

文章编号: 1000-8055(2002)03-0327-05

弯曲叶片积叠线 对压气机叶栅气动性能的影响

王会社¹, 袁 新¹, 岳国强², 钟兢军², 王仲奇²,

(1 清华大学 热能工程系, 北京 100084;

2 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 本文采用拟压缩性方法对不同积叠线弯曲叶片压气机叶栅内三维粘性流场进行了数值模拟。结果表明, 弯曲叶片性能不仅与叶片两端部的弯曲角度有关, 也与积叠线的形状和长度有关。

关键词: 压气机; 弯曲叶片; 积叠线; 拟压缩方法

中图分类号: V 232. 41

文献标识码: A

Effects of Curved Blade Stacking Line on the Aerodynamic Performance of Compressor Cascade

WANG Hui-she¹, YUAN Xin¹

YU E-Guo-qiang², ZHONG Jing-jun², WANG Zhong-qi²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The numerical simulation has been carried out to investigate the three dimensional viscosity flow in the compressor cascades with curved blades of different types of stacking lines. The method of the pseudo-compressibility was used and the incompressible Navier-Stokes equations were solved. The results show that the performance of curved blade is influenced not only by the end angle, but also by the shape and length of the stacking line.

Key words: compressor; curved blade; stacking line; pseudo-compressibility method

1 引言

叶栅中二次流损失的大小直接取决于叶栅端壁附面层和叶片表面附面层的发展及其产生的各种旋涡与分离流动。对压气机叶栅而言, 二次流损失与叶型和叶栅的各几何参数以及有关的气动参数和工况参数有关^[1]。叶栅流道内的损失可分为叶型损失和端壁损失, 叶型损失主要与叶型表面

附面层的分布状况及其是否分离有关, 端壁损失主要与端壁附近的二次流流动状况密切相关, 一般认为端部损失占总损失的30%~50%。由于端壁流动状态的复杂性且端部损失在总损失中所占的比例较大, 国内外学者在这方面的研究中投入了大量的时间和精力, 建立了很多减小端壁损失的行之有效的方法和理论。作为主要的方法之一, 弯扭叶片获得了广泛的研究和应用^[2~4]。但是, 目

收稿日期: 2001- 07- 12; 修订日期: 2002- 02- 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50076009, 50076019), 973(G1999022306, G1999022307);

全国优秀博士学位论文作者专项基金资助项目(199932)

作者简介: 王会社(1974-), 男, 陕西西安人, 清华大学热能工程系博士后

前对压气机中应用弯曲叶片的研究,尤其是弯曲叶片不同积叠线形状对叶栅性能影响的研究还很不深入,而弯曲叶片积叠线的选取,是设计弯曲叶片的关键技术之一^[5]。

计算流体力学的发展使人们有了一个强有力的工具来对叶栅内的流动进行深入细致的研究,并作为压气机设计中进行方案选取的主要手段之一,对叶栅内的流动进行预测和优化。本文采用文献[6]的方法,对直叶栅和三种不同积叠线(叶片正弯曲)的压气机静叶栅进行了数值模拟,并与实验结果进行了对照^[7]。

2 计算结果和讨论

弯曲叶片的作用主要体现在叶片弯曲后叶片力的径向分量上,它与弯曲叶片侧型面的倾角有关,而弯曲叶片倾角的形成与弯曲叶片生成线形状及其位置有关^[8]。以往往往采用拼接的办法,如两端是直线而中间用平滑曲线过渡的组合曲线;或两端仍采用直线,中间也用直线,三条直线间用两条平滑曲线连接的组合曲线作为积叠线(见图1)。一般情况下,端部二次流的作用仅局限于端壁附近的有限范围内,在这一范围内,尽量使弯曲叶片起到其应有的作用,其它区域内的流动,如果不能确信使其变好,则没有必要去改动它。

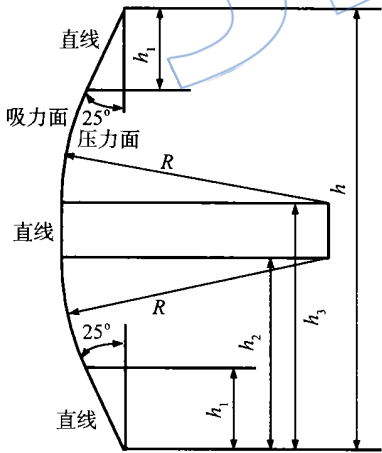


图1 拼接型弯曲叶片生成线

文献[7]对25°端部弯曲角度下由NACA 65-24A₁₀₋₁₀系列叶型叶片组成的正倾斜叶栅、拼接型积叠线正弯曲、反弯曲叶栅、S型弯曲叶栅以及直叶栅等进行了详细的实验研究,得出了很多有益的结论。但并未对相同正弯曲角度下不同积叠

线构成的叶栅进行研究。本文对25°端部弯曲角度下由NACA 65-24A₁₀₋₁₀系列叶型叶片组成的拼接型(pj)、双曲线(sq)和悬垂型(xc)三种积叠线正弯曲叶片构成的叶栅进行了数值模拟。通过求解椭圆方程生成H形计算网格,网格数为81×81×41,叶栅几何参数如表1所示。

表1 叶栅参数
Table 1 Cascade parameters

弦长/节距(b/t)	2
叶片弯曲角 θ/(°)	59.5
展弦比(h/b)	1
叶片安装角 γ/(°)	20
叶片几何进气角 α _{1p} /(°)	49.75
叶片几何出气角 α _{2p} /(°)	-9.75

悬垂线的方程为: $y = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a})$

双曲线方程为: $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$

这两族曲线都具有无穷阶连续导数,当变化曲线中的常量a或者b时即可获得不同弯曲角度的积叠线。图2给出了本文所用的积叠线,由于型线上下对称,清晰起见,图中只给出了下半部分(图中zw代表正弯,zx代表直线,以下各图同)。

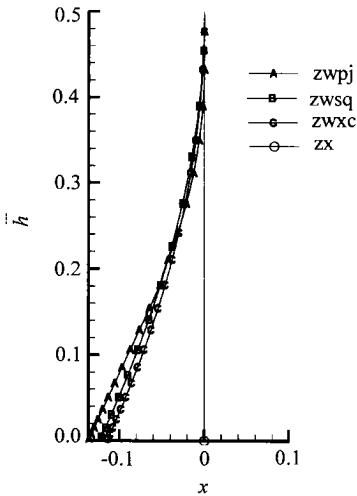


图2 25°倾角下弯曲叶片的不同积叠线

Different blade stacking lines of 25°endwall curved angle

由图3可见,对于拼接型正弯曲叶片,其吸力面表面静压的数值模拟结果(图3(a))与实验结

果^[7](图3(b))相比吻合的较好, 计算结果较好的反映了整个弦长范围的静压分布。在叶片压力面出现了与弯曲形式相一致的静压分布; 在吸力面, 相对于直叶栅来说, 叶片的正弯曲增强了其表面的“C”型压力分布。

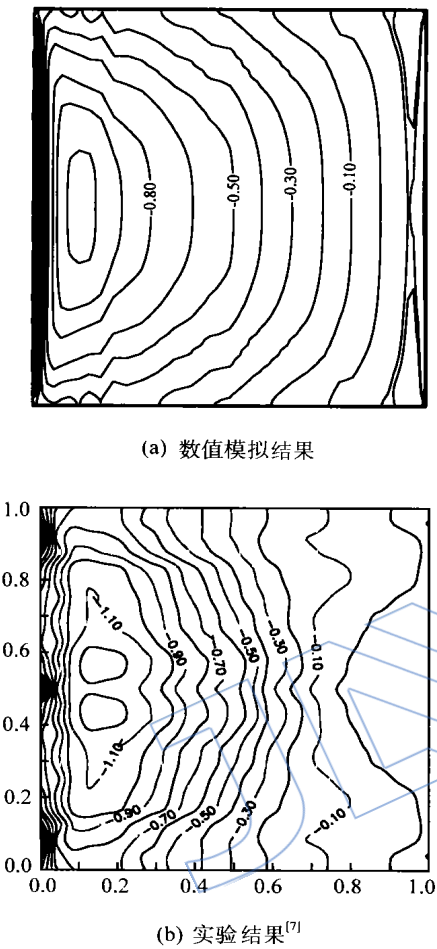


图3 正弯曲叶片吸力面表面静压分布

Fig 3 Static pressure contours on suction surface

在给定的叶栅进口气流角和叶片几何出气角的情况下, 叶栅的出口气流角反映了流道中气流的转折程度和出口气流的落后角, 节距平均出口气流角沿叶高的分布反映了叶片表面附面层的发展及其对叶栅扩压能力的影响。图4给出了零冲角下四种叶栅节距平均出口气流角沿叶高的分布, 其中直叶栅与正弯曲拼接叶栅的分布与文献^[7]中实验所得结果基本一致。叶栅的几何出气角 $\alpha_p = -9.75^\circ$ (以轴向为参考, 逆时针为正), α 表示节距平均出口气流角。 α 与 α_p 差距越大, 则出口气流角越远离几何出气角, 叶栅出口气流的落后角越大, 实际气流的转折角越小, 扩压能力下降。

由 How ell Constant 经验公式可以计算出气

流实际的出口角应为 0.16° ^[9], 这与图4中叶栅出口中部处的值基本相符。除直叶栅两端各5%叶高范围内出现过偏转外, 四种叶栅的出口气流角均落后于叶栅的几何出气角。正弯叶栅 $0 \sim 0.35$ 和 $0.65 \sim 1.00$ 相对叶高范围内的气流落后角明显增加, 过偏转消失, 这是由于正弯曲后端壁横向压力梯度降低, 端壁附面层减薄造成的。正弯曲叶栅中部的气流落后角明显小于直叶栅, 这是由于叶片正弯曲后重组了出口流场且端部低能流体在叶栅中部堆积造成的。

正弯曲叶栅端部过偏转的减小, 有利于动静叶匹配, 但沿叶高出口气流角变化过于剧烈, 又将导致出口流场的不均匀。

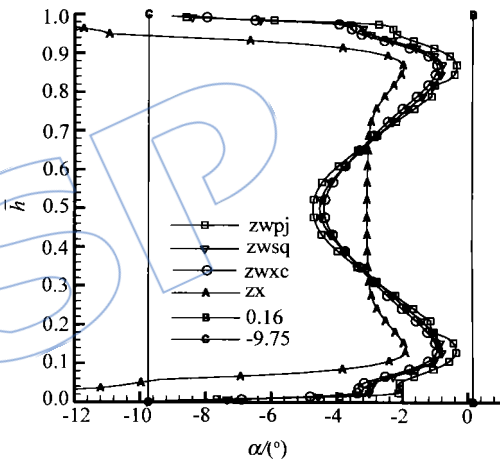


图4 节距平均出口气流角沿叶高的分布

Fig 4 Pitch-averaged exit air angle distribution along blade height

与直叶栅相比, 在三种正弯曲叶栅中, 拼接型弯曲叶栅节距平均出口气流角沿叶高变化最为剧烈, 即其端部的落后角与其它三种叶栅端部落后角相比最大, 叶栅中部的落后角最小; 双曲型弯曲叶栅节距平均出口气流角沿叶高变化居中, 悬垂型弯曲叶栅的节距平均出口气流角沿叶高变化最小。与图2积叠线相对照, 可以发现, 在5%~95%叶高范围内, 其节距平均出口气流角的变化强度与其型线的弯曲程度相一致, 即型线的弯曲程度越大, 其节距平均出口气流角沿叶高的变化越剧烈。而在相同端部弯曲角度下, 具有一阶以上连续导数的正弯曲型线, 其弯曲程度越大, 则其型线的长度越长。因此, 在相同端部弯曲角度下, 型线的长度决定了其对流场的影响强度, 型线越长, 其影响效果越明显。也就是说, 如果某种积叠线的长度

较小, 则要达到相同弯曲角度下较长积叠线的影响效果, 就需增加其端部弯曲角度。

但是, 这几种正弯曲叶栅最大扩压因子基本

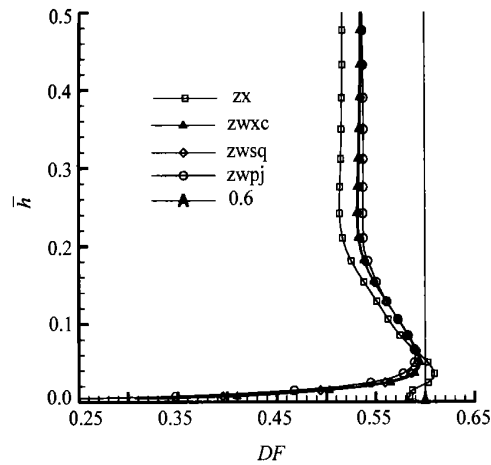
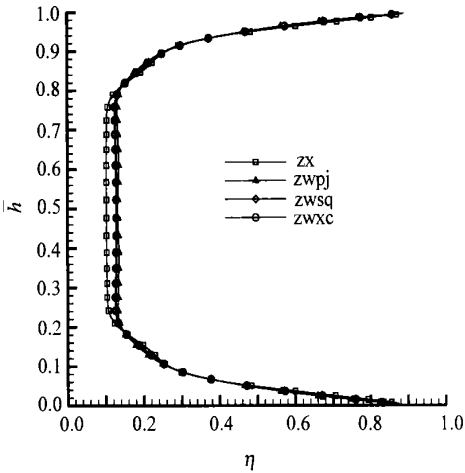


图5 节距平均扩压因子沿叶高的分布

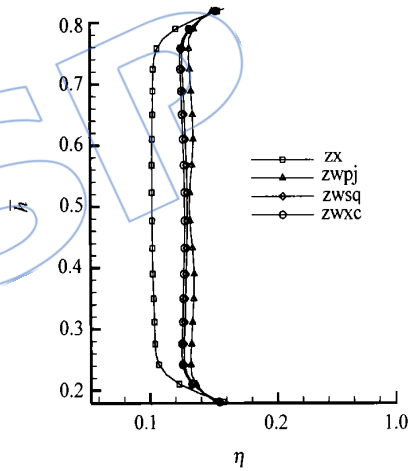
Fig 5 Pitch-averaged diffusion factor distribution along blade height

扩压因子 DF 是整理叶栅损失实验数据时一个极为重要的综合参数^[9]。当扩压因子 $DF > 0.6$ 时, 叶栅损失将剧烈增加。因此, 可将 $DF = 0.6$ 作为压气机平面叶栅的允许负荷极限值^[9]。图5给出了四种叶栅出口处节距平均扩压因子沿叶高的分布情况。由图可见, 在整个叶高范围内, 正弯叶栅节距平均扩压因子都小于0.6, 在端部, 直叶栅有一部分的扩压因子值超过了0.6。在0.00~ 0.10和0.90~ 1.00的相对叶高范围内, 正弯曲叶栅的扩压因子值比直叶栅的要小, 而叶栅中部附近 DF 要比直叶栅高, 这表明正弯曲叶栅在近根部区附近损失值将会降低, 在中部区损失值将会增加, 这与图4的分析结果完全一致, 也与文献[7]的实验结果相一致。

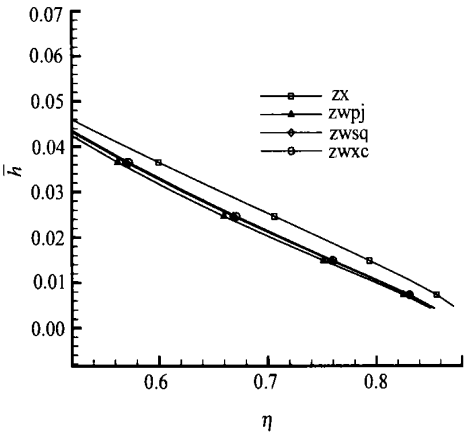
与直叶栅相比, 拼接型弯曲叶栅节距平均扩压因子沿叶高变化最为剧烈, 即其端部的扩压因子小于另外两种正弯曲叶栅端部的扩压因子, 叶栅中部的扩压因子与其他三种叶栅相比又最大, 双曲型弯曲叶栅节距平均扩压因子沿叶高的变化居中, 悬垂型弯曲叶栅节距平均扩压因子沿叶高变化最小。由于双曲型线与悬垂型线长度差别较小, 故其扩压因子差别也较小。节距平均扩压因子沿叶高的分布与图2积叠线和图4节距平均出口气流角沿叶高的分布具有相似性。即在相同端部弯曲角度下, 节距平均扩压因子沿叶高的变化强度与型线长度具有一定的对应关系。



(a) 节距平均能量损失系数沿叶高分布



(b) 中部局部放大



(c) 端部局部放大

图6 节距平均能量损失系数沿叶高的分布

Fig 6 Pitch-averaged energy loss coefficient distribution along blade height

相同, 都没有超过 0.6, 也即这几种正弯曲叶片都达到了把叶栅端部扩压因子降至 0.6 以下的目的, 因此, 选择长度最小的悬垂型积叠线即可, 这样可避免对流动中流动改变的过于剧烈(图 4), 不利于动静叶间的匹配, 且型线越长, 气流与叶片表面接触的越多, 会导致摩擦损失增加。

由图 6 给出的节距平均能量损失系数沿叶高的分布可见, 叶片正弯确实增加了叶栅中部损失(图 6(b)), 而降低了端部损失(图 6(c))。在近两端壁区域内, 正弯曲叶栅的损失系数值比直叶栅低。在叶栅中部, 正弯曲叶栅高损失区域较直叶栅的高损失区域稍有增宽, 且损失系数值也要高一些, 叶栅中部损失值的增加和两端区损失值的降低同时存在。由于正弯曲叶栅两端的正倾斜, 在流动中形成从两端部分别指向叶栅中部的负压力梯度, 在此负压力梯度的作用下, 两端区近吸力面处堆积的低能流体被迁移到中部主流区, 使根部区流动得到改善的同时又恶化了中部区的流动, 使中部损失值增加, 这与文献[10]的理论分析是符合的。

由图可见, 拼接型正弯曲叶栅中部损失明显高于其余两种正弯曲叶栅, 且由于该积叠线缺乏更高阶连续导数, 使得该叶栅在中部处损失分布显得不够平滑。在叶栅端部, 悬垂型积叠线具有仅次于直叶栅的损失, 但其中部损失在三种正弯曲叶栅中是最低的, 双曲型弯曲叶栅损失分布居中, 这也与图 2 弯曲积叠线的弯曲程度相一致。

3 结 论

(1) 叶片正弯可以明显改善叶栅端部流动, 使端部由于扩压因子过大而导致分离的可能性降低, 但是由于中部低能流体的堆积, 导致中部损失增加。

(2) 在相同端部弯曲角度下, 具有一阶以上连续导数的弯曲积叠线, 其长度越长, 对端部产生的影响就越明显, 该叶栅的各种气动参数与直叶栅相差也越大。也就是说, 如果某种积叠线的长度

较小, 要想达到相同弯曲角度下较长积叠线的影响效果, 就需增加其端部弯曲角度。

(3) 25 端部弯曲角度下, 悬垂型积叠线能够把两端的扩压因子降至 0.6 以下, 且悬垂型弯曲叶片对流动参数的影响最小, 利于级间匹配。与双曲线相比, 悬垂线是一种自然曲线; 与拼接线相比, 悬垂线具有更高阶的连续导数, 利于气流沿叶片表面的平滑输运; 悬垂线的长度小, 利于降低气流与叶片表面的摩擦损失。拼接型积叠线目前还不存在优化方法, 选择的随意性较大, 悬垂线的应用可避免这种随意性。

参考文献

- [1] 李根深, 陈乃兴, 强国芳. 船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热力学: 原理、设计与试验研究(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 49- 229
- [2] 王仲奇, 郑严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势[J]. 中国工程科学, 2000, 2(6): 40- 48
- [3] 王仲奇, 苏杰先, 钟兢军. 弯扭叶片栅内减少能量损失机理研究的新进展[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(2): 147- 152
- [4] 宋彦萍. 弯扭叶片的主要研究成果及其应用[J]. 热能动力工程, 1999, 14(5): 159- 163
- [5] 黄洪雁, 袁宁, 王仲奇, 冯国泰. 不同积叠线形式对涡轮性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(3): 306- 309
- [6] 朱自强, 贾剑波. 三角翼大迎角不可压粘性流的数值模拟[J]. 力学学报, 1996(6): 736- 739
- [7] 钟兢军. 弯扭叶片控制扩压叶栅二次流动的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995
- [8] WANG Zhong-qi, LA I Sheng-kai, XU Wen-yuan. An Investigation into the Influence of the Blade Leaning on the Secondary Flow in an Annular Cascades with Small Diameter-Length Ratio[R]. ASME Paper 85- WAM- 1485, 1985
- [9] 王仲奇, 秦仁. 透平机械原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 255- 260
- [10] 苏杰先, 冯国泰, 闻杰, 王仲奇. 弯曲叶片在压气机中的应用[J]. 工程热物理学报, 1990, 11(4): 404- 407

(责任编辑 杨再荣)