

# 一维周期与准周期排列沟槽结构的 流体减阻特性研究\*

王晓娜 耿兴国 臧渡洋†

(西北工业大学理学院, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 西安 710129)

(2012年9月11日收到; 2012年11月4日收到修改稿)

本文设计了具有相同平均沟槽密度的三种排列类型的一维沟槽结构: 密排列、周期间隔排列和两种准周期间隔排列, 并采用数值模拟和实验验证相结合的方法研究了一维沟槽结构在不同排列下的流体减阻特性. 模拟计算分析流场特征和总阻力, 发现相对于密排列和周期间隔排列的沟槽结构, 准周期间隔排列具有更好的减阻特性, 并且这一结果得到减阻实验的验证. 通过流场分布特性进一步分析沟槽结构的减阻机理. 机理分析发现高速流在经一维准周期结构的扰动波调制后形成了准周期间隔排列的速度条纹相, 这有效地抑制了大涡在流向和展向上的形成, 从而实现较大幅度的减阻. 同时对比分析沟槽排列结构调制展向涡和流向涡各自对流动减阻的贡献, 结果表明, 调制流向涡对减阻的作用更大.

**关键词:** 流体减阻, 沟槽结构, 准周期

**PACS:** 47.11.Fg, 47.27.ek, 47.85.lb

**DOI:** 10.7498/aps.62.054701

## 1 引言

在水下航行器高速行进过程所引起的流阻中, 表面摩擦阻力所占比例最大<sup>[1-3]</sup>, 因此如何最大限度的减少表面摩擦阻力, 对于节能降耗具有非常重要的意义. 目前, 减小表面摩擦阻力的方法主要包括: 聚合物添加剂减阻<sup>[4,5]</sup>, 疏水涂层减阻<sup>[6,7]</sup>, 仿生学结构减阻<sup>[8-10]</sup>和随行波减阻<sup>[11]</sup>. 特别是仿生学结构减阻, 不论是采取凹坑结构<sup>[12]</sup>还是沟槽结构<sup>[13,14]</sup>, 由于其稳定的减阻效果和易于实现的特性而得到比较系统的研究和广泛的关注. 如何设计具有良好减阻效果的仿生学结构, 成为流体减阻领域的研究热点.

目前, 关于仿生学非光滑表面结构减阻的相关研究主要集中在减阻结构的基元形状(沟槽, 凹坑, 分形)、基元密度、基元参数(宏观尺度和微观微米尺度)等方面, 其减阻机理一直都是该领域的争

论热点<sup>[15-17]</sup>. 一种观点认为仿生学结构的非光滑表面可以降低速度梯度和湍流强度, 从而减少表面摩擦阻力. 另一种观点认为表面结构能保持低速静态流, 抑制湍流的生成从而减少总阻力. 还有一种观点认为减阻主要通过二次涡实现, 二次涡形成类似轴承的滚珠, 从而减少了流体与物体表面的实际接触面积, 也减小了流体与物体表面的摩擦阻力.

尽管关于流动减阻的结构设计以及减阻机理已经进行了一定的研究, 但前期的研究工作多集中于减阻基元的周期性排列<sup>[18]</sup>. 而目前已证实, 准晶材料表面往往具有很低的表面能, 而常用于不粘涂层和润滑等领域<sup>[19,20]</sup>. 基于此, 与准晶材料相类比, 减阻基元的准周期排列是否也具有更优的减阻效果? 其中包含何种特殊的减阻机理? 这种对减阻结构的准周期性排列的研究却很少<sup>[21]</sup>, 因此, 通过进一步的实验研究和计算模拟, 对比研究减阻基元在不同排列方式下的减阻效果, 进一步揭示准周期排列结构的减阻特性与机理, 具有重要的科学意义与

\* 国家自然科学基金(批准号:10872172)、陕西省自然科学基金(批准号: 2012JQ1016)、西北工业大学基础研究基金(批准号: JC20100242, JCY20130147)和研究生种子基金(批准号:2012234)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dyzang@nwpu.edu.cn

工程应用价值. 在我们前期工作<sup>[22,23]</sup>的基础上, 本文设计了具有相同平均沟槽密度的三种排列类型: 密排列、周期间隔排列和两种准周期间隔排列的一维沟槽结构, 利用数值模拟计算周期和准周期排列的沟槽结构的阻力分布特征, 并与实验测试的剪切应力进行对比验证. 进一步用数值模拟分别对比分析了密排列、周期间隔排列与准周期间隔排列的沟槽结构的流场特征, 揭示其对流体的作用特征, 探讨沟槽排列类型对减阻效果的影响规律, 分析其减阻机理.

## 2 实验与方法

### 2.1 沟槽结构设计

本文设计构建平均沟槽密度相同的三种排列类型的沟槽结构: 周期间隔序列、准周期间隔具有五重对称序列特征 (Fibonacci 数列) 和具有十二重对称序列特征 (Dodecanacci 数列)<sup>[24]</sup> 的沟槽结构. 在周期序列中, 将宽度为  $W$  的沟槽按照同一间距  $A$  来排列, 如图 1(a) 所示. 对准周期序列, 用宽度同样为  $W$  的沟槽按照两个间距: 长间距  $L$  和短间距  $S$  来排列. 其中, Fibonacci 序列中

$L$  和  $S$  有序排列且满足  $L \rightarrow LS, S \rightarrow L$  的变换规则, 组成了 Fibonacci 函数  $f_n$  链, 则每个  $f_n$  链函数项中包含的  $L$  的个数  $l$  与  $S$  的个数  $s$  之和为数列项  $F_n = l + s$ , 且  $F_n$  均满足 Fibonacci 数列递增关系  $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ , 若令  $F_0 = 0, F_1 = 1$ , 可递推所有  $F_n$ , 取  $L/S = \tau$ , 则  $\lim_{n \rightarrow \infty} F_n/F_{n-1} = \tau = (1 + \sqrt{5})/2$ , 这种替换操作表明按 Fibonacci 的  $f_n$  链函数项中包含的  $L$  及  $S$  呈长程有序的准周期性; Dodecanacci 序列中  $L$  和  $S$  有序排列且满足  $L \rightarrow LLSSS, S \rightarrow LSS$  的变换规则, 组成了 Dodecanacci 函数  $d_n$  链, 则每个  $d_n$  链函数项中包含的  $L$  的个数  $l$  与  $S$  的个数  $s$  之和为数列项  $D_n = l + s$ , 且  $D_n$  均满足 Dodecanacci 数列递增关系  $D_n = 4D_{n-1} - D_{n-2}$ , 若令  $D_0 = 0, D_1 = 1$ , 可递推所有  $n \geq 2$  的  $D_n$ , 取  $L/S = \sqrt{3}$ ,  $\lim_{n \rightarrow \infty} D_n/D_{n-1} = \rho = (2 + \sqrt{3})$ , 这种替换操作表明按 Dodecanacci 的  $d_n$  链函数排列的  $L$  及  $S$  呈长程有序的准周期性, 如图 1(b) 和 (c) 所示. 本文中,  $W$  为 2 mm, 并且, 在各种排列结构中, 第一个槽的位置和最后一个槽的位置相同, 即相对于最左端间距皆为 10 mm, 相距最右端的距离也皆为 10 mm, 而沟槽总数相同, 以此来使三种排列的沟槽结构具有相同的平均沟槽密度.

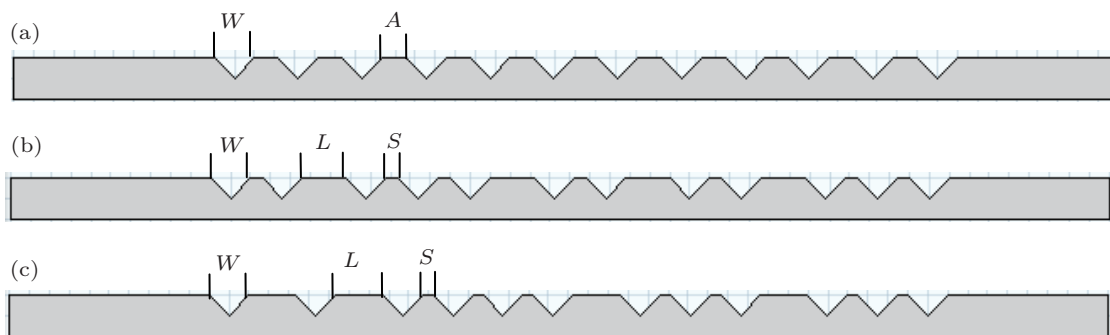


图 1 沟槽结构的不同排列方式 (a) 周期; (b) 准周期五重; (c) 准周期十二重的示意图

### 2.2 流体力学计算前处理

本文采用的计算流体仿真软件为 COMSOL Multiphysics. 在计算流体动力学 (CFD) 模块单相流模式下选择雷诺平均 N-S (Navier-Stokes) 方程

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -pl + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\rho\kappa l \right] + F \quad (1)$$

和 RANG  $k-\varepsilon$  的湍流模型,

$$\rho(u \cdot \nabla)\kappa = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + p_\kappa - \rho\varepsilon, \quad (2)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{\kappa} p_\kappa - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \rho, \varepsilon = \varepsilon p. \quad (3)$$

另外, 流体的运动满足连续性方程

$$\rho \nabla \cdot u = 0, \quad (4)$$

式中, 湍动黏性系数和湍动生成相为  $\mu_T = \rho c_\mu \frac{\varepsilon^2}{\kappa}$ ,  $p_\kappa = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)]$ . 其中常数分别为  $c_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $c_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $c_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_\kappa = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $\kappa_\nu = 0.41$ ,  $B = 5.2$ .

图 2 以模拟密排列的沟槽结构展示了所构建的三维计算模型, 其他不同排列的沟槽结构均在此计算域中进行排列. 其中计算域展向  $x$  长度为 55 mm, 流向  $y$  长度为 160 mm, 垂向  $z$  高度为 3 mm.

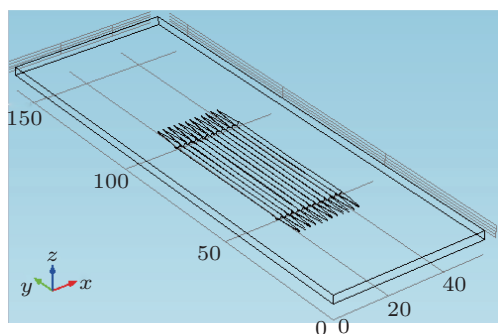


图 2 计算域示意图

为便于比较, 将不同排列的沟槽结构置于相同的计算域中进行模拟, 且将平板和不同沟槽结构面的样板置于同一流场中. 同时, 为简化并提高计算精度, 仅在底部 ( $z = 0$ ) 设置了一系列不同排列的结构面, 计算流域的顶部、左边界和右边界皆为光滑面. 其中底部的结构面被设置为壁函数边界条件, 即无滑移边界条件. 另三个光滑面为滑移边界条件, 即可认为不受其他物理表面约束的对称边界条件. 此外, 为分析研究湍流流动状态, 在入口处除设定了速度外, 还指定了湍流强度  $I_T = 0.05$ . 对于出口, 则选择压力  $P = 0$ 、无黏性应力, 来消除狄氏条件在压力上对黏性应力的限制.

为研究边界湍流状态下的流体减阻特性, 本文选择流体动力学模式, 采用有限体积法离散生成网格. 而针对存在的基元尖角, 难以采用高质量的结构化网格, 为了适应这种非光滑表面的复杂结构, 本文采用自由剖分四面体非结构化的网格在计算域内进行网格填充. 经过反复的尝试, 网格的尺寸确定为: 流向和垂向分别等间距划分 160 个和 4 个网格点. 中心处 (即沟槽结构上方域) 网格较密, 从中心向两边网格长度以 0.87 的比例逐步减小. 在沟槽内部网格划分得较为密集 (曲率解析度为 0.6, 狭窄域的解析度为 0.7).

## 2.3 剪切应力测试

沟槽结构的减阻效果采用锥板式流变仪 ( $R/S+$  rheometer, Brookfield) 进行测试, 如图 3 所示, 所选用的转子半径  $R$  为 25 mm, 转子母线角度  $\theta_0$  为  $1^\circ$ , 测试温度由 Peltier 控温系统控制, 约为  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . 实验采用甘油和水混合液 ( $V_{\text{甘油}} : V_{\text{水}} = 2 : 1$ ) 作为测试液体, 其黏度值  $\eta = 0.0288 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . 将适量的测试液置于不同表面结构的样板上进行剪切应力  $\sigma$  测量实验. 由于样板结构的变化引起流体流动状态的改变, 因而壁面剪切应力会相应的发生变化. 根据所测剪切应力的大小, 即可实现测定表面结构引起流体减阻的目的. 实验过程中剪切速率  $\dot{\gamma}$  范围为  $200\text{--}2000 \text{ s}^{-1}$ , 剪切应力测量误差小于 3%.

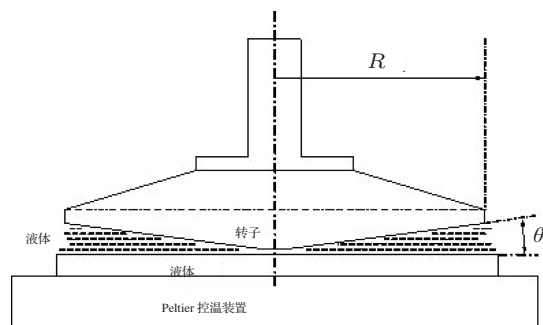


图 3  $R/S+$  rheometer 流变仪

## 3 结果及分析

### 3.1 结构表面流场

进行流场分析时, 由于选用稳态求解器, 因此各参数不随时间变化, 该计算域的流场稳定. 图 4 给出了各种沟槽结构在横截面 ( $z = 0$ ) 上的速度分布图. 由图可知, 沟槽结构的排列方式对湍流状态具有明显的影响. 通过对比图 4(a) 和 (b), 可以看出不论在沟槽域, 还是在出口处, 按周期间隔排列的沟槽面中高速域要远大于密排列的. 值得指出的是, 相对于密排列的沟槽面, 按周期间隔排列的沟槽面中出现了高速带与低速带间隔分布的条纹相. 对比图 4(b) 和 (c), (d), 可以得出在沟槽出口处, 相比于周期间隔排列的沟槽结构面, 准周期五重和准周期十二重间隔排列的沟槽面中不仅有更多的高速带, 而且高速条纹相可延伸到出口处, 即速度条纹相的完整性更好.

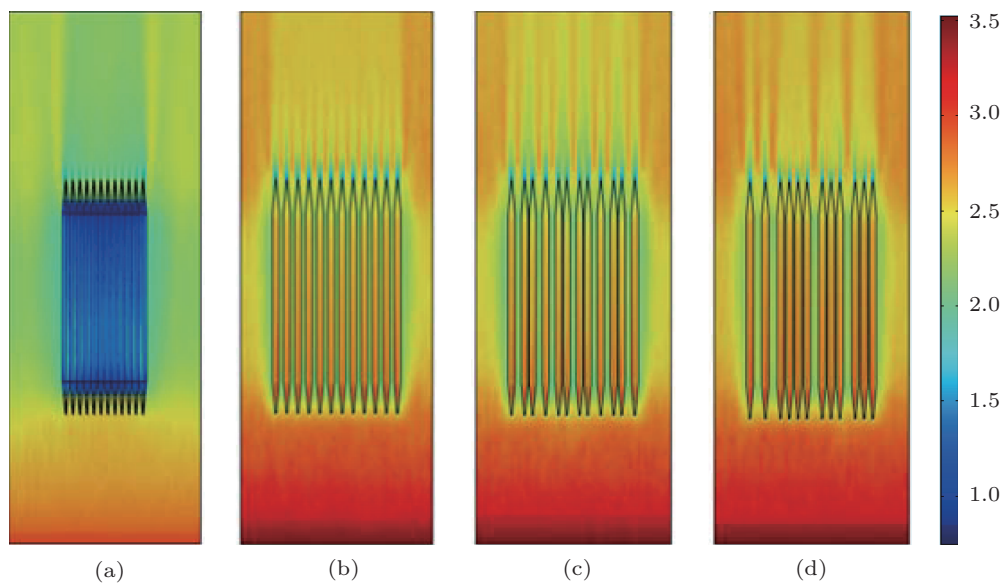


图4 不同排列沟槽结构的速度分布 (a) 密排列; (b) 周期; (c) 准周期五重; (d) 准周期十二重

### 3.2 减阻特性的数值模拟

为研究不同排列的沟槽结构的减阻特性, 对结构面所受的摩擦阻力进行分析. 本文采用面积分方法来研究沟槽面上的摩擦阻力值

$$f = \iint \sigma dx \cdot dy, \quad (5)$$

其中  $\sigma$  为剪切应力. 其数值计算结果如图 5 所示. 由图 5 可知, 不同排列的沟槽结构其摩擦阻力均小于平板的阻力值. 特别是, 间隔排列沟槽结构的摩擦阻力比密排列的更小, 而间隔排列的沟槽结构中又以准周期间隔排列的沟槽结构的阻力值最小.

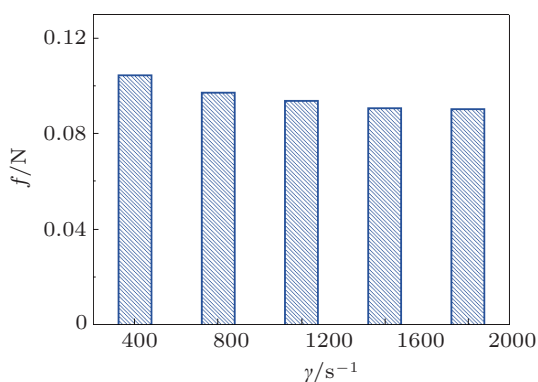


图5 密排列、周期间隔、准周期五重和准周期十二重间隔排列的摩擦阻力  $f$

为更好地比较不同结构的减阻效果, 定义摩擦

阻力的相对减小率

$$K_f = \frac{f_{\text{original}} - f_{\text{structured}}}{f_{\text{original}}}, \quad (6)$$

其中  $f_{\text{original}}$  与  $f_{\text{structured}}$  分别为光滑表面样板和不同沟槽结构板的摩擦阻力. 结果在图 6 中给出. 相对于密排列的沟槽结构, 间隔排列的沟槽结构有更好的减阻效果, 其  $K_f$  约为 10%. 特别是, 准周期十二重序列间隔排列的沟槽结构, 其相对减阻率可达 14%.

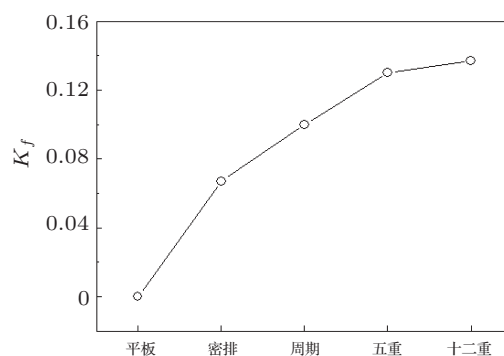


图6 密排列、周期间隔、准周期五重和准周期十二重间隔排列的相对减阻率  $K_f$

### 3.3 减阻特性的实验验证

利用剪切流变仪分别测试了无结构光滑样板、周期间隔排列和两种准周期间隔排列的剪切应力  $\sigma$ . 图 7 给出了不同结构所对应的剪切应力值. 各种测试样板上测得的剪切应力均随剪切速  $\gamma$ . 率线性

增加,这充分表明测试液体为牛顿流体.显然,结构板的剪切应力均小于无结构平板的剪切应力,按准周期序列间隔排列的沟槽结构板的剪切应力最小.这与计算模拟结构所得的结果相一致(图5).

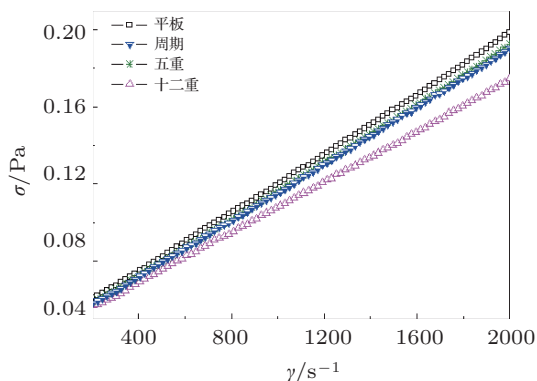


图7 平板、周期间隔、准周期五重和准周期十二重间隔排列的沟槽结构的剪切应力

与(6)式相类似,定义剪切应力的相对减小率  $K_\sigma$  来表征减阻效果

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\text{original}} - \sigma_{\text{structured}}}{\sigma_{\text{original}}}, \quad (7)$$

其中  $\sigma_{\text{original}}$  与  $\sigma_{\text{structured}}$  分别为光滑表面样板和不同沟槽结构板所对应的剪切应力.计算所得的  $K_\sigma$  在图8中给出.当剪切速率从  $200 \text{ s}^{-1}$  增加到  $2000 \text{ s}^{-1}$  时,按准周期五重序列和准周期十二重序列排列的沟槽结构,其相对减阻率分别为7.6%和15.6%.而按周期间隔排列的沟槽结构的相对减阻率仅为6.4%.尤其当剪切速率较小时( $\sim 220 \text{ s}^{-1}$ ),按准周期五重序列和准周期十二重序列间隔排列的沟槽结构,其相对减阻率分别可达21%和17.7%.此外,随着剪切速率的增加,剪切应力相应地增加,相对减阻率逐渐减小到某一恒定值.

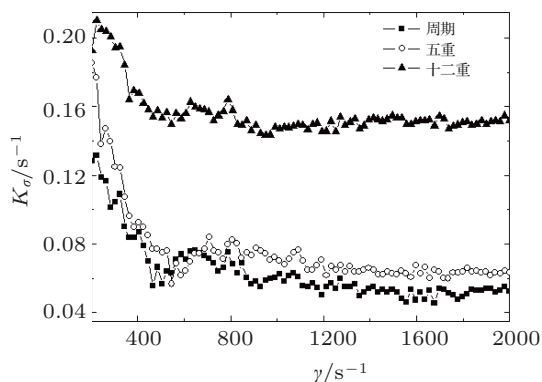


图8 平板、周期间隔、准周期五重和准周期十二重间隔排列的沟槽结构的相对减阻率

实验数据与模拟结果均表明,与周期排列的沟槽结构相比,准周期排列具有更好的减阻效果.特别是准周期十二重序列的沟槽结构表现出最佳的减阻性能.

## 4 减阻机理和原理分析

### 4.1 减阻机理分析

由于流体中产生的扰动是相干波,即流体与沟槽作用后的扰动波相干叠加,因此波在通过各种有序排列的沟槽结构后,波的谱带结构和谱强度会因相干叠加而进行重新分布.因此,当实际流体通过不同有序排列的沟槽结构时,流体的定向性和流动性会发生改变.本文通过计算模拟流体经过沟槽结构之后的流场,发现了流场中涡具有类似波的谱带结构.本文的一个重要思想就是通过研究流场中涡的谱带结构和谱强度,来分析讨论准周期结构的减阻机理.图9给出了沟槽结构的展向涡(图9(a)—(c))和流向涡(图9(d)—(f))的谱带结构和强度值分别在  $x$  与  $y$  方向上的变化规律.其中  $I_x$  和  $I_y$  分别为涡流在  $x$  和  $y$  方向上的强度.

由图9(a)和(b)可知,周期间隔排列的沟槽结构其展向涡的主级大强度约为  $-1350 \text{ s}^{-1}$ ,仅为密排列的  $\sim 1/3$ ,且各级强度分布得更为均匀.这就表明周期间隔排列的沟槽结构与流体的相互作用使能量相对分散,不易团聚而形成大涡结构,相对波动较小,使产生的摩擦阻力较小而实现减阻.这与结构表面流场的条纹相分析相一致<sup>[25,26]</sup>.展向涡可使随行波边界层内剪切应力减小,抑制湍流的促发,同时也使自由来流不与物体壁面直接接触,类似于“滚动轴承”,从而减小阻力<sup>[27]</sup>.比较图9(e)和(f)知,周期间隔排列的沟槽结构其流向涡在结构入口处(即  $y$  约为  $45 \text{ mm}$ )其主级大强度为  $-1000\text{—}1200 \text{ s}^{-1}$ ,约为准周期排列沟槽结构的两倍;在结构出口处(即  $y$  约为  $115 \text{ mm}$ )其强度范围为  $-1400\text{—}1200 \text{ s}^{-1}$ ,约为准周期的10.4倍.尤其在出口处,经准周期结构调制后的涡,其介于零级主级大和一级主级大之间的强度分布值,与一级主级大在总强度中所占量几近相同.这是由于经过准周期间隔排列的调制,流向涡的强度逐渐减弱,从而抑制流向涡对在展向上集结低速流体的能力,使得低速流体保留在沟槽内,阻止了流向涡的失稳.排列结构对流向涡的调制作用引起其强度的相对变化量为200%—500%,而对展向涡进行调制所引

起的相对变化量仅为 33%, 这就可以发现准周期排列结构对流向涡有更加明显的调制作用. 从而推断, 对流向涡的调制更有利于实现较程度上的减阻.

### 4.2 减阻原理

之前本课题组<sup>[28]</sup>为揭示准晶结构对流体的作用原理, 建立了等效栅纹模型来描述流体与沟槽的相互作用. 一维有序多缝栅纹的夫琅禾费衍射场的

强度分布为

$$I(\theta) = |u_0(\theta)|^2 \cdot |S(\theta)|^2, \quad (8)$$

式中  $u_0(\theta)$  为单缝的衍射因子,  $S(\theta)$  为有序结构排列影响因子, 它们各自表达式为  $u_0(\theta) = C \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha}$ ,  $\alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$ ,  $C$  为由单缝决定的常数,  $a$  为单缝宽度,  $\lambda$  为波长,  $\theta$  为衍射角;  $S(\theta) = \sum_j^N e^{i\delta_j}$ ,  $\delta_j = d_j \sin \theta$ .

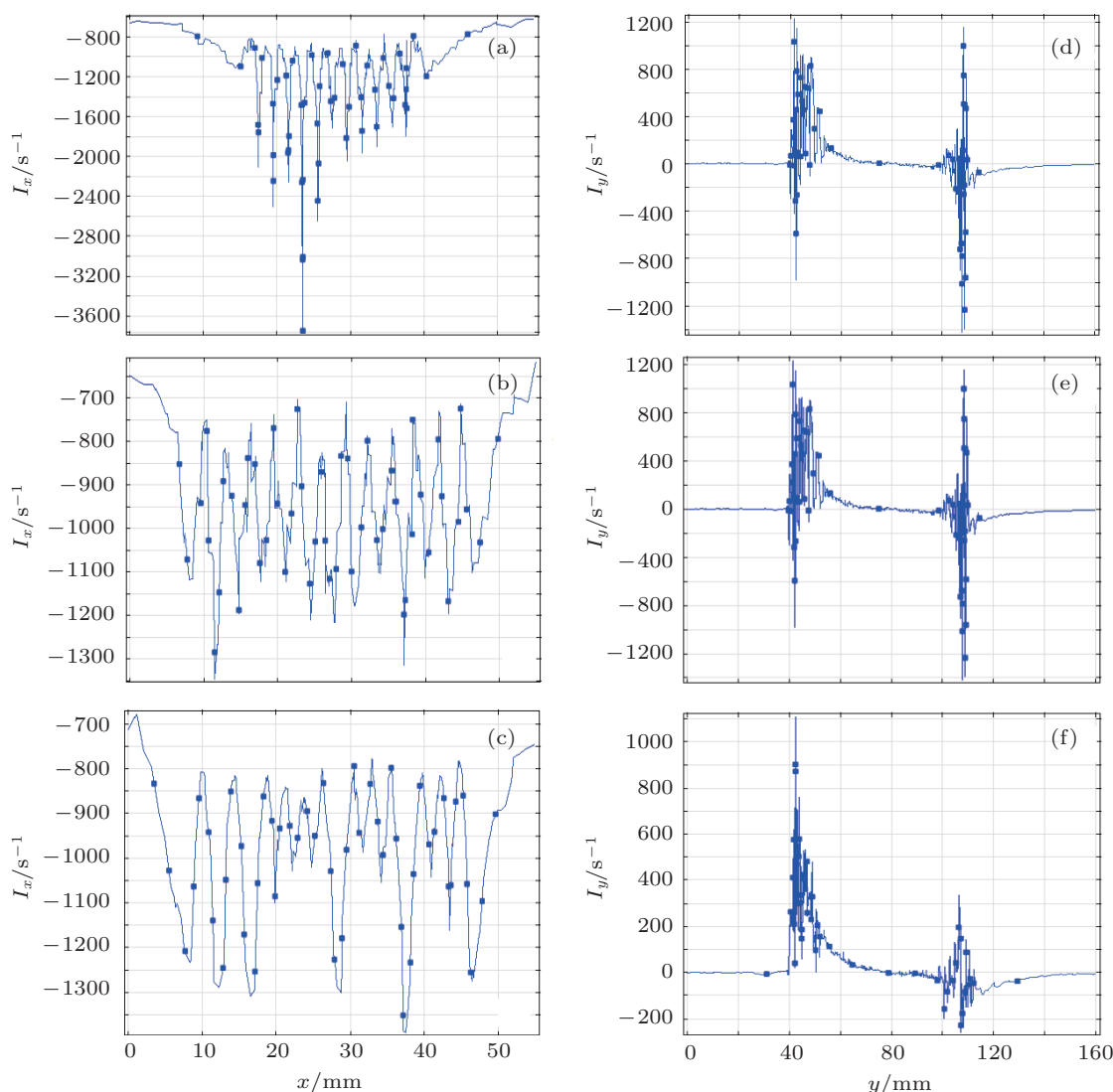


图9 沟槽结构的展向涡 ((a), (b), (c)) 和流向涡 ((d), (e), (f)) 强度 (a), (d) 密排列; (b), (e) 周期间隔排列; (c), (f) 准周期十二重间隔排列

利用等效栅纹模型所得结果在表 1 中给出. 模拟结果显示, 一维的准晶序列结构具有形成谱带结构的特性, 表现为区间内的谱强度分布具有发散角度小且幅度值趋向均匀的特征. 这与本文的流场模

拟结果相一致. 而谱带结构的形成, 意味着大涡的产生得到抑制, 从而有利于流动减阻. 这些结果表明, 准周期序列结构减阻是通过波/流动的特殊调制作用产生的, 这种调制作用仅依赖于减阻单元

的排列方式. 早期研究表明, 相比于周期性排列, 一维短沟槽复合结构<sup>[22]</sup>和凹坑减阻基元<sup>[23]</sup>也均在准周期排列时具有更好的减阻效果. 这说明减阻基元的准周期排列可更为有效地实现流动减阻, 这一结果具有一定的普适性. 当然, 其他减阻基元, 如U形、矩形和梯形沟槽、凸起或凹凸结构, 及其在更宽尺寸范围内是否具有同样的减阻行为, 还有待开展进一步的实验和流体计算研究来证实.

表1 不同结构的衍射波谱强度分布特征<sup>[28]</sup>

栅纹结构	介于0级主极大与1级主极大之间的强度分布 / %	1级主极大强度 / %
周期	4.44	37.22
Fibonacci 序列	8.83	24.68
Dodecanacci 序列	14.18	11.84

## 5 结论

采用数值模拟和实验测试相结合的方法研究

了不同排列类型的沟槽结构的流体减阻特性, 并结合流场涡谱与衍射波谱强度揭示了减阻机制和原理, 主要得到以下结论:

1. 采用数值模拟研究发现, 当流体流经周期间隔或准周期间隔排列的沟槽结构时, 其流场均出现高速带和条纹相. 其中按准周期序列排列的沟槽结构, 高速带更大, 条纹相可以延伸到出口处.

2. 数值计算分析了各种沟槽结构的摩擦阻力, 发现相对于密排列的沟槽结构, 间隔排列的沟槽结构具有更好的减阻效果. 按准周期五重序列和准周期十二重序列间隔排列的沟槽结构, 其减阻效果最好. 这与实验测定结果相一致.

3. 结合衍射波谱强度分布研究, 从展向涡和流向涡的特性分析了密排列、周期间隔和准周期间隔排列的沟槽结构的减阻机理, 发现高速流动在经一维准周期结构的扰动波调制后, 有效地抑制了大涡和大的速度脉动形成, 从而实现了减阻. 对流向涡的调制更有利于实现较大程度的减阻.

- [1] Philips A B, Turnock S R, Furlong M 2010 *Journal of Engineering for the Maritime Environment* **224** 239
- [2] Viswanath P R 2002 *Progress in Aerospace Sciences* **38** 571
- [3] Ke G X, Pan G, Huang Q G, Hu H B, Liu Z Y 2009 *Advances in Mechanics* **39** 5 (in Chinese) [柯贵喜, 潘光, 黄桥高, 胡海豹, 刘占一 2009 力学进展 **39** 5]
- [4] Iaccarino G, Shaqfeh E S G, Dubief Y 2010 *J. Non-Newtonian Fluid Mech* **165** 376
- [5] Elyukhina I, Khomyakov A 2011 *J. Phys.: Conf. Ser* **318** 092013
- [6] McHale G, Newton M I, Shirtcliffe N J 2010 *Soft Matter* **6** 714
- [7] Wang X L, Di Q F, Zhang R L, Ding W P, Gong W, Chen Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 216801 (in Chinese) [王新亮, 狄勤丰, 张任良, 丁伟朋, 龚玮, 程毅翀 2012 物理学报 **61** 216801]
- [8] Jung Y C, Bhushan B 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 035104
- [9] Bhushan B, Jung Y C 2011 *Progress in Materials Science* **56** 1
- [10] Malaspina D C, Schulz E P, Alarcón L M, Frechero M A, Appignanesi G A 2010 *The European Physical Journal E* **32** 35
- [11] Ceccio S L 2010 *Annual Review of Fluid Mechanics* **42** 183
- [12] Choi J, Jeon W P, Choi H 2006 *Phys. of Fluids* **18** 041702
- [13] Walsh M J 1982 *AIAA* **82** 0169
- [14] Lee S J, Lim H C, Han M, Lee S S 2005 *Fluid Dynamics Research* **37** 246
- [15] Zhang C C, Wang J, Shang Y G 2010 *Science China Technological Sciences* **53** 2954
- [16] Park S R, Wallace J M 1994 *AIAA J.* **32** 31
- [17] Choi K S 1989 *J. Fluid Mech.* **208** 417
- [18] Minetti A E, Machtsiras G, Masters J C 2009 *Journal of Biomechanics* **42** 2188-2190
- [19] Sun M, Tian J, Li Z Y, Cheng B Y, Zhang D Z, Jin A Z, Yang H F 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 486
- [20] Zhou P Q, Dong C H, Cao Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6470 (in Chinese) [周培勤, 董纯红, 曹永军 2006 物理学报 **55** 6470]
- [21] Shechtman D, Blech I A, Gratias D, Chan J W 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1951
- [22] Zhang M, Geng X G, Zhang Y, Wang X N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194702 (in Chinese) [张盟, 耿兴国, 张瑶, 王晓娜 2006 物理学报 **61** 194702]
- [23] Gao P, Geng X G, Ou X L, Xue W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 421 (in Chinese) [高鹏, 耿兴国, 欧修龙, 薛文辉 2009 物理学报 **58** 421]
- [24] Guo K X 2004 *Quasiperiodic Crystals* (Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press) **12** p 70 (in Chinese) [郭可信 2004 准晶研究 (杭州: 浙江科学技术出版社) **12** p70]
- [25] Choi K S 2006 *Nature* **440** 754
- [26] Fransson J H M, Talamelli A, Brandt L, Cossu C 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 064501
- [27] Bacher E V, Smith C R 1985 *AIAA Paper* **85** 0548
- [28] Xue W H, Geng X G, Li F, Li J, Wu J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104703

# Drag-reduction of one-dimensional period and quasiperiod groove structures\*

Wang Xiao-Na Geng Xing-Guo Zang Du-Yang<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 11 September 2012; revised manuscript received 4 November 2012)

## Abstract

We design three types of groove structures which are arranged in closely-packed array (space free), periodic and quasiperiodic orders. The drag reduction properties of these structures are studied by numerical simulations and experimental shear stress measurements. Particularly, the effect of groove arrangement on the drag reduction is elucidated. Based on both the numerical and experimental results, it is found that the quasiperiodic arrangement can obtain more effective drag reduction than the close-packed groove structure and periodic structure. The underlying mechanism of the drag reduction is analyzed by vortex redistribution caused by the groove structures. The high-speed flow can be modulated by the disturbance wave resulting from the quasi-periodic groove structure, forming stripe-like flow patterns arranged in quasiperiodic style. This restrains the formation of big vortex in both the spanwise and the streamwise directions, hence leading to substantial drag reduction. Furthermore, the modulation effect on the streamwise vortex is more remarkable than on spanwise vortex, suggesting that the modulation of streamwise vortex plays a more important role in the drag reduction.

**Keywords:** drag reduction, groove structure, quasiperiod

**PACS:** 47.11.Fg, 47.27.ek, 47.85.lb

**DOI:** 10.7498/aps.62.054701

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10872172), the Shanxi Provincial Natural Science Foundation (Grant No. 2012JQ1016), NPU Foundation for Fundamental Research (Grant Nos. JC20100242, JCY20130147) and the Graduate Starting Seed Fund of NPU (Grant No. Z2012234).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dzyang@nwpu.edu.cn