

分类号: TU99

10710-2013129025



# 长安大学

## 硕士学位论文

基于 MATLAB 的佳县暴雨强度公式推求研究

张欣

导师姓名职称	高俊发 教授		
申请学位级别	工学硕士	学科专业名称	市政工程
论文提交日期	2016年5月3日	论文答辩日期	2016年6月10日
学位授予单位	长安大学		



# **Research on deriving Jiaxian Country storm intensity formula based on MATLAB**

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Candidate: Zhang Xin**

**Supervisor: Prof. Gao Junfa**

Chang'an University, Xi'an, China



## 论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 张欣 2016年6月15日

## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名： 张欣 2016年6月15日

导师签名： 高俊岭 2016年6月15日



## 摘 要

在全球变暖的大背景下，随着我国城市化进程的不断加快，城市降雨情况与降雨规律均发生了较大的变化，暴雨造成的城市内涝问题日趋严重，给人们造成了巨大的生命财产损失。科学确定城市雨水排水系统的设计流量，从而合理确定雨水管网的设计口径就显得尤为重要。然而，目前应用于大中城市的暴雨强度公式往往编制于上世纪七八十年代，已经不能适应目前降雨的变化规律，而那些本就没有适合自身降雨规律的暴雨强度公式的小城市，更不能套用邻近大城市的暴雨强度公式。

本文对暴雨强度公式的国内外研究现状进行了探讨，设计了适合佳县的暴雨强度公式推求技术路线。以佳县 21 年的降雨资料为基础，采用年最大值法取样方法，利用 MATLAB 软件分析数据、处理数据，然后通过三种理论频率分布模型（皮尔逊Ⅲ型理论频率曲线、指数分布曲线、耿贝尔分布曲线）对样本资料进行拟合，并选取误差最小的一种模型得出其 T-t-i 关系表。进一步比较了麦夸尔特算法和遗传算法推求暴雨强度公式的效果，最后选用更加高效的麦夸尔特算法进行暴雨强度公式的参数估计。在推求过程中，加入了对原始降雨资料的特大值处理，所以推导出了更精确的佳县暴雨强度公式。

本文基于 MATLAB GUIDE 平台，开发出了一套佳县暴雨强度公式推求软件系统，更加确定了佳县暴雨强度总公式和单一重现期分公式，最终推得重现期 2~20 年的暴雨强度公式： $i = \frac{10.1965(1+0.8959\lg T)}{(t+8.8667)^{0.8371}}$ ，其绝对均方差为 0.0207，相对均方差为 2.6478%；重现期 2~100 年的暴雨强度公式： $i = \frac{12.3145(1+0.8356\lg T)}{(t+10.7631)^{0.8646}}$ ，其绝对均方差为 0.0270，相对均方差为 2.9029%。公式推求精度较高，为佳县雨水排水系统的设计提供了合理和可靠的依据。

**关键词：**暴雨强度公式；佳县；年最大值法；频率分布；MATLAB

## Abstract

With the background of global warming and the accelerating process of urbanization in our country, the pattern of urban rainfall has made a great change. The waterlogging caused by rainstorm is becoming more and more serious, and has made great loss of life and property for the people. Therefore, determining the design flow of city rainwater drainage system, so as to reasonably determine the caliber design of rainwater pipe network is particularly important. However, the rainstorm intensity formulas used in large and medium-sized cities are often developed in the last century seventy or eighty's, and can not adapt to the current rainfall variation. Those small cities with no suitable rainstorm intensity formulas can still not apply the formulas used in adjacent big cities.

This paper discussed the rainstorm intensity formula research status at home and abroad, and designed useful rainstorm intensity formula technical route for Jiaxian. Based on 21 years rainstorm data of Jiaxian, this paper applied annual maximum value method and made use of MATLAB to analyze data. Then the sample data were fitted by three kinds of theoretical frequency distribution curves (Pearson-III distribution, exponential distribution and Gumbell distribution), and the model with least error was used to generate T-t-i table. This paper further compared the results of Marquardt and GA for calculating rainstorm intensity formulas, and chose the more effective algorithm, Marquardt, to evaluate the parameters of rainstorm intensity formulas. In the calculating process, the extraordinary values of raw data were dealt with correctly and that resulted in a more accurate rainstorm intensity formula.

Based on MATLAB GUIDE platform, this paper developed a Jiaxian rainstorm intensity formula calculating system. What's more, Jiaxian rainstorm intensity general formula and single reappearing period formula were determined. Finally, the rainstorm intensity general formula of 2~20 years reappearing period is  $i = \frac{10.1965(1+0.8959\lg T)}{(t+8.8667)^{0.8371}}$ , whose absolute mean square deviation is 0.0207 and relative mean square deviation is 2.6478%; The rainstorm intensity general formula of 2~100 years reappearing period is  $i = \frac{12.3145(1+0.8356\lg T)}{(t+10.7631)^{0.8646}}$ , whose absolute mean square deviation is 0.0270 and relative mean square deviation is 2.9029%. The formulas achieve high accuracy and provide reasonable and reliable foundation for designing Jiaxian rainwater drainage system.



**Keywords** : rainstorm intensity formula; Jiaxian; annual maximum value method; frequency distribution; MATLAB

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 暴雨强度公式研究的背景 .....	1
1.2 暴雨强度公式研究的目的与意义 .....	3
1.3 暴雨强度公式国内外研究现状 .....	3
1.4 暴雨强度公式的主要研究内容 .....	5
1.5 暴雨强度公式推求的技术路线 .....	5
第二章 暴雨强度公式推求的理论基础及样本选取 .....	7
2.1 暴雨强度公式推求的理论基础 .....	7
2.1.1 降水的基本概念 .....	7
2.1.2 降水的几个要素 .....	7
2.1.3 降水的观测方法 .....	8
2.2 暴雨强度公式的样本选取 .....	10
2.2.1 样本的概念 .....	10
2.2.2 暴雨强度公式的选样方法及比较 .....	10
2.2.3 不同选样方法的频率及重现期计算 .....	11
2.2.4 暴雨资料的检验 .....	13
2.3 佳县暴雨资料样本分析 .....	14
2.3.1 佳县概况 .....	14
2.3.2 佳县暴雨资料概述 .....	15
2.3.3 佳县暴雨资料选样 .....	15
第三章 暴雨强度公式频率曲线拟合 .....	17
3.1 随机变量的统计参数 .....	17
3.1.1 均值 .....	17
3.1.2 均方差和变差系数 .....	17
3.1.3 偏态系数 .....	18
3.1.4 矩 .....	19
3.2 经验频率曲线 .....	19
3.3 理论频率曲线 .....	20
3.3.1 皮尔逊III型曲线 .....	20
3.3.2 指数分布曲线 .....	24
3.3.3 耿贝尔分布曲线 .....	26
第四章 暴雨强度公式的推求 .....	29
4.1 麦夸尔特 (Marquitt) 算法 .....	29

4.1.1 麦夸尔特算法的理论推导 .....	29
4.1.2 麦夸尔特算法的电算步骤 .....	31
4.1.3 麦夸尔特算法流程图 .....	32
4.2 遗传算法 .....	34
4.2.1 遗传算法理论 .....	34
4.2.2 遗传算法流程图 .....	36
<b>第五章 暴雨强度公式软件设计与开发 .....</b>	<b>37</b>
5.1 MATLAB 介绍 .....	37
5.1.1 MATLAB 语言的产生和发展 .....	37
5.1.2 MATLAB 的优势与特点 .....	38
5.1.3 MATLAB 图形用户界面工具箱 GUIDE .....	39
5.2 GUI 界面设计原则 .....	39
5.3 开发环境与平台 .....	40
5.4 软件系统需求分析 .....	40
5.5 数据处理流程图 .....	40
5.6 软件系统功能结构图 .....	42
5.7 软件各模块介绍 .....	43
5.7.1 软件欢迎界面 .....	43
5.7.2 系统主界面 .....	43
5.7.3 数据导入和保存 .....	44
5.7.4 频率曲线拟合模块 .....	45
5.7.5 T-t-i 关系表显示模块 .....	46
5.7.6 暴雨强度公式推求模块 .....	46
<b>第六章 佳县暴雨强度公式推求研究 .....</b>	<b>49</b>
6.1 佳县暴雨强度频率曲线拟合及误差分析 .....	49
6.2 佳县暴雨强度公式的误差分析及特大值的处理 .....	50
6.3 特大值处理后的佳县暴雨强度频率曲线拟合 .....	53
6.3.1 特大值处理后的佳县暴雨强度频率模型选取 .....	53
6.3.2 佳县暴雨强度公式 T-t-i 关系表的生成 .....	55
6.4 佳县暴雨强度公式推求 .....	56
6.4.1 遗传算法推求暴雨强度公式 .....	56
6.4.2 麦夸尔特法推导暴雨强度公式 .....	57
<b>第七章 结论与展望 .....</b>	<b>60</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>62</b>

攻读硕士学位期间取得的研究成果.....	65
致谢 .....	66

## 第一章 绪论

### 1.1 暴雨强度公式研究的背景

随着全球气候的变暖，极端天气的变化趋势引起了国内外学者的广泛关注。IPCC 第五次评估报告指出，在过去的 130 年内，全球升温  $0.85^{\circ}\text{C}$ 。期间，陆地增温比海洋快，高纬度地区增温比低纬度地区大，冬半年增温比夏半年明显。过去的 30 年是过去 1400 年来最热的 30 年。中国的气候变暖趋势与全球一致。1913 年以来，我国地表平均温度上升了  $0.91^{\circ}\text{C}$ 。最近 60 年的气温上升尤其明显，平均每十年约升温  $0.23^{\circ}\text{C}$ ，几乎是全球平均水平的两倍。本世纪前十年是我国近百年来最暖的十年。

随着全球气候的变暖，极端降水、干旱、寒潮、台风、冰雹等极端事件也变得越来越。关于气候变暖与极端天气之间的联系，国内外学者也做了大量的研究。KE Trenberth 指出，地面升温会使得地表的蒸发加剧，使得大气保持水分的能力增强，大气中的含水量将会增加<sup>[1]</sup>。地面的蒸发增强，就会更容易发生干旱。同时为了与蒸发平衡，降水也会增长，从而更容易发生洪涝灾害。SC Liu 等研究了各个强度范围的降水量与温度的变化关系后指出，全球平均温度每升高 1K，极强降水量（90%~100%最强强度的降水量）就会增加约 94.2%，而 30%~60%最强强度的降水量将减少约 20%<sup>[2]</sup>。全球气候变暖所引起的平均降水强度的增加幅度要明显大于大气含水能力的增强幅度。由此看来，由气候变暖所引起的极端降水事件确实值得人们的关注。

城市化进程的快速发展也是影响极端天气发生的一个因素。城市化对地面天气最显著的影响就是城市热岛效应<sup>[3]</sup>。城区的地面气温一般比郊区要高，城区陆面变化使得其地表感热通量增加，潜热通量减少，城区的高大建筑物也会影响近地层的风，城区的热容量比郊区要高，白天能比郊区储存更多的热量到夜间释放等。城区的这些特性不仅会影响地面的气温，也会影响城区和周边区域的降水，尤其是强降水的分布变化<sup>[4]</sup>。

在全球变暖的大背景下，随着我国城市化进程的不断加快，中国近百年的气候也发生了明显的变化，21 世纪我国极端降水事件发生的频率和强度也有所增加。

2008 年 8 月 25 日早上，上海地区出现短历时强降雨，1h 最大降雨量超过 110mm，徐家汇累计雨量达到 151.0mm，创下了徐家汇观测站 130 年以来的最大纪录。由于降水过于集中，远远超出上海市每小时 27~36mm 的排水能力，导致全市 170 条段马路积水

10~60cm, 14000 余户民居进水, 市中心部分地区交通一度瘫痪。2008 年 8 月 25 日 7 时至 14 时 30 分, 上海全市共发生各类交通事故 3165 起、车辆抛锚 694 起。2013 年 9 月 13 日午后, 上海再次突降暴雨, 暴雨强度甚至超过了 2008 年的“8.25”暴雨。当天 16 时左右, 浦东率先遭遇强雷暴云团袭击。狂风暴雨中, 源源不断的雨水像从空中直接倾洒, 浦东联洋、洋泾、世纪大道、张杨路等在短短一个小时内便沦为汪洋, 行人、车辆寸步难行, 部分道路积水已经深达腰部。2013 年 9 月 13 日 7 时, 全市测得雨量数据的 461 个测站中有 21 个测站达到大暴雨标准, 有 74 个测站达到暴雨标准, 有 46 个测站达到大雨标准。降雨主要集中在下午 4 时至傍晚 5 时, 最大小时雨量超过 100mm 的有 10 个, 其中小时雨量最大为浦东新区南干线 124mm, 浦东、黄浦、杨浦、长宁等区过程雨量较大、降雨比较集中。由于短时雨量集中, 加之进水口被大风刮落的树叶堵塞, 造成浦东、黄浦、杨浦、长宁等区 80 多条(段)道路短时积水 20~50cm, 部分老小区内道路积水 10~30cm。正逢交通高峰时段的这场暴雨, 给地面交通带来了严重的影响, 也造成了严重的经济财产损失。

2012 年 7 月 21 日~7 月 22 日, 北京地区出现了一次 60 年不遇的大范围大暴雨, 局地特大暴雨的降雨过程<sup>[5]</sup>。强降雨从 7 月 21 日 10 时开始, 到 7 月 22 日凌晨 2 时基本结束。全市平均日降雨量达到  $190.33\text{mm} \cdot (24\text{h})^{-1}$ , 是 1951 年以来的最大值。暴雨中心房山区的河北镇降雨量达到 460.0mm, 城区最大降雨量出现在石景山区模式口, 降雨量达到 328.0mm。最大小时降雨量出现在平谷的挂甲峪, 21 时的小时降雨量达到  $100.3\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此次暴雨使北京城区出现了严重的内涝, 对城市交通造成了极其严重的影响, 还导致了严重的经济损失和人员伤亡<sup>[6]</sup>。

2012 年 6 月~9 月, 陕西大部分地区降雨较常年偏多, 陕北大部分地区偏多 20% 以上, 佳县偏多 100% 以上<sup>[7]</sup>。2012 年 7 月 27 日, 陕北北部出现了局地特大暴雨天气, 佳县的 12h 降雨量达到 217.2mm。强降雨主要集中在 27 日的凌晨 2 时到 13 时, 其中 1h 最大降雨量达到 146.5mm。另外强降雨还出现在佳县西北部的榆林市, 局地降雨量达到 146.5mm。此次降雨过程中佳县的 24h 降雨量是榆林地区有气象记录以来的最大日降雨量。佳县的 27 日降雨量、26 日~28 日 3d 降雨量均突破历史记录, 重现期超过 200 年一遇。此次暴雨造成了严重的城市内涝, 整个县城断水断电, 城区多处市政公共设施遭到严重破坏。210 国道、204 省道、302 省道多处路段被严重水毁, 佳榆路、佳米路、佳吴

路这三条主干道路被全部中断，造成了严重的经济损失。

极端降雨天气对人们的生命财产安全造成了极大的威胁，必须对其加强研究和防御。可以从以下几个方面来应对：（1）加强对高影响极端天气的监测、研究和预警。

（2）加强对高影响极端天气的防御能力建设。例如针对极端降雨天气，为了减少城市内涝和突发洪水的危害性，需要加强防洪工程建设、改善城市排水系统等防御措施<sup>[8]</sup>。

## 1.2 暴雨强度公式研究的目的与意义

要设计城市排水系统，首先要确定设计流量，即要确定当地的暴雨强度公式。目前我国大部分城市的暴雨强度公式资料年限相对较短，导致公式精度低较<sup>[9]</sup>。而且我国大部分城市目前采用的暴雨强度公式大多是上世纪 80 年代所编制，年代比较长久，根据各地现有的降雨资料来看，这些公式已经不能准确反映各地的降雨规律，出现了精度低、误差大的问题。同时当时编制暴雨强度公式的时候只是选取了一些比较有代表性的城市，还有很多城市没有适合自己降雨情况的暴雨强度公式，只能套用附近大中城市的公式，这就大大降低了城市排水系统设计的精度。为了抵御极端降雨天气所带来的危害，重新复核编制大中型城市的暴雨强度公式，编制小城市自己的暴雨强度公式就显得尤为重要。

在排水系统的设计中，确定暴雨强度是首要步骤，即要先确定设计地区的暴雨强度公式。由于地域差异，各地的降雨规律不同，其降雨资料的统计、理论频率曲线模型的适配及最适合当地的参数拟合方法均不相同。本文主要根据佳县 20 年的实测降雨资料，寻求适合佳县降雨规律的理论频率模型，并进行参数的拟合以及佳县暴雨强度公式的编制。本论文所推求的佳县暴雨强度公式不仅能为佳县雨水排水系统的规划及设计提供依据，同时也适用于与佳县有着相似降雨环境的城市的应用。

## 1.3 暴雨强度公式国内外研究现状

利用选取的降雨样本资料，暴雨强度公式的推求工作主要有两部分：一是将降雨资料进行理论频率曲线拟合，进而得出其  $T-t-i$  关系表；二是根据其  $T-t-i$  关系表推求暴雨强度公式的各个参数，进而得出暴雨强度总公式和各个单一重现期的分公式。

由于水文系列总体的频率分布曲线是未知的，通常采用可以拟合较多数水文系列的

分布类型。对于理论频率分布模型，世界各国采用的频率分布曲线不尽相同。国内外专家经过多年研究，主要提出以下几种：皮尔逊Ⅲ型分布、指数分布、耿贝尔分布和 Weibull 分布。英国生物学家皮尔逊在 1985 年提出了一种概括性的曲线族，来拟合实际资料。其后有水文工作者将这种概括性曲线族中的第Ⅲ型曲线引入到水文频率计算中，即皮尔逊Ⅲ型理论频率曲线。我国的水文工作者于二十世纪五六十年代对几种频率分布模型进行了大量的拟合与分析比较，最终认为皮尔逊Ⅲ型理论频率曲线能够较好拟合我国大部分地区的洪水和暴雨等系列<sup>[10-13]</sup>。季日臣、郭晓东将皮尔逊Ⅲ型分布和指数分布从理论上进行了对比，得出指数分布是皮尔逊Ⅲ型分布的一个特例，并利用兰州市的降雨资料进行分析计算，认为指数分布是二参数模型，皮尔逊Ⅲ型分布是三参数模型，指数分布比皮尔逊Ⅲ型分布计算简便且精度高<sup>[14]</sup>。邵尧明、邵丹娜等从我国 58 个大中城市中选取了降水资料完整，并同时具备年最大值法和年多个样法两种选样条件的站点，分别用年最大值法和年多个样法同时选样，并分别采用皮尔逊Ⅲ型分布、指数分布和耿贝尔分布进行拟合和分析计算，最终得出采用年多个样法取样时，三种分布的拟合精度均较高，但皮尔逊Ⅲ型分布所得结果却与另外两种分布有较大差异。采用年最大值法取样时，耿贝尔分布的拟合精度要高于指数分布，皮尔逊Ⅲ型分布的拟合精度最差<sup>[15]</sup>。同时，JK Vrijling<sup>[16]</sup>、GD Salvucci<sup>[17]</sup>、R Garc á-Bartual<sup>[18]</sup>等也对频率分布模型的必选以及参数的推求进行了研究与论述。

得出了 T-t-i 关系表，暴雨强度公式的推求工作主要便是其参数 A、C、n、b 的估计。《室外排水设计规范（2014 年版）》<sup>[19]</sup>中建议先采用图解法求出 b 的近似值，再用最小二乘法求出 A 值和 n 值。中国市政西南设计研究院则建议先求出 n 值，然后再用最小二乘法求出 A 值和 b 值<sup>[9]</sup>。暴雨强度公式的参数问题估计本质上是一个非线性方程的参数估计问题，随着计算机技术的不断发展，非线性方程的参数估计也有许多解法，其中包括麦夸尔特法<sup>[20]</sup>、曲面搜索法<sup>[21]</sup>、遗传算法<sup>[22]</sup>、加速遗传算法<sup>[23]</sup>、加速混合遗传算法<sup>[24]</sup>、粒子群算法<sup>[25]</sup>、改进粒子群算法<sup>[26]</sup>、迭代法<sup>[27]</sup>、带因子-迭代法<sup>[28]</sup>、免疫进化算法<sup>[29]</sup>、高斯-牛顿法<sup>[30]</sup>、计算机搜索法<sup>[31]</sup>、最速下降法<sup>[32]</sup>、协同进化算法<sup>[33]</sup>、微分进化算法<sup>[34]</sup>等。



## 1.4 暴雨强度公式的主要研究内容

本论文的主要研究内容有：

- (1) 收集选取暴雨样本资料，并对暴雨样本资料进行统计和处理；
- (2) 将处理后的暴雨样本资料进行多种概率分布模型的拟合，并根据所研究城市的气候特征及降雨特点，确定最适合该地的理论频率分布模型，并得出  $T-t-i$  关系表；
- (3) 基于 MATLAB 软件平台，设计并优化各种算法，推求出暴雨强度公式的几个参数；
- (4) 利用 MATLAB 软件设计出推求暴雨强度公式的程序系统；
- (5) 输出城市暴雨强度总公式以及各个单一重现期的分公式。

## 1.5 暴雨强度公式推求的技术路线

推求暴雨强度公式已经有了一套成熟的技术流程<sup>[35]</sup>。首先需要针对当地的数据进行采样，本文中按照年最大值法采集了佳县 21 年来的降雨数据，然后对降雨数据进行整理；其次根据三种频率分布对样本数据进行拟合并比较误差；最后通过选定频率分布生成  $T-t-i$  关系表，比较两种迭代算法推求暴雨强度公式效果，选择适当的迭代算法推求出最终的暴雨强度公式以及误差。本论文的暴雨强度公式推求技术路线见图 1.1。

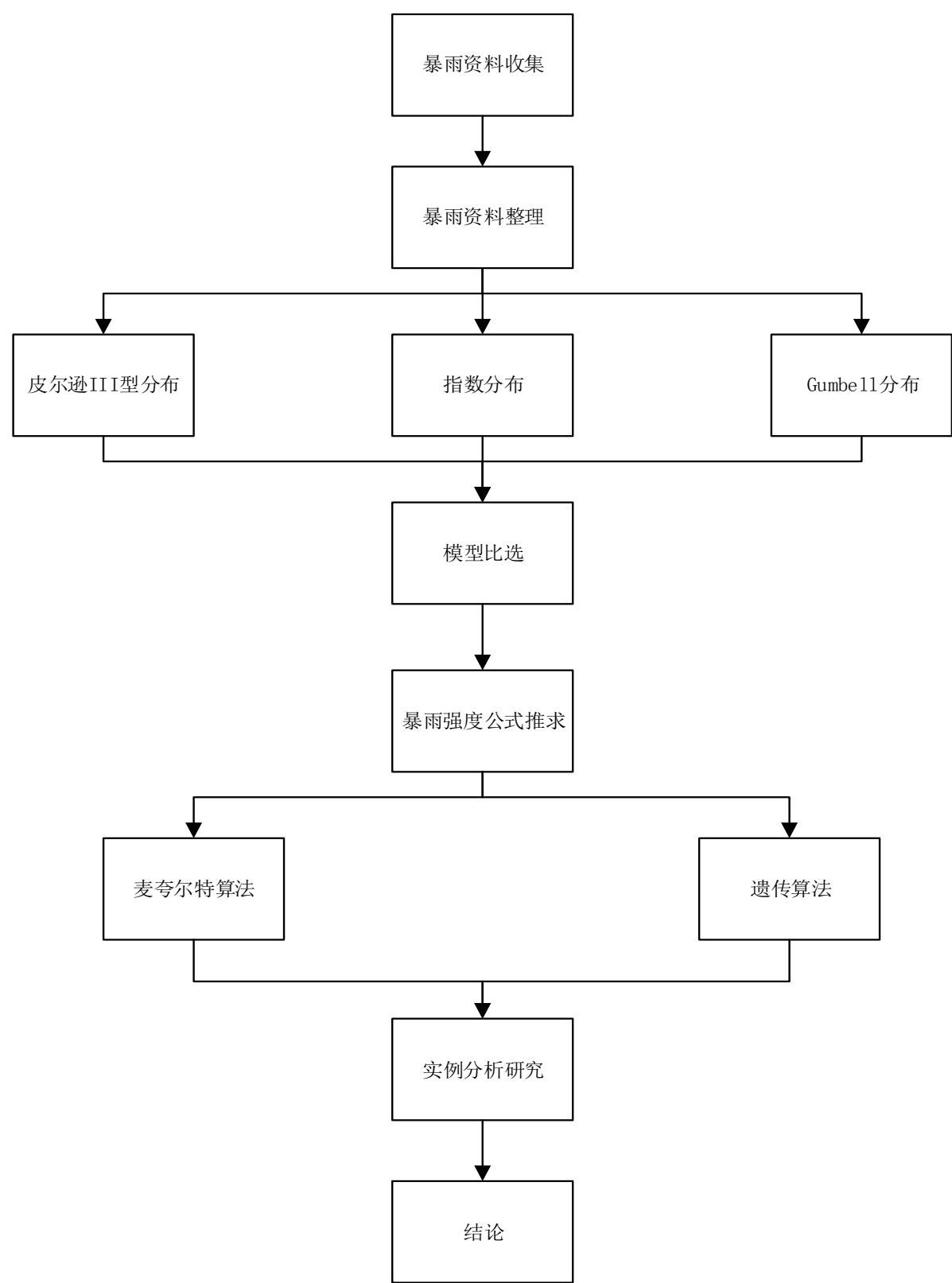


图 1.1 暴雨强度公式推求技术路线

## 第二章 暴雨强度公式推求的理论基础及样本选取

### 2.1 暴雨强度公式推求的理论基础

#### 2.1.1 降水的基本概念

空气中的水汽冷凝并降落到地面的现象称为降水。降水分为水平降水和垂直降水。水平降水是指水汽直接凝结在地表或地物表面，如霜、露、雾等；垂直降水是指水汽凝结物直接从空中降落到地面，如雨、雪、雹等。《地面气象观测规范》规定，降水是指从天空降落到地面上的液态或固态（经融化后）的水。

#### 2.1.2 降水的几个要素

##### （1）降雨量

降雨量是指降雨的绝对量，即降雨深度。用  $H$  表示，单位以  $\text{mm}$  计。也可用单位面积上的降雨体积 ( $\text{L/ha}$ ) 表示。在研究降雨量时，很少以一场雨为对象，而常以单位时间表示，如：

年平均降雨量：指多年观测所得的各年降雨量的平均值。

月平均降雨量：指多年观测所得的各月降雨量的平均值。

年最大日降雨量：指多年观测所得的一年中降雨量最大一日的绝对值。

##### （2）降雨历时

降雨历时是指连续降雨的时段，可以指一场雨全部降雨的时间，也可以指其中个别的连续时段。用  $t$  表示，以  $\text{min}$  或  $\text{h}$  计。《室外排水设计规范（2014 年版）》规定<sup>[19]</sup>，在推求暴雨强度公式时，计算降雨历时应采用  $5\text{min}$ ， $10\text{min}$ ， $15\text{min}$ ， $20\text{min}$ ， $30\text{min}$ ， $45\text{min}$ ， $60\text{min}$ ， $90\text{min}$ ， $120\text{min}$ ， $150\text{min}$ ， $180\text{min}$  共十一个历时。

##### （3）暴雨强度

暴雨强度是指某一连续降雨时段内的平均降雨量，即单位时间的平均降雨深度，用  $i$  表示。

$$i = \frac{H}{t} (\text{mm} / \text{min}) \quad (2.1)$$

在工程上，常用单位时间内单位面积上的降雨体积  $q(\text{L}/(\text{s} \cdot \text{ha}))$  表示。 $q$  与  $i$  之间的换算关系是将每分钟的降雨深度换算成每公顷面积上每秒钟的降雨体积，即：

$$q = \frac{10000 \times 1000i}{1000 \times 60} = 167i \quad (2.2)$$

式中：q——暴雨强度 ( $L/(s \cdot ha)$ )；

167——单位换算系数。

暴雨强度是鉴定暴雨的重要指标，暴雨（英文名称 torrential rain; rainstorm; storm）是指降雨强度很大的雨，常在积雨云中形成。中国气象上规定，每小时降雨量 16 毫米以上、或连续 12 小时降雨量 30 毫米以上、24 小时降水量为 50 毫米或以上的雨称为“暴雨”。按其降雨强度大小又分为三个等级，即 24 小时降水量为 50-99.9 毫米称“暴雨”、100-249.9 毫米之间为“大暴雨”、250 毫米以上称“特大暴雨”。但由于各地降水和地形特点不同，所以各地暴雨洪涝的标准也有所不同。在业务实践中，又可按照发生和影响范围的大小将暴雨划分为：局地暴雨、区域性暴雨、大范围暴雨、特大范围暴雨。局地暴雨历时仅几个小时或几十个小时左右，一般会影响几十至几千平方千米，造成的危害较轻。但当降雨强度极大时，也可造成严重的人员伤亡和财产损失。区域性暴雨一般可持续 3~7 天，影响范围可达 10~20 万平方千米或更大，灾情为一般，但有时因降雨强度极强，可能造成区域性的严重暴雨洪涝灾害。特大范围暴雨历时最长，一般都是多个地区内连续多次暴雨组合，降雨可断断续续地持续 1~3 个月左右，雨带长时期维持。特大暴雨是一种灾害性天气，往往造成洪涝灾害和严重的水土流失，导致工程失事、堤防溃决和农作物被淹等重大的经济损失。特别是对于一些地势低洼、地形闭塞的地区，雨水不能迅速宣泄造成农田积水和土壤水分过度饱和，会造成更多的灾害。

暴雨强度是描述暴雨特征的重要指标，也是决定雨水设计流量的主要因素。所以有必要研究暴雨强度与降雨历时之间的关系。在一场暴雨中，暴雨强度是随降雨历时变化的。如果所取历时长，则与这个历时对应的暴雨强度将小于短历时对应的暴雨强度。

### 2.1.3 降水的观测方法

#### （1）自记雨量计

在数字化采样方法普及以前，器测法是常用的观测降水量的方法。其主要的观测仪器是雨量器和自记雨量计。雨量器一般采用的是定时分段观测制，即把每天 24 个小时分成几段来进行观测，并将北京时间 8 点作为日分界点。而自记雨量计则可以自动将整个降雨过程连续的记录下来，其记录纸（见图 2.1）上可以明确反映出降雨的起止时间、

降雨量的大小以及降雨强度的变化过程，是推求暴雨强度公式的重要基础资料。

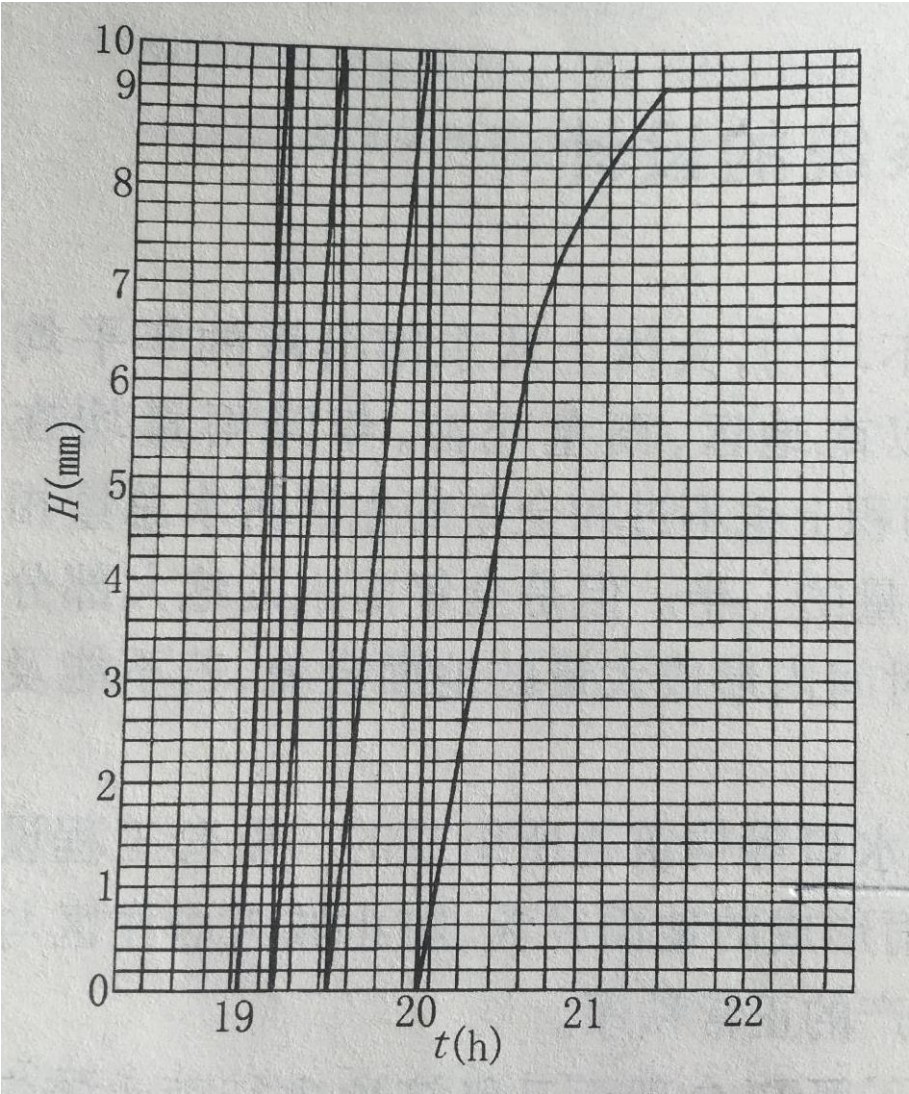


图 2.1 自记雨量记录曲线

从图 2.1 可知，自记雨量曲线实际上是降雨量累积曲线。曲线中任意一点的斜率表示降雨过程中任一瞬时的暴雨强度，称为瞬时暴雨强度。由于曲线上各点的斜率是变化的，表明暴雨强度是变化的。曲线越陡，该点的瞬时暴雨强度就越大。因此在分析暴雨资料时，必须选用对应各降雨历时的最陡的那段曲线，即最大降雨量。但由于在各历时内每个时刻的暴雨强度也是不同的，因此计算出的各历时的暴雨强度称为最大平均暴雨强度。

(2) 降雨记录数据收集软件

降雨资料的收集是推求暴雨强度公式的关键工作，它是推求暴雨强度公式的基础，它的准确性决定了所推求暴雨强度公式的精度。传统的降雨资料数据来自气象局的自记

雨量记录取线,它受人为影响较大,精度较低,误差较大。鉴于此,我国气象局编制了降雨记录数据收集软件,并于 2004 年取代了传统自记雨量记录,用以进行降雨资料的收集。该软件将传统的自记雨量记录曲线所反映的信息以电子记录数据的方法转换成统一格式的逐分钟降雨量,在电子记录表格中可以读取每分钟的降雨量,也可以读取各个历时降雨量的最大值,并按照式(2.1)计算暴雨强度,作为推求暴雨强度公式的基础资料。降雨记录数据收集软件不仅减轻了气象工作人员的工作量,而且提高了数据的准确性,为精确推求暴雨强度公式奠定了基础。

## 2.2 暴雨强度公式的样本选取

### 2.2.1 样本的概念

研究对象的全体成为总体,每一个研究对象称为个体。研究总体离不开研究它的个体。但在许多实际问题中,不可能对所有个体逐一进行研究,而只能从总体中按一定规律抽取一部分个体进行观察(或试验),根据对这部分个体的观察结果来推断总体的分布情况。而从总体中按一定规律随机抽取的这部分个体就称为样本,样本中所含个体的数目称为样本容量。样本容量越大,反映总体规律的精度就越高<sup>[36]</sup>。

### 2.2.2 暴雨强度公式的选样方法及比较

城市暴雨的选样方法可分为年最大值法和非年最大值法两类,其中非年最大值法又包括年多个样法、年超大值法和超定量法。下面分别对这几种方法进行介绍。

#### (1) 年最大值法

年最大值法要求资料年份在 20 年以上,在现有的资料中按照不同降雨历时每年选取一个最大值作为样本资料。该选样方法所选的数据数量与资料的年份一致。按照极值理论,当所选资料年份足够长时,所推求出的样本分布规律近似于总体的规律。这种选样方法简单,资料易得,便于统计,在水文统计中应用广泛。但采用年最大值法会使大雨年雨量次大值被遗漏,从而使较小重现期部分的降雨强度明显偏小,与目前广泛使用的年多个样法取样存在工程设计不衔接问题。

#### (2) 年多个样法

年多个样法适用于具有 10 年以上降雨资料的地区。它是在现有资料中每年每个历时都选取 6 个~8 个最大值,然后不论年次,将每个历时子样按大小次序排列,再从中选

取资料年数的 3 倍~4 倍的最大值,作为统计的基础资料。这种方法最开始用于我国试行的排水规范(1963 年)中,它考虑了次大值,克服了年最大值法中大雨年的一些大强度降雨资料没有被选取的缺点,在低重现期上比较符合降雨规律。同时也兼顾了一些暴雨资料年份较少的地区。

### (3) 年超大值法

年超大值法适用于具有 20 年以上降雨资料的地区。它是将现有降雨资料中每个历时都按照从大到小的顺序排列,然后从中选取资料年数的最大雨量,即平均每年选取一组。它和年多个样法相比减少了一些小暴雨资料,会存在有些年份被选中的降雨资料多,有些年份被选中的降雨资料少甚至没有没有被选中的情况。这种方法是从大量资料中考虑它的发生年,发生的机会是平均期待值。

### (4) 超定量法

超定量法适用于具有 10 年以上降雨资料的地区。它是在现有降雨资料中按照不同降雨历时选取所有降雨标准以上的数据作为基本资料,样本的个数与资料的年份无关。这种方法也是从大量资料中考虑它的发生年,发生的机会是平均期待值。

年最大值法选取的样本资料独立性强,其概率意义为一年一遇的频率年值,合理考虑了一年循环的气象周期,理论上较严谨。根据极值理论,当样本资料的年份足够长时它近似于全部的水文资料计算值<sup>[37]</sup>。年最大值法在水文统计中有着广泛的应用,各地的气象局与水文年鉴对其都有较长年限的记录,资料收集容易。年多个样法发生的概率是平均期待值,这种选样方法的根本缺点是将次频率按照年频率计算,总体误差会比计算值略大一些,而且统计的工作量相当大,资料比较难得,不适合发展的需要<sup>[11]</sup>。鉴于此,又为了方便获取资料,本文采取年最大值法取样方法。

## 2.2.3 不同选样方法的频率及重现期计算

### (1) 暴雨强度的频率

暴雨强度的频率( $P_n$ )是指等于或大于一定大小的暴雨强度出现的次数  $m$  与观测资料总项数  $n$  的百分比,即:

$$P_n = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (2.3)$$

$P_n$ —暴雨强度的频率;

$m$ —等于或大于一定大小的暴雨强度发生的次数;

$n$ —观测资料的总项数。

观测资料的总项数等于所观测资料的年份数  $N$  与平均每年所选取的资料数  $k$  的乘积。年最大值法的取样方法是每年只选取一个最大值，所以观测资料的总项数  $n$  等于所观测资料的年份数  $N$ 。由此得出： $P_n = \frac{m}{N} \times 100\%$ ，该式被称为年频率式。如果平均每年选取  $k$  个样本资料（年多个样法、年超大值法和超定量法），则： $n = k \times N$ ，由此得出： $P_n = \frac{m}{kN} \times 100\%$ ，该式被称为次频率式。

由以上的公式可以得出，频率越小的暴雨强度出现的可能性也就越小。我们假定所观测的降雨资料的年份足够长，即可以反映整个历史的降雨过程。然而事实上我们所取得的降雨资料都是有限的，即观测资料的总项数  $n$  是有限的，所以按照上述方法计算得出的暴雨强度频率只能反映一定时期的经验规律，而不能代表整个历史降雨过程的规律。因此，我们称用上述方法计算得出的暴雨强度频率为经验频率。我们所观测的暴雨强度资料年限无论有多长终归是有限的，它不能反映整个历史降雨过程。我们所观测资料里面的最小暴雨强度不一定是整个历史的最小暴雨强度。而按照上述暴雨强度频率的计算方法，对于观测年限内最小暴雨强度的降雨来说，其发生次数  $m=n$ ，其频率  $P_n = \frac{m}{n} \times 100\% = \frac{n}{n} \times 100\% = 100\%$ ，这显然是不合理的。因此水文计算对上述公式进行了修正，即用  $P_M = \frac{m}{N+1} \times 100\%$  计算年频率，用  $P_E = \frac{m}{kN+1} \times 100\%$  计算次频率。观测资料的年限越长，就越接近整个降雨过程，用上述公式计算的误差也就越小。

年最大值法取样要求观测资料年限在 20 年以上，按照 5min, 10min, 15min, 20min, 30min, 45min, 60min, 90min, 120min, 150min, 180min 共十一个降雨历时，每年每个历时选取一个最大值，然后将所选取的每个历时的子样按照从大到小的顺序进行排列，这样大于或等于某一大小的降雨强度所发生的次数就是该降雨强度样本的序号数。即在公式  $P_M = \frac{m}{N+1} \times 100\%$  中， $m$  为该降雨强度子样的序号数， $N$  为所选取的降雨强度样本的序号总数。

年多个样法取样要求观测资料年限在 10 年以上，按照 5min, 10min, 15min, 20min, 30min, 45min, 60min, 90min, 120min 共九个降雨历时，每年每个历时选取 6 个~8 个最大值，然后将所选取的每个历时的子样按照从大到小的顺序进行排列，再从中选择资料年数的 3 倍~4 倍的最大值，作为统计的基础资料。与年最大值法类似，在公式



$P_E = \frac{m}{kN+1} \times 100\%$  中， $m$  为一定降雨强度子样的序号数， $kN$  为所选取的降雨强度样本的序号总数。年超大值法、超定量法同样适用于该方法，这里不再赘述。

### (2) 暴雨强度的重现期

暴雨强度的重现期（ $T$ ）是指等于或大于一定大小的暴雨强度可能出现的平均间隔时间，以年（ $a$ ）为单位。暴雨强度的重现期是频率的倒数，即：

$$T = \frac{1}{P_n} = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (2.4)$$

用年最大值法选样时： $T_M = \frac{1}{P_M} = \frac{N+1}{m} \times 100\%$ ，用年多个样法选样时：

$$T_E = \frac{1}{P_E} = \frac{kN+1}{m} \times 100\%。$$

同济大学的邓培德教授曾研究得出用年最大值法选样的重现期  $T_M$  与用年多个样法选样的重现期  $T_E$  之间的关系<sup>[11]</sup>：

$$T_M = 1 - e^{-\frac{1}{T_E}} \quad (2.5)$$

$$T_E = \frac{1}{\ln T_M - \ln(T_M - 1)} \quad (2.6)$$

《室外排水设计规范（2014 年版）》规定，雨水管渠的设计重现期应根据汇水地区性质、城镇类型、地形特点和气候特征等因素，经技术经济比较后按下表 2.1 的规定取值，并应符合以下规定：

- （1）经济条件较好，且人口密集、内涝易发的城镇，宜采用规定的上限。
- （2）新建地区应按本规定执行，既有地区应结合地区改建、道路建设等更新排水系统，并按本规定执行。
- （3）同一排水系统可采用不同的设计重现期。

表 2.1 雨水管渠设计重现期（年）

城区类型 城镇类型	中心城区	非中心城区	中心城区的重要地区	中心城区地下通道和下沉式广场等
特大城市	3~5	2~3	5~10	30~50
大城市	2~5	2~3	5~10	20~30
中等城市和小城市	2~3	2~3	3~5	10~20

### 2.2.4 暴雨资料的检验

用于水文频率分析计算的基本资料必须具备一定的原则，这些原则包括可靠性、一

致性、随机性、独立性和代表性。

可靠性是指进行水文分析计算的基础资料必须要真实可靠，否则会严重影响水文计算结果的可靠性。一致性是指进行水文分析的实测资料必须具有相同的类型，必须是在相同的环境下测量得出的，避免在同一时间测量性质不同的资料。随机性是指实测资料数值的大小具有随机性，不能刻意选取具有相关关系的系列来进行分析计算。独立性是指同一系列中的资料必须是相互独立的，不能把具有关联性的资料统计在一起。代表性是指水文分析的样本资料能近似反映出总体的规律，样本的统计特征值与总体相比误差越小，其代表性就越高。

在暴雨资料选样时，要尽可能同时满足以上五条原则，以保证所选暴雨资料的准确性，这是水文分析计算结果可靠性的前提。

## 2.3 佳县暴雨资料样本分析

### 2.3.1 佳县概况

佳县地处北纬  $37^{\circ} 41' 47'' \sim 38^{\circ} 23' 34''$ 、东经  $110^{\circ} 0' 45'' \sim 110^{\circ} 45' 10''$  之间，位于陕西省东北部黄河中游西岸，榆林市东南部，毛乌素沙漠的东南缘。东与山西临县隔黄河相望，西同米脂接壤，南同吴堡县山水相连，北同神木县毗邻，西南依绥德，西北靠榆林。南北长 85 公里，东西宽 23.9 公里，总面积 2028 平方公里。

县内山丘连绵，主体山脉有两条：一条由西北自榆林入境，沿佳芦河岸，向东南延伸 120 公里于县城落脉；另一条始于榆阳区、米脂，分趋于西北、西南境内。两条山脉中，沟、涧、坡、梁、峁纵横交错，地形复杂。海拔高度介于 675~1339.5 米之间，相对高差为 664 米；平均每平方公里有沟壑 33 条，平均长 2.12 公里。山峁顶与沟底部相对高差为 30~200 米。地势西北高，东南低；山脉起于西北，终至东南，西北山峰卑小，东南高峻，延伸至黄河沿岸成绝壁悬崖。由于水土严重流失，毛乌素沙漠缓慢南侵，逐渐形成东南黄河沿岸土石山区、西南丘陵沟壑区、北部风沙区 3 个有明显差异的地貌分区。

佳县深处内陆，属暖温带大陆性半干旱季风气候。冬季漫长寒冷，夏季短促温差较大。日照时间长，光热资源较丰富。年日照时数为 2674.8 小时，日照时数最多的月份为 5 月份，最少的月份为 2 月份<sup>[38]</sup>。干旱是佳县最严重的自然灾害，多发生在春夏。年平

均降水量 397.6 毫米，气候较干旱。降水年际变化率大，相对变化率达 80%，年内分配不均，多年平均降水量只能满足农作物需水量的 1/2。降水集中在 7、8、9 三个月，水分利用率极低。年平均气温为 10.2℃，气温年较差大，达 32.2℃。年极端最高气温为 42.1℃（2005 年 6 月 22 日），年极端最低气温为零下 24.4℃（2002 年 12 月 27 日）。佳县气候比较干燥，年相对湿度为 52%，相对湿度最高的月份为 8~9 月份，最低的月份为 4 月份。

2.3.2 佳县暴雨资料概述

佳县气象站是国家基本气象站，区站号为 53658。站点设在县域内新城区，能够很好地代表本县及邻近区域的气候降水情况。本次收集的暴雨资料均由佳县气象局提供，共收集 1994 年~2014 年共计 21 年的暴雨强度资料。其中 1994 年~2003 年的资料来源为佳县气象局根据自记降雨记录编制的地面气象记录年报表，2004~2014 年的资料来源为佳县气象局根据逐分钟降雨量电子记录编制的地面气象记录电子年报表。所有资料均由佳县气象局实测统计得来，符合可靠性、一致性、随机性、独立性和代表性原则。

2.3.3 佳县暴雨资料选样

根据收集到的佳县暴雨样本资料，本论文采取年最大值法的选样方法。年最大值法取样要求观测资料年限在 20 年以上，按照 5min，10min，15min，20min，30min，45min，60min，90min，120min，150min，180min 共十一个降雨历时，每年每个历时选取一个最大值，然后将各个历时的降雨量按照从大到小的顺序进行排序，并按照式(2.1)计算各个降雨量对应的暴雨强度。排序后的各历时暴雨强度见下表 2.2。

表 2.2 佳县历年（21 年）实测暴雨强度排序成果表（mm/min）

历时 序号	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
1	2.4000	1.8400	1.6600	1.5600	1.4867	1.2933	1.1683	0.9922	0.8150	0.6707	0.5611
2	2.0000	1.7900	1.6267	1.4300	1.1533	0.9578	0.7750	0.5644	0.4467	0.3640	0.3100
3	1.9800	1.5100	1.3400	1.2400	0.9533	0.7400	0.5633	0.3778	0.2983	0.2398	0.2139
4	1.8800	1.4900	1.1333	0.9850	0.7067	0.6222	0.5417	0.3744	0.2925	0.2395	0.2011
5	1.8200	1.4700	1.1133	0.9500	0.6933	0.5756	0.4867	0.3678	0.2900	0.2368	0.2006
6	1.8200	1.4700	1.1000	0.9050	0.6700	0.5156	0.3950	0.2889	0.2658	0.2191	0.1989
7	1.7200	1.3100	1.0867	0.8850	0.6700	0.4689	0.3750	0.2811	0.2433	0.2171	0.1894
8	1.5800	1.3100	1.0667	0.8400	0.6700	0.4644	0.3600	0.2767	0.2317	0.2139	0.1894

历时 序号	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
9	1.5800	1.3100	1.0267	0.8400	0.6467	0.4622	0.3517	0.2744	0.2125	0.2055	0.1856
10	1.5800	1.1400	1.0267	0.8250	0.6400	0.4600	0.3450	0.2567	0.2117	0.1925	0.1722
11	1.5800	1.1000	0.9600	0.7900	0.5600	0.4289	0.3250	0.2522	0.2075	0.1781	0.1639
12	1.5600	1.1000	0.9267	0.7600	0.5333	0.3889	0.3217	0.2511	0.2050	0.1772	0.1611
13	1.5400	1.0400	0.8733	0.7500	0.5300	0.3733	0.3000	0.2300	0.2050	0.1752	0.1600
14	1.4000	1.0100	0.8200	0.6900	0.5267	0.3711	0.2933	0.2300	0.2000	0.1739	0.1550
15	1.3800	0.9200	0.8000	0.6800	0.5033	0.3644	0.2867	0.2256	0.1983	0.1733	0.1489
16	1.3600	0.9100	0.6867	0.6050	0.5000	0.3578	0.2817	0.2189	0.1892	0.1710	0.1461
17	1.3200	0.9000	0.6467	0.5350	0.4367	0.3511	0.2783	0.1956	0.1850	0.1647	0.1433
18	1.1800	0.8000	0.6333	0.5150	0.3967	0.3178	0.2683	0.1900	0.1575	0.1271	0.1083
19	1.1000	0.7100	0.6200	0.4950	0.3667	0.2600	0.2583	0.1867	0.1425	0.1140	0.0950
20	0.8000	0.6800	0.5467	0.4750	0.3200	0.2533	0.2517	0.1789	0.1342	0.1081	0.0944
21	0.7600	0.5800	0.4533	0.3500	0.3000	0.2156	0.1650	0.1556	0.1308	0.1030	0.0906

## 第三章 暴雨强度公式频率曲线拟合

### 3.1 随机变量的统计参数

#### 3.1.1 均值

均值是反映随机变量系列平均情况的数，根据随机变量在系列中的出现情况，其均值的计算方法有以下两种：

##### (1) 加权平均法

设有一实测系列由  $X_1, X_2, \dots, X_n$  组成，各个随机变量出现的次数分别为  $f_1, f_2, \dots, f_n$ ，则该系列的均值为：

$$\bar{\chi} = \frac{\chi_1 f_1 + \chi_2 f_2 + \dots + \chi_n f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \chi_i f_i \quad (3.1)$$

式中： $N$ ——样本系列的总项数。

##### (2) 算术平均法

设有一实测系列由  $X_1, X_2, \dots, X_n$  组成，各个随机变量很少重复出现，则可用算术平均法计算该系列的均值，不考虑出现次数的影响。

$$\bar{\chi} = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \chi_i \quad (3.2)$$

式中： $n$ ——样本系列的总项数。

#### 3.1.2 均方差和变差系数

均值是反映随机变量系列平均情况的数，而要反映整个系列的变化幅度，或者系列在均值两侧分布的离散程度，就要使用均方差或者变差系数。

##### (1) 均方差

设有一实测系列由  $X_1, X_2, \dots, X_n$  组成，其均值为  $\bar{\chi}$ ，离差为  $\Delta\chi_i = \chi_i - \bar{\chi}$ ，则其均方差  $s$  为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i - \bar{\chi})^2}{n}} \quad (3.3)$$

式中： $n$ ——样本系列的总项数。上式只适用于总体，对于样本系列，则应修正为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i - \bar{\chi})^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

均方差反应的是实测系列中各个随机变量离均差的平均情况，对于均值相同的系列，均方差越大，说明系列在均值两旁的分布越分散，整个系列的变化幅度越大，均方差越小，说明系列在均值两旁的分布越集中，整个系列的变化幅度越小。

## (2) 变差系数

均方差反应的是系列的绝对离散程度，对于均值相同而均方差不同的系列，可以比较其离散程度，但是对于均值不同而均方差相同，或者均值与均方差都不相同的系列，则无法比较。这是因为均方差不仅与系列的分布情况有关，也与系列的水平高低有关。在两个不同的系列中，水平高的系列其随机变量与均值的离差一般来说要比水平低的系列大一些，因此其均方差也会比水平低的系列要大。因此，均方差大的系列不一定其离散程度就大。变差系数又称离差系数或离势系数，它是一个系列的均方差与其均值的比值，即：

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.5)$$

### 3.1.3 偏态系数

变差系数虽然反映了随机系列的离散程度，但是它不能反映系列在均值两侧分布的另一种情况，即系列在均值两侧的分布是否对称，若不对称，是大于均值的数出现的次数多还是小于均值的数出现的次数多。故引入另一个参数——偏态系数（也称偏差系数）。数理统计中以下列表达式来定义偏态系数，即：

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{ns^3} \quad (3.6)$$

对于样本系列，则：

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-3)s^3} \quad (3.7)$$

式中：s——样本系列的均方差；

$C_v$ ——变差系数；

n——样本系列的项数。

公式中引用了离差的三次方，以保留离差的正负情况。当  $C_s=0$  时，系列在均值的两侧呈对称分布；当  $C_s>0$  时，系列呈正偏分布；当  $C_s<0$  时，系列呈负偏分布。一般认

为，没有百年的资料， $C_s$  的计算值很难达到一个合理的数值。然而我们的实测值往往没有百年这么多，因此实际应用中我们并不直接计算  $C_s$  的值，而是根据  $C_s$  与  $C_v$  的经验关系，由适线法分析得出。

### 3.1.4 矩

#### (1) 原点矩

随机变量  $x$  的  $r$  阶原点矩是指随机变量  $x$  与原点之间离差的  $r$  次幂的数学期望，用公式表示为：

$$m_r = E(x^r) \quad (r=0,1,2,\dots,n) \quad (3.8)$$

若为离散型随机变量，其  $r$  阶原点矩为：

$$m_r = E(x^r) = \sum_{i=1}^n x_i^r p_i \quad (3.9)$$

式中： $p_i$ ——随机变量  $x_i$  对应的概率。若为连续型随机变量，其  $r$  阶原点矩为：

$$m_r = E(x^r) = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad (3.10)$$

式中： $f(x)$ ——随机变量  $x$  的概率密度函数。

#### (2) 中心矩

随机变量  $x$  的  $r$  阶中心矩是指随机变量  $x$  与分布中心的离差的  $r$  次幂的数学期望，用公式表示为：

$$\mu_r = E\{[x - E(x)]^r\} \quad (r=0,1,2,\dots,n) \quad (3.11)$$

若为离散型随机变量，其  $r$  阶中心矩为：

$$\mu_r = E\{[x - E(x)]^r\} = \sum_{i=1}^n [x_i - E(x)]^r p_i \quad (3.12)$$

若为连续型随机变量，其  $r$  阶中心矩为：

$$\mu_r = E\{[x - E(x)]^r\} = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^r f(x) dx \quad (3.13)$$

## 3.2 经验频率曲线

由第二章可知：经验频率  $P = \frac{m}{N+1}$ 。根据已有的实测降雨数据，可以绘制出其经验频率曲线，绘制方法如下：

(1) 将已有实测降雨数据按照大小降序排列成  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，对应的序号  $m$  分

别为  $1, 2, \dots, n$ ;

(2) 利用经验频率公式  $P = \frac{m}{N+1}$  计算出各个数据的经验频率;

(3) 以经验频率  $P$  为横坐标, 降雨强度  $x$  为纵坐标, 在坐标纸上标出点  $(P_i, x_i)$ , 再用目估法通过点群中心绘制一条光滑曲线, 该曲线便是要绘制的经验频率曲线。

将实测数据绘制成经验频率曲线, 并按照工程设计的频率标准在该曲线上选取所需的设计值, 该设计值就是设计的依据。

由经验频率公式  $P = \frac{m}{N+1}$  得, 当  $T=100a$  时,  $P = \frac{1}{N+1} = \frac{1}{100}$ , 则  $N=99a$ 。也就是说, 想要推求百年一遇的结果, 就必须要有 99 年的实测资料。现实生活中实测资料年限往往没有那么长, 而工程设计中却往往需要推求稀有频率 (如 50 年一遇, 百年一遇等) 的水文数据, 因此就需要将实测资料的经验频率曲线进行外延, 以此满足工程设计的频率标准。

由于水文数据的随机性, 经验频率点的分布有时会比较分散, 用目估法定线会有较大的误差, 会直接影响水文分析的精度。而且在经验频率曲线外延的时候, 没有一个相对可靠的标准, 主观成分较大, 使得水文分析结果的可靠性大打折扣。因此人们提出用数学模型来表示频率曲线 (即理论频率曲线), 以此作为定线和外延的依据。

### 3.3 理论频率曲线

理论频率曲线是通过数学形式确定的、符合经验点据分布规律的曲线。它通常是由人们在实测资料中选取或计算获得几个有代表性的特征值作为参数, 并据此选配一些数学方程作为总体系列频率密度曲线的假想数学模型, 再按一定的方法确定累积频率曲线。我国的水文工作者通过大量的分析和拟合, 认为皮尔逊III型曲线是水文现象中最常用的理论频率曲线。目前我国一般采用的理论频率曲线有以下几种: 皮尔逊III型曲线、指数分布曲线以及耿贝尔极值分布曲线。以下分别对这几种理论频率曲线进行详细的说明。

#### 3.3.1 皮尔逊III型曲线

皮尔逊III型理论频率曲线是一条一端有限一端无限的不对称单峰正偏曲线, 数学上常称伽马分布<sup>[39]</sup>, 其概率密度函数为:



$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (3.14)$$

式中： $a_0$ ——系列起点到坐标原点的距离；

$\Gamma(\alpha)$ ——伽马函数。

皮尔逊Ⅲ型曲线的概率密度函数中含有三个参数： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a_0$ ，这些参数经过适当的换算，可以用实测系列可计算的三个统计参数 $\bar{x}$ 、 $C_v$ 、 $C_s$ 来表示，即：

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \quad (3.15)$$

$$\beta = \frac{2}{x C_v C_s} \quad (3.16)$$

$$a_0 = \bar{x} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s}\right) \quad (3.17)$$

将这些关系带入皮尔逊Ⅲ型曲线的概率密度函数中，则可以表示为：

$$f(x) = f(\bar{x}, C_v, C_s, x) \quad (3.18)$$

这样皮尔逊Ⅲ型曲线的概率密度函数就确定了，给定一个自变量  $x$  就可以计算出一个相应的  $y$ ，从而可以绘制出其概率密度曲线（如图 3.1）。

在水文分析计算中，经常要绘制理论频率曲线，也就是要计算给定频率的  $x_p$  值，我们将公式(3.14)进行积分可得：

$$P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} dx \quad (3.19)$$

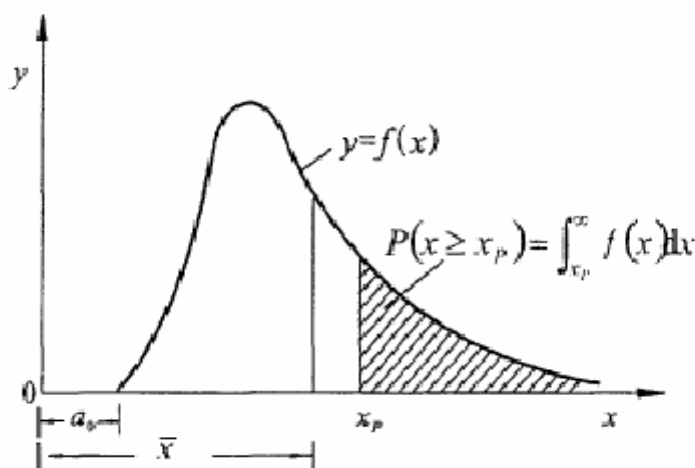


图 3.1 皮尔逊Ⅲ型分布概率密度曲线

将随机变量标准化，令  $\Phi = \frac{x - \bar{x}}{x C_v}$ ，水文学中称  $\Phi$  为离均系数，则  $x = \bar{x}(1 + \Phi C_v)$ ，

$dx = \bar{x}C_v d\Phi$ ，将其带入公式(3.19)得：

$$P = \frac{2^\alpha C_s^{1-2\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \int_{\Phi}^{\infty} (C_s + 2)^{\alpha-1} e^{\frac{2(C_s \Phi + 2)}{C_s^2}} d\Phi \quad (3.20)$$

由式(3.15)得： $\alpha = \frac{4}{C_s^2}$ ，则上式(3.20)中只含有一个未知参数  $C_s$ ，而其他两个未知参数  $\bar{x}$  和  $C_v$  都包含在离均系数  $\Phi$  中。离均系数  $\Phi$  一般通过查皮尔逊III型曲线离均系数  $\Phi$  值表获得。在频率计算时，先计算系列的  $\bar{x}$ 、 $C_v$ 、 $C_s$  值，然后由计算取得的  $C_s$  值查皮尔逊III型曲线离均系数  $\Phi$  值表来得出不同频率  $P$  所对应的离均系数  $\Phi_p$  值，再将  $\bar{x}$ 、 $C_v$  和  $\Phi_p$  代入下式，便可以求出与频率  $P$  相对应的水文特征值  $x_p$ 。

$$x_p = (\Phi_p C_v + 1) \bar{x} \quad (3.21)$$

$$K_p = \Phi_p C_v + 1 \quad (3.22)$$

由不同的频率  $P$  及其对应的水文特征值  $x_p$ ，即可绘制出一条与  $\bar{x}$ 、 $C_v$  和  $C_s$  相应的皮尔逊III型理论频率曲线。

要绘制皮尔逊III型理论频率曲线，参数推求是很重要的一步。参数推求的方法多种多样，有矩法、适线法、遗传法和拟牛顿法等。本文采取优化适线法，具体步骤如下：

(1) 由实测数据，根据公式(3.2)和公式(3.5)计算出系列的  $\bar{x}$ 、 $C_v$  值。

(2) 确定系列的  $C_s$  值。公式(3.7)给出了样本系列  $C_s$  的计算方法，但是研究认为如果没有百年以上的实测资料，用该公式计算得出  $C_s$  值很难达到一个合理的范围。而且现实中我们的实测资料年限往往没有这么长，因此实际工作中不通过该公式计算  $C_s$  的值，而是按照  $C_s$  与  $C_v$  的经验关系通过适线法来确定  $C_s$ 。通常  $C_s$  与  $C_v$  的经验关系为：设计暴雨量： $C_s=3.5C_v$ ；设计最大流量：当  $C_v<0.5$  时， $C_s=(3\sim4)C_v$ ；当  $C_v>0.5$  时， $C_s=(2\sim3)C_v$ ；年径流及年降水： $C_s=2C_v$ 。以上经验关系依然存在一定的误差。为了减小拟合误差，本次论文假设  $C_s=mC_v$ ，用 while 循环在  $2\leq m\leq 4$  的范围内遍历搜索最优的  $m$  值，并由这个最优的  $m$  值确定最优的  $C_s$  值，使得拟合的绝对均方差最小。调整  $C_s$  的同时也可对  $C_v$  进行调整，以便进一步提高拟合精度。绝对均方差的计算公式为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{pi} - x_i)^2} \quad (3.23)$$

式中： $x_i$ ——实测降雨强度（原始数据）；

$X_{pi}$ ——降雨强度的拟合值。

(3) 确定不同频率  $P$  时的离均系数  $\Phi_p$ 。  $\Phi_p$  可以通过查皮尔逊III型曲线离均系数  $\Phi$  值表，用内插法来确定。但是显然，内插法造成的误差较大。而且本论文中  $C_s$  的值是将其与  $C_v$  之间的倍数关系  $m$  在  $2 \leq m \leq 4$  的范围内遍历搜索确定的，每搜索一个  $C_s$  值，就需要确定一个  $\Phi_p$  值，进而推求出拟合值  $X_p$ 。如果使用查表内插法，则过于繁琐且误差较大，不利于结果的推求。因此需要设计一种  $\Phi_p$  的算法，这样也便于编写计算机程序，有利于节省时间和提高精度。关于  $\Phi_p$  的算法，好多专家也进行过一定的研究，本文采取以下方法进行计算：将式(3.15)代入式(3.20)，整理后可得：

$$P = \frac{\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\Gamma(\alpha)} \int_{\Phi_p}^{\infty} (\Phi + \sqrt{\alpha})^{\alpha-1} e^{-\sqrt{\alpha}(\Phi + \sqrt{\alpha})} d\Phi \quad (3.24)$$

令  $N = \sqrt{\alpha}(\Phi_p + \sqrt{\alpha})$ ，代入式(3.24)化简得：

$$P = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{N_p}^{\infty} N^{\alpha-1} e^{-N} dN \quad (3.25)$$

再令  $M = \int_{N_p}^{\infty} N^{\alpha-1} e^{-N} dN$ ， $\Gamma(\alpha, N) = \int_0^{N_p} \frac{N^{\alpha-1} e^{-N} dN}{\Gamma(\alpha)}$ ，代入(3.25)整理得：

$$M = \Gamma(\alpha) \cdot [1 - \Gamma(\alpha, N)] \quad (3.26)$$

将式(3.26)代入式(3.25)，化简整理得：

$$\Gamma\left[\alpha, \sqrt{\alpha}(\Phi_p + \sqrt{\alpha})\right] = 1 - P \quad (3.27)$$

再将式(3.15)代入式(3.27)，化简得：

$$\Gamma\left[\frac{4}{C_s^2}, \frac{2}{C_s}(\Phi_p + \frac{2}{C_s})\right] = 1 - P \quad (3.28)$$

可见，离均系数  $\Phi_p$  隐含在左侧的不完全伽马函数中。此函数在  $N \in (0, +\infty)$  的区间上单调递增，可以在 **matlab** 平台上采用二分法求解。

(4) 由公式(3.22)求出  $K_p$ 。

(5) 再由公式(3.21)求出不同的降雨强度拟合值  $x_p$ 。

(6) 在海森概率格纸上，以频率  $P$  为横坐标，降雨强度拟合值  $x_p$  为纵坐标，绘制出理论点据  $(P, x_p)$ ，再使用 **matlab** 绘制出一条光滑曲线，该曲线即为拟合出的皮尔逊III型理论频率曲线。

绘制在一般坐标纸上的频率曲线的两端坡度较大，即上部急剧上升，下部急剧下降，

而两端正是实际工程中设计频率所在的部位。为了比较方便和精确的绘制出频率曲线，一般采用频率计算专用的海森概率格纸。海森概率格纸的纵坐标可以是均匀分布的常规数学坐标，也可以是对数分格。横坐标是按照正态曲线的概率分布分格制成的。因此正态概率分布曲线在海森概率格纸上呈直线型，非正态概率分布的曲线绘制在海森概率格纸上，其两端坡度也会大大变缓，有利于频率曲线的外延<sup>[40]</sup>。

### 3.3.2 指数分布曲线

指数分布曲线的概率密度函数为<sup>[41]</sup>：

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} \quad (\beta \leq x < +\infty) \quad (3.29)$$

式中： $\alpha$ ——离散程度参数， $\alpha > 0$ ；

$\beta$ ——指数分布曲线下限，适用于短历时城市暴雨， $\beta \geq 0$ 。

对式(3.29)进行求导可得：

$$f'(x) = -\alpha^2 e^{-\alpha(x-\beta)} < 0 \quad (3.30)$$

将式(3.30)再次求导可得：

$$f''(x) = \alpha^3 e^{-\alpha(x-\beta)} > 0 \quad (3.31)$$

由式(3.30)和式(3.31)可知，指数分布曲线是一条一端有限而另一端无限的单调递减并且上凹的曲线（如图 3.2）。

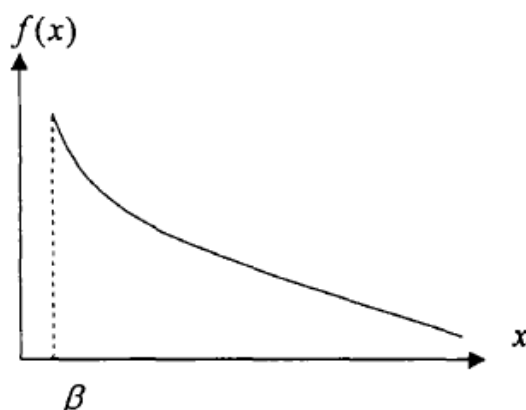


图 3.2 指数分布曲线

其分布函数为：

$$\begin{aligned}
 F(x) &= P(X \geq x) = \int_x^{+\infty} f(x)dx \\
 &= \int_x^{+\infty} \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} dx \\
 &= e^{-\alpha(x-\beta)}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

由公式(3.10)可得，指数分布曲线的  $r$  阶原点矩为：

$$\begin{aligned}
 m_r &= E(x^r) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \\
 &= \int_{\beta}^{\infty} x^r \alpha e^{-\alpha(x-\beta)} dx \\
 &= - \int_{\beta}^{\infty} x^r de^{-\alpha(x-\beta)} \\
 &= \beta^r - \frac{r}{\alpha} \int_{\beta}^{\infty} x^{r-1} de^{-\alpha(x-\beta)} \\
 &= \beta^r + \frac{r}{\alpha} \beta^{r-1} + \frac{r(r-1)}{\alpha^2} \beta^{r-2} + \frac{r(r-1)(r-2)}{\alpha^3} \beta^{r-3} + \dots + \frac{r(r-1)(r-2)\dots 3 \cdot 2 \cdot 1}{\alpha^r} \beta \\
 &= \sum_{k=0}^r \frac{r!}{(r-k)!} \frac{\beta^{r-k}}{\alpha^k} \quad (r=0,1,2,\dots,n)
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

由式(3.33)可以计算出指数分布曲线的以下统计学参数：

均值：

$$\bar{x} = m_1 = \beta + \frac{1}{\alpha} \tag{3.34}$$

方差：

$$\begin{aligned}
 \sigma^2 &= \mu_2 = E\{[X - E(X)]^2\} \\
 &= m_2 - m_1^2 \\
 &= \left(\beta^2 + \frac{2}{\alpha}\beta + \frac{2}{\alpha^2}\right) - \left(\beta + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \\
 &= \frac{1}{\alpha^2}
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

变差系数：

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\alpha\beta + 1} \tag{3.36}$$

偏态系数：

$$\begin{aligned}
 C_s &= \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{E\{[X - E(X)]^3\}}{\sigma^3} \\
 &= \frac{m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^2}{\sigma^3} \\
 &= \frac{(\beta^3 + \frac{2}{\alpha}\beta^2 + \frac{6}{\alpha^2}\beta + \frac{6}{\alpha^3}) - 3(\beta + \frac{1}{\alpha})(\beta^2 + \frac{2}{\alpha}\beta + \frac{2}{\alpha^2}) + 2(\beta + \frac{1}{\alpha})^2}{\sigma^3} \quad (3.37) \\
 &= \frac{2}{\frac{\alpha^3}{\sigma^3}} \\
 &= 2
 \end{aligned}$$

由式(3.37)可分析得，指数分布曲线是皮尔逊III型理论频率曲线在偏态系数  $C_s$  值取 2 时候的特例。该曲线起始于  $\beta$  点，沿着  $+\infty$  方向无限延伸。由于该曲线的  $C_s$  值是确定的，它只有两个参数，因此计算起来比较简单，在国内的应用也比较广泛。由式(3.36)和式(3.37)可以推出：

$$\frac{C_s}{C_v} = 2(\alpha\beta + 1) = 2 + 2\alpha\beta \geq 2 \quad (3.38)$$

指数分布曲线的重现期为：

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{1 - F(x)} = e^{\alpha(x-\beta)} \quad (3.39)$$

方程左右同时取对数，化简得：

$$x = \alpha \lg P + \beta \quad (3.40)$$

采用最小二乘法推求  $\alpha$ 、 $\beta$  得：

$$\alpha = \frac{n \sum (i_p \ln P) - \sum i_p \sum \ln P}{n \sum (\ln P)^2 - (\sum \ln P)^2} \quad (3.41)$$

$$\beta = \frac{\sum i_p - \alpha \sum \ln P}{n} \quad (3.42)$$

通过式(3.40)、式(3.41)和式(3.42)即可求出理论频率点据  $(P, x_p)$ ，然后将理论频率点据绘制在海森概率格纸上，再由 matlab 拟合出一条光滑的曲线，该曲线即为拟合出的指数分布曲线。

### 3.3.3 耿贝尔分布曲线

耿贝尔分布是由极值定理导出的，由费雪和蒂培特于 1928 年研究发现各个样本的最大值分布将趋于三种极限形式的一种，具体由型式参数  $K$  确定，当  $K=0$  时就是耿贝尔分布（见图 3.3），水文方面主要用第 I 型渐进极值分布，也叫极值第 I 型分布<sup>[42]</sup>。

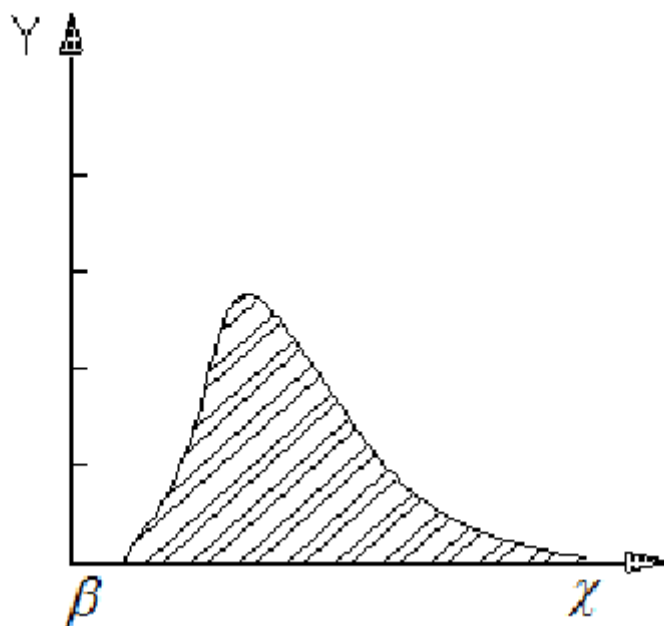


图 3.3 耿贝尔分布曲线

耿贝尔分布适用于年最大值选样方法，其频率曲线的图像形式接近于偏态铃形分布<sup>[43]</sup>。耿贝尔分布函数式为

$$P(x) = \exp(e^{-(a+x)/c}) \quad (3.43)$$

式中  $P(x)$  为耿贝尔分布的非超过几率， $x$  为水文量， $a$  和  $c$  为统计参数

$$a = rc - \bar{x} \quad (3.44)$$

$$c = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_x \quad (3.45)$$

式中  $r$  为欧拉常量， $r=0.57721$ ， $\bar{x}$  为水文量的平均值， $\sigma_x$  为水文量的标准差， $\sigma_x = \sqrt{x^2 - \bar{x}^2}$ 。

设超过概率为  $P_M$ ，则有

$$P_M = 1 - P(x) = 1 - \exp(e^{-(a+x)/c}) \quad (3.46)$$

则  $T_M = \frac{1}{P_M}$ ，即

$$T_M = \frac{1}{1 - \exp(e^{-(a+x)/c})} \quad (3.47)$$

整理上式可等

$$x = -a - c \times \ln[\ln T_M - \ln(T_M - 1)] \quad (3.48)$$

将式子(3.44)和(3.45)代入上式可得

$$x = -\left(r \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_x - \bar{x}\right) - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_x \ln[\ln T_M - \ln(T_M - 1)] \quad (3.49)$$

整理可得到

$$x = \bar{x} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma_x \{r + \ln[\ln T_M - \ln(T_M - 1)]\} \quad (3.50)$$

令频度系数为

$$K = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \{0.57721 + \ln[\ln T_M - \ln(T_M - 1)]\} \quad (3.51)$$

则有

$$x = \sigma_x K + \bar{x} \quad (3.52)$$

根据上式,以水文量  $x$  为横坐标,  $K$  为纵坐标,在直角坐标系中可得到一条直线,令  $A = \sigma_x$ ,

$B = \bar{x}$ , 最小二乘法可求得

$$\begin{aligned} x &= AK + B \\ A &= \frac{\overline{Kx} - \bar{K}\bar{x}}{\overline{K^2} - \bar{K}^2} \\ B &= \frac{\overline{Kx} - \bar{K}\bar{x}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = \bar{x} - A\bar{K} \end{aligned} \quad (3.53)$$

将同一历时的  $A_M$  资料按照降序排列,列表计算出各序列的式中有数值,最后根据式(3.53)求出  $A$  与  $B$  的值,从而得到该历时的频率计算公式  $x$  的值。

可以看到,从某种程度上来说,耿贝尔分布曲线是皮尔逊III型曲线当  $C_s=1.14$  时的一个特例,在计算过程中,  $C_s$  已确定,公式中只剩下  $\bar{x}$  和  $C_v$  两个参数,因此计算比较简便,易于手算或电算,而且精度良好。但它的缺点就是弹性不足,造成样本的适应性相对较差。



## 第四章 暴雨强度公式的推求

城市暴雨强度公式得基本形式为：

$$i = \frac{A(1 + C \lg T)}{(t + b)^n} \quad (4.1)$$

式中：  $i$ ——暴雨强度 [ $L/(s \cdot hm^2)$ ];

$t$ ——降雨历时 (min) ;

$T$ ——设计重现期 (a) ;

$A$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $b$ ——参数，根据统计方法进行计算确定。

城市暴雨强度公式的推求根本上说就是对上述参数  $A$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $b$  的推求，只要这几个参数可以确定，暴雨强度公式也就随之确定了。 $A$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $b$  这四个参数可以用符合数理统计基础理论的数学方法进行推求，常用的求解非线性方程的方法有：牛顿迭代法、高斯—牛顿法、麦夸尔特法、遗传算法等。本论文主要介绍麦夸尔特算法和遗传算法。

### 4.1 麦夸尔特 (Marquilt) 算法

#### 4.1.1 麦夸尔特算法的理论推导

高斯—牛顿法是一种迭代优化算法，求解暴雨强度公式可以取得良好效果<sup>[44]</sup>。麦夸尔特算法本质上是高斯—牛顿法的推广。它在一定程度上解决避免了高斯—牛顿法针对初值选择的苛刻要求，放宽了初值选择的条件，同样而且能够针对多个参数实现协同寻优，避免了逐个优化参数的复杂过程<sup>[45]</sup>。

非线性模型<sup>[46]</sup>一般可以描述为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p; b_1, b_2, \dots, b_m) + \varepsilon \quad (4.2)$$

其中  $f$  为非线性模型， $x_1, x_2, \dots, x_p$  为模型自变量， $b_1, b_2, \dots, b_m$  为模型需要估计的参数， $\varepsilon$  为模型估计值和实际输出值的误差项。设总共有  $N$  个观测样本，则第  $k$  个观测样本数据为  $x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{pk}$ ，对应的模型输出为  $y_k$ ，亦即

$$y_k = f(x_k, b) = f(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kL}; b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (4.3)$$

对于给定的第  $k$  个观测样本数据  $x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{pk}$ ，式(4.3)可以看作是参数  $b_1, b_2, \dots, b_m$  为自变量

的函数。对于给定的初值  $b^0 = b_1^0, b_2^0, \dots, b_m^0$ ，把  $f(x_k, b)$  在初值  $b^0$  处进行泰勒级数展开，并且只保留展开式的常数项和一次项，可以得到：

$$\begin{aligned} f(x_k, b) &\approx f(x_k, b^0) + \\ &\quad \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_1} \right|_{b=b^0} (b_1 - b_1^0) + \\ &\quad \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_2} \right|_{b=b^0} (b_2 - b_2^0) + \dots + \\ &\quad \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_m} \right|_{b=b^0} (b_m - b_m^0) \\ &= f(x_k, b^0) + \sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} (b_i - b_i^0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

通过式(4.4)，在给定了每一组的观测值输入  $x_k$ ，模型输出  $f(x_k, b)$  均可以表示为参数  $b$  的线性函数形式。然后利用最小二乘误差计算原则，可以得到：

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k, b)]^2 \\ &\approx \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k, b^0) - \sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} (b_i - b_i^0)]^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

要使得总误差  $Q$  最小，则要求  $\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0$ 。高斯—牛顿法的主要思路就是给定参数的初值

$b^0 = b_1^0, b_2^0, \dots, b_m^0$  之后，根据上式求解出参数的迭代变化量  $\Delta = b - b^0$ ，直到参数收敛为止。

麦夸尔特法是在上式的基础上加入了一个修正项，变成了：

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k, b)]^2 \\ &\approx \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k, b^0) - \sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} (b_i - b_i^0)]^2 + d \sum_{i=1}^m (b_i - b_i^0)^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

其中  $d$  为阻尼因子，当  $d=0$  的时候，退化为高斯—牛顿法。继续对  $Q$  求偏导数可得：

$$\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 2 \left[ \sum_{k=1}^n [y_k - f(x_k, b^0) - \sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} (b_i - b_i^0)] \left( - \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} \right) + 2d(b_i - b_i^0) \right] \quad (4.7)$$

其中  $i=1, 2, 3, \dots, m$ ，令式(4.7)为零，可写成方程：

$$\sum_{k=1}^n y_k - f(x_k, b^0) - \sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} (b_i - b_i^0) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} (b_i - b_i^0) \left. \frac{\partial f(x_k, b^0)}{\partial b_i} \right|_{b=b^0} + d(b_i - b_i^0) \quad (4.8)$$

对于多个参数  $b_1, b_2, \dots, b_m$  的每一个参数写出对应方程，整理后可以得到以下方程组：

其中：

解上述方程组可得:

通过给定的初值  $b^0$ ，应用所有的样本数据，计算出方程组中的各项系数  $a_{ij}$  和  $a_{iy}$ ，在设定好阻尼因子的初值的情况下，可以得到方程组的解  $\Delta$ ，从而进一步更新  $b^0$  为  $b^1$ 。如果此时  $\max|\Delta_i| \leq \varepsilon$  则迭代终止，否则将更新后的  $b^1$  作为下一轮迭代的初值，不断重复迭代过程直至满足条件为止。后来 Hartley 提出了引入步长因子  $w$  的 Marquilt 算法，主要思路是将参数的变化公式改写为：

通过此项改进,使得方程组的解不再直接作为参数变化量,而是作为参数变化的方向出现,进一步放宽了对参数初值  $b^0$  选取的要求。

#### 4.1.2 麦夸尔特算法的电算步骤

麦夸尔特算法是一种迭代算法<sup>[47]</sup>。将之应用于暴雨强度公式的推导过程当中，根据公式(4.1)，重现期  $T$  以及降雨历时  $t$  为模型的两个自变量，参数  $A, b, C, n$  模型的待估计参数，暴雨强度值  $i$  即为模型的因变量。具体求解步骤如下：

(1) 对  $A, b, C, n$  四个参数分别求偏导数

31

$$\frac{\partial i}{\partial C} = \frac{A \lg T}{(t+b)^n} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial i}{\partial n} = -\frac{A(1+C \lg T) \lg(t+b)}{(t+b)^n} \quad (4.16)$$

(2) 第一次迭代。选择迭代初始值  $b^0 = (A^0, b^0, C^0, n^0)$ ，设定阻尼系数的初始值  $d^0 = 0.01$ ，步长因子初始值  $w^0 = 0.1$ ，然后将上述初始化的参数值以及所有降雨强度样本数据代入公式(4.10)中，可以构建出方程组(4.9)的系数项和常数项。解此方程组得到  $\Delta^0$ ，根据公式(4.12)得到更新后的参数值  $b^1$ ，将  $b^1$  代入

$$Q^0 = \sum_{k=1}^n [i_k - i(T_k, t_k; A, b, C, n)]^2 \quad (4.17)$$

计算得到暴雨强度公式的总体绝对误差值。

(3) 重复迭代过程。令  $b^0 = b^1$ ， $d = u^\alpha d^0$ ，其中  $u$  一般取 10， $\alpha = -1, 1, 2, \dots, 10$ ， $w = w^0$ 。首先  $\alpha$  取值从 -1 开始，得到新的阻尼因子  $d$ 。对于每个  $d$ ，按照方程组(4.9)、(4.11)、(4.13)~(4.17)的思路计算出新的总体绝对误差值  $Q^1$ 。若  $Q^1 < Q^0$ ，则本次迭代结束。若  $Q^1 \geq Q^0$ ，则说明新的  $d$  的取值并不合适，首先不断增加  $\alpha$  从而不断增加  $d$  的值，直到满足  $Q^1 < Q^0$  条件为止。但是工程实际中  $d$  的值一般不能超过 100，当  $d$  达到最大且仍然  $Q^1 \geq Q^0$  的时候，按照  $w = \frac{w^0}{4}$  更新步长因子，然后再从 -1 开始更新  $\alpha$ ，重复上述步骤，直至满足  $Q^1 < Q^0$  为止。

(4) 判断终止条件。检验  $\Delta$  的值是否满足  $\max_{i=1 \dots 4} |\Delta_i| \leq eps$ 。如果满足则终止迭代，输出最新的  $b^1$ ；若不满足，则按照上步更新后的  $d$  作为新的  $d^0$ ， $b^1$  作为新的  $b^0$ ， $Q^1$  作为新的  $Q^0$ ，重复第 (3) 步的迭代过程。直至满足  $\max_{i=1 \dots 4} |\Delta_i| \leq eps$  条件为止。

### 4.1.3 麦夸尔特算法流程图

关于麦夸尔特算法的计算步骤及流程见下图 4.1。

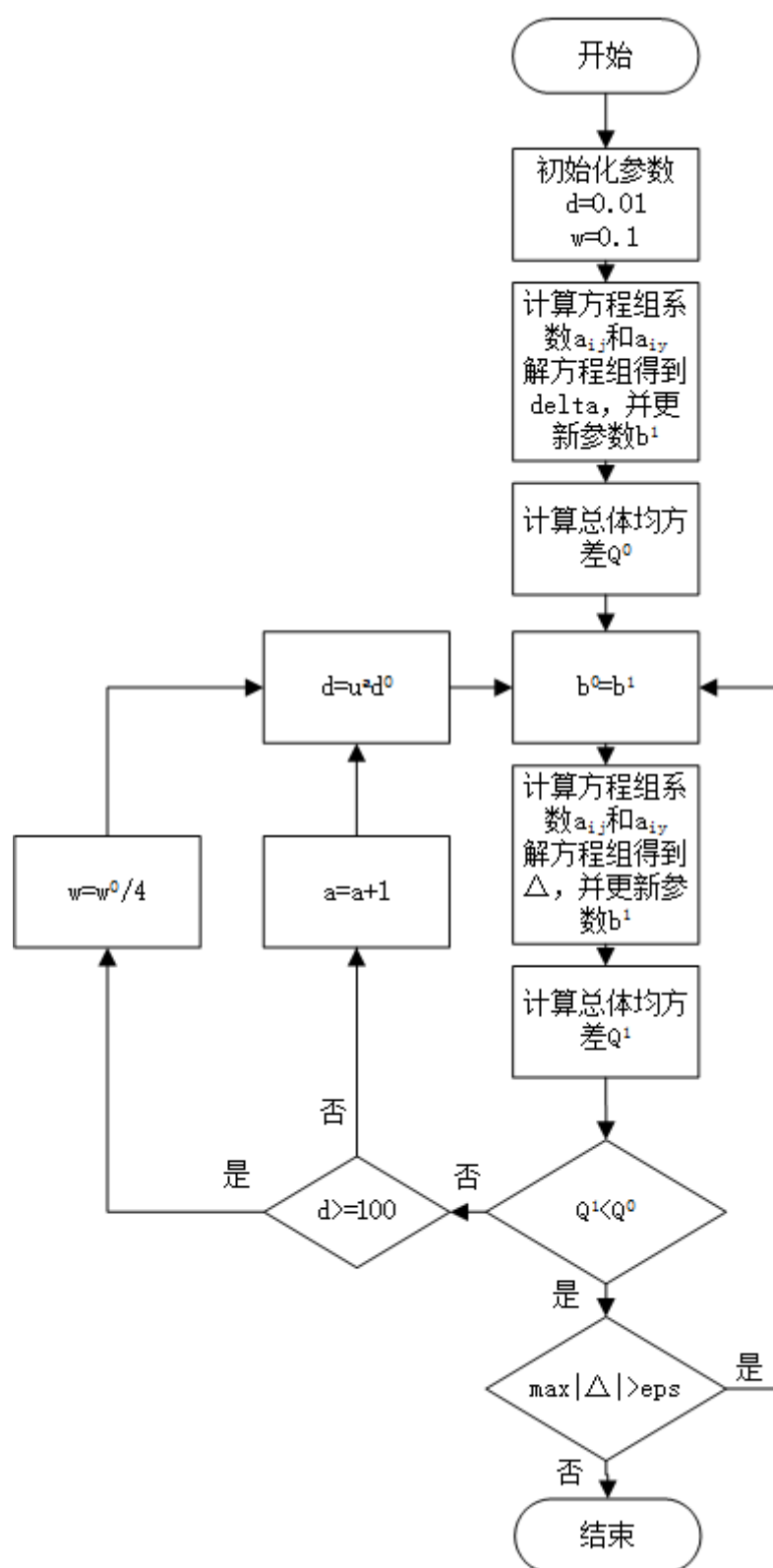


图 4.1 麦夸尔特算法流程图

## 4.2 遗传算法

### 4.2.1 遗传算法理论

暴雨强度公式的推求本质上可以归结为一个多参数协同优化问题。遗传算法作为一种具有一定全局优化性能的优化算法<sup>[48]</sup>，它对模型是否可微、可导以及是否连续并没有限制，实现方法也简单不复杂，已经在多个不同的领域中得到了广泛的应用。

遗传算法启发于生物种群的进化规律。它将生物个体的适应性量化为目标模型的输出，将种群的每个个体抽象为模型参数的一个解，按照适者生存的原则比较各个个体的适应度从而决定，通过交叉变异、基因突变等算子，迭代产生下一代的种群个体，通过不断地迭代最终选出最优的个体，从而得到最优解<sup>[49]</sup>。遗传算法本质上是模拟生物界物竞天择、适者生存的规律，来搜索优化目标的最优解的。遗传算法的主要操作过程有编码、选择、交叉、变异、适应度计算等。

(1) 编码。在利用遗传算法求解优化问题的时候，首先需要对问题的解进行编码。这样做的原因在于，遗传算法是一种模拟生物染色体进化的算法，优化问题的解都是用相应的数字串来进行表示，通常我们将数字编码为二进制的字符串。

遗传算法将问题的解编码为二进制具有诸多优点：二进制表示形式所占位数大大增加，有利于扩大算法的搜索范围，增加了找到全局最优解的概率；二进制表示符合计算机的底层表示，有利于编写计算机运算程序；每一段编码可以理解为一个染色体，其中的每一位可以理解为一个基因，从而可以方便地进行后续的交叉和变异操作。但是遗传算法编码的一个缺点是理论上智能表示离散的变量，而对于连续的变量则需要初始化大量的种群才能达到足够的精度。

(2) 选择。遗传算法的选择是指从上一代种群当中选择出能够在下一代得以保留的个体。总体原则是优胜劣汰。评判个体优良的标准即适应度函数，具有更佳适应度值的个体，留在下一代的可能性就越大。目前常用的选择算法有几种：

轮盘赌方法，又称为适应度比例法。设种群大小为  $N$ ，第  $i$  个个体的适应度为  $f_i$ ，则第  $i$  个个体被选中留在下一代的概率  $P_i$  为

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^N f_k} \quad (4.18)$$

由式(4.18)可以看出, 概率  $P_i$  与个体的适应度呈线性关系, 符合优胜劣汰、适者生存的原则。

最佳个体保留法, 这种方法首先把该代种群按照个体适应度降序排列, 然后选择一个或者多个个体在不加任何变异、交叉的操作情况下, 直接保留至下一代。这种算法直观上保留了当前迭代的最佳效果, 但是缺点也非常明显, 它容易收敛于当前最佳个体所在的局部最优解, 而弱化了其在全局空间内的搜索能力。

(3) 交叉。交叉通过把两个上一代的种群个体部分结构进行重组和替换, 从而产生下一代的种群个体。交叉模拟的是生物染色体的重组的原理。交叉是遗传算法向全局最优解进一步靠近的重要过程。

遗传算法中实现交叉操作, 首先需要随机从种群中选择两个个体。针对如何确定交叉点的位置和如何进行部分编码的交换, 产生了几种不同的操作方式:

A. 单点交叉。作为最简单的一种交叉方式, 它是指随机在染色体中选择一个局部片段, 然后交换两个个体的对应基因。

B. 双点交叉。是指随机在两个染色体中选择两个局部片段, 然后互相交换。与单点交叉不同的是, 双点交叉在两个染色体上面随机的位点不尽相同。

C. 均匀交叉。指两个染色体的每一对对应位点都以相同概率互换位置。

(4) 变异。变异指的是将某个染色体的某些特定的位置基因用其他的基因直接替换, 从而产生“突变”的下一代个体。同样变异也在遗传算法的新个体生成中扮演至关重要的角色。如果变异方法选取得当, 可以增强遗传算法得到全局最优解的能力。又根据如何确定变异点的位置以及如何进行基因值替换, 产生了多种操作方法:

A. 基本位变异。指对一个染色体上特定的一个或多个位置用随机数进行替换。

B. 均匀变异。指对一个染色体上的所有基因, 都以某个特定的随机概率分布来进行替换。

C. 高斯变异。指在均匀变异的基础上, 将原来的随即变异概率用均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^2$  的高斯分布来替换。

(5) 适应度函数。遗传算法的一大优点就是对目标函数没有连续可微的约束, 函数的定义域也可以是不连续的集合。这使得遗传算法的应用范围拓展了许多。通常情况下, 把需要优化的目标函数值转化为求模型的最小值问题。

### 4.2.2 遗传算法流程图

关于遗传算法具体的流程步骤见下图 4.2。

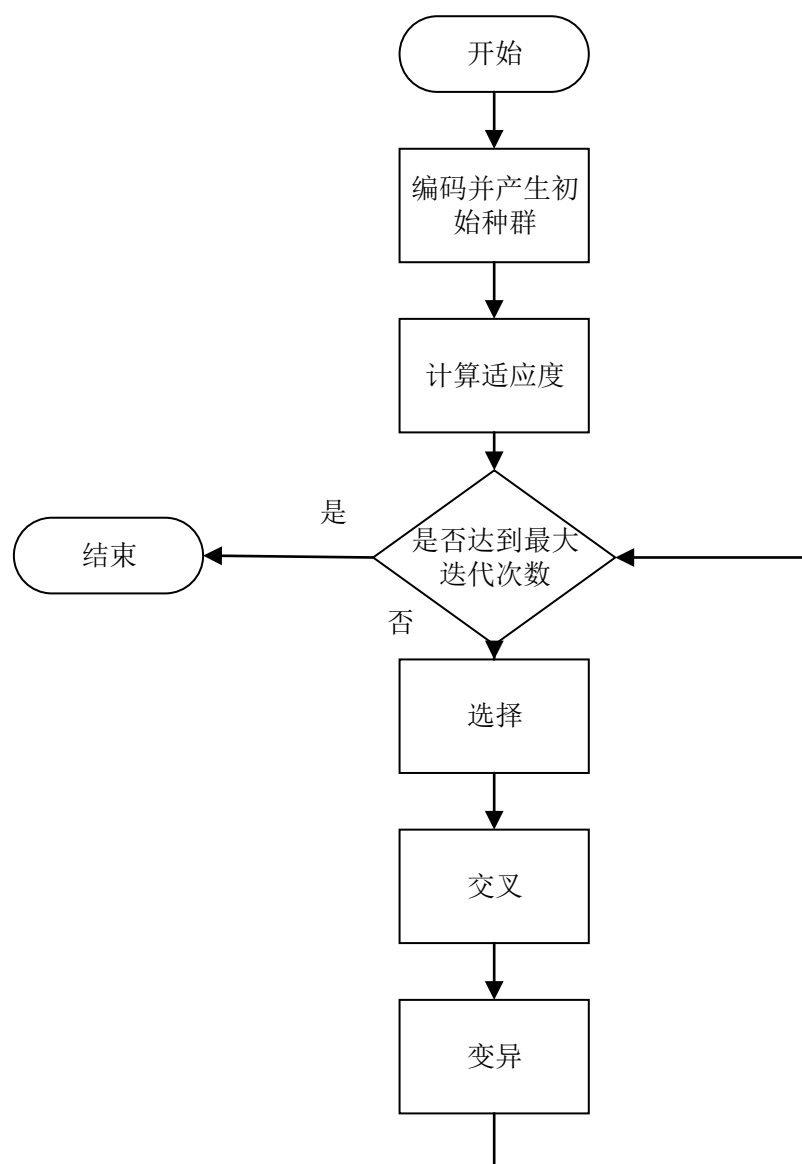


图 4.2 遗传算法流程图



## 第五章 暴雨强度公式软件设计与开发

结合上述推求暴雨强度公式的技术路线，本章基于 MATLAB R2015a 软件平台，设计并开发了相应的暴雨强度公式软件系统。设计软件系统首先设计了简洁而又实用的图形界面，为用户直接使用本软件推求暴雨强度公式提供了方便的交互接口；其次在系统中嵌入了三种频率曲线拟合方法以及两种暴雨强度公式推求方法，并且实现了数据的选取、处理、结果保存等功能。

### 5.1 MATLAB 介绍

MATLAB 是一种科学计算软件，可以用于矩阵运算、控制系统的模拟与仿真以及各类数值算法的实现，它使用方便、上手简单、功能强大，目前已经成为国际上各大高校教学和科研中不可缺少的工具。

#### 5.1.1 MATLAB 语言的产生和发展

MATLAB 语言的产生是和数学计算紧密联系在一起。1980 年，美国新墨西哥州大学计算机系主任 Cleve Moler 在给学生讲授线性代数课程时，发现学生在高级语言编程上花费很多的时间，于是他编写了一套提供给学生使用的 Fortran 子程序库接口程序，并且命名为“MATLAB”（即 Matrix Laboratory 的前三个字母的组合，意为“矩阵实验室”）。这套接口程序取得了很大的成功，深受学生欢迎<sup>[50]</sup>。

20 世纪 80 年代初，Moler 等一批数学家与软件专家组建了 Mathworks 软件开发公司，继续从事 MATLAB 的研究和开发，1984 年推出了第一个 MATLAB 商业版本，其核心由原来的 Fortran 改用 C 语言编写。而后，它又添加了丰富多彩的图形图像处理、多媒体、符号运算以及与其他流行软件的接口功能，进一步增强了 MATLAB 的功能。

Mathworks 公司正式推出 MATLAB 后，于 1992 年推出了具有划时代意义的 MATLAB4.0 版本，之后陆续推出了几个改进和提高的版本。2004 年 9 月正式推出 MATLAB Release 14，即 MATLAB 7.0，其功能在原有的基础上又有了进一步的改进，2008 年 3 月推出了 R2008A，2015 年 3 月推出了 R2015a，即 MATLAB 8.5 版本。

MATLAB 经过几十年的研究与不断完善，现在已经成为国际上最为流行的科学计算与工程计算软件工具之一，现在的 MATLAB 已经不仅仅是一个最初的“矩阵实验室”，

它已经发展成为一种具有广泛应用前景、全新的计算机高级编程语言，可以说他是“第四代”计算机语言。

自 20 世纪 90 年代，美国和欧洲的各大学将 MATLAB 正式列入研究生和本科生的教学计划，MATLAB 软件已经成为应用代数、自控原理、数理统计、数字信号处理、时间序列分析、动态系统仿真等课程的基本工具，成为学生必须掌握的基本软件之一。在研究单位和工业界，MATLAB 也称为工程师们必须掌握的一种工具，被人做进行高校研究与开发的首选软件工具。

### 5.1.2 MATLAB 的优势与特点

MATLAB 在学术界和工程界广受欢迎，其主要优势和特点有如下几个方面。

#### (1) 友好的工作平台和编程环境

MATLAB 由一系列组件构成，其中包括了许多可以直接调用的图形用户界面，而且在不断更新的版本中，这些图形用户界面被不断予以人性化设计，极大地方便了用户的使用。此外，MATLAB 语言类似于 python 等解释性语言，运行前不需要经过整体的编译，可以逐条逐步地运行命令，便于程序的调试。

#### (2) 简单易用的编程语言

MATLAB 语言（也成为 M 语言）是一种基于 MATLAB 开发环境的高级编程语言。它形式简单、语法清晰，新用户一般可以很快地上手学会这种语言。该语言还具有良好的可扩展性和可移植性，MATLAB 内置的功能可以方便地将之转换为 C 系语言，大大提高了 MATLAB 的应用能力。

#### (3) 强大的科学计算机数据处理能力

MATLAB 的设计初衷便是为高校科研人员提供一套便于计算的接口工具，可以说它天生具有处理数学问题的能力基因。后来经过 Mathworks 公司的不断优化，目前 MATLAB 已经封装了 600 多个常用的函数以及多个集成工具箱。这使得用户 MATLAB 在解决科学计算时往往只需要构建上层运行框架，复杂的函数往往直接调用 MATLAB 内置的函数包即可，从而大大减少了编写底层函数的时间。

#### (4) 出色的图形处理功能

MATLAB 自产生之日起就具有翻遍的数据可视化功能。无论是向量、矩阵等作出图形和图表，亦或是二维或者三维图形的可视化、图像处理、动画和表达式作图，都可

利用 MATLAB 提供的相应工具方便地实现。

### 5.1.3 MATLAB 图形用户界面工具箱 GUIDE

GUIDE(Graphics User Interface Development)全称为图形用户界面开发环境，是 Mathworks 为 MATLAB 软件同步提供的一套软件开发框架。基于这一套框架，用户可以方便地创建定制化的 GUI 应用程序，开发过程中不仅仅省去了绘制空间的复杂步骤，而且 GUIDE 可以直接为软件界面生成相应的原始代码 M 文件，大大简化了软件开发的流程。MATLAB 首先集成了一套可视化地创建图形用户借口的工具集，主要有：布局编辑器，几何排列位置工具，属性编辑器，菜单编辑器，对象浏览器。布局编辑器主要用于将控件选择集合中的控件拖拽到主界面的相应位置上；几何位置排列工具用于调节各个控件之间的相对位置，配合布局编辑器，从而完成软件界面设计的层次和结构；属性编辑器用来设置控件对象的各项属性，例如字符、字体等属性；菜单编辑器可以对菜单尽心设计和编辑，它提供了一系列快捷键以供使用，可以方便地任意添加或者删除菜单，并设置菜单的 Tag、Label 等属性；对象浏览器与前述几个基本工具集不同的是，它主要用于浏览当前软件中涉及到的所有的控件对象信息，并可以方便地从对象浏览器中打开属性编辑器。

## 5.2 GUI 界面设计原则

### （1）坚持用户为核心

用户界面的设计一个很重要的原则就是要让用户感觉到整个软件都在他的控制之中，而不是反过来被软件所控制。坚持以用户为开发应用的服务核心：软件开发人员应该只负责提供与本软件有关的各个功能模块，而具体的操作流程和运行顺序应当交由用户自行决定，不能按照开发人员个人的意愿进行定制。

### （2）一致性设计

一致性原则使得用户在使用软件时，可以形成一定的刻板印象，在熟悉某个模块之可以类比地很快熟悉其他功能模块，不必重新适应新的设计风格。例如菜单、列表等选项中应该使用统一的字体风格。

### （3）较快响应速度

响应速度是影响用户体验的重要方面。开发人员应该在设计过程当中有针对性地进

行优化，采用不同的算法或者不同的计算方法可以极大地影响系统的响应速度。

#### (4) 简单美观

用户界面要求简单直接，有利于用户的使用和学习。开发者需要能够为用户提供容易上手、简单明了的界面信息以及界面布局，用户在使用时力求无需过多的专业知识，便可以方便地应用软件。所有的提示模块应该有明确的语义来表示，避免使用冗长的信息提示等等。美观则要求开发人员能够将界面设计得美观大方。可视设计可以为用户提供极佳的用户体验并留下深刻的印象，使得软件在于同类相比较时具有更强的竞争力。

### 5.3 开发环境与平台

硬件环境: CPU: Inter(R) Core(TM) i7-3770K CPU @ 3.50GHz 3.50GHz

内存: 16GB

软件环境: 操作系统: windows 10 专业版 64 位

开发平台: MATLAB R2015a

### 5.4 软件系统需求分析

本软件系统的目标是实现一套可以自动化地推求暴雨公式的功能，为科研人员提供一个方便计算的平台，可以为科研人员节省出设计具体算法的时间。需求具体描述如下：

(1) 数据的导入和保存功能：本系统的数据导入功能要求实现导入用户自定义地区的降雨数据，支持 excel 的.xlsx 格式以及 MATLAB 的.mat 格式导入；数据导出则提供用户保存计算结果的功能，支持 MATLAB 的.mat 格式保存。

(2) 频率曲线拟合方法：要求内置皮尔逊 III 型分布、指数分布、耿贝尔分布三种方法，每种方法都可以计算出拟合误差以及对应的 T-t-i 关系表。

(3) 暴雨强度公式推求方法：要求可以实现总公式以及每个重现期分公式的选择；实现内置麦夸尔特算法和遗传算法的选择；实现公式参数结果的输出以及公式误差的输出。

### 5.5 数据处理流程图

本软件数据流程基本按照暴雨强度公式的技术路线进行设计。首先需要导入原始降

雨强度数据；其次是对数据进行频率曲线拟合，拟合的方法多种多样，有必要根据一定的拟合标准选择最佳的频率曲线；利用优化后的频率曲线，生成暴雨强度公式推求的重要数据—重现期-历时-强度（ $T-t-i$ ）关系表；推求暴雨强度公式并输出公式参数。软件的数据处理流程图如下图 5.1 所示。

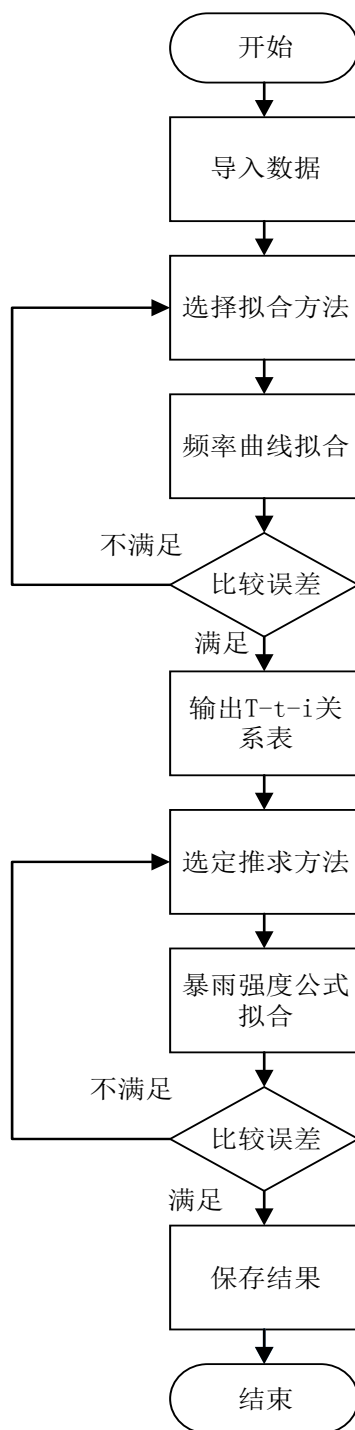


图 5.1 数据处理流程图

## 5.6 软件系统功能结构图

本软件系统包括了数据的处理、频率曲线的拟合、T-t-i 关系表推求、暴雨强度公式的推求等子功能模块，具体软件功能结构图如下图 5.2 所示。

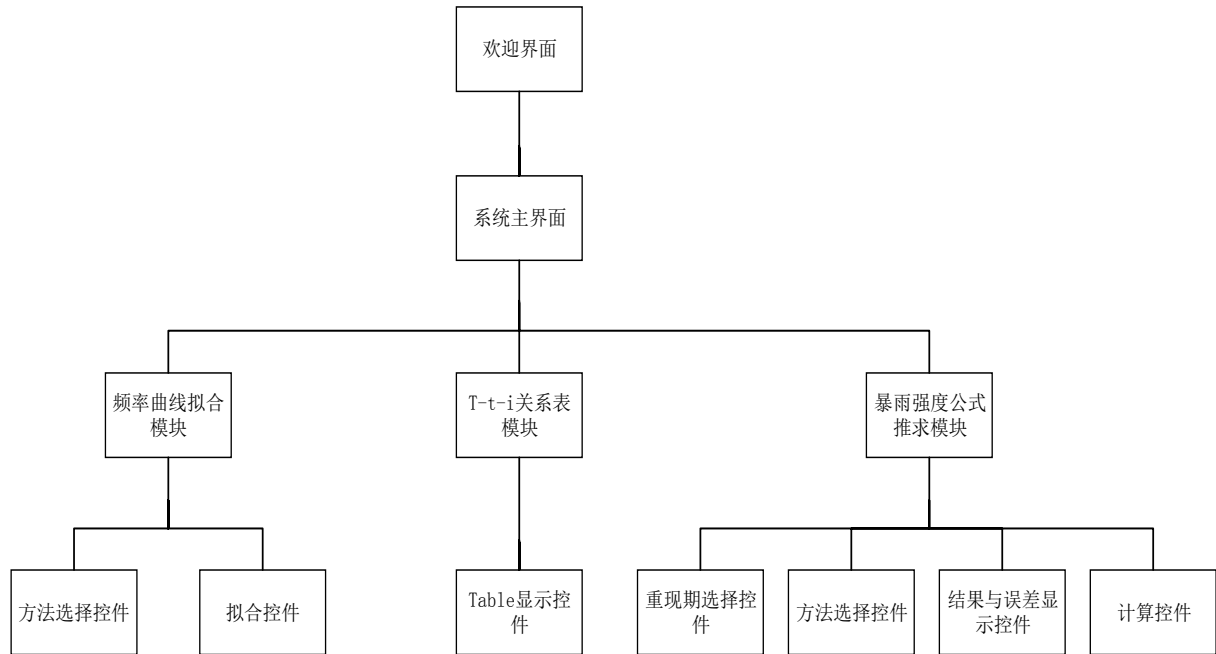


图 5.2 软件系统功能结构图

## 5.7 软件各模块介绍

### 5.7.1 软件欢迎界面

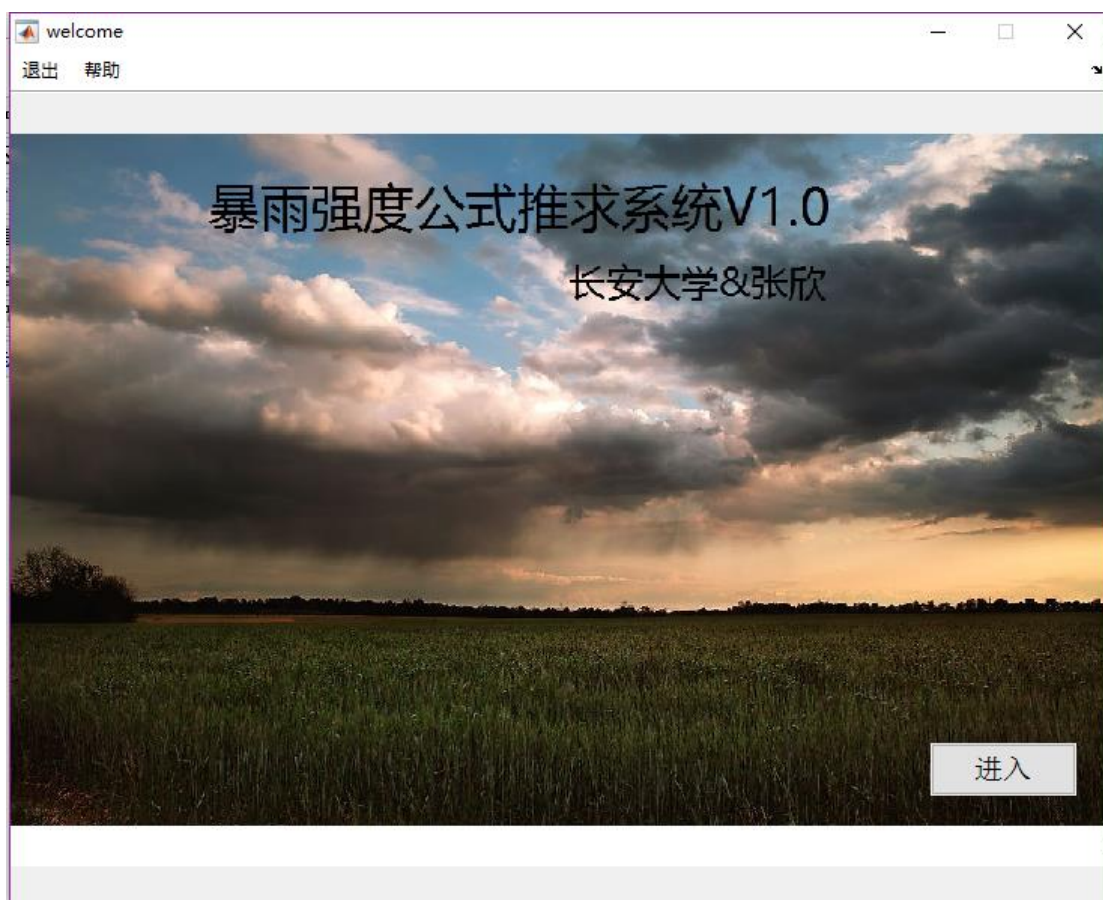


图 5.3 软件欢迎界面

软件的界面设计是人机交互的基础，为了提供更加友好的交互界面，我们本系统中设计了一组欢迎界面，如上图 5.3 所示。本界面显示了系统的版本号、开发者信息，以及提供了几组控件：“退出”控件直接退出本系统；“帮助”控件显示帮助信息；“进入”控件则直接进入本系统的操作主界面。

### 5.7.2 系统主界面

系统主界面是本软件系统的核心部分，负责集成本软件的所有功能，包括了数据导入和保存、频率曲线拟合、 $T-t-i$  关系表示、暴雨强度公式求解、参数结果显示等等功能，如下图 5.4 所示。



图 5.4 系统主界面

### 5.7.3 数据导入和保存

点击系统主界面左上角菜单栏“文件”按钮，弹出导入下拉菜单中包含了“导入”、“保存”和“退出”等按钮，如图 5.5 所示。

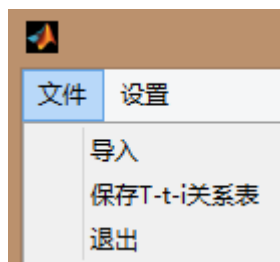


图 5.5 “文件”下拉菜单界面

其中，点击“导入”弹出“选择降雨强度数据”对话框，可以将排好序的降雨强度初始数据输入系统，本系统支持以 excel 的.xlsx 格式和 MATLAB 的.mat 格式导入数据；点击“保存”则弹出“保存计算结果”对话框，可以将系统运算的结果，运算结果将限定为.mat 格式。具体如下图 5.6、5.7 所示。



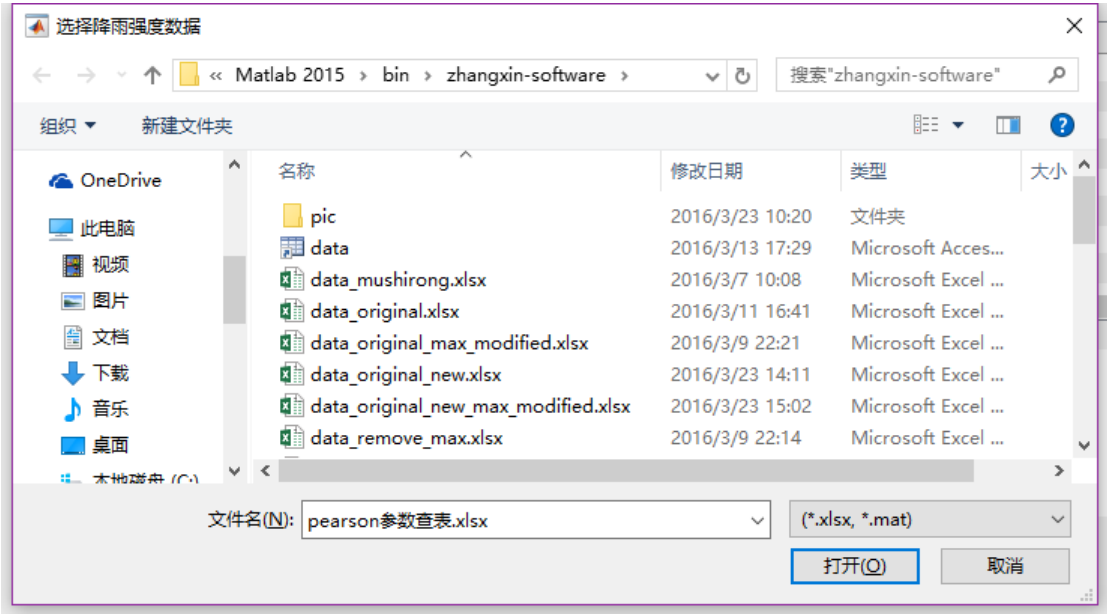


图 5.6 选择降雨强度数据对话框

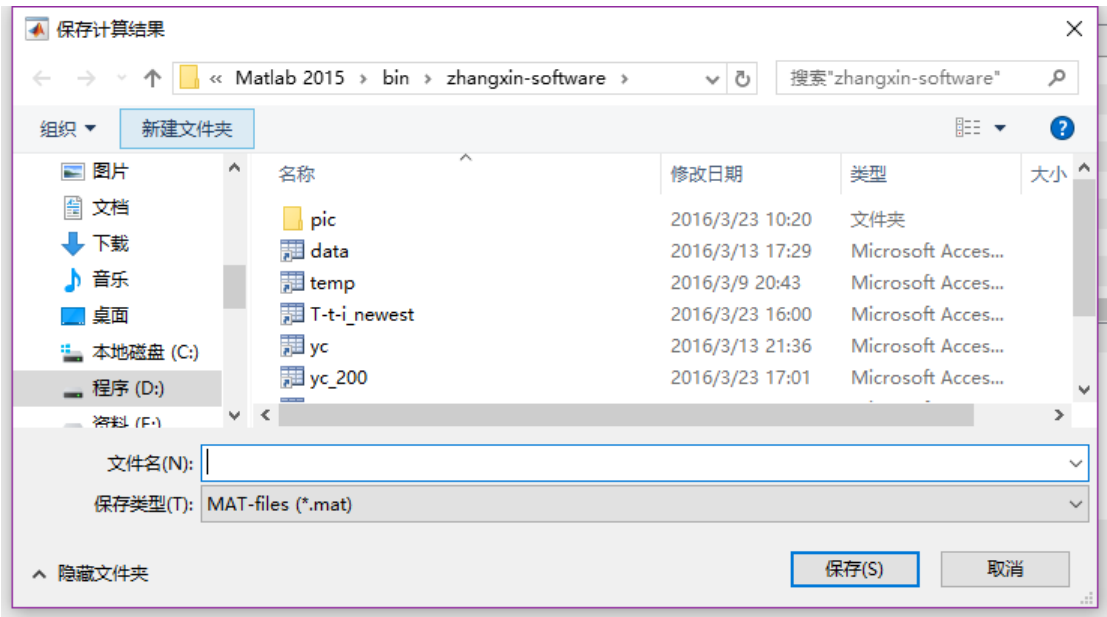


图 5.7 保存计算结果对话框

5.7.4 频率曲线拟合模块

频率曲线拟合模块负责针对降雨数据，利用不同的频率曲线进行拟合。本系统内置了三种方法：皮尔逊 III 型分布、指数分布、耿贝尔分布。使用时只需要选择好哪种曲线，然后点击“拟合”按钮即可。

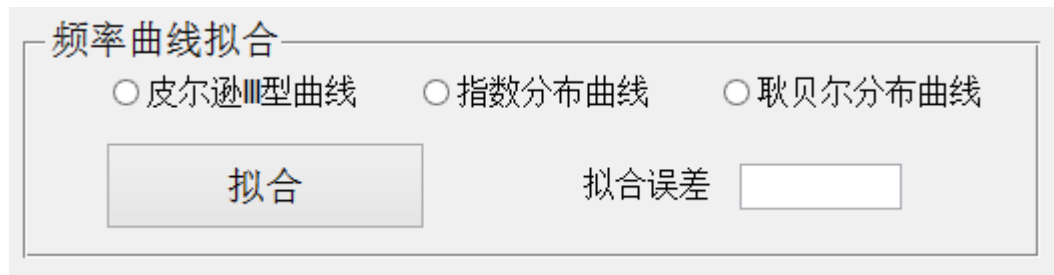


图 5.8 频率曲线拟合界面

#### 5.7.5 T-t-i 关系表显示模块

T-t-i 关系表是根据对应的频率曲线，结合理论频率的值产生的输出，我们在频率曲线拟合的同时，使得系统自动输出对应的 T-t-i 关系表。此模块采用 MATLAB GUIDE 工具箱中的 Table 控件实现，以频率曲线拟合模块的“拟合”按钮触发显示。

	5	10	15	20	30	45	
100	2.9575	2.3417	1.9872	1.7319	1.3295	1.0831	^
50	2.7123	2.1341	1.8055	1.5684	1.2027	0.9743	
30	2.5305	1.9803	1.6707	1.4472	1.1086	0.8935	
20	2.3851	1.8572	1.5629	1.3502	1.0334	0.8290	
10	2.1324	1.6433	1.3755	1.1816	0.9026	0.7167	
5	1.8689	1.4202	1.1802	1.0059	0.7662	0.5997	
-	<						>

图 5.9 T-t-i 关系表显示界面

#### 5.7.6 暴雨强度公式推求模块

此模块主要负责利用上述模块生成的 T-t-i 关系表，根据用户的要求，采用不同的方法计算不同重现期的暴雨强度公式参数。

暴雨强度公式求解

重现期

▼

方法

▼

开始计算

AbCn

绝对误差相对误差 (%)

图 5.10 暴雨强度公式推求界面

本系统针对暴雨强度公式推求问题设置里两个 Pop-up Menu 控件，分别用来设置暴雨强度公式的重现期和推求暴雨强度公式的方法。

重现期

▼

重现期

2-100年总公式

2-20年总公式

100

50

30

20

10

5

3

2

图 5.11 暴雨强度公式推求重现期选取界面

方法

▼

方法

麦夸尔特算法

遗传算法

图 5.12 暴雨强度公式推求方法选取界面

计算结果显示采用了六对 edit text 和 static text 的控件来显示推求的结果，其中四对控件用来显示公式的四个参数，剩余两对控件用来显示绝对误差和相对误差。以麦夸尔特计算总公式的结果为例，如下图 5.13 所示。

**暴雨强度公式求解**

总公式

麦夸尔特算法

**开始计算**

A  b  C  n

绝对误差  相对误差 (%)

图 5.13 暴雨强度公式推求计算界面

最后软件整体显示结果如下图 5.14 所示。

storm\_new

文件 设置

**暴雨强度公式推求系统V1.0** 长安大学&张欣

暴雨强度数据:

**频率曲线拟合**

☐ 皮尔逊III型曲线 ☐ 指数分布曲线 ☒ 耿贝尔分布曲线

**拟合** 拟合误差

**暴雨强度公式求解**

2-100年总公式

麦夸尔特算法

**开始计算**

A  b  C  n

绝对误差  相对误差 (%)

**T-t关系表**

	5	10	15	20	30	45
100	2.9575	2.3417	1.9872	1.7319	1.3295	1.0831
50	2.7123	2.1341	1.8055	1.5684	1.2027	0.9743
30	2.5305	1.9803	1.6707	1.4472	1.1086	0.8935
20	2.3851	1.8572	1.5629	1.3502	1.0334	0.8290
10	2.1324	1.6433	1.3755	1.1816	0.9026	0.7167
5	1.8689	1.4202	1.1802	1.0059	0.7662	0.5997

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

图 5.14 暴雨强度公式输出界面

## 第六章 佳县暴雨强度公式推求研究

### 6.1 佳县暴雨强度频率曲线拟合及误差分析

根据佳县气象局提供的 21 年的初始降雨资料以及十一个选样历时，可以根据第二章公式（2.1）计算出佳县历年（21 年）实测暴雨强度原始数据见表（2.2）。根据实测的暴雨强度数据，本文中分别采用了三种不同的理论频率曲线拟合方法来拟合原始数据，包括皮尔逊 III 型曲线、指数分布曲线以及耿贝尔分布曲线。拟合误差结果如下表 6.1 所示（单位 mm/min）。

表 6.1 三种频率分布模型各历时拟合误差

曲线 历时(min)	皮尔逊III型分布	指数分布	耿贝尔分布
5	0.0885	0.1522	0.1025
10	0.0570	0.1040	0.0586
15	0.0684	0.0834	0.0575
20	0.0734	0.0619	0.0544
30	0.1004	0.0678	0.0847
45	0.0973	0.0596	0.0847
60	0.1023	0.0698	0.0932
90	0.0979	0.0753	0.0921
120	0.0812	0.0641	0.0763
150	0.0657	0.0536	0.0616
180	0.0530	0.0435	0.0495
平均误差	0.0823	0.0811	0.0762

从上表中可以得出，三种不同的理论频率拟合曲线虽然都可以实现对降雨数据的拟合，但三种分布模型各历时的拟合误差均较大，其平均拟合误差均在 0.05 以上。根据上述结果，我们选取平均拟合误差最小的耿贝尔曲线作为标准理论频率曲线。《室外排水设计规范（2014 年版）》规定，采用年最大值法取样时，计算降雨重现期宜按 2 年、3 年、5 年、10 年、20 年、30 年、50 年、100 年统计。基于理论重现期 2a、3a、5a、10a、20a、30a、50a、100a，我们得出了使用耿贝尔理论频率曲线拟合的 T-t-i 关系表如下表 6.2 所示（单位 mm/min）。

表 6.2 佳县暴雨强度 T-t-i 关系表

T (a) t (min)	100	50	30	20	10	5	3	2
i (mm/min)								
5	2.9895	2.7410	2.5569	2.4095	2.1534	1.8864	1.6739	1.4831
10	2.4804	2.2532	2.0848	1.9501	1.7159	1.4717	1.2774	1.1029
15	2.1613	1.9543	1.8008	1.6779	1.4645	1.2419	1.0648	0.9058
20	1.9504	1.7547	1.6096	1.4935	1.2918	1.0814	0.9140	0.7637
30	1.4835	1.3344	1.2239	1.1355	0.9817	0.8215	0.6940	0.5795
45	1.2285	1.0989	1.0029	0.9261	0.7925	0.6533	0.5425	0.4430
60	0.9742	0.8728	0.7975	0.7374	0.6328	0.5238	0.4370	0.3591
90	0.6939	0.6238	0.5718	0.5302	0.4579	0.3825	0.3225	0.2687
120	0.5498	0.4958	0.4557	0.4237	0.3680	0.3100	0.2638	0.2223
150	0.4523	0.4089	0.3768	0.3511	0.3064	0.2598	0.2228	0.1895
180	0.3890	0.3522	0.3250	0.3032	0.2653	0.2258	0.1944	0.1662

## 6.2 佳县暴雨强度公式的误差分析及特大值的处理

基于佳县暴雨强度 T-t-i 关系表 6.2, 利用麦夸尔特迭代算法, 可以计算出公式 (4.1) 中的各项参数 A、C、n、b 以及拟合误差。考虑到不同范围的重现期在工程实际中有着不同的用处, 在此我们也分别计算了 2~20 年和 2~100 年两组不同重现期总公式的拟合误差, 如下表 6.3 所示。

表 6.3 佳县暴雨强度公式误差分析

重现期 (a)	绝对均方差 (s)	相对均方差 f (%)
2	0.0044	0.7332
3	0.0036	0.5021
5	0.0080	0.9532
10	0.0141	1.4240
20	0.0197	1.7296
30	0.0228	1.8587
50	0.0265	1.9848
100	0.0312	2.1087
2~20	0.0420	4.0427
2~100	0.0511	4.9130

《室外排水设计规范 (2014 年版)》规定, 计算重现期在 2 年~20 年时, 在一般强

度的地方，平均绝对方差不宜大于  $0.05\text{mm}/\text{min}$ 。在较大强度的地方，平均相对方差不宜大于 5%。从上表 6.3 可以看出，虽然在单一重现期较小的情况下，暴雨强度公式的拟合误差达到了室外排水规范所要求的  $0.05\text{mm}/\text{min}$  以下的标准，但是在较大重现期的条件下则没有达到要求，对于 2~100 年的重现期范围，平均拟合误差超出了  $0.05\text{mm}/\text{min}$  的界限。产生如此巨大误差的根本原因在于佳县原始降雨数据的相对不规律性。如前文所述，因为佳县特殊的地理条件，降水年际变化率大，相对变化率达 80%，年内分配不均<sup>[38]</sup>，造成了该地区极易出现极端降水或者干旱的状况。为此我们统计了从 1994 年至 2014 年佳县的降水量水平，如下图 6.1 所示（单位  $0.1\text{mm}$ ）。

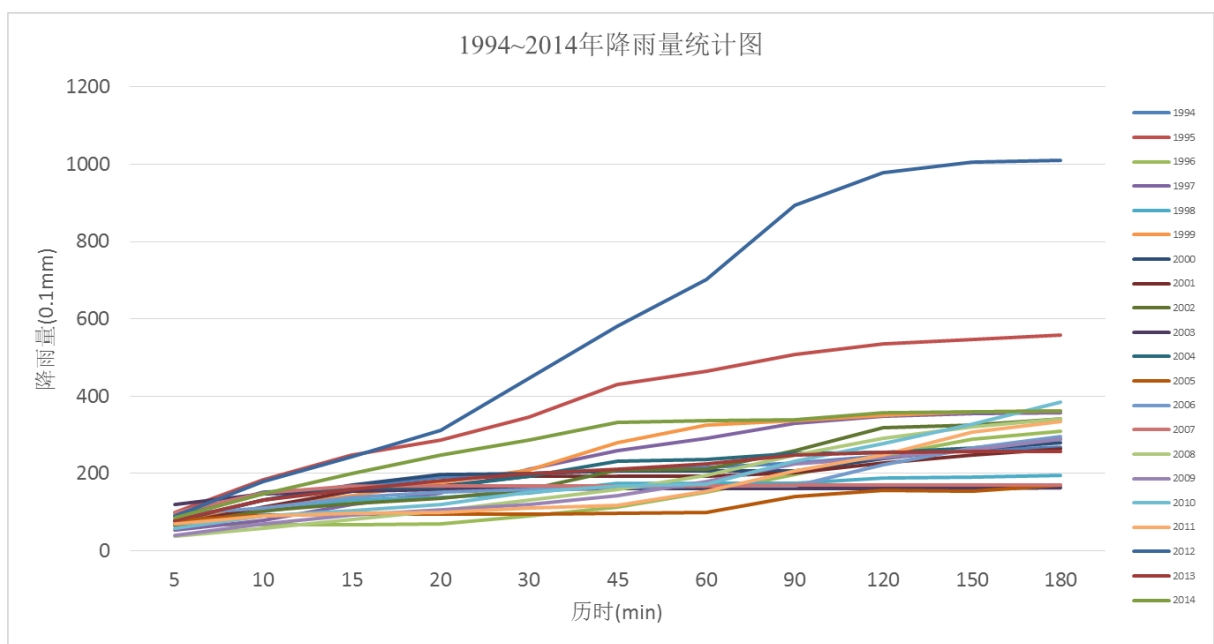


图 6.1 佳县 1994~2014 年降雨量统计图

上图中明显可以看出 2012 年的降雨水平远远超过了其他各个年份的降雨量。查阅相关资料发现，佳县在 2012 年 6 月上旬至 9 月期间，遭遇百年不遇的极端降水情况，降雨量超过了往年降雨的一倍以上，导致了严重的内涝灾害。2012 年的降雨量较之于其他年份的降雨量出现了大幅度的增加。在个别较大历时的情况下，降雨强度竟超过了平均水平的 400%。水文学上称呼这种特大的降雨强度为特大值。在推导暴雨强度公式的时候，特大值的出现往往会导致频率曲线拟合误差过大，进而导致暴雨强度公式推导精度受到消极影响。为了推导出更加适合市政工程设计的水管排水管道以及符合规范的要求，有必要针对特大值做进一步的处理。《给水排水设计手册·第 5 册：城镇排水》中规定，特大值是指比实测系列资料大得多的稀遇暴雨，它是在实测系列资料所点绘的各历时的

重现期——强度曲线上远离曲线规律的测点。如 50 年一遇的暴雨记录中挟有 500 年一遇的暴雨，则该暴雨资料应予以舍弃，否则将会对计算结果产生相当不利的影响，均方差也会变得很大。通常认为当  $i_t/\bar{i}_t \geq 2$  ( $\bar{i}_t$  为计入特大值后的系列均值) 时， $i_t$  可做特大值舍弃处理。或可点绘各历时的重现期——强度曲线，对远离规律的测点做最大值舍弃 [43]。

内蒙古气候中心的马玉峰曾研究过特大值的处理方法，他分了三种情形，即不考虑特大值、以该年的次大值代替特大值、舍弃特大值所在年份的全部数据进行拟合计算，结果表明在不考虑特大值的情况下，拟合精度和暴雨强度公式的计算精度明显要低于后面两种特大值经过处理的情况，而后面两种特大值经过处理的情况误差很接近，而且计算精度明显提高 [51]。

这里我们采用了二倍均值标准来作为特大值的判定依据，然后采用将特大值所在年份的数据舍弃的办法处理降雨强度数据。

首先我们根据降雨强度原始资料以及上述特大值的判定依据对原始数据进行特大值检验，检验结果如下表 6.4 所示。

表 6.4 佳县降雨强度特大值检验表

历时	最大值	均值	2倍均值	特大值	发生时间
5	2.4000	1.5400	3.0800	无	无
10	1.8400	1.1614	2.3229	无	无
15	1.6600	0.9594	1.9187	无	无
20	1.5600	0.8145	1.6290	无	无
30	1.4867	0.6316	1.2632	1.4867	2012年7月27日
45	1.2933	0.4877	0.9754	1.2933	2012年7月27日
60	1.1683	0.3996	0.7992	1.1683	2012年7月27日
90	0.9922	0.3033	0.6066	0.9922	2012年7月27日
120	0.8150	0.2506	0.5012	0.8150	2012年7月27日
150	0.6707	0.2126	0.4252	0.6707	2012年7月27日
180	0.5611	0.1852	0.3704	0.5611	2012年7月27日

由上表可知，30min~180min 的七个降雨历时存在特大值，这些特大值均为 2012 年 7 月 27 日的同一场雨所致。7 月 27 日的这场降雨打破了佳县有降雨记录以来的历史极值，重现期高达 272 年一遇，比历史次极值高出 101% [7]。根据上述特大值的处理办法，我们把特大值所在年份 2012 年的降雨数据舍弃，得到更新后的降雨强度数据，这份数



据是本文最终推导暴雨强度公式的基础数据。

6.3 特大值处理后的佳县暴雨强度频率曲线拟合

6.3.1 特大值处理后的佳县暴雨强度频率模型选取

如上文所述，在对特大值经过处理之后，本文中依旧采用皮尔逊 III 型分布、指数分布和耿贝尔分布这三种最为广泛应用的频率分布模型来对降雨强度数据进行拟合。在使用皮尔逊 III 型频率曲线拟合的时候，需要针对皮尔逊 III 型曲线的参数采用适线法进行优化。下表 6.5 展示了优化前和优化后的皮尔逊 III 型曲线参数变化。

表 6.5 皮尔逊 III 型理论频率曲线参数优化表

项目	降雨强度均值 (mm/min)	优化前			优化后			
		Cs	Cv	Cs/Cv	Cs	Cv	Cs/Cv	
降雨 历时 (min )	5	1.5260	0.9082	0.2595	3.5000	0.6487	0.2695	2.4072
	10	1.1300	1.0215	0.2919	3.5000	0.7296	0.3019	2.4172
	15	0.9260	1.0959	0.3131	3.5000	0.7828	0.3231	2.4226
	20	0.7773	1.1689	0.3340	3.5000	0.8349	0.3440	2.4273
	30	0.5888	1.2148	0.3471	3.5000	0.8677	0.3571	2.4300
	45	0.4474	1.3684	0.3910	3.5000	0.9774	0.4010	2.4377
	60	0.3612	1.3372	0.3821	3.5000	0.9551	0.3921	2.4362
	90	0.2688	1.2250	0.3500	3.5000	0.8750	0.3600	2.4306
	120	0.2224	1.1381	0.3252	3.5000	0.8129	0.3352	2.4254
	150	0.1897	1.0864	0.3104	3.5000	0.7760	0.3204	2.4220
180	0.1664	1.0641	0.3040	3.5000	0.7601	0.3140	2.4204	

同样地，根据第三章所述的理论频率曲线拟合方法，采用指数分布和耿贝尔分布分别拟合降雨强度数据，得到三种曲线的拟合误差如下表 6.6 所示。（单位 mm/min）

表 6.6 特大值处理后的三种频率分布模型各历时拟合误差

曲线 历时(min)	皮尔逊III型分布	指数分布	耿贝尔分布
5	0.0917	0.1464	0.0984
10	0.0573	0.1009	0.0595
15	0.0619	0.0834	0.0576
20	0.0532	0.0629	0.0454
30	0.0543	0.0528	0.0489
45	0.0452	0.0312	0.0401

曲线 历时(min)	皮尔逊III型分布	指数分布	耿贝尔分布
60	0.0430	0.0287	0.0397
90	0.0305	0.0218	0.0278
120	0.0226	0.0186	0.0204
150	0.0184	0.0195	0.0173
180	0.0153	0.0177	0.0148
平均误差	0.0497	0.0665	0.0485

在绘制拟合频率曲线时，普通坐标系容易导致曲线的两段坡度太陡，给画图增加了许多不便，本文中采用海森格纸坐标系来绘制频率曲线图，皮尔逊 III 型分布频率曲线拟合结果如下图 6.2 所示。

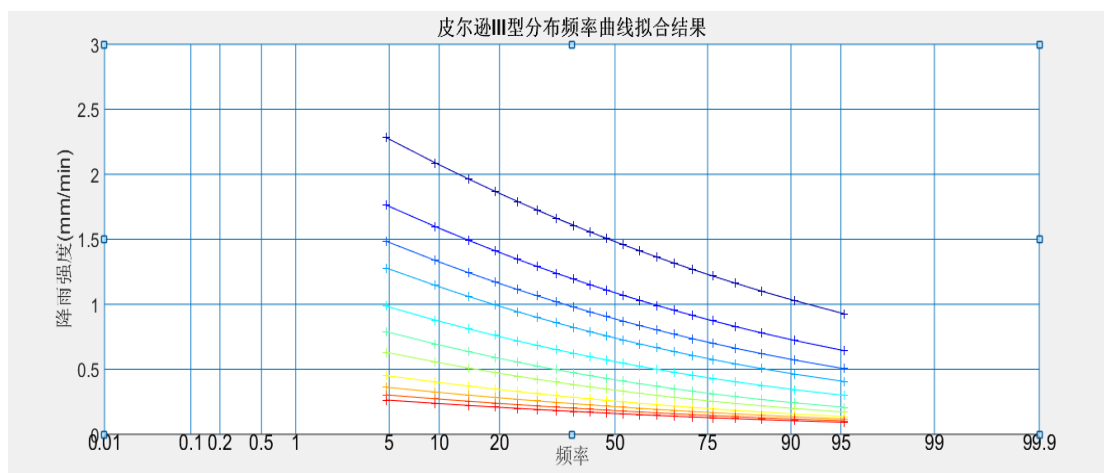


图 6.2 皮尔逊 III 型分布频率曲线拟合

上图中各条曲线之间没有交点，符合频率曲线的绘制要求。同理，我们绘制出指数分布和耿贝尔分布的频率曲线。

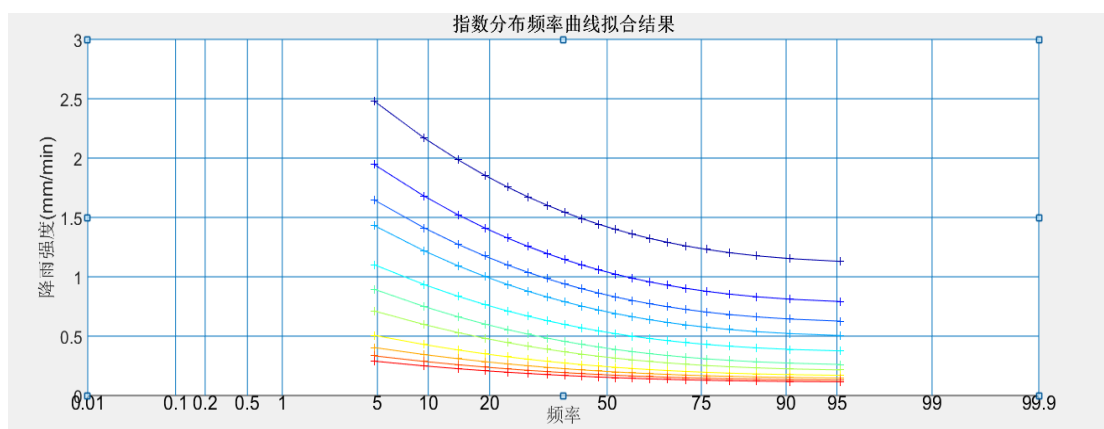


图 6.3 指数分布频率曲线拟合

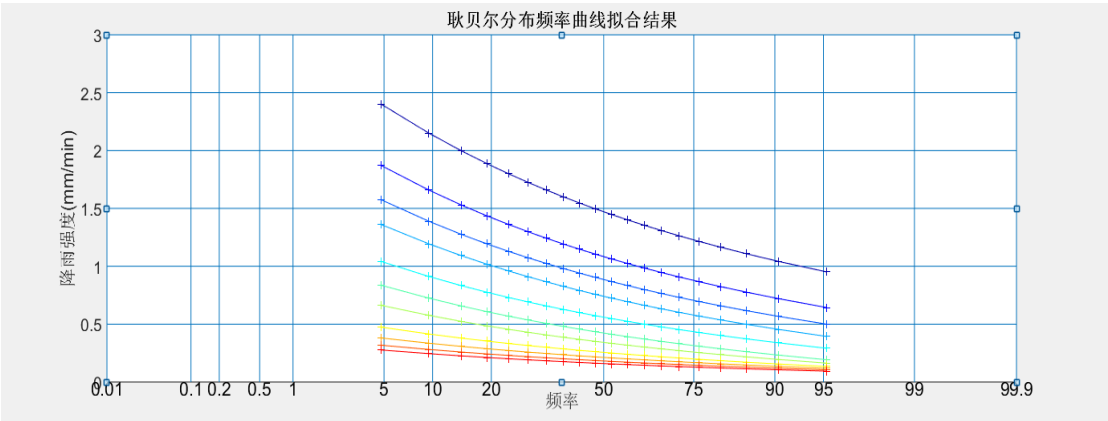


图 6.4 耿贝尔分布频率曲线拟合

6.3.2 佳县暴雨强度公式 T-t-i 关系表的生成

T-t-i 关系表本质上是根据误差最小化原则确定的拟合曲线，利用理论频率计算得出的对应的降雨强度，可以将降雨强度  $i$  看作因变量，历时  $t$  和理论重现期  $T$  看作二维自变量。本文中对比了三种频率曲线对原始降雨强度数据的拟合情况，并且计算出了每种曲线的误差。根据误差最小原则，本文中选择耿贝尔分布曲线作为标准拟合曲线来拟合得到 T-t-i 关系表。

表 6.7 特大值处理后的佳县暴雨强度 T-t-i 关系表

T (a) t (min)	100	50	30	20	10	5	3	2
i (mm/min)								
5	2.9575	2.7123	2.5305	2.3851	2.1324	1.8689	1.6591	1.4709
10	2.3417	2.1341	1.9803	1.8572	1.6433	1.4202	1.2427	1.0833
15	1.9872	1.8055	1.6707	1.5629	1.3755	1.1802	1.0247	0.8851
20	1.7319	1.5684	1.4472	1.3502	1.1816	1.0059	0.8660	0.7405
30	1.3295	1.2027	1.1086	1.0334	0.9026	0.7662	0.6577	0.5603
45	1.0831	0.9743	0.8935	0.8290	0.7167	0.5997	0.5066	0.4230
60	0.8541	0.7697	0.7071	0.6570	0.5700	0.4792	0.4070	0.3422
90	0.6040	0.5466	0.5040	0.4700	0.4108	0.3491	0.3000	0.2559
120	0.4811	0.4368	0.4040	0.3777	0.3320	0.2844	0.2464	0.2124
150	0.3995	0.3636	0.3369	0.3156	0.2786	0.2399	0.2092	0.1816
180	0.3468	0.3159	0.2930	0.2747	0.2428	0.2096	0.1832	0.1594

根据上述 T-t-i 关系表，本文中采用多种不同的方法来进行暴雨强度公式的拟合。其中包括了麦夸尔特算法和遗传算法。应用不同的算法可以得到不同的暴雨强度公式，算法比较的准则应该是以绝对拟合误差值来作为评判标准。下面我们首先计算出每种方法

的拟合误差值，然后选择拟合误差最小的方法来推导最终的暴雨强度公式。

## 6.4 佳县暴雨强度公式推求

### 6.4.1 遗传算法推求暴雨强度公式

暴雨强度公式的推导本质上是一个最优化问题。而启发式算法则可以方便地应用于此类最优化求解问题。本文中采用的是典型的遗传算法来推导佳县暴雨强度公式。遗传算法模拟生物种群的繁衍，应用适者生存的原则逐渐找出最佳后代。对于暴雨强度总公式而言，通过多次迭代，遗传算法使得暴雨强度公式的四个参数  $A$ 、 $b$ 、 $C$ 、 $n$  以及总误差逐渐收敛到一个固定值。

本文中我们分别设置遗传算法初始种群大小为 1000、500 和 200，迭代的停止条件为最大迭代次数 300 次。得到的暴雨强度公式误差变化曲线和四个参数的变化曲线如下图 6.5 所示。

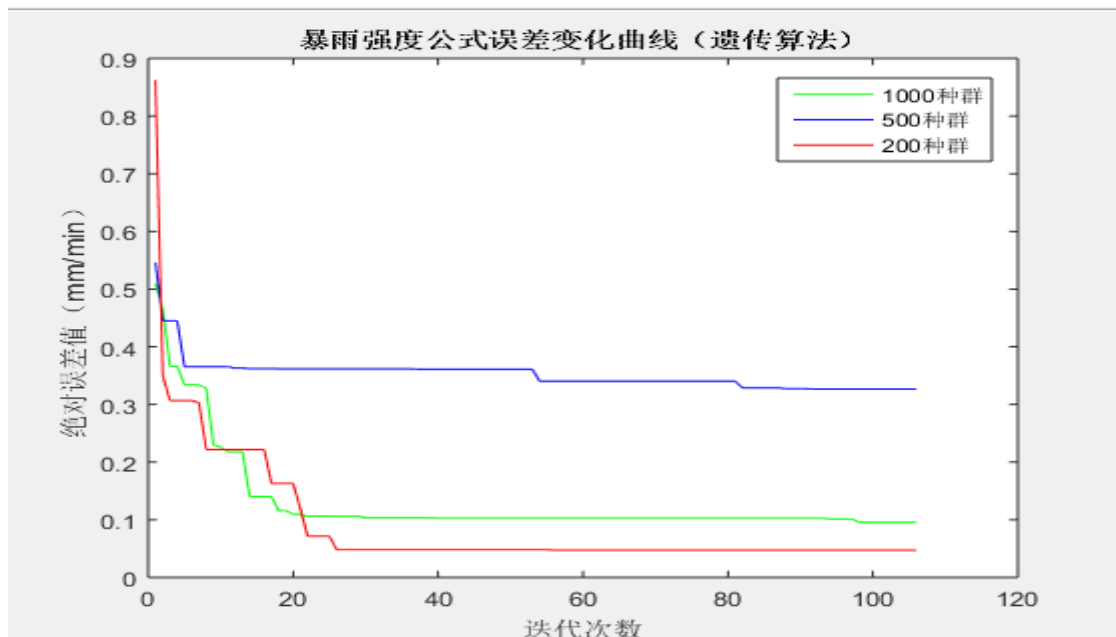


图 6.5 遗传算法误差变化曲线图

我们画出了三种不同种群大小情况下，暴雨强度公式绝对误差的变化曲线。可以看到，随着种群不断地更新迭代，暴雨强度公式的绝对误差趋于更小的值，最后直到趋于稳定。对比三种不同种群初始大小的情况，初始种群大小设定为 200 的时候，取得了最小的拟合误差 0.0472。

## 6.4.2 麦夸尔特法推导暴雨强度公式

麦夸尔特具体算法如前文所述。本文中，我们参考了诸多现有暴雨强度公式的参数，明确了四个参数的数量级，并且设定迭代初始值对应为  $A^0=10$ ， $b^0=10$ ， $C^0=10$ ， $n^0=4$ ，在此基础上开始迭代。迭代中止条件为参数的变化量小于 0.0001。下面详细展示了暴雨强度公式误差拟合的变化曲线以及四个参数的变化曲线。

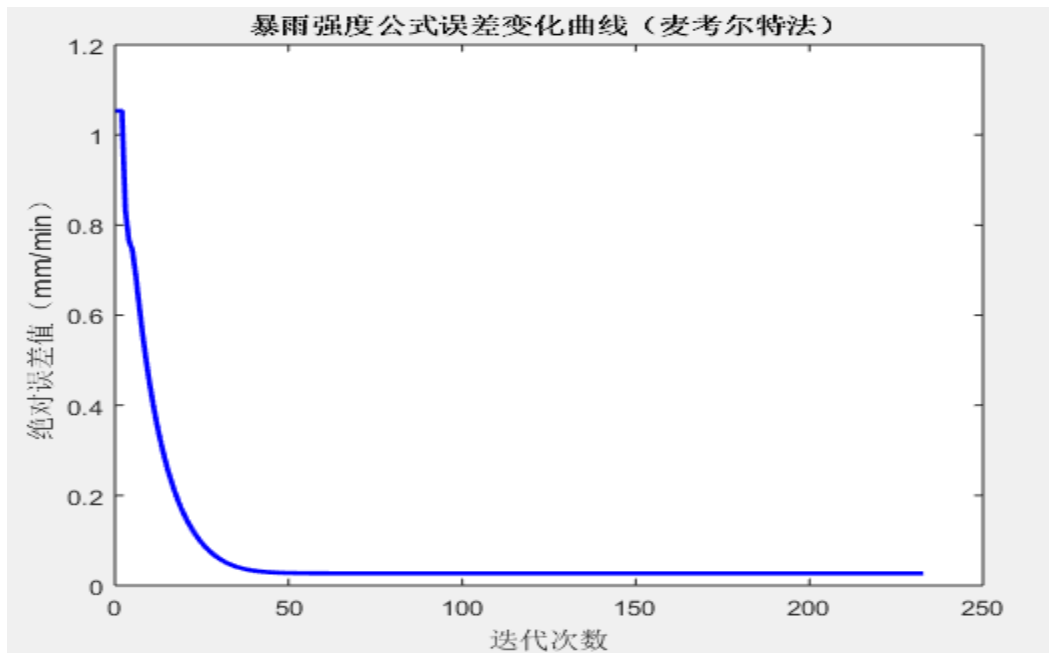


图 6.6 麦夸尔特法误差变化曲线图

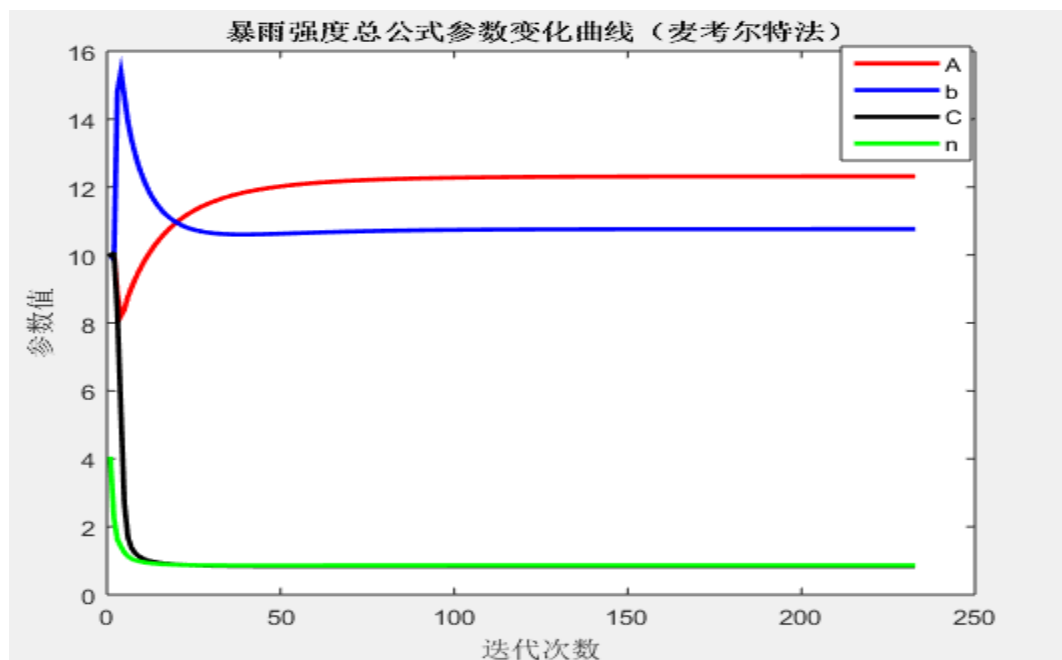


图 6.7 暴雨强度总公式参数变化曲线图（麦夸尔特法）

根据图像可以看出，利用麦夸尔特算法针对暴雨强度总公式的计算在迭代 100 次之

后误差和参数的变化均趋于稳定，直至最后两次迭代之间的变化值小于设定值的时候，迭代计算结束。利用麦夸尔特法计算出的误差值为 0.0270，较之于遗传算法的 0.0472，麦夸尔特算法取得了更好的拟合精度。而且遗传算法每次运行都需要随机初始化种群，以及中间变异的时候也有随机因素在里面，所以运行结果带有一定的随机性。综合考虑，我们决定采用麦夸尔特算法来推求暴雨强度公式，不仅仅因为其拟合误差更小，也因为算法具有更好的稳定性和可重现性。

在计算暴雨强度公式的时候不仅要计算总公式，而且还有必要计算出各个重现期的分公式，以满足市政给排水设计的要求。在此，我们同样利用麦夸尔特算法计算各个分公式的参数以及拟合误差，曲线的变化过程类似于总公式的变化过程，限于篇幅，这里不再一一进行作图展示。下表 6.8 展示出了利用麦夸尔特算法拟合的最终结果。

表 6.8 佳县暴雨强度公式分公式、总公式表

公式类型	重现期 (a)	暴雨强度公式	绝对均方差	相对均方差(%)
单一重现期	100	$i = \frac{41.0112}{(t + 13.4107)^{0.9043}}$	0.0203	1.5815
	50	$i = \frac{34.3841}{(t + 12.4469)^{0.8897}}$	0.0172	1.4711
	30	$i = \frac{29.8256}{(t + 11.6703)^{0.8781}}$	0.0148	1.3729
	20	$i = \frac{26.4057}{(t + 11.0075)^{0.8682}}$	0.0130	1.2826
	10	$i = \frac{20.9596}{(t + 9.7699)^{0.8499}}$	0.0098	1.0998
	5	$i = \frac{15.9824}{(t + 8.3200)^{0.8295}}$	0.0069	0.8989
	3	$i = \frac{12.5497}{(t + 7.0673)^{0.8127}}$	0.0056	0.8382
	2	$i = \frac{9.8755}{(t + 5.8635)^{0.7981}}$	0.0061	1.0566
总公式	2~100	$i = \frac{12.3145(1+0.8356\lg T)}{(t + 10.7631)^{0.8646}}$	0.0270	2.9029
	2~20	$i = \frac{10.1965(1+0.8959\lg T)}{(t + 8.8667)^{0.8371}}$	0.0207	2.6478

根据以上分析，我们利用麦夸尔特得出了最终的暴雨强度公式。可以看到，针对不同重现期的暴雨强度公式，重现期越小则推导而出的暴雨强度公式误差越小。而各个单

一重现期分公式的计算误差也要小于总公式的计算误差，这主要是由佳县地区降雨量的不稳定所造成的。

## 第七章 结论与展望

本文以陕西省榆林市佳县历时 21 年的降雨原始数据为基础,采用年最大值法选取数据,实现皮尔逊 III 型分布、指数分布、耿贝尔分布三种频率曲线拟合方法,并选取了拟合误差最小的曲线生成重现期—历时—降雨强度 ( $T-t-i$ ) 关系表,在生成的重现系—历时—降雨强度关系表基础上,比较了麦夸尔特算法和遗传算法在求解暴雨强度公式时的性能和表现,最终选取精度更高和稳定性更好的麦夸尔特算法,计算出了满足《室外排水设计规范》的暴雨强度公式,为佳县设计排水系统提供了可靠的依据。

在研究暴雨强度公式推求方法以及实际推求佳县暴雨强度公式的过程当中,得出以下几点结论:

(1) 特大值的处理:佳县地处气候多变降雨不规则的黄土高原,并于 2012 年 6~7 月份遭遇特大暴雨灾害。本文在推求佳县暴雨强度公式之初并未考虑特大值处理,发现推求的公式误差过大而无法满足规范的要求,反复调整频率曲线以及非线性参数求解办法依然不能解决问题。而在针对 2012 年特大值进行针对性处理之后,得到了满足规范精度要求的暴雨强度公式。本文一定程度上证明了在推求暴雨强度公式过程当中,对特大值进行检验和处理的必要性。

(2) 频率曲线拟合:本文在对降雨强度数据进行线拟合之时采用了最常用的三种频率曲线(皮尔逊 III 型分布、指数分布、耿贝尔分布)。皮尔逊 III 型曲线采用了优化适线法进行调整优化。对比三种曲线发现耿贝尔分布曲线更能精确地拟合佳县暴雨强度数据。

(3) 暴雨强度公式推求方法:暴雨强度公式推求本质上是对非线性模型参数的估计。本文实现的两种方法(麦夸尔特算法、遗传算法)分别代表了数学定性推导方法以及启发式算法两大类算法。对比两种方法的表现,发现麦夸尔特算法不仅仅可以在本文的数据上取得更佳的拟合精度,而且其结果稳定,不受随机性影响;相比之下遗传算法则在大部分情况下无法取得较好的拟合精度,而且其计算结果受到随机性的很大影响。所以,本文证明了麦夸尔特算法在推求佳县暴雨强度公式问题上的有效性。

(4) 暴雨强度公式推求软件系统:本文按照设计好的技术路线,基于 MATLAB GUIDE 平台,开发出了具有较为广泛适用性的暴雨强度公式推求软件系统。该软件系



统集成了数据存取、频率曲线拟合、T-t-i 关系表、暴雨强度公式计算等功能，并且嵌入了上述三种频率曲线拟合方法以及两种参数求解算法。应用本软件系统可以方便地求解出暴雨强度公式的总公式和各个理论重现期的分公式，为相关研究人员提供了有效的工具。

在解决一系列技术问题的同时，也发现了推求暴雨强度公式过程当中面临的一些问题：

（1）本文在推求佳县暴雨强度公式指出，首要面临着数据的可靠性以及获取性问题。由于我国国情特殊，佳县地区直到 2004 年开始采用自动化逐分钟降雨记录设备，所以 2004 年之前数据理论上存在一定的误差。此外，由于气象局降雨数据并未对社会公开，需要经过多方协调与沟通才得以获取初始数据。针对此问题，建议气象部门可以考虑将此类数据面向科研人员公开，可以在官方网站提供数据接口以供科研人员调用。

（2）如前文所述，本文推求暴雨强度公式过程当中面临着特大值处理问题。但是查阅相关文献，发现针对特大值处理的文献极少，少数文献中提出的处理办法仅为舍去、次大值代替等几种较为粗糙的处理方式。针对特大值情况仍然缺乏一套系统理论的处理方法。

## 参考文献

- [1] Trenberth K E. Atmospheric Moisture Residence Times and Cycling: Implications for Rainfall Rates and Climate Change[J]. Climatic Change, 1998, 39(4): 667-694
- [2] Liu S C, Fu C, Chein - Jung S, et al. Temperature dependence of global precipitation extremes[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(17): 367-389
- [3] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 574-579
- [4] 吴风波, 汤剑平. 城市化对 2008 年 8 月 25 日上海一次特大暴雨的影响[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2011, 47(1):
- [5] 甄小燕. 7·21 北京暴雨的反思[J]. 综合运输, 2012, (8): 87-89
- [6] 湛芸, 孙军, 徐珺, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 2012, (10): 1255-1266
- [7] 雷向杰, 程肖侠, 毛明策. 陕西 2012 年极端天气气候事件与气象灾害[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 105-110
- [8] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63
- [9] 邱兆富, 周琪, 张智, 等. 暴雨强度公式推求方法探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2004, (1): 47-49
- [10] 王正发. MATLAB 在 P-III型分布离均系数 $\Phi_p$ 值计算及频率适线中的应用[J]. 西北水电, 2007, (4): 1-4
- [11] 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, 32(6): 39-42
- [12] 朱齐艳, 张端虎. 韶关站年最大值法暴雨强度公式频率曲线对比[J]. 人民珠江, 2014, (6): 70-72
- [13] 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): 32-38
- [14] 季日臣, 郭晓东. 编制兰州市暴雨强度公式中频率曲线的比较[J]. 兰州交通大学学报, 2002, 21(1): 64-66
- [15] 邵尧明, 邵丹娜, 马锦生. 城市新一代暴雨强度公式编制实践及建议[J]. 中国给水排水, 2012, 28(8):
- [16] Vrijling J K. A Comparative Study of Different Parameter Estimation Methods for Statistical Distribution Functions in Civil Engineering Applications[J]. Structural Safety & Reliability, 1997:
- [17] Salvucci G D, Song C. Derived Distributions of Storm Depth and Frequency Conditioned on Monthly Total Precipitation: Adding Value to Historical and Satellite-Derived Estimates of Monthly Precipitation[J]. Journal of Hydrometeorology, 2000, 1(2): 113
- [18] Garc á-Bartual R, Schneider M. Estimating maximum expected short-duration rainfall intensities from extreme convective storms[J]. Physics & Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans & Atmosphere, 2001, 26(9): 675-681
- [19] GB50014-2006, 室外排水设计规范(2014 版)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [20] 李树平. 用麦夸尔特法推求暴雨强度公式参数[J]. 给水排水, 1999, (2): 26-29

- [21] 傅金祥, 林齐, 王俊凯. 曲面搜索法推求暴雨强度公式参数[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(6): 959-961
- [22] 林林, 樊建军, 陈鹏飞. 遗传算法在暴雨强度公式参数优化中的应用及 Matlab 实现[J]. 水科学与工程技术, 2008, (6): 1-2
- [23] 杨晓华, 金菊良, 张国桃. 加速遗传算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 自然灾害学报, 1998, 71 (3): 71-76
- [24] 任伯帜, 吴学莉, 周义, 等. 加速混合遗传算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版, 2012, 271 (4): 98-101
- [25] 路志强, 杨文海, 黄腾, 等. 粒子群算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 61 (3): 72-73
- [26] 任肖琳, 周元成. 改进粒子群算法在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 科技信息, 2009, (6): 98-101
- [27] 赵建国. 迭代法推求暴雨强度公式参数[J]. 给水排水, 1997, (12): 9-12
- [28] 任伯帜, 沈良峰, 许仕荣, 等. 带因子一迭代法求解暴雨强度公式参数[J]. 中国给水排水, 2002, 181 (2): 63-65
- [29] 倪长健, 丁晶, 李祚泳. 免疫进化算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 长江科学院院报, 2002, 191 (6): 59-61
- [30] 张子贤. 用高斯—牛顿法确定暴雨公式参数[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1995, (5): 106-111
- [31] 周桂明. 计算机搜索法推求暴雨强度公式参数[J]. 浙江大学学报:理学版, 1998, (4): 85-89
- [32] 张云, 柯水洲. 应用最速下降法推求暴雨强度公式的参数[J]. 中国给水排水, 2003, 191 (2): 67-69
- [33] 朱海峰. 协同进化算法研究及在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 2012:
- [34] 许小健, 钱德玲, 张金轮. 微分进化算法在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2008, 311 (4): 645-647
- [35] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中国气象局. 城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则[S]. 北京: 中国气象局, 2014
- [36] 马江洪. 概率统计教程[M]. 科学出版社, 2011
- [37] 周玉文, 翁窈瑶, 张晓昕, 等. 应用年最大值法推求城市暴雨强度公式的研究[J]. 给水排水, 2011, 371 (10): 40-44
- [38] 张凌云. 佳县近 41 年气候特征及变化分析[J]. 陕西气象, 2011, (1): 38-40
- [39] 王德智, 张桂菊, 吴畏, 等. 皮尔逊III型频率曲线图解适线软件开发[J]. 水利科技与经济, 2009, 151 (12):
- [40] 张桂芳, 秦荷杰, 韩广, 等. 关于海森机率格纸在《工程水文学》课程教学中作用的探讨[J]. 教育教学论坛, 2013, (4): 84-85
- [41] 邵尧明. 最大值选样配合指数分布曲线推求雨强公式[J]. 中国给水排水, 2003, 19(z1): 142-144
- [42] 季君鎔. 耿贝尔分布在频率分析中的应用[J]. 铁道工程学报, 1989, (4): 1-8
- [43] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册.第 5 册:城镇排水[J]. 2004:
- [44] 张子贤. 用高斯—牛顿法确定暴雨公式参数[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1995, (5): 106-111

- [45] 王睿, 徐得潜. 合肥市暴雨强度公式的推求研究[J]. 水文, 2016, (1):
- [46] 王基镛. 大范围收敛的迭代法求解非线性回归的参数[J]. 数学的实践与认识, 1991, (2):
- [47] 葛宏立. 麦夸尔特迭代法及其 BASIC 程序[J]. 湖南林业科技, 1987, (4):
- [48] 王小平. 遗传算法[M]. 西安交通大学出版社, 2002
- [49] 王煦法. 遗传算法及其应用[J]. 小型微型计算机系统, 1995, (2): 59-64
- [50] 周建兴. MATLAB 从入门到精通[M]. 人民邮电出版社, 2012
- [51] 马玉峰. 特大值对暴雨强度公式计算精度的影响分析[J]. 内蒙古气象, 2015, (4): 23-26

## 攻读硕士学位期间取得的研究成果

### 1 攻读硕士学位期间参与的课题

- [1]参与编制《陕西省汉中市汉台区生态区建设规划（2014 年-2020 年）》
- [2]参与编制《陕西省汉中市城固县生态县建设规划（2014 年-2020 年）》
- [3]参与编制《洋县龙亭镇污水处理厂可行性研究报告》
- [4]参与编制《黄陵县创建省级生态县技术评估报告》

### 2 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1]张欣. 陕南某县生态功能区划研究[J]. 基层建设, 2015, 20: 392

## 致谢

本论文是在恩师高俊发教授、各位同门以及佳县气象局的工作人员的指导、支持和帮助下完成的，在此，我要对他们表示由衷地感谢！

首先感谢我的恩师高俊发教授。师恩如山，师爱似海。无论是论文的选题、资料的收集、研究方法的确定，还是结论的分析、论文的定稿，都倾注了恩师大量的鲜血。三年的研究生期间，高老师更是对我悉心教导，言传身教，耳提面命，诲人不倦。而高老师深厚的学术造诣、严谨的治学态度、一丝不苟的工作精神和乐观向上的生活态度更是让我受益匪浅，也成为我终身的学习榜样。师恩难忘，值此论文完成之际，我要向恩师高俊发教授致以衷心的感谢和诚挚的敬意！

同时感谢与我朝夕相处的各位同门，在论文的资料收集、研究分析等各方面都给与我帮助和启发。三年的同窗情谊永生难忘，也祝愿大家在未来的人生道路上能够一切顺利，越走越好！

特别感谢佳县气象局的工作人员，在本次论文原始资料的收集上给予我极大的支持和帮助，祝你们工作顺利，事事如意！

感谢所有支持我的家人，是你们无微不至的关怀和照顾让我能够专心投入到论文的研究，你们永远是我的精神支柱，是我避风的港湾。

时光荏苒，转眼间三年的研究生生涯即将结束。感谢在此期间所有帮助过我的老师和同学们。人生的道路布满荆棘，是你们的支持与帮助让我能够坚定不移地奋力前行。祝愿大家都能够一切顺利，好人一生平安！

张欣

2016年4月