

水利水电技术前沿

第 1 辑

湖北省水利水电规划勘测设计院 组编

非
外
借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利水电技术前沿

第 1 辑

湖北省水利水电规划勘测设计院 组编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以湖北省水利水电规划勘测设计院多年来的工程实践和科研攻关项目为依托,对水利工程中的关键技术问题进行了深入分析和探索。本书分为水文分析与规划、工程地勘与测量、工程设计与研究和水保移民与施工四个部分,以专题论文的形式总结并阐述了水利水电技术发展趋势和关键前沿问题。

本书可供水利水电工程领域的管理人员、专业技术人员、研究人员和高等院校师生阅读和参考,是水利科技工作者了解工程技术前沿和重点研究方向的重要参考文献,也是社会公众了解水利技术前沿的引领性读物。《水利水电技术前沿》为连续出版物,计划每年出版一本,本书为第1辑。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电技术前沿. 第1辑 / 湖北省水利水电规划勘测设计院组编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2020. 12

ISBN 978-7-5170-9261-2

I. ①水… II. ①湖… III. ①水利水电工程 IV. ①TV

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第255473号

书 名	水利水电技术前沿·第1辑 SHUILI SHUIDIAN JISHU QIANYAN·DI 1 JI
作 者	湖北省水利水电规划勘测设计院 组编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 383千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编 委 会

主 任：李瑞清

副主任：宾洪祥 许明祥 别大鹏 刘贤才 姚晓敏
熊卫红

委 员：李文峰 陈汉宝 沈兴华 雷新华 刘学知
秦昌斌 周 明 黄定强 翁朝晖 孟朝辉
周 全 王述明 李海涛 崔金秀 黄桂林
陈亚辉 邓秋良

湖北省水利水电规划勘测设计院（以下简称“湖北水院”）是中国水利水电勘测设计行业 AAA+ 信用等级单位，拥有水利水电工程勘察、设计、咨询等 14 个甲级资质，是湖北省属唯一的甲级水利水电勘测设计单位。建院 60 多年来，湖北水院在水利规划、水资源配置、筑坝技术、泵站设计等方面达到国内领先水平，科技创新成果丰硕，取得了 200 余项科技成果和 170 余项技术专利，获得 110 多项国家和省部级科技进步奖、科技成果奖和优秀工程勘察设计奖，荣获 1 项国家设计金奖、3 项银奖和 3 项铜奖。

为充分展示湖北水院的最新研究成果，作者针对一些关键技术问题和焦点问题，以专题文章的形式把这些成果展示给读者。全书包括水文分析与规划、工程地勘与测量、工程设计与研究、水保移民与施工四个部分，每一部分包括 6~7 篇专题文章。

(1) 水文分析与规划。主要包括防洪工程体系风险综合评价研究与应用，平原城镇化地区雨洪模拟方法和雨洪资源化利用，汉北流域水循环的“自然-社会”二元特性分析，综合考虑水动力、水质和经济社会河湖连通综合评价体系研究与应用，湖泊多目标水位调控关键技术与方案设计，鄂北长距离、跨区域引调水工程水资源优化配置理论与方法研究，以及洪水地区组成理论与方法研究等。

(2) 工程地勘与测量。主要包括引江济汉工程膨胀土分类及关键处置技术研究，GIS+BIM 在水利水电工程地质勘察中的应用及展望，机制砂在 PCCP 高强 C55 混凝土中的研究与应用，基于模糊理论的引水隧洞围岩快速分类研究，基于 EGM2008 地球重力场模型的高程拟合研究及应用，以及基于方差-协方差阵估计的 GPS 工程控制网优化设计等。

(3) 工程设计与研究。主要包括湖北水院土石坝工程设计技术发展历程和创新成果总结，BIM 技术研究进展与推广应用分析，黑臭水体底泥修复技术研究，考虑结构面退化非连续变形分析的滑坡动力稳定性系数计算方法研究，大型闸门及启闭设备在线监测技术研究与应用，龙背湾水电站超大型水库放空阀设计，以及水工建筑物安全监测自动化系统发展与应用等。

(4) 水保移民与施工。主要包括 ArcGIS 在水利水电工程移民安置规划设计中的应用，GIS 与 BIM 集成在水利移民设计中的应用和发展方向，生产建设项目水土流失防治技术综述，生态清洁小流域概念内涵、建设理念和构建技术研究，岩石建基面开挖爆破施工技术分析，以及台阶爆破岩石爆破块度预测技术研究等。

编写本书的初衷是总结湖北水院在水利水电工程规划、勘测、设计和施工等方面的实践经验和研究成果，深入剖析水利前沿关键技术研究进展和发展方向。本书既涉及传统的水利水电规划勘测设计方法，又涉及 BIM 等新兴技术，重点讲解这些技术在水利水电工程中的应用和发展方向。既让读者对水利水电工程技术有一个宏观的把握，又通过各种案例的分析，指导读者将这些技术应用到相关的专业和工程中。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

作者

2020 年 10 月

前言

01 水文分析与规划

- ◆ 基于可拓集合理论的防洪工程体系风险评价模型构建 邹朝望 常景坤 (3)
- ◆ 平原城镇化地区雨洪模拟与资源化利用
..... 由星莹 万伟 黄曼丽 凌斌 刘照群 罗颖 (11)
- ◆ 汉北流域“自然-社会”二元水特征浅析 闫少锋 曹国良 曾台衡 (20)
- ◆ 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究 杨卫 (31)
- ◆ 湖泊多目标水位调控技术及应用 刘伯娟 陈颖妹 (50)
- ◆ 长距离、跨区域引调水工程水资源优化配置理论——以鄂北地区水资源配置工程为例
..... 黄绪臣 林杰 孔维娜 柳小珊 (57)
- ◆ 中小河流洪水地区组成理论研究 柳小珊 孔维娜 (63)

02 工程地勘与测量

- ◆ 引江济汉工程膨胀土分类及关键处置技术 董忠萍 邹勇 黄定强 (73)
- ◆ GIS+BIM 在水利水电工程地质勘察中的应用及展望 ... 胡琳莹 彭义峰 张著彬 (89)
- ◆ 机制砂在 PCCP 高强 C55 混凝土中的研究与应用 宋晓波 张著彬 代帆 (96)
- ◆ 基于模糊理论的引水隧洞围岩快速分类研究 邹勇 潘朝 张乾 (102)
- ◆ 基于 EGM2008 地球重力场模型的高程拟合研究及应用 刘勇 邱国辉 万年锋 (113)
- ◆ 基于方差-协方差阵估计的 GPS 工程控制网优化设计 邱国辉 (121)

03 工程设计与研究

- ◆ 土石坝工程创新与发展历程
..... 姚晓敏 陈雷 张祥菊 万志刚 吴红光 杨晓明 (133)
- ◆ BIM 技术的应用与研究进展 黄桂林 汪洋 (148)
- ◆ 黑臭水体底泥修复技术研究 袁葳 倪双双 年夫喜 (156)
- ◆ 考虑结构面退化非连续变形分析的滑坡动力稳定性系数计算
..... 冯细霞 姚晓敏 崔金秀 陈雷 (162)
- ◆ 大型闸门及启闭设备在线监测技术研究与应用
..... 葛韬 吴传惠 罗华 王业交 吴鼎 (173)

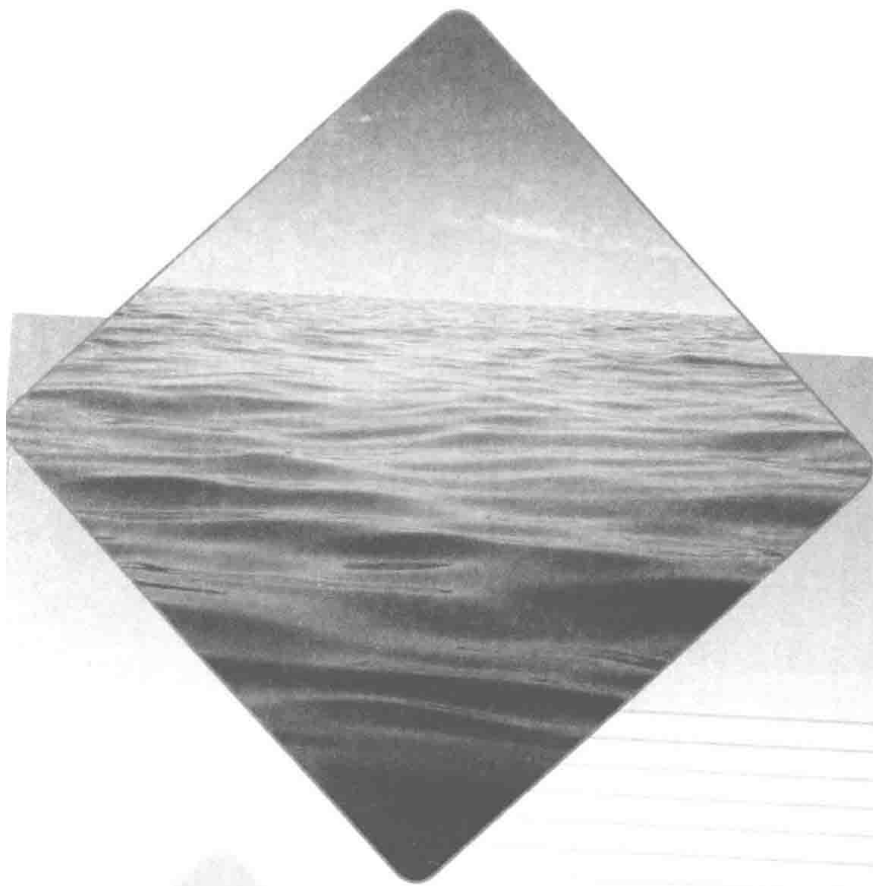
- ◆ 龙背湾水电站超大型水库放空阀设计 胡新益 (184)
- ◆ 水工建筑物安全监测自动化系统的发展与应用 袁葳 严谨 张祥菊 (189)

04 水保移民与施工

- ◆ ArcGIS 在水利水电工程移民安置规划设计中的应用研究 王磊 田伟 (199)
- ◆ GIS 与 BIM 集成在水利移民设计中的应用与研究 张良 范本迅 王绎思 (206)
- ◆ 生产建设项目水土流失防治技术研究 陈芳 李杰 (211)
- ◆ 生态清洁小流域构建技术研究 李杰 陈芳 高宝林 周全 (217)
- ◆ 岩石建基面开挖高效爆破施工技术 刘亮 蔡联鸣 刘磊 刘万浩 曾俊 (225)
- ◆ 台阶爆破岩石爆破块度预测技术 ... 刘亮 喻建春 罗岚 余伟 饶霏 朱全敏 (234)

01

水文分析与规划



基于可拓集合理论的防洪工程体系 风险评价模型构建

邹朝望 常景坤

[摘要] 兴建防洪工程可有效地减轻洪水灾害,任何防洪工程都存在失事的潜在风险。防洪工程风险评价能有效减少工程失事给社会经济带来的巨大损失。目前,防洪工程风险评价主要侧重于单个工程建筑物,而对防洪工程体系进行系统风险评价的研究较少。本文对防洪工程体系风险评价中的多指标综合评价方法进行了综述,比较了它们之间的优劣,并根据可拓集合理论构建了物元可拓评价模型,在对物元可拓评价模型分析的基础上,指出了该模型在风险评价中存在待评物元超出节域而无法计算的局限性。针对该构建的物元可拓综合评价模型的局限性,对原构建的物元可拓评价模型进行了改进,并用于防洪工程体系实例分析。结果表明,改进的物元可拓风险评价方法是科学合理的,有着广阔的应用推广前景。

[关键词] 可拓集合理论;评价模型;防洪工程;风险评价

1 引言

兴建防洪工程可有效地减轻洪水灾害,但也应该承认,任何防洪工程都存在失事的潜在风险。由于洪水频繁发生,许多水利工程设施失事,给人民生命财产安全和经济建设带来了严重的威胁和巨大的社会经济损失。由此,防洪工程风险评价研究备受人们关注。

风险评价的实质就是从系统工程的角度出发,建立经济投入、系统安全、系统破坏可能带来的生命财产损失之间的关系。风险评价的目的在于评价现行系统的安全富余度或系统可靠性是否可以接受,或在系统失事概率和后果两者间选择风险的方案。它包括3个相互联系的部分:风险辨识、风险分析和风险预案。目前,基于风险分析的防洪研究主要侧重于单个工程建筑物。关于防洪工程体系系统风险评价方法的研究比较少,属于当前几个难点和关键问题之一,要比单个工程建筑物的风险评估复杂得多,存在很多需要探索的领域。

常用的多指标综合评价方法主要包括:层次分析法、主成分分析法、模糊综合评判法、灰色系统分析法、TOPSIS法、秩和比(RSR)法以及数据包络分析法。

(1) 层次分析法(AHP)是由美国运筹学家匹兹堡大学教授 Saaty T L 于20世纪70年代初提出的,该方法的优点在于原理简单、层次分明、因素具体,指标对比等级划分比

较细，能对定性与定量资料进行综合分析；其缺点在于遇到因素众多、规模庞大的问题，计算较复杂。另外在权重的确定上，评价结果难免受评价人主观因素的影响。

(2) 主成分分析法是由美国心理学家 Charles Spearman 于 1994 年提出，其优点在于消除变量之间的相关性，减少工作量以及权数的非人性化；其缺点在于样本容量较大，评价单位的多少及增减，都可能改变权数，从而影响评价结论，不适用于包含定性变量的情况，且评价结果是一个相对优劣排序。

(3) 模糊综合评判法是一种对主观产生的“离散”过程进行综合处理的方法，其本身存在明显的缺陷，取小取大的运算法则会使大量有用信息遗失，导致模型的信息利用率低。评价因素越多，遗失的有用信息就越多，信息利用率则越低，误判的可能性也就越大。

(4) 灰色系统分析法弥补了采用统计方法作系统分析所导致的缺憾，它对样本的多少和样本有无规律都同样适用，而且计算量小，十分方便，不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况。

(5) TOPSIS 法的缺点在于相对接近度只能反映各评价对象内部的相对接近程度，并不能反映与理想的最优方案的相对接近程度，且灵敏度不高。

(6) 秩和比 (RSR) 法以非参数法为基础，对指标的选择无特殊要求，适于各种评价对象；计算用的数值是秩次，可消除异常值干扰，合理解决指标值为零时在统计处理中的困惑，结果比单纯采用非参数法更为精确，不仅可以解决多指标的综合评价，而且也用于统计测报与质量控制中；其缺点是指标采用秩代换，对原始定量指标的信息利用不充分，会丧失一些信息；最终得到的 RSR 值反映的是综合秩次的差距，而与顺位间的差异程度大小无关；当 RSR 值实际上不满足正态分布时，分档归类的结果与实际情况会有偏差，且只能回答分级程度是否有差别，不能进一步回答具体的差别情况。

(7) 数据包络分析法的致命缺陷是各个决策单元是从最有利于自己的角度分别表示权重的，导致这些权重随 DMU 的不同而不同，从而使得每个决策单元的特性缺乏可比性，得出的结果可能不符合客观实际。

鉴于此，本文结合防洪工程体系风险评价的内容及评价指标的特点，采用了行之有效的常用方法（可拓方法是可拓理论解决矛盾问题的工具，依据物元理论和可拓集合理论，可拓方法和各领域专业知识相结合，便形成可拓工程方法），对防洪工程的风险状况进行了分级，选取了相应典型防洪工程的风险指标，并据此构造了各级指标的经典域和节域物元，应用物元分析和可拓集合中的关联函数建立了防洪工程体系的综合评判物元模型，并在传统物元模型的基础上对其进行改进，同时应用于工程实例。

2 物元评价模型的基本原理

物元分析 (matter element analysis) 就是在可拓集合论的基础上，将复杂问题抽象为形象化的模型，并利用这些模型研究基本理论，提出相应的应用方法。利用物元分析方法，可以建立事物多指标多等级的性能参数的质量评定模型，能以定量的数值来表

示评定结果与各等级集合的关联度大小，并可据此判断出待评物元的所属级别，从而能够较完整地反映事物质量的综合水平，并易于用计算机进行规范化处理。其具体评价步骤如下：

2.1 同征物元体

物元是以事物 N 、特征 C 及事物关于该特征量值 V 三者所组成的三元组，记作 $R = (N, C, V)$ 。设 $R_1 = (N_1, C_1, V_1)$, $R_2 = (N_2, C_2, V_2)$, \dots , $R_k = (N_k, C_k, V_k)$ 为 K 个同征 (C_1, C_2, \dots, C_n) 物元，则称 R 为 k 格同征物元 R_1, R_2, \dots, R_k 的同征物元体，表达式如下：

$$R = \begin{vmatrix} N & N_1 & N_2 & \dots & N_k \\ C & V_1 & V_2 & \dots & V_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N & N_1 & N_2 & \dots & N_k \\ C_1 & V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1k} \\ C_2 & V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & V_{n1} & V_{n2} & \dots & V_{nk} \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中： N 为 N_1, N_2, \dots, N_k 的全体； C 为事物的特征； C_1, C_2, \dots, C_n 为同征物元事物的 n 个特征，其特征对应的量值为 $V_{ij} (V_{ij})_{rock}$ ，称为同征物元阵。

2.2 确定事物的经典域物元体与节域物元

根据事物标准及评价指标，可确定风险评价的典域物元体及节域物元为

$$R_0 = \begin{vmatrix} N_0 & N_{01} & N_{02} & \dots & N_{0k} \\ C & V_{01} & V_{02} & \dots & V_{0k} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N_0 & N_{01} & N_{02} & \dots & N_{0k} \\ C_1 & [a_{11}, b_{11}] & [a_{12}, b_{12}] & \dots & [a_{1k}, b_{1k}] \\ C_2 & [a_{21}, b_{21}] & [a_{22}, b_{22}] & \dots & [a_{2k}, b_{2k}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & [a_{n1}, b_{n1}] & [a_{n2}, b_{n2}] & \dots & [a_{nk}, b_{nk}] \end{vmatrix} \quad (2)$$

式中： R_0 为事物评价经典域物元体；其中 N_{0k} 表示所划分的第 k 个评价级别； C_i 表示第 i 个评价指标， $V_{0ij} = [a_{ij}, b_{ij}] (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, k)$ 分别为 N_{0k} 关于指标 C_i 所规定的量值范围，即各类别关于对应的评价指标所取的数据范围经典域。令

$$R_p = (P, C, V_p) = \begin{vmatrix} P & C_1 & V_{1p} \\ & C_2 & V_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{np} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P & C_1 & [a_{1p}, b_{1p}] \\ & C_2 & [a_{2p}, b_{2p}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{np}, b_{np}] \end{vmatrix} \quad (3)$$

式中： R_p 为风险评价节域物元； P 为风险评价级别的全体； $V_{ip} = [a_{ip}, b_{ip}]$ 为 P 关于 C_i 所取的量值范围，即 P 的节域。

2.3 确定待评物元体

对待评指标 G_1, G_2, \dots, G_m ，把所得到的分析结果用物元体表示为

$$\mathbf{R}_G = \begin{pmatrix} G & G_1 & G_2 & \cdots & G_m \\ C_1 & v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ C_2 & v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中： v_{il} 为 G_l ($i=1,2,\dots,n, l=1,2,\dots,m$) 关于 C_i ($i=1,2,\dots,n$) 的量值，即待评各类型风险的指标数据。

2.4 确定各指标 C_i 的权重

使用简单关联函数法确定各指标的权重。

2.5 确定待评各指标关于各等级的关联度 $K_j(v_{il})$

关联度函数 $K_j(v_{il})$ 的定义如下：

$$K_j(v_{il}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{il}, V_{oij})}{|V_{oij}|}, & v_{il} \in V_{oij} \\ \frac{\rho(v_{il}, V_{oij})}{\rho(v_{il}, V_{ip}) - \rho(v_{il}, V_{oij})}, & v_{il} \notin V_{oij} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\rho(v_{il}, V_{oij})$ 为点 v_{il} 与有限区间 $V_{oij} = [a_{ij}, b_{ij}]$ 的距离； $\rho(v_{il}, V_{ip})$ 为点 v_{il} 与有限区间 $V_{ip} [a_{ip}, b_{ip}]$ 的距离。

点与有限区间距离的计算公式为

$$\rho(v, V) = \left| V - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{1}{2(b-a)} \quad (6)$$

式中： v 为点值； a, b 分别为区间左端点及右端点的值。

2.6 计算待评物元 G_l 关于等级 j 的综合关联度

$$K_j(G_l) = \sum_{i=1}^n a_i K_j v_{il} \quad (7)$$

2.7 等级评定

若 $K_{j_0}(G_l) = \max_{j \in [1,2,\dots,k]} k_j(G_l)$ ，则评定 G_l 属于等级 j 。

令

$$\bar{K}(G_l) = \frac{K_j(G_l) - \min K_j(G_l)}{\max K_j(G_l) - \min K_j(G_l)} \quad (8)$$

则

$$j^* = \sum_{j=1}^k j \bar{K}_j(G_l) \div \sum_{j=1}^k \bar{K}_j(G_l) \quad (9)$$

式中： j^* 为 G_l 的级别变量特征值，从 j^* 数值的大小可以判断出待评物元偏向相邻级别的程度。

3 改进的物元可拓评价模型构建

应用式 (1)~式 (9), 当各项工程风险指标未超出风险分级标准上限时 (即未超出节域), 物元可拓法可以得到较好的综合评价结果。但是, 一旦风险指标中某一指标风险分级标准超出节域, 如湖泊的洪灾风险度分为微险 (5)、轻险 (7)、中险 (9)、重险 (10) 和特险 (12), 实际计算得到的洪灾风险度为 14, 在计算过程中会出现如下情况:

将 $v_{11}=14, V_{015}=[10,12], V_{1p}=[0,12]$ 代入式 (6)、式 (7) 得到:

$$\rho(v_{11}, V_{015}) = 2\rho(v_{11}, V_{1p}) = 2$$

$$K_5(v_{11}) = \frac{\rho(v_{11}, V_{015})}{\rho(v_{11}, V_{1p}) - \rho(v_{11}, V_{015})} = \frac{2}{2-2}$$

可知, $K_5(v_{11})$ 无意义, 即此种情况下无法再计算下去。同理可推出如其他任一指标 (或某些指标) 实测值一旦超出节域, 其关联度函数就会出现无法计算的情况, 此时就不能用物元可拓法综合评价防洪工程体系的风险状况。然而, 在实际不同工程风险指标的数据中经常会遇到某一指标 (或某些指标) 超出节域的情况, 为此, 有必要对原物元可拓法进行改进。

针对上述物元可拓法在防洪工程系统综合评价中出现的局限性, 本文做以下改进, 其思路如下:

(1) 在原物元可拓法的基础上, 对每个经典域的量值作规格化处理即都除以节域 V_p 右端点数值 b_{ip} , 得到新的物元经典域, 可表示如下:

$$R'_0 = \begin{vmatrix} N'_0 & N'_{01} & N'_{02} & \cdots & N'_{0k} \\ C & V'_{01} & V'_{02} & \cdots & V'_{0k} \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} N'_0 & N'_{01} & N'_{02} & \cdots & N'_{0k} \\ C_1 & [a_{11}/b_{1p}, b_{11}/b_{1p}] & [a_{12}/b_{1p}, b_{12}/b_{2p}] & \cdots & [a_{1k}/b_{1p}, b_{1k}/b_{1p}] \\ C_2 & [a_{21}/b_{2p}, b_{21}/b_{2p}] & [a_{22}/b_{2p}, b_{22}/b_{2p}] & \cdots & [a_{2k}/b_{1p}, b_{2p}/b_{2p}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & [a_{n1}/b_{np}, b_{ni}/b_{np}] & [a_{n2}/b_{np}, b_{n2}/b_{np}] & \cdots & [a_{nk}/b_{np}, b_{nk}/b_{np}] \end{vmatrix} \quad (10)$$

同理, 将待评物元体的量值也作规格化处理, 均除以节域 V_p 右端点数值, 得到新的待评物元体如下:

$$R'_G = \begin{vmatrix} G' & G'_1 & G'_2 & \cdots & G'_m \\ C_1 & v_{11}/b_{1p} & v_{12}/b_{1p} & \cdots & v_{1m}/b_{1p} \\ C_2 & v_{21}/b_{2p} & v_{22}/b_{2p} & \cdots & v_{2m}/b_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C & v_{n1}/b_{np} & v_{n2}/b_{np} & \cdots & v_{nm}/b_{np} \end{vmatrix} \quad (11)$$

(2) 对新的待评物元体用式 (6) 求其关于新的经典域量值范围的距离 D_{ij} 。

(3) 按关联函数法确定各指标的权重 a_i 。

(4) 计算关联度：用 D_{ij} 代替关联度函数 $K_j(v_{il})$ 去计算综合关联度 $K_j(G_l)$ ，即

$$K_j(G_l) = 1 - \sum_{i=1}^n a_i D_{ij} \quad (12)$$

(5) 按式 (9) 和式 (12) 进行物元综合评价。

4 评价模型在工程中的应用

长江某支流中下游防洪工程体系，目前主要由水库、分蓄洪区、堤防、天然湖泊、河道治理工程组成。通过风险分析计算出风险指标值，再据此对防洪工程风险进行分级，一般可按风险从小到大分为：微险、轻险、中险、重险和特险 5 个级别，见表 1。据该流域具体特点和计算出的各防洪工程的风险指标值见表 2，建立防洪工程风险评价的经典域、节域，并根据该防洪工程体系的现状及工程概况，确定其风险的待评物元为

$$R = (P, c, x) = \begin{bmatrix} P & \text{水库风险度 } R_0 & 0.179 \\ & \text{堤防风险度 } P_f & 0.259 \\ & \text{分蓄洪区风险度 } K & 0.308 \\ & \text{湖泊风险度 } R_n & 6.3 \\ & \text{河道工程风险度 } K_h & 0.071 \end{bmatrix}$$

按照改进的物元模型可得到规格化的待评物元为

$$R = (P, c, x) = \begin{bmatrix} P & \text{水库风险度 } R_0 & 0.179 \\ & \text{堤防风险度 } P_f & 0.259 \\ & \text{分蓄洪区风险度 } K & 0.308 \\ & \text{湖泊风险度 } R_n & 0.525 \\ & \text{河道工程风险度 } K_h & 1.01 \end{bmatrix}$$

表 1 防洪工程风险指标及分级表

风险指标	水库风险度 R_0	堤防风险度 P_f	分蓄洪区风险度 K	湖泊风险度 R_n	河道工程风险度 K_h
微险	0.00~0.25	0.00~0.25	0.00~0.25	1~5	-0.070~-0.045
轻险	0.25~0.50	0.25~0.50	0.25~0.50	5~7	-0.045~-0.025
中险	0.50~0.75	0.50~0.75	0.50~0.75	7~9	-0.025~0.010
重险	0.75~0.90	0.75~0.90	0.75~0.90	9~10	0.010~0.045
特险	0.90~1.00	0.90~1.00	0.90~1.00	10~12	0.045~0.070

表 2 各防洪工程的风险指标值

水库风险度 R_0	堤防风险度 P_f	分蓄洪区风险度 K	湖泊风险度 R_n	河道治理工程风险度 K_h
0.179	0.259	0.308	6.3	0.071

同样，按照改进物元可拓模型规格化风险标准的经典域见表 3。

表 3 规格化的防洪工程风险指标及分级表

风险指标	水库风险度 R_0	堤防风险度 P_f	分蓄洪区风险度 K	湖泊风险度 R_n	河道工程风险度 K_h
微险	0.00~0.25	0.00~0.25	0.00~0.25	0.083~0.417	-1.000~-0.643
轻险	0.25~0.50	0.25~0.50	0.25~0.50	0.417~0.583	-0.643~-0.357
中险	0.50~0.75	0.50~0.75	0.50~0.75	0.583~0.750	-0.357~0.142
重险	0.75~0.90	0.75~0.90	0.75~0.90	0.750~0.833	0.142~0.642
特险	0.90~1.00	0.90~1.00	0.90~1.00	0.833~1.000	0.642~1.000

待评物元中的每个新的数据关于新的经典域的距离为

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} 0.398 & 0.473 & 0.879 & 0.921 & 0.543 \\ -0.352 & 0.058 & 0.272 & 0.403 & -0.398 \\ 0.612 & -0.464 & -0.374 & -0.133 & 0.029 \\ -0.785 & -0.643 & -0.583 & -0.381 & -0.119 \\ 0.790 & 0.802 & 0.852 & 0.487 & 0.476 \end{bmatrix}$$

关联函数法确定的各指标权重为

$$\alpha = (0.31, 0.24, 0.16, 0.19, 0.11)$$

按式 (8)、式 (9) 和式 (12) 计算关联度及量级特征值：

$$K_j(G_l) = (0.925, 0.947, 0.739, 0.657, 0.892)$$

$$\overline{K_j(G_l)} = (0.957, 1.000, 0.290, 0.000, 0.839)$$

也就是， $j^* = 2.8$ 。

依据前述评价标准可知：①该流域工程体系的综合风险状况属于 3 级中险，准确地说，在轻险和中险之间；②鉴于防洪工程体系是有效防范洪水威胁的基础，在对防洪工程体系进行风险评价的基础上，应努力完善防洪工程体系建设，如对现有病险工程进行除险加固，对堤防险工险段进行治理等，尽量形成上调、中蓄、适时适量下泄的蓄泄兼筹的体系；③随着防洪非工程措施愈来愈发挥更大的作用，还要积极采取非工程防洪措施，以提高流域防灾抗灾的整体能力。

5 结语

与以往的评价模型相比，本评价模型具有如下的优点：①运用物元分析方法进行防洪工程风险综合评价，计算方法简便，结果比较客观，并且易于实现计算机编程；②对于流域内的大洪水，大部分的防洪工程都会发挥作用，它们之间相互关联。有必要指出：相关性增加，对串联系统是有利的，而对并联系统是不利的。物元分析模型考虑了相关性对风险等级评估的影响，是其他常规评价方法所不可比拟的。

同时，本文通过改变综合关联度的计算方法，使原物元可拓法得到改进，解决了普通物元可拓法无法解决待评物元体中元素超出节域的情况，并首次将其应用到防洪工程体系