

环量控制中射流的非定常流场数值模拟

吴翔, 许和勇

西北工业大学 翼型叶栅空气动力学国家级重点实验室, 陕西 西安 710072

xuheyong@nwpu.edu.cn

介绍

本研究针对CC020-010EJ标准模型, 采用URANS、SBES和LES三种非定常方法对其流场进行数值模拟, 比较这三种计算方法在预测流场上的差异; 此外, 通过对SBES方法计算过程中得到的大量流场快照进行模态分析, 获得流场的相干结构; 最后, 监控相干结构所在流场位置处的局部点压力脉动, 获得对应位置处的主导频率。研究表明, SBES和LES方法都能较好捕捉到射流的发展演变过程, 对射流和上翼面来流能够清楚的展示; 模态分析显示, 流场中的主要相干结构集中在射流势流区、射流失稳区和尾迹区, 其中射流失稳区的相干结构影响最大; 监控点的频谱分析发现, 射流失稳区压强脉动幅度最大, 并在频谱图上形成了低频宽平台和较高频宽平台, 说明除低频大尺度相干结构影响, 还受射流失稳产生较大的范围的高频湍流脉动影响。

研究背景

增升减阻一直是飞行器设计追求的目标, 翼型作为飞行器升力面和控制面的最基本元素, 对飞行器气动性能起着关键作用。当翼型攻角较小时, 升力系数随攻角线性变化, 翼型上翼面气流随攻角增大到一定程度后开始发生分离, 当分离区发展到一定程度, 升力系数突然下降, 翼型进入失速状态, 气动性能急剧恶化。随着人们对流动分离现象的关注, 对流动分离的预测和控制研究便成为了空气动力学研究热点之一。环量控制就是其中发展出来的一种主动控制方法, 如图0展示的是喷口附近速度分布情况, 现阶段对其研究主要集中在定常方法来研究环量控制的影响因素和控制规律, 对具体的射流作用机理研究不够透彻, 因此有必要开展非定常方法数值模拟研究工作。

研究方法

网格: 结构网格
数值方法: URANS、SBES和LES
后处理: 传统流场分析、频谱分析和模态分析

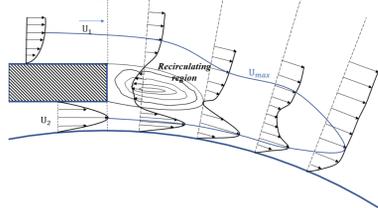


图0 CC020-010EJ翼型喷口附近速度分布示意图

结果和讨论

时均特性

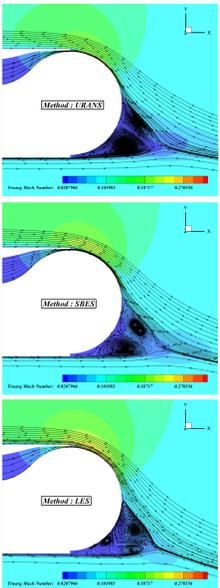


图1-1 时均流线与马赫数云图

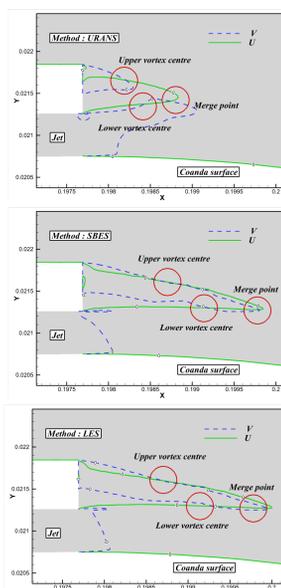


图1-2 涡心位置图

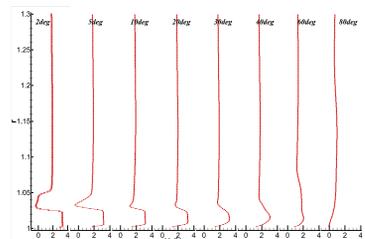


图1-3 SBES方法获得的时均切向速度分布

URANS预测的后缘分离提前发生, SBES次之, LES最后, 且URANS和SBES预测的分离区结构类似, LES预测的后缘回流区涡非对称且细节较多; 后台阶处回流区尺寸, URANS获得的最小, SBES次之, LES最大, 且LES获得的上下涡心位置最靠后。

图1-3是SBES方法获得的柯恩达曲面切向时均速度分布, 图中显示了射流与上翼面来流先形成回流区再接触最后合并为一股流动的全过程, 并通过中间的速度凹坑实现两股流动的能量传递。

模态特性

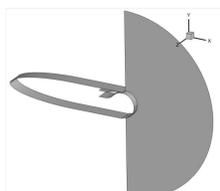


图3-1 截面位置信息

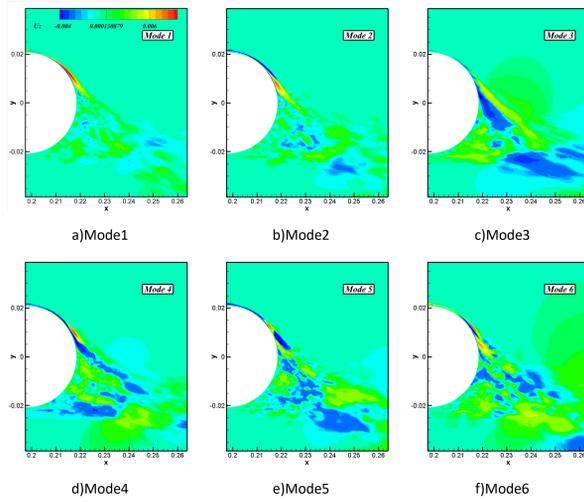


图3-2 模态能量占比

快照POD显示模态前十阶能量约占总能量的60%, 其中其六阶能量占52%。对前六阶的模态系数进行傅里叶变化, 获得的各阶模态主导频率显示: 前两阶模态主导接近1000Hz, 后四阶主导频率不超过200Hz。

结果表明前两阶主要展示射流失稳阶段产生的相干结构, 后四阶获得的是射流势流段以及尾迹区的相干结构。

图3-3 模态云图

瞬态特性

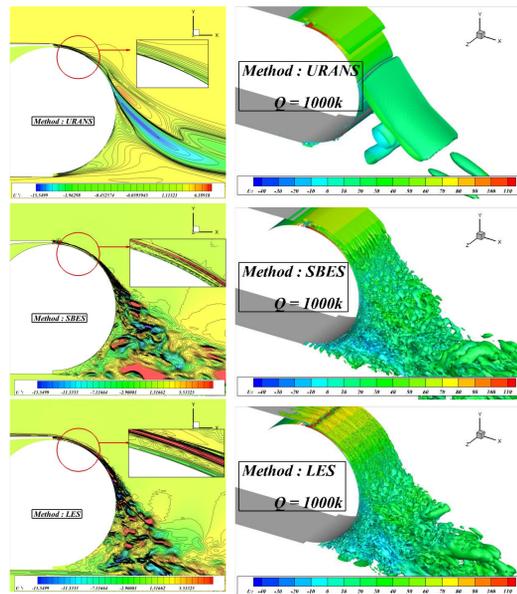


图2-1 流向速度脉动分布

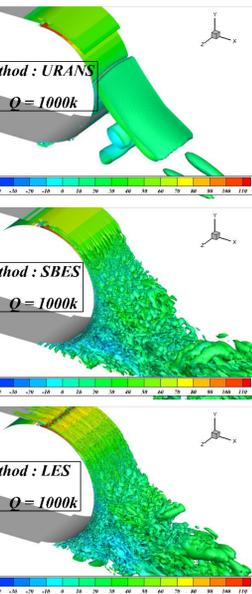


图2-2 Q准则等值面图

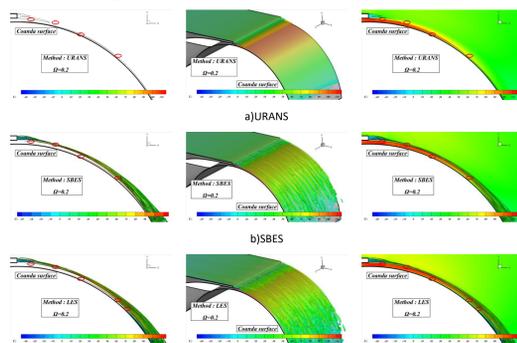


图2-3 射流发展趋势图

频谱特性

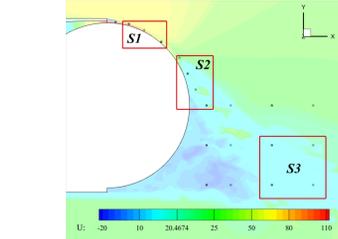


图4-1 监测点位置信息

该翼型后缘段主要分三个区域: 射流势流段S1、势流失稳段S2和尾迹区S3。各个区域点的压强监测趋势显示, S2区域的压强脉动最大, 说明这个区域的湍流脉动频率最高。S1区域的监控点压强频谱图显示主导频率为低频且有低频宽平台, 说明这个区域主要是壁面附近低频大尺度相干结构主导; S2区域形成低频平台和较高频平台, 说明失稳阶段不仅受大尺度结构影响还受失稳产生的高频湍流影响; S3区域主要受高频湍流结构影响。

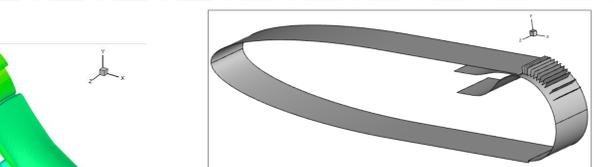


图2-4 流向涡量分布图

瞬态特性显示, SBES和LES方法能够获得射流势流段上下边缘附近的动量与能量交换的路径, 而URANS方法无法获得。此外, SBES与LES也能获得射流上下边缘的接触合并过程, URANS也无法获得, 且LES预测的合并相对靠后。图2-4展示的是不同流向站位的流向涡量, 也能得到LES预测的射流上下边缘最后合并。

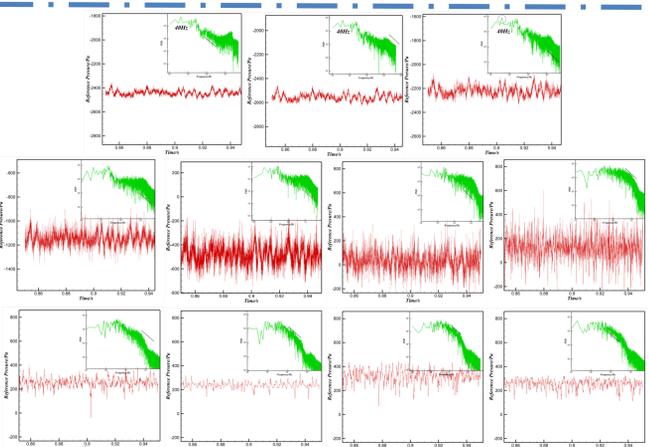


图4-2 监测点压强脉动及其频谱图

结论

通过对CC020-010EJ标准翼型的非定常计算研究发现, SBES和LES方法都能对后缘位置处的三个区域有很好的模拟效果, 且LES方法预测的射流上下边缘合并位置最靠后; 快照模态分析发现, 流场的主导相干结构主要存在在射流失稳区, 且后缘流场三个区域的各自的相干结构不相同; 频谱分析发现, 射流失稳段流场变化最剧烈, 且受壁面低频大尺度相干结构和射流失稳产生大量较高频湍流结构复合影响。