

考虑风作用的公路限速值

赵利苹,许金良,杨宏志,贾兴利

(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:为研究风对交通安全的影响,选择小客车和集装箱车为典型车型,采用风洞试验方法,进行了均匀流的风场模拟,得到了小客车和集装箱车受到的风作用力。以汽车动力学原理为基础,分析了汽车在弯道路段的行驶状态,建立了考虑风作用的汽车安全行驶的车速计算模型,得到了不同风速和设计速度条件下典型车型的限速值。研究表明:汽车受到的风作用力随风等级增加而增加;相同等级的风作用下,集装箱车受到的风作用力远大于小客车受到的力;公路设计速度越高,风力对限速值影响越大。研究成果量化了风对行驶车辆的影响,可为大风频发区的公路安全运营提供理论基础和指导。

关键词:道路工程;限速;风洞试验;风力;横向力系数

中图分类号:U412.3

文献标志码:A

Research on speed limit value for highway considering wind

ZHAO Li-ping, XU Jin-liang, YANG Hong-zhi, JIA Xing-li

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

Abstract: To study the effect of crosswind on traffic safety, wind force on as typical vehicles was obtained by wind tunnel test in simulated uniform wind field a passenger car and a container truck. Based on dynamics principle, the computation model of vehicle driving speed was established with considering wind force by analyzing its driving state on curved section of highway. Moreover, the speed limit values of typical models were proposed in the conditions of varied wind velocities and design speeds. The results show that wind force increases as its scale, and its effect on container truck is larger than that on passenger car under the same wind scale; when the design speed of highway is higher, the speed limit value will be more apparently affected by wind force. The result quantifies the effect of wind force on driving vehicle, and can provide theoretical basis and guidelines for highway safe operation in the wind area. 6 tabs, 4 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; speed limit value; wind tunnel test; wind force; sideway force coefficient

0 引言

公路暴露于自然界,公路交通受风、雨、雾和雪等不良天气条件的影响大,严重时可导致公路交通瘫痪,或造成重大交通事故。统计显示,单位时间内不良天气时的交通事故数是晴好天气的几倍甚至几十倍,且大多为重大和恶性事故^[1]。美国公路交通安全管理局统计显示,超过 22% 的交通事故是由不良天气引起的;中国交通事故中有 18.7% 的事故是不良天气引起的^[2]。近些年,自然环境恶化,沿海城市台风频发,新疆、宁夏等西北地区大风肆虐,处于风区的公路,常发生因风作用诱发的交通封闭或者汽车侧翻事故,极大地降低了公路通行能力和安全服务水平^[3]。

在风对汽车行驶安全的影响方面,英国的贝克教授曾作过大量研究,并取得了一些成果。文献[4]建立了基于车辆重量、轮胎荷载、气动力及驾驶行为的风作用下事故风险方法,包括驾驶行为这种主观性强、不易被量化的因素。文献[5]研究了英国的大风引发交通事故的特点,侧翻是最常见形式;汽车偏离行车路线引发的事故次之;风吹倒树木等物体而诱发的事故数排名第 3。文献[6]研究了大风天气下,特别是在横向风的情况下,汽车发生事故的概率与风速、风向、摩擦因数、道路圆曲线和汽车速度等因素的关系。中国主要研究了风对桥梁的影响及风、车辆、桥梁耦合作用下对安全的影响,鲜有涉及考虑风作用对车速影响的研究^[7]。汽车行驶中,作用于汽车上的风向包括顺风、逆风和侧向风,其中对汽车行驶安全影响最大的是强烈袭来的侧向风。为此,本文重点研究侧向风对汽车行驶稳定性的影响,采用风洞试验方法,量化风作用力,以汽车动力学为基础,分析风场中汽车的受力情况,建立风作用下汽车安全行驶的计算模型,提出不同等级风作用下汽车的安全行驶限速值,以期对强风地区公路的安全控制管理提供指导。

1 风洞试验

1.1 试验说明

1.1.1 试验技术要求

建立一个真实的模拟风场,能够准确确定合适的几何比例模型的受力特性,因此风洞试验要求风洞流场的动力相似试验模型的几何相似。动力相似是指风洞必须能产生足够均匀的流场,包括均匀的风速和流向分布、低湍流度及模拟路面上薄的边界

层厚度^[8]。模型相似要求几何外形相似,即缩小的试验模型与实体车的外廓尺寸、几何形状相似,且具有足够精确的细节模拟,以确保流场中模型重要局部的真实模拟。模型既要保证几何尺寸的精度,又需要具有一定的刚度。

1.1.2 试验模型

(1) 车型的选择

车辆高速行驶中受到风作用时,往往容易发生侧滑或侧翻事故。风对大型客车、面包车、集装箱车等箱形车的影响较大,因为这类车辆受风面积大^[9]。此外,行驶速度越高的车,风对其产生的影响越大。因此,试验模型选取受风影响较大的 2 种车型:一是侧向面积较大的集装箱车;二是车速一般较高的小客车。

(2) 模型尺寸

长安大学风洞实验室 CA-01 试验段的横截面高 2.5 m,宽 3.0 m,为了减少洞壁对试验精确性的干扰,汽车模型的迎风面积不应超过试验段横截面积的 5%,高度不超过风洞气流高度的 30%。试验采用 1:12 的东风天龙集装箱车模型和 1:4 的捷达小客车模型。集装箱车模型的总长 1.140 m,总宽为 0.208 m,总高为 0.318 m;小客车模型的总长为 1.01 m,总宽为 0.42 m,总高为 0.36 m。除了忽略门把手、雨刮器等车身附件,并对模型底盘做简化外,车身的其他细节均进行了较精确的模拟,如轮腔和车轮等,满足几何相似的要求。

(3) 模型材料

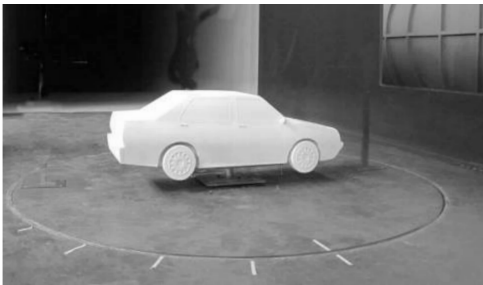
汽车模型大多选用木料或油泥,考虑到油泥模型易受温度影响的特性,本试验模型选用具有一定强度的木料制作,如下页图 1 所示。

(4) 试验方案

试验时,天平安装在试验段底壁转盘下面,模型通过底部钢板与天平铆接,风向选取垂直于车身侧面的方向,如下页图 2 所示。考虑到试验的精准性,试验风速采用 2 种风速: $V_1 = 8 \text{ m/s}$; $V_2 = 13 \text{ m/s}$,通过计算并对比试验数据,给出较精准的试验结果。

1.2 试验结果

《汽车空气动力学》指出汽车与空气相对运动并互相作用,使车身产生气动力和气动力矩^[10]。在风场中,汽车受到的风动力也就等同于汽车的气动力,因为从自然原理上讲,风就是空气场中具有一定速度的气流,汽车受到的风动力方向及计算方法均与气动力一致。因此,本文将气动力及力矩分别称为风



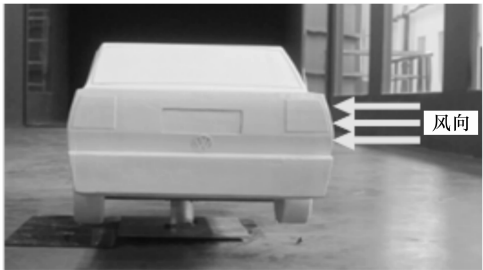
(a) 小客车



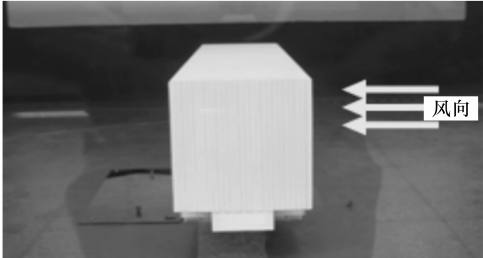
(b) 集装箱车

图 1 试验模型

Fig. 1 Experimental models



(a) 小客车



(b) 集装箱车

图 2 风洞试验方案

Fig. 2 Wind tunnel test

动阻力 F_X 、风动升力 F_Y 、风动侧力 F_Z 及风动侧倾力矩 M_X 、风动横摆力矩 M_Y 和风动纵倾力矩 M_Z , 简称为六分力, 如图 3 所示。

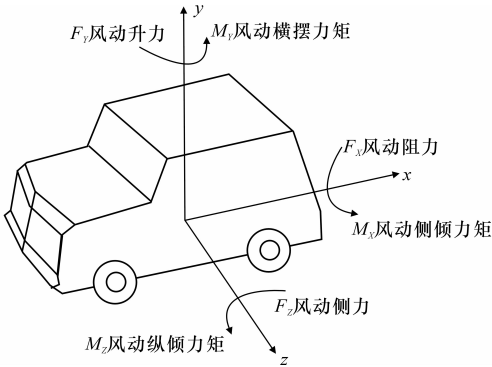


图 3 汽车受到的风作用力分布

Fig. 3 Distribution of wind force on vehicle

风洞试验测得六分力的系数 C_L 、 C_M 、 C_D 、 C_q 、 C_Z 和 C_N , 结果见表 1。根据试验结果可知, 风速为 8 m/s 和 13 m/s 时, 小客车的六分力系数相差不大, 本文在后续计算中选取其均值作为六分力系数 (见表 1 第 3 行), 集装箱车亦是如此。

根据六分力系数及六分力计算式(1)~式(6), 可计算出各级风速下汽车受到的六分力, 结果见下页表 2、表 3。相关研究表明, 不超过 5 级的风对车辆正常行驶基本没有影响, 6 级风时有一定的影响, 7 级及以上的风产生明显影响^[11]。当风力超过 9 级时, 管理部门通常封闭道路。因此, 本文重点研究 6~9 级风对车辆产生的影响。

$$F_X=0.5C_D B H \rho v_w^2 \tag{1}$$

$$F_Y=0.5C_L B L \rho v_w^2 \tag{2}$$

$$F_Z=0.5C_Z L H \rho v_w^2 \tag{3}$$

$$M_X=0.5C_q S_X B H L \rho v_w^2 \tag{4}$$

$$M_Y=0.5C_N S_Y L^2 B \rho v_w^2 \tag{5}$$

$$M_Z=0.5C_M L^2 H \rho v_w^2 \tag{6}$$

式中: ρ 、 v_w 分别为空气密度和来流速度; B 、 L 、 H 分别为模型的长、宽、高。

表 1 试验测得的汽车六分力系数值

Tab. 1 Six-component coefficients obtained by wind simulation test

六分力系数		C_L	C_M	C_D	C_q	C_Z	C_N
小客车	风速 8 m/s	0.105 321	0.017 535	0.017 201	0.379 899	0.627 564	0.031 346
	风速 13 m/s	0.107 666	0.017 359	0.017 191	0.378 879	0.630 012	0.031 228
	均值	0.106 494	0.017 447	0.017 196	0.379 389	0.628 788	0.031 287
集装箱车	风速 8 m/s	0.012 203	0.007 498	0.514 230	1.151 898	0.851 794	0.022 805
	风速 13 m/s	0.012 194	0.007 563	0.513 830	1.151 985	0.851 951	0.022 712
	均值	0.012 199	0.007 531	0.514 030	1.151 942	0.851 873	0.022 759

表 2 风场中小客车受到的六分力值

Tab. 2 Six-component forces on passenger car in wind field							
风力/ 级	风速/ (m·s ⁻¹)	F _Y /N	M _Z / (N·m)	F _X /N	M _X / (N·m)	F _Z /N	M _Y / (N·m)
6	10.8	56	35	3	289	285	73
	13.8	92	57	5	471	465	119
7	13.9	93	58	5	478	471	120
	17.1	141	87	7	723	714	182
8	17.2	143	88	8	732	722	184
	20.7	207	128	11	1 060	1 046	267
9	20.8	209	129	11	1 070	1 056	270
	24.4	287	177	15	1 473	1 453	371

表 3 风场中集装箱车受到的六分力值

Tab. 3 Six-component forces on container car in wind field							
风力/ 级	风速/ (m·s ⁻¹)	F _Y /N	M _Z / (N·m)	F _X /N	M _X / (N·m)	F _Z /N	M _Y / (N·m)
6	10.8	35	531	350	12 604	3 734	1 049
	13.8	57	867	571	20 579	6 097	1 713
7	13.9	58	879	579	20 879	6 186	1 738
	17.1	88	1 331	877	31 599	9 362	2 631
8	17.2	89	1 346	887	31 969	9 472	2 661
	20.7	129	1 950	1 285	46 304	13 719	3 855
9	20.8	130	1 969	1 297	46 752	13 852	3 892
	24.4	179	2 710	1 785	64 336	19 061	5 356

从表中数据可看出,汽车受到的六分力均随风速增加而增加;集装箱车受到的六分力远远大于小客车,主要由于集装箱车受力面积大;汽车所受六分力中,风动侧倾力矩和风动侧力较其他分力大,因为此时汽车受力面积较大的是侧面。

2 考虑风作用的限速值研究

2.1 风环境下汽车受力分析

与其他路段相比,平曲线路段更容易发生交通事故。统计资料显示,中国发生在平曲线路段的交通事故数占总事故数的 6.34%,造成的死亡人数为总死亡人数的 7.32%,美国每年大约有 25% 的交通事故发生在平曲线路段上^[12-13]。因此,本文主要研究侧向风对行驶在平曲线路段上的汽车产生的影响。

为便于研究,在受力分析中作如下假定:①忽略汽车悬架及轮胎的弹性变形,假定汽车为刚性结构;②风作用产生的六分力中,仅考虑对汽车行驶稳定性影响最大的风动侧力 F_Z ;③考虑最不利情况,假定风动侧力 F_Z 与离心力 F 方向一致,且作用点均在汽车重心上;④平曲线路段上纵坡为 0。

大风天气时,行驶在曲线上的汽车除了受到离

心力、重力等力作用,还受到较强的风动力干扰(图 4),使汽车的行驶稳定性受到严重威胁。

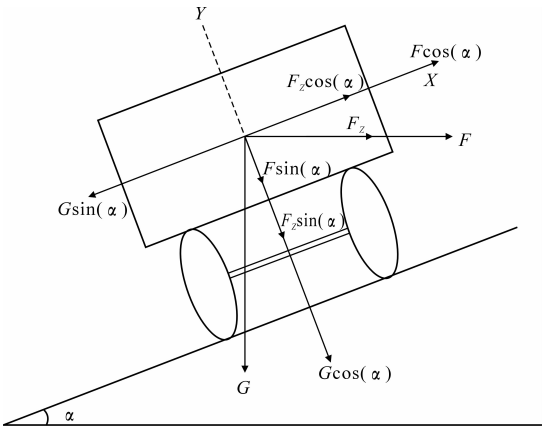


图 4 平曲线上的汽车受力分析

Fig. 4 Force analysis of vehicle driving on horizontally curved section

从图 4 可得,汽车受到的平行于路面的横向力 X 和垂直于路面的竖向力 Y ,即

$$X=F\cos(\alpha)+F_Z\cos(\alpha)-G\sin(\alpha) \tag{7}$$

$$Y=F\sin(\alpha)+F_Z\sin(\alpha)-G\cos(\alpha) \tag{8}$$

因路面横向倾角 α 一般较小,所以取 $\sin(\alpha)\approx\tan(\alpha)\approx i_h$, $\cos(\alpha)\approx 1$, i_h 为超高横坡度。上式可以简化为

$$X=F+F_Z-Gi_h \tag{9}$$

$$Y=G \tag{10}$$

2.2 考虑风作用的限速值计算模型

汽车在平曲线上行驶的横向稳定性主要取决于横向力系数。相关研究表明,因现代汽车重心高度较低,一般情况下在发生侧翻之前先产生侧滑,因此只要保证汽车不产生侧滑,也就保证了横向行驶的稳定性的^[14]。考虑风作用后,横向力系数 μ 除了与汽车行驶速度、平曲线半径、超高有关外,还与风力和车重相关,其计算公式为

$$\mu=\frac{X}{G}=\frac{V^2}{127R}-i_h+\frac{F_Z}{G} \tag{11}$$

式中: G 为车辆总重力(N); V 为汽车的行驶速度(km/h); R 为曲线半径(m)。

当风侧力 F_Z 足够大,致使 μ 超过一定极限时,汽车易发生滑移事故。

若车速过大,汽车受到的离心力偏大,叠加弯道外侧的侧风作用后,侧向力可能超过地面和车轮之间的侧向附着极限,使汽车发生侧向滑移。因此,保证车辆行驶稳定的必要条件为

$$V\leqslant\sqrt{127R(\mu+i_h-\frac{F_Z}{G})} \tag{12}$$

2.3 考虑风作用的公路限速值

《公路工程技术标准(JTG B01—2003)》的试验显示,路面横向力系数为 0.10~0.17 时,安全度较高,可避免汽车横向滑移^[15]。根据式(12)可知,限速值与超高横坡、横向力系数、风力、车重相关,而超高横坡和横向力系数的取值是受道路等级等多因素影响而异的。为保证计算结果的通用性,本文采用《公路工程技术标准》提供的横向力系数和超高值,见表 4。根据限速值计算模型,可得到考虑风作用的限速值,风力选择每级风对应的最大风速,结果见表 5、表 6。

表 4 圆曲线最小半径的横向力系数与超高值
Tab. 4 Lateral force coefficients and superelevations of minimum radius of circular curve

设计速度/ (km·h ⁻¹)	120	100	80	60	40	30	20
横向力系数	0.10	0.12	0.13	0.15	0.15	0.16	0.17
超高值/%	6	6	6	6	6	6	6

表 5 不同风速条件下的小客车限速值
Tab. 5 Speed limits of passenger car in various levels of wind

风力/ 级	风速/ (m·s ⁻¹)	不同设计速度(km/h)的限速值/(km·h ⁻¹)					
		120	100	80	60	40	20
6	13.8	106	89	73	54	36	27
7	17.1	97	82	68	51	34	26
8	20.7	83	72	60	46	30	23
9	24.4	61	58	49	39	26	15

表 6 不同风速条件下的集装箱车限速值
Tab. 6 Speed limits of container car in various levels of wind

风力/ 级	风速/ (m·s ⁻¹)	不同设计速度(km/h)的限速值/(km·h ⁻¹)					
		120	100	80	60	40	20
6	13.8	103	87	71	53	35	27
7	17.1	91	78	64	49	32	25
8	20.7	72	65	54	42	28	16
9	24.4	38	44	39	33	22	13

从表 5、表 6 可看出:设计速度越大,安全行驶速度(限速值)降低的越多;汽车在强风区行驶时,为保证行车稳定,应保持小于设计值的车速;当风力超过 8 级的时候,管理部门应对汽车进行限行管理。

雨天路面积水导致轮胎与路面之间产生水膜,因此附着系数也就降低。雨天路面附着系数不到干燥路面附着系数的一半,干燥水泥路面附着系数为 0.7~1.0,潮湿路面附着系数为 0.4~0.6,下雨时附着系数为 0.3~0.4。路面横向附着系数约为附着系数的 60%,也就是说,雨天路面横向附着系数为 0.18~0.24。根据表 4 可知,本文在计算限速值时,采用的横向力系数值较小,亦能满足雨天安全行车的需求。

3 结 语

(1)采用风洞试验方法,模拟风场,得到了不同等级的风作用下汽车受到的风作用力量化值;相同风速条件下,集装箱车受到的风作用力远大于小客车,因为集装箱车受力面积较大。

(2)以汽车动力学为基础,分析平曲线路段上汽车的受力情况,建立了考虑风作用的限速值计算模型;以此模型为基础,参照《公路工程技术标准》采用的参数值,得到了不同风速和设计速度条件下典型车型的限速值。

(3)研究成果弥补了风环境下公路限速管理的空白,为恶劣天气条件下公路运营安全提供了理论基础和指导,提高了公路的安全水平和服务水平。

(4)平曲线半径、横向力系数和超高的大小对限速值有较大的影响;计算采用的参数值参照《公路工程技术标准》,而未考虑道路实际线形状况及运营状况等对其造成的影响;在实际应用中,可通过现场测试或调查方法确定这些参数值,进而对本文提出的限速值进行适当的修正;此外,集装箱车装载货物后,重心高度会升高,装载过高时也有可能发生先侧翻后侧滑的事故,后续研究中应综合考虑货车的侧翻条件。

参考文献:
References:

[1] 邵海鹏. 公路网应对自然灾害系统框架研究[J]. 长安大学学报:社会科学版,2009,11(4):6-11.
SHAO Hai-peng. Mechanism and framework for natural disaster prevention for highway network[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition,2009,11(4):6-11. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国公安部. 中华人民共和国道路交通事故统计资料汇编[M]. 北京:中华人民共和国公安部,2010.
The Ministry of Public Security of China. China Road Traffic Accidents Statistics Compilation[M]. Beijing: The Ministry of Public Security,2010. (in Chinese)

[3] 艾力·斯木吐拉,胡新民,将松强. 灾害性天气对新疆高等级公路交通安全的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):70-72.
Eli Ismutulla, HU Xin-min, JIANG Song-qiang. Impact of harsh weather condition on high-grade highway in Xinjiang province[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2005,25(3):70-72. (in Chinese)

- YIN Hai-jun, LI Zi-qing, GUO qi, et al. Study on the dynamic characteristics of long span continuous rigid frame bridge with high wall piers[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(5): 663-668. (in Chinese)
- [13] 曹国俊, 何波, 袁峰, 等. 某连续刚构桥动态特性分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2010, 27(2): 71-73.
- CAO Guo-jun, HE Bo, YUAN Feng, et al. Dynamic characteristics analysis of a continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2010, 27(2): 71-73. (in Chinese)
- [14] 于金良, 杨东升. 高墩大跨连续刚构桥梁长期健康监测研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(8): 28-30.
- YU Jin-liang, YANG Dong-shen. Study on healthy monitoring of high-pier and long-span continuous rigid frame bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(8): 28-30. (in Chinese)
- [15] JTG/T B02—01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].
- JTG/T B02—01—2008, Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. (in Chinese)
- China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [11] 海贵春, 谷正气, 王和毅. 侧风对汽车高速行驶性能影响的仿真研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(2): 40-43.
- HAI Gui-chun, GU Zheng-qi, WANG He-yi. Research on the effect of crosswinds on the stability of high speed vehicles[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(2): 40-43. (in Chinese)
- [12] 裴玉龙, 马骥. 道路交通事故道路条件成因分析及预防对策研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 77-82.
- PEI Yu-long, MA Ji. Research on countermeasures for road condition causes of traffic accidents[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 77-82. (in Chinese)
- [13] 张长生, 马荣国. 山区高速公路交通事故分析及多发路段鉴别[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 76-80.
- ZHANG Chang-sheng, MA Rong-guo. Identifying method of traffic accident black spots on mountain freeway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 76-80. (in Chinese)
- [14] 宋年秀, 苏建, 王东杰. 半挂汽车列车弯道行驶横向稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(2): 133-136.
- SONG Nian-xiu, SU Jian, WANG Dong-jie. Analysis on lateral stability of semi trailer train running along a curve[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(2): 133-136. (in Chinese)
- [15] JTG B01—2003, 公路工程技术标准[S].
- JTG B01—2003, Technical standard of highway engineering[S]. (in Chinese)
- [4] Snæbjörnsson J T, Barker C J, Sigbjörssona R. Probabilistic assessment of road vehicle safety in windy environment[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(11): 1445-1462.
- [5] Baker C J. The problems of road vehicles in cross winds[J]. Highways & Transport, 1991, 38(5): 6-9.
- [6] Baker C J. The quantification of accidental risk for road vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 52(5): 93-107.
- [7] 韩万水, 陈艾荣. 风环境下行驶于大跨度桥梁上的车辆安全评价及影响因素研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(4): 465-471.
- HAN Wan-shui, CHEN Ai-rong. Safety assessment of moving vehicles on a long-span bridge under crosswind and influence factors analysis[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(4): 465-471. (in Chinese)
- [8] 庞加斌, 刘晓晖, 陈力. 汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述[J]. 汽车工程, 2009, 31(7): 609-615.
- PANG Jia-bin, LIU Xiao-hui, CHEN Li. A review on Reynolds number, blockage and boundary layer effects in automotive wind tunnel tests[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609-615. (in Chinese)
- [9] Rhonda K Y, Joel L. Estimating the relationship between measured wind speed and overturning truck crashes using a binary logic model[J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(3): 574-580.
- [10] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- GU Zheng-qi. Automobile aerodynamic[M]. Beijing: