

# 蜗壳散射对离心风机气动噪声传播的影响

毛义军, 祁大同, 刘晓良

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 理论分析了声波在空气-钢板界面上的传播过程. 结果表明: 声波在蜗壳壁面上的入射角不小于  $3.23^\circ$  时发生全反射; 在入射角小于  $3.23^\circ$  时虽然存在声波的透射, 但当蜗壳厚度不小于 3 mm 时, 声波经 A 声级计权后的隔声量大于 40 dB, 证明了将蜗壳作为声学硬边界条件处理的合理性. 采用薄壳体边界元方法计算分析了将蜗壳作为声学硬边界对声波传播的影响, 结果表明: 蜗壳对低频声波传播的影响不明显, 风机低频声源可以近似为紧凑声源, 但随着频率的增大, 声波受到蜗壳散射的影响逐步明显, 蜗壳表面上的漫反射使得风机内部分布声源激发的声场趋近均匀化.

**关键词:** 离心风机; 噪声; 散射; 声学硬边界; 边界元方法

**中图分类号:** TB432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0051-05

## Analysis on Effect of Volute Scattering on Aerodynamic Noise Propagation of Centrifugal Fan

MAO Yijun, QI Datong, LIU Xiaoliang

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

**Abstract:** The effect of volute scattering on aerodynamic noise propagation of a centrifugal fan was analyzed. The theoretical result shows that full reflection of sound wave will occur on the air-steel volute interface when the incidence angle is more than  $3.23^\circ$ , but when the incidence angle is less than  $3.23^\circ$ , the A-weighted sound transmission loss is more than 42dB as long as the volute thickness is not less than 3mm. It seems that the volute could be regarded as an acoustic rigid boundary in noise prediction. A further numerical study was carried out by using a thin-body boundary element method (BEM) to analyze the influence of volute scattering on sound propagation. The numerical result shows that volute scattering has slight effect on low-frequency sound propagation and the fan low-frequency noise source can be viewed as a compact source. However, the effect of volute scattering on sound propagation is significant with the increase in sound frequency. The sound field generated by the distributed source in the centrifugal fan is distributed quite uniformly because of the diffuse reflection to the volute.

**Keywords:** centrifugal fan; noise; scattering; acoustic rigid boundary; boundary element method

离心风机广泛应用在工业生产、楼宇空调等场合,其气动噪声的预测近年来成为各国学者研究的焦点.然而,由于蜗壳对风机内部非定常流动和声波反射及散射的影响,增加了噪声预测的难度.

大部分研究人员忽略了蜗壳对声波传播的影响,直接分析风机噪声在自由空间场下的辐射: Moon 和 Cho 等人<sup>[1-2]</sup>采用 FW-H 方程预测了贯流

风机叶片声源在自由空间场下辐射的离散气动噪声;Younsi<sup>[3]</sup>预测了前向多翼离心风机蜗舌部位声源在自由空间场下辐射的气动噪声;Liu 等人<sup>[4-5]</sup>采用 FW-H 方程和 Powell 涡声理论分析了前向离心风机在自由空间场下辐射的离散噪声和宽频噪声.一些学者研究了蜗壳或其替代模型对声波传播的影响;Jeon 等人<sup>[6-7]</sup>研究了离心叶轮和尖劈模型的非

定常流场和声场分布,将尖劈作为声学硬边界处理,分析离心叶轮激发的气动声场受到尖劈模型的反射和散射影响;Langthjem<sup>[8]</sup>同样将蜗壳作为声学硬边界处理,分析了离心水泵叶轮激发的二维声场.虽然蜗壳对声波的反射和散射影响逐步被学者重视,蜗壳作为声学硬边界条件的假设也被应用在噪声预测上,但到目前为止,作者还没有查阅到相关的文献论证这一假设的合理性.此外,Jeon 等人<sup>[6-8]</sup>均分析了尖劈或蜗壳对叶片声源激发声波传播的影响,但大量的研究已经表明,离心风机的气动噪声源主要位于蜗舌区域<sup>[3-5,9]</sup>.

本文首先分析了声波在空气-蜗壳界面上的传播过程,从理论上论证了将蜗壳作为声学硬边界条件处理的合理性,然后采用非定常流动数值计算方法得到蜗壳壁面上的气动声源强度,并应用一种开口薄壳体边界元方法分析离心风机蜗壳对不同频率声波传播的影响.

## 1 蜗壳边界条件

叶轮和蜗壳是风机最基本的气动元件.由于蜗壳声学阻抗不同于空气,风机内部产生的气动噪声不是在自由空间下辐射,而是在蜗壳壁面上经历反射、散射和折射过程.工业风机蜗壳常用钢板制造,分析声波从空气中的钢板一侧透射到另一侧的传播过程,尤其是声波在空气-钢板界面上的传播特点,是深入研究蜗壳对风机噪声传播影响的基础.

声波在空气中的传播表现为纵波形式,但当空气中的纵波在空气-钢板界面上入射时,钢板内部不仅会产生折射纵波,还会产生折射横波,并且这2种折射波的折射角不相同.空气中纵波折射到钢板内产生的横波和纵波均满足折射定律,有

$$\sin\theta_i/\sin\theta_t = c_1/c_2 \quad (1)$$

式中: $\theta_i$ 为声波在空气-钢板界面上的入射角; $\theta_t$ 表示在入射角为 $\theta_i$ 时钢板中声波的折射角; $c_1$ 和 $c_2$ 分别为声波在空气和钢板中的传播速度,由于 $c_1 < c_2$ ,在空气-钢板界面上存在全反射的临界情况,界面上发生全反射的临界入射角

$$\theta_{icr} = \arcsin(c_1/c_2) \quad (2)$$

当空气中声速 $c_1 = 344$  m/s、钢板内纵波传播速度 $c_{2L} = 6.1 \times 10^3$  m/s、横波的传播速度 $c_{2T} = 3.3 \times 10^3$  m/s时,钢板中能够产生折射纵波和横波的临界入射角如下:

$$\text{折射纵波} \quad \theta_{icr,L} = \arcsin(c_1/c_{2L}) = 3.23^\circ \quad (3)$$

$$\text{折射横波} \quad \theta_{icr,T} = \arcsin(c_1/c_{2T}) = 6.0^\circ \quad (4)$$

在入射角 $\theta_i \geq \theta_{icr,T}$ 的情况下,蜗壳壁面上的声波发生全反射,即此时蜗壳壁面可以作为声学硬边界条件处理.

进一步考虑 $\theta_i < \theta_{icr}$ 的情形,声波部分反射,部分则透过钢板传播到外部空间.理论证明,在声波垂直入射,或者固体中间层比较薄甚至是斜入射时,都可以认为固体层中只有纵波传播<sup>[10]</sup>.钢板中声波波长 $\lambda_2 \geq 6D$ ( $D$ 为钢板的厚度)时可以认为蜗壳为薄中间层.工业风机蜗壳钢板厚度一般为 $3 \text{ mm} \leq D \leq 30 \text{ mm}$ ,人耳能够感受到的声波频率范围为 $0.02 \sim 20 \text{ kHz}$ ,在钢板中对应的声波波长范围 $\lambda_2 = 0.3 \sim 300 \text{ m}$ ,因此分析该波长范围内的声波透射时,一般都可以将蜗壳作为薄中间层处理,此时可以忽略钢板中横波的影响.在入射角为 $\theta_i$ 、钢板中纵波折射角为 $\theta_{iL}$ 的情况下,评价声波透射性能的参数——声压透射系数 $t_p$ 和隔声量 $R_{TL}$ 的计算公式分别如下<sup>[10]</sup>

$$t_p = p_t/p_i = 2/[\sqrt{4\cos^2(k_{2L}D) + (Z_1/Z_2 + Z_2/Z_1)^2 \sin^2 k_{2L}D}]^{1/2} \quad (5)$$

$$R_{TL} = 20 \lg(p_i/p_t) = 10 \lg(4\cos^2(k_{2L}D) + (Z_1/Z_2 + Z_2/Z_1)^2 \sin^2 k_{2L}D/4) \quad (6)$$

式中: $Z_1 = \rho_1 c_1 / \cos\theta_i$ ;  $Z_2 = \rho_2 c_{2L} / \cos\theta_{iL}$ ;  $k_{2L} = k_2 \cos\theta_{iL} = 2\pi f \cos\theta_{iL} / c_{2L}$ ;  $p_i$ 和 $p_t$ 分别为入射波和透射波的声压; $f$ 为声波的频率; $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 分别为空气和钢板的密度.

为便于分析钢板厚度和波长的相对尺寸对声波透射性能的影响,定义特征速度 $U = Df$ .讨论声波在入射角 $\theta_i = 0 \sim 3.23^\circ$ 、特征速度 $U = 2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^2 \text{ m/s}$ ( $D = 1 \sim 30 \text{ mm}$ ,  $f = 0.02 \sim 20 \text{ kHz}$ )范围内钢板的透射性能.声压透射系数 $t_p$ 和隔声量 $R_{TL}$ 随入射角 $\theta_i$ 和特征速度 $U$ 的变化如图1所示.透射系数 $t_p$ 是入射角 $\theta_i$ 的增函数,但变化不大,可以忽略不计; $t_p$ 是特征速度 $U$ 的减函数,尤其在 $U = 0 \sim 60 \text{ m/s}$ 范围内, $t_p$ 随声波频率 $f$ 的增大而迅速减小.

假设风机蜗壳厚度为 $3 \text{ mm}$ ,忽略声波入射角的影响,分析频率 $f = 0.02 \sim 20 \text{ kHz}$ 范围内声波透射蜗壳的性能,如图2所示.蜗壳的存在对高频段声波具有较好的隔声效果,但低频段声波却几乎能完全透过蜗壳直接向外界辐射.虽然蜗壳对低频段声波的隔声效果比较差,但由于人耳对低频声波的敏感性较差,因此考虑A声级计权对不同频率声波的声压级 $L_p$ 衰减(见图3),得到A声级计权后的消声量曲线,如图4所示.结果显示,声源通过蜗壳透射和A计权后的声压级衰减量不小于 $40 \text{ dB}$ .

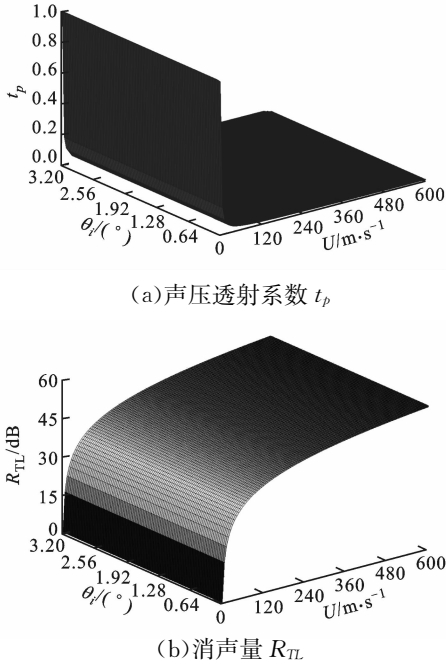
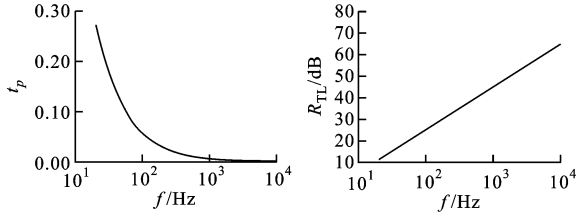
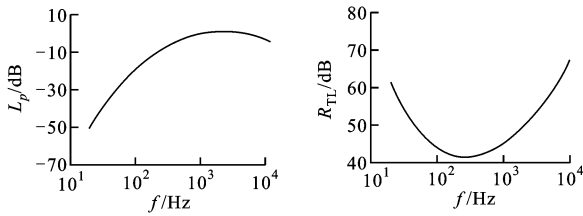
(a) 声压透射系数  $t_p$ (b) 消声量  $R_{TL}$ 图1 入射角  $\theta_i$  和特征速度  $U$  对声波透射性能的影响(a) 声压透射系数  $t_p$ (b) 消声量  $R_{TL}$ 图2 频率对声波透射性能的影响(忽略入射角影响, 钢板厚度  $D=3$  mm)

图3 A计权下的声压级衰减值

图4 A计权下的蜗壳隔声量  $R_{TL}$ 

综合以上分析,可以认为风机由于蜗壳的存在,声波入射角  $\theta_i \geq 3.23^\circ$  时只能通过进出口向外辐射,入射角  $\theta_i < 3.23^\circ$  时,高频段声波基本不能透射蜗壳,只能通过进出口向外辐射,低频段声波虽然透过蜗壳向外辐射时声压衰减量较小,然而由于人耳对低频段声波的敏感性较差,考虑 A 计权衰减后,各频段的噪声经蜗壳透射后其声压级的衰减量至少在 40 dB 以上.因此,在分析风机噪声向外辐射的过程中,能够近似将蜗壳作为声学硬边界处理.

## 2 数值分析

以 T9-19No. 6.3A 离心风机为例,数值预测了该离心风机的气动噪声. T9-19No. 6.3A 离心风机的主要参数如下:叶轮进口直径  $D_1=246$  mm,叶片出口直径  $D_2=630$  mm,无叶旋转扩压器出口直径  $D_3=725$  mm,叶片数  $Z=12$ ,叶片进口安装角  $\beta_{1A}=38^\circ$ ,出口安装角  $\beta_{2A}=126^\circ$ . 计算工况参数:叶轮转速  $n=1450$  r/min,进口速度  $v=12.7$  m/s. 叶片通过频率  $f_{BPF}=290$  Hz.

首先通过求解非定常 RANS 方程获得气动噪声源强度,然后通过薄壳体 BEM 方法求解风机出口的气动声场. 采用二维计算模型,求解非定常 RANS 方程. 湍流模型采用标准  $k-\epsilon$  模型,取标准壁面函数. 由于风机内部流动马赫数很低,认为气体不可压缩且黏性系数为常数. 离散方程采用隐式分离方法求解,压力修正采用 SIMPLE 算法. 对流项采用二阶迎风格式离散,扩散源项采用二阶中心格式离散,时间项采用二阶隐式格式离散. 非定常流动计算取时间步长  $\Delta t=1.1494 \times 10^{-4}$  s(即叶轮每转  $1^\circ$  所需的时间),叶轮旋转 1 周需要的时间步数  $T=360$ .

蜗壳为薄壳体开口结构,利用 Wu 提出的薄壳体边界元方法<sup>[11]</sup>和蜗壳声学硬边界条件分析蜗壳散射对声波传播的影响. 蜗壳壁面上偶极子声源在自由空间场下的辐射声压及其偏导数如下

$$\Phi_1(\mathbf{x}, \omega) = \int_{S(y)} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} p(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi_1(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} = \int_{S(y)} \frac{\partial^2 G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x}) \partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} p(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) \quad (8)$$

利用蜗壳声学硬边界条件

$$\frac{\partial \Phi(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} = 0 \quad \mathbf{x} \in S^* \quad (9)$$

由式(7)~式(9)推导得到薄壳体边界积分方程组如下

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} [\Phi^+(\mathbf{x}, \omega) + \Phi^-(\mathbf{x}, \omega)] &= \Phi_1(\mathbf{x}, \omega) - \\ \int_{S^*} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} [\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) & \\ \mathbf{x} \in S^* & \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Phi(\mathbf{x}, \omega) = \Phi_1(\mathbf{x}, \omega) -$$

$$\begin{aligned} \int_{S^*} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} [\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) & \\ \mathbf{x} \notin S^* & \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi_1(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} - \int_{S^*} \frac{\partial^2 G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y}) \partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} [\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) -$$

$$\Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) = 0 \quad \mathbf{x} \in S^* \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$  分别为观察点和源点的坐标矢量;  $\omega$  为声源角频率;  $p(\mathbf{y}, \omega)$  为蜗壳壁面静压;  $\Phi(\mathbf{x}, \omega)$  为观察点声压;  $\Phi^+(\mathbf{y}, \omega)$  和  $\Phi^-(\mathbf{y}, \omega)$  分别为蜗壳内壁面和外壁面声压;  $\mathbf{n}$  为单位法向矢量;  $S^*$  为蜗壳曲面;  $G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$  为 Helmholtz 方程在自由空间下的基本解. 关于非定常流动数值计算和薄壳体边界元方法的详细推导介绍请参见文献[12]. 噪声预测程序流程如下所述.

预处理程序: ①生成 CFD 计算求解域网格, 求解非定常流动, 存储壁面节点各时刻的压力信息文件; ②输出蜗壳壁面计算网格, 生成 BEM 网格和节点信息.

初始化程序: ①设置非定常计算结果文件数量、存储位置、文件名特征等; ②设定求解声波频率以及观察点位置坐标.

时频转换程序: 批处理非定常计算结果文件, 得到声源时域信息, 再进行 FFT 变化得到声源频域信息.

边界单元声场信息求解程序: ①依据式(7)和式(8)分别计算固体边界上的入射波声压及其偏导数; ②依据式(12)得到壁面两侧声压压差  $\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)$ ; ③(可选)依据式(10)得到壁面两侧声压之和, 最终得到壁面两侧声压信息.

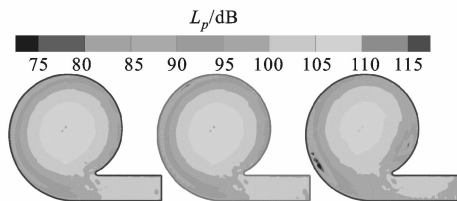
观察点声场求解程序: 依据式(11)得到非边界上任意观察点声压  $\Phi(\mathbf{y}, \omega)$  及相关后处理.

声波计算的频率分别为 0.29、1.45、2.9 kHz 时, 蜗壳内部声场分布见图 5~图 7. 声波频率为 0.29 kHz 时, 自由空间下的辐射声场和考虑蜗壳散射后的总声场分布比较相似, 而且声压级  $L_p$  差别不大. 当声波频率为 1.45 kHz 时, 由于蜗壳散射的影响, 总声场与自由空间下的辐射声场已经存在较大差别, 而在声波频率为 2.9 kHz 时, 总声场与自由辐射声场已经完全不同, 由于蜗壳曲面散射的原因, 蜗壳内部声场已逐渐趋近于均匀分布.

基于上述现象可以得出如下结论: 随着声波频率的不断增大, 蜗壳散射对声场的影响逐步明显; 对于低频声波, 蜗壳的影响十分微弱, 风机声源几乎可以作为紧凑声源考虑; 对于高频声波, 蜗壳的散射影响十分明显, 由于蜗壳壁面各节点位置的法向不同, 多声源激发的声波在壁面发生散射, 使得蜗壳内部的声场趋近于均匀分布.

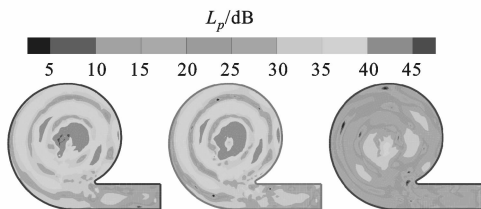
此外, 总声场由自由辐射声场和散射声场两部分组成, 自由辐射声和散射声在同一观察点的声压

相位差随声源频率的不同而发生变化, 因此在某些频率下可能起到噪声抑制的效果, 如声波频率为 1.45 kHz 时的声场分布, 而某些频率下噪声级则可能会提高, 如声波频率为 2.9 kHz 时的声场分布. 通过设计叶片数和叶轮转速控制风机基频并匹配特定的蜗壳外形、利用蜗壳散射影响, 也许是风机基频噪声控制的一条新途径.



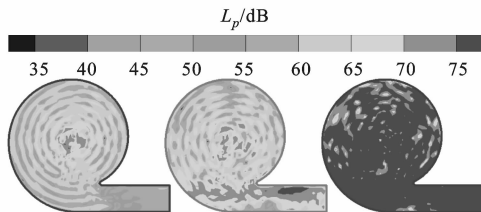
(a) 自由辐射声场 (b) 散射声场 (c) 总声场

图 5 0.29 kHz 下蜗壳的内部声场



(a) 自由辐射声场 (b) 散射声场 (c) 总声场

图 6 1.45 kHz 下蜗壳的内部声场



(a) 自由辐射声场 (b) 散射声场 (c) 总声场

图 7 2.9 kHz 下蜗壳的内部声场

### 3 结 论

(1) 蜗壳厚度不小于 3 mm 时, 声波通过蜗壳透射和 A 计权后的声压级衰减量大于 40 dB, 且当频率大于 0.26 kHz 的声波透过蜗壳时, 声压的衰减量随频率升高而不断增大. 因此, 将蜗壳作为声学硬边界处理时, 在工程应用上具有合理性.

(2) 蜗壳散射对不同频率噪声传播的影响明显不同. 声波频率较低时, 散射作用不明显, 风机声源甚至可以近似作为紧凑声源考虑, 而在声波频率较高时, 由于蜗壳弯曲壁面对声源散射的影响, 其内部声场逐渐趋近于均匀分布.

(3)入射波和散射波声压在观察点处的相位差与声波频率相关,不同频率声源激发的声波经蜗壳散射后其总的声压级会发生变化.因此,利用散射对声波传播的影响,通过设计叶片数和叶轮转速控制风机基频并匹配特定的蜗壳外形,也许是风机噪声控制的一条新途径.

本文数值计算的结论是基于二维模型得到的,需要在三维模型中进行验证.此外,数值模拟中没有考虑叶轮对风机噪声散射的影响,这需要在今后的工作中进一步完善.

### 参考文献:

- [1] MOON Y J, CHO Y, NAM H S. Computation of unsteady viscous flow and aeroacoustic noise of cross flow fans [J]. Computers & Fluids, 2003, 23: 995-1015.
- [2] CHO Y, MOON Y J. Discrete noise prediction of variable pitch cross-flow fans by unsteady Navier-Stokes computations [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(2): 543-550.
- [3] YOUNSI M, BAKIR F, KOUIDRI S, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in centrifugal fan [J]. Proceedings of ImechE: Journal of Power Engineering, 2007, 221: 1025-1036.
- [4] LIU Qihong, QI Datong, MAO Yijun. Numerical calculation of centrifugal fan noise [J]. Proceedings of ImechE: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8): 1167-1178.
- [5] LIU Qihong, QI Datong, TANG Hongtao. Computation of aerodynamic noise of centrifugal fan using LES approach, acoustic analogy and vortex sound theory [J]. Proceedings of ImechE: Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 220(11): 1321-1332.
- [6] JEON W H. A numerical study on the effects of design parameters on the performance and noise of a centrifugal fan [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265: 221-230.
- [7] JEON W H, LEE D K. A numerical study on the flow and sound fields of centrifugal impeller located near a wedge [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266: 785-804.
- [8] LANGTHJEM M A, OLHOFF N. A numerical study of flow-induced noise in a two-dimensional centrifugal pump: hydroacoustics [J]. Journal of Fluids and Structures, 2004(19): 369-386.
- [9] NEISE W. Review of the noise reduction in centrifugal fan [J]. ASME Journal of Engineering and Industry, 1992, 114: 151-161.
- [10] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社, 2001.
- [11] WU T W, WAN G C. Numerical modeling of acoustic radiation and scattering from thin bodies using a Cauchy principal integral equation [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1992, 92(5): 2900-2906.
- [12] 毛义军,祁大同,刘晓良,等. 离心风机气动噪声的数值预测 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 65-69.  
MAO Yijun, QI Datong, LIU Xiaoliang, et al. Numerical prediction of aerodynamic noise for centrifugal fan, Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(3): 65-69.

(编辑 王焕雪)

### 【本刊相关文献链接】

改变蜗壳宽度对离心风机气动噪声影响的数值计算与试验研究. 2008, 42(11): 1429-1434.  
谱元方法求解波动方程时显式与隐式差分方法的比较. 2008, 42(9): 1142-1145.  
轮盖开孔的离心风机流场研究. 2008, 42(9): 1117-1121.  
基于叶型和叶栅稠度改进调节门性能的实验研究. 2008, 42(5): 583-587.  
前向离心风机吸声蜗壳降噪的试验研究. 2009, 43(3): 92-96.