

离心压气机流场的计算研究

谢林旋,葛宁

(南京航空航天大学,江苏 南京 210000)

摘要:针对一款典型的高压比离心压气机 SRV2,采用 NUMECA 软件,计算其内部的流场情况,并对这些流动状态进行研究。研究表明,离心压气机中主要存在 3 种二次流结构,这些二次流相互作用,形成了离心压气机中常见的射流尾迹结构。该研究对于改进离心压气机设计、提高其性能具有重要意义。

关键词:离心压气机;数值计算;二次流结构;射流尾迹结构;流动机理

中图分类号:TH452 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)02-0074-03

Numerical Study of Flow Field in a Centrifugal Compressor

XIE Linxuan, GE Ning

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: To study the flow field of centrifugal compressor, the numerical simulation is carried out for a typical high pressure ratio centrifugal compressor SRV2 by NUMECA software in this paper and the flow fields around the blades are analysed. The results show that three secondary flow structures mainly exist in this centrifugal compressor. Due to the interaction of these secondary flows, a common jet wake structure is formed in centrifugal compressors. This study is of important significance to the design and improvement of the centrifugal compressor and the improvement of its performance.

Keywords: centrifugal compressor; numerical calculation; secondary flow structure; jet wake structure; flow Mechanism

0 引言

离心压气机在涡轴发动机、涡桨发动机和活塞式发动机中应用十分广泛。目前,计算流体力学方法是研究离心压气机的主要手段之一,但计算流体力学方法求得的离心压气机性能与实验值存在较大差异,差异在高压比离心压气机中尤其明显。这是由于高压比离心压气机中的流场存在激波和流动分离,流动具有明显的三维效应。

二次流,在流体力学的定义中,是沿一边界流动的流体因受到横向压力的作用,产生了平行于边界的偏移,则靠近边界的流体层由于速度较小,就比离边界较远的流体层偏移得厉害,这就导致了叠加于主流之上的二次流。离心压气机中由于存在径向压差和离心力的作用,使得流体在叶片表面发生径向流动,向叶顶聚集。聚集的流体一部分碰到壁面反射回原叶片通道,一部分通过叶尖间隙喷射进另一叶片通道。这股泄漏流受到通道内的压力和通道二次流的共同作用,速度不断降低,并最终呈螺旋状向下游流动。这就是离心压气机中常见的射流尾迹结构^[1]。

本文针对一款典型的高压比离心压气机 SRV2,采用 NUMECA 软件,对计算结果进行流场分析。研究对象 SRV2 叶轮出自一项德国与瑞士叶轮机械厂商的联合研究项目。该叶轮的设计参数如表 1 所示,来自 KRAIN 等人于 1995 年发表的文献^[2]。

表 1 SRV2 叶轮设计参数

设计变量	数值
转速 $n/(r/min)$	50 000
质量流量 $m/(kg/s)$	2.55
叶片数 Z_R	13+13
叶轮轮毂半径 r_2/mm	112
前缘叶尖叶片角 $\beta_{1t}/(^{\circ})$	26.5
叶轮出口叶片角 $\beta_2/(^{\circ})$	52
叶轮总压比 $\pi_{t,12}$	6.1
叶轮等熵效率 $\eta_{s,u,12}$	0.84

1 KRAIN 离心压气机性能曲线分析

本文采用的 SRV2 叶型数据来源是 KRAIN 等人于 2002 年发表的文献^[3]。在文献所写的试验中,为了便于试验测量,试验所用的叶轮是由原设计叶轮将出口半径切削至 112 mm 后所得,本文将文献提供的原模型导入 UG 中,把叶轮的出口半径修改至与试验相同,并将新得到的叶轮数据导出。用 AUTOGRID5 对修改后的叶轮进行网

格划分,使用 NUMECA FINE 求解流场,与参考文献中的试验数据进行对比,观察离心压气机内部的流动现象并进行分析。

1.1 网格划分与边界条件

采用蝶形网格划分叶片,其中展向网格节点 61 个,第一层网格高度 1×10^{-5} m,大小叶片的前缘倒圆,尾缘为了维持轮缘半径为 112 mm 而不采取倒圆,叶尖间隙曲线取自 KRAIN 等人于 2002 年发表的文献,大小叶片间节点匹配。

在算例中,使用 Spalart-Allmaras 湍流模型。设置进口总压为 101 325 Pa,进口总温为 288.15 K。出口边界采用平均静压边界,通过改变出口静压来改变叶轮工况。初始化静压设为 80 000 Pa。各算例采用双精度求解,设定全局残差达到 10^{-6} 时停止求解。叶轮转速设置为 50 000 r/min,扩压器段轮鼓机匣转速设置为 0 r/min,叶轮进口段和叶轮段轮鼓机匣转速设置为 50 000 r/min。所有壁面均设为绝热壁。

1.2 压气机特性分析

图 1 将 NUMECA 的计算结果和 KRAIN 等人于 1995 年发表文献[2]中提供带无叶扩压器的 SRV2 叶轮性能曲线进行对比。无量纲流量压比图如图 1(a)所示,无量纲流量效率图如图 1(b)所示。

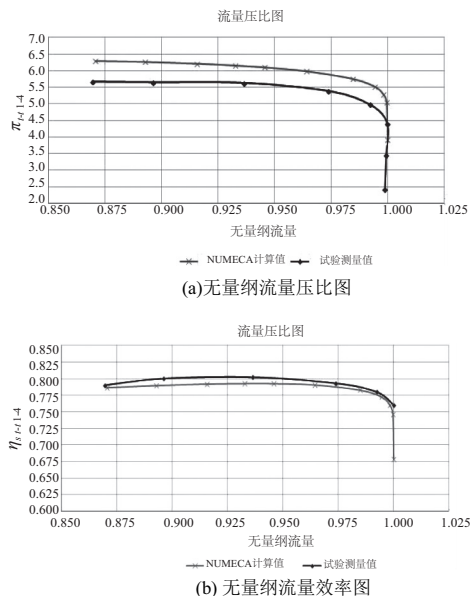


图 1 离心压气机性能曲线对比图

计算得出的平均流量比试验测量值要高 0.068 kg/s 。将流量无量纲化进行对比。由无量纲流量压比图可以看出计算得出的压比比试验测量值要大,这是因为通过数值计算得出的能量损失比实验测量的要小,这一结果与 KRAIN 等人于 1998 年发表文献[4]中的计算结果相似;由无量纲流量效率图可以看出计算所得出的效率基本与试验测量值相同,略低于试验测量值,这也是因为计算出的能量损失略低于试验测量值。

1.3 计算验证

对 NUMECA 计算所求得的最效率点进行后处理,并与 KRAIN 等人于 1995 年发表的文献内的试验结果进行对比。叶轮进口处的相对马赫数对比,如图 2 所示;叶轮出口处的相对马赫数对比,如图 3 所示。图 2 中,NUMECA 的计算结果与试验测量值基本一致,叶轮进口处的相对马赫数最高值均在 1.45 左右,且压力面侧的马赫数梯度比吸力面侧的马赫数梯度大,最高相对马赫数均集中在叶片压力面顶部;图 3 中,NUMECA 计算求得的低速区形状与试验结果稍有不同,但叶轮顶部均可以看到由二次流形成的射流尾迹结构引发的低速区。

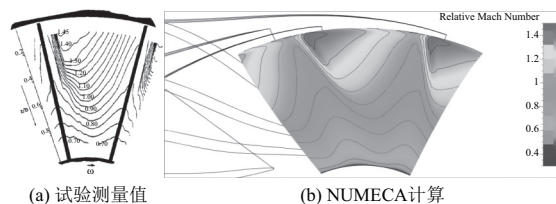


图 2 叶轮进口处相对马赫数对比图

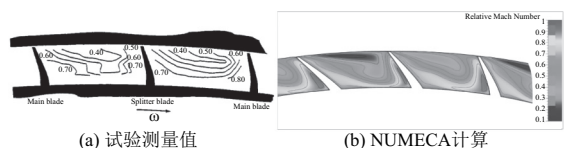


图 3 叶轮出口处相对马赫数对比图

主叶片前缘处的叶片安装角沿叶高的分布如图 4 所示。在设计的质量流量下,由激光测量所得的试验相对气流角 β 以及计算得出的相对气流角,也在图中同时绘制出来。从图上可以看出轮毂处的相对气流角比机匣处的相对气流角要大一些,这与 EISENLOHR 等人在 1998 年发表的文献[4]中指出的相同。叶根区域的气流角在试验中难以测量到,但趋势与计算值不同,这是由于试验时的附面层比计算的附面层厚所导致的。

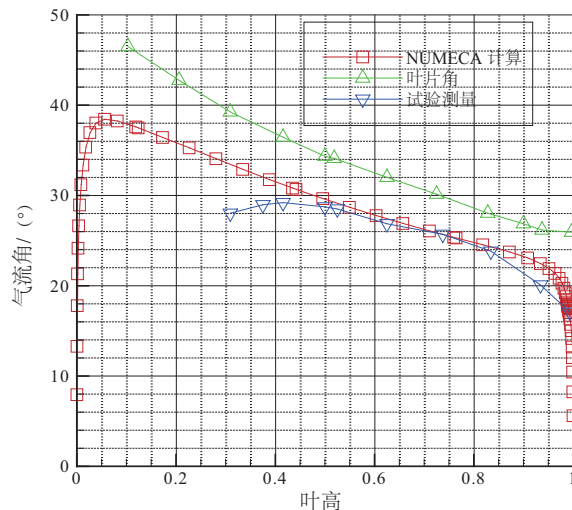


图 4 进口相对气流角 β 沿径向的分布

2 对离心压气机中存在的射流尾迹结构的分析

2.1 离心压气机内部二次流结构

离心压气机中存在多种二次流结构,如叶表二次流、叶顶泄漏二次流和叶顶通道二次流等。这些二次流之间相互作用、相互掺混形成了离心压气机中普遍存在的射流尾迹结构。下面对它们的形成机理、分布规律和基本特点进行简要的分析和说明。

2.2 离心叶轮的叶表二次流结构

在离心压气机中存在径向压差,如图5所示。离心力和径向压差导致的压力共同作用,使得流体在叶片表面存在径向流动,将其称为叶表二次流,如图6所示。离心压气机叶片的吸力面和压力面均存在叶表二次流,一般而言,压力面叶表二次流偏转得更为明显,这是由于在压力面处存在更大的径向压差。这股叶表二次流在运动到叶顶处会分成两股,一股通过叶尖间隙流动到另一叶片通道内形成叶顶泄漏二次流,如图7(b)所示;另一股则由于撞击到叶片而反射形成了叶顶通道二次流,如图7(c)所示。

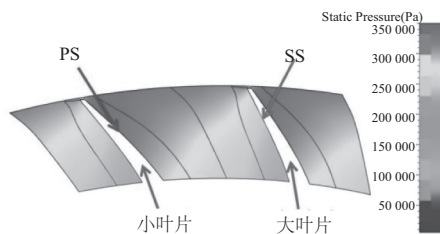


图5 离心压气机中部(约轴向弦长50%处)的静压分布

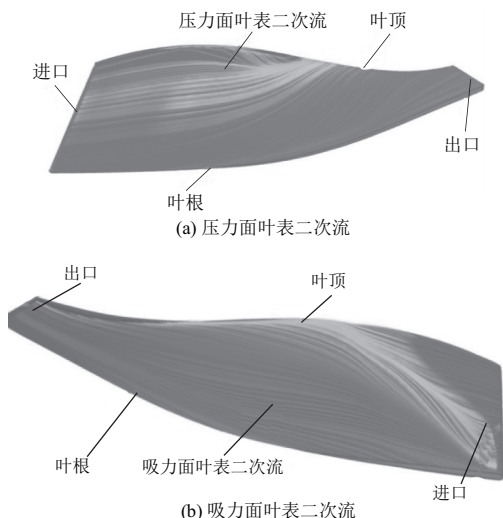


图6 叶表二次流流线图

2.3 离心叶轮的叶顶泄漏二次流结构

半开式叶轮中存在叶尖间隙,由于叶片吸力面和压力

面之间存在压差,使得流体在叶尖间隙中由压力面向吸力面喷射,这股射流会导致原叶片通道内叶顶部分的流体由吸力面向压力面流动,将这种流动称为叶顶泄漏二次流,如图7(b)所示。由于叶轮中压力分布的特点,在叶轮前段吸力面和压力面之间的压差比较小而叶轮后段吸力面和压力面的压差比较大,这导致在叶轮前段的叶顶泄漏二次流能够通过多个叶片通道,而不会受到明显的减弱,但对于叶轮后段的叶顶泄漏二次流,在通道内的径向压差和叶顶通道二次流的共同作用下,导致叶顶泄漏二次流速度逐渐减小,无法继续向下一个叶片通道前进,并变成螺旋状向下游流动。

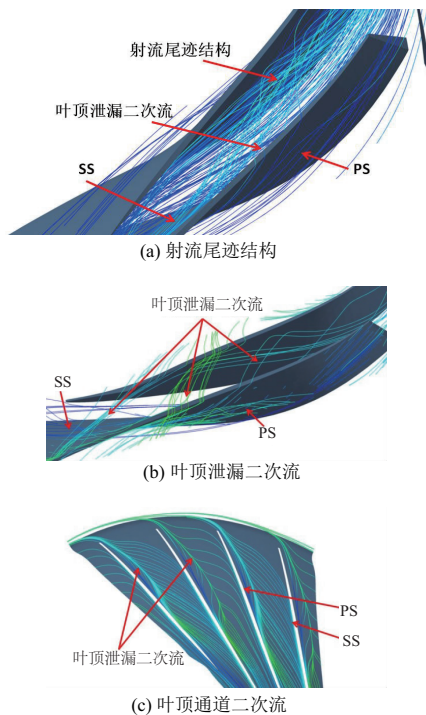


图7 叶顶通道二次流和叶顶泄漏二次流流线图

2.4 离心压气机中的熵分布

从前文可以看出二次流和由二次流所形成的尾迹区中的低能流体主要来自于贴近壁面的流体,而这些流体具有低速、低能和高熵的特点。从离心叶轮的熵分布图可以看出,在叶片前段,高熵区主要集中在叶片表面,后段则逐渐由叶片表面移动到叶片顶部。这也从侧面证明了二次流的流动方向和尾迹区低能流体的来源。

2.5 叶尖间隙对射流尾迹的影响

叶轮的叶尖间隙会对射流尾迹产生影响,本文通过改变叶轮的叶尖间隙进行计算发现,不仅大小而且间隙尺寸的分布也是很重要的。前缘较大间隙与尾缘较小间隙,会导致尾迹靠近吸力面侧。减小前缘间隙,则会使尾迹移动到压力面侧。形成这种现象的原因是往相反方向移动的两个涡旋的相互作用。这些涡旋的强度和位置取决于间隙尺寸的分布。这也从一个侧面证明了射流尾迹的形成与二次流存在联系。

(下转第100页)

于力信号的参与度模型具有一定的有效性。

4 结语

本文提出一种基于人机接触力的人体主动参与程度评估模型。首先,通过人体的肌电信号得到人体肌肉活跃度,建立人体参与度与肌电信号的关系。同时分析这一过程中人机接触力的变化,使用力信号对肌电信号得出的参与度模型进行拟合,得到基于人机接触力的参与度模型,并对此模型进行检验,检验结果两种模型计算的参与度接近,基于力信号的参与度模型具有一定的有效性。

参考文献:

- [1] 宇传华,罗丽莎,李梅. 从全球视角看中国卒中疾病负担的严峻性[J]. 公共卫生与预防医学,2016,27(1):1-5.
- [2] 秦晓勇. 康复器械在偏瘫患者肢体功能恢复中的应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2011,15:9088-9092.
- [3] 杨晓梅. 主动参与在康复训练中的重要性[J]. 按摩与康复医学(上旬刊),2011,2(1):78-81.
- [4] HAMNER S R, SETH A, DELP S L. Muscle contributions to propulsion and support during running[J]. Journal of Biomechanics,2010,43(14):2709-2716.
- [5] 史小华,卢浩,廖梓字,等. 基于表面肌电信号的下肢康复主动训练[J]. 科学技术与工程,2018,18(17):61-66.

- [6] DUSCHAU Wicke A, VON Z J, CAPREZ A, et al. Path control: a method for patient-cooperative robot-aided gait rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2010, 18(1):38-41.
- [7] 李晓飞. 下肢康复机器人的设计及控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [8] 范泽峰. 床式下肢康复训练机器人结构研究[D]. 苏州:苏州大学,2015.
- [9] BUCHANAN T S, LLOYD D G, MANAL K, et al. Neuromusculoskeletal modeling: estimation of muscle forces and joint moments and movements from measurements of neural command.[J]. Journal of Applied Biomechanics, 2004, 20(4):367-370.
- [10] 唐毓尚. 高性能低通滤波器[D]. 成都:电子科技大学,2009.
- [11] 李艳双,曾珍香,张阔,等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用[J]. 河北工业大学学报,1999(1):96-99.
- [12] 樊路平. 基于力反馈的小型椎板磨削手术机器人设计与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [13] 汪晓银,陈颖,陈汝栋. 数学建模方法入门及其应用[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [14] 冷建飞,高旭,朱嘉平. 多元线性回归统计预测模型的应用[J]. 统计与决策,2016(7):82-85.

收稿日期:2019-01-16

(上接第76页)

2.6 射流尾迹结构分析

射流尾迹结构的形成机理可以大致解释为,叶顶泄漏二次流在运动的过程中受到了来自叶顶通道二次流和叶片通道内压力梯度的影响而使得周向速度变小,同时叶顶泄漏二次流的流动方向也发生了改变,不再继续向压力面流动,而是开始旋转向下游流动,这些二次流的流动将叶片壁面附近的低能流体汇集到一起,从而形成明显的尾迹区。

3 结语

1) 本文使用 NUMECA 软件对 KRAIN 叶轮进行数值计算,算得平均流量较试验值偏大,数值计算的压比也较试验值偏大,效率基本相同略低于试验值,这是由于数值计算得出的损失不如试验中的大;

2) 将进出口相对马赫数与试验值进行对比,结果基本相同,进口最高马赫数均为 1.45 左右,出口相对马赫数在叶顶较低而叶根较高,这是由于射流尾迹的影响。将叶轮进口处的相对气流角与试验对比,结果基本相同,轮毂处气流角比机匣处气流角要大一些,这是由于 SA 模型在预测附面层厚度时与实际情况有偏差导致的;

3) 叶尖间隙的大小会对射流尾迹结构产生影响。前缘大而尾缘小的间隙,会导致射流尾迹靠近吸力面侧,减

小前缘间隙,则会使射流尾迹移向压力面侧。形成这种现象的原因是往相反方向移动的两个涡旋的相互作用;

4) 离心压气机中主要存在 3 种二次流结构,分别为:叶表二次流、叶顶通道二次流和叶顶泄漏二次流。压力面叶表二次流汇集到叶顶后,一部分通过叶尖间隙泄漏到另一叶片通道内,形成叶顶泄漏二次流,另一部分通过叶片反射回来,形成叶顶通道二次流。叶顶泄漏二次流由于叶顶通道二次流和通道内压差的共同作用,导致其速度不断降低,并最终成螺旋状向下游流去,形成离心压气机中常见的射流尾迹结构。

参考文献:

- [1] 孙志刚,谭春青. 离心压气机内部流动特性与流场结构研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2011.
- [2] KRAIN H, HOFFMANN B. Aerodynamics of a centrifugal compressor impeller with transonic inlet conditions [C]// ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Houston, Texas, USA, 1995.
- [3] EISENLOHR G, KRAIN H, Richter F A, et al. Investigations of the flow through a high pressure ratio centrifugal impeller[C]// ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2002:649-657.
- [4] EISENLOHR G, DALBERT P, KRAIN H, et al. Analysis of the transonic flow at the inlet of a high pressure ratio centrifugal impeller[C]// ASME-Conference, Stockholm, DLR, 1998.

收稿日期:2018-10-31