后向台阶流动研究综述

曾　诚,王玲玲

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京　210098)

摘要:综述近年来后向台阶流动研究的进展及现状.对研究台阶后再附着点位置、时均流动的漩涡结构、起动涡、雷诺应力和剪切层中大涡结构等重要成果进行了归纳;对大涡模拟在后向台阶流动中的研究状况进行介绍;对现有的研究方法及存在问题进行分析,并指出了进一步的研究方向.

关键词:流体力学;后向台阶流动;漩涡结构;雷诺应力;大涡模拟;综述

中图分类号:O35　　文献标识码:A　　文章编号:1006-7647(2005)S1-0164-05

分离再附运动发生在许多实际工程问题中,例如:气流流过一个薄机翼或一个冲压式空气发动机燃烧室,水流流过截面突扩的管道,等等.分离再附运动涉及流动分离、漩涡的生成和脱落、漩涡之间以及漩涡与固壁的相互作用等理论问题,同时分离再附流动将显著改变与之相互作用的结构物的受力特性,影响其工作性能,所以,研究这一流动现象及其产生机理,对工程应用特别是航空航天及水利工程领域具有非常重要的意义.

作为二维分离再附运动中最简单也是最典型的流动,后向台阶流动一直受到普遍的重视.由于其分离点固定、起始边界条件单纯而被广泛用来研究分离流的再附特性.从 20 世纪 70 年代开始,许多研究者都对后向台阶流动进行了实验研究.近年来,随着新型实验仪器和计算机技术的发展,后向台阶流动方面的研究取得了长足进步.本文拟对台阶后再附着点的位置、时均流动的漩涡结构、起动涡、雷诺应力和剪切层中大涡结构等方面的研究成果进行综述.

1　台阶后再附着点位置

影响台阶后再附着点位置的因素很多.首先是扩张比($E_R = H_2/H_1$,见图 1)对台阶后再附着点的位置的影响,文献[1-4]对此进行了研究,发现扩张比 E_R 越大,则再附着点离台阶分离点越远,台阶后回流区的长度就越大.其次是流体雷诺数 Re 对再附着点位置的影响,Armaly 等[5]的研究表明,台阶后

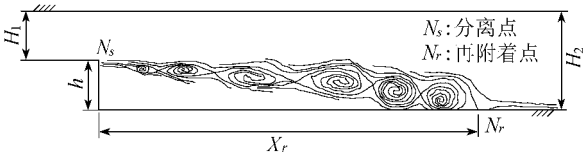

图 1　分离再附流动示意图

回流区的长度 X_r 在 Re 小于 1 200 的时候,随着 Re 的增大而增大;在 $Re \approx 1\,200$ 时达到最大值;在 $1\,200 < Re < 6\,600$ 的变化范围内,随 Re 的增大而逐渐减小;当 $Re > 6\,600$ 时,流动变成了一种充分的紊流状态,X_r 就保持为一个近似的常数,流动明显与 Re 无关,再附着点的位置就基本没有变化了.他们的成果与 Durst 等[2]和 Sinha 等[6]的实验结果极为吻合.其他对台阶后再附着点的位置影响较大的参数还有边界层厚度、来流湍流度以及流动装置的纵横比(槽宽/台阶高).Narayanan 等[7]的数据表明,总体边界层厚度对再附长度影响较弱,但当其他参数相同时,分离点边界层厚度 δ_s 的不同,仍会使再附着点的位置有较大差异.δ_s/h 从 2(湍流边界层)变到 0.2(层流边界层)时,再附长度 X_r 在 5~7.9 个台阶高度间变化;来流湍流度对台阶后再附着点位置的影响研究还很不充分,但已有数据表明,来流湍流度的增加会减小再附长度.这个结果定性上与 Patel[8]平面混和层的测量结果一致.流动装置的纵横比也对台阶后再附着点的位置有一定的影响[9],纵横比大于 10 时这一影响可以忽略,但当纵横比小于 10 时,回流区长度将随分离点边界层特性的变化而变化:分离点边界层为层流,回流区的长度增加;为湍流则使回流区长度减小.这一差异可能是由于角区流动细节不

基金项目:江苏省教育厅资助项目(K2080)

作者简介:曾诚(1981—),男,四川简阳人,硕士研究生,从事计算水力学研究.

同造成的.

近年来,随着先进测量仪器的出现,国内许多学者通过实验对台阶后再附着点的位置进行了测量.如王晋军等利用 LDV 和氢泡显示技术,对后向台阶湍流边界层分离、再附及发展过程进行了研究,取得了一些有意义的成果[10-13].

2 台阶后时均流动的漩涡结构

从 20 世纪 70 年代开始,不断有研究者通过实验研究台阶后时均流动的漩涡结构[14-17]. Gartling[18] 和 Mateescu 等[19]采用数值模拟方法对不同 Re 的时均台阶后流的漩涡结构进行研究,成果较为一致.

a. 层流的剪切层内同时出现 5 ~ 7 个漩涡结构,相邻漩涡间相互作用不明显,漩涡运动有规律,有较好的有序结构.再附着区内存在着漩涡被撕裂和向上游回扫的现象.再附着区下游上壁面附近有逆时针旋转的漩涡结构.

b. 过渡流的剪切层内同时出现 3 ~ 5 个漩涡结构,漩涡结构不如层流流动时有规律,漩涡之间有明显的相互作用.再附着区内存在着漩涡被撕裂和向上游回扫的现象,而且两种现象的作用大体相当.内角区及剪切层内有逆时针的诱导涡.再附着区下游上壁面附近有逆时针旋转的漩涡结构.

c. 湍流的剪切层内同时出现 2 ~ 3 个漩涡结构,漩涡的自由发展空间变小,漩涡之间相互作用非常强烈,漩涡的结构很不规则,漩涡容易破裂或合并.再附着区内存在着漩涡被撕裂现象,漩涡回扫现象不明显.再附着区下游不出现漩涡结构,主流呈上下摆动的波状运动.再附着区下游的上壁面没有分离涡.内角处出现逆时针诱导涡.

研究还发现了层流和湍流时均流场结构的相似之处,即:在台阶下游均形成大小不同的稳定的回流区;回流区内均存在比较规则的回流涡漩,涡漩尺寸与台阶高度为同一量级,但湍流时的回流涡尺寸大于层流时的回流涡尺寸;位于剪切层以上的主流在台阶下游附近处和再附着区的下游区均较为平顺,并且在再附着区处稍有弯曲.两种流态的明显不同之处则在于:①湍流时台阶内角区($x/h = 0 \sim 1.5$, h 为台阶高度)出现了二次回流,称为内角诱导涡,回流区的长度约为 1.3 h ~ 1.5 h,过渡流时上述区域也存在二次回流现象,回流区的长度约为 0.5 h ~ 1.0 h;②层流时在台阶内角处无二次回流现象,但在台阶后的上壁面处出现二次回流现象,称为上壁分离涡,如图 2 所示.

根据王兵等[21]的研究:低雷诺数($Re < 450$)时,不存在上壁分离涡;当 $Re > 450$ 以后,上壁分离涡出现,在 $450 < Re < 1\,200$ 范围内,上壁分离涡的起始位置渐渐往后推移,在雷诺数达到 1 200 时,推移到最远位置,回流区长度基本不变;当 $Re > 1\,200$ 时,流动进入过渡流状态,上壁分离涡的起始位置不断前移,回流区的长度变化不大;当 $Re > 3\,800$ 之后,随着雷诺数的增加,上壁分离涡的起始位置基本保持不动或略有后移,但其结束位置持续前移,整个回流区长度持续减小,直到雷诺数 Re 达到 6 600 时,上壁分离涡消失.

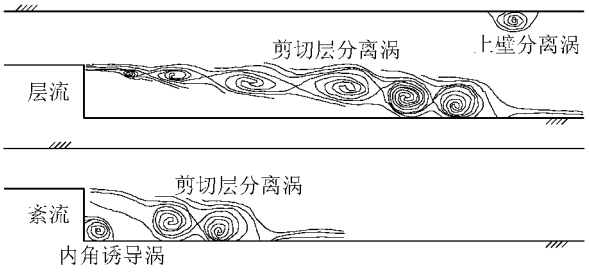

图 2 台阶后时均流动的漩涡结构示意图

3 台阶后起动涡

起动流动的重要特征是由边界层分离导致漩涡产生并开始卷绕,形成逐渐增大的起动涡,其尺寸比同一物体上稳态流动中的脱落涡要大得多.在起动过程中作用在物体上的起动力也很大.起动涡在发展过程中存在复杂得多层次结构.由于起动过程中起动涡不断运动、增长,用传统方法测量这种非定常、非周期的涡的瞬态流场是很困难的.目前对这类问题大多通过数字模拟和流动显示方法进行研究,如文献[22,23]通过测量给出阻流板、双台阶(double step)等起动涡的几何参数;冯广云等[24]用白光气泡 PIV 技术研究后向台阶起动涡的结构特性,给出起动涡的特性参数.齐鄂荣等[20,25]用 PIV 对二维后向台阶起动流的瞬态速度场进行了观测,总结了层流至湍流情况下起动流的运动规律.限于测量技术,尚无法测量连续的瞬时速度分布.

3.1 起动涡的发展过程

起动涡的起动过程大致分为 4 个阶段(图 3):①起动涡形成阶段;②起动涡增大阶段;③其他漩涡产生阶段;④起动涡消失阶段.但是在层流、过渡流和紊流等情况下,起动涡的发展过程又是各不相同的.在层流情况下,起动涡运动相对比较稳定,时间较长,受其他漩涡的的影响较小;在紊流情况下,起动涡存在的时间很短,在很短的时间内起动涡与其稍后产生的分离涡和内角诱导涡相互作用,产生剧烈的变形、破裂;在过渡流情况下,起动涡发展的过程比层流流态时复杂,相互作用时间长于紊流流态.

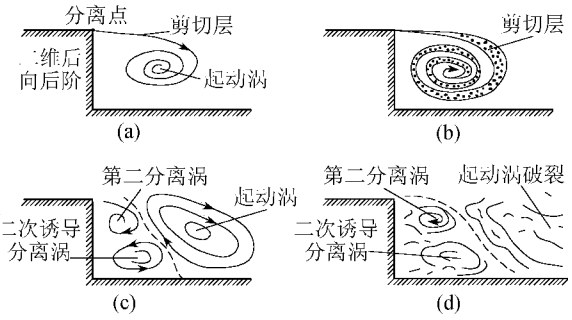

图 3　起动涡发展过程的 4 个阶段

3.2　起动涡的再附着点

起动流再附着点位置随时间的变化也存在一定的规律：层流、过渡流和紊流情况下，再附着点位置在开始一段时间内都有一段近似匀速移动的过程，这个过程存在的时间长短随流态的不同而不同，层流情况下的存在时间最长，其次是过渡流，紊流情况下存在的时间最短.

对于 Re 为 330，1 200，4 400 的 3 种流动，再附着点的位置分别在时间 $t = 1.9$ s，$t = 1.6$ s，$t = 1.1$ s 之前为近似匀速移动. 此后，层流情况下（$Re = 330$），在 $t = 1.8 \sim 3.4$ s 之间，再附着点位置的移动速度逐渐变快，在 $t = 3.4$ s 以后又进入一个近似匀速移动的阶段；过渡流情况下（$Re = 1\,200$），在 $t = 1.6$ s 以后再附着点的位置出现回移现象，在经过一个短暂的停顿后，又近似匀速地向下游移动. 此时，正经历着起动涡破裂、合并的情况，并产生二次分离涡，导致再附着点位置在上下游方向发生摆动；紊流情况下（$Re = 4\,400$），由于流场的湍动强度较大，导致漩涡破裂，使得起动涡的存在时间很短，因此再附着点的存在时间也很短，所以在近似匀速移动过程以后，再附点的位置就很难确定了. 起动涡涡心的位置和再附着点位置这两者具有一定的相关性，两者变化趋势相同，只是后者位置偏向下游. 起动流过程中起动涡和上壁面涡沿流向运移幅度较大，沿垂向运移幅度较小，内角诱导涡仅在较小范围内移动.

4　台阶后雷诺应力分布

台阶后再附区雷诺应力迅速减小，这一点目前仍无较好的解释. 许多实验数据表明，湍流衰减主要发生在两个阶段，衰减最早是从再附着点上游 1.5 个台阶高度处开始的，这一阶段的衰减是自由剪切层内流线的弯曲引起的. 文献[26,27]已经验证了凹状的流向弯曲会引起剪切层湍流量的迅速衰减. 在再附着点上游两个台阶的高度之前分离剪切层只具有较小的曲率，但到再附着点上游，剪切层厚度与弯曲半径之比超过了 0.1，这样强的弯曲即使没有其他因素的影响也会使雷诺应力迅速减小. 但是，流线的弯曲解释不了再附着点下游侧湍流量的衰减. 由于剪切层在再附区受到多种力的作用，且缺乏详细和精确的实验测量，所以该阶段的衰减机理尚难解释. Bradshow 等[28]认为，由于壁面的约束，强流向压力梯度致使大涡在再附区被撕开，长度尺度的减小可能导致湍流度的减小；McGuinness[29]认为，再附区一些大涡向上游回扫，另一部分向下游运动是湍流应力衰减的原因；董宇飞[30,31]发现，再附区大涡一撕为二与大涡向上游回扫两种情况都存在，但前者的情况明显占优. 实际上，无论大涡向上游回扫还是在再附区被撕开，下游的涡量都减小了，这正是湍流应力衰减的原因.

5　剪切层中的大涡结构

对于再附剪切层中的大涡结构，许多研究者都做过研究，研究的焦点集中在再附区中是否存在涡结构或涡结构的尺度等问题上. Kasagi 等[32]的烟线照片表明，再附着点上游的湍流结构已经完全三维化，大涡展向长度尺度与台阶的高度相当，但是他们的工作既没有肯定，也没有否定再附着点上游是否存在展向涡结构. Chandrsuda[33]认为，分离点边界层是湍流时，展向涡不会形成，即使后向台阶形成这些展向结构，受回流区扰动的影响，也会迅速破碎. 但对此，他们并没有实验证据. 许多学者持反对意见. Roos[34]指出，不论层流分离还是湍流分离，都存在大尺度涡结构，且持续较长时间，随着剪切层湍流度的增加，大尺度结构变得越来越不规则. Troutt 等[35]的实验结果也表明，后向台阶分离区和再附区中存在大涡结构. 这些大涡结构在再附区下游很远处仍很规则，对平均流动行为起着十分重要的作用. 文献[35]认为，再附区湍动能的减小以及再附区下游平均流动缓慢的转捩过程（slow transition of mean flow）都与这些涡的影响有关. McGuinness[29]和 Rothe 等[36]都观察到，再附剪切层接近再附区壁面之前，主要是通过涡合并机制增长的. Rothe 等还发现，实验段水流围绕着某一固定的展向运动可抑制三维湍流，而展向涡不受实验段水流旋转的影响. 当实验段水流以某一速度旋转时可以完全抑制三维流动，再附长度比没有旋转时只增长 8%；作为对比，让实验段水流反方向旋转，增加三维湍流度，再附长度减小 50%. 这个结果表明，展向涡在没有旋转时，对回流裹挟起主要作用. Rothe 等认为，展向涡是以平均再附着点为中心的不稳定回流区的成因.

6　后向台阶流动中的大涡模拟

求解紊流问题的困难主要来自于两个方面：一

是紊流的非线性特征难以数值模拟；二是紊流脉动频率谱域极宽，数值模拟技术难以模拟出连续变化的各级紊流运动. 现在被广泛运用的雷诺时间平均方法(RANS—Reynolds averaged Navier-Stokes)抹平了紊流运动的若干微小细节，模型模化过程也带有很多人为因素，所以对分离再附运动的模拟能力还很有限. 而最为精确的直接模拟方法(DNS—directly numerical simulation)又受到计算机容量与速度的影响，普通的研究机构尚难实现. 所以介于 DNS 和 RANS 之间的 LES，由于其较 RANS 更为精细且在常规的计算机上可以实现，因此，在分离再附运动的数值模拟中得到了广泛地应用[37]，取得了一系列的成果.

到目前为止，采用大涡模拟研究后向台阶流动热交换的成果尚未见报道. 对于后向台阶流动的 LES 模拟，现有成果基本局限于等温情况下后向台阶流动的研究.

为了评价空间网格划分的作用，Aranl 等[38]对单向后向台阶流动的模拟结果进行了分析. 他们在相同条件下对空间中 3 种网格划分：$80\times16\times16$，$160\times32\times32$，$320\times48\times64$ 的模拟结果进行了比较，3 种网格划分得到的再附着长度分别为 $7.7h$，$7.3h$，$7.2h$(h 为台阶高度). Aranl 等发现，作为大涡模拟入流条件的入口高度如果增加 4 倍台阶高度，则模拟得到的台阶后漩涡位置将向上游移动较远的距离，这种变化将有助于提高大涡模拟结果与实验结果在再附着长度方面的一致性. 他们还研究了将展向尺寸从 2 倍台阶高度逐渐改变为 8 倍台阶高度的情况，并且监测了在这几种情况下改变网格的剖分质量后得到的再附着长度. 结果发现，当展向尺寸维持在 4～6 倍台阶高度时，再附着长度基本保持不变.

Akselvoll 等[39]用大涡模拟方法对后向台阶流动进行了模拟，目的是对动态亚格子模型(dynamic subgrid scale model)和动态区域模型(dynamic localization model)在复杂流动中的模拟结果进行比较. 结果证实了亚格子模型的影响随着网格剖分精度的提高而减小. Akselvoll 等发现当不用亚格子模型所得到的模拟结果与实验数据有很大差异，这种现象在亚格子剪切应力和耗散率最大的回流区域内尤为明显，证明了动态亚格子模型的优越性. 另外，他们的模拟结果还显示：因为在台阶附近沿流向和垂直于壁面方向的区域具有较大的截断误差，所以高精度地模拟该区域内的流动对大涡模拟整体结果有直接影响.

在国内，王小华等[40]在深入考虑黏性不可压缩流 Navier-Stokes 方程各个子项作用的基础上，提出二阶全展开 Euler-Taylor-Galerkin(ETG)有限元方法作为大涡模拟的离散格式，并采用 Gauss 滤波器，对后向台阶流动进行了大涡模拟，计算结果与相关文献符合得很好. 从计算结果可以看出：大涡模拟与二阶全展开 ETG 有限元方法的结合在捕捉涡系及反映涡动时变过程方面具有明显的优势，说明大涡模拟适合于边界几何形状复杂区域内的流动模拟.

2003 年王兵等[41]用大涡模拟方法研究了湍流后台阶流场中的大涡演变过程，并在此基础上研究了大涡模拟中比较常用的 6 种亚格子模式：标准的 Smagorinsky 模式(M1)、衰减修正的 Smagorinsky 模式(M2)、梯度模式(M3)、动态涡黏性模式(M4)、动态 Clark 模式(M5)和结构函数模式(M6). 表 1 给出了 6 种亚格子模式模拟得到的时均速度场、回流区长度、回流区最大负速度、计算时间的比较. 比较表明：6 种亚格子模式所得到的回流区内最大负速度结果基本一致，但较实验结果偏大. 回流长度结果相差较大，M4 和 M5 的预报结果偏小，时均结果也不理想. 在计算量方面，以 M1 的计算时间为参考值 T_0，M4 和 M5 的计算量较 M1 分别高 22% 和 39%，见表 1. 研究表明，在今后的研究中需要引入壁面模式，以便改善近壁区域的预报结果.

表 1　6 种亚格子模式比较

格子模式	时均速度	回流区长度 (X_r/H)	最大负速度 (u/U_0)	计算时间 (t/T_0)
M1	好	7.27	-0.23	1.00
M2	好	7.68	-0.23	1.12
M3	好	6.46	-0.24	1.00
M4	较差	5.36	-0.24	1.22
M5	较差	5.23	-0.23	1.39
M6	好	7.81	-0.21	1.12
实验	—	7.40	-0.15	—

7　结　语

最近 40 多年来，后向台阶流动得到大量的研究. 其时均流动特性研究已有较丰富的成果. 但是随着测量仪器和大型计算机的发展，后向台阶流动的瞬时特性研究引起了国内外越来越多学者的关注. 虽然人们常采用时均化的实验数据或计算数据研究后向台阶流，但实验已表明，后台向阶流动是一个复杂的、非恒定的过程，必须应用瞬态流场数据进行其流动机理研究. 目前对后向台阶流动瞬时特性的研究还处于起步阶段，对其机理的认识还不够深入，与工程应用还有较大的距离，因此，还需进行大量深入的研究工作：

a. 受测量仪器的限制，现有的实验工作大都是对台阶流某一局部流动或现象进行研究. 至今还未见有对台阶后漩涡的分离区、再附着区和再发展区

进行全程跟踪观测实验成果的报道.如何采用目前较为先进的 PIV 等设备,对这一过程进行全程跟踪观测,获得漩涡产生、发展及消亡完整直观的图像,对分析研究分离流动的机理极为重要.

b. 台阶后再附着点位置随时间的变化规律研究还没有公认的成果. HUNG 等[42]利用计算机对后向台阶流动进行直接模拟的结果表明,台阶后再附着点位置随时间的变化曲线呈锯齿状分布.笔者也认为,台阶后再附点位置随时间变化的过程、台阶后的压力分布、漩涡的位置分布等特性应与涡脱落一样,具有周期性变化特性.证实并研究这一变化的周期及其幅值大小,对了解台阶流的运动机理有重要意义.

c. 采用数值模拟如大涡模拟和直接模拟研究台阶流是另一个重要手段.目前大涡模拟对计算速度及容量的要求相对较低,因此,已在工程实际中得到应用,已有学者将该数值方法应用于台阶流的数值模拟中[21],并取得了一些有价值的成果.可以推测,数值模拟特别是大涡模拟方法必将在后向台阶流动的数值模拟中发挥越来越重要的作用.

参考文献:

[1] KUEHN D M. Some effects of adverse pressure gradient on the incompressible reattaching flow over a rearward-facing step [J]. AIAA, 1980, 18: 343-344.

[2] DURST F, TROPEA C. Turbulent, backward-facing step flows in two-dimensional ducts and channels [C]//Proc Third Intl Symp on Turbulent Shear Flows, University of California, Davis: 18.1-18.5.

[3] ÖTüGEN M V. Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step [J]. exps Fluids, 1991(10): 273-280.

[4] 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.

[5] ARMALY B F, DURST F, PEREIRA J C F, et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step [J]. Journal of Fluid Mech, 1983, 127: 473-496.

[6] SINHA S N, GUPTA A K, OBERAI M N. Laminar separating flow over backsteps and cavities part Ⅰ: backsteps [J]. AIAA, 1981, 19: 1527-1530.

[7] NARAYANAN M A B, KHADGI Y N, VISWANATH P R. Similarities in pressure distribution in separated flow behind backward-facing steps [J]. Aeronautical Quarterly, 1974, 25: 305-312.

[8] PATEL R P. Effects of stream turbulence on free shear flows [J]. Aeronautical Quarterly, 1979, 29: 1-17.

[9] De BREDERODE V A S L. Three-dimensional effects in nominally two-dimensional flow [D]. Imperial College, London University, 1975.

[10] 王晋军,连淇祥.后台阶层流边界层分离实验研究[J].航空学报,1993,14(1): 52-56.

[11] 王晋军,连淇祥.后向台阶湍流边界层分离、再附及发展[J].航空学报,1994,15(4): 393-398.

[12] 王晋军,连淇祥,兰世隆.后向台阶层流分离湍流结构的实验研究[J].航空学报,1996,17(2): 149-154.

[13] 兰世隆,王晋军.后向台阶层流分离剪切层特性研究[J].北京航空航天大学学报,1996,22(5): 581-584.

[14] GOLDSTEIN R J, ERIKSEN V L, OLSON R M, et al. Laminar separation, reattachment and transition of the flow over a downstream-facing step [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1970, 92: 732-741.

[15] EATON J K, JEANS A H, ASHJAEE J, et al. A wall-flow-direction probe for use in separating and reattaching flows [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1979, 101: 364-366.

[16] DRIVER D M, SEEGMILLER H L, MARVIN J G. Time-dependent behavior of a reattaching shear layer [J]. AIAA, 1987, 25: 914-919.

[17] GRANT I, OWENS E YAN Y Y, et al. Particle image velocimetry measurements of the separated flow behind a rearward facing step [J]. Experiments in Fluids, 1992, 12: 238-244.

[18] GARTLING D K. A text problem for outflow boundary conditions-flow over a backward-facing step [J]. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 1990, 11: 953-967.

[19] MATEESCU D, PAÏDOUSSIS M P, BÉLANGER F. A time-integration method using artificial compressibility for unsteady viscous flows [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 177: 197-205.

[20] 齐鄂荣,黄明海,李玮,等.利用 PIV 进行二维后向台阶流流动特性的研究(1):二维后向台阶流的漩涡结构的研究[J].水动力学研究与进展,A 辑,2004,19(4): 525-532.

[21] 王兵,张会强,虞建丰,等.后向台阶分离流动中大涡结构演变的数值模拟[J].力学季刊,2003,24(2): 166-173.

[22] FINAISH F, FREYMUTH P, BANK W. Starting flow over spoilers, double steps and cavities [J]. J Fluid Mech, 1986, 168: 383-392.

[23] LIAN Q X, HUANG Z. Starting flow and the structures of the starting vortex behind bluff bodies with sharp edges [J]. Exp in Fluid, 1990, 8: 1-9.

[24] 马广云,申功祈.应用 PIV 研究二维后向台阶起动流动结构特性[J].航空学报,1996,17(3): 257-264.

[25] 齐鄂荣,黄明海,李玮,等.利用 PIV 进行二维后向台阶流流动特性的研究(2):二维后向台阶流起动流的研究[J].水动力学研究与进展:A 辑,2004,19(4): 533-539.

(下转第 180 页)

[7] TURNER N C. Plant water relations and irrigation management [J]. Agri Water Manag, 1990(17): 59-75.
[8] CHALINERS D J, BVANDEN E. Productivity of peach trees factors affecting dry-weight distribution during tree growth [J]. Ann Bot, 1975(39): 423-432.
[9] 王和洲,张晓萍. 调亏灌溉条件下的作物水分生态生理研究进展[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4): 73-74.
[10] 郭相平,康绍忠. 玉米调亏灌溉的后效性[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 59-60.
[11] 王密侠,康绍忠,蔡焕杰. 玉米调亏灌溉节水调控机理研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(12): 87-89.
[12] 刘庚山,郭安红,任三学,等. 夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期复水的补偿效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 24-29.
[13] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.
[14] 史文娟,康绍忠,宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 92-93.
[15] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.
[16] 林琪,石岩,位东斌. 土壤水与冬小麦产量形成的关系及节水灌溉方案[J]. 华北农学院学报, 1998, 13(3): 1-4.
[17] 邓西平. 渭北地区冬小麦的有限灌溉与水分利用研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1): 43-46.
[18] 康绍忠. 新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展[J]. 农业工程学报, 1998, 16(1): 11-17.
[19] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报, 1998(4): 88-92.
[20] 刘安能,孟兆江. 玉米调亏灌溉效应及其优化农艺措施[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 108-111.
[21] 郭相平,康绍忠,索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 25 ~ 27.
[22] 郭相平,刘才良,邵孝侯. 调亏灌溉对玉米需水规律和水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 93-95.
[23] CHALMERS D J, ENDE B V D. Productivity of peach trees and factors affecting dry-weight distribution during tree growth [J]. Ann Bot, 1975, 39(4): 423-433.
[24] 史文娟,康绍忠,宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 92-93.
[25] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.

(收稿日期:2004-09-29 编辑:高建群)

(上接第 168 页)

[26] CASTRO I P, BRADSHAW P. The turbulence structure of a highly curved mixing layer[J]. J Fluid Mech, 1976, 73: 265-304.
[27] GILLIS J C, JOHNSTON J P. Experiments on the turbulent boundary layer over convex walls and its recovery to flat-wall conditions[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Turbulent Shear Flows, London, 1979.
[28] BRADSHAW P, WONG F Y F. The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer[J]. J Fluid Mech, 1972, 52: 113-135.
[29] McGUINNESS M. Flow with a separation bubble-steady and unsteady aspects[D]. Cambridge University, 1978.
[30] 董宇飞. 轴对称钝体分离流动特性及其控制[D]. 北京:北京大学, 1996.
[31] 董宇飞,魏中磊. 分离再附运动的实验研究[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 87-96.
[32] KASAKI N, HIRATA M, YOKOBORI S. Visual studies of large-eddy structures in turbulent shear flows by means of smokewire method[C]//Proceeding of the 1st International Symposium on Turbulent Shear Flows, Pennsylvania State College, 1977.
[33] CHANDRSUDA C. A reattaching turbulent shear layer in incompressible flow[D]. Imperial College of Science and Technology, 1975.
[34] ROOS F W, KEGELMAN J T. Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers[J]. AIAA 85-0554, 1985.
[35] TROUTT T R, SCHEELKE B, NORMAN T R. Organized structures in a reattaching separated flow field[J]. J Fluid Mech, 1984, 143: 413-427.
[36] ROTHE P H, JOHNSTON J P. Free-shear-layer behavior in rotating systems[J]. J Fluid Engng, 1979, 101(3): 117-119.
[37] 王玲玲. 大涡模拟理论及其应用综述[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(3): 261-265.
[38] ARNAL M, FRIEDRICH R. On the effects of spatial resolution and subgrid-scale modeling in large eddy simulation of a recirculating flow[C]//Proceedings of the Ninth GAMM Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics, Lausanne, 1995.
[39] AKSELVOLL K, MOIN P. Large eddy simulation of turbulent confined coannular jets and turbulent flow over a backward facing step[R]. Report TF-63, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1995.
[40] 王小华,樊洪明,何钟怡. 后阶流动的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2003, 20(3): 361-365.
[41] 王兵,张会强,王希麟,等. 不同亚格子模式在后台阶湍流流动大涡模拟中的应用[J]. 工程热物理学报, 2003, 21(1): 157-160.
[42] HUNG LE, PARVIZ MOIN, JOHN KIM. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step[J]. J Fluid Mech, 1997, 330: 349-374.

(收稿日期:2005-03-14 编辑:马敏峰)