

文章编号:1671-8879(2015)03-0021-06

# 横风作用下载重汽车在复杂路段运行的安全模型

田 林,许金良,张 莹

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为提高横风作用下载重汽车在复杂路段运行的安全性,通过风攻角  $0^\circ$  和  $90^\circ$  这 2 种不同工况下的风洞试验模拟强风作用对载重汽车运行安全的影响,建立了载重汽车气动力六分力坐标系,获得了作用于载重汽车的风作用六分力系数,利用空气动力学公式对作用于载重汽车的六分力进行了量化,对影响横风作用下复杂路段载重汽车运行安全的风险因素进行研究;在此基础上,对在横风作用下运行在弯道路段的载重汽车进行受力分析,利用 Matlab 仿真软件建立了载重汽车在弯道路段侧翻和侧滑的安全运行速度模型,提出了横风作用下复杂路段载重汽车的限速标准,并将限速标准应用于横风作用影响较大的弯道路段。研究结果表明:提出的限速标准减少了强横风弯道路段载重汽车交通事故的发生,为强横风地区复杂路段的限速方案提供了参考,对强风地区复杂路段载重汽车的运行安全起到了一定的保障作用。

**关键词:**道路工程;载重汽车;横风;复杂路段;安全;风洞试验

**中图分类号:**U412.36

**文献标志码:**A

## Operational security model of truck in complex sections under cross wind

TIAN Lin, XU Jin-liang, ZHANG Ying

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to improve running safety of truck in complex road sections under cross-wind, the impact of wind acting on the truck was simulated through the wind tunnel test in two different conditions of wind attack angle  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , and a six-component truck aerodynamic coordinate system was established. Besides, six-component coefficient of wind action acting on the truck was obtained, and six component acting on the truck was quantified by using aerodynamic formula. The action of cross wind affecting road truck operational safety complex risk factors was studied, on the basis, forces acting on truck under cross-wind were analyzed in the curve sections, and safe operation velocity model of truck rollover and sliding was established by using Matlab simulation software under strong wind. Besides, the standard of speed limit of truck in complex sections under cross-wind was proposed and was applied in the curve sections under strong cross-wind. The results show that the standard of speed limit of truck in curve sections under cross-wind reduces the traffic accidents, provides a reference for speed limit proposal for complex

收稿日期:2014-10-24

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015G1311081)

作者简介:田 林(1986-),男,山东沾化人,工学博士研究生,E-mail:changantianlin@126.com。

sections under cross-wind, and plays an important role in safeguarding truck running safety in complex sections under strong wind. 3 tabs, 8 figs, 16 refs.

**Key words:** road engineering; truck; crosswind; complex road section; safety; wind tunnel test

0 引言

在中国东南沿海和青藏高原高海拔地区,强风(或台风)作用力较大,严重影响了公路交通安全,对国民生命和财产安全造成了威胁。在强风作用下,弯道路段和弯坡组合路段中行驶的载重汽车极易发生侧翻和侧滑而导致交通事故<sup>[1-3]</sup>。国外主要通过风洞试验和原尺寸模型试验,测量作用于列车和高边载重汽车的风作用力<sup>[4-7]</sup>。英国诺丁汉大学的 Backer 等通过原尺寸模型试验和风洞试验,在有无大气湍流仿真的情况下,通过 1:50 汽车模型的风洞试验获取在横风作用下高边汽车运行情况的基础数据,研究了作用于卡车的横风空气动力响应<sup>[7-9]</sup>。国外一些学者研究作用于列车的侧向作用力和倾覆力矩的测量方法,利用压力传感器输出作用于列车上的横向风力<sup>[10-11]</sup>。东南大学任秀欢等采用机械系统动力学仿真软件 ADAMS/Car,建立了汽车侧风稳定性试验模型并进行虚拟试验,在分析风压中心及侧向风作用力模拟的基础上,通过采集大量实车数据,经 3 次样条插值建立了一定车速下风压中心位置、稳态和随机侧向风作用力大小随时间变化的连续曲线模型<sup>[12]</sup>;杨啟梁等基于二自由度汽车动力学模型,用 Matlab 软件对侧风引起的汽车行驶稳定性进行了仿真分析,认为汽车在侧风作用下的运动规律取决于侧风气动中心与中性转向点的相对位置<sup>[13]</sup>。中国主要通过风洞试验和数值模拟,分析作用于汽车的风作用力。但是,中国对道路几何条件和风作用耦合作用对汽车运行安全影响的研究较少。为此,本文通过风洞试验获取作用于载重汽车的六分力系数,对作用于载重汽车的风作用六分力进行量化。考虑复杂路段的道路几何条件,对载重汽车进行受力分析,通过 Matlab 仿真软件建立弯道路段和弯坡组合路段载重汽车侧翻和侧滑的安全运行速度模型,为保障横风作用下载重汽车的行车安全提供了理论依据。

1 横风作用下载重汽车空气动力研究

作用于汽车上的气动力和力矩,如图 1 所示,分为相互垂直的 3 个分力和 3 个绕轴的力矩。坐标系中,坐标原点位于前后轴中心所在的平面上, $x$ 、 $y$  轴

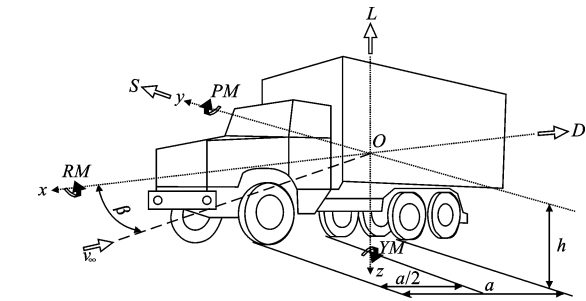


图 1 作用于载重汽车的气动力和力矩

Fig. 1 Aerodynamic forces and moments acting on the truck

表示路面。作用于载重汽车的气动力有气动升力  $L$ 、气动阻力  $D$ 、侧向力  $S$  和纵倾力矩  $PM$ 、侧倾力矩  $RM$  和横摆力矩  $YM$ ,  $h$  为汽车重心高度。

汽车的气动力、力矩和正投影面积  $A$ 、气流动压  $q = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2$  ( $\rho$  为空气密度,  $v_{\infty}$  为汽流速度)、轴距  $a$  的关系如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

表 1 气动力和力矩系数

Tab. 1 Aerodynamic force and moment coefficients

力和力矩	系 数
$\beta=0^\circ$ 时车身纵向作用的气动阻力 $D(F_x)$	阻力系数 $C_D = \frac{2D}{\rho v_{\infty}^2 A}$
垂直于路面的升力 $L(F_z)$	升力系数 $C_L = \frac{2L}{\rho v_{\infty}^2 A}$
垂直于车身对称面 ( $x, y$ ) 的侧向力 $S(F_y)$	侧向力系数 $C_S = \frac{2S}{\rho v_{\infty}^2 A}$
绕 $x$ 轴的侧倾力矩 $RM(M_x)$	侧倾力矩系数 $C_{RM} = \frac{2M_x}{\rho v_{\infty}^2 Aa}$
绕 $y$ 轴的纵倾力矩 $PM(M_y)$	纵倾力矩系数 $C_{PM} = \frac{2M_y}{\rho v_{\infty}^2 Aa}$
绕 $z$ 轴的横摆力矩 $YM(M_z)$	横摆力矩系数 $C_{YM} = \frac{2M_z}{\rho v_{\infty}^2 Aa}$

2 横风作用下载重汽车空气动力量化

2.1 风洞试验研究方案

将汽车模型放置在试验段或者计算域内,入口流入的气流合成速度  $V$ ,由汽车穿过静止空气的车速  $v$  和侧风风速  $v_w$  构成,通过改变合成速度和侧滑角,模拟出对应固定车速和不同侧风风速下的汽车气动特性。

合成速度  $V$ 、车速  $v$  和侧风风速  $v_w$  组成了固定的三角形关系,如下页图 2 所示,三者存在以下关系

$$V = \frac{v}{\cos(\beta)}, v_w = V \sin(\beta) \tag{1}$$

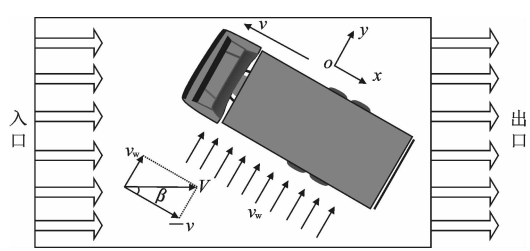


图 2 横风作用下载重汽车风洞试验示意

Fig. 2 Schematic of wind tunnel test of truck under the cross wind

式中: $\beta$  为合成风速与汽车行驶轴线夹角。

2.2 试验汽车模型

2.2.1 车型选择

重型载货汽车使用时外形接近于长方体,侧向面积较大,行驶时侧风作用的干扰对其稳定性的影响较为突出,采用中国产某重型载货汽车进行研究。考虑到重型载货汽车的工作性质,认为货箱内装满货物,货物高度超出货箱高度,如图 3 所示。

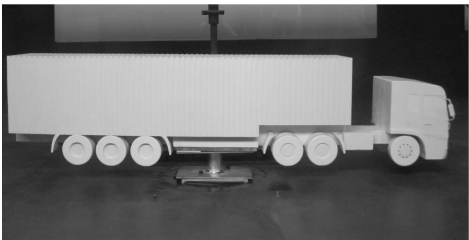


图 3 载重汽车风洞试验模型

Fig. 3 Wind tunnel test model of truck

2.2.2 模型尺寸和外形

根据中国产某重型载货汽车的实际尺寸和长安大学汽车专用风洞的实际空间情况,制作了中国产某重型载货汽车的 1:12 试验模型。试验模型的总长为 1 140 mm,总宽为 208 mm,总高为 310 mm。

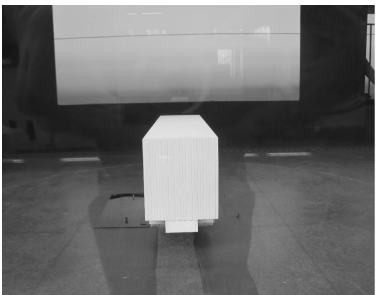
2.2.3 模型材料

试验模型由铝质材料和木质材料制作,铝质材料用于制作车轮,木质材料用于制作其余部分。汽车的货箱部分简化成类似集装箱的外形,以模拟实际满载情况。

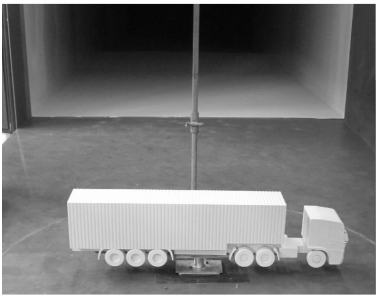
2.3 风洞试验工况

风洞试验中试验模型气动六分力的确定,是借助试验模型相对气流方向的横摆角模拟环境风实现

的。结合长安大学风洞实验室的特点,确定风洞试验工况为:试验攻角角度为 0°和 90°,进行 2 种工况的风洞试验,如图 4 所示。其中,为消除支架对试验模型气动特性的干扰,需要重复进行测试得到支架单独的气动特性数据,并且加以扣除。



(a) 试验攻角为0°



(b) 试验攻角为90°

图 4 风洞试验方案

Fig. 4 Wind tunnel test program

2.4 风洞试验结果

应用机械式天平,可测得空间直角坐标系中 3 个坐标轴方向的气动力以及绕 3 个坐标轴的气动力矩,统称为气动六分力。对于气动力矩来说,不同受力点的气动力矩的值是不同的,因此需要说明气动是针对哪一点的,本文采用空气动力学参考点描述气动力矩。

在横向均匀风场中,变化试验攻角,测出试验风速(8 m/s 和 13 m/s),空气动力对汽车的六分力及六分力系数公式见表 1。六分力系数测量结果如表 2 所示。

根据六分力系数及气动六分力公式,可以求算载重汽车在不同风速横风作用下受到的气动力和力矩。

表 2 载重汽车的六分力系数

Tab. 2 Six-component coefficients of truck

风速/(m·s <sup>-1</sup> )	攻角/(°)	$C_D$	$C_L$	$C_S$	$C_{RM}$	$C_{PM}$	$C_{YM}$
8	0	0.012 199	0.005 429	0.471 698	4.486 646	0.022 759	0.850 230
	90	0.011 481	0.007 531	0.514 030	4.540 005	0.018 475	0.851 873
13	0	0.046 283	0.026 795	0.784 652	0.062 253	-0.005 087	0.026 049
	90	0.043 772	0.025 044	0.766 509	0.062 253	-0.003 213	0.012 438

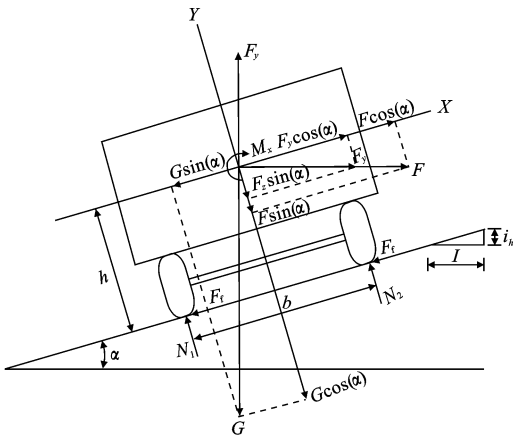
### 3 横风作用下载重汽车在弯道路段行车安全研究

汽车行驶稳定性包括纵向稳定性和横向稳定性。横风作用对汽车运行安全的影响主要表现在增大了载重汽车的横向力,所以横风作用主要影响载重汽车的横向稳定性。

通过数学建模对弯道路段(小半径路段)和弯坡组合路段载重汽车运行安全进行分析,建立载重汽车侧翻和侧滑模型,提出载重汽车横风作用下弯道路段和弯坡组合路段的安全行驶条件。

#### 3.1 横风作用下载重汽车在弯道路段侧翻模型的建立

在对载重汽车进行受力分析时,忽略汽车悬架和轮胎的弹性变形,假定汽车为刚体<sup>[15]</sup>,如图 5 所示。



注:  $F_t$  为路面摩擦力(kN);  $N_1$ 、 $N_2$  为路面支持力(kN)

图 5 弯道路段载重汽车受力分析

Fig. 5 Stress analysis of truck in curve sections

将载重汽车重力  $G$ 、横风作用产生的侧向力  $F_y$ 、气动升力  $F_z$  和离心力  $F$  分解为平行于路面的横向力  $X$  和垂直于路面的竖向力  $Y$ ,即

$$X = F \cos(\alpha) + F_y \cos(\alpha) - G \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$Y = F \sin(\alpha) + F_y \sin(\alpha) + G \cos(\alpha) - F_z \quad (3)$$

路面的横坡度角  $\alpha$  一般较小,所以  $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha) = i_h$ ,  $\cos(\alpha) \approx 1$ , 其中  $i_h$  为横向超高坡度(简称超高值)<sup>[16]</sup>, 所以有

$$X = F + F_y - G i_h \quad (4)$$

$$Y = F i_h + F_y i_h + G - F_z \quad (5)$$

横向力是载重汽车行驶的不稳定因素,竖向力是稳定因素。

汽车运行过程中,在横风作用下,当稳定力矩大于侧翻力矩时,汽车运行稳定,  $F i_h$  和  $F_y i_h$  相对于载

重汽车重力  $G$  很小,可忽略不计,则侧翻力学模型可简化为

$$(mg - F_z) \frac{b}{2} \geq (\frac{mv^2}{R} + F_y - mg i_h) h \quad (6)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $m$  为载重汽车的质量。

载重汽车在弯道路段行驶不发生侧翻的运行速度计算模型为

$$v \leq \sqrt{127R(\frac{b}{2h} + i_h - \frac{F_y}{G} - \frac{F_z b}{G 2h})} \quad (7)$$

载重汽车以一定速度行驶,不发生侧翻的圆曲线半径为

$$R \geq \frac{v^2}{\sqrt{127(b/2h + i_h - F_y/G - F_z b/G 2h)}} \quad (8)$$

式中:  $R$  为圆曲线半径(m);  $b$  为汽车轮距(m);  $h$  为汽车重心高度(m);  $v$  为汽车行驶速度(km/h)。

#### 3.2 横风作用下载重汽车在弯道路段侧滑模型的建立

汽车在弯道路段行驶时,因横向力的存在,可能使汽车产生横向滑移。因此,应使横向力小于等于轮胎与路面之间的横向摩阻力,即

$$X \leq Y \varphi_h \approx (G - F_z) \varphi_h \quad (9)$$

$$\frac{G v^2}{g R} + F_y - G i_h \leq (G - F_z) \varphi_h \quad (10)$$

式中:  $\varphi_h$  为横向摩擦因数,  $\varphi_h = (0.6 \sim 0.7) \varphi$ ,  $\varphi$  为路面附着系数。

载重汽车在弯道路段行驶不发生侧滑的运行速度计算模型为

$$v \leq \sqrt{127R(\varphi_h + i_h - \frac{F_y}{G} - \frac{F_z}{G} \varphi_h)} \quad (11)$$

载重汽车以一定速度行驶,不发生侧滑的圆曲线半径为

$$R \geq \frac{v^2}{127(\varphi_h + i_h - F_y/G - F_z \varphi_h/G)} \quad (12)$$

弯坡组合路段与弯道路段的不同点主要在于用合成坡度  $I = \sqrt{i^2 + i_h^2}$  代替了超高值  $i_h$ , 其中  $i$  为坡度, 受力分析和安全运行速度模型的建立是一样的, 在此不再赘述。

式(11)和式(12)对规范中的安全运行速度和安全圆曲线半径计算公式进行了修正, 以适应东南沿海和青藏高原高海拔地区的公路设计, 提高载重汽车运行的安全性。

#### 3.3 载重汽车安全行驶速度

通过以上弯道路段和弯坡组合路段载重汽车运行速度计算模型计算得到了不同风级下的最大安全行驶速度, 见下页表 3。对弯道路段和弯坡组合路

段,在横风作用下的载重汽车进行限速管理,在一定程度上保障了载重汽车的运行安全。

表 3 不同风级载重汽车最大安全行驶速度  
Tab. 3 Maximum safe driving speed of truck under different wind scales

风级	名称	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大安全行驶速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )
0	静风	0~0.2	
1	软风	0.3~1.5	
2	轻风	1.6~3.3	
3	微风	3.4~5.4	
4	和风	5.5~7.9	
5	劲风	8.8~10.7	
6	强风	10.8~13.8	80
7	疾风	13.9~17.1	80
8	大风	17.2~20.7	60
9	烈风	20.8~24.4	40
10	狂风	24.5~28.4	20
11	暴风	28.5~32.6	封路
$\geq 12$	飓风	$>32.7$	封路

4 工程实例

台金(台州—金华)高速公路 K115+000~K120+000 为小半径路段,半径  $R=520\text{ m}$ ,如图 6 所示。道路几何状况不良,且为桥梁路段,受横风作用影响较大,经实地风速测量,该路段平均风速为  $12.9\text{ m/s}$ ,强横风作用下载重汽车在小半径路段行驶极不安全。在 2011 年事故资料统计中,K115+000~K120+000 路段内发生交通事故 16 起,如图 7 所示,经鉴别分析该路段为载重汽车交通事故多发路段。



图 6 K115+000~K120+000 小半径路段  
Fig. 6 K115+000~K120+000 small radius sections

鉴于该路段为事故多发路段,2012 年台金高速公路管理部门将本文限速标准应用于该路段,限速为  $80\text{ km/h}$ ,桥梁外侧安装风屏障,减小横风作用对载重汽车的影响。通车 1 年后,2012 年交通事故统计中,K115+000~K120+000 路段发生轻微交通事故 3 起,如图 8 所示。

工程实例分析表明,对于强横风作用的小半径

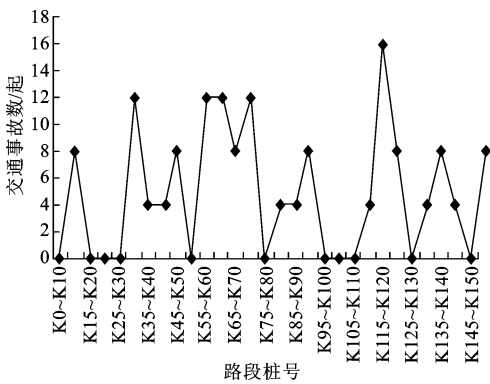


图 7 2011 年交通事故空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of traffic accidents in 2011

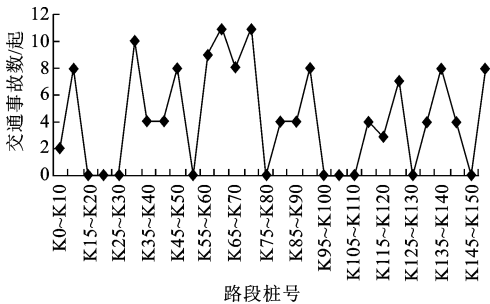


图 8 2012 年交通事故空间分布  
Fig. 8 Spatial distribution of traffic accidents in 2012

路段而言,该限速标准减少了载重汽车交通事故的发生,表明本文所提出的横风作用下小半径路段的限速标准对保障载重汽车行车安全具有一定的实践意义。

5 结 语

- (1)建立了横风作用下载重汽车空气动力坐标系,通过计算流体力学分析了横风作用下载重汽车受到的空气动力六分力。
- (2)通过不同攻角和不同风速的风洞试验获得了横风作用于载重汽车的六分力系数,利用空气动力学公式量化了作用于载重汽车的六分力。
- (3)对在弯道路段运行的载重汽车进行受力分析,综合考虑道路、横风作用和载重汽车安全风险因素,利用 Matlab 仿真软件,建立了弯道路段载重汽车侧翻和侧滑的安全运行速度模型,得到了载重汽车安全行驶速度,从而对载重汽车在横风作用下进行限速管理。
- (4)通过工程实例分析,本研究限速标准对强横风作用下小半径路段载重汽车运行安全起到了一定的保障作用。
- (5)影响载重汽车行车安全的因素很多,本文主要研究了复杂路段横风对载重汽车行车安全的影

响,今后需要进一步研究风雨耦合等作用对载重汽车行车安全的影响。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] Baker C J, Reynolds S. Wind-induced accidents of road vehicles[J]. Accident Analysis and Prevention, 1992, 24(6): 559-575.
- [2] Baker C J. The quantification of accident risk for road vehicles in cross wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 52(3): 93-107.
- [3] Coleman S A, Baker C J. An experimental study of the aerodynamic behavior of high sided lorries in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53(3): 401-429.
- [4] Baker C J, Humphreys N D. Assessment of the adequacy of various wind tunnel techniques to obtain aerodynamic data for ground vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 60(2): 49-68.
- [5] Coleman S A, Baker C J. High sided road vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36(2): 1383-1392.
- [6] Baker C J. High sided articulated road vehicles in strong cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 31(1): 67-85.
- [7] Baker C J. Problems of road vehicles in cross winds[J]. Highways and transportation, 1991, 38(5): 8-9.
- [8] Dorigatti F, Sterling M, Baker C J, et al. Crosswind effects on the stability of a model passenger train-A comparison of static and moving experiments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 138(1): 36-51.
- [9] Coleman S A, Baker C J. Reduction of accident risk for high sided road vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 44(1-3): 2685-2695.
- [10] Chen S R, Cai C S. Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(12): 991-1024.
- [11] Maruyama Y, Yamazaki F. Driving simulator experiment on the moving stability of an automobile under strong crosswind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(4): 191-205.
- [12] 任秀欢, 何杰, 赵池航, 等. 基于 ADAMS/Car 的汽车侧风稳定性虚拟试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(4): 774-778.  
REN Xiu-huan, HE Jie, ZHAO Chi-hang, et al. Virtual test study on automobile cross-wind stability in ADAMS/Car[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(4): 774-778. (in Chinese)
- [13] 杨敬梁, 钟东阶. 侧风对高速汽车行驶稳定性影响的仿真分析[J]. 汽车科技, 2004(4): 18-20.  
YANG Qi-liang, ZHONG Dong-jie. Simulation and analysis on effect of side wind on stabilization of vehicle with high speed[J]. Automotive Technology, 2004(4): 18-20. (in Chinese)
- [14] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
FU Li-min. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [15] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.  
YU Zhi-sheng. Cars theory [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [16] JTG D20—2006, 公路路线设计规范[S].  
JTG D20—2006, Design specification for highway alignment[S]. (in Chinese)