



现代交通运输管理研究书系

城市道路交通事件 影响分析与疏导策略

*A Study on the Impacts and Dispersion of
Traffic Incidents on Urban Roads*

肖恢翠◎著



旅游教育出版社



现代交通运输管理研究书系

城市道路交通事件 影响分析与疏导策略

*A Study on the Impacts and Dispersion of
Traffic Incidents on Urban Roads*

肖恢翠◎著

北京·旅游教育出版社

策 划：李红丽

责任编辑：巨瑛梅

图书在版编目(CIP)数据

城市道路交通事件影响分析与疏导策略 / 肖恢翠著

— 北京：旅游教育出版社，2018.11

(现代交通运输管理研究书系)

ISBN 978-7-5637-3850-2

I. ①城… II. ①肖… III. ①城市道路—交通运输事故—研究 IV. ①U491.31

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第232205号

现代交通运输管理研究书系

城市道路交通事件影响分析与疏导策略

肖恢翠 著

出版单位	旅游教育出版社
地 址	北京市朝阳区定福庄南里1号
邮 编	100024
发行电话	(010) 65778403 65728372 65767462 (传真)
本社网址	www.tepcb.com
E-mail	tepx@163.com
排版单位	北京旅教文化传播有限公司
印刷单位	北京玺诚印务有限公司
经销单位	新华书店
开 本	710毫米×1000毫米 1/16
印 张	11
字 数	148千字
版 次	2018年11月第1版
印 次	2018年11月第1次印刷
定 价	48.00元

(图书如有装订差错请与发行部联系)

前言 Foreword

当前城市道路交通事件的发生频率居高不下，成为导致城市道路交通拥堵、降低路网运行效率的主要原因之一。通过探索城市道路交通事件影响的扩散机理及其疏导与控制策略，可以有效地预防和控制交通拥堵。本书通过构建交通事件影响下的城市网络交通流模型，分析了交通事件影响下的交通流运行规律，揭示了不同路网条件下交通事件影响的形成与扩散机理，探讨了面向交通事件的城市道路交通拥堵疏导策略。

首先，基于元胞传输模型，以交通流密度作为状态变量，针对交通事件发生的不同位置，调整了元胞的划分方式，将特征差异较大的事发路段与正常运行路段进行区别分析，重新确定了事件影响下各个元胞的发送函数及接受函数，并以实际采集的交通事件下的检测器数据为依据，构建了交通事件影响下的网络交通流模型（ECTM）。

基于ECTM模型，本书提出了事件影响长度的概念，用以定量表征交通事件影响范围，并结合路段行程时间、平均拥堵延误、平均行程速度及事件影响长度等指标共同构建了交通事件影响评价指标体系。通过综合考虑交叉口的渠化、信号配时及道路开口对交通流的影响，避免了CTM模型中对节点的简单处理，真实反映了不同连接方式的元胞之间的流量传输方式，构建了普通城市道路交通事件影响范围预测模型（ECTM-R），并选取南京市主城区局部路网的实测数据进行验证分析，结果表明仿真数据的变化趋势与实测数据基本一致。为了进一步验证ECTM-R模型的准确性，通过仿真分析的方法，与已有模型（SCTM模型）进行对比，比较了两种模型下的交通事件影响评价指标及误差，结果表明ECTM-R模型的准确性更高。

结合ECTM模型，通过在路段模型中考虑亚稳态对交通流的影响，真实刻

画快速路交通流运行中的典型现象，并在节点模型中考虑出入口匝道对交通流传播的影响，构建了城市快速路交通事件影响范围预测模型（ECTM-F）。通过对北京市局部快速路网的实例分析及与 SCTM 模型的对比分析表明，依据 ECTM-F 获取的仿真数据与实测数据的变化趋势基本吻合，且此模型的准确性要高于 SCTM 模型。分别基于 ECTM-R 与 ECTM-F 模型，研究了在高峰时段与平峰时段下，交通事件发生后城市快速路与普通城市道路的交通状态变化，并对两种不同路网条件下的交通事件影响差异进行描述。结果表明，当交通事件发生于平峰时段的快速路时，拥堵延误及事件影响范围的增长速度及下降速度均要高于普通城市道路；当交通事件发生于高峰时段的快速路时，事件影响评价指标值的增长速度仍比普通城市道路要高，但其下降速度却要低于普通城市道路。

基于 ECTM-R 模型，将预测所得的普通城市道路的事件影响范围划分为三个不同的处置区域：处置区、控制区及预警区，并针对不同的区域特征分别提出了不同的疏导目的及疏导策略。在此基础上，以控制区为研究对象，利用正交设计均匀分散、齐整可比的特性有效弥补了蚁群算法搜索时间长、易陷于局部最优解的两个主要缺陷，建立了基于蚁群算法及正交试验设计的交通流疏导模型，并结合所选定的路网及实测数据，快速生成了交通事件疏导配流方案。通过与已有模型获取的配流方案进行对比分析，比较了两种配流方案下的交通事件影响评价指标，结果表明应用基于正交设计及蚁群算法的动态疏导模型所获取的配流方案更为均衡合理。

最后，基于快速路交通事件的基本特性，提出了快速路交通事件疏导策略的总体目标。基于此目标，结合 ECTM-F 模型，确定了事件处置区域的划分方法，提出了针对不同处置区域的基于 VMS 的快速路交通事件疏导策略，并将此策略应用于具体路网，结果表明此策略较已有疏导方法可以更有效地抑制交通事件的影响。

本书在撰写的过程中，得到了本人博士生导师陆建教授的鼎力支持和悉心指导，在此表示衷心的感谢。

本著作受上海工程技术大学学术著作出版专项资助，在此深表感谢。

肖恢翠

2018年9月于上海工程技术大学

本书使用的符号及变量说明

G : 路网

T : 时段

k : 时刻

q : 交通流量

$q_j(k)$: 元胞 j 在 $(k, k+1)$ 时段的交通流量

ρ : 交通密度

ρ_j : 阻塞密度

$\rho_{o,j}$: 元胞 j 的临界密度值

ρ_c : 拥挤流向自由流转变的临界车流密度

ρ_f : 自由流向拥挤流转变的临界车流密度

$\rho_i(k)$: 第 k 个时段元胞 i 的车流密度

$\rho_{i,j}$: 元胞 i 的阻塞密度

v : 自由流速度

v_{li} : 元胞 i 处的限速值

$v_i(k)$: 第 k 个时段元胞 i 的平均车速

v_{kj}^i : 控制区内元胞 i 的期望运行速度

w : 激波速度

q_M : 最大流量

Δt : 时间步长

$n_i(k)$: 元胞 i 中所包含的车辆数

$y_i(k)$: 在 $(k, k+1)$ 时段元胞 $i-1$ 流入元胞 i 的车辆数

$Q_i(k)$: 在 $(k, k+1)$ 时段流入元胞 i 的最大车辆数

$N_i(k)$: 在 $(k, k+1)$ 时段元胞 i 所能承载的最大车辆数

$S_{i-1}(k)$: 在 $(k, k+1)$ 时段元胞 $i-1$ 在自由流状态下所能提供的最大流量

$S_{i-1}^0(k)$: 在 $(k, k+1)$ 时段优先于路径 j 的其他路径从元胞 $i-1$ 驶出的最大流量

$S_{i-1,j}^a(k)$: 第 k 个时段上游路段 a 的渠化元胞 $i-1$ 能提供给下游路段 j 的最大流量

$S_m(k)$: 末端元胞的允许流出量

$R_i(k)$: 在 $(k, k+1)$ 时段元胞 i 在拥挤流状态下所能接收的最大流量

$R_{i,j}(k)$: 第 k 时段下游路段 j 混行元胞 i 所能接受的最大流量

$p_{i-1,j}^a(k)$: 第 k 时段由上游路段 a 的渠化元胞 $i-1$ 驶入下游路段 j 混行元胞 i 的流量占驶入元胞 i 的总流量的比例

$\rho_i(k)$: 第 k 时段元胞 i 的车流密度

l_i^a : 路段 a 中元胞 i 的长度

l_{kj}^a : 控制区内元胞 i 距离处置区的长度

$q_{i,in}(k)$: $(k, k+1)$ 时段内单位时间所有进入元胞 i 的车辆数

$q_{i,out}(k)$: $(k, k+1)$ 时段内单位时间所有离开元胞 i 的车辆数

Q'_i : 元胞 i 折减后的通行能力

$c_a(k)$: k 时段内进入路段 a 的不同出行者在路段 a 上的平均行程时间

$c_{ai}^h(k)$: 第 h 位出行者经过路段 a 第 i 个元胞的行程时间

$y_i^a(k)$: k 时段内进入路段 a 第 i 个元胞的出行者数

$y_{i,out}(k)$: 元胞 i 的总流出量

$D(k)$: k 时段内路网 G 的总延误

\bar{D}_T : 时段 T 内路网 G 的平均拥堵延误

U_T : 时段 T 内累计进入路网 G 的总车辆数

\bar{v}_a : 路段 a 的平均行程速度

$IL(k)$: 交通事件发生后 k 时刻的影响长度

- IL_{\max} : 路段交通流恢复自由流状态前所能达到的最大事件影响长度
- $\bar{e}_{i+1}(k)$: 第 k 时段由路段开口进入元胞 $i+1$ 的预估流量
- $v_i(k)$: 第 k 时段元胞 i 进入路段开口的流量占总流出量的比例
- $y_{i+1,j}(k)$: 在第 k 时段由混行元胞 i 驶入流向 j 的渠化元胞 $i+1$ 的流量
- $y_{i,\text{out}}(k)$: 在第 k 时段驶出元胞 $i-1$ 的所有车辆数
- $y_m(k)$: 第 k 时段驶出末端元胞的流量
- θ_j : 混行元胞 i 进入流向 j 的渠化元胞 $i+1$ 的流量占元胞 i 总流出量的比例
- θ_j^a : 路段 a 去往路段 j 的车流所占车道数占渠化区总车道数的比例
- $\bar{Q}_{ij}^a(k)$: k 时段由上游路段 a 的渠化元胞 $i-1$ 流入下游路段 j 元胞 i 的最大车辆数
- γ_j^a : 路段 a 去往路段 j 的车流由于车辆转弯、重型车比例、路段坡度等原因而导致输出能力下降的折减系数
- $\zeta_{i-1,j}^a$: 路段 a 的末端元胞分配给去往路段 j 的饱和流率
- $D_i(k)$: 第 k 时段起始元胞 i 的交通需求
- $Z_i(k)$: 第 k 时段元胞 i 的车流状态
- $r_{m,i+1}(k)$: 入口匝道 $i+1$ 的实测流量
- $x_a^s(t)$: t 时刻路段 a 上去往终点 s 的流量
- $x_a(t)$: t 时刻路段 a 上的流量
- $u_a^s(t)$: t 时刻进入路段 a 要去往终点 s 的流入率
- $v_a^s(t)$: t 时刻离开路段 a 要去往终点 s 的流出率
- $g_l^s(t)$: t 时刻节点 l 产生的要去往终点 s 的流率
- $c_a(t)$: t 时刻路段 a 上的瞬时阻抗
- $c_a^h(t)$: t 时刻第 h 位出行者经过路段 a 所需要的时间
- $c_a(0)$: 初始时刻出行者以自由流速度通过路段 a 所需的时间
- Z : 路网的总行程时间
- N_a : t 时刻路段 a 上的出行者数

τ_{ij} : 路段 (i, j) 上的信息素量

∂ : 路径上信息素的挥发系数

$\Delta\tau_{ij}^{rs}$: OD 对 (r, s) 间路段 (i, j) 上信息素的增量

$p_{ij}^k(t)$: t 时刻蚂蚁 k 在节点 i 处选择转移至节点 j 的概率

η_{ij} : 路段长度 d_{ij} 的倒数

ε_{ij} : 路段流量 q_{ij} 的倒数

$r_j(k)$: 第 k 时段事发路段所在元胞 j 上游的多个入口匝道的累计交通需求量

D_z : 纵向车距

D_h : 横向车距

f : 车辆与路面之间的纵向摩擦系数

第一章 绪论 / 1

第一节 研究背景及意义 / 1

第二节 国内外文献综述 / 2

一、交通事件影响下的交通流模型 / 2

二、路网环境下的交通事件影响范围 / 6

三、基于交通事件的交通拥堵疏导策略 / 9

四、城市动态网络交通流分配模型 / 12

第三节 国内外研究成果评述 / 14

第四节 研究目的及主要内容 / 15

一、研究目的 / 15

二、主要研究内容 / 15

第五节 本书结构安排 / 16

本章小结 / 17

第二章 交通事件影响下的城市道路网络交通流模型 / 18

第一节 元胞传输模型理论概述 / 18

一、CTM路段模型 / 19

二、CTM节点模型 / 20

第二节 元胞传输模型应用概述 / 22

一、动态交通网络设计 / 23



- 二、动态交通分配 / 24
- 三、交通流动态模拟 / 24
- 四、信号控制优化 / 25
- 五、其他应用 / 26
- 第三节 交通事件下的改进型元胞传输模型 / 26
 - 一、元胞长度的可变设计 / 27
 - 二、交通事件对主要特征参数的影响 / 28
 - 三、基于事件位置的元胞划分 / 32
- 本章小结 / 34

第三章 普通城市道路交通事件影响分析 / 36

- 第一节 交通事件影响评价指标体系 / 36
 - 一、路段行程时间 / 37
 - 二、平均拥堵延误 / 38
 - 三、平均行程速度 / 39
 - 四、事件影响长度 / 39
- 第二节 普通城市道路交通事件影响范围预测模型 / 41
 - 一、模型假设 / 41
 - 二、模型构建 / 42
- 第三节 实例验证 / 49
 - 一、模型参数标定 / 49
 - 二、结果分析 / 57
- 第四节 仿真分析 / 62
 - 一、仿真参数确定 / 62
 - 二、仿真结果分析 / 63
- 本章小结 / 67

第四章 城市快速路交通事件影响分析 / 69

- 第一节 快速路交通事件影响范围预测模型 / 69
 - 一、模型假设 / 69

- 二、模型构建 / 70
- 第二节 实例验证 / 76
 - 一、模型参数标定 / 76
 - 二、结果分析 / 81
- 第三节 仿真分析 / 88
 - 一、仿真参数确定 / 88
 - 二、仿真结果分析 / 89
 - 三、与普通城市道路的事件影响对比分析 / 95
- 本章小结 / 101

第五章 普通城市道路交通事件疏导策略研究 / 103

- 第一节 交通事件影响范围的区域划分 / 103
 - 一、处置区 / 104
 - 二、控制区 / 104
 - 三、预警区 / 105
- 第二节 不同区域内的交通疏导策略 / 105
 - 一、处置区 / 105
 - 二、控制区 / 106
 - 三、预警区 / 106
- 第三节 基于正交试验设计及蚁群算法的交通流疏导模型 / 107
 - 一、正交试验设计原理及其应用 / 107
 - 二、蚁群算法原理及其应用 / 110
 - 三、基于正交设计及蚁群算法的动态疏导模型 / 114
- 第四节 实例分析 / 122
- 本章小结 / 130

第六章 城市快速路交通事件疏导策略研究 / 132

- 第一节 快速路交通事件特性及其疏导目标 / 132
- 第二节 快速路交通疏导策略分析 / 134
 - 一、交通事件影响范围的区域划分 / 134



二、不同区域内的交通疏导策略 / 135

第三节 基于VMS的不同区域疏导方案设计 / 139

一、处置区的疏导方案 / 140

二、控制区的疏导方案 / 145

三、预警区的疏导方案 / 148

第四节 实例分析 / 151

一、处置区的VMS疏导方案 / 152

二、控制区的VMS疏导方案 / 154

三、预警区的VMS疏导方案 / 156

四、主要评价指标的对比分析 / 157

本章小结 / 159

第七章 结论与展望 / 161

第一节 主要研究结论 / 161

第二节 主要创新点 / 162

第三节 研究工作展望 / 163



绪 论

第一节 研究背景及意义

交通事件是指任何偶发性的能引起道路通行能力减少或需求增加的非正常事件。城市道路网中出现的交通事件有许多类型，比如交通事故、车辆抛锚、路面维修、大型集会、游行等。^①随着我国经济的高度发展及城市化进程的不断推进，城市人口规模不断扩张，城市小汽车保有量迅速增长，城市道路交通事件频发。以城市交通事件中最常见的交通事故为例，据统计，2014年全国交通事故发生数总计196 812起，造成58 523人死亡、211 882人受伤，直接财产损失达到107 543万元。^②交通事件的发生率居高不下，不仅给道路参与者的生命财产安全造成严重损失，而且对经济和社会发展产生不良影响，还对城市道路的安全畅通造成严重威胁。

目前，交通事件已成为导致城市道路交通拥堵、降低路网运行效率的主要原因之一。交通事件一旦发生，通常会形成道路通行能力的瓶颈，产生车辆拥挤排队现象。如果事件未得到及时处理，交通拥堵很有可能会扩散并导致路网范围内的大面积交通拥堵，甚至是交通瘫痪。同时，交通事件在时间和空间上的不可预知性也极大地增加了预防与控制其影响的难度。

现有的关于城市道路交通事件影响的研究仍存在不足，忽视了不同类型、

^① 王培宏. 城市交通事件应急管理系统及其理论问题的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.

^② <http://www.stats.gov.cn/adv.htm?m=advquery&cn=C01>.



不同级别的交通事件对不同路网条件下交通流的时空动态影响；现有的研究主要针对高速公路交通事件的影响分析，其研究成果与城市道路交通环境下的影响扩散机理存在差异。另外，现有的道路交通事件的快速处置技术体系及机制仍不够完善，交通系统的应急能力仍有待进一步优化。

因此，本书拟通过构建交通事件影响下的城市网络交通流模型，揭示交通事件引发城市道路交通拥堵的形成与扩散机理，确定不同类型、不同级别的交通事件在不同路网条件、交通流条件以及处置时间下的影响范围。在得到交通影响范围的基础上，结合网络交通流模型及动态交通流疏导模型，得出拥挤交通网络上的瞬时交通流分布状态，并以交通管制、调节信号配时和动态路径诱导等措施为主要手段，研究提出应对交通事件的疏导技术及应急预案，提升应对交通事件的能力。

本书的主要意义在于探索城市道路交通事件影响的扩散机理及其疏导与控制策略，研究成果有助于促进交通工程与控制科学、系统科学、管理科学与计算机工程等众多其他学科的交叉融合，并能够为城市交通管理部门提供科学的理论和技术支持，对促进城市交通系统的健康可持续发展具有理论意义及应用价值。

第二节 国内外文献综述

一、交通事件影响下的交通流模型

Michalopoulos^① (1981) 提出了估算偶发性拥堵扩散范围的交通波模型。该模型依据流体动力学的基本原理，将交通流密度的变化比拟成水波的起伏并将其抽象为交通波。当交通流由于道路或交通状况的改变而引起密度发生改变时，在交通流中就产生了交通波的传播。通过分析交通波的传播速度，以揭示交通流量与密度、速度之间的关系，并描述交通流拥堵的形成与消散过程。

^① Panos G Michalopoulos, Vijaykumar B Pisharody. Derivation of delays based on improved macroscopic traffic models [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15 (5): 299-317.

Morales^① (1986) 提出了利用到达率和离去率曲线估计事件引起的总延误的确定性排队论模型。该模型假设到达率和离去率是不变的确切值, 可以计算出拥挤持续时间和排队长度。由于实际交通流是具有波动性的, 到达率和离去率也会随之发生改变, 因此这个模型的计算结果不能应用于交通状态的实时估计, 但其模型构建的想法对后来的研究具有深远影响。

Newell^② (1993) 提出了基于波动理论的累计流量到离曲线模型, 并且由此衍生出了累计占有率到离曲线模型与累计流量 - 占有率曲线模型, 通过这些模型对高速公路上的交通状态进行估计。该模型最大的优点是完全基于实际数据建立, 缺点是只能对交通状态进行定性分析, 无法获得实时的量化指标值。

T. Nagatani^③ (1993) 提出了采用元胞自动机模型对交通事故引起的交通阻塞进行模拟, 并探讨了在交通流模型中, 交通事故的发生对动态阻塞相变的影响。

Lawson^④ (1997) 通过对 I/O 模型进行改进, 对瓶颈路段车辆排队的时空扩散范围进行了估计, 区分了由事件引起的延误和车辆的排队时间, 通过追踪队尾车辆的方法估算了拥挤的时空扩散范围; 但是该模型假设到达率和离去率是固定不变的, 不适用于过饱和交叉口的估计, 且由事件引发的道路通行能力仅会出现一次变化。

Do H. Nam^⑤ (1998) 以循环性挤塞为例, 基于交通动力学原理, 分析了在拥挤情况下高速公路的交通流特性。其中, 采用了传统的两个宏观分析工具: 确定性排队分析和冲击波的分析。比较研究结果表明, 确定性排队分析和冲击波的分析相比, 前者总是低估了总体延误。

① Morales M J. Analytical procedures for estimating freeway traffic congestion [J] . Public Road, 1986, 50 (2) : 55-61.

② Newell G F. A Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Part I: General Theory [J] . Transportation Research B, 1993, 27B (4) : 281-287.

③ Nagatani T. Effect of traffic accident on jamming transition in traffic-flow model [J] . Journal of Physics A: Mathematical and General, 1993 (26) : 1015-1020.

④ Lawson T W, Lovell D J, Daganzo C F. Using the Input-Output Diagram to Determine the Spatial and Temporal Extents of a Queue Upstream of a Bottleneck [C] . Transportation Research Record 1572, Washington DC, 1997: 140-147.

⑤ Do H Nam, Donald R Drew. Analyzing Freeway Traffic Under Congestion: Traffic Dynamics Approach [J] . Journal of Transportation Engineering, 1998, 124 (3) : 208-212.



D. Helbing^① (2003) 基于动态的排队网络模型和交通流的基本特征, 通过将道路细分为较长的具有恒定通行能力的均匀路段, 探讨了在特定横截面的流量和车辆的平均出行时间。该模型可以描述交通流的回滞现象及典型的阻塞模式, 然而其准确性却不如设定恒定的传播速度及可以描述停止 - 启动波的宏观交通模型。

E. Bourrel 与 J. B. Lesort^② (2003) 结合微观模型和宏观模型的交通流建模方法, 提出了一种基于 LWR 模型的混合模型。该混合模型主要解决了离散交通流与连续交通流之间的过渡边界问题。该模型可以清晰地反映出由交通事件引起的排队形成与消散波的传播过程。

Sheu^③ (2004) 基于车道变换行为定义了 6 个随机交通参数, 提出了随机排队预测模型用以预测事件发生点处的排队长度。但是该模型并不适用于对多条车道阻塞的交通事件进行研究。该模型对驾驶人的换道行为设定了一系列的假设, 并且在预测过程中必须保证排队长度不会超出上游检测器。

M. Schönhof 与 D. Helbing^④ (2007) 通过对一高速公路路段的多起交通事件引起的拥挤交通状态的特征属性之研究, 确定了 5 种不同的时空拥堵模式及其组合模式。基于拟合平滑法建立模型, 与一阶、二阶宏观交通模型进行对比, 并对“反向效应”“同步流”及“停止 - 启动波”等问题进行了探讨。

T. Q. Tang 等^⑤ (2009) 分析了由交通事件造成的交通中断概率, 并通过其对车辆跟车行为的影响之研究, 提出了一个新的跟车模型。该模型的稳定状态通过使用线性稳定理论得到, 并构造了修正后的 KDV 方程, 将交通流状态划分为稳态、亚稳态及非稳态。

① Helbing D. A section-based queueing-theoretical traffic model for congestion and travel time analysis in networks [J]. Phys. A: Math. General, 2003 (36): 593-598.

② Bourrel E, Lesort J B. Mixing Micro and Macro Representations of Traffic Flow: a Hybrid Model Based on the LWR Theory [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003: 193-200.

③ Sheu J B, Chou Y H. Stochastic modeling and real-time prediction of incident effects on surface street traffic congestion [J]. Applied Mathematical Modeling, 2004 (28): 445-468.

④ Schönhof M, Helbing D. Empirical Features of Congested Traffic States and Their Implications for Traffic Modeling [J]. Transportation Science, 2007, 41 (2): 135-166.

⑤ Tang T Q, Huang H J, Wong S C, Jiang R. A new car-following model with consideration of the traffic interruption probability [J]. Chinese Physics B, 2009 (18): 975-983.