

图解适线法在水文频率分析中的应用

周正道*, 李云霞*, 王文宝#, 杨 云

云南省水文水资源局大理分局, 云南 大理

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

水文频率分析是揭示水文变量的概率分布, 获取水文过程的频率特征, 从而为水利工程设计、水资源保护等方面提供科学依据。为寻求更加实用和有效的水文频率分析方法, 本文基于图解适线法, 以云南省旧州站与羊庄坪站流量资料为例进行实例研究, 分别以离差绝对值和、离差平方和、标准差最小为适线准则作为该方法最优模型, 对P-III型分布参数进行优化, 优化结果与概率权重矩法、权函数法进行对比。结果表明: 该方法层次清楚, 计算便捷, 拟合曲线效果较好, 是一种实用的水文频率分析方法。

关键词

水文频率分析, 频率曲线, 统计参数, 图解适线法

Application of Graphical Fitting Method in Hydrological Frequency Analysis

Zhengdao Zhou*, Yunxia Li*, Wenbao Wang#, Yun Yang

Dali Branch of Yunnan Hydrology and Water Resources Bureau, Dali Yunnan

Received: Apr. 2nd, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

Hydrological frequency analysis is to reveal the probability distribution of hydrological variables and obtain the frequency characteristics of hydrological processes, so as to provide a scientific basis for water conservancy engineering design and water resources protection. In order to seek a more practical and effective hydrometric frequency analysis method, this paper takes the flow data of Jiuzhou Station and Yangzhuangping Station in Yunnan Province as an example based on the graphical fitting method. The

作者简介: 李云霞(1982年-), 女, 云南大理人, 本科, 工程师, 主要从事水文分析、资料整编工作, Email: 67631806@qq.com

*共同一作。

#通讯作者 Email: 418648627@qq.com

文章引用: 周正道, 李云霞, 王文宝, 杨云. 图解适线法在水文频率分析中的应用[J]. 水资源研究, 2025, 14(3): 334-340.

DOI: 10.12677/jwrr.2025.143036

absolute value sum of the deviation, the square sum of the deviation, and the minimum standard deviation are taken as the optimal model of the method to optimize the *P*-III distribution parameters. Comparing the optimization results with the probability weight moment method and the weight function method shows that the method has a clearer hierarchy, more convenient calculation, and better curve fitting. It is a practical hydrometric frequency analysis method.

Keywords

Hydrologic Frequency Analysis, Frequency Curve, Statistical Parameters, Graphical Fitting Method

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在水利工程设计、水资源保护等工作中,需要为其提供满足设计标准的水文设计值。水文设计值可以通过历史资料进行水文频率分析,建立频率曲线或寻求频率曲线的数学模型而获得,其精度直接关系到水利工程等方面的经济性和安全性。然而,水文频率分析中的许多问题,特别是线型的选择、参数的计算等直接影响设计值精度,针对此类问题的研究也从未停止。在开展水文频率分析工作时,首先需要确定频率曲线线型,并合理地估算频率曲线参数。在我国水文频率分析中,广泛采用皮尔逊 III 型(*P*-III 型)频率曲线线型,其线型基本符合水文现象的变化规律[1]。*P*-III 频率曲线的拟合,关键问题是如何确定变差系数 C_v 、偏态系数 C_s 和均值 $\bar{x}$ 三参数。三参数估计方法有矩法、权函数法、三点适线法、优化适线法等多种方法。权函数法[2]在水文频率计算中实用性较强,但该方法需要经过大量计算,因计算过程复杂,会导致模型的收敛速度下降。三点适线法[3]是通过以线代点的方式统计参数的初始值,拟合性较好,但该方法频率计算不能准确反映总体数据,会导致结果出现一定偏差。优化适线法[4]是一种在水文频率分析中用于优化频率曲线参数的方法,可有效提高参数估计的准确性和可靠性,但该方法在处理异常数据时显得较为脆弱。为有效确定水文频率曲线参数,许多专家学者相继做了大量研究。如王文川等[5]运用群居蜘蛛优化算法求解水文频率曲线参数,研究表明,该方法能有效提高曲线拟合精度,但是随着搜索空间维数的增加,导致计算精度较低。雷庆文等[6]引入粒子群优化算法,研究表明,该算法能够较快地搜索到全局最优解,然而在处理复杂问题时,由于待估参数较多,参数的设置直接影响寻优结果的精度。

为了更好地确定水文频率曲线参数,本文利用图解适线法运用于水文频率分析中,建立寻优模型,并与概率权重矩法[7]、权函数法计算成果进行对比。结果表明,以离差绝对值和、离差平方和与标准差最小的适线准则下,求解与经验点据拟合最佳的频率曲线参数,方法层次清楚,能够较好地用于水文频率曲线参数优化估计。

2. 图解适线法原理

图解适线法是国内外广泛采用的一种参数估计方法,等同于人工绘制频率曲线的目估适线法。该方法是采用期望值公式来估算经验频率,再根据 *P*-III 型分布以经验频率点据为基础,为其选配一条拟合最佳的理论频率曲线,并以此来推求相应于各种频率的水文要素设计值。判断拟合曲线的好坏,是以经验点据与理论频率曲线的离差绝对值和、离差平方和、标准差最小值为适线准则。

2.1. 经验频率与统计参数计算

1) 连续样本系列[8]

当实测资料中无调查值时,按连续样本系列公式计算经验频率 P 、均值 $\bar{x}$ 、离差系数 C_v 、偏态系数 C_s 。

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\bar{x}} - 1 \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中, m 为序列号, $m=1,2,\dots$; x_i 为水文变量值, 如流量(m^3/s)等; n 为样本总数。

2) 非连续样本系列[9]

当实测资料中含有历史调查值时, 采用非连续样本系列公式计算经验频率 P 、均值 $\bar{x}$ 、离差系数 C_v 、偏态系数 C_s 。

$$P = \frac{M}{N+1} \times 100\% \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \left(\sum_{j=1}^a x_j + \frac{N-a}{n-l} \sum_{i=l+1}^n x_i \right) \quad (5)$$

$$C_v = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^a (x_j - \bar{x})^2 + \frac{N-a}{n-l} \sum_{i=l+1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]} \quad (6)$$

式中, N 为调查考证期; M 为特大洪水排列序号; x_j 为特大洪峰流量(m^3/s); x_i 为一般洪水的洪峰流量(m^3/s); a 为特大洪水总项数; l 为筛选出实测洪水系列中需作为特大洪水处理的特定项数。

对于偏态系数 C_s , 一般认为, 没有百年以上资料系列, 最好不要采用公式计算, 在短期系列中, 计算误差较大。因此, 在水文频率分析中通常采用图解适线法进行估计, 即 $C_s = kC_v$ 。

2.2. 理论频率计算[10]

在水文频率分析中, 常用 P -III 曲线作为理论曲线。理论曲线是一条一端有限一端无限的不对称单峰、正偏曲线, 统计学上称之为 Γ 分布, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad x > a_0 \quad (7)$$

式中, x 为水文变量值, 如径流量(亿 m^3)、降水量(mm); α 、 β 、 a_0 分别为形状参数、尺度参数、位置参数; e 为自然对数运算的底数; $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的 Γ 函数, 其分布函数为:

$$p(x) = P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} dx \quad (8)$$

式中, $p(x)$ 为 Γ 分布的超过制函数; x_p 为与 P 相应的设计值, 如水位(m)、降水量(mm)。 Γ 函数常用的三个参数 α 、 β 、 a_0 通过以下关系确定:

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2}; \quad \beta = \frac{2}{\bar{x}C_vC_s}; \quad a_0 = \bar{x} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s} \right) \quad (9)$$

在水文频率分析中, 离均系数 Φ 值、设计值 x_p 按下式计算:

$$\Phi = \frac{C_s}{2} t_p - \frac{2}{C_s} \quad (10)$$

$$x_p = (\Phi C_v + 1)\bar{x} \tag{11}$$

3. 实例分析

本文以云南省旧州水文站 40 a 年平均流量资料以及羊庄坪水文站 33 a 洪峰流量资料为例进行水文频率分析，建立频率曲线模型对 P-III 型分布参数进行优化，以满足水文频率分析要求。

3.1. 计算方法

图解适线法是依据一定的适线准则，求解与经验频率曲线配合最好的理论频率曲线统计参数的方法。以期望值公式来估算经验频率，以经验点据与理论频率曲线的离差绝对值和、离差平方和、标准差最小值为适线准则作为判断拟合优度的标准。理论频率曲线与经验点据吻合情况，主要是对统计参数作适当调整，直到吻合度满意为止。由于 $\bar{x}$ 估算误差较小，一般不需修改，主要修改 C_v 以及 C_s 与 C_v 的比值 k ， k 的取值范围一般大于等于 2，且为 0.5 的整数倍。根据经验， C_v 值越大，频率曲线越陡， C_s 越大，曲线下段越拱。

3.2. 计算结果分析

根据历史调查得知 1915 年和 1922 年羊庄坪站曾发生过大洪水，经考证推算，洪峰流量分别为 302 m³/s、278 m³/s。根据上述两站流量资料，利用图解适线法进行频率分析，计算结果见表 1。按照 P-III 型分布适线准则，由表 1 可知，旧州站从离差绝对值和、离差平方和、标准差上看，第六次适线结果误差最小，即当 $\bar{x} = 763$ 、 $C_v = 0.48$ 、 $C_s = 2C_v$ 时，曲线拟合效果最佳，故采用第六次适线结果作为该站最终采用的频率曲线；羊庄坪站亦是第六次适线结果误差最小，即当 $\bar{x} = 130$ 、 $C_v = 0.52$ 、 $C_s = 3.5C_v$ 时，曲线拟合效果最佳，故采用第六次适线结果作为该站最终采用的频率曲线。

为验证图解适线法在水文频率参数计算中的优越性和适用性，运用概率权重矩法、权函数法得到上述两站 P-III 型分布曲线的 $\bar{x}$ 、 C_s 、 C_v 三个参数，寻求这两种方法所对应的离差绝对值和、离差平方和、标准差最小值作为判断最优拟合曲线的标准，与图解适线法最优拟合曲线进行对比，计算结果见表 2，各方法得到的频率曲线见图 1 和图 2 所示。由表 2 可知，上述两站图解适线法的离差绝对值和、离差平方和、标准差与权函数法相比，均比权函数法小，说明图解适线法在拟合适线方面具有较强的适用性；同时与概率权重矩法相比，离差绝对值和、离差平方和、标准差均小于概率权重矩法，表明该方法在优化适线上具有较高的精度。从图 1 和图 2 可以看出，无论是旧州站还是羊庄坪站，基于离差绝对值和、离差平方和、标准差最小为准则的图解适线法拟合效果均优于权函数法与概率权重矩法。通过分析可知，利用图解适线法对 P-III 型分布参数进行优化，曲线拟合效果较好，是一种实用的水文频率分析方法。

表 1. 图解适线法频率曲线参数计算结果

站名	适线过程	$\bar{x}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	C_v	C_s/C_v	离差绝对值和	离差平方和	标准差/%
旧州	第一次	763	0.45	2.0	1820	112,682	8.4
	第二次	763	0.45	2.5	2070	136,822	9.9
	第三次	763	0.46	2.0	1752	103,638	8.0
	第四次	763	0.46	2.5	1994	128,552	9.4
	第五次	763	0.46	3.0	2331	171,497	11.4
	第六次(采用)	763	0.48	2.0	1664	97,904	7.7
	第七次	763	0.48	2.5	1915	125,911	8.8
	第八次	763	0.48	3.0	2270	172,458	11.0

续表

羊庄坪	第一次	130	0.48	2.5	387	5815	10.5
	第二次	130	0.48	3.0	338	4784	10.1
	第三次	130	0.48	3.5	311	4342	10.0
	第四次	130	0.52	2.5	344	5166	9.0
	第五次	130	0.52	3.0	309	4283	8.8
	第六次(采用)	130	0.52	3.5	286	3594	8.8
	第七次	130	0.54	3.0	306	4512	8.9
	第八次	130	0.54	3.5	293	3823	8.8

表 2. 概率权重矩法、权函数法、图解适线法频率曲线参数计算结果

站名	估算方法	$\bar{x}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	C_v	C_s	离差绝对值和	离差平方和	标准差/%
旧州	概率权重矩法	763	0.45	1.13	2078	136,822	11.0
	权函数法	763	0.49	1.05	1710	106,086	8.5
	图解适线法	763	0.48	0.96	1664	97,904	7.7
羊庄坪	概率权重矩法	130	0.50	1.35	455	3997	9.8
	权函数法	130	0.54	1.69	428	3798	9.3
	图解适线法	130	0.52	1.82	286	3594	8.8

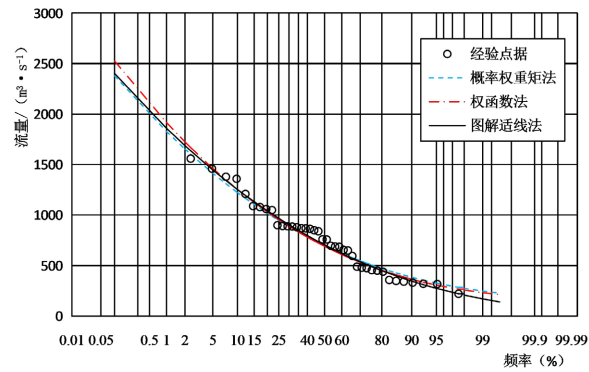


图 1. 旧州站年平均流量频率曲线图

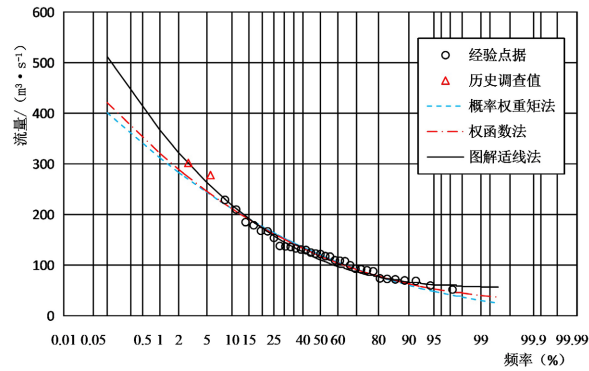


图 2. 羊庄坪站洪峰流量频率曲线图

4. 讨论

由于水文现象具有随机性、复杂性,图解适线法是运用数理统计方法分析水文变量的统计规律,其理论性较强,但分析的成果仍具有抽样误差,该方法优点与缺陷同时存在[11][12]。

4.1. 优点

图解适线法具有以下优点:①图解适线法是采用期望值公式来估算经验频率,它在数理统计上有一定依据,其公式具有较强的理论基础,而且偏于安全,主要用于水文变量分析、水文趋势预测等方面,在各国广泛使用。②该方法层次清楚,使用便捷,对于水文变量中比较重要的点据可以根据情况予以适当照顾,比如历史洪水,适线时尽可能靠近这类点据,对于一般的点据,可以适当偏离,对于精度较低或较高的点据亦可用同样的方式处理。③在有调查值或特大值资料时,不易进行参数计算,对于此类资料,该方法具有显著优势。

4.2. 缺陷

图解适线法存在以下缺陷:①存在一定的“主观性”或“任意性”,凭借于个人的经验和判断,不同的人会得到不同的结果。②水文频率分析本身具有抽象的统计意义,若样本精度不足或缺乏长期实测资料,使用该方法抽样误差较大。③理论上, C_s 计算值有可能是负数,在统计学中称之为负偏,若在水文学研究中数据呈现负偏,则可能意味着数据系列中存在极少数特殊值。这表明,在特定条件下,该方法可能不完全适用。

4.3. 应用前景分析

1)图解适线法存在一定的“主观性”或“任意性”。对于同样的资料,不同的人会得到不同的结果,所以人们希望找到“一锤定音”的精确计算方法,以避免因人而异,这种愿望是可以理解的。例如,当权函数法、数值积分双权函数法等方法出现之后,有不少人对它寄予很大希望,实际上,这些方法的结果亦因人而异。因此,在目前资料情况和技术水平下,图解适线法在参数的优化过程中仍起着至关重要的作用,因为该方法比较灵活,可通过目视判断来调整频率曲线。这种灵活性,是建立在具有丰富经验基础上的灵活调整,专业技术人员通过积累多年的工作经验,亦会发现参数的变化规律。因此,凭借个人的工作经验,可将主观性化为客观性,将任意性变为一种有经验的灵活性,完全可以获得满意的成果。因此,我国相关规范仍将其作为一种主要的水文频率分析方法。

2)尽可能使用长系列资料,以减小抽样误差。在水利工程设计等相关工作中,往往会遇见仅有短期实测资料的情况,若根据现有的资料计算,推求的结果可能存在较大误差。为提高成果的分析精度,在条件允许的情况下,应设法延长资料系列。另外,在进行水文分析时,若有多个站点资料可供选择,应优先选择长时间系列资料的站点,以确保分析结果的准确性和可靠性。

3)对气候异常出现的极值进行处理。在气候因素中,降水与蒸发对径流量影响尤为显著,气候异常可能引起某年或某月径流量显著变化,甚至在枯水期引发径流系列异常。气候异常引发的极端高、低值,常导致适线时部分点据突出,甚至产生负偏。水文分析中,这类由气候异常产生的极值数据极具价值,应慎重对待,需反复分析论证,不能仅凭数据系列直接适线,以免造成适线负偏。因此,建议在数据分析过程中,对极值应引起充分重视,必要时可进行合理修正,进而开展频率分析。

5. 结论与建议

文章通过图解适线法的基本原理和计算方法进行参数优化计算,并将计算结果与概率权重矩法和权函数法进行对比分析,得出如下结论:

1)图解适线法为采用数理统计方法进行频率分析,以离差绝对值之和、离差平方和与标准差最小的适线准

则下, 求解与经验点据拟合最佳的频率曲线参数, 拟合曲线效果较好, 是一种实用的水文频率分析方法。

2) 图解适线法是依据经验频率点据, 通过选取吻合度较好的理论频率曲线, 对水文要素整体特性进行估算。该方法具有灵活性, 是建立在具有丰富经验基础上的灵活调整, 不受频率曲线线型的限制, 方法层次清楚, 操作容易。

水文频率分析本身含有一系列误差, 因此, 在进行水文频率分析时, 须认真审查资料的可靠性、一致性、代表性, 对异常的变化趋势, 应进行综合分析。图解适线法计算便捷, 经验性较强, 要做好水文频率分析工作, 不仅要掌握充足而可靠的水文资料以外, 而且应密切结合水文现象的物理成因及地区特性规律进行综合分析。

参考文献

- [1] 马海波, 赵东亮, 祝薄丽. 几种水文频率曲线参数估计方法的比较[J]. 人民黄河, 2016, 38(3): 9-11.
- [2] 陈望春, 赵立锋. 权函数法在 P -III 型分布中的应用[J]. 浙江水利科技, 2002(4): 46-47.
- [3] 陈卓. 流量推求中的三点适线法选点探究[J]. 四川水利, 2023, 44(1): 74-76.
- [4] 周爱霞, 张行南. 优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 38-39.
- [5] 王文川, 雷冠军, 刘灿灿, 等. 群居蜘蛛优化算法在水文频率分析中的应用[J]. 水文, 2016, 36(3): 34-39.
- [6] 雷庆文, 闫磊, 鲁东阳, 等. 基于粒子群算法的 P -III 型分布极大似然估计研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 128-131, 139.
- [7] 李扬. 部分概率权重矩法和高阶概率权重矩法在洪水频率分析中的比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 50-56, 61.
- [8] 刘仕平, 王文川. 皮尔逊-III 型分布曲线的变步长数值积分[J]. 水文, 2013, 33(1): 18-20.
- [9] 江聪, 熊立华, 黄俊哲, 等. 融合降雨随机变量的洪水频率分布估计方法研究[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 45-53.
- [10] 谢雅洁, 刘曙光, 周正正. 汶川县降雨时空分布特征及设计暴雨频率分析[J]. 人民长江, 2024, 55(1): 105-112.
- [11] 金光炎. 论水文频率计算中的适线法[J]. 水文, 1990(2): 1-6.
- [12] 朱佳君, 张钰, 何彬, 等. 对水文频率分析中目估适线法的思考[J]. 人民长江, 2011, 42(z2): 13-16.