

文章编号: 1000-2022(2001) 03-0410-05

## Monte-Carlo 模拟方法在风工程中的应用

陶立英, 严济远, 徐家良

(上海市气候中心, 上海 200030)

**摘 要:** 用 Monte-Carlo 模拟方法建立了上海的台风年最大风速概率分布, 由此推算的 30 a、50 a 一遇风速(韦伯尔分布)和实测风速值接近。表明由 Monte-Carlo 模拟方法得到的台风年最大风速概率分布较为合理, 在东南沿海台风多发区域, 该方法产生年最大风速概率分布的有力工具。

**关键词:** Monte-Carlo 模拟方法, 台风年最大风速概率分布, 统计推断

**中图分类号:** P444 **文献标识码:** A

风压是建筑结构计算的基本数据, 取值大, 虽安全, 但造价高, 会造成经济上的浪费; 取值小, 造价低, 但不安全。因而在不同概率下风压(风速)取值的合理性研究, 一直受到土木结构和气象工作者的关注。

从 50 年代起, 我国开展风压研究<sup>[1]</sup> 至今, 取得了明显的成效。然而在我国沿海地区作为风压研究基础的原始风速资料存在以下问题: 1) 海面、临近大陆的近海以及一些沿海陆地没有风的观测资料, 因而上述地区在建造石油勘探平台和建筑物的设计时, 无风资料可利用; 2) 沿海有些地区, 虽有风速观测, 但风资料年代较短, 由此用统计方法推断出的风速代表性差, 即推算出的风速和实际风速差异甚大, 因此算出的风压不是明显偏大, 就是明显偏小; 3) 沿海一些大城市虽然风的观测资料甚长, 但由于观测的高度和时距不同, 经过高度和时距的订正后, 风速的失真现象明显。

由于我国东南沿海地区是台风多发区, 年最大风速主要是由台风引起的。对于平均重现期大于 20 a, 台风年最大风速概率分布可以很好近似年最大风速概率分布。应用 Monte-Carlo 方法<sup>[2]</sup> 模拟台风, 建立台风年最大风速概率分布, 推断各重现期风速, 以弥补这些地区存在的风速资料问题, 是一种非常有效的途径。

### 1 Monte-Carlo 方法流程

Monte-Carlo 方法也称随机模拟方法。应用它模拟台风取决于两个方面的原因: 1) 台风是随机现象, 其结构非常相似, 其风场可以由几个关键的特征参数来确定, 如中心气压差  $p$ 、最大风速半径  $R_{\max}$ 、移动速度  $V_T$  等; 2) 历年影响上海的台风的特征参数均有记录, 或者可间接推断得到。

收稿日期: 2001-01-12; 改回日期: 2001-04-26

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 59895410

第一作者简介: 陶立英, 女, 1969 年 8 月生, 硕士, 工程师。

用 Monte-Carlo 模拟方法估计台风年最大风速概率分布主要有 4 个步骤: 1) 应用台风各特征参数的历史记录, 形成各特征参数的概率分布; 2) 基于各特征参数的概率分布随机抽样产生台风特征参数值, 每一组参数组成一个新的模拟台风; 3) 根据台风的风场模式, 计算每个台风在研究点各时次的风速, 取风速中最大值作为此台风在研究点的最大风速, 模拟计算足够多的台风后, 产生一系列最大风速, 它将作为估计台风年最大风速概率分布的基本资料序列; 4) 以模拟计算得到的台风最大风速系列, 通过概率统计方法估计台风年最大风速概率分布。Monte-Carlo 模拟方法流程如图 1 所示。

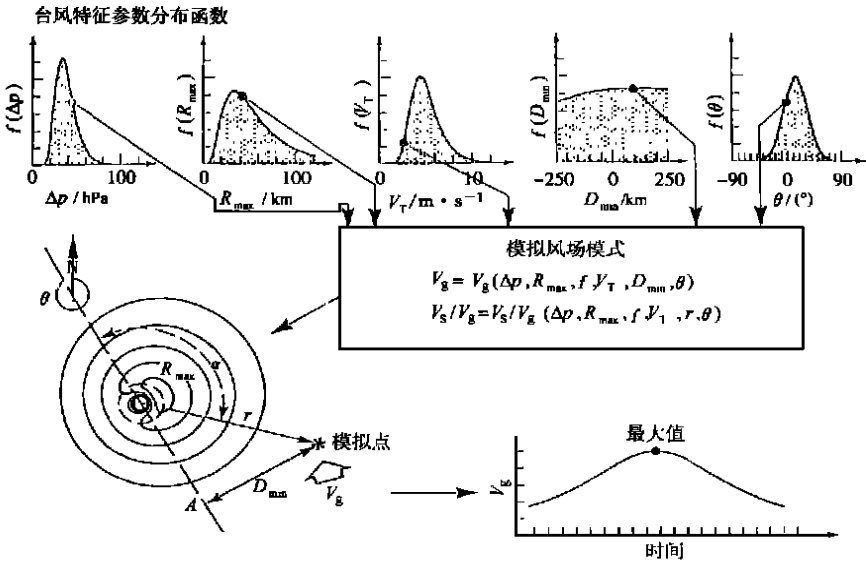


图 1 Monte-Carlo 模拟方法流程

Fig. 1 Flow chart of Monte-Carlo simulation method

2 台风资料的来源及统计

2.1 台风资料的来源

所用台风资料采用中央气象局(1949~1982 年)、国家气象局(1983~1992 年)、中国气象局(1993~1997 年)台风年鉴<sup>[3]</sup>资料共 109 个台风(包括热带气旋)。这 109 个台风影响上海的时间分别为 1~4 d, 每天取 4 个观测时段(02、08、14、20 时), 每个台风过境影响上海平均的时次为 8 次(即 2 d), 少的时候为 5~6 次, 多的时候为 12~16 次。

2.2 台风特征参数的统计

(1) 中心气压差  $p$  是台风中心气压  $p_0$ (年鉴资料) 和外围气压  $p_\infty$ (1 010 hPa) 之差; (2) 台风移动速度  $V_T$  是根据台风移动时, 台风中心前后两个时次的经纬度位置计算得到的; (3) 台风移动方向角是根据台风移动时, 台风中心前后两个经纬度的位置计算得到, 西行为  $0^\circ$  北行为  $90^\circ$  南行为  $-90^\circ$ ; (4) 最小距离  $D_{\min}$  是模拟点与台风移动方向间的垂直距离; (5) 最大风速半径  $R_{\max}$  一部分直接取自台风年鉴实测数据(飞机探测、卫星云图分析); 另一部分根据藤田公式计算得到的。藤田公式为

$$R_{\max} = \frac{2}{(p/(p_\infty - p))^2 - 1} \times r_0$$

式中,  $p$  为模拟点实测气压,  $r$  为台风中心与模拟点的距离, 其他符号与前述相同。

3 台风特征参数的概率分布

用正态分布、对数正态分布、韦伯尔分布、Von Mises 分布<sup>[4]</sup>、泊松分布模型和经验分布拟合各参数的分布。分布的拟合优度检验采取了<sup>2</sup> 拟合优度检验法和经验分布拟合优度检验法, 其中经验分布拟合优度检验法应用了 Kolmogorov-Smirnov 统计量、Anderson-Darling 统计量和 Cramer-von Mises 统计量来度量经验分布和假设的累计分布间的差异。根据以上 4 个统计量的数值, 及样本分位数和拟合分布的分位数之间的差异, 来综合考虑是否可以接受参数为某一类型的分布。检验中置信水平取为 95 %。

参数的分布要经过删改, 剔除从历史资料来看不合理的参数值, 使中心气压差  $p$  范围为 0 ~ 135 hPa, 最大风速半径  $R_{\max}$  范围为 8 ~ 100 km, 台风移速  $V_T$  范围 2 ~ 65 km · h<sup>-1</sup>。

现将上海近海台风出现频率、台风移动方向角、台风中心和模拟点的最小距离、台风中心气压差、台风移动速度和台风最大风速半径选用的概率分布列于表 1。

表 1 上海近海台风特征参数概率分布

Table 1 The characteristic parameters' probability distributions of tropical cyclones near Shanghai

| 参数名称                | 概率分布函数                                                   |
|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 台风出现频率              | 泊松分布( = 2. 102 0)                                        |
| 最小距离 $D_{\min}$     | 经验分布                                                     |
| 台风移动方向角             | Von Mises 分布( = 81. 7 °; $K= 2. 55$ )                    |
| 台风中心气压差 $p$         | 对数正态分布(Lognormal mean 3. 495 8; Log normal rms 0. 459 4) |
| 台风移动速度 $V_T$        | 对数正态分布(Lognormal mean 3. 028 2; Log normal rms 0. 344 0) |
| 台风最大风速半径 $R_{\max}$ | 对数正态分布(Lognormal mean 3. 985 9; Log normal rms 0. 429 4) |

4 台风风场模式

台风风场模式采用 Batts 风场模式<sup>[5]</sup>。

(1) 最大梯度风速为  $V_{gx} = K \sqrt{p - (R_{\max}/2)f}$ 。式中,  $K$  为常系数, 由经验资料求得, 取 6. 72;  $f$  为科氏系数。

(2) 距海面 10 m 高处 10 min 平均最大风速为  $V_{10, R_{\max}} = 0. 865V_{gx} + 0. 5V_T$ 。

(3) 在台风最大风速半径内与台风中心相距  $r$  处距海平面 10 m 的风速为  $V_{10, r}$  内 =  $V_{10, R_{\max}} r/R_{\max}$ 。式中,  $V_{10, r}$  为在直线  $OM$  上与  $O$  相距  $r$  时, 距海平面 10 m 处的风速( $O$  为台风中心,  $OM$  为与台风移动方向成 115 °的直线)。

在台风最大风速半径外与台风中心相距  $r$  处距海平面 10 m 的风速为  $V_{10, r}$  外 =  $V_{10, R_{\max}} (R_{\max}/r)^x$ 。式中,  $x$  根据不同台风在 0. 5 ~ 0. 7 之间变化。

(4) 离台风中心距离为  $r$ , 与直线  $OM$  夹角为  $\theta$ , 距海平面 10 m 处风速为  $V_{10, r} = V_{10, r} - 0. 5V_T(1 - \cos \theta)$ 。式中,  $V_{10, r} = V_{10, r}$  内或  $V_{10, r}$  外。

5 模拟计算结果

我们共模拟了 1 000 个年份共 2 179 个台风。由 Batts 台风风场模式, 计算出了模拟点(上海近海) 10 m 高度的台风年最大风速值, 并绘制成经验分布曲线(图 2)。

由图 2 知, 最大风速达到  $42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 累积频率已达 99 %, 即有 99 % 的年份最大风速小于  $42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据文献和以往的统计结果将上海近海的风速乘以风速减弱系数 0.85<sup>[6]</sup>, 得到沿海 A 类地区的风速序列(从海边向内陆 5 km 处, 建筑规范上称 A 类地区)。A 类地区风速乘以系数 0.88<sup>[7]</sup>, 得到 B 类地区的风速序列(也就是距沿海 5 km 处向市区延伸的郊区地带, 建筑规范上称 B 类地区)。然后通过统计方法得到这两类地区的台风年最大风速概率分布(通过拟合优度检验), 不同重现期的年最大风速值列于表 2。

为了检验用 Monte-Carlo 模拟方法产生的台风年最大风速概率分布的合理性, 将模拟方法得到的各重现期风速和利用 1917~1997 年上海经过高度、时距订正的实测风速序列推算得到的风速及近 40 a 来实际观测到的最大风速值(表 3)进行了比较。

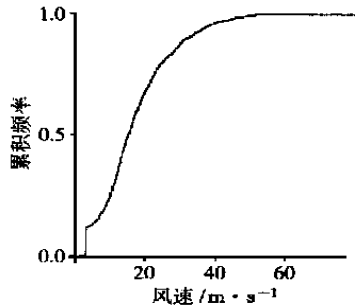


图 2 上海近海 10 m 高度的台风年最大风速经验分布曲线  
Fig.2 Empirical distribution curve of simulated annual maximum wind speed (10 m above sea level) in Shanghai

表 2 模拟方法得到的上海不同重现期年最大风速

Table 2 Simulated annual maximum wind speeds

for different return periods in Shanghai

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

| 分布类型  | 30 a |      | 50 a |      | 100 a |      |
|-------|------|------|------|------|-------|------|
|       | A 类  | B 类  | A 类  | B 类  | A 类   | B 类  |
| 皮尔逊 型 | 29.5 | 26.0 | 32.6 | 28.7 | 36.2  | 31.8 |
| 耿贝尔   | 28.6 | 25.2 | 31.6 | 27.8 | 35.7  | 31.4 |
| 韦伯尔   | 28.0 | 24.7 | 30.5 | 26.8 | 33.6  | 29.5 |

表 3 实测风速得到的上海不同重现期年最大风速

Table 3 Observed annual maximum wind speeds for different

return periods in Shanghai

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

| 分布类型  | 30 a |      | 50 a |      | 100 a |      |
|-------|------|------|------|------|-------|------|
|       | A 类  | B 类  | A 类  | B 类  | A 类   | B 类  |
| 皮尔逊 型 | 34.6 | 30.0 | 36.1 | 31.3 | 38.4  | 33.3 |
| 耿贝尔   | 34.8 | 30.2 | 37.1 | 32.2 | 40.3  | 35.0 |
| 韦伯尔   | 31.6 | 27.4 | 32.6 | 28.3 | 33.9  | 29.4 |

Monte-Carlo 模拟方法得到的风速序列, 用韦伯尔分布算得的 30 a、50 a 一遇的风速比用实测风速序列推算得到的值略小  $1.5\sim3.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 100 a 一遇风速和用实测风速序列相应推算得到的值非常一致。

在 1960~1999 年的 40 a 间, 位于 B 类地区的莘庄、川沙、南汇气象站出现的最大风速分别为 20.0、21.7 和 22.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这表明由 Monte-Carlo 模拟方法得到的台风年最大风速序列, 用韦伯尔分布推算的 30 a、50 a 一遇的年最大风速与实况比较接近。故用 Monte-Carlo 方法模拟得到的大样本风速序列是一种优良的风序列, 同时, Monte-Carlo 方法也为我国东南沿海经常受台风影响的地区, 提供了一种取得年最大风速概率分布的有效工具。此外, 韦伯尔分布最符合年最大风速分布特征, 随着统计年代的延长, 风速增大趋势最小。

## 参考文献:

- [1] 上海中心气象台. 风压论文选辑[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1959.
- [2] Tryggvason B V, Surry D, Davenport A G. Monte-Carlo simulation of hurricanes for the predication of wind-induced response[R]. Engineering Science Research Report. Canada: University of Western Ontario Press, 1976.
- [3] 中国气象局. 热带气旋年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [4] 项静怡, 史久恩, 杜金观, 等. 动态和静态数据处理[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [5] Vickery P J, Twisdale L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predications[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11): 1700~1709.
- [6] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 刘尚培, 项海帆, 谢霁明, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [7] 严济远, 徐家良. 上海气候[M]. 北京: 气象出版社, 1996.

# APPLICATION OF MONTE-CARLO SIMULATION METHOD IN WIND ENGINEERING

TAO Li-ying, YAN Ji-yuan, XU Jia-liang

(Shanghai Climate Center, Shanghai 200030)

**Abstract:** The probability distribution of annual typhoon maximum wind speed in Shanghai is developed through the Monte-Carlo simulation method. The 30-year and 50-year return period wind speed estimations are correspond to the observations. The results show that the annual probability distribution of typhoon maximum wind speed in Shanghai is reliable and the Monte-Carlo method is a good tool for developing annual probability distribution of wind speed in coastlands where are prone to tropical cyclone each year.

**Key words:** Monte-Carlo simulation method; annual probability distribution of typhoon maximum wind speed; statistical estimation