

分布式粗糙度对马赫数为 4.5 的 平板边界层稳定性的影响

张存波, 罗纪生, 高 军

(天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072)

摘 要: 采用数值模拟求解 Navier-Stokes(N-S)方程的方法研究了小幅值分布式粗糙度对马赫数为 4.5 的平板边界层中扰动演化的影响. 用泰勒展开线性化的办法将边界条件取在光滑平板壁面上, 来模拟小幅值分布式粗糙度. 研究了粗糙度及扰动的不同因素对边界层扰动演化的影响, 其中包括粗糙度高度、波长、粗糙度区域的长度及扰动波频率等. 研究表明: 分布式粗糙度通过改变边界层基本流场影响扰动波的幅值演化, 一定幅值的分布式粗糙度会使粗糙度区域前的不稳定区向低频移动, 使粗糙度区域后的不稳定区向高频移动. 从总体效果上看, 对于通过粗糙度时, 靠近中性曲线下支界相对低频的扰动, 粗糙度会抑制其幅值的增长; 对于靠近中性曲线上支界相对高频的扰动, 粗糙度会促进其幅值的增长.

关 键 词: 分布式粗糙度; 超声速; 平板边界层; 转捩预测; 中性曲线上下支界

中图分类号: V211.3; O357.4⁺1

文献标志码: A

Effects of distributed roughness on Mach 4.5 boundary-layer transition

ZHANG Cun-bo, LUO Ji-sheng, GAO Jun

(Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The influence of small distributed surface roughness on disturbance amplification in a Mach 4.5 Blasius boundary-layer was investigated by numerical simulation of Navier-Stokes (N-S) equations. Distributed roughness was simulated by applying the wall boundary condition onto the smooth wall through a method of Taylor expansion. Different parameters of roughness and disturbance were considered including height, spacing, length of roughness and frequency of disturbances. Results show that distributed roughness affects the disturbance amplification by altering the basic flow. Distributed roughness shifts the unstable area to lower frequency for upstream flow field and to higher frequency for downstream flow field. Generally, for lower frequency disturbances near the lower branch of the neutral stability curve in the vicinity of roughness, the amplification was damped, while for higher frequency disturbances near the upper branch of the neutral stability curve, the amplification was amplified.

Key words: distributed roughness; supersonic; Blasius boundary-layer; transition prediction; upper and lower branch of neutral stability curve

收稿日期: 2014-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(11332007); 国家自然科学基金青年基金(11202147);
高等学校博士学科点专项科研基金(20120032120007)

作者简介: 张存波(1989—), 男, 山东天津人, 博士生, 主要从事流动稳定性方面的研究.

预测超声速飞行器表面的热负荷是热防护设计中的重要环节. 由于湍流状态的壁面气动热高出层流状态很多, 只有准确预测转捩位置才能准确给出飞行器表面的热负荷, 从而有效进行热防护设计. 因此转捩位置的准确预测对于航空航天领域有着重要的应用价值.

通常转捩预测研究针对的是光滑壁面, 但实际飞行器表面可能存在许多不光滑的地方, 如材料本身的不光滑性, 飞行器连接处的缝隙、壁面的鼓包, 材料被高温烧蚀后的不平整等, 这些不光滑性被称为粗糙度. 边界层中粗糙度的存在对边界层的转捩位置有显著的影响^[1], 因此研究粗糙度对边界层的转捩位置影响具有重要的应用价值.

通常粗糙度可分为孤立粗糙度和分布式粗糙度^[2]. 孤立粗糙度对于低速流动的影响研究较为充分^[3-6], 一般情况下, 当粗糙度高度较低时, 对转捩位置的影响较小, 超过“临界高度”(critical size)之后, 随粗糙度高度增加转捩位置向上游移动, 直到粗糙度高度达到“有效高度”(effective size), 转捩可以在十分靠近粗糙度的位置发生. 在超声速平板边界方面, 数值模拟方面的研究结果较多. Marxen 等^[7], Fong 等^[8], 李慧等^[9]分别研究了单个凸起粗糙度对流动稳定性的影响, 刘开平等^[10]研究了矩形凹槽对稳定性的影响, 研究发现, 在一定条件下粗糙度对一些频率扰动的幅值增长会起促进作用, 而对另一些频率扰动的幅值增长可能起抑制作用. 吴宁宁等^[11]研究了壁面小折角对马赫数 Ma 为 4.5 的边界层稳定性的影响, 发现壁面小折角对扰动波的增长有阻断作用, 即壁面折角会对超声速边界层起到稳定性作用.

对于分布式粗糙度, 在低速流动边界层方面, Gaster^[12]采用理论和实验的方法研究了分布式粗糙度对稳定性的影响, 发现粗糙度的存在会促进扰动波幅值的增长, 对扰动增长的促进作用随粗糙度高度的增加而增强. Brehm 等^[13]利用数值模拟的方法研究了分布式粗糙度的高度、间距及形状对稳定性的影响, 结果表明分布式粗糙度的高度、间距和形状都是影响扰动波增长的重要因素. 在超声速流动方面, Fujii^[14]通过风洞实验研究波形壁面对 Ma 为 7.1 的尖锥边界层稳定性的影响, 发现某些实验条件下波形壁面会使转捩推迟发生, 他们认为粗糙度的波长与扰动波波长的关系是个重要的影响因素. Bountin 等^[15]通过风洞实验研究了波形壁面对 Ma 为 6.0 的平板边界层稳定性的影响, 发现波纹壁会使转捩位置向下

游移动, 其原因是波形壁能在一个较宽频率带内抑制第 2 模态不稳定波的增长.

从目前的研究结果看, 分布式粗糙度对超声速边界层有推迟转捩的作用. 但研究尚不系统, 对边界层的不稳定性是起促进作用, 还是抑制作用, 哪些因素起决定性作用, 都是有待解决的问题.

本文采用数值求解 N-S 方程的办法, 系统地研究了小幅值分布式粗糙度对 Ma 为 4.5 平板边界层扰动演化的影响, 希望了解分布式粗糙度对边界层的不稳定性所起的作用, 以及起决定性作用的因素是什么. 本文研究的粗糙度为正弦形, 高度小于 0.1 倍边界层厚度, 粗糙度的波长接近不稳定波的波长, 约为 2 倍的边界层厚度. 在处理过程中采用了线性化的办法, 将边界条件取在平板边界层壁面处. 通过改变粗糙度高度, 波长, 长度和扰动波的频率, 考察了这些因素对边界层稳定性的影响. 同时, 还分析了分布式粗糙度对不稳定扰动相对增长的影响特征, 给出了对相对增长的修正, 为在该类粗糙度边界层中用 e^N 方法进行转捩预测提供了技术支持.

1 分布式粗糙度的模型, 控制方程、数值方法

1.1 粗糙度模型

本文考虑超声速平板边界层流动, 设壁面法向为 y , 流动方向 x , 没有粗糙度时边界层的速度和温度 $U_0(y)$, $T_0(y)$. 壁面的粗糙度加在 $x_1 \leq x \leq x_2$ 的范围内, 其外形函数的形式为

$$\epsilon(x) = \begin{cases} 0 & x_0 \leq x < x_1 \\ h_R \sin \left[2\pi N_R \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right] & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0 & x_2 < x \leq x_n \end{cases} \quad (1)$$

式中 h_R 为粗糙度幅值, λ_R 表示粗糙度波长, 粗糙度的范围为 $[x_1, x_2]$, 计算域为 $[x_0, x_n]$. 粗糙度外形如图 1 所示, 该图仅为示意图, 粗糙度尺寸非实际比例.

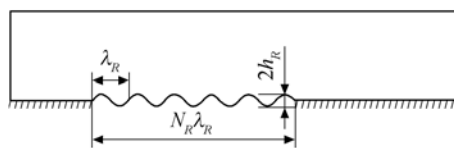


图1 粗糙度外形示意图

Fig. 1 Configuration of distributed roughness

本文研究小幅值粗糙度,对粗糙度的处理方式采用线性化的方法,即利用泰勒展开的方法将边界条件取在光滑壁面处.具体做法如下:黏性流体壁面无滑移及温度绝热的边界条件,对加入粗糙度后的流速和温度有

$$U(\epsilon) = 0 \quad \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\epsilon} = 0 \quad (2)$$

严格的壁面绝热条件壁面法向导数为零,由于本文研究的粗糙度高度相对于其波长较小($h_R < 0.05\lambda_R$),壁面法向方向与 y 方向接近,绝热条件近似按式(2)取.

将式(2)在壁面 $y=0$ 处泰勒展开,只保留 ϵ 的 1 阶小量,有

$$U(\epsilon) = U(0) + \epsilon \left. \frac{\partial U_0}{\partial y} \right|_{y=0}$$

$$\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\epsilon} = \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} + \epsilon \left. \frac{d^2 T_0}{dy^2} \right|_{y=0} \quad (3)$$

由此可以得到有粗糙度在壁面 $y=0$ 上的边界条件为

$$U = -\epsilon \left. \frac{dU_0}{dy} \right|_{y=0}, \quad \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} = -\epsilon \left. \frac{d^2 T_0}{dy^2} \right|_{y=0} \quad (4)$$

1.2 控制方程及数值方法

控制方程为可压缩守恒型 N-S 方程,用来流速度 u_∞ 、密度 ρ_∞ 、温度 T_∞ 对方程无量纲化.黏度 μ 、导热系数 κ 采用 Sutherland 公式计算,取 Prantl 数 Pr 为常数 0.72.

数值模拟分两步进行,首先在壁面适当位置加粗糙度,数值模拟得到有粗糙度边界层的基本流,然后在入口处加入线性稳定性分析得到的扰动波,数值模拟得到扰动波的演化过程.

在基本流计算时,计算域入口条件使用 Blasius 相似性解,出口采用外推边界条件,上边界采用无反射边界条件,壁面采用无滑移条件,绝热壁面,粗糙度区域的边界条件按 1.1 节所述方法处理.计算扰动演化时,计算域入口引入通过稳定性分析求得的特定频率不稳定波.出口边界采用了嵌边区^[16]作为出口边界条件,其他边界条件与基本流计算时一致.

格式方面,采用了高精度格式对方程进行离散,其中对流项采用 Steger-Warming 分裂,正通量和负通量分别采用 5 阶迎风差分格式.黏性项采用 6 阶中心格式.在计算基本流时采用了局部时间步长法^[17],加快计算收敛速度,时间项采用 3 阶 TVD (total variation diminishing) 特性的 Runge-Kutta 法离散.计算扰动演化时采用全局

时间步长,时间项使用 4 阶 Runge-Kutta 法离散.

1.3 计算参数

计算中选 5000 m 高空的气体参数,该高度的温度 T_∞ 为 255.7 K,密度 ρ_∞ 为 0.7364 kg/m^3 ,黏度 μ_∞ 为 $1.628 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.取马赫数 Ma 为 4.5,以边界层位移厚度做特征长度的雷诺数 Re 为 10^5 ,可以推算出 $\delta_0 = 1.533 \text{ mm}$,所对应的无量纲流向位置 $x = 1353.7$.

$Ma = 4.5$ 的平板边界层中第 2 模态扰动波的增长率较大,为主导转捩的模态,因此本文考虑第 2 模态扰动波的演化.引入扰动波的初始幅值较小,以保证在整个计算过程中不稳定波一直处于线性演化阶段.

粗糙度所在区域的边界层名义厚度的最小值为 1.165,粗糙度的高度为 $0.025 \sim 0.1$,不足当地边界层厚度的 $1/10$,基本可以保证粗糙度边界条件线性化的有效性.

为了验证程序,用数值模拟计算了频率 $\omega = 2.3$ 的扰动波在光滑平板边界层中的演化.图 2 给出了数值模拟及 LST (linear stability theory) 的结果,两者吻合的很好,表明了数值模拟程序的正确性.

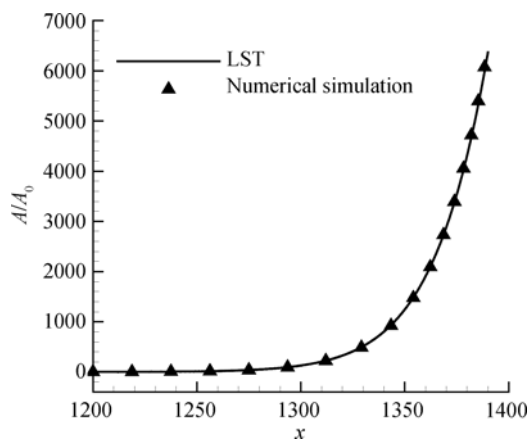


图 2 扰动波幅值演化 ($\omega = 2.3$)

Fig. 2 Amplification of the disturbance ($\omega = 2.3$)

2 计算结果及分析

本文从 5 个方面考察了粗糙度对边界层转捩的影响:扰动频率;粗糙度高度;粗糙度波长;粗糙度的总长度;粗糙度所在的流向位置.研究对转捩的影响,主要是基于 e^N 方法^[18],考虑各种情况对扰动相对增长 N 的修正 ΔN .可以有 3 种方法预测扰动的相对增长 N ,一种是由粗糙度边界层数

值模拟得到的扰动相对增长,记为 N_R ;另一种是由光滑平板边界层进行稳定性分析得到扰动的相对增长,记为 N_S ;第三种用有粗糙度边界层的流场为基本流进行稳定性分析,得到扰动演化的估计,记为 N_{lst} . 修正的 ΔN 有两种计算方法,即 $\Delta N_1 = N_R - N_S$ 和 $\Delta N_2 = N_R - N_{lst}$. ΔN_1 表示与光滑平板边界层稳定性分析的比较, ΔN_2 表示与粗糙平板边界层稳定性分析结果的比较,由于在 N_{lst} 的计算中考虑了粗糙度对边界层流场的影响,因此 N_{lst} 比 N_S 更接近于 N_R , 即有 $|\Delta N_2| < |\Delta N_1|$, 所付出的代价就是要计算有粗糙度的边界层流场. 本文中数值模拟扰动相对增长 N 的计算方法为

$$N_R(x) = \ln \left[\frac{A(x)}{A(x_0)} \right], \quad N_{lst}(x) = \int_{x_0}^x -\alpha_i^R dx$$

$$N_S(x) = \int_{x_0}^x -\alpha_i^S dx \quad (5)$$

其中 x 为计算域入口的流向坐标, $A(x)$ 为数值模拟得到的不同流向位置的扰动幅值, $-\alpha_i^S$, $-\alpha_i^R$ 分别是光滑平板和粗糙平板由流动稳定性分析得到的不稳定扰动的当地增长率.

2.1 粗糙度高度和频率的影响

首先考虑计算域范围为 $x=1200 \sim 1450$, 粗糙度的区域为 $x=1240 \sim 1300$ 的情况. 计算域内的粗糙度个数为 $N_R=24.5$, 粗糙度的波长 $\lambda_R=2.45$, 在这个范围内, 第2模不稳定扰动波的波长范围是 $2.36 \sim 2.84$, 除了光滑平板 $h_R=0$ 外, 计算了粗糙度分别为 $h_R=0.025, 0.05, 0.1$ 的情况. 图3给出了第2模态中性曲线及计算域和粗糙度所在位置的示意图, 同时给出了将研究的扰动频

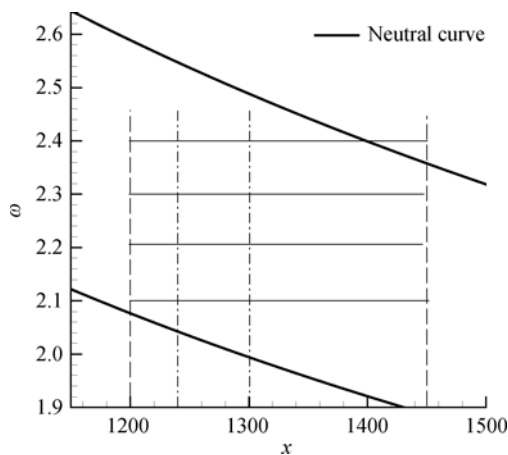


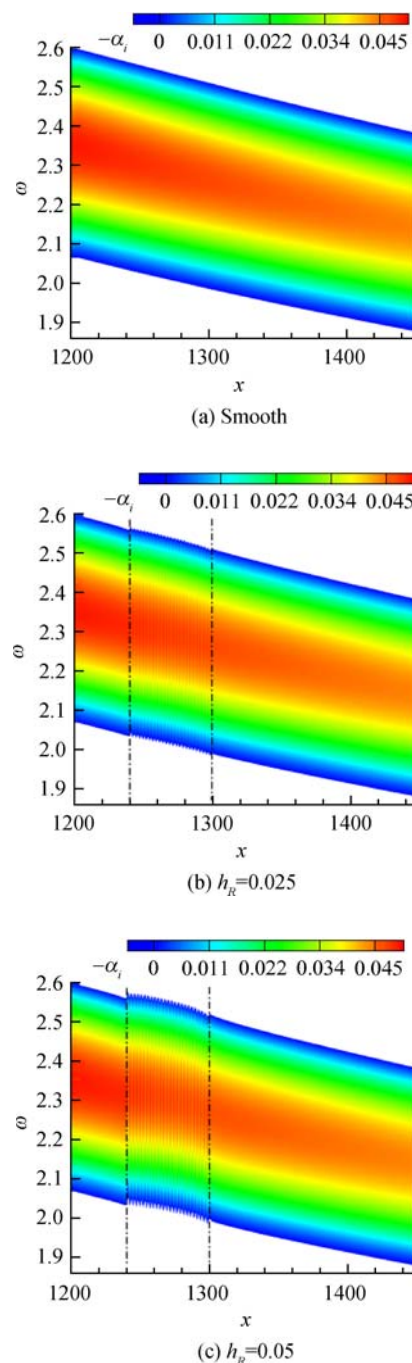
图3 第2模态中性曲线及计算域示意图

Fig. 3 Neutral stability curve of second mode instability and schematic of computation domain

率为 $2.1, 2.206, 2.3, 2.4$ 的相对位置.

壁面分别加入不同高度粗糙度, 利用数值模拟可以得到有粗糙度的基本流场, 对该流场进行流动稳定性分析, 可以得到壁面加入粗糙度的不稳定扰动增长率分布情况. 图4给出了不同粗糙度高度边界层不稳定波的增长率分布云图, 图中两条竖直线之间为粗糙度区域.

对比图4可以看出, 粗糙度改变了边界层的基本流, 进而对扰动波的增长率产生了影响, 影响的程度随粗糙度高度的增加而变大, $h_R=0.025$ 时影响较小, $h_R=0.1$ 时影响较明显. 粗糙度区域



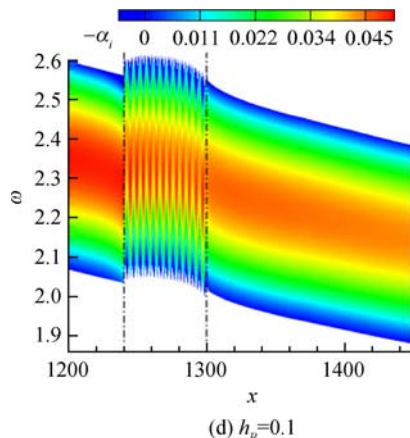


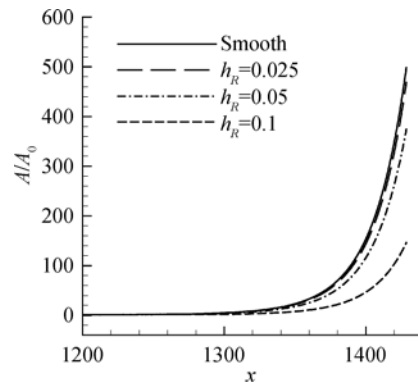
图 4 不同高度粗糙度平板边界层不稳定波的增长率分布云图

Fig. 4 Stability diagrams for varying roughness heights

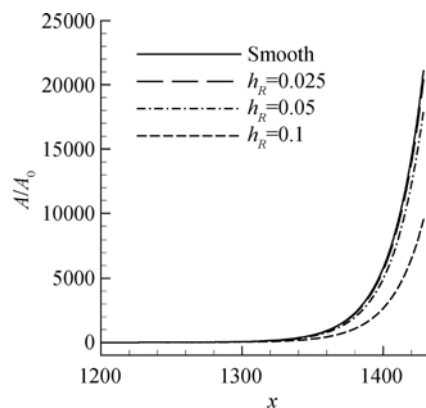
的前端,扰动波增长区整体向低频偏移,后端向高频移动,后端比前端偏移的程度大.对粗糙度高度 $h_R=0.1$,粗糙度对前端的影响范围约为 20 个无量纲长度,对后端的影响范围约为 50 个无量纲长度.在粗糙度区域内,基本流沿流向变化显著,按理说不能用线性稳定性进行分析,但为了完整和比较,我们还是在粗糙度区域内进行了分析,结果表明,该区域内增长率沿流向变化很快,具有波动性,整体效果是使增长区间向高频移动.

对于光滑平板和不同高度粗糙度的边界层,分别在入口引入频率 $\omega=2.1, 2.206, 2.3, 2.4$ 的扰动波,用数值模拟得到了扰动沿流向的演化,图 5 给出了计算结果.图中可以明显看出粗糙度高度对扰动幅值演化的影响,当 $h_R=0.025$ 时影响很较小,扰动幅值演化几乎与光滑平板一致, $h_R=0.05$ 时有一些影响, $h_R=0.1$ 时,与光滑平板有明显区别.还可以看出,粗糙度对边界层内扰动波演化影响的趋势随扰动频率的不同而不同,对频率为 2.1, 2.206 的扰动,粗糙度使扰动幅值变小,即粗糙度对该频率扰动波增长起抑制作用,对频率为 2.4 的扰动波,粗糙度使扰动幅值变大,粗糙度对扰动波增长起促进作用,对频率为 2.3 的扰动波,粗糙度的作用不明显.可见粗糙度对不同频率的扰动波增长所起作用不同,对低频率起抑制作用,对高频率起促进作用.从图 3 可知,不同频率扰动相对中性曲线的位置不同,频率为 2.1, 2.206 靠近中线曲线的下支,而频率为 2.4 更靠近中线曲线的上支.

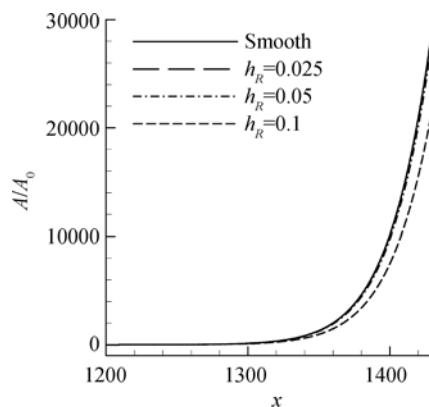
图 6 给出了 $h_R=0.1$ 时, $\Delta N_1, \Delta N_2$ 沿流向的变化.可以看出, ΔN_1 的变化范围在 $-1.57 \sim 1.12$ 之间, ΔN_2 的变化范围在 $-0.47 \sim 0.66$ 之



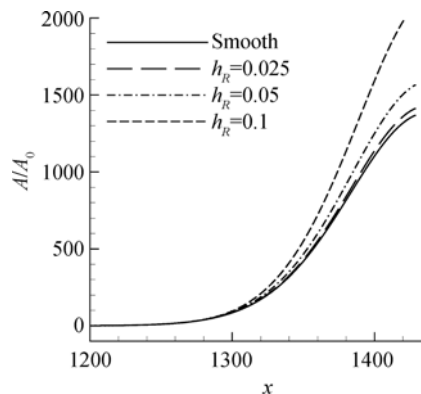
(a) $\omega=2.1$



(b) $\omega=2.206$



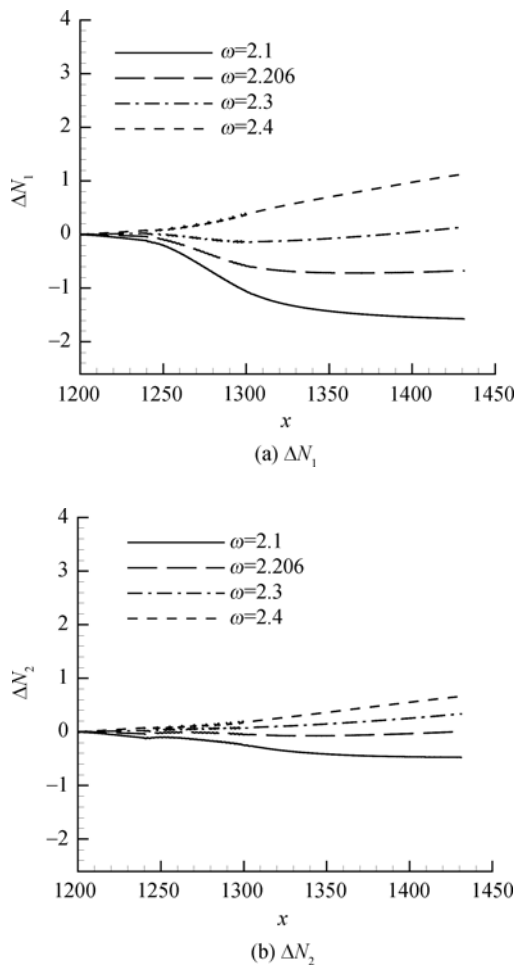
(c) $\omega=2.3$



(d) $\omega=2.4$

图 5 粗糙度高度对不同频率扰动演化的影响

Fig. 5 Streamwise evolution of different frequency disturbances with different roughness heights

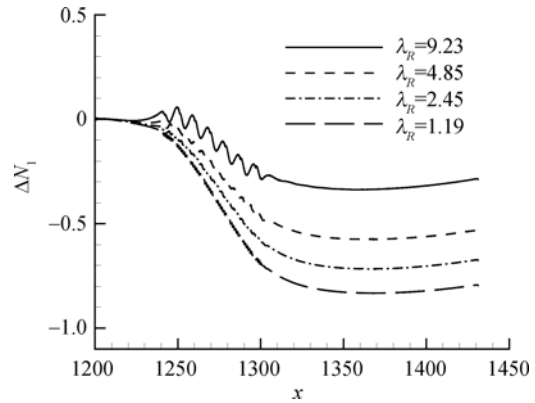
图6 不同频率扰动波 $\Delta N_1, \Delta N_2$ 沿流向的变化Fig. 6 Variation of $\Delta N_1, \Delta N_2$ for varying frequencies along the wall

间,随频率变大,逐渐由负变正.

2.2 粗糙度波长的影响

固定粗糙度的区域 $[1\ 240, 1\ 300]$,通过改变粗糙度的个数 N_R 改变粗糙度的波长研究粗糙度波长对稳定性的影响.共计算了 $N_R=6.5, 12.5, 24.5, 50.5$ 计4组不同波长的粗糙度,对应的粗糙度波长分别为 9.23, 4.80, 2.45, 1.19. 在入口引入频率为 2.206 的扰动波,粗糙度区域内该扰动波的波长在 2.38~2.40 之间,所研究的粗糙度波长范围为不稳定波长的 0.5~4 倍.

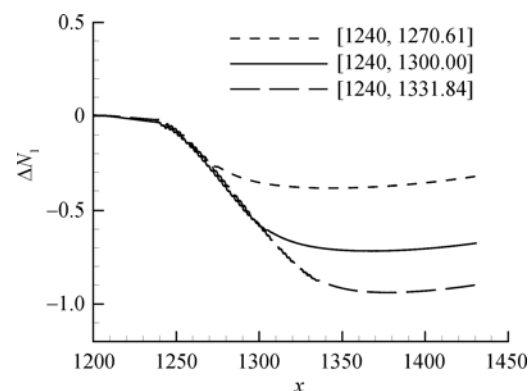
图7给出了由直接数值模拟(DNS)计算得到的 ΔN_1 结果.可以看出,4组波长的粗糙度对该频率扰动波均起到抑制作用,波长小的粗糙度对稳定性的影响强,波长长的粗糙度对稳定性的影响弱.虽然粗糙度波长为 2.45 的粗糙度最接近扰动波的波长,但从数值模拟结果看,对扰动波演化并未产生特殊的影响.

图7 不同粗糙度波长 λ_R 对 ΔN_1 的影响Fig. 7 Variation of ΔN_1 for varying roughness wavelength

2.3 粗糙度区域长度及位置的影响

为了研究粗糙度区域长度对扰动演化的影响,固定粗糙度的波长及起始位置,改变粗糙度区域长度,研究了粗糙度区域的长度对稳定性的影响.粗糙度的区域范围分别取 $[1\ 240, 1\ 270.61]$, $[1\ 240, 1\ 300.00]$, $[1\ 240, 1\ 331.84]$, 相对的粗糙度个数取为 $N_R=12.5, 24.5, 37.5$, 其对应的粗糙度波长均为 2.45. 在入口引入频率为 2.206 的扰动波.

图8给出了计算得到的 ΔN_1 的结果,可以看出,粗糙度区域的加长没有改变粗糙度对扰动演化具有抑制作用的特征,粗糙度区域越长,对不稳定波的抑制作用越强.

图8 不同长度粗糙度对 ΔN_1 的影响Fig. 8 Variation of ΔN_1 for varying roughness length

为了研究粗糙度区域位置对扰动演化的影响,改变粗糙度的流向位置进行了计算.计算域范围是 $[850, 1\ 100]$,加粗糙度区域为 $[890, 950]$,所加粗糙度参数为 $h_R=0.1, N_R=12.5$. 分别在入口引入3个不同频率为 2.5, 2.7, 2.8 的扰动波,

粗糙度区域、扰动频率与中性曲线位置之间的相互关系如图9所示。

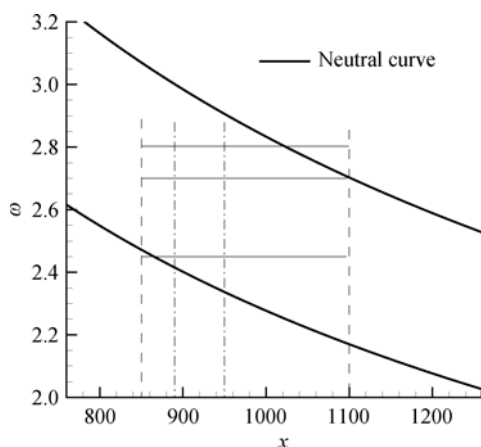


图9 第2模态中性曲线及计算域示意图

Fig. 9 Neutral stability curve of second mode instability and schematic of computation domain

图10给出了光滑平板和粗糙平板边界层增长率分布图。结果与计算域位置在1200~1450的类似,粗糙度前端,中性曲线向低频偏移,粗糙度后端,中性曲线向高频偏移,后端的移动比前端更明显。

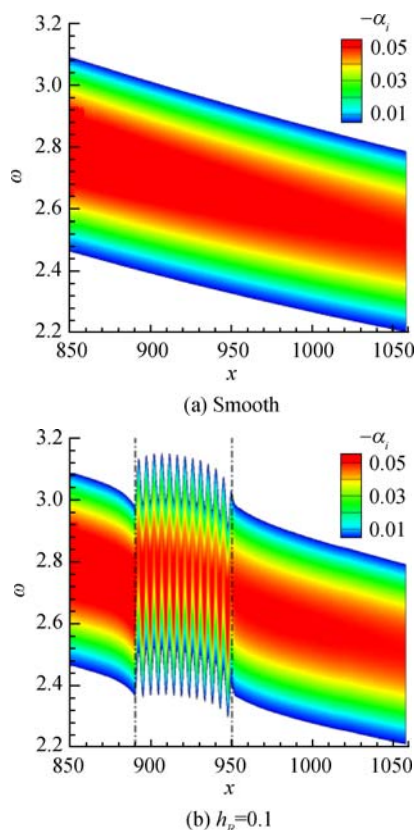


图10 光滑平板和粗糙平板边界层增长率分布云图
Fig. 10 Stability diagrams for smooth wall and rough wall

图11给出了计算得到的 ΔN_1 的结果,频率为2.5的扰动波,靠近中性曲线下支界处,粗糙度使扰动波的幅值减小;频率为2.8扰动波,位于中性曲线的上支界附近,粗糙度使扰动波幅值增大;对频率为2.7的扰动波,粗糙度对其影响较小。

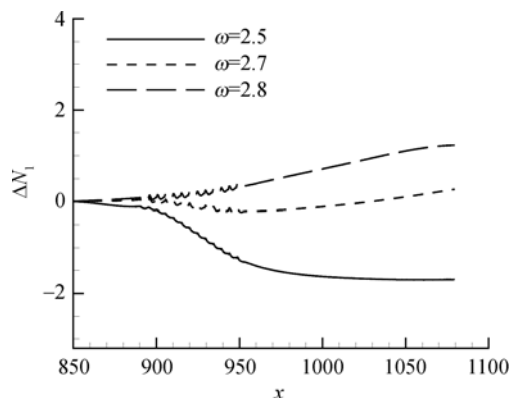


图11 不同频率扰动波 ΔN_1 沿流向的变化

Fig. 11 Variation of ΔN_1 for varying frequencies

所得结果与计算域位置在1200~1450的类似,粗糙度对扰动是促进作用还是抑制作用,决定于粗糙度区域附近处,扰动频率与中性曲线的相对位置。在粗糙度区域处,扰动频率位于中性曲线的下支界附近时,粗糙度对扰动波起抑制作用,扰动频率位于中性曲线上支界附近时,粗糙度对扰动波起促进作用。

3 结 论

本文采用数值模拟的方法,研究了小幅值分布式粗糙度对 Ma 为4.5平板边界层流动稳定性的影响,分别考虑了扰动波频率,粗糙度高度和波长,粗糙度区域的长度和位置等因素的影响。通过计算分析,所得结论如下:

1) 小幅值分布式粗糙度通过改变边界层基本流场影响扰动波的幅值演化。

2) 分布式粗糙度会使粗糙度区域前的不稳定区向低频移动,粗糙度区域后的向高频移动。其总体效果是,扰动波通过粗糙度时,对靠近中性曲线下支界相对低频的扰动,粗糙度会抑制其幅值的增长;对于靠近中性曲线上支界相对高频的扰动,粗糙度会促进其幅值的增长。

3) 在所研究的粗糙度波长范围内,波长短的粗糙度对稳定性影响程度强,波长长的影响程度弱,波长接近扰动波波长的粗糙度对稳定性的影响没有特别的之处。

4) 增加粗糙度区域的长度,将增强对流动稳定性的影响.

参考文献:

- [1] Reshotko E. Disturbances in a laminar boundary layer due to distributed surface roughness[C]// Proceedings of Interational Symposiu, Turbulence and Chaotic Phenomena in fluids. Kyoto, Japan: [s. n.], 1984: 39-46.
- [2] Schneider S P. Effects of roughness on hypersonic boundary-layer transition[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(2): 193-209.
- [3] Fage A. The smallest size of a spanwise surface corrugation which affects boundary-layer transition on an aerofoil [R]. London: Aeronautical Research Council Technical Report, R&M 2120, 1943.
- [4] Klebanoff P S, Tidstrom K D. Mechanism by which a two-dimensional roughness element induces boundary-layer transition[J]. Physics of Fluids, 1972, 15(7): 1173-1188.
- [5] 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.
- [6] Morkovin M V. On roughness; induced transition; facts, views, and speculations [M]. New York: Springer, 1990: 281-295.
- [7] Marxen O, Iaccarino G, Shaqfeh E S G. Disturbance evolution in a Mach 4.8 boundary layer with two-dimensional roughness-induced separation and shock [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 648(10): 435-469.
- [8] Fong K D, Wang X, Zhong X. Numerical simulation of roughness effect on the stability of a hypersonic boundary layer[J]. Computers & Fluids, 2014, 96(96): 350-367.
- [9] 李慧, 黄章峰. 局部凸起对可压缩平板边界层稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 173-181.
LI Hui, HUANG Zhangfeng. Effect of local hump on stability of compressible boundary layer on flat plate [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 173-181. (in Chinese)
- [10] 刘开平, 罗纪生. 凹型粗糙元对边界层稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 168-178.
LIU Kaiping, LUO Jisheng. Effect of concave groove on the stability of boundary layer [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 168-178. (in Chinese)
- [11] 吴宁宁, 罗纪生. 壁面小折角对马赫数4.5边界层中扰动演化的影响[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(2): 219-227.
WU Ningning, LUO Jisheng. Evolution of disturbances in boundary layer for Mach number 4.5 over a small angle of wall corner [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(2): 219-227. (in Chinese)
- [12] Gaster M. The influence of roughness on boundary layer stability [C]// IUTAM Symposium on One Hundred Years of Boundary Layer Research. New York: Springer Netherlands, 2006: 125-134.
- [13] Brehm C, Dackermann T, Grygier F, et al. Numerical investigations of the influence of distributed roughness on Blasius boundary layer stability [R]. AIAA 2011-563, 2011.
- [14] Fujii K. Experiment of the two-dimensional roughness effect on hypersonic boundary-layer transition [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(4): 731-738.
- [15] Bountin D, Chimitov T, Maslov A, et al. Stabilization of a hypersonic boundary layer using a wavy surface [J]. AIAA Journal, 2013, 51(5): 1203-1210.
- [16] 苏彩虹, 周恒. 嵌边法出流条件在可压缩流直接数值模拟中的应用 [J]. 空气动力学学报, 2006, 24(3): 289-294.
SU Caihong, ZHOU Heng. The application of fringe method as the outflow boundary condition for the direct numerical simulation of compressible flows [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006, 24(3): 289-294. (in Chinese)
- [17] 阎超. 计算流体力学方法及应用 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2006.
- [18] 周恒, 赵耕夫. 流动稳定性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

(编辑: 秦理曼)