

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202009032



# 弹簧压并状态下悬架减振器 绕流涡旋特性分析

李明星, 柳江, 赵健, 袁策

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 为研究汽车行驶过程中减振器弹簧压并状态下翼子板内流场特性的变化,将该状态下的减振器简化为三维变截面圆柱模型,并建立变截面圆柱绕流三维流场模型,利用 Transition SST 四方程转捩模型模拟低、中、高 3 种车速对大、小圆柱绕流涡旋特性的影响.结果表明:绕流后尾涡的大小、形态、上升角均受圆柱直径、雷诺数及边界条件的影响,在变截面处验证“下洗”运动对 N 区边缘涡生长的直接作用及对 L 区涡旋分布的干扰作用;3 种流速下适合绕流涡旋振动压电能量回收的最优夹角分别为  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$ ;在有界的高雷诺数流场下对变截面圆柱绕流涡旋重新分区,发现新的涡旋连接方式.

**关键词:** 变截面圆柱模型; 三维流场; 圆柱绕流涡旋; 流致振动

**中图分类号:** U 463.335.107

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2021)04-0425-08

## Analysis on Flow Around Vortex Characteristics of Suspension Shock Absorber of Spring as Pre-Pressing State

LI Mingxing, LIU Jiang, ZHAO Jian, YUAN Ce

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** In order to study the change of flow field characteristics in the fender when the spring as pre-pressing state in the process of vehicle driving, the shock absorber in this state was simplified into a three-dimensional step cylinder model, and the three-dimensional flow field model of step cylinder was established. The Transition SST four equations transition model was used to simulate the effects of low, medium and high vehicle speeds on the flow around vortex characteristics of large and small cylinders. The results show that the size, shape and rising angle of wake vortex are affected by cylinder diameter, Reynolds number and boundary conditions. The direct effect of “downwash” motion on the growth of edge vortices in N zone and the interference effect on vortex distribution in L zone are verified at the step section. The optimal angles for the energy recovery of flow around vortex vibration at three flow rates are  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$  and  $\pm 20^\circ$ . In the bounded high Reynolds number flow field, the flow around vortex of the step cylinder was zoned, and the new vortex connection mode was found.

**Keywords:** model of step cylinder; three-dimensional flow field; vortex flow around cylinder; flow-induced vibration

悬架振动能量的回收利用一直是研究热点,但相关研究多集中于垂向振动方面.由于不需要考虑车身承载的问题,纵向振动能量尽管远小于垂向振动能量,但也是悬架能量回收的有效途径之一.悬架的

**收稿日期:** 2020-09-29

**通信作者:** 柳江(1977-),男,副教授,博士,主要从事汽车系统动力学研究. E-mail: zeh@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51575288)

纵向振动主要是由于前翼子板内部流场引起的减振器绕流涡旋振动,其振动机理及能量回收方法是研究的难点.文献[1-2]重点研究了风致振动对车辆、桥墩的影响,得到不同车速下风-车-桥整体系统响应的变化,但未对车辆内部结构绕流情况进行详细的研究.王夫亮等<sup>[3]</sup>研究轮腔内导流板和车轮旋转引起的流场变化,仿真和试验中能明确观测到减振器柱后的绕流涡旋,但缺乏对发生机理和能量利用潜力的探讨.刘双双等<sup>[4]</sup>将悬架减振器简化为二维圆柱模型,模拟减振器静止及振动时的绕流情况,发现减振器后部涡旋激励会引起压电材料的变形,产生可储存的电能,但忽略了减振器筒、弹簧的直径差异及结构的三维效应,使结果存在一定误差.因此,采用更精细的减振器三维变截面模型有利于提高分析计算的精度.文献[5-7]对变截面绕流柱的流场特征进行仿真及试验,在涡旋形态、分区等方面得到了一些极有价值的结论.然而,国内外学者对变截面圆柱绕流方面的研究多集中于理想模型的流体分析,对复杂工程产品的模型简化,以及产品实际工况对流场形态特征的影响机理仍有待进一步研究.

基于此,本文根据实际的麦弗逊悬架减振器参数,在减振器弹簧压并状态下,将减振器简化为三维变截面圆柱模型,对低、中、高 3 种车速下减振器的绕流涡旋特性进行分析.

1 减振器及流场模型的建立

在减振器弹簧压并状态下,将减振器简化为三维变截面圆柱模型,示意图如图 1 所示.

1.1 数值计算方法

通过 ANSYS-Fluent 软件进行流场数值计算,参考汽车与空气的相对运动速度,当车速  $v_v \leq 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,可得雷诺数  $Re < 3.0 \times 10^5$ ;当  $300 < Re < 3.0 \times 10^5$  (亚临界)时,流场形态由层流向湍流过渡<sup>[8]</sup>,故模拟时采用 Transition SST 四方程转捩模型,从而更好地模拟层流向湍流的转捩过程,算法采用 SIMPLE 压力速度耦合迭代.

Transition SST 四方程转捩模型由  $\gamma\text{-}Re_{\theta,t}$  转捩模型和 SST  $k\text{-}\omega$  模型耦合而成.流动间歇因子  $\gamma$  的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{(\rho U_j k)}{\partial x_j} = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right], \tag{1}$$

$$P_\gamma = c_{a1} F_1 \rho S (\gamma F_o)^{\frac{1}{2}} (1 - c_{e1} \gamma), \tag{2}$$

$$E_\gamma = c_{a2} \rho \Omega \gamma F_t (c_{e2} \gamma - 1). \tag{3}$$

式(1)~(3)中: $\rho$ 为流体密度; $k$ 为湍动能; $t$ 为时间; $U_j$ 为流体在 $j$ 方向的流动速度; $x_j$ 为流体在 $j$ 方向的位移; $P_\gamma$ 为流体压力; $E_\gamma$ 为流体动能; $\mu$ 为流体粘性系数; $\mu_t$ 为湍流粘性系数; $\sigma_t$ 为湍流普朗特数;系数  $c_{a1}$ 取 2.0;系数  $c_{a2}$ 取 0.5; $F_1$ 为控制转捩区长度参数; $S$ 为应变率张量的模; $F_o$ 为涡量雷诺数  $Re_\omega$  和转捩临界动量厚度雷诺数  $Re_{\theta,c}$  的函数,  $Re_{\theta,c} = f(\overline{Re_{\theta,c}})$ ,  $f(\overline{Re_{\theta,c}})$  为经验关联函数; $\Omega$ 为旋涡强度; $F_t$ 为粘性系数比的函数;系数  $c_{e1}$ 取 1.0;系数  $c_{e2}$ 取 0.5.

1.2 模型的建立及网格的划分

参考圆柱绕流的流场设计方法,结合车身及减振器的实际尺寸,按照卡门涡街效应的产生要求,设置下端减振器支柱部分的小圆柱直径  $d$  为 45 mm,高度  $h$  为 200 mm;上端弹簧压并部分的大圆柱直径  $D$  为 90 mm( $2d$ ),高度  $H$  为 100 mm( $h/2$ ).流场计算区域设置为长方体,其流向为 3 150 mm( $70d$ ),横向为 900 mm( $20d$ ),展向为 300 mm( $h + H$ ),圆柱中心距入口边界 900 mm( $20d$ ),距出口边界 2 250 mm( $50d$ ).

流场模型三维图,如图 2 所示.



图 1 减振器三维变截面圆柱模型示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional step cylinder model of shock absorber

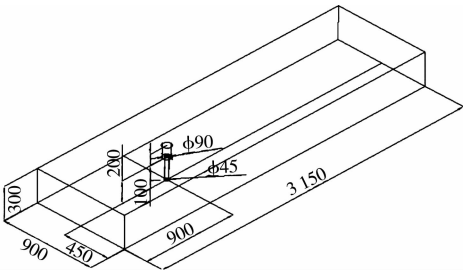
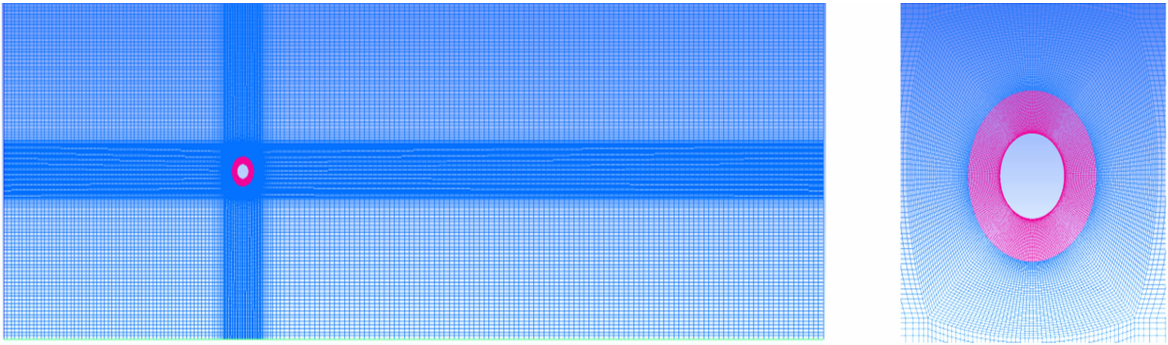


图 2 流场模型三维图(单位:mm)  
Fig. 2 Three-dimensional diagram of flow field model (unit: mm)

采用 Fluent 网格对流场域进行结构化网格划分, 网格共计 198 万个, 在圆柱近壁面区域及绕流的后部流场区域进行加密处理, 以保证仿真计算的可靠性. 计算域结构化网格划分示意图, 如图 3 所示.



(a) 网格划分俯视图 (b) 变截面圆柱附近网格划分

图 3 计算域结构化网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structured grid division of computational domain

2 变截面圆柱体的数值模拟及验证

以 10, 20, 30 m · s<sup>-1</sup> 的空气流速 ( $v$ ) 分别代表汽车行驶的低速、中速、高速, 通过这 3 种空气流速对变截面圆柱绕流进行数值计算, 并对计算结果进行验证. 需要指出, 考虑翼子板边界及车轮转动等实际工况<sup>[3]</sup>, 从前轮腔内流速分布图中取得的空气流速为 0~35 m · s<sup>-1</sup>, 故设置的 3 种仿真流速较为合理.

雷诺数的计算公式为

$$Re = \rho v d_1 / \mu. \tag{4}$$

式(4)中:  $\rho$  取 1 kg · m<sup>-3</sup>;  $d_1$  为特征长度, 即弹簧压并部分大圆柱直径(0.09 m);  $\mu$  在常温下约为 1.8 × 10<sup>-5</sup> N · s · m<sup>-2</sup>.

由此可得空气流速为 10, 20, 30 m · s<sup>-1</sup> 的雷诺数分别为 5.0 × 10<sup>4</sup>, 1.0 × 10<sup>5</sup>, 1.5 × 10<sup>5</sup>. 根据描述圆柱体受力状态的两个关键参数(与来流方向垂直的升力  $F_l$ 、与来流方向平行的阻力  $F_d$ ), 可得升力系数  $C_l$  和阻力系数  $C_d$  的计算公式分别为

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho v^2 S_{dl}}, \quad C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho v^2 S_{dl}}. \tag{5}$$

式(5)中:  $S_{dl}$  为变截面圆柱迎流向的投影面积.

空气流速为 20 m · s<sup>-1</sup> 时变截面圆柱的升力系数曲线, 如图 4 所示. 对升力系数曲线进行快速傅里叶变换, 可得升力系数曲线的频谱分析图, 如图 5 所示. 图 5 中: PSD 为功率谱密度;  $f$  为频率;  $f_s$  为脱涡频率.

由于变截面的存在, 变截面圆柱模型无法直接代入斯特劳哈尔数计算公式  $St = f_s D_l / U$  ( $D_l$  为绕流

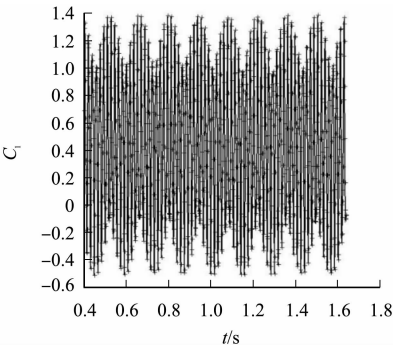


图 4 变截面圆柱的升力系数曲线( $v=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 Lift coefficient curves of step cylinder ( $v=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

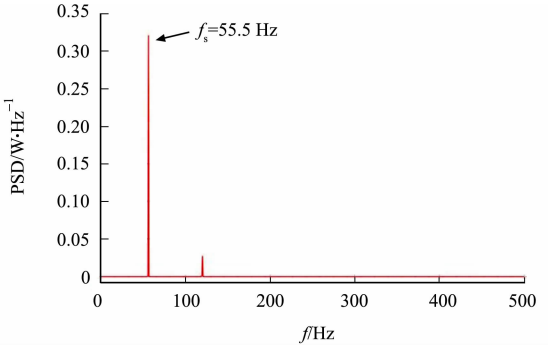


图 5 升力系数曲线的频谱分析图( $v=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 Spectrum analysis diagram of lift coefficient curves ( $v=20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

体的水力直径; $U$  为流速),故选择当量直径,根据脱涡频率的经验公式  $f_s=0.198 \frac{U}{D_1} \left(1-\frac{19.7}{Re}\right)$ ,可得高雷诺数下的  $St\approx 0.198$ ,代入  $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时升力系数曲线的脱涡频率  $f_s=55.5\text{ Hz}$ (图 5),反推得均匀圆柱当量直径为  $0.071\text{ m}$ . 当量圆柱升力系数曲线的频谱分析图,如图 6 所示. 由图 6 可知:当  $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,当量直径为  $0.071\text{ m}$  的均匀圆柱脱涡频率  $f_s=56.5\text{ Hz}$ ,误差约为  $1.77\%$ ,故认为当量直径为  $0.071\text{ m}$  的均匀圆柱能够代替变截面圆柱.

在高雷诺数下,以当量直径为  $0.071\text{ m}$  的均匀圆柱作为算例,验证数值模拟在三维变截面绕流方面的精确性,并与文献[9-15]的参数进行对比,结果如表 1 所示.

表 1 中: $\eta_1$  为  $St$  的相对误差; $\overline{C_d}$  为平均阻力系数; $\eta_2$  为平均阻力系数的相对误差. 由表 1 可知:在  $Re$  为  $5.0\times 10^4, 1.0\times 10^5, 1.5\times 10^5$  (文献[15]为  $1.4\times 10^5$ ) 的条件下,  $St$  的相对误差较小,文中数据与文献[11]的试验数据误差仅为  $3.2\%$ ;  $\overline{C_d}$  的相对误差值也不大,文中数据与文献[14]的试验数据吻合较好( $0.8\%$ ),故选用的计算模型和参数设置是合理、有效的.

表 1 亚临界雷诺数下圆柱绕流参数的对比

Tab. 1 Comparison of cylinder flow around parameters at subcritical Reynolds number

$Re$	数据来源	$St$	$\eta_1/\%$	$\overline{C_d}$	$\eta_2/\%$
$5.0\times 10^4$	文中	0.202	—	1.17	—
$5.0\times 10^4$	文献[9]	0.225	10.2	1.20	2.5
$5.0\times 10^4$	文献[10]	0.198	2.0	1.17	0
$1.0\times 10^5$	文中	0.196	—	1.18	—
$1.0\times 10^5$	文献[11]	0.190	3.2	1.25	5.6
$1.0\times 10^5$	文献[12]	0.196	0	1.21	2.5
$1.5\times 10^5$	文中	0.198	—	1.21	—
$1.5\times 10^5$	文献[13]	0.190	1.1	1.13	7.1
$1.5\times 10^5$	文献[14]	0.220	10.0	1.20	0.8
$1.4\times 10^5$	文献[15]	0.200	1.0	1.29	6.2

3 模拟结果分析

弹簧压并状态下的减振器变截面圆柱模型在 3 种流速( $10, 20, 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )下,模拟低、中、高车速对大、小圆柱中截面、交界面及  $xz$  截面等主要截面涡旋特征的影响.

3.1 变截面圆柱绕流流线分析

对弹簧压并状态下的减振器变截面圆柱模型进行流场状态分析,根据文献[3]的变截面圆柱绕流涡流核心分区的思想,对脱涡时刻涡流区域进行划分,如图 7 所示. 图 7 中: $Q$  为定义涡量等势面的准则.

图 7(a),7(b)可相互对应,由图 7 可得以下 3 点结论. 1) 在尾流与边界交界处易形成涡旋(L,S 区),由于大、小圆柱直径与长径比的影响,在小圆柱绕流后形成管状小尺度涡,脱涡频率高、速度小且速度矢量方向变化快,发展趋于稳定的时间短;在大圆柱绕流后形成粘连在上壁面的条状大尺度涡,脱涡频率低. 2) 在变截面的影响下,N 区在上游 I 区域出现大圆柱向小圆柱倾斜的外区大涡尾迹,证明“下洗”运动开始发生,边缘涡逐渐生成;变截面处的连接涡在流向旋转和流速的作用下进入 II 区域下部,与边缘涡发生耦合作用,致使边缘涡在变截面的两侧卷起并朝向大圆柱,在 II 区域上部形成一个由小圆柱延伸到大圆柱后方的小涡,小涡与 L 区的大涡形成对流,造成大涡的涡柱破损. 3) 图 7(a)中 L,N,S 区靠近圆柱部分都形成了明显的低速回流区,对应图 7(b)中涡管和涡条靠近中心线的内侧区域,其外侧区域为高速区,内外速度差及空气的粘滞作用导致涡旋的产生,涡旋随着流动逐渐向下游发展,速度差

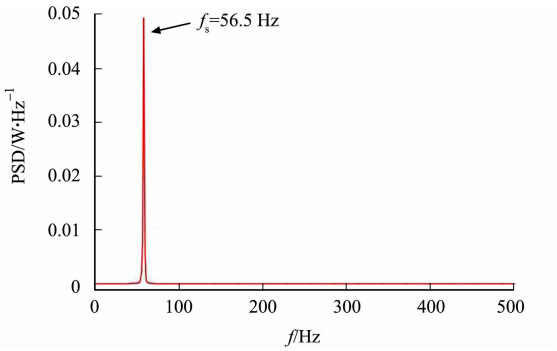


图 6 当量圆柱升力系数曲线的  
频谱分析图( $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 Spectrum analysis diagram of lift coefficient  
curves of equivalent cylinder ( $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )



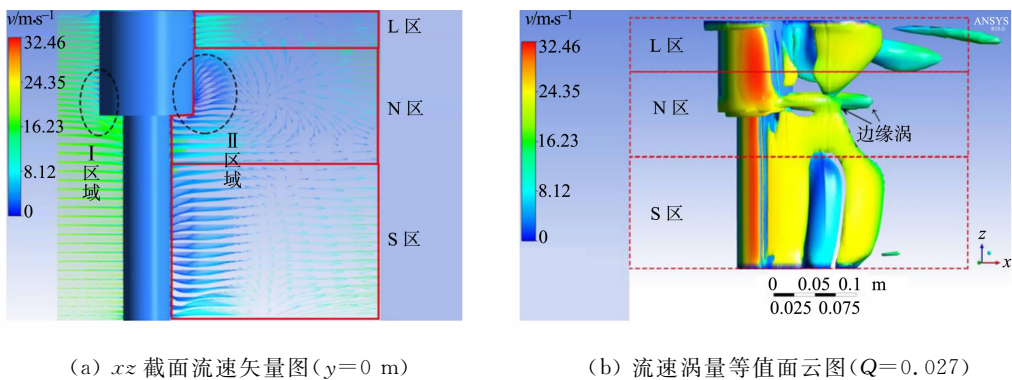


图 7 变截面圆柱脱涡时刻涡流分区示意图( $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 Schematic diagram of vortex partition at vortex shedding moment of step cylinder ( $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
减小, 旋涡消失, 流线变得较为规则.

为探究不同水平面的气流绕流后的运动特征, 以  $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  为例, 截取多个  $xy$  平面的三维流线图, 并由此拓展到其他情况, 如图 8 所示. 图 8 中:  $h_{\min}$ ,  $h_{\max}$  分别最小高度和最大高度;  $\Delta h$  为高度差.

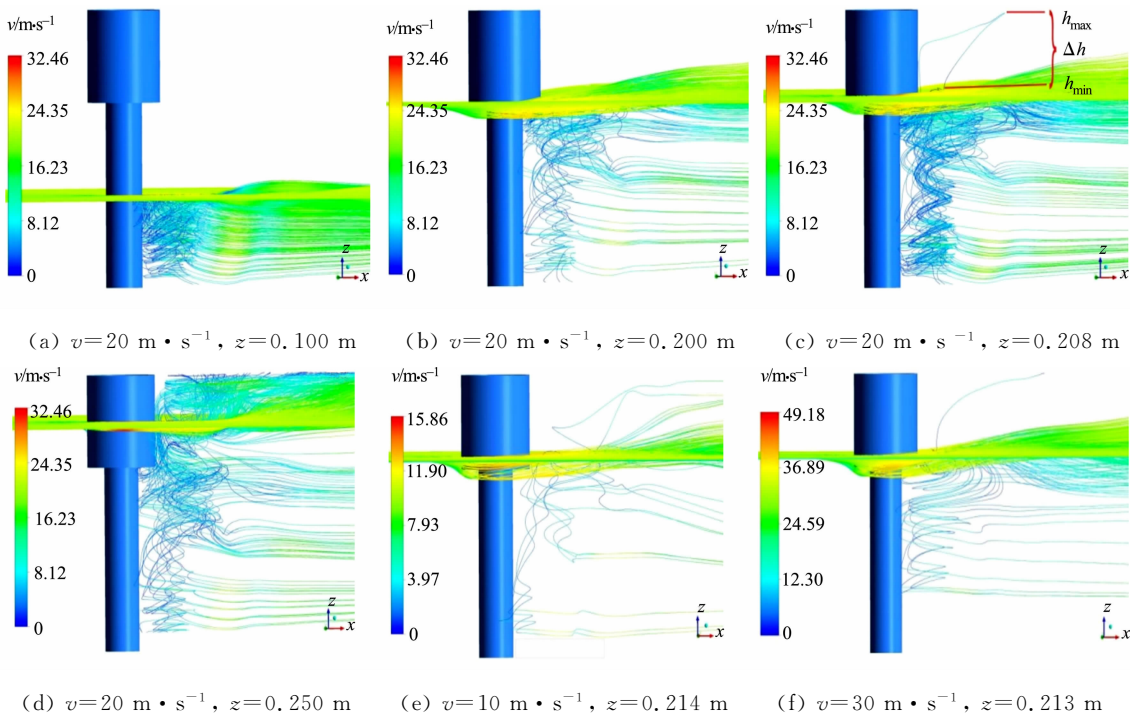


图 8 不同流速下  $xy$  截面的三维流线图

Fig. 8 Three-dimensional streamline diagram of  $xy$  sections at different flow rates

由图 8(a)~(d)可知: 当  $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 不同截面的来流绕流后形成的尾流升角不同, 小圆柱后的尾流升角普遍小于大圆柱; 大圆柱截面绕流后形成的尾流升角随着  $z$  截面的升高而上升, 直至接触上壁面; 4 个截面中, 每个截面都产生螺旋下降, 并逐渐趋于平稳的流线, 但随着截面高度的升高, 趋于平稳的时间不断延长; 小圆柱截面绕流后不能产生螺旋上升的涡旋, 而大圆柱截面绕流后可产生螺旋上升的涡旋, 但由于变截面的扰流作用, 接近变截面的大圆柱截面绕流后也不会产生螺旋上升的涡旋, 只有当  $z=0.208\text{ m}$ , 即高于变截面  $8\text{ mm}$  的情况下可产生螺旋上升的涡旋, 这个最小高度  $h_{\min}$  标志了 N 区的涡旋线从核心区向  $+z$  方向逃逸的起始位置, 涡旋线沿展向回旋并接触大圆柱表面, 其垂向高度定义为最大高度  $h_{\max}$ , 再沿表面下降至重新汇入 S 区的流向涡, 高度差  $\Delta h=h_{\max}-h_{\min}$  是 N 区间涡旋发展的重要参数之一.

由图 8(e)~(f)可知: 当  $v$  为  $10, 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 发生逃逸的起始高度不同,  $v=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时的最小截面高度出现在  $z=0.214\text{ m}$ ,  $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时的最小截面高度出现在  $z=0.213\text{ m}$ .

3.2 变截面圆柱绕流流速分析

对汽车运动过程中空气经历变截面圆柱绕流后的流速变化进行研究,以大、小圆柱中截面及变截面为研究对象,在 3 种流速下经模拟可得流速云图,如图 9 所示。

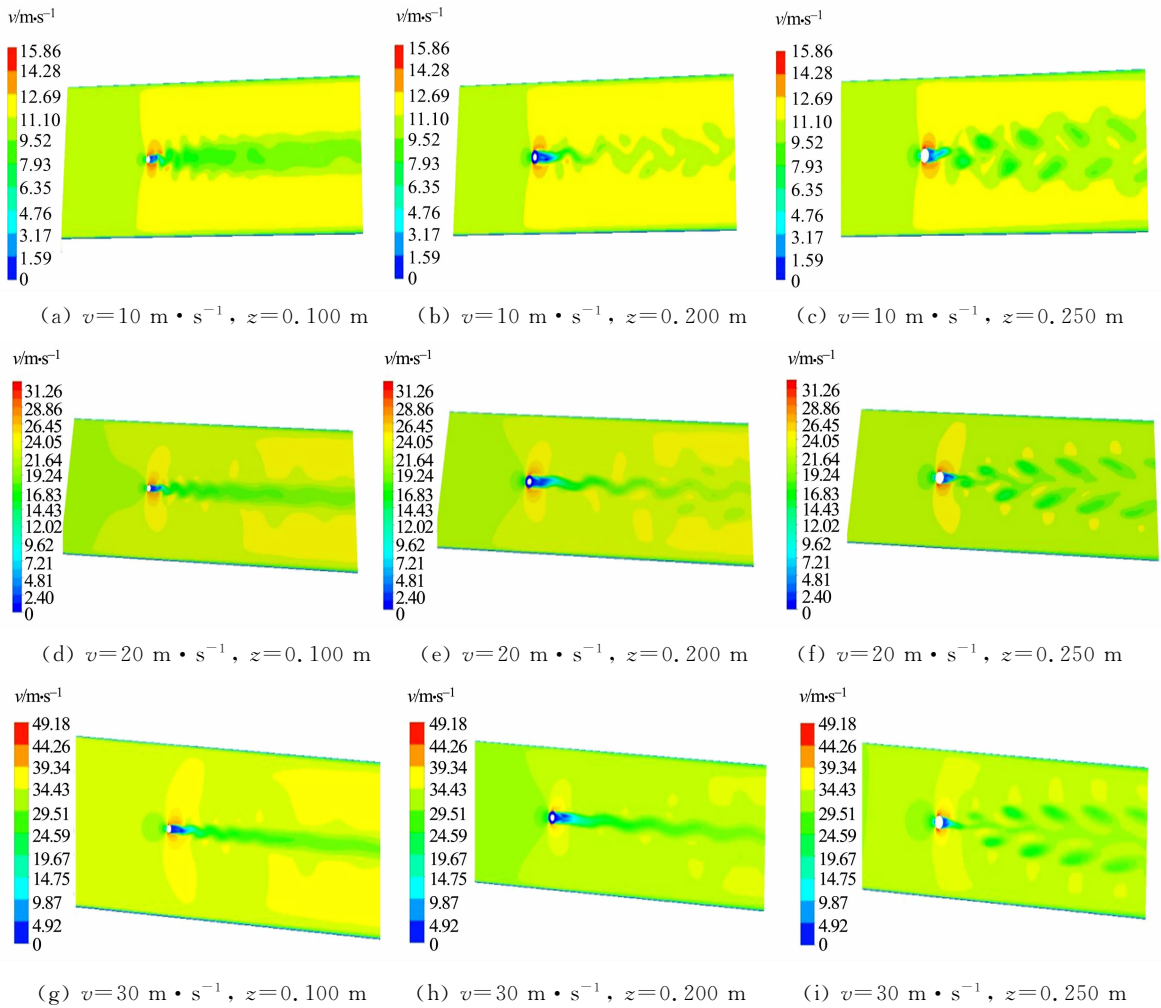


图 9 大、小圆柱中截面及变截面流速云图

Fig. 9 Flow rates nephogram of medium and step sections of large and small cylinders

由图 9 可得以下 4 点结论. 1) 在有限场的圆柱绕流中,小圆柱的脱涡频率约为大圆柱的两倍,大圆柱对尾流的影响占主导地位,绕流后形成的尾涡清晰,交错排布整齐,一直延续至边界处(图 9(a),(c),(d),(f),(g),(i)). 2) 3 种流速下的小圆柱中截面绕流均在下游约 10D 范围内出现清晰的尾涡,高、低速区交错排布规律明显,但由于受到变截面及大圆柱的影响,之后范围内涡旋特征变得模糊(图 9(a),(d),(g)). 3) 随着流速的增加,整个尾流区向两侧边界延伸,同时,低速区和高速区面积扩大,中、高速时涡旋的形态更加规整,基本呈椭圆状(图 9(c),(f),(i)). 4) 3 种流速下变截面绕流后的尾涡具备卡门涡街的基本形态,但在变截面下游 5D 范围内并未观测到明显的涡旋,反而在之后范围内出现形状不规则但交替排列的涡旋(图 9(b),(e),(h)).

3.3 变截面圆柱绕流压力分析

由流速云图的对比可知,气流在大圆柱中截面绕流后形成的尾涡清晰且交错排列规律,故在 3 种流速下将大圆柱中截面作为压力研究对象,其压力云图,如图 10 所示。

由图 10 可知:流速与流场整体的平均压力( $P_{ave}$ )成正比关系, $P_{ave} \propto v$ ,但  $P_{ave} \neq kv$ , $k$  为系数;低压涡旋面积增大,且形态逐渐趋近于椭圆,同侧涡旋相距约为 2D,两侧涡旋的扩散角逐渐增大;当  $v = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,沿着与  $x$  轴约  $\pm 10^\circ$  的夹角向外扩散;当  $v = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,夹角约为  $\pm 15^\circ$ ;当  $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,夹角约为  $\pm 20^\circ$ ;规律明显的压差分布适合进行压电能量的回收,上述 3 个夹角为进行压电能量回收的最优夹角。

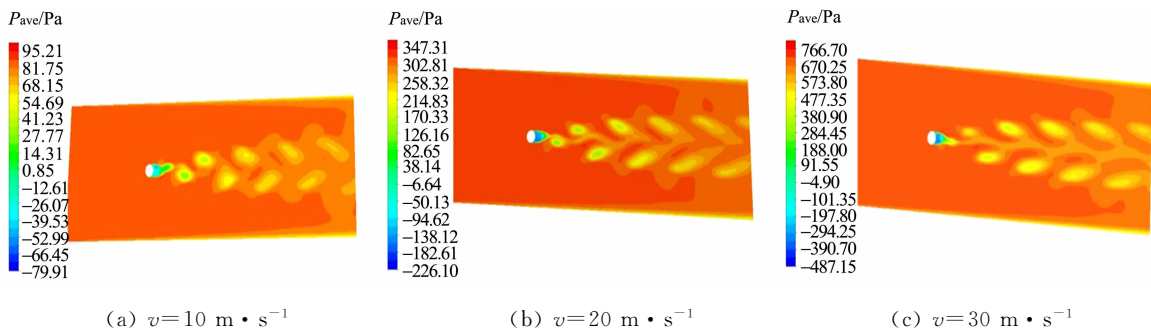


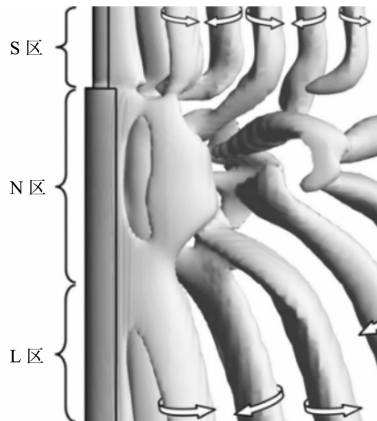
图 10 不同流速下大圆柱中截面的压力云图

Fig. 10 Pressure nephogram of medium section of large cylinders at different flow rates

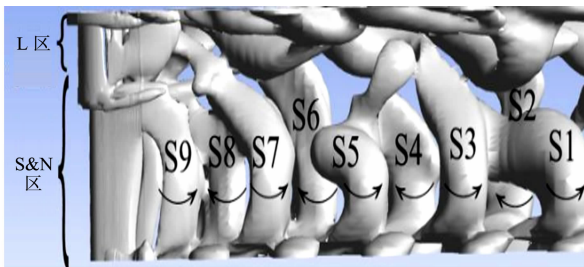
### 3.4 变截面圆柱绕流涡量等值面分区

采用  $Q$  准则绘制涡量等值面示意图,如图 11 所示.图 11 中:图 11(a)为  $Re=150, Q\approx 2\times 10^{-3}$  时的涡量等值面示意图<sup>[6]</sup>;图 11(b)~(d)为高雷诺数下  $Q\approx 1.5\times 10^{-3}$  的涡核心分区示意图;图 11(e)由图 11(d)翻转而得,作为补充;S1~S9 为 S 区涡旋.

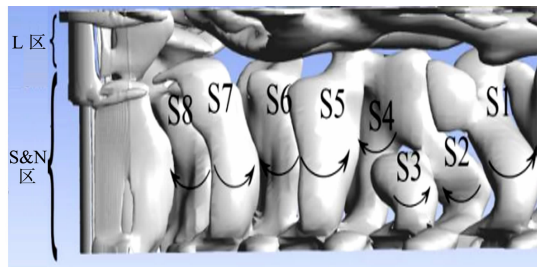
由图 11 可得以下 5 点结论. 1) 大、小圆柱高度比对 N 区涡旋的生长位置和发展方式有重要影响. 在高雷诺数下,由于减振器模型的大圆柱高度仅为小圆柱的 1/2,受到上边界与小圆柱涡旋的影响, L 区未能形成完整的涡管,而是呈条状拖长粘连在上壁面,旋转方向未能标出;高度为大圆柱两倍的小圆柱对 N 区涡旋的发展起主导作用. 2) S 区涡旋通常与 N 区涡旋形成直接的涡连接<sup>[4]</sup>,但此处 N 区杂乱地与 S 区连接、生长(图 11(b), (c)), 难以区分完整的 N 区,故将其划为 S 区与 N 区的混合区(S&N 区). 3) 随着雷诺数的提高, S 区的涡管排列更加整齐, N 区生长延伸更加明显,当  $Re=1.5\times 10^5$  时出现了呈条状分布的 N 区涡旋(图 11(d), (e)), 且 N 区与整齐排列相距约为 1 倍大圆柱直径



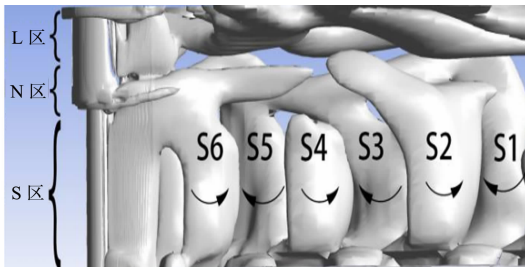
(a)  $Re=150$



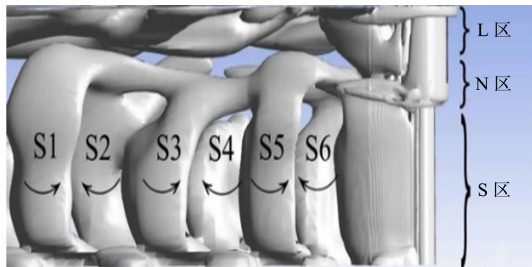
(b)  $Re=5.0\times 10^4$



(c)  $Re=1.0\times 10^5$



(d)  $Re=1.5\times 10^5$



(e)  $Re=1.5\times 10^5$  的翻转图

图 11 不同雷诺数下的涡量等值面示意图

Fig. 11 Isosurface of vorticity at different Reynolds numbers

的 S2, S4, S6 直接相连(图 11(e)). 4) 形成了大量半环连接, 甚至出现了 S1, S3, S5 的同侧双半环连接(图 11(b)), 同时, 存在类似 S7 与 L 区的跨越变截面边界的直接连接, 以及 S9 与混合区域中 N 区的直接连接. 5) 出现了 S2 与 S3, S4 与 S5 的异侧半环连接(图 11(c)), 并在 S4, S2 的同侧半环连接后, 形成

整体与 L 区发生跨越变截面边界的直接连接. 具体直观的涡旋运动的连接方式和位置分布为涡旋形态控制和涡旋振动压电能量回收装置的设计和布置提供了理论参考的依据.

4 结 论

1) 将汽车的减振器弹簧简化为三维变截面圆柱模型, 将当量圆柱作为算例, 获得斯特劳哈尔数、阻力系数等关键特征值. 与已有文献进行对比, 最小相对误差分别为 3.2%, 0.8%, 可保证涡旋流场分析的准确度.

2) 观测 3 种流速下减振器绕流 N 区涡旋线从核心区向 +z 方向逃逸的起始位置, 并将起始逃逸高度差  $\Delta h$  作为 N 区涡旋发展的重要参数之一, 验证“下洗”运动对 N 区边缘涡生长的影响.

3) 分析 3 种流速下, 不同截面绕流流速和压力的分布规律, 从而确定不同流速下适合绕流涡旋振动压电能量回收的最优夹角, 分别为  $\pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ$ .

4) 针对高雷诺数有界工况, 对变截面圆柱绕流涡旋进行重新分区, 在同区域或跨区域的经典连接方式之外, 发现了异侧半环连接、同侧双半环连接两种新的涡旋连接方式, 为涡旋形态控制和涡旋振动压电能量回收装置的设计和布置提供了理论参考依据.

参考文献:

[1] 李军, 张云飞, 高健博. 遭遇横风时高墩高架上的地铁车辆运行安全性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 421-428. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201810055.

[2] 张云飞, 李军. 山区地铁车辆曲线通过时的风致安全性分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 291-297. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201811058.

[3] 王夫亮, 尹章顺, 陈枫, 等. 车轮旋转条件下前轮导流板气动减阻机理研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(2): 157-162. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2016.02.004.

[4] 刘双双, 柳江, 王政皓. 汽车悬架减振器绕流涡旋动态特性分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 297-306.

[5] DUNN W, TAVOULARIS S. Experimental studies of vortices shed from cylinders with a step-change in diameter [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 555: 409-437. DOI:10.1017/S002211200600927X.

[6] MORTON C, YARUSEVYCH S. Vortex shedding in the wake of a step cylinder[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(8): 083602. DOI:10.1063/1.3459157.

[7] CAI Tian, JIANG Fengjian, PETTERSEN B, *et al.* Antisymmetric vortex interactions in the wake behind a step cylinder[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(10): 101704. DOI:10.1063/1.4991530.

[8] 乔永亮, 桂洪斌, 刘祥鑫. 三维圆柱绕流数值模拟湍流方法的选择[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 119-125. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.016.

[9] BOTTERILL N, MORVAN H P, OWEN J S. Investigation into the numerical modelling of the drag crisis for circular cylinders[C]// Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering, Florence; [s. n.], 2009: 1000-1004.

[10] 任晓鹏. 圆柱振荡尾流与涡激振动的被动吹气控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[11] FANG Yuanyuan, HAN Zhaolin. Numerical experimental research on the hydrodynamic performance of flow around a three dimensional circular cylinder[J]. Advances in Civil Engineering, 2011(90/91/92/93): 2778-2781.

[12] 李燕玲. 高雷诺数下圆柱绕流的三维数值模拟[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.

[13] 方芳. 内河码头钢构件防腐涂层冲蚀模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

[14] 王响军. 斜拉索涡激振动被动吹气控制的数值模拟与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

[15] BREUER M. A challenging test case for large eddy simulation: High Reynolds number circular cylinder flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(5): 648-654. DOI:10.1016/S0142-727X(00)00056-4.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)