

离心压气机无叶扩压器旋转失速实验研究

西北工业大学 楚武利 西安交通大学 姜桐

一、前言

人们通常把呈现准同步的旋转速度脉动这种不稳定流动现象定义为旋转失速。当压气机的流量减小到一定程度会出现这种现象。它使得压气机的性能下降,甚至可构成激振源,限制了压气机的运行范围。因此研究失速的特征对设计和运行压气机有一定的指导意义。

随着对旋转失速的研究,已经认识到叶轮进口导叶,叶轮和扩压器都有可能引起失速^[1~3]。失速的产生与叶轮形式,扩压器几何形状及其出口边界条件有密切关系。以前的研究只测出整个级的失速现象,很少区分失速的起源,无法判别失速来源于那个部件,使得各个文献的测量结果差异很大。为了对扩压器的失速详细了解,本文选用强后弯型叶轮,它比前向及径向叶轮流动的稳定区域广,从而可确定由无叶扩压器引起失速的特征。

二、实验装置及测点位置

叶轮采用半开式(图1),其外径为160mm,叶片出口角 16° ;叶片型线为单圆弧,叶片数为5,无叶直壁扩压器的宽度与叶轮出口宽度均为6mm,无叶扩压器出口半径 r_4 与叶轮出口半径 r_2 之比为2.16。叶轮由直流电机带动,其转速在 $0 \sim 20000 \text{ r/min}$ 内连续可调。在两条夹角为 40° 的径向线上各选5个测点a、b、c、d、e,其径向位置与叶轮出口半径之比依次为1.16, 1.25, 1.33, 1.50, 1.75。在两条径向线上,放置两个热线探针,其轴向位置可通过坐标架改变,按文献[4]中的方法,可测出失速团数及传播速度。

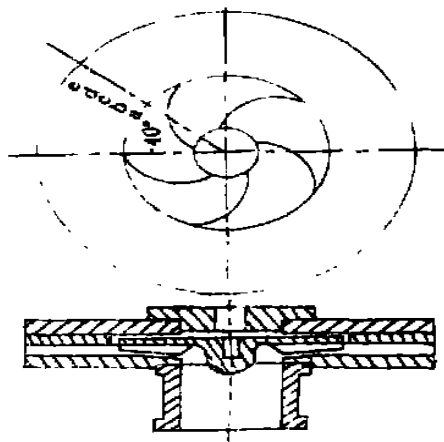


图1 单级离心压气机简图

三、测量结果及分析

1. 失速的产生及发展 在 12000 r/min 下,用热线测量叶轮出口流动,旋转热线探针,使其输出的直流分量最大,这样热线与气流方向垂直。图2给出了设计工况下扩压器中b点的

速度波形, 此时热线距轮盘 3mm, 流量系数 $C_r/U_2 = 0.10$, (C_r 为叶轮出口气流的径向速度, U_2 为叶轮圆周速度) 速度图上已取掉了直流分量, 仅给出了脉动量。从谱分析得知, 脉动频率为 1kHz, 与叶片通过频率相同, 说明此时的速度脉动由叶片尾迹引起。当流量系数减小到

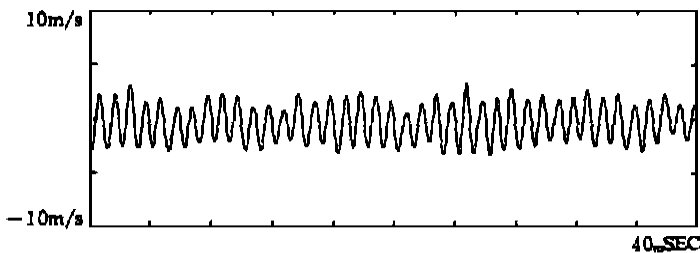


图 2 设计工况下速度波形 ($C_r/u_2 = 0.10$)

$C_r/U_2 = 0.083$ 时, 开始出现旋转失速, 其频率为 72.7Hz, 失速团频率 f 与叶轮转动频率 f_i 之比为 12%, 刚刚开始时的失速并不明显, 而且以间断的方式出现, 随着流量的继续减小, 失速引起扰动的幅度增大, 图 3 给出了 $C_r/U_2 = 0.075$ 时失速的波形及频谱, 失速频率为 79.8Hz, 通过计算得出失速团数为 3, 以 163rad/s 的角速度沿叶轮转动方向运动。当流量系数减小到 $C_r/u_2 = 0.071 \sim 0.059$ 时, 观察到一种新的流动现象, 在同一工况下有两种不同频率的失速交替出现, 图 4 上其脉动频率分别为 89.8Hz 和 156.8Hz, 失速团数分别为 3 和 4, 仔细观察表明低频和高频失速之间的转变是突跃的, 不存在过渡环节。起初作者猜想在此工况下叶轮是否也发生了失速, 但通过对单独叶轮进行测量发现, 叶轮并没有失速, 这两种失速现象均由扩压器引起, 具体原因仍需进一步探讨。当流量系数小于 $C_r/u_2 = 0.059$ 后, 又呈现单一的失速现象, 失速团数为 3, 失速频率随流量的减小继续增加, 流量系数 $C_r/u_2 = 0.032$ 时, 失速频率为 134Hz, $f/f_i = 22\%$, 这就是无叶扩压器中失速现象随流量变化的演变过程。

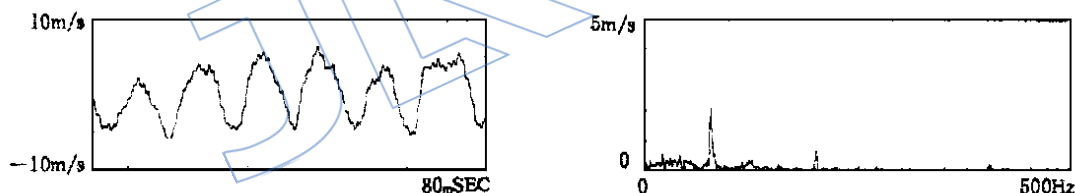


图 3 失速波形及频谱 ($C_r/u_2 = 0.075$)

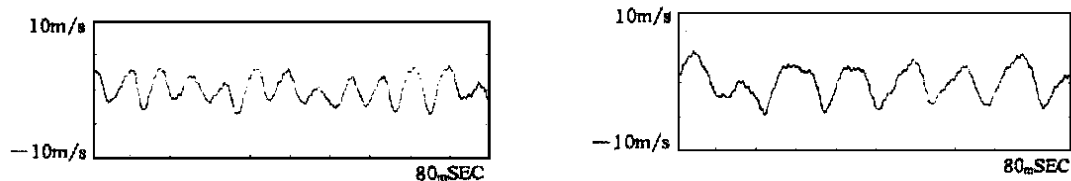


图 4 同一流量下的两种失速波形 ($C_r/u_2 = 0.059$)

2. 失速的空间特征 沿轴向及径向分别移动探针, 可测出失速参数在空间的变化。沿轴向移动探针时, 在各个位置都可感受到失速, 失速频率沿轴向并不发生变化, 说明失速团占据了整个轴向位置。沿径向的测量结果表明, 在一同径向线上失速引起脉动的相位是相的, 同失速频率沿轴向并不发生变化, 说明失速团占据了整个轴向位置。沿径向的测量结果表明, 失

速频率沿径向并不发生变化, 不过在径向位置 $r/r_i = 1.16 \sim 1.33$ 的范围内, 失速波形稳定, 这给确定失速团数带来方便。沿空间的测量结果表明, 旋转失速一旦出现会波及到整个扩压器中, 它是一种大尺度的不稳定流动, 会引起整个流场速度周期性的脉动。

3. 叶轮与扩压器失速的区分 由于叶轮进口导叶, 叶轮及扩压器产生的失速均可传至扩压器, 因此在扩压器中感受到的失速, 并非一定由扩压器引起。为此本文对单独叶轮进行试验, 取掉无叶扩压器, 叶轮出口气体直接排入大气, 用两根热线分别在叶轮进口及出口进行测量, 试验表明 $C_r/u_2 = 0.07$ 时, 叶轮开始出现失速, f/f_i 为 30%。 $C_r/u_2 = 0.032$ 时, $f/f_i = 40\%$, 叶轮失速后, 在其上游靠近进口处可感受到明显的速度脉动, 其频率与叶轮出口一致, 而装上扩压器后, 失速工况下叶轮进口部分并没有感受到速度脉动, 因此带有扩压器的旋转失速由扩压器引起, 另外从失速频率也可看出, 叶轮失速频率 ($f/f_i = 30\% \sim 40\%$) 比无叶扩压器失速频率 ($f/f_i = 12\% \sim 22\%$) 要高。

四、结 论

1. 无叶扩压器中旋转失速的特征是渐变型, 失速随流量的减小逐步建立起来, 失速围绕叶轮转动方向运动, 旋转速度较低 ($f/f_i = 12\% \sim 22\%$), 失速频率随流量的减小逐步增加。

2. 失速是一种大尺度的不稳定流动, 一旦出现会引起整个扩压器中速度周期性的脉动, 在扩压器中同一径向线上, 速度脉动的相位相同。

3. 在强后弯型叶轮后的无叶扩压器中, 观察到一种新的流动现象, 即同一工况下交替出现两种不同频率的失速, 失速团数也不同, 其原因仍需进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] Jansen, W., "Rotating Stall in Radial Vaneless Diffusers", ASME Journal of Basic Engineering, Vol. 86, pp. 750-758, 1964.
- [2] Mizuki, S. et al., "Investigation Concerning Rotating Stall and Surge Phenomena within Centrifugal Compressor Channels", ASME-Paper No. 78-GT-9
- [3] Abdelhamid, A. N., Colwill, W. H., and Barrows, J. F., "Experimental Investigation of Unsteady Phenomena in Vaneless Radial Diffusers", Journal of Engineering for Power, Trans. ASME, Vol. 101, No. 1, January 1979, pp. 52-60.
- [4] R. Languier, "Experimental Analysis Methods for unsteady Flows in Turbomachines", ISABE 85-7030

TECHNICAL NOTES

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ROTATING STALL IN A CENTRIFUGAL COMPRESSOR WITH VANELESS DIFFUSER

Chu Wuli (*Northeastern Polytechnical University*)

Jiang Tong (*Xian Jiaotong University*)

ABSTRACT

This paper deals with experimental investigation of unsteady flow in a radial vaneless diffuser. The circumferentially uniform discharge at the exit of the diffuser changes into a periodic circumferentially fluctuating flow state. The experimental measurements show that the properties of rotating stall in the diffuser are very obvious. The results of the investigation indicate that two type of rotating velocity patterns occur successively as the flow rate decreases. Their rotational speeds are different and the pattern with low rotational speed firstly appears.

VALUATION OF FLOW-INDUCED FORCE IN LABYRINTH SEAL

Fan Feida (*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT

The continuity equation and momentum equation of the flow through a sectorial element in labyrinth seal is linearized according to the presumption of the small disturbance and solved with the aid of matrix method. Then the distribution of the pressure on the cylindrical surface of rotor is obtained. Finally, the flow-induced force on rotor is evaluated by means of integration. Numerical example indicates that as the number of seal chamber increases, the flow-induced force increases while the leakage flow rate decreases; when the seal clearance increases, the flow-induced force decreases while the leakage flow rate increases; but both the flow induced force and leakage flow rate decrease when the exit pressure increases.

ANALYTICAL FORMULAS FOR LOGARITHMIC MEAN TEMPERATURE DIFFERENCE AND HEAT-EXCHANGE AREA

Wang Feng, Liu Zhiwei, Hang Zhenxing

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

In order to save energy and metallic material, it is very important to calculate the logarithmic mean temperature difference between the two kinds of fluids and the superficial area of the heat exchanger accurately. The traditional calculational method is too complicated, but the error of simplified method is too significant, so we deduce the formulas for logarithmic mean temperature difference between the cold and hot fluids in a heat exchanger in consideration of their thermophysical properties and the formula for superficial area of the exchanger. The formulas are easy to use and give accurate results.