

## 第 5 章 FLUENT 在流体机械领域的应用

### 知识要点

- MRF 模型简介及其应用
- 离心泵的流体动力学分析
- 风机的流体动力学分析

### 5.1 概述

流体机械广泛应用于水利、发电、石油、化工、冶金、矿山、钢铁、军工等重要行业中，在创造巨大经济效益的同时，也是主要的耗能设备，约占全国总耗能的 23%。提高单机的设计与系统效率，任务十分艰巨，由于机组经常处于长年运行的变工况状态。因此如压缩机的喘振与防喘振策略，泵与水轮机的空化、泥沙气蚀联合磨损机理与防护、定常激振等一直是该领域中保证机组安全、可靠运行的重要研究课题。

流体机械上要分透平式与容积式两大类，工作原理、设计理论与方法、制造技术等的基础理论为叶轮机械气体动力学、流体力学、计算流体力学、微器件内部流体动力学、生物流体力学、化工工质物性、优化设计理论、强度与转子动力学、轴承理论、检测与控制理论、密封技术、固液两相流及固/液/气多相流动理论、湍流理论、流体系统的动力学理论等多个学科的交叉。当前的发展趋向：在能量转换强度上，向高速、高效、高压力方向发展；在机组规模上，向超大型、超小型的两极方向发展；在设计理念上，从单工况、定常流设计向“三多二非”（多设计工况、多目标函数、多约束条件下的优化设计方法、非定常流动与非稳定流动设计）方向发展；在学科交叉发展上，与生物流体力学、MEMS、高精测量技术、材料等学科交叉方面结合发展；在实验技术上，从外特性实验走向内部非定常流动的无干扰测量技术发展。

### 5.2 泵分析实例

离心泵是一种应用范围十分广泛的通用水力机械，广泛地应用于给水排水及农业工程、工业工程、航空航天和航海工程、能源工程、车辆工程等，而且随着现代科学技术的飞速发展其应用范围正在迅速地扩大。随着应用范围的扩大，工作环境也越来越复杂，现代工程技术对泵的性能要求越来越高，传统的基于经验和模型试验相结合的设计方法很难达到这样的设计要求。传统设计方法的一般过程为：设计→样机性能试验检测→制造，这样样品试制和性能检测要经过多次，整个设计也要经过多次重复，显然，传统设计方法的缺点是设计周期长、设计成本高。产品的开发周期长和设计成本高成为离心泵新品开发难以逾越的瓶颈。因此，需要探索新的离心泵设计方法。

在传统的泵的研制过程中，一个成功的水力设计模型往往要经过多次反复的性能试验模型修改才能完成，随着计算流体力学在其他行业的成功运用，现在完全有可能采用计算流体力学（CFD）仿真分析方法来代替性能试验，在计算机上完成初步造型设计之后，即可进行

流场的校核并预测泵性能，从而缩短产品开发周期和降低成本。

### 5.2.1 概述

#### 1. 泵的基本性能参数

- 流量：单位时间内通过泵出口输出的流体量，一般采用体积流量，用  $Q$  表示。单位是  $\text{m}^3/\text{h}$ 。
- 扬程：单位体积流体从泵进口截面经叶轮到泵出口截面所获得的机械能，用  $H$  表示，单位为米（m）。
- 功率和效率：泵的效率指泵的有效功率和轴功率之比： $\eta = P_e / P$ 。泵的功率通常指输入功率，即原动机传到泵轴上的功率，故又称轴功率，用  $P$  表示。有效功率，即泵的扬程和质量流量及重力加速度的乘积或通过泵的液体在单位时间内从泵中获得的能量，用  $P_e$  表示，单位为 kW。
- 转速：泵的转速是指泵轴每分钟的转数，用  $n$  表示，单位为  $\text{r/min}$ 。它是影响泵性能的一个重要因素，当转速变化时，泵的流量、扬程、功率等都将发生变化。
- 比转速：比转速是离心泵相似原理中一个很重要的概念，是泵的几何相似的判别数，用  $ns$  表示。
- 汽蚀余量：泵进口处单位水量所具有的总水头与相应的汽化压力水头之差，用  $NPSH$  表示。其大小用换算到水泵基准面的水柱高度表示，单位为米（m）。

#### 2. 离心泵的叶轮理论

为讨论叶轮与流体相互作用的能量转换关系，首先要了解流体在叶轮内的运动，由于流体在叶轮内的运动比较复杂，为此作如下假设：①叶轮中叶片数为无限多且无限薄，即流体质点严格地沿叶片型线流动，也就是流体质点的运动轨迹与叶片的外形曲线相重合；②为理想流体，即无粘性的流体，暂不考虑由粘性产生的能量损失；③流体作定常流动。

流体在叶轮中除作旋转运动外，同时还从叶轮进口向出口流动，因此流体在叶轮中的运动是一种复合运动。

当叶轮带动流体作旋转运动时，流体具有圆周运动（牵连运动）。其运动速度称为圆周速度，用符号  $u$  表示，其方向与圆周切线方向一致，大小与所在半径  $r$  及转速  $n$  有关。流体沿叶轮流道的运动称为相对运动，其运动速度称为相对速度，用符号  $w$  表示，其方向为叶片的切线方向，大小与流道及流道形状相关。流体相对静止机壳的运动称为绝对运动，其运动速度称绝对速度，用符号  $v$  表示，它是以上两个速度的向量和，即：

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w} \quad (5-2-1)$$

由这三个速度向量组成的向量图称为速度三角形，如图 5-1 所示。速度三角形是研究流体在叶轮中运动的重要工具。

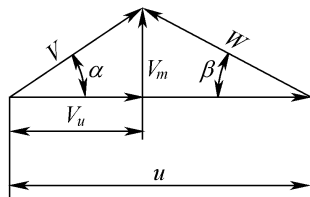


图 5-1 速度三角形

绝对速度  $v$  可以分解为两个相互垂直的分量：对速度圆周方向的分量和绝对速度在轴面（通过泵与风机轴心线所作的平面）上的分量。绝对速度  $v$  与圆周速度  $v_u$  之间的夹角用  $\alpha$  表示，称绝对速度角；相对速度  $w$  与圆周速度反方向的夹角用  $\beta$  表示，称为流动角。

前面分析了流体沿无限多叶片叶轮的流动，这时流道内的流体是按叶片的型线运动的，因而流道任意半径处的相对速度分布是均匀的，而实际叶轮中的叶片不可能无限多，而是有限的，流体是在具有一定宽度的流道内流动。因此，除紧靠叶片的流体沿叶片型线运动外，其他都与叶片的型线有不同程度的差别，从而使流场发生变化。这种变化是由轴向旋涡运动引起的。由轴向涡旋引起速度偏移，使实际的片安装角较小，导致有效出口速度降低，使有限叶片叶轮的理论能头下降。一般用滑移系数  $K$  来修正无限多叶片叶轮的理论能头，即：

$$H_T = KH_{T\infty}$$

(5-2-2)

式中的  $K$  即为滑移系数，其值恒小于 1，此值不是效率，只说明在有限叶片叶轮下，由于轴向涡旋的存在对理论能头产生的影响。对滑移系数现在还没有精确的理论计算公式，一般采用经验公式计算。

5.2.2 数学物理建模

1. 问题描述

研究如图 5-2 所示的二维离心泵的流动情况，该泵由旋转的叶轮和静止的蜗壳两部分组成。流体从叶轮中央的圆形进口沿径向均匀进入叶轮，经过旋转的叶片作用后得到能量，从蜗壳出口排出，已知叶片数为 6，离心泵的几何结构参数如表 5-1 所示。

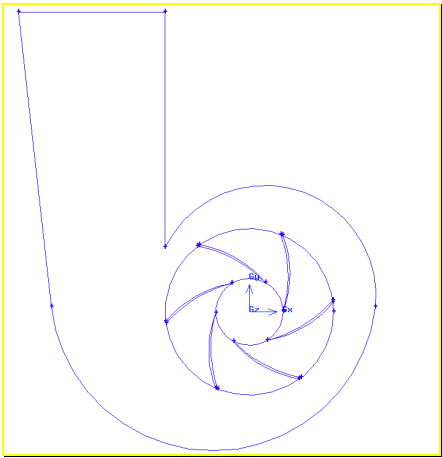


图 5-2 二维离心泵示意图

表 5-1 离心泵结构参数

名称	数值
叶轮进口直径	69mm
叶轮出口直径	69mm
叶片进口安放角	20°
叶片出口安放角	25°
叶片厚度	3mm
出口段扩散角	8°

## 2. 控制方程

二维可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程和双方程湍流模型无量纲化后在笛卡尔坐标系中可以写成如下守恒形式:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} D + S = 0 \quad (5-2-3)$$

式中,  $Q = [q_1, q_2, \dots, q_6]^T$ ,  $F_i$  为对流通矢量,  $D$  为粘性矢量,  $S$  为源项, 具体为:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho E \\ \rho v_1 \\ \rho v_2 \end{bmatrix}, \quad F_i = \begin{bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_1 u_i + \delta_{i1} p \\ \rho u_2 u_i + \delta_{i2} p \\ \rho H u_i \\ \rho v_1 u_i \\ \rho v_2 u_i \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{i1} \\ \tau_{i2} \\ \beta_i \\ \varpi(v_1) \\ \varpi(v_2) \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ S(v_1) \\ S(v_2) \end{bmatrix} \quad (5-2-4)$$

其中:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_1) \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k Re \right] \quad (5-2-5)$$

$$\beta_i = u_1 \tau_{1i} + u_2 \tau_{2i} - q_i \quad (5-2-6)$$

$$\varpi(v_{1i}) = \left[ \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{v_m}} \right] \frac{\partial v_m}{\partial x_i} \quad (5-2-7)$$

$$q_i = - \left[ \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_i}{Pr_i} \right] \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (5-2-8)$$

其中  $E = e + u_1 u_2 / 2 + k$  和  $H = h + u_1 u_2 / 2 + k$  分别是滞止内能和滞止焓,  $k$  是湍动能。

不失一般性, 湍流流动控制方程在任意曲线坐标系中可写成无量纲矢量形式:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} D + S = 0 \quad (5-2-9)$$

其中  $Q = J[q_1 q_2 \dots q_6]^T$ , 对应于连续方程、二维动量方程、能量方程、低雷诺数双方程湍流模型 6 个方程,  $J$  为坐标变换 Jacobian 行列式。  $F_i$  为对流通量矢量,  $D$  为粘性项,  $S$  为源项,  $Re$  是雷诺数。湍流模型采用  $k-\varepsilon$  低雷诺数双方程湍流模型。

## 3. 在 Gambit 中建立模型并划分网格

**Step 1** 在 AutoCAD 中建立离心泵模型。

在 AutoCAD 环境中, 可以按照下列过程生成如图 5-2 所示的二维离心泵模型:

**S1** 以(0,0)为圆心, 绘制表示叶轮进口的圆和表示叶轮出口的圆, 绘制一个叶片的型线。

**S2** 绘制蜗壳。蜗壳弯曲段由圆弧光滑连接而成, 出口段为两条直线。

**S3** 调用 PEDIT 命令, 分别将构成叶片的各线段编辑成封闭的多线段。多蜗壳也做同样处理。

**S4** 调用 REGION 命令, 根据构成叶片的封闭多线段生成区域。

**S5** 重复调用 REGION 命令, 分别针对叶轮进口圆、出口圆和蜗壳生成区域。

**S6** 调用 ARRAY 命令, 圆周阵列生成 6 个叶片。

**S7** 调用 EXPORT 命令, 将绘图结构导出为 ASCII 格式文件(扩展名为 .sat), 以便在 Gambit 中进行后续处理。

**Step 2** 将 AutoCAD 中生成的文件导入到 Gambit 中。

**S1** 启动 Gambit, 并选择求解器为 FLUENT5/6。

**S2** 打开 Main Menu→File→Input→ACIS, 单击 Browse 按钮浏览到 sat 文件, 单击 Accept 按钮。

**Step 3** 剪切面。

操作:

**S1** 打开对话框如图 5-3 (a) 所示。在 Face 中选择 face.9 (蜗壳区域), 在 Subtract Face 中选择 face.5 (叶轮出口圆形区域)。

注意: 请选中 face.5 下面的复选框, 表示要保留叶轮出口圆形区域, 因为下面还要用到这个区域来生成叶轮内转动流体区域。关闭对话框, 便生成了蜗壳内流体区域。

**S2** 重新调用该命令, 在 Face 中选择 face.5 (叶轮出口圆形区域), 在 Subtract Face 中选择叶片所在的 6 个面。

注意: 不要选中对话框中任何一个 Retain 复选框, 如图 5-3 (b) 所示。

**S3** 再次调用该命令, 在 Face 中选择 face.5 (叶轮出口圆形区域), 在 Subtract Face 中选择 face.4 (叶轮进口圆形区域), 如图 5-3 (c) 所示。

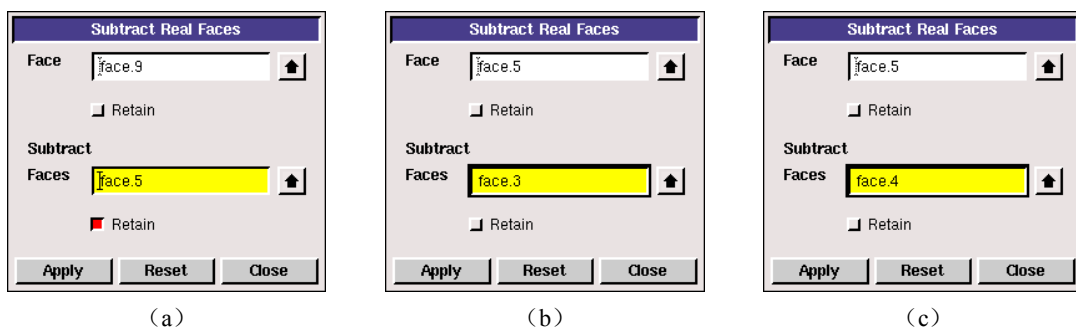


图 5-3 剪切面对话框

**Step 4** 划分面网格。

操作:

**S1** 打开划分面网格对话框, 如图 5-4 (a) 所示。在 Face 中选择 face.9 (蜗壳区域), 在 Elements 列表中选择 Tri (三角形单元), 在 Type 列表中选择 Pave (非结构网格), 选中 Scheme 命令组中的 Apply 复选框, Internal Size=5。单击 Apply 按钮, 则生成蜗壳内流体区域的网格。

**S2** 重复调用该命令, 在 Face 中选择叶轮所在的区域, Internal Size=5, 在 Elements 列表中选择 Tri (三角形单元), 在 Type 列表中选择 Pave (非结构网格), 如图 5-4 (b) 所示。

**Step 5** 设置边界类型和区域类型。

**S1** 操作:

(a) 在 Name 文本框中输入边界名称 inlet, 将 Type 栏选为 Velocity-inlet, 在 Entity 栏选取 Edges, 并选中叶轮进口圆作为进口边界。

(b) 在 Name 文本框中输入边界名称 outlet, 将 Type 栏选为 Outflow, 在 Entity 栏选取 Edges, 并选中蜗壳出口边作为出口边界。

(c) 在 Name 文本框中输入边界名称 wall-1, 将 Type 栏选为 Wall, 在 Entity 栏选取 Edges, 并选中组成 6 个叶片的所有边作为壁面边界 1。

(d) 蜗壳除出口壁面的所有边作为壁面边界 2。

(e) 将蜗壳和叶轮交界处重复的边线分别定义为 fluid-inner 和 fluid-outer, Type 栏选为 Wall。

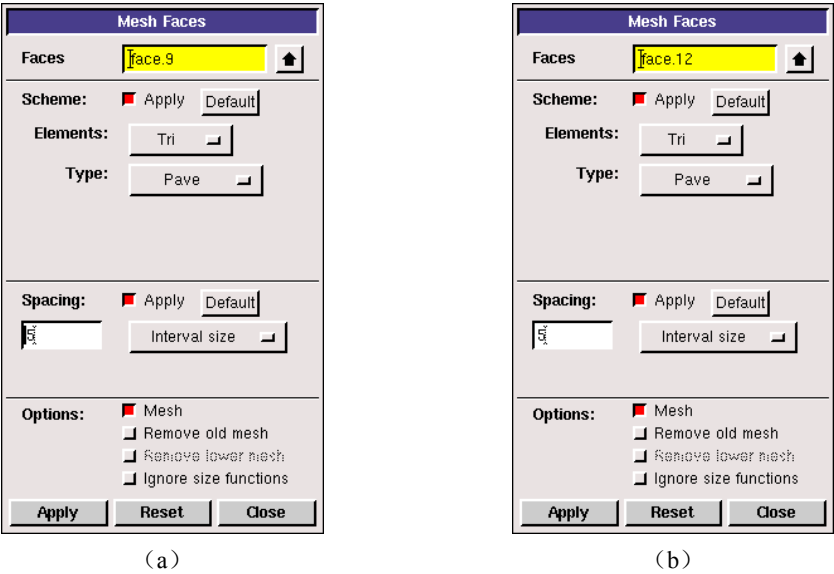



图 5-4 面网格划分设置对话框

结果如图 5-5 (a) 所示。

**S2** 操作：

(a) 在 Name 文本框中输入区域名称 fluid-1，将 Type 栏选为 FLUID，在 Entity 栏选取 Face，并选中叶轮所在的区域。

(b) 在 Name 文本框中输入区域名称 fluid-2，将 Type 栏选为 FLUID，在 Entity 栏选取 Face，并选中蜗壳区域。

结果如图 5-5 (b) 所示。

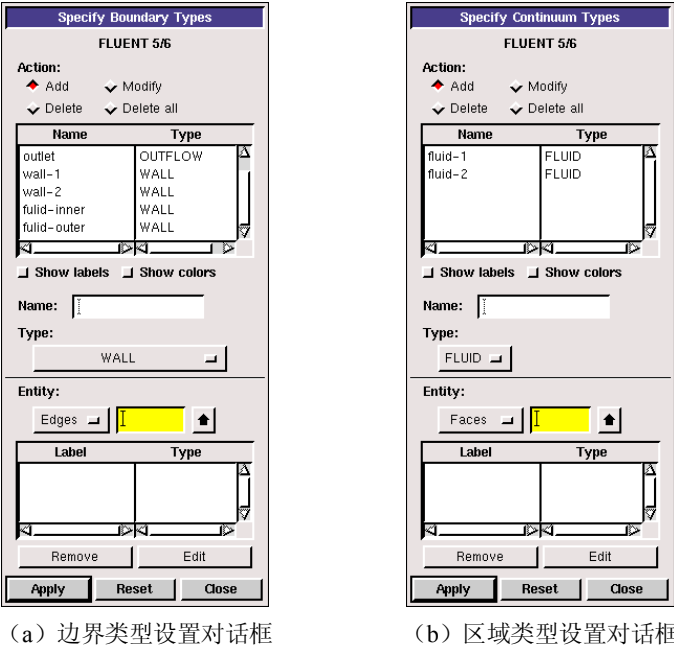


图 5-5 边界类型和区域类型设置对话框

**Step 6** 输出网格文件。

### 5.2.3 边界条件

二维离心泵的边界条件如表 5-2 所示。

表 5-2 边界条件

名称	边界类型	速度
Inlet	Velocity-inlet	2m/s
Outlet	Outflow	
wall-1	Wall	1280rpm
wall-2	Wall	
fluid-inner	Interface	
fluid-outer	Interface	

### 5.2.4 求解计算

求解计算的操作步骤如下：

**Step 1** 导入并检查网格。

**S1** 读入网格文件。

操作：File→Read→Case...

找到 beng.msh 文件后，单击 OK 按钮确认。

**S2** 检查网格。

操作：Grid→Check

网格读入后，一定要进行网格检查，注意最小体积不能为负值。

**S3** 改变长度的单位。

操作：Grid→Scale...

在 Gambit 中，生成网格使用的单位是 mm，在 Grid Was Created In 下拉列表中选择 mm，然后单击 Scale 按钮，关闭对话框。

**S4** 光滑网格与交换单元面。

操作：Grid→Smooth/Swap...

该操作主要是为了改善网格质量，FLUENT 要求对三角形和四面体网格进行此操作。打开 Smooth/Swap Grid 对话框，如图 5-6 所示。单击 Smooth 按钮，再单击 Swap 按钮，重复上述操作，直到报告没有需要交换的面为止。

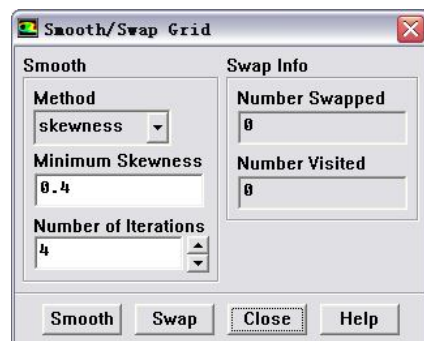


图 5-6 平滑与交换网格对话框

**S6** 选择角速度单位。

操作：Define→Units...

这主要是为了后续定义转动参考系做准备。在打开的 Set Units 对话框的 Quantities 下拉列表中选择 angular-velocity，在 Units 中选择 rpm，如图 5-7 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

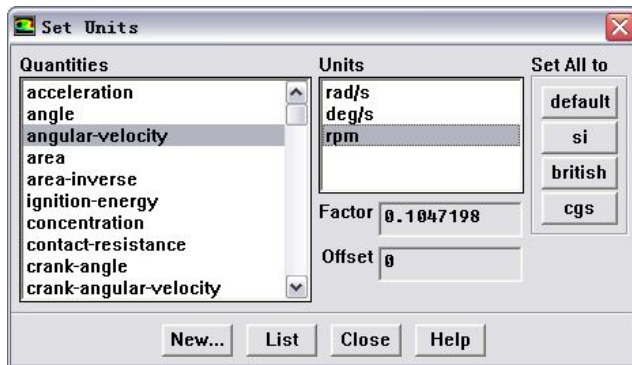


图 5-7 单位设置对话框

**S5** 显示网格。

操作：Display→Grid...

**Step 2** 选择计算模型。

**S1** 设置求解器。

操作：Define→Models→solve...

打开 Solver 设置对话框如图 5-8 所示，保持默认设置即能满足要求。

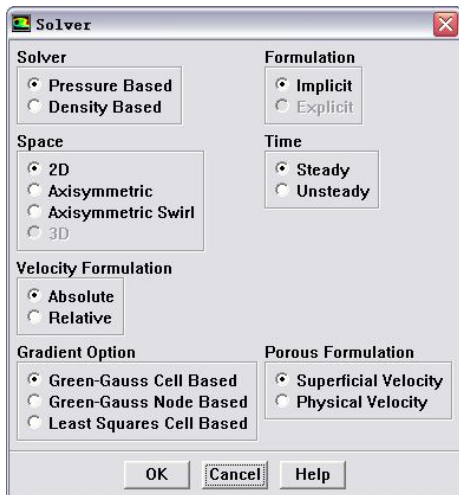


图 5-8 求解器设置对话框

**S2** 设置标准  $k-\varepsilon$  湍流模型。

操作：Define→Models→Viscous...

打开 Viscous Model 对话框，如图 5-9 所示。

(a) 选择 k-epsilon，则打开 Viscous Model 设置对话框，如图 5-10 所示。

(b) 保留默认的值。

(c) 单击 OK 按钮。



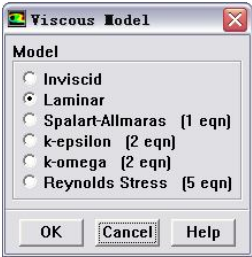


图 5-9 湍流模型选择对话框

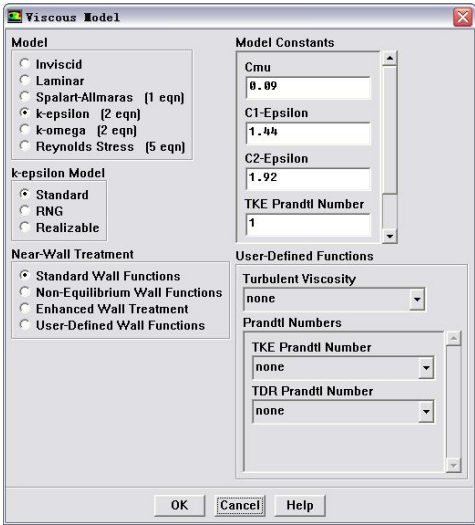


图 5-10 湍流模型设置对话框

**S3** 操作环境的设置。

操作：Define→Operating Conditions...

打开对话框如图 5-11 所示，保持 FLUENT 默认的参考压力值（一个标准大气压）和零参考压力的位置(0,0)，选中 Gravity 复选框，表示计及重力，并在 Y 栏中输入-9.81。

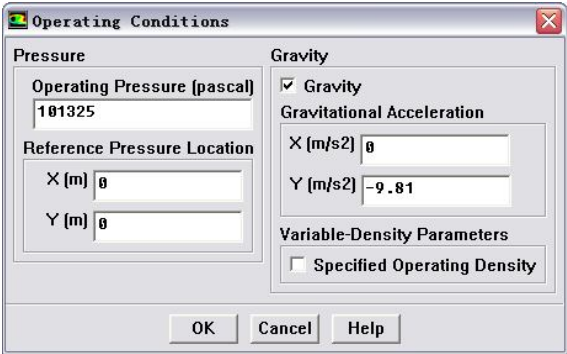


图 5-11 操作环境设置对话框

**Step 3** 定义流体材料。

操作：Define→Materials...

打开对话框如图 5-12 所示，本例中流动介质为水，FLUENT 材料数据库中已经包含这一物质，因此，直接复制即可。

(a) 单击 Fluent Database，打开 FLUENT 自带的材料数据库，如图 5-13 所示。

(b) 在其中的 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<l>]，单击 Copy 按钮。

(c) 单击 Close 按钮关闭对话框。

**Step 4** 设置边界条件。

操作：Define→Boundary Conditions...

打开 Boundary Conditions 设置对话框，如图 5-14 所示。

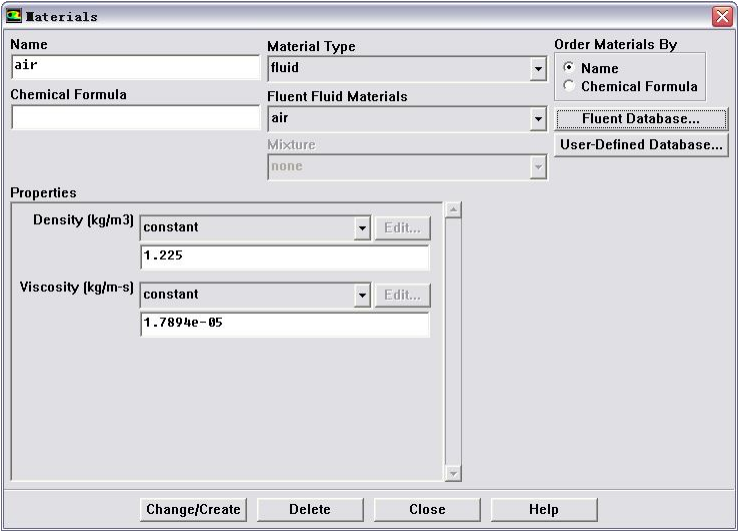


图 5-12 流体材料设置对话框

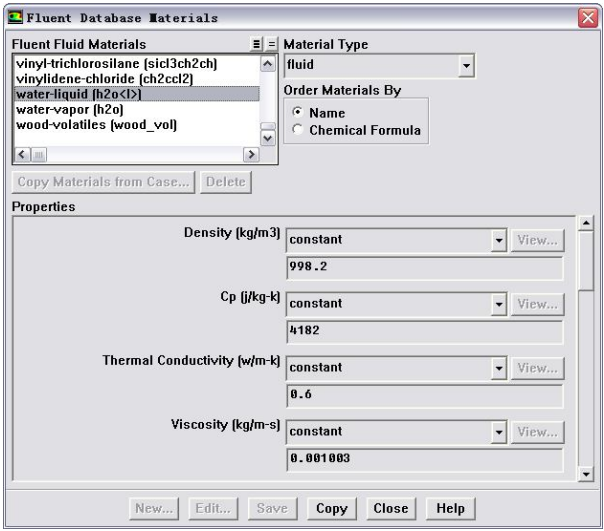


图 5-13 材料选择对话框

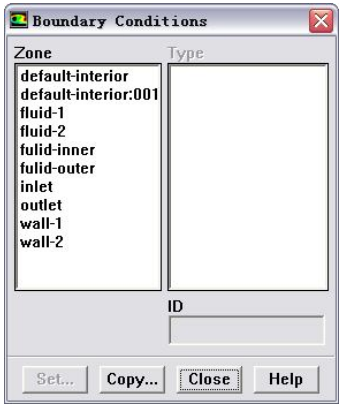


图 5-14 边界选择对话框

**S1** 设置 fluid-1 流体区域的边界条件。

在 Zone 下面选择 fluid-1，它对应的边界条件类型为 fluid，然后单击 Set 按钮，打开 fluid-1 边界条件设置对话框，如图 5-15 所示。在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid；在 Motion 对应的 Motion Type 下选择 Moving Reference Frame，利用它可以设置区域 fluid-1 是可动区域，在 Rotational Velocity 项对应的 Speed 中输入-1280。

**S2** 设置 fluid-2 流体区域的边界条件。

按类似的办法将 fluid-2 流体区域的流动介质改为 water-liquid，其他参数使用默认值，如图 5-16 所示。注意该区域不是转动参考系。

**S3** 设置入口速度边界条件。

在 Zone 栏中选择 inlet，则在右边 Type 栏内显示其类型为 Velocity-inlet，单击 Set 按钮，则打开速度边界设置对话框，如图 5-17 所示；在 Velocity Magnitude（入口速度）栏内输入 2，右侧栏内选择 constant（常值）。

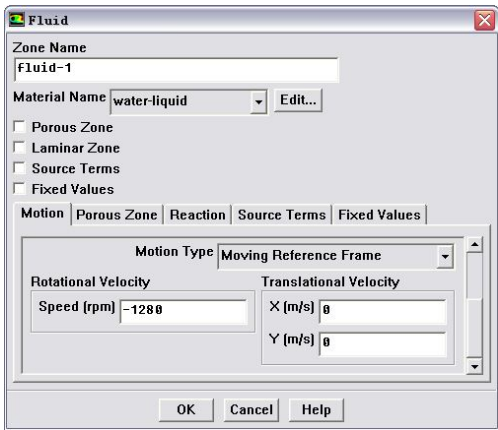


图 5-15 fluid-1 流体区域的边界条件设置

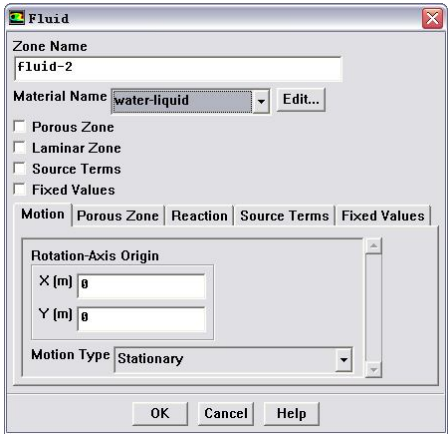


图 5-16 fluid-2 流体区域的边界条件设置

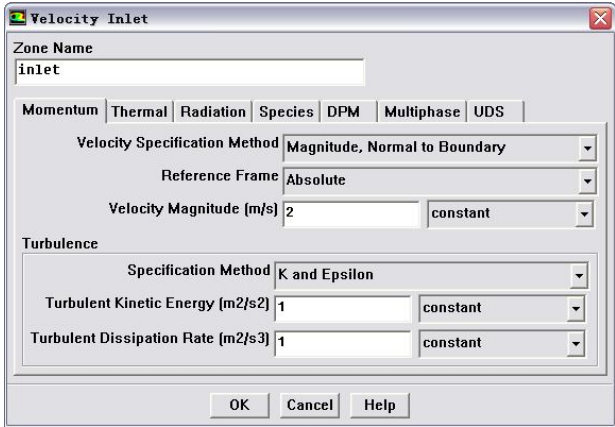


图 5-17 速度边界设置对话框

**S4** 设置出口边界条件。

在 Zone 栏内选择 outlet，再单击 Set 按钮，打开 Outflow 对话框，如图 5-18 所示，保持默认设置，单击 OK 按钮确认。



图 5-18 出口边界条件设置对话框

**S5** 设置 fluid-inner 的边界条件。

在 Zone 下面选择 fluid-inner，看到它对应的边界条件类型为 Wall，本例边界条件需要改为 interface。方法为：在边界条件类型中选中 interface，此时系统会提示是否确认改动，单击 OK 按钮确认。

**S6** 设置 fluid-outer 的边界条件。

在 Zone 下面选择 fluid-outer，同样的方法将 fluid-outer 的边界条件改为 interface。

**S7** 设置叶片的壁面边界条件。

(a) 在 Zone 下面选择 wall-1，单击 Set 按钮，打开对话框如图 5-19 所示。

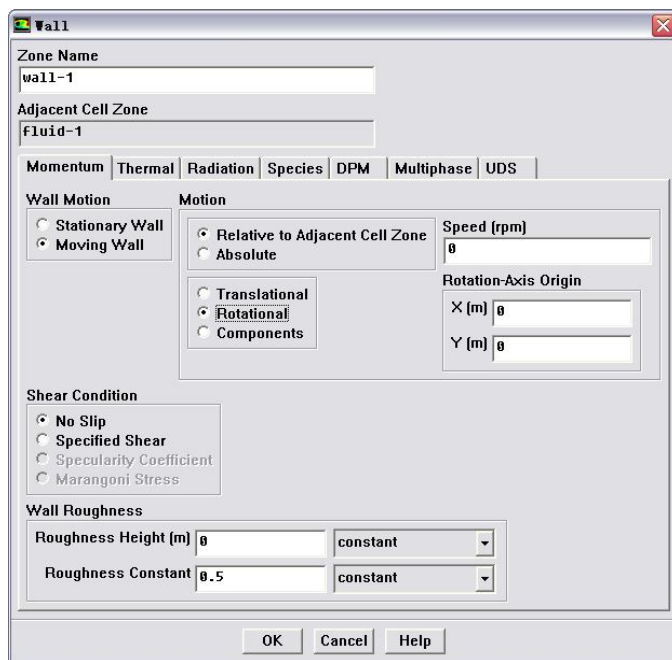


图 5-19 叶片的运动定义对话框

(b) 在 Momentum 对应的 Wall Motion 下面选中 Moving Wall，说明它是运动的。

(c) 在此时展开的 Motion 对应项选中 Rotational，表明是转动。

(d) 选择 Relative to Adjacent Cell Zone，这样叶片就随周围流体一起同速转动。

**Step 5** 定义交界面。

操作：Define→Grid Interfaces...

打开对话框如图 5-20 所示，在 Grid Interface 中输入交界面的名称 interface-zk；在 Interface Zone 1 下面选中 fluid-inner，在 Interface Zone 2 下面选中 fluid-outer。单击 Create 按钮创建交界面，通过这个交界面，fluid1 和 fluid2 中的数据就能交流。

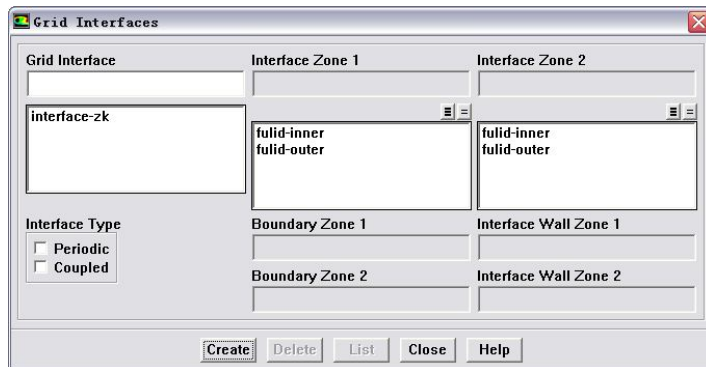


图 5-20 网格界面设置对话框

**Step 6** 求解方法的设置及其控制。

**S1** 求解参数的设置。

操作：Solve→Controls→Solution...

打开如图 5-21 所示的对话框，对速度和压力耦合方式选择 SIMPLEC，对动量、湍动能和耗散率均选择二阶迎风格式，其余用默认值。

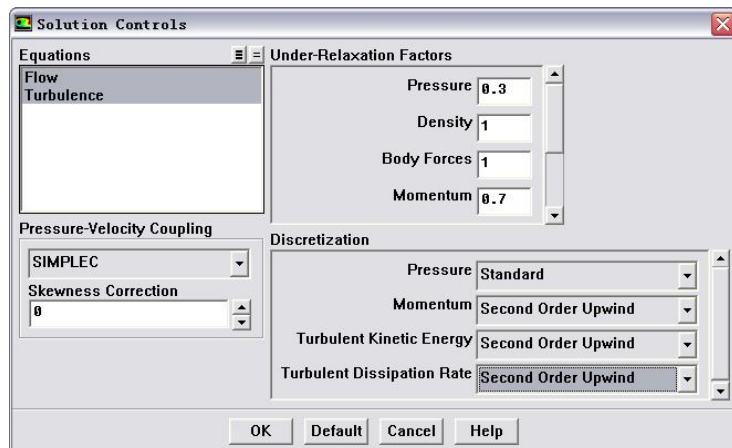


图 5-21 求解参数设置对话框

**S2** 打开残差图。

操作：Solve→Monitors→Residual...

打开残差设置对话框，选择 Option 下面的 Plot，其他保持默认设置。

**S3** 流场初始化。

操作：Solver→Initialize→Initialize...

打开初始化对话框，如图 5-22 所示，并且设置 Compute From 为 inlet，依次单击 Init、Apply 和 Close 按钮。

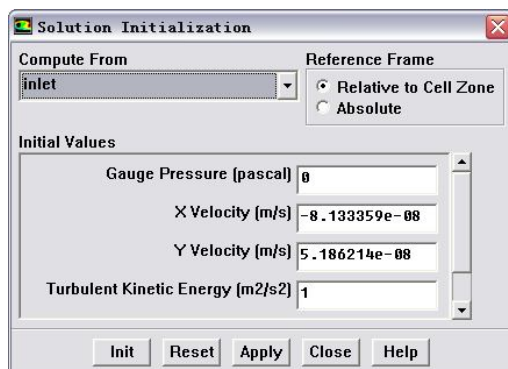


图 5-22 流场初始化对话框

**S4** 保存 case 文件。

操作：File→Write→Case...

输入文件名，并单击 OK 按钮。

**S5** 开始迭代。

操作：Solver→Iterate...

(a) 在 Number of Iteration（迭代次数）文本框内输入 600。

(b) 单击 Iterate 按钮开始计算。

迭代过程的残差如图 5-23 所示。

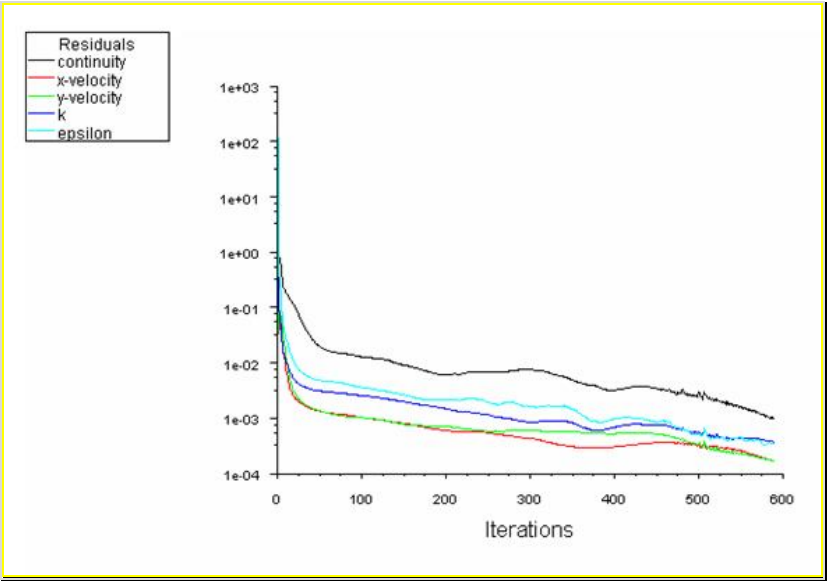


图 5-23 残差图

**S6** 保存 data 文件。  
迭代收敛后，保存 data 文件。

5.2.5 结果分析与讨论

计算收敛后对结果进行分析和讨论。

1. 显示压力分布

操作：Display→Contour...

打开 Contours 对话框如图 5-24 所示，在 Contours of 下拉列表框中选择 Pressure。

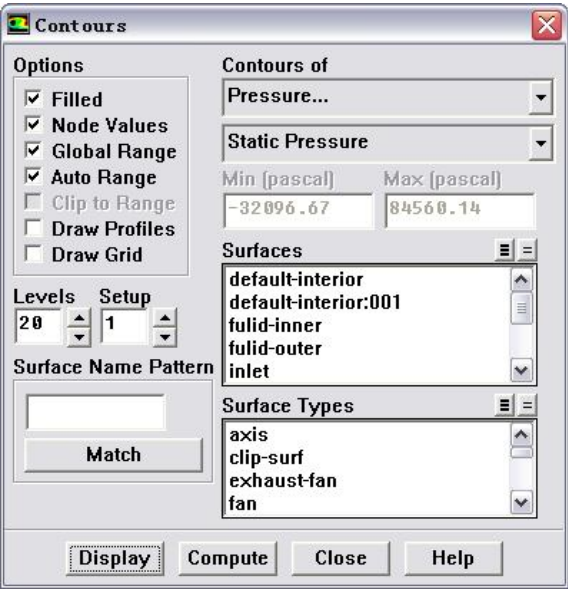
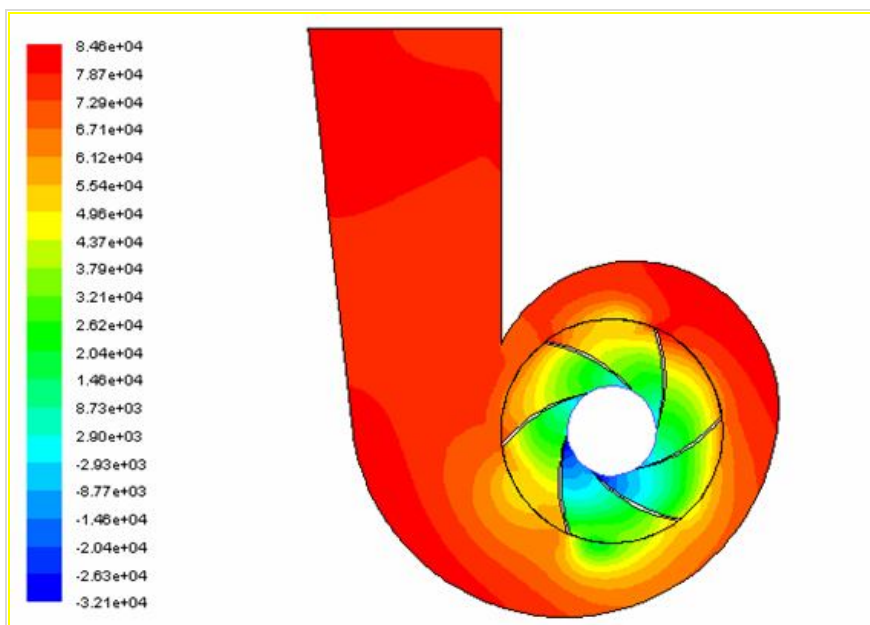
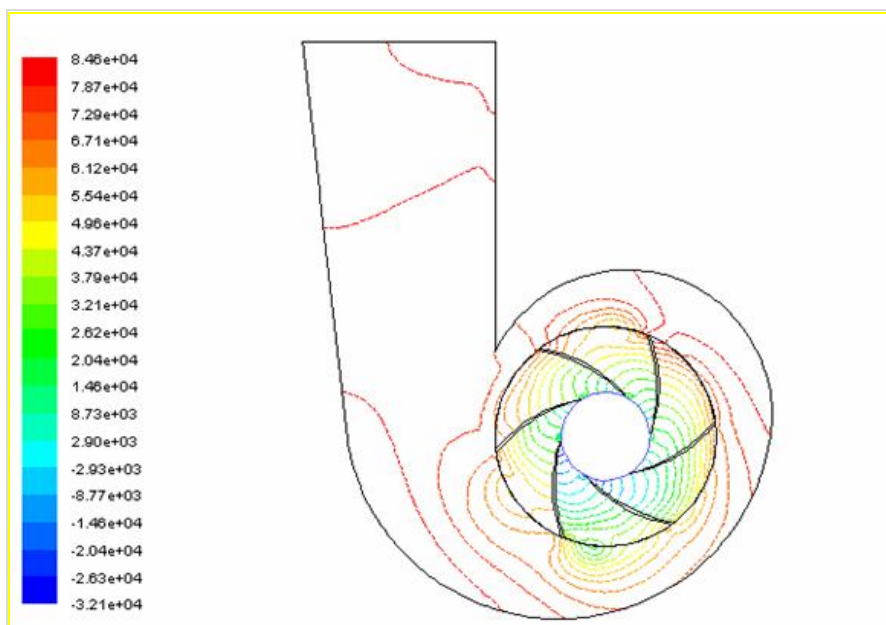


图 5-24 显示压力设置对话框

结果如图 5-25 所示。



(a) 压力分布云图



(b) 压力分布等值线图

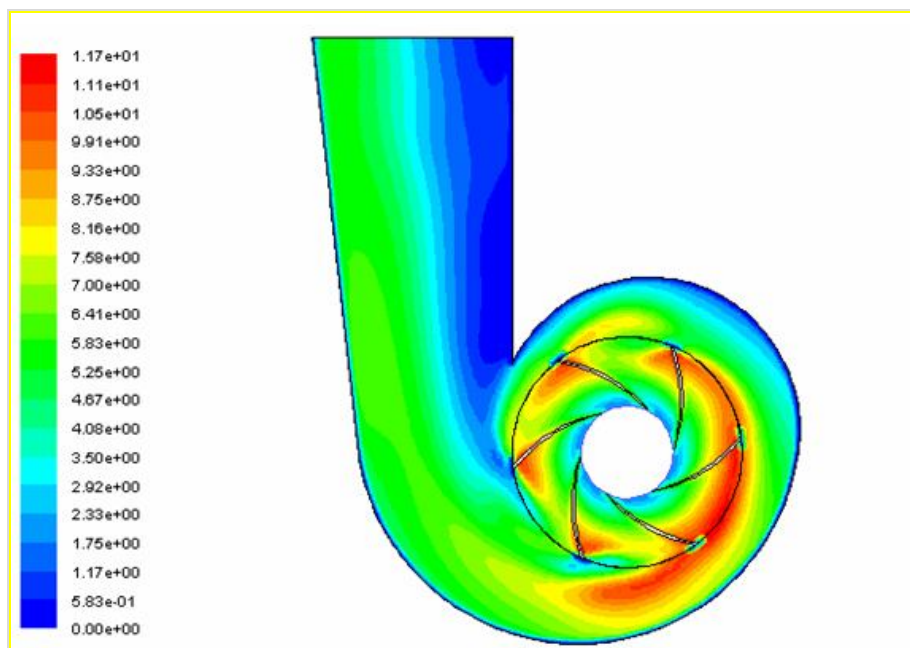
图 5-25 压力分布图

由图 5-25 可以看出，泵内的静压表现出非对称性。在叶轮入口处呈负压，有利于液体的吸入。由于叶轮旋转做功，叶轮内的静压随着流动方向逐渐增大。叶轮离泵壳较近的下区域附近压力较大，其主要原因是蜗壳与流体相接触的所有壁面均采用无滑移固壁面条件，这样流体在蜗壳壁面附近的速度极小，根据能量守恒原理，壁面附近的静压较大。

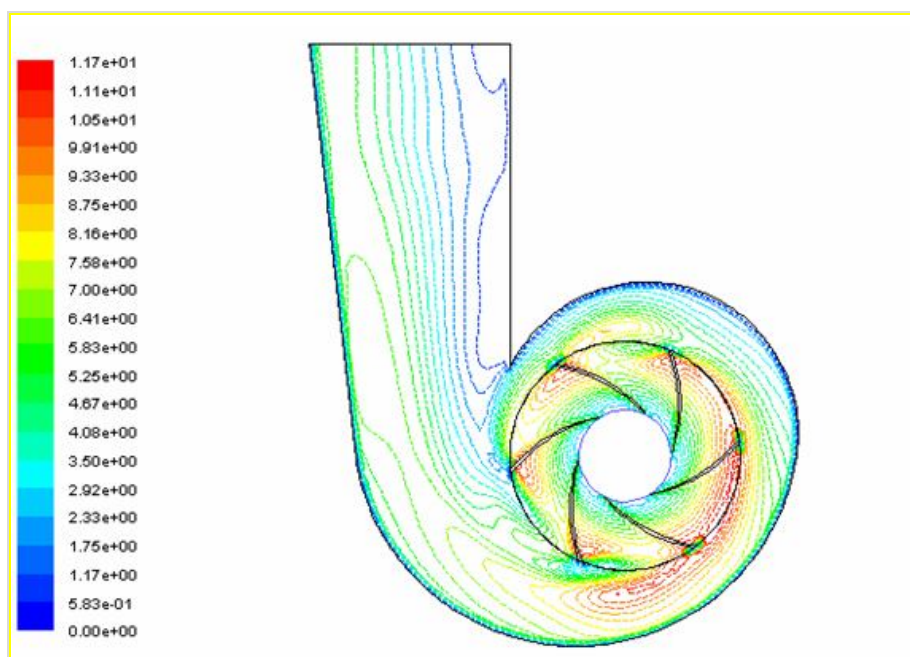
## 2. 显示速度分布

在 Contours of 下拉列表框中选择 Velocity，结果如图 5-26 所示。





(a) 速度分布云图



(b) 速度分布等值线图

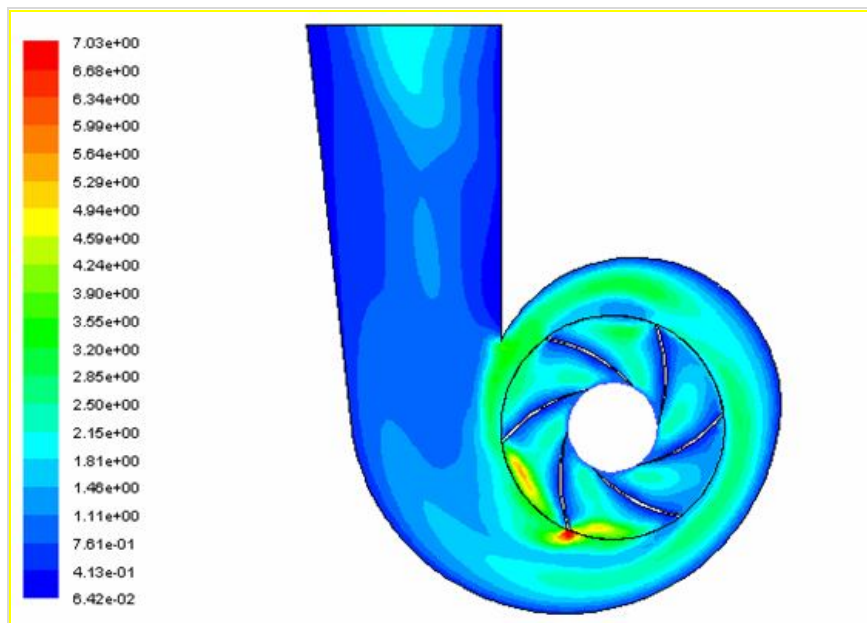
图 5-26 速度分布图

由图 5-26 可以看出, 经过叶轮做功后, 泵内流体沿叶轮半径方向逐渐增大, 在叶轮出口处, 速度有最大值。在蜗壳出口, 靠近内侧速度较低。

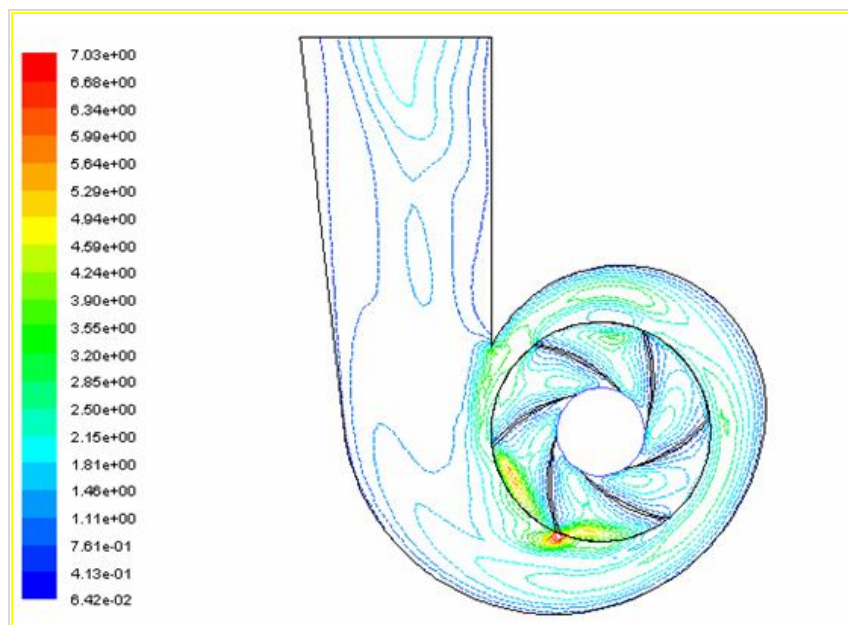
### 3. 显示湍动能分布

在 Contours of 下拉列表框中选择 Turbulence, 结果如图 5-27 所示。





(a) 湍动能分布云图



(b) 湍动能分布等值线图

图 5-27 湍动能分布图

由图 5-27 可以看出，泵内流体在经过叶轮旋转加速后湍动能增加，在叶轮出口处，湍动能相对较高，湍动较为剧烈，随着蜗壳内流道的扩大，流体的一部分机械能转化为静压，湍动能逐渐降低。

#### 4. 显示出口截面速度分布

操作：Plot→XYPlot...

打开对话框如图 5-28 所示。

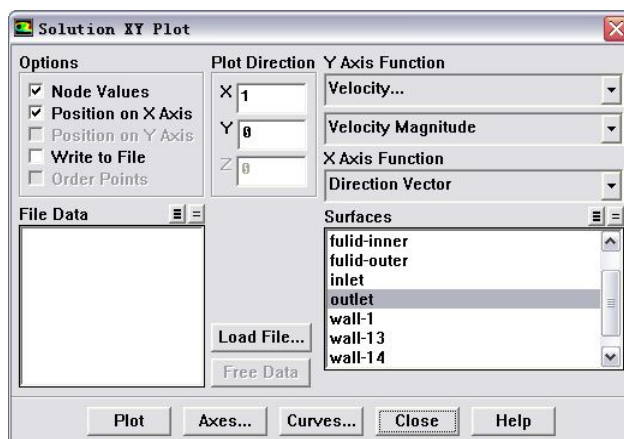


图 5-28 出口截面速度分布设置对话框

**Step 1** 在 Y Axis Function 下拉列表框中选择 Velocity 和 Velocity Magnitude。

**Step 2** 在 Surfaces 下拉列表框中选择出口截面 outlet。

**Step 3** 单击 Plot 按钮。

结果如图 5-29 所示。

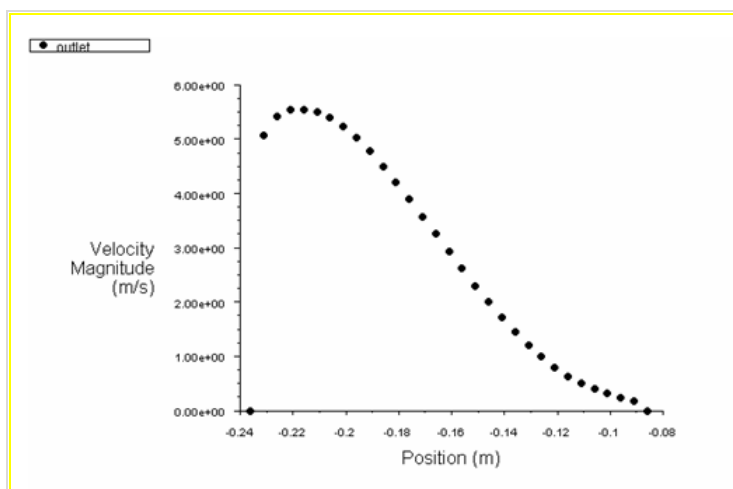


图 5-29 出口截面速度分布图

由图 5-29 可以看出，流体在蜗壳内的速度分布也是不均匀的。在蜗壳出口靠近内侧速度较低，流体主要沿外侧流出，出口外侧速度较大，内侧则相反。为使出口截面的流速分布均匀，应该考虑修改出口的形状，使流速平缓地变化。

#### 5. 显示速度矢量图

操作：Display→Vectors...

打开 Vectors 设置对话框，如图 5-30 所示。

**Step 1** 在 Style 下拉列表框中选择 arrow（箭头）。

**Step 2** 在 Scale 项，将比例因数增加到 3。

**Step 3** 增大 Skip 值为 3。

**Step 4** 单击 Display 按钮。

结果如图 5-31 所示。

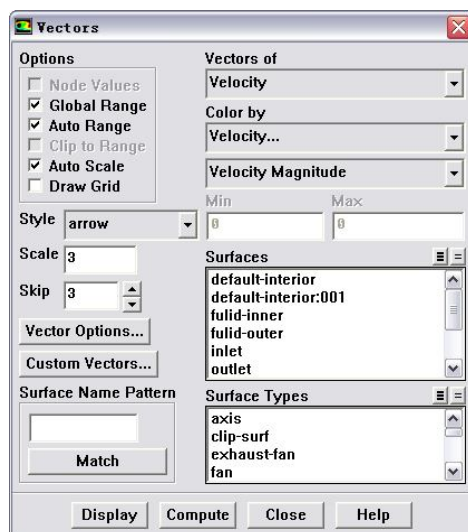
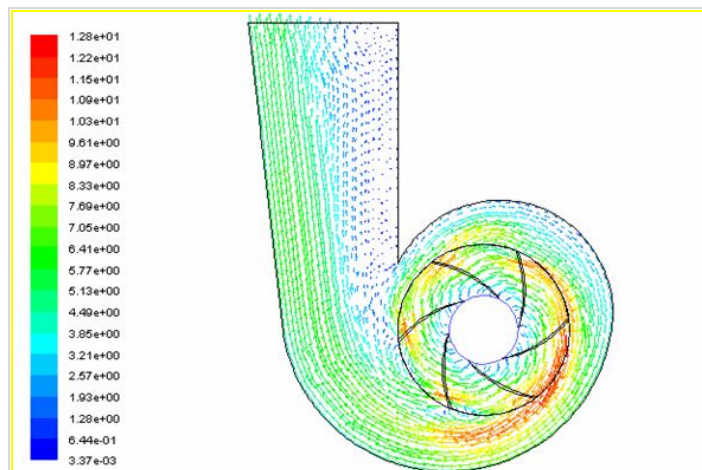
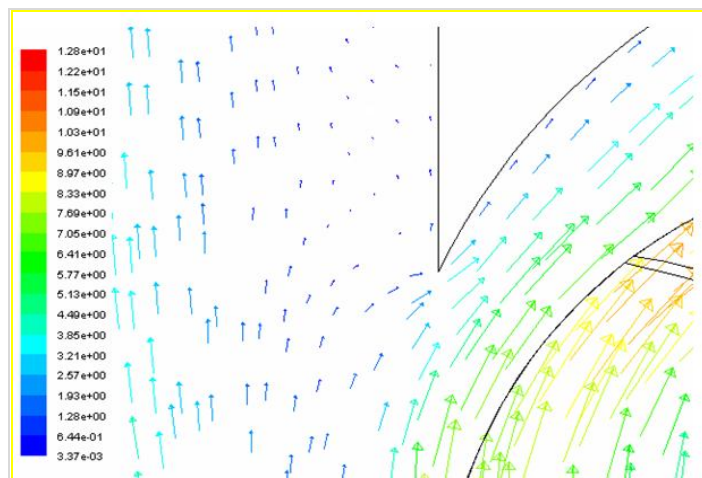


图 5-30 速度矢量设置对话框



(a) 整体分布图



(b) 蜗壳舌部冲击现象

图 5-31 速度矢量分布图

由图 5-31 可以看到蜗壳舌部的冲击现象。可以看出,冲击不是很强烈,泵在此工况下运行良好。如果冲击比较强烈,使得流体激振,蜗壳和叶轮都会发生振动,并产生很大噪声,这样会缩短泵的使用寿命。通过上述的分析可以知道:

- 通过对离心泵流场的模拟,实现了计算结果压力场、速度场、速度矢量分布及湍流强度分布的可视化。
- 得到了内部流动的速度场、压力场的规律。
- 分析了离心泵出口截面的速度分布,为离心泵的优化提供了参考。

### 5.3 风机分析实例

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。能源的发展按照可持续发展战略原则,在开发利用常规能源的同时,应更加注重开发利用对生态有利的新型能源,如风能、太阳能、潮汐能、水能等。现代新能源和可再生能源技术是由 20 世纪能源、电力技术发展形成的高新技术,最近 20 年的长足进步,已对世界能源、电力产业的结构调整产生巨大影响,进而引起能源电力产业结构的大重组和大调整。风力发电由于清洁无污染、施工周期短、投资灵活、占地少、具有较好的经济效益和社会效益,已受到世界各国政府的高度重视。

风力发电在新世纪将大规模开发应用,全世界将以 30%~50% 的速度持续增长。可以预言,21 世纪是人类在能源方面以太阳能、风能等可再生能源为主的世纪,能源的开发利用面临历史性的变革。

人类很早就认识到风能是一种可再生、无污染的绿色能源,使用风能发电,可以“变相地”减少二氧化碳等温室气体的排放。经过计算,平均每装一台单机容量为 7 兆瓦的风能发电机,每年可以减排 2000 吨二氧化碳(相当于种植 2.6 平方公里的树木)、10 吨二氧化硫、6 吨二氧化氮。随着世界范围内能源短缺、经济快速发展对能源需求的增长以及人们的生存环境遭到越来越严重的污染,世界各国政府均把可持续发展与环境保护作为一项基本国策。因此对于能源消耗巨大、噪音污染严重的流体机械设计,主要目标就是提高效率、降低噪音。

国外许多国家一直重视对风力的开发利用,据美国的一项研究表明,风力发电在今后的 20~30 年内具有可提供整个电力 20% 的潜力;若对叶轮技术再进行改进,则具有更大的潜力,提高叶轮的气动性能是很重要的环节。

#### 5.3.1 概述

##### 1. 风轮、叶片和翼型

风轮、叶片和翼型是风能中最基本的概念,它是掌握风能获取机理的基础。只有了解了这些基本概念,才能进一步研究风力机的空气动力学特性问题。相关概念示意图如图 5-32 和图 5-33 所示。

- 风轮:风轮是叶片安装在轮毂上的总称。
- 轮毂:风轮中心位置的叶片固定装置。
- 风轮直径:叶片转动扫掠面的直径。
- 叶片:叶片是接收风能的基本部件。叶片的翼型及扭曲、叶片的数量和尖速比都直接影响叶片接收风能的效率。
- 扫掠面:叶片转动时所形成的圆面。
- 翼展:叶片旋转半径,即风轮转动半径。

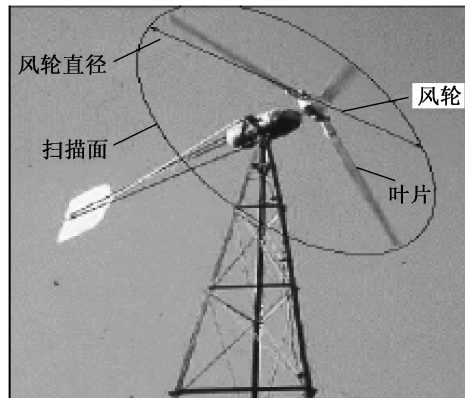


图 5-32 风轮及叶片相关概念示意图

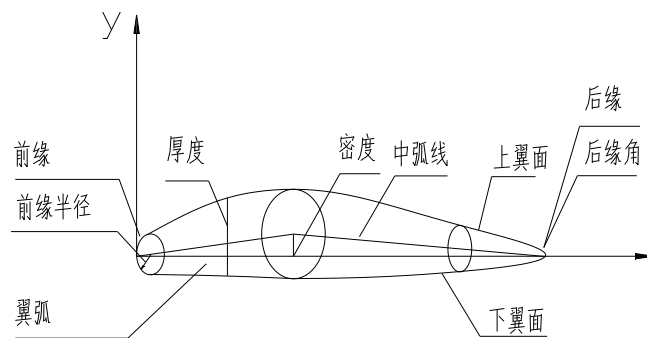


图 5-33 翼型相关概念示意图

- 翼的前缘和后缘：翼的前头为圆头，称翼的前缘，前缘处翼型内切圆半径为前缘半径。翼的尾部，称翼的后缘，若后缘是尖的，则以后缘点上下翼面的切线夹角称为后缘角，若后缘是圆的，则对应后缘半径。
- 翼弦 $l$ ：翼的前缘与后缘的连线称为翼的弦，连线的长称为弦长 $l$ 。
- 翼的上表面（吸附面）：翼弦上面的弧面。
- 翼的下表面（压力面）：翼弦下部的弧面。
- 中弧线：翼型内切圆圆心的连线。
- 厚度 $t$ ：同一 $X$ 坐标处，翼的上表面和下表面相对应的距离。
- 弯度 $f$ ：翼型的中弧线和翼弦间的高度。

## 2. 空气动力学相关概念

对于风力机空气动力学的相关概念，实质上可以划分为翼型空气动力学、叶片空气动力学和风轮空气动力学，此处仅就部分概念粗略描述。

### （1）翼型空气动力学。

#### I. 迎角 $\alpha$ （攻角）

无穷远来流与翼剖面几何弦的夹角。

#### II. 相对风向角 $\phi$

相对风速与风轮旋转平面的夹角，它等于翼型迎角 $\alpha$ 和叶片安装角 $\beta$ 之和，如图 5-34 所示。

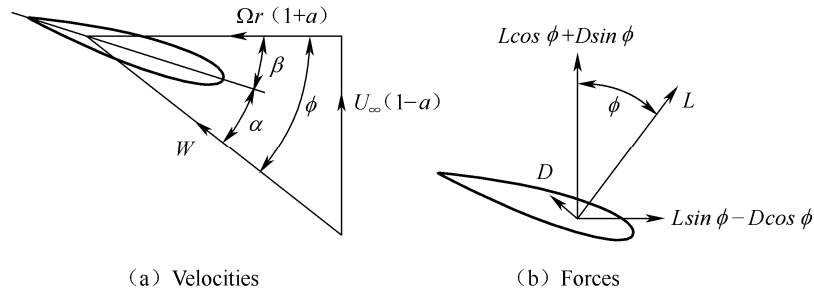


图 5-34 翼型断面空气动力学相关概念示意图

III. 升力系数  $c_l$ 

$$c_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 l} \quad (5-3-1)$$

IV. 阻力系数  $c_d$ 

$$c_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 l} \quad (5-3-2)$$

V. 翼型雷诺数  $R_e$ 

$$R_e = \frac{Vl}{\nu} \quad (5-3-3)$$

## (2) 叶片空气动力学。

I. 叶片的安装角  $\beta$ 

风轮旋转平面与翼弦所成的角  $\beta$  称为叶片安装角。在弯扭叶片中, 沿翼展方向不同位置叶片的安装角各不相同, 用  $\beta_i$  表示。

II. 叶尖速比  $\lambda$ 

风轮的尖速比是风轮的叶尖线速度和设计风速之比, 用  $\lambda$  表示。尖速比是风力机的一个重要设计参数。

$$\lambda = \frac{v}{V} = \frac{2\pi RN}{60V} \quad (5-3-4)$$

$v$ ——叶片尖端线速度, m/s;  $V$ ——设计风速, m/s;

$N$ ——风轮转速, r/min;  $R$ ——风轮转动半径, m。

## III. 叶片所受的力

风以速度  $V$  吹到叶片上, 如图 5-35 所示, 叶片受到空气动力  $F$  开始转动。空气的总动力  $F$  分解在相对风速方向的一个力  $D$  称为阻力; 另一个垂直阻力  $D$  的力称为升力  $L$ ,  $L$  就是使静止的叶片在风速  $V$  吹在叶片上时使叶片旋转的力。

## IV. 叶片的速度

$$\vec{W} = \vec{U} + \vec{V} \quad (5-3-5)$$

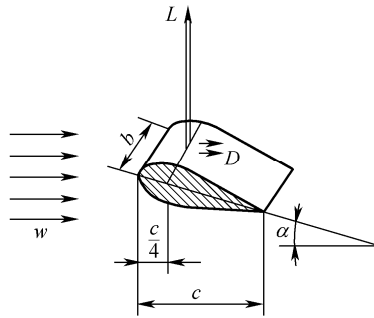
$\vec{W}$  ——相对速度, m/s;  $\vec{U}$  ——叶片线速度, m/s;  $\vec{V}$  ——来流风速, m/s。

$$\vec{U} = \Omega r(1+a) \quad (5-3-6)$$

$$\vec{V} = U_\infty(1-a) \quad (5-3-7)$$

$\Omega$  ——叶片角速度, rad/s;  $r$  ——叶片计算速度点至转动中心之距, m;

$a$  ——轴向诱导因子, 无量纲参数;  $U_\infty$  ——无穷远处来流风速, m/s。

图 5-35 宽度是  $b$  的叶片微元段上的升力  $L$  和阻力  $D$ 

### (3) 风轮空气动力学。

#### I. 风轮的受力

风轮叶片的总体受力是由离心力、推力和哥氏力合成得出的。

#### II. 离心力

所谓的“离心力”和离心现象，是提供给物体的向心力不足而导致的，并没有一个力使物体离心。离心力是对于旋转物体表面的物体而言的，而不是旋转物体本身。

#### III. 哥氏力

哥氏加速度是哥氏力的来源，哥氏加速度是由于质点不仅作圆周运动，而且也做径向运动或周向运动所产生的。当牵连运动为匀角速度定轴运动时，哥氏加速度的大小为： $\partial k = 2\Omega u$ ，式中  $u$  代表质点相对于转轴的径向速度或周向速度。哥氏力按下式计算： $Fk = 2m\omega u$ 。

#### IV. 推力

垂直于风轮扫掠面方向的风轮受力，称为风轮受到的推力。

#### V. 风能利用系数 $c_p$

表征风力机从自然风能中吸取能量的大小程度，也称功率系数，用符号  $c_p$  表示，由下式可知：

$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_1^3} \quad (5-3-8)$$

式中

$P$ ——风力机实际获得的轴功率，W；

$\rho$ ——空气密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$A$ ——风轮的扫风面积， $\text{m}^2$ ；

$V_1$ ——上游来流风速， $\text{m/s}$ 。

### 3. 风力机的种类

人类应用风力机的历史悠久，制造的风力机千姿百态，其分类方法也是多种多样的。归纳起来，主要有以下几种形式：

- 按风力机额定功率大小分类，有 4 种类型，即微型（1kW 以下）风力机、小型（1~10kW）风力机、中型（10~100kW）风力机和大型（100kW 以上）风力机。
- 按照风轮相对于塔架位置分，可分为上风向风力机和下风向风力机。
- 按照桨叶材料分，可分为木质风力机、金属风力机和玻璃钢复合材料的风力机。现代中大型风力机的桨叶多用玻璃钢复合材料。
- 按桨叶数量分，可分为单叶片风力机、双叶片风力机、三叶片风力机和多叶片风力机。

中大型风力机多采用双叶片和三叶片。

- 按尖速比（风力机叶片的叶尖速度和来流风速之比）分，可分为高速风力机（叶尖速度比最大可达到 10 以上）、中速风力机（叶尖速比为 2~5）和低速风力机（叶尖速比小于等于 1）3 类。
- 按桨叶工作原理分，可分为升力型和阻力型。

风能转换系统可以分成两类：一类是利用空气推力(drag)做功，一类是利用空气升力(lift)做功。早期波斯和中国的垂直轴风车是利用空气推力的，但是推力系统装置功率系数非常小，最大功率系数  $C_{p\max}$  仅约等于 0.16。

利用空气升力的风力机又可进一步细分，按照它们旋转轴方向的不同，分成水平轴风力机和垂直轴风力机。

垂直轴风力机在风向改变时无需对风，在这点上相对水平轴风力机是一大优点，它不仅使结构设计简化，而且也减少了风轮对风时的陀螺力。

利用阻力旋转的垂直轴风力机有几种类型，其中有利用平板和杯子做成的风轮，这是一种纯阻力装置；S 型风机，具有部分升力，但主要还是阻力装置。达里厄式风轮是法国 G.J.M. 达里厄于 19 世纪 30 年代发明的。在 20 世纪 70 年代，加拿大国家科学研究院对此进行了大量的研究，现在是水平轴风力机的主要竞争者。

目前，大量文献主要集中在水平轴风力机上，关于垂直轴风力机的文献较少。

### 5.3.2 数学物理建模

下面阐述风机分析的控制方程及在 Gambit 中建立模型的具体方法和步骤。

#### 1. 问题描述

建造一台具有三个叶片的达里厄风力发电机，风速 7.5m/s 时效率最高，输出功率为 5kW，转速为 8.9rad/s。叶片翼型在 NACA 4412、NACA 0012、NACA 0018、NACA 23012 中选择，最大半径等于风轮高度的一半。风轮的几何尺寸如表 5-3 所示。

表 5-3 风轮几何尺寸

高度 (m)	半径 (m)	叶片弦长 (m)
8.4	4.2	1

#### 2. 控制方程

二维可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程和双方程湍流模型无量纲化后在笛卡尔坐标系中可以写成如下守恒形式：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} D + S = 0 \quad (5-3-9)$$

$Q = [q_1, q_2, \dots, q_6]^T$ ， $F_i$  为对流通矢量， $D$  为粘性矢量， $S$  为源项，具体为：

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho E \\ \rho v_1 \\ \rho v_2 \end{bmatrix}, \quad F_i = \begin{bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_1 u_i + \delta_{i1} p \\ \rho u_2 u_i + \delta_{i2} p \\ \rho H u_i \\ \rho v_1 u_i \\ \rho v_2 u_i \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{i1} \\ \tau_{i2} \\ \beta_i \\ \varpi(v_1) \\ \varpi(v_2) \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ S(v_1) \\ S(v_2) \end{bmatrix} \quad (5-3-10)$$



其中:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_1) \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \text{Re} \right] \quad (5-3-11)$$

$$\beta_i = u_1 \tau_{1i} + u_2 \tau_{2i} - q_i \quad (5-3-12)$$

$$\varpi(v_{1i}) = \left[ \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{v_m}} \right] \frac{\partial v_m}{\partial x_i} \quad (5-3-13)$$

$$q_i = - \left[ \frac{\mu}{\text{Pr}} + \frac{\mu_i}{\text{Pr}_i} \right] \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (5-3-14)$$

其中,  $E = e + u_1 u_2 / 2 + k$  和  $H = h + u_1 u_2 / 2 + k$  分别是滞止内能和滞止焓,  $k$  是湍动能。

不失一般性, 湍流流动控制方程在任意曲线坐标系中可写成无量纲矢量形式:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} D + S = 0 \quad (5-3-15)$$

其中  $Q = J[q_1 q_2 \cdots q_6]^T$ , 对应于连续方程、二维动量方程、能量方程、低雷诺数双方程湍流模型 6 个方程,  $J$  为坐标变换 Jacobian 行列式。  $F_i$  为对流通量矢量,  $D$  为粘性项,  $S$  为源项,  $\text{Re}$  是雷诺数。

湍流模型采用  $k-\varepsilon$  低雷诺数双方程湍流模型。

### 3. 在 Gambit 中建立模型并划分网格

本节模型的建立分为两部分: 单叶片流动模型的建立和垂直轴风力机整体模型的建立。

#### (1) 建立单叶片流动模型。

以 NACA 4412 翼型为例建立模型。

##### Step 1 保存点文件。

有 25 个点; 1 表示生成一条曲线; 第一列表示  $x$  坐标的值; 第二列表示  $y$  坐标的值; 第三列表示  $z$  坐标的值;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标间用空格分开。

保存为 NACA 4412.dat 文件, 如图 5-36 所示。




##### Step 2 启动 Gambit, 并选择求解器为 FLUENT5/6。

##### Step 3 将叶片剖面的数据导入 Gambit。

打开 Main Menu → File → Input → ICEM Input, 单击 Browse 按钮浏览关于点文件, 单击 Accept 按钮, 如图 5-37 所示。将显示出 NACA 4412dat 里面所有的点以及生成相应的曲线, 如图 5-38 所示。




##### Step 4 建立叶片外部流动区域。

##### S1 创建节点。

操作:  →  → 

打开对话框如图 5-39 所示, 在其中输入坐标值: (3.5,0.75)、(3.5,-0.75)、(-1.5,0.75)和 (-1.5,-0.75), 创建 4 个坐标点。

##### S2 由节点连成线。

操作:  →  → 

打开创建直线对话框, 如图 5-40 所示。Shift+鼠标左键依次单击各点, 保留默认设置, 单击 Apply 按钮确认。

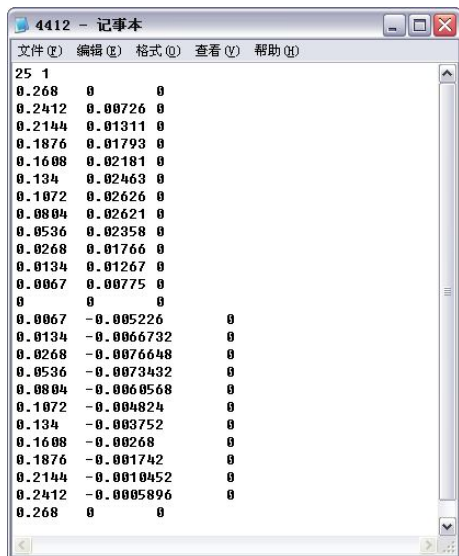


图 5-36 创建 NACA 4412.dat 文件

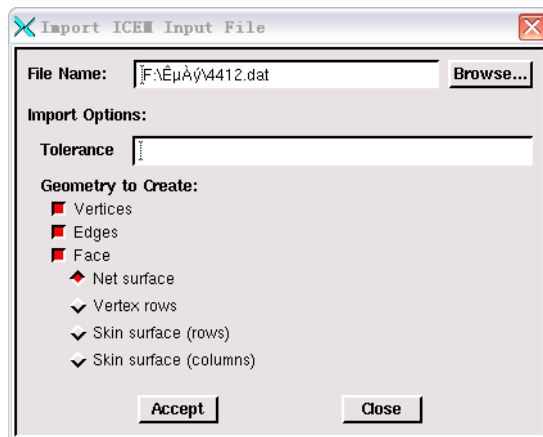


图 5-37 选择创建几何样式

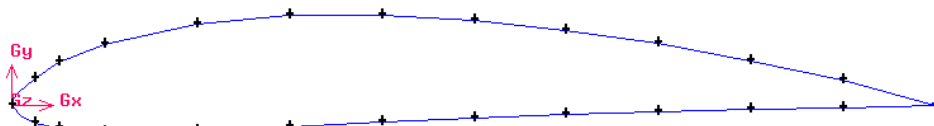


图 5-38 导入 Gambit 中的叶片翼型

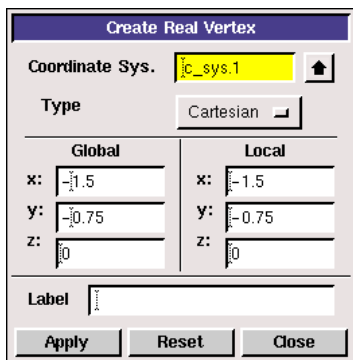


图 5-39 创建点对话框

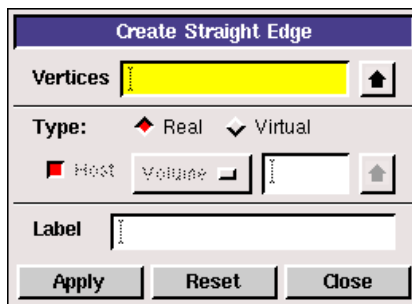





图 5-40 创建直线对话框




### S3 由边线创建面。

操作:  →  → 

打开创建面对话框, 如图 5-41 所示。Shift+鼠标左键依次单击各边, 保留默认设置, 单击 Apply 按钮确认。

创建翼所在的平面, Shift+鼠标左键单击组成翼的边线, 保留默认设置, 单击 Apply 按钮确认。

### Step 5 剪切面。

操作:  →  → 

打开对话框如图 5-42 所示, 在 Face 中选择 face.1, 在 Subtract Face 中选择 face.2, 单击 Apply 按钮确认。剪切后如图 5-43 所示。

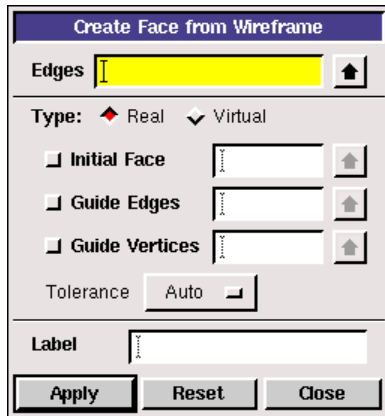


图 5-41 创建面对话框

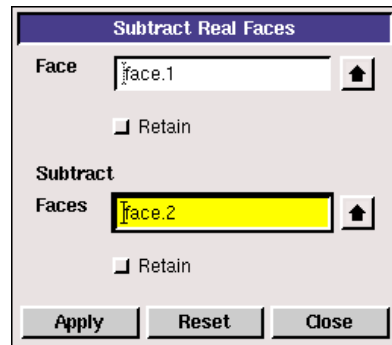


图 5-42 剪切面对话框

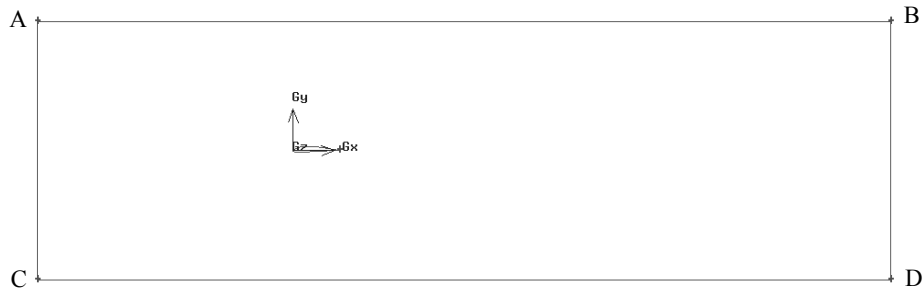





图 5-43 叶片及其外部流动区

**Step 6** 划分面网格。

操作:  →  → 

打开划分面网格对话框,如图 5-44 所示。在 Face 中选择 face.1, Internal Size=0.04, 其他设置如图 5-44 所示。划分后的网格如图 5-45 所示。

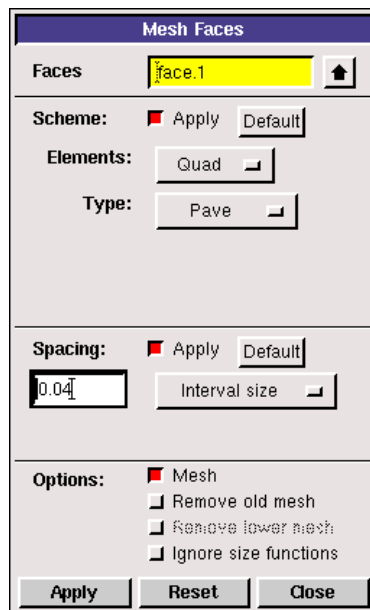


图 5-44 划分面网格对话框

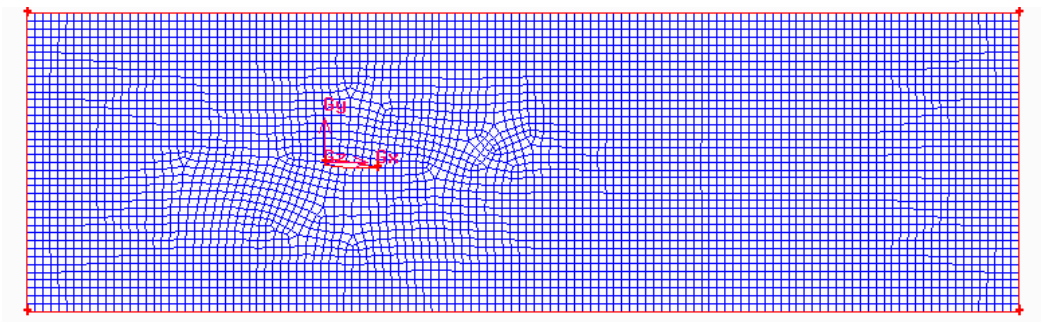


图 5-45 Gambit 中划分的网格

**Step 7** 设置边界类型。

操作： → 

打开边界类型设置对话框，如图 5-46 所示。

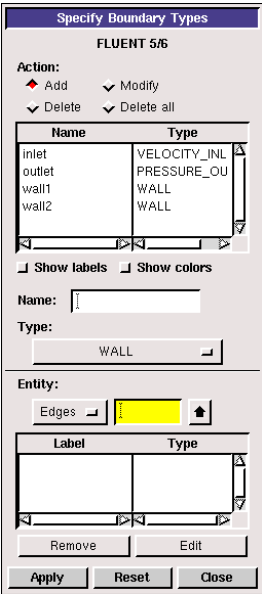


图 5-46 边界类型设置对话框

边界条件的设置如表 5-4 所示。

表 5-4 边界条件设置

边界名称	边界类型	组成边线
Inlet	Velocity-inlet	AC
Outlet	Pressure-outlet	BD
wall1	Wall	叶片的上边线
wall2	Wall	叶片的下边线

**Step 8** 输出网格文件。

操作：File→export→mesh...

打开 Export Mesh File 对话框，如图 5-47 所示。输入文件名，选取 Export 2-D Mesh 复选框，单击 Accept 按钮确认。

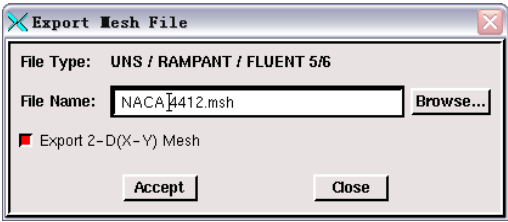


图 5-47 网格文件输出对话框

按照以上各步骤可分别建立 NACA 0012、NACA 0018 和 NACA 23012 翼型叶片的流动模型，翼型边线各点的坐标值可由相关的设计手册查得。

(2) 建立垂直轴风力机模型。

**Step 1** 创建弦长为 1m 的 dat 文件如图 5-48 所示，并将其导入 Gambit 中。

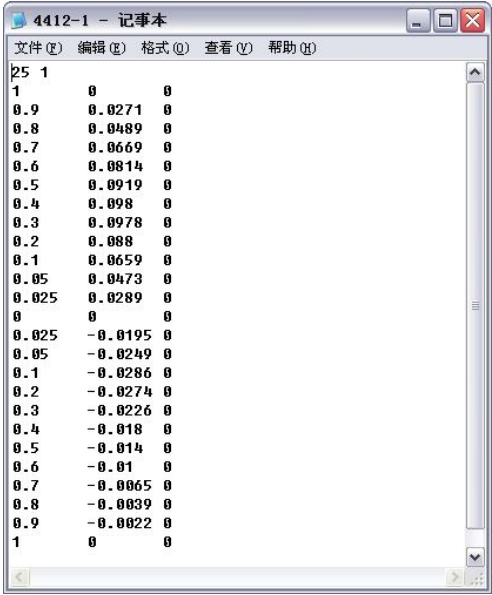


图 5-48 弦长 1m 的 NACA 4412 数据

**Step 2** 创建叶片所在的平面。

Shift+鼠标左键单击组成叶片的边线，保留默认设置，单击 Apply 按钮确认。

**Step 3** 创建旋转流场和外部流场。

操作：[面] → [面] → [旋转]

打开对话框如图 5-49 所示，在半径文本框中分别输入 4.2 和 10，单击 Apply 按钮确认。

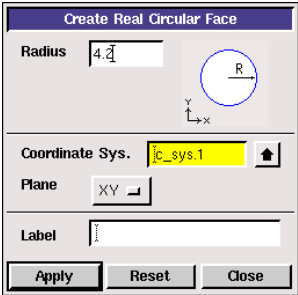





图 5-49 创建面对话框

**Step 4** 将叶片移动并旋转复制成 3 个。

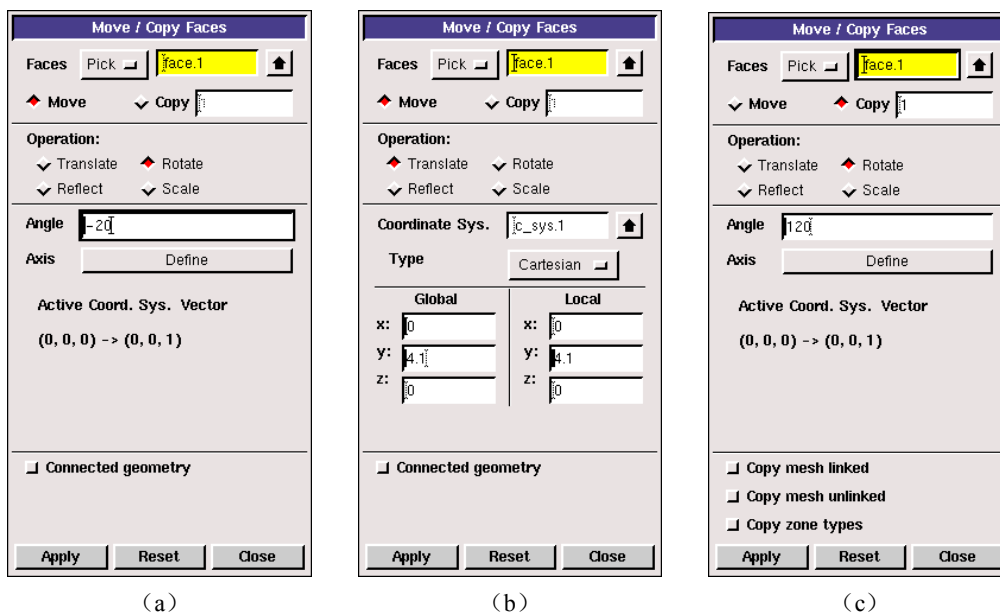
操作： →  → 

打开对话框如图 5-50 所示。

**S1** 选择叶片所在的平面，在 Operation 中选择 Rotate，输入角度 -20，如图 5-50 (a) 所示，单击 Apply 按钮确认。

**S2** 选择叶片所在的平面，在 Operation 中选择 Translate 选项，输入 y 值 4.1，如图 5-50 (b) 所示，单击 Apply 按钮确认。

**S3** 选择叶片所在的平面，在 Operation 中选择 Rotate，输入角度 120，如图 5-50 (c) 所示，单击 Apply 按钮确认。旋转复制出 3 个叶片。





(a)

(b)

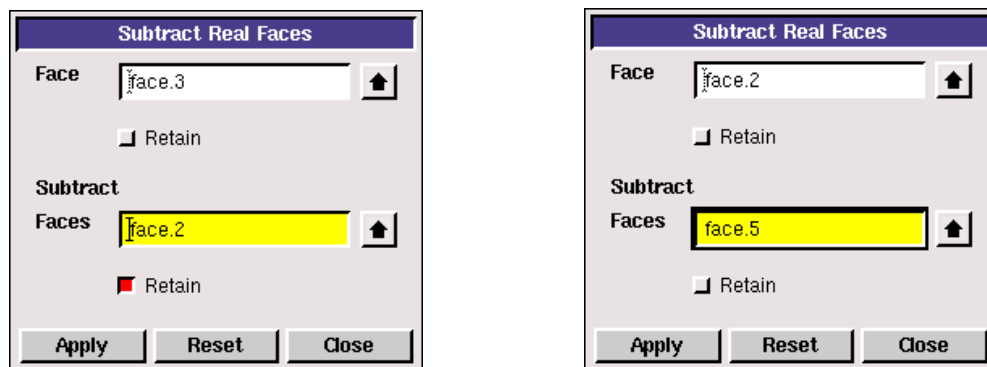
(c)

图 5-50 Move/Copy Faces 设置对话框

**Step 5** 剪切面。

操作： →  → 

打开对话框如图 5-51 所示。



(a)


(b)

图 5-51 剪切面设置对话框

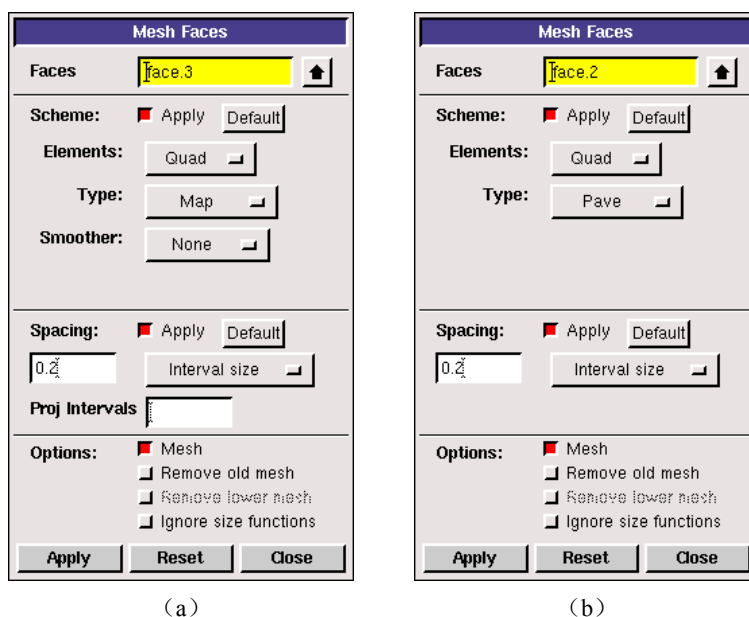
**S1** 在 Face 中选择大圆平面 face.3, 在 Subtract Face 中选择小圆平面 face.2, 单击 face.2 下面的 Retain, 保留小圆, 如图 5-51 (a) 所示, 单击 Apply 按钮确认。

**S2** 在 Face 中选择小圆平面 face.2, 在 Subtract Face 中选择叶片所在的 3 个平面, 如图 5-51 (b) 所示。单击 Apply 按钮确认。  
剪切后只剩下两个面。

**Step 6** 划分面网格。

操作: 

打开对话框如图 5-52 所示, 分别对外部圆环和内部小圆进行网格划分, Internal Size=0.2, 划分后的网格如图 5-53 所示。



(a)

(b)

图 5-52 划分面网格设置对话框

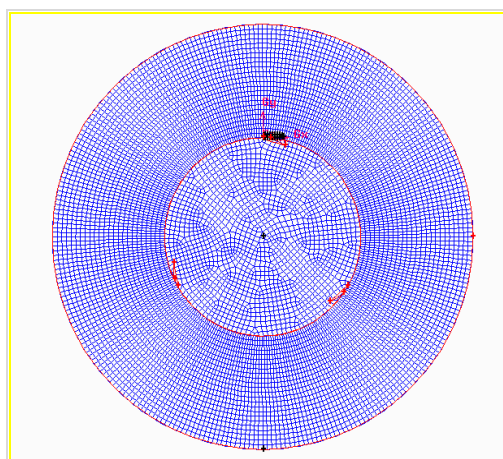





图 5-53 划分后的网格图

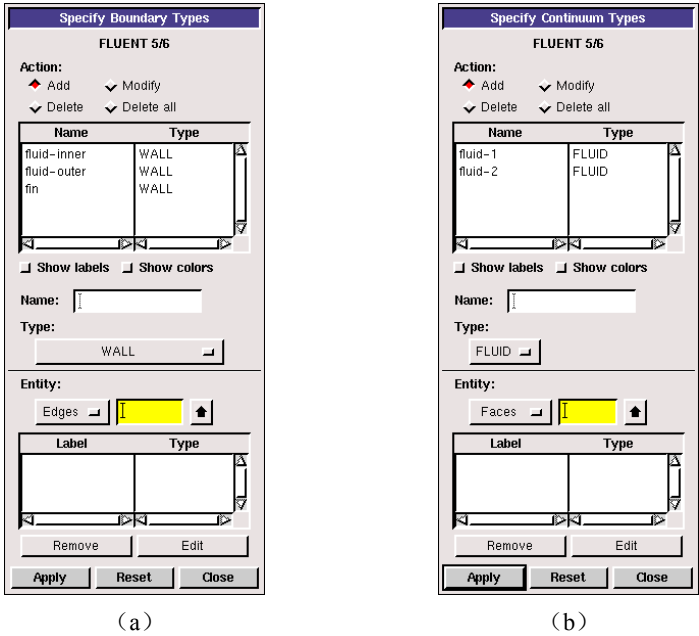
**Step 7** 设置边界类型和区域类型。

**S1** 操作: 

将外部圆环和小圆交界处的两条边线分别设置为 fluid-inner 和 fluid-outer, 边界类型为 Wall。将叶片的三条边线设置为 fin, 边界类型为 Wall, 如图 5-54 (a) 所示。

**S2** 操作:  → 

将小圆、外部圆环分别设置为 fluid-1 和 fluid-2, 如图 5-54 (b) 所示。



(a)

(b)

图 5-54 边界类型设置对话框

**Step 8** 输出网格文件。

5.3.3 边界条件

单叶片的边界条件如表 5-5 所示。

表 5-5 单叶片边界条件

边界名称	边界类型	速度大小
inlet	Velocity-inlet	8m./s
outlet	Pressure-outlet	——
wall1	Wall	——
wall2	Wall	——

垂直轴风力机的转速为 8.9rad/s。

5.3.4 求解计算

本节的求解计算分为两部分：单叶片的数值模拟和垂直轴风力机整体的数值模拟。下面介绍具体的方法和步骤。

1. 单叶片的数值模拟

**Step 1** 与网格相关的操作。

**S1** 读入网格文件 NACA4412.msh。



操作: File→Read→Case...

找到 NACA4412.msh 文件后单击 OK 按钮, Mesh 文件即被导入到 FLUENT 求解器中。

**S2** 检查网格。

操作: Grid→Check

**S3** 确定长度的单位。

操作: Grid→Scale...

打开 Scale Grid 对话框, 如图 5-55 所示。

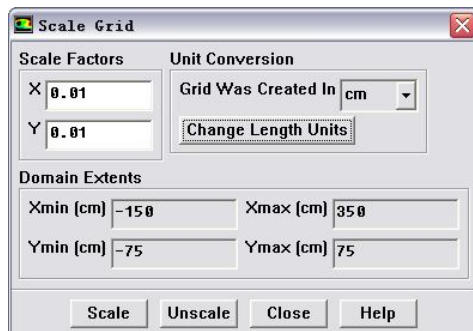


图 5-55 长度单位设置对话框

(a) 在单位转换栏中的网格长度单位右侧的下拉列表框中选择 cm。

(b) 单击 Change Length Units 按钮。

(c) 单击 Close 按钮关闭对话框。

**S4** 显示网格。

操作: Display→Grid...

**Step 2** 选择计算模型。

**S1** 设置求解器。

操作: Define→Models→solve...

打开 Solver 设置对话框, 如图 5-56 所示。在 Solver 下选择 Density Based, 其他设置保留默认, 单击 OK 按钮关闭对话框。

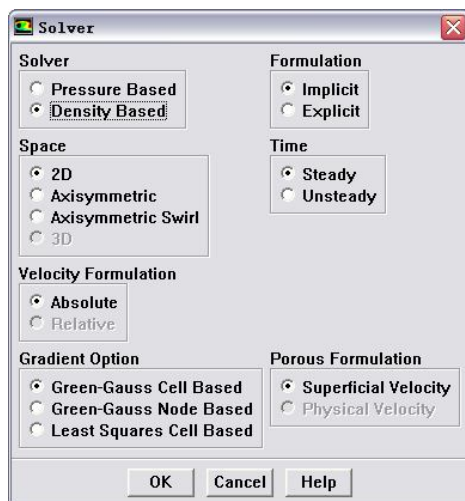


图 5-56 求解器设置对话框

**S2** 设置标准  $k-\varepsilon$  湍流模型。

操作：Define→Models→Viscous...

打开的 Viscous Model 对话框如图 5-57 所示。

- (a) 选择 k-epsilon 单选项则打开 Viscous Model 设置对话框，如图 5-58 所示。
- (b) 保留默认的值。
- (c) 单击 OK 按钮。

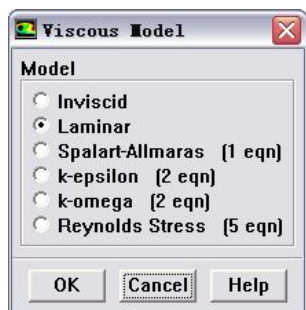


图 5-57 湍流模型选择对话框

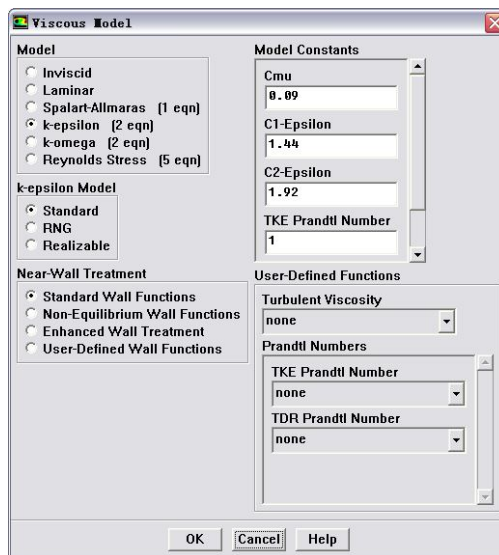


图 5-58 湍流模型设置对话框

### Step 3 设置边界条件。

操作：Define→Boundary Conditions...

打开 Boundary Conditions 设置对话框，如图 5-59 所示。

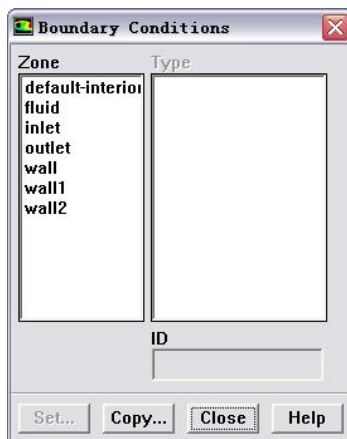


图 5-59 边界选择对话框

**S1** 设置入口速度边界条件。

(a) 在图 5-59 所示对话框的 Zone 列表框中选择 inlet，则在右侧 Type 列表框中显示其类型为 Velocity\_inlet，单击 Set 按钮，打开速度边界设置对话框，如图 5-60 所示。

(b) 在 Velocity Specification Method (速度给定方式) 下拉列表中选择 Magnitude, Normal

to Boundary (给定速度大小, 速度方向垂直于边界)。

(c) 在 Velocity Magnitude (入口速度) 文本框中输入 8, 右侧栏内选择 constant (常值)。

(d) 保留其他设置。

(e) 单击 OK 按钮关闭 inlet 设置对话框。

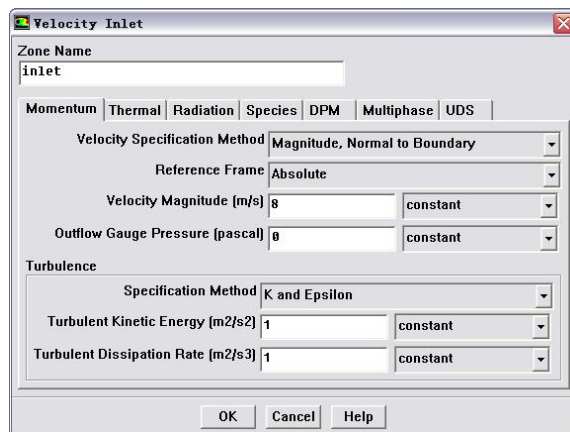


图 5-60 速度边界设置对话框

**S2** 设置出口边界条件。

在 Zone 列表框中单击 outlet, 再单击 Set 按钮, 打开 Pressure Outlet 对话框, 如图 5-61 所示, 单击 OK 按钮确认。

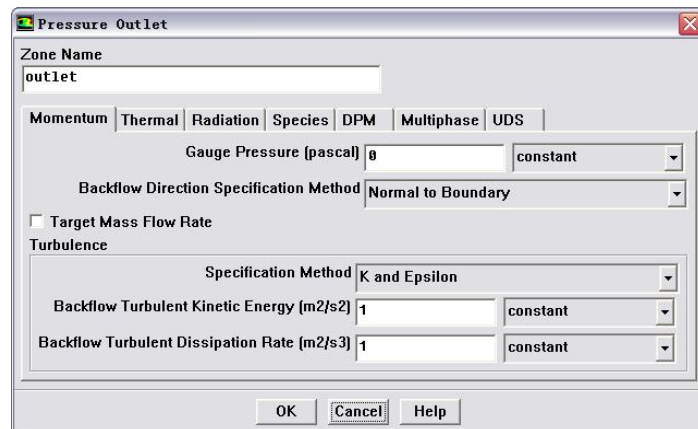


图 5-61 出口边界设置对话框

**S3** 保留壁面的默认设置。

**Step 4** 求解。

**S1** 求解参数的设置。

操作: Solve→Controls→Solution...

打开如图 5-62 所示的对话框, 按图所示进行设置。

**S2** 流场初始化。

操作: Solver→Initialize→Initialize...

打开 Solution Initialization 对话框, 如图 5-63 所示。

在 Compute from 列表框中选择 inlet, 单击 Init 按钮, 再单击 Close 按钮关闭初始化对话框。

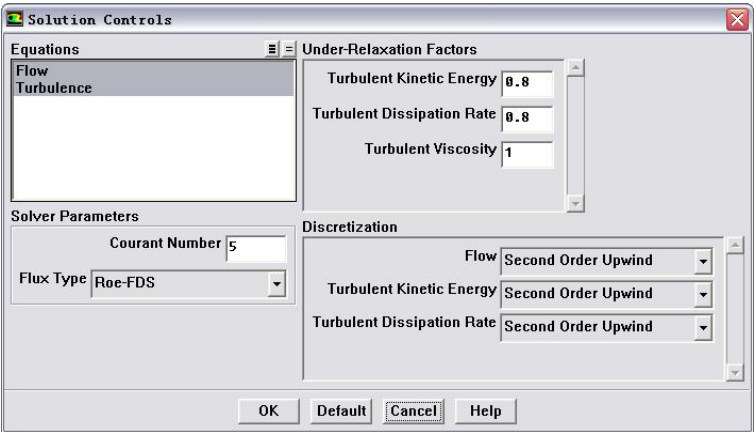


图 5-62 求解参数设置对话框

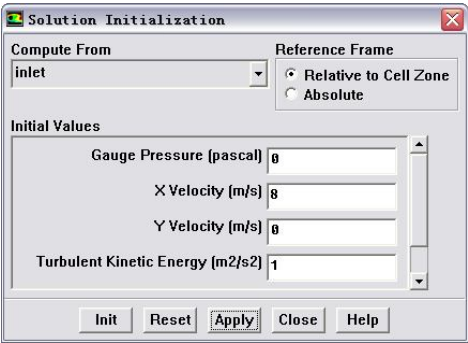


图 5-63 流场初始化对话框

**S3** 打开残差图。

操作：Solve→Monitors→Residual...

打开对话框如图 5-64 所示，选择 Option 下面的 Plot，在计算时动态地显示计算残差，将 Convergence 全部设置为 0.00001，最后单击 OK 按钮。

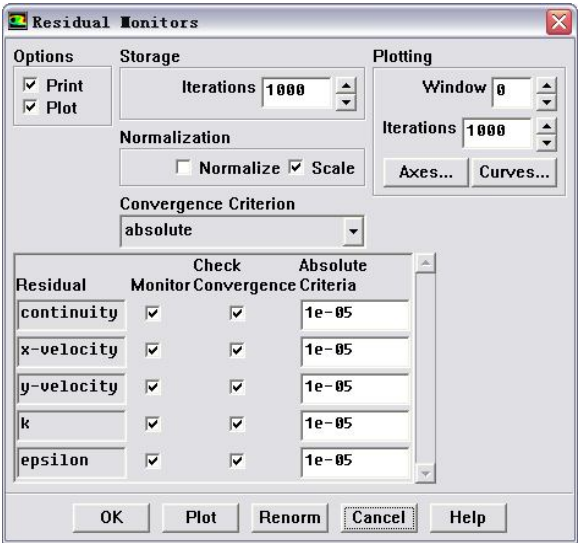


图 5-64 残差设置对话框

**S4** 开始迭代。

操作: Solver→Iterate...

(a) 在打开的对话框中, 在 Number of Iteration (迭代次数) 栏内输入 2000。

(b) 单击 Iterate 按钮开始计算。

**S5** 保存 case 和 data 文件。

操作: File→Write→Case&Data..

在速度和压力梯度大的地方进行网格自适应, 重复计算。

类似地, 可按照上述步骤计算 NACA 0012、NACA 0018 和 NACA 23012 翼型的流动模型。

## 2. 垂直轴风力机的数值模拟

**Step 1** 读入网格文件并进行相关操作, 保留默认尺寸。

**Step 2** 选择计算模型。

**S1** 设置求解器。

操作: Define→Models→solve...

打开 Solver 设置对话框, 如图 5-65 所示。保留默认设置, 单击 OK 按钮关闭对话框。

**S2** 设置标准  $k-\varepsilon$  湍流模型。

**S3** 操作环境的设置。

操作: Define→Operating Conditions...

保留默认设置。

**Step 3** 设置边界条件。

操作: Define→Boundary Conditions...

打开 Boundary Conditions 设置对话框, 如图 5-66 所示。

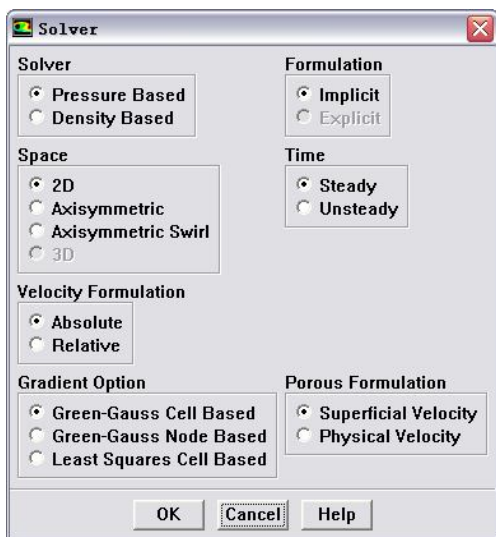


图 5-65 求解器设置对话框

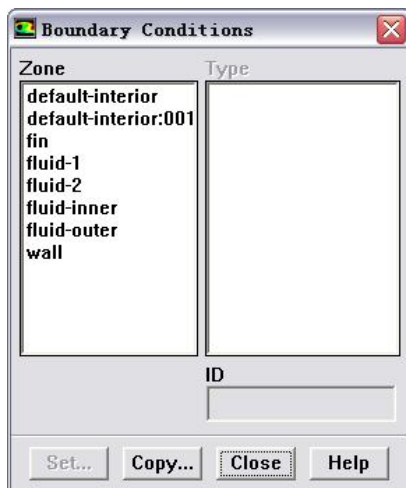


图 5-66 边界选择对话框

**S1** 设置 fluid-1 流体区域的边界条件。

在 Zone 下面选择 fluid-1, 它对应的边界条件类型为 fluid, 然后单击 Set 按钮打开 fluid-1 边界条件设置对话框, 如图 5-67 所示。在 Motion 对应的 Motion Type 下选择 Moving Reference Frame, 利用它可以设置区域 fluid-1 是可动区域, 它的运动方式可以是平动或者转动。本例在 Rotational Velocity 项对应的 Speed 中输入 8.9。

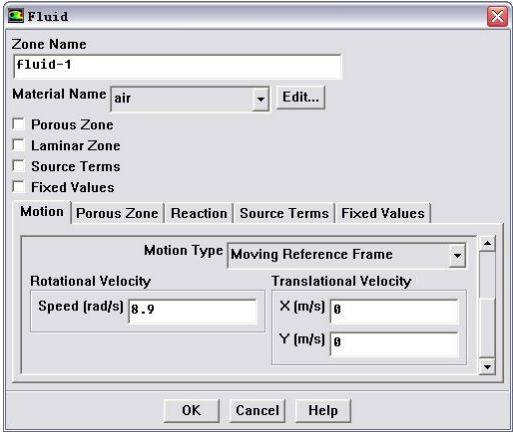


图 5-67 fluid-1 流体区域的边界条件设置

**S2** 设置 fluid-2 流体区域的边界条件。

保留默认设置单击 OK 按钮。

**S3** 设置 fluid-inner 的边界条件。

在 Zone 下面选择 fluid-inner，看到它对应的边界条件类型为 Wall，本例边界条件需要改动为 interface。方法为：在边界条件类型中选中 interface，此时系统会提示是否确认改动，单击 OK 按钮确认。

**S4** 设置 fluid-outer 的边界条件。

在 Zone 下面选择 fluid-outer，看到它对应的边界条件类型为 Wall，本例边界条件也需要改动为 interface，具体方法同 fluid-inner 的改动。

**S5** 设置 fin 的边界条件。

在 Zone 下面选择 fin，它对应计算区域中的 3 个叶片，可见它对应的边界条件类型为 Wall，然后单击 Set 按钮，打开对话框如图 5-68 所示。在 Momentum 对应的 Wall Motion 下面选中 Moving Wall，说明它是运动的。在此时展开的 Motion 对应项中选中 Rotational，表明是转动。如何转动可以选择 Relative to Adjacent Cell Zone，此时 Speed 后面的数值为 0。以上设置就说明叶片是与以 8.9rad/s 转动的 fluid-1 区域是同步转动的。

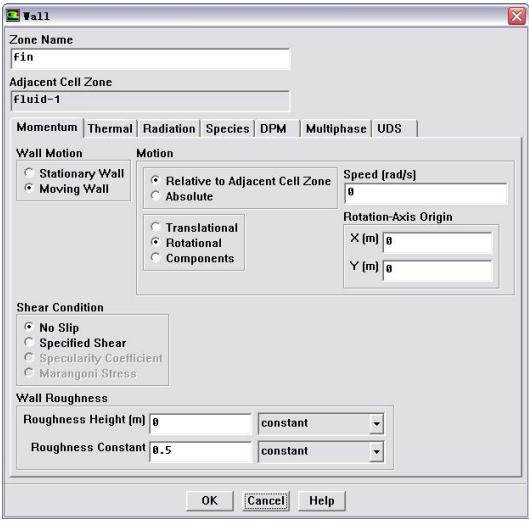


图 5-68 叶片的运动定义对话框

**Step 4** 定义交界面。

操作：Define→Grid Interfaces...

打开对话框如图 5-69 所示，具体操作如下：在 Grid Interface 中输入交界面的名称 interface；在 Interface Zone 1 下面选中 fluid-inner，在 Interface Zone 2 下面选中 fluid-outer。单击 Create 按钮创建交界面，通过这个交界面，fluid1 和 fluid2 中的数据就能交流了。

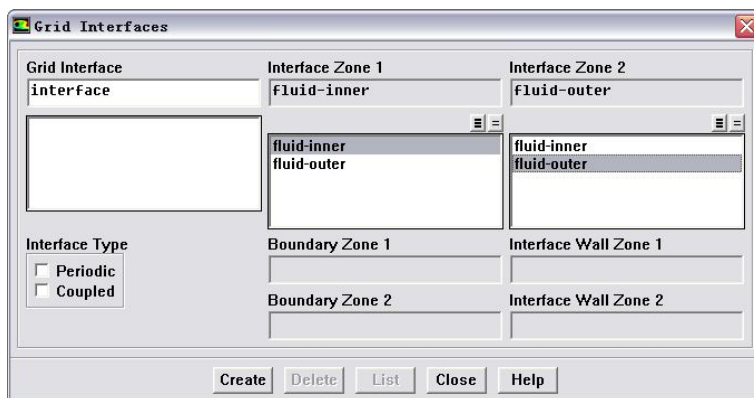


图 5-69 网格交界面的设置

**Step 5** 求解方法的设置及其控制。

**S1** 求解参数的设置。

操作：Solve→Controls→Solution...

打开如图 5-70 所示的对话框，选择二阶迎风格式。

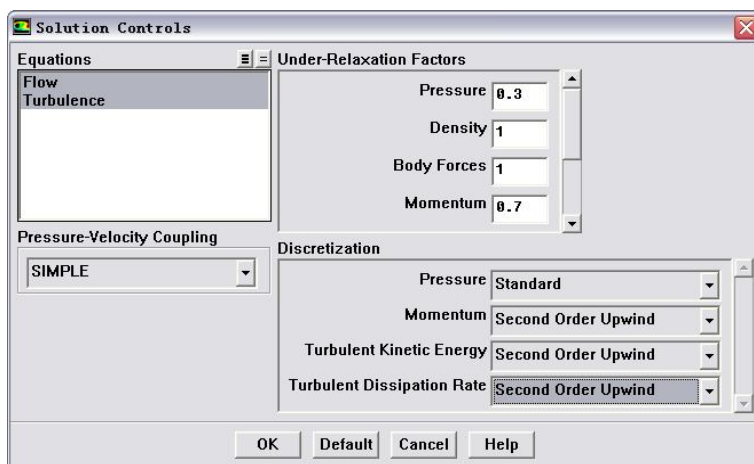


图 5-70 求解参数设置对话框

**S2** 流场初始化。

操作：Solver→Initialize→Initialize...

打开初始化对话框，并设置 Compute from 为 All Zones，依次单击 Init、Apply 和 Close 按钮。

**S3** 打开残差图。

操作：Solve→Monitors→Residual...

打开残差设置对话框，选择 Option 下面的 Plot，Convergence 下面对应的数值均为 0.0001，最后单击 OK 按钮。



**S4** 保存 case 文件。

操作：File→Write→Case...

**S5** 开始迭代

操作：Solver→Iterate...

(a) 在 Number of Iteration (迭代次数) 文本框中输入 2000。

(b) 单击 Iterate 按钮开始计算。

**S6** 保存 data 文件。

迭代收敛后，保存 data 文件。

### 5.3.5 结果分析与讨论

计算收敛后对结果进行分析和讨论。

#### 1. 叶片翼型的选择

(1) 四种叶片翼型的气动特性比较。

中国有效风能密度对应的风速范围为 4~25m/s, 改变来流风速  $V=4\text{m/s}$ 、 $V=12\text{m/s}$ 、 $V=16\text{m/s}$  和  $V=25\text{m/s}$ , 重复计算, 可以得出 4 种翼型在不同来流风速下的气动特性因数, 如图 5-71 至图 5-74 所示。

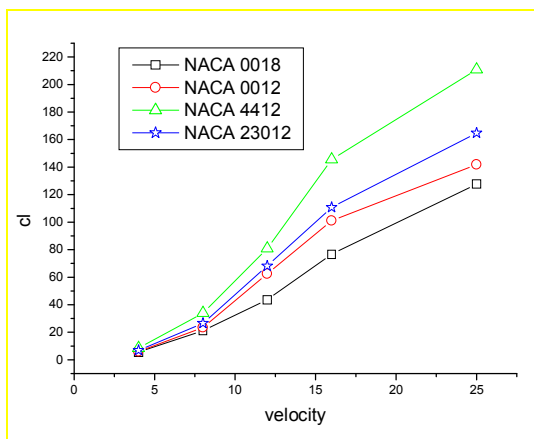


图 5-71 不同翼型在风速变化下的  $c_l$

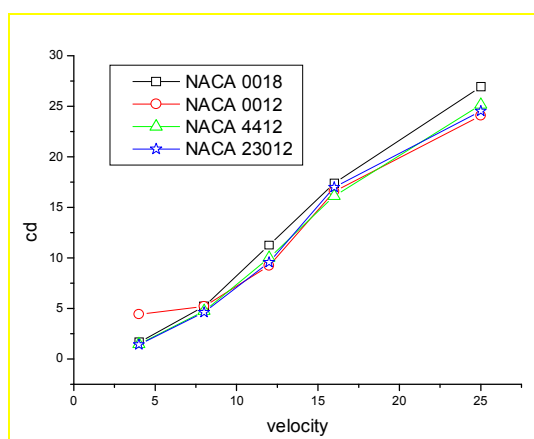


图 5-72 不同翼型在风速变化下的  $c_d$

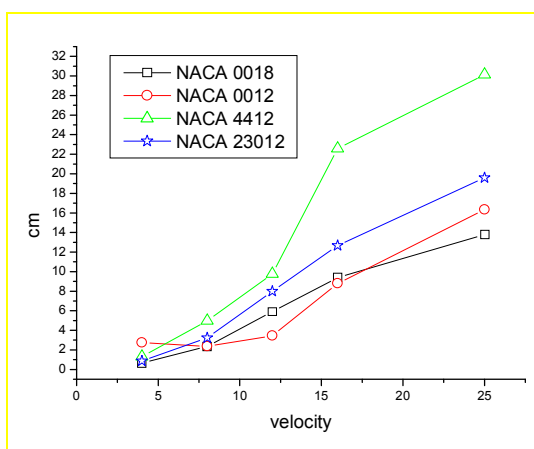


图 5-73 不同翼型在风速变化下的  $c_m$

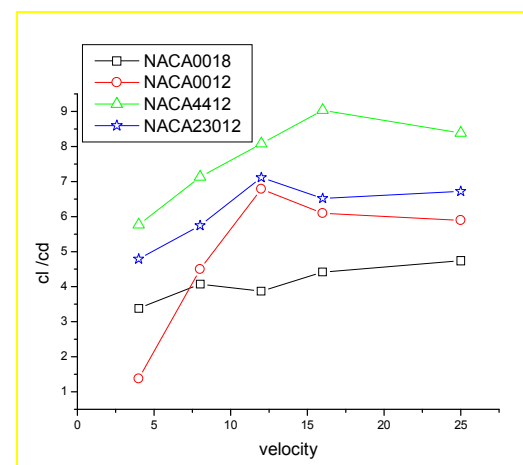


图 5-74 不同翼型在风速变化下的升阻比  $c_l/c_d$



不同的翼型在风速变化下的  $c_l$ 、 $c_d$ 、 $c_m$ 、 $c_l/c_d$  的变化趋势是一样的，随着速度的增大，其值都是增大的趋势。由图 5-71 看出，不同来流风速下 NACA 4412 是 4 种翼型中升力系数最大的。由图 5-72 看出，不同来流风速对阻力系数的影响不是很明显，数值差别很小，而且可以看出 NACA 4412、NACA 0012 和 NACA 23012 翼型的阻力系数几乎没有差别，NACA 0018 翼型比上述 3 种翼型的阻力系数要大。由图 5-73 可以看出，NACA 0018 是 4 种翼型中扭矩系数最小的，NACA 4412 翼型是 4 种翼型中扭矩系数最大的。由图 5-74 看出，来流风速在 4~25m/s 下，NACA 4412 升阻比最高，NACA 0018 升阻比最低。

NACA 4412 气动性能较其他翼型要好，4 种翼型中气动性能最差的是 NACA 0018，因此选择 NACA 4412 翼型用于叶片的制造。

#### (2) NACA 4412 翼型周围流场分析。

显示压力分布和速度分布。

操作：Display→Contour...

Contours 面板打开，在 Options 下加选 Filled；在 Contours Of 下拉列表框中依次选择 Pressure 和 Velocity，结果如图 5-75 和图 5-76 所示。

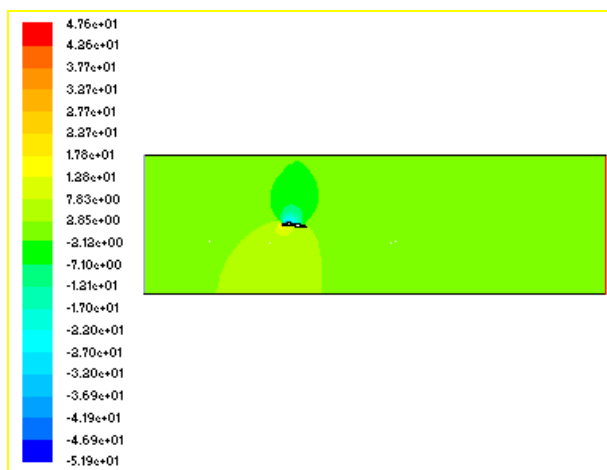


图 5-75 压力分布图

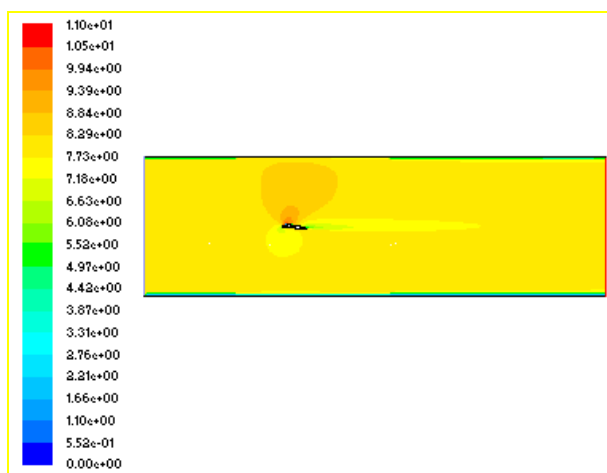


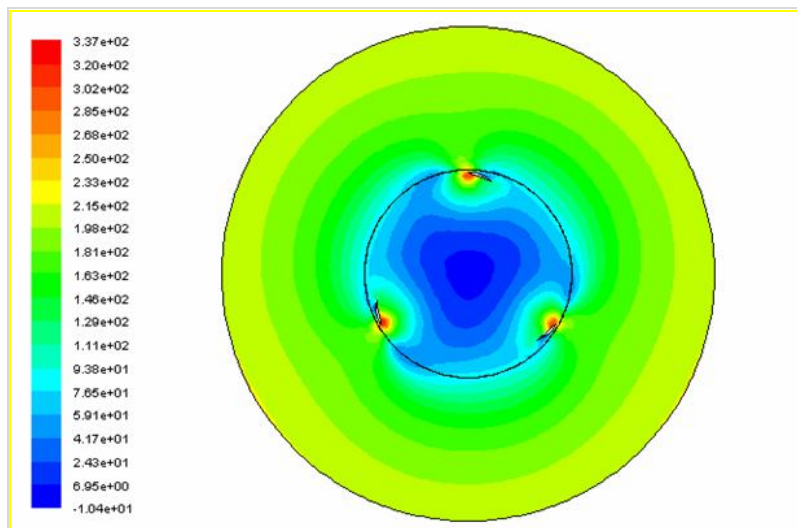
图 5-76 速度分布图

由图 5-75 可以看出,在翼型上下表面有两个等压环,其中下面的等压环值要大于上面的等压环值。由图 5-76 可以看出,在翼型周围并无失速现象产生,即翼型周围无分离涡出现,说明其气动性能较好。

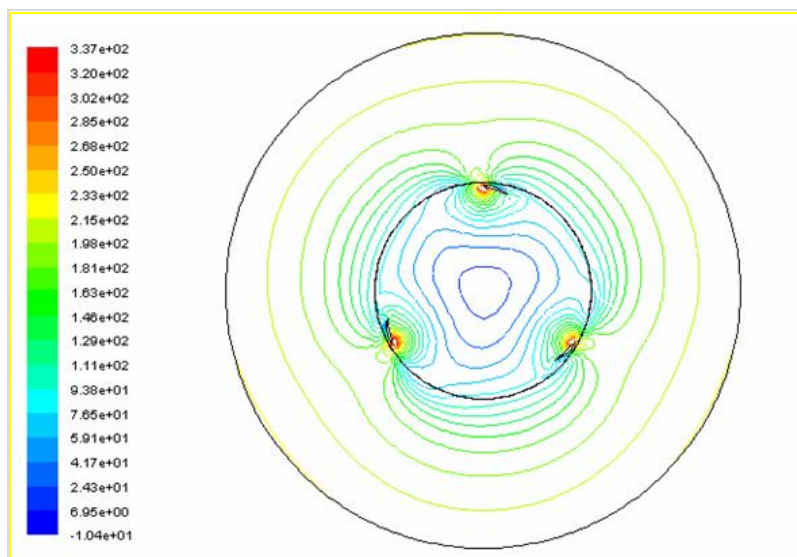
## 2. 垂直轴风力机模拟分析

### (1) 显示压力分布图。

在 Contours Of 下拉列表框中选择 Pressure, 结构如图 5-77 所示。



(a) 云图



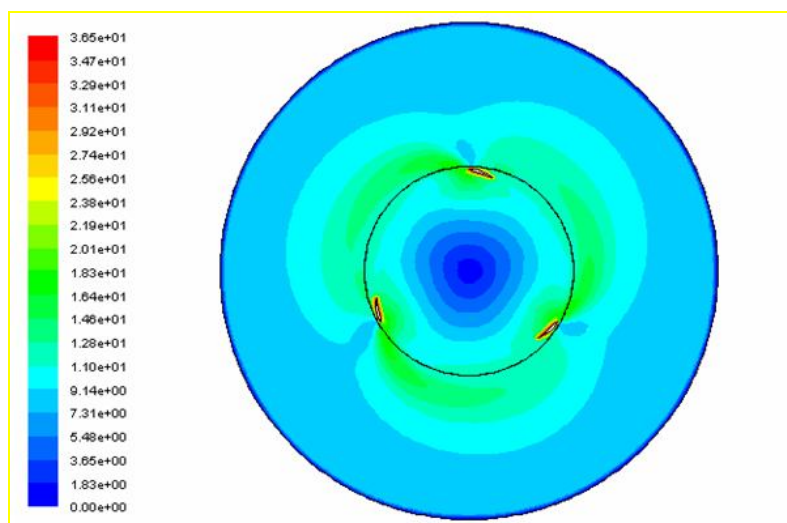
(b) 等值线图

图 5-77 压力分布图

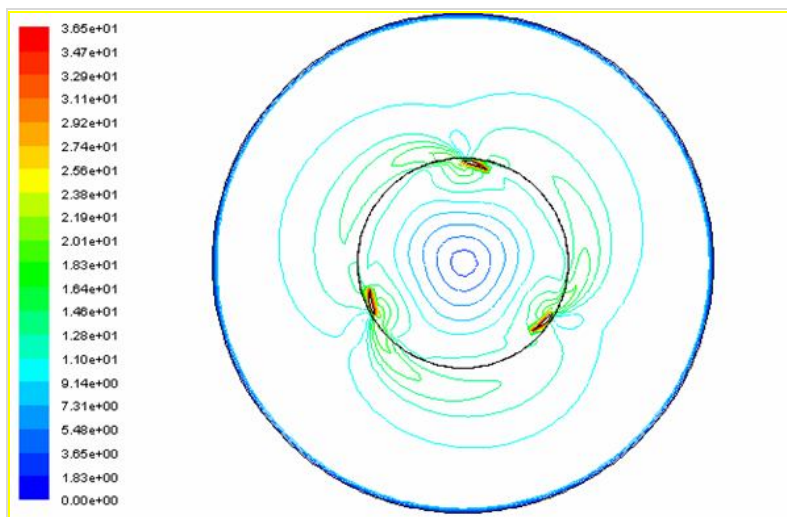
由图 5-77 可以看出,叶片处压力波动较大。

### (2) 显示速度分布图。

在 Contours Of 下拉列表框中选择 Velocity, 结构如图 5-78 所示。



(a) 云图



(b) 等值线图

图 5-78 速度分布图

由图 5-78 可以看出，垂直轴风力机叶片所在的圆域速度较大，向区域内外速度逐渐减小，中心处速度为 0。叶片所在的圆域速度变化较大。

(3) 显示速度矢量图。

操作：Display→Vectors...

打开 Vectors 设置对话框，如图 5-79 所示。

在 Style 下拉列表框中选择 arrow（箭头）；在 Scale 项，将比例因数增加到 3；增大 Skip 值为 3；单击 Display 按钮，结果如图 5-80 所示。

通过分析可以得知：

- 比较了 NACA 0012、NACA0018、NACA 4412、NACA 23012 在不同工况下的升力系数、阻力系数、扭矩系数，发现 NACA 4412 翼型在所选择的翼型里升力系数较大，阻力系数较低，扭矩系数较大，升阻比最大，气动性能最好。最终选定 NACA 4412 翼型用于叶片的制造。

- 用 MRF 模型计算模拟三叶片垂直轴风力机，对风力机周围区域的流场有了定性的了解，为今后进一步研究和改善风力机的设计打下了基础。

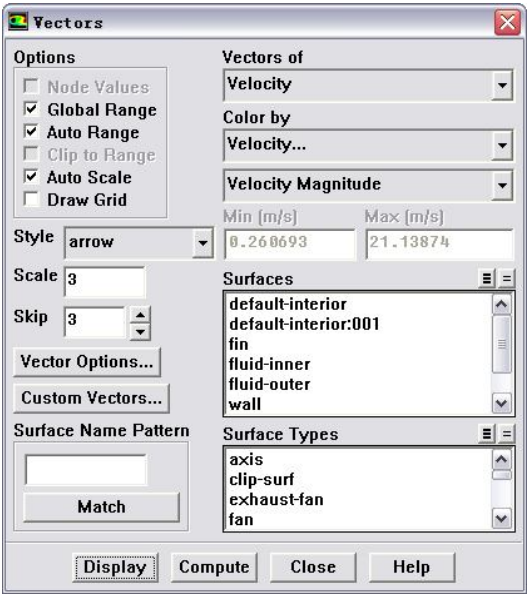


图 5-79 矢量设置对话框

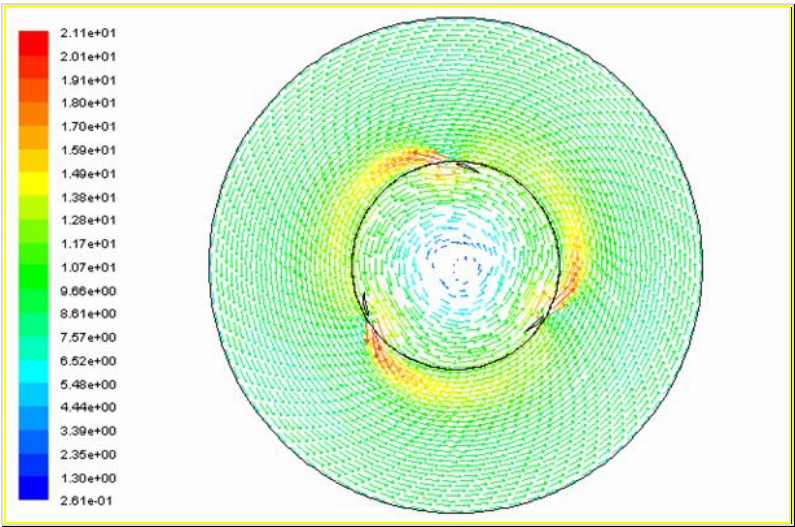


图 5-80 速度矢量图

5.4 本章小结

流体机械学科的研究对象包括压缩机、鼓风机、通风机、泵等设备的逆压流动系统，均以空气、水、各种化工气体介质或液体介质作为主要工质。在实际工程中这类应用广泛，本章通过离心泵和风机的实例来讲解如何应用 FLUENT 进行分析，让读者熟悉该类分析的技术。