

一种运营地铁盾构隧道结构健康状况评价方法^{*}

黄震¹,傅鹤林¹,黄宏伟²,张加兵¹

(1.中南大学 土木工程学院,长沙 410075;2.同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:为解决多指标对盾构隧道结构健康状况的综合影响以及人的有限理性对评价结果的不精确性问题,提出一种基于可能性理论及前景理论的地铁运营盾构隧道结构健康状况评价方法。首先在已确定盾构隧道结构健康状况等级的基础上,构造各健康状况等级可能性分布;然后基于专家期望值得到各监测指标的参考分布函数;基于可能性理论,得到指标监测结果的可能性分布,构造出监测指标与健康状况等级可能性分布函数之间的映射关系;最后,基于前景理论对盾构隧道结构健康状况进行评价。该方法运用于软土盾构隧道结构健康状况的评价,验证了其有效性及实用性,为运营盾构隧道结构健康评价提供了新方法。

关键词:运营盾构隧道;可能性理论;前景理论;前景价值;结构健康评价

中图分类号:U25

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1410-09

A Method for Evaluating the Health Condition of Operation Metro Shield Tunnel Structure

Huang Zhen¹, Fu Helin¹, Huang Hongwei², Zhang Jiabing¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P.R.China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R.China)

Abstract: To solve the comprehensive influence of multi index on the shield tunnel structure health status and people's limited rationality of the evaluation results, a health status evaluation method on shield tunnel structure based on the possibility theory and prospect theory is proposed in this paper. Firstly, the probability distribution of health status is constructed on the basis of the health status of the structure of the shield tunnel; Then the reference distribution function of each monitoring index is obtained based on the expectation of the experts; Based on the probability theory, the probability distribution of the monitoring results is obtained, and the mapping relationship between the monitoring index and the probability distribution function of the health status level is constructed; Finally, evaluating the health status of the shield tunnel structure based on the prospect theory. This method is successfully applied into evaluating the health condition of shield tunnel structure in soft soil region, which verifies the effectiveness and practicability of the method and provides a new method for the structural health evaluation of the operation of the shield tunnel.

Keywords: shield tunnel; possibility theory; prospect theory; prospect value; structural health evaluation

^{*} 收稿日期:2018-03-22(修改稿)

作者简介:黄震(1989-),男,湖南长沙人,博士生,工程师,主要从事隧道及岩土工程方向研究。

E-mail:hzcslg@163.com

基金项目:国家自然科学基金重点基金(51538009);国家自然科学基金(51578550)

0 引言

在北京、上海、广州等特大城市中,轨道交通系统承担了城市公共客运总量的 40%~50%,而盾构法作为城市轨道交通的主要工法,其修建的隧道占据了城市轨道线路总长的 50%~70%^[1-2]。由于盾构隧道穿梭于城市复杂地层中,且周边构筑物基础施工及密集活动人群,盾构隧道在服役环境中存在许多不确定因素,这些因素构成了盾构隧道运营安全的潜在风险源^[3]。针对这些风险源,选择合理的方法来评价运营盾构隧道健康状况尤为重要。为此,近年来我国学者对地铁运营盾构隧道结构的危险及健康状况展开了相关研究,王卓明等^[4]、彭铭等^[5]通过监测项目指标与盾构隧道之间关系,对盾构隧道进行风险评价。孙可等^[6]利用盾构隧道智能化检测数据结果,采用模糊层次分析方法对盾构隧道的健康状态进行定量评价。胥犇等^[7]采用改进层次分析方法定量评估了盾构隧道结构健康状态。杨潇等^[8]利用长期沉降数据为基础,用非均匀有理 B 样条法对上海某区间盾构隧道曲率进行计算,并以此进行盾构隧道健康诊断依据。孔祥兴等^[9]提出了基于可拓学理论的盾构隧道的结构健康状况诊断的方法。刘胜春等^[10]采用光纤传感技术,研究了盾构隧道结构健康监测系统设计方法。刘涛^[11]采用可靠度理论和 Markov 链方法对隧道结构剩余寿命和服役性能进行了评价。叶耀东^[12]针对软土地区地铁盾构隧道,提出了基于模糊综合评判方法的健康诊断模型。

上述隧道结构健康诊断评价方法中,大部分基于指标的最大贡献来确定健康状况,无法有效考虑其他指标的影响,且评价中认为人是完全理性的。然而,在盾构隧道结构健康状况评价的过程中,通常存在多指标、定量与定性的关系处理复杂等问题,导致健康状况评价结果产生一些偏差。基于此,本文将可能性理论和前景理论引入盾构隧道结构健康状况评价中,以解决多指标对盾构隧道结构健康状况的综合影响以及人的有限理性对评价结果的不精确性问题。

1 理论简介

1.1 可能性理论基本概念

可能性理论最早是由 Gaines 等^[13]提出来的,但未明确具体概念,随后 Zadeh^[14]在大量样本信息的基础上,提出了可能性理论的具体概念。可能性理论建立在模糊集理论上,将不确定性问题解释为与概率不同的可能性,是一种不确定性处理方法。图 1 反映了事件发生的可能性与概率之间的关系。

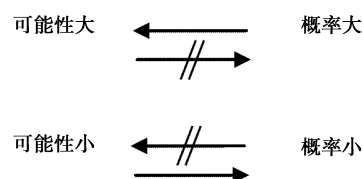


图 1 可能性与概率之间关系

Fig. 1 Relation between probability possibilities and probability

定义 1 设 x 为论域 U 上变量, \tilde{A} 为 U 上的模糊子集,隶属度函数 $u_{\tilde{A}}(x)$ 表示 \tilde{A} 与元素 x 的相容度,而 \tilde{A} 是与 X 相关联的模糊约束 $R(X)$, $R(X) = \tilde{A}$, 变量 X 相关联的可能性分布为 \prod_x , 则:

$$\prod_x = R(X) \quad (1)$$

设 π_x 为 \prod_x 的可能性分布函数,数值上等于隶属度函数 $u_{\tilde{A}}(x)$, 则 $\forall x \in U$ 有:

$$\pi_x = u_{\tilde{A}}(x) \quad (2)$$

定义 2 设 \tilde{A} 为论域 U 上的模糊子集,则 \tilde{A} 的截集为:

$$A_\lambda = \{x | u_{\tilde{A}}(x) \geq \lambda\} = [a_1(\lambda), a_2(\lambda)] \quad (3)$$

式中: $\lambda \in [0, 1]$; $a_1(\lambda)$ 、 $a_2(\lambda)$ 分别为模糊子集两个端点。

定义 3 设 (X, P) 和 (Y, R) 为两个模糊场,令 $\dot{y} = \{y | y \in r \in R\}$, $\dot{Y} = \{\dot{y} | y \in Y\}$, 且 \tilde{R} 是 \dot{Y} 生成的备域,若集值映射 $\xi: X \rightarrow \mathcal{P}(Y)$ 满足:

$$r \in R \Rightarrow \xi^{-1}(R) \in P \quad (4)$$

则称 ξ 为一个可能性集值映射。可能性集值映射集用 $E(X, P; Y, R) = \{\xi | \xi \text{ 为 } (X, P) \text{ 到 } (Y, R) \text{ 的可能性集值映射}\}$ 来表示。

定义4 设 (Ω, A, Π) 为一个模糊可测空间, (X, B) 为一个模糊场,令 $\xi \in E(\Omega, A; X, B)$,则:

$$u_{\xi}(x) = \prod (\{w \in \Omega | x \in \xi(w)\}) = \prod (\xi^{-1}(x)) \quad (5)$$

称 $u_{\xi}(x)$ 为可能性集值映射 ξ 的落影,落影集合表示为:

$$F(X, \prod) = \{u_{\xi} | \xi \in E(\Omega, A; X, B)\} \quad (6)$$

1.2 前景理论基本概念

前景理论是 Kahneman 等^[15]和 Tversky 等^[16]通过大量心理学研究,在期望值理论和期望效用理论的基础上,于1979年提出的风险决策新理论,在金融风险及信息管理方面已广泛运用。前景理论通过前景价值大小来进行方案决策。前景价值大小由价值函数与权重函数决定。

$$V = \sum_{i=1}^k v(D_i) w(p_i) \quad (7)$$

式中: V 表示前景价值, $w(p)$ 表示权重函数, $v(D)$ 表示价值函数。

Tversky 等^[16]人提出的价值函数为幂函数,即

$$v(D) = \begin{cases} D^{\alpha}, D \geq 0 \\ -\lambda (-D)^{\beta}, D < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: D 为收益值和损失值, α, β 分别表示收益和损失区域价值函数凹凸程度, $(0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1)$, α, β 取值越大,表明决策者倾向于冒险; λ 为损失规避系数,反映损失区域比收益区域更陡的特征。文献[17]通过大量实验得出中国情境下风险偏好系数取值,即 $\alpha = 1.21, \beta = 1.02, \lambda = 2.25$ 。

2 盾构隧道结构健康状况评价模型

2.1 评价流程

评价基本思路:在已确定盾构隧道结构健康状况等级的基础上,构造各健康状况等级可能性分布,然后确定各不同健康状况等级下对应各监测评价指标的参考分布函数;将监测指标结果进行处理得到指标可能性分布,并构造出监测指标与健康状况等级可能性分布函数之间的关系;依据前景理论,构造出损益矩阵,计算出价值函数;通过梯形模糊数确定各指标对不同健康状况等级的综合权重;依据价值函数及权重函数计算出盾构隧道结构健康状况的前景价值,并依据前景价值

对盾构隧道结构健康状况进行评价。评价模型流程如图2。

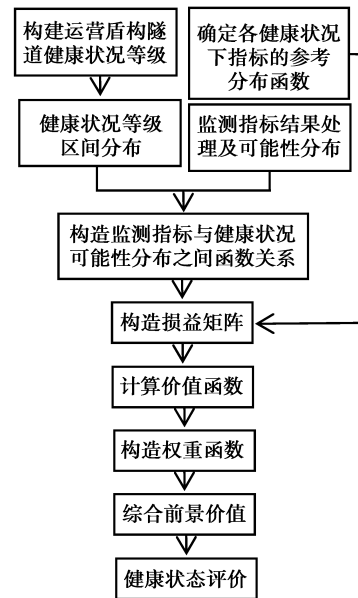


图2 运营地铁盾构隧道健康评价模型

Fig. 2 Health evaluation model of shield tunnel in operation metro

2.2 确定健康状况等级及区间分布

运营地铁盾构隧道结构健康状况等级是确定隧道健康状况的标准,也是指导工程决策的依据,工程上通常采用表1^[12]所示的健康状况等级对盾构隧道结构健康进行诊断。本文将健康状况等级用经典集合中的区间数来描述,即健康状况等级1 $[0, 0.2]$,健康状况等级2 $[0.2, 0.4]$,健康状况等级3 $[0.4, 0.6]$,健康状况等级4 $[0.6, 0.8]$,健康状况等级5 $[0.8, 1]$,其可能性分布如图3所示。

表1 运营地铁盾构隧道结构健康状况等级

Table 1 Health status level of operation metro shield tunnel structure

等级	描述	健康值	工程决策
1	健康	$[0, 0.2]$	正常管理及巡视
2	轻微受损	$[0.2, 0.4]$	需加强管理及巡视
3	中度受损	$[0.4, 0.6]$	加强防范及监测, 制定预防措施
4	严重受损	$[0.6, 0.8]$	需要采取控制措施, 预警方案
5	极端受损	$[0.8, 1]$	停止运营, 规避风险, 采取应急预案

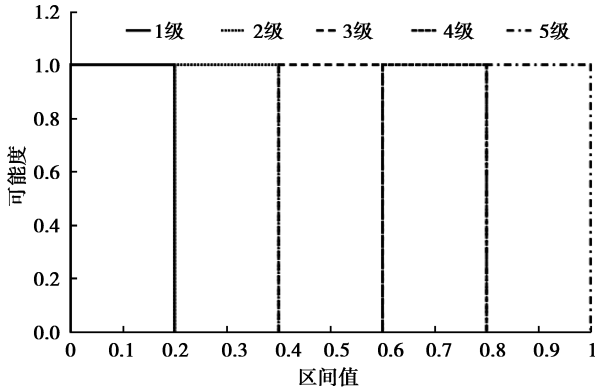


图3 健康状况等级可能性分布

Fig. 3 Probability distribution of health status level

2.3 确定各健康状况下指标参考分布函数

决策者对于决策目标具有自己的参考点,如果目标值超过或低于参考点,那么决策者会比较敏感^[18]。在前景理论中,参考点的选取通常依据专家对目标的期望值获得,然而由于各专家自身的认识和偏好的差异,给出的参考点信息在某种程度上存在模糊性。为此,本文利用可能性分布方法构造各健康状况等级下监测指标的参考分布函数。具体步骤如下:

(1)多位专家依据自身的知识结构及经验给出不同健康状况等级下对应各监测指标的期望值 $E_{ij}^q (i=1,2,3,4,5, j=1,2,\dots,n)$, E_{ij}^q 表示专家 q 对健康等级为 i 下监测指标 j 的期望值。

(2)计算各指标期望值的均值 \bar{E}_{ij} ,并将其作为健康标准值,依据可能性理论,均值对应的可能度为1。

(3)依据期望值的最大值和最小值,确定支撑集 $[E'_{ij}, E''_{ij}] = [\min(E_{ij}^q), \max(E_{ij}^q)]$ 。

(4)利用下式构造出各指标参考分布函数 $\pi_{ij}^r(s)$,并依据该式得到参考信息^[19],令 $s = E_{ij}^q$ 。

$$\pi_{ij}^r(s) = \begin{cases} \left(\frac{s - E'_{ij}}{\bar{E}_{ij} - E'_{ij}} \right), & E'_{ij} \leq s < \bar{E}_{ij} \\ 1, & s = \bar{E}_{ij} \\ \left(\frac{-s + E''_{ij}}{E''_{ij} - \bar{E}_{ij}} \right), & \bar{E}_{ij} < s \leq E''_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

2.4 监测指标结果可能性分布

由于监测人员能力及设备传感器等因素的影响,监测结果信息中存在一定的误差。因此,可依据可能性理论,构造各监测指标的可能性分布函数来表征模糊监测信息^[19]。可能性分布函数的构造方法很多,本文通过各指标监测数据结果,构造指

标监测结果的可能性分布函数,具体步骤如下:

(1)设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为盾构隧道结构某个监测指标数据样本,则该监测数据结果样本均值

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(2)将样本均值 m 作为分界点,将该组监测数据分为2组: $X_1 = \{x_i | x_i < m, i=1,2,\dots,n_1\}$ 和 $X_2 = \{x_i | x_i > m, i=1,2,\dots,n_2\}$,并计算这2组监测数据的

$$\text{均值分别为 } m_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i, x_i < m; m_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} x_i,$$

$x_i > m$ 。

(3)将各监测指标数据用三角可能性分布函数 $\pi(x_i) = (m, 3(m-m_1), 3(m_2-m))$ 来表征。其中, $3(m-m_1), 3(m_2-m)$ 分别表示三角形分布函数的左、右宽度。

2.5 构造监测指标与健康状况之间函数关系

由于确定性函数无法描述各监测指标与盾构隧道结构健康状况之间的复杂多变映射关系,容易导致不准确的评价结果,而可能性集值映射可以弥补确定性函数的不足,来描述两类不确定集合之间的复杂映射关系。因此,本文利用可能性集值映射来构造各监测指标可能性分布与健康状况等级可能性分布之间的函数关系。具体步骤如下:

(1)设 (X, P) 和 (Y, R) 分别为监测指标和盾构隧道结构健康状况信息的两个模糊场,两者对应的可能性分布分别为 π_p 和 π_R 。

(2)确定各监测指标与盾构隧道结构健康状况信息的落影。

$$\begin{cases} \lambda \mapsto P_\lambda \\ \alpha \mapsto R_\alpha \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_λ 为监测指标信息的落影, $\lambda \in [0, 1]$ 为监测指标信息的截集水平; R_α 为盾构隧道健康状况信息的落影; $\alpha \in [0, 1]$ 为盾构隧道健康状况信息的截集水平。

(3)依据扩张原理,将点的映射扩展到模糊集合映射 ζ ,在 $Z: X=Y$ 轴上得到监测指标与健康状况的联合落影 $(\lambda, \alpha) \quad (P_\lambda^c \times Y) \cup (P_\lambda \times R_\beta)$ 。对 $\forall x_0 \in X$, 盾构隧道结构监测指标与健康状况等级之间的可能性集值映射为^[19]:

$$\pi_{ij}^s = \pi_{p \rightarrow R}(x_0, y) = (1 - P(x_0)) \vee P(x_0)R(y) \quad (11)$$

式中: \vee 表示取大运算符号, $P(x_0) = \{\pi_p(x_0) | x_0 \in P(\lambda, \alpha)\} = \{(\pi_p(x_0) | x_0 \in P_\lambda)\}$ 表示

某个监测指标的可能性分布; $R(y) = \{\pi_R(y) | y \in R(\lambda, \alpha)\} = \{(\pi_R(y) | y \in R_\alpha)\}$ 表示健康状况等级可能性分布; x_0 和 y 均为归一化后相应的取值。

2.6 构造损益矩阵

构造损益矩阵前需要判断收益或损失。即通过找到 π_{ij}^s 可能度为 1 的健康状态值 \bar{G}_{ij} , 并与健康标准值 \bar{E}_{ij} 比较, 当 $\bar{G}_{ij} < \bar{E}_{ij}$, 则结构趋于安全, 表示收益; 当 $\bar{G}_{ij} \geq \bar{E}_{ij}$, 则结构趋于危险, 表示损失。收益值与损失值计算公式为

$$D_{ij} = \begin{cases} 1/(\pi_{ij}^s \times \pi_{ij}^r) - \text{收益} \\ -1/(\pi_{ij}^s \times \pi_{ij}^r) - \text{损失} \end{cases} \quad (12)$$

通过上式即可构造出损益矩阵为 $(D_{ij})_{m \times n}$ 。

2.7 构造权重函数

为了符合实际评判思维, 基于梯形模糊数^[20]的监测指标权重确定方法, 采用的梯形模糊数标度等级赋值如表 2 所示, 计算过程如下:

表 2 指标影响性大小量化表

Table 2 Index impact size quantization table

两指标 i 与 j 影响性比较	量化结果
i 对 j 无影响	$\tilde{5}/\tilde{5} = (1, 1, 1, 1)$
i 对 j 较少影响	$\tilde{6}/\tilde{4} = (1, 11/9, 13/7, 7/3)$
i 对 j 一般影响	$\tilde{7}/\tilde{3} = (3/2, 13/7, 3, 4)$
i 对 j 较大影响	$\tilde{8}/\tilde{2} = (7/3, 3, 17/3, 9)$
i 对 j 很大影响	$\tilde{9}/\tilde{1} = (4, 17/3, 9, 9)$

说明: 梯形模糊数 $\tilde{1}$ 对应的隶属度函数为 $(1, 1, 3/2, 2)$, 梯形模糊数 \tilde{x} 对应的隶属度函数为 $(x-1, x-1/2, x+1/2, x+1)$, $x=2$ 到 8, 梯形模糊数 $\tilde{9}$ 对应的隶属度函数为 $(8, 17/2, 9, 9)$; 对任意两个的梯形模糊数 $A \cdot 1 = (l_1, m_1, n_1, s_1)$ 和 $A \cdot 2 = (l_2, m_2, n_2, s_2)$, 且 $A \cdot 1 > 0, A \cdot 2 > 0$, 则 $A \cdot 1/A \cdot 2 = (l_1/s_2, m_1/n_2, n_1/m_2, s_1/l_2)$ 。

(1) 将 K 个专家对同一指标集进行两两比较, 分别给出判断矩阵 $R^{(e)} = (r_{ij}^{(e)})_{n \times n}$, 其中 $(r_{ij}^{(e)})_{n \times n} = (l_{ij}^{(e)}, m_{ij}^{(e)}, n_{ij}^{(e)}, s_{ij}^{(e)})$; e 表示第 e 位专家, $e > 1$ 。采用梯形重心公式把梯形模糊数判断矩阵转化为一般矩阵, 并对判断矩阵进行一致性检验。满足一致性要求后, 综合所有专家的偏好信息, 计算如下。

$$r_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, n_{ij}, s_{ij}) = \frac{1}{Y} \times (r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(e)}) =$$

$$\frac{1}{Y} \times \left(\sum_{e=1}^Y l_{ij}^{(e)}, \sum_{e=1}^Y m_{ij}^{(e)}, \sum_{e=1}^Y n_{ij}^{(e)}, \sum_{e=1}^Y s_{ij}^{(e)} \right) \quad (13)$$

(2) 计算模糊评价值 $v \cdot i$ 。

$$v \cdot i = (\alpha_i \delta^{-1}, \beta_i \gamma^{-1}, \gamma_i \beta^{-1}, \delta_i \alpha^{-1}) \quad (14)$$

$$\text{式中: } \alpha_i = \left(\prod_{j=1}^n l_{ij} \right)^{1/n}, \alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i; \beta_i = \left(\prod_{j=1}^n m_{ij} \right)^{1/n},$$

$$\beta = \sum_{i=1}^n \beta_i; \gamma_i = \left(\prod_{j=1}^n n_{ij} \right)^{1/n}, \gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i; \delta_i = \left(\prod_{j=1}^n s_{ij} \right)^{1/n},$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i。$$

(3) 计算各监测指标模糊评价值 $v \cdot i$ 的期望值 $E(v \cdot i)$, 期望值越大, 则对应的指标越重要。

$$E(v \cdot i) = \frac{l_i + m_i + n_i + s_i}{4} \quad (15)$$

(4) 将式(15)采用归一化处理, 计算得到各监测指标的权重。

$$w_{ij} = \frac{E(v \cdot i)}{\sum_{i=1}^n E(v \cdot i)} \quad (16)$$

(5) 结合前景理论中的权重计算方法计算各指标对同一健康状况等级的影响程度。计算过程如下:

$$w'(w_{ij}) = \begin{cases} \frac{(w_{ij})^\gamma}{((w_{ij})^\gamma + (1 - w_{ij})^{1/\gamma})}, D_{ij} > 0 \\ \frac{(w_{ij})^\delta}{((w_{ij})^\delta + (1 - w_{ij})^{1/\delta})}, D_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: γ, δ 分别为权重函数的弯曲程度参数, 文献[17]通过大量实验得出中国情境下 γ, δ 取值分别为 0.55, 0.49。通过归一化处理, 得到不同指标对同一健康状况等的权重。

$$W' = \frac{w'(w_{ij})}{\sum_{i=1}^n w'(w_{ij})} \quad (18)$$

2.8 计算综合前景价值

结合公式(8)和公式(12)计算出价值函数 $v(D_{ij})$, 利用下式计算出综合前景价值 V_i 。

$$V_i = \sum_{j=1}^n v(D_{ij}) W' \quad (19)$$

将计算得到的不同健康状况等级下综合前景价值进行排序, 选取最小前景价值所对应的健康状况等级即为盾构隧道结构健康状况等级。

3 实例分析

以某市软土地区地铁运营区间盾构隧道结构为例来阐述该方法的实用性, 该隧道的工程概况及

监测数据参见文献[12]。软土盾构隧道结构损伤主要是因为纵向不均匀沉降或横向收敛变形超过地铁规定限值引起结构受力集中;螺栓进入塑性状态引起结构力学性能下降;相对弯曲过大引起错台等。为了全面反映盾构隧道结构健康状况,本文选取的监测指标为:纵向曲率半径 R (单位:1/m)、相对弯曲 Q 、横断面直径变化量 D (单位:mm)、渗漏

量 S (单位:(L/m^2)/24h)、渗漏范围 F 。这些指标反映了对隧道承载能力极限状态和正常使用极限状态影响,且考虑了环缝、纵缝的张开度^[12]。

将收集得到的专家对不同健康状况等级下各指标的期望值,指标期望均值如图4所示,并结合本文2.3节内容,确定了不同健康状况等级下各个指标参考分布,如图5所示。

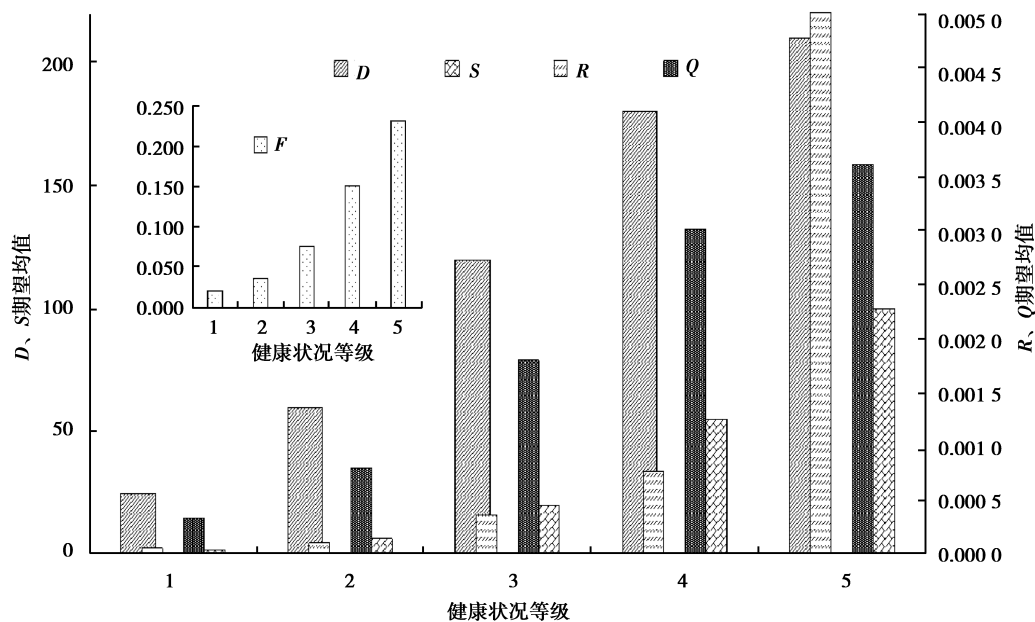
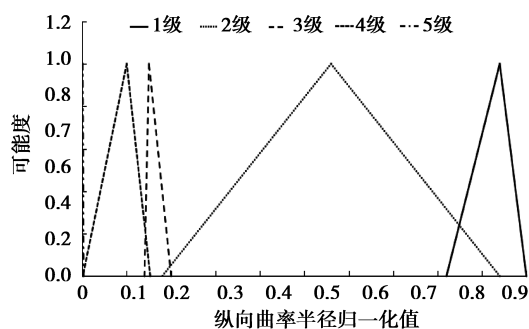
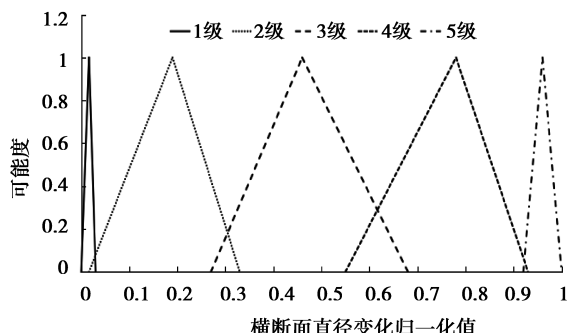


图4 各指标期望均值

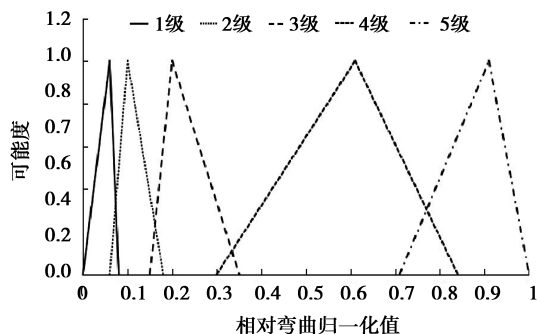
Fig. 4 The expected mean value of each index



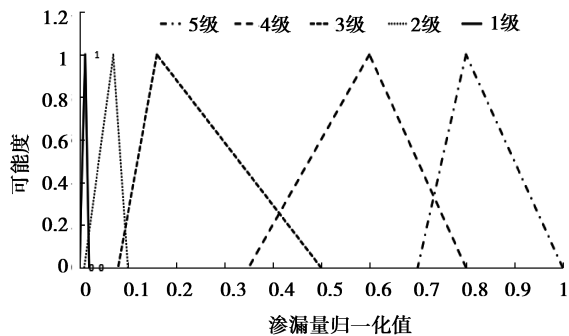
(a) 纵向弯曲半径对各等级的参考分布



(c) 横断面直径变化对各等级的参考分布



(b) 相对弯曲对各等级的参考分布



(d) 渗漏量对各等级的参考分布

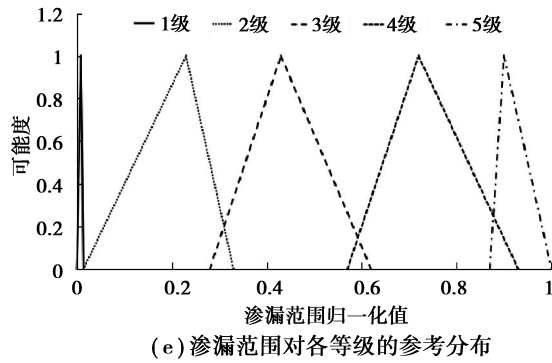


图5 各健康状况等级对应各指标的参考分布

Fig. 5 Reference distribution of each index of health status level

将盾构隧道监测反馈的各指标的数据结果进行整理,并利用第2.4节内容,构造出各指标监测结果的可能性分布,如图6所示。

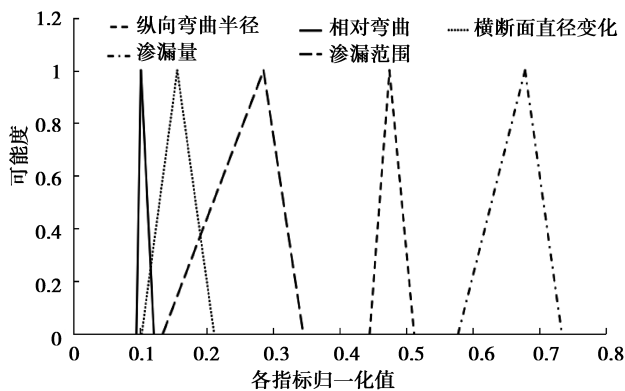


图6 各指标监测结果的可能性分布

Fig. 6 The probability distribution of monitoring results of each index

结合第2.2节提出的盾构隧道结构健康状况等级可能性分布及各指标监测结果的可能性分布,利用式(11)建立监测指标与健康状况之间函数关系,得到 π_{ij}^s ,并通过对比 π_{ij}^s 和 π_{ij}^r ,确定收益或损失。再利用式(12)构造出损益矩阵 D_{ij} ,如表3所示。

表3 损益矩阵

Table 3 Profit and loss matrix

健康状况等级	R	Q	D	S	F
1	3.451 9	-3.231 4	3.923 1	-3.931	3.629 1
2	-2.345 8	-2.693 1	2.921 1	2.231 9	1.693 4
3	4.323 1	4.508 1	-4.805 6	4.699 6	-4.098 4

续表3

健康状况等级	R	Q	D	S	F
4	5.632 9	5.349 6	5.693	-5.933 4	-5.194 8
5	-7.742 8	6.702 4	-7.056 8	7.376 4	6.907 7

将表3损益矩阵代入式(8),计算出价值函数,价值函数矩阵为:

$$v(D_{ij}) =$$

4.477 7	-7.443 2	5.227 5	-9.090 2	4.757 3
-5.368 8	-6.180 7	3.658 6	2.641 8	1.891 5
5.879 1	6.184 9	-11.157 5	6.504 2	-9.485 3
8.098 1	7.608 0	8.202 8	-13.834 1	-12.079 9
-18.149 2	9.994 0	-16.510 6	11.222 6	10.365 6

收集专家对各监测指标权重的打分,结合第2.7节内容,得到不同指标对同一健康状况等的权重矩阵,如表4所示。

表4 权重矩阵

Table 4 Weight matrix

健康状况等级	R	Q	D	S	F
1	0.231 2	0.206 8	0.214 2	0.172 4	0.175 4
2	0.229 8	0.192 5	0.201 8	0.185 3	0.190 6
3	0.218 7	0.187 9	0.198 2	0.190 9	0.204 3
4	0.207 3	0.181 9	0.197 1	0.195 7	0.218 0
5	0.193 8	0.178 2	0.192 3	0.210 3	0.225 4

将价值函数矩阵和权重矩阵代入到公式(19),得到盾构隧道结构各健康状况等级的综合前景值 V_i 分别为: $V_1=-0.117 0$, $V_2=-0.835 2$, $V_3=-0.458 7$, $V_4=0.661 3$, $V_5=0.214 9$ 。根据到的综合前景价值对健康状况等级进行排序,依次为 $V_4>V_5>V_1>V_3>V_2$,则依据最小前景价值为盾构隧道结构健康状况等级的原则,确定该区间盾构隧道结构健康状况等级为2级,结构轻微受损,需要加强管理及巡视检查。

4 结论

(1)由于人的有限理性及监测指标与盾构隧道结构健康状况之间的复杂多变映射关系。结合可能性理论及前景理论,提出了一种运营地铁盾构

隧道结构健康状况评价新方法。通过对软土地铁运营盾构隧道结构健康状况的评价,得到了该隧道的健康状况等级,与文献[12]得到的结果一致,表明该方法的实用性。

(2)由于专家认识、监测人员能力及设备的差异,得到的信息存在模糊性和不确定性,基于可能性理论,可以构造信息的可能性分布函数来表征模糊的信息。

(3)可能性集值映射为集合与集合间映射关系的建立提供了新方法,解决了确定性函数关系在描述不确定性信息间复杂多变性关系时无法随信息的变化而变化的问题。

(4)该方法的评价过程可实现程序化,有利于今后运营地铁盾构隧道健康状况的动态控制。

参考文献(References)

- [1] 张新金,刘维宁,路美丽,等. 北京地铁盾构法施工问题及解决方案[J]. 土木工程学报,2008,41(10):93-99. (Zhang Xinjin, Liu Weining, Lu Meili, et al. Problems and solutions of shield tunneling for Beijing metro[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 93-99. (in Chinese))
- [2] 徐顺明. 广州轨道交通盾构隧道施工控制测量的研究[D]. 武汉:武汉大学,2011. (Xu Shunming. On the control survey in the shield tunnel construction of Guangzhou rail traffic[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (in Chinese))
- [3] 傅鹤林,黄震,黄宏伟,等. 基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J]. 工程科学学报,2017,39(5):794-801. (Fu Helin, Huang Zhen, Huang Hongwei, et al. Health diagnosis method of shield tunnel structure based on cloud theory[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(5): 794-801. (in Chinese))
- [4] 王明卓,黄宏伟. 基于横向收敛变形的盾构隧道风险评价研[J]. 现代隧道技术,2014,51(增1):5-9. (Wang Mingzhuo, Huang Hongwei. Risk assessment of shield tunnel based on horizontal convergence [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(Supp.1): 5-9. (in Chinese))
- [5] 彭铭,黄宏伟,胡群芳,等. 基于盾构隧道施工监测的动态风险数据库开发[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(7):1255-1260. (Peng Ming, Huang Hongwei, Hu Qunfang, et al. A risk database designed for dynamic risk management in shield tunneling from monitoring date[J]. Chinese Journal Underground Space and Engineering, 2007, 3(7): 1255-1260. (in Chinese))
- [6] 孙可,张巍,朱守兵,等. 盾构隧道健康监测数据的模糊层次分析综合评价方法[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(6):769-776. (Sun Ke, Zhang Wei, Zhu Shoubing, et al. Fuzzy analytical hierarchy process comprehensive evaluation method for health monitoring data of shield tunnels[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 769-776. (in Chinese))
- [7] 胥犇,王华牢,夏才初. 盾构隧道结构病害状态综合评价方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(1):201-207. (Xu Ben, Wang Hualao, Xia Caichu. Study on comprehensive evaluation of shield tunnel structural defects[J]. Chinese Journal Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 201-207. (in Chinese))
- [8] 杨潇,李翔宇,朱宝林. 基于长期沉降运营地铁隧道健康诊断[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(1):49-55. (Yang Xiao, Li Xiangyu, Zhu Baolin. Research on the health diagnosis of metro tunnel based on the long-term settlement [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2014, 30(1): 49-55. (in Chinese))
- [9] 孔祥兴,夏才初,仇玉良,等. 基于可拓学理论的盾构隧道结构健康诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(11):1610-1615,1698. (Kong Xiangxing, Xia Caichu, Qiu Yuliang, et al. Health diagnosing method for shield tunnel based on extension theory[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011, 39(11): 1610-1615, 1698. (in Chinese))
- [10] 刘胜春,张顶立,黄俊,等. 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(4):741-748. (Liu Shengchun, Zhang Dingli, Huang Jun, et al. Research and design on structural health monitoring system for large-scale shield tunnel [J]. Chinese Journal Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 741-748. (in Chinese))
- [11] 刘涛. 既有盾构隧道结构性能评价研究[D]. 上海:同济大学,2008. (Liu Tao. Evaluation of existing shield tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [12] 叶耀东. 软土地区运营地铁盾构隧道结构变形及健康诊断方法研究[D]. 上海:同济大学,2007. (Ye Yaodong. Research on deformation and method of health diagnose of operational subway structures in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

- Chinese))
- [13] Gaines B R, Kohout L. Possible automata[A] // Proc. of Int. Symp. on Multiple-Valued Logic, Uncertainty of Indiana[C]. Bloomington, 1975.
- [14] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(1): 3-28.
- [15] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263-292.
- [16] Tversky A, Daniel K. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.
- [17] 曾建敏. 实验检验累积前景理论[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 44-47, 65. (Zeng Jianmin. An experimental test on cumulative prospect theory [J]. Journal of Jinan University (Natural Science), 2007, 28(1): 44-47, 65. (in Chinese))
- [18] Krohling R A, Souza T T M D. Combining prospect theory and fuzzy numbers to multi-criteria decision making[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(13): 11487-11493.
- [19] 史冬梅. 基于可能性集值映射的尾矿风险评估技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015. (Shi Dongmei. Research on tailings dam risk assessment based on possibility of set-valued mapping [D]. Taiyuan: North Central University, 2015. (in Chinese))
- [20] 刘雨华. 基于梯形模糊数的指标权重确定方法的应用研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2009, 1(4): 369-372. (Liu Yuhua. Study on application of the method of determining index weights based on trapezoidal fuzzy numbers [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 1(4): 369-372. (in Chinese))

(上接第 1392 页)

- [2] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中多撑或多锚式地下连续墙的增量计算法[J]. 建筑结构学报, 1994(8): 28-32. (Yang Guanghua, Lu Peiyan. Incremental calculation method of multi-support or multi-anchor underground continuous wall in excavation of deep foundation pit[J]. Journal of Building Structures, 1994(8): 28-32. (in Chinese))
- [3] 杨光华. 深基坑开挖中多支撑支护结构的土压力问题[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 113-115. (Yang Guanghua. The earth pressure problems for the multi-braced retaining structure of deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 113-115. (in Chinese))
- [4] 朱合华, 杨林德, 桥本正. 深基坑工程动态施工反演分析与变形预报[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 97-100. (Zhu Hehua, Yang Linde, Qiao Benzeng. Back analysis of construction of deep excavation and deformation prediction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 97-100. (in Chinese))
- [5] 芦森. 分步开挖和逐级加撑的地铁车站深基坑围护结构性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (Lu Seng. Research on retaining structure characteristics of deep foundation pit for subway stations constructed by step excavation and progression [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [6] 应捷. 考虑土-结构相互作用的深基坑弹性地基有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003. (Ying Jie. Finite element analysis to deep excavation considering of soil-structure interaction [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. (in Chinese))
- [7] 叶新平. 基于杆系有限元在深基坑支护中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(4): 55-58. (Ye Xinping. Application of deep foundation pit support technology based on finite element method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(4): 55-58. (in Chinese))
- [8] 赵延林. 深基坑稳定与变形的可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012. (Zhao Yanlin. Reliability analysis of stability and deformation in deep foundation pit [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese))
- [9] 余新建. 基坑单支撑结构可靠性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. (Yu Xinjian. Probability of single strut retaining structure in foundation pit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))
- [10] Rackwitz R, Fiessler B. Structural reliability under combined random load sequences [J]. Computer and Structures, 1978, 9(5): 489-494.