

非轴对称端壁成型技术的实验研究

汪传美¹, 李国君¹, 郑金¹, 董康田²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安热工研究院有限公司风机所, 710032, 西安)

摘要: 通过风洞实验对三角函数非轴对称端壁成型法和压差非轴对称端壁成型法的效果进行了实验研究与考核. 结果表明: 与轴对称环形端壁相比, 这2种非轴对称端壁使得总压损失系数都有不同程度的减小, 在叶栅出口下游段距尾缘2 mm截面上, 2套造型端壁流道的总压损失系数分别降低了7.78%和10.20%; 在叶栅出口下游段距尾缘4 mm截面处, 2套端壁造型流道的总压损失系数分别降低了9.70%和14.22%. 实验还验证了2种端壁成型方法的有效性, 采用这2种成型方法设计的叶栅流道能够降低叶栅的二次流流动损失, 提高级效率.

关键词: 实验研究; 非轴对称端壁; 总压损失; 二次流流动损失

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1086-05

Experimental Investigation of Non-Axisymmetric Endwall Profiling Technique in Cascades

WANG Chuanmei, LI Guojun, ZHENG Jin, DONG Kangtian

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Fan Branch, Thermodynamics Power Research Institute, Xi'an 710032, China)

Abstract: Aerodynamic performance of two kinds of annular turbine cascade with non-axisymmetric endwall, which are designed with trigonometric function profiling method and pressure difference profiling method, are experimentally investigated with an annular cascade wind tunnel test rig. The results show that the total pressure loss in both cascades with non-axisymmetric endwall are lowered compared with that in axisymmetric annular cascade, which decreases by 7.78% and 10.20% respectively for these two cascades on the 2 mm measuring plane downstream of the cascade trailing edge. And on the 4 mm measuring plane downstream of the cascade trailing edge, the total pressure loss decreases by 9.70% and 14.22% respectively. These two profiling methods for non-axisymmetric endwall are validated by the experiments to provide a useful technique for reducing the secondary flow loss and to improve the efficiency of turbine cascade.

Keywords: experimental investigation; non-axisymmetric endwall; total pressure loss; secondary flow loss

在叶轮机内部各种能量损失中, 叶栅二次流损失所占比例有时可达叶栅总损失的30%~50%^[1]. 国内外学者通过数值模拟证实了非轴对称端壁成型是一种能够减小叶栅压力面与吸力面之间的横向压力梯度、降低叶栅内部二次流流动损失、提高叶栅效率的有效方法. 目前, 对于这一全新课题的

研究仅限于提出不同非轴对称端壁设计方法, 并通过叶栅算例的数值模拟进行考核的阶段. 然而, 对于各种非轴对称端壁成型方法的实验研究在国内外还极为少见, 为了更加全面地分析非轴对称端壁成型方法对叶栅内部流场的影响, 风洞实验仍是最直接、最可靠的手段. 本课题小组将提出的三角

函数方法和压差方法应用于后加载环形叶栅流道的非轴对称端壁成型上,选择数值模拟计算出最优型线,最后通过机械加工获得的这2套非轴对称端壁安装到现有的风洞上进行吹风实验,以三角函数法和压差法的有效性进行了进一步验证,并从实验角度分析、讨论了2种非轴对称端壁成型方法对叶栅二次流损失的影响。

1 非轴对称端壁成型方法及数值模拟结果

1.1 三角函数非轴对称成型方法

文献[2]提出了三角函数非轴对称端壁成型方法,并给出了该方法的详细设计思路,本文不再复述。文献[2]通过对跨音速直列叶栅的数值计算表明:采用该端壁成型方法可以有效降低叶栅内的二次流损失,其中单峰幅值控制函数的最大幅值约占5%叶高为宜,此时在叶栅128%轴向弦长处总压损失系数降低了4.7%。文献[3]对具有后加载特性的亚音速直列叶栅进行了考核,计算结果表明:造型后叶栅二次流损失减少了1%,效率提高了(0.73±0.24)%。

1.2 压差非轴对称成型方法

文献[1]给出了根据叶栅端部压力分布特性进行非轴对称端壁成型的设计思路,限于篇幅本文不再介绍。从文献[1]对跨音速直列叶栅的数值模拟结果可知:当幅值控制系数取0.075时,叶栅出口位置处的总压损失系数约降低了5.6%,文献[4]将该方法应用于具有后加载特性的亚音速直列叶栅进行考核,结果表明:控制函数中幅值控制系数取0.075时,叶栅128%轴向弦长处总压损失系数降低了14.9%。

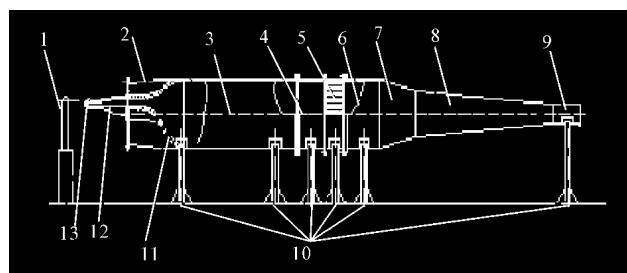
文献[5]将这2种成型方法推广到环形叶栅的非轴对称端壁设计中,与未造型叶栅相比,经过2种方法造型后的叶栅单级效率分别提高了2.2%和3.8%。通过上述的分析可以看出,三角函数和压差2种方法对于所考核的不同加载特性的直列叶栅和环形叶栅的非轴对称端壁的改造都能够有效地降低叶栅内部流动二次流损失,抑制叶栅内部二次流及其涡系的发展,改善叶栅出口下游流场的分布特性。

然而,任何一种理论方法、计算模型的提出,都必须以实际过程的观察、研究和总结为基础,因此本文对经过数值模拟设计的2套后加载非轴对称端壁叶栅流道进行了吹风实验,对三角函数端壁成型方

法和压差端壁成型方法的造型效果进行了考核,以进一步研究叶栅内部三维流动情况以及非轴对称端壁造型对于三维流动的影响。

2 实验风洞及实验叶栅

环形叶栅风洞实验台的结构主要包括5部分:风源管路、风洞本体、实验件安装装置、测量装置和数据采集装置^[6-7]。环形叶栅实验台的布置见图1。图2给出了亚音速后加载叶栅上静压测点位置。其中,叶栅栅距为24.94 mm,弦长为40.15 mm。



1:三维坐标测量系统;2:收敛段;3:直管段;4:整流器;5:蜂窝器;6:直管段;7:扩张段I;8:扩张段II;9:直管段;10:筒体支架;11:收敛器;12:过渡段;13:实验叶栅

图1 环形实验台结构示意图

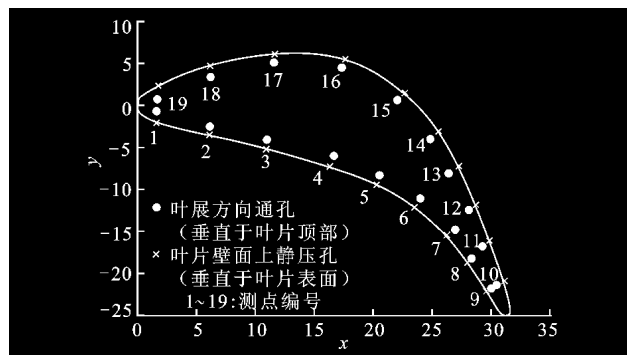


图2 实验叶栅的静压孔测点位置示意

3 非轴对称端壁

实验中采用的叶栅与文献[5]中数值模拟考核的叶栅几何条件完全相同,因此通过线切割和数控中心加工出的三角函数非轴对称端壁和压差非轴对称端壁的端壁型线是由文献[5]数值计算确定的。图3给出了这2套非轴对称端壁示意图。

4 实验装置及实验条件

4.1 实验测量装置

实验测量过程中将“L”型五孔探针安装于三维坐标架系统,由位移机构带动探针沿栅距方向、叶高方向和轴向移动。采用水银测压管测量由五孔探针获取的叶栅出口下游段流场压力。在测得压力值后,



(a)三角函数法成型



(b)压差法成型

图3 非轴对称端壁示意图

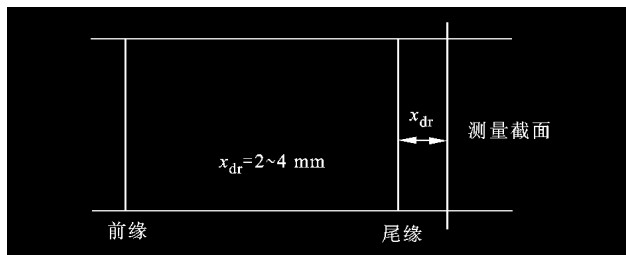
利用校准曲线并结合连续方程、运动方程、能量方程求出总压、静压、气流速度,总压损失系数以及二次流速度等流场参数^[7].

4.2 实验测点布置

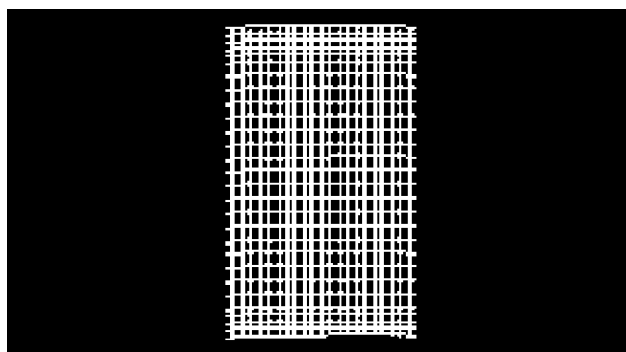
为了考查非轴对称端壁对叶栅内部流场的影响以及端壁造型对叶栅做功能力是否产生影响,在叶栅的叶展壁面上布置静压测点来确定叶栅型面上压力分布(见图2).由于2套非轴对称端壁型面变化情况不同,上下端壁附近区域内的叶栅型面上静压值限于实验条件无法进行测量,因此叶片其他叶高位置上的静压分布可以将数值计算结果作为研究依据.为了与文献[7]中提供的轴对称环形叶栅流道的风洞实验值进行比较,本实验选取了与文献[7]相同的叶栅出口截面位置——叶栅出口下游段距叶栅尾缘2 mm和4 mm处(见图4a).探针沿叶高方向从叶根向叶顶移动,栅距方向为顺时针方向,每个出口截面上测点数为17(展向)×23(周向),图4b给出了测点布置图.

4.3 实验参数

本文对出口马赫数为0.45设计工况下的叶栅出口截面处的气流参数进行了测量.为了保证实验条件,对每个工况下的进口总压参数进行了2次测量并取其平均值(见表1).出口静压即为实验时的大气压力.



(a)叶栅出口测量截面位置示意图



(b)叶栅出口测点布置

图4 叶栅出口测量截面及其测点布置示意图

表1 实验环形叶栅进出口参数

p_{01}/Pa	113 791.4
T_{01}/K	314.25
Ma_2	0.45
p_{02}/Pa	98 145
$\alpha_0/(\circ)$	90.0

注: p_{01} 为气流入口总压; T_{01} 为入口总温; Ma_2 为叶栅出口马赫数; p_{02} 为出口背压; α_0 为相对周向的轴向进口气流角.

4.4 实验误差

由于实验设备和测试条件的限制,实验测量过程中必然会导致误差的产生.首先,探针的加工工艺不能达到足够高的精度,探针的尺度相对于叶栅来说也比较大;其次,由于实验过程中环境因素不断地变化而导致叶栅进口参数不稳定,造成测量参数发生波动.这些因素都造成实验结果与真实值之间存在着一定的差别,所以在数据处理及结果分析过程中应该对数据进行处理,并考虑到误差的存在.

5 实验结果分析

本文对采用三角函数法造型的非轴对称端壁环形叶栅、压差法造型的非轴对称端壁环形叶栅以及轴对称端壁环形叶栅^[7]的3种叶栅流道进行了风洞实验.

5.1 型面压力分布

图5a给出了轴对称端壁环形叶栅中叶展处型面压力的实验测量值和数值计算分布情况,图中良

好的吻合程度证实了实验测量的可靠性.从图 5b 可知:经 2 种非轴对称端壁造型后的叶栅流道叶展型面压力分布与轴对称端壁叶栅叶展压力分布完全吻合,非轴对称端壁对于压力场的影响没有扩展到叶栅的叶展处,这表明 2 种非轴对称端壁成型方法对叶栅做功能力没有产生负面影响.

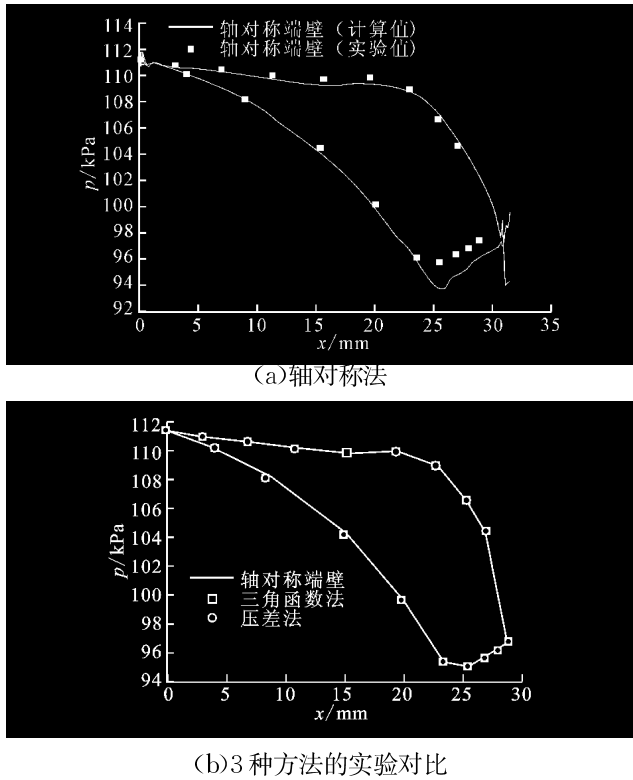


图 5 不同叶栅中叶展型面压力分布

5.2 总压损失系数分布

表 2、表 3 给出了 3 套叶栅出口下游段不同位置处当地总压损失系数在不同叶高($z \cdot H^{-1}$)位置上的分布情况,其中 z 代表以下端壁为基准的径向坐标, H 代表径向叶高.从表 2、表 3 可以看出,经过端壁成型设计后,流道的出口下游段质量加权总压损失系数 C_{pt} 相比于轴对称环形端壁质量加权总压损失系数有着明显的降低.

表 2 出口距尾缘 2 mm 截面总压损失系数分布

$z \cdot H^{-1}$	C_{pt}		
	轴对称环 形叶栅	三角函数 造型叶栅	压差造 型叶栅
0.0	0.025	0.020	0.020
0.3	0.014	0.015	0.012
0.6	0.014	0.013	0.013
0.9	0.015	0.011	0.013
1.0	0.019	0.015	0.014

表 4 给出了叶栅出口下游段不同截面位置上质

量加权的当地总压损失系数平均值.从表中可以看出:在出口下游段距尾缘 2 mm 和 4mm 截面处,三角函数法端壁造型流道和压差法端壁造型流道的当地总压损失系数比轴对称环形端壁都有不同程度的减小,在出口下游段距尾缘 2 mm 截面处,2 套造型端壁流道的总压损失系数分别降低了 7.78% 和 10.20%;在出口下游段距尾缘 4 mm 截面处,2 套端壁造型流道的总压损失系数分别降低了 9.70% 和 14.22%.这说明 2 种非轴对称端壁成型方法能够有效降低叶栅内部二次流流动损失.

表 3 出口距尾缘 4 mm 截面处总压损失系数

$z \cdot H^{-1}$	C_{pt}		
	轴对称环 形叶栅	三角函数 造型叶栅	压差造 型叶栅
0.0	0.041	0.029	0.036
0.3	0.019	0.012	0.018
0.6	0.015	0.014	0.010
0.9	0.016	0.014	0.007
1.0	0.017	0.017	0.008

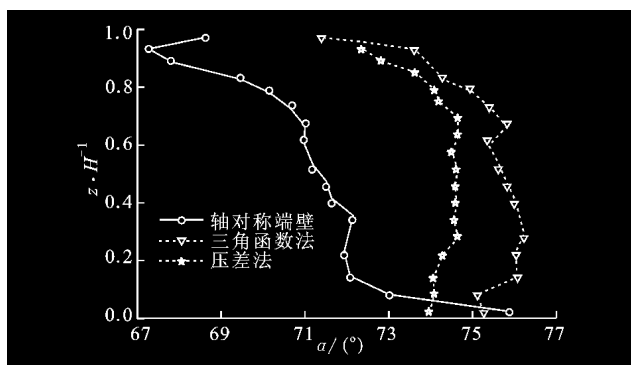
表 4 出口下游段不同截面总压损失系数

截面位置	C_{pt}		
	轴对称环 形叶栅	三角函数 造型叶栅	压差造 型叶栅
出口下游段距尾 缘 2 mm 截面处	0.015 68	0.014 46	0.014 08
出口下游段距尾 缘 4 mm 截面处	0.018 56	0.016 76	0.015 92

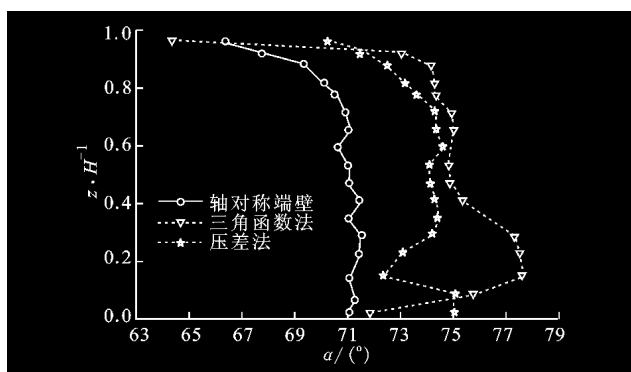
5.3 出口气流角分布

气流角的偏转与变化可以直观地反映出二次流的变化形式,出口气流角分布能否得到改善是衡量端壁造型的主要评定参数之一,它的改善能达到降低叶栅级间进气损失、提高级效率的效果.

图 6 给出了 2 个出口截面处质量加权出口气流角 α 实验值沿叶高的分布情况.可以看出,经过端壁造型后,叶栅出口气流角更加接近设计值(75°),其中压差法的效果最好,三角函数法的出口气流角比设计值大.在轴对称环形叶栅上的端壁附近捕捉到了气流角的欠偏转现象(见图 6),而在端壁造型叶栅流道中却没有捕捉到这一现象,表明非轴对称端壁造型使得二次流强度和通道涡强度有所降低^[7].同时证明,经过端壁造型后叶栅出口气流角更加接近设计值,这对于改善叶栅出口下游段流场分布,减小级间损失和进气损失都将起到正面作用.



(a)出口下游段距尾缘 2 mm 截面处



(b)出口下游段距尾缘 4 mm 截面处

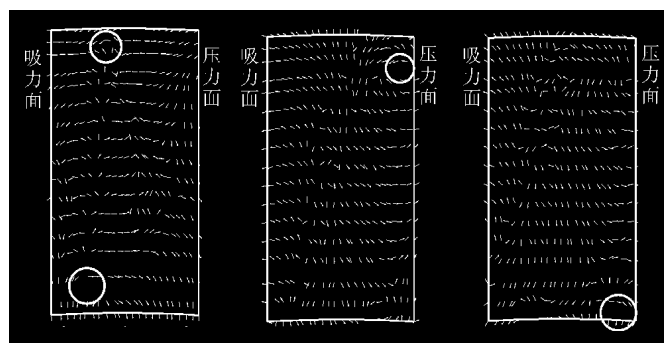
图6 出口截面上平均出口气流角沿叶高的分布

5.4 二次流速度矢量分布

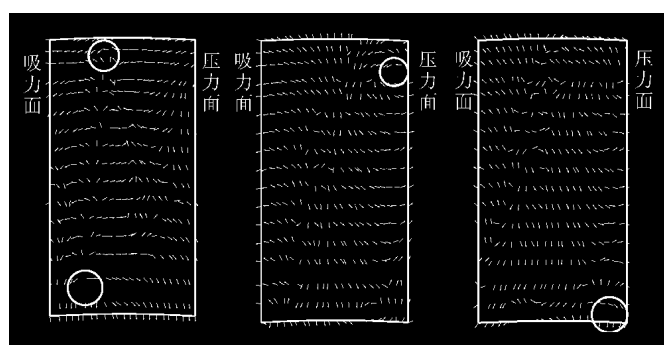
文中采用文献[7]的二次流定义方式来处理二次流速度矢量.图7和图8分别给出了叶栅出口下游段距尾缘2 mm和4 mm截面处二次流速度矢量的实验值分布.通过比较可以发现:在同一轴向截面位置上的环形对称端壁流道内的上、下端壁附近能够捕捉到2个旋向相反的通道涡,这是由于端壁附面层内低能流体在通道涡的作用下向吸力面附近运动堆积,并沿叶高方向扩展,从而形成了2个高损区,分别对应叶栅上下通道涡的核心.2种非轴对称端壁叶栅流道内,只有在上端壁和下端壁附近能捕捉到范围和强度较小的涡系,因此可知,非轴对称端壁能够有效地抑制叶栅内部二次流的产生及发展.另外还可以看出:非轴对称叶栅通道内部的径向二次流比环形轴对称叶栅流道内径向二次流小.

6 结 论

(1)本文通过实验手段对三角函数非轴对称端壁成型方法和压差非轴对称端壁成型方法的造型效果进行了验证,虽然实验过程不可避免地存在误差,但通过比较发现,该实验能够真实地反映叶栅流场特性,客观地揭示出非轴对称端壁对于叶栅内部及其出口下游段流场参数的影响.



(a)轴对称端壁 (b)三角函数法 (c)压差法

图7 叶栅出口下游段距尾缘 2 mm 截面处
二次流速度矢量分布

(a)轴对称端壁 (b)三角函数法 (c)压差法

图8 叶栅出口下游段距尾缘 4 mm 截面处
二次流速度矢量分布

(2)在叶栅出口下游段距尾缘2 mm截面处,三角函数法成型的叶栅流道质量加权当地总压损失系数平均值比未造型叶栅流道降低了7.78%;压差法成型的叶栅流道质量加权当地总压损失系数平均值相比于未造型叶栅通道降低了10.20%;在叶栅出口下游段距尾缘4 mm截面处,2种非轴对称端壁造型流道的质量加权当地总压损失系数平均值比轴对称环形叶栅流道分别下降了9.7%和14.22%.这表明:2种非轴对称端壁成型方法都能够有效地抑制叶栅内部二次流及其涡系的产生和发展,有效地降低二次流流动损失.另外,压差端壁成型方法的造型效果要优于三角函数法,这一结论与文献[5]中的结果一致.

(3)由于实验条件和实验手段的限制,目前无法实现叶栅通道内部流场参数的测量,通过叶栅出口下游段2个截面处流场特性参数的分析比较,可以看出:由于端壁的非轴对称性改变了上、下壁面附近区域的压力分布,进而对整个三维空间的压力分布产生影响.由于压力场分布的变化,使得叶栅流道内部及其出口下游段流场分布更加均匀,流动损失降

低.

参考文献:

- [1] 郑金,李国君,李军,等.一种新非轴对称端壁成型方法的数值研究[J].航空动力学报,2007,22(9):1487-1491.
ZHENG Jin, LI Guojun, Li Jun, et al. Numerical research on a new non-axisymmetric endwall profiling method [J]. Journal of Aerospace Power, 2007,22(9): 1487-1491.
- [2] 马晓永.叶栅非轴对称端壁成型技术及其流动特性的数值研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2005.
- [3] 任光辉.非轴对称端壁成型技术在透平叶栅中应用的数值研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2006.
- [4] 郑金.叶栅非轴对称端壁成型技术的数值模拟及实验研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2007.
- [5] 郑金,李国君,任光辉,等.考虑压差影响的非轴对称端壁成型方法及环形叶栅中的应用[C]//2006年中国工程热物理年会学术会议.重庆:中国工程热物理学会,2006.
- [6] 王玉璋.极小展弦比后加载叶栅气动特性的数值模拟与实验研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2000.
- [7] 李卫华.后加载叶栅气动特性的环形叶栅实验研究与数值模拟[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2004.

(编辑 王焕雪)