

文章编号:1671-1637(2012)04-0075-08

## 城市道路最大出行距离计算模型

龙雪琴,关宏志,秦焕美

(北京工业大学 交通工程北京市重点实验室,北京 100124)

**摘要:**为了合理体现交通事故延误对出行者路径选择的影响,提出了随机状态下的交通事故时间延误模型。将交通事故的随机性、持续时间和道路通行能力等不确定性因素引入到交通分配模型中,并对路径选择模型进行修正。分析了各等级道路最大适宜出行范围,根据修正的路径选择模型,采用逐次交通分配方法,得到各等级道路的出行周转量和出行距离,并与不考虑交通事故延误时的出行距离进行了对比分析。分析结果表明:当考虑交通事故延误时,支路、次干路、主干路、快速路的最大出行距离分别为2.000、2.946、4.054、5.963 km;当不考虑交通事故延误时,支路、次干路、主干路、快速路的最大出行距离分别为2.000、3.000、6.000、10.000 km;交通事故延误是影响出行者路径选择的重要因素;当考虑交通事故延误时,高等级道路的最大出行距离变小。相比于传统的路径选择模型,本文模型更优。

**关键词:**交通规划;出行范围;出行距离;路径选择模型;交通事故延误模型;交通分配

**中图分类号:**U491.1

**文献标志码:**A

## Calculation model of maximum travel distance on urban road

LONG Xue-qin, GUAN Hong-zhi, QIN Huan-mei

(Key Lab of Transportation Engineering of Beijing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to reflect the influence of traffic accident delay on route choice for traveler reasonably, traffic accident delay model under random state was put out. The uncertain factors of traffic accident such as randomness, duration and road capacity were introduced into traffic assignment model, and the route choice model was modified. The maximum preponderant travel range of each grade road was analyzed. According to the modified route choice model, successive traffic assignment method was adopted. The turnovers and travel distances of all grade roads were got, and the travel distances were compared with the travel distances while traffic accident delay was not considered. Analysis result shows that while traffic accident delay is considered, the maximum travel distances of brunch, secondary primary road, main road and expressway are 2.000, 2.946, 4.054 and 5.963 km respectively. While traffic accident delay is not considered, the maximum distances of those roads are 2.000, 3.000, 6.000 and 10.000 km respectively. Traffic accident delay is the significant factor for traveler route choice. While traffic accident delay is considered, the maximum travel distances of higher grade roads decrease. Compared with the conventional route choice models, the proposed model is better. 6 tabs, 3 figs, 23 refs.

**Key words:** traffic planning; travel range; travel distance; route choice model; traffic accident delay model; traffic assignment

收稿日期:2012-01-04

基金项目:国家973计划项目(2012CB725403);北京市自然科学基金项目(8102007)

作者简介:龙雪琴(1982-),女,湖北钟祥人,北京工业大学工学博士研究生,从事道路交通规划研究。

导师简介:关宏志(1959-),男,黑龙江牡丹江人,北京工业大学教授,工学博士。

**Author resumes:** LONG Xue-qin(1982-), female, doctoral student, +86-10-67396182, xueqinangel@163.com; GUAN Hong-zhi(1959-), male, professor, PhD, +86-10-67391980, hguan@bjut.edu.cn.

## 0 引 言

不同等级的道路具有不同的功能和通行条件,出行者对各等级道路的优先选择顺序会有所不同,例如在较长距离的出行时,出行者会优先选择高等级(如城市快速路)道路。各等级道路承担的出行距离是城市路网合理配置研究的基础,是各等级道路资源合理配置的重要依据。随着城市交通事故率的上升,由交通事故导致的交通拥堵现象频繁发生,交通事故延误也越来越严重地影响到了出行者路径选择行为。

国内部分学者研究了城市机动车的各等级道路出行距离。牛学勤等通过实地调查得到了各等级道路的出行距离分布规律,发现高等级道路主要承担长距离出行<sup>[1]</sup>;颜敏对影响机动车出行距离的因素进行了定性分析,指出城市形态、交通方式等是影响居民出行距离的重要因素,并建立了各影响因素与出行距离的函数关系模型<sup>[2]</sup>;陈尚云等通过调查统计和理论推导得到了不同类型城市的机动车出行距离分布模型,并根据调查结果对模型参数进行了标定,为出行距离研究提供了理论支持<sup>[3-4]</sup>;樊大可将交通出行分为3类,每类出行对应不同的出行距离与不同等级的道路,并绘制了出行距离与出行量的对应关系图<sup>[5]</sup>;周文竹等根据各等级道路承担不同出行距离的交通功能的特点,探讨了各等级道路承担的出行距离规律,并建立了各等级道路的出行距离分布模型<sup>[6]</sup>;董红利等分别从时间角度和距离角度出发,根据各等级道路的出行优先级别,推导了各等级道路的最大和最小优势出行距离<sup>[7-8]</sup>。

在事故延误的研究方面,Nam等基于风险理论和排队论模型,研究了交通事故持续时间,发现交通事故持续时间呈正态分布,并与诸多因素有关<sup>[9-10]</sup>;Fu根据模糊排队论,在考虑车辆到达和离开、事故持续时间等不确定性因素的基础上,提出了交通事故延误时间预测模型<sup>[11]</sup>;Sheu等引入离散非线性随机模型,融合卡尔曼滤波算法,提出了事故延误的实时预测模型和排队长度模型,并进行了仿真计算<sup>[12]</sup>;Li等考虑了交通事故的随机性,运用排队论模型研究了随机状态下交通事故的时间延误,提出了平均延误模型、标准差延误模型和总延误模型,并对上述3个模型进行了比较分析<sup>[13]</sup>;Boyles等考虑了事故持续时间的不确定性,提出了事故延误时间均值模型,并采用

蒙特卡罗方法仿真模拟了4种交通需求状况下的事故延误时间<sup>[14]</sup>。

从以上分析可以看出,在关于出行距离的研究方面,上述研究考虑了道路的功能、交通方式、出行量与出行者出行特点,但均以理想路网为研究对象,并未考虑道路交通事故所产生的延误对驾驶人路径选择的影响;在关于交通事故延误的研究中,上述研究大多是结合实际和理论推导,提出了交通事故延误模型,但未考虑交通事故的随机性与道路通行能力的不确定性。本文根据已有的研究结论和方法,分析各等级道路的优先选择顺序,对路径选择模型进行完善,确定各等级道路的最大适宜出行范围;在考虑交通事故的概率、通行能力和事故持续时间等不确定因素的基础上,建立交通事故时间延误模型,结合正常状态下的行程时间对路径选择模型进行修正;通过对各等级道路最大适宜出行范围内的路网进行逐次交通分配,得到各等级道路的最大出行距离。

## 1 基本路网概念

### 1.1 构造路网

为了便于分析,本文假设城市路网为规则的方格状,快速路中间布设一定数量的主干路、次干路和支路,主干路中间布设一定数量的次干路和支路,且同级道路东西向和南北向距离相等,由低等级道路到高等级道路再经低等级道路逐次进行,中间没有跨等级穿越。

令 $i$ 等级道路之间的平均间距为 $d_i$ , $i$ 为1~4分别表示支路、次干路、主干路、快速路,根据《城市道路交通规划设计规范》(GB 50220—95)设定道路间距,路网布局见图1。在图1中:两条支路所围区域的中心为路网中心; $A_1$ 和 $A_2$ 分别为中心区域左上角和右下角中支路和次干路所围区域的中心点; $B_1$ 和 $B_2$ 分别为中心区域左上角和右下角中距离中心区域最近的次干路和主干路所围区域的中心点; $F_1$ 和 $F_2$ 分别为中心区域左上角和右下角中次干路和快速路所围区域的中心点;节点1和节点16分别为距离路网中心最近的次干路所围路网的左上角节点和右下角节点;节点2和节点36分别为距离路网边界最近的次干路所围路网的左上角节点和右下角节点;节点3和节点64分别为整个路网的左上角节点和右下角节点。本文以此路网单元为对象,研究此出行区域内的

各等级道路出行距离。

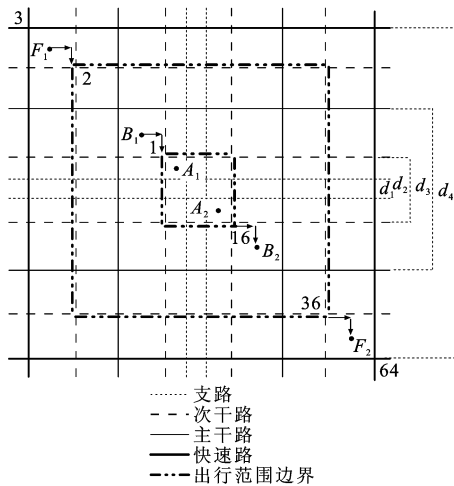


图1 城市路网

Fig. 1 Urban road network

## 1.2 最大适宜出行范围

出行者各等级道路的最大出行距离必然包含在其最大出行范围内,因此,有必要首先确定各等级道路最大适宜出行范围,然后通过研究各等级道路最大适宜出行范围内的出行状况,进一步得到各等级道路最大出行距离。

每个等级道路的可能出行距离均为无穷大,但是考虑到交通便利性,如果在出行范围内有更高等级道路存在,那么此等级道路被选择的优先级降低,即此等级道路不再是最优先被利用的道路,因此, $i$ 等级道路最大适宜出行范围应为 $i+1$ 等级道路所包围的区域,即支路的最大适宜出行范围为次干路所包围的区域,体现为图1中点 $A_1$ 与点 $A_2$ 所构成的区域。同理,次干路、主干路与快速路最大适宜出行范围分别为点 $B_1$ 与点 $B_2$ 、点 $F_1$ 与点 $F_2$ 和整个路网(节点3与节点64)所构成的区域。

## 1.3 出行周转量计算方法

对于支路最大出行范围内的出行距离,不论出行者选择哪一条路径,从点 $A_1$ 至点 $A_2$ 的出行距离 $D_1$ 始终为

$$D_1 = 2d_1 + d_2 - d_1 = d_1 + d_2$$

设该路网OD点对之间的交通量为 $Q_1$ ,则支路上的出行周转量 $Z_1$ 为

$$Z_1 = Q_1 D_1 = Q_1 (d_1 + d_2)$$

次干路最大出行范围内的点 $B_1$ 至点 $B_2$ 的出行过程,可分解为点 $B_1$ 与节点1、节点1与节点16、节点16与点 $B_2$ 三段。设点 $B_1$ 与点 $B_2$ 之间的交通量为 $Q_2$ ,则点 $B_1$ 与节点1的出行中次干路的周转量 $Z_2$ 和节点16与点 $B_2$ 的出行中次干路的出行周转量 $Z_3$

均为

$$Z_2 = Z_3 = Q_2 (d_3 - d_2) / 4$$

节点1与节点16之间的各等级道路出行周转量由节点1与节点16次干路所围路网进行交通分配获得。设点 $F_1$ 与点 $F_2$ 之间的交通量为 $Q_3$ ,则点 $F_1$ 与节点2的出行中次干路的周转量 $Z_4$ 和节点36与点 $F_2$ 的出行中次干路的出行周转量 $Z_5$ 均为

$$Z_4 = Z_5 = Q_3 (d_4 - 2d_3 + d_2) / 4$$

节点2与节点36之间的各等级道路出行周转量由节点2与节点36所围路网进行交通分配获得,节点3与节点64之间的各等级道路出行周转量由整个路网进行交通分配得到。

根据以上分析,只需分别对图1中节点1与节点16所包围的路网、节点2与节点36所包围的路网和节点3与节点64所包围的路网(整个路网)进行交通分配,即可得到各等级道路最大适宜出行范围内的出行周转量。

## 2 路径选择模型

当出行者进行路径选择时,一般均以行程时间作为选择依据,而行程时间与道路交通流状态以及其他不确定性因素有关,如自然灾害、交通拥挤、道路交通事故等。城市道路交通流量大,易引发道路交通事故,从而导致交通拥挤,使得出行时间延误增大,因此,行程时间还应包括其他时间,诸如发生交通事故时的延误时间。

### 2.1 交通事故状态下时间延误模型

#### 2.1.1 交通事故导致交通拥挤的概率模型

设发生交通事故为事件 $M$ ,交通拥挤为事件 $N$ ,则同时发生交通事故和交通拥挤的概率 $P(NM)$ 为

$$P(NM) = P(N|M)P(M)$$

式中: $P(N|M)$ 为发生交通事故后导致交通拥挤的概率; $P(M)$ 为发生交通事故的概率。

#### (1) 发生交通事故的概率

交通事故的发生具有随机性,可认为交通事故服从正态分布。令 $x$ 为交通事故发生的次数, $u_1$ 和 $\sigma_1$ 分别为交通事故发生次数的均值和标准差,则交通事故概率密度 $f(x)$ 为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(x-u_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad x \geq 0 \quad (1)$$

设 $k$ 为预测得到的路段交通事故次数,则 $u_1 = k$ 。根据概率统计理论,正态分布密度函数中的标准差与均值与最小值之差的关系为<sup>[15]</sup>

$$\sigma_1 = [u_1 - \min(x)]/3 = u_1/3 = k/3$$

交通事故概率密度  $f(x)$  为

$$f(x) = \frac{3}{\sqrt{2\pi}u_1} e^{w_1} = \frac{3}{\sqrt{2\pi}k} e^{w_2} \quad x \geq 0 \quad (2)$$

$$W_1 = -\frac{9(x-u_1)^2}{2u_1^2}$$

$$W_2 = -\frac{9(x-k)^2}{2k^2}$$

发生交通事故的概率为

$$P(M) = P(x > 0) = 1 - P(x = 0) = 1 - f(0) =$$

$$1 - \frac{3}{\sqrt{2\pi}k} e^{-4.5} \quad (3)$$

道路上的交通事故次数与交通流和道路特征有关, 表现为

$$k = ad^b q^c$$

式中:  $d$  为路段长度 (km);  $q$  为路段上的交通量 ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $a, b, c$  均为模型参数, 根据 Sawalha 等研究结果<sup>[16]</sup>,  $a$  取 0.003 5,  $b$  取 0.672 4,  $c$  取 0.967 9。

(2) 发生交通事故后导致交通拥挤的概率

当发生道路交通事故后, 通行能力降低为  $C_1$  ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 路段交通量为  $q$ , 发生交通事故后导致交通拥挤的概率  $P(N|M)$  为

$$P(N|M) = \begin{cases} 1 & C_1 < q \\ 0 & C_1 \geq q \end{cases} \quad (4)$$

同时发生交通事故和交通拥挤的概率  $P(NM)$  为

$$P(NM) = P(N|M)P(M) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{\sqrt{2\pi}k} e^{-4.5} & C_1 < q \\ 0 & C_1 \geq q \end{cases} \quad (5)$$

### 2.1.2 交通事故时间延误模型

当发生交通事故并导致交通拥挤后, 交通流将形成排队现象。在交通事故持续时间  $t_1$  内, 道路的通行能力为  $C_1$ ; 当交通事故被清理后, 道路交通流开始恢复到正常状态, 通行能力恢复到  $C$  ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 路段交通量为  $q$ , 直到  $t_2$  时刻所有等候的排队车辆均离开事故现场, 则在  $0 \sim t_2$  时间内, 所有车辆的延误为  $t_3$ 。在  $0 \sim t_2$  时间内, 到达的车辆总数为  $qt_2$ , 每辆车的平均延误  $t_4$  为<sup>[13]</sup>

$$t_4 = \frac{t_1(q - C_1)}{2q} \quad (6)$$

### 2.1.3 交通事故阶段通行能力不确定性的时间延误

(1) 交通事故持续时间的不确定性

交通事故的持续时间与众多因素有关, 包括事故的性质、事故发生的地点等。研究表明, 交通事故的持续时间服从对数正态分布, 事故持续时间  $t_1$  的概率密度函数  $f(t_1)$  为<sup>[14]</sup>

$$f(t_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2 t_1} e^{-[\ln(t_1) - u_2]^2 / (2\sigma_2^2)} \quad 0 < t_1 < T \quad (7)$$

式中:  $u_2, \sigma_2$  分别为事故持续时间自然对数的均值和标准差;  $T$  为事故持续时间的最大值。

(2) 事故阶段通行能力的不确定性

由于天气状况与道路环境的变化, 道路通行能力具有一定的随机性。在交通事故状态下, 由于不确定性因素的影响, 通行能力  $C_1$  可视为随机变量, 认为其服从正态分布, 则通行能力的概率密度函数  $f(C_1)$  为

$$f(C_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-(C_1 - u_3)^2 / (2\sigma_3^2)} \quad 0 < C_1 < C \quad (8)$$

式中:  $u_3, \sigma_3$  分别为发生交通事故后道路通行能力的均值和标准差。

由概率统计理论得

$$\sigma_3 = [u_3 - \min(C_1)]/3 = u_3/3$$

(3) 不确定状态下的交通事故延误

交通事故时间延误与事故持续时间和事故阶段道路通行能力有关, 由于事故持续时间和通行能力均为随机变量, 因此, 交通事故延误时间也应为随机变量。交通事故延误时间  $t_4$  的均值  $E(t_4)$  为

$$\begin{aligned} E(t_4) &= E\left[\frac{t_1(q - C_1)}{2q}\right] = \int_0^T \int_0^C \frac{t_1(q - C_1)}{2q} f(t_1) f(C_1) dt_1 dC_1 = \\ &= \frac{1}{2q} \int_0^T t_1 f(t_1) dt_1 \int_0^C (q - C_1) f(C_1) dC_1 = \\ &= \frac{1}{2q} E(t_1) \left[ \int_0^C q f(C_1) dC_1 - E(C_1) \right] = \\ &= \frac{1}{2q} E(t_1) [q - E(C_1)] = \frac{E(t_1)(q - u_3)}{2q} \quad (9) \end{aligned}$$

式中:  $E(\cdot)$  为均值函数。

### 2.1.4 考虑交通事故概率的时间延误模型

当道路上的交通事故以概率  $P(M)$  发生时, 在考虑交通事故概率的情况下, 交通事故延误时间  $t_5$  的均值  $E(t_5)$  为

$$\begin{aligned} E(t_5) &= E(t_4)P(NM) = \\ &= \begin{cases} \frac{E(t_1)(q - u_3)}{2q} \left(1 - \frac{3}{\sqrt{2\pi}k} e^{-4.5}\right) & C_1 < q \\ 0 & C_1 \geq q \end{cases} \quad (10) \end{aligned}$$

由于交通事故发生阶段的道路通行能力  $C_1$  为一随机变量, 因此, 本文采用 95% 置信度的方法来判断交通事故发生后是否产生拥堵。根据概率统计理论, 对于服从标准正态分布的随机变量, 置信度为  $1 - \alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )。  $Z_\alpha$  为标准正态分布上的  $\alpha$  分位点, 则服从标准正态分布的随机变量大于  $Z_\alpha$  的概率为  $\alpha$ , 小于  $Z_\alpha$  的概率为  $1 - \alpha$ 。对于一给定的数  $X$ ,

交通事故发生后的通行能力  $C_1 < X$  的概率为

$$P(C_1 < X) = 95\%$$

$$C_1 = 1.645\sigma_3 + u_3 = \frac{1.645u_3}{3} + u_3 = 1.55u_3$$

$P(C_1 < X)$  可作为判断交通拥堵的临界值,则交通事故延误时间  $t_5$  的期望值  $E(t_5)$  为

$$E(t_5) = \begin{cases} \frac{E(t_1)(q-u_3)}{2q} \left(1 - \frac{3}{\sqrt{2\pi k}} e^{-4.5}\right) & q > 1.55u_3 \\ 0 & q \leq 1.55u_3 \end{cases} \quad (11)$$

### 2.1.5 交通事故持续时间和通行能力均值

根据部分学者对国内城市道路交通事故持续时间的研究<sup>[17-18]</sup>,发现交通事故的平均持续时间约为 20 min,即  $E(t_1) = 20$  min。

Knoop 等通过实际调查得到了当发生交通事故时通行能力下降的规律<sup>[19]</sup>;美国 FHWA《交通控制系统手册》中给出了不同类型紧急事件对道路通行能力的影响程度,见表 1<sup>[20]</sup>。

城市道路不涉及大型货车,因此,交通事故占用车道数量一般均为 1,那么交通事故发生后的通行

$$t = t_6 + t_5 = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{C}\right)^\beta\right] + E(t_5) = \begin{cases} t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{C}\right)^\beta\right] + \frac{E(t_1)(q-u_3)}{2q} \left(1 - \frac{3}{\sqrt{2\pi k}} e^{-4.5}\right) & q > 1.55u_3 \\ t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{C}\right)^\beta\right] & q \leq 1.55u_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $t_0$  为路段自由流时间;  $\alpha$ 、 $\beta$  均为 BPR 函数中的参数。

本文将以此模型作为交通分配的依据,在获取各参数后,便可计算各路段上的交通量。

## 3 交通分配步骤

本文分别对次干路、主干路和快速路最大适宜出行距离范围内的路网进行交通分配,得到各等级道路的最大出行距离。在分配时,采用单位交通量逐次分配的方法,每次加载 1 个交通量,将其分配到最短路上,继续加载交通量,直到所有交通量加载结束。以次干路最大行驶范围为例说明交通分配的步骤<sup>[21-23]</sup>,见图 2。

通过交通分配,得到节点 1 与节点 16 路网范围内支路和次干路周转量分别为  $Z_6$ 、 $Z_7$ ;节点 2 与节点 36 路网范围内次干路和主干路周转量分别为  $Z_8$ 、 $Z_9$ ;节点 3 与节点 64 路网范围(整个路网)内次干路、主干路和快速路交通周转量为别为  $Z_{10}$ 、 $Z_{11}$ 、 $Z_{12}$ ,则支路、次干路、主干路和快速在其最大适宜行驶范围内的交通周转量分别如下。

在点  $A_1$  与点  $A_2$  路网范围内,支路的出行周转量为

表 1 道路通行能力系数

Tab. 1 Road capacity coefficients

单方向车道 数量	堵塞的车道数量		
	1	2	3
2	0.35	0.00	
3	0.49	0.17	0.00
4	0.58	0.25	0.13

能力降为表 1 中相应的单方向车道数所对应的堵塞 1 个车道时有效百分比与正常状态时通行能力的乘积。例如,单向 2 车道次干路正常状态下的通行能力为  $1185 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,则发生交通事故后通行能力的均值为

$$E(C_1) = u_3 = 1185 \times 0.35 = 415 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$$

### 2.2 路段总行程时间模型

在考虑交通事故时,机动车的出行时间包括发生交通事故时的延误时间  $t_5$  和正常状态下的行程时间  $t_6$ 。在正常状态下,路段行程时间可采用美国公路局的 BPR 函数来计算,路段总出行时间  $t$  为

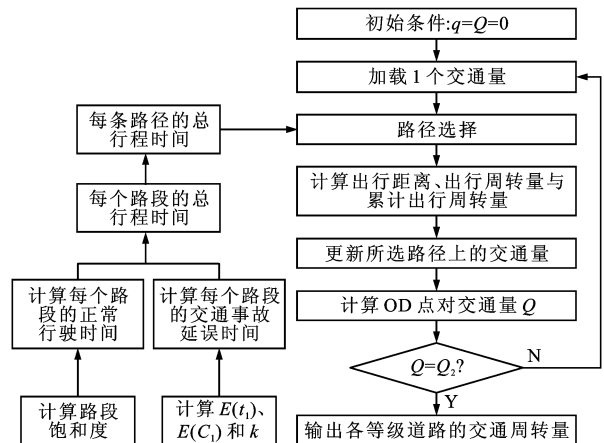


图 2 交通分配

Fig. 2 Transportation assignment

$$Z_1 = Q_1 D_1 = Q_1 (d_1 + d_2)$$

在点  $B_1$  与点  $B_2$  路网范围内,支路的出行周转量为

$$Z_{13} = Z_6$$

次干路的出行周转量为

$$Z_{14} = Z_2 + Z_7 + Z_3 = 2Q_2 (d_3 - d_2) / 4 + Z_7$$

在点  $F_1$  与点  $F_2$  路网范围内,次干路的出行周转量为

$$Z_{15} = Z_4 + Z_8 + Z_5 =$$

$$2Q_3(d_4 - 2d_3 + d_2)/4 + Z_8$$

主干路的出行周转量为

$$Z_{16} = Z_9$$

在整个路网范围内,次干路、主干路和快速路的出行周转量分别为  $Z_{10}$ 、 $Z_{11}$ 、 $Z_{12}$ 。根据各等级道路出行周转量  $Z$ ,可进一步得到各等级道路所承担的出行距离  $L$ ,即

$$L = Z/Q$$

由于本文所建 4 个路网均为各等级道路的最大适宜出行范围,因此, $i$  等级道路最大适宜出行距离为各路网中所求  $i$  等级道路出行距离的最大值。设  $L_1$  为点  $A_1$  与点  $A_2$  路网范围内支路出行距离, $L_2$ 、 $L_3$  分别为点  $B_1$  与点  $B_2$  路网范围内支路和次干路的出行距离, $L_4$ 、 $L_5$  分别为点  $F_1$  与点  $F_2$  路网范围内次干路和主干路的出行距离, $L_6$ 、 $L_7$ 、 $L_8$  分别为整个路网范围内次干路、主干路和快速路的出行距离,则支路最大出行距离  $L_{11}$  为

$$L_{11} = \max\{L_1, L_2\}$$

次干路最大出行距离  $L_{22}$  为

$$L_{22} = \max\{L_3, L_4, L_6\}$$

主干路最大出行距离  $L_{33}$  为

$$L_{33} = \max\{L_5, L_7\}$$

快速路最大出行距离  $L_{44}$  为

$$L_{44} = L_8$$

## 4 计算结果分析

### 4.1 考虑交通事故延误(工况 1)

#### 4.1.1 预设道路间距

按照前述规范,预设支路、次干路、主干路和快速路的间距( $d_1 \sim d_4$ )分别为 0.5、1.5、2.5、5.0 km。假设支路为双向 2 车道,限制速度为  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;次干路为双向 4 车道,限制速度为  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;主干路为双向 6 车道,限制速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;快速路为双向 8 车道,限制速度为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

#### 4.1.2 加载 OD 交通量

设 4 个路网点  $A_1$  与点  $A_2$ 、点  $B_1$  与点  $B_2$ 、点  $F_1$  与点  $F_2$  和整个路网加载的 OD 交通量  $Q_i$  均相等,  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 1\,000 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对 4 个路网分别进行交通分配。按照上述方法,每加载 1 个交通量后,计算所有路径的交通事故延误和正常状态下的行程时间,进行最短路交通分配,继续加载交通量,直到所有交通量加载完毕,得到 4 个路网对应的各等级道路承担的出行周转量,见表 2。

表 2 工况 1 出行周转量

Tab. 2 Travel turnovers of

		condition 1			
		pcu · km · h <sup>-1</sup>			
道路等级		支路	次干路	主干路	快速路
路网	点 $A_1$ 与点 $A_2$ 路网范围	点 $A_1$ 至点 $A_2$	2 000		
	点 $B_1$ 与点 $B_2$ 路网范围	点 $B_1$ 至节点 1		250	
		节点 1 至节点 16	452	2 048	
		节点 16 至点 $B_2$		250	
	点 $F_1$ 与点 $F_2$ 路网范围	点 $F_1$ 至节点 2		375	
		节点 2 至节点 36		2 196	4 054
		节点 36 至点 $F_2$		375	
	节点 3 与节点 64 路网范围	节点 3 至节点 64		1 427	2 610 5 963

#### 4.1.3 总出行周转量

对每个路网,将同等级道路的出行周转量相加,得到此路网范围内各等级道路的出行周转量,4 个路网对应的各等级道路出行周转量见表 3。

表 3 工况 1 总出行周转量

Tab. 3 Total travel turnovers of

		condition 1			
		pcu · km · h <sup>-1</sup>			
道路等级		支路	次干路	主干路	快速路
路网	点 $A_1$ 与点 $A_2$ 路网范围	2 000			
	点 $B_1$ 与点 $B_2$ 路网范围	452	2 548		
	点 $F_1$ 与点 $F_2$ 路网范围		2 946	4 054	
	节点 3 与节点 64 路网范围		1 427	2 610	5 963

#### 4.1.4 出行距离

将得到的各等级道路出行周转量除以对应的交通量,得到各等级道路的出行距离。对同一等级道路,取各路网范围内得到的出行距离的最大值,得到各等级道路的最大出行距离,见表 4,支路、次干路、主干路和快速路的最大出行距离分别为 2.000、2.946、4.054、5.963 km。

表 4 工况 1 出行距离

Tab. 4 Travel distances of condition 1

		km			
道路等级		支路	次干路	主干路	快速路
路网	点 $A_1$ 与点 $A_2$ 路网范围	2.000			
	点 $B_1$ 与点 $B_2$ 路网范围	0.452	2.548		
	点 $F_1$ 与点 $F_2$ 路网范围		2.946	4.054	
	节点 3 与节点 64 路网范围		1.427	2.610	5.963
最大出行距离		2.000	2.946	4.054	5.963

### 4.2 不考虑交通事故延误(工况 2)

根据出行者实际的出行情况,在考虑交通事故造成的时间延误影响时,出行者的路径选择行为将发生变化。为了验证这种影响和变化,本文在不考

考虑交通事故影响情况下,重新计算交通分配结果,得到的各等级道出行周转量与最大出行距离分别见表 5、6。在 2 种工况下,最大出行距离比较见图 3。

表 5 工况 2 总出行周转量  
Tab. 5 Total travel turnovers of condition 2

道路等级		支路	次干路	主干路	快速路
路网	点 A <sub>1</sub> 与点 A <sub>2</sub> 路网范围	2 000			
	点 B <sub>1</sub> 与点 B <sub>2</sub> 路网范围		3 000		
	点 F <sub>1</sub> 与点 F <sub>2</sub> 路网范围		1 000	6 000	
	节点 3 与节点 64 路网范围				10 000

表 6 工况 2 出行距离  
Tab. 6 Travel distances of condition 2

道路等级		支路	次干路	主干路	快速路
路网	点 A <sub>1</sub> 与点 A <sub>2</sub> 路网范围	2.000			
	点 B <sub>1</sub> 与点 B <sub>2</sub> 路网范围		3.000		
	点 F <sub>1</sub> 与点 F <sub>2</sub> 路网范围		1.000	6.000	
	节点 3 与节点 64 路网范围				10.000
最大出行距离		2.000	3.000	6.000	10.000

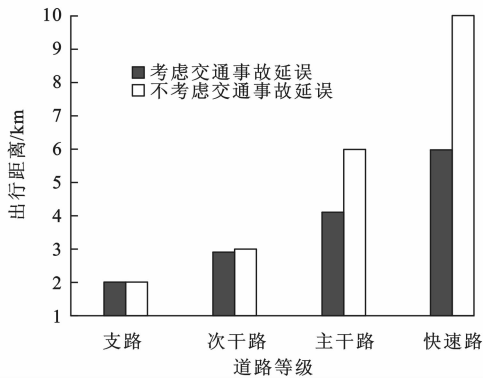


图 3 出行距离比较  
Fig. 3 Comparison of travel distances

从表 6、图 3 可以看出,在不考虑交通事故影响情况下,除支路外,其他各等级道路的最大出行距离均大于考虑交通事故时间延误情况下的结果。当不考虑交通事故的时间延误时,由于高等级道路通行能力大,行驶速度快,出行者倾向于选择高等级道路出行,因此,高等级道路上所承担的行驶距离大。而当考虑交通事故时间延误的影响时,随着高等级道路上的交通量逐渐增大,发生事故和导致交通拥挤的概率也逐渐增大,出行延误时间也逐渐增大;当高等级道路上的交通量达到一定程度时,低等级道路由于交通量小,发生交通事故的概率较小,高等级道路的出行时间将大于采用低等级道路的出行时间,则出行者会转而选择较低等级、交通量较小的路段。

如此,高等级道路上的交通量减小,出行周转量也同样减小,导致其平均出行距离减小,这样高等级道路的最大出行距离也随之减小。考虑交通事故延误影响情况下的路径选择结果更加符合实际情况。

5 结 语

本文以城市路网为研究对象,根据出行距离长短与道路等级的关系和各类道路优先级别,提出了各等级道路的最大适宜出行范围;考虑了交通事故的发生概率、事故的持续时间和道路通行能力的不确定性特点,建立了交通事故延误时间概率模型,对出行者路径选择模型进行了修正,并将其引入交通分配模型中;通过交通分配,得到各等级道路最大适宜出行范围内的出行周转量和出行距离,据此确定各等级道路的最大出行距离。在研究中,本文考虑了事故延误时间对路径选择的影响,能客观地反映出出行者的行为;计算了不考虑交通延误下的最大出行距离结果,对比发现当考虑交通事故延误时,高等级道路的出行距离变短,说明交通事故延误使部分出行者放弃流量大、易发生交通事故的高等级道路,得到的结果符合实际。

参考文献:  
References:

[1] 牛学勤,王 炜,殷志伟.城市客运交通方式分担预测方法研究[J].公路交通科技,2004,21(3):75-77,96.  
NIU Xue-qin, WANG Wei, YIN Zhi-wei. Research on method of urban passenger traffic mode split forecast[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(3): 75-77, 96. (in Chinese)

[2] 颜 敏.城市居民出行距离影响因素研究[D].成都:西南交通大学,2005.  
YAN Min. Research on impact factors of urban residents travel distance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)

[3] 陈尚云,杜 文,高世廉.我国特大城市出行分布模型及其参数的研究[J].系统工程,2002,20(4):63-66.  
CHEN Shang-yun, DU Wen, GAO Shi-lian. The study on the model and parameter of urban-trip distribution in metropolises of China[J]. Systems Engineering, 2002, 20(4): 63-66. (in Chinese)

[4] 陈尚云,杜 文.我国大城市用地形态与交通发展模式的研究[J].系统工程,2003,21(3):53-57.  
CHEN Shang-yun, DU Wen. A study on the development mode of urban traffic and land-use patterns in big cities of China[J]. Systems Engineering, 2003, 21(3): 53-57. (in Chinese)

[5] 樊大可.我国大城市道路网等级结构优化研究[D].西安:

- 长安大学, 2005.
- FAN Da-ke. Research on the road category structure optimized in big city[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [6] 周文竹, 王 炜, 郭志勇. 基于各等级道路的交通方式出行距离分布研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(5): 976-979.
- ZHOU Wen-zhu, WANG Wei, GUO Zhi-yong. Travel distance of different modes traveled on each grade road[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2009, 33(5): 976-979. (in Chinese)
- [7] 董红利. 大城市道路网合理结构及间距研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- DONG Hong-li. Research on reasonable structure and distance of urban road network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 石 飞. 城市道路等级级配及布局方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- SHI Fei. Research on grade proportion and layout method of urban road[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [9] NAM D, MANNERING F. An exploratory hazard-based analysis of highway incident duration[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2000, 34(2): 85-102.
- [10] CHIEN S I J, GOULIAS D G, YAHALOM S, et al. Simulation-based estimates of delays at freeway work zones[J]. Journal of Advanced Transportation, 2002, 36(2): 131-156.
- [11] FU Li-ping. A fuzzy queuing model for real-time, adaptive prediction of incident delay for ATMS/ATIS[J]. Transportation Planning and Technology, 2004, 27(1): 1-23.
- [12] SHEU J B, CHOU Y H, SHEN L J. A stochastic estimation approach to real-time prediction of incident effects on freeway traffic congestion[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2001, 35(6): 575-592.
- [13] LI Ji-bing, LAN C J, GU Xiao-ju. Estimation of incident delay and its uncertainty on freeway networks[J]. Transportation Research Record, 2006(1959): 37-45.
- [14] BOYLES S, WALLER T. A stochastic delay prediction model for real-time incident management[J]. Institute of Transportation Engineers, 2007, 77(11): 18-24.
- [15] 陈艳艳, 王光远. 考虑供需随机性的道路交通系统震害引发损失期望评估[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 25-30.
- CHEN Yan-yan, WANG Guang-yuan. The estimation of indirect loss expectation after earthquake considering randomness of traffic demand and supply[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 25-30. (in Chinese)
- [16] SAWALHAL Z, SAYED T. Evaluating safety of urban arterial roadways[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(2): 151-158.
- [17] 姬杨蓓蓓. 交通事件持续时间预测方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- JI-YANG Bei-bei. Research on prediction method of traffic incident duration[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [18] 刘伟铭, 管丽萍, 尹湘源. 基于决策树的高速公路事件持续时间预测[J]. 中国公路学报, 2008, 18(1): 99-103.
- LIU Wei-ming, GUAN Li-ping, YIN Xiang-yuan. Prediction of freeway incident duration based on decision tree[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 18(1): 99-103. (in Chinese)
- [19] KNOOP V L, HOOGENDOORN S P, VAN ZUYLEN H J. Capacity reduction at incidents: empirical data collected from a helicopter[J]. Transportation Research Record, 2008(2071): 19-25.
- [20] QIN Ling, SMITH B. Characterization of accident capacity reduction[R]. Charlottesville: The University of Virginia, 2001.
- [21] 四兵锋, 杨小宝, 高 亮, 等. 基于出行需求的都市多模式交通配流模型[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 85-91.
- SI Bing-feng, YANG Xiao-bao, GAO Liang, et al. Urban multimodal traffic assignment model based on travel demand[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 85-91. (in Chinese)
- [22] 栾义峰, 付 鑫, 甘家华. 基于出行行为的中心城市周边交通网络系统优化[J]. 长安大学学报: 社会科学版, 2011, 13(1): 38-41.
- LUAN Yi-feng, FU Xin, GAN Jia-hua. Discussion on the traffic network systems optimization around the central city based on travel behaviour[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2011, 13(1): 38-41. (in Chinese)
- [23] 李聪颖, 马荣国, 王肇飞. 基于活动分析法的城市慢行交通行为[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 86-90.
- LI Cong-ying, MA Rong-guo, WANG Zhao-fei. Research on travel behavior of slow traffic based on activity analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 86-90. (in Chinese)