

特定洪水过程研究

姚瑞虎¹, 李深奇², 覃光华^{1,3}, 丁晶¹, 曹冷然¹, 李品良¹

(1.四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2.四川省水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610065;
3.水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:提出特定洪水过程的新概念及其内涵, 论述了工程防洪标准的形式意涵和实质意涵, 引出特定洪水过程与防洪标准之间的联系——洪水过程形式频率新概念。阐述特定洪水过程的三种蜕变类型及其推求方法。指出当前推求特定洪水过程的同倍比和同频率法优缺点, 最后简述了新推求方法的基本思路。

关键词:特定洪水过程; 洪水风险度; 防洪安全标准; 形式频率; 年最高水位

中图分类号:TV122 **文献标识码:** A **文章编号:**1000-0852(2018)01-0001-06

1 概述

洪水过程指洪水流量随时间变化的过程, 通常称为洪水过程线。这是极其重要的, 与人类社会有十分密切的关系, 历来受到高度的关注。洪水过程包含有普遍关心的要素: 洪峰、不同时间段的洪量。但是在某些情况下, 除上述要素外, 还要考虑洪水的涨落特性, 即必须关注整个洪水过程^[1]。

自然界中有各种各样的洪水过程, 但并不是所有的洪水过程都引起人们关注。人们关心的是有特殊意义的洪水过程, 即根据人们的用途和目的所筛选出来的洪水过程^[2]。但是, 现阶段对洪水过程的应用与水利工程防洪安全计算主要集中在设计洪水过程研究的方面, 这是在工程建成之前, 根据现有的无条件的资料所分析得到的。当工程建成后, 将不再是设计阶段, 而是工程的管理运用阶段, 这时对于洪水过程的研究就需要考虑洪水的条件, 即洪水的分期、流域或者河道的前期水量等条件。显然, 对于洪水过程的划分和定义, 需根据具体的要求和条件, 分类进行分析和研究。

对于洪水过程很多学者都进行了研究。肖义等^[3]采用 Copula 函数构造了洪峰和洪量二维变量联合分布, 并介绍了二维情形下重现期的定义, 据此提出了两

变量联合分布的设计洪水过程线推求方法, 为设计洪水过程线研究提供了新的思路。李天元等^[4]以三峡水库为例, 分析了基于多变量联合分布推求设计洪水过程线的新方法, 结果表明该方法合理可行。李天元在另外一篇文献^[5]中指出基于二维变量的峰量组合形式, 放大典型洪水过程线, 经调洪验算得出一系列最高水位, 进而得到高水位的变化范围。丁晶等^[6]在洪水过程随机模型基础上, 采用统计实验手段探讨了设计洪水过程线作为水库防洪安全设计依据的适用性, 指出现行方法的适用性是有条件的。

现阶段对于洪水过程线的应用停留在设计洪水过程, 并没有讨论在工程建成后的管理运用阶段。众所周知, 对于水库防洪而言, 造成工程失事的主要原因在于坝前水位超过了保证大坝安全的最高水位。导致工程遇及的洪水量级超过了防洪安全设计标准值。那么, 如何应用洪水过程于工程的防洪安全计算之中, 使得最终结果满足工程的防洪标准, 是一个亟待解决的问题。本文针对水利水电工程防洪安全分析时所要求的洪水过程进行研究, 其探讨重点为:

(1) 水电工程防洪安全分析既涉及设计阶段也与管理运用阶段有关^[7], 作为防洪安全分析基础的洪水过程, 称为特定洪水过程。那么, 特定洪水过程是怎样

收稿日期: 2017-03-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401903); 国家自然科学基金资助项目 (51679155)

作者简介: 姚瑞虎 (1993-), 河北邯郸人, 硕士, 主要从事水文分析计算。E-mail: yaoruihu@126.com

通讯作者: 覃光华 (1975-), 女, 重庆梁平人, 教授, 主要从事水文预报、水文计算方面研究。E-mail: ghqin2000@163.com

的洪水过程? (2) 防洪安全分析的关键在于工程的防洪安全标准达到国家规定的要求^[5]。特定洪水过程用于工程设计阶段和管理阶段, 与工程防洪标准之间的关系怎样? (3) 特定洪水过程如何推求?

2 特定洪水过程

2.1 特定洪水过程含义

对洪水过程前加“特定”二字, 意指特殊意义和作用的洪水过程, 特定洪水过程和一般设计洪水过程相比更具广泛性、通用性和科学性。设计洪水过程是在工程设计阶段用于防洪安全计算的洪水过程, 是有调节库容的水电工程防洪安全设计的基本依据^[8]。工程一旦建成, 投入运行后, 工程防洪安全计算时所考虑的洪水过程原则上和设计洪水过程不一样, 特称为管运洪水过程。设计洪水过程为无条件对洪水的估计, 管运洪水过程为有条件下对洪水的估计。例如, 在管运工程时, 随着次汛期和主汛期的洪水特性不同, 管运洪水有所差别, 这里的条件是洪水季节的分期。又如管运工程时, 当时河道的前期水量和有价值的预报信息等对估计管运洪水都是值得考虑的条件。设计洪水过程, 不考虑这些条件, 是无条件下估计出的洪水过程^[7]。估计管运洪水过程无条件可利用时, 管运洪水过程就蜕变为设计洪水过程。

为了明显区别这两种洪水过程之间的差异, 不宜将管运洪水过程称为设计洪水过程, 本文将二者统称为特定洪水过程。这样, 特定洪水过程既指设计洪水过程, 也指管运洪水过程, 取决于估计时的条件和用途。

2.2 特定洪水过程与防洪安全标准

特定洪水过程和工程的防洪安全标准紧密相关, “特定”要满足标准的要求, 以下先阐述防洪安全标准的意涵。

(1) 形式意涵。按现在有关的规范^[9]明确: 工程防洪标准指水工建筑物在规定条件下, 抗衡洪水的能力, 一般以洪水重现期(年)表示, 标准的一般意涵是工程抗衡能力的定量表述, 标准高, 即抗衡能力大; 标准低, 即抗衡能力小。这样的意涵虽然已为大家所熟知^[10]。但是, 就科学性和适用性而言还存在一些值得商榷的问题。

洪水具有三要素: 洪峰、洪量、洪水过程线^[1]。标准仅明确抗衡洪水, 未明确抗衡何种洪水要素。当然, 可以普遍地认为规范明确的是对工程破坏起关键作用的洪水要素, 例如洪峰为导致无洪水调节性能的工程失

事的关键因素, 洪水就指洪峰。但是, 对有洪水调节性能的工程, 原则上是洪水过程(峰、量和过程形状的匹配)为工程破坏关键因素^[11]。这时, 规范所指的洪水无疑是洪水过程。就科学性而言, 洪水过程无“重现期”可言; 就实用性而言, 缺乏客观性, 无客观的标准度量过程的重现期, 从而增加了随意性, 导致成果不稳定^[1]。为了深入分析这些问题, 下面提出防洪标准的实质意涵。

(2) 实质意涵。兴修水利水电工程目的在于在保证工程防洪安全的前提下最大限度地发挥工程的作用和效益^[5]。由于当今经济和科技水平限制, 一般情况下要求工程防洪达到绝对安全的程度, 既不科学, 也不合理。通常容许工程在防洪安全方面存在一定风险。即遇及稀遇特大洪水时, 有破坏可能性^[12]。度量这种可能性大小的指标为风险度。关键问题是容许风险度如何确定。风险度与工程规模有关, 是与国家经济等因素紧密联系的一个非常复杂的国家层面上的重要指标。国家或其授权部门才能明确这一指标。风险度指标一经明确并批准实施, 各行各业都必须严格遵守。因此, 风险度实质上就是标准^[11]。简言之, 工程防洪安全标准显示该工程潜在的洪水破坏风险度(以频率形式表示)。实质意涵以破坏风险度(频率)定量表示, 而形式意涵, 以抗衡洪水能力(重现期)表示。当导致工程破坏的洪水要素为单一的洪峰或单一的洪量时, 则二者的区别就消失。因为洪水破坏风险度(频率)和抗洪能力(重现期)存在下述关系:

$$\text{抗衡能力} = 1/\text{风险度} \quad (1)$$

举例说明, 抗衡能力为 100 年一遇洪峰时, 洪峰破坏风险度为 1%。100 年一遇的洪峰和风险度 1% 的洪峰是等同的。但是当导致工程破坏的洪水要素为洪水过程时, 二者的区别就会显现出来。式(1)就出现问题。如洪水风险度为 1%, 则由式(1)的抗衡能力为洪水重现期 100 年。现在的纠结之处为洪水指的是什么要素。如果指洪水过程, 那么洪水过程的重现期为 100 年的含义是什么? 正如前述, 这是当前难以科学地回答的问题。因此, 在这种情况下, 必须强调标准的实质意涵。

2.3 洪水破坏风险度

工程遭受洪水而导致破坏的原因多种多样, 但最主要的因素是洪水来临时形成的坝前最高洪水位超过保证工程安全的最高水位^[11]。破坏风险度的载体为年最高洪水位, 即以洪水位这个物理量 H 作为随机变

量来计算破坏风险度。若保证工程安全的坝前年最高水位为 H_0 。则,当 $H \leq H_0$ 时,工程防洪安全;当 $H > H_0$ 时,工程破坏,相应地工程防洪安全度为:

$$P(H \leq H_0) \quad (2)$$

工程的洪水破坏风险度为:

$$P(H > H_0) \quad (3)$$

若工程防洪安全标准为 P_s ,则按标准实质意涵为:

$$P(H > H_0) = P_s \quad (4)$$

式(4)为本文的达标计算式。按工程特性由有关防洪安全标准规范确定 P_s (重现期的倒数),然后推求该工程的年最高洪水水位 H 的频率曲线 $P(H)$,最后利用 $P(H) = P_s$ 的条件,获得 H_0 ,即 $P(H_0) = P_s$ 。工程按此水位设计和运行,其破坏风险度为 P_s ,符合规范要求。

显然,上述防洪安全计算的关键在于工程坝前年最高洪水水位 H 的频率曲线的合理确定。即推求出 $P(H)$ 。 H 既受洪水的制约,又受工程管理的影响。其随机变化非常复杂。 $P(H)$ 的推求一般通过洪水随机模拟途径模拟出大量洪水,由拟定的运用管理规则进行调洪计算,获得 H 模拟系列,获得 $P(H)$ 。最后,由 $P(H_0) = P_s$ 而得 H_0 ^[13]。这种推求 $P(H)$ 的思路和途径尽管早在 20 世纪 90 年代就提出来了,但迄今仍在探讨中^[4]。在某些情况下,利用随机途径获得 H_0 还是一种可行的途径。当利用模拟途径寻求 $P(H)$ 困难时,可考虑利用其它途径寻求 $P(H)$ 或避开 $P(H)$ 而直接寻求 H_0 ,这在后面详细论述。为了形象地显示工程特性、洪水过程(峰、量和形状)、防洪标准等和洪水风险之间的关系,现给出图 1。

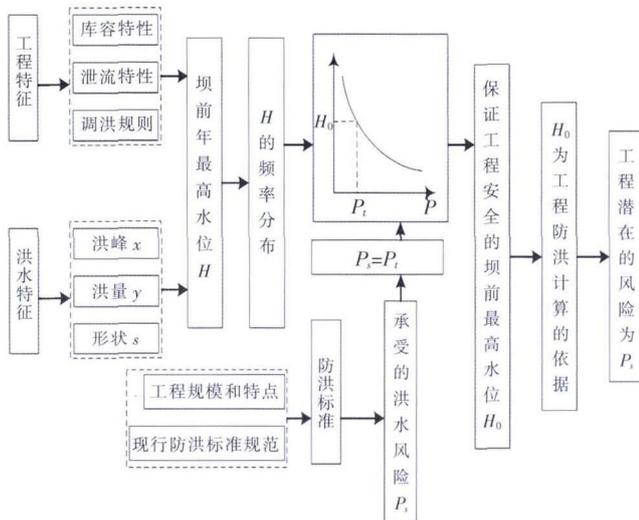


图 1 工程洪水风险及其影响因素之间关系示意
Fig.1 The relationship between the engineering flood risk and its influencing factors

在某些特定情况下上述年最高水位 H 的频率和洪水要素的频率相对应,以 H 频率表征风险度可转换为以洪水要素频率表征风险度。

(1)洪峰的频率表征风险度。当工程遭遇洪水造成破坏的因素起决定性作用的为洪峰时,工程洪水风险度的推求可以基于洪峰的频率分布。以 x 表示年最大洪峰流量,以 $P(x)$ 表其频率分布,有:

$$P(x > x_0) = P_s \quad (5)$$

满足式(5)条件的 x_0 被称为达到标准 P_s (重现期倒数)的洪峰特征量。按 x_0 推求得的相应 H_0 设计和管理运用工程,则该工程防洪安全标准符合前述的实质意涵。工程破坏取决于洪峰,意味着工程坝前最高洪水水位 H 取决于年最大洪峰流量 x 。 H 和 x 是一一对应的关系。在这种情况下, H 和 x 的随机变化特征类同,二者标准变量的频率曲线一样。由符合式(5)要求的 x_0 推求出的 H_0 能满足式(4)的要求。只要工程破坏受制于洪峰,我国大多数无库容或库容较小的水利水电工程在设计和管理时,就隶属于这种情况。防洪标准便由洪峰的频率准确体现出来。这在实用上非常方便^[11]。

(2)洪量的频率表征风险度。当工程遭遇洪水造成破坏的因素起决定性作用的为时段洪量时,即 H 和 y 基本上是一一对应的关系时,工程洪水风险度的推求可以基于洪量频率分析,以 y 表示年最大时段洪量,以 $P(y)$ 表示其频率分布,有:

$$P(y > y_0) = P_s \quad (6)$$

满足式(6)条件的 y_0 被称为达到标准 P_s 的时段洪量特征量。按 y_0 推求的 H_0 设计或管理工程,则工程的防洪安全标准符合实质意涵。究其原因和前述洪峰特征量类似。二者随机特征类同, H_0 和 y_0 的频率一致, y_0 的频率可以表征防洪标准。

(3)洪峰和时段洪量匹配导致水位的频率表征风险度。工程遭遇洪水造成破坏的因素涉及完整的洪水过程(洪峰、洪量和洪水过程线形状),以上(1)和(2)节论述的情况属于特例^[6,15],本小节就一般情况进行论述。由于洪水过程形状的千变万化,影响风险度的因素异常复杂。在分析形状要素时,按两种情况论述:一是形状基本稳定的情况(为单峰三角形);二是形状不稳定的情况(为多峰形状)。本小节就前者重点论述,下节就后者重点论述。

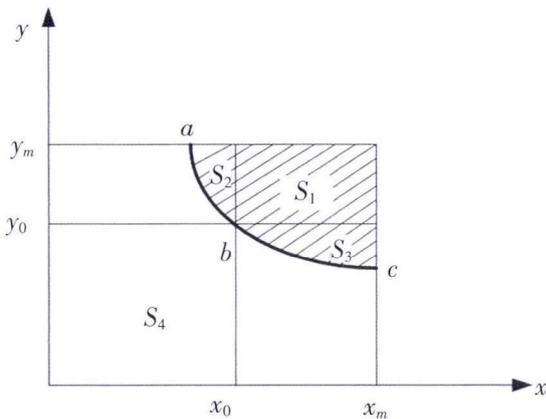
当形状基本稳定,工程调度方式一定时,工程坝前年最高洪水水位 H 主要受制于洪峰 x 和洪量 y 这两个要素,同样一个 H 既可以由较大洪峰和较小洪量造

成,也可能由较小的洪峰和较大洪量造成,这里的关键是 x 和 y 匹配制约 H , 即工程的破坏风险度取决于两个随机变量 x 和 y 的不利匹配。单峰三角形洪水过程, H 和 x, y 的关系,可推得:

$$a_1(H-H_1)^{n_1} - V_c = \frac{x - [a_2(H-H_2)^{n_2} + q_c]}{x - q_s} \left[y - \frac{t_0}{2}(q_c + q_s) \right] \quad (7)$$

式中: H 为最高水位 (m); x 为最大洪峰流量 (m^3/s); y 为洪量时段 t_0 相应的洪量 (10^4m^3); t_0 为洪量时段 (s); q_s 为洪水来临时的基流量 (m^3/s); q_c 为起调水位 H_2 时相应的起调流量 (m^3/s); V_c 为起调水位 H_2 时相应的水库蓄水库容 (10^4m^3); H_1 为库底高程 (m); H_2 为起调水位 (m); a_1, n_1 为库容曲线参数; a_2, n_2 为泄流曲线参数。

式(7)表明, H 为 x, y 的函数。对一定的 x 和 y 匹配就有一个 H 与之相应。据式(4), 由标准 P_s 可以求出 H_0 , 对于这一个 H_0 , 据式(7)就有一对匹配 x_0 和 y_0 与之对应。这样以基于洪水 x_0 和 y_0 的匹配推算出的 H_0 来设计和管理工程, 其风险度符合标准。



注: y_m 为时段洪量的最大值, x_m 为最大洪峰流量的最大值

图2 洪水破坏风险示意图
Fig.2 The flood damage risk

由式(7)可知, 存在一组匹配 (x_0, y_0) 导致 H_0 , 而该 H_0 满足式(4), 但 x_0 和 y_0 不是唯一的, 对于一定的 H_0 有许多组 x 和 y 的匹配与之相应。在图2上, 当 $H=H_0$ 时, 形成像图2所示的临界线。该曲线上的阴影面积为 S_1, S_2, S_3 表示 $H > H_0$ 的可能性, 即洪水风险区, 而下面无阴影的面积 S_4 表示 $H \leq H_0$, 即安全区。以图2表示标准的几何意义是:

$$P_s = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (8)$$

凡在 abc 线以上的点, 都导致 H_0 均符合式(8)的要求, x_0 和 y_0 在临界线上, 若以 x_0, y_0 匹配导致的 H_0 来设计管理工程其潜在的洪水破坏度为 P_s [16]。需要说明, 就 x_0 和 y_0 这一对匹配而言, 通过 x 和 y 二维分布计算出 $P(X > x_0, Y > y_0)$, 记为 P_c 。从图2来看, 出现事件 $(X > x_0, Y > y_0)$ 的面积为 S_1 , 而总面积为 $(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)$, 所以, 有:

$$P_c = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (9)$$

P_c 和式(8)的 P_s 在内涵上有本质的差异。前者与工程毫无关系, 单纯表征事件 $(X > x_0, Y > y_0)$ 出现的可能性, 而后者和工程紧密相关, 反映洪水和工程特性的共同影响而综合表征工程洪水破坏风险度。对比式(8)和式(9), 显然 $P_s > P_c$, 因此以 x 和 y 匹配导致的水位频率 P_s 才能真正表征工程的风险, 而 x 和 y 二维分布的频率不能表征风险, 二者不能混淆。

(4)洪水过程的形式频率表征风险度。洪水过程的形状不确定时, 制约 H 的为洪水过程(峰、量和形状)。过程形状为不可忽略的因素。洪水过程是随机过程的一种, 本质上无频率特征, 因频率是针对随机变量而言。有时出现, 频率为 P 的洪水过程或重现期为 N 年的洪水过程等术语。严格说来, 这些术语会引起概念上的混乱, 应避免。洪水过程用于防洪安全计算时和标准有关, 即和风险度有关。风险度以频率表示, 因此, 洪水过程线必须和频率联系起来。一方面从概念上洪水过程无频率可言, 另一方面从实用上要求过程和频率联系起来。这是水文计算中长期存在的一种矛盾现象, 迄今尚未发现解决这一矛盾的良策。本文尝试提出一个新名词——形式频率, 用来协调这对矛盾。基于洪水资料, 经综合分析判断, 设定一个洪水过程, 记为:

$$Q=f(t) \quad (10)$$

式中: Q 为随时间 t 而变的流量; t 为时间。

在拟定工程管理和运用规则下, 将 $Q=f(t)$ 作为入库洪水过程, 经调洪计算出现相应的坝前水位过程, 并得出过程中的最大值, 记为 H_t , 若 H_t 的频率为 P_t , 即:

$$P(H > H_t) = P_t \quad (11)$$

则, $Q=f(t)$ 赋予频率为 P_t 。过程无频率可言, 针对 P_t 起一个新的名词——过程的形式频率。所谓过程的形式频率是指该过程调洪后的最高水位 H_t 的频率。换言之, 过程的形式频率是以相应最高水位 H_t 的频率来度

量的。实际上以形式频率 P_t 可以判断洪水过程是否达标。在标准(风险度)为 P_s 时,式(11)中的 P_t 等于 P_s , 则该洪水过程就达标了。换言之, $H_t=H_0$, 由式(4)基于该过程而得的 H_t 设计和管理工程, 其潜在的风险度为 P_s 。

3 特定洪水的三种蜕变类型

一般而言, 特定洪水过程指满足防洪安全计算需要的一种洪水过程, 其风险分析的载体为工程坝前年最高水位 H , 风险度的大小由 H 的频率 $P(H)$ 来定量描述。随着工程特性和管理运用方式的差异, 特定洪水过程具体形式亦发生不同, 存在三种蜕变类型。

(1)特定洪水过程蜕变成特定年最大洪峰流量。年最高洪水水位由起决定作用的年最大洪峰流量 x 造成。对于这一类型, 只要通过年最大洪峰资料, 经频率计算推求出 x 的频率曲线, 最后据标准 P_s 推求出 x_0 (达标的年最大洪峰流量), 这时“特定”二字冠在年最大洪峰流量上。

(2)特定洪水过程蜕变成特定年最大时段洪量。年最高洪水水位由起决定作用的年最大时段洪量 y 造成。类似于第一种类型, 通过年最大时段洪量资料, 经计算推求出 y 的频率曲线, 最后由标准 P_s 推求出 y_0 , “特定”二字冠在年最大时段洪量上。

(3)特定洪水过程蜕变成特定洪峰、时段洪量和洪水过程形状的匹配。当洪水过程基本稳定时, 影响年最高水位 H 的因素为 x 和 y , 特定洪水过程便蜕变成成为特定洪峰、洪量的匹配。当前在一定的调洪规则下, 可利用随机模拟途径获得 H 的频率线, 据式(4)求相应于标准 P_s 的 H_0 , 然后基于 H_0 得到各种 x 和 y 的匹配, 最后从中选定一种特定的匹配。我们曾进行了实例计算分析。由 x 和 y 实例资料推求得相应的频率曲线 $F(x)$ 和 $F(y)$, 然后借助 Copula 函数推求 $F(x, y)^{[17]}$, 利用 $F(x, y)$ 模拟出 x 和 y , 进而由式(7)模拟出年最高水位 H , 获得 H 的频率曲线, 据防洪标准 $P_s=1\%$ (重现期 $N=100a$), 由 H 的频率曲线得出相应的年最高水位 $H_0=668.14m$ 。考虑两种匹配方式: 一是 x 的频率达到标准 P_s , 即 x_N , 而与之匹配的时段洪量为 y_x ; 二是 y 的频率达到防洪标准 P_s , 即 y_N , 与之匹配洪峰流量为 x_y 。基于上述两种匹配方式 (x_N, y_x) 和 (x_y, y_N) , 在 $H_0=668.14m$ 的条件下, 利用 $F(x)$ 以及 $F(y)$ 和式(7)得到 $x_N=2\ 300m^3/s$, $y_x=6\ 400\times 10^4m^3$; $x_y=1\ 680m^3/s$, $y_N=13\ 900\times 10^4m^3$, 这两种匹配均达到防洪标准要求。前者为峰大量小的匹配, 后

者为峰小量大的匹配。

4 特定洪水过程的推求

特定洪水过程蜕变成第一种, 第二种和第三种类型时, 推求方法已在上面做了叙述, 本节重点论述最一般的特定洪水过程推求。

4.1 传统推求方法

传统推求设计洪水过程线的方法被广泛称为典型放大法^[18], 设计洪水过程线隶属于本文提出的特定洪水过程线。因此, 典型放大法是推求特定洪水过程的一种传统法。传统推求法当前广泛应用于工程防洪计算的实践中。明显优点是形象、简便, 特别在长期实践的基础上已积累了经验, 为水文工作者所熟悉。但是, 无可讳言, 也存在严重的缺点。按这一方法推求出特定洪水过程作为工程防洪安全计算依据, 其结果是工程潜在洪水风险和规定标准(容许风险)不一致^[12]。

传统法的基本理念为防洪安全标准由用于放大的洪峰频率或者洪量频率表示^[1]。当以洪峰 x 放大时, 若 x 的频率为 P_x , 以 x 放大的过程作为计算依据, 则工程防洪标准便为 P_{x_0} 的频率和防洪标准等同, 即 $P_x=P_s$, 这一理念是不正确的。以 x 放大的过程线为计算依据意味造成破坏的因素不仅有峰还有量和形状。峰并不起决定性作用。在这种情况下, 放大过程线的形式频率, 应以式(11)度量, 为 P_t 。 P_t 为工程的风险, 表征标准, 即 $P_s=P_t$ 。因此, 表征洪峰频率的 P_x 不会和 P_s 相等, 即 $P_x\neq P_s$ 。

当以洪量(y)放大时, 若 y 的频率为 P_y , 以 y 放大的过程作为计算依据, 则工程的防洪标准便为 P_y , 即认为 $P_y=P_s$ 。这样的理念也是不正确的, 理由和对 x 的分析类似, 这里不赘述。

当以峰(x)和量(y)联合放大(同频率放大)时, 若 x 和 y 的频率分为 P_x 和 P_y , 则以 x 和 y 放大的过程作为计算依据, 则工程防洪标准为 P_x 或 P_y 。即认为 $P_x=P_y=P_s$ 。这样的看法同样不对。其原因是同频率是放大的过程线用于防洪计算, 最终的工程风险度量为最高水位 H 的频率, 而不是 x 和 y 的频率。 H 同 x 和 y 之间为非确定关系, 频率之间无对应关系。 $P_t\neq P_x$ 和 $P_t\neq P_y$, 而 $P_t=P_s$, 所以 $P_x\neq P_s, P_y\neq P_s$ 。

4.2 新推求法的基本思路

特定洪水过程推求的核心内容为:(1)形状的选择;(2)峰和量的匹配。在上述(1)和(2)基础上形成的过

程线,用于工程防洪计算,其坝前最高水位 H 的频率 P_t 达到标准 P_s 。由图 1 可知这两项内容涉及工程和洪水特性。达标要求下的形状选择以及 x 和 y 的匹配非常复杂。为处理这一复杂问题,我们的思路认为洪水过程随机模拟途径是可行的途径之一。当前该途径的具体方法,愈来愈多,计算也愈来愈方便^[15]。另外一个途径就是概化途径,其思路是,首先概化这些特性并通过洪水随机模拟途径获得大量 x 和 y 的模拟值,按图 1 流程获得相应的 H ,然后利用大量模拟的 H 得到 H 频率曲线,并借助该曲线得不同标准下的相应 H_0 (不同的标准有不同的 H_0 与之相应)。进而,基于 H_0 探求对形状和 x, y 匹配的要求。最后根据这些要求,归纳出形状选择和 x, y 匹配的结果。有了这些结果便可以对照概化特性,选用相应形状和 x, y 匹配,从而推求出特定洪水过程。作者拟在另一篇文章中较完整地介绍新方法。

5 结语

通过上述分析可以得出以下几点结论:

(1)特定洪水过程是设计和管运洪水过程的统称,特定洪水过程的“特定”和防洪安全“标准”紧密结合,赋有独特而鲜明的“标准”印记。

(2)防洪安全标准的实质意涵为在当前国家经济状况和科学技术水平下,据工程规模和特性规定的洪水破坏风险度,以频率表示。

(3)洪水破坏风险的载体一般为工程坝前的年最高洪水水位 H ,若保证工程安全水位为 H_0 ,其风险度的定量表示为 $P(H > H_0)$ 。这是评价防洪安全计算方法的结果是否达标的依据。

(4)特定洪水过程随工程特性的差异会蜕变成特定洪峰,特定洪量以及特定洪峰和洪量的匹配三种类型。

(5)传统推求特定洪水过程方法有其明显优点,但严重缺陷为推求而得的实际工程洪水风险和规定的防洪标准(容许风险)不一致。

(6)本研究是初步的,今后要深入探讨推求特定洪水过程的科学方法,使工程防洪计算结果切实达到规定的防洪标准。

参考文献:

- [1] 詹道江,徐向阳,陈元芳. 工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2010.(ZHAN Daojiang, XU Xiangyang, CHEN Yuanfang. Engineering Hydrology[M].Beijing: China WaterPower Press,2010.(in Chinese))
- [2] 张泽慧,覃光华,丁晶,等.论涉水工程防洪安全设计的极限洪水[J].水文,2016,36(4):8-10.(ZHANG Zehui, QIN Guanghua, DING Jing, et al. On limiting in flood control safety design for water structures[J]. Journal of China Hydrology, 2016,36(4):8-10. (in Chinese))
- [3] 肖义,郭生练,刘攀,等.基于 Copula 函数的设计洪水过程线方法[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(4):13-17.(XIAO Yi, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Derivation of design flood hydrograph based on Copula function [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007,40(4):13-17.(in Chinese))
- [4] 李天元,郭生练,闫宝伟,等.基于多变量联合分布推求设计洪水过程线的新方法[J].水力发电学报,2013,32(3):10-14.(LI Tianyuan, GUO Shenglian, YAN Baowei, et al. Derivation design flood hydrograph based on trivariate joint distribution[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(3):10-14.(in Chinese))
- [5] 李天元,郭生练,陈璐,等.基于 Copula 函数的水库防洪安全设计[J].水力发电学报,2013,32(6):50-55.(LI Tianyuan, GUO Shenglian, CHEN Lu, et al. Safety design for reservoir flood control based on Copula function[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(6):50-55. (in Chinese))
- [6] 丁晶,邓育仁,侯玉,等.水库防洪安全设计时设计洪水过程线法适用性的探讨[J].水科学进展,1992,3(1):45-52.(DING Jing, DENG Yuren, HOU Yu, et al. The study on application of design flood hydrograph for the design of reservoir safety withstanding flood[J]. Advances in Water Science,1992,3(1):45-52.(in Chinese))
- [7] 丁晶,何清燕,覃光华,等.论水库工程之管运洪水[J].水科学进展,2016,27(1):107-115.(DING Jing, HE Qingyan, QIN Guanghua, et al. Research on the flood for reservoirs engineering management[J]. Advances in Water Science, 2016,27(1):107-115.(in Chinese))
- [8] SING V P,WANG S X,ZHANG L. Frequency analysis of non-identically distributed hydrologic flood data[J].Journal of Hydrology, 2005,307:175-195.
- [9] DL5180-2003, 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准[S].(DL5180-2003, Classification Design Safety Standard of Hydropower Project [S]. (in Chinese))
- [10] 肖义,郭生练,刘攀,等.分期设计洪水与防洪标准关系研究[J].水科学进展,2008,19(1):54-58.(XIAO Yi, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Seasonal flood frequency analysis and flood prevention standard[J]. Advances in Water Science, 2008,19(1):54-58.(in Chinese))
- [11] 叶守泽. 水文水利计算 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.(YE Shouze. Hydrology and Water Conservancy Calculation[M].Beijing: China WaterPower Press,2008.(in Chinese))
- [12] 熊明.三峡水库防洪安全风险[J].水利水电技术,1999,30(2):39-42.(XIONG Ming. Risk research of flood protection for Three Gorges project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999,30(2):39-42.(in Chinese))
- [13] 王文圣,张翔,金菊良,等.水文不确定性分析方法[M].北京:科学出版社,2011.(WANG Wensheng, ZHANG Xiang, JIN Juliang, et al. Method of Uncertainty Analysis for Hydrology[M]. Beijing: Science Press,2011.(in Chinese))
- [14] 丁晶.丁晶水文水资源文集[M].成都:四川科技出版社,2006.(DING Jing. Dingjing's Corpus of Hydrology and Water Resource [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press,2006. (in Chinese))

(下转第 13 页)

- 中国农村水利水电, 2008, (6):52-54. (SONG Maobin, FENG Baoping, ZHANG Zhanyu. Pearson type curve parameter estimations based on genetic algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008,(6):52-54.(in Chinese))
- [12] 王文川,邱林,徐冬梅,等.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社, 2013. (WANG Wenchuan, QIU Lin, XU Dongmei, et al. Engineering Hydrology[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2013. (in Chinese))
- [13] 黄明游. 数值计算方法 [M]. 北京: 科学出版社,2005.(HUANG Mingyou. Numerical Calculation Method [M]. Beijing: Science Press,2005. (in Chinese))
- [14] 刘光文.皮尔逊型分布参数估计[J].水文,1990,(5).(LIU Guangwen. Pearson type distribution parameter estimation [J]. Journal of China Hydrology, 1990,(5). (in Chinese))
- [15] 谢崇宝,袁宏源,郭元裕.P-型理论频率曲线参数估计-模糊极值法[J].水文, 1997,(1):1-7.(XIE Chongbao, YUAN Hongyuan, GUO Yuanyu. A new estimation of Pearson Type distribution parameter of frequency curve-fuzzy maximum value method [J]. Journal of China Hydrology, 1997,(1):1-7. (in Chinese))

Comparative Analysis of P- Distribution Parameter Estimation Based on Numerical Integral Frequency Calculation

LEI Guanjun¹, YIN Junxian¹, ZHANG Lili¹, WANG Wenchuan²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: With trapezoidal algorithm, Simpson algorithm, Romberg integration algorithm, adaptive error integration, Gamma function numerical integral calculation is made, which is also applied in optimization calculation of hydrological frequency parameters. And then intelligent algorithm is used for optimization. The ideal data and observed sequences show that the a new adaptive error algorithm has the advantage of fast calculation and high accuracy, so as to be applied to the engineering practice.

Key words: numerical integration; hydrological frequency analysis; adaptive error integration

(上接第 6 页)

- [15] 叶磊,周建中,曾小凡,等.水文多变量趋势分析的应用研究[J].水文, 2014,34(6):33-38.(YE Lei, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Application of hydrological multivariate trend analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(6):33-38.(in Chinese))
- [16] G. Salvadori, C. De Michele, F. Durante. On the return period and design in a Multivariate framework [J].Hydrology and Earth System Sciences,2012,12:2699-2708.
- [17] 郭生练,闫宝伟,肖义,等.Copula函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J].水文,2008,28(3):1-7.(GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Application of Copula function in multivariate hydrological analysis and estimation[J]. Journal of China Hydrology, 2008,28(3): 1-7.(in Chinese))
- [18] SL44-2006, 水利水电工程设计洪水计算规范 [S].(SL44-2006,Regulation for Calculating Design Flood of Water Resources and Hydropower Projects[S](in Chinese))

Study on Specific Flood Hydrograph

YAO Ruihu¹, LI Shenqi², QIN Guanghua^{1,3}, DING Jing¹, CAO Lingran¹, LI Pinliang¹

(1. School of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation Design Institute, Chengdu 610065, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: According to the study on flood hydrograph, the new concept of specific flood hydrograph and its connotation were proposed. Meanwhile, the external and essential implication of engineering flood prevention standard were expounded. And then the relationship that was the new concept of external frequency of flood hydrograph between specific flood hydrograph and flood prevention standard was drawn. The specific flood hydrograph of three types of transformation and its calculation method were elaborated. The advantages and disadvantages of the common multiple method and the common frequency method of specific flood hydrograph were pointed out. A brief introduction about the basic idea of new calculation method of specific flood hydrograph was given.

Key words: specific flood hydrograph; flood risk degree; flood prevention standard; external frequency; annual highest water level