

琼州海峡跨海工程风速观测与设计风速计算^{*}

杜尧东, 宋丽莉, 毛慧琴, 植石群, 钱光明
(广东省气候与农业气象中心, 广东 广州 510080)

摘 要: 利用 5a 的多层梯度测风资料, 对工程区 3 个测点与参照气象站风速的相关关系、风随高度变化的规律以及阵风系数等进行了分析研究。结果表明, 工程区 3 个测点与参照气象站风速之间的关系均以线性方程拟合效果最佳。利用这些线性方程对工程区短期测风资料进行了延长, 并采用极值 I 型分布计算了 10 m 高处重现期 10 min 平均最大风速。然后, 根据风随高度变化的规律和阵风系数, 计算了桥面高度各重现期瞬时最大风速。

关键词: 琼州海峡跨海工程; 年最大风速; 资料延长; 极值 I 型; 阵风系数; 设计风速

中图分类号: U442.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 02-0098-04

风场是跨海工程设计中非常重要的环境要素^[1-3]。日本的明石海峡大桥、南京长江第二大桥、贵州北盘江大桥、广东虎门大桥等国内外著名大桥, 在设计施工前均对工程区进行了多年的风场环境观测, 提出了合理的风荷载值^[4-7]。琼州海峡跨海工程是我国拟建的六大跨海工程之一, 它起于广东省雷州半岛, 跨越琼州海峡到达海南省海口, 全长 19.5 km, 海水最深处深度超过 100 m, 是一项难度极高、规模巨大的工程。工程所在地又是热带气旋多发区, 因此, 跨海工程的设计、施工和运营对风场环境要求非常严格。为确保跨海工程设计、施工、运营的安全, 我们对琼州海峡跨海工程区的风场环境进行了多年实地观测。本文主要根据实地测风资料, 对跨海工程的设计风速进行计算。

1 资料与方法

1.1 工程区实地测风资料

自 1997 年 6 月至 2002 年 5 月, 在琼州海峡北岸、南岸和中部共设置 3 个测风站(图 1)。北岸测站位于广东省徐闻县五里镇^①台角, 高度 65 m, 分别在 10、20、30、40、50、60、65m 等 7 个层次安装测风仪器; 南岸 10 m 高测站位于海口市新海镇天尾角; 中部测站位于徐闻县前山镇外海东南方向的罗斗沙岛上, 高度 40 m, 分别在 10、40 m 安装测风仪器, 该岛距海岸约 10 km, 面积小, 海拔低, 基本可代表海峡中部的风况。测风仪器采用 EN2 自动测风仪, 测定项目包括逐时 2 min 平均风速及风向、逐时 10 min 平均风速及风向、逐日 10

min 最大风速及风向、逐日瞬间最大风速及风向。数据由 EN2 测风数据处理仪自动记录存储, 每隔一个月前往各测站用手提电脑读取数据。

1.2 周边气象站长年代测风资料及订正方法

与琼州海峡北岸^②台角测站最近的是徐闻县气象站, 与琼州海峡南岸天尾角测站最近的是海口市气象站。由于近年来海口市城市化进程迅猛, 海口市气象站周围高大建筑物较多, 缺乏代表性, 故 3 个测风站均以徐闻气象站作为参照点。徐闻县 1956—2002 共 46 a 的风速资料来源于徐闻县气象局。1956~1970 年徐闻气象站年最大风速取自 2 min 平均, 采用时距变换关系式^[8]: $Y_{10}=0.88 X_2+0.80$, 将 2 min 平均风速 X_2 转换到 10 min 平均风速 Y_{10} , 徐闻气象站测风器离地高度有 5 次变化, 采用风速随高度变化的指数公式^[8], 并取 $\alpha=0.167$ 将其换算到 10 m 高度^[9]。经过两次订正后, 得到徐闻气象站 46 a 的 10 m 高处 10 min 平均年最大风速序列。

2 结果与分析

2.1 工程区实地测风资料的延长

根据短期气候资料延长方法^[10], 选择徐闻气象站作为参照站, 与工程区现场测风资料进行相关分析, 将工程区短期测风资料延长。选取工程区 3 个测点 10 m 高处 10 min 平均最大风速大于 $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据, 与参照站徐闻气象站同步观测资料进行相关分析, 拟合方程包括直线、对数、幂函数、指数函数等。结果表明, 3 个测点风速与徐闻气象站风速之间的关系均以线性拟合效果最佳(表 1), 统

* 收稿日期: 2004-03-15

基金项目: 广东省“十五”科技攻关资助项目(C32002)

作者简介: 杜尧东(1964年生), 男, 博士, 副研究员; E-mail: yddu@gmc.gov.cn

计检验表明, 3 个测点线性方程的回归总体效果均达 0.01 置信水平以上。利用这些线性方程和徐闻气象站的年最大风速序列, 得到 3 个测点 46 a 的 10 m 高处 10 min 平均年最大风速序列。



图 1 工程区测风站及周边气象站分布图

Fig 1 Measuring sites and nearby meteorological stations

表 1 工程区各测点与参照站的风速相关方程

Tah 1 Wind speed correlations between measuring sites and reference meteorological station

测点	相关方程 ¹⁾	R^2
台角	$Y=1.1177X+5.6012$	0.8346
天尾角	$Y=1.0677X+6.1287$	0.8287
罗斗沙	$Y=1.1530X+7.4405$	0.8820

1) X 为徐闻气象站风速, Y 为各测点风速。

2.2 工程区 10 m 高度各重现期 10 min 平均最大风速

因为气象记录中的最大风速值是观测时期内的最大值, 只有相对的意义, 工程可能遇到的极端风速不能简单的用气象记录中的极值, 而需要利用最大风速的频率分布来推算出稀遇的最大风速。研究表明, 风速极值的概率分布以极值—I 型拟合效果最好^[11, 12]。

2.2.1 极值—I 型分布中各参数的估计及拟合优度检验 极值—I 型分布函数为:

$$F(x) = p(X_{\max} < X) = \exp(-\exp(-a(x-u)))$$
 (1)

其超过保证率函数为:

$$P(x) = 1 - \exp(-\exp(-a(x-u)))$$
 (2)

式中, u 为分布的位置参数, 即分布的众值; α 为分布的尺度参数, 通过它们与矩的关系可以求得:

$$\alpha = \frac{1.28255}{\sigma}$$
 (3)

$$u = M_x - 0.57722 \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma$$
 (4)

式中, M_x 、 σ 分别为数学期望和均方差, 实际计算中用有限样本容量的均值和标准差分别作为其近

似估计。

采用 Kolmogorov 检验方法进行拟合优度检验^[13], 3 个测站的最大离差 D_n 均小于 $D_{0.05} = 0.1963$, 拟合效果良好。根据延长后的 3 个测站资料估算的极值—I 型分布各参数及 D_n 列于表 2。

表 2 工程区各测站极值—I 型分布中的参数及最大离差

Tah 2 Parameters and maximum deviation of extreme I for three measuring sites

站名	u	α	D_n
台角	19.039	0.2103	0.11
天尾角	18.972	0.2201	0.14
罗斗沙	21.636	0.2038	0.10

2.2.2 10 m 高 R 年重现期 10 min 平均最大风速计算 由式 (2) 得到:

$$x = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-P} \right) \right]$$
 (5)

重现期为 R (概率为 $1/R$) 时最大风速

$$x_R = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{R}{R-1} \right) \right]$$
 (6)

根据表 2 中各测点的 u 和 α 计算出的 10 m 高处各重现期 10 min 平均最大风速列于表 3。

表 3 10 m 和 65 m 高处各重现期 10 min 平均最大风速

Tah 3 10 min average maximum wind speed for different return periods at 10 and 65 m m/s

高度/m	重现期/a	北岸	南岸	海峡
10	50	37.6	36.7	40.8
	100	40.9	39.9	44.2
	150	42.8	41.7	46.2
	200	44.2	43.0	47.6
65	50	50.7	49.5	55.0
	100	55.2	53.8	59.6
	150	57.8	56.3	62.3
	200	59.7	58.1	64.2

2.3 不同高度各重现期 10 min 平均最大风速

根据国内外研究, 在摩擦层内 (大约在 200 m 以下) 风速随高度的变化规律呈指数函数^[8]。即

$$V_z = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$
 (7)

式中, z_0 为参考高度 ($z_0=10\text{m}$); z 为任意高度 (m); V_0 为参考高度 z_0 处的风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); V_z 为任意高度 z 处的风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); α 为风切变指数, 反映风速随高度增加的快慢, 其大小主要与地面粗糙度、大气稳定度有关。

白天和夜间、晴天和阴天的 α 均存在明显差异^[9]，为反映大风情况下 α 的平均状况，我们利用海峡北岸 3 号台角 65 m 铁塔，10、20、30、40、50、60、65 m 共 7 层的梯度风观测资料，选取 10 min 平均最大风速大于 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据对上述指数函数进行最小二乘法拟合，求得 $\alpha=0.16$ 。由于海峡南岸天尾角和海峡中部罗斗沙只有 1 或 2 个层次，不易分析出风随高度的变化规律，因此本文取海峡北岸 3 号台角的 α 值。

根据 10 和 65 m 高度各重现期 10 min 平均最大风速和上述指数律风速廓线公式，便可确定高度各重现期 10 min 平均最大风速。

2.4 阵风系数和桥面高度各重现期瞬时最大风速

由于大气的湍流扰动，使得平均风速迭加了风速脉动，产生阵风。阵风系数是描述阵风相对强度的参数。把某一短时距平均风速最大值与 10 min 平均风速的比值称为阵风系数^[14]，即

$$K=K_G/\bar{V}$$

(8)

式中 V_G 为阵风风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)，为 10 min 平均风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)， K 为阵风系数。

据研究，3 s 的瞬时最大风速为 10 min 平均风速的 1.2 倍以上，0.5 s、0.1 s 的瞬时最大风速甚至可达 10 min 平均风速的 1.5—3 倍以上^[14, 15]，这种高能量的瞬时风速往往会给海上建筑造成很大危害。因此，在工程设计中，为保证安全需要把 10 min 平均风速乘以阵风系数求得不同短时距阵风。

利用瞬时最大风速与 10 min 平均最大风速计算了 3 个测点不同风速段的阵风系数（表 4），结果表明，阵风系数与下垫面粗糙度、风速大小和高度有关。综合考虑上述因素以及广东热带气旋大风天气平均阵风系数（1.61）^[9]，本文取 3 号台角 65 m 高处 15—20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段的阵风系数 1.31 作为南北两岸的阵风系数，取 40 m 高处 20—25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速段的阵风系数 1.23 作为海峡中部的阵风系数。

表 4 不同测点大风情况下的阵风系数

Tab. 4 Gust factors of three measuring sites at wind speeds over 10 m/s

站点	高度/m	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)									
		10~15		15~20		20~25		25~30		30~35	
		系数	样本	系数	样本	系数	样本	系数	样本	系数	样本
台角	10	1.28	236	1.26	8	1.26	1	1.24	1		
	20	1.24	384	1.26	21	1.26	1	1.25	1		
	30	1.23	427	1.26	31	1.20	2	1.38	1	1.24	1
	40	1.21	467	1.24	39	1.21	2			1.19	1
	50	1.20	519	1.22	46	1.18	3			1.23	1
	60	1.20	550	1.23	51	1.19	4			1.22	1
	65	1.20	508	1.31	38	1.23	2			1.21	1
罗斗沙	10	1.23	322	1.26	39	1.29	5				
	40	1.15	333	1.16	68	1.23	7	1.26	3		
天尾角	10	1.30	302	1.30	16	1.23	1				

瞬时最大风速由 10 min 平均最大风速与阵风系数相乘求得，桥面高度不同重现期瞬时最大风速见表 5。

表 5 65 m 高处(桥面高度)各重现期
瞬时最大风速

Tab. 5 Instantaneous maximum wind speeds for
different return periods at 65 m

m/s

重现期/a	北岸	南岸	海峡
50	66.4	64.8	67.6
100	72.3	70.5	73.3
150	75.7	73.8	76.6
200	78.2	76.1	79.0

3 小结与讨论

(1)工程区各测点与参照点风速之间的关系以线性拟合效果最佳，可以利用这些线性方程和参照站长年资料对工程区各测点的短期测风资料进行延长。拟合优度检验结果表明，工程区 3 个测站的大风资料可以用极值—I 型分布函数拟合，并由此计算重现期的最大风速。

(2)海峡北岸、南岸和中部 100a 重现期的瞬时最大风速分别为 72.3、70.5 和 73.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；150 年重现期的瞬时最大风速分别为 75.7、73.8 和 76.6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3)利用海峡北岸 65 m 铁塔多层梯度风观测资料，求算出指数律风速廓线公式中的 α 值为 0.16，高于我国《建筑结构荷载规范》和《公路桥梁抗风设计指

南》中规定的 0.12(A 类下垫面:海面、海岸),我们利用在广东沿海多处测风塔资料计算的 α 均显著大于 0.12^[9],看来不同纬度、不同天气系统下的海面、海岸均取同一个 α 值的做法值得商榷。

(4)以海峡北岸的 α 值计算海峡南岸和海峡中部风随高度的变化,可能会造成一定偏差,为了求得更客观、更准确的重现期风速值,在海峡南岸和海峡中部各增建一个多层梯度观测塔是十分必要的。此外,在海峡北岸 65 m 铁塔测风期间,所记录到的热带气旋样本较少,没有正面袭击的台风观测数据,造成大于 20 m·s⁻¹大风样本较少,因此本文所取的阵风系数,也有待于今后观测收集到足够的大风样本后予以订正。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通部.公路桥涵设计通用规范(JTJ021—89)[M].北京:人民交通出版社,1989.

[2] 中华人民共和国交通部.港口工程荷载规范(JTJ215—98)[M].北京:人民交通出版社,1998.

[3] 项海帆,林志光,鲍卫刚等.公路桥梁抗风设计指南[M].北京:人民交通出版社,1996.

[4] 马进,周庆桐.日本明石海峡大桥的抗风设计介绍[J].

重庆交通学院学报,1994,13(2):83—89.

[5] 张忠义,刘聪,居为民.南京长江第二大桥桥位风速观测及设计风速计算[J].气象科学,2000,20(2):200—205.

[6] 刘峰,许德德,陈正洪.北盘江大桥设计风速及脉动风频率的确定[J].中国港湾建设,2002(1):23—27.

[7] 刘刚亮,王中文,黄建辉.虎门大桥 270m 连续刚构悬臂施工中的抗风计算及其抗风安全措施[J].桥梁建设,1995(2):57—60.

[8] 朱瑞兆.应用气候手册[M].北京:气象出版社,1991.

[9] 宋丽莉,毛慧琴,汤海燕等.广东沿海近地层大风特性的观测分析[J].热带气象学报,2004,20(6):731—736.

[10] 么枕生,丁裕国.气候统计[M].北京:气象出版社,1990:797—808.

[11] 孙安健,刘小宁.极端风速分布模式在我国各气候区域的适用性[J].气象,1993,19(10):12—15.

[12] SIMIU E, CHANGERY M J, FILLIBEN J J. Probability distribution of extreme wind speeds[J]. Journal of the structural Division, 1976, 102(ST9): 1861—1877.

[13] 耿素云,张立昂.概率统计[M].北京:北京大学出版社,1987.252—268.

[14] 张正,徐天真,方俊雄,等.埤岛海域风况观测与分析[J].黄渤海海洋,1994,12(1):9—18.

[15] 吴增茂,孙士才.近海工程环境中各种风资料的平均时间分析[J].海岸工程,1995,14(3):8—12.

Wind Speed Observation and Design Wind Speed Calculation for Cross-channel Project over Qiongzhou Strait

DU Yao dong, SONG Li li, MAO Hui qin, ZHI Shi qun, QIAN Guang ming
(Climatic and Agrometeorological Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Based on multi-layers gradient observations for five years, the correlations of wind speeds between three measuring sites and reference meteorological station, the changes of wind with altitude and gust factor were analyzed for the project region. The results showed that linear equations were optimal in fitting wind speeds correlations between three measuring sites and reference meteorological station. Short term wind data for the project region were prolonged according to the linear equations, and by using Extreme Type-I distribution. Ten minute average maximum wind speeds were calculated at different return periods at 10 meters. Then, based on the changes of wind with altitude and gust factor, instantaneous maximum wind speeds were calculated for different return periods at bridge surface height.

Key words: cross channel project over Qiongzhou strait; yearly maximum wind speed; data prolongation; function of extreme I ; gust factor; design wind speed