

文章编号: 1672-9897(2007)03-0038-06

## 低速离心压缩机旋转失速的试验研究

郭 强<sup>1</sup>,竺晓程<sup>1</sup>,杜朝辉<sup>1</sup>,陈 华<sup>2</sup>,赵 岩<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院涡轮机研究所, 上海 200030; 2. 美国 Honeywell 公司, 上海 200000)

**摘要:**对某低速离心压缩机无叶扩压器壁面静压波动和内部流场进行了详细的试验测量,重点研究了小流量工况下的不稳定流动和旋转失速。在试验中,首先使用高频动态压力传感器获得了不同流量工况下扩压器前盖板处的静压波动,并对测量结果进行了频谱分析,以确定旋转失速起始工况点和不同小流量工况下的失速频率。然后使用 PIV 测速设备详细测量了在失速条件下,无叶扩压器及叶轮流道内部的流场变化。试验丰富了对低速离心压缩机旋转失速流动现象的认识,为设计高性能的离心压缩机提供了丰富的实验数据。

**关键词:**旋转失速;离心压缩机;无叶扩压器;PIV

中图分类号:TK453 文献标识码:A

### Rotating stall experimental study of a low-speed centrifugal compressor

GUO Qiang<sup>1</sup>, ZHU Xiao-cheng<sup>1</sup>, DU Zhao-hui<sup>1</sup>, CHEN Hua<sup>2</sup>, ZHAO Yan<sup>2</sup>

(1. School of Mech. and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Honeywell Corporation, Shanghai 200000, China)

**Abstract:** Unsteady flows and rotating stall of a low-speed centrifugal compressor were investigated by measuring vaneless diffuser wall static pressure fluctuation and internal flow fields in detail at different small flow fluxes. Firstly the real time static pressure fluctuations on the vaneless diffuser shroud at different circumferential positions are acquired by high-frequency dynamic pressure transducers. DFT analysis is applied to the experimental results to ascertain the rotating stall beginning operation conditions and stall frequency. Then, the internal flow fields of the centrifugal compressor are investigated with a PIV (Particle Image Velocimetry) system at different small flow fluxes. The flow field development of vaneless diffuser and blade flow passage are given in detail at rotating stall conditions. The experiments enrich the understanding of rotating stall flow phenomenon of the low-speed centrifugal compressor and provide full experiment data for designing high performance centrifugal compressor.

**Key words:** rotating stall; centrifugal compressor; vaneless diffuser; PIV

### 0 引言

目前限制压气机设计性能进一步提高的一个重要因素是压气机中常常出现的旋转失速现象。旋转失速是一种局部扰动诱发的不稳定流动,它限制机器

的稳定工作范围,影响运行的可靠性,在机器的设计和调试中是实现各级匹配的重要障碍,并在过渡态和非设计工况运行中导致灾难性的事故。因此人们不得不在设计阶段就要考虑一定的失速裕度,因此它们的存在是阻碍叶轮机械效率提高和运行稳定的重要

• 收稿日期: 2006-11-08; 修訂日期: 2007-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576052).

作者简介: 郭 强(1978-),男,河南焦作市人,博士研究生,研究方向:叶轮机械内部复杂流动. E-mail: guoqiang0808@sjtu.edu.cn

根源。旋转失速现象可能发生在离心压缩系统的任何部分或其组合(如叶轮,有叶和无叶扩压器)。叶轮和有叶扩压器的失速可归因于叶轮和扩压器叶片在大的正迎角情况下的流动分离。许多研究者对之进行了详细的研究,如 Tramm & Dean 和 Lakshminarayana & Runstedler<sup>[1-2]</sup>。无叶扩压器内的试验研究大致可分为定常和非定常两大部分。定常的流动测量包括扩压器进口流动研究<sup>[3]</sup>,扩压器本身内部流动研究<sup>[4-5]</sup>和扩压器失速对压缩机喘振的影响<sup>[6]</sup>。这些研究侧重于压缩机内部的流动。对扩压器内部非定常流动特征的研究主要包括 Abdelhamid 和其合作者<sup>[7-9]</sup>, Senoo 和 Kinoshita, Van Den Braembussche<sup>[8-9]</sup>等人的工作。

他们主要使用热线和压力传感器获得了关键进口流动角和旋转失速的基本特征,如失速团的数目及旋转速度。但是相关文献中没有提供失速条件下,压缩机内部详细的流场测量结果。笔者在一带无叶扩压器的低速离心压缩机试验台上,综合使用高频动态压力传感器和粒子图像测速仪(PIV)对不同小流量工况下无叶扩压器和叶轮流道内部的不稳定流动进行了详细的试验测量,获得了压缩机旋转失速的基本特征及详细流场,丰富了对低速离心压缩机旋转失速现象的认识。

## 1 实验仪器及设备

实验装置由进口集流器、离心叶轮、无叶扩压器和涡壳几部分组成(如图1)。通过测量进口集流器壁面静压差可以计算得到压缩机进口质量流量:

$$m = \alpha \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\rho_0 \Delta p} \quad (1)$$

根据该试验装置布置,进口集流器流量修正系数 $\alpha$ 取值为0.986。式中, $D$ 为进口集流器直径(m); $\rho_0$ 为试验条件下的空气密度(kg/m<sup>3</sup>); $\Delta p$ 为平均静压压差(Pa);

试验时,通过减小出口流通面积减小进口流量,可以研究小流量下的旋转失速现象。

试验离心风机叶轮参数如表1所示。无叶扩压器为平行直壁无叶扩压器。无叶扩压器的宽度与叶轮出口宽度相同,进口直径为400mm,出口直径为600mm。

试验中,3个高频动态压力传感器(Model CYG1406)被安装在无叶扩压器前盖板上(如图2)测量壁面静压波动。通过调整传感器不同的周向及径

向安装位置,分析静压波动信号,可以获得失速团的数目、失速团沿周向的传播速度及空间分布。该传感器测量范围为-100~500Pa,测量精度为0.25%,频响为2000Hz。传感器信号经CB-68LP数据采集板后输入PC机存储。

表1 叶轮参数

Table 1 Rotor parameters

进口 直径	出口 直径	进口安 装角	出口 安装角	叶片数	叶片 高度
240mm	400mm	36°	76°	13	35mm

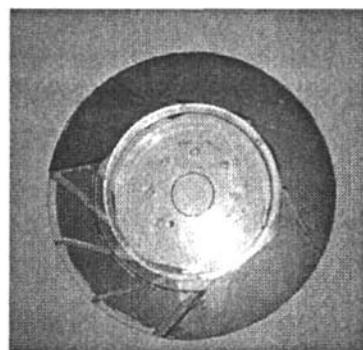
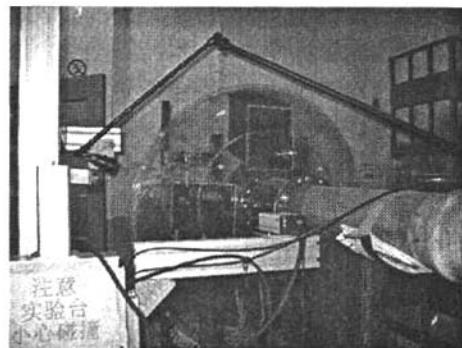


图1 测量装置和实验叶轮

Fig. 1 Experimental equipment and rotor

该实验所使用的两维PIV系统由丹麦的Dantec公司生产。PIV系统的图像拍摄系统有激光源、CCD相机和处理器等组成。实验中,采用两台双谐振脉冲式Nd:YAG激光器为光源,如图1所示。采用两台独立激光器,可以很方便地选择两个激光脉冲之间的时间间隔,而且时间间隔可以达到微秒级,扩大了速度测量的范围。在实验中,必须保证两台激光器形成的光斑有良好的重合度,以保证测量在同一测量区域上,而且强度最好相近。实验中采用Kodak Megaplus ES1.0互/自相关数字相机,分辨率为1018×1008象

素。在相机镜头前还加上一个标准的 60mm 镜头(Nikon Micro Nikkor 60/2.8), 在实际测量中, 调节镜头就可以保证 CCD 相机的焦平面和被测量平面一致。

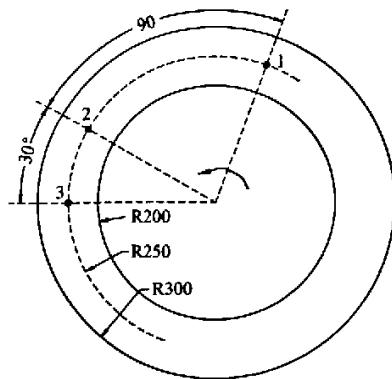


图 2 压力传感器径向测量位置

Fig. 2 Pressure transducer measurement radial positions

## 2 试验结果分析

### 2.1 离心压缩机性能曲线

图 3 给出了叶轮 800r/min 转速下, 离心压缩机流量-总压升性能曲线。离心压缩机总压升为出口总压与进口总压之差。离心压缩机气源来自大气压, 可认为进口总压为 0。出口总压由离心压缩机出气试验测量段的静压和动压测量值算出, 但要对离心压缩机出口与测量处之间的压力损失进行修正, 即:

$$P_{2\text{tot}} = P_{2s} + P_{2d} + \sum \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v_2^2 + \sum \zeta \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad (2)$$

第三项为压缩机出口至测量处间的流动损失, 第四项为弯管和扩散管处的局部损失。

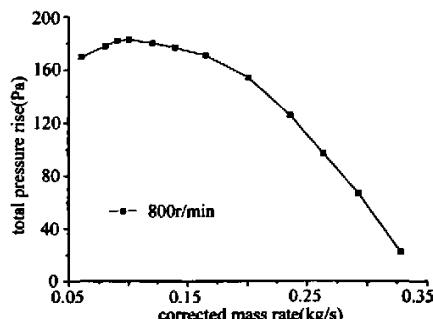


图 3 性能曲线

Fig. 3 Performance curve

由图可见, 随着质量流量的减小, 总压升在质量流量 0.10kg/s 时达到最大值。随着质量流量的进一步减小, 总压升开始下降, 性能曲线斜率为正, 易发生不稳定流动。由于本文研究的重点为不稳定流动和旋转失速, 故试验测量工况点选定在性能曲线斜率为正的区域, 质量流量分别为 0.10kg/s, 0.09kg/s, 0.08kg/s 和 0.06kg/s。

### 2.2 不同流量下静压脉动及频谱分析

试验中, 3 个高频动态压力传感器分别安装在测量位置 1, 2 和 3(如图 2 所示), 同时进行采样。采样频率为 1000Hz, 采样时间为 8s。图 4 给出了质量流量为 0.09kg/s 时, 3 个传感器测量得到的扩压器前盖板壁面静压脉动的频谱分析结果。3 个传感器测量位置周向间隔分别为 30° 和 90°。在该试验中, 叶轮转速为 800r/min, 叶片数为 13, 故叶片通过频率的基频值(BPF1)为 173.33Hz。为了更加准确地捕捉失速现象, 排除可能的高频噪声的影响, 首先对传感器信号进行了滤波。大于 200Hz 的时域成份被从静压信号中剔除。对滤波后的信号, 采用 Matlab 软件包, 进行 DFT 变换, 获得它的频域信息, 在频域上, 除 BPF1 以外, 一个明显失速频率(7.5Hz)被检测到。

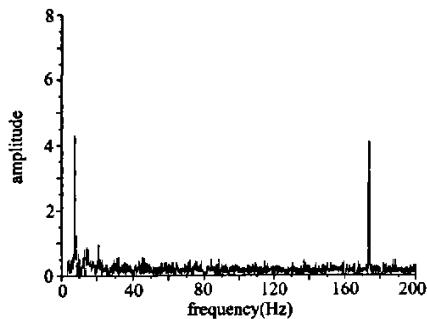


图 4 频谱分析结果 ( $M = 0.09 \text{ kg/s}$ )

Fig. 4 DFT analysis results ( $M = 0.09 \text{ kg/s}$ )

表 2 给出了 4 个小流量工况的传感器数据的频谱分析结果。可以明显发现随着质量流量的减小, 一阶失速频率基本保持不变。

### 2.3 不同径向平面上的流场

为了获得压缩机内部流场, 在不同轴向位置处的  $r-\theta$  面上布置了 3 个测量面, 分别距离前盖板 14.3%、50% 和 85.7% 扩压器宽度, 以下将称这 3 个位置为近前盖板、中间位置和近后盖板, 对该测量面进行二维 PIV 流场测量。图 5 给出了质量流量为 0.06kg/s 时,

锁相平均后的3个测量平面上的相对速度矢量图。锁相平均的公式如下:

$$\bar{V}(x, y, z_0, \theta_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(x, y, z_0, \theta_0) \quad (3)$$

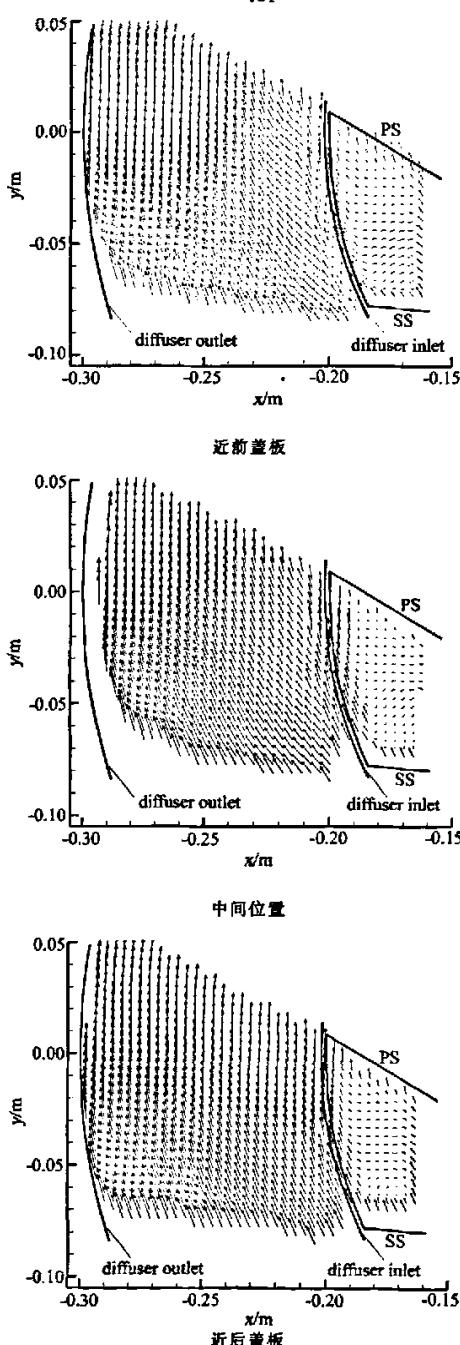


图5 不同径向平面相对速度矢量图

Fig.5 Relative velocity vector in different radial planes

这里,  $z_0$  是轴向位置,  $N$  是在给定轴向位置测量的数目, 在该研究中,  $N = 100$ ;  $\theta_0$  为叶轮相对于测量位置的周向角度。

表2 频谱分析结果

Table 2 DFT analysis results

质量流量 (kg/s)	BPF1 (Hz)	一阶失速 频率(Hz)	二阶失速 频率(Hz)
0.10	173.33	无	无
0.09	173.33	7.5	无
0.08	173.33	7.75	15.5
0.06	173.33	7.5	15

从速度矢量图上,能够看出3个轴向位置处的流动明显不同。在无叶扩压器内靠近叶轮侧,随着测量面沿轴线向后盖板方向推移,近后盖板侧速度矢量分布逐渐与扩压器圆周切线方向靠拢。在扩压器后半部分,由于气体掺混作用,在3个不同测量位置上的速度矢量分布基本相同。在叶轮流道内,随着测量面沿轴线向后盖板方向推移,在中间位置和近后盖板靠近吸力面处则出现了明显的分离区,这主要是叶片旋转失速的影响。

## 2.4 近后盖板侧不同流量下的流场

图6给出了近后盖板侧3个小流量工况下的锁相平均后的相对速度矢量图<sup>[9]</sup>。由图可见在无叶扩压器内,随着质量流量的减小,径向速度逐渐减小,周向流动角度减少。在最小流量时,近后盖板侧速度矢量分布近乎平行于扩压器圆周切线方向。但是在扩压器内都没有出现明显的径向逆流。在流道内,较大流量时(0.09kg/s),在叶片吸力面形成明显分离涡,主流沿着叶片压力面流向扩压器。随着质量流量的减小(从0.09kg/s减小到0.06kg/s),在吸力面侧的分离涡的低速区占据了几乎整个流道,这种流动和Dean<sup>[10]</sup>描述的小流量工况下的叶片失速现象非常吻合。

## 2.5 不同时刻的压缩机内部流场

图7给出了当质量流量0.06kg/s时,近后盖板侧4个不同时刻的相对速度矢量图。

由图可见,在4个不同时刻,无叶扩压器内的流动都没有出现明显径向逆流。而叶轮流道内的流动则完整呈现了失速流动的发展变化。在时刻1,流道内径向流动非常明显,流动非常通畅。主流沿着叶片压力面流出,在吸力面侧没有明显的流动分离。在时

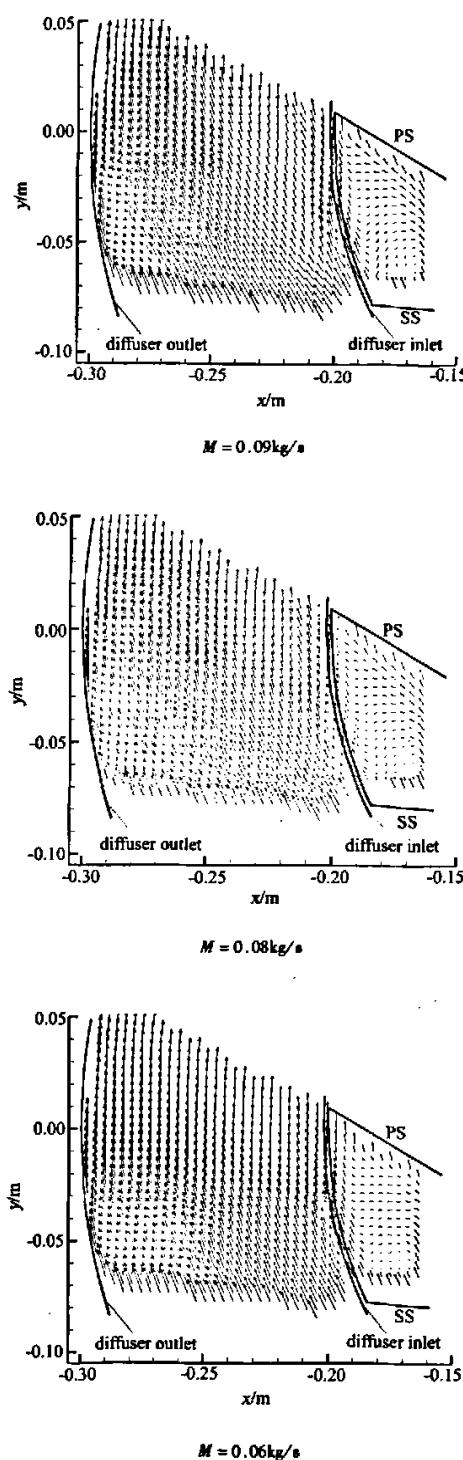
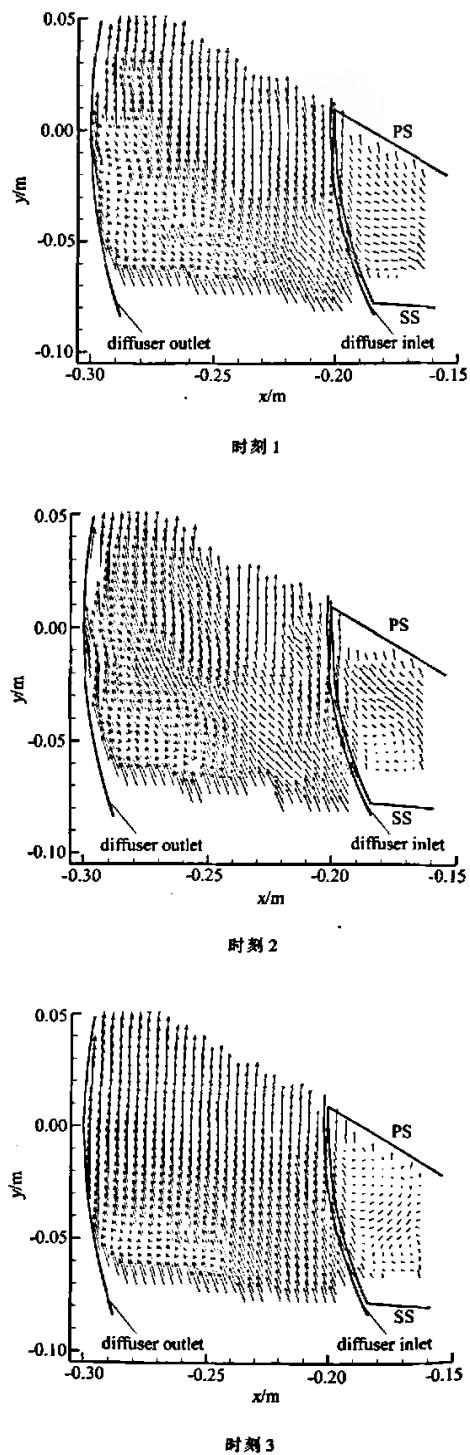


图 6 不同流量下近后盖板侧相对速度矢量图

Fig. 6 Relative velocity vector near the hub at different flow rates

刻 2, 在吸力面侧出现了流动分离, 形成了完整的分离涡。在时刻 3, 在叶片吸力面侧形成的流动分离, 向压力面侧移动, 通道内形成了与叶轮旋转速度相反



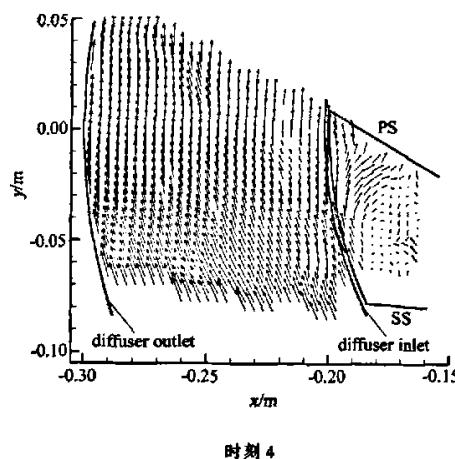


图 7 不同时刻近后盖板侧相对速度矢量图  
Fig. 7 Relative velocity vector near the hub at different moments

的分离涡。在时刻 4, 叶片压力面侧逆流进一步增强, 流道内的分离涡进一步发展壮大, 几乎占据了整个流道, 流动完全雍塞, 而吸力面侧的分离涡几乎消失。瞬时流场的发展变化可以认为试验用离心压缩机在小流量下的旋转失速为叶片失速。

### 3 结 论

根据试验结果, 得出结论如下:

- (1) 综合使用动态压力传感器和 PIV 试验研究了某低速离心压缩机小流量下的旋转失速现象;
- (2) 通过对扩压器壁面静压脉动的频谱分析获得了试验离心压缩机不同小流量工况下失速频率。随着质量流量的持续减小, 失速频率变化很小;
- (3) 锁相平均后的 PIV 试验结果表明, 随着质量流量的减少, 径向速度和周向流动角逐渐减小。在叶片吸力面侧, 所有的小流量下均出现了流动分离, 形成了完整的分离涡。但是在无叶扩压器内始终未出现径向逆流。最小流量时, 近后盖板侧 4 个不同时刻

的相对速度矢量图完整地描述了叶片旋转失速的发展变化过程。

### 参 考 文 献

- [1] TRAMM P C, DEAN Jr. R C, et al. Centrifugal compressor and pump stability, stall and surge [A]. New York: ASME, 1976.
- [2] LASKHMINARAYANA B, RUNSTEDLER P W Jr. Measurement methods in rotating components of turbomachinery [A]. New York: ASME, 1980.
- [3] ECKHART D. Instantaneous measurements in the jet-wake discharge flow of a centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering for Power, 1975, 97: 337-346.
- [4] JANSEN W. Steady fluid flow in a radial vaneless diffuser [J]. Journal of Basic Engineering, 1964, 86: 607-619.
- [5] SENO O, ISHIDA M. Behavior of severely asymmetric flow in a vaneless diffuser [J]. Journal of Engineering for Power, 1975, 97: 375-387.
- [6] TOYAMA K, RUNSTEDLER P W Jr., DEAN Jr R C. An experimental study of surge in centrifugal compressors [J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99: 115-131.
- [7] ABDELHAMID A N, COLWILL W H, BARROWS J F. Experimental investigation of unsteady phenomenon in vaneless radial diffuser [J]. Journal of Engineering for Power, 1979, 101: 52-60.
- [8] VAN DEN BRAEMBUSSCHE R, FRIGNE P, ROUSTAN M. Rotating nonuniform flow in radial compressors [A]. AGARD Cp-282, 1980, 12.
- [9] PANOE N, RIETHMULLER M L, VAN DEN BRAEMBUSSCHE R. Experimental investigation of the flow in the vaneless diffuser of a centrifugal pump by particle displacement velocimetry [J]. Experiment in Fluids, 1989, 7: 371-378.
- [10] DEAN R C. Advanced radial compressors [M]. VKI lecture series 50, 1972.