

涡轮级叶片弦向弯曲与周向弯曲的应用研究*

刘振德¹, 袁宁², 张振家²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 2. 航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘要: 通过对涡轮叶片弦向弯曲与周向弯曲各自机理的分析并结合实际的设计经验和数值模拟方法, 对涡轮级静叶采用弦向弯曲和周向弯曲所应该各自遵循的设计原则进行了研究, 结果表明两种弯曲规律均可以控制叶栅的二次流动, 但控制二次流的机理存在很大的区别。

关键词: 涡轮叶片; 弯曲叶片; 二次流; 纳维尔-斯托克斯方程

中图分类号: V235.113 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)06-0036-04

Two types of bowed blades in turbine stage

LIU Zher-de¹, YUAN Ning², ZHANG Zher-jia²

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: In order to control second flow in cascade, three-dimensional design technique of the blade bowed circumferentially and the blade bowed in its chord-normal direction was successfully applied to the modern turbomachinery design. Depending on numerical simulation and experiment, different physical principium between the blade bowed circumferentially and the blade bowed in its chord-normal direction was analyzed. The design rule for two types of bowed blades in turbine stage was summarized. It points out that two types of bowed blades can control second flow, but their physical principiums are different.

Key words: Turbine blade; Bowed blade; Secondary flow; Navier-Stokes equation

1 引言

叶片径向积迭规律的研究早在 60 年代就已经开始, 其中弯叶片由于可以有效的控制二次流损失而被广泛地应用于叶片机中, 并取得了巨大的成功。关于弯叶片减小端壁损失的机理的解释得到普遍承认的是附面层迁移理论^[1]。在目前弯曲叶片的径向积迭规律中, 弦向弯曲和周向弯曲的两种形式均在实际的涡轮机组中得到了广泛的应用。但在实际涡轮设计中由于机理上的差异, 达到相近弯曲效果所采取的弯量相差很大。设计者应该根据实际情况, 从流动的机理出发灵活运用两种弯曲规律来达到控制叶栅中二次流的目的。文献 [2] 采用求解欧拉方程的方法对两种弯曲规律的叶片进行了数值模拟, 指出两种弯曲规律均可在流道中产生 C 型压力分布。本文采用雷诺平均 N-S 方程, 对两种弯曲规律产生 C 型压力分布的机理进行了分析和解释, 重点

研究了叶片表面型线对弯曲的影响以及弯曲对涡系结构变化的影响。

2 数值方法

对雷诺平均的 N-S 方程进行差分离散。采用了时间隐式推进方式, 空间显式部分采用了三阶精度的 Godunov 格式^[3], 它具有 TVD 的性质。湍流模型采用 B-L 代数模型^[4], 方程中粘性项的离散采用中心差分。

在多叶片排的三维计算中, 使用“混合平面”法进行叶片排间参数的传递处理。在“混合平面”上采用外推边界条件保证了交界面上本叶列参数的周向不均匀性。由于在多叶片排中叶列间小间隙情况求解的过程中, 会引起参数的振荡而很难使程序得到收敛解, 因而采用了一种在交接面上构造 Riemann 问题解和使用松弛因子的方法^[5], 该方法可以大大提高程序的稳定性。同时采用了一种变比热的

* 收稿日期: 1999-12-06; 修订日期: 2000-05-23。基金项目: 国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 刘振德 (1968—) 男, 高级工程师, 研究领域为航空发动机。

计算方法^[6]。

3 叶片弦向弯曲与周向弯曲产生 C 压力分布的不同机理

在目前采用的弯叶片中径向积迭线主要采用周向弯曲和弦向弯曲。本文对静叶为常规直叶片、周向弯曲和弦向弯曲的三套涡轮级进行了数值模拟。静叶叶型相同，弯曲规律见图 1。为了进行比较，两种弯曲规律在叶片的根、顶部均采用 15° 的正弯曲。

图 1 为常规直叶片、周向弯曲静叶片和弦向弯曲静叶片槽道中部静压等值线分布。它表明周向正弯曲和弦向正弯曲都可以产生 C 型压力分布。但弦向正弯曲叶片的静压梯度要大于周向正弯曲叶片，并且 C 型压力分布贯穿于叶片的整个流道并向喉部以后区域扩展。这说明弦向弯曲在喉道附近继续起作用。另一方面，从图 2 叶背表面静压等值线分布可以看出，在叶片进口处弦向弯曲叶片在背弧很快建立起绝对值大于周向弯曲叶片的静压梯度，减小了进口边中径处的扩压流动区域。从上述的结果可以说明在相同弯量的条件下，弦向弯曲叶片要比周向弯曲在整个流道中建立更强的 C 型压力分布，它

将有利于抑制低能流体在端壁的积聚和端壁附面层的分离。

叶片的周向弯曲和叶片的前掠均可在叶片槽道中产生 C 型压力分布，但其产生的机理不同，前者是气流的折转离心力造成的；后者是气流在径向不同截面槽道中加速的状况造成的。

弯扭叶片利用叶片力的径向分力 F_r 来控制叶片表面二次流的径向流动。对于周向弯曲叶片，它控制二次流的能力来源于气流折转离心力的径向分量^[5]，可以看出周向弯曲最有效的部位应该取决于气流折转离心力，而气流折转离心力取决于叶片型线表面的曲率和速度。弦向弯曲叶片是一种复合弯曲叶片，它包括叶片的周向弯曲和轴向弯曲。叶片在子午面上的型线相对于轮毂和机匣成后掠叶片，气流在叶片中部先于叶顶和叶根加速，因此叶片的端部压力要较中部高。在 S_2 流面上叶片呈现 C 型压力分布，但这种 C 型压力分布同叶片周向弯曲产生的 C 型压力分布是不同的，它贯穿于叶片的整个流道，不利之处在于它将在叶片的喉道附近产生强烈的径向压力梯度，有可能带来喉道附近气体流动的恶化，这对于涡轮设计是不利的。但这种现象在周向弯曲中由于喉道附近平直，这种 C 型压力分布基

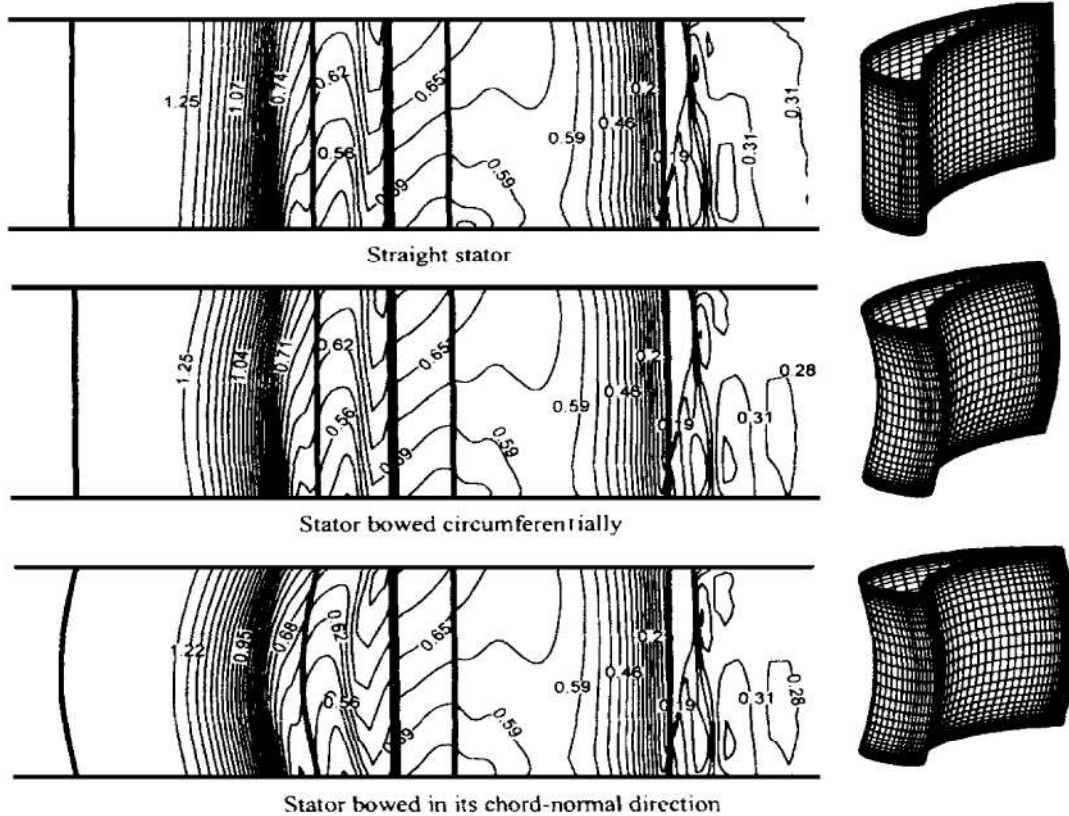


Fig. 1 Static pressure contour of a turbine stage with straight stator, stator bowed circumferentially and stator bowed in its chord-normal direction at mid path

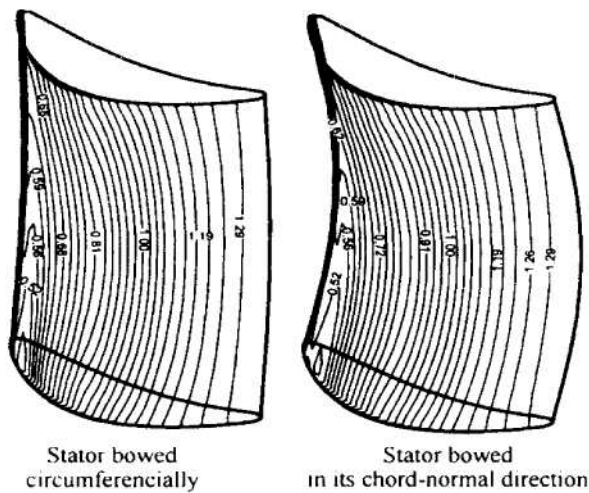


Fig. 2 Static pressure contour on suction surface

本消失，叶片在此处的径向压力梯度是很小的。由于叶片弦向弯曲包括叶片周向弯曲和叶片后掠的双重作用，因此在弯量的把握上要有所考虑，一般情况下弦向弯曲所采用的弯量要明显小于周向弯曲。

4 叶片表面型线对周向弯曲效果的影响

不同曲率分布的叶型对叶片弯曲的敏感程度是有很大的差别的，它直接影响到弯叶片在设计中所起到的作用。“鱼头”叶型由于其良好的气动特点和变工况性能而在汽轮机设计中得到推广，但设计者往往会感到这种叶型对于叶片周向弯曲的敏感度要小于常规叶片，造成这种现象的原因就是气流的折转离心力。“鱼头”叶型背弧较常规叶型要平直的多，这即造成了“鱼头”叶型前缘气流加速较慢，也使得“鱼头”叶型前缘背弧曲率较小，内弧是负曲率。正是由于这个原因，“鱼头”叶型采用周向弯曲叶片设计以后在整个流道中未建立起来明显的C型压力分布（见图3），从而对二次流动的影响非常小，因此降低二次流损失的效果也就不明显。因为此时周向弯曲静叶叶片的径向分力 F_r 在“鱼头”叶型叶片中要较常规叶型小的多。这个原因同叶片喉道以后背弧型线平直、曲率很小，弯叶片作用减弱的原因是一致的。

在上面所述的情况下，设计者可以考虑采用弦向弯曲来达到设计的目的。因为叶片的前掠带来的益处是可以在叶片的前缘曲率较小的叶型，例如“鱼头”叶型中更有效地控制二次流动。不利之处在于它将在叶片的喉道附近产生强烈的径向压力梯度，有可能带来喉道附近气体流动的恶化，这对于涡轮

设计时不利。因此弯、掠结合的弦向弯曲叶片就非常适合于“鱼头”叶型这种前缘小曲率的叶型去控制叶片槽道前部的二次流动，但在弯量的把握上要有所考虑，一般情况下弦向弯曲在相同的弯量下要明显大于周向弯曲。

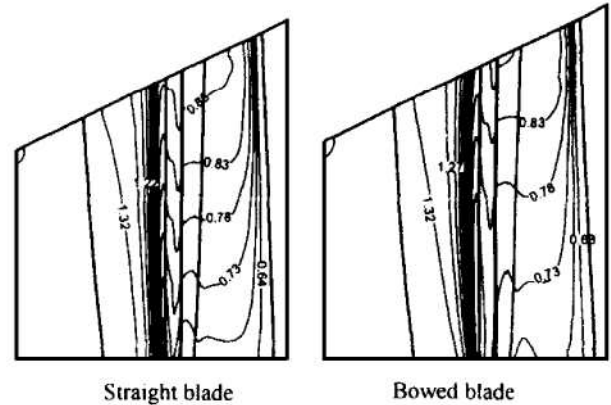


Fig. 3 Static pressure contour at mod-path of converge and bowed blade with “fish head” profile

5 叶片采用弦向弯曲与周向弯曲涡系结构的变化

图4是直叶片、周向弯曲、弦向弯曲静叶的叶背表面和机匣表面的极限流线。结果表明三套叶片叶背气体的分离形式皆为开式分离。但分离线的位置有所不同，它表明通道涡在弦向弯曲叶片中的起始位置最靠前缘，通道涡影响的范围也最大；周向弯曲次之，直叶片起始位置最远离前缘，通道涡影响的范围也最小。在这一现象中下通道涡表现的最为明显。弦向弯曲和周向弯曲叶片前缘马蹄涡鞍点位置要比直叶片更靠前下方，两者之间区别不大。这说明弦向弯曲和周向弯曲叶片前缘马蹄涡生成要比直叶片早，这说明叶片弯曲确实引起了端壁附面层的变化和迁移，进而影响流场中涡系结构的发展。

6 结论

(1) 叶片的周向弯曲和前掠均可在叶片槽道中产生C型压力分布，但其产生的机理是不同的。叶片周向弯曲是由于气流的折转离心力造成的；叶片的前掠是由于气流在径向不同截面槽道中速的状况造成的。

(2) 在相同弯量的条件下弦向弯曲叶片要比周向弯曲在整个流道中建立更强的C型压力分布，这将有利于抑制低能流体在端壁的积聚和端壁附面层

的分离。

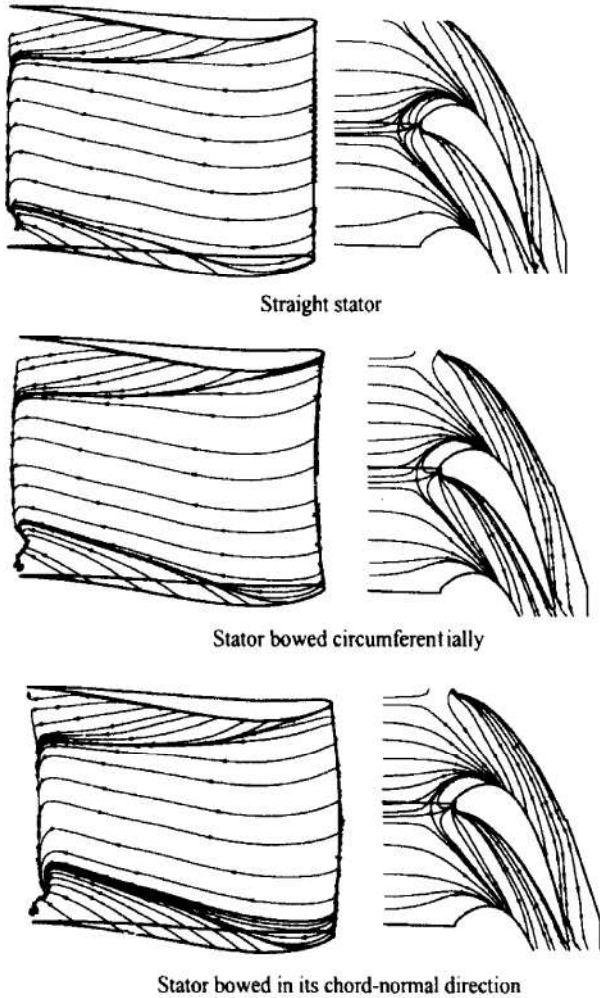


Fig. 4 Liming streamlines on suction surface and near casing

(3) 对于“鱼头”叶型等前缘叶型曲率较小的叶型, 采用周向弯曲效果不显著的原因是其前缘附近叶片的小曲率造成的, 如果采用弦向弯曲则可以较好的解决这个问题。

(4) 采用弦向弯曲和周向弯曲将引起端壁附面层的变化和迁移, 进而影响流场中涡系结构的发展, 从而达到控制二次流的作用。

参 考 文 献

- [1] Wang Zhongqi, Lai Shengkai, Xu Wenyuan. Aerodynamic calculation of turbine stator cascades with curvilinear leaned blades and some experimental results [C]. Symposium paper of 5-th ISABE, India, 1981.
- [2] 顾中华, 刘凤君, 冯国泰, 等. 叶片的周向弯曲与弦向弯曲及其数值分析 [J]. 工程热物理学报, 1994, 15 (3).
- [3] 王松涛, 袁 宁, 王仲奇, 等. 具有 TVD 性质的三阶精度 GODUNOV 格式在粘性流场计算中的应用 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20 (3).
- [4] Baldwin. B. Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows [R]. AIAA 78-257.
- [5] 袁 宁, 张振家, 王松涛, 等. 三维粘性流数值计算在多级透平中的应用 [J]. 推进技术, 1999, 20 (5).
- [6] 袁 宁, 张振家, 王松涛. 某型两级涡轮变比热容三维定常流场的数值模拟 [J]. 推进技术, 1999, 20 (1).

(责任编辑: 盛汉泉)

简 讯

航天动力装置信息网举行 第 21 届技术信息交流会

中国航天第三专业 (动力装置) 信息网第 21 届技术信息交流会暨建网成立 20 周年学术研讨会, 于 2000 年 9 月 18 日至 22 日在浙江省杭州市举行。会议由上海新风化工研究所承办, 主题为“二十一世纪推进技术创新”。36 个单位 86 名代表参加了会议, 交流论文 58 篇, 结合技术创新进行了广泛、深入的交流与讨论, 使与会代表都获得了许多信息, 得到了有益的启发和帮助。会上还对动力网 20 年来工作进行了总结, 肯定了在开展技术信息交流、撰写大型工具书、出版网刊、参与专业发展规划制定、完成情报研究课题等方面所做出的成绩, 指出了今后在网络环境下, 应提高快速反应能力, 加强服务的针对性, 特别注意军民两用技术以及加强国际交流等, 以迎接挑战。

(本刊通讯员)