

离心风机气动噪声的数值预测

毛义军, 祁大同, 刘晓良, 汤宏涛

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 介绍了一种开口薄壳体边界元方法, 该方法的系数矩阵小于以前的方法, 能够降低计算成本. 将该方法应用在离心风机的噪声预测中并考虑了蜗壳对声波反射和散射的影响. 首先利用 RANS 方程和标准 $k-\epsilon$ 模型求解离心风机内部的非定常流动, 获得声源项信息, 然后采用快速傅里叶变换将源项的时域信息转换为频域信息, 最后采用开口薄壳体边界元方法预测风机的气动噪声. 数值计算和实验测量结果表明, 由于该方法考虑了蜗壳反射和散射的影响, 对风机基频及其 2 次谐波的声压级具有较好的预测精度, 但对高频声的预测结果仍不是很满意.

关键词: 气动噪声; 离心风机; 边界元方法; 散射

中图分类号: TH45; TB115 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0065-05

Numerical Prediction of Aerodynamic Noise for Centrifugal Fan

MAO Yijun, QI Datong, LIU Xiaoliang, TANG Hongtao

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

Abstract: A thin-body acoustic boundary element method was applied to predict the aerodynamic noise from a centrifugal fan considering the scattering effect of volute casing. The method can reduce computational cost because its coefficient matrix is smaller than that of conventional methods. The turbulent inner field was computed by solving the unsteady Reynolds averaged N-S equations with $k-\epsilon$ turbulence model. The time accurate acoustic source was transformed to the frequency dependent signals. The thin-body boundary element method was used to predict the aerodynamic tonal noise. The calculated sound pressure levels were compared with the experimental data. The result shows that the calculated sound pressure levels (SPLs) agree well with the experimental data in blade passing frequency and its second harmonic, but the SPLs at high frequency are not well predicted.

Keywords: aerodynamic noise; centrifugal fan; boundary element method; scattering

叶轮机械气动噪声的数值预测是计算气动声学在工程应用领域最受关注的研究焦点之一. 叶轮机械的气动噪声预测一般采用混合计算气动声学方法, 这种方法在忽略声场对流场的耦合影响的假设下, 首先通过求解流动控制方程获取声源项信息, 然后采用 Lowson 公式或 FW-H 方程或涡声理论等方程预测气动声场. 采用 RANS、LES 等方程求解叶轮机械内

部的非定常流动, 从而获取声源信息, 是目前最广泛应用的方法, 很多研究人员借此来分析叶轮机械内部气动噪声源的特点^[1-2]. 在声场预测方面, 积分方程方法得到很多学者的青睐, 应用此方法, 只需要求解 Green 函数即可以方便地得到任意观察点位置的声压信息, 但 Green 函数的解析表达式一般情况下很难得到, 只有对于部分很规则的空间, 诸如自由空间、封闭球空

间、无限大平板半空间等才能得到其解析表达式^[3]。因此,目前针对叶轮机械开口系统的气动噪声预测,大多数研究分析的是自由空间下声传播问题,而忽略了蜗壳、叶轮和进出口管道等

固体边界对声传播的影响^[2,4-6]。

边界元方法是目前广泛应用在封闭腔体内部或

收稿日期:2008-06-03。 作者简介:毛义军(1981—),男,博士生;祁大同(联系人),男,教授,博士生导师。

外部的声辐射和散射场预测的方法之一。但是,应用传统的边界元方法预测诸如离心风机蜗壳这样的开口薄壳体的散射声场时会产生 TSB (thin-shaped break down) 问题^[7]。为了将传统的边界元方法能够扩展应用到开口薄壳体的散射声场预测中,常采用虚拟面方法构造封闭腔体,从而使得边界积分方程能够适用。Langthjem 通过构建虚拟面,采用外部边界元方法预测了离心水泵的散射声场^[8]。该方法需要设置合理的虚拟面声学阻抗,而这在实际噪声预测中很难给定,为了避免设置虚拟面上的声学阻抗,Langthjem 又将虚拟面延展到距离源点很远的远场,将其作为声学硬边界壁面近似处理。采用这种处理方法有 3 点不足:第 1,虚拟面尺度相对壳体尺度很大,由于需要对虚拟面进行离散,因此导致求解满系数矩阵的阶数较大;第 2,虚拟面上的声学边界条件设置存在误差;第 3,在壳体和虚拟面构成的封闭腔体内声场不能求解。Seybert 提出多区域边界元方法并利用虚拟面上的速度、压力信息等连续性条件同时求解内/外部声场,能够求解声场内任意一点的声压^[9]。该方法不用设定虚拟面上的阻抗,因此计算精度更高,但由于该方法需要同时求解内/外部边界元方程以及对虚拟面进行离散,因此满系数矩阵的阶数同样较大,计算成本较高。国内学者王旌生、吴有生采用该方法预测了三维方形开口空腔和开口圆柱体的散射声场^[10]。Wu 提出了一种开口薄壳体边界元方法^[11],该方法不仅不需要进行虚拟面离散和声学阻抗设置,而且降低了计算成本,提高了计算精度,同时还能够求解场内任意位置处的声压信息。本文应用该方法的思想编写了边界元程序,将其应用在考虑蜗壳散射的离心风机气动噪声数值预测中。

1 辐射声数学模型

静止声学介质中声波的波动方程表示如下

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} - \nabla^2 p(\mathbf{x}, t) = \gamma(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

式中: $\gamma(\mathbf{x}, t)$ 表示声源强度。流体介质与固体相互作用激发的气动噪声包括单极子源噪声(体积源噪声)、偶极子源噪声(力源噪声)和四极子源噪声(应力源噪声)。前期的研究表明,离心风机的气动噪声类型主要表现为偶极子源噪声,且主要噪声源位于蜗舌附近的位置^[1-2]。作用在静止固体边界上的偶极子噪声源表示如下

$$\gamma(\mathbf{x}, t) = -\nabla \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{n}(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}, t)$ 表示固体边界作用在单位流体面积上的气动力矢量, $p(\mathbf{x}, t)$ 表示静压, $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ 表示固体壁面的法向矢量,方向由固体区域指向流体区域。对式(1)做 Fourier 变换则得到频域下的方程,即 Helmholtz 方程

$$k^2 \Phi^2(\mathbf{x}, \omega) + \nabla^2 \Phi(\mathbf{x}, \omega) = \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}, \omega) \quad (3)$$

式中: k 表示波数; ∇^2 为 Laplace 算子; $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \omega)$ 表示气动力 $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ 进行 Fourier 变换的结果。式(3)在自由空间下的解^[12]为

$$\Phi_l(\mathbf{x}, \omega) = \int_{S(y)} [\nabla G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)] F(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) = \int_{S(y)} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial n(\mathbf{y})} p(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) \quad (4)$$

式中: $S(\mathbf{y})$ 表示声源体的表面积; $G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ 为自由空间下的基本解,计算如下

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) = \begin{cases} jH_0^{(1)}(kr)/4 & \mathbf{x} \in R^2 \\ e^{jkr/c_0}/4\pi r & \mathbf{x} \in R^3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$ 表示点源和观察点之间的距离; $H_0^{(1)}$ 表示第 1 类 0 阶 Hankel 函数。对上式求关于 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ 的微分得到

$$\frac{\partial \Phi_1(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} = \int_{S(y)} \frac{\partial^2 G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x}) \partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} p(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) \quad (6)$$

$$\begin{array}{ccc} C^-(\mathbf{x}) & 0 & 0.5 & 1 \end{array}$$

2 散射声数学模型

经典的内部和外部边界元积分方程, 广泛应用于封闭区域内部和外部辐射和散射声场的预测当中. 下面将其推广到刚性边壁的开口区域, 用来预测开口边界的辐射和散射声场. 设开口边界为 S^* (见图 1 中的粗实线), 构造虚拟边界 s (见图 1 中的细实线), 使得 $S^* + s$ 构成封闭边界, 封闭边界内部区域记为 D^+ , 外部区域记为 D^- , 如图 1 所示. 则闭合区域内部和外部的边界方程分别为

$$\begin{aligned} C^+(\mathbf{x})\Phi^+(\mathbf{x}, \omega) = \\ \Phi_I(\mathbf{x}, \omega) + \int_{S^*+s} [G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial \Phi^+(\mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}_1(\mathbf{y})} - \\ \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}_1(\mathbf{y})} \Phi^+(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) \end{aligned} \quad (7)$$

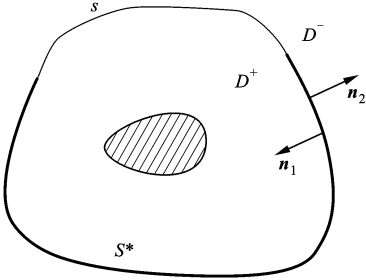


图 1 开口薄壳体示意图

$$\begin{aligned} C^-(\mathbf{x})\Phi^-(\mathbf{x}, \omega) = \\ \int_{S^*+s} [G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}_2(\mathbf{y})} - \\ \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}_2(\mathbf{y})} \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$ 分别为边界指向 D^+ 和 D^- 区域的单位法向矢量, 且 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_1} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_2} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}}$; $C^+(\mathbf{x})$ 和 $C^-(\mathbf{x})$ 为常数, 其取值见表 1.

表 1 常数 $C^+(\mathbf{x})$ 和 $C^-(\mathbf{x})$ 的取值

常数	$\mathbf{x} \in D^+$	$\mathbf{x} \in S^* + s$	$\mathbf{x} \in D^-$
$C^+(\mathbf{x})$	1	0.5	0

在虚拟边界 s 上分别有连续性边界条件

$$\left. \begin{aligned} \Phi^+(\mathbf{x}, \omega) &= \Phi^-(\mathbf{x}, \omega) \\ \frac{\partial \Phi^+(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} &= \frac{\partial \Phi^-(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} \end{aligned} \right\} \mathbf{x} \in s \quad (9)$$

假设蜗壳壁面 S^* 上满足声学硬边界条件

$$\frac{\partial \Phi^+(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} = \frac{\partial \Phi^-(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} = 0 \quad \mathbf{x} \in S^* \quad (10)$$

将式(9)和式(10)分别代入式(7)和式(8)并相加得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} [\Phi^+(\mathbf{x}, \omega) + \Phi^-(\mathbf{x}, \omega)] &= \Phi_I(\mathbf{x}, \omega) - \\ \int_{S^*} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} [\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) \end{aligned} \quad \mathbf{x} \in S^* \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{x}, \omega) &= \Phi_I(\mathbf{x}, \omega) - \\ \int_{S^*} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y})} [\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) \end{aligned} \quad \mathbf{x} \in D^+ \cup D^- \cup s \quad (12)$$

对式(11)求关于 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ 的偏导, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_I(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} - \int_{S^*} \frac{\partial^2 G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{y}) \partial \mathbf{n}(\mathbf{x})} \cdot \\ [\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)] dS(\mathbf{y}) = 0 \quad \mathbf{x} \in S^* \end{aligned} \quad (13)$$

式(11)~式(13)即构成了开口硬边界腔体的边界积分方程. 首先通过求解式(13)得到边界 S^* 上的突跳差值 $\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)$, 然后利用式(11)求解得到边界 S^* 上的 $\Phi^+(\mathbf{y}, \omega) - \Phi^-(\mathbf{y}, \omega)$, 最后利用式(12)求解任意位置处的 $\Phi(\mathbf{x}, \omega)$.

3 算例分析

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. 首先通过求解非定常 RANS 方程, 获得气动噪声源的源强度, 然后通过 BEM 方法求解风机出口的气动声场. 计算采用二维模型. 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 $\beta_{2A}=126^\circ$;计算工况参数中叶轮转速 $n=1\,450\text{ r/min}$,进口速度 $v=12.7\text{ m/s}$.

计算区域采用多块结构化网格剖分,对叶片尾缘和蜗舌附近区域网格进行了加密处理.蜗壳边界上的节点数 $K=571$,节点编号按逆时针方向依次递增.计算模型网格见图2,计算及要求如下:求解二维非定常 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.非定常时间步长 $\Delta t=1.149\,4\times 10^{-4}\text{ s}$,即叶轮每转 1° 所需的时间,叶轮旋转一周需要的时间步数 $T=360$.关于数值计算的详细介绍请参考文献[13].

当数值计算得到风机内部的流动状态随时间呈周期性变化时,则认为计算收敛.蜗壳壁上静压 p 在叶轮旋转一圈的变化见图3.蜗舌附近节点 $K=100$ 的静压在叶轮旋转一圈的变化及其功率谱 P_{power} 见图4.图3和图4的结果表明,在叶轮旋转一圈的过程中,蜗壳壁面静压表现出12个周期的变化,与叶片数刚好相等,风机的噪声类型表现为明显的离散噪声特性.

声压计算的截止频率取决于2个因素:第1是非定常数信号的采样频率,即非定常时间步长的倒数,计算中设定非定常时间步长 $\Delta t=1.149\,4\times 10^{-4}\text{ s}$,根据采样定理,可分析的最高频率约为4 300 Hz;第2是边界单元的最大几何尺度,声学计算中一般要求单元尺度不大于 $1/10$ 波长,计算中划分的边界单元最大几何尺度为 0.002 m ,对应的最高截止频率为 $17\,000\text{ Hz}$.综上分析,可以计算的声压最高频率为 $4\,300\text{ Hz}$.

为了验证数值计算结果的精度,对该风机的气动性能和噪声进行了实验测量.实验在西安交通大学流体机械国家专业实验室的消声室

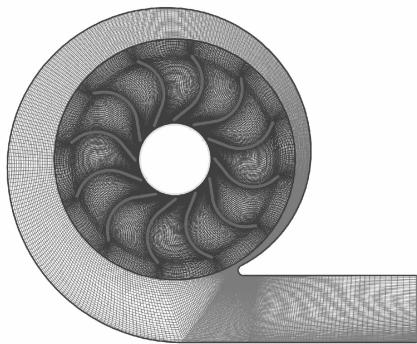


图2 CFD模型网格示意图

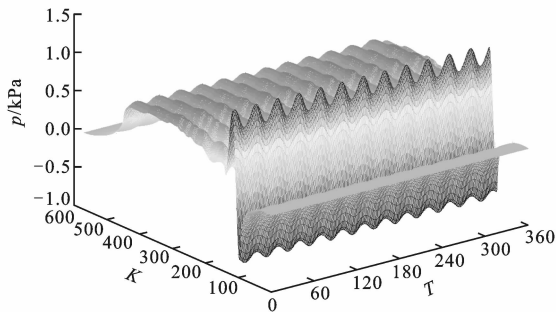
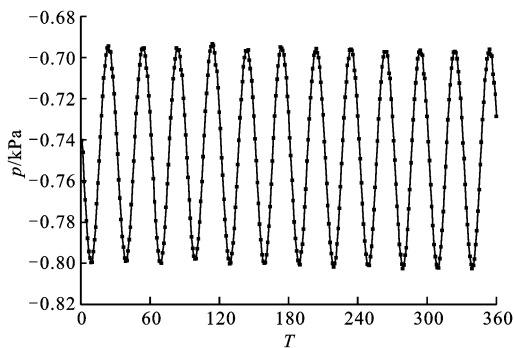
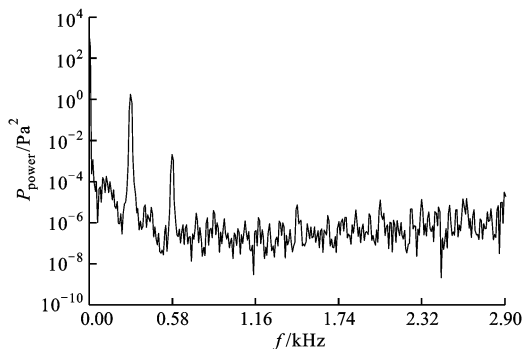


图3 蜗壳壁面压力随时间的变化



(a)静压随时间的变化

内进行,关于实验的详细介绍请参考文献[14].将计算得到的风机基频及其高次谐波的声压级 L 与实验进行了对比(见图5),结果表明,在基频及其2次谐波分量频率下,计算值与实验值误差大约为 $3\sim 4\text{ dB}$,与作者以前没有考虑蜗壳散射影响的计算结果进行比较,新的计算方法误差更小^[3].但是,在高频噪声部分,计算的结果仍出现较大的误差,需要在今后的工作中提高高频噪声的预测精度.此外,数值计算采用二维模型本身会产生误差,也是引起数值计算和实验测量结果偏差的原因之一.



(b)功率谱

图4 蜗壳壁面节点 $K=100$ 时静压的变化

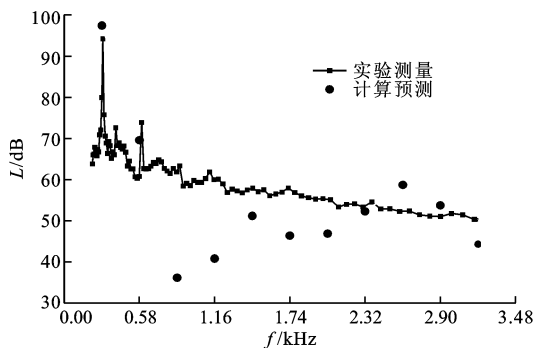


图5 计算和实验的声压级对比

4 结 论

本文采用了一种新的开口薄壳体声学边界元方法,并考虑了蜗壳对离心风机噪声散射的影响。该方法能够求解任意位置处的声压值,而且系数矩阵阶数小于以前的求解方法,因此降低了数值计算成本。依此方法编写了二维声场计算程序,并结合非定常流动的数值模拟对离心风机的气动噪声进行了预测。为了验证预测结果的精度,对该风机的噪声进行了实验测量,结果表明,新的计算方法由于考虑了蜗壳散射的影响,在基频及其二次谐波上的预测值具有更好的精度,但高频噪声的预测结果不能令人满意。

参考文献:

[1] TAJADURA R B, SUARAZ S V, CRUZ J P H,

et al. Numerical calculation of pressure fluctuation in the volute of a centrifugal fan [J]. Journal of Fluid Engineering, 2006, 128(3):359-369.

[2] LIU Qihong, QI Datong, MAO Yijun. Numerical simulation of centrifugal fan noise [J]. Proceedings of Institute Mechanical Engineers: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8):1167-1178.

[3] GOLDSTEIN M E. Aeroacoustics [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1976.

[4] 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, 125:543-550.

[5] YOUNSI M, BAKIR F, KOUIDRI S, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in centrifugal fan [J]. Proceedings of Institute Mechanical Engineers: Journal of Power and Energy, 2007, 221:1025-1036.

[6] SUARAZ S V, TAJADURA R B, MORROS C S, et al. Numerical prediction of the aerodynamic tonal noise in a centrifugal fan [C]// ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York, USA: ASME Fluids Engineering Division, 2002: 993-1000.

[7] MARTINEZ R. The thin-shape breakdown of the helmholtz integral equation [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1991, 90(5): 2728-2738.

[8] LANGTHJEM M A, OLHOFF N. A numerical study of flow-induced noise in a two-centrifugal pump, part II. hydroacoustics [J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19:369-386.

[9] SEYBERT A F, CHENG C Y R, WU T W. The solution of coupled interior/exterior acoustic problems using the boundary element method [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1990, 88(3):1612-1618.

[10] WANG Jingsheng WU Yousheng. Virtual boundary method for solving acoustics problems of open structure [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(6):159-165.

[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] WRIGHT M C M. Lecture notes on the mathematics of acoustics [M]. London, UK: Imperial College Press, 2005.
- [13] 刘晓良,袁民建,祁大同,等. 离心风机改变蜗壳宽度对气动噪声影响的数值与试验研究 [J]. 西安交通大学学报,2008,42(11):1429-1434.
LIU Xiaoliang, YUAN Minjian, QI Datong, et al. Experimental and numerical study on aerodynamic noise of a centrifugal fan with variable volute width [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(11) :1429-1434.
- [14] 马健峰. T9-19 系列小型号离心风机的降噪研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2008.

(编辑 王焕雪)