

畸变进气压气机特性与气动稳定性的改进模拟技术及其实验研究*

西北工业大学 刘燕** 刘伟 刘志伟 陈辅群

【摘要】建立了预测畸变进气压气机特性与气动稳定性的改进多子区平行压气机模型。为了检验该模型的准确性,进行了均匀及 180°畸变进气下级压气机特性与气动稳定性的实验研究。以实测的均匀进气下级压气机特性为基础,应用改进的多子区平行压气机模型,在与进气畸变实验完全相同的条件下,对畸变进气下级压气机等转速线及其不稳定工作点进行了预测,预测与实验吻合良好,证明该模型是有效的。

主题词: 进气道畸变 平行压气机理论 压气机特性

分类号: V231.3

为分析压气机对进气畸变的响应,已发展了许多方法^[1,2]但仍难以准确地预测畸变进气压气机的特性及气动稳定性。其主要原因是,分析方法均以完全均匀进气的压气机试验特性为基础,而没考虑到畸变进气下任一局部均匀进气的子压气机的特性与相同边界条件下完全均匀进气的压气机特性不同,以及有压气机时进气道出口畸变流场会变化。本文正是在这两方面做了进一步的工作,建立了改进的多子区平行压气机模型,计入了非定常可压流效应,推导出了计算压气机进口周向侧流速度的公式。通过实验验证表明,本模型的预测结果更真实地反映了压气机对进气畸变的响应过程,与实验结果吻合良好。

1 改进的多子区平行压气机模型

将压气机进口的畸变流场划分为局部流场均匀的多个扇形子区。以某一子区为进口通过压气机顺着流路一直到出口可看作为一均匀进气的子压气机。每一子压气机的流量由其边界条件以及计入非定常可压流效应的均匀进气压气机特性确定。由于进气道出口流场要受到下游压气机的影响,那么当它发生周向总压畸变时,压气机的抽吸作用会使各子区进口流速趋于一致,从而引起进口气流角的变化^[2],所以需要重新确定压气机进口静压与流速的分布。本文用压气机进口平面处源和汇的分布来表示压气机对上游流动的影响,由此推导出压气机进口周向侧流的计算公式

$$C_{q_L} = \left[\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq L}}^m \frac{Q_n}{2h} \sin \frac{2\pi b(L-n)}{h} \right] \sqrt{\frac{1 - \cos \frac{2\pi b(L-n)}{h}}{1 - \bar{m}_1^2}} \quad L = 1, \dots, m \quad (1)$$

其中, m 为子压气机的数目, h 为周期, $\bar{m}_1$ 为压气机进口气流平均马赫数, b 为子区的周向宽

度, Q_n 为源(汇)强度。由方程(1)可求出进出口气流角的周向分布, 从而得出进气道出口流场有发动机存在时所产生的静压畸变。另外, 压气机转子在其进口气流畸变的条件下旋转时, 压气机转子进口气流攻角及速度将经历一随时间变化的动态过程。它将产生两项非定流效应: 非定常转子流体加速效应和非定常转子损失效应。前者将导致畸变压气机特性与均匀进气的不同, 采用近似方法把转子叶片看作一系列扩压通道, 从进气速度畸变和转子转速计算出加速项的平均值, 以得到转子在周向不均匀流中的非定常响应的修正值。后者意指非定常转子损失滞后现象, 它在预测畸变进气下压气机的不稳定工作边界时起着主要作用。转子在靠近失速状态下工作时, 其瞬时攻角历经大于稳态失速攻角, 而不失稳。所以本模型认为, 当某一子压气机的有效攻角到达稳态失速攻角时, 整台畸变压气机才进入不稳定工作状态。

2 实验装置及测量

实验压气机是一台轴向进气的亚音速单级轴流压气机(如图 1)。气流经进气装置的转折, 变成沿轴向进入实验段。在实验段壳体上, 工作叶片进口 1-1 截面、静子叶片出口 3-3 截面和附加的 3'-3 截面处, 安置了两个相隔一定角度的安装座, 用以安装座标架, 供安装测量压

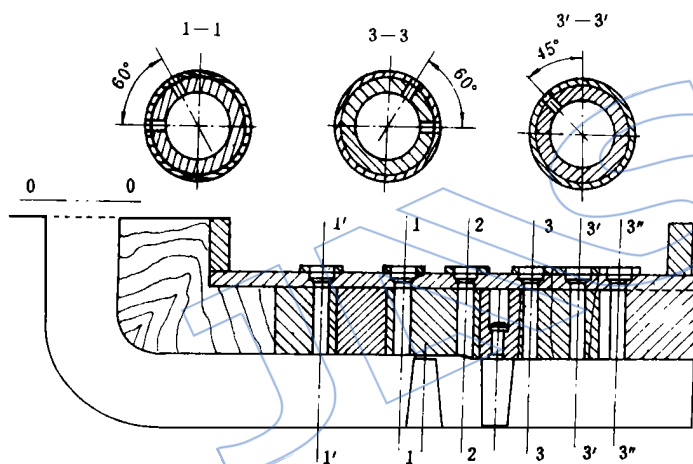


图 1 试验段简图

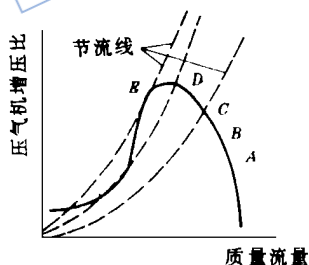


图 2 压气机增压—节流特性

力和温度的探针用。在实验研究中, 测量了实验时的大气压力、工作叶片进口及静子叶片出口的总静压沿叶高的分布及流孔板前后的压力、实验时的大气温度、压气机叶片温升及其在叶栅槽道中沿叶高的分布、工作轮消耗的扭矩及工作轮的转速。

实验用单级压气机是与节流阀直接相连的, 整个压缩系统的工况是由压气机特性线与节流线的交点所确定, 如图 2。实验时, 在一定的折合转速 $n_{cor} = 5059 \text{ r/min}$ 下, 逐渐关小节流阀的开度, 让工作点由交点 A 移向 B, 再移向 C, 而后至 E 测取这 5 个稳定状态下的相应参数, 便实现了录取均匀及 180 畸变进气下单级压气机等折合转速线的目的。

不稳定工作点的录取, 是在节流过程中让工作点通过特性线上的最高点, 继续向左半支移动, 这时 P_3^* 测压管和流孔板压差计中的液柱有明显的脉动情况, 且伴有异常嗡鸣声。出现这种现象后将节流阀开大, 然后再操纵节流阀逐步关小至不稳定工作的临界点 E, 录取该状态下的参数, 即为稳定工作边界点。

3 预测与实验结果对比及其分析

3.1 压气机进口流场

经测定,在均匀进气条件下,本实验压气机的进口流场沿周向基本上是均匀的^[3]。所以,均匀进气时,在 1-1 截面仅布置一个测点。

在进行畸变试验时,实验条件同上,在 0-0 截面安装 1×36 目畸变模拟网,网后布置两个测点。无网区的总、静压值,由以前实验得出的进口总压恢复系数 $\sigma_{\text{进}}$ 随进口速度系数 λ_1 的变化规律曲线^[3]查得。测量结果表明,在压气机进口基本上形成了 180° 的方波畸变,如图 3。

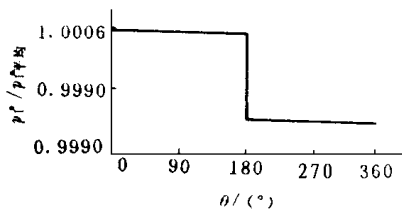


图 3 压气机进口截面总压周向畸变谱

3.2 单级压气机特性的实验与预测比较

图 4 中的实线为均匀进气压气机特性的实验结果。图 4 中○为均匀进气的试验特性及其失速点。□为 180° 畸变进气的试验特性及其失速点,虚线为用本模型预测的畸变进气压气机特性及不稳定工作点,▽为古典平行压气机模型预测的不稳定工作点,其等转速线几乎与均匀进气等转速线相重,与实验值比较相差甚远,不能真实地反映压气机对进气畸变响应的特点。然而考虑了畸变引起的进气重新分布、非定常转子流体加速效应及非定常转子损失效应等因素的改进多子区平行压气机模型的预测结果与实验结果吻合很好(图 4 中△),误差不超过 0.5%。此外,作者还用本模型预测了单轴多级压气机与双转子涡轮喷发动机对进气畸变的响应,结果比之已往的计算有明显改善。可见本模型在预测进气畸变对压气机特性及气动稳定性影响方面是有效的。

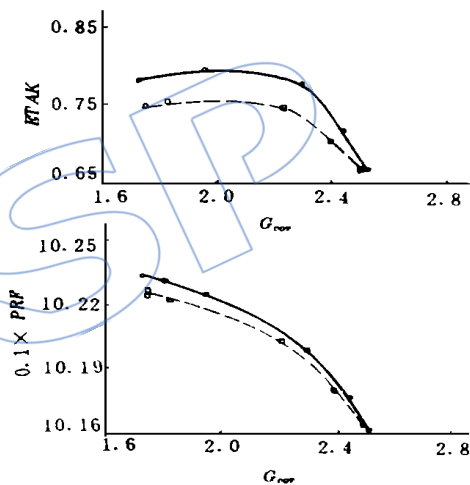


图 4 180° 畸变进气压气机等转速的预测与实验值比较

参 考 文 献

- 1 Tesch W A, Steenken W G. Blade Row Dynamic Digital Compressor Program, Volume I, J85 Clean Inlet Flow and Parallel Compressor Models. NASA CR-134978, 1976
- 2 Mazzawy R S. Multiple Segment Parallel Compressor Model for Circumferential Flow Distortion. AGARD, 1977, CP-177
- 3 王宗源等. 单级轴流压气机流场的测试研究. 西北工业大学科技资料, 1977: 725

(责任编辑 魏星禄)