

文章编号: 1000-0887(2002) 08_0851_04

有叶顶间隙的涡轮弯叶栅拓扑与旋涡结构(II) ——横截面流场拓扑结构与叶栅旋涡结构*

杨庆海, 黄洪雁, 韩万今

(哈尔滨工业大学 458 信箱, 哈尔滨 150001)

(戴世强推荐)

摘要: 根据具有叶顶间隙的直叶栅和正、反弯叶栅壁面流动的墨迹显示以及横截面内气动参数测量, 应用拓扑学原理, 分析了叶栅流道横截面内的拓扑结构。与直叶栅比较, 叶片正弯消除了上通道涡分离线, 并使二次涡由闭式分离转变为开式分离, 而叶片反弯仅影响奇点位置、旋涡强度与尺度。

关键词: 涡轮叶栅; 叶顶间隙; 弯叶栅; 端壁与叶片表面; 拓扑结构

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A

引言

文献[1]指出, 在具有叶顶间隙的涡轮叶栅中, 由于泄漏流动的影响, 大多数奇点与分离线位于上半翼展, 特别是上半翼展的吸力面壁角, 引起那里的气动特性变坏, 不仅产生较大的相对漏气量, 而且产生相当大的涡能耗散与掺混损失。叶片正弯削弱了泄漏流动与端壁流道横向流动之间的相互作用, 使泄漏涡与上通道涡由组对效应转变为合并效应, 消除了上通道涡, 并且二次涡由开式分离产生, 结果在减少相对漏气量的同时, 大大降低了涡能耗散与掺混损失。叶片反弯不改变叶栅壁面流场的拓扑与旋涡结构, 仅引起旋涡产生的位置提前, 涡系间的组对效应增强, 涡能耗散与掺混损失增大。本文采用与文献[1]相同的试验模型并在其基础上, 考察了叶片弯曲后叶栅横截面流场拓扑结构与叶栅旋涡结构的变化。

1 实验结果讨论

1.1 具有叶顶间隙叶栅横截面流场的拓扑法则

叶栅端壁和叶片表面的拓扑法则已在文献[1]中给出, 对三维物体的二维截面, Hunt^[2]给出了临界点的关系:

$$\left(\sum N + 0.5 \sum N' \right) - \left(\sum S + 0.5 \sum S' \right) = 1 - n, \quad (1)$$

故叶栅流道中横截面内的二次流动遵循的拓扑法则为^[3]

* 收稿日期: 2001_05_08; 修订日期: 2002_03_26

基金项目: 国家教委博士点基金资助项目(EDAF24403003)

作者简介: 杨庆海(1969—), 男, 山东临清人, 助理研究员, 博士。

$$(\sum N + 0.5 \sum N') - (\sum S + 0.5 \sum S') = 0, \tag{2}$$

$\sum N$ 和 $\sum N'$ 分别表示横截面内和边界上的结点和半结点总数, $\sum S$ 和 $\sum S'$ 分别表示横截面内和边界上的鞍点和半鞍点总数。

具有叶顶间隙的矩形叶栅与具有叶顶间隙的环形叶栅拓扑等价, 因此前者同样遵循上述拓扑法则。

1.2 横截面流场的拓扑结构

3 套叶栅在轴向弦长中部横截面内二次流场的拓扑结构除奇点位置有差别外, 其余基本一致(图 1)。该截面内的集中涡系以端壁附近两个顺时针旋转的结点 N_{ul} 和 N_l 为特征。源于 N_{ul} 和 N_l 的再附线的两条分支分别进入翼展中部吸力面附近的鞍点 S_{ms} 。 S_{ms} 发出的分离线一条分支上行进入上端壁压力侧附近的半鞍点 S'_{up} , 另一分支下行围绕在下通道涡周围。压力面中部的半附着结点 N'_{ap} 发出的一条再附线进入 S_{mp} 。由上端壁吸力侧附近的半鞍点 S'_{us} 发出的分离线围绕在泄漏涡的周围。在 0.5 轴向弦长处横截面内的二次流场中有 2 个鞍点、2 个半鞍点、2 个结点和两个半结点。奇点总数满足方程(2) 表示的拓扑法则。

在紧靠出口的横截面内, 直叶栅与反弯叶栅的拓扑结构相同(图 2a、c)。除了下通道涡和顶部泄漏涡进一步在强度和尺度方面增大并离开上端部和吸力面之外, 由于该截面位于鞍点 S_c 之后, 逆时针旋转的上通道涡和二次涡形成, 并且强度与尺度随流动逐渐增长, 上通道涡被泄漏涡迅速推向流道和翼展中部。二次涡是位于叶顶吸力边附近的小尺度涡, 它与顶部泄漏涡相互干扰, 产生鞍点 S'_{ts} 。3 种集中涡系——泄漏涡、上通道涡和二次涡的涡量来源于上端壁、上半叶片表面和顶部间隙, 因此在这些表面产生了 6 种形式不同的半奇点。

在直叶栅与反弯叶栅的出口横截面中, 存在 3 个鞍点、5 个半鞍点、4 个结点和 3 个半结点, 奇点总数满足方程(2) 表示的拓扑法则。

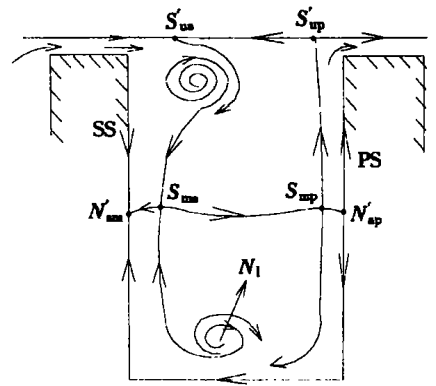
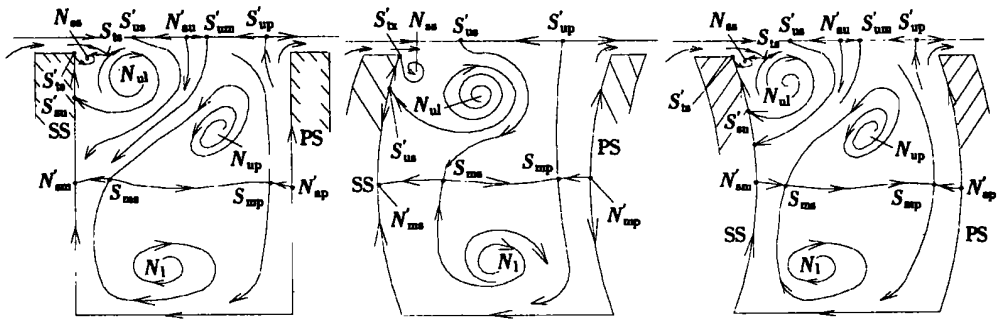


图 1 1/2 轴向弦长处横截面二次流场拓扑结构



(a) 直叶片

(b) 正弯叶片

(c) 反弯叶片

图 2 出口横截面拓扑结构

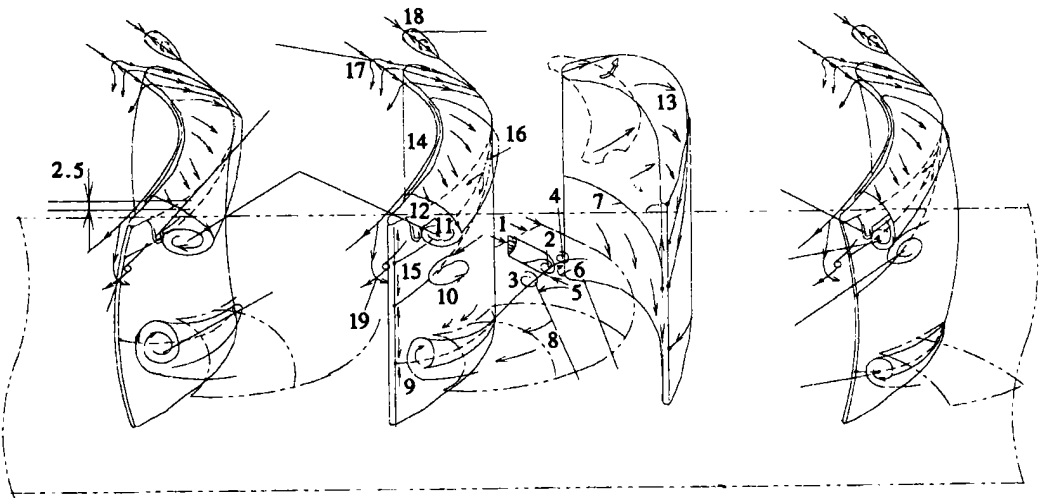
正弯叶栅出口截面的拓扑结构与 0.5 轴向弦长处横截面内的拓扑结构非常类似, 除相应集中涡系的强度、尺度及奇点的位置有变化外, 叶顶吸力侧附近出现了二次涡。叶片正弯消除

了上通道涡,在叶栅流动损失增长很快的后半流道保持横截面内二次流场的拓扑结构变化不大,这是叶片正弯降低相对漏气量以及涡能耗散和掺混损失的主要原因。

1.3 具有叶顶间隙叶栅的旋涡结构

根据涡动力学理论,粘性气体流过静止固体壁面,形成涡量高度集中的附面层,它们在向分离线趋近时,沿分离线卷起,产生螺旋状集中涡系。由此可见,涡的生成必然伴随着分离线的产生。

由图3可以观察到,直叶栅与反弯叶栅除了涡旋产生的位置、强度与尺度有区别外,它们的涡系结构基本一致。这两套叶栅在一个截距的壁面上有7条分离线,分别对应着:上端壁吸力边与压力边马蹄涡、下端壁马蹄涡、上与下通道涡、泄漏涡以及二次涡。在下半翼展区,来流端壁附面层“1”在叶片前缘的鞍点分离,形成马蹄涡“2”。压力侧分支“3”横穿过流道,与吸力侧分支相互缠绕,在吸力面壁角两条分支合并。这一过程可用分离线 S_1 和 S_2 表示,其特点是附面层扭曲,以压力侧分支为核心的下通道涡形成。在具有叶顶间隙的上半翼展来流端壁附面层在叶顶进口边前缘产生双鞍点(S_h 和 S_l)分离,围绕叶顶圆柱形前缘分别形成压力边和吸力边马蹄涡。吸力边马蹄涡的两条分支都迅速折向下游与泄漏涡汇合。压力边马蹄涡在鞍点 S_1 也分裂成两条分支,吸力侧分支横穿过叶顶与泄漏涡相交,压力侧分支跨过流道,与相邻叶顶吸力侧附近的泄漏涡相互作用,被推向流道与翼展的中部,成为上通道涡的核心部分。在横向压力梯度和流动惯性的双重作用下,泄漏流动穿过叶顶,与方向相反的端壁横流相互干扰,形成泄漏涡。在它发展到具有一定的强度时,与其组对的上通道涡和二次涡形成。显然,由于二次涡的强度与尺度较小,对损失的产生,泄漏涡与上通道涡的相互干扰起了重要作用。



(a) 正弯叶片

(b) 直叶片

(c) 反弯叶片

图3 3套叶栅的涡系结构

在正弯叶栅一个截距的壁面上存在着6条分离线。与前两套叶栅比较,它消除了上通道涡分离线。叶片正弯减少了叶顶间隙和端壁流道内的横向压力梯度,这不仅削弱了泄漏流动,而且更大幅度地削弱了端壁流道内的横向二次流,使得压力边马蹄涡的压力侧分支不能与泄漏涡组对,形成上通道涡,而是被泄漏涡合并。与此同时,二次涡由开式分离产生,它的强度与尺度更小。

2 结 论

(1) 在常规直叶栅一个截距的壁面流场中存在着 7 条分离线, 它们分别对应上端壁吸力边与压力边的马蹄涡、下端壁进口边马蹄涡、上和下通道涡、泄漏涡以及二次涡。这些集中涡系之间以及它们和主流之间的相互作用控制着流场。对于损失的产生, 泄漏涡与通道涡之间的相互干扰起主导作用。

(2) 叶片正弯改变叶栅壁面与横截面流场的拓扑与旋涡结构, 而叶片反弯不改变叶栅壁面与横截面流场的拓扑与旋涡结构, 仅引起旋涡产生的位置提前以及在相同横截面内旋涡的尺度与强度增大, 因此涡系间的组对效应增强, 涡能耗散与掺混损失增大。

(3) 壁面流动显示、横截面内二次流的详细测量与拓扑分析相结合, 是正确预测叶栅中拓扑与旋涡结构的一种行之有效的办法。

[参 考 文 献]

- [1] 杨庆海, 黄洪雁, 韩万今. 有叶顶间隙的涡轮弯叶栅拓扑与旋涡结构(I)——实验模型、端壁与叶片表面拓扑结构[J]. 应用数学和力学, 2002, 23(8): 843—850.
- [2] Hunt J C R, Abell C J, Peterla J A, et al. Kinematical studies of the flow around free of surface mounted obstacles: applying topology to flow visualization[J]. Fluid Mech, 1978, 86: 179—200.
- [3] KANG Shun. Investigation on the three-dimensional flow within a compressor cascade with and without tip clearance[D]. Ph D Thesis. Brussel: Vrije Universiteit Brussel, 1993.

Topology and Vortex Structures of a Curving Turbine Cascade With Tip Clearance (II)—Topological Flow Pattern and Vortex Structure in the Transverse Section of a Blade Cascade

YANG Qing_hai, HUANG Hong_yan, HAN Wan_jin

(Academy of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, P O Box 458, Harbin 150001, P R China)

Abstract: By means of ink trace visualization of the flows in conventional straight, positively curved and negatively curved cascades with tip clearance, and measurement of the aerodynamic parameters in transverse section, and by applying topology theory, the topological structures and vortex structure in the transverse section of a blade cascade were analyzed. Compared with conventional straight cascade, blade positive curving eliminates the separation line of the upper passage vortex, and leads the secondary vortex to change from close separation to open separation, while blade negative curving effects merely the positions of singular points and the intensities and scales of vortex.

Key words: turbine cascade; tip clearance; curving cascade; transverse section flow field; topological flow pattern and vortex structure