

广东沿海地区桥址风场特性实测研究

郝键铭^{1,2}, 赵朔滄¹, 辛凌风¹, 赵雪¹, 王峰^{1,2}, 李加武^{1,2}

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学风洞实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 结合广东沿海地区某大跨度悬索桥桥面处三维超声风速仪的长期观测数据, 统计分析了桥址区的风场平均风特性, 以风速超过 8 m/s 为强风标准, 基于强风样本分析了桥址区的脉动风特性。结果表明, 广东沿海地区主要受到春夏季东南季风和秋冬季西北强风的影响; 顺风向紊流强度明显大于横风向、竖向紊流强度, 各分量比值大致为 $I_u:I_v:I_w=1:0.86:0.60$; 阵风因子与紊流强度具有显著的正相关性, CAO 和 CHOI 经验公式能较好地反映两者关系, 且前者推荐的经验公式更加适用于沿海地区; 紊流积分尺度与紊流强度具有一定的负相关性, 随着紊流强度的增大, 紊流积分尺度呈现先迅速减小后趋于稳定的趋势, 根据实测数据给出了紊流积分尺度与紊流强度的经验公式, 两者相关性显著; 实测数据的顺风向功率谱密度与 Kaimal 谱吻合较好, 横风向功率谱密度与 Von Karman 谱吻合性较好, 竖向功率谱密度在高频段与 Panofsky 谱吻合性较好。

关键词: 大跨度桥梁; 风场实测; 风特性; 强风样本; 相关性; 沿海地区

中图分类号: U44.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202308019

Study on wind characteristics of bridge sites in coastal areas of Guangdong Province based on measured data

HAO Jianming^{1,2}, ZHAO Shuohan¹, XIN Lingfeng¹, ZHAO Xue¹, WANG Feng^{1,2}, LI Jiawu^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Wind Tunnel Laboratory, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Combined with the long-term observation data of three-dimensional ultrasonic anemometer at the deck of a long-span suspension bridge in the coastal area of Guangdong Province, the average wind characteristics of the wind field at the bridge site are statistically analyzed. Taking the wind speed exceeding 8 m/s as the standard of strong wind, the fluctuating wind characteristics of the bridge site are analyzed based on strong wind samples. The results show that the coastal areas of Guangdong are mainly affected by the southeast monsoon in spring and summer and the northwest strong wind in autumn and winter. The downwind turbulence intensity is obviously greater than the transverse wind and vertical turbulence intensity, and the ratio of each component is roughly $I_u:I_v:I_w=1:0.86:0.60$. There is a significant positive correlation between gust factor and turbulence intensity, and the empirical formula recommended by Cao and Choi can better reflect the relationship between the two, and the empirical formula recommended by Cao is more suitable for coastal areas. Turbulence integral scale has a negative correlation with turbulence intensity. With the increase of turbulence intensity, turbulence integral scale first decreases rapidly and then tends to be stable. Based on the measured data, the empirical formula of turbulence integral scale and turbulence intensity is given, and the correlation between the two is significant. In the measured data, the downwind power spectral density is in good agreement with Kaimal spectrum, the transverse wind power spectral density is in good agreement with Von Karman spectrum, and the vertical power spectral density is in good agreement with Panofsky spectrum at high frequency band.

Keywords: long-span bridge; wind field measurement; wind characteristics; sample of strong wind; relevance; coastal area

现代桥梁设计正不断朝着大跨、轻柔的方向发展, 桥梁结构对风的敏感性也在不断增加, 自从 1940 年 Tacoma 大桥风毁之后, 桥梁工程界开始逐渐重视风对桥梁结构的影响。为了研究桥梁结构在

风作用下的气动性能, 需要准确的桥址处的风场特性, 为桥梁抗风设计和检验提供可靠的依据。风特性参数包括风速、风向、紊流强度、阵风因子、紊流积分尺度和功率谱密度函数等, 要想准确获得这些参

收稿日期: 2023-08-09; 修订日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978077); 陕西省自然科学基金资助项目(2023-JC-QN-0597)

数,最可靠的方法就是进行现场实测。近些年来,随着大跨度桥梁的建设需求增加,对桥址处的风场实测也取得了一定的成果,周广东等^[1]和李杏平等^[2]根据中国东部沿海地区桥址处的长期风观测数据,得到了桥址 10 min 平均风速年最大值的风玫瑰图、紊流强度、紊流积分尺度以及紊流功率谱函数等风特性,探究了各参数之间的关系,为该地区其他工程结构的抗风研究提供参考;赵林等^[3]对台风气候条件下,实测近地平均风特性和脉动风功率谱进行分析,结果表明,台风过境时,平均风速呈“M”形双峰分布,风向呈连续 180°转换,并伴随着大风攻角的产生;段静等^[4]对实测台风风场数据分别采用离散小波变换、集合经验模态分解、平稳模型方法进行风场特性计算对比,结果显示,采用集合经验模态分解法对台风进行非平稳性研究比离散小波变换法更加合理;王旭等^[5]通过采集台风风场数据,分析了台风演变过程中平均风速、风向角、湍流强度、阵风因子等风场特性的变化;马如进等^[6]、张志田等^[7]和邹云峰等^[8]分析了峡谷地形对风场特性的影响,结果表明,峡谷地形对风场特征存在显著影响,风特性参数呈各向异性分布;李加武等^[9]研究了喇叭口河谷地形的风场特性,结果表明,所测结果与规范对风特性的描述有较大差异;蔡向阳等^[10]和辛亚兵等^[11]研究了桥轴向风特性参数的变化,结果表明,风特性参数沿桥轴向的变化趋势基本一致;陶天友等^[12]根据实测的桥址处飊线风特性研究了大跨度斜拉桥的模式特性,并研究了风场的非平稳特征对桥梁抖振响应的影响^[13-14]。

跨江、跨海大桥具有统一的特点——桥梁跨度大,整体刚度较小,风对桥梁的影响不可忽略。然而,由于沿海地区地形差异大,海洋环境区别明显,不同位置和不同时期的沿海地区风特性都有很大的差异,因此通过实测研究分析沿海地区风场特性以及建立沿海地区风特性数据库势在必行。

为了能够获取更加准确的风场特性用于桥的风振响应分析,并丰富中国沿海地区的风场特性数据库,本文以广东省沿海地区某大跨度悬索桥为工程背景,分析桥面处 YOUNG 81000 三维超声风速仪实测得到风速样本的平均风特性和脉动风特性,由于强风的紊流特性更加显著和稳定,且对桥梁的抖振影响更加明显,故选取桥址处 8 m/s 以上的风速样本,对桥址区的紊流强度、阵风因子、紊流积分尺度之间的相互关系进行研究,并对不同风向情况下 10 min 最大平均风速的实测功率谱和不同理论功率谱进行了比较。

1 风场观测系统

广东沿海地区某悬索桥地处入海口,两岸为低山丘陵地带,桥下水面开阔,东西两岸各有一座小山,东岸最高海拔约 164 m,西岸最高海拔约 281 m。为了准确测量桥址区的风场特性,在悬索桥主跨 $L/2$ 处桥面(离桥面加劲梁垂直距离 6.5 m)上游布置了 YOUNG 81000 三维超声风速仪,如图 1 和 2 所示。该风速仪可以精准地测量出来流风的速度、攻角和风向角,具有响应迅速、分辨率高等特点。风速仪采用全天候采集模式,风速测试范围为 0~40 m/s,精度为 $\pm 1\%$,风向角测试范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$,精度为 $\pm 2^\circ$,风攻角测试范围为 $0^\circ\sim 60^\circ$,精度为 $\pm 2^\circ$;采样频率为 4 Hz,风速仪 0° 对应地理正北方。风观测时间范围为 2021 年 6 月 1 日—2022 年 5 月 31 日,涵盖春、夏、秋、冬四个季节,对桥址区的风环境具有较好的代表性。



图 1 风速仪布置

Fig. 1 Layout of anemometers



图 2 YOUNG 81000 三维超声风速仪

Fig. 2 YOUNG 81000 three-dimensional ultrasonic anemometer

2 风特性实测数据分析

2.1 平均风速与风向

现行《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-

01—2018)(后文简称规范)^[15]采取 10 min 为基本时距,本文采用滑动平均的方式对实测数据进行分析,得到日 10 min 最大平均风速,如图 3 和 4 所示,统计结果表明,一年之中日 10 min 最大平均风速近似服从正态分布,日最大风速分布在 3.23~13.13 m/s,最大平均风速出现在 11 月 7 日,风速值为 13.13 m/s;最小平均风速为 3.23 m/s,平均值为 7.53 m/s,变异系数为 0.266,桥址区日 10 min 最大平均风速值均较小。实测数据中涵盖了一年四季的风速、风向值,以季节为划分,绘制各季节及全年的风玫瑰图,如图 5 和 6 所示。

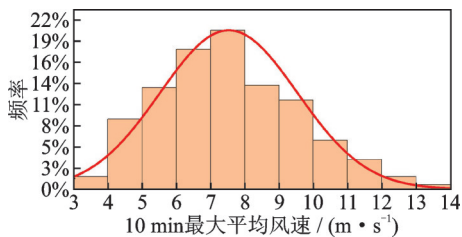


图 3 日 10 min 最大平均风速分布图

Fig. 3 Distribution of maximum average wind speed in 10 min of a day

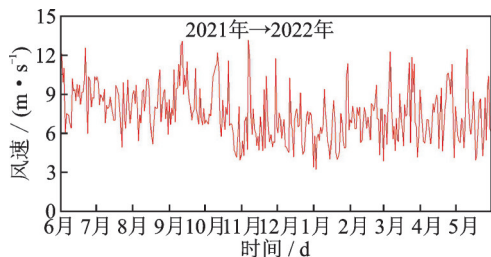


图 4 日 10 min 最大平均风速折线图

Fig. 4 Line chart of the maximum average wind speed in 10 min of a day

由图 5 可知,沿海地区在春夏两季,主要受到东南季风影响;在秋冬两季,主要受到西北强风影响。从图 6 中可以看出,在南东(SE)与南(S)、西北西(WNW)与北北西(NNW)方向的日 10 min 最大平均风速无论是出现频率还是数值都要强于其他方向。一年之中受东南风的影响更为显著,最大风速集中在 8~10 m/s;相比而言,西北强风来流频率较低,但其最大风速数值较大,主要集中在 9~12 m/s。这与中国东南沿海地区身处东亚季风区有较大关系,表明沿海地区受季节风影响显著。

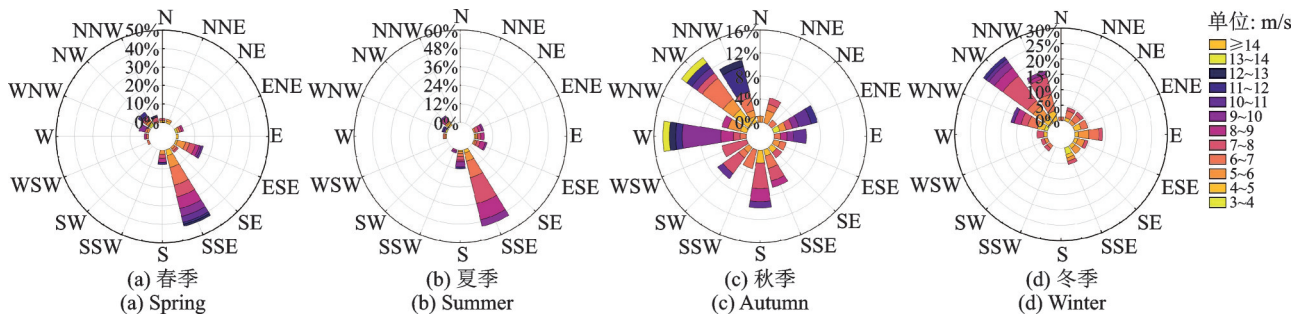


图 5 四季玫瑰图

Fig. 5 Wind rose chart of four seasons

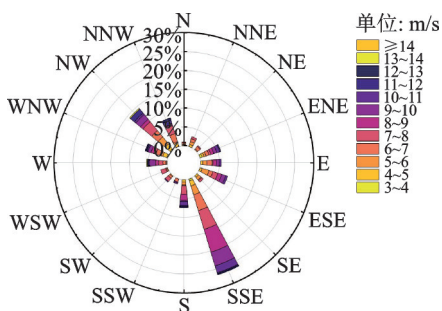


图 6 日 10 min 平均风速年最大值的玫瑰图

Fig. 6 Wind rose chart of annual maximum average wind speed in 10 min of a day

2.2 紊流强度和阵风因子

2.2.1 紊流强度

紊流强度是脉动分量平均变化幅度与平均风速之比,反映了风的脉动强度,可用 I_u, I_v, I_w 表示,是确

定结构脉动风荷载的关键参数,通常定义紊流强度为 10 min 时距的脉动分量的均方根与 10 min 时距水平平均最大风速的比值:

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U}; \quad i = u, v, w \quad (1)$$

式中, I_i 分别表示各个方向的紊流强度; U 表示 10 min 时距水平平均最大风速; σ_i 分别表示对应于脉动风速 $u(t), v(t), w(t)$ 的均方根, σ_i^2 相当于紊流脉动风速在 i 方向上的动能。

为了方便统计计算,在计算脉动风特性时,根据强风原则将所有 10 min 平均风速小于 8 m/s 的风速数据剔除。经计算得到在观测期间内,桥址区强风样本的顺风向、横风向、竖向的紊流强度分布如图 7 所示。图 8 和 9 为顺风向紊流强度与横风向、竖向紊流强度的相关性;图中 R 为相关性系数。

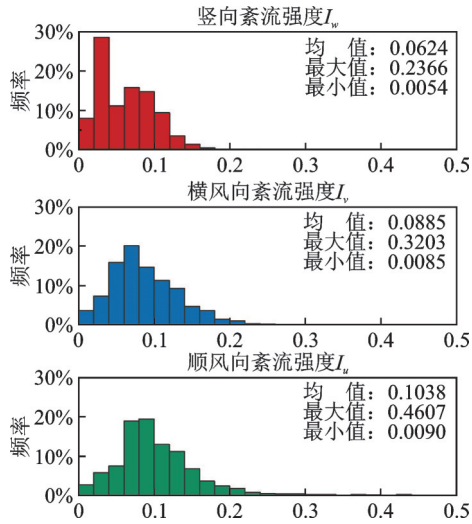


图7 紊流强度直方图

Fig. 7 Histogram of turbulence intensity

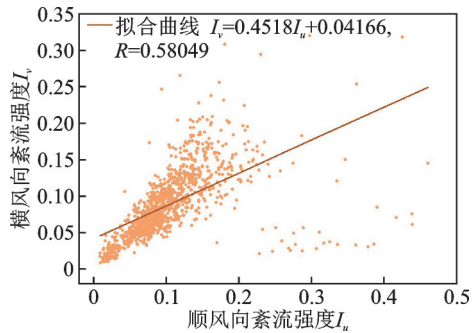


图8 顺风向、横风向紊流强度相关性

Fig. 8 Correlation between downwind and crosswind turbulence intensity

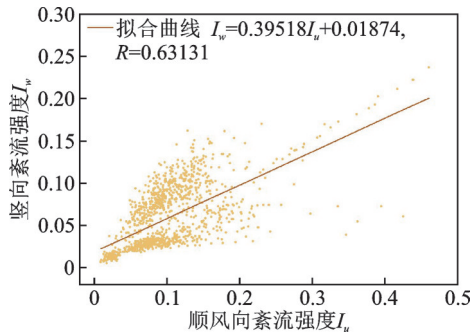


图9 顺风向、竖向紊流强度相关性

Fig. 9 Correlation between downwind and vertical turbulence intensity

由图7可知,顺风向 I_u 主要分布在0.06~0.14之间,均值为0.104;横风向 I_v 主要分布在0.04~0.14之间,均值为0.089;竖向 I_w 主要分布在0.02~1.2之间,均值为0.062;总体来看强风样本下,各分量紊流强度离散性较强,其均值比值为 $I_u:I_v:I_w=1:0.86:0.60$,与《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01-2018)^[15]推荐的 $I_u:I_v:I_w=1:0.88:0.50$ 相比,实际风场的横风向紊流强度偏小一些,竖向紊流强度

偏大一些。

由图8和9可知根据相关系数的划分,顺风向紊流强度 I_u 和横风向紊流强度 I_v 、竖向紊流强度 I_w 具有强相关性。 I_v 、 I_w 和 I_u 具有显著的正相关性,相对而言 I_w 与 I_u 的相关性更加显著。随着 I_u 的增大, I_v 的离散程度有增强趋势,而 I_w 的离散程度呈现先增强后减弱的趋势。对于图中的一些离散点呈现出随着 I_u 增大而 I_v 减小的现象,这些是由于在2021年9月9日-11日期间有台风过境,因此观测数据受到影响较为离散。

2.2.2 阵风因子

风的脉动强度也可用阵风因子表示,阵风因子通常定义为阵风持续期 t_g 内平均风速的最大值与10 min时距平均最大风速之比:

$$G_u(t_g) = 1 + \frac{\max[\bar{u}(t_g)]}{U} \quad (2)$$

$$G_v(t_g) = \frac{\max[\bar{v}(t_g)]}{U} \quad (3)$$

式中, t_g 为阵风持续期; $G_u(t_g)$ 、 $G_v(t_g)$ 分别为顺风向、横风向的阵风因子; $\bar{u}(t_g)$ 、 $\bar{v}(t_g)$ 分别为阵风持续期 t_g 内顺风向、横风向平均风速的最大值。结构风工程中定义阵风持续期为1~3 s,本文 t_g 取为3 s。一般来说, t_g 越大,对应的阵风因子越小,当 $t_g=10$ min时, $G_u=1$ 。

在观测期间强风样本下顺风向紊流强度 I_u 、横风向紊流强度 I_v 和顺风、横风向阵风因子 G_u 、 G_v 的相关性如图10和11所示。由图10可知,根据相关系数的划分 I_u 和 G_u 、 G_v 属于强相关,且 I_u 与 G_u 的相关性更强;由图11可知, I_v 和 G_u 、 G_v 属于强相关,且 I_v 与 G_v 的相关性更强。这可能是由于顺风向与水域纵向方向相近,其地面粗糙度较小,对脉动分量 \bar{u} 影响较小,而横风向受到桥梁结构和桥面建筑的影响,地面粗糙度增大导致其脉动分量 \bar{v} 减小。从而导致相同紊流强度下 G_u 的离散性更大一些。顺风向紊流强度和阵风因子的经验公式为:

$$G_u = 1 + cI_u^d \ln(T/t) \quad (4)$$

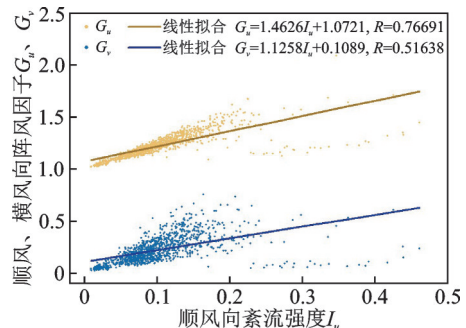


图10 顺风向紊流强度与阵风因子的相关性

Fig. 10 Correlation between downwind turbulence intensity and gust factor

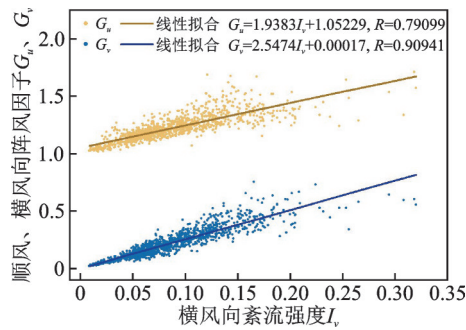


图 11 横风向紊流强度与阵风因子的相关性

Fig. 11 Correlation between turbulence intensity across wind direction and gust factor

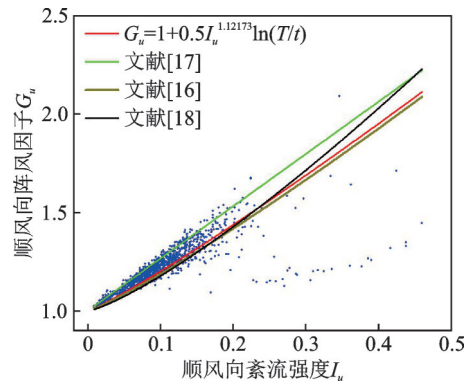


图 12 顺风向紊流强度与阵风因子关系

Fig. 12 Relationship between downwind turbulence intensity and gust factor

式中, T 为平均时距, 即 10 min; t 为阵风风速时距, 取为 3 s; c 和 d 为常数。

表 1 为不同文献推荐的经验常数与本文通过对实测数据拟合得到的经验常数, 图 12 给出了基于实测数据的顺风向紊流强度与阵风因子的关系, 对比经验公式曲线, 可以看出 CAO 等^[16]和 CHOI 等^[18]给出的经验公式曲线能很好地反映实测紊流强度与阵风因子之间的变化趋势。基于式(4)通过 Levenberg-Marquardt 算法对实测数据进行拟合, 得到桥址区经验常数 c 、 d 的最佳拟合值分别为 0.5、1.12。由图 12 可知, 文献[16]给出的经验公式更能反映沿海地区紊流强度与阵风因子的关系。

表 1 经验常数汇总表

Tab. 1 Summary of empirical constants

方法	c	d
文献[16]	0.5	1.15
文献[17]	0.5	1
文献[18]	0.62	1.27
拟合曲线	0.5	1.12

2.3 紊流积分尺度

紊流积分尺度是气流中紊流涡旋平均尺寸大小的度量, 而积分尺度的大小决定了脉动风对结构的影响范围。由于结构风荷载对紊流尺度特性的敏感性, 紊流积分尺度通常是一项重要的但容易被忽略

的风特性指标。

积分尺度分析方法的选择对结果的稳定性非常重要, 比较有效的方法包括利用 Taylor 假设自相关函数积分法和稳态随机信号自拟合的方法等, 本文拟采用 Taylor 假设自相关函数积分法, 设脉动风的自相关函数为 $R(\tau)$, 则:

$$L_i^x = \frac{U}{\sigma_i^2} \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中, $R(\tau)$ 为自相关函数, 定义为 $R(\tau) = E[u(t)u(t+\tau)]$ 。

由测得的风速风向值, 取 10 min 为基本时距, 采用自相关函数积分法计算了桥址区长期的紊流积分尺度, 其中积分上限取至相关系数减少到 0.05 时的 τ 值。经计算得到了桥址区基于长期监测数据的顺风向、横风向和竖向紊流积分尺度的概率分布图, 如图 13 所示。紊流积分尺度和紊流强度虽然是两种不同的表征风特性的参数, 但两者之间却有着一定的联系。

从图 13 中可以看出, 顺风向、横风向紊流积分尺度主要集中在 0~1000 m 之内, 紊流积分尺度平均值分别为 435、456 m; 竖向紊流积分尺度主要集中在 0~500 m 之内, 紊流积分尺度平均值为 239 m; 各分量的比值大致为 1:1.05:0.55。顺风向紊流积分尺度远大于规范推荐的 120 m, 桥址区的紊流积分尺度分布范围较广、离散性较强, 最大大约 5000 m。

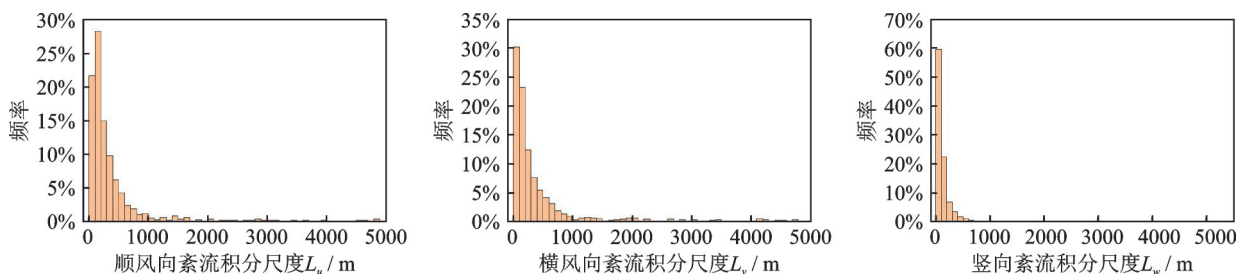


图 13 紊流积分尺度分布图

Fig. 13 Integrated scale distribution of turbulent flow

这可能是由于大气边界层的不稳定性引起的,从物理上讲大气紊流涡团是三维的、随机的和间歇的,反映在积分尺度上自然也是随机的和间歇的,这种大气紊流涡团的特性不仅受到地球表面摩擦作用的影响,而且与天气系统特征密切相关,所以紊流积分尺度在不同观测日的计算结果有时相差很大。

本文给出紊流强度与紊流积分尺度的拟合公式:

$$L_i = a \left(\frac{1}{I_i} \right)^b \quad (6)$$

式中, $i = u, v, w$; L_i 为各方向紊流积分尺度; I_i 为各方向的紊流强度; a 和 b 为待求参数。

表 2 给出了基于实测数据对式(6)拟合得到的相关参数。由图 14 可知,紊流积分尺度与紊流强度

之间具有显著的负相关性,即随着紊流强度的增大,紊流积分尺度先急剧变小后趋于稳定,拟合曲线能较好地反映紊流积分尺度与紊流强度的关系,其中 u, v 两个方向的曲线拟合程度较高。当紊流强度变大时,空气中的大涡旋迅速破裂变成小涡旋,之后随着紊流强度的持续增大,涡旋尺寸开始保持在一个较低的水平几乎不变。

表 2 拟合公式参数汇总表

Tab. 2 Parameters for fitting formula

i	待求参数	
	a	b
u	8.541	1.52
v	7.211	1.52
w	0.298	2.59

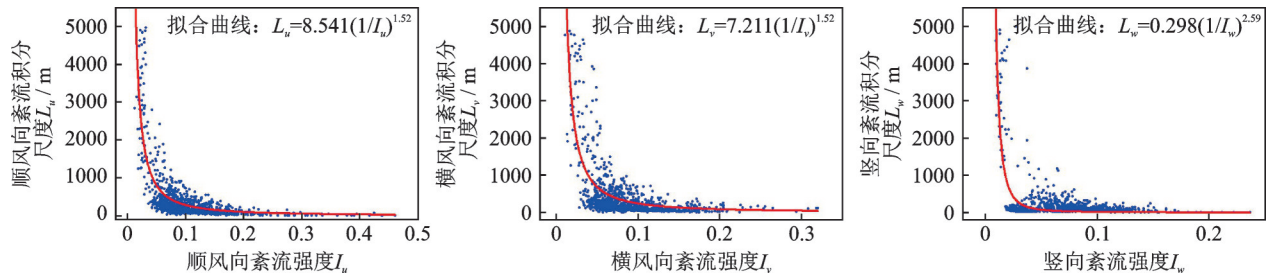


图 14 紊流强度与紊流积分尺度之间的相关性

Fig. 14 Correlation between turbulence intensity and turbulence integral scale

2.4 紊流功率谱密度

紊流功率谱密度是紊流能量在频域上的分布,反映了紊流在各频段对旋涡耗散所作的贡献大小。目前《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)^[15]建议的功率谱表达式是采用 Kaimal 在 1972 年提出的表达式。功率谱密度函数 S_i ($i = u, v, w$) 能够更准确地描述脉动风的特性, S_i 在频域上的分布可以描述紊流动能在不同尺度水平上的比例,它们在频域上的全积分等于脉动风对应方向上的紊流动能^[19],即

$$\int_0^{\infty} S_i(n) dn = \sigma_i^2 \quad (7)$$

式中, $i = u, v, w$; n 为频率; $S_i(n)$ 表示 i 方向上的紊流功率谱密度函数。

紊流功率谱密度函数的一般表达式^[20]为:

$$\frac{n S_i(n)}{u_*^2} = \frac{A \tilde{f}}{(1 + B \tilde{f}^\beta)^\gamma} \quad (8)$$

式中, u_*^2 为摩阻速度^[21]; \tilde{f} 为无量纲频率,也称莫宁坐标, $\tilde{f} = n L_i^j / U(z)$ 或 $\tilde{f} = n z / U(z)$; A, B, β, γ 为待定常数。

考虑季节风向的变化,本文分别选取春夏季(2021年6月22日6:10—6:20,A)东南风和秋冬季(2021年11月7日22:50—23:00,B)西北风10 min最大平均风速出现的时间段的功率谱进行分析,如图15所示,分别得到实测数据的顺风向、横风向和竖向的功率谱密度函数,并对实测数据进行拟合得到拟合曲线,并与 Kaimal 谱^[22]、Von Karman 谱^[23]和 Panofsky 谱^[24]三种理论功率谱密度函数相比较。拟合曲线采用王俊^[19]提出的三参数功率谱密度函数,系数取值如表3所示。图16和17分别给出了时间段A和B的风速时程曲线。

从图15(a)和(b)中可以看出,根据A、B实测数据拟合的顺风向功率谱密度拟合曲线与 Kaimal 谱吻合度较高,总体高于 Von Karman 谱和 Panofsky 谱;从图15(c)和(d)中可以看出,根据A、B实测数据拟合的横风向功率谱密度拟合曲线在低频段均高于理论谱;在高频段内,A的拟合曲线与 Von Karman 谱较吻合,低于 Panofsky 谱和 Kaimal 谱,B的拟合曲线高于 Von Karman 谱,低于 Panofsky 谱和 Kaimal 谱。从图15(e)和(f)中可以看出,根据A、B的竖向功率谱密度拟合曲线在低频段均高于理论谱;

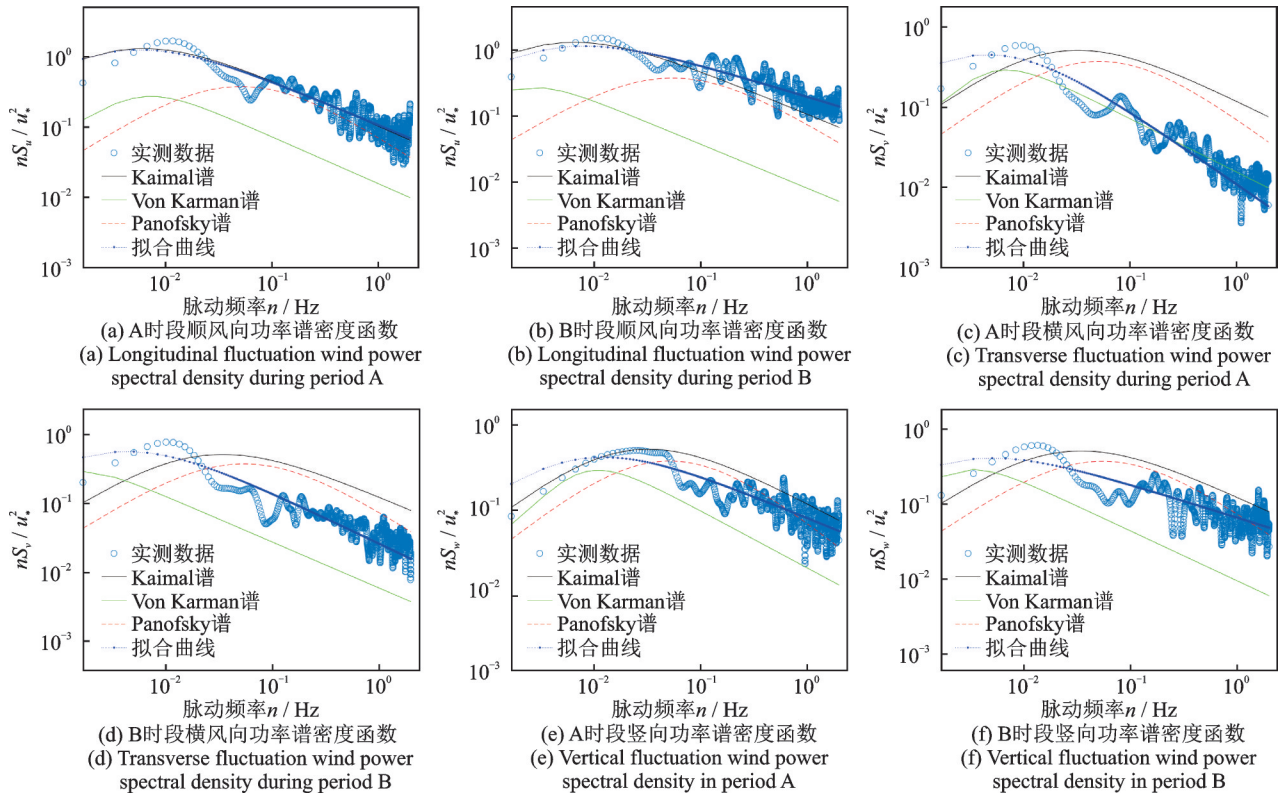


图 15 湍流功率谱密度

Fig. 15 Turbulence power spectral density

表 3 拟合曲线系数

Tab. 3 Fitting curve coefficients

方向	A 时段			B 时段		
	A	B	β	A	B	β
顺风向	1029.5860	277.1972	1.6308	728.5106	249.0444	1.4900
横风向	403.6925	235.2955	1.9246	578.3393	311.4050	1.7419
竖向	172.7732	158.1673	1.5118	445.1880	440.8750	1.4473

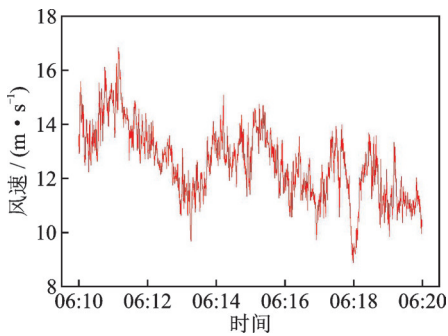


图 16 风速时程曲线图(A时段)

Fig. 16 Time-history diagram of wind speed (period A)

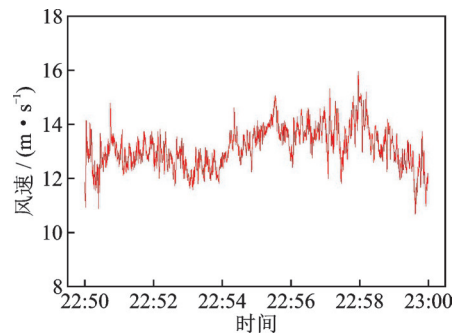


图 17 风速时程曲线图(B时段)

Fig. 17 Time-history diagram of wind speed (period B)

在高频段与 Panofsky 谱比较吻合,但高于 Von Karman 谱,低于 Kaimal 谱。结合图 15~17,整体上看 B 的风速要高于 A,与 A 相比 B 在高频区能量显然有所增高,表明风速较大时,高频区能量有所增大,反映在频谱曲线上的峰值有所增加,这与文献[1]所得结论较为一致。

总体来说实测数据的顺风向功率谱密度拟合曲

线与 Kaimal 谱吻合度较高,横风向功率谱密度拟合曲线与 Von Karman 谱比较吻合,竖向功率谱密度拟合曲线在高频段与 Panofsky 谱比较吻合,这与规范推荐使用单一 Kaimal 谱有所差异。对沿海地区进行抗风设计时,当无实测数据,建议对顺风向采用 Kaimal 谱、横风向采用 Von Karman 谱、竖向采用 Panofsky 谱进行分析计算。

3 结 论

本文对广东沿海地区某大跨悬索桥跨中桥面处风速仪采集的数据进行研究分析,可以得到以下结论:

(1)风观测期间,日 10 min 最大平均风速主要集中在 $[146.25^\circ, 191.25^\circ]$ 和 $[303.75^\circ, 348.75^\circ]$,说明沿海地区受夏季东南台风和冬季强西北风的影响较大,最大平均风速出现在 11 月 7 日,风速值为 13.13 m/s,风向为 315.17° 。

(2)在强风样本下经计算得到的 I_u, I_v, I_w 的均值分别为 0.1038、0.0885、0.0624,紊流强度分量的比值 $I_u:I_v:I_w=1:0.85:0.60$,与规范推荐的 $I_u:I_v:I_w=1:0.88:0.50$ 相比,横风向紊流强度偏小一些,竖向紊流强度偏大一些,且各方向紊流强度离散性比较大。紊流强度与阵风因子具有显著的相关性,随着紊流强度的增大,阵风因子也随之增大。CAO 和 CHOI 经验公式曲线能很好地反映沿海地区实测紊流强度与阵风因子之间的变化趋势,通过对实测数据的曲线拟合得到了相应的经验公式。

(3)紊流积分尺度的变化较大,但其尺度大小主要集中在 1000 m 以内,顺风向、横风向和竖向的紊流积分尺度均值分别为 435、456 和 239 m,各分量的比值大致为 $1:1.05:0.55$;紊流积分尺度与紊流强度呈现负相关性,即随着紊流强度的增大,紊流积分尺度先急剧变小后趋于稳定。本文给出紊流强度与紊流积分尺度的经验公式,一是探究紊流强度和紊流积分尺度关系;二是希望能用紊流强度代替紊流积分尺度,用统一的尺度来衡量风特性对结构物的影响。

(4)广东沿海地区实测功率谱在顺风向与 Kaimal 谱吻合度较高;在横风向与 Von Karman 谱吻合度较高;在竖向高频段与 Panofsky 谱吻合度较高,在竖向低频段理论谱均偏小,这与规范推荐使用单一 Kaimal 谱有所差异。对广东沿海地区进行抗风设计时,当无实测数据,建议根据风向选择合适的谱进行分析计算。

参考文献:

[1] 周广东,丁幼亮,李爱群,等.基于润扬大桥南塔顶长期监测数据风场特性分析[J].工程力学,2012,29(7):93-101.
ZHOU Guangdong, DING Youliang, LI Aiqun, et al. The wind characteristics analysis of Runyang Bridge

based on south tower top long-term monitoring data[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 93-101.

- [2] 李杏平,李爱群,王浩,等.基于长期监测数据的苏通大桥桥址区风特性研究[J].振动与冲击,2010,29(10):82-85.
LI Xingping, LI Aiqun, WANG Hao, et al. Wind characteristics of Sutong Bridge based on long-term monitored data[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 82-85.
- [3] 赵林,吴风英,潘晶晶,等.强台风登陆过程大跨桥梁风特性特征及其抖振响应分析[J].空气动力学报,2021,39(4):86-97.
ZHAO Lin, WU Fengying, PAN Jingjing, et al. Wind field characteristics and wind-induced buffeting response of a long-span bridge during the landing of a strong typhoon[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(4): 86-97.
- [4] 段静,张丽,谢壮宁,等.山竹台风的非平稳风特性研究[J].振动与冲击,2022,41(11):18-26.
DUAN Jing, ZHANG Li, XIE Zhuangning, et al. Non-stationary wind characteristics of typhoon Mangkhut[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(11): 18-26.
- [5] 王旭,刘文韬,叶仲韬,等.沿海大跨径桥址处台风“山竹”风特性实测研究[J].桥梁建设,2021,51(1):29-36.
WANG Xu, LIU Wentao, YE Zhongtao, et al. Field measurement of wind characteristics at long-span bridge site in coastal area during typhoon Mangkhut[J]. Bridge Construction, 2021, 51(1): 29-36.
- [6] 马如进,范爱华,徐向东,等.U形峡谷桥址区风特性实测研究[J].公路,2021,66(9):168-174.
MA Rujin, FAN Aihua, XU Xiangdong, et al. Study of wind environment characteristics for bridge across U-type canyon[J]. Highway, 2021, 66(9): 168-174.
- [7] 张志田,谭卜豪,陈添乐.丘陵地区深切峡谷风特性现场实测研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(7):113-122.
ZHANG Zhitian, TAN Bohao, CHEN Tianle. Study on field measurement of wind properties near a canyon deep-cut to hilly land[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(7): 113-122.
- [8] 邹云峰,康星辉,周帅,等.高海拔深切峡谷桥址风场特性实测研究[J].工程力学,2023,40(5):69-78.
ZOU Yunfeng, KANG Xinghui, ZHOU Shuai, et al. Field measurement study on wind characteristics at bridge site in deep gorge with high altitude[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 69-78.
- [9] 李加武,徐润泽,党嘉敏,等.喇叭口河谷地形基本风特性实测[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):47-56.
LI Jiawu, XU Runze, DANG Jiamin, et al. Field mea-

- surement of basic wind characteristics of trumpet river valley[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2020, 40(6): 47-56.
- [10] 蔡向阳, 龚平, 谢鹏, 等. 赤石特大桥山区地形桥位风特性现场实测[J]. *公路工程*, 2017, 42(2): 1-5.
CAI Xiangyang, GONG Ping, XIE Peng, et al. Field measurement of wind characteristics of Chishi Bridge site with mountainous terrain[J]. *Highway Engineering*, 2017, 42(2): 1-5.
- [11] 辛亚兵, 邵旭东, 刘志文, 等. 高墩多塔斜拉桥沿桥轴向风特性实测分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(11): 103-111.
XIN Yabing, SHAO Xudong, LIU Zhiwen, et al. Wind characteristics along axis bridge measured at multi-pylon cable-stayed bridge site with high piers[J]. *Journal of Hunan University(Natural Science Edition)*, 2016, 43(11): 103-111.
- [12] 陶天友, 金早, 王浩, 等. 飊线风作用下大跨度斜拉桥模态特性实测研究[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(7): 138-146.
TAO Tianyou, JIN Zao, WANG Hao, et al. Study on measured modal properties of a long-span cable-stayed bridge under squall line wind actions[J]. *China Journal of Highway and Transportation*, 2023, 36(7): 138-146.
- [13] TAO T, HE J, WANG H, et al. Efficient simulation of non-stationary non-homogeneous wind field: fusion of multi-dimensional interpolation and NUFFT[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 236: 105394.
- [14] TAO T Y, WANG H. Efficient buffeting analysis of long-span bridges under non-stationary winds: a 2D interpolation enhanced approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 559: 117754.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2019.
- [16] CAO S, TAMURA Y, KIKUCHI N, et al. Wind characteristics of a strong typhoon[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 11-21.
- [17] ISHIZAKI H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone region[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1-3): 55-66.
- [18] CHOI E C C. Gradient height and velocity profile during typhoons[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1-3): 31-41.
- [19] 王俊. U形峡谷风参数空间分布特征及其对大跨径桥梁抖振响应影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
WANG Jun. Wind spatial distribution characteristics in the U-shaped valley and its effect on buffeting response of long-span bridges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [20] RICHARDS P J, HOXEY R P, SHORT J L. Spectral models for the neutral atmospheric surface layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 87(2-3): 167-185.
- [21] WEBER R O. Remarks on the definition and estimation of friction velocity[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 93(2): 197-209.
- [22] KAIMAL J, WYNGAARD J, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972, 98(417): 563-589.
- [23] VON KÁRMÁN T. Progress in the statistical theory of turbulence[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1948, 34(11): 530-539.
- [24] PANOFSKY H A, MCCORMICK R A. The spectrum of vertical velocity near the surface[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1960, 86(370): 495-503.

第一作者: 郝键铭(1991—),男,博士,讲师。

E-mail: jianminghao@chd.edu.cn

通信作者: 王峰(1983—),男,博士,副教授。

E-mail: wf@chd.edu.cn