



第 1 章

流体力学与计算流体力学基础

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, ρ 为流体的密度; M 是体积为 V 的流体内所含物质的质量。

由上式可知, 密度的单位是 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°C 时水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 常温 20°C 时空气的密度为 $1.24\text{kg}/\text{m}^3$ 。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^2 。流体的重度单位为 N/m^3 。

3. 流体的比重

流体的比重为该流体的密度与零下 4°C 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：

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



牛顿内摩擦定律适用于空气、水、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叫作牛顿流体，即严格满足牛顿内摩擦定律且 μ 保持为常数的流体，否则就称为非牛顿流体，如溶化的沥青、糖浆等。

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 τ_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 β ，当质量为 M ，体积为 V 的流体外部压强发生 ΔP 的变化时，相应的其体积也发生了 ΔV 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 ΔP 与 ΔV 总是符号相反的缘故， β 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 α ，当质量为 M ，体积为 V 的流体温度发生 ΔT 的变化时，相应的其体积也发生了 ΔV 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， α 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，相应的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，相应的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 σ 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：

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

式中， f_x 、 f_y 、 f_z 为质量力在 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得。

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_{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：

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



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。对于液体来说，压强用相对压强表示；对于气体来说，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、动压和总压

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

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， $p/\rho g$ 称为压强水头，也就是压能项， p 为静压强； $v^2/2g$ 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机械能； H 称为总的水头高。

若把上式的等式两边同时乘以 ρg ，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; ρgH 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 $rot\vec{v} = 0$, 则流体做无旋运动; 若 $rot\vec{v} \neq 0$, 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 $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$, 则流体做不定常运动。

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 δ 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。

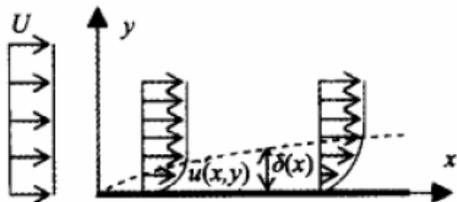


图 1-1 边界层示意图

边界层的厚度较物体的特征长度小得多, 即 δ/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。

对于二维平板或楔边界层方程, 可以通过量阶分析得到:



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1-18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

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：

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

式中， $\text{Re} = \frac{V_\infty d}{\nu}$ 。此式在 $\text{Re} < 1$ 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混掺；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 $\text{Re} \leq 2300$ 时，管流一定为层流； $\text{Re} \geq 8000 \sim 12000$ 时，管流一定为湍流；当 $2300 < \text{Re} < 8000$ ，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到连续相的质量（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； τ_{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。

应力张量由下式给出：

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

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。



技巧提示

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广泛被应用，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，计算流体力学具有对于参数没有什么限制、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，并将其抽象成为数学、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连续的空间。实施过程是把所计算的区域划分成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。

常用的离散化方法为有限差分法、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。它是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，尤其是椭圆形问题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化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集都得到满足，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：适合于处理复杂区域，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。

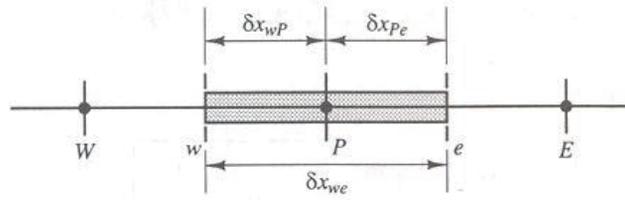


图 1-2 一维有限体积单元示意图

三维对流扩散方程的守恒型微分方程如下：

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

式中， ϕ 是对流扩散物质函数，如温度、浓度。

若上式用散度和梯度表示：

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

将方程（1-26）在时间步长 Δt 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： Δt 时间段控制体 CV 内 $\rho\phi$ 的变化，加上 Δt 时间段通过控制体表面的对流量 $\rho u\phi$ ，等于 Δt 时间段通过控制体表面的扩散量，加上 Δt 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 Δt 时段和控制体积内部对式（1-28）进行积分：

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

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， ΔV 是体积， $\Delta V = A\Delta x$ ， Δx 是控制体宽度， \bar{S} 为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：



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

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率,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、SIMPLEC和PISO。

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来计算压力场,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,必须重复计算直至平衡得到满足。

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和SIMPLEC算法所需的重复计算移除。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步中，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，过去主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验，而现在大多采用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，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正在发挥着越来越大的作用。

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：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：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（CFD）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到软件的最新版本中，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）热问题，多相流问题，化学反应/燃烧问题，旋转机械问题，流动噪音问题等。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软件是当今世界CFD仿真领域最为全面的软件包之一，具有广泛的物理模型，以及能够快速准确的得到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，从鼓风机到钻井平台，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 DesignModeler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-ε模型、低Reynolds数k-ε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模型和大涡模型。

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 DesignModeler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。



第 2 章

CFX 软件简介

CFX是目前国际上比较流行的商用CFD软件，只要是涉及流体、热传递及化学反应等的工程问题，都可以用CFX进行求解。CFX具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面有着广泛的应用。例如，在石油天然气工业上的应用就包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚集、多项流、管道流动等。

知识要点

- 掌握 CFX 软件的结构
- 掌握CFX计算分析过程中所用到的文件类型

2.1 CFX 的软件结构

ANSYS CFX不是单一的软件，而是由多个相互配合的软件模块构成的软件包。ANSYS CFX软件包含4个功能模块，分别为前处理器（CFX-Pre）、求解器（CFX-Solver）、求解管理器（CFX-Solver Manager）、后处理器（CFD-Post），如图 2-1 所示。

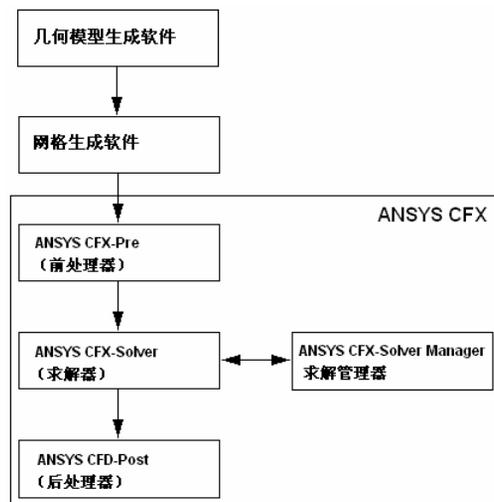


图 2-1 CFX 软件结构图

- 前处理器（CFX-Pre）：用于定义求解的问题，如流体介质的属性、计算区域的边界条件、选用的数学模型、求解的计算精度、迭代的步数、目标残差等。

- 求解器 (CFX-Solver)：是CFX软件模拟计算的核心程序，在后台执行，用户通过求解管理器来控制设置求解器。
- 求解管理器 (CFX-Solver Manager)：便于用户监视求解进程，用于显示CFX求解器输出的求解过程信息，如当前迭代步数、残差等。
- 后处理器 (CFX-Post)：用于完成计算结果的统计和图形化处理。

2.1.1 启动 CFX



启动运行CFX应用程序时，有直接启动及在Workbench中启动两种方式。

1. 直接启动

(1) Windows 系统

只要执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 19.0→Fluid Dynamics→CFX 19.0 命令，便可启动CFX程序进入软件主界面，或者在DOS窗口中输入“C:\Program Files\Ansys Inc\V140\CFX\bin\cfx5.exe”命令，也可以启动CFX程序。

(2) Linux 系统

在终端窗口中键入“/usr/ansys_inc/v140/CFX/bin/cfx5.exe”命令，即可启动CFX程序。

2. 在 Workbench 中启动

在Workbench中启动CFX程序时，首先需要运行Workbench程序，然后导入CFX计算模块，从而进入程序。步骤如下：

- 步骤 01** 在Windows系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 19.0→Workbench命令，启动ANSYS Workbench 19.0，进入如图 2-2 所示的主界面。

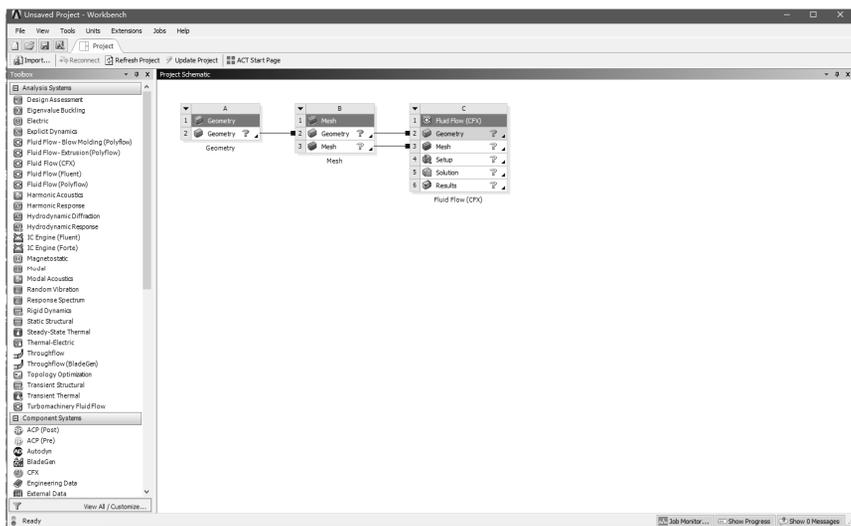


图 2-2 Workbench 主界面

- 步骤 02** 双击主界面Toolbox (工具箱) 中的Component Systems→CFX选项，即可在项目管理区创建分析



项目A，如图 2-3 所示。

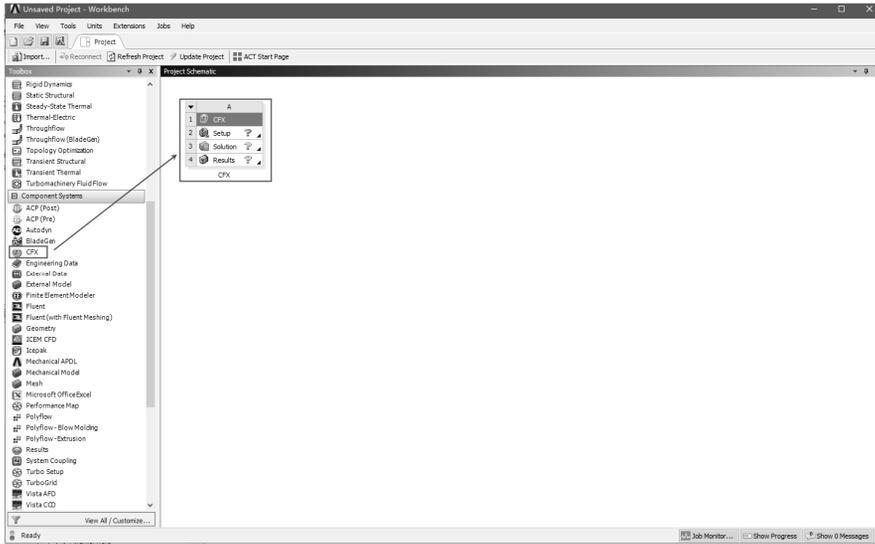


图 2-3 创建分析项目 A

步骤 03 双击分析项目A中的Setup，将直接进入CFX-Pre界面。CFX软件启动后进入Launcher界面，如图 2-4 所示。

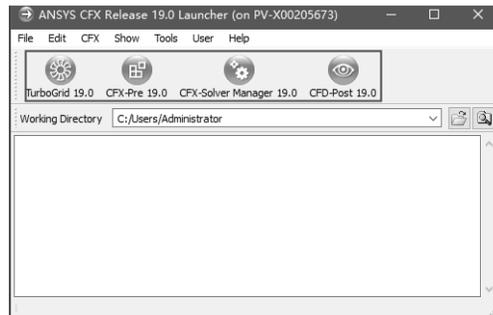


图 2-4 Launcher 界面

步骤 04 通过Launcher界面可以启动TurboGrid 19.0(旋转机械网格)、CFX-Pre 19.0(前处理器)、CFX-Solver Manager 19.0 (求解管理器) 和CFD-Post 19.0 (后处理器) 4 个功能模块。其中，TurboGrid 19.0 (旋转机械网格) 模块主要用于设置旋转机械，通过此模块可以进入旋转机械网格划分界面 (ANSYS TGRID 19.0)，然后通过导入几何图形、设置拓扑、生成网格等操作生成旋转机械网格文件，本书对此部分内容不做详细说明。

2.1.2 前处理器



前处理器 (CFX-Pre) 用于定义求解的问题，如流体介质的属性、计算区域的边界条件、求解参数、迭代的步数、目标残差等。

前处理器 (CFX-Pre) 的主要功能包括导入网格、设置求解条件、生成求解文件等。

- 前处理器 (CFX-Pre) 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信息、ICEM CFD生成的网格、Gambit生成的网格等。
- 前处理器 (CFX-Pre) 中可以设置的求解条件很多, 包括定常/非定常问题、求解域、边界条件和求解参数。
- 前处理器 (CFX-Pre) 会将使用者导入的网格和定义的求解条件统一输出到一个.def文件中, 供求解器求解时使用。

前处理器 (CFX-Pre) 界面如图 2-5 所示, 大致分为 5 个区域。

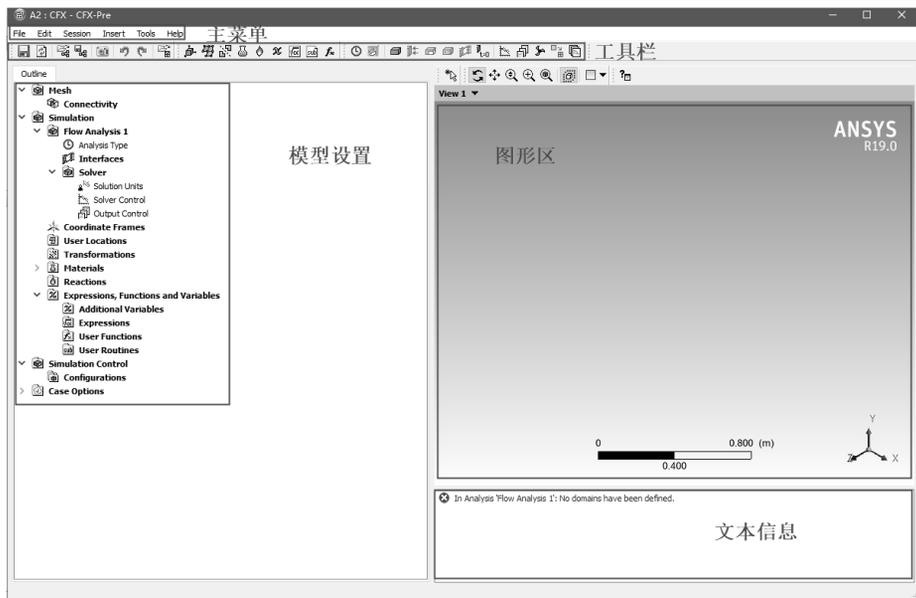


图 2-5 前处理器 (CFX-Pre) 界面

- 主菜单: CFX遵循了常规软件的方式, 主菜单里包含了软件的全部功能。
- 工具栏: 一般情况下, 使用这些工具栏中的按钮就足够了。
- 模型设置: 管理全部模型内容, 包括网格、求解域、边界条件、材料数据库、化学反应库等。
- 图形区: 以图形的方式直观显示模型计算结果。
- 文本信息区: 用于反馈CFX命令的执行情况。

2.1.3 求解管理器



CFX的求解过程实际上就是一个代数方程组的迭代求解过程, 在求解过程中求解器会反馈一些信息, 供使用者判断程序的求解运行过程是否正常。求解管理器 (CFX-Solver Manager) 就是这样一个反馈程序。

求解管理器 (CFX-Solver Manager) 具有下列主要功能:

- 启动一个新的求解过程, 启动前可以定义是否使用外部已有计算文件、是否使用并行。
- 监视正在进行的求解过程, 包括随迭代步变化的残差、监视点的状态参数和三个守恒方程的总体守恒满足程度等。



通过以上信息，可以判断求解过程是否正常，如果发现不正常求解，就可以通过求解管理器中止求解过程，或者动态修改求解参数或边界条件。

- 对于已经求解完成的问题，求解管理器（CFX-Solver Manager）还可以回放求解过程，辅助使用者发现求解过程中的问题。

如图 2-6 所示为求解管理器（CFX-Solver Manager）的界面，主要有两个区域。

- 左侧是收敛曲线，以图形方式显示随迭代步变化的各种收敛判断参数，包括残差、总体守恒度、用户自定义的监视点参数等。
- 右侧是相应的文本信息，在求解出错时，收敛曲线往往只能看到一个不收敛的结果，而文本信息会给使用者提供尽可能多的错误信息，并对如何修改模型提出建议。

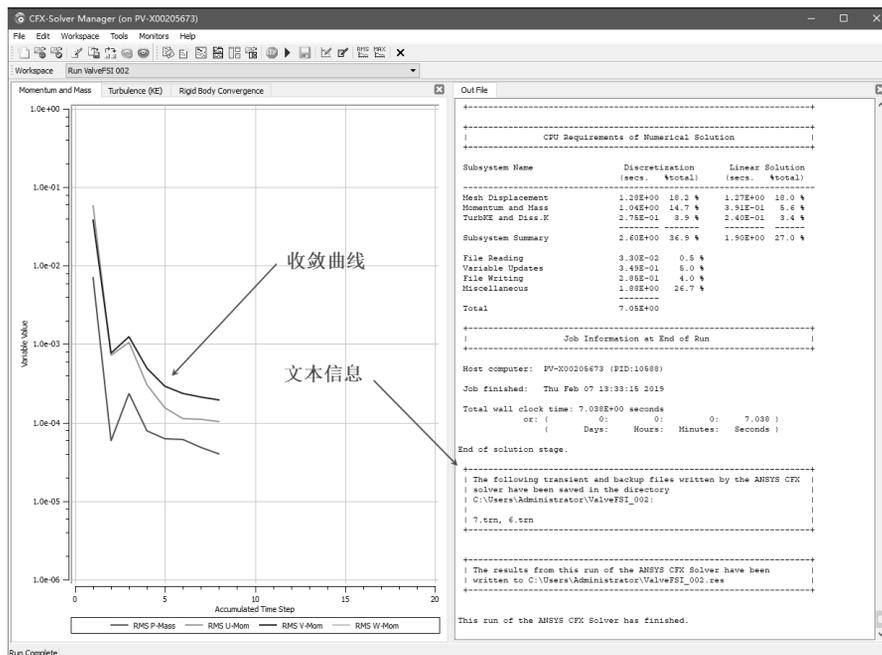


图 2-6 求解管理器（CFX-Solver Manager）界面

2.1.4 后处理器



求解完成后，需要使用后处理器（CFD-Post）对求解后的数据进行图形化显示和统计处理。如图 2-7 所示为后处理器（CFD-Post）的界面。

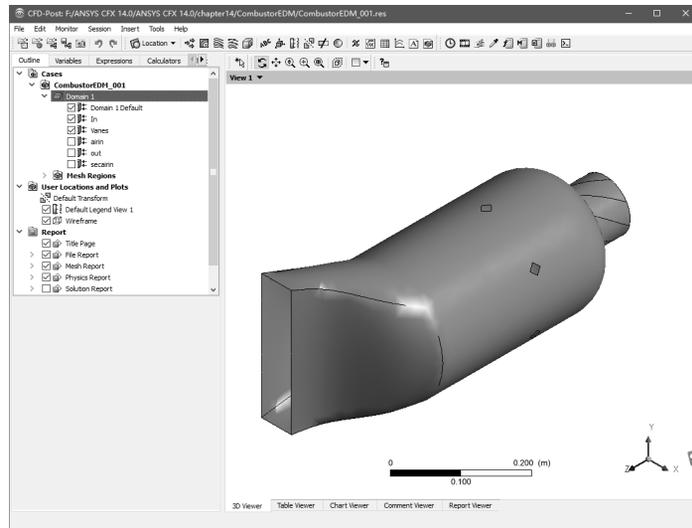


图 2-7 后处理器 (CFD-Post) 界面

后处理器 (CFD-Post) 具有一般后处理器的全部特征, 包括打开结果文件、建立几何特征、生成矢量图/云图、计算统计量、生成动画、导出文本数据等。

后处理器 (CFD-Post) 还可以建立自己的宏命令, 从而构建一套针对特定问题的后处理。后处理器 (CFD-Post) 具有一套专门针对旋转机械的后处理功能, 就是使用宏命令编写的。

2.2 CFX 的文件类型

在创建模型进行计算分析的过程中, CFX 软件将生成一系列的文件, 不同的文件类型具有不同的文件扩展名, 表 2-1 中对这些文件的作用进行了简要介绍。

表 2-1 CFX 文件类型

文件类型	扩展名	作用
项目文件	.cfx	记录物理数据、区域定义、网格信息
网格文件	.cfx, .cfx5, .msh	记录网格数据信息
求解器输入文件	.def, .mdef	记录物理模型、网格数据信息
计算结果文件	.res, .mres	记录中间计算结果、最终计算结果
计算结果备份文件	.bak	文件备份
瞬态计算结果文件	.trn	记录瞬态计算结果
错误记录文件	.err	记录计算过程中的错误信息
信息文件	.pre	记录执行的 CFX 命令语言 (CCL)
CFX 命令语言文件	.ccl	记录 CFX 命令语言

在CFX计算分析的过程中, 不同功能模块将会用到的文件类型如图 2-8 所示。

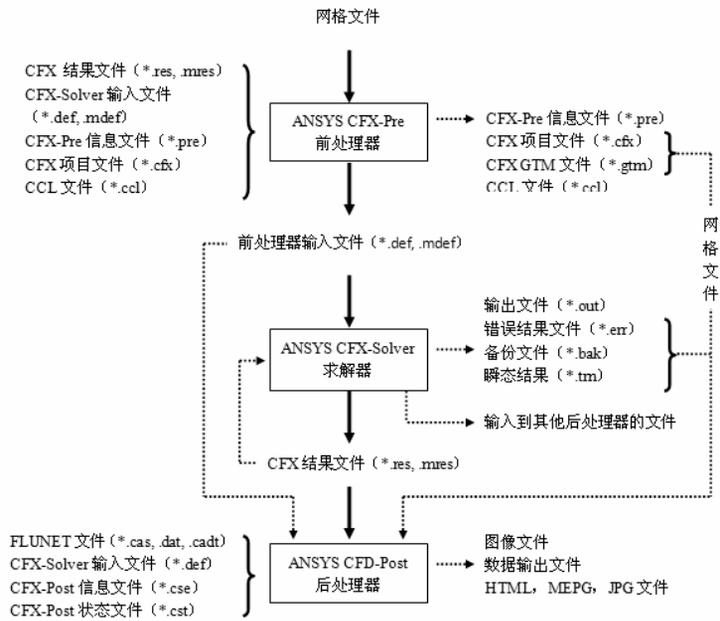


图 2-8 CFX 文件类型

2.3 本章小结

本章介绍了CFX软件的结构和计算分析过程中所用到的文件类型。通过对本章内容的学习，读者可以掌握CFX的基本概念，为后面的学习打下基础。



第 3 章

创建几何模型

创建几何模型是进行计算流体模拟分析的基础，建立良好的几何模型既可以准确地反应所研究的物理对象，又能够方便地进行下一步的网格划分工作。目前，创建几何模型的方法主要有通过网格生成软件直接创建模型和采用三维CAD软件进行几何建模。

本章将重点对DesignModeler软件进行介绍，并通过一个实例来详细介绍DesignModeler的工作流程。

知识要点

- 掌握建立几何模型的基本概念
- 掌握 DesignModeler 软件的使用方法
- 通过实例掌握DesignModeler的工作过程

3.1 建立几何模型概述

在进行计算流体力学计算分析之前，首先要根据所研究的对象建立几何模型。目前，创建几何模型的方法主要有两种。

1. 通过网格生成软件直接创建模型

目前主流的网络生成软件都具备创建几何模型的功能，通过这种方法创建的几何模型精度高，但操作过程相对麻烦，创建复杂的几何模型较为困难。

2. 采用三维 CAD 软件进行几何建模

先通过三维CAD软件创建几何模型，然后转化为网格生成软件可以识别的接口文件，导入网格生成软件后再进行网格划分。通过这种方法创建模型较为方便，能够生成复杂的几何模型，但模型的几何精度一般不高，在导入网格软件后必要时需要进行修复。

下面重点介绍ANSYS Workbench 19.0 中DesignModeler模块的使用方法，这个模块具备一般三维CAD软件使用方便的优点，同时能够保证创建的模型具备较高的几何精度。与其他CAD软件类似，DesignModeler几何建模主要有 3 种方法。

- 自底向顶的建模方法：所谓自底向顶的建模方式就是按“点→线→面”一体的顺序依次建模，它符合设计人员的建模逻辑，对于概念设计阶段的产品建模非常适合。
- 自顶向底的建模方法：它是直接利用体元，通过布尔运算的方法，合并、分割和相交等方式建立复杂的几何模型。这种方式的优点是建模快速，能充分利用已有设计模型及子模型，故而也被广泛采用。



- 混合使用前两种方法：结合前两种方法进行综合运用，但应考虑到要获得什么样的有限元模型，即在进行网格划分时，是要产生自动网格划分还是映射网格划分。自动网格划分时，实体模型的建立比较简单，只要所有的面或体能结合成一个体就可以；而映射网格划分时，平面结构一定要由 3 或 4 个边围成，体结构则要求由 4 或 5 或 6 个面围成。

3.2 DesignModeler 简介

DesignModeler 19.0 是 ANSYS Workbench 19.0 中创建几何模型的平台。从界面上看，DesignModeler 类似于一般的 CAD 工具，但与普通的 CAD 软件又不同。

DesignModeler 主要是为 ANSYS 中有限元分析和计算流体力学分析服务的，它具有的一些功能也是一般 CAD 软件所不具备的，如梁建模、封闭操作、填充操作、点焊设置等。

要进入 DesignModeler 界面，可由 CAD 几何体开始，一般包括以下 3 种方式，具体如图 3-1 所示。

- 从一个打开的 CAD 系统中探测并导入当前的 CAD 文件（File → Attach to Active CAD Geometry）。
- 导入外部集合体（File → Import External Geometry File），几何体格式有 Parasolid、SAT 等。
- 导入杆件模型（File → Import Shaft Geometry），通过一个描述杆件内径、外径和长度的 TXT 文件，建立杆件的 CAD 模型。

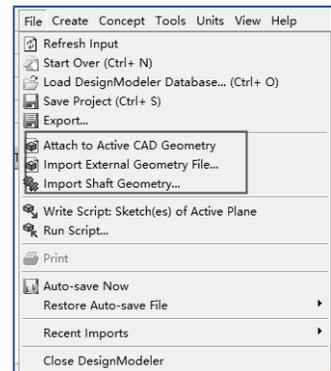


图 3-1 进入 DesingModeler 的方式

进入 DesignModeler 之后，首先呈现在眼前的是如图 3-2 所示的 DesignModeler 用户界面。

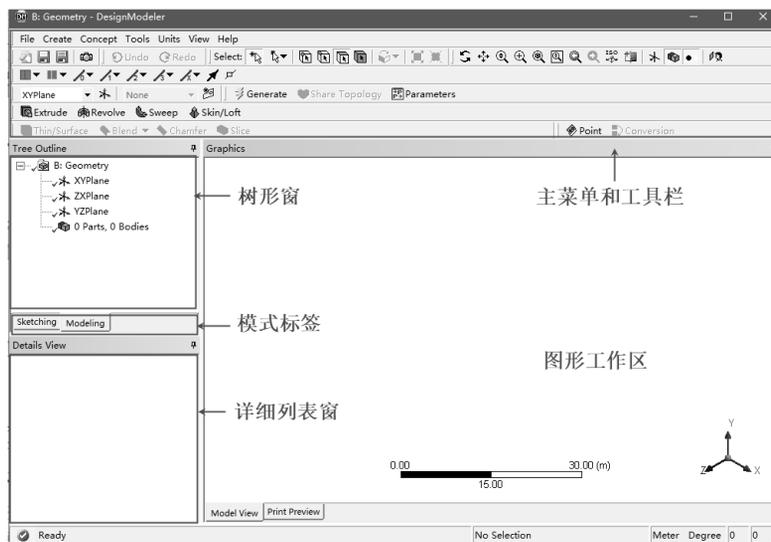


图 3-2 DesignModeler 用户界面

可以看出，DesignModeler 的用户界面实际上与目前流行的三维 CAD 软件非常类似。同样，DesignModeler 也允许用户配置个人窗口来满足使用要求，如利用鼠标移动和调整窗口等。下面来认识一下 DesignModeler

的基本结构。

DesignModeler的主要功能都集成于它的各项主菜单之中，如创建文件、具体操作和帮助文件等。这部分主要包括6项内容，如图3-3所示。

- **File:** 这是基本文件操作，包括常规的文件输入、输出、保存及脚本的运行等功能，子菜单如图3-4所示。

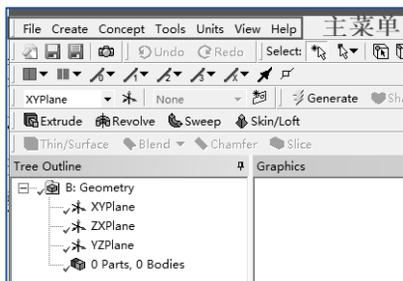


图 3-3 DesignModeler 主菜单

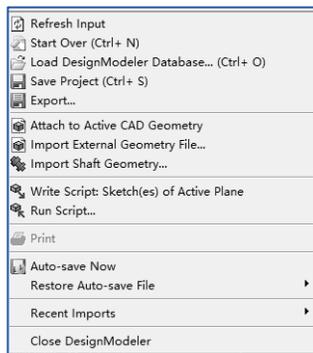


图 3-4 File 子菜单

- **Create:** 用于创建3D模型和修改操作工具（如布尔运算、倒角等），如图3-5所示。
- **Concept:** 用于创建梁模型和面（壳体），子菜单如图3-6所示。
- **Tools:** 用于整体建模操作、参数管理及定制程序等，子菜单如图3-7所示。

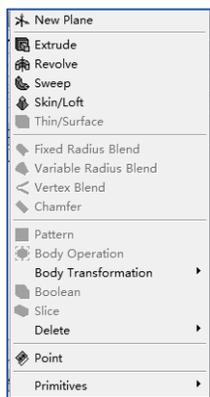


图 3-5 Create 子菜单

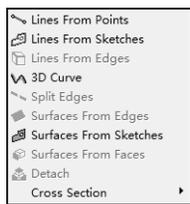


图 3-6 Concept 子菜单

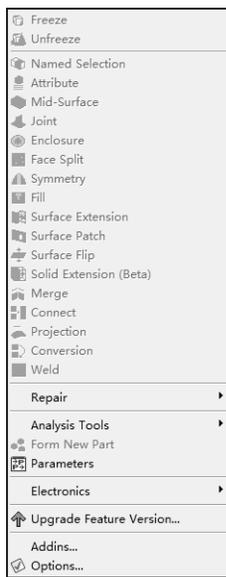


图 3-7 Tools 子菜单

- **View:** 这是用来设置显示项的工具。例如，在梁模型中利用显示功能可以直观地看到梁单元的横截面。其子菜单如图3-8所示。
- **Help:** 这是帮助文档，在使用DesignModeler的过程中碰到一些问题或者有一些不清楚的地方，随时可以使用帮助文档，子菜单如图3-9所示。

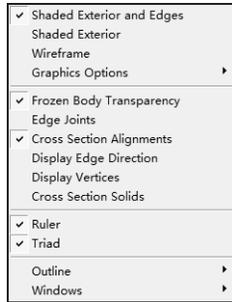


图 3-8 View 子菜单

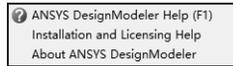


图 3-9 Help 子菜单

除了上述菜单之外，为了便于用户使用，DesignModeler还将一些常见的功能组成工具条形式放置在主菜单下面，只要用鼠标单击相应的图标就可以直接使用。

常见的工具条如图 3-10 所示，包括图形控制器、平面/草图控制器、选择过滤器、3D几何体建模工具等。

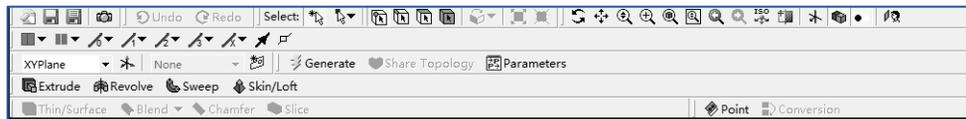


图 3-10 DesignModeler 工具条

3.3 草图模式

在DesignModeler中，创建二维几何体是在草图模式下完成的。这些二维几何体主要是为创建 3D几何体和概念建模做准备的。本节主要学习如何在草图模式下进行 2D建模。

3.3.1 进入草图模式

在开始进行一个新的模型设计之前，首先会出现一个长度单位对话框供用户选择需要的长度单位（可以将其设置为默认值）。当确定长度单位后，就可进入到草图模式中。



单位不能在操作过程中改变，如图 3-11 所示。

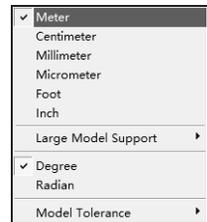


图 3-11 长度单位对话框

3.3.2 创建新平面

因为在DesignModeler中草图都是要在平面上创建的，所以用户必须先建立一个工作平面用来绘制草图。用户可以根据需要任意创建平面，而且一个平面可以和多个草图相关联。

选择  来创建新平面，这时在下拉列表中会显示构建新平面的几种类型，如图 3-12 所示。

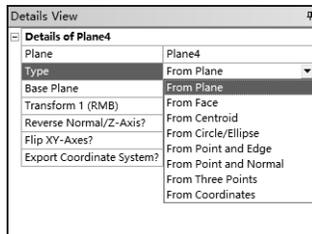


图 3-12 构建新平面

- From Plane: 从另一个已有面创建平面。
- From Face: 从表面创建平面。
- From Point and Edge: 用一点和一条直线的边界定义平面。
- From Point and Normal: 用一点和一条边界方向的法线定义平面。
- From Three Points: 用三点定义平面。
- From Coordinates: 通过键入距离原点的坐标和法线定义平面。

3.3.3 创建草图



当平面创建好以后，就可以在平面上创建草图了。操作时只要用鼠标单击草图  按钮就能在激活的平面上新建草图。

当然，也可以从平面中直接建立面/草图的快捷方式。操作时只要先选中将要创建新平面所用的表面，然后直接切换到草图标签就可以开始绘制草图了，过程如图 3-13 所示。

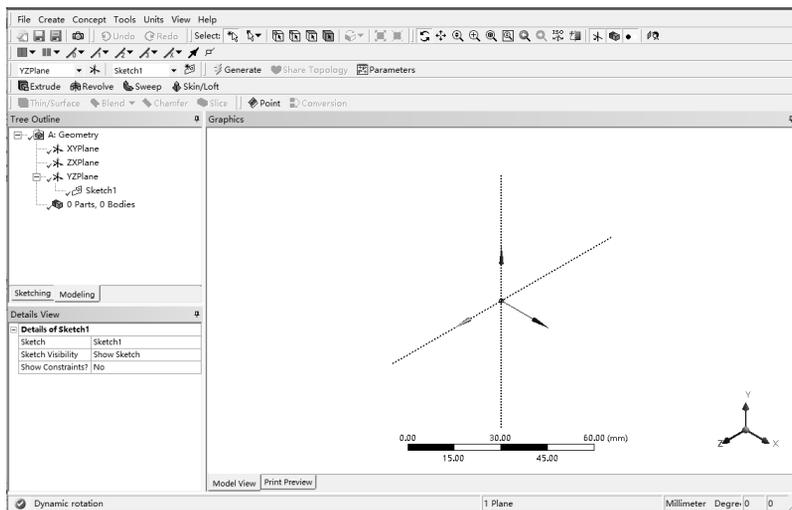


图 3-13 直接建立面/草图

进入草图模式界面后，一系列 Sketching Toolboxes 面板都将出现在草图模式界面的左边，如图 3-14 所示。

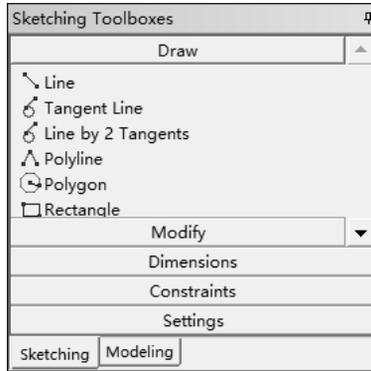


图 3-14 Sketching Toolboxes 面板



技巧提示

利用 Toolboxes 面板绘制草图时会发现, DesignModeler 的草图与目前主流 CAD 软件的草图非常类似, 也容易上手, 对于常规性的绘图过程本书就不作详细介绍了(本书后面有一些 2D 建模的实例操作过程)。

3.3.4 几何模型的关联性



DesignModeler 本身的建模虽然与 CAD 软件的建模思路非常类似, 但是 DesignModeler 也有其自己的特点, 如能与绝大多数 CAD 的几何模型建立关联性。

所谓双向关联性是指, 当外部 CAD 中的模型发生变化时, DesignModeler 中的模型只要刷新便可同步更新, 同样, 当 DesignModeler 中的模型发生变化时只要通过刷新, CAD 中的模型即可同步更新。



技巧提示

若要在 DesignModeler 与 CAD 软件之间建立关联性, 则前提是 CAD 程序一定是开启的。至于能与哪些主流 CAD 软件建立关联性, 本书后面会进行详细讲述。

操作过程为: File→Attach to Active CAD Geometry, 如图 3-15 所示。

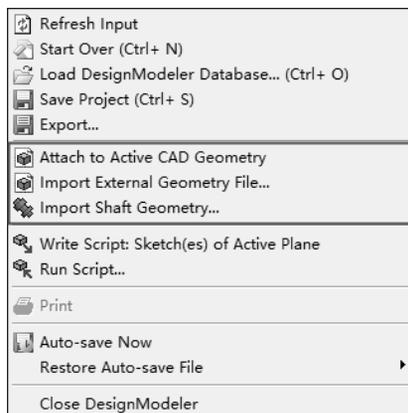


图 3-15 与 CAD 软件间的关联性

3.4 创建 3D 几何体

在DesignModeler草图中建立 2D 几何体后, 只需将 2D 几何体通过一定的拉伸、旋转等操作就能生成 3D 几何体。

同样, 在DesignModeler中生成 3D 几何体的过程与普通CAD软件生成 3D 几何体的建模过程非常类似。只要有一点CAD建模的基本知识, 相信完全能够掌握这些内容。

在DesignModeler中只有两种状态的几何体。

- 激活状态的几何体: 在这种情况下, 几何体可以进行常规的建模操作, 如布尔操作等, 但不能被切片 (Slice)。切片操作属于DesignModeler的特色之一, 这主要是为后面网格划分中划分规则的六面体服务的。
- 冻结状态的几何体: 之所以要对几何体冻结, 实际上就是对几何体进行切片操作。由于建模中的操作除切片外均不能用于冻结体, 所以用户若要在以后划分出高质量的六面体网格, 就要对一些不规则的几何体切片成形状规则的几何体。

DesignModeler包括三种体元, 即 3D 实体 (Solid Body)、面体 (Surface Body) 和线体 (Line Body)。图 3-16 为 3D 建模工具栏, 常用的建模工具按钮及使用说明如下。



图 3-16 3D 建模工具栏

3.4.1 拉伸 (Extrude)

拉伸可以用于创建面体和 3D 实体, 当前激活的 2D 草图为拉伸命令默认的操作图元, 用户可以改变拉伸命令的属性, 如拉伸长度、方向及布尔运算的方式, 控制实体或面体的创建。在拉伸属性设置完毕后, 单击  按钮, 即可生成相应的实体。

例如, 生成一个圆柱体, 可以按照图 3-17 的提示单击  按钮, 设置圆柱的高度为 30mm, 单击  按钮完成建模过程。

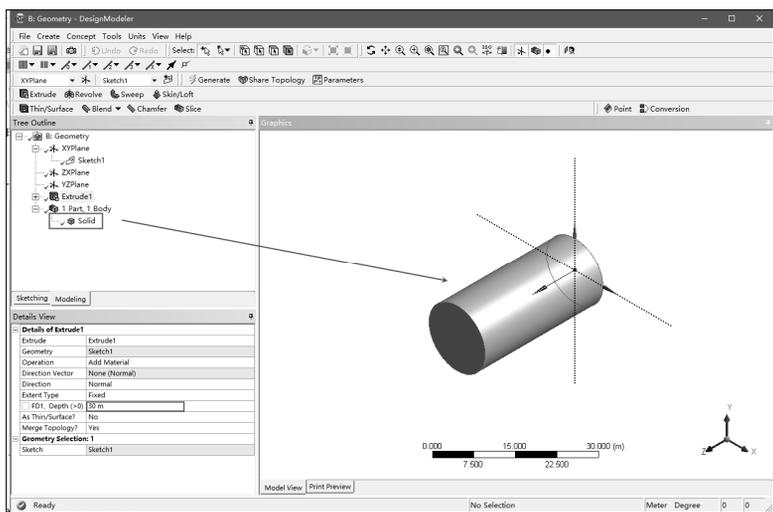


图 3-17 拉伸建模实例



3.4.2 旋转 (Revolve)

旋转命令用于创建 3D 轴对称的旋转体，整个创建过程与拉伸操作类似，也有选择、属性设置和创建三个步骤。区别是在选择时必须制定旋转轴。

图 3-18 给出了用旋转命令来创建实体圆柱的操作过程。

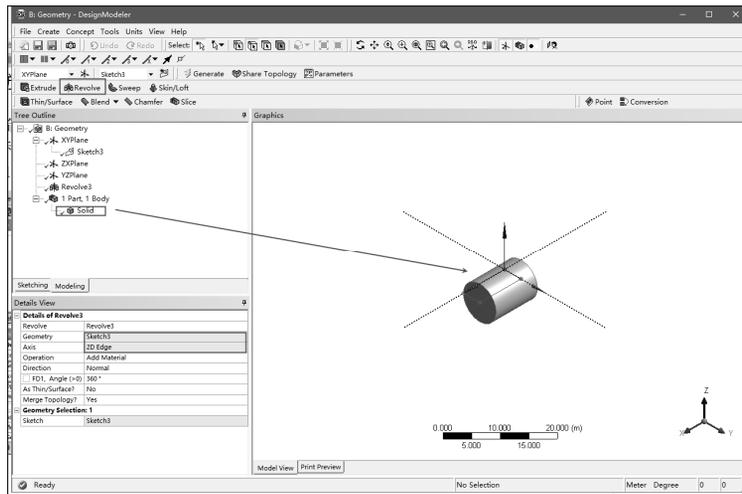


图 3-18 旋转建模实例

3.4.3 扫掠 (Sweep)

扫掠命令可以把几何元素经过不同的形成方式在空间中扫描曲面。如图 3-19 所示为矩形沿着圆弧扫描成扇形体。

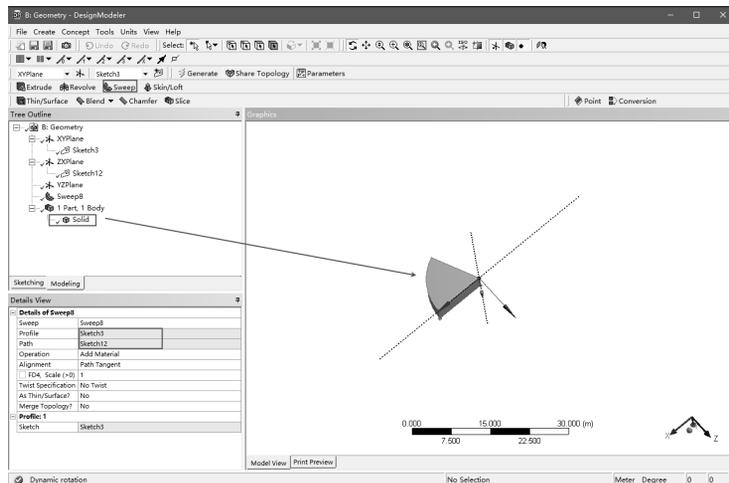


图 3-19 扫掠建模实例

3.4.4 直接创建 3D 几何体 (Primitives)



与上述图元的创建类似，在DesignModeler中，用户可以通过指定角点、中心点以及通过坐标设置等不同的方式来创建棱锥体、圆锥体、球体和圆环体。

该方法因无须事先绘制 2D 草图，故而更加快捷，可以直接生成 3D 图元，如图 3-20 所示。

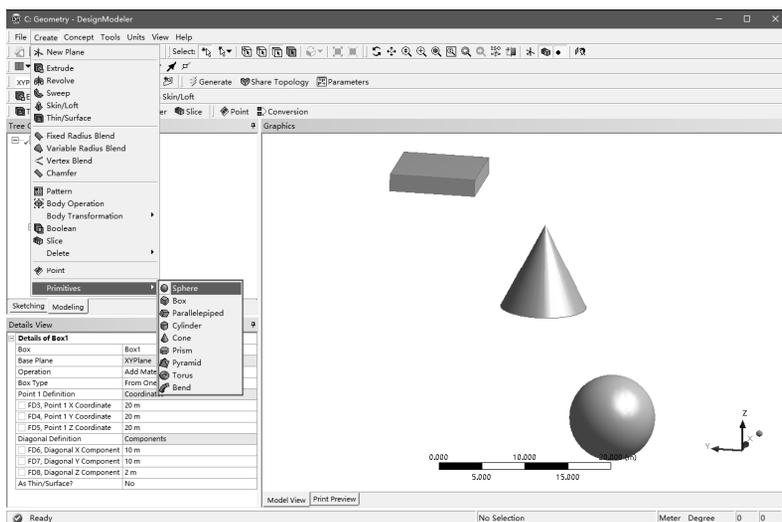


图 3-20 3D 建模实例

3.4.5 填充(Fill)和包围(Enclosure)



填充 (Fill) 和包围 (Enclosure) 这两个操作是在CFD (计算流体力学) 计算建模的过程中经常用到的。如图 3-21 所示是一个管道，流体在管道内流动，现在来对管道内的流体进行分析。

在CAD建模的时候只是创建了固体的管道部分，而CFD分析实际上是对管道空腔内的流体进行分析。此时只要采用填充操作就能建立流体部分的几何体。

下面就以此为例来说明填充的操作过程。

- 步骤 01 在主菜单中执行Tool→Fill命令。
- 步骤 02 用鼠标在选择过滤器中选取类型为面。
- 步骤 03 选中内腔中的两个圆柱面。
- 步骤 04 将Extraction Type设置为By Cavity (腔填充)，并单击Apply按钮。
- 步骤 05 单击Generate按钮。

以上操作过程如图 3-22 所示。

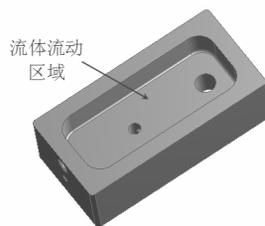


图 3-21 管道模型

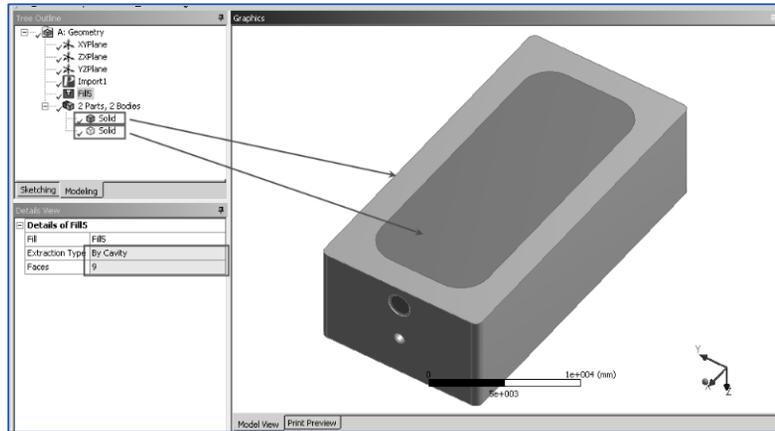


图 3-22 填充 (Fill) 操作过程

对于包围 (Enclosure) 操作, 若要对正在飞行的导弹进行分析, 则在建模的时候只对固体的导弹建模, 而分析时却是将导弹周围的空气作为研究对象, 此时只要采用包围 (Enclosure) 操作就能为周围的空气建立模型。包围 (Enclosure) 操作与填充操作类似, 本书就不再详细讲述了。

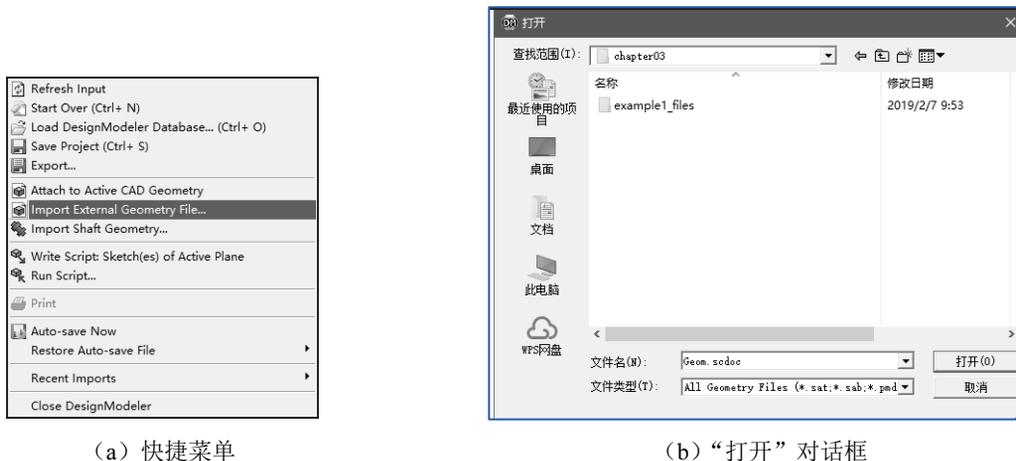
3.5 导入外部 CAD 文件

许多人不熟悉 DesignModeler 建模的命令, 但大多数人都熟悉一种或多种 CAD 软件, 用户可以先在自己熟悉的 CAD 系统中建好模型再将模型导入 DesignModeler 中。

DesignModeler 的优点之一就是能与大多数主流的 CAD 软件协同建模。它不但能读入外部 CAD 模型, 还能嵌入到主流 CAD 软件系统中。

在 CAD 软件中建好模型后, 可以将模型转成第三方格式, 然后导入 DesignModeler 中。目前 DesignModeler 能读入外部模型的格式有 ACIS、AutoCAD、Catia V4、Catia V5、Creo Elements/Direct Modeling、Creo Parametric、Inventor、JTOpen、Parasolid、SolidWorks、Solid Edge。

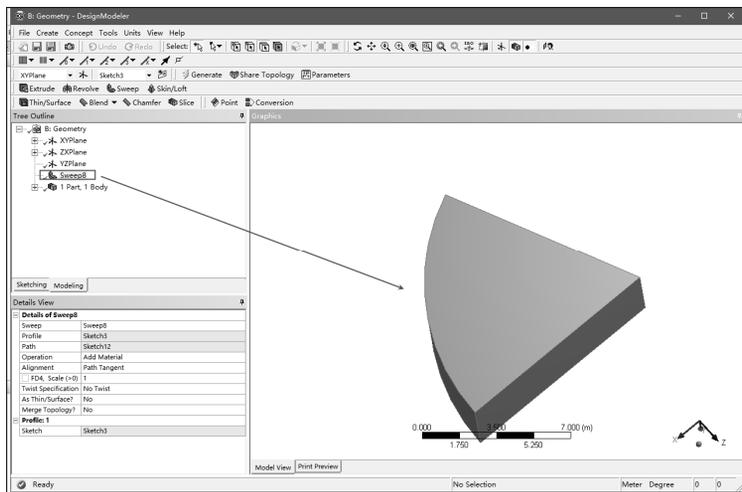
导入时的命令为 File → Import External Geometry File, 操作过程如图 3-23 所示。



(a) 快捷菜单

(b) “打开”对话框

图 3-23 导入文件的操作过程



(c) 几何模型显示

图 3-23 导入文件的操作过程 (续)

在这种情况下导入后的几何体与原先的外部几何体就没有关联性了。若想使CAD中的模型与导入DesignModeler中的模型仍然保持关联性，即二者能相互刷新、协同建模，则需要将DesignModeler嵌入到主流CAD系统中。

若想将DesignModeler嵌入到CAD系统中，则先要安装相应的CAD系统，然后在ANSYS中进行相应的设置，如图 3-24 所示。

若当前CAD系统已打开，则从DesignModeler输入CAD模型后，CAD系统与DesignModeler自动保持双向刷新功能；若需要采用参数化双向刷新功能，则参数采用的默认格式是DS_XX形式。这样二者之间就能通过改变参数值来相互刷新几何体了。

当然，DesignModeler能从外部导入几何体，反过来它也能向外输出几何体模型，其命令为File→Export，如图 3-25 所示。

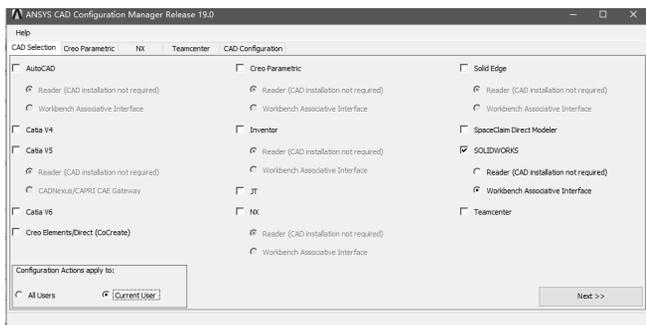


图 3-24 ANSYS 安装过程

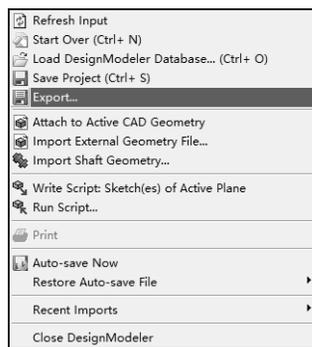


图 3-25 几何模型输出

3.6 创建几何体的实例操作

在了解了DesignModeler的基本功能后，先通过一个实例来巩固一下这些知识。下面的实例过程是先从



外部导入几何体，然后在DesignModeler中对导入的模型加以修改，相应的过程如下。

- 步骤 01** 在Windows系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 19.0 →Workbench 19.0 命令，启动Workbench 19.0。
- 步骤 02** 进入Workbench 19.0 界面后，在任务栏中单击 (保存)按钮进入Save Case (保存项目)对话框，在File name (文件名)中输入example1.wbpj，再单击Save按钮保存项目文件。
- 步骤 03** 双击主界面Toolbox (工具箱)中的Component Systems→Geometry (几何体)选项，即可在项目管理区创建分析项目A，如图 3-26 所示。
- 步骤 04** 双击项目A中的A2 栏Geometry，此时会进入到DesignModeler界面，弹出长度单位选择对话框，如图 3-27 所示，选中Millimeter单选按钮，单击OK按钮。

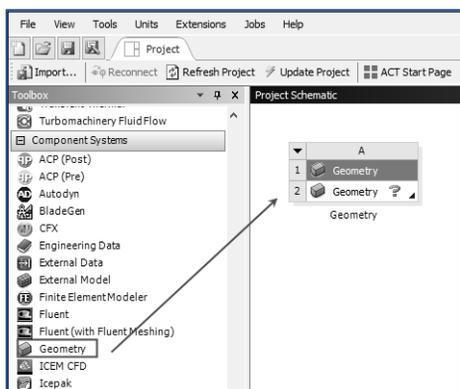


图 3-26 创建分析项目

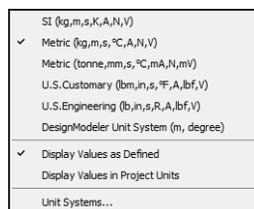


图 3-27 长度单位选择对话框

- 步骤 05** 在Geometry树中单击ZXPlane，选择ZX平面为草图放置平面，然后单击按钮新建草图Sketch1，如图 3-28 所示。为了便于操作，可选择单击按钮，选择视图正视自己的视角。

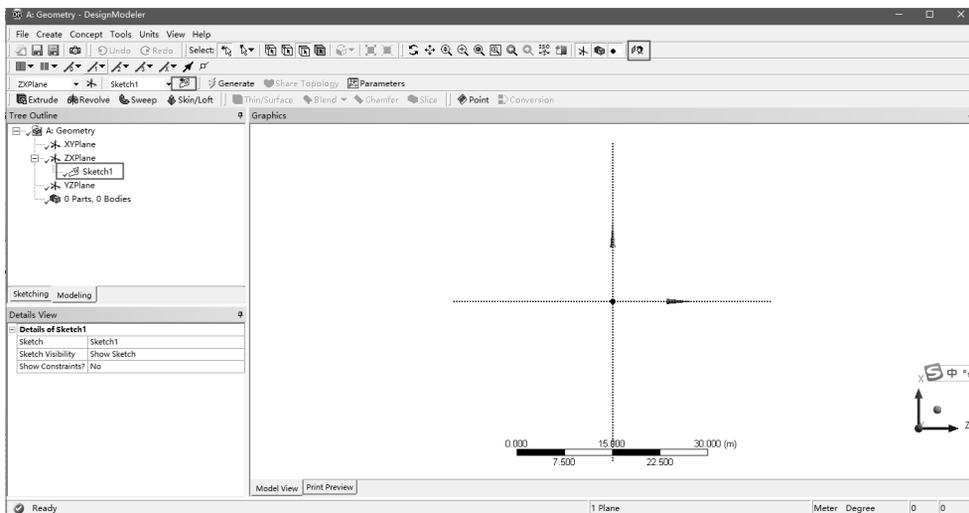


图 3-28 进入草图

- 步骤 06** 选择Sketching选项卡进入Sketching Toolboxes窗口，单击Draw (画图)项中的Rectangle (矩形)按钮，在图形工作区的不同地方单击鼠标两次，生成一个矩形，然后单击Draw (画图)项中的Circle (圆形)按钮，在图形工作区中单击鼠标并拖动，生成一个圆形，如图 3-29 所示。

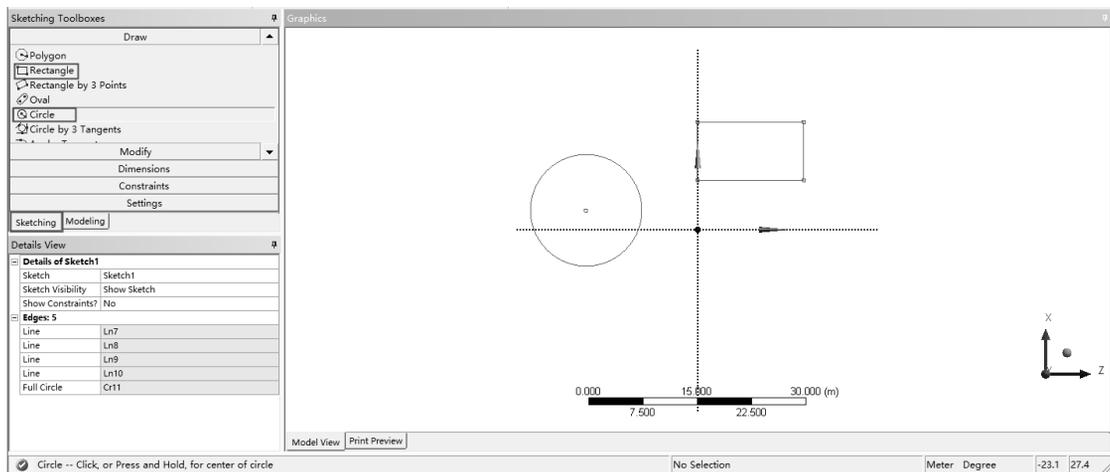


图 3-29 绘制矩形与圆形

步骤 07 如图 3-30 所示,单击Dimensions(尺寸)项中的Diameter(直径)按钮,将圆形的直径设置为 10mm,再单击Dimensions(尺寸)项中的Horizontal(水平)按钮,将圆形圆心到X轴的距离设置为 15mm,矩形的长边长度设置为 20mm,矩形左边到X轴的距离设置为 20mm,单击Dimensions(尺寸)项中的Vertical(竖直)按钮,将圆形圆心到矩形上边的距离设置为 5mm,矩形的短边长度设置为 10mm,矩形下边到Z轴的距离设置为 5mm。

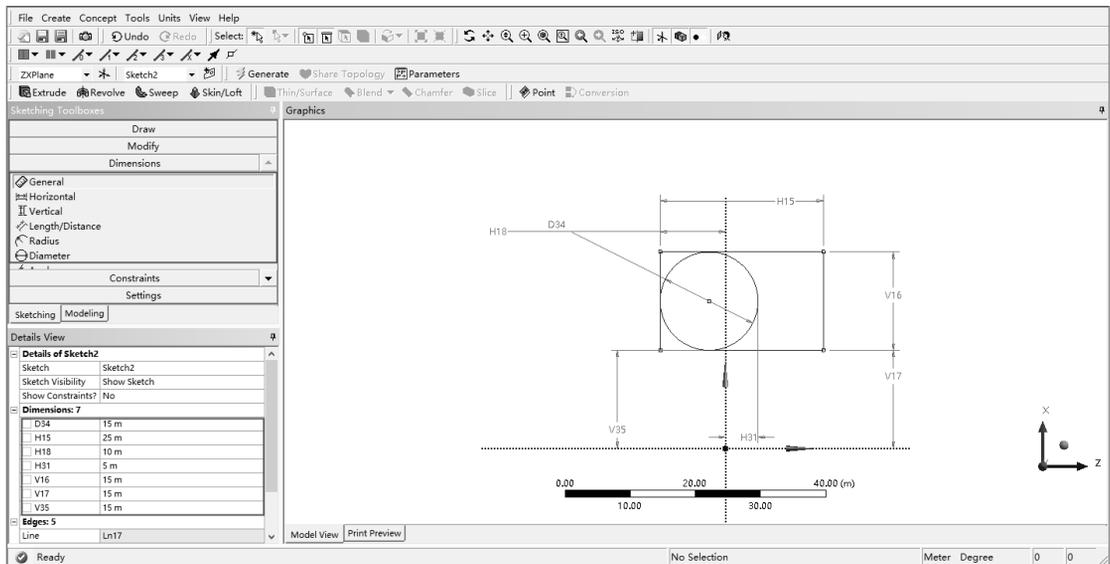


图 3-30 尺寸设置

步骤 08 单击Modify(修改)项中的Fillet(倒角)按钮,设置倒角半径为 2.5mm,再单击Trim(修剪)按钮,将圆形与矩形重叠区域的线段删除,如图 3-31 所示。

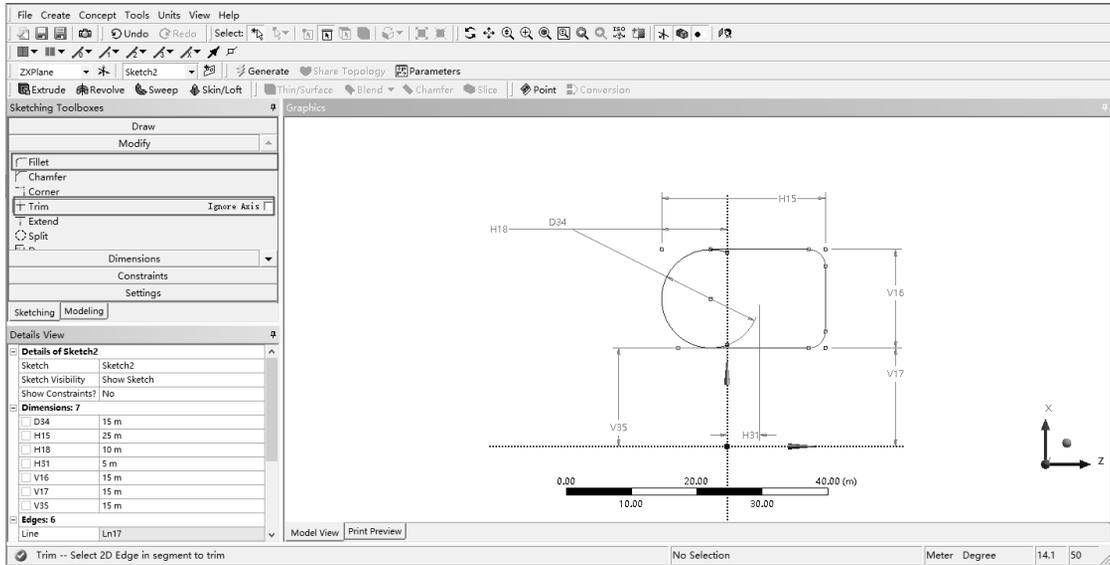


图 3-31 草图修改

步骤 09 单击工具栏中的 **Extrude** (拉伸) 按钮, 选中创建的草图并在 **Details View** 工具栏中设置 **Depth** (高度) 为 20mm, 单击工具栏中的 **Generate** (生成) 按钮来生成三维几何体, 如图 3-32 所示。

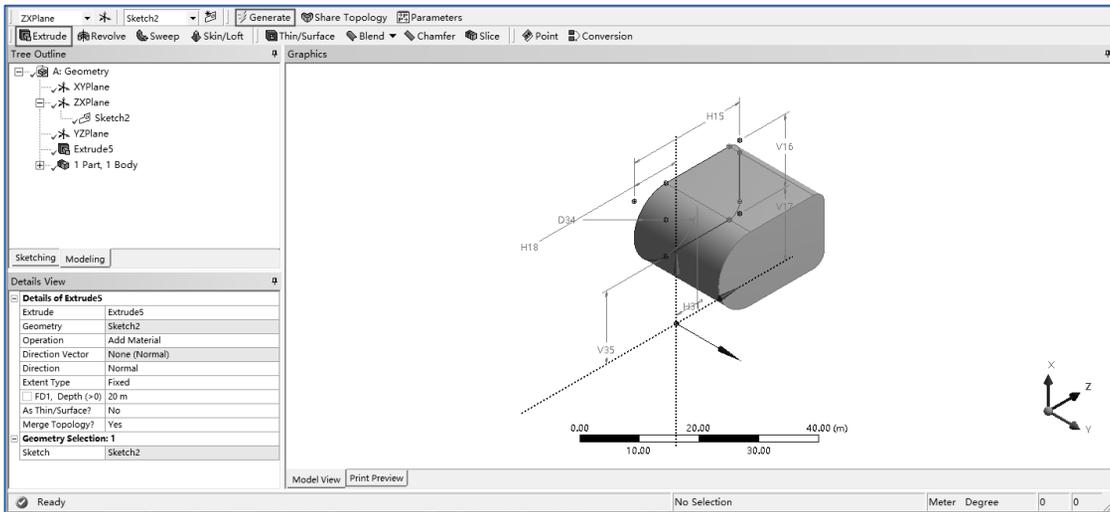


图 3-32 生成三维模型

步骤 10 在主菜单中执行 **Tools** → **Enclosure** (包围) 命令, 在 **Details View** 工具栏中设置 6 个面的 **Cushion** (隔离) 为 100mm。单击工具栏中的 **Generate** (生成) 按钮来生成三维几何体外流场计算区域, 如图 3-33 所示。

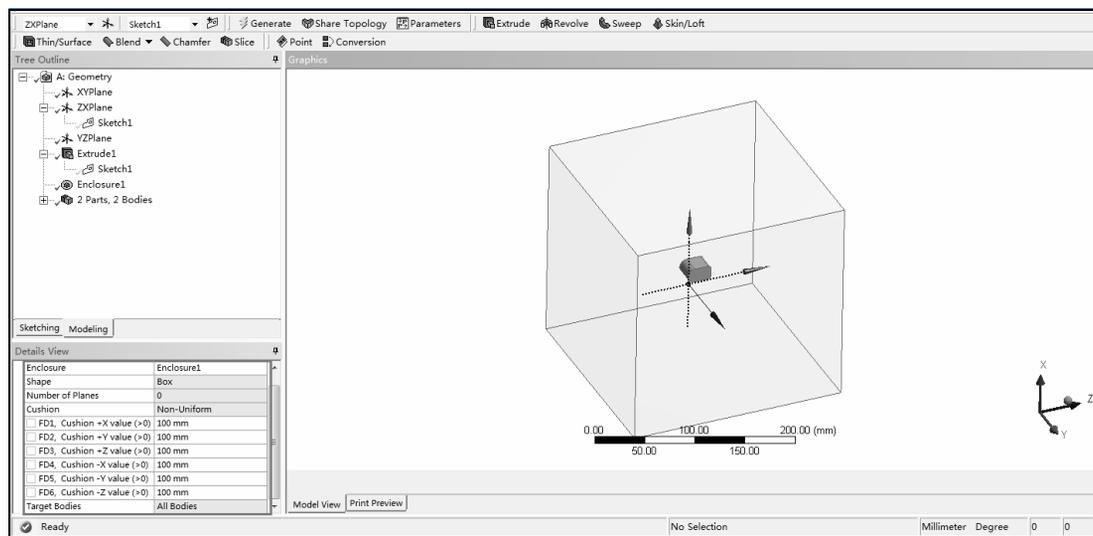


图 3-33 外流场计算区域

3.7 本章小结

本章首先介绍了建立几何模型的基本知识，然后讲解了DesignModeler建立几何模型的基本过程，最后给出了运用DesignModeler建立几何模型的典型实例。通过对本章内容的学习，读者可以掌握DesignModeler的使用方法。



第 4 章

生成网格

在使用商用 CFD 软件的过程中，大约有 80%的时间是花费在网格划分上的，可以说网格划分能力的高低是决定工作效率的主要因素之一。特别是对于复杂的CFD问题，网格生成极为耗时，且极易出错，因此，网格质量将直接影响CFD计算的精度和速度，有必要对网格生成方式给予足够的关注。本章将重点介绍如何利用专业的前处理软件ANSYS ICEM CFD来生成网格。

知识要点

- 掌握网格生成的基本概念
- 掌握 ANSYS ICEM CFD 软件的基本使用方法
- 通过实例掌握ANSYS ICEM CFD的工作过程

4.1 网格生成概述

利用CFD计算分析的第一步是生成网格，即要对空间上连续的计算区域进行剖分，把它划分成许多个子区域并确定每个区域中的节点。

由于实际工程计算中大多数计算区域较为复杂，因而不规则区域内网格的生成是计算流体力学中一个十分重要的研究领域。实际上，CFD计算结果的最终精度及计算过程的效率主要取决于所生成的网格与所采用的算法。

现有的各种生成网格的方法在一定的条件下都有其优越性和弱点，各种求解流场的算法也各有其适应范围。一个成功而高效的数值计算，只有在网格的生成及求解流场的算法这两者之间有良好的匹配时才能实现。

自从 1974 年Thompson等人提出生成贴体坐标的方法以来，网格生成技术在计算流体力学及传热学中的作用日益被研究者们重视。

网格生成技术的基本思想是根据求解物理问题的特征，构造合适的网格布局，且将原物理坐标 (x,y,z) 内的基本方程变换到计算坐标 (ξ,η,ζ) 内的均匀网格求解，以提高计算精度。

从总体来说，CFD计算中采用的网格可以大致分为结构化网格和非结构化网格两大类。一般情况下的数值计算中，正交与非正交曲线坐标系中生成的网格都是结构化网格，其特点是每一节点与其邻点之间的连接关系固定不变且隐含在所生成的网格中，因而我们不必专门设置数据去确认节点与邻点之间的这种联系。

从严格意义上讲，结构化网格是指网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元。结构化网格的主要优点是：

- 网格生成的速度快。
- 网格生成的质量好。

- 数据结构简单。
- 对曲面或空间的拟合大多采用参数化或样条插值的方法得到，区域光滑，与实际模型更接近。
- 它可以很容易地实现区域的边界拟合，便于流体和表面应力集中等方面的计算。

结构化网格最典型的缺点是适用的范围比较窄。尤其是随着近几年计算机和数值方法的快速发展，人们对求解区域的复杂性的要求越来越高，在这种情况下，结构化网格生成技术就显得力不从心了。

在结构化网格中，每一个节点及控制容积的几何信息必须加以存储，但该节点的邻点关系则是可以依据网格编号的规律而自动得出的，因而不必专门存储这类信息，这是结构化网格的一大优点。

但是，当计算区域比较复杂时，即使应用网格生成技术也难以妥善地处理所求解的不规则区域，这时可以采用组合网格，又叫块结构化网格。在这种方法中，把整个求解区域分为若干个小块，每一块中均采用结构化网格，块与块之间可以是并接的，即两块之间用一条公共边连接，也可以是部分重叠的。

这种网格生成方法既有结构化网格的优点，同时又不要求一条网格线贯穿整个计算区域，给处理不规则区域带来了很大便利，因此，目前该方法应用很广。

同结构化网格的定义相对应，非结构化网格是指网格区域的内部点不具有相同的毗邻单元。从定义上可以看出，结构化网格和非结构化网格有相互重叠的部分，即非结构化网格中可能会包含结构化网格的部分。

非结构化网格技术从20世纪60年代开始得到了发展，主要是弥补结构化网格不能解决任意形状和任意连通区域内网格部分的欠缺。

由于其对不规则区域的特别适应性，因而非结构化网络技术自20世纪80年代以来得到迅速发展，由于非结构化网格的生成技术比较复杂，随着人们对求解区域复杂性要求的不断提高，对非结构化网格生成技术的要求也越来越高。

从现在的文献调查情况来看，非结构化网格生成技术中只有平面三角形的自动生成技术比较成熟，平面四边形网格的生成技术正在走向成熟。

4.2 ANSYS ICEM CFD 简介

ANSYS ICEM CFD是一款专业处理软件，包括从几何创建、网格划分、前处理条件设置、后处理等功能。在CFD网格生成领域优势更为突出。

ANSYS ICEM CFD提供了高级几何获取、网格生成、网格优化及后处理工具等，以满足当今复杂分析对集成网格生成与后处理工具的需求。

为了在网格生成与后处理中与几何保持紧密的联系，ANSYS ICEM CFD被用于诸如计算流体动力学与结构分析中。

ANSYS ICEM CFD的网格生成工具提供了参数化创建网格的能力，包括许多不同的格式。

- Multiblock Structured（多块结构网格）。
- Unstructured Hexahedral（非结构六面体网格）。
- Unstructured Tetrahedral（非结构四面体网格）。
- Cartesian with H-grid Refinement（带H型细化的笛卡尔网格）。
- Hybrid Meshed Comprising Hexahedral, Tetrahedral, Pyramidal and/or Prismatic Elements（混合了六面体、四面体、金字塔或棱柱形网格的杂交网格）。
- Quadrilateral and Triangular Surface Meshes（四边形和三角形表面网格）。



ANSYS ICEM CFD提供了几何与分析间的直接联系。在ICEM CFD中，集合可以以商用CAD设计软件包、第三方公共格式、扫描的数据或点数据等任何格式被导入。

4.2.1 ICEM CFD 的工作流程



ICEM CFD的一般工作流程如图 4-1 所示，简而言之，包括以下 5 个步骤。

- 步骤 01 打开/创建一个工程。
- 步骤 02 创建/导入几何体。
- 步骤 03 创建网格。
- 步骤 04 检查/编辑网格。
- 步骤 05 生成求解器的导入文件。

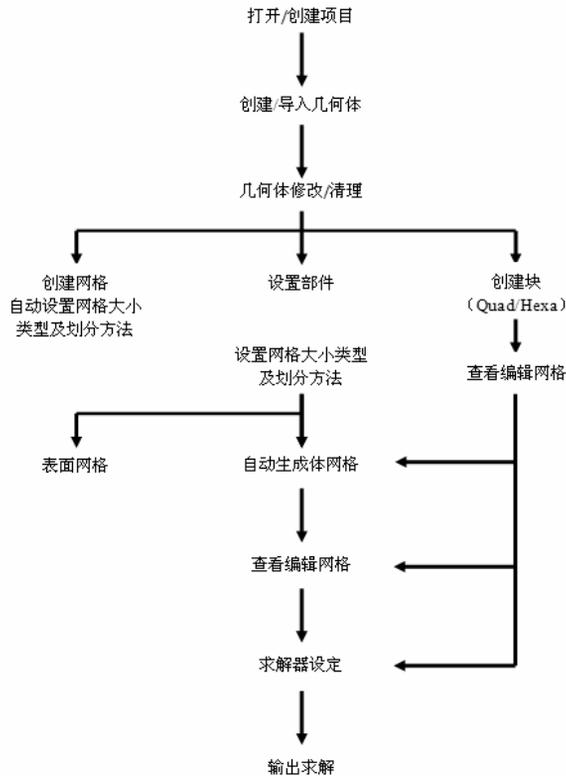


图 4-1 ICEM CFD 工作流程

4.2.2 ICEM CFD 的文件类型



在ICEM CFD工作流程中常用的文件类型如表 4-1 所示。

表 4-1 ICEM CFD 文件类型

文件类型	扩展名	说明
Tetin	*.tin	包括几何实体、材料点、块关联以及网格尺寸等信息
Project	*.prj	工程文件，包含项目信息
Blocking	*.blk	包含块的拓扑信息
Boundary Conditions	*.fbc	包含边界条件
Attributes	*.atr	包含属性、局部参数及单元信息
Parameters	*.par	包含模型参数及单元类型信息
Journal	*.jrf	包含所有操作的记录
Replay	*.rpl	包含重播脚本

4.2.3 ICEM CFD 的用户界面



ICEM CFD的图形用户接口提供了一个创建及编辑计算网格的完整环境。如图 4-2 所示为ICEM CFD的图形用户界面。

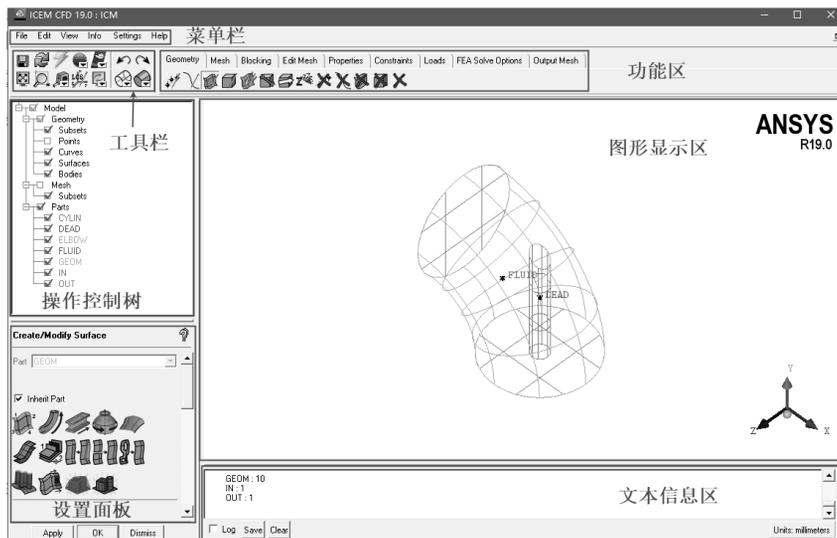


图 4-2 ICEM CFD 图形界面

4.3 ANSYS ICEM CFD 基本用法

ICEM CFD是功能强大的几何建模和网格划分工具，本节将介绍创建几何模型、导入几何模型、生成网格、生成块、编辑网格、输出网格等基本操作。

4.3.1 创建几何模型



在进行流体计算中，不可避免地要创建流体计算域模型。除了使用其他几何建模软件以外，ICEM CFD



也具备一定的几何建模能力。

下面介绍基本几何模型的创建方式，包括点、线、面等。

1. 点的创建

打开Geometry选项卡，单击按钮（创建点），即可进入点创建工具面板。该面板包含的按钮如图 4-3 所示。

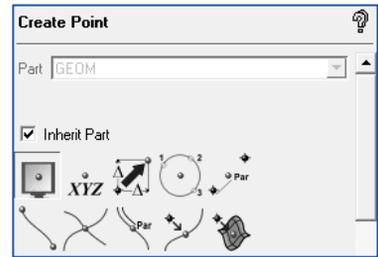


图 4-3 点创建功能区域

(1) Part（部件）

若没有勾选下方的Inherit Part复选框，则该区域可编辑。可将新创建的点放入指定的Part中。默认此项为GEOM且Inherit Part复选框被勾选。

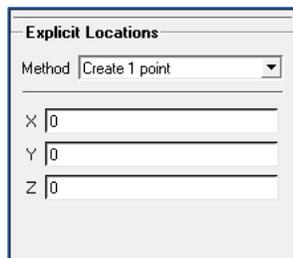
(2) （屏幕选择点）

单击该按钮后可在屏幕上选取任何位置进行点的创建。

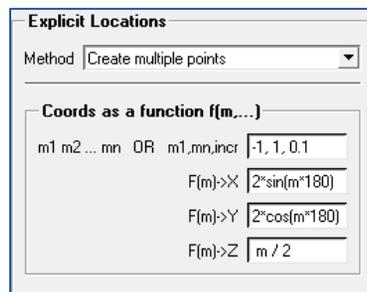
(3) （坐标输入）

单击此按钮后，可进行精确位置点的创建。可选模式包括单点创建及多点创建，如图 4-4 所示。

图 4-4 (a) 为单点创建模式，输入点的(X, Y, Z)坐标即可创建点。图 4-4 (b) 为多点创建模式，可以使用表达式创建多个点。表达式可以包含“+”“-”“/”“*”“^”“()”、sin()、cos()、tan()、asin()、acos()、atan()、log()、exp()、sqrt()、abs()、distance(pt1,pt2)、angle(pt1,pt2,pt3)、X(pt1)、Y(pt1)、Z(pt1)等，所有的角度均以“°”作为单位。对图 4-4 (b) 的说明如下。



(a) 单点创建模式



(b) 多点创建模式

图 4-4 点的创建方式

- 第一个文本框表示变量，包含两种格式，即列表形式（m1 m2 ... mn）与循环格式（m1,mn,incr）。主要区别在于是否存在逗号。若没有逗号，则为列表格式；若有逗号，则为循环格式，如“0.1 0.3 0.5 0.7”为列表格式，“0.1, 0.7, 0.2”为循环格式，表示起始值为 0.1，终止值为 0.7，增量为 0.2。
- F(m)->X为点的X方向坐标，通过表达式进行计算。
- F(m)->Y为点的Y方向坐标，通过表达式进行计算。
- F(m)->Z为点的Z方向坐标，通过表达式进行计算。

实际上，图 4-4 (b) 中创建的是一个螺旋形的点集。

(4) （基点偏移法）

以一个基准点及其偏移值创建点。使用时需要指定基准点以及相对该点的X、Y、Z坐标。

(5) （三点定圆心）

可以利用此按钮创建三个点或圆弧的中心点。选取三个点创建中心点，其实是创建了由此三点构建的

圆的圆心。

(6)  (两点之间定义点)

可利用屏幕上选取的两点创建另一个点。单击此按钮后出现如图 4-5 所示的操作面板。

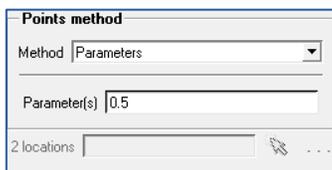


图 4-5 点的创建方式

利用此方法创建点时有两种方式：其一为如图 4-5 所示的参数方法；其二为指定点的个数方法。

- 其一，若设置参数值为 0.5，则创建指定两点连线的中点。此处的参数为偏离第一点的距离，该距离的计算方式为两点连线的长度与指定参数的乘积。
- 其二，可在两点间创建一系列点。若指定点个数为 1，则创建中点。

(7)  (线的端点)

单击此按钮后可创建两个点，且所创建的点为选取曲线的两个终点。

(8)  (线段交点)

创建两条曲线相交所形成的交点。

(9)  (线上定义点)

与方式 (6) 类似，不同的是此按钮选取的是曲线，创建的是曲线的中点或沿曲线均匀分布的N个点。

(10)  (投影到线上的点)

将空间点投影到某一曲线上，创建新的点。该按钮可使新创建的点分割曲线。

(11)  (投影到面上的点)

将空间点投影到曲面上创建新的点。

创建点的方式一共有 11 种，其中用于创建几何的是前 3 种，后面 8 种主要用于辅助几何的构建。当然，它们都可以用于创建几何体。

2. 线的创建

打开Geometry选项卡，单击 (创建线) 按钮，即可进入线创建工具面板。该面板包含的按钮如图 4-6 所示。

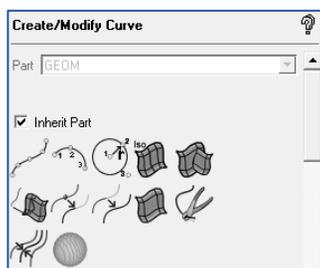


图 4-6 线创建功能区域



(1) (多点生成样条曲线)

该按钮为已存在的点或选择多个点创建曲线。需要说明的是，若选择的点为2个，则创建直线；若点的数目多于2个，则自动创建样条曲线。

(2) (3点定弧线)

圆弧的创建方式有两种：三点创建圆弧和圆心及两点。选用三点创建圆弧时，第一点为圆弧起点，最后选择的点为圆弧终点。

采用第二种方式进行圆弧创建时，也有两种方式，如图4-7所示。

- 若采用Center的方式，则第一个选取的点与第二个点间的距离为半径，第三个点表示圆弧弯曲的方向。
- 若采用Start/End方式，则第一点并非圆心，只是指定了圆弧的弯曲方向，而第二点与第三点为圆弧的起点与终点。当然这两种方式均可人为地确定圆弧半径。

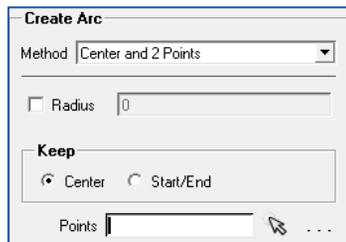


图 4-7 圆弧的创建

(3) (圆心和两点定义圆)

该按钮主要用于创建圆，如图4-8所示，规定了一个圆心加两个点。选取点时，第一次选择的点为圆心。

若没有人为地确定半径值，则第一点与第二点间的距离为圆的半径值。可以设置起始角与终止角。若规定了半径值，则其实是用第一点与半径创建圆，第二点与第三点的作用是联合第一点确定圆所在的平面。

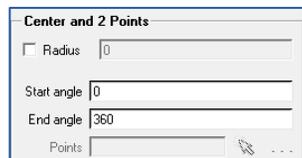


图 4-8 圆的创建

(4) (表面参数)

根据表面参数创建曲线。此按钮的功能与块切割的做法很相似，本功能在实际应用中用得很少。

(5) (面相交线)

此功能按钮用于获得两相交面的交线，使用起来也很简单，直接选取两个相交的曲面即可。选择方式有直接选取面、选择Part及选取两个子集。

(6) (投影到面上的线)

曲线向面投影，有两种操作方式，即沿面法向投影及指定方向投影。沿面法向投影方式只需要指定投影曲线及目标面，指定方向投影的方式需要人为指定投影方向。

3. 面的创建

打开Geometry选项卡，单击 (创建面)按钮，即可进入面创建工具面板。该面板包含的按钮如图4-9所示。

(1) (由线生成面)

单击此按钮后，可以通过曲线创建面。可选模式包括选择2~4条边界曲线创建面，选择多条重叠或不相互连接的线创建面及选择4个点创建面。

(2) (放样)

单击此按钮后，可以通过选取一条或多条曲线沿引导线扫略创建面。

(3) (沿直线方向放样)

单击此按钮后，可以通过选取一条曲线沿矢量方向或直线扫略创建面。

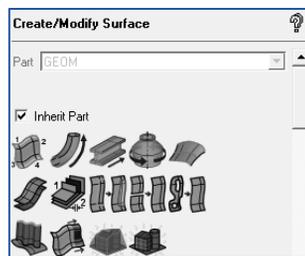


图 4-9 面创建功能区域

(4)  (回转)

单击此按钮后，可以通过设置起始和结束角度，选取一条曲线沿轴回转创建面，如图 4-10 所示。

(5)  (利用数条曲线放样成面)

单击此按钮后，可以通过利用多条曲线放样的方法生成面。

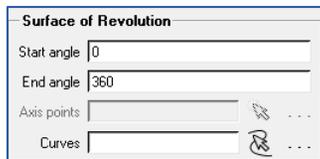


图 4-10 回转创建面

4.3.2 导入几何文件



由于ICEM CFD建模功能不强，因此对于一些复杂结构模型，常常需要在专业的CAD软件中进行创建，然后将几何文件导入到ICEM CFD中完成网格划分。

ICEM CFD可以导入多种CAD软件绘制的几何文件，如图 4-11 所示。

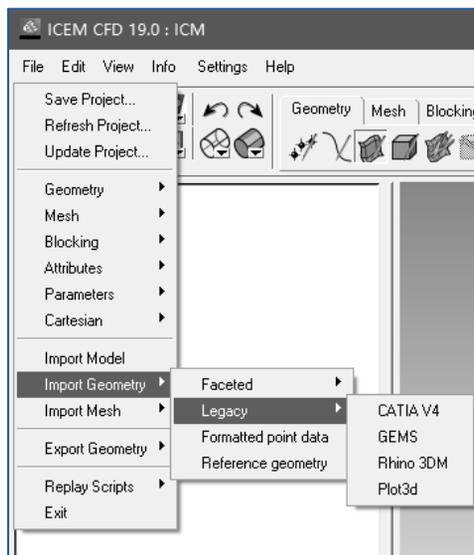


图 4-11 ICEM CFD 可导入的 CAD 格式

4.3.3 生成网格



ICEM CFD生成的网格主要分为四面体网格、六面体网格、三棱柱网格、O-Grid网格等。其中：

- 四面体网格能够很好地贴合复杂的几何模型，生成简单。
- 六面体网格的网格质量高，需要生成的网格数量相对较少，适合对网格质量要求较高的模型，但生成过程复杂。



- 三棱柱网格适合薄壁几何模型。
- O-Grid网格适合圆或圆弧模型。

选择哪种网格类型进行网格划分需要根据实际模型的情况而定，甚至可以将几何模型分割成不同的区域，采用多种网格类型进行网格划分。

ICEM CFD为复杂模型提供了自动网格生成功能，使用此功能能够自动生成四面体网格和描述边界的三棱柱网格。网格生成功能如图 4-12 所示。



图 4-12 网格生成

其主要具备以下功能。

1. Global Mesh Parameters（全局网格设置）

(1) （全局网格尺寸）

用于设置最大网格尺寸及比例尺寸，从而确定全局网格尺寸，如图 4-13 所示。

(2) （表面网格尺寸）

设置表面网格类型及大小，如图 4-14 所示。

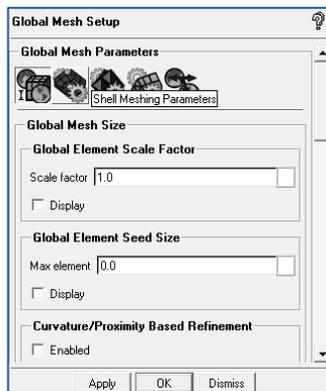


图 4-13 全局网格尺寸

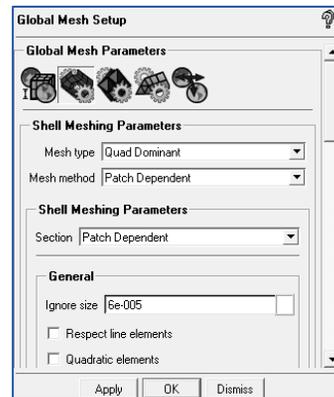


图 4-14 表面网格尺寸

Mesh type（网格类型）中有以下 4 种网格类型可供选择。

- All Tri: 所有网格类型为三角形。
- Quad w/one Tri: 面上的网格单元大部分为四边形，最多允许有一个三角形网格单元。
- Quad Dominant: 面上的网格单元大部分为四边形，允许有一部分三角形网格单元的存在。这种网格类型大多用于复杂的面，如果此时全部生成四边形网格，将会导致网格质量非常低。对于简单的几何模型，使用该网格类型和Quad w/one Tri生成的网格效果相似。
- All Quad: 所有网格类型为四边形。

Mesh method（网格生成方法）中有以下 4 种网格生成方法可供选择。

- AutoBlock: 自动块方法，自动地在每个面上生成二维的Block，然后生成网格。

- **Patch Dependent:** 根据面的轮廓线来生成网格，该方法能够较好地捕捉几何特征，创建以四边形为主的高质量网格。
- **Patch Independent:** 在网格生成过程中不严格按照轮廓线，而是使用稳定的八叉树方法。在生成网格的过程中能够忽略小的几何特征，适用于精度不高的几何模型。
- **Shrink Wrap:** 是一种笛卡尔网格生成方法，会忽略大的几何特征，适用于复杂的几何模型快速生成面网格。此方法不适合薄板类实体的网格生成。

(3)  (体网格尺寸)

用于设置体网格类型及大小，如图 4-15 所示。

Mesh Type (网格类型) 中有以下三种网格类型可供选择。

- **Tetra/Mixed:** 是一种应用广泛的非结构网格类型。在默认情况下自动生成四面体网格 (Tetra)，通过设置可以创建三棱柱边界层网格 (Prism)，也可以在计算域内部生成以六面体单位为主的体网格 (Hexcore)，或者生成既包含边界层又包含六面体单元的网格。
- **Hex-Dominant:** 是一种以六面体网格为主的体网格类型，此种网格在接近壁面处网格质量较好，在模型内部网格质量会较差。
- **Cartesian:** 是一种自动生成的六面体非结构网格。

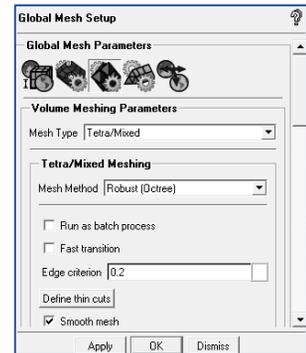


图 4-15 体网格尺寸

不同的体网格类型对应着不同的网格生成方法。Mesh Method (网格生成方法) 中主要有以下几种可供选择：

- **Robust (Octree):** 适用于 Tetra/Mixed 网格类型。此方法使用八叉树方法生成四面体网格，是一种自上而下的网格生成方法，即先生成体网格，然后生成面网格。对于复杂模型，不需要花费大量时间用于几何修补和面网格的生成。
- **Quick (Delaunay):** 适用于 Tetra/Mixed 网格类型。此方法生成的四面体网格是一种自下而上的网格生成方法，即先生成面网格，然后生成体网格。
- **Smooth (Advancing Front):** 适用于 Tetra/Mixed 网格类型。此方法生成的四面体网格是一种自下而上的网格生成方法，即先生成面网格，然后生成体网格。与 Quick 方法不同的是，接近壁面处的网格尺寸变化平缓，对初始的面网格质量要求较高。
- **TGrid:** 适用于 Tetra/Mixed 网格类型。此方法生成的四面体网格是一种自下而上的网格生成方法，能够使近壁面网格尺寸变化平缓。
- **Body-Fitted:** 适用于 Cartesian 网格类型。此方法用于创建非结构笛卡尔网格。
- **Staircase (Global):** 适用于 Cartesian 网格类型。该方法可以对笛卡尔网格进行细化。
- **Hexa-Core:** 适用于 Cartesian 网格类型。该方法用于生成以六面体为主的网格。

(4)  (棱柱网格尺寸)

用于设置棱柱网格大小，如图 4-16 所示。

(5)  (设置周期性网格)

用于设置周期性网格的类型及尺寸，如图 4-17 所示。

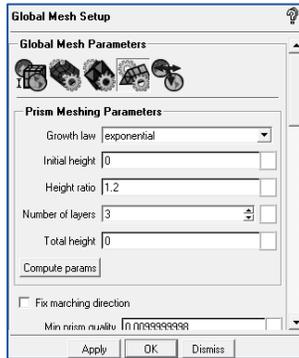


图 4-16 棱柱网格尺寸

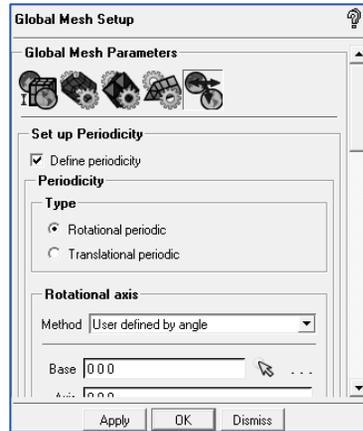


图 4-17 设置周期性网格

由于棱柱网格尺寸和设置周期性网格的相关操作较为简单，限于篇幅不再赘述，请参考帮助文档。

2. Mesh Size for Parts (特定部位网格尺寸设置)

设置几何模型中指定区域的网格尺寸，如图 4-18 所示。可以通过将几何模型中的特征尺寸区域定义为一个 Part (设置较小的网格尺寸) 来捕捉细致的几何特征，或者将对计算结果影响不大的几何区域定义为一个 Part (设置较大的网格尺寸) 来减少网格生成的计算量，以提高数值计算的效率。

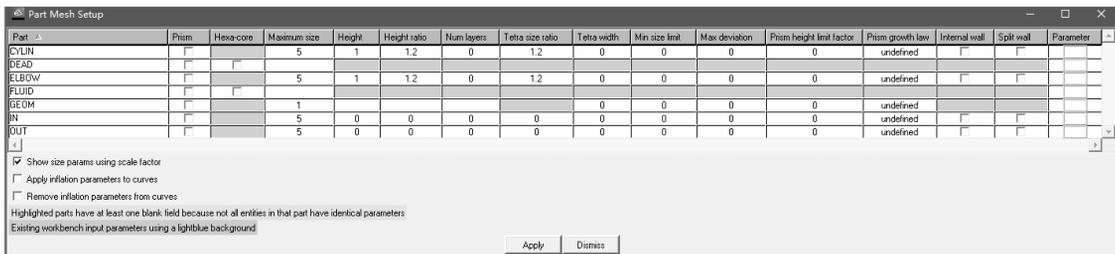


图 4-18 特定部位网格尺寸设置

3. Surface Mesh Setup (表面网格设置)

通过鼠标选择几何模型中的一个或几个面设置其网格尺寸，如图 4-19 所示。

4. Curve Mesh Parameters (曲线网格参数)

设置几何模型中指定曲线的网格尺寸，如图 4-20 所示。

5. Create Density (网格加密)

通过选取几何模型上的一点，指定加密宽度、网格尺寸和比例，生成以指定点为中心的网格加密区域，如图 4-21 所示。

6. Define Connectors (定义连接)

通过定义连接两个不同的实体，如图 4-22 所示。

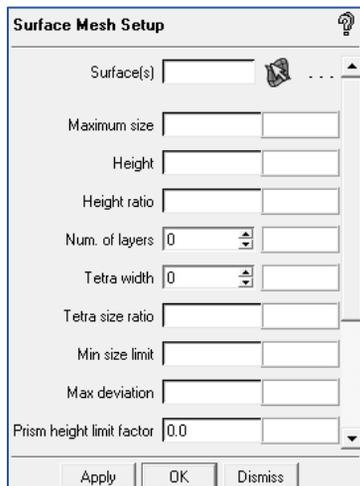


图 4-19 表面网格设置

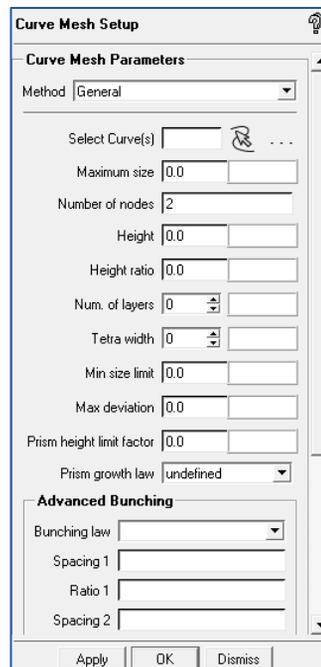


图 4-20 曲线网格参数

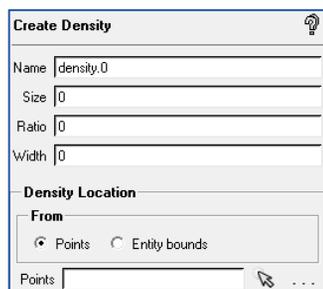


图 4-21 网格加密

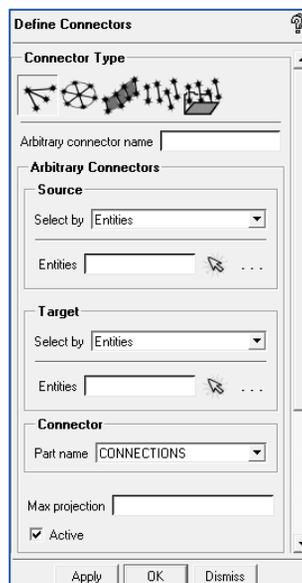


图 4-22 定义连接

-  Mesh Curve (生成曲线网格)
为一维曲线生成网格，如图 4-23 所示。

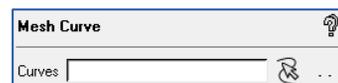


图 4-23 生成曲线网格

-  Compute Mesh (计算网格)

根据前面的设置生成二维面网格、三维体网格或三棱柱网格。



(1)  (面网格)

用于生成二维面网格，如图 4-24 所示。Mesh Type (网格类型) 中有以下 4 种网格类型可供选择。

- All Tri。
- Quad w/one Tri。
- Quad Dominant。
- All Quad。

(2)  (体网格)

用于生成三维体网格，如图 4-25 所示。Mesh Type (网格类型) 中有以下三种网格类型可供选择。

- Tetra/Mixed。
- Hex-Dominant。
- Cartesian。

(3)  (三棱柱网格)

用于生成三棱柱网格，一般用来细化边界，如图 4-26 所示。

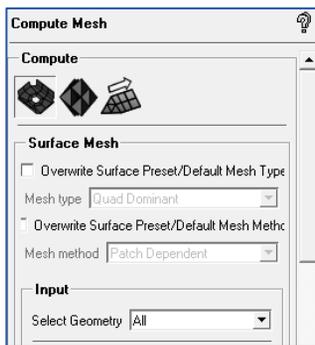


图 4-24 面网格

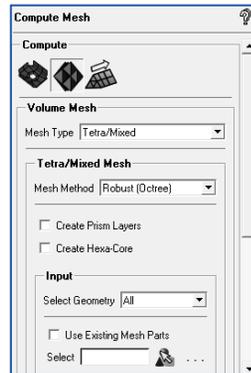


图 4-25 体网格

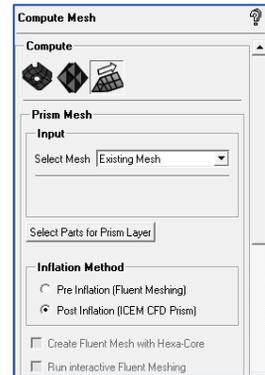


图 4-26 三棱柱网格

4.3.4 生成块



除了自动生成网格外，ICEM CFD还可以通过生成Block (块) 来逼近几何模型，在块上生成质量更高的网格。

ICEM CFD生成块的方式主要有两种：自上而下和自下而上。

- 自上而下生成块的方式类似于雕刻家，利用以切割、删除等操作方式构建符合要求的块。
- 自下而上类似于建筑师，从无到有一步步地以添加的方式构建符合要求的块。

不管是以何种方式进行块的构建，最终的块通常都是相似的。

生成块的功能如图 4-27 所示。



图 4-27 生成块

其主要具备以下功能。

1. Create Block (生成块)

生成块用于包含整个几何模型，如图 4-28 所示。生成块的方法包括以下几种。

-  (生成初始块)：通过选定部位的方法生成块。
-  (从顶点或面生成块)：使用选定顶点或面的方法生成块。
-  (拉伸面)：使用拉伸二维面的方法生成块。
-  (从二维到三维)：将二维面生成三维块。
-  (从三维到二维)：将三维块转换成二维块。

2. Split Block (分割块)

将块沿几何变形部分分割开来，从而使块能够更好地逼近几何模型，如图 4-29 所示。分割块的方法包括以下几种。

-  (分割块)：直接使用界面分割块。
-  (生成O-Grid块)：将块生成O-Grid网格形式。
-  (延长分割)：延长局部的分割面。
-  (分割面)：通过面的上边线分割面。
-  (指定分割面)：通过端点分割块。
-  (自由分割)：通过手动指定的面分割块。

3. Merge Vertices (合并顶点)

将两个以上的顶点合并成一个顶点，如图 4-30 所示。

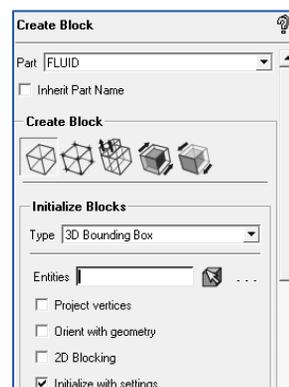


图 4-28 生成块面板

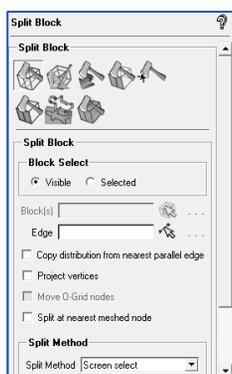


图 4-29 分割块面板

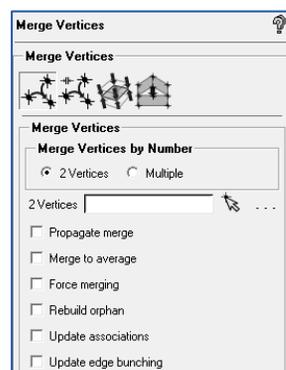


图 4-30 合并顶点面板

合并顶点的方法包括以下几种。

-  (合并指定顶点)：通过指定固定点和合并点的方法将合并点向固定点移动，从而合成新顶点。
-  (使用公差合并顶点)：合并在指定公差极限内的顶点。
-  (删除块)：通过删除块的方法将原来块的顶点合并。
-  (指定边缘线)：通过指定边缘线的方法将端点合并到线上。



4. Edit Blocks (编辑块)

通过编辑块的方法可得到特殊的网格形式，如图 4-31 所示。编辑块的方法包括以下几种。

- (合并块)：将一些块合并为一个较大的块。
- (合并面)：将面和与之相邻的块合并。
- (修正 O-Grid 网格)：更改 O-Grid 网格的尺寸因子。
- (周期顶点)：在选定的几个顶点之间生成周期性顶点。
- (修改块类型)：通过修改块类型生成特殊网格类型。
- (修改块方向)：改变块的坐标方向。
- (修改块编号)：更改块的编号。

5. Blocking Associations (生成关联)

在块与几何模型之间生成关联关系，从而使块更加逼近几何模型，如图 4-32 所示。

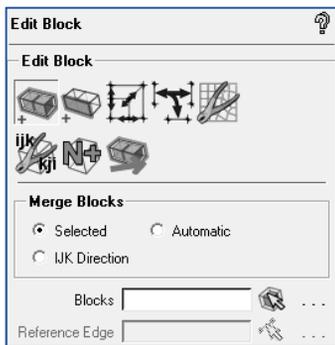


图 4-31 编辑块面板

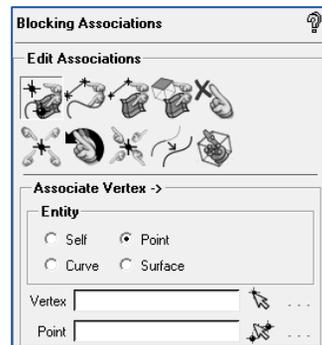


图 4-32 生成关联面板

生成关联的方法包括以下几种。

- (关联顶点)：选择块上的顶点及几何模型上的顶点，将两者关联。
- (关联边界与线段)：选择块上的边界和几何体上的线段，将两者关联。
- (关联边界到面)：将块上的边界关联到几何体的面上。
- (关联面到面)：将块上的面关联到几何体的面上。
- (删除关联)：删除选中的关联。
- (更新关联)：自动在块与最近的几何体之间建立关联。
- (重置关联)：重置选中的关联。
- (快速生成投影顶点)：将可见顶点或选中顶点投影到相对应点、线或面上。
- (生成或取消复合曲线)：将多条曲线生成群组，形成复合曲线，从而可以将多条边界关联到一条直线上。
- (自动关联)：以最合理的原则自动关联块和几何模型。

6. Move Vertices (移动顶点)

通过移动顶点的方法使网格角度达到最优化，如图 4-33 所示。移动顶点的方法包括以下几种。

- (移动顶点)：直接用鼠标拖动顶点。
- (指定位置)：为顶点直接指定位置，可以直接指定顶点坐标，或者选择参考点和相对位置的

方法指定顶点位置。

-  (沿面排列顶点)：指定平面，将选定顶点沿着面边界排列。
-  (沿线排列顶点)：指定参考线段，将选定顶点移动至此线段上。
-  (设置边界长度)：通过修改边界长度的方法移动顶点。
-  (移动或旋转顶点)：移动或旋转顶点。

7. Transform Blocks (变换块)

通过对块的变换复制生成新的块，如图 4-34 所示。变换块的方法包括以下几种。

-  (移动)：通过移动的方法生成新块。
-  (旋转)：通过旋转的方法生成新块。
-  (镜像)：通过镜像的方法生成新块。
-  (成比例缩放)：以一定比例缩放生成新块。
-  (周期性复制)：通过周期性的复制生成新块。

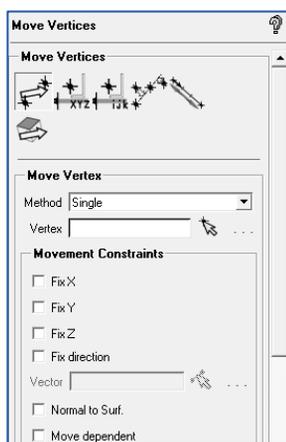


图 4-33 移动顶点面板

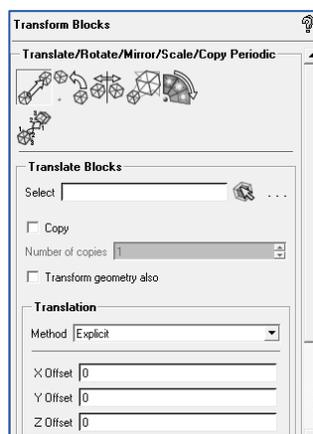


图 4-34 变换块面板

8. Edit Edge (编辑边界)

通过对块的边界进行修整以适应几何模型，如图 4-35 所示。编辑边界的方法包括以下几种。

-  (分割边界)。
-  (移出分割)。
-  (通过关联的方法设置边界形状)。
-  (移出关联)。
-  (改变分割边界类型)。

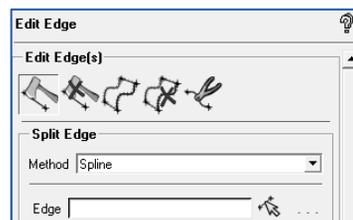


图 4-35 编辑边界面板

9. Pre-Mesh Params (预设网格参数)

用于指定网格参数供用户预览，如图 4-36 所示。预设网格参数包括以下几种。

-  (更新尺寸)：自动计算网格尺寸。
-  (指定因子)：指定一固定值，将网格密度变为原来的n倍。



- (边界参数)：指定边界上的节点个数和分布原则。
- (匹配边界)：将目标边界与参考边界相比较，按比例生成节点个数。
- (细化块)：允许用户使用一定的原则细化块。

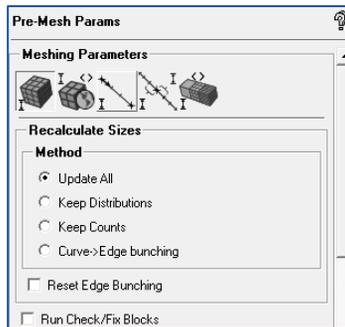


图 4-36 预设网格参数面板

10. Pre-Mesh Quality (预览网格质量)

用于预览网格质量，从而修正网格，如图 4-37 所示。

11. Pre-Mesh Smooth (预网格平滑)

用于平滑网格，提高网格质量，如图 4-38 所示。

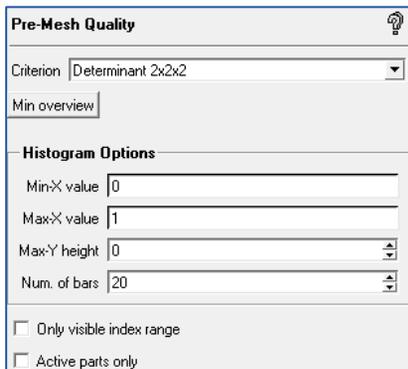


图 4-37 预览网格质量面板

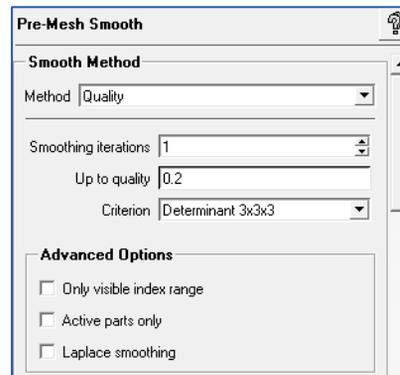


图 4-38 预网格平滑面板

12. Check Blocks (检查块)

用于检查块的结构，如图 4-39 所示。

13. Delete Block (删除块)

用于删除选定的块，如图 4-40 所示。

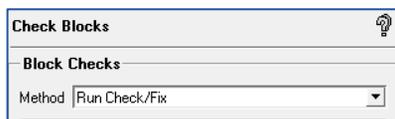


图 4-39 检查块面板

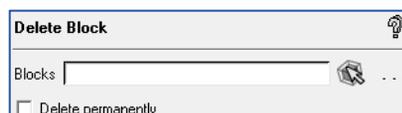


图 4-40 删除块面板

由于预览网格质量、预网格平滑、检查块和删除块的设置相对简单，限于篇幅不再赘述，请参考帮助文档。

4.3.5 编辑网格

网格生成以后，需要查看网格质量是否满足计算要求。若不满足，则需要对网格进行修改，利用网格编辑选项就可实现这样的目的。网格编辑选项如图 4-41 所示。

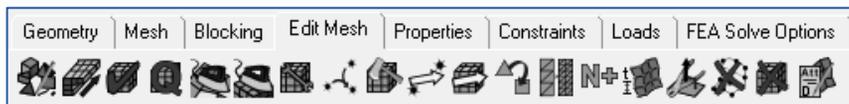


图 4-41 网格编辑选项

1. Create Elements（生成元素）

手动生成不同类型的元素，元素类型包括点、线、三角形、矩形、四面体、棱柱、金字塔、六面体等，如图 4-42 所示。

2. Extrude Mesh（扩展网格）

通过拉伸面网格生成体网格，如图 4-43 所示。扩展网格的方法包括以下几种。

- Extrude by Element Normal（通过单元拉伸）。
- Extrude Along Curve（通过沿曲线拉伸）。
- Extrude by Vector（通过沿矢量方向拉伸）。
- Extrude by Rotation（通过旋转拉伸）。

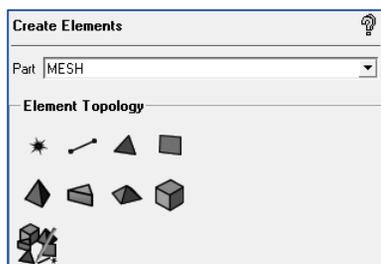


图 4-42 生成元素

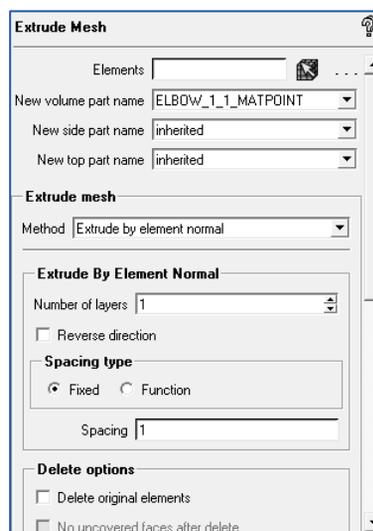


图 4-43 扩展网格

3. Check Mesh（检查网格）

检查并修复网格，以提高网格质量，如图 4-44 所示。



4. Quality Metrics (显示网格质量)

显示查看网格质量，如图 4-45 所示。

5. Smooth Elements Globally (平顺全局网格)

修剪自动生成的网格，删去质量低于某值的网格节点，提高网格质量，如图 4-46 所示。

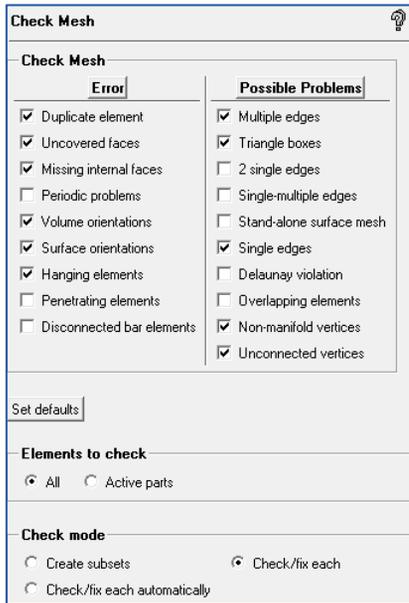


图 4-44 检查网格

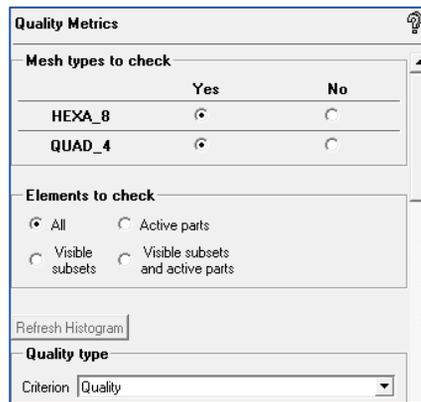


图 4-45 显示网格质量

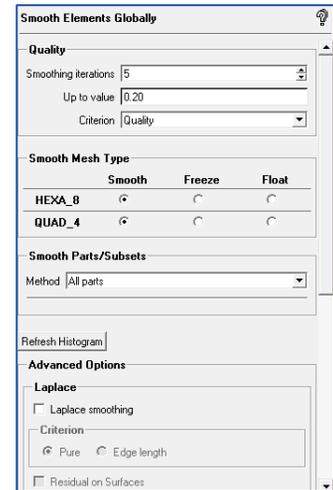


图 4-46 平顺全局网格

平顺全局网格的类型包括以下几种。

- Smooth (平顺)：通过平顺特定单元类型的单元来提高网格质量。
- Freeze (冻结)：通过冻结特定单元类型的单元使得在平顺过程中该单元不被改变。
- Float (浮动)：通过几何约束来控制特定单元类型的单元在平顺过程中的移动。

6. Smooth Hexahedral Mesh-Orthogonal (平顺六面体网格)

修剪非结构化网格，提高网格质量，如图 4-47 所示。平顺类型包括以下两种。

- Orthogonality (正交)：平顺将努力保持正交性和第一层的高度。
- Laplace (拉普拉斯)：平顺将尝试通过设置控制函数来使网格均一化。

冻结选项包括以下两种。

- All Surface Boundaries (所有表面边界)：冻结所有边界点。
- Selected Parts (选择部分)：冻结所选择部分的边界点。

7. Repair Mesh (修复网格)

手动修复质量较差的网格，如图 4-48 所示。

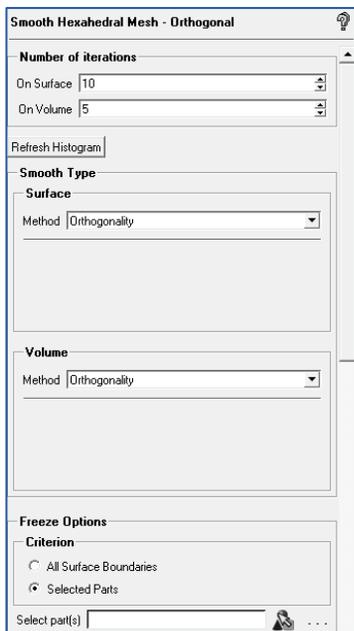


图 4-47 平顺六面体网格

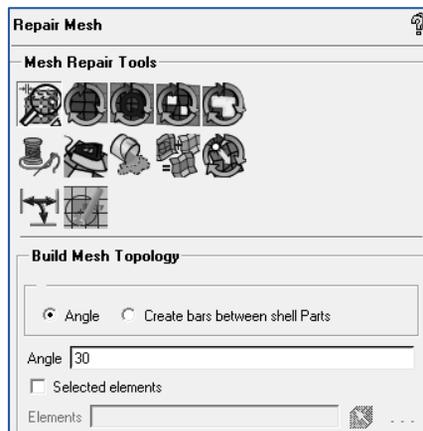


图 4-48 修复网格

修复网格的方法包括以下几种。

-  (建立网格的拓扑结构)。
-  (重新划分网格)。
-  (重新划分质量较差的单元网格)。
-  (发现/关闭网格中的孔)。
-  (网格边缘)。
-  (缝边)。
-  (光顺表面网格)。
-  (填充/使一致)。
-  (关联网格)。
-  (加强节点, 重新划分网格)。
-  (指定/删除周期性)。
-  (标记封闭单元)。

8. Merge Nodes (合并节点)

通过合并节点来提高网格质量, 如图 4-49 所示。合并节点的类型包括以下几种。

-  (合并选定节点)。
-  (根据容差合并节点)。
-  (合并网格)。

9. Split Mesh (分割网格)

通过分割网格来提高网格质量, 如图 4-50 所示。分割网格的类型包括以下几种。

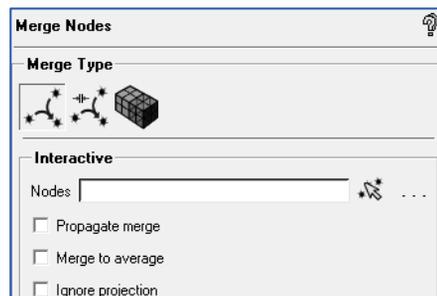


图 4-49 合并节点



- (分割节点)。
- (分割边界)。
- (交换边界)。
- (分割三角单元)。
- (分割内部墙)。
- (分隔六面体单元)。
- (分割三棱柱)。

10. Move Nodes (移动节点)

通过移动节点来提高网格质量,如图 4-51 所示。移动节点类型包括以下几种。

- (移动选取的节点)。
- (修改节点的坐标值)。
- (偏置网格)。
- (定义参考方向)。
- (重新分配三棱柱边界)。
- (投影节点到面)。
- (投影节点到曲线)。
- (投影节点到点)。
- (非投影节点)。
- (锁定/解锁单元)。
- (选取投影节点)。
- (更新投影)。
- (投影节点到平面)。

11. Mesh Transformation Tools (转换网格)

通过移动、旋转、镜像和缩放等方法来提高网格质量,如图 4-52 所示。转换网格的方法包括以下几种。

- (移动)。
- (旋转)。
- (镜像)。
- (缩放)。

12. Convert Mesh Type (更改网格类型)

通过更改网格类型来提高网格质量,如图 4-53 所示。更改网格类型的方法包括以下几种。

- (三角形网格转化为四边形网格)。
- (四边形网格转化为三角形网格)。
- (四面体网格转化为六面体网格)。
- (所有类型网格转化为四面体网格)。

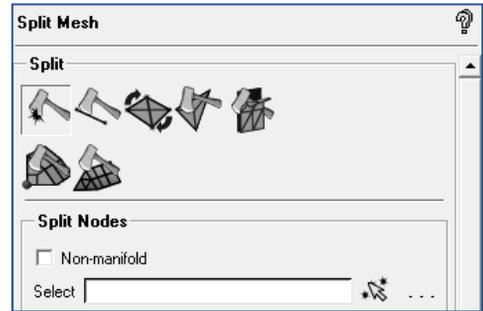


图 4-50 分割网格

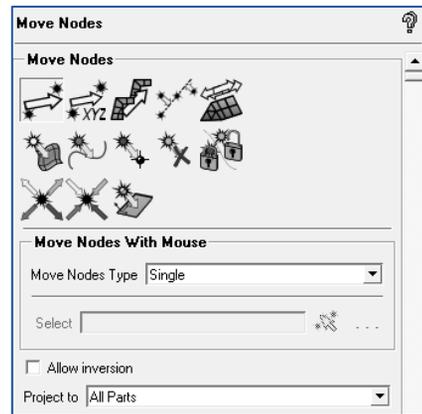


图 4-51 移动节点

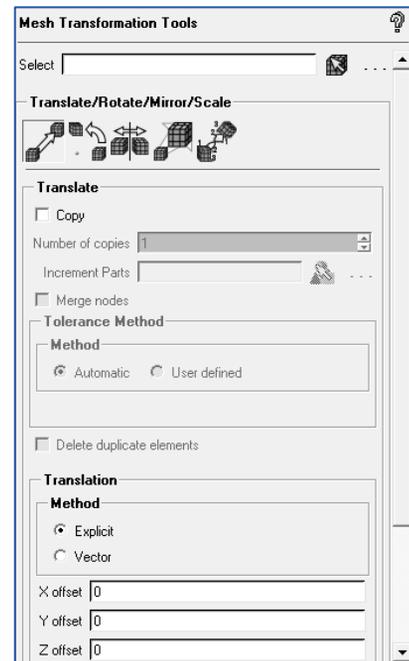


图 4-52 转换网格

-  (面网格转换为体网格)。
-  (创建网格中点)。
-  (删除网格中点)。

13. Adjust Mesh Density (调整网格密度)

加密网格或使网格变稀疏, 如图 4-54 所示。调整网格密度的方法包括以下几种。

-  (加密所有网格)。
-  (加密选择的网格)。
-  (使所有网格变稀疏)。
-  (使选择的网格变稀疏)。

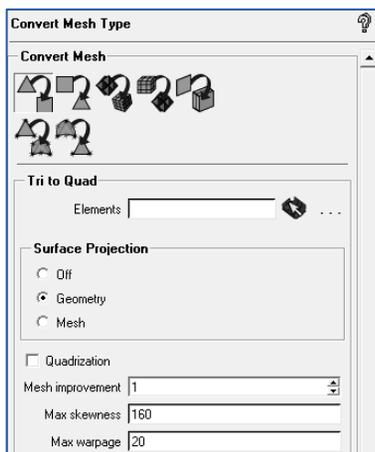


图 4-53 更改网格类型

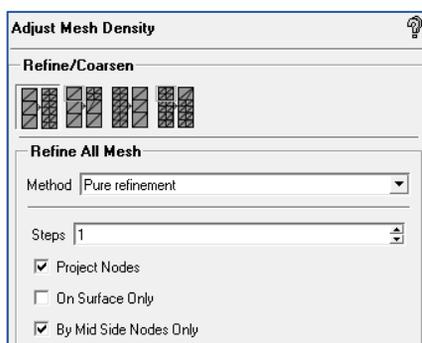


图 4-54 调整网格密度

14. Renum Mesh (重新网格编号)

为网格重新编号, 如图 4-55 所示。重新网格编号的方法包括以下几种。

-  (用户定义)。
-  (优化带宽)。

15. Adjust Mesh Thickness (调整网格厚度)

修改选定节点的网格厚度, 如图 4-56 所示。调整网格厚度的方法包括以下几种。

- Calculate (计算): 网格厚度将自动通过表面单元厚度计算得到。
- Remove (去除): 去除网格厚度。
- Modify selected nodes (修改选择的节点): 修改单个节点的网格厚度。

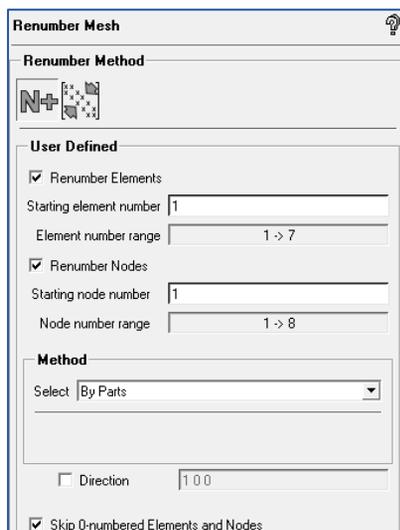


图 4-55 重新网格编号



16. Re-orient Mesh (再定位网格)

使网格在一定方向上重新定位，如图 4-57 所示。再定位网格的方法包括以下几种。

-  (再定位几何体)。
-  (再定位一致性)。
-  (反转方向)。
-  (再定位方向)。
-  (反转线单元方向)。
-  (改变单元方向)。

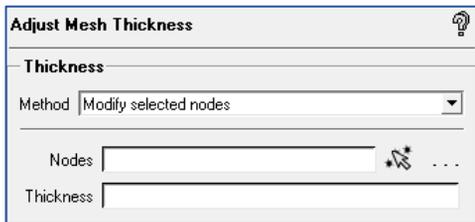


图 4-56 调整网格厚度

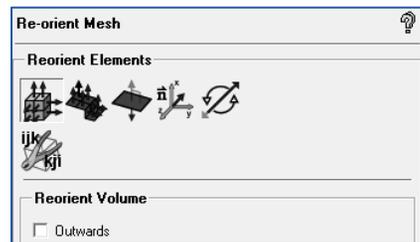


图 4-57 再定位网格

17. Delete Nodes (删除节点)

删除选择的节点，如图 4-58 所示。

18. Delete Elements (删除网格)

删除选择的网格，如图 4-59 所示。

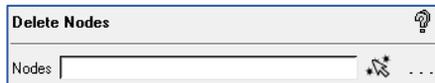


图 4-58 删除节点

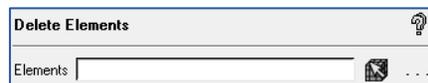


图 4-59 删除网格

19. Edit Distributed Attribute (编辑分布属性)

通过编辑网格单元的分布属性来提高网格质量，如图 4-60 所示。

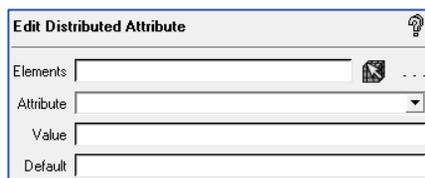


图 4-60 编辑分布属性

4.3.6 输出网格



网格生成并修复后，便可将网格输出，以供后续模拟计算时使用。网格输出的工具如图 4-61 所示。

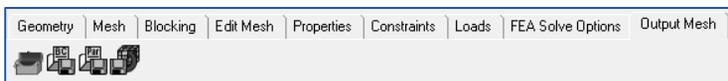


图 4-61 网格输出

网格输出的使用方法如下。

1.  Select Solver (选择求解器)

选择进行数值计算的求解器，对于CFX来说，求解器选择为ANSYS CFX选项，命令结构选择为ANSYS选项，如图 4-62 所示。



图 4-62 选择求解器

2.  Boundary Conditions (边界条件)

此功能用于查看定义的边界条件，如图 4-63 所示。

3.  Edit Parameters (编辑参数)

用于编辑网格参数。

4.  Write Import (写出输入)

将网格文件写成CFX可导入的*.cfx5 文件，如图 4-64 所示。



图 4-63 边界条件

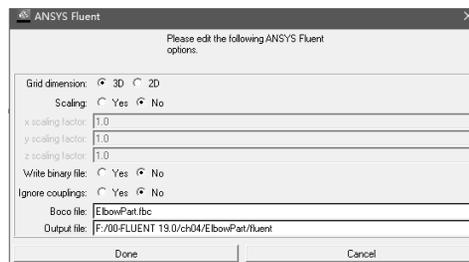


图 4-64 写出输入

4.4 ANSYS ICEM CFD 实例分析

本节将通过一个弯管网格划分的实例，让读者对ANSYS ICEM CFD 19.0 进行网格划分的过程有一个初步的了解。



4.4.1 启动 ICEM CFD 并建立分析项目



步骤 01 在Windows系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 19.0 →Meshing→ICEM CFD 19.0 命令，启动ICEM CFD 19.0，进入ICEM CFD 19.0 界面。

步骤 02 执行File→Save Project命令，弹出如图 4-65 所示的Save Project As (保存项目)对话框，在文件名中输入tube，单击“保存”按钮关闭对话框。

4.4.2 导入几何模型



步骤 01 执行File→Import Geometry→Parasolid命令，弹出如图 4-66 所示的Select ps file (选择文件)对话框，在文件名中输入tube.x_t，单击“打开”按钮。

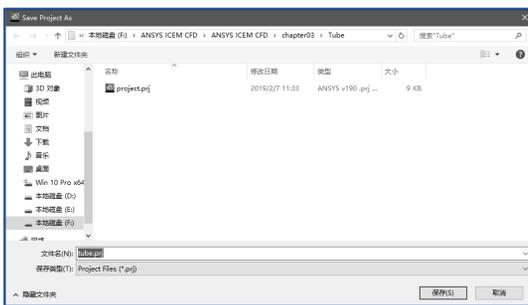


图 4-65 “保存项目”对话框

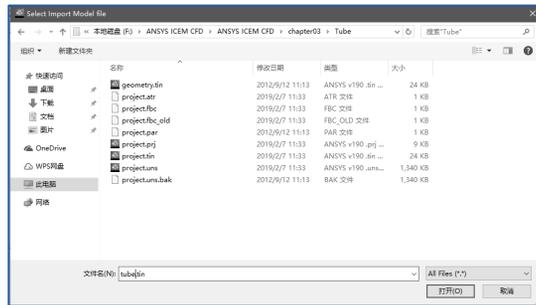


图 4-66 “选择文件”对话框

步骤 02 在弹出的如图 4-67 所示Import Model对话框中，单击OK导入模型。

步骤 03 导入几何文件后，在图形显示区将显示几何模型，如图 4-68 所示。

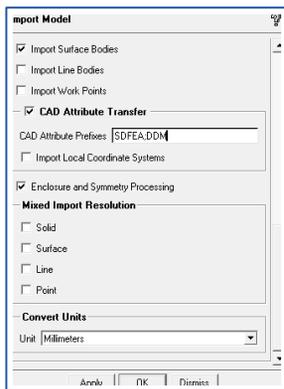


图 4-67 打开“Import Model”对话框

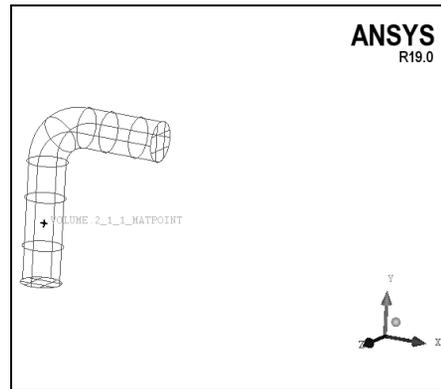


图 4-68 几何模型

4.4.3 建立模型



步骤 01 单击功能区内Geometry (几何)选项卡中的 (修复模型)按钮，弹出如图 4-69 所示的Repair

Geometry (修复模型) 面板, 单击  按钮, 在Tolerance文本框中输入 0.1, 单击OK按钮, 几何模型将修复完毕, 如图 4-70 所示。

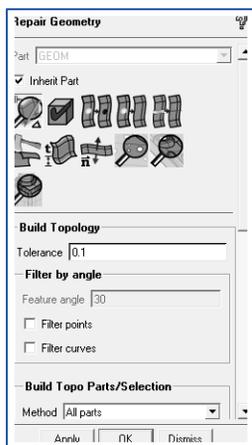


图 4-69 修复模型面板

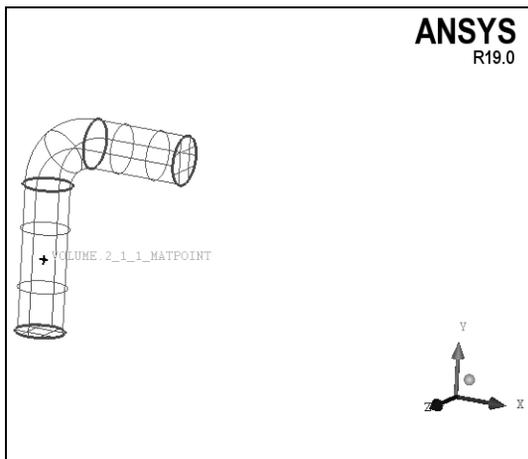


图 4-70 修复后的几何模型

步骤 02 单击功能区内Geometry (几何) 选项卡中的  (生成体) 按钮, 弹出如图 4-71 所示的Create Body (生成体) 面板, 单击  按钮后单击OK按钮确认生成体。

步骤 03 在操作控制树中, 右键单击Parts选项, 在弹出的快捷菜单中 (见图 4-72) 选择Create Part命令, 弹出如图 4-73 所示的Create Part面板, 在Part文本框中输入IN, 单击  按钮选择边界, 单击鼠标中键进行确认, 生成的入口边界条件如图 4-74 所示。

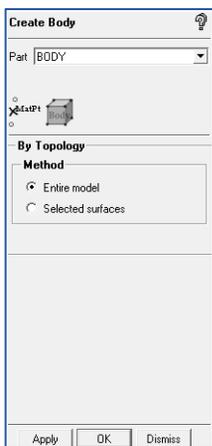


图 4-71 生成体面板

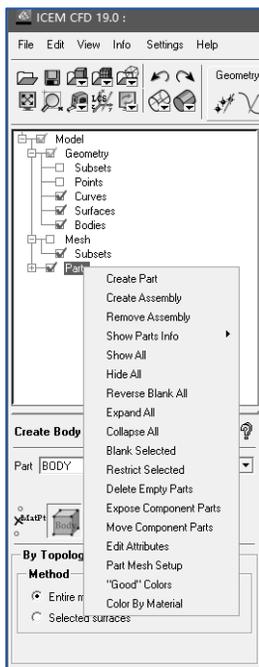


图 4-72 选择生成边界命令

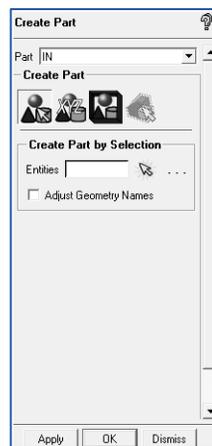


图 4-73 生成边界面板

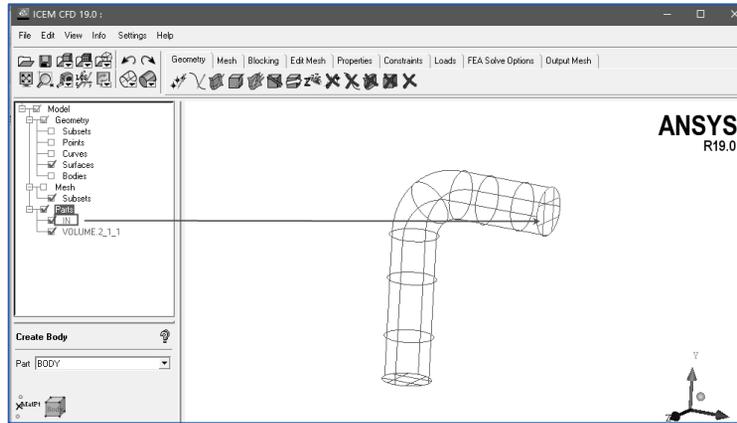


图 4-74 入口边界条件

步骤 04 同步骤 (3) 方法, 生成出口边界条件, 命名为OUT, 如图 4-75 所示。

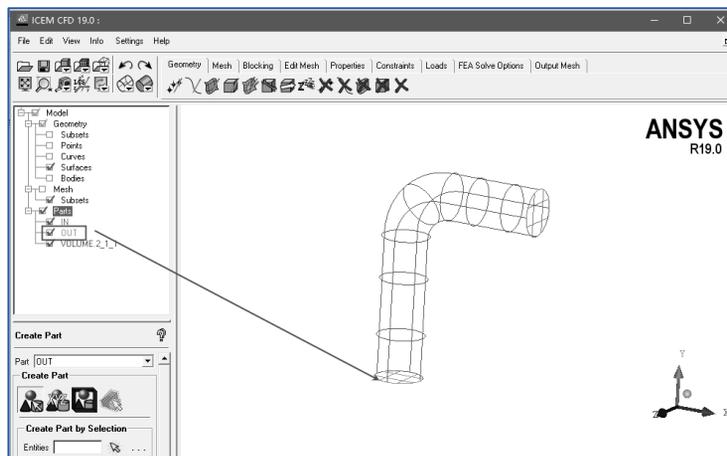


图 4-75 出口边界条件

步骤 05 同步骤 (3) 方法, 生成壁面边界条件, 命名为WALL, 如图 4-76 所示。

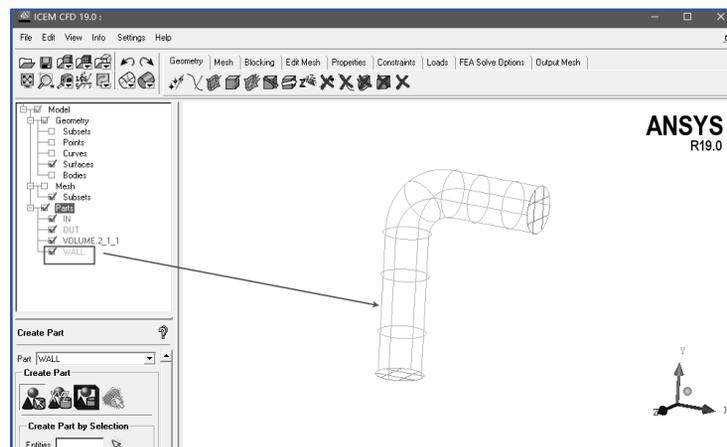


图 4-76 壁面边界条件

4.4.4 生成网格



步骤 01 单击功能区内Mesh(网格)选项卡中的  (全局网格设置)按钮,弹出如图 4-77 所示的Global Mesh Setup (全局网格设置)面板,在Max element文本框中输入 1.0,单击Apply按钮。

步骤 02 单击功能区内Mesh(网格)选项卡中的  (计算网格)按钮,弹出如图 4-78 所示的Compute Mesh (计算网格)面板,单击  (体网格)按钮,再单击Apply按钮确认生成体网格文件,如图 4-79 所示。

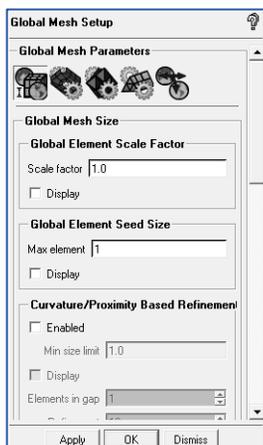


图 4-77 全局网格设置面板

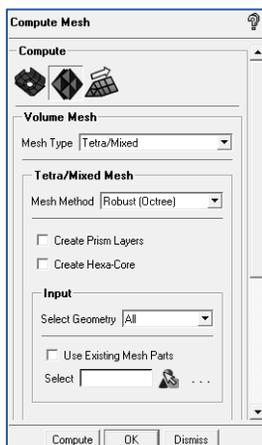


图 4-78 计算网格面板

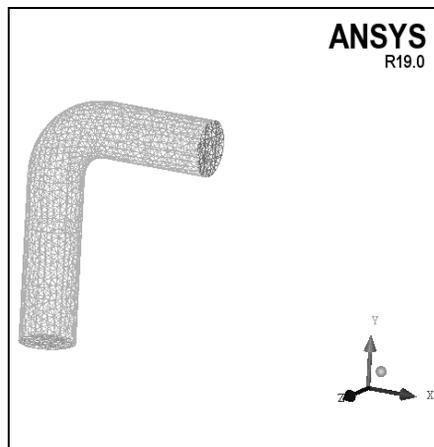


图 4-79 生成体网格

步骤 03 在Compute Mesh (计算网格)面板中,单击  (棱柱网格)按钮后单击 **Select Parts for Prism Layer** 按钮,弹出Prism Parts Data对话框,勾选WALL行中的prism复选框,在Height ratio中输入 1.3,在Num layers中输入 5,如图 4-80 所示,单击Apply按钮退出该对话框,单击Compute按钮重新生成体网格,效果如图 4-81 所示。

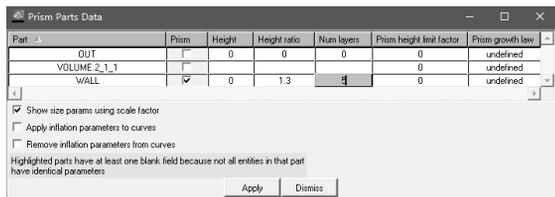


图 4-80 Prism Parts Data 对话框

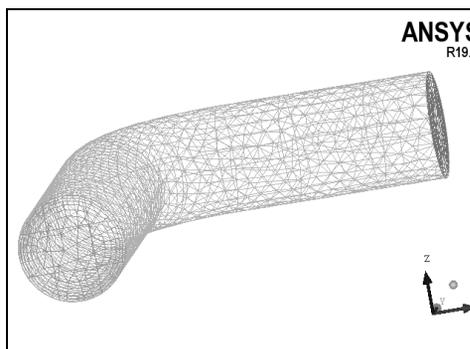


图 4-81 生成体网格

4.4.5 编辑网格



步骤 01 单击功能区内Edit Mesh (网格编辑)选项卡中的  (显示网格质量)按钮,弹出如图 4-82 所示



的Quality Metrics (显示网格质量) 面板, 单击Apply按钮后即可在信息栏中显示网格质量信息, 如图 4-83 所示。

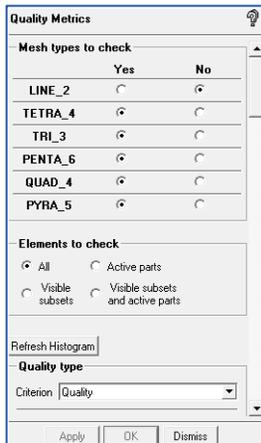


图 4-82 显示网格质量面板

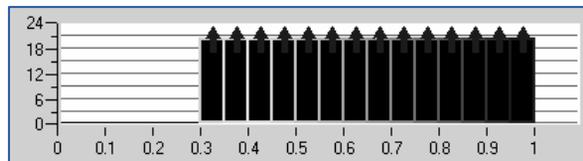


图 4-83 网格质量信息

步骤 02 生成的网格质量为 0.3~1, 一般我们建议删除网格质量在 0.4 以下的网格。单击功能区内Edit Mesh (网格编辑) 选项卡中的 (平顺全局网格) 按钮, 弹出如图 4-84 所示的Smooth Elements Globally (平顺全局网格) 面板, 在Up to value中输入 0.4, 单击Apply按钮。如图 4-85 所示为平顺后的网格。

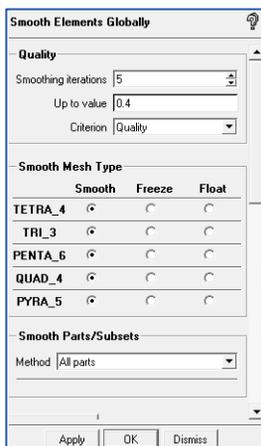


图 4-84 平顺全局网格面板

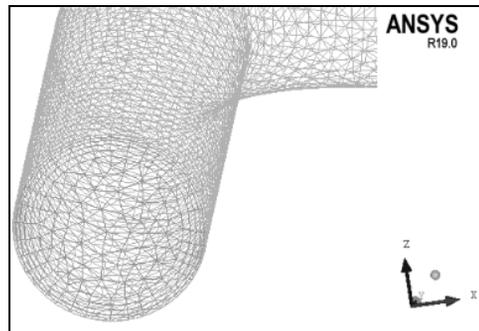


图 4-85 平顺后的网格

4.4.6 输出网格



步骤 01 单击功能区内Output (输出) 选项卡中的 (选择求解器) 按钮, 弹出如图 4-86 所示的Solver Setup (选择求解器) 面板, 在Output Solver中选择ANSYS CFX, 单击Apply按钮。

步骤 02 单击功能区内Output (输出) 选项卡中的 (写出输入) 按钮, 弹出如图 4-87 所示的对话框, 单击Done按钮进行确认即可。

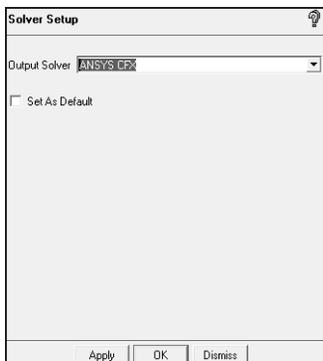


图 4-86 选择求解器面板

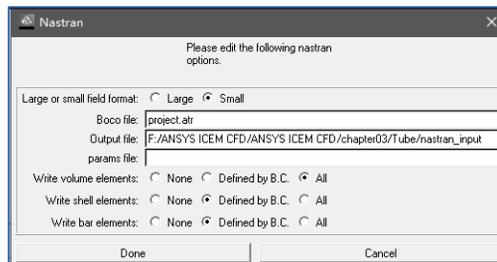


图 4-87 写出输入对话框

4.5 本章小结

本章首先介绍了网格生成的基本知识，然后讲解了ICEM CFD划分网格的基本过程，最后给出了运用ICEM CFD划分网格的典型实例。通过对本章内容的学习，读者可以掌握ICEM CFD的使用方法。