

# 大学生方程式赛车过弯非稳态气动问题的数值与试验研究

贾青<sup>1,2</sup>, 王艺锟<sup>1,2</sup>, 张波<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804;  
3. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**摘要:** 以大学生方程式赛车为研究对象, 采用非稳态来流仿真方法对其过弯时的气动性能展开了研究。采用非稳态来流方法, 将仿真来流速度设置为随时间变化的场函数以精准模拟入弯情形, 并与稳态来流的弯道仿真结果进行了对比; 配合仿真结果, 在道路试验中使用表面压力测量对扩散器和尾翼的局部流场进行了量化。结果表明: 赛车前轮以及前翼在非稳态过弯时会对下游底部流场产生较大影响, 底部扩散器的非稳态气动鲁棒性将是整车气动设计的重点。

**关键词:** 计算流体力学; 弯道; 非稳态来流; 气动性能; 道路测试  
**中图分类号:** U461.1 **文献标志码:** A

## Numerical and Experimental Study on Cornering Unsteady Aerodynamic Performance of Formula SAE Racing Car

JIA Qing<sup>1,2</sup>, WANG Yikun<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract:** The unsteady flow simulation method was used to study the aerodynamic performance of the Formula SAE racing car during cornering. By using the unsteady flow method, the flow speed was set as a field function varying with time to accurately simulate the cornering situation, and the simulation results were compared with the steady cornering simulation. In conjunction with simulation results, the local flow field of diffuser and rear wing was quantitatively studied in road test using surface pressure measurement. The results show that, the front wheels and wings have a great effect

on the downstream bottom airflow during unsteady cornering, and the unsteady aerodynamic robustness of the diffuser is the key point of the racing car aerodynamic design.

**Key words:** computational fluid dynamics; corner; unsteady flow; aerodynamic performance; road test

FSAE (Formula SAE) 是一项大学生车辆工程实践赛事。如何准确预测 FSAE 赛车在转向时的空气动力学表现一直是空气动力学领域备受关注的问题。

对于稳态弯道工况下的车辆气动效果研究, Okada 等<sup>[1]</sup>将车辆的转弯运动分解为偏航和侧滑运动, 并假设可以通过分别叠加侧滑运动参数和偏航运动参数的线性关系来预测动态摆动运动中的气动侧向力和偏航力矩, 随后使用计算流体力学 (CFD) 仿真对该假设进行了验证。结果表明, 动态转弯运动中, 叠加准稳态偏航运动和侧滑运动参数的线性模型可以较好地预测转弯运动中的气动力。然而, 对于车身的某些部位, 特别是尾部, 拟合结果仍有不小差异。Kono 等<sup>[2]</sup>对轿车稳态转弯运动中的空气动力学特性进行了仿真, 并讨论了侧倾方向上的姿态变化对气动性能的影响。仿真结果表明, 车辆在弯道中的侧倾角变化主要由 2 个原因造成, 即随着车身旋转而产生的作用在质心的离心惯性力以及由于车辆周围流动结构的变化而在车身上产生的空气动力分布的变化。Keogh 等<sup>[3]</sup>指出, 在转弯运动中气流的角度 (有效偏航角) 将沿着汽车的长度方向变化, 汽车前部和尾部具有相反符号的偏航角。

收稿日期: 2021-11-15

第一作者: 贾青 (1979—), 女, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学、汽车风洞自由射流。  
E-mail: qing.jia@sawtc.com

通信作者: 王艺锟 (1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为汽车气动特性与风洞流动特性。  
E-mail: wangyikun\_tongji@foxmail.com



论文  
拓展  
介绍

Monash大学的FSAE车队<sup>[4]</sup>在研究赛车过弯空气动力学时使用了旋转参考系和C型流体域来探究弯道中赛车的空气动力学性能。相似地,Sagmo<sup>[5]</sup>在研究赛车的弯道气动性能时使用了旋转参考系法,并考虑了赛车在弯中的姿态对气动分布的影响,但忽略了车轮的旋转效应,对仿真的准确性产生了不小的影响。

目前国内对于非稳态转弯工况下汽车气动性能的研究还尚未深入,更多的是通过瞬态侧风工况来近似模拟。在车辆的CFD仿真方面,直线稳态流场是最为容易获取且稳定的条件,同时大多数风洞也具备复现与CFD仿真相似的流场条件,以进行试验的验证。因此,对于稳态小偏航角转向的研究,通常使用稳态侧风的方法来评估,其具有仿真需求低、试验验证容易等优点。鲍欢欢等<sup>[6]</sup>通过使用用户自定义函数来定义来流方向,从而实现正弦非稳态侧风计算,对于非稳态侧风作用下的汽车气动性能进行了评估。罗泽轩等<sup>[7]</sup>使用Fluent与Matlab进行双向耦合动力学模型仿真,分析了侧向速度与横摆角速度对空气动力学性能的影响。Guilmineau等<sup>[8]</sup>用不可压缩的非稳态雷诺平均N-S(Navier-Stokes)方程对乘用车的瞬时侧风工况进行了仿真,并通过风洞试验验证了仿真的准确性,在瞬态侧风的情况下观察到模型的迎风面和背风面上表面压力的谐波振荡与滞后现象。Tsubokura等<sup>[9]</sup>开发了一种基于大涡模拟的数值方法,用于研究由环境湍流和阵风引起的瞬态空气动力学效应,并对2种瞬态侧风工况进行了预测。在连续正弦偏航的情况下,空气动力和力矩的所有6个分量都表现出或多或少的正弦响

应,其相移取决于所施加的波长。

本研究中首先进行了非稳态来流仿真,将仿真实来流速度设置为随时间变化的场函数以模拟入弯情形。然后,将非稳态来流仿真与已有的稳态弯道仿真结果进行了对比,分析赛车在稳态转弯与非稳态转弯工况下的气动性能差异。最后,通过设计道路试验,使用已有的皮托管与双压力管测压装置在对应的工况下进行了道路试验和数据测量。通过仿真与试验结合分析赛车在弯道工况中的气动性能表现,揭示了在弯道工况下赛车出现较大幅度气动性能衰减的原因。

## 1 弯道问题的研究思路与仿真处理

### 1.1 用于模拟弯道条件的仿真方法

为研究弯道工况下非稳态偏航来流的赛车气动性能,使用了2种仿真域以进行对比:直线流场仿真域与C型弯道流场仿真域。采用的第1种仿真域是直线流场仿真域,如图1所示。在汽车弯道气动性能研究中,直线流场仿真域常被用于纯偏航来流影响下的汽车气动性能研究。该仿真域的优点是可以采用小偏航角来流模拟汽车转弯时的气流,以及能够在风洞试验中通过复现小偏航角来流来验证仿真结果。在小偏航角情况下,偏航来流与实际弯道来流的结果非常相近,因此可以通过直线流场仿真域来近似模拟实际的弯道工况。对于偏航情况下的气流模拟,龚旭等<sup>[10]</sup>对“车辆偏转”和“合成速度”2种偏航来流的CFD仿真方法进行了对比研究。实际上2种方法获得的仿真结果与试验数据非常接近。

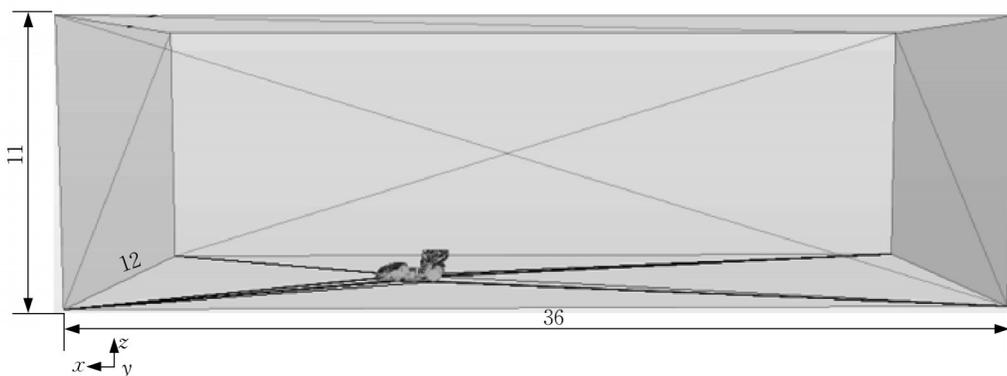


图1 直线流场仿真域尺寸(单位:m)

Fig.1 Dimension of linear simulation domain(unit: m)

采用的第2种仿真域是为Monash大学所使用的C型弯道仿真域<sup>[4]</sup>。弯道仿真域使用旋转坐标系,通过气流绕中心点的相对旋转来模拟弯道中气流的

流动情况。大学生方程式大赛的赛道多以小而急的组合弯为主,对应弯道的来流偏航角更大,前述小偏航角的近似方法不适用,因此通过C型弯道仿真域

(见图2)来模拟弯道流动更能反映实际比赛中的稳态弯道工况。

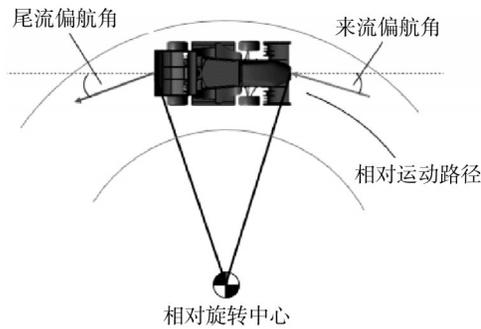


图2 基于旋转坐标系的C型弯道仿真原理示意图

Fig.2 Rotating reference frame based C-shaped cornering simulation

### 1.2 数值模型及相关设置

仿真的高效性与准确性对于大学生方程式赛车空气动力学的迭代开发十分重要。因此,用于仿真的数值模型需要在保留实车细节的基础上进行一定的简化。一些对流场影响很小的几何细节在仿真中被省略,如螺栓、发动机上的附加零件等。

为了使得结果不受数值仿真的网格粗细影响,所使用的网格需要足够精细,但过于精细的网格会导致仿真成本增加。为此进行了网格无关性研究,如图3所示。本研究中采用多面体网格生成器生成网格,对赛车的各个表面所生成的网格进行了面网

格控制(网格加密)。同时,为了体现网格加密对于结果准确性的影响,不进行面网格加密的结果也在图中展示作为对比。在网格尺寸为1 m时,采用网格加密策略所生成的网格数比不采用网格加密策略的网格数多300万,并且有无加密策略对于升阻比的仿真准确性也有较大影响。通过调小网格的基础尺寸,可以使得网格更为精细。可以看出,在网格基础尺寸达0.2 m后,网格的细化对于升阻比的仿真结果影响不大,但网格数量却会迅速增长。数值仿真需要兼顾准确性和计算成本,因此整车的网格数量设为约500万,其网格分布如图4所示。

定常仿真部分采用广泛使用的RKE(realizable

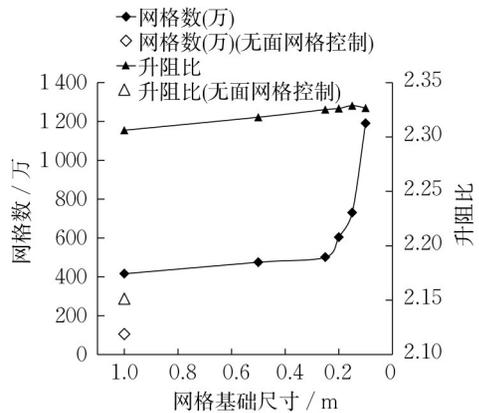


图3 网格无关性研究

Fig.3 Grid size independence study

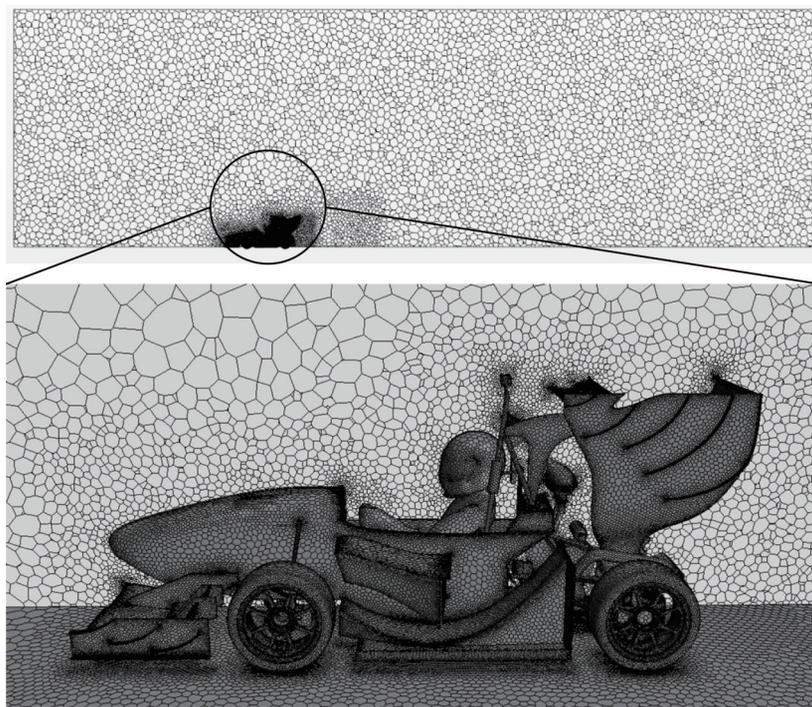


图4 网格分布(中截面)

Fig.4 Mesh distribution (middle section)

$K-\epsilon$ )模型,该模型应用分离流等温不可压模型,对流项和扩散项分别采用边界中心差分格式和二阶迎风离散格式。非定常仿真采用 URANS (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes)模型,为了模拟从直道进入弯道时的整个过程,非稳态仿真以稳态直道仿真结果为初始条件,并且从非稳态 0 s 开始采样,以收集入弯开始时刻直到入弯动作结束整个过程的变化。由赛道实测数据可知,从直道入弯的动作时间约为 0.5 s,因此总采集时长设置为 0.6 s,取 0.5 s 作为实际数据。

时间步无关性研究如图 5 所示,分别是 0.01 s 的时间步共采集 50 组的数据,以及 0.05 s 的时间步共采集 10 组。可以看出,在小偏航角且采集时间较短的设定下,0.05 s 的仿真时间步长与 0.01 s 的仿真时间步长所得结果大部分十分接近。隐式非定常计算需要保证收敛性,每个时间步以上一个时间步的收敛结果作为初始条件进行仿真。该仿真模型的每个时间步需要数十次的迭代才能达到收敛,考虑到大学生车队本身计算资源不充足,而时间步长的减小意味着仿真时长成倍增加,因此选择时间步长为 0.05 s,并且采样间隔为 0.10 s。

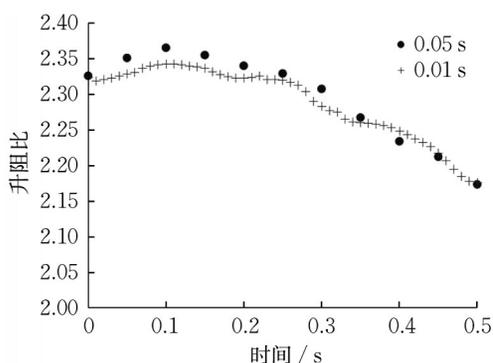


图5 时间步无关性研究

Fig.5 Time step independence study

## 2 过弯非稳态来流仿真

### 2.1 过弯非稳态来流仿真流场设置

非稳态弯道仿真方法有许多种。Nara 等<sup>[11]</sup>结合 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法和非惯性坐标参考系方法的 N-S 方程,分别处理弯道运动中的旋转运动与平移运动,对非稳态工况下的方程式赛车气动性能进行分析,但没有进一步进行试验验证。Shoji<sup>[12]</sup>在研究跑车的弯道非稳态气动性能时,采用了直线流场域结合滑移网格的方法,将赛车周围定

半径的圆柱面设置为滑移面,赛车绕着定点进行旋转运动,并与各稳态偏航角下的气动结果进行对比。

虽然学者们采用了不同的方法研究非稳态弯道工况下的车辆气动性能,但是都忽略了移动地面与旋转轮胎的设定。在赛车特别是方程式赛车中,地面效应气动套件所带来的气动效益占据着整车气动水平的较大部分,若忽略了移动地面与旋转轮胎的设定,近地面气动套件(例如前翼、扩散器)的地面效应则会大打折扣,相当于与实际工况产生较大的差别,导致不能准确预测实际比赛中赛车的气动性能。滑移网格与重叠网格技术的出现部分解决了这个问题,能够实现车体在仿真域中的相对旋转运动,而且在 starccm+ 中使用重叠网格技术还可以同时实现运动地面、轮胎相对轴心的旋转以及轮胎转角的变化。然而,该方法的问题在于,轮胎相对车身的转角变化需要在车身的重叠网格中实现,这增大了仿真的难度与成本。目前来看,车轮重叠网格与背景域地面接触处网格的模拟,与定常仿真中轮胎与地面的接触处理是否有相似的效果仍是一个值得深入探讨的问题。因此,先行探寻一种较为简单且易于实现的方法。

一般来说,通常用一个与前进方向所夹的偏航角来建立弯道模型。对于在静止空气中行驶的汽车,偏航角等于车辆滑移角。只要弯道的曲率足够小(即弯道半径足够大),该方法就可以很好地模拟车在弯道中的情况。在大半径弯道的工况下,偏航角与滑移角的差别不大,此时使用偏航角仿真来近似评估弯道性能有较好的准确性。本研究中的偏航角仿真将来流速度与赛车中线的夹角(即偏航角)设置为随时间增大的函数,进一步模拟入弯时来流偏航角逐渐增大的情形。

考虑到大半径弯道工况下来流的偏航角较小,偏航来流与实际弯道来流的结果非常相近,因此尝试使用直线流场域结合移动地面与旋转轮胎,使得来流角度与地面运动速度同时发生改变,从而模拟入弯情形中来流偏航角与地面相对速度的动态变化。对于非稳态弯道中的前轮角度模拟,在该方法中无论是以入弯时刻 $0^\circ$ 还是以弯中时刻 $4^\circ$ (将在 2.2 节中介绍)作为前轮转角,都会存在一定误差。同时,若试图以动态方式模拟前轮转角变化,则需要使用重叠网格技术,这对于计算资源以及仿真方法设计都有较高的要求。考虑到前轮转角较小,动态弯道仿真中将前轮转角设为 $0^\circ$ 。

非稳态的直线流场域仿真主要为了探究赛车在小偏航角入弯工况时的气动表现,关注入弯过程中的气动性能变化,并与先前使用的稳态弯道仿真结果进行比较。流场域的建立参考龚旭等<sup>[10]</sup>使用的“合成速度”方法,图6为仿真流场域的速度入口与压力出口设置。同时,对于地面与车辆轮胎,分别采用了移动地面和旋转轮胎的设置,使其更贴近真实工况。

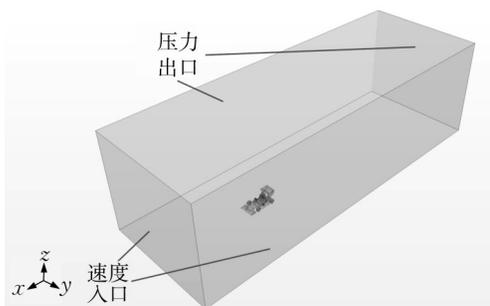


图6 仿真流场域入口与出口的设置

Fig.6 Inlet and outlet settings of simulation flow field

弯道工况一般出现在耐久赛中。图7为常用仿真车速( $14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )下经过处理获得的偏航角频率分布直方图。数据来源于大学生方程式赛车在中国赛耐久赛道的实车测试数据。从整体上看,仿真车速下的偏航角基本不超过 $10^\circ$ ,因此高速弯道仿真以及非稳态弯道偏航仿真的偏航角可以在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 内取合理值。由于研究的是过弯偏航时的赛车气动表现,选择一个相对极端的偏航角可以探究赛车在较大偏航时的表现下界,因此选择 $6^\circ$ 作为偏航工况下的仿真偏航角,可以囊括该速度下约90%的极限偏航角工况。

非稳态仿真中,速度入口以及移动地面的速度被设置成场函数,使其速度可以随时间变化而变化。从先前的赛道实测数据可知,在高速弯从直线状态到完全入弯的反应时间约在 $0.5 \text{ s}$ 左右,因此速度场函数三分量( $v_x, v_y, v_z$ )定义如下所示:

$$(-14 \cos(0.21t), -14 \sin(0.21t), 0) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (1)$$

式中: $t$ 为仿真时间。

## 2.2 稳态弯道仿真设置(对照组)

在赛车设计更新迭代中,通常采用稳态直线以及稳态弯道仿真方法对新设计进行空气动力学性能评估,但忽略了非稳态弯道工况下赛车的气动设计是否符合设计目标。实际上,在比赛中除了大半径弯道工况,赛车还需要进行绕桩避障,很少处于稳态

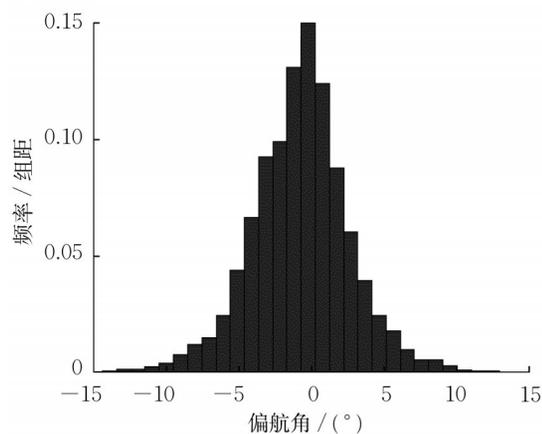


图7 仿真车速下耐久赛偏航角的频率分布

Fig.7 Frequency distribution histogram of yaw angle in endurance race under simulated speed

弯道的情况,更多的是在进行入弯和出弯动作。通过动态入弯与稳态弯道对比,可以发现常用的稳态弯道仿真中无法发现的盲点,从而使得设计更为全面。

稳态弯道仿真使用的是旋转参考系方法(rotating reference frame),在整个域中流体的参考系为旋转参考系,绕中心点做定速旋转,以模拟弯道情况下的赛车气流,如图8a所示。在稳态转弯工况中根据典型工况下的速度、侧向加速度以及悬架侧倾刚度设计值计算得到的转弯半径为 $14.3 \text{ m}$ ,此时前轮转角约为 $4^\circ$ ,因此稳态弯道仿真前轮转角设置为 $4^\circ$ 。图8b为稳态弯道仿真中车身的俯视图。

入口速度设置成与旋转参考系同步旋转,并设置角速度使得车中心处的速度与非稳态仿真的速度大小相同,压力出口设置为标准大气压,两侧以及顶部壁面均设置为滑移。同时,设置移动地面与旋转轮胎。

## 2.3 与稳态弯道仿真结果的对比

如图9a所示,在过弯非稳态来流仿真中,相比于稳态弯道仿真下压力下降较多,而侧向力有所增大。如图9b所示,非稳态情况下俯仰力矩的绝对值比稳态弯道下俯仰力矩的绝对值小 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,侧倾力矩与横摆力矩的值较稳态情况下有所增大。

图10为主要空气动力学部件的下压力衰减对比,其中正值表示非稳态工况下压力绝对值相对于稳态工况的衰减幅值。与稳态弯道工况相比,非稳态来流工况下底部扩散器下压力衰减幅值达 $63.3 \text{ N}$ 。在非稳态工况下,底部的下压力衰减是整车下压力变化的主要原因。

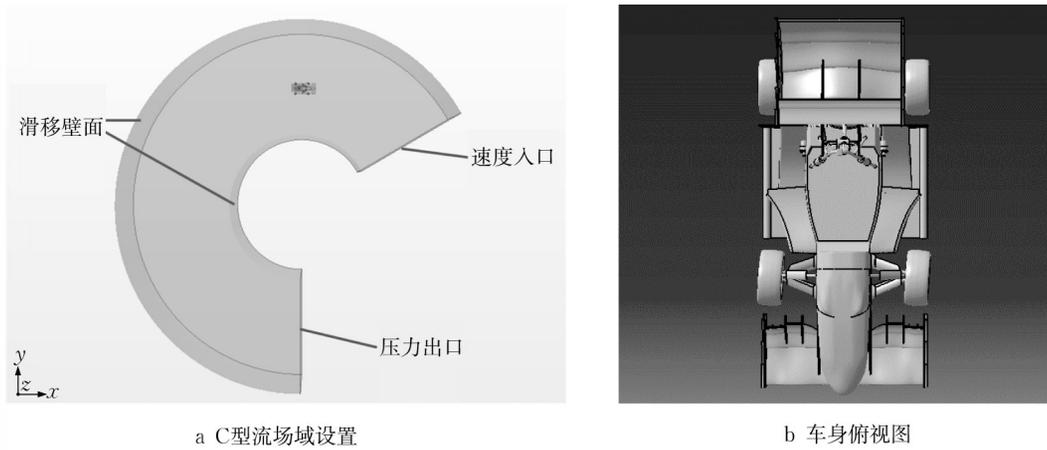


图 8 C型流场域设置和车身前轮转角俯视图

Fig.8 C-shaped flow field settings and top view of front wheel rotation angle

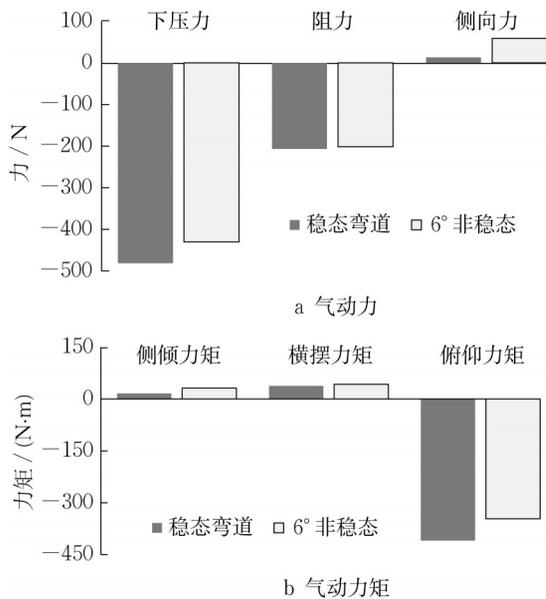


图 9 非稳态来流仿真与稳态弯道仿真的气动力和气动力矩对比

Fig.9 Comparison of aerodynamic force and moment between unsteady flow simulation and steady cornering simulation

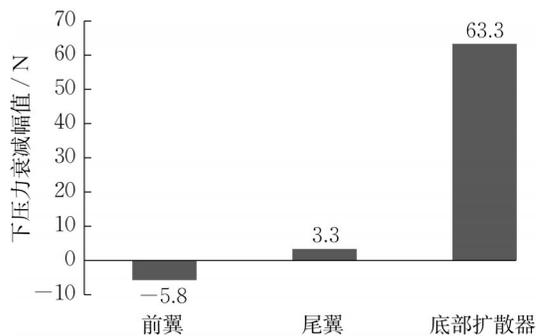


图 10 下压力衰减幅值

Fig.10 Attenuation amplitude of downforce

赛车底部的流场与压力分布如图 11 所示。由图 11 可见,前翼底部气流速度有所增大,但底部扩散器大部分区域的气流速度都有不少下降。在前轮尾流以及入弯时非稳态来流的影响下,扩散器入口的气流受扰动更为严重,进入扩散器通道的低速气流更多。受到上游来流影响,扩散器的低压区衰减较多。

非稳态仿真各偏航角的底部流场如图 12 所示,  $\varphi$  为当前来流偏航角。可以看出,右侧扩散器的收缩段流速受前轮产生的尾流影响,随着尾流的增大而逐渐下降。在动态情况下,来流在经过右前轮时与轮胎结构相互作用从而产生了更为复杂的涡结构,随后进一步影响扩散器入口的高速气流区域。同时,在偏航角逐渐增大的过程中,车中部的气流与左侧前轮的低总压气流结合进入到左侧扩散器的高速区,致使左侧扩散器压缩段气流速度下降。总体而言,在动态入弯过程中,前翼尾流以及前轮尾流对扩散器的气动性能产生了很大的衰减作用,这是在稳态直线以及稳态弯道仿真中所没有发现的。

在各时间步对应的偏航角下空气动力学套件的下压力变化如图 13 所示。在模拟动态入弯的过程中,整车下压力随着扩散器下压力的衰减而有较大幅度的衰减,气动载荷的变化导致俯仰力矩也同时发生改变。

### 3 道路试验

#### 3.1 试验准备

由于 FSAE 赛车具有较强的地面效应气动套件,因此应该在具有运动地面以及旋转轮胎的测试

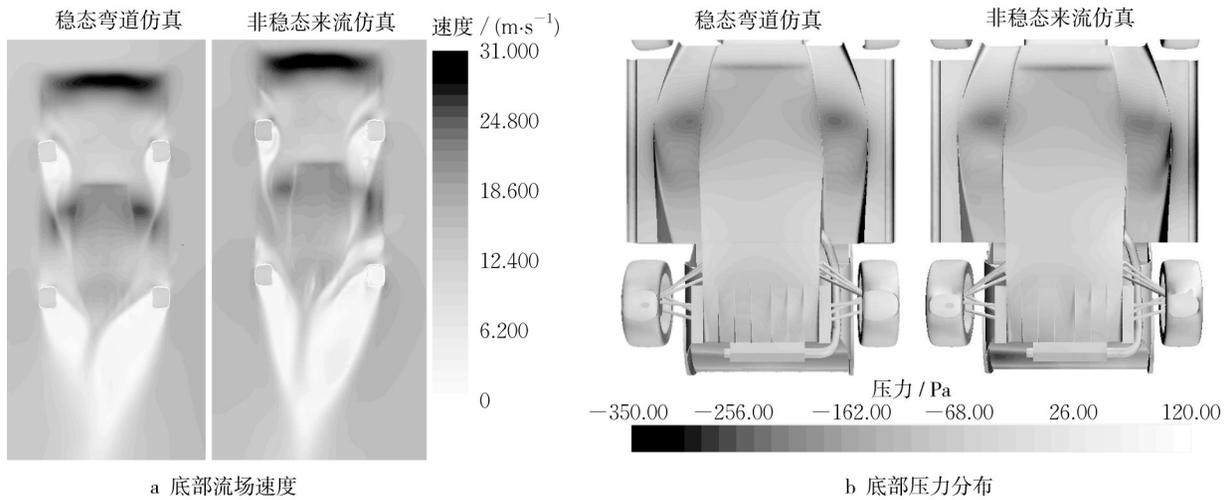


图 11 底部流场速度和底部压力分布

Fig.11 Velocity and pressure distribution at the bottom

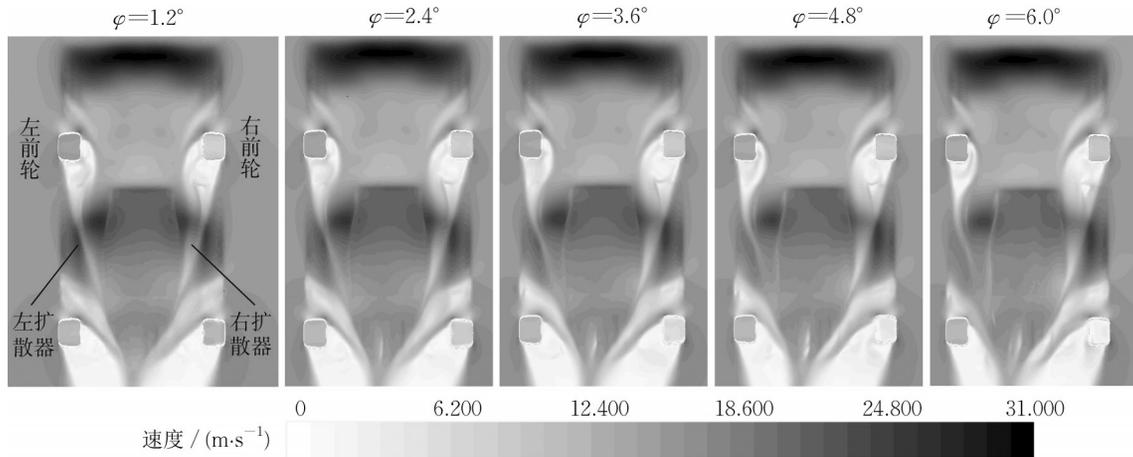


图 12 非稳态来流仿真各偏航角的底部流场

Fig.12 Bottom flow field at each yaw angle in unsteady flow simulation

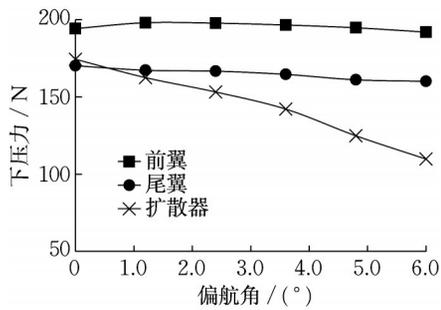


图 13 非稳态来流仿真主要套件下压力变化

Fig.13 Downforce variation of main parts in unsteady flow simulation

条件下进行测试,以免对地面效应套件产生较大影响。目前由于还没有满足 FSAE 赛车尺寸的前述试验条件的风洞,因此选择道路试验。道路测试中可用于 FSAE 赛车的测试装置有限,目前采用的是皮

托管与双压力管装置。由于在道路测试中流速存在较大的波动,因此定义静压系数以便进行更有意义的对比分析。静压系数  $C_p$  的定义为

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} v_\infty^2} \quad (2)$$

式中:  $p_\infty$  和  $v_\infty$  为参考静压和流速,单位分别是 Pa 和  $m \cdot s^{-1}$ ;  $p$  为当地压力,单位为 Pa;  $\rho$  为标准大气压下的空气密度,单位为  $kg \cdot m^{-3}$ 。

试验流程分为稳态弯道测试和动态偏航角测试。稳态弯道测试用于对标稳态弯道仿真,赛车以恒定速率沿着定半径的圆形赛道进行近似稳态绕圈运动,圆形赛道的尺寸与 C 型弯道仿真中设置相同,半径均为 14.3 m。动态偏航角用于对标过弯非稳态来流仿真,赛车偏航角从  $0^\circ$  开始进行给定速度下的

偏航角转向增大,以模拟入弯的情形。

在试验中皮托管与双压力管以及表面测压的采样频率为50 Hz,在道路测试中通过对某时刻的小时间差 $\pm\Delta t$ 对气体本身惯性带来的误差进行修正,并进行多次测试验证。稳态弯道测试的结果取车速稳定在设计工况附近的时均值,并且顺、逆时针各3圈以抵消自然来流的影响。动态偏航角测试则通过多

次动态入弯,同时取偏航角度在 $5^\circ\sim 6^\circ$ 的结果进行时均化并与非稳态仿真中达到 $6^\circ$ 偏航角时的结果进行对比。

### 3.2 仿真设置准确性验证

环形弯道测试用于弯道CFD仿真方法的准确性验证。试验圆形赛道的尺寸与C型弯道仿真的设置相同。测压点位置如图14所示,测压结果如图15所示。

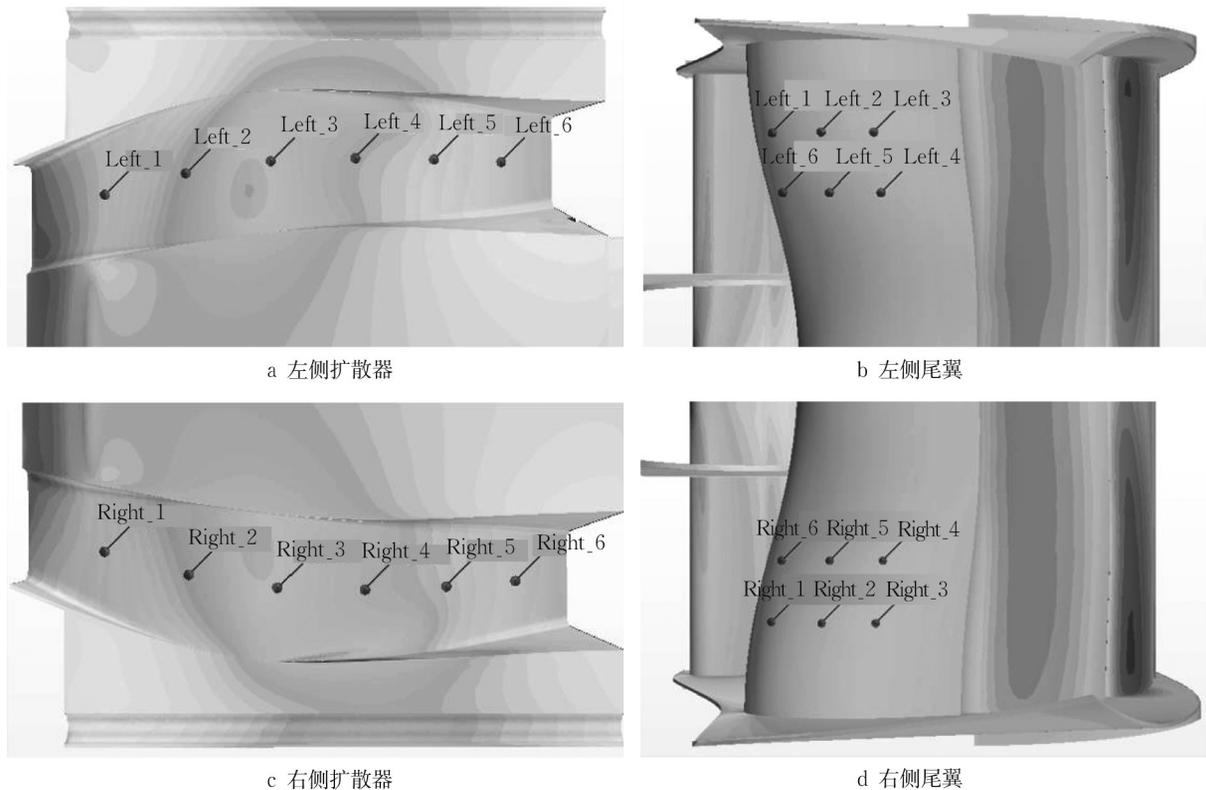


图14 测压点

Fig.14 Location of measuring points

在环形弯道测试中所获得的测压点静压系数与仿真值的误差较小。从图15可以看出,使用旋转参考系进行赛车的弯道气动性能仿真可以获得较为准确的结果。左右扩散器测压点5在弯道仿真中的测压结果与仿真值有较大的差别,主要原因可能是侧面气流入侵扩散器通道区域,在弯道中由于赛车的姿态变化与路面起伏,此处涡流发生了较频繁的改变。尾翼测压点测得的 $C_p$ 变化趋势基本与仿真值相同,但由于其处于整车下游,所测得的值也存在波动。

### 3.3 弯道非稳态来流试验结果

动态偏航角测试中,赛车以恒定的速度转弯,其偏航角从 $0^\circ$ 逐渐增大,以验证动态侧风仿真工况的有效性。选取动态偏航角到达 $5^\circ\sim 6^\circ$ 时的测压结果,如图16所示。

在动态偏航角测试中,各测压点的实测静压系数的变化趋势与非稳态仿真的结果相似,说明过弯非稳态来流仿真能够较好地模拟赛车动态入弯工况下的气动效果,但试验结果与仿真结果存在着一定的差异。这是因为在非稳态来流情况下,来流条件的改变会对结果产生较大的影响。在道路试验中受自然风条件的限制,无法复现与仿真中完全相同的来流条件。动态的流场演变过程主要受前一时刻的来流影响,试验中来流条件的限制是造成结果差异的主要原因。在试验中,底部扩散器由于受到前轮射流的影响,对来流条件更为敏感,因此扩散器的 $C_p$ 实测值虽然与仿真值变化趋势相同,但是仍在数值上存在差异。左侧尾翼在试验过程中受到车手头盔以及前轮尾流的影响,同样对来流条件敏感,实测值也存在差异;而右侧尾翼上游来流较为干净,因此测

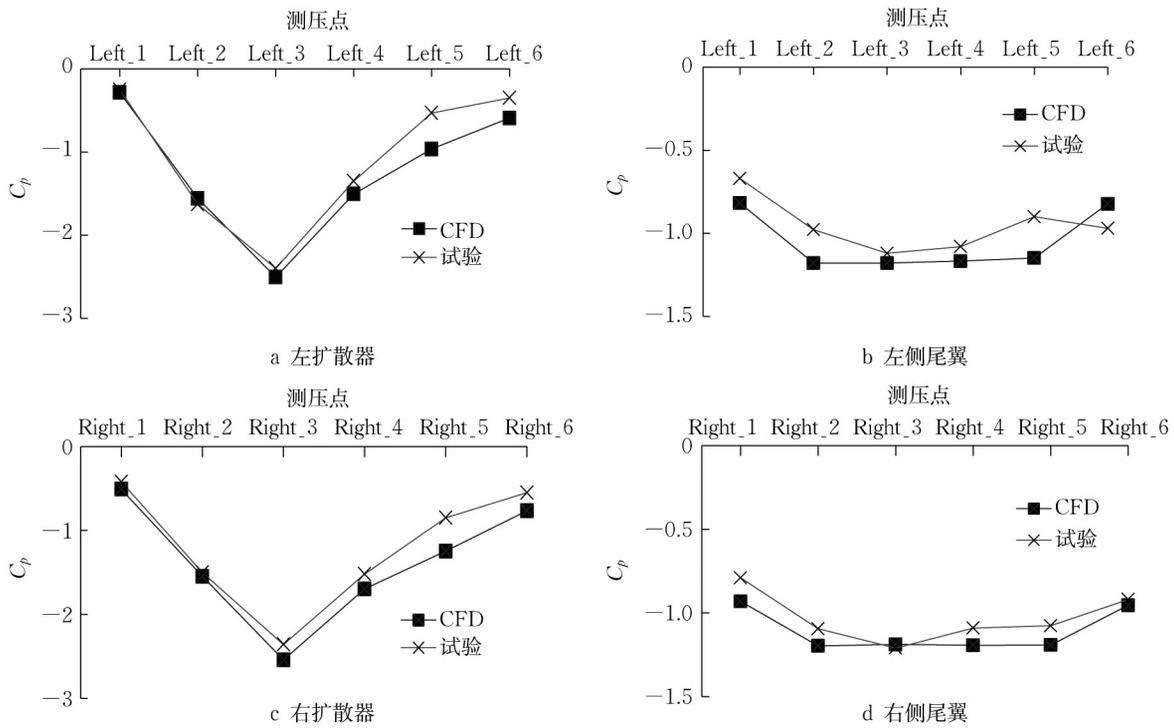


图15 测压点静压系数

Fig.15  $C_p$  of measuring points

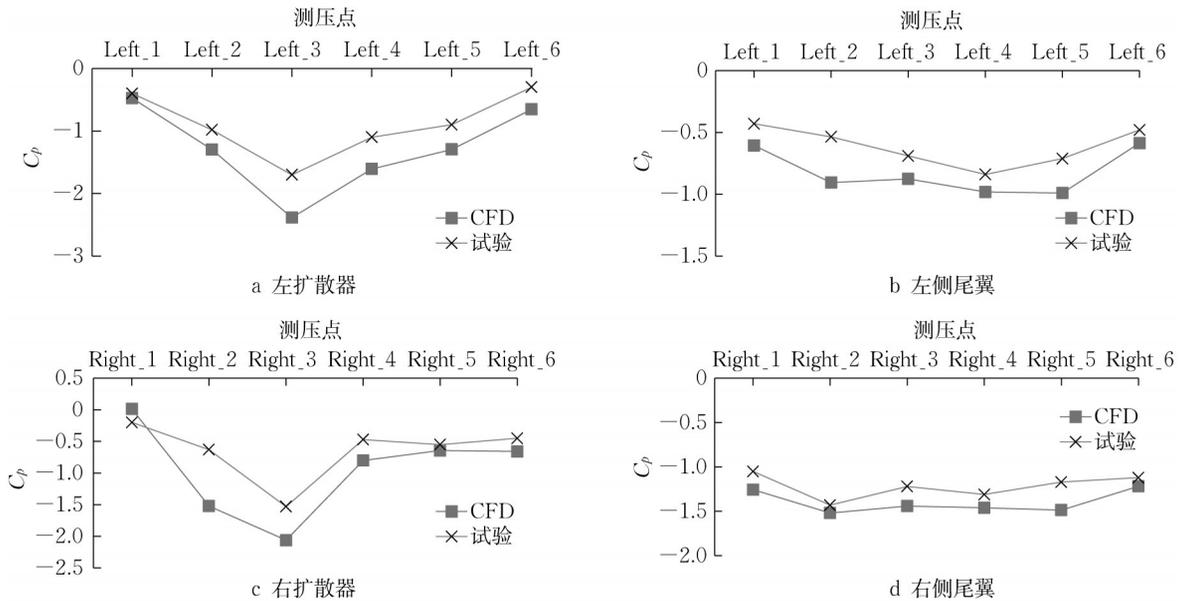


图16 动态偏航角为5°~6°时测压点静压系数

Fig.16  $C_p$  of measuring points at dynamic yaw angles of 5°~6°

压点的  $C_p$  值与仿真值接近。

### 4 结论

(1) 在非稳态仿真中,前轮的尾流进一步影响下游底部扩散器,使其原有的低压区遭受程度更深的破坏。这说明扩散器本身气动性能的鲁棒性是一

个十分重要的评价指标,在设计时要注意其鲁棒性。

(2) 与稳态弯道仿真相比,非稳态弯道仿真的总下压力有所下降,主要是由于扩散器受到来流偏航的影响,下压力减小。在非稳态仿真中,底部扩散器由于受前轮尾流影响较大,下压力衰减幅值增大,同时俯仰力矩也随之发生较大改变。

(3) 在道路试验中,C型弯道稳态试验结果与仿

真结果误差较小,说明在稳态工况下C型弯道仿真方法可以较为准确地评估赛车的气动性能。非稳态弯道试验所获得结果与仿真结果的变化趋势相同,但在数值上存在差异。这些差异产生的原因一方面是受仿真方法限制,无法完全模拟赛车在弯道中的实际情况;另一方面是非稳态工况试验结果的影响因素较多,在试验中车身姿态的变化、环境气流的改变都可能使得非稳态工况下的试验结果与仿真结果产生差异。

#### 作者贡献声明:

贾青:确定研究方向与具体研究内容,指导论文的撰写和修改。

王艺锟:进行数值仿真、道路试验测试、数据采集与处理,论文撰写。

张波:指导软件使用和数值仿真。

杨志刚:学术指导和和论文的整体规划。

#### 参考文献:

- [1] OKADA Y, NAKASHIMA T, TSUBOKURA M, *et al.* Aerodynamics evaluation of road vehicles in dynamic maneuvering[R]. Detroit: SAE, 2016.
- [2] KONO R, NAKASHIMA T, TSUBOKURA M, *et al.* Aerodynamics simulation of a sedan-type road vehicle in cornering motion with roll angle [C]//34th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016: 3726-3736.
- [3] KEOGH J, BARBER T J, DIASINOS S, *et al.* Techniques for aerodynamic analysis of cornering vehicles [R]. Detroit: SAE, 2015.
- [4] Monash Motorsport. The M16 [EB/OL]. [2017-04-23]. <http://www.monashmotorsport.com/the-car/>.
- [5] SAGMO K F. Computational fluid dynamics simulations of a Formula Student race car: effects predicted by the modelling of a steady state cornering vehicle [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [6] 鲍欢欢,王勇,周龙,等.非稳态侧风条件下车辆气动特性研究[J].汽车技术,2017(10):18.  
BAO Huanhuan, WANG Yong, ZHOU Long, *et al.* Study on vehicle aerodynamic characteristics under unsteady crosswind [J]. Automotive Technology, 2017(10): 18.
- [7] 罗泽轩,谷正气,丰成杰,等.基于双向耦合方法的汽车侧风稳定性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(3):305.  
LUO Zexuan, GU Zhengqi, FENG Chengjie, *et al.* Study on vehicle crosswind stability based on two-way coupling method [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2018,41(3): 305.
- [8] GUILMINEAU E, CHOMETON F. Experimental and numerical analysis of the effect of side wind on a simplified car model[R]. Detroit: SAE, 2007.
- [9] TSUBOKURA M, NAKASHIMA T, KITAYAMA M, *et al.* Large eddy simulation on the unsteady aerodynamic response of a road vehicle in transient crosswinds [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(6): 1075.
- [10] 龚旭,谷正气,李振磊,等.侧风状态下轿车气动特性数值模拟方法的研究[J].汽车工程,2010,32(1):13.  
GONG Xu, GU Zhengqi, LI Zhenlei, *et al.* Study on numerical simulation method of car aerodynamic characteristics under crosswind [J]. Automotive Engineering, 2010,32(1): 13.
- [11] NARA K, TSUBOKURA M, IKEDA J. A numerical analysis of unsteady aerodynamics of formula car during dynamic cornering motion [C]//32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1-17.
- [12] SHOJI H. Numerical investigation on unsteady aerodynamic stability of ground vehicles during the cornering entry [D]. Los Angeles: California State University, 2018.