

# 基于中智理论的公路隧道健康状态评价方法研究

邓发友<sup>1</sup>,夏才初<sup>1,2</sup>,许崇帮<sup>3</sup>

(1.绍兴文理学院 土木工程学院,浙江 绍兴 312000;2.同济大学 土木工程学院,上海市 200092;

3.交通运输部公路科学研究院 桥梁隧道研究中心,北京市 100088)

**摘要:**由于公路隧道结构十分复杂,具有不确定性,只有充分考虑各种不确定因素才能合理评价公路隧道的健康状态。通过引入中智理论,考虑每个结构的不确定性,采用中智余弦相似度和正切相似度量,提出一种基于中智理论的公路隧道健康状态评价方法。最后,通过对10个样本的实际评价等级与文中方法的评价结果相比较,结果表明:基于中智理论的公路隧道健康状态评价方法所得评价结果与实际评价等级相符,该方法有助于解决结构中的不确定性且更加简单实用,拓展了公路隧道健康状态的评价体系。

**关键词:**中智理论;公路隧道;余弦相似度量;正切相似度量;健康评估

**中图分类号:**U455.7

**文献标志码:**A

## 0 引言

截至2021年末,中国公路隧道总里程2 469.89万延米。长隧道6 211处,特长隧道1 599处<sup>[1]</sup>。在基础设施高质量发展的同时,合理评价公路隧道的健康状态,提高公路隧道的服役性能逐渐引起专家学者的重视。随着公路隧道数量的不断增大,已建老旧隧道的质量也在逐渐下降,通过对隧道的健康状态进行合理评价,制定相应的隧道养护措施,以提高公路隧道的服役性能,成了隧道行业发展必须面对的难题。科研人员对公路隧道健康状态评价做了大量的工作<sup>[2-3]</sup>。评价结果的准确性依赖于监测手段,目前对公路隧道结构健康监测主要有两种方法:一是基于模型的方法;二是基于数据的方法。第一种方法基于构建精细的有限元模型,并利用模型更新策略进行损伤检测、定位和量化<sup>[4-5]</sup>;第二种方法利用原始测量数据,不需要任何模型构建和更新过程<sup>[6]</sup>。在此基础上,基于数据的方法似乎在简单性和效率方面优于基于模型的技术。

自40多年前Zadeh<sup>[7]</sup>提出模糊理论以来,模糊理论已被用于解决许多基础设施工程问题。王华牢等<sup>[8]</sup>建立了完整公路隧道健康状态的模糊综合评价

模型;李长俊等<sup>[9]</sup>将模糊聚类分析应用于隧道健康监测系统中。然而,模糊理论只能处理不完全的信息,不能处理工程中普遍存在的不确定和不一致的信息<sup>[10]</sup>。公路隧道由于缺乏具体信息和数据稀缺以及岩土材料的复杂性造成信息相互冲突,甚至隧道健康概念模糊,致使隧道健康评价存在许多不确定性。Smarandache<sup>[11]</sup>于1988年提出了中智理论的概念,因其能考虑到对象的确定性和不确定性,在工程上得到广泛应用,如汽油机失火故障诊断<sup>[12]</sup>和多周期医疗诊断<sup>[13]</sup>等;在岩石工程领域,中智理论也被用于边坡稳定性评价<sup>[14]</sup>和岩石节理粗糙度系数的尺度效应和各向异性分析<sup>[15]</sup>。因此,本文基于中智理论,通过中智余弦和正切相似度量方法,对隧道的健康状态进行评价,并根据评价结果对维修提出相应的措施。

## 1 中智理论的概念

中智理论最早由Smarandache提出,它是哲学的一个分支,研究中立性的起源、性质和范围,以及它们与不同概念的相互作用,包括中智集、中智区间概率与统计、中智决策理论与方法等。为了对研究对象进行明确量化,Smarandache在中智理论基础上提出了中智数的概念,其形式为 $N = a + bI$ , $a$ 、 $b$ 为全体实

收稿日期:2022-01-04(修改稿)

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(编号:2020-9032)

作者简介:邓发友,男,硕士研究生.E-mail:fayoudeng@163.com

数,  $I$  为不确定系数,  $a$  代表确定部分,  $bI$  代表不确定部分。中智数有以下运算规则:

- (1)  $N_i + N_j = a_i + a_j + (b_i + b_j)I$
- (2)  $N_i - N_j = a_i - a_j + (b_i - b_j)I$
- (3)  $N_i \times N_j = a_i a_j + (a_i b_j + b_i a_j + b_i b_j)I$
- (4)  $N_i^2 = (a_i + b_i I)^2 = a_i^2 + (2a_i b_i + b_i^2)I$
- (5)  $\frac{N_i}{N_j} = \frac{a_i + b_i I}{a_j + b_j I} = \frac{a_i}{a_j} + \frac{b_i a_j - a_i b_j}{a_j(a_j + b_j)} I (a_j \neq 0, a_j \neq -b_j)$

$$(6) N_i = \sqrt{a_i + b_i I} = \begin{cases} \sqrt{a_i} - (\sqrt{a_i} + \sqrt{a_i + b_i I}) I \\ \sqrt{a_i} - (\sqrt{a_i} - \sqrt{a_i + b_i I}) I \\ -\sqrt{a_i} + (\sqrt{a_i} + \sqrt{a_i + b_i I}) I \\ -\sqrt{a_i} + (\sqrt{a_i} - \sqrt{a_i + b_i I}) I \end{cases}$$

## 2 基于中智理论的余弦相似度和正切相似度

余弦相似度量是通过计算两个向量内积空间夹角的余弦值来度量两者的相似性。若两个向量的方向一致, 则余弦相似度为 1, 若两个向量的方向成  $90^\circ$  夹角, 则余弦相似度为 0。基于余弦相似度量的原理, 通过正切函数, 当  $x \in [0, \frac{\pi}{4}]$ , 则  $y \in [0, 1]$ , 正切函数表示为一个递增函数, 因此提出一种正切相似度量。最后将中智理论融入余弦相似度和正切相似度量中, 用以评价两个向量之间的相似性。

定义 1 令向量  $A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ , 向量  $B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$ , 向量  $A$  与向量  $B$  之间的余弦相似度和正切相似度量可表示为:

$$C_w(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \cos \left\{ \frac{\pi}{4} \left| \left[ a_{Ai} + \inf(b_{Bi} I) \right] - \left[ a_{Bi} + \inf(b_{Bi} I) \right] \right| + \left[ a_{Ai} + \sup(b_{Ai} I) \right] - \left[ a_{Bi} + \sup(b_{Bi} I) \right] \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$T_w(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \tan \left\{ \frac{\pi}{8} \left| \left[ a_{Ai} + \inf(b_{Ai} I) \right] - \left[ a_{Bi} + \inf(b_{Bi} I) \right] \right| + \left[ a_{Ai} + \sup(b_{Ai} I) \right] - \left[ a_{Bi} + \sup(b_{Bi} I) \right] \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

中智理论余弦相似度和中智理论正切相似度量应具备以下性质:

- (1)  $0 \leq C_w(A, B) \leq 1, 0 \leq T_w(A, B) \leq 1$
- (2)  $C_w(A, B) = C_w(B, A), T_w(A, B) = T_w(B, A)$
- (3)  $A = B \Leftrightarrow C_w(A, B) = C_w(B, A) = 1, T_w(A, B) = T_w(B, A) = 1$

$$C(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \left( \frac{\pi}{2} |a_i - b_i| \right) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$T(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tan \left( \frac{\pi}{4} |a_i - b_i| \right) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

余弦相似度和正切相似度量应具备以下性质:

- (1)  $0 \leq C(A, B) \leq 1, 0 \leq T(A, B) \leq 1$
- (2)  $C(A, B) = C(B, A), T(A, B) = T(B, A)$
- (3)  $A = B \Leftrightarrow C(A, B) = C(B, A) = 1, T(A, B) = T(B, A) = 1$

在实际工程中, 通过引入权重来体现各项指标的重要程度, 使评价结果更合理。

定义 2 引入权重向量  $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ ,

$\sum_{i=1}^n w_i = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ , 则向量  $A$  与向量  $B$  之间的余弦相似度和正切相似度量可表示为:

$$C(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \cos \left( \frac{\pi}{2} |a_i - b_i| \right) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$T(A, B) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \tan \left( \frac{\pi}{4} |a_i - b_i| \right) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

定义 3 向量  $A = (N_{A1}, N_{A2}, \dots, N_{An})$ , 向量  $B = (N_{B1}, N_{B2}, \dots, N_{Bn})$ , 权重向量  $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ ,  $\sum_{i=1}^n w_i = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ , 向量  $A$  和向量  $B$  中的元素都用中智理论的形式  $N = a + bI$  表达, 则向量  $A$  和向量  $B$  的形式如下:

$$N_{Ai} = a_{Ai} + b_{Ai} I \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$N_{Bi} = a_{Bi} + b_{Bi} I \quad i = 1, 2, \dots, n$$

则向量  $A$  与向量  $B$  的中智理论余弦相似度和中智理论正切相似度量可表达为:

## 3 基于中智理论的公路隧道健康状态评价方法

隧道属于地下工程, 是围岩和支护结构的耦合系统, 隧道围岩稳定性将直接影响隧道结构的健康

状况。围岩的稳定性通常受岩性、地质条件、初始地应力场条件、地形地貌、地下水条件等因素的影响,故围岩稳定性存在很大的不确定性。此外,隧道断面的形状和大小、支护类型和施工方法都会影响结构的健康状况。因此,影响隧道结构健康的因素相互作用,很难用解析法进行定量评价。但是,利用中智理论可以很好地解决这些问题。该方法将定性因素与定量因素相结合,共同决定隧道结构的长期健康状态,使评价结果更加客观,更符合工程的实际情况。

3.1 公路隧道健康状态分级

根据对国内外隧道健康状态分级的调查分析,结合中国隧道结构健康状态分级的现状,将公路隧道结构的健康状况分为5类,并且分别提出不同的养护措施。隧道健康等级和评级表如表1所示。

表1 隧道健康等级和评级表

等级	$N_i$	隧道健康状况	措施
1	[0.00,0.15)	完好状态	正常养护
2	[0.15,0.30)	轻微破损	对结构破损部位进行监测或检查,必要时实施保养维修
3	[0.30,0.45)	中等破损	对结构破损部位进行重点监测,并对局部实施保养维修
4	[0.45,0.60)	严重破损	尽快实施结构病害处治措施
5	[0.60,1.00]	危险状态	实施病害处治,特殊情况需要进行局部重建或改造

为了全面评价公路隧道的健康状态,指标的选取原则包括科学性原则、完备性原则、简捷性原则、独立性原则和可操作性原则。因此选择10个能够影响公路隧道健康状态的指标。包含隧道内部结构和对交通妨碍情况两个方面进行选取。分别是:洞口( $N_1$ )、洞门( $N_2$ )、衬砌( $N_3$ )、渗漏水( $N_4$ )、路面( $N_5$ )、检修道( $N_6$ )、排水设施( $N_7$ )、吊顶及各种预埋件( $N_8$ )、内装饰( $N_9$ )、交通标志、标线、轮廓线( $N_{10}$ )。

结合专家经验法对隧道不同结构的重视程度分别对结构赋予不同的权重。见图1。

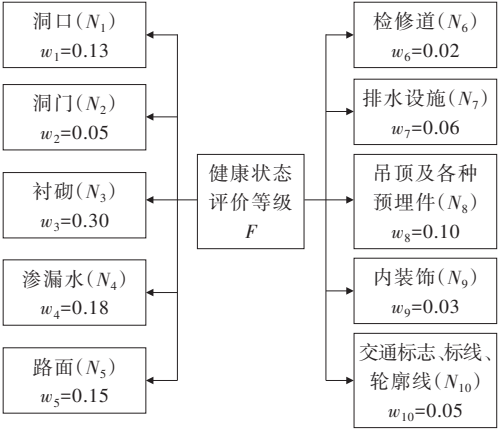


图1 公路隧道结构权重

由于中智理论是依据对象的不确定系数  $I \in [\inf I, \sup I]$  的范围而改变区间值,所以它们可以在不确定的条件下有效而合理地表示不确定性数据。因此,需要将表1中的5个等级表示成区间值形式,其中不确定系数  $I$  转换为  $I \in [0, 0.25]$ ,如表2所示。

表2 公路隧道健康状态的中智理论表达形式

隧道等级	$N_i$	中智数形式
1	[0.00,0.15)	$0+0.75I$
2	[0.15,0.30)	$0.15+0.75I$
3	[0.30,0.45)	$0.30+0.75I$
4	[0.45,0.60)	$0.45+0.75I$
5	[0.60,1.00]	$0.60+1.875I$

3.2 公路隧道健康状态数据获取

为了确保数据的准确程度,严格按照《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2015)对每一项指标进行数据采集,确保每一个数据都是准确可行的;同时为了说明评价方法适用于每一种情况,按照公路隧道的实际等级随机对每种公路隧道健康状态选择两个作为样本。因此,选择包含来自北京市、陕西省、四川省、河北省、浙江省共计10座隧道作为样本。具体的结果见表3。为了提高评价方法的精确度和算法速度,需要对采集的原始数据进行离差标准化处理(表4),然后按照中智理论的表达形式,各项指标需要转化成区间值的形式,例如0.2,表示成  $[0.2, 0.2]$  或者  $0.2+0I$  的形式(表5)。

表3 随机选择样本数据

$N_i$	样本1	样本2	样本3	样本4	样本5	样本6	样本7	样本8	样本9	样本10
$N_1$	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2
$N_2$	0	0	1	1	0	0	2	3	1	2

续表3

$N_i$	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8	样本 9	样本 10
$N_3$	4	4	2	4	2	1	4	4	0	0
$N_4$	1	2	2	2	1	1	2	3	0	0
$N_5$	4	4	2	1	1	1	4	2	0	0
$N_6$	3	3	1	2	1	1	2	2	0	0
$N_7$	2	1	0	2	2	2	1	4	0	0
$N_8$	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$N_9$	1	0	1	1	1	2	1	4	0	0
$N_{10}$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
实际等级	4	4	3	3	2	2	5	5	1	1

表 4 样本离差标准化结果

$N_i$	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8	样本 9	样本 10
$N_1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.50	0.25	0.50
$N_2$	0.00	0.00	0.25	0.25	0.00	0.00	0.50	0.75	0.25	0.50
$N_3$	1.00	1.00	0.50	1.00	0.50	0.25	1.00	1.00	0.00	0.00
$N_4$	0.25	0.50	0.50	0.50	0.25	0.25	0.50	0.75	0.00	0.00
$N_5$	1.00	1.00	0.50	0.25	0.25	0.25	1.00	0.50	0.00	0.00
$N_6$	0.75	0.75	0.25	0.50	0.25	0.25	0.50	0.50	0.00	0.00
$N_7$	0.50	0.25	0.00	0.50	0.50	0.50	0.25	1.00	0.00	0.00
$N_8$	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
$N_9$	0.25	0.00	0.25	0.25	0.25	0.50	1.00	1.00	0.00	0.00
$N_{10}$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00
实际等级	4.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00	5.00	5.00	1.00	1.00

表 5 样本中智形式

$N_i$	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8	样本 9	样本 10
$N_1$	0+0I	0+0I	0+0I	0+0I	0+0I	0+0I	0.25+0I	0.5+0I	0.25+0I	0.5+0I
$N_2$	0+0I	0+0I	0.5+0I	0.5+0I	0+0I	0+0I	0.5+0I	0.75+0I	0.25+0I	0.5+0I
$N_3$	1+0I	1+0I	0.5+0I	1+0I	0.5+0I	0.25+0I	1+0I	1+0I	0+0I	0+0I
$N_4$	0.25+0I	0.5+0I	0.5+0I	0.5+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.5+0I	0.75+0I	0+0I	0+0I
$N_5$	1+0I	1+0I	0.5+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	1+0I	0.5+0I	0+0I	0+0I
$N_6$	0.75	0.75	0.25+0I	0.5+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.5+0I	0.5+0I	0+0I	0+0I
$N_7$	0.5+0I	0.25+0I	0+0I	0.5+0I	0.5+0I	0.5+0I	0.25+0I	1+0I	0+0I	0+0I
$N_8$	0.5+0I	0+0I	0+0I	0+0I	0+0I	0+0I	1+0I	1+0I	0+0I	0+0I
$N_9$	0.25+0I	0+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.5+0I	0.25+0I	1+0I	0+0I	0+0I
$N_{10}$	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0.25+0I	0+0I	0+0I
实际等级	4	4	3	3	2	2	5	5	1	1

### 3.3 应用验证

由图 1 可得,公路隧道结构健康状态指标的各项权重为  $W = \left\{ 0.15, 0.05, 0.25, 0.15, 0.15, \right. \\ \left. 0.02, 0.06, 0.10, 0.02, 0.05 \right\}$ ,得到中智理论余弦相似度量评价结果为  $F_c = \{F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}, F_{c4}, F_{c5}\}$ ,中智理论正切相似度量评价结果为  $F_T = \{F_{T1}, F_{T2}, F_{T3}, F_{T4}, F_{T5}\}$ ,则对每一个样本,利用中智理论余弦相似度量和正切相似度量公式,得到

10个样本在每一个等级下的值,然后基于相似理论,在 5 个评价结果中选择最大值作为评价结果(表 6、7)。

计算结果表明:中智理论余弦相似度量和正切相似性度量的评价结果和隧道健康状态实际评价等级完全一致,中智理论余弦相似度量和正切相似度量可以用于评价公路隧道的健康状态。基于中智理论余弦相似度量和正切相似度量的公路隧道健康状态评价方法在公路隧道健康状态评价中是有效且可行的。

表6 中智理论余弦相似度量评价结果

样本	$F_{C1}$	$F_{C2}$	$F_{C3}$	$F_{C4}$	$F_{C5}$	评价等级	实际等级
1	0.592 8	0.703 4	0.777 8	0.806 9	0.746 7	4	4
2	0.598 2	0.697 7	0.759 9	0.778 6	0.703 4	4	4
3	0.874 5	0.929 3	0.934 5	0.883 8	0.676 8	3	3
4	0.718 1	0.798 1	0.837 2	0.826 9	0.695 3	3	3
5	0.916 7	0.950 3	0.936 0	0.865 7	0.622 2	2	2
6	0.957 5	0.969 8	0.936 0	0.846 1	0.566 6	2	2
7	0.501 0	0.650 9	0.768 2	0.839 9	0.853 4	5	5
8	0.447 7	0.624 8	0.768 1	0.866 6	0.916 8	5	5
9	0.986 9	0.949 2	0.861 3	0.724 7	0.377 1	1	1
10	0.951 5	0.932 2	0.861 3	0.741 7	0.425 4	1	1

表7 中智理论正切相似度量评价结果

样本	$F_{T1}$	$F_{T2}$	$F_{T3}$	$F_{T4}$	$F_{T5}$	评价等级	实际等级
1	0.535 1	0.628 7	0.682 0	0.694 7	0.648 3	4	4
2	0.546 7	0.615 9	0.657 4	0.666 9	0.614 3	4	4
3	0.771 6	0.815 7	0.838 0	0.801 3	0.578 2	3	3
4	0.646 0	0.714 7	0.741 3	0.720 0	0.599 1	3	3
5	0.820 9	0.855 4	0.840 1	0.764 9	0.527 8	2	2
6	0.868 8	0.892 3	0.840 1	0.728 0	0.477 0	2	2
7	0.440 7	0.586 7	0.683 5	0.729 9	0.738 9	5	5
8	0.382 8	0.539 7	0.673 0	0.766 1	0.800 3	5	5
9	0.925 2	0.845 3	0.737 6	0.606 2	0.326 6	1	1
10	0.883 5	0.813 3	0.737 6	0.638 3	0.370 8	1	1

4 结论

针对现有评价方法不能处理不确定环境下公路隧道服役性能评价问题,本文提出基于中智理论的余弦相似度量和正切相似度量,并且应用在公路隧道健康状态评价中。通过对10个公路隧道样本进行分析,说明中智数在公路隧道健康状态评价体系中的适用性。中智理论余弦相似度量和正切相似度量对应的评价结果与10个公路隧道实例的实际等级相同,表明开发的隧道健康状态评价方法在中智数中的有效性和可行性。本研究的主要优点是开发的评估方法比现有方法更简单有效,并且可以采用中智理论来评价隧道健康状态问题,而传统的层次分析法和有限元法无法做到。这不仅拓展了中智理论在隧道工程领域的应用,还拓展了公路隧道健康状态的评价体系。

参考文献:

[1] 交通运输部.2021年我国交通运输行业发展统计公报发布[EB/OL].(2022-05-25)[2022-09-26].[https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524\\_3656659.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html).

[2] 任志华,张博,丁祖德,等.基于云模型的山岭隧道衬砌服役状况评价方法研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(10):2618-2625.

[3] 陈天宇,张子新,黄昕.基于专家评分的城市隧道健康状态评价方法[J].现代隧道技术,2018,55(S2):536-543.

[4] KAVEH A,HOSSEINI VAEZ S R,HOSSEINI P,et al.A new two-phase method for damage detection in skeletal structures[J].Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering,2019,43(1):49-65.

[5] REZAAIEE-PAJAND M, ENTEZAMI A, SARMADI H. A sensitivity-based finite element model updating based on unconstrained optimization problem and regularized solution methods[J].Structural Control & Health Monitoring, 2020,27(5):1-29.

[6] FARRAR Charles-R, KEITH Worden. Structural health monitoring: A machine learning perspective[M]. Wiley A John Wiley & Sons,Ltd,Publication,2013.

[7] ZADEH L-A.Fuzzy sets[J].Information & Control,1965,8(3): 338-353.

[8] 王华牢,许崇帮,褚方平.新型模糊算子的公路隧道健康状态评价方法研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(S1): 1389-1395.

[9] 李长俊,陈卫忠,李明,等.加权距离判别分析法在隧道健康监测系统预警中的应用[J].中外公路,2019,39(6): 162-168.

[10] ZHANG W,SUN K,LEI C Z,et al.Fuzzy analytic hierarchy process synthetic evaluation models for the health monitoring of shield tunnels[J]. Computer-Aided Civil & Infrastructure Engineering,2014,29(9):676-688.

[11] SMARANDACHE F.Neutrosophy.Neutrosophic probability, set,and logic. Analytic synthesis and synthetic analysis[M]. American Research Press,1988.

[12] KONG L W,WU Y F,YE J.Misfire fault diagnosis method of gasoline engines using the cosine similarity measure of neutrosophic numbers[J]. Neutrosophic Sets and Systems, 2015,8(8):42-45.

[13] YE J,FU J.Multi-period medical diagnosis method using a single valued neutrosophic similarity measure based on tangent function[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine,2016,123:142-149.

[14] LI C Q,YE J,CUI W H,et al.Slope stability assessment method using the arctangent and tangent similarity measure of neutrosophic numbers[J].Neutrosophic Sets and Systems, 2019,27:98-103.

[15] YONG R,GU L Y,YE J,et al.Neutrosophic function with NNS for analyzing and expressing anisotropy characteristic and scale effect of joint surface roughness[J]. Mathematical Problems in Engineering,2019,2019(1):1-11.