

串列叶片式离心叶轮内流场的数值研究

王宝潼, 张楚华, 席光, 刘帆

(西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 对串列叶片式离心叶轮内部三维可压缩湍流及气动性能进行了数值模拟, 重点研究了诱导轮及导出轮之间5种不同相对周向位置排列方式对串列式叶轮内部流场及气动性能的影响, 并与传统单列叶片式离心叶轮进行了比较. 研究表明: 对于串列式叶轮, 相对周向位置因子对气动性能及流场的影响较大; 当串列式叶轮的后轮相对于前轮沿旋转方向交错排列时, 叶轮的多变效率低于单列式叶轮, 当相对周向位置因子为0.0~0.4时, 压比高于单列式叶轮, 压比最大提高为1.4%, 且叶轮出口流动参数沿周向分布比较均匀, 对降低叶轮-扩压器间非定常冲击损失及气动噪声有利; 当串列式叶轮的后轮以反旋转方向排列时, 叶轮的多变效率及压比均低于单列式叶轮, 且叶轮内部及出口流动分布很不均匀. 研究成果对串列式离心叶轮及离心压缩机的节能设计具有一定的参考价值.

关键词: 串列叶片; 离心叶轮; 交错排列; 相对周向位置; 数值模拟

中图分类号: TH452 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1275-04

Numerical Study on Internal Flows in Centrifugal Tandem-Blade Impeller

Wang Baotong, Zhang Chuhua, Xi Guang, Liu Fan

(The National Engineering Research Center of Fluid Machinery and Compressor, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Three-dimensional compressible turbulent flows and aerodynamic performance were numerically simulated for centrifugal tandem-blade impellers. The study was focused on the influence of relative circumferential arrangement configuration between the inducer and the exducer on the internal flows and aerodynamic performance of tandem-blade impellers. Five relative arrangement configurations were considered and the flows in tandem-blade impellers were compared with those in a conventional single row blade impeller. The numerical results indicate that, for the tandem-blade impeller, the relative circumferential arrangement configurations play important roles in the flow fields and aerodynamic performance. When the exducer is staggered with the inducer along the single rotation direction, the polytropic efficiency is lower than that of the single row blade impeller. When the factor of relative circumferential position lies from 0.0 to 0.4, the pressure ratio is higher than that of the single row blade impeller, and the highest pressure ratio increases by 1.4%. Moreover, a relative smooth flow distribution along the circumferential direction forms at the impeller outlet, which may reduce the unsteady interaction between the impeller and the vaned diffuser and the aerodynamically generated noise sources there. When the exducer is staggered along the counter-rotation direction, both of the polytropic efficiency and the total pressure ratio of the tandem-blade impeller are lower than those of the single row blade impeller, and the outlet flow distributions vary quite along the circumferential direction.

Keywords: tandem-blade; centrifugal impeller; staggered arrangement; relative circumferential position; numerical simulation

多翼式机翼及串列叶栅技术应用于飞行器外形设计及轴流式压缩机叶栅的设计已有 50 多年的历史,而串列叶片技术应用于离心压缩机,尤其是离心叶轮的历史相对较晚.与传统的单列叶片式离心叶轮相比,串列叶片式离心叶轮的叶片由前后两列(或多列)相互分割、交错排列的旋转叶片组成,其中前列叶片组成诱导轮,后列叶片组成导出轮.目前,对离心叶轮串列叶片的研究还很匮乏,且说法不一.文献[1]利用浸入边界法数值研究了离心泵串列叶片式叶轮内的流动,发现串列叶片能明显改进叶轮出口流动的均匀性,前轮与后轮之间的周向相对位置是影响出口流动均匀性的主要因素.文献[2]采用性能测试及激光测速技术实验研究了串列叶片式离心叶轮对离心压缩机级的气动性能及内部流动的影响,实验表明:相对周向位置对离心叶轮总压比的影响不大,但串列叶片结构能有效减小喘振流量,从而扩大了离心压缩机的稳定运行范围.文献[3]采用定常黏性流动模型数值计算了串列叶片式离心叶轮的内部流动,研究发现:相对周向位置对总压比、总温升、效率、滑移系数有影响;串列叶片并不能提高叶轮流动效率,但能使叶轮出口流动更均匀.这些研究成果启发我们,采用串列叶片式叶轮有望改善叶轮-扩压器之间的匹配关系,从而提高整级效率.

本文利用非结构化网格上的有限体积法,数值研究前后轮叶片间的 5 种相对周向位置对串列叶片式离心叶轮内部流动及性能的影响,并与传统单列叶片式离心叶轮进行对比,为离心式叶轮机械的高效节能设计方法提供参考.

1 串列叶片式离心叶轮模型

本文研究的串列叶片式离心叶轮以 NASA-LSCC 离心叶轮为基础^[4],在叶片子午长度约 3/4 处将叶片分割成前轮及后轮(见图 1a).定义相对周向位置因子 $\lambda_s = \theta_s / \theta_\Delta$,其中 θ_s 为后轮轮相对前轮沿叶轮旋转方向转动的角度(见图 1b), θ_Δ 为单叶道所占的周向角度.该模型的前轮部分基本上为三元叶轮,而后轮部分基本上为二元叶轮,这样的结构有利于叶轮加工、相对排列方式的调节及运行控制装置的结构设计.

叶轮的主要参数为:叶轮出口直径 $D_2 = 1.52$ m,进口直径 $D_1 = 0.87$ m,出口宽度 $b_2 = 0.14$ m,进口宽度 $b_1 = 0.22$ m,叶片出口安装角 $\beta_{2A} = 35^\circ$,前后轮叶片数均为 $N_z = 20$;设计流量 $m = 30$ kg/s,转速

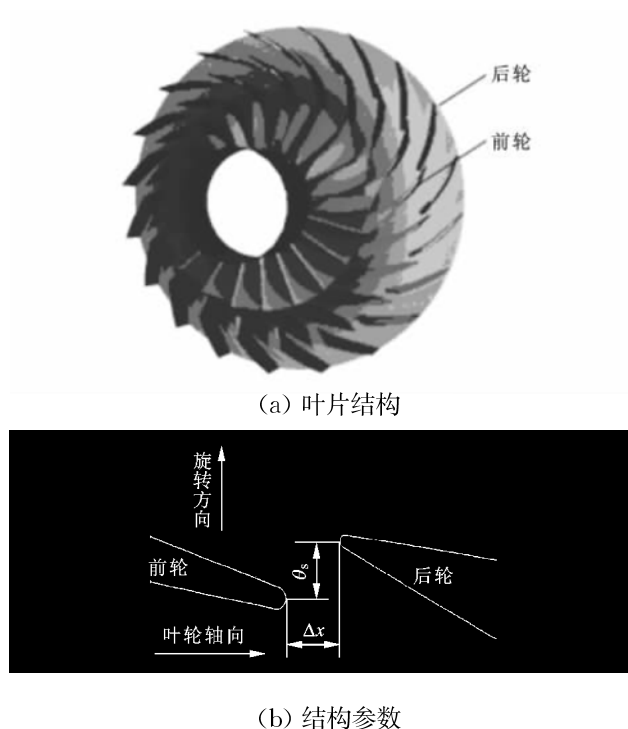


图1 串列叶片式离心叶轮

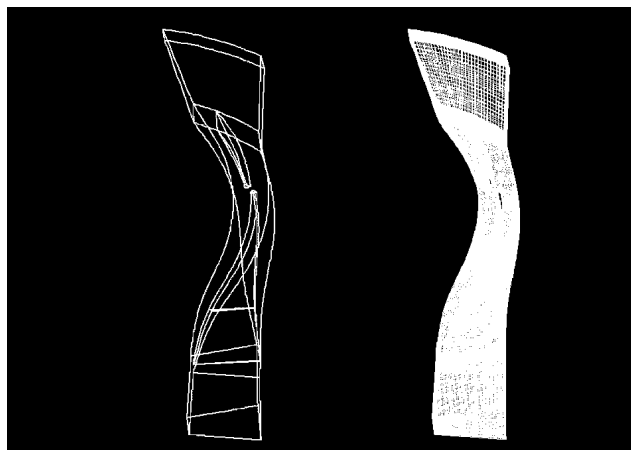
$n = 1\ 862$ r/min.

2 流动数值方法

在旋转坐标系下的三维相对定常可压缩湍流控制方程组包括连续性方程、NS 方程组、能量守恒方程、湍流量方程组及状态方程,流动介质为空气,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型,详细的方程形式及模型参数见文献[5-6].

数值方法为三维非结构化网格上的有限体积法.对流项采用二阶迎风格式离散,扩散项及压力梯度项采用二阶中心格式离散,速度及压力的耦合采用同位网格上的 SIMPLE 算法计算.进口给定总压、总温及流动方向,出口给定质量流量.

采用叶片绕流模型建立单叶道计算区域(见图 2a),在叶轮进出口沿上下游适当延长计算区域来分别描述进风口及无叶扩压器的影响.前轮位于计算区域的中心,后轮的位置与 λ_s 有关:当 $\lambda_s < 0.5$ 时,后轮相对前轮的角度为 θ_s ;当 $\lambda_s > 0.5$ 时,利用周期性条件还需将后轮逆向旋转 θ_Δ 角度,使后轮始终位于单叶道计算区域内.在网格划分过程中,首先将计算区域划分为多块简单的子区域.其次,用六面体网格离散子区域,沿子午方向、跨叶片方向及叶高方向分别布置 164、40 及 40 个网格,网格数约为 26 万.最后,通过非结构化网格方法将每块网格合并(见图 2b).在流场变化剧烈的区域,如近壁区、尾迹区,适当加密了网格.



(a) 计算区域

(b) 计算网格

图2 串列叶片式离心叶轮计算模型

3 计算结果及讨论

3.1 单列叶片式叶轮的变工况性能预测及实验验证

首先对单列叶片式叶轮内部流动及气动性能进行数值计算,叶顶间隙 $t=0.002\ 54\ \text{m}$. 对5个流量进行计算,分别对应于设计流量 ($30\ \text{kg/s}$) 的67%、83%、100%、117%、133%. 由图3可看出:在设计流量下,多变效率的计算值为0.934,相应的实验值为0.923,误差主要是计算模型没有考虑轮盘损失造成的. 根据文献[7]中的经验模型,计及轮盘损失后的多变效率计算值为0.919,与实验值仅相差0.4%,表明所采用的计算模型能够预测离心叶轮内部的流动状况及气动性能.

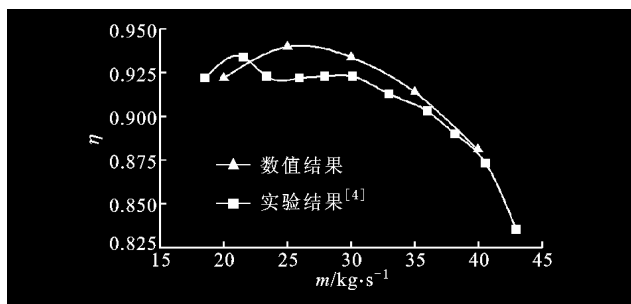


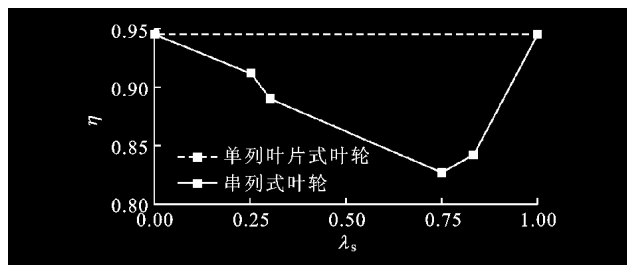
图3 单列式离心叶轮的多变效率-流量性能曲线

3.2 相对周向位置对串列式叶轮流动及性能的影响

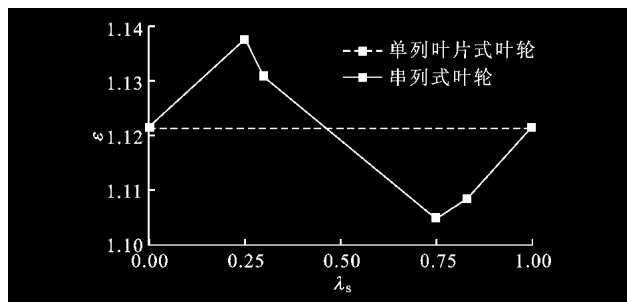
对前后轮间5种不同相对周向位置情况下的串列式离心叶轮内部流场及气动性能进行了数值计算,相对周向位置因子分别为 $\lambda_s=0.0, 0.25, 0.30, 0.75, 0.83$, 其中 $\lambda_s=0.0$ 相当于前后轮间无分割无交错情况,即相当于单列叶片式离心叶轮. 5种情况下的转速及流量均取为 $1\ 862\ \text{r/min}$ 及 $30\ \text{kg/s}$.

从图4可以看出:串列式离心叶轮的多变效率均低于单列叶片式离心叶轮,并且随着周向位置因子 λ_s 的增大,效率先下降后增加,最低效率点约发

生在 $\lambda_s=0.75$ 附近. 仔细观察还可以发现,在 $\lambda_s=0.0\sim0.25$ 范围内效率降低的程度很小,而在 $\lambda_s=0.75\sim1.0$ 范围内效率变化较大,表明效率与相对周向位置因子变化规律呈现出典型的非线性变化过程. 压比 ϵ 随相对周向位置因子 λ_s 的变化关系比较复杂,在 $\lambda_s=0.0\sim0.40$ 范围内,串列式叶轮的压比高于单列式叶轮,而在 $\lambda_s=0.40\sim1.0$ 范围内低于单列式叶轮. 总体来看,串列式叶轮的相对周向位置对气动性能有较大的影响,当后轮相对于前轮沿旋转方向交错排列时 ($\lambda_s=0.0\sim0.25$),串列式叶轮相对于单列式叶轮效率略有降低,但压比高于单列式叶轮,当 $\lambda_s=0.25$ 时,压比最大可提高1.4%. 当沿反旋转方向交错排列时 ($\lambda_s=0.75\sim1.0$),串列式叶轮的效率及压比均低于单列式叶轮. 这说明,沿旋转方向交错排列方式下的气动性能优于反旋转方向.



(a) 多变效率

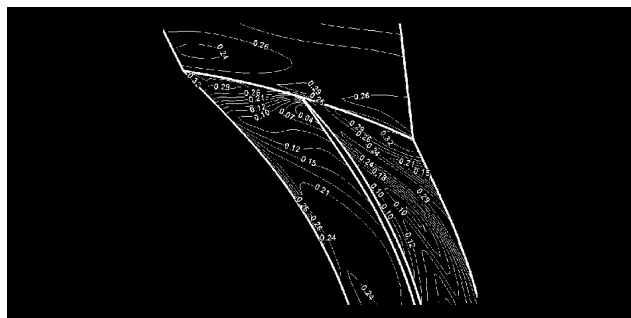


(b) 压比

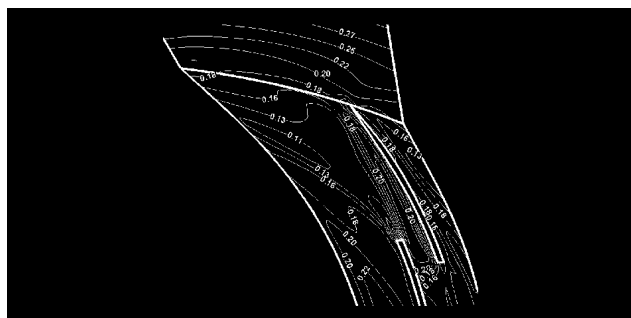
图4 串列叶片式离心叶轮与单列式叶轮气动性能比较

串列式离心叶轮的气动性能变化过程与叶轮内部流场及其相对周向位置的影响有密切关系. 为了清楚起见,图5只给出了后轮附近的局部放大图. 由图5可以看出:在叶轮内部,单列式叶轮的流动不均匀性比较明显,沿圆周方向流场变化较大;沿旋转方向交错的串列式叶轮在前轮压力面侧与后轮吸力面侧的狭小区域内流动马赫数变化较大,而在其他区域内流动分布比较均匀;在反旋转方向交错情况下,后轮吸力面侧的流动参数变化剧烈,可以清楚地看出从后轮前缘到出口出现一个清晰的自由射流区域. 在无叶扩压区内,沿旋转方向交错的串列式叶轮的流动参数沿圆周方向的分布最均匀,单列式叶轮次之,而反旋转方向交错的串列式叶轮的流动参数

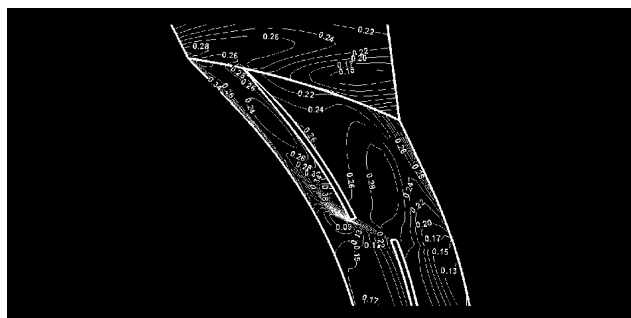
变化最明显. 根据文献[1-3]的讨论, 串列式叶轮能有效改进叶轮出口的三维效应, 使出口流动获得改善, 为叶片扩压器内的流动提供较好的进口流场, 从而提高离心式压缩机/泵的整级流动效率. 从本文计算结果看, 沿旋转方向交错的串列叶轮能有效减弱流动沿圆周方向的变化程度, 从而减轻叶轮-叶片扩压器间的非定常流动损失、气动噪声等现象.



(a) 单列叶轮($\lambda_s = 0.0$)



(b) 沿旋转方向交错($\lambda_s = 0.25$)

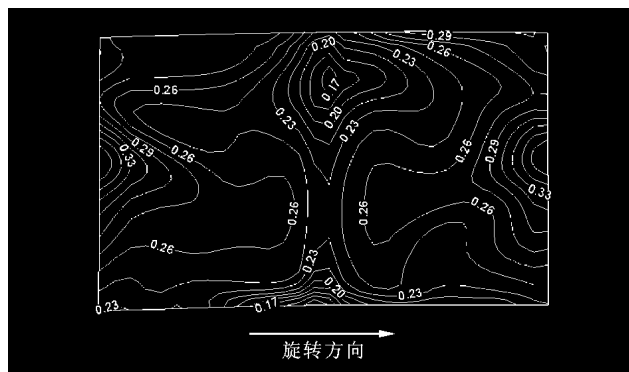


(c) 反旋转方向交错($\lambda_s = 0.75$)

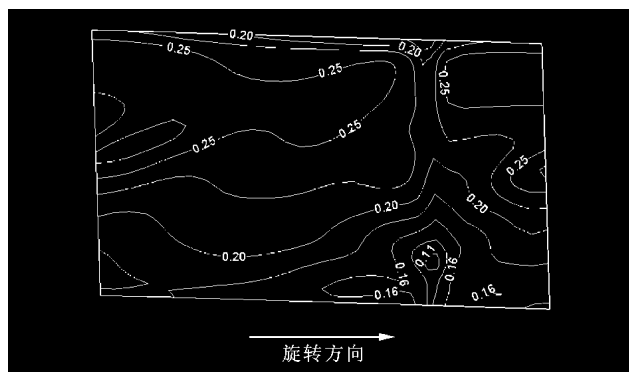
图5 单列及串列叶片式离心叶轮轮盖侧相对马赫数

相对周向位置对串列式离心叶轮出口的速度分布均匀性也有较大的影响. 由图6可以看出: 在单列叶片式叶轮出口截面上, 速度分布均匀性较差, 其中在叶片尾缘对应的出口截面中间位置, 出现低速尾迹区, 尾迹区两侧出现高速区域, 截面相对马赫数变化范围为0.17~0.33; 沿旋转方向交错的串列式叶轮出口截面除在后轮叶片出口位置出现较小的低速区域外, 大部分区域相对马赫数值在0.20~0.25之间, 速度均匀性较好; 在反旋转方向交错情况下, 速度分布均匀性没有改善, 以出口叶片所在位置为界,

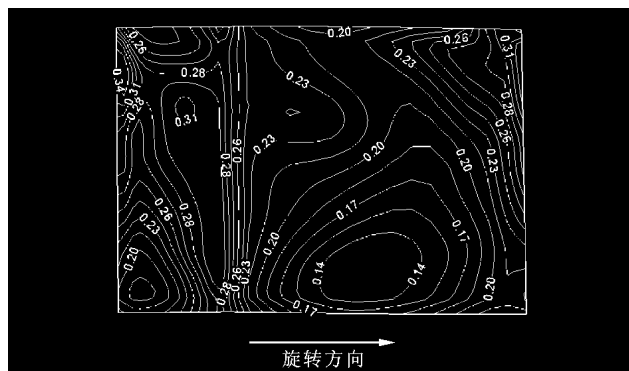
叶片压力面一侧大部分区域为低速区, 而吸力面一侧大部分为高速区, 相对马赫数变化范围为0.14~0.34, 速度分布均匀性比单列叶片式离心叶轮差. 通过分析可以得出: 沿旋转方向交错的串列式离心叶轮对叶轮出口的速度分布改善十分明显, 而反旋转方向交错的串列式离心叶轮的出口速度分布比单列叶片差, 叶轮出口的速度分布状况对扩压器内的流动状况有较大影响, 进而影响到离心压缩机整级效率, 采用沿旋转方向交错的串列叶轮能改善出口的速度分布均匀性, 从而改善离心压缩机的整级效率.



(a) 单列叶轮($\lambda_s = 0.0$)



(a) 沿旋转方向交错($\lambda_s = 0.25$)



(c) 反旋转方向交错($\lambda_s = 0.75$)

图6 单列及串列叶片式离心叶轮出口截面相对马赫数

4 结 论

(1) 单列叶片式离心叶轮的数值研究结果与实验结果符合较好, 验证了本文采用的计算模型能够

准确预测离心叶轮内部流动状况及气动性能。

(2)串列式叶轮的相对周向位置对气动性能有较大的影响,其多变效率普遍低于单列叶片式叶轮,当周向相对位置因子为 0.25 时,压比最大提高为 1.4%。

(3)串列式离心叶轮的叶轮内部及出口流场与其相对周向位置有密切关系,沿旋转方向交错的串列式叶轮的流动参数沿圆周方向的分布最均匀,对叶轮出口速度分布改善明显,单列式叶轮次之,而反旋转方向交错的串列式叶轮的内部及出口的流动参数变化最明显。

参考文献:

- [1] Bache G. Impeller tandem blade study with grid embedding for local grid refinement[C]//Proceedings of the Tenth Workshop for Computational Fluid Dynamics Applications in Rocket Propulsion:Part1. Sacramento, USA: NASA Conference Publication, 1992: 259-288.
- [2] Josuhn-Kadner B. Flow field and performance of a centrifugal compressor rotor with tandem blades of adjustable geometry, ASME Paper 94-GT-13 [R]. New York: ASME Publication, 1994.
- [3] Roberts D A, Kacker S C. Numerical investigation of tandem-impeller designs for a gas turbine compressor [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124 (1): 36-44.
- [4] Hathaway MD, Chriss R M, Wood J R, et al. Experiment and computational investigation of the NASA low-speed-centrifugal compressor flow field[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4): 527-542.
- [5] 张楚华,谷传纲,苗永森. 离心叶轮及无叶扩压器内湍流的非结构化网格数值解法[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(4): 446-450.
Zhang Chuhua, Gu Chuangang, Miao Yongmiao. Numerical simulation of turbulent flows in backswept impeller and vaneless diffuser[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(4): 446-450.
- [6] 张楚华,谷传纲,苗永森. 非结构化网格方法及其差分格式[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 58-61.
Zhang Chuhua, Gu Chuangang, Miao Yongmiao. Unstructured grid method and its differential schemes for NS equation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(9): 48-61.
- [7] 徐忠. 离心式压缩机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

(编辑 王焕雪)