

功效系数法在 TBM 选型定量化决策中的应用\*

杨振兴<sup>1,2</sup>,王浩<sup>3</sup>,周建军<sup>1,2</sup>,沈捷<sup>4</sup>,陈馈<sup>1,2</sup>

(1.盾构及掘进技术国家重点实验室,郑州 450001;2.中国中铁隧道集团有限公司,河南 洛阳 471009;  
3.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,武汉 430001;  
4.中铁工程设计咨询集团,郑州 450001)

**摘 要:**针对 TBM 选型单指标决策的局限性和主观臆断的缺陷,引入功效系数法,实现影响 TBM 选型多个指标的综合决策和定量化。选取地质适应性、线网适应性、施工进度、设备造价、支护费用、洞室稳定性 6 个具有代表性评价指标,采用 Delphi 法确定各指标的权重系数,建立 TBM 选型功效系数法模型。运用所建模型对重庆市地铁 6#线一期工程礼嘉站—平场站和平场站—黄茅坪站区间的 TBM 选型(开敞式 TBM、单护盾式 TBM、双护盾式 TBM、复合式 TBM)。研究结果表明:运用功效系数法进行 TBM 选型,实现了多指标的定量化决策,简单,准确,具有良好的工程应用价值。

**关键词:**TBM 选型;功效系数法;定量决策;多指标

中图分类号:TU352.11      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0799-06

Application of Efficacy Coefficient Method to  
Quantitative Decision of TBM Selection

Yang Zhenxing<sup>1,2</sup>, Wang Hao<sup>3</sup>, Zhou Jianjun<sup>1,2</sup>, Shen Jie<sup>4</sup>, Chen Kui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Shiel Machine and Boring Technology, Zhengzhou 450001, P.R. China;  
2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang, Henan 471009, P.R. China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and  
Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430001, P.R. China;  
4. China Railway Engineering Design Consulting Group Co.,Ltd, Zhengzhou 450001, P.R. China)

**Abstract:** For overcoming the limitation of single factor and defect of subjective judgment in TBM selection, Efficacy Coefficient Method is used to realize the comprehensive decision and quantification of multi-factors. Considering the key influential factors of TBM selection, six representative factors including geology adaptability, route network adaptability, construction progress, equipment cost, supporting cost, stability of tunnel are selected as evaluation indices to establish mathematical model based on efficacy coefficient method, and weight coefficient are determined by Delphi method. Applying the mathematical model to the section of Lijia-Pingchang Station and Pingchang-Huangping Station in the first stage project of Chongqing Rail Line 6, different TBM types is selected including open TBM, single shield TBM, double shield, compound TBM. The results show that application of efficacy coefficient method can simply accurately realize the quantitative decision of TBM selection, and has good prospect of engineering application.

**Keywords:** TBM selection; efficacy coefficient method; quantitative decision; multi-factors

\* 收稿日期:2017-12-16(修改稿)  
作者简介:杨振兴(1987-),男,河南郑州人,硕士,工程师,主要从事岩土工程、隧道及地下工程的稳定性研究工作。  
E-mail: zxyang1866@163.com  
基金项目:国家 863 计划(2012AA041803);国家自然科学基金(41472288);隧研合(2014-02);中国中铁科技开发计划(2014-重大-10)

0 引言

TBM 隧道由于其周围环境的不确定性因素,致使施工过程控制难度加大,施工暂停和事故处置频发<sup>[1-3]</sup>。TBM 设备的合理化选型作为保证隧道工程顺利进行、控制风险、节约工程成本的首要环节,应该得到足够重视<sup>[4]</sup>。

TBM 设备选型控制因素多且关联密切,如地层渗透性、颗粒级配、黏粒含量、岩土强度、软硬地层分布等地质因素,掘进速度、切削难度、造价、辅助工法、线网适应性性、洞室稳定性等施工控制因素<sup>[5-6]</sup>,单因素对 TBM 的适应性要求不同,对设备选型的重要程度存在差异。因此,TBM 的合理化选型是对多因素的综合决策,在考虑地质条件适应性、掘进风险、线网控制、工程进度、机器价格等多目标的基础上作出的统筹判断。

工程实践中,TBM 选型的多目标决策在地质条件与设备适应性的粗略判断基础上,多凭借施工经验对设备型式进行判断<sup>[7-9]</sup>,如山岭隧道应采用 TBM,盾构适用于浅埋城市隧道;当岩土渗透系数小于  $10^{-7}$  m/s 时,可选用土压平衡盾构,当渗透系数大于  $10^{-4}$  m/s 时,宜采用泥水盾构;岩土中粉粒和黏粒的总量达到 40% 时,通常选用土压平衡盾构,相反的情况宜选择泥水盾构,等等。对于 TBM 选型控制因素应依次考虑,逐步筛选,定性判断。首先依据地质因素选择盾构类型,其次考虑施工技术因素及造价等。这种依靠施工经验的 TBM 选型方法简单,可靠度差,易造成施工进度缓慢、控制困难、费用增加等不良后果。

一直以来,国内外诸多研究者和工程师都在积极探索能够正确认识 TBM 选型控制因素、并对 TBM 作出合理选型的工作方法,但研究成果较少。目前,国内外尚未查到科学、完善的 TBM 选型的定量方法。为了弥补这方面研究的不足,本文以重庆地铁 6 号线 TBM 选型工作为背景,引入功效系数法对 TBM 选型的多指标进行定量综合分析评估,实现 TBM 选型的定量化。功效系数法以其客观、准确、简单、易行的特点,在企业效益评估、财务风险评估、造船业风险预警等多个领域得到了广泛的应用<sup>[10-13]</sup>。近几年,已有学者将功效系数法应用到岩体优势结构面的确定、隧道围岩失稳风险预警、岩爆烈度分级预测、隧道结构健康检测系统预警、泥石流灾害预警等方面,并取得了一系列研究成果<sup>[14-19]</sup>。

1 功效系数法基本原理

在利用众多指标对 TBM 进行合理化选型时,由于这些指标的性质、度量单位、评价标准往往不同,不能单独使用某项指标进行选型,也不能对所有指标直接相加综合进行选型,需要通过一定的函数关系将其转化为同度量数据。同时,要考虑各指标所占权重,将同度量数据进行加权综合,形成一个综合指标,从而实现 TBM 的合理化选型。

功效系数法是一种反映多个指标、综合分析的定量评价方法,其核心思想是将众多评价指标通过功效系数函数转化为可以度量的功效系数值,再经过加权评价获得综合评价,据此确定待评估对象的评价结果。基于功效系数法进行 TBM 合理化选型的具体分析过程如图 1 所示<sup>[14-19]</sup>。

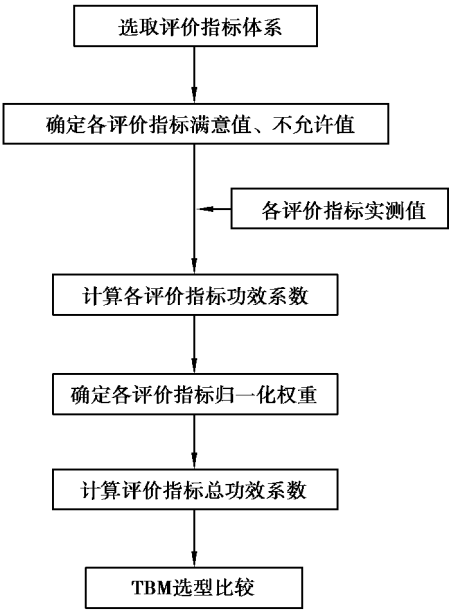


图 1 功效系数法 TBM 选型流程图

Fig.1 Flow chart of TBM selection with efficacy coefficient method

(1)构建评价指标体系:由于 TBM 型式比选指标较多,为了得出更为客观、合理的选型结果,采用功效系数法进行 TBM 选型,要求比选指标具有一定的代表性和典型性,在比选指标体系中既能独立又能互补,能够全面反映评价目标的综合状况。

评价指标体系一般可根据隧道的地质条件、周围环境限制、施工条件等,邀请具有施工经验的专家确定。

(2)确定各评价指标的满意值和不允许值:满意值通常选择评价指标标准的最优限值,不允许值选择评价指标标准的最不利限值,一般可通过已有工程经验对不能量化的评价指标划分等级,对量化的评价指标选择极限值。

(3)计算各评价指标的功效系数值:基于功效系数法的 TBM 选型评价指标体系中存在 2 种变量,分别是:①极大型变量,即评价指标的功效系数值随指标值增大而增大;②极小型变量,即评价指标的功效系数值随指标值增大而减小。其功效系数值计算方法如下:

极大型变量,单项功效系数值表达式为

$$d1_i = \begin{cases} \frac{X_i - X_{ni}}{X_{yi} - X_{ni}} \times 40 + 60, X_i < X_{yi} \\ 100, X_i \geq X_{yi} \end{cases} \quad (1)$$

极小型变量,功效系数值表达式为

$$d2_i = \begin{cases} \frac{X_i - X_{ni}}{X_{yi} - X_{ni}} \times 40 + 60, X_i > X_{yi} \\ 100, X_i \leq X_{yi} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d1_i$  为极大型指标  $i$  的功效系数值; $d2_i$  为极小型指标  $i$  的功效系数值; $X_{yi}$  为评价指标  $i$  的满意值; $X_{ni}$  为评价指标  $i$  的不允许值; $X_i$  为评价指标  $i$  的实际值。

(4)计算总功效系数:单项功效系数值确定后,根据各评价指标的重要性对其赋权,从而可得到 TBM 各类型的总功效系数值:

$$G = \sum_{i=1}^m (g_i \omega_i) \quad (3)$$

式中: $G$  为评价对象的总功效系数; $g_i$  为第  $i$  个评价指标的单项功效系数值; $\omega_i$  为第  $i$  个评价指标的权重系数。

## 2 TBM 比选的功效系数法模型

### 2.1 TBM 选型的评价指标体系

评价 TBM 选型合理性的指标很多,考虑影响 TBM 选型指标之间的相关性可分为地质及水文条件指标、线网适应性指标、施工进度指标、造价指标、洞室稳定性等方面。

#### 2.1.1 地质及水文条件指标

TBM 掘进施工过程是一个设备与岩土体不断

耦合作用的过程,TBM 对周围环境的适应性很大程度上决定着后续施工的难易程度。TBM 型式对地质及水文条件的适应性应综合考虑岩土力学性质、断层破碎带、复合地层情况、颗粒级配、粘粒含量、渗透性等确定,按其适应性分为 5 个层次:差(0 分)、一般(25 分)、较好(50 分)、好(75 分)、非常好(100 分)。

#### 2.1.2 线网适应性指标

TBM 选型应适应隧道设计的最小曲线半径,且不造成铰接油缸损坏和管片挤压变形破坏。

#### 2.1.3 施工进度指标

在围岩质量较好地段施工,不同 TBM 型式对地层的适应性均较好,开敞式 TBM 掘进速度达到 400~500 m/月,单护盾式在 300~450 m/月,双护盾式 TBM 为 350~450 m/月,复合式 TBM 为 200~300 m/月。当遭遇围岩破碎带时,不同 TBM 型式表现出很大的差异。

#### 2.1.4 造价指标

采用 TBM 施工隧道,工程造价不仅考虑购买机器的价格,还应考虑后续支护措施费用,将后续支护费用分为便宜(25 分)、一般(50 分)、高(75)和最高(100)4 个等级。

#### 2.1.5 洞室稳定性指标

TBM 施工的衬砌结构分为复合式衬砌和管片拼装式衬砌,复合式衬砌为现浇且对围岩的适应性好;管片衬砌采用螺栓连接,施工缝多,后期管片可能出现错台、裂缝,防水处理较困难,围岩稳定性指标综合考虑衬砌的耐久性和防水特性分为好(100 分)、较好(75 分)、一般(50 分)、差(0 分)。

### 2.2 各评价指标的功效系数模型

在上述 TBM 选型指标体系中,地质及水文条件指标、施工进度指标、洞室稳定性指标为极大型指标,按式(1)计算功效系数值;线网适应性指标、造价指标为极小型指标,按式(2)计算功效系数值。

评价指标的不允许值和满意值需根据各指标的计算原理和实际可能达到的水平加以确定,这里取各项指标的最小值和最大值作为不允许值和满意值。各评价指标的满意值和不允许值见表 1。

表 1 各评价指标的满意值和不允许值

Table 1 Satisfied values and not allowed values of various evaluation indices

取值 类型	地质 及水 文条 件/分	线网 适应 性/m (m·月 <sup>-1</sup> )	施工 进度/ /亿元	设备 造价 /分	支护 费用 /分	洞室 稳定 性/分
满意值	100	300	500	0.5	100	100
不允 许值	0	650	0	2.0	50	0

2.3 指标赋值及权重确定

不同 TBM 类型对地质条件的适应性存在差别,在行业内没有形成统一认识,导致不同工程师对 TBM 地质适应性判断存在差异。针对特定工程,本文通过专家评估的方法,对 TBM 地质适应性赋值。

确定评价指标权重的方法很多,如专家评估法、层次分析法(AHP)、粗糙集理论、Delphi 法、信息粒度法、客观信息熵法等。由于理论和实践中并没有形成各指标对 TBM 选型影响程度的定量判断标准,为了更能准确、全面地反映各指标对 TBM 选型的重要性,本文采用 Delphi 法确定各评价指标权重。

Delphi 法又称专家调查法,是一种主观赋权法,该方法主要考虑专家对某一评价指标的见解从而对其赋权。该方法赋权流程如下:①邀请行业内经验丰富的专家;②各专家就某一指标对 TBM 选型的影响程度打分;③根据评分结果计算各指标的权重。

$$E_j = \sum_{i=1}^s a_i / s \tag{4}$$

$$\delta_j^2 = \frac{1}{s-1} \sum_{i=1}^s (a_i - E_j)^2 \tag{5}$$

式中: $E_j$  为某一评价指标  $j$  的得分均值; $a_i$  为专家  $i$  对某一评价指标  $j$  的打分; $s$  为专家组成员个数; $\delta_j^2$  为某一评价指标  $j$  的评分方差,反映了各专家意见的统一程度。专家评分完成后,即可得到指标权重结果为

$$w_j = E_j / \sum_{j=1}^m E_j \tag{6}$$

式中: $m$  为 TBM 选型评价指标个数; $0 \leq w_j \leq 1$ ,  
 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$  为指标  $j$  的权重。

3 工程应用

本文借助重庆市地铁 6#线一期工程礼嘉站—平场站和平场站—黄茅坪站区间的实例分析,为功效系数法在 TBM 定量化选型中的可行性研究提供分析依据。

3.1 工程概论

重庆市地铁 6#线一期工程礼嘉站—平场站和平场站—黄茅坪站区间全长 8 239.923 m,线路平面为“S”形,曲线设计半径为  $R_1 = 650$  m、 $R_2 = 700$  m,最大纵坡为 29%,最大埋深为 80 m。根据地质勘察取芯情况,礼嘉—黄茅坪区间以砂岩、砂质泥岩地层为主,伴有土石交替、填土层及“上软下硬”地层的地质特点;岩体饱和单轴极限抗压强度值为 5.3~42.1 MPa,较均质单一;隧道地下水不甚发育,涌水量小,砂质泥岩渗透系数为 0.036~0.2 m/d,属于弱(微)透水岩层,开挖后掌子面基本能够自稳。

3.2 各评价指标的赋值

根据重庆市地铁 6#线一期工程礼嘉站—平场站和平场站—黄茅坪站区间地质概况,对开敞式 TBM、单护盾 TBM、双护盾 TBM 及复合式 TBM 进行比选。邀请行业内知名专家,结合本工程的地质条件为 TBM 地质适应性赋值。4 种 TBM 的各指标数值见表 2。

表 2 TBM 选型各指标参数

Table 2 Parameters of TBM selection

评价指标	TBM 类型			
	开敞式 TBM	单护盾 式 TBM	双护盾 式 TBM	复合式 TBM
地质适应性/分	一般(25)	好(75)	较好(50)	好(75)
线网适应性/m	400	500	500	350
最大掘进 速度/(m·月 <sup>-1</sup> )	450	375	400	250
购买机器价格/亿元	1.25	1.00	1.30	0.90
支护费用/分	一般(50)	高(75)	高(75)	高(75)
洞室稳定性/分	较好(50)	好(75)	好(75)	好(75)

3.3 权重确定

工程 TBM 选型前,邀请 6 位行业内经验丰富的专家就评价指标对 TBM 选型的影响程度打分,根据式(4)、式(6)计算各评价指标的权重,见表 3。



表3 各评价指标的权重计算结果

Table 3 Calculation results of weight coefficients of various evaluation indices		
各评价指标	权重	归一化权重
地质适应性/分	5.83	0.25
线网适应性/m	3.50	0.14
最大掘进速度/(m·月 <sup>-1</sup> )	3.00	0.12
购买机器价格/亿元	3.83	0.16
支护费用/分	3.83	0.16
洞室稳定性/分	4.17	0.17

表4 TBM选型综合评价表

Table 4 Comprehensive evaluation table of TBM selection							
TBM 类型	评价指标						总功效 系数值
	地质适应性	线网适应性	最大掘进速度	购买机器价格	支护费用	洞室稳定性	
开敞式	70	88.57	96	80	86.7	80	81.691 8
单护盾式	90	77.14	90	86.7	73.3	90	84.999 6
双护盾式	80	77.14	92	78.7	73.3	90	81.459 6
复合式	90	94.28	80	89.3	73.3	90	86.615 2

4 结论

(1)首次将功效系数法引入TBM选型领域,综合考虑地质适应性、线网适应性、最大掘进速度、造价、洞室稳定性等多指标对选型的影响,克服了传统单目标判断的局限性。同时,本文将设备选型和数学分析有机结合起来,实现了对多目标决策量化,改变了主观臆断的缺陷。

(2)功效系数法应用于TBM选型,原理简单,计算简捷,易于操作。用总功效系数值作为TBM选型的评价依据,易于理解和比较。

(3)应用TBM选型功效系数模型对重庆市地铁6#线一期工程TBM选型,结果与实践成果完全相符,证明了该模型的准确性,值得在TBM选型领域推广应用。

参考文献(References)

[1] 温森,徐卫亚.洞室变形引起的双护盾TBM施工事故风险分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增1):3060-3065. (Wen Sen, Xu Weiya. Risk Analysis of double shield TBM construction accident induced by tunnel deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Supp. 1): 3060-3065. (in Chinese))

[2] 温森,杨圣奇,董正方,等.深埋隧道TBM卡机机理及

3.4 评价结果

通过功效系数法的程序计算,输出各指标功效系数值和总功效系数值见表4。

从表4可以得出,复合式TBM的总功效系数值最大,即重庆市地铁6#线一期工程TBM的最优选择为复合式TBM。根据现场对复合TBM应用的实践证明,复合式TBM完全适用于该工程地质条件、进度要求和造价要求,此结果与实际相符。

控制措施研究[J].岩土工程学报,2015,37(7):1271-1277. (Wen Sen, Yang Shengqi, Dong Zhengfang, et al. TBM jamming mechanism and control measures in deep buried tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1271-1277. (in Chinese))

[3] 周建军,杨振兴.深埋长隧道TBM施工关键问题探讨[J].岩土力学,2014,35(增2):299-305. (Zhou Jianjun, Yang Zhenxing. Discussion on Key Issues of TBM construction for long and deep tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (Supp. 2): 299-305. (in Chinese))

[4] 李俊伟,李丽琴,吕培印.复合地层条件下的盾构选型风险分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(增1):1241-1260. (Li Junwei, Li Liqin, Lü Peiying. Risk analysis on shield type selection at compound stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (Supp. 1): 1241-1260. (in Chinese))

[5] 唐志强.青岛地铁隧道施工采用TBM工法分析[J].铁道标准设计,2013(5):90-93. (Tang Zhiqiang. Analysis on TBM construction method used for Qingdao metro tunnel [J]. Railway Standard Design, 2013(5): 90-93. (in Chinese))

[6] 郭彩霞,王梦恕,孔恒,等.无水大粒径砾漂石地层盾构选型研究[J].现代隧道技术,2014,51(4):13-17. (Guo Caixia, Wang Mengshu, Kong Heng, et al.

- Selection of a shield tunnelling in waterless strata with large-particle cobbles and boulders [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51 (4): 13-17. (in Chinese))
- [7] 丁志诚,张白勇,白云.广州地铁隧道施工中的盾构选型及盾构改进应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1820-1823. (Ding Zhicheng, Zhang Baiyong, Bai Yun. Application of shield selection and shield improvement in Guangzhou metro tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1820-1823. (in Chinese))
- [8] 刘继国,郭小红.超大直径海底隧道盾构选型研究[J].现代隧道技术,2009,46(1):51-55. (Liu Jiguo, Guo Xiaohong. Study on the selection of super-large-diameter shield for an undersea tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46 (1): 51-55. (in Chinese))
- [9] 晏启祥,郑代靖,何川,等.富水砂卵石地层地铁盾构施工若干问题及对策[J].地下空间与工程学报,2015,11(3):713-719. (Yan Qixiang, Zheng Daijing, He Chuan, et al. Problems and countermeasures of metro shield construction in water-soaked sand and cobble stratum [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 713-719. (in Chinese))
- [10] 王棚宇,王秀兰.基于功效系数法的城市土地利用效益评价——以武汉市为例[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2008,8(1):79-83. (Wang Pengyu, Wang Xiulan. The evaluation of urban land use efficiency based on efficacy coefficient method——a case study in Wuhan City [J]. Journal of Northwest A & F University (Social Science Edition), 2008, 8(1): 79-83. (in Chinese))
- [11] 蒋洁.功效系数法在高校财务风险预警中的应用[J].财务与金融,2009(5):56-60. (Jiang Jie. Application of efficiency coefficient method in early warning of financial risks in colleges and universities [J]. Accounting and Finance, 2009 (5): 56-60. (in Chinese))
- [12] 丁述军,蔺清冰,卞浩.我国农村小额信贷机构可持续发展问题研究——以功效系数法为模型[J].山东财政学院学报,2012(3):23-30. (Ding Shujun, Lin Qingbing, Bian Hao. A research on the sustainable development of China's rural small-credit institutions——taking efficacy coefficient method as a model [J]. Journal of Shandong University of Finance, 2012(3): 23-30. (in Chinese))
- [13] 陶永宏,祁爱琳.基于功效系数法与BP神经网络的造船业风险预警研究[J].中国造船,2010,51(1):191-198. (Tao Yonghong, Qi Ailin. Research on early-warning of China's shipbuilding industry risk based on efficacy coefficient method and BP neural network [J]. Shipbuilding of China, 2010, 51 (1): 191-198. (in Chinese))
- [14] 徐佳,张勤,吴继敏.功效系数法在确定优势结构面中的应用[J].岩土工程学报,2008,30(4):617-620. (Xu Jia, Zhang Qin, Wu Jimin. Application of Efficacy coefficient method to determination of rock preferred structural plane [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 617-620. (in Chinese))
- [15] 王迎超,孙红月,尚岳全,等.功效系数法在隧道围岩失稳风险预警中的应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3679-3684. (Wang Yingchao, Sun Hongyue, Shang Yuequan, et al. Application of efficacy coefficient method to instability risk early-warning of tunnel surrounding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Supp.2): 3679-3684. (in Chinese))
- [16] 王迎超,尚岳全,孙红月,等.基于功效系数法的岩爆烈度分级预测研究[J].岩土力学,2010,31(2):529-534. (Wang Yingchao, Shang Yuequan, Sun Hongyue, et al. Study of prediction of rockburst intensity based on efficacy coefficient method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 529-534. (in Chinese))
- [17] 周小勇.基于功效系数法和超前地质预报的隧道塌方风险预测[J].公路工程,2015,40(2):59-63. (Zhou Xiaoyong. Tunnel collapse risk warning model based on efficacy coefficient method and geological prediction and its applications [J]. Highway Engineering, 2015, 40 (2): 59-63. (in Chinese))
- [18] 李明,陈卫忠,杨建平,等.基于功效系数法的隧道结构健康监测预警研究[J].岩土力学,2015,36(增2):729-736. (Li Ming, Chen Weizhong, Yang Jianping, et al. Early Warning Research for Tunnel Structure Health Monitoring System Based on Efficacy Coefficient Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (Supp.2): 729-736. (in Chinese))
- [19] 孟凡奇,理光杰,王庆兵,等.基于功效系数法的泥石流灾害预警研究[J].岩土力学,2012,33(3):835-840. (Meng Fanqi, Li Guangjie, Wang Qingbing, et al. Research on early warning of debris flow based on efficacy coefficient method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 835-840. (in Chinese))