

# 高速公路桥梁桥面板养护方案多目标决策方法

齐锡晶<sup>1</sup>, 唐 梁<sup>1</sup>, 康伟鑫<sup>1</sup>, 秦娇娇<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁生态工程职业学院 建筑学院, 辽宁 沈阳 110101)

**摘 要:** 针对桥梁养护决策效率低、养护资金不足和分配不合理等问题,提出了一种高速公路桥梁桥面板养护方案多目标决策方法. 首先,建立养护技术数据库以储存养护技术的量化数据;之后,使用基于熵权的理想点(TOPSIS)法和层次分析法(AHP)分别确定高速公路网络内桥梁桥面板养护优先级系数和养护目标的权重;然后,构建以0-1背包问题为基础的多目标决策模型;最后,以辽宁省沈阳市绕城高速(G1501)公路上5座桥梁为案例验证该方法的有效性. 结果表明,该方法在养护决策的过程中能够充分考虑桥梁桥面板的养护优先级,制定合理、有效的养护策略,从而有效支持公路桥梁养护管理决策.

**关 键 词:** 桥梁养护管理;理想点法(TOPSIS);层次分析法(AHP);0-1背包问题;多目标优化

**中图分类号:** TP 20      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)07-1033-08

## Multi-objective Decision-Making Method for Bridge Deck Maintenance Scheme for Highway

QI Xi-jing<sup>1</sup>, TANG Liang<sup>1</sup>, KANG Wei-xin<sup>1</sup>, QIN Jiao-jiao<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Architecture, Liaoning Vocational College of Ecological Engineering, Shenyang 110101, China. Corresponding author: QI Xi-jing, E-mail: qixijing63@163.com)

**Abstract:** In view of the low efficiency of bridge maintenance decision-making, insufficient maintenance funds and unreasonable fund allocation, a multi-objective decision-making method for bridge deck maintenance scheme of highway was proposed. Firstly, a database was established to collect quantitative data of maintenance methods. Secondly, entropy-weight TOPSIS and analytic hierarchy process (AHP) were used to determine the maintenance priority coefficients of bridge decks in highway networks and the weights of maintenance objectives respectively. Thirdly, a multi-objective decision-making model based on 0-1 knapsack problems was established. Finally, five bridges on Raocheng Highway (G1501) located in Shenyang city in Liaoning Province, China were taken as a case study to demonstrate the validity and the effectiveness of the proposed method. The results showed that the proposed method considers the maintenance priorities of bridge decks during the maintenance decision-making process and can give reasonable and feasible maintenance solutions, thus it can be an effective support for the maintenance decision-making management of highway bridges.

**Key words:** bridge maintenance management; TOPSIS; analytic hierarchy process (AHP); 0-1 knapsack problem; multi-objective optimization

桥面板是桥梁系统的主要部件之一,其功能缺陷将严重影响高速公路系统的运营,需要定期对桥面板进行养护<sup>[1]</sup>. 目前,高昂养护费用已给桥梁管理部门带来了巨大的经济压力,其主要原因是养护决策效率低、养护资金不足、分配不合

理<sup>[2]</sup>. 因此,科学、有效的管理决策方法对桥梁养护管理有实际应用意义.

不同桥梁桥面板的功能缺陷,会对其所在的区域高速公路网络造成不同的直接和间接损失<sup>[3]</sup>,因此应按桥梁桥面板缺损对区域路网的影响

响程度,确定资金分配的优先级别,以便相对重要的桥梁桥面板得到更好的养护. 现有桥梁桥面板养护决策的研究中,通常采用多目标优化方法进行决策分析,但其提供的决策方法多未量化考虑桥梁桥面板的养护优先级. Lee 等<sup>[4]</sup>建立了以费用、性能恢复和养护技术适用性为目标的多目标决策模型,能够基于病害检测的结果,同时为高速公路网络内的多座桥梁的桥面板制定详细的养护策略,但在进行养护资金分配时并未考虑不同桥梁桥面板的养护优先级. Zoubir 等<sup>[5]</sup>提出了一种高速公路桥梁桥面板养护多目标决策方法,该方法以费用和环境影响两个相互冲突的目标建立养护决策模型,但只能考虑一座桥梁. 文献[6-8]分别基于不同的养护目标建立了多目标决策模型以对高速公路网络内的多座桥梁的桥面板进行养护决策,但研究重点侧重于目标函数解算方法的研究,并未考虑桥梁桥面板养护资金分配时的优先级. Yoon 等<sup>[1]</sup>提出了一种新的养护多目标决策方法,能够基于高速公路网络内各桥梁桥面板的多种属性确定三年内桥梁桥面板的养护优先次序和所需费用,但只能制定简略的养护策略. 综上所述,目前相关研究仍缺乏功能完善的桥梁桥面板养护多目标决策方法.

针对以上问题,本文提出了一种高速公路桥面板养护方案多目标决策方法,该方法采用在多目标决策模型中附加权重系数(即养护优先级系数)的方式量化考虑桥梁桥面板的养护优先级,实现合理分配养护资金和制定养护策略. 首先对养护技术进行量化分析并建立养护技术数据库以储存相关量化数据;其次以桥梁桥面板的技术状况、安全性、耐久性、适应性和经济性属性考虑桥梁桥面板优先级并基于熵权的 TOPSIS 方法确定其系数的值;然后采用层次分析法确定各养护目标的权重;而后建立以 0-1 背包问题为基础的多目标决策模型;最后以辽宁省沈阳绕城高速公路上的 5 座桥梁为案例来演示该方法的有效性.

# 1 养护技术数据库的建立

模型计算时需调取养护技术的量化数据,因此建立养护技术数据库以储存相关数据. 本文以恢复指数、适用指数和成本<sup>[4,7]</sup>作为养护技术的量化指标.

## 1.1 恢复指数

恢复指数是桥面板在使用特定养护技术养护后技术状况评分(定义和计算方法见相关标

准<sup>[9]</sup>)的提升值,它的值与养护技术的类型和桥面板的恶化等级有关<sup>[10]</sup>.

根据 Ghodoosi 等<sup>[11]</sup>和 Lee 等<sup>[4]</sup>的假设,桥面板养护后技术状况评分  $D$  的确定方法为

$$D = \begin{cases} 90, E + T \geq 90; \\ E + T, E + T < 90. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E$ 为根据病害检测数据确定的桥面板技术状况评分,计算方法见相关标准<sup>[9]</sup>;  $T = R_1 + R_2 + \cdots + R_k$ ,为被选养护技术恢复指数的累加值,  $R_k$ 为养护技术  $k$  的恢复指数值,量化规则见表 1,取值见表 2.

表 1 养护技术适用的构件恶化等级及其恢复指数<sup>[12]</sup>  
Table 1 Components deterioration level and their recovery indices of maintenance methods<sup>[12]</sup>

养护技术类型	构件恶化等级	恢复指数
常规维修	1, 2	1
修复	2, 3	0 ~ 10
恢复	3, 4	0 ~ 40
更换	5	90

## 1.2 适用指数

适用指数表示养护技术的适用程度,它与病害标度有关,病害的标度和定义见标准<sup>[9]</sup>. 适用指数的取值为 0~100,0 表示完全不合适,100 表示完全合适<sup>[4]</sup>. 养护技术的适用指数取值见表 2.

## 1.3 成本

养护技术的成本仅考虑桥梁运营期间项目养护的实际成本<sup>[8]</sup>,养护技术的综合单价见表 2.

# 2 养护优先级系数的确定

以养护优先级系数来考虑不同桥梁桥面板之间的养护优先级,使资金集中到相对重要且急需养护的桥面板上. 使用基于熵权的 TOPSIS<sup>[13]</sup>方法确定各桥面板养护优先级系数.

## 2.1 计算各属性权重

使用熵权法确定各属性客观权重. 设共有  $m$  个桥面板,有  $n$  个属性,则每个属性的信息熵为

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m a_{ij} \ln a_{ij} . \quad (2)$$

式中: $k = 1/\ln m$  为玻尔兹曼常量;  $a_{ij}$  为桥面板  $i$ , 属性  $j$  的属性值.

各属性客观权重:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{i=1}^m H_i} . \quad (3)$$

2.2 确定各桥面板养护优先级系数

使用 TOPSIS 计算路网内各桥面板的养护优

优先级系数  $Z_i$ , 具体步骤如下:

1) 决策矩阵  $R$  规范化:

表 2 养护技术指标值														
Table 2 Index value of maintenance methods														
编号	病害	编号	技术	恢复指数					适用指数					成本
				1	2	3	4	5	I	II	III	IV	V	元·m <sup>-2</sup>
A	混凝土裂缝	A <sub>1</sub>	涂胶封闭	0	5	2	0	0	0	100	40	40	20	20
		A <sub>2</sub>	灌胶封闭	0	5	5	1	0	0	80	100	60	40	50
		A <sub>3</sub>	粘贴玻璃纤维布	0	40	40	10	3	0	60	80	80	60	225
		A <sub>4</sub>	粘贴纤维布	0	40	40	40	5	0	40	60	100	80	300
B	空洞孔洞	B <sub>1</sub>	砂浆充填	0	5	1	0	0	0	100	50	—	—	35
		B <sub>2</sub>	聚合物砂浆充填	0	5	3	1	0	0	80	80	—	—	75
		B <sub>3</sub>	环氧砂浆充填	0	10	8	2	1	0	60	100	—	—	350
C	沥青裂缝	C <sub>1</sub>	冷压缝带	0	5	1	0	0	0	80	40	20	—	35
		C <sub>2</sub>	热粘压缝带	0	5	2	0	0	0	100	60	40	—	50
		C <sub>3</sub>	低压灌浆	0	7	3	1	0	0	60	80	60	—	73
		C <sub>4</sub>	防裂基布	0	7	4	1	0	0	60	100	80	—	80
D	混凝土腐蚀	D <sub>1</sub>	外包玄武岩纤维布	0	40	20	5	1	0	100	40	40	—	210
		D <sub>2</sub>	外包玻璃纤维布	0	40	20	5	1	0	90	50	50	—	225
		D <sub>3</sub>	外包碳纤维布	0	40	30	10	5	0	60	100	80	—	300
		D <sub>4</sub>	外包混凝土	0	40	40	40	10	0	40	80	100	—	420
E	钢筋锈蚀	E <sub>1</sub>	砂浆勾缝修补	0	5	1	0	0	0	100	40	40	20	10
		E <sub>2</sub>	聚合物砂浆修补	0	5	3	1	0	0	90	100	60	40	35
		E <sub>3</sub>	锈、涂锈转化剂	0	10	7	5	1	0	60	80	100	60	60
		E <sub>4</sub>	粘贴纤维布	0	40	30	10	5	0	40	60	80	80	120

注:恢复指数中“1,2,3,4,5”代表构件恶化等级;适用指数中“ I , II , III , IV , V ”代表病害标度.

$$R = (r_{ij})_{m \times n}, r_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}.$$

(4)

式中, $r_{ij}$ 为规范化的属性值, $i$ 和 $j$ 分别代表桥面板和桥面板的属性, $m$ 和 $n$ 分别为它们的数量.桥面板的属性有技术状况、安全性、耐久性、适应性和经济性.

2) 构造加权规范化矩阵  $V$ :

$$V = (v_{ij})_{m \times n} = (w_j \cdot r_{ij})_{m \times n} =$$

(5)

$$\begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}.$$

式中: $v_{ij}$ 为加权规范化属性值; $w_j$ 为属性 $j$ 的权重值.

3) 确定理想方案和负理想方案:

当属性值为效益型时,

理想方案为  $v_j^* = (r_{ij})_{\max}, j = 1, 2, \cdots, n$ ,

负理想方案为  $v_j^- = (r_{ij})_{\min}, j = 1, 2, \cdots, n$ ;

当属性值为成本型时,

理想方案为  $v_j^* = (r_{ij})_{\min}, j = 1, 2, \cdots, n$ ,

负理想方案为  $v_j^- = (r_{ij})_{\max}, j = 1, 2, \cdots, n$ .

本文涉及的 5 种桥面板属性均为成本型.

4) 计算正理想距离  $d_i^*$  和负理想距离  $d_i^-$ :

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, i = 1, 2, \cdots, m;$$

(6)

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \cdots, m.$$

(7)

5) 计算相对接近度  $C_i^*$  后确定养护优先级系数  $Z_i$ :

$$C_i^* = d_i^- / (d_i^* + d_i^-),$$

(8)

$$Z_i = C_i^* / \sum_{i=1}^n C_i^*.$$

(9)

3 不同养护目标下的权重确定

不同的养护管理部门有不同的养护目标(偏好),即在有限预算下,选取桥梁桥面板性能恢复最多的方案还是养护技术最为合适的方案.以权重的

设置来体现各部门的偏好是较为便捷的方法<sup>[14]</sup>,以层次分析法确定养护目标权重<sup>[15]</sup>,计算步骤:

- 1) 根据养护部门专家意见,确定两两判断矩阵;
- 2) 计算矩阵中每一行数值的乘积:

$$M_i = \prod_{j=1}^n x_{ij} \quad i = 1, 2, \cdots, m. \quad (10)$$

式中, $x_{ij}$ 为两两判断矩阵的元素, $i$ 和 $j$ 分别为矩阵的行和列, $m$ 和 $n$ 分别代表它们的数量.

- 3) 计算 $M_i$ 的 $n$ 次方根:

$$\overline{Q_i} = \sqrt[n]{M_i}. \quad (11)$$

- 4) 确定养护目标权重:

$$Q_i = \overline{Q_i} / \sum_{i=1}^n \overline{Q_i}. \quad (12)$$

- 5) 最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(B)_i}{Q_i}. \quad (13)$$

$$\text{式中, } B = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix}.$$

- 6) 一致性检验:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)RI}. \quad (14)$$

式中:CR 为一致性比例,当  $CR < 0.1$  时,则认为计算结果满足要求; $n$  为矩阵阶数;RI 为随机一致性指标,相关取值见表 3.

表 3 随机一致性指标

Table 3 Random consistency index

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.58	0.89	1.12	1.26

若计算结果满足一致性检验,则最大特征根对应的最大特征向量的归一化值即为所求权重值.

4 多目标函数决策模型的建立

建立多目标决策模型后,根据桥面板病害检测信息从养护技术数据库中抽取数据进行计算,则可得到不同预算限制下的最优养护方案.

4.1 多目标函数

建立以 0 - 1 背包问题<sup>[16]</sup>为基础的多目标函数:

$$\min f = Q_1 \cdot c \cdot f_3 - Q_2 \cdot a \cdot f_1 - Q_3 \cdot b \cdot f_2. \quad (15)$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^p R_{ijk} \cdot X_{ijk} \right) \cdot Z_i,$$
$$f_2 = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^p A_{ijk} \cdot X_{ijk} \right) \cdot Z_i,$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^p C_{ijk} \cdot X_{ijk} \right) \cdot Z_i,$$

s. t.  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^p C_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq \text{预算},$

$$\sum_{k=0}^p X_{ijk} = 1,$$
$$X_{ijk} = \begin{cases} 0, & \text{不选择 } k \text{ 养护技术;} \\ 1, & \text{选择 } k \text{ 养护技术.} \end{cases}$$

式中: $Q_1, Q_2$  和  $Q_3$  分别为恢复指数、适用指数和成本的权重; $R_{ijk}, A_{ijk}$  和  $C_{ijk}$  分别为养护技术的恢复指数值、适用指数值和成本,成本为病害的工程数量乘以养护技术综合单价(元); $X_{ijk}$  为决策变量; $Z_i$  为各桥面板养护优先级系数; $i, j$  和  $k$  分别指桥面板、病害和养护技术, $m, n$  和  $p$  分别是它们的数量; $a, b$  和  $c$  是目标函数的规范化因子,计算公式见式(16)<sup>[8]</sup>.

$$a, b, c = (N_{ijklq} - N_{ijklq, \min}) / (N_{ijklq, \max} - N_{ijklq, \min}). \quad (16)$$

式中, $N_{ijklq}$  为各指数矩阵元素. 因为需要在矩阵中设置“空位”(设置方法见 4.2 节),矩阵中将始终有零,则最小值一定为零,故式(16)可以化简为式(17).

$$a, b, c = N_{ijklq} / N_{ijklq, \max}. \quad (17)$$

4.2 抽取数据

根据病害检测的信息,可从养护技术数据库中抽取数据形成各指标决策矩阵,而后代入模型进行计算. 为使一些对整体优化效果较小的养护方法有不被选择的可能,并使矩阵完整,需要在决策矩阵中设置“空位”,图 1 说明了设置“空位”的方法.

养护技术	病害1	病害2	病害3	病害4	病害5
养护技术1	1	5	5	5	40
养护技术2	5	5	5	5	40
养护技术3	40	5	40	5	40
养护技术4	40	0	40	0	40
养护技术0	0	0	0	0	0

图 1 矩阵中设置空位的方法

Fig. 1 The empty value setting method in the matrix

5 实例验证

辽宁省沈阳市绕城高速(G1501)公路上 5 座



桥面板多属性评价结果见表 4,各属性权重和桥梁桥面板优先级系数计算结果见表 5,病害检测结果见表 6,恢复指数数据抽取形成的矩阵见表 7 (仅展示病害 A 数据抽取结果,其他病害和指标的数据抽取方法类似,故不再展示),专家确定的各指标两两判断矩阵见表 8,养护目标权重计算结果见表 9,将数据代入模型,使用 Matlab 中的 Yalmip 工具箱求解多目标函数的帕累托最优解,即可获得桥面板最佳养护方案(见表 10),不同预算限制下各桥面板资金分配方案见表 11.

表 4 桥梁桥面板的多属性评价结果  
Table 4 Multi-attribute evaluation results of five bridge decks

桥面板编号	名称	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
1	木匠西桥	64	67	72	76	75
2	小桥子西桥	72	68	66	95	64
3	小桥子桥	61	60	81	52	68
4	朱尔屯桥	73	76	82	92	78
5	朱尔屯东桥	78	76	66	74	72

注: $a_1$  代表技术状况; $a_2$  代表安全性; $a_3$  代表耐久性; $a_4$  代表适应性; $a_5$  代表经济性.

表 5 各属性权重和各桥梁桥面板养护优先级系数  
Table 5 Weights of each attribute and the related maintenance priority coefficient of bridge decks

属性	权重	桥面板	养护优先级系数
技术状况	0.19	桥面板 1	0.23
安全性	0.19	桥面板 2	0.16
耐久性	0.20	桥面板 3	0.35
适应性	0.22	桥面板 4	0.05
经济性	0.20	桥面板 5	0.21

根据式 (13) 计算两两判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}=3$ ,则  $CR=\frac{\lambda_{\max}-n}{(n-1)RI}=\frac{3-3}{(3-1)\times 0.58}=0<0.1$ ,计算结果满足一致性检验,权重计算结果合理.

## 6 数据分析和讨论

为验证该方法的有效性,对各桥面板养护资金分配结果、恢复和适用指数变化趋势及养护目标权重敏感性进行分析.

### 6.1 各桥梁桥面板资金分配结果分析

由各桥梁桥面板的养护优先级系数计算结果(表 5)可知,当  $Q_1=0.4,Q_2=0.2,Q_3=0.4$  时,桥面板 3 的养护优先级最高(养护优先级系数为 0.35),因此急需养护,所以模型在多种预算限制

下尽可能为桥面板 3 分配最多的养护资金(资金分配占比见图 2,原始数据见表 11). 同样,由图 2 可知,其他桥面板也根据其养护优先级系数被合理地分配了养护资金,由此可见该系数设置的有效性.

表 6 桥梁桥面板病害检测信息  
Table 6 Damage inspection informations of bridge decks

桥面板编号	技术状况	恶化等级	病害	病害标度	工程量 $m^2$
1	64	3	A	Ⅲ	10
			B	Ⅱ	8
			C	Ⅲ	7
			D	Ⅲ	5
			E	Ⅱ	7
2	72	2	A	Ⅱ	7
			B	Ⅱ	5
			C	Ⅱ	7
			D	Ⅲ	8
			E	Ⅲ	6
3	61	3	A	Ⅲ	11
			B	Ⅲ	8
			C	Ⅲ	6
			D	Ⅲ	7
			E	Ⅱ	5
4	73	2	A	Ⅱ	6
			B	Ⅱ	7
			C	Ⅱ	9
			D	Ⅲ	6
			E	Ⅱ	3
5	78	2	A	Ⅱ	2
			B	Ⅱ	5
			C	Ⅱ	6
			D	Ⅱ	2
			E	Ⅲ	7

注:病害 A,B 和 C 不是指桥面板仅发生一处病害,而是将同一病害标度下的病害合并为一类病害参与决策,则表中的工程量为同类病害工程量的叠加.

表 7 病害 A 恢复指数矩阵(局部)  
Table 7 Matrix of recovery index for damage A (partial)

桥面板 1	桥面板 2	桥面板 3	桥面板 4	桥面板 5
2	5	2	5	5
5	5	5	5	5
40	40	40	40	40
40	40	40	40	40
0	0	0	0	0

表 8 养护目标两两判断矩阵  
Table 8 Pairwise judgment matrix of maintenance objective

指标	恢复指数	适用指数	成本
恢复指数	1	2	1
适用指数	1/2	1	1/2
成本	1	2	1

表 9 养护目标权重计算结果

Table 9 Weight calculation results of the maintenance objective

$i$	$M_i$	$\overline{Q}_i$	$(B)_i$	$Q_i$
1	2.00	1.26	1.2	0.4
2	0.25	0.63	0.6	0.2
3	2.00	1.26	1.2	0.4

注： $Q_1$ 、 $Q_2$  和  $Q_3$  分别为恢复指数、适用指数和成本的权重。

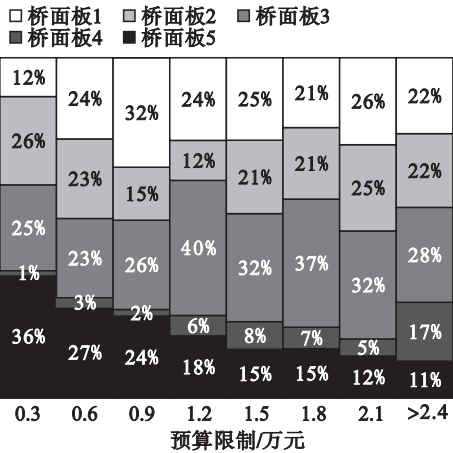


图 2 各桥面板资金平均分配占比

Fig. 2 Average fund allocation percentage of each bridge deck

6.2 恢复和适用指数变化趋势分析

将预算由 3 000 元增加到 24 000 元,甚至更高(每次涨幅 3 000 元),模型制定的养护方案所需总成本也接近预算限制的方式增加,分别为 3 000,5 905,8 980,11 940,14 975,17 920,20 970,24 135 元(当预算限制无限增大时,预算成本为 24 135 元,且不再增加).同时,5 座桥梁的桥面板实际总恢复指数也随之升高(见图 3),但由于式(1)的限制,总恢复指数到达 450 不再上升.此外,当总适用指数上升到 2 080(见图 3)以后,实际总恢复指数依旧上升,而总适用指数下降,这是因为养护目标权重的设置对计算结果造成了影

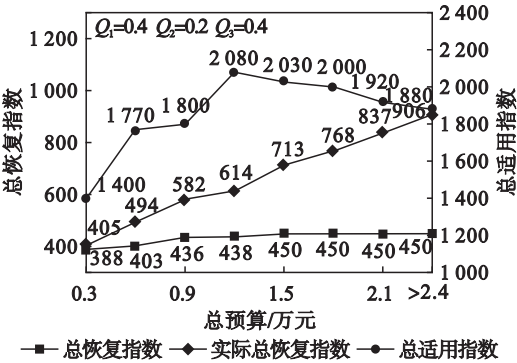


图 3 多种预算限制下总恢复指数和总适用指数的变化情况

Fig. 3 Curves for total recovery and applicability index under various budget constraints

响.更大的恢复指数权重( $Q_1 = 0.4$ )会使模型选用恢复指数高(成本也更高)而不适用于当前病害标度的养护技术组合.例如,当养护资金充足时,更高的恢复指数权重会让模型选择粘贴纤维布(恢复指数和成本较高)养护轻微混凝土裂缝,而不是选用更为适用的涂胶封闭(适用指数高但恢复指数低),从而使总恢复指数升高而总适用指数下降.此现象符合客观事实,由此说明了该方法的合理性.

6.3 养护目标权重敏感性分析

对养护目标权重进行敏感性分析(见图 4),将  $Q_3$  固定为 0.1,不设置预算限制,使  $Q_1$  逐渐增加,则实际总恢复指数(由于式(1)限制且无限制预算导致任何情况下总恢复指数都为 450)和总成本都相应增加,而总适用指数相应减少,可见养护目标权重的设置对最终的桥面板养护方案有巨大的影响,从而表明养护目标权重设置的正确性.

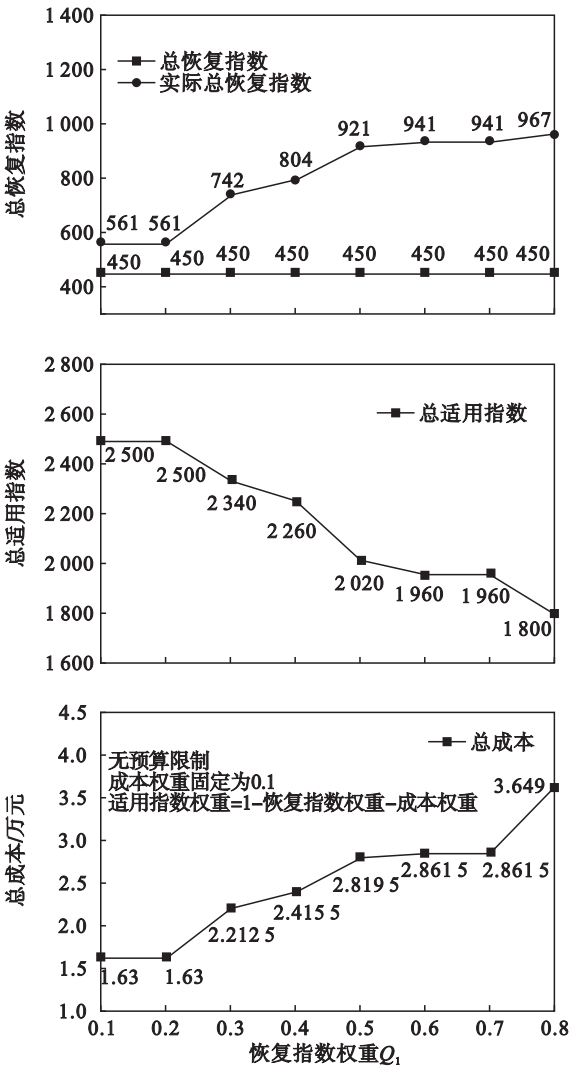


图 4 养护目标权重敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity analysis on maintenance objective weights

表 10 案例计算结果  
Table 10 Computation results of cases

桥面板 编号	病害	病害 编号	预算限制/元							
			3 000	6 000	9 000	12 000	15 000	18 000	21 000	> 24 000
1	混凝土裂缝	A	—	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>
	空洞、孔洞	B	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
	沥青裂缝	C	—	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>
	混凝土腐蚀	D	—	—	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
	钢筋锈蚀	E	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>
2	混凝土裂缝	A	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>
	空洞、孔洞	B	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
	沥青裂缝	C	C1	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
	混凝土腐蚀	D	—	—	—	—	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
	钢筋锈蚀	E	E <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>
3	混凝土裂缝	A	A <sub>1</sub>	A2	A2	A2	A2	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>
	空洞、孔洞	B	—	B <sub>1</sub>	B2	B2	B2	B2	B2	B2
	沥青裂缝	C	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>
	混凝土腐蚀	D	—	—	—	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
	钢筋锈蚀	E	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>
4	混凝土裂缝	A	—	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>
	空洞、孔洞	B	—	B <sub>4</sub>	—	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
	沥青裂缝	C	—	—	—	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C1	C <sub>2</sub>
	混凝土腐蚀	D	—	—	—	—	—	—	—	D <sub>3</sub>
	钢筋锈蚀	E	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>
5	混凝土裂缝	A	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>
	空洞、孔洞	B	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
	沥青裂缝	C	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
	混凝土腐蚀	D	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
	钢筋锈蚀	E	E <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>4</sub>

注：“A<sub>1</sub>”表示使用涂胶封闭(见表 2)养护 A 病害(混凝土裂缝),其他符号类似;“—”代表不修。

表 11 不同预算限制下各桥面板资金分配方案  
Table 11 Fund allocation scheme for each bridge decks under different budget constraints

桥面板 编号	预算限制/元							
	3 000	6 000	9 000	12 000	15 000	18 000	21 000	> 24 000
1	350	1 410	2 910	2 910	3 680	3 680	5 430	5 430
2	770	1 385	1 385	1 385	3 185	3 785	5 220	5 220
3	760	1 370	2 350	4 750	4 750	6 675	6 675	6 675
4	30	150	150	710	1 175	1 175	1 040	4 205
5	1 090	1 590	2 185	2 185	2 185	2 605	2 605	2 605

7 结 论

1) 本文提出了一种高速公路桥面板养护方案多目标决策方法. 该方法引入桥梁桥面板养护优先级系数,能够在模型计算时量化考虑各桥梁

桥面板的养护优先级,以合理分配养护资金和制定养护策略.

2) 建立了一种桥梁桥面板养护多目标决策模型,在不同的养护预算限制下,根据桥面板性能和病害检测数据同时为路网内的多个桥面板制定详细的养护方案.

3) 通过案例证明,该方法所需数据便于收集,模型的计算结果合理,制定的养护方案较为全面,能有效支持公路桥梁养护管理决策。

## 参考文献:

- [1] Yoon Y, Hastak M. Multitiered prioritizing method using urgency scale for bridge deck rehabilitation[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(4): 04017020.
- [2] Ferhat A. Bridge management in Turkey: a BMS design with customised functionalities[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(5): 647–666.
- [3] Razaqpur A G, Halim A O A E, Mohamed H A. Bridge management by dynamic programming and neural networks[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1996, 23(5): 1064–1069.
- [4] Lee C K, Kim S K. GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks[J]. *Automation in Construction*, 2007, 16(2): 153–164.
- [5] Zoubir L, Lyne D. Multi-objective and probabilistic decision-making approaches to sustainable design and management of highway bridge decks[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9(4): 364–383.
- [6] Shim H S, Lee S H, Kang B S. Pareto front generation for bridge deck management system using bi-objective optimization[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(5): 1563–1572.
- [7] Shim H S, Lee S H. Balanced allocation of bridge deck maintenance budget through multi-objective optimization[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(4): 1039–1046.
- [8] Yadollahi M, Majid M Z A, Zin R M. Post-Pareto optimality approach to enhance budget allocation process for bridge rehabilitation management[J]. *Structure and Infrastructure*

*Engineering*, 2015, 11(12): 1565–1582.

- [9] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standards for technical condition evaluation of highway bridge: JTG/T H21—2011 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2011.)
- [10] Neves L A C, Frangopol D M. Probabilistic lifetime-oriented multiobjective pptimization of bridge maintenance: combination of maintenance types[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(6): 991–1005.
- [11] Ghodoosi F, Abu-Samra S, Zeynalian M, et al. Maintenance cost optimization for bridge structures using system reliability analysis and genetic algorithms[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, 144(2): 04017116.
- [12] Liu C L, Hammad A, Itoh Y. Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1997, 123(2): 91–100.
- [13] Chen T Y. A novel PROMETHEE-based method using a Pythagorean fuzzy combinative distance-based precedence approach to multiple criteria decision making[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 82: 105560.
- [14] Lee S Y, Park W, Ok S Y, et al. Preference-based maintenance planning for deteriorating bridges under multi-objective optimization framework[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(7/8): 633–644.
- [15] 王述红, 张泽, 侯文帅, 等. 综合管廊多灾种耦合致灾风险评价方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 902–906. (Wang Shu-hong, Zhang Ze, Hou Wen-shuai, et al. Risk assessment method on multi-disaster coupled hazard for urban utility tunnel[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2018, 39(6): 902–906.)
- [16] Silvano M, David P, Paolo T. New trends in exact algorithms for the 0–1 knapsack problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 123(2): 325–332.

## (上接第 1013 页)

- [4] Feng Q, Zhao W, Wen S. Ammonia modification for enhancing adsorption of sulfide species onto malachite surfaces and implications for flotation[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2018, 744: 301–309.
- [5] Wu D, Ma W, Mao Y, et al. Enhanced sulfidation xanthate flotation of malachite using ammonium ions as activator[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1–9.
- [6] 杨磊, 孙建伟. 低品位氧化蓝铜矿硫化浮选试验研究[J]. 新疆有色金属, 2009, 32(sup2): 100–102. (Yang Lei, Sun Jian-wei. Experimental study on sulfide flotation of low-grade oxidized azurite ore[J]. *Xinjiang Youse Jinshu*, 2009, 32(sup2): 100–102.)
- [7] Srdjan M B. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: flotation of gold, PGM and oxide minerals[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2010: 47–50.
- [8] Pearce M J. An overview of the use of chemical reagents in mineral processing[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(2): 139–149.
- [9] 蒋太国, 方建军, 毛莹博, 等. 铵(胺)盐对孔雀石硫化浮选行为的影响[J]. 矿产保护与利用, 2015(4): 31–37. (Jiang Tai-guo, Fang Jian-jun, Mao Ying-bo, et al. Impact of ammonium(amine) salt on behavior of malachite sulfide flotation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral*

*Resources*, 2015(4): 31–37.)

- [10] Yang X F, Liu Q J, Deng R D. Flotation of copper oxide minerals using ethylene phosphate as activators[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 581/582: 975–982.
- [11] 蒋太国, 方建军, 张铁民, 等. 铵(胺)盐对氧化铜矿硫化浮选行为的影响[J]. 矿产保护与利用, 2014(1): 15–20. (Jiang Tai-guo, Fang Jian-jun, Zhang Tie-min, et al. Impact of ammonium(amine) salt on the sulfide flotation behavior of oxidized copper ores[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2014(1): 15–20.)
- [12] Wang Y J, Wen S M, Liu D, et al. Recovery copper from a complex copper sulfide ore of Yunnan by using flotation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 737: 839–842.
- [13] Wen Y, Fang J J, Mao Y B, et al. Flotation of a refractory copper oxide ore using ammonium bicarbonate as activator[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 581/582: 969–974.
- [14] Corin K C, Kalichini M, O'Connor C T, et al. The recovery of oxide copper minerals from a complex copper ore by sulphidisation[J]. *Minerals Engineering*, 2017, 102: 15–17.
- [15] Wen S M, Deng J S, Xian Y J, et al. Theory analysis and vestigial information of surface relaxation of natural chalcopyrite mineral crystal[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(3): 796–803.