

文章编号:1000-8055(2009)03-0634-09

航空电子设备冷却轴流风扇优化设计

周建辉, 杨春信

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于风扇参数化设计和数值模拟程序, 分析风扇各主要结构参数对其气动性能的影响, 为进一步的优化设计提供了条件. 采用并行计算流体力学 (CFD) 方法, 基于组合优化策略 (正交实验设计、响应面模型、遗传算法和混合整型算法) 以多工作点流量系数平均值最大为目标函数对风扇进行多参数结构优化. 8025 型轴流风扇的优化结果比初步设计方案的性能提高 14.5 %.

关 键 词: 轴流风扇; 参数化设计; 优化; 计算流体力学

中图分类号: V231

文献标识码: A

Optimal design of the axial-flow fan in the aeronautic electronic devices

ZHOU Jian-hui, YANG Chun-xin

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the procedure of the parametric design and numerical simulation of the fan, investigations were made in detail on the effect of various design parameters on the aerodynamic performance of the fan, which can provide deep understanding for the optimization of the fan. The multi-parameter constrained optimization procedures based on the combination algorithms of design of experiments (DOE), response surface models (RSM), genetic algorithm (GA) and mixed integer optimization (MOST), were carried out on 8025 fan for maximizing the coefficient of flow rate over the operating range rather than at a single operating condition with parallel computational fluid dynamics (CFD). Results show that aerodynamic average performance of the optimal fan is increased by 14.5 % when compared to the initial fan.

Key words: axial-flow fan; parametric design; optimization; computational fluid dynamics (CFD)

电子设备的冷却方式很多, 主要包括空气冷却、液体冷却和相变冷却等. 由于航空飞行器、雷达通讯系统和军用电子系统对电子散热设备的特殊性要求, 采用液体冷却比较困难. 空气冷却具有方便、设备简单及低成本等特性, 应用相当广泛. 其中风扇冲击射流在局部冷却及快速散热等方面具有绝对优势, 配合热沉对电子元件进行冷却, 是

解决航空电子设备散热问题的有效途径. 发热源热量通过与其表面直接接触的热沉向外导热, 再由高速转动的风扇将大部分热量通过对流方式带走, 从这个散热过程可以看出风扇是整个散热系统的中枢, 担负着将热气流吹走的重任. 因此设计气动特性优良的风扇就显得至关重要.

目前小型轴流风扇设计方法主要采取两种方

收稿日期: 2008-03-10; **修订日期:** 2008-05-09

基金项目: 国家重点自然科学基金 (50436010)

作者简介: 周建辉 (1976 -), 男, 江西鹰潭人, 博士, 主要从事电子设备热设计与优化方面的研究.

式:经验设计和数值模拟方法,其设计流程如图 1 所示.传统的经验方设计法^[1-3]是一种低效率的设计方法,会造成整个设计成本增加,降低产品市场竞争力.采用数值模拟方法^[4-6]在网格自动生成上还有许多困难难以解决,常常会碰到如叶型平面度不够平滑、尖端处破碎、叶轮与外框间隙网格点数不足等问题.如果初始设计不能满足设计要求时,就需要对风扇结构各参数进行调整,重复数值模拟,判断是否产生平顺流场及符合风扇外特性要求的气动性能,经数值模拟与设计参数的反复修正,最终确立符合设计目标的风扇结构.这个过程的工作量无疑是非常巨大的.

针对上面情况,本文借鉴叶轮机械参数化建模思想^[7-8]提出了轴流风扇参数化设计流程(图 2).二维翼型的产生是三维叶轮成型的基础,首先采用叶型参数设计法设计 NACA 四位数系列翼剖面,运用风扇空气动力设计理论计算得到气动结构参数,通过坐标变换将各个截面二维翼型曲线转换成空间三维曲线.同时沿径向积叠并旋转叶型,构成风扇三维参数化模型.然后利用网格生成工具网格产生规则,按点、线、面和体实现风扇参数化模型与网格生成工具的连接,设计者直接

输入风扇结构参数,在不需要产生 CAD/ CAM 文件的前提下即可快速自动产生叶轮六面体网格模型,进行批处理数值运算,自动获得所需信息,如:效率、压力、流量等风扇性能参数,而且可以同时分析多个结构参数(如叶片数、轮毂直径、叶片安装角等)对风扇性能的影响.

影响轴流风扇性能的因素很多,如何综合考虑这些因素,使得在一定工作条件下轴流风扇气动性能最好是轴流风扇设计中迫切需要解决的问题,因此对轴流风扇进行优化设计就非常必要.大量研究工作主要集中在二维翼型^[9-10]和风扇/机单个叶轮^[11-12]空气动力优化设计上.优化设计关注的对象都是给定设计点上的风扇性能,并没有考虑非设计点工作情况. Bolton^[13]指出实际上风扇经常需要在偏离设计点运转,非常有必要考察设计点附近范围内风扇特性. Sorensen^[14-15]采用任意涡模型对轴流风扇进行有约束条件的优化设计,优化结果表明设计点附近一定范围内的平均效率最大值与选取范围的宽度和轮毂直径相关.本文在以上工作基础上进一步展开研究,对风扇的整体结构参数和外特性曲线进行分析和优化设计,可以全方位获得风扇结构参数对性能的影响.

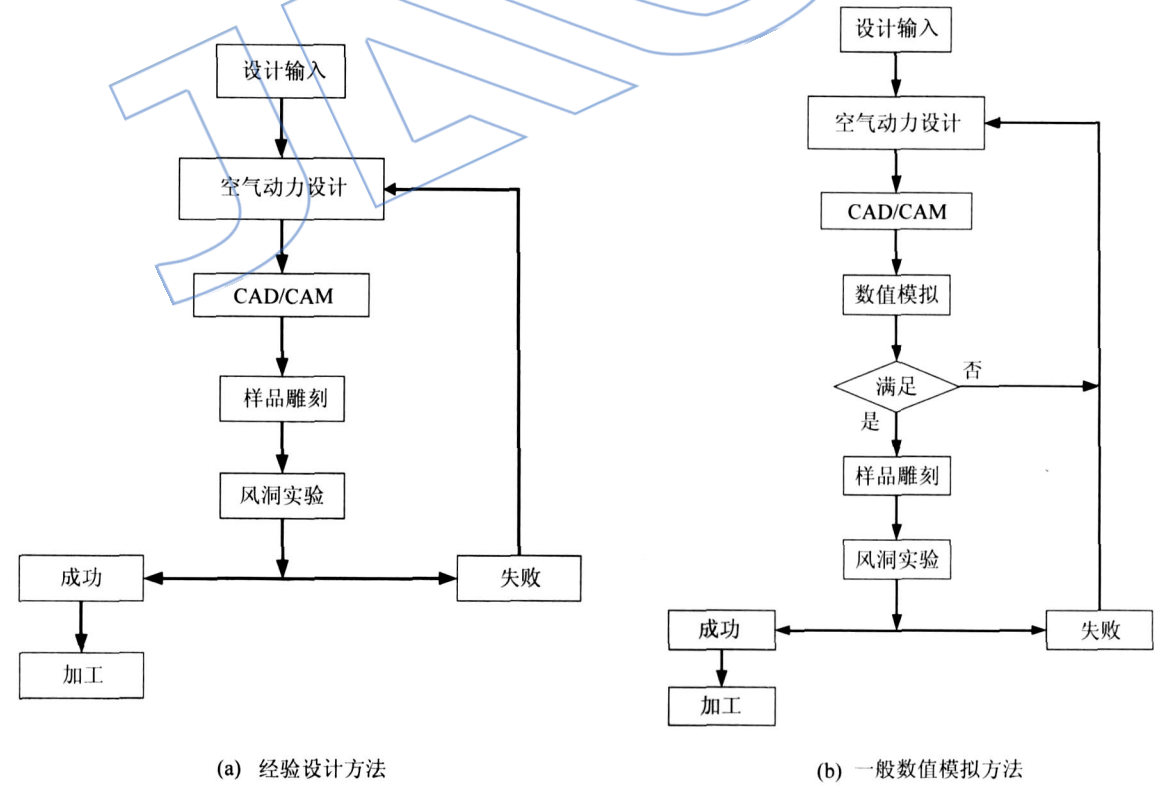


图 1 传统轴流风扇设计流程
Fig. 1 Traditional flow chart of fan design

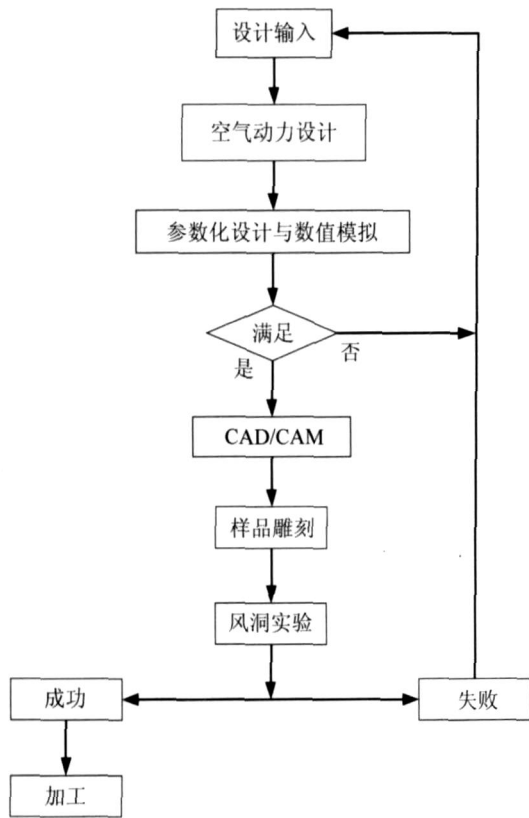


图 2 轴流风扇参数化设计流程
Fig.2 Parametric design of fan design

本文内容包括以下几方面：①提出风扇参数化设计流程,建立了风扇参数化设计模拟系统；②利用风扇参数化设计模拟程序分析风扇的主要结构参数对风扇特性的影响,为多参数优化设计奠定基础；③基于计算流体力学(CFD)采用组合优化策略对风扇的主要性能结构参数进行优化。

1 风扇参数化设计和模拟

CAD 与 CFD 技术的不断发展完善使得设计分析并行化成为现实,但实体建模和网格生成成为现代设计方法中的一个瓶颈.目前较好解决方法是采用参数化设计方法^[16-18].本文将参数化建模延伸到数值模拟领域,开发了参数化设计模拟系统.风扇参数化设计模拟系统主要由三部分组成(如图 3).

前处理部分完成风扇参数化建模和六面体网格划分,求解器采用三维 N-S 方程进行求解,数据管理部分管理前处理的一些重要几何参数和 CFD 计算结果的数据提取和计算.前处理部分提供友好界面,在界面中输入风扇的结构参数,便可由程序自动进行实体建模、网格分区以及高质量的六面体网格划分和边界条件设定等等,能自动进行批处理模拟.计算完毕后参数化程序可以获

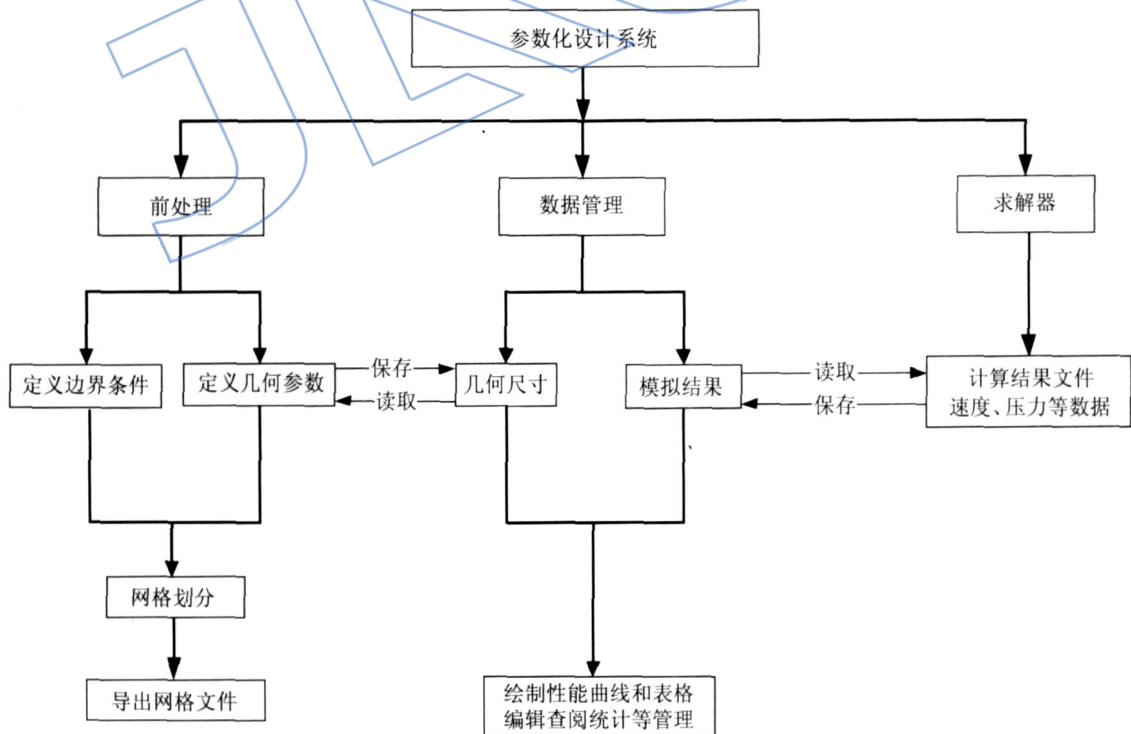


图 3 参数化系统图
Fig.3 Schematic of parametric system

表 1 初始设计的风扇基本参数
Table 1 Baseline design of axial-flow fan

双曲中心线及翼型					
二维扇叶选型	M/ L	P/ L	t/ L	尾缘厚度/ mm	
NACA 四位数	0.062	0.475	0.06 上,0.02 下	0.5	
扇 叶					
叶根安装角/ (°)	扭转角/ (°)	叶根高度/ mm	叶顶高度/ mm	前倾角/ (°)	
52	14	13	18	18	
轮毂和整体					
扇框高度/ mm	叶片数	风扇直径/ mm	轮毂直径/ mm	叶间隙/ mm	转速/ (r/ min)
25	6	80	30	1	4 000

取计算结果中感兴趣的数据,进行相关数据库管理,最后输出性能曲线图和 EXCEL 报表等结果.

关于空气动力设计、风扇数值模拟和实验内容可以参见文献[4],在设计工况点数值模拟值与实验值间的相对误差为 1.5%,而在非设计工况点的相对误差在 8%以内,数值模拟具有较好的预测性.本文根据空气动力设计理论设计了 8025 型风扇(80 mm×80 mm×25 mm),作为参数化分析的基础.表 1 列出了初始设计的风扇结构参数.

表中 M/L 为中心线在厚度最大处的相对纵坐标, P/L 为厚度最大处相对横坐标, t/L 为翼型相对最大厚度.

一般 CFD 网格生成工具并不适用于参数变化较多的模型,本文采用参数化设计方法,按照网格生成工具由下至上网格构建方法快速生成六面体网格(图 4).其优点是不需由 3-D 绘图软件建

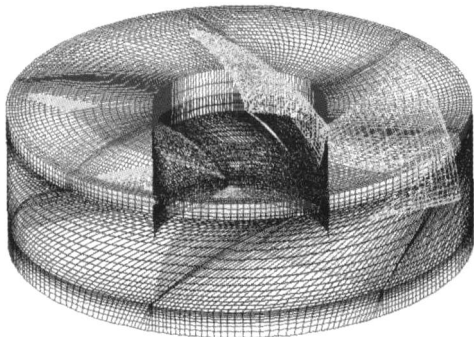


图 4 风扇区域网格
Fig. 4 Fan grid

立模型,同时可节省构建流场网格时间.虽然在前期规划上需要仔细周详的程序结构,但完成后即能迅速随意变更模型的几何设计参数(如叶轮叶片数目、叶轮内外径、叶片安装角度等)且对于模型中流体流动较复杂的几何区域可做局部网格加密,以增加数值模拟精度.参数化建模和网格生成方法所产生的网格形式为结构性网格,相对于非结构性网格而言可以减少网格量,同时在流场计算时,可较快地收敛,节省计算机运算时间.

2 轴流风扇性能参数分析

影响轴流风扇性能的因素主要分为二维翼型、三维叶轮和风扇框架三个层次的几何参数,这些因素的综合影响决定了风扇性能的好坏.深入了解这些因素对风扇的影响有利于对风扇的总体布局进行控制,减少各因素造成的负面影响,提高设计的可行性,从而达到良好的风扇设计性能指标.

本文在已有性能较好的 NACA 翼型基础上仅对叶轮设计展开研究.利用风扇参数化设计和模拟程序改变风扇的性能结构参数(叶片安装角、叶片数、叶片厚度、弦长、扭转角、叶间隙、轮毂比、前倾角和风扇转速),分析其对轴流风扇性能的影响.期望通过分析建立一个完整几何参数影响数据库,为多参数优化提供准备.

风扇无量纲参数定义如下:

流量系数

$$\phi = \frac{q_v}{D^3 \omega}$$

(1)

压力系数

$$\psi = \frac{p}{\rho D^2 \omega^2} \tag{2}$$

其中 q_v 代表体积流量 (m^3/s) , D 代表风扇叶轮直径 (mm) , ω 代表角速度 (rad/s) , p 代表风扇静压升 (Pa) .

2.1 叶片安装角

如图 5 所示,叶根部安装角从 45° 增加到 52° 时,流道面积增加,最大体积流量增加.当安装角增加到 60° 时,其流道面积虽然比安装角 52° 大,但因流体分离点提早发生致使逆向阻力变大,最大流量相对于 52° 增加不多.在最大静压方面,安装角的增加使得静压相对的减少.原因是安装角增大,叶片尾端的压力梯度变化越剧烈,造成出口

静压略减.在最大效率方面,安装角愈大代表叶片越直立,所承受的风阻和损失也越大,效率降低,马达所需的功率必须增加才能使风扇正常运转.

2.2 风扇叶片数

如图 6 所示,在相同转速条件下,叶片数从 6 减为 4 片时,气体从叶轮得到的能量减少,风扇整体的效率、静压、功率都有呈现下降的趋势.当叶片数增加至 8 叶时,虽然可增加气体从叶轮上得到能量,但叶片数太多会对气体形成较多的扰动,增加湍流能量损失,使得风扇效率下降,流量和静压增加不多.因此合理选择叶片数对风扇的性能具有显著的影响.

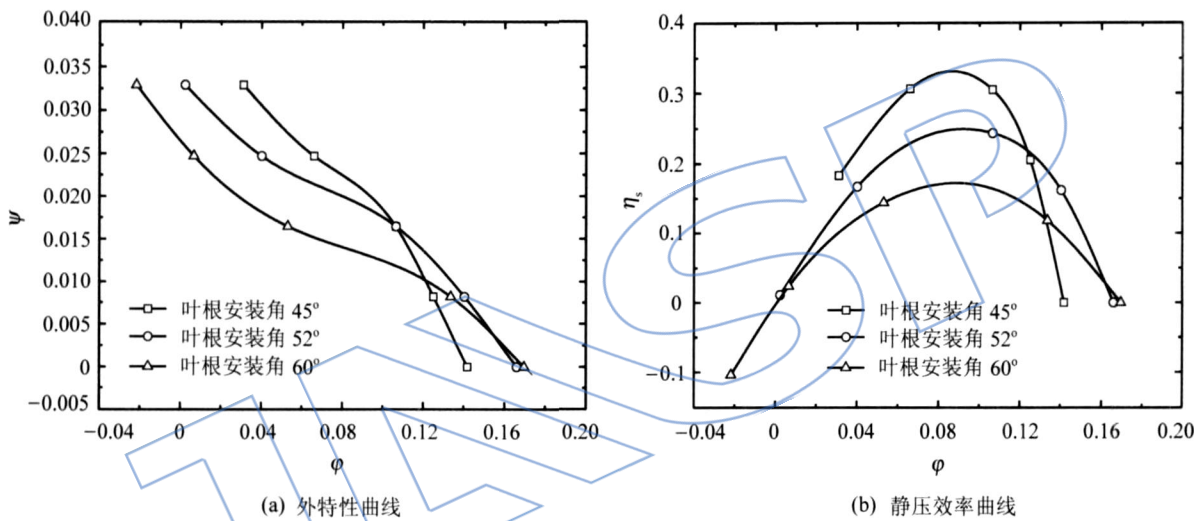


图 5 不同安装角无因次性能曲线比较

Fig. 5 Comparison of non-dimensional character curves with various stagger angles

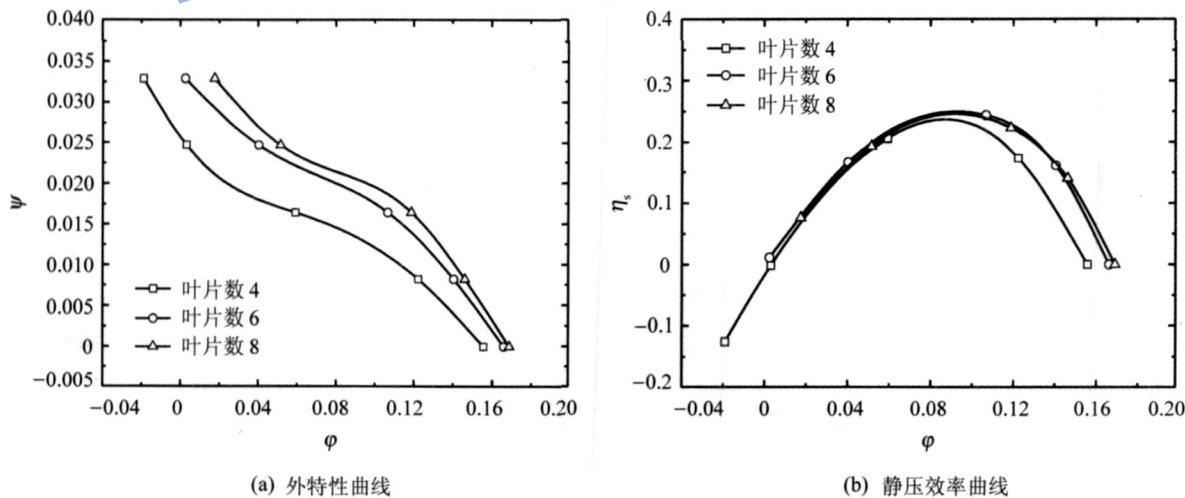


图 6 不同扇叶片数无因次性能曲线比较

Fig. 6 Comparison of non-dimensional character curves with various numbers of blades

2.3 叶片高度

改变叶顶高度,叶根叶片高度不变,中间各截面按线性规律变化.如图 7 所示,若增加叶片高度,叶轮与气体的接触面积增加,气体得到的能量增加,进而使得静压值提升;同时气体与固体边界的摩擦损失也增大,效率维持与初始设计基本相同的水平.而减小叶片高度时,其与外框间的间隙扩大,气体的回流和逆流现象比较严重,气流能量损失增加,同时因接触面减少,气体的压力能与动能降低,造成风扇总体性能下降.由此可知在设计叶片高度时,不仅要考虑到其带动的气流要大,还要避免摩擦损失的增加.

2.4 风扇转速

本文研究了转速在 3000,4000 及 5000 r/min 时的性能曲线,如图 8 所示.这些性能曲线符合一般所知的叶轮转速愈高,所能提供的风量愈越大且风压愈高的观点,同时无量纲特性曲线几乎重复,与风扇相似理论吻合.在叶轮转速 3000 r/min 时,因其转速较低,气体在叶轮的扰动比较缓和,气体的流动损失较少,所以在低流量时效率反而提早到达最高点;当流量逐渐增大时,能量的损失增大,效率呈缓降现象;而在流量系数大于 0.1 后,叶轮已无法提供气体需要的能量,效率骤然下降.

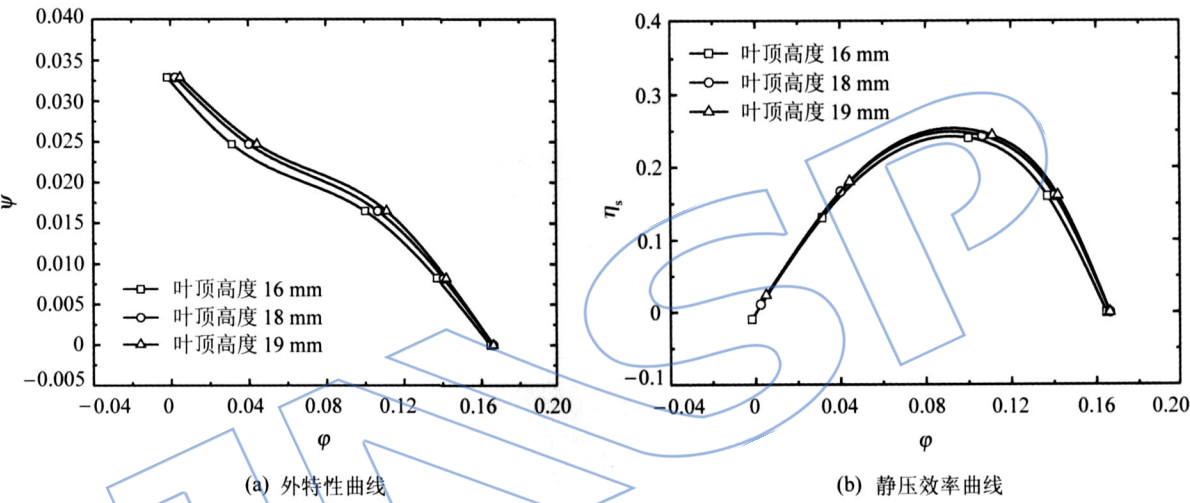


图 7 不同叶片高度无因次性能曲线比较
Fig. 7 Comparison of non-dimensional character curves with various blade heights

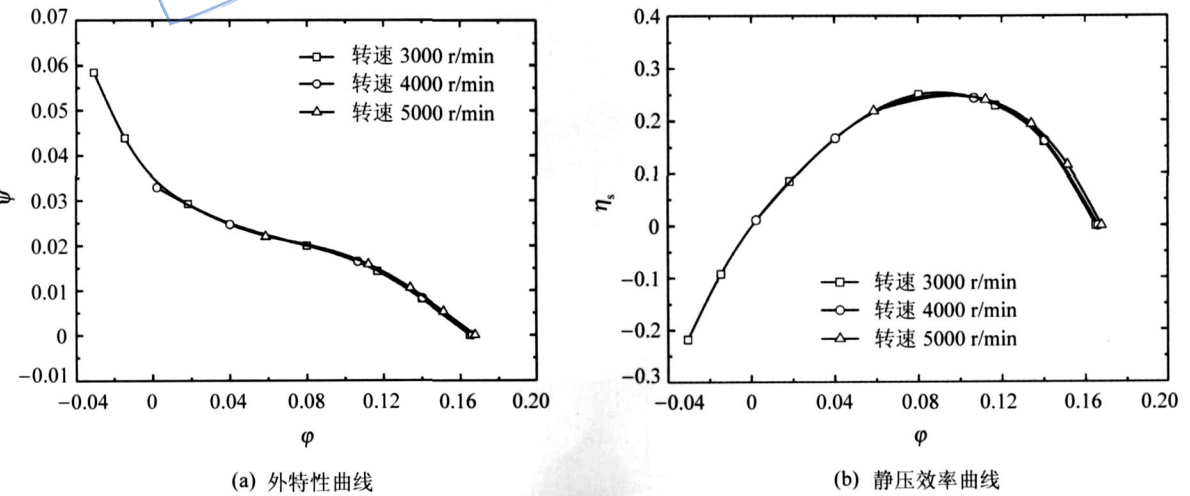


图 8 不同转速无因次性能曲线比较
Fig. 8 Comparison of non-dimensional character curves with various rotation speeds

叶轮转速 5 000 r/min 可获得较高的效率,在大范围的风量下得到较高效率,克服系统阻力的风压也大幅提高,且给气体提供了更多的能量,整体平均性能均优于低转速的情况。

风扇内部流场是很复杂的,各结构参数之间也有着相互影响。本文只改变其中一个参数,了解了每一个参数对风扇性能的影响,实际上,要考虑的是所有参数对风扇的综合影响。但是通过对各主要因素的分析,能够使我们认识到各因素影响风扇性能的原因及大小,能了解风扇内部流动的规律以及流动细节,以便对各影响因素综合考虑之后,抓住影响风扇性能的主要因素并加以改进,从而达到最佳设计方案的目的。

3 轴流风扇优化

本文基于正交实验设计、响应面模型、遗传算法和混合优化算法的组合优化策略,结合风扇特性采用 CFD 方法对有约束条件的风扇进行多参数结构优化。风扇设计优化过程包括:首先参数化风扇分析模型和流场分析;建立解析和整理输出结果的流程;编写结果处理所需的计算程序;在优化主程序中定义风扇模型中已参数化的设计变量以及输出结果中的目标变量;选择优化算法,实现对风扇气动优化问题的集成和寻优。

3.1 优化模型

基于前面参数化分析,改变传统的以设计点效率最高为目标,而是采用类似以整条特性曲线内多个工作点的平均效率^[19-20]为目标函数优化思路,结合电子设备散热特点以最大化特性曲线面积为目标(如图 9),以静压效率不等式为约束条件对风扇进行优化。如公式(3)所示,特性曲线

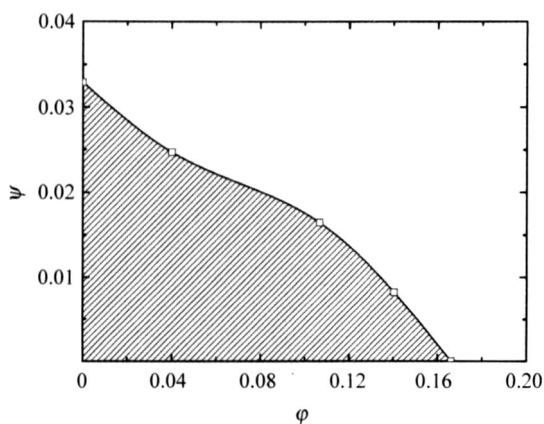


图 9 目标函数

Fig. 9 Objective function

面积越大,在给定的风扇转速和静压范围内,风扇提供给散热器的平均风量越大,风扇和散热器组件热性能提高。由于数值计算的工作量和复杂程度,设计变量定义为 7 个,将问题确定为多变量单目标优化问题。

构造的数学优化模型为

目标函数

$$\text{Max } \bar{\phi} = \frac{1}{\psi_2 - \psi_1} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \phi(\psi) d\psi = f(x) \quad (3)$$

不等式约束

$$\text{Max } (\eta_s) \geq 23\% \quad (4)$$

其中 x 代表叶根安装角、叶顶扭转角、叶片数、叶根高度、叶顶高度、叶顶前倾角和轮毂直径, η_s 代表静压效率。

本文在风扇理论设计的初始设计点(表 1)基础上,在给定风扇转速和空间限制条件下对 8025 型风扇进行优化,因而设计变量的范围都是取在初始设计的 $\pm 30\%$ 内,期望在一个较好解的基础上寻求更优解,达到快速优化设计目的。

3.2 组合优化策略

8025 风扇 CFD 优化设计采用遗传算法和混合整型算法的二阶段组合优化策略^[21],步骤如下:①使用正交实验设计(DOE)构造样本数据分布,探索整个设计空间,获取设计空间的结构化信息;②利用遗传算法(GA)的全局搜索性对构造得到的优化问题进行全局搜索;③利用回归分析法对 DOE 和 GA 得到的历史结果数据构造设计变量和响应的二次响应曲面模型(RSM);④由于遗传算法收敛较慢,在优化后期切换到局部收敛较快的数学优化算法,使用混合整型算法(MOST)对近似模型进行优化,快速得到局部近似最优解;⑤每当基于 RSM 的 MOST 优化算法得到局部近似最优解,全三维 N-S 方程 CFD 求解程序启动,重新计算该点所对应的真实目标函数值,如果不满足收敛条件,用该实际 CFD 计算的结果更新 RSM 模型,重新计算 RSM 模型中的各个系数,对近似模型的校正,然后继续对新的近似模型进行局部寻优,直到找到最终的全局最优解。

3.3 优化结果分析

计算机配置:CPU 为 P4 2.8 G,双核,内存 3 G,单机并行 2 个节点。优化时间 182 h,运行总步数 227。

图 10 是风扇多参数 CFD 优化过程,优化的

第 1 步到第 27 步属于试验设计阶段,找到了近似最优解,相对初始设计平均流量系数改进 9.4%;经过 DOE 分析筛出了两个对目标函数影响较小的设计变量(轮毂直径和叶顶前倾角),优化设计变量减为 5 个.经过 91 步的遗传算法优化(第 28 步到第 118 步),近似最优解得到改善,目标函数改进了 1.8%;第 119 步到第 227 步是混合整型算法和响应面模型及 CFD 相结合的优化综合策略,响应面函数更新三次,MOST 的解比 GA 解得到进一步

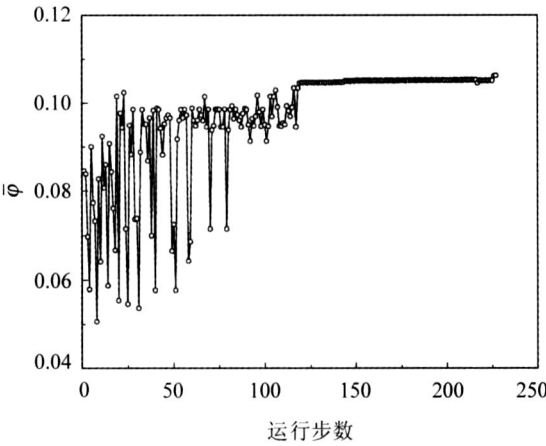
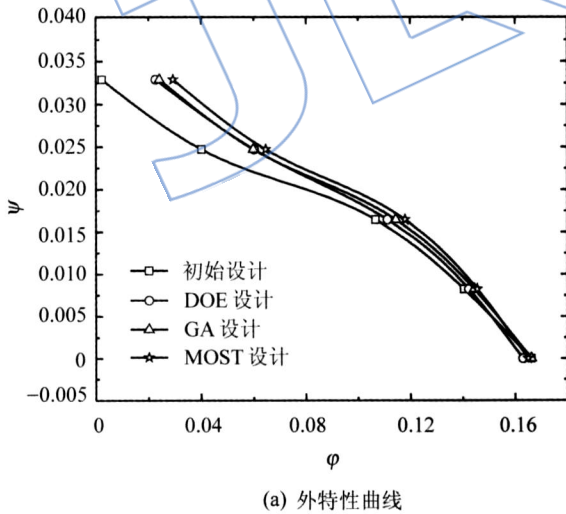


图 10 目标函数优化过程
Fig. 10 Optimization history of objective function



改善,目标函数改进 2.8%,相对初始设计平均流量系数改进 14.5%,具体结果参见表 2.

图 11 阶段最优解比较中可以看到最终最优解的特性曲线面积最大,对应的最大流量和静压也最大,在工作点附近区域在相同的压升下有更大的流量,这表明以面积为目标函数的风扇优化可以起到提高压头和流量的作用.在静压效率方面相对初始设计都有较大改善.

表 2 阶段最优设计解结构参数
Table 2 Geometric parameters of optimal solutions at various stages

阶段解	初始设计	DOE 设计	GA 设计	MOST 设计
轮毂直径/mm	30	28	28	28
叶片数	6	7	7	7
叶根高度/mm	13	11	11.7	13.7
叶顶高度/mm	18	19	19	19
叶顶前倾角/(°)	18	18	18	18
叶根安装角/(°)	52	52	53	50.7
叶顶扭转角/(°)	14	18	17	16
平均流量系数	0.0928	0.1016	0.1034	0.1063

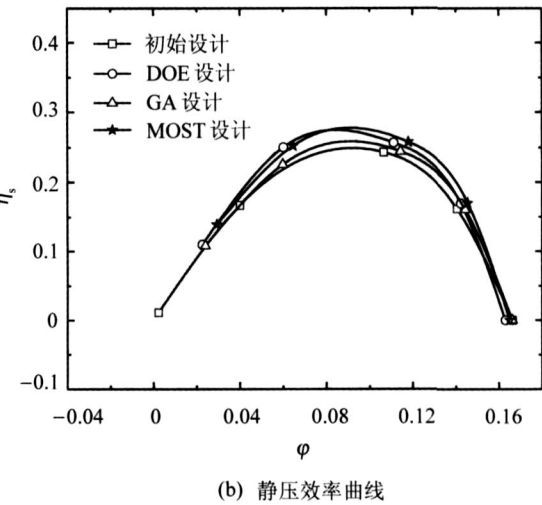


图 11 阶段最优解比较
Fig. 11 Comparison of optimal solutions at various stages

4 结 论

本文采用风扇参数化模型及流场分析程序,定量分析了叶片安装角、叶片高度、叶片数和转速

等因素对轴流风扇性能的影响,建立风扇参数数据库,加深了轴流风扇各主要结构参数在风扇整体性能中影响程度的认识,为提高设计效率和优化设计提供了依据.然后采用并行 CFD 方法,基

于组合优化策略以多工作点平均流量系数最大为目标函数对多参数结构风扇进行快速优化,找到风扇的最佳设计方案.本文所设计的8025轴流风扇的优化结果比初步设计方案的性能提高14.5%.

本文提出的风扇参数化设计和优化方法可以有效地提高风扇性能,大大降低了设计周期和成本,对于同类问题的产品设计模式都有一定的借鉴和启发.

参考文献:

- [1] Eck B. Fans design and operation of centrifugal, axial-flow, and cross-flow fans[M]. Oxford: Pergamon Press, 1973.
- [2] Frank P. Fan handbook: selection, application and design [M]. New York: McGraw-Hill, Inc. 1998.
- [3] 昌泽舟. 轴流式通风机实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 周建辉, 杨春信. CPU 空气强迫对流冷却系统设计[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1592-1597.
ZHOU Jianhui, YANG Chunxin. CPU air forced convection cooling systems design[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1592-1597. (in Chinese)
- [5] Meyer C J. Numerical simulation of the flow field in the vicinity of an axial flow fan[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2001, 36(8): 947-969.
- [6] Lin S C. An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(5): 421-434.
- [7] 王婧超. 涡轮叶片的多学科设计优化系统[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 23-29.
WANG Jingchao. Multidisciplinary optimization design system for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 23-29. (in Chinese)
- [8] 虞跨海. 涡轮冷却叶片参数化建模及多学科设计优化[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1346-1351.
YU Kuahai. Parametric modeling and multidisciplinary design optimization for cooling turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1346-1351. (in Chinese)
- [9] 朱自强. 翼型和机翼的多目标优化设计研究[J]. 中国科学E 辑, 2003, 11: 999-1006.
ZHU Ziqiang. multidisciplinary design optimization of airfoil and wing [J]. Science in China, Ser. E, 2003, 11: 999-1006. (in Chinese)
- [10] 王一伟. 翼型多目标气动优化设计方法[J]. 计算力学学报, 2007, 24(1): 98-102.
WANG Yiwei. Multi-objective optimization of airfoils[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(1): 98-102. (in Chinese)
- [11] Dornberger R. Multidisciplinary turbo-machinery blade design optimization[R]. AIAA-2000-0838.
- [12] Lian Yongsheng. Multi-objective optimization using coupled response surface model and evolutionary algorithm [R]. AIAA-2004-4323.
- [13] Bolton A N. Installation effects in fan systems[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Glasgow: Power and Process Engineering, 1990, Part A, 204: 201-215.
- [14] Sorensen D N. Toward improved rotor-only axial fans — Part II: Design optimization for maximum efficiency[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122: 324-329.
- [15] Sorensen D N. Toward improved rotor-only axial fans — Part I: A numerically efficient aerodynamic model for arbitrary vortex flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122: 318-323.
- [16] Sobieczky H. Parametric airfoils and wings [J]. Note on Numerical Fluid Mechanics, 1998, 68: 71-88.
- [17] Soni B K. Parametric grid generation applicable to design optimization of centrifugal compressor configurations[R]. AIAA-2000-4862.
- [18] Peter A. Multi-disciplinary design and optimization of automotive structures-A parametric approach [R]. AIAA-2000-4706.
- [19] Pierret S. Multidisciplinary and multiple operating points shape optimization of three dimensional compressor blades [J]. Struct Multidisc Optim, 2007, 33: 61-70.
- [20] Hans G B, Kappis W. Practical shape optimization for turbine and compressor blades by the use of PRSQP methods optimization and engineering [J]. Optimization and Engineering, 2002, 3: 395-414.
- [21] YANG Chunxin, ZHOU Jianhui. Multi-disciplinary design optimization of the plate fin heat sink[C]// Thermal Challenges in Next Generation Electronic Systems. Rotterdam: Millpress, 2007: 343-350.