

基于横风作用的大跨径桥梁交通运行安全影响分析

申全军¹,王孜健¹,邢小亮^{2*},张昱^{3,4},高立晓^{3,4},陈亮^{3,4}

(1.山东高速集团有限公司创新研究院,山东 济南 250101;2.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804;
3.山东省交通科学研究院,山东 济南 250031;4.山东省路域安全与应急保障交通运输行业重点实验室,山东 济南 250102)

摘要:横风作用对大跨径桥梁上车辆运行安全影响较大。为探究大跨径桥梁段横风特征参数与交通运行安全性间作用规律,以横风频发的黄河特大桥为试验段,分析桥梁上交通事故与横风分布规律的关系,建立横风作用下大跨径桥梁段交通运行协调性拟合关系模型。研究表明:各季节横风的发生具有较高离散性,横风作用是桥梁段发生侧翻的主要原因,追尾、刮擦、撞物事故直接或间接地受横风作用影响。结合车辆运行速度分布可知,春季和秋季交通运行协调性较差,且运行速度与横风分布特征一致。利用Poly非线性曲面拟合方法,建立运行速度与横风风速、风向间季节性函数关系模型,由模型拟合优度和显著性检验结果可知,该模型拟合优度 R^2 均大于0.8,拟合结果满足收敛和统计学要求。通过剔除横风季节性特征,建立横风作用下大跨径桥梁交通运行安全性一般性模型,提升了模型的适用度。

关键词:大跨径桥梁;交通安全;交通运行安全性;Poly非线性拟合;横风作用

中图分类号:U447

文献标志码:A

Influence of Crosswind on Traffic Operation Safety of Long-Span Bridges

SHEN Quanjun¹,WANG Zijian¹,XING Xiaoliang^{2*},ZHANG Yu^{3,4},GAO Lixiao^{3,4},CHEN Liang^{3,4}

(1.Innovation Research Institute, Shandong Expressway Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China; 2. Experimental Teaching Center of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3.Shandong Transportation Institute, Jinan, Shandong 250031, China; 4.Shandong Road Region Safety and Emergency Support Transportation Industry Laboratory, Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract: Crosswind has a great influence on the operation safety of vehicles on long-span bridges. To explore the relationship between the characteristic parameters of the crosswind and the traffic operation safety of the long-span bridge, the Yellow River Bridge with frequent crosswinds was taken as the experimental section, and the relationship between traffic accidents and the distribution of crosswinds on the bridge was analyzed. A fitting relationship model of traffic operation coordination of the long-span bridge under the action of the crosswind was established. The study shows that the occurrence of crosswinds in each season is highly discrete. The crosswind is the main cause of vehicle overturning on the bridge, and rear-end collision, scraping, and collision accidents are directly or indirectly affected by crosswinds. Combined with the operation speed distribution of the vehicle, coordination of traffic operation in spring and fall is poor, and the operation speed is consistent with the crosswind distribution. By using the Poly nonlinear surface fitting method, the seasonal function model of operation speed, crosswind speed, and wind direction is established. According to the goodness of fit and significance test results of the model, the goodness of fit R^2 of the model is greater than 0.8, and the fitting results meet the requirements of convergence and statistics. By eliminating seasonal characteristics of crosswinds, a general traffic operation safety model of long-span bridges under the action of crosswinds is established, which improves the applicability of the model.

Keywords: long-span bridges; traffic safety; traffic operation safety; Poly nonlinear fitting; action of crosswind

收稿日期:2022-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:71673201);山东省交通运输厅科技计划项目(编号:2020B46)

作者简介:申全军,男,硕士,高级工程师.E-mail:416959474@qq.com

*通信作者:邢小亮,男,博士研究生.E-mail:835950648@qq.com

0 引言

不良天气对驾驶员驾驶行为影响较大,其对交通安全的影响不容忽视^[1-2]。尤其是横风这一特殊现象对车辆运行安全的影响引起了业界的广泛关注。研究表明^[3]:约有20%的交通事故是由横风作用导致。横风引起的主要安全问题包括车辆的侧倾、侧滑以及侧偏,其中大跨径桥梁这一公路典型构造物受横风作用影响尤为显著。分析横风作用下的大跨径桥梁交通运行状况,有助于提升桥梁段智慧化风险预测预警和整体运营安全水平。

国内外学者就横风作用对交通安全性能的影响分析做了大量研究,并取得了一系列具有应用和科研价值的结论和成果。在交通领域内的研究主要集中在宏观特征和微观机理两个方面:一是针对横风作用分布特征展开对汽车或高速列车运行安全性的影响分析。陈洪业^[4]提出大风天气对驾驶员驾驶操作性影响较大,尤其是行驶于大跨度桥梁、高架桥、峡谷、隧道等受横风作用影响较大区域;Meng等^[5]提出一种简化的桥上车辆横风环境评估方法,结合风洞试验提出一种防风栅栏交叉减风措施;田林^[6]根据横风风速、风向、路面摩擦系数、路拱横坡度和汽车速度等变量的相互关系,建立了载重汽车在弯道路段和弯坡组合路段侧翻和侧滑受力模型,提出了横风作用下载重汽车安全行车条件;亓昌等^[7]在modeFRONTIER平台上,搭建了一种考虑气动阻力特性和横风稳定性的车身自动优化设计流程,实现了车身气动阻力和横风稳定性的多目标优化;吴兵等^[8]利用贝叶斯Logistic回归和模糊C-均值聚类算法提出了基于安全风险的恶劣天气下高速公路建议车速确定方法;武万里等^[9]以横风风速为统计指标研究了高速公路沿线横风风险;朱晓东等^[10]提出横风作用下,车辆行驶速度越大,侧滑风险越大。此外,有研究表明^[11]货车翻车对驾驶员伤害程度影响较大。因此,横风多发路段应适当设置速度限制以保证车辆的运行安全。另一方面,部分学者从综合空气动力学和车辆动力学角度开展了横风对运动车辆影响机理的分析。梅辉等^[12]利用Matlab和Simulink搭建了横风作用下车辆仿真模型,分析了横风对车辆横摆角速度和侧向加速度两力学特性指标的影响;Xiang等^[13]提出了横风与高速列车和板式轨道系统动力学分析

方法,分析了侧风对系统动态响应的影响。结果表明:横风对车体横向和竖向位移响应、减载系数和倾覆系数均有显著影响;刘学龙等^[14]利用车辆侧风条件下的动态响应仿真试验分析了气动力对车辆侧风响应的影响及机理,确定侧向力是影响车辆侧风动态响应的关键因素;殷新锋等^[15]基于风-车-桥耦合系统振动理论,通过自编程序和概率统计方法对风环境下车辆动力响应进行了研究,分析了不同车速下的侧倾临界风速、不同风速下侧倾临界车速及不同路面状况下侧滑临界风速,为风环境下桥梁车辆安全运行提供可靠依据;赵军等^[16]建立了直线区段横风载荷对重载货车动力学特性三维仿真模型,分析了车辆运行速度与横风风速对轮轨相互作用的影响。研究结果表明:货车轮轨力和各项安全性指标受横风载荷影响显著;陈宁等^[17]基于虚功原理建立了四轴拖挂车和两轴车的动力学模型,采用大比例尺模型风洞试验提出采用动力稳定平衡方法来评估车辆的侧倾行车安全性。分析了风速、车速及路况条件等因素对车辆和桥梁动力响应及车辆侧倾临界风速的影响,证实了最大倾覆力矩对车辆侧倾行车安全性评估起主导作用;胡朋等^[18]利用直接生成法分析了不同离地高度、风速、车辆运行速度等因素对车辆脉动风速自相关系数函数的影响,提出横风作用下的纵向脉动风速谱模型具有较高的计算精度;Kramer等^[19]提出描述交叉风试验设施设计参数间相互关系函数,该函数可真实模拟车辆在横风环境下的运动行为;崔涛等^[20]建立了横风流体动力学模型和高速列车多体动力学模型,分析了不同侧风环境下列车安全运行的临界速度和侧风作用安全域。

综上所述,由于横风的产生本身具有一定的随机性和不确定性,研究其对交通安全影响常用风洞试验和数值仿真模拟,然而风洞试验成本高、试验测量困难,而数值模拟方法为风环境分析提供一定便利,但由于部分研究难以开展实例验证,导致结论的普适性有待进一步论证^[21-22]。加之横风受地形条件和环境复杂性影响较大,对其分布特征和风险预警的研究受到一定限制,特定环境条件下横风作用特征及其对交通安全性能的影响程度更是难以考量。大跨度桥梁是受横风影响较大的特殊构造物,因此,研究横风作用下大跨径桥梁交通运行安全和风险预警具有重要的理论意义和应用价值。

鉴于此,笔者在总结国内外研究成果的基础上,首先分析大跨径桥梁交通事故和横风分布特征,提取桥梁段横风风力和风向分布规律。结合车辆运行速度与横风分布特征参数,建立大跨径桥梁段交通运行协调性与横风特征参数间的作用耦合关系模型,为研究横风作用下大跨径桥梁交通运行风险智慧监测预警技术提供科学依据。

1 试验方案

1.1 试验路段

以山东省济南市境内横风频发的黄河特大桥某跨为例,开展横风作用影响下大跨径桥梁交通运行风险分析。该桥梁路线全长 3 767.9 m,桥梁全长 2 316 m,主跨长 410 m,桥梁呈东西布置,桥面为双向六车道 I 级公路,设计速度为 80 km/h。结合实地调研情况可知,该桥为衔接黄河两岸地市的重要大跨径桥梁,由于桥梁跨径大,周围环境空旷无任何遮挡物,大气边界层相对活跃,气流运动速度较快,且净高较高,因此,车辆在通过桥梁时极易受横风作用影响,存在发生行驶轨迹偏移甚至侧翻的隐患,对人民生命财产安全带来极大威胁,故选择该大跨径桥梁展开横风与交通运行安全耦合作用分析。

1.2 试验设备

试验所需横风风速和风向数据通过桥梁索塔南北两侧布置的实时监测风环境的风速风向仪 (Anemoclinograph, 记作 A_N 和 A_S) 获取,设备每 1 min 记录一次桥梁南北两侧风速和风向值。此外,桥中段南北双向设置雷达测速设备 (Radar Speed Detector, RSD),以监测桥梁车辆实时车速,设备误差为 ± 2 km/h,设备示意图 1。

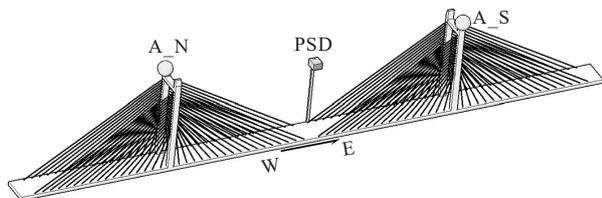


图1 试验设备布置示意图

Figure 1 Test equipment layout

2 特征分析

2.1 事故分布特征

为探究横风作用对大跨径桥梁段交通安全影

响,结合实地调研和问卷调查,获取试验桥梁段 2019—2021 年 3 年内发生的交通事故、事故类型及横风引发的事故分布,如图 2 所示。

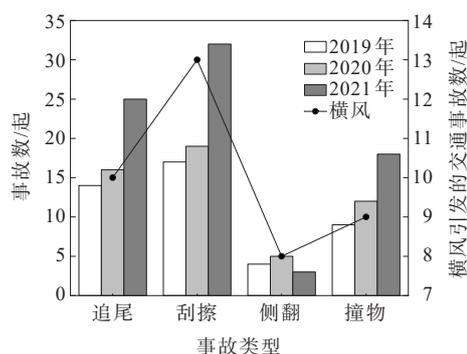


图2 桥梁段交通事故统计

Figure 2 Statistics of traffic accidents on bridge

由图 2 可知:桥梁段 3 年内共发生交通事故 174 起,事故类型主要包括追尾、刮擦、侧翻和撞物 4 类,其中刮擦事故最多,共 68 起,侧翻事故较少,共 12 起。横风引发的交通事故最典型或直接的特征是导致车辆的侧翻,但车辆的刮擦、追尾或撞物是否受横风作用大小直接或间接影响无法确定。由于横风对车辆的影响具有一定的突发性和不确定性,因此,从事事故类型分布很难剥离出交通事故类型与横风之间的作用关系。据此,结合实地调研、查阅道路交通事故现场勘查笔录和监测数据等方式,得到横风直接或间接作用导致的事故统计。由分析可知:横风导致的交通事故 40 起,占总事故数约 23%,与既有研究规律相符。其中追尾 8 起、刮擦 13 起、侧翻 8 起、撞固定物 9 起,分别占各事故类型的 18.2%、19.1%、66.7%、23.1%,据此可知,横风频发是大跨径桥梁段产生侧翻事故的主要原因,车辆的追尾、刮擦、撞物也直接或间接地受到横风不同程度影响。

2.2 横风分布特征

结合桥梁沿线风速风向仪观测数据,统计 2019—2021 年 3 年内月均风速数据见图 3。

由图 3 可知:桥梁段 3 年内月均风速为 2.1~3.6 m/s,数据显示总体风速不高,其中 3—5 月、9—12 月风速相对较高,即春秋季节的平均风速显著高于其他季节,这与当地大风天气分布规律及相应的低频大气环流形势一致^[23-24]。根据数据统计虽能从宏观上得到风环境分布规律,但不能准确掌握横风这一瞬发性现象对交通安全影响规律。

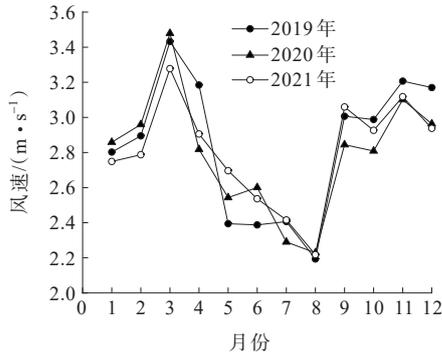


图3 2019—2021年月均风速分布

Figure 3 Distribution of average monthly wind speed from 2019 to 2021

为准确挖掘横风对车辆运行安全的影响,需首先确定横风的分布特征。由于横风的产生存在一定的随机性和短时性。根据中国气象局第16号、气发[2005]109号等文件对于大风的定义,将一天内风速风向仪获取的瞬时风力(10 min内平均风速)达到7级(风速 $v \geq 13.9$ m/s)及以上定义为出现横风。基于此,通过计算分析3年内出现横风时的风速和风向数据,以极坐标形式得到各季节内大跨径桥梁段出现横风的风速和风向分布特征,如图4所示。

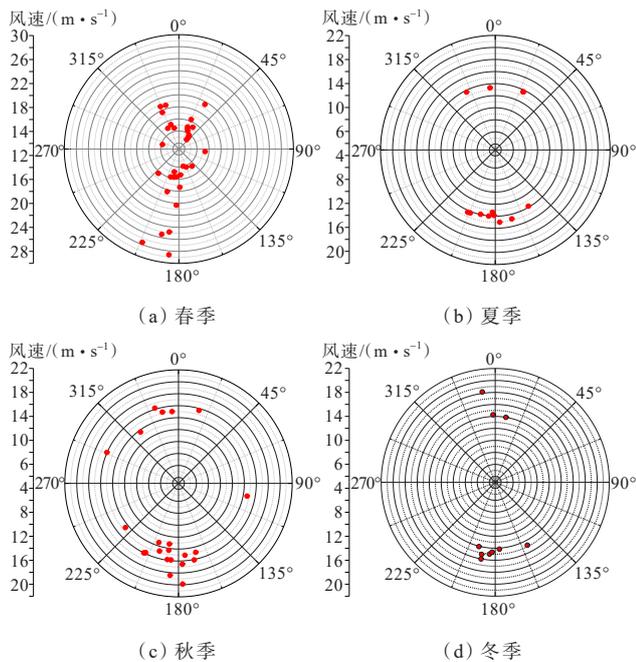


图4 横风风速风向分布

Figure 4 Distribution of crosswind speed and direction

由图4可知:大跨径桥梁段上出现横风频率以春、秋季居多,夏季和冬季出现频次相对较少。由横风风速分布离散性可知,各季节内发生横风现象具

有较高的离散性,与横风的随机性特征一致。其中春季横风瞬时风速最大可至28.64 m/s,极易引发车辆发生侧滑甚至是倾覆隐患,对桥梁段交通运行安全影响较大。由风向分布规律,结合对风向分布进行聚类分析可知,区域内产生横风的风向主要分布在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $135^\circ \sim 225^\circ$ 、 $315^\circ \sim 360^\circ$,即主要分布于NNW、N、NNE、SSE、S、SSW共6个方位。结合桥梁线位布置和车辆受力分析可知,主要风向与线位近似呈垂直关系,因此,横风产生的升浮力和倾覆力矩相对较大,此时,桥梁上行驶车辆重心更加不稳,抓地力行驶稳定性下降愈加明显,给行驶车辆的安全性带来极大威胁。

3 模型构建

3.1 指标分析

判断交通运行协调性和安全性的指标主要有事故率、冲突率、运行速度等,受事故样本数据量大小和事故致因的复杂性影响,基于交通事故率和冲突率研究结论的可靠性有待商榷。运行速度作为评价交通运行安全性的主要指标,且速度控制是改善桥梁交通运行协调性的主要措施。大跨径桥梁段上的横风作用会导致驾驶员在行驶过程中不能及时获取到期望运行速度,车辆实际运行速度与期望速度存在供求不平衡状况,直接导致桥梁段运行速度差异。因此,采用运行速度作为判断横风对大跨度桥梁安全性影响的评价指标符合对实际驾驶规律考虑的要求。为探究横风对桥梁段车辆运行协调性的作用机理,利用双向雷达测速数据,筛选3年内横风发生时各瞬时风力时段(10 min)内车速,计算各时段内的桥梁断面车辆运行速度(v_{85}),并按春(SprV)、夏(SumV)、秋(AumV)、冬(WinV)四季分别进行统计,结果如图5所示。

结合公路项目安全性评价规范规定和图5(a)运行速度分布可知:受横风作用影响各个季节车辆运行速度与设计速度差绝对值大部分处于 $0 \leq |\Delta v_{85}| \leq 10$ km/h。其中,春季和夏季出现车辆运行速度低于60 km/h情况。由此可知,各季节横风对大跨径桥梁交通运行安全性和协调性影响较大,春季和秋季受横风影响尤为显著。同时,结合横风风力和风向特征,发现车辆运行协调性与横风分布特征一致。为剖析横风现象与不同季节车辆运行速度的耦合关

系,避免异常数据对分析结论的影响,通过运行速度箱形图对异常值进行检测。由图5(b)试验数据均值与中位数的关系可知:各季节车辆运行速度值中均无大于1.5倍四分位距的异常值存在,可进一步分析。

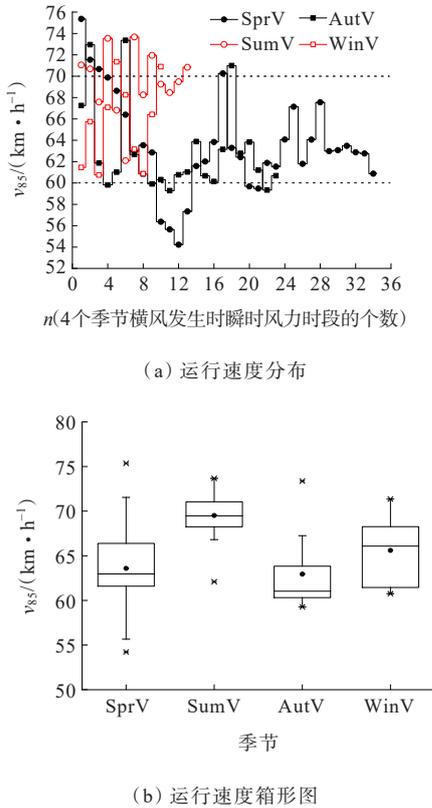


图5 横风作用影响下的车辆运行速度统计
Figure 5 Statistics of vehicle's operation speed under action of crosswind

3.2 建模分析

为得到横风作用对大跨径桥梁交通运行安全性的影响关系,在试验获取的大跨径桥梁车辆运行速度及横风风速和风向分布变化规律基础上,通过多元非线性曲面拟合分析,研究横风与车辆运行协调性之间的关系,建立不同季节条件下横风风速和风向与运行速度之间关系模型和一般关系模型,为研究横风作用下大跨径桥梁交通运行风险智慧监测预警技术提供理论支撑。

(1) 季节性模型

由于桥梁所处风环境的季节性差异对横风影响显著,因此首先根据各季节横风风速 v_w 、风向 d_w 与车辆运行速度 v 之间的变化规律,采用不同的函数模型进行拟合。由拟合结果分析,最终采用Poly多项式函数对三者关系进行非线性曲面拟合,得到的各季

节横风风速、风向与运行速度关系如图6所示。

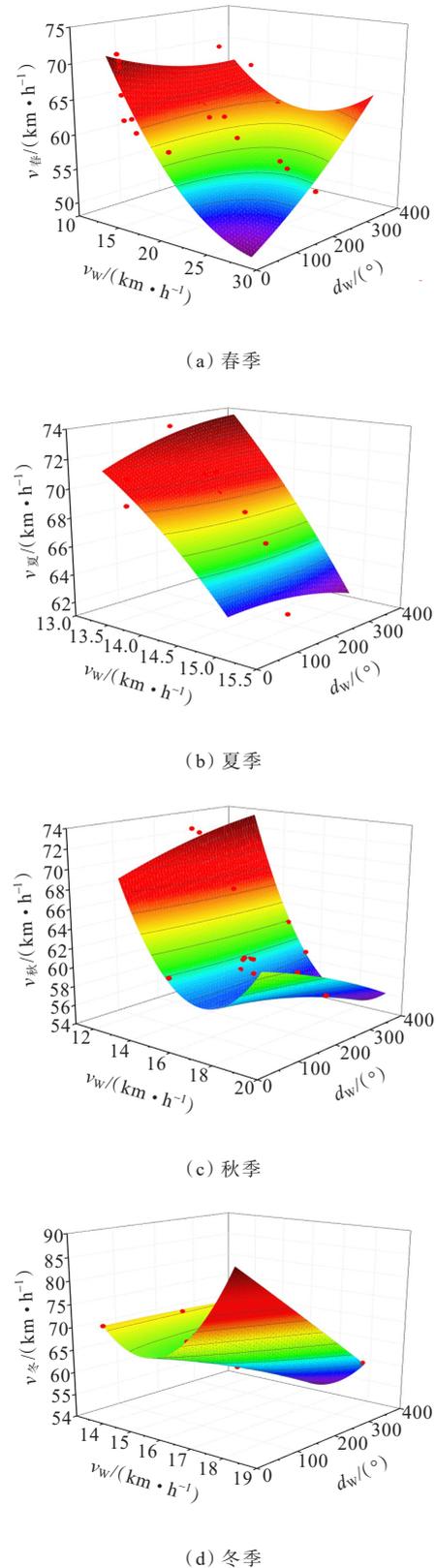


图6 不同季节运行速度与横风特征参数拟合
Figure 6 Fitting of operation speed and crosswind characteristic parameters in different seasons

拟合得到各季节的函数关系模型为:

$$\begin{cases} v_{\text{春}} = 121.07 - 4.78v_w - 0.08d_w + 0.08v_w^2 + \\ \quad 4.47 \times 10^{-5}d_w^2 + 0.04v_w d_w \\ v_{\text{夏}} = -32.11 + 18.62v_w + 0.11d_w - 0.82v_w^2 - \\ \quad 1.91 \times 10^{-5}d_w^2 - 0.007v_w d_w \\ v_{\text{秋}} = 262.08 - 23.68v_w + 0.08d_w + 0.69v_w^2 - \\ \quad 1.68 \times 10^{-5}d_w^2 - 0.005v_w d_w \\ v_{\text{冬}} = 667.62 - 79.68v_w + 0.25d_w + 2.60v_w^2 - \\ \quad 1.78 \times 10^{-5}d_w^2 - 0.018v_w d_w \end{cases} \quad (1)$$

由拟合结果可知:各季节横风风速、风向与车辆运行速度拟合优度 R^2 分别为 0.831、0.889、0.913 和 0.976,拟合过程均满足收敛要求,取显著性水平为 0.05 情况下,经参数 T 检验和拟合方程 F 检验输出结果 p 值均远小于 0.05,表明得到的函数关系模型具有统计学意义且拟合程度较好,可作为横风作用下交通运行安全性及风险预测分析。

(2) 一般性模型

前述研究根据横风产生的季节性特征建立了不同季节横风作用与大跨径桥梁交通运行安全性模型,为提升模型整体的适用性,对获取的横风特征参数与车辆运行速度数据进行整体拟合分析。鉴于模型自变量 v_w 和 d_w 可能存在的多重共线性对拟合结果影响,首先对自变量进行多重共线性检验。由检验结果可知:两自变量方差膨胀系数(Variance Inflation Factor, $F_{\text{VIF}}=0.093 < 10$,容忍度(Tolerance)=2.831 > 0.1,说明 v_w 和 d_w 的多重共线性和内生性较弱,两自变量可用于多元非线性拟合分析,建立三者之间的拟合模型如图 7 所示。

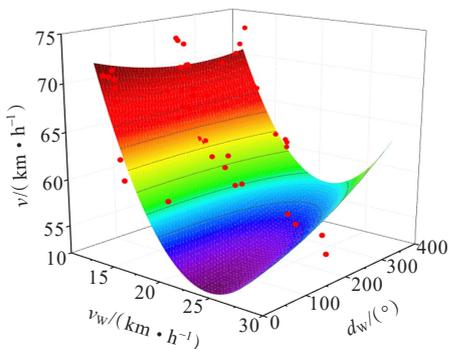


图 7 一般性模型

Figure 7 General model

一般性模型的 Poly 二元多项函数关系式为:

$$v = 144.56 - 7.52v_w - 0.04d_w + 0.15v_w^2 - 3.72 \times 10^{-5}d_w^2 - 0.002v_w d_w \quad (2)$$

由拟合结果可知:模型拟合优度 $R^2=0.814$,拟合过程同样满足收敛要求。对比季节性模型可以看出,一般性模型的拟合优度略低于季节性模型,主要由于一般性模型在整体上考虑了 3 年内与横风风速、风向相关的车辆运行数据,剔除了横风的季节性特征,弱化了地域风环境的季节性特征,导致模型的拟合精度降低。而正由于削弱风环境的外在特征,优化了模型适用度,提升了横风作用下一般性模型在不同区域大跨径桥梁影响的交通安全预测和预警功能。

4 结论

(1) 对大跨径桥梁交通事故和横风分布特征进行分析。横风频发是大跨径桥梁段产生侧翻事故的主要原因,车辆的追尾、刮擦、撞物也直接或间接地受到横风不同程度影响。各季节内发生横风现象具有较高的离散性。横风瞬时风速极易引发车辆发生侧滑甚至是倾覆隐患,对桥梁段交通运行安全影响较大。结合桥梁线位布置和车辆受力分析可知,主要风向与线位近似呈垂直关系,会给行驶车辆的安全性带来极大威胁。

(2) 结合大跨径桥梁车辆运行速度分布可知,受横风影响各季节车辆运行速度与设计速度差绝对值大部分处于 $0 \leq |\Delta v_{85}| \leq 10$ km/h。春季和秋季受横风影响尤为显著,出现车辆运行速度低于 60 km/h 情况,车辆运行协调性较差,安全性较低,极易诱发交通事故。此外,车辆运行速度分布与横风分布特征一致。

(3) 建立了车辆运行速度与横风风速、风向两特征参数间季节性函数关系模型,为横风作用下大跨径桥梁交通运行安全性及风险预测预警提供依据。由拟合结果可知,各季节模型拟合优度 R^2 分别为 0.831、0.889、0.913 和 0.976,且拟合过程均满足收敛要求,拟合程度较好。最后通过剔除横风的季节性特征,建立大跨径桥梁交通运行安全性一般性函数关系模型,提升了模型在不同区域横风作用下大跨径桥梁影响的交通安全预测和预警功能。

本文受限于试验条件和时间限制,在进行横风对大跨径桥梁交通安全影响分析时仅考虑了横风现

象频发的黄河特大桥作为试验数据源进行分析,后续研究将提取更多符合研究条件的试验场地对提出的模型进行修正和优化。此外,相关研究表明不同车型受横风影响不同,后续研究将补充大跨径桥梁段小型车和大型车运营安全性与横风作用间关系模型,进一步提升模型精度和适用度。

参考文献:

References:

- [1] 赵晓华,任贵超,陈晨,等.基于驾驶模拟技术的不良天气对驾驶员跟驰行为的综合影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(6):90-95.
ZHAO Xiaohua, REN Guichao, CHEN Chen, et al. Comprehensive effects of adverse weather on driver's car-following behavior based on driving simulation technology[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(6): 90-95.
- [2] 于东民,林伟南.钢-混组合梁斜拉桥跨径界限影响因素研究[J].中外公路,2020,40(6):187-191.
YU Dongmin, LIN Weinan. Research on influence factor for threshold span length of cable-stayed bridge with steel-concrete composite girders[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 187-191.
- [3] 田林,许金良.横风作用下复杂路段汽车运行安全的概率评估[J].武汉理工大学学报,2014,36(7):61-65.
TIAN Lin, XU Jinliang. Probabilistic assessment of vehicle running safety in complex sections under cross wind[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(7): 61-65.
- [4] 陈洪业.侧风作用下的汽车车身空气动力学性能研究[D].太原:中北大学,2010.
CHEN Hongye. Research on aerodynamic performances of car body in crosswind[D]. Taiyuan: North University of China, 2010.
- [5] MENG X L, ZHU L D. Experimental study on wind environment of vehicles running on a cable-stayed twin-deck bridge[C]//Resilience and Sustainable Transportation Systems. Shanghai, China (Conference Cancelled). Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020: 53-62.
- [6] 田林.横风作用下复杂路段载重汽车运行安全的研究[D].西安:长安大学,2014.
TIAN Lin. Study of operational safety of truck in complex sections of highway under crosswind[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [7] 元昌,韩元吉,杨姝,等.考虑气动阻力和横风稳定的汽车车身多目标优化设计[J].汽车安全与节能学报,2020,11(1):53-60.
QI Chang, HAN Yuanji, YANG Shu, et al. Multi-objective optimization design of auto body considering aerodynamic resistance and crosswind stability[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(1): 53-60.
- [8] 吴兵,翟森,卢建涛,等.基于安全风险的恶劣天气下高速公路建议车速确定方法[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(11):1570-1578.
WU Bing, ZHAI Ben, LU Jiantao, et al. Determination of freeway recommended speed based on safety risk under adverse weather conditions[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(11): 1570-1578.
- [9] 武万里,程雅茹,马宁.宁夏高速公路横风分布特征及风险分析[J].宁夏大学学报(自然科学版),2023,44(4):397-402.
WU Wanli, CHENG Yaru, MA Ning. Distribution characteristics and risk analysis of lateral-wind on Ningxia expressway[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 397-402.
- [10] 朱晓东,徐铖铖,罗瑞琪,等.高速公路横风条件下安全行车速度研究[J].城市道桥与防洪,2019(9):163-165,19.
ZHU Xiaodong, XU Chengcheng, LUO Ruiqi, et al. Research on safe driving speed in crosswind condition of expressway[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(9): 163-165, 19.
- [11] 李俊辉,汤左淦.基于混合有序Probit模型的货车翻车驾驶员伤害程度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(2):21-27.
LI Junhui, TANG Zuogan. Driver injury severity in truck rollover accidents based on mixed ordered Probit model[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(2): 21-27.
- [12] 梅辉,秦永法,张浩文.基于MATLAB/Simulink的横风作用下车辆侧向动力学仿真[J].时代汽车,2020(19):24-25.
MEI Hui, QIN Yongfa, ZHANG Haowen. Simulation of vehicle lateral dynamics under cross wind based on MATLAB/Simulink[J]. Auto Time, 2020(19): 24-25.
- [13] XIANG J, HE D, ZENG Q Y. Effect of cross-wind on spatial vibration responses of train and track system[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(3): 520-524.

- [14] 刘学龙,袁海东,李景.汽车侧风响应影响的仿真与试验研究[J].汽车技术,2021(10):53-58.
LIU Xuelong, YUAN Haidong, LI Jing. Simulation and experimental study on influence of automotive aerodynamic force on cross wind response[J]. Automobile Technology, 2021(10): 53-58.
- [15] 殷新锋,李莱,刘扬,等.风环境下高墩大跨连续刚构桥的行车安全性分析[J].中外公路,2016,36(6):83-88.
YIN Xinfeng, LI Lai, LIU Yang, et al. Driving safety analysis of long-span continuous rigid frame bridge with high piers under wind environment[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(6): 83-88.
- [16] 赵军,梁佳,李少峰,等.横风条件下重载货车直线区段运行安全性研究[J].机械,2021,48(7):13-19.
ZHAO Jun, LIANG Jia, LI Shaofeng, et al. Investigation on running safety of freight wagon subjected to a crosswind on tangent track[J]. Machinery, 2021, 48(7): 13-19.
- [17] 陈宁,李永乐,王修勇,等.横风作用下桥上车辆侧倾行车安全性分析[J].防灾减灾学报,2020,36(4):26-36.
CHEN Ning, LI Yongle, WANG Xiuyong, et al. The rollover driving safety analysis of vehicles on bridge under crosswinds[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2020, 36(4): 26-36.
- [18] 胡朋,林伟,阳德高,等.横风作用下移动车辆脉动风速谱[J].中国公路学报,2018,31(7):101-109.
HU Peng, LIN Wei, YANG Degao, et al. Fluctuation wind speed spectrum of a moving vehicle under crosswinds[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 101-109.
- [19] KRAMER C, GRUNDMANN R, GERHARDT H J. Testing of road vehicles under cross wind conditions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, 38(1): 59-69.
- [20] 崔涛,张卫华.高速列车侧风安全域计算方法[J].交通运输工程学报,2011,11(5):42-48.
CUI Tao, ZHANG Weihua. Calculation method of cross wind security domain for high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 42-48.
- [21] 杨忱.基于数值风洞模拟的超高层建筑风荷载特性研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
YANG Chen. Study on characteristics of high-rise buildings wind load with numerical simulation of wind tunnel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [22] 全涌,曹会兰,顾明.高层建筑横风向风效应研究综述[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(6):810-818.
QUAN Yong, CAO Huilan, GU Ming. Cross-wind effect of high-rise buildings: State of Art[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(6): 810-818.
- [23] 华雯丽,杨晓霞,田雪珊,等.山东省雷暴大风天气学分型与物理诊断量统计特征[J].暴雨灾害,2021,40(4):362-373.
HUA Wenli, YANG Xiaoxia, TIAN Xueshan, et al. Synoptic classification and statistical characteristics of physical diagnoses for thunderstorm gale in Shandong province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(4): 362-373.
- [24] 郑丽娜,刘冬冬,何鹏程.山东大风天气的低频特征及机理分析[J].海洋气象学报,2021,41(2):70-77.
ZHENG Lina, LIU Dongdong, HE Pengcheng. Analysis on low-frequency characteristics and mechanism of strong wind in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(2): 70-77.