

基于综合赋权的公路隧道健康诊断方法研究

杨启航^{1,2}, 朱付广³, 朱泽奇^{1,2*}, 朱京京^{1,2}, 李彪^{1,2}

(1.安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2.中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室; 3.湖北省电力勘测设计院)

摘要:考虑到公路隧道病害的多样性、实时性与不确定性,以乘积标度为主观赋权方法,以基于熵与最大熵原理的熵权法作为客观赋权方法,提出一种改进的主客观综合权重分析方法——综合赋权法。该方法既考虑专家经验及病害作用机理等主观因素的影响,又以数学熵的方法根据现场实测数据进行客观赋权,并将其加权平均得到隧道各病害指标权重。将该方法应用到山王庙隧道与六甲洞隧道中,其评价结果与单独利用乘积标度法及熵权法确定的评价结果对比,具有较好的一致性。当主观权重与客观权重诊断结果差距较大时,该方法可起到数值优化作用,使诊断结果更倾向于隧道真实情况。

关键词:公路隧道; 健康状态诊断; 综合赋权; 乘积标度法; 熵权法

受地域自然条件差异及在建期设计与施工技术条件限制的影响,公路隧道和地下工程结构经常出现不同种类、不同程度的病害。如何对运营期隧道做合理的健康诊断显得极其重要。在公路隧道健康诊断过程中,指标的权重是其对整个隧道病害作用的贡献程度,只有恰当确定其权重,计算各病害指标对评语等级的隶属度,才能得到隧道各段的健康评估。所以,权重确定是隧道健康状态诊断中需要重点研究的问题。

对于指标权重的确定,可分为主观赋权法和客观赋权法,包括层次分析法、模糊层次分析法(FAHP)、乘积标度法等。还有一些其他的赋权方法,如乘积标度法和GRNN神经网络结合确定指标权重;文献收集与问卷调查确定准则层权重和层次分析法确定指标权重;层次分析法、专家决策以及均方差法共同确定权重。上述方法各有优劣,对于层次分析法,虽然能得到定量的权重,但依旧是依据主观的工程经验、专家判断等,其准确度和适当性皆有待推敲;对于BP神经网络确定权重,它是以现场数据作为学习样本,通过计算机语言得到输入样本和输出样本之间的联系,但是输出样本是通过病害现场情况人为定义的,仍带有一定的主观性;对于客观赋权方法,由于仅考虑数据之间的联系而忽略了病害指标的物理意义、力学机制,严重脱离实际。因此,目前隧道健康状态诊断缺乏一种合理的

主观与客观相结合的赋权方法。

该文考虑到隧道病害的多样性、实时性与不确定性,在隧道诊断中提出一种改进的赋权方法——综合赋权法,以乘积标度法作为主观赋权法确定主观权重,同时引入熵与最大熵原理,以熵权法作为隧道健康诊断的客观赋权法,根据病害实测数据得到客观权重,最终通过内积平均或加权平均将主客观权重集合成综合权重。同时需要指出的是,该文将乘积标度法作为主观赋权法以及将熵权法作为客观赋权法,是为了区别赋权方法和方便比较诊断结果,并不涉及对乘积标度法和熵权法进行重新定义。

1 熵及最大熵原理

熵,最初是热力学中表征物质状态的一个参量,表示物质在微观热运动时混乱程度的标志。Jaynes将最大熵原理引入到统计学中,他指出,熵最大,意味着相对于未知的信息来说,利用熵原理得到的解在有限信息条件下是客观、无偏见的。

若某项随机事件有 m 种可能的结果,每种结果出现的概率为 $p_i(i=1,2,3,\dots,m)$,则:

$$H = - \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i \quad (1)$$

收稿日期:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51279202);湖北省交通运输厅科技项目(编号:2017-538-1-8)

作者简介:杨启航,男,硕士研究生.E-mail:yangqh1027@163.com

*通信作者:朱泽奇,男,博士,副研究员.E-mail:zqzhu@whrsm.ac.cn

式中: H 为信息熵的熵函数,反映物质系统内指标的种类及复杂程度。

根据最大熵原理,对于隧道病害健康诊断,每个指标都存在不同程度的破坏特征,若根据破坏轻重将破坏等级分为 B、1A、2A、3A 4 个等级,病害指标在 B 类破坏居多,随着破坏程度加剧,病害指标等级向 1A、2A、3A 发展。当某项破坏指标的破坏特征差异较大时,其熵值越小,表明该指标反映的信息量越大,其权重也越大。这种确定指标权重的方法称为熵权法,可根据隧道病害具体实测数据,定量判定指标权重。

2 综合赋权法

2.1 主观赋权

将乘积标度法作为主观赋权的方法,其原理是对指标分析时采用数字标度的形式,将人的主观判断用数字来表达和量化,以达到对指标权重的客观标度。何金平在分析大坝结构实测性态综合评价中权重的特点时提出了此方法,当指标 A 与指标 B 的关系为“相同”时,两指标比值为 1;当指标 A 比指标 B“稍微大”时,两指标比值为 1.354;当两个权重比较“稍微大”仍不足以反映时,以“稍微大”的比值 1.354 做递乘分析。

在隧道健康诊断体系中,将评价体系分为目标层、准则层及指标层 3 个层次。先确定指标层权重 W'_1 ;再确定准则层指标的权重 W'_2 。最后,将两者相乘得到各指标对隧道系统的权重 W' 。

2.2 客观赋权

熵权法依据各指标的离散程度,利用信息熵算出它们的熵权。根据信息熵原理,当某个对象在某项指标上的值相差越大,熵值越小,说明该指标提供的有效信息量较大,权重也相应较大;相反,当某项指标的值相差越小,熵值越大,说明该指标提供的信息量较小,权重也相应较小。熵权法客观权重分析步骤如下:

(1) 归一化处理。某系统包含 n 个待评价样本, m 项评价指标,则评价样本实测矩阵 $X=[x_{ij}]_{nm}$ 为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{nm} \end{bmatrix}_{nm} \quad (2)$$

对矩阵归一化处理,得到标准矩阵 $V=[x_{ij}]_{nm}$,对于大者为优的指标而言,有:

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (3)$$

对于小者为优的指标而言,有:

$$v_{ij} = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (4)$$

(2) 定义指标熵。第 j 个指标熵 H_j 为:

$$H_j = -t \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

$$f_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{i=1}^n v_{ij}} \quad (6)$$

式中: t 为调节系数, $t = \frac{1}{\ln n}$ 。

(3) 当 $\max_i(x_{ij}) = \min_i(x_{ij})$ 时, n 个样本在指标 j 上的值完全相同, $H_j = 1$; 当 $f_{ij} = 0$ 时, $H_j =$

$-t \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。从而得到熵权 $W'' = (\omega''_j)_{1 \times m}$ 。

$$\omega''_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \quad (7)$$

式中: $1 - H_j$ 为第 j 个指标的差异系数。

2.3 主观与客观综合赋权

将主观法得到的权重 $W'(\omega'_j)_{1 \times m}$ 以及客观法得到的权重 $W''(\omega''_j)_{1 \times m}$ 集成综合权重 $W(\omega_j)_{1 \times m}$, 一般有两种方法,内积平均公式(8)与加权平均公式(9)。

$$\omega_j = \frac{(\omega'_j)^\alpha (\omega''_j)^\beta}{\sum_{j=1}^m (\omega'_j)^\alpha (\omega''_j)^\beta} \quad (8)$$

$$\omega_j = \alpha \omega'_j + \beta \omega''_j \quad (9)$$

式中: α 、 β 分别为主观权重与客观权重的相对重要程度, $0 \leq \alpha, \beta \leq 1, \alpha + \beta = 1$, 采用差异系数法确定:

$$T' = \frac{2}{m} (1p'_1 + 2p'_2 + \cdots + mp'_m) - \frac{m+1}{m} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{m}{1-m} T', \beta = 1 - \alpha \quad (11)$$

式中: T' 为主观权重向量 W' 中各分量的差异系数; p'_1, p'_2, \cdots, p'_m 为 W' 中各分量权重按从小到大依次排序。

3 算例分析

选取贵州省双向山王庙公路隧道和广东省双洞六甲洞公路隧道部分段进行主观与客观综合赋权分析。经现场调研,山王庙隧道通过地段岩石风化深度大,岩石破碎,节理裂隙发育,加之长期无序采煤活动,加剧了岩层结构的破坏,因此山王庙隧道选取区段经常出

现衬砌表层剥落、背后空洞、厚度劣化等主要病害。六甲洞隧道所穿越地带山麓坡积相发育,山体北缓南陡,北坡为顺向坡,南坡为岩层逆向坡,坡脚处均为陡坡,隧址区地下水主要为丘陵区基岩裂缝水,根据现场调

查和检测结果,该隧道选取区段病害主要为衬砌工作缝存在渗漏水现象、衬砌背后空洞、衬砌变形等。隧道区段具体实测数据见表 1。

表 1 山王庙隧道、六甲洞隧道部分区段病害实测数据

隧道	样本	区段	裂缝长/m	裂缝宽/mm	渗漏水	衬砌强度比	衬砌厚度比	空洞深度/mm	变形比	剥落深度/mm	剥落直径/mm
山王庙隧道	1	13	0.6	5.0	拱滴	1	0.298	31	0.07	15	73
	2	16	4.5	2.2	拱滴	0.505	0.867	200	0.27	12	70
	3	18	1.6	1.7	拱滴	1	0.867	36	0.41	15	68
	4	26	5.0	0.8	拱滴	0.505	0.822	36	0.54	17	62
	5	27	1.3	0.5	拱滴	0.510	0.513	41	0.41	11	53
	6	28	1.8	3.5	拱滴	0.690	0.551	47	0.12	8	45
	7	31	4.3	2.0	拱滴	1	0.520	289	0.47	17	81
	8	32	3.8	3.2	拱滴	0.945	0.507	29	0.40	14	55
六甲洞隧道	1	12	10.4	1.2	拱渗	1	1	22	1	—	—
	2	14	5.3	1.0	拱渗	1	1	31	0.08	—	—
	3	18	2.3	0.4	拱涌	0.920	1	44	1	—	—
	4	23	15.2	2.1	拱渗	1	0.909	235	1	—	—
	5	26	3.7	0.6	拱渗	1	0.909	447	1	—	—
	6	29	1.9	0.4	拱渗	1	1	112	0.04	—	—
	7	38	2.9	0.6	拱渗	1	1	0	0.25	—	—
	8	49	4.2	1.3	拱涌	1	0.800	42	1	—	—
	9	77	3.1	0.7	拱渗	1	0.750	0	1	—	—

注:变形比=变形量/内限距,变形量由激光式横断面测量仪测得。

依据 JTG H12—2015《公路隧道养护技术规范》中病害指标定性、定量判定标准,先对两组隧道区段测量数据(表 1)进行病害指标分级判定。然后进行主观权重计算,根据专家经验、病害作用机理及宏观危害性、测量便利性、数据分析成熟度等因素,将各病害相对重要性量化成指标进行排序并赋权,得到指标层及准则层权重,将未检测到的病害指标去除,剩下的指标按比例分配得到隧道病害主观权重。再进行客观权重计算,通过熵权法得到隧道病害客观权重。由于部分病害指标达到较严重的破坏等级,有的甚至达到了破坏等级中最严重的 3A 级;同时,这些主要病害指标数据又较为离散,从 B 到 3A 皆有分布,导致指标熵 H_j 和熵权 W'' 较大,从而体现了熵权法的客观性。最后将主观权重与客观权重加权平均得到综合权重。主、客观相对重要度系数 α 、 β 和主观权重、客观权重及综合权重 W' 、 W'' 及 W 如表 2 所示。

由表 2 得出:山王庙隧道中衬砌起层剥落、背后空洞、厚度劣化的客观权重较大;六甲洞隧道中衬砌变形、背后空洞、渗漏水的客观权重较大,说明病害破坏程度越大,熵权(客观权重)越大。该赋权方法较好地体现实际病害等级,反映病害指标的重要性,具有一定的工程应用价值。

为了检验综合赋权法的可行性,利用模糊综合评价方法来计算各指标对健康等级的隶属度函数,从而得到每个指标的隶属度值,将其与上面的权重相乘进行整合计算,最终得到隧道各段的健康值及相应的健康状态。将主观赋权、客观赋权以及综合赋权得到的隧道病害健康状态和健康值进行对比,结果见表 3 及图 1。与病害等级划分类似,隧道健康等级也分为 4 个等级:轻微破损(B)、存在破损(1A)、较严重破坏(2A)、严重破坏(3A)。为了量化诊断评价结果,4 个等级分别对应数字 4、3、2、1。

表 2 相对重要度系数和主观、客观、主客观综合权重

指标	山王庙隧道			六甲洞隧道		
	$(\alpha=0.519\ 3,\beta=0.480\ 7)$			$(\alpha=0.222\ 2,\beta=0.695\ 3)$		
	W'	W''	W	W'	W''	W
裂缝长度	0.112 5	0.036 0	0.075 7	0.125 0	0.010 0	0.106 3
裂缝宽度	0.112 5	0.036 0	0.075 7	0.125 0	0.010 0	0.106 3
渗漏水	0.150 0	0.060 2	0.106 8	0.166 7	0.134 0	0.161 4
衬砌强度	0.087 5	0.036 1	0.062 8	0.097 2	0	0.081 3
衬砌厚度	0.087 5	0.108 9	0.097 8	0.097 2	0	0.081 3
空洞深度	0.150 0	0.145 2	0.147 7	0.166 7	0.150 7	0.164 1
变形比	0.200 0	0.072 6	0.138 8	0.222 2	0.695 3	0.299 3
剥落深度	0.050 0	0.435 5	0.235 3	—	—	—
剥落直径	0.050 0	0.069 5	0.059 4	—	—	—

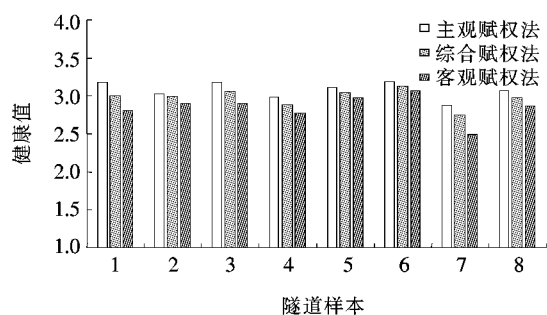
表 3 山王庙隧道、六甲洞隧道综合赋权诊断与主、客观赋权评价结果对比

隧道	样本	评价等级				综合赋 权评价	主观赋 权评价	客观赋 权评价	实际情况
		B	1A	2A	3A				
山王庙 隧道	1	0.298 3	0.407 4	0.294 3	0	1A	1A	1A	存在破坏
	2	0.172 6	0.621 2	0.206 0	0	1A	1A	1A	存在破坏
	3	0.269 4	0.522 0	0.208 6	0	1A	1A	1A	存在破坏
	4	0.200 8	0.486 5	0.312 7	0	1A	1A	1A	存在破坏
	5	0.185 1	0.676 2	0.138 7	0	1A	1A	1A	存在破坏
	6	0.232 6	0.668 0	0.099 4	0	1A	1A	1A	存在破坏
	7	0.125 2	0.498 0	0.376 8	0	1A	1A	2A	存在破坏
	8	0.179 0	0.616 4	0.204 6	0	1A	1A	1A	存在破坏
六甲洞 隧道	1	0.319 8	0.293 0	0.118 5	0.268 7	1A	1A	2A	存在破坏
	2	0.515 9	0.423 0	0.061 1	0	1A	1A	B	存在破坏
	3	0.307 4	0.210 3	0.213 9	0.268 4	1A	1A	2A	存在破坏
	4	0.177 3	0.322 5	0.141 1	0.359 1	2A	2A	2A	较严重破坏
	5	0.250 1	0.299 5	0.071 8	0.376 8	2A	1A	2A	较严重破坏
	6	0.471 0	0.346 5	0.065 6	0.116 9	1A	1A	1A	存在破坏
	7	0.497 7	0.440 9	0.061 4	0	1A	1A	1A	存在破坏
	8	0.242 3	0.267 8	0.221 1	0.268 8	1A	1A	2A	存在破坏
	9	0.376 2	0.302 7	0.052 4	0.267 8	1A	1A	2A	存在破坏

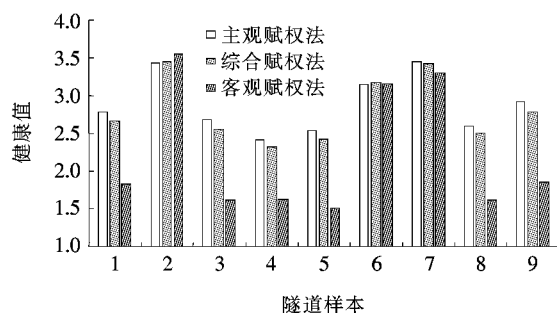
由表 3 可知:该文提出的综合赋权法得出的健康评价结果与乘积标度法(主观赋权)以及熵权法(客观赋权)确定的评价结果基本一致,当主观赋权与客观赋权对评价样本产生分歧时,综合赋权法利用主客观结合的赋权特性,确定评价结果,其描述更加贴近隧道病害真实记录情况。如山王庙隧道样本 7(区段 31)中,用主观赋权法评价的结果为 1A,客观赋权法评价的结果为 2A,而综合赋权法评价的结果为 1A,更符合样本

7(区段 31)“存在破坏”实际情况。又如六甲洞隧道样本 5(区段 26)中,用主观赋权法评价的结果为 1A,客观赋权法评价的结果为 2A,而综合赋权法评价的结果为 2A,更符合样本 5(区段 26)“较严重破坏”的实际情况。

从图 1 可以看出:综合赋权法评价结果与主观赋权法、客观赋权法的评价结果具有较好的一致性。当主观赋权与客观赋权确定的评价结果差距较大时,综



(a) 山王庙隧道



(b) 六甲洞隧道

图 1 3 种赋权法诊断结果比较

合赋权法可起到数值优化作用。此外,综合赋权评价结果更偏向于主观赋权评价结果,在六甲洞隧道中尤为明显,如六甲洞隧道样本 5 中用主观赋权法评价的健康值为 2.537 4,客观赋权法评价的健康值为 1.511 3,而综合赋权法评价的健康值为 2.421 1。原因是当某个指标值离散性较强,熵权法将离散较大的指标赋予较高的权重,这就会导致主观相对重要度系数增大而客观相对重要度系数减小,使综合权重评价结果往主观赋权评价结果倾斜。由此可见,以主、客观综合考虑来对病害指标进行赋权更为合理。

综上所述,综合赋权法可以弥补主观赋权与客观赋权的不足,与隧道病害现场破坏情况及文献[20]结论进行对比,该赋权方法的评价结果与实际情况吻合较好,可行性较强。

4 结论

(1) 引入熵与最大熵原理,提出主观和客观相结合的综合赋权法,该方法结合了专家经验及病害作用机理等主观因素的影响,以数学熵的方法根据现场实测数据进行客观赋权,并通过加权平均得到隧道各病害指标权重,该方法可以较好地体现实际病害等级,反映病害指标的重要性,具有较好的工程应用价值。

(2) 将综合赋权法应用到山王庙隧道与六甲洞隧道健康诊断评价中,将其评价结果与单独利用乘积标度法(主观赋权)及熵权法(客观赋权)确定的评价结果进行对比,具有较好的一致性。当主观权重与客观权重诊断结果差距较大时,综合赋权法通过对主观权重与客观权重数值进行优化,使诊断结果更倾向于隧道真实情况。

该文对综合赋权法的合理性进行了初步的工程验证,目前熵权法在隧道健康诊断领域中使用不多,集熵权法与乘积标度法于一体的综合赋权法更是少有人用,鉴于隧道病害的特殊性,该方法须继续开展深入研究,完善综合赋权法在隧道健康诊断中的应用。

参考文献:

- [1] 宋飞,赵法锁.地下工程风险分析的层次分析法及 MATLAB 应用[J].地球科学与环境学报,2008(3).
- [2] 秦洲.六盘山隧道结构病害健康诊断及处治技术研究[D].长安大学硕士学位论文,2013.
- [3] 金煜皓,王桂萱,赵杰.隧道运营期结构健康评价及 MATLAB 应用研究[J].地震研究,2016(1).
- [4] 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].同济大学博士学位论文,2007.
- [5] 段怀志.隧道及地下工程健康评价研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2009.
- [6] 洪平,刘鹏举.层次分析法在铁路运营隧道健康状态综合评判中的应用[J].现代隧道技术,2011(1).
- [7] 王洪德,高秀鑫.高速公路隧道健康诊断及预警的模糊神经网络方法[J].中国安全科学学报,2014(24).
- [8] 王晓明.高速公路服役隧道结构可靠性分析与后评估研究[D].东北大学博士学位论文,2008.
- [9] 胥彝,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(1).
- [10] 吕林海.南方公路隧道健康诊断与状态评估方法研究[D].广西大学硕士学位论文,2014.
- [11] 李明.山岭隧道与地下工程健康评价理论研究及应用[D].西南交通大学博士学位论文,2011.
- [12] 黄皓.南方公路隧道震后健康诊断方法研究[D].广西大学硕士学位论文,2013.
- [13] 巩航军.高速公路隧道运营安全综合评价研究[D].长安大学博士学位论文,2009.
- [14] JAYNES E T. Information Theory and Statistical Mechanics I [J]. Physical Review, 1957, 106: 620—630.
- [15] JAYNES E T. Information Theory and Statistical Mechanics II [J]. Physical Review, 1957, 108: 171—190.
- [16] JTG H12—2015 公路隧道养护技术规范[S].