

CPU 轴流风扇参数化设计模拟及其应用

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 100083)

摘 要: 基于传统的风扇设计方法, 提出了风扇参数化设计和流场分析程序. 采用 VB 开发了 CPU 轴流风扇空气动力设计软件和风扇参数化设计模拟软件, 使用者只需输入风扇的基本结构参数, 便可由程序自动生成高质量的六面体网格, 能自动进行批处理模拟和结果后处理. 最后采用该软件快速对风扇的结构参数进行性能分析, 加深了 CPU 风扇各主要技术参数在风扇整体性能中影响程度的认识, 为进一步的优化设计提供了条件. 实践证明该方法能大大提高风扇设计者的工作效率, 具有重大工程应用价值.

关键词: 轴流风扇; 气动设计; 参数化设计; 计算流体力学

中图分类号: V231 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 08-1526-06

Parametric Design and Numerical Simulation of CPU Axial-Flow Fan with Application

ZHOU Jian-hui, YANG Chun-xin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on conventional design concept of the fan, the procedure of the parametric design and numerical simulation with application to the axial-flow fan is developed. The procedure and aerodynamic design process of the CPU fan are embodied into parametric design and numerical simulation software utilizing VB language as well as axial-flow fan aerodynamic design software, which can generate high quality HEXA mesh automatically. The numerical simulation can also be performed continuously by batch program and the results about performance curve of the fan can be characterized without resorting to anyone. At last geometry parametric investigations achieved quickly by the procedure are carried out to illustrate the effect of various design parameters on the performance of the fan by choosing one parameter at a time as the control variable, which can provide a more in depth understanding of the flow characteristic of the fan and deep understanding for the optimum of the fan. The procedure can be adopted widely to help engineers to improve work efficiency in practice.

Key words: axial-flow fan; aerodynamic design; parametric design; computational fluid dynamics

1 引言

随着科技的进步, 电子产品的功能越来越强. 但电子组件体积越来越小, 散热已成为电子组件和计算机等难以解决的问题之一. 为了快速排出热量, 常采用风扇散热器组件. 利用风扇强制对气流对电子组件降温冷却, 以保持整个系统正常运作和增加产品的稳定性, 这是一个经济且有效的方法. 因此如何快速设计制造出体积小、效率高、噪音低、可靠性高和生命周期长等性能优良的风扇是一项艰巨且重要的课题.

传统的经验方设计法^[1~3]可概述如下: 轴流风扇扇叶主要采用经验公式推导进行 CAD/CAM 设计, 然后利用 CNC 加工雕刻出外形进行风洞实测 (如图 1). 虽然实

验能够快速获得风扇性能特征曲线, 但是浪费了时间和材料, 而且一次实验所能得到的资料也仅仅是风扇性能的好坏, 无法获得叶片间的流场特性, 并不能对风扇设计工程师提供任何详细的改进信息. 如果性能尚未达到要求时, 则需要重新进行反复流程, 这种传统方法是一种低效率的设计方法, 同时也会造成整个设计成本的增加, 降低了产品市场竞争力.

近些年来随着计算机运行速度加快, 风扇设计者开始采用数值模拟方法^[4~6]进行扇叶的先期设计与分析 (图 2). 单个设计分析周期分别为: CAD 画图 导出 STL 文件至前处理软件中 在前处理软件中划分网格、确定初始及边界条件 求解器进行计算 计算结果的整理. 以目前的计算机运算速度, 求解过程所需时间已经降低

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2008-05-18

基金项目: 国家自然科学基金重点基金 (No. 50436010)

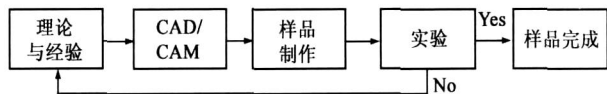


图 1 经验设计方法

很多,而最困扰设计者的就是网格产生极为不便.对风扇使用自动非结构四面体网格很难处理好扭曲型叶面和叶顶间隙网格分布问题,而六面体网格生成需要丰富的网格生成经验和消耗大量时间.另外一个风扇需要设置的最基本参数如下表 1 所示,如果每一项的变化都要重新 CAD CFD 的话,工作量无疑是非常巨大的.

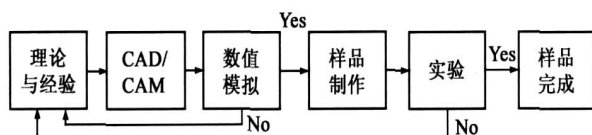


图 2 一般数值模拟方法

针对上面情况,本文在已有风扇设计和数值模拟的基础^[6]上进一步展开工作,提出了风扇参数化设计和模拟方法(图 3):按照网格生成工具的网格生成规则,开发了基于 VB 的轴流风扇设计和模拟软件,用户直接键入风扇结构参数,在不需要产生 CAD/ CAM 文件的前提下即可产生风扇网格模型,进行数值运算,快速获得所需信息,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、风扇直径和安装角等)对风扇性能的影响,可以缩短整个设计过程时间并提升风扇竞争力、降低研发成本等.

表 1 风扇基本参数

中心线及翼型	扇叶	HUB(轮毂)	整体
中心线选型	尾缘厚度	HUB 直径	扇框高度
二维扇叶选型	安装角	HUB 高度	叶片数
M/L (厚度最大处相对纵坐标)	位置	HUB 位置	风扇直径
P/L (厚度最大处相对横坐标)	扇叶高度		叶顶间隙
t/L (翼型相对最大厚度)	前倾角		设计转速

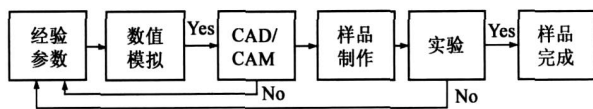


图 3 参数化设计和数值模拟方法

2 轴流风扇参数化设计和模拟

本文首先介绍参数化设计模拟的方法和原理,其中风扇叶片气动设计、风洞实验、数值模拟与特性分析三部分内容参见文献^[6].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.在此阐述与参数化设计相关的内容.

2.1 二维翼型参数化设计

二维翼型的产生是三维叶片成型的基础.如何快速产生高效率的翼型,是许多研究人员及设计者所追求的目标.本文通过采用翼型参数设计法设计 NACA4 位数系列翼剖面,作为三维叶片的基础,能快速设计出性能良好的风扇. NACA4 位数系列翼型产生方式是先决定中心线的位置,再将上下弦依切线坐标取相同厚度,并沿中心线延伸方向将两抛物线相切连接,而在前缘则以切圆弧处理.因此 NACA4 位数系列翼型共需三个参数 (P/L 、 M/L 和 t/L) 就可以决定其外型.图 4 所示为参数 $P/L=0.475$ 、 $M/L=0.062$ 、 $t/L=0.08$ 二维翼型示意图.可以看出其弯曲度不大,较适合在低速运转的风扇.

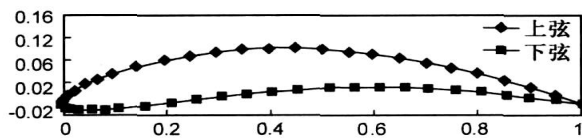


图 4 二维扇叶外型

2.2 风扇叶轮实体造型

运用风扇空气动力设计理论及翼型参数设计法设计出风扇叶片的结构参数和气流参数后,在 7 个指定的柱截面上按设计得到的扇叶安装角、弦长和扇叶的前倾角等通过坐标变换将各个截面二维翼型的空间直角坐标转换成柱面坐标,空间平面曲线转换成三维曲线.同时向上堆栈并旋转叶型(图 5),旋转叶型轴心设定在叶片前缘的垂直轴上.最后以 CAD/ CAM 文件绘出三维叶轮(图 6).

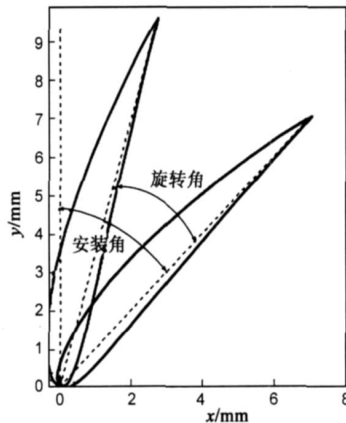


图 5 二维翼型安装角和旋转角

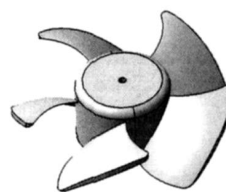


图 6 9238 风扇叶轮

2.3 参数化模型网格生成

一般 CFD 软件本身所提供的网格生成工具并不适用于参数变化较多的模型,本文采用参数化建模方法,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.其优点是不需由 3D 绘图软件建立模型,同时可节省建构流场网格时间.虽然在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

格加密功能,以增加数值模拟精度.参数化建模和网格生成方法所建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,降低计算机运算时间.以下将对风扇的整体流场部分、叶轮部分、进出口区域部分的网格作相关说明.

本文选用六面体结构化网格建立风扇网格模型,以圆柱坐标系建立单个周期性风扇叶片间流道;为了能模拟真实风扇物理现象,在风扇周围的空间建立计算网格,其中包含风扇叶顶间隙层、进流道、出口流道和径向内流道等区域.入口区域长度是风扇厚度的16倍,而出口风口长度是风扇厚度的50倍.为方便观察风扇本体的流场变化,在风扇入口、风扇出口、叶片表面附近与翼端间隙等压力变化较大的地方增加网格,以确保数值模型的计算质量.风扇进出口的网格是以渐疏的方式设定,最靠近风扇的网格距离是1mm;而在叶片表面上为了能观察速度边界层变化,壁面网格的间距是0.2mm;为了能捕捉叶顶间隙中的回流,将叶顶间隙区域径向画分成四层.最后通过旋转复制单流道网格,同时在中心圆柱区域采用O-grid方法生成最后一部分流体网格.全流道整体网格如图7所示,网格数共52万左右.

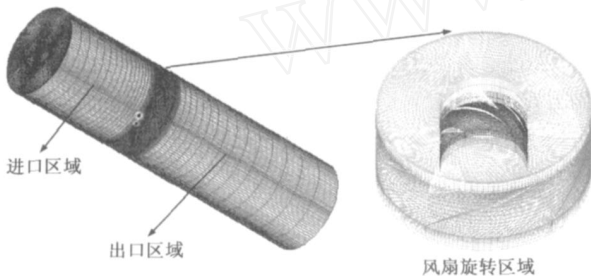


图7 风扇全流道网格

3 轴流风扇参数化设计模拟软件开发与实现

基于设计原理和方法,本文采用VB语言分别开发了轴流风扇空气动力设计软件以及风扇参数设计和模拟软件.

使用者根据设计要求由轴流风扇空气动力设计软件设计出风扇的基本参数(如安装角、弦长),并且获得初始设计风扇的基本性能参数(压力、流量和效率).然后根据经验调整风扇几何参数,输入到风扇参数设计和模拟软件,即可几分钟内自动生成所有单流道/全流道六面体网格,能自动批处理运算、自动输出参数、自动生成solidwork模型、自动获取数据结果画出静压和流量特性曲线(pQ线)并加以统计等,在不需产生CAD文件,不需要前处理的情况下进行数值运算,能极大地提高了工程师的工作效率.

下面分几个部分讲述轴流风扇参数化设计和模拟软件.

3.1 大体设定

设定风扇外形上的尺寸,还有计算所需的一些基本设置.由于是批处理计算,还需设置压力范围和计算点数(如图8).

3.2 安装设定

使用7个翼型组合叶片的方法,可以分别输入7个翼型的安装参数或者用简单的等差方式输入.如果是平滑过渡的扇叶,用简单输入就可以了,但是类似锯齿状或其他不规则概念扇叶就要用到复杂输入了(如图9).由垂直高度和扇叶安装角可以得到扇叶弦长,出口距离是用来调整扇叶的轴向重心高度,前倾角使扇叶沿旋转角度方向倾斜.

3.3 翼型设定(简易)

翼型设计包括中心线设计和翼型的选择,在简单翼

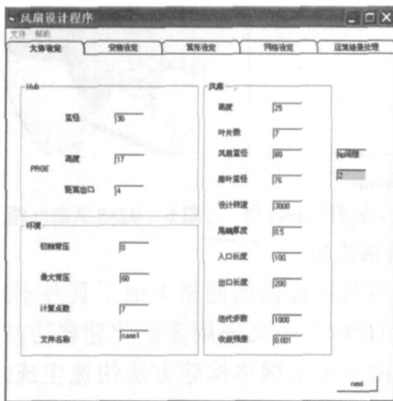


图8 大体设定



图9 安装设定



图10 翼型设定(简易)

型设计中,所选中心线(单圆弧和双曲线等)和翼型同时作用在7个翼型截面上(如图10).

3.4 翼型设定(复杂)

在简单翼型设定页面点击“advanced configuration”按钮,进入复杂翼型设计页面,原理和前面相同,但可以分别对7个翼型剖面进行设置(如图11).

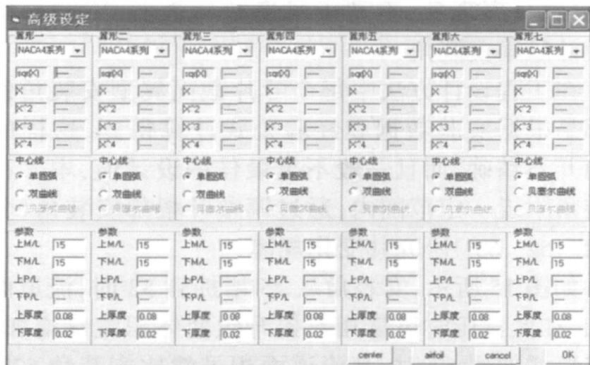


图 11 翼型设定 (复杂)

在简单翼型设置和复杂翼型设置页面上都可以打开三个图示窗口,分别画出中心线、所选翼型、中心线与厚度复合后的翼型,如图 12 是各截面翼型中心线为分别定义不同的 M 和 P 值的双曲线,翼型使用 NACA4 系列翼型所复合的结果。

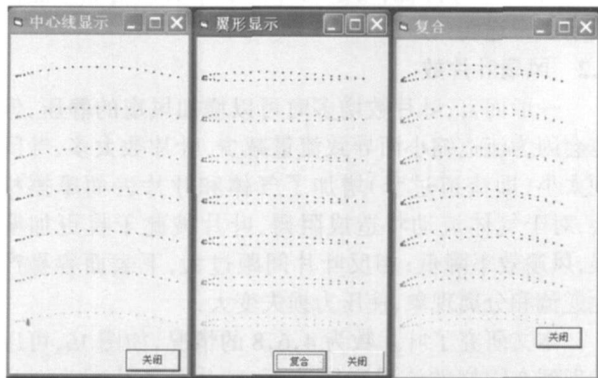


图 12 翼型

3.5 网格设定

各个局部网格可以实现微调,近扇叶的地方可以调密一点,次要区域调疏一些。网格对整体的计算结果有很大的影响,建议在开始时针对同一问题作网格不同设定和实验值的比较,为后续的模拟积累经验,以增加数值模拟准确性。另外,使用 solidwork/proe 二次开发技术生成风扇的 3D 文件,同时采用 excel 文件记录各类参数和翼型坐标(如图 13)。当所有的设定都完成后,使用者只需要点击右下角的单流道或全流域,VB 便可通过批处理程序调用 CFD 代码分别生成周期性和全流道的风扇网格计算模型,并进行相应工况点的连续计算,同时进入结果后处理部分。

本文测试了不同扇叶数目风扇模型,无论使用任何软件,三个不同风扇模型的自动网格产生需要的时间至少每个都在十分钟以上,而且还不包含先前需要产生的 CAD 文件。另外采用自动网格生成也不一定一次就可以完成需要的网格质量,而上述三个风扇模型使用本文的方法可以在不生成 CAD 的情况下,直接产生六面体网格,三个网格合起来所需要的时间约十

分钟,大大缩短使用者的开发时间。

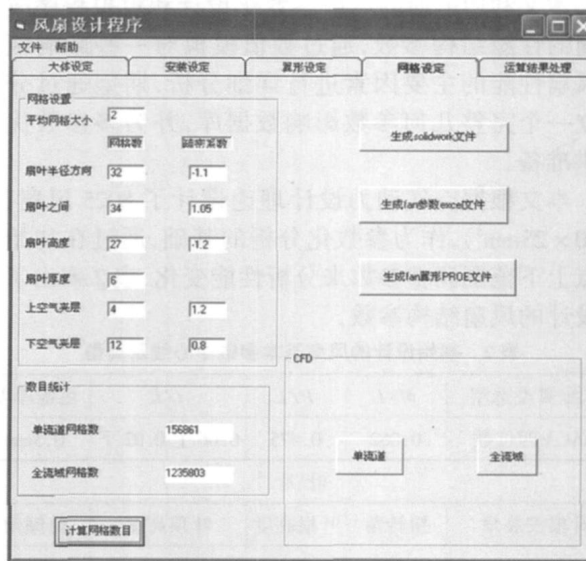


图 13 网格设定

3.6 运算结果后处理

进入后处理部分,可以看到当前工况点的计算状态,如压力、迭代步数和进度条显示。同时在主窗口会显示已经计算工况点的 pQ 曲线。当计算结束后可以生成计算结果 EXCEL 文件与实验数据进行比较(如图 14)。

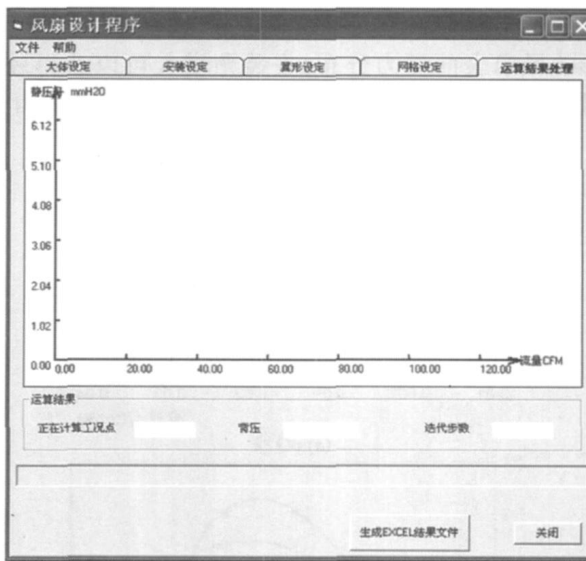


图 14 运算结果后处理

4 轴流风扇参数化设计和模拟软件应用

影响轴流风扇性能的因素很多,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。深入地了这些因素对风扇的影响有利于控制风扇的总体布局,减少各因素造成的负面影响,提高设计的可行性,从而达

到良好的风扇性能指标。

本文利用前面的风扇参数化设计和模拟程序改变风扇的性能结构参数,通过数值模拟对一些影响轴流通风扇性能的主要因素进行详细分析。期望通过分析建立一个完整几何参数影响数据库,并为多参数优化提供准备。

本文根据空气动力设计理论设计了 8025 风扇(80 ×80 ×25mm³),作为参数化分析的基础。通过在初始设计点上下范围调整参数来分析性能变化。表 2 列出了初始设计的风扇结构参数。

表 2 初始设计的风扇基本参数中心线及翼型

二维翼型选型	M/L	P/L	t/L	尾缘厚度	
NACA 四位数	0.062	0.475	0.06 上 0.02 下	0.5mm	
叶片					
叶根安装角	扭转角	叶根高度	叶顶高度	前倾角	
52°	14°	13mm	18mm	18°	
HUB					
叶框高度	叶片数	风扇直径	轮毂直径	叶间隙	设计转速
25mm	6	80mm	30mm	1mm	4000rpm

4.1 叶片安装角

当翼型剖面决定后,以该翼型前缘为中心旋转一定角度,其弦线与水平线夹角即为安装角(如图 5)。叶片安装角是轴流风扇一个重要的参数,安装角的大小会影响风扇表面压力分布。安装角增大可以获得较大流量,但角度过大,上表面处压力提升太大,会产生回

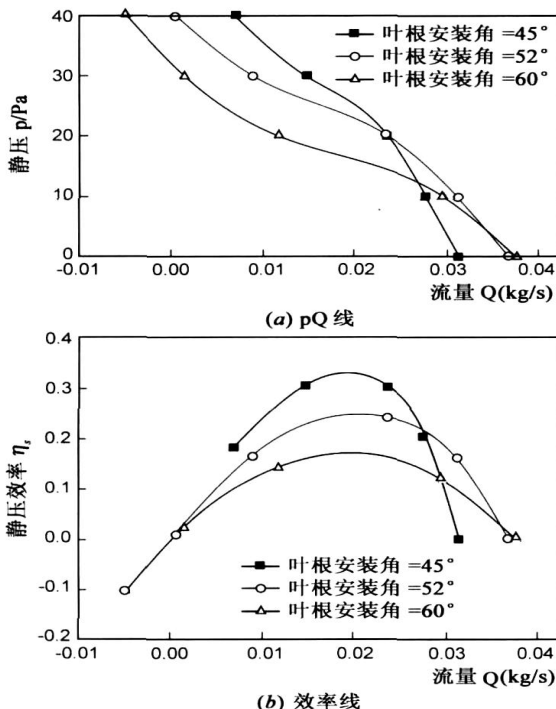


图 15 不同安装角性能曲线比较

流,导致分离现象,不利于风扇整体效益。因此必须合理设计风扇安装角。

在工程设计方法中每个叶片截面翼型安装角设计值都是根据实验数据和经验公式计算得到,这样的安装角并不精确,而且一般不是最佳的设计值。本文在原安装角附近一定范围内,通过调整叶根部安装角(分别为 45°、52°、60°)研究其变化规律。

如图 15 所示,安装角从 45°增加到 52°时,流道面积增加,在低背压时风量相对提升致使体积流量增加。当安装角增加到 62°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。

4.2 风扇叶片数

一般而言,叶片数增多时可以增加风扇的静压,但也会因为流道缩小而导致流量减少。叶片数太多,叶间距太小(即流道过窄)增加了气体和叶片表面摩擦机会,对于气体流动将造成阻碍,叶片彼此干扰更加明显,风扇效率降低;相反叶片间距过大,下表面容易产生逆流和分离现象,使压力损失变大。

本文研究了叶片数为 4, 6, 8 的情况,如图 16,可以发现到在同样的流量和转速下,叶片从 6 片减为 4 片

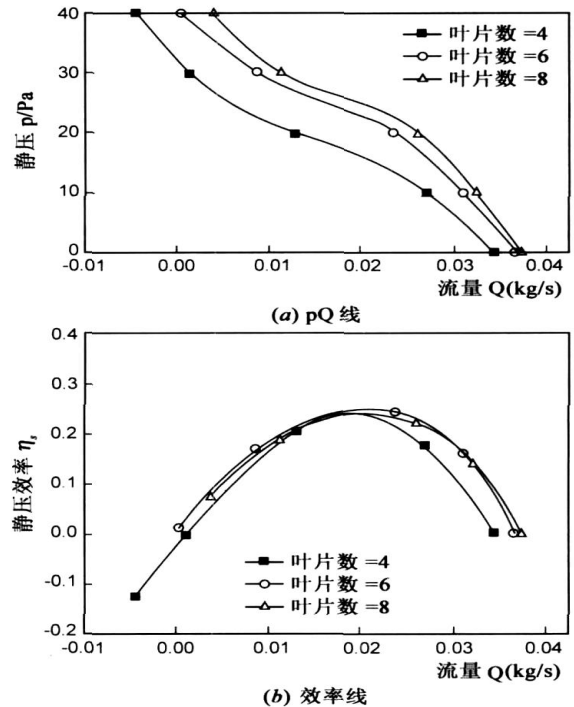


图 16 不同扇叶片数性能曲线比较

时,气体从叶轮中所得到的能量减少,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。

风扇内部流体流动是很复杂的,各结构参数之间相互影响。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。

5 结论

本文阐明了风扇参数化设计原理和方法、软件开发和实现及其应用,下面对关键问题做如下总结。

(1) **翼型参数化设计** 翼型参数化设计是风扇参数化设计的基础,以往风扇的设计不是从翼型内部原理出发而仅仅是从 profiliV2 软件中直接导出翼型坐标,然后进行风扇空气动力设计,这种方法受到的限制很多。首先,profiliV2 软件收集的是几十年来各国机翼的翼型资料,是适用于高马赫数下以产生大升力为目标计算出来的翼型。而对风扇而言,雷诺数相对较低,同时以提供大流量、减少翼尖绕流和低压分离为目标。其次,profiliV2 软件不能对单圆弧、双曲线中心线等进行操控,传统方法已经不能满足于目前风扇精益求精的现状。

(2) **参数化设计原理和方法** 本文提出了轴流式风扇参数化设计和流场分析程序,利用网格生成工具由下向上网格产生规则,以风扇结构参数为变量发展了一种快速生成轴流风扇六面体结构网格的方法。这种方法比起传统方法有许多的优点:当改变风扇结构参数时,可以很快地生成网格并进行数值模拟,该网格结构能够较好地捕捉风扇内部复杂的流动细节。本文的参数化设计方法不仅适用于本文讨论的轴流式风扇,对任何机械设计及模型分析均可采用。

(3) **软件开发和实现** 开发了 VB 风扇参数化设计和模拟软件,设计者只需要输入几个风扇基本结构参数,便可以在无人干预的条件下自动生成六面体高质量网格,能够自动进行批处理运算,自动生成 SOLIDWORK/PROEM 几何模型,自动输出风扇结构参数和画出 pQ 线。实践证明该方法可以大大减轻工程师的设计

压力,在具体应用中具有重大使用价值。

(4) **风扇主要影响因素的分析** 采用本文开发的软件考察安装角、叶片数等结构参数对轴流风扇性能的影响,加深了轴流风扇各主要技术参数在风扇整体性能中影响程度的认识,为这些主要因素进一步的优化设计提供了改进的趋势,为提高设计效率提供了可能。

下一步工作拟开展基于组合优化策略^[7]采用并行 CFD 方法以多工作点平均流量最大为目标函数对轴流风扇进行多参数结构优化,找到风扇的最佳设计方案。

参考文献:

- [1] Eck, Bruno. Fans: Design and Operation of Centrifugal, Axial-Flow, and Cross-Flow Fans [M]. Oxford: Pergamon Press, 1973.
- [2] Frank P. Bleier. 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] 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.
- [5] Sheam-Chyun Lin. An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(5): 421 - 434.
- [6] 周建辉, 杨春信等. CPU 空气强迫对流冷却系统设计 [J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1592 - 1597.
Zhou Jian-hui, Yang Chun-xin. CPU air forced convection cooling systems design [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1592 - 1597. (in Chinese)
- [7] Yang Chun-xin, Zhou Jian-hui. Multi-disciplinary design optimization of the plate fin heat sink [A]. Thermal Challenges in Next Generation Electronic Systems [C]. Millpress. Rotterdam, 2007. 343 - 350.

作者简介:



周建辉 男, 1976 年生于江西。北京航空航天大学人机与环境工程专业博士。主要研究方向为计算传热学和流体力学等。
E-mail: yzhou130@126.com

杨春信 男, 1965 生于湖南。北京航空航天大学人机与环境工程专业博士生导师。主要研究方向为多相流传热、飞机环境控制与安全救生、人机与环境工程等。