

用热线风速仪研究轴流压气机的 非定常流场及端壁附面层

西北工业大学 林其勋 郭捷 李亚平 肖宁芳

摘 要

根据轴流压气机特点和热线风速仪特性,对测试技术作了一些新尝试,本文总结这些方法,并提供若干典型结果。大量试验表明这些方法有效。

一、失速团参数的测量

用三枝同型热线探针作同样安装,沿周向不等间隔分布。失速时同步记录三个同性性质信号(图1)。按两枝探针信号时差 t 及信号频率 f 代入式(1)推算失速团数 N 。但因两枝针间所夹失速团数 m 未知,虽得两个方程,却有三个未知数 N 、 m_1 、 m_2 ,得不定解。

$$N = (360/\theta)(ft + m) \quad (1)$$

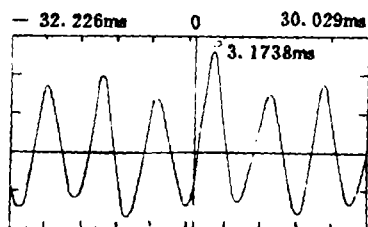


图2 针1与针2信号的互相关函数

N 、 m 必是正整数,故可推算出两个系列的 N 值。如某工况 $f=104\text{Hz}$,对于 $\theta_1=60^\circ$, $t_1=3.17\text{ms}$ 按式(1)得 $N=2, 8, 14, 20, 26, \dots$;对于 $\theta_2=45^\circ$, $t_2=2.69\text{ms}$ 得 $N=2, 10, 18, 26, \dots$ 。但 N 只能相同,

故可能为2, 26, 50, $\dots$ 。存在一个 $(360/\theta_1)$ 和 $(360/\theta_2)$ 的公倍数24的团数混淆。但本压气机只有30片动叶,不可能 $N \geq 26$,故推定 $N=2$ 。以纯数学观点,似乎稍许改变 θ_1 、 θ_2 可使上述公倍数消失,避免这种混淆。但失速信号的强随机性(见图1)将使这作用被掩盖而失去意

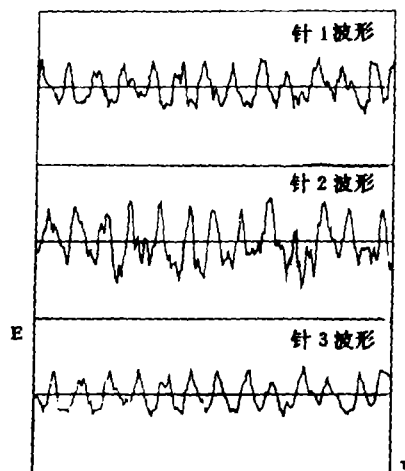
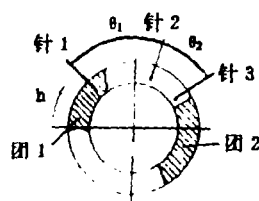


图1 某失速工况同步记录的时差信号

义。图1还说明随机性将使从实录波形图上量测 t 及 f 产生多大误差。必须用互相关分析确定 t (见图2), 用谱分析确定 f 。即便如此, N 的误差仍可达12%。好在 N 的整数性质使这仍可被允许。从图1还可见两个失速团大小悬殊, 而且同一团从叶尖到叶根所占圆心角也不同。如图中国1所示。最后, 失速团传播速度 $h=f/V$ 。

二、二元动态速度矢量场的测量

研究动叶尾迹及失速团的速度场时需测二元动态速度矢。

第一种方法, 用一 x 形探针如图3a布置。丝A沿叶轮径向, 丝B沿切向。亦可分用探针A、B, 处于不同周向位置测量(图3b), 它们还可是一枝纤维膜A与一枝热膜B。因测动叶尾迹时压气机转速已知; 测失速团流场时 h 可事先测出, 故不同点记录的针A波形(图4a)可按时差移成与针B波形(图4b)同步, 相当于同点同步记录。动态信号的随机性则用多个样本作统计平均圆整, 如图4。由(图5A)可见输出主要取决于速度矢的模 $|V|$, 而对其切平面方向变动不敏感。由(图5B)可见输出中既含速度信息, 更显含方向信息。对探针作仔细校准可获其速度角度综合特性, 针A各 γ 等于常数的曲线族要比图6例示密集得多。

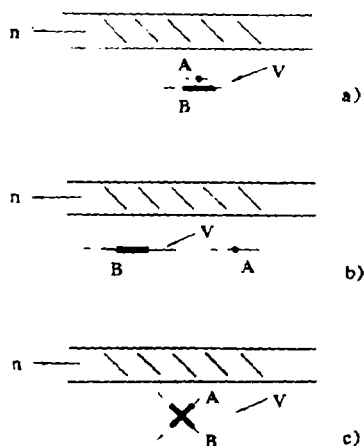


图3 测量动态速度矢量时的探针布置

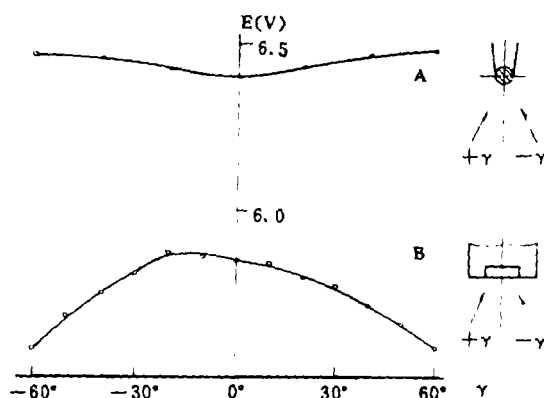


图5 纤维膜A及热膜B的角度特性

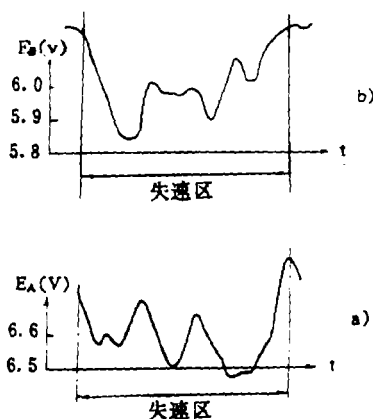


图4 时移后的失速信号图

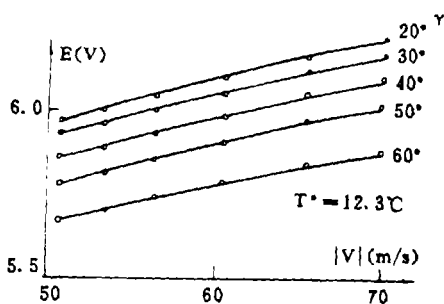


图6 热膜B的综合校准特性(部分)

从图4取同一时刻 t 的 E_A 、 E_B 。按 E_A , 忽略 γ , 直接从针A的校准特性插值求 $|V|$ 。再按此

V 及 E_b 从针 B 的特性 (图6) 插植求 γ 。实践表明, 此法的速度误差 $\neq 3\%$, γ 误差 $\neq 3^\circ$ 。当然可以以此为首近, 再按综合特性作叠代计算, 但这并无实质改进。

求得 $|V| = F_1(t)$ 及 $\gamma = F_2(t)$, 即获相对座标上的速度矢量场 (图7a), 再减去 h (在动叶尾迹测量时则减去叶轮切线速度) 即获得相对座标上的速度矢量场 (图7b)。

此法优点是直接先确定 $|V|$, 很直观。缺点是针 B 不能判别 γ 值的正负。故须事先测出速度时均值的方向, 然后把针 B 预置于合适的角向位置, 以保证瞬时速度的方向 γ 不变号, V 相对于针 B 总处于 $60^\circ > \gamma > 0^\circ$ 或 $-60^\circ < \gamma < 0^\circ$ 的范围内, 以避免混淆。测出 γ 后, 求绝对座标上的速度矢时, 再加 (或减) 这个角度预置。如图4的信号即在针 B 顺时针转过 50° 的情况下获得的, 所有 γ 值加上 50° 即图7a 的绝对座标速度矢方向。

第二种方法, 使 x 形探针的丝 A 与丝 B 均处切平面中 (图3c)。也可使针 A 、针 B 沿周向分开作不同点测量。此法优点是可按 E_A 、 E_B 在 $-45^\circ < \gamma < +45^\circ$ 范围内判别 γ 正负, 测出 $|V|$ 及 γ 。缺点是不能从波形图直观看出 $|V|$ 的变化规律。另外, $\pm 45^\circ$ 范围并不够宽, 故同样要求予测速度时均值方向, 以便予置探针于合适的角向位置, 保证 V 总对着各热丝的不变侧。

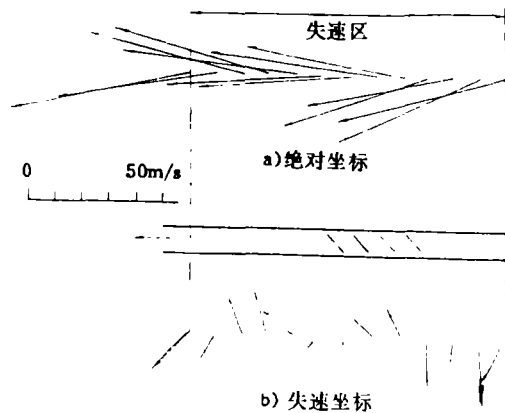


图7 某工况失速团内的速度矢量场

三、端壁附面层的测量

轴流压气机总损失中, 端壁附面层的比重很大。研究时主要对时均速度矢及统计参数的沿径分布感兴趣, 对探针沿径的空间分辨力要求很高。第二种测量方法虽分辨力高, 但因丝 A 与丝 B 所测参数不严格属于同一半径故改用单丝旋转法, 用单热丝先处于图3c 中 A 位置测一次, 保持压气机工况, 把针转过 90° , 置丝于 B 位置再测一次, 以保证测得参数严格同一径位。从图8可清晰看出速度矢沿径迅速减小并趋沿轴向。

因静叶尾迹的影响, 静子后端壁附面层的分布随周向位置 θ 而异。本压气机静子可绕轴转角度, 故用单丝旋转法可测出这种分布 (如图9及图10)。

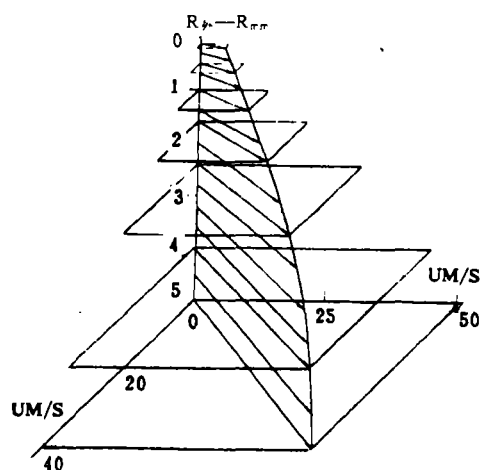
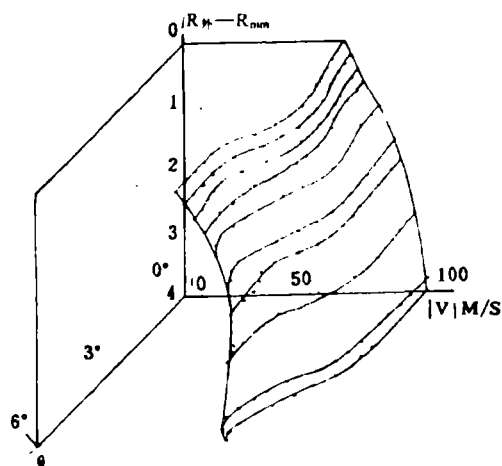
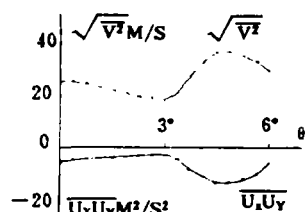


图8 转子后附面层中速度矢时均值的沿径分布
(图中: U 为轴向分速; V 为切向分速)

图9 静子后附面层中的 $|V|=f(R, \theta)$ 图10 静子后附面层中的 $\sqrt{V^2}=f(\theta)$
及 $\overline{U_x U_y}=f(\theta)$

四、几个影响因素

首先是污染的影响。压气机试验时进气无过滤,有不少灰尘,再加轴承难免漏油在气流中形成油雾。二者在探针表面堆积,影响对流换热规律,从而改变灵敏度。此影响随探针型式而异,并随时间增加。无统一规律,无法修正。热膜结构牢固,可经清洗使校准特性还原。对于本压气机,只要使用时间累计不超过30分钟即抽出热膜进行清洗,污染的影响即可控制在允许的范围内。但热线脆弱,不能用清洗的办法。只有进行实时校验,即在压气机试验中靠三孔针及热电偶测出气流稳态参数以决定热线的实时特性。

其次是温度的影响。压气机出口总温随工况而变,这直接影响探针的校准特性。虽可经计算作近似修正,但仍有剩余误差。最佳的办法还是实时校验。

在端壁附面层测量中还有探针孔对附面层流场的干扰问题。在压气机级间,空间狭窄。测外端壁附面层时,只能从外壁开孔沿径向插入探针。这探针孔使当地附面层流线向孔内扭曲。针对本压气机,我们对这种扭曲的影响作了预研,发现当探针孔直径为4.1mm时,这种影响只波及离壁 $>0.15\text{mm}$ 范围。超出0.15mm之后,误差 $>5\%$,基本可满足要求。

INVESTIGATION ON UNSTEADY FLOW FIELD AND ENDWALL BOUNDARY LAYER IN AXIAL FLOW COMPRESSOR WITH HOT-WIRE ANEMOMETER

Lin Qixun, Guo Ningfang, Li Yaping, Xiao Ningfang

(*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT The measurement method of rotating stall is presented. The time difference between two signals and its frequency are determined correctly on the basis of the cross correlation and spectrum analysis. Then, the number of rotating stall regime, its spread velocity and its form are obtained. The methods of the two-dimensional unsteady flow measurement are described. The velocity distribution of the unsteady flow, for example a rotating stall cell, is obtained. A rotating probe wire method is applied to measuring the two-dimensional boundary layer. The results measured behind a single rotor and a stator are shown in the paper. The contamination from dirt, the influence of air flow temperature and the boundary layer flow field disturbance caused by probe hole had been considered.

MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL FLOW IN TURBOMACHINERY WITH A SINGLE SLANTED HOT-WIRE

Li Yuchun and Jiang Haokang

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT An improvement to measuring three-dimensional mean flow field in turbomachinery with a single slanted hot-wire is presented. The method features high accuracy and broad angular measuring range. In order to obtain the three-dimensional flow field, the single slanted wire sets in several positions around the probe axis. The data are sampled with the help of a high speed data acquisition system and the phase-locked ensemble average technique. Then, the three-dimensional mean flow field is calculated by means of a data processing program developed by the authors. A periodic three-dimensional flow field at the exit of an axial-flow compressor rotor successfully measured. A proof calculation against the calibration data shows that the errors in velocity measurement are less than one percent of the mean velocity and the errors in the flow direction are less than one degree.

MEASUREMENT OF THREE-DIMENSIONAL MEAN AND TURBULENT FLOW FIELD WITH A DOUBLE SLANTED HOT-WIRE PROBE

Chen Fan and Jiang Haokang

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT A method to improve the measurement of three-dimensional mean and turbulent flow field with a double slanted hot-wire probe is presented. A prominent feature of the method is that the coefficients of direction k and h are determined according to the directional characteristics of