

射流式漩涡发生器对离心叶轮性能的影响

刘小民, 肖立宁

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用数值计算方法, 对带有漩涡发生器的离心叶轮内流动进行了研究, 从宏观和微观角度说明了流体的可压缩性直接影响着流动分离的发生. 将二倍转速下的离心叶轮作为研究对象, 详细分析了漩涡发生器不同前缘距离(射流管距叶片前缘的距离)、射流管径、倾斜角度(前向倾斜角和侧向倾斜角)及射流流量等对流动控制性能设计的影响. 结果表明, 前缘距离和前向倾斜角对叶轮性能的影响不如射流管径、射流流量以及侧向倾斜角的影响大, 最优参数组合时的效率和压比较原机分别提高了 3.06% 和 4.09%. 进一步研究发现, 合理布置漩涡发生器能明显改善离心叶轮小流量工况时的性能, 且有效扩大了其变工况范围.

关键词: 漩涡发生器; 流动控制; 离心叶轮; 数值计算

中图分类号: TH452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0123-06

Numerical Investigation to Performance of Centrifugal Impeller with Vortex Generator Jets

LIU Xiaomin, XIAO Lining

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The flow performance of centrifugal impeller with vortex generator jets is investigated numerically, and the obvious effects of the fluid compressibility on flow separation is verified respectively from both macro and micro viewpoints. The effects of different forward distance (distance between the jet and the impeller vane), different jet diameter, different inclined angles (including the injection angle and the yaw angle) and different injection flux on the flow separation control are evaluated. The numerical results show that the jet diameter, the yaw angle and the injection flux exert greater influence than the other two parameters. The efficiency and the pressure ratio of the impeller are increased by 3.06% and 4.09% via optimal design of vortex generator jets. And the performance of the centrifugal impeller at lower flow rate is improved and the working range is widened by the reasonable distributions of vortex generator jets.

Keywords: vortex generator jet; flow control; centrifugal impeller; numerical calculation

射流式漩涡发生器(VGJs)作为一种成功的控制策略来控制流动的分离, 其优点在于当压缩机不需要控制时能够将其关闭而不会产生附加的流动损失. 涡生成技术最初由 Wallis 于 1952 年引入^[1], 他提出具有合适倾斜角的射流管可产生离散的纵向涡, 进而控制边界层分离和流动失速. Day 于 1993 年通过实验在 4 级轴流压缩机的启动中采用射流方

法^[2], 而并没将其应用在其他形式压缩机中. Skoch 分别于 2003 年和 2005 年研究了在叶轮出口无叶区和扩压器进口轮盖侧布置不同 VGJs 方案对压缩机性能的影响^[3-4], 比较了脉冲射流和连续射流对旋转失速的控制程度, 但在具体的内部控制机理上没有给出详细的说明. Alexander 于 2000 年引入连续射流和脉冲射流对压缩机的分离失速现象进行研究和

控制^[5],但未综合研究射流管各参数的影响。

本文比较了 NASA Lewis 实验室的低速离心叶轮在一倍和二倍转速时(二倍转速时只从气动方面作研究分析,不考虑强度等方面的因素)的气动性能,在考虑流体可压缩性的影响及流动控制效果的前提下将叶轮转速提高了一倍,并在叶轮叶片轮盖前缘部分采用不同的 VGJs 控制方案来研究 VGJs 设计参数对叶轮性能的影响。通过对带有 VGJs 的叶轮内部流动特性的分析,详细探讨了 VGJs 流动控制机理。

1 研究对象和数值方法

本文所用原始叶轮为 NASA 低速离心压气机实验叶轮。该叶轮为半开式后弯叶轮,共 20 个叶片,进口直径为 0.870 m,进口叶片高度为 0.218 m,出口直径为 1.524 m,出口宽度为 0.141 m,出口安装角为 55°,叶顶出口速度为 153 m/s,叶轮进口到出口的叶顶间隙均为 2.54 mm。设计流量为 30 kg/s,设计转速为 1 862 r/min^[6-7]。原始叶轮在设计转速和二倍设计转速下加入 VGJs,图 1 所示为射流管影响参数的几何图。为了说明不同的 VGJs 参数对叶轮性能的影响,本文中 VGJs 的参数选择详见表 1。

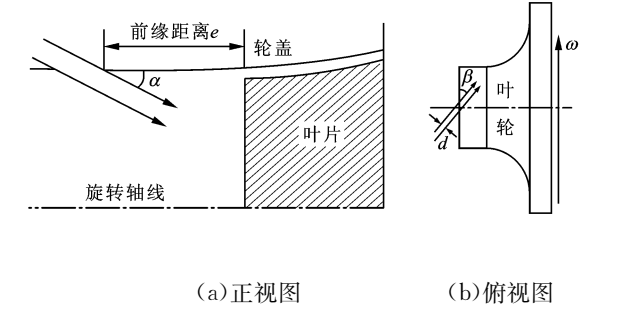


图 1 射流管参数几何图

表 1 VGJs 的参数选取表

e/mm	d/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	射流流量 与主流流 量之比/%
43	20	20	25	0
			35	1
65	30	30	45	3
			60	5

数值计算采用 Numeca 计算流体力学软件,压缩机原机模拟中所用为 IGG 中 AutoGrid 生成的结构化网格,主流道分为进口延伸段、叶轮通道段和出

口延伸段,射流管采用蝶形网格结构,整个计算区域网格约 40 万左右。采用中心差分格式对空间进行离散。由于 Spalart-Allmaras 代数模型相对简单、计算量较小及稳定性好,因此采用湍流模型。边界条件为叶轮进口给定总温总压,射流管进口给定速度方向和射流流量,出口给定质量流量和初始背压。

2 计算结果和对比分析

2.1 叶轮总体性能分析

本文定义压比为出口总压与压缩机原机的进口总压之比。从图 2 可以看出:数值计算结果与实验测量吻合较好,误差均在 2% 以内,符合工程上模拟计算的要求。在设计转速下,流量为 16.0 kg/s 工况时和二倍设计转速下流量为 30.0 kg/s 工况时的压比和效率均明显下降,此工况下的流动已经很恶化,超出了正常意义上的稳定工况范围。加入 VGJs 后,虽然在大流量工况时效率和压比有所下降,但在小流量时不仅提高了气体总压缩功的利用率并且提高了压升,可见加入 VGJs 后偏向小流量的工况范围明显拓宽。

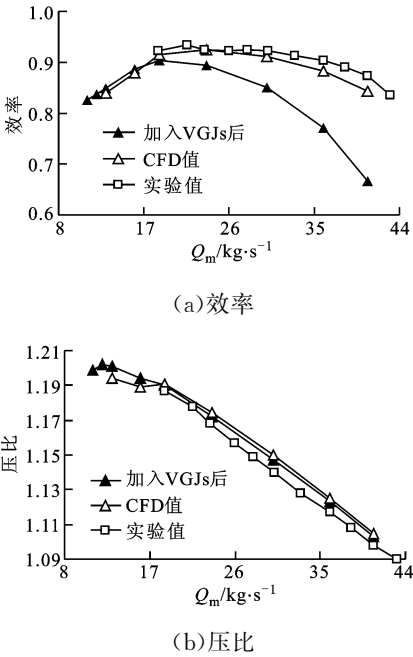


图 2 设计转速下叶轮性能曲线图

比较图 2 和图 3,不难发现在设计转速和二倍设计转速时,加入 VGJs 后虽然小流量下的性能都有所提升,但设计转速时的性能提升明显较二倍转速时少。分析认为:设计转速下,设计流量(30.0 kg/s)时进口截面相对马赫数很小,如图 4 所示,从轮盘附近的 0.168 到轮盖附近的 0.306,基本上均处于

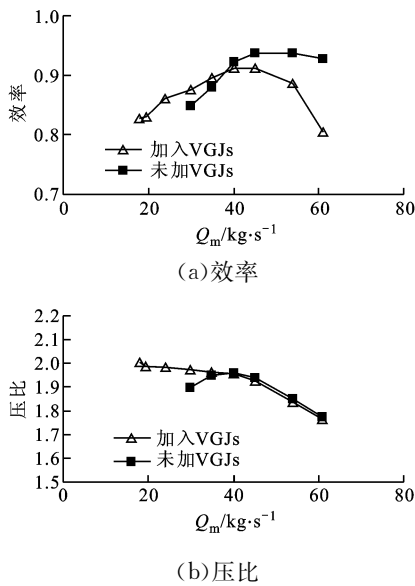
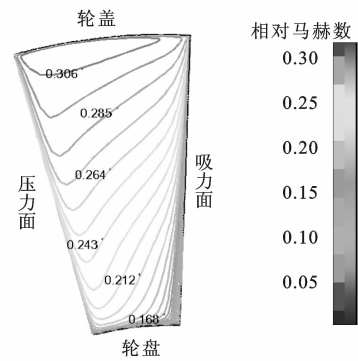
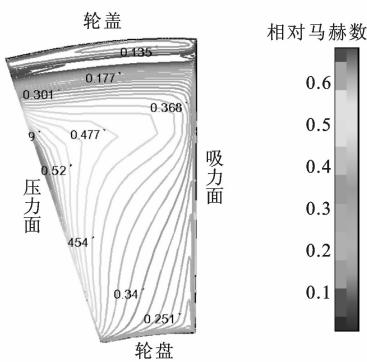


图 3 二倍设计转速下叶轮性能曲线图



(a)设计转速



(b)二倍转速

图 4 设计转速和二倍转速时进口截面相对马赫数分布

不可压缩状态。在二倍转速时,30.0 kg/s 工况下进口截面相对马赫数总体上比设计转速时的高,除轮盘吸力面交界处和轮盖附近的马赫数较小外,其余均大于 0.3,流体处于可压缩状态。根据 Alexander 的研究结果,流体的可压缩性蕴含着潜在的能量,其所提供的惯性增加了流体的流动动能,从而加速了

分离的产生^[5]。可见,二倍转速相比于设计转速,流动稳定性差,较易产生分离,而加入 VGJs 后抑制流动分离、改善流动性能的措施较容易实现,因此本文将着重研究二倍转速下流量为 30 kg/s 时 VGJs 对叶轮内部流动的影响。

2.2 不同 VGJs 布置下叶轮效率、压比的比较

从计算结果选取典型的数据对各参数进行分析对比,最终的计算结果如图 5 所示。通过合理布置 VGJs 的参数,叶轮的效率和压比均可不同程度地得到提升,尤其是在前缘距离为 43mm、射流管径

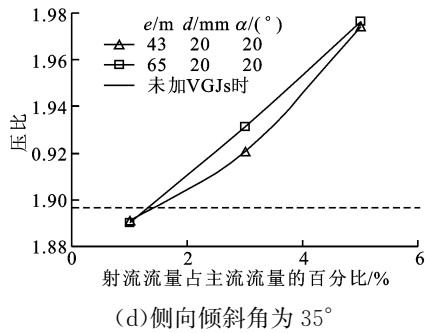
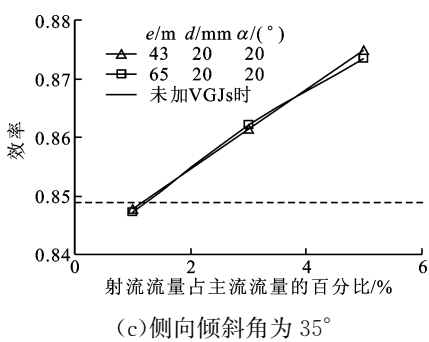
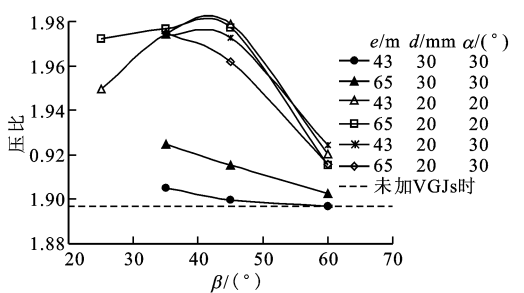
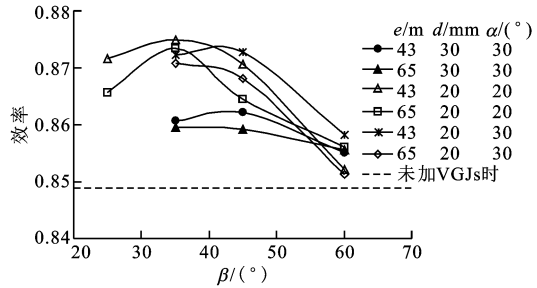


图 5 不同 VGJs 参数布置时叶轮性能的比较

为 20 mm、前向倾斜角为 20° 、侧向倾斜角为 20° 和射流流量为主流流量的 5% 时的情况下,加入 VGJs 后叶轮性能相比于原机模拟时的性能提高最多。

由图 5a、5b 可以看出: e 为 43 mm 时的性能较 e 为 65 mm 时稍有优势,只在 β 为 45° 时, e 为 43 mm 处的效率和压比才有明显提高。分析认为,离心叶轮发生分离的部位在叶片前缘附近的轮盖处,而射流诱发的纵向涡在其后一定范围内起作用,且能持续一段距离的影响。

增加射流管径后,叶轮效率和压比有很明显的下降趋势,但管径过小会导致射流速度的过度增加,产生激波效应,因此在本文研究范围内,管径为 20 mm 的 VGJs 效果最好。

当前向倾斜角 α 为 20° 和 30° 时,叶轮性能提高的差距不明显,因此在前向倾斜角不超出使射流喷射到主流区的前提下,前向倾斜角的改变对效率和压比的提高不明显。 β 对叶轮性能的提高有十分明显的影响,并且在 35° 和 45° 之间存在一个最佳侧向倾斜角,因此射流侧向倾斜角和叶轮进口冲角之间具有一定的函数关系,存在一个最佳的侧向倾斜角。

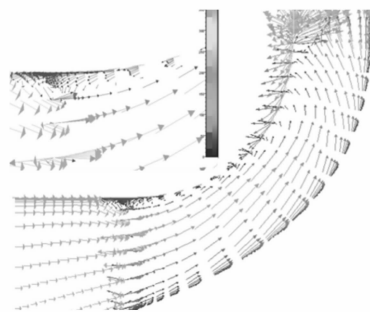
射流流量对叶轮性能的提升同样起着至关重要的作用。从图 5c、5d 可看出,射流流量越大,叶轮性能提高越多。这是因为射流流量越大,由此产生的纵向涡诱导射流主流的掺混能力越强,边界层内得到的动量越大,分离越不容易发生。

2.3 二倍设计转速时加入 VGJs 前、后叶轮的内部流动分析

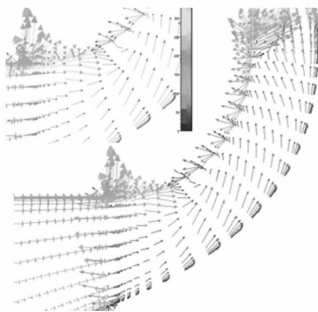
为说明 VGJs 对叶轮内部流动及其性能的影响,本文对二倍设计转速时加入 VGJs 前后的叶轮内部流场进行了数值分析,其中 VGJs 的各参数分别为前缘距离 43 mm、射流管径 20 mm、前向倾斜角 20° 、侧向倾斜角 20° 和射流流量占 5% 的主流流量。

2.3.1 加 VGJs 前后相对速度的比较 从图 6 可看出,未加 VGJs 时从压力面到吸力面流动的分离现象逐渐加重,且在吸力面上由从入口处 50% 的流动恶化状态发展到最终占据整个叶轮出口处的恶化状态。加入 VGJs 后,可明显看出流动方向上速度有了很大改善,压力面上的回流基本消除,在吸力面上的前缘部分流动比较均匀,只是在叶轮的转弯处出现了稍微的分离。与未加 VGJs 时的流动比较,出口截面附近的流动明显均匀,有利于叶轮性能的提升。

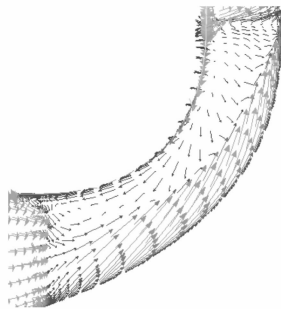
2.3.2 加 VGJs 前后相对静压的比较 从图 7 可以看出,加入 VGJs 后,其做功能力(相对静压图上



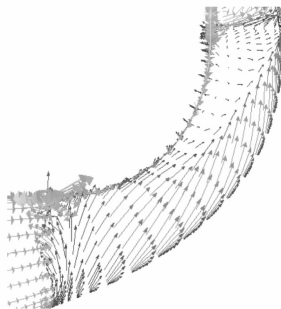
(a)未加 VGJs 的压力面



(b)加 VGJs 的压力面



(c)未加 VGJs 的吸力面



(d)加 VGJs 后的吸力面

图6 加 VGJs 前、后子午流道方向上相对速度分布图

压力面和吸力面之间的面积)虽然没有很大的提升,但由于加入了少量的射流流量,使得入口处的相对静压有所提高,最终促使了出口相对静压的提升,从总体上提高了叶轮的性能,达到了增压的目的。

2.3.3 加 VGJs 前后通流等值线的比较 本文定义尾迹区为 $W_m/U_2 \leq 0.20$ 的区域(其中 W_m 为子午速度, U_2 为叶轮叶尖速度)。沿流道方向取 3 个截

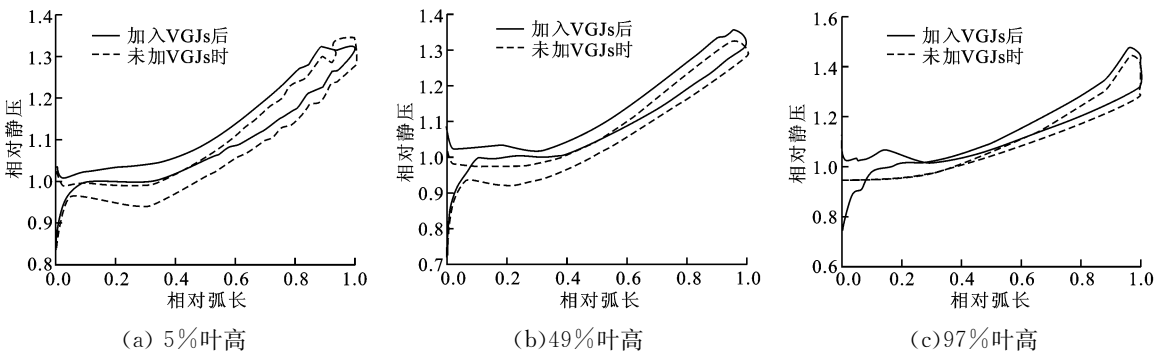


图 7 不同叶高处压力面和吸力面上相对静压的比较

面,分别为 51 截面(叶片进口处)、118 截面和 170 截面(叶片出口处),其具体位置如图 8 所示^[6].

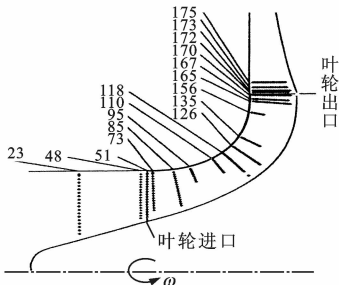


图 8 子午方向测量截面示意图

从图 9 可看出:51 截面处加入 VGJs 后在叶轮的入口处基本消除了未加 VGJs 时轮盖附近尾迹区的存在,只是在压力面和吸力面附近出现了小范围的尾迹区;118 截面处于弯道曲率最大处,加入 VGJs 后缩小了横跨压力面和吸力面之间的尾迹涡,使其集中布置在轮盖压力面交界处的范围内,由于 VGJs 的加入,使尾迹区的范围大幅度减小,且使其由轮盖压力面向轮盖吸力面方向移动;170 截面处加入 VGJs 后,除尾迹区的范围有所减小外,整个截面的通流速度平均值也有所提高,并且出口处通流速度较均匀.由于从叶轮出来的气流要进入扩压器,因此流速的均匀性对扩压器内的流动改善也起到了至关重要的作用.从入口截面到出口截面, VGJs 的影响逐渐减小,但其对流动的影响范围很大.

综上所述,在叶轮叶片前缘加入射流发生器,无论是从效率、压力的提升,还是从回流、尾迹流的消除及出口速度的均匀方面均有不同程度的改善.

3 结 论

本文在原有低速离心叶轮几何模型的基础上,

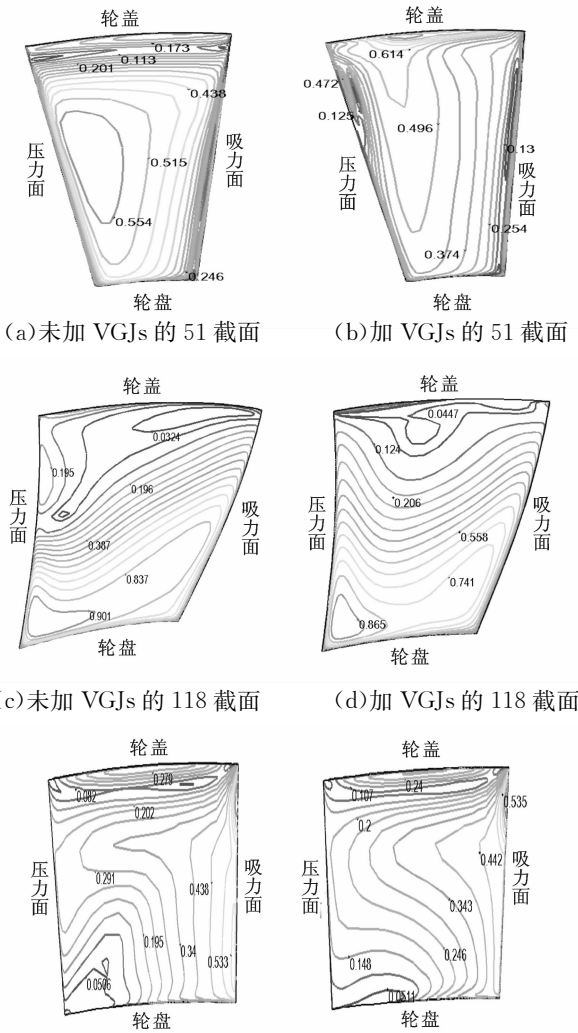


图 9 加 VGJs 前、后各流道截面处的通流速度分布

研究了一倍和二倍设计转速时不同 VGJs 布置对叶轮气动性能的影响,通过流动分析和性能比较,获得的主要结论如下.

(1)流体的可压缩性所蕴含的能量抑制了流动分离的发生,宏观表现在二倍设计转速下离心叶轮

加入 VGJs 后控制效果优于原设计转速.

(2)在叶片前缘轮盖处合理布置 VGJs,可以有效控制叶片前缘附近的流动分离,提高叶轮在小流量工况时的性能.

(3)在 VGJs 的参数配置中,前缘距离和前向倾斜角对叶轮性能提升的影响不如射流管径、射流流量以及侧向倾斜角的影响大.

(4)加入到主流中的射流主要是消除了流动中的回流,缩小了尾迹区的影响范围,使得叶轮出口流动分布趋于均匀,这有利于下游扩压器内流动状态的改善.

参考文献:

- [1] WALLIS R A. The use of air jets for boundary layer control, Aerodynamics Note 110(N-34736)[R]. London,UK;Aeronautical Research Laboratories, 1952.
- [2] DAY I J. Active suppression of rotating stall and surge in axial compressors [J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1):40-47.
- [3] SKOCH G J. Experimental investigation of centrifugal

compressor stabilization techniques [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(4):704-713.

- [4] SKOCH G J. Experimental investigation of diffuser hub injection to improve centrifugal compressor stability [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1):107-117.
- [5] STEIN A. Computational analysis of stall and separation control in centrifugal compressors [D]. Atlanta, USA; School of Aerospace Engineering,Georgia Institute of Technology, 2000.
- [6] HATHAWAY M. Laser anemometer measurements of the three-dimensional rotor flow field in the NASA low-speed centrifugal compressor, TP-2527 [R]. Washington,USA;NASA, 1995.
- [7] CHRISS R M, HATHAWAY M D, WOOD J R. Experimental and computational results from the NASA Lewis low speed centrifugal impeller at design and part-flow conditions [J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(1):55-65.

(编辑 杜秀杰 王焕雪)