

基于 Copula – 云模型的地铁运营隧道渗漏水 风险评价

陈三强¹, 陈虹宇², 吴贤国³, 秦文威³, 汤扬屹³

(1. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030; 2. 南洋理工大学 土木工程与环境学院, 新加坡 639928; 3. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对运营隧道渗漏水危害等级评价中具有模糊性、不确定性问题, 本文将 Copula 函数与云模型相结合, 提出一种适用于运营隧道渗漏水危害等级评价的模型。构建 Copula – 云模型评价方法体系, 具体包括划分指标等级状态、构建云模型、选择 Copula 函数、构建 Copula – 云模型、风险等级隶属度计算等步骤。基于运营隧道渗漏水影响因素分析的大量工程实践和参考文献, 对运营地铁隧道渗漏水来源进行梳理, 建立自然条件、围岩及地下水、隧道设计、施工与运营五个方面一级指标, 以及五个因素下得到的 17 个具体二级子因素, 建立运营地铁隧道渗漏水危害指标评价体系及等级评定标准。以武汉地铁 2 号线上的循礼门站、中南路站、江汉路站及三号线上的王家湾站、香港路站为运营地铁隧道渗漏水危害等级评定案例, 采用 Copula – 云模型对五个站点的区块进行渗漏水危害等级划分, 评价结果与实际相符, 表明了研究方法的正确性。

关键词: 运营隧道; 渗漏水; 风险评价; Copula 函数; 云模型

中图分类号: U231+.94; U457+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2019) 05-0090-06

Risk Assessment of Metro Tunnel Leakage Based on Copula-cloud Model

CHEN San-qiang¹, CHEN Hong-yu², WU Xian-guo³, QIN Wen-wei³, TANG Yang-yi³

(1. Wuhan Metro Group Co Ltd, Wuhan 430030, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639928, Singapore; 3. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the fuzziness and uncertainty in the evaluation of the leakage level of the operating tunnel leakage, this paper combines the Copula function with the cloud model, and proposes a model suitable for the evaluation of the leakage level of the operating tunnel leakage, and constructs the Copula-cloud model. The evaluation method system includes the steps of dividing the indicator level status, constructing the cloud model, selecting the Copula function, constructing the Copula-cloud model, and calculating the risk level membership degree. Based on a large number of engineering practices and references for analyzing the influencing factors of leakage of operating tunnels, the sources of leakage water in the operation of subway tunnels are sorted out, and the first-level indicators of natural conditions, surrounding rock and groundwater, tunnel design, construction and operation are established. Under the five factors, 17 specific secondary sub-factors are carefully analyzed to establish an evaluation index system and rating criteria for the water leakage in the subway tunnel. To evaluate the leakage level of the subway tunnels in Xunlimen Station, Zhongnan Road Station and Jiangnan Road Station on Wuhan Metro Line 2, Wangjiawan Station and Hongkong Road Station on

收稿日期: 2018-12-11 修回日期: 2019-05-28

作者简介: 陈三强(1968-) 男, 湖北崇阳人, 高级工程师, 研究方向为地铁运营维保管理(Email: liuling520aaa@163.com)

通讯作者: 陈虹宇(1995-) 女, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向为工程管理(Email: 2991811227@qq.com)

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800208); 国家自然科学基金(51378235; 71571078; 51778262; 51308240); 武汉市建委科技项目(201414; 201619; 201334)

Line 3, the Coupla-cloud model is adopted. The level of the leakage of the five sites is divided, and the evaluation results are consistent with the actual conditions, indicating the correctness of the research method.

Key words: operating tunnel; leakage water; risk evaluation; Copula function; cloud model

伴随着我国城市化进程加快、经济增长方式转型注重质量的提升,我国基础设施建设中的轨道交通如雨后春笋般涌现。随着地上空间利用趋于饱和,我国逐渐转向地下空间开发与利用,其中隧道工程与日俱增。然而因地铁工程多在地下,在众多病害中,渗漏水病害在运营隧道中发生较为频繁。运营地铁隧道内发生渗漏水不但会造成隧道结构出现开裂、内部结构装修腐蚀,导致隧道内附属设备使用寿命变短、列车运行效率与安全性降低等,使得运营地铁维护困难,严重者会造成人员伤亡及财产损失。因此,如何有效地进行运营地铁渗漏水评价,有重点地采取预防渗漏水病害的发生,是运营地铁工程领域需要迫切解决的一大难题。

Copula 函数作为多变量相关性分析函数,能表达出危害变量之间的相关性,云模型作为一种定性定量之间相互转换的模型可以用于描述运营隧道渗漏水中评价指标中的风险不确定性与模糊性,同时利用 Copula 函数方法和云模型方法,使之可以很好的结合,有助于消除一般评价模型不够客观的弊病。Eryilmaz 等^[1]在 Copula 基本理论分析的基础上,进行了关于系统生存函数以及动态可靠性的模型构建,同时对此模型进行了大量科学可靠的分析。Jiang 等^[2]为了研究工程结构的可靠度,利用 Copula 函数建立了证据理论模型。为了能够对更复杂的相关性进行合理建模,秦振江等^[3]为解决复杂程度更大的相关性而建立相关科学模型,找出了 Copula 函数在此分析上面的优势,并提出其可以应用到实际近海工程施工中。李典庆等^[4,5]则利用 Gaussian Copula 函数构建了岩土体工程的一些非正态参数联合概率分布函数,可有效应用于实际工程。基于 Copula 理论对结构的可靠度进行研究,还处于初级阶段,特别是对于地铁结构可靠性等的研究几乎一片空白。而且因为工程项目的复杂性,在此领域里普遍存在不确定性,导致产生了两种性质,即模糊性以及随机性,云模型的出现就是为了较好地分析这两种性质之间的关联性^[6];目前,云模型方法也已被普遍应用到各种工程的风险评价中^[7~10]。

针对运营隧道渗漏水危害等级评价中具有模糊性、不确定性问题,本文将 Copula 函数与云模

型相结合,提出一种适用于运营隧道渗漏水危害等级评价方法体系。基于运营隧道渗漏水影响因素分析的大量工程实践和参考文献,从自然条件、围岩及地下水、设计与施工因素、运营因素五个方面出发建立起运营隧道渗漏水危害等级评价指标体系;根据建立起来的地铁运营隧道渗漏水危害等级评价指标体系,采用 Coupla - 云模型评价武汉地铁运营隧道渗漏水危害等级。

1 研究方法

1.1 Copula 理论

Copula 源于 Sklar 定理,Sklar 定理于 1959 年被提出。应用比较广泛的 Copula 函数有多种,其中阿基米德(Archimedean) Copula 函数因其相对简单的形式、对称性质以及可结合性等优势,而成为了各种 Copula 函数中比较重要的一类。其中比较常用的 Frank Copula 函数的分布函数 $C(x, y; \lambda)$ 和密度函数 $c(x, y; \lambda)$ 如式(1)(2)所示。

$$C(x, y; \lambda) = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\lambda x} - 1)(e^{-\lambda y} - 1)}{e^{-\lambda} - 1} \right] \quad (1)$$

$$c(x, y; \lambda) = \frac{-\lambda(e^{-\lambda} - 1)e^{-\lambda(x+y)}}{[(e^{-\lambda} - 1) + (e^{-\lambda x} - 1)(e^{-\lambda y} - 1)]^2} \quad (2)$$

式中: λ 为相关参数, $\lambda \neq 0$, λ 取正(负)值时,其相关性显著,越接近零关联性越小。

1.2 二维云模型理论

二维云为一维云在二维空间的延伸,与一维云特征一样,二维云也是用云模型的三个特征值(E_x, E_n, He)表示,只是涉及两个变量。

假设满足二维正态分布的随机函数为 $N(E_{x_i}, E_{x_j}, E_{n_i}, E_{n_j})$, 在此随机函数中 E_{x_i}, E_{x_j} 为期望, E_{n_i}, E_{n_j} 为熵, He_{x_i}, He_{y_j} 为超熵,满足式(3)~(5)的云滴(x_i, y_i, μ_i) $i=1, 2, \dots, n$, 也即服从正态分布的云滴(各个点)共同形成的云模型,就是二维正态云模型。

$$(x_i, y_i) = N(E_{x_i}, E_{x_j}, E_{n_i}, E_{n_j}) \quad (3)$$

$$(P_{x_i}, P_{y_i}) = N(E_{n_i}, E_{n_j}, He_{x_i}, He_{y_j}) \quad (4)$$

$$\mu_i = e^{-\left[\frac{(x_i - E_{x_i})^2}{2P_{x_i}^2} + \frac{(y_i - E_{y_i})^2}{2P_{y_i}^2}\right]} \quad (5)$$

1.3 Copula – 云模型评价方法

针对运营隧道渗漏水危害等级评价中具有模糊性、不确定性和指标定权问题,本文将 Copula 函数与云模型相结合,提出一种适用于运营隧道渗漏水危害等级评价的模型。Copula 函数作为多变量相关性分析函数,能表达出危害变量之间的相关性,且云模型作为一种定性与定量之间相互转换的模型可以用于描述运营隧道渗漏水中评价指标的风险不确定性与模糊性,将 Copula 函数与云模型结合克服了传统评价模型的主观性^[4,5],其具体步骤如下:

Step 1: 选取指标,划分等级状态

首先选取相互关联的指标,将一级指标下面的二级指标作为相关联指标,然后根据各个指标的危害程度进行等级划分,共设 m 个等级。

Step 2: 构建云模型

针对 n 个指标的 m 个等级(本文中一共选取 17 个二级指标,5 个等级),分别构建云模型。设指标 x 的第 i 等级的上下界限为 (x_{imin}, x_{imax}) ,则该等级一维云模型的三个特征值 (Ex_x, En_x, He_x) 按式(6)计算,其中 s 为常量。

$$\begin{cases} Ex_x = \frac{x_{imin} + x_{imax}}{2} \\ En_x = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{6} \\ He_x = s \end{cases} \quad (6)$$

对两随机变量 x 和 y ,其一维云模型分别为 (Ex_x, En_x, He_x) 与 (Ex_y, En_y, He_y) ,联合构建二维云模型 $(Ex_x, En_x, He_x; Ex_y, En_y, He_y)$;同理对三维变量 x, y, z ,其一维云模型分别为 (Ex_x, En_x, He_x) 、 (Ex_y, En_y, He_y) 和 (Ex_z, En_z, He_z) ,联合构建二维云模型 $(Ex_x, En_x, He_x; Ex_y, En_y, He_y; Ex_z, En_z, He_z)$ 。

Step 3: 选择 Copula 函数

因不同指标之间关联性不同,因而对于指标变量之间 Copula 函数的选择就显得非常重要。本文采用阿基米德 Copula 函数作为随机变量,且采用两个随机变量,同时分别采取 Clayton, Gumbel, Frank Copula 三种函数代入前面选取的阿基米德 Copula 函数变量指标,并对指标之间进行相依性分析。而对于多维变量,则选取藤 Copula 函数,在计算变量之间的相依性时将多维变量先转化为多个二维变量再进行分析。

Step 4: 计算 Copula 参数相关系数 θ

在 Copula 函数中常用 Kendall 秩相关系数 τ 法、Spearman 秩相依系数 ρ 法和 Gini 相关系数 γ 法这三种方法作为测算随机变量之间的相关性。本文采取 Kendall 秩相关系数法计算 Copula 相关参数,这种算法中常用的一个函数是 Frank Copula 函数,详细的函数如式(7)所示。

$$\tau = 1 + 4 \frac{D_1(\gamma) - 1}{\gamma} \quad (7)$$

Frank Copula 函数相关性参数 γ 与 τ 关系如下:

$$D_1(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \int_0^\gamma \frac{t}{e^t - 1} dt \quad (8)$$

τ 的计算可采用 Matlab,对于两随机变量,在 Matlab 中输入代码如下:

输入: 变量 x 和 y 的监测值所构成的向量;

`corr(x, y, 'type', 'Kendall');`

输出: 变量 x 和 y 间的 Kendall 秩相关系数 τ 。

而对于三元以上的变量 x, y, z, \dots ,在利用 Matlab 计算出 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \dots$ 后,则需根据式(9)进行转换之后得到相关系数 θ 。

$$\theta = 1/n [1/(1 - \tau_{xy}) + 1/(1 - \tau_{yz}) + 1/(1 - \tau_{xz}) + \dots] \quad (9)$$

Step 5: 构建 Copula – 云模型

根据秩相关系数 τ 与 Copula 函数相关性参数之间的公式变换,可得相关性参数,本文中 Copula 函数的变量采用云模型的语义表示,为了指标云模型对应的数据具有连贯性,本文结合云模型特征,将指标随机变量 x 第 i 等级 (x_{imin}, x_{imax}) 从 Ex_{xi} 划分为两段,分别为 (x_{imin}, Ex_{xi}) 和 (Ex_{xi}, x_{imax}) ,变量 y 也按同样方法划分。对两随机变量 x 和 y ,建四段 Copula – 云模型,用两随机指标云模型等级区间表示,如式(10)所示。

$$\begin{cases} (x_{imin}, Ex_{xi}; y_{jmin}, Ex_{yj}) \\ (x_{imin}, Ex_{xi}; Ex_{yj}, y_{jmax}) \\ (Ex_{xi}, x_{imax}; y_{jmin}, Ex_{yj}) \\ (Ex_{xi}, x_{imax}; Ex_{yj}, y_{jmax}) \end{cases} \quad (10)$$

Step 6: 风险等级隶属度计算

因多数随机变量服从正态分布,文章指标变量相依性隶属度基于 Copula 与服从正态分布的多维云计算,见式(11),该式可计算出多维变量对各个等级的隶属度。

$$\begin{cases} \mu(x_1, x_2, \dots, x_n) = aC(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) + \\ b \exp\left(\sum_{i=1}^n [-(x_i - Ex_i)^2 / Enn_i^2]\right) \\ Enn_i = En_i + s_i \text{rand}() \\ a + b = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $C(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)$ 为固定选择的 Copula 函数; θ 为 Copula 函数中相对应的相关性参数; a, b 分别为 Copula 函数以及正态云分布函数的系数, 本文设定 $a = 0.5, b = 0.5$; s 为常量。通过正态分布公式 $\exp\left(\sum_{i=1}^n [-(x_i - Ex_i)^2 / 2Enn_i^2]\right)$ 可得指标隶属度。

2 运营地铁隧道渗漏水危害等级评价指标构建

在通过实际工程实践和大量文献阅读分析

后,发现运营地铁隧道发生渗漏水的各种不同方面的原因包括:(1)自然条件的影响,这些影响因素包括降水量、植被覆盖率、温度以及湿度等;(2)围岩及地下水,指隧道所处的地下环境与本身所具备的因素;(3)隧道设计因素,包括材料、防水方面的设计;(4)隧道施工,包含了工程施工所包含的混凝土主要材料、衬砌厚度以及工程施工质量的评价定级;(5)隧道运营维护,包括维护管理及排水管理。这五个因素又可以细分为 17 个具体的子因素。下面从这五个大方面的因素着手分析,以进行科学合理的等级划分。

对运营地铁隧道渗漏水的来源的梳理,以及对运营地铁隧道工程中地下水环境效应与以往工程实例中运营地铁隧道渗漏水受到影响因素的分析,从自然条件、围岩及地下水、隧道设计、施工与运营五个方面出发,本文建立运营地铁隧道渗漏水危害指标评价体系及等级评定,如表 1 所示。

表 1 运营地铁隧道渗漏水危害指标评价体系及等级评定

评价指标		评价等级				
1 级	2 级	I	II	III	IV	V
自然条件	年均降雨量/mm	0~200	200~600	600~1000	1000~1600	>1600
	地表汇水面积/km ²	0~20	20~40	40~80	80~100	>100
	不良地质条件	无	轻微	中度	严重	很严重
	隧道内湿度	干燥	湿度很小	湿度一般	湿度较大	湿度很大
围岩及地下水	围岩裂隙联通情况	0~0.01	0.01~0.5	0.5~0.6	0.6~0.8	0.8~1
	地下水腐蚀情况 PH	>7.9	5.5~7.9	4.0~5.5	3.0~4.0	2.0~3.0
	地下水位差/mm	400~500	300~400	100~300	50~100	0~50
隧道设计	三缝防水设计	防水处理完善	防水处理较好	防水处理一般	防水处理欠缺	无防水处理
	防水材料性能	很好	较好	一般	差	较差
	注浆防水措施	综合规范与经验	按设计要求	按经验	不足	无
隧道施工	衬砌厚度	2/3~1	1/2~2/3	1/3~1/2	1/6~1/3	0~1/6
	施工质量	很好	较好	一般	差	较差
	混凝土强度	2/3~1	1/2~2/3	1/3~1/2	1/6~1/3	0~1/6
	防排水施工	完备	较完备	一般	部分处理	无
隧道运营维护	维护管理	正确措施	措施较晚	措施滞后	部分处理	无
	排水沟泄水能力	大于最大设计	大于平均设计	达到平均设计	达到淡季设计	小于淡季设计
	排水泵站系统	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

3 工程实例

3.1 工程概况

本文选择武汉地铁 2 号线上的循礼门站、中南路站、江汉路及 3 号线上的王家湾站、香港路站为运营地铁隧道渗漏水危害等级评定的案例。

为获取运营地铁隧道的渗漏水危害状态,在查阅运营地铁隧道各种历史资料的同时,根据武汉地铁集团采用各项仪器获取运营地铁隧道中用

于评价渗漏水危害等级的指标数值,包括地表汇水面积大小、年均降雨量等各项指标。以上述五处所选区间的运营地铁隧道的获取数据为基础,构建多维 Copula - 云模型,进行相依性评价,评定运营隧道渗漏水危害所属等级。

3.2 渗漏水危害等级评价

3.2.1 指标等级状态划分

为便于分析,首先需对定性指标进行一定程度的量化处理。而且在实际工程中,定性指标的评价值由现场从事地铁施工的工程师依据工程实

际特性和施工管理经验,根据量化评分表上的内容就可以对定性指标进行科学的评定,合理判断这些指标所属的正确等级。本文对定性指标按定性指标量化表 2 中的准则进行量化处理,表 3 为

指标等级划分结果。

表 2 定性指标量化

安全等级	I	II	III	IV	V
数量化处理	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2

表 3 指标等级划分结果

指标	编号	等级				
		I	II	III	IV	V
年均降雨量/mm	A_1	[0, 200]	(200, 600]	(600, 1000]	(1000, 1600]	(1600, 1800]
地表汇水面积/km ²	A_2	[0, 20]	(20, 40]	(40, 80]	(80, 100]	(100, 120]
不良地质条件	A_3	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
隧道内湿度	A_4	(0.9, 1]	(0.7, 0.9]	(0.5, 0.7]	(0.3, 0.5]	[0, 0.3]
围岩裂隙联通情况	B_1	(0, 0.01]	(0.01, 0.5]	(0.5, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]
地下水腐蚀情况 PH	B_2	(7.9, 8]	(5.5, 7.9]	(4, 5.5]	(3, 4]	(2, 3]
地下水位差/mm	B_3	(400, 500]	(300, 400]	(100, 300]	(50, 100]	[0, 50]
三缝防水设计	C_1	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
防水材料性能	C_2	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
注浆防水措施(完善程度)	C_3	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
衬砌厚度	D_1	(2/3, 1]	(1/2, 2/3]	(1/3, 1/2]	(1/6, 1/3]	(0, 1/6]
施工质量	D_2	[0, 0.04]	(0.04, 0.08]	(0.08, 0.12]	(0.12, 0.16]	(0.16, 0.2]
混凝土强度	D_3	(2/3, 1]	(1/2, 2/3]	(1/3, 1/2]	(1/6, 1/3]	(0, 1/6]
防排水施工	D_4	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
维护管理	E_1	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
排水沟泄水能力	E_2	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	(0, 0.2]
排水泵站系统	E_3	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]

3.2.2 二维云模型构建

对武汉运营地铁隧道各指标用 Copula - 云模型评价,本文仅以年均降雨量、地表汇水面积指标为例,按照式(6)计算各指标的云模型特征值,

表 4 为年均降雨量指标和地表汇水面积指标的一维云模型组合构建的二维云,其中第一行为地表汇水面积模型的特征值,第二行为年均降雨量云模型的特征值。

表 4 二维云模型

指标	等级	年均降雨量 A_1				
		I	II	III	IV	V
地表汇水能力 A_2	I	(10, 0.001, 0.0001) (100, 0.05, 0.005)	(30, 0.001, 0.0001) (400, 0.05, 0.005)	(60, 0.001, 0.0001) (800, 0.05, 0.005)	(90, 0.001, 0.0001) (1300, 0.05, 0.005)	(110, 0.001, 0.0001) (1700, 0.05, 0.005)
	II	(10, 0.001, 0.0001) (400, 0.05, 0.005)	(30, 0.001, 0.0001) (0.75, 0.083, 0.0083)	(60, 0.001, 0.0001) (0.75, 0.083, 0.0083)	(90, 0.001, 0.0001) (0.75, 0.083, 0.0083)	(110, 0.001, 0.0001) (0.75, 0.083, 0.0083)
	III	(10, 0.001, 0.0001) (800, 0.05, 0.005)	(30, 0.001, 0.0001) (1.25, 0.083, 0.0083)	(60, 0.001, 0.0001) (1.25, 0.083, 0.0083)	(90, 0.001, 0.0001) (1.25, 0.083, 0.0083)	(110, 0.001, 0.0001) (1.25, 0.083, 0.0083)
	IV	(10, 0.001, 0.0001) (1300, 0.05, 0.005)	(30, 0.001, 0.0001) (1.75, 0.083, 0.0083)	(60, 0.001, 0.0001) (1.75, 0.083, 0.0083)	(90, 0.001, 0.0001) (1.75, 0.083, 0.0083)	(110, 0.001, 0.0001) (1.75, 0.083, 0.0083)
	V	(10, 0.001, 0.0001) (1700, 0.05, 0.005)	(30, 0.001, 0.0001) (2.25, 0.083, 0.0083)	(60, 0.001, 0.0001) (2.25, 0.083, 0.0083)	(90, 0.001, 0.0001) (2.25, 0.083, 0.0083)	(110, 0.001, 0.0001) (2.25, 0.083, 0.0083)

3.2.3 Copula 函数选择及 Copula 相关参数计算

选择阿基米德 Copula 函数中的 Frank Copula 函数,在 Matlab 中输入指标评定值,得到 Kendall 秩相关系数法 $\tau=0.209$ 。

3.2.4 Copula - 云模型构建

按上节所述,对表 2 中所列的 25 个二维云模型分别构建 Copula - 云模型,以年均降雨量指标和地表汇水面积指标的 I 等级为例,按式(9)构建

两个 Copula - 云模型,用等级区间表示分别为 (0, 50; 5, 10) 和 (50, 100; 5, 10)。在 Matlab 中绘制单个 Copula - 云模型,以 Clayton Copula 函数为例,三维立体图如图 1 所示,分别对应下述两个 Copula - 云模型。

将四个云图拼在一起,可得到年均降雨量指标和地表汇水面积指标关于等级 I 的 Copula - 云模型立体图。同理,可构建这两个指标关于其他

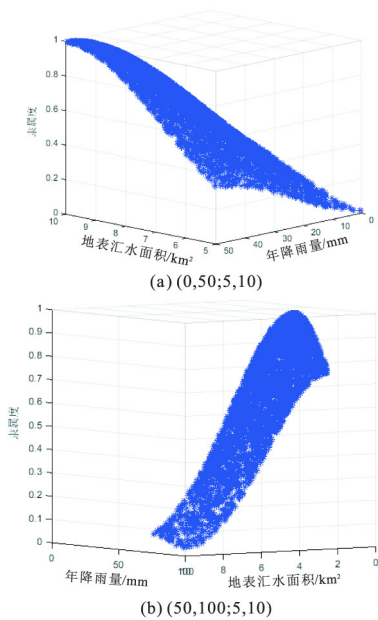


图 1 Copula – 云函数立体图

等级的共 20 个 Copula – 云模型。

3.2.5 N=4 的指标隶属度计算

对于 N=4 的二级指标 ,同样以自然条件中的年均降雨量 A₁、地面汇水面积 A₂、不良地质条件 A₃、隧道内湿度及湿度 A₄ 为例进行隶属度计算 ,其结果表示自然条件因素中的五个指标在相互作用下其一级指标自然条件 A 对五个等级的隶属程度 ,Copula 函数的计算结果如表 5 所示。

表 5 N=4 的二级指标对各等级的隶属度

指标	各等级隶属度				
	I	II	III	IV	V
年均降雨量 A ₁ /mm	0.0001	0	0	0	0
地表汇水面积 A ₂ /km ²	0.0205	0	0	0	0
不良地质条件 A ₃	0.4910	0.3183	0.1781	0.0849	0.0342
隧道内湿度 A ₄	0.4955	0.3636	0.2122	0.1058	0.0350

根据隶属度计算式(11) ,对自然条件下的各个指标进行综合隶属度计算 $\mu_i=0.5\theta+0.5(A_1+A_2+A_3+A_4)$ $i=I,II,\cdots,V$ 汇总后并对其进行归一化处理 ,各上级指标对各等级的隶属度如表 6 所示。图中加粗数字为五个等级对应数字中最大的数字 ,表示目前该指标隶属于该等级的程度最高。

表 6 各渗漏水指标对各等级的隶属度

指标	各等级隶属度					所属等级
	I	II	III	IV	V	
自然条件 A	0.572	0.170	0.155	0.076	0.027	I
围岩及地下水 B	0.210	0.774	0.008	0.006	0.002	II
隧道设计 C	0.756	0.175	0.034	0.031	0.004	I
隧道施工 D	0.096	0.753	0.098	0.021	0.032	II
隧道运营维护 E	0.050	0.108	0.678	0.112	0.052	III

根据专家经验对各指标赋值相同 ,权重: A : B : C : D : E=0.2 : 0.2 : 0.2 : 0.2 : 0.2 ,对每个站点

的一级指标进行加权 ,求得站点等级隶属度情况 ,见表 7。选取隶属度最高的作为该站点的渗漏水危害等级。

表 7 各站点渗漏水危害等级的隶属度

站点	危害等级的隶属度					所属等级
	I	II	III	IV	V	
江汉路站	0.337	0.396	0.195	0.049	0.023	II
循礼门站	0.498	0.256	0.123	0.085	0.038	I
中南路站	0.156	0.614	0.165	0.033	0.032	II
王家湾站	0.012	0.296	0.586	0.025	0.081	III
香港路站	0.139	0.611	0.168	0.059	0.023	II

上述江汉路站、中南路站、香港路站危害等级均属于 II 等级(从运营隧道指标计算中可能会存在滴水的危害) ,循礼门属于 I 等级(可能会存在渗润的危害) ,王家湾站隶属于 III 等级(可能存在流水的危害) 。结合运营地铁隧道发生危害等级 ,对风险指数相对较高的区域进行重点监测养护。

4 结 论

(1) 地铁工程众多病害中 ,渗漏水病害在运营隧道中发生较为频繁。运营地铁隧道内发生渗漏水不但会造成隧道结构出现开裂、内部结构装修腐蚀 ,导致隧道内附属设备使用寿命变短、列车运行效率与安全性降低等 ,使得运营地铁维护困难 ,严重者会造成人员伤亡及财产损失。因此 ,如何有效地进行运营地铁渗漏水评价 ,有重点的采取预防渗漏水病害的发生 ,是运营地铁工程领域需要迫切解决的一大难题。

(2) Copula 函数作为多变量相关性分析函数 ,能表达出危害变量之间的相关性 ,云模型作为一种定性定量之间相互转换的模型可以用于描述运营隧道渗漏水中评价指标中的风险不确定性与模糊性 ,将 Copula 函数与云模型结合可克服传统评价模型的主观性。针对运营隧道渗漏水危害等级评价中具有模糊性、不确定性问题 ,本文将 Copula 函数与云模型相结合 ,提出一种适用于运营隧道渗漏水危害等级评价方法体系。

(3) 基于运营隧道渗漏水影响因素分析的大量工程实践和参考文献 ,从自然条件、围岩及地下水、设计与施工因素、运营因素五个方面出发建立起运营隧道渗漏水危害等级评价指标体系; 根据建立起来的地铁运营隧道渗漏水危害等级评价指标体系 ,采用 Coupla – 云模型评价武汉地铁运营隧道渗漏水危害等级进行评价 ,明确了渗漏水风险等级需重点高监测的区域。 (下转第 101 页)

可行性以及操作简便性,可为其它 DB 模式施工招标确定评标指标权重提供参考。

参 考 文 献

- [1] Tran Dai Q, Diraviam G, Minchin R E. Performance of highway Design-Bid-Build and Design-Build projects by work types[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144(2): 04017112-1-9.
- [2] Yu D J, Wu Y Y, Zhou W. Multi-criteria decision making based on Choquet integral under hesitant fuzzy environment[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7: 4506-4513.
- [3] Xu Z, Xia M. Hesitant fuzzy entropy and cross-entropy and their use in multiattribute decision-making[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2012, 27: 799-822.
- [4] 刘红霞, 韩晓虎. 建筑工程招标中评价指标权重的研究——层次分析法(AHP) 应用[J]. 价值工程, 2014, (11): 95-96.
- [5] 孙现军. 基于主成分分析法的清单商务标评标方法及应用[J]. 建筑经济, 2011, (7): 58-61.
- [6] 罗 党, 孙慧芳, 毛文鑫. 基于三角模糊数-TOPSIS

的绿色施工评标方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 73-77.

- [7] 李 丹, 董志国. 模糊综合评价模型在评标中的应用——以高校物资采购为例[J]. 河南科学, 2012, 30(11): 1669-1671.
- [8] 王小忠, 刘晓东. 新疆库阿高速公路设计施工总承包应用探析[J]. 公路, 2012, (5): 268-270.
- [9] 邓 雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [10] 陈树伟, 蔡丽娜. 区间值犹豫模糊集[J]. 模糊系统与数学, 2013, 27(6): 38-44.
- [11] 胡冠中, 周志刚. 区间犹豫模糊熵应用于地方高等教育发展研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(23): 26-30.
- [12] 李香英. 区间犹豫模糊熵和区间犹豫模糊相似度[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(19): 227-231.
- [13] 郭秀英. 区间数指标权重确定的熵值法改进[J]. 统计与决策, 2012, (17): 32-34.
- [14] Grzegorzewski P. Distances between intuitionistic fuzzy sets and/or interval-valued fuzzy sets based on the Hausdorff metric[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148: 319-328.

(上接第 95 页)

参 考 文 献

- [1] Eryilmaz S. Multivariate copula based dynamic reliability modeling with application to weighted-k-out-of-n systems of dependent components[J]. Structural Safety, 2014, 51: 23-28.
- [2] Jiang C, Zhang W, Wang B, et al. Structural reliability analysis using a copula-function-based evidence theory model[J]. Computers and Structures, 2014, 143: 19-31.
- [3] 秦振江, 孙广华, 闫同新, 等. 基于 Copula 函数的联合概率法在海洋工程中的应用[J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 83-90.
- [4] 李典庆, 唐小松, 周创兵, 等. 基于 Gaussian Copula 函数的相关非正态岩土体参数不确定性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(12): 1440-1448.
- [5] 唐小松, 李典庆, 周创兵, 等. 基于 Copula 函数的

抗剪强度参数间相关性模拟及边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2284-2291.

- [6] 李德毅, 刘常昱, 杜 鹞, 等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594.
- [7] Dai J, Liu X. Approach for text classification based on the similarity measurement between normal cloud models[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 784392-1-9.
- [8] 胡甚平, 黄常海, 张 浩. 基于云模型的海上交通系统风险蒙特卡罗仿真[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 20-26.
- [9] 张秋文, 章永志, 钟 鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 87-95.
- [10] 吴贤国, 翟海周, 张立茂, 等. 基于云模型的改进 R=P×C 风险评价法[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(1): 37-42.