

文章编号:1000-582X(2009)11-1345-07

## 隧道长期安全监测及评价模型

任 松,王新胜,姜德义,李 林,王春荣

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘 要:**分析影响隧道长期安全的结构因素和环境条件因素,并根据有关规范,设计监测方案。根据监测方案建立隧道长期安全评价模型。其中,对于隧道结构,基于单指标安全等级评价建立隧道结构长期安全的多指标综合评价模型,并引入 6 位 5 进制数作为隧道结构长期安全状况综合评分,与安全等级评价相结合,更加详实地反映了隧道结构的安全性。对于环境条件,应用层次分析法确定指标权重,梯形分布隶属函数计算指标隶属度,建立隧道运营安全的模糊综合评价模型。最后,将监测方案和评价模型应用于重庆嘉华隧道,取得良好的效果。

**关键词:**隧道长期安全;安全因素;安全监测;等级评价;隶属函数;模糊综合评价

**中图分类号:** U459.2;X924.2

**文献标志码:** A

### Monitoring and evaluation model of tunnel long-term safety

REN Song, WANG Xin-sheng, JIANG De-yi, LI Lin, WANG Chun-rong

(Key Laboratory for Exploitation of China Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400030, P. R. China)

**Abstract:** This paper conducts a comprehensive analysis on the structural factors and environmental condition factors that influence the long-term safety of the tunnels, and designs a long-term monitoring scheme of tunnels according to relevant norms. The long-term tunnel safety evaluation model based is developed on the tunnel monitoring scheme. For the tunnel structure, this study evaluates the safety ratings with a single index, and develops the multi-index comprehensive evaluation model. As an integrated score, a quinary digit which contains six digits is inducted. Together with the evaluation of safety ratings, it can detailedly reveal the actual safety condition of tunnel structure. As to the tunnel operation, the weight of indexes is confirmed using AHP, and the membership degree of indexes was calculated by trapezoidal distribution membership functions. A fuzzy comprehensive evaluation model of safety is built. This model is applied to evaluate the safety of Jiahua Tunnel, which has achieved a good result.

**Key words:** tunnel long-term health; safety factor; safety monitoring; rating evaluation; membership functions; fuzzy comprehensive evaluation

因隧道支护结构、地质条件和病害机理极其复杂,近年来,由隧道结构失稳、环境条件变化等所造成的崩塌、火灾等事故时常发生,严重威胁着隧道安

全以及人的生命和财产安全。1996 年 2 月 10 日,日本 FURUBIRA 隧道由于山体断层发生局部崩塌,将一辆客车掩埋在数千吨岩石之下,由于救援不

收稿日期:2009-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674108);国家创新研究群体科学基金资助项目(50621403)

作者简介:任松(1975-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事岩土工程力学、安全技术与工程方向的研究,

(Tel)023-65105605;(E-mail)rs\_rwx@tom.com。

及时,造成驾乘人员全部死亡。2002 年 10 月 24 日,瑞士圣哥达隧道发生火灾,死亡 13 人,直接经济损失达 130 万瑞士法郎<sup>[1]</sup>。

由于隧道结构和环境的复杂性,国内外关于隧道监测的研究,明显落后于桥梁等其他土木结构的研究,且主要停留于施工期。文献[1]提出了隧道结构健康监测的定义,介绍了光纤传感技术在隧道运营期变形监测中的应用。文献[2]提出了隧道主体完工后对衬砌结构内力进行跟踪监测,并总结了结构荷载的发展和变化规律。目前,对隧道运营期的安全评价很少利用监测数据,对其结构安全性的评价较少,且带有很大的主观性<sup>[3]</sup>。如何合理地利用监测数据,客观评价隧道运营期安全,一直是岩体工程技术界的研究热点,且尚没有成熟的理论与应用技术。基于此,在总结国内外相关工程实例的基础上,提出了影响隧道长期安全的结构和环境因素,并按照有关规范设计了监测方案;依据结构因素的特征,建立了隧道结构的多指标等级评价模型,并提出了 6 位 5 进制数评价方法;对于环境条件,建立了基于层次分析法和梯形分布隶属函数的隧道运营安全的模糊综合评价模型;最后,将其应用于重庆嘉华隧道,说明其具有重要的实用价值。

## 1 隧道长期安全因素分析

### 1.1 隧道结构安全因素分析

隧道稳定,指隧道围岩变形速率呈递减趋势并逐渐趋近于零,其最终位移不超界,支护结构不出现影响正常使用的变形和损伤,更不能发生大范围的坍塌<sup>[4]</sup>。隧道在本质上是围岩和支护结构的复合体,在进行隧道结构安全因素分析时,要综合考虑围岩与支护结构的变形及其相互作用,它们共同决定了隧道结构的安全性和稳定性<sup>[5-6]</sup>。考虑到隧道运营期的监测实际,变形因素主要考虑围岩内部位移和裂纹。隧道完工后,围岩—初衬接触应力、初衬—二衬接触应力、初衬钢拱架应力、二衬结构内应力、锚杆轴力仍会继续发展,其是否已经趋于稳定,是判断隧道是否已经稳定的依据<sup>[2]</sup>。隧道通车后,围岩、初衬和二衬作为一个复合体,接触应力可以不作考虑。因此,相互作用方面主要考虑初衬钢拱架应力、二衬结构内应力、锚杆轴力 3 个因素。

### 1.2 隧道环境条件因素分析

高速公路隧道交通较其他道路交通,具有封闭

性强、空气质量低、环境噪音大、能见度低、光过渡等特点<sup>[7]</sup>。首先,隧道内车辆排放的尾气得不到有效扩散和稀释,有害污染物不断积聚,不但对人体健康产生危害,而且使隧道能见度降低,引发交通事故,因此在空气质量方面,考虑有害气体浓度(主要指 CO 浓度)和可以反映能见度的烟雾浓度两个因素。第二,隧道穿越含煤层时,常伴有瓦斯突出,隧道运营期间,瓦斯浓度过高,则有害身体健康,特别是瓦斯浓度达到其爆炸极限,遇火花或达到其着火点,都会引起爆炸,产生灾难性后果,因此,穿越煤层隧道必须考虑瓦斯浓度。第三,高温使人情绪烦躁和不舒服,会间接导致交通事故,高温也会使火灾发生概率增加,增加隧道危险性,因此,温度是一般隧道都要考虑的因素,特别是穿越高温地层的隧道。第四,通风可以稀释和排出有害气体,降低温度,因此通风应重点考虑。第五,由于黑洞和白洞现象的存在,因此亮度须特别考虑,并根据隧道洞内外亮度的变化实现照明的自动或人工干预控制。第六,噪声影响人的身心健康和分散注意力,也可能引发交通事故,特别是人车混合隧道,噪声也是要考虑的一个因素。此外,影响仪器测量精度的湿度和气压也是必须考虑的。

## 2 隧道长期安全监测方案设计

### 2.1 隧道结构健康监测

隧道结构健康监测(Tunnel Structural Health Monitoring,简称 TSHM)<sup>[1]</sup>定义为“利用现场的无损传感技术,通过隧道系统的特征分析,检测隧道支护系统损伤(或退化),分析发生损伤(或退化)的地点、程度和原因,并对隧道整体的健康状态做出评价”。与桥梁、建筑等不同,新奥法建设的隧道,并不是单纯的钢筋混凝土结构,在本质上是围岩和支护结构的综合体。因此,与一般构筑物或建筑物不同,TSHM 范围不再局限于结构的损伤或退化,它比一般的结构健康监测更复杂,不仅将监测范围从支护结构扩展至隧道围岩,并且由于围岩成分复杂,监测和诊断难度也大大增加,这正是隧道结构健康监测与其他如桥梁结构健康监测的本质区别<sup>[8-11]</sup>。因此,在进行隧道结构健康监测时,要同时监测围岩与支护结构的变形以及相互作用 2 个方面。

1) 围岩内部位移监测:围岩内部位移监测,是通过钻孔位移计量测围岩不同深度的轴向位移,据此分析判断隧道围岩位移的变化范围和松弛范围,预

测围岩稳定性,为修改锚杆支护参数提供依据<sup>[12-13]</sup>。根据地质条件,量测断面应选在典型构造地段及埋深较大或较浅地段,一般每隔 100 m 设置一个断面,断层带每隔 50 m 设置一个断面,其余地段断面间距可适当加大,但须保证沿每类围岩至少有一个断面,测点布设情况见图 1。

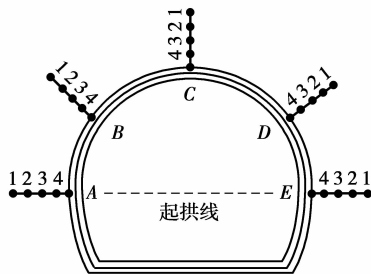


图 1 围岩内部位移测点布设示意图

2) 裂纹监测:裂纹监测,是对隧道裂纹的发展变化进行观测。根据隧道裂纹调查资料,结合隧道实际情况,在隧道布置合适数量的裂纹计对有发展迹象的裂纹进行监测。

3) 初衬钢拱架应变监测:初衬钢拱架作为隧道主要的承重结构,测量其应变,可以掌握隧道围岩的稳定性。一般每 10 榀钢拱架设一断面,每根钢拱架沿水平中性轴位置左右对称安装 2 个钢弦式表面应变计,如图 2 所示。

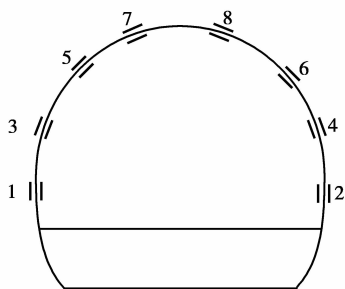


图 2 初衬钢拱架应变测点布设示意图

4) 二衬结构内应力监测:结合地质条件,在代表性地段设断面,测点布设见图 3。二衬钢筋铺设完毕未浇注混凝土前截断待测位置的钢筋,将传感器串联在钢筋上,作相关防护并将线路引出即可。

5) 锚杆轴力监测:根据隧道设计和地质情况,一般每 10 m 布置 1 个断面,每个断面至少布设 3 根锚杆,如图 4 所示。在安设锚杆前将锚杆截断,将轴力计串联焊接在距离锚杆孔口 0.5~1.0 m 处,用砂浆锚固装有轴力计的锚杆。

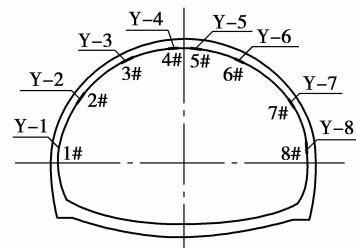


图 3 二衬结构内应力测点布设示意图

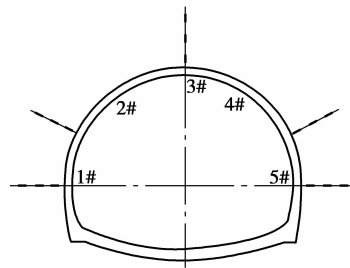


图 4 锚杆轴力测点布设示意图

## 2.2 隧道环境条件监测

1) 空气质量监测:《公路隧道通风照明设计规范》<sup>[14]</sup>规定,VI 仪的设置位置与台数应根据通风方式及烟雾浓度分布特征确定。高速公路特长隧道一般按 300~500 m 间距布设,其他等级公路隧道可适当放宽,通风井口应布设 VI 仪。CO 传感器的布设间距与 VI 仪相同,宜采用红外线传感器。

2) 瓦斯浓度监测:瓦斯传感器安装位置与台数应根据通风方式及煤层分布确定。高速公路特长隧道可按 100~200 m 间距布设,其他等级公路隧道可适当放宽。

3) 温度监测:温度传感器布设可以根据隧道等级、长度及是否穿过高温地层等确定。

4) 通风监测:测点应根据隧道实际情况,但至少应满足在隧道两端、中间、人行横道、车行横道、应急停车带和风井等位置安装风速风向传感器。

5) 亮度监测:根据《公路隧道通风照明设计规范》,应至少在洞口、入口段、过渡段、中间段、出口段、应急停车带和连接通道等处设置光亮度检测仪。

6) 噪声监测:测点布设根据实际情况,但至少应在隧道两端、中间和风机安设处布设噪声监测点。

7) 湿度和气压监测:根据隧道实际,分别参考温度和风速风向监测进行测点布设。

### 3 隧道长期安全评价模型

#### 3.1 隧道结构长期安全评价

选定影响隧道结构安全的 5 个因素为评价指标, 即指标集  $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{\text{围岩内部位移, 裂纹, 初衬钢拱架应力, 二衬结构内应力, 锚杆轴力}\}$ 。

1) 建立单指标安全等级评价模型。利用多点位移计测得所有测点的围岩内部位移, 根据最大值计算其变形速度。参照《公路隧道养护技术规范》<sup>[15]</sup> 得到隧道围岩内部位移安全评价等级标准, 见表 1。同理, 得到隧道裂纹安全评价等级标准, 见表 2。

表 1 隧道围岩内部位移安全评价等级

变形速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$1 > v$	$3 > v \geq 1$	$6 > v \geq 3$	$10 > v \geq 6$	$v \geq 10$
安全等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级

表 3 隧道初衬钢拱架应力安全评价等级

$\sigma_3^0$	$0 \leq \sigma_3^0 < 0.25$	$0.25 \leq \sigma_3^0 < 0.5$	$0.5 \leq \sigma_3^0 < 0.75$	$0.75 \leq \sigma_3^0 < 1$	$\sigma_3^0 > 1$
安全等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级

表 4 隧道二衬结构内应力安全评价等级

$\sigma_1^0$	$0 \leq \sigma_1^0 < 0.25$	$0.25 \leq \sigma_1^0 < 0.5$	$0.5 \leq \sigma_1^0 < 0.75$	$0.75 \leq \sigma_1^0 < 1$	$\sigma_1^0 > 1$
安全等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级

表 5 隧道锚杆轴力安全评价等级

$N^0$	$0 \leq N^0 < 0.25$	$0.25 \leq N^0 < 0.5$	$0.5 \leq N^0 < 0.75$	$0.75 \leq N^0 < 1$	$N^0 > 1$
安全等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级

2) 建立隧道结构长期安全评价模型。隧道结构长期安全等级一般由最差指标的等级决定, 为了更加详实地表征隧道结构的长期安全状况, 引入一个 6 位 5 进制数作为隧道结构长期安全状况的综合评分。该 5 进制数从其低位到高位依次表示 I 级位、II 级位、III 级位、IV 级位、V 级位、劣 V 级位, 只要某指标安全等级为  $n$  级, 就在 5 进制数中相应位上加 1, 最终得到的 5 进制数即为隧道结构长期安全状况的综合得分, 该得分可以显示处于各个安全等级的指标数和最差安全等级, 也可以将最高位所对应的等级作为隧道结构的长期安全等级。

表 2 隧道裂纹安全评价等级

裂纹等级	裂纹宽度 $b/\text{mm}$		
	$b > 5$	$5 \geq b > 3$	$3 \geq b$
$l > 10$	V 级	IV 级	III 级
$10 \geq l > 5$	IV 级	III 级	II 级
$5 \geq l$	III 级	II 级	I 级

利用仪器测得初衬钢拱架应力  $\sigma_3$ , 记初衬钢拱架应力监测历史最小值为  $\sigma_{\min}$ , 钢拱架材料许用应力为  $\sigma_{\max}$ , 进行初衬钢拱架应力无量纲化处理, 即  $\sigma_3^0 = \frac{\sigma_3 - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}$ , 根据  $\sigma_3^0$  建立表 3 所示的初衬钢拱架应力安全评价等级。同理, 建立二衬结构内应力和锚杆轴力安全评价等级标准, 分别见表 4、5。

#### 3.2 隧道运营安全的模糊综合评价

根据监测方案建立隧道运营安全评价指标体系, 如图 5 所示。与结构安全等级划分保持一致, 运营安全评价等级同样分为 5 级, 即  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{很安全, 较安全, 一般安全, 不安全, 很不安全}\}$ , 相应分值取为  $\{90, 80, 70, 60, 40\}$ <sup>[3]</sup>。

1) 层次分析法确定指标权重。参考隧道安全事故原因统计和专家意见, 根据 1~9 相对重要性定义表, 构造两两比较判断矩阵  $A = (a_{ij})_{9 \times 9}$ 。利用 Matlab 软件的  $[V, D] = \text{eig}(A)$  命令求解判断矩阵的特征值及其特征向量和进行一致性检验, 确定各指标权重  $W$ 。

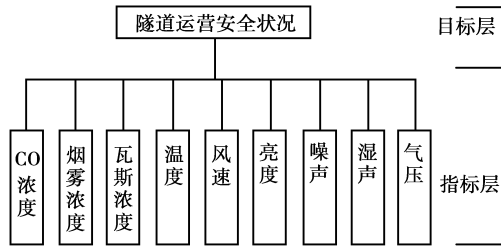


图 5 隧道运营安全评价指标体系

2) 模糊综合评价。聘请合适数量隧道方面的专家,或采用德尔菲法,分别对 9 个指标进行评分,将专家评分取均值代入梯形分布的隶属函数<sup>[16]</sup>

$$f_1(u_{ij}) = \begin{cases} 1(90 \leq u_{ij} \leq 100), \\ \frac{u_{ij} - 80}{90 - 80}(80 \leq u_{ij} < 90), \\ 0(u_{ij} < 80); \end{cases}$$

$$f_2(u_{ij}) = \begin{cases} \frac{100 - u_{ij}}{100 - 90}(90 \leq u_{ij} \leq 100), \\ 1(80 \leq u_{ij} < 90), \\ \frac{u_{ij} - 70}{80 - 70}(u_{ij} < 80), \\ 0(u_{ij} < 70); \end{cases}$$

$$f_3(u_{ij}) = \begin{cases} 0(90 \leq u_{ij} \leq 100), \\ \frac{90 - u_{ij}}{90 - 80}(80 \leq u_{ij} < 90), \\ 1(70 \leq u_{ij} < 80), \\ \frac{u_{ij} - 60}{70 - 60}(60 \leq u_{ij} < 70), \\ 0(u_{ij} < 60); \end{cases}$$

$$f_4(u_{ij}) = \begin{cases} 0(80 \leq u_{ij} \leq 100), \\ \frac{80 - u_{ij}}{80 - 70}(70 \leq u_{ij} < 80), \\ 1(60 \leq u_{ij} < 70), \\ \frac{u_{ij} - 40}{60 - 40}(40 \leq u_{ij} < 60), \\ 0(u_{ij} < 40); \end{cases}$$

$$f_5(u_{ij}) = \begin{cases} 0(70 \leq u_{ij} \leq 100), \\ \frac{70 - u_{ij}}{70 - 60}(60 \leq u_{ij} < 70), \\ 1(u_{ij} < 60). \end{cases}$$

得到各指标对  $V_j$  的隶属度及模糊关系矩阵  $R$ 。进而得到综合评价矩阵  $B=W * R$ 。最后,求得隧道运营安全的综合得分  $M=B * V^T$ 。

### 4 嘉华隧道工程应用

嘉华隧道是重庆市城市总体规划中南北快速干道——嘉华大桥及南北引道工程的一部分。隧道全长 1 393 m,双线双洞三车道,单洞净跨 12.25 m,洞高 7 m,两洞距 43.75 m,纵坡 2.86%。

#### 4.1 典型断面监测

重庆大学监控量测组根据隧道施工情况和地质条件的变化,选择性的进行典型断面监测,其监测项目包括围岩内部位移、初衬钢拱架应力、二衬结构内应力和锚杆轴力,断面选择和传感器布设情况见表 6。定期进行监测,并对监测数据进行处理,得到如表 7 所示的围岩变形速度、钢拱架应力、二衬结构应力和锚杆轴力在各个断面处的最大值及整个隧道的最大值。

表 6 嘉华隧道典型断面传感器统计表

埋设里程	位移计	应变计	压力盒	轴力计	埋设日期
常规段 LK1+130	20	5	5	5	2006 年 09 月 17 日
加宽段 A RK1+265	20	5	5	5	2006 年 10 月 07 日
加宽段 B LK1+298	20	5	5	5	2006 年 11 月 22 日
加宽段 C LK1+323	20	5	5	5	2006 年 12 月 22 日

表 7 嘉华隧道典型断面监测结果统计表

断面	围岩变形速度/(mm · a <sup>-1</sup> )	钢拱架应力/MPa	二衬结构内应力/MPa	锚杆轴力/kN	监测天数/d
LK1+130	2.42	125.336 8	0.463 5	27.060 5	62.19
RK1+265	2.36	123.576 3	0.451 3	15.710 4	51.85
LK1+298	2.15	72.241 6	0.400 9	25.385 6	38.00
LK1+323	2.47	131.660 2	0.594 5	38.957 3	27.00
最大值	2.47	131.660 2	0.594 5	38.957 3	—

### 4.2 嘉华隧道结构长期安全评价

根据嘉华隧道监测数据和前面建立的结构安全等级评价模型,单指标安全等级评价结果见表 8。

表 8 嘉华隧道结构长期安全等级评价结果

评价指标	围岩内 部位移	裂纹	初衬钢 拱架应力	二衬结构 内应力	锚杆轴力
安全等级	II 级	I 级	II 级	I 级	I 级

根据安全等级由最差指标的等级决定的原则,嘉华隧道结构长期安全的评价等级为 II 级。引入 6 位 5 进制数模型,其综合评分为 000023,显示评价结果为, I 级指标 3 个, II 级指标 2 个,最差等级为 II 级。由此得到嘉华隧道结构的长期安全等级为 II 级,安全状况综合得分为 000023,评价显示嘉华隧道结构安全性较好。

### 4.3 嘉华隧道运营安全的模糊综合评价

首先建立指标集  $U = \{CO \text{ 浓度, 烟雾浓度, 温度, 风速, 亮度, 噪声, 湿度, 气压}\}$ ,嘉华隧道未穿越煤层,故不考虑瓦斯浓度指标。评价集同上。然后,利用 AHP 构造两两比较判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 & 2 & 1/2 & 5 & 4 & 7 \\ 2 & 1 & 2 & 3 & 1 & 7 & 6 & 9 \\ 1 & 1/2 & 1 & 2 & 1/2 & 5 & 4 & 7 \\ 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/3 & 3 & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 3 & 1 & 7 & 6 & 9 \\ 1/5 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/7 & 1 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/6 & 1/4 & 1/2 & 1/6 & 1 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/9 & 1/7 & 1/4 & 1/9 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

利用 Matlab 的  $[V, D] = \text{eig}(A)$  命令求解判断矩阵的特征值及其特征向量。其中  $\lambda_{\max} = 8.0576$ ,对应的特征向量经归一化处理,得到权重向量  $W = [0.152, 0.256, 0.152, 0.085, 0.256, 0.035, 0.040, 0.023]$ 。进行一致性检验,  $C.I. = 0.0082$ ,查平均随机一致性指标  $R.I. = 1.41$ ,  $C.R. = C.I./R.I. = 0.0058 < 0.1$ ,说明求得的判断矩阵和指标权重是合理的。

根据通车一年来的环境监测数据,由 6 位专家对各指标打分后取平均,得到  $M' = [85.2, 87.6, 93.3, 84.8, 90.4, 88.0, 91.4, 95.2]$ ,将其代入梯形分布的隶属函数,按行作归一化处理,得到模糊

关系矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.26 & 0.5 & 0.24 & 0 & 0 \\ 0.38 & 0.5 & 0.12 & 0 & 0 \\ 0.5988 & 0.4012 & 0 & 0 & 0 \\ 0.24 & 0.5 & 0.26 & 0 & 0 \\ 0.5102 & 0.4898 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5376 & 0.4624 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6711 & 0.3289 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

综合评价矩阵  $B = W * R = [0.4298, 0.4764, 0.0928, 0, 0]$ ,并求得嘉华隧道运营安全的综合得分  $M = B * V^T = 83.29$ ,表示嘉华隧道运营安全状况良好。

## 5 结 语

从结构和环境条件 2 个方面,对隧道长期安全影响因素、监测方法及评价模型进行研究,并将其应用于嘉华隧道,评价结果显示嘉华隧道结构和运营都较安全,与实际情况相吻合,说明该监测方法和安全评价模型具有很高的推广使用价值。同时注意到,现在大多隧道在施工期设计安装的监测系统并未得到有效保护,其线路或埋于衬砌中或被破坏,这将不利于隧道运营期间对其结构安全的实时监控,特别是地壳活动活跃地区和围岩情况较差的隧道,将不能预测其危险性。对于环境条件,很多隧道也没有安装相应传感器,特别是对于穿越煤层或高温地层的隧道,实时监控其瓦斯浓度或温度和通风情况则显得尤为重要。这就需要相关部门制定相应的标准或规范,使隧道长期安全监测方法和评价模型得到有效推广,并最终保证隧道运营安全。

### 参考文献:

[1] 丁勇,施斌,隋海波. 隧道结构健康监测系统与光纤传感技术[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 375-380.  
DING YONG, SHI BIN, SHUI HAI-BO. Tunnel structural health monitoring system and fiber optic sensing technology[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 375-380.

[2] 王建秀,朱合华,唐益群. 高速公路隧道跟踪监测及承载状况诊断[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 110-114.  
WANG JIAN-XIU, ZHU HE-HUA, TANG YI-QUN. Post-construction monitoring and carrying capacity diagnose of a highway tunnel constructed NATM [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38

- (2):110-114.
- [ 3 ] 顾吟,杨建宏,梁之坚. 城市隧道运行管理模糊综合评价方法[J]. 市政技术, 2006,24(5):311-316.  
GU YIN, YANG JIAN-HONG, LIANG ZHI-JIAN. A fuzzy comprehensive evaluation method of city tunnel operation management [J]. Municipal Engineering Technology, 2006, 24(5):311-316.
- [ 4 ] 陈耕野,刘斌,万明富,等. 韩家岭大跨度公路隧道应力监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(增 2): 5509-5515.  
CHEN GEN-YE, LIU BIN, WAN MING-FU, et al. Analysis of stress monitoring of a large-span highway tunnel in Hanjialing Mountain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (suppl2): 5509-5515.
- [ 5 ] LI H N, LI D S, SONG G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1647-1657.
- [ 6 ] 蒋树屏,赵阳. 复杂地质条件下公路隧道围岩监控量测与非确定性反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(20):3460-3464.  
JIANG SHU-PING, ZHAO YANG. Study on monitoring and back analysis of road tunnel with complex geology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3460-3464.
- [ 7 ] 尚荣丽,张生瑞. 高速公路隧道交通安全保障系统的研究[J]. 公路, 2006(12):137-130.  
SHANG RONG-LI, ZHANG SHENG-RUI. A study on tunnel traffic security system of expressway [J]. Highway, 2006(12): 137-130.
- [ 8 ] BIZJAK K F, BORUT P. Displacement analysis of tunnel support in soft rock around a shallow highway tunnel at Golovec [J]. Engineer in Geology, 2004,75 (1): 185-196.
- [ 9 ] RICHARDS J A. Inspection maintenance and repair of tunnels: international lessons and practice [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(3):369-375.
- [10] TESTUO I, WATARU A, HIROMICHI S, et al. Estimation of natural ground behavior ahead of face by measuring deformation which utilized TBM drift tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(6): 527-528.
- [11] 袁勇,王胜辉,杜国平,等. 双连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(3): 480-484.  
YUAN YONG, WANG SHENG-HUI, DU GUO-PING, et al. In-situ testing study on lining system of double-arched tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 480-484.
- [12] 靳晓光,王兰生,卫宏. 公路隧道围岩变形监测及其应用[J]. 中国地质灾害预防防治学报, 2000,11(1):19-23.  
JIN XIAO-GUANG, WANG LAN-SHENG, WEI HONG. Surrounding rock deformation monitor and application in highway tunnel[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(1):19-23.
- [13] SAKURAI S, AKUTAGAWA S, TAKEUCHI K, et al. Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003,18(2/3): 527-528.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ 026-1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG H12-2003 公路隧道养护技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [16] 闵文飞,许俊杰,扬晓鸿. 多层次模糊综合评判在选煤工艺流程选择中的应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 201-205.  
MIN WEN-FEI, XU JUN-JIE, YANG XIAO-HONG. Selection of coal preparation flow sheet by multi-stage comprehensive fuzzy evaluation method[J]. Journal of China Coal Society, 2002,27(2):201-205.

(编辑 赵 静)