

文章编号:1671-8879(2013)01-0001-05

基于区间模糊分析法的边坡治理方案决策

周志军¹, 张铁柱², 牛涌¹, 梁涵¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 云南省公路开发投资有限责任公司, 云南 昆明 650200)

摘 要:针对现有边坡治理方案评价方法所存在的缺陷与不足,同时考虑到评价过程中的多层次、多目标、模糊性、全面性等特征给决策过程所带来的困难,基于区间模糊分析理论,构造了边坡治理方案的多层次综合评价模型。工程实例计算表明:该模型体现了边坡治理方案各影响因素与评价指标的逻辑关系,反映了决策过程中的层次性和全面性;区间数的引入可以很好的体现参数取值不确定性、模糊性的特点;权向量能衡量不同指标间的相对重要程度,充分体现了主要因素的影响,同时也兼顾了次要因素的作用,使边坡治理方案决策过程更加合理。为边坡治理方案决策提供了一种合理可行的方法。

关键词:道路工程;边坡治理;综合评价模型;模糊理论;相对优势度;相似度分析

中图分类号:U418.52;P642.22 **文献标志码:**A

Study on decision-making for slope treatment scheme based on the method of interval fuzzy analysis

ZHOU Zhi-jun¹, ZHANG Tie-zhu², NIU Yong¹, LIANG Han¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Yunnan Province Highway

Development and Investment Limited Liability Company, Kunming 650200, Yunnan, China)

Abstract: Aimed at the shortcomings of decision-making method for slop treatment scheme and considering the multi-objective, multi-level, vagueness and comprehensiveness in decision-making process, a multi-level comprehensive evaluation model for slope treatment scheme was established based on the theory of interval fuzzy analysis. Engineering examples show that the model reflects the logical relationship between the factors and evaluation indexes of the slope treatment scheme, reflects the levels and comprehensiveness of decision-making process. The interval numbers can well reflect the characteristics of decision-making process in the parameter values. Weight vectors can measure relative importance between different indexes and fully reflect both the influences of main factors and the effect of secondary factors. This model makes slope treatment scheme a more rational decision-making process and provides a reasonable and feasible method for slope treatment scheme decision-making. 2 tabs, 1 fig, 11 refs.

Key words: road engineering; slope treatment; comprehensive evaluation model; fuzzy theory; degree of relative importance; similarity analysis

收稿日期:2012-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41172262)

作者简介:周志军(1975-),男,江苏泰兴人,副教授,工学博士,E-mail:5974100@qq.com。

0 引言

边坡治理是边坡工程研究的核心问题,其治理方案的合理选择直接关系到边坡治理的成功与否^[1-2]。由于岩土体本身是一个高度复杂的不确定系统,人们对其认识存在一定的模糊性和局限性,材料参数、本构模型、计算荷载、量测的位移和应力等无法得到精确值,即便确定了某个取值,也可能存在较大误差,使人难以信服。在治理方案确定过程中,需考虑的影响因素众多,同时,这些因素之间的相对重要程度也不一样,这就使得在实际工程中进行决策分析时,决策者往往觉得顾此失彼。不确定性分析方法近年来一直是工程和研究中的一个重要课题。夏元友等采用多层次模糊综合群决策方法确定边坡治理方案,采用了权重突出不利因素的影响,但其未考虑评价指标取值不确定性对方案选择所产生的影响^[3]。谢全敏等基于二维足码定位理论对治理方案进行群决策分析,但没有考虑到权重的确定,不能反映评价指标之间影响程度的差异^[4]。所以,现有边坡治理决策方法虽然可行,但仍存在不足处。为此,本文基于区间模糊方法,在综合考虑影响边坡方案确定的各因素的基础上,选用多项影响因素作为综合评价的评价因子,建立了边坡治理方案评价的多层次综合评价模型,通过对多个治理方案进行区间模糊

分析,为边坡治理方案决策提供了一种可靠的新方法。该方法能较好地反映决策过程中的层次性、模糊性及不确定性,并已成功应用于许多工程领域^[5]。

1 区间模糊分析

区间模糊分析方法是采用区间数变量来表示工程中的不确定性量,并通过区间数进行规范化处理,得到各方案的规范化区间数决策矩阵,进而虚构理想中的最优方案决策矩阵。在综合评价模型的基础上,利用模糊数学理论对各备选方案与理想最优方案进行区间关联分析,与理想最优方案相似程度最大的备选方案,即为决策者所需要的综合治理效果最佳的最优方案。

1.1 多层次综合评价模型的建立

合理确定边坡治理方案综合评价指标体系是对方案进行优选的基础。在建立评价模型时,应充分考虑到影响因素及其评价指标的层次性与模糊性,并且指标的选择需具有全面性。

本文通过对多项实际治理工程方案所考虑的影响因素进行类比分析,确定了包括经济、技术、环境因素的边坡治理方案多层次综合评价模型,如图 1 所示。模型从指标、准则层对方案进行综合评价,需先后进行两次区间关联分析,其中指标层区间关联分析是其上级准则层分析的基础。

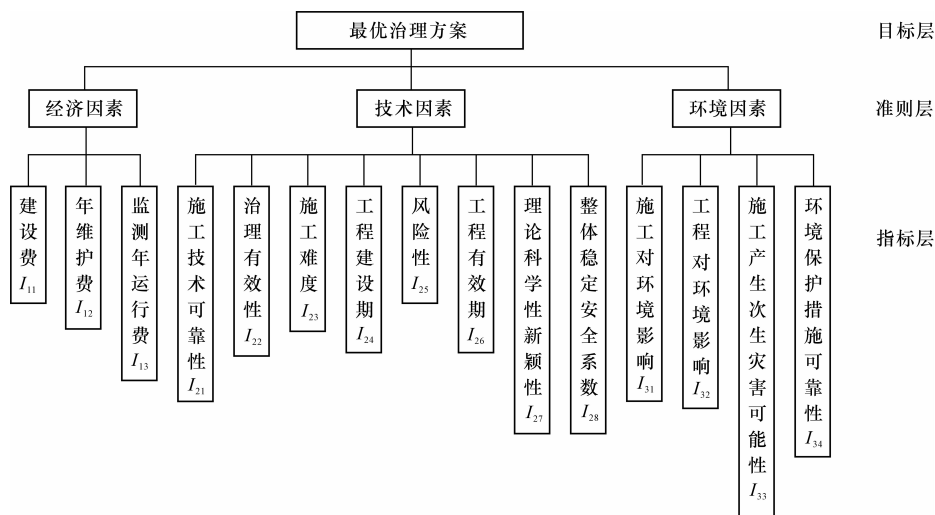


图 1 边坡治理方案的综合评价模型

Fig. 1 Comprehensive evaluation model of slope treatment scheme

1.2 评价指标区间数决策矩阵的确定以及规范化

针对评价指标取值的模糊性,采用区间数 (x_{mij}^L, x_{mij}^R) 来反映指标的属性值。其中:L,R 为左右侧限值; $m=1,2,\dots,m$ 为边坡治理方案个数; $i=1,2,3$ 为影响因素的编号; $j=1,2,3$ 为评价指标的编号;

x_{mij}^L, x_{mij}^R 分别为区间左、右界限数值。

从图 1 可以看出,评价指标分为定量(比如 I_{11} 、 I_{12} 等经济指标)和定性(比如 I_{21} 、 I_{31} 等技术、环境指标)2 种类型; I_{ij} 为影响因素 I_i 的第 j 个评价指标;由于它们的量纲和数量级不同,互相之间存在不可

公度性,可能造成数量级小的指标属性值被“淹没”,故需将决策矩阵根据指标类型进行规范化处理,使指标属性值转化到规范的 $(0,1)$ 区间才能进行区间关联分析^[6]。指标类型又分为效益型(取值越大越好)和成本型(取值越小越好),在处理方法上存在差异。

1.2.1 定量评价指标区间属性值的确定及规范化

(1)效益性指标

$$r_{kij}^L = x_{kij}^L / \sum_{k=1}^n x_{kij}^R \quad (1)$$

$$r_{kij}^R = x_{kij}^R / \sum_{k=1}^n x_{kij}^L$$

(2)成本性指标

$$r_{kij}^L = (1/x_{kij}^L) / \sum_{k=1}^n (1/x_{kij}^L) \quad (2)$$

$$r_{kij}^R = (1/x_{kij}^R) / \sum_{k=1}^n (1/x_{kij}^R)$$

式中: x_{kij}^L 、 x_{kij}^R 分别为归一化评价指标属性值的上、下限; x_{kij}^L 、 x_{kij}^R 分别为专家评分得到的区间属性值上、下限。

1.2.2 定性评价指标区间属性值的确定及规范化

确定定性评价指标时,局限于人类认识与经验的限制,存在更大的不确定性,如何利用区间数来尽量减少不确定性成为关键。利用专家评语法将定性评语转化为定量值,所有定性评价指标在 $0 \sim 1$ 区间上被划分为10个评价等级,用不同数值与模糊性评语对应:最小为0、很小为0.1、较小为0.2、小为0.3、偏小为0.4、平均为0.5、偏大为0.6、大为0.7、较大为0.8、很大为0.9、最大为1。实际操作时,由3~5名专家对不同评价指标分别给出定性评语,将所有专家结果汇总转化可得定性指标的区间属性值。然后利用式(1)、式(2)根据指标类型进行规范化处理。将规范化处理后的决策矩阵记作 R_i 。

$$R_i = \begin{bmatrix} (r_{1i1}^L, r_{1i1}^R) & (r_{1i2}^L, r_{1i2}^R) & \cdots & (r_{1ij}^L, r_{1ij}^R) \\ (r_{2i1}^L, r_{2i1}^R) & (r_{2i2}^L, r_{2i2}^R) & \cdots & (r_{2ij}^L, r_{2ij}^R) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (r_{ki1}^L, r_{ki1}^R) & (r_{ki2}^L, r_{ki2}^R) & \cdots & (r_{kij}^L, r_{kij}^R) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (r_{mi1}^L, r_{mi1}^R) & (r_{mi2}^L, r_{mi2}^R) & \cdots & (r_{mij}^L, r_{mij}^R) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_i 为规范化区间决策矩阵; (r_{mij}^L, r_{mij}^R) 的意义同式(2)。

1.3 指标层理想最优方案的虚构

在进行区间关联分析之前,还需虚构出一个理想中的最优方案作为区间关联分析的参照物。由于分析过程分层次进行,所以先确定指标层层次上的

理想最优方案,其区间属性值左、右界限取所有方案中对应影响因素的评价指标区间属性值的最大左、右界限,即集合所有备选方案优势的“理想”取值

$$\left. \begin{aligned} r_{0ij}^L &= \max_{1 \leq k \leq n} (r_{kij}^L) \\ r_{0ij}^R &= \max_{1 \leq k \leq n} (r_{kij}^R) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: n 为方案编号;0为“理想”的意思。

则可得到指标层理想最优方案属性值区间数向量 $S_{0i} = \{(r_{0i1}^L, r_{0i1}^R), (r_{0i2}^L, r_{0i2}^R), \dots, (r_{0ij}^L, r_{0ij}^R)\}$,即将式(4)中得到的结果组合成的向量。

1.4 区间数权向量的确定

为突出不同影响因素及其评价指标在边坡治理决策时重要程度的差异,需要确定一个权向量来体现这种相对重要程度。现有最常用的权向量确定方法是层次分析法,假设在某一不确定决策分析过程中,相对于 n 个备选方案的两两比较区间数判断矩阵 $A = [A_{ij}]_{n \times n}$, $A_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$,其中 a_{ij} 、 b_{ij} 为数值,具体取值见文献[7],并且满足: $A_{ij} = (1, 1) = 1$, $A_{ji} = \frac{1}{A_{ij}}$ 。则由区间数判断矩阵 A 可得权向量

$$W_i = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \right] \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

由此可得到影响因素 I_i 的区间数权向量为

$$W = \{(\omega_1^L, \omega_1^R), (\omega_2^L, \omega_2^R), (\omega_3^L, \omega_3^R)\} \quad (6)$$

评价指标 I_{ij} 的区间数权向量为

$$W_i = \{(\omega_{i1}^L, \omega_{i1}^R), (\omega_{i2}^L, \omega_{i2}^R), \dots, (\omega_{ij}^L, \omega_{ij}^R)\} \quad i=1, 2, 3 \quad (7)$$

1.5 指标层区间关联度的确定

备选方案、指标层理想最优方案的区间数向量及权向量均已得出,可进行备选方案与理想方案的指标层次区间关联分析,即检验各方案与理想最优方案在指标层上的近似程度,本文引用区间关联度来衡量这种近似程度^[8]。

由灰色关联度分析方法,方案 M_k 与理想最优方案 M_0 关于影响因素的评价指标 I_{ij} 的区间数关联系数为

$$\xi_k(I_{ij}) = \frac{\min_j \{L_{kij}\} + 0.5 \max_j \{L_{kij}\}}{L_{kij} + 0.5 \max_j \{L_{kij}\}} \quad (8)$$

式中: L_{kij} 为规范化区间值 (r_{kij}^L, r_{kij}^R) 与 (r_{0ij}^L, r_{0ij}^R) 的欧氏距离,其计算公式为

$$L_{kij} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|r_{0ij}^L - r_{kij}^L|^2 + |r_{0ij}^R - r_{kij}^R|^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

由加权求和法可得备选方案 M_k 与指标层理想

最优方案 M_0 关于影响因素 I_i 的区间关联度为

$$\zeta_{ki}=(\zeta_{ki}^L,\zeta_{ki}^R)=\sum_{j=1}^n\xi_k(I_{ij})(w_{kij}^L,w_{kij}^R)$$

$i=1,2,3$

(10)

式中: ξ_k 为区间关联系数,同式(8)。

1.6 准则层区间关联度的确定及相似度分析

参照多级模糊综合层次评判方法,将式(10)所得指标层区间关联度作为准则层影响因素的规范化区间数属性值进行准则层区间关联分析,分析过程与指标层分析时一样^[9]。首先虚构准则层理想最优方案区间数向量 $S_0=\{(r_{01}^L,r_{01}^R),(r_{02}^L,r_{02}^R),(r_{03}^L,r_{03}^R)\}$,再对备选方案与准则层理想最优方案进行准则层次区间关联分析,得到准则层关联度 ζ_k ,计算方法与指标层分析一致。 ζ_k 能综合反映准则层中影响因素与指标层中评价指标的共同影响。本文引用相对优势度方法对关联度进行排序。首先,计算出每两个关联度之间的相对优势度,并用判断矩阵形式予以表示;然后,通过判断矩阵计算出备选方案与准则层理想最优方案的相似度值,依据相似度值大小进行排序,与理想最优方案最相似的方案即为最优方案。具体计算方法如下所述

任意的 2 个区间关联度 $\zeta_u=(\zeta_u^L,\zeta_u^R)$ 与 $\zeta_l=(\zeta_l^L,\zeta_l^R)$ ($u,l=1,2,\cdots,n$)关于 $(\zeta_u>\zeta_l)$ 的相对优势度为

$$p(\zeta_u>\zeta_l)=\begin{cases} 1-\frac{1}{2\exp((\zeta_u^R-\zeta_l^L)/(\zeta_u^R-\zeta_u^L+\zeta_u^R-\zeta_l^L)-1/2))}& (\frac{\zeta_u^R-\zeta_l^L}{\zeta_u^R-\zeta_u^L+\zeta_u^R-\zeta_l^L}\geq\frac{1}{2}) \\ \frac{1}{2\exp(1/2-(\zeta_u^R-\zeta_l^L)/(\zeta_u^R-\zeta_u^L+\zeta_u^R-\zeta_l^L))}& (\frac{\zeta_u^R-\zeta_l^L}{\zeta_u^R-\zeta_u^L+\zeta_u^R-\zeta_l^L}<\frac{1}{2}) \end{cases}$$

(11)

用 h_{ul} ($u,l=1,2,\cdots,n$)为区间数相对优势度 $p(\zeta_u>\zeta_l)$,则可得到相对优势度的判断矩阵 $H=[h_{ul}]_{n\times n}$ ^[10]。验证可知, H 为模糊互补矩阵。由文献[11]提出的方法可得第 s 个方案的区间关联度 ζ_s 的相似度值为

$$D_s(\sum_{i=1}^n h_{ui}+\frac{n}{2}-1)/n(n+1)$$

(12)

将计算出的 D_s 按大小顺序排列,可得到 n 个备选方案的优劣次序, D_s 最大者即为工程实际治理的最优方案。

2 工程实例分析

现结合某具体工程实例进行研究,以论证所述

方法的合理性与可行性。某岩质边坡位于地质灾害群发区,已发生地质灾害多次,对危岩、滑坡区的北、东、西三侧人民生命安全构成严重威胁。设计过程中提出 2 种可行方案:爆破削方法(方案一)和锚+网锁固法(方案二)。为此咨询了 5 位参与设计的专家,经整理,方案一与方案二的评价指标属性值经过量化与规范化后的结果见表 1。其中,整体稳定安全系数 I_{28} 与环境保护措施可靠性 I_{34} 根据文献[3]中的资料未能计算出,在此分析中不予考虑。

表 1 评价指标规范化区间数属性值

Tab. 1 Interval number attribute values of normalized evaluation indexes

评价指标	方案一	方案二
I_{11}	0.2,0.3	0.45,0.55
I_{12}	0.7,0.8	0.075,0.175
I_{13}	0.7,0.8	0.45,0.55
I_{21}	0.9,1.0	0.7,0.8
I_{22}	0.9,1.0	0.7,0.8
I_{23}	0.45,0.55	0.2,0.3
I_{24}	0.9,1.0	0.9,1.0
I_{25}	0.8,0.9	0.45,0.55
I_{26}	0.9,1.0	0.7,0.8
I_{27}	0.45,0.55	0.8,0.9
I_{31}	0.2,0.3	0.7,0.8
I_{32}	0.55,0.65	0.7,0.8
I_{33}	0.45,0.55	0.7,0.8

采用本文 1.4 节所述方法,确定影响因素 I_i 的区间数权向量 W 及其评价指标 I_{ij} 的区间数权向量 $W_1\sim W_3$ 分别为

$$\begin{aligned} W &= \{(0.325,0.392),(0.383,0.460),(0.207,0.244)\} \\ W_1 &= \{(0.615,0.864),(0.136,0.193),(0.093,0.127)\} \\ W_2 &= \{(0.107,0.273),(0.183,0.457),(0.067\ 1,0.180), \\ &\quad (0.020\ 6,0.056\ 9),(0.088\ 9,0.233),(0.132,0.335),(0.024\ 4,0.069\ 5)\} \\ W_3 &= \{(0.218,0.268),(0.183,0.224),(0.500,0.618)\} \end{aligned}$$

由式(8)、式(9)计算指标层决策矩阵属性值 (r_{kij}^L,r_{kij}^R) 与指标层理想最优方案属性值 (r_{0ij}^L,r_{0ij}^R) 的关联系数,结合权向量 $W_1\sim W_3$ 得到影响因素的区间关联度,具体数据见下页表 2。将所得指标层区间数关联度作为影响因素的规范化区间属性值,最终得到 2 个备选方案的准则层区间关联度分别为

$$\zeta_1=(0.613,0.734),\zeta_2=(0.558,0.667)$$

由式(11)计算可得相对优势度矩阵为

$$H=\begin{bmatrix} 0.500 & 0.616 \\ 0.384 & 0.500 \end{bmatrix}$$

表 2 影响因素区间关联度
Tab. 2 Interval relational grades of factors

影响因素	方案一	方案二
I_1	0.537,0.752	0.712,0.999
I_2	0.609,1.000	0.382,0.986
I_3	0.475,0.585	0.901,1.000

进而通过式(12)得到相似度 D_1 、 D_2 分别为 0.19,0.15。方案一略优于方案二,即:该治理方案宜采用爆破削方法。所得结果与文献[3]中分析结果相同。施工结果表明,该方案满足工程要求。

3 结 语

(1)综合评价模型基本上涵盖了边坡治理方案各方面的特性,同时也体现了各影响因素与评价指标的逻辑关系,充分反映出决策过程中的层次性、全面性。

(2)区间数的引入可以很好地体现参数取值不确定性、模糊性的特点,避免产生过大误差;权向量能衡量不同指标间的相对重要程度,充分体现了主要因素影响,同时也兼顾了次要因素的作用,使边坡治理方案决策过程更加合理;为边坡治理方案决策提供了一种合理可行的方法。

参考文献:

References:

[1] 熊 炜,范 文,邓龙胜,等.基于有限元修正节理岩质边坡稳定性计算的解析解[J].地球科学与环境学报,2011,33(3):306-310.
XIONG Wei,FAN Wen,DENG Long-sheng,et al. Amendment of analytical solution on stability of joint rock slope based on finite element method[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2011,33(3):306-310. (in Chinese)

[2] 李 萍,张 波,李同录.黄土高原边坡特征与破坏规律的分区研究[J].地球科学与环境学报,2012,34(3):89-98.
LI Ping,ZHANG Bo,LI Tong-lu. Study on regionalization for characteristic and destruction rule of slope in loess plateau[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2012,34(3):89-98. (in Chinese)

[3] 夏元友,朱瑞赓.不稳定边坡治理方案的多层次模糊综合群决策[J].自然灾害学报,1998,7(1):60-65.
XIA Yuan-you,ZHU Rui-geng. Multiperson multilayer fuzzy comprehensive decision making for control plans of unstable slopes[J]. Journal of Natural Disasters,1998,7(1):60-65. (in Chinese)

[4] 谢全敏,王红彬,吴定洪,等.边坡治理群决策的二维足码定位法研究[J].岩土力学,2009,30(2):429-

432.
XIE Quan-min,WANG Hong-bin,WU Ding-hong,et al. Two dimension leg-mark selected location method of group decision making of slope treatment[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(2):429-432. (in Chinese)

[5] 黄 侨,唐海红,任 远.基于模糊理论的大跨度桥梁评估理论研究[J].公路交通科技,2010,27(1):62-66.
HUANG Qiao,TANG Hai-hong,REN Yuan. Study of assessment theory of long-span bridges based on fuzzy theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2010,27(1):62-66. (in Chinese)

[6] 党耀国,刘思峰,刘 斌,等.多指标区间数关联决策模型的研究[J].南京航空航天大学学报,2004,36(3):403-406.
DANG Yao-guo,LIU Si-feng,LIU Bin,et al. Study on incidence decision making model of multi-attribute interval number[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2004,36(3):403-406. (in Chinese)

[7] 翟晓燕,张新政.群决策中区间数判断矩阵的集结及权重的计算[J].系统工程,2005,23(9):103-107.
ZHAI Xiao-yan,ZHANG Xin-zheng. The methods on aggregation of interval number judgment matrixes and calculation of its priorities in the group decision-making[J]. Systems Engineering,2005,23(9):103-107. (in Chinese)

[8] 李伟军,叶 飞.基于灰色关联度的区间评价方法探讨[J].系统工程与电子技术,2001,23(2):55-57.
LI Wei-jun,YE Fei. Interval appraise method based on grey relation[J]. Systems Engineering and Electronics,2001,23(2):55-57. (in Chinese)

[9] 王大伟,冯英俊.模糊多级综合评价模型与应用[J].系统工程与电子技术,2006,28(6):867-868.
WANG Da-wei,FENG Ying-jun. Application of fuzzy multilevel comprehensive evaluation method in function[J]. Systems Engineering and Electronics,2006,28(6):867-868. (in Chinese)

[10] 张吉军.区间数的排序方法研究[J].运筹与管理,2003,12(3):18-22.
ZHANG Ji-jun. Research on method for ranking interval numbers[J]. Operations Research and Management Science,2003,12(3):18-22. (in Chinese)

[11] 段宝彬.基于区间数的多级模糊优选模型[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):478-480.
DUAN Bao-bin. Interval number-based multiple fuzzy optimization model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2004,32(4):478-480. (in Chinese)