

叶顶间隙非均匀对大型轴流风机性能的影响

成铠, 陈云瑞, 孟凡杰, 李景银

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了探索叶顶间隙沿周向非均匀变化对大型低压轴流风机性能的影响,以某民用大型低压轴流风机为研究对象开展研究,选择表征轴流风机周向非均匀间隙的两个关键参数——平均间隙水平、非均匀度为影响因素,通过定常、非定常的数值模拟,研究周向非均匀的叶顶间隙对风机外特性的影响,以及对叶顶间隙流动和流场变化的影响机理。结果表明:轴流风机平均间隙、非均匀度的增加均会造成风机效率和静压的下降,但平均间隙的改变对静压的影响明显大于非均匀度变化所产生的影响;叶顶间隙不均匀,会改变叶顶泄漏的起始位置和发展方向,在间隙较大处,叶顶泄漏不但有带涡核的主泄漏,还包括无涡核的附加泄漏,同时叶顶的泄漏流量会因受到前向叶片泄漏涡的卷吸而周期性地改变。该研究成果对低压轴流风机设计及高效运行具有一定的参考价值。

关键词: 轴流风机;非均匀间隙;非均匀度;泄漏涡;数值模拟

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202210018 **文章编号:** 0253-987X(2022)10-0180-10

Influence of Non-Uniform Blade Tip Clearance on the Performance of a Large Axial Flow Fan

CHENG Kai, CHEN Yunrui, MENG Fanjie, LI Jingyin

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

Abstract: This research was conducted to explore the influence of a non-uniform change of blade tip clearance along the circumferential direction on the performance of a large low-pressure axial flow fan. In this research, a large civil low-pressure axial flow fan was taken as the research object, with two key parameters (namely, the average clearance and the non-uniformity) representing the circumferential non-uniform clearance of the axial flow fan selected as the influencing factors. Steady and unsteady numerical simulations were conducted to research the influence of circumferential non-uniform blade tip clearance on the external characteristics of the fan, and on the blade tip clearance flow and flow field change. The results show that both the increase in the average clearance and non-uniformity of the axial flow fan led to the decrease of the fan's efficiency and static pressure, and the influence caused by the change of the average clearance is significantly greater than that by non-uniformity. When the clearance is large, blade tip leakage flows include not only the main leakage flow with a vortex core, but also an additional leakage flow without a vortex core. The non-uniform blade tip clearance will change the starting position and development direction of blade tip leakage flow. In addition, the blade tip leakage flow will be subject

收稿日期: 2022-03-01。 作者简介: 成铠(1998—),男,硕士生;李景银(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876158)。

网络出版时间: 2022-05-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220524.1916.006.html>

to a periodic change due to the entrainment of the leakage vortex from its leading blade. This research is helpful in the design and efficient operation of low-pressure axial flow fans.

Keywords: axial-flow fan; non-uniform clearance; non-uniformity; leakage vortex; numerical simulation

大型民用轴流风机使用范围极其广泛。为了减重和降低成本,大型民用轴流风机机壳刚度偏低,经常导致较明显的机壳变形,造成叶顶间隙沿周向的不均匀分布,影响风机的性能和流场变化。

叶顶间隙是影响轴流风机气动性能十分关键的因素,国内外学者已对均匀分布的叶顶间隙开展了大量的研究。Freeman 等^[1-2]研究了叶顶间隙尺寸对轴流压气机性能的影响,发现随着叶顶间隙的增加,压气机性能显著降低。

随着数值模拟技术的发展和试验测试技术的进步,现在的研究进一步着重于叶顶间隙与叶顶泄漏涡的发展之间的联系。祁明旭等^[3]通过分析不同间隙情况下的间隙流动发现,随着动叶叶顶间隙的增加,间隙涡的产生位置提前,强度增大,损失增大;此外,动叶顶部的高损失区域位置和范围发生变化,通道涡被破坏,高损失区向压力面迁移,并远离端壁。Moghadam 等^[4-5]通过分析叶顶间隙大小对叶顶泄漏流的影响,指出随着叶顶间隙的增加,叶顶泄漏流的尺度和强度均增大,涡核向叶根位置移动,增强了对主流的堵塞。吴艳辉等^[6]通过分析 3 种间隙的泄漏流特点,发现泄漏涡在近失速工况发生破碎,造成泄漏涡体积突然膨胀,对来流阻塞效应增大,大间隙时最先发生泄漏涡破碎。高杰等^[7]通过数值模拟发现,间隙对泄漏涡破碎位置的影响比较明显,掺混损失主要发生在泄漏涡破碎之后。Nho 等^[8-10]的研究发现,随着叶尖间隙的增加,叶尖泄漏涡流变得更加强烈。此外,随着叶顶间隙的增加,叶顶泄漏涡流的位置从叶片吸力侧表面向邻近叶片的压力侧移动。陆华伟等^[11]通过对叶栅试验测试发现,在固定马赫数和冲角时,随着叶顶间隙的增加,近端壁面层低能流体的聚集和发展受到影响,叶栅损失呈现先减小后增大的趋势。You 等^[12]采用大涡模拟研究了叶顶间隙对涡轮机的叶顶泄漏流动的影响,发现随叶顶间隙的减小,泄漏流中的旋涡和湍动能的强度逐渐降低。Gamil 等^[13]通过对工业风机的数值模拟,展示了叶尖泄漏流在不同流速、叶尖间隙和安装角下的泄漏流结构分布。Khalid 等^[14]已经证明,随着叶片安装角的增加,叶尖泄漏涡流的强度降低,并向转子出口移动。Han 等^[15]使用 DMD、POD 对混流

泵叶尖泄漏涡的流动结构进行分解和重构,发现一次叶尖涡(PLTV)的演变频率为 8.4 倍叶轮旋转频率,且 PLTV 主要分为振荡的 PLTV-A 和脱落的 PLTV-B。Han 等^[16]进一步通过提高混流泵转速,发现叶尖泄漏流量和轴向动量均有所增加,并提出叶尖泄漏涡分离角预测模型。

研究人员也研究了安装误差导致叶顶间隙不均匀的影响。Storace 等^[17-18]开展涡轮转子的偏心引起的叶顶间隙不均匀的研究,发现穿过不同间隙的叶片载荷不同,从而引起涡流诱导力。Graf 等^[19]通过试验和理论分析,研究了叶尖间隙周向不均匀对轴流压气机性能和稳定性的影响。结果表明,间隙不对称使压缩机失速裕度减小,非均匀间隙对峰值效率的影响小于对峰值压力的影响。Chen 等^[20]通过数值模拟对 Rotor 67 的周向非均匀间隙下的外特性进行了研究,结果表明风机性能主要受到间隙不均匀性和平均间隙水平的影响。陈秀颖等^[21]通过研究 3 种周向间隙布局对多排转子的影响,发现后排转子叶尖流场非对称性大,且非均匀间隙布局与叶片气动力分布有对应关系。Ma 等^[22]通过比较 3 种在叶轮轴向方向上的叶顶间隙变化对 Rotor37 性能的影响,发现最佳不均匀间隙的轴向分布,可以削弱叶尖泄漏涡,吹扫边界层中的低能流体,改善压气机的性能。叶学民等^[23]对 OB-84 风机进行研究,发现轴向渐缩型间隙可减少叶顶泄漏,提高风机性能。姬田园等^[24]发现叶片加工误差引起的不确定性间隙会对叶顶泄漏流产生影响,并降低叶片稳定裕度。Hao 等^[25]对由于一个叶片高度变化,导致叶顶间隙非对称,对“泵-水轮机”型叶轮的瞬态空化流动进行研究,发现这会恶化空化性能,同时影响径向力的大小和方向。

目前对于均匀叶顶间隙的研究较多,对于非均匀间隙的研究主要集中在叶顶切割的轴向非均匀间隙的情况;以及一些具有周向非均匀间隙的压气机等高压高速设备。对于量大面广的大型民用低压轴流风机而言,机壳尺寸大和机壳薄,导致机壳刚度明显不足,因此必须预留较大的叶顶间隙,同时,由机壳变形导致的叶顶间隙沿周向的不均匀性变化显著,但目前对此类风机的不均匀叶顶间隙影响的研究很少。

本文针对某大型家畜养殖场用大型轴流通风机

的非均匀叶顶间隙,开展了定常、非定常数值模拟。对该风机的叶顶间隙,采用非均匀度和平均间隙两个因素控制周向非均匀度,研究非均匀间隙对风机外特性、静压分布、叶顶泄漏流等方面的影响,旨在为低压轴流风机的加工制造精度要求、高效运行等方面提供一定的指导。

1 研究方法

1.1 研究对象

本文中叶轮直径 D 为 1 445 mm,设计叶顶尖隙为 10 mm。风机在使用过程中机壳出现椭圆化,偏心化等问题都会造成轴流风机周向间隙的不均匀,周向非均匀叶顶间隙示意图如图 1 所示。对于均匀间隙,可由机壳与叶轮的半径之差表示间隙的大小。椭圆形等非均匀机壳,引入平均间隙 C_a 表示其叶顶间隙水平,即

$$C_a = 2 \frac{S}{L} - r \quad (1)$$

式中: S 为机壳内流道截面积; L 为机壳周长。

为了更好地研究此类问题,引入一个表示非均匀度的因子 λ 来量化机壳的非均匀度,即

$$\lambda = \frac{b-a}{b-r} \quad (2)$$

式中: a 、 b 分别为最小、最大间隙处的半径; r 为叶轮半径。

λ 的取值在 0~1 之间,0 代表均匀间隙,即机壳为正圆形,1 代表极不均匀间隙,可表示为短半轴等于叶轮半径的椭圆形。本文选取 0、0.5、0.8 这 3 种非均匀度的间隙进行研究。

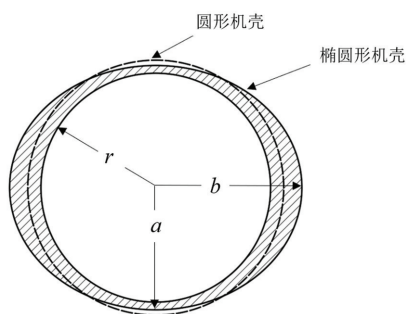


图 1 周向非均匀叶顶间隙示意图

Fig. 1 Sketch of circumferential non-uniform tip clearance of an axial flow fan

1.2 计算模型与网格

为了准确模拟叶顶周向非均匀间隙,将计算模型分为内、外两个区域,内部区域为叶轮旋转域,外部区域为非均匀间隙区域。为了两个计算域更好地传递数据,在内部叶轮旋转域中帶有一部分均匀间

隙,区域分区图如图 2 所示。

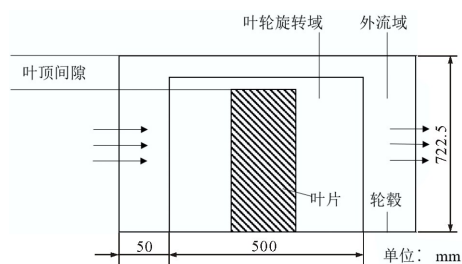


图 2 计算域区域分区图

Fig. 2 Schematic diagram of computational domains

叶轮网格在 Turbo Grid 软件中生成,叶片周围采用 O 型剖分,外流域网格在 Ansys ICEM 软件中生成,壁面 Y^+ 保持在 30 左右。内外区域均划分为结构化网格,在叶顶部分共有 30 层网格,其中 7 层在内部旋转域,23 层在外部区域,如图 3 所示。

为了验证网格的无关性,在相同边界条件设置下,共选择了 7 组网格数进行数值模拟并比较其总压效率,结果如图 4 所示。综合计算精度与计算速度,最终选择总网格数 450 万,其中内部网格数 260 万,外部网格数 190 万。

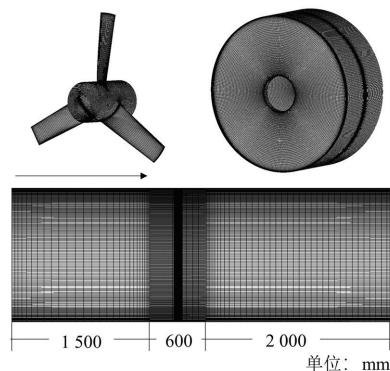


图 3 计算域网格分布

Fig. 3 The grids of computational domains

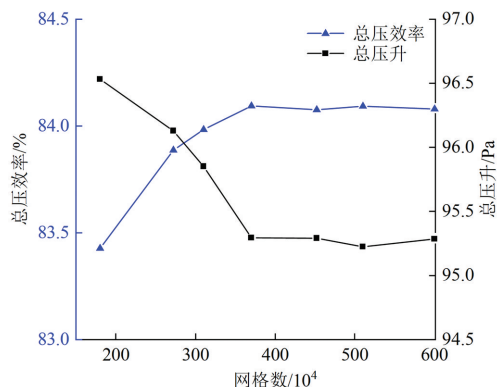


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Verification process of grid independence

1.3 数值计算方法试验验证

风机性能试验方法按照 GB/T1236—2017《工业通风机用标准化风道性能试验》,采用 C 型试验装置。流量用多喷嘴流量计测得,功率用电测法测得。流量与压力试验数据均通过自动采集系统得到。试验装置结构如图 5 所示。

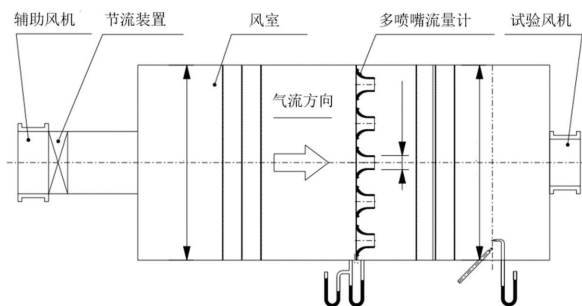


图 5 试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the test device

本文使用 Ansys CFX 进行计算,采用多重参考系方法(MRF)用于叶轮与机壳的动静交界面处,其中叶轮流域为旋转坐标系求解,外壳流域用静止坐标系求解。采用 SST $k-\omega$ 湍流模型、Scalable 壁面函数,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法,空间离散二阶迎风格式,进口采用速度边界条件,出口采用压力边界条件。由于机壳与内旋转域的相对旋转,对于非定常计算,数值格式采用高分辨率平流空间精度和二阶后向欧拉离散化的时间精度,瞬态模拟的时间步长为 2.3×10^{-4} s。定子-转子界面处的边界设置为瞬态转子-定子界面,以便正确模拟从静止框架到旋转框架的滑动界面。

基于上述计算方法和设置,对平均间隙为 10 mm 的模型进行数值计算,并将计算结果与试验数据进行对比,如图 6 所示。计算模型的压力、效率随流量的变化与试验值基本一致,全压的最大误差为

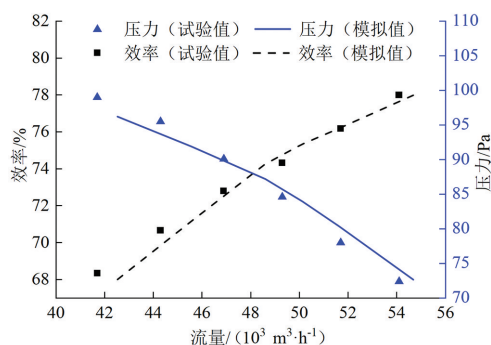


图 6 数值模拟与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between numerical simulations and experimental results

3.85%,效率的最大误差为 2.04%,所以认为此风机性能模拟的模型方法可靠。

2 稳态结果分析

为了研究间隙非均匀度和平均间隙水平对风机外特性的影响,开展固定平均间隙,改变非均匀度,固定非均匀度,改变平均间隙两种情况进行研究,具体情况如表 1、表 2 所示。

表 1 平均间隙相同但非均匀度不同的间隙情况

Table 1 Cases with different non-uniform clearances but the same average clearance

方案	C_a/mm	λ	L/mm
方案 1	10	0	4 461.1
方案 2	10	0.5	4 473.8
方案 3	10	0.8	4 498.6

表 2 非均匀度相同但平均间隙不同的情况

Table 2 Cases with different average clearances but the same non-uniform clearance level

方案	C_a/mm	λ	L/mm
方案 4	6	0.5	4 441.2
方案 5	10	0.5	4 473.8
方案 6	14	0.5	4 501.9

定常计算的叶片周向位置如图 7 所示,图中 φ_1 表示叶顶间隙最小位置, φ_2 表示小间隙旋入大间隙位置, φ_3 表示大间隙旋入小间隙位置。

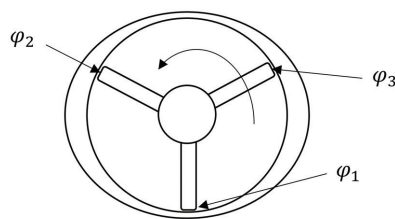
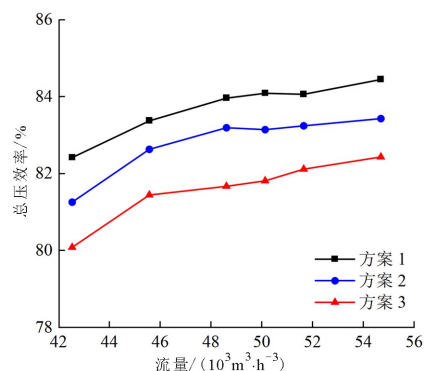


图 7 定常计算的叶片周向位置

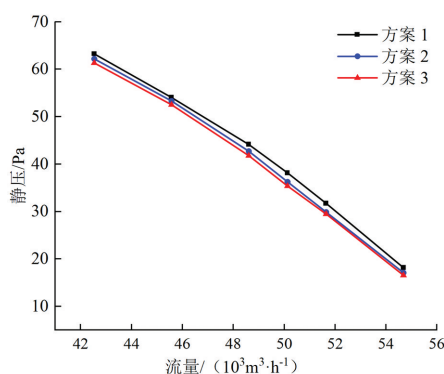
Fig. 7 Circumferential positions of the blades for steady simulations

2.1 非均匀度的影响

表 1 中方案 1、方案 2、方案 3 的效率-流量曲线和静压-流量曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,平均间隙大小不变,随着非均匀度的增加,效率明显下降,其中效率下降最大值约为 2.30%,静压略微下降,下降最大值约为 1.91 Pa。可知在相同平均间隙下,非均匀度对效率的影响大于对压力的影响。



(a) 总压效率



(b) 静压

图8 不同非均匀度对风机性能的影响

Fig. 8 Influence of non-uniformity on fan's performance

体积流量为 $50\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 时,3个叶片的叶顶静压分布图如图9所示。从图9可以看出,随着不均匀度的增加,叶顶截面的静压分布沿周向位置的变化更加显著。对于 φ_1 位置,在平均间隙一样的前提下,不均匀度的增加,意味最小间隙 φ_1 处的间隙减小,虽然方案3中 φ_1 处间隙最小,受泄漏流的影响,该叶顶间隙处的叶顶低压区反而最小,而对于其他两个叶片位置,叶片在前缘和后缘的径向间隙不同,且随着不均匀度增加,径向间隙的差别增大;在 φ_2 位置处,受泄漏流的影响,低压区的分布区域在轴向上(接近垂直叶片方向)随非均匀度的增大有扩大的趋势;在 φ_3 位置处,泄漏的影响在周向上有明显扩大的趋势。

方案3在 φ_2 位置处的叶顶泄漏流线和 Q 准则下 ($Q = 8 \times 10^5\text{ s}^{-1}$) 的涡结构如图10所示,一般的叶顶间隙泄漏流动会形成漩涡,并形成涡核流动。由图10可知:叶顶间隙泄漏可分为3个部分,靠近叶尖处形成两股带涡核流动的泄漏流,其中泄漏流A涡延展距离明显大于泄漏流B;此外,在靠近机壳壁面还形成了一个没有涡核的附加泄漏流动,该泄漏沿轴向发展一段距离后,再与主泄漏流一起沿周向流动。

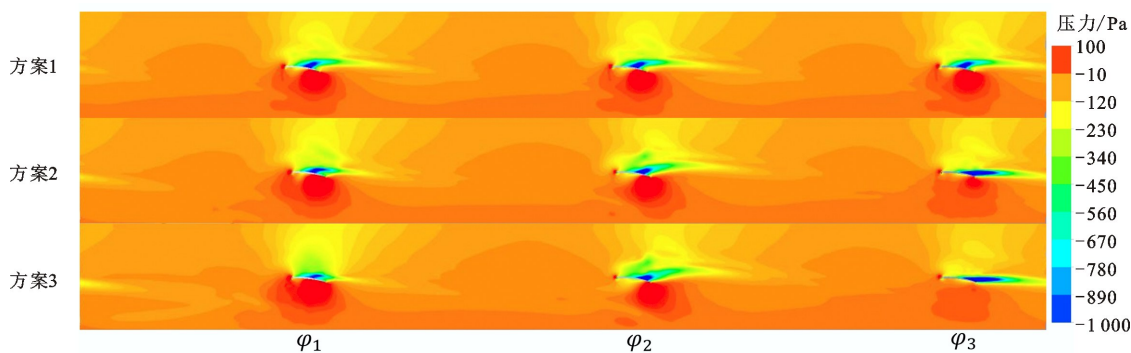


图9 方案1、2、3的叶顶静压分布

Fig. 9 Pressure distributions at blade tips for the cases 1 to 3

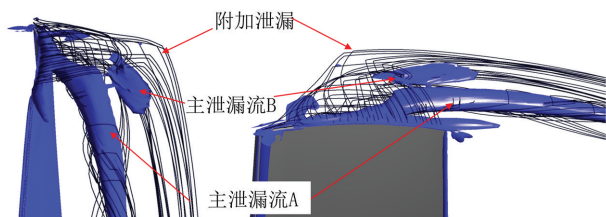


图10 叶顶泄漏流的流线和涡结构图

Fig. 10 Diagram of the tip leakage streamlines and vortex structures

2.2 不同平均间隙的影响

非均匀度为0.5时3种平均间隙的性能曲线图如图11所示,可知随着平均间隙的增加,效率和静压都有明显的下降,其中效率在小流量下降最大,达2.97%,静压接近等量下降。与非均匀度增大的情况相比,平均间隙的增大对效率的影响同样比对压力的影响显著,但是平均径向间隙的增大对压力的影响程度比非均匀度增加更显著。

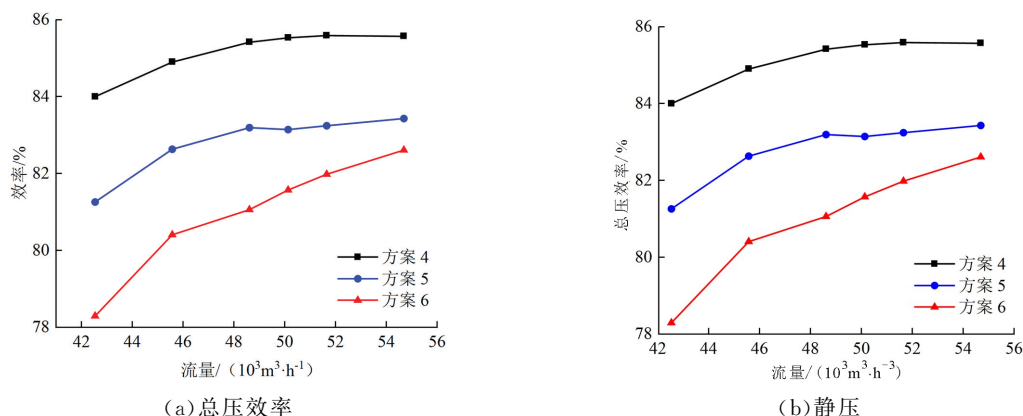


图 11 不同平均间隙对风机性能的影响

Fig. 11 Influence of the average clearance on fan's performance

方案 4、5、6 的叶顶静压分布如图 12 所示,可知随着平均间隙的增大,低压区在 3 个叶片位置上,都随间隙的增大而在轴向上有减小的趋势,在周向有

所增加。这与讨论均匀叶顶间隙的文献[7]中所述结论一致。由于叶顶间隙的增加使泄漏在周向的扩大影响了叶片的做功,从而导致了整体性能下降。

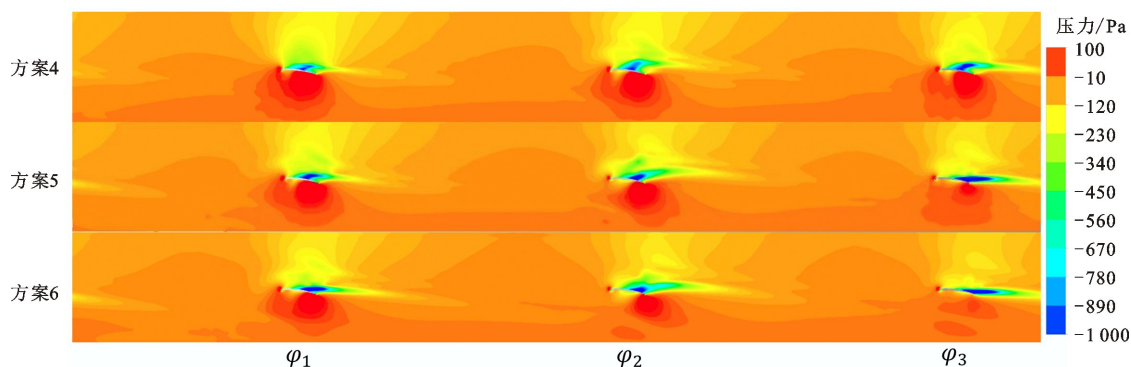


图 12 方案 4、5、6 的叶顶静压分布

Fig. 12 Pressure distributions at blade tips for the cases 4 to 6

2.3 机壳周长不变条件下的变形对风机性能的影响

实际风机的机壳变形往往导致间隙的不均匀度和平均值同时变化,为此进行了在固定周长下两个因素的变化情况。在周长一定的情况下,随着非均匀度的增大,叶顶间隙的平均径向间隙反而有所减小。表 3 所示为固定周长 $L=4\ 461.1\text{ mm}$ 情况下,不同均匀度和相应的平均径向间隙的 3 种情况。

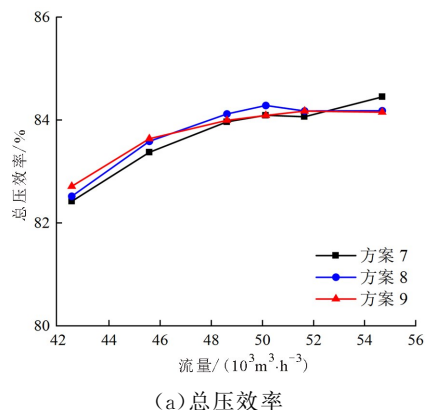
表 3 具有相同周长的机壳不同变形情况的间隙

Table 3 Clearances of different casing deformations for the fan with the same perimeter

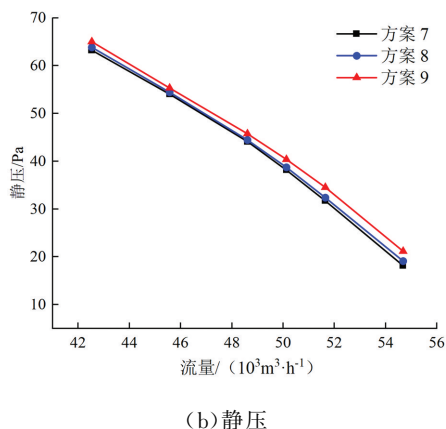
方案	C_a/mm	λ
方案 7	10.0	0
方案 8	8.6	0.5
方案 9	6.9	0.8

在表 3 给定周长情况下,由于机壳变形,导致风

机性能曲线的变化如图 13 所示。在定周长情况下,非均匀度的增加导致了平均间隙的减小。由图 13 可以看出,在两种间隙参数相反变化的共同作用下,效率-流量曲线未发生较大的变化,而在静压-流量曲线中,压力有一定的上升。这说明在保证机壳设计间隙的条件下,机壳的轻微变形,对风机的性能影响不显著。



(a) 总压效率



(b) 静压

图 13 相同周长下机壳变形对性能的影响

Fig. 13 Influence of casing deformation on performance under the same perimeter

3 瞬态结果分析

以方案3模型为例,进行非定常模拟,研究非均匀间隙下轴流风机的非定常特性和非均匀间隙对叶顶泄漏的影响,非定常计算的风机模型如图14所示。对一特定叶片从 0° 转到 180° 的流场特性进行分析,即可得到整周不同间隙的影响,其中叶片旋转到 0° 、 180° 为两个最小间隙, 90° 为最大间隙所在位置。

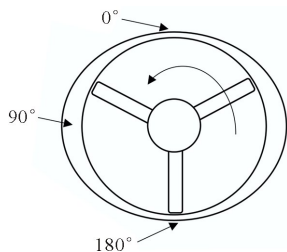
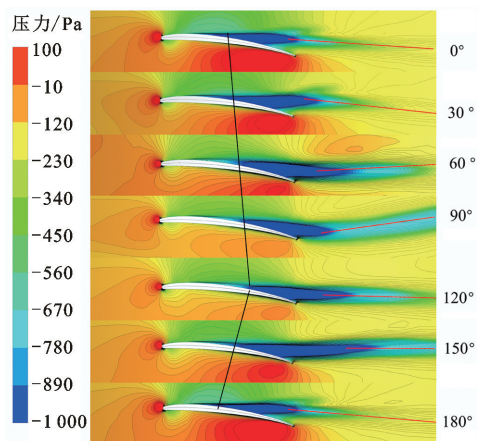


图 14 非定常计算的叶片周向角度示意图

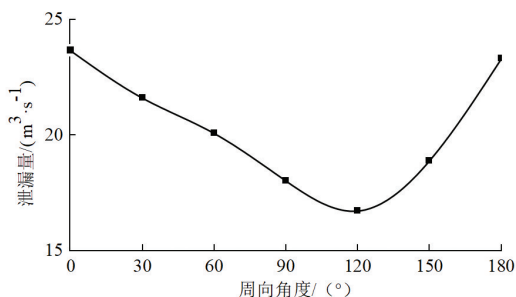
Fig. 14 Diagram of the circumferential angle of blades for unsteady simulations

周向角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的叶顶静压分布与泄漏流量如图15所示,图中红线标示了叶背后面低压区的摆动方向。叶片从 0° 位置旋转至 180° 位置,叶顶间隙先增大后减小,由叶顶泄漏所引起的低压区也有先增大后减小的趋势。在 $0^\circ \sim 120^\circ$ 区间内,低压区向后移动,如图15中黑线连线所示,不同相位角时,吸力面上具有同样的静压值的起始位置不断后移;在 $120^\circ \sim 180^\circ$ 区间内,有相反的变化。由图15可以看出,叶片由 0° 旋转至 180° 过程中,泄漏引起的低压区位置在 120° 时最为靠后,在这一过程中低压区的摆动在 90° 偏离最大。由图15(b)可以发现,在此过程中, 0° 、 180° 两个小间隙处的泄漏量反而最大,而介于其中的

间隙泄漏量逐渐减小,并在 120° 时达到最小值。



(a) 静压分布



(b) 泄漏流量

图 15 $0^\circ \sim 180^\circ$ 周向角的叶顶静压分布与泄漏流量Fig. 15 Tip static pressure distribution and leakage flow rate for the blade from 0° to 180° circumferential angle

叶片在不同周向角度时的S3流面流线及静压云图如图16所示,可以看出:在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 相位处,叶片受到前向叶片泄漏涡的影响,叶顶的泄漏流一部分被卷吸,造成了泄漏流量的减小;而在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 相位处,泄漏流并未受到影响,故而泄漏流量更大,泄漏涡形状也更传统。

图17展示了叶顶基元环形叶片的流场平面展开图,以叶片沿周向前进 30° 显示了不同时刻的叶片整周静压流场,图中标出了最大和最小间隙所在位置。当叶顶产生的泄漏流穿过逐渐减小的间隙时,泄漏涡流迅速耗散,对相邻后向叶片的做功影响减小;反之,当叶顶产生的泄漏流穿过逐渐增大的间隙时,泄漏涡流在一段距离内耗散不明显,有所增强,对相邻后向叶片的做功影响增大。

4 结论

文本通过定常和非定常数值模拟,对低压轴流风机周向非均匀叶顶间隙对性能和流场的影响展开研究,得到如下结论。

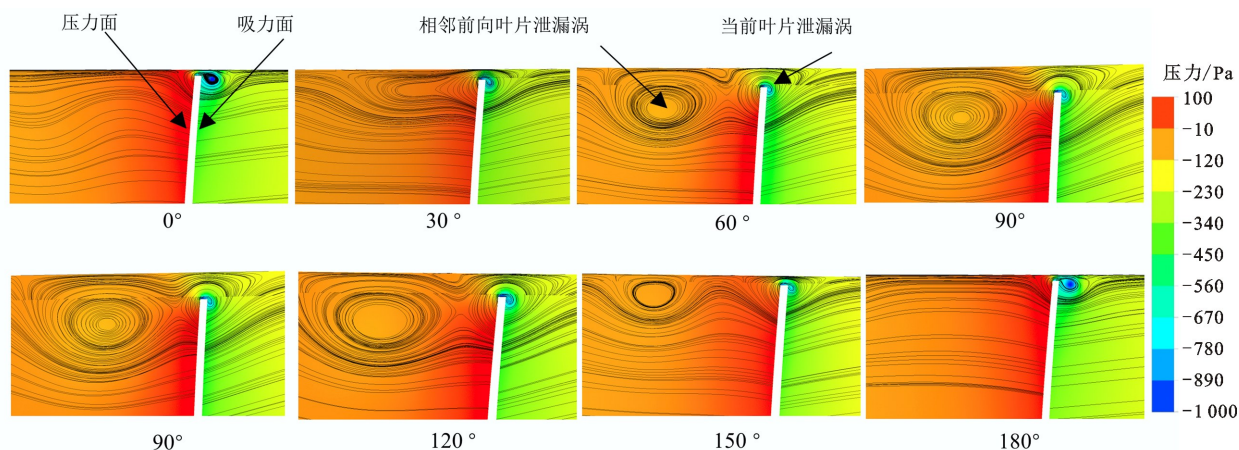


图 16 叶片在不同周向角度时的 S3 流面流线及静压云图

Fig. 16 Streamline and static pressure cloud diagrams at different blade circumferential angles on the S3 flow surface

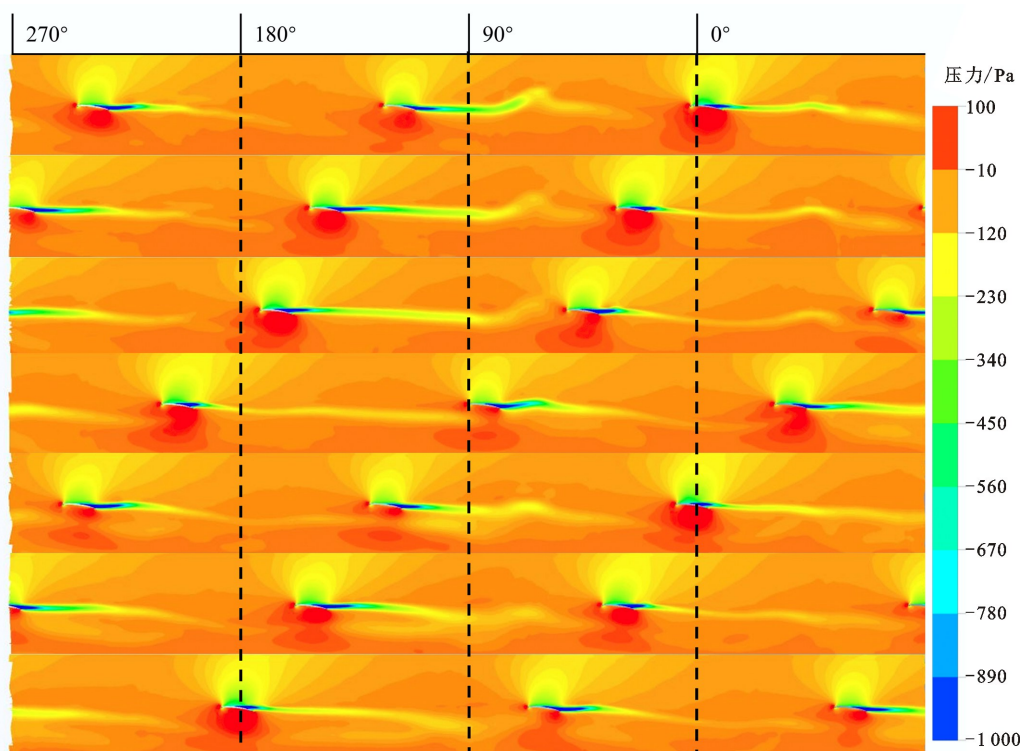


图 17 不同时刻叶顶环面上的叶顶泄漏流的压力场分布

Fig. 17 Pressure contours of the leakage flow at different instants on the annular tip blade cascade plane

(1)随着周向非均匀间隙的平均间隙和非均匀度这两个关键因素的增加,均会造成风机效率的明显下降,以及静压的下降,其中平均间隙的影响更为显著。

(2)在非均匀叶顶的大间隙范围内,叶顶泄漏可分为两部分,叶顶侧具有涡核的主泄漏部分沿周向发展,机壳侧无涡核附加泄漏先沿轴向发展一段距离后再沿周向发展。

(3)在叶顶间隙从小变大再变小的过程中,叶顶

的泄漏量和间隙大小不同步,且在最小叶顶间隙时,叶尖泄漏量最大。造成这一现象的主要原因是,相邻前向叶片的泄漏流对当前叶片泄漏形成卷吸,导致了泄漏量的变化。

(4)在整周流动中,泄漏流穿过逐渐减小的间隙时,叶顶泄漏对相邻后向叶片的影响减小;泄漏流穿过逐渐增大的间隙时,叶顶泄漏对相邻后向叶片的影响增大。

参考文献:

- [1] FREEMAN C. Effect of tip clearance flow on compressor stability and engine performance [J]. VKI Lecture Series, 1985, 5: 5.
- [2] CORY W. Fans and ventilation: a practical guide [M]. Oxford, UK: Elsevier Science, 2005.
- [3] 祁明旭, 丰镇平. 透平动叶顶部间隙流的表现形式及其对透平性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 243-246, 265.
QI Mingxu, FENG Zhenping. Representation formation of tip clearance flow and influence on turbine performance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(3): 243-246, 265.
- [4] MOGHADAM S M A, MEINKE M, SCHRÖDER W. Analysis of tip-leakage flow in an axial fan at varying tip-gap sizes and operating conditions [J]. Computers & Fluids, 2019, 183: 107-129.
- [5] POGORELOV A, MEINKE M, SCHRÖDER W. Effects of tip-gap width on the flow field in an axial fan [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 61: 466-481.
- [6] 吴艳辉, 楚武利, 张燕峰. 间隙大小对压气机转子间隙泄漏流场的影响 [J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(6): 838-842.
WU Yanhui, CHU Wuli, ZHANG Yanfeng. Effects of tip clearance size on tip leakage flow fields in a subsonic compressor rotor [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(6): 838-842.
- [7] 高杰, 郑群, 许天帮, 等. 涡轮间隙泄漏涡破碎对损失的影响 [J]. 航空学报, 2014, 35(5): 1257-1264.
GAO Jie, ZHENG Qun, XU Tianbang, et al. Effect of tip leakage vortex breakdown on losses in turbines [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(5): 1257-1264.
- [8] NHO Y C, PARK J S, LEE Y J, et al. Effects of turbine blade tip shape on total pressure loss and secondary flow of a linear turbine cascade [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 33(1): 92-100.
- [9] TALLMAN J, LAKSHMINARAYANA B. Numerical simulation of tip leakage flows in axial flow turbines, with emphasis on flow physics: part I effect of tip clearance height [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 314-323.
- [10] LEE S W, MOON H S, LEE S E. Tip gap height effects on flow structure and heat/mass transfer over plane tip of a high-turning turbine rotor blade [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(2): 198-210.
- [11] 陆华伟, 杨益, 刘俊, 等. 叶顶间隙影响高负荷扩压叶栅气动性能实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(3): 509-514.
LU Huawei, YANG Yi, LIU Jun, et al. An experimental investigation on the aerodynamic performance of highly-loaded compressor cascade with different tip clearance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3): 509-514.
- [12] YOU D, WANG Meng, MOIN P, et al. Effects of tip-gap size on the tip-leakage flow in a turbomachinery cascade [J]. Physics of Fluids, 2006, 18(10): 105102.
- [13] GAMIL A A A, TEIXEIRA J A, ADDALI A, et al. Demonstration of leakage flow distribution of an axial fan inside the tip clearance gap [C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Palo Alto, CA, USA: AIAA Press, 2017: AIAA 2017-1012.
- [14] KHALID S A, KHALSA A S, WAITZ I A, et al. Endwall blockage in axial compressors [C]//ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. New York, NY, USA: ASME, 1998: V001T01A047.
- [15] HAN Yadong, TAN Lei. Dynamic mode decomposition and reconstruction of tip leakage vortex in a mixed flow pump as turbine at pump mode [J]. Renewable Energy, 2020, 155: 725-734.
- [16] HAN Yadong, TAN Lei. Influence of rotating speed on tip leakage vortex in a mixed flow pump as turbine at pump mode [J]. Renewable Energy, 2020, 162: 144-150.
- [17] STORACE A F, WISLER D C, SHIN H W, et al. Unsteady flow and whirl-inducing forces in axial-flow compressors: part I experiment [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3): 433-445.
- [18] ALFORD J S. Protecting turbomachinery from self-excited rotor whirl [J]. Journal of Engineering for Power, 1965, 87(4): 333-343.
- [19] GRAF M B, WONG T S, GREITZER E M, et al. Effects of nonaxisymmetric tip clearance on axial compressor performance and stability [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 648-661.
- [20] CHEN Yingxiu, HOU Anping, ZHANG Mingming, et al. Effects of nonuniform tip clearance on fan performance and flow field [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2015: V02AT37A010.
- [21] 陈颖秀, 侯安平, 张明明, 等. 轴流压气机机匣变形对多排转子流场特性的影响 [J]. 航空学报, 2016, 37

- (11): 3284-3295.
- CHEN Yingxiu, HOU Anping, ZHANG Mingming, et al. Effects of casing deformation on blade rows flow field characteristics in an axial-flow compressor [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3284-3295.
- [22] MA Hongwei, LI Baihe. Effects of axial non-uniform tip clearances on aerodynamic performance of a transonic axial compressor [J]. *Journal of Thermal Science*, 2008, 17(4): 331-336.
- [23] 叶学民, 崔建光, 李春曦. 动叶可调轴流风机叶顶间隙形态的优化研究 [J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(10): 3939-3948.
- YE Xuemin, CUI Jianguang, LI Chunxi. Optimization of tip clearance patterns of variable-pitch axial flow fan [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(10): 3939-3948.
- [24] 姬田园, 楚武利, 戴雨晨, 等. 叶顶间隙偏差对叶片气动性能影响的不确定性研究 [J/OL]. *推进技术* [2022-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1813.V.20220118.1437.004.html>.
- JI Tianyuan, CHU Wuli, DAI Yuchen, et al. Study on the influence of tip clearance deviation uncertainty on blade aerodynamic performance [J/OL]. *Journal of Propulsion Technology* [2022-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1813.V.20220118.1437.004.html>.
- [25] HAO Yue, TAN Lei. Symmetrical and unsymmetrical tip clearances on cavitation performance and radial force of a mixed flow pump as turbine at pump mode [J]. *Renewable Energy*, 2018, 127: 368-376.
- (编辑 赵炜 杜秀杰)