

中文摘要

交通事件是引起交通路网中各种偶发性拥挤的关键因素,同时会造成交通设施服务效率下降以及交通使用者的利益损失。于是,对城市交通事件进行准确有效的检测和管理是减少城市交通事故、降低事故损失、减少交通堵塞的有效的方法。本文从事件管理的角度入手,重点进行了如下三个部分的研究。

第一部分(第一章、第二章):交通事件管理系统的设计研究。在本部分,对城市交通事件的类别、特性以及事件对交通状况的影响进行了详尽的分析,在此基础上,参考国外发达国家对事件管理领域的研究成果以及我国 ITS 框架中对事件管理的要求,设计出适应我国城市交通状况的“城市交通事件应急管理系统”。对各个子系统的进行了功能分析、设计出系统运行的信息流图,并探讨了系统内部有重要研究意义的若干理论问题。

第二部分(第三章):对交通事件引起的车辆延误进行分析研究。交通事件使得事发路段的原有交通流变为间断交通流,行驶车辆在事发点上游形成排队等待现象。本章对交通事件造成的延误进行了定性和定量两方面的分析研究,将车流波动理论的原理运用到事件延误的分析中,对集结波与消散波的蔓延速度进行了合理的计算,并运用天津大学系统工程研究所自行设计的交通流仿真系统对事件延误进行了仿真实验。

第三部分(第四章):对交通事件的应急调度进行了分析研究。交通事件对道路交通状况的影响随着时间的延伸而呈指数范围扩散。因此,事件管理有必要在短时间内对事件作出响应救援措施,同时,救援实施也要求救援成本的合理性。本章首先在事件延误计算的基础上,分析了行驶车辆在事发路段上的行驶时间,提出在事件的不同状况下行驶时间的分布情况;然后对从出救点到应急点的最短路问题进行了分析研究;最后,在最短路计算的基础上,运用多目标决策分析方法研究了应急资源的应急调度问题。

第五章,对全文进行了总结,并提出了进一步研究的方向。

关键词: 智能交通系统 交通事件 应急管理 调度 最短路 多目标决策分析

ABSTRACT

Traffic incidents always result in every kinds of congestion, reducing the service efficiency of traffic facilities and damaging the interests of road-users. Therefore, it is necessary to detect and manage traffic incidents happened in urban traffic network. At the same time, emergence management of traffic incidents will be an effective means to reduce the possibility of second-incidents. From the point of view of incident management, this thesis focuses on three sections as follows.

The first section (the 1st chapter and the 2nd chapter): Design of the Traffic Emergence Management System. On the basis of analyzing traffic incidents' characteristics and researching traffic incidents' impacts on traffic flows, the paper proposes an Urban Traffic Emergence Management System (UTEMS) which adapts to the urban traffic conditions in China, in the light of the definition of emergence management in the Intelligent Transport System (ITS) Architecture and some existing research results of developed countries. Every sub-system's function is well explained and the information flow for the system running is showed in a flow chart.

The second section (the 3rd chapter): Study on the vehicle delay caused by traffic incidents. Traffic incident cuts off the traffic flow into discontinuous flow, giving rise to congestion and vehicle delay. This chapter analyses the vehicle delay qualitatively and quantitatively. Applying the traffic flow wave theory into vehicle delay studying, this paper calculates the speed of the concentrate wave and the volatilization wave. A simulation experiment proved the research result.

The third section (the 4th chapter): Study on the emergence dispatch problem. It is essential to respond to traffic incident in time because the jam will be diffused on exponent as time goes on. Based on the vehicle delay estimate refer to the 3rd chapter, this chapter analyzes the travel time on the road where incident happened, clarifying the distributing state of travel time according to the various state of incident. Further more, the shortest path from retrieval depots to incident spot is researched. At last, this paper mainly discusses the emergence dispatch problem using a practical multiple objectives decision-making method, on the ground of shortest path calculating.

The 5th chapter reviews the whole thesis and sums up some research fruits, putting forward the directions of further study.

KEY WORDS: Intelligent Transport System (ITS), traffic incident, emergence management, shortest path, dispatch, multiple objectives decision-making

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2008年1月19日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2008年1月19日

签字日期：2008年1月19日

第一章 绪论

本章首先阐明了本文所选课题的研究背景及其研究价值；然后对交通事件以及事件管理的基本概念进行了简要介绍，探讨了交通事件与道路通行能力、偶发性交通拥挤、车辆延误、二次事件、道路服务水平的关系，指出了交通事件管理的必要性、目标以及一般思路；最后评述了目前该领域的研究进展，对国内外的关于交通事件应急管理的研究现状进行了介绍。

1.1 本文的选题背景与研究意义

自 1886 年第一辆汽车问世以来，全世界已经有 3000 多万人死于交通事故。据国际红十字会新月会公布的资料，世界上每年约有 50 万人死于交通事故，1500 多万人受伤，甚至成为终身残废。交通事故对人类造成的损失是惊人的，然而其危害性不仅仅反映在伤亡人数上，它在经济方面造成的损失同样是巨大的，据权威部门估计，交通事故总的损失约占国民经济的 1% 左右^[1]。各发达国家都在投入巨资为减少交通事故而做出努力，尽管交通事故不可能完全避免和消除，然而通过一定的管理干预，可以实现对交通事故的预测、缩短响应时间以及最大限度降低交通事故带来的损失。

采取科学的交通管理措施对于预防城市交通事件的发生是极为必要的。但由于交通事件发生的随机性和突发性，更多的交通事件又是难以预防的，因此，事件发生后采取及时而有效的紧急救援措施，对于降低事故造成的直接损失、预防二次事件、降低事件引起的延误甚为重要。因而，对交通事件管理的研究具有重要的理论意义和实用价值。

自八十年代末期，以当代高新技术为基础的智能交通系统（Intelligent Transport System, ITS）概念和技术在工业化国家被提出^{[2] [3]}，其中，异常状态的紧急救援系统，是 ITS 的一个重要组成部分，国外目前正在着力开发道路交通紧急救援的设施、设备，有关紧急救援决策与辅助管理技术的研究必将是未来的发展趋势。我国也正在积极地研究和开发适应我国城市交通的 ITS，而开发研究交通事件预防与紧急救援系统，将为形成我国的智能化的实用的道路管理技术奠定基础。

因为交通事件是不可避免的，所以交通阻塞和车辆延误也是必不可少的道路

交通现象,事件管理系统通过现有技术的合理应用及各相关单位的有效协调组织可以有效地降低交通延误和交通阻塞。

美国许多地方如城间高速公路上和城市内高速公路上应用事件管理系统后都取得了相对可观的效益,下面是两个具体的实例^[4]。

科罗拉多且佛事件处理巡逻队在一个具有代表性的路段区间上将应用巡逻队前后的效果进行对比,用一年的平均值做参考说明:事件处理巡逻队在每日最高峰期间可以减少由于交通延误造成的80—100万美元的损失;在每日晚高峰期间可以减少由于交通延误造成的90万美元的损失。其效益相当客观。

伊利诺斯芝加哥车辆巡逻队应用事件管理系统后,通过计算得出的投入产出比是17:1,此外统计推测得出,系统可以减少由于该事件可能产生的18%的二次事故和60%的交通阻塞。

由上可知,对交通事件管理的研究,是极具理论意义和实用价值的课题。

随着我国高速公路的大幅度增长,相关高速公路的紧急事件管理系统被更多的人所关注^{[5][6]},与高速公路相比,城市交通中可能发生的交通事件的种类、对路网的影响、救援的方法和路径都更复杂,本文试图从事件管理角度提出城市交通事件管理系统的建立。

1.2 交通事件

1.2.1 交通事件的定义、类别和基本特征

交通事件(Traffic Incident)是指任何偶发性的能引起车道通行能力减少或需求增加的非正常事件^[7]。这样的事件包括交通追尾、停滞的车辆、抛洒的货物、公路正常维护、重建项目或特殊的非紧急事件(例如显著地影响车道通行能力的情况、局面或任何其他的事件)等。

城市路网中出现的交通事件有很多种,所有能引起路网通行能力降低或者交通需求突增的事件都可以包括其中,比如车车相撞、人车相撞、车辆抛锚、路面维修、大型集会、游行等等,这些交通事件会给当事人和道路使用者带来直接损失,然而,它更大的潜在损失是在于二次事故的诱发以及交通阻塞的出现,尤其在城市交通高峰期,交通事件持续的时间越长,其造成的交通阻塞会在临近路网甚至整个路网上扩散,严重的时候可能会使局部路网甚至城市整个路网陷于瘫痪状态。

为了准确把握事件的性质、及时有效地对交通事件进行反应和处理,按照城市道路上异常事件的产生原因和表现形式,可以将事件分为如下五种类型。

1) 一般交通事件：包括车辆抛锚、货物散落、交通拥堵、中断、超速、违章装载等异常事件。

2) 交通事故：指发生在城市道路上的造成人员伤亡、车辆损坏的严重交通事故，包括超车撞车、追尾、撞隔离带、爆炸等各种事故。

3) 养护维修：城市道路或路边设施的养护维修会造成道路通行能力的降低，尤其是重大养护期间，道路的整体服务水平会发生变化。

4) 恶劣天气：恶劣天气包括风、雾、雪、雨等可能降低城市道路的道路通行能力并可能引发交通事故的各种天气状况。大雾或大雨造成能见度降低，致使交通流速度下降、交通阻塞、交通事故多发；降雨降雪以及结冰造成路面摩擦系数降低，造成异常交通现象。

5) 自然灾害：道路所在地或邻近地域发生的对道路本身造成直接损坏的自然灾害，如地震、泥石流、塌方、道路水毁、滑坡、海啸等现象。

根据表 1-1 所示的北京市四环路 2002 年 3 月份的一项统计数据^[6]，可以看出大量的交通事件是由于车辆本身的机械或油电气路的故障导致的抛锚，约占总数的 38%。

交通事故的次数约占总数的 22%，但大多数都是一些小事故，如车辆的擦刮、冲出车道、与护栏相撞、相对速度较小的追尾事故等。

但在交通事故中约有 5%—10% 的事故是严重交通事件，如撞人、逆向行驶相撞、与装有危险品的车辆相撞等，这样的事故可能会导致数个小时的延误。尽管此类交通事故的数量很小，但会对局部交通网络甚至整个地区的交通网络产生重大的不良影响，是交通事件管理的重点对象。

道路维护工作、路上有杂物、路边丛林着火、迷路的行人、跑到道路上来的动物以及其它一些事件占整个交通事件总数的 40%。这类事件虽然对交通状况的影响持续时间不会太长，但如果不及时清除，容易诱发二次事件。

表 1-1 北京四环路 2002 年 3 月交通事件统计数据

事件类型	交通事故	车辆抛锚	火警	恶劣天气	其它
出现数量	291	498	70	2	440
出现比率	22.4%	38.3%	5.4%	0.2%	33.8%

异常交通事件的基本特征可以概括为：成因的不确定性、发生时间和地点的随机性。因其发生的时间或地点不能准确预测，事件发生后导致道路的通行能力急剧降低，当交通需求超过事件点的实际通行能力时，即造成超过通行能力的那部分交通量滞留在道路上而导致拥挤发生、车辆延误、诱发二次事件等等。

下面将重点讨论交通事件对道路通行能力、偶发性拥挤、车辆延误、二次事

件、道路服务水平等方面的影响。

1.2.2 交通事件对道路通行能力的影响

通行能力分析的主要目的是估算已知交通设施所能容纳的最大交通量,其次也被用来估算交通设施在规定的运行质量条件下所能适应的最大交通量^[9]。

道路通行能力(单位:辆/h)通常定义为在一定的道路、交通状态和环境条件下,单位时间内(通常为15min),一条车道或道路的某一断面能够通过的最大交通实体(车辆或行人)。在计算某段道路的通行能力时,假定只由相同性能、相同技术数据的小汽车组成理想交通流行驶在该道路上,保持安全车头时距,算出的单位时间内通过的最大的小汽车数量即为该道路的理论通行能力。

决定道路实际通行能力的因素主要有车道宽度、车道数、车道外侧净空、交通流构成、路面和交通状况以及天气等。道路上发生的交通事件常会占用路肩、阻塞车道、或使路面和交通状况恶化,从而使道路通行能力严重下降。雾、雪和大雨等恶劣天气,使能见度降低,路面状况恶化,而且影响范围较大,会降低多个路段的通行能力。阻塞车道或路肩的事件使事发路段的通行能力大大下降,形成道路的瓶颈,其造成的道路通行能力的降低大大高于其引起的道路有效空间的减少。例如,在单向三车道高速路段上,路肩事故能减少通行能力约33%,一条车道阻塞会使通行能力下降达50%,两条车道阻塞将使通行能力下降高达79%。表1-2的统计数据表明了事件对道路通行能力的影响程度^[10]。

表 1-2 不同车道数上事件发生后道路通行能力下降程度统计表

高速公路单向车道数	路肩占用	路肩事故	阻塞车道数		
			1	2	3
2	5%	19%	65%	100%	--
3	1%	17%	51%	83%	100%
4	1%	15%	42%	75%	87%
5	1%	13%	35%	53%	80%
6	1%	11%	29%	50%	75%
7	1%	9%	25%	43%	64%
8	1%	7%	22%	37%	59%

1.2.3 交通事件对偶发性交通拥挤的影响

偶发性拥挤是相对于常发性拥挤而言的。常发性拥挤是指在某些位置或在某

件、道路服务水平等方面的影响。

1.2.2 交通事件对道路通行能力的影响

通行能力分析的主要目的是估算已知交通设施所能容纳的最大交通量,其次也被用来估算交通设施在规定的运行质量条件下所能适应的最大交通量^[9]。

道路通行能力(单位:辆/h)通常定义为在一定的道路、交通状态和环境条件下,单位时间内(通常为15min),一条车道或道路的某一断面能够通过的最大交通实体(车辆或行人)。在计算某段道路通行能力时,假定只由相同性能、相同技术数据的小汽车组成理想交通流行驶在该道路上,保持安全车头时距,算出的单位时间内通过的最大的小汽车数量即为该道路的理论通行能力。

决定道路实际通行能力的因素主要有车道宽度、车道数、车道外侧净空、交通流构成、路面和交通状况以及天气等。道路上发生的交通事件常会占用路肩、阻塞车道、或使路面和交通状况恶化,从而使道路通行能力严重下降。雾、雪和大雨等恶劣天气,使能见度降低,路面状况恶化,而且影响范围较大,会降低多个路段的通行能力。阻塞车道或路肩的事件使事发路段的通行能力大大下降,形成道路的瓶颈,其造成的道路通行能力的降低大大高于其引起的道路有效空间的减少。例如,在单向三车道高速路段上,路肩事故能减少通行能力约33%,一条车道阻塞会使通行能力下降达50%,两条车道阻塞将使通行能力下降高达79%。表1-2的统计数据表明了事件对道路通行能力的影响程度^[10]。

表 1-2 不同车道数上事件发生后道路通行能力下降程度统计表

高速公路单向车道数	路肩占用	路肩事故	阻塞车道数		
			1	2	3
2	5%	19%	65%	100%	—
3	1%	17%	51%	83%	100%
4	1%	15%	42%	75%	87%
5	1%	13%	35%	53%	80%
6	1%	11%	29%	50%	75%
7	1%	9%	25%	43%	64%
8	1%	7%	22%	37%	59%

1.2.3 交通事件对偶发性交通拥挤的影响

偶发性拥挤是相对于常发性拥挤而言的。常发性拥挤是指在某些位置或在某偶发性拥挤是相对于常发性拥挤而言的。常发性拥挤是指在某些位置或在某

件、道路服务水平等方面的影响。

1.2.2 交通事件对道路通行能力的影响

通行能力分析的主要目的是估算已知交通设施所能容纳的最大交通量,其次也被用来估算交通设施在规定的运行质量条件下所能适应的最大交通量^[9]。

道路通行能力(单位:辆/h)通常定义为在一定的道路、交通状态和环境条件下,单位时间内(通常为15min),一条车道或道路的某一断面能够通过的最大交通实体(车辆或行人)。在计算某段道路的通行能力时,假定只由相同性能、相同技术数据的小汽车组成理想交通流行驶在该道路上,保持安全车头时距,算出的单位时间内通过的最大的小汽车数量即为该道路的理论通行能力。

决定道路实际通行能力的因素主要有车道宽度、车道数、车道外侧净空、交通流构成、路面和交通状况以及天气等。道路上发生的交通事件常会占用路肩、阻塞车道、或使路面和交通状况恶化,从而使道路通行能力严重下降。雾、雪和大雨等恶劣天气,使能见度降低,路面状况恶化,而且影响范围较大,会降低多个路段的通行能力。阻塞车道或路肩的事件使事发路段的通行能力大大下降,形成道路的瓶颈,其造成的道路通行能力的降低大大高于其引起的道路有效空间的减少。例如,在单向三车道高速路段上,路肩事故能减少通行能力约33%,一条车道阻塞会使通行能力下降达50%,两条车道阻塞将使通行能力下降高达79%。表1-2的统计数据表明了事件对道路通行能力的影响程度^[10]。

表 1-2 不同车道数上事件发生后道路通行能力下降程度统计表

高速公路单向车道数	路肩占用	路肩事故	阻塞车道数		
			1	2	3
2	5%	19%	65%	100%	--
3	1%	17%	51%	83%	100%
4	1%	15%	42%	75%	87%
5	1%	13%	35%	53%	80%
6	1%	11%	29%	50%	75%
7	1%	9%	25%	43%	64%
8	1%	7%	22%	37%	59%

1.2.3 交通事件对偶发性交通拥挤的影响

偶发性拥挤是相对于常发性拥挤而言的。常发性拥挤是指在某些位置或在某

些时期经常发生的交通拥挤，它通常发生于交通流高峰阶段，此时，交通需求超过了道路的理想通行能力，形成特定时间特定路段上的交通拥挤现象。根据对常发性拥挤的长期观察和统计结果，可以对它的发生位置、发生时间、持续时间和影响程度进行预测，这样就可以事先采取一些预防措施消除或减轻拥挤程度。

而偶发性拥挤是指由于道路通行能力临时下降或交通需求临时增加而产生的交通拥挤。此类拥挤主要由事件引发，交通事件引起道路实际通行能力降低，在事发路段形成瓶颈，当交通需求超过瓶颈处的道路通行能力时，将会在瓶颈处形成向上游延伸的拥挤现象。城市中大量的拥挤现象是这种偶发性拥挤。

由于事件的随机性，偶发性拥挤发生的时间、地点等几乎无法预测，所以会对正常的交通运行产生巨大破坏作用。

在美国的一些大城市，事件与拥挤的重要关系可以用来估计偶发性拥挤的数量。德克萨斯运输学会每年都要报导城市道路的拥挤情况^[11]。1998年最拥挤的十个城市，事件引起的拥挤延迟数在218000人次/小时到1295000人次/小时之间。在这十个最拥挤的城市里，每年燃料的额外消费在214到1447百万公升。这每年分摊到每个有资格的驾驶员身上的花费是\$140到\$291。

1.2.4 交通事件对车辆延误的影响

延误（单位：s/辆）是指行驶在路段上的车辆由于受到道路环境、交通管理与控制及其他车辆的干扰等因素的影响而损失的时间。

延误一般包括：停车延误（是一辆车通过道路设施的某一部分所用的全部停车时间）、行程时间延误（是一辆车通过道路设施的某一部分所用的实际时间与无延误时间的差值）、固定延误（由交通控制装置引起的延误，信号、停车标志、让路标志和铁道口等都会引起固定延误）、运行延误（由各种交通组成部分之间相互干扰而引起的延误）、排队延误（车辆排队时间与车辆按自由行驶车速驶过排队路段的时间之差）。

事件引发的偶发性拥挤必然会造成车辆延误。根据美国货运协会和剑桥系统公司的联合研究表明^[12]，大都市地区高速公路系统中事件造成的车辆延误占总延误的50%—60%。

影响事件延误的主要因素有：交通需求流量、降低的道路通行能力、离去流量和事件持续时间。其中，事件持续时间和降低的道路通行能力是最重要的两个影响因素。

1.2.5 交通事件对二次事件的影响

交通事件很容易诱发二次事件，而且二次事件的影响范围和程度常常较首发

事件更加严重，对交通安全造成更大危害。

在美国，明尼苏达州的研究发现所有高峰时期13%的碰撞事件是由一起已发生的事件直接造成的^[1]。一项华盛顿运输部门的研究更进一步强调了这点^[13]。研究发现，在为期7年的一个调查阶段中，3165起路肩碰撞事件发生在州际的道上、限制通道上或其他的一些省级道路上。这些事件造成了40人死亡和1774人受伤。路肩碰撞伤亡率明显地高于其他类型事件的伤亡率。这些研究显示将近41%的路肩碰撞事件中均有人员受伤情况。除此之外，二级碰撞造成的严重度比初次碰撞大得多。一起事件处理的时间越长，造成二次事件的可能性就越大。1995年加州的一些主干道和高速公路碰撞数据分析显示：二次碰撞将危险增加至600%。

当事件响应者执行他们的工作时，很容易被过往的车辆碰伤。1997年，将近40%的执法官员在执行工作时死于交通意外^[1]。一起事件处理的时间越长，事件响应者受伤、受攻击的可能性就越大。

除了事件现场的危险，在事件处理过程中，紧急状况响应者在医生传送病人、伤员的紧急事件旅途中或在紧急救护的专用车辆设备上时也是很危险的。在1998年，美国有143人在紧急状况交通车辆的运送途中伤亡，77起事件发生在响应一些紧急事件的过程中^[1]。

交通事件的持续时间越久二次事件发生的可能性就越大；事件现场上游的交通需求越大、车速越高、车间距越小，就越容易发生二次事故。采取合理的事件管理策略来减少事件的持续时间可有效减少或防止二次事件的发生。另外，利用其他事件管理手段，如：可变情报板和电台等驾驶员信息系统，将事件的相关信息及时告知驾驶员，使他们能提前采取防范措施，对减少或预防二次事件有积极作用。

1.2.6 交通事件与道路服务水平的关系

交通事件对道路交通状况的影响程度与道路的服务水平密切相关，如果道路的服务水平高，同样事件对交通状况的影响程度就小。规定服务水平是为了表示三个关键性变量（平均行程速度、密度和交通流率）的合理范围。根据道路设计标准^[14]，一共有六级服务水平 A、B、C、D、E、F，随着服务水平由 A 降至 F 级，每一级服务水平对应的密度和速度变化范围增加了，而交通流率的范围却缩小了。下面的对交通事件对各级服务水平的影响进行说明。

A 级服务水平： 此级服务水平的交通主要是自由运行状况，交通流中的车辆可以毫不受阻地发挥它们的行驶性能。它保证驾驶员获得高水平的舒适感。在这一水平上，小的事故或故障的影响很容易消除。尽管在出现交通事件的附近地区，服务水平出现下降，但并不会形成停车排队现象。过了事故点后，交通流会

迅速地恢复到 A 级服务水平。

B 级服务水平： 表明道路上运行的也是合理的自由交通流情况。交通流中车辆行驶性能的发挥稍受限制。提供给驾驶员的舒适感仍然较高。较小事故和行车故障产生的影响仍易消除，只不过事故区域内的服务水平下降程度比 A 级服务水平要大一些。

C 级服务水平： 道路设施仍能保持稳定的运行条件，但已接近不稳定范围。交通流中车辆的行驶自由度明显地受到限制，较小事故造成的影响仍然可以消除，但事故区域内的服务水平显著下降。任何严重的阻塞都会形成排队现象。

D 级服务水平： 与不稳定交通流为界。在此范围内，流量的微小增长会引起服务水平的明显下降。交通流中车辆行驶的自由度已经受到严重限制，由于交通流中间距很小，难以消除交通中断的影响，因而很小的事故也会造成持续的排队现象。

E 级服务水平： 此级的车辆运行情况是极其不稳定的。这是由于实际交通流中已不存在可被利用的间隙。车头间距相当均匀，这是维持稳定车流所需的最小间距。任何对交通流的干扰都会引起后面车辆停驶，因此会出现一个向上游交通流传播的干扰波。达到通行能力时，交通流无法消除甚至很小的干扰行车现象。任何事故都会引起严重的堵塞现象，并使车辆形成很长的排队。

F 级服务水平： F 级是指强制车流或堵塞车流。这种情况一般发生在堵塞点后面形成的排队车辆中。如果交通事故造成某一路段上的通行能力大幅度下降，使得到达事故点的车辆数量大于容许通过的车辆数量，在事故点上游就会出现 F 级的行车状况。当实际到达的车流率与实际的通行能力之比超过 1.0 时，就会发生堵塞现象。在交通事件发生点的交通运行状况一般将达到或接近通行能力。当车辆通过了“瓶颈”路段后，下游的运行状况将会好转。

1.3 交通事件管理

1.3.1 交通事件管理的提出

交通事件引起的交通延误、拥挤损失、二次事故等不良影响与事件的检测时间、管理部门的反应时间以及事故的排除时间有关。从发生事故到排除事故的时间越短，引起的拥挤程度就会越小、交通延误越少。因此需要建立一个监视功能完善、应急反应迅速的事件管理系统来解决偶发性拥挤。

美国的国家 ITS 框架^[15]中把“事件管理”用户服务描述为：“事件管理用户服务使用先进的传感设备、数据处理和通讯技术提高运输和公共安全部门的事件

管理能力。该服务将帮助这些部门快速准确地识别各种事件，并实施一系列的措施把这些事件对人和货物运输的影响降低到最小。另外，该服务还帮助管理部门识别或预测有危险的天气、交通和设施条件，以便提前采取措施，防止事件的发生或将其影响减少到最小”。可见事件管理就是通过有效地减少事件检测和确认的事件、采取恰当的事件响应措施、安全地清除事件、管理受到影响的交通流直至恢复原有的通行能力来提高道路的运行效率和安全。

具体而言，交通事件管理是指利用人、制度、机械和技术资源，系统地、有计划地相互协调以减少事件的碰撞程度和持续时间，以此来提高司乘人员、事件受害者、事件响应者的安全水平。这些资源也可以通过系统的减少发现和查证一起事件的时间来提高事件的操作效率、安全程度，实现适当的响应，安全地清除事件现场。管理流程的结束一般要到现场恢复成初始状态、偶发性交通拥挤消失为止。

1.3.2 交通事件管理的目标

交通事件管理的基本目标应该是：最大限度地降低异常交通所导致的人员和物的损失；最短时间内恢复道路的通行能力。

高效的事件管理系统能够对道路交通产生显著的效益，事件管理的目标还可以从两个方面进行考察，一方面是针对事件本身，另一方面是针对事件所产生的影响。

针对交通事件本身，通过有效的事件管理措施，可以降低发现事件、响应事件、清除事件所需要的时间，从而来提高解决事件的有效性。在尽可能早的时间里对事件本身进行处理，可以减少交通事件造成的人员伤亡损失、改善事件当事人、处理人和其它道路使用者的安全性、有效地使用应急资源等等。

从交通事件的影响方面考量，有效的交通事件管理系统减少了事件持续的时间，从而可以大大地降低二次事件的发生、减少事件造成的延误、降低偶发性拥挤的程度、丰富出行者信息发布内容、减少驾驶员的运行费用、更高效地使用人力和道路设备等等。

可以用三个方面的指标来衡量事件管理系统的有效性和实用性，这三个方面分别为技术性、耗费性、效益性，如表 1-3 所示。

表 1-3 交通事件管理系统的主要指标

技术性指标	安全性、服务水平、可靠性等
耗费性指标	所投入的应急资源（救援资源、出救点）最小
效益性指标	应急时间（检测时间、响应时间、清理时间）最短

1.3.3 交通事件管理的一般思路

从事件管理角度考量，交通事件可分为可预见型的和不可预见型的，因此，事件管理的一般思路为：对可预见的交通事件（如恶劣天气、道路养护等所诱发的）采取相应的预防措施，以避免事件的发生；对已发生的不可预见或没能预见到的事件进行快速检测，并实施相应的事件处理方案和控制方案，以快速消除事件、清理事件现场和恢复交通，避免二次事故的发生。本文研究主要针对于第二种情况。

因此，事件管理活动主要包括事件检测和确认、快速反应、道路清理等步骤。它是在事件发生后合理的使用人力、物力和技术资源尽快使道路恢复其通行能力、减少其影响范围所进行的一系列工作。它主要是合理组织和安排交通流在整个事件处理过程中顺利通过事件发生地。在事件处理的整个过程中，需要对现场连续监控并不断地调整交通管理策略，同时应对出行公众提供事件处理过程的必要信息。

有效的事件管理应包括以下几个过程：事件检测、事件辨识、应急方案的决策、应急方案的实施、事件信息发布、实施效果的确认，其过程如图 1-1 所示。在实际执行中，这些过程通常是同时或交替进行的，有时根据事件的实际情况可以减少其中一个或多个工作环节。

为实现和保障事件管理系统的效率和有效性，事件应急管理系统应该具有以下几方面的功能：

- ◆ 对交通状况进行监控，检测出异常事件。可迅速准确的收集到异常交通状况数据，如事故发生地点、事故性质、严重程度、周围交通环境等。
- ◆ 生成紧急救援策略。对救援资源进行部署，生成路网上交通设备的控制策略及对驾驶员的诱导及控制策略。
- ◆ 提供设备控制功能。包括交叉口信号灯控制、电子板上信息提供、匝道开启关闭控制等，即对紧急救援策略进行执行的功能。
- ◆ 提供基于车载系统的自主型路线导行
- ◆ 动态预测异常事件排除时间
- ◆ 对异常事件清除后交通流进行诱导和控制
- ◆ 对异常事件发生及处理的详细情况进行记录，为以后事故处理提供参考依据。

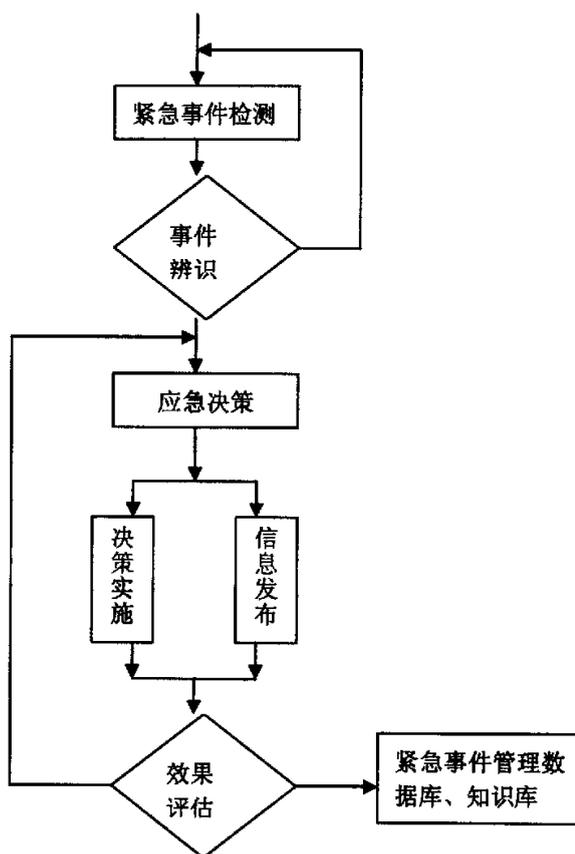


图 1-1 事件管理一般处理流程

1.4 交通事件管理的研究现状

1.4.1 交通事件管理在国外的研究现状

在美国，事件管理系统在许多州已经得到了广泛的应用，它的事件管理示范工程一个是 1960 年建成的，另一个是 1970 年建成的^[1]。上个世纪 60 年代，Detroit 的交通工程师就出版了有关各类交通事件出现频率的调查报告，70 年代中期，加州交通局广泛地报道了洛杉矶地区的高速公路监控系统中应用事件管理的最新进展。联邦公路局也出版两卷有关高速公路与事件管理的报告：“高速公路事件管理的两种概念和方法”（1978）和“高速公路管理手册”（1983）。在 1988 年，TRB 组织完成了一个关于事件管理的综合报告“高速公路事件管理”。

近年来，ITS 的广泛实施改进了交通流监控、通信和出行者信息信息发布媒介等事件管理的支撑技术，使得事件管理系统也逐步向自动化、智能化迈进。世

界许多发达国家的高速公路系统几经改造,形成了各具特色的事件管理系统。在澳大利亚,悉尼市建立了把高速公路网络(有 320 个 CCTV 监视器和以 500 米间隔布置的检测线圈)同城市交通信号系统(SCATS)相结合的,具有快速事件检测和响应能力的事件管理系统^[16]; Queensland 洲建立了具有半自动化事件检测能力的事件管理系统;墨尔本建立了具有全自动事件检测能力的 VicRoads 事件管理系统,以及 Perth 市在市区 60 公里的高速公路上新引进的 MRWA 系统。在欧洲,很多国家建立了基于视频检测技术 CCATS&CCIDS 的事件检测和管理系统,德国的是集中式的事件预警系统——COMPANION 事件管理系统,瑞典的是 MCS 系统。美国的高速公路里程居世界第一,因此高速公路管理和事件管理系统遍及全国,一些系统相当成功,明尼苏达州的 FIVERT、马里兰州的 CHART、纽约和新泽西区域的 TRANSMIT、圣地亚哥的智能呼救电话和 ADVANCE 等。对于具有代表性的系统介绍如下^{[16][17][18]}:

DIVERT (During Incident Vehicles Exit to Reduce Time)

明尼苏达州运输局先进交通运输系统办公室和圣保罗市联合开发并实施了 DIVERT 这个事件管理项目,对 I-49 和 I-35E 这两条比邻圣保罗市中心的高速公路进行管理。DIVERT 由事件检测、路径诱导和交通信号控制三个主要部分构成,主要目的是改善高速公路和城市交通的联合管理,通过在事件期间与城市道路控制相协调,为车辆提供替代路径。DIVERT 在 1993 年末提出,1996 年 9 月开始运行,经对比评价取得了良好的效果。另外, DIVERT 还为分析使用城市道路作为转移路径,车辆转移对该地区交通流影响提供了一个有力的工具。

CHART (Chesapeake Highway Advisories Routing Traffic)

CHART 是马里兰州公路管理局的公路事件管理项目。起源于 80 年代中期的“到达海岸 (Reach the Beach)”项目,现已扩展成为一个州际项目。控制中心设置在 Baltimore, CHART 覆盖了全州范围的高速公路和公路主干线。CHART 由 4 个主要部分构成:交通监视、事件响应、出行者信息和交通管理。其中的事件响应和出行者信息系统日益受到公众、媒体和交通运输专家的关注。1997 年由于 CHART 项目的实施,总的延误时间减少 1560 万车辆小时,燃油消耗大约减少 585 万加仑,减少潜在的二次事故 337 起。

圣地亚哥智能呼救电话 (San Diego Smart Call Box)

圣地亚哥智能呼救电话系统是为了检验使用现有的路边呼救电话作为连接其它交通管理设施(如车辆检测器、摄像机、可变信息板和气象信息站)的通讯手段的可能性。智能呼救电话系统作为一种支持事件检测、确认和管理方法的技术得到了验证。该系统应用的成功表明可以充分利用现有设备,减少通信系统的投资。

ADVANCE (Advanced Driver and Vehicle Advisory Navigation Concept)

ADVANCE 的最初目标是建立动态路径诱导系统。ADVANCE 利用浮动车、环形线圈检测器计算出的行程时间数据和人工事件信息向出行者提供快速到达目的地的路径。ADVANCE 交通信息中心 (Traffic Information Center, TIC) 处理行程时间数据并传输给安装有“移动导航辅助单元 (Mobile Navigation Assistants, MNAs)”的车辆,通过车载图形用户界面向驾驶员直接提供静态路径诱导和动态路径诱导信息。ADVANCE 使用浮动车在大范围内监视高速公路和城市干道的交通状况 (事件检测),并向安装有车载导航设备的车辆提供路径转移信息 (事件管理)。系统中的事件检测一方面可直接向驾驶员提供事件信息或融合到诱导系统中在计算最优路径时把事件考虑在内,另一方面可以为交通管理者服务,使其能够快速地对事件作出响应,减小事件对交通流正常运行的影响。

亚特兰大的 NAVIGATOR

NAVIGATOR 是一个 ATIS 和 ATMS 在亚特兰大中心区大规模集成实施的系统。系统中集成了包括实时交通参数采集、拥挤监控、自动和人工事件检测、高速公路安全巡逻车、闭路电视摄像、可变信息板、公路咨询广播、互联 ATIS 终端等的多项事件管理技术。该系统的建成为 1996 年奥运会提供了良好的交通条件。

据美国运输工程师协会 (Institute of Transportation Engineers, ITE) 估计^[17],高速公路使用事件管理后,在交通拥挤期间可以减少 10%—15% 的行程时间。上述的许多系统在实施后都进行了效益评估,如 1997 年由于 CHART 项目的实施,总的延误时间减少 1560 万车辆小时,燃油消耗大约减少 585 万加仑,潜在的二次事故减少 337 起;亚特兰大 NAVIGATOR 系统建成后,事件检测和确认的时间由原来的平均 4.2 分钟减少到平均 1.1 分钟,降低了 74%,事件确认和自动产生事件响应之间的平均时间降低 59%,事件确认和车道清除之间的平均时间降低了 38%。事件管理在产生巨大的经济效益的同时还能带来诸多难以度量的社会效益:如,缓解事件当事人的紧张心理和减少事件带来的不便、减少延误、减少有害气体的排放、改善公共关系等。

从世界范围来看,事件管理有些是相对独立的系统 (如 CHART、圣地亚哥智能呼救电话等),而更多的是注重运用 ITS 的理念,把事件管理系统与其它系统进行集成,通过通讯链路的链接实现信息共享和互相配合,以达到整个交通运输系统的高效、安全运行。上述系统中的 ADVANCE、NAVIGATOR 和 DIVERT 等就是把高速公路事件管理系统与城市道路信号控制系统、出行者信息系统、电子收费系统等进行协调和集成的有益尝试。因此,在 ITS 框架下,充分利用 ITS 新技术、新策略对事件管理系统进行扩充和改造是必要的发展方向。

1.4.2 交通事件管理在我国的研究现状

就事件管理系统而言，我国在该领域的研究和实施都处于刚刚起步的阶段，目前见到报道的仅有首都机场高速公路建成的事件快速响应系统^[18]。这样的现状显然是远远落后于发达国家。目前在我国各大城市都还没有建立有效的城市交通事件应急管理系统，然而这样的事件管理系统却是城市交通系统甚至整个城市系统正常运作所必须的。

虽然国内有关事件管理或者紧急救援的资料相对贫乏，事件管理在我国还只是刚刚起步，然而，随着近几年对交通事件管理领域认识的加深，国内学术界在相关的理论和实践方面也取得了令人欣慰的成果^{[18] [19] [20]}。

交通部公路科学研究所的王彦卿等人提出了能自适应交通状况变化的“交通异常检测算法”，该算法交通参数的“阈值”可以随交通状况的变化而自动调节，对交通流的变化有一定的适应性，并在广佛高速公路上得到了检验。

哈尔滨建筑大学的罗丽君等人对冰雪条件下的最小车间距进行了研究，并按不同的坡度给出了恶劣气候条件下的最小安全车间距离。

天津大学徐岩宇等人对事件发生情况下的车辆线路引导系统VRGS (Vehicle Route Guidance System) 进行了研究，提出VRGS系统在事件发生后能引导车辆避开交通拥挤路段，沿最佳的行车线路到达目的地的方法。

东南大学的刘春林等人运用模糊规划方法对应急救援的车辆调度问题进行了研究，提出了基于模糊规划方法的调度优化算法。

以上的相关研究成果侧重于对道路事件管理系统的某一方面进行分析，尚没有形成对交通事件管理的系统性的研究。本文致力于首先建立一个完整的事件管理系统框架，然后对其中的一些理论问题进行研究。

1.5 本章小结

阐明了本文所选课题的研究背景及其研究价值，说明城市道路交通事件对道路交通状况造成的损失影响提出了对此课题的研究要求，同时结合国外发达国家在事件管理上的先进方法以及实践效果，说明了对事件管理系统进行研究的实际意义。

对交通事件以及事件管理的基本概念进行了简要介绍，按照事件的成因以及表现形式，将交通事件分为五大类，每种事件对道路交通状况的影响都不尽一致，有的是局部的、轻微的、短暂的影响，有的是全面的、严重的、长期的影响，但 these 事件又同时具备一些共同的特征。

探讨了交通事件对道路通行能力、偶发性交通拥挤、车辆延误、二次事件的影响，在不同的道路服务水平上影响程度会不尽相同。分析了交通事件管理的必要性、目标、功能、一般思路等。

最后评述了目前该领域的研究状况，对国内外的关于交通事件应急管理的研究现状进行了简单介绍，并提出了本文研究的出发点和方向。

第二章 基于 ITS 的城市交通事件应急管理系统框架设计

在本章中，首先介绍了 ITS（智能交通系统）对交通事件管理的要求，然后依照要求设计出适应我国城市交通状况的事件应急管理系统框架，并设计出事件应急管理系统的各个子系统（内部、外部），对系统的运作信息流进行说明，最后探讨了系统实现需要解决的一些核心理论问题。

2.1 ITS 中有关交通事件应急管理的界定

在 ITS 体系结构^[3]中，分别有两处涉及到交通事件应急管理方面，一个是 CIUS2.2 的意外事件管理（Incident Management）部分，一个是 CIUS6.2 的急救车辆管理（Emergency vehicle management）部分。本文的研究主要在这两部分的战略思想框架下进行展开。

2.1.1 意外事件管理（Incident Management -IM）

ITS 中意外事件管理的含意：帮助有关部门快速识别交通意外事件，并采取有效措施，最大限度地降低其对交通的影响。使用先进的检测、数据处理和通信技术，以提高交通管理部门、救护部门及其他处理意外事件有关的机构和人员对事件的相应能力。强化意外事件检测和确认能力，帮助有关人员快速、准确地识别意外事件并采取措施，从而降低事件对交通的影响；还将帮助交通管理人员预测意外事件，从而提前采取行动以防止潜在事故的发生或降低其不利影响。直接用户是负责对意外事故检测和处理的交通管理部门、急救中心等；而最大的受益者则是商业运输和公共交通经营者以及广大的旅行者。表 2-1 对 ITS 规定中的意外事件管理服务功能进行了说明。

表 2-1 ITS 中意外事件管理服务的功能

意外事件管理的功能		功能说明
事件识别功能	预测交通	1. 从如下类型的信息源获取的信息，来预测可能要发生的交通意外事件：交通流传感器、环境感应器、公共安全部门、宣传媒体、气象信息源、运输公司、特殊事件主办、危险情况预测算法。

意外
事件

	的功能	<ol style="list-style-type: none"> 2. 确定每件预测事件的下述特征：类型、影响范围、严重性、地点、预期持续时间。 3. 确定预测事件对交通流的影响。
	识别已发生事件的功能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 从如下类型的信息源获取的信息来识别意外事件：、交通流感应器、环境感应器、公共安全部门、宣传媒体、气象信息源、运输公司、旅行者 2. 确定并连续检视每件现发事件的下述特征：类型、影响范围、严重性、预期持续时间 3. 确定并连续检视事件对交通流的预期影响
	响应措施制定功能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 为每件已被识别出的意外事件制定适当的响应措施并在必要时修改某些措施 2. 建议并促进对那些能够经安排而使事件发生的可能性、事件的影响和用于事件管理的资源最小化的预知事件进行安排。 3. 建议并促进适当地派遣紧急响应车辆到事故地点 4. 建议并促进适当地派遣服务性车辆到事故地点 5. 建议并促进适当地向旅行者和潜在旅行者发布事故相关信息 6. 建议并促进适当地进行交通信号控制和其他交通控制，以减少事件对交通流的影响
	响应措施实施功能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 协调地实施事件响应措施。 2. 提供至少如下的决策支持功能，以协调所有参加事件响应机构的行动：选择和确定解决每一事件所需的步骤，并向那些响应事件的机构提供这些步骤；向那些响应事件的机构提供解决事件所需的所有资源的状态。 3. 提供与意外事件响应所需的其他用户服务（如“紧急车辆管理”）之间的联系通道。 4. 向其他机构和用户服务（“路线导行”）发布有关意外事件响应状态的信息的功能。
	其他功能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 预测可能引起意外事件的危险情况（如危险品运输、车辆超载等）出现的时间和地点。 2. 对不同类型事故的发生频率、发生事故的地点、时间等进行统计。 3. 在事故多发路段设立警告标志。

2.1.2 急救车辆管理 (Emergency Vehicle Management)

在 ITS 框架中, 针对急救车辆管理有如下定义。

急救车辆管理的目的: 减少急救车辆对事故的响应时间。

急救车辆管理的任务: 提供急救车辆路线导行及信号灯优先控制。急救车辆路线导行与信号灯优先控制相结合可以减少急救车辆到达救援现场的响应时间。急救车队管理功能帮助调度者派遣那些能最快到达紧急事件地点的车辆, 路线导行引导急救车辆到达事故地点, 信号优先控制对急救车辆路线上的交通信号配时进行优化。本服务的主要用户是交通管理部门、消防部门和急救中心。

急救车辆管理服务应得到急救车队管理系统、路线导行系统、信号控制优先系统的支持, 这些支持系统给急救车辆管理服务提供的服务功能在表 2-2 中进行了说明。

表 2-2 急救车辆管理服务的相关支持系统

相关的支持系统	支持系统提供的服务功能
急救车队管理系统	维持相关急救车辆的备用状态、具备接收急救车辆出动请求的功能、确定响应事件的最适急救车辆、派遣急救响应车辆到达急救事件现场。
路线导行系统	维持关于交通状况、急救响应车辆的位置和急救响应车辆的目的地等的实时信息; 为急救响应车辆建议合适的路线。
信号控制优先系统	维持信号配时、急救响应车辆的位置和急救响应车辆线路等相关的实时信息; 改变相关信号灯的配时方案, 以利于急救车辆的迅速通行

2.2 交通事件管理系统框架设计

基于 2.1 中的 ITS 系统所提出的交通事件管理的目标与功能, 本文从系统工程的角度提出我国城市交通事件管理系统的设计思路以及功能模块。

完善而有效的交通事件管理系统至少应该包括对事件的检测、分析、对策、执行等功能, 同时还要与交通系统内部的其它系统(如交通管理系统、养护管理系统等)相融合, 因此, 本文设计出如图 2-1 所示的交通事件管理框架图, 框架图内包含了道路交通控制中心、研究中心等组成的指挥机构, 以及由应急控制中心、应急响应、资源维护等组成的操作机构, 还包含了相关的外部信息机构。比较详细而全面地构造了交通事件管理系统的基本框架。

第二章 基于 ITS 的城市交通事件应急管理系统框架设计

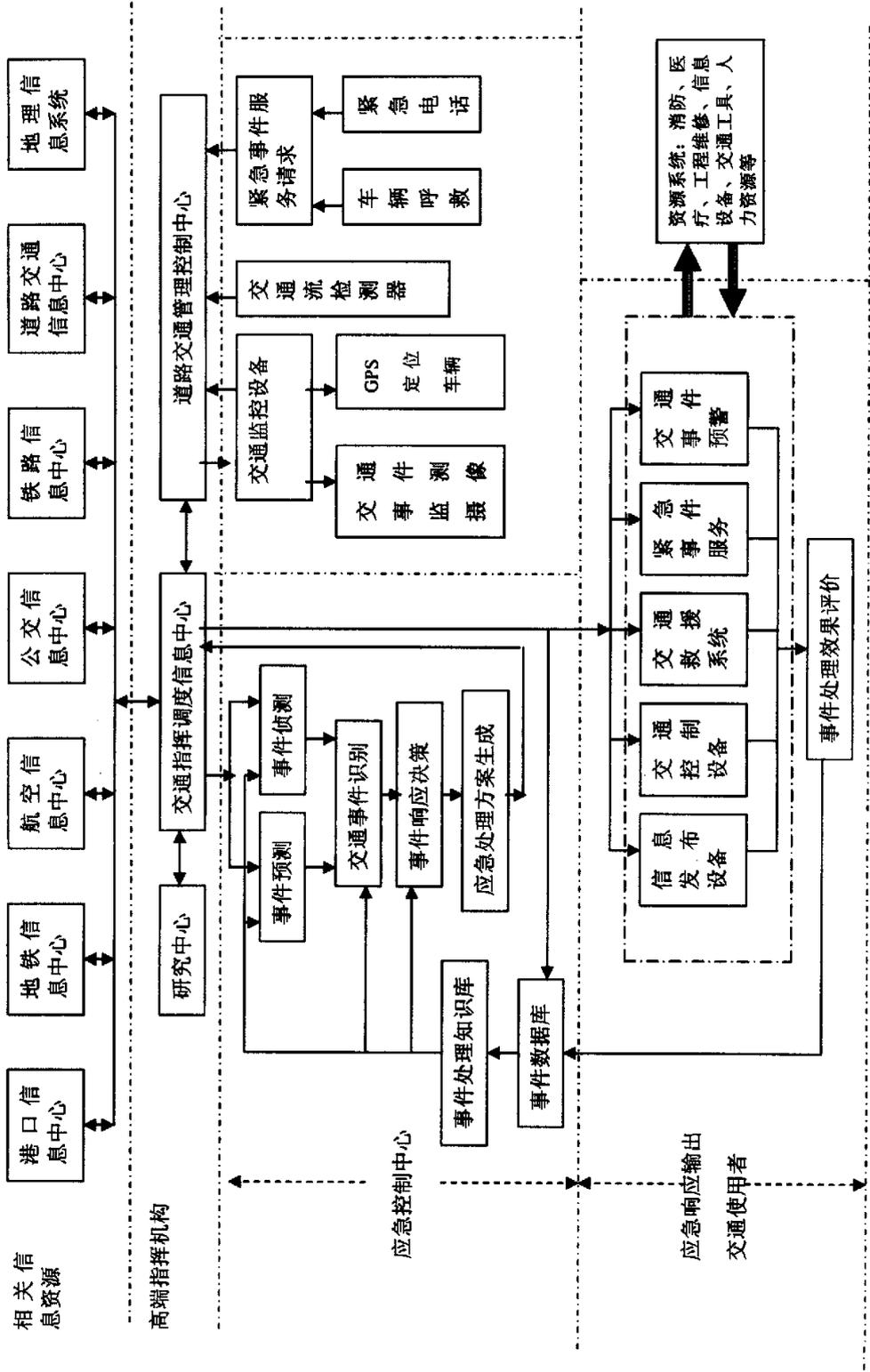


图 2-1 交通事件应急管理系统结构框图

在图 2-1 的交通事件管理框架图中, 包含有若干个子系统, 其中主要的有由事件检测子系统、事件分析子系统、对策决策子系统、救援执行子系统、评估子系统、档案管理子系统等六个组成的内部子系统以及由辅助决策子系统、资源维护子系统两个组成的外部子系统, 各个子系统的协调一致共同构建成城市交通事件应急管理系统。子系统之间的关系如图 2-2 所示, 下文中重点对各个子系统的功能进行说明。

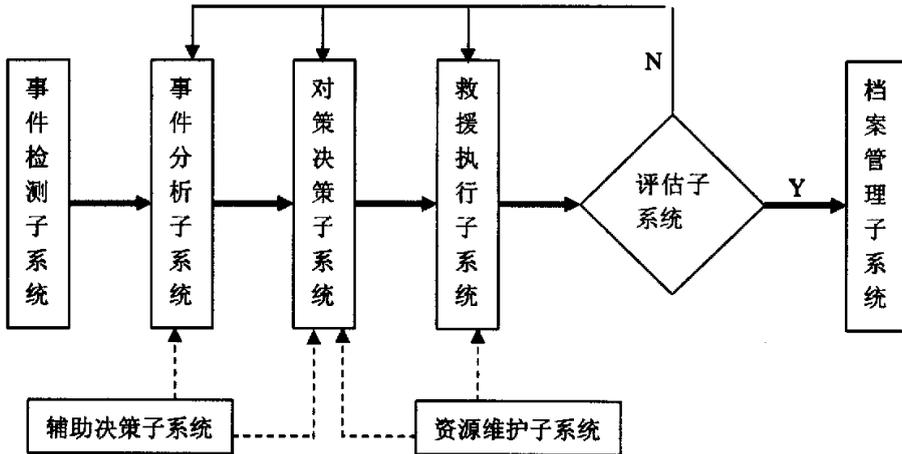


图 2-2 城市交通事件管理系统功能流程图

2.3 交通事件管理系统的内部子系统

2.3.1 事件检测子系统

交通事件能否及时检测是事件管理中首要解决的问题, 事件检测子系统就是用来实现检测并确定事件性质的功能。

事件检测技术是事件检测子系统的理论基础, 它不仅关系到监控系统(硬件部分)的作用能否充分发挥, 而且对事故的处理也具有极重要的意义。例如: 事故发生后的快速检测, 对事故作出快速反应——采取相应的交通控制措施、防止二次事故的发生、快速处理事故、降低事故损失等等, 都与事件的检测算法有着直接的关系。

为了保证操作机构对交通流和安全设施的正常响应。通常使用的事件检测设施有:

司乘人员的行动电话呼叫

- # 通过操作员观测的闭环电视监视系统
- # 基于检测软件的自动车辆识别系统
- # 电子车辆检测装置(例如录像机图像、检测线困或雷达发现器)和交通反常检测运算法则
- # 司乘人员的帮助电话或呼叫盒子
- # 警察巡逻
- # 空中监视系统
- # 运输部门或公众的双频道电台工作组员报告
- # 基于路车间信息系统的异常交通信息采集
- # 交通报道服务
- # 路过的车辆(路过或跟踪)
- # 漫游服务巡逻

通过这些设施采集的信息包括：道路环境（气象等）和交通状态（交通流量、密度、速度、排队长度、异常交通现象等）信息，其中异常交通现象类型的判断、确认是在信息采集的基础上，通过交通管理中心的人员来实现。异常交通状态的预测，则可以运用状态模型加以预测。

事件检测的准确率与所采纳的自动检测算法有重要的关系，所以，为了提高交通事件检测的准确率，在提高硬件对交通信息的检测精度外，重点要加强对各种检测算法的研究和应用。

2.3.2 事件分析子系统

事件检测子系统检测到所发生的和将要发生的交通事件后，原始的事件信息以及事件地点的环境信息、交通信息被汇总到事件分析子系统，进行进一步的过滤和分析。在本子系统内部，要完成对事件的类型、严重程度、导致原因等因素进行判别，并对事件造成的瓶颈处通行能力的下降程度、可能造成的阻塞以及阻塞的扩散程度等几个方面进行分析和预测。为下一步的事件决策提供基本的依据。事件分析的过程首先是事件确认的过程，因为在事件检测过程中会有一些的误报率，同时事件检测所提供的事件的属性数据可能很不全面，因此事件分析首先要对事件的有无进行判断，而后需要借助各种预先设计的模型和预案以及专用的数学算法对事件进行归类分析，最终得出事件的特征信息、严重程度、影响指数等重要参数。当检测子系统提供的数据不够完善或有残缺时，还需要运用数据挖掘技术和数据融合技术对事件的属性数据进行进一步的处理。

本子系统研究重点包括：对各种交通事件的分类研究、建立各种交通事件的模型、事件程度的判断标准、事件造成的延误分析、事件持续时间预测等。

2.3.3 事件决策子系统

决策分析是交通事件管理的难点,它负责生成救援方案并通知相关派遣救援资源。该模块利用交通检测子系统采集的信息以及分析子系统的初步结果生成救援策略,包括车道控制策略、匝道控制策略等。这些策略生成时应考虑相关路网的通行能力、各路段通行能力之间的匹配、各路段的预测行驶时间,同时应通知相关救援部门实施事故救援过程。

决策分析的优劣程度直接影响到事件管理的效果优劣,对城市交通事件进行决策分析时,不仅需要依据从事件分析子系统得到的交通事件的相关信息,还要依赖两个外部子系统:辅助决策子系统和资源维护子系统。其中辅助决策子系统主要由城市的 GIS 系统和气象、环境等系统组成,为决策分析提供必要的地理、环境、气象预测等信息;资源维护子系统主要提供各种应急资源的配置、补给等信息,这些信息都直接影响到决策方案的制定和执行过程。同时,历史的交通事件信息和预先设计的交通事件案例模型都是进行交通事件决策分析的有效依据。

对策决策子系统的主要功能是生成针对具体事件的应急方案集,并能找出最理想的应急方案,最理想的应急方案应该是在最短的时间内以最低的成本解决交通事件及消除事件对路网造成的影响。方案是根据所获得的相关信息通过具体的决策算法和优化算法最终由人工做出的。当然,方案并不是一成不变的,在具体的响应实施中,要根据事件的发展变化进行适当的调整。

应急方案的内容应该包括事发路段的交通管理、出救资源种类的选择、出救资源点的选择、应急资源的配置、最优救援路径的选择、上游流入交通的迂回诱导与控制管理方案、关联平面道路的紧急管理方案、信息发布方案等多个方面。

本子系统研究重点包括:出救对策生成的算法、最优解的探讨(包括最优时间、最优出救点、最优资源携带、最优出救路线等)

2.3.4 决策执行子系统

响应执行是将应急方案付诸实际的过程,交通事件中的救援过程可能会涉及到各个具体部门,包括交通管理部门(需要在事发路段实行限速、限流量、关闭路段等各种交通控制策略)、监控部门(对交通事件进行实时监控)、拖运部门(将故障车拖离事发路段,恢复道路通行能力)、信息发布部门(通过具体的信息发布渠道对驾驶员、行人、公众进行交通事件的实时发布)、城市消防部门(对交通事件引起的爆炸、起火进行灭火消防)、医疗救助部门(对交通事件引起的人员伤亡进行紧急救援处理)、交警部门(对事件的直接原因、责任人等进行调查取证)、环卫部门(对交通事件造成的环境污染进行处理)等等。因为救援过程

所涉及到的部门可能比较多,所以尽管在对策决策子系统中对各个救援部门的出救点、资源配置和行车路线都进行了决策,在具体的执行过程中还是需要有一个统一的指挥中心,对各个救援部门进行统一管理和协调,从整体上提高应急的效率。

对不同事件的决策执行可能差异会很大,下面举例说明本系统两个重要的功能:现场管理功能和信息发布功能。

现场管理功能:

现场管理是一个使各个部门有效合作及现场资源有效调配的过程。现场管理的主要任务是准确评价事件严重程度;确定合适的优先权;协调相关资源的使用;保证通讯的清晰与畅通;通过有效的方法安全、快速、高效地清理事件现场。其中,保证事件处理人员、事件的当事人以及其他车辆驾驶员和乘客的安全是事件现场管理的首要目的。

现场管理的一个重要内容是现场的交通管理,交通管理是对事件影响的区域进行交通控制措施的应用。事件交通管理的主要内容包括:

- 现场交通控制点的设立
- 车道关闭与开放
- 红绿灯控制
- 使用可替代道路
- 管理车道空间
- 设计、研究引导交互的路径

信息发布功能:

事件信息发布是通过各种信息发布渠道和方式将事件信息传播给道路使用者以及公众的过程。

当发生异常交通现象时,及时的向其上游的车辆通报交通信息,既可以让这些车辆了解前方的交通状态,采取适当的对策预防尾随事故的发生,又可以诱导上游的交通流绕行,一方面减少这些车辆的等候时间,另一方面降低事故突发路段的交通压力,为迅速恢复正常交通提供条件。信息发布内容一般包括:异常交通现象的发生地点和事故类别的信息、流入和流出诱导信息、车道或行驶速度限制信息、替代路径推荐信息等。

常用的发布信息的仪器设备有:道路交通咨询电台、可变信息情报板、商业电台广播、车内路线导行装置、有线电视交通报道、Internet、电话情报系统、车载或个人信息辅助系统、路径引导系统、由数据服务提供者提供的多种散播机等。

司乘人员需要尽可能多地接收信息,超出时间效应的事件报导可能导致另一起事件的发生。实际上,信息传播应该直到交通流恢复到常态时为止,如果一个

事件发生在一个高峰时期或有地域冲突的区域，这可能将持续更长的一段时间。

2.3.5 效果评估子系统

评估子系统的主要功能是对交通事件解决的效果进行评价，通过救援执行过程的实施，发生的交通事件或者被及时地解决，或者没有获得有效的解决，或者根本没有起到减少事件损失的效果，这些都需要评估子系统进行具体的评价，评价的内容包括对事件本身的评价和对事发路段交通状况的评价，如果效果没有达到规定的要求，则将具体不符合要求的信息反馈给相应的子系统（包括事件分析子系统、对策决策子系统和救援执行子系统），进行重新分析、决策和救援。如果评价结果达到要求，则对此交通事件进行结案处理，将整个事件的相关信息（包括事件发生时间、地点、类型、严重程度、应急方案、延续时间、消耗的应急资源、应急效果等）录入到城市交通事件的档案管理子系统中，形成历史案例数据库，为以后的交通事件管理提供有用的参考。

对事件管理效果的评估可采用检测率（DR）、误检率（FDR）、平均检测时间（MDT）和预防管制措施下与未实施管制下车速平均值的相对误差、车速方差相对误差、占有率平均值相对误差、占有率方差相对误差等七项指标。

前三项指标可反映检测算法性能的优劣：检测率和误检率反映了检测算法的准确性，检测率越高，误检率越低，则检测的准确性就越高；平均检测时间则反映了检测算法对交通流异常的敏感性，算法越敏感，则平均检测时间越短。后四项指标表示了响应措施的作用：采取一定的交通控制措施后，车流运行趋向稳定，其行驶速度增大，车速波动较小——即平均车速提高但其方差减小，占有率将降低，而且其波动范围也有限——即占有率降低且方差也减小，此四项指标即反映了这一规律。具体而言，车速平均值的相对误差越大越好，占有率方差相对误差、占有率平均值相对误差、车速方差相对误差则越小越好。

2.3.6 档案管理子系统

档案管理子系统是城市交通事件管理系统的智力仓库，它包括交通事件管理的模型库、知识库、历史数据库，这些数据库对交通事件的管理具有切实有效的参考价值，建立和完善交通事件的档案管理子系统对于交通事件管理有着重要的意义。当然，理想的数据库并不是一开始就能建立的，需要在日常的事件管理过程中逐步地改进和完善。

档案管理子系统主要负责异常事件的基本信息和整个救援过程信息的整理、归档，对异常事件成因进行分析，对救援效果进行评价，生成救援报告，为未来的事件管理提供历史依据。

2.4 交通事件管理系统的外部子系统

2.4.1 基于 GIS 的辅助决策子系统

交通事件及其管理总是发生在一定的地理环境下,几乎所有事件的管理决策和活动都需要利用其中的地理信息。若能建立一管理、分析和表现这些与事件管理相关的地理信息的可视化虚拟现实环境作为交通事件管理的地理信息平台,则交通事件将会在一可视化环境中进行管理,这必然会大大提高管理效率。利用先进的 GIS 技术就可以满足这一需求。

GIS (Geographic Information System) [21]是在计算机硬件和软件支持下,对整个或部分地球表层空间中的有关地理分布数据进行采集、存储、管理、分析、显示和描述的技术系统。通过对多种地理空间实体数据(如空间位置数据、图形数据和属性数据等)及其关系的管理和处理,它可以分析一定区域内分布的多种现象和过程,解决规划、决策和管理等问题。

GIS 的技术优势在于它的数据综合、模拟和分析能力,可以得到常规方法或普通信息系统难以得到的重要信息,实现地理空间过程演化的模拟和预测。

交通事件管理涉及大量相关的地理信息,有效地管理、分析和表现这些信息,将会为事件管理提供强大的决策支持,而 GIS 的最大特点就是其地理信息的管理、处理和表现能力。因此,GIS 在事件管理中必然会有巨大的应用潜力。

GIS 技术可以为交通事件管理提供可视化、易操作的图形用户界面。GIS 技术的一个典型特点就是数据的可视化,它能将大量道路交通地理信息以矢量或栅格地图的方式来表示,而且可以通过设置图层的显示或隐藏来有选择地按需显示地图上的地理对象,如:仅显示高速公路的各个路段。对于地图上的各个点、线、面和体对象,可以直接对它们进行操作,如:通过点击某一地理对象来获得它的属性信息等。另外,通过与外部交通数据库建立链接,在高速公路地图上可通过改变代表各路段的图形对象的颜色等方式来实时反映交通状况。

GIS 技术与 GPS (Global Position System) 技术、通信技术相结合可以实现对紧急车辆的实时跟踪与紧急调度。GIS 中的地图在创建时都建立了相应的地理坐标系或投影坐标系,地图中的每一点都对应着该坐标系中唯一的一组坐标值,相对而言,只要获得了该坐标系中的一组坐标值就可以确定地图中唯一的点。在紧急车辆中配备 GPS 收发装置,并与交通监控中心建立通信链路,周期性地发送车辆的经纬度、速度等数据。这样,监控中心直接利用这些数据或对其做某些处理就可以在 GIS 的地图中显示紧急车辆的位置,从而实现实时跟踪。事件发生时,根据地图中所显示的各紧急车辆的位置与事件现场的远近,就可以合理调

度紧急救援车辆。

GIS 技术与事件自动检测技术相结合可以实现对事件位置的自动定位和显示。利用事件检测算法对所有或部分交通数据进行处理,就可以自动检测事件及其大致的发生位置。将 GIS 技术与之相结合,就可以动态显示被检测出的事件的位置甚至它对道路交通造成的影响(如:排队车辆长度等),如:在城市道路地图上闪烁显示一个点或者面对象来表示此处发生了交通事件。

GIS 技术与 CCTV (Closed Circuit Television) 系统相结合可以实现事发情况下对事件现场的自动监视和事件的鉴别。在创建 GIS 地图时,可以将道路沿线的摄像机作为地图所示内容的一部分,并通过软件和硬件的支持建立地图上的摄像机图形对象与实际摄像机间的控制关系,即能够通过操纵摄像机图形对象来遥控实际的摄像机。事件发生后,既可以在图形界面上通过摄像机控制窗口人工操纵就近的摄像机来鉴别事件,也可以自动弹出就近摄像机的当前试图与控制窗口,再进行人工控制。这种将 GIS 与 CCTV 相结合的方式简化了从事件检测到事件鉴别的过渡过程,还可以与事件的自动检测集成而实现事件检测和鉴别的一体化。

GIS 技术可以促进事件状态下替换道路计划的快速、有效实施。当交通事件严重影响道路通行能力且可能持续较长时间就需考虑实施替换道路计划。选择何种替换道路计划主要取决于事件发生的路段,事件的性质和影响程度和附近的交通状况。在制定替换道路计划时,可以利用 GIS 技术将各种不同条件下可能的替换道路分别以地图的形式表示出来。正常情况下它们在高速公路地图中处于隐藏状态;事件发生后,根据事件所在路段、性质和周围交通状况等显示合适的替换道路。这种方式直观、清楚、简便,很有利于替换道路计划的快速实施。

随着事件管理需求的不断升级,GIS 技术的日益进步,GIS 技术将会更加有力地促进城市交通事件管理的发展,基于 GIS 的辅助决策子系统也会为事件管理决策提供更及时和更准确的决策支持信息。

2.4.2 资源维护子系统

资源维护主要指救援资源的配置、使用和补给。救援过程不仅涉及到交通部门内部,而且会涉及到其他社会相关部门(例如消防站、医院、环境保护部门等)。资源维护子系统保证了各个出救点资源的供需平衡,并将各个出救点的应急资源信息实时地传递给对策决策子系统,以保证所做出的救援方案都能够有足够响应的资源,避免出现理论上最佳而实际中无法执行的现象。

资源维护子系统需要解决的问题有:各种出救点在路网中的配置、各个出救点规模的设置、应急资源数量在出救点中的配置、出救资源的配置、消耗性的资

源的补充和更新等。

2.5 交通事件管理系统的信息流

上面对交通事件管理系统的各个功能子系统进行了描述,各个功能模块要能够协调、高效地发挥功能,必须要以即时信息共享作为基础。图 2-3 对事件管理系统的信息流图进行了说明。

异常交通的紧急管理作业涉及到诸多的业务部门(作业程序如图 2-4 表示),主要包括:城市道路交通管理中心、交通警察部门、医务部门、事故排除部门、消防部门、特种物品处置部门、巡逻管理部门等。在事件处理的各个环节中,相关管理部门的相互协调是非常必要的。其信息共享和信息传输可通过局域网实现,并且,局域网与 Internet 相联结,可实现该系统与外部的联系,如通过 Internet 向社会公众发布交通信息。

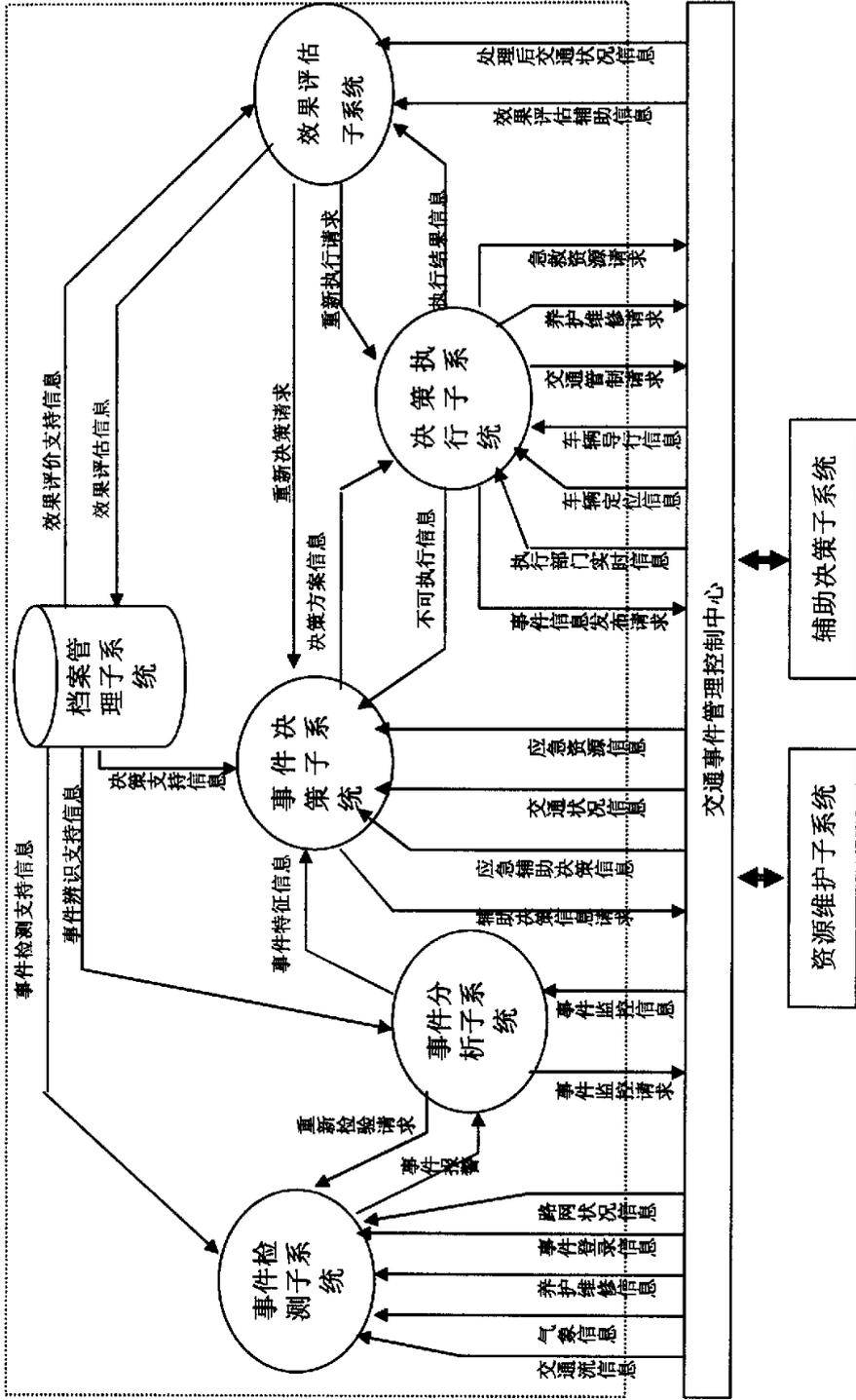


图 2-3 交通事件管理的信息流程图

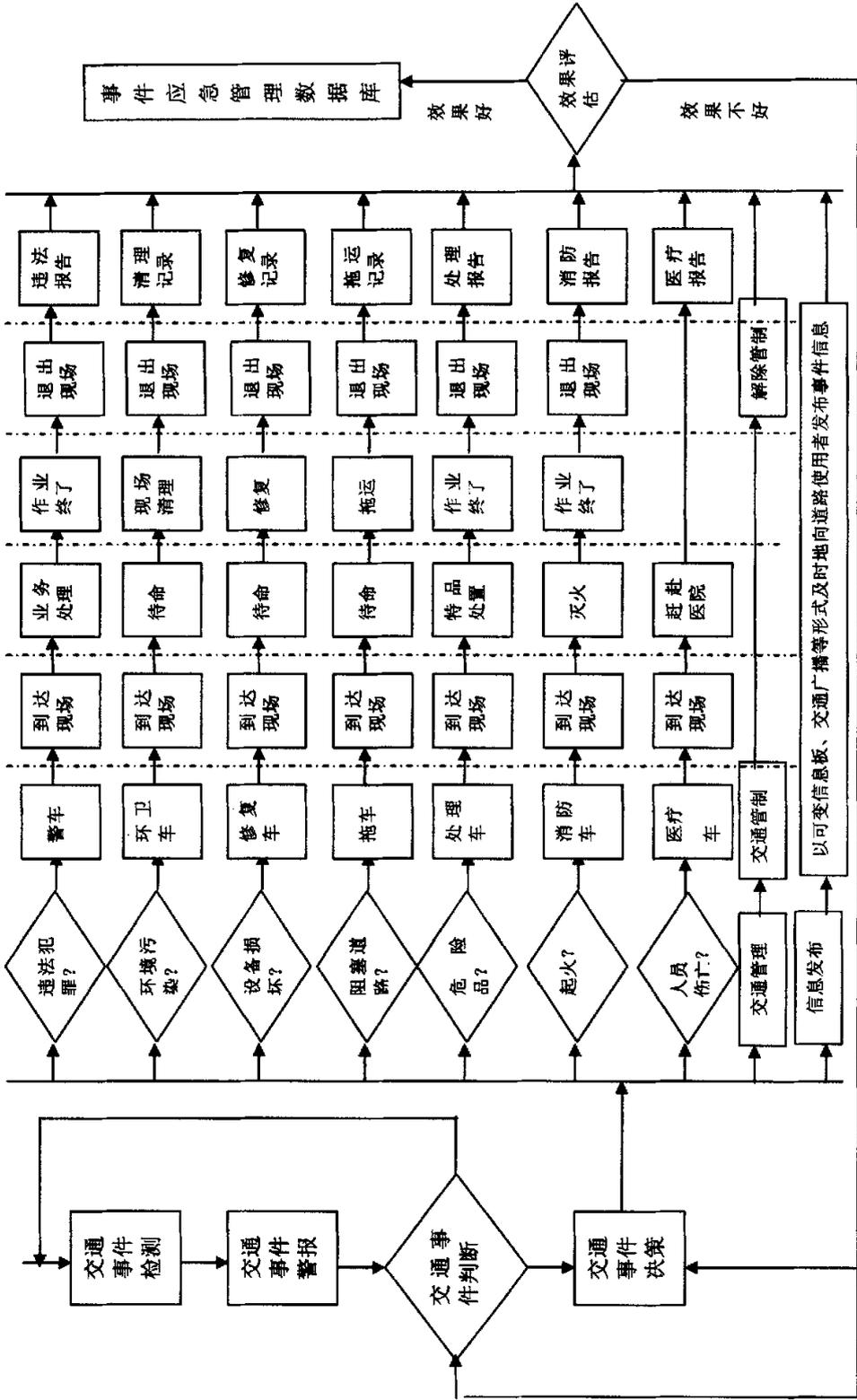


图 2-4 交通事件管理响应部门作业流程示意图

2.6 交通事件管理系统的主要理论问题

2.6.1 事件检测算法问题

虽然有一部分交通异常事件可以通过巡逻车、电话等人工方法通知交通管理中心，但大多数交通异常事件仍要采用各种道路事件自动检测AID（Automated Incidence Detection）^[22]算法实现。AID算法的基本原理是由交通异常事件导致的道路交通流变化，可以通过实时检测道路上不同位置的交通流参数变化值加以识别。当发生交通异常事件后交通流参数会发生突变（表现在占有率、流量、速度、密度等参数上），若变化程度超过了预先设置的阈值，判别为异常事件发生。城市道路由于信号灯控制而发生常发性交通拥挤，因此检测异常事故的算法要比高速公路检测算法复杂一些，通常采用占有率作为检测参数。

事件的检测算法主要有：根据检测截面可分为单截面和双截面检测算法；依据监控设备可分为基于常规监控设备的算法和基于非常规监控设备的算法；按控制策略也可将检测算法分为模式识别方法和统计预测方法。

随着现代新技术的发展，也形成了一些新的事件检测算法，如人工神经网络法和图象处理法。人工神经网络法是用有代表性的交通状态数据对人工神经元（网络）进行训练，直到它能够识别不同的交通状态为止。由于人工神经网络在理论上的优势，该算法的发展前景较好。但因其对训练样本的要求过于苛刻（覆盖所有的事故和非事故状态），而且对训练样本的依赖性较大，也即该算法对数据采集设备的布设和交通环境的适应能力较差。图像处理法是以摄像机和计算机处理技术为基础对道路上的事件进行自动检测，它可以跟踪单个车辆或一个车队进行图象采集，通过处理图象信息即可获得流量、空间车速、空间占有率等参数，它不仅可以判断事故的发生，而且还可以预测事故，因而具有广泛的应用和发展前景。

随着新技术和新理论的出现，事件检测算法会不断优化，能辅助检测元件为事件管理中心提供准确的事件信息。

2.6.2 事件引起的交通延误问题

对事件引起的交通延误问题的分析研究是生成救援对策的重要前提。如果事件导致的延误不超过规定阈值，则可以不对事件进行应急响应；如果预测出事件导致的车辆延误过于严重，则需要通过上游交通控制、车辆导行、紧急处理事件源等响应措施来减少车辆延误。对于车辆延误一般采用交通流理论中排队论的方法进行研究。

2.6.3 最佳救援路径问题

出救点配置在城市路网中的不同位置,事件发生地可能会在路网中的任一点,因此,出救点到应急点的救援路径选择问题就需要进行深入的研究。传统的方法是采用图论中的最短路径算法。但由于路网中各个路段的阻抗会随时间而变化,因而,这种计算方法有一定的局限性。

2.6.4 出救点调度问题

一个出救点到一个应急点的调度、一个出救点到多个应急点的调度、多个出救点到一个应急点的调度、多个出救点到多个应急点的调度。这些问题也是应急救援系统中的难题。由于优化目标的不同,所采用的算法也各异。现在流行的有各种遗传算法、禁忌算法等^[23]。

2.6.5 驾驶员导行问题

在正常交通状况下并非所有汽车司机都利用导行系统选择行驶路径,当地司机往往凭经验选择走哪条道路。但发生异常事件后,由于事发路段通行能力突然下降并波及相邻路段,为司机提供准确地导行,既有利于减少交通异常事件的影响范围,又可节省行程时间。目前在诱导算法中比较有效的是实时动态交通分配算法。它根据交通需求随时间而变化,对道路网上各路段实行动态配流,从而达到对司机进行动态诱导的目的,但目前算法普遍存在计算时间长,与实际有较大差异等缺点。常用算法还有遗传算法、神经网络模型、卡尔曼滤波理论^[24]等。

2.7 本章小结

本章试图从宏观角度提出城市交通事件应急管理系统的思路,为我国的城市交通管理提供一种策略。

首先介绍了 ITS 对交通事件管理的要求,对我国 ITS 框架下的意外事件管理服务和急救车辆管理服务进行了总结。

设计出城市交通事件应急管理系统的框架,对各个功能子系统(检测、分析、决策、执行、评估、管理、辅助决策、资源维护)进行了解释性说明。对系统的运作信息流进行了研究,最后探讨了系统实现需要解决的一些核心理论问题。

第三章 交通事件对车辆延误的影响研究

一旦检测到事件的发生并确定其性质后,估计事件可能引起的延误大小是必需的。首先,延误估计是进一步采取事件救援措施的依据,如果事件引起的延误大小在允许的范围内,则不需要采取应急措施;如果事件可能引起比较大的延误,则必须作出事件响应措施。过大或过小的响应都对减小事件的影响不利。其次,事件延误不仅对事件管理本身重要,它还为 ITS 其它子系统,特别是出行者信息系统(ATIS)、先进的交通管理系统(ATMS)以及先进的公共交通管理系统(APTS)提供重要的实时信息,以便各个系统采取相应的措施和方案。

目前对偶发性事件引起的延误分析,主要是确定性排队分析方法^[25],这种方法虽分析简单,适应方便,但没有考虑到冲击波的移动速度对交通流各参数的影响,结果不很准确,因此需要研究能更加准确的对拥挤情况下的交通流进行分析的方法。

本节从车流波动理论的角度对偶发性拥挤下的交通流进行了分析,分析结果更接近实际。这种方法要求测量出流量与密度的值,而密度在过去难以进行直接测量,因此过去使用得很少。现在,由于视频检测器和其他方法的应用,使人们能够对密度、空间平均车速等交通流的参数进行直接测量^[26],因此,这种分析方法也具有实际应用性。

3.1 交通流中主要参数的关系及间断流特性

为了顺利进行以下问题的研究,有必要将交通流中流量、速度、密度的关系以及间断交通流的基本知识做一简单介绍。

3.1.1 流量、速度、密度的关系^[27]

1): 速度与密度的关系

1933年, Green Shields 提出了速度—密度的线形模型:

$$\bar{v}_s = v_f \left(1 - \frac{K}{K_j}\right) \quad (3-1)$$

式中: v_f —— 自由流速度;

K_j —— 阻塞密度。

研究表明,在通常的交通流密度下,该模型与实测数据的拟合较好。速度与密度的关系如图 3-1 所表示。例如图中 C 点的密度为 k_m , 速度为 v_m , 则流量 $Q_m = v_m k_m$, 就是曲线下面的矩形部分的面积。

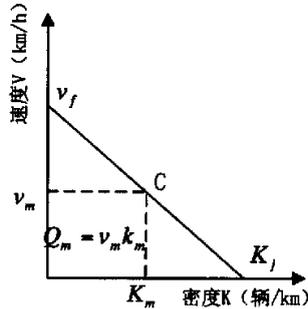


图3-1 速度-密度关系

当交通流密度很大或很小时该模型与实际情况有一定偏差,当交通流密度很大时,可以采用 Greenberg 提出的对数模型:

$$v_s = v_m \ln\left(\frac{K_j}{K}\right) \quad (3-2)$$

式中: v_m —— 临界速度

当交通流密度很小时,可以采用 Underwood 提出的指数模型:

$$v_s = v_f e^{-\frac{k}{k_m}} \quad (3-3)$$

式中: k_m —— 阻塞密度

2): 流量与密度的关系

根据 Green Shields 模型以及速度-密度-流量的基本关系,可得

$$Q = K v_f \left(1 - \frac{K}{K_j}\right) \quad (3-4)$$

图 3-2 的抛物线表示了密度与流量两者之间的关系,图上 C 点代表最大流量 Q_m , 相应的密度为 K_m , 密度小于此值时,流量随密度的增加而增加;当密度大于此值时,流量随密度的增加而减小,直至达到阻塞密度 K_j , 阻塞密度时流量为 0。在图上, C 点左边的部分表示不拥挤, C 点右边的部分表示拥挤状态。

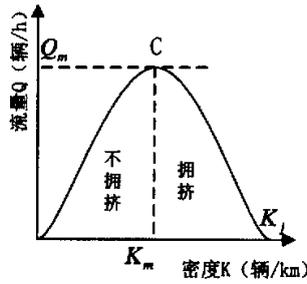


图3-2 流量与密度的关系

3): 流量与速度的关系

根据 Green Shields 模型以及速度—密度—流量的基本关系，可得

$$Q = K_j \left(v_s - \frac{v_s^2}{v_f} \right) \quad (3-5)$$

图 3-3 的抛物线表示了速度与流量的关系，通常速度随流量增加而降低，直至达到最大通行能力的流量 Q_m 为至。在曲线上拥挤的部分，流量和速度都降低。在图上，C 点以上的部分表示不拥挤，C 点一下的部分表示拥挤状态。

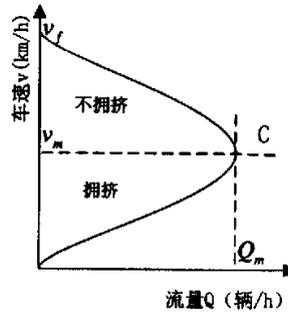


图3-3 流量与速度的关系

3.1.2 间断交通流的特性^[27]

间断交通流指有外部影响因素的间断交通流。描述间断流的参数有：饱和流率、损失时间，交通流运行效率的指标—延误。

信号交叉口引起的间断流是典型的间断流，由于交通事件引起的间断流与信号交叉口引起的间断流相类似，因此，了解与交叉口相交道路上的交通流特性，对研究间断流的特性是很有意义的。

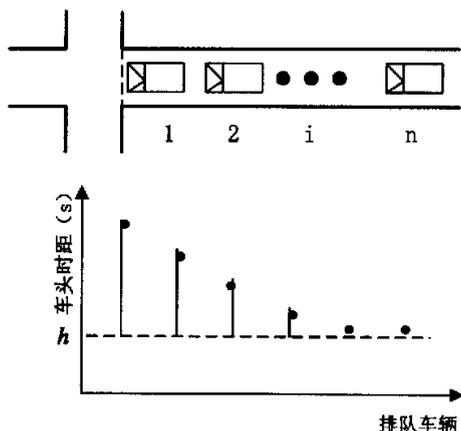


图3-4 交叉口排队示意图

信号交叉口的交通流一般采用饱和车头时距、饱和流率和损失时间来描述。稳定行驶连续流的车头时距称为饱和车头时距，用 h_s 表示。因为这个时距接近相等，所以进入交叉口的每条车道上的车辆数可按下式计算：

$$S = \frac{3600}{h_s} \quad (3-6)$$

式中： S ——饱和流率（辆/h）

h_s ——饱和车头时距（s）。

饱和流率 S 是每条车道能进入交叉口的车辆数，只有该方向车道总是绿灯信号，车辆通过交叉口无需停车，该式才是正确的。

当信号变为绿灯时，车辆由停止状态开始运动，前几辆车的车头时距是大于 h_s 的。因此，对于前几辆车，应增加其时距（ $\geq h_s$ ），从而得到一个增量值，称为起动损失时间，用 l_1 表示，则

$$l_1 = \sum_{i=1}^n t_i \quad (3-7)$$

式中： l_1 ——总起动损失时间（s）；

t_i ——第 i 辆车的起动损失时间（s）。

交通流每次从排队等待状态开始运动，都要把起动损失时间加到每辆车的时距上。通过饱和流率和起动损失时间两个假设，就可以确定一个车队通过交叉口所需的时间，并可算出每次使一个交通流停止所造成的额外损失时间。

3.2 事件引起延误的定性分析研究

3.2.1 异常交通事件引起的延误模型

事件发生后在事发地点形成瓶颈点，如上游的交通需求小于瓶颈点的通行能力，那么上游的车辆以较低的速度通过瓶颈点，不会形成排队；如上游的交通需求大于瓶颈点的通行能力，就会在瓶颈处产生排队并向上游延伸。

图 3-5 是发生事件时标准的延误曲线。在图中横轴表示某一事件发生、检测、处理、消除以及对交通流产生影响的持续时间，纵轴表示累计交通量或在特定时段内通过道路某断面的车辆总和。 f_d 表示需求流量， f_s 表示事件发生期间的瓶颈处通行能力， f_c 表示事件消除后的驶离流量。 t_s （从 t_0 到 t_1 ）表示事件持续时间，事件在 t_0 时刻发生后，因车道阻塞导致交通流量从 f_d 降到 f_s ，直到事件排除时刻 t_1 后，排队的车辆以接近道路通行能力的饱和流量消散。当到达时刻 t_1' 后，排队的最后一辆车恢复到正常的车速，此时交通量恢复到原来的需求交通量，即事件的影响时间为 t_0 到 t_1' 时间段，图中由 f_d 、 f_s 、 f_c 所围成的三角形面积即为事件引起的总延误大小（辆·小时），根据三角形面积公式可知，事件延误是各种流量和事件持续时间 t_s 的函数：

$$d_s = \frac{t_s^2}{2} \cdot \frac{(f_d - f_s)(f_c - f_s)}{(f_c - f_d)} \quad (3-8)$$

可见事件延误与事件持续时间平方成正比。因此减少事件的持续时间就显得非常重要了。

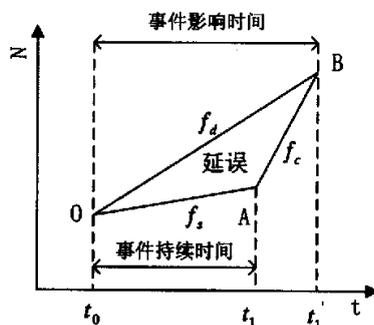


图3-5 事件延误曲线

事件的持续时间可以分解为事件检测时间、事件响应时间、事件清除时间三个部分，为减少事件的持续时间，需要应急管理系统从这三方面进行应急。各部分时间所受的影响因素如表 3-1 所示。

表 3-1 影响事件持续时间的因素

	事件持续时间		
	事件检测时间	事件响应时间	事件清除时间
影响因素	事件发生的位置 事件发生时的交通条件 检测子系统的有效性	救援设备的位置 事件发生地点 交通条件 气象条件 道路结构和几何条件	响应部门的协调程度 事件种类 事件的类型 事件的严重程度

3.2.2 通过事件管理后改善了的延误模型

进行交通事件管理，可以通过改变事件持续时间 t_s 和交通需求 f_d 两个参数的值，从而改变总的延误量。从减少事件持续时间 t_s 方面考虑，需要尽量减少事件的检测时间、相应时间、清除时间；从改变交通需求 f_d 方面考虑，需要控制上游交通需求、转移部分原有交通需求量等。

图 3-6 表示了进行事件管理后，通过减少事件总的持续时间所带来的延误改善示意图。其中， t_0 表示事故发生时刻； t_2 表示没有事件管理系统时事件被发现和处理的时刻； t_2' 表示没有事件管理系统时事件的影响完全解除的时刻； t_1 表示有事件管理系统时事件被发现和处理的时刻； t_1' 表示有事件管理系统时事件影响完全解除的时刻；四边形 ABCD 的面积就是由于运用事件管理系统所带来的延误时间减少量。

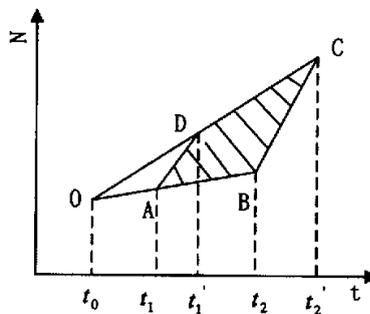


图3-6 减少事件持续时间后导致的延误减少量

由此可知，及时有效的救援措施，可以大大地降低交通事件造成的损失，减少延误，提高道路通行能力。

图 3-7 表示了进行事件管理后，通过事发路段上游的交通控制，改变交通需

求后的延误图。图中 OCB 线表示没有进行上游交通控制的交通需求量，当事件在 t_0 时刻发生后，因为事件的检测需要一定的时间，所以不可能立刻对上游交通需求进行调控，在 C 点开始控制上游的进入流量，使交通需求变为 CD 线。从而事件引起的延误降低了三角形 CBD 面积的大小。

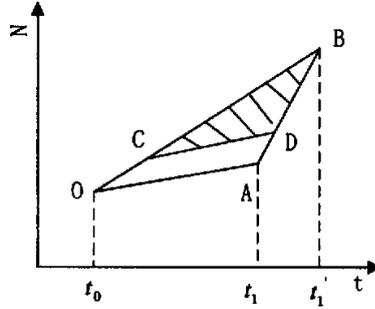


图3-7 改变交通需求量后的车辆延误变化

3.3 事件引起延误的定量分析研究

对延误进行定量分析的传统方法是使用确定性排队论理论，然而，拥挤下的交通流的各个参数会受到冲击波移动速度的影响，而确定性排队理论分析则没有考虑到这种影响，因此，这种分析方法不能动态反映拥挤状况下交通流的真实状态。在本节中，拟采用考虑冲击波移动速度的车流波动理论对事件引起的延误进行定量分析。

3.3.1 车流波动理论

车流中两种不同密度部分的分界面经过一辆辆车朝车流后部传播的现象，称为车流波动。密度分界面沿道路移动的速度称为波速^[28]。

当发生交通事件后，事件发生点的通行能力降低，如果上游的交通需求超过瓶颈点的通行能力，产生排队，排队尾端界面向上游蔓延，即出现一向后的返回波，称为“集结波”；当事故排除后，排队车辆以饱和流从原瓶颈处流出，队列首端界面向上游延伸，即出现“消散波”^[29]，此时集结波依然存在，两者方向相同，都向上游延伸。如果消散波推进的速度大于集结波的，则排队消散最终能够完成，否则，排队就不会消散尽。

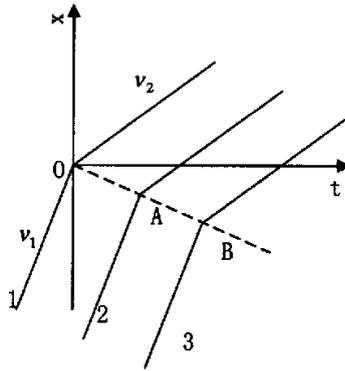


图3-8 车流波的形成与传播

图 3-8 描述了车流波的形成与传播的轨迹，图中所考察的是车流从低密度过渡到高密度而形成集结波的过程。一辆车的行驶状态可通过它的位置 x 随时间 t 的变化规律来表示，图中三条折线表示上述集结波形成车流内三辆车的动态。折线斜率等于车速，两折线之间的垂直距离 l 表示车头间距，水平距离 h 表示车头时距。设第一辆车减速发生的时刻为零时刻，对应的位置为零位置，即坐标原点 O 是第一辆车的变速点，随后第二辆车也减速，其开始减速的位置在零位置之后，用图中 A 点表示，继之第三辆车开始减速的位置更靠后，在图中用 B 点表示。直线 OAB 显示了集结波的动力学轨迹，它的斜率就是波速。从图中看到，集结波产生于 O 位置，然后传播到 A 位置的第二辆车上，最后从 A 位置传播到 B 位置的第三辆车上。

3.3.2 交通事件引起的集结波与消散波模型

当交通事件发生时，车流从高速低密度状态变成低速高密度状态甚至零速度高密度状态，形成集结波，排队队列的尾部沿上游延伸的速度就是停车波的波速。

到达车流到达交通事件发生地后，因道路通行能力降低使通过率降低，从而形成排队，集结成密度较高的队列，队列的长度随着集结波的运动而变长，如图 3-9 所示；当交通事件消除后，高密度的排队队列陆续起步疏散成一系列低密度的车队，形成消散波，如图 3-10 所示，队列的长度随消散波的运动而变短，但同时又随集结波的运动而变长，因而，队列最终能否消散完毕需要看两个波的波速大小关系。

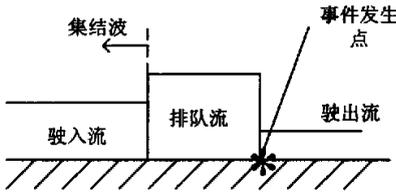


图3-9 事件持续中的集结波

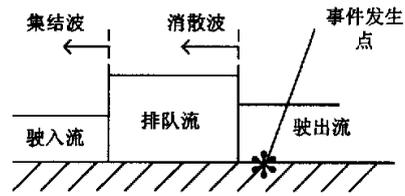


图3-10 事件清除后的消散波和集结波

下面对事件形成集结波和消散波的波速进行研究:

1): 事件发生和持续时

如图 3-11 所示, 考虑基本路段 x_1 至 x_2 , 在交通事件持续进行中, 驶出流量会下降到驶入流率以下, 排队将会产生并且其长度不断增加。用 q_n 和 k_n 分别代表着陆流的流率和密度, q_{q1} 和 k_{q1} 分别代表排队流的流率和密度, x_2 代表事件发生地点, x_1 代表上游控制入口点 (假设 x_1 与 x_2 之间的距离大于最大排队长度, 即事件延误引起的排队长度没有超过路段入口点), 在时间 t 排队流的长度为 l_1 , 着陆流的长度为 l_2 , 经过 Δt 时间后, 排队流的长度变为 l_3 , 着陆流的长度变为 l_4 。排队流的长度增加了 $l_3 - l_1$, 着陆流的长度变化了 $l_2 - l_4$, 则有: 在 Δt 时间内, 路段车辆的增加量 (驶入量与驶出量之差) 为 $(q_n - q_{q1})\Delta t$; 在 Δt 时间内, 该路段车辆数的变化量为 $(k_{q1}l_3 + k_n l_4) - (k_{q1}l_1 + k_n l_2)$ 。

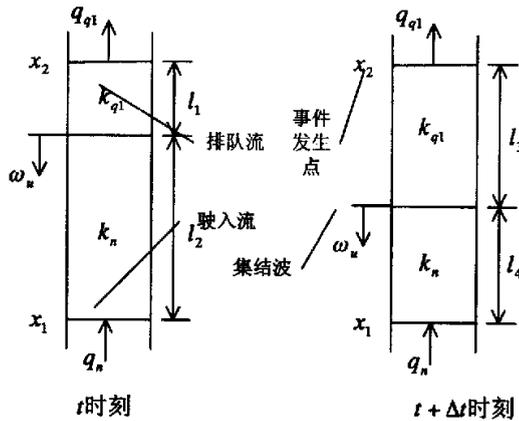


图3-11 集结波形成示意

$$\therefore l_1 + l_2 = l_3 + l_4 \quad (3-9)$$

$$\therefore (k_{q1}l_3 + k_n l_4) - (k_{q1}l_1 + k_n l_2) = k_{q1}(l_3 - l_1) - k_n(l_3 - l_1) = (k_{q1} - k_n)(l_3 - l_1) \quad (3-10)$$

根据车辆守恒原理, 在 Δt 该路段车辆变化数应等于车辆增加数, 因此:

$$(q_n - q_{q1})\Delta t = (k_{q1} - k_n)(l_3 - l_1) \quad (3-11)$$

将式 3-11 改写为：
$$\frac{l_3 - l_1}{\Delta t} = \frac{q_n - q_{q1}}{k_{q1} - k_n} \quad (3-12)$$

3-12 式中， $l_3 - l_1$ 是车辆排队长度的变化量， Δt 是时间差，因此 $\frac{l_3 - l_1}{\Delta t}$ 实际上就是集结波的移动速度，令其值为 ω_u ，则有：

$$\omega_u = -\frac{l_3 - l_1}{\Delta t} = -\frac{q_n - q_{q1}}{k_{q1} - k_n} < 0 \quad (3-13)$$

令 n 为排队车辆数，定义排队率 ω_n 为单位时间内排队车辆的增加数，排队车辆的变化数 $\Delta n = k_{q1}(l_3 - l_1)$ ，则有：

$$\omega_n = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{k_{q1}(l_3 - l_1)}{\Delta t} = -\omega_u \cdot k_{q1} \quad (3-14)$$

由式 3-11 可得： $k_{q1} = k_n - \frac{q_n - q_{q1}}{\omega_u} k_n$ ，代入式 3-14 得：

$$\omega_n = (q_n - q_{q1}) + \frac{k_n(l_3 - l_1)}{\Delta t} = (q_n - q_{q1}) - \omega_u k_n \quad (3-15)$$

此式中 $(q_n - q_{q1})$ 表示由于驶入流率与驶出流率的差异对排队率产生的影响，它就是确定性排队分析法中的排队率； $-\omega_u k_n$ 表示排队长度的增加和驶入流的密度变化对排队率产生的影响。

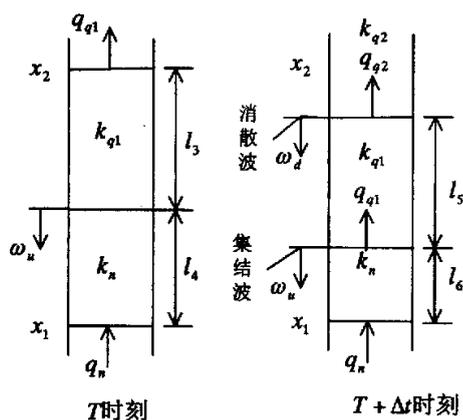


图3-12事件消除后，集结波与消散波同时并存

2): 事件消除后

事件被处理和清除后，事件引起的排队队列并不会立刻消失，集结波依然存在，上游驶入的车辆依然在队列末端进入排队流。因为事件被排除，导致道路通行能力下降的因素消失，道路的事发路段处恢复到正常的通行能力，排队的队列从事件发生地开始加速，以饱和流率 q_{q2} 、密度 k_{q2} 流出。此时，从事件发生地开

始产生一消散波 ω_d ，方向向队列的上游移动，如图 3-12 所示。

与计算集结波的方法相同，同理可以求出消散波 ω_d 的大小：

$$\omega_d = \frac{q_{q2} - q_{q1}}{k_{q2} - k_{q1}} < 0 \quad (3-16)$$

(小于 0 表示其方向与车辆行驶方向相反)

当消散波与集结波同时存在时，排队率 ω_m 为：

$$\begin{aligned} \omega_m &= \frac{\Delta n}{\Delta t} \\ &= \frac{|\omega_u| \cdot \Delta t \cdot k_{q1} - |\omega_d| \cdot \Delta t \cdot k_{q1}}{\Delta t} \\ &= (|\omega_u| - |\omega_d|) \cdot k_{q1} \end{aligned} \quad (3-17)$$

由 3-17 式可得：

当 $|\omega_d| > |\omega_u|$ 时， $\omega_m < 0$ ，即队列随时间延续而变短；

当 $|\omega_d| < |\omega_u|$ 时， $\omega_m > 0$ ，即队列随时间延续而变长；

当 $|\omega_d| = |\omega_u|$ 时， $\omega_m = 0$ ，即队列长度不随时间变化而变化。

即，当事件消除后，事件造成的排队可能会在一段时间内消失，也可能会一直扩散，直至于局部路网甚至整个路网。有如下三种情形。

1): $|\omega_d| > |\omega_u|$ ，消散波移动速度大于集结波的速度，排队队列在有限时间内可以自动消散完，交通流恢复到正常状态，事件造成的影响至此结束。这种情况造成的延误是我们一般所看到的延误，如图 3-13 和图 3-14 所示。

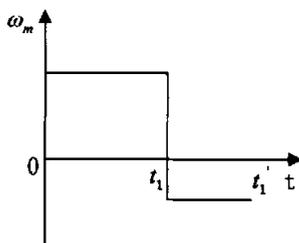


图3-13 $|\omega_d| > |\omega_u|$ 时的 ω_m

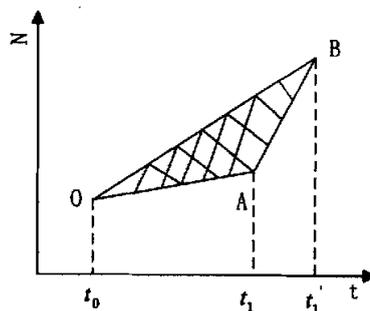


图3-14 $|\omega_d| > |\omega_u|$ 时的延误示意图

2): $|\omega_d| < |\omega_u|$ ，消散波移动速度小于集结波的速度，排队队列将会向路段上游一直延伸并不断加长，最终超出路段入口，形成车辆回流现象。其延误状况如图 3-15 和图 3-16 所示。

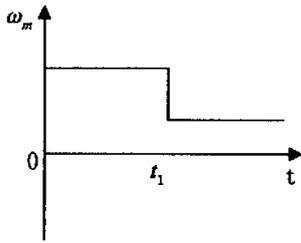


图3-15 $|\omega_d| < |\omega_u|$ 时的 ω_m

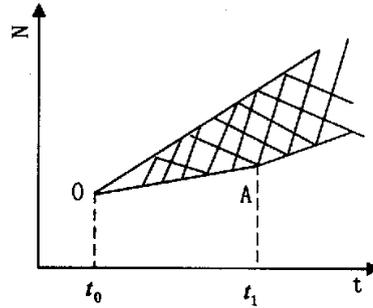


图3-16 $|\omega_d| < |\omega_u|$ 时的延误示意图

3): $|\omega_d| = |\omega_u|$, 消散波移动速度与集结波相等, 排队队列将会向路段上游一直延伸, 但队列长度自从消散开始时并不再加长, 最终依然会超出路段入口, 形成车辆回流现象。其延误状况如图 3-17 和图 3-18 所示。

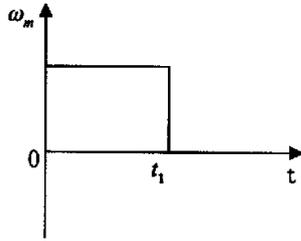


图3-17 $|\omega_d| = |\omega_u|$ 时的 ω_m

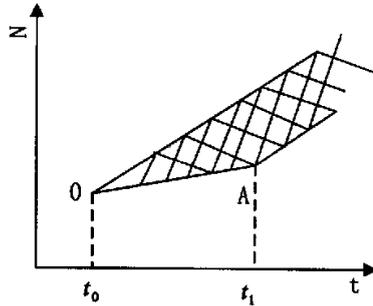


图3-18 $|\omega_d| = |\omega_u|$ 时的延误示意图

3.3.3 基于集结波与消散波的延误计算

本节中, 用车辆的排队长度 $y(t)$ 以及排队车辆数 $N(t)$ 来反映事件造成的延误大小。

此处所说的排队长度不是排队理论中通常所指的顾客数即车辆数, 而是指排队车辆的空间距离, 也就是说不是把车辆看作是无体积的、可以在瓶颈处无限堆积的质点, 而是要正确计算瓶颈上游排队的车辆依次向上游延伸的距离。传统的排队论理论中, 单纯地采用需求流量与通过能力的关系来推算排队长度, 这样会因为忽略了车头间距和车流波动的影响而导致不准确和失实, 本节提出基于车流波动理论的确定车辆排队长度的方法。

由上节中构造的集结波与消散波模型可知, 事件造成的延误与集结波的移动速度、事件持续时间有直接关系。在上游交通需求以及事件引起的瓶颈处通行能力不变情况下, 集结波 ω_u 的值为 $\omega_u = -(q_n - q_{q1}) / (k_{q1} - k_n)$, 在事件开始、持续、消散整个过程中, 队列的末端以此速度向上游蔓延, 即事件引起的偶发性拥挤以此速度向上游蔓延。队列长度随时间变化, 即:

$$\text{排队长度: } y(t) = |\omega_u| \cdot t \quad (3-18)$$

$$\text{排队车辆数: } N(t) = \omega_m \cdot t = |\omega_u| \cdot k_{q1} \cdot t \quad (3-19)$$

如果事件在长时间内得不到解决 (t 过大) 或上游交通需求量大大超出瓶颈处通行能力 ($|\omega_u|$ 过大), 则事件造成的偶发性拥挤会在路段中持续扩散, 直至邻近的路网中。

当事件被清除后, 事件发生地引发的消散波的波速 ω_d 为:

$$\omega_d = \frac{q_{q2} - q_{q1}}{k_{q2} - k_{q1}}$$

为一般起见, 只讨论 $|\omega_d| > |\omega_u|$ 的情形 (即假设在消散开始后, 队列最终能消散完成)。

假设事件发生于 t_0 时刻, 在 t_1 时刻被清除, 事件引起的排队队列在 t_2 时刻消散完。

则: 当 $t_1 \leq t < t_2$ 时, 集结波与消散波同时存在, 排队队列随时间变短, 直至消失。此时, 排队长度和排队车辆数分别变化为:

$$\text{排队长度: } y(t) = |\omega_u| \cdot t - |\omega_d| \cdot (t - t_1) \quad (3-20)$$

$$\text{排队车辆数: } N(t) = y \cdot k_{q1} = |\omega_u| \cdot k_{q1} \cdot t - |\omega_d| \cdot k_{q1} \cdot (t - t_1) \quad (3-21)$$

综合 (3-18)、(3-19)、(3-20)、(3-21), 可得事件在整个过程中对上游交通流的影响函数:

排队长度 $y(t)$ 的函数:

$$y(t) = \begin{cases} |\omega_u| \cdot t & t_0 < t < t_1 \text{ 时;} \\ |\omega_u| \cdot t - |\omega_d| \cdot (t - t_1) & t_1 \leq t < t_2 \text{ 时;} \\ 0 & t_2 \leq t \text{ 时。} \end{cases} \quad (3-22)$$

其图形如图 3-19 所示。

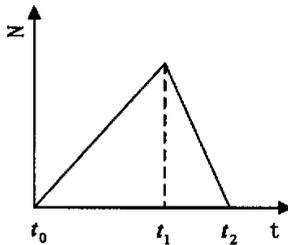


图3-19 排队车辆数示意图

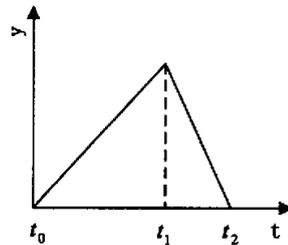


图3-20 排队长度示意图

排队车辆数 $N(t)$ 的函数:

$$N(t) = \begin{cases} |\omega_u| \cdot k_{q1} \cdot t & t_0 < t < t_1 \text{ 时;} \\ |\omega_u| \cdot k_{q1} \cdot t - |\omega_d| \cdot k_{q1} \cdot (t - t_1) & t_1 \leq t < t_2 \text{ 时;} \\ 0 & t_2 \leq t \text{ 时。} \end{cases} \quad (3-23)$$

其图形如图 3-20 所示。

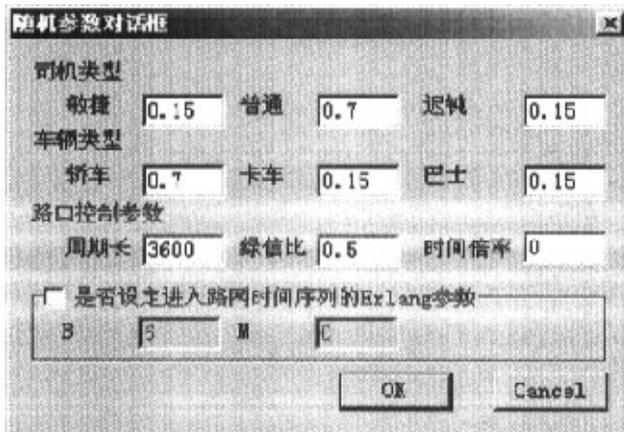
3.4 仿真实例

利用天津大学系统工程研究所自行开发的交通流仿真系统进行事件发生状况下的排队队长和延误时间模拟实验。模拟如下一种交通事件。

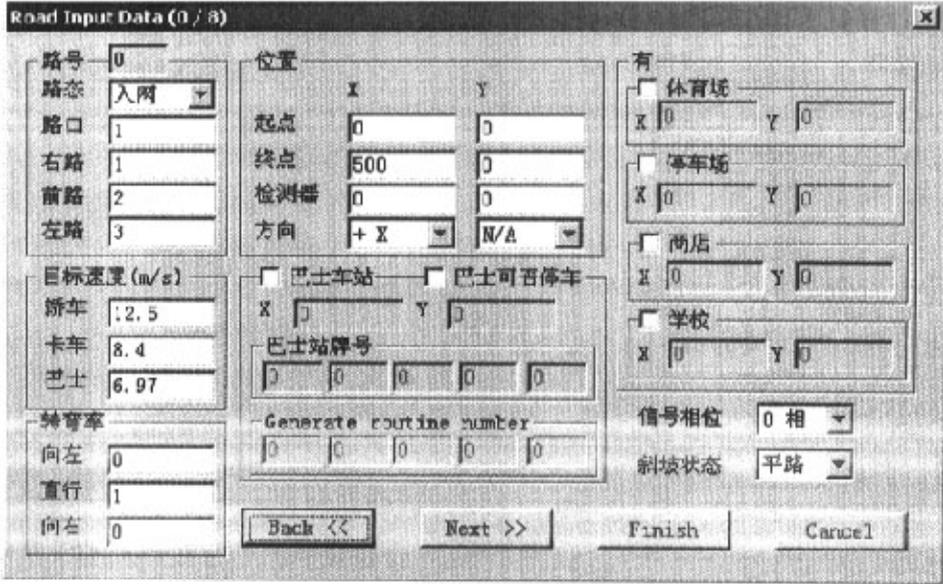
设城市道路网中某一路段的正常通行能力 $q_{q2}=133$ 辆/分钟，在路段某处发生一起交通事故，使得瓶颈处的通行能力下降为 $q_{q1}=65$ 辆/分钟，车辆到达率 $q_n=[90\sim 100]$ 辆/分钟随机给出（5分钟为一时间间隔）。事件从发生到消除一共假设为30分钟，30分钟后拥挤开始消散，路段的通行能力恢复到133辆/分钟。

仿真说明：

- 1、用单路口的红绿灯来模拟事件发生和消散。红灯表示事件发生、绿灯表示事件消除。
- 2、假设司机类型为：敏捷型 15%、普通型 70%、迟钝型 15%；车辆类型为：轿车 70%、卡车 15%、巴士 15%；为模仿 30 分钟的交通事件，即将路口控制参数的周期设为 3600 秒，绿信比为 0.5，以红灯开始，则第一个周期里的延误状况就可以近似为事件持续 30 分钟的延误状况。如下图所示。



- 3、以十字路口的红绿灯模拟事件发生地，路口参数如下图所设。



仿真结果:

仿真出的排队长度与计算出的排队长度如表 3-2 所示。

表 3-2 仿真出的队列状况

时刻 (分钟)	车辆到达率 (辆/分钟)	计算排队 长度 (m)	仿真排队 长度 (m)
0	96	0	0
5	98	105	98
10	102	210	204
15	104	315	325
20	101	420	434.5
25	98	525	532.5
30	99	630	635
35	100	520	504
40	100	400	386.5
45	97	280	262
50	104	160	155
55	100	40	38
60	102	0	0

结果说明:

由表 3-2 显示的模拟结果可看出, 仿真出的排队长度与用本文模型计算出的结果误差率不超过 5%, 说明了本文模型与仿真的结果相匹配。由于仿真模拟了相对真实的交通流状况, 从而也间接地证明了文中模型的正确性。

3.5 本章小结

本章首先对普通的间断交通流的特性参数进行了介绍,而后对事件引起的延误进行了定性和定量分析,指出减少延误的两种措施:减少事件持续时间和改变交通需求,显然减少事件持续时间对延误的改善效果最明显。

考虑了排队车辆位置的变化,利用车流波动理论解释事件造成排队队列中的两种波的存在,并给出集结波和消散波的计算公式,在此基础上,对事件造成的排队队列进行计算,给出在不同情况下的排队队列的长度计算公式。

用天津大学系统工程研究所的交通流模拟软件对一特定交通事件进行仿真模拟,其结果与利用集散波计算出延误排队变化过程的相吻合。

第四章 基于车辆延误的事件应急调度问题研究

4.1 关于应急资源调度问题的研究思路

对应急资源调度问题的研究在交通事件应急管理系统中有着非常重要的意义,因为有效的应急资源调度能大幅度地降低事件本身(特别是重大交通事故)对受害人造成的损失(在许多重大交通事故中,死亡者往往并不是在车辆的碰撞中或爆炸中死去,而是由于重伤后得不到及时治疗而死亡)^[30],另外,及时地对事件进行处理,能减少事件在道路上的持续时间,从而降低事件对道路交通造成的影响。

应急资源调度的硬件基础是在本文第二章中介绍的资源维护子系统,在现代化的城市路网中,有必要在各个主干线、市内快速路等沿线合理配置各种应急资源中心站(下文中统一称为出救点,将事件发生地改称为应急点),在资源维护子系统内部,要处理好出救点在路网中的配置、应急资源在出救点中的配置、损耗性应急资源的补给等等问题。

由于应急救援的时间的紧迫性,在对应急调度问题进行研究时,常常把应急开始时间最短作为优化的首要目标,因而,调度问题常常被归结为从出救点到应急点的最短路径问题^[31]。最短路径问题虽然已经有比较完善的研究理论,如Dijkstra算法^[32],然而,本算法中所要求的路段中的阻抗(一般表示为行程时间)却经常被认为是固定不变的,这显然不符合现实中交通流波动对阻抗的影响,尤其是有交通事件发生后的道路行程时间的变化。为解决这一问题,有必要对事件发生路段的道路行程时间进行深入地探讨研究。

因此,本章的论述思路为:首先对由于交通事件引起的车辆延误的路段行程时间研究;然后,基于路段行程时间对应急调度中的最短路径问题进行说明;最后,根据最短路径时间,运用多目标决策分析方法对应急调度问题做进一步研究。

4.2 车辆延误下的路段行程时间研究

4.2.1 路段行程时间

事发路段的路段行程时间指救援车辆或上游车辆经过此路段所需要的总时间。为了能给事件管理控制中心提供准确的路段行程时间以便计算用户最优路线

和救援车辆的最佳救援路径,有必要在事件延误的基础上进一步研究事件发生路段的行程时间变化情况。

交通事件对路段行程时间的影响与事件的类型、发生地点、发生时间、严重程度有关,也和异常事件下交通控制和信息发布情况有关。为简化问题,本节所讨论的路段仍然是道路的基本区段,即为不受进出匝道交通的合流、分流及交织影响的路段,同时假设上游的交通需求是不变的。

事发路段行程时间的构成分析可按照上游的交通需求 q_n 与瓶颈处的通行能力 s_1 大小关系分为两种情形讨论:

情形 1、 $q_n \leq s_1$ 时, 不产生排队;

情形 2、 $q_n > s_1$ 时, 产生排队。

下面分别对这两种情况进行分析。

4.2.2 无排队情况下的路段行程时间估计 ($q_n \leq s_1$ 时)

当路段上游的交通需求没有超过事件导致的瓶颈处通行能力时,上游驶来的车辆在瓶颈处低速通过,不形成排队。图 4-1 显示了这种情况的行程时间分配,图中 a 路段的总长度为 L_a , 事件发生地在图示“*”处,事件引起的瓶颈长度为 L_p 。

图 4-2 是瓶颈处的流量—密度曲线变化图,从图中可以看出,由于瓶颈点的通行能力降低,当上游的流量到达瓶颈处,密度增大,车速降低,行程时间相应增加,因为事件引起的瓶颈路段长度为 L_p , 所以此路段的总行程时间为

$$T_a(t) = \frac{L_a - L_p}{v(t)} + \frac{L_p}{v_p(t)} \quad (4-1)$$

式中, $T_a(t)$ 表示时间 t 进入路段 a 的车辆在 a 上的走行时间, $v(t)$ 是 t 时刻路段 a 的非瓶颈路段的车辆平均行驶速度, $v_p(t)$ 是 t 时刻路段 a 瓶颈路段的车辆平均行驶速度。

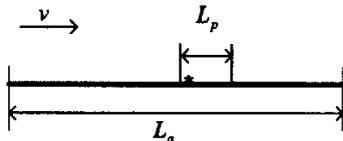


图4-1 无排队的路段行程区段

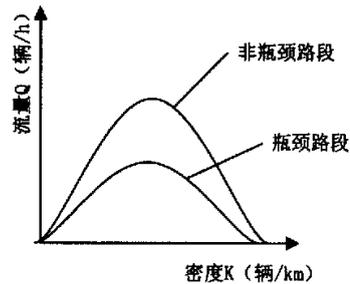


图4-2 瓶颈处流量与密度变化图

4.2.3 有排队时的路段行程时间研究 ($q_n > s_1$ 时)

当上游的交通需求大于瓶颈处的通行能力时，在瓶颈处上游形成排队队列，导致路段的行程时间发生变化，行程时间随着队列长度的变化而变化。为了清楚地分析这时路段行程时间的状况，有必要按照事件的发生、持续与清除划分出两个阶段进行讨论。

第一阶段：事件发生和持续中 ($t_0 < t < t_1$):

此时，事件发生和应急响应所占用的路段形成瓶颈，在瓶颈段上游有排队队列所处的排队等待路段，队列上游则是驶入流所处的路段，在瓶颈段下游则是驶出流所处的路段（如图 4-3 中所显示）。因而，事发路段上的行程时间主要由四部分构成：第一部分是车辆在驶入流的行驶时间 $T_{a1}(t)$ ；第二部分是车辆在排队流中的排队等待时间 $T_{a2}(t)$ ；第三部分是在瓶颈段的行驶时间 $T_{a3}(t)$ ；第四部分是车辆在瓶颈段下游的行驶时间 $T_{a4}(t)$ 。

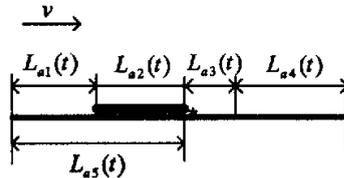


图4-3 有排队的事件持续中路段行程区段

假设 $L_{a1}(t)$ 为车辆在事故点上游正常行驶的长度， $L_{a2}(t)$ 为某时刻延迟队列的排队长度， $L_{a3}(t)$ 为事件造成的瓶颈段长度， $L_{a4}(t)$ 为车辆在瓶颈段下游行驶的长度， $L_{a5}(t)$ 为瓶颈段与道路入口之间的距离。（注： $L_{a3}(t)$ 与 $L_{a4}(t)$ 固定不变， $L_{a2}(t)$ 随集结波上移而增长， $L_{a1}(t)$ 随集结波上移而减少）

定义 $T_a(t)$ 为时间 t 进入路段 a 的车辆在 a 上的行驶时间，则有：

$$T_a(t) = T_{a1}(t) + T_{a2}(t) + T_{a3}(t) + T_{a4}(t) \quad (4-2)$$

$$L_{a5}(t) = L_{a1}(t) + L_{a2}(t) \quad (4-3)$$

其中， $L_{a5}(t)$ 是确定事件发生位置后就已知的量。

第二阶段：事件解除后 ($t_1 < t < t_2$):

事件解除后，瓶颈段消失，上游排队队列并不会立刻消散。此时，路段行程时间可以分为三部分（如图 4-4 中所显示）：第一部分是车辆在驶入流的行驶时间 $T_{a1}(t)$ ；第二部分是车辆在排队流中的排队等待时间 $T_{a2}(t)$ ；第三部分是车辆在队列首端开始的以饱和流量流出的驶出时间 $T_{a6}(t)$ 。

与第一种情况假设相类似， $L_{a1}(t)$ 为驶入流的长度， $L_{a2}(t)$ 为排队队列的长度，

$L_{a6}(t)$ 为饱和驶出流的长度, (注: $L_{a1}(t)$ 随集结波上移而减少, $L_{a2}(t)$ 随集结波与消散波的同时上移而减少, $L_{a6}(t)$ 随消散波的上移而增加)

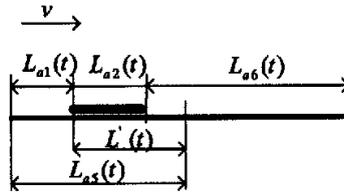


图4-4 有排队的事件消散后的路段行程区段

定义 $T_a(t)$ 为时间 t 进入路段 a 的车辆在 a 上的行驶时间, 则有:

$$T_a(t) = T_{a1}(t) + T_{a2}(t) + T_{a6}(t) \quad (4-4)$$

$$L_{a5}(t) = L_{a1}(t) + L'(t) \quad (4-5)$$

其中, $L'(t)$ 为集结波与事件发生地之间的距离。

下面分别求解各段的行驶时间 $T_{a1}(t)$ 、 $T_{a2}(t)$ 、 $T_{a3}(t)$ 、 $T_{a4}(t)$ 、 $T_{a6}(t)$

1): 驶入时间 $T_{a1}(t)$

由上游驶入流的流率 q_n 与密度 k_n , 根据交通流的“流量—密度—速度”基本关系公式可以求出驶入流的车辆平均行驶速度为 v_n , 则驶入时间 $T_{a1}(t)$ 为:

$$T_{a1}(t) = \frac{L_{a1}}{v_n} = \frac{L_{a1} \cdot k_n}{q_n} \quad (4-6)$$

因为 $L_{a1}(t)$ 的大小受到延误队列的集结波位置的影响, 所以要计算 $T_{a1}(t)$ 必须先求得队列末端的位置到事件发生地的距离 (即集结波向上游蔓延的长度)。

根据 3.3.2 中, 事件引发的集结波的速度为:

$$\omega_u = -\frac{q_n - q_{q1}}{k_{q1} - k_n}$$

在 t 时刻, 集结波移离事件发生地的距离 $L'(t)$ 为:

$$L'(t) = |\omega_u| \cdot t \quad (t_0 \leq t \leq t_2)$$

因此, 可得到 $L_{a1}(t)$ 的值:

$$L_{a1}(t) = L_{a5} - L'(t) = L_{a5} - |\omega_u| \cdot t \quad (t_0 \leq t \leq t_2) \quad (4-7)$$

于是, 驶入时间 $T_{a1}(t)$ 为:

$$T_{a1}(t) = \frac{L_{a1} \cdot k_n}{q_n} = \frac{(L_{a5} - |\omega_u| \cdot t) \cdot k_n}{q_n} \quad (t_0 \leq t \leq t_2) \quad (4-8)$$

可见, 驶入过程所需的时间与驶入流的流率 q_n 、密度 k_n 、事件发生的位置 L_{a5} 、集结波的速度 ω_u , 以及时刻 t 相关。

2): 排队等待时间 $T_{a2}(t)$

由排队队列的流率 q_{q1} 与密度 k_{q1} , 可得一辆车通过队列所需要的时间 $T_{a2}(t)$

为：

$$T_{a2}(t) = \frac{L_{a2}}{v_{q1}} = \frac{L_{a2} \cdot k_{q1}}{q_{q1}} \quad (4-9)$$

根据 3.3.3 节的计算，事件引发的排队队列长度为：

$$L_{a2}(t) = \begin{cases} |\omega_u| \cdot t & t_0 < t < t_1 \text{时;} \\ [|\omega_u| \cdot t - |\omega_d| \cdot (t - t_1)] & t_1 \leq t < t_2 \text{时.} \end{cases}$$

因而，排队等待时间 $T_{a2}(t)$ 为：

$$T_{a2}(t) = \begin{cases} \frac{|\omega_u| \cdot t \cdot k_{q1}}{q_{q1}} & t_0 < t < t_1 \text{时;} \\ \frac{[|\omega_u| \cdot t - |\omega_d| \cdot (t - t_1)] \cdot k_{q1}}{q_{q1}} & t_1 \leq t < t_2 \text{时.} \end{cases} \quad (4-10)$$

3)：瓶颈段行驶时间 $T_{a3}(t)$

瓶颈段是指事件发生地点以及为排除事件所需要占用的道路设施段，因而，如果事件在持续发生中，则瓶颈段的路段长度 $L_{a3}(t)$ 不发生变化；如果事件清除完毕，则瓶颈路段立即跟随事件消除。假设瓶颈段车辆的行驶速度为 v_{a3} ，则瓶颈段行驶时间 $T_{a3}(t)$ 为：

$$T_{a3}(t) = \begin{cases} \frac{L_{a3}}{v_{a3}} & t_0 < t < t_1 \\ - & t_1 \leq t \end{cases} \quad (4-11)$$

4)：事件持续阶段的驶出时间 $T_{a4}(t)$

事件持续阶段的驶出时间是车辆驶过瓶颈段后，以自由流状态行驶的一段时间，因为瓶颈段限制了车辆的驶出数目，因而这个地段的交通流为高速底密的自由流。因为瓶颈地段不变，所以驶出路段的长度 $L_{a4}(t)$ 也是不变的。假设车辆的行驶速度为 v_{a4} ，则事件持续阶段的驶出时间 $T_{a4}(t)$ 为：

$$T_{a4}(t) = \frac{L_{a4}}{v_{a4}} \quad t_0 < t < t_1 \quad (4-12)$$

可见， $T_{a3}(t)$ 与 $T_{a4}(t)$ 都只与事件发生的位置有关。

5)：事件清除后的驶出时间 $T_{a6}(t)$

事件清除后，排队车辆以饱和流率 q_{q2} 、密度 k_{q2} 流出，于是有：

$$T_{a6}(t) = \frac{L_{a6}}{v_{q2}} = \frac{L_{a6} \cdot k_{q2}}{q_{q2}} \quad (4-13)$$

因为 $L_{a6}(t)$ 的大小与车辆的消散波位置有关系，所以，要先求出在 t 时刻消散波的移动距离，才能得到驶出路段的长度。

由 3.3.3 得，消散波 $\omega_d = \frac{q_{q2} - q_{q1}}{k_{q2} - k_{q1}}$ ，因而 $L_{a6}(t)$ 为：

$$L_{a6}(t) = L_{a4} + |\omega_d| \cdot (t - t_1) \quad t_1 \leq t$$

所以, 事件清除后的驶出时间 $T_{a6}(t)$ 为:

$$T_{a6}(t) = \frac{L_{a6} \cdot k_{q2}}{q_{q2}} = \frac{[L_{a4} + |\omega_d| \cdot (t - t_1)] \cdot k_{q2}}{q_{q2}} \quad (4-14)$$

综上所述, 可得整个路段的行程时间函数:

$$T_a(t) = \begin{cases} \frac{(L_{a5} - |\omega_u| \cdot t) \cdot k_n}{q_n} + \frac{|\omega_u| \cdot t \cdot k_{q1}}{q_{q1}} + \frac{L_{a3}}{v_{a3}} + \frac{L_{a4}}{v_{a4}} & t_0 < t < t_1 \\ \frac{(L_{a5} - |\omega_u| \cdot t) \cdot k_n}{q_n} + \frac{[|\omega_u| \cdot t - |\omega_d| \cdot (t - t_1)] \cdot k_{q1}}{q_{q1}} + \frac{[L_{a4} + |\omega_d| \cdot (t - t_1)] \cdot k_{q2}}{q_{q2}} & t \geq t_1 \end{cases} \quad (4-15)$$

(注: t_0 表示事件发生时刻, t_1 表示事件清除时刻, t_2 表示拥挤消失时刻)

4.3 应急救援中的最短路问题

4.3.1 应急救援中最短路问题的特点

最短路问题一方面涉及交通网络图的建立, 另一方面涉及到最短路径算法。交通网络图建立的基础是数据库技术^[33], 而经典的最短路径算法——Dijkstra 算法是目前多数系统解决最短路径问题采用的理论基础^[34]。

应急资源出救点设置在城市路网中的不同位置, 事件发生地可能会在路网中的任一点, 城市交通路网往往又是错综复杂, 因此, 出救点到应急点的路径选择问题就成了应急调度中无法回避的问题。传统的方法是采用图论中的最短路径算法。将道路网视为一有向图, 由路段、结点(交叉口)、路径等元素构成, 每一路段赋予一定的阻抗, 阻抗可为行程时间、出行油耗等, 一般将行程时间作为路段阻抗^[35]。按路径阻抗递增的次序搜寻从起点到终点的最短路径。

这种算法的难点便是路段阻抗的确定, 因为各路段阻抗随各时刻交通状况不同而变化。在以往的计算中, 往往只是估计出整个路段的平均速度, 而后求出行程时间^[36]。在本文前一节中, 通过分解事件发生后路段的行程区间, 而后给出随时间先后变化的道路路段行程时间公式, 应该比较好的解决了最短路求解过程中的阻抗确定问题, 这样可以在不同的时间段内提供出可能不同的最短路径方案, 从而也更加接近实际情况。

针对应急救援系统中求最短路问题, 需要先将交通网络抽象为一个权值为正值的有向图, 这一过程可以借助基于 GIS 技术的决策支持子系统^[37], 在网络拓扑结构中, 预先确定出所有出救点的位置, 事件发生后, 根据检测信息以及辅助

决策信息，确定应急点的位置。然后，采用 Dijkstra 算法基于道路动态行程时间求解最短路径问题^[38]。

4.3.2 最短路径问题的模型和算法说明

假设一城市路网中的出救点有 n 个，各自标号为 A_i ($i=1,2,\dots,n$)。事件发生地为 B 点 (如图 4-5 所示)。则问题归结为各 A_i 点到 B 点的最短路径问题。

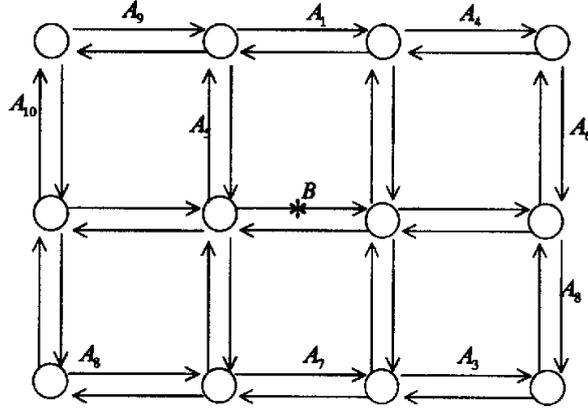


图4-5 一小型路网及出救点配置

在计算的时候要求对每一个 A_i 求出它距离 B 点的最短路径。不失一般性，以求 A 到 B 的最短路为例来说明模型。

把路网抽象为一有向图 $G=(V,E)$ ，图中节点集为 $V=\{v_1,\dots,v_m\}$ ，节点间的边集为 $E=\{e_1,\dots,e_n\}$ ，车辆通过 G 上任一条边 $e_k=(v_i,v_j)$ 的时间为 t_{ij} (随交通流状况而变化，计算时可在某一短暂时间内认为固定)，设 P 为 G 中 A 到 B 的一条路径，车辆沿此路径的运行时间为 $T_d(P)$ ，

$$\text{则 } T_d(P) = \sum_{(v_i,v_j) \in P} T_{ij}$$

则本问题就是要在图 G 中找出 A 到 B 的最短路径 P^* ，使之满足：

$$T_d(P^*) = \min\{T_d(P) | P \text{ 为 } G \text{ 中 } A \text{ 到 } B \text{ 的路径}\}$$

计算流程：

假设每个点都有一对标号 (d_j, p_j) ，其中 d_j 是从起源点 A 到点 j 的最短路径的长度 (这里即时间)； p_j 则是从 A 到 j 的最短路径中 j 点的前一点。求解从 A 到 B 的最短路径的基本过程如下：

- 1)、初始化。 将起源点 A 设置为： $d_a = 0$ ，所有其他点设置为 $d_i = \infty$ 。起源点标记为 $k = A$ ，其他所有点设为未标记的。

2)、检验从所有已标记的点 k 到其直接连接的未标记的点 j 的距离, 并设置:

$$d_j = \min[d_j, d_k + T_{kj}] \quad \text{其中, } T_{kj} \text{ 即为前面所说的边上的权值。}$$

3)、选取下一个点。从所有未标记的节点中, 选取 d_j 中最小的一个 i :

$$d_i = \min[d_j, \text{所有未标记的点 } j]$$

点 i 就被选为最短路径中的一点, 并设为已标记的。

4)、找到点 i 的前一点。从已标记的点中找到直接连接到点 i 的点 k^* , 作为前一点, 设置: $i = k^*$

5)、标记点 i 。如果所有点已经标记, 则算法完全退出, 否则, 记 $k = i$, 转到 2) 再继续。

最终, 完成各个出救点 A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 在各特定时间内到达 B 应急点的最短路径以及最短时间。这些结果可以为下一步的应急调度问题提供基本的参考。

(因为 Dijkstra 算法已比较成熟, 所以此处不做过多赘述^[38])

4.4 基于最短路的应急调度问题研究

如前所述, 应急调度问题应以“最早开始应急时间”作为优化目标, 因此, 调度问题要以最短路径问题研究为基础^{[39][40]}。若一个出救点的应急资源完全可以解决应急点所需要的资源, 那么, 单纯对最短路问题进行研究就可以了, 然而, 事实上, 一件交通事件往往需要从不同的地方提供相同或不同的应急资源进行救援, 尤其对重大交通事故来说, 这一点更为明显, 往往需要从不同地方调集医疗队、救火车、拖车等等应急资源。这样, 使得救援问题变的复杂化, 只单纯对“最早开始应急时间”作为追求目标便不再合适了。

因为受到资源的限制, “最近的出救点”所提供的资源往往不能满足解决事件所需要的救援资源。因而需要多个出救点协同起来共同提供救援资源, 所以这里的“最短时间”目标就变成了最“远”的出救点到达事发地的时间要求最短。同时, 从应急系统的成本考虑, 解决某一事件所投入的出救点越少, 则消耗的成本越低。所以, “出救点数目最少”也成了这一阶段的规划目标^[41]。

另外, 只把“最早开始应急时间”作为目标还易于导致出救点数目较大的情况, 无论从系统的稳定可靠性还是费用考虑, 这种现象的发生都是不利的。因此, 本文针对“最早开始应急时间”和“出救点数目最少”的多目标应急调度问题进行展开研究。

4.4.1 一种改进的多目标决策方法

首先介绍一种简单而有效的改进型多目标决策方法^{[42][43]}。本节拟运用这种较优越于传统的多目标决策方法来对应急调度问题进行解决。

对于多目标决策问题,解决这类问题的方法有多种,其中, TOPSIS 法^[44]和最小隶属度偏差法^[45]是两种借助于一多目标决策问题的理想点去排序的方法。但 TOPSIS 法计算较为复杂,而且采用非线性方式把属性值规范化,使得变换后各属性的最大值和最小值并不是统一的值(即:最小值不为 0,最大值不为 1),因此不便于属性间的比较。最小隶属度偏差法也只考虑逼近于理想点,而忽略了负理想点,欠缺合理性。

本节计划尝试采用求理想点的方法来求解多目标决策问题。求解思路是:先求出两个目标函数的正理想点和负理想点,然后根据偏好函数算出每个非劣解与正、负理想点的接近度。最后求出每个非劣方案对理想点的相对接近度,按照此值进行排序,相对接近度最大的就是最优方案。

通过采用线性变换方式把属性值规范化,并利用理想点和负理想点给出了一种简洁有效的最优决策方法。

首先给出多目标决策问题的数学模型:

设 $R = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示 n 种方案集, 向量 $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))^T$ 表示 p 个目标, 其中, 有一部分要求越小越好, 而另一部分则要求越大越好。我们不妨设前 k 个目标 $f_i(x) (i = 1, 2, \dots, k)$ 要求越小越好, 而后 $p - k$ 个目标 $f_i(x) (i = k + 1, k + 2, \dots, p)$ 要求越大越好。于是, 这类问题可归纳为:

$$(UP) \begin{cases} \min_{x \in R} f^1(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T \\ \max_{x \in R} f^2(x) = (f_{k+1}(x), f_{k+2}(x), \dots, f_p(x))^T \end{cases} \quad (4-16)$$

所谓正理想点是一设想的最好的方案, 它的各个属性值都达到各候选方案中的最好的值, 而负理想点是另一设想的最差的方案, 它的各目标值都达到各候选方案中的最差值。虽然, 原有方案集中一般并没有这种正理想点和负理想点, 但是, 当实际中的某个方案最靠近正理想点, 同时又最远离负理想点, 这个方案就应该是方案集中最好的方案。另外, 需要采用一个测度(方案和理想点的相对接近度)来判断方案的优劣^{[48][49]}。

这种方法的算法步骤如下:

- 1)、求出决策矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_1(x_2) & \dots & f_1(x_n) \\ f_1(x_1) & f_1(x_2) & \dots & f_1(x_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_1(x_1) & f_1(x_2) & \dots & f_1(x_n) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \underline{U}_i &= \min\{f_i(x_1), f_i(x_2), \dots, f_i(x_n)\}, & i = 1, 2, \dots, k; \\ \overline{U}_i &= \max\{f_i(x_1), f_i(x_2), \dots, f_i(x_n)\}, & i = k+1, \dots, p; \\ \overline{V}_i &= \max\{f_i(x_1), f_i(x_2), \dots, f_i(x_n)\}, & i = 1, 2, \dots, k; \\ \underline{V}_i &= \min\{f_i(x_1), f_i(x_2), \dots, f_i(x_n)\}, & i = k+1, \dots, p; \end{aligned}$$

2)、确定正理想点和负理想点:

$$\text{正理想点: } x^* = (\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_k, \overline{U}_{k+1}, \dots, \overline{U}_p)^T$$

$$\text{负理想点: } \bar{x} = (\overline{V}_1, \overline{V}_2, \dots, \overline{V}_k, \underline{V}_{k+1}, \dots, \underline{V}_p)^T$$

3)、计算接近度:

每个方案与正理想点的接近度:

$$R_i = \frac{1}{p} \left[\sum_{j=1}^k \frac{\underline{U}_j}{f_j(x_i)} + \sum_{j=k+1}^p \frac{f_j(x_i)}{\overline{U}_j} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-17)$$

每个方案与负理想点的接近度:

$$r_i = \frac{1}{p} \left[\sum_{j=1}^k \frac{f_j(x_i)}{\overline{V}_j} + \sum_{j=k+1}^p \frac{V_j}{f_j(x_i)} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-18)$$

4)、计算每个方案对理想点的相对接近度

$$\varepsilon_i = \frac{R_i}{R_i + r_i}, \quad 0 \leq \varepsilon_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-19)$$

5)、排序方案的优先次序, 按 ε_i 由大到小的顺序排列。排在最前面的方案就是最优方案。

4.4.2 应急调度的多目标问题模型

在本节中, 针对不同的应急调度问题建立数学模型。

设立两个优化指标, 一个是效益性指标, 采用“开始应急时间最短”; 另一个是耗费性指标, 采用“出救点数目最少”。

按照出救资源的不同, 应急调度问题的模型可以分为单一资源的应急模型以及多资源的应急模型, 在实际的应急救援活动中, 两种情况都会存在, 不过更为普遍的是多种资源的救援需求。因而产生两种应急调度情况: 第一种是单一资源多出救点双目标调度, 另一种是多资源多出救点双目标调度。

下面建立两种情况下的调度数学模型:

1)、单一资源多出救点双目标应急调度模型:

A_1, A_2, \dots, A_n 为 n 个应急资源的出救点, B 为事发地点。 x 为所需要的应急资源量, A_i 的资源可用量为 x_i ($x_i \geq 0$), 并且 $\sum_{i=1}^n x_i \geq x$, A_i 到 B 的最短时间为 t_i (也就是前面计算出的最短路的时间 T_{di})。出救方案 φ_i 表示为 $\varphi_i = \{(A_{i1}, x'_{i1}), (A_{i2}, x'_{i2}), \dots, (A_{im}, x'_{im})\}$, 其中 $0 < x'_{ik} \leq x_{ik}$, $\sum_{k=1}^m x'_{ik} = x$, 其中 i_1, i_2, \dots, i_m 为 $1, 2, \dots, n$ 子列的一个排列。用 Ω 表示所有方案的集合。

把应急活动的开始时间表示为最后一个到达事发地点的车辆到达时间, 则方案 φ 的最早开始时间记为 $T(\varphi)$, 其中 $T(\varphi) = \max(t_j | j = 1, 2, \dots, m)$ 。

用 $N(\varphi)$ 表示对应于方案 φ 的出救点数目, 则问题成为:

$$\begin{aligned} \min & \begin{cases} T(\varphi) \\ N(\varphi) \end{cases} & (4-20) \\ \text{s. t.} & \varphi \in \Omega \end{aligned}$$

2)、多资源多出救点双目标应急调度模型:

A_1, A_2, \dots, A_n 为 n 个应急资源的出救点, B 为事发地点。在突发事件中, 应急点 B 共需要 m ($m > 1$) 种资源, 定义为 X_1, X_2, \dots, X_m , 需求量分别为 x_1, x_2, \dots, x_m , 并设第 i 个出救点对第 j 种资源的现存储量为 x_{ij} , ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$, 且 $\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq x_j$), 对于任一个 A_i , $x_{ij} \geq 0$ 。

从 A_i 到 B 的最短路时间为 t_i ($t_i > 0$), 不失一般性, 假定 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ 成立。要求给出一调度方案, 使得在保证应急需求的情况下, 应急开始的时间最早, 并且从费用的角度要求出救点的数目也尽可能少。

任一可行方案 φ 表示为: $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$,

其中, $\varphi_j = \{(A_{d_1}, x'_{d_1j}), (A_{d_2}, x'_{d_2j}), \dots, (A_{d_k}, x'_{d_kj})\}$ 表示第 j 种资源的应急调度方案, (x'_{d_kj} 表示第 k 个出救点对第 j 种资源的供应量)。

d_1, d_2, \dots, d_k 为数列 $1, 2, \dots, n$ 子列的一个组合, 称之为一个排列, 并且有:

$\sum_{i=1}^k x'_{d_ij} = x_j, j = 1, 2, \dots, m$ 表明从 n 个出救点中挑出 d_1, d_2, \dots, d_k 这么几个出救点来提供第 j 种资源参加应急, 并且对该资源的数量为 $x'_{d_1j}, x'_{d_2j}, \dots, x'_{d_kj}$, 记所有所有方案的集合为 Ω 。

对某一方案 φ , 记出救点的个数为 $N(\varphi)$, 应急开始的时间为 $T(\varphi)$, 这里应急开始时间是指所有需求的资源都到达应急点的时间。

由定义得到, $T(\varphi) = \max(t_i), i = d_1, d_2, \dots, d_k$, 而 $N(\varphi)$ 为出救点排列组成的集

合 $\{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ 中元素的个数。因此，多出救点的多资源双目标应急调度问题的模型也可归结为：

$$\begin{aligned} \min & \begin{cases} T(\varphi) \\ N(\varphi) \end{cases} \\ \text{s. t.} & \varphi \in \Omega \end{aligned} \quad (4-21)$$

这么一个非线性的多目标优化问题。

对于这两个数学模型，因为第二种情况更接近现实情况，并且包含了第一种情况，所以，本文针对这种多资源多出救点的双目标应急调度问题进行研究。

4.4.3 用多目标决策方法解决应急调度问题

依照 4.4.1 中介绍的通过求理想点的多目标决策方法和思路对上述中的交通事件应急管理中的多资源多出救点的双目标应急调度问题进行求解。

符号含意：

φ ：方案

Ω ：可行方案集

$N(\varphi)$ ：方案 φ 的出救点个数

$\underline{N}(\varphi)$ ：出救点数目的正理想点

$\overline{N}(\varphi)$ ：出救点数目的负理想点

$T(\varphi)$ ：方案 φ 的应急开始时间

$\underline{T}(\varphi)$ ：应急开始时间的正理想点

$\overline{T}(\varphi)$ ：应急开始时间的负理想点

R ：出救点集合

针对本问题，整理出如下的解决步骤：

- 1)、 $\underline{T}(\varphi), \overline{T}(\varphi)$ 应急开始时间的正、负理想点的求解

$$\begin{aligned} \min & \{N(\varphi)\} \\ \text{st.} & \varphi \in \Omega \end{aligned} \quad (4-22)$$

只需分别求出每一种应急资源的应急开始时间，再从中挑出最大值，即为所要求的“时间正理想点” $\underline{T}(\varphi)$ ：

在模型中已经设 A_1, A_2, \dots, A_n 等出救点按各自到应急点的最短路径时间 t_i 升序排列，对第 j 种资源，设

$$\sum_{p=1}^{q_j-1} x_{pj} < x_j \leq \sum_{p=1}^{q_j} x_{pj}$$

可以得到对第 j 种资源的以应急开始时间最早为目标的最优调度方案

$$\varphi_j = \left\{ (A_1, x_{1j}), (A_2, x_{2j}), \dots, \left(A_{q_j}, x_j - \sum_{p=1}^{q_j-1} x_{pj} \right) \right\} \quad (4-23)$$

则最早应急开始时间为对应于出救点 A_{q_j} 的出救时间 t_{q_j} 。

同理，求出其它各种所需资源的最早应急开始时间，得到解决“最早应急开始时间”的单目标最佳应急方案为

$$\begin{aligned} \varphi^* &= \{\varphi_1^*, \varphi_2^*, \dots, \varphi_m^*\}, \\ \text{则} \quad T(\varphi^*) &= \max(t_{q_1}, t_{q_2}, \dots, t_{q_m}) \end{aligned} \quad (4-24)$$

此外，对任意的一个其它方案 φ ，都存在如下关系式：

$$T(\varphi^*) \leq T(\varphi) \leq t_n$$

即对任一方案，它的应急开始时间一定在 $T(\varphi^*)$ 和 t_n 之间，

因此可知“时间负理想点” $T(\overline{\varphi})$ 的值：

$$T(\overline{\varphi}) = t_n \quad (4-25)$$

2) $N(\underline{\varphi})$, $N(\overline{\varphi})$ 出救点数目的正理想点、负理想点的求解。

$$\left. \begin{aligned} \min(N(\varphi)) \\ \text{st. } \varphi \in \Omega \end{aligned} \right\} \quad (4-26)$$

求解方法：

对于第 j 种资源 X_j ，让 $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}$ 从大到小排列得 $x_{k_1j}, x_{k_2j}, \dots, x_{k_nj}$ （其中 k_1, k_2, \dots, k_n 为 $1, 2, \dots, n$ 的一个排列），

若存在正整数 $p_j \in [1, n]$ ，使得

$$\sum_{i=1}^{p_j-1} x_{k_ij} < x_j \leq \sum_{i=1}^{p_j} x_{k_ij} \quad (4-27)$$

$$\text{则可令 } \varphi_j = \left\{ (A_{k_1}, x_{k_1j}), (A_{k_2}, x_{k_2j}), \dots, (A_{k_{p_j-1}}, x_{k_{p_j-1}j}), \left(A_{k_{p_j}}, x_j - \sum_{i=1}^{p_j-1} x_{k_ij} \right) \right\} \quad (4-28)$$

则 φ_j 就是对第 j 种资源的出救方案， p_j 即是最少出救点的个数。

同样原理，求出每种资源时候的最少出救点个数 p_j ，（ $j = 1, 2, \dots, m$ ）

令 $N_{\max} = \max(p_1, p_2, \dots, p_m)$

则对任一方案 φ ，一定有： $n \geq N(\varphi) \geq N_{\max}$ 。

接下来可用图 4-6 所表示的流程来求得出救点数目的正理想点。

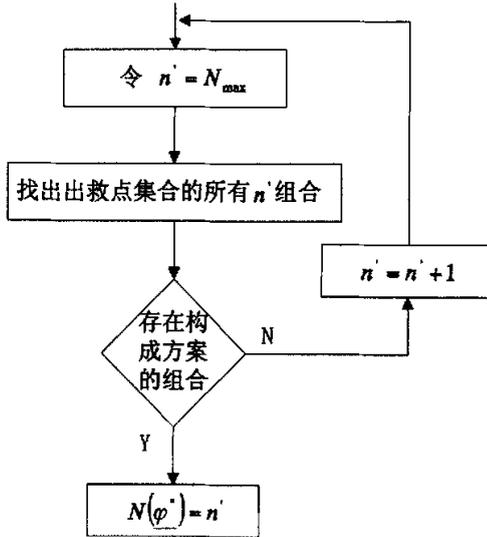


图4-6 计算出救点最少正理想点的步骤

通过上述过程可以求出 $N(\overline{\varphi''})$ ，另外显然，负理想点为所有出救点出动的数目，

$$\text{即：} \quad \overline{N(\varphi'')} = n \quad (4-29)$$

3) 根据偏好函数计算每个非劣方案 φ_v 与正、负理想点的接近度 R_v 和 r_v 。

利用公式

$$R_v = w_1 \frac{N(\varphi'')}{N(\varphi_v)} + w_2 \frac{T(\varphi')}{T(\varphi_v)} \quad (4-30)$$

$$r_v = w_1 \frac{N(\varphi_v)}{N(\overline{\varphi''})} + w_2 \frac{T(\varphi_v)}{T(\overline{\varphi'})} \quad (4-31)$$

其中 w_1 和 w_2 分别为关于出救点个数和应急开始时间的权重，满足归一化条件 ($w_1 + w_2 = 1$)。

4) 计算每个非劣方案对理想点的相对接近度。

$$\varepsilon_v = \frac{R_v}{R_v + r_v} \quad \varepsilon_v \in [0,1] \quad (4-32)$$

5) 对各个非劣方案的 ε_v 值按照降序排列。排在最前面的就是最优方案。

计算流程图如图 4-7 所示。

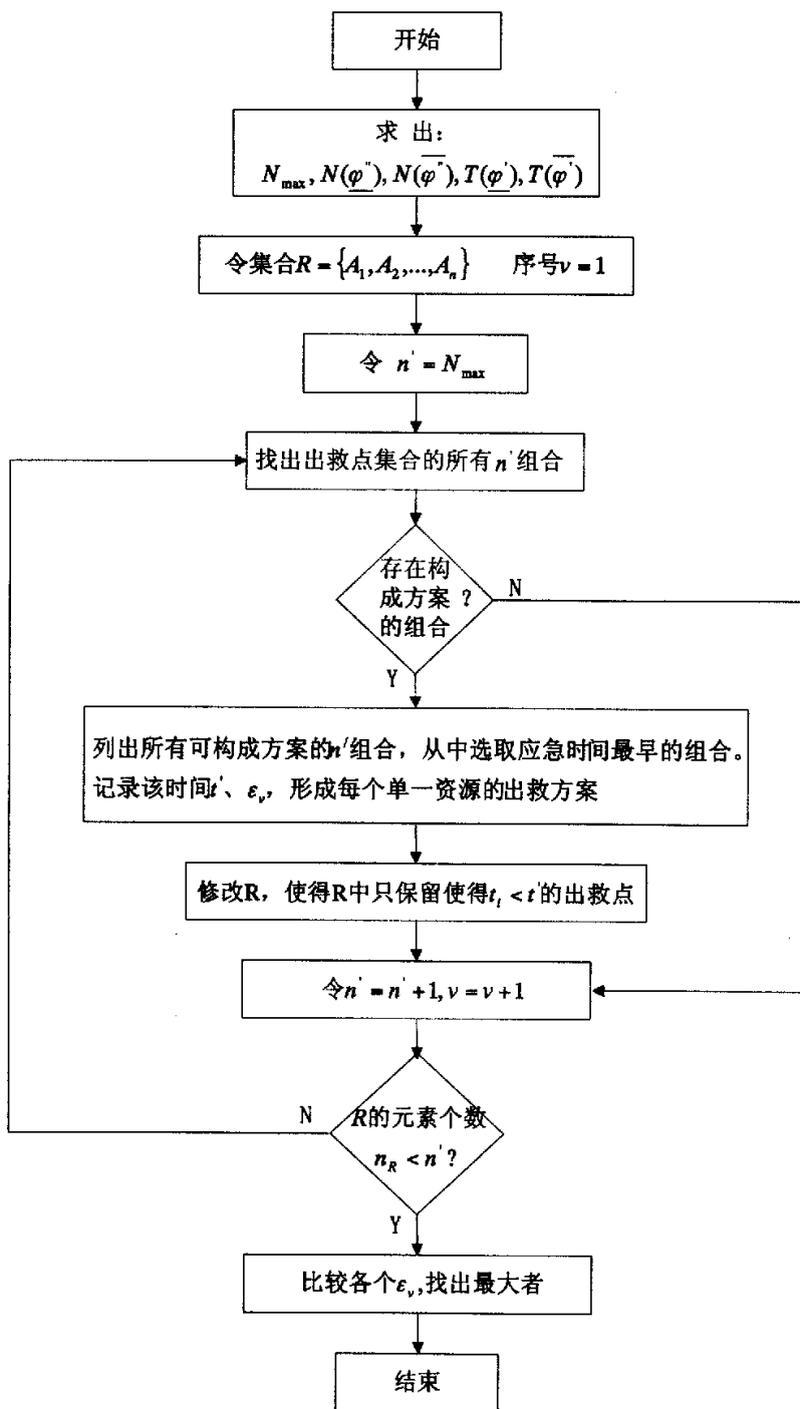


图4-7 多资源多出救点双目标调度计算流程图

4.4.4 算例

例如在某小型路网上有 10 个出救点（参考路网图 4-5），事件发生地 B 为一个应急点，应急时候需要从出救点调度 3 种资源，各个出救点资源的储备量如表 4-1 所表示，应急点 B 对 3 种资源的需求分别为 (18, 17, 20)；各出救点到应急点的最短路时间分别为 (2, 3, 3, 4, 5, 8, 11, 11, 15, 20)。求满足应急开始时间最短和出救点数目最少两个目标的应急资源调度方案。

（备注：本题假设应急开始时间权重为 0.6，出救点个数最少权重为 0.4）

表 4-1 各个出救点资源的储备量

资源	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
x_1	8	3	2	5	4	7	10	3	4	5
x_2	5	6	2	2	3	9	2	3	4	10
x_3	7	1	5	9	4	2	4	5	12	3

计算结果如表 4-2 所示。

表 4-2 计算过程及结果

前期计算： $N_{\max} = 2$, $N(\varphi^*) = 3$, $N(\varphi^{\bar{}}) = 10$, $T(\varphi^{\bar{}}) = 5$, $T(\varphi^{\bar{}}) = 20$						
v	R	N_v^*	φ_v^*	n'	t'	ε_v
1	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 $A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$	不存在可行 的 n' 组合	--	2	--	--
2	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 $A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$	A_1, A_6, A_9	$(A_1, 8)(A_6, 7)(A_9, 3)$ $(A_1, 5)(A_6, 9)(A_9, 3)$ $(A_1, 7)(A_6, 2)(A_9, 11)$	3	15	0.56 0
3	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 A_6, A_7, A_8	$A_1, A_3,$ A_4, A_6	$(A_1, 8)(A_3, 2)(A_4, 5)(A_6, 3)$ $(A_1, 5)(A_3, 2)(A_4, 2)(A_6, 8)$ $(A_1, 7)(A_3, 5)(A_4, 7)(A_6, 0)$	4	8	0.63 2
4	A_1, A_2, A_3, A_4, A_5	$A_1, A_2, A_3,$ A_4, A_5	$(A_1, 8)(A_2, 3)(A_3, 2)(A_4, 5)(A_5, 0)$ $(A_1, 5)(A_2, 6)(A_3, 2)(A_4, 2)(A_5, 2)$ $(A_1, 7)(A_2, 1)(A_3, 5)(A_4, 7)(A_5, 0)$	5	5	0.68 0
5	R 的元素个数小 于 n' , 终止程序	--	--	6	--	--

结果说明:

1)、比较各种可行方案与理想点的相对接近度,选取其中最大的 0.680,与此相对应的调度方案就是满足本多资源多出救点双目标调度问题的方案。在本例中,最优的调度结果是:第 1、2、3 出救点提供自己全部的应急资源;第 4 出救点出动全部的一、二资源以及 7 单位的三资源;第 5 出救点只提供 2 单位的二资源;其它各出救点不用出动应急资源。这样的应急调度分配,就既可以满足应急需要、又能保证救援成本最小。

2)、在本例中,计算出的结果与采用传统的用于解决多目标决策问题的 TOPSIS 法结果相同,然而,这种算法却比 TOPSIS 法更简单直观,说明本文所采用的算法是有效的和实用的。在交通事件管理系统的多目标调度问题中,可以推广采用这种简化的决策算法。

4.5 本章小结

本章讨论的三个问题:路段行程时间、最短路、应急调度问题,在事件应急管理中是连为一体的,最短路径的计算是以对有事件发生后的路段行程时间计算为基础的;同时,应急调度问题的研究又要以出救点到应急点的最短路径时间为前提。

首先创新性地提出了事件发生后路段行程时间的一个简单却有效的计算模型,通过推导,给出了在不同时间过程中事发路段的行程时间的确定公式。从而解决了最短路求解中道路阻抗不好确定的问题。

然后对最短路问题进行了说明,指出在应急救援过程中,最短路径的计算要保持时间的动态性。最后针对应急调度问题提出一种多目标决策计算方法,并将其运用到应急调度问题的求解中。最后用一个实例对此算法进行了检验,说明了此种算法的有效性和实用性。

第五章 总结与展望

5.1 全文总结

与国外发达国家相比,交通事件管理的研究在我国还属于起步阶段,本文在这一领域内做了有益的探索研究。为建立适应我国各大中城市的交通事件应急管理系统提供了理论上的依据。文中主要的研究成果有如下几点:

1)、提出建立适应我国城市交通状况的事件应急管理系统的理论框架;对系统内部的子系统(六个内部子系统和二个外部子系统)功能进行了定义;提出了保障系统正常运行的信息流图。

2)、对交通事件引起的车辆延误进行了定性和定量分析,将车流波动理论运用到对延误的分析中,得出事件引起的集结波与消散波的波动变化状况,并由此推导出事件造成的排队长度随时间变化的情况。

3)、在计算车辆延误的基础上,对事发路段的行程时间进行了研究,按照事件的发生、持续、消除状态变化,得出在事发路段行程时间随时间变化的计算公式,从而为交通路线优化提供了相对准确而实时变化的时间信息。

4)、对应急救援的调度问题进行了研究,采用了一种求理想点的多目标决策算法,对事件管理中的多资源多出救点双目标应急调度问题进行了分析,证明了这种算法对该问题的适用性。

本文虽然对交通事件管理系统做了比较深入地研究,文章的结构脉络也算合理清晰,然而,由于时间所限,本文在如下几个方面尚显欠缺:

1)、只从宏观层面对系统的功能模块和运作流程进行了设计,没有对具体的模块进行设计。

2)、对交通事件引起的延误只进行了模型上的仿真,没有对实际交通事件进行考察、统计、分析。

3)、对交通延误分析计算只限于理论上的计算,而实际的车流运行是相当复杂的,实际车流对交通事件的反应可能不像文中描述的那么固定,因而,计算结果也与实际中会有所差距。

4)、缺乏对系统评价指标的具体研究。

基于以上这些总结,提出未来的研究展望。

5.2 研究展望

在下一步的对交通事件应急管理系统的研究中,可以从如下几个角度进行重点研究。

1)、事件引起的偶发性交通拥挤在路网中的传播。在本文中,假定在分析延误时排队没有超出路段入口,而当排队超出路段入口后,拥挤在路网中扩散的情况会更复杂。

2)、基于事件状态改变的上游交通控制研究。本文对事发路段的行程时间进行了分析,在此基础上,可以对上游的流量合理控制、分流、替代路径等方面进行研究。

3)、应急调度多目标的进一步研究。本文对双目标调度问题进行了初步研究,可能在实际应急过程中,应急调度的目标会更多,有必要探索出更多目标的调度问题的解决途径。

4)、从应急到预防的研究。本文的事件管理系统突出了事后控制的功能,对预防事件发生的功能没有进行具有建设性的探讨。而事件预防是事件管理的更高层次的目标,如果能将交通事件控制在其萌芽状态,则会避免更多的损失发生。

5)、一些具体的事件管理技术的开发研究。如车辆安全驾驶辅助系统、在线车辆导行系统等。

伴随着 ITS 技术的进步及在我国各大城市的运用,事件管理系统在高速公路与城市路网中的重要性被越来越充分地认识到,关于事件管理的研究与具体实践也处在不断发展中。希望并相信在不久的将来,我国各个大中型城市的交通路网中都会配备有交通事件应急管理系统,为整个城市交通系统能正常和高效地运行提供保障。

参考文献

- [1] 方亮等, 聚焦美国交通事件管理[J], 中国交通信息产业, 2003(8): 72~74
- [2] 贺国光, 智能交通系统的发展历程与现状分析[J], ITS 通讯, 2001(1): 25~32
- [3] 杨佩昆, 智能交通运输系统体系结构[M], 同济大学出版社 2001(5)
- [4] Westwood Professional Services, Inc, DRIVERT(During Incidents Vehicles Exit to Reduce Time) Evaluation Report, September 1998
- [5] 张洋 朱岩, 高速公路交通事件紧急救援系统建设方案探讨[J], 中国交通信息产业, 2003(3): 37~41
- [6] 杨晓光 王一如 彭国雄, 高速公路交通事故对策与紧急救援系统[J] 上海公路 1999(2): 35~40
- [7] Kaan Ozbay, Pushkin Kachroo. Incident Management in Intelligent Transportation Systems [M], Artech House. Inc, 1999
- [8] 北京交通信息网, <http://www.1039.com.cn>
- [9] 任福田等 译, 道路通行能力手册[M], 中国建筑工业出版社, 1991
- [10] Do H.Nam, Donanld R.Drew, Analyzing Freeway Traffic Under Congestion: Traffic Dynamics Approach[J], Journal of Transportation Engineering. 1998. 124(3): 208~217
- [11] 张学尽 余建华, 基于 GIS 的公路交通事故救援体系研究, 四川工业学院学报四川工业学院学报-2002. 21(4): 21~24
- [12] Donald H Kraft, Frederick E Petry. Fuzzy information systems: managing uncertainty in databases and information retrieval systems[J]. Fuzzy Sets and Systems. 1997, 90(2): 183~191
- [13] Meyer, M, A Toolbox for Alleviating Congestion and Enhancing Mobility, Institute of Transportation Engineers, Washington.2000.(6): 23~27
- [14] 徐吉谦, 交通工程总论[M], 人民交通出版社 2002 (12)
- [15] 国家智能运输系统研究中心网页, <http://www.itsc.com.cn>
- [16] Home page of Smart Traffic, <http://www.transportroundtable.com.au>
- [17] Home page of ERTICO, <http://www.ertico.com>
- [18] 王笑京, ITS 在中国的发展[J], 中国汽车保修设备.2000(2): 7~10
- [19] 高海龙 张北海, 高速公路紧急事件管理系统的开发[J], ITS 通讯, 2001(1): 43~47

- [20] 徐岩宇, VRGS 在交通事件管理中的理论和方法研究[J], 系统工程 1998.16(2): 68~69
- [21] 吴毅洲, 高速公路事件管理系统分析[J], 交通企业管理, 2003(7): 21~23
- [22] 彭春露 彭国雄, 城市道路交通异常事件管理系统设计[J], 交通运输系统工程与信息, 2002.2(3): 18~21
- [23] 刘春林 何建敏, 应急系统调度问题的模糊规划方法[J], 系统工程学报 1999(4): 352~356
- [24] Nakatani, N.; Yamasaki, S.; Takahashi, K.; Hijikata, Y.; Nishida, S.; Communication support system for emergency management[J]. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. 2002(3): 1647~1650
- [25] 臧华 彭国雄, 高速道路异常状况下车辆排队长度的预测模型[J], 交通与计算机, 2003.21(3): 10~12
- [26] Meiping Yun; Xiaoguang Yang; An optimization model of road networks subarea districting for incident management systems.[J] Intelligent Transportation Systems, 2003. (12): 437~441
- [27] 李江等, 交通工程学[M], 人民交通出版社, 2002(7)
- [28] Al-Deek H M. A combined traveler behavior and system performance model with advanced traveler information systems [J]. Transpn Res.1998.32(7): 479~493
- [29] Josefa Z. Hernandez, Juan M, Serrano. Knowledge-based Models for Emergency Management Systems. Expert Systems with Applications. 2001. (12): 173~186
- [30] 刘伟铭 黄志军, 用交通动力学法对高速公路事件影响分析的研究, 长沙交通学院学报 2003.19(1): 63~67
- [31] Liu Wenqi. The ordinary variable weight principle and multi objective decision-making[J]. Systems Engineering Theory & Practice. 2000(3): 1~11
- [32] 陈荣军, Dijkstra 算法的应用 [J], 常州工业技术学院学报, 1999(12):78~82
- [33] Lin Cuoyun, Dongjiali. The method and theory of multi-bojective optimization [M]. Changchun: jilin Education Publishing House, 1992
- [34] 刘春林 施建军 李春雨, 模糊应急系统组合优化方案选择问题的研究 [J], 管理工程学报 2002.16(2):25~29
- [35] 云辉 戴香菊 译, 城市交通网络—用数学规划方法进行网络平衡分析 [M], 西南交通大学出版社 1992(2)
- [36] Akcelik R. Traffic Signals. Capacity and Timing Analysis[J]. Australian Road Research. 1998(5):32~26

- [37] 张春贤, 国道主干线设计集成系统开发研究[M], 交通部科技教育司编 人民交通出版社 2001(8)
- [38] 陈珽, 决策分析[M], 科学出版社 1997(2)
- [39] 陈海泳, 高速公路交通拥挤及其控制对策[J], 济南交通高等专科学校学报 2000. 8(4):56~57
- [40] 袁振洲, 确定动态交通分配中路段行驶时间方法的研究[J], 交通运输系统工程与信息, 2002. 2(2):54~58
- [41] 乐阳 龚健雅, Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J], 武汉测绘科技大学学报, 1999. 24(3):209~212
- [42] 魏权龄 胡显佑, 运筹学通论[M], 中国人民大学出版社, 2001
- [43] 刘文奇, 一般变权原理与多目标决策[J], 系统工程理论与实践, 2000(3): 1~11
- [44] Xu zeshui,Liu haifeng. A practical method of multi-objective optimum decision [J]. Operations Research and Management Science, 2000,19(1):74~78
- [45] Lin Chunlin, Hejianmin, Sheng Zhaohan. Fuzzy programming in selection of multi-depot for emergency systems [J]. Journal of systems Engineering, 1999.14(4):351~355
- [46] D. C. Gang-Len Chang and Deepak, Performance Evaluation of CHART-An incident Management Program in 1997 Final Report, May 2000
- [47] 蒋骥 任福田等, 交通流理论[M], 人民交通出版社, 1983
- [48] 袁振洲, 动态交通分配中道路阻抗模型的研究[J], 中国公路学报, 2002. 15(3):16~19
- [49] Q Xin. M Rao, Knowledge Architecture and System Desian for Intelligent Operation Support Systems. Expert Systems with Applications. 1999. (7):115~127

发表论文和科研情况说明

发表的论文：

- [1] 王培宏 贺国光，一体化交通：综合运输的发展方向，《综合运输》，
2003. (10):10~11

参与的科研项目：

宁杭高速公路信息管理系统的设计

2004年5月

致 谢

本论文的工作是在我的导师贺国光教授的悉心指导下完成的，贺老师严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在接近三年的学习和科研生涯中，贺老师的言传身教将会影响我的一生，其孜孜不倦的科研热情让我敬仰，其淳淳善诱的教导方法使我受益匪浅。在此衷心感谢几年来贺老师对我的关心和指导。也同时感谢师母王桂珠老师对我学业和生活上的关心和帮助。

马寿峰教授悉心指导我完成了实验室的科研工作，感谢马老师为我们创造的适宜的科研环境。马老师在学习上和生活中也都给予了我很大的关心和帮助，在此一并向马寿峰老师表示衷心的感谢。

感谢温娟同学为本论文所作出的前期工作，感谢她提供的重要的参考数据，为本论文的顺利进展提供了基础。

在实验室工作及撰写论文期间，万兴义、钟石泉、王浩、卜军峰等同学对我论文中的研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

还要感谢研究生企业管理大班的所有同学，在此不一一列出名单，是他们让我感受到了集体的温暖和关怀。

郑重感谢我的家人，我的父亲、母亲、兄嫂、妹妹和妹夫以及女友，他们是我坚强的后盾，是我完成硕士学业的有力保障，在此，向他们表示最真挚的感激之情。

最后，感谢各位评审专家在百忙中审阅本文。

王培宏
2005年1月