



计算流体动力学分析 (Computational Fluid Dynamics, CFD), 是通过计算机进行数值计算, 模拟流体流动时的各种相关物理现象, 包含流动、热传导、声场等。计算流体动力学分析广泛应用于航空航天器设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计等诸多工程领域。

本章将介绍流体动力学的基础理论、计算流体力学基础和常用的CFD软件。

### 知识要点

- 掌握流体动力学分析的基础理论
- 通过实例掌握流体动力学分析的过程
- 掌握计算流体力学的基础知识
- 了解常用的CFD软件

## 1.1 流体力学基础

本节介绍流体力学的基础知识, 包括流体力学的基本概念和流体力学的基本方程。流体力学是进行流体力学工程计算的基础, 如果想对计算的结果进行分析与整理, 在设置边界条件时有所依据, 那么学习流体力学的相关知识是非常有必要的。

### 1.1.1 基本概念

#### 1. 流体的密度

流体的密度是指单位体积内所含物质的多少。若密度是均匀的, 则有:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

式中,  $\rho$  为流体的密度;  $M$  是体积为  $V$  的流体所含物质的质量。

由上式可知, 密度的单位是  $\text{kg/m}^3$ 。对于密度不均匀的流体, 其某一点处密度的定义为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-2)$$

例如，零下4℃时水的密度为1000kg/m<sup>3</sup>，常温20℃时空气的密度为1.24kg/m<sup>3</sup>。各种流体的具体密度值可查阅相关文献。



流体的密度是流体本身固有的物理量，它随着温度和压强的变化而变化。

## 2. 流体的重度

流体的重度与流体密度有一个简单的关系式：

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

式中， $g$ 为重力加速度，其值为9.81m/s<sup>2</sup>。流体的重度单位为N/m<sup>3</sup>。

## 3. 流体的比重

流体的比重为该流体的密度与零下4℃时水的密度之比。

## 4. 流体的粘性

在研究流体流动时，若考虑流体的粘性，则称为粘性流动，相应的称流体为粘性流体；若不考虑流体的粘性，则称为理想流体的流动，相应的称流体为理想流体。

流体的粘性可由牛顿内摩擦定律表示：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$



牛顿内摩擦定律，也称为牛顿粘性定律，是描述流体力学中流体内部摩擦力与流体层间相对运动速度之间的关系的一个基本定律。牛顿内摩擦定律适用于空气、水、石油等大多数在常温常压下表现为牛顿流体特性的物质。这些流体的粘度在给定温度和压力下不随切变速率的变化而变化。相对的，非牛顿流体则不满足牛顿内摩擦定律，它们的粘度不是常数，会随切变速率或其他因素（如温度、压力等）的变化而变化。非牛顿流体包括溶化的沥青、糖浆、血液及塑料溶胶等。

非牛顿流体有以下三种不同的类型。

- 塑性流体，如牙膏等，它们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后，其切应力才与速度梯度成正比。即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

- 假塑性流体，如泥浆等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1-6)$$

- 胀塑性流体，如乳化液等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (n > 1) \quad (1-7)$$

## 5. 流体的压缩性

流体的压缩性是指在外界条件变化时，其密度和体积发生了变化。这里的条件有两种：一种是外部压强发生了变化；另一种是流体的温度发生了变化。

流体的等温压缩率 $\beta$ ，当质量为 $M$ ，体积为 $V$ 的流体外部压强发生 $\Delta P$ 的变化时，相应的其体积也发生了 $\Delta V$ 的变化，则定义流体的等温压缩率为：

$$\beta = -\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \quad (1-8)$$

这里的负号是考虑到 $\Delta P$ 与 $\Delta V$ 总是符号相反的缘故， $\beta$ 的单位为 $1/\text{Pa}$ 。流体等温压缩率的物理意义为：当温度不变时，每增加一个单位压强所产生的流体体积的相对变化率。

考虑到压缩前后流体的质量不变，式（1-8）还有另外一种表示形式，即：

$$\beta = \frac{d\rho}{\rho dp} \quad (1-9)$$

气体的等温压缩率可由气体状态方程求得：

$$\beta = 1/p \quad (1-10)$$

流体的体积膨胀系数 $\alpha$ ，当质量为 $M$ ，体积为 $V$ 的流体温度发生 $\Delta T$ 的变化时，相应的其体积也发生了 $\Delta V$ 的变化，则定义流体的体积膨胀系数为：

$$\alpha = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} \quad (1-11)$$

考虑到膨胀前后流体的质量不变，式（1-11）还有另外一种表示形式，即：

$$\alpha = -\frac{d\rho}{\rho dT} \quad (1-12)$$

这里的负号是考虑到随着温度的升高，体积必然增大，密度必然减小， $\alpha$ 的单位为 $1/\text{K}$ 。体积膨胀系数的物理意义为：当压强不变时，每增加一个单位温度所产生的流体体积的相对变化率。

气体的体积膨胀系数可由气体状态方程求得：

$$\alpha = 1/T \quad (1-13)$$

在研究流体流动的过程中，若考虑到流体的压缩性，则称为可压缩流动，相应地称流体为可压缩流体，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，相应地称流体为不可压缩流体，如水、油等液体的流动。

## 6. 液体的表面张力

液体表面相邻两部分之间的拉应力是分子作用力的一种表现。液面上的分子受液体内部分子吸引而使液面趋于收缩，表现为液面任何两部分之间的具体拉应力，称为表面张力，其方向和液面相切，

并与两部分的分界线相垂直。单位长度上的表面张力用  $\sigma$  表示, 单位是N/m。

## 7. 质量力和表面力

作用在流体微团上的力可分为质量力与表面力。

与流体微团质量大小有关并且集中作用在微团质量中心上的力称为质量力, 如在重力场中的重力  $mg$ 、直线运动的惯性力  $ma$  等。

质量力是一个矢量, 一般用单位质量所具有的质量力来表示, 其形式如下:

$$\mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k} \quad (1-14)$$

式中,  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为单位质量力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的投影, 或者简称为单位质量分力。

大小与表面面积有关且分布作用在流体表面上的力称为表面力。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。

作用在静止流体上的表面力只有沿表面内法线方向的正压力; 单位面积上所受到的表面力称为这一点处的静压强。静压强有以下两个特征:

- 静压强的方向垂直指向作用面。
- 流场内的任意一点处的静压强大小与方向无关。



对于理想流体流动, 流体质点所受到的作用力只有正压力, 没有切向力; 对于粘性流体流动, 流体质点所受到的作用力既有正压力, 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出; 对于多元流动, 切向力可由广义牛顿内摩擦定律求出。

## 8. 绝对压强、相对压强与真空度

一个标准大气压的压强是760mmHg, 相当于101325Pa, 通常用  $p_{\text{atm}}$  表示。若压强大于大气压, 则以此压强为计算基准得到的压强称为相对压强, 也称为表压强, 通常用  $p_r$  表示; 若压强小于大气压, 则压强低于大气压的值就称为真空度, 通常用  $p_v$  表示; 若以压强0Pa为计算的基准, 则这个压强就称为绝对压强, 通常用  $p_s$  表示。这三者的关系如下:

$$p_r = p_s - p_{\text{atm}}, \quad p_v = p_{\text{atm}} - p_s \quad (1-15)$$



在流体力学中, 压强都用符号  $p$  表示, 但一般来说有一个约定: 对于液体, 压强用相对压强表示; 对于气体, 特别是马赫数大于0.1的流动, 应视为可压缩流动, 压强用绝对压强表示。当然, 特殊情况应有所说明。

## 9. 静压强、动压强和总压强

对于静止状态下的流体, 只有静压强。对于流动状态的流体, 有静压强、动压强和总压强之分。

在一条流线上流体质点的机械能是守恒的, 这就是伯努里 (Bernoulli) 方程的物理意义, 对于理想流体的不可压缩流动, 其表达式如下:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1-16)$$

式中,  $\frac{p}{\rho g}$  称为压强水头, 也就是压能项,  $p$  为静压强;  $\frac{v^2}{2g}$  称为速度水头, 也就是动能项;  $z$  称为位置水头, 也就是重力势能项, 这三项之和就是流体质点的总的机械能;  $H$  称为总的水头高。

若把上式的等式两边同时乘以  $\rho g$ , 则有:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-17)$$

式中,  $p$  称为静压强, 简称静压;  $\frac{1}{2} \rho v^2$  称为动压强, 简称动压, 也就是动能项;  $\rho g H$  称为总压强, 简称总压。



对于不考虑重力的流动, 总压就是静压和动压之和。

### 1.1.2 流体流动的分类

流体流动按运动形式分: 若  $\text{rot} \vec{v} = 0$ , 则流体做无旋运动; 若  $\text{rot} \vec{v} \neq 0$ , 则流体做有旋运动。

流体流动按时间变化分: 若  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ , 则流体做定常运动; 若  $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$ , 则流体做非定常运动。

流体流动按空间变化分: 流体的运动有一维运动、二维运动和三维运动。

### 1.1.3 边界层和物体阻力

#### 1. 边界层

对于工程实际中大量出现的大雷诺数问题, 应该分成两个区域, 即外部势流区域和边界层区域。

- 对于外部势流区域, 可以忽略粘性力, 采用理想流体运动理论解出外部流动, 从而知道边界层外部边界上的压力和速度分布, 并将其作为边界层流动的外边界条件。
- 在边界层区域必须考虑粘性力, 只有考虑了粘性力才能满足粘性流体的粘附条件。边界层虽小, 但是物理量在物面上的分布、摩擦阻力及物面附近的流动都与边界层内的流动联系在一起, 因此非常重要。

描述边界层内的粘性流体运动的是N-S方程, 但是由于边界层厚度  $\delta$  比特征长度小很多, 而且  $x$  方向的速度分量沿法向的变化比切向大得多, 所以N-S方程可以在边界层内做很大的简化。简化后的方程称为普朗特边界层方程, 它是处理边界层流动的基本方程, 边界层示意图如图1-1所示。

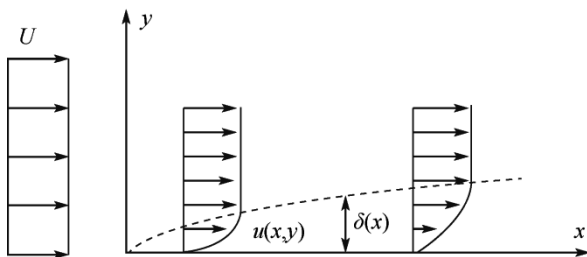


图1-1 边界层示意图

边界层的厚重比物体的特征长度小得多, 即  $\delta/L$  (边界层相对厚度) 是一个小量。边界层内粘性力和惯性力同阶。

对于二维平板或楔面边界层方程, 可以通过量阶分析得到:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\end{aligned}\quad (1-18)$$

边界条件: 在曲面物体  $y=0$  上  $u=v=0$ , 在  $y=\delta$  或  $y \rightarrow \infty$  时,  $u=U(x)$ 。

初始条件: 当  $t=t_0$  时, 已知  $u$ 、 $v$  的分布。

对于曲面物体, 应采用贴体曲面坐标系, 从而建立相应的边界层方程。

## 2. 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, 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总和, 是粘性直接作用的结果。
- 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总和, 是粘性间接作用的结果, 即由于边界层的分离, 在物体尾部区域产生尾涡而形成的。压差阻力的大小与物体的形状有很大关系, 又称为形状阻力。

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:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (1-19)$$

式中,  $A$  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, 其阻力系数为:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (1-20)$$

式中,  $Re = \frac{V_\infty d}{\nu}$ 。此式在  $Re < 1$  时, 计算值与试验值吻合得较好。

### 1.1.4 层流和湍流

自然界中的流体流动状态主要有两种形式, 即层流和湍流。在许多中文文献中, 湍流也被译为紊流。层流是指流体在流动过程中两层之间没有相互干扰; 湍流是指流体不是处于分层流动状态。一般来说, 湍流是普通的, 层流属于个别情况。

对于圆管内的流动, 当  $Re \leq 2300$  时, 管流一定为层流; 当  $Re \geq 8000 \sim 12000$  时, 管流一定为湍流; 当  $2300 < Re < 8000$  时, 流动处于层流与湍流间的过渡区。

### 1.1.5 流体流动的控制方程

流体流动要受物理守恒定律的支配，基本的守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。

如果流动包含不同成分的混合或相互作用，系统还要遵守组分守恒定律；如果流动处于湍流状态，系统还要遵守附加湍流输运方程。控制方程是这些守恒定律的数学描述。

#### 1. 质量守恒方程

任何流动问题都必须满足守恒定律。该定律可表述为：单位时间内流体微元体中质量的增加，等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一定律，可以得出质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1-21)$$

该方程是质量守恒方程的一般形式，适用于可压流动和不可压流动。源项 $S_m$ 是从分散的二级相中加入连续相的质量（例如由于液滴的蒸发），也可以是任何的自定义源项。

#### 2. 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为：微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。

该定律实际上是牛顿第二定律。按照这一定律，可导出动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1-22)$$

式中， $p$ 为静压； $\tau_{ij}$ 为应力张量； $g_i$ 和 $F_i$ 分别为 $i$ 方向上的重力体积力和外部体积力（如离散相相互作用产生的升力）， $F_i$ 包含了其他的模型相关源项，如多孔介质和自定义源项。

应力张量由下式得出：

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (1-23)$$

#### 3. 能量守恒方程

能量守恒定律是包含热交换的流动系统必须满足的基本定律。该定律可表述为：微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体积力与表面力对微元体所做的功。该定律实际上是热力学第一定律。

流体的能量 $E$ 通常是内能 $i$ 、动能 $K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ 和势能 $P$ 三项之和，内能 $i$ 与温度 $T$ 之间存在一定关系，即 $i = c_p T$ ，其中 $c_p$ 是比热容。可以得到以温度 $T$ 为变量的能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div} \left( \frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (1-24)$$

式中,  $c_p$  为比热容;  $T$  为温度;  $k$  为流体的传热系数;  $S_T$  为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 有时简称  $S_T$  为粘性耗散项。



虽然能量方程是流体流动与传热的基本控制方程, 但是对于不可压缩流动, 若热交换量很小或可以忽略时, 则可不考虑能量守恒方程。此外, 它是针对牛顿流体得出的, 对于非牛顿流体应使用另外形式的能量守恒方程。

### 1.1.6 边界条件与初始条件

对于求解流动和传热问题, 除了使用上述介绍的三大控制方程以外, 还要指定边界条件。对于非定常问题, 还要制定初始条件。

边界条件就是在流体运动边界上控制方程应该满足的条件, 一般会对数值计算产生重要的影响。即使对于同一个流场的求解, 随着方法的不同, 边界条件和初始条件的处理方法也是不同的。

在CFD模拟计算时, 基本的边界类型包括以下几种。

#### 1. 入口边界条件

入口边界条件就是指定入口流动变量的值。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。这一边界条件适用于不可压缩流, 如果用于可压缩流, 就会导致非物理结果, 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妨碍物, 否则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及其他标量属性。它既可以用于可压流, 也可以用于不可压流。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, 通常就会使用质量入口边界条件。



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

#### 2. 出口边界条件

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。如果当地流动变为超声速, 就不再指定表压了, 此时压力要从内部流动中求出, 包括其他的流动属性。

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, 收敛性困难的问题就会不明显。

当流动出口的速度和压力在解决流动问题之前是未知时, 可以使用质量出口边界条件来模拟流动。需要注意的是, 如果模拟可压缩流或者包含压力出口时, 就不能使用质量出口边界条件。

### 3. 固体壁面边界条件

对于粘性流动问题，可设置壁面为无滑移边界条件，也可以指定壁面切向速度分量（壁面平移或旋转运动时）给出壁面切应力，从而模拟壁面滑移。可以根据当地流动情况，计算壁面切应力和与流体的换热情况。壁面热边界条件包括固定热通量、固定温度、对流换热系数、外部辐射换热、对流换热等。

### 4. 对称边界条件

对称边界条件应用于计算的物理区域是对称的情况。由于在对称轴或对称平面上没有对流通量，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，任何量的梯度也为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，就可以采用周期性边界条件。

## 1.2 计算流体力学基础

本节介绍计算流体力学的基础知识，包括计算流体力学的基本概念、求解过程、数值求解方法等。了解计算流体力学的基本知识，有助于理解CFX软件中相应的设置方法，是做好工程模拟分析的基础。

### 1.2.1 计算流体力学的发展

CFD是20世纪60年代起伴随计算科学与工程（Computational Science and Engineering, CSE）迅速崛起的一门学科分支，经过半个世纪的迅猛发展，这门学科已经相当成熟，一个重要的标志就是近几十年来，各种CFD通用软件的陆续出现，成为商品化软件，服务于传统的流体力学和流体工程领域，如航空、航天、船舶、水利等。

由于CFD通用软件的性能日益完善，应用的范围也在不断扩大，在化工、冶金、建筑、环境等相关领域中也已被广泛应用，因此现在我们利用它来模拟计算平台内部的空气流动状况，也算是在较新的领域中应用。

现代流体力学的研究方法包括理论分析、数值计算和实验研究三个方面。这些方法针对不同的角度进行研究，相互补充。理论分析研究能够表述参数影响形式，为数值计算和实验研究提供了有效的指导；试验是认识客观现实的有效手段，用于验证理论分析和数值计算的正确性。计算流体力学通过提供模拟真实流动的经济手段补充理论及试验的空缺。

更重要的是，计算流体力学提供了廉价的模拟、设计和优化的工具，以及提供了分析三维复杂流动的工具。在复杂的情况下，测量往往是很困难的，甚至是不可能的，而计算流体力学则能方便地提供全部流场范围的详细信息。与试验相比，计算流体力学对于参数没有什么限制，并且费用少，流场无干扰的特点，我们选择它来进行模拟计算。简单来说，计算流体力学所扮演的角色是：通过直观地显示计算结果，对流动结构进行仔细的研究。

计算流体力学在数值研究上大体沿两个方向发展：一个是在简单的几何外形下，通过数值方法来发现一些基本的物理规律和现象；另一个是为解决工程实际需要，直接通过数值模拟进行预测，为工程设计提供依据。理论的预测出自数学模型的结果，而不是出自一个实际的物理模型的结果。计算流体力学是多领域交叉的学科，涉及计算机科学、流体力学、偏微分方程的数学理论、计算几何、数值分析等，这些学科的交叉融合，相互促进和支持，推动了学科的深入发展。

CFD方法是将流场的控制方程利用计算数学的方法将其离散到一系列网格节点上求其离散的数值解。控制所有流体流动的基本定律是质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律，由它们分别导出连续性方程、动量方程（N-S方程）和能量方程。应用CFD方法进行平台内部空气流场模拟计算时，首先需要选择或者建立过程的基本方程和理论模型，依据的基本原理是流体力学、热力学、传热传质等平衡或守恒定律。

由基本原理出发，可以建立质量、动量、能量、湍流特性等守恒方程组，如连续性方程、扩散方程等。这些方程构成非线性偏微分方程组，不能用经典的解析法，只能用数值方法求解。求解上述方程时，必须先给定模型的几何形状和尺寸，确定计算区域并给出恰当的进出口、壁面及自由面的边界条件，而且还需要适合的数学模型及包括相应的初值在内的过程方程的完整数学描述。

## 1.2.2 计算流体力学的求解过程

CFD数值模拟一般遵循以下几个步骤：

- 步骤 01** 建立所研究问题的物理模型，并将其抽象成数学、力学模型，然后确定要分析的几何体的空间影响区域。
- 步骤 02** 建立整个几何体与其空间影响区域，即计算区域的CAD模型，将几何体的外表面和整个计算区域进行空间网格划分。网格的稀疏及网格单元的形状都会对以后的计算产生很大的影响。为保证计算的稳定性和计算效率，不同的算法格式对网格的要求也不一样。
- 步骤 03** 加入求解所需要的初始条件，入口与出口处的边界条件一般为速度、压力等。
- 步骤 04** 选择适当的算法，设置具体的控制求解过程和精度的一些条件，对所需分析的问题进行求解，并且保存数据文件结果。
- 步骤 05** 选择合适的后处理器（Post Processor）读取计算结果文件，分析并显示出来。

以上这些步骤构成了CFD数值模拟的全过程，其中数学模型的建立是理论研究的课堂，一般由理论工作者来完成。

## 1.2.3 数值模拟方法和分类

在运用CFD方法对一些实际问题进行模拟时，常常需要设置工作环境、边界条件和选择算法等，算法的选择对模拟的效率及其正确性有很大的影响，需要特别重视。

随着计算机技术和计算方法的发展，许多复杂的工程问题都可以采用区域离散化的数值计算并借助计算机得到满足工程要求的数值解。数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要动力之一。

区域离散化就是用一组有限个离散的点来代替原来的连续空间。实施过程是把所计算的区域划分为许多互不重叠的子区域，确定每个子区域的节点位置和该节点所代表的控制体积。

一般把节点看成控制体积的代表。控制体积和子区域并不总是重合的。网格是离散的基础，网格

节点是离散化物理量的存储位置。

常用的离散化方法包括有限差分法、有限单元法和有限体积法。

### 1. 有限差分法

有限差分法是数值解法中比较经典的方法。它将求解区域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解区域，然后将偏微分方程（控制方程）的导数用差商代替，推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。这种方法的产生和发展比较早，也比较成熟，较多用于求解双曲线和抛物线等问题。用它求解边界条件时比较复杂，尤其是在椭圆形问题上，不如有限单元法或有限体积法方便。

构造差分的方法有多种形式，目前主要采用的是泰勒级数展开方法。其基本的差分表达式主要有4种形式，即一阶向前差分、一阶向后差分、一阶中心差分和二阶中心差分，其中前两种形式为一阶计算精度，后两种形式为二阶计算精度。通过对时间和空间这几种不同差分格式的组合，可以组合成不同的差分计算格式。

### 2. 有限单元法

有限单元法是将一个连续的求解域任意分成适当形状的许多微小单元，并与各小单元分片构造插值函数，然后根据极值原理（变分或加权余量法），将问题的控制方程转换为所有单元上的有限元方程，把总体的极值作为各单元极值之和，即将局部单元总体合成，形成嵌入了指定边界条件的代数方程组，求解该方程组就能得到各节点上待求的函数值。

有限单元求解的速度比有限差分法和有限体积法慢，在商用CFD软件中的应用并不广泛。目前常用的商用CFD软件中，只有FIDAP采用的是有限单元法。



有限单元法对椭圆形问题有很好的适应性。

### 3. 有限体积法

有限体积法又称为控制体积法，是将计算区域划分为网格，并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积，将待解的微分方程对每个控制体积积分，从而得到一组离散方程。其中的未知数是网格节点上的因变量。子域法加离散，就是有限体积法的基本思想。有限体积法的基本思路易于理解，并能得出直接的物理解释。

离散方程的物理意义就是因变量在有限大小的控制体积中的守恒原理，如同微分方程表示因变量在无限小的控制体积中的守恒原理一样。

有限体积法得出的离散方程，要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足，对整个计算区域自然也得到满足，这是有限体积法吸引人的地方。

有一些离散方法（有限差分法）仅当网格极其细密时，离散方程才满足积分守恒，而有限体积法即使在粗网格情况下，也能显示出准确的积分守恒。

就离散方法而言，有限体积法可视作有限单元法和有限差分法的中间产物，三者各有所长。

- 有限差分法：直观、理论成熟、精度可选，但是不规则区域处理烦琐。虽然网格生成可以使有限差分法应用于不规则区域，但是对于区域的连续性等要求比较严格。使用有限差分法的好处在于易于编程、并行。

- 有限单元法：适用于处理复杂区域，精度可选。缺点是内存和计算量大，并行不如有限差分法和有限体积法直观。
- 有限体积法：适用于流体计算，可以应用于不规则网格，适用于并行。精度只能是二阶。



由于ANSYS CFX是基于有限体积法的，所以下面将以有限体积法为例介绍数值模拟的基础知识。

## 1.2.4 有限体积法的基本思想

有限体积法是从流体运动积分形式的守恒方程出发来建立的离散方程。一维有限体积单元示意图如图1-2所示。

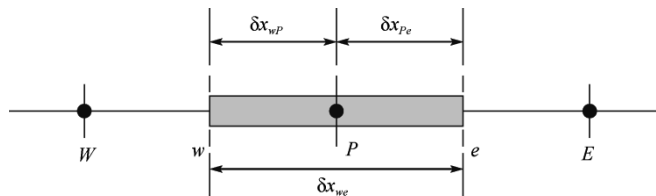


图1-2 一维有限体积单元示意图

三维对流扩散方程的守恒型微分方程如下：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (1-25)$$

式中， $\phi$ 是对流扩散物质函数，如温度、浓度。

若式（1-25）用散度和梯度表示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(K \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1-26)$$

将式（1-26）在时间步长 $\Delta t$ 内对控制体体积 $CV$ 积分，可得：

$$\int_{CV} \left( \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dt \right) dV + \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_A n \cdot (\rho u\phi) dA \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_A n \cdot (K \text{grad}\phi) dA \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S_\phi dV dt \quad (1-27)$$

式中散度积分已用格林公式简化为面积积分， $A$ 为控制体的表面积。

该方程的物理意义是： $\Delta t$ 时间段控制体 $CV$ 内 $\rho\phi$ 的变化，加上 $\Delta t$ 时间段通过控制体表面的对流 $\rho u\phi$ ，等于 $\Delta t$ 时间段通过控制体表面的扩散量，加上 $\Delta t$ 时间段控制体 $CV$ 内源项的变化。

例如一维非定常热扩散方程：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (1-28)$$

在 $\Delta t$ 时间段和控制体内部对式（1-28）进行积分：

$$\int_t^{t+\Delta} \int_{CV} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta} \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta} \int_{CV} S dV dt \quad (1-29)$$

上式也可写成：

$$\int_w^e \left[ \int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV = \int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left( kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt \quad (1-30)$$

式(1-30)中  $A$  是控制体面积,  $\Delta V$  是体积,  $\Delta V = A\Delta x$ ,  $\Delta x$  是控制体宽度,  $\bar{S}$  是控制体中平均源强度。设  $P$  点在  $t$  时刻的温度为  $T_p^0$ , 而  $t+\Delta t$  时的  $P$  点温度为  $T_p$ , 则式(1-30)可简化为:

$$\rho c (T_p - T_p^0) \Delta V = \int_t^{t+\Delta t} \left[ k_e A \frac{T_E - T_p}{\delta x_{PE}} - k_w A \frac{T_p - T_W}{\delta x_{WP}} \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt \quad (1-31)$$

为了计算上式右端的  $T_p$ 、 $T_E$  和  $T_W$  对时间的积分, 引入一个权数  $\theta=0\sim 1$ , 将积分表示成  $t$  和  $t+\Delta t$  时刻的线性关系为:

$$I_T = \int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [\theta T_p + (1-\theta)T_p^0] \Delta t \quad (1-32)$$

式(1-31)可写成:

$$\rho c \left( \frac{T_p - T_p^0}{\Delta t} \right) \Delta x = \theta \left[ \frac{k_e (T_E - T_p)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_p - T_W)}{\delta x_{WP}} \right] + (1-\theta) \left[ \frac{k_e (T_E^0 - T_p^0)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_p^0 - T_W^0)}{\delta x_{WP}} \right] + \bar{S} \Delta x \quad (1-33)$$

由于上式左端第二项中  $t$  时刻的温度为已知, 因此该式是  $t+\Delta t$  时刻  $T_p$ 、 $T_E$ 、 $T_W$  之间的关系式。列出计算域上所有相邻三个节点上的方程, 可形成求解域中所有未知量的线性代数方程, 给出边界条件后可求解代数方程组。



由于流体运动的基本规律都是守恒律, 并且有限体积法的离散形式也是守恒的, 因此有限体积法在流体流动计算中应用广泛。

## 1.2.5 有限体积法的求解方法

控制方程被离散化之后就可以进行求解了。下面介绍几种常用的压力与速度耦合求解算法, 分别是SIMPLE算法、SIMPLEC算法和PISO算法。

### 1. SIMPLE算法

SIMPLE算法是目前工程实际中应用比较广泛的一种流场计算方法, 它属于压力修正法的一种。该方法的核心是采用“猜测-修正”的过程, 在交错网格的基础上计算压力场, 从而达到求解动量方程的目的。

SIMPLE算法的基本思想可以叙述为: 对于给定的压力场, 求解离散形式的动量方程, 得到速度场。因为压力是假定的或不精确的, 这样得到的速度场一般都不能满足连续性方程的条件, 所以必须对给定的压力场进行修正。修正的原则是修正后的压力场相对应的速度场能满足这一迭代层次上的连续方程。

根据这个原则, 我们把由动量方程的离散形式所规定的压力与速度的关系代入连续方程的离散形式, 从而得到压力修正方程, 再由压力修正方程得到压力修正值。接着根据修正后的压力场求得新的速度场, 然后检查速度场是否收敛。若不收敛, 用修正后的压力值作为给定压力场, 开始下一层次的计算, 直到获得收敛的解为止。

在上面所述的过程中, 核心问题在于如何获得压力修正值以及如何根据压力修正值构造速度修正

方程。

## 2. SIMPLEC算法

SIMPLEC算法与SIMPLE算法在基本思路是一致的，不同之处在于SIMPLEC算法在通量修正方法上有所改进，加快了计算的收敛速度。

## 3. PISO算法

PISO算法的压力速度耦合格式是SIMPLE算法族的一部分，它是基于压力速度校正之间的高度近似关系的一种算法。SIMPLE算法和SIMPLEC算法的一个限制就是在压力校正方程解出之后，新的速度值和相应的流量不满足动量平衡。因此，必须重复计算直至满足动量平衡。

为了提高该计算的效率，PISO算法执行了两个附加的校正，即相邻校正和偏斜校正。PISO算法的主要思想就是将压力校正方程中解的阶段中的SIMPLE算法和SIMPLEC算法所需要的重复计算移除。经过一个或更多的附加PISO循环，校正的速度会更满足连续性和动量方程，这一迭代过程被称为动量校正或邻近校正。

PISO算法虽然在每个迭代中要花费较多的CPU时间，但是极大地减少了达到收敛所需要的迭代次数，尤其是对于过渡问题，这一优点更为明显。

对于具有一些倾斜度的网格，单元表面质量流量校正和邻近单元压力校正差值之间的关系是相当简略的。因为沿着单元表面的压力校正梯度的分量开始是未知的，所以需要进行一个与上面所述的PISO邻近校正中相似的迭代步骤。

初始化压力校正方程的解之后，需要重新计算压力校正梯度，然后用重新计算出来的值更新质量流量校正。这个被称为偏斜校正的过程极大地减少了计算高度扭曲网格所遇到的收敛性困难。PISO偏斜校正可以使我们在基本相同的迭代过程中，从高度偏斜的网格上得到和更改为正交网格上不相上下的解。

# 1.3 计算流体力学的应用领域

近十多年来，CFD有了很大的发展，替代了经典流体力学中的一些近似计算法和图解法，过去的一些典型教学实验，如Reynolds实验，现在完全可以借助CFD手段在计算机上实现。

所有涉及流体流动、热交换、分子输运等现象的问题，几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。CFD不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程、工业制造等领域发挥作用。典型的应用场合及相关的工程问题包括：

- 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。
- 汽车流线外形对性能的影响。
- 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。
- 温室或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。

对这些问题的处理,以往主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验,而如今大多采用CFD的方式加以分析和解决,CFD技术现已发展到完全可以分析三维粘性湍流及漩涡运动等复杂问题的程度。

## 1.4 常用的CFD商用软件

为了完成CFD计算,过去大多是由用户自己编写计算程序的,但由于CFD的复杂性及计算机硬件条件的多样性,使得用户各自的应用程序往往缺乏通用性,而CFD本身又有其鲜明的系统性和规律性,因此比较适合于被制成通用的商用软件。

从1981年开始,陆续出现了如PHOENICS、STAR-CD、STAR-CCM+、FLUENT、CFX等多个商用CFD软件。这些软件的特点为:

- 功能比较全面、适用性强,几乎可以求解工程界中的各种复杂问题。
- 具有比较易用的前后处理系统和与其他CAD及CFD软件的接口能力,便于用户快速完成造型、网格划分等工作。同时,还可以让用户扩展自己的开发模块。
- 具有比较完备的容错机制和操作界面,稳定性高。
- 可在多种计算机、多种操作系统(包括并行环境)下运行。

随着计算机技术的快速发展,这些商用软件在工程界的作用越来越大。

### 1.4.1 PHOENICS

PHOENICS是世界上第一套计算流体动力学与传热学的商用软件,除了通用CFD软件应该拥有的功能外,PHOENICS软件还具有自己独特的功能。

- 开发性: PHOENICS 最大限度地向用户开发了程序,用户可以根据需要添加用户程序、用户模型。
- CAD 接口: PHOENICS 可以读入任何 CAD 软件的图形文件。
- 运动物体功能: PHOENICS 可以定义物体的运动,克服了使用相对运动方法的局限性。
- 多种模型选择: PHOENICS 提供了多种湍流模型、多相流模型、多流体模型、燃烧模型、辐射模型等。
- 双重算法选择: PHOENICS 既提供了欧拉算法,也提供了基于粒子运动轨迹的拉格朗日算法。
- 多模块选择: PHOENICS 提供了若干专用模块,用于特定领域的分析计算,如 COFFUS 用于煤粉锅炉炉膛燃烧模拟,FLAIR 用于小区规划设计及高大空间建筑设计模拟, HOTBOX 用于电子元器件散热模拟等。

### 1.4.2 STAR-CD

STAR-CD是目前世界上使用最广泛的专业计算流体力学分析软件之一,由世界领先的综合性CAE软件和服务提供商CD-adapco集团开发。集团不断将分布于世界各地的代表处的开发成果以及广大合

作研究单位的研究成果融入软件的最新版本中，使得STAR-CD保持了在热流解析领域的领先地位。

STAR-CD的解析对象涵盖基础热流解析，导热、对流、辐射（包含太阳辐射）问题，多相流问题，化学反应/燃烧问题，旋转机械问题，流动噪声问题等。目前STAR-CD已将解析对象扩展到流体/结构热应力问题、电磁场问题和铸造领域。

作为最早引入非结构化网格概念的软件，STAR-CD保持了对复杂结构流域解析的优势，其最新的基于连续介质力学求解器具有内存占用少、收敛性强、稳定性好等特点，受到全球用户的好评。

STAR-CD作为重要工具参与了我国许多重大工程项目，如高速铁路、汽车开发设计、低排放内燃机、能源化工、动力机械、船舶设计、家电电子、飞行器设计、空间技术等，并为客户取得了良好的效益。

### 1.4.3 STAR-CCM+

STAR-CCM+是CD-adapco集团推出的新一代CFD软件，采用最先进的连续介质力学算法，并和卓越的现代软件工程技术结合在一起，拥有出色的性能、精度和高可靠性。

STAR-CCM+拥有一体化的图形用户界面，从参数化CAD建模、表面准备、体网格生成、模型设置、计算求解一直到后处理分析的整个流程，都可以在同一个界面环境中完成。

基于连续介质力学算法的STAR-CCM+，不仅可以进行热、流体分析，还拥有结构应力、噪声等其他物理场的分析功能，功能强大且又易学易用。

### 1.4.4 FLUENT

FLUENT软件是当今CFD仿真领域最为全面的软件包之一，具有广泛的物理模型，以及能够快速准确地得到CFD分析结果。

FLUENT软件拥有模拟流动、湍流、热传递和反应等广泛物理现象的能力，在工业上的应用包括从流过飞机机翼的气流到炉膛内的燃烧，从鼓泡塔到钻井平台，从血液流动到半导体生产，以及从无尘室设计到污水处理装置等。软件中的专用模型可以用于开展缸内燃烧、空气声学、涡轮机械和多相流系统的模拟工作。

现今，全世界范围内数以千计的公司将FLUENT与产品研发过程中设计和优化阶段相整合，并从中获益。先进的求解技术可提供快速、准确的CFD结果、灵活的移动和变形网格，以及出众的并行可扩展能力。用户自定义函数可实现全新的用户模型和扩展现有模型。

FLUENT中的交互式的求解器设置、求解和后处理能力可轻易暂停计算过程，利用集成的后处理检查结果改变设置，并随后用简单的操作继续执行计算。ANSYS CFD-Post可以读入Case和Data文件，并利用其先进的后处理工具开展深入分析。

ANSYS Workbench集成ANSYS FLUENT后给用户提供了与所有主要CAD系统的双向连接功能，其中包括ANSYS SpaceClaim强大的几何修复和生成能力，以及ANSYS Meshing先进的网格划分技术。该平台通过使用一个简单的拖放操作便可共享不同应用程序的数据和计算结果。

### 1.4.5 CFX

CFX是全球第一个通过ISO9001质量认证的大型商业CFD软件，由英国AEA Technology公司开发。2003年，CFX软件被ANSYS公司收购。诞生在工业应用背景中的CFX一直将精确的计算结果、丰富的物理模型、强大的用户扩展性作为其发展的基本要求，并以其在这些方面的卓越成就引领着CFD技术的不断发展。目前，CFX已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域，为其在全球6000多个用户解决了大量的实际问题。

与大多数CFD软件不同，CFX除了可以使用有限体积法之外，还采用了基于有限单元的有限体积法。基于有限单元的有限体积法保证了在有限体积法的守恒特性的基础上，吸收了有限单元法的数值精确性。在CFX中，基于有限单元的有限体积法对六面体网格单元采用24点插值，而单纯的有限体积法仅仅采用6点插值；对四面体网格单元采用60点插值，而单纯的有限体积法仅仅采用4点插值。在湍流模型的应用上，除了常用的湍流模型外，CFX最先使用了大涡模拟（LES）和分离涡模拟（DES）等高级涡流模型。

CFX可计算的物理问题包括可压与不可压流体、耦合传热、热辐射、多相流、粒子输送过程、化学反应和燃烧问题。还拥有诸如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等的使用模型。

在其湍流模型中，纳入了k- $\epsilon$ 模型、低Reynolds数k- $\epsilon$ 模型、低Reynolds数Wilcox模型、代数Reynolds应力模型、微分Reynolds应力模型、微分Reynolds通量模型、SST模型以及大涡模拟方法。

作为世界上唯一采用全隐式耦合算法的大型商业软件，其算法上的先进性，丰富的物理模型和前后处理的完善性使ANSYS CFX在结果精确性、计算稳定性、计算速度和灵活性上都有优异的表现。

除了一般工业流动以外，ANSYS CFX还可以模拟诸如燃烧、多相流、化学反应等复杂流场。ANSYS CFX可以与ANSYS Structure及ANSYS Emag等软件配合，实现流体分析、结构分析、电磁分析等的耦合。ANSYS CFX也被集成在ANSYS Workbench环境下，方便用户在单一操作界面上实现对整个工程问题的模拟。

ANSYS Workbench平台融合了ANSYS SpaceClaim强大的几何修复和ANSYS Meshing先进的网格划分技术，为所有主流的CAD系统提供优质的双向连接，使数据的拖放转换以及不同的应用程序间共享结果更为容易。例如，流体流动仿真可以应用在随后的结构力学模拟边界负荷的定义中。ANSYS CFX与ANSYS结构力学产品天然的双向连接，使最复杂的流固耦合（FSI）问题处于简便使用的环境内，减少了购买、管理或运行第三方耦合软件的需要。

ANSYS CFX具备以下特色功能：

- 先进的全隐式耦合多网格线性求解器。
- 收敛速度快（同等条件下比其他流体软件快 1~2 个数量级）。
- 可以读入多种形式的网格，并能在计算中自动加密/稀疏网格。
- 优秀的并行计算性能。
- 强大的前后处理功能。
- 丰富的物理模型，可以真实模拟各种工业流动。
- 简单友好的用户界面，方便使用。
- CCL 语言使高级用户能方便地加入自己的子模块。

- 支持批处理操作。
- 支持多物理场耦合。
- 支持 Workbench 集成。

CFX能够解决的工程问题可以归结为以下几个方面：

- 可压缩与不可压缩流动问题。
- 稳态与瞬态流动问题。
- 层流与湍流问题。
- 牛顿流体与非牛顿流体问题。
- 对流换热、热传导与热辐射问题。
- 化学组分混合与反应问题。
- 多孔介质流动问题。
- 多相流问题。
- 自由表面流动问题。
- 流固耦合问题。
- 粒子流动问题。

当然，很多实际工程问题较为复杂，需要多个计算模型，CFX都能很好地计算并求解。

## 1.5 本章小结

本章首先介绍了流体力学的基础知识，然后讲解了计算流体力学的基本概念，最后介绍了常用的CFD商用软件。通过对本章内容的学习，读者可以掌握计算流体力学的基本概念，了解目前常用的CFD商用软件。