

带执行装置的压气机系统 建模及仿真

苏三买¹, 孙占恒¹, 吕 焱², 刘俊杰¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中航出版传媒有限责任公司, 北京 100012)

摘 要: 针对压气机主动稳定控制对模型的要求,以 Moore-Greitzer 模型为基础,首先将模型进行空间离散化,用平均分布在压气机周向环面的离散位置点来描述流量扰动,建立了反映压气机周向动态特性的多维状态空间模型;其次以喷气装置作为主动稳定控制系统的执行装置,通过分析加入喷气装置后对流动区域产生的质量和动量影响,同时考虑气流从喷气装置出口到压气机起始平面存在的时间滞后,建立了带执行装置的压气机系统动态模型.以某压气机为例,对压气机失速行为及喷气状态下对失速的抑制作用进行仿真,结果表明:所建立的模型可以反映压气机旋转失速动态过程,通过控制喷气流量能拓展压气机的稳定工作范围,有效抑制压气机失速,模型可用于压气机主动稳定控制系统分析与设计.

关 键 词: 压气机; 主动稳定控制; 喷气装置; 失速与喘振; 动态数学模型与仿真

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Modeling and simulation of compressor system with actuators

SU San-mai¹, SUN Zhan-heng¹, LÜ Ye², LIU Jun-jie¹

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aviation Publishing and Media Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100012, China)

Abstract: For the requirement of compressor model for active stability control purpose, the multi-dimensional space state compressor model was built by discretizing the Moore-Greitzer model in space and representing the flow disturbance using discrete points around compressor circumference. Then the multi-dimensional compressor model with air injector was established considering the time lag of actuators and the momentum and mass effects caused from adding of air injector. Simulation on compressor stall and the suppression effect of air injection indicates that the rotating stall behavior is captured by the model established herein, the stable compressor operating range is expanded and stall is suppressed by air injection. The compressor model with air injectors is available for the analysis and design of active stability control system.

Key words: compressor; active stability control; air injection actuator;
surge and stall; dynamic mathematical model and simulation

收稿日期:2014-12-15

基金项目:航空科学基金(2013ZB53019)

作者简介:苏三买(1968—),男,陕西府谷人,副教授,博士,主要从事航空推进控制系统建模与仿真方面的研究.

符号表

p_t	总压
V_p	集气箱容积
Φ	平均流量
ξ	无量纲时间
ϕ	局部流量
γ	节流阀开度系数
$\delta\phi$	局部流量扰动
n	流量扰动傅里叶模态
Ψ_c	压气机压升

L_τ, L_s	动叶与静叶黏性损失
U	压气机叶片平均半径处速度
λ, μ	压气机与转子流动惯量
A_c	压气机进口面积
θ	压气机周向角度
α_s	压气机进口声速
τ_τ, τ_s	动叶和静叶黏性损失时间常数
l_i, l_e, l_c	压气机无量纲化上、下游管道及总管道长度

压气机失速与喘振是制约航空发动机性能提高与影响工作安全的重要因素^[1],工作时通常先进入失速,然后诱发喘振.现代航空发动机要求压气机具有更高的压比和更宽的稳定工作范围,因此对失速与喘振控制是航空发动机控制系统设计的重要组成部分.传统控制多采用放气、进口导叶角度调节等被动方法^[2]使压气机工作在一定设计裕度范围,虽然实现稳定工作,但通常稳定裕度偏大,限制了压气机性能潜力的发挥.为改善或避免压气机不稳定行为,基于动态反馈的压气机主动稳定控制(active stability control, ASC)技术^[3-6]成为该领域的研究热点.

压气机主动稳定控制源自 Epstein 等提出的失速主动控制理论^[7-9],应用该理论的控制设计思路是在失速发生初期,探测与分析失速的信号,获得扰动的幅值和相位,然后根据所设计的控制律控制沿压气机周向安装的喷气装置等执行装置在压气机内部产生与失速初始扰动相对应的反相扰动,从而实现抑制失速,避免喘振,减小稳定裕度.其中,系统模型是控制设计的前提.

与传统控制系统中控制对象与执行机构模型可线性叠加不同,由于压气机工作的非线性以及喷气装置气动影响与压气机内流场间的耦合关系,主动稳定控制系统设计要求建立压气机及执行机构的综合动态模型^[2].

传统的压气机模型多为描述稳定工况下的流量、压比与效率的变化关系^[10],属于压气机的外部特性,不能反映失速与喘振时压气机内部参数变化.为研究失速与喘振时的压气机内部动态行为,以 Moore-Greitzer 为代表,许多学者分析内部流动状态并根据动量守恒建立了压气机动态模型^[11-12]. Moore-Greitzer 模型(简称 M-G 模型)能有效描述压气机内部压力与流量参数的变化,但

无法描述旋转失速时失速团沿压气机周向的旋转特性,不适合主动稳定控制^[13-14].关于执行装置, Behnken 和 Gysling 等^[14-15]对喷气装置产生的气动影响进行理论分析与试验研究,但未提出完整的压气机控制系统模型.国内针对喷气装置对压气机稳定性影响进行了系列试验^[16-18],验证了喷气可有效抑制失速,避免喘振,但未从理论上给出喷气装置动态模型.

综上,本文在 Moore-Greitzer 模型的基础上,首先建立可描述失速团沿压气机周向旋转的多维状态空间模型,然后综合喷气装置对流动区域产生的质量和动量影响,建立含喷气装置的压气机系统综合动态模型,并对喷气状态下压气机失速产生及抑制效果进行仿真.

1 压气机系统结构

为进行压气机系统建模,定义压气机系统的简化结构图如图 1 所示.系统主要部件包括:上游管道、喷气装置、压气机、下游管道、集气箱和节流阀等,其中用集气箱模拟发动机燃烧室以实现其容积效应特性,用节流阀模拟涡轮以实现其压降和节流特性.

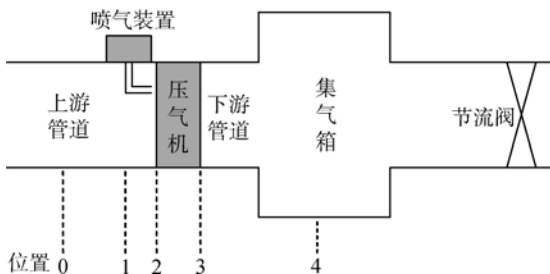


图 1 含有喷气装置的压气机系统结构简图及截面定义
Fig. 1 Schematic and the section definition of compressor system with air injector

2 压气机系统动态建模

2.1 多维压气机状态空间模型

Moore-Greitzer 模型^[2]为基于准稳态压气机特性,考虑非稳态下流动损失,以平均流量、压升及流量扰动所表示的一组的偏微分方程,经推导^[2]可表示为

$$\begin{cases} \dot{\Psi} = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \gamma \sqrt{\Psi}) \\ l_c \cdot \frac{d\Phi}{d\xi} + \lambda \frac{\partial(\delta\phi)}{\partial\theta} + \left[\mu + \frac{2}{n} \right] \cdot \frac{\partial(\delta\phi)}{\partial\xi} = \\ \Psi_c(\phi) - L_r - L_s - \Psi \\ \tau_r \left(\frac{\partial L_r}{\partial\xi} + \frac{\partial L_r}{\partial\theta} \right) = L_{ss}^r(\phi) - L_r(\phi) \\ \tau_s \frac{\partial L_s}{\partial\xi} = L_{ss}^s(\phi) - L_s(\phi) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $L_{ss}^r(\phi)$, $L_{ss}^s(\phi)$ 分别为转子与静子的静态流动损失; $B = \frac{U}{2a_s} \sqrt{\frac{V_p}{A_c l_c}}$ 是压气机工作的特征参数,其值表征了压气机状态。

式(1)模型描述了压气机内部某一位置的参数变化,但不能完全反映旋转失速时失速团沿压气机周向的旋转特性(如失速团的幅值和相位等),为此,将式(1)模型在压气机周向环面 θ 方向平均分布的 $2N+1$ 个位置通过空间离散傅里叶变换扩展,建立用周向平均离散位置处参数所描述的压气机多维状态空间方程模型。

流量扰动 $\delta\phi$ 在压气机环面上随 θ 的变化具有周期性,并满足拉普拉斯方程,求解可得

$$\delta\phi(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}_n(\theta) \cdot e^{in\theta} e^{|n|\eta} \quad \eta \leq 0 \quad (2)$$

其中 η 为压气机轴向位置; $\tilde{\phi}_n(\theta)$ 为空间傅里叶模态系数, $\tilde{\phi}_n(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \delta\phi(\eta, \theta) \cdot e^{-in\theta} d\theta, \eta = 0$ 。

对 $\tilde{\phi}_n(\theta)$ 函数进行离散化处理可得

$$\tilde{\phi}_n(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=0}^{2N+1} \phi(\theta_k) \cdot e^{-in\theta_k} \quad (3)$$

$$\text{其中 } \phi(\theta_k) = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=0}^{2N+1} \tilde{\phi}_n(\theta) \cdot e^{in\theta_k}.$$

对压气机动态与稳态工作状态下的不稳定损失作类似的离散化处理可得

$$L_{\cdot}(\theta_k) = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=0}^{2N+1} \tilde{L}_{\cdot, n} \cdot e^{in\theta_k} \quad (4)$$

$$L_{ss}^{\cdot}(\theta_k) = \frac{1}{\sqrt{2N+1}} \sum_{k=0}^{2N+1} \tilde{L}_{ss, n}^{\cdot} \cdot e^{in\theta_k} \quad (5)$$

其中 $\tilde{L}_{\cdot, n}$, $\tilde{L}_{ss, n}^{\cdot}$ 分别为动态及稳态下转子与静子损失的空间傅里叶变换系数。

定义并引入矩阵 G

$$G = \sqrt{\frac{2}{2N+1}} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \cdots & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cdots & \cos \theta_{2N+1} \\ \sin \theta_1 & \sin \theta_2 & \cdots & \sin \theta_{2N+1} \\ \cos(2\theta_1) & \cos(2\theta_2) & \cdots & \cos(2\theta_{2N+1}) \\ \sin(2\theta_1) & \sin(2\theta_2) & \cdots & \sin(2\theta_{2N+1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos(N\theta_1) & \cos(N\theta_2) & \cdots & \cos(N\theta_{2N+1}) \\ \sin(N\theta_1) & \sin(N\theta_2) & \cdots & \sin(N\theta_{2N+1}) \end{bmatrix}$$

将式(2)~式(5)代入式(1),得到反映周向动态特性的压气机多维状态空间模型模型。

$$\begin{cases} \dot{\Phi} = E^{-1} \cdot (-A \cdot \Phi + \Psi_c(\phi) - L_r(\phi) - L_s(\phi) - T \cdot \Psi) \\ \dot{\Psi} = \frac{1}{4l_c B^2} (S \cdot \Phi - \gamma \sqrt{\Psi}) \\ \dot{L}_r(\phi) = \frac{1}{\tau_r} L_{ss}^r(\phi) - W \cdot L_r(\phi) \\ \dot{L}_s(\phi) = \frac{1}{\tau_s} [L_{ss}^s(\phi) - L_s(\phi)] \end{cases} \quad (6)$$

其中 $E = G^{-1} D_E G$, $A = G^{-1} D_A G$, $W = G^{-1} D_W G$, S 为元素是 $\frac{1}{2N+1}$ 的行向量, T 为单位列向量。

$$D_A = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \begin{bmatrix} 0 & \lambda \\ -\lambda & 0 \end{bmatrix} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \begin{bmatrix} 0 & N\lambda \\ -N\lambda & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_E = \begin{bmatrix} l_c & & & \\ & \begin{bmatrix} \left(\frac{2}{1} + \mu\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{2}{1} + \mu\right) \end{bmatrix} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \begin{bmatrix} \left(\frac{2}{N} + \mu\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{2}{N} + \mu\right) \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_W = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_r} & & & \\ & \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_r} & 1 \\ -1 & \frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_r} & N \\ -N & \frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

式(6)模型拥有 $2N+1$ 个状态变量 Ψ 和 ϕ , 模型求解可获得沿周向的流量 $\phi(\theta_k)$ 和压升 $\Psi(\theta_k)$, 反映了压气机内部流量和压升随旋转角度 θ 变化的动态关系. 同时, 通过平均流量 Φ , 流量扰动 $\delta\phi$ 及其空间傅里叶模态系数, 可判断压气机是否失速或喘振.

2.2 喷气装置模型

沿压气机进口周向均布的喷气装置, 各点离散喷射近似于周向连续喷射, 可简化为厚度无限小的执行盘, 控制容易产生要求的扰动波形.

建立含有喷气装置的压气机系统动态模型, 首先需对加入喷气后的系统流场进行分析, 研究喷气装置对流动区域产生的质量和动量影响. 图2为含喷气装置的压气机系统简化模型.

由图2, 根据质量守恒和动量守恒有

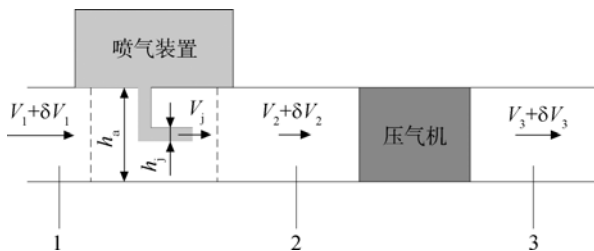


图2 带喷气装置的压气机系统简化模型

Fig. 2 Simplified compressor system model with air injector

$$\rho h_a [V_1 + \delta V_1(\theta)] + \rho h_j V_j = \rho h_a [V_2 + \delta V_2(\theta)] \quad (7)$$

$$h_a [p_{s_1} + \delta p_{s_1}(\theta)] + \rho h_a [V_1 + \delta V_1(\theta)]^2 + \rho h_j V_j^2 = h_a [p_{s_2} + \delta p_{s_2}(\theta)] + \rho h_a [V_2 + \delta V_2(\theta)]^2 \quad (8)$$

其中 ρ 为空气密度; h_a 为无量纲化压气机流体通道相邻叶片间距离; h_j 为无量纲化喷口直径; V_j 为喷气装置出口平均速度; $V_1, V_2, \delta V_1(\theta)$ 和 $\delta V_2(\theta)$ 分别为位置1和位置2处环面的平均速度及速度扰动; $p_{s_1}, p_{s_2}, \delta p_{s_1}(\theta)$ 和 $\delta p_{s_2}(\theta)$ 分别为位置1和位置2处的环面平均静压及压力扰动.

式(7)两边同除压气机叶片平均半径处速度 U , 并按流量与流速的关系, 经整理可得

$$\delta\phi_1(\theta) = \delta\phi_2(\theta) - \frac{h_j}{h_a} \Phi_j \quad (9)$$

其中 $\Phi_j = V_j/U$, 为喷气装置流量系数, 当压气机处于某一恒定转速, 该系数反映了喷气装置的流速.

根据流量连续可得

$$\phi(\theta) = \Phi + \delta\phi_1(\theta) + \frac{h_j}{h_a} \Phi_j = \phi_1(\theta) + \frac{h_j}{h_a} \Phi_j \quad (10)$$

根据总压与静压的关系可得总压扰动与静压扰动之间关系为

$$\frac{\delta p_s}{\rho U^2} = \frac{\delta p_t}{\rho U^2} - \Phi \delta\phi(\theta) - \frac{1}{2} [\delta\phi(\theta)]^2 \quad (11)$$

在位置1和位置2应用静压和总压扰动之间的关系式(11), 则式(8)可整理为

$$\frac{\delta p_{t1}(\theta)}{\rho U^2} + \Phi \delta \phi_1(\theta) + \frac{h_i}{h_a} \Phi_1^2 + \frac{1}{2} [\delta \phi_1(\theta)]^2 =$$

$$\frac{\delta p_{t2}(\theta)}{\rho U^2} + \delta \phi_2(\theta) \Phi + \frac{1}{2} [\delta \phi_2(\theta)]^2 \quad (12)$$

联立式(9)~式(12),经推导可得气流通过喷气装置的压升为

$$\Psi_j = \frac{1}{\rho U^2} [\delta p_{t2}(\theta) - \delta p_{t1}(\theta)] =$$

$$[\Phi_j - \Phi - \delta \phi_1(\theta)] \frac{h_i}{h_a} \Phi_1 - \frac{1}{2} \left[\frac{h_i}{h_a} \Phi_1 \right]^2 =$$

$$\left[\frac{h_a + h_i}{h_a} \Phi_j - \phi(\theta) \right] \frac{h_i}{h_a} \Phi_1 - \frac{1}{2} \left[\frac{h_i}{h_a} \Phi_1 \right]^2 \quad (13)$$

喷气改变了压气机进口的气流流量,并导致进口截面压力变化.式(13)反映了喷气对压气机流场的气动影响,可看出压气机进气截面的压力变化由进气气流扰动以及喷气共同作用.式(9)表明气流经过喷气装置前后流量系数扰动量的变化量受喷气装置喷口直径 h_j 以及喷气流量系数 Φ_j 共同影响,合理选择参数 h_j 和 Φ_j 可以抑制或消除压气机起始平面处流量扰动 $\delta \phi_2$,进而抑制或消除失速.

2.3 含喷气装置的压气机系统模型

综合考虑喷气的质量及动量影响,在式(1)模型的基础上,结合式(13),同时考虑喷气装置的气流从喷口到压气机起始平面存在的时间滞后,经推导获得考虑喷气装置后的压气机系统动态模型为

$$\begin{cases} \dot{\Psi} = \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \gamma \sqrt{\Psi}) \\ l_c \frac{d\Phi}{d\xi} + \left[\lambda \frac{\partial}{\partial \theta} + \left(\mu + \frac{2}{n} \right) \frac{\partial}{\partial \xi} \right] \cdot (\phi - \Phi) = \\ \Psi_c(\phi) - L_r(\phi) - L_s(\phi) - \Psi + \Psi_j \\ \tau_r \left[\frac{\partial L_r}{\partial \xi} + \frac{\partial L_r}{\partial \theta} \right] = L_{ss}^r(\phi) - L_r(\phi) \\ \tau_s \frac{\partial L_s}{\partial \xi} = L_{ss}^s(\phi) - L_s(\phi) \\ \tau_j \frac{d\Phi_j}{d\xi} = \Phi_{js} - \Phi_j \end{cases} \quad (14)$$

其中 τ_j 为喷气装置时间常数, Φ_{js} 为喷气量控制值.

类似式(2)流量扰动及离散化方法,根据式(9),喷气装置流量采用空间傅里叶系数模态描述为

$$\frac{h_i}{h_a} \Phi_j = \phi(\theta) - \phi_1(\theta) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{2N+1}} \left[\sum_{n=0}^{2N+1} \tilde{\phi}_n \cdot e^{in\theta_k} - \sum_{n=0}^{2N+1} \tilde{\phi}_{n,1} \cdot e^{in\theta_k} \right] \quad (15)$$

结合式(15),将式(14)模型进行空间离散化,应用空间傅里叶变换得到含喷气装置的压气机系统动态模型为

$$\begin{cases} \mathbf{E} \dot{\Phi} = -\mathbf{A} \cdot \Phi + \Psi_c(\phi) - L_r(\phi) - L_s(\phi) - \\ \mathbf{T} \cdot \Psi + \mathbf{T} \cdot \Psi_j \\ \dot{\Psi} = \frac{1}{4l_c B^2} (\mathbf{S} \cdot \Phi - \gamma \sqrt{\Psi}) \\ \dot{L}_r(\phi) = \frac{1}{\tau_r} L_{ss}^r(\phi) - \mathbf{W} \cdot L_r(\phi) \\ \dot{L}_s(\phi) = \frac{1}{\tau_s} [L_{ss}^s(\phi) - L_s(\phi)] \\ \dot{\Phi}_j = \frac{1}{\tau_j} (\Phi_{js} - \Phi_j) \end{cases} \quad (16)$$

该模型为离散空间状态方程组,可计算喷气流量扰动作用下沿周向 $2N+1$ 个位置处的压气机流量及压升变化,即喷气作用下的压气机周向动态特性,反映了喷气与压气机状态参数之间的输入输出关系,特别是式(15)给出了周向流量扰动 n 次模态系数 $\tilde{\phi}_n$ 与喷气装置喷口直径 h_j 和喷气流量系数 Φ_j 之间的关系,为采用喷气装置作为执行装置的模态控制系统的控制算法和控制器设计提供了理论基础.

3 仿真与结果分析

为验证压气机在全喷气下的动态特性及对失速的抑制作用,以文献[13]中压气机为例,采用所建立的带执行装置压气机动态模型进行仿真.

当压气机及喷气装置几何参数确定,式(1)中的 B 参数反映了压气机的工作状态,参考文献[13],选取 B 为 0.1,通过节流对压气机进行逼喘,调节喷气流量系数 Φ_j 并通过流量 ϕ 和压升 Ψ 的变化表征其动态特性.

无喷气条件下,图3为压气机出口从大到小节流并进入失速状态所计算的无量纲化特性;图4为对应失速状态下压气机不同周向位置无量纲化流量扰动和压力随转数(时间)的变化关系,其中 $\theta_k = 2\pi k / (2N+1)$ 代表环面离散位置.

由图3与图4可以看出,当节流到一定程度,压气机进入失速状态,并且失速团沿压气机周向进行旋转.

理论上,旋转失速时,有一个或多个低速气流区以低于压气机转子转速沿转子旋转方向转动^[10],因此,压力流量变化周期在单个失速团情况大于 $1r$,在多个失速团情况下将会变小.通常,失速团的数量取决于占主导的扰动模态,图4给

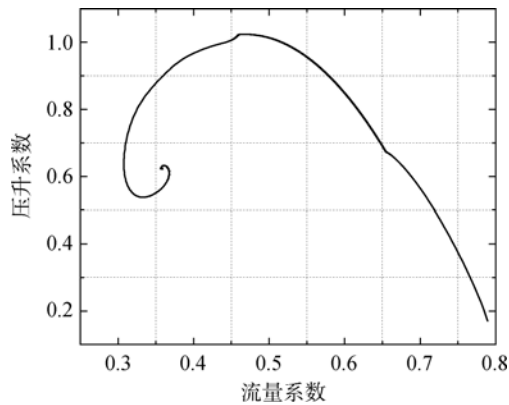
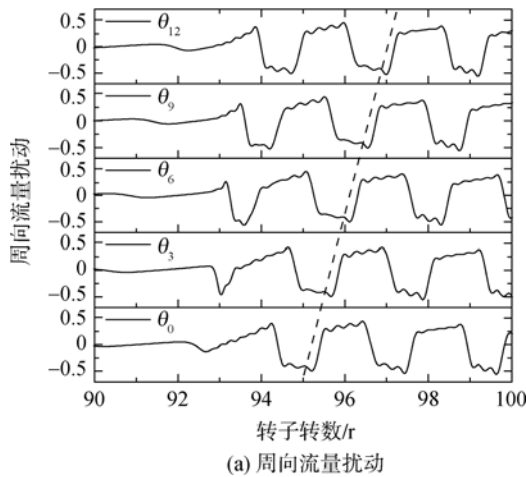
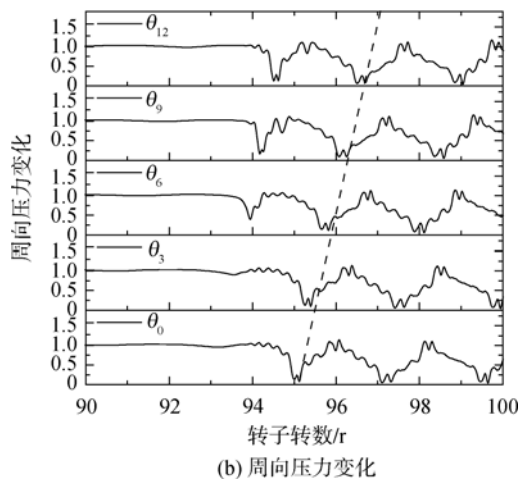


图3 无量纲化压气机特性

Fig. 3 Non-dimensional compressor characteristic



(a) 周向流量扰动



(b) 周向压力变化

图4 失速状态下压气机周向动态参数变化

Fig. 4 Circumferential dynamic parameters of compressor in stall

出的为1阶模态扰动下的仿真曲线,经仿真验证,在相同仿真条件下,3阶模态扰动下,压力流量变化周期变为 $0.5r$,更高阶扰动模态对应更多的失速团,这与压气机失速理论一致^[2,8].受篇幅所

限,仿真结果不一一给出.

图5为压气机节流到某一位置时不同喷气流量系数下计算的特性对比,可以看出当 $\Phi_j=0$,即无喷气时压气机进入失速状态,而在 $\Phi_j>0$,即有喷气下压气机仍维持稳定工作,且随着喷气流量系数增大,特性线向压升增大的方向偏移.当 $\Phi_j=3.5$ 时,压升较失速点处提高2.5%.

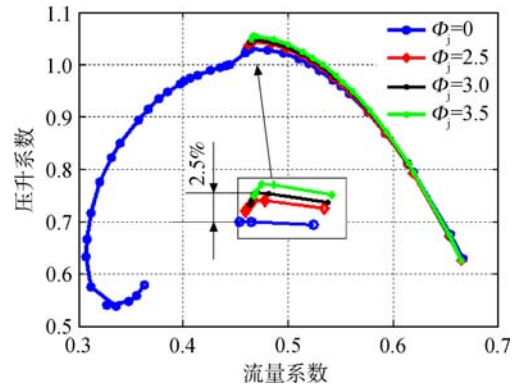


图5 不同喷气流量系数下的压气机特性

Fig. 5 Compressor characteristic at different injected flow coefficients

图6为在不同喷气流量系数下压气机分别节流到临界失速点时计算的特性对比.可以看出喷气状态下可以拓展压气机稳定工作区域,随着喷气流量系数增大,特性线向流量减小的方向偏移.当 $\Phi_j=3.5$ 时,与无喷气下失速点处相比,流量降低2%,压升提高1.7%.

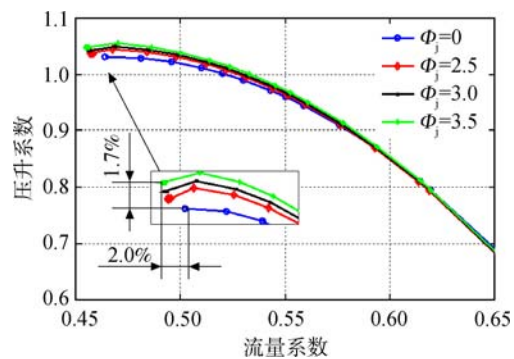


图6 不同喷气流量系数下压气机特性拓展

Fig. 6 Compressor characteristic expansion at different injected flow coefficients

图5与图6仿真结果表明,当压气机失速时,通过控制喷气流量拓展了压气机的稳定工作范围,可实现对失速的抑制.同时,由模型仿真计算的参数变化趋势及数量级与同类试验结果吻合^[14,16-17,19].

在一定的喷气流量下,当进一步对压气机出口节流时,根据压气机工作原理,仍将进入失速状态.图7为无喷气和喷气流量系数 $\Phi_j=2.5$ 两种条件下压气机分别节流到失速状态计算的特性对比,由图及以上分析可知,加入喷气后的压气机失速特性比无喷气时有所提高,由此表明控制喷气量虽然对失速具有抑制作用,但扩稳范围是有限的,工程应用时需结合压气机要求的扩稳范围、引气量对压气机性能的影响等方面对喷气流量进行相应的调节.

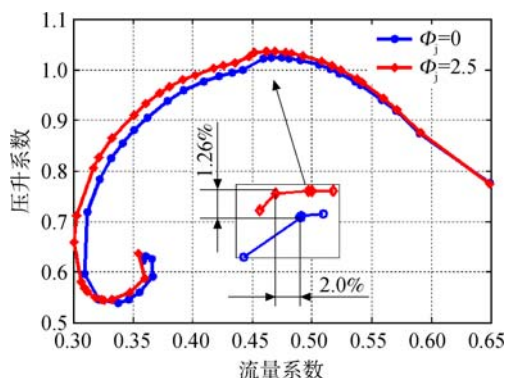


图7 不同喷气流量系数下的压气机失速特性

Fig.7 Compressor characteristic in stall at different injected flow coefficients

4 结 论

采用喷气装置作为执行装置,以 Moore-Greitzer 模型为基础,为主动稳定控制设计建立了压气机系统动态模型,并对压气机失速行为及喷气状态下对失速的抑制作用进行仿真,建模理论分析及数值仿真结论如下:

1) 喷气影响压气机内流场,压气机内部动态参数变化由进气气流及喷气共同作用,因此主动稳定控制系统设计需要建立压气机及执行机构的综合动态模型.

2) 通过在压气机周向环面进行空间离散化方法,建立了含执行装置的压气机多维状态空间模型,实现了失速团沿压气机周向旋转的幅值与相位等动态参数计算.

3) 采用喷气装置可拓展压气机稳定工作区域,并能有效抑制失速,进而避免喘振,但在主动稳定控制系统设计时,需根据要求的扩稳范围及引气对压气机影响等因素,确定合理的喷气流量系数.

建模方法不针对具体压气机型号,仿真结果

与压气机理论和同类试验相符,所建立的模型可用于主动稳定控制系统分析与设计.

参考文献:

- [1] 苏三买,吕烨,黄顺炳.航空发动机主动稳定控制方法分析[J].航空工程进展,2014,5(1):7-11.
SU Sanmai, LÜ Ye, HUANG Shunbing. Analysis of aircraft engine active stability control method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(1): 7-11. (in Chinese)
- [2] 吕烨.航空发动机主动稳定控制建模方法研究[D].西安:西北工业大学,2014.
LÜ Ye. Research on modeling method of aero-engine compressor active stabilization control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014. (in Chinese)
- [3] 黄顺炳.航空发动机压气机主动稳定控制研究[D].西安:西北工业大学,2012.
HUANG Shunbing. Research for aero-engine compressor active stabilization control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [4] HUANG Shunbing, SU Sanmai. Key technology analysis for active compressor stabilization control of aero-engine [R]. Jilin Jilin; International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, 2011.
- [5] 于兰兰,胡俊,屠宝锋,等.轴流压缩系统中主动抑制旋转失速的数值模拟[J].航空动力学报,2010,25(1):92-101.
YU Lanlan, HU Jun, TU Baofeng, et al. Numerical simulation of active suppression of rotating stall in axial compression systems [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 92-101. (in Chinese)
- [6] 王健,李应红,张东方,等.基于分岔理论的轴流式压气机旋转失速主动控制技术[J].航空动力学报,2007,22(7):1179-1183.
WANG Jian, LI Yinghong, ZHANG Dongfang, et al. Investigation on active control of rotating stall in axial flow compressors via bifurcation theory [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1179-1183. (in Chinese)
- [7] Epstein A H, Ffowcs Williams J E, Greitzer E M. Active suppression of aero dynamic instabilities in turbomachines [J]. Journal of Propulsion and Power, 1989, 5(2): 204-211.
- [8] Behnken R L, Andrea R D, Murray R M. Control of rotating stall in a low-speed axial flow compressor using pulsed air injection: modeling, simulations and experimental validation [R]. New Orleans: The 34th Conference on Decision and Control, 1995.
- [9] Paduano J D. Active control of rotating stall in axial compressors [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [10] 楚武利,刘前智,胡春波.航空叶片机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2009.
- [11] Moore F K, Greitzer E M. A theory of post-stall transients in a axial compressor systems: Part I development of e-

- quations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108(1): 68-76.
- [12] Greitzer E M. Surge and rotating stall in axial flow compressors; Part I theoretical compression system model [J]. Journal of Engineering for Power, 1976, 98(2): 190-198.
- [13] Mansoux C. Distributed nonlinear stability analysis of rotating stall [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [14] Behnken R L. Nonlinear control and modeling of rotating stall in an axial flow compressor[D]. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1996.
- [15] Gysling D L. Dynamic control of rotating stall in axial flow compressors using aeromechanical feedback [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [16] 童志庭, 聂超群, 朱俊强. 喷气提高轴流压气机稳定性的研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 121-124.
- TONG Zhiting, NIE Chaoqun, ZHU Junqiang. Investigation on micro tip injection improving the stability of an axial compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 121-124. (in Chinese)
- [17] 卢新根, 楚武利, 朱俊强. 定常喷气提高轴流压气机稳定工作裕度机理探讨[J]. 西北工业大学报, 2007, 25(1): 17-21.
- LU Xingen, CHU Wuli, ZHU Junqiang. Investigation on constant micro tip injection improving the stability of an axial compressor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(1): 17-21. (in Chinese)
- [18] 李亮, 胡俊, 王志强, 等. 喷气对压气机稳定性影响的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(1): 161-168.
- LI Liang, HU Jun, WANG Zhiqiang, et al. Experiment of effect of micro injection on compressor stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1): 161-168. (in Chinese)
- [19] Weigl H J. Active stabilization of rotating stall and surge in a transonic single stage axial compressor [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1997.

(编辑:秦理曼、王碧珺)