

离心风机气动噪声控制的理论与实验研究

赵 忭 祁大同 毛义军* / 西安交通大学

Abstract

■摘要:若干年来,我们针对离心风机气动噪声控制问题进行了一系列理论和实验研究,提出了一种识别风机内部主要气动噪声源并通过判断主要噪声源强度变化对风机进行降噪改进的简捷方法,明确了离心风机的主要气动噪声源在蜗壳上,而不是在叶轮上,通过对离心风机气动噪声的产生及传播机理的研究,在理论上为正确进行离心风机气动噪声的控制及预测做出了有意义的推进。以上述理论为核心,本文进行了大量的实验研究,形成了一套对离心风机进行降噪改进的关键技术。

■关键词:离心风机; 气动噪声; 噪声控制; 理论与实验研究

中图分类号:TH432 文献标志码:A
文章编号:1006-8155(2013)06-0024-12
Theoretical and Experimental Study on Aerodynamic Noise Control of Centrifugal Fan

Abstract: In recent years, a series of theoretical and experimental study on aerodynamic noise control of centrifugal fan was carried out, and a simple method of identifying main aerodynamic noise sources in internal of fan and reducing the noise by determining the changes of intensity of main noise sources was pointed out. It was clearly that the main aerodynamic noise sources of centrifugal fan was on the volute but the impeller. The study on the generation and propagation mechanism of aerodynamic noise of centrifugal fan had advanced the proper control and forecast for the aerodynamic noise of centrifugal fan in theory. Based on the theory, a large number of experiments were carried out and a set of key techniques of reducing noise of centrifugal fan was formed.

Key words: centrifugal fan; aerodynamic noise; noise control; theoretical and experimental study

0 引言

Lighthill声比拟理论是流体机械噪声研究领域解决工程问题应用最为普遍的理论,声比拟理论的提出以航空轴流压气机的噪声研究为主要背景,在轴流式压气机及风机的噪声研究中有重大推进,但在离心风机和压缩机领域的应用还很不成熟。针对离心风机,与以往研究只考虑叶轮的做法不同,我们首先在数学物理模型的建立上考虑了蜗壳及进口装置在内的完整风机结构,推出了新形式的方程并给出了求解方法。从利于正确分析气动噪声源的角度,总结出一套较好的离心风机内部非定常流场的数值计算方法。通常情况下,离心风机的主要气动噪声源在蜗壳上,而不是在叶轮上,为正确进行离心风机降噪研究指出了方向,并以T9-19No.4A离心风机降噪为目标开展了一系列研究工作,研制了低噪声离心风机。

*本文其他作者:徐辰 温选锋/西安交通大学

*2013中国风机学术会议论文

收稿日期:2013-01-08 陕西 西安 710049

1 离心风机气动噪声控制的理论思路

已有的研究告诉我们,在正常运行状态下,气动噪声是离心风机的主要噪声之一,通常包括基频噪声(叶片通过频率噪声)、涡流噪声、声波叠加和反射形成的腔体共鸣噪声等。为使研究工作有的放矢,我们对企业提供的一台T9-19No.4A离心风机进行了性能测试,噪声频谱见图1。很明显,该风机最突出的噪声成分是气动噪声中的基频噪声。

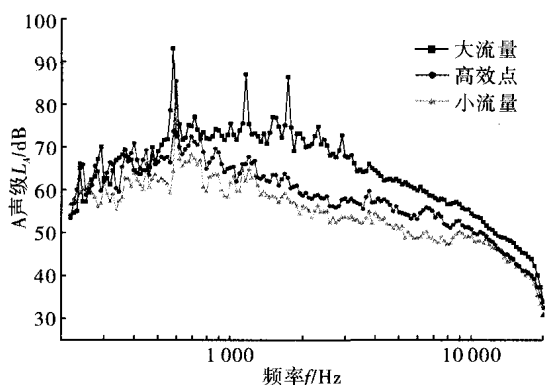


图1 T9-19No.4A离心风机噪声频谱图

根据该风机的噪声特点,基于对国内外离心风机研究现状和发展的分析,形成了我们进行噪声控制研究的主要思路:通过风机内部非定常流动的数值计算,并结合Lighthill声比拟理论、涡声理论等,对风机内部主要气动噪声源的位置、类型、强度等进行了分析和识别,然后采取措施降低主要气动噪声源的强度,从而降低整个风机的气动噪声。另外,通过对风机辐射声场进行计算,掌握风机内部气动噪声向外界传播的途径和辐射特点,设法在噪声传播过程中对其进行阻断或削弱,从而降低风机向外界传播的气动噪声。

研究初期遇到的最大困难是,以往基于气动声学基本理论的研究文献中,离心风机声学计算的理论模型都是针对单个叶轮向无限大自由空间辐射噪声,而没有考虑蜗壳的存在,直到

2003年才有一篇国外论文在叶轮附近放置一个尖劈,模拟蜗舌对叶轮流动的影响^[1]。以国内外已有研究为基础,我们在数学物理模型的建立上,考虑了蜗壳及进口装置在内的完整风机结构,推导了新形式的方程并给出了求解方法^[2-3]。以新的模型为基础,我们在离心风机气动声场的计算、噪声传播和预测等方面开展了研究工作^[4-16]。事实表明,只有在理论建模上考虑完整的风机结构,才可能全面分析风机内部的气动噪声源,正确反映噪声传播途径并正确进行噪声预测,也才能正确反映蜗壳及进口装置对噪声散射、反射的影响及风机内部可能产生的声共鸣现象等。

从根本上讲,离心风机的气动噪声源于其内部的非定常流动。为了获取足够准确的气动噪声源信息,我们采用全三维粘性N-S方程和当时最新流行的DES(分离涡模拟)、LES(大涡模拟)方法对离心风机内部的非定常流场进行数值模拟。同时,分别采用Realizable $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、DES和LES四种模型对T9-19No.4A离心风机的非定常流场进行计算,研究了不同湍流模型对数值计算精度和速度的影响,从利于正确分析气动噪声源的角度总结出一套较好的离心风机内部非定常流场的数值计算方法^[4-5,17]。

为了尽快推进离心风机降噪研究,我们于2005年提出了一种识别风机内部主要气动噪声源并通过判断主要噪声源强度变化对风机进行降噪改进的简捷方法^[18]。该方法以非定常流场计算为基础,通过流体的压力脉动情况对主要气动噪声源的类型、位置及强度进行识别和判断。然后对风机结构和流动进行改进,重新进行主要噪声源的识别计算,如果主要噪声源的强度下降,说明改进取得了降噪效果。该方法省去了对风机辐射声场的复杂计算,虽不能知道改进前后噪声级下降的准确数值,但后续降噪实践证明,这确实是一个定性指导降噪的行之有效的简捷方法。

Lighthill声比拟理论是噪声研究领域解决工程噪声问题应用最为普遍的理论,该理论的提出以航空轴流压气机的噪声研究为主要背景,在轴流式压气机及风机的噪声研究中有重大推进。根据离心风机的结构和流动特点,我们对Lighthill声比拟理论中的某些假定、应用条件、基本方程和求解方法进行了拓展,将声比拟理论更好地推广应用于离心风机(低马赫数流动条件下)噪声研究领域^[10,13-16,19]。

2 T9-19No.4A 离心风机降噪的改进研究

以上述理论研究为基础,针对T9-19No.4A离心风机的气动噪声控制问题进行了一系列的数值与实验研究。

2.1 采用倾斜蜗舌并配合改变蜗壳宽度

针对T9-19No.4A离心风机(以下简称原风机)的直蜗舌结构,采用理论分析计算与实验相结合的方法研究了蜗舌倾角和安装位置对风机气动噪声的影响^[20-22]。通过数值模拟方法对这两个因素进行系列组合,选取其中效果较好的7种组合设计,制造样机进行实验研究,找出最佳的倾斜蜗舌结构和安装位置,在此基础上就蜗壳宽度对风机噪声的影响进行研究,找到了最佳蜗壳宽度。选取三个因素的最佳优化组合,对T9-19No.4A原风机进行改进设计(以下均简称为改进风机)。改进风机的气动性能及降噪效果经机械工业风机产品质量监督检测中心进行了检测认定,如图2所示,图中考核点表示原风机,实测点表示改进风机。改进风机在整个运行工况范围内噪声曲线整体下移,A声级噪声平均降低5.2dB(A),高效点降低6.5dB(A)。

风机的噪声频谱比较曲线见图3。在3个工况下,改进风机的基频及其谐波的噪声峰值显著降低,基频及其谐波附近的宽频噪声也都有比较明显的下降。尽管高频区域宽频噪声有所上升,小流量工况出现了一个较高的低频噪声峰值(可能由振动引起),但改进风机的总噪声明显降低。

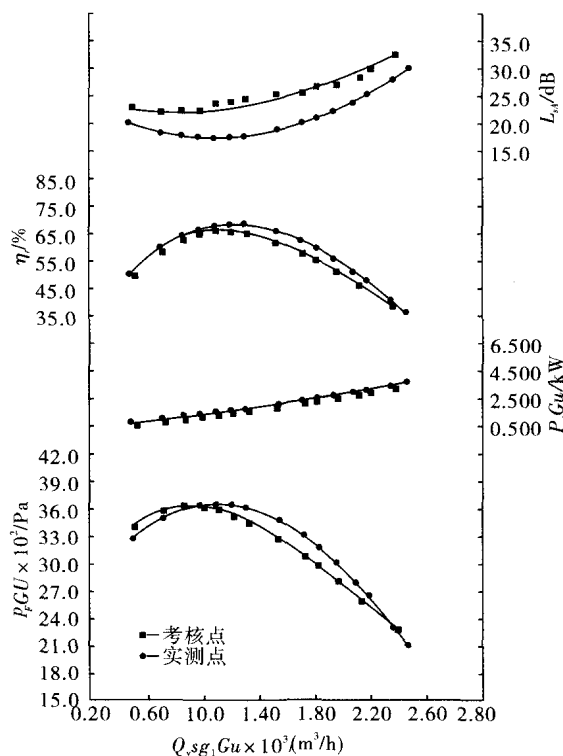
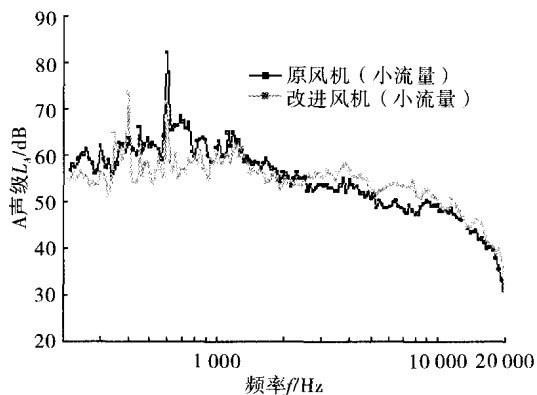


图2 改进前后风机气动及噪声特性比较图

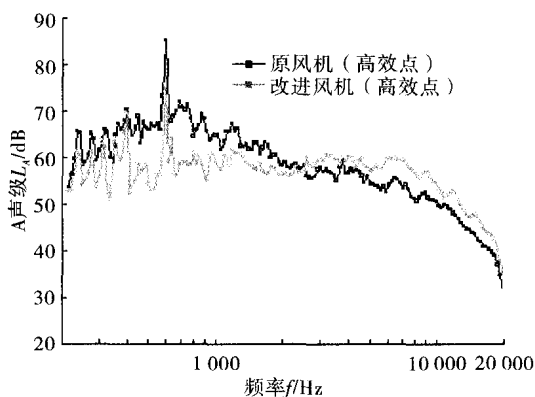
原风机与改进风机的对比实验中,气动性能采用进气测量,出气端测量噪声。实验装置和测量方法按照《GB/T 1236-2000 工业通风机用标准化风道进行性能试验》和《GB/T 2888-2000 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法》执行^[23-24],实验在半消声室内进行。本文只有进气端加装简易消声器的对比实验,采用的是出气端测量气动性能,进气端测量噪声,下面提到的其它实验工作均采用进气端测量气动性能,出气端测量噪声。所有实验装置均按照上述国家标准进行,不再赘述。

2.2 采用变螺旋角蜗壳型线

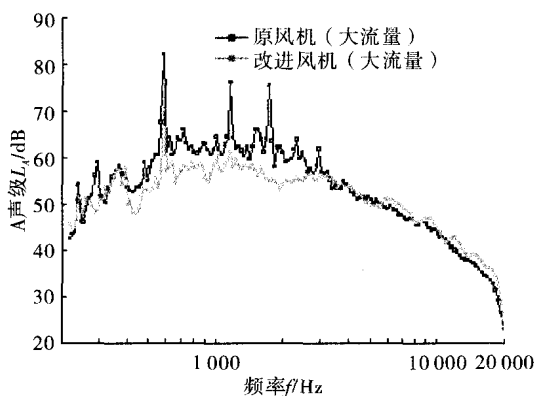
以往的研究表明:在某些条件下,与目前通常使用的单一螺旋角的对数螺旋线蜗壳型线相比,采用变螺旋角蜗壳型线有可能使风机获得更好的性能^[25]。所以我们采用变螺旋角设计方法对改进风机的蜗壳型线进行了改进设计,数值优化设计后的计算结果可使改进风机在气动性能基本不变的情况下进一步降低噪声约3dB(A)^[26],但这仅是一种理论和计算探索,正在准备进行实验验证。



(a)小流量频谱图



(b)高效点频谱图



(c)大流量频谱图

图3 改进前后风机噪声频谱曲线对比图

2.3 改进设计蜗壳出口结构

针对采用直蜗舌结构的原T9-19No.4A离心风机,如图4所示,通过响应面分析方法建立了蜗壳出口扩张角 θ 、蜗舌安装间隙 t 、叶轮露出高度 e 与风机的效率和A声级之间的数学模型,比较清楚地表示出3个结构参数之间的交互作用,

3个结构参数对风机的气动性能和气动噪声均有一定的影响,其中叶轮的露出长度和蜗舌间隙影响更为明显。数值优化结果表明:蜗壳出口3个结构参数的设计组合,能够使改进后风机的气动性能与原风机基本相同,而气动噪声明显降低。响应面优化结果与相应的CFD验证结果相比误差很小。由于气动噪声的计算是在自由声场下得到的,忽略了蜗壳反射的影响,因此该结果仍有待于下一步进行实验验证^[27]。

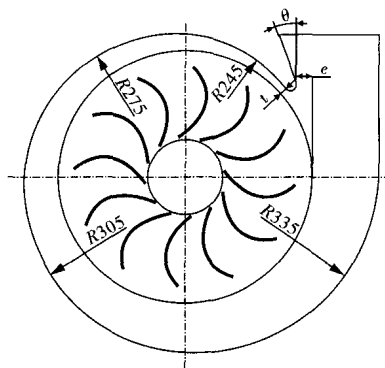


图4 离心风机结构示意图

2.4 在叶轮中采用串联叶片结构

针对T9-19No.4A前向离心风机,串联叶片结构见图5~图7,通过响应面分析方法建立串联叶片的相对长度 l_s 、相对周向位置 θ 与风机效

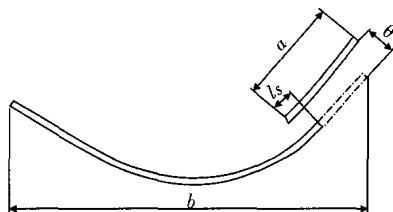
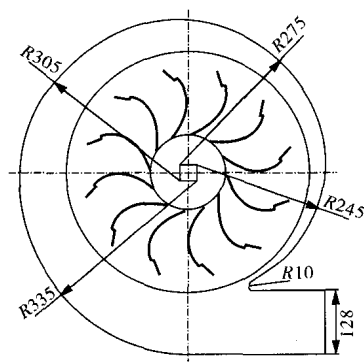


图5 串联叶片示意图

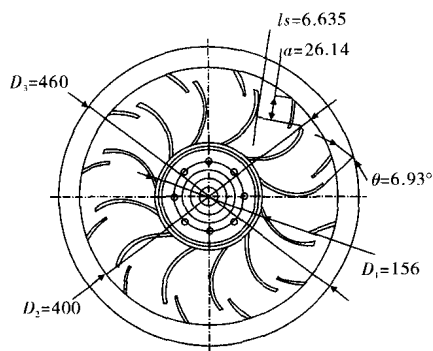


图6 等距串列叶片叶轮图

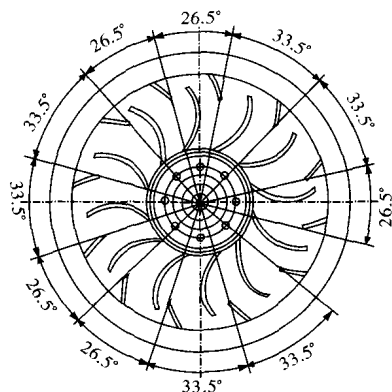


图7 不等距串列叶片叶轮图

率 η 和A声级之间的数学模型,采用数值模拟的方法优化设计了串列叶片^[28]。理论计算显示,优化设计的串列叶片取得了较好的降噪效果,然而实验却证明效果并不理想。针对采用直蜗舌的T9-19No.4A原离心风机,使用等距串列叶片叶轮和不等距串列叶片叶轮取代原叶轮进行了降噪实验,有两点体会供同行参考:1)使用等距串列叶片叶轮取代原风机叶轮时,风机气动性能变化较小,噪声在整个流量范围的48.7%区域内比原风机降低,但不超过2dB(A),在其他流量范围内风机噪声则增高,但也不超过2dB(A)。而使用不等距串列叶片叶轮时,风机的气动性能和噪声均明显变差。因此,建议在进一步研究中暂不考虑使用不等距串列叶片叶轮,而只考虑采用等距串列叶片叶轮;2)虽然本次降噪实验的效果不够理想,但实验结果仍显示出,采用串列叶片叶轮降低前向离心风机的气动噪声是有可能的。这样分析主要基于两个理由:第一个理由是使用等距串列叶片叶轮取代原风机叶轮,基本上可以保持风机气动性能变化不大,即便是针对目前风机全压和效率略微下降的情况,也还可以通过采取某些措施进一步加以改善。第二个理由是使用等距串列叶片叶轮取代原风机叶轮,虽然只在整个流量范围的48.7%范围内取得了降噪效果,但是该流量范围恰恰是风机最高效率点及其附近区域,这

比在其他区域取得降噪效果更有意义。

2.5 在叶轮中采用不等距叶片

不等距叶片指叶片沿叶轮圆周方向不等距分布。首先通过数学模拟对其进行了优化设计,选取其中的两个效果较好的方案制造了样机,测试结果见图8。

实验结果表明改进并不成功:1)改进后的风机在大流量区域噪声明显增高,达1~4dB,高效点的噪声也基本不变或稍有下降。但在小流量区域风机噪声下降了1~2.5dB,这至少说明还存在继续降噪的可能性,应该深入分析产生上述结果的原因;2)采用不等距叶片叶轮确实可以改变前向离心风机的某些峰值噪声的频率和某些频率所对应的噪声峰值,这为前向离心风机降噪或改善声音的品质提供了可能;3)单纯将沿叶轮圆周均匀分布的叶片改变为不等距分布的叶片,可能会引起叶轮内部流动的变化,从而降低风机的气动性能。建议在改变叶片周向间距的同时,配合改进叶片型线,探索叶片不等距条件下的最佳叶片型线设计规律,这样不仅有利于使叶轮叶道内仍保持较好的流动状态,从而有利于保持风机原有的气动性能,而且还能对发挥不等距叶片的降噪效果也有好处^[29]。

2.6 在叶轮中采用锯齿形叶片

通过数值模拟对尖顶和平顶锯齿形叶片进

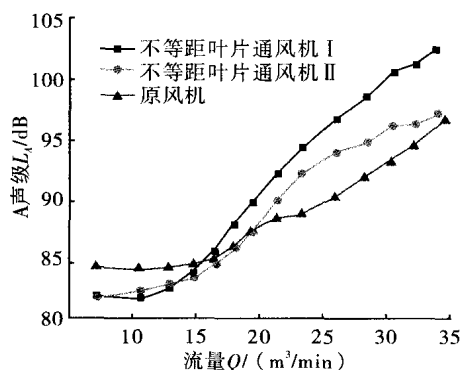
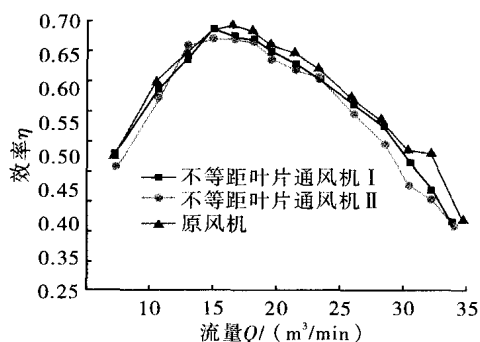
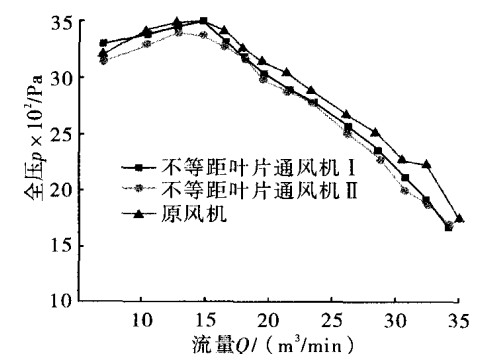


图8 不等距叶片对风机气动性能和噪声的影响图

行了流场计算^[30],数值计算结果表明,与原始叶片相比,叶片进出气端的平顶锯齿形处理能够取得较为明显的降噪效果,尖顶锯齿边处理也有一定降噪效果。因此从优化结果中选择具有最佳无量纲平顶齿形参数的叶片进行实验,实验结果见图9。原风机叶片称为原始叶片,实验结果表明锯齿叶片对离心风机未起到降噪作用,只是在小流量区域由于锯齿破坏了旋涡使得A声级有所下降。

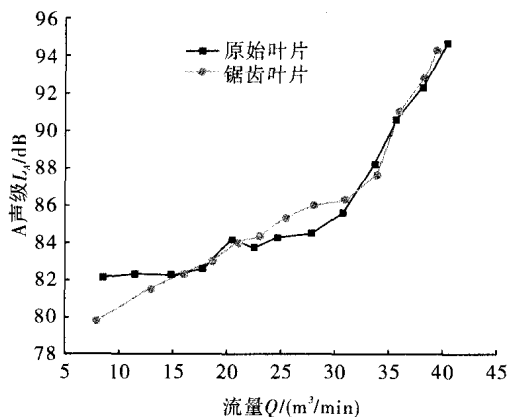


图9 锯齿叶片与原始叶片A声级比较图

2.7 改变叶轮叶片数

实验研究了减少叶轮叶片数对风机噪声的影响^[30],为保证风机的气动性能不变,适当增加了叶片长度。首先将原风机的12叶片叶轮改为10叶片叶轮进行实验,测量结果见图10。结果表明,仅在小流量下噪声略有降低。因此,减少叶片数目并不能取得满意的降噪效果。

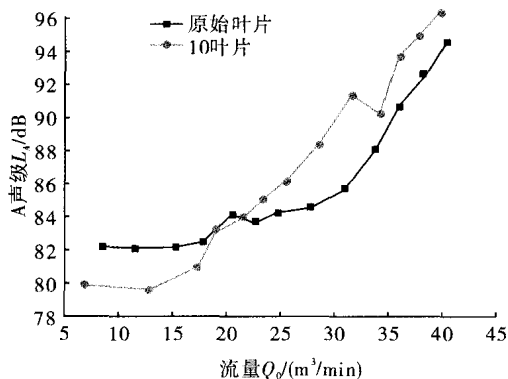


图10 10叶片与原始叶片A声级比较图

2.8 改变蜗舌材料

为了得到不同蜗舌材料对风机噪声的影响,针对T9-19No.6.3A离心风机加工了两个不同结构的橡胶倾斜蜗舌,分别命名为4号和10号蜗舌。4号和10号蜗舌的倾角和安装间隙不同。同时加工了4号和10号钢质倾斜蜗舌,进行对比实验。A声压级对比曲线见图11,频谱曲线见图12和图13。实验结果表明:将蜗舌材料换为橡胶以后,风机的A声压级、全压和效率与钢结构蜗舌差别不大。从改变蜗舌材料前后的频谱曲

线也可以看出,蜗舌材料的改变并没有改变风机的频谱特性^[29]。

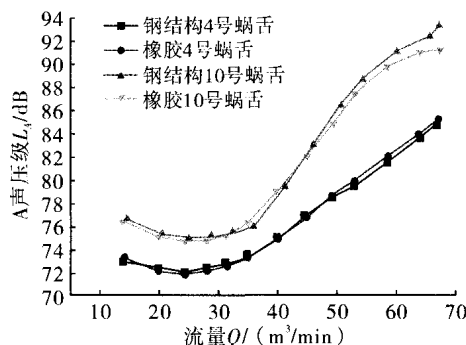


图11 A声级比较图

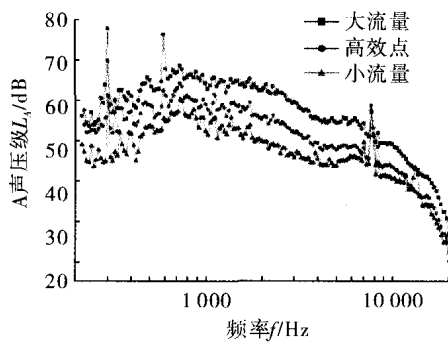


图12 4号橡胶蜗舌频谱图

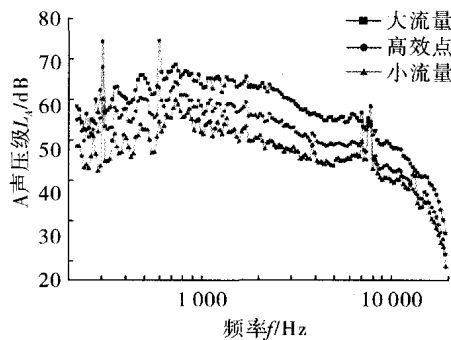
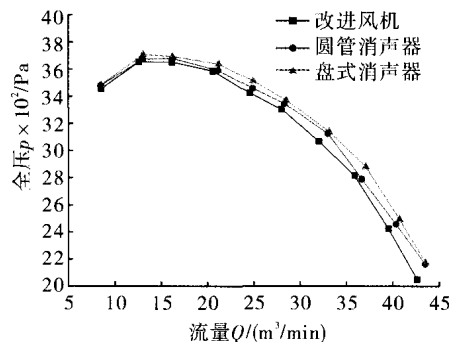


图13 4号钢蜗舌频谱图

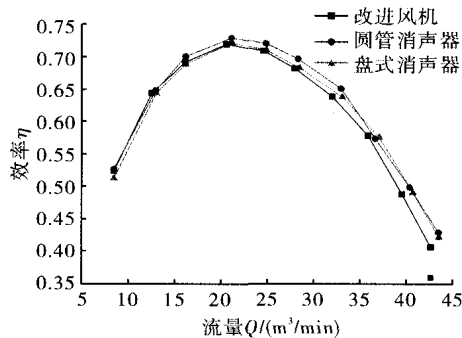
2.9 风机进出口加装简易消声器

针对改进风机设计加工了圆管式和盘式两类5种型号的阻性简易消声器,研究了改进风机进口加装简易消声器对风机气动性能和噪声特性的影响^[31]。因为消声器装在风机进气口,所以风机的气动性能采用排气端测量,进气端测量噪声,测量结果见图14。实验结果表明:加装圆管式消声器后,整个运行工况范围内噪声平均降低约6.3dB(A),高效点处降低5.61dB(A),气动性能只有效率在小流量下略有0.35%的降低,其它工

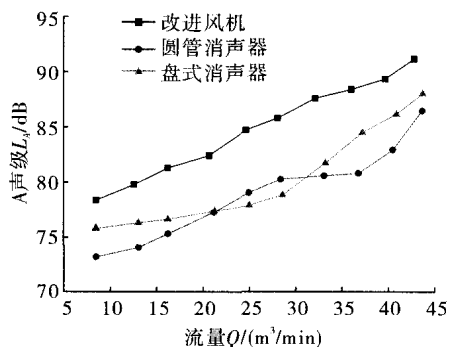
况下全压和效率都有所提高;加装盘式消声器后,噪声平均降低5.2dB(A),高效点处下降5.1dB(A),风机效率在小流量下降约1.2%,其它工况下的全压和效率均有所提高。



(a)全压比较图



(b)效率比较图



(c)噪声比较图

图14 进口加装简易消声器风机与改进风机对比曲线图

改进风机加进口阻性简易消声器组合与原风机(直蜗舌)的对比叠加降噪量,受实验条件的限制未进行直接测量,但可以间接估算其降噪量。我们对改进风机采用进气端测量噪声,并与出气端测量噪声进行了对比实验,对比曲线见图15。结果表明,在出气端测得的噪声比在进气端

测得的噪声略高,只有在两端的极限点工况相差最大约2.4dB(A),在中间绝大运行工况范围内测得的噪声A声级基本一致,因此我们可以近似推断,改进风机进口加装简易消声器后的降噪量与原风机相比,高效点处降低约11.6dB(A)。

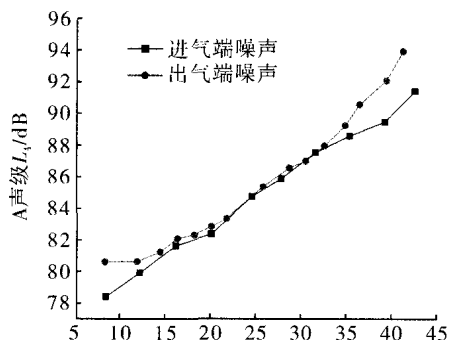


图15 改进风机进出气端测得的噪声对比曲线图

另外,我们自行设计了简易的抗性、阻性消声器,分别装在具有直蜗舌和倾斜蜗舌的T9-19No.4A离心风机的进口或出口,对气动性能和噪声进行了测量^[29,32],大致情况如下。

在风机进出口分别加装简易抗性消声器时,风机的气动性能基本不变,但降噪效果不太理想,在中小流量区域降噪2~4dB(A),在大流量时上升2~3dB(A)。与直蜗舌的风机相比,倾斜蜗舌风机的降噪效果更差一些。

当在风机出口安装阻性消声器时,具有直蜗舌的风机气动性能变化不大,在整个流量范围内风机噪声曲线平移下降6~8dB(A),具有倾斜蜗舌的风机全压略微下降,在整个流量范围内风机噪声曲线平移下降10~12dB(A)。

上述实验表明,对于在一定变工况范围内运行的离心风机,如果需要安装消声器,选择阻性消声器可以获得更好的降噪效果,将阻性消声器与倾斜蜗舌两种降噪措施同时使用时,二者的降噪效果具有良好的叠加性。

2.10 采用吸声蜗壳

所谓吸声蜗壳,就是在蜗壳内壁面加上一定厚度的吸声材料和空腔结构。我们设计制造了吸声蜗壳,研究了吸声材料厚度和空腔厚度对风机性能和噪声的影响^[33],实验结果表明,这两个因素对于风机降噪而言应该存在最佳匹配,但本

次设计的吸声蜗壳只在小流量下降低噪声较明显,在大流量下甚至有所上升。同时研究了倾斜蜗舌与吸声蜗壳叠加对风机噪声的影响,降噪效果见图16。风机噪声在两种措施叠加后取得了更大的降噪量,但叠加后的降噪量并不等于两种措施单独降噪量之和。与原风机相比,叠加后的风机在整个运行工况范围内降噪量为7~10dB(A)。但风机的气动性能有所下降,如图17所示,全压降低了约50~200Pa,效率下降了约3%~5%,风机输出的最大容积流量减少了约4%,因此该方案有待进一步完善,目前已进一步做了一些理论和实验研究^[34-35]。

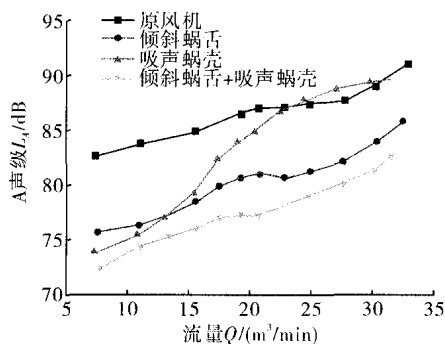


图16 A声级对比图

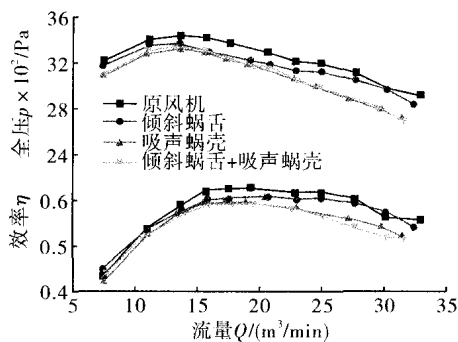


图17 风机气动性能对比曲线图

2.11 采用不同机壳壁厚的优化组合

通常情况下,离心通风机工作时,风机进口或出口直接与外界相通,风机内部的气动噪声通过敞开的进口或出口直接向周围环境传播。而离心压缩机的进出口通常都连接着管道,压缩机在封闭的管道系统中运行且密封良好。所以,离心压缩机内部的气动噪声不能直接向外界传播,而是内部非定常流场产生压力脉动,脉动的压力作用于机壳使机壳产生响应振动,振动的机壳作

为声源直接向周围环境辐射噪声,这被国内外学术界称为流动诱发振动噪声。为了进行离心压缩机的噪声机理和控制研究,又因为直接以压缩机为研究对象存在很多困难,所以我们在研究的初期是以离心通风机为研究对象,开展了对流动诱发振动噪声的研究,最终目的仍是为了解决离心压缩机的噪声研究问题。研究的大致思路是:首先求解风机内部的非定常流场,然后计算流场内压力脉动激励下机壳的响应振动,最后计算机壳振动向外界的辐射噪声^[36-37]。在此研究过程中通过研究结构振动与噪声辐射之间的关系,针对离心风机蜗壳提出了一种减振降噪的数值优化设计方法^[38-39]。该方法以降低蜗壳结构振动为目标进行优化,并对优化设计结果进行声学数值计算。针对T9-19No.4A离心风机蜗壳进行了两种优化设计,一种是在原蜗壳质量不变的情况下,通过改变前侧板和蜗板的厚度参数对蜗壳振动进行优化设计,另一种是在没有质量约束的情况下,通过改变前后侧板和蜗板3个厚度参数对蜗壳振动进行优化设计。优化结果表明:在质量不变条件下进行优化后,蜗壳的辐射声功率降低

了 $4.254 \times 10^{-5} \text{W}$,比原蜗壳辐射声功率降低了48%;在无质量约束条件下优化后,蜗壳的辐射声功率降低了 $7.9269 \times 10^{-5} \text{W}$,比原蜗壳辐射声功率降低了89%。两次优化设计均达到了减振降噪的目的,其中无质量约束条件下的优化结果比质量不变条件下的优化结果更好。早期我们也曾针对离心风机机壳壁厚对噪声的影响进行过数值研究,研究表明并非机壳壁越厚,振动辐射噪声就越小,而是对应确定的激励频率,存在最佳的机壳壁厚尺寸或各部分不同壁厚尺寸的组合使机壳振动辐射噪声最小^[40]。但由于实验条件限制,上述研究结果中,仅有部分中间结果经过实验验证,目前正在创造条件,争取进一步进行全面实验验证。

3 针对前向多翼离心风机的降噪研究

3.1 采用椭圆形进口集流器

针对如图18所示的某一空调用双吸前向多翼离心风机,设计了一种如图19所示的椭圆形进口集流器,并实验研究了这种集流器对风机气动性能与噪声的影响^[41]。

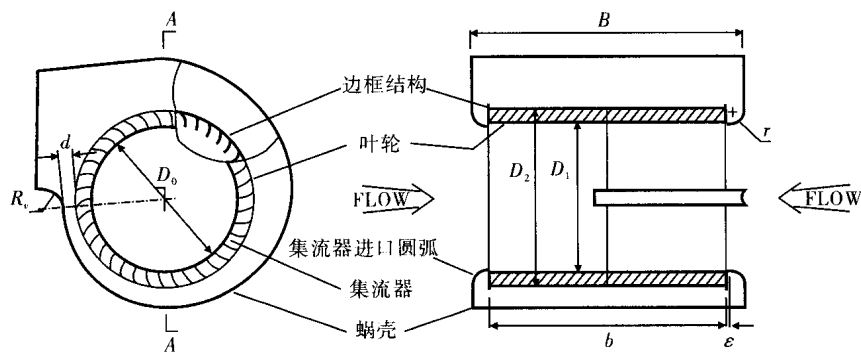


图18 双吸前向多翼离心风机结构示意图

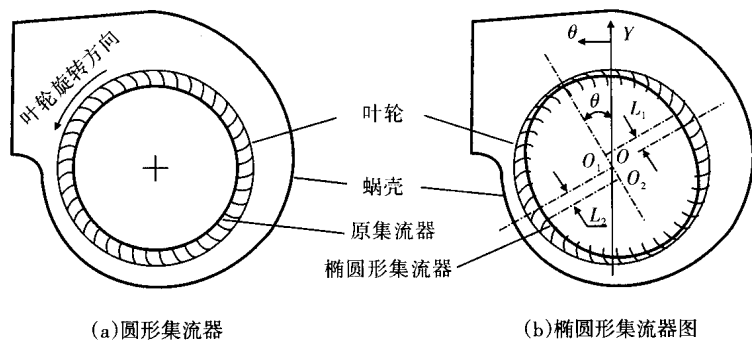


图19 圆形及椭圆形集流器出口截面图

实验结果表明:合理选择椭圆形集流器的结构参数及安装位置,有利于提高风机在不同转速下的气动性能,同时降低风机的噪声。相比于使用圆形集流器的原风机,当 $\theta=0^\circ$ 、 $L_1/D_1=L_2/D_2=0.067$ 时,椭圆形集流器可使风机风量提高8.8%~12.8%,总效率提高1.7%~4.6%,噪声降低0.4~0.6dB(A);当 $\theta=30^\circ$ 、 $L_1/D_1=L_2/D_2=0.067$ 时,椭

圆形集流器可使风机风量提高2.5%~6.0%,总效率提高0.6%~1.4%,噪声降低1.2~1.5dB(A)。

3.2 改变蜗壳与叶轮的相对位置

设计了叶轮与蜗壳相对安装位置可调的试验装置,研究了叶轮与蜗壳相对安装位置对风机气动性能的影响^[42]。图20为位置调整时相关参数的示意图。

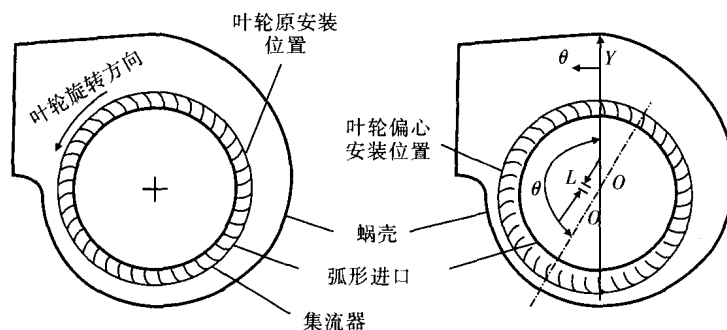


图20 叶轮与蜗壳相对安装位置方案示意图

实验结果表明:在某些应用条件下,叶轮中心与蜗壳型线中心相重合的位置不一定是最佳位置。对于本文研究的前向多翼风机,两者合适的相对安装位置更有利于提高风机的气动性能并改善风机噪声。与叶轮中心和蜗壳型线中心相重合的原风机相比,当叶轮中心位置的偏距比 $L/D_2=0.003$ 、偏心角 $\theta=150^\circ$ 时,改进风机在设计转速下风量提高了6.08%,总效率提高了2.4%,噪声降低0.8dB(A)。

4 结论

1) 进行离心风机气动噪声研究时,在数学物理模型的建立上考虑包括叶轮、蜗壳及进口装置在内的完整风机结构,从研究风机内部的非定常流动入手,继承并拓展前辈和同行们在气动声学理论和风机降噪研究方面的已有成果,充分利用各种先进的数值计算方法,这个总体思路是正确的,为全面分析风机内部的气动噪声源和噪声传播途径,正确进行气动噪声的控制和预测提供了基础。

2) 在正常运行条件下,T9-19No.4A离心风机的噪声主要是气动噪声中的基频噪声,主要噪声源位于机壳(特别是蜗舌部位)上而不是在叶轮上,噪声通过敞开的风机进口或出口直接向周

围环境传播,且噪声传播具有指向性。对于在封闭管道系统中正常运行的离心压缩机,其噪声特点是由内部非定常流动激励机壳及进出口管道产生振动,从而通过振动的机壳和管道向外界辐射噪声(流动诱发振动噪声)。这些不同特点对于同类风机或压缩机具有一定普遍性,提示我们在进行噪声研究时应予以区别对待。

3) 以风机内部的非定常流场分析为基础,通过流体的压力脉动状况对主要气动噪声源的类型、位置及强度进行识别,然后对风机结构和内部流动进行改进,重新进行主要噪声源的识别分析,如果噪声源的强度下降,说明改进取得了降噪效果。这种通过风机内部主要气动噪声源及其强度变化的分析对风机进行降噪改进的方法,省去了对风机辐射声场的复杂计算,虽不能知道改进前后噪声下降的准确数值,但我们的降噪实践表明,这确实是一个定性指导风机降噪的行之有效的简捷方法。

4) 对于同一风机,两种单独使用时降噪效果良好的降噪措施,在同时使用时,却不一定具有预期降噪效果的叠加性。根据我们的经验,同时使用的两种措施最好具有不同的降噪目标或针对不同的降噪目标频率,两种措施的主要降噪作用最好不要互相重复而是互相补充,这样可以

提高不同降噪措施同时使用时实现预期降噪效果的成功概率。

5) 本文介绍了一些我们针对T9-19No.4A离心风机采取的降噪措施和取得的不同效果,包括一些讨论和分析。应该说明,我们采用的一些措施没有取得降噪效果,并不一定说明这些措施就真的没有降噪作用。没有取得降噪效果的原因很多,可能是这些措施不适用于这种风机类型或使用条件,也可能是我们的工作自身存在问题导致改进无效。也许其他同行应用这些降噪措施,或针对别的研究对象或别的应用场合,则可能取得很好的降噪效果。所以,本文主要目的是与同行交流我们的工作,希望得到同行的赐教和批评指正。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘秋洪,祁大同,曹淑珍,等.离心风机气动声学分析的一个理论模型和计算方法[J].西安交通大学学报,2004,38(3):313-316.
- [3] 毛义军,祁大同.开口/封闭薄壳体声辐射和散射的统一边界积分方程解法[J].物理学报,2009,58(10):6764-6769.
- [4] Q Liu, D Qi, Y Mao. Numerical calculation of centrifugal fan noise. Proc. Instn Mech. Engrs, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8): 1167-1177.
- [5] Q Liu, D Qi, H Tang. Computation of aerodynamic noise of centrifugal fan using large eddy simulation approach, acoustic analogy, and vortex sound theory. Proc. Instn Mech. Engrs, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 221(11): 1321-1332.
- [6] Y Mao, D Qi. Computation of rotating blades noise scattered by a centrifugal volute. Proc. IMechE, Part A: J. Power and Energy, 2009, 223(8): 965-972.
- [7] 刘秋洪,祁大同,毛义军.离心叶轮气动声场的数值计算与分析[J].应用力学学报,2006,23(1):110-114.
- [8] 毛义军,祁大同,徐长棱.叶片与蜗舌耦合对离心风机性能和旋转噪声影响的数值研究[J].应用力学学报,2006,23(3):368-372.
- [9] 黄翌宇,刘秋洪,祁大同.封闭圆柱腔内旋转点声源声压的近场频域解[J].应用力学学报,2004,21(2):37-40.
- [10] 毛义军,祁大同,刘晓良.蜗壳散射对离心风机气动噪声传播的影响[J].西安交通大学学报,2009,43(5):51-55.
- [11] 蔡建程,祁大同,卢傅安,等.离心风机基频气动偶极子噪声的数值研究[J].西安交通大学学报,2009,43(11):66-70,108.
- [12] Y Mao, D Qi, X Liu, et al. Numerical prediction of aerodynamic tonal noise radiated from a centrifugal fan [J]. Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: Journal of Power and Energy, 2008, 222(8): 831-842.
- [13] Y Mao, D Qi, Y Gu. Prediction of airfoil noise induced by low Mach number flow [J]. Proc. Instn Mech. Engrs, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(5): 561-573.
- [14] 毛义军,祁大同.非紧凑低马赫数运动边界散射流动噪声的预测[J].工程热物理学报,2012,33(7):1151-1154.
- [15] Y Mao, D Qi, Y Gu. Prediction of hydrodynamic noise scattered by the non-compact circular cylinder [J]. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM, v 1, PARTS A, B AND C, p 403-409, 2010, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting Collocated with 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, FEDSM2010.
- [16] Y Mao, Y Gu, D Qi, et al. An exact frequency-domain solution of the sound radiated from the rotating dipole point source [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(3): 1294-1302.
- [17] 刘秋洪.离心通风机气动噪声数值分析方法的研究及工程应用[D].西安:西安交通大学,2007.
- [18] 毛义军,祁大同,刘秋洪.基于非定常流场的离心风机气动噪声分析[J].西安交通大学学报,2005,39(9):989-993.
- [19] 毛义军.低马赫数流动中声比拟理论拓展及其应用研究[D].西安:西安交通大学,2010.
- [20] J Cai, D Qi, F Lu, et al. Study of Tonal Fan Noise Reduction by Modification of the Volute Cutoff [J]. ACTA Acustica united with Acustica, 2010, 96(6): 1115-1124.
- [21] 黄友艳,秦国良.面向降噪的汽车空调用多翼离心风机性能研究及改进[J].风机技术,2012(5):14-18.
- [22] D Qi, Y Mao, X Liu, et al. Experimental study on the noise reduction of an industrial forward-curved blades centrifugal fan [J]. Applied Acoustics, 2009, 70(8): 1041-1050.
- [23] GB/T 1236-2000 工业通风机用标准化风道进行性能试验[S].北京:全国风机标准化技术委员会,2000.
- [24] GB/T 2888-2000 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法[S].北京:全国风机标准化技术委员会,2000.
- [25] Qi DT, Pomfret MJ, Lam K. A New Approach to the Design of Fan Volute Profiles [J]. Proc. Instn Mech. Engrs, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1996, 210(3): 287-294.
- [26] 李艳,赵村,卢傅安,等.变螺旋角方法离心风机蜗壳型线数

(下转第40页)

壳进气管处;

2) 机壳稳态运行过程中,进气腔侧温度较低,排气腔侧温度较高,中间部位温度沿轴向呈带状分布,中腔到排气腔过渡处温度变化幅度较大,其他部位温度变化平稳;

3) 机壳热应力分析表明,机壳的大部分区域等效应力较低,在102MPa左右;最大应力为922MPa,出现在排气腔法兰约束处。最大应力超过了材料的屈服强度,整个机壳存在一定的安全隐患,应进行结构或材料的优化,以提高结构强度;

4) 机壳稳态运行过程中,大部分区域的变形在7mm左右;排气腔由于热膨胀变形相对较大,直径扩张19mm左右。机壳在稳态运行时变形量较大,应通过改善结构或增加约束等方式减少其变形量。

参 考 文 献

- [1] 丁如义,孟鑫,田梦远,等.大型轴流压缩机焊接机壳结构设计[J].风机技术,2012(5):39-43.
- [2] 姜国栋,张三元,史晓云.大型轴流压缩机国产化设计的新发展[J].风机技术,2001(4):3-5.
- [3] 李雀屏,张玉珠,韩清凯.离心式压缩机机壳强度分析与结构优化设计[J].组合机床与自动化加工技术,2009(2):4-7.
- [4] 郝建国,王润军,聂万隆,等.进出口焊接机壳的拼装—焊接技术浅谈[J].风机技术,2010(6):42-44,80.
- [5] 李雀屏,郑涛,韩清凯.离心式压缩机焊接机壳结构的研究与优化设计[J].装备制造技术,2008(12):78-80.
- [6] 王仪田,叶长青.大型轴流压缩机的自主设计和创新[C].陕西装备制造业发展论坛论文集,2006,177-186.
- [7] 王瑁成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [8] [美]Saeed Moavenj.有限元分析—ANSYS理论与应用[M].王崧,董春敏,金云平,等译.第2版.北京:电子工业出版社,2005.
- [9] 杜平安.有限元划分的基本原则[J].机械设计与制造,2000(1):34-36.
- [10] 田梦远,张建勋,丁如义.CAD/CAE在轴流压缩机机壳铸改焊结构设计中的应用[J].风机技术,2012(5):49-53.
- [11] 黄正,姜宏飞,刘宏伟.三维CAD软件在结构件展开中的应用[J].风机技术,2007(3):44-46.
- [12] 值优化.应用力学学报,2012,40(3):1-7.
- [27] 刘晓良,袁民建,毛义军,等.前向离心风机蜗壳出口结构的数值优化[J].西安交通大学学报,2009,43(5):61-65.
- [28] 刘晓良,祁大同,毛义军,等.串列叶片式前向离心风机气动与噪声特性的优化研究[J].应用力学学报,2009,26(1):40-44.
- [29] 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,2008.
- [30] 黄翌宇.离心风机叶片的点声源模拟和T9-19No.4A离心风机降噪试验研究[D].西安:西安交通大学,2005.
- [31] 赵婷.T9-19No.4A低噪声离心风机模型及进口阻性消声器研究[D].西安:西安交通大学,2012.
- [32] 唐因.离心风机进出口及机壳辐射噪声控制的计算与实验研究[D].西安:西安交通大学,2009.
- [33] 刘晓良.T9-19No.4A离心风机降噪的数值优化与试验研究[D].西安:西安交通大学,2009.
- [34] 顾媛媛,袁民建,毛义军,等.离心风机吸声蜗壳结构的数学物理模型及实验验证[J].西安交通大学学报,2011,45(1):83-88.
- [35] Y Gu, D Qi, Y Mao, et al. Theoretical and experimental study on the noise control of centrifugal fan combining absorbing liner and inclined tongue[J]. Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: Journal of Power and Energy, 2011, 225(6): 789-80.
- [36] 蔡建程,祁大同,唐因.离心风机蜗壳振动声辐射的定量预测[J].西安交通大学学报,2009,43(9):71-74.
- [37] 卢傅安,祁大同,蔡建程,等.离心风机蜗壳在内部流场脉动压力激励下的动力响应研究[J].应用力学学报,2009,26(3):450-455.
- [38] F Lu, D Qi, X Wang, et al. A numerical optimization on the vibroacoustics of a centrifugal fan volute[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(10): 2365-2385.
- [39] 周正,卢傅安,祁大同,等.一种离心风机蜗壳减振降噪的数值优化方法[J].西安交通大学学报,2011,45(9):59-64.
- [40] 潘地林,张立祥.离心式通风机蜗壳内部流动特性的数值计算分析[J].风机技术,1999(3):12-16,11,3-4.
- [41] 温选锋,杨昕,祁大同,等.椭圆形进口集流器对多翼离心风机性能影响的实验研究[J].西安交通大学学报,2011,45(11):45-51.
- [42] 黄利忠,窦勇,李嵩,等.特小比转数的后向离心通风机的研究与开发[J].风机技术,2006(4):1-4.

(上接第34页)