

# 城市市区地下空间暗挖工法适应性研究\*

袁贝<sup>1,2</sup> 陈卫忠<sup>1,3</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所,武汉 430070; 2.中国科学院大学,北京 100049;  
3.山东大学岩土与结构工程研究中心,济南 250061)

**摘要:** 随着城市现代化的推进,地下空间资源的开发利用强度与日俱增。面对越来越多的城市市区地下空间暗挖工程事故的发生,从源头出发,选取适宜的施工工法能达到重大防范和降低事故概率效果。最优的暗挖工法的选择在地下空间开发利用中至关重要。运用层次分析法(AHP),将地层条件、线路条件、环境与工期条件、成本造价与安全作为一级指标,将软土地层、砂卵石地层、复合地层、地下水、长度、断面、埋深、沉降、工程期限、成本造价、安全控制作为二级指标,选取了具有代表意义的土压平衡盾构法、泥水平衡盾构法、顶管法、浅埋暗挖法、管幕法、浅埋暗挖法 5 种暗挖工法进行了适应性和优先级的分析。将权重系数值作为暗挖工法选取的优先级判别标准。同时,基于 MATLAB 平台编制了层次分析法(AHP)算法和开发出工法决策软件,并结合具体工程案例验证了该分析方法和软件算法的正确性与可靠性。该暗挖工法的适应性研究实现了从定性分析向定量分析的转变。对暗挖工法适应性的研究具有重大指导意义。

**关键词:** 层次分析法;暗挖工法;MATLAB;适应性

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2020)04-1172-11

## Study on Adaptability of Underground Excavation Method in Urban Area

Yuan Bei<sup>1,2</sup>, Chen Weizhong<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P.R. China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China; 3. Geotechnical and  
Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, P.R. China)

**Abstract:** With the modernization of the city, the exploitation and utilization of underground space resources is becoming more and more strong. In the face of more and more urban underground space excavation accidents, selecting suitable construction methods can prevent and reduce the probability of accident to a great extent from the source. The selection of most reasonable excavation method is very important in the development and utilization of underground space. The formation conditions, line conditions, environment and duration conditions, cost and safety taken as the first level indicators and the soft soil layer, sand gravel stratum, composite stratum, groundwater, length, section, depth, settlement, engineering period cost and safety control taken as the two grade indexes, the paper adopted analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the adaptability and priority of the representative soil pressure balance shield method, mud balance shield method, pipe jacking method, pipe curtain method and shallow excavation method. The weight value was used as the criterion of prioritization. At the same time, the analytic hierarchy process (AHP) algorithm and the decision-making software were developed based on the MATLAB platform. The adaptability study of this method has realized the transformation from qualitative analysis to quantitative analysis. It is of great guiding significance to study the adaptability of underground excavation method.

**Keywords:** analytic hierarchy process (AHP); MATLAB; excavation method; adaptability

\* 收稿日期: 2020-01-10(修改稿)

作者简介: 袁贝(1993—)男,湖北潜江人,硕士,主要从事地下空间方面的研究。E-mail: yuanbei16@mailsucas.edu.cn  
基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)(KFJ-EW-ST5-122)

## 0 引言

随着人口激增和社会经济的快速发展,城市中心区的交通、环境、用地紧缺问题越来越突出,21世纪注定是地下空间高度开发利用的世纪<sup>[1-3]</sup>,为了避免大开挖对交通的阻断,对环境的破坏,避免地下管线拆迁等问题。城市区地下空间开发利用更倾向于采用暗挖工法,然而根据地铁事故统计分析,由暗挖施工导致的事故高达39%,西安5.6地铁塌方事故、佛山地铁2号线盾构区间的坍塌事故造成的影响巨大。所以根据不同工程实际,分析其施工重点考虑的因素对象,视情况选取最合适的暗挖工法具有重大防范意义。很多学者对此做了研究,王梦恕<sup>[4]</sup>对隧道工程浅埋暗挖法施工要点进行了分析,比较了浅埋暗挖法各具体施工方案。张洁溪等<sup>[5]</sup>选取双侧壁导坑法和单拱大空间法分析了上软下硬地层浅埋暗挖工法适应性。葛金科等<sup>[6]</sup>对管幕箱涵法的关键施工技术进行了详细的介绍,王心毅等<sup>[7]</sup>提出了方法的可行性、施工的安全性、工期的可控性和造价的经济性的开挖方法的选择原则。姚聪璞等<sup>[8]</sup>基于风险分析理论对地下工程的工法选择进行了适用性研究。刘辉<sup>[9]</sup>对浅埋暗挖法和盾构法在地铁修建中的适用性问题进行了研究,并分析了相应的施工技术的改进;米思兴<sup>[10]</sup>研究了软土地区机场飞行区地下穿越工法的适用性问题,认为盾构法优先级更高。徐前卫等<sup>[11]</sup>对砂土地层盾构法施工的地层适应性进行了模型试验。但上述研究是针对某特定暗挖工法的研究,或是定性地比较不同暗挖工法的优缺点,且研究较为粗略,缺乏从定量角度统一化的分析,也缺少算法及软件等高效率工具的运用。本文基于层次分析(AHP)<sup>[12]</sup>,引入一级指标和二级指标权值因素,深入分析了土压平衡盾构法、泥水平衡盾构法、顶管法、浅埋暗挖法、管幕法、浅埋暗挖法5种典型暗挖工法的对应因素的权重系数值,评定出了各暗挖工法的相应的适应性和优先级别<sup>[13]</sup>,同时基于MATLAB平台<sup>[14-15]</sup>编制了层次分析法(AHP)算法和开发出工法决策软件<sup>[16-17]</sup>,并结合具体工程案例分析了其在地下空间暗挖工法适应性研究的应用。

## 1 层次分析法

层次分析法(AHP)是一种重要的多目标多属性的决策方法,适用于分析目标模糊、涉及的因素

众多以及考虑的问题复杂的情况。层次分析法将定性分析转化为定量分析,通过把影响因素以合理的逻辑关系进行分解,构建由指标层、准则层和目标层组成的层次结构,然后对问题进行判断,得到不同层级的分析结果。

### 1.1 建立递阶的层次结构图

确定评估的目标、主要因素、对象。将评定对象 $A_k(k=1, 2, \dots, m)$ 作为指标层,将主要影响因素 $B_k(k=1, 2, \dots, n)$ 作为准则层,建立合理且完备的层次结构图。

### 1.2 构造模糊判断矩阵

采用Saaty等建议的1~9标度方法构造判断矩阵,如表1。模糊判断矩阵的构造<sup>[18]</sup>是将定性分析转化为定量分析的关键。

表1 层次分析法比较度量

标度	定义	说明
1	同等重要	两对象对比,相同的重要性;
3	稍微重要	两对象对比,第一个对象比第二个对象稍微重要;
5	明显重要	两对象对比,第一个对象比第二个对象明显重要;
7	绝对重要	两对象对比,第一个对象比第二个对象绝对重要;
9	极端重要	两对象对比,第一个对象比第二个对象极端重要;
2, 4, 6, 8	中值	上述两相邻判断的中值;
倒数	反比较	若对象1与对象2比较得到的判断 $\gamma_{ij}$ ,则对象2与对象1比较得到的判断为 $\gamma_{ji} = 1/\gamma_{ij}$

### 1.3 计算单一准则下的模糊权重以及一致性检验

求解模糊判断矩阵得到最大特征值 $\lambda_{\max}$ 的特征向量 $w = [w_1, w_2, w_3]$ ,并对向量 $w$ 进行归一化处理得到该准则下的模糊权重系数向量 $\beta_k$ :

$$\beta_k = \left[ \frac{w_1}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{w_2}{\sum_{i=1}^n w_i}, \dots, \frac{w_n}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (1)$$

并按照如下公式对模糊判断矩阵进行一致性检验,仅当随机一致性指标 $<0.1$ 时,才认为模糊判断矩阵中的权重分配系数是合理的。

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - \eta) / (\eta - 1) \quad (3)$$

式中: CR 为判断矩阵的随机一致性比率; CI 为判断矩阵的一般一致性指标; RI 为判断矩阵平均随机一致性指标,如表 2。

表 2 平均随机一致性指标值

Table 2 Average random consistency index

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

分别对准则层  $\beta_k$  的其他准则进行求解,得到  $n$  个模糊权重系数向量。

### 1.4 权重总排序(确定各指标相对总目标的权重值)

假设在准则  $\beta_k$  下得到的权重向量分别为  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , 则总体综合矩阵  $B$  为:

$$B = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

然后求解总目标  $C$  的模糊判断矩阵的模糊权重向量为  $A$ , 则指标层各个对象  $A_k$  对总目标  $C$  的综合权重系数为:

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_n] = A \times B \quad (5)$$

权重系数  $w_i$  代表指标层不同对象的优先级权重系数。得到的权重系数越大,则优先级越高。

## 2 评价模型

### 2.1 数学评价总体模型

基于层次分析法的基本原则,对地下空间暗挖工法适应性评价,可以采用多目标线性加权函数法来建立评价的总体数学模型<sup>[13]</sup>,如下式:

$$S = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n A_i B_i \right) C_j \quad (6)$$

式中:  $S$  为评价目标总得分 ( $0 \leq S \leq 1$ );  $A_i$  为第  $i$  个单项指标的量化分值;  $B_i$  为第  $i$  个单项指标的权重;  $C_j$  为第  $j$  个主题的权重。

### 2.2 指标体系

城市区典型的地下工程包括地铁、越江隧道、地下通道、市政设施、地下停车场等,结合相应暗挖工法的特点,通过对大量文献及工程实例事故原因的研究,采用统计和理论分析相结合的方法,遴选出影响暗挖工法选取的 4 个主要因素,即地层条件 ( $B_1^1$ )、线路条件 ( $B_2^1$ )、环境与工期 ( $B_3^1$ )、造价与安全 ( $B_4^1$ ),并将其作为一级指标,在此基础上进一步将一级指标细分为若干二级指标<sup>[19-20]</sup>,指标只考

虑主要影响因素。分别对应如下。

地层条件 ( $B_1^1$ ): 软土地层 ( $B_1^2$ ), 砂卵石地层 ( $B_2^2$ ), 复合地层 ( $B_3^2$ ); 地下水 ( $B_4^2$ );

线路条件 ( $B_2^1$ ): 长度 ( $B_5^2$ ), 断面 ( $B_6^2$ ), 埋深 ( $B_7^2$ );

环境与工期 ( $B_3^1$ ): 沉降 ( $B_8^2$ ), 工程期限 ( $B_9^2$ );

造价与安全: 成本造价 ( $B_{10}^2$ ), 安全控制 ( $B_{11}^2$ );

结合上述分析,确定如下城市区典型地下工程暗挖法适应性研究的评价指标体系,如图 1。

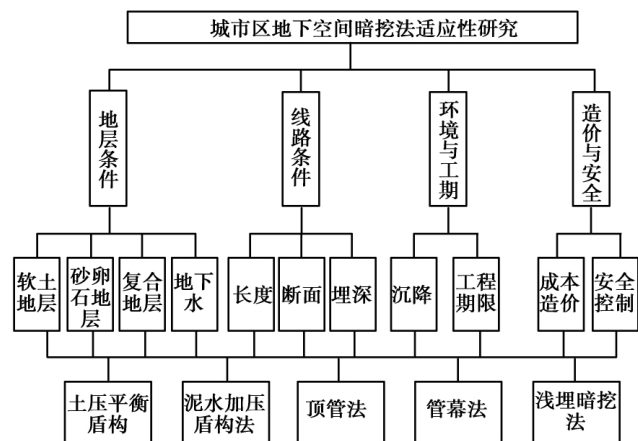


图 1 评价指标体系

Fig. 1 Assessment indicator system

求解评定对象土压盾构法  $A_1$ 、泥水加压盾构法  $A_2$ 、顶管法  $A_3$ 、管幕法  $A_4$ 、浅埋暗挖法  $A_5$  在准则层二级指标 ( $B_i^2$ ) 下的模糊判断矩阵,即分别对软土地层 ( $B_1^2$ ), 砂卵石地层 ( $B_2^2$ ), 复合地层 ( $B_3^2$ ), 地下水 ( $B_4^2$ ), 长度 ( $B_5^2$ ), 断面 ( $B_6^2$ ), 埋深 ( $B_7^2$ ), 沉降 ( $B_8^2$ ), 工程期限 ( $B_9^2$ ), 成本造价 ( $B_{10}^2$ ), 安全控制 ( $B_{11}^2$ ) 构造 11 个判断矩阵。

#### 2.2.1 地层条件

本文地层条件主要考虑的是土层强度等物理力学性质和地下水位高低,在全国范围选取了典型的武汉、上海地区软土地层,北京的砂卵石地层,广州的复合地层来分析。软土主要指淤泥、淤泥质土和部分冲填土、杂填土及其他压缩性土。软土主要的工程特征有含水量高、压缩性高、孔隙比大、灵敏度大、抗剪强度很低、渗透性很小。卵砾石地层基本结构松散、胶结程度差、卵砾石含量及强度高、粒径分布不均且大粒径卵砾含量高,卵石空隙多被中、粗砂充填,上软下硬的复合地层,土体物理力学性质差异明显,内部应力场,应变场不明确。地下水会降低地层的强度,同时地下水的渗流会加剧地层变形。在上述各种地层条件下,施工难度挑战很

大,对暗挖工法要求很高,适应性分析如表3。

表3 工法的地层适应性分析

Table 3 Stratum adaptability analysis of working method

工法	软土	砂卵石	复合地层	地下水位
土压平衡盾构	适应	适应	适应	适应
泥水加压盾构	适应	较适应	适应	适应有水地层
顶管法	适应	较适应	适应	适应
管幕法	适应	不太适应	较适应	不适合高地下水位
浅埋暗挖法	不适应自立性差的软土	适应	适应	不适应高地下水位

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解到评定对象对软土因素的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_1^2, B_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_1 = [0.324 \ 1 \ 0.324 \ 1 \ 0.179 \ 0.106 \ 5 \ 0.066]$ ,  $\lambda_{max} = 5.112 \ 1$ ,  $CI = 0.028$ ,  $CR = 0.025 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数值可知,土压平衡盾构法、泥水平衡盾构法比顶管法、浅埋暗挖法在软土地层条件下适应性更好。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解到评定对象对砂卵石的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_2^2, B_2^2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 7 & 3 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1/2 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_2 = [0.442 \ 0.253 \ 0.094 \ 7 \ 0.047 \ 3 \ 0.147]$ ,  $\lambda_{max} = 5.075 \ 4$ ,  $CI = 0.0188 \ 5$ ,  $CR = 0.016 \ 8 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数值知,土压平衡盾构法的优先级最高。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出评定对象对复合地层的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_3^2, B_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 2 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$\beta_3 = [0.373 \ 0.282 \ 0.115 \ 0.0553 \ 0.176]$ ,  $\lambda_{max} = 5.115$ ,  $CI = 0.028 \ 75$ ,  $CR = 0.025 \ 7 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数值知,土压平衡盾构法的优先级更高。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出评定对象对地下水的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_4^2, B_4^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 5 & 7 \\ 2 & 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$\beta_4 = [0.295 \ 0.391 \ 0.210 \ 0.0634 \ 0.0415]$ ,  $\lambda_{max} = 5.137$ ,  $CI = 0.034 \ 3$ ,  $CR = 0.030 \ 6 < 0.1$ , 满足一致性条件,由权重系数值知,泥水平衡盾构法的优先级更高。

### 2.2.2 线路条件

线路条件包含断面、长度、埋深、坡度等几方面。对工法适应性而言,选取主要因素即线路断面、线路长度、线路埋深来分析,断面尺寸大小主要取决于使用功能,断面形式主要有圆形、矩形和异形断面(随着地下空间开发利用工法技术越来越成熟,异形断面的需求越来越多)。实际工程案例还可能出现断面形式发生变化,断面形式既要满足实际工程的功能需求,又要考虑结构的受力合理性和经济性。地下空间的线路长度可以从几十米到几百米甚至更大,地下停车场、地下过街通道线路长度相对于地铁、隧道会偏短。线路埋深要满足工法技术条件,埋深太浅容易出现坍塌,但也不能过深。适应性分析如表4。

表4 不同工法的线路适应性分析

Table 4 Line adaptability analysis of different working methods

工法名称	线路长度	线路断面	线路埋深
土压平衡盾构法	以500 m以上为宜,适合长距离	以圆形断面为主,不适应断面变化	有一定要求,一般在1.0D以上

续表4

工法名称	线路长度	线路断面	线路埋深
泥水加压盾构法	以 500 m 以上为宜, 适合长距离	以圆形断面为主, 不适应断面变化	有一定要求, 一般在 1.0D 以上
顶管法	以 100 m 左右为宜, 较长需设置中继间	适应各种断面, 但不适应断面变化	有一定要求, 一般在 0.8D 以上
管幕法	以较短路线为佳, 较长时需设置中继间	断面适应性较好, 但不适应断面变化	适宜性较好, 但须考虑管幕止水能力
浅埋暗挖法	对线路长度适应性好	适应于各种断面和断面变化	适宜性较好, 但要考虑地下水位

采用专家调查法, 由评判成员将因素两两比较对其重要性打分, 求解出评定对象对线路长度的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_5^2, B_5^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 2 & 1/3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 1/3 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 1/5 \\ 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/5 \\ 3 & 3 & 5 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_5 = [0.169 \quad 0.183 \quad 4 \quad 0.101 \quad 9 \quad 0.071 \quad 7 \quad 0.473 \quad 5]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.066 \quad 7$ ,  $CI = 0.016 \quad 7$ ,  $CR = 0.014 \quad 9 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数可知: 浅埋暗挖法的线路长度适应性更强。

采用专家调查法, 由评判成员将因素两两比较对其重要性打分, 求解到评定对象对线路断面的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_6^2, B_6^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/5 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/5 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 5 & 5 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_6 = [0.089 \quad 0.089 \quad 0.172 \quad 0.172 \quad 0.479]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.005 \quad 3$ ,  $CI = 0.001 \quad 3$ ,  $CR = 0.012 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数可知: 浅埋暗挖法的线路断面适应性更强。

采用专家调查法, 由评判成员将因素两两比较对其重要性打分, 求解出评定对象对线路埋深的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_7^2, B_7^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_7 = [0.162 \quad 7 \quad 0.162 \quad 7 \quad 0.282 \quad 6 \quad 0.282 \quad 6 \quad 0.109]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.077 \quad 6$ ,  $CI = 0.019 \quad 4$ ,  $CR = 0.017 \quad 3 < 0.1$ , 满足一致性条件, 由权重系数可知: 顶管法的线路断面适应性更强。

2.2.3 环境与工期条件

大型地下空间开发利用时, 不同的工法会不同程度地对生态环境造成破坏。暗挖法施工时, 主要考虑对地层环境损伤、地层沉降的影响, 特别是过大的地层沉降会造成地面大面积塌陷、工程失事、周边建(构)筑物损害, 工程建设工期的时长也会对环境产生持续性的影响, 会一定程度影响周边建筑、周边设施的正常使用功能, 必须严格把控进度、缩短工期。对工法的沉降控制能力而言, 盾构法、顶管法施工技术成熟, 与其他暗挖工法相比, 沉降控制能力较好, 可以在微小扰动的情况下施工, 可适用于大部分环境条件的施工。管幕法因为采取了有刚度的管幕来进行结构支护, 能有效减小地面变形, 沉降大小介于浅埋暗挖法和盾构、顶管法之间, 但仍很难做到微扰动施工, 只能用于沉降控制不太严格的施工区域。浅埋暗挖法有一定沉降控制能力, 但总体沉降较大。同时, 盾构法、顶管法施工机械化程度较高, 受外界条件影响较小, 在线路长度一定的条件下, 其施工期限较短。管幕法机械化程度相对较低, 施工速度较盾构法和顶管法慢, 浅埋暗挖法由于工序复杂, 采取的辅助措施多, 因此其施工速度最慢。适应性分析如表 5。

表 5 各工法环境与工期适应性分析

Table 5 Analysis on the adaptability of working environment and construction period

工法名称	沉降	工期
土压平衡盾构法	沉降小	较短, 月平均进度 150~170 m 之间
泥水加压盾构法	沉降小	较短, 月平均进度 150~180 m 之间
顶管法	沉降小	较短, 月平均进度 130~150 m 之间
管幕法	沉降中等	工期长, 慢, 月平均进度 65 m 左右
浅埋暗挖法	沉降较大	工期长, 慢, 月平均进度 60 m 左右

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出评定对象对沉降的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_8^2, B_8^2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_8 = [0.395 \ 1 \ 0.299 \ 0.187 \ 9 \ 0.077 \ 4 \ 0.039 \ 4]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.132 \ 6$ ,  $CI = 0.033 \ 2$ ,  $CR = 0.029 \ 6 < 0.1$ , 满足一致性条件。从权重系数可知,泥水平衡盾构法和土压平衡盾构法沉降最小,优先级更高。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出评定对象对工期的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_9^2, B_9^2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 7 & 7 \\ 1 & 1 & 3 & 7 & 7 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 5 & 5 \\ 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_9 = [0.368 \ 0.368 \ 0.171 \ 0.052 \ 8 \ 0.039 \ 9]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.152 \ 8$ ,  $CI = 0.038 \ 2$ ,  $CR = 0.034 \ 1 < 0.1$ 。从权重系数可知,泥水平衡盾构法和土压平衡盾构法工期最短,适用性更高。

2.2.4 造价与安全条件

工程成本造价与安全也是工法选择时的一个重要考虑因素,经济性指标是不容忽视的。不同工法应用于不同的工程条件,其在经济指标上差别很大。盾构法施工时设备费用和工作井费用很高,使盾构法成本造价提升很大,尤其是泥水加压平衡盾构的泥水处理系统。但在线路长度较长时,每米均摊值会下降,从而比较经济。同时,盾构法机械化程度高,掘进时有钢筒保护,技术成熟,安全性好。顶管法与盾构法比较类似,顶管法根据现有案例、定额、市场价等资料测算得出成本造价比盾构法略低,施工时人工少,机械化程度较高,安全性也较好。管幕法因为管幕施工和箱涵施工时费用都比较高,最终成本最高,管幕法在围护结构、管幕顶进、结构施工等阶段存在安全风险,需要采取安全措施进行防护和控制。浅埋暗挖法施工辅助措施带来的费用很高,但比较前几种暗挖工法,其造价相对较低。常需保证无水条件下施工,其沉降控制能力也差,当沉降过大时,很难采取相应的补救措

施,所以其总体安全性差。适应性分析如表6。

表6 各工法的成本造价与安全适应性分析  
Table 6 Analysis on cost and safety adaptability of each construction method

工法名称	工程直接费 /(万元·m <sup>-1</sup> )	安全性
土压平衡盾构法	约4.5	技术成熟,安全控制能力强
泥水加压盾构法	约5.0	技术成熟,安全控制能力强
顶管法	约4.2	技术成熟,安全控制能力好
管幕法	约7.6	安全控制能力较好
浅埋暗挖法	约4.0	机械化不高,安全可控性一般

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出评定对象对成本造价的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_{10}^2, B_{10}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/3 & 5 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/3 & 5 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 & 7 & 1/2 \\ 1/5 & 1/5 & 1/7 & 1 & 1/7 \\ 3 & 3 & 2 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_{10} = [0.146 \ 5 \ 0.111 \ 0.286 \ 1 \ 0.034 \ 7 \ 0.377]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.211 \ 2$ ,  $CI = 0.052 \ 8$ ,  $CR = 0.047 \ 1 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数可知:浅埋暗挖法和顶管法对成本造价适应性更好。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出评定对象对安全性的模糊判断矩阵:

$$A \rightarrow B_{11}, B_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\beta_{11} = [0.415 \ 3 \ 0.314 \ 7 \ 0.157 \ 0 \ 0.074 \ 7 \ 0.038 \ 3]$ ,  $\lambda_{\max} = 5.194 \ 6$ ,  $CI = 0.048 \ 7$ ,  $CR = 0.043 \ 4 < 0.1$ , 满足一致性条件。由权重系数可知:土压平衡盾构和泥水平衡盾构法安全性最强,适应性更好。

上述判断矩阵及求解的权重系数是针对最普遍的情况得出的,没有考虑实际工程特性,所以不

适用于具有鲜明特性的实际案例。但各指标的权重系数整体趋势是正确的,从思路对定性向定量的评价转化具有一定指导意义。具有特性的工程案例的判断矩阵的建立,需重点考虑其特性而得到。

### 2.3 权重向量综合分析

通过对大量文献的分析及总结,得出线路长度、断面大小必须满足地下工程功能,具有不可改变性,是工法的选择的重要考虑因素。其次,地下水条件会加大工法的施工难度。沉降大小是每个地下工程必须严格控制的对象,成本造价也是影响工法选择不可忽视的因素。

采用专家调查法<sup>[21-22]</sup>,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,得出相应二级指标对一级指标的模糊判断矩阵如下。求解出对应二级指标因素对地层条件的模糊判断矩阵为:

$$B_1^2 \ B_2^2 \ B_3^2 \ B_4^2 \rightarrow B_1^1 \ B_1^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$\beta_1^1 = [0.167 \ 0.167 \ 0.167 \ 0.5]$ ,  $\lambda_{\max} = 4.0$ ,  $RI = 0$ , 满足一致性条件。由权重系数值知:软土、地下水在地层条件中为更不利因素,应优先考虑。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出对应二级指标因素对线路条件的模糊判断矩阵为:

$$B_5^2 \ B_6^2 \ B_7^2 \rightarrow B_2^1 \ B_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$\beta_2^1 = [0.539 \ 6 \ 0.296 \ 9 \ 0.163 \ 5]$ ,  $\lambda_{\max} = 3.009 \ 2$ ,  $CI = 0.004 \ 6$ ,  $CR = 0.008 \ 5 < 0.1$  满足一致性条件。由权重系数值可知:在线路条件中优先考虑长度、埋深因素。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出对应二级指标因素对环境与工期的模糊判断矩阵为:

$$B_8^2 \ B_9^2 \rightarrow B_3^1 \ B_3^1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$\beta_3^1 = [0.75 \ 0.25]$ , 满足一致性条件,由权重值可知,沉降因素优先级更高。

采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出对应二级指标因素对造价与安全的模糊判断矩阵为:

$$B_{10}^2 \ B_{11}^2 \rightarrow B_4^1 \ B_4^1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$\beta_4^1 = [0.667 \ 0.333]$ , 满足一致性条件,由权重系数可知:成本造价优先级更高。

上文建立了评定对象对二级指标、二级指标对一级指标的模糊判断矩阵,并分析出了相应的权重值。对于目标层,以高效、经济、环保、安全原则为指引,采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,求解出一级指标  $B_k^1$  对目标层  $C$  的模糊判断矩阵为:

$$B_k^1 \rightarrow C \ C = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 3 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

计算权重向量为:  $\alpha = [0.312 \ 1 \ 0.443 \ 5 \ 0.123 \ 7 \ 0.123]$ ,  $\lambda_{\max} = 4.060 \ 6$ ,  $CI = 0.020 \ 2$ ,  $CR = 0.022 \ 7 < 0.1$  满足一致性条件。于工法而言,地层条件、线路条件相对更重要。同时,其包含的二级指标因素多,得到的权重向量值更大,应优先考虑。

采用上文的数学评价总体模型,得出二级评价指标对于总目标的判断矩阵  $\alpha$  如下:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.312 \ 1 \times \beta_1^1 & 0.443 \ 5 \times \beta_2^1 \\ 0.123 \ 7 \times \beta_3^1 & 0.123 \ 7 \times \beta_4^1 \end{bmatrix}$$

二级评价指标对于总目标的权重系数值为:

$$\alpha = [0.052 \ 0.052 \ 0.052 \ 0.156 \ 0.239 \ 0.132 \dots \ 0.072 \ 5 \ 0.09 \ 3 \ 0.31 \ 0.08 \ 3 \ 0.041 \ 4]$$

由权重值可知,长度、断面、地下水、沉降、成本造价的二级指标因素在暗挖工法选取时应重点优先考虑。上述对于总目标的二级评价指标权重系数值是根据大量文献、大量实际案例分析并结合经验丰富的地下空间领域的专家调查打分法总结而来,可以作为统一的定量评价指标值,用于后续的分析。

## 3 算法编程及软件开发

层次分析法结果的实现可以归结为矩阵最大特征值和特征向量的求解问题,使用 matlab 算法可以轻松解决,在计算精度和效率上也可大大提高,能够达到良好的应用效果。

### 3.1 关键算法编程要点:

①批量读取 txt 文件;②循环读取每个判断矩阵;③求解最大特征值、权向量与一致性检验。

部分代码如下:

```

fid=fopen('C:\Users\dell\Desktop\xxx.txt','r');%文本数据文件存放路
n1=4;%准则层个数
n2=11;%子准则层个数
n3=5;%方案层个数
a=[];

for i=1:n2
    str1=char(['c',int2str(i),'='];');
    str2=char(['c',int2str(i),'=[c',int2str(i),'tmp];']);
    eval(str1);
for j=1:n3
    tmp=str2num(fgetl(fid));
    eval(str2); %读方案层的判断矩阵
end
end
end

ri=[0,0,0.58,0.90,1.12,1.24,1.32,1.41,1.45]; %一致性指标
[x,y]=eig(a);
lamda=max(diag(y));
num=find(diag(y)==lamda);
w0=x(:,num)/sum(x(:,num));%准则层对目标层的权重
cr0=(lamda-n1)/(n1-1)/ri(n1)%准则层对目标层判断矩阵的一致性检验。
    
```

### 3.2 软件实现

软件界面的简洁性、控件组织逻辑合理性、易操作性是软件设计的重要原则<sup>[23]</sup>,基于层次分析法的暗挖工法决策软件界面如图 2。

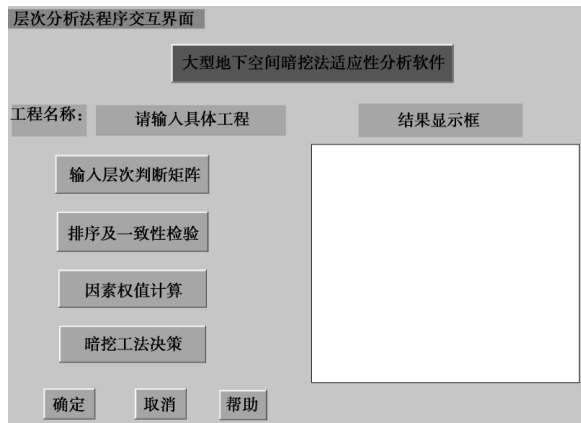


图 2 软件界面

Fig. 2 Software interface

## 4 工程应用

城市区典型的地下工程包括地铁、越江隧道、地下通道、市政设施、地下停车场等。本文选取具有代表意义的越江隧道和地下停车场暗挖工法实际案例分析。

港珠澳大桥连线拱北隧道<sup>[24]</sup>: 拱北隧道是港珠澳大桥珠海连接线的关键性控制工程。暗挖段为双层超大断面浅埋暗挖隧道。暗挖段主体结构最大开挖跨度为 18.7 m,最大开挖高度为 20.8 m,隧道开挖断面达到 345 m<sup>2</sup>,拱北口岸暗挖段长 220 m,埋设深度仅 6~7 m,口岸段邻近海域,地层软弱松散,岩土性质软弱且变异显著;拱北隧道穿越拱北

口岸,上部地表建(构)筑物密集、管线密布且重要程度高,对隧道施工变形沉降控制要求极高。同时,还要在施工过程中确保全国第二大口岸的正常通关,技术难度非常大。暗挖施工工法选取时既是难点也是重点。采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,利用前文层次分析方法及算法软件得到权重系数值如表 7,工程案例中没有提及的因素权值按平均分配处理。综合权重系数决策值如表 8,并绘制综合权重图如图 3。

表 7 各指标权重系数结果值

Table 7 Results of weight coefficient of indicators

工法名称	土压平衡盾构	泥水平衡盾构	顶管法	管幕法	浅埋暗挖法
软土地层	0.222 2	0.222 2	0.222 2	0.222 2	0.111 2
砂卵石地层	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
复合地层	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
地下水	0.159 9	0.418 5	0.097 3	0.262 5	0.061 8
长度	0.090 9	0.090 9	0.272 7	0.272 7	0.272 7
断面	0.142 9	0.142 9	0.142 9	0.285 7	0.285 7
埋深	0.222 2	0.222 2	0.222 2	0.222 2	0.111 2
沉降	0.164 5	0.303 1	0.164 5	0.303 1	0.064 9
工程期限	0.315 8	0.315 8	0.157 9	0.157 9	0.052 8
成本造价	0.200 5	0.100 3	0.200 5	0.247 1	0.251 6
安全控制	0.259 4	0.259 4	0.105 7	0.259 4	0.114 3

表 8 综合权重系数结果值

Table 8 Results of comprehensive weight coefficient

工法名称	土压平衡盾构	泥水平衡盾构	顶管法	管幕法	浅埋暗挖法
综合权重系数	0.165 6	0.210 5	0.188 3	0.255 6	0.179 9

由层次分析法和算法软件综合权重值得出优先级别为:管幕法>泥水平衡盾构法>顶管法>浅埋暗挖法>土压平衡盾构法。管幕法的优先级最高,对此实际工程的适用性更强,因此优先选择此法。该分析结论与实际情况相符,验证了本文层次分析方法和算法软件的正确性和可靠性。



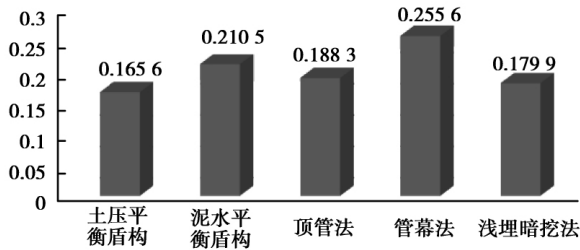


图 3 综合权重值分布

Fig. 3 Comprehensive weight distribution

国家计委停车场<sup>[25]</sup>:为了解决计委大楼前的车辆和人员拥挤不堪、交通秩序混乱的问题,保证计委机关正常工作,决定在计委大院修建一座大型地下停车场。为了保持已有地上停车场的正常运行,只能采取暗挖法。地层条件为第四系的软弱松散砂砾石地层,其占地范围东西长 150.36 m,南北向宽 37.4 m,建筑面积 6 675 m<sup>2</sup>,由两个平行的双层停车主洞室组成。超浅埋,覆土厚 2.8~3 m,大跨度,单洞达 13 m。而且主洞离计委大楼 11 m,出入口边墙离大楼 4 m。从上述工程概况来看,软弱松散地层、覆土超浅埋、大跨度、离周围建筑物近等因素对施工难度挑战很大,必须在暗挖工法选取时予以重点考虑。采用专家调查法,由评判成员将因素两两比较对其重要性打分,利用前文层次分析方法及算法软件得到权重系数值如表 9,工程案例中没有提及的因素权值按平均分配处理。综合权重系数决策值如表 10,并绘制综合权重直观如图 4。

表 9 各指标权重系数结果值

Table 9 Results of weight coefficient of indicators

工法名称	土压平衡盾构	泥水平衡盾构	顶管法	管幕法	浅埋暗挖法
软土地层	0.324 1	0.324 1	0.179	0.106 5	0.066 2
砂卵石地层	0.442 3	0.260 0	0.097 4	0.048 6	0.151 7
复合地层	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
地下水	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
长度	0.089	0.089	0.171 5	0.171 5	0.479 0
断面	0.089	0.089	0.171 5	0.171 5	0.479 0
埋深	0.072 3	0.072 3	0.134 5	0.134 5	0.586 4
沉降	0.299 2	0.396 1	0.187 9	0.077 4	0.039 4

续表9

工法名称	土压平衡盾构	泥水平衡盾构	顶管法	管幕法	浅埋暗挖法
工程期限	0.359 9	0.359 9	0.153 5	0.074 3	0.052 4
成本造价	0.153 3	0.116 3	0.299 4	0.036 3	0.394 7
安全控制	0.403 3	0.307 2	0.164 3	0.078 4	0.046 8

表 10 综合权重系数结果值

Table 10 Result values of comprehensive weight coefficient

工法名称	土压平衡盾构	泥水平衡盾构	顶管法	管幕法	浅埋暗挖法
综合权重系数	0.211 1	0.206 9	0.184 6	0.122 3	0.275 2

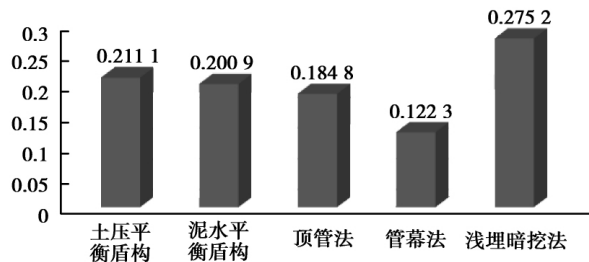


图 4 综合权重值分布

Fig. 4 Comprehensive weight distribution

由层次分析法和算法软件综合权重值得出优先级别为:浅埋暗挖法>盾构法>顶管法>管幕法。浅埋暗挖法的优先级最高,对此实际工程的适用性更强,因此优先选择此法。该分析结论与实际相符,验证了本文层次分析方法和算法软件的正确性和可靠性。

## 5 结论

城市区地下空间开发利用已进入迅速发展阶段,开发强度和规模与日俱增。面对越来越多的暗挖工程事故的发生,从源头出发,选取最优的施工工法具有重大防范意义。本文根据层析法(AHP)理论,对工法选取进行了详尽的分析,实现了从定性到定量分析的转变,并利用 MATLAB 平台编制了层次分析法(AHP)算法和开发出工法决策软件。综上得到如下结论:

- (1) 基于层次分析法,将地层条件、线路条件、环境与工期条件、成本造价与安全作为一级指标,

将软土地层、砂卵石地层、复合地层、地下水、长度、断面、埋深、沉降、工程期限、成本造价、安全控制作为二级指标 构造出相应模糊判断矩阵,求出权重系数值,可以作为城市市区地下空间开发利用暗挖工法选取的优先级判别标准。

(2) 实际工程中,当对地层条件、环境与工期条件、安全控制适应性要求高时,优先选取土压平衡盾构法和泥水平衡盾构。对线路断面形状、大小、断面变化要求高时,优先选取浅埋暗挖法和管幕法。当线路过长时,优先选取盾构法。要求成本造价尽可能低时,优先选取浅埋暗挖法和顶管法。对某一主要影响因素有特殊要求时,优先选取该对应权重系数值大的暗挖工法。

(3) 利用层次分析法(AHP)算法程序和软件可大大提高工法决策效率,保证分析结果的可靠性和正确性,对其他行业的适应性评价也具有参考价值。

(4) 城市市区地下空间的开发利用可以考虑两种工法共同施工,结合两种工法的优点,以达到更好的适应性效果。例如采用盾构法与浅埋暗挖法共同建造地铁站,这是后文文章研究的重点。

#### 参考文献(References)

- [1] 蒋旭,王婷婷,穆静. 地下空间开发利用适宜性与资源量的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1145-1153. (Jiang Xu, Wang Tingting, Mu Jing. Applied research on suitability and resource quantity of underground space development and utilization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1145-1153. (in Chinese))
- [2] 柳昆,彭建. 地下空间资源开发利用适宜性评价模型[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 219-231. (Liu Kun, Peng Jian. Suitability evaluation model for development and utilization of underground space resources[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 219-231. (in Chinese))
- [3] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 112-113. (Qian Qihu. Meet of climax of China city underground space development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 112-113. (in Chinese))
- [4] 王梦恕. 隧道工程浅埋暗挖法施工要点[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 1-4. (Wang Mengshu. The construction of shallow buried excavation method in tunnel engineering[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(5): 1-4. (in Chinese))
- [5] 张洁溪,郭福成,雷刚. 上软下硬地层浅埋暗挖工法适应性模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增1): 1415-1421. (Zhang Jiexi, Guo Fucheng, Lei Gang. Adaptability simulation of shallow excavation method in upper soft and lower hard strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Supp.1): 1415-1421. (in Chinese))
- [6] 葛金科,李向阳. 软土地层管幕-箱涵顶进施工新技术[J]. 城市道桥与防洪, 2007, 22(5): 40-45. (Ge Jinke, Li Xiangyang. Soft soil pipe roof box jacking construction[J]. City Bridge And Flood Control, 2007, 22(5): 40-45. (in Chinese))
- [7] 王心毅,张波,郑继强. 浅埋暗挖法的施工适应性及展望[J]. 交通运输研究, 2011(9): 64-68. (Wang Xinyi, Zhang Bo, Zheng Jiqiang. Construction adaptability and prospect of shallow buried excavation method[J]. Transportation Research, 2011, (9): 64-68. (in Chinese))
- [8] 姚聪璞,黄宏伟,胡群芳. 基于风险分析理论的地下工程施工工法适用性研究[A]//中国土木工程学会年会[C]. 2006: 581-585. (Yao Congpu, Huang Hongwei, Hu Qunfang. Research on the applicability of underground engineering construction method based on the theory of risk analysis[A]//China Civil Engineering Society Annual Meeting [C]. 2006: 581-585. (in Chinese))
- [9] 刘辉. 浅埋暗挖法和盾构法在地铁修建中的适应性问题研究[D]. 成都:西南交通大学, 2004. (Liu Hui. Research on adaptability of shallow buried excavation method and shield method in subway construction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [10] 米思兴. 软土地区机场飞行区地下穿越工法适应性研究[D]. 上海:同济大学, 2007. (Mi Sixing. Study on the adaptability of underground method of through soft ground in flight area [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [11] 徐前卫,朱合华,廖少明,等. 砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2902-2909. (Xu Qianwei, Zhu Hehua, Liao Shaoming, et al. Model experimental study on stratum adaptability of tunnel excavation with epb shield machine in sandy stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2902-2909. (in Chinese))
- [12] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用

- [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153. (Guo Jinyu, Zhang Zhongbin, Sun Qingyun. Research and application of analytic hierarchy process (AHP) [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2008, 18(5): 148-153. (in Chinese))
- [13] 彭建, 柳昆, 郑付涛, 等. 基于 AHP 的地下空间开发利用适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 688-694. (Peng Jian, Liu Kun, Zheng Futao, et al. Evaluation for the suitability of underground space exploitation and utilization based on AHP [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 688-694. (in Chinese))
- [14] Ye J, Ma X S, Yang L. Design and realization of AHP toolbox in MATLAB [A] // IEEE International Conference on Granular Computing [C]. IEEE, 2008: 740-745.
- [15] 罗华飞. MATLAB GUI 设计学习手记(第 2 版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011. (Luo huafei. Script of MATLAB GUI design (2nd edition) [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011. (in Chinese))
- [16] 马鹏举, 朱东波, 丁玉成, 等. 基于模糊层次分析方法(F-AHP)的盟员优化选择算法[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(7): 108-110. (Ma Pengju, Zhu Dongbo, Ding Yucheng, et al. Fuzzy-AHP based algorithm for optimal partner-selecting in agile manufacturing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(7): 108-110. (in Chinese))
- [17] 余正, 肖峻, 莫易敏. 基于 MATLAB/GUI 的层次分析法在投资评价中的应用[J]. 机械研究与应用, 2009(5): 103-105. (Yu Zheng, Xiao Jun, Mo Yiming. Application of analytic hierarchy process based on MATLAB/GUI in investment evaluation [J]. Mechanical Research and Application, 2009(5): 103-105. (in Chinese))
- [18] Zhang G, Zou P X W. Fuzzy analytical hierarchy process risk assessment approach for joint venture construction projects in China [J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2007, 133(10): 771-779.
- [19] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1757-1766. (Xu Zhenhao, Li Shucui, Li Liping, et al. Risk assessment of water inrush from karst tunnel based on analytic hierarchy process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1757-1766. (in Chinese))
- [20] 王颀, 黄斌, 周强, 等. 隧道总体风险评价的改进模糊评判方法[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 531-538. (Wang Hao, Huang Bin, Zhou Qiang, et al. Improved fuzzy evaluation method for tunnel overall risk assessment [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 531-538. (in Chinese))
- [21] 邱成虎, 陈寿根, 谭信荣, 等. 基于模糊层次分析法的瓦斯隧道施工风险评价[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 774-780. (Qiu Chenghu, Chen Shougen, Tan Xinrong, et al. Risk assessment of gas tunnel construction based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 774-780. (in Chinese))
- [22] 郑余朝, 周贤舜, 李俊松. 盾构隧道下穿高速铁路站场安全风险评估管理方法[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 523-529. (Zheng Yuchao, Zhou Xianshun, Li Junsong. Safety risk assessment and management method for shield tunnel crossing high-speed railway station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 523-529. (in Chinese))
- [23] 余正, 肖峻, 莫易敏. 基于 MATLAB/GUI 的层次分析法在投资评价中的应用[J]. 机械研究与应用, 2009(5): 103-105. (Yu Zheng, Xiao Jun, Mo Yiming. Application of analytic hierarchy process based on MATLAB/GUI in investment evaluation [J]. Mechanical Research and Application, 2009(5): 103-105. (in Chinese))
- [24] 余晶, 程勇, 贾瑞华. 港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道方案论证[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 244-249. (Yu Jing, Cheng Yong, Jia Ruihua. Scheme demonstration of gongbei tunnel of zhuhai connection line of hong kong-zhuhai-macao bridge [J]. Modern Tunnel Technology, 2012, 49(1): 244-249. (in Chinese))
- [25] 孙建华, 刘昌用. 邻房超浅埋大跨度地下停车场暗挖施工新技术[J]. 隧道建设, 1994(3): 1-18. (Sun Jianhua, Liu Changyong. The construction of new technology [J]. tunnel construction, 1994(3): 1-18. (in Chinese))