

文章编号: 1000-8055(2000)02-0215-04

直升机粒子分离器三维两相流场的数值模拟

侯凌云¹ 严传俊²

¹(清华大学 工程力学系燃烧组, 北京 100084)

²(西北工业大学 七系, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文以某型直升机粒子分离器为研究对象, 在三维非正交曲线坐标系下计算湍流分叉流动和砂粒运动, 结合边界条件特殊处理, 采用分块计算来考虑叶片对流场的影响, 首次对有叶片粒子分离器三维两相流动进行了数值模拟。计算结果与实验值吻合较好。

关键词: 粒子; 分离器; 两相; 流动; 数值模拟

中图分类号: V 211.3

文献标识码: A

1 引言

粒子分离器安装在直升机发动机前端, 它有效分离砂粒才能保证发动机正常工作。了解和掌握它们的流动结构和特性, 对设计粒子分离器和提高其性能有极大的作用。从目前国内外粒子分离器数值模拟的现状来看, 所有的计算都局限于二维流场和粒子轨迹计算^[1, 2], 对于有叶片的粒子分离器流场计算还仅限于二维无粘流场, 叶片对流场的影响还没有考虑到^[3]。这些忽略因素必会给粒子分离器的数值模拟带来误差。另外, 粒子分离器具有其非常独特的结构: 环形分叉流路, 内壁型面弯曲大, 内外流路流动状态差异大以及叶片在流道中的存在, 这些都给数值模拟带来相当大的难度。针对上述问题, 本文对粒子分离器进行深入研究, 数值模拟三维湍流有粘分叉流场及三维砂粒运动。

2 控制方程及数值求解

在曲线坐标系 (ξ, η, γ) 下, 三维湍流的基本微分方程以强守恒形式用以下统一形式表示:

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(\rho U \Phi) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V \Phi) + \frac{\partial}{\partial \gamma}(\rho W \Phi) =$$
$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} q_{11} \Phi \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} q_{22} \Phi \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} q_{33} \Phi \right) + S^{\Phi}(\xi, \eta, \gamma) \times$$
$$J + S^{CT} \quad (1)$$

针对粒子分离器这一独特结构, 边界条件有其特殊性, 对于弯曲壁面采用三维非正交曲线坐标系下壁面函数处理; 对于环形分叉流路, 分叉结构视为流场中的堵块处理, 内外流路的出口不仅满足全局质量守恒, 而且还必须满足清除比(清除流流量与主气流流量之比)要求; 在三维环形粒子分离器计算中, 由于旋转 30°, 前后旋转面必须采用周期性边界条件; 在有叶片粒子分离器计算中, 采用分块计算叶片通道流场及叶片后分叉流场。结合上述边界条件, 对控制方程采用有限体积法离散, 交错网格布局, SIMPLEC 算法求解整个流场。

由于粒子浓度属于稀疏悬浮流, 主要考虑气相流场对粒子的作用。对粒子运动的描述采用拉格朗日方法进行, 在曲线坐标系下, 砂粒的运动方程和轨迹方程分别如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_p} (u_g - u_p) \\ \frac{dv_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_p} (v_g - v_p) \\ \frac{dw_p}{dt} &= \frac{1}{\tau_p} (w_g - w_p) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

收稿日期: 1999- 03- 10; 修订日期: 1999- 06- 10

作者简介: 侯凌云(19-), 女, 北京清华大学工程力学系燃烧组, 博士后



$$\left. \begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= u_p \xi_x + v_p \xi_y + w_p \xi_z \\ \frac{d\eta}{dt} &= u_p \eta_x + v_p \eta_y + w_p \eta_z \\ \frac{d\gamma}{dt} &= u_p \gamma_x + v_p \gamma_y + w_p \gamma_z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上述方程中各变量的含义见文献[4]。由于在粒子三维轨迹运动中,砂粒会与叶片及壁面进行反复碰撞,所以粒子轨迹运算中必须考虑碰撞的影响。故本文对三维碰撞采用如下经验公式:

$$\frac{V_2}{V_1} = 1 - 2.03\beta_1 + 3.32\beta_1^2 - 2.24\beta_1^3 + 0.472\beta_1^4 \quad (4a)$$

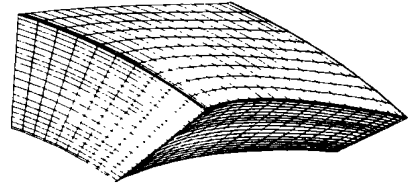
$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = 1 + 0.409\beta_1 - 2.52\beta_1^2 + 2.19\beta_1^3 - 0.531\beta_1^4 \quad (4b)$$

其中, V_1, V_2 为碰撞前后的合速度, β_1, β_2 为碰撞前后合速度与碰撞面的夹角。在实际运算中,反弹后速度 u_2, v_2, w_2 的求解相对复杂,具体见文献[4]。

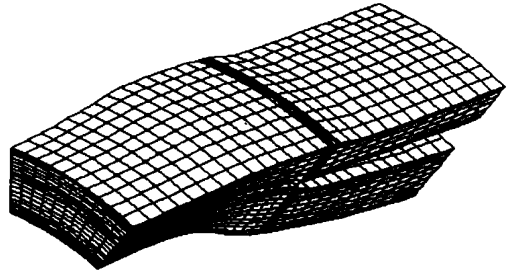
3 结果和讨论

某叶片粒子分离器在进口安置了 12 片预旋叶片,在主流路入口安置了 18 片反旋叶片,在清除流路入口安置了 8 片清除叶片。从预旋叶片、反旋叶片和清除叶片的数目来看,它们各不相同,不可能在流动中形成一个通道,因此在三维计算时无法同时考虑 3 种叶片的影响,鉴于 3 种叶片中预旋叶片对于粒子分离器的分离效率有最大影响,所以在实际计算中仅考虑预旋叶片作用。

为实际研究预旋叶片对整个流场的影响,将流场分为叶片通道流场及叶片后分叉流道流场。在设计状态时进口流量为 5.262 kg/s,清除比为 16%,叶片流道计算采用如图 1(a) 所示的 $21 \times 22 \times 11$ 贴体曲线网格,叶片后分叉流道计算采用如图 1(b) 所示的 $32 \times 22 \times 11$ 贴体曲线网格。图 2 为 $k=6$ 截面两部分速度等值线图,由图 2 可看出,在叶片通道中由于入口无旋流,各截面流动速度较为均匀,但在叶片通道出口,由于叶片形状,形成了旋流效应,造成在清除流道中有一回流区存在,这一位置正是清除叶片安置位置。另一方面,由于实际计算中没有考虑清除叶片的影响,16% 的清除比致使主气流产生较大的下拉作用,导致此段流场出现回流,这正说明清除叶片安放的重要性。

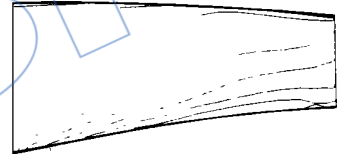


(a) 叶片通道

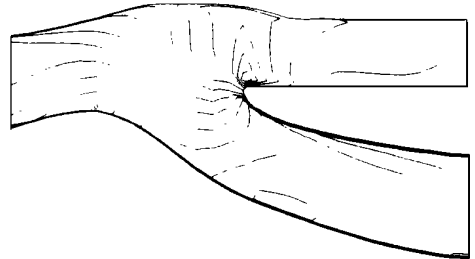


(b) 叶片后分叉流道

图 1 有叶片粒子分离器网格图



(a) 叶片通道

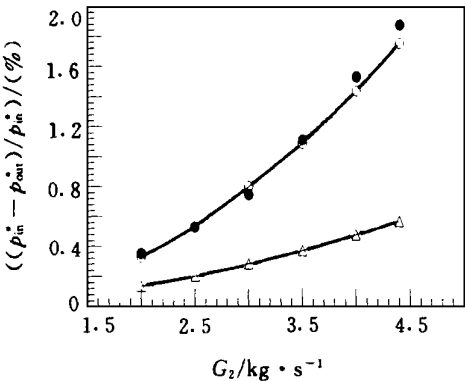


(b) 叶片后分叉流道

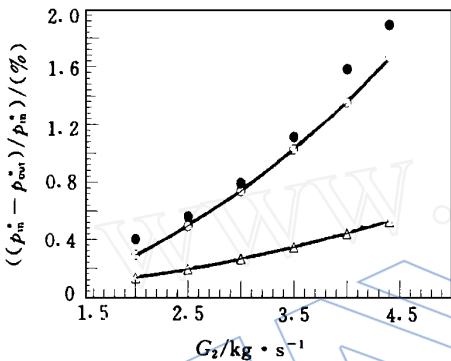
图 2 $k=6$ 截面速度等值线图

图 3 为当清除流分别为 $G_3 = 0.75 \text{ kg/s}$ 和 $G_3 = 0.93 \text{ kg/s}$ 时,总压损失 $(p_{in} - p_{out})/p_{in}$ 随主气流 G_2 的变化。图中,●为主气流总压损失试验值,○为主气流总压损失计算值,△为清除流总压损失计算值。在清除流流量固定不变时,随着主气流流量的增加(即清除比的下降),主气流和清除流总压损失均有所上升。由计算值与试验值对比可看出,两者基本吻合。

在砂粒计算中,为近似考虑各叶片的影响,其

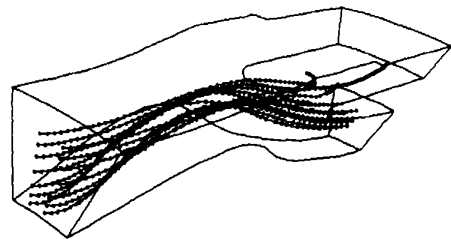


(a) 清除流流量 $G_3=0.75\text{ kg/s}$

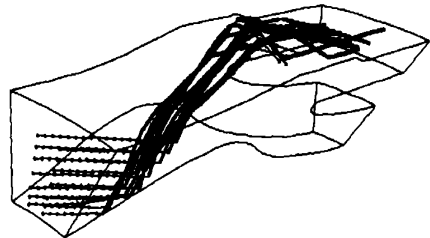


(b) 清除流流量 $G_3=0.93\text{ kg/s}$

图 3 总压损失随主气流流量 G_2 的变化



(a) 细砂粒



(b) 粗砂粒

图 4 砂粒运动轨迹

于密度大于气体,在其随气流流动过程中,其速度比气流要慢,一般取为 $u_p=0.8u_g$,砂粒在入口沿径向大致均匀分布,分成 7 组,共两排分布。从图 4 中可看出,当砂粒较小时,受气流作用大,与壁面基本不碰撞,一部分砂粒即便与壁面相遇,也被壁面所吸附,一些砂粒进入清除流中回流区,会随气流而回转。它们的分离主要是由于旋流的离心作用,大部分砂粒进入清除流道中,一部分由主气流的下拉而进入到主气流中。当砂粒较大时,受气流作用小,与壁面反复碰撞,碰撞后速度在空间方向上发生变化,由壁面结构决定砂粒进入清除流道中。

由两种标准砂粒的构成及各尺寸砂粒的分离,可知在设计状态下, C 规范砂分离效率为 99.5%, A C 粗砂分离效率为 84.5%, 与试验值 ($\eta=98\%$, $\eta_c=85\%$) 相比基本一致。

4 结 论

首次对三维有叶片粒子分离器进行了数值模拟,从中发现,清除叶片有引导清除流进入涡壳,并控制分流器唇口附近的清除流动,缺少它将导致产生较大回流区,预旋叶片所产生的旋流以及弯曲分叉型面有助于砂粒的分离,计算结果为更进一步揭示真实粒子分离器的内部流动机理及开发高性能粒子分离器提供理论依据。

参 考 文 献

1 Zedan M, Hartman P, Mostafa A, Sehra A. Viscous Flow Analysis for Advanced Inlet Particle Separator[R]. AIAA 90-2136

2 Hamed A, Jun Y D, Yeuan J J. Particle Dynamic Simulations in Inlet Separator with an Experimentally Based Bounce Model[J]. J. Propul Power, 1995, 11(2): 230- 235

3 Hamed A. Effects of Particle Characteristics on Trajectories and Blade Impact Patterns[J]. J. Fluid Engrg, 1988, 110: 33- 37

4 侯凌云. 直升机粒子分离器两相流场的数值模拟: [博士论文][D]. 西北工业大学, 1998

(责任编辑 王震华)

Numerical Simulation of 3-D Two-Phase Flowfield in Inlet Particle Separator for Helicopter

Hou L ingyun¹, Yan Chuanjun²

¹(Dept of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(7th Dept Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract An inlet particle separator with vanes in helicopter is investigated. Turbulent bifurcated flow field and particle motion are simulated in the three-dimensional non-orthogonal curvilinear coordinate system, boundary condition is treated specially and the effect of vanes on flow field is considered by the use of zonal method. Predicted results and experimental data are in good agreement.

Key words particles; separators; two-phase; flows; numerical simulation

(The Chinese text of the following abstract is printed in PP212- 214)

The Effect of Coupling on Distortion Transfer in Fan and Compressor

Wang Zhanxue, Tang Diyi, Wang Jianfeng

(7th Dept Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract The mechanism of spool coupling effect on distortion transfer in fan and compressor is analyzed. A quick convergent method is selected to calculate amplitude of the total pressure distortion at exit of low pressure spool in cases of no coupling, complete coupling, and real coupling respectively, then the correcting coefficient of the distortion transfer is obtained. The results show that the distortion transfer characteristics of no coupling differ from those of actual coupling.

Key words coupling; compressor characteristics; transfer