

可控减速法设计离心风机两元叶片的研究

李景银, 牛子宁, 梁亚勋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出采用可控减速法设计离心风机两元叶片, 即通过三维黏性流场计算, 采用正交试验设计方法, 以确定流道内平均速度的减速规律和叶片型线. 在满足原有的气动设计点参数和不改变风机轮盖和轮盘几何尺寸的前提下, 对某高效离心风机叶片型线进行了重新设计. 整机全工况数值计算表明, 优化后的风机效率在绝大部分工况范围内都明显提高, 压力在设计和小流量工况时也比原风机高, 而且大大避免了原风机的过载导致烧毁电机的问题. 设计工况详细的流场分析表明, 优化设计风机的叶轮流道内静压分布更加均匀, 消除了分离损失, 说明该方法是风机叶片优化设计的可靠和快速方法.

关键词: 离心风机; 叶片设计; 正交设计; 可控减速

中图分类号: TH432 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0067-04

Design of 2D Blade Curves of Centrifugal Fans by Controlled Deceleration Flow Method

LI Jingyin, NIU Zining, LIANG Yaxun

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

Abstract: A new approach to optimum design of the two-dimensional blade curves of centrifugal fans was proposed in this study. In the present method, the orthogonal design and the three-dimensional viscous flow field computation were used to determine the optimum controlled deceleration flow in impellers and the blade curves. The blade of a high-efficiency fan was redesigned without changing its design point parameters and the profiles of its hub and shroud. The computational results for the whole fan show that the fan efficiency is improved clearly in most of the operation range, and the total pressure is increased at the design and low flow rates. Moreover, unlike the original fan, the possibility of the motor burning caused by overload can be reduced greatly. In addition, the analysis on the flow field indicates that the static pressure distribution of the flow in the impeller is more uniform and the separation region is eliminated. These results imply that this reliable method may be suitable to the design of the two-dimensional blade curves of centrifugal fans.

Keywords: centrifugal fans; blade design; orthogonal design; controlled deceleration flow

尽管人们对离心压缩机三元叶片的设计方法进行了大量的研究^[1-2], 但对大型工业离心风机使用的两元叶片的设计研究很少. 离心风机两元叶片的设计方法大致有以下几种: ①最传统的按圆弧几何成型, 该方法叶轮效率偏低; ②给定叶轮内相对平均速

度的分布规律, 如采用等减速或等扩张角度的方法^[3-4], 或直接给定平均速度沿流道的分布, 然后进行叶片载荷分析^[5], 这类方法需要进行风机性能测试或三维流场计算, 然后进行性能或流场分析对比并反复调整经验设计参数以提高风机效率; ③采用

给定角动量的设计方法^[6],这与压缩机叶轮设计方法^[1]一样,但只给中间流线加载,并且结合了边界层计算,设计方法比较复杂。

近年来采用试验设计和三维流场数值计算,然后优选或构造回归函数优化的方法成为叶轮机械设计的一个研究热点^[7].本文提出在离心风机叶道内采用可控减速设计方法,通过正交试验设计,优化确定叶道内气流平均速度的减速规律,从而设计高效的离心风机两元叶轮,并以9-19型离心风机为例进行了设计方法的研究。

1 设计参数及设计方法

9-19离心风机是国内推广的高压小流量风机的典型代表,得到了广泛的应用.本文按6号风机模化设计,确定单级单进气风机设计工况流量为 $1.1385\text{ m}^3/\text{s}$,全压为 8.6 kPa ,转速为 2900 r/min .为了对比,本文仅重新设计9-19风机叶片,而保持叶轮的轮盖、轮盘型线不变.首先,假设流道内气流的平均相对速度变化率沿半径的分布为二次多项式,即

$$\frac{dw}{dt} = f(r) = Ar^2 + Br + C \quad (1)$$

式中: w 为气流相对速度; t 为时间;参数 A 、 B 、 C 为可调变量; r 为叶轮半径.因为在叶片中间区域,叶片控制流动分离的能力强,流动效果好,因此应采用较大的减速和扩压度,也即式(1)的减速规律的系数 C 应该取较小值。

由于叶道中间流线 m 与叶轮半径 r 及径向气流速度 C_r 与相对气流角 β 有如下关系

$$dm = dr/\sin\beta; C_r = w\sin\beta \quad (2)$$

所以,式(1)可以进一步变化为

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= w \frac{dw}{dm} = w\sin\beta \frac{dw}{dr} = \\ C_r \frac{dw}{dr} &= f(r) = Ar^2 + Br + C \end{aligned} \quad (3)$$

已知叶轮过水断面宽度 $b'(r)$ 和叶片阻塞系数 τ ,由文献[3]的等减速方法可知

$$\begin{aligned} w &= w_1 + (w_2 - w_1) \int_{r_1}^r r\tau dr / \int_{r_1}^{r_2} r\tau dr \\ \beta_1 &\leq \beta \leq \beta_2 \end{aligned} \quad (4)$$

由此可得可控减速法的叶道内相对速度分布为

$$\begin{aligned} w &= w_1 + (w_2 - w_1) \int_{r_1}^r f(r)r\tau dr / \\ &\int_{r_1}^{r_2} f(r)r\tau dr \end{aligned} \quad (5)$$

式中:下标1和2分别代表叶片进口和出口处值.最后,由 $C_r = w\sin\beta$,可得到叶片角度 β 沿半径 r 的分布,由叶片内径或外径沿流线积分就可得到叶片型线。

2 正交优化及设计结果

正交试验设计具有均匀分布、整齐可比等优点.本文采用常见的正交试验表见表1,对本文的3个因素进行优化设计.如果采用完全析因设计,需要27次计算,而采用正交试验设计,只计算9次就可以得到全部结果中前3名的设计结果。

根据经验和对流道内气流的相对速度变化规律的分析,确定式(1)中系数 A 、 B 、 C 的变化范围如下:因素 $A[0.00078, 0.0008]$,因素 $B[-0.0345, -0.0355]$,因素 $C[2.6, 2.8]$.对3个因素各取3个水平,将其代入正交表1。

表1 正交数值试验表

编号	因素A	因素B	因素C
1	0.00078	-0.0345	2.6
2	0.00078	-0.0350	2.7
3	0.00078	-0.0355	2.8
4	0.00079	-0.0345	2.7
5	0.00079	-0.0350	2.8
6	0.00079	-0.0355	2.6
7	0.00080	-0.0345	2.8
8	0.00080	-0.0350	2.6
9	0.00080	-0.0355	2.7

对表1中的9组设计参数全部进行了叶片造型和相应的风机整机全三维数值模拟计算,由此得到效率最高的设计结果.所得到的 $f(r)$ 曲线如图1所示,该曲线因素 C 为2.6,即最小值.图2为原始9-19风机的叶片型线与正交优化设计确定的风机叶片型线的对比图。

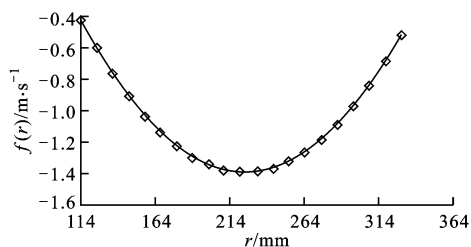
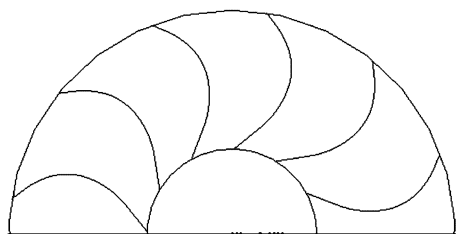
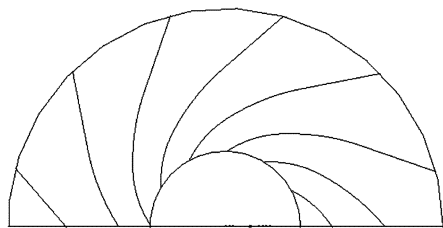


图1 优化后的气流减速函数 $f(r)$ 分布



(a)原始的 9-19 风机叶片型线



(b)正交优化确定的风机叶片型线

图2 9-19 风机与优化设计风机的叶片型线对比图

3 优化前后的风机性能和流场对比分析

3.1 网格分布以及数值计算模型

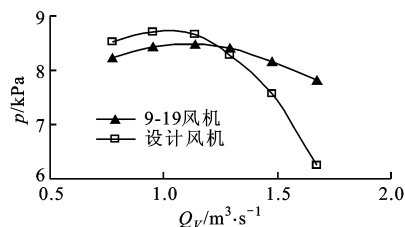
本文采用 fluent 软件进行三维数值模拟计算. 计算全部采用结构化六面体网格, 进气段网格数约 15 万, 叶轮网格数约 50 万, 蜗壳网格约 40 万, 并进行了网格无关性计算, 当网格总数达到 157 万时, 计算的效率和全压变化均小于 0.1%, 可认为达到了网格无关性的要求. 同样的计算网格和计算模型曾用于自主开发的、具有准确性能测试结果的离心风机的性能和流场计算, 风机的性能计算精度完全令人满意^[8].

计算模型采用三维 N-S 方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型. 控制方程采用隐式分离方法求解, 压力修正采用 SIMPLEC 算法. 进口边界条件为速度进口, 出口静压边界为标准大气压, 壁面采用无滑移条件, 动静边界采用 MRF 模型.

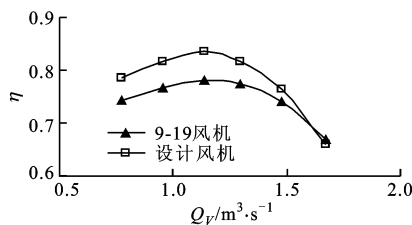
3.2 优化设计风机与原 9-19 风机的全工况特性对比

从图 3 非常明显地看出, 优化设计风机的效率在大部分工况下都明显高于原 9-19 风机, 其中设计流量时, 全压效率由原来的 80.1% 提高到 84.8%, 效率提高达 4.7%, 小流量时全压效率由原来的 76.8% 提高到 80.4%. 另外, 设计点风机全压提高了 3.5%, 小流量时风机全压提高 3%, 但在大流量时, 设计风机的压力低于原风机. 这主要是因为原 9-19 风机采用了 15% 的旋转扩压器, 而优化设计的

风机增大了叶片直径, 只保留了较小的旋转扩压器, 从而可以采用后向叶片, 这样设计风机就具有后向叶片的特性. 尽管大流量时压力下降, 但避免了大流量时的前向叶片风机过载特性所导致的烧毁电机的问题. 从计算的功率曲线看, 优化设计的风机确实具有不过载特性. 由于通过正交优化设计的风机在设计点效率已经达到 84.8%, 令人满意, 而且压力也与气动设计要求差别不大, 所以就没有再进行响应面函数的构造和最优点的进一步选择.



(a)压力性能曲线图



(b)效率性能曲线图

图3 优化设计风机与 9-19 风机的计算性能对比图

3.3 优化设计风机与原 9-19 风机流场对比分析

图 4 为设计工况下 2 个风机叶轮跨盘盖中心回转面上的静压系数等值线图, 其中静压系数定义为 $\psi_s = p_{sF} / \rho u^2$, 其中 p_{sF} 是当地静压升, u 是叶片直径 600 mm 处的周向速度. 由图可以看到, 优化设计风机的静压增加比 9-19 风机要均匀得多. 另外, 对设计流量下 2 种风机流场的涡量、速度、压力分布等流动参数也进行了全面对比分析, 优化的风机各种流场都明显改善.

4 结 论

初步性能试验结果表明, 本文采用可控减速正交优化设计的风机, 其压力和效率的改善与数值实验对比结果一致, 因此可以得到如下结论.

(1) 采用可控减速设计规律优化设计风机, 符合在叶片进出口采用较小减速和扩压度、在叶片中间部分采用较大减速和扩压度的要求, 有利于减少流动损失.

