

集对分析在水文水资源中的应用

万 星¹,王文圣²,丁 晶²

(1.重庆交通大学机电学院,重庆 400074; 2.四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要:集对分析是处理不确定性问题的理论,在一个系统中确定性与不确定性相互联系、影响、制约,并在一定条件下相互转化,用联系度及其数学表达式统一描述系统的各种不确定性,由此实现系统的评价和决策。以黄河、长江两大河流径流资料为例,通过集对分析方法,建立了评价区域径流变化程度的新模型,表明该方法在水文水资源中具有广阔的应用前景。
关键词:集对分析;不确定性;水文水资源;联系度
中图分类号:P333 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2006)04-0009-03

Set pair analysis and its application to hydrology and water resources//WAN Xing¹, WANG Wen-sheng², DING Jing²
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Hydraulic and Hydro-electric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)
Abstract: Set pair analysis (SPA) is a theory for treatment of indeterminate problems. In a certain system, the indeterminateness and determinateness are interrelated and interacted with each other, and sometimes they can interconvert under certain condition. In this paper, the connection degree and its mathematic formula were used for describing various indeterminateness of the system, and thus the assessment of and decision-making for the system were realized. As a case study, a new model for evaluation of regional runoff variation was developed by use of SPA based on the runoff data of the Yellow River and the Yangtze River, and it is verified that the method is of wide scope of application in hydrology and water resources.
Key words: set pair analysis; indeterminateness; hydrology and water resources; connection degree

水文水资源系统是一个包括随机性、模糊性和灰色性等多种不确定性的信息系统,如洪水、径流、降雨等具有大量的不确定性和复杂性,它们的时间序列几乎都是非平稳的,是随时间变化的事变序列^[1],因而不确定性分析方法在水文水资源系统中占有重要地位。随机理论、模糊理论和灰色系统具有处理不确定信息的能力,不确定性分析最初采用单一分析途径,实际上多种不确定性共存于水文水资源系统中。为了克服单一随机分析、模糊分析和灰色分析等的不足,①引入新理论、新方法,如集对分析法、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform,简称HHT)及模态理论、小波分析法、遗传算法、神经网络、投影寻踪、物元可拓等;②将多种不确定分析方法相互耦合用于水文水资源分析中。

灰色分析方法主要处理对象是信息不充分而出现的 uncertainty;模糊分析用于表达和处理客观存在的模糊信息,研究具有模糊信息的时间序列;希尔伯特-黄变换及经验模态分解(empirical mode decomposition,简称EMD)方法是一种全新的信号处理方法,运用这一方法,对于处理像水电能源系统的非线性、非平稳信号有清晰的物理意义,能够得到信号的振幅-时间-频率分布特征,并且具有自适应性;小波分析是数学领域近10年迅速发展起来的先进理论,具有时域和频域多局部化或接近局部化的功能,并且能随着所提取频道不同的信号成分自动缩放时域窗口,水文水资源研究对象正是局部的、非平稳的变化信号,尤其适合用小波理论来研究解决;神经网络、神经智能和遗传算法是水科学中信息处理优化求解新方法,特别适用于参数优化;投影寻踪是一种处理高维、非线性、非正态数据信息的一种有效方法;物元可拓是解决不相容问题的一种分析方法。上述分析方法在水文水资源分析中发挥着重要作用,由于水文现象和水资源问题异常复杂,因此,探索新的分析方法是水文水资源工作者孜孜以求的目标。近年来我国学者赵克勤提出的集对分析(set pair analysis,简称SPA)方法^[2],针对关于确定系统与不确定系统给出了

分析背景下的集对联系度表达式,由于联系度概念具有鲜明的辩证性、完整性,成为处理不确定性问题独具特色的思想方法。该方法提出后,受到了广泛的重视,特别是在水文水资源参数评价、径流预测、相似流域评价等方面有广泛的应用前景,为研究和处理不确定性的水文水资源系统提供了新的思路 and 工具。

1 集对分析的基本思想和特点

1.1 集对分析的基本思路

集对分析是一种处理不确定性问题的系统分析方法。所谓集对,是指有一定联系的两个集合组成的对子。集对分析的核心思想是把不确定性和确定性作为一个系统加以处理,其基本思路是在一定的背景下,对组成集对的两个集合特性做同一性、差异性、对立性的分析,并建立两个集合的同异反联系度表达式:

$$\mu(w) = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中: N 为集合特性的总数; S 为同一的个数; P 为对立的个数; F 为差异的个数; i 为差异不确定系数,在 $[-1, 1]$ 区间视不同情况取值,有时有差异标记作用; j 为对立系数,在计算中 $j \equiv -1$,有时起对立标记作用。为简便起见,令 $a = \frac{S}{N}$, $b = \frac{F}{N}$, $c = \frac{P}{N}$, 则 a, b, c 分别称为在所论问题 w 下的同一度、对立度和差异度,式(1)可写成:

$$\mu(w) = a + bi + cj \quad (2)$$

其中 a, b, c 满足归一化条件: $a + b + c = 1$ 。

1.2 集对分析的特点

a. 全面性. 集对分析在具体的问题背景下,既分析两个系统的同一性,又分析两个系统的对立性和差异性。因此,集对分析又称为同异反分析法。

b. 定性定量相结合. 集对分析不仅对具体分析得到的特性进行两个集合是否共同具有还是相互对立或者差异的分析、判断、分类,还要采用一定的数学运算对同异反做定量刻画。

c. 将确定性分析结果与不确定性分析结果有机地结合. 集对分析把确定性分析结果和不确定性分析结果统一在一个同异反联系度表达式中,便于人们对实际问题做辩证、定量和完整的分析研究。

d. 应用广泛. 集对分析既可直接对系统作宏观分析,也可用于对系统作微观分析;既适应于简单系统分析,又适用于复杂系统分析等。

2 水文水资源与集对分析方法

集对分析创造性地引入水文水资源领域是最近

几年的事。

冯利华等^[13]根据集对分析的原理和方法,对水资源变化趋势的预测进行了研究。该研究利用前期的预测因子进行计算,使集对分析具有预测的功能,通过反复的调整预测因子各区段的分界值,可以使水资源要素计算等级和实际等级的历史拟合率达到最大,其结果是较好的,这是水资源变化趋势预测研究的一种新尝试。

王栋等^[14]引入集对分析和模糊集合论,结合水环境评价中模式识别、等级评价等的实际应用,将有关的观念和理论进行了扩大;定义了广义联系度和广义相对隶属度,分别建立了基于集对分析的水体营养化评价一级模型和基于集对分析与模糊集合论的水体营养化评价的二级模型,评价结果相对全面,更好地反映了待评价水样与评价标准两个集合的确定性和不确定性的关系和联系度。

门宝辉等^[15]提出了基于集对分析的水资源开发利用程度评价的新方法,评价结果符合实际情况,且该评价模型概念清晰,评价结果直观。

显然,上述文献为集对分析在水文水资源中的应用打开了大门,在一定程度上起到了领路作用。今后要沿着这条路走下去,拓广、丰富、完善和发展集对分析在水文水资源不确定性分析中的应用。

集对分析的基础是“集对”。水文水资源中普遍存在各种“集对”,洪涝与干旱、汛期与非汛期、冲刷与沉积、蓄水与泄水、余水和亏水、降水和蒸发、相似与非相似、大尺度和小尺度、超过或不及、合格与不合格、安全与破坏、一般与特殊、输入与输出、稳定与非稳定、相关与非相关、丰和枯等等,都可以看作是集对的例子,实际上,水文水资源中集对的例子俯拾皆是,不胜枚举,这就为集对分析在水文水资源中的合理应用创造了先决条件。

集对之间的联系异常复杂,既有确定性联系也有不确定性联系,例如汛期和和非汛期这一集对,对一年中的某些月份,联系是确定的,但对另一些月份,联系是不确定的。集对分析的核心思想是将集对之间的确定性联系和不确定性联系作为一个确定和不确定系统来统一分析和处理,将确定性分析和不确定性分析有机地结合起来。这种分析和处理的思想适用于水文水资源中客观存在的各种集对,因此,集对分析引入水文水资源是必要的,既可能解决传统方法难以合理解决的某些复杂问题,又可能为人们提供一条研究和分析水文水资源问题的新途径。下面举例说明集对分析在水文水资源中可能潜在的应用。

a. 在水文预报误差评定时可引用集对分析中的联系度. 将误差小于某一高标准时的联系称为同

联系,大于某一低标准时的联系称为反联系,将处于高、低之间的联系称为异联系。据集对分析的原理,误差联系度可写成:

$$\mu_{\text{误}} = a + bi + cj \tag{3}$$

式中: a 定量表示同联系的可能性; c 定量表示反联系的可能性; b 定量表示异联系的可能性。从 a, b, c 的值就可以客观地评价预报方案的优劣。

b. 流域年水量平衡的定量状况,同样可以用联系度表示。以 y, x, z 和 s 分别表示流域的径流量、降水量、蒸发量和调蓄量,径流量的联系度一般可写成下列形式:

$$\mu_{\text{径}} = \frac{y}{x} + \frac{s}{x}i + \frac{z}{x}j \tag{4}$$

即
$$\mu_{\text{径}} = a + bi + cj \tag{5}$$

式中: a 定量表示降水量中产生径流量的份额(同联系); c 定量表示降水量中的蒸发损失份额(反联系); b 定量表示调差量份额(异联系); $\mu_{\text{径}}$ 表示流域降水和径流量之间的联系度,由 $\mu_{\text{径}}$ 值可以分析流域水文特性。

c. 联系度的分析可以有助于客观地选择相似流域。设计流域和参证流域组成的一个集对,其联系度写成:

$$\mu_{\text{相}} = a + bi + cj \tag{6}$$

式中: a 定量表示两流域影响径流因子同联系比重; c 定量表示两流域影响径流因子反联系比重; b 定量表示两流域影响因子异联系比重。

以上 3 例只是一种设想,需要进一步研究实施和具体应用,但是这些例子显示集对分析在水文水资源中的应用有着广阔空间。

3 集对分析应用实例

3.1 基本资料

采用黄河三门峡站、长江宜昌站还原到天然情况下的年径流资料,三门峡站资料来源于黄河水资源研究所,宜昌站资料来源于长江水利委员会。长江、黄河均以 1878 ~ 1986 年的资料为依据。

3.2 联系度模型

以黄河和长江年径流所处状态作为一个集对,探讨这一集对的相互关系,即研究二者的联系度,并通过联系度揭示黄河、长江年径流量同步变化特性。按表 1 将年径流量状态分为 3 级和相应的丰、中、枯 3 种状态,黄河三门峡站多年平均年径流量为 500.6 亿 m^3 ,长江宜昌站为 4 507 亿 m^3 ,根据表 1 标准,可将黄河和长江年径流量序列转化为状态序列。基于两河 109 年同步状态序列,计算两河同状态(同一级)、异状态(相邻级)和反状态(隔一级)发生的年

数,最后结果为 $S = 54, F = 55, P = 0$ 。考虑到总数 $N = 109$,据式(2)得 $a = 0.495, b = 0.505, c = 0$,即

$$\mu_{\text{黄-长}} = 0.495 + 0.505i + 0j \tag{7}$$

表 1 年径流丰枯变化分级标准

分级	标 准	状态
1	$y_i > 1.15\bar{y}_i$	丰
2	$0.85\bar{y}_i < y_i < 1.15\bar{y}_i$	中
3	$y_i < 0.85\bar{y}_i$	枯

注: y_i 为年径流量; $\bar{y}_i$ 为多年平均年径流量。

式(7)清楚地表明:黄河和长江年径流在时序演变中异状态出现的可能性最大,同状态出现的可能性小,反状态出现的可能性为零。就水文意义而言,式(7)揭示:当长江出现丰水时,黄河不可能出现与之相反的枯水,反之亦然;当长江出现丰水时,黄河出现丰水的可能性为 0.495,出现中水的可能性为 0.505,反之亦然。当长江出现枯水时,可类推。因此,式(7)高度概括地表示出黄河和长江年径流量状态同步变化的定量特征,和传统相关系数相比,既简明形象,又全面准确,这在一定程度上显示出集对分析引入水文水资源中会产生积极的作用。

4 结 语

通过以上分析可以得出以下几点初步结论:①集对分析是一种新颖的不确定性分析方法,和传统方法相比有明显特点;②集对分析的基础是集对,水文水资源中普遍存在各种集对,这为引入集对分析创造了先决条件;③当前集对分析在水文水资源中的应用是开拓性和尝试性的,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005:5.
[2] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000:23.
[3] 王霞,马蕾.集对分析方法及其在其它数学分支中的应用[J].辽宁工程技术大学,2001,20(5):731-732.
[4] 宋向炯.物理实验教学中的同异及系统辩证思维初探[C]//赵克勤,曹鸿兴.集对分析与界壳论的研究与应用论文集.北京:气象出版社,2002:10-14.
[5] 马良.基于集对分析的群决策灵敏度分析[J].上海理工大学学报,2003,23(1):30-34.
[6] 何文斌.基于可拓集对的经济策略生成方法[J].系统工程,2004,22(4):91-94.
[7] 周泽,张玲.用集对分析方法研究平衡施肥[J].农业系统科学与综合研究,1998,14(1):21-24.
[8] 黄世国,林思祖,洪伟,等.集对分析在伴生树种选择上的应用[J].福建林学院学报,2001,21(1):45-48.

(下转第 20 页)

2.3.3 抗冲磨性能

磨损冲击破坏是水工建筑物常见的病害之一，尤其是当水流流速较高，水流中挟带砂石等磨损介质时，这种破坏更为严重。以混凝土抗冲磨强度为指标，对水工特细砂混凝土抗冲磨性能进行试验研究。试验结果表明：在混凝土强度等级相同的情况下，水工特细砂混凝土 28 d 龄期的抗冲磨强度为 $1.05 \text{ h/(g} \cdot \text{cm}^{-2})$ ，中砂混凝土 28 d 龄期的抗冲磨强度为 $0.62 \text{ h/(g} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。在混凝土中粗骨料的抗冲磨强度远比砂浆抗冲磨强度高，而水工特细砂混凝土采用低砂率，使得其粗骨料在混凝土中所占比例较大，因此其抗冲磨性能要优于中砂混凝土。

2.4 水工特细砂混凝土的热学性能

混凝土的温度应力来源于混凝土受约束时的热变化而导致的体积变化。在大体积混凝土中，水泥因水化而发热，热量从表面散发，所以在混凝土中产生温度梯度，由此温度梯度导致的应力足以使大体积混凝土内部产生贯通性裂缝。水工特细砂混凝土的绝热温升过程线见图 3。由试验结果可以看出：由于水工特细砂混凝土粉煤灰掺量较高，使得其混凝土绝热温升值较低，这对水工混凝土大坝的温控十分有利。

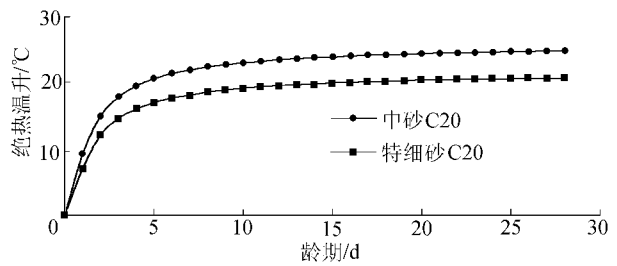


图 3 混凝土的绝热温升过程线

3 结 语

采用低砂率、低用水量、低坍落度、高粉煤灰掺量和掺高效减水剂的方法可以配制满足设计要求的水工特细砂大体积混凝土，对降低工程造价和合理开发利用自然资源均具有一定的经济意义和社会意义。采用上述方法配制的水工特细砂混凝土具有一定的性能特点：①具有收缩变形较小、抗渗及抗冲磨能力较强以及绝热温升较低的优点；②存在着早期强度较低、混凝土弹强比较高、极限拉伸值较低以及抗碳化能力稍逊的不足。因此在水电工程实际中，要充分认识水工特细砂混凝土的性能特点，扬长避短，使采用水工特细砂混凝土浇筑的水工大体积混凝土的性能更加完善。

参考文献：

[1] 冯乃谦.实用混凝土大全[M].北京:科学出版社,2001:743-749.
[2] 刘云霞,黄绪通.特细砂混凝土的性能及其应用[J].水电站设计,1996(3):97-102.
[3] 谢祥明,黄绪通.特细砂水工混凝土配合比设计的“三低一超”法[J].混凝土,2003(8):55-56.

(收稿日期:2005-12-16 编辑:熊水斌)

(上接第 11 页)

[9] 任淑良,赵克勤.集对分析在企业能源管理中的应用探讨[J].能源工程,1996(3):21-23.
[10] 吴福.高校引进师资的 SPA 评价模型及应用[J].哈尔滨学院学报,2003,24(10):9-10.
[11] 龚士良.地质环境合理开发利用集对论准则[J].西部探矿工程,2003,90(11):164-166.
[12] 王国平,王洪亮.集对分析用于污水处理厂的综合评价[J].江苏环境科技,2002,15(6):16-18.
[13] 冯利华,张行才,龚建林.关于集对分析的水文水资源变化趋势的统计预测[J].水文,2004,24(2):11-14.
[14] 王栋,朱元,赵克勤.基于集对分析和模糊集合论的水体营养化评价模型应用研究[J].水文,2004,24(3):9-13.
[15] 门宝辉,梁川,赵曼京.评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J].南水北调与水利科技,2003(6):30-32.

(收稿日期:2005-09-01 编辑:熊水斌)

(上接第 17 页)

参考文献：

[1] 陈观福,徐艳杰,张楚汉.强震区高拱坝横缝配筋抗震措施[J].清华大学学报:自然科学版,2003,43(2):266-269.
[2] 陈观福,张楚汉,徐艳杰,等.拱坝横缝钢筋与混凝土相互作用研究[J].工程力学,2002,19(3):16-19.
[3] 迟世春,林皋.拱坝的动力控制研究[J].世界地震工程,2002,18(1):1-8.
[4] 郭永刚,涂劲,陈厚群.高拱坝伸缩横缝间布设阻尼器对坝体地震反应影响的研究[J].世界地震工程,2003,19(3):44-49.
[5] 徐艳杰,张楚汉,王光纶,等.小湾拱坝模拟实际横缝间距的非线性地震反应分析[J].水利学报,2001(4):68-74.
[6] 陈厚群,郭永刚.小湾拱坝抗震工程措施深化研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2002.
[7] 徐艳杰.横缝配筋的拱坝地震非线性模型与无限地基影响研究[D].北京:清华大学,1999.
[8] 陈观福.强震区高拱坝横缝配筋与混凝土相互作用模型研究与应用[D].北京:清华大学,2002.

(收稿日期:2005-05-31 编辑:熊水斌)