

基于可拓学理论的盾构隧道结构健康诊断方法

孔祥兴^{1,2,3}, 夏才初^{1,2}, 仇玉良³, 胥 犇⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中交第一公路勘察设计研究院 地下工程与轨道交通研究所, 陕西 西安 710075; 4. 中国中铁二院工程集团 重庆公司, 重庆 400015)

摘要: 针对目前世界最大直径的长距离盾构隧道, 基于可拓学理论的物元可拓性和菱形思维方法, 将研究对象、评判指标和指标特征值结合成为物元, 通过物元表述关系式建立隧道健康诊断的物元模型, 确立健康诊断指标体系和指标评判基准, 提出了基于熵和乘积标度的融合赋权方法, 并依据非对称贴近度原则进行了上海长江隧道(崇明越江通道)健康诊断的研究工作, 同时也给出了可拓学健康诊断方法的具体实现步骤. 研究表明: 隧道健康诊断的可拓学法能全面系统地反映隧道结构的整体健康状态, 且健康诊断结果可靠合理, 其作为新的健康诊断思路和方法可为隧道长期健康服役和及时合理的养护维修提供科学的理论支撑与技术指导.

关键词: 隧道工程; 健康诊断; 可拓学; 层次分析法; 熵权
中图分类号: U 451.4 **文献标识码:** A

Health Diagnosing Method for Shield Tunnel Based on Extension Theory

KONG Xiangxing^{1,2,3}, XIA Caichu^{1,2}, QIU Yuliang³, XU Ben⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. The First Highway Survey and Design Institute of China Communications Construction Company Ltd., Xi'an 710075, China; 4. China Railway No. 2 Engineering Group Company Ltd., Chongqing 400015, China)

Abstract: Based on rhombus thought and extension theory that matter element is of extension nature, research objects and judging indexes as well as the index characteristic values are considered as matter element. Matter-element model is established in accordance with the relationships between matter-elements, health diagnosis indexes system and the criterion for evaluating indexes are also determined. Fusion

index weight method based on Shannon entropy and multiplication scale method is proposed. Then taking the Shanghai Yangze River Tunnel, which is a long-distance shield tunnel with the largest diameter in the world at present, as an object, in light of the principle of unsymmetrical nearness degree, the evaluation of the tunnel health conditions carries out according to theories mentioned above and the processes of the health diagnosing method based on extension theory are presented. According to the results, it is demonstrated that the health diagnosing method based on extension theory can be adopted to evaluate health state of tunnel structure, and the evaluating results is reasonable and reliable. As a new health diagnosing method, it will provide scientific theory foundation and valuable technology instruction for durable health state and timely maintenance of tunnel.

Key words: tunnel engineering; health diagnosing; extension theory; analytical hierarchy process(AHP); entropy weight

在长期的自然环境和使用的双重作用下, 隧道结构会受到损伤, 其功能亦将逐渐衰弱. 然而, 目前对隧道工程的研究主要集中在设计计算理论和施工技术方面, 因此, 更需要科学合理的隧道健康诊断方法来指导运营管理及养护维修. 针对隧道健康诊断, 已有研究大致可分为两类. 其一, 在定性分析的基础上应用数学力学方法, 建立数学模型以评价隧道健康状态, 譬如: 罗鑫、夏才初采用层次分析法建立健康状态指标体系, 并依据模糊数学提出了公路隧道健康诊断的模糊综合评价方法^[1]; 姜松湖、关宝树研究得出了铁路隧道健全度判定模型^[2]. 再者, 在总结分析病害类型基础上, 建立病害力学模型并采用数值计算以评判隧道健康状态, 例如: 刘海京、

收稿日期: 2011-01-18

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(07DZ12059); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1029); 中国交通建设集团科技研发项目(2007-ZJKJ-A-08)

第一作者: 孔祥兴(1981—), 男, 工学博士, 主要研究方向为隧道与地下工程. E-mail: xiangxingkong8129@163.com

通讯作者: 夏才初(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为隧道及地下建筑工程. E-mail: tjxiacbc@126.com

夏才初建立了公路隧道病害力学模型,对隧道健康状态和结构安全性进行数值计算及敏感性分析^[3]; Lee 等在韩国高速铁路隧道健康监测中提出以变形数据诊断隧道病害的系统识别方法^[4].

然而,在隧道健康状态的诊断过程中,常会出现多层次多指标、目标之间矛盾和定性信息与定量信息共存等诸多复杂问题,并非是上述已有方法能妥善地处理.可拓学正是解决矛盾相容、定性定量共存问题的一种有效方法^[5].可拓学理论在隧道健康诊断的实际应用中也存在着不完善和局限性.本文提出了以乘积标度法作为主观赋权法、熵权法作为客观赋权法,并将所获两权重进行相互融合,以达到在隧道健康诊断中科学合理分配权重.另外,鉴于因舍弃甚至掩盖评判结果向量中部分信息而导致失效的最大隶属原则,本文采用非对称贴近度方法使问题得以有效地解决,从而确保隧道健康诊断结果更为可靠与合理.

1 可拓学在隧道健康诊断中的优化

1.1 融合权重

作为评价的关键内容,权重的分配是否合理将直接影响到健康诊断结果的可靠性和准确性.在可拓评判法中常采用初等关联函数确定权重,但所得权重敏感性较差,基本上集中在均值附近.目前常用的权重确定方法可概括为主观赋权法和客观赋权法.其中,主观赋权法是通过专家对各指标进行评分,并对其结果进行数学分析而得出权重的方法,其缺点是计算结果受主观因素干扰较大,且未能与评价结果很好地相结合;客观赋权法则是通过对评价因素数据集本身所包含的客观信息进行提取和分析,并从中找寻规律,以确定指标的权重,它的不足是过分依赖于客观数据,而忽视了专家在权重确定中所发挥的重要性,其计算结果有时会差强人意.故本文提出融合方法以确定权重,兼顾决策者的丰富经验,又充分吸取客观数据的有效信息,使得赋权达到主观与客观的统一,使健康诊断结果更真实和可靠.

1.1.1 客观赋权的熵权法

纵观百年以来熵的发展历史,可以说熵是对“不确定性”问题的最佳测度.因此可利用熵值法计算指标的权重,其本质就是充分利用指标的信息效用值,效用值越高,则对评价的重要性也就越大.熵权法确定指标权重的主要计算步骤为:

(1) 根据传统的熵概念,可确定 m 个评价事物

n 个评价指标 $(x_{ij})_{mn}$ 的熵为

$$H_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (1)$$

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + b_{ij})} \quad (2)$$

式中, $b_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$, x_{\max} , x_{\min} 分别为同指标下不同事物中最满意或最不满意者(越小越满意或越大越满意).

(2) 计算评价指标的熵权:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad (3)$$

1.1.2 主观赋权的乘积标度法

乘积标度法是以层次分析原理为基础,并考虑隧道健康诊断特征的一种权重确定方法.乘积标度法确定指标权重的基本步骤为:①依据实测资料,对 m 个评判指标进行定性重要程度排序;②对指标 A 与 B 进行对比,确定其重要性的差异归属于“相同”或“稍微大”;③当指标 A 与 B 重要性的差异用“稍微大”还不足以反映时,可采用多个“稍微大”加以体现.

1.1.3 融合权重法

由主观赋权法与客观赋权法融合而成的权重 $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$,可采用简单线性加权组合法 (simple additive weight method) 加以确定,即为

$$w_i = (1 - u) w_{1i} + u w_{2i} \quad (4)$$

式中, u 为主观偏好系数, $(1 - u)$ 为客观偏好系数.当 $u < 0.5$ 时,客观权重在融合权重中所占的比例相对较大而主观权重则较小,反之客观权重较小而主观权重较大.在此认为以上两种赋权方法具有同等重要性,故健康诊断中评价指标的融合权重为

$$w_i = \frac{1}{2} w_{1i} + \frac{1}{2} w_{2i} \quad (5)$$

1.2 非对称贴近度

(1) 可拓评判法关联度局限性分析

关联度和等级评定是可拓评判法的核心部分,就其算法本身而言,关联度可看作是模糊数学中隶属度概念的延伸,可拓评判中评判原则相当于模糊数学评判中的最大隶属原则.最大隶属原则掩盖甚至舍弃了评判结果向量中部分信息,导致各分量分布较均匀时,待评对象等级会出现偏差甚至失真.

(2) 基于非对称贴近度的改进方法

根据目前已有研究进展^[6],采用非对称贴近度

原则能够有效地解决最大隶属原则失效问题.常用的非对称贴近度计算方法为

$$N(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{Y=1}^n |\mu_A^p(u_Y) - \mu_B^p(u_Y)|^{\frac{1}{Y}} \quad (6)$$

$$N(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{Y=1}^n |\mu_A^p(u_Y) - \mu_B^p(u_Y)|^Y \quad (7)$$

由式(6)和(7)所得的贴近度实质上就是分别对低、高级别所对应的偏差度给以加重“惩罚”,其中 $\mu_A^p(u_Y)$ 和 $\mu_B^p(u_Y)$ 分别是 A, B 所对应的对象隶属于 u_Y 的隶属度,“ p ”对计算结果发挥着调节的作用,与“ $1/Y$ ”,“ Y ”的作用相互补偿,促使计算结果更加有利于分级,通常情况下取 $p=1$.

2 基于可拓学隧道结构健康诊断方法

在充分考虑隧道健康诊断丰富内涵和显著特征的基础上,据可拓学理论和层次分析原理,确立健康诊断指标体系和指标评判基准,运用物元可拓性和菱形思维方法将研究对象、评价指标和指标特征值结合成为物元,建立以物元关系表述的健康诊断物元模型,从而形成隧道健康诊断的可拓学法,使得隧道健康诊断这一多层次多指标的复杂矛盾问题在物元模型下得到合理有效地解决.具体实现步骤如下.

2.1 多层次健康诊断体系及评价指标集的建立

(1) 建立隧道多层次健康诊断体系

在充分考虑影响隧道健康状态的内在作用机理和外界环境构成要素的基础上,并依据物元可拓性规律,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)将隧道健康状态分解为若干诊断层次多个评判指标来逐层逐个分析.

(2) 建立评价指标集

以国内外现行规范标准和工程实测统计数据为基本参照^[7],辅以力学解析计算和数值仿真等方法,从而确立了隧道健康诊断的指标评判量化标准.由于评价指标原始数据的取值范围、度量方法及单位各不相同,则需采用极差变换进行量纲一化处理.

2.2 隧道健康状态检测项目的可拓学评判——检测项目层可拓学评价

(1) 确定经典域

隧道健康诊断检测项目层的经典域 R_{0k} 是由本层对应指标 C_j ($j=1, 2, \dots, n$)及其量值范围 $V_{0jk} = (a_{0jk}, b_{0jk})$ ($k=1, 2, \dots, h$, h 为健康等级数)构成,可表示为

$$R_{0k} = (N_{0k}, C_j, V_{0jk}) =$$

$$\begin{bmatrix} N_{0k} & C_1 & V_{01k} \\ 0 & C_2 & V_{02k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & C_n & V_{0nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0k} & C_1 & (a_{01k}, b_{01k}) \\ 0 & C_2 & (a_{02k}, b_{02k}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & C_n & (a_{0nk}, b_{0nk}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

(2) 确定节域

节域可表示为

$$R_P = (P, C_j, V_{Pj}) = \begin{bmatrix} P & C_1 & V_{P1} \\ 0 & C_2 & V_{P2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & C_n & V_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & (a_{P1}, b_{P1}) \\ 0 & C_2 & (a_{P2}, b_{P2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & C_n & (a_{Pn}, b_{Pn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: P 为全部等级; (a_{Pj}, b_{Pj}) ($j=1, 2, \dots, n$)为评价指标 C_j 在 P 条件下所取得的量值范围.

(3) 确定待评物元

检测项目层待评对象可用物元表示为

$$R = (N_i, C_j, V_j) = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & v_1 \\ 0 & C_2 & v_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & C_n & v_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: N_i 为隧道第 i 区段的健康诊断待评对象; v_j ($j=1, 2, \dots, n$)为对象关于指标 C_j 的取值.

(4) 计算关联函数

由距 ρ 的定义,可计算关联函数为

$$K_{ij}(v_{ij}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{ij}, V_{0ij})}{|V_{0ij}|} \\ \frac{\rho(v_{ij}, V_{0ij})}{\rho(v_{ij}, V_{Pij}) - \rho(v_{ij}, V_{0ij})} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $v_{ij} \notin V_{0ij}$.

(5) 计算融合权重

由前述熵权法与乘积标度法可分别求得客观权重 w_{1j} 、主观权重 w_{2j} ,认为两种赋权方法具有同等重要性,故健康诊断中评价指标 j 的融合权重 w_j 为

$$w_j = \frac{1}{2} w_{1j} + \frac{1}{2} w_{2j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

(6) 计算综合关联度

综合关联度可表征评判对象对于评判等级的归属程度,其表达式为

$$K_{jk}(N_i) = W_{jk} \cdot V_{jk} = (w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{jk})_{1 \times j} \cdot (v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{jk})_{j \times 1}^T \quad (13)$$

其中, w_j 为指标 j 的融合权重,且满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

(7) 计算非对称贴近度

由前述计算方法可得非对称贴近度 $N(B, D_i)$,

即为 $N(B, D_i) = N(B^{(j)}, D_1) (i \in J_n)$.

2.3 隧道健康状态子项目的可拓学评判——因素层可拓学评价

在检测项目层可拓学评判的前提和基础上,同理可进行隧道因素层的健康诊断.

2.4 隧道结构整体健康状态的可拓学评判——目标层可拓学评价

在因素层可拓学评判的前提和基础上,采用可拓学理论中的物元可拓性和菱形思维方法去分析隧道健康诊断的评判体系,从而进行隧道目标层的健康诊断.因篇幅所限,因素层和目标层可拓学评判的具体分析过程不再赘述,参见 2.2 节内容.

2.5 隧道健康诊断结果的判定

首先可按表 1 划分隧道健康状态等级,再依据可拓学评价结果判定隧道健康状态的等级.

表 1 隧道健康状态等级划分

Tab.1 Classification of tunnel healthy status

健康等级	健康状态	对策
D	结构无破损或存在轻微破损	保持正常监测
C	结构存在破坏	准备采取对策措施
B	结构存在较严重破坏	尽快采取对策措施
A	结构存在严重破坏	立即采取对策措施

3 上海长江隧道的健康诊断

上海长江隧桥工程采用“南隧北桥”方案,其中崇明越江通道按双向 6 车道高速公路标准设计(车道下预留轨道交通空间),采用盾构法施工的江中段隧道是迄今为止世界最大直径的长距离盾构隧道.

3.1 评价指标体系及指标判定标准

根据工程实际情况,采用自下而上的评价层次设计方法,合理有效地确定各层次评价项目,形成一个包含多评价子项目多评价指标的分层次诊断系统(图 1).

从荷载、材料劣化和渗漏水方面建立评判指标集合,并选取相应的表征量进行考量,再对指标的评判标准进行量纲一化处理,其结果见表 2.

3.2 上海长江隧道检测项目层可拓学评价

针对上海长江隧道工程实际,依据由理论分析和数值计算制定的监测方案,采用先进仪器设备对隧道的重点断面位置及项目等进行了长期、周密的健康监测和分析.截止 2009 年 9 月,健康监测结果及其量纲一化处理见表 3.

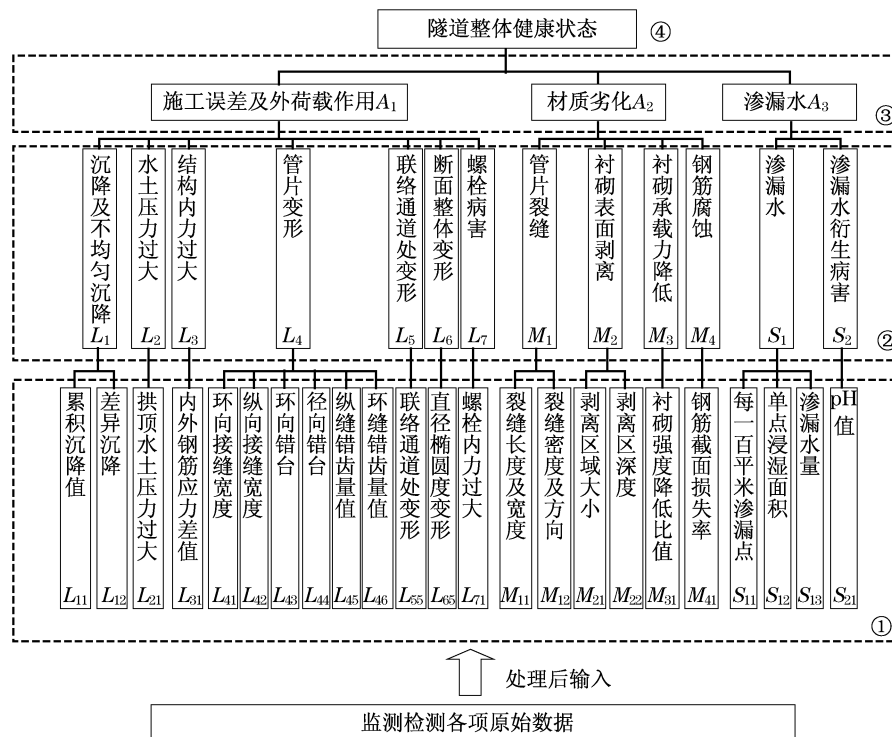


图 1 隧道健康诊断指标体系

Fig.1 The index system of tunnel health diagnosis

表 2 评判指标量纲一化后的分等级量值基准
Tab.2 Criteria of dimensionless indices with health grades

评判指标	健康等级				评判指标	健康等级			
	D	C	B	A		D	C	B	A
累积沉降	0.75~1.00	0.50~0.75	0.25~0.50	0~0.25	螺栓应力与强度之比	0.44~1.00	0.33~0.44	0.17~0.33	0~0.17
差异沉降	0.68~1.00	0.52~0.68	0.28~0.52	0~0.28	裂缝宽度	0.91~1.00	0.67~0.91	0.34~0.67	0~0.34
拱顶土压增大系数	0.23~1.00	0.15~0.23	0.08~0.15	0~0.08	裂缝密度	0.69~1.00	0.46~0.69	0.23~0.46	0~0.23
钢筋应力差控制系数	0.33~1.00	0.23~0.33	0.12~0.23	0~0.12	剥落直径	0.80~1.00	0.70~0.80	0.40~0.70	0~0.40
环向接缝宽度	0.67~1.00	0.58~0.67	0.33~0.58	0~0.33	剥落深度	0.85~1.00	0.70~0.85	0.38~0.70	0~0.38
纵向接缝宽度	0.67~1.00	0.58~0.67	0.33~0.58	0~0.33	衬砌强度降低比	0.86~1.00	0.57~0.86	0.29~0.57	0~0.29
环向错台	0.43~1.00	0.29~0.43	0.14~0.29	0~0.14	钢筋截面损失率	0.93~1.00	0.75~0.93	0.38~0.75	0~0.38
径向错台	0.43~1.00	0.29~0.43	0.14~0.29	0~0.14	任意 100 m ² 渗漏点数	0.93~1.00	0.80~0.93	0.53~0.80	0~0.53
环缝错齿	0.73~1.00	0.67~0.73	0.40~0.67	0~0.40	单点浸湿面积	0.75~1.00	0.50~0.75	0.25~0.50	0~0.25
纵缝错齿	0.73~1.00	0.67~0.73	0.40~0.67	0~0.40	渗漏水量	0.83~1.00	0.58~0.83	0.33~0.58	0~0.33
联络通道处变形	0.80~1.00	0.63~0.80	0.40~0.63	0~0.40	pH 值中性偏离量	0.75~1.00	0.50~0.75	0.25~0.50	0~0.25
直径椭圆度变形	0.60~1.00	0.40~0.60	0.20~0.40	0~0.20					

表 3 上海长江隧道的健康监测结果(截止 2009 年 9 月)
Tab.3 Results of health monitoring for Shanghai Yangtze River Tunnel (by the time of September, 2009)

指标结果	累计沉降	差异沉降	土压增大系数	钢筋应力差	椭圆度变形	其余指标
监测值	40.0 mm	19.7 mm	0.97	0.47	2.0	0.0
量纲一值	0.76	0.80	0.25	0.45	0.80	1.00

首先,由可拓学原理中距的概念计算出关联函数,并作归一化处理;再依据熵权法和乘积标度法分别计算客观权重与主观权重,并将两者进行合理的融合;最后,计算得到能够表征本层评判指标对于相应上层待评对象归属程度的综合关联度.计算结果见图 2(图中横轴为评判指标,纵轴为其关联函数,下同),表 4.

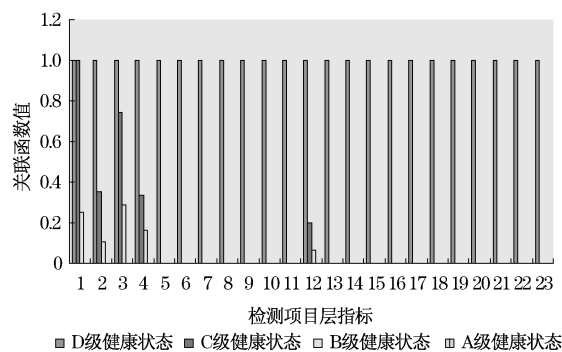


图 2 检测项目层指标的关联函数

Fig.2 Correlation function of index in detection hierarchy

3.3 上海长江隧道因素层可拓学评价

在检测项目层可拓学评判的前提和基础上,对隧道进行因素层健康诊断,分别计算关联函数、融合

权重和综合关联度见图 3、表 5.限于篇幅,检测项目层和因素层综合关联度计算结果均不再列出.

表 4 检测项目层指标的融合权重

Tab.4 Combination weights of indices in detection hierarchy

评判指标	主观权重	客观权重	融合权重
累积沉降	0.580	0.498	0.539
差异沉降	0.420	0.502	0.461
拱顶土压增大系数	1.000	1.000	1.000
钢筋应力差控制系数	1.000	1.000	1.000
环向接缝宽度	0.166	0.166	0.166
纵向接缝宽度	0.166	0.166	0.166
环向错台	0.166	0.166	0.166
径向错台	0.166	0.166	0.166
环缝错齿	0.166	0.166	0.166
纵缝错齿	0.170	0.170	0.170
联络通道处变形	1.000	1.000	1.000
直径椭圆度变形	1.000	1.000	1.000
螺栓应力与强度比	1.000	1.000	1.000
裂缝宽度	0.500	0.500	0.500
裂缝密度	0.500	0.500	0.500
剥落直径	0.500	0.500	0.500
剥落深度	0.500	0.500	0.500
衬砌强度降低比	1.000	1.000	1.000
钢筋截面损失率	1.000	1.000	1.000
任意 100 m ² 渗漏点数	0.333	0.333	0.333
单点浸湿面积	0.333	0.333	0.333
渗漏水量	0.334	0.334	0.334
pH 值中性偏离量	1.000	1.000	1.000

3.4 上海长江隧道目标层可拓学评价

在因素层可拓学评判的前提和基础上,同样地遵循可拓学理论中的物元可拓性和菱形思维方法去

分析隧道健康诊断的评判体系,从而对上海长江隧道开展目标层的健康诊断,分别计算关联函数、融合权重和综合关联度,见图 4、表 6~表 7.

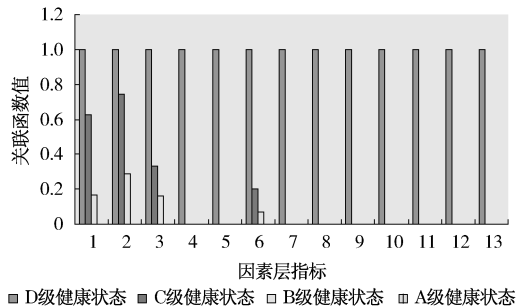


图 3 因素层指标的关联函数

Fig.3 Correlation function of index in factor hierarchy

表 5 因素层指标的融合权重

Tab.5 Combination weights of indices in factor hierarchy

评判指标	主观权重	客观权重	融合权重
沉降	0.120	0.141	0.130
水土压力	0.120	0.140	0.130
结构内力	0.170	0.141	0.155
管片变形	0.170	0.145	0.158
联络通道变形	0.120	0.145	0.133
断面变形	0.170	0.142	0.156
螺栓病害	0.130	0.145	0.138
管片裂缝	0.268	0.250	0.259
衬砌表面剥离	0.198	0.250	0.224
衬砌承载力降低	0.268	0.250	0.259
钢筋腐蚀	0.266	0.250	0.258
渗漏水状态	0.500	0.500	0.500
渗漏水衍生病害	0.500	0.500	0.500

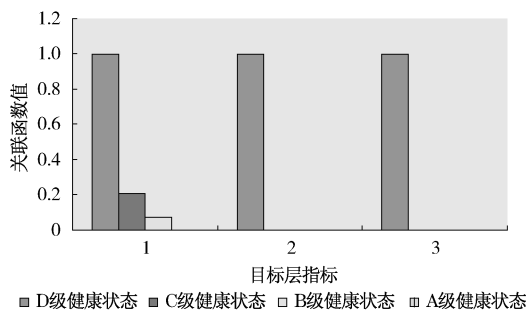


图 4 目标层指标的关联函数

Fig.4 Correlation function of index in object hierarchy

3.5 上海长江隧道健康诊断结果的判定

通过对目标层综合关联度的归一化和极差化,进而计算非对称贴近度为 0.845、0.457、0.448 和 0.368.因此可得健康诊断结果为 D 级,说明了截止 2009 年 9 月上海长江隧道的健康状态属于结构无破损,仅需对隧道结构保持日常的监测和检查.

表 6 目标层指标的融合权重

Tab.6 Combination weights of indices in object hierarchy

评判指标	主观权重	客观权重	融合权重
施工误差及外荷载作用	0.400	0.344	0.372
材质劣化	0.300	0.328	0.314
渗漏水	0.300	0.328	0.314

表 7 目标层指标的综合关联度

Tab.7 Synthetic relation degrees of indices in object hierarchy

健康等级	上海长江隧道健康状态		
	施工误差及外荷载作用	材质劣化	渗漏水
D		0.049	
C		-0.840	
B		-0.885	
A		-0.908	

4 结论

针对由多层次多指标集成的隧道健康诊断系统,将可拓学理论与层次分析原理相结合,提出了基于熵和乘积标度的融合赋权方法以优化权重,并采用非对称贴近度改进关联函数,从而构建了隧道健康状态的可拓学评判体系和诊断方法,结论如下:

(1) 针对采用任意单独赋权方法都难以取得令人满意的结果,本文提出了以乘积标度法作为主观赋权法、熵权法作为客观赋权法,并将主客观权重进行融合,以达到在隧道健康诊断中科学合理地分配权重.

(2) 鉴于最大隶属原则会掩盖甚至舍弃评判结果向量中部分信息,导致各分量分布均匀时待评对象等级会出现偏差甚至失真.本文采用非对称贴近度有效地解决了最大隶属原则失效问题,以确保隧道健康诊断结果更为可靠与合理.

(3) 基于可拓学理论和层次分析原理,提出了隧道健康诊断的评判体系,运用物元可拓性和菱形思维方法将研究对象、评价指标和指标特征值结合成为物元,建立了以物元关系表述的健康诊断物元模型和方法,从而使得上海长江隧道健康诊断这一多层次多指标的复杂矛盾问题在物元模型下得到了合理有效地解决.

参考文献:

[1] 罗鑫.公路隧道健康状态诊断及系统的研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007.

(下转第 1698 页)