

基于 FAHP-ISP A-PCN 耦合的隧道施工动态评价模型*

刘杰^{1,2},宋亮²,毛爱民²,马冰^{2,3}

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院,合肥 230009;2.新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院,乌鲁木齐 830006;3.新疆大学 建筑工程学院,乌鲁木齐 830047)

摘 要:由于风险具有一定的复杂性和不确定性,风险控制是隧道施工安全的关键。建立公路隧道施工风险评价指标体系及其评价标准,利用模糊层次分析理论(FAHP)建立隧道风险评价指标的权重求解模型;结合改进集对分析方法(ISP A)建立公路隧道施工风险评价模型,实现了隧道施工风险评价的半定量;引入多元联系数的偏联系数(PCN)和集对势(*shi*)概念,建立 FAHP-ISP A-PCN 耦合的隧道施工风险动态评价模型。FAHP-ISP A-PCN 模型实现了隧道两级风险评价指标模型的态势分析和发展趋势分析,完善了隧道施工风险评估。

关键词:隧道;风险等级;偏联系数;集对势

中图分类号:U45;C931 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)00-0559-08

Tunnel Construction Risk Dynamic Evaluation Model
Based on the Coupling of FAHP-ISP A-PCN

Liu Jie^{1,2},Song Lang²,Mao Aimin²,Ma Bing^{2,3}

- (1. School of Civil &Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R. China;
2. Xinjiang Transportation Planning Surveying and Design Institute, Urumqi 830000, P.R. China;
3. School of Construction Engineering, Xinjiang University of Technology, Urumqi 830047, P.R. China)

Abstract: It is crucial to control risks in the construction of tunnels due to its complicated factors and uncertainty. Establishing highway tunnel construction risk evaluation indicators system and standards, applying the means of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), weight of each evaluation index was determined. We built a highway tunnel construction risk model by using improved set pair analysis method (ISP A) and solved the problem of half ration estimation. Concepts of partial connection number (PCN) and set pair potential (*shi*) through multivariate connection number were introduced. The coupling of FAHP-ISP A-PCN under the highway tunnel construction risk dynamic evaluation model was established. The FAHP-ISP A-PCN model has realized situation analysis of highway tunnel construction risk evaluation index system and development trend, improving the science of the highway tunnel construction risk evaluation process.

Keywords: tunnel; level of risk; partial connection number; set pair potential

0 引言

隧道工程建设是一项高风险建设工程,隧道工

程施工周期长,施工技术复杂,施工过程中风险因素众多、不确定性强,因此,在施工过程中安全事故发生的概率相比其他工程要大,有的甚至酿成灾

* 收稿日期:2016-08-14(修改稿)
作者简介:刘杰(1986-),男,甘肃酒泉人,博士生,主要从事公路工程、岩土工程的科研及勘察设计工作。
E-mail: hfutliujie@163.com
基金项目:安徽省自然科学基金(KJ2014A092);国家自然科学基金(50278030);中央直属高等院校基本科研业务专项基金(2012HGZY0024)资助

难^[1-3]。针对公路隧道施工过程中风险的不确定性,通过风险评价,正确识别出风险因素,采取有效的风险防范措施,从而降低风险发生的等级和带来的损失,对隧道施工有着重要的意义^[4]。

随着我公路建设的发展,越来越多的公路隧道位于地质较为复杂的山岭地区,施工过程中风险因素多,资料比较缺乏,很难利用传统的数学方法建立统一的多指标风险评价模型^[5-6]。在山区隧道施工风险评价方面利用人工智能等方法为隧道工程的风险评价提供了诸多新的手段与方法^[7-9]。目前,施工风险评价主要采用的是定性评价的方法,基于风险的相对数值的半定量评价方法对风险评价具有更大的实际意义,但隧道施工风险评价半定量的风险评价方法研究还较少^[10]。一些学者将集对分析(Set Pair Analysis Method, SPA)引入到地表水环境质量评价、投标企业发展趋势、地铁施工风险评价、高边坡稳定性分析中,在实现指标排序的同时,还指出了指标的水平,实现了评价的半量化^[11-14],但是半量化结合指标发展态势方面的研究还较少。

笔者根据公路隧道施工风险评价指标体系及其评价标准,利用模糊层次评价法(Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP)^[14]确定隧道风险各级指标的权重,引入改进集对分析方法(Improved Set Pair Analysis Method, ISPA)^[15-17],引入集对分析中的联系数理论中的偏联系数(Partial Connection Number, PCN)^[18]和集对势(*shi*)^[15],对隧道施工风险的潜在发展趋势进行研究,建立隧道施工安全评价的模糊层次、改进集对分析、偏联系数三者(FAHP-ISPA-PCN)耦合模型。FAHP-ISPA-PCN耦合模型实现了隧道施工安全风险评价的半量化与风险演变趋势的预测。

1 模型的建立

在对国内多个山岭地区复杂条件隧道设计、施工资料分析和事故分析的基础上,建立隧道施工风险评价指标系统。根据隧道的地形地貌、地质、周边环境、设计情况、结构方案、施工技术,将隧道安全风险事件通过理论研究、事故统计、相似工程类比建立风险评价一级子系统,根据一级子系统风险事件对应的风险源建立一级子系统下属的二级子系统,由此建立复杂条件下隧道施工风险综合评价系统。

1.1 隧道风险评价准则

根据隧道施工风险评价指标,结合事故统计、相似工程类比数据、经验、规范等,将隧道施工风险评价等级分为 4 个等级:Ⅰ级(低度)、Ⅱ级(中度)、Ⅲ级(高度)、Ⅳ级(极高),如表 1 所示^[9]。

表 1 隧道施工风险等级标准

可能性	程度				
	轻微	较大	严重	很严重	灾难性
很不可能	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅲ级
不可能	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级
偶然	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级
可能	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级
很可能	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级

根据风险等级划分,建立隧道的风险接受准则和处理措施,如表 2 所示。

表 2 风险接受准则和处理措施

风险等级	接受准则	处理措施
Ⅰ级 (低度)	可忽略	不需采取风险处理措施和监测。
Ⅱ级 (中度)	可接受	不需采取风险处理措施,但需予以监测。
Ⅲ级 (高度)	不期望	必须采取风险处理措施降低风险并加强监测,且满足降低风险的成本不高于风险发生后的损失。
Ⅳ级 (极高)	不可接受	高度重视并规避,否则要不惜代价将风险至少降低到不期望的程度。

1.2 隧道风险评价指标权重

综合考虑隧道的地质情况、设计方案、施工技术情况,利用模糊层次分析理论(FAHP)建立隧道施工风险模型,并确定评价系统中各子系统及对应评价指标间的权重。结合专家打分评价的分析,对一、二级系统评价指标进行两两重要性对比,在此基础上建立模糊互补判断矩阵 $A=(a_{ij})$,且该矩阵满足 $a_{ij}+a_{ji}=1(i,j=1,2,\cdots,n_q)$,其中 $0\leq a_{ij}\leq 1$,式中 a_{ij} 表示指标*i*优于指标*j*的相对程度^[4,19],判断矩阵的排序向量为 $\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)^T$ 。根据文献[20]提出的层次分析判断矩阵排序广义最小

平方法,对隧道施工风险评价子系统及其评价指标的模糊互补判断矩阵 $A=(a_{ij})$ 进行权重计算,得到 $A=(a_{ij})$ 的权重向量 ω 为:

$$\omega = \left(1/\sum_{i=1}^n a_{i1}, 1/\sum_{i=1}^n a_{i2}, \cdots, 1/\sum_{i=1}^n a_{in} \right)^T \quad (1)$$

在层次分析法中,一般通过专家打分给出判断矩阵。由于不同的专家知识结构、水平、个人偏好等不同,专家主观因素的影响对评价结果影响较大,此外对事物的判断本身具有一定的模糊性和不确定性。因此,根据文献[20]定义广义偏差函数为:

$$F(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \left\{ a_{ij} \frac{\omega_j}{\omega_i} \right\}^\alpha - 1 \right|^2 \quad (2)$$

一般可以认为,当 $F(\omega) < 0.1$ 时隧道施工风险评价指标权重计算结果可信。

1.3 隧道施工风险二级评价系统

集对分析(Set Pair Analysis,简称SPA)^[15,19-20] 的核心思想是:在给定背景下,先对一个事物的某一特性作同一性、差异性、对立性的分析,然后建立

$$\mu_{mk} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & c_{mk} \in \text{I} \\ \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{(2,3)k}}{s_{(1,2)k} - s_{(2,3)k}} + \frac{1}{2} i_1 + \frac{1}{2} \frac{s_{(1,2)k} - c_{mk}}{s_{(1,2)k} - s_{(2,3)k}} i_2 + 0i_3 + 0j & c_{mk} \in \text{II} \\ 0 + \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{(3,4)k}}{s_{(2,3)k} - s_{(3,4)k}} i_1 + \frac{1}{2} i_2 + \frac{1}{2} \frac{s_{(2,3)k} - c_{mk}}{s_{(2,3)k} - s_{(3,4)k}} i_3 + 0j & c_{mk} \in \text{III} \\ 0 + 0i_1 + \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{(4,5)k}}{s_{(3,4)k} - s_{(4,5)k}} i_2 + \frac{1}{2} i_3 + \frac{1}{2} \frac{c_{mk} - s_{(4,5)k}}{s_{(3,4)k} - s_{(4,5)k}} j & c_{mk} \in \text{IV} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & c_{mk} \in \text{V} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为对应评价单元; k 为对应评价指标; c_{mk} 为评价指标的样本值; $s_{(x,y)k}$ 为第 k 个评价指标的第 x, y 级标准所对应的临界值; i_1, i_2, i_3 为差异度系数,取值区间为 $[-1, 1]$,同时利用差异度系数对差异进行标记;其中 j 为对立度系数,取值为 -1 ,起对立标记的作用^[21]。

利用改进集对分析模型(ISPA)分别评价模型的两级系统和总系统的联系数 μ ,进而对隧道施工风险作出综合评价^[14]。具体计算方法为:

1.3.1 二级子系统的 n 元联系数为:

$$\mu_{mk} = r_{mk1} + r_{mk2} i_1 + r_{mk3} i_2 + \cdots + r_{mkn-1} i_{n-2} + r_{mkn} j \quad (4)$$

式中: $r_{mk1}, r_{mk2}, r_{mk3}, \cdots, r_{mkn-1}, r_{mkn}$ 为联系数分量,取值区间均为 $[0, 1]$,且有 $r_{mk1} + r_{mk2} + r_{mk3} + \cdots + r_{mkn-1} + r_{mkn} = 1$ 。其中 $i_1, i_2, \cdots, i_{n-2}$ 为差异度系数,取值区间均为 $[-1, 1]$; j 为对立度系数,取值定为 -1 。

集对的同、异、反联系度。改进集对分析(ISPA)是一种基于集对分析同、异、反联系数的推广与改进方法,将基于同、异、反三元联系数推广到了多元联系数。

在分析复杂的问题时,改进集对分析(ISPA)可以对对象进行更加详细的刻画,文献[16]针对标准集对分析中同、异、反评语的细化问题,利用集对分析的联系度的可扩展性对其进行扩展,得出了评价样本与评价等级之间的多元优劣趋同程度。文献[17]用集对分析理论建立了一种基于接近度概念的模糊差异度系数的改进计算模型的新的预测模型方法。建模步骤如下:

将隧道施工风险评价样本与评价指标体系及评价等级标准作为一个集对进行分析。

基于改进集对分析模型(ISPA)^[17] 建立隧道施工风险评价指标与评价指标体系及评价等级标准之间的集对,采用 n 元联系数建立隧道施工风险的二级评价系统,计算风险评价指标值^[21]。

1.3.2 一级子系统 n 元联系数为:

$$\mu_m = r_{m1} + r_{m2} i_1 + r_{m3} i_2 + \cdots + r_{mn-1} i_{n-2} + r_{mn} j \quad (5)$$

式中, $r_{m1} + r_{m2} + r_{m3} + \cdots + r_{mn-1} + r_{mn} = 1$ 。

$$r_{ml} = \omega_{mk} r_{mkl} \quad (l = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (6)$$

1.3.3 综合评价 n 元联系数为:

$$\mu = r_1 + r_2 i_1 + r_3 i_2 + \cdots + r_{n-1} i_{n-2} + r_n j \quad (7)$$

式中, $r_1 + r_2 + r_3 + \cdots + r_{n-1} + r_n = 1, i_n \in [-1, 1], j = -1$ 。

$$r_l = \sum_{m=1}^k \omega_{mk} r_{mkl} \quad (l = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (8)$$

根据“不确定度均分原理”在 $[-1, 1]$ 区间中进行 $n-1$ 等份的均分,各个分点用 $i_1, i_2, \cdots, i_{n-3}, i_{n-2}, j$ 表示,计算得到一级、二级子系统的联系数。再将 $[-1, 1]$ 区间按照均值划分为 n 份,然后依次确定各个区间对应的评价标准等级。将样本计算所得的联系数与所对应的区间进行比较,可以得出样本的评价等级。

1.4 隧道施工风险趋势分析

文献[18]用偏联系数作为联系数的伴随函数

刻划了同、异、反联系数的确定不确定联系状态的发展趋势。文献[10]根据文献[18]给出的三元联系数偏联系数的定义,推广到了多元联系数,给出了多元联系数的偏联系数定义。

对于 n 元联系数

$$\mu = r_1 + r_2i_1 + r_3i_2 + \cdots r_{n-1}i_{n-2} + r_nj \tag{9}$$

一阶偏联系数:

$$\partial\mu = \partial r_1 + \partial r_2i_1 + \partial r_3i_2 + \cdots \partial r_{n-1}i_{n-2} \tag{10}$$

式中: $\partial r_1 = \frac{r_1}{r_1+r_2}, \partial r_2 = \frac{r_2}{r_2+r_3}, \partial r_3 = \frac{r_3}{r_3+r_4}, \cdots, \partial r_{n-2} = \frac{r_{n-2}}{r_{n-2}+r_{n-1}}.$

二阶偏联系数:

$$\partial^2\mu = \partial(\partial\mu) = \partial^2r_1 + \partial^2r_2i_1 + \partial^2r_3i_2 + \cdots \partial^2r_{n-2}i_{n-3} \tag{11}$$

式中: $\partial^2r_1 = \frac{\partial r_1}{\partial r_1+\partial r_2}, \partial^2r_2 = \frac{\partial r_2}{\partial r_2+\partial r_3}, \partial^2r_3 = \frac{\partial r_3}{\partial r_3+\partial r_4}, \cdots, \partial^2r_{n-2} = \frac{\partial r_{n-3}}{\partial r_{n-3}+\partial r_{n-2}}.$

$n-1$ 阶偏联系数:

$$\partial^{n-1}\mu = \partial^{n-2}(\partial\mu) = \partial^{n-1}r_1 \tag{12}$$

式中: $\partial^{n-1}r_1 = \frac{\partial^{n-2}r_1}{\partial^{n-2}r_1+\partial^{n-2}r_2}.$

文献[10][21]通过分析 $n-1$ 阶偏联系数与第 $n-2$ 阶偏联系数之间的发展关系和层次关系,得出了多元联系数的联系状态的正向发展趋势。

文献[10]根据文献[15]给出的三元联系数的集对势的概念,认为 n 元联系数的集对势为在指定的背景下同一度 r_1 与对立度 r_n 的比值,记为: $shi(H) = r_1/r_n$ 。在隧道风险评价背景下,记 shi (实际-理想) = r_1/r_n 。 r_1 至 r_n 数值越大表示风险等级越高。当 $shi(H) > 1$ 时记为同势,即发展趋势为同一趋势;当 $shi(H) = 1$ 时记为均势,即发展趋势相

同;当 $shi(H) < 1$ 时记为反势,即发展趋势对立。

文献[18]给出了完整的三元联系数的态势,文献[22]给出了完整的四元联系数态势,文献[11]给出了完整的五元联系数态势,文献[10]利用集对势的态势分析对某燃气管网风险进行了动态分析。由于篇幅原因,此处不再列出联系数的同、异、反排序表。

当 $shi(H) > 1$ 时,表示与参照系统相比,待评价系统具有较低的风险态势为同势;当 $shi(H) = 1$ 时,表示待评价系统与参照系统风险趋势相当为均势;当 $shi(H) < 1$ 时,表示待评价系统具有较高的风险态势为反势。隧道风险评价过程中, $shi(H)$ 值越大表示风险越高,更应该在隧道工程设计及施工中引起足够的关注,使 $shi(H)$ 向低的方向发展,保证 $shi(H)$ 处于大于或者等于 1 的状态,即处于同势或者均势状态^[21]。

2 工程实例

国道 314 线又称为中巴公路,中巴公路公格尔隧道起止桩号为 K1592+435~K1595+070,总长 2 635 m,为中巴公路奥依塔格—布仑口段改建工程的控制性工程,属于复杂条件下的长大公路隧道。

根据公格尔隧道地形地貌、地质、周边环境、设计情况、结构方案、施工技术状况,把隧道风险评价系统分为:塌方、大变形、洞口安全(进出洞口)、环境保护、突水涌泥、洞口防冻、工期设计 8 个一级指标组成的一级子系统和 49 个二级指标组成的 8 个二级子系统,在此基础上建立公格尔隧道施工风险综合评价系统。

根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)及《公路工程地质勘察规范》(JTJ064—98)、《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评价指南》,建立公格尔隧道施工风险评价指标体系,如表 3 所示^[23]。

表 3 公格尔隧道评价指标体系及评价等级标准

Table 3 Konggu tunnel construction indexes & grades standard

评价等级	一级	二级	三级	四级	五级
断层破碎带情况	附近无断层破碎带	附近有小断层破碎带	洞室离断层破碎带较近	附近有大断层破碎带	洞室穿过断层破碎带
基岩裂隙水情况	无	较少	一般	较大	很大
地质超前预报	非常有利	较有利	一般	较不利	很不利
超前预注浆影响	无	较小	一般	大	很大
开挖方法	双侧壁法	环形开挖法	短台阶法	长台阶法	全断面法
管棚及小导管影响	无	较小	一般	大	很大

续表 3

评价等级	一级	二级	三级	四级	五级
围岩状况	0.9~1.0	0.75~0.9	0.5~0.75	0.25~0.5	0~0.25
周边道路环境	很好	较好	一般	较差	很差
边坡	非常有利	较有利	一般	较不利	很不利
降水情况	降雨量小	降雨量较小	降雨量一般	降雨量较大	降雨量很大
崩塌体情况	无	较少	一般	较大	很大
监控量测频率	很合理	较合理	一般	较差	很差
洞口清危防护	很好	较好	一般	较差	很差
支护结构情况	很好	较好	一般	较差	很差
特殊地段情况	非常有利	较有利	一般	较不利	很不利
弃渣场设计	很合理	较合理	一般	较差	很差
温度	非常有利	较有利	一般	较不利	很不利
水(含盐量)	0~0.02	0.02~0.05	0.05~0.07	0.07~0.09	0.09~0.1
混凝土质量	很好	较好	一般	较差	很差

结合专家评价结果和该隧道的实际情况,对一级、二级评价系统的评价指标分别进行两两重要性对比,建立模糊互补判断矩阵 A 。由式 1 计算得到两级评价系统指标的权重值,如表 4。

表 4 公格尔隧道施工风险评价二级子系统和权重
Table 4 Konggu tunnel construction risk second-grade subsystems & weight

一级指标 权重		二级指标及权重						
突水涌泥	0.121	断层破碎带	基岩裂隙水	地质超前预报	超前预注浆	开挖方法	管棚及小导管	
		0.170	0.170	0.187	0.150	0.160	0.163	
工期设计	0.116	开挖方法	浅埋	断层破碎带	基岩裂隙水	周边道路、环境	管棚及小导管	围岩状况
		0.138	0.143	0.148	0.133	0.138	0.148	0.152
进口洞口	0.118	高边坡	降水	崩塌体	监控量测	洞口清危防护	开挖方法	浅埋
		0.152	0.145	0.148	0.136	0.138	0.138	0.143
出口洞口	0.130	浅埋	围岩状况	开挖方法	降水	监控量测	洞口清危防护	
		0.180	0.153	0.170	0.173	0.160	0.163	
塌方	0.148	管棚及小导管	围岩状况	断层破碎带	开挖方法	浅埋	地质超前预报	支护结构设计
		0.169	0.152	0.143	0.136	0.129	0.138	0.133
大变形	0.132	围岩状况	支护结构设计	断层破碎带	监控量测	管棚及小导管	浅埋	
		0.197	0.180	0.173	0.153	0.147	0.150	
环境保护	0.121	周边道路、环境	地质超前预报	基岩裂隙水	特殊地段设计	开挖方法	弃渣场设计	
		0.170	0.163	0.170	0.163	0.160	0.174	

通过式(2)计算广义偏差值,一级评价系统和 8 个二级评价系统的偏差值均小于 0.1,可认为公格尔隧道评价指标权重计算结果可信。

通过建立的风险评价模型计算得到二级、一级以及总评价指标的联系数,计算所得一级评价指标的联系数如表 5 所示。一级评价指标联系数通过式(5)可以得到联系数主值 μ ,将 $[-1,1]$ 进行四等

分,为 $(0.5,1), (0,0.5), (-0.5,0), (-1,-0.5)$ 。根据均分原则取 $r_1=1, r_2=0.5, r_3=0, r_4=-0.5, r_5=-1$,分别对应隧道风险评价的 I 级(低度)~IV 级(极高)4 个等级。

将一级评价指标 8 个联系数主值带入式(7)可以得到总体评价指标的联系数可以表达为: $\mu=0.215r_1+0.156r_2+0.145r_3+0.193r_4+0.294r_5$,计算得

总评价指标的联系数为-0.098,按照风险评价等级划分,公格尔隧道总体风险等级为Ⅲ级(高度)。根据一级评价指标联系数主值计算结果,得出一级评价指标的风险等级排序为:大变形>进洞口>出洞口>塌方>环境保护>工期设计>突水涌泥>洞口防冻,如表 5 所示。

表 5 一级评价指标五元联系数及发展趋势
Table 5 Primary indices five-element connection number & trends

一级指标	权重	现状五元联系数	主值	风险等级	态势	四元偏联系数	态势
突水涌泥	0.121	0.224r ₁ +0.259r ₂ +0.126r ₃ +0.114r ₄ +0.276r ₅	0.021	Ⅱ级	反势	0.46r ₁ +0.67r ₂ +0.52r ₃ +0.29r ₄	同势
工期设计	0.116	0.209r ₁ +0.170r ₂ +0.133r ₃ +0.304r ₄ +0.183r ₅	-0.041	Ⅲ级	同势	0.55r ₁ +0.56r ₂ +0.30r ₃ +0.62r ₄	反势
进洞口	0.118	0.170r ₁ +0.097r ₂ +0.179r ₃ +0.253r ₄ +0.303r ₅	-0.211	Ⅲ级	反势	0.64r ₁ +0.35r ₂ +0.41r ₃ +0.45r ₄	同势
出洞口	0.130	0.260r ₁ +0.050r ₂ +0.093r ₃ +0.260r ₄ +0.337r ₅	-0.182	Ⅲ级	反势	0.84r ₁ +0.35r ₂ +0.26r ₃ +0.44r ₄	同势
塌方	0.148	0.145r ₁ +0.196r ₂ +0.203r ₃ +0.149r ₄ +0.308r ₅	-0.140	Ⅲ级	反势	0.43r ₁ +0.49r ₂ +0.58r ₃ +0.33r ₄	同势
大变形	0.132	0.216r ₁ +0.079r ₂ +0.112r ₃ +0.248r ₄ +0.345r ₅	-0.214	Ⅲ级	反势	0.73r ₁ +0.41r ₂ +0.31r ₃ +0.42r ₄	同势
环境保护	0.121	0.216r ₁ +0.152r ₂ +0.153r ₃ +0.158r ₄ +0.322r ₅	-0.109	Ⅲ级	反势	0.59r ₁ +0.50r ₂ +0.49r ₃ +0.33r ₄	同势
洞口防冻	0.107	0.312r ₁ +0.276r ₂ +0.169r ₃ +0.064r ₄ +0.276r ₅	0.142	Ⅱ级	同势	0.53r ₁ +0.62r ₂ +0.72r ₃ +0.19r ₄	同势

对总体评价指标联系数进行风险发展趋势态势分析, $shi(H)=0.215/0.294=0.731$, $a<e$ 、 $a>b$ 、 $b<c$ 、 $c<d$ 、 $d<e$,发展态势为反势,第 19 级^[11]。塌方(Ⅲ级)、进洞口(Ⅲ级)、大变形(Ⅲ级)、环境保护(Ⅲ级)、出洞口(Ⅲ级)、突水涌泥(Ⅱ级)处于反势。等级向高风险发展趋势排序为:塌方>进洞口>大变形>环境保护>出洞口>突水涌泥。工期设计(Ⅲ级)和洞口防冻(Ⅱ级)处于同势区,等级向低风险的方向发展的排序为:工期设计>洞口防冻。

四元偏联系数为现状五元联系数的趋势表征,称为五元联系数的趋势联系数,根据式(10)总体评价指标偏联系数表达式: $\partial\mu=0.592r_1+0.487r_2+0.446r_3+0.382r_4$, $shi(H)=0.592/0.382=1.550$, $a>b$ 、 $b>c$ 、 $c>d$,处于同势第 11 级^[22]。工期设计(Ⅲ级)为反势,其他 7 个一级指标均为同势,等级向低风险发展趋势排序为:洞口防冻>出洞口>环境保护>大变形>突水涌泥>进洞口>塌方。

表 6 一级评价指标五元联系数及发展趋势(续表)
Table 6 Primary indices five-element connection number & trends (continued table)

一级指标	权重	三元偏联系数	态势	二元偏联系数	态势	一元偏联系数	态势
突水涌泥	0.121	0.41r ₁ +0.56r ₂ +0.64r ₃	反势	0.42r ₁ +0.47r ₂	反势	0.47r ₁	反势
工期设计	0.116	0.50r ₁ +0.65r ₂ +0.33r ₃	同势	0.43r ₁ +0.66r ₂	反势	0.39r ₁	反势
进洞口	0.118	0.65r ₁ +0.46r ₂ +0.48r ₃	同势	0.58r ₁ +0.49r ₂	同势	0.54r ₁	同势
出洞口	0.130	0.71r ₁ +0.57r ₂ +0.38r ₃	同势	0.55r ₁ +0.60r ₂	反势	0.48r ₁	反势
塌方	0.148	0.46r ₁ +0.46r ₂ +0.64r ₃	反势	0.50r ₁ +0.42r ₂	同势	0.55r ₁	同势
大变形	0.132	0.64r ₁ +0.57r ₂ +0.43r ₃	同势	0.53r ₁ +0.57r ₂	反势	0.48r ₁	反势
环境保护	0.121	0.54r ₁ +0.50r ₂ +0.60r ₃	反势	0.52r ₁ +0.46r ₂	同势	0.53r ₁	同势
洞口防冻	0.107	0.46r ₁ +0.46r ₂ +0.79r ₃	反势	0.50r ₁ +0.37r ₂	同势	0.58r ₁	同势

总体评价指标三元偏联系数为四元偏联系数的趋势联系数,根据式(11)表达式: $\partial^2\mu=\partial(\partial\mu)=0.543r_1+0.525r_2+0.529r_3$, $shi(H)=0.543/0.529=1.926$, $a>c$ 、 $a>b$ 、 $b<c$,处于同势。出洞口(Ⅲ级)、工期设计(Ⅲ级)、大变形(Ⅲ级)、进洞口(Ⅲ级)

为同势,等级向低风险发展趋势排序为:出洞口>工期设计>大变形>进洞口。塌方(Ⅲ级)、环境保护(Ⅲ级)、突水涌泥(Ⅱ级)、洞口防冻(Ⅱ级)为反势,等级向高风险排序为:洞口防冻>突水涌泥>塌方>环境保护。

总体评价指标二元偏系数为三元偏系数的趋势系数,根据式(12)表达式: $\partial^3\mu=\partial(\partial^2\mu)=0.502r_1+0.502r_2$, $shi(H)=0.502/0.502=1.0$, $a=b$,处于均势。洞口防冻(Ⅱ级)、塌方(Ⅲ级)、进洞口(Ⅲ级)、环境保护(Ⅲ级)为同势,等级向低风险发展趋势排序为:洞口防冻>塌方>进洞口>环境保护。出洞口(Ⅲ级)、工期设计(Ⅲ级)、大变形(Ⅲ级)、突水涌泥(Ⅱ级)为反势,等级向高风险排序为:工期设计>突水涌泥>出洞口>大变形。

总体评价指标一元偏系数为二元偏系数的趋势系数,根据式(12)表达式: $\partial^4\mu=\partial(\partial^3\mu)=0.5r_1$, $shi(H)=0.5/(0.5+0)=1.0$,处于均势。洞口防冻(Ⅱ级)、塌方(Ⅲ级)、进洞口(Ⅲ级)、环境保护(Ⅲ级)为同势,等级向低风险发展趋势排序为:洞口防冻>塌方>进洞口>环境保护。出洞口(Ⅲ级)、工期设计(Ⅲ级)、大变形(Ⅲ级)、突水涌泥(Ⅱ级)为反势,等级向高风险排序为:工期设计>突水涌泥>出洞口>大变形。

综合以上分析得出,大变形风险、出洞口、工期设计风险向高风险正向发展趋势较明显,在施工过程中应该重点采取措施。在格格尔隧道风险态势中,1阶偏系数风险态势呈现上升趋势,1阶至5阶偏系数态势总体同势多于反势,系统整体风险处于下降的趋势,在下降趋势中同时存在着上升的因素,同时风险存在着一定的波动特征^[10]。

3 结论

(1)结合改进集对分析方法(ISP)建立公路隧道施工风险评价模型,实现了隧道施工风险评价的半定量化;引入多元联系数的偏系数(PCN)和集对势(shi)概念,建立FAHP-ISP-PCN耦合的隧道施工风险动态评价模型。

(2)综合考虑总体评价、一级指标、二级指标中同等风险等级中具体的数值刻划,对准确的评定隧道施工风险至关重要。

(3)隧道施工风险防范措施制订和施工过程中,应该在重点抓住高风险指标的同时注意处于反势的较低风险指标发展的趋势必须处于可控状态。

(4)在隧道风险评估过程中考虑风险防控的经济性因素,在设计、施工过程中可以采取使集对势处于同势($shi(H)>1$)和反势($shi(H)<1$)的评价指标共同向集对势为均势($shi(H)=1$)方向发展。

参考文献(References)

[1] 钱七虎,戎晓力.中国地下工程安全风险管理的现

状、问题及相关建议[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):649-655.(Qian Qihu, Rong Xiaoli. State, issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649-655. (in Chinese))

[2] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):13-20.(Huang Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and under-ground works [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13-20. (in Chinese))

[3] 贺志军.山岭铁路隧道工程施工风险评估及其应用研究[D].长沙:中南大学,2009.(He Zhijun. Research on risk assessment and its application in mountain railway tunnel construction [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))

[4] 胡长明,贡少瑞,张超晖,等.基于突变理论的山岭隧道塌方风险预测[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(1):10-15.(Hu Changming, Gong Shaorui, Zhang Chaohui, et al. Caving risk forecast of mountain tunnel construction based on catastrophe theory [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(1): 10-15. (in Chinese))

[5] 王迎超.山岭隧道塌方机制及防灾方法[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):787-792.(Wang Yingchao. Collapse mechanism and preventive measures of mountain tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 787-792. (in Chinese))

[6] 苏永华,刘科伟,张进华.基于粗糙集重心理论的公路隧道塌方风险分析[J].湖南大学学报(自科版),2013,40(1):21-26.(Su Yonghua, Liu Kewei, Zhang Jinhua. Fuzzy evaluation of collapse incidents in highway tunnel construction based on rough set and barycenter theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(1): 21-26. (in Chinese))

[7] 刘保国,沈铭龙,马强.模糊网络分析法在公路山岭隧道施工风险分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):2861-2869.(Liu Baoguo, Shen Minglong, Ma Qiang. Application of fuzzy analytic network process in risk analysis for construction of highway mountain tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Supp. 1): 2861-2869. (in Chinese))

[8] 黄小城,陈秋南,阳跃朋,等.可拓理论对复杂条件下岩溶隧道的风险评估[J].地下空间与工程学报,2013,9(5):1179-1185.(Huang Xiaocheng, Chen Qiunan, Yang Yuepeng, et al. Risk evaluation of karst

- tunnel under complex geological condition with extension theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1179-1185. (in Chinese))
- [9] Karwowski W, Mital A. Application of approximate reasoning in risk analysis [A]//Applications of Fuzzy Set Theory in Human Factors [C]. New York, Elsevier, 1986: 227-243.
- [10] 周兴慧, 张吉军. 基于五元联系数的风险综合评价方法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2169-2176. (Zhou Xinghui, Zhang Jijun. Risk comprehensive evaluation method and its application based on the five-element connection number [J]. Journal of Systems Science and Information, 2013, 33(8): 2169-2176. (in Chinese))
- [11] 王国平, 杨洁, 王洪光. 五元联系数在地表水环境质量评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(6): 21-24. (Wang Guoping, Yang Jie, Wang Hongguang. Application of five-element connection number to the quality assessment of the surface water environment [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(6): 21-24. (in Chinese))
- [12] 吴亭, 赵克勤, 张清河. 偏联系数在投标企业发展趋势分析中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(5): 16-21. (Wu Ting, Zhao Keqin, Zhang Qinghe. Apply of partial connection number in the analysis development trend of bidding enterprise [J]. Mathematics in practice and theory, 2008, 38(5): 16-21. (in Chinese))
- [13] 李聪, 陈建宏, 杨珊, 等. 五元联系数在地铁施工风险综合评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(10): 21-26. (Li Cong, Chen Jianhong, Yang Shan, et al. Application of five-element connection number to comprehensive evaluation of risks involved with subway construction [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(10): 21-26. (in Chinese))
- [14] 秦植海, 秦鹏. 高边坡稳定性评价的模糊层次与集对分析耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 706-711. (Qin Zhihai, Qin Peng. Evaluation coupling model for high slope stability based on fuzzy analytical hierarchy process-set pair analysis method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 706-711. (in Chinese))
- [15] 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. (Zhao Keqin. Set pair analysis and its application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [16] 王颖, 邵磊, 杨方廷, 等. 改进的集对分析水质综合评价方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 99-106. (Wang Ying, Shao Lei, Yang Fangting, et al. Comprehensive evaluation method of water quality based on improved set pair analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 99-106. (in Chinese))
- [17] 汪明武, 李丽, 金菊良. 泥石流危险度的改进集对分析模型[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 124-128. (Wang Mingwu, Li Li, Jin Juliang. An improved set pair analysis model for evaluation of dangerous degree of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6): 124-128. (in Chinese))
- [18] 赵克勤. 偏联系数[A]//中国人工智能进展论文集[C]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 884-885. (Zhao Keqin. Partial connection number [A]//Progress of Artificial Intelligence in China [C]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 884-885. (in Chinese))
- [19] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314. (Xu Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4): 311-314. (in Chinese))
- [20] 徐泽水. 层次分析中判断矩阵排序的新方法: 广义最小方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(9): 38-43. (Xu Zeshui. A new class of priority methods of comparison matrix in analytic hierarchy process—the generalized least square methods [J]. Journal of Systems Science and Information, 1998, 18(9): 38-43. (in Chinese))
- [21] 唐鹏, 刘杰, 钱德玲. 基于联系函数的沥青路面使用性能系统综合评价模型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 323-327. (Tang Peng, Liu Jie, Qian Delin. System comprehensive evaluation model of asphalt pavement performance based on connection function [J]. Journal of Hefei University of Technology (national academy), 2014, 37(3): 323-327. (in Chinese))
- [22] 王霞. 联系范数为4与6的四元联系数系统态势数值排序及应用[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(7): 107-112. (Wang Xia. The permutation and use of four unit relation number systems situation numerical value of relation model number 4 and 6 [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2004, 34(7): 107-112. (in Chinese))
- [23] 刘杰, 宋亮, 毛爱民, 等. 基于模糊层次与改进集对分析的格格尔隧道施工风险评估[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 211-216. (Liu Jie, Song Lang, Mao Aimin, et al. Based on the fuzzy analytical hierarchy process & improved set pair analysis method under the Konggu highway tunnel construction risk assessment model [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(6): 211-216. (in Chinese))