文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

水文频率分析在水利设计中的实践

贺颖
新疆维吾尔自治区昌吉水文勘测中心
DOI:10.12238/hwr.v9i8.6521

[摘　要] 水文频率分析作为水利工程设计的基石,通过概率统计理论量化水文要素(如洪峰流量、年径流量)的随机特性及其可靠性,为工程规模确定和安全标准制定提供科学依据。基于此,本文系统阐述了水文频率分析的基本原理、方法体系及其在水利工程设计各环节的关键应用。同时,审视了当前水文频率分析面临的非一致性、极端事件推求不确定性等挑战,并展望了非平稳频率分析、多变量联合分析等前沿发展方向。
[关键词] 水文频率分析；水利工程设计；概率分布；设计洪水；设计年径流；风险分析
中图分类号：TV122　文献标识码：A

Hydrological Frequency Analysis in the Practice of Water Conservancy Design

Ying He
Changji Hydrological Survey Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] As the cornerstone of water conservancy engineering design, hydrological frequency analysis quantifies the random characteristics and exceedance probabilities of hydrological elements (e.g., peak flood discharge, annual runoff) through probabilistic and statistical theories, providing a scientific basis for determining engineering scales and establishing safety standards. This paper systematically elaborates the fundamental principles, methodological frameworks, and critical applications of hydrological frequency analysis across various stages of water conservancy engineering design. It also examines current challenges, such as non-stationarity and uncertainties in extreme event estimation, and outlines frontier directions including non-stationary frequency analysis and multivariate joint analysis.
[Key words] hydrological frequency analysis; water conservancy engineering design; probability distribution; design flood; design annual runoff; risk analysis

引言

水循环过程固有的随机性导致关键水文要素(如暴雨、洪水、径流)观测数据呈现显著波动特征。水利工程(包括水库、堤防、排水系统等)的规划设计与运行管理,核心目标是调控、利用及防御具有高度不确定性的水文事件,以满足防洪减灾、供水保障、水力发电等社会经济需求。工程规模参数(如水库库容、堤防高程、渠道断面)的确定以及安全标准(如防洪设计标准、供水保证率)的设定,本质上是对未来水文情势(尤其是极端事件)的定量化预判。此类预判不能仅基于单一历史事件,而必须依赖于水文要素长期统计规律的客观分析。水文频率分析正是解决这一核心问题的理论基础与技术手段。

1 水文频率分析的概述

水文频率分析的原理在于运用概率统计理论,将关键水文要素(如洪峰流量、年径流量)视为具有内在随机性的变量,基于其历史观测序列,拟合最佳的概率分布模型,以量化未来不同量级水文事件发生的可能性(频率或重现期),从而为水利工程的安全与经济设计提供科学依据。

1.1基本原理

水文频率分析建立在随机性假设、频率与重现期关系以及从样本推断总体等核心概念基础之上。该分析方法将年际水文特征值(如年最大洪峰流量)视为独立随机事件,承认其内在的不确定性特征。频率指某一量级水文事件发生的概率,重现期则表征事件在长期序列中发生的平均间隔年数,二者构成衔接水文理论与工程实践的桥梁。需要强调的是,重现期具有概率统计意义,而非确定的周期性规律。由于实际观测序列仅为漫长历史过程中的有限样本,分析的核心在于通过样本信息推定水文事件总体的统计规律,这一推断过程构成水文频率分析的理论基础。

1.2工作流程

水文频率分析遵循系统化的工作流程,首先对水文观测数据进行收集、审查与整理,确保样本资料的可靠性与一致性。在

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

分布选择阶段,需根据水文变量的统计特性选用合适的概率分布模型,其中皮尔逊III型分布因能良好刻画水文序列的右偏特征,成为我国规范推荐的核心模型。模型拟合阶段通过参数估计方法确定分布参数,使理论频率曲线最佳描述样本数据的统计规律。最终基于拟合的理论分布推求指定重现期对应的设计值,或评估特定水文事件的发生频率,为工程规划与设计提供定量依据。

1.3设计值推求与重现期/风险

拟合分布模型后,即可推求满足特定工程设计标准的水文设计值x：

(1)重现期(T)与超越概率(p)。设计标准通常以重现期(T)表示(如“百年一遇”洪水,T=100年)。其对应的年超越概率(p)=1/T(如p=0.01)。x即满足P(X>x)=p的值,是该分布的上分位数。对于P-III分布,x可计算为$x=\bar{x}(1+Cv*\Phi)$,其中Φ为依赖于p和Cs的离均系数(查表可得)。

(2)风险率(R)。重现期T是长期统计的平均间隔概念。工程在其设计寿命N年内,遭遇超过设计值x的事件(即失效)的概率称为风险率(R),计算公式为R=1-(1-p)^N。例如,采用百年一遇洪水标准(p=0.01)的工程,若使用寿命为50年,其风险率R≈39.5%,远非“一劳永逸”。清晰量化风险对工程安全裕度设定至关重要。

2 水文频率分析在水利设计中的应用实践

2.1在防洪工程设计中的应用实践

2.1.1设计洪水过程线推求

频率分析不仅提供设计洪峰流量(Qp,如Q100),还需结合暴雨洪水同频率放大、典型洪水过程线放大等方法,推求完整的设计洪水过程线。该过程线描述了设计洪水在时间轴上的流量变化,是水库调洪演算、确定防洪库容和最高洪水位、堤防高度设计、分洪闸规模确定的基础依据。例如,水库的调洪演算需要输入设计洪水过程线,模拟洪水在水库中的蓄泄过程,从而求解满足下游防洪要求所需的防洪库容以及水库自身需达到的坝顶高程。

2.1.2堤防与河道整治

堤防的设计高度、堤身断面结构强度,以及河道整治工程的过流能力(如拓宽、疏浚、护岸规模),均需依据设计洪水位或对应的设计洪峰流量来确定。频率分析提供的设计洪水流量是计算设计洪水位的关键输入(通过水力学方法如曼宁公式推算)。河道整治工程的规模必须保证在设计洪水标准下,洪水能够安全下泄,不造成漫堤或灾害性冲刷。

2.1.3分(蓄、滞)洪工程

此类工程的设计决策(如启用标准、分洪流量、蓄滞洪区容积)高度依赖于对超标准洪水风险的分析。频率分析有助于确定不同量级洪水的发生概率,为分洪工程的启用阈值设定(如遭遇超过某一重现期洪水时启用)、需要分泄的设计分洪流量,以及蓄滞洪区所需的有效蓄洪容积提供科学依据,实现洪水风险的最优调控。

2.2在水资源配置与供水工程设计中的应用实践

2.2.1设计年径流量保证率

供水工程(城市、工业、灌溉)、水电站的保证出力计算,其关键在于确定符合一定设计保证率(P_des,如95%)的设计年径流量(W_p)。设计保证率P_des表示工程在长期运行中,年供水量或年发电量能达到或超过设计值的概率。频率分析通过拟合年径流序列,推求相应于概率P_des的分位数W_p。例如,一个设计保证率为95%的供水工程,其设计年径流量W95意味着在长期运行中,有95%的年份实际年径流量不小于W95,从而能按设计规模满足供水需求。

2.2.2水库兴利调节库容确定

为了将天然来水(具有丰枯变化)调节为相对均匀、满足设计保证率的稳定供水量(或发电量),水库需要足够的兴利库容。频率分析提供的设计年径流及其年内分配(常通过典型年法或同频率缩放法获得月径流设计值)是进行水库兴利调节计算(如时历法、数理统计法)的基础输入。计算的目标就是求解在满足设计保证率要求下所需的最小库容(兴利库容)。保证率越高或天然径流变差越大,所需库容通常越大。

2.2.3枯水流量分析

对于河道内生态需水保障、航运用水以及直接从河道取水的工程设计,设计最小流量(如Q90、Q95,即90%或95%保证率的最小流量)是关键参数。频率分析通过对枯水期(如连续30天最小)流量序列或年最小流量序列的分析,推求满足生态或取水保证率要求的最小流量阈值,为取水工程规模(取水口高程、引水能力)设计、生态流量泄放设施的设置提供依据。

2.3在除涝与排水工程设计中的应用实践

除涝与排水工程(如泵站、排水沟渠、涵闸)的设计需依据特定重现期(T)的短历时设计暴雨量(P_tp,如重现期为10年的24小时暴雨)。水文频率分析通过拟合不同历时(1h、6h、24h、3d等)的年最大暴雨序列,推求目标重现期T与历时t对应的设计暴雨量P_tp,并建立暴雨强度-历时-频率关系(P_tp公式/曲线)。该设计暴雨量作为输入,经产流模型(如下渗扣损法)与汇流模型(如单位线法、水力学模型)计算,生成排水出口断面的设计排涝流量(或径流过程线)。此流量是确定排水沟渠断面尺寸、泵站装机容量、涵闸孔径等工程规模的核心依据,确保在设计暴雨情景下区域积水的及时排除,从而有效防控涝灾风险。

3 面临的挑战与发展趋势

3.1核心挑战

3.1.1水文非一致性问题

传统频率分析基于“一致性”假设,即水文序列的统计特性(均值、方差、分布形式)在时间上保持稳定。然而,全球气候变化(导致降水、蒸发、极端事件格局改变)和剧烈的人类活动(如大规模土地利用/覆被变化、水利工程建设、河道改造、地下水超采)已显著改变了流域的下垫面条件和水循环过程。这使得许多观测水文序列不再满足一致性前提,基于历史序列拟合的分布参数可能无法代表未来条件。

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

3.1.2样本资料的限制

对于中小流域或特定地区,实测资料往往样本容量不足(n值小),特别是稀遇洪水或特枯水事件的样本稀缺。小样本导致参数估计(尤其是高阶矩如Cs)的不确定性极大,设计值外延的可靠性显著降低。同时,观测资料可能存在误差、缺失或代表性不足的问题,影响分析质量。历史洪水/枯水调查可在一定程度上延长序列,但其精度通常低于实测值。

3.1.3极端事件推求的不确定性

工程设计往往最关心的是重现期很长的极端事件(如PMF、万年一遇洪水)。这些事件的推求严重依赖于分布模型对序列尾部行为的拟合和外延。然而,不同理论分布(如P-III、GEV、广义帕累托分布GPD)的尾部形态可能存在显著差异。基于有限样本(尾部样本尤其少)选择模型并进行长重现期外推,其结果具有固有的、难以消除的高度不确定性。模型选择、参数估计方法的微小差异都可能导致设计值产生显著波动。

3.1.4多变量联合事件分析需求

许多复杂的水文工程问题(如水库遭遇洪水与风浪的组合作用、多站洪水遭遇、洪量与洪峰的组合)涉及多个相关水文变量的联合概率特性。传统单变量频率分析无法充分刻画这些组合事件的真实风险。例如,下游防洪不仅取决于上游洪峰,还取决于洪水总量及其过程线形状。多变量联合分布建模复杂、参数估计困难、设计组合事件的定义(如“AND”型、“OR”型)及其重现期解释也更加复杂。

3.2发展趋势与应对策略

3.2.1非平稳水文频率分析

在变化环境背景下,传统水文频率分析所基于的平稳性假设受到根本性挑战。为应对这一问题,非平稳水文频率分析应运而生。该方法的核心思想是：承认并量化水文序列的统计特征随时间或外部驱动因子而演变的动态特性。具体而言,不再将表征分布特性的关键参数(如均值、变差系数和偏态系数)视为固定常数,而是将其处理为随时间或协变量(如气候指数、城市化水平)系统变化的动态量。

3.2.2基于物理机制与多源信息的分析

突破对单一观测序列的依赖,将基于过程的物理水文模型、分布式水文模型与频率分析结合。例如,利用长系列气候模式输出驱动水文模型,生成更长的“合成”水文序列用于频率分析,或直接利用模型模拟极端事件。同时,整合历史洪水/枯水调查信息、古洪水研究成果、遥感反演数据等多源信息,约束和校正统计模型,特别是对序列尾部的估计。

3.2.3不确定性量化与管理

认识到频率分析结果固有的不确定性(来自模型选择、参数估计、样本抽样、非平稳性等)至关重要。研究重点转向发展更完善的不确定性量化框架(如贝叶斯方法、自助法Bootstrap),清晰地表达设计值的不确定性范围(如置信区间),并将这些不确定性信息纳入工程设计的风险决策过程中(如基于风险的设计、适应性管理)。

3.2.4多变量水文频率分析

传统的水文频率分析通常针对单个变量(如洪水峰值)进行独立研究,然而许多水文极端事件本质上是多变量共同作用的结果(如洪峰、洪量与历时)。为应对这一挑战,多变量水文频率分析得以发展,其核心在于量化并整合多个关键水文特征之间的内在统计关联性。该方法不再孤立地看待各个变量,而是致力于构建一个能够系统描述变量间协同变化规律的联合概率框架。基于此框架,研究者能够推求更具物理意义的联合设计事件,例如评估所有变量同时超过临界状态的“且事件”重现期,或至少一个变量发生超阈的“或事件”重现期。这极大地增强了对复杂水文系统综合风险的评估能力,为大型水利工程与防洪体系的稳健设计与安全运行提供了更为科学可靠的决策依据。

3.2.5区域频率分析与信息移植

对于资料短缺的站点或无资料地区(PUB),区域频率分析(RFA)是关键手段。其核心假设是地理气候条件相似的流域具有相似的水文响应(即水文同质性)。通过汇集区域内多个站点的资料,建立标准化的区域频率曲线(如区域增长曲线),利用指数洪水法(Index Flood Method)将区域信息移植到目标站点(目标站点的设计值=站点指数值*区域增长因子)。RFA能有效利用空间信息,提高小样本站点设计值的可靠性。难点在于准确识别同质区并选择合适的区域化方法。

4 结束语

面对气候变化与人类活动加剧导致的水文非平稳性挑战,水文频率分析需重点发展非平稳模型、多变量联合分析(如Copula技术)及不确定性量化方法。通过融合多学科方法,提升设计值推求的可靠性,为防洪标准制定、水资源优化配置及水工程安全设计提供核心科学支撑,保障水安全可持续发展目标。

[参考文献]

[1]冯婧涵,钱龙霞,唐加山,等.数据稀缺条件下水文频率分布模拟及应用[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(1):72-84.

[2]雷庆文,闫磊,鲁东阳.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.

[3]顾学志,叶磊,赵铜铁钢,等.中国日降水量的概率分布[J].水利学报,2021,52(10):1248-1262.

作者简介：

贺颖(1989--),女,汉族,河南陕县人,大学本科,工程师职称,研究方向为水文资料整编分析。