

文章编号: 1000-8055(2002)03-0314-05

非定常条件下叶片弯曲对流场参数的影响

王松涛, 王仲奇, 冯国泰, 孙玺淼

(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: 分别对具有弯、直导叶的一级涡轮叶栅流场进行了非定常的数值模拟。研究了叶片弯曲对多级叶栅流场非定常气动性能尤其是效率的影响; 分析了叶片弯曲对尾迹扩散效应及其三维形状的影响; 以及尾迹形状与扩散过程的变化对动叶进口条件的改变; 同时还研究了叶片弯曲对涡轮级内非定质量堆积的影响。通过对定常效率与非定常效率波动及其平均值的对比, 分析了在考虑非定常条件下弯曲导叶对降低本列叶栅损失与动叶内损失的贡献。

关键词: 弯叶片; 非定常干扰; 数值模拟

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

The Effect of Blade Bowing on Aerodynamic Parameters with Rotor/Stator Interaction

WANG Song-tao, WANG Zhong-qi, FENG Guo-tai, SUN Ximiao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Simulation of 3D unsteady stator/rotor interaction in turbine stage with bowed and straight vane was presented in this paper. The effect of blade bowing on aerodynamic parameters especially on efficiency was studied in detail. The difference between 3D wake structure and wake mixing process in bowed and that in straight vane stage was discussed. The effect of blade bowing on the inlet condition of rotor was also studied. Efficiency and mass flow fluctuation phenomena and their effects on stage performance were described in detail. Based on the comparison between instant and average efficiency, the contribution of blade bowing to loss reduction in stator and rotor was also studied.

Key words: bowing blade; stator/rotor interaction; numerical simulation

1 引言

经过近半个世纪的发展, 弯叶片已经成功的应用于燃气与蒸汽涡轮中, 在压气机中弯叶片的作用也正在逐渐引起研究者与设计者的关注。尽管研究者进行了大量的关于弯叶片降低损失机理的研究, 但由于受到实验手段的限制, 目前关于弯叶片的实验研究大多是基于单列叶栅而进行的。

叶轮机内的叶片排数是多级的, 一系列叶栅几何条件的改变, 流动状况的变化必定会影响其他叶栅内的流动, 因此研究弯叶片对损失的影响也就一定要考虑叶片弯曲后对临近叶栅内流动状况的影响。借助于数值模拟技术, 文献[1]研究了叶片弯曲后对级间参数匹配的影响, 但采用的是定常的计算方法, 因此关于弯叶片对临近叶栅参数的非定常影响没有能够揭示出来。

收稿日期: 2001-05-14; 修订日期: 2001-09-05

基金项目: 国家科技部973资助项目(G1999022307); 哈尔滨工业大学校基金资助项目(ADAQ18000076)

作者简介: 王松涛(1971-), 男, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院热力发动机教研室副教授, 博士

叶片弯曲这种边界条件的改变形式会对诸如尾迹、尾缘激波形式、通道涡在级内的发展、端壁附面层的输运等多种流动现象产生极大的影响。这种影响会对级效率有显著的改变。关于非定常效应对流动状况影响的研究在90年代后期已经引起了研究者的极大兴趣。Tan^[2](1996年), Adamczyk^[3](1996年), Eulitz^[4](1996年), Suryavamshi^[5](1998年), Wakler^[6](1998年)等研究了尾迹的输运对下游叶栅乃至整个级的流动影响, Ralf E. Walraevens^[7](1998年)借助于数值模拟研究了1.5级涡轮内涡的输运现象, 并分析了尾迹在输运过程中对叶栅流场的影响; 国内关于非定常现象的研究还处于起步阶段, 黄伟光, 陈乃兴^[8](1998年)较早在国内开展了非定常现象的研究, 季路程, 周盛^[9](1999年)对跨音压气机的非定常流场进行了计算; 刘前智, 周新海^[10](2000年)计算了多级压气机的非定常流场。

但目前关于叶片弯曲对临近叶栅内流动状况、级效率影响的实验与数值研究还不多见。本文将借助于数值模拟手段研究涡轮静叶弯曲后对动叶栅内流动的影响, 主要侧重于研究叶片弯曲后对尾迹输运, 对动叶进口条件、对整个级效率的影响, 并给出了弯叶片的尾迹发展模型。

2 数值方法与算例

本文算例原型为某汽轮机涡轮。为排除子午

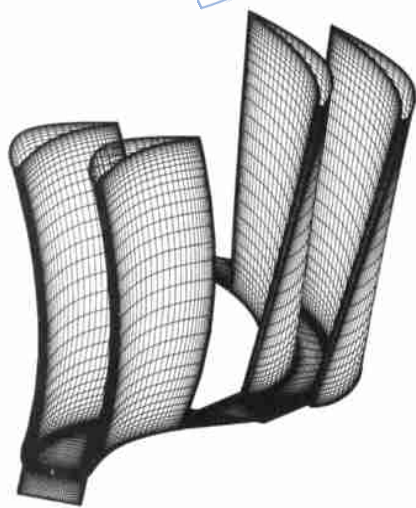


图1 计算网格与叶栅几何构型

Fig. 1 Geometry of cascade and computational grid

流道形状的改变对流场结构的影响, 将原子午流

道改为直线形式; 同时叶片通道数简化为1·1。针对此涡轮级进行了静叶为直叶片与正弯20叶片的非定常求解。在弯直叶栅两种几何条件下, 进出口气动边界条件均相同: 静叶进口总压为105500 Pa, 总温为430 K, 进口轴向进气; 动叶出口压力为45000 Pa, 转速为3000 r/min。静叶网格点数为轴向85、周向43、径向41; 动叶网格点数为轴向85、周向43、径向41。一个通道分为30个物理时间步。计算网格如图1所示。

采用NUMECA 软件对上述叶弯、直叶栅流场进行了数值模拟。差分格式选为具有2阶精度的TVD 格式, 湍流模型为B-L 代数模型, 每个槽道周期内取30个切向位置。在迭代4个周期后得到了收敛解。

3 叶片弯曲对尾迹形状及尾迹输运的影响

我们首先研究在翼展中部处, 弯叶片尾迹与直叶片尾迹的差异。一般说来叶片弯曲对本列叶栅槽道中部的流动状况的影响不大。但叶片弯曲对出口后流场尤其是尾迹的耗散与输运却有着较为显著的影响。

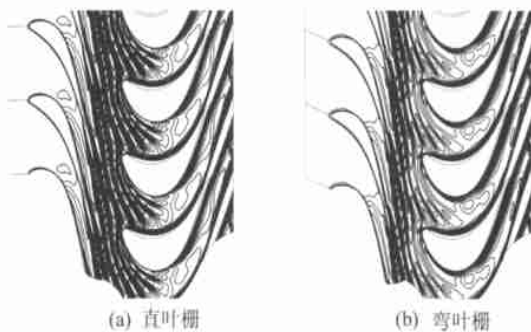


图2 50% 叶高处弯、直叶栅内的尾迹

Fig. 2 Wake in bowed and straight blade at 50% span

图2给出了直叶栅在50%翼展处的尾迹输运过程, 同时从该图中也可看出尾迹的耗散的差异, 直叶栅内尾迹较强, 能够传输的很远, 尾迹耗散的过程较慢。但在弯叶栅内, 由于弯叶片对尾迹的耗散作用的增强, 使得尾迹削弱得很快, 这表现为尾迹较宽, 同时尾迹在动叶中的输运距离的减小, 这一点可以从图2中看出来。由图中可知, 即便是在叶片中部, 与直叶片相比, 弯叶片的尾迹在进入动叶之前其强度已明显的减弱。所以动叶前缘段尾迹已经变得很弱, 不象直叶栅的那样有很强的穿透能力。由于弯叶片的尾迹耗散太快, 在动叶中尾

迹的强度大大削弱,所以在图2中没有明

来在直叶栅内尾迹在动叶中的耗散程度要比弯叶栅的大。

叶片弯曲后对尾迹的三维形状也会产生极大的影响。图3给出了弯、直叶栅内的尾迹的发展过程。在导叶出口处尾迹的形式由于受到叶片形状的限制,因此表现出与叶片相同的形状即直叶栅的为直线形状,弯叶栅的为与叶片形状相同的曲线。此时端壁附面层的厚度在该位置上基本形同,同时尾迹的损失分布也基本一致。但在随后的发展过程中,可以看到直叶栅的尾迹形状基本保持为直线形状没有多大的改变。但弯叶栅的尾迹在中部截面得到拉伸,尾迹沿周向扩散的较为严重。在沿轴向的发展过程中尽管直叶栅的尾迹也在沿周向扩散,但其扩散程度远不如弯叶片的严重,这种扩散将导致动叶进口处流场的均化。另外一个值得注意的问题是,端壁附面层在弯直叶栅内的发展也有显著的差异,由图(e)与图(f)可以看出直叶栅端壁附面层发展的较快,其厚度比弯叶栅的要大,可以推知在该位置上直叶栅的端壁损失要比弯叶栅的大。

在进入动叶流道后由于弯叶片的尾迹是弯曲的,因此动叶中部将首先接触来自于导叶的尾迹,由图中可以明显的看出在动叶中部,由于受到导叶尾迹的影响在该位置处的损失将比端壁附近的要大。在随后的位置上弯叶栅的尾迹将逐渐接触到叶片端部,逐渐扫过整个动叶表面。在弯叶栅内由于尾迹与端壁形成了一个角区,在压力面与端壁角区内的损失要比直叶栅的要高,但可以明显的看到动叶内的端壁低失厚度要比直叶栅的小得多。

由上述分析可以得出如下结论:弯叶栅内尾迹扩散程度与速度要较直叶栅的大;在考虑动静叶相互干涉的非定常流动条件下弯叶片对损失影响也主要是通过改变或减少端壁处的损失来实现的。

4 效率的非定常波动

图4给出了在不同的周向位置上,直叶片级与弯叶片级的绝热效率曲线。从图中可以看出,无论是对直叶片还是对弯叶片都存在着最高效率点,最高效率点的位置基本上是处在当尾迹刚好扫到动叶前缘位置附近,而最低效率点的位置对应于尾迹穿过动叶流道时的位置上。这说明尾迹在动叶主流中的耗散是引起级的损失增加的一个原因,另外,最低效率点的位置也刚好是静叶中的

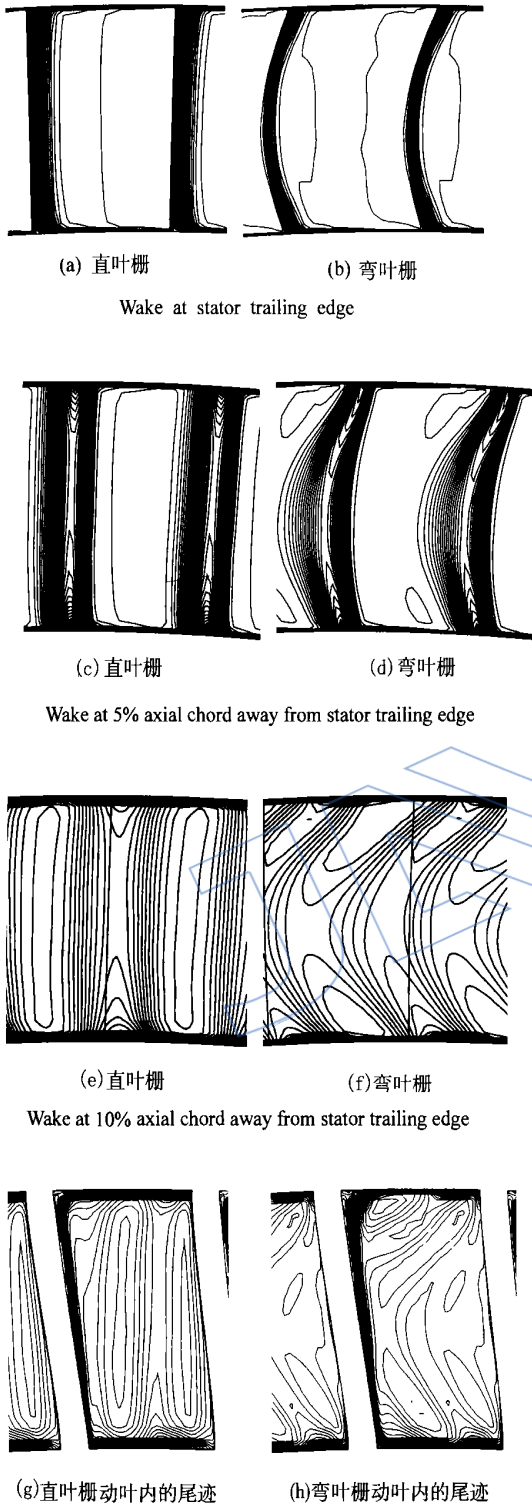


图3 尾迹的空间输运

Fig 3 Wake convection

显的看到尾迹在动叶内的向下游输运过程。在直叶栅中同样由于静叶尾缘过小,造成尾迹强度不大,在动叶中得输运现象也不是很明显,但总的说

通道涡, 打到动叶前缘时的位置, 在此位置上通道涡将在动叶前缘附近被破碎掉, 通道涡内部集聚的低能流体将以热能形式耗散于流场中, 使得损失增加。

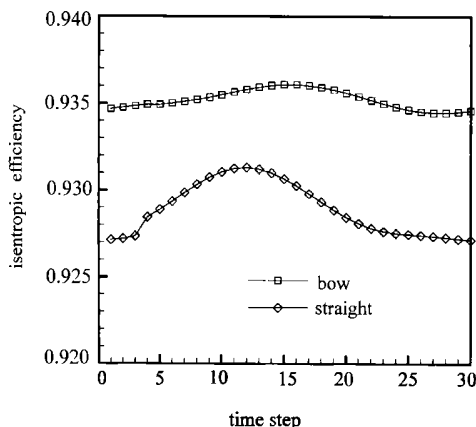


图4 效率的非定常波动

Fig 4 Efficiency oscillation

从图中还可以看出, 在周向不同的位置上弯叶片的效率普遍比直叶片的高。弯叶片级的效率脉动较小, 其脉动量只有0.1%, 而直叶片级的效率脉动量相对较大为0.5%, 是弯叶片级的5倍。上述现象产生原因可在于如下几个方面: 首先, 如前所述, 静叶弯曲后使其尾迹的扩散过程加快, 这使得动叶入口流场在周向不同位置上得到了均化, 表现为尾迹在周向的扩散, 而且, 静叶弯曲后也会使得静叶出口损失沿径向均化, 这两种均化的结果使得动叶在不同的周向位置处其进口条件差别不是很大; 此外, 静叶尾迹形状发生弯曲后, 会使得动叶前缘对静叶尾迹的接受是从流道中间逐渐向端壁过渡(在不同的周向位置上动叶接受尾迹的位置也不同), 减少了尾迹对动叶冲击, 使得动叶流场的变化不是很突然(直叶栅中, 静叶尾迹是在某一周向位置上全部打到动叶前缘, 然后又在下几个时刻内全部远离动叶前缘, 这对动叶流场内的流动具有一种冲击作用, 会使得动叶的损失与表面压力分布有突然的变化)。

用混合平面法求解的定常流场效率分别是: 直叶栅: 0.92651; 弯叶栅: 0.93475。非定常平均效率分别是, 直叶栅: 0.92891; 弯叶栅: 0.93500。从这两组对比数据中可以看出, 考虑非定常效应后, 对于弯直叶栅而言, 几乎在周向任何一个位置上, 非定常效率值都要比定常计算结果的高。在本算例条件下, 弯叶栅非定常效率波动较小, 这说明了

在弱尾迹条件下叶片弯曲对动叶内损失的改变较小, 因此在这种条件下, 进行弯叶片设计应将减少静叶损失与改善级间匹配作为主要研究目标。在二次流较强与尾迹较大的条件下如何考虑弯叶片的非定常影响将有待进一步研究。

弯叶片对效率脉动量的减少, 说明了采用弯叶片后涡轮的运行会更加平稳。甚至可以推断出, 采用弯叶片后在变工况条件下整个级的运行会比直叶片级的平稳, 这对于经常工作在变工况条件下航空反动机而言是很重要的。

5 质量堆积的非定常波动

图5给出了质量的非定常波动。不管是对于直叶栅还是对于弯叶栅而言, 其质量的波动周期均为一个栅距, 静叶的进口流量波动的较小, 对于本算例而言, 采用定常算法得到的质量流量与非定常平均流量相差并不大。

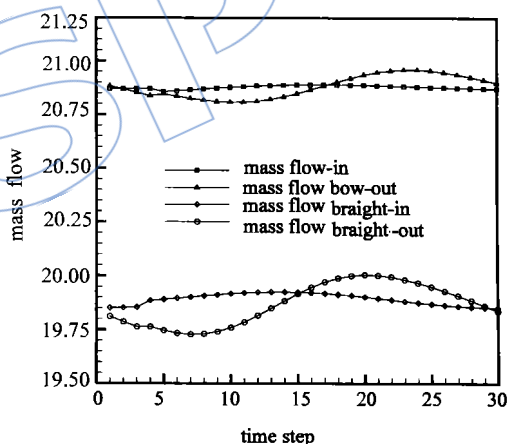


图5 质量的非定常堆积

Fig 5 Mass flow oscillation

由图中可以得知质量流量的最大点刚好位于静叶尾迹扫到动叶前缘位置处, 质量流量的最低点位于静叶尾迹扫到动叶流道中部位置处。对比图4可以看出质量流量的最低点与最高点并不刚好使效率达到最低值与最高值, 效率最高点位于质量流量达到最大值的前几个位置处。其中的原因有待进一步研究。

由图中可以得出另外一个结论, 那就是叶片弯曲之后有助于使质量流量的脉动量降低, 这也是使涡轮平稳运行的一个因素。此外质量波动的降低对于压气机而言可能将会带来更大的收益。

6 结 论

(1) 叶片弯曲后不但要改变尾迹的空间形状, 同时也将影响尾迹在静叶与动叶内的扩散。弯曲导叶将会使尾迹在进入动叶流道前以较快的速度耗散掉。

(2) 叶片弯曲后, 通过对尾迹扩散的影响, 将会改变动叶进口的条件, 使动叶进口在周向不同位置上趋于均化。

(3) 叶片弯曲之后有助于使效率与质量流量的脉动量降低, 这也是促使涡轮平稳运行的一个因素。

参考文献

[1] 袁宁, 王松涛, 顾中华. 一种适用于涡轮全三维设计的气动设计体系[R]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议, 982015, 1998

[2] Deregél P, Tan C S. Impact of Rotor Wakes on Steady State Performance of Compressor[R]. ASME Paper 96- GT- 253, 1996

[3] Adamczyk J J. Wake Mixing in Axial Flow Compressors[R]. ASME Paper 96- GT- 29, 1996

[4] Eulitz F, Engel K, Gebing H. Numerical Investigation of

Clocking Effects in a Multistage Turbine[R]. ASME Paper 96- GT- 26, 1996

[5] Suryavamshi N, Lakshminarayana B, Prato J. A spirating Probe Measurements of the Unsteady Total Temperature Field Downstream of an Embedded stator in a Multistage Axial Flow Compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 156- 169

[6] Walker G J, Hughes J D. The Influence of Wake-Wake Interactions on Loss Fluctuations of a Downstream Axial Compressor Blade Row[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 695- 703

[7] Ralf E Walraevens, Hein E Gallus. Experimental and Computational Study of The Unsteady Flow in a 1.5 Stage Axial Turbine with Emphasis on the Secondary Flow in the Second Stator[R]. ASME Paper, 98- GT- 254, 1998

[8] 黄伟光, 陈乃兴. 叶轮机机械动静叶片排非定常气动干涉的数值模拟[R]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议, 982038, 1998

[9] 季路程, 周盛. 一个跨音风扇级转/静叶干扰流动的时间精确解[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(4): 426- 430

[10] 刘前智, 周新海, 胡运聪. 轴流叶轮机三维粘性非定常流动计算的双时间方法[R]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议, 20002027, 2000

(责任编辑 杨再荣)

本刊获准改成双月刊

长期困扰编辑部的难题之一: 是稿件逐年增加, 每期都增加页码, 但仍难解决压稿问题。故于去年报请季刊改为双月刊。

今年2月6日收到中国航空工业第一集团科技发展部转来的国家科学技术部批准“航空动力学报”改成双月刊的批文。因此编辑部积极筹备, 决定从今年下半年改为双月刊, 从本期开始实施。

这对广大作者是一个喜讯, 这能缩短论文发表周期, 能让自己的研究成果早日介绍给广大读者, 因此编辑部希望大家要更踊跃投稿。

这对读者也是一个喜讯, 能够通过本刊获得更多的信息。