

文章编号: 1000-8055(2000) 02-0147-04

# 前弯动叶片变工况性能的估计方法

刘富斌 钟芳源 杜朝辉

(上海交通大学 动力与能源学院, 上海 200030)

摘要: 在低速轴流风机中, 前弯动叶和常规径向直叶片比较, 具有提高效率 4~5%, 增加变工况范围 15~20% 的优良性能。本文在发展完善“双激盘”理论模型的基础上, 采用平板圆弧叶型实验数据, 加入了攻角损失的计算, 并将其用于前弯动叶片设计工况以及变工况的性能估计。在设计工况下和实验结果比较, 沿叶高效率的最大误差为 1.5%, 沿叶高总压的最大误差为 1.8%, 两参数沿叶高的流量平均误差分别为 1% 和 1.5%。在稳定工况范围内按流量平均计算的效率误差和总压误差均在 2% 以内。计算结果表明, 该法可用于估计变工况下弯掠动叶片的性能, 是一种简单、明了、适合工程需求的方法。

关键词: 动叶片; 性能; 方法

中图分类号: TH43

文献标识码: A

## 1 “双激盘”理论模型

在低速轴流风机中, 相对于径向叶片, 采用弯掠叶片是抑制二次流损失, 扩大稳定工作范围的一个有效途径<sup>[1]</sup>。文献[1, 2]测试、计算, 比较了径向叶片与弯掠叶片的运行性能。本文的工作是建立在上述实验和理论研究的基础上, 利用“双激盘”理论模型, 采用修正的 Howell 损失模型作为损失估计模型, 然后利用 Wallis 的叶型损失模型<sup>[3]</sup>替代原程序中叶型阻力损失系数和叶型升力系数的经验估计值进行变工况的性能估计。

本文采用“双激盘”理论模型进行流场的计算。“双激盘”理论模型是一种计及弯掠动叶的叶片力影响而提出的简化的流场计算方法, 在第一激盘上, 叶片力全部集中参与做功, 而且还集中了动叶的全部气流损失; 第二激盘上则是在加功量不变和无流动损失的前提条件下, 释放全部径向力。其计算结果可以反映动叶出口的气动参数, 从而用来计算效率和加功量等性能参数<sup>[1]</sup>。对损失的计算是由修正的 Howell 损失模型而得到的:

$$C_x = k_0 [\bar{C}_{xp} + k(k_s \bar{C}_{xs} + \bar{C}_{xa})] \quad (1)$$

式中:  $\bar{C}_{xp}$ ,  $\bar{C}_{xs}$ ,  $\bar{C}_{xa}$  分别表示叶型阻力系数, 二次流

阻力系数和环端面阻力系数。 $k_0$ ,  $k$ ,  $k_s$  分别是对旋转、三元流动损失和非常规(弯掠)影响的修正系数, 其详细修正参见文献[2]。

## 2 损失模型的修正

本文在修正的 Howell 损失模型的基础上, 采用 Wallis<sup>[3]</sup>叶型升—阻力实验曲线进行变工况下平板圆弧叶片叶型的升—阻力系数估计, 利用文献[4]给出的近似方法估计叶型在非稳定工况下的损失。这样该方法就可以比较全面地用于估计前弯动叶片的性能。

变工况下弯掠动叶片的攻角损失估计: Wallis 叶型实验数据(参见图 1)给出了平板圆弧叶片在二元流动的情况下当攻角  $\alpha$  变化时叶型升力系数和阻力系数的变化规律。其中, 弯曲度定义为叶型最大挠度和弦长的比值, 以百分数表示。对不同的弯曲度 (Camber), 其规律是不同的。在设计工况附近, 对同一攻角, 随着弯曲度的增大, 阻力系数和升力系数均增大; 当流量偏离设计流量并减小时, 攻角  $\alpha$  增大, 叶型升力系数和阻力系数均增加, 但存在一最佳弯曲度, 此时叶型阻力系数增加的斜率最小。计算时只要在给定工况下计算出攻

收稿日期: 1999-04-13; 修订日期: 1999-07-28

基金项目: 高等学校博士点学科专项基金资助项目

作者简介: 刘富斌(1972-), 男, 上海交通大学动力与能源学院

角,就可以用此来估计叶型的升—阻力系数。

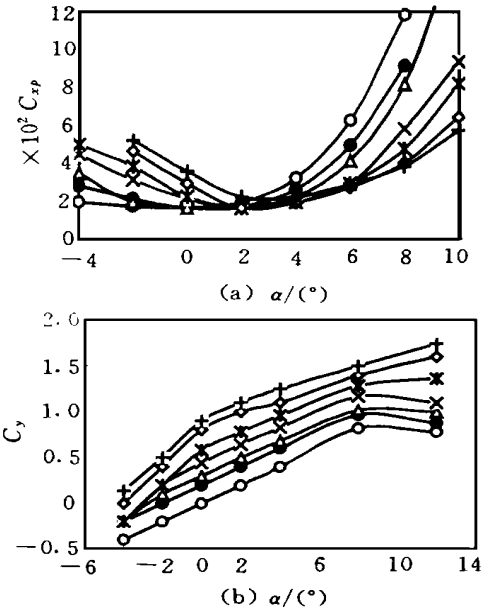


图1 Wallis 平板圆弧叶型实验数据

(○—平板 ●—2% 弯曲度 ×—4% 弯曲度  
\* —6% 弯曲度 ◇—8% 弯曲度 + —10% 弯曲度)

叶型在非稳定工况下损失的估计: 一般可把叶型阻力系数  $C_{xp}$  小于等于最小损失系数 2 倍的工作范围称为叶型的稳定工作区域。当超过此范围时, 叶型将工作在非稳定工况, 叶片吸力面上附面层迅速增厚且产生分离, 导致损失剧烈增加, 叶型效率降低。计算过程发现, 即使在风机的稳定工况下, 由于叶片设计的某些原因, 在某些基元叶片上也会出现攻角偏离设计工况过大的现象。这时, 为保证风机稳定工作区域计算结果的稳定与可靠, 我们参考轴流压气机变工况性能计算的经验, 依据文献[5]给出的方法来估计损失, 如图 2 所示

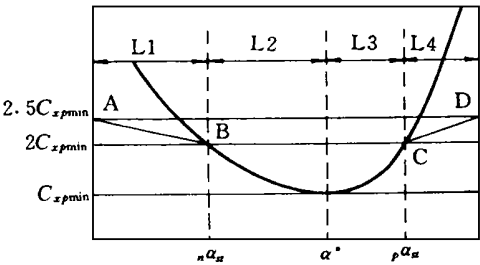


图2 非稳定工况下损失的估计模型( $L_1 = L_2, L_3 = L_4$ )

(图中曲线表示图3Wallis 叶型损失中的一条或经插值得出)。计算方法为: 首先确定在设计工况下的叶型损失系数, 这由修正的 Howell 损失模型得到。随着流量的改变, 叶型损失逐渐增大到 2 倍

$C_{x\text{pmin}}$ , 此时的攻角定义为正负失速攻角  $\rho\alpha_t, n\alpha_{st}$ , 在图中这两个点由 B 和 C 表示; 对于超过正负失速攻角范围的基元叶型, 采取攻角增大一倍, 叶型损失增大为 2.5 倍  $C_{x\text{pmin}}$  的办法在曲线上确定 A 和 D 两点, 连接直线 AB, CD, 从而利用这两条直线来近似估计叶型损失。

有必要指出得是: 叶栅来流的  $Ma$  数和  $Re$  数对流场、叶栅特性乃至整机特性都是有影响的。对低压低速的风扇, 它们的影响在这里可忽略不计。

3 计算结果及分析

用于设计工况计算: 文献[2]指出, 叶型重心联线为圆弧的前弯动叶片的最佳前弯角度的推荐值为  $8 \sim 12^\circ$ ; 相对于常规直叶片, 其效率增高值和噪声降低值分别为 3.2% 和 4.5 dB(A)。在数值模拟时取前弯角为  $8.3^\circ$ ; 设计工况时的流量为  $14000 \text{ m}^3/\text{h}$ , 转速为 1441 r/min, 叶顶和叶根的半径分别为 0.298 m 和 0.119 m, 前弯动叶片数为 7。其它输入参数可参考文献[1]。

图 3 是设计工况下动叶片效率  $\eta$ , 总压升  $\Delta p^*$ , 动叶片出口轴向速度  $V_{z2}$  和动叶片出口相对气流角  $\beta_2$  沿叶高的分布规律。其中对前弯动叶片和常规直叶片的实验和理论计算进行了比较 (前弯叶片的弦长比直叶片大 20%), 利用这些结果就可以确定前弯动叶片的性能。

在设计工况下, 由于对计算模型进行了修正, 动叶效率、总压以及出口轴向速度的理论计算值要比文献[1]的好。与直叶片比较表明, 前弯叶片沿叶高损失小, 效率高, 做功能力强, 显示出一定的优越性。同时说明该方法修正后可以更准确地估计设计工况下的动叶片性能。图中  $\zeta = (r - r_t) / (r_t - r_h)$  为相对叶高,  $r_t$  和  $r_h$  为叶顶和叶根半径。

用于变工况计算: 变工况情况下, 对常规直叶片和前弯角为  $8.3^\circ$  的前弯动叶片进行了变工况的性能计算 (其它参数相同), 可以得到了不同流量 (变工况) 下两种叶片的攻角  $\alpha$ 、落后角、效率、损失系数以及总压升等参数沿径向的变化。计算结果表明这种估计方法可以得到稳定运行工况下较好的损失估计值。图 4 是在相对半径为 0.2, 0.5 以及 0.8 处的特征流线上阻力系数  $C_x$  和升力系数  $C_y$  随着攻角  $\alpha$  的变化。由图 4 可知, 对常规直叶片而言, 稳定运行工况 (从最高效率点到旋转失速前的稳定工况点) 的攻角约在  $1 \sim 5^\circ$  左右, 对前弯动叶而言, 攻角约在  $-1 \sim 7^\circ$  左右, 将攻角

转换成流量, 前弯动叶片比常规直叶片增加约为 15%~20%, 这的确是非常优越的。计算表明, 在叶顶处, 常规直叶片的升力系数随攻角增加而增加的幅度比前弯动叶片的大, 所以在其他参数不变的条件下, 前弯动叶片的做功能力有所下降。

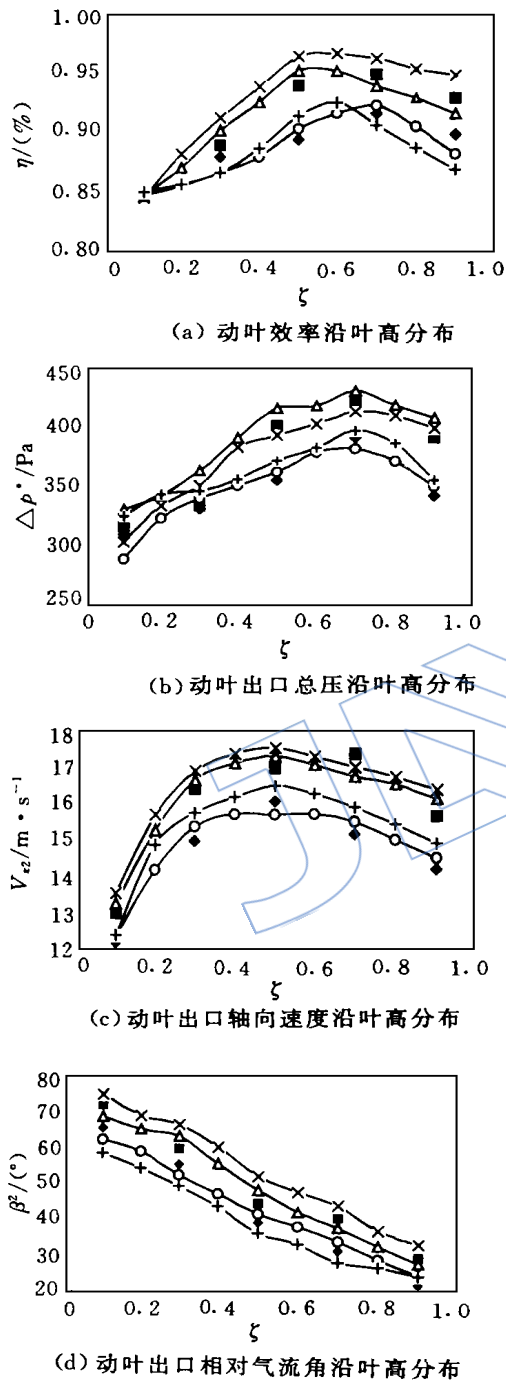


图 3 设计工况下计算和实验比较  
(◆—直叶片(实验) ○—直叶片(计算)  
+ —直叶片(计算<sup>[2]</sup>) ■—前弯叶片(实验)  
×—前弯叶片(计算) △—前弯叶片(计算<sup>[2]</sup>)

与常规直叶的变工况(效率、总压升)的计算与实

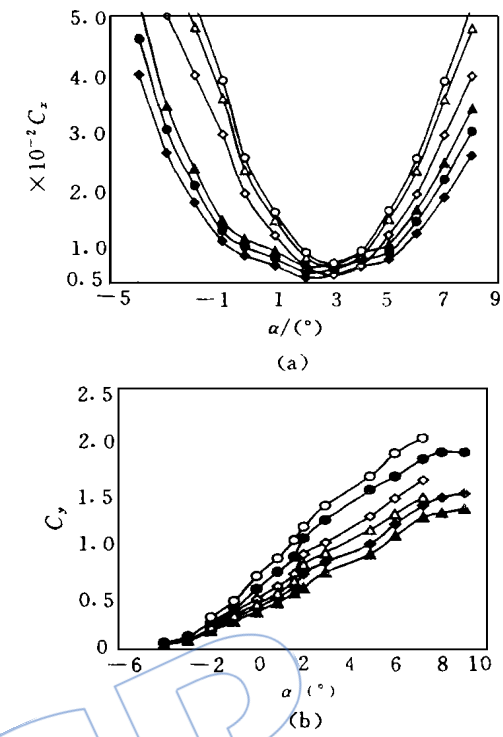


图 4 前弯叶型升力阻力随攻角的变化  
(◆—前弯叶片  $\zeta=0.5$  ◇—直叶片  $\zeta=0.5$   
▲—前弯叶片  $\zeta=0.2$  △—直叶片  $\zeta=0.2$   
●—前弯叶片  $\zeta=0.8$  ○—直叶片  $\zeta=0.8$ )

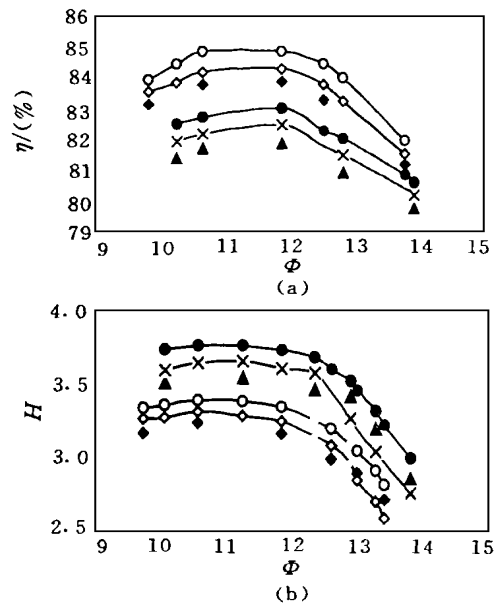


图 5 两类动叶片变工况的计算与实验比较  
(◆—前弯叶片(实验) ▲—直叶片(实验)  
○—前弯叶片(修正前) ●—直叶片(修正前)  
◇—前弯叶片(修正后) ×—直叶片(修正后))

中相对流量  $\Phi$  定义为:  $\Phi= 10^3 \times (Q/3600) / (S \times p_0 / \rho)$ , 其中  $Q$  为风机流量,  $S$  为风机通流管道面积,  $\rho$  为常温下空气的密度,  $p_0$  为大气压力。相对总压升  $H$  定义为:  $H= 10^3 \times (p_2^* - p_1^*) / p_0$ , 其中:  $p_1^*, p_2^*$  动叶片进口和出口的总压。

显然加入攻角损失后, 在失速点前的稳定工作区域, 计算结果和实验值吻合得更好。稳定工况相同流量下, 前弯动叶片要比直叶片效率高 3%~5%, 前弯动叶片可在更大范围内进行流量调节。在设计工况点附近攻角变化不大的稳定工作范围内, 经过攻角损失修正后, 效率计算值要小于没有经过攻角损失的计算结果。

4 结果讨论及结论

利用 Wallis 的升—阻力系数随攻角变化的实验曲线(即计算中所谓的攻角损失)来预测平板圆弧叶片的变工况性能, 这实际上是考虑了流量改变(攻角随之改变)时叶型损失的变化。在变工况时, 二次流损失和端壁附面层损失的变化较小, 在稳定工况攻角变化不大时, 它们的值可以用设计工况下的值来估计。由于叶型损失的变化随着攻角的变化比较大, 所以引入攻角损失就可以更加准确地预测动叶片的变工况特性。

Wallis 攻角损失模型是实验结果, 但仅限于平板圆弧叶型, 因而对采用其它叶型的动叶片的变工况损失估计必须要采用相应的实验数据。对于稠度较大的叶栅, 稠度增加导致叶型升力下降,

各种损失也有变化, 计算误差增大, 还必须进行相应的修正。

本文主要结论如下: (1) 本文从实验数据和理论分析角度出发, 修正了“双激盘”理论中原来使用的损失模型, 使之可以更准确地模拟前弯动叶片的性能。计算结果表明: 设计工况下, 动叶沿叶高流量平均的效率误差在 1% 左右, 总压误差在 1.8% 左右。在变工况下, 稳定工况的流量平均效率误差和总压误差均在 2% 以内。(2) 利用 Wallis 升—阻力实验曲线对单圆弧叶片的变工况特性进行了模拟, 验证了其有扩大变工况范围(以流量计) 15%~20% 的优良特性。(3) 利用该法可以估计变工况下的常规直叶片、弯掠动叶性能, 该法简单、实用, 物理概念清楚, 有一定的工程适用价值。

参 考 文 献

1 蔡娜. 轴流式弯掠动叶的气动声学性能计算及设计方法的研究[D]. 上海交通大学动力机械工程系, 1994

2 钟芳源(主编). 节能降噪轴流/离心风机(理论、计算、设计、实验研究)论文集[C]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 55- 79

3 Allan Wallis R. Axial Flow Fans and Ducts[M]. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1983

4 八田桂三. 气体机械[M]. Handbook, 1969

5 斯坦利 W. 坎德伯(Stanley W. Kandebo). GE 公司试验前掠风扇技术[J]. 国际航空, 1997, (3):

6 Beiler M G, Carlous T H. Computation and Measurement of the Flow in Axial Flow Fans with Skewed Blades[J]. ASME, Journal of Turbomachinery, January 1999, 121: 59- 66

(责任编辑 杨再荣)

A Modified Estimation Method for off-Design Performance Prediction of Forward-Skewed Rotor Blades

Liu Fubin, Zhong Fangyuan, Du Zhaohui

(College of Power & Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The forward-skewed rotor blade of low-speed axial flow fan can increase the efficiency by 4~5%, expand the range of off-design condition by 15~20% in the comparison with the typical blade-straight blade. In this paper, the “di-actuator disc” theory model is applied to calculating the flow field of forward-skewed rotor blade; the modified loss model in design condition is adapted to the lift/draft model of attack angle and is used to estimate the off-design condition flow field, the efficiency of the blade, etc. The estimated results at the design condition are in good agreement with the experimental results<sup>[1]</sup>. The maximum error of the efficiency along the blade height is 1.5% and that of the total pressure is 1.8%. The mass average errors are 1% and 1.5%. At off-design condition, the mass average errors of the efficiency and the total pressure are all less than 2%. It is proved that this method is applicable and can meet the need of the engineering design.

**Key words:** Moving blade; properties; methods

Copyright © 2009 Chinese Journal of Aeronautics Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>