

旋转失速状态下静子叶排的新认识*

西北工业大学 朱俊强* 刘志伟
空军工程学院 李 军

【摘要】 测量了孤立转子及单级轴流压气机的旋转失速起始边界、旋转失速后续性能及其流场结构以及整个压缩系统的不稳定形态。讨论了单级轴流压气机中静子叶排对各特征参数的影响,分析了旋转失速状态下静子叶排所起的作用。通过分析指向静子叶盆的滑移速度,讨论了旋转失速状态下静子叶排加入后各性能参数的变化趋势,解释了单级压气机所固有的一些性质。

关键词: 单级轴流压气机 旋转失速起始边界 静子叶排的作用

1 实验装置及测试系统

国内外的一些设计者,试图取消轴流压气机的静子叶排,让两级相邻的转子反方向旋转,前一级转子的出口并非轴向的气流,作为后一级转子予旋后的进口气流,其目的就是为了减小流动损失,增大推重比。静子叶排似乎成为多余。但在我们实验研究压气机的旋转失速后续性能过程中,发现静子叶排除了在稳态条件下传统的作用外,在非稳态条件下还有着改变失速性能的作用。通过具体的实验研究,本文讨论了静子叶排对旋转失速边界点、特征参数、流场结构及整个压缩系统不稳定形态的影响,简述了单级及孤立转子在旋转失速状态下叶片受迫振动的情况,为今后轴流压气机的设计过程提供了第一手资料。

单级压气机和孤立转子旋转失速性能及其不稳定形态的实验研究,是在西工大的单级轴流压气机试验台上完成的。实验段上安排了4个测量截面,每个测量截面有两个 $\Phi 12$ 的孔用以安装探针。使用两支完全相同形式的锥膜探针来测定失速团数目及其传播速度,结合钩膜探针测量失速区范围。在同一截面沿周向 α 夹角下安装两支锥膜探针,同步记录探针1和2的输出信号。在转子后分别有夹角60和45的两排安装孔,进行两次实验便可确定失速团数目及其传播速度,以钩膜探针叶尖位置正对轴向的信号作为标准信号,锥膜探针沿径向作5次测量,各测点的径向相对位置分别为叶高的17%、25%、55%、82%和90%。把对应的锥膜信号和钩膜信号经同步处理后,以钩膜探针的结果作基准,判定各径向测点的失速区相对位置,以描述动叶排出口截面处失速区所占整个压气机环形通道的范围。

微型固阻式压力传感器尺寸小、频响高,把它装入圆柱形三孔针内制成高频响的动态压力探针。通过气动吹风校准确定方向系数、静压系数和总压系数与气流方向的关系曲线,因不同速度下曲线的重合性并不理想,可通过迭代修正的方法来计算气流参数。

由敏感元件测得的流场参数是在失速流场的周期性变化规律上叠加随机紊流脉动信号。

这里组成这样一个适用于旋转失速流场结构的数据采集与处理系统: 热膜信号经热线风速仪主机以及动态压力探针信号经放大器后, 均用示波器实时监视, 由数字电压表记录其平均值, 然后记入磁带记录仪。在 920 信号分析仪上分析各种状态下信号的频率和同截面两锥膜信号的时差, 再由模数转换器实现数字化并输入计算机, 对三孔针三路信号采集结果首先进行同步化处理, 然后再进行集平均计算, 最后由绘图机输出计算结果。这里平均次数为 50, 每个失速周期内包含 50 至 100 个点。

2 静子叶排对旋转失速性能的影响

如表 1 所示, 由于静子叶排的存在, 在相同的转速下比较时, 级的失速起始流量值小于孤立转子的对应值, 也就是说, 静子叶栅起到了推迟旋转失速发生的作用。文献 [1] 从损失变化的角度, 解释了这一结论。表 2 给出了在 8130rpm 换算转速下单级和孤立转子的旋转失速特征参数。

表 1 旋转失速点性能参数比较

$\bar{n}$	孤立转子			单 级		
	流 量	总压比	效 率	流 量	总压比	效 率
0.33	1.7284	1.0278	0.8845			
0.54	2.8941	1.0704	0.8874	2.8268	1.0637	0.8003
0.71	3.6421	1.1298	0.9015	3.5707	1.1152	0.7873
0.84	4.4572	1.1834	0.8745	4.4462	1.1644	0.7792

表 2 旋转失速后特征参数比较

类 型	失速团数目	相对传播速度	滞后环面积	失速堵塞比	性能损失
孤立转子	2	0.62	0.0101	0.4101	0.1132
单 级	1	0.33	0.0057	0.4481	0.1403

图 1 给出了各自的旋转失速发生后继续节流至深失速以及退出失速过程的特性变化趋势, 对比看出, 单级压气机比孤立转子具有更大的失速进入点堵塞比和性能损失。但是, 作

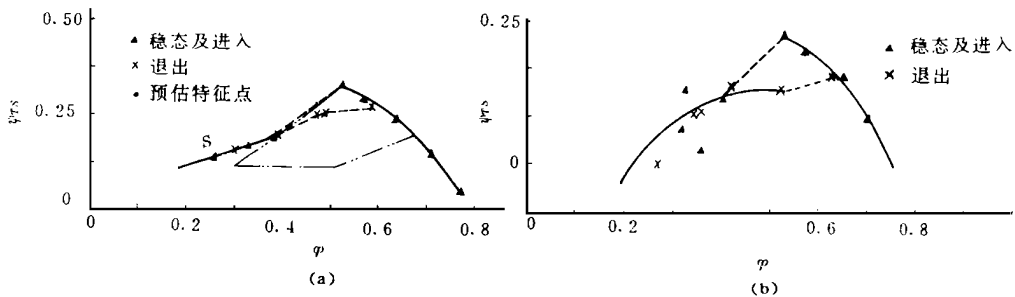


图 1 失速后续特性 ((a) 单级 (b) 孤立转子)

为表征失速滞后效应的回线面积有明显的减小,这说明由于静子叶排的加入,改善了转子叶排旋转失速的恢复性能。由图 1 所示的特性图,结合图 2 表示的失速解除信号可以看出,虽全为突变型的全叶高失速,但单级压气机的总静压升系数下降较为缓慢,具有较大的失速进入点堵塞比和性能损失,喘振状态出现的较早,其解除过程是渐进的,并伴随着失速团的分裂。实验发现,单机压气机失速解除过程中,由单团的失速结构分裂为双团的失速结构,传播速度几乎保持不变特性图上出现“阶梯状”曲线。对比旋转失速发生后孤立转子和单级压气机的进口总压 P_1^* 沿径向分布可知,静子的存在较为显著地减弱了转子前气流的能量,尤其在叶片尖部。同时使各个不同节流状态下的 P_1^* 沿径分布趋于平缓。

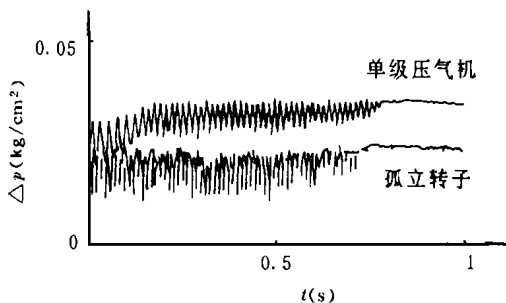


图 2 失速解除信号

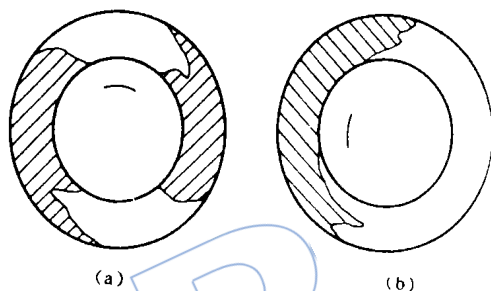


图 3 失速区范围 (a) 孤立转子 (b) 单级压气机)

图 3 给出了孤立转子和单级压气机的旋转失速区范围。图 4 表示的则是二者进入旋转失速状态下的叶尖基元二维速度分布图。显著的不同之处在于：(1) 对于单级压气机，出现单团全叶高失速结构，失速区域几乎占了环形通道的一半，且传播速度较低，而对于孤立转子，则是双团全叶高失速结构，传播速度几乎增加一倍，失速区范围约占整个环形通道的 3/5；(2) 在单级压气机转子前失速区的后沿，没有主流的穿越现象，而是有离开失速区的流动趋向；(3) 在单级压气机失速区内存在着倒流，在转子前失速区的后沿及在转子后失速区的中部，尤为强烈。

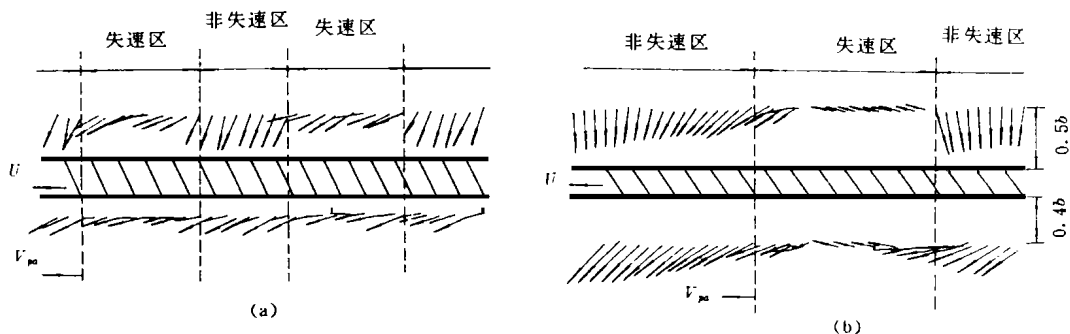


图 4 转子前后叶尖处流场速矢分布图 (a) 孤立转子 (b) 单级压气机)

这一实验结果清楚地阐明了我们在测取旋转失速平均性能时获得的转子叶尖区进口总压恢复系数大于 1 的特有现象。同时表明,单级压气机的实验结果似乎并不支持文献 [2] 提出的“穿流模型”,而与文献 [3] 所获得的测量结果基本相符。即,在转子前失速区的高压气流并不进入非失速区,而是倒流进入转子前的空间,耗散能量,再随进口气流进入转子叶排,

同时这股高压气流迫使正常区出现逆转子转向的切向分速, 总静压都出现最小值。

3 静子叶排对压缩系统不稳定形态的影响

图 5 表示了单级压气机与孤立转子压缩系统在转速 $n = 8130 \text{ rpm}$ 时典型的不稳定形态。对比看出, 孤立转子在进入失速的过程中, 其失速团发展区域要明显地长于单级压气机。在

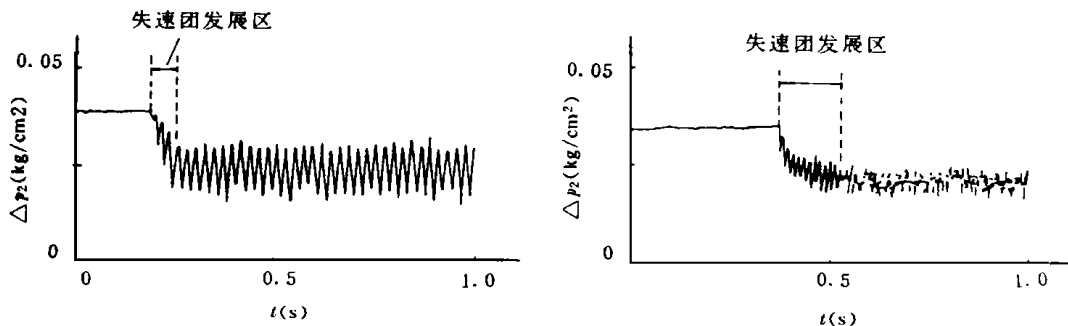


图 5 旋转失速发展过程 (a) 单级压气机 (b) 孤立转子

高转速下 (如 $n = 10765 \text{ rpm}$), 单级压气机已明显地进入喘振状态, 如图 6 所示。而孤立转子在此转速下的不稳定型式是双团结构的旋转失速状态, 甚至在更高的转速下 ($n = 12800 \text{ rpm}$), 孤立转子仍然处于一种双团结构的旋转失速状态。造成这种差异的原因在于, 一方面由于静子叶排的存在与否影响着失速团的发展速度, 文献 [4] 认为这一发展过程对压缩系统的不稳定形态有较大的影响, 单级压气机的时间常数小, 况且突变型失速时的压升变化量要比孤立转子的, 即加给气流动能的变化量大, 再由于旋转失速特性的滞后环较大, 这些因素导致了单级压气机较孤立转子容易进入喘振工作状态。

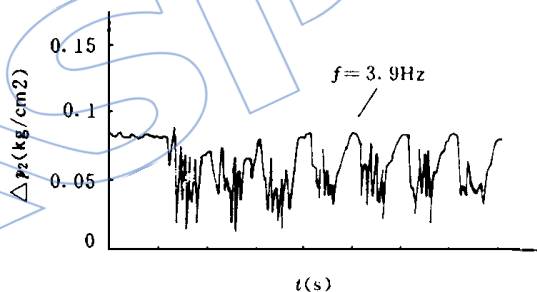


图 6 单级压气机高转速下的不稳定形态

值得一提的是单级压气机在高转速 ($n > 12250 \text{ rpm}$) 出现一种新的不可恢复性失速现象, 正如文献 [5] 所提出的“失速悬挂”现象, 此时的节气门等控制措施“失控”, 压气机处于稳定的倒流状态, 只有停车才能恢复。这是孤立转子在任何转速下都没有出现的流动现象。

通过粘贴在转子叶片上的多个应变片, 测量了孤立转子与单级压气机在旋转失速状态下叶片受迫振动时的应力。初步实验结果表明, 虽然二者的旋转失速性能有着较大的差异, 但叶片所受到的激振力并无太大的差别, 只是单级的略微高一点。在从稳定状态进入旋转失速状态; 以及从叶根到叶尖两种情况下, 应力表现出较显著的变化。

4 静子叶排改变旋转失速性能的机理探讨

在主流区和尾迹区气流出气角相同的假设下, 我们来分析静子叶排对旋转失速流场结构的影响。如图 7 所示, 当转子叶片中气流发生分离时, 分离区的速度降低, 从图 7 中的速度三角形变化可以看出, 与正常区相比, 气流产生“滑移速度”, 该速度方向指向静子叶排的叶

盆。正是指向静子叶盆的滑移速度,使得静子叶盆有收集尾迹的作用,一方面有将该分离气流纳入尾迹区的趋势。由于旋转失速的起因是由尾迹的发展而成的,而尾迹是由叶片表面脱落旋涡下洗汇合而成,当这些非定常旋涡达到一定强度时,将使给定的气流结构失去稳定性,而出现所谓“旋转失速”。如果转子后是自由空间,这些消耗了能量的旋涡的无约束发展,将加剧旋涡的强度,招致旋转失速的提前到来。相反,若转子后存在静子叶排,由于静子叶排有收集尾迹的作用,抑制了从动叶表面脱落下来的非定常旋涡的发展,使得失速区得以较快地成为一稳定的区域。实验结果表明,单级压气机进入旋转失速时其失速团的发展区域相对于孤立转子要小,就充分地证明了这一问题。另一方面,静子叶盆收集尾迹的作用,使得单级压气机中的静子积聚了大量的低能量流体,一旦这些低能量的流体失速,加上转子叶排处于更深一步的节流状态下,将会导致更为严重的失速状态,单级压气机失速后性能下降剧烈、堵塞严重、高转速下易于进入喘振状态及单级压气机所展示的“失速悬挂”现象,正说明了这一问题。

5 结 论

(1) 静子叶排不仅能起到推迟旋转失速发生的作用,而且影响着失速状态的解除过程,单级压气机展示了孤立转子所没有的失速渐进解除的特性。

(2) 静子叶排影响着整个失速后续性能及失速流场结构,使得失速团数目及传播速度发生变更,失速区内气流流动也互不相同。

(3) 静子叶排的加入使得系统易于进入喘振工作状态,并导致单级轴流压气机在 $\bar{n} = 0.85$ 附近出现一种新的“不可恢复性失速”现象。

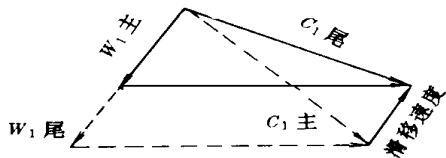


图 7 静子叶排作用示意图

参 考 文 献

- 1 朱俊强, 刘志伟. 双叶排旋转失速起始的研究. 工程热物理学报, 1988, 9 (3): 218-223
- 2 Day I J, Cumpsty N A. The Measurement and Interpretation of Flow Flow Within Rotating Stall Cell in Axial Flow Compressors. Journal Mechanical Engineering Science, 1978, 20 (2)
- 3 Das D K, Jiang H K. A Experimental Study of Rotating Stall in a Multistage Axial Flow Compressor. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, July, 1984, 106
- 4 Greitzer E M. Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors, Part I, II. ASME J. of Engineering for Power, Apr. 1976, 98
- 5 Sugiyama Y, Tabakiff W, Hamed A. J85 Surge Transient Simulation. ISABE 87-7076

(责任编辑 魏星禄)

tained from extrapolation. The resulted algebraic equations are tridiagonal block matrix system and solved by sweeping in each direction. So the scheme is a 5 point implicit AF scheme of first-order temporal and third order or second-order spacial accuracy depending on the two TVD factors. Two examples are presented, the first verifies the calculation of third-order scheme with a low speed wind tunnel experiment, the second compares the third-order scheme with the second-order one. The examples indicate that the code results in numerical solutions agree with the experiment, and the third-order scheme has little difference from the second-order one in the solutions, but it decreases the convergent residual greatly. Also it is showed that the two schemes do not agree with each other very well in the throat of the cascade where the flow velocity is equal to the local sound speed.

A METHOD OF USING TVD SCHEME TO CALCULATE INCOMPRESSIBLE FLOWS SEPARATELY

He Jun (*China Institute of Aeronautic Systems Engineering*)

Feng Qin, Yan Chuanjun, Liu Songling (*Northwest Polytechnical University*)

ABSTRACT

The Total Variation Diminishing (TVD) schemes have been adapted to incompressible flow computations. Considering the characters of the computation in the incompressible flow, a new method is given that the TVD scheme is used with separating the continue equation from momentum equations. The continuum governing equations are discretized on a modified nonstaggered grid. In the momentum equations, the convective terms are discretized by a third-order TVD scheme, and the others are done by central finite difference scheme. The pressures are solved by pressure substitution. Furthermore, a pressure correction procedure and the Gauss-Seidel centrally symmetric iteration algorithm are used to enhance the convergence rate. As a result, the code containing those methods has been applied to computation of two typical flow problems: the channel flow problem and the lid-driven cavity flow problem. A comparison of the present results with the literature data is also given in good agreement. It is shown that the TVD scheme is not only applicable to incompressible flow computation, but also it yields higher accuracy than the non-TVD scheme.

A NEW COMPREHENSION ON STATOR CASCADE UNDER ROTATING STALL

Zhu Junqiang and Liu Zhiwei (*Northwestern Polytechnical University*)

Li Jun (*Air Force Engineering College*)

ABSTRACT

Onset points of rotating stall, time-average performance and flow fields after stall appearing, as well as the unstable behaviors for a single-stage axial-flow compressor and an isolated rotor have been measured successfully with hot-film probes and a three-hole cylindrical pressure probe containing fast response transducers. On the basis of many experimental data, the influences of stator cascade in the single-stage compressor on the whole time-average characteristics and the cessation behavior of rotating stall, as well as the stalled flow field have been elaborated in detail. When a single-stage compressor enters the unstable condition, the roles of the stator cascade, such as postponing the appearance of rotating stall, as well as modifying the stalled flow field and cessation form, have been analysed. There is an obvious difference of the unstable behavior between the single-stage axial-flow compressor and the isolated rotor. At high rotor speed ($\bar{n} > 0.85$), a nonrecoverable stall phenomenon appears for a single stage compressor, but it does not appear for an isolated rotor at any speed.

HEAT TRANSFER FROM SHROUDED ROTATING DISK WITH CENTRIC AIR INFLOW

Xu Guoqiang, Cao Yuzhang, Qiu Xuguang

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

An air-cooled turbine disk was investigated as the model of a rotating disk.