

局部凸起对可压缩平板边界层稳定性的影响

李 慧^{1,2}, 黄章峰^{1,2}

(1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;

2. 天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072)

摘 要: 在采用直接数值模拟(DNS)方法计算得到来流马赫数为4.5的带局部凸起的可压缩平板边界层基本流的基础上,基于线性稳定性理论(LST)进行稳定性分析,通过求解扰动方程研究了不同频率的扰动波与不同高度的局部凸起的相互作用,定义了穿透系数来研究局部凸起对流动稳定性的影响.研究表明:当局部凸起高度小于0.2个边界层厚度时局部凸起对来流的影响是局部的;局部凸起使频率小于最不稳定波频率的扰动波更不稳定,对频率大于最不稳定波频率的扰动波有稳定作用,其中最不稳定波频率是指局部凸起中心位置处平板边界层中第2模态最不稳定波的频率;穿透系数定量刻画了局部凸起对稳定性的影响,高度为0.2个边界层厚度的局部凸起引起e-N方法中N值的修正量达到0.8,接近转捩位置处N值的10%,在转捩预测中必须考虑.

关 键 词: 局部凸起; 稳定性; 边界层; 直接数值模拟; 穿透系数

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Effect of local hump on stability of compressible boundary layer on flat plate

LI Hui^{1,2}, HUANG Zhang-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Aerodynamics,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Department of Mechanics,

School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Direct numerical simulation (DNS) method was performed on compressible boundary layer on flat plate with a local hump, and linear stability theory (LST) was applied to conduct the stability analysis based on the mean flow with Mach number of 4.5. The interactions between the disturbances with different frequencies and the local hump with various heights were simulated by solving the perturbation equations, and the effect of local hump on the stability was characterized by a transmission coefficient. The results show that, the local hump affects the mean flow locally when the height of the local hump is smaller than 0.2 times of the boundary layer thickness. Local hump destabilizes the disturbances with frequency smaller than the most unstable disturbance frequency, and stabilizes the disturbances with frequency larger than the most unstable disturbance frequency, wherein the most unstable disturbance frequency is the frequency of the most unstable second modal disturbance of the boundary layer on flat plate at the center position of the local hump.

收稿日期: 2013-08-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11332007); 空气动力学国家重点实验室开放课题(SKLA201301, SKLA201401)

作者简介: 李慧(1988—), 女, 河南新乡人, 硕士生, 主要从事边界层流动稳定性研究. E-mail: lh_890118@sina.com

通讯作者: 黄章峰(1977—), 男, 湖南宜章人, 副教授, 博士, 主要从事流动稳定性、转捩及湍流、直接数值模拟方向的研究.

E-mail: hzf@tju.edu.cn

Transmission coefficient quantitatively describes the effect of local hump on the instability. The local hump with height 0.2 times of the boundary layer thickness enables the correction of the N of e - N method 0.8, about 10% of N at the transition location, which can not be neglected in the transition prediction process.

Key words: local hump; stability; boundary layer; direct numerical simulation; transmission coefficient

飞机机翼、舵、叶轮等的气动效率受转捩位置影响很大,转捩位置与其表面光滑程度关系密切。尽管制造工艺不断提高,在物体表面仍有部件之间的间隙、固定螺母凸起、局部壁面凸起、波纹壁等壁面瑕疵。这些壁面瑕疵提高了自由流对声音干扰的感受性,增大了 Tollmien-Schlichting (T-S) 波幅值的线性增长、增强了分离流中剪切层的不稳定性以及 Gortler 不稳定性和二次不稳定性,对流动稳定性和转捩具有一定影响^[1]。

早期人们进行了大量实验来研究不同壁面条件对流动稳定性和转捩位置的影响。Nayfeh 等^[2]研究了壁面凸起对三维亚谐波二次失稳的影响,指出当添加的凸起足够高能使流动产生分离时,凸起对基本波和亚谐波的影响明显大于没有分离流的情况。Krishnan 等^[3]用雷诺平均方程和大涡模拟的方法研究了平板上粗糙单元对壁面分离流的影响。Fransson 等^[4]用实验和理论结合的方法研究了在平板上添加多排小圆柱后,在边界层中产生的展向周期性条纹的演化情况。Piot 等^[5]利用 DNS 和全局稳定性分析方法研究了展向一排圆柱型粗糙单元后产生的展向周期性涡对边界层稳定性的影响,发现由粗糙单元产生的周期性涡会激发出三维模态波,这种涡对边界层有稳定作用。Gao 等^[6]用抛物化稳定性方程(PSE)研究了凸起高度、宽度对有分离流的边界层中 T-S 波演化的影响,发现凸起对扰动波幅值增长影响的程度随凸起宽度的增加而减小,当凸起高度高于临界边界层厚度时,凸起会明显影响扰动波的演化。陆昌根等^[7]研究了局部吹吸壁面扰动对边界层三维扰动波失稳机制的影响,发现不同分布、类型和强度的壁面扰动对扰动波的影响情况不同,有的可以激励扰动波的增长,有的对扰动波有稳定作用。Bountin 等^[8]用数值模拟和实验的方法研究了波纹壁对高超声速边界层稳定性的影响,文章研究了波纹壁对第 2 模态扰动波的影响,发现在一个比较宽的范围内,波纹壁对高频扰动波有稳定作用。Fong 等^[9-10]通过 DNS 方法研究了高度为 0.5 倍边界层厚度的粗糙单元不同安放位置对

来流马赫数为 5.92 的超声速边界层稳定性的影响,发现在快声波和慢声波共振点前面安放的粗糙单元会增强扰动波的不稳定性,但是当粗糙单元位于共振点或在其下游时,粗糙单元对于扰动波有稳定性的作用。另外还有研究者^[8,11]通过实验研究得到在某些情况下粗糙单元对扰动波有稳定性的作用的结果。还有不少研究者研究了不同的壁面条件对湍流边界层的影响^[12-14]。另外在工程实际应用方面,许多国内研究者^[18-24]对在机翼、舵等上添加粗糙单元的实用性进行了大量数值和实验研究,发现在合适的位置添加适当的粗糙单元可以提高机翼等的气动效率,改善其使用性能。

前人的研究主要关注流动出现分离时粗糙单元对流动稳定性和转捩的影响,以及粗糙单元对气动特性的影响。本文将采用 DNS 方法,研究局部凸起(以下简称凸起)高度较小时,边界层中不出现分离时,凸起对可压缩平板边界层稳定性的影响,并通过定义穿透系数来定量描述不同高度的凸起对不同频率扰动波幅值演化的影响,为工程应用提供理论基础和预测转捩位置的方法。

1 控制方程、边界条件及计算方法

1.1 基本流方程

直角坐标系下的无量纲守恒型二维可压缩 Navier-Stokes(N-S)方程可写为^[25]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} \quad (1)$$

其中 t 为时间; x 和 y 为直角坐标系下流向和法向方向; U 为守恒型通量; $\partial E/\partial x$ 和 $\partial F/\partial y$ 为非线性项,其中包括压力项; $\partial E_v/\partial x$ 和 $\partial F_v/\partial y$ 为黏性项,其中包括热传导项。

图 1 为计算域示意图,入口开始给定相似性解,待流场收敛后取流向下流某处流场作为入口条件,继续计算至再次收敛;上边界和出口采用嵌边法^[25];下边界固壁采用绝热无滑移条件。

由于下边界存在一个高度为 h 、宽度为 d 的余弦凸起,计算坐标采用贴体坐标系,对应的无量

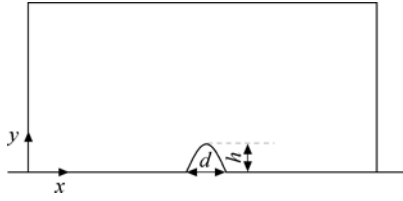


图 1 计算域示意图

Fig. 1 Sketch of computational domain

纲守恒型二维可压缩 N-S 方程可写为^[23]

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial E_1}{\partial \xi} + \frac{\partial F_1}{\partial \eta} = \frac{\partial E_{v1}}{\partial \xi} + \frac{\partial F_{v1}}{\partial \eta} \quad (2)$$

$$\text{其中 } U_1 = JU, \begin{bmatrix} E_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E \frac{\partial \xi}{\partial x} + F \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ E \frac{\partial \eta}{\partial x} + F \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} E_{v1} \\ F_{v1} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_v \frac{\partial \xi}{\partial x} + F_v \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ E_v \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_v \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix}, J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{vmatrix}, \xi \text{ 和 } \eta \text{ 为贴体}$$

坐标系。

进行数值计算时,时间项采用具有 TVD(total variation diminishing) 特性的 3 步 3 阶 Runge-Kutta 格式,对流项进行通量分裂后采用 5 阶的 WENO(weighted essentially non-oscillatory)格式,黏性项则采用 6 阶中心紧致差分格式。计算收敛后得到二维定常的基本流场。

1.2 扰动方程

将守恒量写成基本流量与扰动量之和的形式,带入无量纲守恒型二维可压缩 N-S 方程中,减去基本流项,得到扰动项的满足无量纲守恒型二维可压缩非线性扰动方程

$$\frac{\partial U'_1}{\partial t} + \frac{\partial E'_1}{\partial \xi} + \frac{\partial F'_1}{\partial \eta} = \frac{\partial E'_{v1}}{\partial \xi} + \frac{\partial F'_{v1}}{\partial \eta} \quad (3)$$

基本流量满足 N-S 方程,基本流量与扰动量之和也满足 N-S 方程,因此扰动方程是一种 N-S 方程的未经简化形式,采用扰动方程的优点是容易给定边界条件以及计算精度高。在入口给定扰动为根据 LST 得到的 T-S 波,出口处采用出流边界条件,上边界为 $\rho' = u' = v' = T' = 0$,下边界为 $u' = v' = \partial T' / \partial y = \partial p' / \partial y = 0$ 。扰动量往往要比基本流量小 1~2 个量级,非线性的扰动方程避免了在计算机仿真过程中一个大量和一个小量相互作用时计算精度降低的问题。时间项采用 4 阶 Runge-Kutta 格式,对流项进行通量分裂后采用 5 阶迎风格式,黏性项采用 6 阶中心差分格式。

2 计算参数的选取

无量纲化参数参考值取:密度 $\rho_\infty = 0.01841 \text{ kg/m}^3$,温度 $T_\infty = 226.5 \text{ K}$,动力黏度 $\mu_\infty = 1.475 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,相当于 30 km 高空处之值,来流马赫数 $Ma = 4.5$,对应的单位雷诺数为 $Re = 1.7 \times 10^6 / \text{m}$ 。以计算域入口处边界层的位移排移厚度 δ 为特征长度,平板边界层的雷诺数越大,其基本流平行性越好。本文选取一个较大的雷诺数,减小基本流的非平行性对结果的影响。取 $\delta = 2.95 \text{ cm}$,由此定义的雷诺数 $Re_\delta = 50000$ 。

在距离入口 40 个无量纲长度的位置添加余弦凸起,其凸起的高度 h 分别为 0, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 和 0.2 共 6 种工况,其宽度与没有凸起的工况下最不稳定的波长相当,取为 3 个无量纲长度。

图 2 给出了余弦凸起附近的网格分布。本文计算域流向为 120 个无量纲长度,共 1201 个点,为等间距网格,网格间距为 0.1,一个扰动波长内有至少 30 个点;法向为 20 个无量纲长度,共 221 个点,为变间距网格,在 1 个边界层厚度里面有 100 个点,壁面处最小间距为 0.0005。本文对流向、法向网格各加密 1 倍和同时加密 1 倍计算,结果几乎一样,说明网格数已经足够。

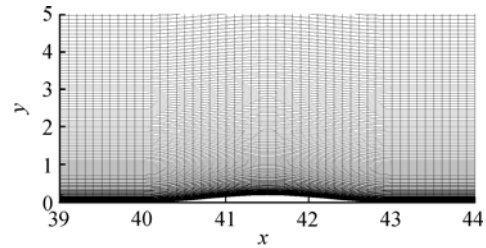


图 2 余弦凸起附近的网格分布

Fig. 2 Grid distribution near cosine hump

在定常流场计算中,由于 N-S 方程的时间离散和空间积分是非耦合的,流场各点的发展历程不影响最终的定常解。所以在进行基本流计算时采用的是当地最大时间步长

$$\Delta t \leq C_{fl} \times \min \left\{ \frac{\Delta \xi}{\lambda_\xi}, \frac{\Delta \eta}{\lambda_\eta} \right\} \quad (4)$$

其中 $\lambda_\xi = |U| + a \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$, $\lambda_\eta = |V| + a \sqrt{\eta_x^2 + \eta_y^2}$, $|U|$ 和 $|V|$ 分别是随体坐标流向、法向方向的速度; a 是局部声速。文中取库朗数 $C_{fl} = 0.8$ 。

进行扰动方程计算时选取固定的时间步长,

在一个扰动周期内计算2500步. 对于频率 $\omega=2.2$ 的扰动波, 时间步长 $\Delta t=1.1424 \times 10^{-3}$.

3 计算结果与分析

3.1 基本流结果

图3中显示的是不同凸起高度工况下基本流

的压力分布情况(已做无量纲化处理). 可以看出, 由于凸起的存在, 在凸起后的流场中出现一道马赫波, 但马赫波的影响范围是有限的, 在远离凸起的地方, 流场恢复成与平板边界层接近的状态. 随着凸起高度的增加, 马赫波的强度逐渐增大, 影响范围也在扩大. 这说明凸起对基本流有局部影响, 而且凸起高度越高, 影响越强、影响的范围也越大.

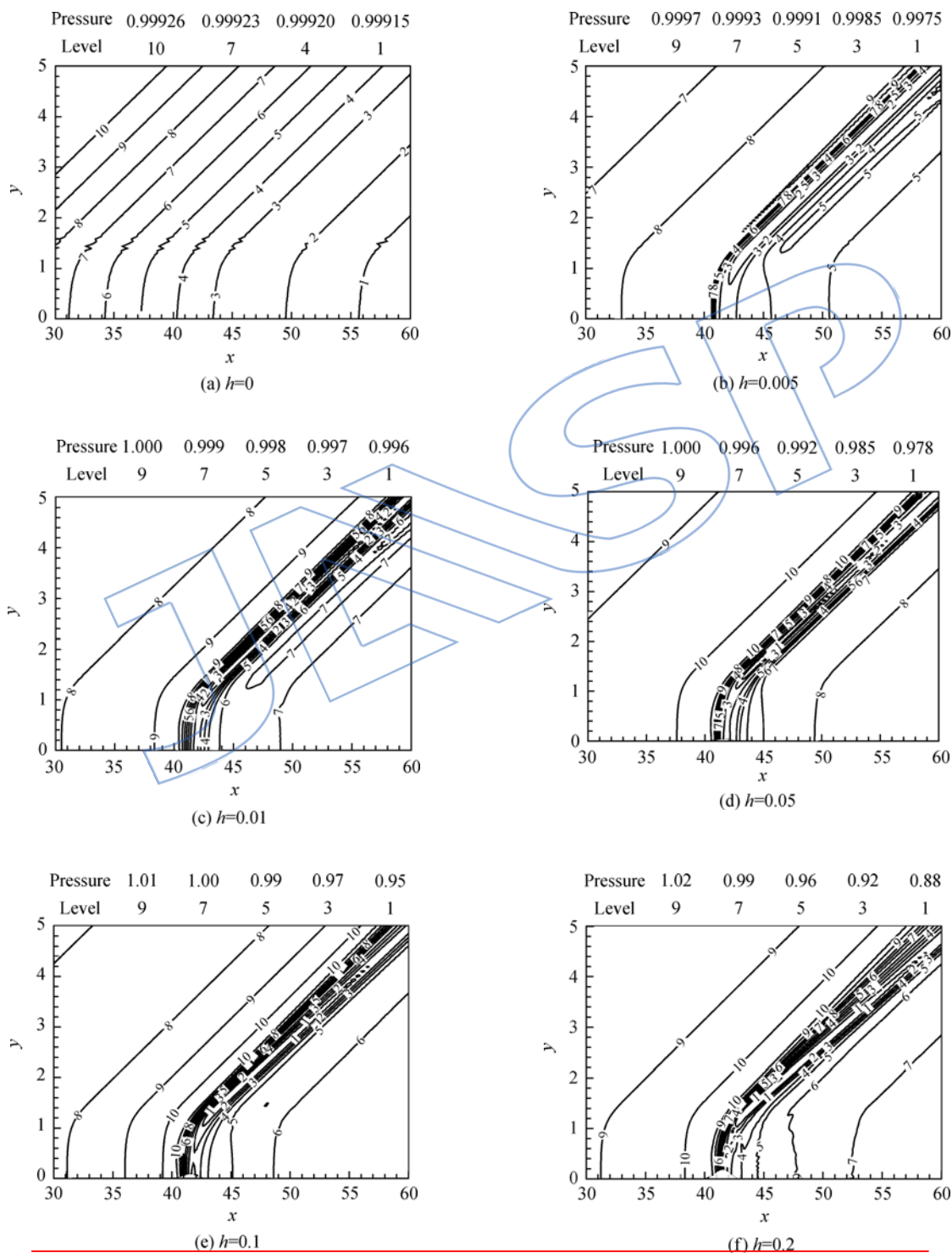


图3 基本流的压力分布

Fig. 3 Pressure distribution of mean flow

3.2 稳定性分析

基于 LST 对基本流进行分析,可以得到其稳定性特征.图 4(a)给出了平板以及添加了不同高度凸起的边界层第 2 模态扰动波的中性曲线.可以看出在远离凸起的地方,有凸起的中性曲线与平板的中性曲线比较符合,说明单个凸起对流动的影响是局部的;在靠近凸起的地方,中性曲线上的频率均减小,而且随着凸起高度的增加减小的幅度也增加;而在凸起附近,中性曲线有剧烈的变化,其相应的频率突然增加.图 4(b)给出了最不稳定波的频率曲线,其趋势与中性曲线一致.这是因为,随着凸起高度的增加,在凸起附近存在明显的马赫波,基本流变化较大,基本流的非平行性的影响需要考虑,基于局部平行流假设的 LST 不再适用.

从图 4(b)还可以看出最不稳定波的频率范围为 $2.0 \sim 2.2$.图 5 给出了不同频率扰动波增长率 $-\alpha_i$ 的流向分布 (α_i 为扰动波的特征值的虚部).可以看出对频率为 2.0 的情况,在凸起前面

增长率随着凸起高度的增加而增加,表明凸起使该扰动波更不稳定;随着频率的增加,凸起前面的增长率逐渐减小;对频率为 2.2 的情况,凸起前面部分区域的增长率变成负值,表明凸起对该扰动波有稳定作用.虽然在凸起附近各扰动波的增长率变化剧烈,但在凸起的后面较远处,各个扰动波的增长率逐渐与平板情况下的增长率趋近或平行.对频率为 2.1 和 2.15 的情况,凸起前的增长率先增大后减小.说明凸起对不同频率扰动波的影响是不同的,总体说来凸起使低频扰动波更加不稳定,对高频扰动波有稳定作用,对最不稳定波的影响较小.

3.3 扰动波幅值演化曲线

在较高凸起附近, LST 不再适用.为了研究单个凸起对扰动波幅值演化的影响,本文采用 DNS 方法,在入口处添加扰动波,通过求解扰动方程计算得到该扰动波沿流向的演化规律.选取了 4 种不同频率的扰动波,其特征函数如图 6 所

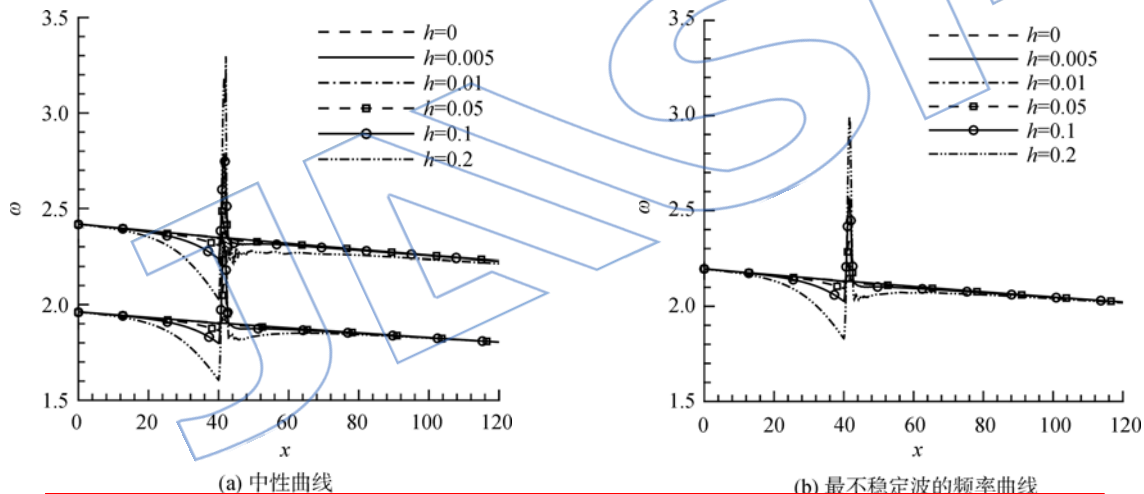
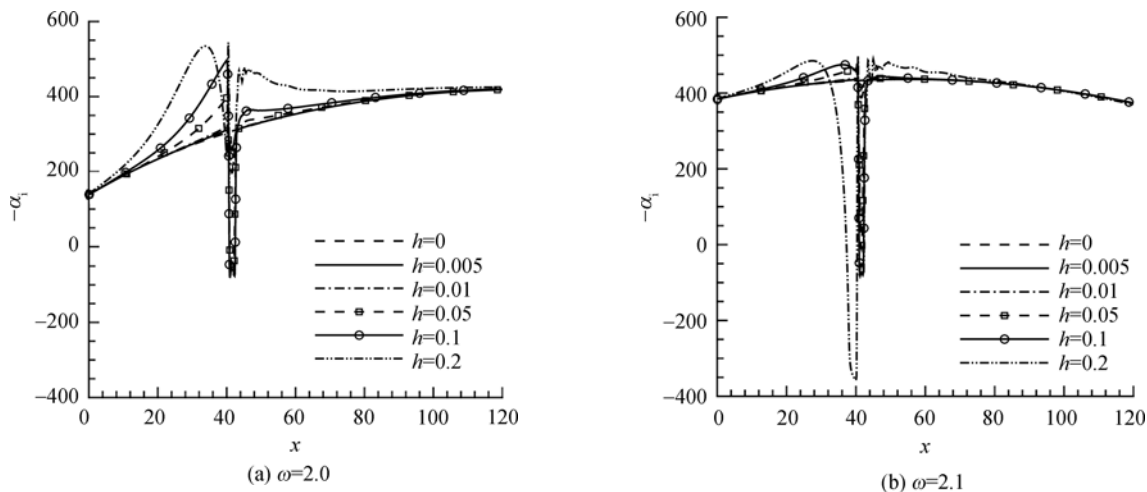


图 4 LST 分析结果

Fig. 4 Analysis results of LST



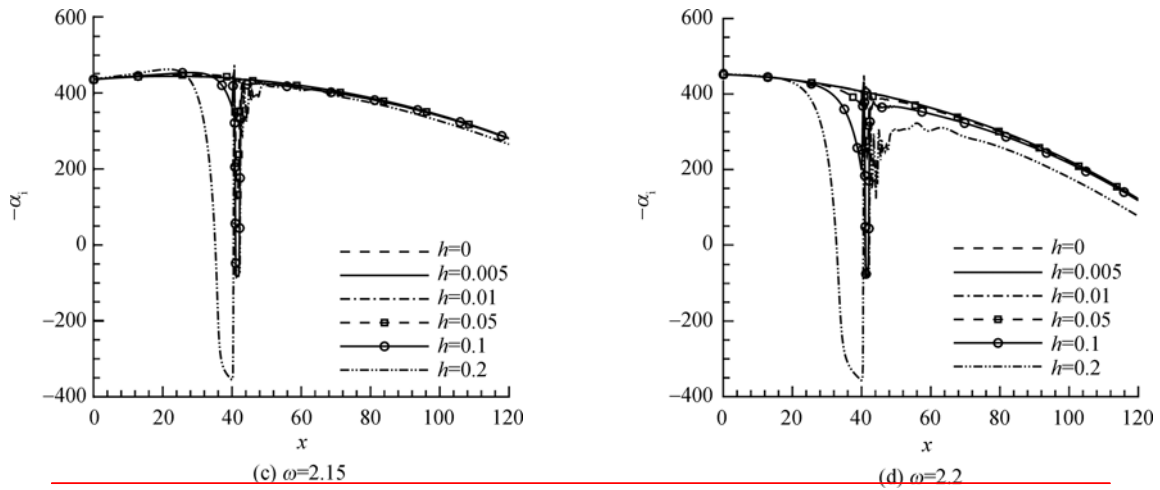


图5 不同频率扰动波增长率的流向分布

Fig. 5 Flow distribution of growth rate of disturbance with different frequencies

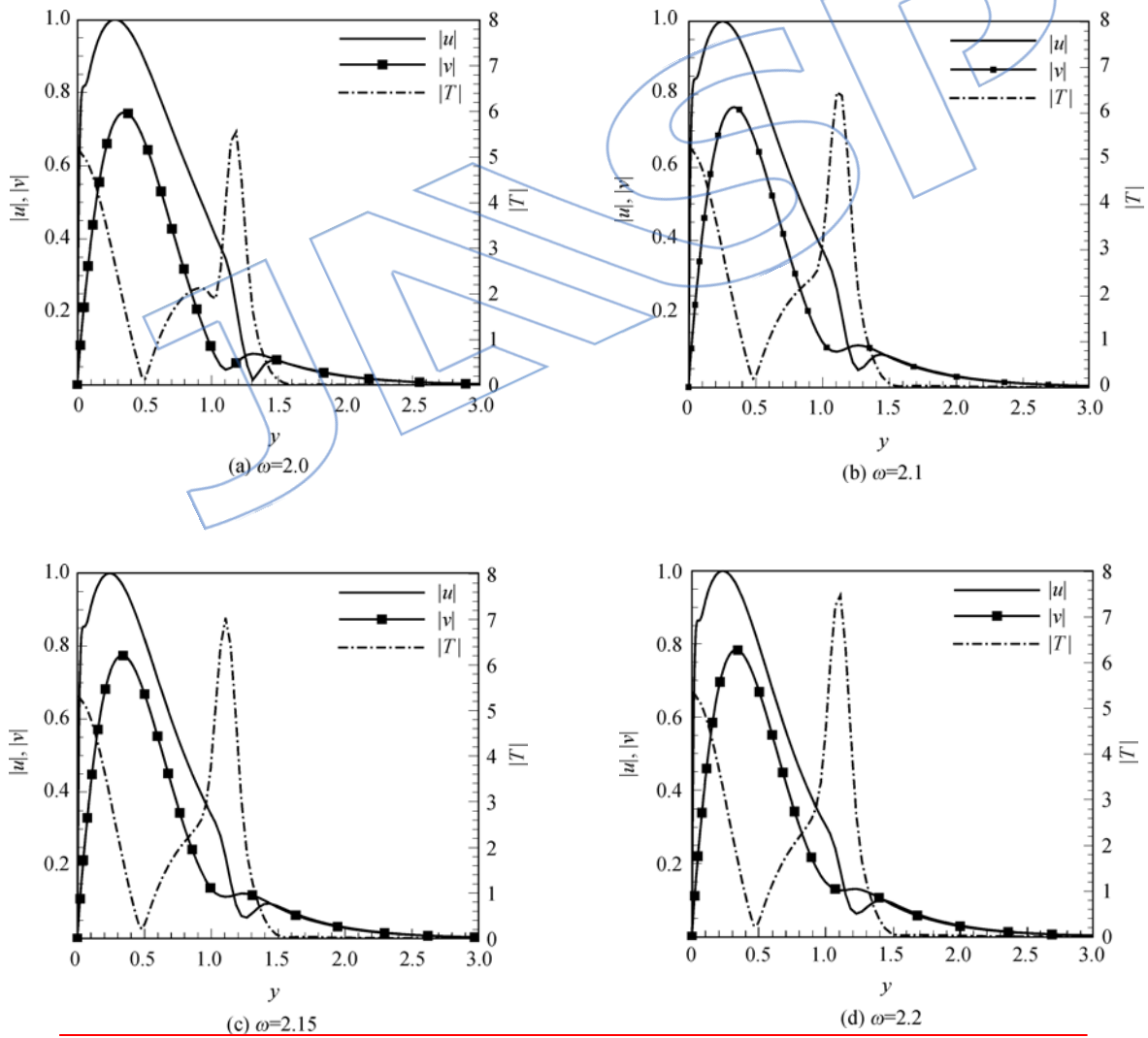


图6 不同频率扰动波的特征函数

Fig. 6 Eigen-function of disturbance with different frequencies

示,特征值如表 1 所示(α_r 为特征值的实部). 其中 $\omega=2.2$ 的扰动波是在入口处第 2 模态最不稳定的二维波,而在添加凸起中心位置平板边界层最不稳定的频率为 2.13. 4 个不同频率的扰动波中,其中 2 个扰动波的频率比凸起中心位置最不稳定的频率大,另外 2 个要小. 如图 6 所示,4 个不同频率扰动波的特征函数相差很小,其扰动速度 u 和 v 的最大值位置在 $y=0.3$ 附近,而扰动温度 T 的最大值在 $y=1.2$ 附近. 但是它们的增长率相差很大, $\omega=2.2$ 的扰动波的增长率比 $\omega=2.0$ 的大 2 倍多. 在入口处的扰动波幅值为 10^{-5} .

表 1 不同频率扰动波的特征值

Table 1 Eigenvalue of disturbance with different frequencies

ω	α_r	α_i
2.0	2.120 620 75	-0.013 850 55
2.1	2.265 508 79	-0.038 584 21
2.15	2.335 847 36	-0.043 608 97
2.2	2.406 832 72	-0.045 166 70

图 7 给出了频率为 2.0 和 2.2 的扰动波在添加了不同高度的凸起时扰动波幅值演化曲线,其中 DNS 的扰动波幅值为流场统计定常后 20 个周期内扰动速度 u 的最大值的平均值, LST 的幅值是根据稳定性分析得到的增长率沿流线积分得到的(即图 7 中的 A_u). 通过图 7 可以看出,在远离凸起的前面 DNS 与 LST 得到的曲线重合,在凸起附近开始偏离. 在凸起后,远离凸起的位置, DNS 与 LST 的结果偏离越来越大. 这是因为在凸起附近,基本流场局部变化较快,流场的平行性很差,不能满足 LST 的平行流假设,所以在凸起附近,稳定性分析的结果不能预测扰动波的演化趋势, DNS 与 LST 计算得到的结果开始发生偏离. 在凸起后面较远处,由于前面凸起的影响沿流向的积累, DNS 与 LST 得到结果差异随着流向位置向后移动会越来越大. 对频率为 2.0 的扰动波,在凸起附近两种方法得到的扰动波幅值均上升,而对频率为 2.2 的情况,扰动波幅值均下降.

为了进一步研究凸起高度 h 对扰动波演化的影响,定义

$$\Delta n(x) = \ln(A_h^x/A_h^0) - \ln(A_0^x/A_0^0) \quad (4)$$

其中 A_h^x 表示添加高度为 h 的凸起后扰动波幅值, A_0^x 表示平板边界层中扰动波幅值. 其中,下标 h 表示添加凸起的高度,上标 x 表示流向位置的

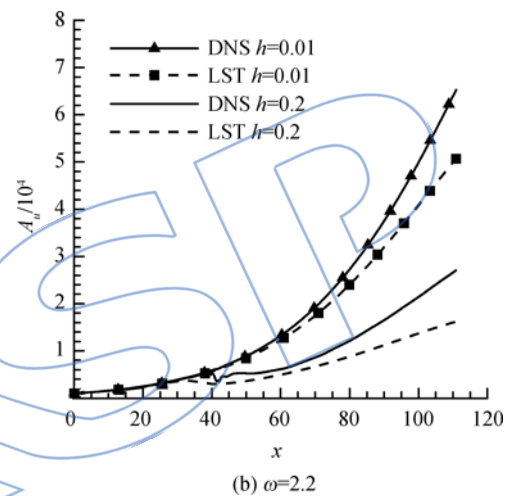
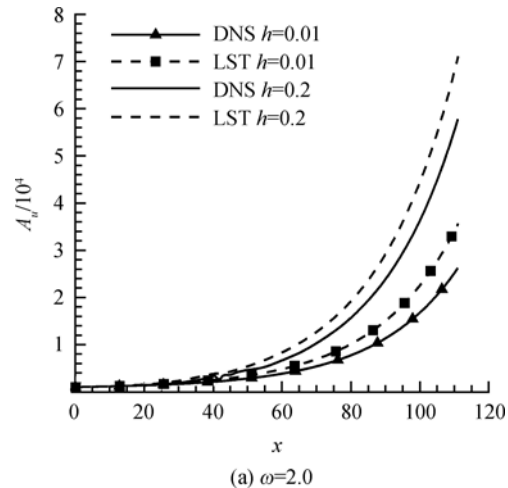


图 7 扰动波幅值演化曲线

Fig. 7 Amplitude evolution curve of disturbance

坐标值. 从图 8 给出的频率为 2.2 的扰动波的 Δn 沿流向的演化可以看出,尽管在凸起附近 Δn 变化很剧烈,在凸起前较远处为 0,而在凸起后较远处趋向一个常数 ΔN . 这一点跟前面的稳定性分析结果是一致的.

我们定义常数 ΔN 为穿透系数,为频率 ω 和凸起高度 h 的函数. 图 9 给出了不同频率的扰动波下穿透系数 ΔN 与凸起高度 h 之间的关系. 研究穿透系数 ΔN 的好处有:①可以定性研究凸起对流动稳定性的影响, $\Delta N > 0$ 表明凸起使扰动波更不稳定,而 $\Delta N < 0$ 表明凸起使扰动波变得稳定;②可以定量研究凸起对扰动波幅值的影响,表现为频率为 ω 的扰动波与高度为 h 的凸起相互作用后扰动波幅值改变了 $e^{\Delta N}$ 倍;③有助于工程师快速、有效地实现对有凸起工况的转捩预测,工程师在预测转捩位置时,并不需要深入细致地知道凸起附近的流动特征,仅仅需要在凸起附近对 $e-N$ 方法的 N 值进行修正即可,而凸起引起的修

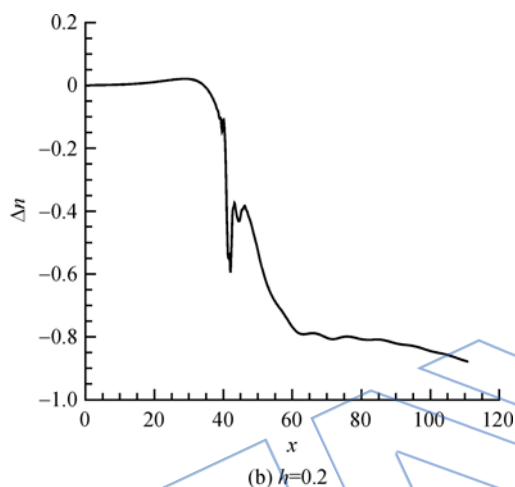
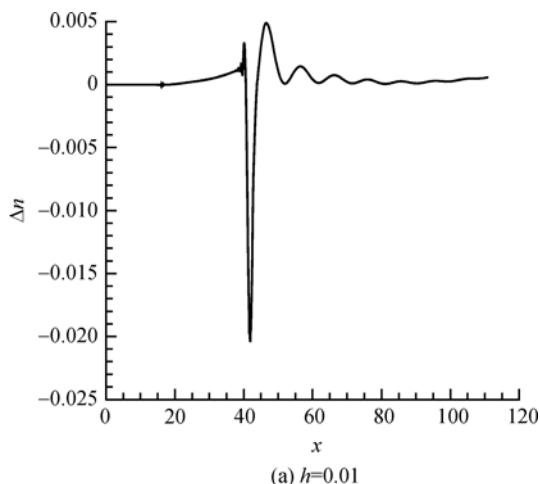


图8 Δn 沿流向的演化
Fig. 8 Evolution of Δn along flow

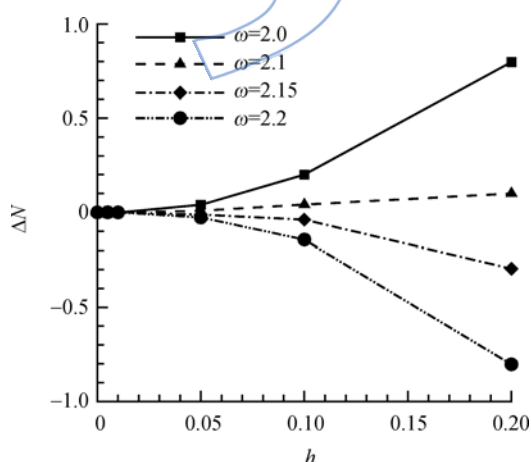


图9 穿透系数 ΔN 与凸起高度 h 的关系
Fig. 9 Relationship between transmission coefficient ΔN and hump height h

正值即为穿透系数 ΔN ; ④可以指导工程师对不同凸起高度采取不同的处理方法, 若认为 $|\Delta N| < 0.1$ 时凸起对扰动波的影响可以忽略, 从

图9可以看出, 对频率为2.0的扰动波, 在 $h < 0.07$ 时可以忽略, 而对于频率为2.1的扰动波, 在 $h < 0.2$ 时可以忽略。

4 结 论

本文采用DNS方法计算了具有凸起边界层的基本流场, 采用LST进行了稳定性分析, 求解扰动方程, 研究了不同频率的扰动波与不同高度凸起的相互作用, 定义了穿透系数来研究凸起高度对稳定性的影响, 研究结果发现:

1) 凸起对基本流的影响有限, 在凸起附近会产生一道马赫波, 在凸起上下游比较远的地方基本流会恢复到原来平行流的状态。

2) 凸起使低频扰动波更不稳定, 对高频扰动波有稳定作用。

3) 穿透系数定量刻画了凸起对流动稳定性的影响, 有助于工程师快速、有效地实现对有凸起工况的转换预测。

参考文献:

- [1] Nayfeh A H, Ragab S A, Al Maaitah A A. Effect of bulges on the stability of boundary layers[J]. Physics of Fluids, 1988, 31(4): 796-806.
- [2] Nayfeh A H, Ragab S A, Masad J A. Effect of a bulge on the subharmonic instability of boundary layers[J]. Fluid Dynamics, 1990, 2(6): 937-948.
- [3] Krishnan V, Squires K D, Forsythe R F. Prediction of separated flow characteristics over a hump[J]. AIAA Journal, 2006, 44(2): 252-262.
- [4] Fransson J H M, Brandt L, Talamelli A, et al. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer[J]. Fluid Dynamics, 2004, 16(10): 3627-3638.
- [5] Piot E, Casalis G, Rist U. Stability of the laminar boundary layer flow encountering a row of roughness elements: global stability approach and DNS[J]. European Journal of Mechanics: Fluids, 2008, 27(6): 684-706.
- [6] Gao B, Park D H, Park S O. Stability analysis of a boundary layer over a hump using parabolized stability equations[J]. Fluid Dynamics Research, 2011, 43(5): 1-19.
- [7] 陆昌根, 赵玲慧, 沈露予. 局部扰动对平板边界层流动稳定性影响的研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(1): 63-67. LU Changgen, ZHAO Linghui, SHEN Luyu. Numerical study on the effect of local disturbance on hydrodynamic stability of plate boundary layer[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(1): 63-67. (in Chinese)
- [8] Bountin D, Chimitov T, Maslov A, et al. Stabilization of a hypersonic boundary layer using wavy surface[R]. AIAA-2012-1105, 2012.
- [9] Fong K D, Wang X, Zhong X. Finite roughness effect on

- modal growth of a hypersonic boundary layer[R]. AIAA-2012-1086, 2012.
- [10] Duan L, Wang X, Zhong X. Stabilization of a Mach 5.92 boundary layer by two-dimensional finite-height roughness[J]. AIAA Journal, 2013, 51(1): 266-270.
- [11] Fujii K. Experiment of the two-dimensional roughness effect on hypersonic boundary-layer transition[J]. AIAA Journal, 2006, 44(4): 731-738.
- [12] Postl D, Fasel H F. Direct numerical simulation of turbulent flow separation from a wall-mounted hump[J]. AIAA Journal, 2006, 44(2): 263-272.
- [13] El-Askary W A. Numerical simulations of non-equilibrium turbulent boundary layer flowing over a bump[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011, 66(2): 230-252.
- [14] Cavar D, Meyer K E. Investigation of turbulent boundary layer flow over 2D bump using highly resolved large eddy simulation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(11): 1-12.
- [15] Orlandi P. DNS of transitional rough channels[J]. Journal of Turbulence, 2011, 12(29): 1-20.
- [16] Wu X H, Squires K D. Prediction of the high-Reynolds-number flow over a two-dimensional bump[J]. AIAA Journal, 1998, 36(5): 799-808.
- [17] Kim J, Sung H J. Wall pressure fluctuations in a turbulent boundary layer over a bump[J]. AIAA Journal, 2006, 44(7): 1393-1401.
- [18] 陈金, 陈方, 刘洪. 超临界翼型加装鼓包减阻的数值研究及优化设计[J]. 微型电脑应用, 2011, 27(2): 1-3.
CHEN Jin, CHEN Fang, LIU Hong. Investigation on drag reduction with bump located on a supercritical airfoil and design optimization of the bump[J]. Microcomputer Applications, 2011, 27(2): 1-3. (in Chinese)
- [19] 董程栋, 叶卫国. 鼓包对舵的气动特性影响研究[J]. 航空学报, 2002, 23(4): 324-326.
DONG Chengdong, YE Weigu. Research on aerodynamical characteristics of a fin with bulge[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(4): 324-326. (in Chinese)
- [20] 张明禄, 吕志咏. 鼓包对双立尾/三角翼立尾抖振的影响[J]. 实验流体力学, 2010, 24(4): 48-51.
ZHANG Minglu, LÜ Zhiyong. Effect of bulges on vertical tail buffeting of twin vertical tails/delta wing[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(4): 48-51. (in Chinese)
- [21] 杨洋, 陈迎春, 黄炜. 跨音速机翼采用鼓包主动减阻技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(2): 13-17.
YANG Yang, CHEN Yingchun, HUANG Wei. Active drag-reducing technique using bumps on transonic wings[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2012(2): 13-17. (in Chinese)
- [22] 石清, 李桦. 实体鼓包对超临界翼型的流动控制和减阻研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(4): 462-465.
SHI Qing, LI Hua. Numerical simulation on action of flow control and wave drag reduction effect with contour bump located on the supercritical airfoil[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(4): 462-465. (in Chinese)
- [23] 曾友兵, 吕志咏, 殷显峰. 头部鼓包对不同截面机身测力影响研究[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 833-838.
ZENG Youbing, LÜ Zhiyong, YIN Xianfeng. Study of effects of bumps on forebodies with different sections on side force[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 833-838. (in Chinese)
- [24] 屠秋野, 周莉, 蔡元虎. 叶型上局部凸起对扩压器性能影响的数值研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(5): 10-14.
TU Qiuye, ZHOU Li, CAI Yuanhu. Investigation of influence of local bulge on vaned diffuser performance[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(5): 10-14. (in Chinese)
- [25] 黄章峰, 曹伟, 周恒. 超音速平板边界层转捩中层流突变为湍流的机理: 时间模式[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2005, 35(5): 537-547.
HUANG Zhangfeng, CAO Wei, ZHOU Heng. The mechanism of laminar mutated to turbulent in supersonic boundary layer transition: the time mode[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica and Astronomica, 2005, 35(5): 537-547. (in Chinese)