

公路路面养护资金动态分配优化研究

邹祎

(江西赣粤高速公路工程有限责任公司,江西 南昌 330069)

摘要: 养护资金不足与养护需求增长的冲突,制约了公路路面技术状况改善。该文以路面技术状况技术等级定义路面养护需求状态空间,将不同养护措施下的需求状态设计成一个马尔可夫决策过程,建立公路路面养护资金动态分配优化模型,并设计相应的遗传算法。最后对建立的优化模型进行算例模拟分析。结果表明:马尔可夫决策过程可以动态地分配公路路面养护资金,使得整个路面养护需求状态趋于平缓,实现路面技术状况改善效用最大化。

关键词: 养护资金;马尔可夫;养护需求状态;动态分配;遗传算法

中图分类号: U418.6,U491.112

文献标志码: A

0 引言

截至2020年底,中国公路总里程519.81万km,养护总里程514.40万km,占公路总里程99.0%^[1],说明中国公路领域已由大规模建设时期迈入建养共存时期。大量的养护需求与有限的养护资金间的冲突日益严重,而传统的以人工调查和主观决策为主的经验决策方法^[2]与以路面技术状况为主的排序法^[3]无法合理地分配养护资金,进一步制约了公路路面技术状况的改善^[4]。基于此,交通运输部《“十三五”规划公路养护管理发展纲要》提出积极推进养护科学决策的要求。

目前,国内外学者提出了一些养护科学决策理论与方法,许多学者将路面资金分配抽象成单目标或者多目标组合优化问题,如养护成本和用户成本之和最小^[5-6]、路网优良率最大化^[7]、环境效益最大化^[8]等路面资金分配模型。针对上述方法多为静态资金分配优化模型的情况,国内外学者引入马尔可夫过程模型^[9-10]、遗传算法^[11]、神经网络法^[12]以及模糊推理法^[13]等来解决公路路面资金分配中多年度(多阶段)动态特性与不确定性,科学地分配路面养护资金。

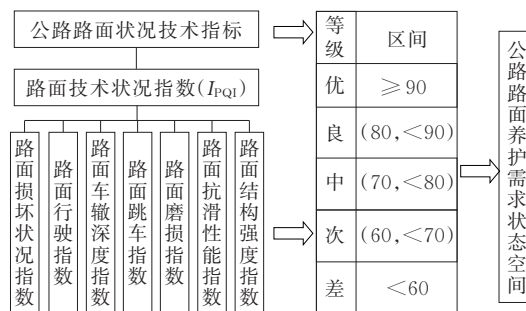
上述成果主要集中于资金分配优化,没有结合公路路面技术状况。基于此,本文将路面技术状况

演变抽象为马尔可夫过程,在此基础上构建多年度路面养护资金分配模型,并设计遗传算法求解养护资金分配模型。

1 公路路面技术状况的马尔可夫过程分析

1.1 公路路面养护需求状态空间构建

公路路面养护需求状态空间是指公路养护规划期间路面所处的状态,可依据公路路面技术状况等级确定,如图1所示。《公路状况技术评定标准》(JTG 5210—2018)(以下简称《评定标准》)将路面技术状况分为:优、良、中、次、差5个等级。据此,定义公路路面养护需求状态空间 $S=\{0|1,2,3,4,5\}$,是一个连续的马尔可夫过程,其中 $\theta=1$ 与路面技术状况等级优相对



注:图中等级区间为一般示例,具体参考《评定标准》

图1 公路路面技术状况技术等级指标与等级

应,数值越大表示等级越低,养护需求越迫切。

1.2 公路路面衰变的马尔可夫过程分析

在无养护措施干预的情况下,路面存在随役龄平缓累积的连续衰变,例如图2中的连续衰变曲线;但是公路路面不可避免要遭受暴雨、洪水、风沙、冰雪、地质等外部环境影响,路面状态也存在突发性衰变,例如图2中的突然衰变曲线。因此,公路路面养护需求状态存在连续转移和跳跃转移两种情况,且公路路面养护需求只能由较好状态转向较差状态,转移过程如图3所示。

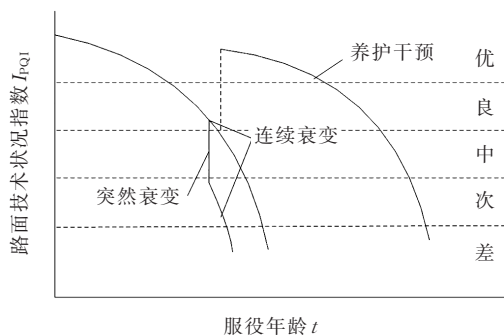


图2 公路路面技术状况衰变过程

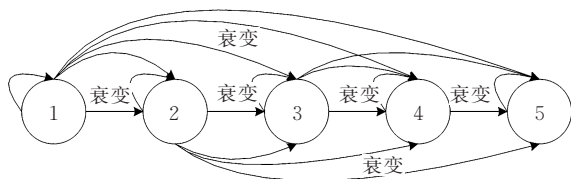


图3 公路路面养护需求状态转移过程

为刻画公路路面衰变现象,定义参数 C_j^t 表示路段 j 第 t 年度养护需求状态(根据《评定标准》,路段 j 是长度 1 km 的路段单元,实际中每条道路可划分为串行的路段单元,不足 1 km 的按标准换算),其中, $J=\{j|1, 2, \dots, j^{\max}\}$ 为路段集, $T=\{t|1, 2, \dots, t^{\max}\}$ 为养护年度集合,如 $C_j^t=3$ 表示路段 j 在第 t 年度的养护需求状态为 3。根据前述,公路路面养护需求状态是一个不减函数,满足:

$$C_j^{t_1} \leq C_j^{t_2} \quad (1)$$

式中: $t_1, t_2 \in T, 1 \leq t_1 < t_2 \leq T$ 。

由于路面衰变受多重因素影响,养护需求状态具有不确定性,因此路段养护需求状态 C_j^t 是一个随机变量。在路面未进行养护时,养护需求状态 C_j^t 按照路面衰变规律 $R_j(\theta_i, \theta_k)$ (其中, $1 \leq \theta_i \leq \theta_k \leq 5$, 即状态转移概率;可根据专家经验或者路面技术状况

技术指标统计数据按公式 $R_j(\theta_i, \theta_k) = q_{ik}/q_i$ 确定, q_{ik} 为从状态 θ_i 转移至 θ_k 的数量),在下年度转移至一个新的状态 C_j^{t+1} ,如此在公路养护规划期 T 内,路段 j 产生不同年度序列 $C_j^1, C_j^2, \dots, C_j^T$ 构成一个马尔可夫链。根据马尔可夫性,下年度路段 j 的状态只与当前路面养护需求状态有关,与之前的养护需求状态无关。将路面在 $t+1$ 年度的养护需求状态的期望值表示为 EC_j^{t+1} ,有:

$$EC_j^{t+1} = \sum_{\theta=C_j^t}^{\theta_5} \theta \cdot R_j(C_j^t, \theta) \quad (2)$$

其中,由于路面养护需求状态具有不减性,则衰变规律 R_j 是一个上三角矩阵,有:

$$R_j = \begin{bmatrix} R_j(\theta_1, \theta_1) & R_j(\theta_1, \theta_2) & \cdots & R_j(\theta_1, \theta_5) \\ & R_j(\theta_2, \theta_2) & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & R_j(\theta_4, \theta_5) \\ 0 & & & R_j(\theta_5, \theta_5) \end{bmatrix}$$

显然,养护需求状态 EC_j^{t+1} 并不一定是整数,不满足公路路面养护需求状态空间的定义,且不一定与下一年度的养护需求状态重合,即 $EC_j^{t+1} \neq C_j^{t+1}$ 。根据文献[14],通过极限取值构造一个连续决策问题,满足 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} EC_j^{t+1} = C_j^{t+1}$,其中 Δt 为相邻时间。针对连续决策问题难以求解的情况,通过随机取整转化为离散决策问题,有:

$$C_j^{t+1} = \text{round} \left(\sum_{\theta=C_j^t}^{\theta_5} \theta \cdot R_j(C_j^t, \theta) \right) \quad (3)$$

式中: $\text{round}(x)$ 为 x 随机取整原则,具体运算规则见式(4),此式能尽可能地取接近自身的整数。

$$\text{round}(x) = \begin{cases} \lfloor x \rfloor & \text{rand} \leq x - \lfloor x \rfloor \\ \lfloor x \rfloor + 1 & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

式中: rand 为在区间 $[0, 1]$ 内随机取值, $\lfloor x \rfloor$ 为对 x 向下取整。

1.3 养护措施干预下的马尔可夫过程分析

公路路面技术状况衰变至一定标准时,需进行养护以维持或改善路面使用性能。根据《公路养护工程管理办法》(交公路发[2018]33号),通过采取小修、中修、大修三类养护措施^[7],使得路面技术状况从较差状态向较好状态转移,或者延缓路面技术状况的衰变速率,形成与衰变过程相逆的马尔可夫过程,如图4所示。

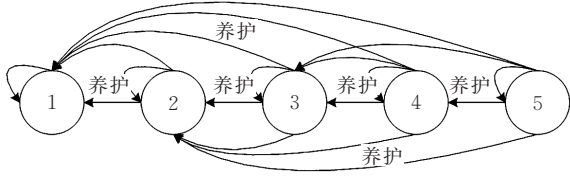


图4 养护干预下的公路路面养护需求状态转移过程

由于不同养护措施对路面维持或修复效果不一致,因此定义参数 $R_j(k, \theta_i, \theta_l)$ 为路段 j 在养护措施 k 干预下养护需求状态 θ_i 转移至 θ_l 的概率,其中, $K = \{k|1, 2, \dots, k_{\max}\}$ 为养护措施集, $1 \leq \theta_i \leq \theta_l \leq 5$ 。因此,养护措施干预下的路面养护需求状态概率转移矩阵为:

$$R_{jk} = \begin{bmatrix} R_j(k, \theta_1, \theta_1) & R_j(k, \theta_1, \theta_2) & \cdots & R_j(k, \theta_1, \theta_5) \\ R_j(k, \theta_2, \theta_1) & R_j(k, \theta_2, \theta_2) & \cdots & R_j(k, \theta_2, \theta_5) \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ R_j(k, \theta_5, \theta_1) & R_j(k, \theta_5, \theta_2) & \cdots & R_j(k, \theta_5, \theta_5) \end{bmatrix}$$

为区别无养护和有养护措施下的路面需求状态,定义参数 \tilde{C}_{jk}^t 为路段 j 在养护措施 k 干预下第 t 年度的养护需求状态。根据无养护的分析过程,有:

$$\tilde{C}_{jk}^{t+1} = \text{round} \left(\sum_{\theta=\theta_1}^{C_{jk}^t} \theta \cdot R_j(k, C_{jk}^t, \theta) \right) \quad (5)$$

在路面养护实践中,管养部门需要制定多年度的养护方案,规划各年度内采取哪种养护措施维修哪个路段。为描述多年度养护规划的动态性,引入参数 Y_{jk}^t 为第 t 年度路段 j 是否采取养护措施 k ,则:

$$Y_{jk}^t = \begin{cases} 1 & \text{第 } t \text{ 年度路段 } j \text{ 采取养护措施 } k \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

在考虑养护措施干预后,路面的养护需求状态演化取决于此路段是否进行养护,如图3、4所示。因此,式(3)、(5)难以有效地刻画路面养护需求状态演化,整合式(3)、(5)、(6),有:

$$\hat{C}_{jk}^t = \begin{cases} \theta_j^1 & t=1 \\ \left[\text{round} \left(\sum_{\theta=\theta_1}^{C_{jk}^{t-1}} \theta \cdot R_j(K, C_{jk}^{t-1}, \theta) \right) \right]^{Y_{jk}^t} \times \left[\text{round} \left(\sum_{\theta=C_j^t}^{\theta_5} \theta \cdot R_j(C_j^t, \theta) \right) \right]^{1-Y_{jk}^t} & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

2 公路路面养护资金动态分配优化模型建立与求解

2.1 公路路面养护资金动态分配优化模型

在公路养护规划期内,管养部门需要根据路面的实际技术状况,动态地分配养护资金,以使有限的资金实现最大的路面养护效益。因此,本文建立养护规划期内所有路段养护需求状态变化量最小化的养护资金动态分配优化模型(路面技术状况改善满足 $\Delta \hat{C}_{jk}^t < 0$): $\min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \Delta \hat{C}_{jk}^t$ 。

除去式(1)~(7)外,还需要补充4个约束条件:

$$\Delta \hat{C}_{jk}^t = \hat{C}_{jk}^t - \hat{C}_{jk}^{t-1} \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{jk}^t \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} Y_{jk}^t \leq b \quad (10)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} Y_{jk}^t \leq B \quad (11)$$

式中: c_{jk} 为路段 j 中养护措施成本(万元/km); B 为总养护预算;式(8)表示需求状态的变化量,反映了路面技术状况改善水平,体现了养护资金的效益;式(9)表示在每个年度每个路段最多采取一种养护措施;式(10)、(11)分别表示年度养护计划和养护规划期资金约束。

2.2 基于遗传算法的资金优化模型求解

上述公路路面养护资金分配优化模型,涉及养护路段与养护措施双重决策,传统的迭代法难以在有限的时间内求得全局最优法。因此,本文提出一种遗传算法,通过选择、交叉、变异等操作有效地逼近全局最优解^[11]。

(1) 个体编码

文中遗传算法的每个染色体个体对应路段-养护措施选择的组合方案。当待选路段总数为 J , 路段 j 养护规划期为 T 时,则染色体个体长度为 $J \times T$ 。其中,采用整数编码方式,定义表示形式: {无养护,小修,中修,大修} = {1, 2, 3, 4}。如个体:

$$\underline{13432} \quad \underline{21431} \quad \cdots \quad \underline{24131}$$

第1个路段 第2个路段 第J个路段

该个体表达了规划年度内相应的路段-养护方案,如第1个路段第1年度采用无养护措施,第2年度采用中修措施,第3年度采用大修措施。

(2) 适应度函数

根据所建路面养护资金分配优化模型,引入罚函数将其转化为无约束优化问题,适应度值计算公式为:

$$\text{fitness}(i) = \min \sum_{i \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \Delta \hat{C}_{jk}^t + M \left| \min \left(0, B - \sum_{i \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} Y_{jk}^t \right) \right| + N \sum_{i \in T} \left| \min \left(0, B - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} Y_{jk}^t \right) \right| \quad (12)$$

式中: M 、 N 取极大值。

(3) 选择、交叉和变异

染色体的选择操作使用轮盘赌法。交叉操作采用两点交叉法,操作如下:从种群中随机选择两个交叉个体,以交叉概率判断个体是否进行交叉。若是,在染色体维度内随机生成交叉位置(如2和5),并交换两个个体交叉位置间的基因,如下示例;否则不进行交叉。

个体: [1 3 4 2 2 1 4 3 1] $\xrightarrow{\text{交叉}}$ [1 1 3 1 3 1 4 3 1]

极值: [2 1 3 1 3 2 4 1 4] $\xrightarrow{\text{交叉}}$ [2 3 4 2 2 2 4 1 4]

染色体变异操作如下:从种群中随机选择一个

变异个体,以变异概率判断个体是否进行变异。若是,在维度内随机选择个体变异位置 $p1$ 和 $p2$,交换 $p1$ 和 $p2$ 实现路段-养护措施选择变异;否则不进行变异。

重复步骤(2)~(3),当种群满足最大进化次数后停止运算,获得资金分配 Pareto 最优养护方案,具体运算步骤遵循一般遗传算法求解过程^[11]。

3 算例分析

3.1 算例描述与参数设计

本文设计一个算例分析管养部门一个养护规划期(5年)内资金分配问题。假定选取某高速公路6个路段单元,在道路不断使用过程中,路面技术状况不断发生变化,其养护需求共有5个状态,设6个路段的初始养护需求状态为[2 1 2 3 3 2],养护需求状态的转移概率(实际中可根据图1中指标及等级,结合专家调查确定)与不同养护措施费用(假设不细分类别的养护对策)如表1所示。在此算例中路面养护资金的年度计划和规划期预算为60万元和250万元。

表 1 不同养护措施下需求状态转移矩阵及养护费用

状态	无养护措施					小修措施				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	0.650	0.250	0.050	0.006	0.004	0.850	0.100	0.050	0	0
2	0	0.600	0.250	0.150	0.100	0.050	0.700	0.200	0.050	0
3	0	0	0.400	0.350	0.250	0	0.025	0.450	0.300	0.225
4	0	0	0	0.350	0.650	0	0	0	0.350	0.650
5	0	0	0	0	1.000	0	0	0	0	1.000
养护费用/ (万元·km ⁻¹)	0					5				
状态	中修措施					大修措施				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1.00	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0
2	0.70	0.30	0	0	0	1.00	0	0	0	0
3	0.20	0.55	0.25	0	0	0.85	0.15	0	0	0
4	0	0	0.45	0.55	0	0.75	0.20	0.05	0	0
5	0	0	0	0.25	0.75	0.50	0.35	0.10	0.06	0.04
养护费用/ (万元·km ⁻¹)	20					50				

3.2 算例求解与分析

在 CPU 为 2.5 GHz,内存为 4 GB 的笔记本上,通

过 Matlab2016a 进行遗传算法求解,算法参数设置如下:最大迭代次数为 200 次,种群大小 100,选择代沟

0.9,交叉概率0.8,变异概率0.7(此处表示 $\text{rand}<0.7$ 时变异)。连续运行程序20次,求解时间基本集中在 $3\times 10^{-6}\text{s}$,表明求解结果具有较高稳定性,求解速率较快。选取其中一次结果做分析,适应度函数以及均值的变化情况(图5)反映了适应度函数在早期快速收敛,体现了遗传算法全收最优解搜索的优越性,可见遗传算法能有效地应用于公路养护资金分配决策优化。

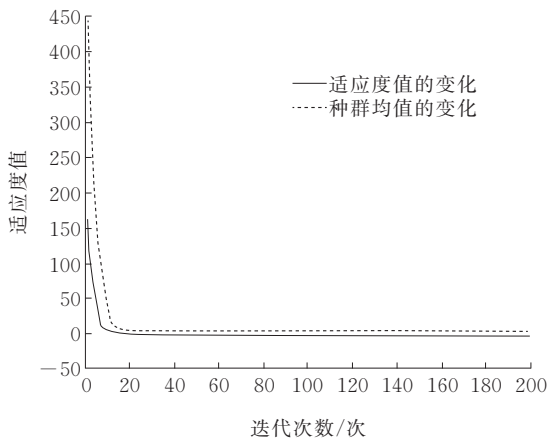


图5 适应度值及均值变化曲线

3.3 最优养护方案分析

养护措施的最优策略如表2所示,由于养护资金不足,每个年度都无法养护所有路段,比如在第1年度路段4和5均处于养护需求状态3,但仅对路段4采

路段	不同年度下养护措施				
	1	2	3	4	5
1	无养护	中修	无养护	小修	无养护
2	无养护	小修	无养护	无养护	无养护
3	小修	小修	无养护	中修	小修
4	中修	中修	小修	中修	无养护
5	小修	无养护	小修	无养护	小修
6	小修	无养护	大修	小修	小修

取中修措施。

为刻画养护措施对路面技术状况的影响,绘制图6。相对而言,路段4最多的中修措施,可能是因为路段4病害较为复杂且极易受外部环境影响,一旦不采取养护措施极易向较差状态转移[如图6(d)第5年度],而初始状态相同的路段5可能病害较为单一,仅需小修措施就能有效地维护路面技术状况。同时从图6(a)、(c)、(f)可以看出,路段1、路段3和路段6在无养护措施下具有相同的演变规律,说明可能3条路段间受相同病害侵蚀,且外部环境较为相似。但根据3条路段的养护措施可以看出,越早采用中或者大修措施能使路段越早恢复优良状态,极大延缓了路段衰变,并节省了后续的养护费用。根据图6(b)可以看到,对于路面初始状态处于“优”的路段2,仅需在养护规划期内进行一次小修即可维护状态,有效

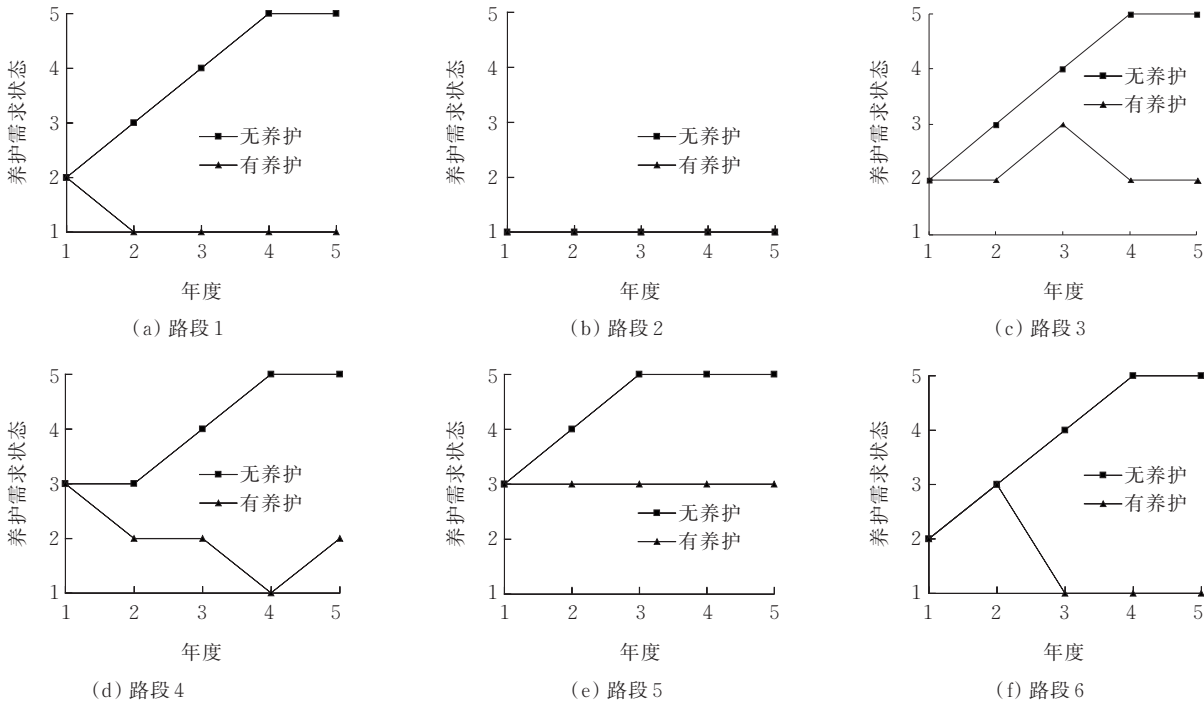


图6 无养护和有养护措施时需求状态变化曲线

地延缓了路面衰变。同时,从图 6 可以看出,养护资金总是较多地分配给了养护需求状态较大的路段,使得整体路段养护需求状态曲线较为平缓,有效地提高了整体的路面技术状况。

根据上述养护方案得出的单元路段养护费用之和,即各年度养护资金计划,如表 3 所示。

表 3 各年度养护资金计划和总养护费用

年度	费用/万元	总费用/万元	节余/%
1	35	210	16
2	50		
3	60		
4	50		
5	15		

从表 3 可以看出:各年度养护资金严格控制在预算范围内,且节余 16% 的总预算。

可见,以公路路面衰变规律为基础的养护资金动态分配优化模型,能有效地实现养护需求与养护资金分配的均衡优化,以便科学制定公路路面养护决策。

4 结 论

综合考虑路面养护需求增长与养护资金不足间的矛盾,建立公路路面养护资金动态分配优化模型,得到如下结论:

(1) 马尔可夫决策过程能够有效地分析无养护与有养护措施下路面技术状况演化规律,形成基于路面技术状况的养护资金分配优化方法。

(2) 分析无养护和有养护措施下模型应用情况可知,文中设计的算法能在较短时间内求解模型,且所建模型能有效地将养护资金分配给等级较低的路面,极大地延长路面的使用寿命。

(3) 不同养护措施的养护成本、实施时间、性能以及产生的用户成本存在差异,这些都可能影响资

金分配结果。因此,下一阶段研究需详细考虑养护措施的差异性。

参考文献:

- [1] 交通运输部.2020 年交通运输行业发展统计公报[J].交通财会,2021(6):92-97.
- [2] 潘宗俊.基于预算绩效管理的普通干线公路养护项目决策机制探讨[J].公路,2015,60(7):274-276.
- [3] 彭华,孙立军,陈长.沥青路面网级管理系统中资金优化模型[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(8):1177-1181,1193.
- [4] 马艳玲,史纪村,钱琪,等.高速公路沥青路面养护投资规划及其有效性研究[J].中外公路,2017,37(6):305-310.
- [5] 李骏,张培林,毛新华.考虑交通流动态分布的路面养护最优决策[J].中国公路学报,2019,32(11):227-233.
- [6] OUYANG Y.Pavement resurfacing planning for highway networks: Parametric policy iteration approach[J].Journal of Infrastructure Systems,2007,13(1):65-71.
- [7] 苏卫国,李绍杰.县道路网路面养护修复资金优化分析[J].中外公路,2017,37(2):310-314.
- [8] 陈文,黄能,何若夫,等.基于寿命周期分析的项目级路面养护决策应用研究[J].中外公路,2019,39(5):64-68.
- [9] KHAN M, MESBAH M, FERREIRA L, et al. Development of optimum pavement maintenance strategies for a road network[J].Australian Journal of Civil Engineering,2016,14(2):85-96.
- [10] 彭华,陈长,孙立军.网级路面管理系统中项目优化模型的双层优化[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(3):380-385.
- [11] 谢峰.基于改进 NSGA-II 算法的路网养护决策优化研究[J].中外公路,2017,37(3):307-310.
- [12] 李志刚,刘新杰,邓学钧.基于神经网络的高速公路沥青路面决策方法研究[J].公路交通科技,2001,28(4):28-30,39.
- [13] 韩世莲,刘新旺,黄卫.基于模糊推理的公路养护资金多目标分配问题求解[J].公路交通科技,2001,28(5):25-28.
- [14] 詹沙磊,傅培华,李修琳,等.基于马尔可夫决策的应急物资动态分配模型[J].控制与决策,2018,33(7):1312-1318.