三维效应对轴流压气机气动稳定性的影响[1)]

曹人靖 周 盛
(北京航空航天大学 动力系)

摘 要 轴流压气机的气动稳定性模型,最初为一维模型,仅适用于描述喘振发作. 对于旋转失速发作,在公开文献中有一些二维模型发表. 本文提出了一类考虑压气机径向扰动对失速影响的新的气动稳定性模型. 计算结果表明压气机的轴向扰动往往随着径向扰动的产生,径向扰动的强度影响压气机的气动稳定性,在叶尖还是叶根首先产生失速与压气机基元叶栅特性密切相关. 本文对轴流压气机二维和三维气动稳定性模型的计算结果进行了对比分析.

关键词 轴流式压缩机; 流动稳定性; 三维
分类号 V 231.3

从压气机产生旋转失速的位置来看,大部分压气机在叶尖流面产生失速团[1, 2],但有的压气机实验表明失速团产生的位置不一定在叶尖,失速团有时在叶根出现. 当压气机进入旋转失速后,压气机所产生的扰动不仅往上游和周向传播,由于扰动本身的三维性,径向扰动的发展及其与周向和轴向扰动的相互作用对旋转失速的发展具有重要影响.

文献[3, 4]提出了一个描述轴流压缩系统动态行为的物理模型. 由于采用流量周向平均假设,该模型对旋转失速的描述就显得不充分. 文献[4]给出了压气机二维气动稳定性模型,建立了考虑压气机前后流场干扰的控制方程. 旋转失速存在强烈的三维性,因此,发展新的压气机气动稳定性模型应该考虑流动的三维性和相应的旋转失速三维性.

本文对提出的轴流压气机三维气动稳定性模型[5]进行了数值分析,并且与文献[4]所提出的轴流压气机二维气动稳定性模型的数值模拟结果进行了对比分析.

1 轴流压气机三维气动稳定性模型

文献[5]提出了轴流压气机三维气动稳定性模型,物理模型如图 1 所示,基本假设见文献[5]. 压气机由上游管道、压气机及下游管道组成;图 2 表示了坐标定义和相应的角度定义,在物理模型和基本假设的条件下,文献[5]所推导的轴流压气机三维气动稳定性模型的特征方程为

$$\left[\left(\frac{2}{|n|}+\mu\frac{\partial}{\partial\tau}+R\frac{\partial}{\partial\theta}+S\frac{\partial}{\partial\eta}\right)\delta\phi=T\delta\phi\right] \tag{1}$$

式中 n——空间谐波数; μ——整个压气机级的惯性参数; τ——时间自变量; θ——周向坐标; η——径向坐标; $\delta\phi$——轴向流动系数扰动.

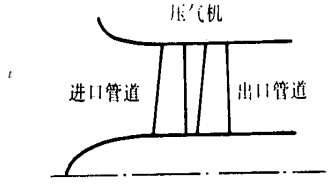


图 1 压气机模型简图

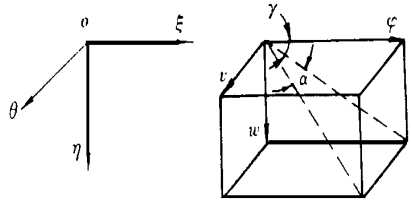


图 2 坐标系及角度定义

$$R=\lambda-\frac{\phi^2\sec^2\alpha_2}{|n|\cos\gamma}\frac{\partial\alpha_2}{\partial\phi}+\frac{\partial\alpha_2}{\partial\alpha_1}\frac{\phi\sin\alpha_1\cos\alpha_1}{|n|\cos\gamma\cos^2\alpha_2}-\frac{\partial\alpha_2}{\partial\alpha_1}\frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_1\sin^2\gamma}{|n|\cos\gamma\cos^2\alpha_2}+\frac{\phi\sin\gamma}{|n|\cos^2\alpha_2}-$$

收稿日期: 1996-09-02 第一作者 男 26 岁 博士生 100083 北京;作者现在汕头大学能源与环境科学研究所
1) 国家自然科学基金资助项目

$$\frac{\tan\alpha_2\sin^2\gamma}{|n|\cos\gamma}-\frac{\partial\psi^{ts}}{\partial\alpha_1}\frac{\cos^2\alpha_1\cos\gamma}{\phi^2|n|}$$

$$S=\lambda-\frac{\phi\sin\gamma\cos\gamma}{|n|\cos^2\alpha_2}+\frac{\partial\psi^{ts}}{\partial\alpha_1}\frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_1\sin\gamma\cos\gamma}{\phi^2|n|}$$

机在　　$T=\dfrac{\partial\psi^{ts}}{\partial\alpha_1}-\dfrac{\partial\alpha_2}{\partial\alpha_1}\cdot$

$$\left(\frac{\phi\cos^2\alpha_1}{|n|\cos^2\alpha_2}-\frac{\partial\alpha_2}{\partial\alpha_1}\frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_1\sin\gamma}{|n|\cos^2\alpha_2}\right)-$$

$$\frac{\partial\psi^{ts}}{\partial\alpha_1}\frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_1}{\phi}-$$

$$\frac{\sin\alpha_1\cos\alpha_1\sin^2\gamma}{\phi^2}+\frac{\partial\psi^{ts}}{\partial\gamma}\sin\gamma\cos\gamma$$

式中　λ——压气机转子的惯性参数; ϕ——轴向流动系数; α——压气机进口气流角; γ——子午流线与轴向的夹角; ψ^{ts}——总-静压升系数; 下标: 1——压气机进口; 2——压气机出口. 方程(1)为描述压气机三维气动稳定性的控制方程.

2　轴流压气机三维气动稳定性模型计算结果

2.1　压气机特性线沿叶高的分布

图3和图4表示了三维计算的叶尖、叶根的

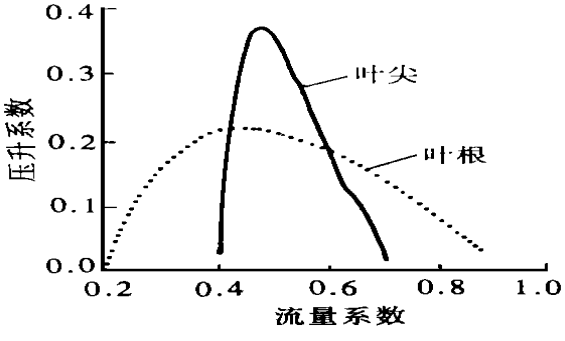


图 3　压气机压升特性与流量系数的关系

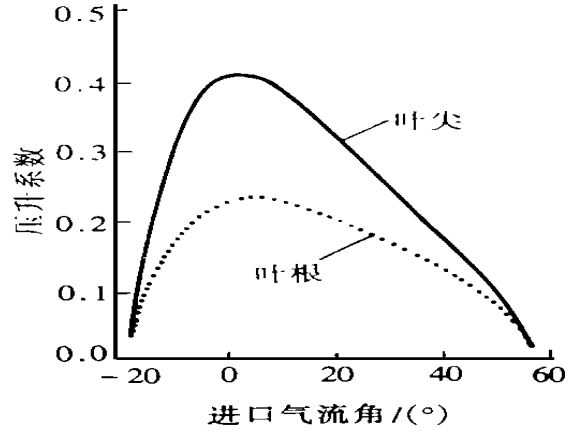


图 4　压气机压升特性与进口气流角的关系

$\dfrac{\partial\psi^{ts}}{\partial\phi}$和$\dfrac{\partial\psi^{ts}}{\partial\alpha}$分布. 其它输入参数: $\delta\alpha_2=0.06\,\delta\alpha_1$; $\dfrac{\partial\psi^{ts}}{\partial\gamma}=0$; $\dfrac{\partial\alpha_2}{\partial\phi}=0$.

2.2　轴向速度扰动沿展向、周向随时间的变化

图 5 表明压气机叶根、中径、叶尖 3 个流面轴向速度扰动沿周向随时间的变化. 图 5(a) 为初始扰动值, 叶根、中径、叶尖的初始扰动值相同. 图 5(b)~(e) 为随着时间的发展, 轴向速度扰动的变化. 从图中可以看出, 叶根处的轴向速度扰动随时间变化不大, 而中径处的扰动不但没有扩展, 还有

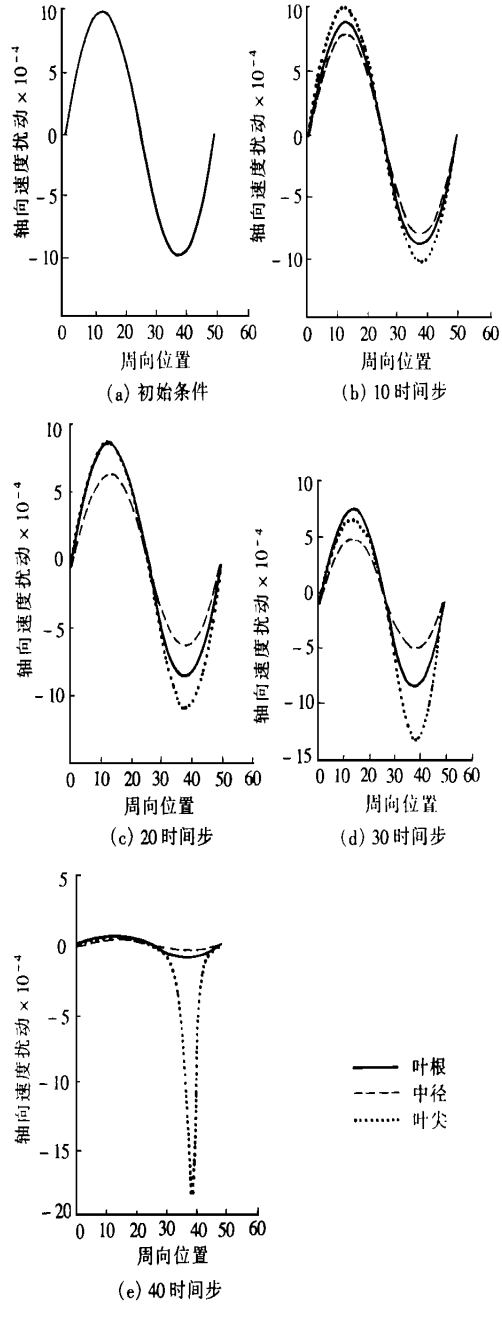


图 5　$\phi_0=0.47$ 时轴向速度扰动的变化

衰减的趋势. 叶尖的扰动开始比较缓慢, 当发展到一定时间, 轴向速度扰动扩展速度增快. 因此, 当节流流量为 0.47 时, 压气机处于旋转失速状态, 而且最先在叶尖产生. 扰动的发展沿叶高表现出不同的敏感性. 叶根、中径对扰动的发展不敏感, 叶尖扰动的发展决定了压气机的失速特性. 因为沿着叶高, 各基元叶栅具有不同的压升与流量和压升与攻角的特性, 叶根处负荷较低, 压升特性较平缓, 叶尖负荷较大, 特性线较陡, 对流量的敏感性增强. 对于压气机 3D(三维)气动稳定性模型, 考虑叶片负荷或环量沿叶高的分布是很重要的.

2.3 二维和三维气动稳定性模型计算结果对比

对轴流压气机气动稳定性模型[5]进行如下简化处理: (1)将 γ 取为零, (2) $\frac{\partial}{\partial\eta}=0$, 可以得到文献[4]中的轴流压气机二维(2D)气动稳定性模型. 对于三维气动稳定性模型, 对于固壁边界条件, 采用两种处理方法. 第一种方法把扰动的径向分量表示为 $f\left(\frac{\partial}{\partial\eta}\delta\phi\right)$ 的形式, 解除壁面约束条件而直接求解 $\delta\phi$ 在时间域和空间域的分布, 该方法定义为 3D Model-A. 另外一种处理方法, 根据周向振动和径向扰动的定义来求解, 在固壁处, 假设 $\frac{\partial}{\partial\eta}\delta\phi\neq0$, 这一类假设条件, 为分析 $\frac{\partial}{\partial\eta}\delta\phi$ 的影响提供依据(定义为 3D Model-B).

从图6可以看出, 随着时间的发展, 2D模型

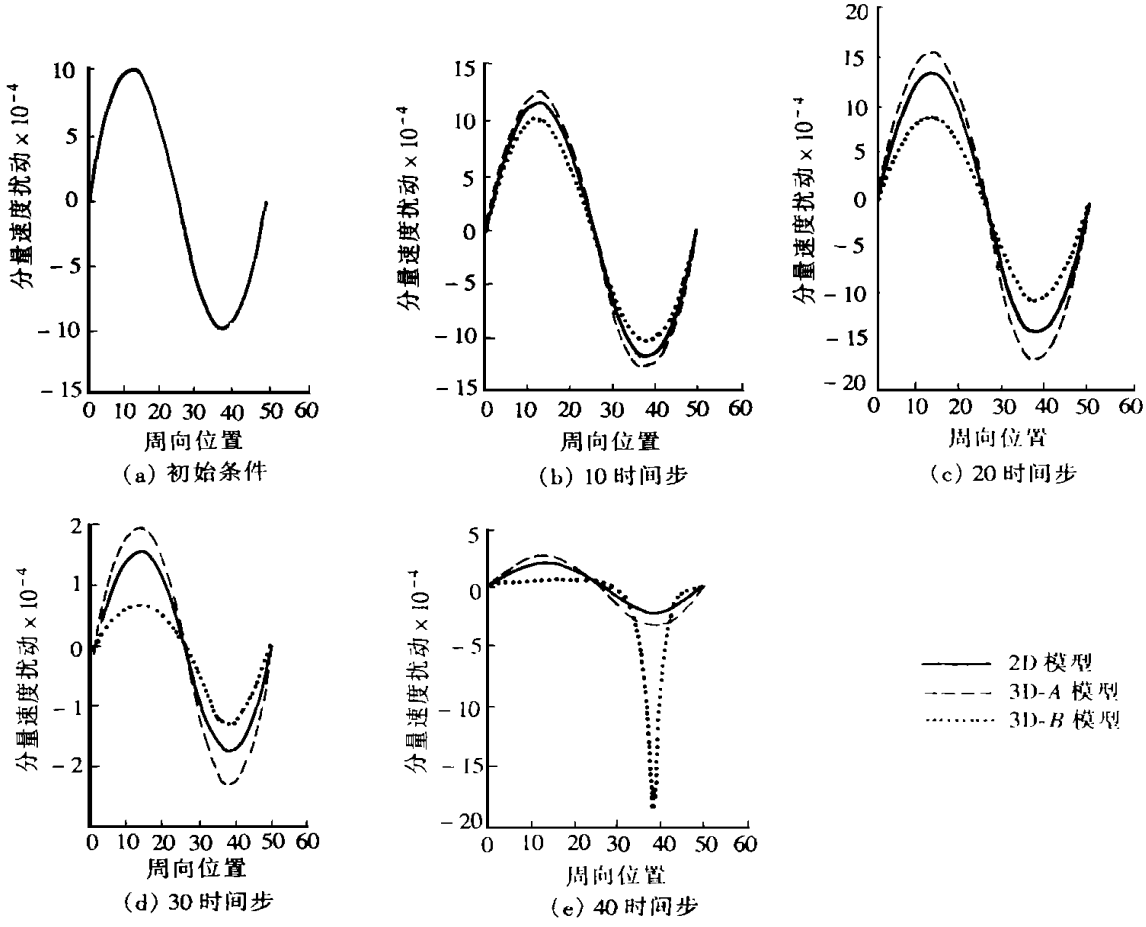


图 6 $\Phi_0=0.47$ 时 2D 和 3D 模型的轴向速度扰动计算结果对比

计算的轴向速度扰动发展的速率比 3D 模型要慢. 从 3D 模型的两种处理方法来看, *B* 方法计算的扰动明显比 *A* 方法的发展得快, 这说明 *B* 方法所描述的压气机气动稳定性比 *A* 方法所描述的要差. 这是因为 *A* 方法在内外机匣处约束了径向扰动的发展, 径向扰动被约束影响了轴向扰动的变化. *B* 方法假设在内外机匣不存在固壁的约束条件, 很显然, 径向扰动在内外机匣的发展变化比 *A* 方法所确定的要快一些, 相应地对轴向速度扰动也造成影响.

3 结 论

1) 压气机在近失速点的扰动具有三维性, 并

且径向扰动对压气机的稳定性有重要的影响. 压气机的气动稳定性与失速波的周向传播、径向扰动的发展有着密切的关系.

2) 轴流压气机的负荷分布对轴流压气机气动稳定性有重要影响. 扰动沿叶高表现出不同的敏感性, 叶根、中径对扰动的发展不太敏感, 叶尖区扰动的发展决定了压气机的失速特性.

3) 通过对轴流压气机 2D 和 3D 气动稳定性模型计算结果的对比分析, 表明随着时间的发展, 二维气动稳定性模型计算的轴向扰动发展速率比三维气动稳定性模型的更慢. 从整体上看, 三维气动稳定性模型计算的轴流压气机气动稳定性范围比二维气动稳定性模型计算的结果相对更为保守, 从物理上看, 则更符合实际情况.

参 考 文 献

1 Day I J, Cumpsty N A. The measurement and interpretation of flow within rotating stall cells in axial compressors. Journal of Mechanics Engineering Sciences, 1978, 20: 101~ 114

2 Day I J. Stall inception in axial flow compressors. ASME 91-GT-86, 1991

3 Greitzer E M, Moore F K. A Theory of post- stall transients in axial compression system. Prat II- Application. Transaction of the ASME Journal of Engineering for Gasine and Power, 1986. 108

4 Lonley J P. A review of non-steady flow models for compressor stability. ASME 93-GT-17, 1993

5 Zhou S, Li X D, Cao R J. From flow fields in turblomachinery to their mathematical models. In: Mei Z Y, Wu Y L, eds. Proceedings of 2nd International Conference of Pump and Fan. Beijing: Petroleum Industry, 1995. 1~ 16

Effects of 3D Flow on Aerodynamic Stability of Axial Flow Compressor

Cao Renjing　Zhou Sheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Jet Propulsion)

Abstract　Concerning the models for discribing aerodynamic stability of axial flow compressor, the original model is one-dimensional, and it is reasonable for the onset of surge only. For the onset of rotating stall, there are just some two-dimensional models at published literatures. A three-dimensional aerodynamic of compressor has been presented in this paper. An aerodynamic stability model concerning radial disturbance of compressor is presented. The calculated results show that the occurrence of radial disturbance is related to the axial velocity disturbance, which has important effect on aerodynamic stability of compressor. The position of onset of stall, in blade tip or hub, is dependent upon the characteristics of blade element. The comparisons of calculated results predicted by 2D and 3D aerodynamic stability model have also been made in this paper.

Key words　axial flow compressor; aerodynamic stability; three-dimension