

沥青路面网级管理系统中资金优化模型

彭 华, 孙立军, 陈 长

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 从路网未来高、中、低三种规划目标出发, 将网级路面管理系统中的资金优化模型分为高服务水平资金优化模型、中服务水平资金优化模型和低服务水平资金优化模型, 既符合道路管理部门决策过程, 又为降低模型的求解难度提供了一种新的路径. 在对三类模型的形式及求解过程分析的基础上, 通过实例对模型的有效性进行了验证, 验证结果表明, 该分析方法对道路管理部门进行养护维修经费的需求分析具有实用价值.

关键词: 路面管理系统; 资金需求分析; 资金优化模型; 动态规划

中图分类号: U 418.2

文献标识码: A

Optimal Maintenance Fund Allocation Models for Network Level Asphalt Pavement Management Systems

PENG Hua, SUN Lijun, CHEN Zhang

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this study, a set of optimal maintenance fund allocation models are established to cope with different desirability levels of pavement conditions at the network level for asphalt pavements. Corresponding to low, middle and high levels of pavement condition desirability, the proposed fund allocation models can adapt to the decision-making processes of the authorities and reduce the computational burden. Case studies indicate that the models can effectively solve the pavement maintenance fund allocation problems. This study also shows that classifying the pavement condition desirability levels and establishing corresponding analysis procedures can provide solid foundations for the future demand of maintenance funds.

Key words: pavement management system; maintenance fund demand analysis; optimal fund allocation model; dynamic programming

道路管理部门在日常工作中, 需根据路网未来的发展预期对规划期内需要的养护维修经费进行资金需求分析, 力图通过最少经费实现预定的规划目标, 在此过程中, 由于需要对路网内每条道路单元、道路单元可能维修对策及维修时机进行细微权衡、综合考虑, 使得传统的经验法、排序法^[1-2]难以取得理想效果, 在此背景下, 国内外许多研究机构都试图利用现有的微机技术, 从数学规划角度, 通过资金优化模型对该问题进行求解, 但一直收效甚微^[3-4], 其中, 由美国亚立桑那州路面管理系统所采用的马尔可夫决策过程的财政规划模型^[5]算是一个成功范例, 但该模型也存在着输出结果只有资金分布而无最终养护实施计划表, 求解过程面临“维数灾难”^[6-7]等缺陷.

从实际工作经验可知, 道路管理部门对路网未来的规划预期并非一成不变, 该预期与道路管理部门可支配的规划养护经费密切相关: 资金充足时, 规划预期目标就高, 反之, 规划预期则低. 因此, 在对路网规划期养护维修经费进行需求分析时, 可采用高、中、低三类预期目标分别进行养护维修经费的需求分析. 如此, 不仅能拟合管理部门的决策过程, 还能通过规划目标的划分, 有效降低模型的求解难度, 扩大模型的应用范围.

本文在资金优化模型分类的基础上, 针对路网未来高、中、低三种规划目标, 分别给出了高服务水平、中服务水平、低服务水平三类资金优化模型及各模型的求解方法, 最后, 通过对复杂程度最高的低服务水平资金优化模型的实际求解, 验证了三类模型的实用性.

1 资金优化模型的分类

资金优化是资金需求分析的工具, 是指规划期

收稿日期: 2009-05-13

作者简介: 彭 华(1976—), 男, 工学博士, 主要研究方向为交通资产管理. E-mail: shgxy@hotmail.com

孙立军(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为道路工程、交通资产管理. E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

内,在道路最低可接受服务水平的约束下,道路管理部门在保证路网使用性能符合最低标准的条件下所需要最小维修资金^[8].根据不同规划目标,可对资金优化的形式进行分类.从目前管理需求出发,道路管理部门对路网未来发展的预期目标主要有三种情况,与之相对应,资金优化也分为三种形式:

(1) 规划期各年里,路网所有道路的使用性能都大于“某最低标准”,由于该管理目标是针对所有道路而言,体现了道路管理部门保持路网较高服务水平的要求.因此,可将与之相对应的资金优化模型称为高服务水平下的资金优化模型.

(2) 路网使用性能在规划期各年里的平均值分别大于“某最低标准”,该目标满足了道路管理部门要求路网保持一种中等服务水平的需要.与之相对应的,产生中等服务水平下的资金优化模型.

(3) 路网使用性能在规划期里的平均值大于“某最低标准”,该目标满足了道路管理部门要求路网保持一种较低服务水平的需要.与之相对应,产生低服务水平下的资金优化模型.

上面所说的三种资金优化模型,可以用一个统一的数学模式进行描述:

min 规划期里维修项目所发生的维修费用最小

st 维修项目实施后,路网使用性能符合某种最低标准

2 高服务水平的资金优化模型

根据资金优化模型分类,高服务水平下的资金优化模型定义为:规划期里,为维持路网中各道路单元的使用性能在某最低标准之上时,路网需要的最少维修资金.该模型通过对路网内每条道路单元的使用性能的约束达到路网整体使用性能的控制,从较高水平保证了路网的服务状态.同时,为保证总维修费用最低,模型中待维修项目集合内的任意项目的维修对策除必须能保证道路维修后其使用性能高于预定标准外,其维修费用还应当最少,项目的维修对策具有唯一性.模型的数学表达式如下:

$$\min Y_t = \sum_{i=1}^N X_{it} C_{it}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

$$\text{st } X_{it} = \begin{cases} 1 & i \text{ 路段在 } t \text{ 年的使用性能} \\ & \text{低于预定标准 } A \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{it} > 0 \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: Y_t 表示第 t 年总的维修费用; C_{it} 表示项目 i 在第 t 年里进行维修时的费用; A 表示路网中各道路单元某一使用性能的预定标准; T 为规划期长,一般为5年或10年; N 表示路网内总的道路管理单元数.式(1)表示以规划期各年维修项目所发生的维修费用最小为规划目标,式(2)表示 X_{it} 是一个布尔量,式(3)是维修费用非负的约束条件.

从高服务水平下的资金优化模型的定义及表达式可知,由于低于预定服务标准的道路单元都是维修对象且维修对策唯一,计算过程只涉及一些简单数学运算,因此,在此对其具体求解方法不再进行详细说明.

3 中等服务水平下的资金优化模型

3.1 模型含义

道路管理部门在进行路网规划时,其所能支配的规划资金是有限的,这些资金相对于高服务水平下的资金需求来说,一般都存在着相当的缺口.在这种情况下,道路管理部门需要对规划期内较高的规划目标进行调整,调整的有效方式之一就是将对路网中各道路单元使用性能的控制转化为对路网各年平均使用性能的控制,由此产生中等服务水平下的资金优化模型,具体定义为:规划期里,在道路最低可接受服务水平的约束下,为维持路网各年所有道路的使用性能平均值不低于 $A(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_T)$ (a_i 为路网第 i 年的最低使用性能)时,路网需要的最少维修资金.模型通过对路网各年使用性能的控制,将控制目标由个体转向路网,模型的数学表达式如下:

$$\min Y_t = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^m X_{ijt} C_{ijt}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

$$\text{st } \left(\left(\sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^m X_{ijt} B_{ijt} \right) + E_t \right) / n \geq a_t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ijt} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N_t; t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1 & i \text{ 路段 } j \text{ 对策在 } t \text{ 年实施} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$B_{ijt}, C_{ijt}, a_t > 0 \quad (8)$$

式(4)~式(8)中: Y_t 表示第 t 年总的维修费用; C_{ijt} 表示项目 i 在第 t 年里用 j 方法进行维修时的费用; B_{ijt} 表示项目 i 在第 t 年里用 j 方法进行维修后该项目使用性能的值; E_t 为第 t 年里,不需要维修的项

目使用性能值的总和; a_t 为第 t 年路网需要达到的平均使用性能; N_t 表示第 t 年里, 路网内共有待维修的道路管理单元的数目; m 表示对于任一个维修项目共有 m 种维修对策; n 表示路网中的路段总数. 式(4)表示规划期各年维修项目维修费用最小的规划目标, 式(5)是规划期各年维修项目实施后, 路网使用性能平均值的约束条件, 式(6)是规划期里任意一年中, 每一项目只能采取一种维修对策.

3.2 模型求解

中等服务水平下的资金优化模型需根据当年路网最低使用性能 a_t , 对该年维修集合进行优化, 以找到一个维修费用最少的维修项目和维修策略的组合, 求解过程如图 1 所示.

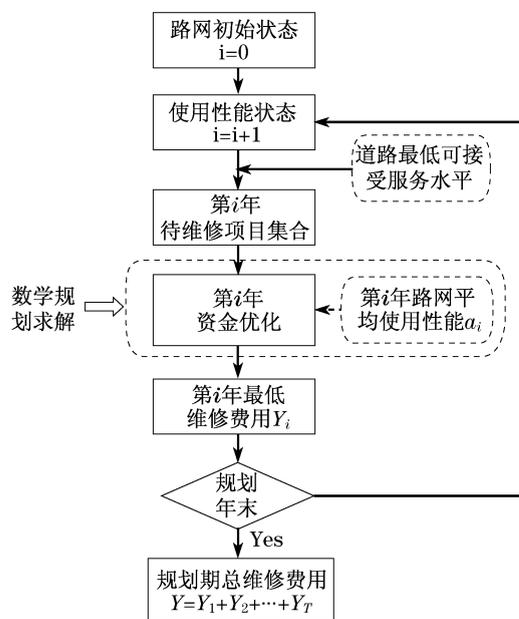


图 1 中等服务水平下的资金优化模型的求解过程
Fig.1 Process of optimal maintenance fund allocation models on middle levels of pavement condition desirability

从图 1 可知, 中等服务水平下的资金优化模型除事先需确定各年路网最低平均使用性能外, 还需确定道路最低可接受服务水平, 低于该水平的道路单元为待维修项目, 待维修项目可能的维修对策有多种. 与高服务水平下的资金优化模型不同, 中等服务水平下的资金优化模型需用数学优化方法, 对各年最少维修费用进行优化.

4 低服务水平下的资金优化模型

4.1 模型含义

低服务水平下的资金优化模型指: 路网在规划

期里, 在道路最低可接受服务水平的约束下, 为使路网使用性能在规划期内的平均值大于预定标准时所需的最少维修资金. 该模型从一个较长的时间跨度(规划期)对路网的最低使用性能进行约束, 忽略了路网内各条道路或路网各年使用性能的具体变化, 其分析结果具有更强的宏观控制效果. 其数学模型表达式如下:

$$\min Y = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^m X_{ijt} C_{ijt} \quad (9)$$

$$\text{st} \left(\left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^m X_{ijt} B_{ijt} \right) + E \right) / nT \geq A \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ijt} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N_t; t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1 & i \text{ 路段 } j \text{ 对策在 } t \text{ 年实施} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$B_{ijt}, C_{ijt}, A > 0 \quad (13)$$

式(9)~式(13)中: Y 表示规划期总的维修费用; E 为规划期各年里, 不需要维修的项目使用性能值的总和; A 为规划期路网平均使用性能; 其余参数意义同前. 式(9)表示规划期总维修费用最小的规划目标, 式(10)是维修项目实施后, 规划期里路网使用性能的平均值的约束条件.

4.2 模型求解

对于一个路网, 规划期内维修项目少则上百多则上千, 因此, 式(9)是一个大型整数规划问题, 对于这类问题, 目前一般都采用近似优化的简化算法进行求解^[9], 为此, 本文从道路管理部门实际工作特点出发, 采用了两种近似求解手段: ①总规划资金的优化中, 近似认为各年规划资金最少时, 总规划资金最少; ②将约束条件 A 离散为 j 个向量 $A_i (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{Ti})$, $i = 1, 2, \dots, j$, 每一向量为规划期内各年路网使用性能最低要求的组合(例如: a_{2i} 表示根据 A 离散后, 得到的第 i 组向量中, 第二年路网最低使用性能为 a_{2i}), 以每组向量所表示的年最低使用性能 A_i 为约束条件求出该组合下的最少规划资金 E_i , 最后从中选取最小值作为费用最少的总规划资金 E , 其中 $E = \min (E_1, E_2, \dots, E_j)$. 求解过程如图 2 所示.

4.2.1 约束条件 A 的离散

规划期路网最低服务水平 A 的离散就是把对规划期路网总的要求 A 转化为对规划期各年路网的子要求 (a_1, a_2, \dots, a_T) (其中 $\sum_{i=1}^T a_i / T \geq A$, T 为规划期长), 通过这种转化, 将一个时间跨度为 T 的总规

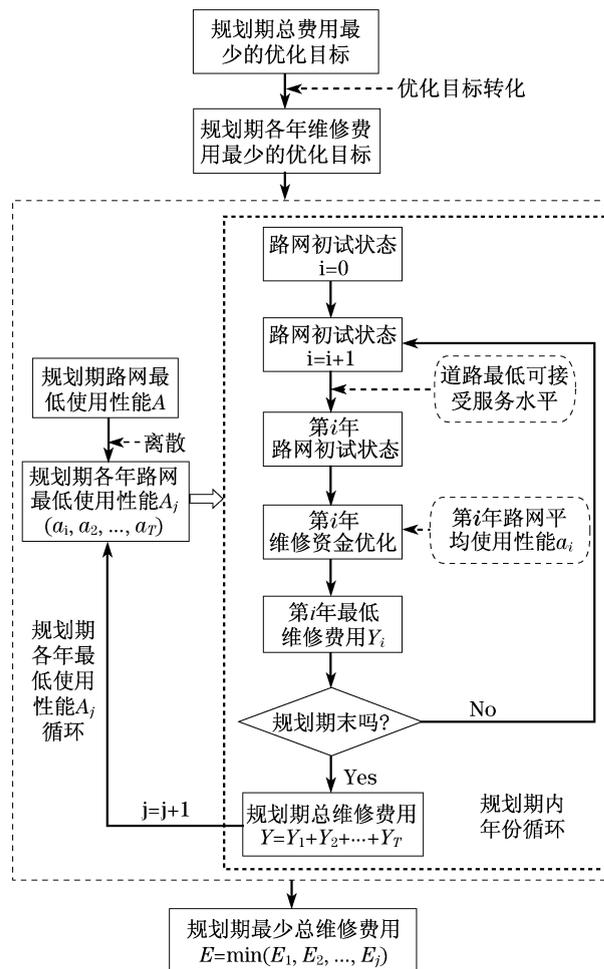


图2 低服务水平下的资金优化模型简化计算的求解过程

Fig.2 The process of optimal maintenance fund allocation models on low levels of pavement condition desirability

划转化为跨度仅有一年的各子规划的拼接,降低了规划求解的难度. 在满足 $\sum_{i=1}^T a_i/T \geq A$ (T 为规划期长) 的条件下, (a_1, a_2, \dots, a_T) 组合数众多, 要对这些众多的组合采用一一试算的方法来确定最佳组合显然是很难进行的. 为此, 管理部门可以根据日常管理的经验, 限制 a_i 的变化范围, 从而减少方程 $\sum_{i=1}^T a_i/T \geq A$ 可行解的个数. 本文根据一些相关资料采用如

$$\text{Cost}(k) = f(i, m) =$$

$$\begin{cases} \min(w_{it}) \\ f(i-1, m) \\ \min(f(i-1, m), f(i-1, m-v_{it}) + w_{it}) \end{cases}$$

式中, $f(i, m)$ 为最优指标函数, 表示在前 i 个项目中, 使路网 PCI 恰好等于 m 时的最少维修费用; $m = a_i N_i$. 根据式(14)可计算出第 k 年最少维修

下方法来降低 (a_1, a_2, \dots, a_T) 可能的组合数, 主要有:

(1) 规划期里, 一个好的投资组合应该能使路网使用性能的变化保持这么一种状态: 在规划初期, 由于资金的投入, 路网使用性能得到一定的恢复, 在一段时间后, 路网使用性能的变化应该进入一个相对稳定的状态^[1,5], 如图3所示. 因此, 路网各年最低使用性能 (a_1, a_2, \dots, a_T) 的确定应该能体现这一规律.

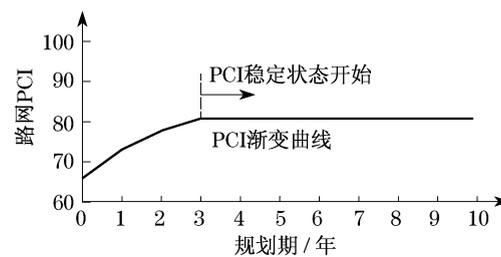


图3 路网使用性能变化的稳定状态

Fig.3 The change of road's performance on steady state

(2) 根据规划期路网最低使用性能 A , 以及式(1)中的规律, 在规划初期, 路网使用性能的变化可以较大, 规划中、后期, 路网使用性能的变化应当较小;

(3) 为路网各年最低使用性能的变化确定步长, 步长的选择应当慎重, 步长过大使得最终的优化结果距离最优解太远, 步长太小则增加了优化过程所需要的时间(例如: 本文认为, 如果以路网道路状况指数 (pavement condition index, PCI) 为决策变量, 步长取为 0.5 是较为合适的);

4.2.2 各年维修资金的优化

各年最低使用性能 (a_1, a_2, \dots, a_T) 确定后, 开始进行各年最小维修资金的计算. 假设在“第 k 年维修资金优化”步骤中, 待维修项目集合中共有 N_i 个项目需要维修, 每个项目有三种维修对策, 项目维修后, 路面 PCI 由小到大记为 v_{k1}, v_{k2}, v_{k3} , 同时维修费用对应为 w_{k1}, w_{k2}, w_{k3} , 对应的规划目标为在保证维修后路网 PCI 不低于 a_i 时, 如何安排该年维修项目, 使得维修费用最低. 对此问题, 本文采用动态规划法^[9]来进行求解, 其递归方程如下:

$$m = v_{it}, \text{ 且 } i = 1, t = 1, 2, 3$$

$$\text{如果 } f(i-1, m-v_{it}) \text{ 不存在, 且 } i > 1, t = 1, 2, 3 \text{ (14)}$$

$$\text{如果 } f(i-1, m-v_{it}) \text{ 存在, 且 } i > 1, t = 1, 2, 3$$

资金.

根据规划期路网最低服务水平离散化的结果, 计算出各离散组合下相应规划期最少维修费用后,

即可从中进行筛选,找到规划期需要的最少维修资金如下:

$$c_j(A_j) = c_j(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jT}) = \text{cost}(1) + \text{cost}(2) + \dots + \text{cost}(T) \quad (15)$$

式中, $c_j(A_j)$ 表示根据 A 离散后得到的第 j 组各年最底使用性能标准 $(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jT})$ 后,其对应的规划期内最少维修资金.

$$C = \min(c_1(A_1), c_2(A_2), \dots, c_j(A_j), \dots, c_N(A_N)) \quad (16)$$

5 模型求解和结果分析

从前分析可知,低服务水平下的资金优化模型计算最为复杂,而其余两种模型在计算方法上可视为低服务水平下的资金优化模型的特例.因此,限于篇幅所限,本文仅对低服务水平下的资金优化模型进行实际数据的检验.本文数据来源于2004年上海市12个行政区的部分沥青路面调查数据,其中,调查路段总数为867条,路段总长238 332 m,路段总面积3 093 293 m².

(1) 参数的设定包括:规划期路网最低 PCI 取 90、规划期里路网各年最低、最高 PCI 分别取 87 和 93,以及各年 PCI 变化的步长为 0.5.

(2) 路面 PCI 性能预测方程:为对规划期各年道路单元性能衰变进行合理预估,本文采用了同济大学孙立军教授所建立的,经实践有效的沥青路面 PCI 衰变方程^[10]作为本算例的沥青路面性能预测模型,计算式如下:

$$PCI = 100 \left[1 - e^{-\left(\frac{A}{y}\right)^B} \right] \quad (17)$$

式中各参数含义见孙立军教授《沥青路面结构行为理论》.

(3) 模型求解使用 VB6.0 编程实现,求解结果见表 1.

(4) 结果分析

在规划第 1 年,由于路网使用性能较高,该年需要的维修经费也较少,随着路网使用性能的进一步衰变,路网需要的维修资金不断增加,但进入到规划期第 7 年后,随着路网使用性能的稳定,各规划年需要的维修资金始终处于一个较低的水平,这与实际情况是相吻合的.

6 结语

通过数学规划法对规划期内的网级路面管理系

表 1 资金优化模型求解结果

Tab.2 Results of the optimal fund allocation model

年份/年	维修路段总数/个	维修路段总长/m	维修路段总面积/m ²	维修总费用/万元	路网 PCI/%
2005	32	6 694	60 931	339	88.5
2006	76	22 733	229 093	1 710	88.0
2007	80	23 811	284 828	1 929	87.5
2008	122	31 649	344 975	1 813	88.5
2009	122	32 383	410 464	2 389	90.0
2010	112	26 413	303 652	1 474	91.5
2011	57	9 758	87 208	344	91.5
2012	59	10 811	118 047	460	91.5
2013	64	13 904	153 136	608	91.5
2014	65	18 243	235 243	1 005	91.5
合计	789	196 399	2 227 577	12 071	90.0

统进行资金需求分析,关键是需要找到一个既能满足实际工作需要,又能易于为管理部门理解和接受的模型和算法.本文采用的高服务水平、中等服务水平和低服务水平下的三种资金优化模型,与传统的经验法、排序法及马尔可夫数学规划法比较而言具有以下特点:

(1) 资金优化模型的三种分类方法实用性较强,满足了道路管理部门因维修资金不足而对路网性能存在不同管理目标的实际需要,避免了以往计算模型适用性单一的缺点.

(2) 模型中采用的将管理目标离散化的算法,很好地解决了以往数学规划中出现的“维数灾难”问题,经实际数据的检验,模型计算时间少,满足大规模路网实际计算的需要.

(3) 模型输出结果不仅有规划期各年资金分布情况,还对规划期各年内路网所有道路单元进行了维修计划的安排,克服了以往数学规划法中维修计划仅能分配至某一类具有相同特征的道路集合的不足.

高、中、低三种资金优化模型的使用,很好地解决了管理者在不同管理目标下对路网养护维修进行不同资金需求分析的需要,同时,由于模型是以不同道路管理单元在不同规划年里的不同养护维修方式作为模型变量.因此,在模型输出结果中,还将获得路网规划期内各道路单元的具体维修对策,这为判断养护维修计划是否科学提供了依据.

参考文献:

[1] 姚祖康.路面管理系统[M].北京:人民交通出版社,1993.