

基于云模型的综合管廊规划方案评价

李 锐¹, 李 婷², 景亚杰³, 张 弛¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西冶金设计研究院有限公司, 陕西 西安 710032;
3. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 城市综合管廊的规划是干线和支线规划相互协调的过程, 有必要在初步规划的基础上对规划方案做进一步的分析与评价。首先, 综合考虑综合管廊规划建设的主要影响因素, 从网络拓扑结构、社会效益和经济技术三个方面建立评价指标体系; 其次, 基于云模型构建综合管廊规划评价模型; 最后, 运用工程实例对评价模型进行验证。研究结果表明, 将云模型引入综合管廊规划领域, 可以综合考虑指标的模糊性和随机性, 弱化主观随意性, 为综合管廊规划方案的评价提供了理论依据。

关键词: 云模型; 综合管廊; 方案评价; 评价指标

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0511-06

Evaluation of utility tunnel planning scheme based on cloud model

LI Rui¹, LI Ting², JING Yajie³, ZHANG Chi¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China;
2. Shaanxi Metallurgical Design and Research Institute Co. LTD, Xi'an 710032, China;
3. School of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The planning of urban utility tunnel is a process of coordination between trunk line planning and branch line planning. It is necessary to further analyze and evaluate the plan on the basis of preliminary planning. First of all, the establishment of an evaluation index system is on the basis of three aspects: network topological indexes, social benefits indexes and economic and technical indexes considering main influence factors. Secondly, a utility tunnel planning evaluation model is built based on the cloud model. Finally, the evaluation model is validated by engineering examples, which proves the feasibility of the model. The establishment of cloud model provides a great reference for the evaluation of the utility tunnel planning scheme. The research results show that cloud method is introduced into the utility tunnel planning field to comprehensively consider the ambiguity and randomness of indicators, to weaken subjective randomness, and to provide a theoretical basis for the evaluation of utility tunnel planning.

Key words: cloud model; utility tunnel; scheme evaluation; evaluation index

城市综合管廊的规划是干线和支线规划相互协调的过程, 而且综合管廊作为服务于城市的市政基础设施, 在规划时需要考虑很多方面的因素, 包括社会效益、建设成本、施工难易性等等, 但是这些因素在规划过程中很难同时考虑进去, 使其达到最优。所以有必要在初步规划的基础上对规划方案做进一步的分析与评价。现阶段, 综合管廊的评价体系主要是对管廊的路径适建性、综合管廊建设区位分析的评价, 对综合管廊规划方

案的评价体系还较少, 主要有 Julian Canto-Perello 等采用 SWOT 分析与 AHP 分析相结合的 A'WOT 混合法研究城市地下综合管廊规划, 使用特征向量方法对它们进行优先排序^[1], 王海采用多因子叠加法初选, 模糊数学分析法复选, 最终确定综合管廊规划布局方案^[2], 叶晓东等提出了基于 GIS 分析的综合管廊规划布局量化评价方法^[3]。

“云”的概念最早是 1995 年由我国工程院院士李德毅提出来的, 这是一种不确定性推理技术,

是实现不确定性的定性知识与定量知识之间的转换的数学模型。云模型在传统模糊集理论的核心——模糊性的基础上融合了随机性,实现了定性概念和定量数据的同时兼容和自由转换^[4]。

本文以实现城市地下空间可持续发展为原则,建立评价指标体系,利用“云模型”的理论构建综合管廊规划方案评价模型。

1 评价指标体系建立

通过分析国内外城市地下市政综合管廊规划相关案例和文献资料,综合考虑综合管廊规划建设的主要影响因素,从网络拓扑结构、社会效益、经济技术三方面,提出以下管廊规划方案评价指标。

1.1 网络拓扑结构

(1) 网络结构熵

“熵”是用来度量系统无序程度的一个量。网络结构熵,也被称为网络拓扑熵,就是度量复杂网络的序状态的度量,它是定义在度分布上的^[5]。假设网络中节点 v_i 的重要度为 k_i ,可以定义网络结构熵为

$$E = - \sum_{i=1}^N I_j \ln I_j \quad (1)$$

式中, I_i 表示无权网络的节点 v_i 的重要度; E 表示网络结构熵。

(2) 连通度

在综合管廊网络中,连通度的大小反映了整个网络中节点之间的完善程度和整个系统运行的顺畅程度,用来描述网络拓扑结构的完整程度^[6]。综合管廊网络的连通度可表示为

$$C = \frac{L/\xi}{HN} = \frac{L/\xi}{\sqrt{AN}} \quad (2)$$

式中: C 为表示规划区域内管廊网络的连通度; L 为表示规划区域内管廊网络总长度, km; ξ 表示非直线系数; H 表示节点之间的平均直线距离, km; A 表示规划区域面积, km^2 ; N 表示规划区域连通的节点数。

(3) 非直线系数

线路长度与起、终点之间空间直线距离之比称为非直线系数^[7]。在管廊建设过程中,转弯交叉点等特殊节点处需要特殊处理,会额外增加其造

价。所以在规划时就应尽量做到平顺直。非直线系数可表示为

$$\sum_{i \in N, j \in N} \left[\frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right] \leq \left[\frac{L}{d} \right]_{\max} \quad (3)$$

式中: l_{ij} 为路径 $v_i - v_j$ 的长度, km; d_{ij} 为路径起、终点的空间直线距离, km。

1.2 社会效益指标

(1) 管网的道路等级水平

综合管廊是沿着城市道路敷设的,不同道路的等级会对管廊的建设条件、效益发挥以及管廊的适建性产生影响。敷设管廊的路径道路等级越高,管廊的建设条件就会越好。管网的道路等级水平可表示为^[6]

$$G = \frac{\sum_i L_i G_i / \eta_i}{\sum_i L_i} \quad (4)$$

式中: G 表示管网的道路等级水平; L_i 表示管廊的总长度, km; G_i 表示敷设各管廊的道路等级; η_i 表示技术修正系数。

(2) 适建性指标

管廊的路径适建性指标^[8]在对于干线管廊进行规划时,作为一个约束条件;在对支线综合管廊进行规划时,将其作为启发信息。所以需要对整个管廊网络的适建性进行单独分析,作为评价指标之一。一段道路的管廊适建性指标表示为该路段各路径的管廊路径适建性之和。

(3) 管网沿线区域的开发强度^[9]

该指标主要考虑总规中的城市中心区的划分,以及重点区域的发展定位。在重要功能区、城市高强度开发区建设综合管廊是十分必要的。管廊路径所经过的功能区越重要,评分越高^[8]。

1.3 经济技术指标

(1) 建设费用

综合管廊网络中,干线综合管廊和支线综合管廊由于断面大小不同、管廊内部的设备不同,其造价也是不同。在对综合管廊规划方案的建设费用进行分析时,按照干、支线各自的路径长度与各自的单价的乘积之和作为衡量建设费用的指标。

(2) 管网服务率

管网服务率用于评价支线综合管廊路径长度

服务的用户需求量的大小. 一个方案的管网服务率表示为各路径的管廊服务效率之和.

(3) 管网密度

管网密度表示综合管廊网络在城市用地面积中占的比例, 管网密度反映了城市综合管廊的普及程度, 它是综合管廊网络宏观控制的指标之一^[6]. 某种程度上而言, 管网密度越大, 表明城市的市政设施体系越完善, 城市的发展水平越高. 面积密度表示为管廊的路径长度之和与规划区面积的比率.

(4) 节省地下空间资源率

传统直埋管线在规划建设时, 会大量占用地下空间资源, 造成地下空间的无序利用. 将管线统一收集于综合管廊之中, 可以极大地节省地下空间资源. 节省地下空间资源率具体表达式如下所示^[10].

$$w_{JD} = \sum \frac{ZML - GLL}{ZML} \quad (5)$$

其中: w_{JD} 为节省地下空间资源率; ZML 为直埋管线所需地下空间资源量; GLL 为建设综合管廊所需地下空间资源量.

(5) 地下改扩建工程比率

地下改扩建工程比率表示规划的路径中有地下改扩建工程的路径长度占网络总长度的比值^[10], 计算公式如下:

$$GKB = \frac{\sum L_D}{L_Z} \quad (6)$$

式中: GKB 为地下改扩建工程比率; L_D 为有地下改扩建工程规划的路径长度, km; L_Z 为综合管廊路径总长度, km.

2 基于云模型的综合管廊规划评价模型构建

2.1 建立描述评价集云模型

根据第1节中构建的指标集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ (m 为评价指标个数), 建立评价集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是对指标评语等级的模糊描述^[11].

根据本文研究, 将评价等级分成五级, 即 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} = \{\text{很好}, \text{较好}, \text{一般}, \text{较差}, \text{很差}\}$ ^[7]. 根据云模型理论的黄金分割率中的

云生成方法, 确定评价状态机中各评价等级的云数字特征及其在 x 轴上的范围, 中间等级的云模型参数为 $E_{x_3} = 0.5$, $H_{e_3} = 0.005$, 则各评价状态的云模型参数如下^[12].

对第二个评价等级“较好”, 三个参数值为: $E_{x_2} = E_{x_3} + (1 - 0.618)(x_{\max} + x_{\min})/2 = 0.691$; $E_{n_2} = (1 - 0.618)(x_{\max} - x_{\min})/6 = 0.064$; $He_2 = He_3/0.618 = 0.0081$.

对于第一个评价等级“很好”, 参数为: $E_{x_1} = 1$; $E_{n_1} = E_{n_2}/0.618 = 0.103$; $He_1 = He_2/0.618 = 0.0131$.

其余各评价状态的云模型参数可类推. $E_{x_4} = 0.309$; $E_{n_4} = 0.064$; $He_4 = 0.0081$; $E_{x_5} = 0$; $E_{n_5} = 0.103$; $He_5 = 0.0131$.

2.2 指标量化

定性指标一般都是用专家咨询法进行打分赋值^[6]. 云模型理论可以通过正向云、逆向云发生器实现定性指标与定量指标的转换, 在定性指标数值化时, 可以很好地协调定性指标的模糊性^[13]. 本文结合专家意见, 对每个方案的每项指标进行打分赋值, 将定性指标转化成云模型表示.

本文将定性评价等级分为五个等级, 为“很好”、“较好”、“一般”、“较差”以及“很差”. 每个评语等级均有1个对应的云模型, 则 h 个语言性评价值可表示为一个综合云模型^[13].

$$E_x = \frac{E_{x1}E_{n1} + E_{x2}E_{n2} + \dots + E_{xh}E_{nh}}{E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{nh}} \quad (7)$$

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} + \dots + E_{nh} \quad (8)$$

式中: $E_{xi} (i = 1, 2, \dots, h)$ 为第 i 个专家认为该指标所属评语等级的云模型期望值; $E_{ni} (i = 1, 2, \dots, h)$ 为第 i 个专家认为该指标所属评语等级的云模型的熵.

由此得到的每个定性指标的期望值 E_x 即可作为该指标的量化值, 然后再根据定量指标的无量纲公式对其进行归一化处理^[13].

2.3 关联度计算及综合结果评判

若某一评价等级的云模型数字特征为 (E_x, E_n, H_e) , 则得到的指标无量纲结果 x 可看成是该评语等级的一个具体实现即云滴^[13]. 云滴 x 满足: $x \sim N[E_x, (E'_n)^2]$, 其中 $E'_n \sim N[E_n, H_e^2]$. 则该云滴 x 与对应等级云的关联度 k 的计算公

式为

$$k = \exp[-(x - E_x)^2 / 2 (E_n')^2] \tag{9}$$

该关联度 k 表示了指标与各评价等级的符合程度. 通过将每个云滴与每个评价结构进行关联度计算, 即可求得综合评判矩阵 $D_{m \times n}$, 其中 D_{ij} 表示第 i 个云滴属于第 j 个评语等级云的关联度.

将评价指标权重向量矩阵 W 与综合评判矩阵 D 相乘, 可以得到综合评判结果矩阵 B .

$$B = W \times D = [b_1, b_2, \cdots, b_n] \tag{10}$$

式中, $b_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 表示第 i 个评价规划方案属于第 i 个评价等级的隶属度.

最终可求得每个评价方案的评判结果得分 r :

$$r = \sum_{i=1}^n b_i f_i \tag{11}$$

其中 f_i 表示第 i 个等级的得分, 按照等级 1 ~ 5 分别赋值 5、4、3、2、1.

最后得到所有方案的总得分. 将得分最高的方案作为最终的方案.

3 实例验证

本文选用的研究区域是陕西南部某市的老城区. 该区因为需要进行城区改造, 且街道、管线老化较为严重, 需要对城区内的基础设施进行改造. 拟进行综合管廊建设, 切实解决市政建设基础问题.

在对干线综合管廊和支线综合管廊有了初步的规划方案之后, 本节对规划方案进行系统的分析和比选.

比选方案如图 1 所示, 其中红色表示干线, 绿色表示支线.

基于云模型的综合管廊规划评价模型, 对三个管廊规划方案进行评价比选.

3.1 评价指标整理

根据相关资料, 计算三个备选方案各指标的无量纲值, 并用熵权法计算各指标权重, 结果如表 1 所示.

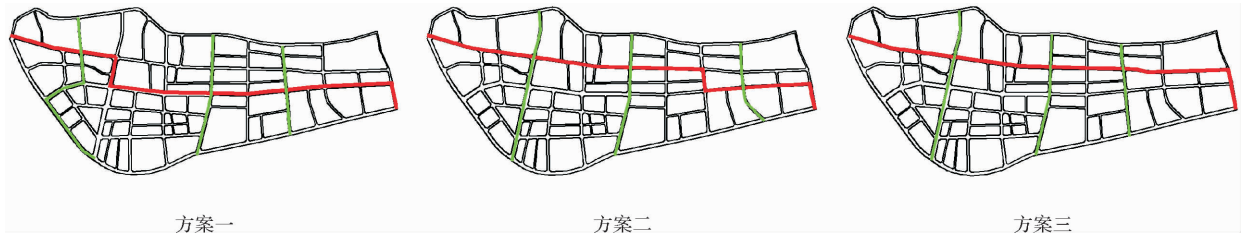


图 1 比选方案

Fig. 1 Comparison scheme

表 1 比选方案各指标的指标权重及无量纲化值

Tab. 1 Weights and dimensionless values of each index

一级指标层	二级指标层	指标权重	方案一	方案二	方案三
网络拓扑性指标	网络结构熵	0.172 6	1.00	0.00	0.00
	连通度	0.078 6	0.00	0.40	1.00
	非直线系数	0.000 2	0.884	0.942	0.966
社会效益指标	管网的道路等级水平	0.148 9	0.00	0.036	1.00
	适建性指标	0.153 8	1.00	0.026 4	0.00
	管网沿线区域的开发强度	0.006 3	1.0	0.691	0.50
经济技术指标	建设费用	0.063 8	0.00	0.940	1.00
	管网服务率	0.068 8	1.00	0.00	0.597 6
	管网密度	0.172 6	1.00	0.00	0.00
	节省地下空间资源率	0.066 2	1.00	0.699	0.00
	地下改扩建工程比率	0.068 2	1.00	0.616 5	0.00

3.2 关联度矩阵计算

根据正态云模型发生器生成正态随机数 E'_n , 生成随机数之后, 按照公式(9)计算 x 与各评价等级的关联度. 由此可以得到综合评判矩阵 $D_{m \times n}$. 则方案一、二、三的关联度矩阵为

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.007 & 1.038 & 1.346 & 6.179 & 0.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \end{bmatrix}$$
$$D_2 = \begin{bmatrix} 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.197 & 1.089 & 1.020 & 1.047 & 0.000 \\ 1.002 & 1.066 & 1.482 & 9.089 & 0.000 \\ 1.592 & 1.543 & 1.542 & 1.508 & 13.999 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.049 & 1.000 & 1.076 & 2.234 & 0.000 \\ 1.002 & 1.065 & 1.477 & 8.963 & 0.000 \\ 1.607 & 1.563 & 1.571 & 1.553 & 4.134 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.046 & 1.000 & 1.083 & 2.311 & 0.000 \\ 1.076 & 1.006 & 1.028 & 1.683 & 0.000 \end{bmatrix}$$
$$D_3 = \begin{bmatrix} 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.001 & 1.079 & 1.548 & 10.779 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.084 & 1.009 & 1.019 & 1.582 & 0.000 \\ 1.133 & 1.038 & 1.000 & 1.223 & 0.000 \\ 1.000 & 1.101 & 1.654 & 13.874 & 0.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \\ 1.649 & 1.620 & 1.654 & 1.692 & 1.000 \end{bmatrix}$$

3.3 综合评判

将上述各方案的关联度计算矩阵与权重矩阵相乘, 得到最终的综合评判结果向量 B 如表 5 所示.

表 2 各比选方案评判结果向量

Tab. 2 Evaluation results of each selection scheme

方案	很好	较好	一般	较差	很差
方案一	1.189 1	1.252 4	1.654 0	10.323 7	0.291 3
方案二	1.474 4	1.435 6	1.479 3	2.101 6	3.134 2
方案三	1.417 9	1.423 2	1.606 2	5.231 9	0.633 4

进一步利用公式(11)得出最终的评判结果 r 为

方案一: $r = W \times D_1 = 36.855\ 8$; 方案二: $r = W \times D_2 = 24.889\ 7$; 方案三: $r = W \times D_3 = 28.698\ 1$. 最终评价结果: 方案一 > 方案三 > 方案二.

从以上案例可以看出, 方案一虽然相对方案二、三路径较长, 导致建设成本稍高, 但是整个路径的管廊适建性好, 沿线的开发程度高, 管网的服务率以及节省地下空间资源的比率都比较高, 所以考虑长远利益, 方案一的经济、社会效益最优.

4 结语

本文对综合管廊规划方案的评价方法进行了研究. 从网络拓扑指标、社会效益指标和经济技术指标三个方面建立了综合管廊规划方案的评价体系; 为了克服传统评价方法不能结合指标随机性与模糊性的缺点, 引入“云模型”理论建立了评价模型; 并利用工程实例验证了所建模型的可行性. 该模型的建立为综合管廊规划方案的评价提供了理论依据, 具有较大参考价值.

参考文献 References

[1] PERELLO J C, ESPARAZA J C, STRATEGIC V C. Decision support system for utility tunnel's planning applying A'WOT method[J]. In Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 55:146-152.

[2] 王海. 荆州市综合管廊规划需求分析及规划布局探究[J]. 市政技术, 2017, 35(2):127-131, 135.

WANG Hai, Requirement and plan analysis of utility tunnels in Jingzhou[J]. Municipal Engineering Technology, 2017, 35(2):127-131, 135.

[3] 叶晓东, 张亚朋, 谢晖, 等. 综合管廊规划布局量化评价体系构建及宁波实践[J]. 规划师, 2017, 33(7): 149-155.

- YE Xiaodong, ZHANG Yapeng, XIE Hui, et al. Quantitative evaluation of pipe gallery planning layout, Ningbo[J]. Planners, 2017, 33(7):149-155.
- [4] 尹航, 李远富. 综合交通项目安全应急方案的云模型比选方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 102-107.
- YIN Hang, LI Yuanfu, Research on cloud model comparison and selection method for safety emergency plan of comprehensive transportation project [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(7):102-107.
- [5] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015:221-222.
- SUN Xijing, SI Shoukui, Complex network algorithm and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015:221-222.
- [6] 施耀忠, 陈学武, 刘小明. 公路网规划的技术评价指标与评价标准研究[J]. 中国公路学报, 1995(S1): 120-124.
- SHI Yaozhong, CHEN Xuewu, LIU Xiaoming. Technical evaluation indicator and standard in highway network planning [J]. China Journal of Highway and Transport, 1995(S1):120-124.
- [7] 王伟, 杨新苗, 陈学武. 城市公共交通系统规划方法与管理技术[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- WANG Wei, YANG Xinmiao, CHEN Xuewu. Planning method and management technology of urban public transport system [M]. Beijing: Science Press, 2002
- [8] 徐波. 城市地下综合管廊路径适建性评价体系研究[J]. 城市道桥与防洪, 2016(9):61-64.
- XU Bo. Study on constructability evaluation system of urban underground comprehensive municipal tunnel path[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2016(9):61-64.
- [9] 陈奕. 城市综合管廊建设区位量化评估体系构建及应用研究[J]. 给水排水, 2016(8):118-125.
- CHEN Yi. Research on the construction and application of quantitative evaluation system for construction area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016(8): 118-125.
- [10] 刘应明. 城市地下综合管廊工程规划与管理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017:107-108.
- LIU Yingming. Project planning and management of urban underground comprehensive pipe corridor[M]. China Architecture & Building Press, 2017:107-108.
- [11] 李德毅, 刘常昱, 杜鹄, 等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11):1583-1594.
- LI Deyi, LIU Changyu, DU Yi, et al. Artificial Intelligence with Uncertainty [J]. Journal of Software, 2004, 15(11):1583-1594.
- [12] 何金平, 高全, 施玉群. 基于云模型的大坝安全多层次综合评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11):2977-2983.
- HE Jinping, GAO Quan, SHI Yuqun. A multi-hierarchical comprehensive evaluation method of dam safety based on cloud model[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2016, 36(11):2977-2983.
- [13] 董美玲, 游大海, 王刚, 等. 基于云模型的输电网规划方案综合决策方法[J]. 电力建设, 2015, 36(10):154-160.
- DONG Meiling, YOU Dahai, WANG Gang, et al. Comprehensive decision-making of transmission network planning schemes based on cloud model[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10):154-160.

(编辑 桂智刚)