

波流边界层的大涡模拟及其统计特性¹⁾

钟艳玲 周济福 张强

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

波流边界层是河口海岸环境中的一种典型流动。海底边界层、海洋结构物附近的流动均是受波和流共同影响的波流边界层。影响沿海地区环境演化的污染物、营养盐等标量物质输运都强烈依赖于波流边界层的流动特性。由于波流的非线性作用, 这种流动较单向槽道流和纯波引起的近壁振荡边界层要复杂得多, 以往研究大多只涉及到平均量而不能给出湍流场内的瞬时脉动信息。因此, 关于波流边界层湍流特性的研究具有重要意义。

采用迭加了一个定常速度的振荡平板所诱导的水流运动模拟波流边界层, 运用基于非均匀网格的大涡模拟方法和 Smagorinsky 亚格子模型, 并引用 Van Driest 函数考虑壁面衰减效应, 来模拟波流边界层中的湍流运动, 利用 DNS 结果和实验数据检验了 LES 模型和结果。在此基础上建立了不同波雷诺数, 不同波流比情况下的若干大涡模拟数据库, 并分析波流边界层中各种湍流统计量的变化规律, 如速度廓线、剪应力、湍流强度、高阶矩等的空间分布和时间过程。

以波雷诺数 $Re_w = u_w \delta / \nu$ (其中 u_w 为波浪诱导的底部水质点速度振幅, δ 为 Stokes 厚度, ν 为水的黏性系数) 和波流比 u_c / u_w (u_c 为流分量速度) 作为描述波流边界层的两个无量纲参数, 分析了流动参数变化时, 边界层内统计量的变化情况。对于波边界层, 流体质点在一个周期内将等时反向地经历两次“减速-加速”过程(图 1 中 a 线),

而对于波流边界层, 当 $u_c / u_w < 1$ 时, 虽然流体质点仍经历两次“减速-加速”过程, 但减速和加速的时间已然不等(图 1 中 b 线), 当 $u_c / u_w \geq 1$ 时, 流体图 1 不同波流比时, 底部流体质点速度的周期过程质点在一个周期内将只经历一次“减速-加速”过程(图 1 中 c 线), 这种流动过程的改变, 导致了波流边界层与波边界层的显著差异。波流比较小时, 流分量较小, 波所诱导的边界层起主导作用, 流动接近于纯振荡的情形; 波流比越大, 流分量的作用越显著; 当波流比远大于 1 时, 流所诱导的边界层占主导地位, 流动接近于单向槽道流。当波雷诺数相同时, 波流比越大, 剪应力、湍流强度都随之增加; 当波流比相同时, 波雷诺数越大, 由于无量纲化采用的速度亦较大, 则得到无量纲剪应力和无量纲湍流强度减小, 这与纯振荡流中所得规律相同。在一个周期中, 波诱导的底部质点速度有两次反向, 因此波分量与流分量或同向或逆向迭加。当波流分量同向迭加时, 雷诺应力和湍流强度沿垂向分布基本单调, 最大值在近壁处; 当波流分量逆向迭加时, 雷诺应力和湍流强度的最大值在距离壁面 $10\delta \sim 50\delta$ 处。雷诺应力和湍流强度的周期过程不对称, 其最大值出现在波流分量同向迭加的相位。在雷诺应力与速度之间存在相位差, 且此相位差随波雷诺数的增加而减小, 这是因为波雷诺数越大, 则波动频率越小, 流动对波动的响应时间相对整个周期来说越短的缘故。

进一步分析了波流边界层湍流场脉动速度的分布特征, 脉动速度 3 阶矩(偏斜因子)和 4 阶矩(平坦因子)的空间分布结果表明, 波雷诺数越大, 或波流比越大, 则高阶矩更趋向于正态分布的相应值, 流动更趋于各向同性湍流, 壁面附近尤为明显。而从高阶矩的周期过程来看, 波雷诺数越大, 波流比越大, 则湍流脉动速度概率分布越接近于正态分布, 且近似于正态分布的流动时段越宽, 这种规律在速度最大的相位即波流分量同向迭加的相位附近更加明显。

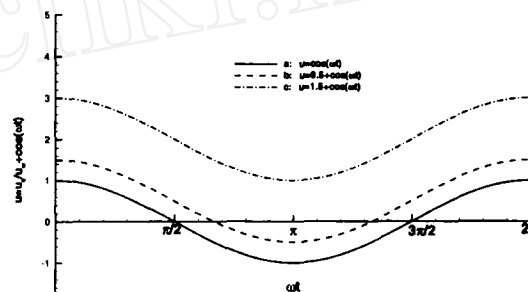


图 1

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目 (10332050)