

前置导叶对两种涡轮导向器及涡系结构的影响*

安柏涛¹, 韩万金², 王松涛², 王仲奇²

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 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: 为了考察导向叶片对实验涡轮导向器气动性能及涡系结构的影响, 采用在实验叶栅前放置前置导叶的方法分别对原型和改型两种涡轮低压导向器进行了低速风洞实验。实验结果表明: 增加前置导叶后, 两种导向器的总损失分别比不加前置导叶时降低, 前置导叶对上、下通道涡强度及位置的影响较大, 并导致损失分布及其它气动参数的相应变化。但增加导叶后两种导向器总体性能差不变, 仍是改型优于原型。

关键词: 涡轮导向叶片; 导流叶片; 边界层; 涡流; 实验

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 04-0333-05

Effects of front guide blade on performance and vortices structure in two turbine low pressure guide vanes

AN Bai-tao¹, HAN Wan-jin², WANG Song-tao², WANG Zhong-qi²

(1. Inst. of Engineering Thermophysics, Academia sinica, Beijing 100080, China;

2. School of Energy Science Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To investigate the aerodynamic performance effects of front guide blade to test cascade, low speed wind tunnel experiments were carried out on the two LGV cascades with and without front guide blade. Experimental results showed that total pressure loss of the two LGV decreased accordingly when they were mounted the front guide vane, and intensity and position of up and lower passage vortices varied obviously. Thus, the loss distribution changed. The modified design has better performance than the original design all the time with or without front guide blade.

Key words: Turborotor; Guide vane; Boundary layer; Vortex flow; Experimentation

1 引 言

实际叶轮机中除第一级静叶外, 其余级静叶前均有动、静叶栅。而实验研究中进口流场大致有两种, 一种是平行进口边界层^[1], 另一种是扭曲进口边界层^[2]。显然采用上述两种进口条件的环型叶栅实验不能完全模拟真实叶栅中的流动状况。

为使实验更接近真实流动, 假如被测量叶栅为静叶, 则通常在前排动叶位置设计适当的前置导叶来模拟动叶出口流场。导叶出口流场的特点是: 气流流经导叶后, 形成高损失的贯穿整个叶高的尾迹区, 多数情况下导叶出口流场中还具有上、下通道涡等集中涡

系, 但此类方法的缺点是导叶位置相对固定, 不能模拟真实流动中的非定常特性。文献[3]详细比较了安装与不安装前置导叶(导叶位置固定)两种进口条件下的模型叶栅出口流场后, 得出结论: 实际叶栅中若被研究叶栅前面存在叶列, 其模型叶栅前的导叶就不能省略。此外, 经过设计的尾部可转动的前导叶经常作为进行变工况实验的一种方法, 来调节模型叶栅进口冲角^[4]。

本文研究的低压导向器分为原型和改型两种。文献[5, 6]分别对原型进行了端壁型线和叶片积叠线的优化, 文献[7]对原型和改型进行了数值模拟对比, 以上计算都是在没有前置导叶条件下进行。本文实

* 收稿日期: 2003-05-26; 修订日期: 2003-11-20。

基金项目: 国家“九七三”项目 (G1999022309)。

作者简介: 安柏涛 (1969—), 男, 博士, 研究领域为叶栅气体动力学, 气膜冷却。E-mail: anbt69@sina.com

验则对比了原形和改型两种导向器分别在安装前置导叶与不安装前置导叶两种条件下的涡系结构与气动特性的变化。

2 实验模型与方法

两种导向器叶栅实验模型均为扇形叶栅, 实验叶片数为 6。低压导向器具有进口段较长的特点, 且进口段上端壁有较大的扩压度, 其中原型为直叶片, 改型为正弯叶片, 两种导向器具有不同的上端壁扩张曲线。叶栅主要几何与气动参数为: 叶高: $h = 227\text{mm}$; 外、中、内径: D_t, D_m, D_h 分别为 $1275\text{mm}, 1048\text{mm}, 821\text{mm}$; 径高比: $D_m/h = 4.62$; 节距: t_t, t_m, t_h 分别为 $138.05\text{mm}, 113.47\text{mm}, 88.09\text{mm}$; 叶片数: $N = 29$; 轴向弦长: 原型 B_t, B_m, B_h 分别为 $99.28\text{mm}, 88.95\text{mm}, 78.63\text{mm}$, 改型 $B_t, B_m, B_h = 95\text{mm}$; 展弦比: 原型 $h/b_m = 1.56$, 改型 $h/b_m = 1.52$ 。图 1 为前置导叶和其几何出气角沿叶高分布。图 2 给出前置导叶的安装位置和模型叶栅测量站布置, 测量站(用 i 表示) 0 测量导叶出口流场, $i = 1 \sim 8$ 测量实验叶栅流场。前置导叶安装位置在相对轴向弦长 $x/B = -3.5$ 处。叶片表面静压测量方法是叶片沿叶高方向均分为 10 份, 共 9 排测压孔, 由根部至顶部分别为 $h = 0.1 \sim$

0.9。

因为测量分为原型和改型, 分别安装和不安装导叶, 因此测量方案共 4 种, 分别为: 方案 1 为改型不安装导叶, 方案 2 为改型安装导叶, 方案 3 为原型不安装导叶, 方案 4 为原型安装导叶。实验在哈尔滨工业大学低速扇形叶栅风洞进行, 实验栅前总压 $p_0^* = 5065\text{Pa}$ (表压), 叶高中部马赫数 $Ma = 0.268$, 雷诺数 $Re = 4.9 \times 10^5$ 。测量采用 5 孔球头探针, 综合实验误差为压力 0.4%, 速度 0.8%, 气流角 0.25° 。

3 实验结果分析

3.1 进口流场比较

图 3 为测量站 0 位置安装导叶与不安装导叶两种情况流场对比。不难看出, 图 3(a) 为典型的平行边界层, 图 3(b) 上、下端壁边界层被扭曲, 中部流场形成明显的带状尾迹区。安装导叶后上、下端壁处总压损失比无导叶时小, 而中部损失增加, 如图 3(c)。

由于在流道内安装与不安装导叶这两种情况, 如果来流条件一样, 则雷诺数不同, 故本文采用安利·邓纳梅损失修正公式对损失系数等进行修正, 使其对应同一雷诺数。

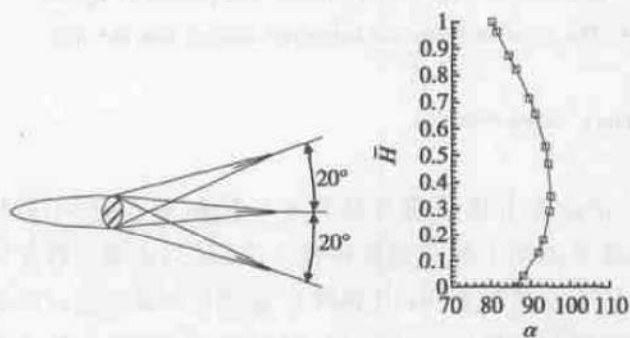


Fig.1 Adjustable front guide blade and geometrical exit angle distribution

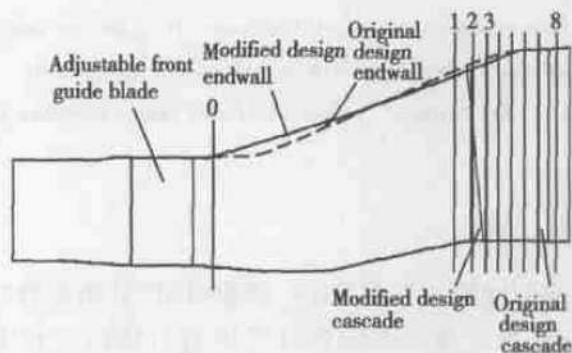
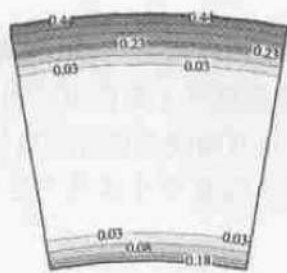


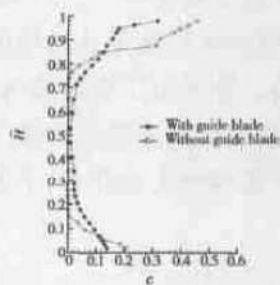
Fig.2 Measurement planes arrangement



(a) Without guide blade



(b) With guide blade



(c) Total pressure loss coefficient

Fig.3 Flow field comparison at measurement plane 0

3.2 叶片表面压力分布

在本实验条件下,对比方案1,2和方案3,4叶片表面静压分布的变化均相当微弱,如图4。无论原型还是改型,在安装与不安装导叶两种情况下,整个叶高范围内表面静压分布几乎完全吻合,微小变化集中在流道前半部分,在扩压段基本无变化。

联系导叶出口流动性质,安装导叶后导叶出口增加了尾迹区流动,且边界层沿周向分布比不安装导叶时扭曲。本实验中,原型和改型尾迹区都是在两叶片之间进入导向器叶栅流道(图5可观察到),这应该是对叶片吸力面和压力面静压的影响都不大的原因。

3.3 各测量截面损失系数等值线及二次流矢量

分析图5中4种方案的总压损失系数等值线看到,安装前置导叶后涡系结构的变化主要受导叶出口尾迹区影响。不安装导叶时叶栅进口可认为是二维流动,而安装导叶后进口变为三维流动。这种三维流动是由导叶出口的尾迹流动直接引起,本实验中这一尾迹区流动主要有二个特点:一是,尾迹区有非常好的传播性质。由导叶出口至实验低压导向器叶栅出口,大部分范围内尾迹区的形状和宽度一直保持很好,只是在流道的后部遇逆压梯度稍有耗散,直至导向器叶栅出口处才基本被通道涡卷吸,但仍有残留;二是,尾迹区的存在使端壁边界层流体沿周向的分布不均匀。其结果是尾迹区两端的边

界层高损失区变薄,随着尾迹区向下游的传播,这种作用始终存在。

安装前置导叶对通道涡形成位置的影响并不大。但由于受尾迹区影响,安装与不安装前置导叶两种情况,两导向器通道涡在出口截面及接近出口截面处的强度和位置产生了一些变化。对比图5中4种方案的 $i=7$ 发现,方案2与方案4接近出口截面附近上、下通道涡核心位置分别比方案1和方案3更靠近上下端壁,上通道涡核心分别上移了约5%相对叶高。而下通道涡核心由于本身位置较贴近端壁,故安装导叶后下通道涡核心位置的移动不易分辨,但趋势是下移。

安装前置导叶后通道涡强度和尺度的减弱主要表现在,形成通道涡的马蹄涡吸力侧与压力侧分支强度及尺度的减弱。图5(a)中方案1的测量截面6,马蹄涡两分支尺度均较大,可清楚观察到其组对向下游运动^[7],但图5(b)方案2中测量截面6马蹄涡压力侧分支已经不可见,仅观察到吸力侧分支且尺度较小强度也较低。图5(c)及图5(d)原型导向器中也有类似现象。最主要原因是导叶出口低能流体分布的变化,即尾迹区带走一部分端壁处的低能流体进入中部区,两端壁处低能流体的数量明显减少,端壁处低能流体数量减少,通道涡核心的强度就下降,位置就更靠近上、下端壁。

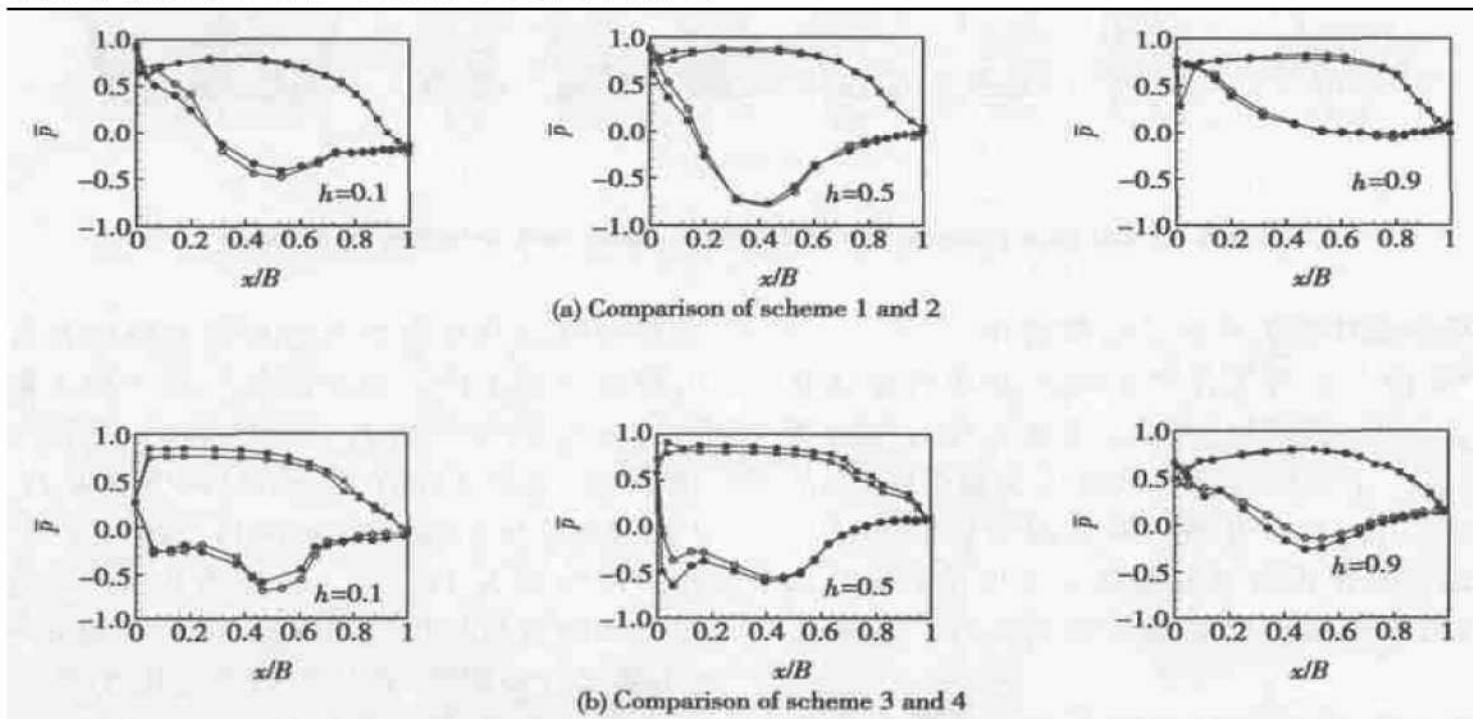


Fig. 4 Static pressure distribution along the blade profile at different height

● SS without guide blade ■ PS without guide blade ○ SS with guide blade □ PS with guide blade

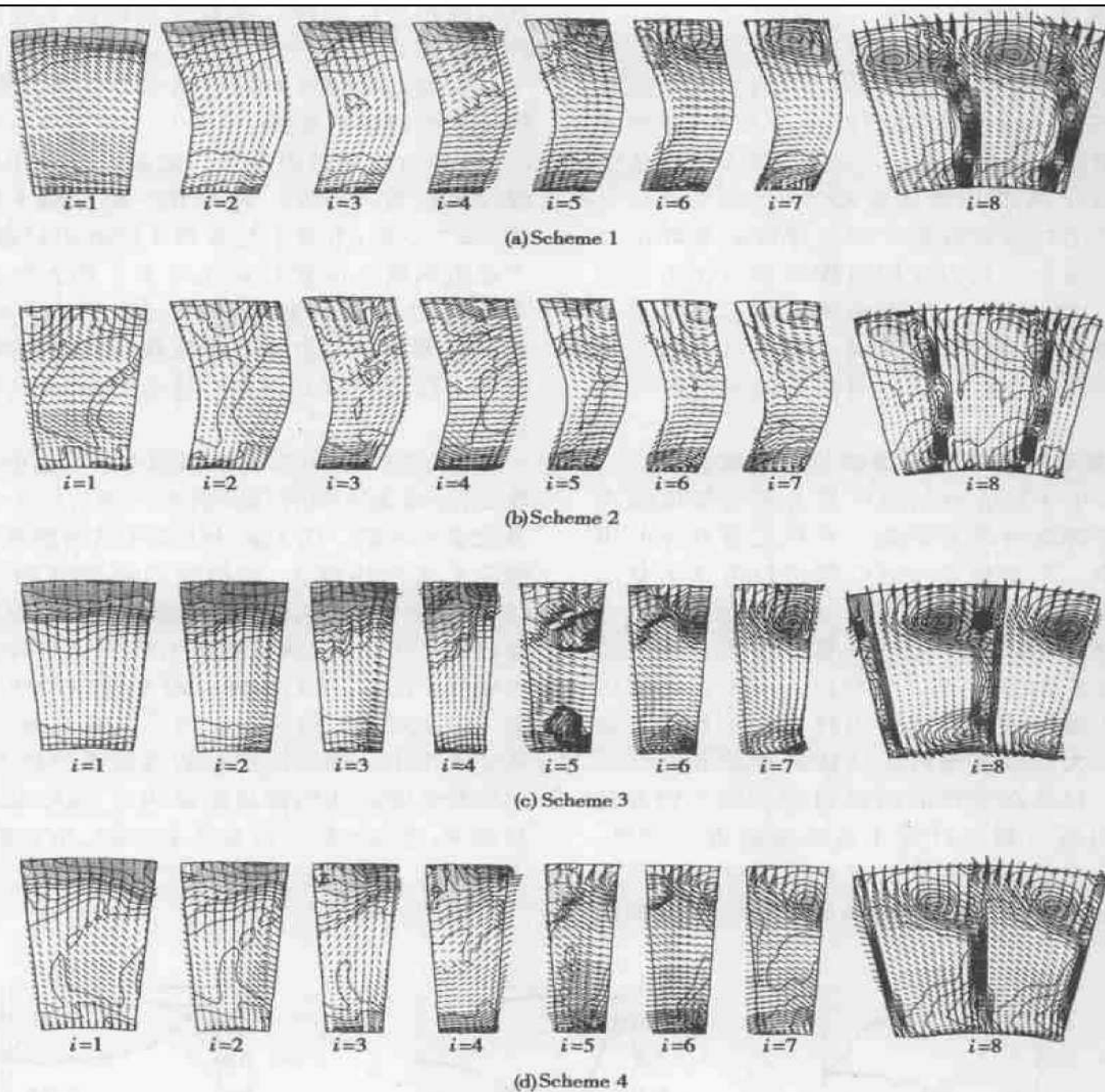


Fig. 5 Local total pressure loss coefficient contours and secondary flow vector

3.3 节距平均总压损失系数沿叶高分布

图6中4种方案总压损失沿叶高分布的变化在于:相对于各自不安装导叶情况,安装导叶后在通道涡形成之前,上、下端壁附近总压损失明显下降,在形成通道涡之后,上、下通道涡对应的损失核心的值均降低,而中部区总压损失稍有提高。这也是和导叶出口边界层的扭曲以及形成尾迹区流动的特点相对应的。

从数值上看,导叶对两端损失的影响大于中部区,两端总压损失的下降大于中部损失的提高,因此

安装导叶后原型和改型的总损失相比各自不安装导叶情况均有下降。实验测得方案2和方案4出口截面($i=8$)质量平均的全总压损失分别为:9.11%和10.29%,方案2比方案4相对减小损失11.5%;方案1和方案3分别为9.61%和11.27%,方案1比方案3相对减小损失14.7%。可以看出安装前置导叶后,原型和改型出口损失均降低,原型叶栅降低的多一些(主要是叶顶附近,减少的损失值比改型稍多)。但有一点是一致的,即改型出口损失在安装和不安装前置导叶两种情况均比原型有较大降低。

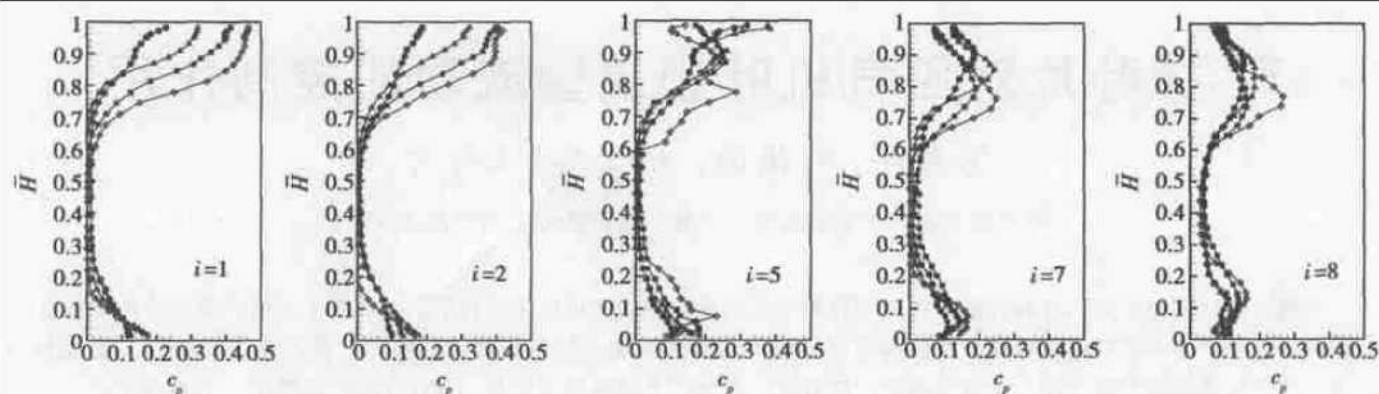


Fig. 6 Pitchwise averaged total pressure loss coefficient distribution along blade height

△—Scheme 1 ●—Scheme 2 ◇—Scheme 3 ■—Scheme 4

3.4 出口气流角

分别对应方案1和3,方案2和4的出口气流角有两点变化,如图7。首先,安装导叶后上、下通道涡位置的气流欠偏转减少;其次,对应上、下端壁处的过偏转减小,但中部折转角增加,这与导叶出口流动造成的低能流体分布的变化相一致。上述变化使负荷沿叶高有均化趋势。

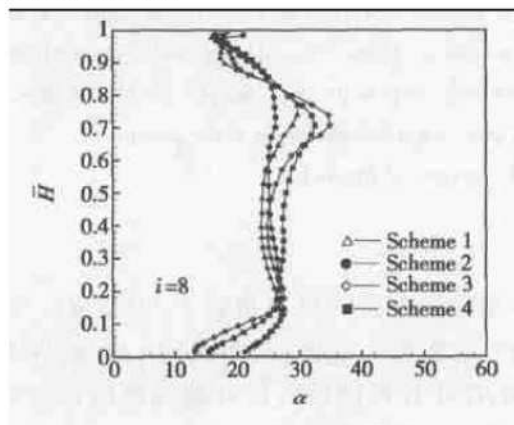


Fig. 7 Pitchwise averaged exit yaw angle distribution along blade height

4 结 论

(1) 安装前置导叶不影响上、下通道涡的形成,但对上、下通道涡强度位置的影响比较大,主要表现在安装导叶后上、下通道涡强度均降低,通道涡核心的位置均比不安装导叶时更靠近端壁。

(2) 前置导叶的存在减少了叶顶附近的二次流损失,而中部区损失增加,但分别对比不安装导叶情况总损失都是下降的,导叶对叶栅两端损失的影响相对中部要大。

(3) 安装前置导叶后,两种导向器出口气流角比

不安装导叶时有不同程度均化。

(4) 前置导叶对原型和改型导向器叶栅总体性能的影响基本是一致的(对原型的影响稍大)。不安装导叶时,改型的总压损失比原型减少14.7%,安装导叶后此值为11.5%。

参考文献:

- [1] Sieverding C H. Recent progress in the understanding of basic aspects of secondary flows in turbine blade passages[J]. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1985, 107(4): 248~ 257.
- [2] Bindon J P. The effect of hub inlet boundary layer skewing on the endwall shear flow in an annular turbine cascade[R]. *ASME Paper*, 79-GT-13, 1979.
- [3] 韩万今,顾中华,卢文才,等.前置导叶对叶栅出口涡系的影响[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(3): 246~ 250.
- [4] 顾中华,韩万今,周 逊,等.冲角对涡轮低压导向器气动特性影响的实验研究[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(2).
- [5] 安柏涛,韩万金,王松涛,等.大扩张角子午流道型线对损失的影响[J]. *推进技术*, 2001, 22(3) (AN Bai-tao, HAN Wai-jin, WANG Song-tao, et al. Effects of diffused meridional passage contour on loss[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(3)).
- [6] 安柏涛,韩万金,王松涛,等.子午扩张流道中叶片积叠线形式对损失的影响[J]. *推进技术*, 2002, 23(2) (AN Bai-tao, HAN Wai-jin, WANG Song-tao, et al. Influence of blade stacking line on loss in diffused meridional passage[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(2)).
- [7] 安柏涛,韩万金,王仲奇.子午扩压对环形叶栅流道内旋涡发生和发展的影响[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(4): 361~ 365.

(编辑:王居信)