

泥石流防治工程规划的可拓决策技术

汤家法, 姚令侃, 王 沁

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 泥石流防治工程规划属于一种半结构化的决策问题。可拓决策是根据物元的可拓性, 采用定性分析与定量计算相结合的方法解决矛盾问题的一种决策技术。本文根据可拓学的基本理论与方法, 提出了一种首先基于系统物元相容性评判进行方案比选; 再对初选方案通过系统物元变换进行方案优化设计的可拓决策模式, 并以成昆铁路大田箐沟泥石流防治方案的优化设计为例说明这种可拓决策技术的应用程式。

关键词: 泥石流防治; 相容度评判; 物元变换; 可拓决策

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

1 引言

在客观世界中, 事物是质与量的统一体, 事物的变化是其量变与质变的总和。对于给定事物的名称 N , 它关于特征 c 的量值为 v , 以三个有序三元组 $R = (N, c, v)$, 可拓学将其作为描述事物的基本单元, 简称为物元, 事物的可变性称之为物元的可拓性^[1]。所谓可拓决策, 就是把问题用物元模型描述出来, 根据物元的可拓性, 利用物元变换使目的和条件朝着相互统一的方向转化, 从而生成各种策略集, 并运用可拓数学方法进行定量计算, 通过评价产生最佳决策的一种决策技术, 其基本的思想是要最大限度地满足主指标和主条件的要求, 将不相容系统通过物元变换化为相容系统^[1~4]。可拓决策技术除了能够完成其他决策技术所完成的方案比选的任务外, 它还研究策略的形成和策略的开拓等问题, 是对矛盾问题进行决策非常适用的一种决策技术。

山区铁路线路工程的建设过程中, 不可避免要遇到跨越泥石流沟问题。铁路线路工程与泥石流沟的空间位置重叠, 使得二者构成一对尖锐的空间对立系统。铁路部门经过多年的实践, 对这种空间对立问题, 发展了多种解决办法, 归结起来可分为三类。一类是“非此即彼”的方法, 通过线路绕避泥石流危险区或通过控制泥石流形成的措施, 消灭或控制对立系统中的一类物元, 以达到化解矛盾的目的;

一类是“彼此相兼”方法, 如各类线路工程防护措施、各类控制泥石流堆积与流通的措施等, 使双方按一定比例保留部分量值, 对双方折中调和; 另一类是“转换桥”法, 通过在对立双方之间设置起连接和转换作用的“转换桥”, 如各类跨越、穿越措施, 使泥石流与线路工程在空间上相容, 从而使二者“各行其道, 各得其所”^[1,4]。“转换桥”是连接和转换矛盾双方并使之转化为相容或共存的工具, 是可拓决策中的重要思想方法。在工程实践中, 这三类方法既可以单独使用, 又可以混合使用。本文试就成昆铁路大田箐沟的泥石流防治方案的比选和优化为例, 来说明可拓决策方法的应用。

2 建立问题系统的物元模型

早期铁路部门在进行泥石流沟普查时, 大田箐沟被认为是处于衰退期的泥石流沟, 后由于当地农民大规模的垦荒, 使得该沟泥石流重新活跃起来, 仅在 1994-05-29 ~ 09-13 就先后爆发 10 次规模不等的泥石流。鉴于此, 铁路原有的越沟措施显得不够, 表现为: 1) 大桥的过流能力不足; 2) 大桥的^{#5}, ^{#6}桥墩正对原沟, 可能遭受泥石流携带的 4 m ~ 6 m 粒径石块的撞击; 3) 下游回淤严重。因此需要在原有的工程基础上增加新的工程措施, 确保线路的安全。

根据可拓学观点, 该问题可描述为:

$(R_1 \odot R_2) \downarrow (r(B(R_1, R_2)))$, 因 $R'_2 = TR_2$, 使

收稿日期: 2001-08-20.

基金项目: 铁道部科技开发项目(99G50)。

作者简介: 汤家法(1971-), 男, 安徽庐江人, 道路及铁道工程专业博士研究生。

得:

$$(R_1 \odot R'_2) \uparrow (r(B(R_1, R'_2))) \tag{1}$$

式中 R_1 表示线路工程物元; R_2 表示泥石流物元; $B(R_1, R_2)$ 表示物元 R_1, R_2 之间的转换桥; T 表示物元的变换; $(R_1 \odot R_2) \downarrow (r(B(R_1, R_2)))$ 表示 R_1, R_2 在条件 r 下相容; $(R_1 \odot R'_2) \uparrow (r(B(R_1, R'_2)))$ 表示 R_1, R'_2 在条件 r 下不相容。

系统因物元 R_2 的拓展由相容转为不相容, 要恢复系统的相容状态, 则必须进行相应的物元变换。考察系统的具体情况, 因受当地条件和运输任务等诸多因素的限制, 物元 R_1 没有可拓空间, 物元 R_2 的负拓展一时难以奏效, 因此可考虑改变系统的约束条件, 使之相容, 即: 通过 $B'(R_1, R'_2)=TB(R_1, R'_2), r'=Tr$, 使得

$$(R_1 \odot R'_2) \downarrow (r'(B'(R_1, R'_2))) \tag{2}$$

式(2)表明, 通过转换桥 $B(R_1, R'_2)$ 的物元变换, 可达到系统的相容。这种“转换桥”的构造是否成功, 是否真正起到了“转换”的作用, 则可通过泥石流与转换桥这一对共轭物元的相容度的评判来进行评价。

3 系统相容性可拓评判

3.1 确定待判物元

对于泥石流的描述, 有许多特征参数, 如容重、

流速、流量等等, 每个特征参数都对应相应的数值, 据此可构造出一类待判物元:

$$A=\begin{bmatrix} \text{泥石流} & \text{容重} & v_1 \\ & \text{流速} & v_2 \\ & \text{流量} & v_3 \\ & \text{粒径} & v_4 \\ & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

铁路泥石流防治工程的修建一般按 100 年一遇、500 年校核标准修建。描述泥石流的参数很多, 但在设计该沟的防治工程时, 主要考虑其流量、冲击力等物理指标; 另外由于在经济上要求, 希望能将投资规模控制在 120 万元以内, 最大投资额度不能超过 150 万元。因此, 构造出待判物元:

$$A_1=\begin{bmatrix} \text{设计规模泥石流流} A_1 & \text{流量} & (120\text{m}^3/\text{s} \sim 140\text{m}^3/\text{s}) \\ & \text{冲击力} & (480\text{T}, 520\text{T}) \\ & \text{防治投资控制} & (0, 120 \text{ 万元}) \end{bmatrix}$$

泥石流与线路工程两者之间的根本矛盾就是它们之间的空间位置的冲突。所以, 从其空间属性出发, 对系统组成物元和约束条件的变换, 是解决问题的根本途径。铁路部门以此为指导思想, 根据技术要求, 提出三个初步设计方案(表 1), 据此可构造出另一类待判物元。

表 1 成昆铁路大田箐沟泥石流防治方案

Table 1 Projects of protecting debris flow disaster of Datianqing gully of Cheng-Kun railway

方案代号	工 程 措 施	投资 (万元)	待判物元
S_1	1. 修建 0+40~0+100 段导流墙及以上左侧护岸墙; 2. 0+100~0+160 段直墙式排导槽; 3. 0+160~0+275 框架结构的渡槽; 4. 0+275~4+50 段斜墙式排导槽	376	$B'_1=\begin{bmatrix} \text{转换桥 } B'_1 & \text{过流能力} & (0, \wedge) \\ & \text{抗冲击力} & (0, \wedge) \\ & \text{投资规模} & 376 \end{bmatrix}$
S_2	1. 修建 0+40~0+100 段导流护岸墙; 2. 修建 0+100~1+40 段护导流岸墙; 3. 防冲嵌 15 道	157	$B'_2=\begin{bmatrix} \text{转换桥 } B'_2 & \text{过流能力} & (120, 130) \\ & \text{抗冲击力} & (480, 540) \\ & \text{投资规模} & 157 \end{bmatrix}$
S_3	1. 修建 0+40~0+100 段导流墙及以上左侧护岸墙; 2. 0+100~1+60 段斜墙式排导槽	79	$B'_3=\begin{bmatrix} \text{转换桥 } B'_3 & \text{过流能力} & (110, 120) \\ & \text{抗冲击力} & (480, 540) \\ & \text{投资规模} & 79 \end{bmatrix}$
500 年一遇工程校核值	$\begin{bmatrix} \text{转换桥 } B & \text{过流能力} & (110, 170) \\ & \text{抗冲击力} & (480, 580) \\ & \text{投资规模} & (0, 150) \end{bmatrix}$		
备注	过流能力单位为 m^3/s ; 抗冲击力单位为吨; 投资规模单位万元。校核标准流量以 100 年一遇的 1.25 倍计算 ^[5] 。		

在这三个方案中, S_1 方案采用了构建新的“转换桥”思想, 通过明洞渡槽将泥石流排出, 避免了泥石流对 #5、#6 桥墩的直接冲击, 设计纵坡达 80 %,

是较为理想的排泄坡度, 有效解决了泥石流对桥头路基及桥墩的危害, 因此, 对其前两个属性的可赋值 为 \wedge (表示该属性取值足够大); S_2 方案、 S_3 方案则

是试图通过辅助工程约束泥石流在沟道中的扩展达到化解系统矛盾的目的, 因采用的排导措施不同, 其排泄能力有所差异, 两者对桥墩的保护都显不足, 主要还是依靠钢筋混凝土结构桥墩(Φ=1 m)本身的抗剪能力抵抗泥石流的冲击力。B 可看作方案 B_1' 、 B_2' 、 B_3' 的可拓域。

3.2 方案的相容性评判及比选

可拓集合是利用关联函数来刻画事物与量值之间的关系, 因此建立在实轴上的关联函数, 使得解决矛盾问题的过程量化成为可能。

设 $X_0=\langle a, b \rangle$, $X=\langle c, d \rangle$, $X_0 \subset X$, 且无公共端点, 令

$$K(x)=\frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \tag{3}$$

其中, $\rho(x, X_0)=\left|x-\frac{a+b}{2}\right|-\frac{1}{2}(b-a)$
$$D(x, X_0, X)=\begin{cases} \rho(x, X)-\rho(x, X_0), & x \notin X \cap X_0 \\ -1, & x \in X_0 \end{cases}$$

称 $K(x)$ 为 x 关于区间 X, X_0 的关联函数。

为了能进行相容性评判, 这里引进相容物元的概念。观察泥石流与防护工程两类物元的属性特征, 其冲击力与抗冲能力、流量与过流能力、投资控制与投资额都是共轭特征。对于这些共轭特征, 若

$$R^1(t)=(N_1(t), c, c(N_1(t)))$$
$$R^2(t)=(N_2(t), \hat{c}, \hat{c}(N_2(t)))$$

c 和 \hat{c} 是共轭特征, 在 $c(N_1(t))$ 的取值范围内建立可拓集合 $X_1, \hat{c}(N_2(t)) \in X_2$, 则称

$$\langle \min_{x \in X_1} K_{X_1}(x), \max_{x \in X_2} K_{X_2}(x) \rangle = \langle p_1, p_2 \rangle \tag{4}$$

为 R_2 关于 R_1 的相容度区间。其中若 $p_1 > 0$, 则称 R_2 关于 R_1 相容; 若 $p_2 < 0$, 则称 R_2 关于 R_1 不相容; 若 $0 \in \langle p_1, p_2 \rangle$, 则称 R_2 关于 R_1 既相容, 又不相容。

有了上述的概念, 根据式(3)和(4)对物元 $A_1, B'_i(i=1, 2, 3)$ 进行相容性评判。以 (A_1, B'_2) 的 K_1 计算说明算法。

令 $X_0=\langle 120, 130 \rangle$, $X=\langle 110, 170 \rangle$, 则
$$\rho(x, X_0)=|x-125|-5;$$
$$D(x, X_0, X)=\begin{cases} |x-140| - |x-125| - 25, & x \notin X_0 \\ -1, & x \in X_0 \end{cases}$$

所以, 当 $x=\langle 120, 140 \rangle$, $k_1=\langle -0.25, 0 \rangle$ 。

表 2 系统相容度区间表
Table 2 Compatibility of the system

待判物元系统	待判属性相容度区间	$\langle \min_{x \in X_1} K_{X_1}(x), \max_{x \in X_2} K_{X_2}(x) \rangle$
$A_1 B_1$	K_1	\wedge
	K_2	\wedge
	K_3	-8.5
$A_1 B_2$	K_1	$\langle -0.25, 0 \rangle$
	K_2	$\langle 0, 30 \rangle$
	K_3	-1.2
$A_1 B_3$	K_1	$\langle -0.4, 0 \rangle$
	K_2	$\langle 0, 30 \rangle$
	K_3	1.4

从表 2 可看出, S_1 方案存在不相容区间, 在技术上是通过明洞渡槽将泥石流引走, 使得二者在空间上完全错开而完全相容, 其技术指标相容性极大, 因而该方案在技术上是完全可行的, 但因其所需的投资远大于财务要求的上限, 而在铁路计划部门对该项目投资严格控制的前提下又不可能改变投资属性的可拓域, 故造成该属性不相容性较大且无法进行相容性转换的局面; 考察 S_2 方案, 其经济上和技术上都有不相容区间存在; S_3 方案不相容性表现在技术指标上, 但其经济属性相容性较大, 而在技术上却存在着优化的可能性。根据方案相容性评判及比选结果, 决定将 S_1, S_2 方案淘汰, 下一步则集中力量对 S_3 方案进行物元变换, 形成新的物元系统, 即 $B''(R_1, R'_2)=TB'(R_1, R'_2)$, 提出优化设计方案。

3.3 设计方案的优化

矛盾问题的解决, 在很多情况下是通过物元的改变, 即物元的变换来实现的。由物元 $R_0=(N_0, c_0, v_0)$ 改变为物元 $R=(N, c, v)$ 或若干物元 $R_1=(N_1, c_1, v_1), R_2=(N_2, c_2, v_2), \dots, R_n=(N_n, c_n, v_n)$, 称为物元变换, 记作 $TR_0=R$ 。物元变换实际上是对其要素事物、特征、量值的变换或它们的组合。

对于泥石流, 可将其抽象为一种流动的空间自然几何体。它在运动扩展过程中出现的堆积、漫流、冲刷、超高和爬高等现象, 是其受到所流经地段地形地貌的影响后, 形成的一种三维空间的可变占据状态。

假设体积一定(v)的泥石流, 在某流通段其三维空间的扩展分别为 x, y, z , 则

$$v=\Delta x \times \Delta y \times \Delta z \tag{5}$$

式中 $\Delta x = \{ \Delta x | x \in U, \Delta x = \langle 0, x \rangle \}$; $\Delta y = \{ \Delta y | y \in U, \Delta y = \langle 0, y \rangle \}$; $\Delta z = \{ \Delta z | z \in U, \Delta z = \langle 0, z \rangle \}$; 此时, 对其一个属性可拓域的变换, 由式(5)的关系, 必然会导致另外两个属性可拓域的因变, 若

$$T\Delta y = \{ y | y \in U, y = \langle 0, y' \rangle \}$$

则

$$T\Delta x = \{ x | x \in U, x = \langle 0, x' \rangle \} \vee \\ T\Delta z = \{ z | z \in U, z = \langle 0, z' \rangle \} \quad (6)$$

工程上常利用这一特性在泥石流流路上有选择地修建约束工程, 通过人造的微地貌改变泥石流在空间各方向上的可拓域, 控制其可拓域与 R_2 的对应属性量值的交集, 降低了系统在空间上的对立程度。如 S_3 方案就体现了这一设计思想。

由表 1 知, S_3 物元由物元导流墙 (N_0) 和物元排导槽 (N_1) 组成, 即 $S_3 = N_0 \oplus N_1$, B_3 的功能属性正是通过其构成物元来实现的。 B'_3 不相容是其过流能力不足引起的, 分析其原因可知, N_1 长度不够, 根据式(5)、(6)可知, 会引起泥石流在 x, z 轴 (设 y 轴为泥石流流通方向) 方向上的可拓域的增加, 表现为泥石流容易在河床上停淤而导致槽内大量回淤, 从而导致泥石流排泄不畅, 降低了 B'_3 的过流能力。为此需增加泥石流在 y 轴上的扩展、降低在 x, z 轴方向上的可拓范围。因此对 S_3 采取以下改进措施: 1) 增加 N_1 长度, 将其设计纵坡提高为 50‰, 采用 V 型铺底; 2) 在河对岸增建护岸墙 (N_2), 防止河床被泥石流堆积物压缩后河水冲刷对岸。共需追加投资 40 万元。其过程表达为:

$$\begin{aligned} B''_3 &= TB_3 = T(B_3 \oplus S_3) \\ &= B_3 \oplus TS_3 \\ &= B_3 \oplus N_0 \oplus TN_1 \oplus N_2 \\ &= B_3 \oplus N_0 \oplus N_1 \oplus N_2 \end{aligned} \quad (7)$$

经过式(7)的变换, 形成新的物元 B''_3

$$B''_3 = \begin{bmatrix} \text{转换桥 } B''_3 & \text{过流能力} & (110, 150) \\ & \text{抗冲击力} & (480, 540) \\ & \text{投资规模} & 119 \end{bmatrix}$$

根据式(3)和(4)对物元 A_1, B''_3 再进行相容性评判, 其相容度区间为 $\langle p_1, p_2 \rangle = \langle 0.03, 30 \rangle$, 由此可见, $A_1 B''_3$ 无不相容区间的存在, $(R_1 \odot R'_2) \downarrow (r''(B''(R_1, R'_2)))$, 做到了技术指标与经济指标双赢。

4 分析与讨论

(1) 可拓决策方法是一种定性与定量相结合的开放式决策方法, 本文利用三个初始方案作为问题的初解, 再利用物元的可拓性, 通过物元变换, 调整目的和条件, 得到更符合实际的解 S'_3 。在这个过程中, 既采用了数学模型和数学方法, 也注意发挥了人的智慧, 做到定性与定量相结合。

(2) 可拓决策技术的过程可概括为一般步骤: 建立问题模型 → 求初始解 → 建立可拓集合 → 相容度分析 → 物元变换 → 生成策略集。

(3) 铁路的防灾决策是一个复杂的半结构化决策过程。如何利用可拓工程方法, 结合铁路部门经过多年防灾实践积累的丰富经验和成熟技术, 寻找和生成关键策略, 使其决策过程更加科学规范, 并利用计算机技术形成智能化的决策体系, 将是下一步的研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 17~18.
- [2] 姚令佩. 可拓学在泥石流预报减灾决策上的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998, (1): 139~144.
- [3] 陈巨龙. 可拓决策, 从物元分析到可拓学[C]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995. 217~214.
- [4] 蒋忠信, 陈光曦, 等. 中国山区道路灾害防治[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996. 153~265.
- [5] 姚令佩. 铁路泥石流防治工程可靠性设计初探[A]. 见: 第四届泥石流学术讨论会论文集[C]. 成都: 西部文化出版社, 1994. 467~474.

The Extension Decision for Debris Flow Disaster Mitigation Planning

TANG Jia-fa, YAO Lin-kan and WANG Qin

(College of Civil Engineering of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China)

Abstract: The disaster mitigation planning of debris flow is a kind of semi—structure decision making problem. Extension decision, based on the theory of extenics and the method of qualitative and quantitative analysis, is a good solution for contradictoriness. A model of extension decision with two gradations is provided in this paper. First, the comparison of schemes, according to the compatibility analysis of system matter element, is carried out. Then, the mitigation planning is treated for optimization by transforming the system matter elements. A case study is carried out on the Datianqing gully using this method.

Key words: debris flow protection; compatibility analysis; matter element change; extension decision