

文章编号: 1006 - 2106 (2010) 01 - 0063 - 05

# 隧道渗漏水病害等级评价体系研究<sup>\*</sup>

潘海泽<sup>1\*</sup> 黄远春<sup>1</sup> 曹江英<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学, 上海 201620; 2. 石家庄法商职业学院, 石家庄 050091)

**摘要:**研究目的:隧道渗漏水是隧道运营中的主要地质灾害之一,为了更好地预防渗漏水的发生,以及运营阶段的渗漏水病害治理,本文系统性提出了“隧道渗漏水病害发生可能性等级预测——运营隧道渗漏水病害等级评价——现场实测资料评价渗漏水病害等级”的思路,为隧道渗漏水病害分级预测、评价提供一条新思路。

**研究结论:**采用不同的随机性数学方法建立了渗漏水病害发生可能性等级预测、运营隧道渗漏水病害等级评价的模型,并进行了模型的实例应用研究。结果表明马氏距离法预测隧道渗漏水的等级, BP神经网络方法和模糊综合评价法评价渗漏水等级与现场资料实测的评价等级一致。

**关键词:**隧道渗漏水;现场实测资料评价;马氏距离法;BP神经网络法;模糊综合评价

**中图分类号:** U457 **文献标识码:** A

## Study of Grade Evaluation System for Tunnel Leakage Disaster

PAN Hai - ze<sup>1</sup>, HUANG Yuan - chun<sup>1</sup>, CAO Jiang - ying<sup>2</sup>

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shijiazhuang Vocational College of Law and Commerce, Hebei, Shijiazhuang 050091, China)

**Abstract: Research purposes:** Tunnel leakage is one of the major geological disasters in the process of tunnel operation. In order to better prevention of tunnel leakage and better treatment of tunnel leakage in tunnel operation, this paper presents a systematic research thoughts of "prediction of possibility grade of happening tunnel leakage disaster - evaluation of tunnel leakage disaster grade in tunnel operation period - evaluation of tunnel leakage grade with field measured data", for offering a new thought on classificatory prediction and evaluation of tunnel leakage disasters.

**Research conclusions:** The models for prediction of possibility grade of happening tunnel leakage disaster and evaluation of tunnel leakage disaster grade in tunnel operation period are established with all kinds of stochastic mathematical methods, and the applied research on these models are done. The results show that the grades of tunnel leakage predicted by Mahalanobis distance method and evaluated by BP neural network and Fuzzy comprehensive evaluation methods are consistent with the evaluation with from the field measured data.

**Key words:** tunnel leakage; evaluation with field measured data, Mahalanobis distance method; BP neural network method; Fuzzy comprehensive evaluation

对于国内已竣工营运的隧道,由于受修建时期设计与施工技术条件的限制,目前普遍存在隧道衬砌结构渗漏水情况。隧道渗漏水已成为我国铁路隧道工程

最为普遍的病害之一<sup>[1]</sup>,为减少隧道渗漏水对隧道运营中的破坏,建立隧道渗漏水病害发生可能性等级预测——运营隧道渗漏水病害等级评价——现场实测资

\* 收稿日期: 2009 - 10 - 30

基金项目:铁道部科技研究开发课题 (2006G - 047);上海市教育委员会重点学科建设项目资助 (J51401);博士科研启动基金 (09 - 20)

\*\* 作者简介:潘海泽, 1978年出生,男,讲师。

料评价渗漏水病害等级的思路,对隧道渗漏水发生强度进行预测,同时对运营阶段的隧道漏水进行评价,进而有效地防治隧道渗漏水病害是隧道工程研究中的一个重要课题,本文采用距离判别法对隧道渗漏水病害等级进行预测,采用BP神经网络的方法对运营阶段隧道渗漏水病害进行等级评价,同时采用统计学的方法对现场实测的隧道渗漏水情况进行评价,并在实际工程中进行应用,取得了良好的效果。

1 隧道渗漏水发生的原因

根据对国内外文献的查阅以及对我国南北方95条典型隧道的调查,分析总结出了隧道渗漏水发生原因主要有自然地理状况、围岩及地下水情况、隧道施工因素、防排水工程措施因素4个一级指标。又可以分为10个二级指标(以 $X_j$ 表示),即:隧道埋深( $X_1$ )、

隧道区植被覆盖情况( $X_2$ )、隧道区气候情况<sup>[2]</sup>( $X_3$ )、隧道区平均降雨量( $X_4$ )<sup>[3-5]</sup>、隧道区地表水状况( $X_5$ )、隧道区地下水腐蚀情况<sup>[6-7]</sup>( $X_6$ )、隧道区围岩裂隙情况<sup>[8-9]</sup>( $X_7$ )、隧道的施工情况<sup>[10]</sup>( $X_8$ )、隧道防排水工程措施的设计合理性( $X_9$ )、隧道防排水工程措施的破坏和堵塞情况( $X_{10}$ )。

2 隧道渗漏水发生等级预测

2.1 马氏距离在隧道渗漏水病害等级预测中的应用

本文借鉴判别分析理论的思想,同时考虑到时隧道渗漏水等级的预测,筛选了隧道渗漏水发生原因中10个因素中的8个,不包括隧道防排水工程措施的设计合理性( $X_9$ )、隧道防排水工程措施的破坏和堵塞情况( $X_{10}$ ),进行隧道渗漏水等级预测,因子归一化结果如表1所示。

表 1 归一化结果示意表

分项指标	区分程度区间及分值结果				
植被覆盖情况	茂密	较茂密	一般	较稀疏	稀疏
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
隧道区气候	年平均气温在零下5℃,风速很大,空气干燥	年平均气温在-5~0℃,湿度很小,风速较大	年平均气温在0℃以上,湿度一般,风速较大	年平均气温在0℃以上,湿度较大,降水多,风速小	年平均气温在0℃以上,湿度很大,降水多,风速小
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
地表水状况	无地表水系	有小型地表水体 $Q < 5 \text{ m}^3$	有小型地表水体 $Q > 5 \text{ m}^3$	有大型地表水体的中型河	有大型地表水体的大型河
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
地下水腐蚀情况	pH>7.9地下水无侵蚀性	pH6.1~7.9地下水有微弱侵蚀性	pH5.1~6.0地下水有弱侵蚀性	pH4.1~5.0地下水有一般侵蚀性	pH<4.0侵蚀性地下水
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
围岩裂隙联通情况	裂隙不发育紧闭,含水层渗透系数 $k < 0.001$	裂隙发育张开,含水层渗透系数 $0.001 < k < 0.01$	断层破碎带,含水层渗透系数 $0.01 < k < 1$	岩溶裂隙发育,含水层渗透系数 $1 < k < 10$	岩溶断层带,有大型溶洞、暗河,含水层渗透系数 $k > 10$
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
隧道设计与施工情况	好	较好	一般	较差	差
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
隧道埋深/m	<100	100~400	400~700	700~1 000	>1 000
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
隧道区平均降雨量/mm	<200	200~400	400~800	800~1 600	>1 600
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
隧道防排水工程措施的设计合理性	合理	较合理	一般	较不合理	不合理
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
隧道防排水工程措施的破坏和堵塞情况	轻微	较轻微	中度	较严重	严重
分值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1

2.1.1 距离判别分析理论

判别分析是用于判断样品所属类别的一种应用性

很强的统计方法,并已渗透到各个科学领域,该方法通常从各训练样本中提取已有的各总体的信息,构造一

定的判别准则,判断新样品属于哪个总体,其中距离判别的基本思想是:样品距哪个总体距离最近,就判它属于哪个总体<sup>[11-12]</sup>。

多个总体的判别准则如下:

设总体  $G = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}^T$  为  $G = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$  是  $m$  元总体 (考察  $m$  个指标), 其中样本  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ , 令  $u_i = E(x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 则总体均值向量为  $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ , 总体的协方差矩阵为公式 (2)。设有  $K$  个  $m$  元总体:  $G_1, G_2, \dots, G_k$  ( $k > 2$ ) 从中任意取 2 个总体  $G_p, G_q$ , 考察新样本  $X$  到总体  $G_p, G_q$  的马氏距离平方差为:

$$d^2(X, G_q) - d^2(X, G_p) = -2[W_q(X) - W_p(X)] \tag{1}$$

其中:  $W_p(X) = (\mu_p^{-1} X - 0.5 \mu_p^{-1} \mu_p)^T (\mu_p^{-1} X - 0.5 \mu_p^{-1} \mu_p)$ ,  $W_q(X) = (\mu_q^{-1} X - 0.5 \mu_q^{-1} \mu_q)^T (\mu_q^{-1} X - 0.5 \mu_q^{-1} \mu_q)$ , 由此有:  $d^2(X, G_q) < d^2(X, G_p) \Leftrightarrow W_p(X) < W_q(X)$

一般情况下,总体的均值向量  $u_1, u_1 \dots u_k$  和公共协方差矩阵是未知的,可以利用各总体的学习样本进行统计。

设  $X_t^{(q)} = \{x_{t1}^{(q)}, x_{t2}^{(q)}, \dots, x_{tm}^{(q)}\}$  ( $q = 1, 2, \dots, k; t = 1, 2, \dots, n_q, n_q$  为总体  $G_q$  的学习样本个数), 则  $\mu_q$  的无偏估计为:

$$\bar{X}^{(q)} = \left\{ \frac{1}{n_q} \sum_{t=1}^{n_q} x_{t1}^{(q)}, \dots, \frac{1}{n_q} \sum_{t=1}^{n_q} x_{tm}^{(q)} \right\} \tag{2}$$

学习样本的协方差矩阵  $S_q$  的估计为组内协方差矩阵  $S_q$ :

$$S_q = \frac{1}{n_q - 1} \sum_{t=1}^{n_q} [X_t^{(q)} - \bar{X}^{(q)}] [X_t^{(q)} - \bar{X}^{(q)}]^T \tag{3}$$

当各总体的协方差矩阵相等时,则此时总体的协方差矩阵的一个无偏估计为:

$$S = \frac{1}{\sum_{q=1}^k (n_q - 1)} \sum_{q=1}^k S_q \tag{4}$$

以  $\bar{X}^{(q)}$  和  $S$  分别代替  $\mu_q$  和  $S_q$ , 从而可以得到:  $W_{(q)}(X)$  ( $q = 1, 2, \dots, k$ ) 的估计为:

$$W_{(q)}(X) = (S^{-1} \bar{X}^{(q)})^T X - 0.5 (\bar{X}^{(q)})^T S^{-1} \bar{X}^{(q)} \tag{5}$$

因此,多总体情况下的距离判别准则为:若总体  $G_{q0}$  满足  $W_{q0}(X) = \max_{1 \leq q \leq k} W_q(X)$ , 则  $X \in G_{q0}$ 。

2.1.2 隧道渗漏水预测距离判别分析模型

根据对我国南北方隧道的调查资料,选择 10 个实例作为学习样本进行训练,将隧道渗漏水的情况分为轻微、较轻微、中等、较严重、严重 5 个等级,即总体为  $G = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{10}\}^T$  为十元总体,建立距离判别分析模型,以  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{10}$  这 10 个指标作为输入层单元,对 10 组渗漏水资料数据进行规格化后作为学习样本生成学习样本集,以  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5$  作为输出层单元,判别层为  $W_q(X)$  ( $q = 1, 2, 3$ )。利用样本数据进行训练,经过训练过后的模型,利用回代估计法对学习样本判别,预测结果和期望输出结果一致,预测结果全部准确,所以误判率为 0。由此可见,距离判别分析模型用于隧道渗漏水发生与否及其渗漏水等级的预测,是完全可行并且高效的。

2.1.3 距离判别分析法在隧道渗漏水病害等级预测中的应用

以魏黄隧道和大寨隧道为例,利用马氏距离预测方法预测隧道渗漏水病害等级,2 个隧道预测因子的归一化结果如表 2 所示。利用学习好的距离判别分析模型对 2 个隧道渗漏水病害等级进行预测,预测结果显示,魏黄隧道将发生轻微渗漏,而大寨隧道的渗漏情况将较严重。

表 2 隧道判别因子归一化及预测结果表

隧道名称	判别因子								DDA 预测等级
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	
大寨隧道	0.7	0.5	0.1	0.1	0.3	0.5	0.3	0.3	
魏黄隧道	0.7	0.9	0.3	0.3	0.9	0.9	0.7	0.9	

3 运营隧道渗漏水病害等级评价

这里根据渗漏水成因分析中的病害等级判定指标:  $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_{10})$  与安全等级判定集  $U =$  (轻微、较轻微、中等、较严重、严重), 采用 BP 算法建立隧道渗漏水病害等级评价模型并进行渗漏水病害等级评价,因子的归一化结果如表 1 所示。

这里选取 8 个南北方隧道作为训练样本,按照马氏距离中的隧道渗漏水病害评价指标的归一化方法,将 BP 神经网络评价隧道渗漏水病害等级的指标归一化,归一化数值如表 3 所示。将 5 类样本的期望输出值依次设置为: “1, 0, 0, 0, 0”(类); “0, 1, 0, 0, 0”(类); “0, 0, 1, 0, 0”(类); “0, 0, 0, 1, 0”(类); “0, 0, 0, 0, 1”(类)。神经网络的隐含层为 1 层,含 21 个节

点,训练迭代次数为 26次,收敛度达 0.000 480 578,经过学习,网络完全识别了所给的学习样本,建立了评价因素与隧道渗漏水病害等级之间的复杂映射关系(误差曲线如图 1所示),然后通过得出的非线性映射关系,来评价隧道渗漏水病害等级,是一种快速准确评价的有效方法<sup>[13-14]</sup>。

这里依然选择魏黄隧道和大寨隧道作为测试的样本,输入数据如表 4所示。输出结果为:(0.992 2, 0.057 3, 0.011 5, 0.000 0, 0.000 0)和(0.000 1, 0.000 0, 0.126 9, 0.963 3, 0.000 0),评价等级为 级(轻微)、(较严重),评价结果与马氏距离预测的等级一致。

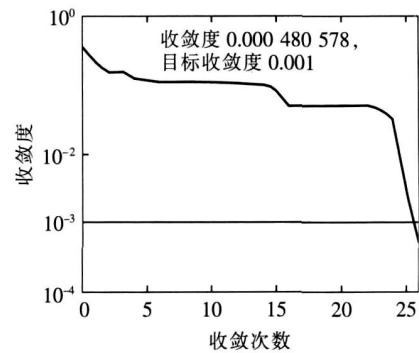


图 1 BP网络训练误差收敛图

表 3 隧道渗漏水判别因子归一化结果表

隧道名称	判别因子										等级
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	
大秦军都山隧道	0.9	0.7	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	
隆化隧道	0.9	0.5	0.3	0.7	0.5	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	
大瑶山隧道	0.5	0.5	0.1	0.9	0.3	0.7	0.5	0.7	0.5	0.3	
成昆线前进隧道	0.7	0.7	0.1	0.3	0.3	0.7	0.3	0.5	0.5	0.3	
阳安线马岭隧道	0.7	0.9	0.3	0.3	0.1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	
新龙角 1 隧道	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.7	
岭头隧道	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.5	0.1	0.1	0.3	0.1	
牛舌口隧道	0.9	0.9	0.3	0.3	0.7	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	

表 4 大寨隧道与魏黄隧道判别因子归一化结果表

隧道名称	判别因子									
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
大寨隧道	0.7	0.5	0.1	0.1	0.3	0.5	0.3	0.3	0.1	0.3
魏黄隧道	0.7	0.9	0.3	0.3	0.9	0.9	0.7	0.9	0.9	0.9

4 现场实测资料评价渗漏水病害等级

根据 95条南北方典型隧道的渗漏水调查资料,将集中涌水点(处)、点漏(处)、面漏(处)、缝漏(处)、基底水害(处)根据其对隧道渗漏水病害的影响程度赋予一定的权值,为了综合衡量一条隧道的渗漏水病害的严重程度,把发生渗漏水处的数值与相应权值相乘的数值除以其隧道的长度。此值定为  $K$ ,根据对 95条运营隧道的渗漏水调查的结果统计,我们按照  $K$  值的大小把隧道渗漏水病害分为了 5个等级,即  $K \leq 0.001$  (轻微)、 $0.001 < K \leq 0.01$  (较轻微)、 $0.01 < K \leq 0.1$  (中度)、 $0.1 < K \leq 1$  (较严重)、 $K > 1$  (严重)。为了方便操作,本文用 VB 编写了现场调查渗漏水情况评价等级的程序。这里仍然以大寨隧道和魏黄隧道为例进行了渗漏水病害等级评价,评价结果与马氏距离预测的结果以及 BP神经网络的预测结果一致。

5 结论

大寨隧道和魏黄隧道的预测、评价、实测值判断的渗漏水病害等级一致,这些研究有利于施工和设计单位预防和治理隧道的渗漏水病害,但是需要指出的是,每种方法各有利弊,这里以实测值的渗漏水病害等级评价为准。本文确定现场实测渗漏水情况的  $K$  值,提出  $K$  值不同等级的范围,以此来判断隧道渗漏水病害等级。为了更好地避免渗漏水病害的发生,可以采用距离判别法预测隧道的渗漏水病害等级,然后根据其预测的严重程度,在设计和施工上采取针对性的措施,以有效地避免隧道渗漏水病害。在隧道运营阶段可以采用 BP神经网络的方法来评价隧道渗漏水病害的等级,根据隧道渗漏水病害的成因分析,采取有效的措施,治理隧道渗漏水病害,同时需要指出的是,BP神经网络需要一定的样本,操作起来有一定难度。

## 参考文献:

- [1] A. KocbayR Kilic: Engineering Geological Assessment of the Obruk dam site ( Corum, Turkey ) [ J ]. Engineering Geology. 2006(3/4):141 - 148
- [2] YoshimuraJ, Design for frost prevention in road tunnels: simplified design method for insulator between the outer and inner lining [ C ] //Pro of the Int congression Tunnel and underground works Today and Future, 1990:55 - 63
- [3] 蒋忠信. 隧道工程与水环境相互作用 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2005 (1): 121 - 127.  
Jiàng Zhongxìn. Interaction between Tunnel Engineering and Water Environment [ J ]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2005 (1): 121 - 127.
- [4] 张卢明,何敏,郑明新. 降雨入渗对滑坡渗流场和稳定性的影响分析 [ J ]. 铁道工程学报, 2009 (7): 15 - 19.  
Zhang Lumíng, He Mínn, Zheng Míngxìn. Effects Analysis of Rainfall Infiltration on the Landslide Seepage Field and Stability [ J ]. Journal of Railway Engineering Society, 2009 (7): 15 - 19.
- [5] 吴治生. 不同地质边界条件岩溶隧道涌水量预测及展望 [ J ]. 铁道工程学报, 2007 (11): 48 - 50.  
Wú Zhìshēng. Prediction of Water - bursting Volume in Karst Tunnel under Different Geological Boundary Conditions [ J ]. Journal of Railway Engineering Society, 2007 (11): 48 - 50.
- [6] N Loganathan. Analytical Prediction for Tunneling - Induced Ground Movements in Clays [ J ]. Journal of Geotechnique and Geoenvironmental Engineering 1998 (1): 49 - 58.
- [7] Daniel Eklund, Hakan stille penetrability due to filtration tendency of cement - based grouts [ J ]. Tunneling and underground space technology, 2008 (4): 389 - 398.
- [8] 江亦元,王星华. 昆仑山隧道渗漏水原因探讨及治理 [ J ]. 中国铁道科学, 2005 (4): 52 - 56  
Jiàng Yìyuán, Wáng Xīnghuá. Study on Waterproof Treatment and Causes for Leakage Water of Kunlun Mountain Tunnel [ J ]. China Railway Science, 2005 (4): 52 - 56.
- [9] Pal, Lokendra A Simple Method for Calculation of Pemeability Coefficient of Porous Media [ C ] //2006 TAPPI Papemakers Conference And 2006 TAPPI Coating And Graphic Arts Conference Proceedings 2006:10 - 16
- [10] 吕康成,崔凌秋. 隧道防排水工程指南 [ M ]. 北京:人民交通出版社, 2005.  
Lǚ Kāngchéng, Cui Língqiū. Engineering Guiding of Waterproofing and Drainage for Tunnels [ M ]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [11] 宫凤强,李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别分析方法及应用 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2007 (5): 1012 - 1018  
Gōng Fēngqiáng, Lǐ Xībīng. A Distance Discriminant Analysis Method for Prediction of Possibility and Classification of Rock Burst and Its Application [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007 (5): 1012 - 1018.
- [12] 宫凤强,李夕兵. 距离判别分析法在岩体质量等级分类中的 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2007 (1): 191 - 194.  
Gōng Fēngqiáng, Lǐ Xībīng. Application of Distance Discriminant Analysis Method to Classification of Engineering Quality of Rock Masses [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007 (1): 191 - 194.
- [13] 贺清碧,周建丽. BP神经网络收敛性问题的改进措施 [ J ]. 重庆交通学院学报, 2005 (2): 143 - 145.  
Hè Qīngbì, Zhōu Jiànlì. The Convergence and Improvements of BP Neural Network [ J ]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005 (2): 143 - 145.
- [14] 林国玺,宣慧玉. 遗传算法和 BP人工神经网络在税收预测中的应用 [ J ]. 系统工程理论方法应用, 2005 (4): 145 - 148  
Lín Guóxǐ, Xuān Huìyù. Application Research on Tax Forecasting Based on Genetic Algorithms and BP Artificial Neural Networks [ J ]. System Engineering Theory Methodology Application, 2005 (4): 145 - 148.