

城市道路建设时序决策的鲁棒优化

伍建辉^{1,2} 黄中祥¹ 李 武² 吴健辉² 彭 鑫² 张 生¹

(长沙理工大学交通运输工程学院 长沙 410114)¹

(湖南理工学院信息与通信工程学院 湖南 岳阳 414006)²

摘 要 为提高城市道路建设时序决策的鲁棒性,提出了城市道路建设时序决策优化的双层规划模型。模型假定出行需求在一定范围内扰动,上层规划是在有限资金的约束下寻求各建设阶段的系统总出行时间与系统总出行时间对出行需求的灵敏度之间的综合最小值,下层规划为各建设阶段的随机用户均衡配流。文中推导出了系统总出行时间对出行需求灵敏度的计算式,并给出了模型的求解算法。最后以一个测试路网为例,对基于系统总出行时间、基于灵敏度、基于系统总出行时间与灵敏度综合出行时间的决策优化模型进行了计算分析,结果显示 3 种决策优化模型均可寻找到各自目标最优的城市道路建设时序,但在需求不确定的情景下基于灵敏度、基于系统总出行时间与灵敏度综合出行时间的决策优化结果更具鲁棒性。

关键词 交通网络设计,需求不确定,鲁棒优化,灵敏度

中图法分类号 U491 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.013

Robustness Optimization of Sequence Decision in Urban Road Construction

WU Jian-hui^{1,2} HUANG Zhong-xiang¹ LI Wu² WU Jian-hui² PENG Xin² ZHANG Sheng¹

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)¹

(College of Information & Communication Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang, Hunan 414006, China)²

Abstract In order to improve the robustness of sequence decision in urban road construction, a bi-level programming model was proposed to optimize urban road construction sequence decision. The model assumes that travel demand disturbs in a certain range, the upper-level is programmed to seek the comprehensive minimum value between system total travel time and the sensitivity of system total travel time under the limited funds constraint, and the lower-level programming is a stochastic user equilibrium assignment model. The sensitivity calculation formula of system total travel time travel demand was derived, and the solution algorithm of the model was also presented. At last, taking a test road network as an example, three decision optimization models based on system total travel time, based on sensitivity and based on comprehensive travel time with system total travel time and sensitivity were analyzed. The results show that three decision optimization models can seek the optimal urban road construction sequence of its objective function respectively, but the optimal results based on sensitivity and based on comprehensive travel time are more robust than the optimal result based on system total travel time under demand uncertainty.

Keywords Traffic network design, Demand uncertainty, Robust optimization, Sensitivity

1 引言

随着我国经济的快速发展,机动车保有量大幅增加,使得城市道路资源供不应求,交通拥堵日趋严重。为缓解城市交通问题,需在不断完善交通管理措施的基础上大力加强城市道路升级改造。然而,城市道路建设速度过快易造成资源浪费和地方财政负担过重,若建设速度过慢,则将直接影响城市的可持续发展。因此,在建设需求与资金预算之间存在较大

差距时,合理地选取拟建道路(尤其是优化拟建道路建设时序)显得至关重要^[1-2]。

目前,用于优化城市道路建设时序的研究主要集中在两个方面:1)从宏观角度出发,通过节点重要度、路段重要度和单元重要度等^[3-5]建立评价指标体系,采用层次分析法、主成分分析法和熵值法等^[6-8]计算各指标的权重值,根据理想解法、极大极小法和灰色关联法等^[9-11]得到最终的城市道路建设时序。这类研究成果在一定程度上推动了城市道路建设时

到稿日期:2017-05-20 返修日期:2017-09-26 本文受国家自然科学基金项目(51338002,51408058),湖南省科技计划项目(2016TP1021)资助。
伍建辉(1984—),男,博士生,主要研究方向为交通运输规划与管理;黄中祥(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: mehzx@126.com(通信作者);李 武(1977—),男,博士,教授,主要研究方向为决策分析、复杂系统建模与优化;吴健辉(1977—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为目标识别、算法优化及决策分析;彭 鑫(1981—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为无线网络优化;张 生(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为交通运输规划与管理。

序研究的发展,但由于定量参数不容易获取等原因导致其应用性不强。2)基于交通流的微观排序法,以系统总出行时间、消费者剩余和经济效益等^[12-14]为目标函数,融入不同约束条件,计算得出城市道路建设时序的最优方案。这种方法具有较强的实际应用性,但若在决策模型中忽视了需求与供给的不确定性,则可能会得到一些次优的建设方案,导致道路建设过程中的通行效率远不如预期^[15-16]。

为解决需求与供给的不确定性给城市道路建设带来的不利影响,一些学者通过假设出行需求满足某种概率分布,来构建在需求不确定的条件下的多阶段交通网络设计模型^[17-18]。这类研究由于在校准出行需求的概率分布时缺乏大量数据,导致假定的概率分布与真实的概率分布之间存在误差,因此其在优化城市道路建设时序研究中仍存在一些不足。另一些学者利用灵敏度分析方法来评估需求不确定对交通网络的影响^[19-20],但其本质仅是后期验证,并未直接提供基于灵敏度的控制策略。基于此,本文假设出行需求在一定范围内扰动,基于系统总出行时间和灵敏度综合最优的决策标准,建立城市道路建设时序决策优化模型,给出模型的求解算法,通过数值算例对模型进行验证。

2 模型的建构

2.1 符号及假设

给定一路网 $G_0 = (N, A_0, \bar{A}_0)$, 其中 N 为所有节点的集合, A_0 为初始阶段已有路段的集合, $\bar{A}_0$ 为初始阶段待建路段的集合, 且其数量为 n 。设 W 为所有 OD 对的集合, R_w 为 OD 对 w 间所有路径的集合, f_a 为路段 a 上的流量, h_r^w 为 OD 对 w 间路径 r 上的流量, δ_{ar}^w 为 OD 对 w 间路段 a 与路径 r 间的关联关系(若 $a \in r$, 则 $\delta_{ar}^w = 1$; 否则 $\delta_{ar}^w = 0$), c_a 为路段 a 上的出行时间, c_r^w 为 OD 对 w 间路径 r 上的出行时间。考虑到出行需求的不确定性, 假定 OD 对 w 间的出行需求 $d_w(\epsilon)$ 由确定项 d_w 和扰动项 ϵ_w 组成, 有:

$$d_w(\epsilon) = d_w + \epsilon_w, \forall w \in W \quad (1)$$

基于随机用户均衡原则, 出行者选择路径 r 的概率 P_r^w 为:

$$P_r^w = \frac{e^{-\theta c_r^w}}{\sum_{k \in R_w} e^{-\theta c_k^w}}, \forall r \in R_w, w \in W \quad (2)$$

其中, θ 为系统参数, $c_r^w = \sum_{a \in A_s} c_a \delta_{ar}^w$, $\sum_{r \in R_w} P_r^w = 1$ 。

假设路网 $G_0 = (N, A_0, \bar{A}_0)$ 分为 S ($S \leq n$) 个建设阶段, $s = 1, \dots, S$, A_s 为第 s 阶段路网中路段的集合, 由第 $s-1$ 阶段路网中已有路段集 A_{s-1} 和第 s 阶段新建路段 l 组成, 有:

$$A_s = \begin{cases} A_{s-1} \cup \{l | \xi_{ls} = 1, l \in \bar{A}_{s-1}\}, & s \geq 1 \\ A_0, & s = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\bar{A}_{s-1}$ 为第 $s-1$ 阶段路网中待建路段的集合, ξ_{ls} 为路段 l 与第 s 阶段间的关联关系, 若路段 l 在第 s 阶段建设, 则 $\xi_{ls} = 1$; 否则 $\xi_{ls} = 0$ 。那么, 第 s 阶段路网中待建路段集 $\bar{A}_s$ 指在 $\bar{A}_{s-1}$ 中删除 $\bar{A}_{s-1}$ 与 A_s 的公共路段, 有:

$$\bar{A}_s = \begin{cases} \bar{A}_{s-1} - (\bar{A}_{s-1} \cap A_s), & s \geq 1 \\ \bar{A}_0, & s = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 城市道路建设时序决策优化模型

城市道路建设时序决策目标是在资金预算阶段的约束下, 从若干可行的建设时序中选取最佳的建设方案, 使得各建

设阶段的目标函数最优。鉴于需求的不确定性, 为最大限度地降低需求扰动对建设时序决策的影响, 本文在以各建设阶段的系统总出行时间最小为上层规划的基础上, 将系统总出行时间对出行需求的灵敏度应用于建设时序决策的目标函数中, 构建基于系统总出行时间和灵敏度的城市道路建设时序决策优化模型。

定义系统总出行时间为:

$$C = \sum_{a \in A_s} c_a(f) f_a \quad (5)$$

定义 OD 对 w 间的系统总出行时间对出行需求的灵敏度为:

$$\nabla_{\epsilon_w} C = \frac{\partial C}{\partial \epsilon_w}, \forall w \in W \quad (6)$$

定义路网 G_0 中的系统总出行时间对出行需求的灵敏度为:

$$\nabla_{\epsilon} C = [\nabla_{\epsilon_1} C, \dots, \nabla_{\epsilon_w} C, \dots], \forall w \in W \quad (7)$$

假设各建设阶段的系统综合出行时间 F_s 等于系统总出行时间(C)与系统总出行时间对出行需求的灵敏度的平方和($\nabla_{\epsilon} C \cdot \nabla_{\epsilon} C^T$)的线性加权组合, 则上层规划模型为:

$$\min_s F_s = \beta \cdot C|_{\epsilon=0} + (1-\beta) \cdot \nabla_{\epsilon} C|_{\epsilon=0} \cdot (\nabla_{\epsilon} C|_{\epsilon=0})^T \quad (8)$$

约束条件:

$$\sum_{s=1}^S \xi_{ls} = 1, \forall l \in \bar{A}_{s-1} \quad (9)$$

$$\sum_{l \in \bar{A}_{s-1}} b_l \xi_{ls} \leq B_s, \forall s = 1, \dots, S \quad (10)$$

其中, β 为决策系数, b_l 为路段 l 的建设成本, B_s 为第 s 阶段的资金预算上限。式(8)旨在使各建设阶段的系统综合出行时间最少, 式(9)为变量 ξ_{ls} 的约束, 式(10)为城市道路建设阶段的资金预算约束。

下层规划模型用来刻画各建设阶段出行者的出行路径选择行为, 采用随机用户均衡分配模型, 其目标函数为:

$$\min Z = \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} h_r^w \ln h_r^w + \sum_{a \in A_s} \int_0^{f_a} c_a(f) df \quad (11)$$

约束条件:

$$\sum_{r \in R_w} h_r^w = d_w, \forall w \in W \quad (12)$$

$$h_r^w \geq 0, \forall r \in R_w, w \in W \quad (13)$$

$$f_a = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} h_r^w \delta_{ar}^w = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} d_w P_r^w \delta_{ar}^w, \forall a \in A_s \quad (14)$$

其中, 式(12)和式(14)分别为路径流量和路段流量守恒约束条件, 式(13)为路径流量非负约束。

需指出的是, 式(8)中 $\beta=1$ 时, 上层目标函数变成单一的, 系统总出行时间, 此时即为基于系统总出行时间的决策优化模型; $\beta=0$ 时, 上层目标函数变成单一的系统总出行时间对出行需求的灵敏度的平方和, 此时即为基于灵敏度的决策优化模型; $0 < \beta < 1$ 时, 上层目标函数为系统总出行时间与灵敏度平方和的线性加权组合, 此时即为基于系统综合出行时间的决策优化模型。

3 模型的求解

3.1 灵敏度的求解

在求解城市道路建设时序决策优化模型时, 如何计算系统总出行时间对出行需求的灵敏度 $\nabla_{\epsilon_w} C$, 是模型求解过程中的重点和难点问题。由式(1)知 $d_w(\epsilon)|_{\epsilon=0} = d_w$, $\nabla_{\epsilon_w} C = \nabla_{d_w} C$, 则有:

$$\nabla_{\varepsilon_w} C|_{\varepsilon=0} = \sum_{a \in A_s} (f_a \cdot \nabla_{f_a} c_a + c_a) \cdot \nabla_{d_w} f_a, \forall a \in A_s \quad (15)$$

由式(15)可知,若要得到 $\nabla_{d_w} C$,则必须计算 $\nabla_{d_w} f_a$ 。又由式(14)可知,路段流量 f_a 是出行需求确定项 d_w 的隐函数,令:

$$\Gamma_a = f_a - \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} d_w P_r^w \delta_{ar}^w, \forall a \in A_s \quad (16)$$

那么,函数 Γ_a 对路段流量 f_a 的偏导数为:

$$\nabla_{f_a} \Gamma_a = 1 + \nabla_{f_a} c_a \cdot \sum_{w \in W} d_w \cdot \sum_{r \in R_w} (\delta_{ar}^w P_r^w \theta (1 - \sum_{r \in R_w} P_r^w \delta_{ar}^w)) \quad (17)$$

函数 Γ_a 对出行需求确定项 d_w 的偏导数为:

$$\nabla_{d_w} \Gamma_a = - \sum_{r \in R_w} P_r^w \delta_{ar}^w \quad (18)$$

根据式(17)和式(18),有:

$$\begin{aligned} \nabla_{d_w} f_a &= - \frac{\nabla_{d_w} \Gamma_a}{\nabla_{f_a} \Gamma_a} \\ &= \frac{\sum_{r \in R_w} P_r^w \delta_{ar}^w}{1 + \nabla_{f_a} c_a \cdot \sum_{w \in W} d_w \cdot \sum_{r \in R_w} (\delta_{ar}^w P_r^w \theta (1 - \sum_{r \in R_w} P_r^w \delta_{ar}^w))} \end{aligned} \quad (19)$$

综合式(15)和式(19)不难得出系统总出行时间对出行需求的灵敏度 $\nabla_{\varepsilon_w} C$,有:

$$\begin{aligned} \nabla_{\varepsilon_w} C|_{\varepsilon=0} &= \frac{\sum_{a \in A_s} (f_a \cdot \nabla_{f_a} c_a + c_a) \cdot \sum_{r \in R_w} P_r^w \delta_{ar}^w}{1 + \nabla_{f_a} c_a \cdot \sum_{w \in W} d_w \cdot \sum_{r \in R_w} (\delta_{ar}^w P_r^w \theta (1 - \sum_{r \in R_w} P_r^w \delta_{ar}^w))} \end{aligned} \quad (20)$$

3.2 求解算法

城市道路建设时序决策优化模型的求解步骤如下:

第 1 步 初始化。将所有规划待建路段构成集合 $\bar{A}_0$,将现有路段构成集合 A_0 , $\bar{A}_s = \bar{A}_0$, $A_s = A_0$,待建路段数量为 n ,建设阶段为 S , $s=1$, $m=1$, $k=n$ 。

第 2 步 将集合 $\bar{A}_s$ 中第 m 个元素所对应的路段添入集合 A_s 中,求解下层规划模型^[21-22]:

①初始化。令 $i=1$,设置误差限值 σ 、参数 θ 、初始出行需求和初始路径流量,确定有效路径集,计算各路段的出行时间和流量 f_a^i 。

②根据式(2)、式(14)计算各路段的附加流量 y_a^i 。

③采用迭代加权法更新路段流量 $f_a^{i+1} = f_a^i + (y_a^i - f_a^i)/i$ 。

④收敛性判断。若 $|f_a^{i+1} - f_a^i| \leq \sigma$,则输出结果,转入第 3 步;否则,令 $i=i+1$,返回步骤②。

第 3 步 根据式(8)和式(20)计算系统综合出行时间 F_s^m ,将其添入集合 Ω 中,并将 $\bar{A}_s$ 中第 m 个元素所对应的路段从 A_s 中剔除。

第 4 步 若 $m=k$,则转入第 5 步;否则,令 $m=m+1$,返回第 2 步。

第 5 步 采用排序法对集合 $\Omega = \{F_s^1, \dots, F_s^m\}$ 中的数据进行从大到小的排序,选取满足上层规划约束条件(9)和(10)的最佳路段(一条或多条待建路段)作为第 s 阶段建设路段,记第 s 阶段建设路段的数量为 j_s ,更新待建路段数量为 $k=k-j_s$ 。

第 6 步 根据式(3)和式(4)更新已有路段集 A_s 和待建路段集 $\bar{A}_s$ 。

第 7 步 若 $s=S$,则停止排序,输出结果;否则,令 $s=$

$s+1$, $m=1$,返回第 2 步。

综上所述,新建不同路段均需重新求解下层规划模型,若令下层模型求解算法的复杂度为 $O(1)$,则在第 1 阶段上层规划模型求解算法的复杂度为 $nO(1)$,在第 2 阶段上层规划模型求解算法的复杂度为 $(n-j_1)O(1)$,以此类推,在第 S 阶段上层规划模型求解算法的复杂度为 $(n-j_1-\dots-j_{S-1})O(1)$ 。因此,城市道路建设时序决策优化模型求解算法的复杂度为:

$$nO(1) + (n-j_1)O(1) + \dots + (n-j_1-\dots-j_{S-1})O(1) \quad (21)$$

4 算例分析

为验证本文所建模型的有效性,给定一测试路网,如图 1 所示。图 1 中含 4 个 OD 对:(1,2),(1,3),(4,2)和(4,3),以及 13 个节点和 19 条路段。其中实线表示已有路段,共 15 条;虚线表示待建路段,共 4 条。

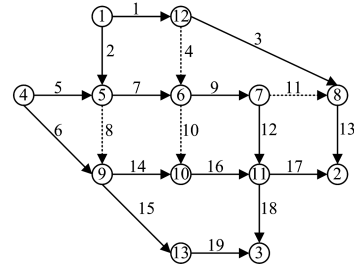


图 1 测试路网

Fig. 1 Test road network

在算例中,路段出行时间函数采用传统的 BPR 函数,有:

$$c_a(f) = c_a^0 \cdot [1 + 0.15 \cdot (\frac{f_a}{K_a})^4] \quad (22)$$

其中, c_a^0 为路段 a 上的自由流时间, K_a 为路段 a 上的最大通行能力,具体参数如表 1 所列。

表 1 路段出行时间函数参数

Table 1 Parameters of link travel time function

路段编号	自由流时间	最大通行能力	建设成本
1	9	400	—
2	7	800	—
3	14	400	—
4	7	200	60
5	9	200	—
6	12	800	—
7	3	350	—
8	8	300	90
9	5	800	—
10	13	200	90
11	9	400	100
12	9	300	—
13	15	550	—
14	10	550	—
15	9	600	—
16	6	700	—
17	9	500	—
18	8	300	—
19	11	600	—

为体现在需求不确定的情况下考虑灵敏度的城市道路建设时序决策优化结果更具鲁棒性,下文将对基于系统总出行时间、基于灵敏度和基于系统综合出行时间的 3 种决策优化模型进行比较分析。选取决策系数 $\beta=1$ 、 $\beta=0$ 和 $\beta=0.7$ 分别表示上述 3 种城市道路建设时序决策优化模型。假设路网

建设阶段数 $S=4$, 各阶段资金预算上限 $B_i=100$, 出行需求确定项 $d_{12}=400, d_{13}=800, d_{42}=600, d_{43}=200$, 各路径的初始流量为 0, 误差限值 $\sigma=0.01$, 参数 $\theta=1$ 。

表 2 3 种决策类型下的建设时序优化结果

Table 2 Optimal results of construction sequence under three decision types

建设阶段	基于系统总出行时间的决策优化模型		基于灵敏度的决策优化模型		基于系统综合出行时间的决策优化模型	
	新建路段	目标函数	新建路段	目标函数	新建路段	目标函数
1	8	83785	8	5430	8	60278
2	10	82034	11	3294	11	58732
3	11	81811	4	3198	10	58255
4	4	81848	10	3094	4	58222

由表 2 可知, 基于系统总出行时间、基于灵敏度和基于系统综合出行时间这 3 种决策优化模型均可寻找到各自目标最优的城市道路建设时序, 但由于三者的决策目标存在差异, 使得道路建设时序决策结果各不相同, 这反映了决策系数对道路建设时序决策的影响, 也从侧面体现了决策者风险偏好在城市道路建设时序决策过程中的重要作用。由图 2 可知, 基于系统总出行时间的道路建设时序在各建设阶段中的系统总出行时间均最优, 但其在各建设阶段中的灵敏度均大于或等于基于灵敏度和系统综合出行时间的道路建设时序, 这说明基于系统总出行时间的道路建设时序在各建设阶段中的系统总出行时间随需求扰动的变化有较大幅度的波动, 甚至可能超过另两种道路建设时序在各建设阶段中的系统总出行时间。为进一步验证该结论, 假设出行需求 $d_{12}(\epsilon), d_{13}(\epsilon), d_{42}(\epsilon)$ 和 $d_{43}(\epsilon)$ 分别在 $[400, 800], [800, 1000], [600, 800]$ 和 $[200, 600]$ 范围内扰动, 随机选取 1000 组不同出行需求组合, 并将其代入上述 3 种道路建设时序优化结果的模型中, 计算得出 1000 组不同的目标值并取其均值, 结果如图 3 所示。

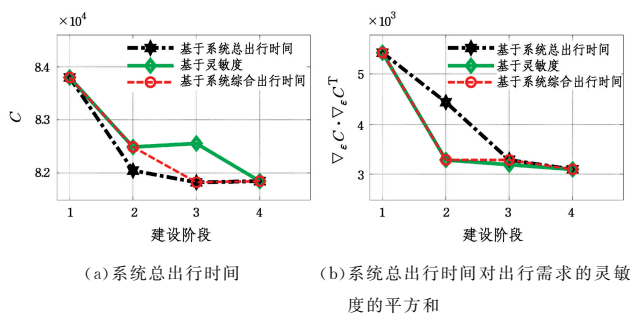


图 2 系统总出行时间和灵敏度变化曲线

Fig. 2 Changing curves of system total travel time and sensitivity

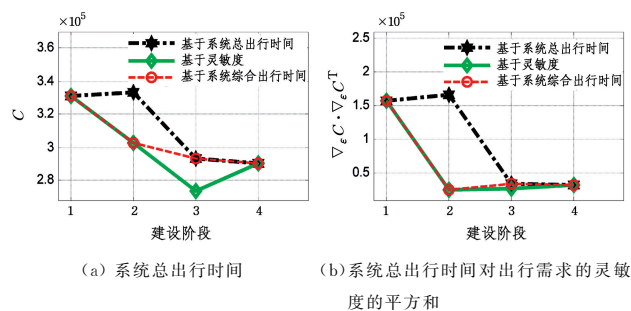


图 3 需求扰动下的系统总出行时间和灵敏度变化曲线

Fig. 3 Changing curves of system total travel time and sensitivity under demand perturbation

从图 3 可以看出, 在需求扰动的情景下基于灵敏度和系统综合出行时间的道路建设时序优化结果在系统总出行时间和灵敏度两方面均优于基于系统总出行时间的道路建设时序优化结果。比较图 2 和图 3 可以发现, 道路建设时序在各建设阶段中的灵敏度越高, 在需求扰动情景下的系统总出行时间的波动范围就越大。这也从侧面反映了基于系统总出行时间的道路建设时序的鲁棒性差于基于灵敏度和系统综合出行时间的道路建设时序, 体现了灵敏度在城市道路建设时序决策过程中的重要作用。

结束语 考虑到城市道路建设中资金预算的时段约束性和出行需求的不确定性, 本文以各建设阶段的系统总出行时间与灵敏度的综合出行时间最优作为上层规划, 以各建设阶段的随机用户均衡分配模型作为下层规划, 提出了在需求不确定的情形下的城市道路建设时序决策优化模型, 并对基于系统总出行时间、基于灵敏度和基于系统综合出行时间的 3 种决策优化模型进行了对比分析。结果表明: 基于系统总出行时间、基于灵敏度和基于系统综合出行时间的城市道路建设时序决策优化模型均可寻找到各自目标最优的建设方案; 相对基于系统总出行时间的建设方案而言, 基于灵敏度和系统综合出行时间的建设方案更具鲁棒性。因此, 在城市道路建设时序决策过程中考虑系统总出行时间对出行需求的灵敏度不仅具有重要的理论意义, 还具有广泛的实用价值。

本研究有助于提高城市道路建设时序决策的鲁棒性, 为交通网络设计提供较好的辅助决策支持, 但后续还有一些工作有待进一步开展, 例如, 如何考虑不确定因素对决策者风险偏好的影响以及如何简化灵敏度求解公式等, 都将是下一步工作的研究方向。

参考文献

- [1] GAO Y W. Sequencing the urban roads construction based on entropy weighting, grey relation analysis and TOPSIS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
高跃文. 基于熵-灰色关联-理想解法的城市道路建设时序规划研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [2] QI J D. Research on urban expressway construction sequence based on traffic network impact[D]. Changchun: Jinlin University, 2016. (in Chinese)
齐景东. 考虑网络交通影响的城市快速路建设时序研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [3] LIANG Y, CHEN Y Y, REN F T. Project order decision of road network planning basing on the component importance analysis [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(3): 284-287. (in Chinese)
梁颖, 陈艳艳, 任福田. 基于单元重要度分析的公路网规划项目建设序列论证[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(3): 284-287.
- [4] QIN J, NI L L, DONG L Y, et al. Bi-level programming model and algorithm for transportation network design problem considering sustainable development [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(4): 111-117. (in Chinese)
秦进, 倪玲霖, 董龙云, 等. 考虑可持续发展的交通网络设计双层模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(4): 111-117.

- [5] SONG X S, WANG X X, LI A Z, et al. Node importance evaluation method for highway network of urban agglomeration[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(2): 84-90. (in Chinese)
宋新生, 王啸啸, 李爱增, 等. 城市群区域公路网节点重要度评估方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(2): 84-90.
- [6] QU D Y, WANG W, DENG W. Order of item in the process of highway network planning based on AHP[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 64-68. (in Chinese)
曲大义, 王伟, 邓卫. 基于系统层次分析法的公路网规划项目建设序列论证[J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 64-68.
- [7] WANG Z B, CHEN Y Y, HAN D. Optimization method of project construction scheduling for intermodal hub[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(4): 899-903. (in Chinese)
王振报, 陈艳艳, 韩冬. 城市客运交通枢纽建设时序优化方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(4): 899-903.
- [8] JANACKOVIC G L, SAVIC S M, STANKOVIC M S. Selection and ranking of occupational safety indicators based on fuzzy AHP: A case study in road construction companies[J]. South African Journal of Industrial Engineering, 2013, 24(24): 175-189.
- [9] GUO Y Y, LIU P, WU Y. Construction sequence of urban rail transit system based on cumulative prospect theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 3(4): 29-35. (in Chinese)
郭延永, 刘攀, 吴瑶. 基于累计前景理论的城市轨道交通建设时序[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 3(4): 29-35.
- [10] GAO Y W, SHAO C F, DONG C J. Research on sequencing urban roads construction based improved TOPSIS[J]. Road Traffic & Safety, 2015(5): 6-12. (in Chinese)
高跃文, 邵春福, 董春娇. 基于改进理想解法的城市道路建设排序方法[J]. 道路交通与安全, 2015(5): 6-12.
- [11] ZHANG T, JIN J, SHEN L, et al. Decision method for urban rail transit construction scheme based on grey lattice order theory[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(10): 102-105. (in Chinese)
张桐, 金键, 沈犁, 等. 基于灰色格序决策理论的城市轨道交通建设项目时序确定方法[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 102-105.
- [12] KIM B J, KIM W, SONG B H. Sequencing and scheduling highway network expansion using a discrete network design model[J]. The Annals of Regional Science, 2008, 42(3): 621-642.
- [13] DENG L B, HUO L. Dynamic programming method of the item order optimal for transportation network design[J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(5): 45-51. (in Chinese)
邓连波, 霍亮. 交通网络建设序列的动态规划方法[J]. 运筹与管理, 2010, 19(5): 45-51.
- [14] YE Q, UKKUSURI S V. Resilience as an Objective in the Optimal Reconstruction Sequence for Transportation Networks[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2015, 7(1): 91-105.
- [15] SONG L Y, ZHANG W Y. Urban traffic organization with road blocking activities[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(2): 162-167. (in Chinese)
宋丽英, 张文义. 城市道路施工期间道路交通组织研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(2): 162-167.
- [16] LI X W. Quantitative analysis of traffic efficiency and its influencing factors[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
李晓蔚. 城市道路通行效率及其影响因素的量化分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [17] SUN Q, WANG Q Y, GAO Y L. Multi-period bi-level programming model for regional comprehensive transport network design with uncertain demand[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 111-116. (in Chinese)
孙强, 王庆云, 高咏玲. 不确定需求条件下多阶段区域综合交通网络设计的双层规划模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6): 111-116.
- [18] BIAN C Z, YU X X, LU H P. Multi-stage discrete network design under stochastic demand[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(4): 558-563. (in Chinese)
卞长志, 蔚欣欣, 陆化普. 随机需求多阶段离散交通网络设计[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 558-563.
- [19] CHENG L, LI X Y, XU T. Sensitivity analysis of user equilibrium network based on network decomposition and composition[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(2): 502-508. (in Chinese)
程琳, 李向阳, 徐婷. 基于网络分解与叠加的用户均衡网络敏感度分析[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(2): 502-508.
- [20] DU M, JIANG X, CHENG L. Estimating the Capacity of Urban Transportation Networks with an Improved Sensitivity Based Method[J]. Discrete Dynamics in Nature & Society, 2015, 2015: 1-13.
- [21] KUANG A W, HUANG Z X, ZHANG S. Stochastic assignment model based on generalized travel disutility under ATIS[J]. System Engineering, 2010, 28(10): 108-113. (in Chinese)
况爱武, 黄中祥, 张生. ATIS影响下基于广义出行负效用的随机分配[J]. 系统工程, 2010, 28(10): 108-113.
- [22] KAROONSOONTAWONG A, LIN D Y. Combined Gravity Model Trip Distribution and Paired Combinatorial Logit Stochastic User Equilibrium Problem[J]. Networks and Spatial Economics, 2015, 15(4): 1011-1048.