

基于广义联系度函数的城市防洪 标准方案优选模型

唐言明¹, 白 夏², 卜 松³, 董洪茂¹, 吴成国⁴

(1. 中海油山东化学工程有限责任公司, 山东 济南 250101;

2. 蚌埠学院 机械与车辆工程系, 安徽 蚌埠 233030;

3. 安徽新华学院 土木与环境工程学院, 安徽 合肥 230088;

4. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 城市防洪标准方案优选是城市洪水灾害风险管理系统的重要组成部分, 可为城市适应环境变化和应对洪水带来的自然灾害等方面提供科学的决策依据。城市防洪标准方案优选的本质是复杂系统多因素评价问题, 其研究难点是如何有效地将多属性指标综合成一维单指标形式, 由此实现一维单指标的方案优选。为此, 针对标准集对分析方法(SPA)联系度计算时如何确定差异度系数 i 的难点, 从投票模型原理出发, 进一步分解差异度, 再次分解为同一度、差异度和对立度, 提出了基于集对分析广义联系度函数的复杂系统方案优选模型。将上述模型进行应用, 计算结果表明: 该模型物理概念清晰、计算过程直观、易于理解, 能较好地表征不同方案不同指标之间的差异情况。

关键词: 集对分析; 广义联系度; 相对差异度; 方案优选

中图分类号: TV214

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)02—0178—04

Comprehensive Optimization Model for Urban Flood Control Schemes Based on Generalized Connection Degree

TANG Yanming¹, BAI Xia², BU Song³, DONG Hongmao¹, WU Chengguo⁴

(1. CNOOC Shandong Chemical Engineering Co. Ltd, Jinan, Shandong 250101, China;

2. Department of Mechanical and Vehicle Engineering, Bengbu College, Bengbu, Anhui 233030, China;

3. School of Civil and Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei, Anhui 230088, China;

4. College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Urban flood control operation schemes optimization, as the important composition part of urban flood risk management, can supply important decision basis for the establishment and implementation of urban flood control operation, and the researching emphasis is how to synthesizing the multi-objective and multi-attribute evaluating indexes as an one-dimensional single index, so as to realizing the classification and assessment for the operation schemes in a one-dimensional real space. For the difficulties of determining the difference-degree coefficient of standard Set Pair Analysis method, from the point view of voting model, the difference-degree coefficient was further divided into identical degree, difference - degree and opposite degree, and then the scheme optimization model of complex system based on generalized connection degree was proposed in this paper. The results show that, this model has a clear physical meaning, and the calculating process is easy to understand, which can better describe the difference between different schemes and indexes.

Keywords: set pair analysis; generalized connection degree; relative difference degree; scheme optimization

城市防洪标准方案优选可为城市适应环境变化和应对洪水带来的自然灾害等方面提供科学的决策依据,对改善城市的生态环境,提高民众的生活质量具有重要意义^[1]。城市防洪标准方案优选是一高维非线性弱相依复杂系统,对其研究目前仍处于积极探索阶段^[1-2]。常用的研究方法主要有模糊综合评价模型^[3-4]、神经网络评价模型、灰色评价模型^[5]、层次分析法、投影寻踪评价模型^[6]等。由于防洪规划方案评价涉及的评价指标众多、且不同指标之间的量纲不尽相同,上述方法在应用过程中均存在一定不足^[7]。为此,本文将集对分析法^[7-8](Set Pair Analysis, SPA)引入城市防洪规划方案综合评价系统,集对分析是一种新的不确定系统分析方法,它从同、异、反三方面对构成集对的两个集合进行分析,并用联系度描述复杂系统的各种不确定性,进而采用定量数学分析运算方法识别复杂系统的各种不确定性^[8]。集对分析的难点是如何确定差异度系数 i ,由此通过计算最终联系度并对评价结果进行分类优选。汪新凡、周兴慧等^[9-10]采用广义同一度指标进行评价方案优劣排序,没有计算最终联系度。为此,在上述研究的基础上,本文依据“专家投票”原理,将标准集对分析中差异度系数 i 进一步细分为同一度(偏同差异度)、差异度和对立度(偏反差异度),并将二次划分后的差异度系数按 $i=0$ 处理,计算出一次划分的差异度系数 i ,由此得到最终联系度,为寻找最好城市防洪标准方案提供准确的数值,构建了基于广义联系度函数的城市防洪标准方案优选模型。最后,将上述复杂系统方案优选模型应用于某城市防洪标准方案优选实例中,开展了应用研究。结果表明,上述模型物理概念清晰,计算直观,易于理解,能较好地表征不同方案不同指标之间的差异情况。

1 基于广义联系度函数的城市防洪标准方案综合评价模型

1.1 集对分析简介

集对分析(SPA)方法是一种用于处理复杂系统不确定性信息的系统分析方法^[7,11],其核心思想是将不确定性问题看作一个不确定性系统,并从同、异、反三方面分析不确定与确定信息之间的联系与转化,并采用联系度指标衡量系统的不确定性,从而将不确定信息的辩证认识转换成定量数学分析运算问题^[7]。集对是指由具有一定联系的集合 A 和 B 组成集对,记为 $H=(A,B)$,从同一度、差异度和对立

度三个方面进行分析。对集对 H 的 N 个特性进行分析,其中集对 H 有 S 个同一度特性, P 个对立度特性,差异度特性有 $F=N-S-P$ 个,则该两个集合的联系度表达式为^[7-8]

$$u(H, W) = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中: u 为集对 $H=(A,B)$ 在实际应用背景 W 下的三元联系系数; S/N 为集合 A 和 B 的同一度,记为 a ; F/N 为集合 A 和 B 的差异度,记为 b ; P/N 为集合 A 和 B 的对立度,记为 c 。则式(1)可简化记为^[7,12-13]

$$u = a + bi + cj \quad (2)$$

式中: i 为差异度系数,在 $[-1,1]$ 中取值,当 i 取 -1 和 1 时表示 b 是确定的,此时系统蕴含的不确定信息最少;而 b 的不确定性在 i 接近于 0 时也不断增强;对立度系数 $j=-1$ 。

1.2 模型建立

基于广义联系度函数的城市防洪标准方案优选模型的建立过程包括如下步骤:

(1) 指标体系的建立。首先,对城市防洪标准方案将原始值 $X^* = \{x^*(i, j) \mid i=1 \sim n, j=1 \sim m\}$ 做一致无量纲处理,得到城市防洪标准方案评价指标标准值 $X = \{x(i, j) \mid i=1 \sim n, j=1 \sim m\}$ (其中: i 为评价方案序号, j 为评价方案指标序号, n 为方案数目, m 为指标数目)。由于越大越优型(正向)指标和越小越优型(逆向)指标对评价结果的作用方向不同,为此,需根据实际问题背景,按如下公式进行一致无量纲处理:

$$x(i, j) = \begin{cases} [x^*(i, j) - x_{\min}(j)]/[x_{\max}(j) - x_{\min}(j)], & \text{若指标 } j \text{ 为正向指标} \\ [x_{\max}(j) - x^*(i, j)]/[x_{\max}(j) - x_{\min}(j)], & \text{若指标 } j \text{ 为逆向指标} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_{\min}(j)$ 为样本集中第 j 个指标的最小值; $x_{\max}(j)$ 为评价样本集中第 j 个指标最大值。

(2) 方案 i 联系度 $u(i)$ ($i=1 \sim n$)的计算。联系度计算重点是计算方案 i 与理想方案之间的同一度、差异度、对立度及确定最后的差异度系数 i 。为此,在现有评价方案集的基础上,依据不同指标的作用方向对不同方案进行优劣排序,选出最终的理想方案,将各评价方案与理想方案构成一个集对,计算方案 i 与理想方案之间的同一度、差异度、对立度及确定差异度系数 i ,其中,对立度为最差的,同一度为最优的,差异度为中间部分^[14-15]。为计算最终联

系度,根据文献[7] 相对贴进度 $r_k = \frac{a_k}{a_k + c_k}$ 和同一度 $\tilde{a} = a + ab = a(1 + b)$ 原理,将差异度系数 i 进一步分为

$$i = \frac{a + b_1}{a + b + c} + \frac{b_0}{a + b + c}i' + \frac{b_2 + c}{a + b + c}j \quad (4)$$

式中,将差异度系数进一步分为 $\frac{a + b_1}{a + b + c}$ 、 $\frac{b_0}{a + b + c}i'$ 和 $\frac{b_2 + c}{a + b + c}j$ 三部分,分别为同一度、差异度(计算时 $i' = 0$)、对立度。其中, b_0, b_1, b_2 划分“按 60 分及格”原则处理(中间值此处归一化后取 0.5)^[12],即当 $x_{ij} \in (0, 0.3]$ 区间时, i 取值为 -1 (相当于对立度);当 $x_{ij} \in (0.3, 0.7)$ 区间时, $i = 0$ (相当于差异度);当 $x_{ij} \in [0.7, 1)$ 区间时, $i = 1$ (相当于同一度)。将式(4) 代入式(2) 后,整理得出最终联系度计算公式为

$$u(i) = a + \frac{ab + b_1b}{a + b + c} + (\frac{b_2b + bc}{a + b + c} + c)j \quad (5)$$

式中, $a + \frac{ab + b_1b}{a + b + c}$ 为广义同一度, $\frac{b_2b + bc}{a + b + c} + c$ 为广义对立度。

用“投票模型”解释广义同一度和广义差异度^[8]:式(4) 中弃权人数用 b 表示,弃权部分中又有倾向于投赞成票的部分,倾向于投反对票的部分,仍然倾向于弃权的部分,为此根依据不同倾向的分配比例将首次弃权部分细分为 $\frac{a + b_1}{a + b + c}$ 、 $\frac{b_0}{a + b + c}$ 和 $\frac{b_2 + c}{a + b + c}$,分别表示原 b 中同一度、差异度和对立度三种倾向票数的比例。由此,联系度计算式可以

简化为

$$u(i) = \tilde{a} + \tilde{c}j \quad (6)$$

式中: $\tilde{a}$ 为广义同一度,包括赞成票和首次弃权中的具有赞成倾向的票; $\tilde{c}$ 为广义差异度,包括反对票和首次弃权中具有反对倾向的票,用两者之和表示决策者的对不同方案满意程度,这与实际情况较相符。

即 $\tilde{a} + \tilde{c} = a + \frac{ab + b_1b}{a + b + c} + \frac{b_0b}{a + b + c} + \frac{b_2b + bc}{a + b + c} + c = a + \frac{b(a + b_0 + b_1 + b_2 + c)}{a + b + c} + c = a + b + c = 1$ 满足集对分析的归一化要求。

(3) 城市防洪标准方案的优选。依据由第二步计算所得的联系度 $u(i) (i = 1 \sim n)$,按联系度 $u(i)$ 值大小即可对评价方案进行优劣排序,最优方案为最大 $u(i)$ 。

2 应用实例

2.1 基本资料

城市防洪规划首先根据城市的社会、经济情况和自然条件初步拟定规划方案,然后对规范方案分别从政治、社会、经济、技术等方面进行分析^[1]。以某省会城市为例,根据该市社会、经济情况和自然条件,以防御百年一遇洪水为标准,分析后拟定了 6 个防洪规划方案^[7]。现以该城市防洪规划方案评价系统 10 个评价指标、6 个评价方案为例^[7-8],将上述建立的基于广义联系度函数的城市防洪标准方案优选模型,应用于城市防洪规划实际案例中开展应用研究,该市防洪规划方案评价系统 6 个规划方案的评价指标值如表 1 所示^[16]。

表 1 城市防洪方案评价优选系统指标值^[16]

方案	移民 人数 /万人	市政 工程费 /亿元	综合 利用费 /亿元	景观 建设费 /亿元	投资 建设费 /亿元	流域 防洪费 /亿元	施工 建设费 /亿元	生态 环境费 /亿元	防汛 救险费 /亿元	日常 维护费 /亿元
理想方案	0.2443	2.1726	2.2890	2.1726	0.6949	1.8913	2.8080	2.8080	2.8080	2.8080
方案 F ₁	1.4198	0.8436	0.9648	0.4434	0.9841	0.8152	0.5678	0.5678	0.8310	1.5678
方案 F ₂	0.4122	0.4434	0.3114	0.7436	1.6437	1.0761	0.4334	0.4334	0.1284	0.4334
方案 F ₃	0.2443	0.1320	0.3114	0.1320	0.6949	0.0000	0.2304	0.2304	0.4334	0.2304
方案 F ₄	0.2901	0.2358	0.6102	0.2358	0.9206	0.5870	0.1284	0.1284	0.2304	0.1284
方案 F ₅	1.8321	2.1726	2.2890	2.1726	0.9271	1.8931	0.8310	0.8310	2.8080	0.8310
方案 F ₆	1.8015	2.1726	1.5492	2.1726	0.8289	1.6304	2.8080	2.8080	0.5678	2.8080

2.2 计算过程

首先,将表 1 给出的评价方案集指标原始值按其作用方向进行优劣排序,得理想方案。并根据式(1)对评价指标原始数据进行标准化处理,经标准化

处理后的指标标准值如表 2 所示。然后,计算评价方案集不同方案与理想方案之间的联系度值,其中将差异度进一步划分、计算广义差异度所需的 b_0, b_1, b_2 的划分原则按中间值左右的“60 分及格原则”

处理,由此根据式(6),最终计算得评价方案集不同方案的最终联系度 $u(i)$ 为 $-0.30, -0.79, -0.44, -0.65, 0.48, 0.80$ 。方案联系数度 $u(i)$ 越大,表示

方案越优。将联系度 $u(i)$ 值从大到小排序,得方案集不同方案优劣排序结果如表 3 所示。

表 2 城市防洪方案评价系统指标体系标准值

方案	移民 人数 /万人	市政 工程费 /亿元	综合 利用费 /亿元	景观 建设费 /亿元	投资 建设费 /亿元	施工 建设费 /亿元	生态 环境费 /亿元	流域 防洪费 /亿元	防汛 救险费 /亿元	日常 维护费 /亿元
理想方案	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0381	0.0381	0.0000	0.1138	0.0381
方案 F ₁	0.8943	0.1526	0.0000	0.2997	0.0000	0.1138	0.1138	0.5690	0.0000	0.1138
方案 F ₂	0.0193	1.0000	0.6259	1.0000	0.8588	1.0000	1.0000	0.8621	0.5372	1.0000
方案 F ₃	0.9712	0.0509	0.1511	0.0509	0.7621	0.0000	0.0000	0.3104	0.0381	0.0000
方案 F ₄	0.2597	0.3487	0.3304	0.1526	0.6952	0.5372	0.5372	0.4310	0.2662	0.5372
方案 F ₅	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0381	0.0381	0.0000	0.1138	0.0381
方案 F ₆	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.7553	0.2622	0.2622	1.0000	1.0000	0.2622

表 3 城市防洪方案评价系统方案联系度排序结果

方案	联系度分量值	联系度 u 值	排列序号
方案 F ₁	$0.00 + 0.30j$	-0.30	3
方案 F ₂	$0.07 + 0.86j$	-0.79	6
方案 F ₃	$0.28 + 0.72j$	-0.44	4
方案 F ₄	$0.14 + 0.79j$	-0.65	5
方案 F ₅	$0.74 + 0.26i$	0.48	2
方案 F ₆	$0.85 + 0.05j$	0.80	1

2.3 结果分析

由表 3 可以看出:

(1) 评价方案集优劣排序结果依次为方案 F₆、方案 F₅、方案 F₁、方案 F₃、方案 F₄、方案 F₂,其中方案 F₆ 为最优方案,且不同方案之间联系度差异较大,有利于决策分析;

(2) 文献[7]中采用层次灰色耦合模型计算的评价方案集不同方案联系度分别为 0.5695,0.6493,0.7793,0.7251,0.9304,0.9530,采用基于加速遗传算法的层次分析评价模型计算的方案集不同方案联系度为 0.1294,0.0881,0.1891,0.1251,0.2041,0.2641。可见,不同方法计算结果均显示方案 6 为理想最优方案,且本文所建的评价模型计算结果差异明显、分辨率高;

(3) 可见,本文提出的基于广义联系度函数的城市防洪标准方案优选模型计算结果与文献[7]的结果及工程实际情况完全一致,说明了本文所建模型的实用性和科学性。

3 结 论

本文针对传统集对分析方法联系度计算时如何

确定差异度系数 i 的难点,提出了进一步分解差异度,再次分解为同一度、差异度和对立度,并将二次划分后的差异度系数按 $i = 0$ 处理,有效利用了第一次差异度系数中数据,避免了数据失真和提高了求解过程中数据的使用率,由此构建了基于广义联系度函数的城市防洪标准方案优选模型。应用结果说明:将上述模型用于处理城市防洪标准方案优选问题,概念清晰、计算简便、有效、理解简单,在其它复杂系统方案综合评价问题中具有广泛的应用价值。

参考文献:

[1] 宋 珊.区域防洪规划理论与方法研究[D].保定:河北农业大学,2014.

[2] 杨亚锋.基于集对逻辑的近似推理方法研究[J].智能系统学报,2015,10(6):921-926.

[3] 陈守煜.可变集及水资源系统优选决策可变集原理与方法[J].水利学报,2012,43(9):1066-1074.

[4] 潘争伟,金菊良,吴开亚,等.巢湖流域水安全评价的集对分析模型[J].水资源保护,2012,28(3):9-15.

[5] 何 君,金菊良,黄诗峰,等.基于 BP 神经网络与 GIS 的巢湖水华危险性评价[J].水电能源科学,2011,29(5):34-36,151.

[6] 李 磊,席占生,朱永楠,等.基于投影寻踪聚类思想的区域旱灾综合风险动态评估模型[J].水电能源科学,2012,30(9):1-5.

[7] 王文圣,张 翔,金菊良.水文学不确定性分析方法[M].北京:科学出版社,2011.

[8] 蒋云良,赵克勤,刘以安,等.信息处理集对分析[M].北京:清华大学出版社,2015.

[9] 汪新凡,王坚强,杨恶恶.基于二元联系系数集结算子的多准则群决策方法[J].控制与决策,2013,28(11):1630-1636.

(下转第 201 页)