

苏通大桥短期观测流速在设计基准期内的应用

苏 慧, 龚维明, 梁书亭

(东南大学土木学院混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 南京 210096)

[摘要] 对缺乏长期流速资料的地区, 给出了一种通过当地短期流速资料推算设计基准期参考流速的方法; 通过分析苏通长江公路大桥水流速度观测的有关内容, 采用实测的短期实际流速记录建立流速概率分布模型, 按小样本推算极值的办法, 得到大桥的设计基准期的基本流速并进行相关分析, 确认计算结果的合理性, 建立线性回归方程; 为确保大桥在动力荷载作用下的安全应用及苏通大桥工程设计、施工提供可靠的技术指导。

[关键词] 短期观测; 设计基准期流速; 相关分析; 回归方程

[中图分类号] U441; U442 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)07-0042-05

对大跨度桥梁结构进行动力响应分析, 首先需要确定动力荷载。大跨度桥梁下部支撑结构承受的动力荷载主要是随机浪流。在浪流作用下, 结构和浪流荷载都存在大量的不确定性, 因此以可靠度方法进行的研究是比较适合的。很多建设地点可能缺乏流速观测资料, 也可能只有一个短期的流速观测记录, 这样的记录不能直接用于桥梁结构的计算。因此, 如何根据有限的短期资料给出一个合理的设计参考流速, 具有重要的意义。鉴于桥梁的设计使用寿命一般为100~150年, 流速重现期一般取100~150年, 至少要用100年一遇的流速资料进行分析才行。笔者以可靠度理论为基础, 对苏通大桥流速进行设计基准期计算。苏通大桥区域由于冲淤演变、海陆相互作用, 往往导致浪流场的变化, 依靠多布点长期观测不但在经济效益上不可取, 而且很难实际操作。为此, 采用了苏通大桥实测的短期实际流速记录, 按小样本推算极值的办法, 推算出苏通大桥100年, 即设计基准期的流速。

1 流速概率分布模型

极值I型分布是具有指数型原始分布随机变量的极大值渐近分布, 该分布函数的任意次幂均服从

该分布, 这对于计算任意基准期的极值流速是非常方便的, 因而在工程界得到广泛使用。Gumbel分布函数的极值I概率分布函数为^[1]:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] \quad \mu, \sigma \in (0, \infty) \quad (1)$$

式中 μ 为位置参数, σ 为尺度参数。

极值I型分布流速 x 的平均值 $E(x)$ 和标准差 $S_D(x)$ 表示为:

$$\begin{aligned} E(x) &= \mu + 0.577216\sigma \\ S_D(x) &= \frac{\pi}{\sqrt{6}}\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

目前, 在工程上解决估计问题常用的方法有: 矩法、极大似然法、顺序统计法、最小二乘拟合法。笔者采用矩法和极大似然法。

1.1 矩法

矩法是采用样本的 n 阶矩估计母体的 n 阶矩, 假设流速随机变量 x 的期望与均方值可用对应的样本统计值代替, 即可得到分布参数的估计值^[2,3]:

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{X} \\ S_D(x) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 = S \end{aligned} \quad (3)$$

[收稿日期] 2005-09-15; 修回日期 2005-11-25

[基金项目] 江苏省高校自然科学基金研究计划资助项目(04KJD560074); 江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人资助项目

[作者简介] 苏 慧(1968-), 女, 江苏连云港市人, 东南大学土木学院副教授

式中 \bar{X} 为样本的均值； S 为样本的方差，分布参数的估计值为：

$$\hat{\sigma} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \quad (4)$$

$$\hat{\mu} = \bar{X} - 0.577 2 \hat{\sigma} = \bar{X} - 0.450 0 S$$

1.2 极大似然法

极大似然法通过引入似然函数，使其在某组参数上最大，该组参数作为模型参数的极大似然估计。极值 I 分布的概率密度函数为^[2,3] $f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]$ ，得极大似然函数为：

$$L(\sigma, \mu/x_i) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right) \exp\left[-\exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)\right] \right\} = \frac{1}{\sigma^n} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^n x_i + n\mu}{\sigma} - \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)\right] \quad (5)$$

$\frac{\partial \lg L}{\partial \sigma} = 0, \frac{\partial \lg L}{\partial \mu} = 0$ ，则

$$\hat{\mu} = -\hat{\sigma} \lg \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{x_i}{\hat{\sigma}}\right) / n \right],$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \exp\left(-\frac{x_i}{\hat{\sigma}}\right) = (\bar{X} - \hat{\sigma}) \sum_{i=1}^n x_i \exp\left(-\frac{x_i}{\hat{\sigma}}\right).$$

2 基准期设计流速

基准期设计流速是对应于设计基准期内具有一定保证率的特定流速。假设设计的基准期为 t 年，那么对应于 t 年一遇的流速 x_t （即重现期为 t 年），每年的超越概率为 $1/t$ 。结合式 (3) 的上式，设计基准期的设计流速为^[1,4]：

$$u_t = \mu + q_t \sigma \quad (6)$$

其中 $q_t = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{t} \right) \right]$ ，当 t 较大时，取 $q_t = \ln t$ 。得到 μ, σ 后，即可得到设计基准期的参考流速。

3 线性回归方法

瞬时极大流速与平均流速有良好的线性关系，可以利用线性回归方法，先确定其线性关系，然后再确定瞬时极值流速。设 x 是某站平均流速观测记录， y 表示瞬时流速，假定两者的线性关系为：

$$y = ax + b + e \quad (7)$$

式中 a, b 为待定常数， e 为随机误差。于是，可

估计 y 值为 $\hat{y} = ax + b$ 。

1) 确定某观测站的平均流速 x_1, x_2, \dots, x_n 和瞬时流速 y_1, y_2, \dots, y_n 观测记录。

2) 回归方程式中的系数 a, b 由数理统计的现成公式求出^[2]，即：

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

$$a = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \quad (8)$$

式中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}; l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ，以

及 $l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 。

3) 线性相关的显著性检验。根据观测数据计算样本的相关系数^[2]： $\gamma = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} l_{yy}}}$ 。

当 $|\gamma| \leq \gamma_{0.05}$ 时，认为线性关系不显著； $\gamma_{0.05} < |\gamma| \leq \gamma_{0.01}$ 时，认为线性关系显著； $|\gamma| > \gamma_{0.01}$ 时，认为线性关系特别显著。

4) 利用线性回归方程进行预测。流速样本 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的分布参数不可能精确得到；取其估计值得到的设计流速只能是近似值。假设设计基准期的设计流速估计值服从正态分布，如果是无偏估计量，对于给定的置信概率求出的置信区间称为预测区间。

例如，对于置信概率 0.95 的预测区间为 $(-1.96s, +1.96s)$ ；对于置信概率 0.99 的预测区间为 $(-2.58s, +2.58s)$ 。 s 为剩余标准差，表示瞬时极偏离回归直线的平均误差^[2]：

$$s = \sqrt{\frac{s_e}{n-2}} \quad (9)$$

s_e 为瞬间极值的离差平方和与回归平方和之差。

若在回归直线，在 $l: y = ax + b$ 的上下两侧分别做一条与回归直线平行的直线： $l_1: y = ax - 1.96s + b, l_2: y = ax + 1.96s + b$ ，可以预测，在全部观测的数据中，有 95% 的点落在这两条直线之间的带形区域内。

4 苏通大桥实测流速分析

4.1 测流垂线及测点的最大流速

根据长江下游潮位特性分析可知，长江下游大通至南京，年内最高潮位大都发生在 7 月上旬，江

阴以下则多发生于 8~9 月。本次全潮测验选择在农历八月初十至八月十九,分为小、中、大三个代表潮测验。以各断面潮过程线闭合为原则,每次测验从落潮憩流前开始至第三次落憩后结束,每次测验历时约 28 h。大潮测验时间自 9 月 27 日 12:30 开始至 9 月 28 日 14:00 结束。从合理性检查看,流速分布是合理的。东线断面大潮最大涨潮测点流速和最大落潮测点流速分别为 3.05 m/s 和 4.47 m/s

左右,真实反映了大潮的水文特性。东线断面在深泓两侧共布设 7 条垂线,垂线分别为 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, A₁, A₂, A₃, A₄;在主泓范围内布设 1 条垂线,采用固定或移动锚法施测,取洪季东线断面大潮(汛 3)实测数据,共测得 319 组流速数据。表 1 为洪季东线各测点的最大流速,图 1 为洪季东线各测点的最大流速过程图。

表 1 洪季东线断面实测最大流速

Table 1 Top current velocity at east line cross section in cataclysm occasion

时间	12: 30	13: 00	13: 30	14: 00	15: 00	16: 00	17: 00	18: 00	19: 00	20: 00
水深/m	34.0	6.5	7.5	36	20.7	37.5	23.0	20.0	35.3	18.0
测点最大流速/m·s ⁻¹	4.47	1.68	2.33	3.05	2.00	0.65	1.06	2.22	2.71	3.49
时间	21: 00	22: 00	23: 00	0: 00	0: 30	1: 00	2: 00	3: 00	4: 00	5: 00
水深/m	38.5	34.3	33.0	36.0	14.0	34.8	40.5	27.8	29.8	22.0
测点最大流速/m·s ⁻¹	3.18	3.65	3.30	3.14	1.85	1.23	2.87	2.14	1.01	0.92
时间	6: 00	7: 00	8: 00	9: 00	10: 00	10: 30	11: 00	12: 00	13: 00	14: 00
水深/m	19.0	37.8	36.0	35.3	16.8	27.0	34.8	34.0	34.0	33.8
测点最大流速/m·s ⁻¹	2.37	2.85	3.30	3.04	2.75	3.94	4.00	3.63	3.56	2.63

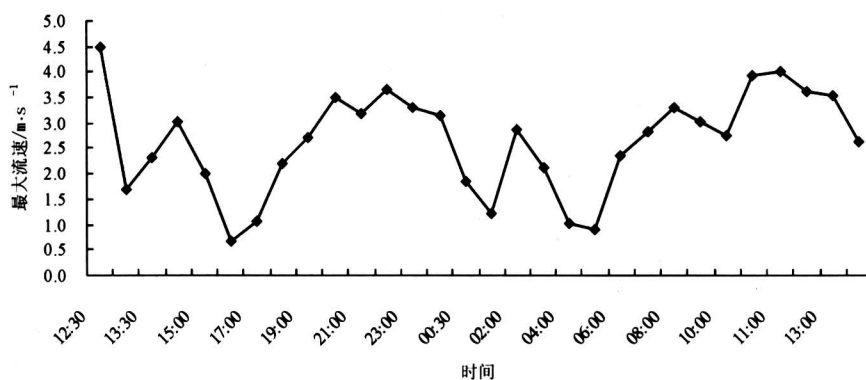


图 1 洪季东线系列 1 各测点的最大流速过程图

Fig. 1 Course figure of top current velocity at east line cross section in cataclysm occasion

4.2 流速概率分布模型讨论

当 $\bar{X} = 2.634$, $S = 0.964$ 时,分布参数的估计值为:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.752,$$

$$\hat{\mu} = \bar{X} - 0.577 2 \hat{\sigma} = \bar{X} - 0.450 0 S = 2.200.$$

作为模型参数的极大似然估计,极值 I 分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{0.752} \exp\left(-\frac{x-2.2}{0.752}\right).$$

$$\exp\left[-\exp\left(-\frac{x-2.2}{0.752}\right)\right],$$

得极大似然函数为:

$$L(\sigma, \mu/x_i) = \frac{1}{\sigma^n} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^n x_i + n\mu}{\sigma} - \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)\right] = \frac{1}{0.752^n}.$$

$$\exp\left[\left(\frac{-\sum_{i=1}^n x_i + 2.2n}{0.752} - \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_i - 2.2}{0.752}\right)\right)\right]$$

4.3 设计基准期的参考流速

取 $q_i = \ln t$, $u_i = \mu + q_i \sigma = 2.2 + 0.752 \times \ln 12t$, 设计基准期平均最大流速见表 2。

表 2 设计基准期平均最大流速

Table 2 Average top current velocity of reference period

设计基准期/a	30	50	100	150
平均最大流速/m·s ⁻¹	6.626	7.011	7.531	7.837

表 3 东线各迹线（落潮）基准期最大流速、设计流速

Table 3 Reference period's top current velocity and devise current velocity at east line of every trail m/s

断面	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线	东迹线
	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#
平均值	1.675	1.665	1.740	1.569	1.527	1.557	1.754	1.897	1.912	1.791	1.975	1.927
基准期最大值（100 年）	7.007	6.997	7.072	6.901	6.859	6.889	7.086	7.229	8.244	7.123	7.307	7.259
回归计算设计值	7.044	7.028	7.149	6.873	6.805	6.853	7.172	7.403	7.428	7.232	7.530	7.452
相对误差	0.005	0.004	0.010	0.004	0.008	0.005	0.012	0.024	0.098	0.015	0.031	0.027

3) 线性相关的显著性检验。根据观测数据计算样本的相关系数 γ ：

$$\gamma = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}l_{yy}}} = 0.677, \gamma_{0.05} = 0.576, \gamma_{0.01} =$$

0.708。所以瞬时极大流速与平均流速线性关系显著。

4) 利用线性回归方程进行预测：

$$s = \sqrt{\frac{s_e}{n-2}} = \sqrt{\frac{1.507 - 0.692}{12-2}} = 0.285。$$

置信概率 0.95 的预测区间为 $(y_0 - 1.96s, y_0 + 1.96s)$ ，即 $(y_0 - 0.559, y_0 + 0.559)$ 。

若在回归直线， $l: y = 1.618x + 4.334$ 的上下两侧分别做与回归直线平行的直线： $l_1: y = 1.618x + 3.775$, $l_2: y = 1.618x + 4.893$ 。

可见，只有一点落在这两条直线之外区域内，见图 2，系列 1 为瞬时最大流速，系列 2 为 l_1 ，系列 3 为 l_2 。

4.5 沿深度方向设计基准期流速计算

由洪季东线断面大潮（汛 3）实测的 319 组流速数据中可以看出，每组是不同时刻、不同垂线，在水面，深度 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m 及水底的流速；每组最大流速大多为水面的流速；流速基本上沿深度呈线性变化。根据不同深度的平均流

4.4 线性回归方法计算设计基准期流速

1) 取 10 min 东线桥记录（落潮）平均流速 x_1, x_2, \dots, x_n 和瞬时流速 y_1, y_2, \dots, y_n ，见表 3。

2) 确定回归方程式中的系数 a, b ：

$$b = \bar{y} - a\bar{x} = 4.334,$$

$$a = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} = 1.618$$

$$\hat{y} = 1.618x + 4.334。$$

从表 3 结果可以看出，由回归计算的基准期内设计值与基准期最大流速相对误差最大为 0.031，最小为 0.004，在误差容许范围之内。

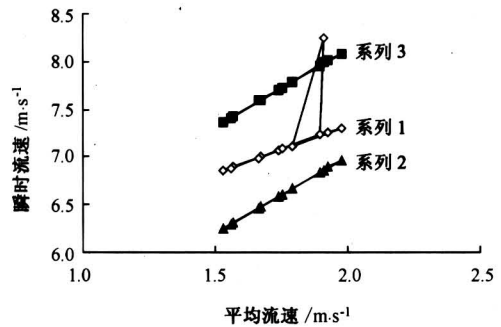


图 2 回归方程预测图

Fig.2 The forecast figure of regression equation

速，按照前面求瞬时极值的方法、线性回归计算方法，可求出不同深度基准期内的瞬时极值、设计值，见表 4。图 3 为不同深度最大流速过程线。

表 4 不同深度基准期最大流速、设计流速

Table 4 Reference period's top current velocity and devise current velocity at difference height m/s

深度/m	水面	0.2	0.4	0.6	0.8	水底
测试最大平均值	2.656	2.584	2.491	2.316	2.114	1.727
瞬时极值（100 年）	7.987	7.915	7.822	7.647	7.445	7.058
基准期设计值	8.631	8.515	8.364	8.081	7.754	7.128
（100 年遇最大值）						

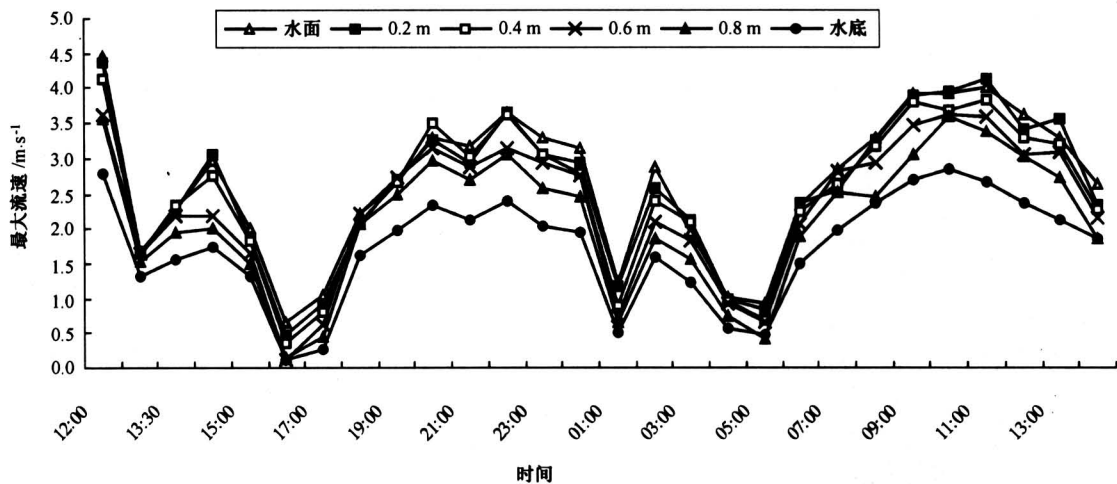


图 3 不同深度最大流速过程图

Fig.3 Course figure of top current velocity at difference depth

参考文献

- [1] 胡文辉, 阮 静. 润扬长江公路大桥桥位风速观测及设计风速计算[J]. 公路交通科技, 2004, (2): 41 ~ 43
- [2] 沈恒范. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996. 90 ~ 111, 195 ~ 202, 276 ~ 289
- [3] 袁子厚, 何英明, 吴桂英. 对数正态分布随机变量在设计基准期内的最大值分布[J]. 中国农村水利水电, 2001, (1): 35 ~ 37
- [4] 金伟良, 沈照伟, 李海波. 结构可靠度分析中设计基准期的敏感度分析[J]. 中国海洋平台, 2003, (10): 15 ~ 18

Short-Range Current Velocity Records to Apply in the Reference Period for Sutong Bridge

Su Hui, Gong Weiming, Liang Shuting

(The Key Laboratory for RC and PC Structures of Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The current velocity of reference period is determined by the local primitive data. A method is introduced to determine the current velocity of reference period through short-range current velocity records for the area that lacks of long-range current velocity records. According to short-range current velocity records of Sutong Bridge the probability distribute mode of the current velocity is established. Presuming the extreme value by way of minority sample, the current velocity of reference period is calculated. Correlation analysis is carried out, the rationality of the calculation is validated and the regression equation is established. The calculated results provide credible technical guide to devise and construct Sutong Bridge and ensure current and wave resistance safety.

[Key words] short-range records; the current velocity of reference period; correlation analysis; regression equation