

区域疏散交通管理问题解析及集成建模框架

崔建勋, 安 实

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨, daqing8210@126.com)

摘 要: 为解析区域疏散交通管理所涉及的相关策略及其相互之间的时空关联, 从灾害应急管理的全局角度, 明确了灾害管理的类型、阶段以及灾害管理过程中所涉及的主要交通管理问题, 从而阐明了区域疏散交通管理问题的内涵及外延, 建立了包含灾害情景分析、疏散交通需求预测、疏散交通流解析、疏散交通动态分配模型、疏散综合交通管理以及疏散交通管理方案仿真评价等在内的集成疏散交通管理建模框架. 该框架能够有效指导区域疏散交通管理问题的分析与建模, 对于提高道路网交通疏散效率具有理论和实践价值.

关键词: 区域疏散; 交通管理; 集成建模

中图分类号: U492.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)08-0103-06

Analysis of regional evacuation and traffic management and its integrated modeling framework

CUI Jian-xun, AN Shi

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, daqing8210@126.com)

Abstract: To analyze the relative management strategies during regional evacuation and traffic management and the relationship among them, from the global perspective of disaster emergency management, this paper identifies the types, stages of disaster management and major traffic management issues involved during the process of disaster management. Also, the connotation and extension of regional evacuation traffic management are clarified. Finally, a integrated modeling and analysis framework of evacuation traffic management is established, including the disaster scenario analysis, evacuation traffic demand forecasting, evacuation traffic flow analysis, evacuation traffic dynamic assignment model, integrated evacuation traffic management and simulation evaluation of evacuation traffic management plan. This framework can effectively guide the analysis and modeling of regional evacuation traffic management issue and present a significant theoretical and practical value for improving the efficiency of traffic evacuation in a transportation network.

Key words: regional evacuation; traffic management; integrated modeling

灾害条件下的交通管理是一个多阶段、多任务的决策与调度过程, 可能会面对各种交通问题, 诸如受灾区域疏散交通管理、应急救援交通管理以及路网恢复、重建管理等. 同时, 灾害交通管理还必须与其他灾害管理活动协同进行, 例如灾害预报、可能受灾区域的危险性分析以及避难所管理等^[1-4].

区域疏散交通管理是灾害交通管理的一个重要组成部分. 对于疏散本身而言, 依据发生在灾前

或者灾后, 也包含了不同的规划与响应活动^[5-6]. 在疏散交通管理过程中, 有许多活动都与之同时发生, 并与之相互影响, 例如紧急救援与紧急路网修复. 因而, 疏散不仅仅是要解决疏散清空时间估计的问题. 为此, 有必要从灾害管理的全局角度审视疏散交通管理问题, 明确其内涵及外延, 从而建立区域疏散交通管理的集成建模与分析框架. 本文在对灾害管理所涉及的灾害类型、灾害管理阶段以及灾害管理过程中所涉及的交通管理等内容进行分析的基础上, 着重阐述灾害条件下疏散交通管理所涉及的核心内容及其相互的关联, 为疏

收稿日期: 2010-04-29.

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.

散交通管理的建模与分析提供框架性支撑。

1 面向道路交通的灾害管理

通常情况下,灾害按照成因分类为:自然灾害和人为灾害。但从灾害交通管理的角度来看,这种划分方法并不能有效说明问题。例如,恐怖袭击或核事故虽然与飓风或地震本质上属于不同类型的灾害,但从交通分析的角度,却导致了相似的疏散活动^[7-8]。因而,本节将从灾害相关、需求相关和路网相关3个角度,给出各种灾害的具体特性分析,从而解析相关灾害交通管理的特性,进而描绘出灾害条件下道路交通管理问题的基本轮廓。

1.1 灾害类型

从灾害交通管理的角度,着重从以下几个方面划分不同类型的灾害:

1) 预报时间。地震和飓风的主要区别在于是是否能够提前预报,这也决定了疏散是在灾前还是灾后进行。洪水本质上具有与飓风相类似的可提前预报特性,但其预报时间要比飓风短。核设施事故、危险物质事故以及恐怖袭击往往很短、甚至没有预报的时间。

2) 路网破坏。在飓风灾害条件下,潜在危险区域路网的破坏类型是可以事先预测的,但由于飓风轨迹的不确定性,又使得确定实际的破坏情况变得较为困难。道路基础设施的破坏主要源于强风与飓风所引发的洪水。在洪水灾害条件下,路网的破坏是较为局部的,破坏的类型和强度受到了路网地理结构的影响,尤其是海拔的影响。在洪水的作用下,一些关键的基础设施,如桥梁可能会发生垮塌等现象,从而造成局部路段的中断。相对上述两种灾害而言,地震对路网的破坏程度要大得多。关键基础设施,诸如核电站、军火库、机场以及重要的政府建筑物往往会成为恐怖袭击的目标,这些设施遭到袭击后,对周围路网造成的破坏,可以类比为较小规模的地震所造成的影响。如果,恐怖袭击的类型为施放毒气等,那么不会对路网造成实际的物理破坏,只会造成局部路网的暂时不可使用,这可类比危险物质事故对路网造成的影响。

3) 有效路网服务能力。有效路网服务能力的确定一方面依赖于灾害对现有路网的破坏,另外一方面依赖于所采取的交通管理措施,诸如逆行车道设置、应急专用通道、濒危建筑物周围的道路封闭等。同时,有效路网服务能力也与疏散发生的阶段有关。例如,尽管飓风会对路网设施造成破坏,但在一定预报时间存在的情况下,可以在灾害

登陆前,路网未遭破坏的情况下进行紧急疏散。而如果在飓风发生后进行疏散,由于此时在已遭破坏的路网上同时要进行搜索和路网修复工作,因而会极大的降低疏散性能。

4) 灾前准备。核电站等设施周围的疏散准备相对其他灾害而言较为完善和具体,这主要是因为灾害发生的位置是确定的,然而实际的受灾区域却是随着具体灾害发生时外界因素的变化而不同的。飓风和洪水灾害所威胁的区域,也可以根据历史数据和提前预报而做出相应准备。地震灾害、恐怖袭击等由于无法事先预报,因而其疏散往往是实时的,不过仍然可以根据灾前的情景分析,做出一定的准备。

5) 需求预测。飓风灾害条件下的疏散响应取决于灾害发生的日期、时间以及沿海地区人口分布和住房类型等。以往的研究多数假定飓风期间的疏散需求服从累积正态分布,也就是当疏散指令发布后,大多数的人员将会参与到疏散中,而仅有少数人在疏散指令发布之前或发布后较长时间才开始参与疏散。疏散的交通需求也取决于疏散指令的类型(强制还是自愿)以及人们对灾害严重程度度的感知。尽管目前还没有关于洪水和核设施事故所导致疏散交通需求预测的研究,但其疏散交通需求的产生可以类比飓风疏散的情形,采用需求加载曲线来表示。在这3种类型的灾害情况下,人们通常并不单独参与疏散,而是首先寻找各自的家庭成员,然后一起疏散,而且在洪水或飓风灾害登陆之前,一些人通常会到一些地点,例如商店等,获取一些必要的工具,这都将产生额外的出行需求。

6) 应急响应。飓风、洪水等灾害灾前阶段的应急响应,通常包括疏散医疗机构、学校、监狱等特定场所内的人员,同时运送负责实施应急疏散的相应人员到达指定地点。对于核事故或危险物质事故等灾害,还需要运送专业人员来清理受到污染的区域。灾后应急响应包括搜救和应急物资的运输。

当然,除了此处总结的灾害类型外,还有暴雨、泥石流、火山喷发、大火以及海啸等,这里没有一一列出,但均可以上述分类分析的方法进行描述。

1.2 灾害管理阶段

在阐述了各种不同类型灾害特性及其对交通需求、交通路网的影响后,接下来有必要从灾害发生的不同阶段,阐述灾害与相应交通管理之间的关系,从而明确灾害发生的不同阶段,所包含的各

种交通管理活动及其相互的影响. 通常情况下灾害的阶段划分为灾前阶段、灾中阶段和灾后阶段.

1)灾前. 从交通分析的角度,灾前是指从当前到下一次发出灾害警报或灾害发生之间的一段时间. 这个阶段主要的工作是应急规划、准备以及人员培训等. 在灾前阶段,一些活动是直接与管理相关的,还有一些是与行政、立法、应急物流准备和灾害缓解措施相关的. 与交通管理相关的内容包括数据收集和基础设施评估,它们共同作为灾害情景分析的输入,通过灾害情景分析,可以确定针对各种类型和严重程度的灾害所需要采取的综合交通管理方案. 在实际发生某种灾害时,按照实际情况的特殊性,可适当修改这些方案而后执行,或部分的执行某些管理方案. 灾害情景分析过程中,假定的路网服务能力直接影响着后续生成的应急响应方案. 因此,在规划阶段,应尽量采用能够反映真实情景的交通分析模型,从而捕捉实时交通问题以及各种管理控制措施与交通流之间的交互行为.

2)灾中. 从交通分析的角度,灾中是指从发出灾害警报或灾害发生到灾情紧急状态解除之间的一段时间. 灾害的响应开始于对灾害事件的检测和识别. 检测包含了确定危险区域范围、人口规模和事件的严重程度. 接下来是对交通路网进行评估. 由于灾害条件下收集交通数据的困难,加之灾害条件的不断演变,使得交通路网评估非常困难. 应采用逆行车道、停车限制、路肩车道启用等管理措施,尽量保证采用最大的路网服务能力来满足非常规的大规模交通需求. 在灾中阶段,主要包含两个方面的交通管理活动:应急疏散和紧急救援,它们往往相互冲突. 对于有一定长度报警时间的灾害而言,疏散准备过程中,管理者能够确定潜在危险区域,并决定各个区域的优先疏散权,确定安全终点,可用的交通工具以及指定疏散路径等. 不管是否拥有疏散准备的过程,疏散的具体执行都十分困难,主要是因为监测灾害、路网基础设施以及疏散交通流需要大量的人力、物力资源. 道路基础设施的修复主要发生在紧急状态结束以后,但通常情况下,为了紧急救援和紧急疏散的顺利开展,需要迅速修复一些关键性的基础设施.

3)灾后. 从交通分析的角度,灾后始于灾情紧急状态的解除,也就是大规模的搜救工作已经结束. 灾后阶段包括短期和长期的路网恢复与重建以及灾后日常交通的管理.

1.3 灾害交通管理

以灾害的类型以及灾害管理的阶段分析为基

础,可以从灾害管理的全局视角,给出灾害管理不同阶段所涉及的交通管理问题及它们相互之间的关系,见图 1.

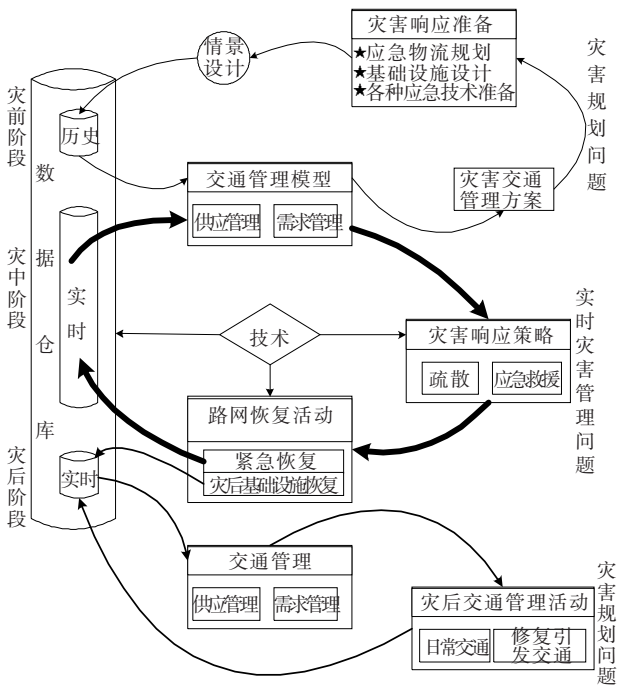


图 1 灾害管理各阶段的主要交通管理问题

灾前阶段主要是规划问题,包括历史数据收集、灾害情景设计和交通管理方案制定等. 历史数据和灾害情景共同输入到交通管理模型中,将会生成应急交通管理方案,从而根据生成的交通管理方案做出各种应急准备. 图 1 中,交通管理模型一方面服务于规划阶段,另一方面又服务于实时交通管理阶段,实际上,目前还没有这样的综合模型. 规划阶段的交通管理模型较为细致,计算成本较高,因而很难满足实时管理的要求;而实时的交通管理模型目前还不成熟,缺乏必要的解析模型作为支撑.

灾中阶段的交通管理问题主要包括疏散和各种应急救援行动. 该阶段需要实时的收集灾害、道路基础设施以及交通等方面数据,输入到实时交通管理模型中,从而制定灾害响应策略,进而根据应急响应策略进行疏散、救援和紧急的路网修复工作. 虽然,图 1 将该阶段所采集的数据与规划阶段的数据共同表示在一个数据仓库中,但两种数据之间有很大区别. 该阶段数据要求采集容易、处理快速,并能够实时的反映灾害、路网和交通的动态演变. 此外,这里的“技术”是一个广义的概念,包含为数据仓库提供灾害、路网和需求数据的信息技术,为具体应急工作提供支持的各种交通监控技术和路网修复过程中的各种工程技术,例如临时桥的铺设技术等.

灾后阶段的应急工作主要包括路网基础设施修复与重建以及针对日常交通与路网修复所引发交通的管理。

2 面向道路交通的疏散管理

2.1 疏散管理的一般性内容

疏散管理是灾害管理的重要组成部分. 灾害期间的区域疏散是大规模的管理与调度问题, 它可能发生在灾前(例如飓风、洪水), 也可能发生在灾后(例如地震、恐怖袭击). 疏散管理研究所包含的一般性内容:

1) 灾害分析. 主要研究灾害的类型、强度以及可能对道路交通产生的危害. 依据先进的技术和方法, 可以大致估计灾害发生的时间和地点以及所产生的破坏类型.

2) 危险性分析. 该分析采用灾害分析的结果, 用以确定受灾区域、人口规模以及相应的社会经济特性, 诸如住房条件、人口密度等. 同时, 也对一些关键基础设施在灾害袭击下的损毁风险进行分析.

3) 避难所分析. 用以确定危险区域内外的各安全终点以及相应的服务能力.

4) 行为分析. 危险区域待疏散人员对疏散指令的反应是一项重要的研究内容. 主要目的是确定人员的疏散参与率以及疏散发生的时间分布. 此外, 也对人员的安全终点选择行为进行研究.

5) 交通分析. 将前续 4 个分析步骤所产生的结果输入到交通分析模型中, 用以确定疏散主要通道以及相应的流量分配结果, 确定路网疏散清空时间, 并识别瓶颈路段. 通常情况下, 会针对各种不同的灾害情景和疏散交通需求水平, 得出多种交通分析结果.

2.2 疏散管理中的交通分析

在灾害条件下, 传统交通规划所普遍采用的“4 阶段”需求预测模型, 并不能够很好反映疏散交通的动态演变过程. 为此, 有必要依据疏散交通需求及管理措施的特性, 寻求恰当的疏散交通分析方法. 如图 2 所示, 一般情况下, 疏散交通分析包含交通发生、交通分布和交通分配 3 个部分.

1) 疏散交通生成. 疏散交通生成分析首先要确定潜在的危險区域. 危险区域的确定依赖于灾害分析的结果. 进而, 将危险区域进行小区划分, 并依据危险性分析的结果, 确定每个小区总的人口数和车辆数.

2) 疏散交通分布. 疏散交通分布分析的首要问题是确定人员的疏散终点选择行为. 如果根据

历史灾害的行为调查数据, 能估计出每个交通小区人员疏散终点的选择, 那么便可直接确定疏散交通分布情况(即疏散的 OD 矩阵). 如果不能通过历史数据估计出每个交通小区人员终点选择的行为, 那么可将疏散交通分布分析与接下来的疏散交通分配分析结合在一起, 进行同步优化.

3) 疏散交通分配. 疏散交通分配分析是将每个疏散交通小区产生的疏散交通需求, 按照相应的终点选择, 在指定的疏散路网上做出路径分配. 疏散交通分析的主要目的是在给定的灾害情景下, 确定安全有序疏散所需要的最小路网疏散清空时间, 此外, 还包括: ① 生成有效的疏散交通管理控制方案; ② 评价各种交通管理控制措施的有效性; ③ 识别疏散过程中的路网瓶颈节点和路段.

根据交通分析的结果, 可以从需求管理和供应管理 2 个方面, 对疏散交通管理方案进行改进, 从而进行新一轮的疏散交通分配分析, 对疏散清空时间等指标进行再评价, 这样反复的迭代直到当前的路网和疏散交通管理方案能够满足, 在安全时限内疏散所生成的交通需求.

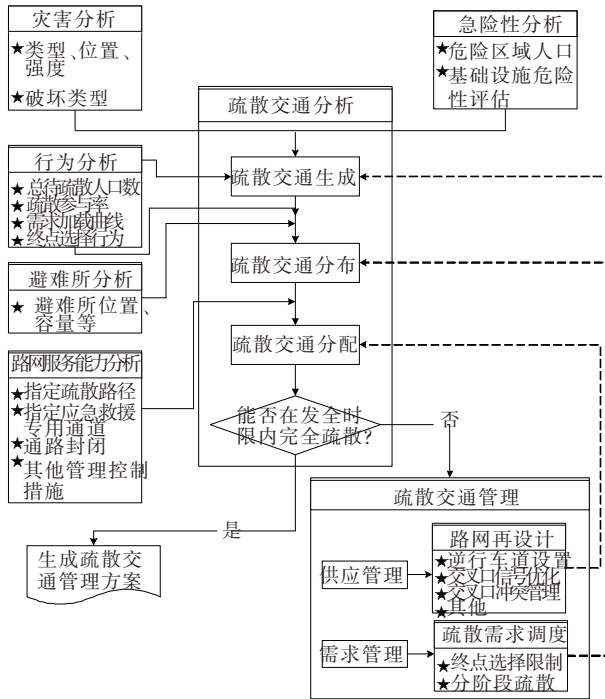


图 2 疏散交通分析基本框架

3 区域疏散交通集成管理建模

3.1 区域疏散交通管理建模核心问题

疏散交通管理的目标是借助综合的需求管理措施和供应管理措施来提高疏散的效率. 因而, 疏散交通管理建模包含了多个核心的子问题, 它们不可或缺又相互影响, 主要包括:

1) 灾害影响分析. 用于确定危险区域以及安全疏散的时限.

2)疏散交通需求预测. 用于估计危险区域的人口总数,可用于疏散的交通工具类型与数量以及人们对于疏散指令的反应.

3)疏散交通流建模. 用于对疏散交通流在疏散网络上的传播过程进行建模,从而捕获交通管理、控制措施与疏散交通流之间的时空关系,为疏散交通管理控制措施的生成,提供基础支撑.

4)交通管理建模. 从需求管理和供应管理的双重角度,综合考察多种疏散交通管理控制措施,管理控制目标以及其实施约束,建立综合的疏散交通管理最优化模型.

5)最优管理控制策略求解. 应用算法来求解疏散交通管理最优化问题,并寻找最佳的疏散交通管理控制参数组合.

6)疏散交通管理方案评价. 依据最优化模型求解所生成的“最佳”疏散交通管理方案,采用微观交通仿真软件进行仿真分析,输出各种疏散交通性能指标,从而修正疏散交通管理策略.

1)和2)两个子问题主要用于确定疏散区域的范围和疏散交通的需求;3)~6)则用于生成最佳的综合疏散交通管理方案,从而满足所预测的交通需求.3)~6)这4个子问题是研究的重点.

3.2 区域疏散交通管理建模的需求

疏散交通管理建模的目标是确定针对特定疏散情景和交通需求的综合疏散交通管理控制策略. 所建立的模型要具有以下功能:

1)准确描述疏散交通流的动态特征及其与疏散交通管理措施间的交互. 疏散交通管理模型应能够较为真实的反映时变的疏散交通需求、疏散网络上的交通流传播动态以及捕获潜在的排队形成和消散. 该功能对于生成合理、高效的疏散交通管理策略至关重要.

2)高效集成各种主要的疏散交通需求管理与供应管理控制措施. 本文中疏散交通供应管理措施主要包括逆行车道的设计和交叉口交通组织优化;需求管理措施主要包括各疏散交通小区的分阶段疏散时序优化以及交叉口大型运载工具(如公交车辆)的优先通行.

3)充分反映每种管理控制策略的实施约束. 疏散交通管理最优化模型应尽量考虑各种疏散交通管理策略的实施约束,使模型可操作性较强.

4)能够针对其设计高效的求解算法. 疏散路网的规模和复杂程度,会对最优化管理模型的求解性能带来很大影响,因此,对于规模和复杂度较大的路网疏散交通管理模型求解,应设计适当的启发式算法,从而在求解的准确性和效率间取得

折中.

5)能够生成评价疏散交通管理控制策略的指标. 给定一个疏散交通管理方案,管理者需要知道执行该方案后,整体路网交通的疏散性能,因而,疏散交通管理优化模型的求解,需要能够得到各种疏散系统性能的评价指标.

3.3 区域疏散交通管理集成建模框架

图 3 给出了疏散交通管理集成建模框架.

3.3.1 模型输入模块

该模块允许用户设计特定的灾害情景、疏散交通需求以及避难所(安全疏散终点)相关信息,从而共同作为疏散交通管理综合模型的输入;针对特定类型和强度的灾害,应急管理者优先需要确定危险或潜在危险区域,并根据危险性将其划分为不同的交通分析小区,根据灾害的演变规律确定每个小区安全疏散时限,即在什么时间前,必须完成该小区的人员疏散,同时,根据灾害对路网交通的影响评估,确定可用于疏散的路网. 疏散交通需求的确定往往遵循 3 个步骤:

1)每个交通小区参与疏散人口数与车辆估计. 这不仅要确定该小区人口总数,还要分析该区域人员对灾害、疏散指令等做出的行为反应. 确定疏散人口总数的同时,还要确定疏散的车辆利用率,亦即对于特定的疏散人口数会产生多少车辆出行.

2)疏散交通需求加载曲线. 该曲线反映了动态的交通生成. 用于确定每个疏散交通小区,每个时间间隔内,参与疏散的交通量.

3)避难所分析. 用于确定避难所的位置和容量,以此为疏散交通管理模型提供疏散终点输入.

3.3.2 模型主体模块

在输入模块所指定的疏散情景下,该模块负责从疏散供应管理和需求管理 2 个方面,建立综合各种疏散交通管理策略的最优化模型. 主要研究内容包括:

1)疏散交通流建模. 真实反映疏散交通流在路网传播过程,并能捕获疏散过程中的拥堵、排队形成及消散等,是疏散动态交通分配及疏散交通管理方案生成的基础.

2)基础疏散动态交通配流模型. 在不考虑各种疏散交通管理措施情况下,按照可用路网和预测的交通需求,以疏散总时间最短为系统最优的目标,进行动态交通配流,从而得到疏散交通诱导的基础模型.

3)基础模型的修正. 从供应管理角度:①逆行车道设计(Contra-flow lane design). 疏散往往具有较大的方向性,因而通过将疏散整体倾向

相逆的路段实行逆行,从而增加疏散方向的道路通行能力;② 交叉口的冲突管理. 疏散过程中,主要的出行延误都发生在交叉口处,因而尽量消除交叉口的转向冲突是加快疏散过程的关键. 从需求管理的角度主要为分阶段疏散优化. 分阶段疏散(Staged Evacuation)是另外一种普遍采用的控制疏散交通流的措施. 与逆行车道设计和强制路线选择的控制方法不同,分阶段疏散并不改变网络的拓扑结构,而是主要通过在一时间窗内,合理的分布各个交通小区疏散交通需求,从而最大限度的利用现有的疏散网络. 在分阶段疏散中,按照灾害影响的演进和其他相关因素的预测,疏散的整个区域被分割成一些小的疏散区域. 管理者给与紧急程度较高的区域以优先疏散权. 分阶段疏散使用的条件是,导致疏散的灾害事件是逐渐扩展到整个疏散网络的. 基于以上3个方面的修正,可以将基础疏散交通配流模型转化为综合的疏散交通管理模型. 由于,疏散路网规模往往较大,实施各种管理策略的约束较多,最优化的模型求解往往具有很大的困难,尤其对于实时性要求较高的疏散操作,将无法满足现实需求. 因而,需要设计相应的启发式算法,使该模型能够广泛应用于大规模路网的区域疏散.

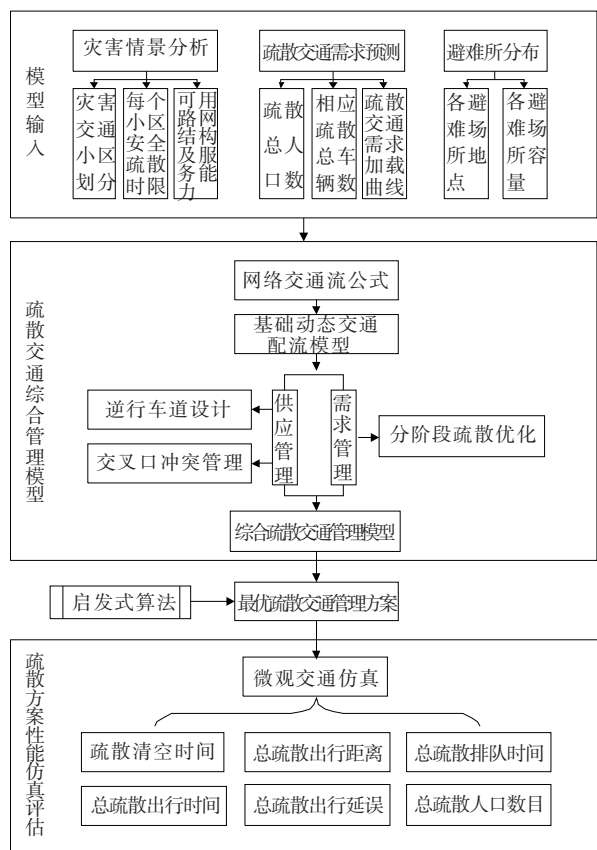


图3 疏散交通管理集成建模框架

3.3.3 仿真评估模块

针对不同的疏散情景设计,经过最优化模型的求解,将会产生疏散交通管理方案,但由于最优化方法无法考察疏散者及车辆的微观行为,因而其生成的方案过于“理想化”. 因此,应采用微观交通仿真软件,将最优化模型的求解结果,作为微观仿真的情景输入,从而在微观交通仿真环境中,通过各种疏散交通性能的指标输出,评估方案的有效性.

4 结 语

疏散交通管理本质上属于复杂的、动态的优化决策问题. 本文以灾害管理→疏散管理→疏散交通管理为脉络,从面向道路交通的角度出发,系统剖析了灾害管理、疏散管理中所涉及的交通管理问题,明确了疏散交通管理建模与分析的核心问题,同时给出了用于指导疏散交通管理分析与建模的集成框架.

参考文献:

- [1] 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.
- [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] LIU Y. Two-level integrated optimization system for planning of emergency evacuation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(10):800-807.
- [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] 刘小明,胡红. 应急交通疏散研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3):108-121.
- [7] XIE C, LIN DY, WALLER S T. A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies[J]. Transportation Research Part E, 2010, 46(3):295-316.
- [8] COVA T J, JOHNSON J P. A network flow model for lane-based evacuation routing[J]. Transportation Research Part A, 2003, 37:579-604.

(编辑 赵丽莹)