

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.12.005

# 涡流发生器对重型货车气动减阻特性的影响

许建民<sup>1,2,3</sup>, 范健明<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心, 福建 厦门 361024; 3. 泉州信息工程学院 虚拟制造技术福建省高校重点实验室, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 为了解涡流发生器对重型厢式货车气动减阻特性的影响, 以某国产重型厢式货车为研究对象, 基于计算流体动力学的数值模拟, 研究涡流发生器的形状、布置位置、高度以及间隙比对厢式货车的减阻效果, 并分别从速度流线结构、湍动能分布和压力分布等方面探讨其减阻原因。结果表明: 涡流发生器的形状、布置位置、高度以及间隙比对重型厢式货车气动阻力的影响较大。其中叉形涡流发生器位于货厢后端时的气动阻力系数最小, 其值为 0.699 6, 相对于货车原始模型的减阻率为 11.7%, 因此叉形涡流发生器是最佳的涡流发生器造型。加装涡流发生器减小了货车尾部流区的面积和强度, 使尾部气流延迟分离, 进而减小了货车前后压差阻力。

**关键词:** 厢式货车; 涡流发生器; 布置位置; 减阻效果; 气流延迟分离

**中图分类号:** TH122

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2020)12-041-18

## Influence of vortex generator on the aerodynamic drag reduction characteristics of heavy truck

XU Jianmin<sup>1,2,3</sup>, FAN Jianming<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, P. R. China; 2. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen, Fujian 361024, P. R. China; 3. Fujian Province University Key Laboratory of Virtual Manufacturing Technology, Quanzhou University of Information Engineering, Quanzhou, Fujian 362000, P. R. China)

**Abstract:** To understand the influence of the vortex generator on the aerodynamic drag reduction characteristics of heavy-duty trucks, a Chinese heavy-duty truck was taken as the research object to study the influence of the shape, arrangement position, height and gap ratio of the vortex generator on drag reduction effect of the truck based on the numerical simulation of computational fluid dynamics. The reason for drag reduction was discussed from the aspects of velocity streamline structure, turbulent kinetic energy distribution, and pressure distribution. The results show that the shape, arrangement position, height and gap ratio of the vortex generator have a great influence on the aerodynamic drag of the heavy-duty truck. The fork-shaped vortex generator has the smallest aerodynamic drag coefficient when it is located at

**收稿日期:** 2020-07-05

**基金项目:** 福建省自然科学基金面上项目(2020J01269); 厦门理工学院“科研攀登计划”项目(XPDKT20024)。

Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J01269), and the Scientific Research Climbing Program of Xiamen University of Technology (XPDKT20024).

**作者简介:** 许建民(1981—), 男, 厦门理工学院副教授, 博士, 主要从事汽车空气动力学、数字化制造研究, (E-mail) xujianmin1020@163.com。

the rear end of the cargo compartment, and its value is 0.699 6. Compared with the original model of the truck, the drag reduction rate is 11.7%, indicating that the fork-shaped vortex generator is the best vortex generator shape. The installation of the vortex generator can reduce the area and strength of the vortex zone of the rear of the truck, and delay the separation of the tail airflow, thereby reducing the differential pressure resistance of the front and rear parts of the truck.

**Keywords:** van type truck; vortex generator; placement position; reason for drag reduction; airflow delay separation

目前在发达国家的公路货运车辆中,重型厢式货车的比例在 90% 以上,在中国该比例也越来越高。厢式货车一般为长方体结构,因此在高速行驶过程中会产生很大的气动阻力<sup>[1]</sup>。研究表明,65% 的发动机燃油消耗是用于克服重型厢式货车在长距离行驶中的行驶阻力。因此改善厢式货车的气动特性对于厢式货车节能减排具有重要的现实意义。近 20 年来,中外学者对轿车气动减阻已经进行了比较系统和深入的研究<sup>[2-4]</sup>。相比而言,无论是在学术界还是企业界,厢式货车的气动减阻优化并没有得到足够的重视,这主要是因为货车生产厂家最关心的是在国家规定的货车尺寸范围内使货车的载货量最大化而不是气动减阻。但是随着国家法规对重型厢式货车节能减排的要求越来越严格,近年来厢式货车的气动减阻也越来越受到学术界和企业界的重视。研究表明<sup>[5]</sup> 重型厢式货车的气动阻力主要来自 4 个部位:货车驾驶室前部的气流阻滞区、货车底部、驾驶室与货厢之间的间隙以及货厢尾部的气流分离。关于在这 4 个部位的气动减阻装置在相关文献中已经有详细介绍<sup>[6-9]</sup>。由于厢式货车的钝体结构,在行驶过程中货厢尾部会产生严重的气流分离,进而产生较大的压差阻力。相关学者通过在尾部增加导流板、隔离板、船型尾部等减阻措施来避免货厢尾部气流分离<sup>[10-12]</sup>。另外,尾部气动射流减阻也是一种有效的减少压差阻力的气动减阻方法<sup>[13-15]</sup>。

尽管尾部导流板、隔离板、船型尾部以及尾部气动射流减阻均具有一定的减阻效果,但是这些减阻装置在实际应用中并不普遍,这是因为尾部导流板、隔离板、船型尾部这 3 种减阻装置的添加会增加货车的整车长度,而尾部气动射流减阻需要额外消耗能量,因此提出一种新型的尺寸较小且不需要额外消耗能量的控制尾部气流分离的气动减阻措施很有必要。涡流发生器(Vortex Generator, VG)是汽车行业中一种很有潜力的气动减阻装置。该装置由美国联合飞机公司的 Bmynes 和 Tayler 于 1947 年首次提出,其利用生成的流向涡使边界层内部低速气流与外部高速气流进行能量交流,从而实现控制流动分离和降低气动阻力的目的。已有不少针对涡流发生器对翼型气动性能影响的文献,但大部分的研究对象是航空翼型,少数是关于汽车气动减阻的研究<sup>[16]</sup>。在中国,对于涡流发生器对厢式货车气动特性影响的研究相对较少<sup>[17]</sup>。因此,需要对涡流发生器对厢式货车气动特性的影响机理及其几何形状、几何尺寸、安装位置等对气流控制效果的影响进行深入的研究。

笔者设计了圆柱形、椭圆形、楔形和叉形等 4 种新型涡流发生器加装于厢式货车模型的货厢顶部和侧部,详细研究了 4 种新型涡流发生器布置于厢式货车不同位置的减阻效果,并分别从压力分布、速度轨迹以及湍动能分布等 3 方面分析涡流发生器的减阻效果。在此基础上进一步分析了涡流发生器的高度和间隙比对厢式货车减阻效果的影响。该研究为厢式货车的减阻优化提供了一种新型的有效可行的方法。

## 1 原车模型及计算方法

以某国产厢式货车为原型采用三维建模软件 UG 建立货车模型,由于计算条件的限制,建模时忽略了后视镜、前大灯、排气系统、轮胎花纹等细节特征,并以光滑表面来代替货车底部。图 1 为建立的货车原始模型尺寸示意图<sup>[18]</sup>。根据经验取 8 倍车长,4.5 倍车宽,5 倍车高的长方体作为数值模拟的计算域。采用有限元软件 ANSYS Workbench 的前处理软件对长方体计算域进行网格划分,并通过在货车模型壁面设置膨胀层的方式对关键部位网格进行局部加密,最终的网格单元数为 450 万。

以计算流体动力学分析软件 ANSYS Fluent 作为仿真平台,选取稳态定常条件,并选用标准  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[19-20]</sup>来模拟该厢式货车的外流场。设定入口边界条件为速度入口,入口速度为 30 m/s,出口边界设置为压力出口,且表压为 0,壁面设置为无滑移边界条件。

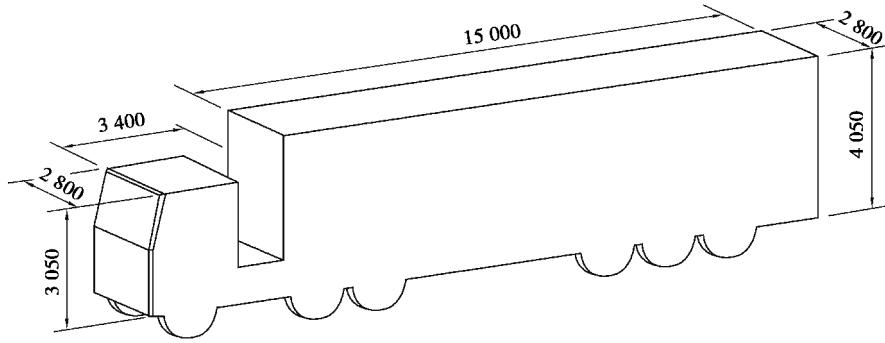


图 1 货车原始模型尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the original model size of the truck

## 2 计算结果与分析

### 2.1 新型涡流发生器设计

受航空翼型和风力机翼型涡流发生器<sup>[21-23]</sup>的启发,设计了圆柱形、椭圆形、楔形和叉形等 4 种新型涡流发生器加装于厢式货车模型的货厢顶部和侧部(位于货厢前部位置),如图 2 所示。为了保证加装涡流发生器后整车迎风面积的一致性,设计 4 种涡流发生器具有相同的高度、宽度以及相邻涡流发生器之间的间隙,具体尺寸如下:高度  $h$  为 50 mm;宽度  $W$  为 100 mm;相邻涡流发生器中心距为 400 mm。表 1 为分别安装 4 种涡流发生器货车模型的空气阻力系数及减阻率对比。由表 1 可知,设计的 4 种新型涡流发生器均具有较好的减阻效果,其中叉形涡流发生器的减阻效果最佳,相对于货车原始模型的减阻率为 8.7%。

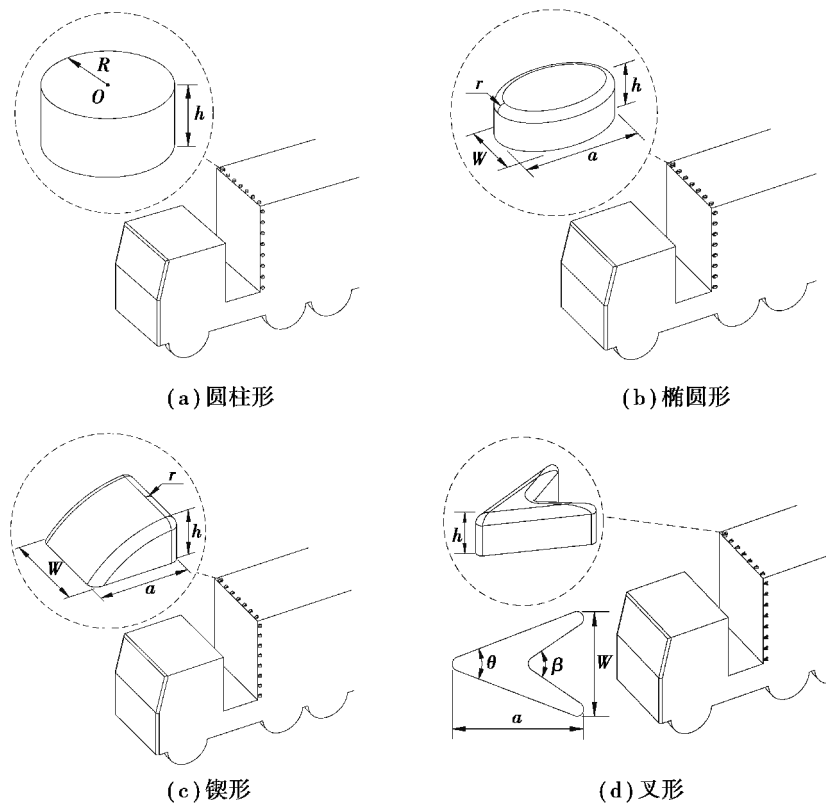


图 2 涡流发生器的形状及布置位置

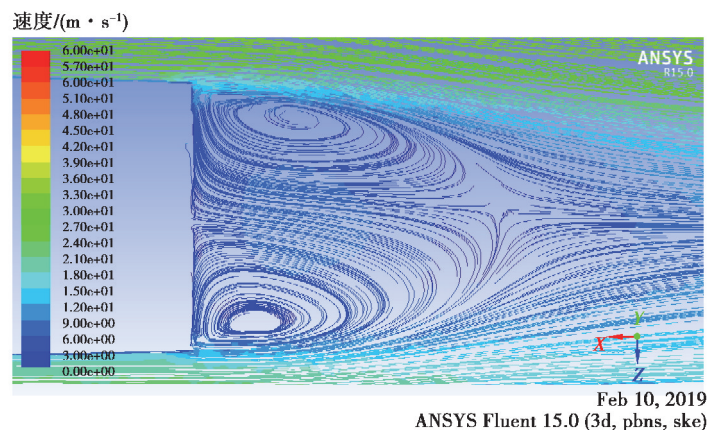
Fig. 2 The shape and arrangement position of the vortex generator

表 1 4 种涡流发生器货车模型的减阻率

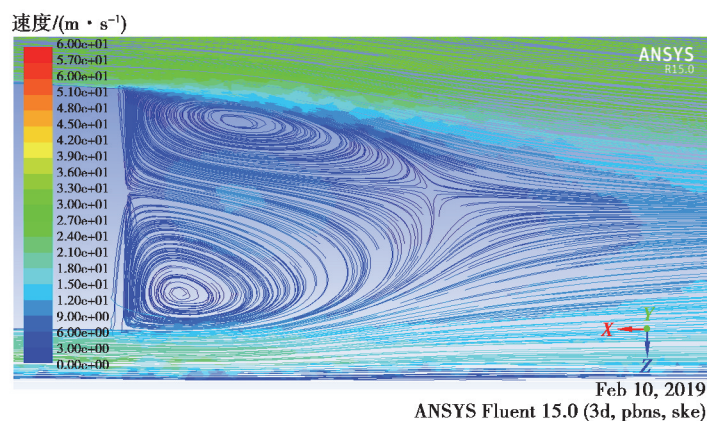
Table 1 The drag reduction rates of truck models with four types of vortex generator

货车模型	空气阻力系数	减阻率(相对于原车模型)/%
原车模型	0.792 1	0
圆柱形	0.735 3	7.2
椭圆形	0.735 2	7.2
楔形	0.768 7	2.9
叉形	0.722 8	8.7

图 3 为货车原始模型和设计的 4 种新型涡流发生器模型尾部纵向对称面的速度轨迹云图。由图可知,原始模型和安装了涡流发生器模型的尾部均出现了较强的涡流,该涡流由上下两个反向漩涡构成,一个位于货厢尾端的底部,一个位于货厢尾端的顶部。对比分析可知,原始模型尾部涡流区域的面积最大,两个尾涡中心点离货厢尾部比较近;相对于货车原始模型,装了涡流发生器模型的尾部涡流区的面积和湍流强度均有一定减小,这样尾部涡流消耗的能量也较小,这说明涡流发生器的安装可以使货车尾部气流延迟分离。其中叉形涡流发生器模型的尾部涡流区面积最小,其尾部的上下两个反向漩涡的汇合点离货车尾部距离最远。

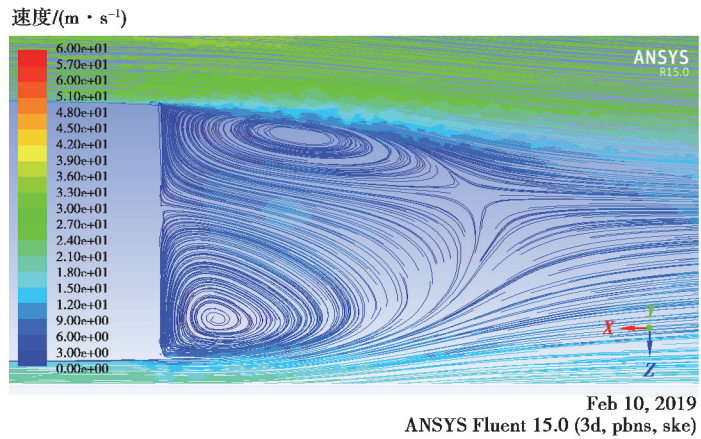


(a) 原始模型

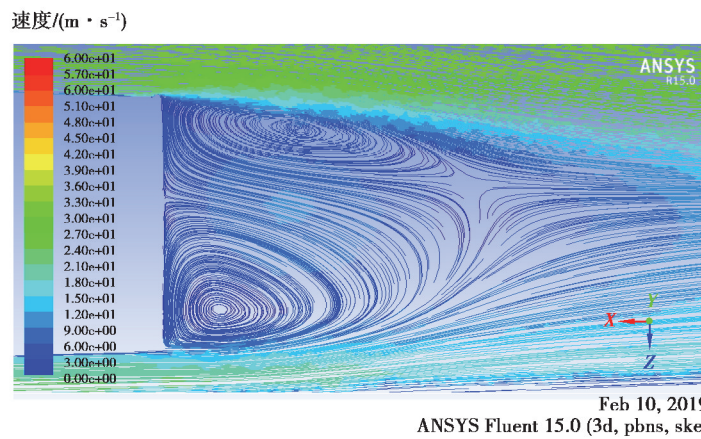


(b) 圆柱涡流发生器

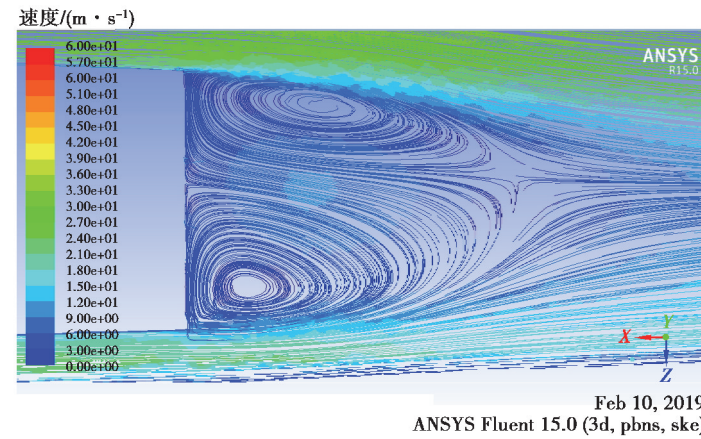




(c) 椭圆涡流发生器



(d) 楔形涡流发生器

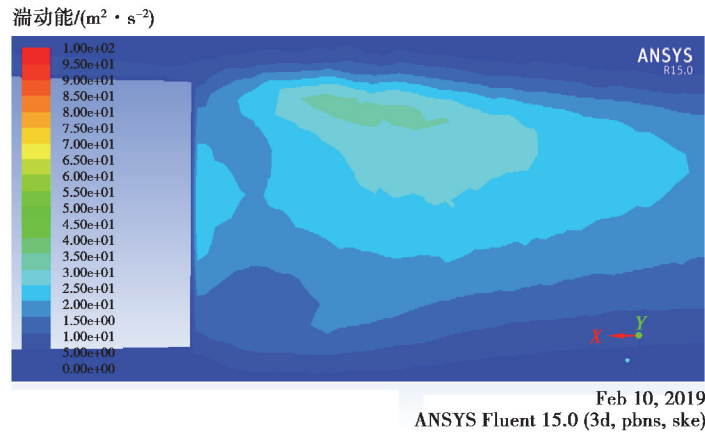


(e) 叉形涡流发生器

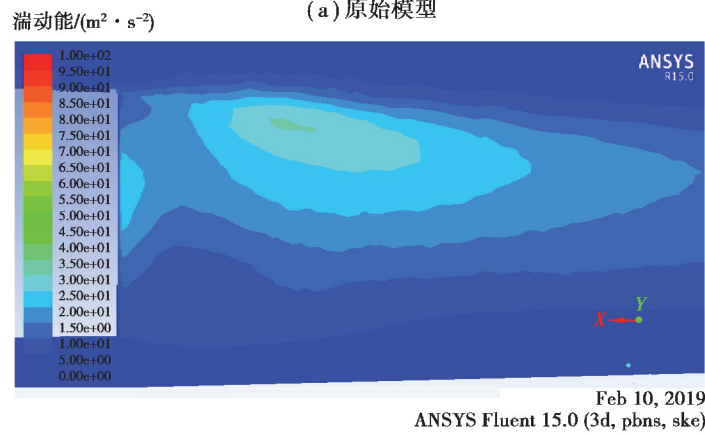
图 3 货车尾部速度流线图对比

Fig. 3 The comparison of the speed streamline diagram at the rear of the truck

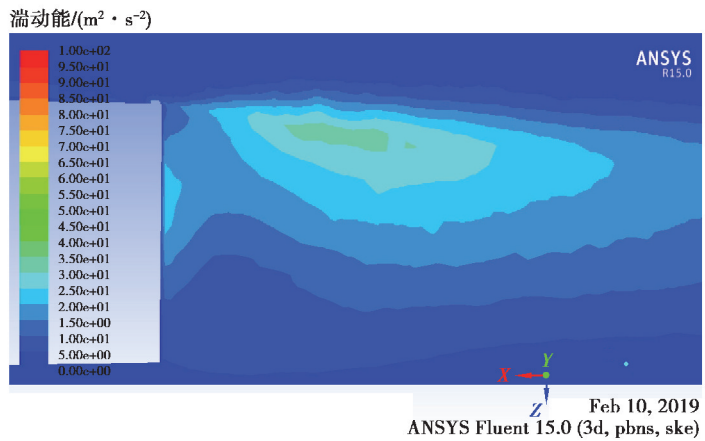
图 4 为货车原始模型和设计的 4 种新型涡流发生器模型尾部纵向对称面的湍动能云图。湍动能可以用来衡量车辆尾部气流的能量耗散。湍动能值越小,表示气流能量耗散也越小,相应的气动阻力也比较小。由图可知,原始模型与加装涡流发生器模型的尾部均出现了一定面积的高湍动能值区域。对比分析可知,货车原始模型尾部的湍动能值最大,且高湍动能区域的面积最大,表示该区域出现了严重的气流分离,从而消耗了大量的气流能量。加装涡流发生器的货车尾部湍动能值相对较小,而且高湍动能值区域离货车尾部的距离比较远,因此对货车尾部的影响较小,这也侧面证实了涡流发生器的减阻效果。



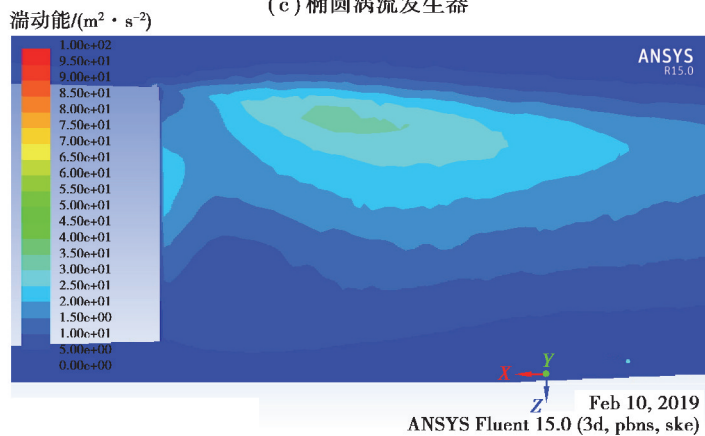
(a) 原始模型



(b) 圆柱涡流发生器



(c) 椭圆涡流发生器



(d) 楔形涡流发生器

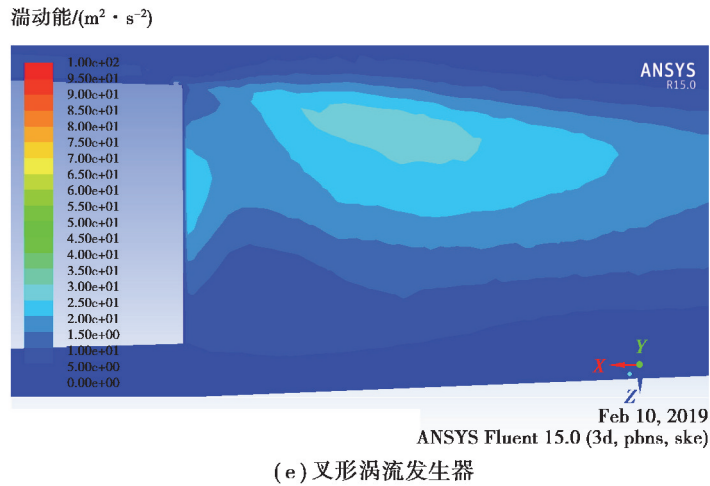


图 4 货车尾部湍动能分布云图对比

Fig. 4 The comparison of the turbulent energy distribution at the rear of the truck

### 2.2 涡流发生器布置位置的影响

图 5 为顶部和侧部涡流发生器在货厢的位置布置示意图。采用  $l/L$  来表征顶部和两侧涡流发生器在货厢上的位置,  $l/L=0$  表示涡流发生器位于货厢的最前端,  $l/L=1$  表明涡流发生器位于货厢的最后端。研究了 4 种涡流发生器分别布置于货厢 5 个位置的情况 ( $l/L=0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ )。图 6 对比了 4 种涡流发生器分别布置于货厢 5 个位置时货车模型的气动阻力系数。由图分析可知,除了位于  $0.25L$  和  $0.75L$  的楔形涡流发生器之外,布置于厢式货车不同位置的 4 种涡流发生器均具有较好的减阻效果。4 种涡流发生器在货厢的最后端时具有最佳的减阻效果。从整体趋势来看,加装涡流发生器货车模型的气动阻力系数是先增加后减小。其中叉形涡流发生器模型的气动阻力系数最小,其值为 0.699 6,相对于货车原始模型的减阻率为 11.7%,因此叉形涡流发生器是最佳的涡流发生器造型。楔形涡流发生器的减阻效果最差,圆柱形和椭圆形涡流发生器的减阻效果居中。

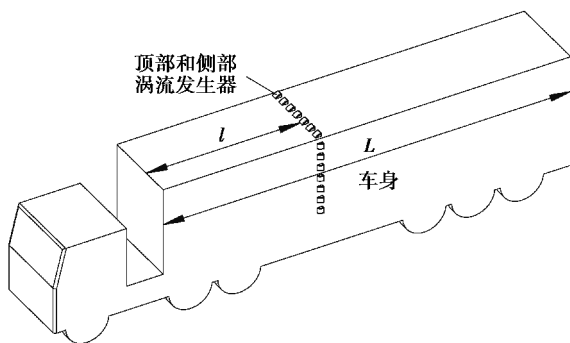


图 5 涡流发生器在货厢上的布置位置  
Fig. 5 Placement of the vortex generator on the cargo compartment

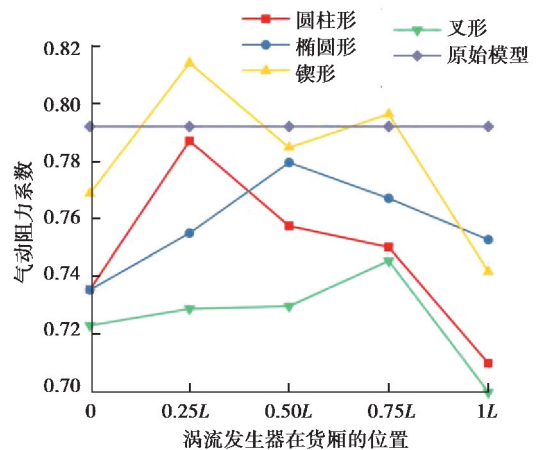
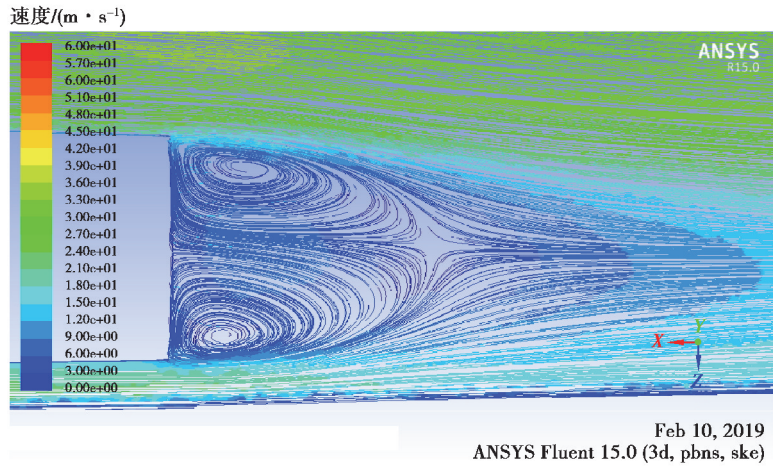


图 6 4 种涡流发生器布置位置对整车气动阻力系数的影响  
Fig. 6 Influence of arrangement position of four kinds of vortex generators on aerodynamic drag coefficient of truck

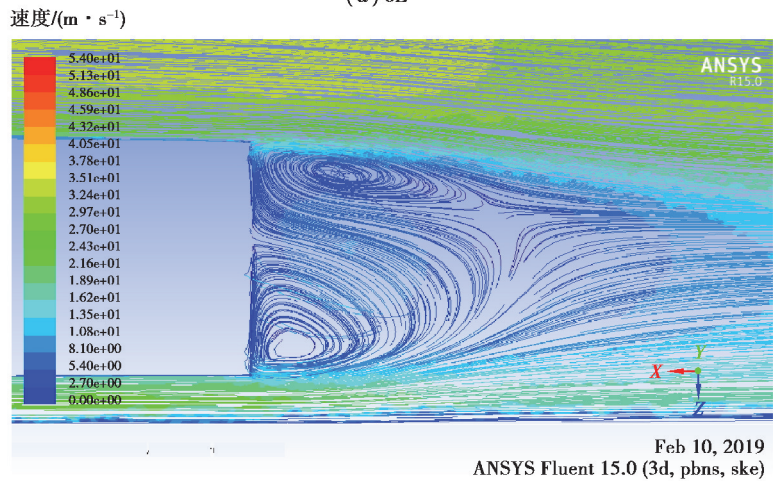
图 7 为不同位置叉形涡流发生器货车模型的尾流结构图。由图可知,货车模型尾部出现了严重的气流分离和尾涡流。为了方便分析,将尾部上部顺时针漩涡定义为上涡;将尾部下部逆时针漩涡定义为下涡。对比分析可知,叉形涡流发生器模型相对于原始模型,其尾部涡流结构改善明显,上涡和下涡的范围均有一定



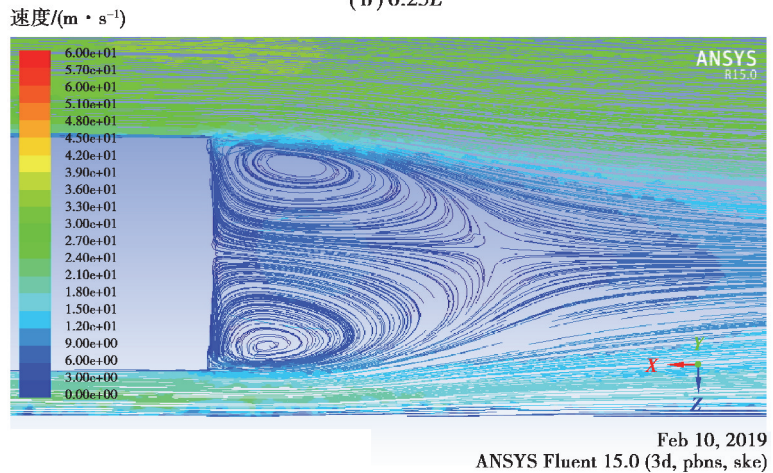
缩小,并且上下涡均远离货车尾部,上下涡气流的汇合点延迟,从而使得尾部涡流中心向后推移,货车尾部受尾涡中心低速低压区的影响减弱,尾部气流更加光滑,前后压差阻力获得减小。图 8 为不同位置叉形涡流发生器货车模型的湍动能分布云图。对比分析可知,相对于原始模型叉形涡流发生器模型尾部湍动能值明显减小,高湍动能区域面积缩小,而且高湍动能区域均有向下和向后推移,湍动能的减小降低了尾部气流的能量消耗,从而起到减阻效果。当叉形涡流发生器位于货厢后端时,其尾部湍动能最小,这也从另一方面说明叉形涡流发生器此时具有最佳的减阻效果。



(a) 0L

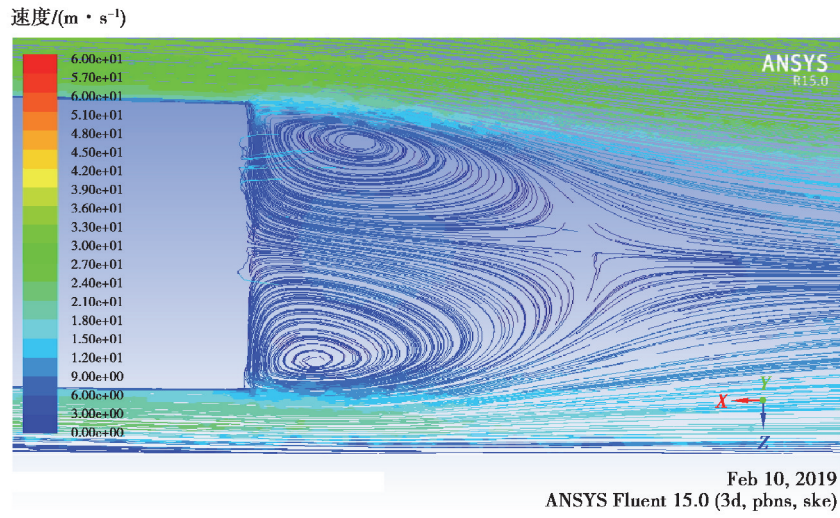


(b) 0.25L

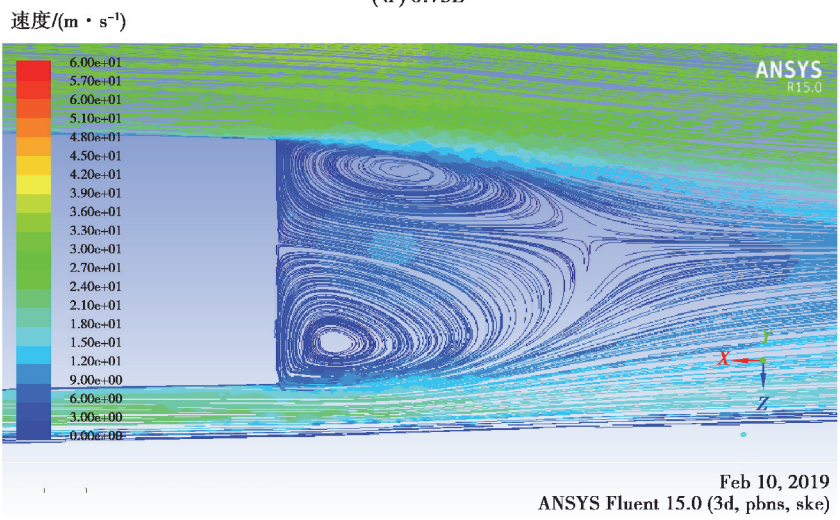


(c) 0.50L

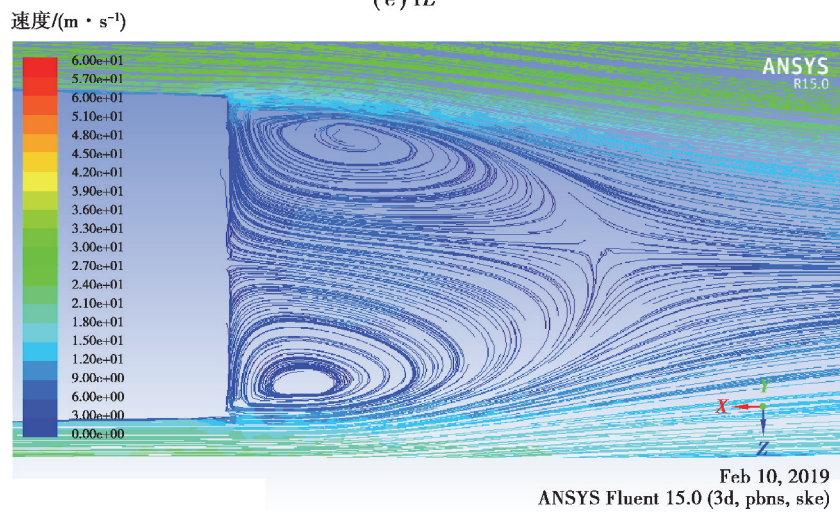




(d) 0.75L



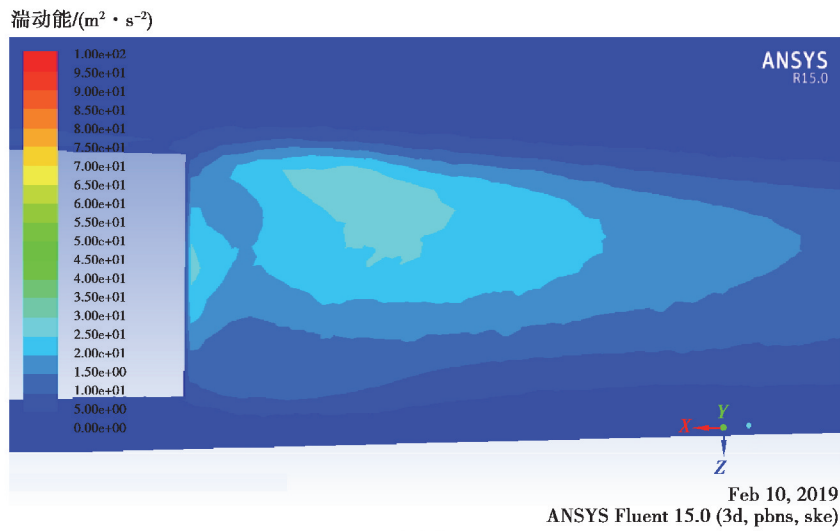
(e) 1L



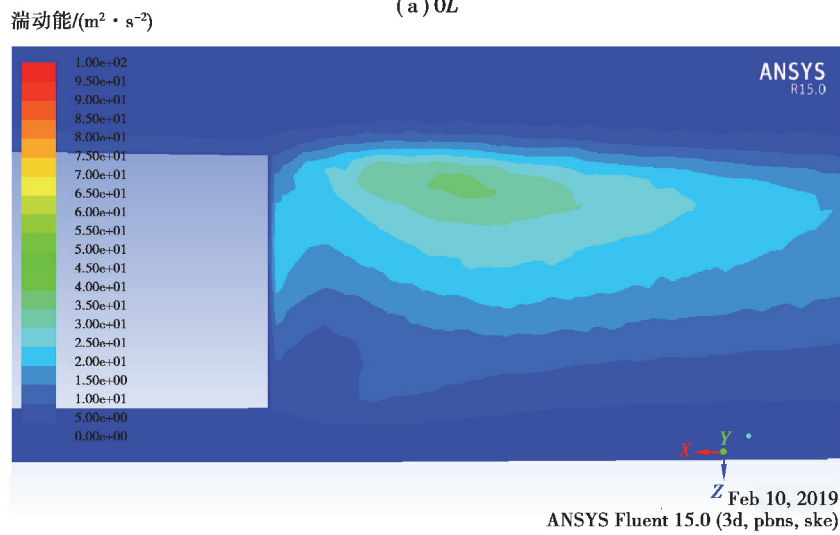
(f) 原始模型

图 7 不同位置叉形涡流发生器货车尾部速度轨迹

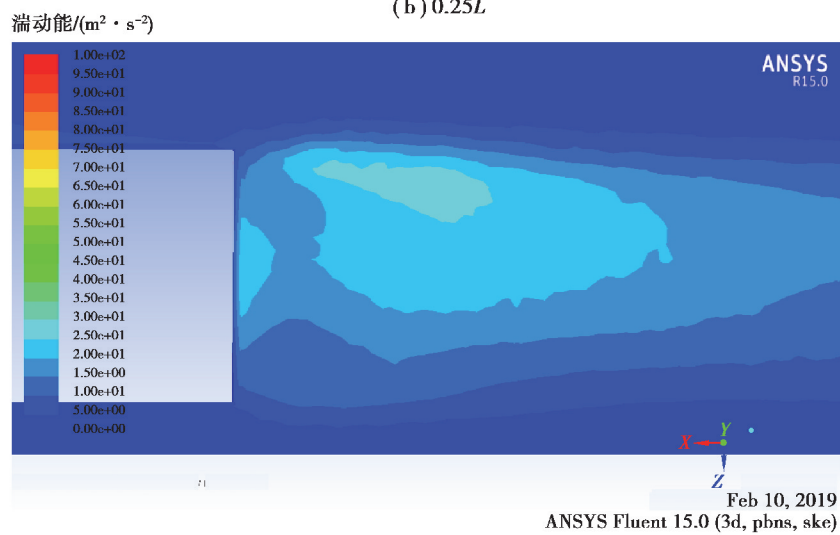
Fig. 7 The speed trajectory at the rear of the truck with a fork vortex generator installed at a different position



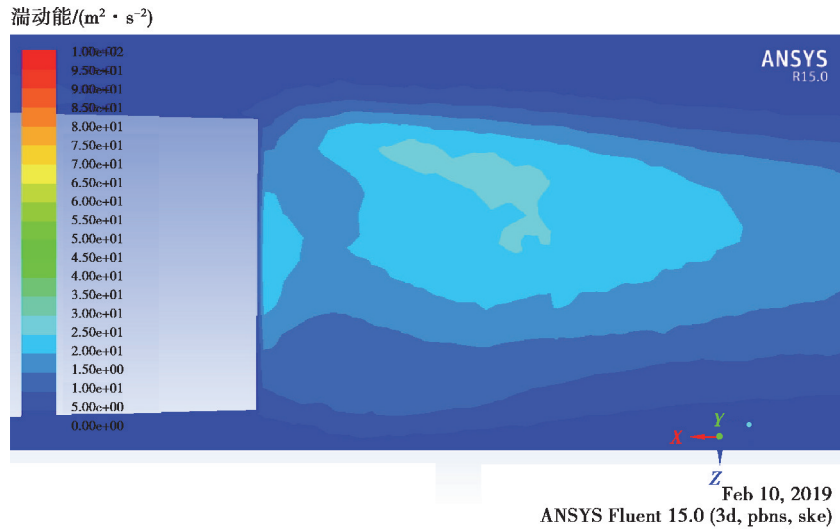
(a) 0L



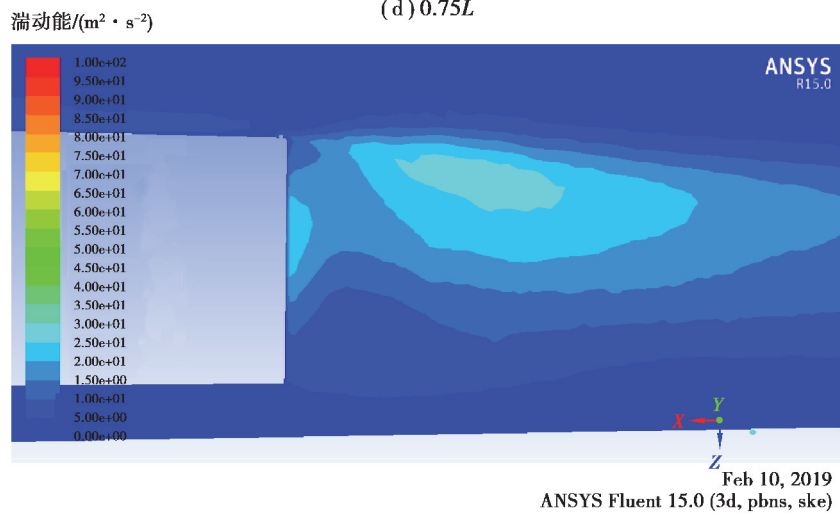
(b) 0.25L



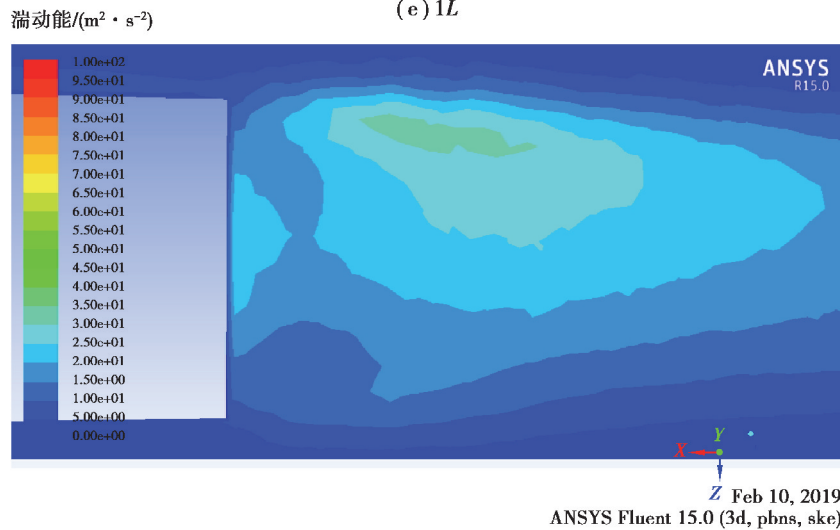
(c) 0.50L



(d) 0.75L



(e) 1L



(f) 原始模型

图 8 不同位置叉形涡流发生器货车尾部湍动能分布

Fig. 8 The turbulent energy distribution at the rear of the truck with a fork vortex generator installed at a different position

### 2.3 涡流发生器高度的影响

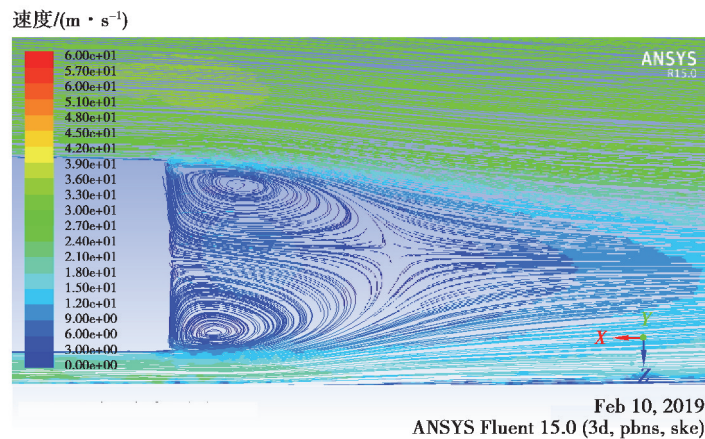
表 2 为不同高度圆柱形涡流发生器的减阻效果。由表分析可知,5 种不同高度的圆柱形涡流发生器均具有较好的减阻效果。其中高度等于 60 mm 的圆柱形涡流发生器的减阻效果最佳,相对于货车原始模型的减阻率为 8.4%。

表 2 不同高度圆柱形涡流发生器的减阻效果

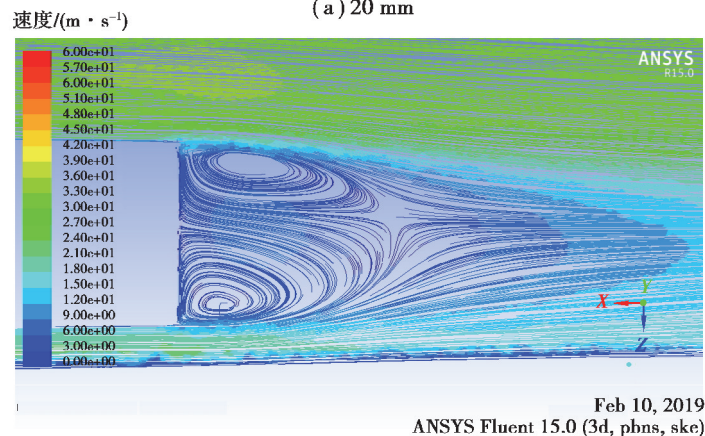
Table 2 Drag reduction effect of the cylindrical vortex generator with a different height

发生器高度 $h/\text{mm}$	空气阻力系数	减阻率(相对于原车模型)/%
20	0.746 4	5.8
30	0.750 1	5.3
40	0.728 8	8.0
50	0.735 3	7.1
60	0.725 3	8.4
原车模型	0.792 1	0

图 9 为不同高度圆柱形涡流发生器货车模型尾部速度轨迹。对比分析可知,相对于货车原始模型,不同高度圆柱形涡流发生器货车模型尾部涡流中心离车尾较远,涡流中心距离货厢尾部的距离越远,表明货车尾部受尾涡中心低速低压区的影响较小,压差阻力小,得到了较为理想的气动减阻效果。图 10 为不同高度圆柱形涡流发生器货车模型尾部湍动能分布云图。由图分析可知,不同高度圆柱形涡流发生器货车模型尾部湍动能相对于货车原始模型均有不同程度的减小,湍动能值减小,表示气流流过货车模型时的能量耗散也减小,从而货车的压差阻力减小。

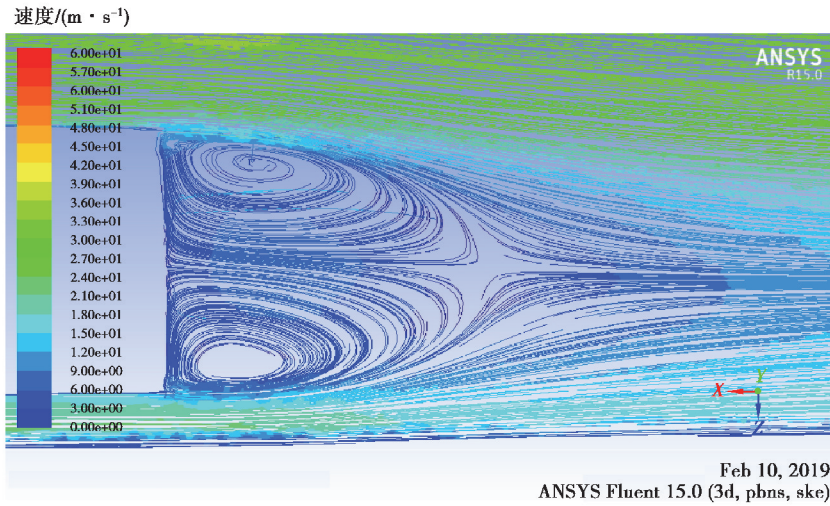


(a) 20 mm

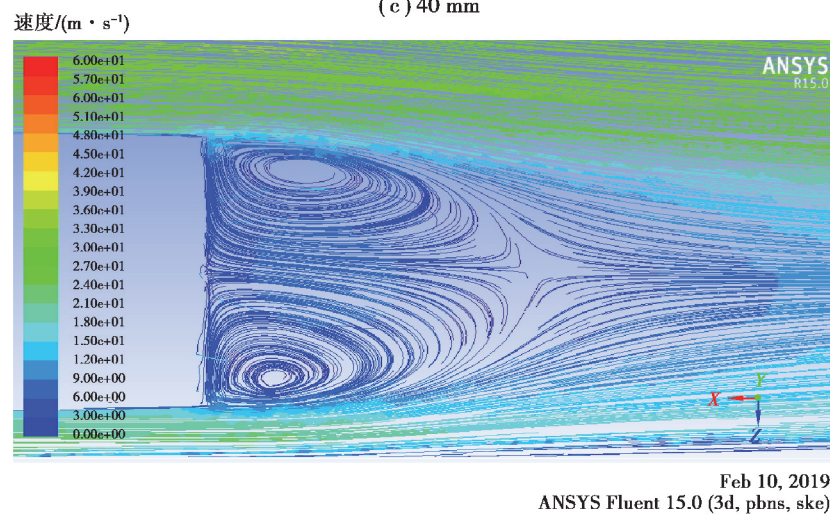


(b) 30 mm

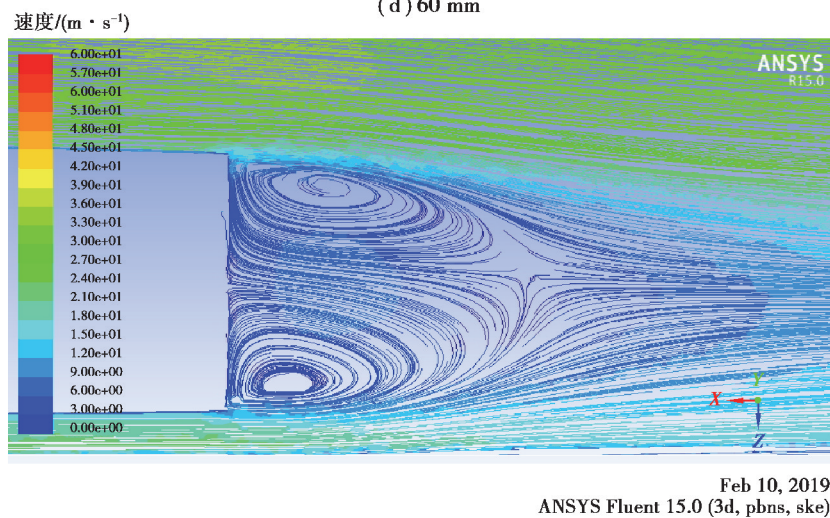




(c) 40 mm



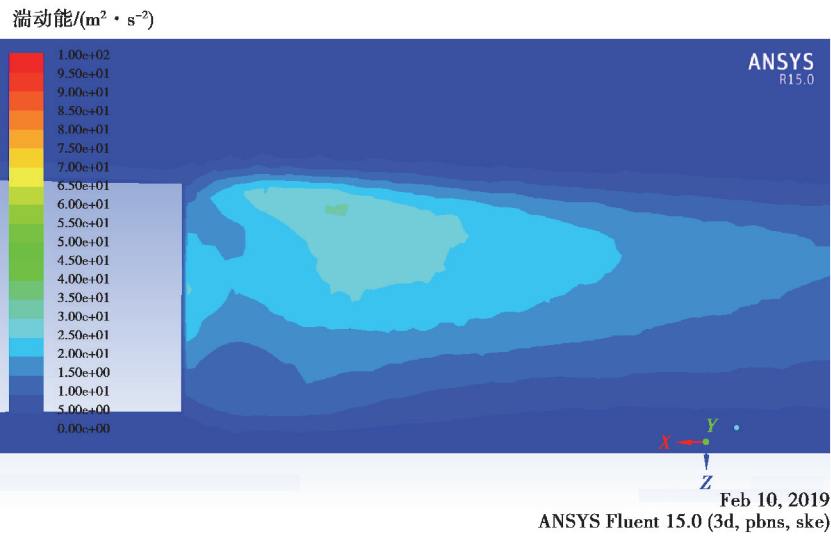
(d) 60 mm



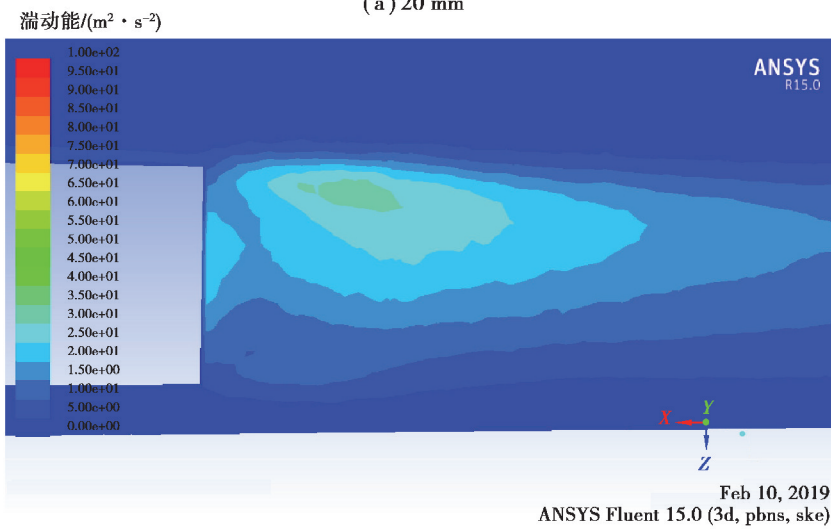
(e) 原始模型

图 9 不同高度圆柱形涡流发生器货车模型尾部速度轨迹

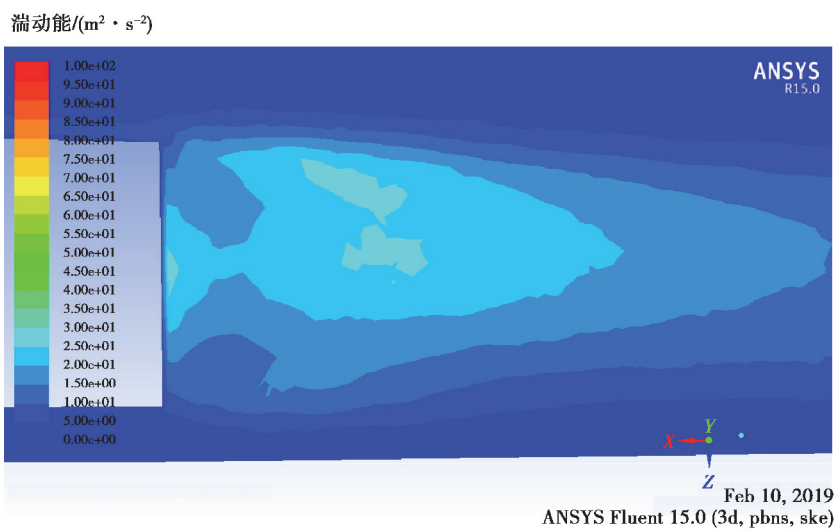
Fig. 9 The speed trajectory at the rear of the truck with a cylindrical vortex generator of a different height



(a) 20 mm



(b) 30 mm



(c) 40 mm

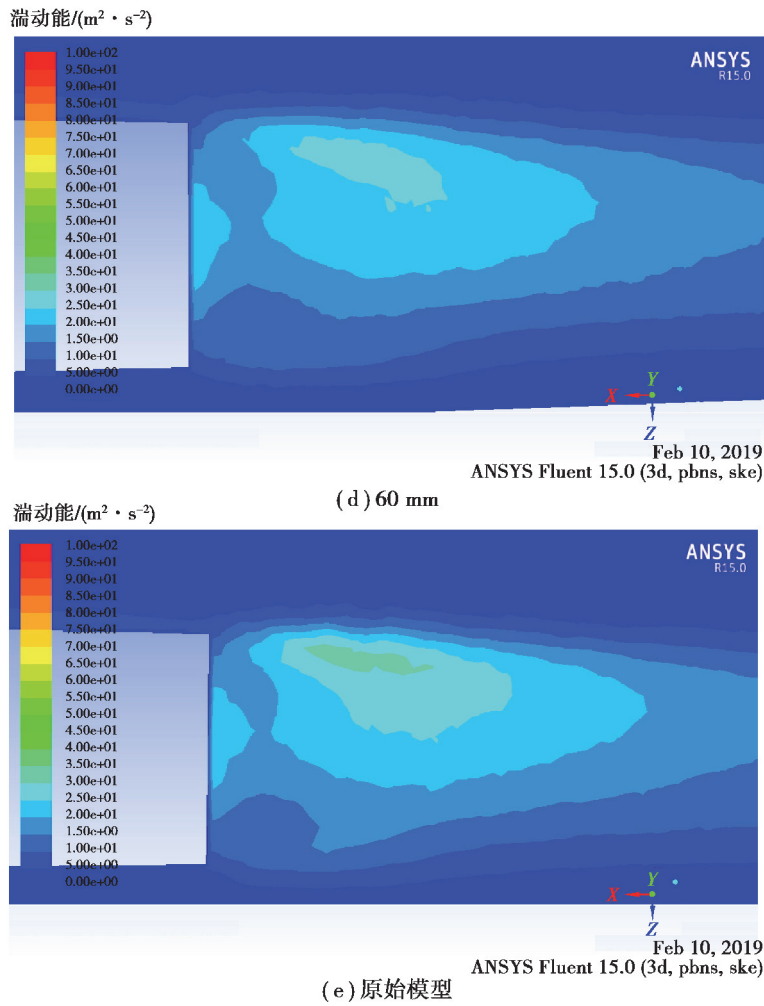


图 10 不同高度圆柱形涡流发生器货车模型尾部湍动能分布

Fig. 10 The turbulent energy distribution at the rear of the truck equipped with a cylindrical vortex generator of a varied height

### 2.4 涡流发生器间隙比的影响

图 11 为圆柱形涡流发生器间隙比示意图。表 3 为不同圆柱形涡流发生器间隙比对货车模型的减阻效果。由表可知,涡流发生器间隙比对厢式货车的气动阻力系数的影响比较大。当间隙比为 4 时,相对于原始模型的减阻率为 6.9%,减阻效果最佳。当间隙比为 5.5 时,相对于原始模型的减阻率为 -1.5%,货车气动阻力系数反而增加,这表明如果间隙比取得不当,涡流发生器不但不能减阻,反而会增加货车的气动阻力。图 12 为货车模型纵向对称面压力分布。由图分析可知,涡流发生器对货车前部压力没有影响,影响的主要是货车尾部压力。相对于货车原始模型,安装间隙比为 4.0 的圆柱形涡流发生器模型的尾部负压区有明显减小,正压区增大,从而使货车模型前后的压差阻力减小,总的气动阻力也减小。

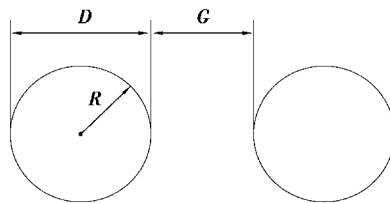


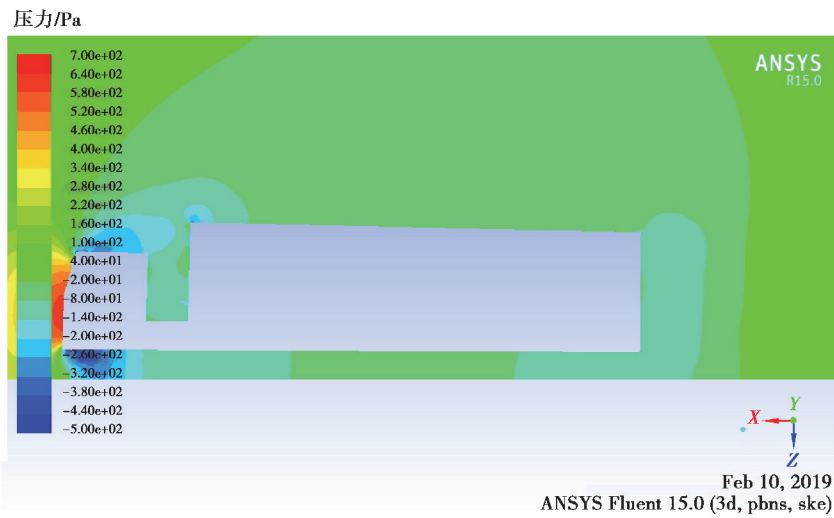
图 11 圆柱形涡流发生器间隙比示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the gap ratio of the cylindrical vortex generator

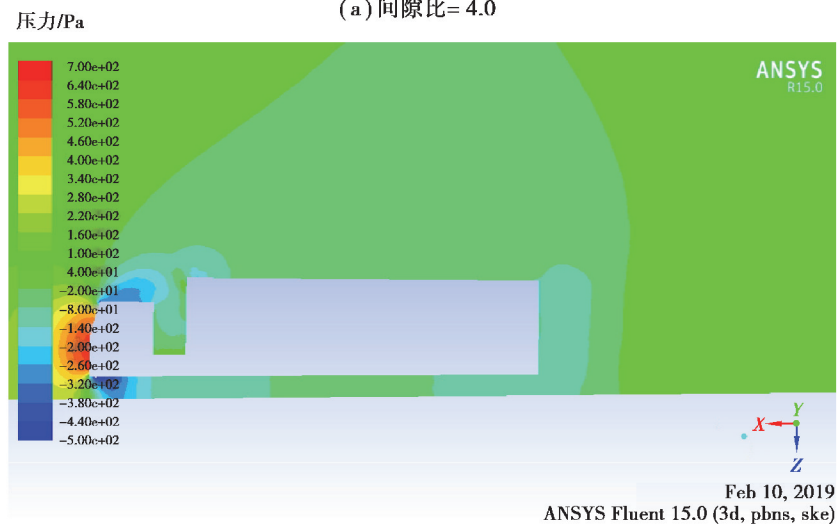
表 3 不同圆柱形涡流发生器间隙比的减阻效果

Table 3 Effect of gap ratio of the cylindrical vortex generator on the drag reduction

间隙比	空气阻力系数	减阻率(相对于原车模型)/%
3.5	0.786 9	0.65
4.0	0.736 8	6.90
4.5	0.747 0	5.60
5.0	0.793 7	-0.20
5.5	0.803 9	-1.50
6.0	0.764 2	3.50
原车模型	0.792 1	0.00



(a) 间隙比= 4.0



(b) 原始模型

图 12 货车模型纵向对称面压力分布

Fig. 12 Pressure distribution on the longitudinal symmetry plane of truck model



### 3 结 论

1)设计的圆柱形、椭圆形、楔形和叉形等 4 种新型涡流发生器对厢式货车均具有较好的减阻效果。涡流发生器的形状和布置位置对厢式货车气动阻力的影响较大。其中叉形涡流发生器位于货厢后端时的气动阻力系数最小,其值为 0.699 6,相对于货车原始模型的减阻率为 11.7%,因此叉形涡流发生器是最佳的涡流发生器造型。楔形涡流发生器的减阻效果最差,圆柱形和椭圆形涡流发生器的减阻效果居中。

2)涡流发生器的高度和间隙比对货车模型的减阻效果均具有显著的影响。对于圆柱形涡流发生器,当高度为 60 mm,间隙比为 4.0 时的减阻效果最佳。如果间隙比取得不当,涡流发生器不但不能减阻,反而会增加货车的气动阻力。

3)涡流发生器将边界层内的低速气流与外部的高速气流进行掺混,增加边界层内的气流能量。涡流发生器减小货车尾部涡流区的面积和强度,降低尾部涡流消耗的能量。涡流发生器使尾部上下涡气流的汇合点延迟,从而使得尾部涡流中心向后推移,这说明安装涡流发生器使货车尾部气流延迟分离,从而使货车的前后压差阻力减小。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Altaf A, Omar A A, Asrar W. Passive drag reduction of square back road vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 134: 30-43.
- [ 2 ] 杨易,黄剑锋,范光辉,等.非光滑表面对汽车尾涡结构的控制分析研究[J].机械工程学报,2016,52(8):133-140.  
YANG Yi, HUANG Jianfeng, FAN Guanghui, et al. Research on non-smooth surfaces for control of the automobile trailing vortex structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(8):133-140. (in Chinese)
- [ 3 ] 张英朝,薛学栋,丁伟,等.某两厢车气动外形减阻自动优化设计[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(11):1771-1775,1795.  
ZHANG Yingchao, XUE Xuedong, DING Wei, et al. Automatic shape optimization of hatchback to reduce aerodynamic drag[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(11): 1771-1775, 1795. (in Chinese)
- [ 4 ] 王靖宇,王泽伟,顾庆童,等.弯道行驶车辆瞬态气动特性的数值模拟[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(1):44-48.  
WANG Jingyu, WANG Zewei, GU Qingtong, et al. Numerical simulation of transient aerodynamic characteristics of turning vehicle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 44-48. (in Chinese)
- [ 5 ] Lo K H, Kontis K. Flow characteristics over a tractor-trailer model with and without vane-type vortex generator installed[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 159: 110-122.
- [ 6 ] 张英朝,丁伟,陈涛,等.商用车驾驶室导流罩气动造型设计[J].汽车工程,2014,36(9):1063-1067.  
ZHANG Yingchao, DING Wei, CHEN Tao, et al. Aerodynamic styling of fairing for commercial vehicle cab[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(9): 1063-1067. (in Chinese)
- [ 7 ] Kim J J, Lee S, Kim M, et al. Salient drag reduction of a heavy vehicle using modified cab-roof fairings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 164: 138-151.
- [ 8 ] Khosravi M, Mosaddeghi F, Oveisi M, et al. Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4645-4652.
- [ 9 ] Choi H, Lee J, Park H. Aerodynamics of heavy vehicles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 441-468.
- [ 10 ] 杨小龙,邹宏伟,张泽坪.厢式货车尾部非光滑表面导流板减阻效果研究[J].汽车工程,2016,38(7):815-821.  
YANG Xiaolong, ZOU Hongwei, ZHANG Zeping, et al. A study on the drag reduction effects of rear deflector with non-smooth surface for a cargo van[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(7): 815-821. (in Chinese)
- [ 11 ] Lee E J, Lee S J. Drag reduction of a heavy vehicle using a modified boat tail with lower inclined air deflector[J]. Journal of Visualization, 2017, 20(4): 743-752.
- [ 12 ] 胡兴军,李腾飞,王靖宇,等.尾板对重型载货汽车尾部流场的影响[J].吉林大学学报(工学版),2013,43(3):595-601.  
HU Xingjun, LI Tengfei, WANG Jingyu, et al. Numerical simulation of the influence of rear-end panels on the wake flow field of a heavy-duty truck[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(3): 595-601. (in Chinese)

- [13] 张英朝, 杜冠茂, 朱会, 等.  $25^\circ$  Ahmed 模型射流主动控制气动减阻策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 100-108.  
ZHANG Yingchao, DU Guanmao, ZHU Hui, et al. Strategy of active flow control to reduce aerodynamic drag with steady jet for  $25^\circ$  Ahmed model[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(1): 100-108. (in Chinese)
- [14] Joseph P, Amandolèse X, Aider J L. Drag reduction on the  $25^\circ$  slant angle Ahmed reference body using pulsed jets[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(5): 1169-1185.
- [15] Littlewood R P, Passmore M A. Aerodynamic drag reduction of a simplified squareback vehicle using steady blowing[J]. Experiments in Fluids, 2012, 53(2): 519-529.
- [16] Rouméas M, Gilliéron P, Kourta A. Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(1): 60-70.
- [17] 李斌斌, 姚勇, 印帅, 等. 基于涡流发生器的 Ahmed 模型分离流被动控制实验[J]. 西南科技大学学报, 2016, 31(3): 95-101.  
LI Binbin, YAO Yong, YIN Shuai, et al. Experimental investigation on passive control of Ahmed model separation flow based on vortex generator[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2016, 31(3): 95-101. (in Chinese)
- [18] 许建民, 范健明. 基于正交试验法的厢式货车气动减阻优化[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(3): 12-26.  
XU Jianmin, FAN Jianming. Optimization of pneumatic drag reduction of van type truck based on orthogonal test method[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(3): 12-26. (in Chinese)
- [19] 谷正气, 申红丽, 杨振东, 等. 汽车空调风道改进及对乘员热舒适性影响分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(8): 91-96, 104.  
GU Zhengqi, SHEN Hongli, YANG Zhendong, et al. Improvement of vehicle air-conditioning duct and analysis of its impact on occupant thermal comfort[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(8): 91-96, 104. (in Chinese)
- [20] 李以农, 王雷, 柳承峰, 等. 汽油机歧管式催化转化器流固耦合热应力分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(4): 1-6.  
LI Yinong, WANG Lei, LIU Chengfeng, et al. Fluid-structure thermal simulation of gasoline engine manifold catalytic converter[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(4): 1-6. (in Chinese)
- [21] 张进, 刘景源, 张彬乾. 微型涡流发生器对超临界翼型减阻机理实验与数值分析[J]. 实验流体力学, 2016, 30(4): 37-41.  
ZHANG Jin, LIU Jingyuan, ZHANG Binqian. Experimental and CFD study on the mechanism of supercritical airfoil drag reduction with micro vortex generators[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(4): 37-41. (in Chinese)
- [22] 张惠, 赵宗德, 周广鑫, 等. 涡流发生器对风力机翼型气动性能影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 951-958.  
ZHANG Hui, ZHAO Zongde, ZHOU Guangxin, et al. Experimental investigation of effect of vortex generator on aerodynamic performance of wind turbine airfoil[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2017, 38(4): 951-958. (in Chinese)
- [23] 徐志明, 韩志敏, 王景涛, 等. 卧式半圆柱型涡流发生器的传热与阻力特性及场协同理论分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 166-172.  
XU Zhiming, HAN Zhimin, WANG Jingtao, et al. Heat transfer and flow resistance characteristics of the horizontal semi-cylindrical vortex generators and analysis with field synergy theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 166-172. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)