DrivAer轿车表面V型流向沟槽减阻方法的试验研究

赵峰　张惠林　耿子海　李松锜　陈钰婷　牛莎莎

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518100）

【欢迎引用】赵峰，张惠林，耿子海，等. DrivAer轿车表面V型流向沟槽减阻方法的试验研究[J]. 汽车文摘，2026(5): 53-62.

【Cite this paper】ZHAO F, ZHANG H L, GENG Z H, et al. An Experimental Investigation on Drag Reduction by V-Shaped Stream-Wise Grooves on DrivAer Model Surface[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(5): 53-62.

【摘要】为了优化新能源汽车气动构型低风阻技术，将流动控制减阻方法引入新能源车低风阻设计中，针对V型流向沟槽减阻方法开展了试验研究。在低速回流风洞中，对光滑表面与V型沟槽表面的DrivAer轿车模型分别进行了阻力、尾流湍流度与旋涡结构的测量。结果表明：当Re处于6×10^5~3×10^6范围内，阻力系数随雷诺数增大而降低，V型流向沟槽具有显著减阻效果；当Re为3×10^6时，阻力系数降低0.003，其作用机理体现为尾流湍流度下降与旋涡结构尺度减小，与湍流减阻理论一致，证实了V型流向沟槽在工程应用中的减阻价值，为新能源汽车的低风阻气动设计提供了新思路。

关键词：新能源汽车；流动控制减阻；V型流向沟槽；湍流减阻机理

中图分类号：U461.1　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250226

An Experimental Investigation on Drag Reduction by V-Shaped Stream-Wise Grooves on DrivAer Model Surface

Zhao Feng, Zhang Huilin, Geng Zihai, Li Songqi, Chen Yuting, Niu Shasha

（BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518100）

【Abstract】 To optimize the low-drag aerodynamic configurations for new energy vehicles, flow control drag reduction methods are adopted into the low-drag design of new energy vehicles. An experimental investigation is conducted on the drag reduction effect of V-shaped streamwise grooves. Tests are performed in a low-speed recirculating wind tunnel using a DrivAer sedan model with both smooth and V-groove surfaces. Measurements include drag force, wake turbulence intensity, and vortex structures. The results show that within the Reynolds number (Re) range of 6×10^5 to 3×10^6, the drag coefficient decreases with increasing Re, and the V-groove surface exhibits a significant drag reduction effect. At Re=3×10^6, the drag coefficient decreases by 0.003. The underlying mechanism is attributed to reduced wake turbulence intensity and smaller vortex scales, which aligns with turbulent drag reduction theory. These findings confirm the engineering applicability of V-shaped streamwise grooves and provide a new perspective for the low-drag aerodynamic design of new energy vehicles.

Key words: New energy vehicle, Flow control for drag reduction, V-shaped flow groove, Mechanism of turbulence drag reduction

0　引言

在全球能源结构转型的背景下，新能源汽车的续航能力与能源利用效率已成为其核心竞争力。降低气动阻力是提升车辆续驶里程、减少能量消耗的关键途径，对实现绿色低碳交通具有重要意义[1]。在车型研发过程中，气动外形的构型优化与先进的流动控制技术是达成低风阻设计目标的两大关键技术[2]。风洞试验作为验证气动性能、揭示流动机制的核心手段，不仅可直接评估设计方案的减阻效果，更能为低风阻车型优化技术路线提供定量化依据[3]。

为突破传统气动造型优化的性能瓶颈，新型流动控制减阻技术成为行业研究热点[3]。其中，V型流向沟槽作为一种被动流动控制技术，源于对鱼类的仿生研究。研究表明，鲨鱼等快速游动生物体表面鳞片所具有的微观沟槽结构能有效抑制横向流动、稳定边界

通信作者：耿子海（1973—），高级工程师，研究方向为汽车空气动力学、汽车风洞试验技术、流动显示与控制减阻等，gzhlqtt_11@163.com。

层，从而显著降低游动阻力。后续研究将这一复杂生物结构简化为规则的V型沟槽，并发现在特定无量纲尺寸下（高度h^+≤25，宽度s^+≤30）仍能保持显著的减阻效果[4-6]。V型流向沟槽减阻最初主要应用于航空飞行器和水下航行器，清华大学、上海交通大学等高校团队对V型流向沟槽减阻机理开展了系统研究，明确了V型流向沟槽能够改变湍流结构、削弱流向涡，减小边界层速度梯度、降低湍流动能[7-9]。西北工业大学流动控制团队开展了V型流向沟槽减阻研究，应用直接数值模拟方法对微结构仿生壁面结构、减阻效果等进行了系统分析，明确了具有减阻效果的流向沟槽无量纲特征尺寸、流向涡分布规律，以及对湍流度的弱化效果[10]。

为了探究V型流向沟槽技术在新能源汽车低风阻设计中的实际应用潜力，本文以DrivAer轿车模型为研究对象，在低速风洞中开展了系统的对比试验，旨在量化评估该技术在典型车辆雷诺数范围内的减阻效益，并通过测量尾流场湍流度与旋涡结构，从流动机理层面阐释其作用机制，以期为新能源汽车的低风阻气动设计提供新的技术视角与试验依据。

1 V型沟槽的减阻机理

目前，学术界对V型沟槽的减阻机理主要存在3种理论阐释：突出高度理论（Protrusion height theory）、第二涡群理理论（Secondary vortex theory）和微空气轴承理论[11]。

Bechert等[12]依据粘性底层等效厚度与减阻效果提出“突出高度”理论。“突出高度”定义为沟槽顶部与沟槽壁面的等价光滑壁面之间的距离，即沟槽顶部至表观起点所在平面的距离，如图1所示。该理论认为沟槽的减阻机理为：沟槽的存在使其表面的“突出高度”大于光滑表面，这相当于增加了粘性底层厚度，减小了速度梯度，从而减小了壁面摩擦阻力。由于沟槽横向“突出高度”较大，限制了瞬时横流的产生与发展，抑制了动量交换，减小了湍动能变化。Baron和Quadrio[13]在低速风洞中开展了系列试验，结果表明沟槽壁面边界层速度型有所抬升，粘性底层增厚，与突出高度理论一致。Luchini等[14]在该理论的基础上，进一步研究并提出了“突出高度差”理论，即沟槽壁面的“纵向突出高度”大于其“横向突出高度”，这使得横向流动的产生被抑制，降低边界层内的湍动能，使阻力降低。

Bacher与Smith[15]提出了“第二涡群”理论，其中二次涡由反向的流向涡与沟槽顶部相互作用产生，如图2所示。该理论的微结构壁面作用机理为：近壁区反向旋转的流向涡尺度略大于沟槽间距，使其得以保持在沟槽上方仅与沟槽尖端相互作用，产生二次涡。二次涡削弱了流向涡强度，使沟槽内部的低速条带运动更加稳定。由于较高速度的涡流仅与沟槽尖端的较小表面积相互作用，只有该局部区域承受较高的剪切应力，该区域之外的沟槽内部区域则受到非常低的剪切应力，使得因浸润面积增加产生的不利影响得到弱化甚至抵消，最终二者的综合作用使沟槽壁面的总阻力降低。Lee等[16]通过试验对该理论进行了验证，结果表明沟槽壁面抑制了流向涡的横向运动，降低了横向动量交换。

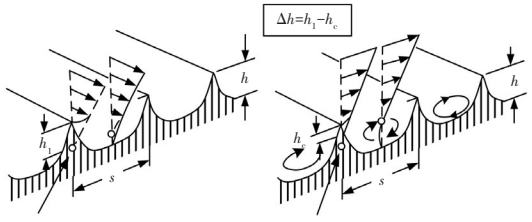


图1 V型沟槽减阻的“突出高度理论”示意

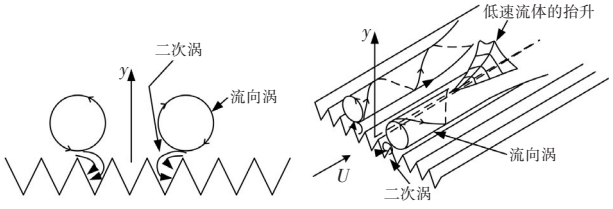


图2 V型沟槽减阻的“第二涡群理论”示意

微空气轴承理论是解释V型沟槽减阻机理的另一个重要观点。该理论认为，垂直于流动方向、具有特定截面尺寸的沟槽肋条能够“捕获”近壁区的小尺度涡结构。这些被约束在沟槽内的小涡在演化过程中保持旋转运动，其作用类似于一系列“微型轴承”。试验结果表明，微沟槽表面的沟谷内形成了低速旋涡，抑制了湍流发生，使流体与壁面间由滑动摩擦变成了滚动摩擦，从而减小了阻力[17]。

基于上述理论可知，众多学者围绕V型流向沟槽的减阻效果开展了大量研究，证实了微结构尺度的沟槽可显著改变湍流边界层特性，从而实现减阻。在湍流结构方面，Gallagher与Thomas[18]基于变间隔时间平均法（Varying Interval Time Average Method, VITA）开展了研究，结果表明相较于光滑壁面，V型沟槽壁面的湍流猝发频率下降了约30%。Hooshmand等[19]研究表明，减阻沟槽使近壁区湍流强度降低5%~8%。Choi[20]进一步指出，在无量纲高度h^+<70范围内，流向、法向和展向3个方向的湍流强度均显著降低，且雷诺应力降低约20%。此外，Vukoslavcevic等[21]研究表明，沟槽

内部湍流脉动强度减弱，速度分布的平坦系数和偏斜系数增大。Park与Wallace[22]研究表明，湍流强度与雷诺应力在空间分布上呈现不均匀性：雷诺应力在沟槽顶部区域略有升高，而在沟槽底部区域则大幅降低。上述系统性研究为V型沟槽的减阻机理提供了多角度的实证支持。

2 技术路线与试验系统

2.1 技术路线

本研究通过风洞试验，系统验证V型流向沟槽的减阻效果，探究其流动机理，并评估其工程应用潜力。依据风洞试验段特征尺寸和测力试验标准确认风洞试验模型的总体尺寸，风洞试验段横截面宽1.8 m、高1.4 m、长5 m，横截面积2.52 m^2。为满足汽车风洞测力试验阻塞率需<5%，本研究选用1∶4缩比DrivAer轿车模型（长0.922 m、宽0.406 m、高0.284 m），其阻塞率为4.5%。

首先，选择V型沟槽的深度无量纲参数h^+和宽度无量纲参数s^+；然后，依据工程估算方法计算得到布置在模型表面的V型流向沟槽的实际尺寸。V型流向沟槽设计过程如下[23]：

（1）确认V型流向沟槽的无量纲参数h^+和s^+的取值范围，即$h^+<25$、$s^+<30$；

（2）计算模型区流场特征雷诺数Re_L，$Re_L=\frac{LU_\infty}{\gamma}$，模型长度$L$为0.922 m，$U_\infty$为10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s，$6\times10^5\leqslant Re_L\leqslant3\times10^6$，依据$Re_L$值选择工程估算公式；

（3）估算模型表面摩擦因数C_f，$C_f=\frac{0.026}{(Re_L)^{\frac{1}{7}}}$；

（4）估算模型表面摩擦应力τ_w，$\tau_w=\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 C_f$和摩擦速度$U^*$，$U^*=\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$；

（5）依据无量纲特征值定义，计算V型沟槽深度和宽度尺寸h^+、s^+，$h^+=\frac{hU^*}{v}$，$s^+=\frac{sU^*}{v}$。

制定测力试验、测尾流场湍流度试验和测尾流场旋涡结构试验的实施方案。通过光滑表面模型和V型流向沟槽表面模型的盒式天平测力试验结果验证该方法的减阻效果。通过光滑表面模型和V型流向沟槽表面模型的热线风速仪测湍流度试验验证该方法的湍流度控制效果。通过光滑表面模型和V型流向沟槽表面模型的粒子图像测速（Particle Image Velocimetry，PIV）系统测尾流场旋涡结构试验验证该方法的尾流旋涡控制效果。

2.2 试验系统

此次研究的试验系统包括风洞、DrivAer轿车模型、测力天平、热线风速仪和PIV系统。

2.2.1 风洞

风洞是某实验室研究型低速回流风洞（图3），该风洞具有开口和闭口可互换试验段，本试验在闭口试验段完成，试验段截面宽1.8 m、高1.4 m、长5 m，试验段下洞壁具有转盘机构，可实现-180°~180°的模型侧滑姿态调整，试验段稳定流速范围为20~110 m/s。



图3 低速回流风洞

2.2.2 试验模型

试验模型是2个1∶4的DrivAer轿车模型，一个是光滑表面，另一个部分区域带有V型沟槽表面。为保证试验安全需求，模型主体使用实木为原材料，表面包覆5 mm厚的玻璃钢，一方面保证模型表面光洁度，另一方面保证制作的表面流向沟槽满足设计需求，如图4所示。V型流向沟槽深1 mm，宽1 mm[24-26]，布置在车顶和底盘如图5、图6和图7所示。模型外表面喷涂黑色哑光漆，避免PIV试验发生壁面反光。



图4 DrivAer轿车模型

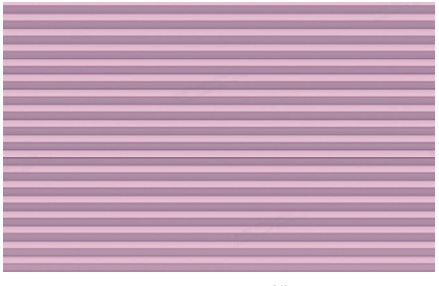


图5 V型流向沟槽结构

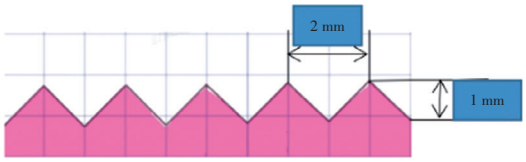
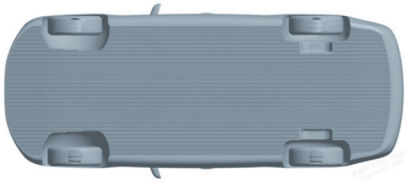
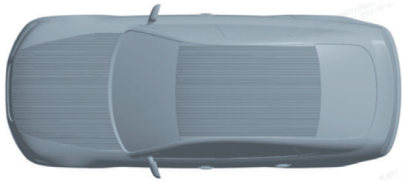


图6　V型流向沟槽特征尺寸



(a)车身底部



(b)车身顶部

图7　V型流向沟槽在模型表面布置

2.2.3　测力系统

测力试验选用载荷匹配的盒式六分量天平(图8),天平安装在风洞外,天平与DrivAer轿车模型通过翼型支杆连接(图9)。

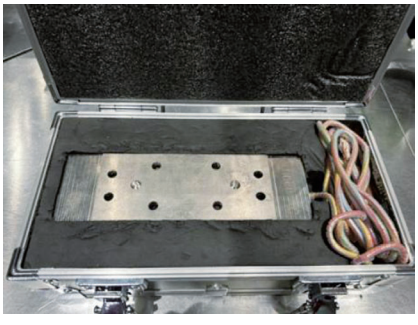


图8　测力天平

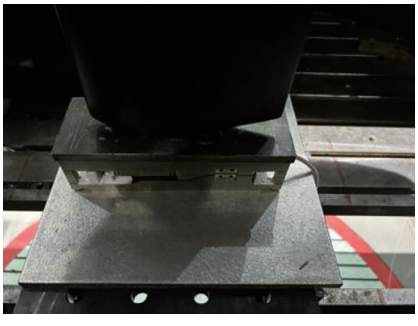


图9　天平与模型连接

2.2.4　热线风速仪

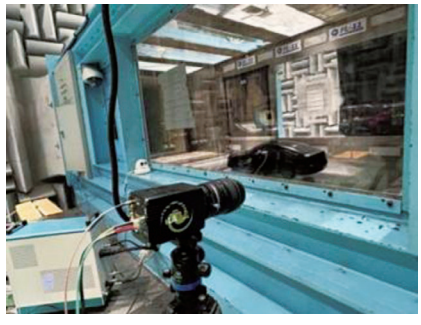
湍流度测量采用丹麦丹迪公司的Streamline热线风速仪设备(图10),配备55P11一维探头和55P61二维探头,测点布置于风洞试验段的中心,系统配置的采集卡分辨率为16位。数据采样频率为20 kHz,采样时间为30 s。热丝材料采用直径为5 μm的镀铂钨丝,长度为1.25 mm,电阻温度系数为0.003 6 K^{-1}。钨丝强度高但易氧化,增加镀铂层可以降低钨丝的高温氧化效应,保证热丝在较长工作时间的稳定性,同时重点对探头焊点进行加固,增加了探头热丝的抗断强度[27]。



图10　热线风速仪设备

2.2.5　PIV设备

本试验采用德国ILA公司的PIV设备,包括相机、激光器、片光成形器、数据处理软件等,如图11所示。



(a)相机



(b)激光器

图11　PIV设备

2.3　测试原理

2.3.1　应变天平测力原理

本试验采用TH0601C型盒式六分量应变天平测量气动力。其工作原理是:作用在汽车模型上的空气动力载荷经支撑机构传递至天平测量元件,使其产生弹性变形;粘贴于元件敏感部位的应变计随之变形,使其电阻值发生改变;该电阻变化量在应变计构成的惠斯通电桥中转换为电压信号增量,此电压增量与所受载荷成正比,通过标定即可得到载荷大小。该天平通过8组电桥的组合设计,分别感知3个方向的气动

力(阻力F_x、升力F_z、侧力F_y)和3个方向的气动力矩(滚转力矩M_x、俯仰力矩M_y、偏航力矩M_z)。在电桥布局与设计过程中,需确保各测量通道对其目标载荷具有高灵敏度,同时最大限度地抑制其他载荷分量(干扰载荷)的交叉耦合影响。

2.3.2 热线风速仪测湍流度原理

热线风速仪是测量低速风洞流场湍流度的经典高精度设备。试验过程中,热线风速仪通过测量流体速度脉动引起的热能传递变化,结合信号处理技术实现湍流度的定量表征。热线风速仪测量湍流度的完整流程包括:信号采集→流速重构→脉动提取→标准差计算→代入湍流度公式,得到湍流度值[28]。

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}\left(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2\right)}}{U} \tag{1}$$

式中:x、y和z分别为三维坐标上的方向分量,u为速度的脉动量,U为速度测量结果的平均值,I为三维湍流度。

2.3.3 PIV测速原理

PIV是一种全场、非接触式流场测量方法,其基本原理为:在流场中播撒具有良好跟随性的示踪粒子,用脉冲激光片光源照亮待测流场区域,由高分辨率相机连续记录2次(或多次)激光脉冲期间粒子群的图像(图12)。通过互相关算法分析粒子图像对,计算各查询窗口内粒子的平均位移Δs,已知2次曝光的间隔时间Δt,即可通过公式(2)得到该区域流体的二维速度矢量[29]。

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{2}$$

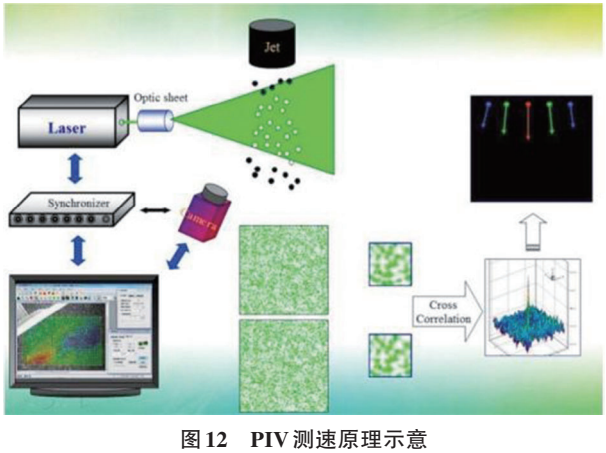


图12 PIV测速原理示意

3 试验内容与试验方法

3.1 试验内容

为全面评估V型流向沟槽的减阻效果及流场影响,本试验包含以下内容:

(1)风阻系数测量:直接测量并对比光滑模型与沟槽模型的气动阻力,验证V型流向沟槽仿生壁面的减阻效果。测试内容包括:

a. 光滑表面模型基本状态阻力重复性试验;

b. 不同风速下,光滑表面模型阻力测量;

c. 不同风速下,V型流向沟槽表面模型阻力测量。

(2)尾流湍流度测量:使用热线风速仪测量2种模型尾流区的湍流度,从流动结构变化间接分析减阻机理。测试内容包括:

a. 不同风速下,光滑表面模型湍流度测量;

b. 不同风速下,V型流向沟槽表面模型湍流度测量。

(3)尾流涡结构测量:采用PIV技术捕捉2种模型尾流场的旋涡结构,可视化分析沟槽对流动分离及涡动力学的影响,间接验证V型流向沟槽的减阻效果。测试内容包括:

a. 不同风速下,光滑表面模型尾流旋涡结构测量;

b. 不同风速下,V型流向沟槽表面模型尾流旋涡结构测量。

本次试验具体内容见表1。

表1 试验内容表

序号	模型	模型姿态	风速/m·s^{-1}	备注
1	模型1	基准状态$\beta = 0°$	30	重复性试验7次
2	模型1	基准状态$\beta = 0°$	20、30、40、50	测力
3	模型2	基准状态$\beta = 0°$	20、30、40、50	测力
4	模型1	基准状态$\beta = 0°$	20、30、40、50	测湍流度
5	模型2	基准状态$\beta = 0°$	20、30、40、50	测湍流度
6	模型1	基准状态$\beta = 0°$	20、30、40、50	测旋涡结构
7	模型2	基准状态$\beta = 0°$	20、30、40、50	测旋涡结构

3.2 试验方法

3.2.1 模型安装

以测力试验为依据,DrivAer轿车模型底部有一个矩形内凹安装面,支杆一端有矩形法兰,支杆本体为圆柱形,为弱化圆柱形支杆产生的干扰,支杆外部安装一个对称翼型支杆,支杆另一端通过矩形法兰与盒式天平浮动端安装面固连,盒式天平固定端通过支座固连到风洞接口。模型安装后,DrivAer轿车模型和一部分翼型支杆在风洞内,另一部分支杆在风洞外,盒式天平也在风洞外。

3.2.2 测力试验方法

DrivAer轿车模型采用底部支撑,模型重心在支杆

中心线上。选择量程与模型气动载荷匹配的盒式六分量天平，天平载荷信息见表2。天平安装过程中的浮动端表面与水平基准面在俯仰与滚转的零位通过电子倾斜仪测试调整。

表2　盒式六分量天平载荷表

参数	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
设计载荷	100 N	700 N	800 N	30 N·m	300 N·m	80 N·m
校准载荷	100 N	800 N	800 N	25 N·m	125 N·m	80 N·m
精确度/%	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
准确度/%	0.30	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10

模型在基准状态安装完成后，使用激光投线仪测试DrivAer轿车模型表面的基准位置标记线与风洞水平与垂直基准面相对位置，调整模型的零位初始安装角。测试现场如图13所示。

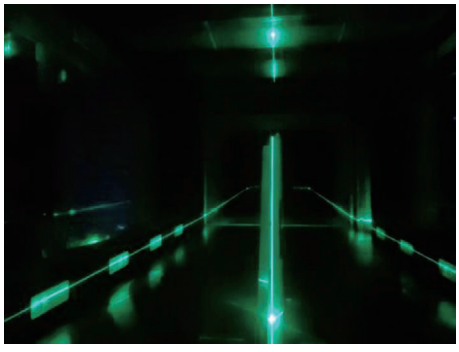


图13　激光投线仪标定模型安装角

测力试验准备就绪后，开展天平测量准度校核，在风洞内安装好简易砝码架，使用标准砝码给模型加载，经测试天平准度正确。依据天平校准证书，天平公式中各读数的单位为字：1字=10 μV。其中：

$$\Delta n_i = n_i - n_{i0} \tag{3}$$

式中：n_i为加载读数，n_{i0}为初读数，$i = \{y,x,m_z,z,m_y,m_x\}$。

按规定桥压供电，并根据天平接头端测得的实际供桥电压对测量输出值进行修正，修正系数为：

$$K_{if} = 10/U_{ri} \tag{4}$$

式中：K_{if}为第i通道供桥电压修正系数，U_{ri}为实际供桥电压。

将测力试验数据采集系统的原始数据代入天平校准公式计算。

$$F_i = K_{i1}N_i + K_{i2}N_i^2 \tag{5}$$

$$N_i = \Delta N_i - \sum_j (K_{ji1}\cdot F_j + K_{ji2}\cdot F_j^2) - \sum_{m,n} K_{mni}\cdot F_m \cdot F_n \tag{6}$$

式中：F_i代表各分量载荷大小，ΔN_i为组合后各分量末读数减初读数，K_{i1}与K_{i2}分别表示各分量的主系数和平方项系数，K_{ji1}与K_{ji21}分别表示j分量对i分量的一次干扰系数和平方干扰系数，K_{mni}表示m分量和n分量对i分量的交叉干扰系数。

$$i = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\} \tag{7}$$

$$j = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\},\quad j \neq i \tag{8}$$

$$m = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\} \tag{9}$$

$$n = \{X, Y, Z, M_x, M_y, M_z\},\quad n \neq m \tag{10}$$

测力试验目标六分量与8个桥路输出信号之间的关系如下，法向力（升力）$Z = B_1 + B_2 + B_3 + B_4$；轴向力（阻力）$X = B_7 + B_8$；俯仰力矩$M_y = B_1 + B_2 - B_3 - B_4$；侧向力（侧力）$Y = B_5 + B_6$；偏航力矩$M_z = B_5 + B_8 - B_6 - B_7$；滚转力矩$M_x = B_2 + B_3 - B_1 - B_4$。

试验时，依据天平校准公式计算各分量载荷，天平校准系数如表3所示。

为保证试验数据质量，试验前需要开展7次重复性试验以考核测力试验系统，结果表明轿车模型风阻系数7次重复性试验结果的均方根误差为0.000 4，符合GJB 1061—1991《高速风洞和低速风洞测力实验精度指标》合格指标，具体数据如表4所示。

3.2.3　测湍流度试验方法

采用热线风速仪对模型尾流区湍流度进行测量，并基于高通惯性衰减滤波方法处理干扰信号。试验结果表明，高通惯性衰减滤波方法可以有效控制干扰信号对测量结果的影响程度，是湍流度测量试验中信号处理的有效方法[30]。

3.2.4　测旋涡结构试验方法

试验获取的粒子图像采用德国PIVTEC公司开发的PIVview2C软件进行分析处理，处理过程采用快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform，FFT）标准相关算法和3点高斯峰值算法，计算过程中采用二次相关和移动窗口提高分析精度[31-32]。图像采集软件采集的粒子图像，选取任意相邻的2个图像做互关分析即可获得所拍摄平面区域的流场速度。

4　试验结果与分析

4.1　雷诺数效应

文献[33]的雷诺数效应曲线表明，当试验雷诺数较低时，阻力系数随雷诺数增大而减小（图14）。当Re>6×10^{6}时，阻力系数随雷诺数增大基本保持不变，从气动特性分析，阻力系数保持不变的原因在于湍流处于充分发展的状态，气动特性表现为阻力系数在一定范围内保持相对稳定。基于本试验条件，如果使试验Re=6×10^6，试验风速必须达到100 m/s，虽然风洞本身没有问题，考虑到模型的安全因素，选择最大

表3　天平校准系数数据

参数	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
K_{i1}^{+}	$4.835\ 9\times10^{-3}$	$3.838\ 3\times10^{-2}$	$6.621\ 1\times10^{-2}$	$9.974\ 6\times10^{-4}$	$4.209\ 0\times10^{-3}$	$3.669\ 7\times10^{-3}$
K_{i1}^{-}	$4.849\ 7\times10^{-3}$	$3.838\ 3\times10^{-2}$	$6.621\ 1\times10^{-2}$	$9.965\ 2\times10^{-4}$	$4.209\ 0\times10^{-3}$	$3.665\ 3\times10^{-3}$
K_{i2}^{+}	$2.955\ 9\times10^{-9}$					
K_{i2}^{-}						$-4.980\ 1\times10^{-9}$
KF_{yi1}^{+}	$1.797\ 7\times10^{-1}$		$-4.152\ 6\times10^{-2}$	$-5.666\ 4\times10^{-2}$	$-1.706\ 2\times10^{-1}$	$-8.650\ 1\times10^{-2}$
KF_{yi1}^{-}	$1.770\ 6\times10^{-1}$		$-4.152\ 6\times10^{-2}$	$6.109\ 5\times10^{-2}$	$-1.706\ 2\times10^{-1}$	$-8.650\ 1\times10^{-2}$
KF_{yi2}^{+}						
KF_{yi2}^{-}	$-2.166\ 3\times10^{-4}$			$5.441\ 8\times10^{-4}$		
KF_{xi1}^{+}				$-3.027\ 3\times10^{-1}$	−1.521 8	4.774 8
KF_{xi1}^{-}				$-3.027\ 3\times10^{-1}$	−1.521 8	4.774 8
KM_{zi1}^{+}	$1.359\ 7\times10^{1}$	−1.005 7				
KM_{zi1}^{-}	$1.352\ 8\times10^{1}$	$-8.489\ 7\times10^{-1}$				
KF_{zi1}^{+}	$9.323\ 8\times10^{-2}$	$2.780\ 7\times10^{-2}$		2.137 9	$-6.006\ 8\times10^{-2}$	$3.559\ 2\times10^{-2}$
KF_{zi1}^{-}	$9.323\ 8\times10^{-2}$	$2.780\ 7\times10^{-2}$		2.137 9	$-6.006\ 8\times10^{-2}$	$2.645\ 8\times10^{-2}$
KM_{yi1}^{+}	$-4.367\ 5\times10^{-1}$	$-3.201\ 0\times10^{-1}$	$-4.883\ 3\times10^{-1}$	$-2.657\ 7\times10^{-1}$		$-3.633\ 9\times10^{-1}$
KM_{yi1}^{-}	$-4.977\ 7\times10^{-1}$	$-1.467\ 8\times10^{-1}$	$-4.078\ 4\times10^{-1}$	$-2.657\ 7\times10^{-1}$		$-3.633\ 9\times10^{-1}$
KM_{yi2}^{+}						
KM_{yi2}^{-}		$-1.318\ 5\times10^{-2}$				
KM_{xi1}^{+}	−3.983 7	$1.879\ 6\times10^{-1}$			−2.480 7	8.950 0
KM_{xi1}^{-}	−3.983 7	1.513 5			$-4.644\ 7\times10^{-1}$	8.950 0

试验风速 50 m/s，Re=3×10⁶。

表4　风阻系数7次重复性试验结果

试验序号	1	2	3	4	5	6	7
风阻系数	0.296 0	0.296 1	0.296 0	0.295 6	0.295 6	0.296 3	0.296 9
均方根误差	0.000 4						

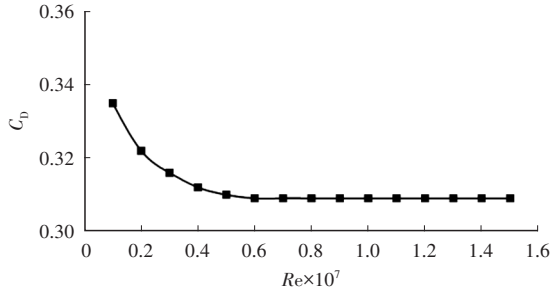


图14　雷诺数对阻力系数的影响

4.2　阻力系数

为考核测力试验系统的精准度，选择光滑表面模型开展了7次重复性试验，试验曲线如图15所示，试验结果见表4。经计算，阻力系数7次重复性试验均方根误差为0.000 4，该结果满足GJB 1061—1991《高速风洞和低速风洞测力实验精度指标》对阻力系数重复性试验指标的要求（合格指标为0.000 5）[34]。V型流向沟槽减阻效果曲线如图16所示，试验结果如表5所示。试验结果表明：在Re=3×10⁶的试验条件下，V型流向沟槽风阻系数比光滑表面风阻系数减小了0.003。

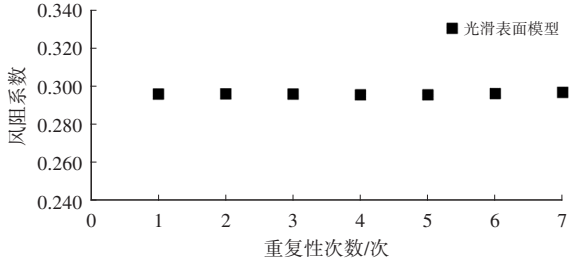


图15　阻力系数7次重复性试验

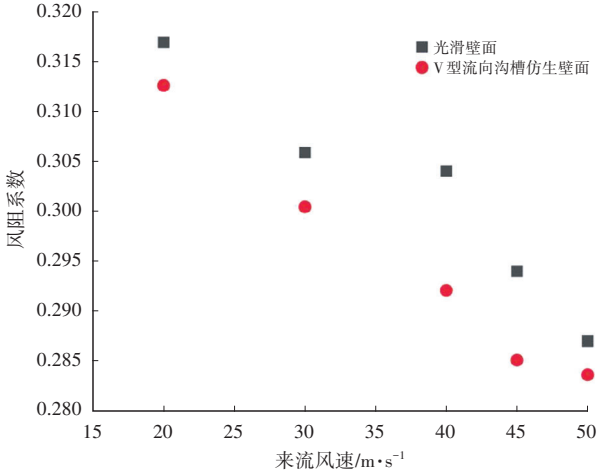


图16　不同表面模型的阻力系数结果

表5　不同风速下2种模型阻力系数试验结果

风速/m·s^{-1}	风阻系数	
	光滑表面模型	沟槽表面模型
20	0.317 05	0.312 72
30	0.305 98	0.300 52
40	0.304 14	0.292 13
45	0.294 05	0.285 12
50	0.287 03	0.283 64

4.3　尾流区湍流度

为进一步分析V型流向沟槽的减阻机理，分别对2种模型的尾流区进行湍流度的测量。在不同来流风速下，光滑表面模型和局部V型流向沟槽模型尾流区湍流度测量结果如图17所示。图17和表6表明，局部V型流向沟槽模型尾流区湍流度明显低于光滑表面模型尾流区湍流度，局部V型流向沟槽能够明显抑制模型尾流区湍流度。

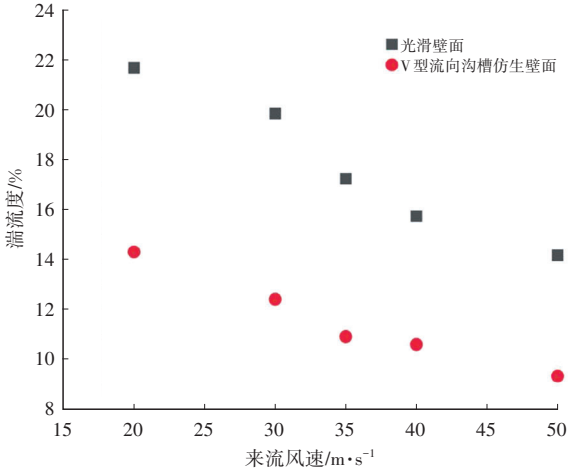


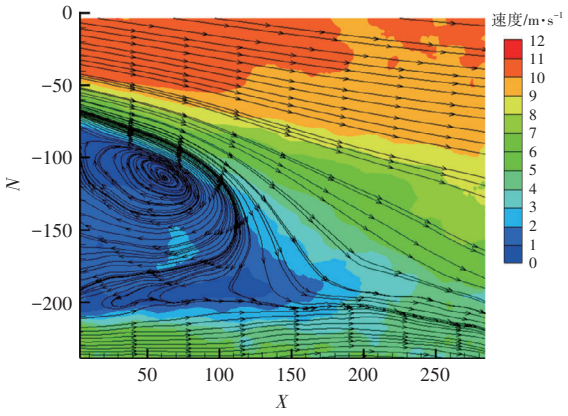
图17　不同表面模型的尾流区湍流度结果

表6　不同表面模型的尾流区湍流度测量结果

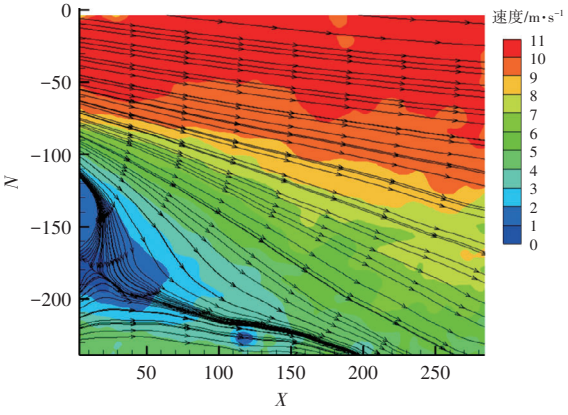
风速/m·s^{-1}	湍流度/%	
	光滑表面	V型流向沟槽表面
20	21.69	14.31
30	19.86	12.41
35	17.25	10.91
40	15.75	10.60
50	14.18	9.33

4.4　尾流区旋涡结构

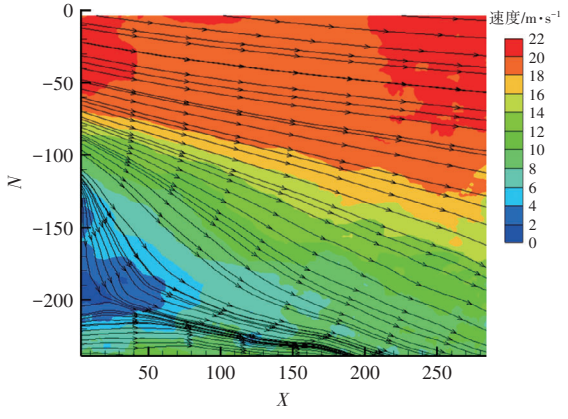
受限于风洞闭口试验段光学条件，使用二维PIV试验技术测量了沿流向平面内的二维速度场。不同来流风速下，光滑表面模型和局部V型流向沟槽模型尾流区旋涡结构测量结果，如图18所示。其中，相比于光滑模型的尾涡区域，局部带流向沟槽表面的DrivAer模型尾流旋涡区域明显减小，流动分离明显被抑制。



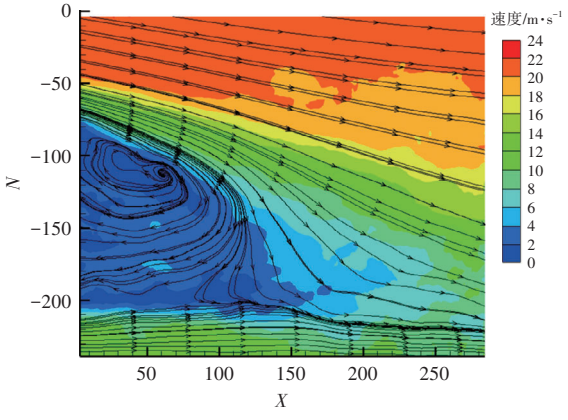
(a)光滑表面模型，来流风速10 m/s



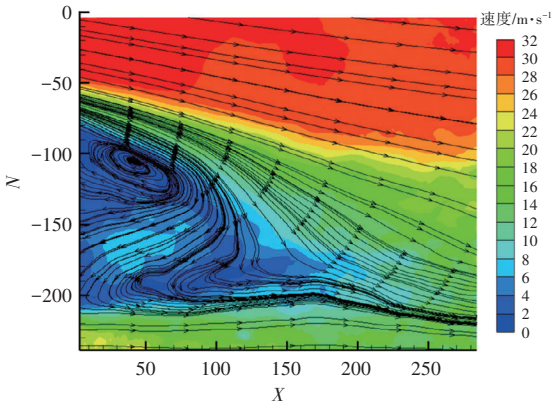
(b)沟槽表面模型，来流风速10 m/s



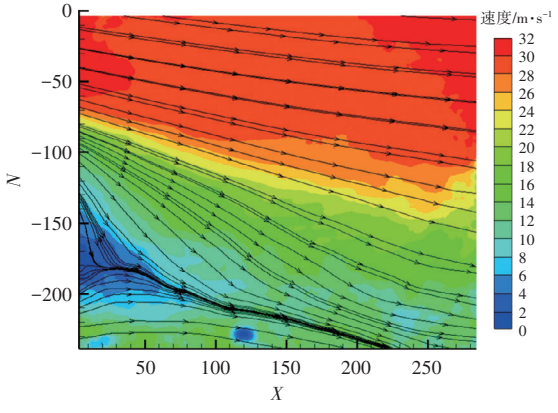
(c)光滑表面模型，来流风速20 m/s



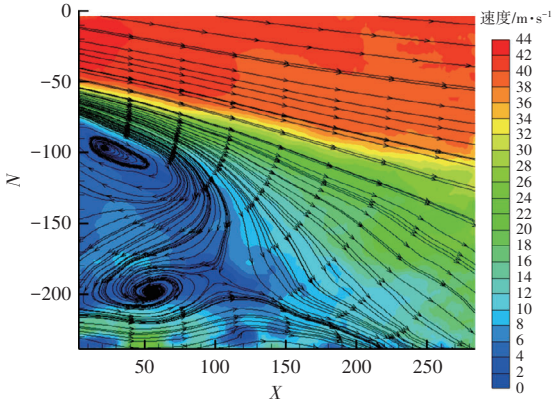
(d)沟槽表面模型，来流风速20 m/s



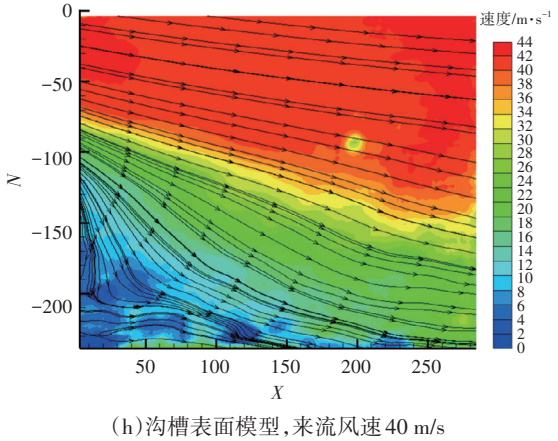
(e)光滑表面模型,来流风速30 m/s



(f)沟槽表面模型,来流风速30 m/s



(g)光滑表面模型,来流风速40 m/s



(h)沟槽表面模型,来流风速40 m/s

图18　2种模型的尾流区旋涡结构对比

5　结论

本研究提供了一种V型流向沟槽仿生壁面雷诺数归一化设计方法,通过一系列风洞试验,具体如:天平测力、热线风速仪测定湍流度和PIV设备测定旋涡结构等,验证了该方法在新能源汽车减阻中的工程可行性和应用价值。研究结果表明,V型流向沟槽仿生壁面结构对湍流分离与能量耗散的协同控制能力,有效提升了新能源汽车传统造型优化减阻效果,推动了流动控制减阻方法的工程化进程。在*Re*为6×10^5~3×10^6的试验条件下,V型流向沟槽仿生壁面结构风阻系数降低0.003,湍流度降低约35%,旋涡结构尺度大幅减小,试验结果与湍流减阻理论相符。目前,研究尚未开展V型流向沟槽仿生壁面实车风洞试验验证,下一步将重点围绕该问题展开工作,以进一步支撑该减阻方法的工程应用。

参　考　文　献

[1] 胡昱. 基于汽车外流场的减阻控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 26-43.

[2] 朱云云. 基于试验设计的车身非光滑表面气动减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 43-78.

[3] 高新华. 轿车燃油经济性开发的关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 70-89.

[4] 李超群, 李易, 张晨曦, 等. 沿流向微结构沟槽流场直接数值模拟[J]. 航空学报, 2020(11): 147-158.

[5] 李超群, 唐硕, 李易, 等. 基于神经网络的减阻沟槽壁面形状优化[J]. 航空动力学报, 2022: 640-647.

[6] 李炳炘. 微沟槽减阻技术研究现状与进展综述[J]. 煤气与热力, 2023(12): 21-25.

[7] 吴光辉, 陈迎春. 大型客机减阻机理及方法研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018: 149-206.

[8] 陈迎春, 张美红, 张淼, 等. 大型客机气动设计综述[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 35-51.

[9] 马汉东, 崔尔杰. 大型飞机阻力预示与减阻研究[J]. 力学与实践, 2007(2): 1-8.

[10] 王晋军. 沟槽面湍流减阻研究综述[J]. 北京航空航天大学学报, 1998(1): 35-38.

[11] 王安宇. 表面沟槽的填充及组合调控方式对摩擦学行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2023: 73-103.

[12] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Fluid Mechanics of Biological Surfaces and Their Technological Application[J]. Naturwissenschaften, 2000, 87(4): 157-71.

[13] BARON A, QUADRIO M. Some Preliminary Results on the Influence of Riblets on the Structure of a Turbulent Boundary Layer[J]. International Journal of Heat and Fluid

Flow, 1993, 14(3): 223-230.

[14] LUCHINI P, MANZO F, POZZI A. Resistance of a Grooved Surface to Parallel Flow and Cross-Flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 228: 87-109.

[15] BACHER E V, SMITH C. A Combined Visualization-Anemometry Study of the Turbulent Drag Reducing Mechanisms of Triangular Micro-Groove Surface Modifications[C]// AIAA Shear Flow Control Conference, Boulder: Colorado, 1985.

[16] LEE S J, LEE S H. Flow Field Analysis of a Turbulent Boundary Layer over a Riblet Surface[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(2): 153-166.

[17] 任峰, 高传强, 唐辉. 机器学习在流动控制领域的应用及发展趋势[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 152-166.

[18] GALLAGHER J, THOMAS A. Turbulent Boundary Layer Characteristics over Streamwise Grooves[C]// 2nd Applied Aerodynamics Conference, 1984.

[19] ABDULBARI HA, MAHAMMED H, HASSAN Z B F, et al. Bio-Inspired Passive Drag Reduction Techniques: A Review[J]. ChemBioEng Reviews, 2015, 2(3): 185-203.

[20] CHOI K S, GADD G E, PEARCEY H H, et al. Tests of Drag-Reducing Polymer Coated on a Riblet Surface[J]. Applied Scientific Research, 1989, 46(3): 209-216.

[21] VUKOSLAVCEVIC P, WALLACE J M, BALINT J L. Viscous Drag Reduction Using Streamwise-Aligned Riblets[J]. AIAA Journal, 1992, 30(4): 1119-1122.

[22] PARK S R, WALLACE J M. Flow Alteration and Drag Reduction by Riblets in a Turbulent Boundary Layer[J]. AIAA Journal, 1994, 32(1): 31-38.

[23] 陈莹, 陈迎春, 黄炜, 等. 旋成体表面沟槽减阻试验研究[J]. 实验流体力学, 2012(4): 42-45.

[24] 杨筱沛. 低速风机翼型仿生脊状表面减阻机理分析及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022: 34-134.

[25] LI C Q, TANG S, Yi Li, GENG Z H. A Modified RANS Model for Drag Prediction of Practical Configuration with Riblets and Experimental Validation[J]. AEROSPACE, 2022, 9(3): 125 .

[26] LI C Q, TANG S, Yi Li, GENG Z H. Numerical and Experimental Investigations on Drag-Reducing Effects of Riblets[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2021, 15(1): 1726-1745.

[27] 朱博, 汤更生. 声学风洞流场低湍流度及频谱测量研究.[J]实验流体力学, 2015, 29(4): 58-64.

[28] 朱博, 熊波, 吴巍, 等. 定/变热线过热比跨超声速流场湍流度测量[J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1816-1823.

[29] 范宝春, 董刚, 张辉. 湍流控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 111-152.

[30] 朱博, 廖大雄, 陈振华, 等. 跨声速流场扰动模态与湍流度精细测量[J]. 航空学报, 2023, 44(4): 1-12.

[31] 王洪平, 高琪, 魏润杰, 等. 基于层析PIV的湍流边界层展向涡研究[J]. 实验流体力学, 2016(4): 59-65.

[32] 于长东. 基于深度光流学习的粒子图像测速算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023: 18-36.

[33] 托马斯. 许茨. 胡克汽车空气动力学手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2024: 140-155.

[34] 国防科学技术工业委员会. 高速风洞和低速风洞测力实验精度指标: GJB 1061—1991[S/OL]. (1992-03)[2026-04-09]. https://img. antpedia. com/standard/files/pdfs_ora/20200926/GJB%201061-1991.PDF.

（责任编辑　**明慧**）