 2024 R1 的软件结构主要包括：前处理器、求解器和后处理器3个部分。

### 2.1.1 前处理器

前处理器主要用来建立要进行流体动力学分析的几何模型并对模型进行网格划分。在 Fluent 软件被整合到 ANSYS 软件包之后，可以通过 ANSYS 软件包中的 DesignModeler 或 SpaceClaim 软件来建立几何模型，然后通过 Meshing 软件或 ICFM CFD 软件来进行网格划分。

### 2.1.2 求解器

求解器是 Fluent 软件模拟计算的核心程序。在读入划分好网格的模型文件后，剩下的操作就是利用求解器进行计算了，包括材料的设定、边界条件的设置、求解的方法和控制在以及网格的优化等。

### 2.1.3 后处理器

求解完成后，就可以进行后处理操作了，包括求解过程的查看、云图的生成、动画的模拟等，这些可以在ANSYS软件包中的CFD-Post进行操作，也可以在Fluent自带的后处理器进行操作。

在ANSYS公司开发出Workbench后，所有的Fluent软件都被集成在ANSYS Workbench环境下，可以对Fluent分析的前处理、求解和后处理的数据进行传递和分享，集设计、网格划分、仿真、求解、优化功能于一体，对各种数据进行项目协同管理。

## 2.2 Fluent 的启动

Fluent的启动包括直接启动和通过Workbench中的“流体流动 (Fluent)”项目模块来启动。

### 2.2.1 直接启动

选择“开始”→“所有应用”→ANSYS 2024 R1→Fluent 2024 R1命令，如图2-1所示。打开Fluent Launcher 2024 R1启动器，如图2-2所示，在启动器中可以设置分析的是二维问题(2D)或三维问题(3D)，设置计算精度(单精度或双精度)等参数，然后单击启动器中的Start按钮，启动Fluent。

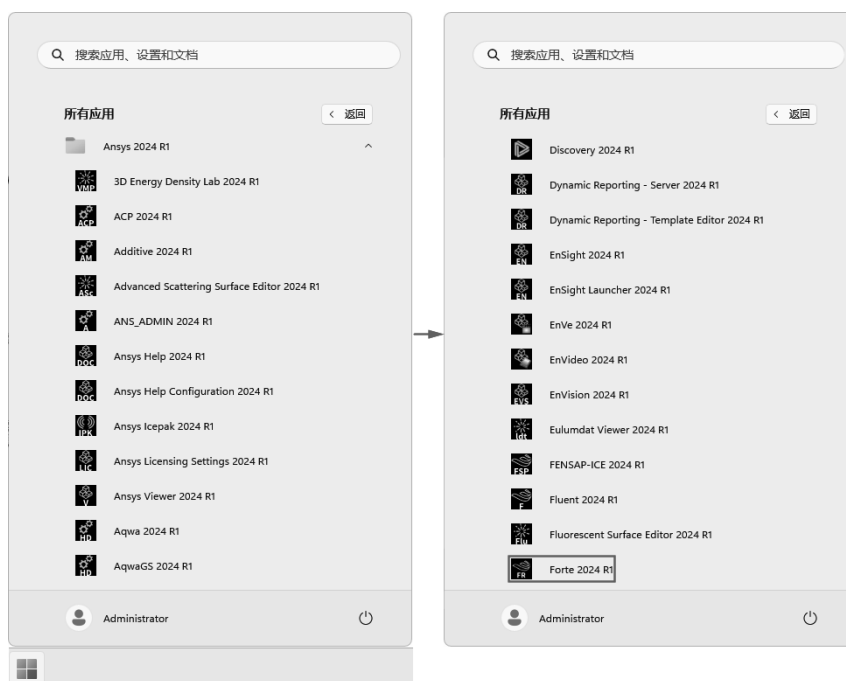


图2-1 在开始菜单启动Fluent



图2-2 Fluent Launcher 2024 R1启动器

## 2.2.2 在Workbench中启动

**步骤 01** 选择“开始”→ANSYS 2024 R1→Workbench 2024 R1命令，打开Workbench主界面，如图2-3所示。

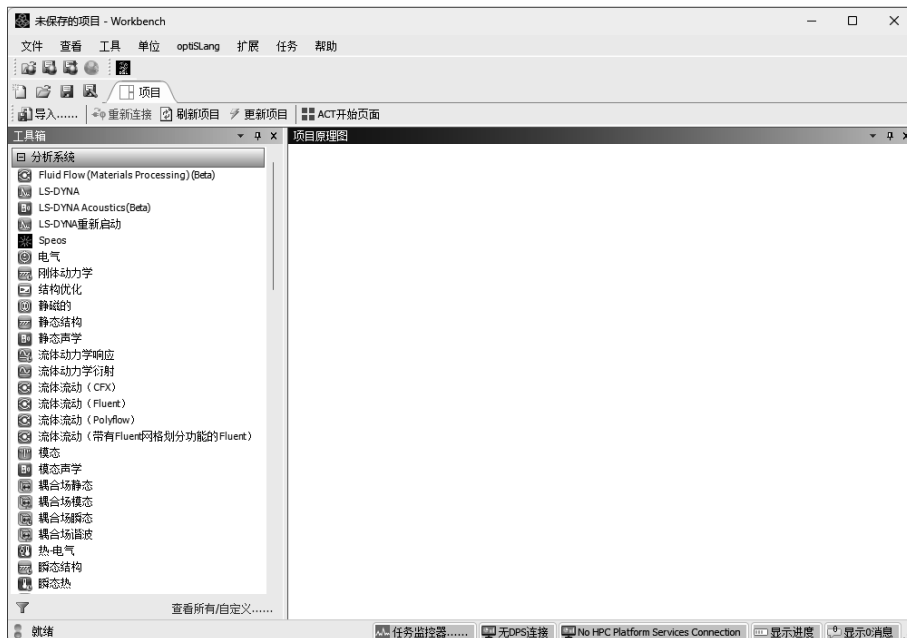


图2-3 Workbench主界面

**步骤 02** 展开左边工具箱中的“分析系统”栏，将工具箱中的“流体流动（Fluent）”选项直接拖曳到“项目原理图”界面中或直接双击“流体流动（Fluent）”选项，建立一个含有“流体流动（Fluent）”的项目模块，如图2-4所示。

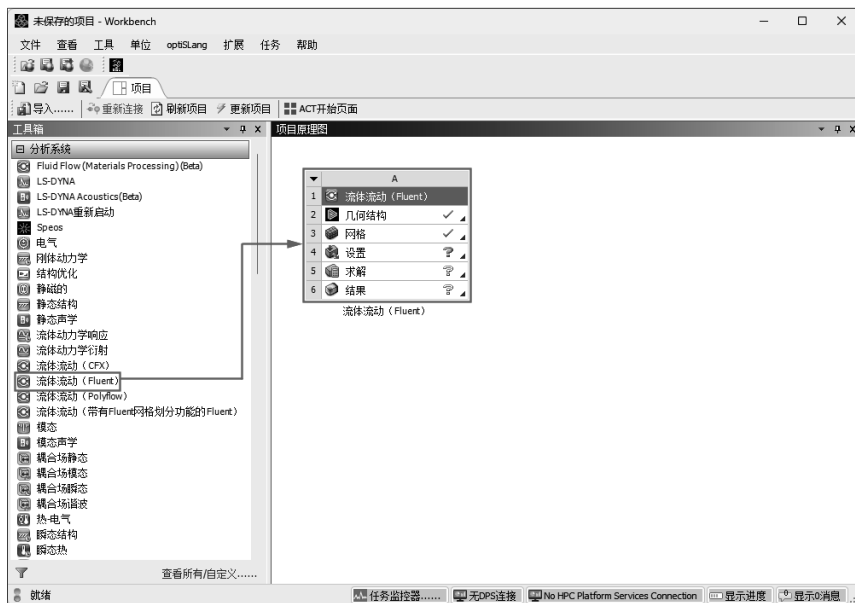


图2-4 创建“流体流动 (Fluent)”项目

**步骤 03** 右击“流体流动 (Fluent)”项目模块中的“几何结构”栏，在弹出的快捷菜单中选择“新的Discovery几何结构……”命令、“新的SpaceClaim几何结构……”命令或“新的DesignModeler几何结构……”命令，创建几何模型；也可选择“导入几何模型”命令，如图2-5所示，导入几何模型。

**步骤 04** 导入模型后，右击“流体流动 (Fluent)”项目模块中的“网格”栏，在弹出的快捷菜单中选择“编辑……”命令，启动Meshing程序，划分网格。若**步骤 03**未创建或导入模型，则可选择“导入网格文件……”，导入已经划分好的网格文件，这样就可以跳过建模步骤，如图2-6所示。



图2-5 创建或导入几何模型



图2-6 划分网格或导入网格模型

**步骤 05** 划分好网格或导入网格文件后，右击“流体流动（Fluent）”项目模块中的“设置”栏，在弹出的快捷菜单中选择“编辑……”命令，如图2-7所示。打开Fluent Launcher 2024 R1（Setting Edit Only）启动器，如图2-8所示。在启动器中根据前面创建或导入的几何模型自动选择二维（2D）或三维（3D）分析，在设置计算精度（单精度或者双精度）等参数后，单击启动器中的Start按钮 **Start**，启动Fluent。



图2-7 Workbench启动Fluent

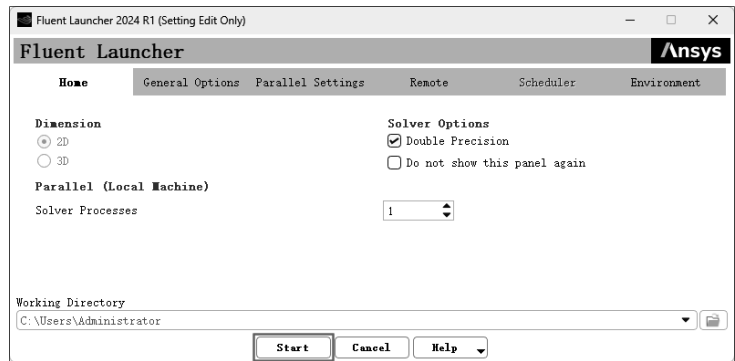


图2-8 Fluent Launcher 2024 R1（Setting Edit Only）启动器

## 2.3 Fluent 2024 R1 的用户界面

Fluent用户界面用于定义并求解问题，包括导入网格、设置求解条件以及进行求解计算等。

Fluent可以导入的网格类型较多，包括ANSYS Meshing生成的网格、CFX网格工具生成的网格、CFX后处理中包含的网格、ICEM CFD生成的网格、Gambit生成的网格等。

Fluent中内置了大量的材料数据库，包括各种常用的流体、固体材料，如水、空气、铜、铁、铝等。用户可以直接使用这些材料定义求解问题，也可以在这些材料的基础上进行修改或创建新材料。

Fluent中可以设置的求解条件很多，包括定常/非定常问题、求解域、边界条件、求解方法、控制方案以及结果后处理等。

Fluent界面如图2-9所示，大致分为Workbench工具、选项卡、概要视图、任务面板、图形工具、图形窗口、控制台7个区域。

- **Workbench工具**：当改变模型或网格后，该工具可以刷新或更新模型及网格。
- **选项卡**：包括文件、域、物理模型、用户自定义、求解、结果、查看、并行、设计等几大选项卡，与其他常规软件一样，每个选项卡又包括自己的工具面板，包含软件的全部功能。
- **概要视图**：进行Fluent计算分析的工作流程，包括通用设置、模型设置、材料设置、单元区域条件、边界条件、求解、结果、参数和定制及仿真报告等。
- **任务页面**：在选项卡或概要视图的某一功能被选中后，设置面板将切换到选中的功能进行详细设置。

- 图形工具：图形工具分布在图形窗口的两侧，是进行图形设置的工具条，包括网格的显示、正面透明、框选、旋转、平移、图形反射、图形投影、地面效果、隐藏选中的面、透明选中的面以及显示所有面等工具。
- 图形窗口：用来显示网格、残差曲线、动画以及各种后处理显示的图像。
- 控制台：显示各种信息提示，包括版本信息、网格信息以及错误提示信息等。

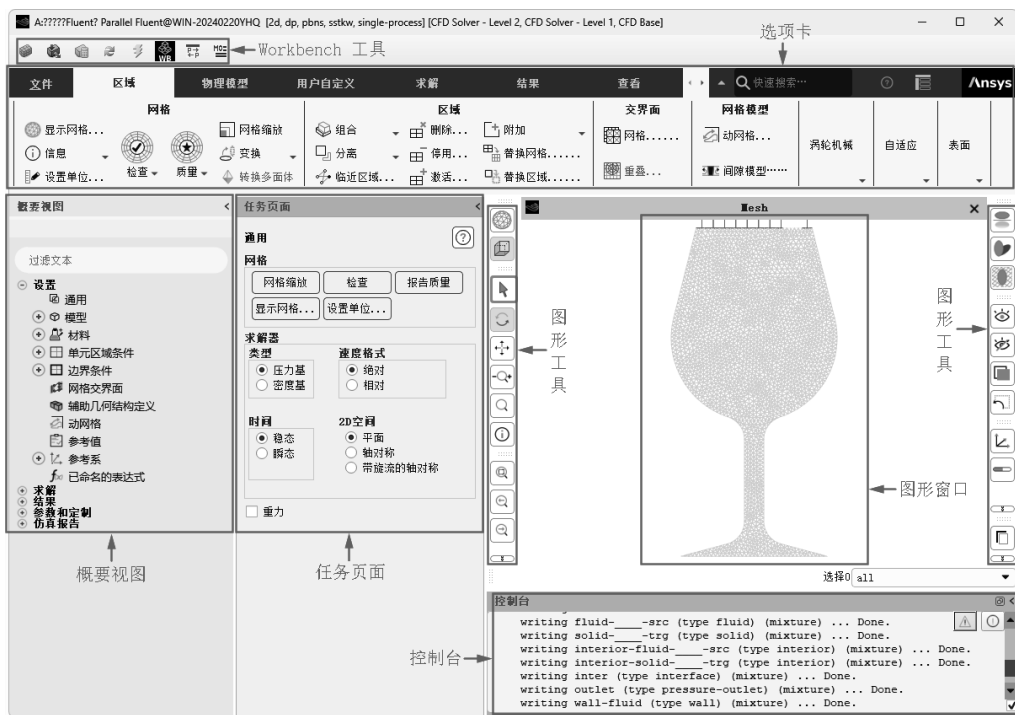


图2-9 Fluent界面

## 2.4 Fluent 的求解器类型

在Fluent软件中有两种求解器类型，分别是压力基求解器和密度基求解器，如图2-10所示。

Fluent软件的压力基求解器和密度基求解器完全在同一界面下，确保Fluent对于不同的问题都可以得到很好的收敛性、稳定性和精度。

### 2.4.1 压力基求解器

压力基求解器采用的计算法则属于常规意义上的投影方法。在投影方法中，首先通过动量方程求解速度场，继而通过压力方程的修正使得速度场满足连续性条件。

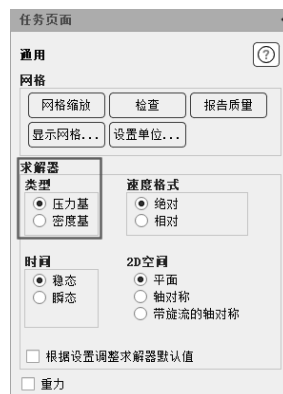


图2-10 Fluent求解器类型

压力方程来源于连续性方程和动量方程，可以保证整个流场的模拟结果同时满足质量守恒和动量守恒。由于控制方程（动量方程和压力方程）的非线性和相互耦合作用，因此需要一个迭代过程使得控制方程重复求解直至结果收敛，用这种方法求解压力方程和动量方程。

在Fluent软件中包含两个压力基求解器：一个是压力基分离求解器，另一个是压力基耦合求解器。

### 1. 压力基分离求解器

该求解器顺序求解每个变量的控制方程，此算法内存效率非常高（离散方程只在一个时刻需要占用内存），收敛速度相对较慢，因为方程以“解耦”方式求解，对燃烧、多相流问题更加有效。

### 2. 压力基耦合求解器

该求解器以耦合方式求解动量方程和基于压力的连续性方程，它的内存使用量大约是分离算法的1.5到2倍。由于以耦合方式求解，使得它的收敛速度具有5~10倍的提高。同时，还具有传统压力算法物理模型丰富的优点，可以和所有动网格、多相流、燃烧和化学反应模型兼容，同时收敛速度远远高于基于密度的求解器。

## 2.4.2 密度基求解器

密度基求解器是同时求解连续方程、动量方程、能量方程及组份输运方程的耦合方程组，然后逐一求解湍流标量方程。由于控制方程是非线性的，并且相互之间是耦合的，因此在得到收敛解之前，要经过多轮迭代，步骤说明如下：

- (1) 根据当前解的结果，更新所有流动变量。如果计算刚刚开始，则用初始值来更新。
- (2) 同时求解连续方程、动量方程、能量方程及组份输运方程的耦合方程组（后两个方程视需要进行求解）。
- (3) 根据需要，逐一求解湍流、辐射等标量方程。注意在求解之前，方程中用到的有关变量要用到前面得到的结果更新。
- (4) 对于包含离散相的模拟，当内部存在相间耦合时，根据离散相的轨迹计算结果更新连续相的源项。
- (5) 检查方程组是否收敛，若不收敛，则回到第（1）步，重新计算。

## 2.5 Fluent 的功能特点和应用

Fluent的功能特点包括多种数值算法和先进的物理模型，本节讲解它的功能特点及其应用。

### 2.5.1 数值算法

Fluent软件采用有限体积法，提供了3种数值算法，具体如下。

### 1. 非耦合隐式算法

该算法适用于不可压缩流动和中等可压缩流动，不对Navier-Stoke方程联立求解，而是对动量方程进行压力修正。该算法是一种很成熟的算法，在应用上经过了很广泛的验证。这种方法拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合，适用于低速流动的CFD模拟。

### 2. 耦合显示算法

这种算法由Fluent公司与NASA联合开发，与SIMPLE算法不同，是对整个Navier-Stoke方程组进行联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，时间离散采用多步Runge-Kutta格式，并采用了多重网格加速收敛技术。对于稳态计算，还采用了当地时间步长和隐式残差光滑技术。该算法稳定性好，内存占用小，应用极为广泛。



### 3. 耦合隐式算法

该算法也对Navier-Stoke方程组进行联立求解，由于采用隐式格式，因此计算精度和收敛性较耦合显示算法要好，但占用内存较多。该算法还有一个优点就是可以对从低速流动到高速流动的全速范围进行求解。

## 2.5.2 物理模型

Fluent软件含有丰富的物理模型，有黏性模型、多相流模型、辐射模型、分组模型、离散相模型以及凝固和融化模型，具体如下。

### 1. 黏性模型

Fluent提供了11种黏性模型：无粘模型、层流模型、Spalart-Allmaras (1 eqn) 模型、k-epsilon (2 eqn) 模型、k-omega (2 eqn) 模型、转捩k-kl-omega (3 eqn) 模型、转捩SST (4 eqn) 模型、雷诺应力 (RSM-7 eqn) 模型、尺度自适应模型 (SAS)、分离涡模拟 (DES) 模型和大涡模拟 (LES) 模型。其中，大涡模拟 (LES) 模型只对三维问题有效。在“概要视图”中的“模型”列表中双击“黏性”按钮，也可在“物理模型”选项卡的“模型”面板中单击“黏性”按钮，弹出“黏性模型”对话框，如图2-11所示。默认状态下，“黏性模型”对话框中的“无粘”单选按钮处于选中状态。

- 无粘模型：进行无粘流计算。
- 层流模型：层流模拟。
- Spalart-Allmaras (1 eqn) 模型：用于求解动力涡粘输运方程。该模型是专门为涉及壁面边界流动的航空航天应用领域而设计的，并已被证明对受到逆压力梯度作用的边界层具有良好的效果。该模型在旋转机械领域的应用也越来越普遍。
- k-epsilon (2 eqn) 模型：该模型又分为Standard模型、RNG模型和Realizable模型3种。
  - ◆ Standard模型忽略分子间的黏性，只适用于完全湍流。



图2-11 “黏性模型”对话框

- ◆ RNG模型考虑了湍流漩涡，其湍流Prandtl数采用解析公式（而非常数），并且考虑了低雷诺数下的黏性效应等，故而对于瞬变流和流线弯曲有更好的表现。
- ◆ Realizable模型提供旋流修正，对旋转流动、流动分离有很好的表现。
- k-omega (2 eqn) 模型：使用该模型进行湍流计算，它分为Standard模型、GEKO模型、BSL模型和SST模型。Standard模型主要应用于壁面约束流动和自由剪切流动；GEKO模型的目标是提供一个具有足够灵活性的单一模型，以覆盖广泛的应用，这是一个强大的模型优化工具，但是需要正确理解这些系数的影响，以避免失调；BSL模型有效地将近壁区域的稳健且精确的模型公式与远场自由流无关的模型公式融合在一起；SST模型在近壁面区有更好的精度和算法稳定性。
- 转捩k-kl-omega (3 eqn) 模型：用于模拟层流向湍流的转捩过程。
- 转捩SST (4 eqn) 模型：基于k-omega (2 eqn) 模型中的SST模型开发的，额外添加了两个用于求解转捩过程的方程，计算量要比SST模型大。
- 雷诺应力 (RSM-7 eqn) 模型：该模型是制作最精细的湍流模型，可用于飓风流动、燃烧室高速旋转流、管道中二次流等。
- 尺度自适应模型 (SAS)：是优先推荐的尺度解析模型，适用于强旋流、混合流、钝体绕流等Fluent求解模拟。
- 分离涡模拟 (DES) 模型：是近年来出现的一种结合雷诺平均方法和大涡数值模拟两者优点的湍流模拟方法。采用基于Spalart-Allmaras方程模型的DES方法，数值求解Navier-Stokes方程,模拟绕流发生分离后的旋涡运动。其中空间区域离散采用有限体积法，方程空间项和时间项的数值离散分别采用Jameson中心格式和双时间步长推进方法。通过模拟圆柱绕流以及翼型失速绕流，观察到了与物理现象一致的旋涡结构，得到与实验数据相吻合的计算结果。
- 大涡模拟 (LES) 模型：该模型只对三维问题有效。

## 2. 多相流模型



Fluent提供了3种多相流模型：VOF (Volume of Fluid) 模型、Mixture (混合) 模型和欧拉 (Eulerian) 模型。在“概要视图”中的“模型”列表中双击“多相流”按钮，也可在“物理模型”选项卡的“模型”面板中单击“多相流”按钮，弹出“多相流模型”对话框，如图2-12所示。默认状态下，“多相流模型”对话框的关闭单选按钮处于选中状态。



图2-12 “多相流模型”对话框

### 1) VOF 模型

该模型通过求解单独的动量方程，并处理穿过区域的每一流体的容积比，来模拟两种或3种不能混合的流体。典型的应用包括流体喷射、流体中气泡的运动、流体在大坝坝口的流动，以及气液界面的稳态和瞬态处理等，如图2-13所示。

### 2) Mixture 模型

该模型用于模拟拥有不同速度的多相流，但是假定了在短空间尺度上局部的平衡。典型的应用包括沉降、气旋分离器、低载荷作用下的多粒子流动、气相容积率很低的泡状流，如图2-14所示。



图 2-13 VOF 模型



图 2-14 Mixture 模型

### 3) 欧拉模型

该模型可模拟多相分流及相互作用的相，与离散相模型中的Eulerian-Lagrangian方案只用于离散相不同，在多相流模型中，欧拉可用于模型中的每一相，如图2-15所示。

### 3. 辐射模型



Fluent提供了6种辐射模型：Rosseland模型、P1模型、Discrete Transfer (DTRM) 模型、表面到表面 (S2S) 模型、离散坐标 (DO) 模型、Monte Carlo (MC) 模型。在“概要视图”中的“模型”列表中双击“辐射”按钮，也可在“物理模型”选项卡的“模型”面板中单击“辐射”按钮，弹出“辐射模型”对话框，如图2-16所示。这些模型可用于火焰辐射传热、表面辐射传热、导热、对流与辐射的耦合问题、采暖、通风等场景。



图 2-15 欧拉模型





图 2-16 “辐射模型”对话框

- **Rosseland模型**: 该模型不求解额外的关于入射辐射的传输方程，因此该模型计算速度快，节省内存。但该模型只能用于光学深度比较大的情况，当光学深度大于3时优先使用该模型，并且该模型不能用于密度基求解器。

- P1模型：该模型为一个扩散方程，考虑了扩散效应，因此求解占用较小的内存，尤其对于求解光学深度比较大时（如燃烧应用），表现非常好。但该模型也存在一定的限制条件：该模型假定所有的表面均为散射，且假定基于灰体辐射；当光学深度很小时，会失去求解精度。
- Discrete Transfer（DTRM）模型：该模型可用于光学深度非常广的情况下，模型较为简单，可以通过增加射线数量来提高计算精度，但需要占用很大的内存。使用该模型的限制条件为：假定所有表面都是散射的，但不包括散射效应，且假定基于灰体辐射；不能与非共形交界面或滑移网格同时使用，不能用于并行计算。
- 表面到表面（S2S）模型：该模型适用于封闭空间中没有介质的辐射问题（如太空空间站的排热系统、太阳能的收集系统等）。使用该模型的限制条件为：假定所有表面都是散射的，且假定基于灰体辐射；不能用于介质参与的辐射问题；不能用于含有周期边界的模型中；不能用于含有对称边界的问题；不支持非共形交界面、悬挂节点或网格自适应。
- 离散坐标（DO）模型：该模型应用较为广泛，它能够求解所有光学深度区间的辐射问题；能求解燃烧问题中面对面的辐射问题，计算速度和占用内存都比较适中。
- Monte Carlo（MC）模型：该模型能够解决从光学薄区域（透明区域）到光学厚区域（扩散区域）的问题（如燃烧问题）。该模型计算准确，但占用的内存较高，计算时间长。该模型可用于求解壳传导问题、周期性边界问题、瞬态辐射问题、热交换器问题。

#### 4. 组份模型

在“概要视图”的“模型”列表中双击“组份”按钮，也可在“物理模型”选项卡的“模型”面板中单击“组份”按钮，弹出“组份模型”对话框，如图2-17所示。该模型主要用于对化学组份的输运和燃烧等化学反应进行模拟。

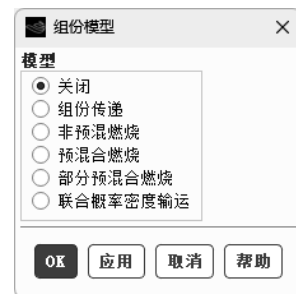




图2-17 “组份模型”对话框

- 组份传递模型：通用有限速率模型。
- 非预混燃烧模型：主要用于模拟湍流扩散火焰设计。
- 预混合燃烧模型：主要用于完全预混合的燃烧系统。
- 部分预混合燃烧模型：用于非预混燃烧和完全预混燃烧相结合的系统。
- 联合概率密度输运模型：该模型可用于预混、非预混及部分预混火焰中。

#### 5. 离散相模型

在“概要视图”的“模型”列表中双击“离散相”按钮，也可在“物理模型”选项卡的“模型”面板中单击“离散相”按钮，弹出“离散相模型”对话框，如图2-18所示。该模型主要用于预测连续相中由于湍流漩涡作用而对颗粒造成的影响，以及离散相的加热或冷却、液滴的蒸发与沸腾、崩裂与合并，还可用于模拟煤粉燃烧等过程。

#### 6. 凝固和熔化模型



在“概要视图”的“模型”列表中双击“凝固和熔化”按钮，也可在“物理模型”选项卡的“模型”面板中单击“更多”下拉列表中的“熔化…”按钮，弹出“凝固和熔化”对话框，如图2-19所示。如果要进行凝固和熔化的计算，需要勾选“凝固/熔化”复选框，给出“糊状区域参数”值，一般在104~107。



图 2-18 “离散相模型”对话框



图 2-19 “凝固和熔化”对话框

### 2.5.3 Fluent的应用

基于上述Fluent强大的功能特点，使得Fluent在很多领域得到广泛的应用，主要有以下几个方向：

- 水轮机、风机和泵等流体内部的流体流动。
- 汽车工业的应用。
- 换热器性能分析及换热器形状的选取。
- 飞机和航天器等飞行器的设计。
- 洪水波及河口潮流计算。
- 风载荷对高层建筑物稳定性的影响。
- 温室及室内空气流通分析。
- 电子元器件冷却分析。
- 河流中污染物的扩散分析。
- 建筑设计和火灾研究。

## 2.6 Fluent 的边界条件

边界条件包括流动变量和热变量在边界处的值。它是Fluent分析很关键的一部分，设定边界条件必须小心谨慎。


边界条件可分为入口边界条件、出口边界条件、固体壁面边界条件、对称边界条件和周期性边界条件，具体说明如下。

### 1. 入口边界条件

入口边界条件是指定入口处流动变量的值。常见的入口边界条件有速度入口边界条件、压力入口边界条件和质量流量入口边界条件。

- 速度入口边界条件：用于定义流动速度和流动入口的流动属性相关的标量属性。这一边界条件适用于不可压缩流，如果用于可压缩流，则会导致非物理结果，这是因为它允许驻点条件浮动。注意不要让速度入口靠近固体障碍物，因为这会导致流动入口驻点属性具有太高的非一致性。
- 压力入口边界条件：用于定义流动入口的压力和其他标量属性。既适用于可压流，又适用于不可压流。压力入口边界条件可用于压力已知，但是流动速度和/或速率未知的情况。这一情况可用于很多实际问题，如浮力驱动的流动。压力入口边界条件也可用来定义外部或无约束流的自由边界。
- 质量流量入口边界条件：用于已知入口质量流量的可压缩流动。在不可压缩流动中，不必指定入口的质量流量，因为密度为常数时，速度入口边界条件就确定了质量流量条件。当要求达到的是质量和能量流速而不是流入的总压时，通常使用质量入口边界条件。

---

 **说明** 调节入口总压可能会导致收敛速度较慢，当压力入口边界条件和质量流量入口边界条件都可以接受时，应该选择压力入口边界条件。

---

## 2. 出口边界条件

出口边界条件是指定出口处流动变量的值。常见的出口边界条件有压力出口边界条件和质量出口边界条件。

- 压力出口边界条件：压力出口边界条件需要在出口边界处指定表压。表压值的指定只用于亚声速流动。如果是超声速流动，就不再适用指定表压，此时压力要从内部流动中求出，包括其他流动属性。

在求解过程中，如果压力出口边界处的流动是反向的，则回流条件也需要指定。如果对于回流问题指定了比较符合实际的值，收敛性困难问题就会不明显。

- 质量出口边界条件：当流动出口的速度和压力在解决流动问题之前未知时，可以使用质量出口边界条件模拟流动。需要注意，如果模拟可压缩流或包含压力出口，则不能使用质量出口边界条件。

## 3. 固体壁面边界条件

壁面边界条件用于限制流体和固体区域。在黏性流动中，壁面处默认为非滑移边界条件，但是也可以根据壁面边界区域的平动或转动来指定切向速度分量，或者通过指定剪切来模拟滑移壁面。在当地流场的详细资料基础上，可以计算出流体和壁面之间的剪应力和热传导。

## 4. 对称边界条件

对称边界条件用于计算的物理区域是对称的情况。在对称轴或对称平面上没有对流量，因此垂直于对称轴或对称平面的速度分量为0。在对称边界上，垂直边界的速度分量为0，任何量的梯度为0。

## 5. 周期性边界条件

如果流动的几何边界、流动和换热是周期性重复的，那么可以采用周期性边界条件。

## 2.7 Fluent 的分析流程

使用Fluent解决某一问题时，首先要考虑如何根据目标需要选择相应的物理模型，然后明确所要模拟的物理系统的计算区域及边界条件，再确定是二维问题还是三维问题。

在确定所解决问题的特征之后，Fluent的分析流程基本包括如下步骤。

### 1. 创建几何模型

在Workbench中创建的“流体流动（Fluent）”项目模块中右击“几何结构”栏，在弹出的快捷菜单中选择“新的SpaceClaim几何结构……”命令、“新的DesignModeler几何结构……”命令或“新的Discovery几何结构……”命令，创建几何模型；也可以选择“导入几何模型”命令，导入已经建好的几何模型。

### 2. 划分网格

右击“流体流动（Fluent）”项目模块中的“网格”栏，在弹出的快捷菜单中选择“编辑……”命令，启动Meshing程序，划分网格；也可以选择“导入网格文件”，导入已经划分好的网格文件，这样就可以跳过建模步骤。

### 3. 分析设置


#### 1) 选择合适的主程序

划分好网格或导入网格文件后，右击“流体流动（Fluent）”项目模块中的“设置”栏，在弹出的快捷菜单中选择“编辑……”命令，打开Fluent Launcher 2024 R1（Setting Edit Only）启动器，如图2-8所示。

在Fluent Launcher 2024 R1（Setting Edit Only）启动器的Home（主页）选项卡中可进行以下设置：


- 在Dimension中选择2D或3D。
- 在Solver Options中勾选Double Precision复选框，选择双精度。
- 并行运算设置：可选择单核运算或并行运算。设置Solver Processes后面的数值，设置进行并行运算的核数。

还可以在General Options（常规选项）选项卡中设置启动路径，在Parallel Settings（并行设置）选项卡中设置并行运算类型等。


设置完成后，单击Start按钮 ，进入Fluent的主界面。

#### 2) 检查网格

Fluent中的网格检查功能提供了区域范围、体积统计、网格拓扑结构和周期性边界的信息，以及单一计算的确认。此外，对于轴对称算例，该功能还可确认节点在X轴上的位置。

具体操作为：单击“通用”任务页面“网格”栏中的“检查”按钮 ，或者单击“域”选项卡“网格”面板中“检查”下拉列表中的“执行网格检查”命令。执行该命令后，网格检

查信息会出现在控制台窗口，如图2-20所示。在检查过程中，读者可以在“控制台”窗口中看到区域范围、体积统计以及连通性信息。

 **注意** 推荐读入结算器之后检查网格的正确性，这样可以在设定问题之前检查任何网格错误。

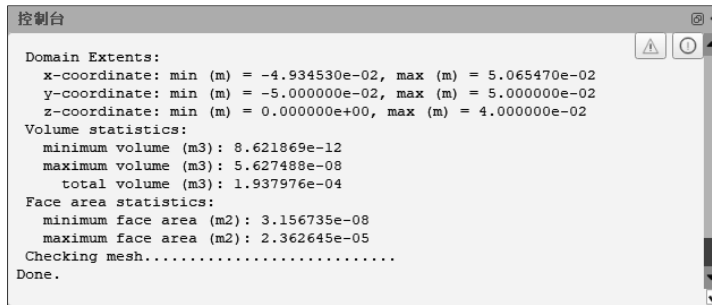


图2-20 网格检查

其中，各部分含义如下：

- Domain Extents（区域范围）：列出了 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 坐标的最大值和最小值，单位是 $m$ 。
- Volume statistics（体积统计）：包括单元体积的最大值、最小值以及总体积，单位是 $m^3$ 。体积为负值表示一个或多个单元有不正确的连接。通常来说，可以用Iso-Value Adaption确定负体积单元，并在图形窗口中查看它们。进行下一步之前这些负体积必须消除。

网格检查很容易出现的问题是网格体积为负数。如果最小体积是负数，就需要修复网格以减少解域的非物理离散。

### 3) 选择解的格式

根据问题的特征对求解器进行设置，后面会针对不同的物理模型展开说明求解的具体格式。分离解算器是Fluent默认的解算器。

### 4) 选择基本物理模型

在选择基本物理模型时，需要考虑以下问题：流动是无粘流、层流还是湍流；流动是可压缩的还是不可压缩的；是否需要考虑传热问题；流场是定常的还是非定常的；计算中是否还要考虑其他物理问题。





### 5) 确定所需的附加模型

确定在分析过程中是否需要加入风扇模型、换热器模型、多孔介质模型等。





### 6) 指定材料的物理性质

为模型选择合适的材料及流体属性，或者创建自己的材料数据。



### 7) 指定边界条件

在“概要视图”的“设置”列表中双击“单元区域条件”按钮和“边界条件”按钮, 也可在“物理模型”选项卡的“区域”面板中单击“单元区域”按钮和“边界”按钮, 打开相应的“单元区域条件”和“边界条件”面板进行设置。




#### 8) 调整求解控制参数

在“概要视图”中“求解”列表中双击“方法”按钮和“控制”按钮,也可在“求解”选项卡的“求解”面板中单击“方法”按钮,在“控制”面板中单击“控制”按钮,打开相应的“求解方法”和“解决方案控制”面板进行设置。在打开的面板中可以改变松弛因子、多网格参数以及其他流动参数的默认值,但是一般来说这些参数不需要修改。

#### 9) 初始化流场

迭代之前要初始化流场,即提供一个初始解。用户可以从一个或多个边界条件计算出初始解,也可以根据需要设置流场的数值。在“概要视图”的“求解”列表中双击“初始化”按钮,也可在“求解”选项卡的“初始化”面板中选中“标准”单选按钮,然后单击“选项”按钮,打开相应的“解决方案初始化”面板进行设置。

### 4. 求解

进行求解计算时,需要设置迭代步数,在“概要视图”的“求解”列表中双击“运行计算”按钮,也可在“求解”选项卡的“运行计算”面板中单击“运行计算”按钮,打开相应的“运行计算”面板进行设置,然后单击“运行计算”面板中的“开始计算”按钮,进行求解。

### 5. 查看求解结果

通过图形窗口中的残差图查看收敛过程,通过残差图可以了解迭代解是否已经收敛到允许的误差范围,以及观察流场分布图。

### 6. 保存结果

问题的定义和计算结果分别保存在Case和Data文件中。为了方便以后重新启动分析,必须同时保存这两个文件。具体操作为:单击“文件”选项卡下拉列表中“导出”下一级列表中的Case & Data命令。

大多数情况下,仿真分析是一个反复改进的过程,如果仿真结果的精度不高或不能反映真实情况,可以采用提高网格质量、调整参数设置和物理模型的方法,使仿真结果不断接近真实情况,提高仿真精度。