

对旋风机叶轮内部流场的压力脉动分析

陈庆光, 房菲, 张振东, 贾祥省

(山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266510)

摘要:采用大涡模拟(LES)方法对一台对旋式轴流风机进行了三维全流场内非定常流动的数值模拟,在前后级叶轮流场的关键位置布置了若干监测点,在几个旋转周期内采集了各监测点处的压力数据,通过快速傅里叶变换方法将采集到的压力数据进行处理,得到各监测点的压力脉动频域图,通过频域图分析了监测点处压力脉动的频率、强度及形成原因。研究结果可为对旋风机气动噪声分析和风机的优化设计提供参考。

关键词:快速傅里叶变换;大涡模拟;压力脉动;三维流场;对旋式轴流风机

中图分类号:TH432.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)02-0080-06

Analysis on Pressure Fluctuation of the Interior Flow Field in Impellers of a Contra-rotating Axial Fan

CHEN Qingguang, FANG Fei, ZHANG Zhendong, JIA Xiangxing

(College of Mechanical & Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: The numerical simulation of unsteady flow in 3-D full flow field of a contra-rotating axial fan was made by means of the large eddy simulation (LES) technique. Many monitoring points were arranged at the key position in the flow field of both front and back impellers. The pressure data at the monitoring points in several rotating periods were collected and, then, processed by using fast Fourier transform (FFT) algorithm, obtaining the diagrams of frequency domain at all monitoring points. The frequency, strength and genesis of pressure fluctuation at all monitoring points were analyzed through the frequency domain diagrams. This study could be useful in analysis of aerodynamic noise and the optimal design of contra-rotating axial fan.

Key words: fast Fourier transform; large eddy simulation; pressure fluctuation; 3-D flow field; contra-rotating axial fan

对旋式轴流风机由前后两级旋向相反的叶轮组成,后级叶轮不仅要对流过的气体做功,而且担负着普通轴流式风机中导叶的整流作用,其流场也具有与普通轴流式风机完全不同的特性。叶轮机械中非定常流场的压力变化对其性能和机械方面有很大影响,例如,燃气轮机中转叶同其下游部件周围不均匀压力场的相互作用、转叶尾迹中周期性的压力亏损同下游静叶或动叶的相互作用是引起风机气动噪声的重要原因^[1],实验结果也表明对旋风机流场内的压力脉动是各种故障产生的根本原因^[2]。因此,分析对旋风机流场内部的压力变化情况,具有十分重要的意义。

数值模拟方法的选择对于流场模拟来说十分关键。介于直接模拟(direct numerical simulation, DNS)方法和雷诺平均(Reynolds Navier-Stokes, RANS)法之间的大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法在复杂湍流高精度数值模拟中已经获得了很多应用^[3-6]。相对于DNS方法,LES方法可以节省很大的计算量,而且在流动动态特性的获得和普适性方面优于RANS法^[7],更适合计算复杂的流动问题^[8];LES结合计算气动声学(calculation aeroacoustics, CAA)应用于气动噪声预测中,结果与实验值十分吻合^[9-10]。陈庆光、王

收稿日期:2010-11-28

基金项目:教育部科学研究重点项目(209070);山东省教育厅科技计划项目(J08LB03)。

作者简介:陈庆光(1969—),男,山东莒南人,教授,博士生导师,主要从事流体机械内流、气动噪声及流体传热等方面的教学与研究工作。E-mail:chenqingguang03@tsinghua.org.cn。

维斌和张永超等^[11-12]利用 Realizable $k-\epsilon$ 方法对风机进行了非定常湍流计算,并分析了干涉面的压力脉动情况。本研究采用 LES 对风机进行三维全流场数值模拟,得到叶轮内部流场的压力脉动情况,对叶轮内部流场和干涉面压力脉动的频率、强度及形成原因进行研究,分析尾迹和位势作用的影响范围,研究结果可为对旋风机的气动噪声分析和结构优化设计提供有益的参考。

1 数值模型

大涡模拟(large eddy simulation, LES)将比网格尺度大的湍流运动通过瞬时 Navier-Stokes 方程直接计算出来,而小尺度涡对大尺度涡的影响则通过一定的模型在针对大尺度涡的瞬时 Navier-Stokes 方程中体现出来^[13]。

方程(1)和方程(2)构成了应用于 LES 方法的控制方程组:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}. \quad (2)$$

其中: μ 为动力黏度; ρ 为流体密度; \bar{u}_i 为平均速度在直角坐标系(x_1, x_2, x_3)上 x_i 方向上的速度分量; \bar{p} 为平均压力; τ_{ij} 为亚格子应力, $\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j$ 。

根据 Smagorinsky 的基本亚格子模型,亚格子应力如式(3)所示:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}. \quad (3)$$

其中, $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$, μ_t 为亚格子尺度的湍流粘度。

本研究采用 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型,有

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|. \quad (4)$$

其中: $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$; L_s 为网格的混合长度, $L_s = \min(kd, C_s V^{\frac{1}{3}})$, k 为常数, d 为到最近壁面的距离, V 为计算单元的体积,取 $C_s = 0.1$ 。

2 网格和监测点的布置

本研究选择一台对旋轴流式风机进行研究,风机结构参数和设计工况为:流量 $Q=3.5 \text{ m}^3/\text{s}$,全压升 $P=2100 \text{ Pa}$,转速 $n=2920 \text{ r}/\text{min}$,轮毂直径 $d=295 \text{ mm}$,叶轮外径 $D=500 \text{ mm}$,前级叶片数 $z=8$,后级叶片数 $z=7$ 。分块建立从风机集流器入口至风机扩散器出口的全流场几何模型,采用非结构化网格进行划分,对两级叶轮处和叶轮顶隙进行网格加密,在叶轮和电机段的动-静界面及叶轮之间的动-动界面采用滑移网格技术。网格数分布如表 1 所示。

设定入口速度和出口全压边界条件,采用无滑移壁面条件。定常计算的结果作为非定常计算的初场,前期非定常计算采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型, SIMPLE 算法。计算稳定后,以此得到的流场数据做为大涡模拟的初场,小尺度涡的模拟采用 Smagorinsky-Lilly 亚格子模型。

在前后级叶轮中各设置 3 个监测面、9 个监测点,监测面分别为叶片顶部前缘处截面(叶轮入口监测面),叶片中间弦长处截面(叶轮中间监测面)和叶片顶部后缘处截面(叶轮出口监测面),每一个监测面中监测点分别在轮毂处、50%叶高处和叶顶间隙处,如图 1 所示。

表 1 网格分布表

Tab. 1 The table of grid distribution

划分部位	集流器段	前级叶轮及电机段	后级叶轮及电机段	扩散器段
网格数	23 812	805 529	657 203	15 620

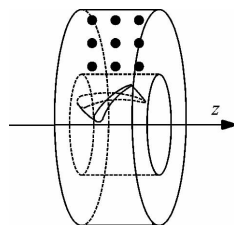


图 1 叶轮监测点分布示意图

Fig. 1 The sketch of monitoring points distribution of the impeller

以流体流动方向为 z 轴正方向,所取前级叶轮的各监测面沿 z 轴的位置坐标分别为 $-0.067, 0.0204, 0.047$,后级叶轮监测面沿 z 轴的位置坐标分别为 $0.125, 0.139, 0.154$,轮毂上所取监测点的坐标位置为 $(0.148, 0)$,叶道中间监测点坐标为 $(0.19925, 0)$,叶顶间隙处监测点的位置坐标为 $(0.2495, 0)$ 。将前级叶轮和电机段干涉面、后级叶轮和电机段干涉面、两叶轮之间干涉面也作为监测面进行压力数据采集,监测点设置与叶轮上的监测面相同。

采集6个旋转周期内各监测面压力分布数据,从中提取出各监测点上的压力参数(压力随时间的变化),并通过快速傅里叶变换方法(fast fourier transform algorithm, FFT)变换成各监测点的压力脉动频域图。从监测点压力脉动频域图可以分析各监测点处压力脉动的强度和频率特性,进而分析造成该点压力脉动的原因,将各监测点压力脉动特性进行汇总,就能得到叶轮流场的压力脉动特性,为叶轮流场特性的分析提供依据。

3 数值结果和分析

用FFT方法对数值模拟结果进行处理,得到监测点处的压力脉动频域图,如图2~图7所示。其中,图2~图4是前级叶轮监测点的压力脉动频域图,图5~图7是后级叶轮监测点的压力脉动频域图。

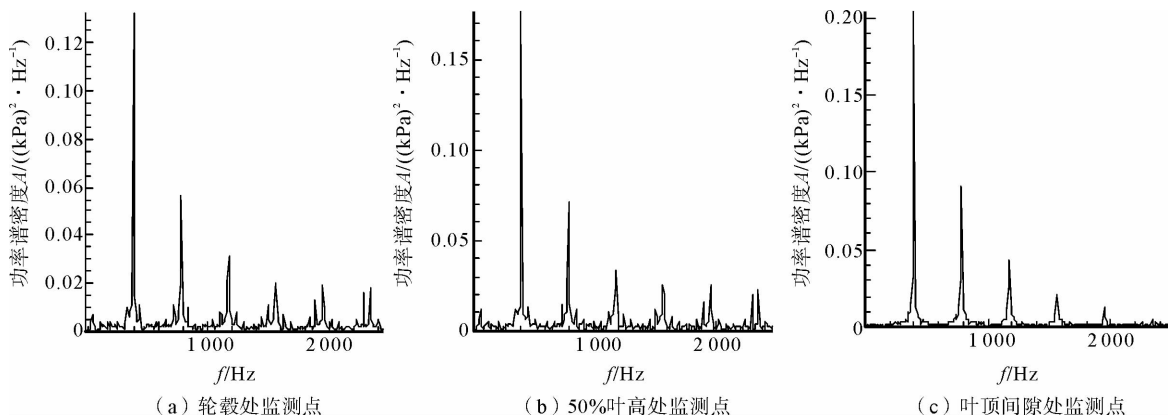


图2 前级叶轮入口监测面脉动频域图

Fig. 2 The frequency domain diagram of pressure fluctuation at inlet monitoring face of the front impeller

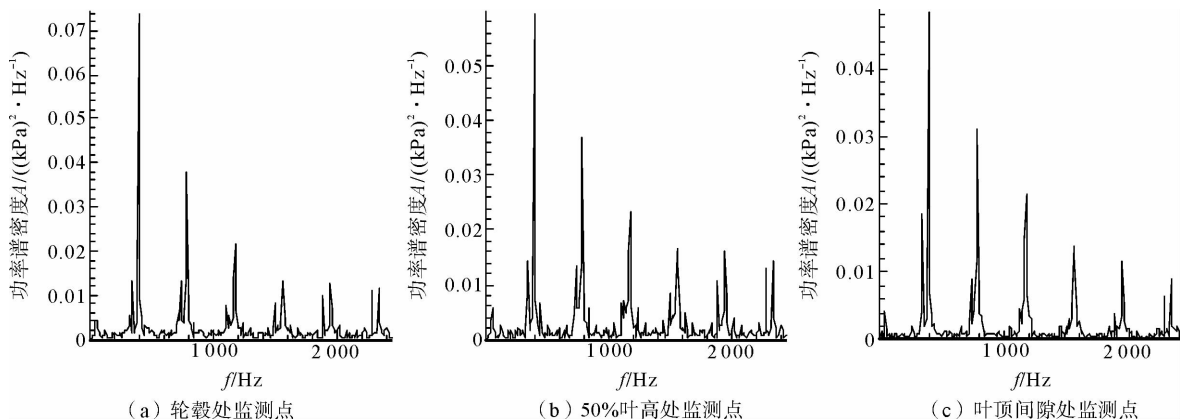


图3 前级叶轮中间监测面脉动频域图

Fig. 3 The frequency domain diagram of pressure fluctuation at the middle monitoring face of front impeller

从图2~图4可以看出,前级叶轮3个监测面上的压力脉动既包括离散的压力脉动也包括在监测频率范围内宽频率的压力脉动。其中,脉动离散峰值在叶顶叶片前缘位置的压力脉动强度最大,在同一监测面上,宽频率的压力脉动则是在叶轮流道内的监测点脉动强度稍高于叶顶监测点处。

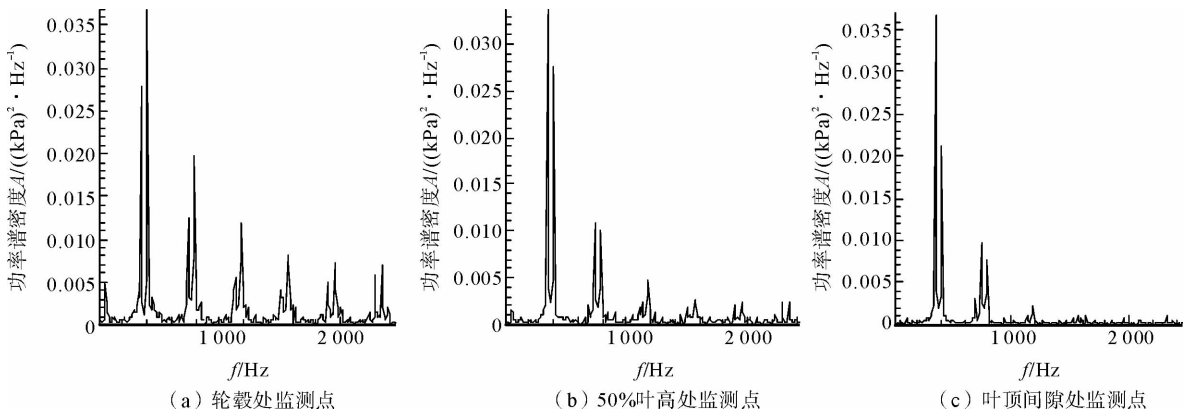


图 4 前级叶轮出口监测面脉动频域图

Fig. 4 The frequency domain diagram of pressure fluctuation at the outlet monitoring face of the front impeller

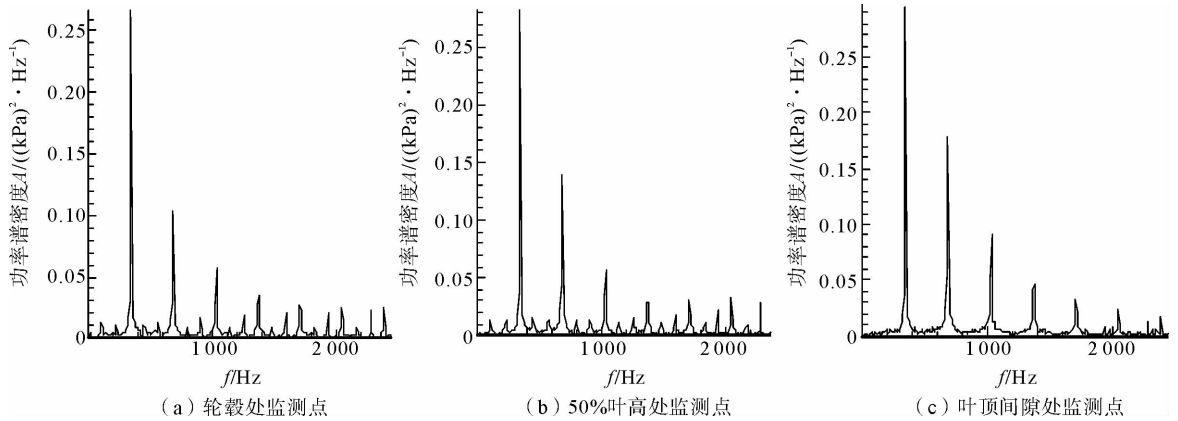


图 5 后级叶轮入口监测面脉动频域图

Fig. 5 The frequency domain diagram of pressure fluctuation at the inlet monitoring face of the back impeller

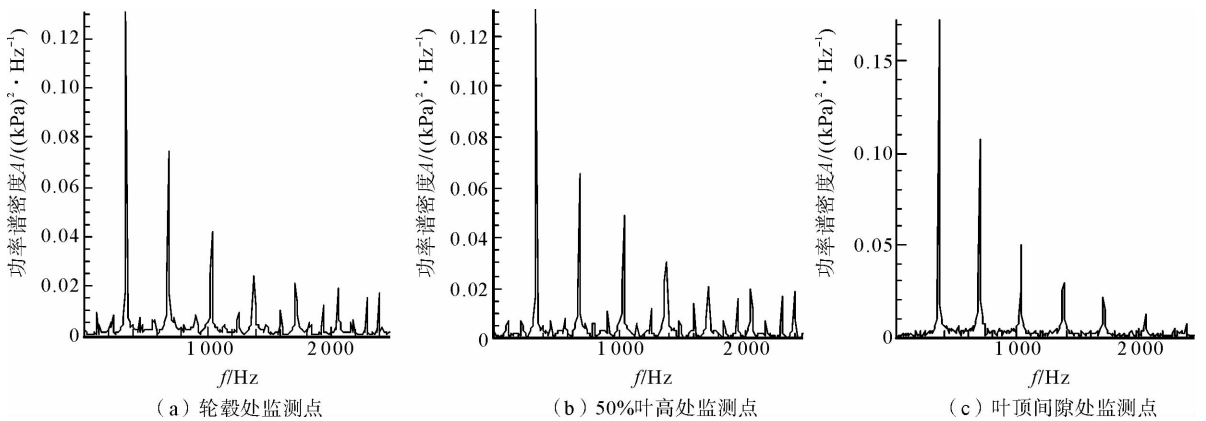


图 6 后级叶轮中间监测面脉动频域图

Fig. 6 The frequency domain diagram of pressure fluctuation at the middle monitoring face of back impeller

经计算,风机前后级叶轮的基频($f = zn/60$)分别为 389.3 Hz 和 340.6 Hz,观察离散脉动峰值的频率和强度可知:叶轮入口监测面处只受到前级叶轮自身旋转和位势作用的影响,离散脉动的频率都在前级基频和谐频附近;中间监测面处,在 3 个监测点位置都能够看到在后级基频和谐频附近的压力脉动,说明后级叶轮位势作用的影响范围达到了前级叶轮的中间部位,此时仍是前级叶轮自身的影响较大;在叶轮出口监测面

处,由于后级位势作用的增强,叶轮出口监测面在50%叶高处和叶顶间隙处后级基频和谐频位置的压力脉动成为主要脉动。

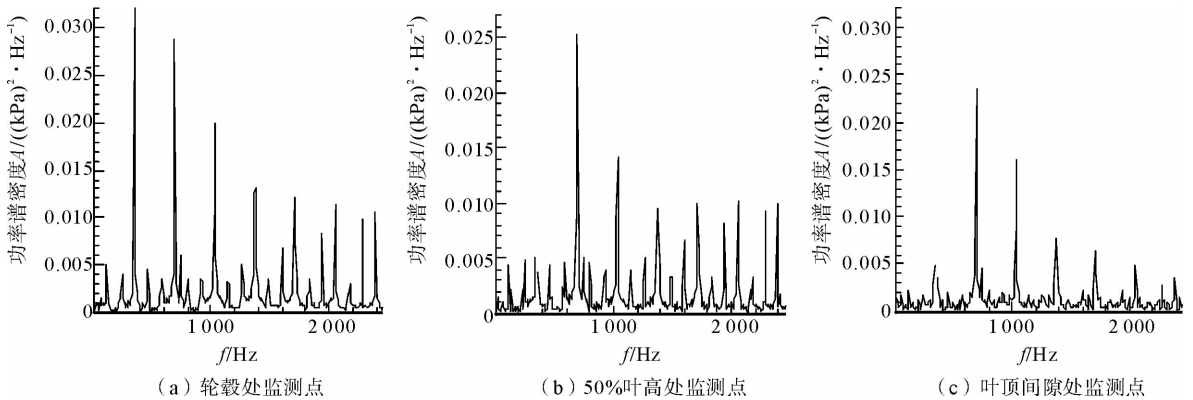


图7 后级叶轮出口监测面脉动频域图

Fig. 7 The frequency domain diagram of pressure fluctuation at the outlet monitoring face of the back impeller

综合分析前级叶轮3个监测面的压力脉动情况可知,沿流动方向,离散脉动和宽频脉动的强度都有所减弱;在叶轮出口监测面50%叶高和叶顶监测点宽频脉动不明显;叶轮出口监测面的离散脉动只在轮毂监测点处还存在丰富的次频,50%叶高和叶顶监测点只在基频和主要次频附近存在离散脉动峰值。

分析后级叶轮压力脉动频域图可知,后级叶轮流场中的压力脉动情况有与前级相似的地方,主要表现在后级叶轮压力脉动也是包括离散压力脉动和宽频脉动两种脉动形式,压力脉动也同样具有沿流动方向脉动强度减弱的特点,叶片顶部前缘部位仍然是离散脉动最为强烈的位置,在同一监测面上,宽频率脉动的强度沿径向逐渐减弱。

分析后级叶轮的离散脉动频率,可以发现整个后级叶轮监测点的离散脉动频率都是在后级的基频和谐频附近,并不像前级叶轮那样在叶轮后半部分显示出两级叶轮的共同影响,可见,前级叶轮的尾迹的作用要远低于后级叶轮自身的位势作用;观察后级叶轮出口监测面的脉动情况可知,出口监测面上仍具有很强的宽频脉动,压力离散脉动的频域也十分丰富。

总体来看,后级叶轮总体压力脉动强度高于前级叶轮,这说明同前级叶轮相比,后级叶轮内部流场内的流动情况更为复杂。两级叶轮中都包含有丰富的离散压力脉动和大范围的宽频脉动成分,它们对非定常流场的形成和风机的气动声学性能都具有重要影响。

前干涉面、中间干涉面、后干涉面的压力脉动情况汇总于表2。

结合前面对叶轮流场的压力分析可知,受到后级叶轮位势作用的影响,前级叶轮尾迹对下游流场的作用受到了抑制。压力宽频脉动主要分布在叶轮内部的流场中,在没有转子分布的流场中不明显,因此,宽频率脉动的产生主要与叶片与非定常流场的干涉以及叶片自身造成的非定常湍流变化有关;后干涉面上宽频脉动仍十分明显,说明尾迹也是形成宽频率脉动的原因之一。

表2 干涉面脉动数据列表

Tab. 2 The table of pressure fluctuation data at interference faces

位置	离散脉动数目	脉动频率 f/Hz	主频功率谱密度 $A/((\text{kPa})^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$	宽频率脉动
前干涉面(轮毂处)	3	390,750,800	0.035 0	不明显
前干涉面(50%叶高处)	3	390,750,800	0.040 0	不明显
前干涉面(叶顶处)	3	390,750,800	0.045 0	不明显
中间干涉面(轮毂处)	4	390,700,750,800	0.085 0	不明显
中间干涉面(50%叶高处)	3	390,700,750	0.130 0	不明显
中间干涉面(叶顶处)	3	390,700,750	0.150 0	不明显
后干涉面(轮毂处)	3	350,700,750	0.013 0	不明显
后干涉面(50%叶高处)	4	350,700,750,105 0	0.009 0	不明显
后干涉面(叶顶处)	3	350,700,750	0.007 5	明显

4 结论

通过分析对旋风机叶轮流场的压力脉动情况,得到以下主要结论。

1)前级叶轮流场中离散脉动受到前级叶轮自身旋转和后级叶轮压力位势的共同影响,后级压力位势对前级的影响范围可以达到叶轮的中部。后级叶轮离散压力脉动主要受后级叶轮自身旋转和位势的作用。

2)后级叶轮的位势对前级叶轮的尾迹有抑制作用。

3)宽频压力脉动主要分布在叶轮内部的流场中,与转子叶片和非定常流场之间的干涉以及叶片自身引起的非定常湍流变化有关,尾迹也是形成宽频脉动的原因之一。

参考文献:

- [1]唐狄毅. 叶轮机非定常流[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
- [2]谷勇霞,周忠宁,李意民,等. 基于压力脉动研究的矿用对旋通风机典型故障分析[J]. 矿山机械,2007(5):53-54.
- [3]RIZZETTA D P, VISBAL M R, MORGAN P E. A high-order compact finite-difference scheme for large-eddy simulation of active flow control[J]. Progress in Aerospace Sciences,2008,44(6):397-426.
- [4]LO LACONO G, TUCKER P G, REYNOLDS A M. Predictions for particle deposition from LES of ribbed channel flow[J]. Journal of Heat and Fluid Flow,2005,26(4):558-568.
- [5]TULISZKA-SZNITKO E, ZIELINSKI A, MAJCHROWSKI W. LES of the non-isothermal transitional flow in rotating cavity[J]. Journal of Heat and Fluid Flow,2009,30(3):534-548.
- [6]容易,张会强,王希麟. 气固两相圆湍射流流动的大涡模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(2):240-243.
RONG Yi,ZHANG Huiqiang,WANG Xilin. Large eddy simulations of gas-particle turbulent round jet flows[J]. Journal of Tsinghua University:Science&Technology,2007,47(2):240-243.
- [7]崔桂香,许春晓,张兆顺. 湍流大涡数值模拟进展[J]. 空气动力学学报,2004,22(2):121-129.
CUI Guixiang,XU Chunxiao,ZHANG Zhaoshun. Progress in large eddy simulation of turbulent flows[J]. Acta Aerodynamica Sinica,2004,22(2):121-129.
- [8]吴德铭,部治编. 实用计算流体力学基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006.
- [9]LELE S K, MENDEZ S, RYU J, et al. Sources of high-speed jet noise: analysis of LES data and modeling[J]. Procedia Engineering,2010(6):87-93.
- [10]LIU Q, QI D, TANG H. Computation of aerodynamic noise of centrifugal fan using large eddy simulation approach, acoustic analogy, and vortex sound theory[J]. Journal of Mechanical Engineering Science,2007,221(11):1321-1333.
- [11]王维斌,陈庆光,张永超,等. 基于非定常计算的对旋风机压力脉动分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2009,28(1):74-78.
WANG Weibin,CHEN Qingguang,ZHANG Yongchao,et al. Analysis of pressure pulsation of counter-rotating ventilator based on unsteady calculation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2009,28(1):74-78.
- [12]张永超,陈庆光,王维斌,等. 对旋风机非定常湍流计算及整机压力脉动分析[J]. 山东大学学报:工学版,2008,38(6):7-10.
ZHANG Yongchao,CHEN Qingguang,WANG Weibin,et al. Unsteady turbulent simulation of counter-rotating axial flow and the analysis of pressure pulsation in the whole passage[J]. Journal of Shandong University:Engineering Science,2008,38(6):7-10.
- [13]王福军. 计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.