

平面叶栅内固体粒子运动特性的研究

上海交通大学 伊景海
西安交通大学 史峰 徐忠

【摘要】 在利用高速摄影技术获得固体粒子在平面叶栅内运动特性的基础上, 采用 Lagrangian 轨迹法分别在考虑与不考虑边界层影响的情况下, 计算了固体粒子在叶栅内的运动轨迹和速度。通过与实验结果的比较发现: 在利用 Lagrangian 法计算固体粒子的运动特性时, 对于尺寸比较大的粒子可以不考虑边界层的影响, 而对于尺寸比较小的粒子则需考虑边界层的影响。

主题词: 平面叶栅 固体颗粒 运动特性 高速摄影 边界层
分类号: O359.1 V235.113

真实地再现固体粒子在叶栅内的运动过程, 不仅可以准确地预示粒子撞击叶片的部位, 还有助于分析粒子对气体流动的影响规律。鉴于目前对叶栅内固体粒子运动特性的实验研究开展较少, 一些数值计算缺乏实验验证的现状^[1]。本文借助先进的高速摄影技术再现了固体粒子通过平面叶栅的瞬间过程, 并利用 Lagrangian 轨迹法计算了粒子在叶栅内的运动特性, 着重考查了边界层对粒子运动的影响。

1 实验装置与实验结果

实验是在特制的气固两相流平面叶栅吹风实验风洞上完成的。使用的高速摄影机为 Nac E-10 型旋转棱镜式高速摄影机, 其拍摄速度为 300~4000 F/s, 拍摄到的胶片送至 Movies Model 100 型胶片运动分析仪进行分析处理。拍摄时高速摄影机与实验风洞的布置以及叶栅的几何参数详见文献[2]。实验粒子的特性参数以及拍摄不同粒度的粒子时高速摄影机的拍摄速度和放大倍数列于表 1 中。

表 1 粒子的物性参数与拍摄技术参数

粒子材料	粒度范围(μm)	质量密度(kg/m^3)	拍摄速度(F/s)	摄影放大倍数
钠阳离子树脂	200~500	1340	3500	0.20
铝粉	50~100	2700	5000	0.86

结合在胶片运动分析仪上得到的结果, 讨论在叶栅进口气流速度 $U_g = 10 \text{ m/s}$, 冲角 $i = -64^\circ$, 气体雷诺数 $Re = 1.04 \times 10^5$ 时, 粒子的初始位置对粒子在叶栅内运动特性的影响。

图 1、图 2 是两个仅仅初始位置不同的铝粉粒子在叶片表面附近的运动情况。它们的平均粒径均为 $80 \mu\text{m}$ 。其中 03 号粒子(图中以 $\cdot$ 表示)距离叶片表面比较近, 04 号粒子(图中以 $\circ$ 表示)距离叶片表面稍远一些。在运动过程中, 它们的运动轨迹都几乎与叶片表面相平行, 但从它

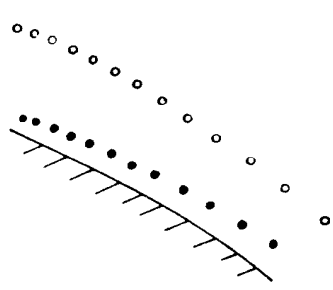


图 1 初始位置对粒子运动轨迹的影响

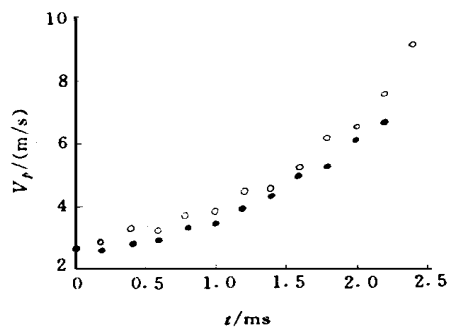


图 2 初始位置对粒子运动速度的影响

们速度变化曲线来看, 04 号粒子的速度升高较快。这一方面说明了粒子的初始位置不同将导致粒子在叶栅内的运动轨迹和速度有较大差异; 另一方面表明, 对于尺寸较小的粒子, 当其在叶片表面附近运动时, 气体粘性对其运动特性的影响较大, 计算时应考虑气体粘性的影响。

2 粒子运动方程及计算结果

在研究稀薄气固两相流中固体粒子的运动特性时, 可以忽略粒子之间的相互作用, 这一假设已为高速摄影实验所证实^[2], 在粒子所受的气动力中只考虑气体与粒子的速度差所产生的粘性阻力。根据牛顿第二定律可得质量为 m_p 的球状粒子的运动方程:

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = G(\vec{U}_g - \vec{U}_p), \quad G = \frac{1}{2} \rho C_D A_p |\vec{U}_g - \vec{U}_p| \quad (1)$$

其中 $\vec{U}_p$ 、 m_p 为粒子的运动速度和质量; C_D 、 A_p 为球状粒子的阻力系数和迎风面积; $\vec{U}_g$ 为气体的流动速度。

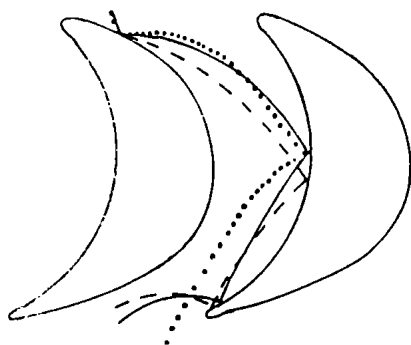
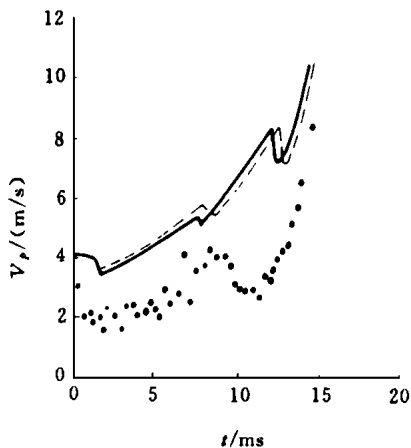
在积分方程(1), 计算粒子的运动特性时, 气体流场是在无粒子的条件下先计算出来的。本文采用流函数法计算平面叶栅内的理想流场, 利用粘性与非粘性迭代技术计算考虑粘性影响的流场。粒子运动特性的计算, 是以初始条件开始的, 因此粒子的初始位置和速度给定非常重要。跟踪粒子所遇到的另一个问题是颗粒碰撞后恢复系数的确定, 对这个问题的处理方法不同, 将导致粒子碰撞后的运动不同。文中所计算的 3 个粒子的初始参数均取测量值, 反弹后粒子运动速度采用文献[2]中给出的钠阳离子交换树脂与不锈钢相碰撞的反弹关系式计算。本文所计算的粒子的初始参数均列于表 2 中。

表 2 粒子进入叶栅的初始运动参数

粒径(μm)	300、500
x 坐标(mm)	- 1.16
y 坐标(mm)	3.87
U_x (m/s)	3.58
U_y (m/s)	1.75

图 3、图 4 为粒径 $d_p = 300 \mu\text{m}$ 的粒子, 在考虑与不考虑边界层影响的运动轨迹和速度的计算值与实验值的比较情况(图中·实验值, - 考虑边界层, -- 不考虑边界层)。在不考虑边界层影响时, 粒子运动轨迹和速度的计算值均与实验值相差较大; 考虑边界层影响后, 粒子运动轨迹的计算结果与实验结果的吻合程度明显改善, 粒子运动速度的计算值与实验值的吻合程度也有所改善。

在考虑与不考虑边界层影响的条件下, 粒径 $d_p = 500 \mu\text{m}$ 的粒子运动特性的计算值与实验值的比较(略)。在不考虑边界层影响时, 粒子运动轨迹的计算值与实验值吻合的较好; 考虑边界影响后, 计算值与实验值的吻合程度有所改善。对于粒子的运动速度, 在考虑与不考虑边

图 3 $d_p = 300 \mu\text{m}$ 粒子运动轨迹的计算与实验比较图 4 $d_p = 300 \mu\text{m}$ 粒子运动速度的计算与实验比较

界层的影响时, 计算值与实验值的吻合均比较好。

由图 3 可以察到, 不考虑边界层影响时, 粒径较小的粒子的运动轨迹是偏向气体流动方向。造成这一现象的原因是由于在理想流场中, 叶片表面上的气流速度不等于零, 当粒子运动到叶片表面附近或粒子与叶片相碰撞反弹后, 粒子受气流的影响比实际情况要大得多, 从而导致粒子的运动轨迹偏向气体流动方向。这个问题同样存在于大粒子的计算中, 但是由于尺寸较大的粒子具有比较大的运动惯性, 气体对它的影响相对小一些, 所以大粒子在理想流场中的计算结果仍能与实验结果吻合的比较好。因此, 在利用 Lagrangian 轨迹法对粒子运动特性进行计算时, 当粒子的尺寸比较小时, 应考虑边界层的影响。

3 结 论

(1) 粒子进入叶栅时的初始位置不同将导致粒子在叶栅内的运动特性不同, 在叶片表面附近活动的小粒子受到气体粘性的影响较大;

(2) 在利用 Lagrangian 轨迹法计算粒子的运动特性时, 对于尺寸较小的粒子应考虑边界层的影响, 而对于尺寸较大的粒子可以不考虑边界层的影响。

参 考 文 献

- 1 Tabakoff W. Review-Turbomachinery Performance Deterioration Exposed to Solid Partides Enviroment. ASME Journal of Fluids Eng ineering, 1984, 106: 125~134
- 2 伊景海. 平面叶栅内气固两相流动的研究: [学位论文]. 西安交通大学博士学位论文, 1993

(责任编辑 魏星禄)

new trainer engine. This study shows that due to short average flight time, a great difference exists between the mission duty cycles of the trainer engine and the design requirements of Engine Structural Integrity Standard (MIL-STD-1783).

Key words Training aircraft Aircraft engines Loading spectrum

A FINITE ELEMENT METHOD FOR COMPUTING DYNAMIC COEFFICIENT OF HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARINGS

Wang Dongwei and Zhu Jun

(*Inst. of Lubrication and Bearings, Xian Jiaotong University, Xian 710049*)

ABSTRACT A finite element method is presented for computing the oil-film dynamic coefficients of hydrodynamic journal bearings. Once the integral equations of the four functions, $\hat{q}_p/\hat{\alpha}_{xc}$, $\hat{q}_p/\hat{\alpha}_{yc}$, $\hat{q}_p/\hat{\alpha}_{xc}$, $\hat{q}_p/\hat{\alpha}_{yc}$, are gotten, their matrix expressions can be obtained immediately. Integrating them over the film domain, we can get the eight oil-film dynamic coefficients. Then it is possible to solve the Reynolds equation only once.

Key words Matrices Hydrodynamic journal bearings Finite element methods

AN INVESTIGATION ON VIBRATION MONITORING TECHNIQUE FOR A TURBOSHAFT ENGINE

Li Xifa

(*First Air Force Research Institute, Beijing 100076*)

ABSTRACT The Vibration characteristics of the turboshaft engine on ground and in flight are considered. According to the distribution of the vibration frequency spectrum, a method is presented to display and record vibration velocity value of the turboshaft engine on ground or in flight. A vibration monitor made of INTEL 51 series 8031 single chip microcomputer has eight channels. Six channels are employed to record vibration signals and the other two channels to measure engine rotating speeds. The system operation performance has been proved by a large amount of measurements on fields and airborne measurements.

Key words Turboshaft engines Vibration Monitoring

A STUDY ON MOTION BEHAVIOURS OF PARTICLES THROUGH TURBINE CASCADE

Yi Jinghai

(*Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)

Shi Feng and Xu Zhong

(*Xi'an Jiaotong University 710049*)

ABSTRACT A high speed camera is used to photograph the motion process of particles through turbine cascade. The effects of particle size and initial position on the particle trajectories and velocities are analyzed. The particle trajectories and velocities are also computed with the Lagrangian method under conditions of flow with and without boundary layer. Comparison between computational and experimental results shows that it is necessary to consider the effect of the boundary layer for the smaller particles, but it is unnecessary for the larger particles when the Lagrangian method is used to compute the motion behaviours of particles.

Key words Plane cascades Solid particles High-speed photography