

文章编号:1671-8879(2008)05-0053-05

## 杭州湾大桥观光塔风速风向联合分布

刘健新,马 麟,白 桦

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**采用概率相关系数(PPCC)最大化原则和极大似然法,根据杭州湾中心岛屿玉盘山气象站的实测风速资料,分析不同风向的最优分布类型,探讨最优分布类型与概率曲线相关系数随形状参数变化规律之间的关系,并用风速风向联合分布推算设计基本风速。研究表明:在 3 种极值分布中的 PPCC 随形状参数递减的分布为最优,具体哪种分布的 PPCC 递减则依赖于具体风速样本,因此在以后的风速概率拟合中可以先由 PPCC 的规律确定分布类型,然后仅求解此分布的有效最优参数;16 个风向中的最优分布除正西方向是极值 II 型外,其他都是极值 III 型;用联合分布推算的基本风速比传统的非联合分布的结果略低,传统的方法得到的基本风速偏保守,用联合分布推算基本风速更加科学。

**关键词:**桥梁工程;基本风速;风速风向联合分布;极值分布;极大似然法

**中图分类号:**U441.3

**文献标志码:**A

## Joint probability distribution of wind speed and direction of sightseeing tower in Hangzhouwan bridge

LIU Jian-xin, MA Lin, BAI Hua

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on wind velocity datum of the Yupanshan weather-station in the center the Hangzhouwan bay, the maximization principle of probability plot correlation coefficient(PPCC) and the maximum verisimilitude method are adopted to analyze the optimal probability distribution type of wind velocity in all directions. The relation between the optimal distribution type and the variation trend of probability plot correlation coefficient is discussed with shape parameter of distribution. The joint distribution is used to estimate the designing basic wind velocity. Calculating results show that the type is always optimal whose PPCC decreases monotonically with shape parameter among three extreme distribution types. But what distribution types' PPCC accords the trend is dependent on wind velocity samples. So it can be put forward that, in probability fitting of wind velocity, the optimal distribution type could be assured according to the inherent relation between optimal type and PPCC and only the distribution's effective optimal parameters need to be solved. The Weibull distribution is optimal in 16 wind directions except for west direction in which the Frechet distribution is optimal. The basic wind velocity estimated by joint probability distribution is a little less than that by

收稿日期:2007-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50578014)

作者简介:刘健新(1942-),男,山西清徐人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:LJX@gl.chd.edu.cn.

traditional non-joint distribution. Basic wind velocity by joint distribution is more scientific, and the traditional method is inclined to be conservative. 6 tabs, 4 figs 10 refs.

**Key words:** bridge engineering; basic wind speed; joint probability distribution of wind speed and wind direction; extreme distribution; probability plot correlation coefficient

## 0 引言

平均风速的概率分布是研究长大桥梁风振疲劳、行车安全的概率评价、抖振和颤振的可靠度分析等课题的重要基础<sup>[1-3]</sup>,其自身也是近年来桥梁风工程的研究难点之一。对于风速概率分布类型的采用,现行规范<sup>[4]</sup>采用极值Ⅰ型;美国采用极值Ⅱ型;加拿大采用极值Ⅲ型;葛耀君<sup>[5]</sup>提出计算3种极值分布的概率曲线相关系数来比较拟合好坏,取用拟合效果最优的极值分布,为风速概率分布的研究提供了新的思路;对于极值Ⅱ型和极值Ⅲ型,用极大似然法估计分布参数时,存在估计失效问题,赵林等<sup>[6-7]</sup>在对上海地区的平均风特性进行研究时,探讨了似然估计的求解策略,建立了一种高效、强稳定性的分析方法——逐步迭代法,解决了极大似然法失效的问题;近几年,考虑风向频度的联合分布是风速概率分布研究中比较关心的另一个问题,杨咏昕等<sup>[8]</sup>较早研究了该问题,用16个风向的风向频度函数和风速分布函数组成联合分布,但文中的参数估计采用了误差较大的最小二乘法,且假设16个风向的概率分布类型相同,其合理性有待进一步研究。

本文采用杭州湾大桥观光塔附近玉盘山气象站的风速资料<sup>[9]</sup>,深入分析了极值Ⅱ型分布和极值Ⅲ型的概率曲线相关系数随形状参数的变化规律,探讨它与最优分布类型之间的内在关系。在此基础上,精简求解各风向有效最优分布的计算过程;用联合分布推算观光塔设计基本风速,并与文献<sup>[9]</sup>中传统的非联合分布推算的结果进行比较。

## 1 风速风向联合分布概率

设 $f(\theta)$ 是反映平均风方向影响的风向频度函数, $G_{\theta_i}(u) = P\{U_{\theta_i} < u\}$ 是风向 $\theta = \theta_i$ 条件下事件 $\{U < u\}$ 发生的条件概率,由全概率和条件概率的关系可知,事件 $\{U < u\}$ 的概率为

$$F(u) = P\{U < u\} = \sum_{i=1}^n f(\theta_i) G_{\theta_i}(u) \quad (1)$$

式中: $F(u)$ 为最大风速的分布函数; $n$ 为风向划分的区域数,一般取16。

由分布函数和概率密度函数的关系可知,风速

风向的联合概率密度函数为

$$p(u, \theta) = f(\theta) g_{\theta}(u) \quad (2)$$

式中: $g_{\theta}(u)$ 为 $\theta$ 方向的风速概率密度函数,并且有 $g_{\theta}(u) = dG_{\theta}(u)/du$ 。

## 2 风速的分布拟合

### 2.1 极值风速采样

杭州湾跨海大桥位于钱塘江河口与杭州湾交汇处,全长36 km,观光塔位于K66+120 m处。观光塔结构(含顶部杆)总高度146.5 m,是典型的风敏感性结构。由于观光塔靠近杭州湾入海口,观光塔水面上空的气象条件必定与两岸陆地上空的气象条件有一些差异。为了解桥位水面上空的气象条件和计算基本风速,在杭州湾中心岛屿玉盘山上建立了自动气象站进行气象观测。为更精确地拟合风速的分布,应充分利用气象资料中的风速数据,阶段采样法的时间间隔越小越好。文献<sup>[9]</sup>中给出了整理后的玉盘山气象站近3年10 m高10 min平均最大风速及相应风向(1999-5~2002-3),而要用日最大平均风速的阶段极值样本进行分布极值拟合,则需要各个风向的日最大平均风速。本文将所有日最大风速按风向归类,这样处理严格来说不符合阶段极值采样原理,但这样的处理是偏于安全的。

### 2.2 风速分布的概率和极大似然估计

目前,最大风速的分布拟合采用极值分布。数理统计中的Fisher-Tippet定理说明,极值分布的渐近形式不取决于原始分布的精确形式,极值的渐近分布趋向收敛于3种极值分布(极值Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型),3种分布的数学表达式、位置参数和尺度参数的极大似然估计公式见文献<sup>[5-6]</sup>,限于篇幅,不再赘述。

### 2.3 形状参数 $r$ 的确定

一种分布曲线能否真正代表变量的分布规律,可以通过拟合度的检验来判定。3种极值分布之间判定何者为最优,也要通过拟合度来检验。对于风速资料这样的小样本拟合,采用概率曲线相关系数 $r_D$ 来检验, $r_D$ 值越大,说明拟合效果越好。为取得最佳的拟合效果,形状参数 $r$ 的确定并不是按照极大似然原则,而是将原本用于检验的方法用于确定形状参数,让 $r_D$ 取得可能的最大值,然后再按照极大似

然原则估计位置参数  $b$  和尺度参数  $a$ 。

概率曲线相关系数定义公式为

$$r_D = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) [M_i(D) - \bar{M}(D)]}{[\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (M_i(D) - \bar{M}(D)^2)]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i$ ;  $\bar{M}(D) = \frac{1}{n} \sum M_i(D)$ ;  $n$  为样本容量;  $D$  为要检测的分布; 数值  $X_i$  来源于原样本的从小到大的顺序排列;  $M_i(D)$  为第  $i$  小值分布的中值, 由式(4)求解

$$\left. \begin{aligned} &\int_0^1 t^{r-1} (1-t)^{r-1} dt = \frac{1}{2} \\ &\int_0^1 t^{r-1} (1-t)^{r-1} dt = \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$
$$G_0[M_i(D)] = \lambda$$

式中:  $t$  为变量;  $\lambda$  为常数。

2.4  $r_D-r$  曲线变化规律

根据文献[7], 概率曲线相关系数  $r_D$  只与形状参数  $r$  有关, 与其他参数无关。下面探讨不同分布类型相关系数随形状参数的变化规律, 简称  $r_D-r$  曲线。利用式(3)、式(4)及极值分布函数的表达式, 采用玉盘山的气象资料, 分析了不同风向极值 II 型和 III 型  $r_D-r$  曲线的变化规律。 $r_{D1}$ 、 $r_{D2}$ 、 $r_{D3}$  为极值 I、II、III 型分布的概率曲线相关系数;  $r_2$ 、 $r_3$  为极值 II、III 型分布的形状参数。

从表 1 和图 1(a) 可以看出, 对于玉盘山气象站 N 方向的样本数据,  $r_{D2}-r_2$  曲线随  $r_2$  单调递增, 不存在  $r_{D2}$  的最大值, 这和文献[6] 指出的是不一样的。经计算,  $r_2 > 100$  后,  $r_{D2}$  变化很小, 且逼近于极值 I 型的  $r_{D1}$  (0.913 4)。其他风向(除 W 方向外)的极值 II 型  $r_{D2}-r_2$  曲线也存在相同的规律。

从图 1(b) 中可以看出, N 方向极值 III 型  $r_{D3}-r_3$  曲线  $r_3$  从 2 到 100 单调递减, 这是前述文献没有指出的。但在  $r_3 = 2$  时, 极大似然法可能失效, 即出现风速样本最大值大于估计参数的现象。经检验, 极大似然法有效时,  $r_{D3}$  最大值为 0.975 9, 比极值 I 型的  $r_{D1}$  要大。其他风向(除 W 方向外)的极值 III 型  $r_{D3}-r_3$  曲线也存在相同的规律。

从以上分析可见, N 方向风速样本的极值 III 型拟合效果最好, 极值 II 型最差, 极值 I 型居中。图 2 是玉盘山气象站 N 方向的样本经验分布和极值分布拟合曲线, 从中也可以看出相同的规律。其他风向(除 W 方向外)的风速样本也存在类似规律。

表 1  $r_{D2}$  随  $r_2$  的变化规律

$r_2$	100	200	500	1 000	2 000
$r_{D2}$	0.911 6	0.912 5	0.913 1	0.913 3	0.913 3

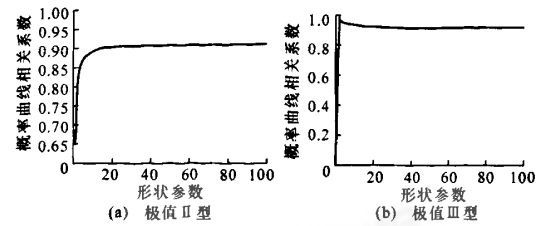


图 1 玉盘山气象站 N 方向的  $r_D-r$  曲线

从图 3 和表 2 可知, 对于 W 方向样本数据,  $r_D-r$  曲线存在相反的规律: 极值 II 型  $r_{D2}$  从 2 到 100 单调递减,  $r_{D3}-r_3$  曲线递增,  $r_{D3}$  在  $r_3 > 100$  后,  $r_{D3}$  变化很小, 且逼近于极值 I 型  $r_{D1} = 0.984 0$ 。经检验, 极大似然法有效时,

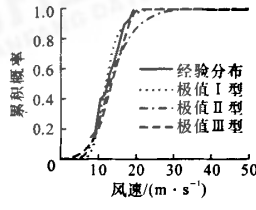


图 2 玉盘山气象站 N 方向的样本经验分布和极值分布拟合曲线

最大极值 II 型的  $r_{D2} = 0.988 6$  比极值 I 型的  $r_{D1} = 0.984 0$  要大, 所以, W 方向风速样本的极值 II 型拟合效果最好, 极值 III 型最差, 极值 I 型居中。

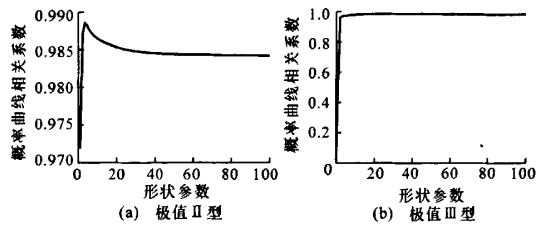


图 3 玉盘山气象站 W 方向的  $r_D-r$  曲线

表 2  $r_{D3}$  随  $r_3$  的变化规律

$r_3$	100	200	500	1 000	2 000
$r_{D3}$	0.983 7	0.983 8	0.983 9	0.983 9	0.984 0

由此可见, 各方向的最优分布可能是极值 III 型, 也可能是极值 II 型, 极值 I 型的拟合效果总是居中。极值 II 型和极值 III 型的  $r_D-r$  曲线总是一个单调递增, 一个  $r$  从 2 到 100 单调递减。 $r_D-r$  曲线单调递增分布的拟合效果是最差的, 其拟合效果随  $r$  增大, 逼近极值 I 型。 $r_D-r$  曲线  $r$  从 2 到 100 单调递减分布的拟合效果是最好的, 但  $r = 2$  时, 极大似然法可能失效, 可通过逐步迭代的方法求解极大似然法有效的最大  $r_D$  值。

3 联合分布的求解步骤

基于以上分析, 可以大大精简求解各方向最优分布类型和参数的过程。在求解各风向最优分布时, 首先求解极值 II 型和 III 型分布的  $r_D-r$  曲线, 确定

最优分布类型为  $r_D-r$  曲线单调递减的分布;然后用逐步迭代的方法求解极大似然法有效时的最大  $r_D$  值及相应的形状参数  $r$ 、位置参数  $b$ 、尺度参数  $a$ 。由于  $r_D-r$  曲线  $r$  从 2 到 100 变化平缓,在迭代过程中,令  $\Delta r=1$  已经足够精确。详细的求解步骤见图 4。基于图 4 的步骤,编制了相应的计算程序。求解结果如表 3 和表 4 所示。

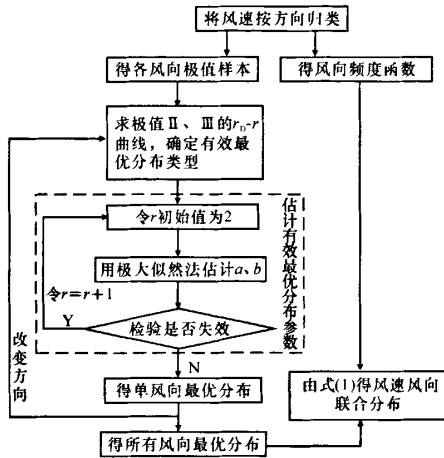


图 4 风速风向联合分布的求解步骤

表 3 玉盘山气象站风向频度

风向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
数据长	28	28	53	41	34	94	199	40
频度/%	3.97	3.97	7.52	5.82	4.82	13.33	28.23	5.67
风向	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
数据长	8	16	27	17	9	4	54	53
频度/%	1.13	2.27	3.83	2.41	1.28	0.57	7.66	7.52

注: N 为正北; NNE 为北偏东 22.5°; NE 为北偏东 45°; ENE 为北偏东 67.5°; E 为正东; ESE 为东偏南 22.5°; SE 为东偏南 45°; SSE 为东偏南 67.5°; S 为正南; SSW 为南偏西 22.5°; SW 为南偏西 45°; WSW 为南偏西 67.5°; W 为正西; WNW 为西偏北 22.5°; NW 为西偏北 45°; NNW 为西偏北 67.5°。

从表 4 中  $\max(x)$  和  $b$  值的比较来看,极值 III 型的极大似然估计都没有失效,又因为所有的风速样本都大于 0, W 方向的  $b$  值小于 0, 所以极值 II 的估计也是有效的。

#### 4 观光塔基本风速的确定

文献[9]采用年最大风速样本,不考虑风向频度,用皮尔逊 III 型和极值 I 型计算了基本风速。文献[9]用极值 I 型比皮尔逊 III 型计算的基本风速要大,出于安全考虑,采用了极值 I 型的计算结果,给出的玉盘山处基本风速  $V_{10}=39.0\text{ m/s}$ 。基于玉盘

表 4 玉盘山气象站各风向最优极值分布类型及参数

风向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
极值类型	III	III	III	III	III	III	III	III
$r_{D1}$	0.913 4	0.859 7	0.918 8	0.930 7	0.959 3	0.930 1	0.892 5	0.890 4
$r_{D2}$	0.911 6	0.857 7	0.916 6	0.930 2	0.958 7	0.928 4	0.890 1	0.888 5
$r_{D3}$	0.975 9	0.931 3	0.984 8	0.939 6	0.964 8	0.971 7	0.961 0	0.957 5
$r$	2	3	3	3	5	2	2	3
$b$	20.760 1	19.637 0	20.841 8	19.953 7	27.675 7	18.618 8	21.998 3	20.126 9
$\max(x)$	19.900 0	17.600 0	19.100 0	19.300 0	21.100 0	18.500 0	21.900 0	18.800 0
$a$	8.549 8	7.496 7	9.542 8	10.325 7	17.808 6	7.922 9	9.705 1	8.374 5
风向	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
极值类型	III	III	III	III	II	III	III	III
$r_{D1}$	0.962 6	0.875 1	0.962 9	0.936 4	0.984 0	0.752 5	0.895 1	0.889 7
$r_{D2}$	0.961 9	0.873 4	0.962 7	0.935 3	0.988 6	0.751 5	0.892 8	0.887 5
$r_{D3}$	0.989 2	0.937 8	0.964 1	0.967 7	0.983 7	0.799 8	0.965 3	0.961 6
$r$	2	2	9	2	3	2	2	2
$b$	18.735 1	20.630 9	39.847 4	17.335 6	-8.658 4	15.342 2	23.050 3	21.171 3
$\max(x)$	17.400 0	18.800 0	23.400 0	16.600 0	22.400 0	13.700 0	22.600 0	20.600 0
$a$	8.382 8	11.307 1	30.490 4	6.752 2	18.303 5	4.658 5	11.124 7	9.211 7

注:表中数据是在风速样本的单位为 m/s 的情况下得出的。

山气象站 1999 年 5 月至 2002 年 3 月的实测风速,采用日最大风速和风速风向联合分布计算基本风速。文献[10]的期望风速  $u_T$  与重现期的关系为

$$u_T = F^{-1}(1 - 1/T) \quad (5)$$

本文可以得到相同的表达形式,所不同是文献

[10] 中的  $F(u_T)$  是不考虑风向频度的风速分布函数,而在本文中  $F(u_T)$  是式(1)所示的风速风向联合分布。式(5)中  $1 - 1/T$  为保证率,设计基准期为 100 年时,取保证率为:  $1 - 1/(100 \times 12) = 0.999\ 2$ 。于是 100 年重现期的设计基本风速的计算公式为

$$u_T = F^{-1}(0.999\ 2) \tag{6}$$

由于本文中  $F(u_T)$  比较复杂,所以上式的求解采用编程迭代求解。

同理可得其他重现期的保证率(表 5)。由表 5、表 6 可见,由联合分布得到的 100 年重现期的设计基本风速比文献[9]中得到的结果要低,这说明不考虑风向频度的传统方法是偏安全的。

表 5 不同重现期的基本风速

重现期/年	100	50	30	20	10
保证率	0.999 2	0.998 3	0.997 2	0.995 9	0.991 9
基本风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	36.95	26.75	22.60	21.85	21.15

表 6 本文方法与文献[9]的比较

方 法	文献[9]方法	本文方法
极值样本	实测和推延	玉盘站实测
采样方法	采用年最大风速	采用日最大风速
风向影响	不考虑风向频度	风速风向联合分布
分布类型	采用极值 I 型	采用极值 I、II、III 型

5 结 语

(1)应用日最大风速和联合分布模型推算基本风速。采用日最大风速可以用短期内实测的有限风速资料进行分析,而用临近气象站资料进行推延的方法可能产生较大误差。

(2)极值 II 型和 III 型的  $r_D-r$  曲线一个单调递增,一个  $r$  从 2 到 100 单调递减。 $r_D-r$  曲线递增的分布拟合效果最差,且随形状参数增大,拟合效果逼近极值 I 型; $r_D-r$  曲线递减分布的拟合效果是最好的;极值 I 型的拟合效果居中。所以,在求解有效最优分布时,可首先求解极值 II 型和 III 型的  $r_D-r$  曲线,确定最优分布类型为  $r_D-r$  曲线递减的分布,然后用逐步迭代的方法,求解极大似然法有效时的最大  $r_D$  值及相应的形状参数  $r$ 、位置参数  $b$ 、尺度参数  $a$ 。由于  $r_D-r$  曲线  $r$  从 2 到 100 变化平缓,在迭代过程中,令  $\Delta r = 1$  已经足够精确。

(3)各方向的最优分布可能是极值 III 型,也可能是极值 II 型,但以极值 III 型为主。平均风速在同一地点不同风向时,可以服从不同的分布类型,更加符合实际情况,说明文献[5]中的假定基本合理。

(4)将所有日最大风速按风向归类,得到各风向的日极值风速样本,这样处理严格来说不符合阶段极值采样原理,但这样得到的结果是偏安全的,建议以后的气象资料宜提供每日各方向最大风速。

参考文献:

References:

[1] 刘志文,陈艾荣,贺拴海. 风荷载作用下斜拉桥概率有限元分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):53-57.  
LIU Zhi-wen, CHEN Ai-rong, HE Shuan-hai. Probabilistic finite element analysis of cable-stayed bridges under wind[J]. Journal of Chang'an University, Natural Science Edition,2004,24(2):53-57.

[2] 庞加斌,王达磊,陈艾荣,等. 桥面侧风对行车安全性影响的概率评价方法[J]. 中国公路学报,2006,19(4):59-64.  
PANG Jia-bin, WANG Da-lei, CHEN Ai-rong, et al. Probability evaluating method of bridge deck side wind effects on driving safety[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(4):59-64.

[3] Gu M, Xu Y L, Chen L Z, et al. Fatigue life estimation of steel girder of Yangpu cable-stayed bridge due to buffeting [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80(3):383-400.

[4] JTG/T D60-01-2004,公路桥涵抗风设计规范[S].

[5] 葛耀君. 桥梁结构风振可靠性理论及其应用研究[D]. 上海:同济大学,1997.

[6] 赵 林,葛耀君,项海帆. 平均风极值分布极大似然求解及其应用[J]. 土木工程学报,2004,37(6):41-46.  
ZHAO Lin, GE Yao-jun, XIANG Hai-fan. Solution and application of distribution of extreme mean wind speeds by maximum verisimilitude method[J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(6):41-46.

[7] 赵 林,葛耀君,项海帆. 极值风速拟合优化策略[J]. 同济大学学报,2003,31(4):383-388.  
ZHAO lin, GE Yao-jun, XIANG Hai-fan. Optimal policy of extreme wind fitting[J]. Journal of Tongji University,2003,31(4):383-388.

[8] 杨咏昕,葛耀君,项海帆. 风速风向联合分布的平均风统计分析[J]. 结构工程师,2002(3):29-36.  
YANG Yong-xin, GE Yao-jun, XIANG Hai-fan. Statistic analysis of wind speed based on the joint distribution of wind speed and wind direction [J]. Structure Engineers,2002(3):29-36.

[9] 徐文宁,石人光,黄思源,等. 杭州湾交通通道课程可行性研究系列:桥位梯度风速观测、设计风速计算[R]. 宁波:宁波市气象中心,2002.

[10] 陈英俊,于希哲. 风荷载计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1998.