

# 几何参数对叶栅失速流场的影响

朱俊强 刘志伟 马存宝

(西北工业大学 704 教研室, 西安, 710072)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE STALL FLOW FOR DIFFERENT GEOMETRIC PARAMETERS OF CASCADE

Zhu Jun-qiang, Liu Zhi-wei, Ma Cun-bao

(Faculty 704 of Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

**摘要** 利用热膜探针及装有高频响压力传感器的三孔探针, 结合动态数据采集和处理系统, 测量了孤立转子的失速流场。描述了失速团数目、失速团传播速度和周向范围与叶栅主要几何参数的关系。实验结果表明: 增大安装角或减小稠度均使绕叶栅的气流参数沿周向的变化率趋于缓和; 失速区与非失速区之间存在着复杂的质量交换, 后者证实了失速区边缘处存在穿越流动现象。

**关键词** 旋转失速, 流场, 测量

**Abstract** With the help of the hot film probe and a three-hole probe containing fast response transducers in association with a digital data acquisition and processing system, the flow measurements during stall in an isolated rotor are obtained. The relation between the number and speed of stall cells and the circumferential stalled region and the main geometric parameters of cascade is described. The experimental results indicate that firstly, the rate of circumferential variation for aerodynamic parameters of airflow passing the cascade becomes smoother as the stagger is increased or the solidity decreased and secondly, there is complex mass transport between the stalled and unstalled parts of the flow. It is confirmed by the latter that the fluid must cross from one side of the cell to the other in the tangential direction.

**Key words** rotating stall, flow field, measurement

经典旋转失速模型是用死区的概念描述的。直到 70 年代, 研究方向仍是对失速团数目、范围及传播速度等基本特征参数进行测量。文献[1]首次应用具有快速响应能力的热线及压力传感器测量了某四级压气机的失速流场, 提出了著名的旋转失速穿流模型。文献[2]应用某三级压气机失速流场的测量结果, 对上述模型进行了补充和修正。目前大部分实验多偏重于不同截面的测量、不同叶片负荷下失速区的测量, 尚未涉及主要几何参数对叶栅失速流场的影响。

### 1 试验装置及测试系统

试验是在单级轴流压气机试验台上完成的。压气机设计转速为 15 000r/min, 转子平均半径处安装角为 42.9°, 稠度为 1.165。转子前、后及静子后 3 个截面上各有两个直

1992 年 5 月 15 日收到, 1992 年 11 月 9 日收到修改稿

航空青年基金资助课题

径为 12mm 的孔用以安装探针, 两孔之间的夹角分别为 60°、60°及 45°。

锥膜探针及钩膜探针如图 1 所示, 两者皆输出电压信号。锥膜探针气流速度大小变化较敏感, 对气流方向的变化不敏感。测量中认为它直接感受气流速度的大小。钩膜探针对流速大小和方向变化都敏感。失速区内气流方向变化剧烈, 因此, 钩膜探针可以认为是一种理想的参考探针。

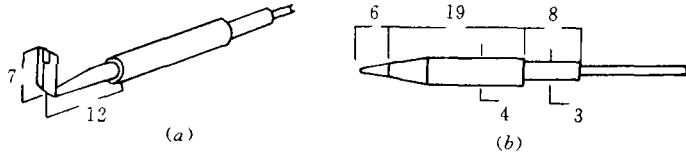


图 1 探针示意图 (a)钩膜探针 (b)锥膜探针

70 年代初研制成功的微型固阻式压力传感器具有尺寸小、频响高的特点, 可将其装入圆柱形三孔压力探针内(图 2(a)), 图 2(b)为压力传感器接口处的局部放大图。为使圆柱形三孔探针具有高灵敏度, 取两侧孔与中间孔夹角为 45°。为减小头部对测量的影响, 测孔到头部的距离应大于 2 倍圆柱体直径。

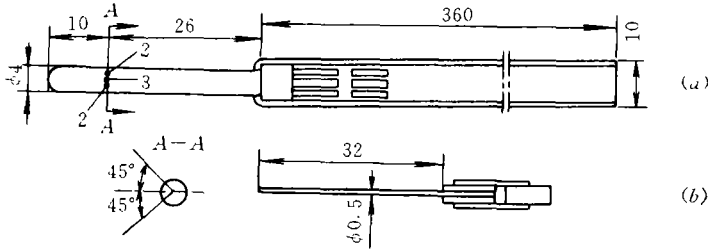


图 2 三孔压力探针示意图 (a)探针外形 (b)传感器接口

### 2 测试方法及处理过程

失速团数目及其传播速度是旋转失速的基本特征参数。在一截面沿周向夹角为  $\theta$  安装两支相同的锥膜探针, 同步记录其输出信号。两路信号周期相同, 延迟时差为  $\Delta\tau$ 。若假设两支探针之间存在  $N$  个失速团, 且探针感受到的失速信号的频率为  $f$ ,  $n$  为一周总失速团数目, 由此可导出

$$\Delta\tau = \theta n / 2\pi f - N / f = r\theta / V_{pa} - N / f \tag{1}$$

其中  $V_{pa}$  为失速团传播速度,  $V_{pa} = 2\pi r f / n$ 。利用转子后和静子后的两个测量截面 ( $\theta_1 = 60^\circ$ ,  $\theta_2 = 45^\circ$ ) 进行两次实验便可确定总失速团数目

$$n = 2\pi f (\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) / (\theta_1 - \theta_2) \tag{2}$$

其中, 时差  $\Delta\tau_1$ 、 $\Delta\tau_2$  通过输出电压信号的互相关分析确定; 频率  $f$  由 Fourier 变换或功率谱密度函数确定。

转子出口环形截面内失速区范围依靠钩膜探针及锥膜探针进行测量。在转子后, 距轮毂 90% 叶高处轴向放置一支钩膜探针, 测量过程中位置不变, 其信号作为参考信号。锥膜探针沿径向作 5 次测量, 各测点距轮毂分别为叶高的 17%、25%、55%、82% 和

90%。求对应的锥膜信号和钩膜信号互相关函数以确定其时差  $\Delta\tau$ 。设某确定半径  $r$  处转子线速为  $U$ , 在相对坐标系中失速团扫过的周向范围为  $(U - V_{pa})\Delta\tau$ 。利用集平均运算消除各信号湍流脉动的影响后, 以钩膜探针的集平均运算作参考基准, 首先确定距轮毂 90% 叶高处的失速区范围。再由各径向位置处失速团所扫过的不同周向范围, 确定其余 4 个径向位置的失速团边缘与 90% 叶高处失速团边缘的相对位置。即通过各锥膜探针信号的集平均结果与同时间段内的钩膜探针信号的集平均结果相互比较判断其间“超前”或“滞后”的关系。

采用三孔探针测定失速流场参数。圆柱形三孔探针(其轴与来流垂直)不对向测量气流参数的根据是: 气流绕圆柱体流动时, 圆柱表面任一点的压力与来流方向、总压和静压等参数存在确定性关系。现定义如下无量纲参数:

$$\text{方向参数: } A = (2p_2 - p_1 - p_3) / (p_1 - p_3) \quad (3)$$

$$\text{静压参数: } B = (2p - p_1 - p_3) / 0.5[(p_2 - p) + |p_1 - p_3|] \quad (4)$$

$$\text{总压参数: } C = (p^* - p) / (|p_2 - p| + |p_1 - p_3|) \quad (5)$$

这里, 压力  $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_3$  分别为测孔 1、2 及 3(图 2)感受的压力值。 $p$  为流场静压,  $p^*$  为流场总压。可以证明参数  $A$ 、 $B$  和  $C$  是气流方向与三孔探针 3 孔间夹角的函数。

通过吹风校准确定无量纲参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  与气流方向的关系曲线。实验结果表明所用探针测量气流方向变化范围可达  $\pm 65^\circ$ 。初步对该孤立转子测量发现, 失速区内气流角度变化大约在  $100^\circ$  以内。因此可根据初步测量结果, 实验前选取一合适角度固定探针以避免实验过程中再作转动。利用该三孔探针, 既要测量转子前又要测量转子后的失速流场参数, 但仍须选用钩膜探针提供参考信号。由三孔探针经压力传感器得到电压信号, 同样利用集平均运算消除湍流脉动的影响。集平均运算时取周期数为 50, 每个失速周期内包含 50 至 100 个点。根据每点 3 孔压力  $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_3$  的集平均结果, 结合校准曲线, 确定在该点垂直于探针轴线平面内的方向角  $\alpha$ 、静压  $p$  和总压  $p^*$ 。因不同速度系数( $\lambda = V/a_{cr}$ )下校准曲线的重合性并不理想, 可通过迭代修正法得到正确结果。最后结合热电偶测量的总温值便可确定流场各参数。

虽然在失速区离心力影响相当强烈, 但速度的径向分量比另外两分量仍然相当小。因此, 由径向分速带来的误差可略去不计。上述测量方案仅以复现旋转失速流场的二维性为主。

### 3 叶栅几何参数对失速流场的影响

实验中采用不同安装角  $\gamma$ 、不同平均半径稠度  $(b/t)_{cp}$  组合下的孤立转子。实验测出的失速起始点换算流量  $G_{cor}$ 、失速团数目和相对传播速度列于表 1 中。图 3 给出了表 1 中各种情况在环面内失速区所占范围。从图中看出, 安装角增大  $5^\circ$  并不影响失速团结构, 而减小  $10^\circ$  则双团的全叶高失速合并为一团, 失速区所占范围略有减小。把稠度缩减一半后虽然维持双团全叶高失速, 但失速区所占范围减小。

表 1 不同安装角、不同稠度下失速团数目及传播速度

$(b \cdot t)_{cp}$	1.165	1.165	1.165	0.583
$\gamma$	$42.9^\circ$	$32.9^\circ$	$47.9^\circ$	$42.9^\circ$
$n$	2	1	2	2
$f \cdot n$	85.5	77.5	85.6	69.4
$V_{pa} / U$	0.62	0.57	0.63	0.51
$G_{co2}$	2.3553	3.0442	2.0043	2.4103

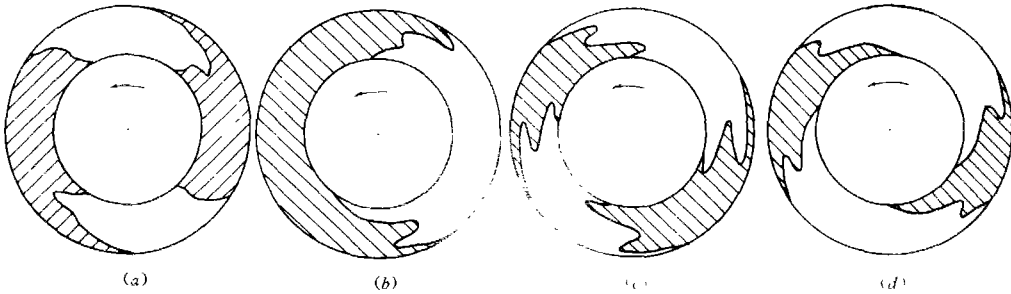


图 3 转子出口截面失速区范围

(a)  $\gamma = 42.9^\circ$ ,  $(b/t)_{cp} = 1.165$  (b)  $\gamma = 32.9^\circ$ ,  $(b/t)_{cp} = 1.165$

(c)  $\gamma = 47.9^\circ$ ,  $(b/t)_{cp} = 1.165$  (d)  $\gamma = 42.9^\circ$ ,  $(b/t)_{cp} = 0.583$

图 4 给出了孤立转子在设计安装角及设计稠度下距轮毂 90% 叶高处非失速区和失速区的参数变化情况。 $C_{pt} = (p^* - p_a) / \rho U^2$ 、 $C_{ps} = (p - p_a) / \rho U^2$  分别为总、静压系

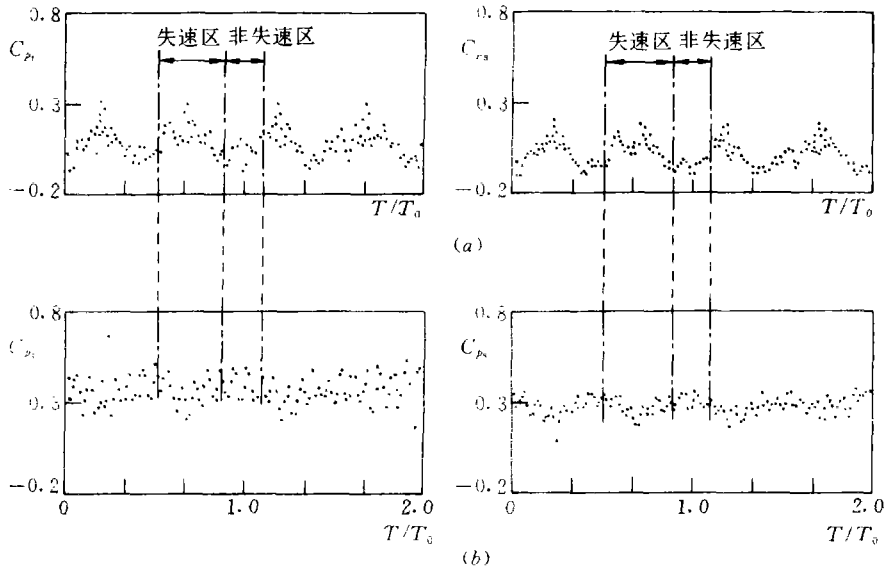


图 4 总、静压系数变化规律 ( $\gamma = 42.9^\circ$ ,  $(b/t)_{cp} = 1.165$ ) (a) 转子前 (b) 转子后

数;  $p_a$  为大气压;  $T_0$  表示信号周期;  $t$  表示时间。图 5 是由流速和流向的测量结果得到的速度矢量分布图。从中看出, 转子前失速团前、后缘总、静压均较小, 表示该处损失较

高。转子后参数分布也有相同规律, 只是相对平缓些。从固定于失速团的相对坐标系看, 转子叶排以速度  $U - V_{pa}$  从其尾缘进入失速区。这意味着在一个很短的周向距离内(文献[3]认为大约是叶片周向栅距量级), 叶排从非失速区过渡到失速区, 使转子叶片通道内气流速度急剧下降。失速区边缘处参数变化比较剧烈, 其原因可能是非定常惯性力在当地起支配作用的结果。失速区内速度分布确实以切向为主, 方向与转子旋转方向大体相同; 大小略小于转子切向速度。失速区前、后缘存在穿越现象。

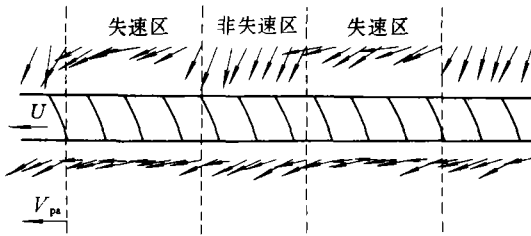


图5 流场速度矢量图

( $\gamma = 42.9^\circ$ ,  $(b/r)_{cp} = 1.165$ )

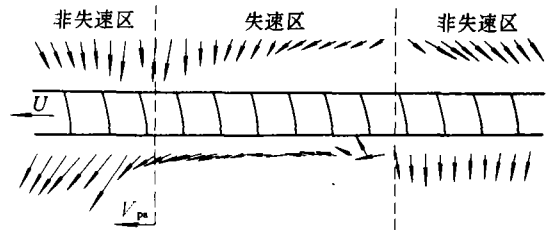
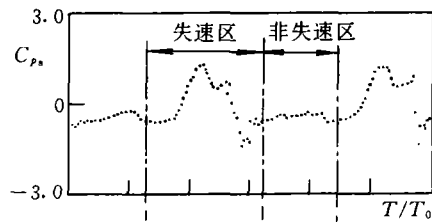
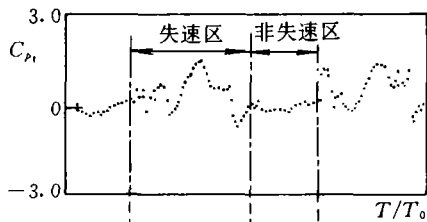
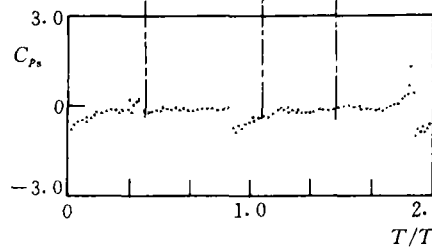
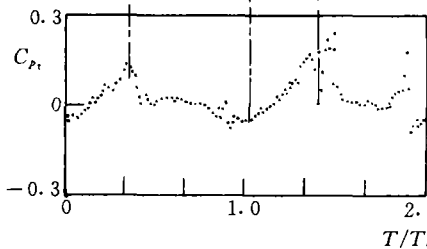


图6 流场速度矢量图

( $\gamma = 32.9^\circ$ ,  $(b/r)_{cp} = 1.165$ )



(a)



(b)

图7 总、静压系数变化规律 ( $\gamma = 32.9^\circ$ ,  $(b/r)_{cp} = 1.165$ ) (a)转子前 (b) 转子后

图6和图7给出了孤立转子在  $\gamma = 32.9^\circ$ 、设计稠度下的测量结果。与前述情况有以下明显区别: 此时出现单团全叶高失速结构, 失速程度剧烈得多, 失速区占多半环面; 转子前后缘压力变化很陡, 总、静压都出现极小值, 前缘总压稍有升高; 转子后速度矢量图显示了明显的倒流现象; 失速区前缘处出现明显分离现象, 且速度较低, 方向比较杂乱。

图8和图9给出了孤立转子在  $\gamma = 42.9^\circ$ ,  $(b/r)_{cp} = 0.583$  时的测量结果。与第一种几何状态相比, 转子叶排稠度减小一半后, 失速流场结构未出现质的变化。其特点是失速剧烈程度减弱。在转子前, 失速区前、后缘附近压力变化均无明显间断出现。转子后, 失

速区与非失速区无明显边缘特征。由速度矢量看转子前、后均无明显倒流现象，但失速区前后缘仍有明显穿越流动现象。

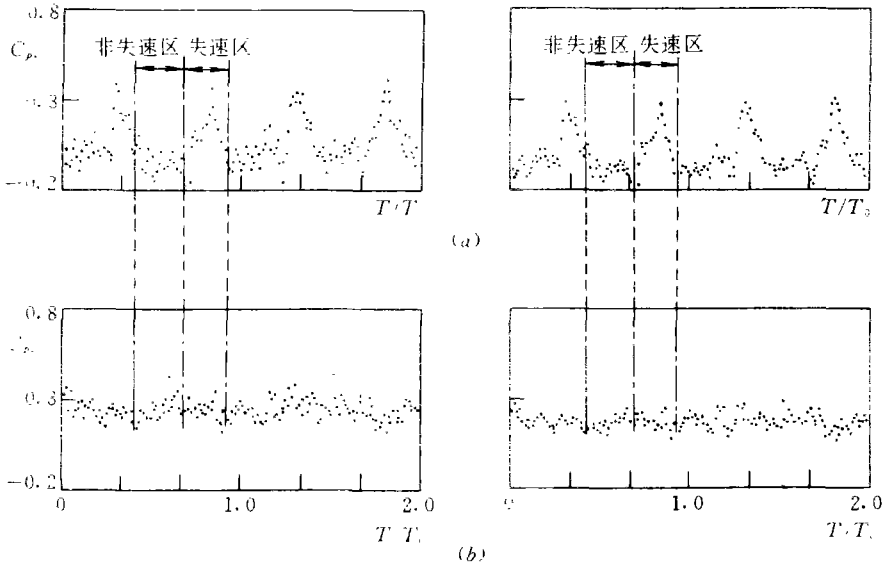


图 8 总、静压系数变化规律 ( $\gamma = 42.9^\circ$ , (a),  $(t_{cp})_0 = 0.583$ ) (a)转子前 (b)转子后

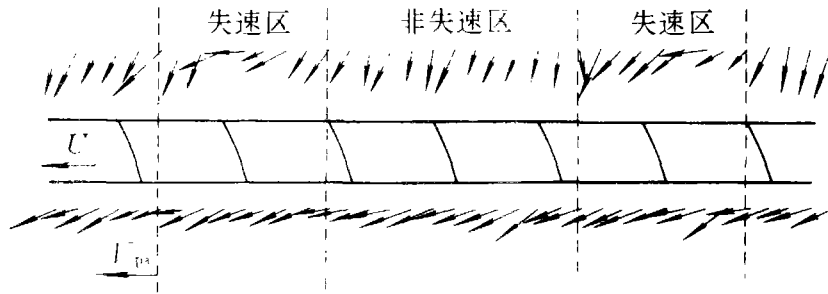


图 9 流场速度矢量图 ( $\gamma = 42.9^\circ$ , (b),  $(t_{cp})_0 = 0.853$ )

上述实验均为孤立转子在非设计转速下进行的。其结果是否适用于多级轴流压气机还有待进一步的实验结果。

### 参 考 文 献

- 1 Day I J. Detailed Flow Measurements during Deep Stall in Axial Flow Compressors. AGARD-CP-177, 1976.
- 2 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, 1984, 106: 542~551
- 3 Cumpsty N A, Greitzer E M. A Simple Model for Compressor Stall Cell Propagation. Transactions of the ASME, 1982, 104(1701): 170~176