

DOI: 10.7652/xjtuxb201309003

离心叶轮出口流动分离区影响因素的数值研究

李学臣, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对离心叶轮出口区域的流动分离问题,对影响离心叶轮出口流动分离的 3 种因素进行了数值研究。研究离心叶轮扩压度影响时发现:对于闭式叶轮,叶轮扩压度对出口的流动影响较大,当叶轮的进口与出口相对速度比大于 2 时,设计工况下叶轮出口出现了较大的流动分离区,这与传统的设计理论一致;对于半开式叶轮,设计工况下叶轮出口均出现了流动分离,且分离区的大小随着叶轮扩压度的增加而增大。研究叶顶间隙对离心叶轮出口流动分离影响时发现:叶顶间隙对叶轮出口流动分离区的大小影响显著,就所研究的叶轮而言,并非间隙越小分离区越小,当叶顶间隙为 7.5% 叶轮出口宽度时,叶轮出口流动分离区最小。研究叶片扩压器进口收敛角对半开式叶轮出口流动分离区的影响时发现,增大扩压器进口收敛角可以有效抑制叶轮出口的流动分离,但是收敛角过大,叶轮叶顶间隙区域附近的叶尖回流区增大,整级的气动性能降低。

关键词: 离心叶轮出口;流动分离;扩压度;收敛角

中图分类号: TH432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0016-07

Numerical Research on Influence Factors of Flow Separation near Centrifugal Impeller Outlet

LI Xuechen, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The flow behavior near the centrifugal impeller outlet determines the impeller aerodynamic performance significantly and also influences the performance of the downstream components. The three factors affecting the impeller outlet flow separation were numerically investigated. For the shrouded centrifugal impeller, the impeller diffusion ratio has great influence on its outlet flow behavior; there is a large separation zone near the impeller outlet at the design flow rate when the centrifugal impeller inlet/outlet relative velocity ratio is above 2.0, which agrees with the conventional impeller design theories. For the unshrouded centrifugal impeller, there always exists a separation zone near the impeller outlet at the design flow rate when the inlet/outlet relative velocity ratio is high or low. The tip clearance has a significant influence on the scale of the impeller outlet flow separation zone. For the impeller studied here, the smaller tip clearance does not correspond to the smaller separation zone, and the separation zone is smallest when the tip clearance equals 7.5% of impeller outlet width. In addition, increasing the diffuser pinch angle is effective in controlling the impeller outlet flow separation, but an excessive pinch angle can enlarge the recirculation flow zone near the impeller tip clearance, which will lower the aerodynamic performance of the entire compressor stage.

Keywords: centrifugal impeller exit; flow separation; diffusion ratio; pinch angle

收稿日期: 2013-01-06。 作者简介: 李学臣 (1981—),男,博士生;席光(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976085)。

网络出版时间: 2013-07-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130716.1822.005.html>

离心叶轮出口的流动状态不仅决定着叶轮自身性能的优劣,还会极大地影响着叶轮下游部件的气动性能,因此长期以来一直受到研究者的关注。

Dean 等人首先提出了离心叶轮出口流动的“射流-尾迹”模型理论^[1],随后 Eckardt 使用热线测速系统通过对一台高转速离心式压缩机叶轮下游流场的详细测量,验证了 Dean 的模型理论^[2]。Inoue 等人发现,当扩压器叶片距离叶轮较近且流量不大时,气流会倒流入叶轮^[3]。Rohne 等人发现,与径向叶轮相比后弯叶轮出口的速度场更为均匀^[4]。Pinarbasi 使用热线测速仪对楔形叶片扩压器内的 8 个不同截面的速度测量时发现,虽然闭式离心叶轮的出口气流不均匀,呈现出典型的射流-尾迹特征,但并未出现流动分离^[5]。Kang 等人利用粒子成像测速系统测量时发现,某一离心压气机在小流量工况,无叶扩压器中近盘侧出现了局部回流,认为正是这种回流的累积引起了压气机的旋转失速,通过减小无叶扩压器的宽度实现了回流区域的有效控制^[6]。

席光等人采用三孔和五孔探针对一闭式离心叶轮出口和无叶扩压器内部流场进行测量时发现,即使是高效三元叶轮,其出口流场仍然不均匀^[7]。刘小民等人采用三孔探针沿轴向对叶片扩压器跨盘盖侧流场测量时发现,小流量工况下,叶片扩压器进口截面近轮盖侧出现了较明显的倒流^[8]。楚武利等人采用热线风速仪对一半开式离心叶轮出口测量时发现,流量减小到某一个值时,轮盘侧出现了明显的倒流现象^[9]。李学臣等人的实验研究发现^[10-11],即使在设计流量工况下,半开式离心叶轮出口近轮盖侧也会存在一个较大的流动分离区,这种流动分离区的出现,一方面增大了叶轮的流动损失,增加了叶轮下游扩压器部件优化设计的困难,另一方面当叶轮出口存在较大的流动分离区时,叶轮及扩压器气动性能的测量精确及评价会受到影响。因此,研究影响离心叶轮出口区域流动分离的关键因素,实现对其有效控制,对提高离心压气机的气动性能意义重大。

本文从实际需要出发,通过一个改造的大尺度离心压缩机实验台,研究了引起离心叶轮出口区域出现流动分离的关键因素,并设计出叶轮出口区域不出现较大尺度流动分离的实验叶轮。

1 物理模型及数值方法

本文压气机是一台单级离心式压气机,主要包括进口可调导叶、离心叶轮和叶片扩压器等,几何参

数见表 1。

表 1 离心压气机级的主要几何参数

参数	进口导叶	叶轮	叶片扩压器
进口直径/mm	423.0	421.8	940.0
出口直径/mm	423	796	1 258
进口宽度/mm	115.0	103.9	43.8
出口宽度/mm	115.0	43.8	43.8
叶片数	13	10+10	13

数值计算采用 NUMECA 软件和时间推进法,通过求解雷诺时均 Navier-Stokes(RANS)方程模拟实验离心压气机流道中的定常三维黏性流动。湍流计算采用 Spalart-Allmaras 模型,计算中涉及到二阶中心差分格式、四阶 Runge-Kutta 方法、二阶和四阶人工耗散和 W 循环多重网格技术,结合了当地时间步长和隐式残差光顺等方法,以加速计算收敛。本文所有算例均采用相同的计算区域和网格尺度,计算区域选取了进口导叶的一个流道、离心叶轮的主叶片流道和一个分流叶片流道,以及叶片扩压器的一个流道。网格总数约为 192 万,其中离心叶轮的网格总数约为 120 万。

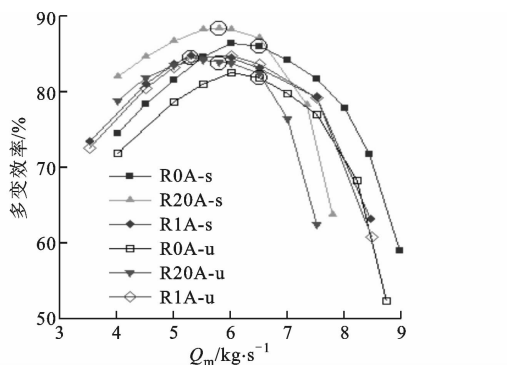
2 离心叶轮出口流动分离的影响因素

2.1 叶轮扩压度对叶轮出口流动分离的影响

一般认为,叶轮进口与出口的相对速度比 $w_1/w_2 < 2$, w_1/w_2 的取值范围为 1.6~1.8^[12]。为了考察扩压度对离心叶轮出口流动分离的影响,本文利用文献[13]中的方法和子午型线分别设计了 R0A、R20A 和 R1A 3 种叶轮, w_1/w_2 分别为 1.17、1.68 和 2.04。

图 1 为采用 R0A、R20A 和 R1A 型线的闭式叶轮和半开式叶轮级的多变效率曲线,半开式叶轮的叶顶间隙为 2 mm,均匀分布。从图 1 可以看出,对于扩压度较小的 R0A 和 R20A 闭式叶轮,在设计工况点附近的整级效率比半开式叶轮高近 4%,而扩压度较大的 R1A 闭式叶轮的级效率与半开式叶轮相当。

图 2 为设计工况下 3 种型线闭式叶轮级的子午平均速度流线分布。图 3 为设计工况下 3 种型线闭式叶轮出口在半径 $R=0.43$ m 截面处的相对速度径向分量分布,图中 b 为宽度坐标, B 为叶轮出口宽度, $b/B=0$ 表示轮盘侧, $b/B=1.0$ 表示轮盖侧。从图 2 和图 3 中可以看出,在设计工况下,扩压度较小的 R0A 和 R20A 闭式叶轮出口处均未出现流动分



s: 闭式叶轮; u: 半开式叶轮; ○: 中点; 叶轮的设计工况点

图1 3种型线闭式和半开式叶轮的级效率曲线

离,而扩压度较大的 R1A 闭式叶轮出口处出现了较大的流动分离区。这一数值研究结果与传统理论的设计结果一致。

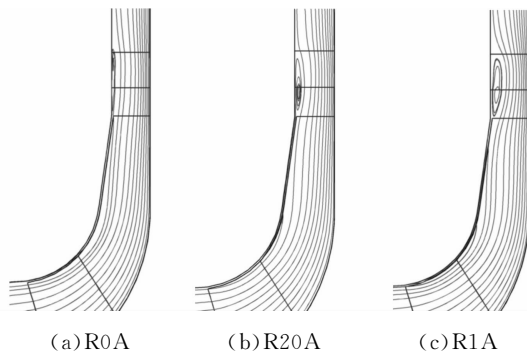


图4 设计工况下3种型线半开式叶轮的

子午平均速度流线分布

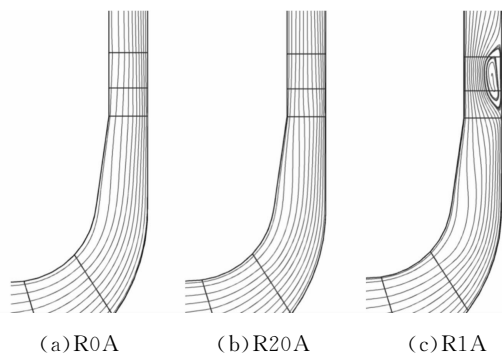


图2 设计工况下3种型线闭式叶轮的

子午平均速度流线分布

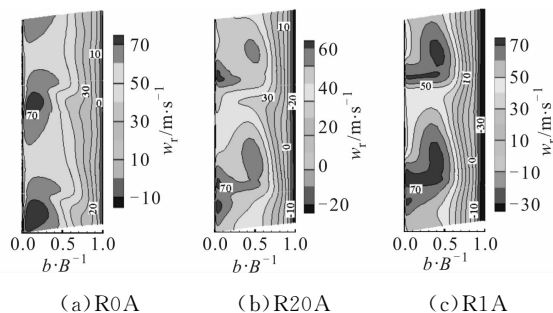


图5 设计工况下3种型线半开式叶轮出口在 $R=0.43$ m 截面处的相对速度径向分量分布

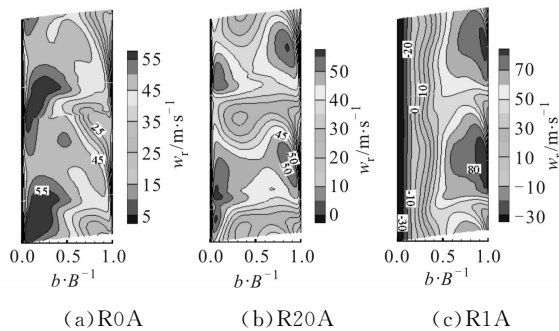


图3 设计工况下3种型线闭式叶轮出口在 $R=0.43$ m 截面处的相对速度径向分量分布

图4为设计工况下 R0A、R20A 和 R1A 3种半开式叶轮级的子午平均速度流线分布。图5为设计工况下3种型线半开式叶轮出口在 $R=0.43$ m 截面处的相对速度径向分量分布。从图4、图5中可以看出,设计工况下半开式叶轮出口处在靠近轮盖一侧出现了流动分离,流动分离区的大小随着叶轮扩压度的增加而增大,这正是半开式叶轮效率通常比闭式叶轮低的主要原因。对于扩压度较大的

R1A 闭式叶轮,其在多变效率上较半开式叶轮并未体现出明显的优越性,这可能是过大的扩压度使得 R1A 半开式叶轮和闭式叶轮在出口区域均出现流动分离,且分离区的大小较为接近的缘故。值得注意的是,当采用 R1A 闭式叶轮时,叶轮出口的流动分离区出现在靠近轮盘的一侧,而采用半开式叶轮时,叶轮出口的流动分离区出现在靠近轮盖的一侧。

众所周知,离心叶轮下游需要匹配静止部件以继续扩压,离心叶轮出口流场具有较大的逆向压力梯度。图6为设计工况下3种型线叶轮出口在 $R=0.4$ m 截面处的平均速度分布。从图6可以看出:扩压度较小的 R0A 和 R20A 闭式叶轮在出口跨盘盖处的速度分布较为均匀,气流能够克服叶轮出口区逆向压力梯度的作用,所以叶轮出口区域未出现流动分离;扩压度较大的 R1A 闭式叶轮在出口靠近轮盘侧存在着一个低速区,低速流体不能克服叶轮出口区逆向压力梯度的作用,因此 R1A 闭式叶轮在出口靠近轮盘一侧出现了回流区。

从图6还可以看出,3种型线半开式叶轮在出口靠近轮盖侧均存在着一个低速区,低速区的范围随着叶轮扩压度的增加而增大。因此,3种型线半开式叶轮在出口靠近轮盖一侧均出现了流动分离,

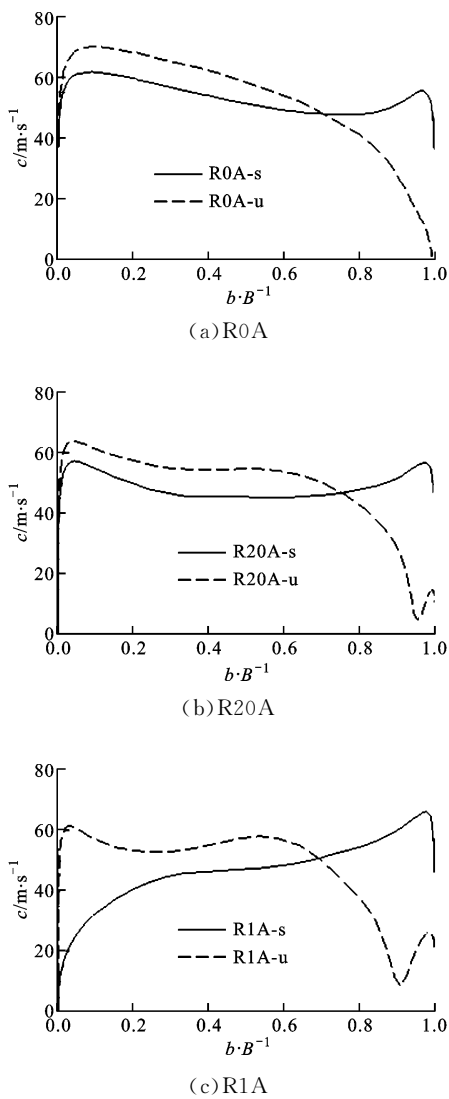


图 6 设计工况下 3 种型线叶轮出口在 $R=0.4\text{ m}$ 截面处的平均速度分布

流动分离区的大小随着叶轮扩压度的增加而增大。

2.2 叶顶间隙对叶轮出口流动分离的影响

由上述分析可知,叶顶间隙对离心叶轮出口区的流动分离会产生重要影响。叶顶间隙的存在甚至会迫使叶轮出口的流动分离区从盘侧向盖侧转移,为此本文就叶顶间隙对于离心叶轮出口区流动分离的影响进行了数值研究。

数值模拟针对的是 R20A 半开式离心叶轮,叶顶间隙比为实际间隙与叶轮出口宽度之比,即

$$t_B = t/B$$

计算时设定了 7 种均匀间隙,即 $t_B=1.141\ 5\%$ ($t=0.5\text{ mm}$), 2.283% ($t=1\text{ mm}$), 4.566% ($t=2\text{ mm}$), 7.5% , 10% , 15% , 20% 。

图 7 为采用 R20A 型线半开式叶轮在不同叶顶间隙下的子午平均速度流线分布,图 8 为采用 R20A

型线半开式叶轮出口在不同叶顶间隙下的 $R=0.43\text{ m}$ 截面处相对速度径向分量分布。从图 7、图 8 可以看出,设计流量下 5 种叶顶间隙的叶轮出口区在近轮盖侧均存在流动分离。

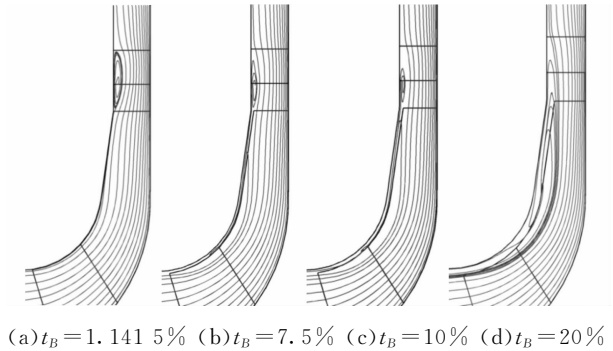


图 7 R20A 型线半开式叶轮在不同叶顶间隙下的子午平均速度流线分布

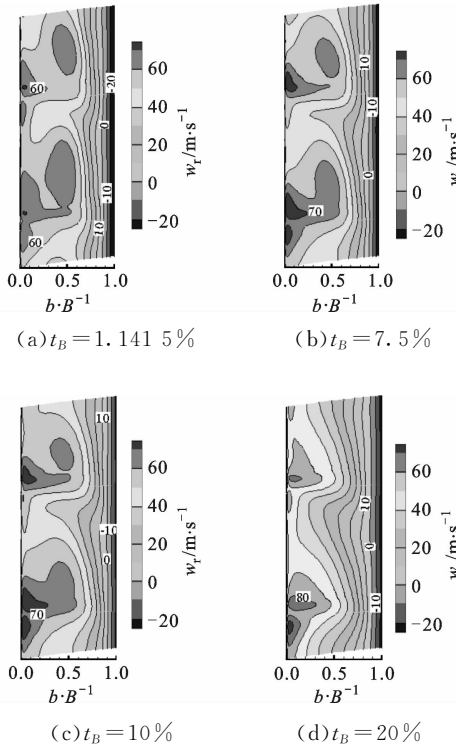


图 8 R20A 型线半开式叶轮出口在不同叶顶间隙下的 $R=0.43\text{ m}$ 截面处相对速度径向分量分布

为了便于比较分离区的大小,将离心叶轮出口近盖侧流动分离区的中心(径向速度云图中速度值为 0 的等值线)距轮盖的最大距离 $L_{\max}$ 与 B 之比定义为实际距离与叶轮出口宽度之比。图 9 为叶轮出口流动分离区的 $L_{\max}$ 与 t_B 的关系。

结合图 7 和图 8 可以看出,对于本文的 R20A 型线叶轮,叶顶间隙对半开式叶轮出口流动分离的影响并不是一个简单的线性关系,当 t_B 为 7.5% 时,

叶轮出口流动分离区最小。文献[14]也发现,半开式叶轮的叶顶间隙并不是越小越好,而是存在一个最佳的叶顶间隙使得流动损失最小。本文研究发现,增大叶顶间隙,叶轮级的多变效率和总压比均有所降低,见图 10。这可能是,对于本文的 R20A 型线叶轮,当叶顶间隙增大时,叶顶间隙区附近的叶尖回流区加大,从而增大了流动损失的缘故。

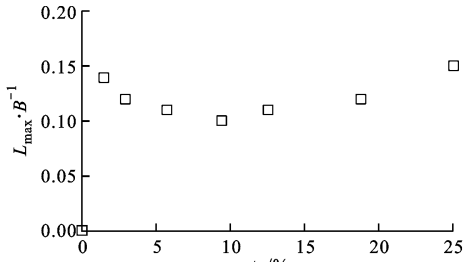
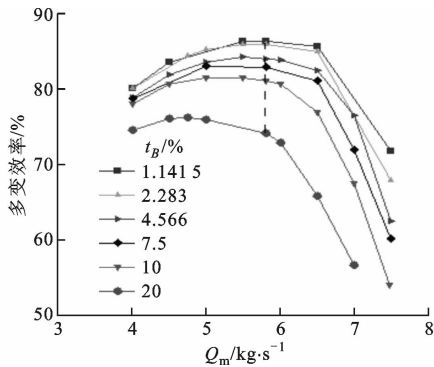
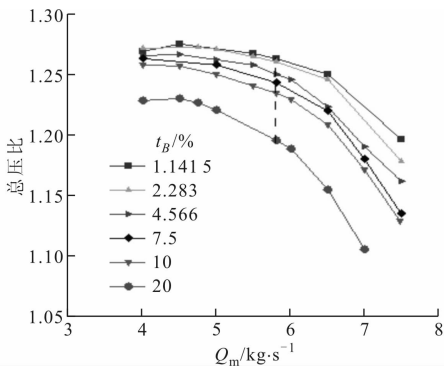


图 9 $L_{\max}$ 与 t_B 的关系



(a) 多变效率



(b) 总压比

图 10 不同叶顶间隙下的气动性能曲线

2.3 扩压器进口收敛角对叶轮出口流动分离的影响

文献[15]研究了叶轮叶片载荷和叶轮子午型线对叶轮出口区域流动分离的影响,提出了减小叶轮出口区近轮盖侧的叶片载荷可以有效抑制叶轮出口区流动分离的方法,但该方法并不能将流动分离完全消除。本文采用的 R20A 叶轮就是文献[15]优化了的叶轮。

由于扩压器进口的几何结构对叶轮出口流动也会产生较大的影响,所以本文还研究了扩压器进口收敛角对叶轮出口流动分离的影响。

扩压器进口收敛角定义为在叶轮出口至叶片扩压器进口区域,轮盖向流道内侧的倾斜角 α (见图 11)。以 R20A 型线半开式叶轮(叶顶间隙为 2 mm 的均匀间隙)的离心压气机为对象,研究了 α 分别为 0.0° 、 2.5° 、 5.0° 、 7.5° 、 10.0° 的 5 个算例。图 12 为不同 α 时叶轮级的气动性能。

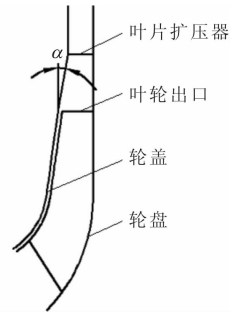
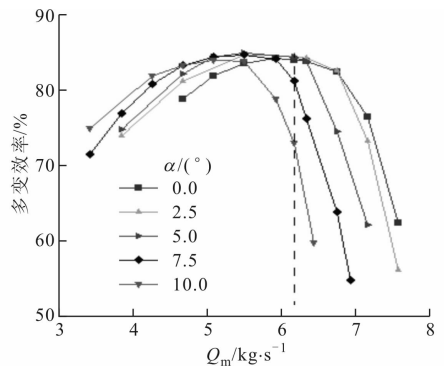
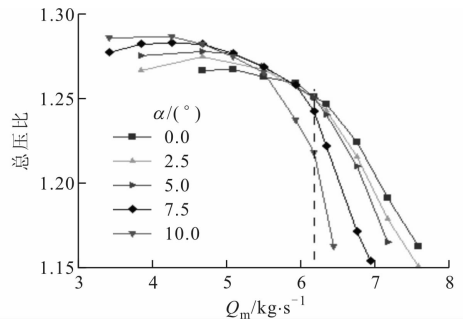


图 11 扩压器进口收敛角示意

从图 12 可以看出,随着 α 的增大,叶轮级的性能曲线逐渐向小流量方向平移。这主要是,增大 α 会减小扩压器的宽度,从而减小了扩压器的通流面积,使得叶轮级的阻塞流量减小,迫使性能曲线左移。



(a) 多变效率



(b) 总压比

图 12 不同 α 时叶轮级的气动性能

为了考察 α 对叶轮出口流动分离的影响,以 $\alpha=0^\circ$ 时的设计流量为参考点,对同一流量下的流场特征进行比较,结果见图 12 中虚线。图 13、图 14 分别为不同 α 下在指定流量时的子午平均速度流线分布与 $R=0.43\text{ m}$ 截面处相对速度径向分布。从图 13、图 14 可以看出,随着 α 的增大,叶轮出口流动分离区不断减小, $\alpha=7.5^\circ$ 时叶轮出口流动分离已完全消失。值得注意的是,当 α 增大时,虽然参考点始终保持在指定流量下,但由于级的性能曲线向小流量方向偏移,所以给定的参考点就落在了级的大流量区域。这种相对较大的流量也是离心叶轮出口流动分离区减小的另一重要原因。

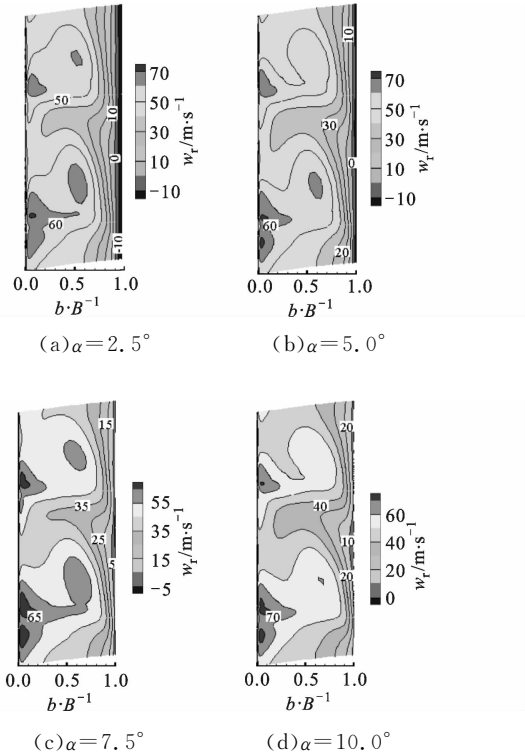


图 13 不同收敛角及设计工况下 $R=0.43\text{ m}$ 截面处的相对速度径向分量分布云图

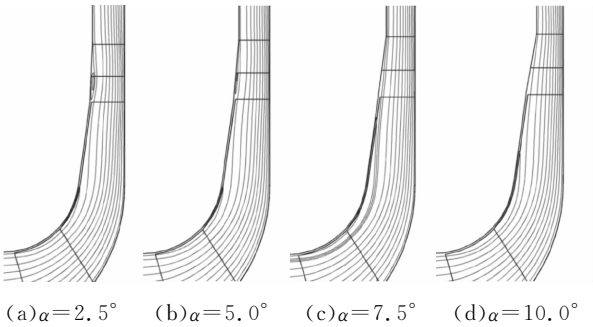


图 14 不同收敛角及设计工况下子午平均速度流线的分布

α 增大,尽管叶轮出口流动分离区逐渐减小,直至消失,但叶轮叶顶间隙区域附近的叶尖回流区不断增大,叶轮级的性能曲线不断向小流量方向偏移,致使参考点的多变效率和总压比持续下降。因此,在综合评价之下,对于本文的离心压气机,当采用 R20A 型线半开式叶轮时, $\alpha=5^\circ$ 最为适宜,它既能最大程度地抑制叶轮出口流动分离,又不会带来较大的气动性能损失。

3 结 论

通过研究影响离心叶轮出口流动分离的 3 种因素,得到如下主要结论。

对于闭式叶轮,扩压度对叶轮出口流动分离的影响较大。当叶轮的进口与出口的相对速度比大于 2 时,设计工况下叶轮出口近轮盘侧出现了较大的流动分离区;当扩压度分别为 1.17 和 1.68 时,设计工况下叶轮出口未出现流动分离。对于半开式叶轮,设计工况下叶轮出口近轮盖一侧均出现了流动分离,且流动分离区的大小随着叶轮扩压度的增加而增大。

叶顶间隙对叶轮出口流动分离区大小的影响显著,结果是并非间隙越小分离区越小。对于本文叶轮,当 $t_B=7.5\%$ 时,叶轮出口流动分离区最小。

增大 α 可以有效抑制叶轮出口区域的流动分离,但是过大的 α 会促使叶轮叶顶间隙区域附近的叶尖回流区增大,迫使叶轮级的性能曲线向小流量方向偏移,从而降低了叶轮整级的气动性能。

参考文献:

[1] DEAN R, SENOO Y. Rotating wakes in vaneless diffusers [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1960, 82 (3): 563-574.

[2] ECKARDT D. Instantaneous measurements in the jet-wake discharge flow of a centrifugal compressor impeller [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1975, 97(3): 337-345.

[3] INOUE M, CUMPSTY N A. Experimental study of centrifugal impeller discharge flow in vaneless and vaned diffusers [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(2): 455-467.

[4] ROHNE K H, BANZHAF M. Investigation of the flow at the exit of an unshrouded centrifugal impeller and comparison with the “classical” jet-wake theory [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113 (4): 654-659.

- [5] PINARBASI A. Experimental hot-wire measurements in a centrifugal compressor with vaned diffuser [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(5): 1512-1526.
- [6] KANG K J, SHIN Y H, KIM K H. Effect of diffuser contraction for a centrifugal compressor [C]// *Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. New York, USA: ASME, 2010: 30944.
- [7] 席光, 王尚锦, 袁民建, 等. 离心式叶轮出口及其无叶扩压器内部流场的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 1992, 13(2): 91-96.
- XI Guang, WANG Shangjin, YUAN Minjian, et al. Experimental research for the discharge flow of a centrifugal impeller and the flowfield in the vaneless diffuser [J]. *Journal of Engineering Thermodynamics*, 1992, 13(2): 91-96.
- [8] 刘小民, 席光, 王尚锦, 等. 叶片扩压器内跨盘-盖流场的实验研究 [J]. *流体机械*, 1997, 26(1): 6-10.
- LIU Xiaomin, XI Guang, WANG Shangjin, et al. Experimental research for the flowfield in the vaned diffuser [J]. *Journal of Fluid Machinery*, 1997, 26(1): 6-10.
- [9] 楚武利, 刘志伟. 间隙泄漏对半开式离心叶轮性能影响的实验研究与分析 [J]. *推进技术*, 1996, 20(3): 69-72.
- CHU Wuli, LIU Zhiwei. Experiment study on effect of tip clearance on centrifugal impeller performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 20(3): 69-72.
- [10] LI Xuechen, XI Guang, JIANG Hua, et al. Investigation of the wake effect from the centrifugal splitter impeller blade to the vaned diffuser [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo*. New York, USA: ASME, 2012: 68927.
- [11] LI Xuechen, XI Guang, JIANG Hua, et al. Comparison of two unsteady CFD methods applied to a 1.5 stage centrifugal compressor: nonlinear harmonic method and the domain scaling method [C]// *Proceedings of the Asia Joint Conference on Propulsion and Power*. Xi'an, China: AJCPP, 2012: 160.
- [12] 徐忠. 离心压缩机原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 32, 221.
- [13] 席光, 王晓锋, 蒋三红, 等. 基于三维粘性流动分析的离心压缩机叶轮设计方法 [J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(S1): 54-57.
- XI Guang, WANG Xiaofeng, JIANG Sanhong, et al. Design method of centrifugal compressor impellers based on 3-D Viscous flow analysis [J]. *Journal of Engineering Thermodynamics*, 2002, 23(S1): 54-57.
- [14] GAO Limin, XI Guang, WANG Shangjin. Influence of tip clearance on the flow field and aerodynamic performance of the centrifugal impeller [J]. *Chinese Journal of Aeronautics; English Edition*, 2002, 15(3): 139-144.
- [15] XI Guang, LI Xuechen, GONG Wuqi, et al. Study on the controlling of flow separation zone near unshrouded impeller exit for centrifugal compressors [C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo*. New York, USA: ASME, 2013: 94792.

[本刊相关文献链接]

- 徐立群, 王志恒, 席光. 迷宫密封泄漏对小流量离心叶轮气动性能影响的研究. 2010, 44(11): 23-27. [doi: 10.7652/xjtuxb201011005]
- 陈浩, 李开泰, 王尚锦. 叶轮机械通道内压力的修正方程和数值模拟. 2010, 44(11): 98-102. [doi: 10.7652/xjtuxb201011020]
- 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计. 2010, 44(1): 31-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201001008]
- 姜华, 官武旗, 张炜, 等. 带分流叶片离心叶轮非定常流场的实验研究. 2009, 43(9): 14-18. [doi: 10.7652/xjtuxb200909004]
- 刘小民, 肖立宁. 射流式漩涡发生器对离心叶轮性能的影响. 2009, 43(6): 123-128. [doi: 10.7652/xjtuxb200906026]
- 王宏亮, 席光. 离心叶轮几何形变对气动性能的影响. 2009, 43(05): 46-50. [doi: 10.7652/xjtuxb200905010]
- 毛义军, 祁大同, 许庆余. 离心压缩机叶轮叶片疲劳断裂故障的数值分析. 2008, 42(11): 1336-1339. [doi: 10.7652/xjtuxb200811005]
- 李景银, 田华, 梁亚勋. 轮盖开孔的离心风机流场研究. 2008, 42(9): 1117-1121. [doi: 10.7652/xjtuxb200809012]
- 胡小文, 闻苏平, 席光. 离心叶轮的速度系数对级性能的影响. 2008, 42(7): 807-810. [doi: 10.7652/xjtuxb200807005]

(编辑 苗凌 荆树蓉)