

文章编号:1671-8879(2007)05-0062-04

## 基于组合权值灰关联法的旧桥加固方案评价

杨雅勋<sup>1</sup>, 李子春<sup>2</sup>, 李子青<sup>1</sup>, 郝宪武<sup>1</sup>

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 铁道部 科学研究院, 北京 100081)

**摘 要:**旧桥加固方案评价是旧桥加固工程中一个重要的环节。针对方案评价中存在主观影响因素过多、评价指标权值不确定性等问题,在方案评价常用的灰关联理论中引入组合权值的概念,将改进 AHP 法和熵值法相结合,提出了确定指标权值的一种非线性目标规划方法,建立了组合权值灰关联法评价模型。该模型考虑了人们判断的模糊性和方案评价中存在的灰色信息,从而使方案评价更加客观。实例分析表明,采用该方法的评价结果符合工程实际。

**关键词:**桥梁工程;旧梁加固;方案评价;组合权值;灰色关联度

**中图分类号:**U445.72

**文献标志码:**A

### Evaluation on reinforcement schemes of existing bridges based on combination-weight-gray-relation method

YANG Ya-xun<sup>1</sup>, LI Zi-chun<sup>2</sup>, LI Zi-qing<sup>1</sup>, HAO Xian-wu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** How to evaluate the reinforcement schemes of existing bridges is an important step in engineering projects. Since the schemes evaluation had many subjective factors and uncertainty of the index weights existed in current evaluation, the conception of combination weight was used in gray relation method which was usually used in the evaluation, a nonlinear-objective programming method based on improved AHP method and information entropy was presented, and the evaluating model was established. The fuzziness of people's judgment and the gray information in evaluation were taken into account in this model, thus the evaluation was more objective. An example indicates that this method has a good accordance with the reality. 3 tabs, 11 refs.

**Key words:** bridge engineering; existing bridge reinforcement; evaluation of schemes; combination weight; grey relational degree

## 0 引 言

随着公路交通量的急剧增大,大量的旧桥需要加固,以满足公路运输发展的需要。合理的选择加

固方案直接关系到旧桥的使用功能、安全运营、经济效益和社会效益,因此必须对备选加固方案进行综合评价,根据评价结果选择最佳方案。

目前,国内外建立的综合评价方法很多,如模糊

收稿日期:2006-06-12

基金项目:陕西省交通科技项目(01-19k)

作者简介:杨雅勋(1979-),男,陕西西安人,博士研究生,E-mail:yyxkl@163.com.

综合评价法<sup>[1]</sup>、灰色理论<sup>[2]</sup>等,这些方法以不同的途径构造了加固方案评价模型。然而,在加固方案评价中,指标权值对评价结果有着重要影响,因此,合理的确定指标权值是方案评价的一个关键问题。指标权值的确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法,如层次分析法、专家评分法等,所确定的权值体现了决策者的意向,但是决策或评价的结果具有较大的主观随意性;客观赋权法,如熵值法、因子分析法等,所确定的权值虽然具有较强的数学理论依据,但没有考虑到决策者的主观意向。这两类方法均有一定的局限性<sup>[3]</sup>。为此,本文针对旧桥加固方案评价的特性,将改进 AHP 法和熵值法有机结合,提出了确定指标权值的一种非线性目标规划方法,并采用灰色关联度法,实现对各备选加固方案的综合评价。

## 1 评价方法

### 1.1 评价指标体系

结合旧桥加固的特点和技术要求,可概括出影响加固方案评价的因素,主要包括 4 个方面内容<sup>[4]</sup>:①加固方案的效果可靠性;②加固方案的经济合理性;③加固方案的技术可行性;④加固方案的结构美观性。旧桥加固方案评价指标体系如表 1 所示。

表 1 旧桥加固方案评价指标体系

总目标	第一层因素	第二层因素
方案评价 U	效果可靠性 U <sub>1</sub>	承载能力要求满足程度 u <sub>11</sub>
		耐久性要求满足程度 u <sub>12</sub>
		新旧结构协调工作要求满足程度 u <sub>13</sub>
		对加固构件无不利影响的要求满足程度 u <sub>14</sub>
	经济合理性 U <sub>2</sub>	加固所需总费用 u <sub>21</sub>
		加固所需工期 u <sub>22</sub>
		加固后所需的年维护费用 u <sub>23</sub>
		对原有结构的利用程度 u <sub>24</sub>
	技术可行性 U <sub>3</sub>	加固技术可靠性 u <sub>31</sub>
		加固技术适用性 u <sub>32</sub>
		加固技术的复杂程度 u <sub>33</sub>
		加固对交通的影响程度 u <sub>34</sub>
	结构美观性 U <sub>4</sub>	加固后结构的美观程度 u <sub>41</sub>

### 1.2 指标权值的计算

#### 1.2.1 客观赋权法—熵值法

熵值法是一种依据各指标值所包含的信息量的大小确定指标权值的客观赋权法,其计算步骤为<sup>[5]</sup>:

(1) 将各指标同度量化,计算  $f_{kj}$  的比重  $p_{kj}$

$$p_{kj} = f_{kj} / \left( \sum_{j=1}^m f_{kj} \right) \quad (1)$$

式中:  $f_{kj}$  为第  $k$  项指标下第  $j$  个待评价方案的指标值 ( $k = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$ )。

(2) 计算第  $k$  项指标的熵值  $e_k$

$$e_k = -c \sum_{j=1}^m p_{kj} \ln p_{kj} \quad (2)$$

式中:常数  $c(c > 0)$  与系统的样本数(方案数)  $m$  有关,且  $c = 1/\ln m, 0 \leq e_k \leq 1$ 。

(3) 计算第  $k$  项指标的差异系数  $g_k$ 。对于第  $k$  项指标,指标的差异越大,对方案评价的作用越大,熵值就越小,指标权值相应就越大。因此,第  $k$  项指标差异系数  $g_k$  为

$$g_k = 1 - e_k \quad (3)$$

(4) 计算第  $k$  项指标权值  $w_k^{(1)}$

$$w_k^{(1)} = g_k / \left( \sum_{j=1}^m g_k \right) \quad (4)$$

#### 1.2.2 主观赋权法—改进 AHP 法

AHP 法的计算是建立在判断矩阵一致性基础上,而实际应用中建立的判断矩阵往往都不一致;而且当被比较元素超过 9 个时,判断就不准确。针对这些问题,采用改进 AHP 法<sup>[6]</sup>来计算指标的权值向量,该方法不受元素个数限制,且不需要进行一致性判断。

(1) 假设将某一层的指标  $y$  作为准则,对下一层的指标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  有支配作用,那么在准则  $y$  之下按它们相对重要性赋予  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相应的权值。若评价指标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相对于评价准则  $y$  具有如下的关系

$$x_1 > x_2 > \dots > x_n \quad (5)$$

则称评价指标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之间确立了序关系。其中,  $x_i > x_j$  表示  $x_i$  相对于评价准则  $y$  的重要性程度大于(或不小于)  $x_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )。

(2) 设专家关于评价指标  $x_{k-1}$  与  $x_k$  的重要性之比  $w_k^{(2)}/w_{k-1}^{(2)}$  的判断为

$$w_k^{(2)}/w_{k-1}^{(2)} = r_k, k = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中:  $w_k^{(2)}$  为  $x_k$  的权值;  $r_k$  的赋值见表 2<sup>[7]</sup>。

表 2  $r_k$  赋值参考

$r_k$	说明
1	指标 $x_{k-1}$ 与 $x_k$ 具有同样重要性
3	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 稍微重要
5	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 明显重要
7	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 强烈重要
9	指标 $x_{k-1}$ 比 $x_k$ 极端重要
2, 4, 6, 8	表示相邻判断 1~3, 3~5, 5~7, 7~9 的中值

如果  $x_1, x_2, \dots, x_n$  具有式(5)的序关系,则有

$$r_{k-1} r_k > 1 \quad (7)$$

又由于  $\prod_{i=k}^n r_i = w_k^{(2)}/w_n^{(2)}$ , 则有

$$\sum_{k=2}^n \left( \prod_{i=k}^n r_i \right) = \sum_{k=2}^n (w_k^{(2)}/w_n^{(2)})$$

注意到  $\sum_{k=1}^n w_k^{(2)} = 1$ , 则有

$$w_n^{(2)} = 1 / \left( 1 + \sum_{k=2}^n \left( \prod_{i=k}^n r_i \right) \right) \quad (8)$$

根据式(6)及式(8), 可知

$$w_k^{(2)} = r_k w_k^{(2)} \quad (9)$$

### 1.2.3 组合赋权法

为了全面反映评价指标的重要性, 并考虑到专家的经验判断力, 将专家对各指标的主观权值与嫡值法确定的客观权值相结合, 最终确定各指标组合权值。合理的组合权值向量  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  的获取, 应使其与原权向量尽可能贴近。设由嫡值法计算得到权值向量  $w^{(1)} = (w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, \dots, w_n^{(1)})^T$ , 改进层次分析法得到权值向量  $w^{(2)} = (w_1^{(2)}, w_2^{(2)}, \dots, w_n^{(2)})^T$ , 那么在贴近度最大意义下构造优化模型

$$\left. \begin{aligned} & \max \sum_{k=1}^n \lambda_k (w, w^{(k)}) \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_k (w, w^{(k)}) = 1 - d_k(w, w^{(k)})$ , 为  $w$  与  $w^{(k)}$  的贴近度;  $d_k(w, w^{(k)}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i - w_i^{(k)})^2}$ , 为  $w$  与  $w^{(k)}$  之间的欧式距离<sup>[8]</sup>。利用该优化模型进行组合赋权, 即可得到指标的组权值向量  $w$ 。

## 1.3 方案评价

### 1.3.1 指标无量纲化处理

(1) 定量指标处理。旧桥加固方案评价指标体系中有些评价指标属于能够用数值表示并且指标值可直接作为方案的定量指标, 如加固所需费用、加固所需工期等。定量指标可以采用如下的处理方法:

对于效益型指标, 即属性值愈大愈好的指标, 其无量纲化值为

$$f'_{ij} = \begin{cases} 0 & f_{ij} \leq f_{\min} \\ \frac{f_{ij} - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} & f_{\min} < f_{ij} < f_{\max} \\ 1 & f_{ij} \geq f_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

对于成本型指标, 即属性值愈小愈好的指标, 其无量纲化值为

$$f'_{ij} = \begin{cases} 0 & f_{ij} \geq f_{\max} \\ \frac{f_{\max} - f_{ij}}{f_{\max} - f_{\min}} & f_{\min} < f_{ij} < f_{\max} \\ 1 & f_{ij} \leq f_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $f_{ij}$  为第  $j$  个待评价方案对第  $i$  项指标所具有的指标值;  $f'_{ij}$  为归一化处理后的值;  $f_{\min}$  为各方案第  $i$  项评价指标中最小指标值, 即  $f_{\min} = \min(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in})$ ;  $f_{\max}$  为各方案第  $i$  项评价指标中最大指标值, 即  $f_{\max} = \max(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in})$ ; 其中  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

(2) 定性指标处理。旧桥加固方案评价指标体系中的有些评价指标属于只能对其进行定性的估计和评判的定性指标。根据旧桥加固的需要, 采用 9 级因素等级集,  $E = \{\text{最差、很差、差、较差、中、较好、好、很好、最好}\}$ , 对于定性指标语言灰量, 采用线性灰量白化灰函数<sup>[3]</sup>进行量化, 量化结果见表 3。

表 3 定性指标量化结果

等级	最差	很差	差	较差	中	较好	好	很好	最好
量值	0	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000

### 1.3.2 确定分析序列

灰关联分析法研究对象是无量纲化后的序列, 分为母序列和子序列, 通常称母序列为参考序列, 子序列为比较序列。参考序列是灰关联分析法中的标准序列, 记为  $f_0$ , 其第  $k$  项指标值为  $f_{k0}$ , 则参考序列可以表示为

$$f_0 = (f_{10}, f_{20}, \dots, f_{n0}) \quad (13)$$

比较序列是灰关联分析法中的对象序列, 其类似可记为  $f_1, f_2, \dots, f_h$ ,  $h$  为比较序列个数。

### 1.3.3 计算灰关联度

灰关联度评价主要是确定各方案与最优方案的关联度, 即各方案的比较序列  $f_q (q = 1, 2, \dots, h)$  与参考序列  $f_0$  的关联度。如果关联度越大, 则表示  $f_q$  与  $f_0$  越接近, 那么在一系列比较序列中为较优序列, 其对应方案就为较优方案<sup>[10-11]</sup>。

比较序列  $f_q (q = 1, 2, \dots, h)$  对参考序列  $f_0$  第  $k$  项指标的灰关联系数为

$$\xi_{kq} = \frac{\min_k \min_q |f_{k0} - f_{kq}| + \rho \max_k \max_q |f_{k0} - f_{kq}|}{|f_{k0} - f_{kq}| + \rho \max_k \max_q |f_{k0} - f_{kq}|} \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为分辨系数,  $0 \leq \rho \leq 1$ , 通常取  $\rho = 0.5$ 。

设  $w_k$  为第  $k$  项指标的组权值, 且  $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ , 则比较序列  $f_q$  与参考序列  $f_0$  的灰关联度  $\gamma_{q0}$  为

$$\gamma_{q0} = \sum_{k=1}^n w_k \xi_{kq} \quad (15)$$

## 2 应用实例

某高速公路上一座桥梁, 为 6 孔普通钢筋混凝土

土简支 T 梁桥,每孔长 15.96 m。该桥已出现了严重的病害,经过对该桥的承载力鉴定,已经无法满足现有荷载等级要求,故应进行加固。根据该桥结构出现的病害,经综合考虑,拟采用的加固方案有 4 种:方案 I 扩增截面加固(在原 T 梁下加设马蹄);方案 II 粘贴钢板加固;方案 III 体外预应力加固;方案 IV 转换体系加固(变简支为连续)。

(1) 根据表 1,对各备选加固方案的指标特征值进行无量纲化处理,结果为

方案 I:  $f_1 = (0.63, 0.75, 0.75, 0.50, 0.70, 0.65, 0.80, 0.75, 0.75, 0.75, 0.63, 0.63, 0.50)$

方案 II:  $f_2 = (0.88, 0.63, 0.75, 0.63, 0.80, 0.80, 0.60, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.63)$

方案 III:  $f_3 = (0.88, 0.75, 0.75, 0.75, 0.80, 0.85, 0.70, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.63)$

方案 IV:  $f_4 = (0.63, 0.75, 0.75, 0.50, 0.75, 0.70, 0.80, 0.75, 0.63, 0.75, 0.63, 0.25, 0.38)$

(2) 将无量纲化结果通过熵值法计算,得出第二层指标对于总目标的排序权值向量

$$w^{(1)} = (0.10, 0.02, 0.0, 0.10, 0.01, 0.04, 0.05, 0, 0.02, 0.03, 0.49, 0.14)$$

由专家对第一层指标因素的排序和比较评分,通过改进 AHP 法计算得出第一层指标因素对总目标的排序权值向量为

$$A = (U_1, U_2, U_3, U_4) = (0.64, 0.23, 0.11, 0.02)$$

同理可得出第二层指标对第一层各指标为准则的排序权值向量为

$$A_1 = (u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}) = (0.49, 0.25, 0.13, 0.13)$$

$$A_2 = (u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}) = (0.31, 0.31, 0.15, 0.23)$$

$$A_3 = (u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}) = (0.18, 0.70, 0.09, 0.03)$$

$$A_4 = (u_{41}) = (1)$$

则第二层指标对于总目标的排序权值向量为

$$w^{(2)} = (0.31, 0.16, 0.08, 0.08, 0.07, 0.07, 0.03, 0.05, 0.02, 0.08, 0.02, 0.01, 0.02)$$

由以上求得的客观权值  $w^{(1)}$  和主观权值  $w^{(2)}$ ,构造优化模型式(10),求解后即可得到主客观结合的组权值向量

$$w = (0.15, 0.06, 0.02, 0.09, 0.03, 0.05, 0.04, 0.01, 0.02, 0.02, 0.03, 0.37, 0.11)$$

(3) 根据方案 I ~ IV 指标特征值无量纲化结果,选择各指标的最优值,即可确定理想最优方案指标无量纲化结果

$$f_0 = (0.88, 0.75, 0.75, 0.75, 0.80, 0.85, 0.80, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.63)$$

通过式(14)、(15),计算方案 I ~ IV 相对于理想最优方案的灰关联度,其分别为

$$\gamma_{10} = 0.68, \gamma_{20} = 0.93, \gamma_{30} = 0.98, \gamma_{40} = 0.54$$

显然,方案 III 与理想最优方案的灰关联度最大,故方案 III 即体外预应力加固方案为最优方案。这与该桥实际所采用的加固方案一致,说明本文提出的方案评价方法具有一定的理论价值和实用性。

### 3 结 语

(1) 将改进的 AHP 法与熵值法相结合,提出了基于贴近度最大的组合赋权方法,减少了评价的主观性对评价结果的影响,从而使得方案评价更加客观、可信。

(2) 采用灰关联度分析法进行方案评价,考虑了人们判断的模糊性和方案评价中的灰色信息。

(3) 工程实例表明,基于组合权值的灰关联法能够有效地进行旧桥加固方案评价,评价结果符合实际,从而减少了以往凭经验做出决策的失误。

(4) 由于组合权值灰关联法的计算较为繁琐,在实际应用中可以编制计算机软件。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 曾小刚,肖盛燮. 模糊综合评判法在旧桥加固方案优选中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(4): 1-3. ZENG Xiao-gang, XIAO Sheng-xie. Fuzzy comprehensive evaluation in optimal selection of old bridge's reinforcement project [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, 22(4): 1-3.
- [2] 王 成,邵毅松,瞿光义. 灰色理论在桥梁方案比选中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 1999, 18(4): 125-130. WANG Cheng, ZOU Yi-song, QU Guang-yi. Grey system theory in the selection of bridge design plans [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1999, 18(4): 125-130.
- [3] 徐泽水,达庆利. 多属性决策的组合赋权方法研究[J]. 中国管理科学, 2002, 10(2): 84-87. XU Ze-shui, DA Qing-li. Study on method of combination weighting [J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(2): 84-87.
- [4] 王子军. 在役桥梁可靠性评估及加固方案优选研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [5] 彭勇行. 管理决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(下转第 74 页)

## 参考文献:

## References:

- [1] Aktan A E, Grimmelsman K A, Helmicki A J. Issues and opportunities in bridge health monitoring[C]// Takuji K, ed. Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Japan: Kyoto, 1998; 2 359-2 368.
- [2] 秦 权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 37-42.  
QIN Quan. Health monitoring of long-span bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 37-42.
- [3] 郭晓光, 徐祖恩. 大型桥梁健康监测动态及发展趋势[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(1): 39-42.  
WU Xiao-guang, XU Zu-en. Development of long-span bridge health monitoring [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(1): 39-42.
- [4] 张启伟, 周 艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 54-58.  
ZHANG Qi-wei, ZHOU Yan. Applicability of bridge health monitoring technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 54-58.
- [5] Wong K Y, Lau C K, Flint A R. Planning and implementation of the structural health monitoring system for cable-supported bridges in Hongkong [C]// SPIE. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering Newport Beach, CA, USA; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000; 266-275.
- [6] Lynch J P, Law K H, Straser E G, et al. Development of a wireless modular health monitoring system for civil structures [C]// Advanced Technologies Workshop. Proceedings of the MCEER Mitigation of Earthquake Disaster, NV, USA: Las Vegas, 2000; 83-90.
- [7] 唐亚鸣, 丁立波, 张 河. 桥梁健康无线监测系统[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 71-74.  
TANG Ya-ming, DING Li-po, ZHANG He. Bridge health wireless monitoring system [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 71-74.
- [8] 赵祥模, 郭晓盼, 徐志刚, 等. 汽车检测控制系统网络通信技术[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 98-102.  
ZHAO Xiang-mo, GUO Xiao-fen, XU Zhi-gang, et al. Network communication technology of vehicle inspection control system [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 98-102.
- [9] 王松宏, 李德化. 基于 GPRS 的车辆监控系统车载移动终端的设计[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(6): 184-186.  
WANG Song-hong, LI De-hua. Design of mobile terminal of vehicle for monitoring system based on GPRS [J]. Application Research of Computers, 2005, 22(6): 184-186.
- [10] 武同乐, 徐 岳. 公路旧桥加固效果综合评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 28-32.  
WU Tong-le, XU Yue. Comprehensive evaluation method of bridge strengthening effectiveness [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 28-32.
- [11] 张建仁, 王 磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 49-55.  
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 49-55.

(上接第 65 页)

- [6] 马荣国, 李铁强, 肖代全. 灰关联决策在公路建设项目方案比选中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 67-70.  
MA Rong-guo, LI Tie-qiang, XIAO Dai-quan. Application of gray relational decision in highway items selection [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 67-70.
- [7] 梁 军, 江 薇, 李旭宏. 模糊综合评价方法改进及其在交通管理规划中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 68-72.  
LIANG Jun, JIANG Wei, LI Xu-hong. An improvement on fuzzy comprehensive evaluation method and its use in urban traffic planning [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 68-72.
- [8] 陈传德, 张明远. 基于风险分析的公路项目投资决策[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 99-103.  
CHEN Chuan-de, ZHANG Ming-yuan. Investment

- decision for highway project based on risk analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 99-103.
- [9] Avineri E, Prashker J, Ceder A. Transportation projects selection process using fuzzy sets theory [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(1): 35-47.
- [10] 武同乐, 徐 岳. 公路旧桥加固效果综合评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1): 28-32.  
WU Tong-le, XU Yue. Comprehensive evaluation method of bridge strengthening effectiveness [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 28-32.
- [11] 张建仁, 王 磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 49-55.  
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 49-55.