

基于滑移边界的沟槽模化方法以及应用研究

张悦¹, 蔡晋生¹, 李文丰^{1*}

¹西北工业大学航空学院流体力学系, 西安, 710072

*w.li@nwpu.edu.cn.

摘要

本文提出了一种简单高效的适用于真实飞机外形的沟槽微结构模化方法。该模化方法基于沟槽微结构对平均流动产生的壁面滑移的概念, 避免了复杂边界条件的限制, 可以同时满足减阻和增阻沟槽的模化要求。首先验证了该边界模化方法复现布置减阻沟槽的槽道流的准确性。基于直接数值模拟的计算结果表明, 应用该壁面模化方法可以准确的复现直接数值模拟的布置沟槽的槽道流的一阶和二阶湍流统计量以及对应的沟槽减阻率; 基于大涡模拟的计算结果表表明, 该模化方法可以复现槽道流的减阻率和一阶统计量; 而基于雷诺应力模型的计算结果表明, 该滑移边界可以复现一阶湍流统计量以及对应的沟槽减阻率。最后, 将该模化方法应用在平板边界层减阻模化计算中, 计算结果表明该边界模化方法可以较为准确的复现布置减阻沟槽的平板边界层的减阻率和速度型等参数。

滑移边界沟槽模化方法

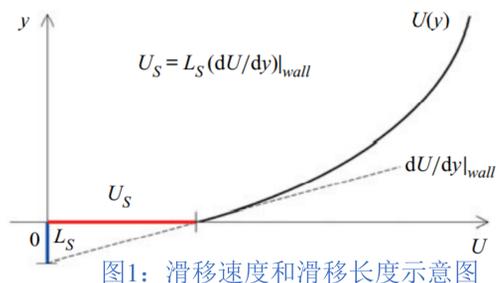


图1: 滑移速度和滑移长度示意图

1、滑移速度(滑移长度)边界:

Navier滑移边界条件(Navier 1823)是在假设展向滑移相对较小的情况下, 模拟流向方向上减阻的湍流流动的方法之一。公式为 $u_s = L_s (du/dy)|_{wall}$ 。如图1所示, 其中 u_s 为滑移速度, L_s 为滑移长度, 对于稳定的流动来说, 均可作为模化减阻沟槽的中间量。

2、减阻率代理模型

对于固定几何外形的沟槽, 可以用二次函数拟合减阻率代理模型。根据Walsh[1]的实验数据, 拟合得到的减阻率和沟槽无量纲几何 s^+ 的函数关系为:

$$DR = 0.05646(s^+)^2 - 1.317s^+ + 0.205$$

拟合函数和实验数据的对比如图2(a)所示。对于同一种外形但是几何形状不同的沟槽, 可以用相应面代理模型拟合减阻率和三角形沟槽参数 s^+ 和 h^+ 之间的关系。用kriging模型拟合的减阻率响应面如图2(b)。

3、减阻率和滑移速度之间的关系推导

除近壁面外, 沟槽不影响边界层的速度型分布, 因此滑移速度和对数区的速度型偏移近似相等。通过分析减阻率关系式和摩擦系数公式, 可以得到滑移速度和减阻率之间的关系为:

$$U_s^+ = \Delta U^+ = -\langle u \rangle_{sm}^+ \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1+DR}}\right)$$

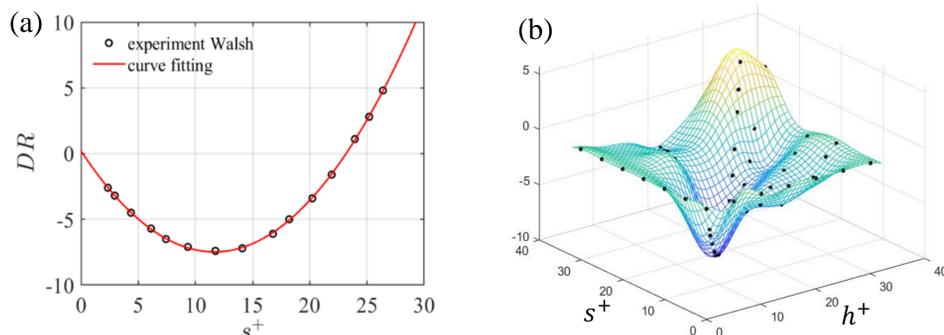
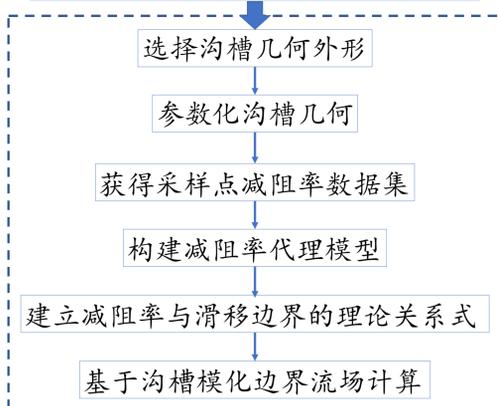


图2: 减阻率代理模型: (a) 减阻率二次函数拟合曲线; (b) 减阻率曲面代理模型。

4、模化方法路线图:

所提出的沟槽模化方法的计算流程如下。首先选择需要模化的沟槽的几何外形, 然后根据沟槽的几何特点提取关键几何模化参数。其次选择采样点并采用实验或数值计算得到减阻率数据集。采用数据拟合或构建响应面的方法建立沟槽减阻率代理模型, 并建立减阻率与滑移边界的理论关系式。最后进行基于沟槽模化边界的流场计算。

滑移边界沟槽模化方法路线图



模化方法验证

1、DNS验证:

通过对比沟槽湍流槽道流动和光滑槽道流[2]的直接数值模拟结果如图3(a)和(b)所示。模化沟槽的减阻率为10%, 速度型偏移 $U_s^+ = \Delta U^+ = 1$ 。对比结果表明, 除粘性底层为受到沟槽展向各向异性影响的区域外, 直接数值模拟和模化方法得到的结果基本吻合。

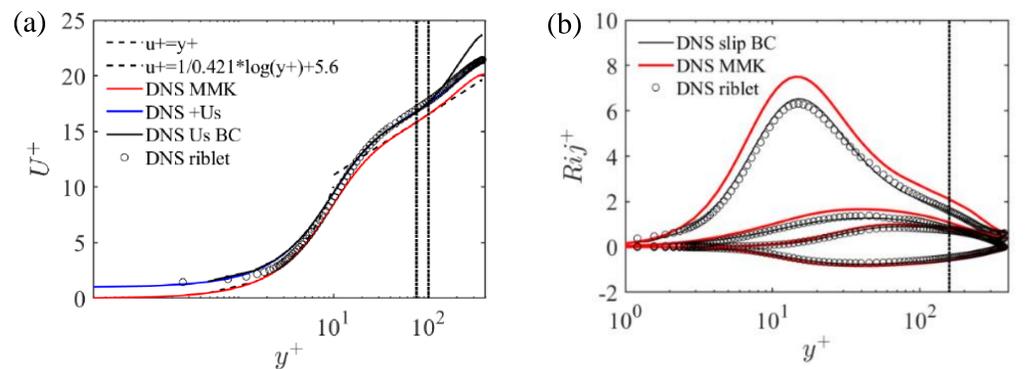


图3: 模化边界和DNS沟槽计算结果对比: (a) 壁面单位归一化平均速度型. (b) 壁面单位归一化平均雷诺应力对比。

2、LES验证:

分别针对减阻和增阻的情况, 采用大涡模拟的方法对该模化方法进行验证, 采用的亚格子模型为Smagorinsky模型。对于 $Re_\tau = 395$ 的槽道流, $U_s^+ = 1$ 对应的减阻率为10%, $U_s^+ = -1$ 对应的增阻率为10%。如图4所示, 对数区的速度型偏移均复现的较好, 缓冲区受到湍流模型的影响和DNS结果存在一定的差距。

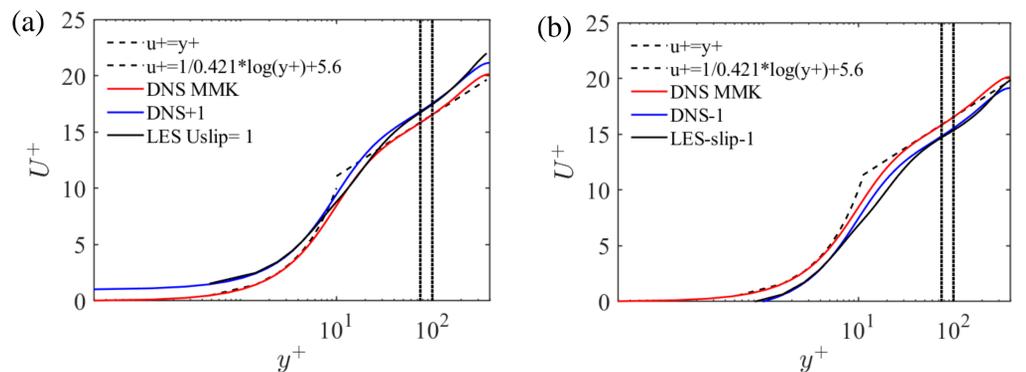


图4: 模化边界壁面单位归一化速度型对比: (a) 减阻率为10%. (b) 增阻率为10%。

3、RANS验证:

验证滑移速度边界在二维湍流平板边界层中的计算结果。平板边界层雷诺数为 $Re_x = 1 \times 10^7$, 湍流模型为 $k-w$ SST模型, $U_\infty = 69.4m/s$, 在网格量为 449×385 。设置不同沟槽几何得到N组结果, 为了消除边界层前段发展区的影响将平板末端的减阻率和实验值作比较。下图可以看出, 在不同的沟槽参数下, 是实验减阻率“Walsh”和计算减阻率“present”基本吻合。

图(b)对光滑和模化平板边界层速度型进行对比。该位置的滑移速度为 $U_s^+ = 1$, 可以看出模化速度型准确复现了减阻速度型。

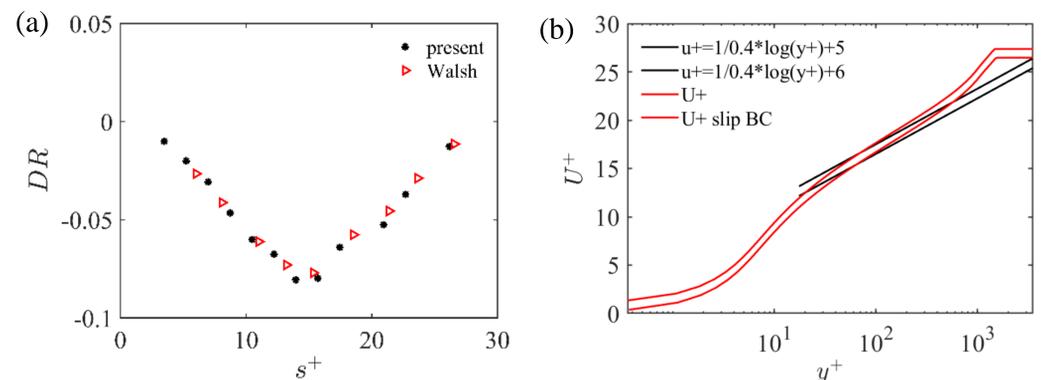


图5: 平板边界层减阻率和速度型对比: (a) 实验和计算减阻率. (b) 光滑平板边界层和模化边界层速度型对比。

结论

本工作研究了沟槽模化滑移边界条件以及其在槽道和零压力梯度平板边界层中的应用。首先根据滑移速度和沟槽的几何之间的关系构建了减阻率代理模型, 通过分析减阻率关系式和摩擦系数公式, 可以得到滑移速度和减阻率之间的关系。通过和沟槽DNS计算的结果进行对比, 证明该模化方法可以准确的复现减阻沟槽的一阶和二阶统计量以及减阻率。对比槽道模化沟槽LES计算的速度型和减/增阻率同样证明了该模化方法可以用于LES模型。最后, 平板边界层的计算结果表明, 该模化方法可以用于RANS模化沟槽的计算中, 减阻率和速度型的对比结果可以看出该模化方法的正确性。