

伸缩变构对高超声速边界层中Mack 模态演化的影响 1)

蒋根瑞^{*}, 董明^{*,2)}, 赵磊⁺

^{*} (中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

⁺ (天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072)

摘要: 大空域、宽速域、跨流域的天地往返飞行器是未来航天运输系统的发展方向。为适应在不同速域下的高效飞行, 表面变构成为一种潜在可行的解决途径。对变构飞行器设计而言, 为了精准预测摩阻及热流, 关键在于对边界层从层流向湍流转捩的准确预测, 然而转捩与变构效应耦合将大大增加气动性能的预测难度。因此, 系统地研究变构效应对边界层内扰动演化的影响至关重要。本文针对典型的伸缩式变构方式, 研究伸缩平板对马赫数 5.92 的高超声速边界层中扰动演化的影响。首先, 采用调和线性化 Navier-Stokes 方程 (HLNS) 计算 Mack 模态在修正平均流中的演化。结果显示, 表面变构对 Mack 模态的影响包含两种方式: 一是伸缩点附近快变平均流导致扰动的局部散射, 扰动幅值出现跳跃; 二是下游平均流速度变化引起扰动模态增长率的修正。其次, 本文基于大雷诺数渐近方法, 发展了定量刻画伸缩效应对 Mack 模态影响的理论模型, 引入放大系数来量化表面变构的影响程度。发现在最不稳定第二模态频率附近存在一个临界频率, 高于该频率的 Mack 模态被伸长效应促进, 而低于该频率的则被伸长效应抑制, 缩短效应对扰动幅值的影响与之相反。此外, 增大伸缩速度将引起更大的平均流修正, 进而使扰动的演化更加偏离未伸缩壁面状态。最后, 为了验证了理论模型的准确性, 将渐近预测的结果与 HLNS 进行比较, 结果表明当雷诺数较大时, 理论预测与数值结果吻合较好。

关键词: 变构飞行器; 边界层转捩; 高超声速; 局部散射

1) 资金资助项目: 国家自然科学基金(92371104, U20B2003, 11988102), 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSBR-087)