

## 后台阶流动及其控制述评

胡如云, 王亮 and 符松

Citation: 中国科学: 物理学 力学 天文学 **45**, 124704 (2015 ); doi: 10.1360/SSPMA2015-00450-176

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSPMA2015-00450-176>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/45/12>

Published by the 《中国科学》杂志社

---

### Articles you may be interested in

[后台阶流动及其控制述评](#)

中国科学: 物理学 力学 天文学 **45**, 124704 (2015);

[基于NPLS 的超声速层流/湍流后台阶流动精细结构研究](#)

科学通报 **56**, 3057 (2011);

[超混沌同步及其超混沌控制](#)

科学通报 **40**, 306 (1995);

[不同pH值下KDP晶体{100}面生长的AFM研究](#)

中国科学: 技术科学 **40**, 1074 (2010);

[高速流场主动流动控制激励器研究进展](#)

中国科学: 技术科学 **42**, 1103 (2012);

---



## 新型飞行器的关键空气动力学问题专题·评述

## 后台阶流动及其控制述评

胡如云, 王亮, 符松\*

清华大学航天航空学院, 北京 100084

\*联系人, E-mail: fs-dem@tsinghua.edu.cn



收稿日期: 2015-09-07; 接受日期: 2015-10-12

国家自然科学基金(批准号: 11202115, 11272183)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB744801)资助项目

**摘要** 本文试对后台阶流动及其控制研究的进展进行综述. 首先, 试图归纳来流条件与几何参数对后台阶流动的分离泡长度、壁面压力系数、壁面摩擦系数、速度分布及雷诺应力分布的影响. 其次, 总结了后台阶流动的非定常特性, 并结合作者自己的研究工作, 发现后台阶流动由 SL 模态(Shear Layer Mode)和 SD 模态(Shedding Mode)主导, 前者又包含 K-H 不稳定性(Kelvin-Helmholtz Instability)、涡配对(Vortex Pairing)和 ST 模态(Step Mode). 此外, 后台阶流动低频特性包括剪切层的摆动(Flapping)和再附位置的振荡(Oscillating), 由剪切层中拟序结构与壁面相互作用导致. 最后, 回顾了后台阶激励流动的相关研究, 提炼出了减小分离泡长度的最优激励频率  $St_h \approx 0.2$ , 并对该频率作出了物理解释.

**关键词** 后台阶, 时均特性, 非定常特性, 分离控制

**PACS:** 62.50.+p, 47.40.-x, 43.40.Jc

**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00450

流动分离现象在日常生活和工业领域普遍存在, 比如: 机翼绕流分离、汽车尾部流动分离、发动机进气道及燃烧室流动分离等. 流动分离带来了额外的流动阻力和流动噪声, 在较大分离情况下, 还会导致飞机的失速. 因此, 抑制流动分离极其重要. 附着流动在逆压梯度或几何变化等因素影响下, 发生分离. 分离流与分离泡之间由于速度差形成自由剪切层, 自由剪切层在下游再附, 与壁面发生相互作用. 所以分离流由自由剪切层及其与壁面的相互作用所主导. 许多典型的流动都包含分离流, 如: 起落架、前体、后体、机翼、凹腔、后台阶等. 在诸多的流动中, 后台阶几何外形简单, 流动分离位置固定, 但后台阶流

动又具有分离流动的主要特征——自由剪切层及其与壁面的相互作用, 包含了复杂的流动机理, 也是许多工程实际流动的原型, 所以, 本文通过综述后台阶流动及其控制来展示基于流动自身不稳定性的控制机理.

考虑到自由剪切流在分离流动中的主导作用, 对自由剪切流的认识至关重要. Brown 和 Roshko<sup>[1]</sup>通过实验研究两层不同密度的气体差速流动引起的平面混合层, 发现湍流剪切流动由展向拟序结构所主导, 并且拟序结构存在配对过程, 这一过程使得拟序结构尺度增大, 从而促进混合层的增长. Winant 和 Browand<sup>[2]</sup>通过实验研究两层速度不同的水流, 也得

**引用格式:** 胡如云, 王亮, 符松. 后台阶流动及其控制述评. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 124704

Hu R Y, Wang L, Fu S. Review of backward-facing step flow and separation reduction (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 124704, doi: 10.1360/SSPMA2015-00450

出了一致的结论. 除了展向拟序结构外, Bernal 和 Roshko<sup>[3]</sup>测得平面混合层的三维空间运动, 发现了混合层中流向涡结构的存在, 且它们的展向尺度向下游不断增加. Balaras 等人<sup>[4]</sup>通过数值研究湍流混合层流动, 也发现了流向涡结构. 为了研究拟序结构在剪切流中的特征和动力学特性, Hussain 和 Zaman<sup>[5]</sup>实验研究了初始为全湍流的混合层流动(单层来流), 发现基于混合层当地动量厚度和自由来流速度的无量纲频率约为 0.024. 在低雷诺数条件下, 剪切层中的拟序结构都比较整齐, 致使剪切层的发展不连续. 而 Yang 等人<sup>[6]</sup>采用大涡模拟计算了较高雷诺数下的混合层流动, 发现拟序结构的配对过程在空间和时间随机发生, 使得混合层连续增长. 除了平面混合层外, 关于轴对称射流的研究也发现了类似平面混合层的拟序结构及其动力学特性<sup>[7-9]</sup>.

从平均流动来看, 后台阶流动由一个大的分离泡和角涡构成, 分离泡与主流之间形成剪切层. 此剪切层类似平面混合层, 但由于分离泡的存在, 使得其与平面混合层有所不同. 剪切层在下游再附, 发展出新的边界层. 分离泡长度是后台阶流动的一个关键参数, 受来流条件和几何参数的影响<sup>[10]</sup>. 从瞬时流动来看, 由于剪切层的存在, 后台阶流动中必然存在大尺度展向拟序结构, 此剪切层受到分离泡回流的影响, 使得其动力学特性与平面混合层有所不同. 剪切层中拟序结构通过涡配对, 尺度不断增加, 最终拍击到下壁面上, 与壁面相互作用.

流动控制手段多种多样, 可分为被动控制和主动控制两大类. 被动控制装置有涡流发生器<sup>[11]</sup>、凹槽<sup>[12]</sup>等. 这些控制装置体积较大, 带来较大的额外阻力且不具有实时性. 相对而言, 主动控制方案具有响应快、可控性强且额外阻力小等优点. Cattafesta 和 Sheplak<sup>[13]</sup>归纳了主动控制激励器的相关研究, 将主动控制激励器分为四类: 射流、移动物面、等离子体和电磁类. Greenblatt 等人<sup>[14]</sup>总结了周期性激励在分离流控制中的应用, 并重点讨论了翼型绕流分离控制. Glezer 和 Amitay<sup>[15]</sup>回顾了合成射流控制方案, 分析了射流的演化及其与主流的相互作用机理. 主动控制激励器通过激励流动与主流发生相互作用, 从而改变主流特性. 而周期性激励方案利用主流自身的不稳定性, 通过激发不稳定结构, 从而达到抑制流动分离的效果.

## 1 后台阶平均流动特征

后台阶流动可以采用很多参数来表征, 如: 分离泡长度、壁面摩擦系数、壁面压力系数、速度分布、雷诺应力分布等, 下面将逐一论述.

### 1.1 分离泡长度

分离泡长度是至关重要的参数之一. Ötügen<sup>[16]</sup>研究了风洞扩张比(ER)的影响, 其他参数的研究见 Eaton 和 Johnston<sup>[10]</sup>的综述文章. 分离泡长度可表示为来流条件和几何参数的函数

$$x_r/h = f(AR, ER, Re_\theta, \delta/h, TI, \partial p/\partial x), \quad (1)$$

其中  $h$  为台阶高度,  $AR$  为风洞长宽比(风洞宽度与台阶高度之比),  $ER$  为风洞扩张比(台阶下游风洞高度与台阶上游风洞高度之比),  $Re_\theta$  为基于来流边界层动量厚度和来流速度的雷诺数,  $\delta$  为来流边界层厚度,  $TI$  为来流湍流强度,  $\partial p/\partial x$  为流向压力梯度.

Brederode 和 Bradshaw<sup>[17]</sup>实验研究风洞长宽比对分离泡长度的影响, 发现随着风洞长宽比的增加, 分离泡长度不断减小, 当长宽比  $AR > 10$  时, 长宽比的影响可以忽略不计, 此时风洞中心的流动为准二维流动. Ötügen<sup>[16]</sup>通过改变台阶高度来研究风洞扩张比对后台阶流动的影响, 在所考虑的扩张比范围内( $ER=1.47-3$ ), 随着扩张比的增加, 剪切层湍流强度增加、增长率加快, 从而使得归一化分离泡长度减小. Driver 和 Seegmiller<sup>[18]</sup>, Ra 和 Chang<sup>[19]</sup>通过改变台阶下游上壁面的偏角, 研究逆压梯度对分离泡长度的影响, 发现分离泡长度随着逆压梯度的增加而增加. Isomoto 和 Honami<sup>[20]</sup>在台阶上游安装二维凹腔或者细棒来改变来流湍流强度, 发现分离泡长度与近壁最大湍流强度呈强的负相关关系. 除此之外, Armaly 等人<sup>[21]</sup>实验研究了基于水力直径和自由来流速度雷诺数  $Re=70-8000$  的后台阶流动, 发现分离泡长度在层流段随雷诺数增加而增加, 在转捩段随雷诺数增加而减小, 而在湍流段再次增加, 最终达到一个平台后并保持不变, 即达到了雷诺数不变性. Adams 和 Johnston<sup>[22,23]</sup>, Jovic 和 Driver<sup>[24]</sup>的实验进一步补充了后台阶流动的雷诺数效应(参见文献[23]图 2). Adams 和 Johnston<sup>[23]</sup>还研究了来流边界层厚度对分离泡长度的影响, 发现分离泡尺度随来流边界层厚度的增加而减小.

## 1.2 壁面压力系数

壁面压力系数在再附区出现最小值, 过了平均再附位置后达到最大值, 最后在附着区有所降低或几乎保持不变(依流动条件而变). 与分离泡长度一样, 壁面压力系数的分布也受诸多参数的影响.

Ra 和 Chang<sup>[19]</sup>研究了流向压力梯度等参数对下壁面压系数分布的影响. 采用了 Narayanan 等人<sup>[25]</sup>提出的归一化准则,

$$C_p^+ = \frac{C_p - C_{p,\min}}{C_{p,\max} - C_{p,\min}}, \quad x^+ = (x - x_{p/2})/h, \quad (2)$$

其中  $C_{p,\max}$  为壁面压力系数最大值,  $x_{p/2}$  为壁面压力系数最大值对应流向位置与最小值对应流向位置的中点.

在此归一化条件下, 不同条件(不同压力梯度、不同台阶高度、不同来流雷诺数、不同来流速度)下的  $C_p^+ - x^+$  分布在再附区落到同一条曲线上, 而上游的分布和下游的分布都不一致(参见文献[19]图 5). 这说明再附区具有普适的流动结构(Universal Flow Structure).

## 1.3 壁面摩擦系数

除了摩擦系数在附着区一直增加而不会出现峰值外, 壁面摩擦系数分布与壁面压力系数分布类似. Jovic 和 Driver<sup>[24]</sup>实验研究了后台阶流动的雷诺数效应, 发现壁面摩擦系数最小值  $C_{f,\min}$  出现在  $2/3x_r$  处, 且绝对值随雷诺数呈  $-1/2$  指数递减,

$$-C_{f,\min} = 0.19Re_h^{-1/2}. \quad (3)$$

这与层流 Blasius 解得到的壁面摩擦系数分布 ( $C_f = 0.664Re_h^{-1/2}$ ) 相似.

Jovic 和 Driver<sup>[24]</sup>的研究说明再附区受来流雷诺数的影响较大, 或者说受来流状态的影响较大. Adams 和 Johnston<sup>[23]</sup>研究发现来流状态(来流雷诺数)对  $x^+ = (x - x_r)/x_r$  在  $-0.5 \sim 0$  之间的壁面摩擦系数影响显著, 但在附着区, 壁面摩擦系数主要受来流边界层厚度的影响.

## 1.4 速度分布及雷诺应力分布

速度分布和雷诺应力分布也是后台阶流动非常重要的参数. 对于湍流来说, 雷诺应力的分布至关重要, 它反应了湍流强度的分布及湍流的输运性质. 随

着测量技术的不断提高, 许多实验都测得了后台阶流动的速度分布和雷诺应力分布.

Westphal 和 Johnston<sup>[26]</sup>实验研究发现, 平均再附位置附近的速度分布和雷诺应力分布主要受风洞扩张比和来流边界层厚度的影响. 在相同扩张比、雷诺数和边界层厚度、而不同来流扰动和流线曲率下, 在平均再附位置附近, 在台阶高度范围内在同一  $x^+$  位置的速度分布和雷诺应力分布落在同一曲线上. 但是雷诺应力分布在不同来流边界层厚度和风洞扩张比条件下不再一致. 随着扩张比的增加, 雷诺剪切应力峰值位置升高, 峰值增大(参见文献[22]图 12). 流向湍流强度也呈现相同的趋势.

Jovic 和 Driver<sup>[24]</sup>测得附着区速度分布, 发现此区域的流向速度型分布在对数律的下方, 且回到对数律的速度缓慢(参见文献[24]图 3). Le 等人<sup>[27]</sup>的直接数值模拟(DNS)计算给出了同样的结论.

## 2 后台阶流动非定常特性

作者根据 Driver 和 Seegmiller<sup>[18]</sup>的实验条件, 采用改进的延迟大涡模拟(IDDES)方法计算了后台阶流动, 获得了后台阶流动的时均流场和瞬时流场. 同时也计算了合成射流激励下的后台阶流动, 获得了一定的控制效果. 接下来, 作者将结合自己的研究, 分析后台阶流动的非定常特性及其控制.

后台阶流动再附过程呈现强烈的非定常特性. 由于剪切层的存在, 使得后台阶流动具有类似平面混合层的特征和动力学特性. Troutt 等人<sup>[28]</sup>首先采用热线技术测量了后台阶流动, 发现了剪切层中及附着区存在大尺度拟序结构.

### 2.1 SL 模态

剪切层中的展向涡结构在向下游发展的过程中发生配对——这与平面混合层的拟序结构演化类似. Hasan<sup>[29]</sup>在台阶处对层流分离的剪切层进行周期性激励, 发现剪切层存在两个不同的模态: 剪切层由 K-H 不稳定性(Kelvin-Helmholtz Instability)卷起展向涡和此展向涡经过一个或几个涡配对过程生成的较大尺度的展向涡(The Final Vortex<sup>[30]</sup>), 第二个模态称作 ST 模态(Step Mode), 模态频率约为  $St_h = fh/U_0 = 0.185$ . 这两个模态及涡配对都跟剪切层相关, 所以本文将它们统称为 SL 模态(Shear Layer Mode). 图 1

给出了研究后台阶流动所得的展向平均压力脉动等值线图, 可以看出, 剪切层失稳卷起的展向涡在向下游演化的过程中经过涡配对后尺度增加, 最后, 大尺度拟序结构拍击到下壁面, 导致流动再附. 采用 DMD (Dynamic Mode Decomposition) 方法分析后台阶流动所得的 ST 模态见图 2(b), 频率亦为 0.185. 该模态起源于剪切层, 且与壁面发生相互作用, 引起剪切层再附. 而涡尺度较小的模态虽起源于剪切层, 却不与壁面发生相互作用, 见图 2(a). 所以, ST 模态主导着流动再附过程.

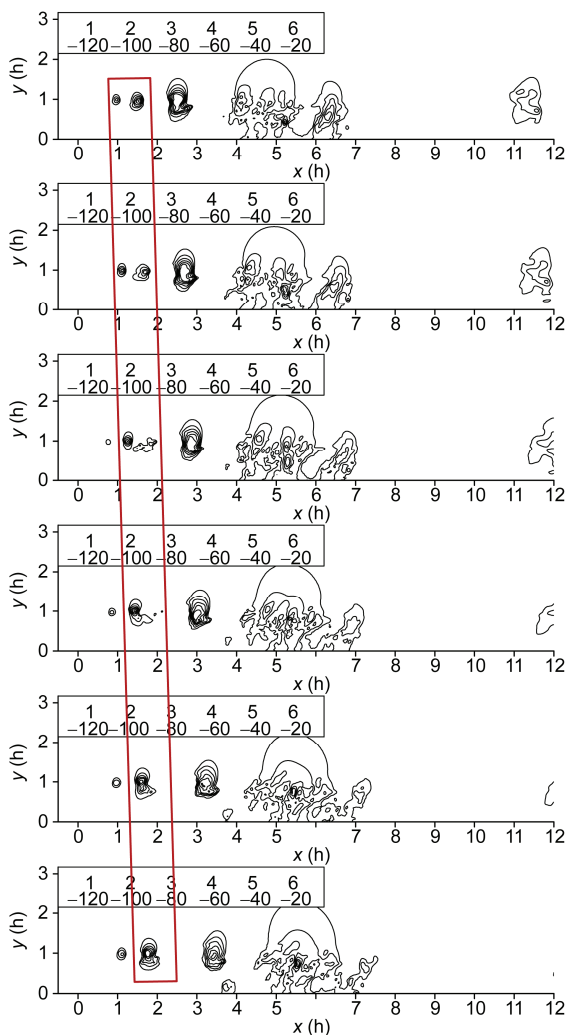


图 1 (网络版彩图) 涡配对及大尺度涡结构与壁面相互作用. 展向平均及时均再附位置为 6.6 h

Figure 1 (Color online) Vortex pairing and the interaction between large coherent structures and the wall. time- and spanwise-averaged reattachment location is 6.6 h.

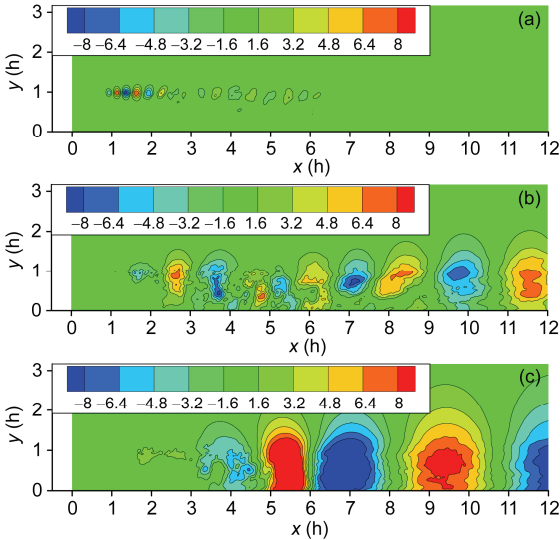


图 2 (网络版彩图) DMD 分析结果. K-H 不稳定性 (a), ST 模态(b)和 SD 模态(c)

Figure 2 (Color online) Result of DMD analysis. K-H instability (a), step mode (b) and shedding mode (c).

Westphal 和 Johnston<sup>[26]</sup>与 Adams 和 Johnston<sup>[22]</sup>分别测得了平均再附位置附近的近壁流体前向流动比例(Forward-Flow Fraction),  $\gamma$  (参见文献[22]图 11). 由此百分比定义的再附区绕平均再附位置对称分布, 范围约为  $x^* = -0.4 - 0.4$ . 此范围随着风洞扩张比的增加而增加, 随着来流边界层高度的增加而增加.  $\gamma$  接近零处为剪切层拟序结构与壁面最初发生相互作用的位置, 而  $x^* = -0.4$  接近壁面摩擦系数最小值出现的位置, 见表 1<sup>[31,32]</sup>. 所以, 壁面摩擦系数最小值及其位置应和大尺度展向结构与壁面发生作用有关.

2.2 SD 模态

Kaiktsis 等人<sup>[33]</sup>通过稳定性分析后台阶流动得到, 当雷诺数  $Re_h > 800$  时, 后台阶流动两个不稳定频率,

表 1 后台阶流动壁面摩擦系数最小值位置

Table 1 Location of minimum value of skin friction of lower wall in backward-facing step flow

来源	$Re_h$	$C_{f,min} \times 10^3$	$x^*$
Adams 和 Johnston <sup>[23]</sup>	36000	-0.885	-0.37
Jovic 和 Driver <sup>[24]</sup>	10400	-2.0	-0.37
Spazzini 等人 <sup>[31]</sup>	10000	-1.87	-0.40
Kopera 等人 <sup>[32]</sup>	9000	-2.9	-0.38
Le 等人 <sup>[27]</sup>	5100	-2.89	-0.39



$St_h$ , 分别为 0.054 和 0.104, 所以, 后台阶流动附着区的峰值频率, 可能由上述两个不稳定模态相互作用决定. 许多研究都得到了附着区大尺度展向拟序结构的扫过频率, 见表 2<sup>[34-39]</sup>. 不同实验条件或计算条件得到的无量纲频率  $St_h = 0.06-0.1$ . Sigurdson<sup>[30]</sup>在圆柱的端面引入周期性速度扰动, 干扰沿轴向的自由来流, 分析得到了钝体绕流分离两种不同的稳定性, 其中一种对应整个分离泡的涡脱落不稳定性 (Shedding-Type Instability). 因此, 本文将涡从分离泡脱落及向下游的独立演化过程对应的模态称作 SD 模态 (Shedding Mode), 此模态频率范围应为  $St_h = 0.054-0.104$ , 模态由图 2(c)所示.

相关的实验及数值研究在附着区不同流向位置都测得了单一的峰值频率(见表 2), 这说明附着区的展向涡结构不再配对. 如图 3 所示, 附着区的大尺度展向拟序结构独立演化. 这些拟序结构顺时针旋转, 从而减小近壁区流向速度, 使得平均流向速度型不够饱满, 速度低于对数律. 这些大尺度展向拟序结构在向下游演化的过程中不断扩散和耗散, 强度逐渐降低, 使得平均流向速度型逐渐回到对数律.

除了大尺度展向拟序结构外, 剪切层中还存在流向涡结构. Neto 等人<sup>[32]</sup>、Le 等人<sup>[27]</sup>分别采用 LES 和 DNS 模拟了后台阶流动, 发现了流向涡结构的存在.

### 2.3 低频特性

后台阶流动除了大尺度拟序结构外, 剪切层和再附位置还存在低频的运动. Eaton 和 Johnston<sup>[36]</sup>测得了剪切层的低频摆动(Flapping), 摆动无量纲频率约为 0.02, 他们认为此低频运动是由分离泡进出流体的不平衡造成的; 而 Driver 等人<sup>[31]</sup>观察到了短时平均流场再附位置的变化, 进而测得了再附位置的

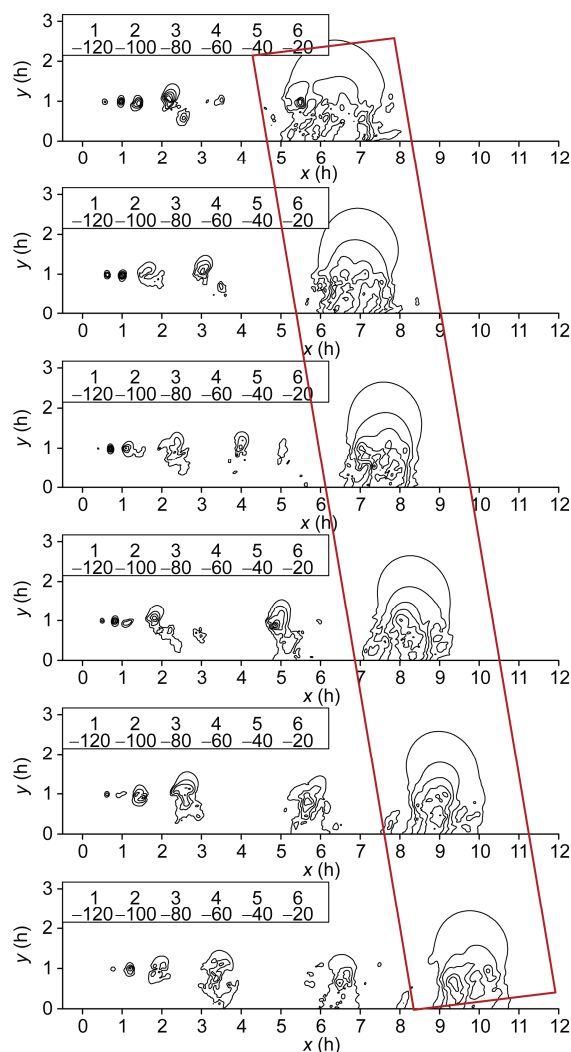


图 3 (网络版彩图)附着区大尺度展向涡结构的演化

Figure 3 (Color online) Evolution of large coherent structures in the reattached region.

低频振荡频率约为  $St_h = 0.03$ , 他们推测此低频振荡是由剪切层中涡的卷起和配对过程的无序性造成的.

表 2 后台阶流动附着区大尺度展向拟序结构扫过频率

Table 2 Passing frequency of large-scale spanwise coherent structures in the reattached region of backward-facing step flow

来源	方法	边界层厚度 $\delta/h$	雷诺数 $Re_\theta$	扩张比 $Er$	无量纲频率 $St_h$
Driver 等人 <sup>[34]</sup>	实验	1.5	5000 (37000)	1.125	0.098[0.60]
Eaton 和 Johnston <sup>[35]</sup>	实验	0.2	890 (39000)	1.67	0.07[0.52]
Neto 等人 <sup>[36]a)</sup>	LES	0.2	852 (38000)	1.67	0.08[0.54]
Kopera 等人 <sup>[32]</sup>	DNS	—	—(9000)	2.0	0.064[0.55]
Dejoan 和 Leschziner <sup>[37]b)</sup>	LES	—	—(3700)	1.5	0.077[0.54]
Le 等人 <sup>[27]c)</sup>	DNS	1.2	610 (5100)	1.2	0.06[0.38]

a) 计算参数来自 Eaton 和 Johnston<sup>[10]</sup>的实验; b) 计算参数来自 Yoshioka 等人<sup>[38]</sup>的实验; c) 计算参数来自 Jovic 和 Driver<sup>[39]</sup>的实验; () 里的数字为  $Re_h$ , []里的数字为基于分离泡长度的无量纲频率

后续的数值研究发现, 低频特性是由剪切层中的大尺度拟序结构与壁面的相互作用引起的<sup>[37,40]</sup>.

研究发现, 剪切层中的大尺度展向结构拍击到壁面上, 导致瞬时再附位置随着该拟序结构的演化而变化, 又由于大尺度拟序结构的多尺度性和无序性, 造成了再附位置的低频振荡, 进而引起剪切层的低频摆动.

### 3 后台阶流动控制

为了减小流动分离, 各种类型的激励器都被应用于后台阶流动. 在被动控制方面, Park 等人<sup>[41]</sup>在台阶处安装方形薄片, 以增强后台阶流动的掺混和减小分离泡长度. Heenan 和 Morrison<sup>[42]</sup>在台阶下游安装渗透性的壁面, 在此情况下, 低频运动完全被抑制. 在主动控制方面, 回流区振动翼型<sup>[43]</sup>和台阶下游振动壁面<sup>[44]</sup>也被用来激励后台阶流动, 减小分离泡长度. 但是, 这些激励器由于外形较大且植入了流场空间, 给后台阶流动带来了额外的阻力, 相关的研究并不多见. 反馈控制被广泛应用在流动控制研究领域<sup>[45-47]</sup>, 但是反馈控制方式需要安装传感器和设计控制率, 增加了流动控制的复杂度. 在台阶上、下拐角处或者整个台阶高度范围内的定常吹气或者吸气也得到一定的关注<sup>[48-50]</sup>. 吸气方式吸走了回流区的流体, 从而减小分离泡长度.

另一大类主动控制方式是周期性激励, 包括合成射流和等离子体激励器等. 周期性激励的物理基础是结构共振, 激励器所产生的流动能与基本流动本身的流动结构相匹配, 从而激发出该流动结构. 为了研究后台阶流动的非定常特性, 进而减小分离泡的长度, 大量的周期性激励手段被用在后台阶流动中. 激励器外形有圆孔型和狭缝型的, 激励器有安装在台阶上游上、下壁面的<sup>[51,52]</sup>, 也有直接安装在台阶边缘处的<sup>[53-55]</sup>. 通过周期性激励发现后台阶存在两个不稳定模态: SL 模态和 SD 模态<sup>[29,30,37]</sup>, 其中 SL 模态包含 ST 模态和 K-H 不稳定性模态, SL 模态见图 2.

激励流动的分离泡长度与激励频率有极大的相关性, 但有效激励频率(即能使分离泡长度有所减小的频率)  $St_h < 0.8$ <sup>[30,56-58]</sup>, 该频率可能对应于剪切层的最不稳定频率. Yoshioka 等人<sup>[38]</sup>在台阶边缘处安装合成射流激励器, 尝试了不同的激励频率, 发现最优控制频率  $St_h = 0.19$ , 并解释为涡脱落频率(即 SD 模态

频率)的两倍, 认为最优频率跟涡脱落相关. Benard 等人<sup>[59]</sup>也做出了同样的推论. Dejoan 和 Leschziner<sup>[37]</sup>采用 LES 方法模拟 Yoshioka 等人<sup>[38]</sup>的实验流动, 在  $St_h = 0.2$  频率的激励下, 分离泡长度减小了 30%. 此激励周期与剪切层中的涡时间尺度相当, 激发了剪切层中的涡结构, 他们认为再附过程是由剪切层与壁面的相互作用所主导. 从长度尺度的角度来讲, 最优激励频率所产生的扰动波长与分离泡高度相当<sup>[27]</sup>.

采用最优激励频率  $St_h = 0.2$  激励后台阶流动, 使得分离泡长度减小约 50%, 而非最优激励频率的控制效果稍逊, 如图 4. 在此频率激励下得到的相平均流动分离泡中包含两个大尺度涡结构(见图 5), 与 ST 模态在与壁面发生相互作用前的大尺度涡结构尺度一致, 且该激励频率与作者研究所得的 ST 模态频率相当. 所以, 最优控制频率应该对应于 ST 模态频率, 此激励频率激发出 ST 模态, 从而促进后台阶流动的再附. 较高的激励频率主要影响剪切层的稳定性, 不影响附着区的流动结构<sup>[56,57]</sup>, 因此此区域由低频的 SD 模态所主导.

从另一个角度讲, 在较优激励频率的激励下, 剪切层中的大尺度结构非常整齐. 激励促进了剪切层中涡的合并, 从而增强了剪切层中的湍流生成, 提高了剪切层的增长率(见图 6); 大尺度展向结构的出现

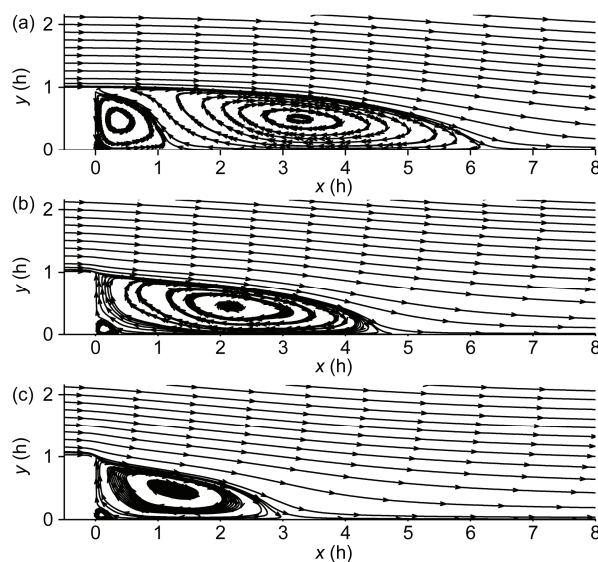


图 4 基本流平均流线(a)、0.5 倍最优激励频率控制下的平均流线(b)和最优激励频率控制下的平均流线(c)

Figure 4 Streamlines of base flow (a), that of the one excited at half of the optimum frequency (b) and at the optimum frequency (c).

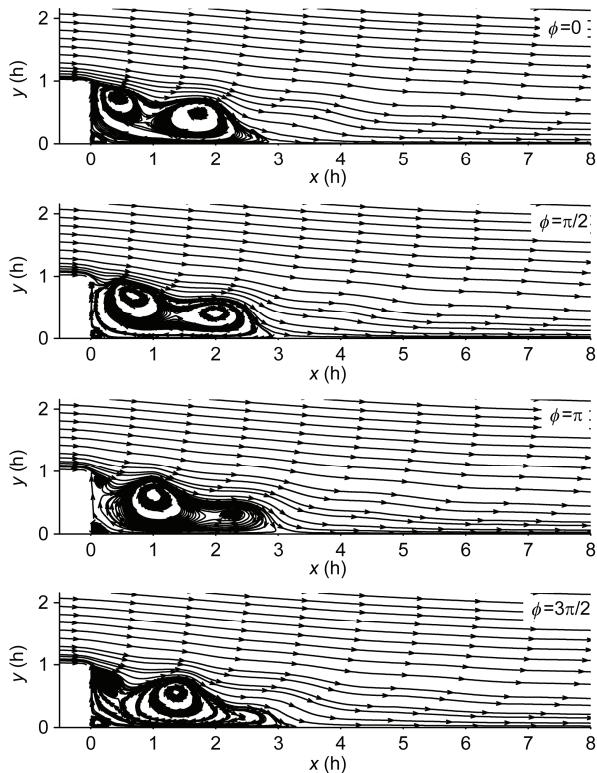


图 5 最优激励频率控制下的后台阶流动相平均流线  
Figure 5 Streamlines of phase-averaged backward-facing flow excited by synthetic jet at optimum frequency.

增强了剪切层的卷吸作用<sup>[27,57,58]</sup>. 这些都使得剪切层迅速失稳和发展, 提前与壁面发生相互作用, 所以在较优激励频率的激励下, 分离泡长度大大减小.

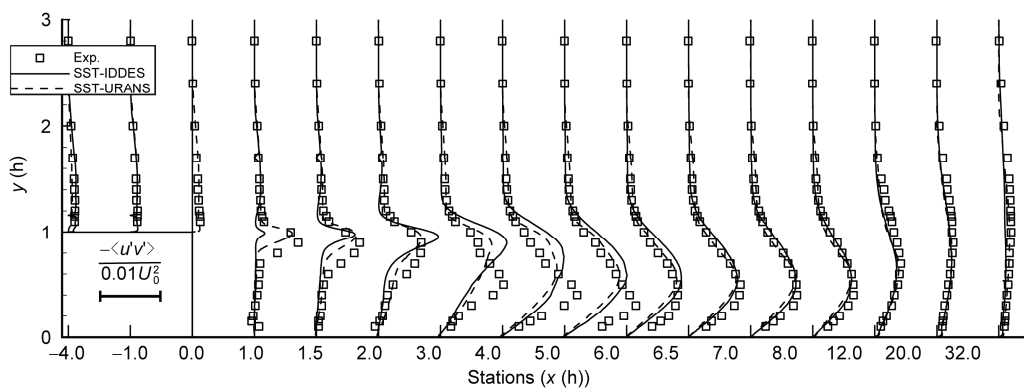


图 6 后台阶流动剪切雷诺应力分布. 正方形: Driver 和 Seegmiller<sup>[18]</sup>基本流动的测量数据, 实线: 基本流动模拟结果, 虚线: 最优激励频率激励下的结果

Figure 6 Profiles of shear stress in backward-facing step flow. Square: Experimental data from Driver and Seegmiller [18], solid line: base flow from simulation, dash line: excited under optimum frequency.

## 4 结论及展望

本文回顾了后台阶湍流流动及其控制的相关研究. 在 Eaton 和 Johnston<sup>[10]</sup>对分离泡长度影响因素分析讨论的基础上, 进一步总结了壁面压力系数、壁面摩擦系数、速度分布与雷诺应力分布对相关参数的变化趋势.

从模态角度来看, 后台阶流动由 SL 模态和 SD 模态主导, 前者包含 K-H 不稳定性、涡配对和 ST 模态. ST 模态主导后台阶流动的再附过程, 无量纲模态频率约为 0.2. 此频率对应于后台阶流动的最优控制频率(就减小分离泡长度而言).

到目前为止, 对分离流控制的认识已经相当深入. Greenblatt 和 Wygnanski<sup>[14]</sup>对周期性激励做了详细综述, Collis 等人<sup>[60]</sup>对主动流动控制应注意的问题和发展路径做了清晰的描述. 对于后台阶流动控制, 主动控制的主要机理是利用剪切层自身的不稳定性, 即激励剪切层的不稳定模态, 使得剪切层迅速发展, 进而重新附着.

目前绝大部分的研究关注的是后台阶流动的展向拟序结构及利用展向拟序结构的共振来减小分离泡长度, 对流向结构的研究相对较少, 且认识也还不深入. 流向结构是如何演化? 流向结构的尺度几何? 能否利用流向结构来达到进一步减小分离泡长度的目的? 这些问题的解决都有待进一步的研究来给出答案.



## 参考文献

- 1 Brown G L, Roshko A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *J Fluid Mech*, 1974, 64: 775–816
- 2 Winant C D, Browand F K. Vortex pairing: The mechanism of turbulent mixing-layer growth at moderate Reynolds number. *J Fluid Mech*, 1974, 63: 237–255
- 3 Bernal L P, Roshko A. Streamwise vortex structure in plane mixing layers. *J Fluid Mech*, 1986, 170: 499–525
- 4 Balaras E, Piomelli U, Wallace J M. Self-similar states in turbulent mixing layers. *J Fluid Mech*, 2001, 446: 1–24
- 5 Hussain A, Zaman K. An experimental study of organized motions in the turbulent plane mixing layer. *J Fluid Mech*, 1985, 159: 85–104
- 6 Yang W B, Zhang H Q, Chan C K, et al. Large eddy simulation of mixing layer. *J Comput Appl Math*, 2004, 163: 311–318
- 7 Crow S C, Champagne F H. Orderly structure in jet turbulence. *J Fluid Mech*, 1971, 48: 547–591
- 8 Hussain A, Clark A R. On the coherent structure of the axisymmetric mixing layer: A flow-visualization study. *J Fluid Mech*, 1981, 104: 263–294
- 9 Hussain A K M F, Zaman K. The “preferred mode” of the axisymmetric jet. *J Fluid Mech*, 1981, 110: 39–71
- 10 Eaton J K, Johnston J P. A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA J*, 1981, 19: 1093–1100
- 11 Lin J C. Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation. *Prog Aero Sci*, 2002, 38: 389–420
- 12 Eiamsa-ard S, Promvong P. Numerical study on heat transfer of turbulent channel flow over periodic grooves. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2008, 35: 844–852
- 13 Cattafesta III L N, Sheplak M. Actuators for active flow control. *Ann Rev Fluid Mech*, 2011, 43: 247–272
- 14 Greenblatt D, Wygnanski I J. The control of flow separation by periodic excitation. *Prog Aero Sci*, 2000, 36: 487–545
- 15 Glezer A, Amitay M. Synthetic jets. *Ann Rev Fluid Mech*, 2002, 34: 503–529
- 16 Ötügen M V. Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step. *Exper Fluids*, 1991, 10: 273–280
- 17 Brederode V, Bradshaw P. Three-dimensional flow in nominally two-dimensional separation bubbles. I. Flow behind a rearward-facing step. *Imp Coll Aero Rep*, 1972: 72–19
- 18 Driver D M, Seegmiller H L. Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow. *AIAA J*, 1985, 23: 163–171
- 19 Ra S H, Chang P K. Effects of pressure gradient on reattaching flow downstream of a rearward-facing step. *J Aircraft*, 1990, 27: 93–95
- 20 Isomoto K, Honami S. The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward-facing step. *J Fluids Eng*, 1989, 111: 87–92
- 21 Armaly B F, Durst F, Pereira J C F, et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. *J Fluid Mech*, 1983, 127: 473–496
- 22 Adams E W, Johnston J P. Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Part 1: Pressure and turbulence quantities. *Exper Fluids*, 1988, 6: 400–408
- 23 Adams E W, Johnston J P. Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Part 2: Reattachment length and wall shear stress. *Exper Fluids*, 1988, 6: 493–499
- 24 Jovic S, Driver D. Reynolds number effect on the skin friction in separated flows behind a backward-facing step. *Exper Fluids*, 1995, 18: 464–467
- 25 Narayanan M A B, Khadgi Y N, Viswanath P R. Similarities in pressure distribution in separated flow behind backward-facing steps. *Aero Quarterly*, 1974, 25: 305–312
- 26 Westphal R V, Johnston J P. Effect of initial conditions on turbulent reattachment downstream of a backward-facing step. *AIAA J*, 1984, 22: 1727–1732
- 27 Le H, Moin P, Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. *J Fluid Mech*, 1997, 330: 349–374
- 28 Troutt T R, Scheelke B, Norman T R. Organized structures in a reattaching separated flow field. *J Fluid Mech*, 1984, 143: 413–427
- 29 Hasan M A Z. The flow over a backward-facing step under controlled perturbation: Laminar separation. *J Fluid Mech*, 1992, 238: 73–96
- 30 Sigurdson L W. The structure and control of a turbulent reattaching flow. *J Fluid Mech*, 1995, 298: 139–165
- 31 Spazzini P G, Iuso G, Onorato M, et al. Unsteady behavior of back-facing step flow. *Exp Fluids*, 2001, 30: 551–561
- 32 Kopera M A. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. Dissertation for Doctoral Degree. Coventry: University of Warwick, 2011

- 33 Kaiktsis L, Em Karniadakis G, Orszag S A. Unsteadiness and convective instabilities in two-dimensional flow over a backward-facing step. *J Fluid Mech*, 1996, 321: 157–187
- 34 Driver D M, Seegmiller H L, Marvin J G. Time-dependent behavior of a reattaching shear layer. *AIAA J*, 1987, 25: 914–919
- 35 Eaton J K, Johnston J P. Low frequency unsteadiness of a reattaching turbulent shear layer. In: *Turbulent Shear Flows 3*. Berlin-Heidelberg: Springer, 1982. 162–170
- 36 Neto A S, Grand D, Métais O, et al. A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step. *J Fluid Mech*, 1993, 256: 1–25
- 37 Dejoan A, Leschziner M A. Large eddy simulation of periodically perturbed separated flow over a backward-facing step. *Int J Heat and Fluid Flow*, 2004, 25: 581–592
- 38 Yoshioka S, Obi S, Masuda S. Organized vortex motion in periodically perturbed turbulent separated flow over a backward-facing step. *Int J Heat Fluid Flow*, 2001, 22: 301–307
- 39 Jovic S, Driver D M. Backward-facing step measurements at low Reynolds number,  $Re_h = 5000$ . NASA Technical Memorandum, 1994, 108807
- 40 Schäfer F, Breuer M, Durst F. The dynamics of the transitional flow over a backward-facing step. *J Fluid Mech*, 2009, 623: 85–119
- 41 Park H, Jeon W P, Choi H, et al. Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs. *Phys Fluids*, 2007, 19: 105103
- 42 Heenan A F, Morrison J F. Passive control of pressure fluctuations generated by separated flow. *AIAA J*, 1998, 36: 1014–1022
- 43 Lai J C S, Yue J, Platzer M F. Control of backward-facing step flow using a flapping foil. *Exp Fluids*, 2002, 32: 44–54
- 44 Huteau F, Lee T, Mateescu D. Flow past a 2-D backward-facing step with an oscillating wall. *J Fluids Struct*, 2000, 14: 691–696
- 45 Kang S, Choi H. Suboptimal feedback control of turbulent flow over a backward-facing step. *J Fluid Mech*, 2002, 463: 201–227
- 46 Garwon M, King R. A multivariable adaptive control strategy to regulate the separated flow behind a backward-facing step. In: *Proceedings of 16th IFAC World Congress*. Laxenburg: International Federation of Automatic Control, 2005
- 47 Henning L, Pastoor M, King R, et al. Feedback control applied to the bluff body wake. In: *Active flow control*. Berlin-Heidelberg: Springer, 2007. 369–390
- 48 Sakuraba K, Fukazawa K, Sano M. Control of turbulent channel flow over a backward-facing step by suction or injection. *Heat Transfer—Asian Res*, 2004, 33: 490–504
- 49 Uruba V, Jonáš P, Mazur O. Control of a channel-flow behind a backward-facing step by suction/blowing. *Int J Heat Fluid Flow*, 2007, 28: 665–672
- 50 Sano M, Suzuki I, Sakuraba K. Control of turbulent channel flow over a backward-facing step by suction. *J Fluid Sci Tech*, 2009, 4: 188–199
- 51 Morioka T, Honami S. Dynamic characteristics in a control system of backward facing step flow by vortex generator jets. *AIAA Paper*, 2004, AIAA-2004-2125
- 52 Yamada S, Okamoto K, Nitta T, et al. Flow structures by synthetic jets over a backward facing step in low Reynolds number. *AIAA Paper*, 2009, AIAA-2009-0576
- 53 Wengle H, Huppertz A, Bärwolff G, et al. The manipulated transitional backward-facing step flow: An experimental and direct numerical simulation investigation. *Euro J Mech-B/Fluids*, 2001, 20: 25–46
- 54 Šarić S, Jakirlić S, Tropea C. A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: An example of flow separation control. *J Fluids Eng*, 2005, 127: 879–887
- 55 Rhee G H, Sung H J. Numerical prediction of locally forced turbulent separated and reattaching flow. *Fluid Dyn Res*, 2000, 26: 421–436
- 56 Troutt T R, Bhattacherjee S, Scheelke B. Modification of vortex interactions in a reattaching separated flow. *AIAA J*, 1986, 24: 623–629
- 57 Roos F W, Kegelmann J T. Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers. *AIAA J*, 1986, 24: 1956–1963
- 58 Chun K B, Sung H J. Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local forcing. *Exp Fluids*, 1996, 21: 417–426
- 59 Benard N, Sujar-Garrido P, Bayoda K D, et al. Pulsed dielectric barrier discharge for manipulation of turbulent flow downstream a backward-facing-step. In: *Proceedings of 52nd Aerospace Sciences Meeting*. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014
- 60 Collis S S, Joslin R D, Seifert A, et al. Issues in active flow control: Theory, control, simulation, and experiment. *Prog Aero Sci*, 2004, 40: 237–289

## Review of backward-facing step flow and separation reduction

HU RuYun, WANG Liang & FU Song<sup>\*</sup>

*School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

This article reviews the development of research work on backward-facing step flow and separation reduction techniques. Firstly, the effects of inflow conditions and geometry parameters on the bubble length, pressure coefficient, skin friction coefficient, velocity profiles and profiles of Reynolds stresses of the backward-facing step flow are identified. Secondly, we find that the unsteadiness of backward-facing step flow is dominated by shear layer mode and shedding mode, the former including Kelvin-Helmholtz instability, vortex pairing and step mode. Furthermore, the lower-frequency characteristics are consist of shear layer flapping and reattachment oscillating, resulting from the interaction between the coherent structures in the shear layer and the wall. Finally, the flow control practice on the backward-facing step flow has also been discussed. It is found that the recirculating bubble length can be significantly reduced with appropriate excitation frequency in the harmonic excitation practice. The optimum excitation frequency,  $St_h$ , is of about 0.2, and a physical explanation is given by the authors.

**backward-facing step, time-averaged characteristics, unsteadiness, separation control**

**PACS:** 62.50.+p, 47.40.-x, 43.40.Jc

**doi:** 10.1360/SSPMA2015-00450