

基于遗传算法推求城市暴雨强度公式的工程实践

李鹏程, 徐旻辉

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 以A市过去30 a的降雨资料为基础,运用优化适线法对理论频率分布曲线进行参数估算,并借助遗传算法求解超定非线性方程,分别构建了A市的单次暴雨重现期公式和暴雨总量公式。结果表明:相较于传统手段,利用遗传算法推求暴雨公式可大幅缩减人力和时间投入,通过均方根误差和相对均方根误差来评判这些公式的精度也完全符合相关规范的要求,可为各地暴雨公式修订工作提供一定的借鉴。

关键词: 遗传算法;非线性方程;暴雨公式

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0171-05

Engineering Practice of Calculating Formula of Urban Rainstorm Intensity Based on Genetic Algorithm

LI Pengcheng, XU Minhui

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Based on the rainfall data of City A over the past 30 a, the parameters of the theoretical frequency distribution curve are estimated by using the optimized curve-fitting method, and the over-determined nonlinear equation is solved with the aid of the genetic algorithm. The formulas for the recurrence period of single rainstorm and the total amount of rainstorm in City A are constructed respectively. The results indicate that compared to traditional methods, the use of the genetic algorithm to derive the rainstorm formulas significantly reduces the human and time investments. The accuracy of these formulas is judged through the root mean square error and relative root mean square error, which also fully complies with the requirements of relevant norms, and can provide a certain reference for revising the rainstorm formulas in various regions.

Keywords: genetic algorithm; nonlinear equation; rainstorm formula

0 引言

依据联合国下属的政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新发布的第6份评估报告^[1],在过去半个世纪里,地球温度上升的速度创下了2千年来之最。气候的变迁不仅使得全球温度有所上升,还使得极端天气现象变得更为常见。依据卢珊等^[2]的研究,在过去56 a间,全国范围内的极端降水现象显著上升,其中68%的监测站点显示出极端降水量和日数增长的趋势,特别是华东地区,其极端降水量的增长速度位居全国之首。我国2021年的气候状况白皮书指出:极端气候事件正变得频繁、强烈、广泛且同时发生,2021年共经历了36场区域性强降雨,其中汛期降雨强度大、极端性强,尤以河南省的特大暴雨影

响最为严重;全国范围内共出现47次区域性强对流天气,局部地区灾情严重;另外,在秋季,黄河流域多地出现了连续降雨。

2022年6月,住房和城乡建设部办公厅、国家发展改革委办公厅、中国气象局办公室联合发布《关于进一步规范城市内涝防治信息发布等有关工作的通知》(建办城[2022]30号),明确提出了相关规范要求:应尽快更新暴雨强度计算公式,依据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)等相关规范,各地应以最新的降雨统计分析数据为依据,每隔5 a对本地暴雨强度公式进行一次修订;对于那些城市规模较大、降雨分布不均匀的地区,还需依据具体的降雨分布情况,分别编制相应的暴雨强度公式。

近年来,与暴雨公式相关的研究出现了几个方向:有研究者聚焦于在公式中考虑暴雨衰减特性的影响^[2-4];也有研究者着重分析同一地区暴雨公式的变化特征和变化趋势,并以此来判断未来可能发生

收稿日期: 2024-12-18

作者简介: 李鹏程(1986—),男,博士,高级工程师,从事排水设计工作。

的变化^[5-9];还有研究者将暴雨公式和设计雨型相结合,从总雨量和时间分布两方面进行统筹考虑^[10-13]。但对于工程实践来说,如何更加快捷地推求暴雨公式参数且能够达到相关规范的精度要求,是更加现实的需求。

过去,在处理用于描述暴雨强度所采用的非线性方程公式时,通常需依赖经验数据,借助图示分析或与之相配套的计算方法来精确确定相关参数,这个过程较为复杂。伴随着计算机技术的进步,遗传算法、单纯形加速法、迭代法等数值解法被创新性地提出,为求解非线性问题提供了新工具,进而为暴雨公式的推演带来了全新的方法。例如遗传算法被广泛用于飞机尾翼设计、道路边坡稳定性分析、天然气流量分配、水文频率曲线计算等领域^[14-18];蚁群算法用于灌区、城市给水管网配水优化,预测空气质量、优化泵站运行等^[19-24];差分进化算法用于水库、中长期水资源优化调度等^[25-27]。

在城市排水领域,我国专家对如何用新的数值方法来改进城市暴雨公式的计算进行了有价值的尝试。王欢等^[28]将蚁群算法和寻优算法相结合,有效地防止了计算中最优解的遗漏问题;顾春新^[29]运用麦夸尔特法,对暴雨公式的参数进行了推测;王鹏飞等^[30]运用麦夸尔特法和遗传算法来求解宝鸡站的四参数暴雨公式参数,结果显示遗传算法更适用于暴雨公式参数的估计;刘森等^[8]以江苏省南通市为例,运用高斯-牛顿数值法对暴雨强度公式进行深入剖析,获得了显著成果。但在探究遗传算法在暴雨公式研究中的应用方面,实例尚显不足。本文以A市

30 a降雨记录为依据,运用遗传算法,独立推导出该市单次暴雨和总体暴雨公式,以此验证遗传算法在暴雨公式编制中的有效性。

1 降雨数据资料及取样方法

本文采纳了A市气象局管辖下位于市区的某气象站点数据。该站点始建于1966年8月,拥有历史悠久、完整的气象观测资料。常规监测内容涵盖温度、降水、光照、蒸发等多个方面,所使用的监测器械和后期数据处理均严格遵循国家标准。

挑选暴雨数据的主要方式分为年最大值法、非年最大值法2种。采取年最大值法,即依据各类降雨事件的不同持续时长,从多年降雨数据中挑选出每年的降雨量峰值,将这些峰值数据作为分析的基础单元。在数据分析中,非年最大值法包括年超大值法、超定量法和年多样法等不同处理手段。从20世纪60年代后期开始,我国气象和水文机构仅对1 a中的最高数值进行记录,而废弃了多种样值的年度统计。相较之下,仅记录年最大值的方式可使数据获取更为便捷,并且由此构建的数据序列更为长久。根据《室外排水设计标准》附录B,暴雨样本选择,选用年最大值法。

本文的基础数据取样自A市气象观测站公布的1987—2020年期间,涵盖年降雨量最大值的5~180 min时段的降雨系列。该序列数据(见表1)历经观测员初步和复核计算、台站预先审查、气象局官方核对、省级气象管理机构抽样检查等多重工序,确保了高可靠性。

表1 年最大值法选取不同历史降雨强度数据 单位:mm/min

年份	降雨历时/min									
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	180
1987	2.32	2.00	1.73	1.61	1.47	1.25	1.10	0.94	0.80	0.57
1988	1.92	1.49	1.14	0.89	0.67	0.55	0.45	0.33	0.26	0.22
1989	1.86	1.05	0.88	0.74	0.57	0.40	0.33	0.33	0.31	0.24
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2018	2.84	2.38	1.77	1.36	0.96	0.71	0.55	0.37	0.31	0.23
2019	1.82	1.52	1.27	1.06	0.85	0.66	0.52	0.35	0.27	0.19
2020	1.88	1.59	1.57	1.45	1.26	1.16	0.98	0.68	0.53	0.36

2 频率分析

2.1 频率分布曲线的选择

暴雨强度公式的编撰离不开气象部门提供的降雨数据,这些数据的随机性较高,必须借助数理统计手段,寻找其统计规律,以期确立精准的 $P-i-t$ (重现

期—降雨强度—降雨历时)关联,进而精确推导出暴雨强度计算公式。

在我国,常用的频数分布图形态归纳为皮尔逊Ⅲ型分布线、指数分布曲线、极值Ⅰ型分布和正态分布走势图这4种主要类型。

皮尔逊Ⅲ型分布线(又称 $P-Ⅲ$ 曲线)是一种统计

学上的概率分布;用指数分布函数绘制的图形,称为指数分布曲线;极值Ⅰ型分布(又称耿贝尔分布),指的是耿贝尔极值分布曲线所描述的概率分布;正态分布走势图是指数轴上的正态分布走势图。

在城市降雨强度计算领域,前3种方法广受欢迎,是目前国内普遍采用的曲率剖析手段,尤其是P-Ⅲ曲线,其使用范围最为广泛;另外,在南方诸多城市中,指数分布曲线被广泛采用,其显著特点是全部依赖数值解法,省去了曲线拟合的繁琐步骤,使得计算过程变得简洁;近年来,耿贝尔分布这一概率分布模型在处理暴雨强度样本数据方面也得到了广泛应用,特别是在选取历年最大值的系列分析中,展现出了显著的效果。从数学角度看,P-Ⅲ分布曲线是探究这类问题的根本,而指数分布曲线仅是P-Ⅲ曲线在 C_s 值(偏态系数,当 $C_s > 0$ 时,数据分布呈正偏态,即数据的右尾较长,表示大部分数据集中在较小值的一侧)为2这一情况下的特例,担当其偏态分布的下方部分。耿贝尔分布实际上是P-Ⅲ曲线的一个

变种,当其参数 C_s 保持固定时,这种分布便被简化成了仅含2个参数的形式,相应的图形也随之转变为1条直线。在全面评估不同线型特性及其适用范围的基础上,结合A市及其周边地区在选择暴雨频率分布曲线线型时的常规经验,本研究采用P-Ⅲ曲线作为理论频率分布曲线的线型。

2.2 参数估计方法的选定

综合考虑各种方法的优缺点和应用的广泛性,本文采用优化折线法来确定分布曲线的参数。

优化折线法的基本公式为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n |x_i - x_p|^k \tag{1}$$

式中: F 为优化目标函数; x_i 为数据序列的值; x_p 为与 x_i 具有相同频率的频率曲线上的对应值; n 为系列数据个数; k 为幂次。

本文根据离差平方和最小的原则进行适线,优化适线的结果见表2。根据理论频率曲线,最终可得出在各重现期 P 下、不同降雨历时 t 所对应的降水强度 i ,如表3所列。

表2 P-Ⅲ型曲线参数估计表

频率曲线类型	求参方法	参数	降雨历时/min									
			5	10	15	20	30	45	60	90	120	180
P-Ⅲ型	优化折线法	$\hat{x}$	2.44	1.93	1.69	1.46	1.14	0.90	0.75	0.57	0.46	0.34
		C_e	0.31	0.32	0.33	0.36	0.37	0.37	0.40	0.41	0.38	0.33
		C_s	0.70	0.62	0.53	0.55	0.54	0.41	0.58	0.85	0.79	0.77

表3 A市在各重现期P下,不同降雨历时t所对应的降水强度*i*

单位:mm/min

重现期 P/a	降雨历时 t/min									
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	180
100	4.58	3.75	3.29	2.89	2.28	1.77	1.57	1.25	0.96	0.66
50	4.26	3.48	3.07	2.69	2.12	1.65	1.45	1.15	0.89	0.61
30	4.02	3.20	2.82	2.53	2.00	1.56	1.36	1.07	0.83	0.58
20	3.82	3.11	2.74	2.40	1.89	1.48	1.29	1.00	0.78	0.55
10	3.45	2.80	2.47	2.16	1.70	1.34	1.15	0.88	0.69	0.49
5	3.04	2.45	2.17	1.88	1.48	1.17	0.99	0.75	0.60	0.43
3	2.69	2.15	1.90	1.64	1.29	1.02	0.85	0.64	0.51	0.38
2	2.36	1.93	1.65	1.44	1.19	0.91	0.75	0.56	0.46	0.36

3 利用遗传算法推求暴雨公式

3.1 暴雨公式推求方法

依据《室外排水设计规范》(GB 50014—2021),暴雨强度公式的定义为:

$$q = \frac{167A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \tag{2}$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot hm^2)$; P 为重现期,数值区间为0.25~100 a; t 为降雨历时,min,取值区间为1~

120 min,时间跨度越长、持续时间越短,降雨就越猛烈; A_1 为雨力参数,是指一年一度的情况下,1 h内预期发生的最大降雨量,mm; b 为降雨历时修正参数,min; C 为雨力变动参数,反映了暴雨强度的变异性,影响暴雨强度随降雨历时的变化速率;对暴雨强度公式进行对数变换,是希望将原本非线性的降雨历时修正参数转化为线性关系,从而引入一个时间参数,方便曲线拟合; n 为暴雨衰减的速率系数,其与雨水的平均重现时间紧密相连。

国家标准规定中,针对暴雨强度的计算公式采用了一种非线性的数学模型。过往在确定该公式中的相关参数时,通常依赖于经验数据、图表解析,或是将图表解析与计算相结合,又或者采用优选回归分析等复杂手段。相较之下,遗传算法能够高效地解决这类复杂的非线性问题。

3.2 遗传算法求解超定方程原理及步骤

本文采用遗传算法求解超定非线性方程(暴雨公式)。遗传算法的原理及步骤如下:

$$\min Q = \sum_{i=1}^m \|f(c_1, c_2, \dots, c_p; x_i) - y_i\|^q$$

$$a_j \leq c_j \leq b_j, j = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

式中: $\{c_j\}$ 为模型 p 个待优化参数; $\{x_i\}$ 为 m 个 N 维模型输入向量; $\{y_i\}$ 为 m 个 M 维模型输出向量; f 为一般非线性模型, $\{x_i, y_i\}$ 为模型的 m 对输入输出观测数据; $\|\cdot\|$ 为取范数; q 为实常数,视实际优化问题的要求而定; Q 为优化准则函数。

遗传算法推算暴雨公式参数的具体步骤如下:

(1) 框定待调整的参数大概区间,随后对搜寻领域进行编码处理;遗传算法借助编码手段,完成了从表现形式到基因构成的遗传学映射,所述参数的粗略界限便是初始父本群体的范围。观察降水本身,暴雨预测公式中的各项指标并非没有上限,借助我国现行的暴雨强度预测公式,可以大致确定其中参数 A 、 b 、 n 的取值区间。依据实践认知,暴雨强度方程中的种群数量通常设定为 400。在信息编码方面,普遍采用二进制编码体系,简而言之,就是借助二进制数字序列来刻画每个对象的唯一标识。在制定暴雨强度公式时,借助编码让 A 、 b 、 n 这 3 个参数分别对应一定长度的二进制数字序列,也就是将十进制转换为二进制,将这些数字序列拼接起来形成染色体,其长度即为编码长度。搜索的精准度、决策变量的边界范围、上下的限制,共同决定了二进制编码的长度。根据计算,暴雨强度公式中参数 A 、 b 、 n 的编码长度分别为 14、11、11,所以染色体长度为 36。

(2) 父代个体的解码,即把以二进制数字串形式表示的模型参数转换为十进制表示的模型参数。

(3) 构造适应度函数,对于暴雨强度公式,需要构造如下的目标函数:

$$\min G(x) = \left[\frac{A}{(t+b)^n} - i' \right]^2 \quad (4)$$

将式(4)转换成相应的适应度函数:

$$F_i[G(x)] = \frac{1}{1 + G(x)}, G(x) \geq 0 \quad (5)$$

将 A 、 b 、 n 这套数据组合代入式(5),估算出每位参赛者的适合度,随后运用轮盘抉择技巧进行挑选。

(4) 执行到程序的第 4 步骤时,上一轮筛选出的 400 个父代代码各自寻找搭档,成功配对成 200 对父母代码。基于一定的概率,随机挑选 1 对代码,提取它们中间 2 个特定基因 $cs1$ 、 $cs2$ 进行位置互换,由此诞生的 2 个新代码后代会继承这场基因重组的特性。

(5) 进行到第 5 步骤时,后代物种将产生差异。针对后代个体,以 0.025 的概率随机变更二进制编码中的 2 个位置,具体操作是将原本的 1 转换为 0,将原本的 0 转换为 1,这一变异概率是在制定城市暴雨强度方程式时设定的。

(6) 历经逐代繁衍和优化,上一阶段产生的 400 个后代样本将成为新一代的父本,算法行进至第 2 阶段。如此循环往复,不断推动群体整体的适应性向上攀升,从而达成进化过程的最优化。

3.3 遗传算法推求暴雨公式成果

依照上节所描述的技术路径,运用遗传优化技术求解了暴雨强度公式中的关键数值。依照我国相关标准,衡量该公式精度的指标为均方根误差和相对均方根误差。因此,针对 A 市暴雨数据的模型适配效果,将使用绝对均方根误差和相对均方根误差进行评估。具体公式为:

$$s = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - x_{ji})^2 / N \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$f = \frac{s}{\bar{x}} \quad (7)$$

式中: s 为绝对均方根误差; f 为相对均方根误差; x_i 为各历时刻实测暴雨强度值,又称经验频率强度; x_{ji} 为根据各历时理论频率曲线得出的暴雨强度值,又称理论频率强度; N 为各历时的样本容量; $\bar{x}$ 为样本均值。

A 市单一重现期的暴雨公式参数和误差见表 4。

同样使用遗传算法推求 A 市暴雨总公式,此时公式变为 4 参数形式。修改遗传算法代码后,求解超定非线性方程,可以得到 A 市暴雨总公式为:

$$i = \frac{21.990(1 + 0.663 \lg P)}{(t + 13.9)^{0.813}} \quad (8)$$

其计算精度评定见表 5。

由表 5 可知,所推求的暴雨总公式在不同重现期

表 4 单一重现期暴雨公式参数和误差

重现期/ a	A	b	n	绝对均方根误差/ (mm·min ⁻¹)	相对均方 根误差/%
100	59.56	16.01	0.845	0.049 7	3.36
50	68.70	18.05	0.890	0.049 8	3.30
30	55.72	16.72	0.860	0.051 4	2.86
20	63.56	18.00	0.900	0.039 9	2.80
10	63.62	18.79	0.924	0.034 7	2.52
5	55.95	18.75	0.926	0.032 5	2.29
3	49.35	18.10	0.933	0.028 6	2.72
2	44.73	18.27	0.937	0.023 3	4.29

表 5 暴雨总公式参数和误差

误差	重现期/a				
	2~10	2~20	2~30	2~50	2~100
绝对均方根误差/ (mm·min ⁻¹)	0.045 6	0.046 1	0.045 4	0.045 2	0.049 5
相对均方根误差/%	3.521	3.409	3.341	3.334	3.398

下,其精度均满足《室外排水设计规范》(GB 50014—2021)的要求,即“在一般强度的地方,绝对误差不宜大于0.05 mm/min;在强度较大的地方,相对误差不宜大于5%”,推求结果合理。

4 结 语

本论文所收集的超过 30 a 的降雨数据,能够真实反映当前的气候变化模式,并满足使用年最大值法选样的必要条件。研究中使用皮尔逊Ⅲ型分布作为理论分布曲线的线性部分,并通过优化适线法来估计理论曲线的参数。依据频率分析的结果,运用遗传算法分别推导了 A 市单一重现期暴雨公式和暴雨总公式,并且按照《室外排水设计规范》(GB 50014—2021)进行了精度检验。结果表明这 2 种公式都基本满足该规范要求的精度,说明遗传算法在推导暴雨公式方面具有较高的适用性,有着良好的工程实践应用前景。

参考文献:

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[2] 王东升,李伯根,杨洋,等.基于变异特征的 10 min~72 h 综合暴雨公式研究[J].水文,2024,44(10):12-27.

[3] 和鹏飞,赖瑞勋,许树洪,等.基于暴雨衰减特性的江苏镇江市综合暴雨公式研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(8):37-41;80.

[4] 贾卫红,徐卫忠,李琼芳,等.基于暴雨衰减特性的上海市长历时综合暴雨公式[J].水科学进展,2021,32(2):211-217.

[5] 毛明策,吴素良,雷杨娜.陕西主要城市新旧暴雨强度误差变化特征[J].陕西水利,2023(1):62-65.

[6] 吴艳鸣,周荣,田立,等.南通市短历时暴雨强度变化趋势探析[J].江苏水利,2022(9):27-29;33.

[7] 袁冯,张君枝,王冀,等.气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征[J].大气科学学报,2020,43(5):802-809.

[8] 刘森,周荣,辛朋磊,等.南通城市设计暴雨方法比较及公式修订[J].水文,2019,39(4):24-28.

[9] 叶姗姗,俞芳琴,刘俊,等.不同资料年限下城市暴雨公式型式研究[J].水电能源科学,2020,38(5):18-21.

[10] 周荣,吴艳鸣,田立,等.南通市城市暴雨强度公式及设计雨型研究[J].科学技术创新,2022(10):114-118.

[11] 张进丽,任建民.兰州市暴雨强度公式及雨型的推求研究[J].甘肃科技纵横,2020,49(3):10-13.

[12] 袁婷婷,李国芳,王艺晗.常州市区设计暴雨公式及雨型研究[J].水电能源科学,2019,37(6):16-18;131.

[13] 徐雨.泰州市暴雨强度公式修编及设计暴雨雨型研究[D].扬州:扬州大学,2018.

[14] 杨辉,易仁发.基于遗传算法和有限元计算联合仿真的尾翼轻量化设计[J].兵器装备工程学报,2024,45(11):222-229.

[15] 姚爱超.基于遗传算法的路基边坡全寿命周期稳定性计算分析[J].交通科技与管理,2024,5(17):1-3.

[16] 刘明亮.优化遗传算法在天然气管网流量分配过程模拟计算中的应用[J].计量学报,2024,45(6):848-856.

[17] 邓乐斌.基于遗传算法的核电站汽轮机抽汽流量优化计算[J].电工技术,2024(11):220-222;225.

[18] 史彤阳,赵奇,冯淋文.基于遗传算法的水文频率曲线计算应用研究[J].中国高新科技,2024(8):149-150;160.

[19] 李慧.改进蚁群算法的城市地铁应急疏散路径优化[J].中国储运,2024(12):119-120.

[20] 段立伟.基于蚁群算法的大型泵站优化运行研究[J].吉林水利,2024(3):20-23.

[21] 毛丹.基于改进蚁群算法的给水管网优化设计方法研究[J].科学技术创新,2024(3):134-137.

[22] 王蕊.基于改进多目标蚁群算法浑北灌区优化配水研究[J].东北水利水电,2023,41(5):46-49.

[23] 杜沅昊,刘媛华.混合遗传蚁群算法优化 BP 神经网络预测空气质量[J].计算机系统应用,2023,32(4):223-230.

[24] 苗晓锋,刘志伟.具有多种自适应机制的差分进化算法研究[J].自动化技术与应用,2024,43(11):6-9;28.

[25] 何耀耀,胡千帝,张召.基于自适应混沌精英变异差分进化算法的中长期水资源优化调度[J].长江科学院院报,2024,41(10):14-22.

[26] 杨丽娟,薛联青,伍佑伦,等.基于多目标混合蛙跳差分进化算法的皂市水库优化调度[J].中国农村水利水电,2023(11):27-34;44.

[27] 卢珊,胡泽勇,王百朋,等.近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J].高原气象,2020,39(4):683-693.

[28] 王欢,洪光雨,封一波.新暴雨特性下连云港市暴雨公式研究[J].水利规划与设计,2019(5):40-42;65.

[29] 顾春新.城市短历时暴雨强度公式及参数确定方法研究[D].南京:河海大学,2007.

[30] 王鹏飞,王双银,王晶,等.短历时暴雨频率分布及暴雨公式研究[J].水电能源科学,2021,39(1):22-25.