

基于云理论的隧道结构健康诊断方法

傅鹤林¹⁾, 黄震¹⁾✉, 黄宏伟²⁾, 张加兵¹⁾, 尹光明³⁾

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 3) 长沙市轨道交通集团有限公司, 长沙 410133
✉ 通信作者, E-mail: hzcslg@163.com

摘要 隧道健康状态诊断过程作为一个模糊系统,具有随机性和模糊性的特点。传统的隧道结构健康诊断方法无法妥善地将系统的模糊性和随机性关联在一起。基于此,针对隧道结构健康状态诊断系统的模糊性和随机性特点,提出了基于云理论的隧道结构健康状态诊断方法。首先,建立反映隧道结构健康状况等级评语集的正态云模型。然后,依据逆向云发生器原理,将隧道结构健康状态指标的监测数据的归一化结果值转化为隶属度云模型。将健康状态指标的重要性语言值转化为权重云,用于表征各健康状态指标的重要程度。最后,运用云理论的计算方法对隧道结构健康状态等级进行诊断,得到健康状态等级诊断结果的云模型。应用云模型的改进方法,对某市地铁2号线盾构隧道结构健康状态进行了诊断,极大提高了诊断结果的可视化和鲁棒性。

关键词 隧道工程; 健康诊断; 云理论; 健康状态指标; 正态云; 模糊系统

分类号 U25

Health diagnosis method of shield tunnel structure based on cloud theory

FU He-lin¹⁾, HUANG Zhen¹⁾✉, HUANG Hong-wei²⁾, ZHANG Jia-bing¹⁾, YIN Guang-ming³⁾

1) School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China
2) College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
3) Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha 410133, China
✉ Corresponding author, E-mail: hzcslg@163.com

ABSTRACT The process of diagnosing tunnel health as a fuzzy system has the characteristics of randomness and fuzziness. Traditional risk assessment methodologies do not account for the fuzziness and randomness of risk. Therefore, using cloud theory, a new comprehensive risk assessment model was proposed for shield tunnels aimed at the fuzziness and randomness of health diagnosis system of shield tunnel structure. Firstly, the normal cloud model of evaluation terms is constructed, which reflects the health status of the tunnel structure. Then, the normalized value of monitoring data of tunnel structural health status index is transformed into membership cloud model by the principle of the reverse cloud generator. And the importance linguistic value of the health status index is transformed into the weight of the cloud which is used for characterization importance of health index. Finally, the cloud theory computing method is used to diagnose the health status of the tunnel structure, and the cloud model of health status is obtained. The improved method of cloud model was applied to diagnose the structural health status of shield tunnel of Metro Line 2, and this method greatly improves the visualization and robustness of the diagnosis results.

KEY WORDS tunnel engineering; health diagnosis; cloud theory; health state index; normal cloud; fuzzy system

作为一项重要的基础设施,隧道工程在交通运输、管道运输、地下排水、区域经济等方面发挥着巨大效

收稿日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51538009); 国家自然科学基金资助项目(51578550); 研究生自主探索创新资助项目(2017zzts152)

益^[1]。然而,由于隧道工程所处的环境极为复杂,容易受到施工条件、自然环境及人为因素等方面的综合影响,严重威胁着隧道工程的服役安全^[2]。因此,需要采取科学合理的隧道健康状态诊断方法来判定隧道的安全状态及指导养护维修工作,隧道结构健康状态的诊断方法自然成为一项极为重要的研究内容。

近年来学者们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,王卓明和黄宏伟^[3]以及彭铭等^[4]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^[5]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。胥霖等^[6]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^[7]利用长期沉降数据为基础,采用非均匀有理 B 样条法对上海某区间盾构隧道曲率进行计算,并以此作为盾构隧道健康诊断依据。孔祥兴等^[8]提出了基于可拓学理论的盾构隧道的结构健康状况诊断方法。刘胜春等^[9]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^[10]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^[11]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。

盾构隧道健康状态诊断过程作为一个模糊系统,具有随机性和模糊性的特点,上述健康诊断方法无法妥善的将系统的模糊性和随机性关联在一起,导致隧道健康状态诊断结果的准确性降低。云理论作为一种用来描述事物定性定量之间不确定性关系转化的数学工具,其主要特点在于能够同时反映描述事物的随机性和模糊性,并构成定性定量之间的映射关系,因而可用于描述模糊、信息不完整的不确定性问题。目前,该理论已广泛运用于电力系统评估、装备保障体系性能评估、环境质量评估等领域^[12-14],并显示出良好的发展前景。因此,本文在隧道结构健康状态指标的

监测数据的基础上,提出基于云理论的隧道健康状态诊断模型,利用云理论的计算方法对隧道结构健康状态进行诊断。

1 云理论

云理论是由李德毅院士^[15-17]在传统的模糊集理论和概率统计学的基础上提出来的,是用于研究不确定问题的数学工具。它实现了定性概念与定量数值之间的转换,同时兼顾了事物的模糊性和随机性特点。

1.1 云的数字特征

设 U 为精确数值组成的定量论域, C 为论域 U 上的定性概念,对于任意的元素 x 都存在稳定倾向的随机数 $u(x) \in [0, 1]$ 与之对应,称之为 x 对定性概念 C 的隶属度。隶属度 u 在论域 U 上的分布形成隶属云 $C(x)$,而 $[x, u(x)]$ 构成一个云滴。

云理论通过引入期望值 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 来表示云的数字特征。数字特征将模糊性和随机性关联起来,反映了事物定性概念的定量特点,建立了定性概念与定量数值之间的转换模型。其中,期望值 E_x 是论域 U 上最能够代表模糊定性概念 C 的点值,表示模糊概念 C 在论域中的中心值,是隶属云的中心分布;熵 E_n 是对定性概念 C 不确定性程度的度量,它的大小反映了定性概念 C 的云滴出现的随机概率和论域 U 中可被定性概念 C 接受的云滴范围,熵值越大,随机性和模糊性越大,反之亦然;超熵 H_e 是熵的不确定性度量,反映了云的离散程度和云厚度,超熵由熵的模糊性和随机性决定,反映了研究对象的随机性和模糊性之间的关联性。

1.2 云的运算法则

设给定的论域 U 上的云 $C_1(E_{x1}, E_{n1}, H_{e1})$ 、 $C_2(E_{x2}, E_{n2}, H_{e2})$, C_1 与 C_2 的算术运算结果为 $C(E_x, E_n, H_e)$ 。 C_1 与 C_2 的算术运算法则如表 1 所示。

表 1 云的运算法则

Table 1 Cloud computing rules

算法	E_x 的法则	E_n 的法则	H_e 的法则
+	$E_{x1} + E_{x2}$	$\sqrt{E_{n1}^2 + E_{n2}^2}$	$\sqrt{H_{e1}^2 + H_{e2}^2}$
-	$E_{x1} - E_{x2}$	$\sqrt{E_{n1}^2 + E_{n2}^2}$	$\sqrt{H_{e1}^2 + H_{e2}^2}$
×	$E_{x1} \times E_{x2}$	$E_{x1} E_{x2} \sqrt{\left \frac{E_{n1}}{E_{x1}} \right ^2 + \left \frac{E_{n2}}{E_{x2}} \right ^2}$	$E_{x1} E_{x2} \sqrt{\left \frac{H_{e1}}{E_{x1}} \right ^2 + \left \frac{H_{e2}}{E_{x2}} \right ^2}$
÷	$\frac{E_{x1}}{E_{x2}}$	$\frac{E_{x1}}{E_{x2}} \sqrt{\left \frac{E_{n1}}{E_{x1}} \right ^2 + \left \frac{E_{n2}}{E_{x2}} \right ^2}$	$\frac{E_{x1}}{E_{x2}} \sqrt{\left \frac{H_{e1}}{E_{x1}} \right ^2 + \left \frac{H_{e2}}{E_{x2}} \right ^2}$

1.3 正态云模型

目前,云理论的分布形态已经发展出三角形云、矩形云、梯形云、正态云等,其中正态云模型由于其独特的数学特性和普适性而应用广泛^[18],本文采用正态云

分布模型进行评价。将正态云模型用 (E_x, E_n, H_e) 表示,图 1 为一维正态云模型示意图,特征参数含义如图 1 所示。

为实现定性概念的定量化表示,本文采用正向正

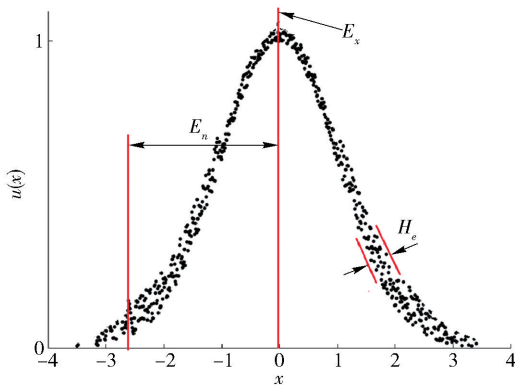


图 1 正态云图

Fig. 1 Typical cloud image

态云云发生器建立定量与定性之间的映射关系. 具体算法如下.

(1) 生成 1 个 E_n 为期望值, H_e 为标准差的一个正态随机数 E'_n .

(2) 生成 1 个 E_x 为期望值, E'_n 为标准差的一个正态随机数 x , x 为论域空间中的一个云滴.

(3) 计算 $y = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2(E'_n)^2}}$, 令 y 为 x 属于定性概念 C 的确定度.

(4) 重复计算上述步骤, 直至生成 N 个云滴为止.

2 基于云理论隧道结构健康诊断模型

2.1 隧道结构多层次健康指标体系

对隧道结构健康状况的诊断, 首先需要揭示其健康损伤因子来源. 由于不同隧道的结构特点及周边环境作用机理不同, 对结构产生的损伤因子不尽相同, 需要将损伤因子进一步划分为可以反映结构健康状况的指标. 因此, 采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 将隧道结构健康状态分解为不同层次的健康状指标来进行由下向上逐步分析.

2.2 隧道结构健康状况等级正态云模型

隧道结构健康状态等级是确定隧道健康状况的标准, 也是指导隧道运营安全及养护维修的决策依据, 工程上通常采用表 2^[11] 所示的健康状态等级对隧道结构健康进行诊断. 由于隧道风险等级划分具有一定的模糊性. 如果采用传统的定量方法对这些定性指标进行描述, 消除了定性指标的模糊性, 不仅引起评价结果的不客观性, 而且降低了评判过程的灵活性. 因此, 本文基于云理论方法, 将健康状态等级评价集转化为正态云模型来表示, 其论域为 $[x_{\min}, x_{\max}]$. 针对隧道结构健康状态等级划分为“1 级”、“2 级”、“3 级”、“4 级”、“5 级”, 并采用黄金分割法将 5 个级别的定性概念转化为 5 云模型. 步骤如下.

设中间云为 $C_0(E_{x0}, E_{n0}, H_{e0})$, 其左右相邻的云分别为 $C_{-1}(E_{x-1}, E_{n-1}, H_{e-1}), C_{+1}(E_{x+1}, E_{n+1}, H_{e+1}), C_{-2}$

$(E_{x-2}, E_{n-2}, H_{e-2}), C_{+2}(E_{x+2}, E_{n+2}, H_{e+2})$. 各云的数字特征算法如下

$$\begin{cases} E_{x0} = (x_{\max} + x_{\min})/2, \\ E_{x-2} = x_{\min}, \\ E_{x+2} = x_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{x-1} = E_{x0} - 0.382(x_{\max} + x_{\min})/2, \\ E_{x+1} = E_{x0} + 0.382(x_{\max} + x_{\min})/2. \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{n-1} = E_{n+1} = 0.382(x_{\max} - x_{\min})/6, \\ E_n = 0.618E_{n+1}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_{n-2} = E_{n+2} = E_{n+1}/0.618. \\ H_{e-1} = H_{e+1} = H_{e0}/0.618, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H_{e-2} = H_{e+2} = H_{e+1}/0.618. \end{cases}$$

定义有效论域为 $[0, 1]$, 令 $H_{e0} = 0.005$, 得到健康状态等级“1 级”、“2 级”、“3 级”、“4 级”、“5 级”所对应的云模型, 结果见表 2, 图 2 为隧道健康状态等级所对应的正态云图.

表 2 隧道结构健康状况等级云模型

Table 2 Cloud model of tunnel structure health status level

等级	描述	云模型
1 级	健康	(0.000, 0.104, 0.013)
2 级	轻微受损	(0.309, 0.064, 0.008)
3 级	中度受损	(0.500, 0.039, 0.005)
4 级	严重受损	(0.691, 0.064, 0.008)
5 级	极端受损	(1.000, 0.104, 0.013)

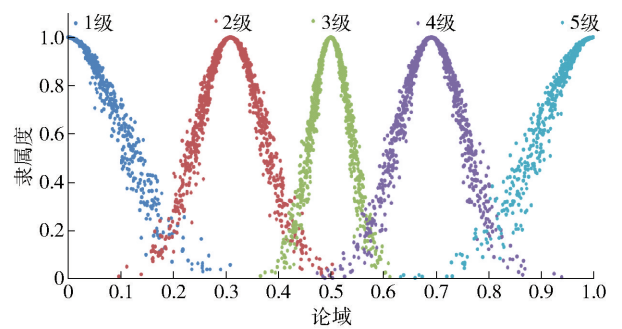


图 2 隧道健康状态等级正态云图

Fig. 2 Typical cloud images of tunnel health status level

2.3 隧道结构健康指标的权重云模型

目前, 指标权重确定的方法主要有两类, 一类是以专家打分为主的主观赋权法, 另一类是以数据结果为依据的客观赋权法, 这两类方法各有优缺点, 由于人的自身偏好差异, 主观赋权法存在一定的随意性, 而客观赋权法得到的权重存在与实际不符的现象. 由于在实际评估中通常难以准确的得到指标的权重量化值, 因此, 本文采用语言评价价值来反映指标的重要程度, 这种方法既反映了人类思维的模糊性、不确定性和复杂性, 也消除了主客观赋权法的随意性以及与实际不符的问题.

假设用于表征指标重要程度的论域为 $[0, 1]$, 依据专家对各个指标重要程度的语言评价及其对应的论域转化为相应的权重云模型^[19]. 表3中列出了指标评价语言值及其对应的权重云模型, 图3为云模型表示的指标权重等级图.

表3 评价语言及权重云模型

Table 3 Evaluation language and weighted cloud model

评价语言值	权重云
极重要	(1.000, 0.040, 0.003)
较重要	(0.776, 0.069, 0.005)
一般	(0.515, 0.045, 0.005)
次重要	(0.255, 0.068, 0.005)
不重要	(0.000, 0.032, 0.003)

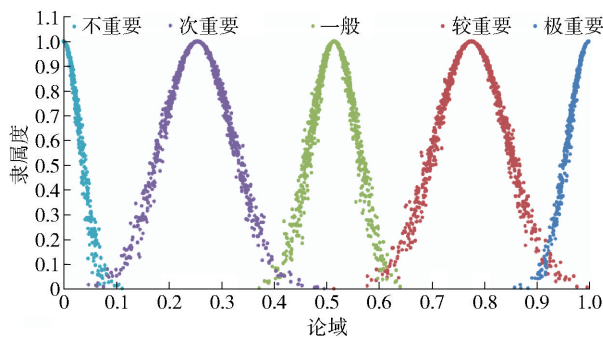


图3 权重云模型

Fig. 3 Weighted cloud model

2.4 健康状态指标监测结果的隶属度云模型

对隧道结构健康状态指标进行长期监测, 但由于各个健康状态指标的单位量纲、度量方法、取值范围不统一, 因此, 采用极差变换方法对监测结果进行量纲归一化处理, 得到各健康状态指标的取值范围为 $[0, 1]$.

为了得到健康指标监测结果的隶属度云模型, 依据逆向云发生器的原理, 将各个健康状态指标的监测结果转化为其对应的云模型. 具体步骤如下.

(1) 计算健康状态指标的期望值 E_x , 得到云模型的云滴均值.

$$E_x = \bar{\lambda} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (4)$$

(2) 计算熵 E_n .

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\lambda_i - E_x|. \quad (5)$$

(3) 计算超熵 H_e .

$$H_e = S. \quad (6)$$

式中, λ 为健康状态指标的监测数据结果, $i = 1, 2, \dots, n$ 表示健康状态指标的监测数据个数. S 为常数, 可结合相应指标的模糊性和随机性进行调整, 本文令 $H_e = 0.005$ ^[20]. 健康指标监测结果的云模型, 将健康指标的模糊性和随机性两者综合考虑, 反映了定性与定量之

间的一对多的映射关系. 利用云的期望值、熵、超熵数字特征来表征健康状态指标的数学特点, 充分考虑了健康状态指标的随机性和离散性特点.

2.5 隧道结构健康状态诊断结果

依据隧道结构健康状态诊断指标体系, 结合表1中的云计算法则. 采用加权平均法将底层评估结果传递给上一层, 得出第 i 层的综合评价云模型结果集 $A_i = (a_1, a_2, \dots, a_k)$, 其中 a_k 为第 i 层中第 k 个指标的云模型, 计算如下.

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^n a_{kj} W'_{kj}}{\sum_{j=1}^n W'_{kj}}. \quad (7)$$

式中, a_{kj} 为第 i 层中第 k 个指标的第 j 个子指标的云模型; W'_{kj} 为第 i 层中第 k 个指标的第 j 个子指标的权重云模型.

3 应用实例及验证分析

某市地铁2号线一期工程于2009年开工建设, 采用盾构法施工. 2013年年底试运行, 贯通东西, 连接城市“一主、两次”, 自西向东连接了河西新城、主城区、火车站、火车南站, 是该市轨道交通东西向的核心线路, 对应于该市东西向客流量最大、公交压力最大的交通走廊.

地铁2号线, 横穿江河、高速公路、城市主干道、城市商业圈、重要建筑物等, 串连了城市东西向3大客运枢纽(汽车西站、火车站、火车南站). 此外, 沿线水文地质条件较为复杂, 根据全线水文地质调查结果: 以江为界, 东岸主要为白垩纪红层, 其工程性状较差, 多为极软岩-软岩; 而主要分布在西岸及伍家岭以北区域的震旦纪板岩, 可分为砂质结构和泥质结构两类, 前者强度与红层相类似, 后者性质较前者好, 但裂隙甚为发育, 多系较软岩-较坚硬岩. 部分区域存在岩溶发育. 地铁沿线的地下水主要为赋存于砂砾层中的潜水, 即弱承压水, 其渗透性强弱因地而异, 灰岩及板岩中存在基岩裂隙水.

由于地铁2号线服役环境的错综复杂, 隧道结构安全受到施工误差、材料劣化、外界环境、水文地质条件等因素的影响. 为保证地铁2号线的运营安全并且指导养护维修工作, 定期对隧道结构健康状态进行安全诊断是很有必要的.

3.1 确定健康状态监测指标体系

本着科学性、独立性、可测性、完备性、层次性和时效性的原则, 结合工程实际情况, 考虑施工误差、材料劣化、外界环境等因素对隧道结构的影响, 采用层次分析法将隧道结构健康状态分解为不同层次的健康状况指标进行由下向上逐步分析. 图4为隧道多层次多指



图 4 隧道健康状况评价指标系统

Fig. 4 Evaluation index system for determining tunnel health status

标健康状况评价指标系统。

3.2 确定指标监测结果的云模型

针对该运营地铁实际情况,采用监测仪器设备对到隧道盾构区间段进行长期监测和统计。发现该盾构隧道结构病害主要为结构渗漏水、管片裂损,如图 5 所示。选取上行侧某盾构区间段监测结果进行分析,采用极差变换方法对监测结果进行量纲归一化处理,并利用 2.4 节中监测结果的云模型转化方法,将结果健康状态指标的监测结果转化为其对应的云模型,转化结果见表 4。

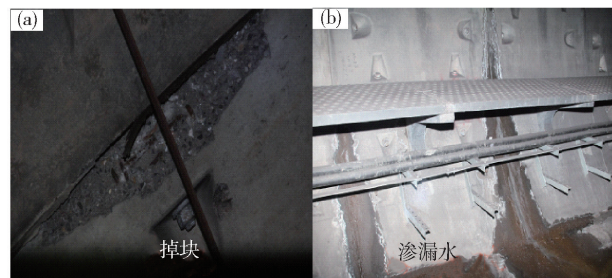


图 5 隧道结构主要病害。(a) 管片裂损;(b) 结构渗漏水

Fig. 5 Main problems in tunnel structure: (a) segment damage; (b) structure water leakage

表 4 指标监测结果的云模型

Table 4 Cloud model monitoring results

监测指标	云模型
累积沉降值	(0.376, 0.262, 0.005)
差异沉降值	(0.515, 0.310, 0.005)
土压力增大系数	(0.449, 0.277, 0.005)
钢筋应力差	(0.479, 0.283, 0.005)
椭圆度变形	(0.390, 0.329, 0.005)
每 100 ³ m 渗漏点数	(0.278, 0.229, 0.005)
浸湿面积	(0.380, 0.277, 0.005)
剥落面积	(0.358, 0.349, 0.005)
剥落深度	(0.495, 0.339, 0.005)

3.3 确定指标的权重云模型

为获得各指标的权重,由隧道工程专业专家、科研单位主要技术人员、设计院主要技术人员、项目部主要技术人员组成的专家讨论组,依据各指标的重要程度,采用评价语言对各个指标进行评价,并结合表 3 得到各层指标的权重云模型,结果显示在图 4 中各层指标后。

3.4 健康诊断

结合表4中各指标监测结果的云模型,利用式(7)由底层指标逐步向上层指标加权计算,得到一级指标云模型计算结果,见表5。最终计算出该上行侧地铁盾构区间段的健康诊断结果云模型为(0.378, 0.104, 0.004)。将评估结果云模型,按照正向正态云发生器计算步骤,得到评估结果云图,如图6所示。从图6中可直观看出,该上行侧地铁盾构区间段的结构健康状态等级为2级~3级之间,且偏向于2级风险。说明了该盾构区间段隧道结构健康状态为轻微受损,需要加强监测及检查,并对此重视,制定相应的预防性措施方案。

表5 一级指标云模型计算结果

Table 5 Calculation results of the first-level index cloud model

一级指标	云模型
施工误差及外界环境	(0.412, 0.153, 0.004)
渗漏水	(0.279, 0.184, 0.006)
材料劣化	(0.427, 0.191, 0.007)

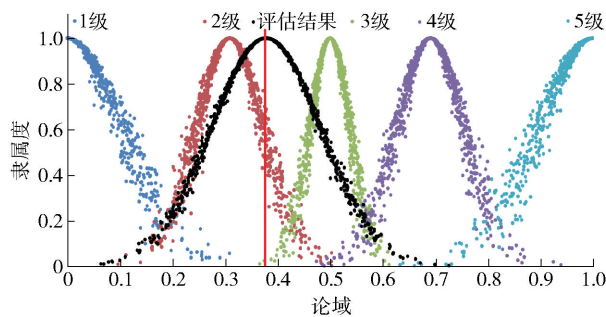


图6 健康诊断结果云图

Fig. 6 Health diagnosis results

3.5 验证分析

为了验证上述方法的实用性及有效性,采用文献[21]提出的隧道结构健康诊断方法,并在图4隧

表7 隧道洞体结构变形检测评定等级表

Table 7 Assessment levels of tunnel structure deformation detection

判定等级	1级	2级	3级	4级	5级
变形速率, $V/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	$V < 1$	$1 \leq V < 3$	$3 \leq V < 10$	$10 \leq V < 50$	$50 \leq V \leq 100$

为了量化结构变形健康度与现场检测数据之间的联系,依据表6与表7对应关系,通过下式建立健康度与结构变形现场实测数据之间的关系式。

$$J = f(V) = \begin{cases} -0.2V + 1, & 0 \leq V < 1; \\ -0.1V + 0.9, & 1 \leq V < 3; \\ -0.02857V + 0.6857, & 3 \leq V < 10; \\ -0.005V + 0.45, & 10 \leq V < 50; \\ -0.004V + 0.4, & 50 \leq V \leq 100. \end{cases} \quad (9)$$

道健康状况评价指标系统的基础上,对本文案例的地铁2号线盾构区间段进行结构健康诊断。该方法给出了隧道健康度函数表达式,该函数的自变量为现场监测指标的检测值,值域为 $[0, 1]$ 。函数表达式如下:

$$J = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n). \quad (8)$$

式中, J 为隧道健康度函数; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 为隧道结构健康指标的检测值。当健康度为0时,隧道整体结构或子结构极端受损,无法保证车辆运营的安全;当健康度为1时,隧道整体结构或子结构完好无损;当健康度在0~1之间时,隧道整体结构或子结构存在不同程度地受损。

为建立各指标评定标准与隧道结构健康状况评定分级结果和各分项评定指标及其属性指标的对应关系,将各指标健康度的取值范围与本文介绍的隧道结构健康状况等级建立起了对应关系,如表6所示。

表6 健康度取值范围与健康等级对应表

Table 6 Health degree range and the corresponding health grade table

等级	描述	健康度取值范围
1级	健康	$[0.8, 1.0]$
2级	轻微受损	$[0.6, 0.8)$
3级	中度受损	$[0.4, 0.6)$
4级	严重受损	$[0.2, 0.4)$
5级	极端受损	$[0, 0.2)$

通过参照规范相关标准,制定和量化隧道结构健康状况评定标准。由于篇幅有限,本文仅以洞体结构变形为例进行说明,依据《铁路桥隧建筑物劣化评定标准—隧道》(TB/T 2820.2—1997)、《城市轨道交通设施养护维修技术规范》(DB11/T 718—2010)、《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)等制定隧道洞体结构变形检测评定等级表,如表7所示。

其他指标检测值与健康度之间的关系,采用上述相似方法进行。将该区间盾构隧道结构评价指标监测结果转化为健康度来表示,采用“最不利原则”方法,选取各级评定指标中的最不利的评价结果向上逐层进行评价,结果如表8所示,最终得到该地铁区间段的结构健康等级为2级。

采用文献[21]的隧道结构健康诊断方法得到的该地铁2号线上行侧某盾构区间段的结构健康等级为

表8 隧道结构健康评价结果

Table 8 Health evaluation results of tunnel structure

监测指标	材料劣化	施工误差及外界环境	渗漏水	文献[21]	本文诊断结果
评价结果	1级	1级	2级	2级	2~3级,偏向于2级

2级,与本文提出的隧道结构健康诊断方法得到的结果相同,验证了基于云理论的隧道结构健康诊断方法的有效性及实用性,同时也体现了该方法诊断过程和结果高效可视的特点。

4 结论

(1)传统的隧道结构健康诊断方法无法妥善的将系统的模糊性和随机性关联在一起,基于此,研究针对盾构隧道结构健康诊断的模糊性及随机性特点,提出了基于云理论的盾构隧道结构健康综合诊断模型.通过对某市地铁2号线某区间段盾构隧道结构进行健康诊断及验证分析,表明了该方法的实用性及有效性。

(2)采用语言评价价值来反映指标的重要程度,既反映了人类思维的模糊性、不确定性和复杂性,也消除了主客观赋权法随意性以及与实际不符的问题.将隧道结构健康状态指标的监测数据的归一化结果值转化为隶属度云模型,保留了监测结果的模糊性和评价结果的客观性。

(3)该隧道结构健康诊断结果是一个有期望值、熵和超熵3个数字特征组成的云模型.该云模型综合考虑了评估结果的期望值、模糊性及随机性特点,提高了结构健康诊断的鲁棒性,为盾构隧道结构健康诊断系统的不确定性,提出了一种简便高效可视的新方法。

参 考 文 献

- [1] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering. *Tunneling Undergr Space Technol*, 1996, 11(2): 141
- [2] Tonon F, Mammion A, Bernardini A. Multiobjective optimization under uncertainty in tunneling application to the design of tunnel support/reinforcement with case histories. *Tunneling Undergr Space Technol*, 2002, 17(1): 33
- [3] Wang M Z, Huang H W. Risk assessment of shield tunnel based on horizontal convergence. *Mod Tunnel Technol*, 2014, 51(Suppl 1): 5
(王明卓, 黄宏伟. 基于横向收敛变形的盾构隧道风险评价研究. *现代隧道技术*, 2014, 51(增刊1): 5)
- [4] Peng M, Huang H W, Hu Q F, et al. A risk database designed for dynamic risk management in shield tunneling from site monitoring data. *Chin J Undergr Space Eng*, 2007, 3(7): 1255
(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. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(7): 1255)
- [5] Sun K, Zhang W, Zhu S B, et al. Fuzzy analytical hierarchy process comprehensive evaluation method for health monitoring data of shield tunnels. *J Disas Prev Mitig Eng*, 2015, 35(6): 769
(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. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(6): 769)
- [6] Xu B, Wang H L, Xia C C. Study on comprehensive evaluation of shield tunnel structural defects. *Chin J Undergr Space Eng*, 2010, 6(1): 201
(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. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(1): 201)
- [7] Yang X, Li X Y, Zhu B L. Research on the health diagnosis of metro tunnel based on the long-term settlement. *J Shenyang Jianzhu Univ Nat Sci*, 2014, 30(1): 49
(杨潇, 李翔宇, 朱宝林. 基于长期沉降运营地铁隧道健康诊断. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(1): 49)
- [8] Kong X X, Xia C C, Qiu Y L, et al. Health diagnosing method for shield tunnel based on extension theory. *J Tongji Univ Nat Sci*, 2011, 39(11): 1610
(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. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 1610)
- [9] Liu S C, Zhang D L, Huang J, et al. Research and design on structural health monitoring system for large-scale shield tunnel. *Chin J Undergr Space Eng*, 2011, 7(4): 741
(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. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(4): 741)
- [10] Liu Tao. *Evaluation of Existing Shield Tunnel* [Dissertation]. Shanghai: Tongji University, 2008
(刘涛. 既有盾构隧道结构性能评价研究[学位论文]. 上海: 同济大学, 2008)
- [11] Ye Y D. *Research on Deformation and Method of Health Diagnose of Operational Subway Structures in Soft Soil* [Dissertation]. Shanghai: Tongji University, 2007
(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[学位论文]. 上海: 同济大学, 2007)
- [12] Jiao P, Zha Y B. Credibility evaluation method based on cloud model// *International Conference on Electrical and Control Engineering*. Wuhan, 2010: 648
- [13] Zhang Y Y, Liao R J, Yang L J, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model. *Trans Chin Electrotech Soc*, 2012, 27(5): 13
(张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝

- 缘状态评估方法. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13)
- [14] Li D R, Di K C, Li D Y. Knowledge representation and uncertainty reasoning in GIS based on cloud models // *Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Data Handling*. Beijing, 2000: 3
- [15] Li D Y. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers. *Comput Math Appl*, 1998, 35(3): 99
- [16] Li D Y, Du Y. *Artificial Intelligence with Uncertainty*. Beijing: National Defense Industry Press, 2005
(李德毅, 杜鹃. 不确定性人工智能. 北京: 国防工业出版社, 2005)
- [17] Liu C Y, Li D Y, Du Y, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model. *Inf Control*, 2005, 34(2): 236
(刘常昱, 李德毅, 杜鹃, 等. 正态云模型的统计分析. 信息与控制, 2005, 34(2): 236)
- [18] Li D Y, Liu C Y. Study on the universality of the normal cloud model. *Eng Sci*, 2004, 6(8): 28
(李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28)
- [19] Xin J, Xia D Y, Pang X L, et al. Fire risk assessment for high-rise buildings based on cloud theory. *Fire Sci Technol*, 2011, 30(3): 258
(辛晶, 夏登友, 庞西磊, 等. 基于云理论的高层建筑火灾风险评估. 消防科学与技术, 2011, 30(3): 258)
- [20] Fan L, Xia F, Su H Y, et al. Risk assessment of high voltage insulator contamination condition by cloud theory. *Power Syst Prot Control*, 2012, 40(15): 57
(范莉, 夏非, 苏浩益, 等. 基于云理论的高压绝缘子污秽状态风险评估. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 57)
- [21] Zhang S L. *Study on Health Diagnosis and Technical Condition Assessment for Tunnel Lining Structure* [Dissertation]. Beijing: Beijing JiaoTong University, 2012
(张素磊. 隧道衬砌结构健康诊断及技术状况评定研究[学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012)