

粒子分离器气动特性数值研究

北京航空航天大学 林国华* * 袁修干
中航总机载设备局 杨燕生

【摘要】 本文利用张量分析建立了三维贴体坐标系上的通用输运方程;采用贴体网格计算了粒子分离器二相流的三维流场;建立了三维的粒子运动轨迹微分方程,理论上分析了粒子分离器结构设计对其性能的影响,与试验结果吻合较好。

主题词: 粒子 分离器 三维流动 数值模拟
分类号: V 231.3

1 计算模型及方法

目前,直升机粒子分离器普遍趋于采用惯性粒子分离器,组成它的主要元件是涡旋管(如图 1),它是利用粒子本身的惯性从气流中分离出来^[1]。涡旋管内的流体流动是复杂型面内的三维流动,本文将采用贴体网格,模拟涡旋管内二相流的三维流场,并建立三维的粒子轨迹方程,对涡旋管的主要性能参数:分离效率和压力损失进行数值分析。

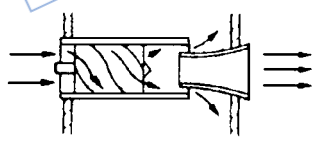


图 1 涡旋管原理图

在气、粒二相流中,由于微粒浓度甚小,微粒间的相互作用力几乎可以忽略;微粒动力学主要是由气体与微粒的相互作用,以及微粒与边界碰撞决定的;而且流场也不会因为微粒的存在而受影响。要计算微粒轨迹,先必须完成涡旋管内流场的计算。

所要计算的物理域是螺旋形的三维区域,为了避免在边界条件上的近似处理,本文采用曲线坐标系,使该坐标系下计算域的边界与坐标系贴合。针对计算模型的结构特点,本文的网格生成采用如下方式:先在沿程的 $\zeta - \eta$ 平面构筑二维的贴体平面网格,然后叠加生成计算所用的三维贴体网格(见图 2)。平面二维的贴体网格生成采用 TTM 方法^[2]。

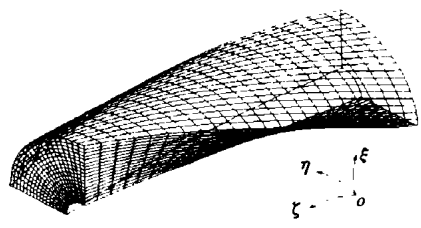


图 2 曲线坐标系下的三维贴体网格($\omega = \pi/2$)

在笛卡尔直角坐标系,三维通用输运方程的矢量形式为:

$$\nabla \cdot (\rho^{\zeta} V^{\Phi}) - \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi} \text{grad } \Phi) = S^{\Phi}$$

各变量含义见文献[3]。本文利用张量分析及矢量理论,推导了曲线坐标系下的通用输运方程,其张量形式为:

1997 年 6 月收稿,1997 年 12 月收到修改稿。

* * 男 31 岁 博士生 北京航空航天大学 505 教研室 100083

$$\frac{\partial}{\partial \alpha^i} \left(\overline{g} \rho \Phi V^i \right) - \frac{\partial}{\partial \alpha^i} \left(\overline{g} \Gamma^{\Phi}_{g^{ij}} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha^j} \right) = \overline{g} S^{\Phi} \quad (1)$$

在 $\xi-\eta-\zeta$ 曲线坐标系下, (1) 式的展开式为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho U \Phi}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho V \Phi}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho W \Phi}{\partial \zeta} \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\frac{\alpha}{g} \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\frac{\beta}{g} \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(-\frac{\gamma}{g} \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \right) + \overline{g} S^{\Phi} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $U = \alpha_1 u + \alpha_2 v + \alpha_3 w$, $V = \beta_1 u + \beta_2 v + \beta_3 w$, $W = \gamma_1 u + \gamma_2 v + \gamma_3 w$

$$\alpha_1 = z \eta \eta - z \eta \gamma \zeta, \quad \alpha_2 = x \zeta \eta - x \eta \zeta, \quad \alpha_3 = y \zeta \eta - y \eta \zeta$$

$$\beta_1 = z \xi \gamma \zeta - z \gamma \xi, \quad \beta_2 = x \xi \zeta - x \zeta \xi, \quad \beta_3 = y \xi \zeta - y \zeta \xi$$

$$\gamma_1 = z \eta \gamma \xi - z \xi \gamma \eta, \quad \gamma_2 = x \eta \zeta - x \zeta \eta, \quad \gamma_3 = y \eta \zeta - y \zeta \eta$$

$$\alpha = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3 + \alpha_1 \gamma_1 + \alpha_2 \gamma_2 + \alpha_3 \gamma_3$$

$$\beta = \beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 + \alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3 + \beta_1 \gamma_1 + \beta_2 \gamma_2 + \beta_3 \gamma_3$$

$$\gamma = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 + \gamma_1 \beta_1 + \gamma_2 \beta_2 + \gamma_3 \beta_3 + \alpha_1 \gamma_1 + \alpha_2 \gamma_2 + \alpha_3 \gamma_3$$

在计算域上采用交错网格系统^[3], 将式(2)对控制容积积分, 并采用 Spalding 等人提出的混合差分格式^[3], (2) 式的最终离散方程可以表示为:

$$A_P \Phi_P = A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + A_H \Phi_H + A_L \Phi_L + B \quad (3)$$

式中: A 和 B 为离散方程中的系数和常数项, Φ 为通用因变量, P, E, W, N, S, H, L 为主节点及东西北南上下节点, 对代数方程组(3)采用 TDMA 法进行求解。

求出了速度场后, 为便于建立微粒轨迹方程和分析涡旋管的性能, 先引入几点假设: (1) 忽略微粒所受的重力; (2) 忽略微粒间的相互碰撞; (3) 微粒近似为球体; (4) 气、微粒二相流相互作用只有粘性力; (5) 不考虑微粒与壁面的碰撞; (6) 微粒与气流以相同速度进入涡旋管; (7) 不考虑微粒对压损的影响。

根据上述假设, 微粒在流场中受到的外力为: $F_{\text{外}} = (1/8) \pi C_{\text{D}} d^2 \rho |v - v_P| (v - v_P)$

在圆柱坐标系中, 微粒的速度表达式为: $\vec{v} = \dot{r} \vec{e}_r + r \dot{\theta} \vec{e}_{\theta} + \dot{z} \vec{e}_z$

对上式求导, 由基矢微商关系式可得加速度表达式: $\vec{a} = (\ddot{r} - r \dot{\theta}^2) \vec{e}_r + (r \ddot{\theta} - 2 \dot{r} \dot{\theta}) \vec{e}_{\theta} + \ddot{z} \vec{e}_z$ 则在圆柱坐标系中, 微粒的轨迹方程为:

$$\begin{cases} d^2 r / dt^2 = F_r \cdot (V_r - dr/dt) + r(d\theta/dt)^2 \\ r(d^2 \theta / dt^2) = F_{\theta} \cdot (V_{\theta} - r d\theta/dt) - 2(dr/dt)(d\theta/dt) \\ d^2 z / dt^2 = F_z \cdot (V_z - dz/dt) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_{\varphi} = (3/4)(C_D/d)(\rho/\rho_P)|V_{\varphi} - \Phi| \quad \varphi = r, \theta, z$

在上面求出的流场基础上, 对(4)式采用四阶龙格—库塔法进行求解。

2 算 例

完成了上述方程推导及编程工作后, 本文对某型机粒子分离器涡旋管的三维流场和性能进行了计算。该机发动机最大进气流量为 2.5 kg/s, 粒子分离器共由 492 个涡旋管组成, 每个涡旋管平均最大流量为 5.08 g/s, 涡旋管结构参数为: $r_{\text{in}} = 2 \text{ mm}$, $r_{\text{out}} = 8 \text{ mm}$, $L = 42 \text{ mm}$ (有叶片的轴向长度 28 mm), 见图 3。湍流模型采用 $k-\epsilon$ 双方程模型, 进口条件由经验公式给出; 应用壁面函数法以减少壁面网格的划分; 固壁为无滑移条件。

本文在 $\xi-\eta-\zeta$ 方向共划分了 $17 \times 19 \times 22$ 个控制容积, 分别计算了不同安装角 α (叶片与轴线的夹角, 见图 3) 下的螺旋管的流场。图 2 是本文所生成的螺旋角 ω (叶片沿周向所转过的角度, 见图 3) 为 $\pi/2$ 的三维贴体网格。为了表示螺旋通道内的速度分布, 本文任意选取了两个流面: $\eta=8$ 流面的 $\xi=11$ 流面, 分别给出了这两个流面上的速度矢量图, 见图 4, 结构参数是: 安装角 $\alpha=36^\circ$; 所对应螺旋角 $\omega=0.809\pi$ 。从图 4(a) 及图 5 中可以看出, 由于气流粘性影响, 近壁区

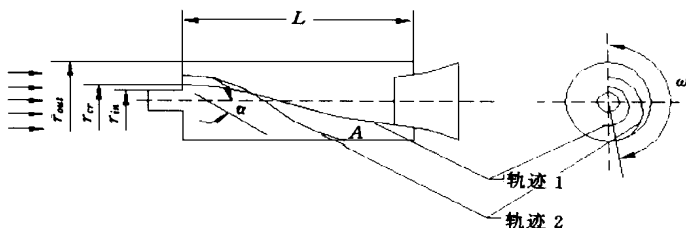


图 3 螺旋管结构参数和粒子轨迹示意图

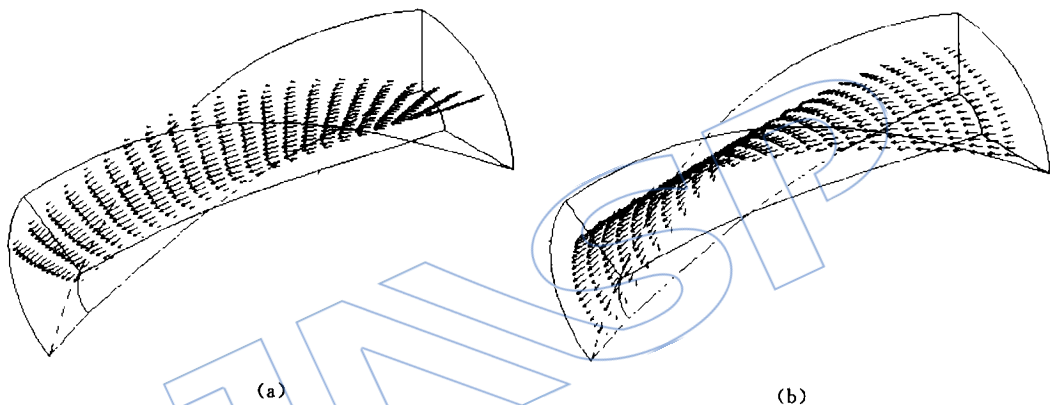


图 4 沿流动方向的速度矢量图($\alpha=36^\circ$; 对应 $\omega=0.809\pi$)

速度梯度大, 流道速度分布呈 n 分之一次方规律; 但在图 4(b) 中, 可以发现另一现象: 速度的峰值不再在螺旋通道的中心流面上, 而是靠近 $\eta=1$ 流面, 与直管内流的速度分布型不一样, 这是因为: 螺旋通道内的流动实际上是强迫旋转流动, 由文献[4]可知, 其内侧($\eta=0$)的流速较外侧($\eta=19$)的流速高, 计算结果与文献试验结果的分布规律相同。同时, 本文还给出安装角 $\alpha=36$ 和 $\alpha=42^\circ$; $\zeta=11$ 横截面(任取)的速度矢量图, 见图 5。从图中可以明显看出: 随着安装角的增大, 切向速度愈来愈大, 也就是离心力场的强度愈来愈大, 这对砂尘的分离是有益的, 从图 6 可能看到, 随着安装角的增大, 分离效率(对应粒子直径 $50 \mu\text{m}$)是不断增加的, 但从图中又能看到, 随着安装角的增大, 损失也是不断增加的, 于是存在折衷问题。数值模拟的目的, 正是为设计提

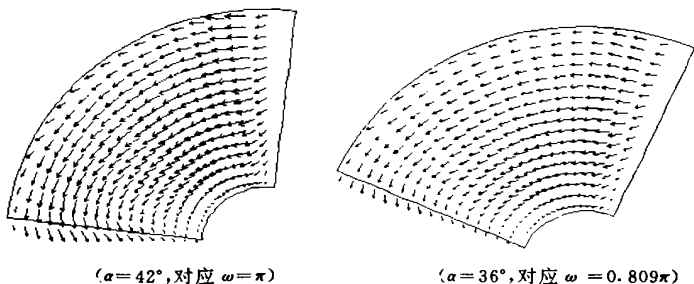


图 5 横截面速度矢量图

供理论依据。本文还计算了不同流量下的压损(图7, 安装角在 $\alpha=42^\circ$), 随着流量增加, 损失是增大的, 这与试验的结果相符, 计算为涡旋管管径的设计提供了依据。

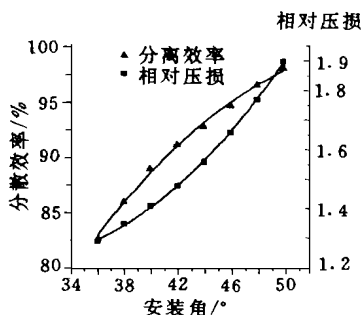


图6 安装角与分离效率及
相对压损关系曲线

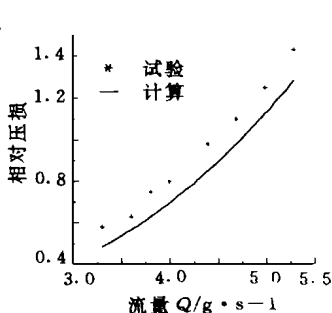


图7 流量与相对压
损关系曲线

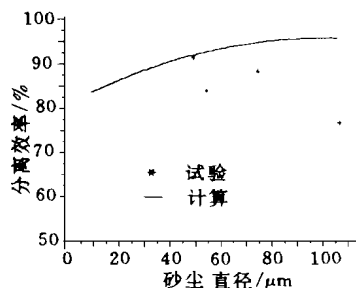


图8 沙尘直径与分离
效率关系曲线

沙尘分离效率的定义: $\eta = (\text{分离出的沙尘质量}) / (\text{进入涡旋管沙尘质量})$, 在计算时, 取沙尘的平均直径, 并认为沙尘与气流以同一速度、均匀分布地进入涡旋管。设存在一临界半径 r_{cr} (见图3), 沙尘在进入涡旋管时, 如果其所处的位置大于 r_{cr} , 则被分离出去; 反之, 则未被分离。则: $\eta = (r_{out}^2 - r_{cr}^2) / (r_{out}^2 - r_{in}^2)$ 。图3给出了粒子的运动轨迹, 轨迹1表示的是在涡旋管进口, 粒子所处的半径等于 r_{cr} ; 若在涡旋管进口, 粒子所处的半径大于 r_{cr} (见轨迹2), 则粒子在A点处已与壁面碰撞, A点以后的轨迹与粒子碰撞时的入射角、涡旋管材料等有极大的关系。本文假定, 粒子碰撞后就沿着壁面流动, 不发生反弹。这样的假设, 对粒径大于 $50 \mu\text{m}$ 的粒子, 有一定的误差, 而对粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 的粒子较符合(见图8)。

3 结束语

(1) 计算了不同安装角的速度场, 计算结果与粘性管流的流动规律是相符的, 计算还得出螺旋形通道流动的特殊性, 即在流动的内外面($\eta=0$ 与 $\eta=19$)间的速度分布是不对称的, 速度峰值偏向于 $\eta=1$ 的流面, 计算结果符合强制旋转流动规律; (2) 计算了涡旋管不同的结构尺寸(安装角)对其性能—分离效率和相对压损的影响, 为涡旋管的优化设计、试验奠定了基础; (3) 计算结果表明本文的算法及编程具有较好的模拟复杂三维粘性流动的能力。

参 考 文 献

- 1 Potts J T JR. Why an Engine Air Particle Separator(EAPS). ASME Paper 90- GT- 297, 1990
- 2 Thompos J F, Warsi Z U A, Mastin C W. Numerical Grid Generation, Foundation and Applications. North- Holland, New York, 1985
- 3 Patankar S V 著, 张政译. 传热与流体流动的数值计算. 北京: 科学出版社, 1984
- 4 顾维藻等. 强化传热. 北京: 科学出版社, 1990

(责任编辑 王震华)

TECHNICAL NOTES

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW FIELD IN AN AIR PARTICLE SEPARATOR

Lin Guohua and Yuan Xiugan

(5th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A general differential equation in oblique curvilinear coordinates has been established according to the tensor analysis and has been used to simulate the 3-D flowfield in a particle separator. Computational grid are set up with the body-fitted coordinates and a $k-\epsilon$ turbulence model is adopted in computation. Special fluid phenomena in a helicoidal pipe have been simulated. The particle trajectory model has also been established and has been used to analyze the performance of the vortex tube. The results are in good agreement with the experiment.

Key Words Particles separation Three dimensional flow Numerical simulation

NUMERICAL ANALYSIS OF COMPRESSOR CASCADE FLOW WITH NOVEL TURBULENCE MODELS

Li Ling and Lu Yajun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

An explicit N-S solver has been written at the option of one of three turbulence models: Standard K- ϵ model is an implicit K- ϵ model coupled with the explicit N-S solver in a novel way which takes account of multiple time scales by adding an extra term to the dissipation equation, and turbulence model based on RNG method which takes account of unbalance effect by adding an extra term to the dissipation equation. The code has been applied to numerical analysis of the flow in the compressor cascade. Three solutions obtained with the three correspondent turbulence models are compared with the experimental results by Flot, R and Papalio, K. It is shown that the results with later two turbulence models become closer to the experimental results.

Key Words Turbulence Viscous flow Numerical simulation Compressor

A CALCULATION OF CROSS-SECTIONAL STIFFNESS OF COMPOSITE HELICOPTER BLADE

Xiang Jinwu and Zhang Xiaogu

(5th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

An approach is presented for calculation of composite helicopter