

质量引射对边界层稳定性的影响

李 瑾¹, 苏 伟², 黄章峰¹, 刘文伶²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072;

2. 中国运载火箭技术研究院 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘 要: 采用直接数值模拟(DNS)方法和线性稳定性理论(LST)研究了质量引射对马赫数为 6 的钝板边界层中第二模态扰动演化的影响。研究了质量引射及扰动的不同因素对扰动演化的影响,包括引射速度幅值、引射宽度、位置、组合以及体积流量。研究表明:质量引射对二维和三维扰动波都起不稳定作用,当引射位置接近扰动波中性曲线的下支界时,不稳定作用最明显;体积流量是决定质量引射对边界层作用的重要因素;当体积流量较小时,质量引射组合放置能起到单个质量引射叠加的效果;LST 预测得到的 N 值修正与直接数值模拟的结果相近,可以定量地反映质量引射对边界层流动稳定性的影响。

关 键 词: 质量引射; 线性稳定性理论 (LST); 高超声速; 边界层; 直接数值模拟(DNS) 方法

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Effect of mass ejection on boundary layers stability

LI Jin¹, SU Wei², HUANG Zhangfeng¹, LIU Wenling²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle,

China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The effect of the mass ejection on the evolution of the second-mode disturbances in a boundary layer of Mach number of 6 on a blunt plate was investigated by using direct numerical simulation (DNS) method and linear stability theory (LST). Different parameters of the mass ejection and disturbances, such as the ejection velocity, width, location, combination and volume flowrate, were considered. Results showed that: the mass ejection destabilized the two-dimensional and three-dimensional disturbance waves, and the effect was the strongest when the ejection position was close to the lower bound of the neutral curve of disturbances; the volume flowrate was an important factor to determine the effect on the evolution of disturbances; the combined mass ejection had the superposition effect when its volume flowrate was small; the value of N predicted by LST was close to the direct numerical simulation result, implying that LST can quantitatively determine the effect of the mass ejection on the stability of boundary layer.

Key words: mass ejection; linear stability theory (LST); hypersonic; boundary layer; direct numerical simulations (DNS)

收稿日期: 2019-07-24

基金项目: 国家数值风洞(2018-ZT1A03); 国家自然科学基金(11672351)

作者简介: 李瑾(1995—), 女, 硕士生, 主要从事边界层流动稳定性研究。

通信作者: 黄章峰(1977—), 男, 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: hzcf@tju.edu.cn

引用格式: 李瑾, 苏伟, 黄章峰, 等. 质量引射对边界层稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2): 280-293. LI Jin, SU Wei, HUANG Zhangfeng, et al. Effect of mass ejection on boundary layers stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 280-293.

预测高超声速边界层转换位置是飞行器设计中的重要环节^[1-2]。在高超声速飞行器的飞行过程中,由于气体的可压缩效应以及激波和黏性的作用,导致飞行器表面附近的空气温度急剧升高,飞行器结构无法承受。科技工作者通常采用“烧蚀防热”来克服这一难题^[3]。烧蚀防热是一种通过烧蚀飞行器表面部分的防热材料,来吸收和耗散大量热量的防热方法。但防热层在烧蚀过程中产生大量的气体及其他烧蚀产物引射到边界层内,会对热流产生阻塞效应;使得表面摩擦减小,质量引射使边界层厚度改变,将改变飞行器的有效外形,从而影响到边界层流动稳定性。因此,研究质量引射对边界层流动稳定性的影响,具有重要的工程应用价值。

随着计算机技术的不断提高,人们更多的开始使用数值计算的方法来研究来流为高超声速时,壁面对边界层稳定性的影响,从而弥补实验研究费用高,难以实现的缺点。Lester 等^[4]通过研究在二维情况下均匀质量引射,发现当气体以单一速率垂直注入平面,并与迎面而来的高超声速气流混合时,会产生明显的流线倾斜;在实际流动中,质量引射的影响是局部的,在下游某个位置恢复到无引射情况下的值。Peltier 等^[5]发现在来流马赫数为 4.9 的湍流边界层中,引射会使得边界层下半部分的雷诺应力增加,而使边界层上部分的雷诺应力减小。Wang 等^[6]以来流马赫数 8 的 5.3° 半角尖楔为研究对象,发现特定形式下的吹吸会使 T 模态、S 模态的扰动波和声波都会变得更不稳定。Sawaya 等^[7]以来流马赫数为 5.92 的二维平板为研究对象,探究了不同的壁面形状(波纹、前进/后退台阶、凸起)对壁面吹吸的影响。研究发现:周期性吹吸会在下游引起转捩,而壁面变形对扰动波起稳定作用,而这个现象可能是由于壁面变形导致流动不均匀,扰动的能量偏离了边界层导致的。Johnson 等^[8]研究了光滑平板上的引射,发现不稳定性会随着引射速率的增加而增加。Egorov 等^[9]对自由来流马赫数为 6 的平板周期性吹风进行直接数值模拟(DNS),发现对于小幅值吹吸,使用直接数值模拟方法和线性稳定性理论(LST)方法得到的第二模态增长率保持一致。罗纪生等^[10]用直接数值模拟的方法,在壁面引入定常的波纹状吹吸边界条件,利用层流模型假设研究了由变化幅值的周期性抽吸边界条件引起的扰动的变形率,研究发现:在周期性的湍流边界层中,雷诺数的变化,波纹状吹吸的波长对雷

诺应力与相应地速度变形率之间的相位差影响不大,且在吹吸幅值不是很大时,利用层流模型可以较好地模拟湍流场中的扰动及其变形率。陆昌根等^[11]研究了二维平板壁面具有局部吹吸的边界层感受性问题,发现自由来流湍流分别与壁面局部吹吸相互作用诱导二维边界层内产生相位相反的 Tollmien-Schlichting (T-S) 波。曹卫东等^[12]用数值计算的方法研究了不同的壁面吹吸扰动对不稳定的二维 T-S 扰动波在空间演化过程中的非线性演化的影响,研究表明壁面吹吸扰动会增加边界层的非线性不稳定性,增大扰动波的增长率。赵耕夫^[13-14]研究了抽吸对高超声速三维边界层稳定性的影响,发现抽吸使得第一模态和第二模态增长率减小。张存波等^[15]研究了分布式粗糙度对平板边界层稳定性的影响,得出分布式粗糙度在低频抑制转捩,高频促进转捩的结果。另外, Holloway、Marxen、Fong、李慧等^[16-19]研究了粗糙元对高超声速边界层稳定性的影响,发现粗糙元在一定条件下对一些频率的扰动起促进作用,而对一些频率的扰动起稳定作用。刘开平等^[20]研究了二维凹槽对扰动演化的影响,发现在特定工况下,凹槽对扰动波具有抑制作用。

人们做的理论和实验方面的工作更多关注的是壁面条件对转捩位置的影响,但壁面条件对 T-S 波在边界层中演化规律影响的研究还不是特别全面。本文采用 DNS 和 LST 方法,系统的研究了质量引射对 Ma 为 6 的钝板边界层的影响。本文通过改变质量引射区域的宽度、引射速度幅值、位置等研究质量引射对可压缩钝板边界层稳定性的影响,给出了 N 值修正系数,来定量研究烧蚀质量引射对流动稳定性的影响,为烧蚀表面引起的转捩判据修正提供依据,以便为工程应用提供参考。

1 控制方程及计算方法

1.1 物理模型

本文计算中选取高超声速二维钝板为研究对象,具体参数如下:钝板的钝头是半径为 0.1 mm 的半圆,来流马赫数为 6,单位雷诺数为 $1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$,总温为 600 K,壁温为 300 K。

图 1 给出了计算域示意图,本文选取 $r = 1 \text{ mm}$ 为特征长度对空间坐标进行无量纲化,速度、密度、温度等来流参数无量纲化。计算时,先计算无质量引射的光滑钝板基本流(如图中

domain 所示)($x=0\sim1\,300$);再截取过钝头后某处流场作为辅助计算域(auxiliary domain),添加质量引射,计算基本流($x=200\sim1\,300$);最后在辅助计算域内取一段实际计算域(actual domain)加密网格,入口添加扰动波进行计算($x=300\sim700$)。

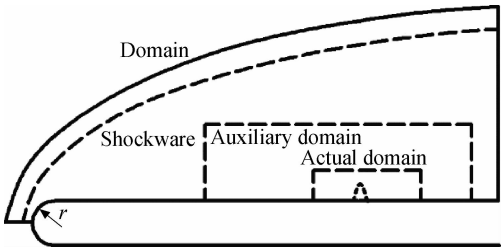


图 1 计算域示意图

Fig. 1 Computational domain diagram

本文研究的引射速度形状为余弦形,其表达式如下:

$$v_w = \frac{a \times 0.001}{2} \left[\cos \left(2\pi \frac{x - x_c}{n \times d_0} \right) + 1 \right] \quad (1)$$
$$x_c - \frac{n \times d_0}{2} \leq x \leq x_c + \frac{n \times d_0}{2}$$

式中 $a \times 0.001$ 代表引射速度幅值; $n \times d_0$ 代表引射宽度,即 4.5、9、18、36,引射宽度是根据光滑钝板 $x=400$ 处最不稳定波的波长($\lambda_m \approx 9$)确定的,所研究的引射宽度范围约为不稳定波长的 0.5~4 倍,为了便于表示,选取 $d_0 = 4.5$; x_c 代表中心位置。下文用 d1a1 表示实际引射宽度为 4.5,引射速度幅值为 0.001,以此类推。图 2 为质量引射速度示意图。

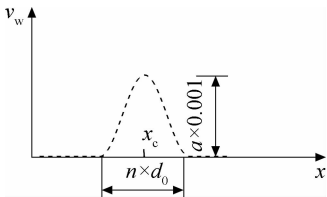


图 2 引射速度示意图

Fig. 2 Ejection velocity diagram

体积流量是关于引射速度幅值和引射宽度乘积的一个函数,其计算公式如下:

$$Q_v = \int_{x_c - \frac{n \times d_0}{2}}^{x_c + \frac{n \times d_0}{2}} \frac{a \times 0.001}{2} \left[\cos \left(2\pi \frac{x - x_c}{n \times d_0} \right) + 1 \right] dx = \frac{an}{2} \times 0.001 \times d_0 = q \times 4.5 \times 10^{-3} \quad (2)$$

1.2 控制方程和数值方法

瞬时流场满足守恒型二维可压缩 Navier-Stokes(N-S)方程。具体形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} \quad (3)$$

式中 t 为时间, x 、 y 分别为直角坐标系下的流向和法向坐标, $\mathbf{U}$ 表示守恒变量, $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$ 表示对流项, $\mathbf{E}_v$ 、 $\mathbf{F}_v$ 表示黏性项。

首先计算带质量引射的钝板边界层的基本流场,给定入口边界条件,求出基本流;在计算扰动时,瞬时物理量分为基本流 $\boldsymbol{\varphi}_0 = [\rho_0, u_0, v_0, T_0]^T$ 和扰动量 $\boldsymbol{\varphi}' = [\rho', u', v', T']^T$ 的叠加,如下:

$$\boldsymbol{\varphi} = [\rho_0 + \rho', u_0 + u', v_0 + v', T_0 + T']^T \quad (4)$$

求解控制方程。扰动量为 $\boldsymbol{\varphi}' = \boldsymbol{\varphi} - \boldsymbol{\varphi}_0$,取一个周期内沿法向的最大值,其中, ρ 、 u 、 v 、 T 分别代表密度、流向速度、法向速度、温度。流向速度的扰动幅值记为 A 。

进行基本流和扰动计算时,时间项采用 2 阶 Runge-Kutta 格式,对流项采用 5 阶迎风格式,黏性项采用 6 阶中心差格式。在 Domain 计算域内计算基本流时,激波附近采用降阶处理,防止发散。

1.3 Δn 的定义

本文从 6 个方面研究质量引射对边界层转换的影响:引射速度幅值、引射区域宽度、体积流量、引射区域所在的流向位置,引射区域组合以及展向波数。本文主要基于 e^N 方法研究质量引射对转换的影响,考虑系数 N 值修正系数 Δn 。本文用两种方法预测 Δn :①对基本流进行稳定性分析,通过直接数值模拟计算得到的带有质量引射和光滑钝板的基本流,带有质量引射钝板的速度型在基本流中已经体现,在进行稳定性分析时,考虑小扰动的线性演化, LST 的壁面边界条件均为:扰动速度 $u' = v' = 0$,计算 Δn_{lst} 的公式为式 (5)。其中, $-\alpha_i^0$ 和 $-\alpha_i^Z$ 是光滑钝板边界层和带有质量引射的边界层由线性稳定性分析得到的不稳定扰动的增长率。②首先将光滑边界层和带有质量引射的边界层进行直接数值模拟得到扰动幅值曲线,分别是 $A_0(\omega, x, 0, 0)$ 和 $A(\omega, x, a, d)$ 。其中, $A_0(\omega, x, 0, 0)$ 是指频率为 ω 的扰动波添加在光滑钝板的扰动幅值曲线, $A(\omega, x, a, d)$ 是指频率为 ω 的扰动波添加在质量引射中心位置为 x , 宽度为 d , 引射速度幅值为 a 的扰动幅值曲线。然后由式 (6) 计算 Δn_{dns} 。

$$n_{\text{lstz}} = \int_{x_0}^x -\alpha_i^z dx \quad n_{\text{lst0}} = \int_{x_0}^x -\alpha_i^0 dx$$
$$\Delta n_{\text{lst}} = n_{\text{lstz}} - n_{\text{lst0}} \tag{5}$$

$$\Delta n_{\text{dns}}(\omega, x, a, d) = \ln \frac{A(\omega, x, a, d)}{A_0(\omega, x, 0, 0)} \tag{6}$$

1.4 程序验证及网格无关性验证

为验证基本程序的可靠性,文章选取了Wang^[21]的计算工况: $Ma=5.92$,来流温度 $T_{\infty}^*=48.69\text{ K}$,雷诺数 $Re_{\infty}^*=1.3\times10^7/\text{m}$,计算模型为尖平板。图 3(a)给出了过激波后壁面压力的对比图,其中 p 为壁面压力,可以看出结果吻合得很好,说明本文采用的基本流计算程序是可靠的。

为了验证 LST 程序,选取了张存波等^[15]的计算工况:5 000 m 高空, $Ma=4.5$,光滑平板,以边界层厚度为特征长度下的雷诺数为 10^5 ,在入口添加频率为 2.3 的扰动波,图 3(b)给出了扰动幅值的对比结果,其中 A 为流向速度的扰动幅值, A_0 为入口扰动波的幅值,可以看出,两者吻合

的很好,验证了 LST 程序的可靠性。

为了验证网格无关性,选取 d2a1 的工况,原网格为流向 1 301 个点,在质量引射区域内进行加密处理,且采用光滑过渡,一个扰动波长内至少有 30 个点;法向为变间距网格,301 个点,在一个边界层厚度里有 100 个点。将网格流向和法向网格均加密,为 $2\,001\times451$ 。采用两套网格计算基本流,稳定性分析得到的中性曲线对比如图 4 (a),在入口添加无量纲频率为 0.55 的扰动波,入口扰动波幅值为 10^{-5} 。图 4(b)给出了两套网格下的幅值扰动演化结果,从图中可以看出,两套网格的计算结果重合,说明原网格满足计算精度要求,在后面的计算中,采用此网格。

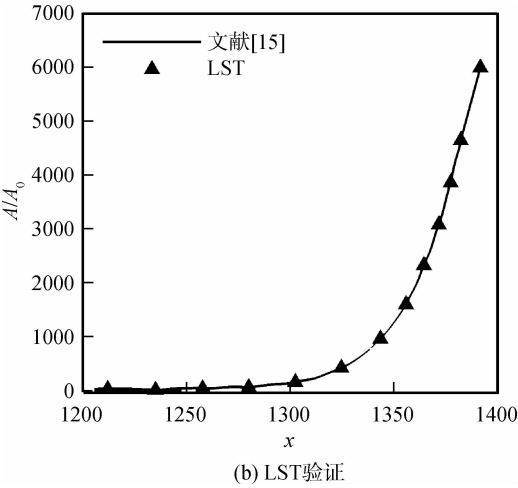
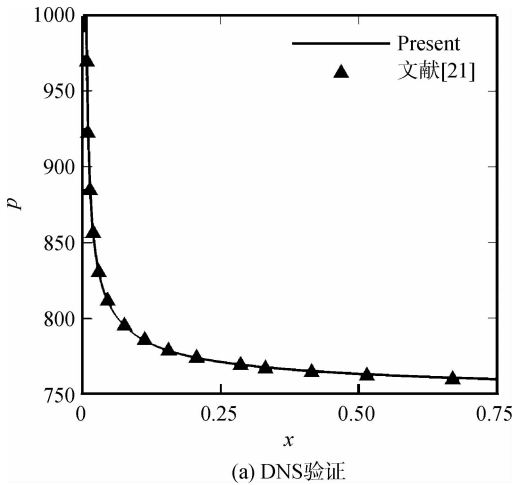


图 3 与文献对比图
Fig.3 Comparisons with literature

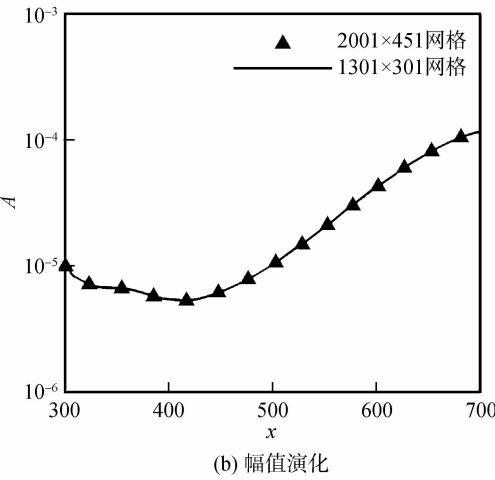
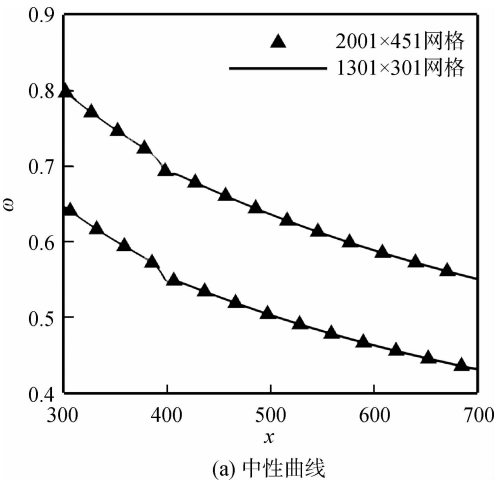


图 4 不同网格下的中性曲线和扰动演化
Fig.4 Neutral curve and disturbance evolution under different grids

2 计算结果及分析

2.1 工况选取

在研究质量引射速度幅值和引射宽度的影响

时,选取引射位置为 $x_c=400$,改变引射速度幅值为 $a=1,5,10,20$ 。改变引射区域的宽度为 $d=1,2,4,8$ 。研究引射位置的影响时,选取 d2a1 形式,改变引射位置为 $x_c=373,400,427,454,481,500$,共计 6 种不同位置的质量引射。研究组合形式的影响时,选取 d2a1 形式,通过固定第一个引射位置为 400,改变第二个引射位置来研究组合的影响,第二个引射位置分别为 373、427、454、481、500。表 1 给出了具体的基本流计算参数。

表 1 基本流计算参数
Table 1 Base flow calculation parameters

工况	d	a	x_c	q
C0.0	0	0		0
C1.1	1	1	400	0.5
C1.5	1	5	400	2.5
C1.10	1	10	400	5
C1.20	1	20	400	10
C2.1	2	1	400	1
C2.5	2	5	400	5
C2.10	2	10	400	10
C4.1	4	1	400	2
C4.5	4	5	400	10
C8.1	8	1	400	4
X1	2	1	373	1
X2	2	1	400	1
X3	2	1	427	1
X4	2	1	454	1
X5	2	1	481	1
X6	2	1	500	1
Z1	2	1	400+373	1
Z2	2	1	400+427	1
Z3	2	1	400+454	1
Z4	2	1	400+481	1
Z5	2	1	400+500	1

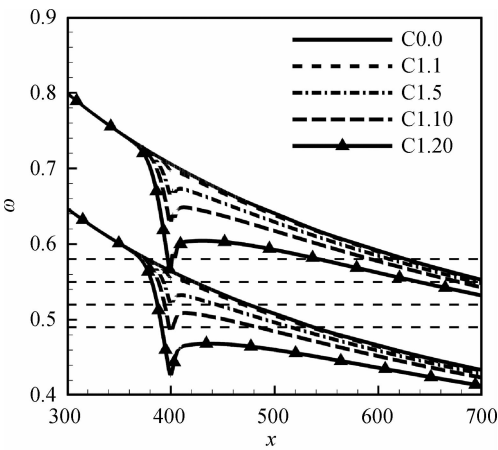
第二模态扰动波频率的选取是基于线性稳定性分析得到的。

研究引射速度幅值对扰动波的影响时,固定引射位置为 400,引射宽度 $d=1$,选取 C1.1、C1.5、C1.10、C1.20 工况,其中入口扰动波频率的选取是根据光滑钝板边界层以及这四种不同引

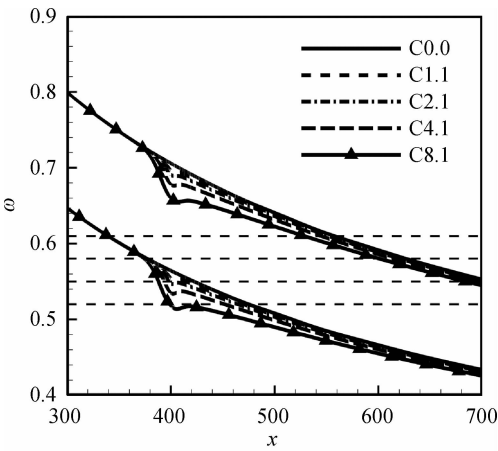
射速度幅值工况在计算域内的第二模态不稳定波的中性曲线确定的,选取增长区间较长的频率。如图 5(a),选取频率为 0.49、0.52、0.55、0.58。研究引射宽度对扰动波的影响时,固定引射位置为 400,引射幅值 $a=1$,选取 C1.1、C2.1、C4.1、C8.1 工况,如图 5(b),选取这组内增长区间较长的频率为 0.52、0.55、0.58、0.61。研究体积流量的影响时,选取 C1.20、C2.10、C4.5,由于基本流变形较大,入口扰动的频率为 0.46、0.48、0.49、0.52、0.55、0.58,当扰动波的频率为 0.46、0.48、0.49 时,由于增长区间变长,扰动的计算域增加至 900,如图 5(c)。研究引射位置的影响时,选取 X1~X6,入口扰动波的频率为 0.49、0.52、0.55、0.61,共计 $6\times4=24$ 种情况。扰动波的频率和中性曲线的相对位置如图 5(d)。研究组合的影响时,主要考虑的是组合效果是否和两个单独放置的质量引射单独作用的叠加效果相当,因此,选择了频率为 0.52 和 0.55。

2.2 基本流结果

图 6(a)给出了当引射位置为 400, $d=1$,不同



(a) C0.0, C1.1, C1.5, C1.10, C1.20



(b) C0.0, C1.1, C2.1, C4.1, C8.1

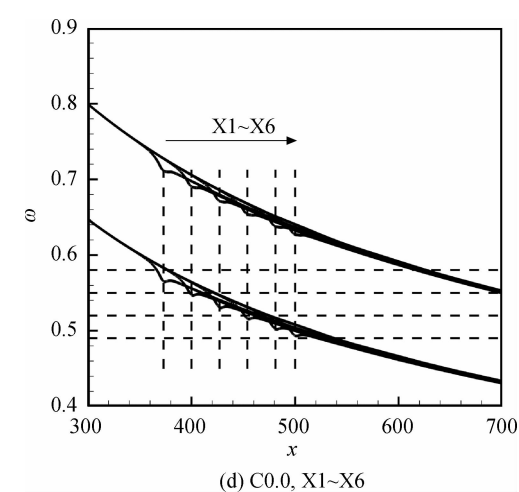
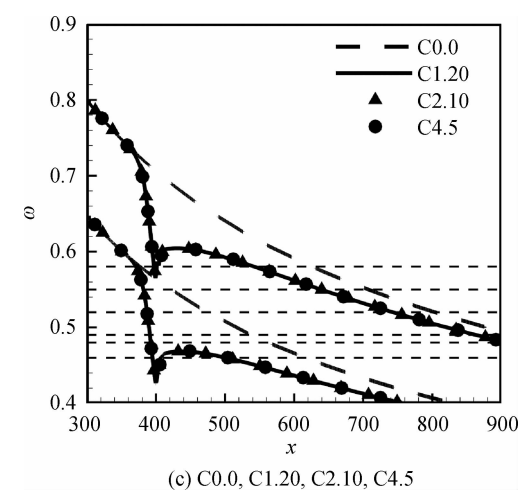


图 5 质量引射对中性曲线的影响
Fig. 5 Effect of mass ejection on neutral curve

引射速度幅值和光滑钝板在 $x=400$ 处的流向速度 u 的剖面,可以看出:质量引射使得流向速度降低,且引射速度幅值越大,速度剖面变形越严重。图 6(b)给出了边界层厚度随流向的变化,其中, δ 为边界层厚度,可以看出,质量引射使得边界层变厚,且引射速度幅值越大,边界层厚度变化越明显。

图 7(a)展示了不同速度幅值下壁面剪切率 $u_y=(\partial u/\partial y)$ 沿流向的分布,可以看出, u_y 在质量引射区域附近时明显降低,这表明了壁面附近流速降低,随着引射速度幅值的增加,下降幅度加大。图 7(b)展示了壁面压力 p_w 沿流向的分布,随着引射速度幅值的增加,平均压力修正增大。

2.3 质量引射对抗动的影响

2.3.1 质量引射速度幅值的影响

冷壁使第二模态变得不稳定,使第一模态变得稳定,分析发现在计算域内不存在第一模态。图 8(a)给出了当引射中心位置为 400 处,宽度为

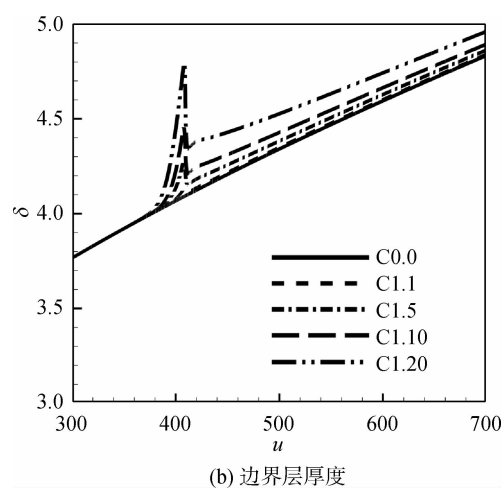
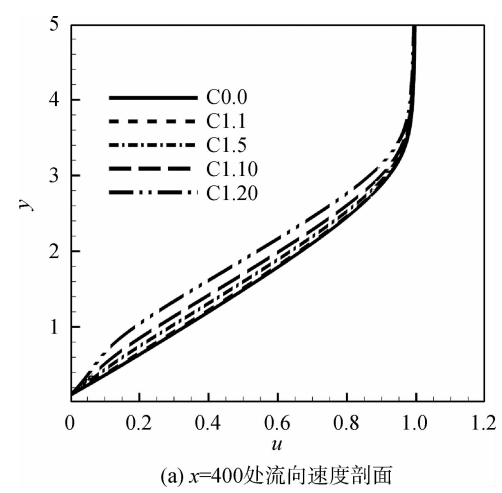
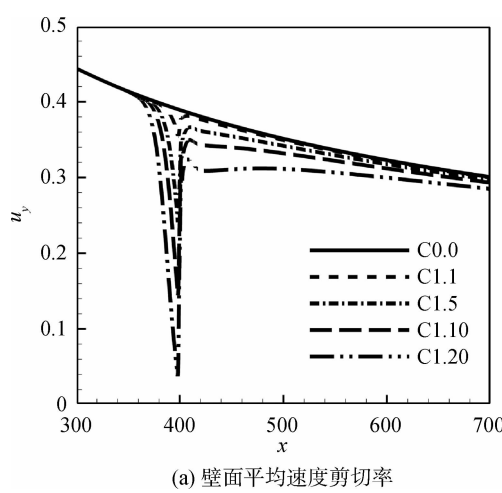
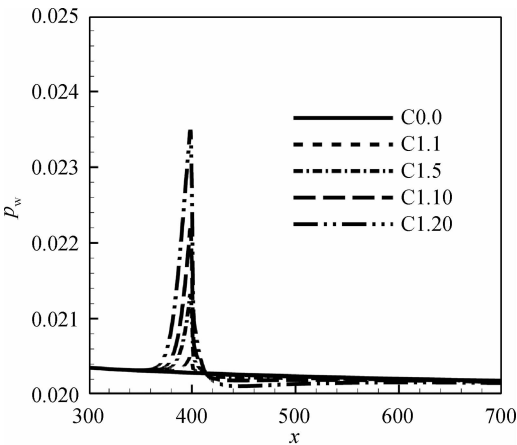


图 6 $x=400$ 处流向速度剖面和边界层厚度示意图
Fig. 6 Profile of the steamwise velocity at $x=400$ and sketch of boundary layer thickness

$d=1$ 时,不同引射速度幅值条件下的第二模态中性曲线,从图中可以看出,在靠近 $x=400$ 时,不稳定波的频率随着引射速度幅值的增加而降低,表明质量引射使得不稳定波的频率整体减小;当引射速度幅值增大时,流向影响的区域变大。图

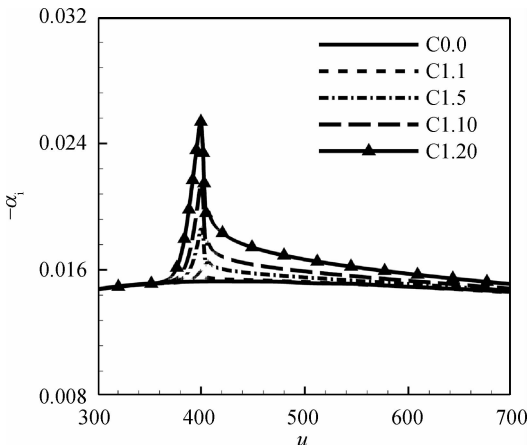




(b) 压力的流向分布

图 7 壁面平均速度剪切率和压力的流向分布

Fig. 7 Flow direction distribution of pressure and wall average velocity shear rate



(b) 最不稳定波增长率曲线

图 8 C0.0、C1.1、C1.5、C1.10、C1.20 的中性曲线和最不稳定波增长率曲线

Fig. 8 Neutral curve and growth rate curve of the most unstable wave at C0.0, C1.1, C1.5, C1.10, C1.20

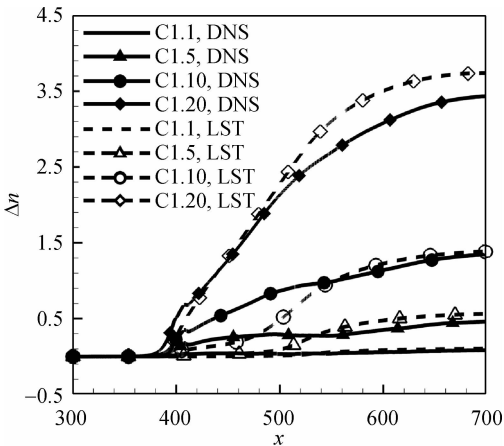
8(b)给出最不稳定波的增长率曲线,带有质量引射的钝板边界层的最不稳定波的增长率变大,这说明带有质量引射后边界层变得更不稳定;随着引射速度幅值增大,最不稳定波的增长率变大。

对于光滑钝板和不同引射速度幅值的边界层,分别在入口引入 $\omega=0.49, 0.52, 0.55, 0.58$ 的扰动波,利用 DNS 和 LST 得到 Δn ,如图 9。可以看出,当 $a=1$ 时,扰动幅值演化与光滑钝板基本一致;随着引射速度幅值 a 的增大,影响变大,与光滑钝板有明显区别;质量引射对边界层扰动波的影响大小随入口扰动波频率的不同而不同。可以看出,在引射区域上游较远处 ($x<400$), $\Delta n=0$,说明质量引射对上游的影响有限;在质量引射区域及其下游位置, Δn 明显变大,随着引射速度幅值的增加, Δn 变大,这表明质量引射会使不稳定波变得更不稳定。当 $\omega=0.58$ 时,在下游位置 Δn 出现负值,这是由于加入质量引射后增

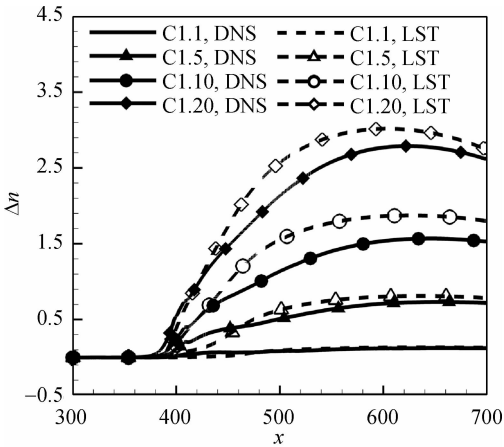
长区间变短导致的。

2.3.2 引射宽度的影响

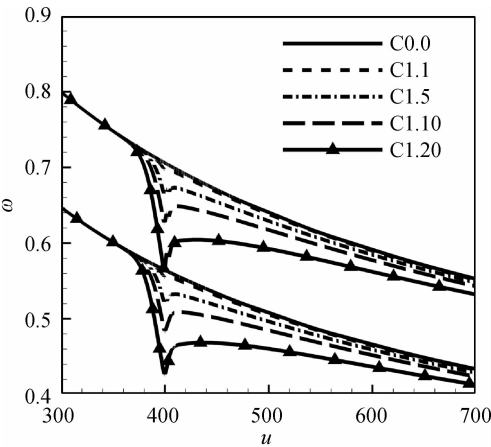
固定引射速度幅值 $a=1$,改变引射宽度研究



(a) $\omega=0.49$



(b) $\omega=0.52$



(a) C0.0, C1.1, C1.5, C1.10, C1.20 的中性曲线

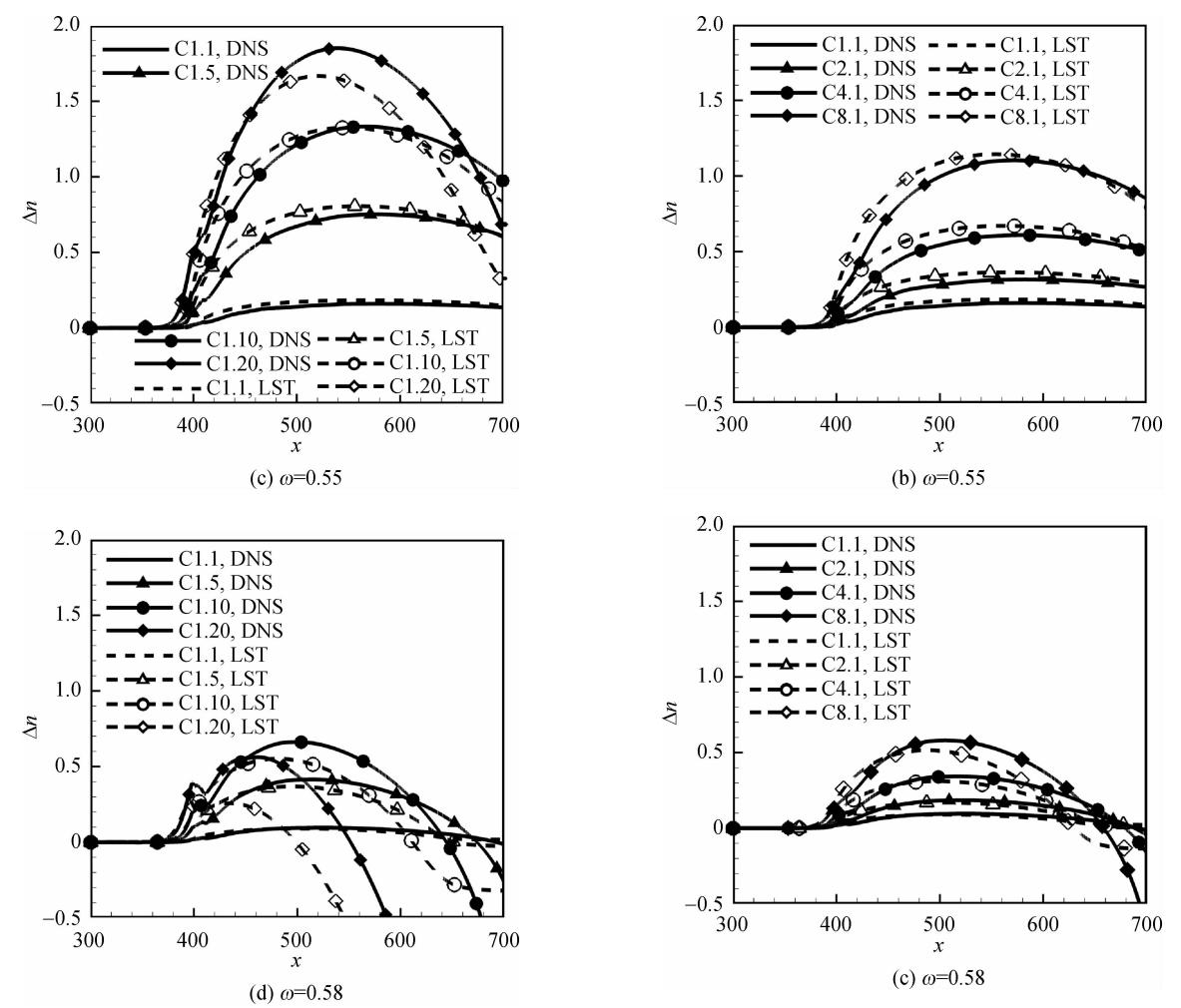


图 9 引射速度幅值对 Δn 的影响
Fig. 9 Effect of the ejection velocity on Δn

宽度对稳定性的影响,共计算了 $d=1,2,4,8$ 四组不同引射宽度的质量引射。图 10 给出了入口引入频率为 0.52、0.55、0.58、0.61 的扰动波,计算得到的 Δn 结果,可以看出,质量引射区域加宽,对扰动波还是起促进作用,质量引射区域越宽,对不稳定波的促进作用越强。

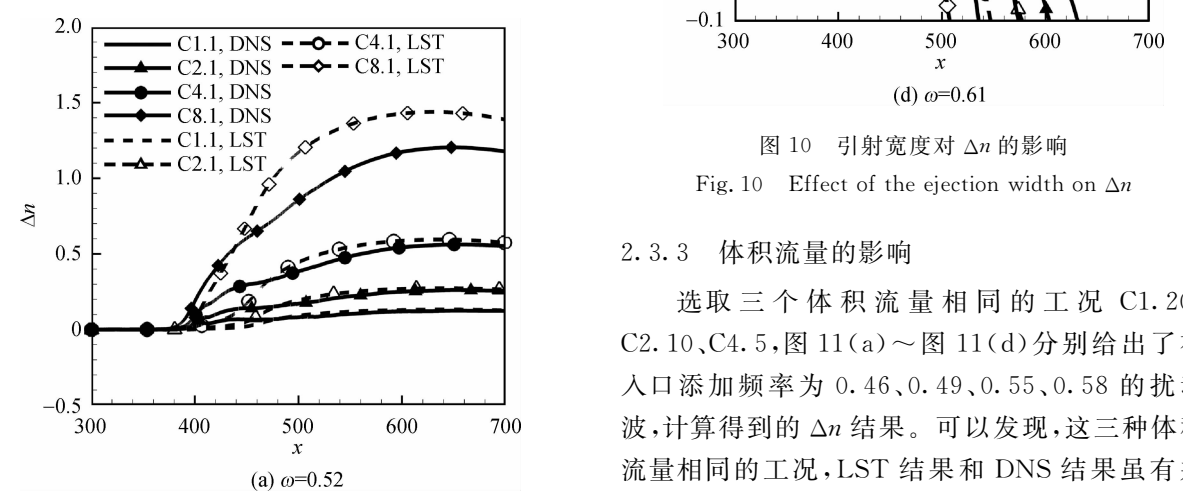
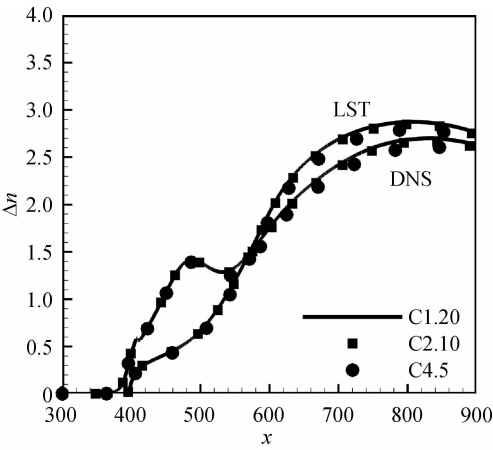


图 10 引射宽度对 Δn 的影响
Fig. 10 Effect of the ejection width on Δn

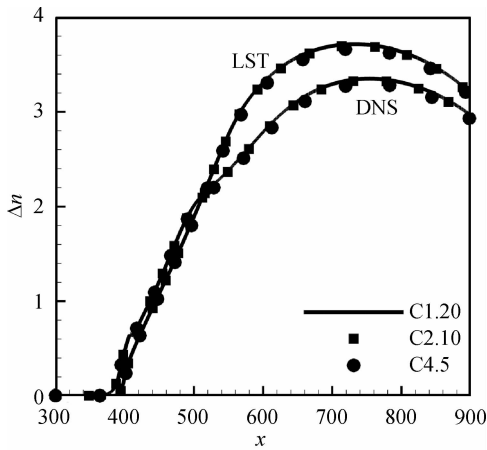
2.3.3 体流量的影响

选取三个体流量相同的工况 C1.20、C2.10、C4.5,图 11(a)~图 11(d)分别给出了在入口添加频率为 0.46、0.49、0.55、0.58 的扰动波,计算得到的 Δn 结果。可以发现,这三种体流量相同的工况,LST 结果和 DNS 结果虽有差

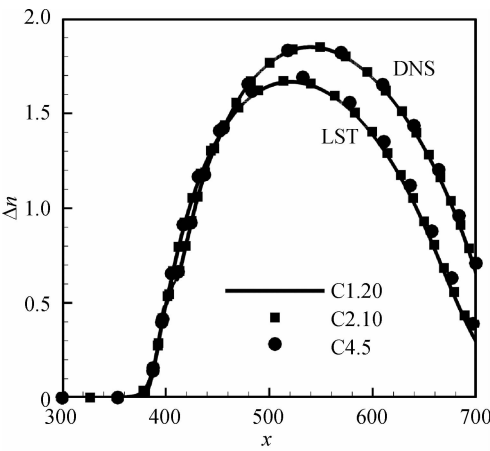
别,但使用相同方法算出来三种工况下的 Δn 基本一致。当体积流量一定时,引射宽度和速度幅值改变并不能改变其扰动波的影响作用大小。因此,体积流量是影响边界层流动稳定性的决定性因素。当扰动波的频率为 0.46 和 0.49 时, Δn 的最大值 ΔN 达到 3,接近一般转捩预测 N 值的 30%,在转捩预测中应该考虑。



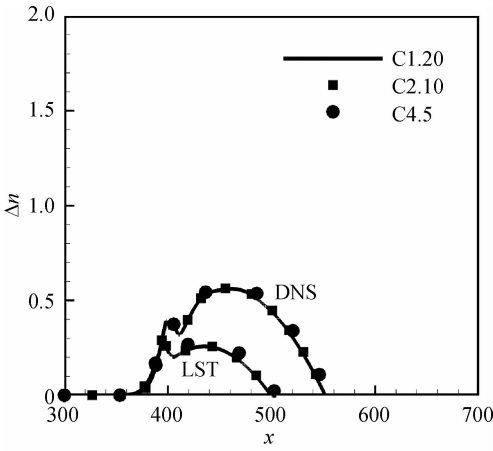
(a) $\omega=0.46$



(b) $\omega=0.49$



(c) $\omega=0.55$



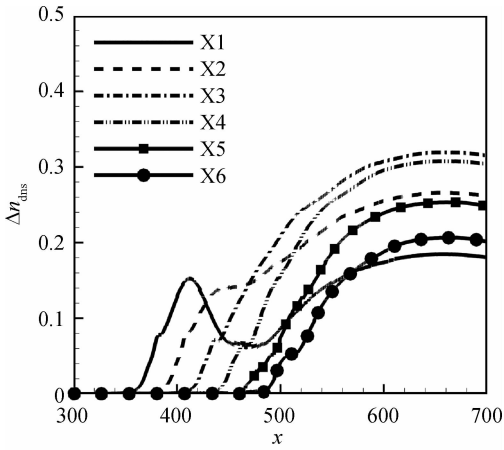
(d) $\omega=0.58$

图 11 相同体积流量下的 Δn 曲线

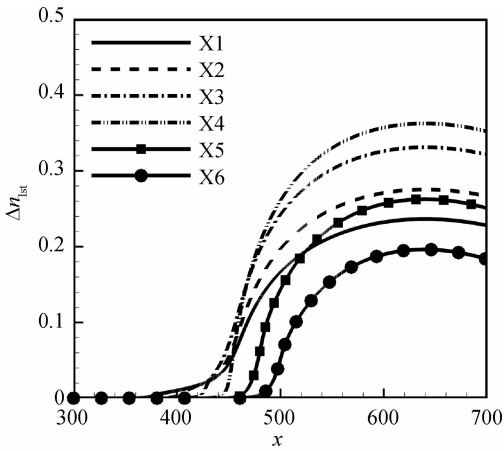
Fig. 11 Δn curve with the same Q_v

2.3.4 质量引射位置的影响

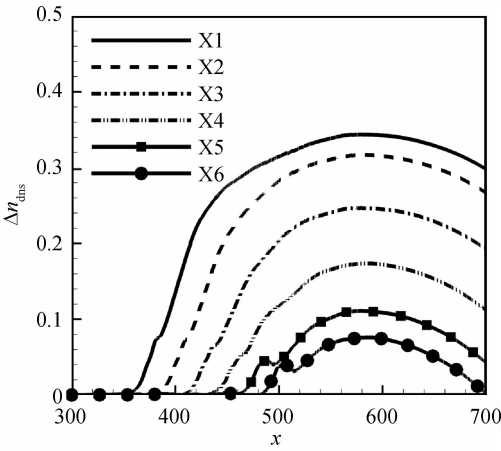
本节研究了引射区域中心位置对边界层流动稳定性的影响,选取了 X1~X5 工况进行计算。在入口引入频率为 0.49、0.52、0.55、0.58 的扰动波,图 12 给出了在入口添加频率为 0.52、0.55 的



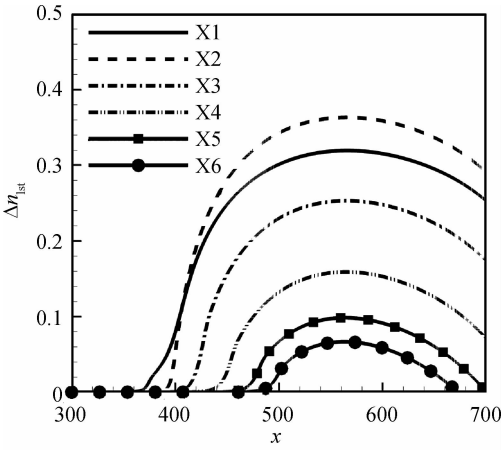
(a) $\omega=0.52$



(b) $\omega=0.52$



(c) $\omega=0.55$



(d) $\omega=0.55$

图 12 引射位置对 Δn 的影响

Fig. 12 Effect of the ejection location on Δn

扰动波计算得到的 Δn 。可以发现,不同位置下的质量引射对扰动波的作用效果不同;在远离引射区域位置的上游, Δn 为 0,在靠近引射区域位置时,修正系数 Δn 开始变大,证明质量引射对基本流场产生作用的区域随位置的后移而后移。频率为 0.49 和 0.58 的计算结果与上述类似。

2.3.5 组合的影响

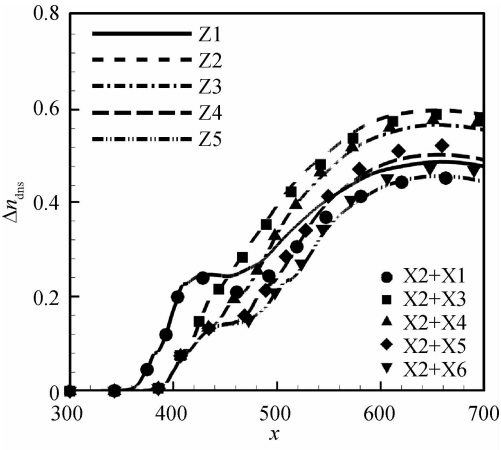
研究组合对 Δn 的影响时,选取 Z1~Z5 工况。图 13 给出了在入口添加频率为 0.52 和 0.55 的扰动波计算得到的 Δn ,其中,线条代表组合情况下的 Δn ,点代表引射区域单独放置时的 Δn 叠加。从图中可以看出:两者符合得很好,说明组合形式的质量引射对扰动波的促进作用与两个质量引射单独作用时的叠加效果相当。

2.3.6 展向波数的影响

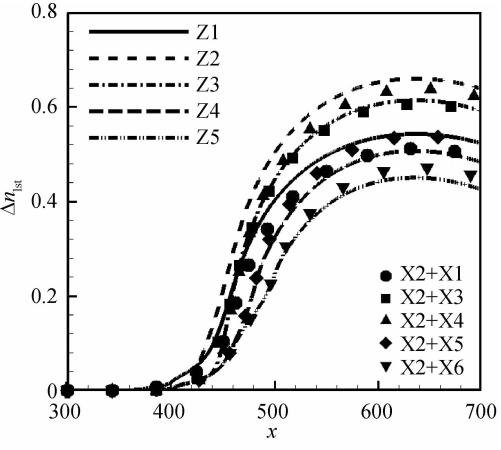
研究展向扰动对流动稳定性的影响时,选取 C2.5 工况,基本流是将二维基本流沿展向进行拉伸得到的。由于只考虑展向波数对流动稳定性的

影响,固定扰动波频率为 0.55,展向波数分别为 0、0.2、0.3、0.35、0.4、0.5,来研究展向波数对流动稳定性的影响。图 14(a)、图 14(b)给出了 LST 和 DNS 得到的 Δn 曲线,可以看出,质量引射对三维扰动波同样有明显的促进作用,在展向波数 $\beta \approx 0.35$ 时, Δn 最大。

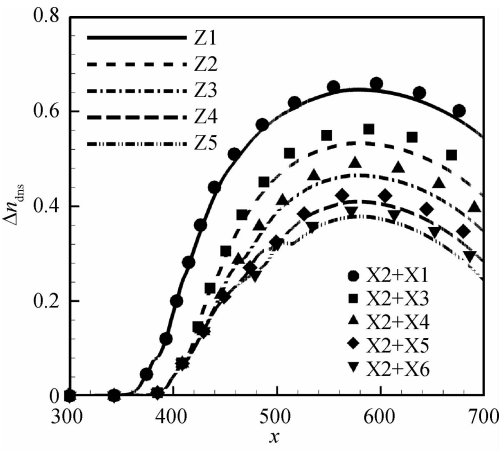
图 15 给出了沿流向不同展向波数下的中性曲线,从图中可以看出,展向波数的改变对中性曲



(a) $\omega=0.52$



(b) $\omega=0.52$



(c) $\omega=0.55$

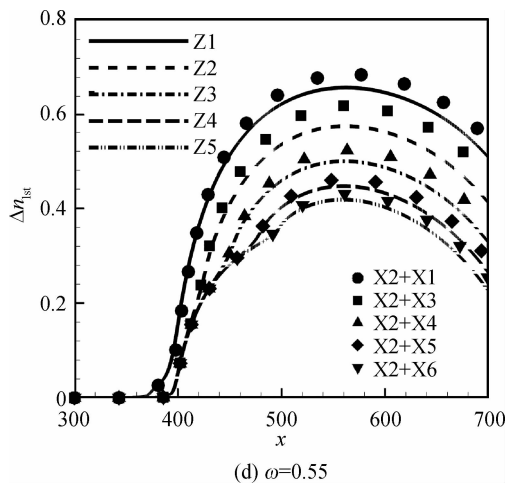


图 13 引射组合对 Δn 的影响

Fig. 13 Effect of the ejection combinations on Δn

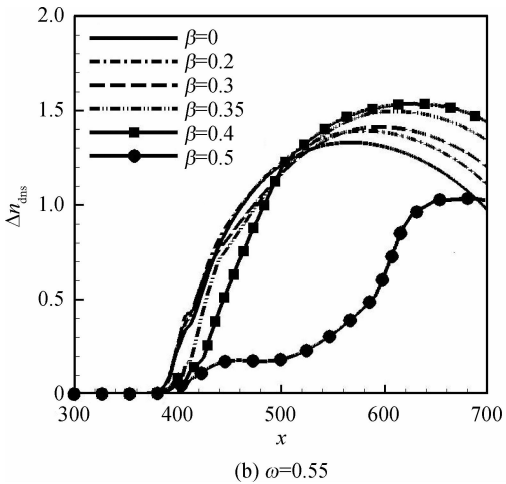
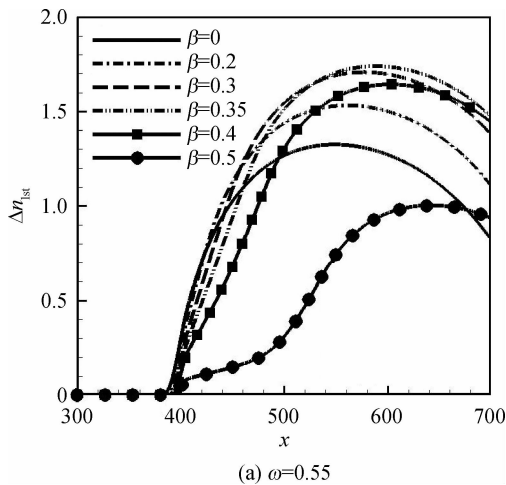


图 14 展向波数对 Δn 的影响

Fig. 14 Effect of the spanwise wave number on Δn

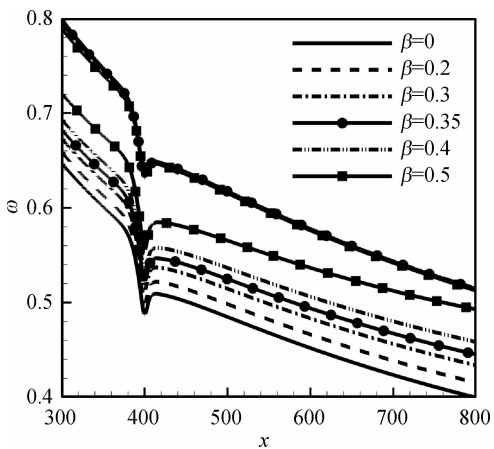


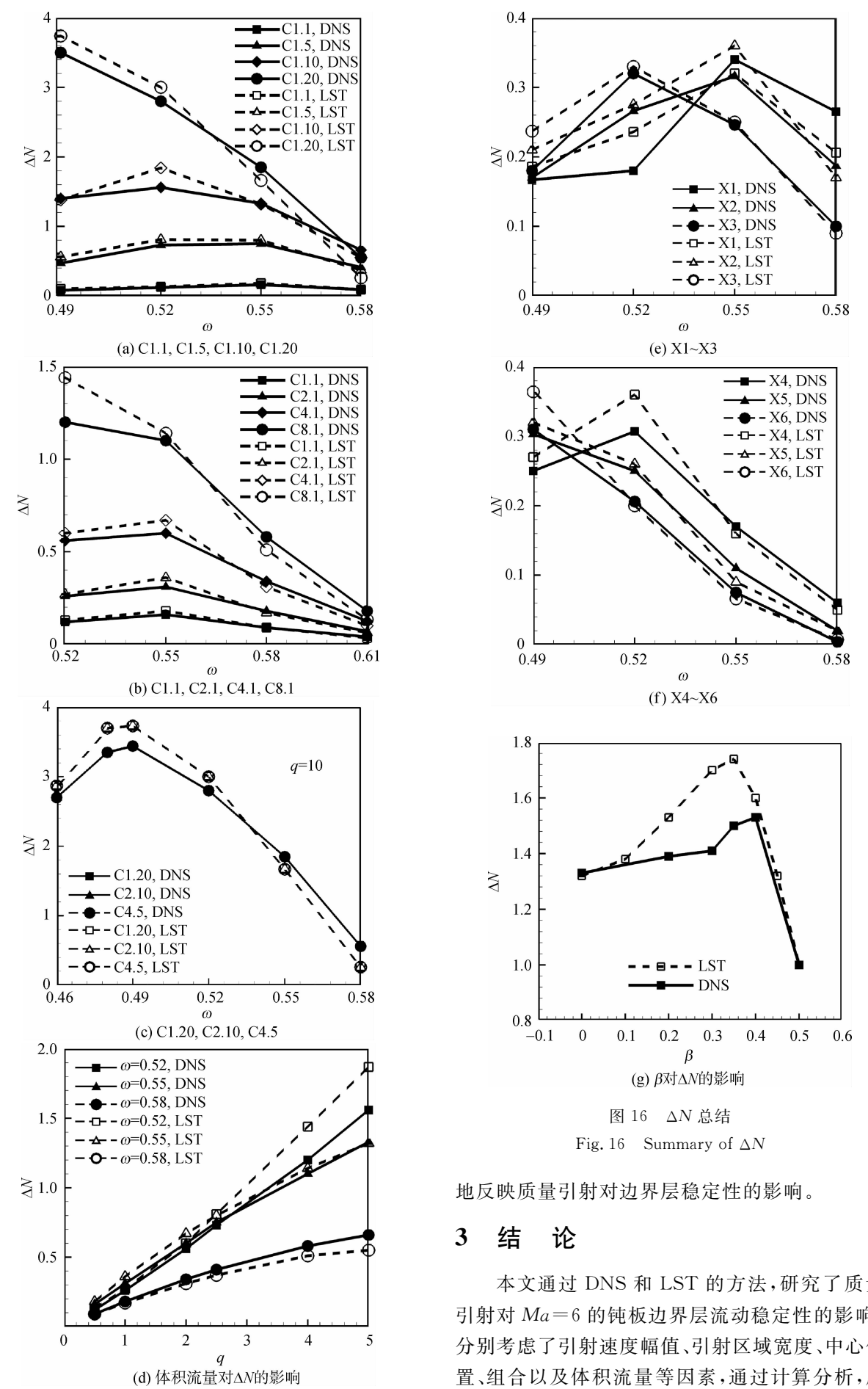
图 15 中性曲线

Fig. 15 Neutral curve

2.4 规律分析

本节对 DNS 和 LST 计算的幅值演化结果进行了整理,分析了不同因素对沿流向最大的 Δn (记为 ΔN) 的影响。图 16 给出了 DNS 和 LST 计算得到的 ΔN 。实线代表 DNS 的结果,虚线代表 LST 的结果。可以发现,在所有频率下, $\Delta N > 0$, 说明质量引射对 T-S 波的增长具有促进作用,使钝板边界层变得更不稳定。图 16(a)、图 16(b)列举了 C1.1、C1.5、C1.10、C1.20 以及 C1、C2.1、C4.1、C8.1 工况下 ΔN 和入口扰动波频率之间的关系,可以看出,当频率相同时,随着引射速度幅值的增加,引射宽度的增加,对扰动波的促进作用增强。图 16(c)给出了 C1.20、C2.10、C4.5 工况下的 ΔN 曲线,可以得出,体积流量相同时,对扰动波的促进效果相同。当扰动波的频率为 0.46、0.48、0.49、0.52 时, ΔN 达到 3 左右,这在转捩预测中必须考虑。图 16(d)给出扰动波频率为 0.52~0.58 时 ΔN 随 q ($0.5 \leq q \leq 5$) 的变化曲线,随着 q 的增加 ΔN 变大。图 16(e)、图 16(f)给出了不同位置下的 ΔN 曲线,通过分析图中每个工况峰值所对应的频率与图 5(d)中引射位置处中性曲线下支界的频率,可以看出: ΔN 随频率的变化并不是单调的,质量引射对扰动的促进作用大小决定于入口的扰动波的频率与中性曲线的相对位置,当引射位置接近扰动波中性曲线的下支界时,质量引射对扰动波的促进作用最明显。图 16(g)展示的是 ΔN 随展向波数 β 的演化规律,可以看出,质量引射对三维扰动波同样具有促进作用,在某一展向波数下,促进效果最明显,当 β 为 0 或无穷大时,促进效果较弱。总体来看, LST 和 DNS 在计算 ΔN 时结果相差较小, LST 可以定量

线的上支影响不大,但展向波数增加,中性曲线的下支上移。 $\omega=0.55$ 最接近 $\beta \approx 0.35$ 时中性曲线下支在引射位置处的频率,增长区间最长,所以在 $\omega=0.55, \beta \approx 0.35$ 时, Δn 最大。



得结论如下:

1) 质量引射会使得第二模态中性曲线向下凹陷,凹陷程度随引射速度幅值、引射区域宽度增大而增大,质量引射对不同频率的扰动波有促进作用,且体积流量是影响边界层流动稳定性的决定性因素,体积流量相同时,对扰动波的不稳定作用相同。

2) 质量引射对扰动的促进作用大小决定于入口的扰动波的频率与中性曲线的相对位置,当引射位置接近扰动波中性曲线的下支界时,质量引射对扰动波的不稳定作用最明显;当引射宽度为 9,幅值为 0.001 时,质量引射组合放置能起到叠加单个质量引射作用的效果;质量引射对三维扰动波同样具有促进作用,在某一展向波数下,不稳定效果最明显。

3) Δn 可以定性的描述质量引射对流动稳定性的影响, $\Delta n > 0$ 表示质量引射使得扰动波更不稳定, $\Delta n < 0$ 表示质量引射使得扰动波稳定;当 $q=10$ 时,在一定频率范围内, ΔN 达到 3,这在转捩预测中必须考虑;LST 和 DNS 在计算 Δn 时结果相差较小,LST 可以定量的反映质量引射对边界层稳定性的影响,可以应用于质量引射对边界层稳定性的研究。

参考文献:

[1] 周恒,赵耕夫.流动稳定性[M].北京:国防工业出版社,2004.

[2] MALIK M R,ORSZAG S A. Comparison of methods for prediction of transition by stability analysis[J]. AIAA Journal,1980,18(12):1485-1489.

[3] 李俊宁,胡子君,孙陈诚,等.高超声速飞行器隔热材料技术研究进展[J].宇航材料工艺,2011,41(6):10-13.

LI Junning,HU Zijun,SUN Chencheng,et al. Thermal insulation materials for hypersonic vehicles[J]. Aerospace Materials Technology,2011,41(6):10-13. (in Chinese)

[4] LESTER L,ROBERT L C. Surface mass injection at supersonic and hypersonic speeds as a problem in turbulent mixing. [J]. AIAA Journal,1969,7(4):671-680.

[5] PELTIER S J, HUMBLE R A, BOWERSOX R D W. Crosshatch roughness distortions on a hypersonic turbulent boundary layer[J]. Physics of Fluids,2016,28(4):045105.1-045105.23.

[6] WANG X,ZHONG X,MA Y. Response of a hypersonic boundary layer to wall blowing-suction[J]. AIAA Journal,2011,49(7):1336-1353.

[7] SAWAYA J,SASSANIS V,YASSIR S,et al. Assessment of the impact of two-dimensional wall deformation shape on high-speed boundary-layer disturbances [J]. AIAA Journal,2018,56(6):1-14.

[8] JOHNSON H,GRONVALL J,CANDLER G. Reacting hypersonic boundary layer stability with blowing and suction[R]. AIAA-2009-938,2009.

[9] EGOROV I V,FEDOROV A V,SOUDAKOV V G. Direct numerical simulation of disturbances generated by periodic suction-blowing in a hypersonic boundary layer[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics,2006,20(1):41-54.

[10] 罗纪生,王新军.壁面定常波纹状吹吸槽道流中湍流特性的研究[J].力学学报,2005,37(6):673-681.

LUO Jisheng,WANG Xinjun. The study of turbulent properties in stable flexuous blow-suck boundary channel flow[J]. Theoretical and Applied Mechanics,2005,37(6):673-681. (in Chinese)

[11] 陆昌根,沈露予.壁面局部吹吸边界层感受性的数值研究[J].物理学报,2015,64(22):314-322.

LU Changgen,SHEN Luyu. Numerical study on boundary-layer receptivity with localized wall blowing/suction [J]. Acta Physica Sinica,2015,64(22):314-322. (in Chinese)

[12] 曹卫东,李跃.二维 T-S 波在壁面局部喷吸边界层流中的演化,水利水电科技进展,2009,29(5):16-19.

CAO Weidong,LI Yue. Study on evolution of 2D T-S wave in boundary layer with localized ejection and suction[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(5):16-19. (in Chinese)

[13] 赵耕夫.抽吸和压力梯度在层流边界层转捩过程中的作用[J].力学学报,1994,26(5):631-635.

ZHAO Gengfu. Role of suction and pressure gradient in the transition process of boundary layer[J]. Theoretical and Applied Mechanics,1994,26(5):631-635. (in Chinese)

[14] 赵耕夫.壁面冷却和抽吸对超声速高超声速三维边界层稳定性的影响[J].空气动力学学报,1999,17(1):21-29.

ZHAO Gengfu. Effect of wall suction and cooling on the stability of the supersonic and hypersonic three dimensional boundary layer[J]. Acta Aerodynamica Sinica,1999,17(1):21-29. (in Chinese)

[15] 张存波,罗纪生,高军.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[J].航空动力学报,2016,31(5):1234-1241.

ZHANG Cunbo,LUO Jisheng,GAO Jun. Effects of distributed roughness on mach 4.5 boundary-layer transition [J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(5):1234-1241. (in Chinese)

[16] HOLLOWAY P F,STERRETT J R. Effect of controlled surface roughness on boundary-layer transition and heat transfer at Mach numbers of 4.8 and 6.0[R]. NASA TN-D-2054,1964.

[17] 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(5):435-469.

[18] FONG K D,WANG Xiaowen,ZHONG Xiaolin. Numerical

simulation of roughness effect on the stability of a hyper-sonic boundary layer[J]. Computers and Fluids, 2014, 96(6):350-367.

[19] 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)

[20] 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)

[21] WANG Xiaowen. Passive control of a Mach 5. 92 flat-plate boundary layer using steady blowing and suction[R]. AIAA-2018-3212, 2018.

(编辑:张 雪)