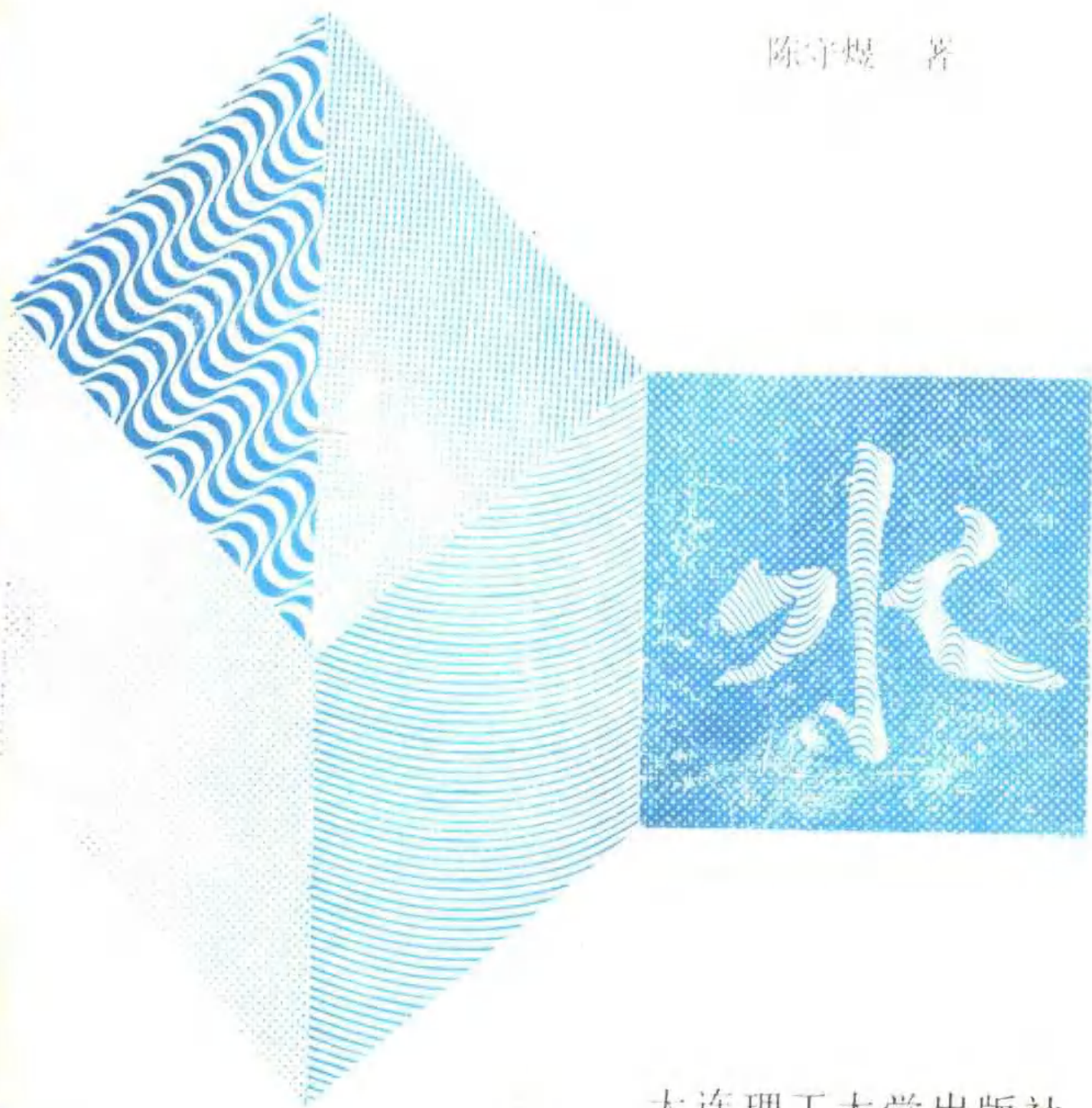


水利水文水资源系统的 模糊、优化与数值计算

陈守煜 著



大连理工大学出版社

水利水文水资源系统的模糊、 优化与数值计算

陈守煜 著

大连理工大学出版社

内 容 简 介

本文集是著者近年在水利、水文、水资源、水力发电学科领域内的最新研究成果。其中包括新学科模糊水文学的研究方法论,汛期的模糊集描述,大系统层次分析模糊优选理论与模型,梯级水电站、水电站群规划设计参数的优化计算,水库与水电站径流调节,河渠不恒定流数值计算,过渡区泥沙沉速公式等诸多方面的新颖内容。

本文集汇集的二十二篇论文详细地论述了著者在水利、水文、水资源、水力发电工程学科领域内提出的许多新的理论与方法。

本文集可供水利、水电、水文、水力、水资源专业的工程技术与研究人员阅读与参考,并可作为水文、水资源、水力发电工程专业的研究生、大学生的教学参考书。

水利水文水资源系统的模糊、优化与数值计算

Shuili Shuiwen Shuiziyuan Xitong De Mohu Youhua Yu Shuzhi Jisuan

陈守煜 著

大连理工大学出版社出版发行

(大连市甘井子区凌水河)

大连船舶生产服务公司印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: $11\frac{5}{8}$ 字数: 275千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数: 0001—2000册

责任编辑: 许芳春 责任校对: 邓玉萍 封面设计: 关伟

ISBN 7-5611-0116-3/TP·10 定价: 2.70元

前 言

近年来著者在系统地提出了水资源系统模糊集分析理论与方法的基础上，又首次提出了创建模糊水文学新学科的研究课题。由于客观世界的现象既有确定性（或必然性）的一面，又有着不确定性（或非确定性）的一面。现象的不确定性表现为随机性与模糊性两个侧面。仅考虑水文现象的必然性与随机性，常常还不能完整地描述水文现象与表达水文系统的特性。例如，对于汛期的描述与表达，过去由于忽视了汛期现象的模糊性，使得一些与汛期有关问题的处理与研究，难于取得突破性的进展。因而著者把创建模糊水文学的目的与意义，模糊水文学的特点与研究方法论列于全书之首篇，并望得到国内外水文学界的广泛重视与广大水文科技教学、实际工作者的支持，以加速模糊水文学理论体系与分析方法的建立，推进水文学科的深入发展。

本书的另一个重要内容是将系统分析与模糊集分析联系起来，提出系统模糊分析优选理论与模型，开拓了求解大系统多层次、多因素模糊优选研究的新途径。此外，又将某些水资源系统的约束特点与系统优化分析结合起来，提出了水资源系统优化的分析解法途径。解决问题的基本思路不是通过传统的优化方法（如线性规划、非线性规划、动态规划），而是用简单的分析法，使问题得到与传统优化方法同样的解答。

本书以相当数量的内容论述了著者在八十年代初开始系统地提出的水库、水电站径流调节数值解法的原理与方法，这不仅形成了卓有成效的径流调节数值解法新的研究途径，而且有利于电子计算机在径流调节学科中的广泛应用。

本书以上三个方面既有区别又相互联系，构成水利、水文、水资源（包括水电能源）系统模糊集分析、优化分析、数值计算领域的新颖内容。著者相信，这些研究成果将有助于促进有关学科的进一步发展。

本文集中的第二、三、五、七、二十二篇系作者与辽宁师范大学数学系赵瑛琪副教授合作完成。

陈守煜

1987.6.于大连工学院

目 录

模糊水文学.....	(1)
汛期的模糊集模式及其应用.....	(4)
年调节水库设计年径流确定的随机模糊原理与方法.....	(12)
水利水电规划方案选择的模糊优选模型.....	(24)
系统层次分析模糊优选理论与模型.....	(30)
系统与模糊分析求解水电站最优排序.....	(41)
碧流河水库水质模糊综合评价.....	(53)
梯级水电站工作深度优选的数学规划分析.....	(61)
梯级水电站工作深度优选模型与解法.....	(69)
水电站群总装机容量最优分配的数学规划分析.....	(77)
用数理统计法计算年调节水库及其综合性线图.....	(83)
水电站水库径流调节的迭代数值计算.....	(87)
水电站群补偿调节计算的迭代数值解法.....	(95)
综合利用水库径流调节的数值解法.....	(104)
水库调洪计算的数值解法.....	(116)
水库调洪数值解法的理论、模式与程序.....	(121)
不同类型泄洪建筑物调洪计算的通用数学模式与程序.....	(131)
河渠不恒定流考虑惯性项的瞬态法.....	(141)
河渠不恒定流瞬时流态的迭代对分解法.....	(151)
河渠中洪水波的展平计算.....	(160)
水文概率统计中的一个理论问题.....	(165)
过渡区泥沙沉速公式.....	(171)
参考文献.....	(178)

模糊水文学

一、模糊水文学的特点

水文现象不仅具有必然性与随机性，而且还有着模糊性。只考虑必然性与随机性，常常还不能完整地描述水文现象与表达水文系统的特征。

事实上，年径流现象的“丰”、“枯”是不能以某一个径流量值来分界的。水体质量的“清洁”与“污染”，流域自然地理条件的“相似”与“不相似”（或“相异”）也都找不到明确的界面。事物或现象从差异的一方到差异的另一方，中间经历一个从量变到质变的连续过渡过程，这是差异的中介过渡性，由中介过渡性而产生划分上的不确定性就是模糊性。水文事件或现象中的模糊性还可以举出很多。汛期与非汛期，暴雨、大暴雨与特大暴雨，流域的上、中、下游，湿润地区与干旱地区，过程线的典型与不典型，水汽供应充分与不充分等等。

从系统的观点来看，综合运用系统的成因分析（必然性分析、确定性分析）、概率统计分析（随机性分析）与模糊集分析（可以与随机性分析统称为非确定性分析或不确定性分析）相结合的新的理论分析体系，简称为模糊随机系统分析，研究此理论分析体系与方法的新的水文学科，笔者称它为模糊水文学。因此，模糊水文学区别于其他水文学科的主要特征在于，不仅顾及水文现象的系统成因、随机特性，而且还考虑现象的模糊性，以促进水文学科的进一步发展，这是笔者创建模糊水文学的目的。

二、模糊水文学的基本内容

根据工程应用的观点，模糊水文学至少应该有两个方面的基本内容：一是水文计算的模糊集理论及其分析方法，二是水文预报的模糊集分析与方法。

第一方面我们研究并已取得有关成果有：推求设计典型年径流过程的软划分聚类分析，设计年径流分析的模糊随机模型，多年径流过程描述的模糊聚类分析，多年径流过程周期分析的模糊统计推断，月径流的随机模拟，单位线模糊模式识别方法，汛期的模糊集描述及其应用，水体质量综合评价的模糊集分析原理与方法等。第二方面的研究成果有：径流长期预报的模糊推理模式，径流分级长期预报的模糊聚类分析，水文气象单要素预报模糊推理，水文点值预报与区间预报精度评价的模糊集分析等。有关这两个方面的具体内容，可以参阅我们的研究成果文献〔1〕至〔22〕，其中大部分已经公开发表，本文限于篇幅就不作详细论述了。

三、模糊水文学的研究方法

根据本文第一节中的论述,模糊水文学的研究方法是对水文事件或现象的系统成因分析、随机分析与模糊集分析相结合的综合性方法。也就是笔者首次提出的模糊随机系统分析。现以汛期的模糊集分析来说明此理论分析方法的基本思路。

前面已经提到汛期的边界不清晰,是客观存在着的模糊现象,应该用模糊集理论加以分析。

设给定论域 T 为一年内的时间, t 为 T 中的任意元素,汛期是论域 T 上的一个模糊子集。记作 $\tilde{A}$ 。 $\tilde{A}$ 可用隶属函数加以描述,即对于任意 $t \in T$,确定映射

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}}: T &\rightarrow [0, 1] \\ t &\mapsto \mu_{\tilde{A}}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$\mu_{\tilde{A}}(t)$ 是元素 t 属于模糊子集 $\tilde{A}$ 的隶属函数。根据模糊子集 $\tilde{A}$ 由非汛期过渡到主汛期(此时 $\mu_{\tilde{A}}(t)$ 由0变到1),再由主汛期过渡到非汛期($\mu_{\tilde{A}}(t)$ 由1变到0)的特点,按我们在文[20]中的研究,可将隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(t)$ 用分段函数表示如下:

$$\mu_{\tilde{A}}(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{a_1-t}{b_1}\right)^2} & t < a_1, b_1 > 0 \\ 1 & a_1 \leq t \leq a_2 \\ e^{-\left(\frac{t-a_2}{b_2}\right)^2} & t > a_2, b_2 > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 a_1, a_2, b_1, b_2 均为参数, a_1, a_2 分别为主汛期开始、结束时刻,可根据河流所在地区水文气象系统的洪水成因分析确定。参数 b_1, b_2 可按照河流所在地点水利工程的设计标准,由概率统计分析(随机分析)确定。

根据水文随机分析法,分别统计非汛期至主汛期初、主汛期(a_1 至 a_2)、主汛期末至非汛期三个分期的洪水样本,进行洪水频率分析计算,按工程设计标准,分别确定相应各分期的设计值(设计洪峰、一定时段内的设计洪量、或设计防洪库容等)^[10]。

设各分期的设计值依次为 x_{n1}, x_p, x_{n2} 。显然 $x_p > x_{n1}, x_p > x_{n2}$,则有

$$\frac{x_{n1}}{x_p} = \zeta_1 < 1 \quad \frac{x_{n2}}{x_p} = \zeta_2 < 1$$

令 ζ_1, ζ_2 分别等于非汛期至主汛期初、主汛期末至非汛期两个分期中间时刻 t_{M1}, t_{M2} 的隶属度,即 $\zeta_1 = \mu_{\tilde{A}}(t_{M1}), \zeta_2 = \mu_{\tilde{A}}(t_{M2})$ 。由式(1)可反求得到确定参数 b_1, b_2 的公式分别为:

$$b_1 = \frac{a_1 - t_{M1}}{\sqrt{\ln \frac{1}{\zeta_1}}} \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{t_{M2} - a_2}{\sqrt{\ln \frac{1}{\zeta_2}}} \quad (3)$$

根据我们在文〔15〕中的论述,由式(2)、(3)确定的参数 b_1, b_2 ,可使隶属函数式(1)符合工程设计标准,满足工程设计的安全要求。

由上述对汛期的模糊集分析可见,描述汛期 A 的隶属函数 $\mu_A(t)$ 乃是综合运用所研究的河流系统的成因分析(如确定参数 a_1, a_2),随机分析(如确定参数 b_1, b_2)与模糊集分析(确定隶属函数 $\mu_A(t)$)相结合的结果。这样的分析体系与基本思路,可作为模糊随机系统分析理论体系的一个典型例子。

类似这样的例子在模糊水文学中可举出很多。如年径流现象既受流域水文气象条件的制约,又有着随机性与模糊性的特征。因此,河流某断面的设计年径流及其年内分配,既要分析其主要影响因素,考虑年径流受流域的水量平衡这一确定性关系的约束,又要计入年径流变化的随机性与年径流丰枯的模糊性。因而可以使设计年径流及其年内分配的确定,建立在模糊随机系统分析理论体系的基础上。我们在文〔12〕中曾对此进行了研究与论述,本文就不另介绍了。

四、结 束 语

水文现象既有受控于流域的水文气象、自然地理等确定性因素影响的一面,又有着非确定性即随机性与模糊性的另一面。水文现象的随机性早已为人们所普遍接受,且在研究与实际工作中广泛应用概率统计方法处理随机性。在那里,事件本身有着明确的含义,仅仅是因为条件不充分,使得条件与事件之间未能出现决定性的因果关系,因而,在事件出现与否上表现出非确定性。但水文现象的模糊性作为一种基本的真实,目前还未被人们所普遍认识。事实上,模糊性是排中律的一种破缺,在那里,概念本身没有明确的外延,一个对象是否符合这个概念难以确定,是由于概念外延的模糊而造成划分上的非确定性。“一切差异都在中间阶段融合,一切对立都经过中间环节而相互过渡”。“辩证法不知道什么绝对分明和固定不变的界限,不知道什么无条件的‘非此即彼’,它使固定的形而上学的差异互相过渡,除了‘非此即彼’,又在适当的地方承认‘亦此亦彼’,并且使对立互为中介”(恩格斯)。这也是水文现象模糊性的客观本质。因此,综合运用系统的成因分析、随机分析与模糊集分析相结合的新的模糊随机系统分析理论体系,将会推进水文学科的加速发展。因而,模糊水文学的创建,在水文学科的基本理论与应用方面都有着深远的意义。

汛期的模糊集模式及其应用

一、前言

汛期是水库、江河堤防、水利工程施工以及一切与河流有关的水利设施运行管理工作的关键时期。汛期运用管理的合理与否，直接关系到大坝、堤防的安全，涉及到国家资产、千百万人民生命财产的安全，关系到水库能否多蓄水，以满足各个兴利部门的用水要求。因此，人们总是极其重视水利工程汛期的运用管理工作。但过去由于对汛期本身的认识与描述都不够完善，表达汛期的基本方式是普通集合论，即：当论域 T 为一年内的时间， t 为 T 中的任意元素，把汛期 A 作为 T 上的一个普通子集。若 $t \in T$ ，则或者 $t \in A$ ，或者 $t \notin A$ ，二者必居其一，且仅居其一。这种汛期表达模式，使得一些与汛期有关问题的研究，难于取得突破性的进展。

我们认为，河流由非汛期逐步过渡至主汛期，在经历一段时间以后，再由主汛期逐渐过渡至非汛期，其间的界限并不清晰，应属于模糊现象的范畴。基于这一概念，本文提出完整的汛期模糊集模式，分别用升半正态分布、矩形分布、降半正态分布来表达非汛期向主汛期过渡，主汛期向非汛期过渡。在此基础上，提出了确定汛期各时期工程施工围堰控制高程、水库汛期限制水位等课题研究的新途径。

二、汛期的模糊集模式

前言中已经指出，汛期的边界不清晰，是模糊概念，是客观存在着的模糊现象。因此可将汛期作为论域 T 上的一个模糊子集 $\tilde{A}$ ，按模糊集合，可用隶属函数加以描述，即对于任意 $t \in T$ ，以确定一个映射

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}}: T &\rightarrow [0, 1] \\ t &\mapsto \mu_{\tilde{A}}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

隶属函数的研究与确定是处理模糊现象一个十分重要的问题。本文根据汛期这个模糊集合的特点，提出下列几条原则来确定汛期这一模糊子集隶属函数的具体模式。

1. 隶属函数的形式要适合现象的物理性质，即要符合汛期洪水发生发展变化的总趋势，例如主汛期向非汛期过渡的隶属函数，这期间洪水变化过程的总趋势是逐渐地衰减，且过渡阶段初期，洪水衰减相对地比较缓慢，模糊分布中的降半正态分布能够适合这一要求。

2. 要从水利工程在汛期防洪安全的角度出发，应符合工程防洪标准的要求。关于此点先论述如下：对于任意 $t \in T$ ，都有一个数 $\mu_{\tilde{A}}(t) \in [0, 1]$ ，它是 t 对 $\tilde{A}$ 的隶属度。设要求主汛期满足水利工程防洪标准的相应参数为 P_f （例如水库的防洪库容等），显然，主汛期的

$\mu_A(t)$ 为1。随着非汛期向主汛期的转变,或是主汛期向非汛期的过渡,在同样的工程防洪标准条件下, $\mu_A(t)$ 在逐渐地变化,前者增加,后者减小。将隶属度 $\mu_A(t)$ 作为权重,于是过渡段所需要的相应防洪参数应为: $\mu_A(t) \cdot P_F$ 。非汛期的隶属度 $\mu_A(t) = 0$,所需的防洪参数为0。主汛期的隶属度 $\mu_A(t) = 1$,需要的防洪参数为 P_F ,符合工程防洪标准的要求。因此,在主汛期向非汛期过渡的开始阶段,隶属函数变化缓慢一些,这样可使所需的相应防洪参数 P_F 减小得稍慢一点,符合安全原则。降半正态分布可以适合这一原则。

3. 隶属函数中的参数不宜过多,参数要有物理意义,参数的确定要便于数学处理。降半正态分布只有两个参数,参数不仅有物理意义,且确定比较方便。

根据上述原则,我们确定主汛期向非汛期过渡段的隶属函数为降半正应分布,主汛期为矩形分布,非汛期向主汛期过渡段的隶属函数,按对称性可取为升半正态分布。于是整个汛期 A 作为论域一年内的时间 T 上的模糊子集(图1),其隶属函数为

$$\mu(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{a_1-t}{b_1}\right)^2} & t < a_1, b_1 > 0 \\ 1 & a_1 \leq t \leq a_2 \\ e^{-\left(\frac{t-a_2}{b_2}\right)^2} & t > a_2, b_2 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 a_1, a_2, b_1, b_2 为参数。

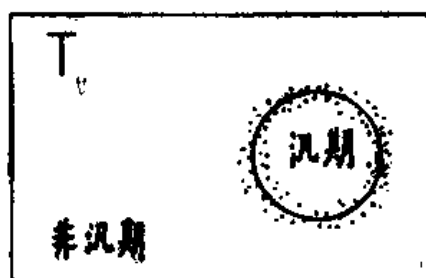


图1 汛期的模糊子集

主汛期的隶属函数为矩形分布,且 $\mu(t) = 1$,由式(2)可见,当 $a_1 - t = 0; t - a_2 = 0$ 时, $\mu(t) = 1$ 。因此,式(2)中的参数 a_1, a_2 应分别是主汛期开始、结束的时间,可根据工程所在地河流的实际洪水资料分析确定,具有明确的物理意义。不同河流,由于洪水发生发展变化的特性不尽相同,因而也具有各自的参数 a_1, a_2 值。

应该指出,表示主汛期开始与结束时刻的参数 a_1 与 a_2 是不确定的,或是模糊的。应根据模糊子集向普通子集转化取相应的阈值(或截集水平值)来确定。从防洪的安全角度考虑,宜取主汛期开始时刻的参数 a_1 靠前些,取主汛期结束时刻的参数 a_2 靠后些。

参数 a_1, a_2 决定后,隶属函数式(2)中的参数 b_1, b_2 就容易进行数学处理了。根据上面提出的确定汛期隶属函数模式的第2条原则,参数 b_1, b_2 应能满足工程防洪标准的要求,即应根据工程防洪标准加以确定。

参数 b_1, b_2 的确定方法如下:分别统计非汛期至主汛期、主汛期至非汛期两个过渡时期

的洪水样本资料,对样本系列进行洪水频率分析,推算符合工程设计或校核防洪标准的洪水要素(峰、量、过程),分别根据两个过渡阶段工程控制运用的具体要求,求出相应的符合防洪标准的防洪参数值: P_{11} , P_{12} 。按上面提出的隶属度作为权重的原则,显然应有

$$P_{11} = \mu(t_1) \cdot P_{F1} \quad \text{或} \quad \mu(t_1) = \frac{P_{11}}{P_{F1}} \quad (3)$$

$$P_{12} = \mu(t_2) \cdot P_{F2} \quad \text{或} \quad \mu(t_2) = \frac{P_{12}}{P_{F2}} \quad (4)$$

隶属函数 $\mu(t_1)$ 、 $\mu(t_2)$ 所对应的时间 t_1 、 t_2 可分析样本洪水发生的最早、最晚时间,发生洪水次数较多的时间,综合考虑对工程防洪安全要求等因素后取定(详见本文的计算实例)。于是由式(2)可得

$$b_1 = \frac{a_1 - t_1}{\sqrt{\ln \frac{1}{\mu(t_1)}}} = \frac{a_1 - t_1}{\sqrt{\ln \frac{P_{F1}}{P_{11}}}} \quad (5)$$

$$b_2 = -\frac{t_2 - a_2}{\sqrt{\ln \frac{1}{\mu(t_2)}}} = -\frac{t_2 - a_2}{\sqrt{\ln \frac{P_{F2}}{P_{12}}}} \quad (6)$$

式(5)用于非汛期向主汛期过渡的时期,式(6)则用于主汛期向非汛期过渡时期。

三、应用实例——大伙房水库主汛期向非汛期

过渡阶段限制水位的拟定

大伙房水库位于辽宁省浑河的中上游,是一座以防洪、灌溉、工业给水为主,兼顾发电、养鱼等综合利用的多年调节水库。

水库根据千年一遇洪水标准设计,设计洪水位236.20m,相应库容 $18.93 \times 10^8 \text{m}^3$ 。万年一遇洪水标准校核,校核洪水位237.70m,相应库容为 $20.59 \times 10^8 \text{m}^3$ 。水库的主汛期为7月10日至8月10,主汛期的防洪限制水位为226.40m,相应库容 $9.99 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

水库设计蓄水位231.50m,相应库容 $14.30 \times 10^8 \text{m}^3$ 。水库水位容积关系曲线如图2所示。

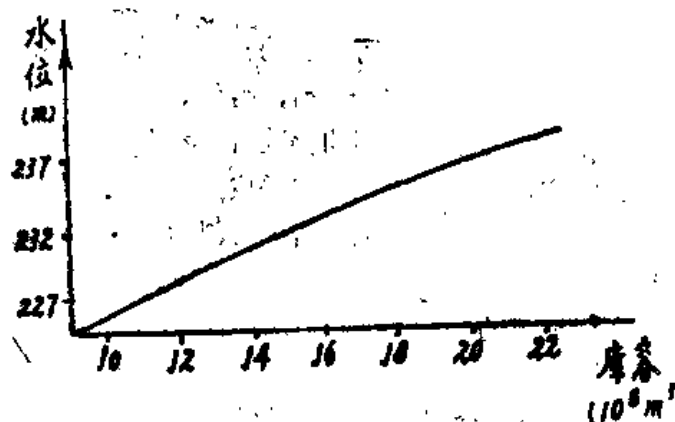


图 2

为了与文〔58〕中用分期设计洪水确定分期防洪限制水位方法所得结果进行比较,故引用文〔58〕中的同一资料系列与指标值,即引用文〔58〕表7-7中1935至1975年实测洪峰大于 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 统计资料与表7-8中1905至1934年三日暴雨大于70mm的统计资料。

为了分析的需要,将水库坝址处1935年至1975年洪峰大于 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的实测洪水资料列于表1,水库下游浑河沈阳站1905至1934年三日暴雨量大于70mm的实测资料列于表2。

表 1 (1935至1975年洪峰 Q 大于 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的统计数据)

年	月	日	洪 峰 $Q_m \text{ m}^3/\text{s}$	年	月	日	洪 峰 $Q_m \text{ m}^3/\text{s}$	年	月	日	洪 峰 $Q_m \text{ m}^3/\text{s}$	年	月	日	洪 峰 $Q_m \text{ m}^3/\text{s}$
1935	7	29	5020	1942	7	26	1720	1954	8	26	1600	1964	8	19	1150
1936	7	22	1100	1942	7	29	1250	1954	9	16	2020	1966	8	27	1500
1938	8	10	2030	1951	8	15	2180	1960	6	8	1320	1967	4	30	1240
1937	8	6	1240	1951	8	24	1430	1960	8	4	7650	1970	8	1	1090
1938	8	12	1450	1953	7	30	2890	1963	7	23	1430	1971	8	1	3560
1939	9	3	1460	1953	8	20	1650	1964	7	28	1160	1973	7	15	1040
1939	9	16	1430	1954	7	28	1290	1964	8	6	2590	1975	8	5	4430
1942	7	22	2500	1954	8	23	1020	1964	8	12	1650				

表 2 (1905至1934年三日降雨 X 大于70mm的统计数据)

年	月	日	三日降雨 X_{mm}	年	月	日	三日降雨 X_{mm}	年	月	日	三日降雨 X_{mm}	年	月	日	三日降雨 X_{mm}
1905	7	30	77.0	1911	8	12	261.6	1921	7	18	135.6	1929	8	6	133.8
1907	8	3	146.5	1912	8	6	75.1	1921	8	4	72.4	1930	7	15	155.6
1908	6	11	76.6	1912	8	11	75.7	1921	8	8	90.1	1931	8	8	191.4
1908	8	16	98.5	1914	7	18	90.5	1923	8	7	259.3	1932	7	23	138.9
1909	7	24	72.4	1914	9	9	149.8	1923	8	21	82.9	1934	8	17	80.0
1910	6	1	123.9	1917	7	25	123.8	1926	8	15	89.8				
1911	7	15	173.7	1918	8	1	75.7	1929	7	17	196.9				

上面列出的有关原始数据与资料均引自文〔58〕。现在我们应用提出的汛期模糊集模式与给出的资料, 来研究确定大伙房水库主汛期至非汛期过渡阶段的限制水位。

根据主汛期防洪限制水位 226.40m, 相应库容 $9.99 \times 10^8 \text{ m}^3$, 万年一遇校核洪水位 237.70m, 相应库容 $20.59 \times 10^8 \text{ m}^3$, 可得主汛期万年一遇校核洪水标准的防洪库容为 $10.60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 即主汛期校核洪水标准的防洪参数值 $P_{F_1} = 10.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。又按水库主汛期的结束日期为8月10日, 故参数 $a_2 = 8$ 月10日。参数 b_2 可根据式 (6) 确定, 为此需先确定主汛期向非汛期过渡阶段符合校核洪水标准的防洪参数值 P_{F_2} 及其相应的时间 t_2 。

文〔58〕用洪水频率分析方法推算大伙房水库主汛期千年、万年一遇的设计、校核洪峰流量值分别为 $15600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $21500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。并推得大伙房水库主汛期以后 (即本文称为主汛期向非汛期过渡阶段, 文〔58〕则称为汛后期) 万年一遇校核洪水过程线与调洪计算成果分别列于表3及表4。

表 3 (主汛期后, 设计频率 $P = 0.01\%$ 的校核洪水过程线)

日	时	流 量 $Q \text{ m}^3/\text{s}$	日	时	流 量 $Q \text{ m}^3/\text{s}$	日	时	流 量 $Q \text{ m}^3/\text{s}$	日	时	流 量 $Q \text{ m}^3/\text{s}$	日	时	流 量 $Q \text{ m}^3/\text{s}$
14	8	852	15	5	2760	15	18	12300	16	2	14100	17	8	5560
	12	875		7	3900		19	13100		4	13900		12	5010
	18	990		9	5080		20	13600		6	13200		14	5010
	21	1080		11	6570		22	14000		10	11700		20	4220
	24	1310		14	9250		23	14300		15	9320	18	6	3300
15	1	1490		16	11100		24	14300		18	8320		12	3020
	3	2090		17	11600	16	1	14500		24	6910	19	6	2460

表 4 (主汛期后, 设计频率 $P = 0.01\%$ 调洪计算结果)

水库起调水位 (m)	229.0	229.5	230.5
水库最高水位 (m)	235.42	235.55	236.21

由表3可见, 主汛期向非汛期过渡阶段的万年一遇洪峰流量为 $14500 \text{ m}^3/\text{s}$, 略小于主汛期的千年一遇洪峰。因此, 该时期的调洪最高水位, 从符合安全要求考虑, 以控制在主汛期的水库千年一遇设计洪水位 236.20m 为宜。根据表4水库的起调水位定为 230.49m, 由图2查得其相应库容为 $13.45 \times 10^8 \text{ m}^3$, 于是主汛期向非汛期过渡阶段符合校核洪水标准的防洪参数值, $P_{F_2} = 20.59 \times 10^8 - 13.45 \times 10^8 = 7.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。则 $\mu(t_2) = 0.674$ 。

现在来研究确定相应的时间 t_2 。由表1可见, 1935 至 1975 年间大伙房水库坝址处大于 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量出现 29 次 (不包括1967年4月30日、1960年 6 月8日两次), 其中主汛期期间7月15日至8月10日发生17次, 占总次数 58.6%, 其平均洪峰流量为 $2470\text{m}^3/\text{s}$ 。主汛期向非汛期过渡阶段8月10日以后发生12次, 占总次数41.4%, 平均洪峰流量为 $1786\text{m}^3/\text{s}$, 为主汛期平均洪峰流量值的72%, 其中9月以后出现3次, 最晚发生的时间为 9 月16日, 但却出现了2次, 1次为1939年9月16日, 其洪峰流量为 $1430\text{m}^3/\text{s}$ 。另1次为1954年9月16日, 其洪峰流量为 $2020\text{m}^3/\text{s}$, 为主汛期最大洪峰流量 $7650\text{m}^3/\text{s}$ 的26%, 且为主汛期平均洪峰流量 $2470\text{m}^3/\text{s}$ 的82%。

又根据表2, 1905至1934年间大伙房水库下游的浑河沈阳站三日暴雨大于70mm出现 24 次 (不包括1908年6月11日、1910年6月1日两次), 其中主汛期期间7月15日至 8 月10出现17次, 占总次数的71%, 其平均三日降雨量为130mm, 最大三日降雨量为 259.3mm。主汛期向非汛期过渡阶段8月10日以后出现7次, 占总次数的29%, 最晚发生的时间为9月9日, 三日降雨量为149.8mm, 为主汛期最大三日降雨量的58%。

综合上述洪水与暴雨的实测资料, 以及它们发生的最晚时间, 分别考虑时间 t_2 为 9 月15日, 9月10日再进行分析。先令 $t_2 = 9$ 月15日, 根据式 (6)

$$b_2 = \frac{36}{\sqrt{\ln \frac{10.6}{7.14}}} = 57.27$$

于是大伙房水库主汛期向非汛期过渡阶段的隶属函数按式 (2) 为:

$$\mu(t) = \begin{cases} 1 & 7\text{月}10\text{日} \leq t \leq 8\text{月}10\text{日} \\ e^{-\left(\frac{t-8\text{月}10\text{日}}{57.27}\right)^2} & t > 8\text{月}10\text{日} \end{cases}$$

根据上式可得主汛期后不同时间 t 对汛期的隶属度 $\mu(t)$, 将隶属度作为权重, 则得大伙房水库主汛期向非汛期过渡阶段不同时间 t 所需要的防洪参数 (库容) 值 P_t , 及其相应的水库汛期限水位 $Z(t)$ 如表5所列。

表 5 (主汛期后水库的汛限水位, $b_2 = 57.27$)

时 间 t	8月10日	8月15日	8月20日	8月25日	8月31日	9月5日	9月10日	9月15日	9月20日
隶属函数 $\mu(t)$	1.0	0.992	0.970	0.934	0.874	0.814	0.746	0.674	0.599
防洪库容 $P_t, 10^8\text{m}^3$	10.60	10.62	10.28	9.90	9.36	8.63	7.91	7.14	6.35
汛限水位 $Z(t), \text{m}$	226.40	226.50	226.79	227.23	227.99	228.73	229.58	230.49	231.43

类似地, 令 $t_2 = 9$ 月10日, 由式 (6) 得

$$b_2 = \frac{31}{\sqrt{\ln \frac{10.6}{7.14}}} = 49.32$$

则得隶属函数为,

$$\mu(t) = \begin{cases} 1 & 7\text{月}10\text{日} \leq t \leq 8\text{月}10\text{日} \\ e^{-\left(\frac{t-8\text{月}10\text{日}}{49.32}\right)^2} & t > 8\text{月}10\text{日} \end{cases}$$

由上式得不同时间 t 所需的防洪参数 P_t 及相应的水库汛限水位 $Z(t)$ 列于表6。

表 6 (主汛期后水库的汛限水位, $b_2 = 49.32$)

时 间 t	8月10日	8月15日	8月20日	8月25日	8月31日	9月5日	9月10日	9月15日
隶 属 函 数 $\mu(t)$	1.0	0.990	0.960	0.912	0.834	0.757	0.674	0.587
防 洪 库 容 $P_t \cdot 10^4 \text{m}^3$	10.60	10.49	10.18	9.67	8.84	8.02	7.14	6.22
汛 限 水 位 $Z(t) \text{m}$	226.40	226.53	226.90	227.50	228.48	229.45	230.49	231.57

为了对两个方案的成果进行分析, 拟定大伙房水库主汛期向非汛期过渡阶段不同时间 t 的汛限水位, 将文〔58〕应用分期设计洪水方法推得的主汛期后各时段水库的汛限水位列于表7, 经38年资料校验, 蓄至231.50m的概率为50%。

表 7 (主汛期后水库的汛限水位, 文〔58〕成果)

时 间 t	8月上旬前	8月中旬	8月下旬	9月下旬	9月中旬
汛 限 水 位 $Z(t) \text{m}$	226.40	228.00	229.50	230.50	231.50

比较表6、表7的结果可见, 9月上、中旬的汛限水位基本一致, 8月中、下旬的汛限水位表6约低于表7成果1m, 略偏于安全, 但蓄出水库设计蓄水位231.50m概率略小于50%。

表5的结果虽更偏于安全, 但使水库蓄至231.50m的概率过小。

综上所述, 可考虑用表6所列的防洪限制水位。

四、水利工程施工围堰控制高程的推算

非汛期向主汛期过渡阶段常需推算不同时间 t 水利工程施工围堰的控制高程。本文提出的汛期模糊集模式 (2) 可用以推求水利施工围堰的控制高程。这里将推算的主要步骤说明

如下:

1. 根据施工设计洪水标准, 求得主汛期水利施工防洪参数值 P_F ——设计地面径流洪峰值。

2. 统计非汛期向主汛期过渡阶段的洪水样本, 推求符合施工设计标准的防洪参数值 P_{ti} , 可得 $\mu(t_i)$, 分析确定相应的时间 t_i (可用上节算例中的类似方法)。 P_{ti} 应是设计地面径流洪峰值。

3. 按式 (5) 求出 b_i , 再由式 (2) 确定非汛期向主汛期过渡阶段的隶属函数 $\mu(t)$ 。

4. 用隶属度为权重, 根据下式

$$P_{ti} = \mu(t) P_F \quad (7)$$

计算非汛期向主汛期过渡阶段符合防洪标准的不同时间 t 的设计地面径流流量值 P_{ti} 。 P_{ti} 加地下径流, 得到不同时间设计流量 Q_{ti} 。

5. 根据不同时间的设计流量 Q_{ti} , 应用水力学中的相应泄流公式 (如宽顶堰泄流公式) 推算过水断面设计水位, 考虑安全超高, 就可推得非汛期向主汛期过渡阶段不同时间水利工程施工围堰的控制高程。

五、结 束 语

长期来对汛期描述建立在普通集合论的基础上, 本文提出表达汛期的完整的模糊集合模式, 能够比较完善地描述汛期这一模糊概念的实际情况。在此基础上, 进一步提出推算非汛期向主汛期过渡阶段各个时期水利工程施工围堰的控制高程、主汛期向非汛期过渡阶段不同时间水库汛期限制水位等课题研究的新途径。文中论述的模糊集模式及其应用的基本原则, 可拓广应用于与汛期有关的其他课题的研究。

年调节水库设计年径流确定的随机模糊原理与方法

一、概 述

河川径流现象具有非确定性的特征，这里所谓的非确定性是指径流变化的随机性与径流丰枯的模糊性，前者已为人们所普遍接受，并在研究与实际工作中广泛应用概率统计方法处理随机性。但对模糊性，在目前水文水资源学科领域中应用模糊集理论与方法的研究成果还不多，为现代科学提供新的数学语言与工具的模糊数学在今天的信息革命中占有重地要位，可以预料，近期内模糊集理论与方法在水利、水电、水文、水资源等学科领域研究中的应用，将会有很大的进展。这是因为这些领域中的许多现象与问题，用模糊集模型来描述与概括，更为自然，更接近于客观实际。例如水文现象中的年径流，其丰、中、枯水之间没有绝对清晰的界限，属于客观存在着的模糊现象，即现象在差异的中介过渡时所呈现的“亦此亦彼”性。因此用模糊集理论与方法，研究确定设计年径流过程，更符合现象的客观实际。

随机性与模糊性是年径流非确定性的两种表现，本文综合考虑年径流变化的随机性与年径流丰枯的模糊性，运用概率理论中的重复试验定理与模糊集理论中的软划分聚类分析，研究提出确定年调节水库（或水电站）设计参数非确定性方法。文中首先根据入库年径流的随机性，论述计算年调节水库（或水电站）年径流总量的概率论方法。然后考虑入库年径流量丰枯的模糊性，阐述了确定设计年径流量的年内分配的模糊集方法。

二、年调节水库（或水电站）设计年径流量 确定的概率论方法

每年超过某一年径流量 Y 的概率 p 可用年径流量保证率曲线 $p = f(Y)$ 或经验频率计算公式

$$p = \frac{m}{n+1} 100\%$$

来确定。

式中 m 为 n 年资料中年径流量由大到小排列的序号，

n 为年径流量的资料年数，

p 为每年超过某一年径流量 Y 的概率。

大量的年径流量实测资料证明，各年的年径流量在统计学意义上可以认为是彼此独立的事件，即某一年年径流量 Y 的概率分布和相邻年的年径流量无关，因此逐年超过或不超过某一年径流量 Y ，是彼此不相关的独立事件。设超过该年径流量 Y 的概率为 p ，则根据概率 p 与