

# 大跨径悬索桥风场特征监测及其与 振动加速度关联分析

曾广平

(湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

**摘要:**该文以某大跨径悬索桥为研究对象,通过现场风场监测和振动加速度监测,获取平均风速、湍流强度、迎风角等风场特征,并结合桥梁振动加速度数据,研究风场特征与振动加速度的相关性。结果表明:桥址处风主要来自桥梁的东侧和西侧,但随着风速增大,风的方向性逐渐显著,而湍流强度逐渐降低。建立振动平方根速度与平均风速、湍流强度等级的关系模型,发现桥梁振动加速度大小随着风速增加而上升是普遍的规律,在风速一定情况下,竖向风扰动程度越大,引起的竖向振动加速度也越大;风向对竖向振动加速度和横向振动加速度的影响很小,但在同样的平均风速下,东侧来风可以引起更大的扭转加速度,这主要是由于东侧起伏地形引起的高强度湍流所致。

**关键词:**悬索桥;风场特征;平均风速;湍流强度;振动加速度

## 1 引言

如今以高桥墩、大跨径为特点的桥梁在中西部交通建设中成为主流,随着跨径和墩高的增加,桥梁刚度明显减小,加之中西部地区地形地貌结构复杂,山地、丘陵、河谷等地形气候多变,桥梁更容易受到风的影响而出现颤振、涡振等现象<sup>[1-2]</sup>。为了制定较好的抗风设计方案以减小区域强风对桥梁结构健康与稳定的影响,开展桥梁风场与振动实地观测与分析研究十分必要<sup>[3]</sup>。

国内外陆续开展了一些对于平原区、山区、峡谷区桥址风场监测的研究。Solari<sup>[4]</sup>采集了大量的桥址风场数据,发现可以利用实测随机风荷载的规律来预测未来的风场特征;Hui<sup>[5]</sup>在山区实测风速数据的基础上,以地形起伏参数和地表粗糙度为变量,建立了能够模拟复杂地形地貌下的平均风速模型;Cheynet等<sup>[6]</sup>利用风速仪采集到的大跨径桥梁风速数据,全面分析了复杂地形下风场与抖振位移的关联规律;张志田<sup>[7]</sup>研究了湘西矮寨大桥山区峡谷风对桥梁结构抗风设计的影响;胡峰强<sup>[8]</sup>在贵州北盘江特大桥、湖北四渡河大桥等山区桥梁处开展了风场监测,通过山区桥址处风特性模型试验和桥位风速实测,获取了典型山区桥位风场的分布规律;李永乐<sup>[9]</sup>在大渡河大桥桥址处利用

自动气象站、手持风速仪等设备对风特性进行实测,探讨了峡谷桥址处日常大风成因,并获取了桥位地形、气候风速等因素对桥梁振动的影响;沈炼<sup>[10]</sup>以某峡谷大桥为研究对象,对不同风向下的山区峡谷桥梁风场进行数值模拟和监测验证,得到了该大桥桥址处风场的详细分布规律;李永乐<sup>[11]</sup>从历史统计资料、数值风洞模拟、现场实测等方面讨论了桥梁设计风速标准确定方法,分析了桥梁在非均匀来流和非平稳来流下的颤振性能,并讨论了大风攻角下几种优化措施对结构颤振性能的影响。

相对沿海地区,中西部复杂的山区地形地貌对风速影响极大,桥址处风场受周边地形起伏影响,风场的脉动往往十分剧烈,需要开展研究来总结山区桥梁风场特性,并进一步了解风致振动的相关规律。该文以某跨江大桥桥址附近的风场特性为研究对象,通过现场风场监测,获取平均风速、湍流强度、迎风角等特征,并结合桥梁振动加速度数据,研究风场与振动加速度的相关性,为指导类似山区起伏地形区域的大跨径桥梁抗风设计提供参考。

## 2 工程概况及监测方案

某桥梁位于长江中游,为低山~丘陵地貌,长江由

西向东流,河谷走向较平直,呈壮年期河谷地貌,河谷形态呈不对称“U”形,地面高程为155~235 m,东侧为群山,地形起伏较大,西侧相对平坦。两岸漫滩较大,北岸宽220 m,坡角为 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,南岸宽100 m,坡角为 $3^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,两岸河漫滩均为基岩出露,岩性属硬质砂岩。该桥为双塔简支钢箱梁悬索桥,桥梁全长1 165 m,顺桥向约为 $335^{\circ}$ ,大致垂直于河流走向。

该悬索桥的监测元器件布置如图1所示。风速监测系统由9个超声式风速计构成,通过超声波的传递时间来测算风速,风速的量程及精度为 $0\sim 50\text{ m/s}$  ( $\pm 0.2\text{ m/s}$ ),风向的量程和精度为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$  ( $\pm 2^{\circ}$ ),采样频率为 $0.2\text{ Hz}$ 。风速计A1~A5、A7~A8安装在桥面以上7 m处的吊索上,而A6则安装在桥梁中央的灯杆上,最后一个风速计(A9)安装在北塔的顶部。三分量振动加速度计共有11个,基本沿桥墩均匀布置,量程为 $\pm 4g$ 。每个传感器都连接到数据采集单元,数据采集后通过无线传输发送至后台监控系统。

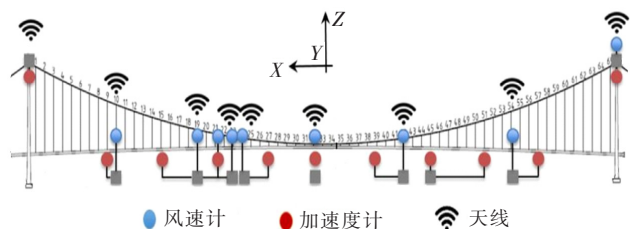


图1 监测元器件布置

该文研究主要针对2016年12月至2019年3月共计28个月的监测数据。在此期间,为了减小数据量,只有当风速超过 $15\text{ m/s}$ ,才会触发系统对监测数据进行存储,存储时长为 $10\text{ min}$ ,风速数据和振动加速度数据同时被采集、存储。

### 3 监测结果与分析

监测系统记录的自然风被分解为平均风分量(平均值, $U$ )和脉动风分量,脉动风分量又被进一步分解为顺风向脉动风( $u$ )、横风向脉动风( $v$ )和竖风向脉动风( $w$ ),图2为A6风速计采集的上述3个分量的数据样本。

#### 3.1 平均风分量

根据A6风速计采集的所有 $10\text{ min}$ 数据样本,绘制出平均风分量的极坐标图如图3所示,图中 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 方向代表桥的线路方向,其中 $0^{\circ}$ 为桥的北侧,地理正北方大致在该极坐标图的 $23^{\circ}$ 方向。从图3可以看出:风主要来自桥梁的东侧和西侧,其中低速风的方向

离散性较大,随着风速增大,风的方向性逐渐显著,对于东侧高速风( $U\geq 18\text{ m/s}$ ),其方向主要为 $67^{\circ}\sim 135^{\circ}$ ,即地理方位的 $44^{\circ}\sim 112^{\circ}$ ,最大平均风速达到 $20\text{ m/s}$ 左右,这是由于东侧地势较高,存在山峰,在一定程度上降低了风速,而对于西侧高速风,其方向为 $250^{\circ}\sim 290^{\circ}$ ,即地理方位的 $227^{\circ}\sim 267^{\circ}$ ,即西南风,范围更窄,最大平均风速接近 $30\text{ m/s}$ ,而且最大风速出现时风向几乎垂直于桥梁。

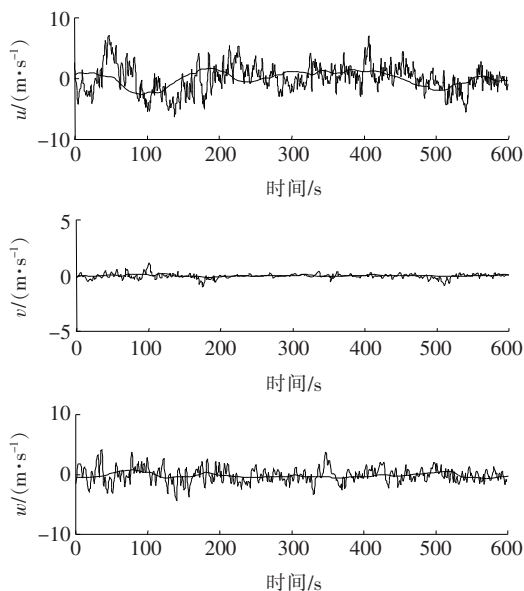


图2 A6风速计采集数据样本

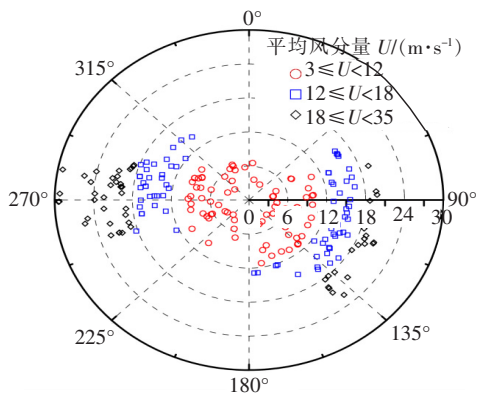


图3 平均风分量极坐标图

#### 3.2 湍流强度

湍流强度是一个大气扰动指标,用于表述风速随时间和空间的变化程度,反映脉动风速的相对强度。对于3个脉动风分量( $u, v, w$ ),湍流强度定义为:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}, I_v = \frac{\sigma_v}{U}, I_w = \frac{\sigma_w}{U} \quad (1)$$

式中: $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 为脉动风分量的标准差; $U$ 为平均风速。

湍流强度的极坐标图如图4所示。从图4可以看

出:对于低速风,湍流强度是相当随机的,这是由于较低的风速更容易出现风向的波动变化,风场较不稳定。然而,对于速度较高的强风,离散性则小得多,风向的规律性更加明显。当  $12\text{ m/s} \leq U < 18\text{ m/s}$  时,顺风的湍流强度范围主要为  $0.1 \sim 0.3$ ,而横风和竖风的湍流强度更小,范围为  $0 \sim 0.15$ ;当  $18\text{ m/s} \leq U < 35\text{ m/s}$  时,顺风的湍流强度为  $0 \sim 0.15$ ,横风和竖风的湍流强度基本小于  $0.1$ 。总体来看,风速越大,湍流强度越低。

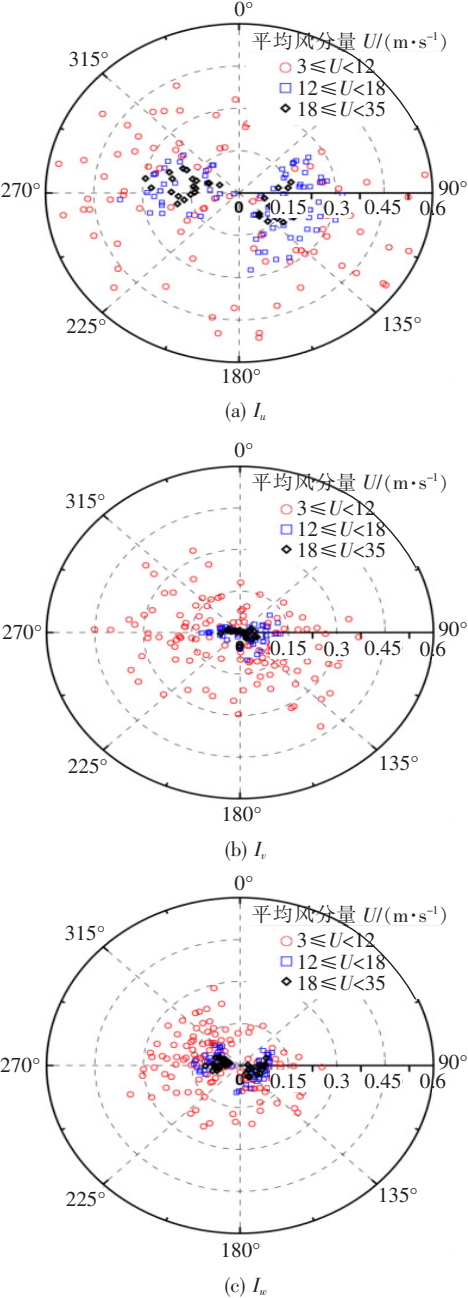


图 4 湍流强度极坐标图

顺风向湍流强度与竖风向湍流强度的协方差如图

5 所示,负相关性和正相关性的数据分别被绘制在两张图中,湍流分量协方差的计算方法如下:

$$\text{cov}(u, w) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \mu_u) * (w_i - \mu_w) \quad (2)$$

式中: $N$  为数据采集数; $\mu_u$ 、 $\mu_w$  为湍流平均值分量; $*$  为共轭操作。

从图 5(a)可以看出:具有负相关关系的风主要是西侧来风,表明西侧水平向来风和垂直向来风较多;而更多的数据点位于图 5(b)中,这表明  $u$ 、 $w$  两者更多具有正相关性。沿着江风吹( $240^\circ \sim 270^\circ$ )和来自岸上的风( $270^\circ \sim 300^\circ$ )几乎无相关性。

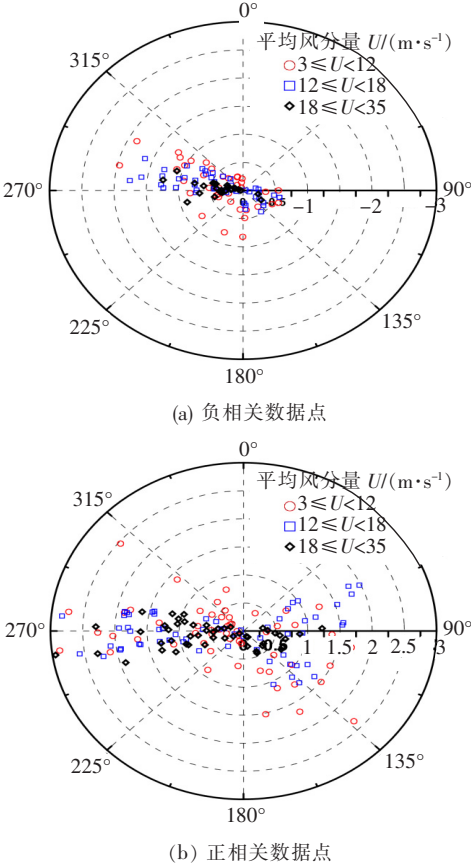


图 5 湍流强度协方差极坐标图

3.3 迎风角

该文中迎风角指的是平均风速矢量与水平面的夹角,由于迎风角会影响结构振动,对于迎风角的分析也是必要的。迎风角的极坐标图如图 6 所示,几乎很少出现负的迎风角(平均风速矢量向下),所以该图中仅标出了正迎风角的数据。

从图 6 可以看出:风速较小时,迎风角的分布范围从  $0^\circ \sim 16^\circ$  不等,而且西侧风的迎风角分布范围更大,这可能与西部地形相对平坦有关,而随着风速的增大,

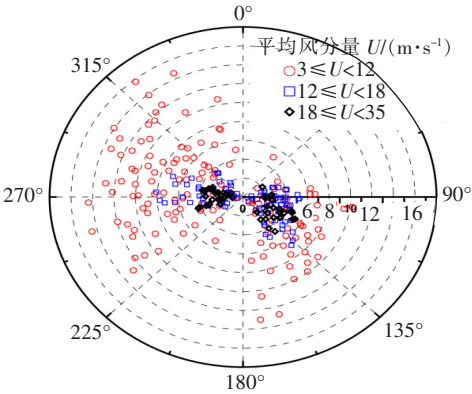


图6 迎风角极坐标图

迎风角逐渐减小,当  $18\text{ m/s} \leq U < 35\text{ m/s}$  时,迎风角多为  $1^\circ \sim 5^\circ$ ,可见强风主要从近乎水平的方向到达桥梁。

4 桥梁振动加速度与风速的关系

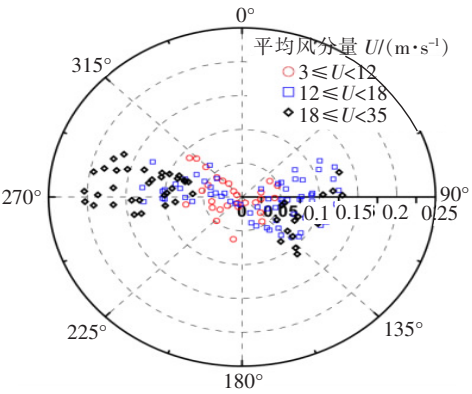
为了研究风引起的振动加速度,需要先过滤掉诸如交通荷载等其他因素引起的振动。风引起的桥梁振动的频率通常为  $0 \sim 1\text{ Hz}$ ,通过该文数据观察,主要采集的振动都是低频的,因此对于高频数据进行了滤波处理。

图7为风矢量所对应的桥梁横向、竖向、扭转加速度的平方根。

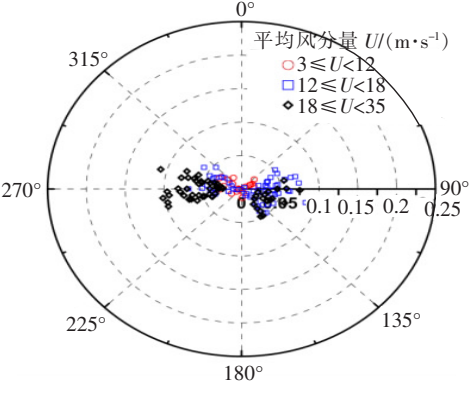
由图7可以看出:对于横向振动加速度,加速度大小与风速大小有较好的一致性,风速越大,加速度值越大,风向越与桥梁垂直,加速度值也越大。而且西侧风更容易引起较大的横向振动加速度。但对于竖向振动加速度和扭转振动加速度,数值上相对更小,而且东侧来风的风速与加速值大小关联较小,尤其对于扭转振动加速度,中等风速 ( $12 \leq U < 18\text{ m/s}$ ) 引起的加速度值更大,角度为  $70^\circ \sim 110^\circ$ 。

不同湍流强度下振动加速度平方根与平均风速的关系见图8,  $\sigma_z$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_\theta$  分别为横向、竖向、扭转加速度分量,从而显示出风与动力响应的总体关系。

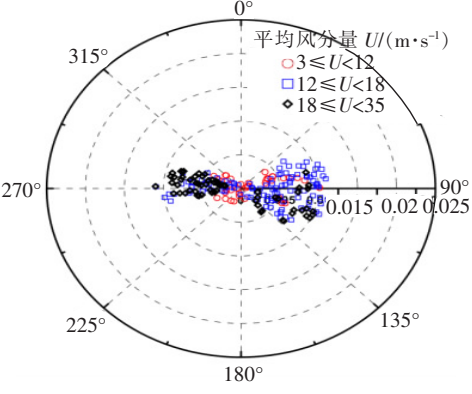
从图8(a)可以看出:振动加速度大小随着风速增加而上升是普遍的规律,横向加速度  $\sigma_z$  极大地受到竖向湍流强度的影响,随着湍流强度减小,横向振动加速度与平均风速的关系向图右侧偏移,可见在风速一定情况下,横向风扰动程度越大,引起的横向振动加速度也越大。对于竖向振动加速度[图8(b)],最大的加速度值出现在平均风速为  $22 \sim 25\text{ m/s}$  的范围内,加速度大小与顺风湍流强度的关系缺少规律性。对于扭转振动加速度[图8(c)],最大的加速度值出现在平均风速为  $15 \sim 20\text{ m/s}$  的范围内。



(a) 横向



(b) 竖向



(c) 扭转

图7 振动加速度三分量平方根

将湍流强度  $I_w$  等级  $G_w$  分为4级:  $1(0.15 \leq I_w < 1)$ 、 $2(0.1 \leq I_w < 0.15)$ 、 $3(0.05 \leq I_w < 0.1)$ 、 $4(0 \leq I_w < 0.05)$ ,  $I_u$  等级  $G_u$  分为3级:  $1(0.3 \leq I_u < 1)$ 、 $2(0.15 \leq I_u < 0.3)$ 、 $3(0 \leq I_u < 0.15)$ ,通过 Matlab 进行多元拟合,可以得出振动平方根速度与平均风速、湍流强度等级的关系模型:

$$\sigma_z = (0.000\ 52 - 0.000\ 08G_w) U^2 + 0.000\ 6U, R^2 = 0.896\ 7 \tag{3}$$

$$\sigma_y = (0.000\ 37 - 0.000\ 1G_u) U^2 + 0.000\ 2U, R^2 = 0.845\ 2 \tag{4}$$



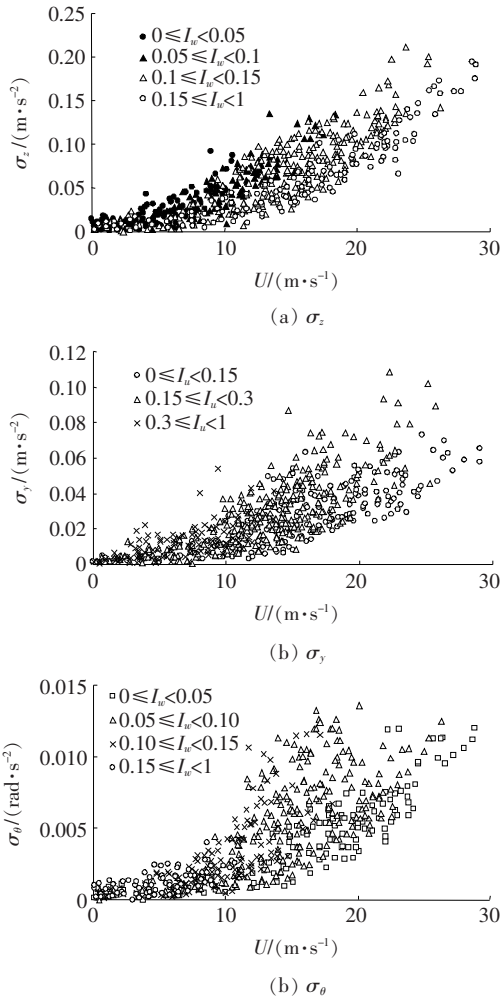


图 8 不同湍流强度下振动加速度平方根与平均风速的关系

$$\sigma_{\theta} = (0.000\ 046 - 0.000\ 007 G_w) U^2 + 0.000\ 04 U, \quad R^2 = 0.855\ 1 \quad (5)$$

不同风向下振动加速度平方根与平均风速的关系绘制于图 9 中。由图 9 可以发现:风向对横向振动加速度和竖向振动加速度的影响很小,而对扭转振动加速度的影响十分明显,在同样的平均风速下,东侧来风可以引起更大的扭转加速度,这主要是由于东侧起伏地形引起的高强度的湍流所致。

## 5 结论

该文对某大跨径桥梁的风场及振动加速度进行了监测及数据分析,得到如下结论:

(1) 桥址处风主要来自桥梁的东侧和西侧,其中低速风方向离散性较大,东侧高速风方向主要为  $67^{\circ} \sim 135^{\circ}$ ,最大平均风速达到  $20\text{ m/s}$  左右;对于西侧高速风,其方向为  $250^{\circ} \sim 290^{\circ}$ ,范围更窄,最大平均风速接

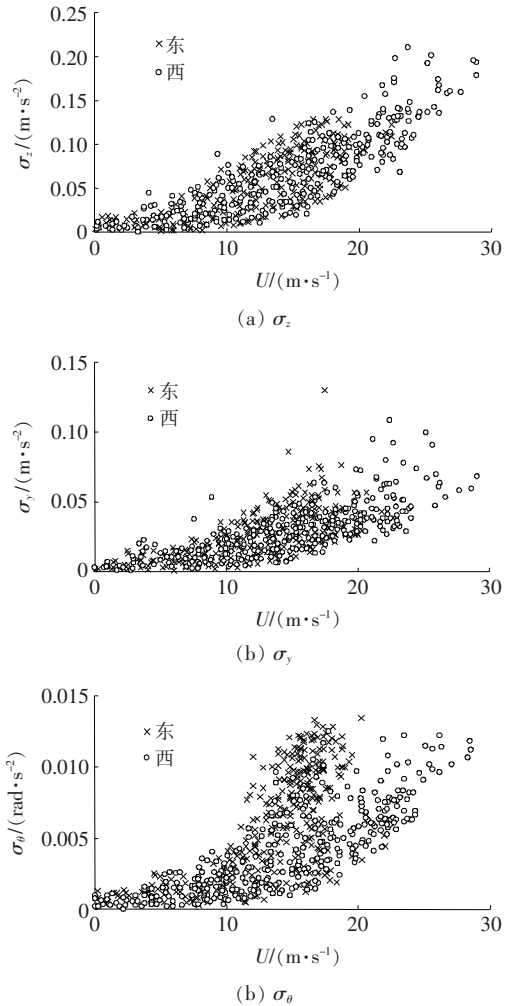


图 9 不同风向下振动加速度平方根与平均风速的关系

近  $30\text{ m/s}$ 。

(2) 迎风角的分布范围为  $0^{\circ} \sim 16^{\circ}$  不等,当  $18\text{ m/s} \leq U < 35\text{ m/s}$  时,迎风角多为  $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ,强风主要从近乎水平的方向到达桥梁,说明了风向对于主梁振动影响多体现在横向,竖向振动影响可忽略。

(3) 建立了振动平方根速度与平均风速、湍流强度等级的关系模型。发现桥梁振动加速度大小随着风速增加而上升是普遍的规律,横向振动加速度随风扰程度增加而增大,非平稳的横风对桥梁稳定非常不利。

(4) 风向对横向振动加速度和竖向振动加速度的影响很小,而对扭转振动加速度的影响十分明显,在同样的平均风速下,东侧来风可引起更大的扭转加速度,主要是由于东侧起伏地形引起的高强度湍流所致。

## 参考文献:

[1] 吴本刚,傅继阳,吴玖荣.实测风场风速风向耦合的三维非平稳特征研究[J].建筑结构学报,2016,37(2):106—114.