

# 三元离心叶轮内部紊流流场的数值分析

西安交通大学 张谋进\* \* 谷传纲 苗永森

**【摘要】** 应用  $k-\epsilon$  紊流模型及非交错网格 SIMPLE 方法, 求解了三维时均  $N-S$  方程。对一三元离心式叶轮在设计工况下的内部流场进行了数值分析, 并将计算结果与实验结果进行了对比, 两者相符较好。本文的数值分析能够反映出三元离心叶轮内部的实际流动情况, 特别是在叶轮出口附近射流-尾流这一特殊现象的形式。

主题词: 紊流 叶轮机械 数值计算

分类号: V232.4 O357.5

## 1 控制方程、计算区域及边界条件

由于叶轮内部流动有很强的紊流及二次流作用, 且叶道的几何形状比较复杂, 特别是三元离心叶轮, 使用“两类相对流面”理论以及有粘-无粘迭代方法进行计算困难较大, 且计算与实验结果有一定的差距, 特别是在描述叶轮出口附近射流-尾流结构的形成与发展方面。因此用解三维  $N-S$  方程的方法来分析叶轮内部的紊流流场是十分必要的<sup>[1]</sup>。本文应用  $k-\epsilon$  紊流模型及非交错网格 SIMPLE 方法, 对一三元离心叶轮在设计工况下运行时的内部流场进行了数值分析, 并与文献[2]的测量结果进行了对比。由于实验是在转速  $500\text{r/min}$  及最大相对马赫数为 0.04 的条件下进行的<sup>[2]</sup>, 因此按不可压流动计算。

假定叶轮内部流动是定常的,  $N-S$  方程及  $k-\epsilon$  紊流模型方程均可表达为任一输运量  $\Phi$  的对流-扩散形式。

$$\text{div}[\rho \vec{V} \Phi - \Gamma \nabla \Phi] = S^\Phi \quad (1)$$

源项  $S^\Phi$  的表达式见文献[1]。按控制体法将方程(1)离散, 其离散形式为:

$$A_P \Phi_P = \sum_{i \in \text{NEUSUD}} A_i \Phi_i + J(S^\Phi_P + S^\Phi_i) \Delta \xi \Delta \eta \Delta \tau \quad (2)$$

有关方程的离散及推导等详见文献[1]。方程(2)可用迭代法求解, 本文采用文献[3]提出的三维强隐式方法(TSIP)以加快收敛速度。在流场计算中采用非交错网格 SIMPLE 方法, 以使方程推导简单、编程容易及减少计算时间<sup>[1,4]</sup>。

实验叶轮是一出口角为  $90^\circ$ , 叶片数为 19 片的三元离心叶轮。叶轮的几何造型及 5 个测量截面的位置详见文献[5]。

叶轮进口质量流量为  $2.44\text{kg/s}$ , 转速  $500\text{r/min}$ , 处于设计运行工况。在计算中, 在叶轮进出口处均加上一延伸区, 延伸区按叶道几何形状外推得到, 计算域出口处半径与叶轮出口半径之比为 1.15, 进口延伸区轴向长度为叶轮轴向长度的一半。在跨叶片方向布置 11 个计算节点,

在跨盘盖方向布置 15 个节点;沿流动方向布置 53 个节点,其中 33 个节点在叶道区中。在固壁附近网格线进行了适当加密。进口边界处假定绝对速度是轴向,均匀的。紊动能及耗散率按经验公式给出;出口参数按局部单向化外推得到;对固壁给定无滑移条件,近壁区采用壁面函数法;而对周期边界则按周期条件处理。数值计算用作者研制的通用计算软件 TDFFCP<sup>[1]</sup>,在 IBM 486 微机上计算约用时 5 小时。

## 2 计算结果及分析

文献[2]将所测得的速度分量按垂直于测量面及平行于测量面的方向画出,垂直于测量面的速度分量画成等值线形式;平行于测量面的速度分量画成矢量形式,本文也按这种方式处理计算结果。本文只列出第 2、4 和 5 截面的测量与计算值。

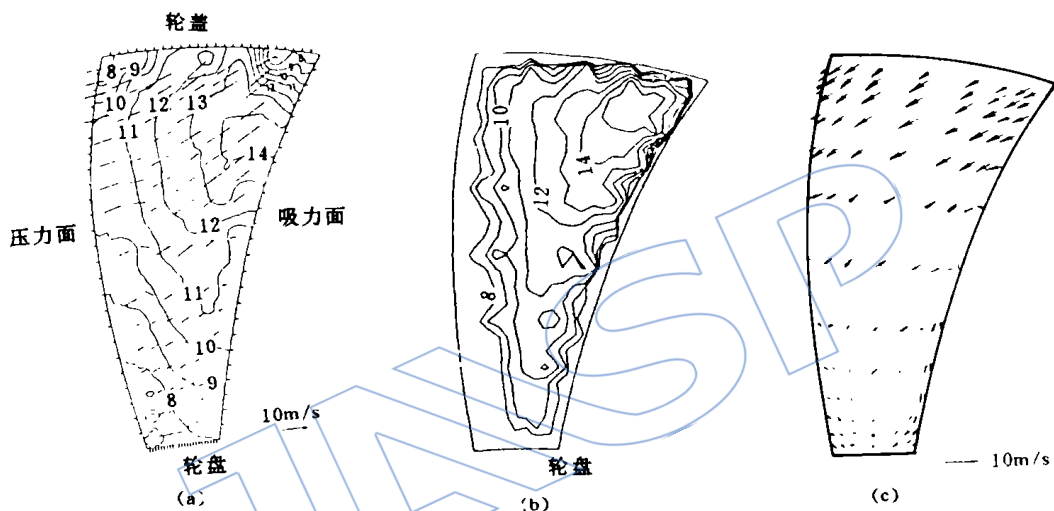


图 1 第 2 截面上(a)速度测量值(b)垂直于测量面的速度计算值(c)平行于测量面的速度计算值

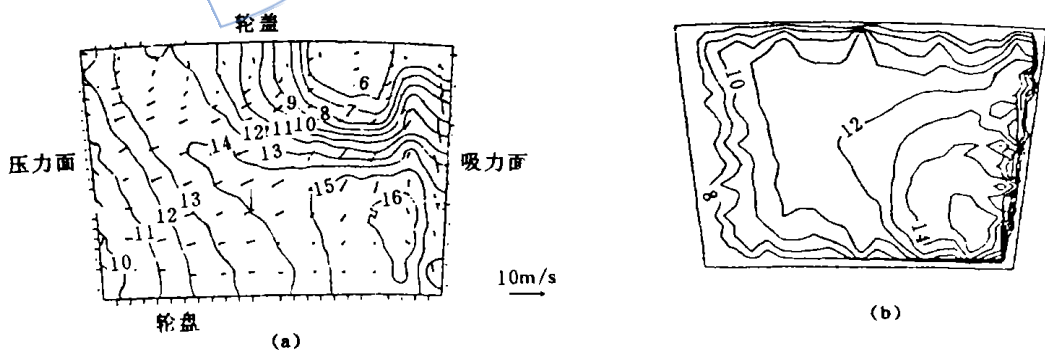


图 2 第 4 截面上(a)速度测量值(b)垂直于测量面的速度计算值

在第 2 截面上,在垂直于测量面的方向上,速度计算值与测量值吻合较好,高速区均在叶片吸力面-轮盖角区附近,见图 1(a)和(b);在平行于测量面的方向上,速度计算值与测量值基本吻合。在输盘一侧,文献[2]未给出压力边和吸力边附近的速度测量值,计算则显示出在这一区域气流有了旋转,见图 1(c)。

在第 4 截面上, 垂直于测量面的速度其高速区已由第 2 截面上的吸力边- 轮盖角区移至吸力边- 轮盘角区, 而在吸力边- 轮盖角区有一低速区形成, 也即形成了尾流区, 见图 2(a)。计算值也显示出高速区由吸力边- 轮盖角区向吸力边- 轮盘角区的移动, 在吸力边- 轮盖角区也有低速区的形成, 但计算值不如测量值明显, 见图 2(b)。

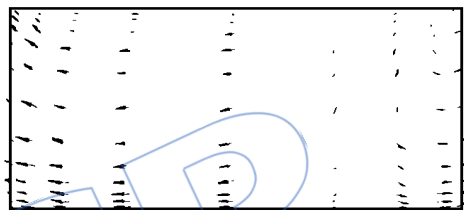
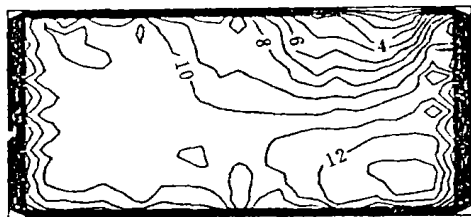
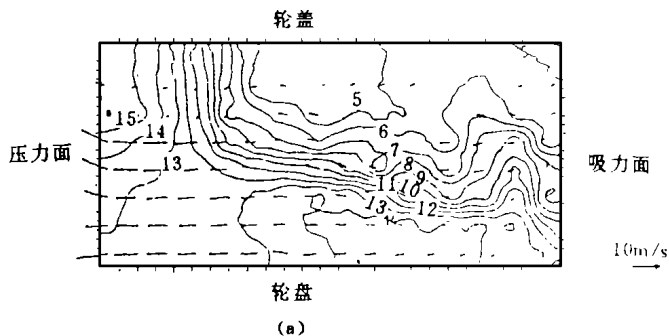


图 3 第 5 截面上(a)速度测量值(b)垂直于测量面的速度计算值(c)平行可测量面的速度计算值

在第 5 截面上, 尾流区更加明显, 且所占区域也很大, 见图 3(a)。计算值也显示出了这一明显变化, 计算所得的低速区所占的区域也很大, 较第 4 截面的计算值有很大的变化, 另外测量及计算均未发现此时有回流现象出现, 见图 3(b)。平行于测量面的速度计算值与测量值趋势一致, 见图 3(c)。

本文的数值研究, 反映了叶轮内部的实际流动情况, 特别是在出口附近射流- 尾流结构的形成。尽管没有分离现象, 射流- 尾流结构也会出现。

## 参 考 文 献

- 1 张谋进. 粘性内流的 SIMPLE 方法及可压缩性影响的数值与实验研究: [学位论文]. 西安交通大学博士学位论文, 1993
- 2 Farge T Z, Johnson M W. The Effect of Backswept Blading on the Flow in a Centrifugal Compressor Impeller. ASME, 1990: 90- GT- 231
- 3 张谋进, 谷传纲, 苗永森. 三维扭曲叶道贴体网格生成的多网格—强隐式方法. 西安交通大学学报, 1993, 27(1): 7- 12
- 4 Rhie C M, Chow W L. Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation. J. of AIAA, 1983, 22(1): 1525- 1532
- 5 Johnson M W, Moore J. The Development of Wake Flow in a Centrifugal Impeller. J. of Engineering for Power, 1980, 102: 382- 390

(责任编辑 魏星禄)