

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220613014

文章编号:1672-9331(2023)01-0121-08

引用格式:黄中祥,何禄舟,况爱武.考虑路径舒适性的连续道路网络设计[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):121-128.

Citation: HUANG Zhongxiang, HE Luzhou, KUANG Aiwu. Design of continuous traffic network considering route comfortability[J]. J. Changsha Univ. Sci. Tech (Nat. Sci), 2023, 20(1): 121-128.

# 考虑路径舒适性的连续道路网络设计

黄中祥<sup>1</sup>, 何禄舟<sup>1,2</sup>, 况爱武<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 451400)

**摘要:**【目的】基于出行者的舒适性偏好,探究考虑路径舒适性的连续型交通网络设计,拓展网络设计的相关理论,为交通规划与设计提供新思路。【方法】在现有路径舒适度不能直接叠加的情况下,重新定义路径舒适性并对其量化分析,将其转化为可叠加的舒适度成本;再以变分不等式的形式建立考虑舒适性择路准则的交通网络均衡分配模型;最后,建立考虑路径舒适性的网络设计双层规划模型,采用基于灵敏度分析的方法求解,并在一个小型测试网络上进行验证。【结果】以舒适度成本最小化为准则进行分配后得到的路径流量符合用户均衡原理,能使采用最优策略时的路网总阻抗最小。【结论】舒适性择路准则能合理地刻画舒适偏好出行者的路径选择行为,在交通网络设计中具有一定的实用性。

**关键词:**舒适性;交通网络设计;网络均衡;双层规划

**中图分类号:**U491.1

**文献标志码:**A

## 0 引言

交通网络设计是研究如何用最少的投资成本使网络中某项或某几项性能指标达到最优的投资决策问题。网络设计问题是典型的领导者和追随者问题。作为领导者的政府部门,为了实现在有限投资下路网总阻抗最小、通行效率最高、通行能力最大等目标,对路网进行改造,以充分使用城市交通网络的整体交通容量;而作为追随者的交通网络用户在使用交通网络的过程中,力图找到一条阻抗最小的路径,以便尽快地到达目的地。依据不同的决策变量,网络设计通常分为离散型、连续型和混合型3类。

国外对交通网络设计的研究起步较早,1979年,ABDULAAL等<sup>[1]</sup>提出了城市交通连续均衡网

络设计模型,以连续变量作为决策变量,以均衡流量约束表示网络中用户的路径选择行为,建立了双层规划模型,该模型为后续的研究奠定了基础。在上层模型的目标函数方面,HAAS等<sup>[2]</sup>以出行时间最小化和路网安全最大化为目标,建立了双层规划模型。LI等<sup>[3]</sup>研究了资源约束的单路径服务网络设计模型。DI等<sup>[4]</sup>研究了网络与需求的耦合效应,建立了相关模型处理可变车道的网络设计。黄中祥等<sup>[5]</sup>研究了在限速条件下考虑服务水平可靠性的连续均衡网络设计。在模型的求解上,冯雪松等<sup>[6]</sup>借鉴次优收费原理,设计了基于嵌套粒子群算法的对角化算法来求解所提出的双层规划模型。在路径分配方面,涂强等<sup>[7]</sup>考虑了路径出行时间的有界性和准时到达概率对出行者路径选择行为的影响,建立了变分不等式模型,并设计了基于路径的连续平均算法(method of successive

收稿日期:2021-12-27;修回日期:2022-06-27;接受日期:2022-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52978082);湖南省教育厅科学研究项目(20A023)

通信作者:黄中祥(1965—)(ORCID:0000-0002-5407-8845),男,教授,主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

E-mail:mehzx@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

algorithm, MSA)。贾洪飞等<sup>[8]</sup>分析了潮汐车道的设置条件与方向分布系数,从路网系统的角度建立了设置潮汐车道方案的双层规划模型。PYYANADAN等<sup>[9]</sup>量化了路径的安全性指标,以安全性为主要目标进行路径分配。在双层网络设计方面,姚佼等<sup>[10]</sup>提出了一种考虑不同类型应急车辆调度和最优路径选择的双层规划优化模型。陈学伟等<sup>[11]</sup>针对不确定环境下的交通网络应急防护问题,构建了同时考虑资金预算、旅行时间可靠性和灾后路段通行能力等约束的双层规划模型。WANG等<sup>[12]</sup>考虑了土地利用与可达性的关系,提出了一种考虑土地利用的离散型网络设计模型。

在已有的网络设计模型研究中,大多数学者采用用户均衡模型或随机用户均衡模型刻画下层用户的出行路径选择行为,还有部分学者将出行时间的可靠性高作为驾驶员选择路径的准则对流量进行分配,这两者都将路径出行时间作为刻画出行行为的主要变量。另有一些研究以路网的安全性高作为用户的路径选择准则,以路径的安全性最大为目标对流量进行分配。在实际的出行中,驾驶员的出行偏好是影响其进行路径选择的关键因素,一部分驾驶员追求出行的快捷性,另一部分驾驶员则更关注出行的舒适性。目前,考虑驾驶员的路径舒适性偏好的网络设计研究较少。鉴于此,本研究对考虑路径舒适性的连续网络设计问题进行了较全面的分析。

## 1 路径舒适性影响因素分析

本研究将路径舒适性定义为驾驶员对行驶性能的直观感受,其由道路的路面质量、道路景观、道路线形和自由行驶机会等共同决定。其中,路面质量包括路面的强度、平整度、粗糙度、抗滑指数和耐久性等方面。在行驶过程中,受道路质量影响所出现的摇晃、颠簸等会给驾驶者带来不适,降低出行的舒适性。道路景观是指道路的周边环境,如绿化、照明等,这些会影响驾驶员的心情和感受。道路线形是指构成行驶路径的各种直线段和曲线段,合理的线形搭配能降低驾驶员的心理

负担。自由行驶机会指的是驾驶员的行驶自由度,同一道路上同时行驶的车辆数量越少,驾驶难度越低,驾驶员越轻松,脑力负荷越小;而当同一道路上同时行驶的车辆较多时,驾驶员需要集中精力,时刻注意周边的驾驶环境,驾驶难度较高,脑力负荷也较大,驾驶员容易感到不适。

在本研究定义的路径舒适性的概念中,路面质量、道路景观和道路线形等因素是道路基础设施的固有属性,不受交通流量变化的影响,无法反映驾驶员的路径选择行为。本研究主要考虑自由行驶机会这一因素对路径舒适性的影响,故选取道路的拥挤程度和路径复杂程度这两个指标对路径舒适性进行量化,用舒适度成本度量出行者在所选路径上行驶时所产生的不适程度。在舒适性择路机制下,驾驶员总是希望所选路径的舒适性更好,即所选路径的舒适度成本更低。

道路拥挤程度由该路段的交通量决定,在路段通行能力范围内,交通量越大,其饱和度越大,道路越拥挤,驾驶员不适感越强。路段的舒适性随着路段饱和度的增加而降低。本研究将道路舒适度成本定义为段路流量的一元严格单调递增函数,具体表达式为:

$$T(f_a) = F\left(\frac{f_a}{c_a + y_a}\right) \quad (1)$$

式中: $T(f_a)$ 为路段 $a$ 的拥挤度成本; $f_a$ 为路段 $a$ 的流量; $c_a$ 为路段 $a$ 的容量; $y_a$ 为路段 $a$ 的容量增加量。

一般情况下,驾驶员在通过交叉口时,需要投入更多注意力来应对复杂的道路交通环境,故行驶路径包含的交叉口数量越少,驾驶难度越低,舒适性越好,舒适度成本越低。反之,行驶路径包含的交叉口数量越多,驾驶难度越高,舒适性越差,舒适度成本越高。本研究构造一个复杂度成本函数来度量路径舒适度成本中路径复杂程度的影响,该函数是所选路径交叉口数量的一元严格单调递增函数,具体表达式为:

$$M(k) = 0.2k \quad (2)$$

式中: $M(k)$ 是路径 $k$ 的复杂度成本。

路段的拥挤程度不具备可加性,因此,不能用其来度量路径的拥挤程度。本研究重新定义某段路径的拥挤度成本为该路径包含的所有路段的拥挤度成本中的最大值。因此,从起点 $i$ 到终点 $j$ 的

交通出行量(origin-destination, OD)综合考虑拥挤度成本和复杂度成本的路径 $k$ 的舒适度成本 $C_k^i$ 的表达式为:

$$C_k^i = \rho \cdot \max \{ T(f_a) \cdot \delta_{a,k}^i \mid a \in A \} + (1 - \rho) \cdot M(k) \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为路径拥挤度成本与路径复杂度成本两者相对于舒适度成本的权重系数, $0 < \rho < 1$ ;  $A$ 为所有路段的集合; $\delta_{a,k}^i$ 为路段-路径的关联变量,若从起点 $i$ 到终点 $j$ 的路径 $k$ 经过路段 $a$ ,则其值为1,否则为0。

## 2 考虑路径舒适性的连续型网络设计模型

### 2.1 舒适性择路机制下的网络均衡模型

在舒适性择路机制下,驾驶员不考虑出行时间的长短,仅考虑路径的舒适性,以舒适性成本最小为路径择路准则。当网络达到均衡状态时,某一个OD对之间所有的路径都具有相等且最小的舒适度成本。换言之,没有任何一位驾驶员能通过变更路径的方式来减小舒适度成本。其对应的网络均衡条件为:

$$\begin{cases} C_k^i - \mu_{ij} < 0, h_k^i > 0 \\ C_k^i - \mu_{ij} \geq 0, h_k^i = 0 \end{cases}, i \in I, j \in J, k \in K_{ij} \quad (4)$$

式中: $\mu_{ij}$ 为从 $i$ 点到 $j$ 点路径的最小舒适度成本; $h_k^i$ 为路径 $k$ 上的流量; $I$ 为起始点的集合; $J$ 为终点的集合; $K_{ij}$ 为网络中从 $i$ 点到 $j$ 点的路径 $k$ 的集合。

由均衡条件(4)建立基于舒适性的网络均衡模型,寻找平衡路径流量 $h^*$  ( $h^* \in \Omega$ ),得到变分不等式:

$$C(h^*)^T (h - h^*) \geq 0, \forall h \in \Omega \quad (5)$$

$$\Omega = \{ h \mid \Delta \cdot h = q, h \geq 0 \} \quad (6)$$

$$f_a = \sum_i \sum_j \sum_k h_k^i \cdot \delta_{a,k}^i, \forall a \in A, i \in I, j \in J, k \in K_{ij} \quad (7)$$

式中: $C(h^*)$ 为路径阻抗向量的舒适度成本函数; $h$ 为路径流量; $\Omega$ 为路径流量集; $q$ 为OD对之间的需求量; $\Delta$ 为OD对中路径的关联矩阵。

### 2.2 网络设计双层规划模型

采用双层规划模型构建考虑舒适性的连续网络设计模型。其中,上层规划模型以系统总阻抗与投资成本之和最小为目标函数,下层规划模型采用舒适性择路机制下的网络均衡模型。

考虑一个单OD对的强连通网络, $q_{ij}$ 为从起点 $i$ 到终点 $j$ 的需求量; $h$ 为路径流量的向量表示; $f$ 既是路段流量,也表示下层模型的决策变量; $y$ 既是路段流量的增加量,也是上层模型的决策变量; $T_a(f_a(y), y_a)$ 为路段 $a$ 的阻抗成本函数; $G_a(y_a)$ 为路段 $a$ 在通行能力增加量为 $y$ 时的投资成本函数; $i$ 表示起始点, $i \in I$ ;  $j$ 表示终点, $j \in J$ ;  $\theta$ 为匹配投资费用与出行费用的系数。在固定需求下城市交通连续平衡网络设计的双层规划模型为:

(U)

$$\min Z = \sum_{a \in A} T(f_a(y), y_a) \cdot f_a(y) + \theta \sum_{a \in A} G_a(y_a) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } y_a \geq 0, \forall a \in A \quad (9)$$

其中, $f_a(y)$ 由变分不等式模型求出,即寻找平衡路径流量 $h^*$ ,使在所有的 $h \in \Omega$ 的情况下,式(10)~(12)成立:

(L)

$$C(h^*)^T (h - h^*) \geq 0 \quad (10)$$

$$\Omega = \{ h \mid \Delta \cdot h = q, h \geq 0 \} \quad (11)$$

$$f_a = \sum_i \sum_j \sum_k h_k^i \delta_{a,k}^i, \forall a \in A \quad (12)$$

### 2.3 模型的求解

双层规划模型的求解方法可分为极点搜索法、库恩-塔克法、下降法、直接搜索法和启发式算法5大类。其中,极点搜索法和库恩-塔克法主要用于求解线性双层规划模型,不能求解本研究提出的非线性双层规划模型。启发式算法中的遗传算法不能求出各个路段容量增加量的具体值,也不适合求解本研究问题。

针对本研究提出的城市交通连续平衡网络设计问题的广义双层规划模型,考虑到下层变分不等式模型无法准确得到下层问题对上层决策变量梯度信息的情况,本研究采用基于灵敏度的双层线性近似算法(bi-level linear approximation based on difference, BLABD)进行求解。该算法对小型网络的求解速度较快,收敛精度较高,计算量也较小。

对于考虑舒适性择路准则的下层变分不等式模型,可采用MSA进行求解。MSA的步骤为:

step 0: 初始化。计算各路段流量为零时的路径舒适度成本,按照舒适度成本最小化准则执行



一次0-1分配,得到各路径的交通流量,进而得到各路段的分配交通量 $\{f_n\}$ ,令 $n=1$ ;

step 1:更新路段拥挤度成本 $T(f)$ ,计算路径舒适度成本 $C_k^y$ ;

step 2:按照 step 1 计算出的舒适度成本 $\{C_k^y\}$ 和OD需求量,再执行一次0-1分配,得到一组附加的交通量 $\{l_i\}$ ;

step 3:计算各路段的交通量: $f_{n+1} = f_n + \varphi(l_n + f_n)$ ,  $0 \leq \varphi \leq 1, \forall a \in A$ ,  $\varphi$ 取 $1/n$ ;

step 4:如果 $f_{n+1}$ 与 $f_n$ 的差值小于预设的收敛精度(通常取为 $10^{-3}$ ),则停止计算, $\{f_{n+1}\}$ 即为最终结果;否则令 $n=n+1$ ,转入 step 1。

双层规划模型的求解,重点是在满足约束条件的情况下,求解路段通行能力的增加引起的路段平衡流量的变化。采用基于灵敏度分析的BLABD算法求解。

该算法思路如下:考虑到连续型网络设计问题中每一条路段的平衡流量都是由网络中所有路段通行能力的增加量共同决定的,即 $f_a = f_a(y)$ 。因此,当求出任一条路段 $a$ 上的通行能力增加量 $\Delta y_a$ ,及整个网络中任意路段 $b$ 上的平衡流量的变化量 $\Delta f_b(y)$ 时,则作为导数近似值的差商为 $\Delta f_b(y)/\Delta y_a$ 。

设 $y'$ 为路段容量增加的初始值, $f_a(y')$ 为相应的平衡路段流量(由下层问题求出),则有:

$$f_a(y) \approx f_a(y') + \sum_{i \in A} \left( \frac{\Delta f_a(y)}{\Delta y_i} \right) (y_i - y_i') \quad (13)$$

将式(13)代入到上层规划中,则上层规划转化为以路段容量增加量为自变量的普通非线性优化问题,可用迭代法求解。即先从上层规划求出最优解(新路段的容量增加值);再求解下层规划,可以得到下一轮的路段平衡流量;重复以上过程,又得到一组新的路段容量增加值,一直迭代直至得到收敛于双层规划模型的近似最优解。具体步骤为:

step 0:初始化,计算差商 $\Delta f_i(y)/\Delta y_i$ ;

step 1:设定一个路段容量增加量的初始解 $y_0$ ,令迭代次数 $k=0$ ;

step 2:对于给定的 $y_k$ ,求解下层问题,得到平衡路段流量 $f_k$ ;

step 3:计算式(13),将结果代入到上层函数中,再次求解上层规划,得到一组新的路段容量增加值 $y_{k+1}$ ;

step 4:收敛性判断。如果 $\forall a \in A, \max |y_{a,k+1} - y_{a,k}| \leq \sigma$ ,则停止,其中 $\sigma$ 为预设的收敛精度;否则,令 $k=k+1$ ,转向 step 2。

### 3 算例与分析

构造一个简单网络,测试该模型及算法的有效性,网络如图1所示。从图1可看出,该道路网络是一个小型单OD对网络,网络中含4个节点,5条路段,共3条可选路径。OD对之间的需求量为100,收敛精度设为 $10^{-3}$ 。路段容量参数 $c$ 、投资系数 $\theta$ 等参数见表1。在该算例中,道路拥挤程度和路径复杂程度的相关系数 $\rho$ 取为0.5。

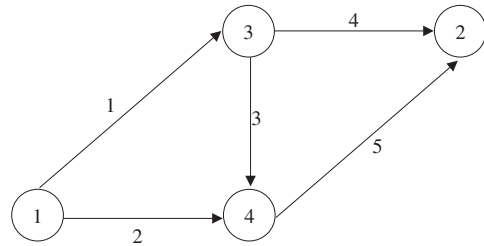


图1 算例网络示意图

Fig. 1 Illustration of example network

表1 算例模型参数值

Table 1 The parameters values of example model

路段	$c/(\text{辆} \cdot \text{h}^{-1})$	$\theta$
1	30	0.25
2	40	0.35
3	60	0.40
4	35	0.30
5	35	0.30

上层目标函数 $Z$ 的表达式为:

$$Z = \sum_{a \in A} t_a(f_a, y_a) f_a + \theta \sum_{a \in A} G_a(y_a) \quad (14)$$

式中:投资成本函数 $G_a(y_a)$ 为:

$$G_a(y_a) = g(y_a) \quad (15)$$

下层舒适度成本函数同式(3)。

#### 3.1 结果分析

在MATLAB软件上编写求解双层规划模型的

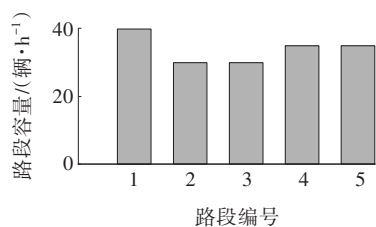
BLABD 算法程序。主程序求解路段容量的增加量,子程序对下层模型的流量进行分配。算例结果显示:在迭代458次后,程序达到了收敛条件,得到各路段所需增加的容量。

将原始路网的均衡状态与扩容后的进行对比,结果见图2~3。从图2~3可看出:

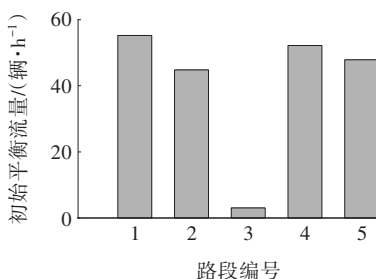
1) 在未对路网容量扩充前,在容量无限制的条件下,路网达到均衡状态时,除路段3的其余4条路段流量均已超过了其自身的容量,必须扩充路段容量。

2) 当路段拥挤度成本与复杂度成本对路径舒适性影响相同时,路段3是被选择最少的路段,说明出行者更愿意在简单道路上行驶。

3) 路段1和路段5的增加量要高于路段2和路段4的,因此,路段1和路段5是该网络中被用户选择较多的路段,路径1上的一部分流量发生了转移。



(a) 扩容前不同路段容量



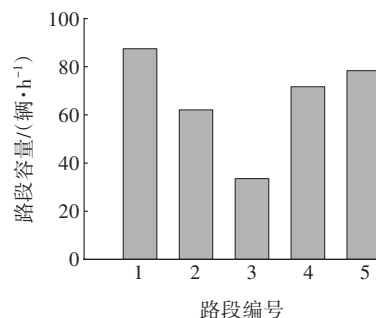
(b) 扩容前不同路段初始平衡流量

图2 扩容前路网均衡状态

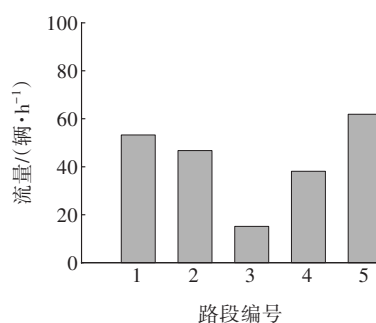
Fig. 2 The balancing state of road network before capacity expansion

4) 在对路网容量进行扩充后,出行者的路径选择更多样化;当路网达到均衡状态时,计算扩容后路网均衡状态下的各路径阻抗,3条路径的舒适度成本分别为2.016、2.020和2.017,其流量分配结果符合Wardrop第一原理,即有流量的路径具有最

小且相等的阻抗,在阻抗大于或等于最小阻抗的路径上,其流量为零,符合模型假设。



(a) 扩容后不同路段容量



(b) 扩容后不同路段流量

图3 扩容后路网均衡状态

Fig. 3 The balancing state of road network after capacity expansion

最终扩容后的路段容量与平衡路段流量见表2。我国交通部门一般根据路段的饱和度值对道路服务水平进行划分。按照此种划分标准,当前路网中的路段都属于服务水平较高的路段,出行舒适性较好。此时,目标函数值为4 905.1。

表2 扩容后的路段容量与流量结果

Table 2 Model results of road capacity and flow after capacity expansion

路段	$l/(辆 \cdot h^{-1})$	$c/(辆 \cdot h^{-1})$	饱和度
1	55.23	87.49	0.63
2	44.77	62.11	0.72
3	15.14	33.55	0.45
4	38.09	71.66	0.53
5	61.91	78.39	0.78

### 3.2 敏感性分析

#### 3.2.1 拥挤程度与复杂程度

在考虑路径舒适性的连续型网络设计模型

中,下层模型的择路准则受拥挤度成本与复杂度成本两个因素的共同影响。本文假定拥挤度成本与复杂度成本相等,即两者权重相等。以下讨论该权重的影响。

当拥挤度成本对路径舒适性影响较大,复杂度成本对路径舒适性影响较小时,取模型中的权重系数 $\rho=0.7$ ,此时拥堵更易导致不适感,计算当前路网的平衡状态,得到流量分配结果,见表3。

由表3可知,当权重系数为0.7时,路段3的流量要高于权重系数为0.5时的,即出行者从较拥挤的路径转而选择较复杂的路径,以路径的复杂成本来取代路径的拥堵成本,这与实际情况一致,说明模型是合理的。

表3 路段容量与流量分配结果

Table 3 Distributing results of road capacity and flow

路段	$q/(\text{辆}\cdot\text{h}^{-1})$	$c/(\text{辆}\cdot\text{h}^{-1})$	饱和度
1	57.43	85.72	0.67
2	42.57	57.53	0.74
3	20.53	35.42	0.58
4	36.90	69.64	0.53
5	63.10	83.13	0.76

### 3.2.2 交通需求

在考虑路径舒适性的交通网络设计中,采用了固定需求下的双层规划模型。本算例的出行需求量为100。以下讨论在不同需求下,整个路网的运行状态。

① 当交通需求量低于设置的固定需求量,即路网处于低需求时,假设交通需求量为80,重新计算路网的交通流量。通过计算,得到网络均衡时的流量状态,其中,路段1、2、3、4、5上分配的流量分别为45.56、34.44、5.30、40.26和39.74辆/h。此时路网上各条路段均处于较舒适的水平,路径1、2、3上的舒适度成本分别为1.814、1.821和1.815,目标函数值为4 021.5。

② 当交通需求量高于设置的固定需求量,即路网处于高需求时,假设交通需求量为120,重新计算路网的交通流量。通过计算,得到网络均衡时的流量状态,其中,路段1、2、3、4、5上分配的流量分别为69.37、50.63、11.07、58.29和61.71辆/h。除路段3外,其他路段的舒适饱和度均处于临界值,路径1、2、3上的舒适度成本分别为2.462、

2.511和2.461,目标函数值为6 429.7。

通过对比以上结果可以得出:① 在对路段容量进行扩充后,不同需求条件下的流量分配结果是不同的。在低需求情况下,路网整体的舒适性较好,但并未完全发挥出最优的扩容策略;在高需求情况下,路网也可达到均衡状态,但会增加一部分舒适度成本,此时的路网状态不是最优策略。② 交通需求增加后,流量未出现较大程度转移,即用户的路径选择行为并未发生明显改变,新增的出行需求仍按舒适性择路准则选择路径。

## 4 讨论

本研究主要探讨考虑路径舒适性的连续网络设计问题,量化路径的舒适度成本,构造路径舒适性函数模型,并将其应用到用户均衡条件中,建立考虑路径舒适性的网络设计双层规划模型,并通过灵敏度分析方法对其进行求解。

本研究基于路网中的所有用户都可以获得完备路网信息的假设,以舒适性好作为路径决策准则。但在实际中,由于驾驶员的出行目的各不相同,路径选择偏好也不尽相同,并非所有驾驶员都以出行舒适性作为路径选择准则,同时,也未必所有驾驶员都能获得完备的路网信息。因此,在后续的研究中,将考虑对驾驶员进行分类,更精确地刻画驾驶员的出行行为,使得交通网络设计方案更切合实际的复杂交通系统。

## 5 结论

本研究采用双层规划的方法进行建模分析,提出以舒适性好作为路径决策准则,为交通网络设计提供新的思路和方向。在进行流量分配后,发现驾驶员的出行行为遵循用户均衡原理,与实际的路径选择一致,该研究结果可为研究用户出行行为提供参考。

### 〔参考文献〕

- [1] ABDULAAL M, LEBLANC L J. Continuous equilibrium

- network design models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1979, 13(1): 19–32.
- [2] HAAS I, BEKHOR S. Network design problem considering system time minimization and road safety maximization: formulation and solution approaches[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2017, 13(9): 829–851. DOI: 10.1080/23249935.2017.1345998.
- [3] LI X Y, DING Y, PAN K, et al. Single-path service network design problem with resource constraints[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 140: 101945. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101945.
- [4] DI Z, YANG L X. Reversible lane network design for maximizing the coupling measure between demand structure and network structure[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 141: 102021. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102021.
- [5] 黄中祥,王涛,覃定明. 限速条件下考虑服务水平可靠性的连续均衡网络设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(1): 31–36.  
HUANG Zhongxiang, WANG Tao, QIN Dingming. A continuous equilibrium network design problem considering level of service reliability under speed limit [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(1): 31–36.
- [6] 冯雪松,张路凯. 基于双层规划的危险货物高速公路运输网络收费[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 710–715, 750. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19307.  
FENG Xuesong, ZHANG Lukai. Tolling of expressway transportation networks for hazardous materials based on bi-level programming[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(5): 710–715, 750. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19307.
- [7] 涂强,程琳,孙超,等. 截断随机出行时间下可靠网络均衡模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 175–181. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.01.023.  
TU Qiang, CHENG Lin, SUN Chao, et al. Reliability-based network equilibrium model with truncated stochastic travel time[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 175–181. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.01.023.
- [8] 贾洪飞,丁心茹,杨丽丽. 城市潮汐车道优化设计的双层规划模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(2): 535–542. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180790.  
JIA Hongfei, DING Xinru, YANG Lili. Bi-level programming model for optimization design of tidal lane [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 535–542. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180790.
- [9] PAYYANADAN R P, SANCHEZ F A, LEE J D. Assessing route choice to mitigate older driver risk[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(3): 527–536. DOI: 10.1109/TITS.2016.2582513.
- [10] 姚佼,邵楚薇,鲍雨婕,等. 基于双层规划模型的应急救援调度与路径选择集成优化[J]. 公路交通科技, 2021, 38(6): 149–158. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.06.019.  
YAO Jiao, SHAO Chuwei, BAO Yujie, et al. Bi-level programming model based integrated optimization of emergency rescue scheduling and route selection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(6): 149–158. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.06.019.
- [11] 陈学伟,秦进,周颖靓. 不确定环境下交通网络应急预防优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1307–1315. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200623.  
CHEN Xuewei, QIN Jin, ZHOU Yingliang. Optimization of transportation network emergency prevention in uncertain environments[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1307–1315. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200623.
- [12] WANG Z Q, HAN Q, DE VRIES B. Land use oriented bi-level discrete road network design[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 37: 35–42. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.163.

## Design of continuous traffic network considering route comfortability

HUANG Zhongxiang<sup>1</sup>, HE Luzhou<sup>1,2</sup>, KUANG Aiwu<sup>1</sup>

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 451400, China)

**Abstract:** [Purposes] This paper explores the design of continuous traffic network considering route comfortability based on traveler's comfort preference, and expands the relevant theories of network design which can provide new ideas for traffic planning and design. [Methods] In the condition that the route comfortability cannot be directly superimposed, the route comfortability was transformed into a superimposed comfort cost through the method combining quantitative analysis and qualitative definition. Then, a balanced distribution model of the transportation network was established in the form of variational inequality considering the comfort criterion. Therefore, a bi-level programming model for network design considering route comfortability was constructed and estimated through the method based on sensitivity analysis, also this model was verified by a small test. [Findings] The path flow allocated by minimizing the comfort cost complies with the principle of user balancing, and the total impedance of road network is the minimum when the optimal strategy is adopted. [Conclusions] The criterion of comfort route selection mechanism can reasonably describe the route selection behavior of travelers with comfort preference, which has certain practicality in traffic network design.

**Key words:** comfortability; traffic network design; network balancing; bi-level programming

---

**Manuscript received:** 2021-12-27; **revised:** 2022-06-27; **accepted:** 2022-07-28

**Foundation item:** Project (52978082) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (20A023) supported by Hunan Provincial Department of Education Scientific Research

**Corresponding author:** HUANG Zhongxiang (1965—) (ORCID: 0000-0002-5407-8845), male, professor, research interest: transportation planning and management. E-mail: mehzx@126.com

(责任编辑:李脉;校对:石月珍;英文编辑:邢璐)