

# 基于内部流场分析的小型轴流风扇结构优化

赵 屹, 金英子, 吴文浩, 张 立, 钱红玉

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 采用孤立叶型设计法、CFD 技术、遗传算法等理论,运用自编软件对某一轴流风扇轮毂比参数进行结构优化设计,优化目标为风扇流量。对比分析优化前后风扇内部流场,如风扇的静特性、叶片表面静压分布、子午面涡量分布等信息。由此验证优化方法的可行性,并总结轮毂比参数对此风扇性能的影响。结果表明:优化后风扇叶片和轮毂表面减小了因涡流带来的能量损失,但叶顶间隙处的涡流增大,能量损失略有增大;在不同流量下,优化后风扇静压有不同程度的提高;优化后风扇的出口速度均比优化前大幅提高;风扇在额定工况下性能、静特性及内部流场都得到了很好的改善。

**关键词:** 轴流风扇; 轮毂比; 内部流场; 遗传算法

**中图分类号:** TM925. 11 **文献标识码:** A

## 0 引 言

小型轴流风扇主要应用于计算机、电子仪器仪表等电子元器件的散热和通风。并且,随着计算机等设备运行速度的提高,发热量的增加,对风扇性能提出了更高的要求。风扇的性能主要取决于其内部流场状况,对内部流场的分析是研究风扇性能的必要手段。影响风扇内部流场的因素有很多<sup>[1-2]</sup>,如轮毂比、叶片数、叶顶间隙、叶片安装角、叶型等。通过适当改变风扇的结构参数可以达到优化风扇的目的。李杨等<sup>[3]</sup>通过叶片弯掠技术对叶片的周向弯曲角度进行寻优,达到风扇气动性能优化的目的。沈国民、谢军龙<sup>[4]</sup>通过改变叶片安装角和叶型能提高

效率、降低噪音。

本文主要研究轮毂比对风扇内部流动特性的影响。结合孤立叶型设计法、CFD 技术、遗传算法等理论,通过自编软件建立的风扇优化设计系统,进行小型轴流风扇的优化设计,对比并分析了优化前后风扇的静特性、叶片表面静压分布、子午面涡量分布等信息。

## 1 研究对象和优化方法

### 1.1 物理模型

本文对原始模型风扇轮毂比参数进行优化,优化目标为风扇流量与静压。圆弧板叶型,几何参数如表 1。

表 1 风扇几何参数

轮毂直径/mm	风扇外径/mm	叶片数	叶片厚度/mm	轮毂比	叶顶间隙/mm	风扇转速/(r/min)	风量/(kg/s)
61	85	5	1.5	0.72	1.5	3000	0.107

### 1.2 优化方法

遗传算法是一种模拟达尔文的遗传选择和生物进化过程搜索最优解的方法。遗传算法不需要梯度

信息,不需要函数连续,优化结果具有全局性,应用于机械优化设计问题中,可以有效地避开局部最优解,获得问题的全局最优解<sup>[5]</sup>。

本文采用 Holland 发展的标准遗传算法<sup>[6]</sup>,步骤如图 1 所示。

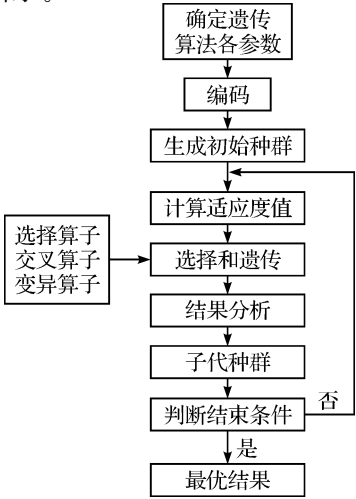


图 1 遗传算法运算流程

算法各组成部分如下。

- a)编码:遗传算法不能直接对现实问题中的参数进行优化,而必须将各参数转换成基因的形式,再将所有参数的基因首尾相连组成一个整体即染色体,这个过程称为编码。编码策略必须符合完备性、健全性和非冗余性 3 个规范。常用的编码技术有二进制编码、浮点数编码、字符编码和变成编码等。
- b)初始种群的生成:由系统随机产生  $N$  个结构数据,每个结构数据表示一个个体,所有个体组成初始种群。初始种群是遗传算法开始迭代的起点。
- c)适应度值评价检测:适应度值表示个体对环境的适应能力,它是判断个体优劣的标准,也是个体进化的动力。在优化中,遗传算法根据每个个体适

应度值大小对其进行排序,并由适应度值计算个体被选择的概率,概率越高,被选中的机会越大,因此必须保证适应度值为正。

d)选择算子:选择是指从上一代中选择适应度值大的个体,将其遗传到下一代;或者是在上一代中随机选择父代,由父代进行交叉操作产生新个体,再将新个体遗传到下一代。

e)交叉算子:交叉是指将父代个体中的基因进行交换重组,以产生新的子代。通过交叉可极大提高遗传算法的搜索能力。

f)变异算子:变异是指将个体的某个基因作随机的变动。通过变异使遗传算法具备局部搜索能力,并保持种群的多样性。

g)终止条件判断:优化终止判断主要有两种方法,优化代数限制和精度限制。优化代数限制是指在遗传算法进行前设置好需要优化的子代数,当程序运行到设置好的子代数以后自动停止;优化精度限制是指连续  $N$  代( $N$  为设定参数)中,父代与子代的适应度值之差小于某一精度要求时,便认为计算已经收敛,程序停止运行。

在微小型轴流风扇优化设计系统中,分为风扇设计模块、前处理模块和流场计算模块,它们既可单独运行也可串联运行。单独运行时,模块之间无通讯,各模块执行各自功能。进行风扇优化时,需要将风扇设计模块、前处理模块及流场计算模块中的优化模式选中,使各模块串联运行,并将计算结果导入优化程序中作为遗传算法的适应度值。程序流程见图 2。

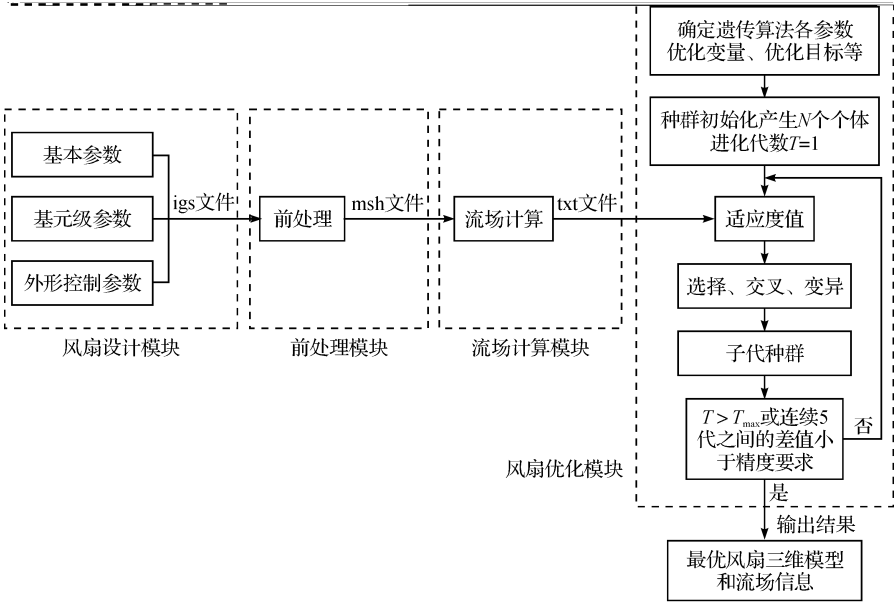


图 2 系统程序流程

运算流程如下。

a)首先根据用户输入的风扇基本设计参数,如全压、流量、密度、效率及转速等,运用孤立叶型法进行计算,得到轮毂比、叶片数、风扇外径和每个基元级的半径、弦长和安装角等参数,并将每个基元级半径、弦长和安装角数据保存到基元级参数中。

b)采用最小二乘法对各基元级弦长和安装角进行拟合,拟合后弦长和安装角过渡更加光滑,提高了叶片的光滑度。

c)根据用户输入的叶片积叠线控制点参数、轮毂直径、轮毂长度、基元级弯度、叶片厚度、叶型名称等参数,调用绘图程序进行三维图形创建,得到符合设计要求的初始风扇模型,并将三维模型以 prt 和 igs 文件进行保存。

d)根据用户输入的旋转区、管道区、进口延长段和出口延长段的尺寸大小及网格大小,调用 Gambit 进行计算域创建、网格划分及边界条件定义,并将结果保存为 msh 文件。

e)根据用户输入的进口流量、湍流动能、湍流耗散率、松弛系数、迎风格式、收敛误差、进出口位置等参数调用 Fluent 进行流场计算,计算结束后将结果保存为 cas 及 dat 文件。计算得到的进出口压差及扭矩值则单独以 txt 文件进行保存,并将其作为遗传算法中的适应度值。

f)根据用户输入的初始种群、子代数、基因交换概率、基因变异概率、精度要求、优化变量及优化目标等参数,调用遗传算法进行寻优,每一代中个体的优化变量值、优化目标值、及子代数等信息都以 txt 文件的形式保存到硬盘中。

优化结束后输出最优风扇三维模型和流场信息。

2 优化结果分析

2.1 优化前后参数对比

对比优化前后风扇的外形、结构参数和性能参数。图 3、图 4 为优化前后风扇三维模型。

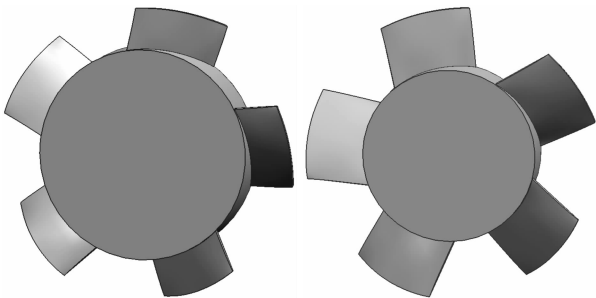


图 3 优化前风扇模型      图 4 优化后风扇模型

由于是对风扇的轮毂比进行优化,且保持风扇外径不变,因此其结构参数中只有轮毂直径改变了,表 2 为优化前后风扇结构参数对比。

表 2 优化前后风扇结构参数

	风扇外径/mm	轮毂直径/mm	轮毂比
优化前	85	61	0.72
优化后	85	51	0.60

表 3 为优化前后风扇在额定工况下性能参数对比。

表 3 优化前后风扇性能参数

	流量/ (kg/s)	效率/%	风压/Pa	转速/ (r/min)
优化前	0.0107	27.8	14.95	3 000
优化后	0.014	27.75	13.54	3 000

由风扇性能参数可知,在额定工况下,经系统优化后风扇流量由 0.010 7 kg/s 增大到 0.014 kg/s,流量增幅为 30.8%。风扇效率和风压略有降低,但降低的幅度很小,对微小型轴流风扇而言,适当牺牲效率和风压以提高风扇流量是可取的,因此通过该系统达到了风扇优化的目的。

2.2 风扇静特性分析

如图 5 所示为优化前和优化后风扇  $P-Q$  曲线及  $\eta-Q$  曲线

由  $P-Q$  曲线图可知:当流量小于 0.008 kg/s 或大于 0.012 kg/s 时,相同流量下,优化后风扇静压显著大于优化前风扇静压,风扇的最高静压值由 18.8 Pa 增大到 26.1 Pa;当流量从 0.008 kg/s 到 0.012 kg/s 时,优化前后风扇的静压值相差不明显;当流量大于 0.015 7 kg/s 时,优化前风扇的静压出现负值,而优化后风扇的静压仍有 10.8 Pa。由此可见,经优化后风扇的平均静压值得到了较大提高,最高静压增大了 7.3 Pa,流量范围也明显增大。

由  $\eta-Q$  曲线图可知:当流量小于 0.007 4 kg/s 时,优化后风扇效率比优化前略微降低;当流量从 0.007 4 kg/s 到 0.012 kg/s 时,优化后风扇效率较优化前差别不大,其平均效率由 26.1% 减小为 23.1%;当流量大于 0.012 kg/s 时,优化前风扇的效率急剧减小,而优化后风扇效率减小趋势缓慢,仍然保持在 22% 以上,平均效率由优化前的 17.7% 增大到 25.1%,这主要是因为当流量大于 0.012 kg/s 时,优化后风扇仍然保持较高静压的缘故。

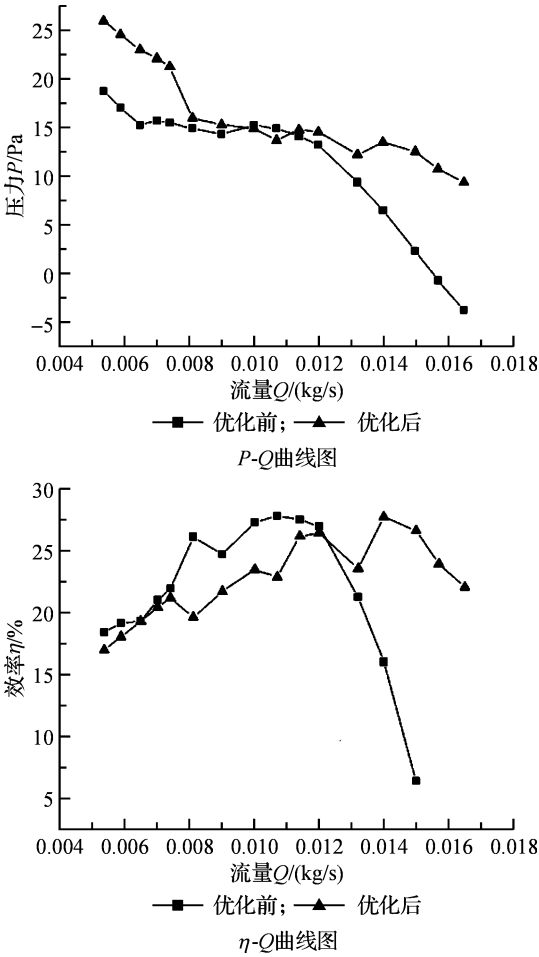


图5 风扇性能曲线

2.3 子午面轴向速度及涡量分布

图6和图7所示为子午面轴向速度分布及涡量分布。

由图6(a)与图6(b)可知:经系统优化后,风扇叶顶间隙处的回流速度增大,回流范围增大,从而使叶顶泄漏涡增强,导致叶顶间隙处的能量损失增大;优化前后,风扇吸力面侧的入流速度最大位置均位于风扇叶根处,出流速度的最大位置均位于风扇叶中部;但是经优化后,风扇的入流和出流速度都有较大提高,且高速区的范围较优化前有明显增大,说明优化后风扇的做功能力增强。

由图7(a)与图7(b)可知:优化前风扇的叶片及轮毂表面有较大的涡流存在,而优化后叶片及轮毂表面的涡流明显减少,从而减小了因涡流带来的能量损失;优化后风扇的涡流主要集中在叶顶间隙处,其涡流强度和范围较优化前都有增加,从而使叶顶间隙处的能量损失增大,这与分析图6所得结论一致。

2.4 风扇出口速度分布

图8为优化前后风扇出口速度沿径向分布。

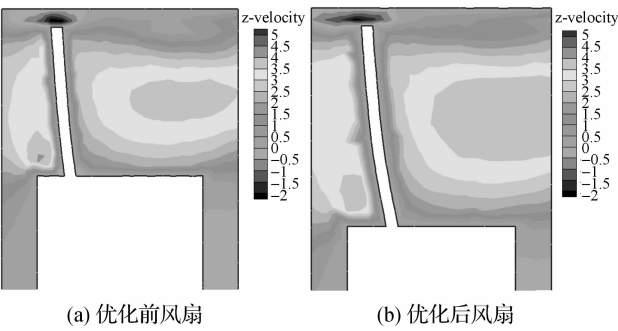


图6 子午面轴向速度

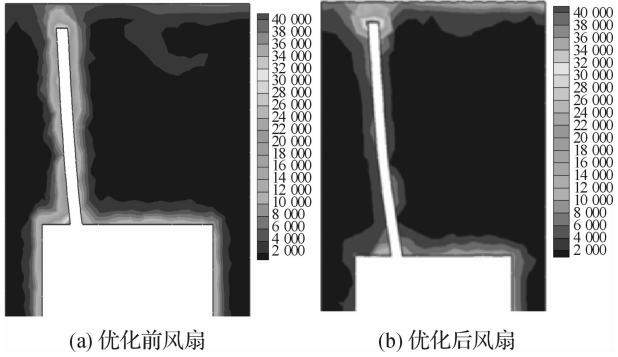


图7 子午面涡量分布

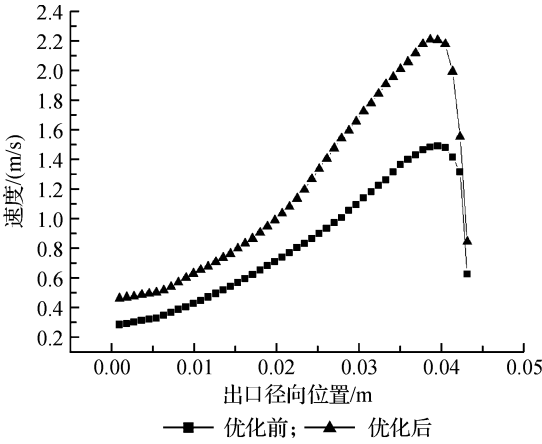


图8 出口速度沿径向分布

如图8所示,横坐标为风扇出口处的径向位置,纵坐标为速度大小。优化前后风扇的出口速度沿径向逐渐增大,当速度达到最大值以后开始急剧减小,这主要是由于接近机闸处,受附面层的影响,流体的速度会显著减小。沿径向位置,优化后风扇的出口速度均比优化前大,且越靠近叶顶位置,其速度的增大幅度越大。这点同样可以从图6速度云图看出。优化前风扇出口速度的最大值为1.49 m/s,优化后其出口速度最大值增大到2.21 m/s,增大了48.3%。由此可见,经过系统优化后,风扇的出口速度平均值较优化前有明显增大,做功能力增强。

3 结 语

a)在额定工况下,经系统优化后风扇效率和风压略有降低,流量有大幅度提高,增幅为 30.8%;当流量小于 0.008 kg/s 或大于 0.012 kg/s 时,优化后风扇静压显著增大,最高静压增大了 7.3 Pa,流量范围也明显增大;当流量 0.007 4~0.012 kg/s 时,优化后风扇平均效率由 26.1%减小为23.1%,当流量大于 0.012 kg/s 时,优化后风扇平均效率由 17.7%增大到 25.1%。

b)优化后风扇的入流和出流速度都有较大提高,高速区范围较优化前有明显增大;叶片和轮毂表面的涡流减小,从而减小了因涡流带来的能量损失;优化后风扇叶顶间隙处的涡流增大,能量损失增大。

c)优化后风扇的出口速度均比优化前大,且越靠近叶顶位置,其速度的增大幅度越大;出口速度的最大值由优化前的 1.49 m/s 增大到 2.21 m/s,平均速度也有大幅增加。

由以上结果可知,在对轮毂比优化后,风扇在额定工况下性能、静特性及内部流场都得到了很好的

改善,达到了风扇性能优化的目的。

此类方法可以同样应用于风扇其他结构参数的优化。

参考文献:

[1] 唐涛,杨爱玲,陈康明,等. 掠叶型对小型轴流风扇性能的影响[J]. 流体机械, 2008, 36(2): 14-17.

[2] Shiomi N, Jin Y Z, Kenji Kaneko, et al. Flow fields with tip leakage vortex in a small axial cooling fan[C]// Proceedings of 2nd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science. Luoyang, China, 2008: 36-42.

[3] 李杨,欧阳华,杜朝辉. 轴流风扇转子叶片优化设计[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(9): 1522-1525.

[4] 沈国民,谢军龙. 轴流通风机的叶片形状和安装角对噪声影响的实验研究[J]. 风机技术, 2000(4): 24-26.

[5] 孔月萍,继军琪. 人工智能及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 127-147.

[6] Hollstien R B. Artifical Genetic Adaption in Computer Control Systems:[D]. Ann Arbor, America: University of Michigan, 1971.

Small Axial Fan Structure Optimization Research Based on the Analysis of the Internal Flow Field

ZHAO Yi, JIN Ying-zi, WU Wen-hao, ZHANG Li, QIAN Hong-yu

(School of Machinery & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In the paper, the authors apply theories of isolated blade design method, CFD technology, genetic algorithm, and use self-made software to optimize the hub ratio of axial flow fan. The optimization objective is fan flow. Then the authors comparatively analyze the fan internal flow field, including static characteristic, blade surface static pressure distribution and meridian plane vortex quantity distribution, etc. , to make sure the feasibility of this optimization method, and conclude the effect of hub ratio to the fan performance. The results show that the energy loss brought by vortex is reduced on fan blades and hub surface after optimization, while the vortex and energy loss on tip are increased slightly. In different flow, there are varied improvements on fan static pressure and outlet velocity after optimization. Under the rating conditions, the fan performance, static characteristic and internal flow field have good improvement.

**Key words:** axial fan; hub ratio; internal flow field; genetic algorithm

(责任编辑: 杨元兆)