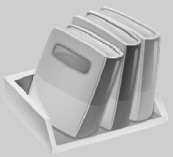


第 1 章

流体力学与计算流体力学基础

导言

计算流体动力学分析（Computational Fluid Dynamics，CFD）的基本定义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，包括流动、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、流体力学基础和常用的 CFD 软件。

学习目标

★ 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

本节将介绍流体力学一些重要的基础知识，包括流体力学的基本概念和基本方程。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必要的。

1.1.1 一些基本概念

（1）流体的密度

流体密度的定义是单位体积内所含物质的多少。若密度是均匀的，则有：

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{1-1}$$

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：

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \tag{1-2}$$

例如，4℃时水的密度为 1000 kg/m³，常温 20℃时空气的密度为 1.24 kg/m³。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，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，即：

$$\gamma = \rho g \tag{1-3}$$

式中：g 为重力加速度，值为 9.81 m/s²。流体的重度单位为 N/m³。

（3）流体的比重

流体的比重定义为该流体的密度与 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，相应地称流体为粘性流体；若不考虑流体的粘性，则称为理想流体的流动，相应地称流体为理想流体。

流体的粘性可由牛顿内摩擦定律表示：

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{1-4}$$

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都叫作牛顿流体，即严格满足牛顿内摩擦定律且 μ 保持为常数的流体，否则就称其为非牛顿流体。例如，溶化的沥青、糖浆等流体均属于非牛顿流体。

非牛顿流体有以下 3 种不同的类型。

- 塑性流体，如牙膏等。塑性流体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，其切应力才与速度梯度成正比，即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{1-5}$$

- 假塑性流体，如泥浆等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\right)^n \quad (n<1) \tag{1-6}$$

- 胀塑性流体，如乳化液等。其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\right)^n \quad (n>1) \tag{1-7}$$

（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，一种是外部压强产生了变化；另一种是流体的温度发生了变化。

① 流体的等温压缩率为β，当质量为M、体积为V的流体外部压强发生Δp的变化时，体积会发生ΔV的变化。定义流体的等温压缩率为：

$$\beta = -\frac{\Delta V / V}{\Delta p} \tag{1-8}$$

这里的负号是考虑到Δp与ΔV总是符号相反；β的单位为 1/Pa。流体等温压缩率的物理意义为当温度不变时，每增加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，上面的公式还有另一种表示形式，即：

$$\beta = \frac{\mathrm{d}\rho}{\rho \mathrm{d}p} \tag{1-9}$$

气体的等温压缩率可由气体状态方程求得：

$$\beta = 1/p \tag{1-10}$$

② 流体的体积膨胀系数为α，当质量为M、体积为V的流体温度发生ΔT的变化时，体积会发生ΔV的变化。定义流体的体积膨胀系数为：

$$\alpha = \frac{\Delta V / V}{\Delta T} \tag{1-11}$$

考虑到膨胀前后流体的质量不变，上面的公式还有另一种表示形式，即：

$$\alpha = -\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho \mathrm{d}T} \tag{1-12}$$

这里的负号是考虑到随着温度的增高，体积必然增大，而密度必然减小；α的单位为 1/K。体积膨胀系数的物理意义为当压强不变时，每增加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：

$$\alpha = 1/T \tag{1-13}$$

③ 在研究流体流动过程时，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具体的拉应力，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。

① 与流体微团质量大小有关并且集中作用在微团质量中心的力称为质量力。比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表示，形式如下：

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \tag{1-14}$$

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

② 大小与表面面积有关而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。静压强有两个特征：

- 静压强的方向垂直指向作用面。
- 流场内一点处静压强的大小与方向无关。

对于理想流体流动，流体质点只受到正压力，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，又有切向力。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 760 mmHg，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称为真空度，通常用 p_v 表示。

如果以压强 0 Pa 为计算的基准，那么这个压强称为绝对压强，通常用 p_s 表示。

三者的关系如下：

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

在流体力学中，压强都用符号 p 表示。一般来说，有一个约定，对于液体来说，压强用相对压强；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。当然，特殊情况应进行说明。

（9）静压、动压和总压

对于静止状态下的流体，只有静压强；对于流动状态的流动，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，表达式如下：

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

式中：$p/\rho g$ 称为压强水头，也是压能项，p 为静压强；$v^2/2g$ 称为速度水头，也是动能项；z 称为位置水头，也是重力势能项；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：

$$p+\frac{1}{2}\rho v^2+\rho gz=\rho gH \tag{1-17}$$

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：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，因此可以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，而且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和边界层内流动有联系，因此非常重要。

描述边界层内粘性流体运动的是 N-S 方程。由于边界层厚度 δ 比特征长度小很多，而且 x 方向速度分量沿法向的变化比切向大得多，因此 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。

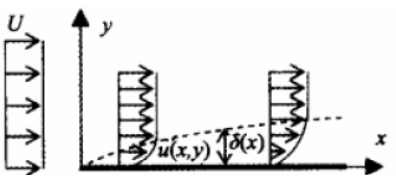


图 1-1　边界层示意图

大雷诺数边界层流动的性质：边界层的厚重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，通过量阶分析得到：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$
$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+v\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{1-18}$$

边界条件：在物面 $y=0$ 上 $u=v=0$，在 $y=\delta$ 或 $y\to\infty$ 时 $u=U(x)$。

初始条件：$t=t_0$，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，故阻力可分为摩擦阻力和压差阻力两种。

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

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：

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

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，阻力系数为：

$$C_D=\frac{24}{\mathrm{Re}} \tag{1-20}$$

式中：$\mathrm{Re}=\frac{V_\infty d}{v}$，在 $\mathrm{Re}<1$ 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，而湍流是指流体不是处于分层流动状态。一般说来，湍流是普通的，而层流属于个别情况。

对于圆管内流动，当 Re≤2300 时，管流一定为层流；当 Re≥8000~12000 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。

因为湍流现象是高度复杂的，所以至今还没有一种方法能够全面、准确地对所有流动问题中的湍流现象进行模拟。在涉及湍流的计算中，都要对湍流模型的模拟能力和计算所需的系统资源进行综合考虑，

再选择合适的湍流模型进行模拟。

Fluent 中采用的湍流模拟方法包括 Spalart-Allmaras 模型、Standard K-Epsilon 模型、RNG（重整化群）K-Epsilon 模型、Realizable K-Epsilon 模型、v2-f 模型、RSM（Reynolds Stress Model，雷诺应力模型）和 LES（Large Eddy Simulation，大涡模拟）方法。

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：

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

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（比如由于液滴的蒸发），源项也可以是任何自定义源项。

（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：

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

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（如离散相互作用产生的升力），F_i 包含其他模型相关源项，如多孔介质和自定义源项。

应力张量由下式给出：

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

（3）能量守恒方程

能量守恒定律是包含有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 $K=\frac{1}{2}\left(u^2+v^2+w^2\right)$ 和势能 P 三项之和，内能 i 与温度 T 之间存在一定关系，即 $i=c_pT$，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：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+div(\rho uT)=div\left(\frac{k}{c_p}gradT\right)+S_T \tag{1-24}$$

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，但对于不可压缩流动，若热交换量很小，甚至可以忽略时，可以不考虑能量守恒方程。此外，这是针对牛顿流体得出的，对于非牛顿流体，应使用其他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外，还要指定边界条件；对于非定常问题，还要指定初始条件。

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影响。即使对于同一个流场的求解，方法不同，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处流动变量的值。常见的入口边界条件有速度入口边界条件、压力入口边界条件和质量流量入口边界条件。

速度入口边界条件：用于定义流动速度和流动入口的流动属性相关的标量。这一边界条件适用于不可压缩流，如果用于可压缩流会导致非物理结果，这是因为它允许驻点条件浮动。应注意不要让速度入口靠近固体妨碍物，因为这会导致流动入口驻点属性具有太高的非一致性。

压力入口边界条件：用于定义流动入口的压力和其他标量属性。既适用于可压流，又适用于不可压流。压力入口边界条件可用于压力已知但是流动速度和/或速率未知的情况。这一情况可用于很多实际问题，如浮力驱动的流动。压力入口边界条件也可用来定义外部或无约束流的自由边界。

质量流量入口边界条件：用于已知入口质量流量的可压缩流动。在不可压缩流动中不必指定入口的质量流量，因为密度为常数时，速度入口边界条件就确定了质量流量条件。当要求达到的是质量和能量流速而不是流入的总压时，通常使用质量入口边界条件。

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：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，就不再使用指定表压，此时压力要从内部流动中求出，包括其他流动属性。

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

质量出口边界条件：当流动出口的速度和压力在解决流动问题之前未知时，可以使用质量出口边界条件模拟流动。需要注意，如果模拟可压缩流或包含压力出口时，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。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，任何量的梯度为 0。

（5）周期性边界条件

如果流动的几何边界、流动和换热是周期性重复的，那么可以采用周期性边界条件。

1.1.7 流体力学专业词汇

由于大多数 CFD 商用软件都是英文版，因此为了方便用户使用查询，本节对流体力学中主要专业词汇的中英文对照进行汇总，详见表 1-1。

表 1-1 流体力学专业词汇中英文对照

英　文	中　文	英　文	中　文
(Non)Linear	（非）线性	Moment	矩
(Non)Uniform	（非）均匀	Momentum Thickness	动量厚度
Absolute(Gage,Vacuum) Pressure	绝对（表，真空）压力	Momentum(Energy)-Flux	动量（能量）流量
Acceleration	加速度	Momentum-Integral Relation	动量积分关系
Area Moment of Inertia	惯性面积矩	Navier-Stokes Equations	N-S 方程
Atmospheric Pressure	大气压力	Net Force	合力
Average Velocity	平均速度	Newtonian Fluid	牛顿流体
Barometer	气压计	Newtonian Fluids	牛顿流体
Bernoulli	伯努力	No Slip	无滑移
Bernoulli Equation	伯努力方程	Nondimensionalization	无量纲化
Blasius Equation	布拉修斯方程	No-Slip Condition	无滑移条件
Body Force	体力	Nozzle	喷嘴
Boundaries	边界	One-Dimensional	一维
Boundary Layer	边界层	Operator	算子
Breakdown	崩溃	Osborne Reynolds	奥斯鲍恩·雷诺

（续表）

英　文	中　文	英　文	中　文
Calculus	微积分	Parabolic	抛物线
Cartesian Coordinates	笛卡坐标	Parallel Plates	平行平板
Centroid	质心	Partial Differential Equation	偏微分方程
Channel	槽道	Pathline	迹线
Coefficient of Viscosity	粘性系数	Perfect-Gas Law	理想气体定律
Composite Dimensionless Variable	组合无量纲变量	Plane(curved) Surface	平（曲）面
Compressible(Incompressible)	（不）可压的	Plate	板
Conservation of Mass	质量	Poiseuille Flow	伯肖叶流动
Conservation of Mass(Momentum, Energy)	质量（动量，能量）守恒	Prandtl	普朗特
Continuum	连续介质	Pressure	压力，压强
Control Volume	控制体	Pressure Center	压力中心
Control-Volume	控制体	Pressure Distribution(Gradient)	压力分布（梯度）
Convective Acceleration	对流加速度	Pressure Gradient	压力梯度
Coordinate Transformation	坐标变换	Random Fluctuations	随机脉动
Couette Flow	库塔流动	Rate of Work	功率
Density	密度	Rectangular Coordinates	直角坐标（系）
Differential	微分	Reservoir	水库
Dimension	量刚尺度	Reynolds	雷诺
Displacement thickness	排移厚度	Reynolds Number	雷诺数（Re）
Dot Product	点乘	Reynolds Transport Theorem	雷诺输运定理
Drag	阻力	Rigid-Body	刚体
Dynamics	动力学	Scalar	标量
Elliptic	椭圆的	Second-Order	二阶
Energy(Hydraulic) Grade Line	能级线	Shaft Work	轴功
Equilibrium	平衡	Shape Factor	形状因子
Euler	欧拉	Shear(Normal) Stress	剪（正）应力
Eulerian(Lagrangian) Method of Description	欧拉（拉格朗日）观点，方法	Similarity	相似
Field of Flow	流场	Skin-Friction Coefficient	壁面摩擦系数
Flat-Plate Boundary	平板边界层	Solution	解答
Flow Pattern	流型（谱）	Smooth	平滑
Fluid Mechanics	流体力学	Specific Weight	比重
Flux	流率	Stagnation Enthalpy	制止焓
Fourier's Law	傅立叶定律	Statics	静力学
Free Body	隔离体	Steady(Unsteady)	（非）定常
Function	函数	Strain	应变

（续表）

英　文	中　文	英　文	中　文
Heat Flow	热流量	Streamline(Tube)	流线（管）
Heat Transfer	热传递	Substantial(Material) Derivative	随体（物质）导数
Horizontal	水平的	Surface Force	表面力
Hydrostatic	水静力学，流体静力学	Surroundings	外围
Hyperbolic	双曲线的	System	体系
Imaginary	假想	Thermal Conductivity	热传导
Inertia	惯性，惯量	Thermodynamics	热力学
Infinitesimal	无限小	Time Derivative	时间导数
Inlet, Outlet	进、出口	Total Derivative	全导数
Instability	不稳定性	Transition	转换
Integral	积分	Variable	变量
Integrand	被积函数	Vector	矢量
Internal(External) Flow	内（外）流	Vector Sum	矢量合
Jet Flow	射流	Velocity Distribution	速度分布
Karman	卡门	Velocity Field	速度场
Kinematics	运动学	Velocity Gradient	速度梯度
Kinetic(Potential, Internal)Energy	动（势，内）能	Velocity Profile	速度剖面
Lagrange	拉格朗日	Venturi Tube	文图里管
Laminar	层流	Vertical	垂直的，直立的
Linear(Angular)-Momentum Relation	线（角）动量关系式	Viscous(Inviscid)	（无）粘性的
Liquid	流体	Volume Rate of Flow	体积流量
Local Acceleration	当地加速度	Volume(mass) Flow	体积（质量）流量
Mean Value	平均值	Volume(mass) Rate of Flow	体积（质量）流率
Mercury	水银	Wall Shear Stress	壁面剪应力

1.2 计算流体力学基础

本节介绍计算流体力学的一些重要基础知识，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础知识，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根基。

1.2.1 计算流体力学的发展

计算流体动力学（CFD）是 20 世纪 60 年代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了。一个重要的标志是近几十年来，各种 CFD 通用软件陆续出现，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。

CFD 通用软件的性能日益完善，应用的范围也不断扩大，在化工、冶金、建筑、环境等相关领域中被广泛应用，现在我们利用它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。

现代流体力学研究方法包括理论分析、数值计算和实验研究 3 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有效的指导；实验是认识客观现实的有效手段，可以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实验的空缺。

更重要的是，计算流体力学提供廉价的模拟、设计和优化工具，并提供分析三维复杂流动的工具。在复杂的情况下，测量往往很困难，甚至不可能，而计算流体力学能方便地提供全部流场范围的详细信息。与实验相比，计算流体力学具有对于参数没有限制、费用少、流场无干扰的特点。出于计算流体力学的优点，我们选择它进行模拟计算。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研究。

在数值研究方面，计算流体力学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，或者发展更好的计算方法；另一个是解决工程实际需要，直接通过数值模拟进行预测，为工程设计提供依据。理论的预测出自于数学模型的结果，而不是出自于一个实际物理模型的结果。

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 方法是对流场的控制方程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数值解的一种方法。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。这些方程构成连理的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。求解上述方程必须首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、壁面以及自由面的边界条件，而且还需要适宜的数学模型和包括相应初值在内的过程方程的完整数学描述。

求解的数值方法主要有有限差分法（FDM）、有限元（FEM）以及有限分析法（FAM），应用这些方法可以将计算域离散为一系列网格，并建立离散方程组。离散方程的求解是由一组给定的猜测值出发迭代推进，直至满足收敛标准。常用的迭代方法有 Gauss-Seidel 迭代法、TDMA 方法、SIP 法及 LSORC 法等。利用上述差分方程及求解方法可以编写计算程序或选用现有的软件实施过程的 CFD 模拟。

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 5 个步骤：

步骤 01 建立所研究问题的物理模型，再将其抽象成为数学、力学模型。之后确定要分析的几何体的空间影响区域。

步骤 02 建立整个几何形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。网格的稀疏和网格单元的形状都会对以后的计算产生很大影响。不同的算法格式为保证计算的稳定性和计算效率，一般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、压力条件。

步骤 04 选择适当的算法，设定具体的控制求解过程和精度条件，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，一般由理论工作者完成。

1.2.3 数值模拟方法和分类

在运动 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。特别是算法的选择，对模拟的效率及其正确性有很大影响，需要特别重视。要正确设置数值模拟的条件，有必要了解数值模拟的过程。

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。

区域离散化是用一组有限个离散的点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。节点是需要求解的未知物理量的几何位置、控制体积、应用控制方程或守恒定律的最小几何单位。

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。在区域离散化过程开始时，由一系列与坐标轴相应的直线或曲线簇所划分出来的小区域称为子区域。网格是离散的基础，网格节点是离散化物理量的存储位置。

常用的离散化方法有有限差分法、有限单元法和有限体积法。对这 3 种方法分别介绍如下。

（1）有限差分法

有限差分法是数值解法中最经典的方法。它是将求解区域划分为差分网格，用于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。

这种方法产生和发展得比较早，也比较成熟，较多用于求解双曲线和抛物线型问题。用它求解边界条件很复杂，尤其是椭圆型问题，没有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：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，前两种格式为一阶计算精度，后两种格式为二阶计算精度。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微小单元，并在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，求解该方程组就可以得到各节点上待求的函数值。

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

有限单元法对椭圆型问题有更好的适应性。

（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体都得到满足，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优点。

有一些离散方法（如有限差分法）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较严。使用有限差分法的好处在于易于编程、易于并行。

有限单元法适合处理复杂区域，精度可选。缺点是内存和计算量巨大，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，但是精度基本上只能是二阶。有限单元法在应力应变、高频电磁场方面的特殊优点正在被人重视。

由于 Fluent 基于有限体积法，因此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。

三维对流扩散方程的守恒型微分方程如下：

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

式中：ϕ 是对流扩散物质函数，如温度、浓度等。

上式用散度和梯度表示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)+div(\rho u\phi)=div(Kgrad\phi)+S_{\phi} \tag{1-26}$$

将方程(1-26)在时间步长 Δt 内对控制体体积 CV 积分，可得：

$$\int_{CV}\left(\int_t^{t+\Delta t}\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)\,\mathrm{d}t\right)dV+\int_t^{t+\Delta t}\left(\int_A n\cdot(\rho u\phi)\,\mathrm{d}A\right)\mathrm{d}t=\int_t^{t+\Delta t}\left(\int_A n\cdot(Kgrad\phi)\,\mathrm{d}A\right)\mathrm{d}t+\int_t^{t+\Delta t}\int_{CV}S_\phi\mathrm{d}V\mathrm{d}t \quad (1\text{-}27)$$

式中：散度积分已用格林公式化为面积积分，A 为控制体的表面积。

该方程的物理意义是：Δt 时间段和体积 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如下：

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

在 Δt 时段和控制体体积内部积分(1-28)式：

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

上式可写成如下形式：

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

在(1-30)式中，A 是控制体面积；ΔV 是体积，$\Delta V=A\Delta x$，Δx 是控制体宽度；$\overline{S}$ 是控制体中的平均源强度。如图 1-2 所示，设 P 点 t 时刻的温度为 T_P^0，而 $\mathrm{t}+\Delta t$ 时 P 点温度为 T_P，则(1-30)式可得：

$$\rho c(T_P-T_P^0)\Delta V=\int_t^{t+\Delta t}\left[k_eA\frac{T_E-T_P}{\delta x_{PE}}-k_wA\frac{T_P-T_W}{\delta x_{WP}}\right]\mathrm{d}t+\int_t^{t+\Delta t}\overline{S}\,\Delta V\mathrm{d}t \quad (1\text{-}31)$$

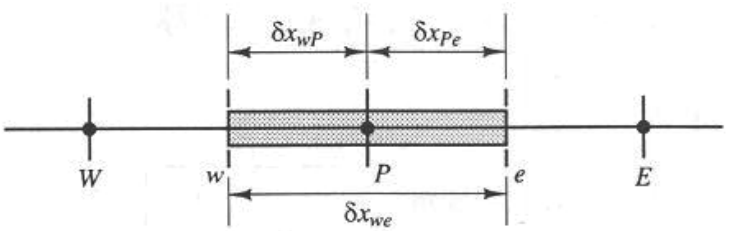


图 1-2　一维有限体积单元示意图

为了计算上式的 T_P、T_E 和 T_W 对时间的积分，引入一个权数 $\theta=0\sim1$，将积分表示成 t 和 $\mathrm{t}+\Delta t$ 时刻的线性关系：

$$I_T=\int_t^{t+\Delta t}T_P\mathrm{d}t=[\theta T_P+(1-\theta)T_P^0]\Delta t \quad (1\text{-}32)$$

(1-31)式可写成：

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

上式左端括号中 t 时刻的温度 T_P^0 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 3 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，而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

控制方程被离散化以后，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最为广泛的一种流场计算方法，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，从而得到速度场。因为压力是假定或不精确的，这样得到的速度场一般都不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，则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。在上述过程中，核心问题在于如何获得压力修正值、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 算法在基本思路上是一致的，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，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 算法的一个限制是在压力校正方程解出后，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：相邻校正和偏斜校正。PISO 算法的主要思想是将压力校正方程中解阶段中的 SIMPLE 和 SIMPLEC 算法所需的重复计算移除。经过一个或更多附加 PISO 循环，校正的速度会更接近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 算法在每个迭代中要花费稍多的 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，所以需要进行一个和上面所述的 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，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。这个被称为偏斜矫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为正交的网格上不相上下的解。

1.3 计算流体力学应用领域

近十多年来，CFD 有了很大发展，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 不仅可以作为一个研究工具，还可以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、工业制造等流域发挥作用。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、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，过去多是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 本身又有鲜明的系统性和规律性，因此比较适合被制成通用的商用软件。

自 1981 年以来，出现了 PHOENICS、STAR-CD、STAR-CCM+、CFX、Fluent 等多个商用 CFD 软件，这些软件的特点是：

- 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、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 可以读入几乎任何 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。提供的模型有湍流模型、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，又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。例如，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。CD-Adapco 集团不断将分布于世界各地代表处的开发成果和广大合作研究单位的研究成果融入软件的最新版本当中，使得 STAR-CD 保持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，流动噪声问题等。在新发布的 v4 版本中，STAR-CD 更是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的求解器具有内存占用少、收敛性强、稳定性好的特点，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（computational continuum mechanics algorithms），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、模型设定、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，功能强大而又易学易用。

STAR-CCM+创新性的表面包面功能、全自动生成多面体网格或六面体为核心的体网格功能、在计算过程中实时监控后处理结果的功能，甚至细微到使用复制、粘贴功能传递设定参数等，处处体现了 STAR-CCM+为了最小化用户的人工操作时间，更方便、更直接地将结果呈现在用户面前而精心设计的理念。

1.4.4 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发展的基本要求，并以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实际问题。

和大多数 CFD 软件不同，CFX 除了可以使用有限体积法外，还采用基于有限元的有限体积法。基于有限元的有限体积法保证在有限体积法守恒特性的基础上，吸收有限元法的数值精确性。

在 CFX 中，基于有限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采用 6 点插值；基于有限元的有限体积法对四面体网格单元采用 60 点插值，而单纯的有限体积法仅采用 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、真实气体等大批负责现象的使用模型。

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，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。

除了一般的工业流动外，ANSYS CFX 还可以模拟燃烧、多相流、化学反应等复杂流场。ANSYS CFX 还可以和 ANSYS Structure、ANSYS Emag 等软件配合，实现流体分析和结构分析、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 CFX 不仅是一款强大的 CFD 软件，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-放转换和不同的应用程序间共享结果更为容易。

例如，流体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 结构力学产品的天然双向连接，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、管理和运行第三方耦合软件的需要。

1.4.5 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，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，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。

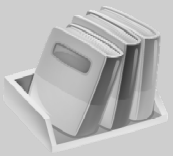
现今，全世界范围内数以千计的公司将 Fluent 与产品研发过程中设计和优化阶段相整合，并从中获益。先进的求解技术可提供快速、准确的 CFD 结果，灵活的移动和变形网格，以及出众的并行可扩展能力。用户自定义函数可实现全新的用户模型和扩展现有模型。

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，同时对比多个算例。

ANSYS Workbench 集成 ANSYS Fluent 后，为用户提供了与所有主要 CAD 系统的双向连接功能，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以共享不同应用程序的数据和计算结果。

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。通过本章的学习，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

Fluent 软件简介

导言

Fluent 是用于模拟具有复杂外形的流体流动以及热传导的计算机程序。它提供了完全的网格灵活性，用户可以使用非结构网格，例如二维三角形或四边形网格、三维四面体/六面体/金字塔形网格来解决具有复杂外形的流动，甚至可以使用混合型非结构网格。软件允许用户根据解的具体情况对网格进行修改（细化/粗化）。

对于大梯度区域，如自由剪切层和边界层，为了非常准确地预测流动，自适应网格是非常有用的。与结构网格和块结构网格相比，这一特点很明显地减少了产生“好”网格所需要的时间。对于给定精度，解适应细化方法使网格细化方法变得很简单，由于网格细化仅限于那些需要更多网格的求解域，大大减少了计算量。

Fluent 是用 C 语言写的，因此具有很大的灵活性与能力。因此，动态内存分配、高效数据结构、灵活的解控制都是可能的。除此之外，为了高效地执行、交互地控制以及灵活地适应各种机器与操作系统，Fluent 使用 client/server 结构，因此它允许同时在用户桌面工作站和强有力的服务器上分离地运行程序。

学习目标

★ 掌握 Fluent 软件的结构
★ 掌握 Fluent 计算分析过程中所用到的文件类型

2.1 Fluent的软件结构

Fluent 软件结构主要包括前处理器、求解器和后处理器三个部分。

1．前处理器

前处理器主要用来建立所要计算问题的几何模型及网格划分。在 Fluent 早期版本中，通常使用 GAMBIT 软件来完成几何模型的建立和网格划分。在 Fluent 软件整合进 ANSYS 软件包之后，可以通过 ANSYS 软件包中的 DesignModeler 软件来建立几何模型，通过 Meshing 软件或者 ICEM CFD 软件来进行网格划分。

在 Fluent 19.0 中，已经集成了 Meshing 功能，可以利用 Meshing 模式划分高质量非结构网格。

2．求解器

求解器是 Fluent 软件模拟计算的核心程序。一旦网格被读入 Fluent，剩下的任务就是使用解算器进行计算了，其中包括边界条件的设定、流体物性的设定、解的执行、网格的优化等。

3．后处理器

Fluent 软件带有功能比较强大的后处理功能，同时还可借助于 ANSYS 软件包中的 CFD-Post 软件进行专业化的后处理。

2.1.1 Fluent 启动

在 Fluent 中，启动运行 Fluent 应用程序，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→Fluent 19.0 命令，便可启动 Fluent 程序，进入软件主界面。或者，在 DOS 窗口中输入“C:/Program Files/ANSYS Inc/v170/Fluent/ntbin/ntx86/Fluent.exe”命令，即可启动 Fluent。

（2）Linux 系统

在终端窗口中输入“/usr/ansys_inc/v170/Fluent/ntbin/ntx86/Fluent.exe”命令，即可启动 Fluent。

2．在 Workbench 中启动

在 Workbench 中启动 Fluent 首先需要运行 Workbench 程序，然后导入 Fluent 计算模块，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 2-1 所示的主界面。

步骤 02 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Fluent 选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 2-2 所示。

步骤 03 双击分析项目 A 中的 Setup，将直接进入 Fluent 软件。Fluent 软件启动后，进入 Launcher 界面，如图 2-3 所示。

步骤 04 通过 Launcher 界面可以设置计算问题是二维问题（2D）或者三维问题（3D），设置计算的精度（单精度或者双精度），设置计算过程是串行计算还是并行计算，设置项目打开后是否直接显示网格等功能。

选中 Meshing Mode 复选框可以进入 Fluent 的网格划分模式。

Meshing Mode 只有在 3D 模型下才可选，因为 Fluent 整合的 Meshing 功能只能划分三维体网格。

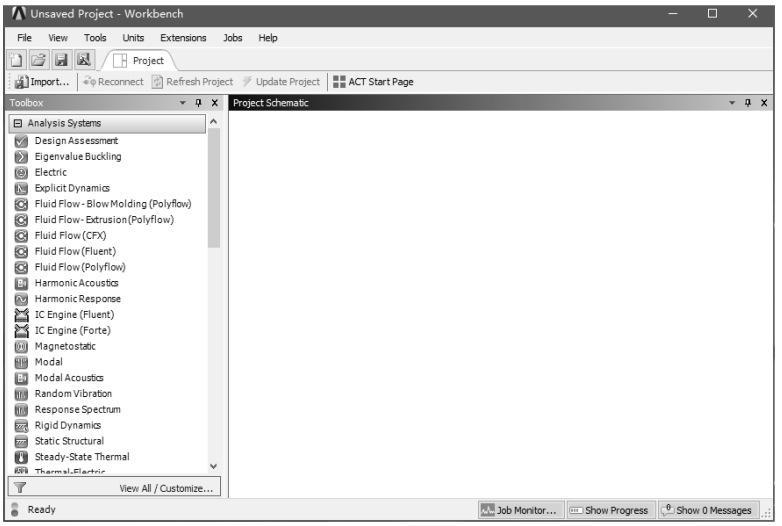


图 2-1　Workbench 主界面

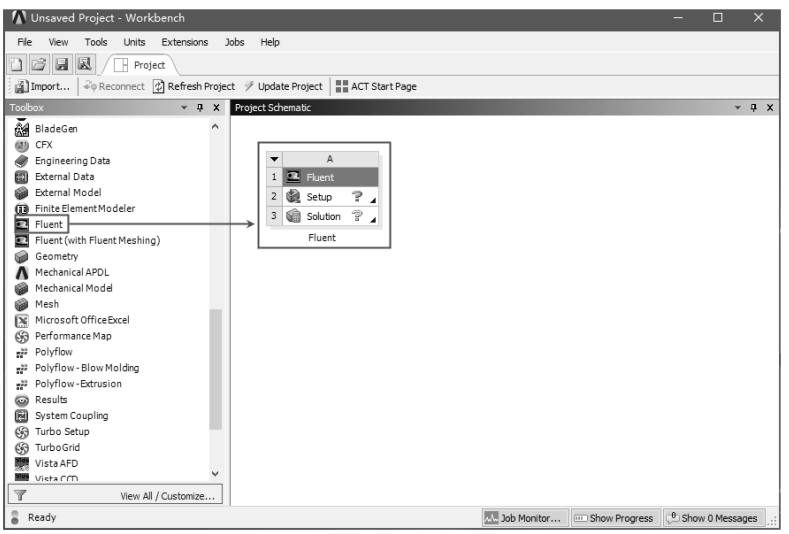


图 2-2　创建分析项目 A

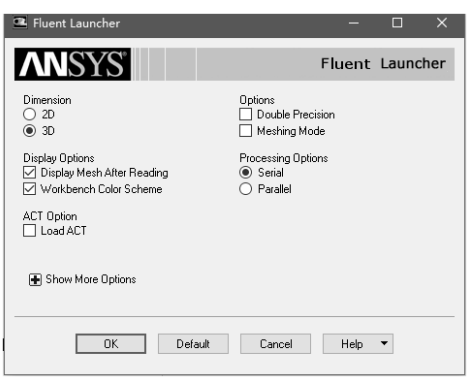


图 2-3　Launcher 界面

2.1.2 Fluent 用户界面

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

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

Fluent 中内置了大量的材料数据库，包括各种常用的流体、固体材料，如水、空气、铁、铝等。用户可以直接使用这些材料定义求解问题，也可以在这些材料的基础上进行修改或创建一种新材料。

Fluent 中可以设置的求解条件很多，包括定常/非定常问题、求解域、边界条件和求解参数。

Fluent 19.0 界面如图 2-4 所示，界面大致分为 6 个区域。

图 2-4　Fluent 19.0 界面

- 功能区：Fluent 19.0 改变了以往主菜单下拉的形式，变成了更加直观化的功能区形式，单击每个主菜单会激活相应的功能卡。
- 信息树：信息树是从 Fluent 16.0 开始才出现的，具备 ANSYS 家族软件的热点，能快捷、直观地看到整个计算模型的状态，也能以此为入口对模型进行操作。
- 设置选项卡：在信息树某一功能被选中后，设置选项卡将用来对这一功能进行详细设置。
- 图形控制工具：集成了对图形操作的按钮，包括旋转、平移、缩放、截图等。
- 右半部分分为上、下两个区域：上面是图形区，以图形方式直观地显示模型；下面是文本信息区。

技巧提示

Fluent 默认的图形显示界面通常是黑色或者渐变的浅蓝色背景，通过以下步骤可改变 Fluent 图形显示界面背景颜色。

（1）如图 2-5 所示，在 Viewing 功能卡中单击 Options 按钮，弹出如图 2-6 所示的 Display Options（显示设置）对话框。

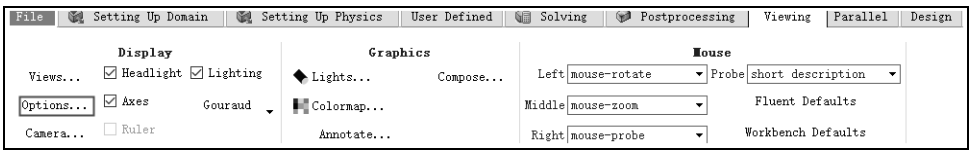


图 2-5　Options 选项

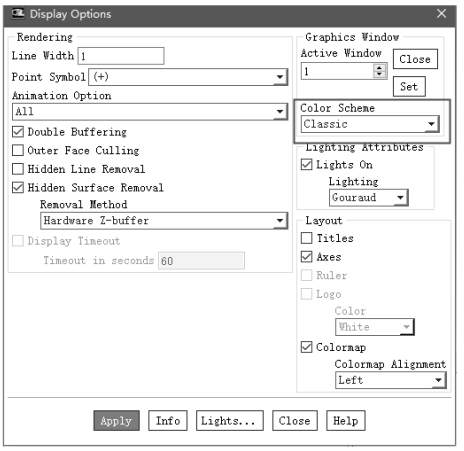


图 2-6　Display Options 对话框

（2）在 Display Options（显示设置）对话框中，将 Color Scheme 改为 Classic。

（3）在文本信息区，依次输入以下指令：

```
> display
/display> set
/display/set> colors
/display/set/colors> background
Background color ["black"] "white"
```

（4）完成以后，切换窗口以更新设置，设置完成。

2.1.3　Fluent 文件读入与输出

Fluent 除了可以读入、输出必要的网格文件、算例文件、数据文件和进程文件外，还保存了与其他软件的接口，包括 CFX、ABAQUS、NASTRAN、Fluent4 等，同时还有与 I-DEAS 和 ANSYS 的接口。所有的读入与输出操作均可以在 File 菜单中完成，本小节将逐项进行介绍。

1. 读取网格文件

网格文件是包含各个网格点坐标值和网格连接信息，以及各分块网格的类型和节点数量等信息的文件。在 Fluent 中，网格文件是算例文件的一个子集，因此在读取网格文件时可以用菜单操作：

```
File→Read→Mesh
```

打开菜单并读入网格文件。当然这些网格文件的格式必须是 Fluent 软件内定的格式。可以用来生成 Fluent 内定格式网格的网格软件有 GAMBIT、TGrid 和 ICEM CFD。

除了使用 Fluent 内定格式的网格文件外，Fluent 还可以输入其他格式的网格文件。

其他格式文件输入的菜单操作是：

```
File→Import
```

然后再打开相应格式的输入菜单完成，主要的格式文件包括 GAMBIT、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN、CGNS 等。

2. 读写算例文件和数据文件

在 Fluent 中与数值模拟过程相关的信息保存在算例文件和数据文件里。在保存文件时，可以选择将文件保存为二进制格式或纯文本格式。二进制文件的优点是占用系统资源少，运行速度快。Fluent 在读取文件时可以自动识别文件格式。Fluent 还可以根据计算开始前的设置，在间隔一定的迭代步数时自动保存文件。

（1）读写算例文件

如前所述，算例文件中包含网格信息、边界条件、用户界面、图形环境等信息，其扩展名为.cas，其读入操作可以按下列次序单击菜单，打开文件选择窗口，就可以读入所需的算例文件了：

```
File→Read→Case
```

与此相类似，按下列次序单击菜单，打开文件选择窗口，就可以保存算例文件了：

```
File→Write→Case
```

（2）读写数据文件

数据文件记录了流场的所有数据信息，包括每个流场参数在各网格单元内的值以及残差的值，其扩展名为.dat。

数据文件的保存过程与算例文件类似，执行菜单操作：

```
File→Read→Data
```

打开文件选择窗口就可以读入数据文件。

执行菜单操作：

```
File→Write→Data
```

则可以保存数据文件。

（3）同时读写算例文件和数据文件

算例文件和数据文件包含与计算相关的所有信息，因此使用这两种文件就可以开始新的计算。在 Fluent 中可以同时读入或写出这两种文件，执行菜单操作：

```
File→Read→Case&Data…
```

打开文件选择窗口，然后选择相关的算例文件完成读入工作，Fluent 会自动将与算例有关的数据文件一并读入。类似地，执行菜单操作：

```
File→Write→Case&Data…
```

打开文件选择窗口，然后选择 Save（保存），就可以将与当前计算相关的算例文件和数据文件同时保存在相应的目录里。

（4）自动保存算例和数据文件

在 Fluent 中还可以使用自动保存功能以减少人工操作。使用这项功能，可以设定文件保存频率，即每隔一定的迭代步数就自动保存算例和数据文件，菜单操作为：

```
File→Write→Autosave…
```

于是 Autosave Case/Data（自动保存算例和数据文件）面板被打开，如图 2-7 所示。可以分别设定算例文件和数据文件的保存间隔。在系统默认设置中，文件保存间隔为 0，即不做自动保存。

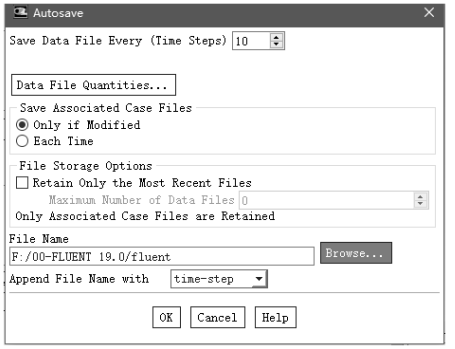


图 2-7　自动保存算例和数据文件面板

在文件名一栏中可以为需要保存的文件命名，如果在命名过程中没有使用扩展名，则系统会自动为所保存的算例文件和数据文件分别加上.cas 或.dat 的后缀。

如果在命名过程中使用.gz 或.z 的后缀，则系统会用相应的压缩方式保存算例文件和数据文件。这里.gz 和.z 是 Fluent 中压缩文件格式。

3. 创建与读取进程文件

进程文件（journal file）是一个 Fluent 的命令集合，其内容用 Scheme 语言写成。可以通过两个途径创建进程文件：一个是在用户进入图形用户界面后，系统自动记录用户的操作和命令输入，自动生成进程文件；另一个是用户使用文本编辑器直接用 Scheme 语言创建进程文件，其工作过程与用 FORTRAN 语言编程类似。

进程文件中可以使用注释语句，Scheme 语言用分号“；”作为注释语句的标志。在一行语句前面使用分号“；”，则表明该行为注释行，用户可以在注释行中为进程文件添加说明信息，也可以锁定一些无用的命令行。

使用进程文件可以重复过去的操作，包括恢复图形界面环境和重复过去的参数设置等。形象地说，使用进程文件就是重播用户曾经进行的操作，这个重播过程中包含了用户曾经进行过的各种有用和无用的操作过程。因此其使用效率比下面将介绍的描述文件要低。

执行菜单操作：

```
File→Write→Start Journal
```

系统就开始记录进程文件。此时原来的 Start Journal（开始进程）菜单项变为 Stop Journal（终止进程），单击 Stop Journal（终止进程）菜单项则记录过程停止。

执行菜单操作：

```
File→Read→Journal
```

打开选择文件窗口，选择要打开的进程文件，然后单击 OK 按钮就可以打开进程文件了。

4. 创建记录文件

与进程文件类似，记录文件（transcript file）也是用 Scheme 语言写成的，可以记录用户的所有键盘输入和菜单输入动作，不同的是记录文件不能被读入进行重播操作。记录文件只是为计算做一个完整的操作记录，以便在程序出错时可以回过头来进行检查。

录制进程文件菜单项的下方就是录制记录文件的菜单项，其录制和停止过程也与进程文件类似，即执行菜单操作：

```
File→Write→Start Transcript…
```

就开始录制记录文件。执行菜单操作：

```
File→Write→Stop Transcript…
```

则停止录制过程。

5. 读写边界函数分布文件

边界函数分布文件（profile file）用于定义计算边界上的流场条件，比如可以用边界函数分布文件定义管道入口处的速度分布。边界函数分布文件的读写操作如下：

（1）执行菜单操作：

```
File→Read→Profile…
```

打开文件选择窗口，然后选择文件，即可读入边界函数分布文件。

（2）执行菜单操作：

```
File→Write→Profile…
```

打开 Write Profile（写边界函数分布）面板，如图 2-8 所示，选择创建新的边界文件还是覆盖原有文件，同时在 Surfaces（表面）中选择要定义的边界区域，再在 Values（值）中选择要指定的流场参数，单击 Write（写）按钮就可以生成边界函数分布文件。

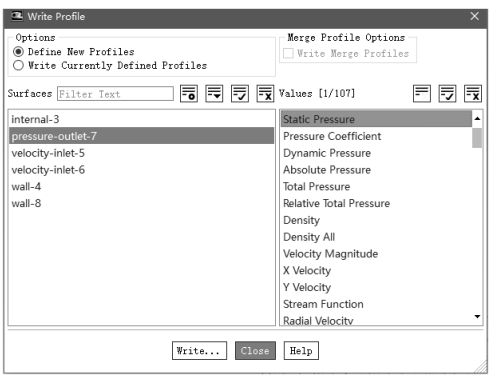


图 2-8　Write Profile（写边界函数分布）面板

边界函数分布文件既可以用在原来的算例中，也可以用在新的算例中。例如，在管道计算中，用户为出口定义了速度分布，并将它保存在一个边界函数分布文件中。在计算另一个新的算例时，用户可以读入这个文件作为新的管道计算的出口条件。

6. 保存图像文件

图形显示窗口显示的图像可以用很多种方式和文件格式进行保存。保存方式包括使用 Fluent 软件内部工具进行保存，也可以使用第三方图形软件保存屏幕显示图像。

Fluent 内部有一个 Save Picture（保存图形）面板，在保存图像文件前，可以使用这个面板对图像文件的保存格式、颜色方案等进行设置，如图 2-9 所示。

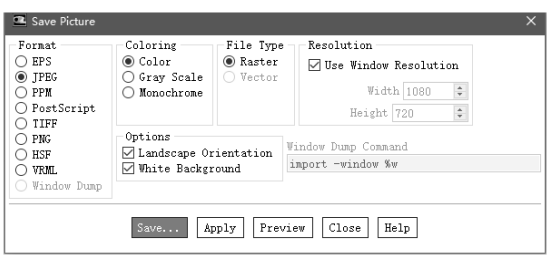


图 2-9　保存图形面板

在这个面板上可以选择图像文件格式、颜色方案、文件类型、分辨率和方向，并可以预览图像文件。图像文件格式的差别不大，可以根据需要进行选择。颜色方案是选择将文件保存为彩色图像、灰度图像或单色图像。文件类型可以为光栅格式和矢量格式，区别是光栅格式的文件读写速度较快，但是图像质量较差；矢量格式读写速度慢，但是图像质量高。

在设置完成后，先用 Preview（预览）按钮检查图像是否满足需要，如果跟自己的预想相去甚远，就重新调整上述几项参数设置；如果对预览结果满意，就可以按 Save（保存）按钮保存图像。如果想了解参数的含义，可以按 Help（帮助）按钮获得在线帮助信息。

7. 读入 Scheme 源文件

Scheme 语言的源文件可以用三种方式读入：一种是在菜单中作为 Scheme 文件读入；第二种是在菜单中作为进程文件读入；第三种是用 Scheme 语言的函数命令读入。

如果 Scheme 文件比较大，可以通过下列菜单操作读入：

```
File→Read→Scheme...
```

或者使用函数命令读入：

```
> (load "file.scm")
```

小的 Scheme 文件可以用下列菜单操作读入：

```
File→Read→Journal...
```

或者用命令 file/read-journal 读入，还可以用“.”或 source 命令读入：

```
> . file.scm
```

或

```
> source file.scm
```

2.2 Fluent计算类型及应用领域

Fluent 可以计算的流动类型包括：

- 任意复杂外形的二维/三维流动。
- 可压、不可压流。
- 定常、非定常流。
- 无粘流、层流和湍流。
- 牛顿、非牛顿流体流动。
- 对流传热，包括自然对流和强迫对流。
- 热传导和对流传热相耦合的传热计算。
- 辐射传热计算。
- 惯性（静止）坐标、非惯性（旋转）坐标中的流场计算。
- 多层次移动参考系问题，包括动网格界面和计算动子/静子相互干扰问题的混合面等问题。

- 化学组元混合与反应计算，包括燃烧模型和表面凝结反应模型。
- 源项体积任意变化的计算，源项类型包括热源、质量源、动量源、湍流源和化学组分源项等形式。
- 颗粒、水滴和气泡等弥散相的轨迹计算，包括弥散相与连续项相耦合的计算。
- 多孔介质流动计算。
- 用一维模型计算风扇和换热器的性能。
- 两相流，包括带空穴流动计算。
- 复杂表面问题中带自由面流动的计算。

简而言之，Fluent 适用于各种复杂外形的可压和不可压流动计算。

2.3 Fluent求解步骤

Fluent 是一个 CFD 的求解器，在计算分析之前要在头脑中先勾勒出一个计划，再按照计划进行工作。

2.3.1 制订分析方案

制订步骤之前，需要了解下列问题：

- 确定工作目标：明确计算的内容是什么？计算结果的精度应该有多高？
- 选择计算模型：要考虑如何划定流场？流场的起止点在哪里？边界条件怎么定义？是否可以用二维进行计算？网格的拓扑结构应该是什么样的？
- 选择物理模型：流动是无粘流、层流，还是湍流？流动是可压的，还是不可压的？需要考虑传热问题吗？流场是定常的，还是非定常的？在计算中是否还要其他的物理问题？
- 确定求解流程：要计算的问题能否用系统默认的设置简单地完成？是否有什么窍门可以加快计算的收敛？计算机的内存是否够用？计算需要多长时间？仔细思考这些问题可以更好地完成计算，否则在计算的过程中就会经常遇到意想不到的问题，并且经常返工，浪费时间，降低工作效率。

2.3.2 求解步骤

确定所解决问题的特征之后，你需要以下几个基本的步骤来解决问题：

- 创建网格。
- 运行合适的解算器：2D、3D、2DDP、3DDP。
- 输入网格。
- 检查网格。
- 选择需要解的基本方程：层流还是湍流（无粘）、化学组分还是化学反应、热传导模型等。
- 选择解的格式。

- 确定所需要的附加模型：风扇，热交换，多孔介质等。
- 指定材料物理性质。
- 指定边界条件。
- 调节解的控制参数。
- 初始化流场。
- 计算解。
- 检查结果。
- 保存结果。
- 必要的话，细化网格，改变数值和物理模型。

Fluent 的计算步骤对应的菜单或功能区见表 2-1。

表 2-1　Fluent 计算步骤及对应的菜单或功能区

步　　骤	对应菜单项
输入网格	File 菜单
检查网格	Setting Up Domain 功能区
选择基本方程	Setting Up Physics 功能区
选择求解格式	Solving 功能区
物质属性	Setting Up Physics 功能区
边界条件	Setting Up Physics 功能区
调整求解控制参数	Solving 功能区
初始化流场	Solving 功能区
计算求解	Solving 功能区
检查结果	Postprocessing 功能区
保存结果	File 菜单
根据结果对网格做适应性调整	Setting Up Domain 功能区

2.4 Fluent使用的单位制

Fluent 提供英制（British）、国际单位制（SI）和厘米-克-秒制（CGS）等单位制，这些单位制之间可以相互转换。但 Fluent 规定，对于边界特征、源项、自定义流场函数、外部创建的 X-Y 图散点图的数据文件数据，必须使用国际单位制。

对于网格文件，不管在创建时用的什么单位制，在被 Fluent 读入时，均假定为是用国际单位制（长度单位为米）创建的。因此，在导入网格文件时，要注意按当前设定的单位制对网格尺寸进行缩放处理，以保证其几何尺寸的有效性。

2.5 Fluent使用的文件类型

使用 Fluent 时，涉及多种类型的文件，Fluent 读入的文件类型包括 grid、case、data、profile、Scheme 以及 journal 文件，输出的文件类型包括 case、data、profile、journal 以及 transcript 等。

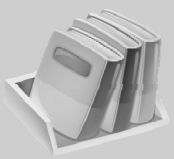
Fluent 还可以保存当前窗口的布局以及保存图形窗口的硬拷贝。表 2-2 给出了 Fluent 用到的主要文件类型。

表 2-2　Fluent 文件类型

文件类型	扩 展 名	作　　用
grid（网格文件）	.msh	记录网格数据信息
case（项目文件）	.cas	记录物理数据、区域定义、网格信息
data（数据文件）	.dat	记录每个网格数据信息以及收敛的历史记录（残差值）
profile（边界信息文件）	用户指定	用于指定边界区域上的流动条件
journal（日志文件）	用户指定	记录用户输入过的各类命令
transcript（副本文件）	用户指定	记录全部输入及输出信息
HardCopy（硬拷贝文件）	取决于输出格式	将图形窗口中的内容硬拷贝输出为 JPEG、TIFF、PostScript 等格式文件
Export（输出文件）	取决于输出格式	将计算数据输出为 AVS、FAST、EnSight、FIELDVIEW 等软件可读入格式文件
Interpolate（转接文件）	用户指定	用于两种网格方案之间的数据文件交换
Scheme（源文件）	.scm	用 Scheme 语言编写的源程序文件
配置文件	.Fluent	记录对 Fluent 进行定制和控制的文件

2.6 本章小结

本章中介绍了 Fluent 软件的基本情况，包括 Fluent 的主要计算方式和适用范围，Fluent 的图形用户界面和文字用户界面，Fluent 与其他 CAD/CAE 软件的接口，各种文件在 Fluent 中的导入和导出方法，以及 Fluent 的计算步骤。



第 3 章

创建几何模型

导言

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，又能够方便进行下一步网格划分工作。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，并通过一个实例详细介绍 DesignModeler 的工作流程。

学习目标

★ 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以下两种。

1．通过网格生成软件直接创建模型

目前主流的网格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模型几何精度高，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。

本章重点介绍 ANSYS Workbench 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。类似其他 CAD 软件，DesignModeler 几何建模主要有以下 3 种方法：

- 自底向顶的建模方式。所谓自底向顶的建模方式，就是按点→线→面→体的顺序依次建模，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。该方法是直接利用体元，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、5 或 6 个面围成。

3.2 DesignModeler简介

DesignModeler 是 ANSYS Workbench 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，具有一些一般 CAD 软件所不具备的功能，如梁建模、封闭操作、填充操作、点焊设置等。

3.2.1 启动 DesignModeler

要启动运行 DesignModeler 应用程序，需在 Workbench 中进行。

在 Workbench 中启动 DesignModeler，首先需要运行 Workbench 程序，然后导入 DesignModeler 模块，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。

步骤 02 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry 选项，即可在项目管理区创建分析项目 A，如图 3-1 所示。

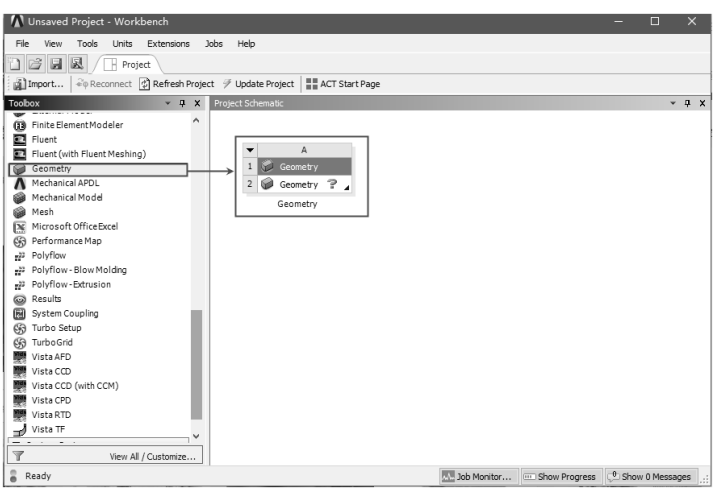


图 3-1 创建分析项目 A

步骤 03 右击项目，选择 New Geometry in DesignModeler，将直接进入 DesignModeler 软件。

3.2.2 DesignModeler 的用户界面

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

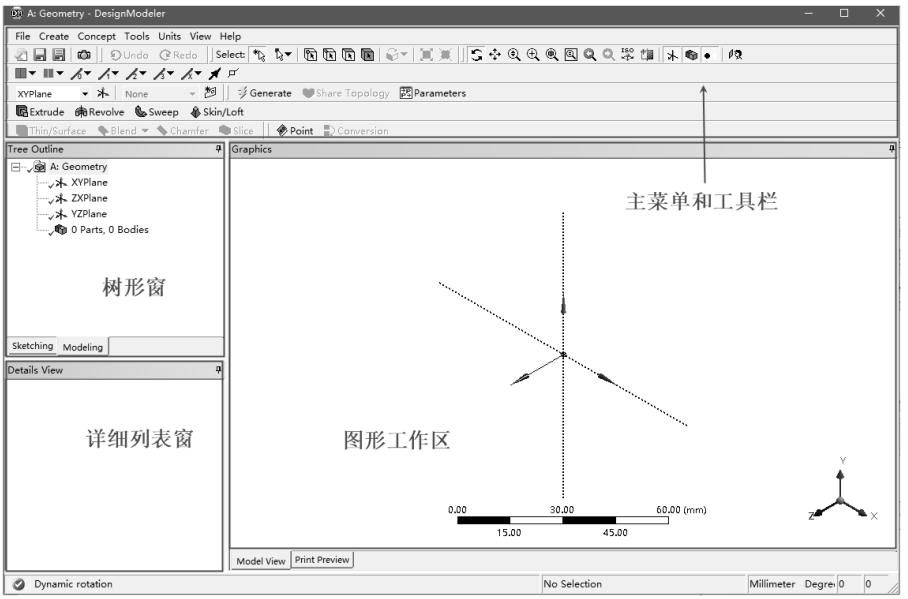


图 3-2 DesignModeler 的用户界面

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 允许用户配置个人窗口满足使用要求，如利用鼠标移动和调整窗口等。下面认识一下 DesignModeler 的基本结构。

DesignModeler 的主要功能都集中在各项主菜单中，如创建文件、具体操作和帮助文件等。这部分主要包括 7 项内容，如图 3-3 所示。

- File：基本文件操作，包括常规的文件输入、输出、保存以及脚本的运行等功能，如图 3-4 所示。

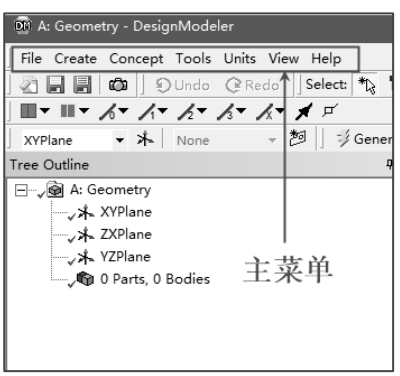


图 3-3 DesignModeler 主菜单

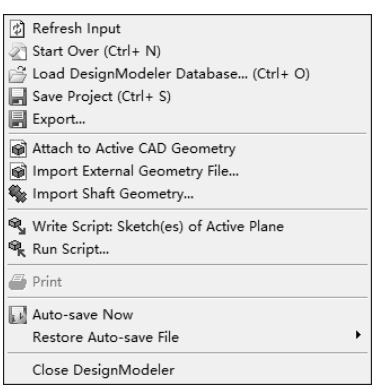


图 3-4 File 子菜单

- Create：用来创建 3D 模型和修改的操作工具（如布尔运算、倒角等），如图 3-5 所示。
- Concept：用来创建梁模型和面（壳体）的工具，如图 3-6 所示。
- Tools：用来整体建模操作、参数管理以及定制程序等的工具，如图 3-7 所示。

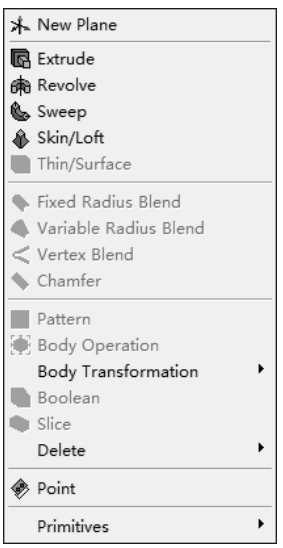


图 3-5　Create 子菜单

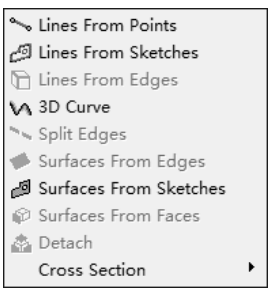


图 3-6　Concept 子菜单

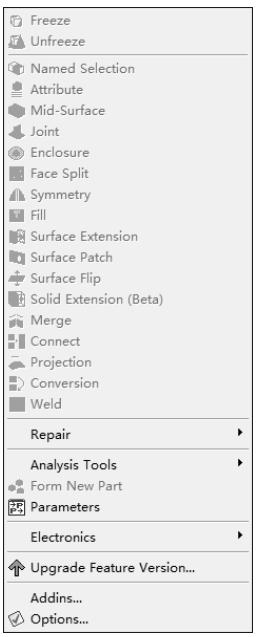


图 3-7　Tools 子菜单

- Units：用来设置模型所采用的单位制和模型识别精度。
- View：用来设置显示项的工具，如图 3-8 所示。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。
- Help：帮助文档，在使用 DesignModeler 的过程中，碰到一些问题或有一些不清楚的地方时可以随时使用，如图 3-9 所示。

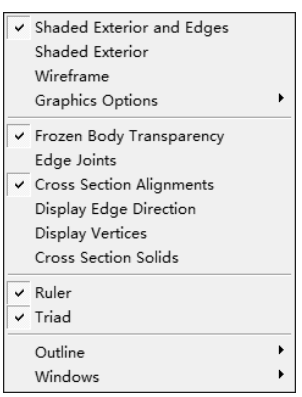


图 3-8　View 子菜单

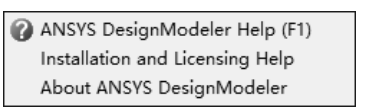


图 3-9　Help 子菜单

除了上述菜单外，为了便于用户使用，DesignModeler 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/工具、3D 几何体建模工具等。

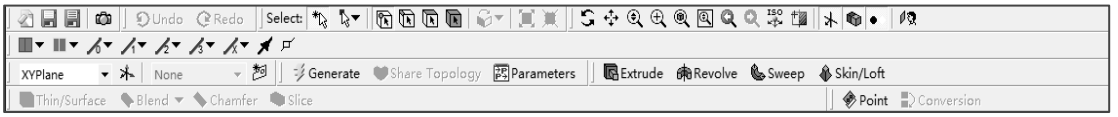


图 3-10　DesignModeler 工具条

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，需要在 Units 菜单中为模型指定长度单位，如图 3-11 所示，供用户选择需要的长度单位（可以将其设置为默认值）。

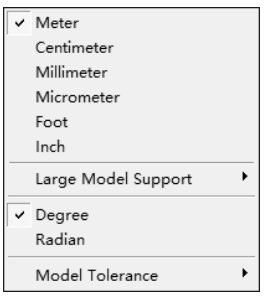


图 3-11　Units 菜单

3.3.2　创建新平面

在 DesignModeler 中，草图都要在平面上创建，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。

选择创建新平面，这时在树形目录中显示构建新平面的几种类型，如图 3-12 所示，具体含义如下。

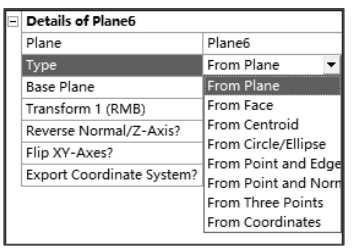


图 3-12　构建新平面

- From Plane：从另一个已有面创建平面。
- From Face：从表面创建平面。
- From Centroid：通过三维模型的质心创建平面。
- From Circle/Ellipse：基于某个圆或椭圆创建平面。
- From Point and Edge：用一点和一条直线的边界定义平面。
- Form 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：通过输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，就可以在平面上新建草图了。操作时只要单击草图按钮，就能在激活的平面上新建草图。

当然，也可以从面直接建立面/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。当然，新面和草图会自动创建，实例过程如图 3-13 所示。

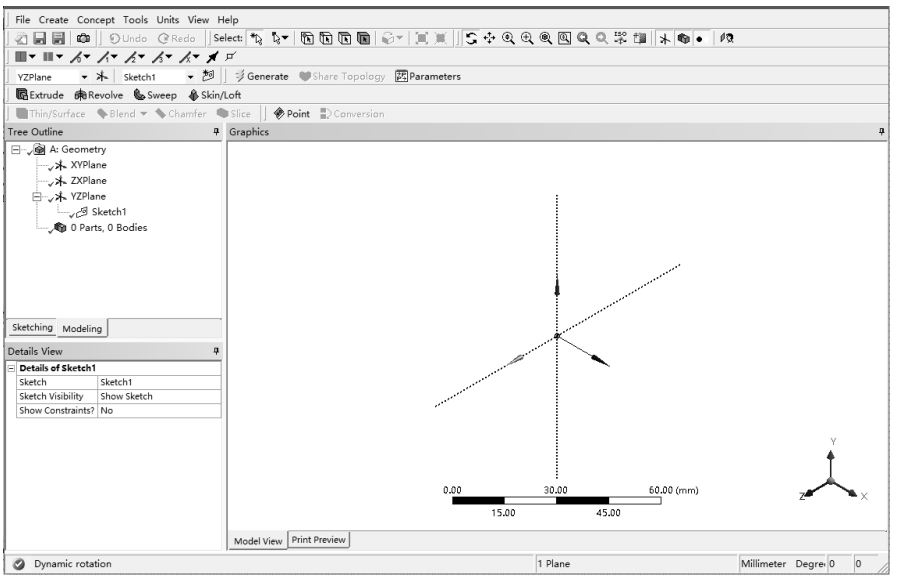


图 3-13　直接建立面/草图

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

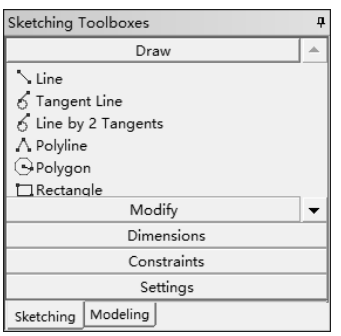


图 3-14　Sketching Toolboxes 面板

说明

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，也非常容易上手，因此对于常规性绘图过程，本书就不做详细介绍了（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 还有自己的特点。

DesignModeler 可导入外部 CAD 几何体模型，具体如图 3-15 所示。一般包括以下 3 种方式：

- 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。

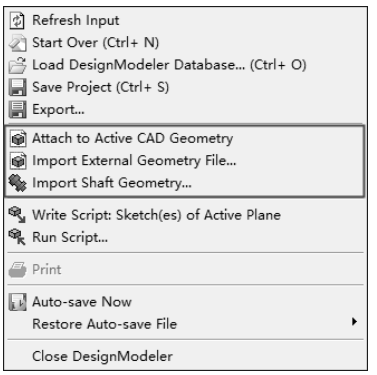


图 3-15　与 CAD 软件间的关联性

其中，第一个功能（File→Attach to Active CAD Geometry）可以使 DesignModeler 与绝大多数 CAD 的几何模型建立双向关联性。

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 中的模型也可同步更新。

要在 DesignModeler 与 CAD 软件之间建立关联性，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，本书后面会详细讲述。

3.4　创建3D几何体

了解了在 DesignModeler 草图中建立 2D 几何体后，只需将 2D 几何体通过拉伸、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，实际上可以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，因此用户若要在以后划分出高质量的六面体网格，则先要将一些不规则的几何体切片成规则形状的几何体。

DesignModeler 包括 3 种体元，即 3D 实体（Solid Body）、面体（Surface Body）和线体（Line Body）。图 3-16 所示为 3D 建模工具栏，其中的命令将在后面分别进行介绍。

图 3-16　3D 建模工具栏

3.4.1　拉伸

拉伸（Extrude）可以用于创建面体和 3D 实体。当前激活的 2D 草图作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、方向以及布尔运算的方式，控制实体或面体的创建。在拉伸属性设定完毕后，单击 Generate 按钮，即可生成相应的实体。

例如，生成一个立方体，在创建一个矩形的草图之后，选中草图，按照图 3-17 的提示单击 Extrude，设置立方体高度为 10m，然后单击 Generate 完成建模过程。

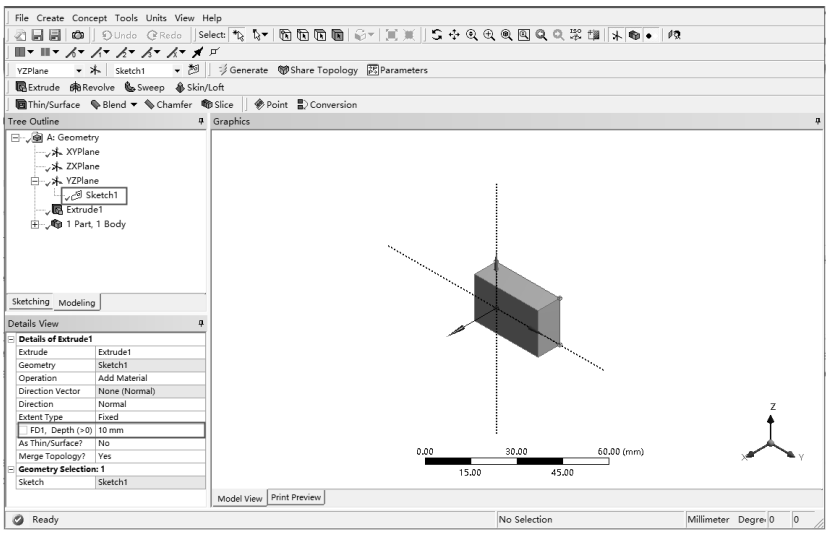


图 3-17　拉伸建模实例

3.4.2　旋转

旋转（Revolve）命令用于创建 3D 轴对称旋转体。整个创建过程与拉伸操作类似，也是有选择、属性设定和创建 3 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。

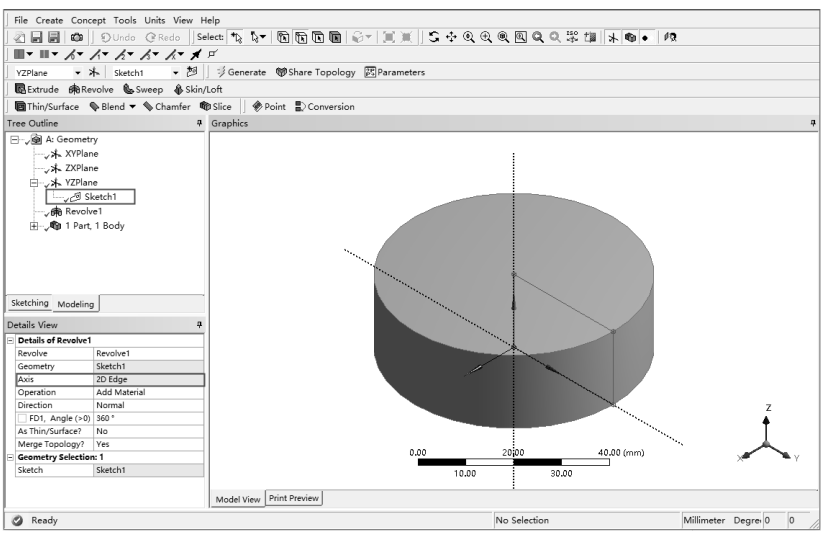


图 3-18　旋转建模实例

3.4.3 扫掠

扫掠（Sweep）命令可以用几何元素经过不同的路径在空间中扫描曲面。图 3-19 所示为矩形沿着曲线扫描得到的模型。

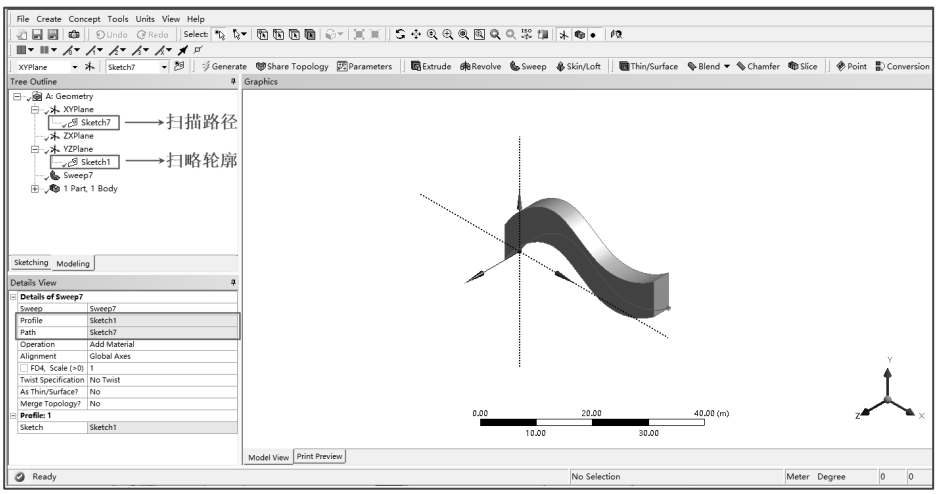


图 3-19　扫掠建模实例

3.4.4 直接创建 3D 几何体

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定等方式创建棱锥体、圆锥体、球体和圆环体。该方法无须事先绘制 2D 草图，使操作更加快捷，可以直接生成 3D 图元，如图 3-20 所示。

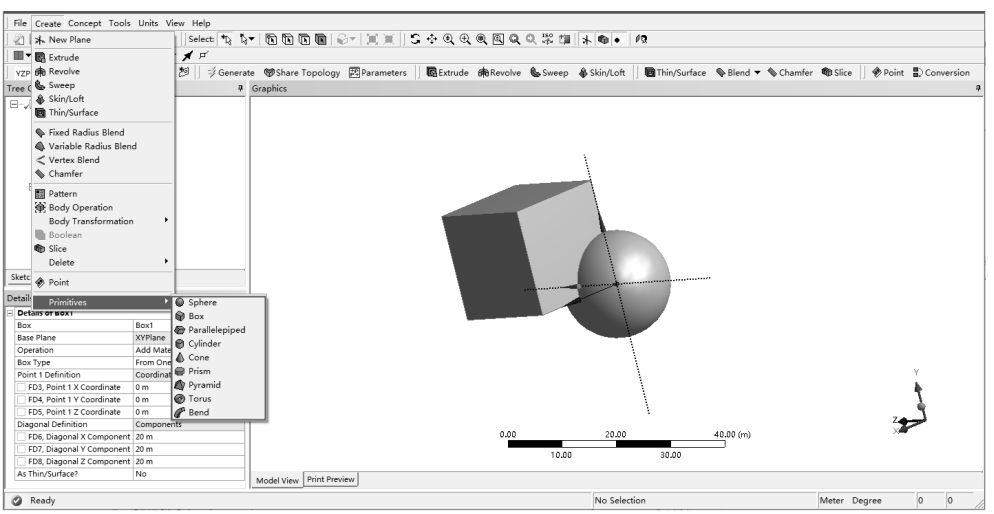


图 3-20　直接创建 3D 几何体建模实例

3.4.5 填充和包围

填充（Fill）和包围（Enclosure）这两个操作在 CFD（计算流体力学）计算建模过程中经常会用到。图 3-21 所示是某种简化的接头，流体在接头内流动。下面对接头内的流体进行分析。

在 CAD 建模的时候只是创建了接头的固体部分，而 CFD 分析实际是对接头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。

下面以此为例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择面。

步骤 03 选中内腔的壁面。

步骤 04 在屏幕左下方的详细栏中确定为 By Cavity（腔填充），并单击 Apply 按钮。

步骤 05 单击 Generate 按钮，生成流体区域，重命名为 Fluid。

隐去原有的固体区域，即可看到产生的流体区域，如图 3-22 所示。

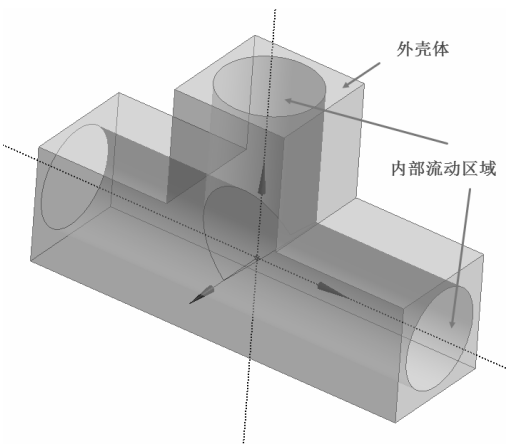


图 3-21 接头模型

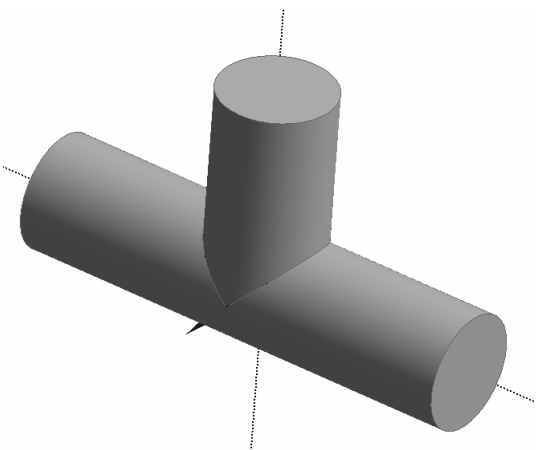


图 3-22 填充操作过程

技巧提示

在操作过程中，按住 Ctrl 键便可选择多个平面。

对于包围操作，如对正在飞行的导弹周围的空气流场进行分析，一般在建模的时候只会对固体的导弹建模，而分析时是将导弹周围的空气作为研究对象。

此时只要采用包围操作，就能将周围的空气建立模型。包围操作与填充操作类似，本书就不再详细讲述了。

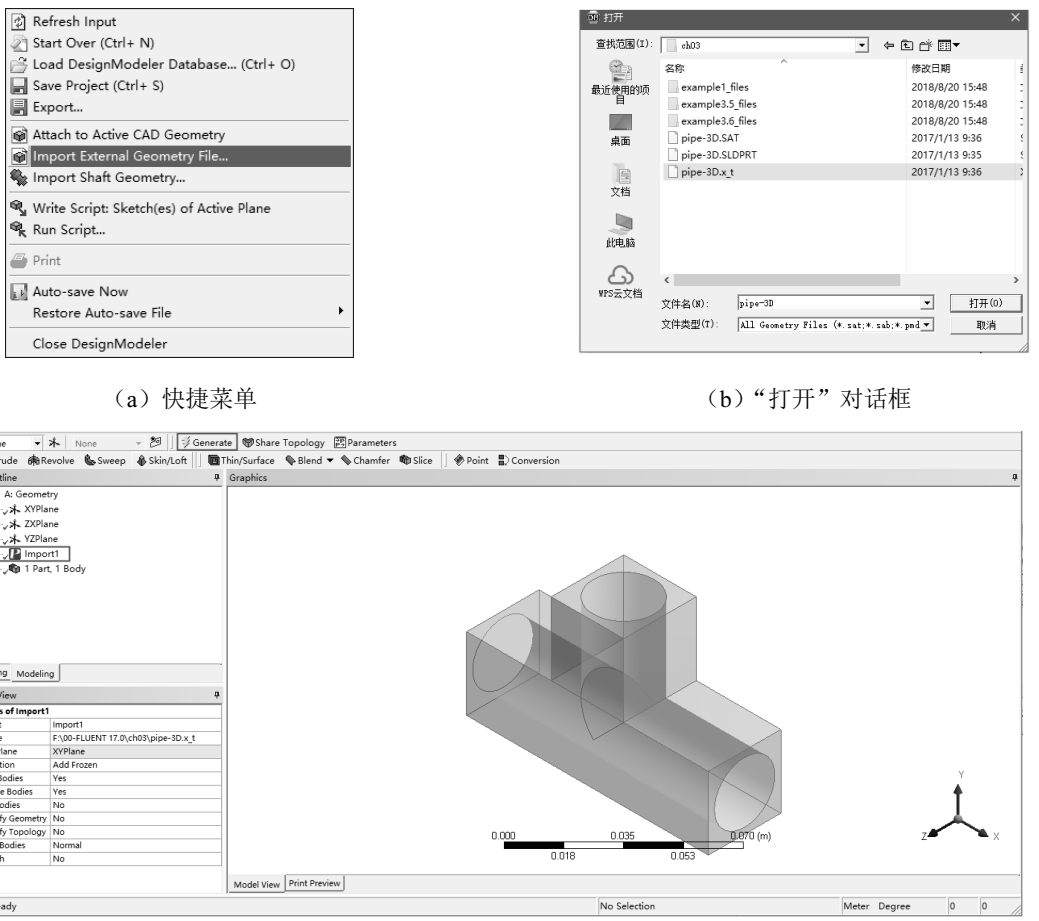
3.5 导入外部CAD文件

许多人对 DesignModeler 建模的命令都不熟悉，但大多数人都熟悉三维 CAD 软件，用户可以在自

已熟悉的 CAD 系统中先建好模型，再将模型导入 DesignModeler 中。DesignModeler 的优点之一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 能读入的外部模型格式有 ACIS、AutoCAD、Catia V4、Catia V5、Creo Elements/Direct Modeling、Creo Parametric、GAMBIT、IGES、Inventor、JTOpen、Monte Carlo N-Particle、Parasolid、SolidWorks、STEP、Unigraphics NX。

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



（a）快捷菜单　　（b）“打开”对话框

（c）几何模型显示

图 3-23　导入第三方格式文件操作过程

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（二者能相互刷新、协同建模），则需要将 DesignModeler 嵌入主流 CAD 系统中。

目前，DesignModeler 能嵌入的主流 CAD 系统有 AutoCAD、BladeGen、CATIA、Creo Modeling、Pro/ENGINEER、Inventor、UG NX、SolidWorks。

若想将 DesignModeler 嵌入 CAD 系统中，首先要安装相应的 CAD 系统，然后在 ANSYS 安装时进行相应设置。如果安装时没有设置，那么可以安装后在 ANSYS 的 CAD Configuration Manager 19.0 中设置，

如图 3-24 所示。在 Windows 中可以通过“开始”菜单→“所有程序”→ANASYS 19.0→Utilities 找到 CAD Configuration Manager 19.0 项，然后完成相关操作。

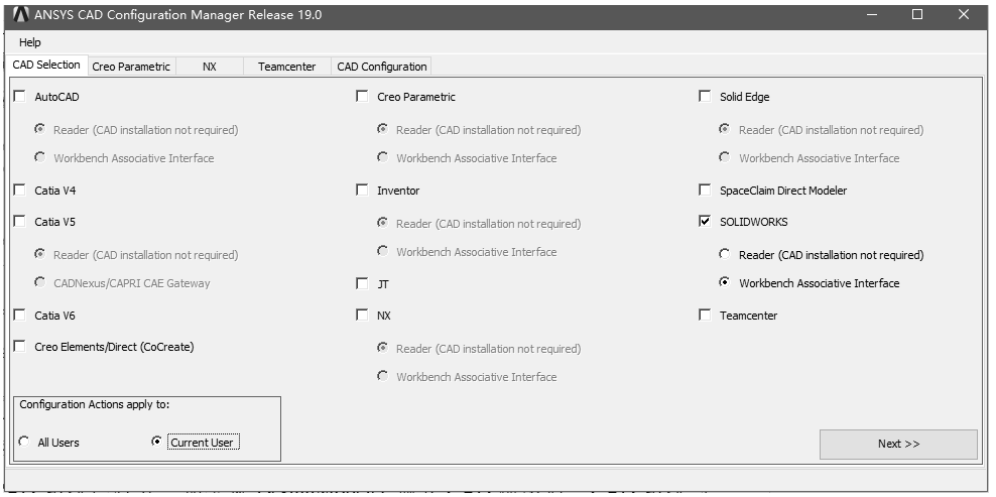


图 3-24　ANSYS 的 CAD 接口管理器（CAD Configuration Manager 19.0）

如果当前 CAD 系统已打开，那么从 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。这样两者之间就能通过改变参数值相互刷新几何体了。

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

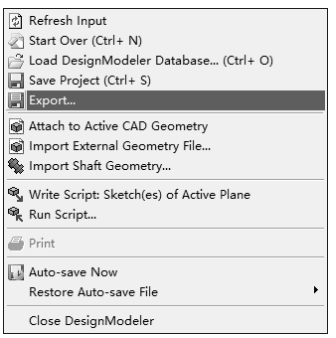


图 3-25　DesignModeler 几何模型输出

3.6　创建几何体的实例操作

在了解 DesignModeler 的基本功能后，先通过一个实例巩固一下这些基本知识。下面的实例过程首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，进入 Workbench 19.0 界面。

步骤 02　进入 Workbench 19.0 后，在任务栏单击（保存）按钮，进入 Save Case（保存项目）对话框，在 File Name（文件名）中输入“example3.6.wbpj”（按照实例文件出现的章节命名），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。

步骤 04 双击项目 A 中的 A2 栏 Geometry，此时会进入 DesignModeler 界面，在弹出的“长度单位选择”对话框中选择 mm，单击 OK 按钮确认。

步骤 05 在 Geometry 树中单击 ZXPlane，选择 ZX 平面为草图放置平面，然后单击草图按钮新建草图 Sketch1，如图 3-26 所示。为了便于操作，可单击按钮，选择视图正视自己的视角。

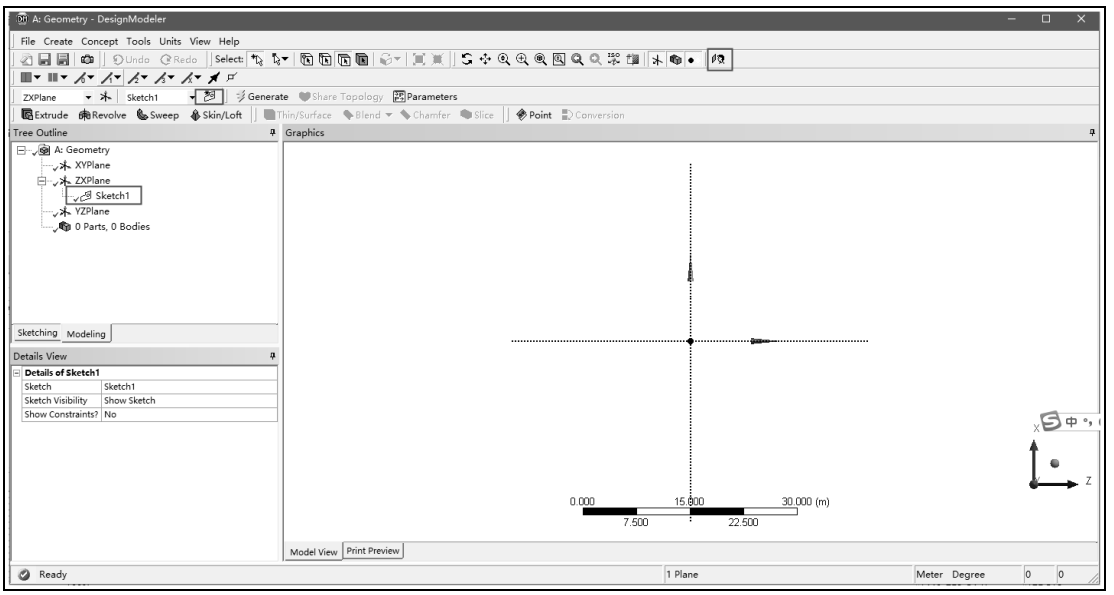


图 3-26 进入草图

步骤 06 在树形窗内选择 Sketching 选项卡，进入 Sketching Toolboxes 窗口，单击 Draw（画图）中的 Rectangle（矩形）选项，在图形工作区两处不同的地方分别单击，生成一个矩形，然后单击 Draw（画图）中的 Circle（圆形）选项，在图形工作区单击并拖动鼠标，生成一个圆形，如图 3-27 所示。

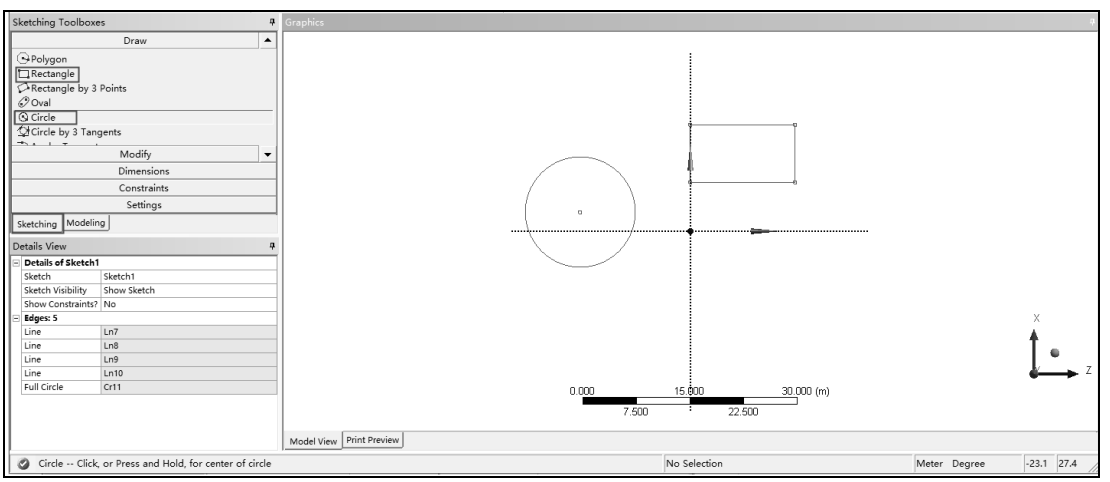


图 3-27 绘制圆形与矩形

步骤 07 单击 Dimensions（尺寸）中的 Diameter（直径）选项，将圆形的直径设置为 15mm；再单击 Dimensions（尺寸）中的 Horizontal（水平）选项，将圆形右端点到 x 轴的距离设置为 5mm，

将矩形的长边长度设置为 25mm，将矩形左边到 x 轴的距离设置为 10mm；单击 Dimensions（尺寸）中的 Vertical（竖直）选项，将圆形下端点到 z 轴的距离设置为 15mm，将矩形的短边长度设置为 15mm，将矩形下边到 z 轴的距离设置为 15mm，如图 3-28 所示。

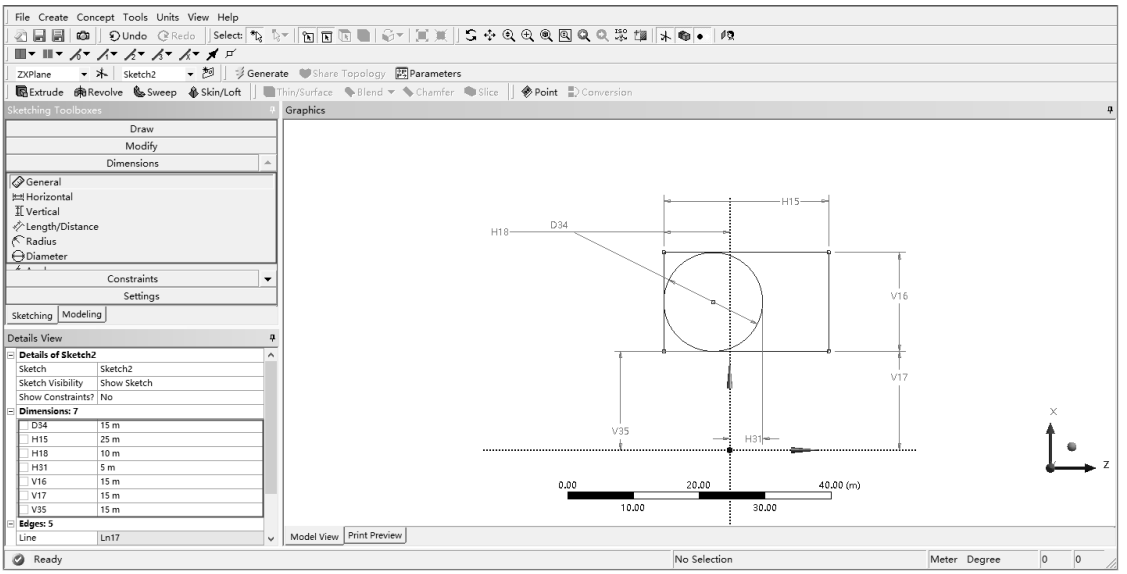


图 3-28　尺寸设置

步骤 08　单击 Modify（修改）中的 Fillet（倒角）选项，设置倒角半径为 2.5mm；再单击 Trim（修剪）选项，将圆形与矩形重叠区域的线段剪除，如图 3-29 所示。

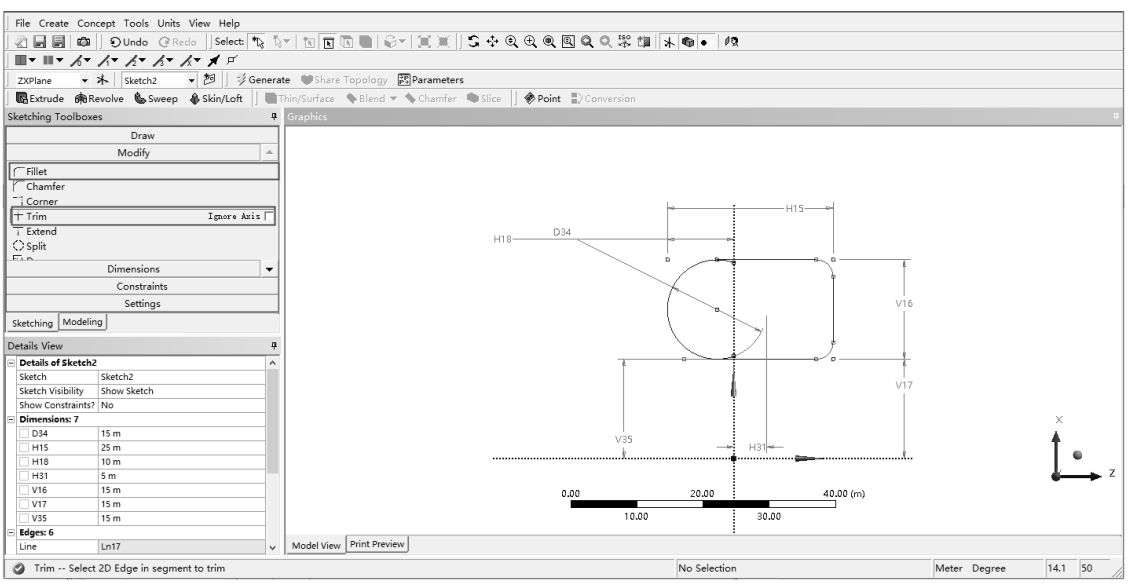


图 3-29　草图修改

步骤 09　单击工具栏中的 Extrude（拉伸）按钮，单击选中上述创建的草图，并在 Details View 工具栏中设定 Depth（高度）为 20mm，单击工具栏中的 Generate（生成）按钮生成三维几何体，如图 3-30 所示。

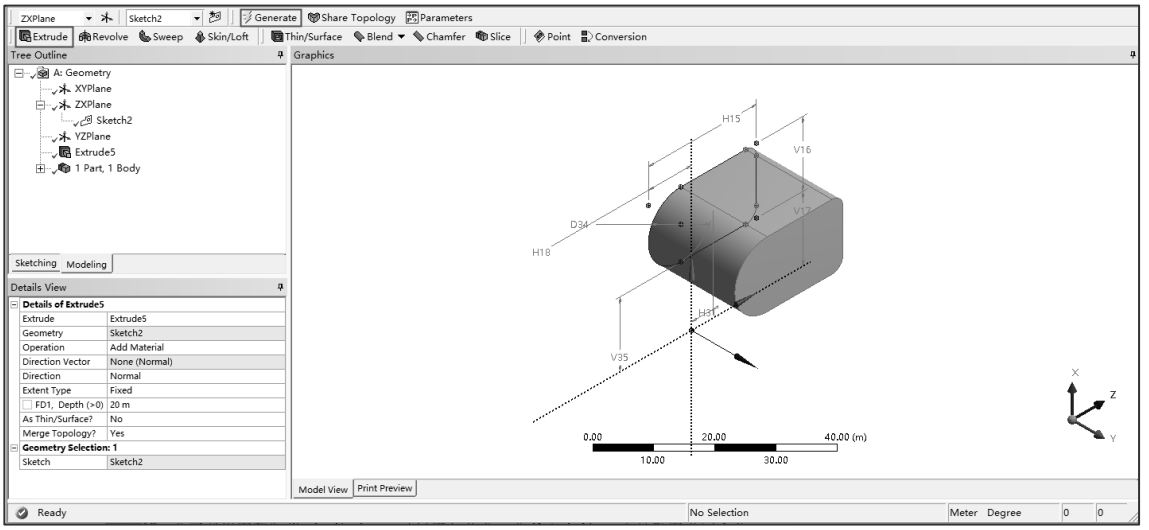


图 3-30　生成三维模型

步骤 10　在主菜单中执行 Tool→Enclosure（包围）命令，在 Details View 工具栏中设定 6 个面的 Cushion（间离）为 100mm，单击工具栏 Generate（生成）按钮生成三维几何体外流场计算区域，如图 3-31 所示。

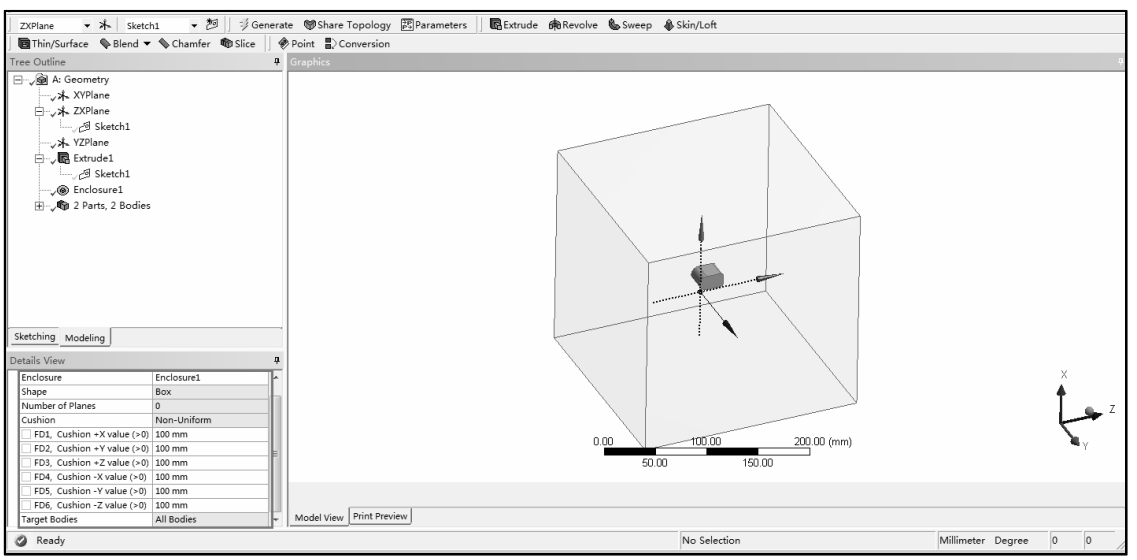


图 3-31　外流场计算区域

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。通过本章的学习，读者可以掌握 DesignModeler 的使用方法。