

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.020

## 利用汽车行驶风测试结构气动力系数的 车振影响分析\*

李胜利, 郑舜云, 郭攀, 武昊

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 参照结构风洞试验和现场实测的方法, 结合车辆行驶能产生风的特点, 提出一种理想道路条件下利用汽车行驶风测试结构气动力系数的跑车试验方法, 该方法可成为风洞试验的有益补充。然而, 汽车在行驶中由于路面不平整、发动机抖动及机械传动等因素作用下不可避免地产生振动, 搭载于车上的结构模型由于该车辆振动的影响将受到惯性力的作用, 该惯性力也会被测力天平采集, 造成结果失真。采用理论推导和现场试验的方法, 构建了跑车试验的基本理论, 设计和组装了跑车试验的物理试验平台, 运用该方法对参考文献三棱柱模型的升、阻力系数进行测试, 同时对汽车行驶振动的影响进行研究。结果表明: 在理想道路条件下, 跑车试验理论公式正确, 构建的跑车试验装置合理, 等腰三棱柱模型的升、阻力系数跑车试验测试结果与风洞试验结果吻合很好, 汽车行驶振动对利用汽车行驶风测试三棱柱模型升、阻力系数的影响很小, 可忽略不计。跑车试验为结构抗风研究提供了一种新的试验方法。

**关键词:** 汽车行驶风; 气动力系数; 车振; 跑车试验方法; 三棱柱结构

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0647-08

## Analysis of Vehicle Vibration Impact on Measuring Aerodynamic Coefficients of Structures Using the Wind Generated by a Moving Vehicle

LI Shengli, ZHENG Shunyun, GUO Pan, WU Hao

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Referring to the methods of wind tunnel experiment and field measurement on aerodynamic coefficients of structures, and combining the characteristic of a moving vehicle can produce wind, a kind of test method for measuring aerodynamic coefficients of structures is presented. This method can be a useful supplement to wind tunnel test. However, when the vehicle is running, the vibration is inevitable because of the pavement unevenness and engine vibration. The test model on the vehicle will be affected by the inertial force due to the vibration, and the inertia force will be collected by dynamometer, resulting in distortion of the results. On the basis of theoretical derivation and field test, the

\* 收稿日期:2018-07-12;修回日期:2018-11-26

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51778587, 51808510)、河南省自然科学基金项目(162300410255)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2017GGJS005)、郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1421322059)、河南省交通运输厅科技项目(2016Y2-2, 2018J3)资助

**作者简介:** 李胜利(1979-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构抗风和健康监测方面的研究。Email: lsl2009@126.com

basic theory of transiting test was constructed. The physical test platform of transiting test was designed and assembled. The method of test data processing was studied. The transiting test method was used to measure the lift and drag coefficient of a triangular prism model in the quoted references. At the same time, the influence of vehicle vibration is studied. The results show that: under the ideal road condition, the theoretical formula of the transiting test presented in this paper is correct. The system of hardware and software is reasonable. The test results of lift and drag coefficients of the triangular prism model show good agreement with the wind tunnel test results of the relevant literatures. The impact of vehicle vibration on the aerodynamic coefficients of a vehicle is very small, and it can be neglected completely. The feasibility of this method under ideal road condition is verified. The study on transiting test provides a new test method for structural wind resistance.

**Keywords:** wind generated by a moving vehicle; aerodynamic coefficients; vehicle vibration; transiting test; triangular prism model

## 引言

气动力系数是桥梁抗风计算的重要基础数据。众多学者对桥梁主梁断面、斜拉桥覆冰斜拉索、悬索桥吊索等结构或构件的气动力系数进行了深入研究,为桥梁结构的驰振、涡振及颤振等研究提供参考<sup>[1-3]</sup>。目前,桥梁三分力系数主要采用风洞试验<sup>[4-5]</sup>、数值计算<sup>[6-8]</sup>和现场实测<sup>[9-10]</sup>的方法获得。考虑到车辆在行驶过程中由于其与空气的相对作用将产生相对的行风,该行风可以被巧妙地用于测试结构气动力系数,这是气动力系数研究方法上的一次创新。目前已有相关学者对车辆行驶过程中气动特性进行研究。胡传双等<sup>[11]</sup>利用数值仿真的方法研究了预制木结构房在高速运输过程中由于与空气的相对运动而在墙面和屋顶上产生的压力分布。刘堂红等<sup>[12]</sup>为了解决目前车篷布的兜风现象,通过实车试验,对列车交会压力和货车篷布绳索拉力进行测试分析。综上可知,车辆在行驶过程中不仅车辆整体本身受到空气相对运动(行风)的作用,车辆局部甚至车辆上所运输的物体也会受此行风的作用。

众所周知,桥梁等结构抗风的基础理论和研究方法主要是参考航空领域进行的。然而,飞行器由于本身的运动而受到相对风场的作用,桥梁等结构受到风本身的主动作用,在这方面它们并不一样。不过,本文提出的利用汽车行驶风测试结构气动力系数的跑车试验方法与航空航天领域正好完全一

致,航空航天空气动力学理论更为符合。因此,一种通过汽车的运动产生相对风场,进而对桥梁结构构件三分力进行测试研究的跑车试验装置具有一定的理论背景和可行性。

然而,汽车是个复杂的振动系统,汽车车身振动系统包括车身的垂直振动、纵向角振动和侧倾振动、发动机振动等<sup>[13-14]</sup>。利用汽车行驶风测试结构气动力系数时,由于汽车行驶振动的影响,搭载于车上的结构模型将受到惯性力,该惯性力也会被测力天平采集到,造成结果失真。本文通过理论推导和试验研究两方面对汽车行驶振动的影响进行研究。同时,还进行了某等腰三棱柱模型的气动力系数测试,并将该测试结果与风洞试验结果进行比较,验证该跑车试验的可行性。

## 1 跑车试验方法

### 1.1 理论模型

在土木工程领域,结构所受的气动力一般为阻力、升力和扭矩。单位长度结构的气动力系数表达式为<sup>[15-16]</sup>:

$$C_d = \frac{2d}{\rho U^2 b} \quad (1)$$

$$C_l = \frac{2l}{\rho U^2 b} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{2m}{\rho U^2 b^2} \quad (3)$$

式中,跑车试验与风洞试验的气动力系数表达式含

义相同的物理量有:阻力  $d$ , 升力  $l$ , 力矩  $m$ , 空气密度  $\rho$ , 模型特征尺寸  $b$ ; 不同的物理量主要为风速  $U$ , 跑车试验中行驶风速理论上为车速, 为了更加准确地测试汽车行驶风速, 跑车试验方法需采用皮托管或风速仪对实际的来流行驶风速进行测试。

根据伯努利方程, 有:

$$U = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}} \quad (4)$$

式中,  $U$  为汽车行驶风速;  $P_0$  为总压;  $P$  为静压;  $\rho$  为空气密度。

将式(4)代入式(1)~(3), 得到搭载于车顶结构模型单位长度气动力的表达式为:

$$C_d = \frac{d}{(P_0 - P)b} \quad (5)$$

$$C_l = \frac{l}{(P_0 - P)b} \quad (6)$$

$$C_m = \frac{l}{(P_0 - P)b^2} \quad (7)$$

式(5)~(7)即为本文跑车试验方法的基本理论公式。与传统的气动力系数公式相比, 该公式无需测试空气密度, 空气密度的测试误差不影响该方法的测试精度, 因此本文提出的跑车试验方法的理论公式简单实用。

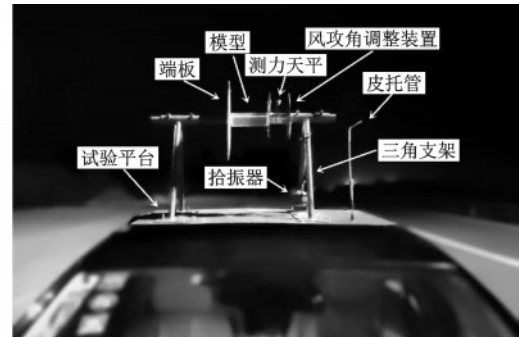
## 1.2 物理试验平台

汽车行驶时, 由于运动的相对性, 搭载于车上的试验模型将受相对风场(行驶风)的作用, 运用仪器设备便可对气动力进行测试。

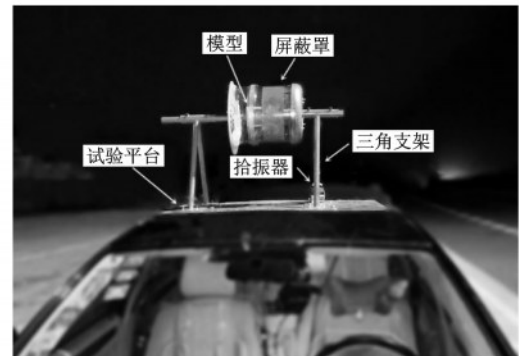
如图1所示, 跑车试验装置主要包括一辆家用小汽车、物理试验平台和信号测试系统等。所采用的小汽车须具备定速巡航功能和良好的减震系统, 并带有天窗。其中图1(a)是结构气动力系数测试装置, 图1(b)是车振影响分析装置, 该车振影响分析装置是在气动力系数测试装置的基础上增加了风场屏蔽罩, 风场屏蔽罩可隔离试验模型周围的风场, 使试验模型仅受车振的作用, 而不受汽车行驶风的作用, 则测力天平只采集试验模型所受的振动惯性力。

如图1所示, 物理试验平台包括支撑试验模型和天平的支架、皮托管、风场屏蔽罩、风攻角调整装置和风场屏蔽罩等。文献[17]的风洞试验研究表明, 靠近车顶附近存在边界层。为了避免车顶边界

层的影响, 利用支架将模型和测力天平支起, 支起高度为 35 cm。皮托管用于测试总压和静压。拾振器布置在支架底座之上, 并与测力天平同步振动。如图2所示, 风攻角调整装置由带刻度的刻度盘、指针和锁定装置组成, 风攻角调整精度为  $1^\circ$ 。如图1(b)所示, 风场屏蔽罩是车振影响分析装置独有的构件, 可用于隔离试验模型周围的风场, 采用橡皮泥封堵风场屏蔽罩的缝隙和孔洞。



(a) 测力装置(无屏蔽罩)



(b) 振动分析装置(有屏蔽罩)

图1 利用汽车行驶风测试结构气动力系数的跑车试验装置

Fig.1 Transiting test device for measuring aerodynamic coefficients of structures using the wind generated by a moving vehicle

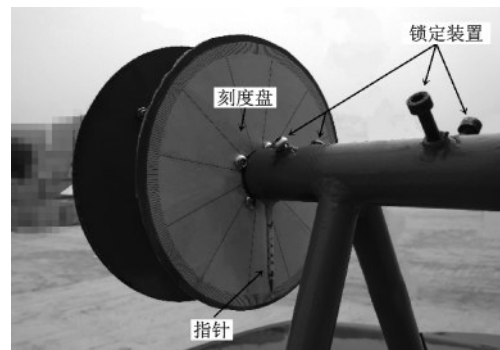


图2 风攻角调整装置

Fig.2 Regulating device of wind attack angle

### 1.3 测试软硬件系统

跑车试验设备包括测力天平、皮托管、风压传感器、拾振器以及相应配套的数据采集软件。测力天平用于气动力的采集,其  $x$  轴和  $y$  轴的量程均为  $\pm 150$  N,绕  $z$  轴的力矩量程为  $\pm 50$  N·m,采样频率为 30 Hz。风压传感器和皮托管用于测试汽车行驶风场的总压和静压,风压传感器量程为  $\pm 2$  KPa,试验采样频率为 1 KHz。拾振器用于测试汽车行驶风场的加速度时程,采集的加速度方向与各个气动力分量方向一致,试验采样频率为 128 Hz。

如图 3 所示,信号测试系统布置于车厢内部,主要包括数据采集仪器,笔记本电脑,风压传感器和电源系统等。皮托管通过 PVC 软管与风压传感器连接。电源系统由电池组和逆变器组成。所有数据采集设备连接至同一台电脑,实现数据的同步采集和保存。



图 3 车内的信号采集测试系统  
Fig.3 Arrangement of interior collecting instrument

### 1.4 试验方法

对于利用汽车行驶风测试结构气动力的跑车试验。首先,选择合适的理想试验道路和试验时段,理想试验道路和试验时段主要满足以下条件:道路平直,交通量很小,无自然风,以及天气晴朗等。然后,安装试验平台和仪器设备并调试无误。之后,启动汽车,将汽车行驶至试验车速,打开定速巡航使汽车匀速行驶。最后,通过车厢内的数据采集仪和笔记本对测试数据进行实时采集。

对于汽车行驶振动的影响分析试验,其试验方法(包括试验装置,试验道路,试验条件,试验流程和试验数据等)和气动力测试试验基本一致,唯一不同的在于试验装置上增加一个用于屏蔽风场的屏蔽罩,使测力天平仅采集试验模型所受的振动惯性力。

本试验选择在郑云高速(武陟至云台山段)深

夜几乎无交通流和自然风条件下的平直路段进行。郑云高速为新开通不久的高速公路(图 4),道路平坦笔直,是良好的试验道路。试验模型为一个三棱柱(图 5),本模型尺寸与文献[15]一致,三棱柱的底面为一个高 10 cm,顶角为  $30^\circ$  的等腰三角形,模型高为 14.5 cm,质量为 0.779 kg(图 6)。



图 4 郑云高速武陟至云台山段  
Fig.4 Wuzhi to Yuntai Mountain section in Zheng-Yun high-speed route

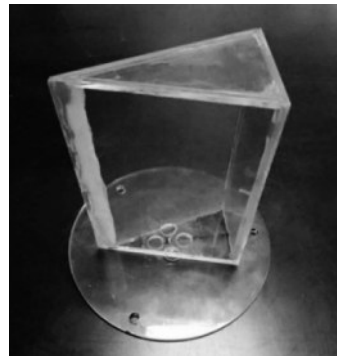


图 5 三棱柱模型  
Fig.5 The triangular prism model

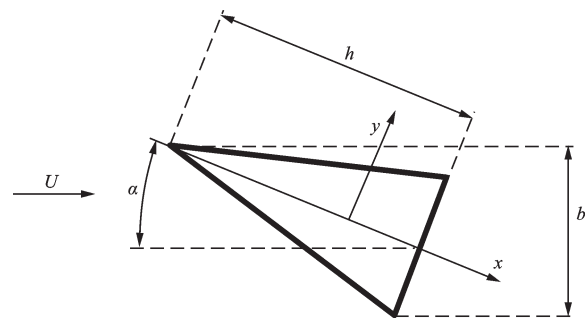


图 6 三棱柱模型截面  
Fig.6 Section of the triangular prism model

## 2 车振影响分析

### 2.1 理论分析

在利用汽车行驶风测试气动力时,测力天平测

得的结果包含气动力和振动惯性力两个部分。汽车行驶的振动时程可以通过加速度拾振器采集,根据牛顿第二定律计算出振动惯性力,便可扣除车振的影响。

根据达朗贝尔原理,天平测得结果:

$$F_t = F_a + F_v \quad (8)$$

由牛顿第二定律:

$$F_a = F_t - F_v = F_t - ma \quad (9)$$

取均值:

$$F_a = \overline{F_t - ma} = \overline{F_t} - m\overline{a} \quad (10)$$

式中, $F_t$ 为天平测得的力; $F_a$ 为试验模型所受的气动力; $F_v$ 为试验时模型的振动惯性力; $m$ 为试验模型的总质量; $a$ 为试验时模型的振动加速度。

采用图1(a)所示的气动力测试试验装置(无屏蔽罩)对三棱柱模型气动力进行测试,一典型工况的测力结果如图7所示,试验车速为72 km/h(20 m/s),风攻角为30°。由图7可知,天平测得的结果时程较为稳定,波动较小。根据式(10)计算的升力方向和阻力方向的振动惯性力分别为-0.001 4 N

和0.000 4 N,相对于气动力系数的测试量级,该值极小。可见,在理想道路上,汽车行驶振动产生的惯性力很小,可忽略不计。

## 2.2 试验分析

在气动力测试试验装置上增设风场屏蔽罩,对模型周围的风场进行屏蔽,使模型仅受车振的作用,并利用天平对该情况下的模型受力情况进行实测。试验风攻角为30°,试验车速为72 km/h(20 m/s)。

图8为升力和阻力方向的振动时程和测力时程。结果表明:总体上测力时程平稳,波动较小。由于少量道路坑洼的影响,在某些时候测力时程出现较大峰值,但持续时间很短。升力和阻力方向测力结果均值分别为0.003 2 N和-0.005 4 N,相对于气动力系数的测试量级,该值极小。可见,在理想道路上,汽车行驶振动产生的惯性力可忽略不计。

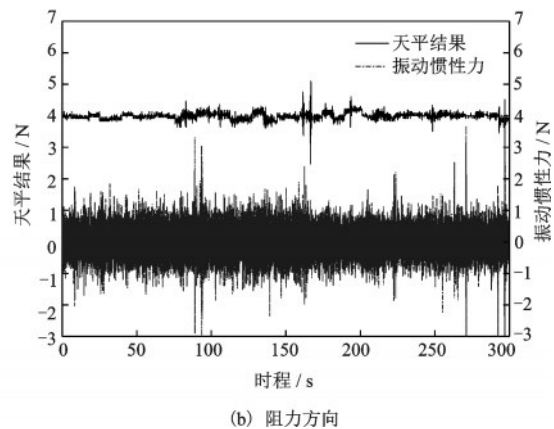
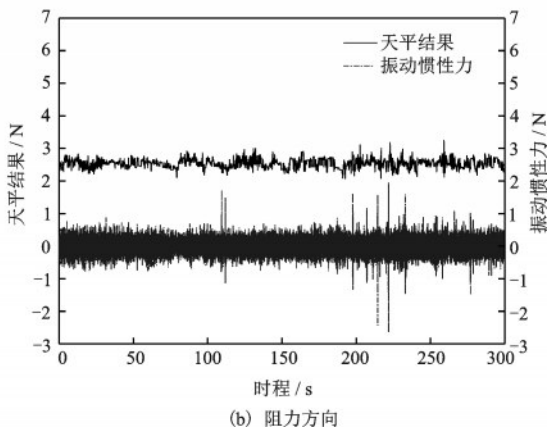
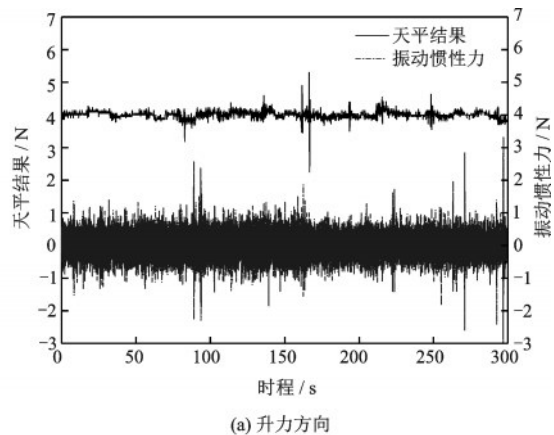
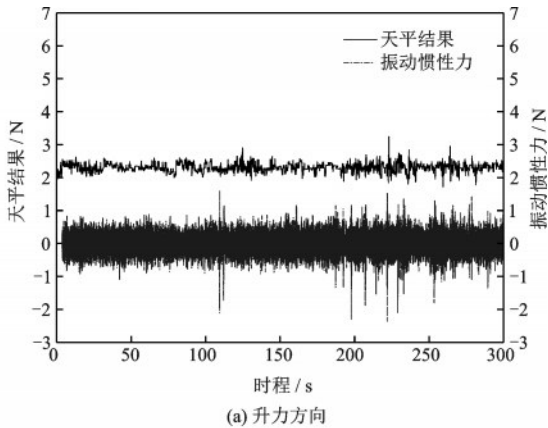


图7 天平测试结果和振动惯性力时程(无屏蔽罩)

Fig.7 Time history of dynamometer result and vibration inertial force (without shield)

图8 天平测试结果和振动惯性力时程(有屏蔽罩)

Fig.8 Time history of dynamometer result and vibration inertial force (with shield)

根据  $3\sigma$  准则,对采集到的原始数据中较大的峰值进行处理,处理后的结果如图9所示。结果表明,升力和阻力方向测力结果均值有所变化,分别为  $0.006\ 0\ \text{N}$  和  $-0.001\ 9\ \text{N}$ ,数值极小,可忽略不计。即使存在少量道路坑洼的影响,在对数据取均值后,这些影响会被自动抵消滤除,道路少量坑洼的影响很小。

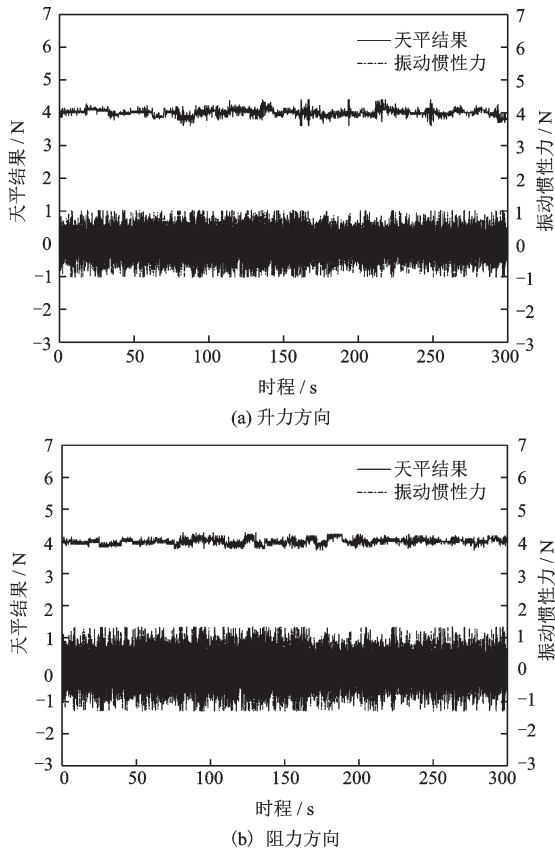


图9 处理后的测力结果和振动惯性力时程(有屏蔽罩)  
Fig.9 The processed time history of dynamometer result and vibration inertial force (with shield)

### 3 气动力系数结果与分析

根据前文提到的试验装置(图1(a))和方法,利用汽车行驶风对三棱柱模型的升阻力进行测试,并计算气动力系数,试验风攻角为  $0^\circ\sim 180^\circ$  (间隔  $30^\circ$ ),汽车行驶速度为  $72\ \text{Km/h}$  ( $20\ \text{m/s}$ ),气动力系数结果如图10所示。由图10可以看出,该试验方法测得的气动力系数随风攻角的变化趋势和风洞试验结果一致,除  $180^\circ$  的阻力系数结果外,数据大小也基本相近。由于结构风致响应的复杂性,影响因

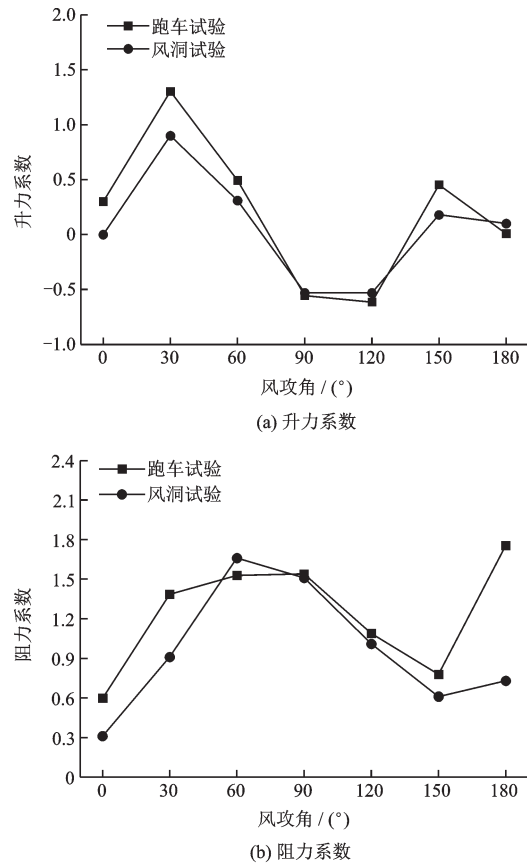


图10 三棱柱气动力系数

Fig.10 The aerodynamic coefficients of triangular prism model

素较多,某些风攻角下的升阻力偏差较大。特别地,  $180^\circ$  的阻力系数误差偏大,但考虑对称模型在  $180^\circ$  风攻角下的升力系数为0,与本跑车试验结果一致,参考文献[15]的风洞试验结果可能存在一定误差。

根据公式(10),对车振的影响进行扣除,扣除车振影响的结果如图11所示。由图11可以看出,有无扣除振动影响的结果基本无差别,车振的影响可忽略不计。

### 4 结论

(1)提出了一种利用汽车行驶风测试结构气动力系数的跑车试验方法,并设计和搭建了试验装置。

(2)在理想试验条件下,汽车行驶振动对三棱柱模型的气动力测试的影响很小,可忽略不计。

(3)在理想的试验条件下,该试验方法测得的

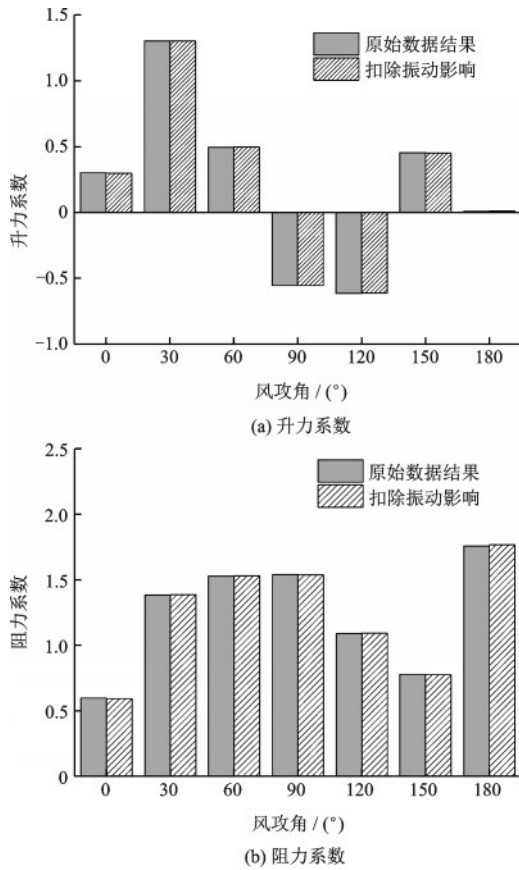


图 11 车振对气动系数影响

Fig.11 The vehicle vibration impact on aerodynamic coefficients

气动系数和风洞试验结果吻合较好,说明该试验方法的准确性是可以肯定的,有一定的研究意义。

### 参考文献:

[1] Shirai Shuji, Ueda Toshio. Aerodynamic simulation by CFD on flat box girder of super-long-span suspension bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1):279-290.

[2] Xu F, Wu T, Ying X, et al. Higher-order self-excited drag forces on bridge decks [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015: 06015007.

[3] Chen W L, Zhang Q Q, Li H, et al. An experimental investigation on vortex induced vibration of a flexible inclined cable under a shear flow [J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 54(1):297-311.

[4] 李永乐,徐昕宇,郭建明,等.六线双层铁路钢桁桥车桥系统气动特性风洞试验研究[J].工程力学,2016,33(4):130-135.

Li Y L, Xu X Y, Guo J M, et al. Wind tunnel tests on aerodynamic characteristics of vehicle-bridge system for six-track double-deck steel-truss railway bridge [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):130-135. (in Chinese)

[5] 何 玮,郭向荣,邹云峰,等.风屏障透风率对车-桥系统气动特性影响的风洞试验研究[J].振动与冲击, 2015,34(24):93-97.

He W, Guo X R, Zou Y F, et al. Wind tunnel test on the effect of wind barrier porosity on train-bridge system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(24):93-97. (in Chinese)

[6] 李胜利,王超群,王东炜,等.大跨径悬索桥施工期尖顶型主缆驰振性能分析[J].振动与冲击,2015,34(22):154-159.

Li Sh L, Wang Ch Q, Wang D W, et al. Galloping performance of large scale spire type main cable of suspension bridge during construction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22):154-159. (in Chinese)

[7] 李永乐,易仁彦,王东绪,等.悬索桥主缆架设过程驰振性能时域分析[J].西南交通大学学报,2013,48(1):21-28.

Li Y L, Yi R Y, Wang D X, et al. Time-domain analysis of galloping of main cables of suspension bridge during erection process [J]. journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1):21-28. (in Chinese)

[8] Xu F, Chen W L, Xiao Y Q, et al. Numerical study on the suppression of the vortex-induced vibration of an elastically mounted cylinder by a traveling wave wall [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 44 (1):145-165.

[9] 禹见达,李 彬,竹剡锋.洞庭湖大桥桥塔塔顶风场与风压特性试验研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2014,29(3):49-52.

Yu J D, Li B, Zhu Sh F. Investigation into the characteristics of wind and wind pressure of the tower top of Dongting Lake Bridge [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(3):49-52. (in Chinese)

[10] 禹见达,吴小希,胡佳星.基于现场观测的拉索风雨振参数特性分析[J].湖南工业大学学报,2013,27(2):38-44.

Yu J D, Wu X X, Hu J X. Study on parameter characteristics of wind-rain induced stay-cable vibration based on field observations [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(2):38-44. (in Chinese)

[11] 胡传双,李重根,廖红霞,等.运输过程中预制木结构房风荷载分布的模型[J].华南农业大学学报,2008,29(2):112-114.

- Hu Ch Sh, Li Ch G, Liao H X, et al. Modeling the wind pressure distribution on a prefabricated wood framing structure during high-speed transportation [J]. Journal of South China Agricultural University, 2008, 29(2): 112-114. (in Chinese)
- [12] 刘堂红, 田红旗. 列车交会篷布气动力分析 [J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 4-8.  
Liu T H, Tian H Q. Crossing aerodynamic force analysis of tarpaulin for trains [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 4-8. (in Chinese)
- [13] 何渝生. 汽车振动学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 1-2.  
He Y Sh. Automotive vibration [M]. Beijing: China Communications Press, 1990: 1-2. (in Chinese)
- [14] 蒋国平, 王国林, 周孔亢. 汽车整车振动特性研究综述 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2001, 26(3): 194-197.
- [15] Jian G P, Wang G L, Zhou K K. Review on research of vibration characteristics of automobile [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2001, 26(3): 194-197. (in Chinese)
- [16] Alonso G, Meseguer J, Perez-Grande I. Galloping stability of triangular cross-sectional bodies: a systematic approach [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 928-940.
- [17] Simiu, Emil; Scanlan, Robert H. Wind effects on structures [M]. Wiley, 1986.
- [18] Altinisik A, Kutukceken E, Umur H. Experimental and numerical aerodynamic analysis of a passenger car: influence of the blockage ratio on drag coefficient [J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137, 081104.

(本文责编: 周小潭)



## “重大灾害的机理、监控和风险研究”专栏征稿函

2017年,中共中央、国务院出台了“关于推进防灾减灾救灾体制机制改革的意见”,提出要“加强基础理论研究和关键技术研发,着力揭示重大自然灾害及灾害链的孕育、发生、发展、演变规律,分析致灾成因机理,提高重大自然灾害防范的科学决策水平和应急能力”。其中,对于我国经济建设和社会发展有重大影响的自然灾害(诸如地震灾害、地质灾害、海洋灾害、气象灾害、生态环境灾害等)及其诱发的工程灾害,其形成机理与防灾减灾对策所涉及的重大科学问题,亟需开展跨学科的合作和多灾种协同评估研究。

《防灾减灾工程学报》现针对以上重大灾害的核心科学问题,设立长期专栏——“重大灾害的机理、监控和风险研究”,欢迎从事相关科研工作的专家、学者踊跃投稿。主要征稿方向如下:

1. 大型滑坡、泥石流等地震、地质灾害的成灾机理
2. 极端气象、海洋环境下的重大工程安全及致灾机理
3. 重大工程灾害的监控预警与风险评估
4. 重大工程的多灾种耦合致灾机理、风险演变与协同评估
5. “一带一路”沿线重大自然灾害的风险评估与防治

本专栏投稿邮箱: fzjzgcxb@vip.163.com, 投稿时请注明“重大灾害的机理、监控和风险研究”专栏;编辑部联系电话: 025-84285560, 84285517。

《防灾减灾工程学报》编辑部