

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.09.020

多车型高速公路连续平衡网络 设计问题的双层规划模型

姜山¹, 付凌峰², 刘伟铭², 刘玉印²,

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037;
3. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 利用双层规划理论建立了多车型高速公路连续平衡网络设计问题的优化模型, 将改扩建路段的位置、容量与收费费率确定纳入一个决策过程, 从而建立了高速公路改扩建项目的科学决策方法。上层规划中将路网管理者(政府)作为领导者, 经营者的财务目标以及投资上限作为实现系统最优的约束条件; 下层规划则在考虑了不同车型道路使用者路径选择的差异性以及增加道路容量对交通分布影响的基础上, 建立了多车型多准则用户均衡模型。最后以一个算例对模型的效果进行了验证说明, 结果表明: 应用该模型可对高速公路改扩建问题进行有效决策。

关键词: 交通工程; 网络设计; 双层规划模型; 连续平衡网络; 多车型; 收费道路

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2011)09-0125-06

A Bi-level Programming Model for Multi-vehicle-type Continuous Equilibrium Network Design

JIANG Shan¹, FU Lingfeng², LIU Weiming³, LIU Yuyin³

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. Chtan Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China; 3. South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: A bi-level programming model for optimization of multi-vehicle-type freeway continuous equilibrium network design was presented to set up a scientific method for road section reconstruction or extension in freeway network which integrated their positions, capacities, and the corresponding network toll rates into one optimal decision-making process. The upper level program model takes the road manager (government) as the leader of the decision-making, and regards the operators' financial goals and upper limit of investment as the constraints to achieve optimum system. The lower level program builds multi-vehicle-type multi-criterion user equilibrium model considering the differences in route choice behaviors of different vehicle type users and the effects of road volume extension on the traffic distribution. Finally, a numerical example was presented to illustrate the benefit of this model. The result shows that the proposed model is efficient to make decisions on freeway reconstruction or extension project.

Key words: traffic engineering; network design; bi-level programming model; continuous equilibrium network; multi-vehicle-type; toll road

0 引言

一般来说, 连续交通网络设计问题是指在一定

的投资约束条件下, 考虑道路使用者出行选择行为, 在交通网络中改善某些路段的通行能力, 以使整个网络达到某种系统指标最优的决策过程, 这里的连

收稿日期: 2011-03-03

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(200139822382)

作者简介: 姜山(1977-), 男, 山东诸城人, 硕士, 副研究员。(bjboyjs2011@sohu.com)

续是指通行能力的增加是连续的、渐进的^[1]。与此对应的是离散交通网络设计问题,即通过在网络中增加新的路段来实现系统某项指标最优,离散是指路段通行能力的增加是跳跃性的,例如新修路段,从无到有^[2]。

高速公路的建设对区域经济、社会发展以及生态环境有着很大影响,而且耗资巨大,更需要科学的规划与量化的决策支持。目前高速公路网络设计普遍采用先确定道路位置与容量,再制定收费费率的方法,这种方法割裂了路网结构、路段容量与道路收费这三个网络特征的影响因素,很难获得全面最优的决策方案。

高速公路网络设计问题的研究成果还很有限, Yang&Meng^[3]将道路经营者作为领导者,假设所有用户具相同的时间价值,建立了双层规划模型对B-O-T下新建高速公路的最佳道路容量与收费问题展开了富有成效的研究。Yang&Huang^[4]通过放宽单一VOT的假设,对不同类用户情况做出了更进一步的研究。这些成果为收费道路网络设计问题提供了有益的启示,但与我国目前高速公路的管理与收费体制有着一定的差异。

高速公路网络设计需要考虑以下几个特征性问题:(1)网络存在收费道路,道路收费标准不仅关系着道路建设经营者的利益甚至高速公路项目的可行性,对网络中的交通流量分布也有着很大影响;(2)目前通行费普遍采取分车型征收,不同车型的道路使用者在出行成本与路径选择过程中表现出明显的差异性;(3)在考虑改扩建收费道路位置与扩充容量的同时,还应确定相应的收费费率。因此,需要对高速公路平衡网络设计问题进行有针对性的研究,将待改建路段的位置、增加容量与收费方案一起考虑。

刘伟铭等^[5]针对高速公路离散平衡网络问题,建立了多车型高速公路离散平衡网络设计问题的优化模型,将新建路段的位置、容量与收费费率的确定纳入一个决策过程,取得了较好的效果。在上述研究的基础上,本文继续利用双层规划理论探讨高速公路连续平衡网络问题。文章以高速公路及相邻道路组成的路网为研究对象,利用双层规划理论描述了道路规划管理者、建设经营者以及不同车型道路使用者在网络设计决策中的利益、作用与地位。上层规划中将政府作为领导者,经营者的财务目标以及投资上限作为实现系统最优的约束条件。下层规划在考虑了不同车型道路使用者路径选择的差异

性以及增加道路容量对交通分布影响的基础上,建立起多车型多准则用户均衡模型,以更准确的预测交通流在既定路网中的分布状态。利用本文提出的多车型连续高速公路交通平衡网络设计问题的双层规划模型,可同时优化出需改扩建路段位置、最佳容量和各路段上相应的分车型收费费率,所得结果可以兼顾效率最大化原则、成本原则、效益原则、公平原则和用路者路径选择行为准则。文中还介绍了利用遗传-模拟退火混合优化策略进行模型求解的步骤,最后以一个算例对模型的效果进行了验证说明。

1 多车型高速公路连续平衡网络设计问题的双层规划模型

高速公路网络设计问题中,路网管理者(政府)对需改扩建路段的位置、容量与相应的收费标准进行决策,其根本目的是为了合理建设道路网络,尽可能实现路网社会效益的最大化,但同时必须满足收费道路经营者的投资上限与财务的目标。道路使用者则在既定网络条件下,通过路径选择行为尽量降低自己的出行成本,从而影响管理者的决策。这是一个典型的Stackelberg^[6]对策问题,在数学形式上我们用双层规划来表述。

1.1 符号与函数定义

A 为路网中的路段集合; A^* 为路网中收费路段的集合; $\bar{A}$ 为待决策改扩建路段的集合; $\bar{A}_{nr}$ 为经营者 nr 需改建路段的集合; N 为收费道路经营者的集合; NR 为待改建路段的经营者 nr 的集合; r/s 为起始/终止节点; k_{rs} 为连接 $r-s$ 的路径; g 为车型分类参数; Γ_g 为车型 g 对基准车型的换算系数, $\Gamma_1=1$; m 为待决策改扩建路段; ΔC_m 为路段 m 增加的容量值; $\Delta C_m^{\min}$ 为路段增加容量最小允许值; $I_m(\Delta C_m)$ 为路段 m 上通行能力增加 ΔC_m 所需的投资; S_{nr} 为经营者 nr 待改建路段的预算总投资额上限; REV_n 为经营者 n 的财务目标; η_1/η_2 为经营者实际营运情况与计划财务目标的浮动参数; q_{rs}^g 为车型 g 从 r 到 s 的交通需求量; $D_{rs}^g(\bullet)$ 为 r 和 s 之间车型 g 的出行需求函数; $c_{k,g}^{rs}$ 为车型 g 使用路径 k 从 r 到 s 的出行费用; c_g^{rs} 为车型 g 从 r 到 s 的最小出行费用; φ_{ag} 为路段 a 上车型 g 的通行费转化为等价值时间的转换系数; y_{ag} 为路段 a 上车型 g 的通行费,当 a 属于非收费路段时, $y_{ag}=0$; l_a 为路段 a 的长度; Λ_{ag} 为路段 a 上车型 g 行驶费用的时间折算值; $y_{ag}^{\min}/y_{ag}^{\max}$ 为在路段 a

上车型 g 应付的最低/最高收费费率值; x_{ag} 为在路段 a 上车型 g 的流量; x_a 为在路段 a 上的当量基准车型流量; $f_{k_g}^{rs}$ 为 OD 对 (r, s) 之间路径 k 上车型 g 的流量; $\delta_{a_k}^{rs}$ 为如果路段 a 在连接 $r-s$ 的路径 k 上, 其值为 1 否则为零。

1.2 下层规划的交通均衡模型

交通网络设计问题双层规划模型的下层规划一般采用描述道路使用者出行选择行为的交通均衡模型。收费道路网中, 不同车型道路使用者的出行成本以及对成本的认识具有明显的差异性, 路径选择需要考虑的因素包括时间成本、行驶费用、道路收费等多个方面, 是多类别多准则的决策过程, 且具有路段与路径相依性, 另外还要考虑增加路段容量对交通分布的影响, 本文提出一个多车型多准则的交通均衡模型。

1.2.1 收费道路广义行程费用函数

行程费用函数是道路使用者路径选择的决定因素, 也是交通均衡模型的基础。本文假设通行能力的改变不会影响用户在该路段的自由行驶时间, 在 BPR 函数的基础上, 以不同车型道路使用者的行驶时间成本、通行费的时间折算成本 $\varphi_{mg} \gamma_{mg} l_m$ 与路段行驶费的时间折算成本 Λ_{mg} (油费、车辆保养和折旧费以及路径选择偏好等) 的加权和形式建立起多车型多准则的广义行程费用函数:

$$t_{mg}(x_m, \gamma_{mg}, \Delta C_m) = t_m^0 [1 + \alpha (\frac{x_m}{C_{mmax} + \Delta C_m})^\beta] + \varphi_{mg} \gamma_{mg} l_m + \Lambda_{mg} = t_m^1 + \varphi_{mg} \gamma_{mg} l_m + \Lambda_{mg}, \quad (1)$$

式中, α, β 为行程时间模型参数; C_{mmax} 为路段 m 的通行能力; t_m^1 为路段 m 的行驶时间函数, 取 $t_m^1(x_m, \Delta C_m) = t_m^0 [1 + \alpha (x_a / C_{amax} + \Delta C_m)^\beta]$ 。

对于无需进行改建决策路段的行程费用 $t_{ag}(x_a, \gamma_{ag})$, 只需取上式中的 ΔC_m 为零。

1.2.2 对弹性需求的考虑

收费道路的改造是一个长期规划, 而且网络条件与道路收费等因素的变化对交通需求有着直接的影响, 在网络设计决策时考虑交通需求的弹性变化将更符合实际情况。车型 g 在 (r, s) 之间的交通需求与它们之间出行费用的关系可以用一个函数来描述:

$$q_{rs}^g = D_{rs}^g(c_g^{rs}), \quad (2)$$

$$c_g^{rs} = \min(c_{k_g}^{rs}) = \sum_{a \in A-\tilde{A}} t_{ag} \delta_{a_k}^{rs} + \sum_{m \in A} t_{mg} \delta_{m_k}^{rs}。$$

1.2.3 弹性需求下的收费道路网多车型多准则交通均衡模型

本文提出的弹性需求下多车型多准则用户均衡模型可等价如下数学规划问题:

$$\min_{x, q} f(x, q) = \sum_{a \in A-\tilde{A}} \int_0^{x_a} t_a^1(w) dw + \sum_{m \in \tilde{A}} \int_0^{x_m} t_m^1(w, \Delta C_m) + \sum_{a \in \tilde{A}} \sum_g \Gamma_g \Lambda_{ag} x_{ag} + \sum_{a \in A^*} \sum_g \Gamma_g \varphi_{ag} \gamma_{ag} l_a x_{ag} - \sum_{rs} \sum_g \Gamma_g \int_0^{q_{rs}^g(y, \Delta C_m)} D_{rs}^{-1}(w) dw, \quad (3a)$$

$$\text{s. t. } \sum_k f_{k_g}^{rs} = q_{rs}^g, \quad \forall r, s, g, \quad (3b)$$

$$f_{k_g}^{rs} \geq 0, \quad \forall k, r, s, g, \quad (3c)$$

$$q_{rs}^g \geq 0, \quad \forall r, s, g, \quad (3d)$$

$$x_{ag} = \sum_{rs} \sum_k f_{k_g}^{rs} \delta_{a_k}^{rs}, \quad \forall a, g, \quad (3e)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \sum_g \Gamma_g f_{k_g}^{rs} \delta_{a_k}^{rs}, \quad \forall a \in A. \quad (3f)$$

利用这一模型可以在上层规划确定新增路段容量 ΔC 以及费率 γ 的情况下预测出相应的交通需求 $q(y, \Delta C)$ 以及各路段上分配的交通流量 $x(y, \Delta C)$ 。

1.2.4 模型的求解算法

为了使各车型的路段流量解唯一, 先在目标函数 (3a) 中添加附加项如式 (4):

$$\sum_{a \in \tilde{A}} \sum_g \frac{\gamma \Gamma_g x_{ag}^2}{2} \quad (\gamma \text{ 是一小正数}), \quad (4)$$

再对 Frank-Wolfe 方法在稍加修改即可求解以上的用户均衡模型, 在每次迭代过程后 γ 值就减少一半, 即 $\gamma^{(n+1)} = 0.5\gamma^{(n)}$, 详细步骤参见文献 [6]。

1.3 连续平衡网络设计问题的上层规划

多车型高速公路连续网络设计问题的上层规划模型如式 (5) 所示:

$$\max_{\gamma, \Delta C} F(\gamma, \Delta C) = \sum_{rs} \sum_g \Gamma_g q_{rs}^g(\gamma, \Delta C), \quad (5a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{m \in \tilde{A}_{nr}} I_m(\Delta C_m) \leq S_{nr}, \quad \forall nr, nr \in NR, \quad (5b)$$

$$\Delta C_m \geq \Delta C_m^{\min} \geq 0, \quad m \in \tilde{A}, \quad (5c)$$

$$\gamma_{ag}^{\min} \leq \gamma_{ag} \leq \gamma_{ag}^{\max}, \quad \forall a \in A^*, g \in G, \quad (5d)$$

$$\eta_1 REV_n \leq \sum_{a \in A_n^*} \sum_{g \in G} \gamma_{ag} l_a x_{ag} \leq \eta_2 REV_n, \quad \forall n, n \in N. \quad (5e)$$

注: 投资预算和收费道路经营者财务目标不同。

路段流量 $x(y, \Delta C)$ 和交通需求 $q(y, \Delta C)$ 可以通过求解下层规划 (3) 获得。

上层规划 (式 5) 以各收费路段的费率 γ 与扩建容量 ΔC_a 为决策变量, 决策目标可以根据不同策略采用不同的形式, 本文采用网络用户需求最大作为

决策目标,以体现道路管理者追求社会效益最大化的思想,并以满足道路经营者的投资上限(5b)以及财务目标(5e)为约束条件, REV_n 的大小由经营者 n 各条道路的建设成本、各项税率、运营成本、预期收益和收费期限率等因素确定^[7]。约束条件(5d)体现了政府作为管理者,对收费费率的限制,以平衡经营者与道路使用者的利益,其中上限 $y_{ag}^{\max}$ 可取道路使用者所获得的级差效益,下限 $y_{ag}^{\min}$ 可以取0。通过模型求解最终可以获得路网中应扩建路段的位置与最佳扩建容量、各路段最佳的分车型收费费率以及相应的路段流量,交通需求和路网整体用户总需求等数据。

2 模型的求解算法

双层规划问题是一个 NP-hard 问题,模型的求解非常困难。到目前为止,学者们设计了许多算法求解连续平衡网络问题,如迭代优化配流算法(Iterative Optimization Assignment Algorithm, IOA)、路段使用比例算法(Link Usage Proportion-Based Algorithm, LUPB)和灵敏度分析法(Sensitivity Analysis-Based Algorithm, SAB)。IOA 算法曾被 Asakusa&Sasaki^[8]和 Friesz&Harker^[9]充分利用来求解连续网络设计问题。SAB 算法^[10]利用了下层决策向量对上层决策变量的梯度信息,从理论上比 IOA 算法和 LUPB 算法更精确,但存在着需要强的假设条件、复杂的矩阵求逆计算等问题。本研究采用遗传—模拟退火(Genetic Algorithm-Simulated Annealing, GASA)混合优化策略求解多车型高速公路连续平衡网络设计问题的双层规划模型,其基本思想是:对上层规划的决策变量进行编码,通过求解下层规划问题计算每个串的适应度。经过复制、交叉、变异和模拟退火操作后,最终可以得到全局最优或近似最优解^[11]。这种混合优化策略结合了遗传算法的并行结构和模拟退火算法的概率突跳性,提高了获得全局最优解的可靠性和计算效率。

2.1 GASA 算法步骤如下:

Step 1: 初始化。

1-1 设置遗传算法中,种群规模 N ,交叉概率 p_c ,变异概率 p_m ,最大进化代数 MaxGen,设置进化代数 $gen=0$;

1-2 设置模拟退火算法中内层循环数 M ,初温 t_0 ,退温速率 λ ,退温函数采用 $t_k = \lambda t_{k-1}$,置 $t = t_0$;

1-3 根据上层规划问题的目标函数确定合理

的适应度函数形式,将上层规划问题的决策变量 y 和 ΔC 进行编码,随机产生初始种群 $X(1) = (\dots, \text{书版无字符: } 0x2944x_i(1) \text{ 书版无字符: } 0x2944, \dots), i = 1 \dots N$ 。书版无字符: 0x2944, 书版无字符: 0x29442 书版无字符: 0x2944, 书版无字符: 0x2944 $\dots N$,置 $gen = 1$ 。

Step 2: 将 $X(gen)$ 代入下层规划进行流量分配,计算每一个体 $x_i(gen)$ ($i = 1, 2, \dots, N$)的适应度。如果 $gen = \text{MaxGen}$,适应度最大的染色体即全局最优解;否则转 Step 3。

Step 3: 根据适应度分布复制种群 $X(gen)$ 。

Step 4: 根据交叉概率 p_c ,执行交叉操作。

Step 5: 根据变异概率 p_m ,执行变异操作,令 $gen = gen + 1$,从而得到新种群 $X(gen)$,并计算 $X(gen)$ 中个体的适应度。

Step 6 令 $i = 1$,对种群 $X(gen)$ 进行模拟退火操作。

6-1 若 $i = N$,转 Step 7; 否则令循环轮次计数 $k = 1$,转 6-2;

6-2 利用状态产生函数产生个体 $x_i(gen)$ 的新状态,并对新个体进行解码后代入下层规划问题进行 UE 分配计算,从而得到上层规划的目标函数值,并计算其适应度;

6-3 以 Metropolis 概率公式接受新个体;

6-4 若 $k = M$,令 $i = i + 1$,转 6-1; 否则,令 $k = k + 1$,转 6-2。

Step 7: 退温,令 $t = 0.5t$,转 Step 2。

2.2 适应度函数的确定:

首先将上层规划的目标函数转换为:

$$\tilde{F} = -F + \rho_1 P_1(w_1) + \rho_2 P_2(w_2), \quad (6)$$

惩罚系数 $\rho_1 = \rho_2 = 100$,定义惩罚函数:

$$P_i(w_i) = w_i^2, i = 1, 2, \quad (7)$$

式中,

$$w_1 = \max \left(\sum_{a \in A^+} \sum_{g=1}^2 x_{ag} y_{ag} l_a \eta_1 REV \right),$$

$$w_2 = \min \left(\sum_{a \in A^+} \sum_{g=1}^2 x_{ag} y_{ag} l_a \eta_2 REV \right)。$$

最终得到如下的适应度函数:

$$Fitness = Max - \tilde{F} \quad (Max = 50\ 000) \quad (8)$$

3 算例分析

为方便对模型效果进行比较,我们仍采用刘伟铭等^[5]中的道路网络为例,来说明本文提出的多车

型收费道路连续平衡网络设计问题的双层规划模型的合理性。这是一个四城市间的公路网络,与刘伟铭等^[5]中不同的是,节点3与节点4之间为已修建的高速公路,而非需要决策是否需要修建的高速公路,其两个方向(路段9、10)是收费路段,其余为非收费路段,如图1所示。为简便,假设网络中仅存在两种车型。现决策收费路段9、10是否需要进行改扩建,根据投资约束和交通需求发展的需要,确定扩建的最佳道路容量以及扩建后的费率。

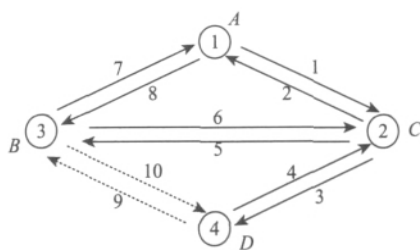


图1 路网示意图

Fig.1 Schematic diagram of road network

3.1 路网状况

(1) 路段参数

表1列出了各车型在路段 a 上的行驶费用,据此映射为行驶费用的时间成本 t_{ag} 。

REV取收费路段9、10的建造成本,它是路段容量 $C_{amax} + \Delta C_a$ 的线性函数:

$$G_a = t_a^0 (\sigma_1 C_{amax} + \sigma_2 \Delta C_a) \quad \mu \in A^*, \quad (9)$$

式中, t_a^0 和 C_{amax} 的数值见表2,参数 $\sigma_1 = \sigma_2 = 1.0 \times 10^6$ 。对于不需改建的路段 $\Delta C_a = 0$ 。另外,还需要将收费道路的建造成本映射为模型中单位时间的费用

表1 改扩建前路段的参数

Tab.1 Parameters of road sections before reconstruction or extension

路段	行驶费用/(元·veh ⁻¹)		t_a^0 /h	C_{amax} /(veh·h ⁻¹)
	车型1	车型2		
1	24.0	37.5	1.5	9 000
2	24.0	37.5	1.5	9 000
3	6.4	10.0	0.4	7 200
4	6.4	10.0	0.4	7 200
5	9.6	15.0	0.6	3 400
6	9.6	15.0	0.6	3 400
7	19.2	30.0	1.2	9 000
8	19.2	30.0	1.2	9 000
9	8.0	12.5	0.5	4 000
10	8.0	12.5	0.5	4 000

注:以车型1测算道路的容量

ΨG_a ,取 $\Psi = 3.4 \times 10^{-5}$ (1/h)。

假设车型1与车型2的换算系数之比 $\Gamma_1 : \Gamma_2 = 1 : 1.7$, $\Gamma_1 = 1$,它们在各路段上的收费转化为等价值时间的转换系数分别为 $\varphi_{a1} = 1/100.0$ (h/元), $\varphi_{a2} = 1/200.0$ (h/元)。

(2) 弹性需求函数

本例中使用指数型交通需求函数 $D_{rs}(\bullet)$:

$$q_{rs}^g = \hat{q}_{rs}^g \exp(-\kappa c_{rs}^g), \quad \forall r, s, g, \quad (10)$$

式中, $\hat{q}_{rs}^g$ 是车型 g 从 r 到 s 的潜在需求; κ 是反映需求对出行费用的灵敏度的参数,设 $\kappa = 1.0$ (1/h)。潜在交通需求如表3所示。

3.2 模型与求解算法中参数的设置

(1) 根据交通发展的要求以及投资规模的约束,最后确定路段9、10改扩建容量规模的范围是500~2 000 veh/h

(2) 车型1的收费额界限为0.0~40.0元/veh,车型2的收费额界限为0.0~60.0元/veh。

(3) GASA算法的参数设置:种群规模 N 为80;复制操作采取按比例复制;交叉操作采取单点交叉,交叉概率 p_c 为0.40;变异操作采取单点变异,变异概率 p_m 为0.35;模拟退火时内层循环数 M 取20,初温 t_0 取90,退温速率 λ 取0.5;状态产生函数设计为INV操作;终止准则是满足最大进化代数 $MaxGen = 200$ 即可。

3.3 模型求解与数值分析

采用GASA混合优化算法求解双层规划问题,表2给出了目前与预测扩建收费路段后收费费率、道路容量等参数的计算结果,表3和表4分别列出了改善方案对应的路网中的OD需求和路段流量模式。由计算结果得出,扩建容量为598veh/h,车型1与2的收费标准分别为19.8元/veh与42.5元/veh,OD总需求为21 828 veh/h,下层规划问题的目标函数值为-26 665.16 h。同扩建前数据比较,扩建

表2 优化结果对比

Tab.2 Comparison of optimization results

类别	收费额 (元·veh ⁻¹)	OD总需求 (veh·h ⁻¹)	下层规划 问题目标 函数值/h	收费路段 的交通量/ (veh·h ⁻¹)
目前	16.8 (车型1) 37.4 (车型2)	21 852	-26 790.88	3 488
扩建路段 9、10后	19.8 (车型1) 42.5 (车型2)	21 828	-26 665.16	3 476
增减 比例	17.8% (车型1) 13.7% (车型2)	-0.108%	-0.469%	-0.345%

后的 OD 需求、网络中总出行时间、各路段的交通流量均有所下降。说明无论从用户和系统的角度来看, 扩建后网络性能均有下降, 故此扩建工程是不需要的。

表3 目前与预测扩建收费路段后各 OD 对间的交通需求 (单位: $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$)

Tab. 3 Traffic demands of each OD pairs at present and prediction of toll links after extension (unit: $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$)

OD 对	潜在		目前		扩建后		增加比例/%	
	交通需求		分车型流量		分车型流量		交通量	
	车型1	车型2	车型1	车型2	车型1	车型2	车型1	车型2
①-②	6 000	1 765	1 246	366	1 869	1 241	365	1 862
①-③	6 000	1 765	1 246	366	1 869	1 241	365	1 862
①-④	4 000	1 177	831	244	1 246	828	243	1 241
②-①	6 000	1 765	1 246	366	1 869	1 241	365	1 862
②-③	2 000	589	667	196	1 000	667	196	1 000
②-④	4 000	1 177	1 333	392	2 000	1 333	392	2 000
③-①	6 000	1 765	2 000	588	3 000	2 000	588	3 000
③-②	2 000	589	667	196	1 000	667	196	1 000
③-④	4 000	1 177	1 333	392	2 000	1 333	392	2 000
④-①	4 000	1 177	1 333	392	2 000	1 333	392	2 000
④-②	4 000	1 177	1 333	392	2 000	1 333	392	2 000
④-③	4 000	1 177	1 333	392	2 000	1 333	392	2 000

表4 扩建收费路段后的路段交通量预测值 (单位: $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$)

Tab. 4 Prediction of traffic volumes on toll links after extension (unit: $\text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$)

路段	目前		扩建收费路段后		增加比例/%	
	分车型流量		分车型流量		交通量	
	车型1	车型2	车型1	车型2	车型1	车型2
1	1 246	360	1 869	1 241	365	1 862
2	1 246	360	1 869	1 241	365	1 862
3	831	244	1 246	828	243	1 241
4	831	244	1 246	828	243	1 241
5	415	122	623	414	122	621
6	415	122	623	414	122	621
7	2 076	611	3 114	2 069	609	3 104
8	2 076	611	3 114	2 069	609	3 104
9	1 661	1 075	3 488	1 655	1 071	3 476
10	1 661	1 075	3 488	1 655	1 071	3 476

4 结论

本文主要研究路网下高速公路改扩建问题的决策方法, 通过对高速公路网络设计问题的分析, 提出了多车型高速公路连续网络设计问题的双层规划模型及高效的求解算法。上层规划中将路网管理者

作为决策的领导者, 以满足道路经营者的合理利益为约束条件, 下层规划采用多车型多准则交通均衡模型来描述不同车型道路使用者在收费道路网络中的路径选择行为。通过模型的求解可以将需改造收费道路的位置、道路容量和道路分车型收费费率一起优化, 从而更真实、更全面、更合理、更公平地描述了庞大、异常复杂而且分层的高速公路平衡网络设计问题。算例分析结果说明, 并不是所有改扩建项目都会获得社会效益的增加, 本文提出的方法可为政府和投资者进行收费道路项目投资决策时提供科学的量化支持。

参考文献:

References:

- [1] 高自友, 张好智, 孙会君. 城市交通网络设计问题中双层规划模型、方法及应用 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4 (1): 35-44.
GAO Ziyu, ZHANG Haozhi, SUN Huijun. Bi-level Programming Models, Approaches and Applications in Urban Transportation Network Design Problems [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2004, 4 (1): 35-44.
- [2] 刘灿齐. 现代交通规划学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
LIU Canqi. Advanced Traffic Planning [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [3] YANG H, MENG Q. Highway Pricing and Capacity Choice in a Road Network under a Build-operate-transfer Scheme [J]. Transportation Research A, 2000, 34: 207-222.
- [4] YANG H, HUANG H J. The Multi-class, Multi-criteria Traffic Network Equilibrium and Systems Optimum Problem [J]. Transportation Research B, 2004, 38: 1-15.
- [5] 刘伟铭, 姜山, 付凌峰. 多车型高速公路离散平衡网络设计的双层规划模型 [J]. 中国公路学报, 2008, 21 (1): 94-99.
LIU Weiming, JIANG Shan, FU Lingfeng. Bi-level Program Model for Multi-type Freeway Discrete Equilibrium Network Design [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (1): 94-99.
- [6] 刘伟铭. 道路收费系统的优化模型及算法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
LIU Weiming. Optimization Models and Its Algorithms for Highway Toll Collection System [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

(下转第141页)

- 术改进 [J]. 黑龙江科技信息, 2008 (21): 238.
- ZHONG Zijin. The Common Forms and Technical Improvement of Portable Barrier in Median of Freeway [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008 (21): 238.
- [4] 陈春, 吕洪燕, 张颖. 广东省高速公路护栏设置状况及安全分析 [J]. 公路, 2004 (11): 205-209.
- CHEN Chun, LV Hongyan, ZHANG Ying. The Situation of Barrier in Guangdong Expressway and Safety Analysis [J]. Highway, 2004 (11): 205-209.
- [5] 王宏伟, 贾日学, 王彦卿, 等. 沪宁高速公路安全体系和中分带开口护栏研究 [J]. 现代交通技术, 2006 (5): 95-98.
- WANG Hongwei, JIA Rixue, WANG Yanqing, et al. Research on Safe System and Hatch of Interval Median Barrier in Huning Expressway [J]. Modern Transportation Technology, 2006 (5): 95-98.
- [6] 北京中路安交通科技有限公司. 公路用链式混凝土护栏: 中国, 200520129445. 6 [P]. 2006-12-27.
- Beijing Zhonglu'an Traffic Science and Technology Co., Ltd. Chained Concrete Barrier for Highway: China, 200520129445. 6 [P]. 2006-12-27.
- [7] 闫书明, 白书锋. 钢管预应力索防撞活动护栏开发 [J]. 交通运输工程学报, 2010, 10 (2): 41-45.
- YAN Shuming, BAI Shufeng. Development of Crashworthy Movable Barrier with Pretension Wire in Tube [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10 (2): 41-45.
- [8] 北京中路安交通科技有限公司. 高速公路钢管预应力索式防撞活动护栏: 中国, 200620165746. 9 [P]. 2008-02-20.
- Beijing Zhonglu'an Traffic Science and Technology Co., Ltd. Crashworthy Movable Barrier with Prestressed Cable in Tube for Freeway: China, 200620165746. 9 [P]. 2008-02-20.
- [9] JTG/T F83-01-2004, 高速公路护栏安全性能评价标准 [S].
- JTG/T F83-01-2004, The Evaluation Specification for Highway Safety Barriers [S].
- [10] HALLQUIST J O. LS-DYNA Theory Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

(上接第124页)

- [16] GUOPIH. EPABRAHAM T, RODDICK J F. Survey of Spatio-temporal Databases [J]. GeoInformatica, 1999, 3 (1): 61-99.
- [17] 王长缨. 时态 GIS 若干关键技术的研究 [D]. 西安: 西北大学, 2006.
- WANG Changying. Study on Some Key Techniques of Temporal GIS [D]. Xian: Northwest University, 2006.
- [18] 陈军, 赵仁亮. GIS 空间关系的基本问题与研究进展 [J]. 测绘学报, 1999, 28 (2): 95-102.
- CHEN Jun, ZHAO Renliang. Spatial Relations in GIS: a Survey on Its Key Issues and Research Progress [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28 (2): 95-102.
- [19] 舒红, 陈军, 杜道生, 等. 时空拓扑关系定义及时态拓扑关系描述 [J]. 测绘学报, 1997, 26 (4): 299-306.
- SHU Hong, CHEN Jun, DU Daosheng, et al. Definition of Spatio-temporal Topological Relationships and Description of Temporal Topological Relationships [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 26 (4): 299-306.

(上接第130页)

- [7] 丁岳维. 联合收费道路费额分配方法研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 1999, 19 (3): 48-50.
- DING Yuewei. Study on the Distribution of the Sum from Unity Road Toll [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19 (3): 48-50.
- [8] SAKURA Y, SASAKI T. Formulation and Feasibility Test of Optimal Road Network Design Model with Endogenously Determined Travel Demand [C] // Proceedings of the 5th World Conference on Transport Research. Yokohama, Japan [s. n.], 1990: 351-365.
- [9] FRIESZ T L, HARKER P T. Properties of the Iterative Optimization-equilibrium Algorithm [J]. Civil Engineering Systems, 1985, 2: 142-154.
- [10] ABDULAAL M, LEBLANC L J. Continuous Equilibrium Network Design Models [J]. Transportation Research-B, 1979, 13: 19-32.
- [11] 刘伟铭, 姜山. 基于 GASA 混合优化策略的双层规划模型求解算法研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36 (7): 27-32.
- LIU Weiming, JIANG Shan. GASA Hybrid Optimization Strategy for Bilevel Programming Models [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36 (7): 27-32.