

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.030

引用格式:傅丹华,李向颀,陶继进,等.高速公路养护作业风险分析及安全布防系统研究[J].公路与汽运,2024,40(5):164-167+171.

Citation:FU Danhua, LI Xiangdi, TAO Jijin, et al. Research on optimization of pavement maintenance decision based on two-layer programming[J]. Highways &amp; Automotive Applications, 2024, 40(5): 164-167+171.

# 基于双层规划的路面养护决策优化研究

傅丹华<sup>1</sup>, 李向颀<sup>2</sup>, 陶继进<sup>2</sup>, 梁子笑<sup>2</sup>

(1.浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 310023; 2.浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051)

**摘要:**从公路多级管养的实际情况出发,提出考虑养护决策者和养护管理者双重利益的双层规划模型,上层模型描述养护决策者通过制定最优成本管控策略实现养护经济性目标,下层模型描述养护管理者在上层模型规定的成本约束范围内提升养护效益,为两个层级的决策者提供博弈平衡的投资策略和养护方案。考虑到路网级决策寻优难的问题,设计基于边际效益的双种群遗传算法进行求解,并设计数值算例进行验证。结果表明,在前期数据调查充分的前提下,该模型能实现两个层次目标的优化,养护决策者能在保障路况水平的前提下优化资金分配,养护管理者能在资金约束内最大化长期养护效益。

**关键词:**公路;路面养护;路网投资决策;双层规划;遗传算法;边际效益

中图分类号:U415.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0164-04

近年来,中国公路逐渐由“以建为主”向“建养并举”转变,进入新的发展阶段。因基础设施老化、管养里程规模增加、人力和材料资源成本上涨等,公路行业养护资金需求持续快速增长<sup>[1]</sup>,养护管理在资金保障、持续投入能力方面表现出较大压力。为有效保障公路路面使用性能,建立科学、经济的养护决策体系尤为重要。现有方法大多采用决策树或决策矩阵等模型比选养护对策,如曹明明、梁斌等通过建立养护触发指标和阈值确定预防性维修方案,这类方法的决策内涵更偏向于养护设计而非养护投资策略<sup>[2-3]</sup>;张艳红等提出先决策项目级的路段单元,再优化路网级的资金分配或将资金最小化作为一个优化目标,进而求解多目标规划问题<sup>[4]</sup>,这类方法以养护需求为导向,忽略了资金在养护决策中作为先决条件的现实情况<sup>[5]</sup>。随着各地交通运输供给侧结构性改革的深化,养护决策体系呈现金字塔形管理模式,如中央和地方、集团公司和运营子公司、路网和路段等。处在上层的养护决策者通过宏观投资决策,对影响全局公路经济发展的投资规模、资金分配做出抉择,指导下层养护管理者进行项目级微观养护决策<sup>[6]</sup>。在这种管理架构下,决策权的层层分摊会影响资金的有效利用,如部分路段过度养护,而部分路段资金不足。针对上述问题,本文构建基于双层规划的路面养护决策模型,模型的上层规划以下

层问题为约束条件,描述养护决策者通过制定最优成本管控策略实现养护经济性目标,下层规划描述养护管理者在上层成本管控策略范围内通过优化养护需求实现养护效益最大的目标,为路网级的管养单位提供各层级博弈平衡的投资策略和养护方案,并设计基于边际效益的双种群遗传算法对模型进行求解。

## 1 问题描述与模型构建

### 1.1 公路多级管养架构下养护投资决策优化问题

养护决策者可以通过改变单位里程投入标准和养护目标等影响养护管理者对养护方案的选择,提高养护效益,养护管理者在职责范围内根据自己的养护规划和具体需求自由决策养护方案<sup>[7]</sup>,两者间存在主从关系,但由于决策目标和约束有所差异,往往存在博弈关系。养护决策者以养护资金为主要导向,关注路网养护投资经济性和路况稳定;养护管理者以养护需求为主要导向,关注路段养护方案的效益最优。这种关系和双层规划模型的定义基本一致。

上层规划模型的一般表现形式为:

$$\min F(x, y) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } G(x, y) \leq 0 \quad (2)$$

下层规划模型的一般表现形式为:

$$\max_y f(x, y) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } g(x, y) \leq 0 \quad (4)$$

双层规划是一种具有双层梯阶结构的决策优化模型,由上层规划和下层规划组成,有各自的目标函数  $F$ 、 $f$  和约束条件<sup>[8]</sup>。上层决策者通过设置  $x$  的值影响下层决策者,从而限制下层问题的可行约束集,而上层问题的最优目标  $F$  又受下层决策变量  $y$  的影响。

### 1.2 上层规划

从养护决策者的角度考虑,上层规划的目标函数为全路网养护资金最少。考虑通车年限、交通量等因素,不同特征路段的单位里程养护投入标准应有所区别,本文将路网划分为  $I$  类路段集进行差异化定标准<sup>[9]</sup>。同时,主管部门和财务部门对养护资金使用有一定指导作用,投入标准应有一个上限,各路段在资金使用约束下要能达到交通主管部门既定的养护目标<sup>[10]</sup>。据此建立上层规划模型如下:

$$\min F \sum_i \sum_j \sum_k (y_{ijk} \cdot \text{cost}(y_{ijk})) \quad (5)$$

$$\forall j \in J_i \sum_j \sum_k (\text{PPI}(y_{jk}) \cdot \omega_{jk}) \geq I_{\text{PPI},1} \quad (6)$$

$$\forall i \in I, x_i \leq x_{iu} \quad (7)$$

式中: $F$  为上层目标函数,即最小化养护资金投入; $y_{ijk}$  为下层模型的 0~1 决策变量,表示第  $i$  ( $i \in I$ ) 类路段集中路段  $j$  的第  $k$  个养护需求单元是否实施大中修,是为 1, 否则为 0;  $\text{cost}(y_{ijk})$  为决策变量的反映函数,表示养护单元  $y_{ijk}$  大中修所适用的典型养护对策的综合成本; $J_i$  为第  $i$  类路段集合; $\text{PPI}(y_{jk})$  为决策变量的反映函数,表示养护单元  $y_{jk}$  的路面性能预测值; $I_{\text{PPI},1}$  表示路面性能目标下限; $\omega_{jk}$  表示养护单元  $y_{jk}$  的权重,通常指养护单元长度占比; $x_i$  为上层决策变量,表示对第  $i$  类路段设定的单位里程养护投入标准; $x_{iu}$  为第  $i$  类路段养护投入标准的约束上限。

### 1.3 下层规划

根据效用理论,管理者在特定条件下会选择其认为效益值最大的决策方案<sup>[11]</sup>。不同的养护资金使用效率取决于对养护方案的选择,养护对策、养护需求、养护时机不是单一的,养护管理者可根据路况、经济条件、养护规划等自由组合、选择<sup>[12]</sup>。据此建立下层规划模型如下:

$$\max f = \sum_i \sum_j \sum_k (\text{eff}(y_{ijk}) \cdot \omega_{ijk}) \quad (8)$$

$$\forall j \in J_i, \sum_j \sum_k (y_{jk} \cdot \text{cost}(y_{jk})) \leq x_i \cdot L_j \quad (9)$$

式中: $f$  为下层目标函数,即最大化养护效益,将各养护单元的效益加权为路网综合效益<sup>[4]</sup>;  $\text{eff}(y_{ijk})$  为决策变量的反映函数,表示养护单元  $y_{ijk}$  在设计使用寿命内的养护效益预测值<sup>[13]</sup>;  $L_j$  表示路段  $j$  的总长度。

## 2 求解算法

### 2.1 求解基础

双层规划模型的求解需要找到反映函数  $\text{cost}$ 、 $\text{PPI}$  和  $\text{eff}$  的具体形式,即三者与养护方案间的函数关系。假设各养护单元的典型适用养护对策已知,养护成本可根据造价提前估算,作为一个已知参数输入模型。对于路面性能,选取路面损坏状况指数  $I_{\text{PCI}}$ 、路面行驶质量指数  $I_{\text{RQI}}$ 、路面车辙深度指数  $I_{\text{RDI}}$  作为目标约束。不同特征的养护单元在采用特定养护对策养护后的性能变化并不具有可比性,难以用特定的数学模型准确描述全路网的性能变化规律。为此,假设路面性能预测根据往年的典型数据分析结果已知,则约束(6)可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_{\text{PCI},1} \cdot \omega_1 & I_{\text{PCI},2} \cdot \omega_2 & \cdots & I_{\text{PCI},k} \cdot \omega_k \\ I_{\text{RQI},1} \cdot \omega_1 & I_{\text{RQI},2} \cdot \omega_2 & \cdots & I_{\text{RQI},k} \cdot \omega_k \\ I_{\text{RDI},1} \cdot \omega_1 & I_{\text{RDI},2} \cdot \omega_2 & \cdots & I_{\text{RDI},k} \cdot \omega_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{\text{PCI},s} \\ I_{\text{RQI},s} \\ I_{\text{RDI},s} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} I_{\text{PCI},1} \\ I_{\text{RQI},1} \\ I_{\text{RDI},1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $I_{\text{PCI},k}$ 、 $I_{\text{RQI},k}$ 、 $I_{\text{RDI},k}$  为养护后性能相对提升理论值; $I_{\text{PCI},s}$ 、 $I_{\text{RQI},s}$ 、 $I_{\text{RDI},s}$  为养护前性能初始观测值; $I_{\text{PCI},1}$ 、 $I_{\text{RQI},1}$ 、 $I_{\text{RDI},1}$  分别为  $I_{\text{PCI}}$ 、 $I_{\text{RQI}}$ 、 $I_{\text{RDI}}$  的目标下限。

养护效益函数  $\text{eff}$  描述养护方案在实施后产生各种影响的综合效用。现有研究中最能全面评价养护效益的是面积法,即用养护后路面性能曲线和原始路面性能曲线之间的面积积分表征中长期养护效益(见图 1)。根据初定的典型养护对策和路面性能预测模型,可用预期使用寿命内的步进等效面积提

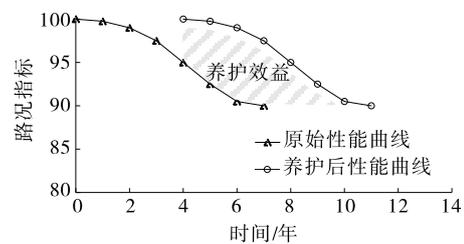


图 1 养护效益面积

前确定养护单元的潜在养护效益。

### 2.2 基于边际效益的双种群遗传算法

双层规划的求解主要分求解法和启发式算法两大类。启发式算法通过设置初始可行解、迭代方向和收敛阈值搜索解集,直到通过收敛性检验<sup>[14-16]</sup>。本文出于简化考虑,将非线性的反映函数替代为线性关系,而现实的全寿命周期费用模型、性能预测模型和养护效益模型都是非线性的,无法确定解集的凹凸性。此外,模型主要面向路网级决策,需决策的养护单元规模庞大。因此,设计基于边际效益的双种群遗传算法,在可行域内寻找模型最稳定解。

遗传算法是一种模拟自然进化过程搜索较优解的方法,由一个给定的初始种群逐代演化出适应度更好的新种群。本文从上层规划模型入手,将生成的投入标准作为参数输入下层模型,决策最佳养护方案;然后回传到上层模型求解上层目标,完成一次迭代。依此类推,直至最优解收敛于某一个值为止。算法的求解步骤见图 2。

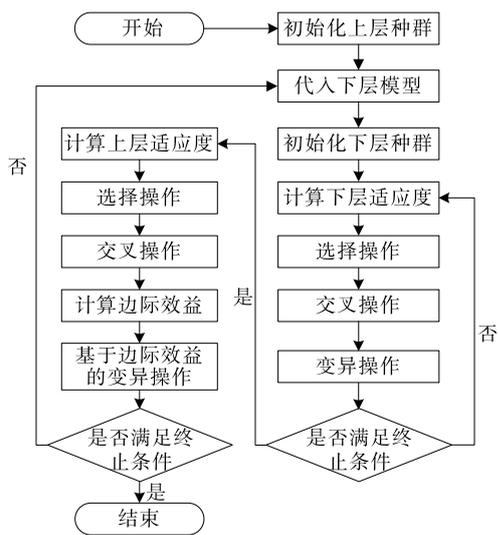


图 2 双层规划模型的求解步骤

算法中比较关键的是种群生成和变异操作。模型上层决策变量为整数,下层决策变量为 0~1 变量,迭代搜索方向不同,适合采用双种群策略,在参数编码时分别使用整数编码和二进制编码。考虑到下层模型严格的约束条件,在资金紧张时容易出现无可行解的情况,上层模型决策变量在初始化时在经验范围内优先取大值。在种群迭代时,相比于传统的随机变异,合理的变异策略可以有效防止算法陷入局部最优。从模型可以看出,资金投入和路面技术状况指数存在潜在的正相关关系,迭代的关键

方向在于找到最佳的下降梯度。基于上述思想,建立边际效益函数对上层决策变量种群的变异进行非均匀控制。假设  $x_n = \{x_n^{(1)}, x_n^{(2)}, \dots, x_n^{(i)}\}$  为要变异的个体,则变异过程为:

$$x_{n+1}^{(i)} = x_n^{(i)} - \mu \cdot L_{EMn}^{(i)} \tag{11}$$

$$L_{EMn}^{(i)} = \begin{cases} (I_{PPI,n}^{(i)} - I_{PPI,1}) \cdot \left| \frac{F_n^{(i)} - F_{n-1}^{(i)}}{I_{PPI,n}^{(i)} - I_{PPI,n-1}^{(i)}} \right|, & I_{PPI,n}^{(i)} \geq I_{PPI,1} \\ (I_{PPI,1} - I_{PPI,n}^{(i)}) \cdot \left| \frac{F_n^{(i)} - F_{n-1}^{(i)}}{I_{PPI,n}^{(i)} - I_{PPI,n-1}^{(i)}} \right|, & I_{PPI,n}^{(i)} < I_{PPI,1} \end{cases} \tag{12}$$

式中: $\mu$  为变异保守系数,根据经验判断,取值范围为 0.5~1.0; $L_{EMn}^{(i)}$  为第  $i$  类路段在第  $n$  步的变异步长; $n$  为迭代步数; $I_{PPI,n}^{(i)}$  表示第  $i$  类路段在第  $n$  步的路面技术状况,采用  $I_{PCI}$ 、 $I_{RQI}$ 、 $I_{RDI}$  加权后的路况综合指标表征; $F_n^{(i)}$  表示第  $i$  类路段在第  $n$  步的总投入。

上述变异过程量化了紧前步数变异产生的养护边际效益,即每增加单位养护投入能提高的路面性能指数。在能达到养护目标的前提下,以合理的梯度逐步减少养护投入,加快收敛速度。终止条件设置为两代种群间个体的平均改善程度小于给定的限值  $\epsilon$ ,公式如下:

$$\left| \frac{\bar{F}_{n+1} - \bar{F}_n}{\bar{F}_n} \right| < \epsilon \tag{13}$$

## 3 模拟计算与结果分析

### 3.1 算例描述

假设某省交通集团有 2 个运营子公司 A、B,每个运营子公司管辖或受托高速公路各 2 条,呈现省、市两级的双层管理决策模式。从集团公司的角度,制定合理的单位里程养护投入标准以宏观把控路网的资金分配至关重要。前期勘察发现存在养护需求的路段单元及推荐的养护对策见表 1。

根据往年数据积累与决策经验,标定各养护对策的成本、预期使用寿命、各指标提升绝对值(见表 2)。假设养护前后的性能衰变模型为线性模型,综合养护效益等于各指标养护效益面积积分的加权和, $I_{PCI}$ 、 $I_{RQI}$ 、 $I_{RDI}$  的权重分别为 0.4、0.3、0.3。

### 3.2 算例求解

基于 Python3.7 生成数值算例并编写求解算法程序。遗传算法中,令两类路段的养护投入标准的约束上限分别为 20 万元/km、25 万元/km,变异保

表 1 养护需求单元

运营子 公司	养护路段 编号	养护类别	养护路段 长度/km	养护单元 编号	养护单元 长度/km	$I_{PCI}$	$I_{RQI}$	$I_{RDI}$	养护对策
A	A1	II类	20	A11	3	95.04	94.02	92.18	预防性养护
				A12	4	90.52	89.94	89.47	罩面加铺
	A2	I类	30	A21	2	88.12	93.08	91.08	罩面加铺
				A22	2	88.81	92.64	93.34	预防性养护
B	B1	II类	40	B11	3	88.47	95.04	94.02	非罩面病害处理
				B12	2	92.61	89.10	89.83	罩面加铺
	B2	I类	25	B21	1	88.91	91.23	91.51	罩面加铺
				B22	3	94.03	95.90	94.94	预防性养护

表 2 典型养护对策参数

养护对策	综合单价/ (元·m <sup>-1</sup> )	预期使用 寿命/年	各性能指标提升值		
			$I_{PCI}$	$I_{RQI}$	$I_{RDI}$
非罩面病害处理	1 250.0	5	100	95	97
罩面加铺	365.0	8	100	95	97
预防性养护	187.5	3	100	94	96

守系数  $\mu=0.8$ ,路面技术状况指数  $I_{PCI}$ 、 $I_{RQI}$ 、 $I_{RDI}$  的目标下限分别为 92、90、90。选择和交叉操作采用常规的轮盘赌策略、随机算数杂交和随机单点杂交,令初始种群为 200 个,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.001,终止限值  $\epsilon=0.01$ ,最大遗传代数为 100 次。模型求解出 I 类养护路段单位里程投入标准为 12.5 万元/km,II 类养护路段单位里程投入标准为 18.3 万元/km,总投资为 2 230 万元,总养护效益为 72.06(见表 3)。

表 3 最优养护决策

项目	求解结果
养护投资/万元	2 230
养护效益	72.06
养护类别	I 类;II 类
单位里程投入标准/(万元·km <sup>-1</sup> )	I 类,12.5;II 类,18.3
养护单元	A22,B12

传统养护决策方法中,各路段仅考虑自身资金限制和路况,路网层面汇总后再人工调整和统筹,容易出现局部路段过度养护而其他路段投入不足。双层规划模型能在保障路况指标达标的前提下有效分配路网资金,既能为上层投资者、决策者每年滚动式

规划制定投入标准提供依据,也能为下层管理者筛选养护单元和预估养护效益提供依据。

#### 4 结语

本文根据公路多级管养的实际情况,建立考虑养护决策者和养护管理者双重利益的双层规划模型,将复杂的多级决策问题转化为资金-效益间的博弈平衡问题。上层模型通过决策单位里程投入标准约束下层的养护方案决策,实现养护投资和养护方案的双重优化。从费效比的角度设计双种群改进遗传算法和求解步骤,以每增加单位投入能提高的路面性能指数为边际效益寻找种群的合理进化方向,加快算法收敛。该模型能解决目前公路多级管理架构下双层决策的问题,避免局部路段的过度养护或资金不足,为路网级养护决策提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 陈丰,赵岁阳,宋明涛.考虑路面车辙的自动驾驶卡车高速公路车道管理策略研究[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(6):95-104.
- [2] 曹明明,岳建洪,陈金蓉,等.沥青路面预防性养护决策指标体系分析[J].公路与汽运,2021(1):140-143+147.
- [3] 梁斌.水泥砼路面养护维修措施及养护决策矩阵研究[J].公路与汽运,2021(2):90-92.
- [4] 张艳红,申爱琴,侯芸.资金-目标双优化法在路面养护决策中的应用[J].公路交通科技,2018,35(9):34-40.
- [5] BAO S T, HAN K Y, ZHANG L, et al. Pavement maintenance decision making based on optimization models[J].Applied Sciences,2021,11(20):9706.

(下转第 171 页)