

前向离心风机蜗壳出口结构的数值优化

刘晓良, 袁民建, 毛义军, 祁大同

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 对某前向离心风机内部三维非定常流动进行了数值计算, 重点研究了蜗壳出口的 3 个结构参数——蜗壳出口扩张角、叶轮的露出长度以及蜗舌间隙对风机气动性能及气动噪声的综合影响. 通过响应面方法对数值结果进行二次回归拟合, 得到 3 个结构参数与风机效率和 A 声级间的函数关系, 并进行了优化分析. 数值结果表明: 叶轮露出长度和蜗舌间隙对风机效率和 A 声级影响较为显著, 通过优化能够在保持风机效率基本不变的情况下使 A 声级降低 9.4 dB. 将可靠的 CFD 数值技术与响应面方法结合起来用于指导离心风机的改进及试验设计是可行的.

关键词: 蜗壳出口结构; 气动性能; 气动噪声; 前向离心风机; 响应面方法

中图分类号: TB53; O355 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0061-05

Numerical Optimization of Volute Outlet Structure for Forward-Curved Centrifugal Fan

LIU Xiaoliang, YUAN Minjian, MAO Yijun, QI Datong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical optimum study on three-dimensional unsteady viscous flow in a centrifugal fan with forward-curved blades was performed. The influence of the outlet angle of the volute, the bare length of the impeller and the cutoff clearance on aerodynamic performance and aerodynamic noise of the centrifugal fan was analyzed concerning the whole impeller-volute configuration. The correlations of the fan efficiency and A-weighted sound pressure level with the three parameters were obtained by quadratic polynomial regression with the response surface methodology (RSM). The results show that the bare length of the impeller and the cutoff clearance affect the fan efficiency and A-weighted sound pressure level significantly. Moreover, A-weighted sound pressure level decreases by 9.4dB with the three parameters optimized while in this case the fan efficiency only decreases slightly. The method of reliable CFD technique in combination with RSM can be effectively applied to the improvement and experiment design of centrifugal fans.

Keywords: volute outlet structure; aerodynamic performance; aerodynamic noise; forward-curved centrifugal fan; response surface methodology

气动噪声通常是离心风机的主要噪声, 主要包括离散噪声和涡流噪声, 其中离散噪声一般占有主导地位. 由于旋转叶轮出口的非均匀气流和蜗壳之间存在强烈的非定常干涉, 使得蜗壳表面、特别是蜗舌区域成为离心风机的主要噪声源区^[1-4].

由于上述原因, 国内外很多离心风机的降噪研究都着眼于蜗舌处几何参数的改进. Sasaki 等人^[5-6]试验研究了叶轮的露出长度和蜗壳出口扩张度对离心风机气动性能及气动噪声的影响. 以往的研究大多是对几何参数进行独立的降噪设计, 很少考虑到

参数之间的交互影响及优化设计,虽然有的能够取得一定的降噪效果,但也容易伴随产生风机气动性能有所下降的问题. 寻求既能降低风机气动噪声同时又能保持甚至提高原有气动性能的设计方法,成为目前风机降噪研究追求的目标之一. 因此,对离心风机的气动性能和气动噪声同时进行多参数的综合优化很有必要.

本文采用数值方法对蜗壳出口扩张角、叶轮的露出长度以及蜗舌间隙等 3 个蜗壳出口结构参数,对某前向离心风机气动性能和气动噪声的影响同时进行了研究. 通过 FLUENT 软件计算离心风机内部非定常流动来获取流场和声源信息,利用效率公式和 FW-H 方程求得离心风机的效率和离散噪声,并采用响应面方法(RSM),经过二次回归拟合得到 3 个结构参数与离心风机气动性能和气动噪声的函数关系式,寻找 3 个参数的最佳组合点,在保持离心风机原有良好气动性能的情况下,使气动噪声降至最低,为离心风机的优化设计提供参考.

1 离心风机的几何参数

本文所研究的前向离心风机结构如图 1 所示. 叶轮进口直径 $D_1=156\text{ mm}$,叶片出口直径 $D_2=400\text{ mm}$,无叶旋转扩压器出口直径 $D_3=460\text{ mm}$,叶片数 $Z=12$,叶轮进口宽度 $b_1=70\text{ mm}$,叶轮出口宽度 $b_2=36\text{ mm}$,蜗壳宽度 $B_1=64\text{ mm}$,蜗壳出口长度 $B_2=128\text{ mm}$.

原风机设计转速 $n=2\,900\text{ r/min}$,其出口结构参数见表 1.

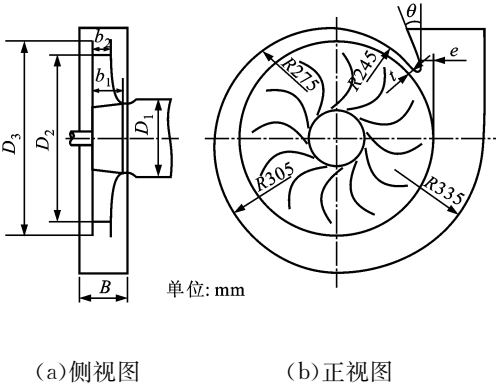


图 1 离心风机结构示意图

表 1 原风机出口结构参数

蜗壳出口扩张角 $\theta/(^\circ)$	0
叶轮的露出长度 e/mm	8
蜗舌间隙 t/mm	9.3

2 数值计算方法

2.1 三维非定常流场的数值计算方法

采用 FLUENT 软件计算风机内部的非定常流动来获取流场和声源信息. 风机计算区域主要分为 3 个部分:进气段、叶轮(包括旋转扩压器)和蜗壳. 为了提高收敛速度,忽略了进风口和旋转叶轮套接部分的内泄漏流动. 各部位的具体网格节点数分别为:进气部分约 6 万个,叶轮部分约 48 万个,蜗壳部分约 40 万个. 整机网格节点总数约 94 万个. 风机的计算网格模型如图 2 所示.

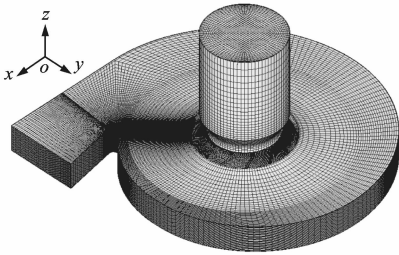


图 2 风机整体网格

非定常计算的控制方程采用三维雷诺守恒型 N-S 方程,湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 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,扩散项采用二阶中心格式离散,时间项离散采用二阶隐式格式. 计算中时间步长确定如下

$$\Delta t = 60/nKZ \tag{1}$$

式中: n 为叶轮转速; K 为每个流道内计算的时间步数.

计算给定进口速度边界条件,依据流量计算管道进口速度,且假设进口速度均匀分布,给定蜗壳出口压力边界为标准大气压,壁面采用无滑移条件,计算中取进口体积流量 $q_v=27.7\text{ m}^3/\text{min}$.

2.2 气动性能和气动噪声的计算方法

内效率(简称效率)是衡量风机气动性能的主要参数之一,风机效率的计算方法可由下式确定

$$\eta = \frac{(p_2 - p_1)q_v}{M\omega} \tag{2}$$

式中: p_1 、 p_2 分别为风机进、出口的总压; M 为叶轮施加给流体的作用力对 z 转轴的力矩; ω 为叶轮旋转的角速度. 计算中上述各参数均采用国际标准单位. 由于在不同时刻计算所得的效率不同,为了便于比较,给出的效率为 360 个非定常时间步的时均值.

声压级是衡量风机噪声大小的常用物理量之一,本文运用三维非定常流场数值计算的结果,采用 FW-H 方程对风机的离散噪声进行计算^[1],并利用自由空间格林函数求解 FW-H 方程,因此有

$$p(\boldsymbol{x},t)=\frac{1}{4\pi c_0}\int_{f=0}\left[\frac{1}{R(1-M_R)^2}\frac{\partial(F_iR_i)}{\partial t}\right]dS+\frac{1}{4\pi}\int_{f=0}\left[\frac{F_iR_i-F_iM_i}{R(1-M_R)^2}\right]dS+\frac{1}{4\pi c_0}\int_{f=0}\left[\frac{F_iR_i\{R\partial M_R/\partial t+c_0(M_R-M^2)\}}{R^2(1-M_R)^3}\right]dS$$

(3)

因篇幅所限,式(3)和式(4)中各符号的含义详见文献[2,4].

2.3 数值方法可靠性的说明

文献[1-2,4]曾通过改变蜗舌倾角和叶片节距对本文中的原风机进行了改进前、后的气动性能和气动噪声的研究,并取得了较好的预测效果. 研究中采用数值方法对改进前、后风机内部的非定常流场进行了分析,并对风机噪声进行了数值预测,同时对改进前、后的风机进行了试验测量. 数值分析结果与试验结果的对比表明,该数值方法的分析结果与试验测量结果基本一致,将其应用于离心风机气动性能与气动噪声的工程分析具有较高的可靠性. 本文采用文献[1-2,4]中所使用的数值方法,因篇幅限制,本文不再对数值方法可靠性进行验证分析,详情参见文献[1-2,4].

3 数值计算的结果及响应面优化

3.1 响应面方法

响应面方法是将试验设计与数理统计相结合的优化方法,其模型建立容易、使用方便,而且能够显式地揭示设计变量和目标之间的响应关系,因此在叶轮机机械的优化设计中得到了广泛应用^[7-9].

响应面近似函数通常使用二阶多项式(但不限于多项式),对 3 个变量的情况表示如下

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+\beta_4x_1^2+\beta_5x_2^2+\beta_6x_3^2+\beta_7x_1x_2+\beta_8x_1x_3+\beta_9x_2x_3$$

(4)

对于根据样本点拟合出来的响应面多项式,常使用统计学中的决定系数 R^2 和修正决定系数 R_a^2 来评价响应面的近似质量. 这 2 个系数越接近 1,表示响应面的近似程度越高,足够地逼近通常要求 R^2 和 R_a^2 的值在 0.9 以上.

3.2 样本点设计和数值结果分析

选取风机的效率 η 和 A 声级 L_A 为设计目标,

应用响应面分析方法优选 θ 、 e 和 t 的范围,首先将 θ 、 e 和 t 编码至 $(-1,1)$ 产生设计空间,见表 2.

表 2 设计参数水平及编码

参数	范围	编码	编码水平		
			-1	0	1
$\theta/(^\circ)$	0~20	x_1	0	10	20
e/mm	8~72	x_2	8	40	72
t/mm	9.3~29.3	x_3	9.3	19.3	29.3

在考虑 3 个结构参数对风机效率 η 和 A 声级 L_A 的影响时,采用 Box-Behnken 法进行样本点的选取,数值计算所得的结果见表 3.

表 3 设计方案与数值计算结果

编号	x_1	x_2	x_3	效率 η	L_A/dB
1	-1	-1	0	0.685	92.0
2	1	-1	0	0.699	91.9
3	-1	1	0	0.713	83.3
4	1	1	0	0.707	87.6
5	-1	0	-1	0.736	91.2
6	1	0	-1	0.737	91.1
7	-1	0	1	0.664	84.7
8	1	0	1	0.692	85.7
9	0	-1	-1	0.727	95.4
10	0	1	-1	0.736	87.5
11	0	-1	1	0.670	91.8
12	0	1	1	0.692	80.9
13	0	0	0	0.715	89.0
原风机				0.724	95.2

采用完全二阶多项式拟合得到 η 和 L_A 关于 3 个编码自变量的回归方程,分别表示为

$$\eta=0.714\,79+0.004\,358x_1+0.008\,071x_2-0.027\,479x_3-0.004\,467x_1x_2+0.007\,283x_1x_3+0.003\,708x_2x_3-0.006\,298x_1^2-0.007\,223x_2^2+0.000\,973x_3^2$$

$$R^2=0.986\,8;\quad R_a^2=0.971\,9$$

(5)

$$L_A=88.974\,07+0.080\,093x_1-4.532\,41x_2-2.794\,91x_3+0.114\,81x_1x_2+0.339\,81x_1x_3-0.685\,19x_2x_3-1.008\,33x_1^2-0.283\,33x_2^2+0.241\,67x_3^2$$

$$R^2=0.996\,6;\quad R_a^2=0.992\,7$$

(6)

由于 R^2 和 R_a^2 都很接近于 1,因此认为所得到的多

项式拟合程度较好,可以用来预测和进行优化分析.图 3、图 4 分别给出 3 个结构参数对 η 和 L_A 的敏感性分析.图 3、图 4 中: $x_i(i=1,2,3)$ 为 3 个结构参数的编码自变量; η_{old} 、 L_{old} 分别为原风机数值计算的效率和 A 声级; η 、 L_A 分别为 3 个结构参数独立变化时,通过响应面预测得到的风机效率和 A 声级.

从图 3 可以看出:蜗舌间隙 t 对风机效率影响最大,随着蜗舌间隙 t 的增大,风机的效率明显降低,而蜗壳出口扩张角 θ 和叶轮的露出长度 e 对风机效率影响则相对较小,随着这 2 个参数值的增加,风机效率都是先增大后减小.在 3 个结构参数中,叶轮的露出长度 e 和蜗舌间隙 t 对风机的 A 声级影响较大,随着 2 个参数值增大,风机的 A 声级均有显著下降.因此,可以通过响应面寻找 3 个结构参数的最佳组合,获得理论上的理想设计点.

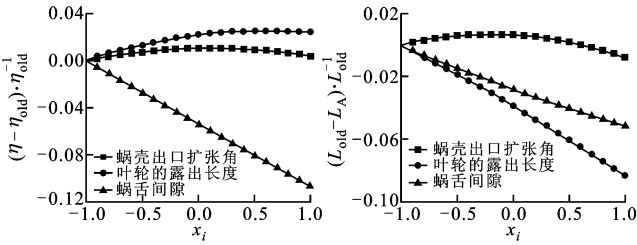


图 3 设计参数对效率

图 4 设计参数对 A 声级

的敏感性分析

的敏感性分析

3.3 响应面优化及数值验证

对于本文所研究的前向离心风机,其理想的最优设计目标是使风机效率达到最高,同时 A 声级最低,但回归方程式(5)和式(6)并不存在这样的最优值.综合起来考虑,本文选取改进后的风机在效率不低于原风机效率的情况下,寻找 A 声级最小时的 3 个结构参数的值.该优化问题可以用以下数学表达式来描述.

目标函数
$$\min L_A(x_1, x_2, x_3)$$

约束条件
$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(x_1, x_2, x_3) \geq \eta_{old} \\ -1 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1 \end{array} \right\} \quad (7)$$

在约束条件下,求取目标函数的最小值,可以得到效率不低于原风机的效率及 A 声级最小的 3 个编码自变量的值.通过求解式(5)~式(7)可得,当 $x_1=-0.64$ 、 $x_2=0.95$ 、 $x_3=-0.38$ 时,对应的 A 声级为最小值($L_A=85.3$ dB).此时,效率 $\eta=0.724$,相应的蜗壳出口结构参数 $\theta=3.6^\circ$ 、 $e=70.4$ mm、 $t=15.5$ mm.

利用上面所述及经过以往工作验证的数值方

法^[1-2,4],并在完全相同的条件下(包括风机运行条件、流量和数值处理方法等),对本文优化后的离心风机进行了数值计算.表 4 给出了响应面和 CFD 数值计算的结果,并与原风机的数值计算结果进行了比较.

表 4 响应面优化结果的数值验证

	优化后风机		原风机
	响应面 优化结果	CFD 数值 计算结果	
η	0.724	0.719	0.724
L_A /dB	85.8	85.0	95.2

数值结果表明:该响应面具有较高的预测精度,采用响应面与 CFD 计算所得到的效率和 A 声级,其误差分别为 0.7% 和 0.9%,通过优化设计,能够在基本不影响风机原有气动性能的情况下,使风机的 A 声级显著降低,综合性能明显改善.数值预测结果为下一步的试验设计提供了可参考的依据.

4 结 论

(1)通过响应面分析方法建立了蜗壳出口扩张角、叶轮的露出长度和蜗舌间隙与前向离心风机的效率和 A 声级之间的数学模型,可以比较明确地表示出 3 个结构参数之间的交互作用.数值分析结果表明:蜗壳出口的 3 个结构参数对风机的气动性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.

(2)优化结果表明:通过响应面优化得到的蜗壳出口 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一样,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试验验证.

(3)将 CFD 与 RSM 相结合的设计方法应用于指导离心风机的气动性能及气动噪声的优化分析中,可以为试验设计提供参考依据,有助于减少试验次数,降低试验成本,缩短研发周期.本文工作可为从事风机节能与降噪研究的同行们提供一些有益的参考.

参考文献:

[1] LIU Qihong, QI Datong, MAO Yijun. Numerical calculation of centrifugal fan noise [J]. Proceedings of

- the Institution of Mechanical Engineers; Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8): 1167-1178.
- [2] 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:西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [3] 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): 123-127.
- MAO Yijun, QI Datong, LIU Qihong. An analysis of the aeroacoustic source and noise type of a centrifugal fan based on the unsteady flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 123-127.
- [4] 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 the Institution of Mechanical Engineers; Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 221(11): 1321-1332.
- [5] SASAKI S, HATAKEYAMA M, KODAMA Y, et al. An experiment study of the flow at impeller outlet and the noise of dual-cascade centrifugal fan (effect of bare ratio and outlet angle of scroll casing) [J]. Reports of the Faculty of Engineering, 2002, 32(59): 25-32.
- [6] KODAMA Y, SHINBARA N, HAYASHI H, et al. Aerodynamic characteristics of multiblade radial flow fan (effects of the bare length and the divergent angle at the outlet of the scroll casing) [J]. Reports of the Faculty of Engineering, 1998, 28(50): 21-28.
- [7] HAN Y, MAENG J S, YOON D H. Shape optimization of cutoff in a multi-blade fan/scroll system using response surface methodology [J]. Numerical Heat Transfer; Part B, 2003, 43(1): 87-98.
- [8] KIM K Y, SEO S J. Application of numerical optimization technique to design of forward-curved blades centrifugal fan [J]. Numerical Heat Transfer; Part B, 2006, 49(1): 152-158.
- [9] 王晓锋, 席光, 王尚锦. 响应面方法在叶片扩压器优化设计中的应用研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 391-394.
- WANG Xiaofeng, XI Guang, WANG Shangjin. Application of response surface methodology in the optimization design of vaned diffuser [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3): 391-394.

(编辑 王焕雪)