

基于 SST-DES 方法的离心泵叶轮内流场涡结构特性研究

袁志懿^{1, 2}, 张永学^{1, 2}

(1. 中国石油大学(北京) 机械与储运工程学院, 北京 102249;

2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249)

摘要: 本研究采用分离涡方法 (DES), 选择 SST- $k-\omega$ 湍流模型, 对一离心泵内流场进行了数值模拟, 使用拓扑分析讨论了叶片壁面分离涡的生成及发展, 并应用 Omega 涡识别方法研究了叶轮流场内的涡结构特性。结果表明: 吸力面附近出现大范围分离涡主要受吸力面进口闭式分离泡、压力面与吸力面间的横向压力梯度与吸力面上的逆压梯度这 3 个因素控制; 涡团间的能量传递可由碰撞、附着与破碎脱落 3 个过程组成。

关键词: 离心泵; 分离涡方法; 拓扑分析; Omega 涡识别; 涡结构

1 引言

对内流场涡结构进行流动控制是目前泵优化设计的主要方法之一, 它依赖于准确的数值计算与细致的内流场分析。Strelets^[1]在 2001 年提出了 SST-DES 分离涡模拟, 大量实践表明该方法能够比 RANS 方法得到更加准确的流场结构, 并且能够进行机理性的分析研究^[2]。

对泵内流场的涡结构特性进行研究, 能够更进一步认识泵内流动不稳定现象, 如流动分离、射流一尾迹、动静干涉, 失速等^[3-5]。使用拓扑分析能够掌握流动分离与旋涡结构的基本骨架^[6-7], 曹璞钰^[8]通过对离心泵叶片吸力面的拓扑结构分析, 捕捉到与压气机中的 Spike 式失速^[9]类似的双龙卷分离涡结构, 杨宝锋^[10]使用 Omega 涡识别方法对涡轮油泵中离心轮与扩压器之间的动静干涉机理进行了阐释。但到目前为止, 对泵叶轮流道内壁面流谱的拓扑分析研究还较少, 对涡团间的相互作用过程研究也鲜有见到。因此, 为了对离心泵叶轮内流场有更全面细致的分析, 以 IS150-125-250 型离心泵为研究对象, 对流动分离与涡团能量传递过程进行模拟研究, 为高性能的离心泵内流场涡结构的流动控制提供一定的

¹ 基金项目: 国家自然科学基金 (51876220)

理论基础。

2 数值计算

模型泵的主要参数如表 1 所示，图 1 为使用 ICEM 划分的混合网格。在 CFX 中设置转速为 1450rpm，非定常计算时间步设置为叶片转过 2° 对应的时间 1.149×10^{-4} s。图 2 为网格无关性验证，综合考虑 DES 模拟的准确性与计算性能，选定网格数量为 702 万。如图 3 为模拟结果与实验外特性比较，其平均误差在 3% 左右，数值计算的结果是可信的。

表 1 离心泵参数

性能参数		结构参数	
比转速	130	进口直径(mm)	150
设计流量(m³/h)	200	出口直径(mm)	125
设计扬程(m)	20	叶轮直径(mm)	270
叶片数	6	叶片出口宽(mm)	30

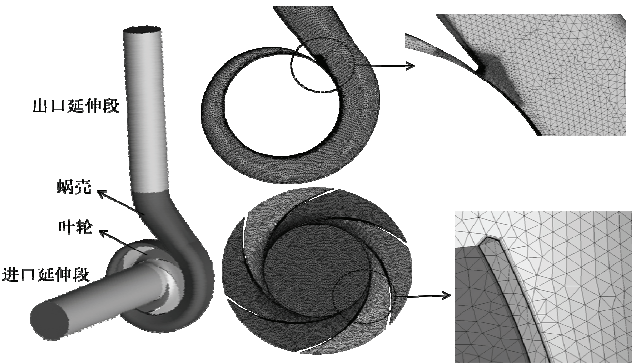


图 1 离心泵模型与网格图

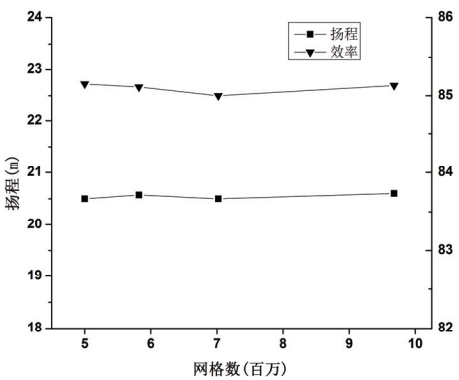


图 2 网格无关验证

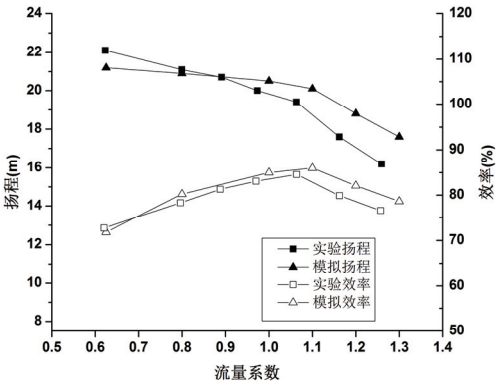


图 3 外特性实验与数值计算对比

3 结果与讨论

3.1 拓扑分析

拓扑图由流谱中奇点的特性绘制, 其中奇点是表面摩擦力为零的点, 根据其性质分为结点和鞍点, 尽管随着工况或结构的改变, 物面流谱形状和奇点数会随之变化, 但鞍点和结点的总数之差始终等于某个常数, 即拓扑不变量。根据张涵信的描述^[11], 分离线是流线的包络或是周围极限流线渐进靠拢的一条极限流线, 王国璋^[12]将壁面分离分为开式分离和闭式分离, 开式分离的分离线起始点不能是鞍点, 并且对来流极限流线不是闭合的; 而闭式分离的分离线起始点为鞍点, 并对来流极限流线闭合, 是来流和回流极限流线的交界线。附面层来流在分离线上离开壁面, 从再附线上回到壁面。根据拓扑法则, 可以验证流谱的正确性并将复杂流场简化分析。

图 4 是流量系数为 0.8 时流道的壁面流谱, 其中 N 表示结点, S 表示鞍点, R 表示分离涡结构, 下标中 sh 表示上盖板, h 表示下盖板, s 表示吸力面, p 表示压力面, 根据表面极限流线上的奇点分布, 满足康顺^[13]推导的拓扑法则:

$$\Sigma N - \Sigma S = 13 - 15 = -2$$

式中 ΣN 、 ΣS 分别是壁面极限流线结点和鞍点的总数, 可见图中的流谱满足拓扑规律。需要说明的是, 拓扑结构只是定性的分析流场的骨架, 其中奇点与所对应分离线、再附线的位置经过了近似处理。

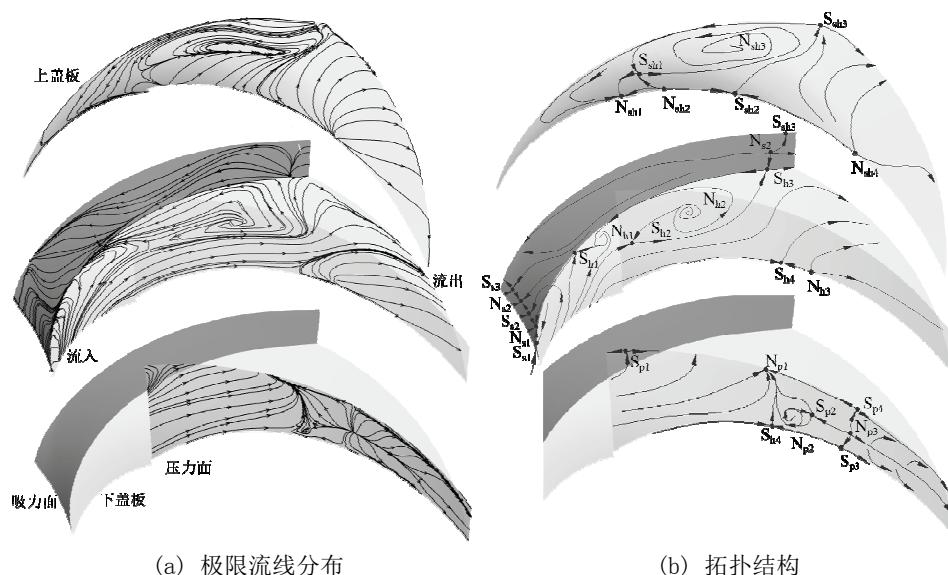


图 4 流道内壁面流谱

壁面流谱展示了附面层流体的流动状况, 由此分析研究壁面分离流动的生成发展。从拓扑图 4 (b) 可以看出, 吸力面进口端壁上有一条闭式分离线 SL_{s1} , 其奇点的排列顺序为

$S_{s1} \rightarrow N_{s1} \leftarrow S_{s2} \rightarrow N_{s2} \leftarrow S_{s3}$, 出口端壁有一条再附线 RL_{s1} , 奇点排列顺序为 $S_{sh3} \leftarrow N_{s2} \rightarrow S_{h3}$ 。分离线 SL_{s1} 处存在一个闭式分离泡, 低能流体在此处堆积, 堵塞了进口流道。附面层流体从分离线 SL_{s1} 离开壁面, 在压力面与吸力面之间横向压力梯度作用下从再附线 RL_{s1} 回到壁面, 在吸力面逆压梯度和进口流道堵塞的影响下, 使得吸力面附面层出现了几乎覆盖整个物面的回流, 分离涡在下盖板形成附着螺旋结点 N_{h2} , 在上盖板为附着螺旋结点 N_{h3} , 并与闭式分离泡相互作用搓洗出分离螺旋结点 N_{h1} 。在压力面上存在闭式分离线 SL_{p1} , 奇点排列顺序为 $S_{h4} \rightarrow N_{p1}$, 压力面附面层来流在逆压梯度作用下从分离线 SL_{p1} 离开壁面, 随后从再附线 RL_{p1} 的 $S_{p4} \leftarrow N_{p3} \rightarrow S_{p3}$ 段回到壁面, 回流与分离流面的搓洗下在分离线 SL_{p1} 右侧形成附着螺旋点 N_{p2} 。

3.2 涡结构非定常演化

由流线显示涡结构存在较大的局限性, 比如对局部涡结构展示困难, 不满足伽利略不变性等。这里采用刘超群提出的 Omega 涡识别方法^[14-15]对局部涡结构进行展示, 其物理意义为刚性旋转在涡量中的占比, 当 omega 值大于 0.5 时, 认为此时流体微团是旋转状态。

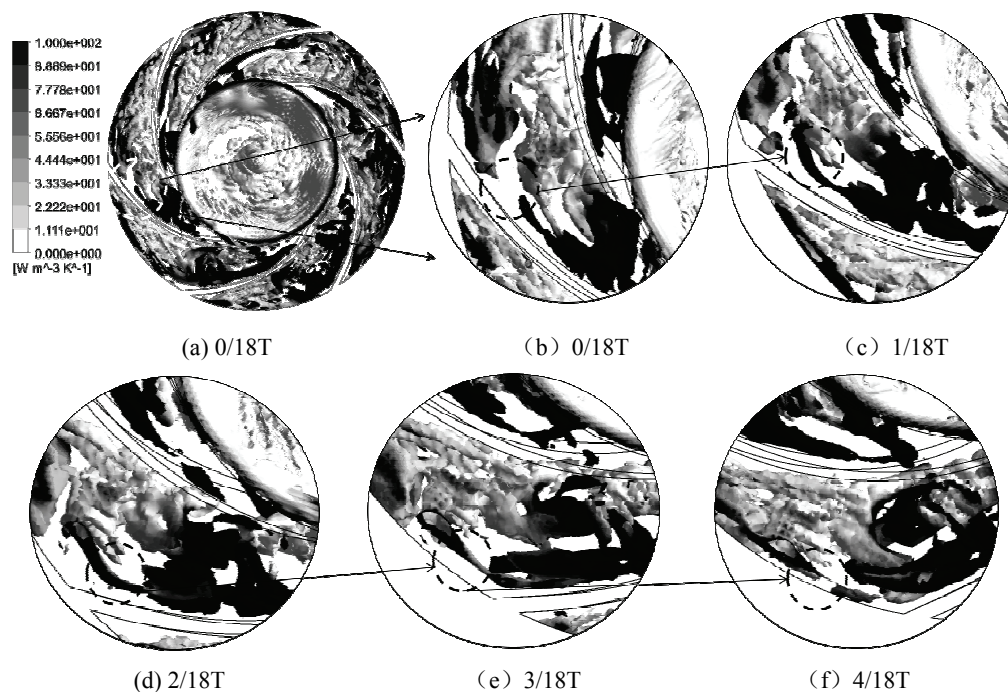


图5 涡结构的非定常演化

为了便于分析, 提取 Omega 为 0.65 时的涡结构等值面, 如图 5 所示, 灰度图为湍流熵产^[16]云图, 颜色越深表示耗散越高, 内能越大。以叶轮旋转一周为一个周期。其中 (a) 是叶轮区域整体的涡结构图, (b) 是对白色圆圈区域放大后的图像, 在 1/18T 时, 圆圈内两涡团碰撞连接在一起, 随后条状涡团的头部 (碰撞区域) 湍流熵产降低, 认为是能量向低能涡团传递出去而耗散减小, 在 3/18T 时条状涡团的尾部收缩, 头部区域附着融合, 到下

一时刻尾部脱落破碎, 最开始的条状涡消失, 可以认为是完成一次涡团间的能量传递过程。

3 结果与讨论

通过 SST-DES 方法对离心泵叶轮内流场进行了模拟计算, 采用拓扑方法分析了主流尺度的分离涡特征, 借助 Omega 的涡识别方法对局部的涡结构非定常演变过程进行初步讨论。研究发现, 由于吸力面进口处附面层流体分离, 形成闭式分离泡堵塞来流, 分离流在横向压力梯度与逆压梯度作用下从吸力面出口附近壁面再附形成回流至分离泡区, 使得吸力面附近出现大范围的分离涡; 涡团在非定常运动过程中, 高能涡团与低能涡团发生碰撞, 高能涡团头部附着, 尾部破碎脱落, 使能量从高能涡团向低能涡团传递。

参 考 文 献

- 1 Strelets M . Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows[C]// 39th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. 2001.
- 2 高丽敏, 李瑞宇, 赵磊, 等. 分离涡模拟类方法发展及在叶轮机械内流场的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(03):301-312.
- 3 Wang HH, Tsukamoto HH. Fundamental Analysis on Rotor-Stator Interaction in a Diffuser Pump by Vortex Method. ASME. J. Fluids Eng. 2001;123(4):737-747.
- 4 González J, Santolaria C. Unsteady Flow Structure and Global Variables in a Centrifugal Pump. ASME. J. Fluids Eng. 2006;128(5):937-946.
- 5 Pedersen N, Larsen PS, Jacobsen CB. Flow in a Centrifugal Pump Impeller at Design and Off-Design Conditions—Part I: Particle Image Velocimetry (PIV) and Laser Doppler Velocimetry (LDV) Measurements. ASME. J. Fluids Eng. 2003;125(1):61-72.
- 6 钟兢军, 苏杰先, 王仲奇. 压气机叶栅壁面拓扑和二次流结构分析[J]. 工程热物理学报, 1998, V19(1):40-44.
- 7 张永军, 王会社, 徐建中, 等. 扩压叶栅中拓扑与漩涡结构的研究[J]. 中国科学(E 辑:技术科学), 2009,39(05):1016-1025.
- 8 曹璞钰, 印刚, 王洋, 等. 离心泵内双龙卷风式分离涡数值分析[J]. 农业机械学报, 2016,47(04):22-28.
- 9 Pullan GG, Young AM, Day II, Greitzer EM, Spakovszky ZS. Origins and Structure of Spike-Type Rotating Stall. ASME. J. Turbomach. 2015;137(5):051007-051007-11.
- 10 杨宝锋, 李斌, 陈晖, 等. 新 Omega 涡识别法在液体火箭发动机涡轮氧泵中的应用[J]. 推进技术, 2019
- 11 张涵信. 分离流与旋涡运动的结构分析[M]. 2002.
- 12 Wang K C . Separation Patterns of Boundary Layer Over an Inclined Body of Revolution[J]. AIAA Journal,

- 1971, 10(8):14.
- 13 康顺. 拓扑方法在叶栅三元流场分析中的应用(I)——表面摩擦力线和截面流线的拓扑法则[J]. 应用数学和力学, 1990, 11(5):457-462.
- 14 ChaoQun L, YiQian W, Yong Y, et al. New omega vortex identification method[J]. Science China(Physics,Mechanics & Astronomy), 2016(08):62-70.
- 15 Liu C, Gao Y, Tian S, et al. Rortex A New Vortex Vector Definition and Vorticity Tensor and Vector Decompositions[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(3).
- 16 张永学, 侯虎灿, 徐畅, 等. 熵产方法在离心泵能耗评价中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2017(04):277-282.

Study on flow field vortex characteristics of centrifugal pump impeller Based on SST-DES Method

YUAN Zhi-yi^{1,2}, ZHANG Yong-xue^{1,2}

(1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2 Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing 102249, China)

Abstract: Detached Eddy Simulation method based on SST-k- ω was applied to simulate the flow field in a centrifugal pump. The generation and development of the separation vortex near the blades was discussed with the help of topological analysis, and the vortex structure characteristics in the impeller flow field was studied by omega vortex identification method. The results show that the separation vortex of the suction surface is mainly affected by the following three factors: the closed separation bubble at leading edge of the suction surface, the transverse pressure gradient between the pressure surface and the suction surface and the back pressure gradient on the suction surface; In the unsteady flow, the energy transfer between the vortex can be composed of three processes: collision, adhesion and fracture.

Key words: centrifugal pump; detached eddy simulation; topological analysis; omega vortex identification; vortex structure.