

轴流压缩系统对非定常扰动响应的新模型*

西北工业大学 吴 虎 廉小纯 陈辅群

【摘要】 对进口非定常扰动条件下多级轴流压气机动态响应及气动稳定性进行了详细的数值分析。采用了目前广泛使用的逐级模型。基于逐级特性,建立了该模型中叶片力和轴功的准定常计算方法并导出了基于特征线和 MacCormack 二步差分相结合的数值计算方法。应用本模型对两个多级轴流压缩系统算例进行了数值预测,其结果与实验结果一致性较好,表明了本文新模型是可行的。

主题词: 轴流式压缩机 动态畸变 响应分析 气动稳定性

分类号: V231.3

1 引 言

飞机高机动飞行姿态、发射机载武器等所造成的发动机进口组合动态畸变流场已成为引起压气机失稳的主要因素之一。此类课题主要以实验研究为基础。随着新机研制的发展,费用十分惊人。80 年代以来,为满足新一代战斗机对其推进系统性能的要求且降低研制费用,国外开展了大量的理论模型研究。美国的 AEDC、AFSC、英国的剑桥大学均开展了此项目的研究。发表的文献大都采用了逐级压缩系统模型^[1-6]。文献[4]的研究表明,该模型不仅适用于分析压缩系统的非定常响应及气动稳定性,而且适用于计算压缩系统特性及整台发动机非设计总性能。据文献[3]报道,将逐级压缩系统模型与闭环控制技术相结合实施主动控制,可明显提高压缩系统稳定工作范围。由此可见,轴流压缩系统的逐级模型具有良好的应用前景。为跟踪国外在该领域的研究进展,本文对逐级模型进行了详细推导,建立了模型中叶片力和轴功准定常算法并给出两个压气机算例结果。

2 逐级模型

在压缩系统逐级模型中,假设:气体为完全气体;流动为一维非定常流动。将多级轴流压气机划分成由若干单级组成的有叶和无叶流道。在有叶流道中,叶片及系统壁面对气流的作用力分别用分布的非定常叶片力 $F(x, t)$, 轴功 $W_s(x, t)$ 及换热量 $Q(x, t)$ 来模拟。在无叶流道中仅考虑沿程损失。压缩系统模型及逐级模型控制体划分如图 1 所示。对微元控制体分别应用流量、动量及能量方程得:

$$\partial(\rho A) / \partial t + \partial \dot{m} / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$\partial \dot{m} / \partial t + \partial(\dot{m} C_x) / \partial x + \partial(p A) / \partial x = F + p \partial A / \partial x \quad (2)$$

$$\partial(E A) / \partial t + \partial H / \partial x = W_s + Q \quad (3)$$

ρ, C_x, P, A 分别表示密度、轴向速度、静压及截面积, $\dot{m}$ 表示质量流量, $H = \dot{m} C_p T_0$, $E = \rho(e + C_x^2/2)$ (T_0 为总温, e 为内能), 考虑到本文将分析进口非定常温度扰动的响应, 程序中采用了通常的变比热关系式。

作为研究第一步, 本文分析中暂略去 Q 且在无叶流道中采用了沿程损失关系式。而在有叶流道中, 几乎在所有公开发表的文献中均未给出 F 及 W_s 的计算细节。本文建立的具体模化算法为: 首先由方程 (2)、(3) 确定定常条件下的 F, W_s , 即是利用各个级的稳态特性计算 F, W_s , 然后在非定常计算中利用前一时刻各个级的非定常参数对 F, W_s 进行修正。即是采用了准定常方法确定 F, W_s 。以完成的两个算例的数值结果与实验结果比较来看, 方法效果较好。

3 数值计算方法

求解方程组 (1) - (3) 采用的方法为特征线差分与 MacCormack 预估-校正法相结合算法。在进、出口边界采用了特征线差分法, 内部流场采用了 MacCormack 差分格式。经详细推导, 方程组 (1) - (3) 可整理成下列形式:

$$\left[2 - a \frac{k}{k} \right] \frac{\partial a}{\partial t} + C_x \left[2 - a \frac{k}{k} \right] \frac{\partial a}{\partial x} - \frac{a}{p} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{a C_x}{p} \frac{\partial p}{\partial x} - a \frac{\partial C_x}{\partial x} = \frac{a C_x}{A} \frac{dA}{dx} \quad (4)$$

$$C_x \frac{\partial C_x}{\partial x} + \frac{\partial C_x}{\partial t} + \frac{a^2}{k p} \frac{\partial p}{\partial x} = a^2 F / (k p A) \quad (5)$$

$$h \frac{\partial a}{\partial t} + C_x h \frac{\partial a}{\partial x} + C_x h \frac{\partial a}{\partial x} + C_x^2 \frac{\partial C_x}{\partial x} - \frac{a^2}{p k} \frac{\partial p}{\partial x} = a^2 W_s / (k p A) \quad (6)$$

方程中 a 为音速, k 为比热比, $\dot{k}$ 为 dk/dA , $\dot{h}$ 为 dh/dA 。

由上方程组导出的特征方程 $\lambda = C_x$, $\lambda = C_x + a$, $\lambda = C_x - a$ 相对应的相容性方程为:

$$h da - a^2 / (k p) dp = (I_3 - I_2 C_x) dt \quad (7)$$

$$dC_x + a / (p k) dp = \{-I_1 + (I_2/a)[(1-k)C_x + a] + I_3(k-1)/a\} dt \quad (8)$$

$$-dC_x + a / (p k) dp = \{-I_1 + (I_2/a)[(1-k)C_x - a] + I_3(k-1)/a\} dt \quad (9)$$

方程中 λ 为 dx/dt , $I_1 = a(C_x/A)(dA/dx)$, $I_2 = a^2 W / (k p A)$, $I_3 = a^2 W_s / (k p A)$ 。在进口, 由特征线理论可知, 只有方程 (9) 可用。故必须给定两个进口边界条件。为便于和实验结果作比较, 算例 1 给定的进口条件为:

$$P_0(t) = 101325 = \text{const}, T_0(t) = 288 + DT \cdot t$$

式中 P_0, T_0 分别为总压总温, DT 为进口温升率。算例 2 给定的进口边界条件为: $T_0(t) = 288 = \text{const}$, $P_0(t)$ 则参照实验数据输入。而对于出口边界有方程 (7)、(8) 两组方程可用, 故需指定一个流动参数。对于算例 1 本文基于文献 [5] 确定出口静压, 算例 2 的出口静压则由实验给定。内部流动参数的 MacCormack 差分算法为:

$$(\rho A)^{(p)}_i = (\rho A)_i - \frac{\Delta t}{\Delta x_{i-1}} (\dot{m}_i - \dot{m}_{i-1}) \quad (10)$$

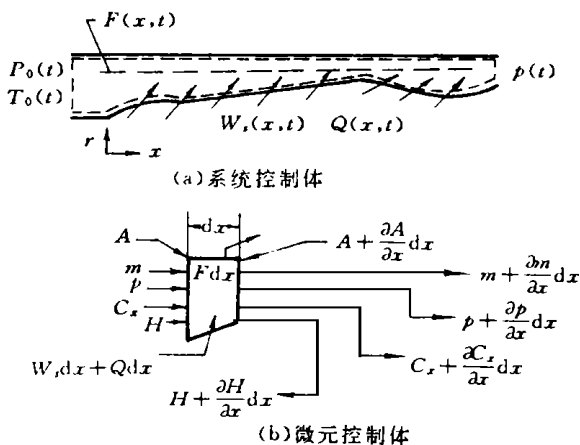


图 1 模拟的物理系统及相应的控制体

$$(\rho A)_i^{(c)} = 0.5 \left[(\rho A)_i + (\rho A)_i^{(p)} - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (m_{i+1}^{(p)} - m_i^{(p)}) \right] \tag{10}$$

$$m_i^{(p)} = m_i - \frac{\Delta t}{\Delta x_{i-1}} (IMP_i - IMP_{i-1}) + F'_{i-1} \Delta t \tag{11}$$

$$m_i^{(c)} = 0.5 \left[m_i + m_i^{(p)} - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (IMP_{i+1}^{(p)} - IMP_i^{(p)}) + F'_i \Delta t \right] \tag{11'}$$

$$(EA)_i^{(p)} = (EA)_i - \frac{\Delta t}{\Delta x_{i-1}} (H_i - H_{i-1}) + W_{s_{i-1}} \Delta t \tag{12}$$

$$(EA)_i^{(c)} = 0.5 \left[(EA)_i + (EA)_i^{(p)} - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (H_{i+1}^{(p)} - H_i^{(p)}) + W_{s_i}^{(p)} \Delta t \right] \tag{12'}$$

方程中 $IMP = mC_x + pA$, $F = F + p \, dA/dx$, 角标 “ p ”、“ c ” 分别表示预估和校正值。差分格式的稳定性条件为:

$$(\Delta t)_{\max} \leq (\Delta x)_{\min} / (a + |C_x|)$$

4 算例及其结果分析

为检验导出的新模型及其算法的可行性, 本文给出了文献[2]、[6]两个轴流压气机算例, 具体结果如图 2~ 6 所示。

图 2 为本文计算的文献[6]中轴流压气机在不同进口温度扰动条件下压气机的动态特性及不稳定点分布 (* 200 K/s, $\triangle$ 300 K/s, ∇ 400 K/s, $\circ$ 500 K/s); 图 3 曲线 1 为本文计算的不同进口温度扰动条件下压缩系统失稳的时间分布; 图 3 中的曲线 2 为文献[6]给出的相应结果。比较表明两者定性符合较好。从图 2、图 3 看出, 随着进口扰动的增强, 压缩系统稳定工作范围减少且失稳出现的时刻也相应提前。图 4 中的曲线 1 为本文得到的压缩系统失稳时, 其进口总温升与其进口总温扰动之间的关联关系; 曲线 2 为文献[6]给出的相应结果。比较表明, 本文结果与文献[6]给出的结果定性一致。图 5(a) 为本文计算出的压气机各个级进、出口静压的时间历程, 图 5(b) 为文献[1]给出的 10 级高压压气机的相应

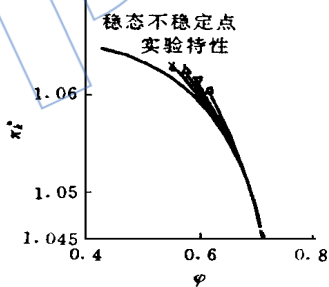


图 2 压缩系统动态特性分布

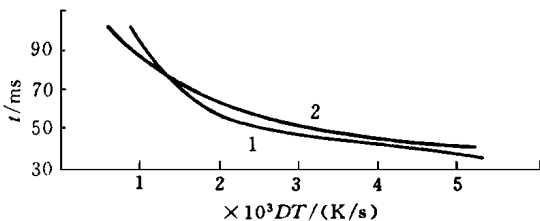


图 3 不同扰动条件下压缩系统失稳的时间分布

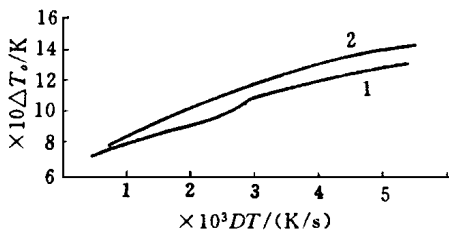


图 4 压缩系统失稳时进口总温升与进口扰动之间的关联关系

结果。文献[1]指出由于压气机第 7 级进口静压增加, 而其出口即是第 8 级进口静压降低, 压气机的第 7 级可能是失稳的首发级。从图 5(a) 可看出, 压气机第 1 级进口静压的增加速率较其出口静压的增加速率快一些。对比图 5(a) 与图 5(b) 表明, 本文算例压气机的第 1 级是可能失稳的首发级。图 6 为本文计算的文献[2]中压气机总压的时间历程及其与实验结果的比较, 对

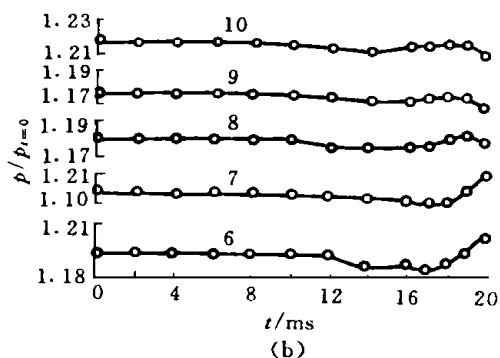
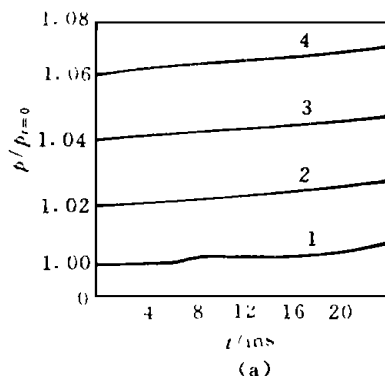


图 5 压缩系统各级进出口静压的时间历程

比结果表明预测值与实验值定性符合;对于压气机中静压的时间历程, 计算结果也显示出与实验结果定性符合。

5 结 论

(1) 采用本文导出的逐级压缩系统模型及相应的数值计算方法分析多级轴流压缩系统的气动动态响态及气动稳定性是可行的;

(2) 随着进口总温扰动的增强, 压缩系统稳定工作范围减少且系统不稳定出现的时刻提前;

(3) 压缩系统进口总温升与其进口总温扰动强度近似成线性关联关系;

(4) 对于本文算例的实验压气机, 在平面扰动条件下, 压气机出现不稳定的首发级可能是第 1 级。

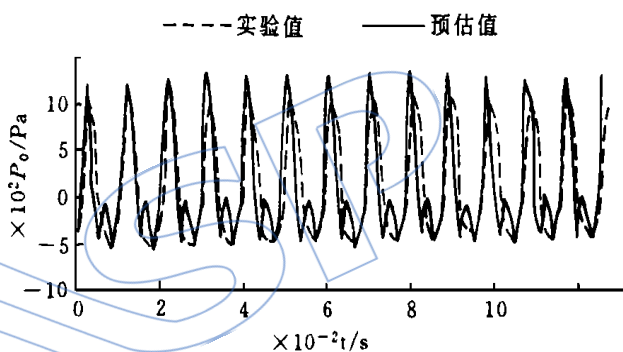


图 6 总压的时间历程

参 考 文 献

- 1 Chamblee C E, et al. A multistage axial flow compressor mathematical modeling inchnigae with aplication to two current turbofan compression systems. AIAA 80- 0054, 1980
- 2 Das D K, et al. Effects of inlet pressure fluctuations on axial flow compressors: some experimental and theoretical results. AIAA 85- 1135, 1985
- 3 Day I J. Actrve suppression of rotating stall and surge in axial comressors. ASME Paper-91-GT-87, 1991
- 4 Mark S, Johnson. One-Dimensional stage-by-stage axial compusor performance model. ASME Papor 91-GT-192, 1991
- 5 Davis M W, et al. A post-stall compression system modeling. AEDC-TR-86-34, 1986
- 6 Das D K, et al. Unsteady response of an axiel dlow compusor to planar teperature transients. J of peopulsion 1985, 1

(责任编辑 魏星禄)