

基于元胞传输模型的区域疏散动态交通分配

崔建勋¹, 安实², 崔娜¹

(1. 哈尔滨工业大学 经济与管理学院, 哈尔滨 150001, daqing8210@126.com;

2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为制定合理、高效的灾害条件下区域疏散交通管理与规划方案, 针对道路交通应急区域疏散的动态交通分配问题进行研究. 首先, 采用元胞传输理论和单终点疏散方法, 建立了元胞-连接桥疏散路网模型, 进而以系统疏散出行时间最短为目标函数, 以元胞流量守恒和流量传播等为约束条件, 构建了区域疏散动态交通分配线性规划模型. 对该模型的求解可以得到系统最优疏散出行时间、疏散清空时间、分阶段疏散优先权分配方案、交叉口车流诱导方案以及疏散者终点选择和路径选择最优方案. 案例分析的结果表明, 该模型即能够满足大规模疏散路网建模的需求, 同时又能恰当地反映疏散交通流的动态特性.

关键词: 区域疏散; 动态交通分配; 元胞传输模型

中图分类号: U121

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0123-05

Dynamic regional evacuation traffic assignment based on cell transmission model

CUI Jian-xun¹, AN Shi², CUI Na¹

(1. School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, daqing8210@126.com;

2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to present reasonable and effective traffic planning and management strategy under disaster conditions, the dynamic regional evacuation traffic assignment during the process of road transportation emergency planning and operations was studied. First, a cell-connector model for evacuation road network modeling was presented based on the revised cell transmission model. Then, we constructed a dynamic regional evacuation traffic assignment model with the minimal evacuation travel time as its object function and cell flow conservation and propagation as its major constraints. By solving this model, we can obtain the system's optimal travel time, network clearance time, optimal flow staging at origins, optimal flow distribution at intersections and optimal evacuation route choice and destinations. Results of a case study show that this presented model can meet the modeling demand of mass evacuation road network and effectively describe the dynamics nature of evacuation traffic flow.

Key words: regional evacuation; dynamic traffic assignment; cell transmission model

区域疏散是道路交通应急响应阶段的重要手段之一. 恰当地反映疏散交通流的动态特性以及合理的区域疏散交通动态分配, 是有效进行疏散交通规划与实时疏散交通管理实践的核心理论问题.

国内外学者针对大规模道路网区域疏散问题

的研究, 所采用的建模方法主要包括网络流理论和静态交通分配理论^[1-3]. 然而, 无论是采用哪一种方法进行研究, 其核心的理论难题是对疏散交通流动态、随机本质的准确刻画^[4].

元胞传输模型(简称 CTM). 可以捕捉到网络交通流中的不连续变化现象, 清晰地描述排队的物理效应, 可以较好地模拟出激波、排队形成、排队消散以及多路段间的相互影响等交通动力学特性. 因此, CTM 被应用于动态交通分配中, 以增强估算路径阻抗的准确性, 提高动态交通分配模型

收稿日期: 2009-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70973032).

作者简介: 崔建勋(1982—), 男, 博士研究生;

安实(1968—), 男, 教授, 博士生导师.

的应用效果^[5-8].

鉴于此,本项目从深入剖析疏散网络交通流的动态特性出发,采用元胞传输理论,构建疏散路网动态交通流模型,并形成疏散路网元胞-连接桥模型的一般性构造方法.在此基础上构建了以疏散出行时间最短为目标的动态交通分配线性规划模型,以期生成疏散交通规划决策及管理与控制决策的最优方案.最后,基于所建立的模型,给出了具体的案例分析.

1 基于元胞传输的疏散路网建模

1.1 元胞传输模型基本理论

CTM本质上属于时空离散的动力学系统^[9-10].首先,在空间上路段被离散化为一组相互连接的同质小段,称为元胞(cell).每个元胞的长度定义为单位时间间隔内,车辆以该路段自由流速度行驶,所能运行的距离.其次,在时间上,CTM将交通流动态的考察时间周期离散化为多个单位时间间隔,允许研究人员根据所考察问题的精度进行自定义.此外,每个元胞*i*都具有自身的状态,即第*t*个单位时间间隔开始时,其上存在的车辆数, x_i^t .任意元胞*i*在时间间隔*t*内可能的最大输出和最大接收车辆数满足如下约束:

$$S_i^t = \min(x_i^t, Q_i^t),$$

$$R_i^t = \min(Q_i^t, N_i^t - x_i^t).$$

式中: S_i^t 为时间间隔*t*内,元胞*i*的最大输出车辆数约束; R_i^t 为时间间隔*t*内,元胞*i*的最大接收车辆数约束; Q_i^t 为时间间隔*t*内,元胞*i*可能的最大流量; N_i^t 为时间间隔*t*内,元胞*i*上所能存在的最大车辆数.

图1中,(a)表示了路段上普通元胞之间的连接关系,由此可知,车辆在任意两个相互连接的普通元胞之间的传输车辆数*y*应满足约束条件:

$$y_{i-1,i}^t = \min(S_{i-1}^t, R_i^t).$$

即在时间间隔*t*内,从元胞*i-1*到元胞*i*的最大车辆数应等于元胞*i-1*所能输出的车辆数和元胞*i*所能接收的车辆数两者之中的最小者.

从而,任意元胞*i*可以在每个离散的时间间隔内进行状态的更新,如下式:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + y_{i-1,i}^t - y_{i,i+1}^t. \quad (1)$$

这样,便实现了在离散的时空框架下,能够捕捉交通流动态特性的元胞传输动力学系统.

此外,图1中的(b)和(c)分别表示了交叉路口的合流元胞和分流元胞,其各自的传输车辆数约束表示为

$$y_{i,k}^t \leq S_i^t; y_{j,k}^t \leq S_j^t; y_{i,k}^t + y_{j,k}^t \leq R_k^t;$$

$$y_{k,i}^t \leq R_i^t; y_{k,j}^t \leq R_j^t; y_{k,i}^t + y_{k,j}^t \leq S_k^t.$$

其相应的元胞状态更新可按公式(1)类比推出.

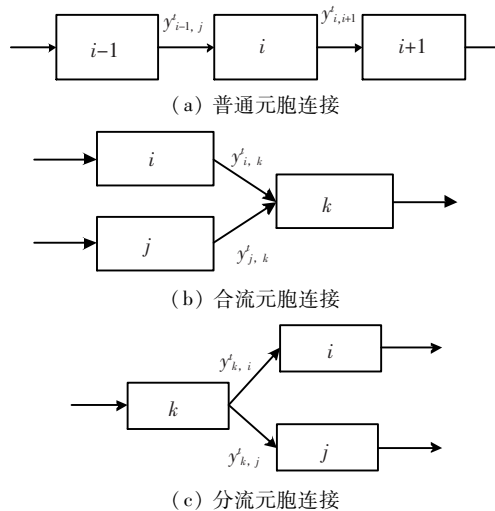


图1 各种元胞连接

1.2 元胞-连接桥路网模型

1.2.1 单终点疏散路网模型

传统的路网表示通常采用节点-弧的有向图模型.以图2为例,编号为“1”的点表示危险区域,即疏散交通需求的产生点;编号为“3”和“4”的点表示安全区域,即疏散的终点.

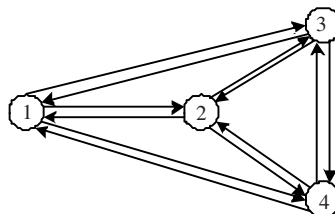


图2 节点-弧路网

在日常的交通情景下,交通参与者都有自己特定的目的地,因而其交通分布需求即OD矩阵,可以依据双约束重力模型等做出预测.而在疏散条件下,从应急管理者的角度,重要的是在短时将人员疏散到安全地点,至于疏散者选取哪条路径和哪个安全终点并不重要.这种疏散者终点选取的弹性可以使得研究者无需事先确定OD矩阵,而是通过将所有疏散终点连接到一个虚拟终点上,并假定连接疏散终点与虚拟终点的弧段(图3中的虚线箭头)具有无穷大的通行能力和零出行时间,从而将原本包含交通分布预测和交通分配预测两个阶段的多起点-多终点的网络优化问题转化为多起点-单终点的交通分布和交通分配同步网络优化问题.从而克服了以往研究中,首先按照地理位置的临近而将疏散者分配到指定的疏散终点(避难所),然后进行路径规划的缺

点,如图3.

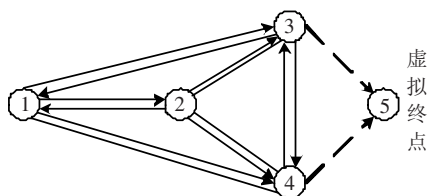


图3 单终点节点-弧路网

1.2.2 节点-弧路网到元胞-连接桥路网的转换

为了将CTM理论应用于具体的疏散交通管理实践,需要建立从经典节点-弧路网到元胞-连接桥路网转换的一般性方法.

1)路段的空间离散化——元胞生成. 依据CTM理论,路段被离散化的表达为一系列的同质元胞,每个元胞的长度 l 表达为该路段的自由流速度 f 与单位时间间隔 τ 的乘积:

$$l = f \times \tau,$$

由此,以路段长度 $link_length$ 和元胞长度 l 的比值,可以进一步确定每条路段对应的元胞数目 Num :

$$Num = link_length/l.$$

以图3所示的节点-弧路网为例,假定单位时间间隔为10 s,则可得到如表1所示的路段到元胞转换的结果(限于篇幅,仅给出了部分路段的元胞转换结果). 其中,“0-1”为虚拟路段,假定疏散的交通需求从“0”点产生到达“1”点,由此确定的元胞为起点元胞;“5-0”也是虚拟路段,假定疏散的交通需求最终都从“5”点到达“0”点,从而离开危险区域,由此确定的元胞为终点元胞.

表1 路段到元胞的转换

路段	长度/m	自由流速/ (m · s ⁻¹)	元胞长度/m	元胞数
0-1	∞	∞	∞	1
1-2	500	16.7	167	3
1-3	970	13.9	139	7
3-5	∞	∞	∞	1
4-5	∞	∞	∞	1
5-0	∞	∞	∞	1

进一步,需要对元胞进行唯一编号,其格式为: $X-Y-Z$,其中 X 和 Y 分别表示该元胞所处路段的上游节点编号和下游节点编号, Z 表示从上游开始计算,元胞在所处路段的位置,即该元胞为该路段从上游开始计算第 Z 个元胞. 如表2(限于篇幅,仅给出了部分元胞).

表2 元胞编号

元胞编号	1	2	3	50	52
所处位置	0-1-1	1-3-1	1-3-2	3-5-1	5-0-1

2)元胞连接桥的生成. 元胞生成之后,需要

构造连接桥(Connector)来连接这些元胞,使之能够相互传输车辆. 其一般性构造如图4所示.

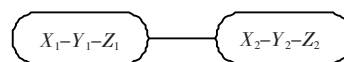


图4 元胞连接桥

连接桥主要分为两种:普通路段元胞连接桥和交叉口元胞连接桥. 两者的判别标准分别如式(2)和(3)所示:

$$X_2 = X_1; Y_2 = Y_1; Z_2 = Z_1 + 1. \quad (2)$$

$$X_2 = Y_1; Z_2 = 1. \quad (3)$$

由此可以将传统的节点-弧路网模型完整地转换为元胞连接桥模型,如图5.

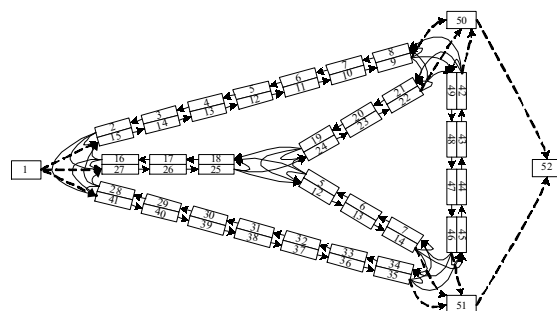


图5 元胞-连接桥路网

2 系统最优的疏散交通动态分配模型

依据上一节所描述的CTM基本理论和元胞-连接桥路网模型一般性构造方法,给出以疏散出行时间最短为目标的疏散动态交通分配模型.

目标函数:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in C/C_s} x_i^t. \quad (4)$$

约束条件:

$$x_i^t - x_i^{t-1} - \sum_{k \in I^{-1}(i)} y_{k,i}^{t-1} + \sum_{j \in I(i)} y_{i,j}^{t-1} = 0; \quad \forall i \in C \setminus \{C_R, C_S\}, \forall t \in T. \quad (5)$$

$$y_{i,j}^t - x_i^{t-1} \leq 0, y_{i,j}^t \leq Q_j^t, y_{i,j}^t \leq Q_i^t, y_{i,j}^t + \delta_j^t x_j^t \leq \delta_j^t N_j^t; \quad \forall (i,j) \in \mathbf{h}_0 \cup \mathbf{h}_R, \forall t \in T. \quad (6)$$

$$y_{i,j}^t - x_i^{t-1} \leq 0, y_{i,j}^t \leq Q_j^t; \quad \forall (i,j) \in \mathbf{h}_S, \forall t \in T. \quad (7)$$

$$y_{i,j}^t \leq Q_j^t, y_{i,j}^t + \delta_j^t x_j^t \leq \delta_j^t N_j^t; \quad \forall (i,j) \in \mathbf{h}_D, \forall t \in T. \quad (8)$$

$$\sum_{j \in I(i)} y_{i,j}^t - x_i^t \leq 0, \sum_{j \in I(i)} y_{i,j}^t \leq Q_i^t; \quad \forall i \in C_D, \forall t \in T. \quad (9)$$

$$y_{i,j}^t - x_i^t \leq 0, y_{i,j}^t \leq Q_i^t; \quad \forall (i,j) \in \mathbf{h}_M, \forall t \in T. \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I^{-1}(j)} y_{i,j}^t \leq Q_j^t, \sum_{i \in I^{-1}(j)} y_{i,j}^t + \delta_j^t x_j^t \leq \delta_j^t N_j^t; \quad \forall j \in C_M, \forall t \in T. \quad (11)$$

$$x_i^t - x_i^{t-1} + y_{i,j}^{t-1} = d_i^{t-1};$$

$$\forall j \in \Gamma(i), \forall i \in C_R, \forall t \in T. \quad (12)$$

$$x_i^t \geq 0; \forall i \in C, \forall t \in T. \quad (13)$$

$$y_{i,j}^t \geq 0; \forall (i,j) \in \mathbf{h}, \forall t \in T. \quad (14)$$

模型中变量说明如下:

C 为元胞的集合. 其中, C_o 为普通元胞集合; C_D 为分流元胞集合; C_M 为合流元胞集合; C_R 为起点元胞集合; C_P 为终点元胞集合; C_S 为虚拟终点元胞集合.

T 为离散时间间隔的集合; x_i^t 为 t 时刻元胞 i 上的车辆数; N_i^t 为 t 时刻元胞 i 上允许存在的最大车辆数; Q_i^t 为 t 时刻元胞 i 可以流入/流出最大车辆数; y_{ij}^t 为时间间隔 $[t, t+1]$ 内, 从元胞 i 到元胞 j 的车辆数; $\mathbf{h}$ 为连接桥集合. 其中, $\mathbf{h}_o$ 为普通连接桥; $\mathbf{h}_M$ 为合流连接桥; $\mathbf{h}_D$ 为分流连接桥; $\mathbf{h}_R$ 为起点连接桥; $\mathbf{h}_S$ 为终点连接桥.

d_i^t 为 t 时刻起点元胞 i 产生的车辆数; $\hat{d}_i^t$ 为仿真过程中, 将在起点元胞 i 处产生的总车辆数 (总需求); $\hat{x}_i$ 为疏散开始时任意元胞 i 上的初始车辆数; v_i 为元胞 i 的自由流速度; w_i 为元胞 i 的反向交通波传播速度; δ_i^t 为 t 时刻元胞 i 的自由流速与反向波速之比, 即 v_i/w_i ; $\Gamma^{-1}(i)$, $\Gamma(i)$ 分别为元胞 i 的前继元胞集合和后继元胞集合.

模型中, 式(4)给出了疏散动态交通配流的目标函数: 最小化系统总疏散出行时间. 在疏散时间周期 T 的每个单位时间间隔内, 除虚拟终点元胞以外, 任意元胞上的车辆, 要么是在该元胞上等待了一个时间间隔, 要么是在该时间间隔内从该元胞的上游到达该元胞, 因而其等待或出行时间均为一个单位时间间隔, 由此, 该时间间隔内的车辆总等待/出行时间为所有元胞 (除去虚拟终点元胞) 上的车辆数之和.

式(5)为普通元胞 (即除起点和虚拟终点之外的元胞) 流守恒约束; 式(6)~(11)定义了各种类型连接桥与元胞的输入/输出约束; 式(12)为起点元胞的流守恒约束和初始条件约束; 式(13)、(14)表示了相应的非负约束.

3 案例分析

本节应用第1节所建立的疏散元胞-连接桥路网的构造方法以及第2节所建立的疏散动态交通配流模型进行了案例分析.

3.1 元胞-连接桥路网构建

图6表示了以节点-弧方式给出的案例路网. 编号为“1”, “2”和“3”的点为疏散需求产生点, “6”和“8”点疏散终点, “9”点为虚拟终点. 该

路网的部分几何特征信息如表3示 (限于篇幅, 仅给出了部分元胞).

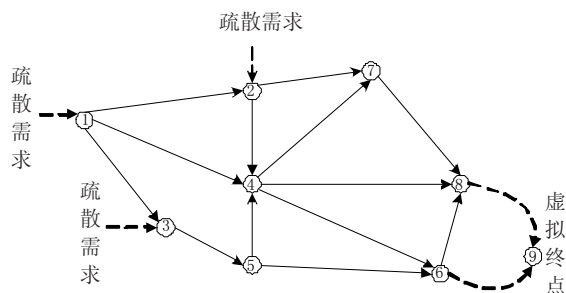


图6 节点-弧案例路网

表3 路网几何特征

路段	长度/m	车道数	自由流/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流率/ ($\text{辆} \cdot \text{h}^{-1}$)
1-2	550	2	13.9	3 600
1-3	410	2	13.9	3 600
1-4	550	2	13.9	3 600
6-8	280	2	13.9	3 600
7-8	690	2	13.9	3 600
6-9	∞	∞	∞	∞
8-9	∞	∞	∞	∞

疏散的时间间隔 T 设定为 30 个单位时间间隔, 每个时间间隔 10 s. 由此, 将节点-弧表示的案例路网按照第1节所给出的转换方法, 构造了该案例路网的元胞-连接桥模型, 见图7.

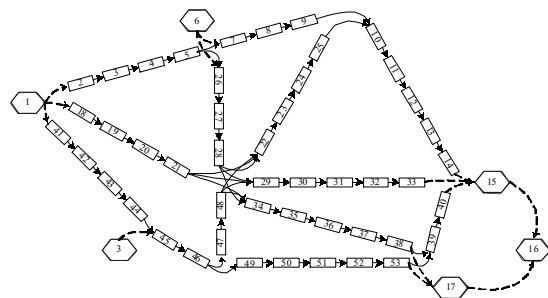


图7 元胞-连接桥案例路网

表4元胞的一些初始特性: 最大承载车辆数 N_i , 单位时间间隔内的最大流量 Q_i 以及元胞初始车辆数 x_i^0 进行了描述. 表5对各起点元胞的动态疏散交通生成需求 d_1^t , d_6^t 和 d_{45}^t 进行了描述.

表4 元胞的恒量特性

元胞编号	N_i / 辆	Q_i ($\text{辆} / \text{单位时间间隔}$)	x_i^0 / 辆
1, 6, 45	∞	∞	0
15, 16, 17	∞	∞	0
其他	15	10	0

表5 起点元胞的时变交通需求

时刻	元胞1交通 需求 d_1^t	元胞6交通 需求 d_6^t	元胞45交通 需求 d_{45}^t
0	175	150	125
1	0	0	0
2-30	0	0	0

3.2 案例结果分析

第2节所建立的疏散动态交通配流模型,其本质上属于线性规划问题.采用了MATLAB 7.0中的“LinProg”过程,结合3.1节所界定的仿真情景进行了相应的案例求解,结果分析如下:

1) 路网清空时间. 定义为从疏散仿真开始到最后一个疏散者抵达虚拟终点所经历的时间,是反映疏散性能最重要的指标,可以用于制定和评价疏散交通规划方案. 本案例的求解结果是27个单位时间间隔;

2) 系统最优出行时间. 定义为疏散清空时间内,所有参与疏散的车辆从起点元胞到虚拟终点元胞出行所用时间总和. 其所反映的是疏散的总时间成本. 本案例的求解结果是2304个单位时间间隔;

3) 起点元胞处等待时间. 定义为在各疏散起点元胞处,所有车辆等待进入疏散路网的时间之和,即起点元胞处车辆总延误. 该结果可以决定起点处疏散优先权的最优分配方案. 本案例的求解结果是235个单位时间间隔;

4) 最优的终点分布. 定义为疏散起点元胞与疏散终点元胞之间的疏散车流量. 本案例的求解结果见表6.

起点元胞编号	终点元胞编号	
	6	8
1	98	77
2	84	66
3	113	12

5) 疏散最优动态配流结果. 可以通过对模型中 x_i^t 和 $y_{i,j}^t, \forall t \in T$ 的求解,获得任意时间间隔内,每个元胞上的车辆数以及每个连接桥在间隔内所传输的车辆数. 疏散最优动态配流结果主要反映的是每个时间间隔内,起点元胞处以及交叉口元胞处的各元胞间的流量. 该结果可以用于生成动态交通控制与诱导策略. 由于元胞和连接桥数量之和与离散时间间隔数量之间的笛卡尔积高达3 360之多,限于篇幅,未列出详细结果.

4 结 论

元胞传输模型(CTM)可以有效的反映疏散交通流的动态特性. 同时,单终点疏散方法,可以对多起点-多终点疏散交通配流问题进行大大简化. 二者的结合可以有效的对疏散路网进行建模,从而将疏散系统最优动态配流问题转化为线性规划模型的求解问题. 该模型的优点在于:(1)可以通过解析的方法获取系统最优配流结果,一方面

可以为疏散实时交通诱导与控制措施的生成提供有效的支撑,一方面又可以提高疏散清空时间等规划层面指标估计的准确性;(2)基于元胞的路网建模方法,一方面可以提高疏散路段、节点交通流建模的准确性,同时由于其采用连接桥的方式详细的描述了交叉口处的交通流向信息,因而其具备同Cova^[1]提出的基于车道路网建模方法的同样优点,因而也允许对交叉口处转向控制的建模分析,以及在疏散配流模型中,加入交叉口冲突数为0,交织数小于某个上限的约束条件,从而获取疏散交叉口分流控制方案.

未来的研究中,将以疏散者交通行为研究为重点,研究实时疏散交通诱导策略及控制策略的生成方法,同时考虑进一步完善本文所建立的系统最优配流模型.

参考文献:

- [1] COVA T J, JOHNSON J P. A network flow model for lane-based evacuation routing [J]. Transportation Research Part A, 2003, 37: 579-604.
- [2] 陈岳明, 萧德云. 应急疏散过程建模及其算法研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(6): 96-100.
- [3] 邹亮, 任爱珠, 张新. 基于GIS的灾害疏散模拟及救援调度 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 141-145.
- [4] 安实, 崔建勋, 王健. 国外道路交通应急区域疏散综述 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(6): 38-45.
- [5] URBINA E, WOLSHON B. National review of hurricane evacuation plans and policies: a comparison and contrast of state practices [J]. Transportation Research Part A, 2003, 37: 257-275.
- [6] DAGANZO F C. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory [J]. Transportation Research Part B, 1994, 28(4): 269-287.
- [7] DAGANZO F C. The cell transmission model, part II: Network traffic [J]. Transportation Research Part B, 1995, 29(2): 79-93.
- [8] 贾斌, 高自友, 李克平, 等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] DAGANZO F C, LAVAL J A. Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows [J]. Transportation Research Part B, 2005, 39(9): 855-863.
- [10] SZETO W Y, LO H K. A cell-based simultaneous route and departure time choice model with elastic demand [J]. Transportation Research Part B, 2004, 38(7): 593-612.

(编辑 赵丽莹)