

一种非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构湍流减阻特性研究

魏俊东, 田 军, 屈建飞

中国船舶集团公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌

收稿日期: 2022年7月18号; 录用日期: 2022年8月2号; 发布日期: 2022年8月22号

摘 要

本文基于柔性壁减阻技术, 设计了一种非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构, 其由非均匀弹簧阵列和蒙皮两部分组成。首先, 由Falknar-Skan方程和混合长度理论推导得到非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构在湍流边界层下的速度型控制方程; 然后, 将速度型控制方程导入Matlab进行计算, 得到结构的湍流边界层速度型; 最后, 根据蒙皮结构的减阻效果与湍流边界层速度型变化的相关性, 对结构减阻特性进行分析。结果表明, 非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的减阻性能优于单层蒙皮结构和均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构。另外, 减小弹簧刚度、减小蒙皮材料的阻尼和刚度可以提高结构的减阻效果。

关键词

柔性壁减阻, 湍流, 速度型

Research on Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Characteristics of Non-Uniform Spring Array Supported Skin

Jundong Wei, Jun Tian, Jianfei Qu

Yichang Testing Technique Research Institute, Yichang Hubei

Received: Jul. 18th, 2022; accepted: Aug. 2nd, 2022; published: Aug. 22nd, 2022

Abstract

Based on the drag reduction technology of flexible skin, a skin structure supported by non-uniform

spring array is proposed, which consists of non-uniform spring array and the skin on top. The control equation of velocity characteristic of the structure under turbulent flow is derived by using Falkner-Skan equation and mixing length theory. Control equation is then solved using Matlab, and the velocity characteristic of the structure is obtained. According to the correlation between the drag reduction effect of skin structure and the change in velocity characteristic, the drag reduction characteristics of the structure are analyzed. The results show that the proposed structure has a better drag reduction effect than simple skin structure and uniform spring array support skin structure. In addition, reducing the stiffness of the spring and the damping and stiffness of the skin material can improve the drag reduction effect of the structure.

Keywords

Flexible Skin Drag Reduction, Turbulent Flow, Velocity Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水面与水下航行器的减阻一直以来都是相关领域研究的焦点与难点，柔性壁减阻技术由于不需要对航行器结构进行更改，能适用于大部分壳体形状等优点，逐渐成为研究热点之一。

柔性壁减阻最早来源于 1960 年 Kramer [1] 的研究。他模拟海豚表皮，提出了使用柔性结构可延迟层流向湍流的转捩。Riley 等人 [2] 在 1988 年提出了一种均匀分布的弹性支撑蒙皮结构，其由柔性蒙皮和均匀布置的离散弹性支撑组成。他们通过实验测量得出，所设计的结构可以有效抑制流场中扰动。

由于湍流流动的复杂性，目前对于湍流中的减阻研究大多是以数值计算、实验分析的方式进行的。1993 年 Lee 等人 [3] 通过观察粘弹性柔性平板上湍流边界层，发现柔性壁和边界层在一定雷诺数范围内 (1700~3000) 相互作用，使湍流边界层对数区发生了明显的上移现象。1997 年，Choi 等人 [4] 再一次通过实验证实了减阻效果与速度型对数区变化的相关性。2002 年，赵汉中 [5] 通过数值分析，在理论上证实了上述湍流边界层速度型变化和减阻效果的关联具有普适性。2010 年，陈冰鹤 [6] 使用优化后的 Falkner-Skan 对湍流求解，其结果与试验数据相匹配。2012 年，罗敏和胡建成 [7] 进一步验证了 Falkner-Skan 方程求解的准确性。2018 年，郝路亭 [8] 对蒙皮结构进行仿真和试验验证，证明了蒙皮结构具有减阻能力。

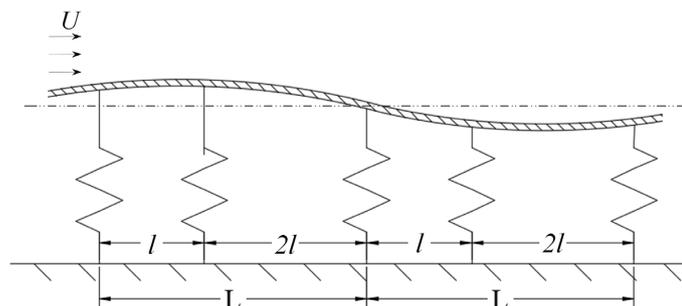


Figure 1. Physics model of non-uniform spring array supported skin
图 1. 非均匀弹簧支撑蒙皮结构物理模型

本文首先设计了一种非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构，并根据湍流边界层速度型对数区变化与减阻效果存在的相关性，验证该结构具有的减阻特性，以及各结构参数变化对减阻效果的影响。

2. 非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构物理模型

非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构主要由下层的非均匀布置的弹簧阵列和上层的蒙皮材料两部分组成，如图 1 所示。弹簧阵列固定在刚性表面上，沿流体流动方向按照 1:2 的距离间隔布置，而垂直于流体流动方向均匀布置；蒙皮固定在弹簧阵列上。

3. 选取湍流边界层速度型

根据 Lee、赵汉中等人的研究成果[3] [5]，蒙皮结构减阻效果与其表面湍流边界层速度型存在关系。所以，可以通过分析湍流边界层速度型来研究非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构具备的减阻效果。

在分析边界层速度型之前，需要首先得到边界层速度型的控制方程。设边界层无量纲速度：

$$u = f'(y)$$

经过 Cebeci 和 Smith 坐标变换的湍流 Falknar-Skan 方程为：

$$\left[(1 + \epsilon^+) f'' \right]' + ff'' = 2\xi \left(f' \frac{\partial f'}{\partial \xi} - f'' \frac{\partial f}{\partial \xi} \right) \quad (1)$$

其中 f 为关于 η 的函数， ϵ^+ 为涡粘系数的无量纲形式。

根据混合长度理论， ϵ^+ 表达式为：

$$\epsilon^+ = \begin{cases} \frac{\nu}{U} k^2 (y^+)^2 \left(1 - e^{-\frac{y^+}{A^+}} \right)^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, & y^+ \leq y_i^+ \\ \alpha U \delta^*, & y^+ > y_i^+ \end{cases} \quad (2)$$

其中 δ^* 为排挤厚度， y_i^+ 为内层湍流与外层湍流的分界点， U 为边界层外流速， ν 为动力粘度。

为了方便计算，减少变量数量，设

$$\varphi = f - \eta$$

对式(1)做进一步变换如下：

$$(1 + \epsilon^+) \varphi''' + (\epsilon^+)' \varphi'' + (\varphi + \eta) \varphi'' = 2\xi \left[(\varphi + 1) \frac{\partial \varphi'}{\partial \xi} - \varphi'' \frac{\partial (\varphi + \eta)}{\partial \xi} \right] \quad (3)$$

变换完毕的式子，即式(3)，为非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构在湍流中的表面边界层速度型的控制方程。

得到边界层速度型的控制方程后，需要将式(3)导入 Matlab 编程，使用有限差分方法对式子进行变换，并选用流速 $U = 1 \text{ m/s}$ 、密度为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、运动黏度为 $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、阻尼长度 $A^+ = 26$ 的流体流过结构，迭代求解[9]并生成结构在流向不同位置处的边界层速度型如图 2 所示。由图可知，随着位置不断向后，也就 x 值不断增大，边界层速度型形状开始逐渐发生变化，意味着流体随着 x 值增大而发生转换，由层流转变为层流湍流混合，最终完全转变为湍流状态。观察可得，在 $x = 2.4$ 处，速度型已经明显体现为湍流状态下的速度型形状，可以认为此时流体已完全转换；因此，选取 $x = 2.4$ 处的曲线作为结构在湍流下的减阻特性的研究对象。

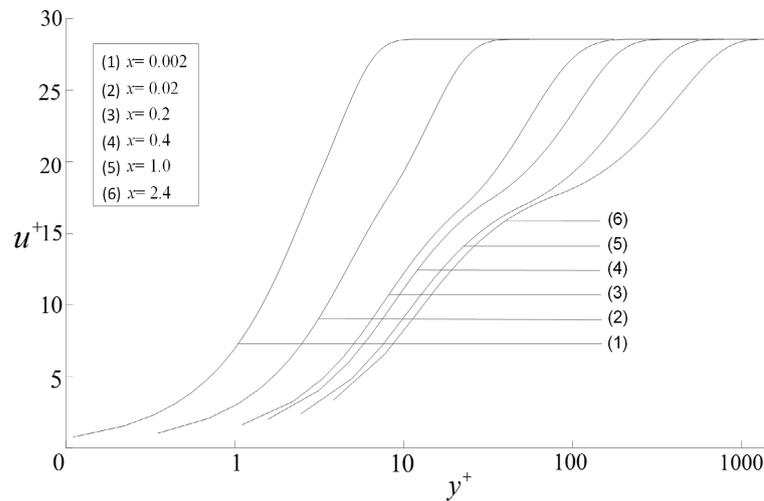


Figure 2. Velocity characteristics at different location
图 2. 不同位置下的速度型

蒙皮结构减阻效果与其表面湍流边界层速度型存在关系，速度型对数区上移越多，结构的减阻效果越好。因此，下文将通过观察速度型对数区上移的程度对非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的减阻效果进行分析。

4. 非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构与其它结构减阻效果对比

目前广泛研究的蒙皮减阻结构主要有两种，一种为单层蒙皮结构，另一种为均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构。使用 Matlab 求得上述两种结构与非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的湍流边界层速度型如图 3 所示；为了控制变量，保证对比结果有效，三种结构使用相同的蒙皮参数，非均匀与均匀弹簧阵列使用相同的弹簧参数。求解。观察图 3 可知，非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的速度型对数区上移的程度高于单层蒙皮结构与均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构，说明其相较于后两者具有更好的减阻效果。

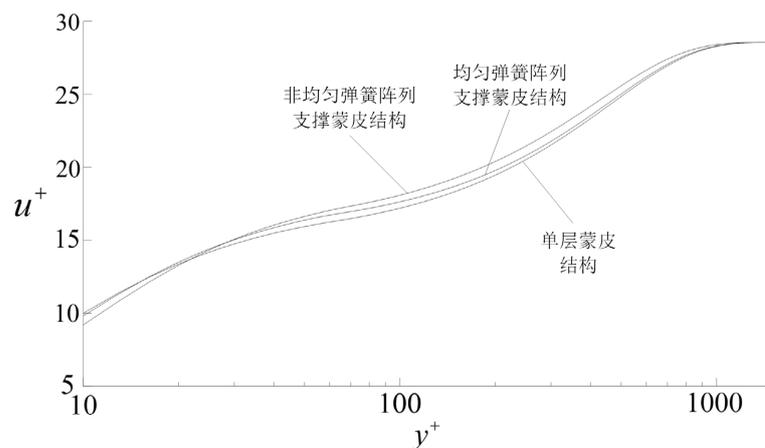


Figure 3. Velocity characteristics comparison of three different structures
图 3. 三种结构的速度型对比

5. 结构参数对速度型影响

蒙皮结构中各参数的变化将对整体结构的减阻特性产生影响，这些参数包括弹簧间距、弹簧刚度、蒙皮材料阻尼、蒙皮材料刚度。

1) 弹簧间距对速度型影响

研究非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的弹簧间距对速度型的影响，可以通过研究无量纲单元长度 L 来实现。各长度 L 下的速度型如图 4 所示。观察图 4 可得，单元长度 L 增大，各 L 参数下得到的速度型的对数区出现上移趋势，说明增大单元长度 L 时，非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的减阻效果提高。同时注意到，速度型在层流次层出现下移趋势，这是由于粘性力增大而使得层流次层的区域得到扩大。

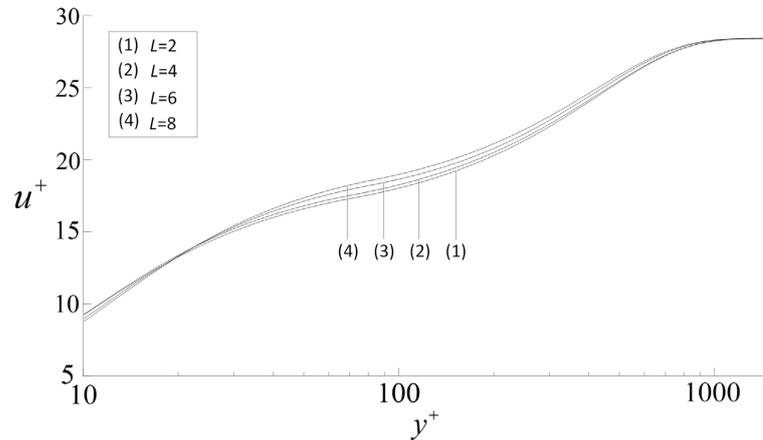


Figure 4. Velocity characteristics under different spring spacing

图 4. 不同弹簧间距下的速度型

2) 弹簧刚度对速度型影响

通过改变弹簧刚度 k 来研究其对非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构减阻效果的影响。不同弹簧刚度 k 下的速度型如图 5 所示。由图 5 可知，当弹簧刚度 k 增大时，各 k 参数下得到的速度型的对数区出现下移，说明增大弹簧刚度 k ，非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的减阻效果降低。

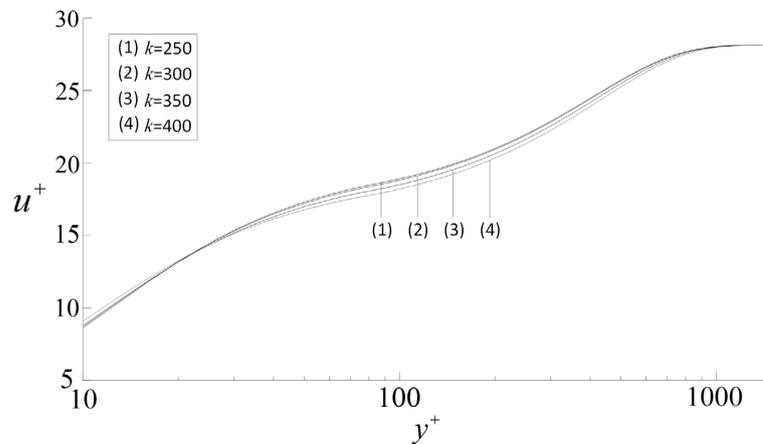


Figure 5. Velocity characteristics under different spring stiffness

图 5. 不同弹簧刚度下的速度型

3) 蒙皮材料阻尼对速度型影响

通过改变蒙皮材料阻尼系数 d 来研究材料阻尼对非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的减阻效果的影响。不同蒙皮材料阻尼系数 d 的速度型如图 6 所示。由图 6 可以看出，当蒙皮材料阻尼系数 d 增大，各阻尼系数 d 下得到的速度型的对数区逐渐下移，说明增大蒙皮材料阻尼系数 d 时，非均匀弹簧阵列支撑蒙皮

结构减阻效果降低。

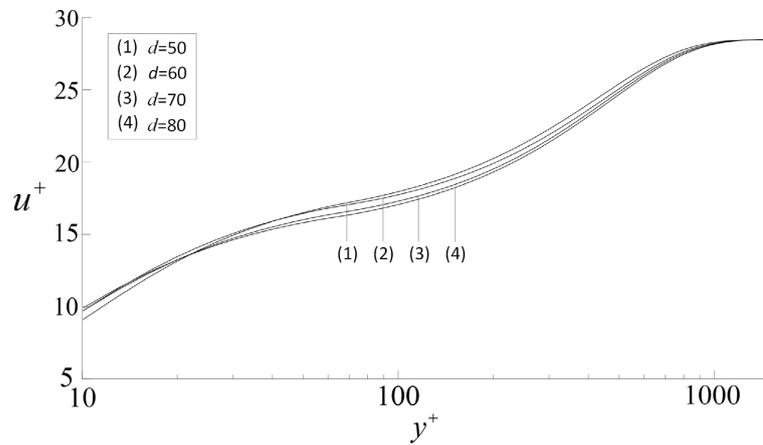


Figure 6. Velocity characteristics under different damping coefficient
图 6. 不同阻尼系数下的速度型

4) 蒙皮材料刚度对速度型影响

通过改变蒙皮材料剪切波速 C_t 来研究蒙皮刚度对非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构减阻效果的影响。不同蒙皮材料剪切波速 C_t 下的速度型如图 7 所示。由图 7 可知，当蒙皮材料剪切波速 C_t 增大，各蒙皮材料剪切波速 C_t 下得到的速度型的对数区发生下移，说明增大蒙皮材料剪切波速 C_t 时，非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的减阻效果降低。

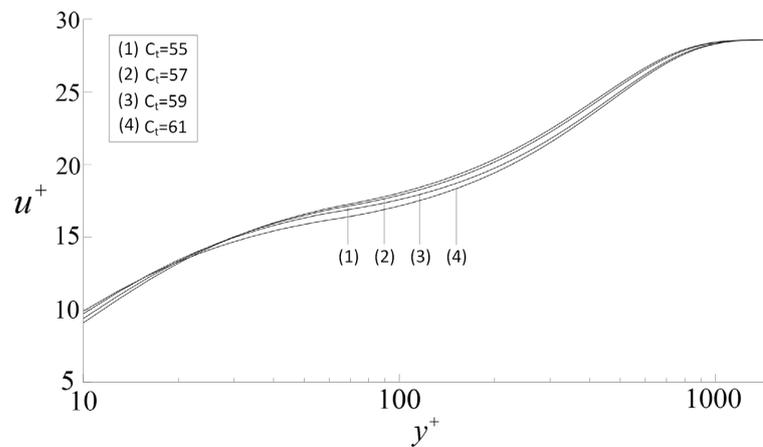


Figure 7. Velocity characteristics under different shear wave velocity
图 7. 不同蒙皮材料剪切波速下的速度型

6. 结论

本文提出了一种非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构，并建立了结构的物理模型，根据 Falknar-Skan 方程和混合长度理论，建立了结构的速度型控制方程；使用 Matlab，对速度型控制方程进行迭代求解，得到结构在湍流边界层下的速度型；通过观察速度型对数区上移的情况对比分析了非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构相对其他结构的减阻效果，并分析了各结构参数对减阻效果的影响。

结果表明，本文提出的非均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构的湍流边界层速度型的对数区上移的程度高于同等条件下的单层蒙皮结构与均匀弹簧阵列支撑蒙皮结构，说明此结构在减阻性能上相较于后两者具有

优势。同时, 根据分析得到, 可通过增大弹簧间距, 减小弹簧刚度、减小蒙皮材料的阻尼和刚度等方式提高结构得到减阻效果。

参考文献

- [1] Kramer, M.O. (1960) Boundary Layer Stabilization by Distributed Damping. *Journal of the Aeronautical Sciences*, **27**, 69.
- [2] Riley, J.J., Gad-el-Hak, M. and Metcalfe, R.W. (1988) Compliant Coatings. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **20**, 393-420. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.20.010188.002141>
- [3] Lee, T., Fisher, M. and Schwarz, W.H. (1993) Investigation of the Stable Interaction of a Passive Compliant Surface with a Turbulent Boundary Layer. *Journal of Fluid Mechanics*, **257**, 373-401. <https://doi.org/10.1017/S002211209300312X>
- [4] Choi, K.S., Yang, X. and Clayton, B.R., et al. (1997) Turbulent Drag Reduction Using Compliant Surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **453**, 2229-2240. <https://doi.org/10.1098/rspa.1997.0119>
- [5] 赵汉中. 柔性壁对湍流边界层速度型的变形影响[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2002, 17(4): 391-399.
- [6] 陈冰鹤. Falkner-Skan 方程的数值解法[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [7] 罗敏, 胡建成. 边界层理论中 Falkner-Skan 方程的数值解[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 49(3): 514-516.
- [8] 郝路亭. 基于双向流固耦合的柔性表面仿生减阻研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [9] 魏俊东. 准周期弹性支撑蒙皮湍流边界层减阻特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020. <https://doi.org/10.27060/d.cnki.ghbcu.2020.002092>