

合肥市暴雨强度公式的推求研究

王睿, 徐得潜

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:城市暴雨强度公式的准确性直接影响着城市排水管网的规范设计。合肥市原有暴雨强度公式亟需重新修订。对合肥市董铺站 1965~2012 年共 48 年的全部暴雨资料进行分析, 用年最大值法取样, 采用皮尔逊-Ⅰ型分布、指数分布和耿贝尔分布曲线进行拟合, 对频率分析后的数据分别采用了麦夸尔特法、高斯-牛顿法、遗传算法、拟牛顿法、模拟退火法、粒子群算法共 6 种优化算法进行公式参数推求, 最终确定以指数分布配合麦夸尔特法确定的公式精度最好, 公式精度大大优于合肥市原有的暴雨强度公式, 所推求出的暴雨强度公式可用于洪水灾害的危险性分析、城市给水排水设计等供水灾害管理中, 对合肥市的防涝、排涝、排水设施规划和工程设计具有重大意义。

关键词:暴雨强度公式; 麦夸尔特算法; 指数分布; 合肥市

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)01-0071-04

近几年来全球气候变化加剧, 城市局地强暴雨等极端天气频繁出现, 对人们日常生活和工业生产造成了巨大影响, 加上部分城市排水防涝等基础设施建设滞后、调蓄雨洪和应急管理能力不足, 时常出现严重的暴雨内涝灾害。合肥市域原有的设计暴雨强度计算公式为 $q = \frac{3600(1+0.76lgP)}{(t+14)^{0.84}}$, 由合肥市城建局确定于 20 世纪 70 年代, 采用的资料为合肥站 1953~1977 年连续 25a 的雨量资料, 样本年限较短, 该公式编制至今已有 30 余年, 已无法反映当下合肥市的水文现状, 样本选取采用年多个样法, 且缺少 150min 和 180min 的短历时降雨资料, 与最新版《室外排水设计规范》要求不符, 因此有必要依据近年新增的暴雨资料修订合肥市的设计暴雨强度公式。

1 降雨资料及其选样

本次重点研究合肥市城区的雨量观测站, 根据地理位置接近合肥市中心的要求, 本文收集了合肥市董铺站 1965~2012 年共 48 年的全部暴雨资料, 计算降雨历时采用 5、10、15、20、30、45、60、90、120、150 和 180min 共 11 个时段, 分别计算出了各个时段下的降雨强度。

暴雨强度资料的选取有多种方法, 包括年最大值法、超定量法和年多个样法等。《室外排水工程设计规范》及文献[1]中均推荐采用年最大值法取样, 采用年最大值法取样既可以简化资料的整理, 又不会降低公式的精度, 一般认为年最大值法需资料 20a 以上^[2], 本次选取的数据完全满足要求。综上, 本文采用年最大值法, 即每年分别选取各个时段的最大雨强值, 并按照从大到小对原始降雨资料进行排列。

2 降雨资料的频率调整

暴雨强度公式中, 常用的理论频率曲线是皮尔逊-Ⅰ型曲线、指数分布曲线和耿贝尔分布曲线^[3]。

合肥市原设计暴雨强度公式所采用的是皮尔逊-Ⅰ型曲线, 本文为了选择最合适的配线形式, 采用最小二乘法对指数分布和耿贝尔分布进行求解, 在确保绝对均方差最小的前提下进行参数求解。至于皮尔逊-Ⅰ型分布则可通过插值的反复试算, 不断调整 C_s 和 C_u 的值, 使精度尽量提高。各分布拟合的 $p-i-t$ 表数据见表 1。

皮尔逊-Ⅰ型分布的平均绝对均方差为 0.056, 平均相对均方差为 0.052。指数分布的平均绝对均方差为 0.063, 平均相对均方差为 0.081。耿贝尔分布的平

表1 3种分布分别拟合的 $p-i-t$ 表
Table1 $p-i-t$ data obtained by 3 different distributions

| i / mm | t / min | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | p / a | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| 2 | | 1.937 | 1.696 | 1.458 | 1.268 | 1.004 | 0.795 | 0.650 | 0.497 | 0.407 | 0.346 | 0.305 |
| | | 1.864 | 1.662 | 1.411 | 1.244 | 1.003 | 0.796 | 0.654 | 0.487 | 0.392 | 0.328 | 0.286 |
| | | 2.042 | 1.742 | 1.478 | 1.306 | 1.056 | 0.838 | 0.690 | 0.512 | 0.412 | 0.345 | 0.300 |
| 3 | | 2.270 | 1.974 | 1.690 | 1.480 | 1.180 | 0.936 | 0.767 | 0.582 | 0.473 | 0.400 | 0.351 |
| | | 2.194 | 1.932 | 1.638 | 1.454 | 1.179 | 0.939 | 0.774 | 0.575 | 0.460 | 0.383 | 0.333 |
| | | 2.346 | 1.993 | 1.690 | 1.501 | 1.219 | 0.971 | 0.802 | 0.595 | 0.475 | 0.396 | 0.344 |
| 5 | | 2.676 | 2.295 | 1.950 | 1.725 | 1.393 | 1.108 | 0.913 | 0.681 | 0.547 | 0.458 | 0.400 |
| | | 2.609 | 2.272 | 1.925 | 1.719 | 1.401 | 1.119 | 0.925 | 0.687 | 0.546 | 0.453 | 0.392 |
| | | 2.684 | 2.272 | 1.927 | 1.718 | 1.400 | 1.120 | 0.928 | 0.687 | 0.545 | 0.453 | 0.393 |
| 10 | | 3.216 | 2.702 | 2.273 | 2.038 | 1.675 | 1.336 | 1.109 | 0.808 | 0.638 | 0.529 | 0.457 |
| | | 3.173 | 2.734 | 2.315 | 2.078 | 1.701 | 1.363 | 1.129 | 0.839 | 0.662 | 0.547 | 0.471 |
| | | 3.109 | 2.623 | 2.224 | 1.990 | 1.629 | 1.306 | 1.085 | 0.803 | 0.633 | 0.525 | 0.454 |
| 20 | | 3.746 | 3.090 | 2.575 | 2.337 | 1.950 | 1.560 | 1.303 | 0.931 | 0.724 | 0.594 | 0.509 |
| | | 3.737 | 3.196 | 2.705 | 2.437 | 2.001 | 1.607 | 1.333 | 0.991 | 0.778 | 0.641 | 0.550 |
| | | 3.516 | 2.959 | 2.510 | 2.252 | 1.847 | 1.485 | 1.236 | 0.914 | 0.718 | 0.594 | 0.513 |
| 50 | | 4.440 | 3.584 | 2.956 | 2.720 | 2.309 | 1.854 | 1.558 | 1.089 | 0.831 | 0.675 | 0.571 |
| | | 4.482 | 3.806 | 3.219 | 2.912 | 2.399 | 1.930 | 1.604 | 1.191 | 0.932 | 0.766 | 0.656 |
| | | 4.043 | 3.394 | 2.879 | 2.590 | 2.131 | 1.717 | 1.432 | 1.057 | 0.827 | 0.683 | 0.589 |
| 100 | | 4.961 | 3.949 | 3.233 | 3.003 | 2.578 | 2.074 | 1.751 | 1.206 | 0.910 | 0.732 | 0.615 |
| | | 5.046 | 4.268 | 3.609 | 3.271 | 2.699 | 2.174 | 1.808 | 1.343 | 1.048 | 0.860 | 0.735 |
| | | 4.439 | 3.720 | 3.155 | 2.844 | 2.343 | 1.890 | 1.578 | 1.165 | 0.909 | 0.750 | 0.646 |

注:每一种重现期下的降雨强度数据,从上到下依次是P-III分布、指数分布和耿贝尔分布。

均绝对均方差为 0.067,相对均方差 0.05。由此可知,三种分布的拟合效果差距很小,皮尔逊-III型的适线值与实测值之间的相对均方差及绝对均方差最小,线型相对更为合理。但在实际配线过程中皮尔逊-III型曲线的拟合好坏受人为因素的影响较大,并且笔者在经过后期参数率定时发现,并不是分布拟合的误差越小,公式预测效果就越好,最终公式的精度以及预测效果如何还需算法与拟合结果相互配合,以最终公式的误差为准,本文在配线拟合时皮尔逊-III型分布与指数分布拟合效果十分接近,但在最终公式误差上,指数分布的精度优于皮尔逊-III型分布,最终选择了指数分布。

3 公式的推求

3.1 公式形式的选择

目前我国常用的暴雨强度公式依据《室外排水设计规范》要求,如式(1)所示:

$$i = \frac{A(I + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (1)$$

式中: b 为时间参数; n 为衰减系数; A 为雨力,mm/min; P 为重现期, a 。

3.2 公式推求方法的选择

暴雨强度公式的推导实际上就是无约束条件下的非线性模型的参数率定问题。对于非线性模型,通常都是通过不断地迭代优化最终确定参数^[4]。本文分别选用了麦夸尔特法、高斯牛顿法、遗传算法、拟牛顿法、粒子群算法以及模拟退火法进行推导,以残差平方和最小为原则,通过计算机程序不断迭代,最终确定各个参数。在迭代过程中笔者发现麦夸尔特法迭代最稳定,初值选择好坏的影响较小,其他几种算法的迭代结果对初值十分敏感,其中粒子群算法和模拟退火法迭代经常出现不稳定的状态,不同分布下的计算结果见表2。

表2 三种分布下的各参数
Table2 The parameters of the three distributions

| 方法 | 皮尔逊-型 | | | | 指数分布 | | | | 耿贝尔分布 | | | |
|-------|---------|--------|--------|-------|---------|--------|--------|-------|---------|--------|--------|-------|
| | A | C | n | b | A | C | n | b | A | C | n | b |
| 麦夸尔特法 | 21.9691 | 1.0834 | 0.8668 | 16.61 | 25.8280 | 1.3659 | 0.9126 | 20.51 | 26.5415 | 0.8327 | 0.8795 | 18.19 |
| 高斯牛顿法 | 30.0016 | 0.9387 | 0.9133 | 19.05 | 30.0051 | 0.8057 | 0.8831 | 19.15 | 30.0065 | 1.3841 | 0.9867 | 19.18 |
| 遗传算法 | 35.3186 | 1.0796 | 0.9636 | 21.16 | 39.9999 | 2.2010 | 1.0792 | 26.50 | 38.8565 | 0.8316 | 0.9571 | 21.93 |
| 拟牛顿法 | 21.9682 | 1.0834 | 0.8668 | 16.61 | 25.8260 | 1.3659 | 0.9126 | 20.51 | 26.5404 | 0.8327 | 0.8795 | 18.19 |
| 粒子群算法 | 23.6437 | 1.0835 | 0.8821 | 17.30 | 27.8225 | 1.3598 | 0.9270 | 21.24 | 22.0308 | 0.8348 | 0.8412 | 16.41 |
| 模拟退火法 | 22.9842 | 1.2040 | 0.8758 | 19.42 | 16.3837 | 1.5707 | 0.8291 | 18.11 | 33.7214 | 0.8301 | 0.9224 | 21.33 |

表3 三种分布下各方法所求公式误差
Table3 Errors of the formula of the three distributions

| 方法 | 分布 | 皮尔逊-型分布 | | 指数分布 | | 耿贝尔分布 | |
|-------|----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 绝对均方差 | 相对均方差 | 绝对均方差 | 相对均方差 | 绝对均方差 | 相对均方差 |
| 麦夸尔特法 | | 0.0614 | 0.0427 | 0.0259 | 0.0170 | 0.0283 | 0.0243 |
| 高斯牛顿法 | | 0.0712 | 0.0436 | 0.1316 | 0.1010 | 0.1368 | 0.1158 |
| 遗传算法 | | 0.0647 | 0.0379 | 0.1157 | 0.1098 | 0.0323 | 0.2102 |
| 拟牛顿法 | | 0.0614 | 0.0427 | 0.0259 | 0.0170 | 0.0283 | 0.0243 |
| 粒子群算法 | | 0.0615 | 0.0406 | 0.0261 | 0.0151 | 0.0296 | 0.0325 |
| 模拟退火法 | | 0.0781 | 0.0611 | 0.0544 | 0.0548 | 0.0339 | 0.0258 |

表4 新旧公式误差对比
Table4 Error comparisons between the former and new formulas

| 误差 | i / mm | t / min | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| 最大误差 | | -0.4663 | -0.5043 | -0.3985 | -0.4620 | -0.4370 | -0.4060 | -0.3463 | -0.2448 | -0.1603 | -0.1109 | -0.0845 |
| 原暴雨强度公式 ^[6] | 平均绝对误差 | 0.0080 | -0.1326 | -0.0949 | -0.1397 | -0.1427 | -0.1471 | -0.1244 | -0.0837 | -0.0501 | -0.0297 | -0.0213 |
| | 平均相对误差 | 2.93% | -2.34% | -1.65% | -3.88% | -5.22% | -7.40% | -7.46% | -6.45% | -4.51% | -2.66% | -2.03% |
| | 最大误差 | -0.0323 | -0.0516 | 0.0985 | 0.0165 | 0.0130 | -0.0537 | -0.0513 | -0.0273 | 0.0087 | 0.0256 | 0.0288 |
| 新暴雨强度公式 | 平均绝对误差 | 0.0029 | -0.0327 | 0.0397 | 0.0069 | 0.0022 | -0.0211 | -0.0178 | -0.0064 | 0.0079 | 0.0152 | 0.0143 |
| | 平均相对误差 | 0.34% | -1.45% | 1.30% | 0.25% | 0.31% | -1.14% | -1.03% | -0.26% | 1.27% | 2.58% | 2.61% |

3.3 公式的精度分析

依据《室外排水工程设计规范》中要求,当计算重现期在 0.25~10a 时,在一般强度的地方,平均绝对方差不宜大于 0.05mm/min。在较大强度的地方,平均相对方差不宜大于 5%^[5]。通过分析三种分布下不同算法的平均绝对方差和平均相对方差,所得结果列于表 3,可以得出在指数分布下用麦夸尔特法推求出的暴雨强

度公式误差最小,精度最好。通过综合比选,确定合肥市暴雨强度公式的最终结果为:

$$i = \frac{25.8280(1+1.3659 \lg P)}{(t+20.5150)^{0.9126}} \quad (2)$$

式中:i 为暴雨强度,mm/min;t 为降雨历时,min;P 为重现期,a。

表 4 列出了新、旧公式在指数分布下的最大误

差、平均绝对误差和平均相对误差,可知新公式在精度上相比原公式明显提高。笔者在计算时发现,合肥市原暴雨强度公式在各个重现期下的误差基本都为负值,说明原公式计算结果偏小。通过对比合肥市三十年间的降雨量变化可以发现不同类型降雨的发生频率和发生次数明显增加,新公式因为选取的是合肥市董铺站1965~2012年共48年的全部暴雨资料,因此实用性更好更符合合肥市目前的水文特性。

4 结论

本文通过对比皮尔逊-Ⅲ型分布、指数分布和耿贝尔分布下所推求出的公式精度,最终确定在指数分布下利用麦夸尔特法推求的公式为最优解,所求出的公式的绝对均方差为0.0259,相对均方差为0.017,完全满足规范要求,公式合理有效。由误差对比可以发现,新公式相对原公式精度大大提高,原公式甚至在部分时段的绝对误差已经无法满足规范要求,新公式推求过程中所采用的雨量资料更新,公式结果误差更小,因此预测性更好,更能反映合肥市当下的水文条件。

参考文献:

- [1] 邓培德. 城市暴雨两种选样方法的概率关系与应用评述[J]. 给水排水, 2006,(6). (DENG Peide. Review on probability and application of two sampling methods for urban storm [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006,(6). (in Chinese))
- [2] 邓培德. 暴雨选样与频率分布模型及其应用[J]. 给水排水, 1996,(2). (DENG Peide. Establishment and application of mathematical model for storm sampling and frequency distribution [J]. Water & Wastewater Engineering, 1996,(2). (in Chinese))
- [3] 夏宗尧. 编制暴雨强度公式中应用P-Ⅲ曲线与指数曲线的比较[J]. 中国给水排水, 1990,(3). (XIA Zongrao. The comparison between the application of Pearson-Ⅲ curve and exponential curve in deriving the storm intensity formula [J]. China Water & Wastewater, 1990, (3). (in Chinese))
- [4] 金光炎. 水文水资源计算实务[M]. 南京: 东南大学出版社, 2010. (JIN Guangyan. Hydrology and Water Resources Calculation and Pragmatic [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2010. (in Chinese))
- [5] GB50014-2006, 室外排水规范[S]. (GB50014-2006, Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering [S]. (in Chinese))
- [6] 中国建筑研究院. 建筑给水排水设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (China Architecture Design & Research Group. Design Manual for Building Water Supply and Drainage [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese))

Derivation of Rainstorm Intensity Formula for Hefei City

WANG Rui, XU Deqian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The accuracy of rainstorm intensity formula directly affects the design of city water supply and drainage pipeline network. The original rainstorm intensity formula for Hefei City was determined in the 1970s which has been unable to meet present requirement in the precision and standardization. For the urgent need to revise a new formula, the precipitation data at the Dongpu Station in Hefei City from 1965 to 2012 were analyzed. All the data were taken with the annual maximum sampling method, and the fitting was made by using the method of Pearson-Ⅲ type of distribution, exponential distribution and Gumbel distribution. In order to determine the parameters of the formula, 6 optimization algorithms such as Levenberg-Marquart algorithm, Gauss-Newton method, quasi-Newton method, genetic algorithm, simulated annealing algorithm and particle swarm algorithm were used. Finally, the best formula was ascertained with exponential distribution matching Marquart algorithm. The accuracy is greatly improved relative to the original formula. The new formula can be used in many fields such as risk analysis of flood disasters and design of city water supply and drainage pipeline network. This new formula has great significance to prevent waterlogging, drainage, drainage facilities planning and engineering design of Hefei City.

Key words: rainstorm intensity formula; Levenberg Marquart algorithm; exponential distribution; Hefei City