

轮盖开孔的离心风机流场研究

李景银, 田华, 梁亚勋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出的在离心风机轮盖上靠近叶片吸力面处开孔的方法, 可利用蜗壳内的高压气体产生射流, 从而直接给叶轮内的低速或分离流体提供能量, 以减弱由叶轮内二次流所导致的射流-尾迹结构, 并可用于消除或解决部分负荷时常发生的离心叶轮的积灰问题. 通过对离心风机整机的数值实验发现, 轮盖开孔后, 在设计点附近的风机压力提高了约 2%, 全压效率提高了 1% 以上, 小流量时压力提高了 1.5%, 全压效率提高了 2.1%. 进一步的流场分析表明, 在设计流量和小流量时, 由于轮盖开孔形成的射流可以明显改善叶轮出口的分流流动, 减小低速区域, 降低叶轮出口处的最高速度和速度梯度, 从而减弱离心叶轮出口处的射流-尾迹结构. 此外, 沿叶片表面流动分离区域减小, 压力增加更有规律. 所提方法可以提高设计流量和小流量下的闭式离心叶轮性能和整机性能, 结合其他离心叶轮自适应边界层控制技术, 可全面提高离心叶轮的性能.

关键词: 离心叶轮; 轮盖开孔; 射流-尾迹结构; 边界层控制

中图分类号: TH432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1117-05

Study on Flow Fields in a Centrifugal Fan with Holes in the Impeller Shroud

LI Jingyin, TIAN Hua, LIANG Yaxun

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

Abstract: A new method of drilling through-holes near the blade suction surfaces in the shroud of a centrifugal impeller is proposed, where pressurized air in the volute casing generates jet flows to directly supply additional energy to the flow characterized by low velocity or separation inside the impeller. Consequently the jet-wake flow caused by secondary flows in the impeller is weakened, and the often encountered problem of dust or ash accumulated on the blades under partial loads is expected to be solved to some extent. The computational results show that the total pressure rise of the fan with holes in the shroud increases by 2% and efficiency over 1% at designed flow rate while the increase in the total pressure rise reaches to 1.5% and efficiency 2.1% at lower flow rate. Furthermore, the change of the internal flow fields indicates that the separated flows at the exit of the impeller are improved obviously due to the jet flows through the holes at designed and lower flow rates. In addition, the area with low velocity and the peak values of the radial velocity as well as the radial velocity gradient are also reduced reasonably, which leads to weakened jet-wake flows at the exit of the impeller. Along the blades the separation regions become smaller and the increases in the static pressure become more regular. As a result, better performance of the shrouded impeller and of the fan can be achieved by drilling through-holes in the shroud, and this new method can be used in combination with other adaptive boundary control technique in the centrifugal impeller to totally improve the performance of the fan.

Keywords: centrifugal impeller; drilling through holes in the shroud; jet-wake flows; boundary layer control

离心式叶轮的内部流动非常复杂,叶片通道内存在着叶片压力面向吸力面的二次流动,同时由于气流 90° 转弯,导致轮盘压力大于轮盖压力也形成了二次流,这一般会引起叶轮的轮盖和叶片吸力面区域出现低速区甚至分离,形成射流-尾迹结构,从而导致离心风机全压效率下降^[1],噪音增大,并且容易在低速或分离区积灰^[2].

为了减弱离心风机叶轮内的射流-尾迹结构,提高风机性能和扩大稳定工况范围,目前的热点研究均采用射流、涡流等流动控制方法.如通过采用串列叶片技术^[3-4]在叶轮内形成射流,可明显提高离心风机的全压效率和全压,特别是大流量的性能,但实验显示小流量的性能基本没有改善;同时,采用类似的结构还可以有效地防止叶片积灰^[5],但这种结构在离心压缩机叶轮的数值计算中没有得到性能改进的结果^[6],分析原因可能在于该文献的主要注意力是放在串列叶片的时序效应的研究,而没有研究串列叶片的串列位置.另外,也有采用射流(也可称为涡流发生器)在离心叶轮前缘轮盖处引入连续射流和脉冲射流的方法来消除叶轮进口处的流动分离^[7],以及改善小流量时的叶轮内部流动^[8],但该方法采用主动控制技术,结构复杂.

本文提出在离心叶轮轮盖上直接开孔,从而可以利用离心叶轮内外压力差,在轮盖上靠近叶片吸力面处直接引入一股射流,为低速或分离区域的流体提供能量,从而减弱和消除分离或低速区域,同时可消除或解决部分负荷时常发生的离心通风机的叶轮积灰问题^[2],以提高叶轮性能.

1 计算模型及数值模拟方法

本文首先对文献^[1]中的叶轮进行了轮盖开孔计算,小流量时获得了全压效率和压力都提高 2% 的效果.为了便于进一步验证轮盖开孔的效果,同时也便于交流,本文又对流体机械行业全面推广的 9-19 型高效高压风机进行了轮盖开孔数值实验.该风机的空气动力略图可在各种通风机手册内查得^[9],性能也可在产品样本中获得.下面将以 9-19 型 6 号风机为例进行分析和对比,其叶片直径为 600 mm,包括旋转扩压器时的叶轮直径为 690 mm,12 只叶片,计算转速为 2 900 r/min.对 9-19 风机流场进行分析之后,即在轮盖上开孔,开孔位置距轮盖中心 250 mm,孔的形状为长方形,其一边与叶片吸力边平行.长方形的边长为 5 mm 和 8 mm,距离每个叶片吸力面 3 mm.轮盖开孔位置见图 1.

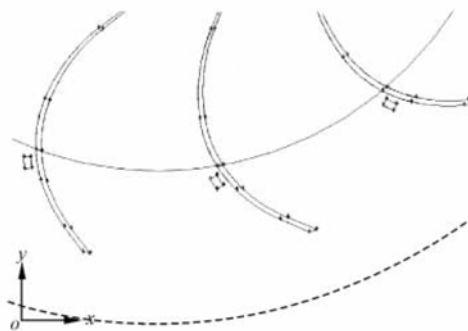


图1 轮盖开孔位置示意图

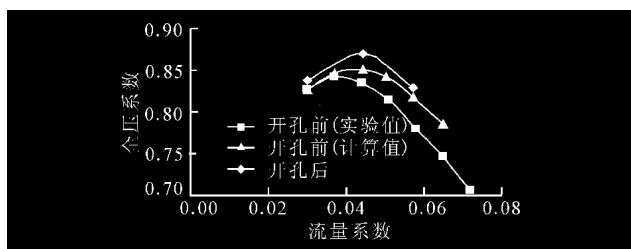
数值计算采用 Fluent 软件,由于风机压力不高,故采用三维不可压缩黏性流动计算.控制方程采用隐式分离方法求解,压力修正采用 SIMPLEC 算法,湍流模型为 RNG $k-\epsilon$ 模型.边界条件为进气口给定流量、总温以及绝对速度方向;蜗壳出口给定为以标准大气压作静压;各固体壁面均采用无滑移条件,叶轮内部流体采用 MRF 模型.计算区域为风机整机流场,包括进气口(集流器)、叶轮流道、蜗壳.由于叶轮进口处的内泄漏量小,且为了简化网格生成,本文忽略进气口与叶轮之间的间隙.为了保证叶轮进口气流的均匀及风机出口处不出现回流,在进气口和蜗壳出口处分别进行了适当延长.

进气口部分采用非结构化六面体网格划分;叶轮流道部分采用结构化六面体网格划分;蜗壳划分成结构相对简单的 5 块,然后分别生成结构化六面体网格.最终的网格数目为进气口 13 万,叶轮 50 万,蜗壳 42 万,网格总数为 105 万.为了验证网格无关性,本文又进行了网格加密计算,当总网格数目为 157 万时,全压效率和全压变化小于 0.1%,因此可认为原网格达到了网格无关性的要求.

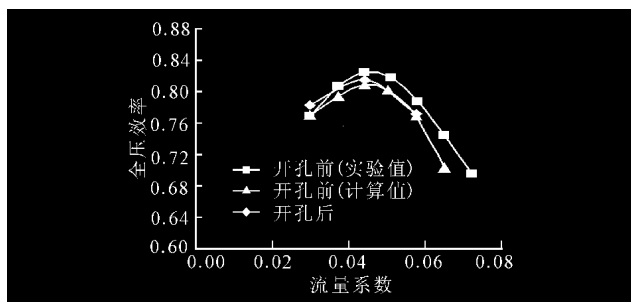
2 计算结果及对比分析

本文首先对轮盖开孔前后的叶轮进行了整机流场计算,结果见图 2.与通常的通风机全压和全压效率定义一样,风机的全压是蜗壳出口气流全压和集流器进口全压之差,流量按集流器进口流量计算,耗功是叶轮转矩和叶轮转速的乘积,风机全压效率为风机全压和流量的乘积除以风机耗功.因为叶轮开孔前后风机全压和全压效率的计算方式完全相同,所以计算结果具有可比性.从图 2 可以看出,叶轮开孔前风机的性能和产品实验结果误差满足工程要求,这也与我们对大量的离心风机整机性能计算的相符.当轮盖开孔后,在设计点附近的风机压力提高了约 2%,全压效率提高了 1% 以上,小流量时

压力提高了 1.5%, 全压效率提高了 2.1%。这种趋势与我们计算的 7-40 风机一致^[1], 可见轮盖开孔确实改善了叶轮内部流场。



(a) 开孔前后压力对比图



(b) 开孔前后全压效率对比图

图2 轮盖开孔与否的风机性能对比图

为了方便分析叶轮内部流场的改变, 本文以相对蜗舌的距离, 将叶轮流道划分为 4 个区域, 如图 3 所示。风机小流量时的流量系数为 0.03, 实际流量为 0.928 8 kg/s; 设计点流量系数为 0.044 2, 实际流量为 1.394 kg/s; 大流量时的流量系数为 0.057 3, 实际流量为 1.771 2 kg/s。

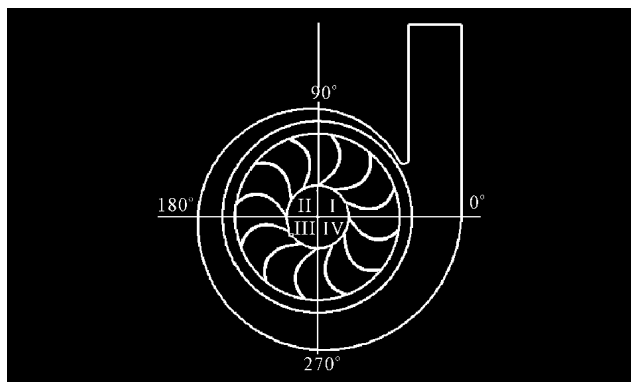
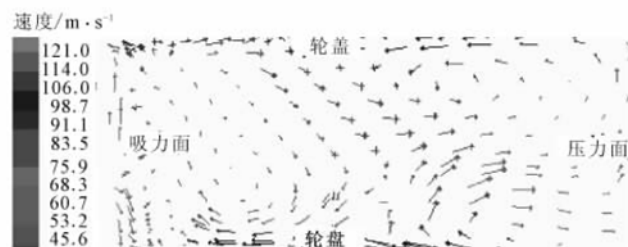


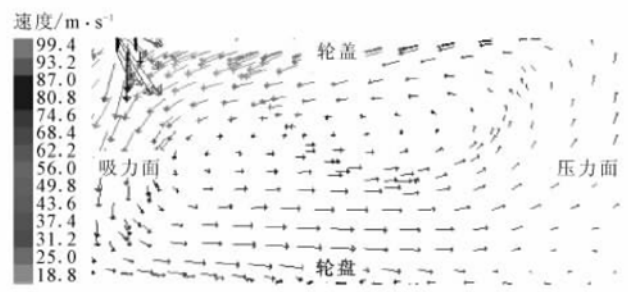
图3 流道区域划分图

图 4 是速度矢量在叶轮半径 252 mm 处的回转面图, 可以看出图 4a 所显示的二次流与经典的叶轮内部流动分析完全一致, 二次流从压力面向吸力面, 以及从轮盘向轮盖流动, 导致低速流体聚集在轮盖和吸力面交界处。叶轮开孔后, 高速射流从轮盖外侧进入轮盖和吸力面交界处, 明显改变了叶道内的二次流图谱(见图 4b), 不但从轮盖到轮盘的二次流完

全消失, 而且有从轮盖向轮盘的流动趋势, 这种改变一致持续到叶轮出口, 从而大大改善了叶道内的低速流体的积聚现象。由于设计流量与小流量情况下, 开孔后的射流结构类似, 故只采用一个区域的流道说明该结构。



(a) 普通叶轮



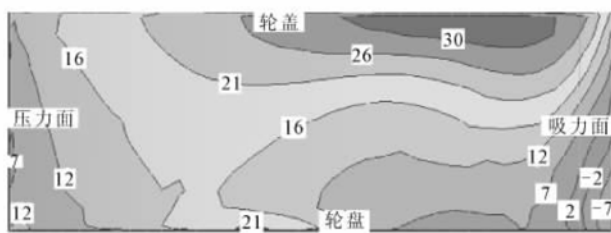
(b) 开孔叶轮

图4 设计流量时区域 II 叶轮回转面上的速度矢量图

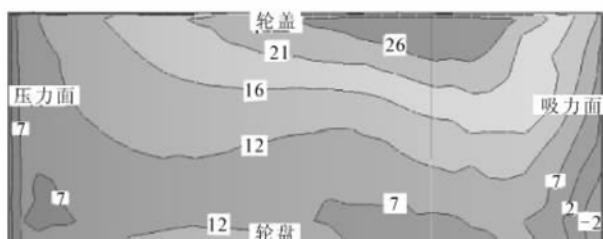
图 5 为小流量情况下, 区域 I 的叶片出口径向速度等值线图。图 5a 的吸力面出现了明显的回流区域, 而图 5b 相应的回流区域基本消除, 并且对应的最高速度区域也明显变小, 整个叶片出口区域流场更均匀。类似的流场变化在叶轮区域 II、III、IV 同样出现。总体而言, 轮盖开孔后叶轮的回流区和低速区大大减小, 出口射流-尾迹结构减弱, 速度分布更加均匀。

图 6 对比了设计流量下的叶片出口流场。轮盖开孔后, 区域 II 的叶片出口流场经历了与图 5 类似的变化, 分离区减小, 最大速度区域减小, 射流-尾迹结构的速度梯度也明显减小。同时, 原来具有两个速度峰值的出口速度分布也改变为单值峰值, 并且最大速度区域向轮盖方向移动, 速度分布明显均匀。

图 7 为开孔前后出口叶片平均高度处的回转面区域 IV 流道中的静压系数等高线图, 静压系数 $\phi_s = \frac{P_{sf}}{\rho u^2}$, P_{sf} 是当地静压, u 是叶片直径 600 mm 处的周向速度。由图 7 可见: 随着叶轮半径的增大, 流道中的压力逐步升高; 轮盖开孔后, 流道内低压区和最低压力都有所减小, 同时静压增加更加规律, 因此叶片通道内的扩压损失也相应减小。



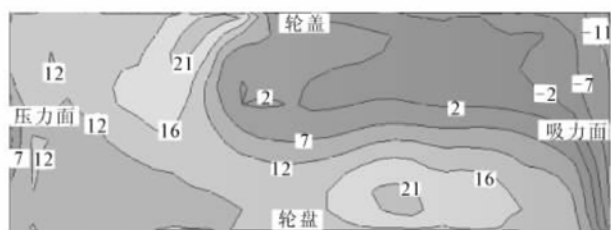
(a)普通叶轮



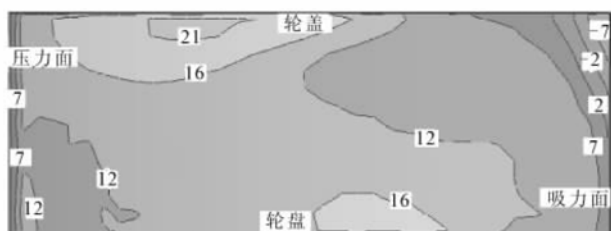
(b)轮盖开孔

单位: m/s

图5 小流量时区域I叶片出口径向速度分布等值线图



(a)普通叶轮



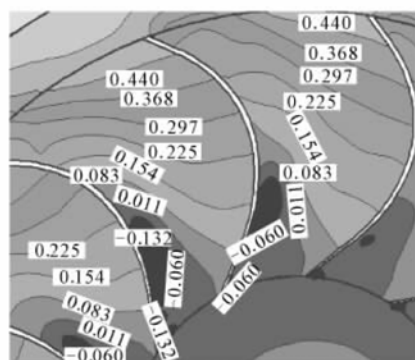
(b)轮盖开孔

单位: m/s

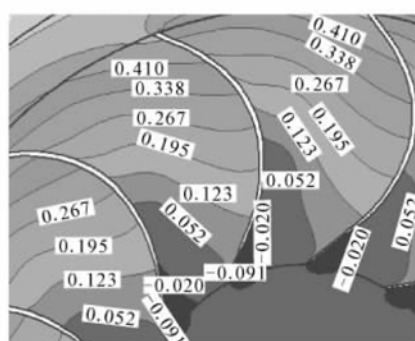
图6 设计流量时区域II叶片出口径向速度分布等值线图

图8为轮盖开孔前后出口叶片平均高度处的回转面区域III的绝对速度等高线图。从图中可以看出,轮盖开孔后在叶片出口截面内的最大速度降低了近6%。在其他3个区域的情况也是如此。因此,在气流从叶片进入到蜗壳时,由于截面的突然变大所产生的突扩损失就比较小,这是轮盖开孔比不开孔全压效率高的另外一个机理。

从开孔前后的回转面矢量场看,没有开孔的叶轮内流场普遍比开孔后的差。开孔前,叶片进口和出口处都发生了明显的流动分离,而开孔后,流动分离现象基本消除,流场在整个回转面上都有所改善。

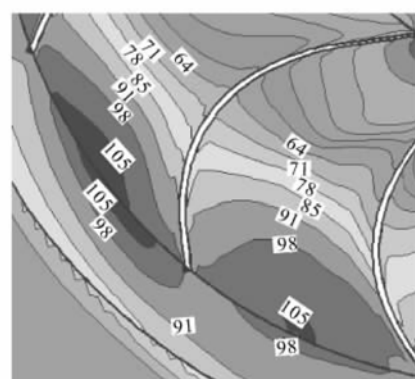


(a)普通叶轮

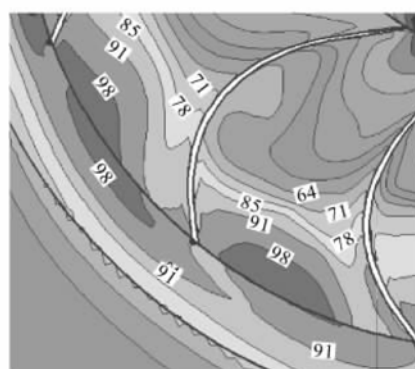


(b)轮盖开孔

图7 设计流量时区域IV流道中的静压系数等高线图



(a)普通叶轮



(b)轮盖开孔

单位: m/s

图8 小流量时区域III的叶片出口绝对速度等高线图

3 结 论

本文尝试通过轮盖开孔来改善离心叶轮内部流场,并以 9-19 离心通风机叶轮为例,首先根据经验确定了开孔位置,然后进行了开孔前后风机整机的数值计算和详细的流场对比分析,在设计流量和小流量情况下,得到以下结论。

(1)轮盖开孔可以明显改善或消除离心通风机叶轮出口的射流-尾迹现象,从而提高全压效率,减小噪音。

(2)轮盖开孔后,叶轮出口速度较均匀,且最大绝对速度明显减小,因此从叶轮到蜗壳的突扩损失也将减小,这也使得轮盖开孔后叶轮的全压效率有所提高。

(3)轮盖开孔的叶轮内部相对速度分布更加均匀,静压增加更有规律,流道内流动损失减小,有利于减轻和消除叶轮内部积灰问题。

(4)轮盖开孔是利用叶轮内外压差产生射流,属于自适应离心叶轮边界层控制技术,并且对设计流量和小流量下的离心叶轮效果明显;如果与串列叶片这种适合于设计流量和大流量的自适应离心叶轮边界层控制技术联合使用,将可能在全部流量范围内提高离心风机的性能。

参考文献:

- [1] 李景银,梁亚勋,田华. 不同型线离心风机叶轮的性能对比研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(6):963-966.
LI Jingyin, LIANG Yaxun, TIAN Hua. Flow field comparison between two centrifugal impellers with different blade curves [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2008,29(6):963-966.
- [2] 王顺,吕太. 离心引风机负荷对叶片积灰的影响[J]. 风机技术,2006(1):8-11.
WANG Shun, LÜ Tai. Influence to the dust-gathered blade by the load of centrifugal induced draft fan [J].

Compressor, Blower & Fan Technology, 2006 (1): 8-11.

- [3] 唐旭东,黄东涛,朱之垠. 边界层控制技术在离心叶轮中的应用[J]. 流体机械,1998,26(9):15-18.
TANG Xudong, HUANG Dongtao, ZHU Zhiyin. Application of boundary layer control technique to centrifugal impellers [J]. Fluid Machinery,1998,26(9): 15-18.
- [4] 黄东涛,边晓东,唐旭东,等. 长短叶片开缝技术在离心风机设计中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(4):6-9.
HUANG Dongtao, BIAN Xiaodong, TANG Xudong, et al. Application of slotted technique on splitter blade in centrifugal fan [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),1999,39(4):6-9.
- [5] 许云龙. 粘性粉尘排送风机[J]. 风机技术,1996(2): 26-27.
XU Yunlong. Exhaust fan for viscous dust [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 1996(2):26-27.
- [6] DOUGLAS A R, SURESH C K. Numerical investigation of tandem-impeller designs for a gas turbine compressor [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002,124(1): 36-44.
- [7] STEIN A, NIAZI S, SANKAR L. Computational analysis of stall and separation control in compressors [J]. Journal of Propulsion and Power, 2000,16(1):65-71.
- [8] 刘小民,张炜,席光. 带有涡流发生器的离心压气机内流动分析[J]. 工程热物理学报,2007,28 (6):951-953.
LIU Xiaomin, ZHANG Wei, XI Guang. Internal flow analysis of centrifugal compressor with vortex generator jet [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007,28 (6):951-953.
- [9] 续魁昌. 风机手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

(编辑 荆树蓉)