

分类号:U491.31

10710-2013221097



长安大学

专业硕士学位论文

高速公路交通事故传播规律及分流措施 应用研究

张顺利

导师姓名职称	杨少伟 教授 黄治炉 高工		
申请学位级别	硕士	专业学位类别 及领域名称	交通运输工程
论文提交日期	2015 年 5 月 30 日	论文答辩日期	2015 年 6 月 13 日
学位授予单位	长安大学		

Study on Spread Regular of the Traffic Accidents and Diversion Measures in Expressway

A Thesis Submitted for the Degree of Master

Candidate: Zhang Shunli

Supervisor: Prof. Yang Shaowei

Chang'an University, Xi'an, China

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：张顺利

2015年6月16日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：张顺利

2015年6月16日

导师签名：杨中伟

2015年6月16日

摘 要

高速公路因其安全、快捷、舒适的行驶环境成为我国交通运网中不可或缺的组成部分。近年来，随着社会经济的不断发展，汽车保有量连年激增，但高速公路网初步建立，较为脆弱，运营稳定性有待提高。高速公路上车流流量较大，一旦发生事故，整个路网都将受到影响，因此研究分析交通事故影响规律对提高道路管理水平、保障路网安全可靠性的意义重大。

本文以《河北省区域高速公路网安全性评价和应急研究》项目为依托，研究事故条件下的交通流变化特性，分析影响事故传播消散的关键因素，探究事故影响区域车辆可能的运行情况，得出车辆的延误时间，进而提出分流措施的实施方法。

本文首先以交通波理论为基础，分析事故持续时间、拥挤传播和消散过程，得出高速公路上的事故传播模型。其次通过对不同交通流的车流速度分析，得出受事故影响的车辆速度分布情况，建立车辆在不同情况下通过事故路段的延误时间计算模型，提出绕行措施的影响因素。最后分析交通拥挤处理措施，提出影响分流措施实施的三个关键参数，在延误时间计算模型的基础上具体给出分流量大小和分流开始及结束时间的计算公式，并讨论通过蚁群算法寻找分流最优路径的方法，综合得出分流措施的具体实施方案。

关键字：高速公路交通事故；交通波传播模型；车辆延误时间；分流措施

Abstract

Expressway has become an integral part of national transportation network to its safe, efficient and comfortable driving environment. In recent years, with the continuous development of social economy, there has been a significant increase of vehicle fleet, and the development of expressway is slower relatively. In expressway, the traffic flow can be great, so the accident will affect the whole road network. Thus, to study and analyze the regular pattern of traffic accident influence has a great significance in improving road management and guarantee the safety and reliability of road network.

For the above, the characters in traffic flow change under accident conditions and accident spread dissipation's critical factors have been studied and analyzed. The implied vehicle operation situation in accident effect areas has also been analyzed. The vehicle delay has been obtained and the embodiments of diversion support measure has also been carried out.

This paper is based on Traffic Wave Theory, analyzed the accident duration and congestion propagation and dissipation, obtained the accident propagation model in expressway. Then analyzed the traffic speed in different traffic flow based on the research above, obtained the vehicle velocity distribution under accident influence, carried out the factors toward bypass measures. At last, the congestion dealing measures have been analyzed, three critical parameters effecting diversion measures have been carried out, and the exact formula of shunt size and the beginning and ending time of diversion has been obtained based on the delay calculation model. Also, the method of finding optimal classification path in Ant Colony Algorithm has been discussed, obtained the specific embodiments of diversion support measures based on all aspects.

Keywords: Accidents in expressway, Traffic Wave spread Theory, Vehicle delay, Diversion measures

目 录

第一章绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 国内高速公路建设及营运安全现状	1
1.1.2 研究意义与目的	2
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	4
1.3 主要研究内容及技术路线	6
1.3.1 主要研究内容	6
1.3.2 技术路线	6
第二章高速公路交通事故条件下的交通波理论	8
2.1 交通流三参数分析	8
2.1.1 交通流速度	8
2.1.2 交通流密度	8
2.1.3 交通流流量	9
2.2 速度-密度模型	9
2.3 交通波事故传播模型	13
2.3.1 事故持续时间分析	15
2.3.2 基本路段上的事故传播规律	18
2.4 小结	24
第三章高速公路交通事故延误时间分析	25
3.1 交通事故影响区域车辆速度分布情况	25
3.1.1 处于集散波密度下的车辆速度	26
3.1.2 处于启动波密度下的车辆速度	27
3.1.3 处于事故点下游低密度区域的车辆速度	27
3.2 单车最大延误时间计算	30
3.2.1 第一种情况下车辆所遇到的延误时间	32
3.2.2 第二种情况下车辆所遇到的延误时间	33

3.2.3 第三种情况下车辆所遇到的延误时间.....	36
3.3 路段绕行决策研究.....	38
3.4 小结.....	41
第四章高速公路分流措施研究	42
4.1 分流流量计算.....	43
4.2 分流措施的开始时间.....	49
4.3 分流措施的结束时间.....	52
4.4 蚁群算法在分流措施中的应用.....	55
4.4.2 蚁群算法的模型简介.....	56
4.4.3 蚁群算法在路网分流中的应用.....	58
4.5 小结.....	59
总结	60
主要研究成果.....	60
研究的缺陷之处与进一步研究方向.....	60
参考文献	61
致谢	63

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 国内高速公路建设及营运安全现状

公元前 212 年，秦王朝为了加强对全国各地的统治，修建了秦直道，专供一定规格的战车通行，整条道路全长 736 公里，是世界上第一条“高速公路”。而真正现代化的第一条高速公路，是德国在二战期间为期“闪电战”服务的波恩到科隆的公路^[1]，此后随着社会的进步，高速公路快速发展，成为最重要的交通方式之一。

截至到 2013 年，我国公路总里程达 435 万公里，高速公路通车里程达 10.5 万公里，居世界第一，按照中国 2005 年公布的高速公路网发展规划，到 2020 年，基本建成国家高速公路网。由 7 条首都放射线、9 条南北纵向线和 18 条东西横向线组成新的高速公路网，简称“7918 网”，到 2020 年，中国高速公路通车总里程将达 10 万公里^[2]，超过美国成为世界高速公路里程最长的国家，现已提前完成目标。

高速公路为车辆提供快捷高速的通行环境，它是一个封闭的道路系统，以互通式立交的形式与其他道路连接，行车横向干扰少，道路线型指标较高，安全性比一般的道路高，但同时“高速”也一定伴随着高风险。在高速公路上较少发生交通事故，但是一旦发生，由于车速较高，一般都是非常严重的事故。轻则车辆货物损伤，重则车毁人亡。据统计，2011 年我国共发生涉及人员伤亡的道路交通事故 210812 起，造成 62387 人死亡，直接经济损失超过 10 亿元，全国共发生一次死亡 10 人以上特大交通事故达 27 起^[3]，交通安全现状非常严峻。

在过去二十年间，由于国家重视基础设施的建设，高速公路得到了前所未有的黄金发展期，全国性的高速路网也基本形成，随之而来的交通安全问题也逐渐显现出来。由于设计标准不健全、施工质量低、管理体系不完善等一系列的问题使得我国高速公路运营情况不容乐观，交通事故的发生频率和死亡人数都远远大于西方发达国家。同时，我国的机动车保有量也持续增加，交通需求旺盛。与美国相比，我国平均车辆高速公路占有率小了很多，东部沿海地区的高速公路网已逐渐出现供不应求的现象，一到节假日出行高峰时，高速公路的堵车现象已属常见现象，此时一旦发生交通事故，

整个路网交通就会陷入瘫痪，造成大面积的交通延误现象，而我国现有的高速公路管理体制存在诸多问题，使得交通事故所造成的间接损失巨大。

1.1.2 研究意义与目的

随着社会经济的发展，人们逐渐开始关注发展所带来的社会及环境等问题。在我国高速公路经历了快速发展的时期后，交通工程领域也逐渐成为专家学者研究的重点，而交通流理论作为交通工程领域的重要分支，已经成为重要的新兴学科之一，研究交通流的各种特性，分析不同情况下的交通流出现的状态，为提高和改善交通运营环境、提高路网的可靠性和组织管理的有效性提供支持。

目前，交通流理论领域已经有了丰富的研究成果，通过研究不同的方法模型来深层次的剖析交通车流的运动规律，在此基础上结合实际的交通情况制定合理的交通规划方案，改善现有交通体制下的运营管理方法的不足之处，为交通行业的稳定发展提供保障。

由于我国改革开放时间较短，公路交通的发展更是比国外落后了很多，与国外众多优秀的交通理论研究成果相比，我国的交通流理论起步较晚，发展也较为缓慢，而由于高速公路的快速发展，各种交通问题凸显，尤其是交通事故频发，事故造成的直接和间接的损失巨大。严峻的交通安全问题急需尽快地建立完善适用于我国的交通流理论体系，大力发展智能交通运输系统，改善道路的运营环境，因此对于交通流理论的研究和进一步针对交通事故传播及应对措施的研究具有着重要的理论和实际意义。

本文以为高速公路事故应急管理体系的建立提供理论支撑为目标，对高速公路交通事故的发生发展及影响的规律进行分析研究，以此为基础建立事故延误时间计算模型，为事故分流保障措施提供理论依据。

1.2 国内外研究现状

交通流理论是一门具有很高运用价值的理论，通过对道路上交通流各项参数的分析得到各个参数之间的关系，以此为基础描述交通流在时间及空间上的变化规律。不同的交通流模型针对不同的交通问题设定假设条件，通过理论分析和仿真模拟等手段解决现有的交通问题，所以根据不同的实际情况，各个国家针对本国的交通状况和存在的问题在交通流理论方面取得了丰富的研究成果

1.2.1 国外研究现状

国外交通流理论起步较早，经过多年的发展得出了许多重要的研究成果，其发展过程主要分为三个阶段：

(1) 上世纪 30 年代初开始的自由流研究阶段，即主要研究流量不大、密度较小、车辆自由行驶的交通流状态，采用数理统计和概率论等数学方法，研究交通流的车流量、车头间距、车流速度等参数的分布特征。

(2) 上世纪 50 年代初开始的非自由流研究阶段，该阶段理论研究发展较快，主要研究流量较大、密度较高的交通流，此时车辆行驶多受相邻车辆影响。之后经过不断完善得到的主要理论成果有：跟驰理论；交通波理论；排队理论等。

(3) 上世纪 80 年代至今的理论研究进展缓慢，主要是在第二阶段产生的各种理论模型基础上的修正和改进，该阶段主要的理论成果有：元胞自动机模型；神经网络模型；Payne 模型等等。

国外针对交通事故而造成的偶发性拥挤现象研究比较深入，主要的理论模型如下表：

表 1.1 国外交通流的理论模型

模型	方法	假设条件	主要研究结论	优缺点及适用情况
跟驰理论模型	以汽车动力学为理论基础	车辆处于高密度的非自由流行驶状态，不存在超车行为	解释了单车道上的交通流变化特征，得到跟驰状态下车辆的速度关系	优点：具有制约性、延迟性、传递性；缺点：是不能解决车辆超车变道等问题；适用于研究单车道车流特征 ^[4]
交通波理论模型	以流体力学、应用数学等学科为理论基础	交通流为连续的、不可压缩的流体，交通流内所有车辆行驶行为一致	从宏观角度表示交通流的特征和本质，解释了在交通事故下的交通流变化情况	优点：模型与模拟时间和车辆数无关，计算耗费小；缺点：不能对交通流进行稳定性分析；适用于稠密、均匀、稳定的交通流 ^[5]
排队理论模型	以运筹学为理论基础	将交叉口、停车场、加油站看作“服务系统”，车辆为服务“对象”	研究描述了信号交叉口的排队现象，得出其所造成车辆延误，以最小延误为目标优化区域交通控制	优点：以“服务”，“需求”为指导，解决交叉口配时问题， 缺点：运用条件单一，无法解释交通状态特征；适用于城市交叉路口的交通流研究 ^[6]

元胞自动机模型	以流体力学为基础	车流为不可压缩流体，以单个车辆为研究对象	将整个交通流离散化，从微观层面，以一个元胞为单位详细描述交通流的交通波及排队形成的特征	优点：能够清晰准确的模拟出交通流的连续变化现象 缺点：车流分支过细冗长，导致计算机储存运算效率低 ^[7]
神经网络模型	基于非线性动力学系统	以仿生原理，将路网看作一个神经网络	以单个神经元为基础组成网络计算系统，为众多因素综合作用下的交通流进行动态模拟	优点：有很强的容错性，善于联想、综合和推理； 缺点：适用于交通量预测和交通控制 ^[8]

除了上表中的各种模型外，较为典型的模型还有 Lawson1997 年分析区分事件所引起的延误和车辆的排队时间，改进了 I/O 模型，该模型估计了事故瓶颈路段车辆排队的时间扩散范围及空间扩散范围，并追踪对位车辆从而获得交通拥挤时间空间扩散范围^[9]。Jiun-BiingSheu 基于车道变换行为定义了 6 个随机交通状态参数，形成了随机排队预测模型，用于对事故发生点出的排队长度进行预测^[10]。

上述各种模型由于基本的假设条件不同，适用于研究分析不同的交通状态，在具体应用时，需要综合考虑模型的精度、有效性和计算成本等各方面因素，来选取合适的交通流模型。

1.2.2 国内研究现状

与国外的交通流理论研究历史相比，我国的交通流理论研究起步较晚，主要是在学习国外理论的基础上加以改进创新得到的理论成果，主要的著作有：王殿海教授的《交通流理论》、宁宣熙教授的《堵塞流理论及其应用》以及高自友教授的《城市动态交通流分配模型与算法》。这些著作在交通流特性研究、宏观交通流模型、交叉口理论研究、交通阻塞研究及交通流分配模型研究方面为我国的交通学科的研究奠定了基础。

在路网下交通流中出现交通事故时对交通流特征分析方面的研究中主要的结论有如下表：

表 1.2 国内交通拥挤传播规律研究现状

代表人物	主要研究结论
彭国雄 (2003)	运用交通波理论,提出了一种在事故情况下对车辆排队长度进行估计的模型 ^[11]
王建军 (2006)	在研究交通波理论的基础上,提出干涉作用下的交通事故的传播规律模型 ^[12]
龙建成 (2009)	利用 CTM 研究了突发事件下道路交通拥堵的传播规律,并构建了交通拥堵的评价指标体系 ^[13]
王永明 (2009)	基于元胞自动机理论建立了 CACF 模型,模拟出意外事故下造成的交通拥堵的传播规律 ^[14]
张敖木翰 (2012)	利用 CTM 研究了突发事件诱发的网络非重复性交通拥堵传播规律,并针对突发事件下拥堵传播的区域禁行策略设计问题 ^[15]

此外,还有一些学者对事故情况下的交通流特征进行了研究,吴正在《低速混合型城市交通的流体力学模型》^[16]一文中,针对我国低速混合型交通提出了一种新的交通流力学模型,它比目前常用的交能流模型更具有一般性,尤其适用于我国城市现阶段低速混合交通为主的实际状况;陈斌和魏郎在《高速公路意外事件影响下的车辆跟驰模型》^[17]一文中建立了跟驰框架和车辆的主体结构,分析了车辆跟驰的 BDI 属性,并从信念模型、愿望模型和意图模型方面进行了仿真模拟,得出了与实际情况较为符合的结论;张晶晶在《路网环境下高速公路交通事故影响传播分析》^[18]一文中通过对高速公路路网环境下的交通波模型的研究,得出分流组织措施干涉条件下,路网交通事故的传播规律和事故影响范围计算模型;王俊骅和赵新勇在《高速公路网突发交通事件时空影响预测模型》^[19]一文中根据交通事故发生发展的不同阶段,建立了相对应的时间预测模型,并在传统道路交通波的理论基础上,分析得出了进出口匝道和主线连接段道路的交通事故影响范围预测模型。

综上所述,我国学者在研究吸取外国先进理论的基础上做出了较多的理论创新,结合我国的实际交通环境,在交通规划与设计、路网交通事故组织管理、智能交通等领域取得了丰富的理论成果,为后续研究奠定了坚实的基础。

1.3 主要研究内容及技术路线

1.3.1 主要研究内容

本文主要以交通波理论为基础，分析研究高速公路上发生交通事故以后，交通流的转换过程及机理，据此研究不同情况下的车辆延误时间，制定相对应的分流措施实施方案。具体内容如下：

- （1） 研究分析交通流三参数之间的关系，选取线性速度-密度模型，研究交通波理论下的高速公路交通事故发展和传播规律。
- （2） 以交通波理论为基础，分析三种不同时段受到事故影响的车辆，研究其通过事故影响区域的过程，建立相应的计算模型，得出事故所造成最大延误时间，并通过对比讨论绕行措施的可行性。
- （3） 在得到事故延误规律之后，针对三种不同的延误时间计算模型，计算出不同情况下采取分流措施需已知的分流流量大小、分流开始及结束时间、分流路径选择等参数，保障分流措施实施的可行性和有效性。

1.3.2 技术路线

本文以理论基础、计算模型、实施措施三步为文章的总体思路，技术路线如图 1.1 所示。

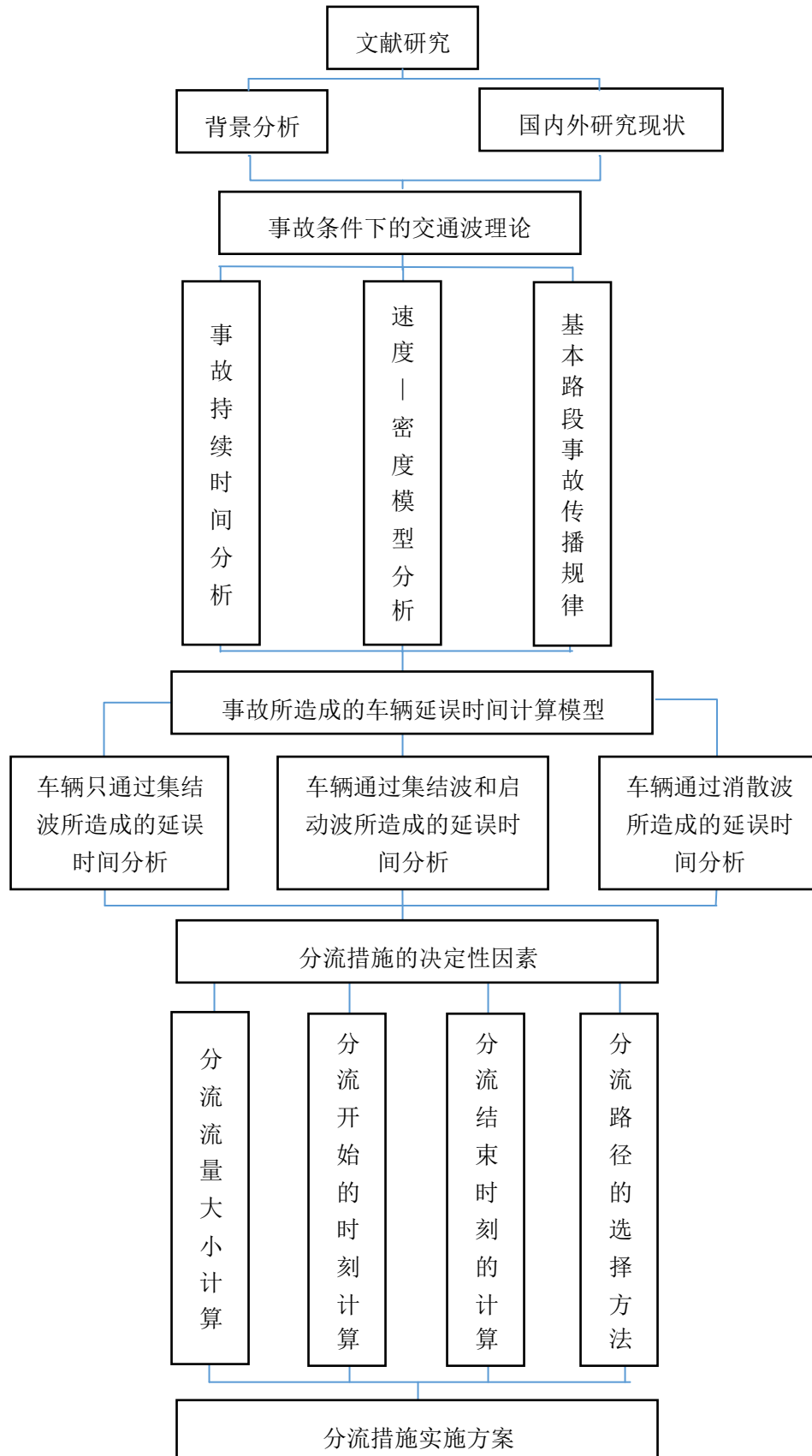


图 1.1 技术路线图

第二章 高速公路交通事故条件下的交通波理论

交通波理论作为交通流理论中的重要组成部分，以流体力学为基础，将交通流比拟为水流，将交通流密度大小的变化抽象为水流扰动后形成的水波，以此描述沿同一方向运动，但不同密度的两股交通流相遇时交通流状态的相互影响的过程。交通波理论适用于稠密、均匀、稳定的交通流，以交通流为连续流为假设条件，通过流体力学、应用数学、系统工程等学科的研究方法，分析交通流扰动后车流波的传播规律，得出交通流速度、密度和流量之间的关系。

交通波理论是将整个交通流看作一个宏观的整体，研究它的各种状态及规律，并假设交通流中的所有单个车辆的运动规律完全一致，这种假设与实际的交通情况不符，但是在研究道路发生交通事故交通流状态的变换过程中，可以较为准确地模拟交通流的实际情况。在交通流的分析、交通模拟、交通事故安全评价中广泛应用。

2.1 交通流三参数分析

在研究交通流的状态及变化过程时，交通流的速度、交通流的密度、交通流的流量是最为重要的三个参数，对于研究高速公路交通事故下的交通流状态的描述、交通事故所造成的延误时间计算及针对事故所采取的分流措施的研究都有重要意义。交通流速度、密度、流量的定义及计算方法也是本文的理论基础。

2.1.1 交通流速度

高速公路是一个相对封闭的交通环境，基本路段不存在横向干扰。假设道路上的车流是均匀连续分布的，可以将交通流类似的看作是在没有横向影响，在管道中流动的水流，在整个运行过程中，将交通流的速度定义为一定长度范围内所有行驶车辆速度的平均值。用 V 来表示交通流空间平均车速，单位为 km/h 。在后面的计算公式中用到的交通流中的单一车速也近似的看成此刻其所在的交通流的速度。

2.1.2 交通流密度

若将交通流看作连续均匀的流体，则其一定存在一个密度，在流体力学中流体密度的定义为：单位体积内所具有的流体质量称为密度。用 K 来表示交通流密度，单位为 kg/m^3 。同理可得交通流密度的定义为：单位路段长度内所有行驶车辆的总数，单位为辆/ km 。

交通流密度与其单位车辆所占有的空间大小有关，而车辆安全行驶的最小空间为车辆本身长度加最小的车头间距，最小车头间距与速度相关，速度越大，安全行驶的最小车头间距越大，所以交通流的密度与速度之间存在一定的函数关系。

2.1.3 交通流流量

高速公路作为一种交通方式，就是为使用者提供安全、快速、便捷和舒适的出行环境，交通量对这些方面均有不可忽略的影响。在道路等级及车道数的设计、服务水平以及道路安全评价中，交通流的流量都是决定性因素。

在将交通流比拟为水流的情况下，交通流的流量可定义为：单位时间内通过道路横截面的车辆数，用 Q 来表示，单位为辆/h。流量、速度和密度之间的关系为 $Q=V*K$ 。

下图为三参数之间的空间关系曲线：

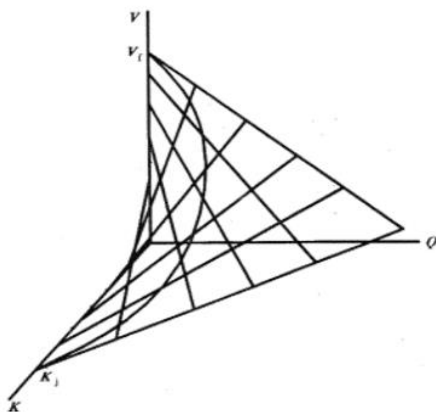


图 2.1 Q 、 V 、 K 空间关系曲线

2.2 速度-密度模型

交通流的速度、密度、流量是描述交通流状态特征的重要参数，三要素之间存在一定的函数关系，研究它们之间的函数关系，对了解交通波理论有非常重要的作用，流量-密度模型用以研究稳定的交通流，因交通事故而发生产生扰动时交通波的传播规律；速度-流量模型在通行能力分析中用来评价道路的服务水平。速度-密度模型是以上两种模型的基础，一旦速度-密度模型确定，就可确定交通流三参数之间的所有关系模型。

经典的速度-密度模型基本上分为两种：单段函数模型和多段函数模型，在单段函数模型中具有代表性的模型有格林希尔治模型、安德伍德模型和格林伯格模型等；多段函数模型中的代表模型有伊迪模型和三段线型模型。由于在描述交通流状态时多段

函数模型对交通流分类较为复杂，且实际应用也比较困难，所以在交通流的研究中多采用单段函数模型。下面将简要介绍三种单段速度-密度函数模型并比选。

(1) 格林希尔治模型

格林希尔治模型是格林希尔治在最早 1935 年提出，他也是最早速度-密度模型可以确定其他两种关系模型的学者。后来该模型经过不断的完善而在交通流研究过程中被广泛应用。在实际应用中格林希尔治模型适用于车流密度大小适中的情况，模型以交通流密度为自变量，将速度表示成密度的函数。该模型的单段线性模型为：

$$V = a - bK \quad (2.1)$$

当密度 K 为 0 时，交通流速度为 V_f ：畅行速度，

由此可得： $a = V_f$

当密度 K 达到最大值 K_j 时，车流速度 $V = 0$ ，

由此可得： $b = V_f/K_j$

将 a 、 b 带入式 (2.1) 中可得速度与密度之间的函数关系式如下：

$$V(K) = V_f \left[1 - \frac{K}{K_j} \right] \quad (2.3)$$

由 $Q = V \cdot K$ ，可得：

$$Q(K) = V_f \left[K - \frac{K^2}{K_j} \right] \quad (2.4)$$

式中：

K_j — 阻塞密度；

V_f — 自由流车速。

根据以上公式可绘制交通流密度与流量之间的关系图，如下图：

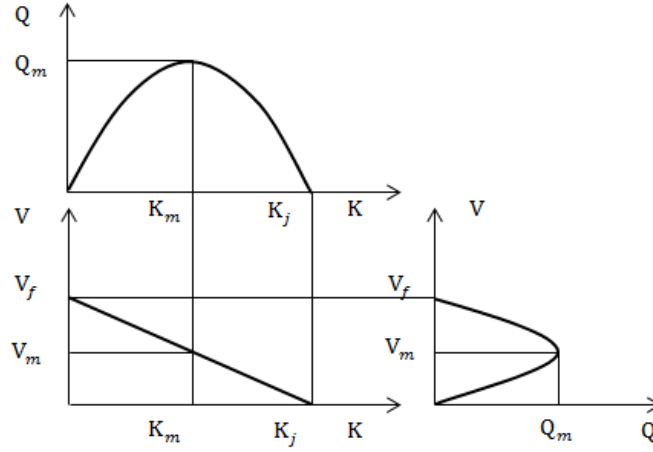


图 2.2 格林希尔治线性模型关系图

图中 Q_m 表示公路最大通行能力对应的交通量， V_m 和 K_m 为 Q_m 对应的交通流速度与密度

(2) 安德伍德模型

安德伍德模型是安德伍德在 1961 年提出的交通流速度与密度呈负指数函数关系模型，其适用于实际交通量较小的情况，该模型假设： $K_j/K_m = e$ ，则其模型公式如下：

$$V = V_f \exp(-K/K_m) \quad (2.4)$$

式中 K_m 为交通流流量达到最大时所对应的交通流密度。

(3) 格林伯格模型

格林伯格对数模型是 Grengerg 在 1959 年提出的，该模型中交通流速度与密度之间呈对数函数关系，在实际应用中该模型适用于交通流密度较大时的情况。假设： $V_f/V_m = e$ ，则其模型公式如下：

$$V(K) = V_m \ln \frac{K_j}{K} \quad (2.5)$$

上式中 V_m 表示最大交通量所对应的车流速度。

将 $Q = V \cdot K$ 带入上式可得：

$$Q(K) = KV_m \ln \frac{K_j}{K} \quad (2.6)$$

其交通流密度与流量的关系图如下：

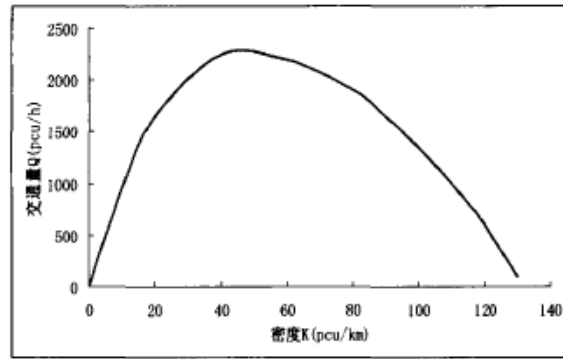


图 2.3 格林伯格对数模型密度与流量关系图

(4) 三个模型之间对比

格林希尔治模型、安德伍德模型和格林伯格模型作为单段函数模型的代表，徐程和陈晓明在公路交通科技期刊上发表的《交通流速度-密度模型特性分析》^[20]中采用采样非线性最小二乘法对上述三种模型参数进行标定及误差拟合，得到三种模型在实际应用过程中的误差。下表为三个模型各个方面综合对比。

表 2.1 单段函数模型对比表

	格林希尔治模型	安德伍德模型	格林伯格模型
速度-密度函数关系	线性函数关系	指数函数关系	对数函数关系
适用交通量	适中	较小	较大
模型公式	$V(K) = V_f \left[1 - \frac{K}{K_j} \right]$	$V = V_f \exp(-K/K_m)$	$V(K) = V_m \ln \frac{K_j}{K}$
相对误差标准差 (%)	5.7	4.6	5.3
相关系数标准差	0.046	0.043	0.049

由上表可知，在实际运用中，三个模型的拟合误差相差不大，其中安德伍德模型的相对误差和相关系数的标准差较小，模型相对稳定，但安德伍德模型适用于交通流量较小时的交通流速度-密度关系，本文主要研究高速公路交通量较大，发生交通事故后产生拥挤的情况，故安德伍德模型不适用于本文研究。格林希尔治模型和格林伯格模型在相对误差和相关系数上相差较小，而格林希尔治线性模型相对较为简单，为了后面相应公式推导的简化，本文直接采用格林希尔治模型。

2.3 交通波事故传播模型

交通波模型的理论根本是路段内存在两种密度的交通流，当两股交通流相遇后就会产生类似于水流中出现的水波一样的车流波，向上游或下游移动，如下图所示：

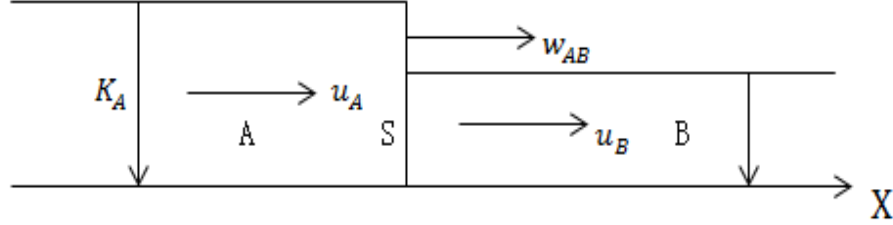


图 2.4 两种密度交通流产生的交通波

图中 S 为交通波的波面； K_A 和 K_B 为两股交通流的密度； u_A 和 u_B 为 A、B 两段交通流内的平均车速； ω_{AB} 为交通波的波速^[21]。

如果将 S 波面看作相对静止不动的，在一个时间段 Δt 内由 A 通过波面 S 的车辆数 N_1 应该为：

$$N_1 = (u_A - \omega_{AB}) K_A \Delta t \quad (2.6)$$

在 Δt 内通过波面 S 进入 B 交通流的车辆数 N_2 应该为：

$$N_2 = (u_B - \omega_{AB}) K_B \Delta t \quad (2.7)$$

由交通流流量守恒可知： $N_1 = N_2$ ，因此：

$$(u_A - \omega_{AB}) K_A \Delta t = (u_B - \omega_{AB}) K_B \Delta t \quad (2.8)$$

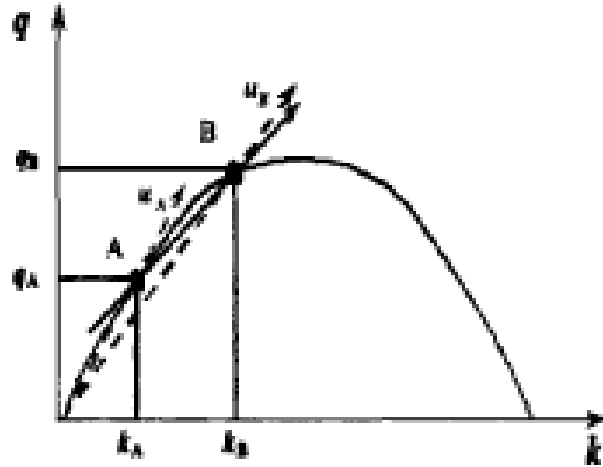
带入流量、密度、速度关系式： $Q = V \cdot K$ 可得：

$$\omega_{AB} = \frac{Q_B - Q_A}{K_B - K_A} \quad (2.9)$$

上式即为交通波理论的波速公式，也是后面公式推导的基础公式，此式还有如下表达式：

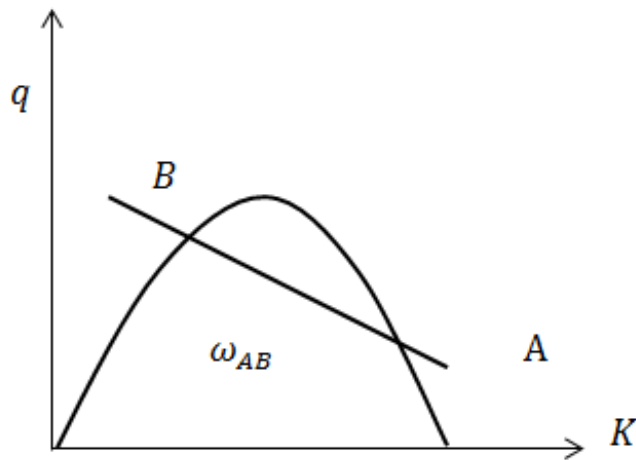
$$\omega_{AB} = \frac{\Delta Q}{\Delta K} \quad (2.10)$$

由格林希尔治模型交通流的流量-密度模型可知，当交通流 A 的流量 Q_A 小于交通流 B 的流量 Q_B 时，如下图所示。


 图 2.5 $\Delta Q > 0, \Delta K > 0$ 状态下的交通波

当 $\Delta Q > 0, \Delta K > 0$ ，所以 $\omega_{AB} > 0$ 。 ω_{AB} 的速度方向与图 2.5 的假设方向一致，故两交通流产生的交通波沿交通流前进的方向，即向道路下游传播，这种情况即为道路发生拥挤后拥挤消散的过程。

同理可知，当交通流 A 的流量 Q_A 大于交通流 B 的流量 Q_B 时，如下图所示，


 图 2.6 $\Delta Q < 0, \Delta K > 0$ 状态下的交通波

因为 $\Delta Q < 0, \Delta K > 0$ ，所以 $\omega_{AB} < 0$ 。 ω_{AB} 的速度方向与图 2-6 的假设方向相反，因此两交通流产生的交通波沿交通流前进相反的方向，向道路上游传播，这种情况即为道路发生交通事故出现拥挤的过程，道路下游出现交通事故，事故点流量减小，事故点上游交通流密度变大出现交通波，向上游传播，此过程就是后面将要讲的集结波产生的过程。

2.3.1 事故持续时间分析

在高速公路上，由于道路封闭，基本路段发生交通事故后，事故发生路段车道减少，通行能力下降，如果到达交通量不减少，道路开始出现拥堵，随后事故点清除完毕，交通逐渐恢复正常状态。从事故发生一刻开始，交通流出现扰动，最后事故处理完毕，交通恢复正常为止，这段时间就是交通事故的持续时间，该时间段可以分为 3 个阶段：

- ① 检测与响应时间：即从事故发生到处理人员到场所用的时间。
- ② 事故清理时间：即从事故处理人员到场至事故处理完毕，通行能力恢复所用的时间。
- ③ 影响持续时间：即从事故处理完毕直到事发路段的交通流完全恢复正常状态所用的时间。

如果事故发生前道路处于通畅状态，通行能力满足要求，则事故发生点上游的交通流流量随事故的发生、结束而发生的变化过程如下图

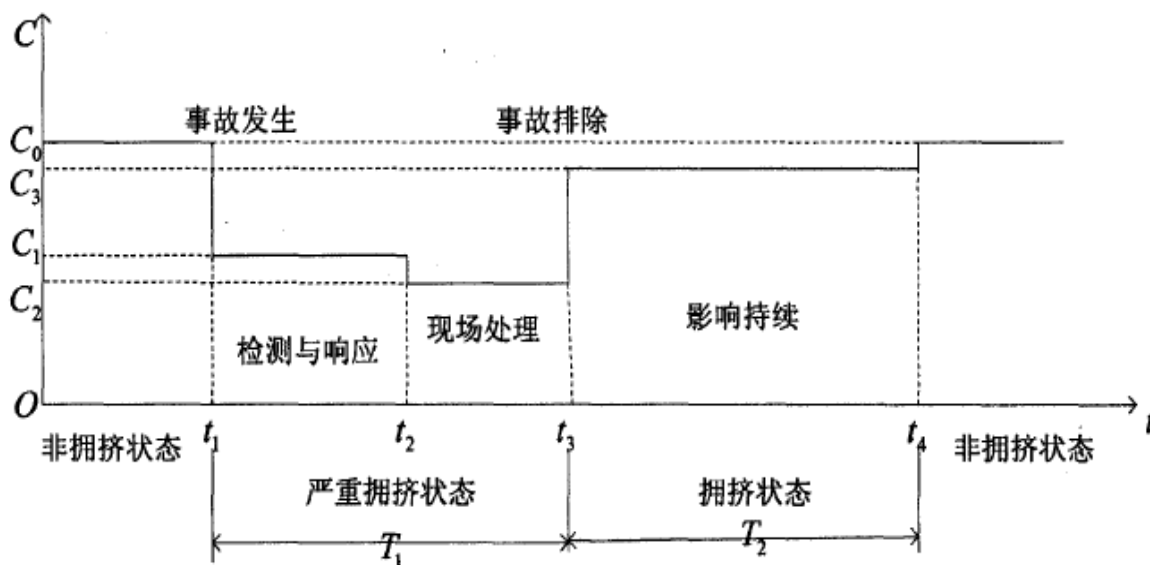


图 2.7 交通流状态变化过程

第 1 阶段：检测与响应过程

该阶段如图 2.7 所示，为从 t_1 时刻到 t_2 的时间段， t_1 时刻在道路某点处发生交通事故，第一阶段正式开始，由于事故占用了部分车道，事故点的通行能力显著降低，如图 2.7 所示通行能力由 C_1 变为 C_0 ，到达事故点的车辆未能及时通过，滞留于事故点上

游，滞留车辆越来越多，最终产生严重的交通拥堵现象。通过人为报告或者路段仪器检测发现事故，并做出回应，事故处理人员前往事故点。

第 2 阶段：事故清理过程

该阶段如图 2.7 所示，为从 t_2 时刻到 t_3 的时间段，从事故发生开始，经过第一阶段的时间，交通应急管理人员到达事故发生地点，开始对发生交通事故的车辆、人、交通设施等进行处理。出于安全考虑，处理时需要再次封闭分布车道，事故点的通行能力再次下降，如图 2.7 所示。

第 3 阶段：拥堵消散过程

该阶段如图 2.7 所示，为从 t_3 时刻到 t_4 的时间段，在 t_3 时刻时事故点的障碍清理完毕，通行能力基本恢复，由于拥堵产生的排队车流较密，所以事故点的流量并没有完全恢复正常，经过一段时间的疏散，到 t_4 时刻时，原事故点的交通完全恢复到事发之间的非拥挤状态，至此，事故影响才完全结束^[21]。

在整个交通路网中，一旦某一路段上发生交通事故，事故点可用行车道减小，打破了原来单位时间通过事故点的车辆数与单位时间到达事故点的车辆数的平衡状态，到达的车辆滞留在事故点上游，排队等待通过，未能及时离去的车辆不断增加，形成排队车流，如果事故点的通行能力不能及时恢复，上游的排队车流长度不断增加，最终可能排队到上游立交处，使事故影响到其他道路。在整个事故发生到结束的过程中，交通状态的变化如下图所示。

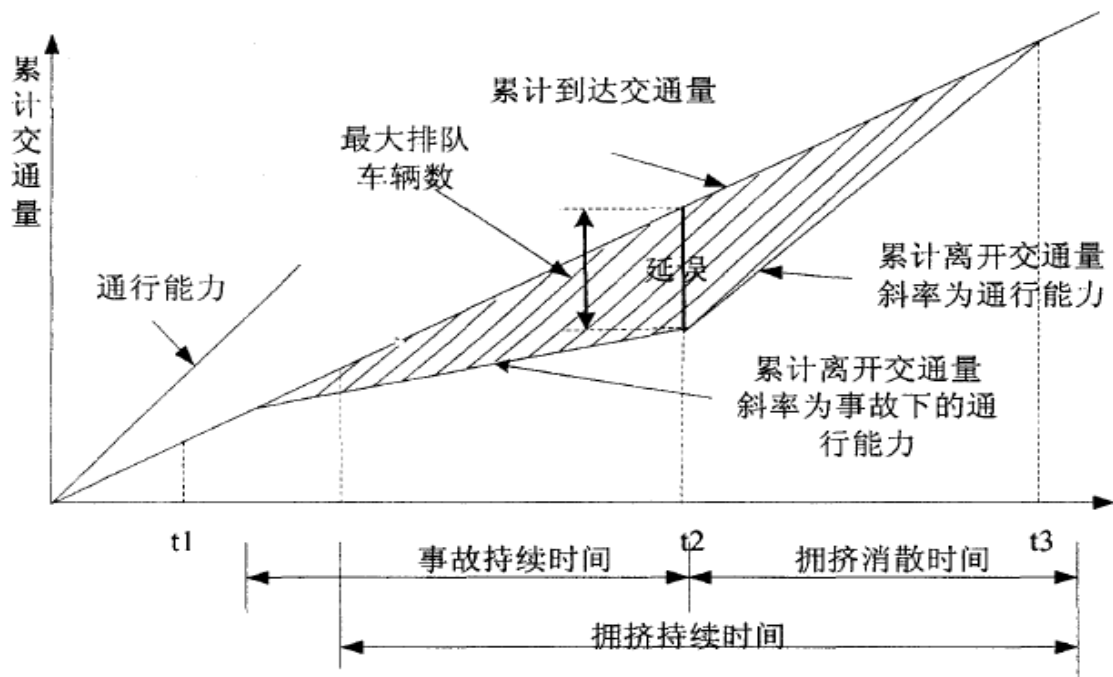


图 2.8 事故影响流程图

图 2.8 为事故影响的过程图，图中坐标系横轴为时间，纵轴为累计交通量，两者的比值即图中直线的斜率为通行能力。

事故在 t_1 时刻发生，由图中可以看出，在事故持续时间段内，事故点通行能力下降，累计离开事故点的交通量减小，累计到达交通量和累计离去交通量的差值越来越大。

t_2 时刻为事故结束的时刻，此刻以后，事故点的通行能力恢复，其大小与事故点的最大通行能力相近，由图中线段斜率可知， t_2 时刻之后为事故拥挤消散的时间，直到 t_3 时刻，累计积压的车辆全部离去，事故影响才完全结束。

由图中可以看到由于事故点的通行能力降低导致车辆不能及时离去，积压在上游，形成排队车流，图中的阴影部分的纵坐标差值即为积压的车辆数，由图可知，在 t_2 时刻，排队车流的长度达到最大值，此后缓慢减小，直至完全消散。

通过对交通事故持续时间分析可知，事故发生后，随着时间的推移，排队的车流长度逐渐变大，如果事故点恢复通行后的通行能力不变，则由图 2.8 可知， t_2 时刻的值越大，交通完全恢复的时刻 t_3 的值越大，车辆的最大排对数也越大，所以，可以得出结论： t_2 时刻的大小是决定事故影响程度的关键因素，即事故现场清理完毕的时间越早，事故对上游交通的影响越小。

因此，在无法控制事故发生与否和事故大小程度时，高速公路管理者应当采取各种可能的方案来缩短事故的持续时间：检测相应时间、到场处理时间。如此即可在一定程度上减小事故的影响程度。

2.3.2 基本路段上的事故传播规律

在高速公路基本路段，不存在其他交通流汇入和分流的干扰，交通流状态的变化只受基本路段内的交通因素的影响，所以当基本路段发生交通事故时，事故点的通行能力降低，到达交通量大于离去交通量，事故点上游车辆开始减速慢行通过事故点，形成密度高于正常状态的交通流，后面正常行驶的车辆也逐渐加入其中，形成排队车流。随着事故清理完毕，事故点的通行能力恢复，排队的车辆开始缓慢加速离去，形成密度较排队交通流小的车流，随着排队的车辆逐渐离去，所有的排队车辆全部加速离开后，交通流的速度恢复了正常，在整个过程分为三个阶段：集结波阶段；启动波阶段；消散波阶段。

(1) 集结波

假设事故发生在 $t = 0$ 时刻，从此时开始，事故点 X_0 的通行能力下降，引起事故点上游开始出现减速排队通过事故点的车流，即形成了密度大于正常状态的交通流，此交通流与正常交通流的分界面随着进入大密度交通流车辆的不断增加，向上游移动，这一现象就是集结波的传播过程。从事故发生到事故处理完毕，这段时间内，交通流不会再出现其他的密度变化情况，设事故处理完毕的时刻为 t_0 ，则集结波的传播过程如下图：

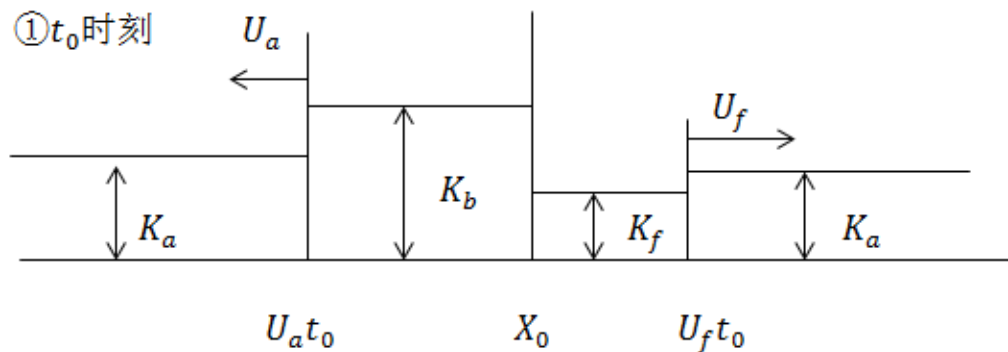


图 2.9 集结波传播形式

由于 X_0 处的通行能力突然下降，使交通流发生扰动，出现密度为 K_b 的交通流，正常状态的交通流密度为 K_a ，两密度不同的交通流的分界面就是集结波的波面，由交通波理论可知，这种情况下产生的交通波的波速 U_a 为：

$$|U_a| < \left| \frac{Q_f - Q_a}{K_b - K} \right| (0 < t < t_0) \quad (2.11)$$

式中： Q_f —— 事故处理完毕前事故点 X_0 处的交通量，即密度为 K_b 交通流的交通量；

Q_a —— 正常状态下交通流的交通量；

由于 $Q_f < Q_a, K_b > K_a$, 所以 $U_a < 0$ ，即集结波的传播方向与交通流的方向相反。

在 t_0 时刻之前，事故点上游只有集结波一种车流波，从 $t=0$ 到 t_0 此时间段内，集结波从事事故点向上游移动的距离 X_b 为：

$$X_b = U_a t_0 \quad (2.12)$$

当集结波出现并向上游传播时，事故点 X_0 下游由于交通量的突然减小，离去率大于到达率，出现密度为 K_f 的交通流，该交通流与正常交通流相遇形成交通波，如上图所示，该波的波速为：

$$U_f = \frac{Q_f - Q_a}{K_f - K_a} \quad (2.13)$$

由于 $Q_f < Q_a, K_f < K_a$ ，所以 $U_f > 0$ ，即波传播的方向和车流方向一致。

(2) 启动波

从 t_0 时刻开始， X_0 处的交通量增大，出现密度为 K 的交通流，该交通流与形成集结波的交通流的分界面形成波面，这两种密度的交通流相遇所产生的交通波称为启动波，其传播形式如下图：

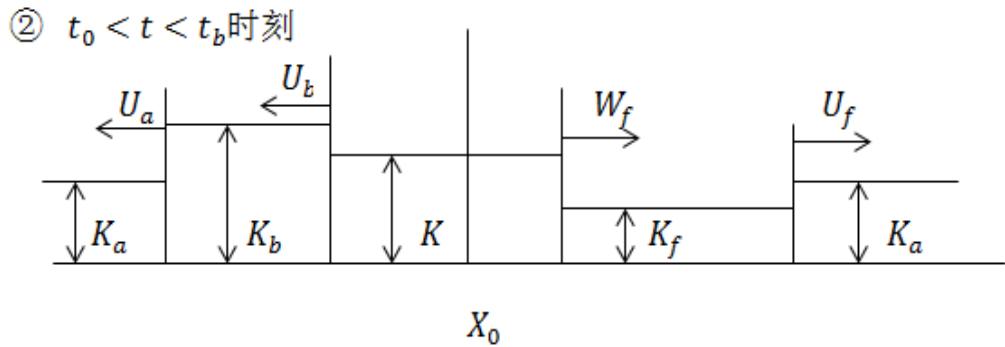


图 2.10 启动波传播形式

同理，由交通波理论可知，启动波的波速公式为：

$$U_b = \frac{Q_f - Q}{K_b - K} (t_0 < t < t_b) \quad (2.14)$$

式中： Q —— 事故处理完毕后事故点 X_0 处的交通量，即密度为 K 的交通流流量；

t_b —— 波速为 U_b 的启动波与波速为 U_a 的集结波相遇的时刻。

由于 $Q_f < Q$ ， $K_b > K_0$ ，所以 $U_b < 0$ ，即波传播的方向和车流方向相反。

当 Q_a 、 Q_f 、 Q 三者之间的关系为： $Q_f < Q_a < Q < Q_x$ 时（ Q_x 为道路最大通行能力下的最大交通量），由集结波和启动波的波速公式得：

$$|U_b| = \left| \frac{Q_f - Q_a}{K_b - K_a} \right| \quad (2.15)$$

因为 $K_a < K < K_b$ ，所以 $K_b - K_a > K_b - K > 0$ ，则：

$$|U_a| < \left| \frac{Q_f - Q_a}{K_b - K} \right| \quad (2.16)$$

又因为 $Q_f < Q_a < Q$ ，所以 $|Q_f - Q_a| < |Q_f - Q|$ ，则：

$$|U_a| < \left| \frac{Q_f - Q}{K_b - K} \right| \quad (2.17)$$

所以：

$$|U_a| < |U_b|$$

由于 $|U_a| < |U_b|$ ，启动波速度大于集结波速度，拥挤会逐渐消散，当 $Q_f < Q < Q_a < Q_x$ 时，到达率仍然大于离去率，拥挤不会消散。

同时，由于流量变化，引起的事故点下游同样出现密度为 K 的交通流，与原来密度为 K_f 的交通流相遇，形成波速为 W_f 的交通波，波速公式如下：

$$W_f = \frac{Q_f - Q}{K_f - K} \quad (2.18)$$

(3)消散波

当启动波的速度大于集结波时，在事故结束后某个时刻 t_b ，启动波与前面的集结波相遇，然后形成了上游密度为 K_a 、下游密度为 K 的两股交通流相交的情况，所产生的车流波称为消散波，其传播形式如下图：

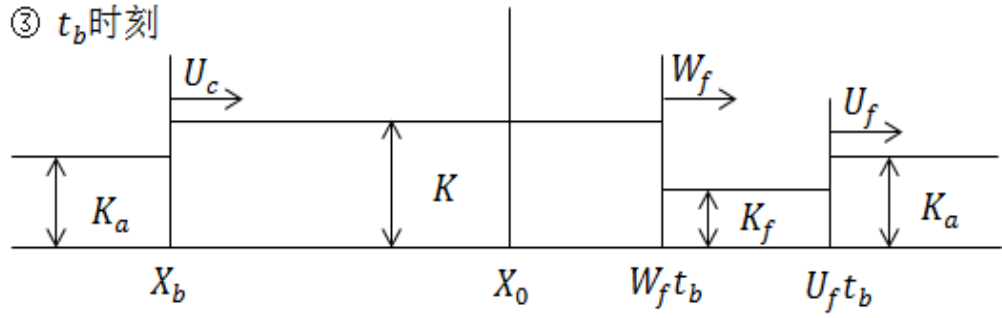


图 2.11 消散波传播形式

同理可得，消散波的波速公式如下：

$$U_c = \frac{Q - Q_a}{K - K_a} (t > t_b) \quad (2.19)$$

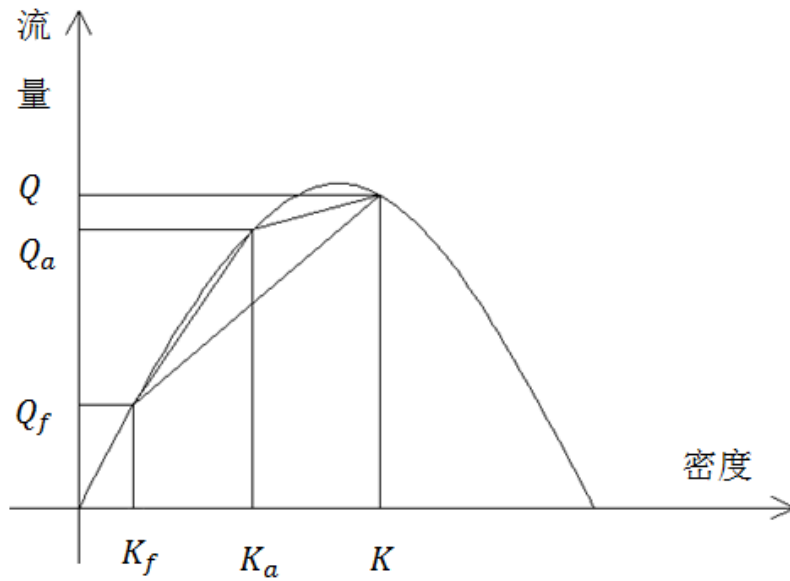
公式中的符号含义同上。

由图 2.11 可以看到，在消散波前方有波速为 W_f 的交通波和波速为 U_f 的交通波，这三个波面移动方向一致，大小不同，下面分析三个波面之间的关系。

由前面启动波速度大于集结波的条件可得， $Q_f < Q_a < Q$ ，同时由图 2.11 可以看出密度的关系为： $K_f < K_a < K$ 。由交通波的定义可知：

$$U = \frac{\Delta Q}{\Delta K} \quad (2.19)$$

利用流量与密度的关系图也可以得到相同的结论，如下图所示：

图 2.12 波 W_f 、 U_f 、 U_c 流量-密度关系

在图 2.12 坐标系中有三个点： (K_f, Q_f) 、 (K_a, Q_a) 、 (K, Q) 。这三个点代表三种不同状态的交通流，两种交通流相遇后形成的交通波大小正是图中两个点之间的连线，斜率大于 0 则与车流行驶方向一致，斜率小于 0 则与车流行驶方向相反，图中三条线段组成了三角形，可以直观地看出波 W_f 的斜率小于波 U_f 的斜率，而 U_c 的斜率则小于 W_f 的斜率，所以，三个波面的移动速度大小关系为： $U_c < W_f < U_f$ ，即从事故发生到事故结束，三个波先后产生，以相同的方向运动，但是彼此并没有相遇的机会。当消散波形成，排队车辆全部离去，事故影响逐渐消散，最终交通恢复正常，以上就是交通波理论的基本过程，以道路为渠道，以车流为水流，以交通事故为干扰，分析了事故发生、扩散、结束的全过程。

在高速公路基本路段上，不存在其他的横向干扰，事故发生后，交通拥挤现象只沿着该条道路向上游传播，如果事故持续时间较长，交通拥挤扩散到了上游立交处，或者交通事故就发生在立交附近，由于立交进出口匝道的分合流现象的影响，事故传播的规律比基本路段相对复杂，但是本文主要研究路网的安全保障方法，就是为了确保事故传播仅发生在基本路段，不会传播到立交进而影响路网的通畅运行，故而只对事故传播到立交处的情况作简要分析，不深入研究。

出口匝道作为高速公路交通事故高发路段之一，当事故影响到出口匝道时，由于分流现象，匝道前方部分车辆有分流驶入匝道的需求，就有一段车流交织变换车道的路段，而因为事故的影响，排队车流扩散到该段时，就会加重该路段的车流混乱程度。

事故造成的瓶颈路段流量下降，车辆形成排队，在匝道上，由于分流区车流密度的增大，分流速度降低，故而匝道上的交通流降低，将匝道的分流量和主线上瓶颈路段的通行量相加，可以等效于基本路段上事故点的交通流量，在分流区上游，事故传播的规律和基本路段相同。

由于交通事故的影响，出口匝道的交通量减少，这种情况下，事故的影响不会传播到相关道路上，在分析时，将事故点的交通量和匝道上的分流量之和看作基本路段上事故点处的交通量，则其传播过程可以等效为基本路段上的传播规律。

在进口匝道处，主线交通流的基础上汇入了相邻道路上驶入的交通量，所以在进口匝道下游发生交通事故时，排队车流末尾到达合流区后会分流两个车流波向主线上游和匝道上游传播，

事故发生前主线的合流交通量为 Q_A ,密度为 K_A ,合流区上游主线交通量为 Q_a ,密度为 K_a ,匝道上的交通量为 Q_{a1} ,密度为 K_{a1} ,事故发生后,合流区下游通行能力下降,流量减小为 Q_f ,事故点上游交通流密度开始变大为 K_B ,从而形成排队波扩散,当该密度车流延续到入口时,主线上的交通量变为 Q_{fa} ,密度为 K_b ,匝道上的交通流变为 Q_{fa1} ,密度为 K_{b1} 。事故处理结束后,合流区下游主线交通量和密度分别为 Q 和 K ,合流区上游主线的交通量和密度分别为 Q_0 和 K_0 ,匝道上的交通量密度和交通量变为 Q_1 和 K_1 。

假设正常交通状态时匝道与主线所占合流交通量的比例在事故发生后密度变大时仍然不变,即: $\frac{Q_a}{Q_A} = \frac{Q_{fa}}{Q_f}$, $\frac{Q_{a1}}{Q_A} = \frac{Q_{fa1}}{Q_f}$, 由合流后事故点的交通流可算出事故影响到下游主线和匝道时两个的交通量变化。

如果合流前和合流后的主线交通流在事故影响下形成的排队车流波的波速分别为:

$$U_A = \frac{Q_f - Q_A}{K_B - K_A} \quad (2.20)$$

$$U_a = \frac{Q_{fa} - Q_a}{K_b - K_a} \quad (2.21)$$

在事故结束,启动波开始向上游传播时,合流区前后主线交通流的启动波速分别为:

$$U_B = \frac{Q_f - Q}{K_B - K} \quad (2.22)$$

$$U_b = \frac{Q_{fa} - Q_0}{K_b - K_0} \quad (2.23)$$

而此处立交进口匝道的间距为 l_1 ,事故点到入口的距离为 L ,则事故传播到该立交的进口匝道所用的时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{L}{U_A} + \frac{l_1}{U_a} \quad (2.24)$$

事故的持续时间为 t_0 ,若:

$$t_1 > t_0 + \frac{L}{U_B} + \frac{l_1}{U_b} \quad (2.25)$$

则说明事故的影响将扩散到立交的进口匝道处,否则不会受到影响。

同理，当事故引起的排队波传播到匝道上时，其波速为：

$$U_{a1} = \frac{Q_{fa1} - Q_{a1}}{K_{b1} - K_{a1}} \quad (2.26)$$

启动波传播到匝道上后速度变为：

$$U_{b1} = \frac{Q_{fa1} - Q_1}{K_{b1} - K_1} \quad (2.27)$$

假设匝道长度为 l_2 ，排队波传播到匝道另一端的出口处所用的时间 t_2 为：

$$t_2 = \frac{L}{U_A} + \frac{l_2}{U_{a1}} \quad (2.28)$$

同样，当：

$$t_2 > t_0 + \frac{L}{U_B} + \frac{l_2}{U_{b1}} \quad (2.29)$$

说明事故影响将传播到相连的道路上，如果小于则不会。

2.4 小结

本章内容主要介绍了交通流理论体系中的交通波理论模型，分析了交通波模型的基本原理，并运用交通波模型研究分析了高速公路上发生交通事故以后，事故影响下不同状态交通流的分布情况。通过分析讨论不同速度-密度模型的使用情况，最终选取了线性速度-密度模型，在此模型基础上运用交通波理论得出了交通事故影响的传播规律。

第三章 高速公路交通事故延误时间分析

高速公路是一个封闭的交通环境，当有交通事故发生时，通行车道数减少或全部封闭，事故发生点的交通流流量突然减少，使该点的到达交通量大于离去交通量，出现供不应求的现象，并产生集结波向上游扩散，被影响到的车辆均需减速慢行通过事故点，之后一段时间内行驶速度才能恢复到正常状态，车辆从开始的正常行驶速度到减速慢行通过事故影响区，再到速度恢复正常，期间车辆通过相同长度的路段所用的时间较正常状态下多出一部分，一次事故所造成的影响大小，也决定于它造成的高速公路网交通流延误时间的大小，当延误时间较短，交通流在无需干涉的条件下短时间内恢复正常状态，而当延误时间较长，事故影响不断向上游扩散，受影响车辆需要等待较长时间才能通过事故影响区，如果延误时间超过驾驶员的忍受范围，或者大于车辆采取绕行方法通过该区域所花费的时间时，就必须采取相应的干涉措施，保证路网交通环境的安全与快捷。

当高速公路上发生交通事故后，事故点上游形成交通流的集结波，不断向上游传播，如果事故影响时间较长，就会传播到上游立交处，影响相关的道路运行状况，如果上游立交是枢纽互通式立交，如不采取相应的处理措施，事故影响就会逐渐传播到整个路网，造成重大的损失。所以需要在交通事故发生后较短时间内，预测出事故的影响程度，采取相应的组织措施，将事故影响控制在一定范围内，在众多的高速公路事故应急保交通组织措施中，分流干涉无疑是最直接也是最有效的组织措施，在事故影响还没有扩散到上游的立交处时，提前采取分流措施，保证在较短时间内事故影响得以消散。

本章主要研究事故影响区内的车辆延误时间，据此判断是否需要采取分流干涉措施、分流干涉开始的时间、分流量的大小和分流结束的时间。

3.1 交通事故影响区域内车辆的行驶速度分布情况

在高速公路上事故发生后，原来正常状态下的交通流参数 Q_0 、 K_0 、 V_0 都发生了变化，事故点处的通过交通量减小到 Q_a ，交通流到达量大于通过量，事故点上游发生拥挤，交通流的密度增大，车辆的行驶速度降低，影响不断向上游传播。

当事故点现场清理完毕后，所有车道均恢复通行，则事故点交通流的流量、密度逐渐恢复到正常状态，在整个过程中受到影响的车辆在通过事故影响区域时，其行驶速度的变化主要分为三个阶段。

3.1.1 处于集散波密度下的车辆速度

事故发生后，交通流产生集结波以波速 U_a 向上游传播，正常状态下的交通流密度为 K_0 、车辆行驶速度为 V_0 。当与集结波相遇时，交通流密度变为 K_a ，相应的车辆行驶速度变为 V_a ，之后车辆将以此速度向前行驶直到经过事故点或遇到启动波。

在计算车流速度时，要得到实时的车速或者密度都比较困难，而流量可以通过日常平均值得到。在第二章中研究交通流参数的函数关系时，采用格林希尔治线性模型，以交通流密度为自变量，流量和速度为因变量，得到：

$$V(K) = V_f \left[1 - \frac{K}{K_j} \right] \quad (3.1)$$

$$Q(K) = V_f \left[K - \frac{K^2}{K_j} \right] \quad (3.2)$$

密度与流量成二次抛物线函数的关系， V_f 为自由流状态下的车速，所以设 $V_f = V_0$ ，因此可得流量的峰值为：

$$Q_x = \frac{1}{4} V_0 K_j \quad (3.3)$$

同时，当已知流量值 Q 时，可根据函数得到两个密度的解：

解一：

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4Q}{V_0 K_j}} \right) K_j \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q}{Q_x}} \right) K_j \end{aligned} \quad (3.4)$$

解二：

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4Q}{V_0 K_j}} \right) K_j \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q}{Q_x}} \right) K_j \end{aligned} \quad (3.5)$$

$K_1 > K_2$ ，当已知事故发生后事故点的流量 Q_f 时，即可得到相应的两个密度解，由流量密度抛物线可知，发生拥挤时应取两者之中的大值，即：

$$K_b = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_f}{Q_x}} \right) K_j \quad (3.6)$$

将 K_b 带入线性速度-密度公式中，可得到：

$$V_b = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_f}{Q_x}} \right) V_0 \quad (3.7)$$

因此，当交通事故发生后，可以根据事故占用车道数来预测事故瓶颈路段的交通量，道路的最大交通量和正常状态下的车速都是已知量，所以根据公式（3.7）可以得到集结波下的车流速度^[22]。

3.1.2 处于启动波密度下的车辆速度

当处于集结波状态中的车辆在通过事故点之前，事故现场清理完成，全部车道均恢复通行，交通流流量增大，向上游产生波速为 U_b 的启动波，同时产生向下游以波速 W_f 移动的波，处在 U_b 和 W_f 两个波面之间的交通流密度为 K_b ，对应的车辆行驶速度为 V_q ，此状态下的车辆以速度 V_q 向前行驶直，到车辆追上 W_f 的波面。

如果事故现场处理完毕，但由于道路损坏或其他原因造成车道未能全部恢复通行，此阶段的速度分布将分为两部分，上游启动波的密度为 K_b ，下游由于通行量没有完全恢复，启动效应向下游传播的密度为 K_{b1} ，这种情况较为少见，通常在道路出现坍塌、滑坡等大型不可预期事件后出现，故而本文不做详细分析。

在启动波范围内的车辆的密度为 K ，通过前面对集结波内车速的计算公式，可以类推推出交通流密度为 K 时的车流速度：

$$K = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q}{Q_x}} \right) K_j \quad (3.8)$$

则

$$V_q = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q}{Q_x}} \right) V_0 \quad (3.9)$$

3.1.3 处于事故点下游低密度区域的车辆速度

当在第二阶段的车辆以速度 V_q 追上交通波 W_f 后，其进入密度为 K_f 的低密度交通流中，行驶速度相应地提高到 V_f ，并以此速度向前行驶，直至进入正常的交通流状态。

同样，根据前面两种车速的计算方法，可以得到此段交通流的密度应取两个解中的较小值：

$$K_f = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_f}{Q_x}} \right) K_j \quad (3.10)$$

则速度公式应为：

$$V_f = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_f}{Q_x}} \right) V_0 \quad (3.11)$$

由公式可知， Q_f 较小时， V_f 与 V_0 的相差不大，且车辆还有加速的过程，道路有限速的条件，所以在后面计算延误时间时，该速度段不予考虑其造成的延误时间。

本文采用的线性速度-密度模型，密度越大速度越小、密度越小速度越大，直到达到高速公路限速值。由此可知，速度-密度直接相关，在划分速度区域时，只需已知交通流密度的分布情况。

在事发路段上，从交通事故发生到结束，交通流共发生两次突变：一是在事故发生时，事故点上游交通流密度突然增大，事故点上下游交通流密度突然改变，造成两种密度的交通流相交，对应的有两种交通流速度；二是在事故清理结束，交通完全恢复通行时，事故点的交通流密度变为 K_b ，此密度的交通流向上下游同时传播，形成一个速度阶段。

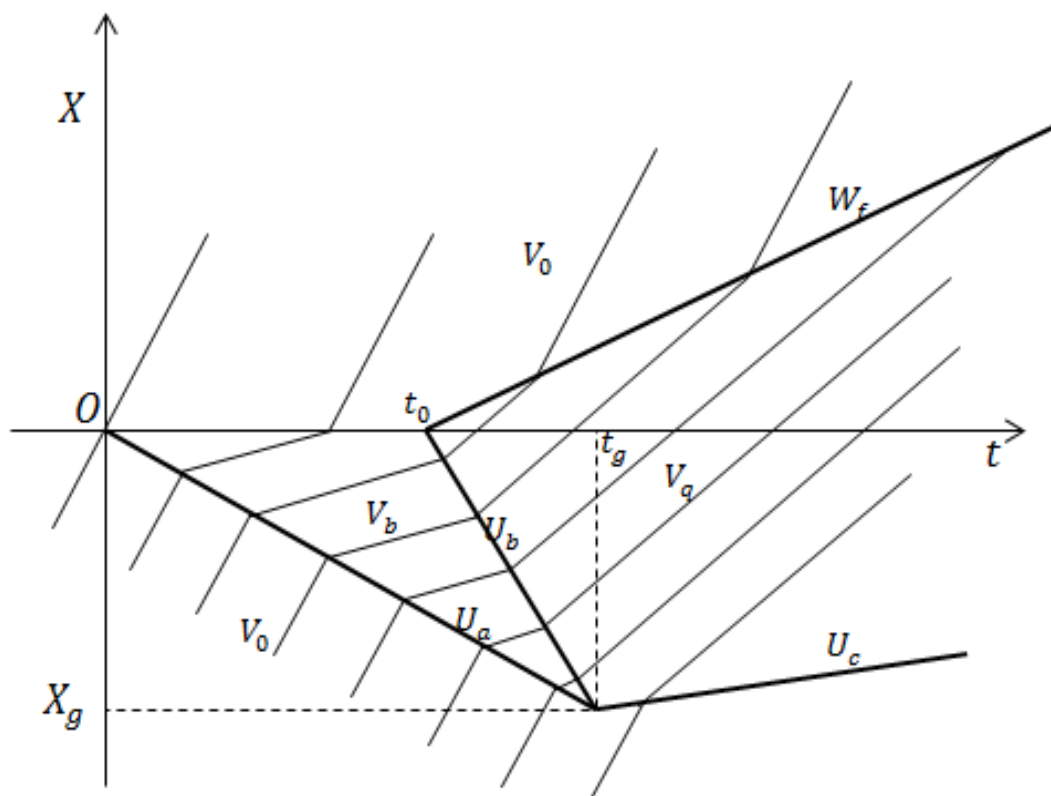


图 3.1 车辆速度变化图

在上图中，平行细线代表的运行车辆，其斜率为车辆行驶速度，粗线代表交通波的波面，其斜率为波面的移动速度。图中所有的直线斜率为正的，代表速度与车流方向相同，斜率为负的，代表其速度与车辆方向相反。

由图可知，从 $t = 0$ 时刻开始，集结波开始沿车流反方向以速度 U_a 移动，正常行驶的车辆与集结波波面相遇后速度变为 V_b ，其后若车辆通过事故发生点 $X = 0$ 时，启动波未开始，则其通过事故点后恢复正常行驶速度 V_0 ，若车辆在行驶至 $X = 0$ 处时，启动波已经向上游移动，则车辆与启动波波面相遇后，以速度 V_q 继续行驶，直到与启动波同时开始移动的波 W_f 相遇，越过波面速度恢复至 V_0 。

在图 3.1 中，代表集结波与启动波的两直线的相交点，纵坐标即为启动波与集结波相遇点 X_g ，横坐标代表两波面的相遇时间 t_g 。 t_0 时刻，在事故点 $X = 0$ 处，事故现场清理完毕，启动波与离去波分别以波速 U_b 和 W_f 向上下游移动。

根据此结论，可分析在不同速度下行驶分别所造成的延误，并讨论车辆通过整个事故影响路段所用时间与正常情况下所用时间差。

3.2 单车最大延误时间计算

在高速公路上发生交通事故时，会对原有正常通畅的交通流产生强烈干扰，原本以较高车速行驶的车辆都被迫降低速度，缓慢跟驰通过事故发生点。如果事故较为严重，大部分或全部车道封闭，就会造成车辆停车排队。而高速公路的主旨就是为旅行者提供高效，舒适的交通服务，由于交通事故的影响，使事故道路的服务水平下降，旅客花费较长时间才能通过该路段。在事故延误方面，已有较多研究，时间延误率、空间延误率、平均延误时间等。本文主要通过研究道路上每一辆车通过事故影响路段所造成的延误时间，从微观层面分析事故所造成的影响程度。

通过对车辆所经历的不同速度段的分析，分段计算单个车辆在不同速度段所花费时间，根据车辆正常行驶该段长度的道路所用的时间，判断单车的延误时间。将每个速度段的延误相加即为该车辆的总延误时间。

下面首先将所用到的所有参数进行如下的定义，定义如下符号 V_0 、 V_b 、 V_q 、 U_a 、 U_b 、 U_c 、 W_f 、 t_x 、 t_1 、 t_0 、 Δt 、 T_a 、 T_b 。每个符号的具体含义如下：

V_0 ：车辆在正常交通流状态下的行驶速度；

V_b ：车辆在集结波状态中行驶的车速；

V_q ：车辆在启动波状态中行驶的车速；

U_a ：集结波的速度；

U_b ：启动波的速度；

U_c ：集结波与启动波所合成的消散波的速度；

W_f ：离去波的波速，即与启动波同时开始，向事故点下游传播的波速；

t_x ：某一时刻上游排队末尾的车辆在 t_0 时刻刚好经过事故发生点；

t_0 ：事故现场处理完毕，事故点交通恢复，即启动波开始时刻；

t_1 ：在 t_x 后，一个时间步长 Δt 时刻排队末尾车辆与启动波相遇的时刻；

T_a ： $t_x + \Delta t$ 时刻在上游排队末尾的车辆在集结波中行驶的时间；

T_b ： $t_x + \Delta t$ 时刻在上游排队末尾的车辆在启动波中行驶的时间。

因事故发生后集结波与启动波先后出发，故在所有受到影响的车辆中，可以分为三种情况：

第一种情况：车辆在事故发生点上游以正常速度行驶，前方突然发生交通事故，车辆进入集结波密度下的交通流，排队车流不断增加，被影响到的车辆减速缓慢通过事故发生点，然后速度恢复离去，整个过程中，所有车辆的行驶速度都分为两部分，其一是正常行驶速度 V_0 ，其二是在排队车流中行驶速度 V_b 。

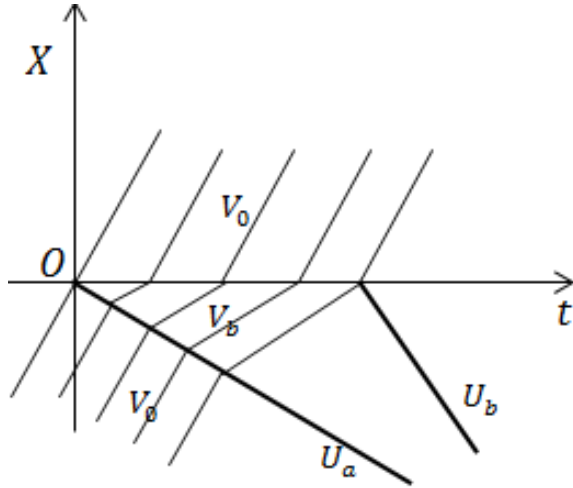


图 3.2 第一种情况下的车辆运行速度分布图

第二种情况：在第一种情况下，车辆在排队车流中行驶时，前方事故发生点的交通已经恢复，启动波开始从事务点向上游移动，当以速度 V_b 行驶的车辆进入启动波后，其速度变为 V_q ，并以此速度向行驶，直到遇到与启动波同时发出，向下游传播的交通波，通过此波面，速度恢复后加速离去。整个过程中车辆的速度分为三部分，与第一种情况相比，多了在启动波中以速度 V_q 行驶的过程。

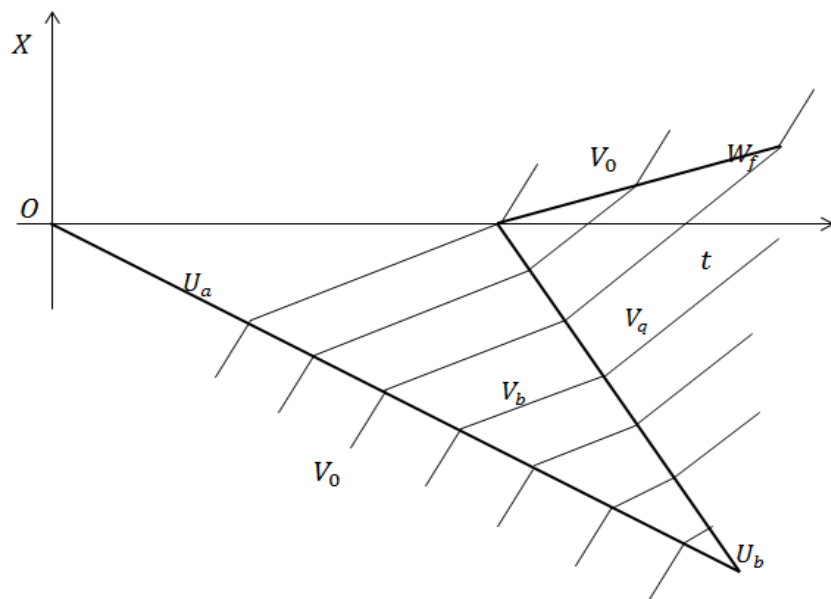


图 3.3 第二种情况下的车辆运行速度分布图

第三种情况：车辆驶入事故影响区域，遇到的是消散波，此时车流已不在视为拥挤车流，因消散波 U_c 追不上前面离去的波 W_f ，若路段无限长，密度为 K 的交通流长度将不断增加。但在实际情况下，该段交通流将在下一个立交处分流出去，最终主线完全恢复到事故发生前的状态，虽然此交通流不算做拥挤状态，但此时的车辆延误时间还是不可忽视的。

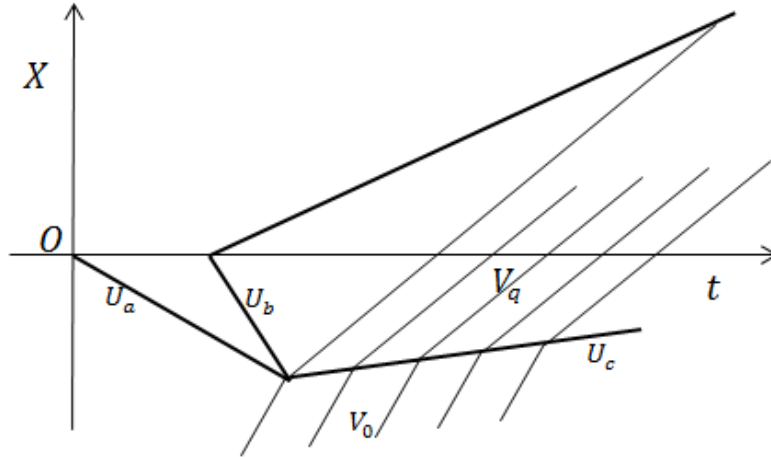


图 3.4 第二种情况下的车辆运行速度分布图

下面将分别对前两种情况下车辆所经历的速度区间进行延误时间的分析，并得到车辆驶入路段的时间与其将会遇到的延误时间之间的函数关系，确定车辆何时进入该路段将会经历所有车辆中最长的延误时间。

3.2.1 第一种情况下车辆所遇到的延误时间

由定义可知， t_x 时刻为某一时刻事故点上游排队车流末尾的车辆，在 t_0 时刻刚好经过事故发生点，在 t_x 时刻之后与集结波相遇的车辆，都会在行驶到事故发生点之前与启动波相遇，此为第二种情况，假设以事故发生的时刻为时间起点， t_x 可以通过计算该时刻进入集结波的车辆到达事故点所用时间确定，该车辆到达事故发生点的时间正好为启动波开始的时刻 t_0 ，所以：

$$t_0 - t_x = \frac{U_a \cdot t_0}{V_b} \quad (3.12)$$

即：

$$t_x = t_0 - \frac{U_a \cdot t_0}{V_b} \quad (3.13)$$

则在 $0 < t < t_x$ 这段时间内与集结波相遇车辆的行驶速度分为两段：①与集结波相遇前以速度 V_0 行驶；②与集结波相遇后以速度 V_b 行驶并通过事故发生点。

根据车辆进入集结波的时间 t 的不同，计算事故影响到的全部车辆的延迟时间 T_y 为，则车辆以速度 V_b 通过集结所用时间 t_j 为：

$$t_j = \frac{U_a \cdot t_0}{V_b} \quad (3.14)$$

车辆以正常速度行驶通过该长度路段用所用时间 t_j^0 为：

$$t_j^0 = \frac{U_a \cdot t_0}{V_0} \quad (3.15)$$

所以 t 时刻与集结波相遇的车辆总共遇到的延迟时间 T_y 为：

$$T_y = \frac{U_a \cdot t}{V_b} - \frac{U_a \cdot t}{V_0} \quad (0 < t < t_x) \quad (3.16)$$

3.2.2 第二种情况下车辆所遇到的延误时间

由上文可知，在 t_x 时刻之后进入集结波的车辆，将会在之后某一时刻与启动波相遇，然后以启动波中的车流速度行驶，直到驶出该段交通流。

假设集结波与启动波相遇的时刻为 t_b ，则在 $t_x < t < t_b$ 时间段内与集结波相遇的车辆都属于第二种情况的车辆。在该时间段内进入排队的车辆行驶速度分为三段：①与集结波相遇前以速度 V_a 行驶；②与集结波相遇后以速度 V_b 行驶；③与启动波相遇后以速度 V_q 行驶并最终通过事故点。

以 Δt 为一个时间步长，以 t 时刻与集结波相遇并进入排队末尾的车辆为研究对象，计算在 $t_x < t < t_b$ 时间段内所有进入排队的车辆的延迟时间。

(1) 车辆在集结波中行驶的时间

在 t_x 之后的第一个 Δt 时刻，处于排队末尾的车辆进入集结波中行驶，直到遇到启动波，假设 t_1 为第一个 Δt 时刻处于排队末尾的车辆，行驶一段时间后与启动波相遇的时刻，此时，车辆在集结波中行驶的长度与启动波波面所在的位置之和，就是在之前 $t_x + \Delta t$ 时刻集结波波面所在的位置，由上述位置关系可得如下方程：

$$V_b(t_0 - t_x - \Delta t) + U_b(t_1 - t_0) = U_a(t_x + \Delta t) \quad (3.17)$$

从上式中可以推导出：

$$t_{1?} = \frac{(U_a + U_b)(t_x + \Delta t) + U_b t_0}{V_b - U_b} \quad (t_0 < t_1 < t_b) \quad (3.18)$$

同理，在 t_x 之后的第 i 个 Δt 时刻，处于排队末尾的车辆进入集结波中行驶，其遇到启动波的时间为 t_i ，由上述公式可以类推出 t_i 的表达式为：

$$t_i = \frac{(U_a + U_b)(t_x + i\Delta t) + U_b t_0}{V_b - U_b} \quad (t_0 < t_1 < t_b) \quad (3.19)$$

则在 $t_x + \Delta t$ 时刻以后，所有不同时间处于上游排队末尾的车辆在集结波中行驶的时间为：

$$T_a = t_i - (t_x + i\Delta t) \quad (3.20)$$

即：

$$T_a = \frac{(U_a + U_b)(t_x + i\Delta t) + U_b t_0}{V_b - U_b} - t_x - i\Delta t \quad (3.21)$$

由于：

$$t_0 = t_x + \frac{U_a t_x}{V_b} \quad (3.22)$$

带入 t_x 得：

$$T_a = \frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} i\Delta t + \frac{U_a V_b + 3U_b V_b + U_a U_b - V_b^2}{(V_b - U_b)(V_b + U_a)} \quad (3.23)$$

(2) 车辆在启动波中行驶的时间

车辆在启动波中行驶的道路长度可以分为两部分，一部分为在事故点上游的启动波中行驶的长度，一部分为在事故点下游的离去波中行驶的长度，两种波的交通流状态一致，所以车辆在其中行驶的速度相同。

在 t_x 时刻之后，于 $t_x + i\Delta t$ 时刻，处于上游排队末尾的车辆在启动波中行驶的时间为：

$$T_{b1} = \frac{U_b(t_i - t_0)}{V_q} \quad (3.24)$$

在 $t_x + i\Delta t$ 时刻时处于上游排队末尾的车辆在通过事故点后继续以 V_q 的车速行驶，直至追上离去波 W_f 。

$$T_{b2} = \frac{W_f(t_i - t_0 + T_{b1})}{V_q} \quad (3.25)$$

在 $t_x + \Delta t$ 时刻与集结波相遇的车辆以速度 V_q 行驶的时间 T_b 为:

$$T_b = \frac{U_b(t_i - t_0)}{V_q} + \frac{W_f(t_i - t_0 + T_{b1})}{V_q} \quad (3.26)$$

化简可得:

$$T_b = \frac{(U_b + W_f)(t_i - t_0)}{V_q - W_f} \quad (3.27)$$

由 $V_b(t_0 - t_x - i\Delta t) + U_b(t_i - t_0) = U_a(t_x + i\Delta t)$ 得:

$$t_i - t_0 = \frac{(U_a + V_b)(t_x + i\Delta t) - V_b t_0}{U_b} \quad (3.28)$$

$$T_b = \frac{(U_b + W_f)[(U_a + V_b)(t_x + i\Delta t) - V_b t_0]}{(V_q - W_f)U_b} \quad (3.29)$$

分离出变量 $i\Delta t$, 并带入 t_x , 可得:

$$T_b = \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f)U_b} i\Delta t - \frac{(U_b + W_f)U_a^2 t_0}{(V_q - W_f)U_b V_b} \quad (3.30)$$

在 $t_x + i\Delta t$ 时刻处于上游排队末尾的车辆由于事故影响而造成的时间延误 T_y 为:

$$T_y = T_a + T_b - \frac{U_a(t_x + i\Delta t)}{V_0} \quad (3.31)$$

由前面得到的 T_a , T_b 可得:

$$\begin{aligned} T_y = & \frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} i\Delta t + \frac{U_a V_b + 3U_b V_b + U_a U_b - V_b^2}{V_b - U_b} t_0 + \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f)U_b} i\Delta t \\ & - \frac{(U_b + W_f)U_a^2}{(V_q - W_f)U_b V_b} t_0 - \frac{U_a(t_x + i\Delta t)}{V_0} \end{aligned} \quad (3.32)$$

经过整理化简可得:

$$T_y = \left[\frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} + \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f)U_b} - \frac{U_a}{V_0} \right] i\Delta t$$

$$+ \left[\frac{U_a V_b + 3U_b V_b + U_a U_b - V_b^2}{V_b - U_b} - \frac{(U_b + W_f) U_a^2}{(V_q - W_f) U_b V_b} - \frac{(V_b - U_a) U_a}{V_0 V_b} \right] t_0 \quad (3.33)$$

上式为在 $t_x + i\Delta t$ 时刻, 刚好处于排队末尾的车辆以较低的车速行驶通过事故点总共造成的延误时间, 其 t_0 为事故处理完毕的时间, 为已知量, 当 i 取 1、2、3 ... n 时 $t_x + i\Delta t$ 时刻处于排队末尾车辆的延误时间。

为简化表述, 假设

$$A = \frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} + \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f) U_b} - \frac{U_a}{V_0}$$

$$B = \frac{U_a V_b + 3U_b V_b + U_a U_b - V_b^2}{V_b - U_b} - \frac{(U_b + W_f) U_a^2}{(V_q - W_f) U_b V_b} - \frac{(V_b - U_a) U_a}{V_0 V_b}$$

则车辆延误总公式为:

$$T_y = Ai\Delta t + Bt_0 \quad (3.34)$$

由上式可知, 总的延误时间为变量 i 的一次线型函数, 其取值范围为, $0 < i\Delta t < t_b - t_0 - \frac{U_a \cdot t_0}{V_b}$, 由 A 的表达式可知 $A > 0$, 所以随着时间的推移, 后面进入事故影响区域的车辆的总延误时间不断增大。

3.2.3 第三种情况下车辆所遇到的延误时间

在此种情况下, 车辆先遇到的是消散波, 进入消散波中以消散波密度下的车速行驶, 直至其通过波面 W_f , 恢复正常速度。

消散开始的时刻为 t_b , 此时密度为 K 的交通流的长度应为:

$$L_{tb} = U_a \cdot t_b + (t_b - t_0) W_f \quad (3.35)$$

由于 $W_f > U_c$, 所以 W_f 和 U_c 两波面之间的距离随时间而增大, 其表达式为:

$$L_t = L_{tb} + (W_f - U_c)(t - t_b) \quad (t > t_b) \quad (3.36)$$

则在 t_b 时刻以后的 t 时刻进入消散波的车辆在消散波中行驶的时间为:

$$T_1 = \frac{L_t}{V_q - W_f} \quad (3.37)$$

而在正常交通流的情况下, 车流通过该长度路段所用时间应为:

$$T_2 = \frac{T_1 \cdot V_q}{V_0} \quad (3.38)$$

所以在这种情况下, 在 t_b 时刻以后的 t 时刻进入消散波的车辆的延误时间的计算公式为:

$$T_y = T_1 - T_2 \quad (3.39)$$

带入相关参数整理可得:

$$T_y = \left[(W_f - U_c)t + (U_a + U_c)t_b - W_f \cdot t_0 \right] \frac{V_o - V_q}{(V_q - W_f)V_0} \quad (t > t_b) \quad (3.40)$$

由上式可知, 随着时间 t 的增加, 延误时间不断增大, 如果道路下游一直没有立交, 则延误时间无限增大, 而实际情况是在某个时刻, 波 W_f 进入下游立交, 由于立交处的匝道分流使主线交通流的密度基本恢复正常状态, 详细情况本文此处不做分析, 就认为密度为 K 的交通流在进入下个立交后完全消散。

假设事故点距下游立交处的距离为 X_w , 则波 W_f 到达下游立交的时刻 t_w 为:

$$t_w = t_0 + \frac{X_w}{W_f} \quad (3.41)$$

第三种情况下延误时间的公式应分为两段, W_f 到达下游立交前, 延误时间线性增加; W_f 到达下游立交之后, U_c 到达下游立交之前, 延误时间线性减小, 公式如下:

① 线性增加段

$$T_y = \left[(W_f - U_c)t + (U_a + U_c)t_b - W_f \cdot t_0 \right] \frac{V_o - V_q}{(V_q - W_f)V_0} \quad (t_b < t < t_w) \quad (3.42)$$

② 线性减小段

在 W_f 到达下游立交的时刻 t_w 时, U_c 距下游立交的距离为:

$$L_c = L_{tb} + (W_f - U_c)(t_w - t_b) \quad (3.43)$$

则此时的车辆在该密度交通流中行驶的时间为:

$$T_1 = \frac{L_c - (t - t_w)U_c}{V_q} \quad (t > t_w) \quad (3.44)$$

整理化简之后可得最终公式为:

$$T_1 = \frac{(U_a + U_b)t_b - (t_w - t_b)W_f - U_c t}{V_q} (t_w < t < t_c) \quad (3.45)$$

此时，车辆行驶相同长度的道路所花费的时间为：

$$T_2 = \frac{T_1 V_q}{V_0} \quad (3.46)$$

车辆在 t_w 时刻后进入密度为 K 的交通流后，其所经历的延误时间为：

$$T_y = T_1 - T_2 \quad (3.47)$$

带入相关参数，整理可得：

$$T_y = \frac{[(U_a + U_c)t_b - (t_w - t_b)W_f - U_c \cdot t](V_0 - V_q)}{V_0 V_q} (t_w < t < t_c) \quad (3.48)$$

上式中 t_c 为波面 U_c 最终到达下游立交处的时刻，直到此时刻，事故引起的交通流异常完全消散， t_c 的表达式为：

$$t_c = \frac{U_a \cdot t_b + X_w}{U_c} \quad (3.49)$$

上述详细分析了事故发生后，不同阶段进入事故影响区域的车辆在其中行驶的速度变化过程，计算得到车辆通过事发路段在高密度、低车速的交通流中行驶的时间，通过对比车辆在正常交通流状态下通过该长度的道路多花费的时间，得到最终的车辆延误时间，并以此为理论根据，研究后面的绕行分流等措施的实施方案。

3.3 路段绕行决策研究

在高速公路基本路段发生交通事故后，所有受到影响的车辆通过该路段均会造成一定的时间延误。高速公路运营的安全高效性，应该采取有效的方法来降低延误时间。由延误时间的计算公式可知，延误时间和道路本身的通行能力、交通流量、事故发生地点、事故占有车道数以及事故持续时间有关。在诸多因素中，除了事故持续时间可以通过提高到场救援速度和现场处理速度，以及完善交通事故预报体系等方法减小影响外，道路交通方面的因素在道路设计时就已确定，无法有效改善，事故发生的地点及事故占有车道数有很大的随机性，为不可控因素。所以通过减小延误时间来保证高速公路通畅运行的方法能起到较好的效果。

高速公路上出现交通事故后，车辆通过该路段的时间必然增加，而增加的时间就是所谓的延误时间，延误时间无法有效减小，本节讨论通过绕行解决该问题的可行性。当将一个区域的整个路网统一研究，如果交通事故发生的高速公路区域内，有能够实现 OD 运输的其它道路时，可以选择其他替代路段绕行通过，相对于在正常车流状态下通过此路段增加的旅行时间，将之定义为路段绕行增加的时间。

为解决交通事故拥挤，保证道路运行的高效性，路段绕行具体实施的可能性与有效性应进行明确的分析与说明，下面将分别对路段绕行的必要性、影响绕行有效性的因素进行分析研究。

如果高速公路发生拥挤，车流在不知情的情况下，由上游立交主线或其他道路的立交匝道汇流驶入该路段时，车流已经没有选择的余地，只能加入排队车流，缓慢通过事故路段，如果能有效的在车辆进入该基本路段前，提醒预报车辆前方的交通情况，就可以为驾驶员的路径选择提供帮助。现有的交通保障体系中已经有了事故预报提醒指示牌，告知驾驶员下一个立交后有交通事故发生，但是所提示的信息量太少，不能只是提示驾驶员前方有事故，道路拥挤，驾驶员在行车途中没有时间去判断是否有必要去绕行通过，这和个人驾驶习惯有很大的关系，并非完全合理，需要运营管理者提供可靠的绕行判断依据。

在上节本文提出不同时间进入该路段的单车时间延误概念，并计算出了车辆在事故影响路段通过时所消耗的时间，通过事故路段的最短时间，可以提前通过对路网的分析研究得到，由此可知绕行所增加的时间，设为 T_r ，上文得到的直接通过事故路段多耗的时间，即延误时间 T_y ，由这两个时间可以对是否绕行进行理论上的判断。但是驾驶员的判断存在主观因素的影响。

(1) 理论分析判断

在已知事故路段的延误时间和路段绕行增加的时间情况下，直接比较两者的大小，即可初步判断是否需要绕行，两者之差设为 T_g ，则 T_g 的表达式为：

$$T_g = T_r - T_y = T_r - (Ai\Delta t + Bt_0) \quad (3.50)$$

设 $T_g = 0$ ，即某时刻进入该路段的车辆绕行增加时间和直接通过事发路段的延误时间相等，就可以得到相应的 $i\Delta t$ 的值，设 i 的解为 m ：

$$m\Delta t = \frac{T_r - Bt_0}{A} \quad (3.51)$$

在某辆车进入事故路段后，在 $t_x + m\Delta t$ 时刻时处于上游排队车流的末尾，则其绕行时间与延误时间相等。而在此车辆之后的车辆延误时间都会大于绕行增加的时间，理论上建议驾驶员采取绕行措施，直到消散波开始，拥挤消散，不再建议绕行，具体在事故路段上游立交前多远处设置提示牌；何时开始显示需绕行的提示；何时结束提示需进一步研究分析。

(2) 驾驶员心理分析

由于每个驾驶员的性格、心理特征不尽相同，所以在遇到相同情况下的拥堵延误时，不同的驾驶员可能采取不同的驾驶行为通过该路段。

有的驾驶员可能比较反感拥堵，在绕行增加时间和延误时间相等，甚至绕行增加的时间稍大于直接通过的延误时间时，这部分驾驶员还是会采取绕行，避免拥堵在道路上。相反，由于对绕行的路径不熟悉、绕行的道路等级较低、服务水平差，在绕行增加时间等于甚至略大于直接通过的延误时间的情况下，这部分驾驶员会选择在事故路段排队慢行通过^[23]。

针对这种因人而异的情况，可以采用问卷调查的手段，对一定具有代表性的驾驶员样本群做抽样抽调查问卷，得到采用不同选择方案的人数比例，并通过问卷调查，得出驾驶员所能忍受的最大延误时间的分布情况，用数理统计的方法得到一定的置信区间，以此为依据，来综合决策事故发生后绕行措施的管理组织方案。由于时间及实际调研条件的不足，未能进行相关的调查工作，故此处只做理论分析，具体数据调查和分析希望在后续的研究中得出具体结论。

综合上述分析，对采取绕行措施的决策，需要在理论时间判断的基础上，结合驾驶员的心里分析得到一个初步的结论。然而高速公路两个立交之间没有直接相连的其他可替代路线，加之一些替换路线道路技术等级较低、服务水平较低、拥堵事故风险高，导致驾驶员替换选择的余地进一步压缩，因此，绕行措施的判断需要对整个路网条件、道路运行状况、天气条件、事故影响时间、驾驶员心理特征等因素综合处理，得出最佳的绕行方案提示，为旅客提供更好的高速服务。

3.4 小结

本章主要是在交通波理论的基础上提出了交通事故对单个车辆造成的延误时间计算。在事故发生前，本来路段内只有正常运行的一种状态的交通流，而事故发生后，由于事故点的通行量发生了两次变化，使原有平静的交通流出现三种不同状态的交通流，不同的密度和流量所对应的车辆的行驶速度均不相同。本章以不同状态的交通流下的车辆的行驶速度为基本要素，分析不同时刻进入事故影响区域的车辆所经历的行驶速度分布情况，根据速度-密度模型，计算出相应的速度大小，进而得出所有排队车辆通过事故路段所用的时间，和正常行驶所用时间对比即可得到本章的主要结论：事故造成的车辆延误时间。得出延误时间之后，站在驾驶员的角度上既可得到前方事故预报、绕行提示等服务，提高了高速公路的服务效率。

第四章 高速公路分流措施研究

当交通事故发生后,靠近事故发生点的上游路段因集结波的影响,车流速度变慢,集结波传播的距离越远,受影响的车辆相对于正常车流状态下的旅行时间延长越大。如果影响范围超过上游数个立交节点,则事故会对相邻道路产生影响,拥堵蔓延,导致整个路网运行出现障碍,造成重大的经济损失。如何保证高速公路在发生交通事故,或其他紧急情况下产生的交通拥挤,不会扩散到相邻路网中,即为本文主要研究内容。

由交通波理论可知,交通事故发生后主要可以分为拥堵扩散和拥堵消散两个过程,事故发生后,只要事故现场能够完全清理,事故产生的拥堵现象最终都会自行消散。然而当事故持续时间较长时,为了保障路网的连续高效运行状态,高速公路管理者就必须采取一定管理组织措施疏散拥挤的车流。经过对相关部门的调查得知,高速公路发生交通事故后,高速路政和交警部门主要的组织措施有路段限速、封闭入口、分流导流等^[24],而这些措施都是在事故已经造成严重拥堵后实施的,这时拥堵已对一定的路网区域产生影响,如果能将交通事故发生的过程研究分析清楚,在得知事故占用几条车道后,就可迅速做出整个事故发展的准确预估,提前采取相应的措施,保障路网的可靠性。

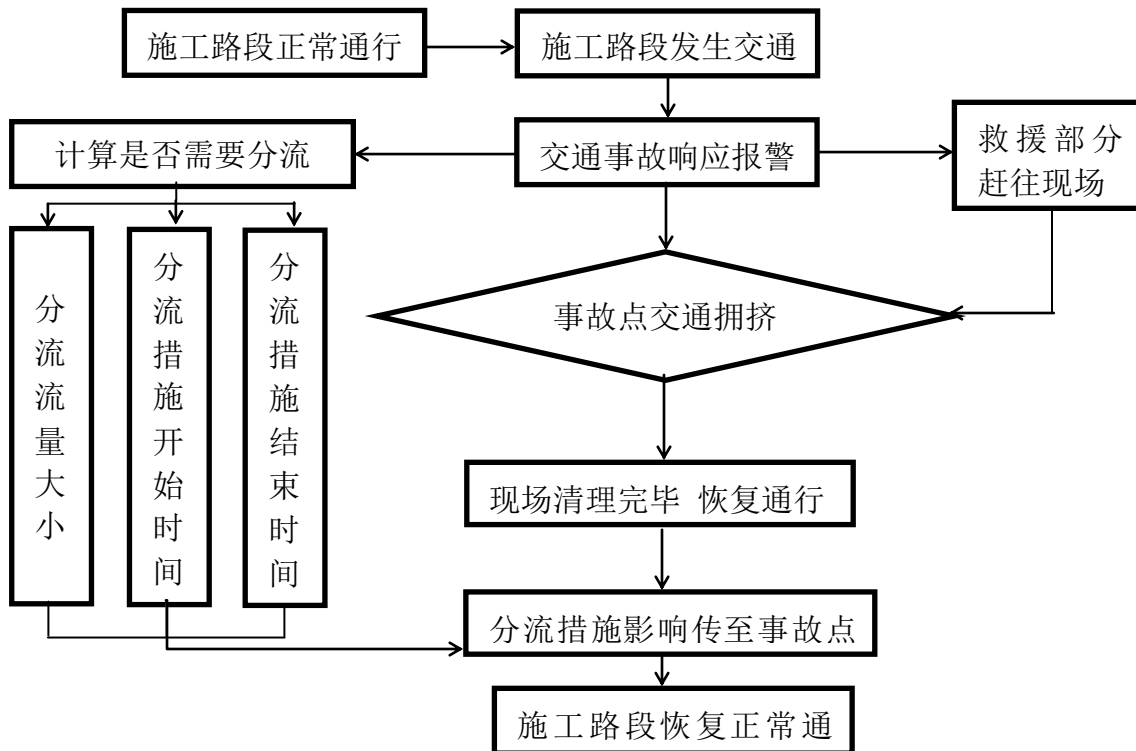


图 4.1 交通事故分流组织流程图

根据对事故发展规律和车流延误规律的研究,对事故的影响程度做出快速准确的判断,本章主要研究分流措施的实施组织方案,为交通事故应急保障体系的建立提供理论支持。

4.1 分流流量计算

高速公路上发生交通事故后,产生交通拥堵的直接原因是事故点的车流到达率大于离去率,事故点的通行能力下降,形成交通瓶颈路段,上游车流车速降低,排队等待,最终通过该事故路段的时间较正常车流状态下的通过时间长,即造成了交通延误。为了保证事故的影响范围得到控制,所造成延误时间小于绕行所增加的时间,在事故上游立交处需采取分流措施,使得事故点的到达率和离去率平衡,保证路网的运行和旅客的快捷通行。

当事故发生后,事故会扩散到上游立交处或者事故的延误时间大于分流绕行的时间,在事故点上游立交处采取分流措施,事故未影响到的车流密度发生变化,从 K_a 变化为 K_r ,形成一个冲击波,称其为干涉波,此波向下游运动,波速公式为:

$$U_e = \frac{Q_a - Q_r}{K_a - K_r} \quad (4.1)$$

干涉措施产生的干涉波和因交通事故产生的三种车流波,相互作用的情况可分为三种。第一种情况为在事故结束之前,干涉波和集结波相遇;第二种情况为事故结束之后,干涉波与集结波相遇之后再与启动波相遇;第三种情况为事故结束之后,启动波和集结波综合作用产生的消散波之后,干涉波再与此消散波相遇。

(1) 第一种情况

事故发生后组织分流,分流产生的干涉波以波速 U_e 向下游移动,此时事故点产生的集结波以波速 U_a 向上游移动,两个波面在 t_g 时刻于 X_g 处相遇,而后两波合成波面 U_g , U_g 的移动方向与分流量的大小有关,如果 U_g 向事故点上游移动,则分流没有起到相应的效果,此种情况不予考虑, U_g 向事故点移动中,通过事故点时,启动波还未出现。如下图所示:

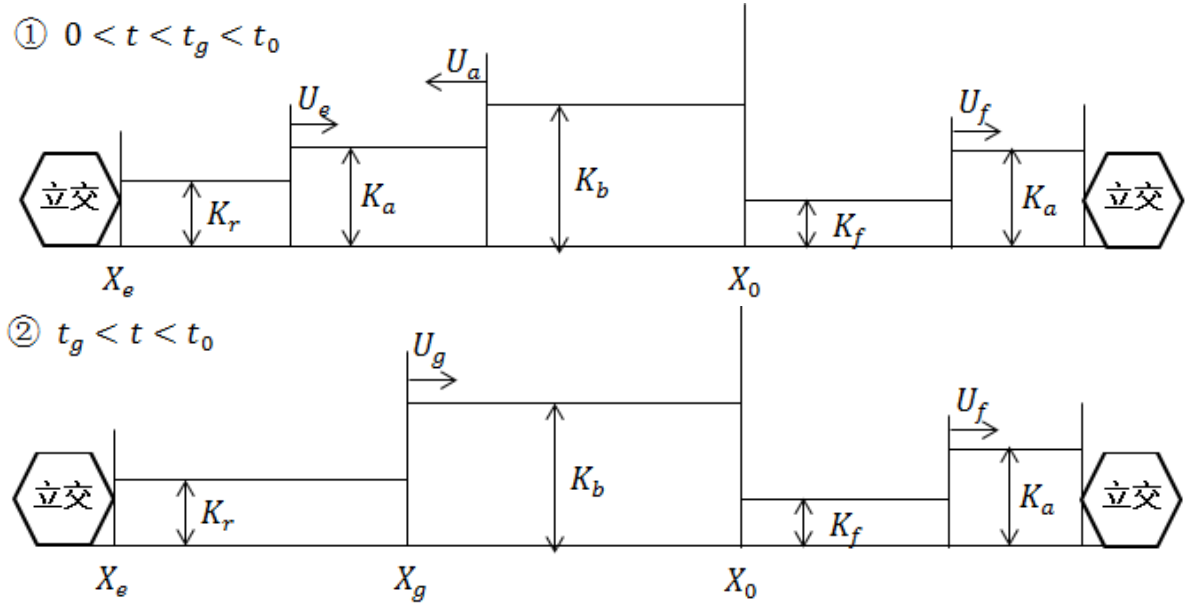


图 4-2 干涉波与集结波相遇前后示意图

这种情况下的车辆延迟时间计算公式为：

$$T_y = \frac{U_a \cdot t}{V_b} - \frac{U_a \cdot t}{V_0} \quad (4.2)$$

分流的目的是就是要让延误时间保持在一定的范围内不在增加,由上述公式可知, T_y 随时间 t 线性增加,只需让 T_y 达到允许最大值时,自变量 t 的斜率为 0,此时 T_y 的函数图像如下:

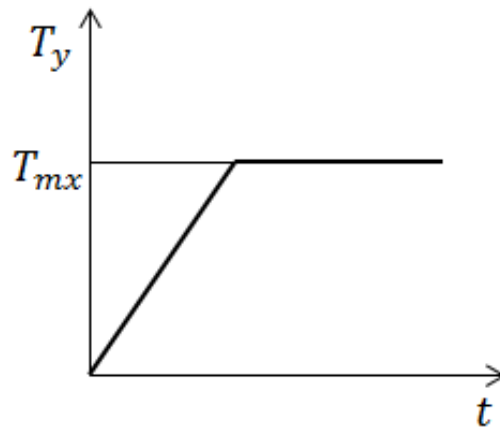


图 4.3 延误时间函数图

由 t 的斜率为 0 可得:

$$\frac{U_a}{V_b} - \frac{U_a}{V_0} = 0 \quad (4.3)$$

所以: $U_a = 0$

分析上述情况可知，分流后干涉波与集结波合成了新的波面，速度为 U_g ，波面在车流的排队末尾，可认为 U_g 代替了原来的波面 U_a ，排队尾部波速 U_g 为：

$$U_g = \frac{Q_f - Q_r}{K_b - K_r} = \frac{Q_f - Q_a + Q_e}{K_b - K_r} \quad (4.4)$$

假设干涉波与集结波相遇的位置，即排队造成最大延误时间时集结波到达的位置，与事故点到上游立交的长度两者之间的较大值为 X_g ，为了保证随着时间推移，允许的最大延误时间不超过绕行增加的时间，或者交通拥堵不影响到上游立交，则干涉波与集结波合成的波速 U_g 必需为0。

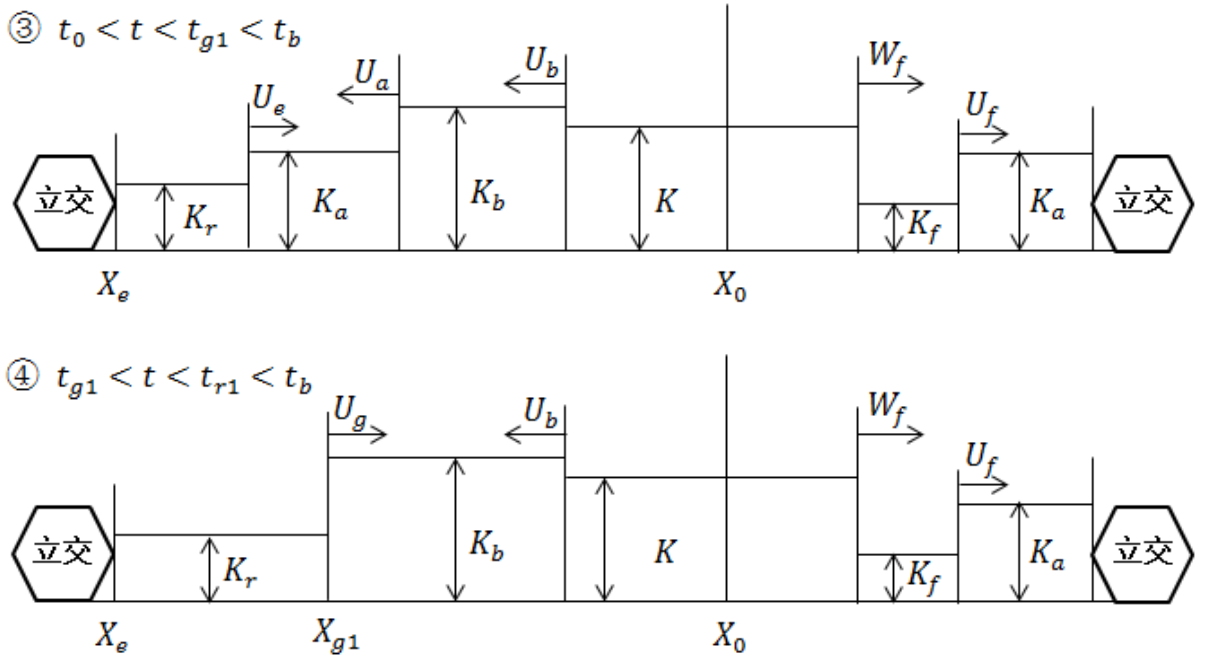
由上式得： $U_g = 0$

则： $Q_f - Q_a + Q_e = 0$

即分流量： $Q_e = Q_a - Q$

(2) 第二种情况

在干涉波与集结波相遇前，事故地点交通流恢复，启动波开始传播。在 t_{g1} 时刻，干涉波以波速 U_e 与以波速 U_a 移动的集结波在 X_{g1} 处相遇，形成新的车流波，波速为 U_g ，在波面 U_g 的下游，启动波正以波速 U_b 向其移动，如果 U_g 向下游移动，则两波于 t_{r1} 时刻在 X_{r1} 处相遇形成车流波，波速为 W_c 。过程如下图：



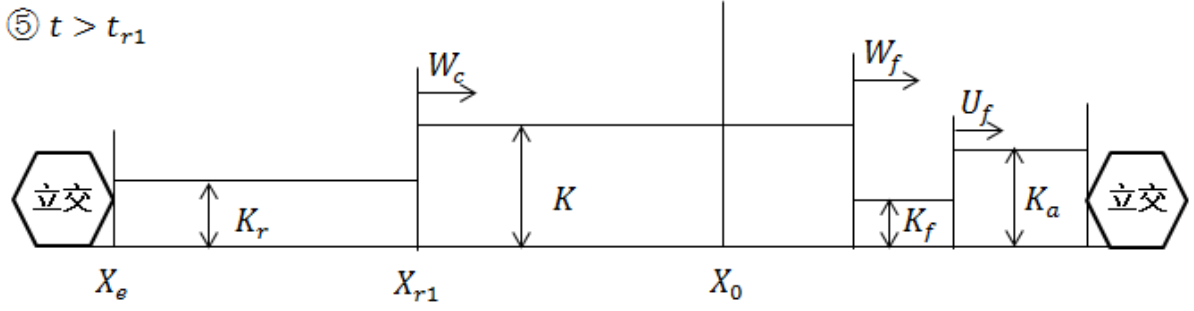


图 4.4 干涉波与集结波相遇后再与启动波相遇情况

根据第三章的结论可知延误时间的计算公式为：

$$T_y = Ai\Delta t + Bt_0 \quad (4.5)$$

其中：

$$A = \frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} + \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f)U_b} - \frac{U_a}{V_0}$$

$$B = \frac{U_a V_b + 3U_b V_b + U_a U_b - V_b^2}{V_b - U_b} - \frac{(U_b + W_f)U_a^2}{(V_q - W_f)U_b V_b} - \frac{(V_b - U_a)U_a}{V_0 V_b}$$

上述公式可知，延误时间 T_r 随 i 呈线性增加趋势，当达到最大允许值时，就需 T_r 的值保持不变，即 i 的系数需为 0，此时 T_r 的函数图像与图 4.3 相同，由自变量 i 的系数为 0 可得： $A = 0$ ，即：

$$\frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} + \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f)U_b} - \frac{U_a}{V_0} = 0$$

设：

$$V_b - U_b = C_1$$

$$\frac{V_q - W_f}{U_b + W_f} = C_2$$

则：

$$\left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right) U_a = \frac{2U_b - V_b}{C_1} + \frac{V_b}{C_2} \quad (4.6)$$

由此可以解出这种情况下，集结波的波面需要反方向以一定的速度移动，分流产生的干涉波与集结波相遇后形成新的波面，此时，不同密度的交通流所形成的分布情况与没有分流前相同，此时可将波 U_g 看作启动波的波面，由上式可得：

$$U_a' = \frac{[(2U_b - V_b)C_2 + V_b C_1]V_0}{V_0(C_1 + C_2) + C_1 \cdot C_2} \quad (4.7)$$

假设 $U_g = U_a'$ ，则：

$$\frac{Q_f - Q_a + Q_e}{K_b - K_r} = U_a' \quad (4.8)$$

由此可以解出分流所需的分流量 Q_e 的值为：

$$Q_e = (K_b - K_r)U_a' - Q_f + Q_a \quad (4.9)$$

(3) 第三种情况

在干涉波与集结波相遇前，启动波已经追上集结波，形成消散波以波速 U_c 向下游移动，干涉波与消散波同向移动，如果 $U_e > U_c$ ，则两波将于 t_{r2} 时刻在 X_{r2} 处相遇。合成波 W_{cr} ，向下游移动，如下图：

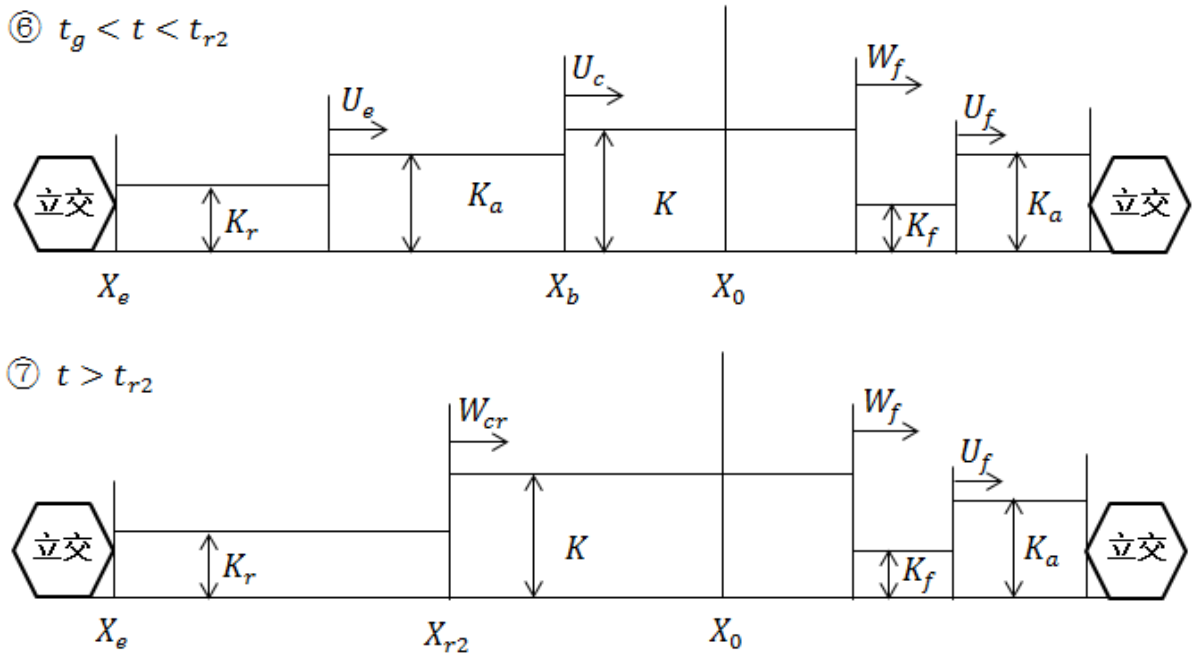


图 4.5 干涉波与消散波相遇情况

这种情况在第三章中所对应的延误公式有两种，一种线性增加，一种线性减小，分流措施需在延误时间增大时即开始，才能有效防止车辆延误超过绕行增加的时间，所以采用线性增加的延误公式：

$$T_y = \left[(W_f - U_c)t + (U_a + U_c)t_b - W_f \cdot t_0 \right] \frac{V_0 - V_q}{(V_q - W_f)V_0} \quad (t_b < t < t_w) \quad (4.10)$$

随着时间的推移，延误时间不断增加，当达到最大允许延误时间后，要求分流干涉的作用已经影响到延误时间中相应波的传播，使延误时间保持不变，由上式可知， T_y 保持不变，则自变量 t 的参数 $(W_f - U_c)$ 应为0，当干涉波与消散波相遇并合成新的波 W_{cr} 时， W_{cr} 的波速应与 W_f 的速度相同，使密度为K的高密度车流的长度不变，导致延误时间不变。利用交通波理论可以得到 W_{cr} 的公式为：

$$W_{cr} = \frac{Q - Q_r}{K - K_r} = \frac{Q - Q_a + Q_e}{K - K_r} \quad (4.11)$$

由： $W_{cr} = W_f$ ，可得： $W_{cr} = W_f$

$$W_f = \frac{Q - Q_a + Q_e}{K - K_r} \quad (4.12)$$

所以得到分流量 Q_e 为：

$$Q_e = (K_b - K_r)W_f - Q_f + Q_a \quad (4.13)$$

通过分析上述三种情况可知，第一种情况下均形成了干涉波与集结波合成的波面，速度为 U_g ，波面在车流的排队末尾，则当排队尾部波速 U_g 为0时，排队车流的长度保持不变，可使事故的延误时间不再增加；第二种情况下同样是干涉波与集结波相遇合成波面，速度为 U_g ，为使延误时间不再增加， U_g 的值就必须等于 U_a ，而 U_a 是由延误时间增加的斜率为0得到的排队末尾波面的速度；第三种情况下是干涉波与消散波相遇，由于消散波是密度为K的高密度交通流的末尾波面，其下游的起始波面速度为 W_f ，为了使两波面之间的距离保持不变，需让干涉波与启动波的合成波面，作为末尾波面的速度与起始波面速度相同，该密度的交通流长度不变，车辆的延误时间不再增加。

在交通事故发生后，通过预报监测等手段快速地得到事故点的车道占用情况，通过对以往交通事故情况的研究，综合平均可得相应车道占用情况下，事故点的流量 Q_f ，

根据不同允许最大延误时间，判断该时刻事故传播的及时情况，通过分析该时刻属于上述三种情况中的哪一种，再由相应的公式计算出分流措施最有效的分流量。

4.2 分流措施的开始时间

由于事故发生发展传播的规律是随时间不断变化的，由时间延误公式可以得出，在事故发生后，随着时间的增加，延误时间是线性增加的。分流措施开始时间的确定也需要有充分的理论根据，过早分流，分流出的车辆绕行时间会大于排队等待通过的时间，对旅客造成不便；过晚分流，事故影响传播扩大，延误时间增加，此时分流也不能保证主线交通流的延误时间和绕行增加的时间相等。所以在适当时间分流出去适当的交通量，才能最有效地保证高速公路运行的通畅性和可靠性。

假设分流产生的干涉波与事故产生的集结波相遇的位置，是排队造成最大延误时间时集结波到达的位置 X_g ，允许最大延误时间等于绕行所增加的时间，而绕行时间 T_r 可由绕行路径和车速得到，为已知量。对驾驶员的最大忍耐时间，因条件限制，尚无确切的公式数据，在后续计算中直接用绕行增加的时间和延误时间作比较，最大容忍时间不做计算。

分流措施产生的干涉波与事故发生产生的两种波之间存在三种情况，不同的关系所对应的延误时间计算方法也不同，在前面讨论了分流的流量大小，三种情况下分流流量的计算均有一个先决假设条件：当事故影响扩散使得延误时间达到最大延误时间时，干涉波正好与排队末尾的波面相遇，对排队车流产生影响，使得延误时间不在增加，本节主要研究何时在上游立交处开始分流，才能使干涉波在恰当时刻正好与末尾波面相遇。

由第三章中得到的延误时间计算公式得知，分流开始的时刻也分为三种情况：

(1) 干涉波与集结波相遇后合成的波不会遇到启动波的情况

这种情况由第三章的延误计算中第一类情况的计算公式可知，在启动波还没有开始时，则不同时刻进入集结波中车辆的延误时间为：

$$T_y = \frac{U_a \cdot t}{V_b} - \frac{U_a \cdot t}{V_0} \quad (4.14)$$

假设此刻排队末尾的车辆，通过事发路段造成的延误时间 T_y ，与其在上游立交处选择分流绕行所增加的行程时间 T_r 相等，则可知：

$$T_r = \frac{U_a \cdot t}{V_a} - \frac{U_a \cdot t}{V_0} \quad (4.15)$$

当延误时间达到允许最大值时所对应的时刻，设为 t_g ：

$$t_g = \frac{V_0 V_a T_r}{(V_0 - V_a) U_a} \quad (4.16)$$

因为 T_r 可根据路网分析提前计算得到，所以由上式得，允许的最大排队长度 X_g 为：

$$X_g = U_a \cdot t_g = \frac{V_0 V_a T_r}{V_0 - V_a} \quad (4.17)$$

假设分流措施实施的分流点距事故发生点的距离为 X_e ，干涉波从上游立交分流点 X_e 开始到达位置 X_g 所用的时间为 T_e ，则：

$$T_e = t_g - t_e \quad (4.18)$$

式中：

t_g —— 干涉波与集结波相遇的时刻，事故发生的时刻为时间 0 点；

t_e —— 分流措施开始的时刻。

由干涉波与集结波的位置关系可知， X_e 的值等于从事故开始到 t_g 时刻，干涉波与集结波各自移动的长度，方程如下式：

$$X_e = U_e T_e + \frac{V_0 V_a T_r}{V_0 - V_a} \quad (4.19)$$

由方程可得 T_e 的值：

$$T_e = \frac{1}{U_e} \left(X_e - \frac{V_0 V_a T_r}{V_0 - V_a} \right) \quad (4.20)$$

则干涉开始的时刻为：

$$t_e = t_g - \frac{1}{U_e} \left(X_e - \frac{V_0 V_a T_r}{V_0 - V_a} \right) \quad (4.21)$$

(2) 干涉波与集结波相遇时启动波已经开始的情况

这种情况下，由第三章中延误时间计算的第二种情况，如果绕行增加时间与最大延误时间相等则：

$$T_r = A_i \Delta t + B t_0$$

其中：

$$A = \frac{U_a + 2U_b - V_b}{V_b - U_b} + \frac{(U_b + W_f)(U_a + V_b)}{(V_q - W_f)U_b} - \frac{U_a}{V_0}$$

$$B = \frac{U_a V_b + 3U_b V_b + U_a U_b - V_b^2}{V_b - U_b} - \frac{(U_b + W_f)U_a^2}{(V_q - W_f)U_b V_b} - \frac{(V_b - U_a)U_a}{V_0 V_b}$$

由上式可以求出 i 的值，假设方程的解为 n ：

$$n\Delta t = \frac{T_r - Bt_0}{A} \quad (4.22)$$

则允许的最大排队长度 X_g 为：

$$X_g = U_a(t_x + n\Delta t) \quad (4.23)$$

分别带入 t_x 和 $n\Delta t$ 的值可得：

$$X_g = U_a \left[\frac{V_b t_0}{V_b + U_a} + \frac{1}{A}(T_r - Bt_0) \right] \quad (4.24)$$

干涉波到达位置 X_g 所用的时间为：

$$T_e = t_g - t_e \quad (4.25)$$

由于干涉波与集结波的位置关系可得方程：

$$X_e = U_e T_e + U_a \left[\frac{V_b t_0}{V_b + U_a} + \frac{1}{A}(T_r - Bt_0) \right] \quad (4.26)$$

则干涉开始的时刻为：

$$t_e = t_g - \frac{1}{U_e} \left(X_e - U_a \left[\frac{V_b t_0}{V_b + U_a} + \frac{1}{A}(T_r - Bt_0) \right] \right) \quad (4.27)$$

(3) 干涉波遇到消散波的情况

干涉分流措施还没有影响到拥挤车流时，消散波已经开始移动，此时的延误时间并未因消散波的产生而减小，而持续增大，不考虑其中延误减小的时间段，延误时间计算公式为：

$$T_y = \left[(W_f - U_c)t + (U_a + U_c)t_b - W_f \cdot t_0 \right] \frac{V_0 - V_q}{(V_q - W_f)V_0} \quad (4.28)$$

由延误时间等于绕行增加的时间可以算出相对应的时刻 t_c 的值：

$$t_c = \frac{1}{W_f - U_c} \cdot \left[\frac{(V_0 - V_q)T_r}{(V_q - W_f)V_0} - (U_a + U_c)t_b + W_f \cdot t_0 \right] \quad (4.29)$$

即 t 时刻干涉波追上了消散波，而由上文可知，消散波在 t_b 时刻在 X_b 处形成并开始移动，所以，同样假设干涉波到达 X_b 处所用时间为 T_e ，表达式同上。由于干涉波与消散波的位置关系可得方程：

$$X_e = U_a \cdot t_b - U_c(t_c - t_b) + U_e T_e \quad (4.30)$$

带入 $T_e = t_c - t_e$ 可得：

$$t_e = t_c - \frac{1}{U_e} [X_e - U_a \cdot t_b + U_c(t_c - t_b)] \quad (4.31)$$

通过对以上三种情况的分析，即可根据事故道路的具体情况，以及路网中相邻道路的运行情况来准确分流措施开始的时间。

在事故发生后，根据事故占有车道情况、道路原有交通流状态、选定的最佳分流路线情况计算出相应分流量的大小，可得出干涉波的波速，进而根据本节公式分流开始时刻。通过以上的这些步骤就可以基本上保证事故发生后，道路不会因为事故造成的拥堵而产生大范围的车辆延误事件。

4.3 分流措施的结束时间

在高速公路上，从有事故发生开始，交通出现拥挤，为了保证道路拥堵尽快消散，采取分流措施，在本章的前两节内容中，分别得出了分流措施所须知道的分流流量大小和分流的最佳开始时间，而在随着拥堵车辆的逐渐离去，事故所造成的延误时间达到最大值后开始减小，而由于分流措施的影响，实际的延误时间被控制在一个合理的范围内，一旦离去车辆增多，延误时间小于所控制的值时，车辆直接通过该路段的时间将小于绕行分流所用的时间，此时即为分流的结束时间。

在讨论事故结束时间问题上，同样分为三种情况，下面就分别讨论三种情况下的事故结束时间。

(1) 事故现场清理完毕前

与上节第一种情况向对应，交通事故造成的拥挤排队车辆的范围控制在一定的长度内，同时延误时间也等于允许值，这种状态将一直持续下去，直到出现新的交通扰动现象，即事故清理完成，车道恢复通行，启动波开始影响上游车流，同时，事故点

的下游也开始出现较高密度的离去车流，此部分的车流同样存在时间上的延误，因此总的延误时间并没有因为事故现场的清理而减小，相反可能还会缓慢增大，此时的延误时间延误计算公式如下：

$$T_y = A i \Delta t + B t_0$$

其中参数A、B的表达式同上，但与原本情况不同的是，由于分流措施的影响，原来的集结波波面的速度 U_a 为0，则A、B的表达式变为：

$$A = \frac{2U_b - V_b}{V_b - U_b} + \frac{(U_b + W_f)V_b}{(V_q - W_f)U_b}$$

$$B = \frac{3U_b V_b - V_b^2}{V_b - U_b}$$

其中A可以整理为：

$$A = \frac{U_b}{V_b - U_b} - 1 + \frac{(U_b + W_f)V_b}{(V_q - W_f)U_b} \quad (4.32)$$

由于事故发生后，事故点的通行量很小，才会造成拥堵，由 W_f 的公式可知， $W_f < V_q$ ，但是两者的差值很小，否则就不会造成严重的交通拥挤，显然 $A > 0$ 。所以此时延误时间还再增大，不宜结束分流，直到启动波开始后，进入第二种情况进行计算。

(2) 消散波形成之前

在事故发生后，集结波在前，启动波在后，延误时间线性增加，通过分流干涉的影响，使集结波和干涉波的合成波沿车辆行驶方向向下游移动，以此保证延误时间不变，合成波的速度为：

$$U_a' = \frac{[(2U_b - V_b)C_2 + V_b C_1]V_0}{V_0(C_1 + C_2) + C_1 \cdot C_2} \quad (4.33)$$

其中参数：

$$C_1 = V_b - U_b$$

$$C_2 = \frac{V_q - W_f}{U_b + W_f}$$

由上文已知干涉波与集结波的相遇时间为：

$$t = t_x + n\Delta t \quad (4.34)$$

其中 n 为 i 的解, 值为:

$$n\Delta t = \frac{T_r - Bt_0}{A} \quad (4.35)$$

此时刻集结波与启动波两波面之间的距离为:

$$L = (t_x + n\Delta t)U_a - (t_x + n\Delta t - t_b)U_b \quad (4.36)$$

则 t 时刻之后, 启动波与合成波相遇的时刻为:

$$t' = t + \frac{(t_x + n\Delta t)U_a - (t_x + n\Delta t - t_b)U_b}{U_b} \quad (4.37)$$

此后合成波与启动波又合成新的交通波, 向下游移动, 由波速的计算公式及流量-密度关系图, 可直观得到上述先后出现的三个波之间的关系为:

$$U_c < W_c \cong W_f \quad (4.38)$$

W_c 定义为干涉波与集结波合成波再遇到启动波后合成的交通波速度, 由于 W_c 和 W_f 的值相差不大, 假设两波速相同, 延误时间不变, 这种状态直到波 W_f 到达下游立交处为止, 此时刻 W_c 波面处的车辆, 在到达上游分流点的时刻就为分流结束的时刻。

假设分流点到下游立交处的距离为 L_E , 车辆从分流点到 W_c 波面所用过的时间为:

$$T_E = \frac{L_E - (t_x + n\Delta t)U_a - (t_x + n\Delta t - t_b)U_b}{V_0} \quad (4.39)$$

W_f 波面到达下游立交所用的时间为:

$$T_f = \frac{L_E - X_e}{W_f} \quad (4.40)$$

W_f 的起始时刻为 t_0 , 综合分析可得出分流结束时刻应为:

$$t_j = t_0 + T_f - T_E \quad (4.41)$$

(3) 消散波形成之后

当消散波形成后, 根据上节结论, 为了保证延误时间不增加, 计算出相应的分流流量和分流时间, 此后, 该路段上密度为 K 的交通流保持一定长度不变向下游移动,

直到前波面遇到下游立交位置，此后延误时间开始减小，与上述分流结束时间 t_j 的计算情况相同，但 T_E 的值有改变。

在消散波形成时刻 t_b 之后计算出了延误时间允许值所对应的时刻 t_c 的值，则在 t_c 时刻密度为 K 的交通流的长度应为：

$$L_c = U_a \cdot t_b + W_f(t_b - t_0) + (W_f - U_c)(t_c - t_b) \quad (4.42)$$

在此种情况下：

$$T_{E1} = \frac{L_E - L_c}{V_0} \quad (4.43)$$

W_f 波面到达下游立交所用的时间为：

$$T_f = \frac{L_E - X_e}{W_f} \quad (4.44)$$

这种情况下的分流结束时间为：

$$t_j = t_0 + \frac{L_E - X_e}{W_f} - \frac{L_E - L_c}{V_0} \quad (4.45)$$

综上所述，在讨论分流措施结束的时刻时，分三部分分析不同情况下分流措施结束时刻的计算方法，通过分流流量的计算、分流开始时间的计算、分流结束时间的计算，为高速公路分流缓堵措施提供了基本的理论依据，本文的所有计算都是在理想条件下的结论，计算结果都是在一定条件下完成的，在实际的交通状况中，由于存在驾驶员驾驶行为、路网完善程度、高速公路管理经济性等各方面因素影响，分流措施的实施就有较强的实际区别性，本章内容就是为分流提供最基本的理论计算依据，具体实施时，高速公路管理者还需要结合当地实际情况，增加相应的影响因素。

4.4 蚁群算法在分流措施中的应用

蚁群算法是上世纪 80 年代末，由意大利的科学家 Dorigo M 等人首次提出的一种生物仿生的优化算法，后来经过人们的不断完善和改进，当今与遗传算法(Genetic Algorithm,GA)、神经网络、禁忌搜索(Tabu Search, TS)等优化算法一同被人们广为引用，其本身具有鲁棒性、自组织特性、真反馈和负反馈特性等，在解决车间调度问题、指派问题、旅行售货员问题、TSP 问题等优化选择方面有较为明显的优势^[26]。

4.4.1 蚁群算法的基本原理

蚁群算法的基本原理，是模拟仿生了昆虫世界中的族群生活类昆虫蚂蚁的觅食行为得来的。昆虫学家发现蚂蚁是一种具有很强社会性和组织性的群居性昆虫，每个蚂蚁都有自己特定的职责，所有的蚂蚁都会非常有纪律性的完成觅食、筑巢、迁移等活动。在蚂蚁觅食的过程中，每个蚂蚁最开始都是从巢穴中出来，随机向一个方向搜索寻找食物，如果找到食物或者搜寻较长时间未果而返回。

研究发现，蚂蚁的视觉很差，彼此之前的交流是通过其自身分泌的一种特殊物质来交流的。每只蚂蚁在外出觅食的过程中，会边走边释放一种信息素来标记自己走过的路线，找到食物后会沿着原路返回，召集更多的蚂蚁去搬食物。如果同一个食物有不同的蚂蚁走过不同的路径寻找到，则其返回蚁巢召集的帮手出蚁巢后，会随机选一条标记过能到达食物点的路径。标记路径的信息素会随着时间慢慢挥发，如果选择不同路径的蚂蚁数量相同，通过不同路径留下的信息素浓度也是相同的，但是较长路径上的蚂蚁往返一次的时间较长，该条路径上的信息素就挥发的较多。在回巢后出来重新选择路径时，蚂蚁会偏向于选择信息素浓度高的路径，如此往返若干次之后，较长路径上的信息素浓度越来越小，而短路径上的信息素浓度越来越高，最终大多数的蚂蚁都会走最短的路径去搬食物。

这整个过程中，蚁群中的所有蚂蚁从开始的若干条道路中，选择出最短路径的方法就是蚁群算法通过模拟蚂蚁觅食行为的基本原理。

4.4.2 蚁群算法的模型简介

蚁群算法自提出以来，经过不断的完善和改进后出现了多种不同的求解模型，本文只简单介绍基本蚁群算法的模型构建方法。通过蚁群算法的原理可知，蚂蚁在觅食过程有几个关键因素：蚁群的数量、起始点和目标点、选择路径原则、信息素的启发因子、信息素的挥发系数、所有候选路径信息。则蚁群算法的基本步骤如下：

第一步：选择一个道路节点为起始点，将蚂蚁放到该点；

第二步：根据信息素的启发因素和信息素浓度确定选择不同方向道路的概率，通过迭代的方法将未选择的路径添加到整个候选路径选表中，直到所有路径都已选择；

第三步：返回最初的出发点。

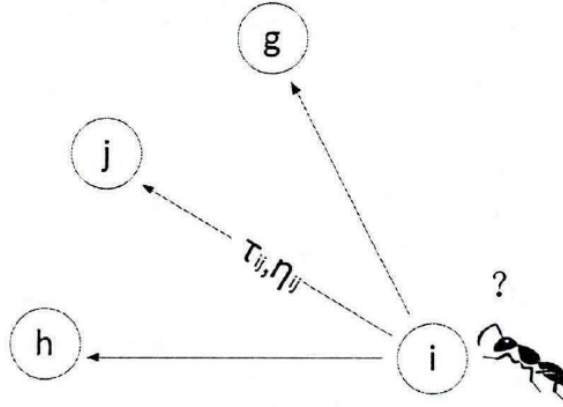


图 4.5 蚂蚁选择路径

如上图所示，处于节点 i 的蚂蚁从未访问过的下一个节点中，选择一个节点继续访问，而选择不同节点的依据是路径上的信息素 τ_{ij} 和启发信息 η_{ij} 的函数。在开始时，所有路径上的信息素均相等，蚂蚁 $k(k = 1, 2, 3, \dots, m)$ 在觅食过程中根据不同路径上信息素浓度和启发因子来决定路径的选择， $P_{ij}^k(t)$ 表示 t 时刻处于节点 i 的蚂蚁 k 选择节点 j 为下一个要访问的节点的概率， $P_{ij}^k(t)$ 的表达式如下式：

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha (\eta_{ij})^\beta}, & j \in N_i^k \\ 0, & j \notin N_i^k \end{cases} \quad (4.46)$$

其中 τ_{ij} 为路径上的信息素浓度，它直接影响蚂蚁从一个节点到下一个节点时对路径的喜好程度，可以称为期望度。设启发信息因素 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ， d_{ij} 为两个节点之间的距离，启发信息因素 η_{ij} 与两节点之间的距离呈反比，距离越大，选择该路段的概率越小。设定 α 、 β 分别为信息浓度因素 τ_{ij} 和启发信息因素 η_{ij} 的相对影响系数，决定了两个因子对路径选择概率的影响程度。 N_i^k 表示蚂蚁 k 在节点 i 处下一步可以直接访问没有到达过的所有节点的集合， N_i^k 的值将在蚂蚁选择过程中做出相应的调整。

当网络中的所有蚂蚁都搜寻完路径之后，各个节点之间路径上的信息因素 τ_{ij} 会做出相应的改变，公式如下：

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{m=1}^k \Delta\tau_{ij}^m \quad \forall (i, j) \in L? \quad (4.47)$$

上式中 ρ 为信息素的挥发率，取值在(0,1)之间， ρ 的存在使得较优路径上的信息素浓度明显较高，突出路径的优化选择，上式中的 $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示蚂蚁 k 在其所经过路径上留下的信息素，其定义公式如下：

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 1/L_k & \text{路段}(i,j) \text{在路径} T^k \text{上} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (4.48)$$

其中 L_k 表示蚂蚁 k 建立的路径 T^k 的长度，即： T^k 中所有边的长度之和。由上式可以看出，蚂蚁构建的路径越短，路径上的各边获得的信息素量就会越多^[27]。

4.4.3 蚁群算法在路网分流中的应用

蚁群算法是一种在整个网络中寻找最优路径的优化方法，若将网络替换成路网，就可将蚁群算法用在整个路网的路径选择中，包括高速公路和一、二级公路，其中互通式立交为节点，基本路段为边，将车辆比拟为蚂蚁，就可将两节点之间最优路径选择问题引入到蚁群算法当中来。

当路网中某一路段发生交通事故，事故造成的车流拥挤蔓延到上游，导致部分路段无法正常通行，原有路径被打断，就需在路网中寻找出发点到目的地的替代路径，通过运用蚁群算法，设定相应的参数，通过程序计算就可得到需要的最短替代路径。

对需要研究的路网整体分析，与 GIS 系统相结合，得出整个路网的数据信息禁忌表，寻找众多路径中的较短路径，由于交通事故发生后，大量车流拥堵在道路上，如果需要分流，分流的交通量则会很大，如果只向一条道路上分流，则分流量可能会超出分流道路的通行能力，造成新的拥堵。所以，运用蚁群算法找出路网中多条较短路径，本文设定为最优的前三条路径，作为分流措施的分流路径，最优路径的寻找步骤如下：

- (1) 选取始发节点和目的节点。在路网中发生交通事故后，由事故拥堵长度和拥堵程度来选取上游分流点和下游的目标点；
- (2) 提取路网信息系统中的路段信息；
- (3) 使用基本蚁群算法，设定相应的信息素和启发信息素参数 α 、 β ，多次迭代寻找出路径中最短的前 6 条路径；

- (4) 结合各条路径上的实际交通量和路径通行能力,计算出通过每条路径所用行驶时间;
- (5) 综合考虑各条道路路径长短、承载能力、安全状况、组织管理的方便性等因素,设置相应因素的权重比值,最终计算出最优的前三条路径为分流措施使用过的分流路径。

本节内容主要介绍了蚁群算法的来源和基本原理,分析讨论了基本蚁群算法的模型公式并将其运用到高速公路网事故应急分流措施的实施方案中来,提出了相应的最优路径的选取步骤。由于时间关系和本人能力有限,未能根据上述理论对路网中的分流路径选择问题上实现具体操作模拟,希望在以后的研究中得以完善。

4.5 小结

本章以交通事故造成的延误时间为基础,分析了不同情况延误控制的分流措施的实施,根据三种延误时间的计算方法,得出相对应的三种分流流量计算方法;三种分流措施开始时刻的计算方法;三种分流结束时刻的计算方法;提出蚁群算法在分流路径选择中的应用方法,为分流措施的具体实施提供了基本的理论支撑。

由于论文所依托项目开始时间较短,相关资料数据还再收集中,无法支持本论文进行实例验证,以后再后续的工作将运用本文理论在实际分流措施中,进行验证和完善。

总结

主要研究成果

(1) 揭示并阐述高速公路交通事故影响的特性、传播规律及其内在机理等, 为有效控制交通事故影响传播提供了理论依据。

(2) 建立交通事故条件下, 事故影响路段车辆通过所造成的延误时间计算模型, 详细分析不同时刻进入事故路段的车辆所经历的不同状态的交通流, 通过延误时间计算模型得到车辆在事故路段的延误规律, 进一步补充了交通波模型下的事故传播规律理论。

(3) 通过对事故传播规律的深刻分析, 建立起应对突发交通事故的应急分流措施实施方案, 分析了不同情况下分流措施所需采用的分流流量大小、分流开始时间和分流结束时间, 为高速公路的安全运营管理提供了有效的理论支撑。

研究的缺陷之处与进一步研究方向

(1) 由于本文所依托项目开始时间较短, 各项数据资料还不健全, 正在收集中, 暂时无法支撑本文完成一个完整的验算实例, 为保证数据的真实性, 本文未做出实例应用, 希望在后续工作中, 应用完整数据对本文研究成果进行验证。

(2) 对于延误时间计算之后提出的绕行方案问题, 文中只是做了一些理论的分析, 提出了需要考虑因素, 但没有通过相应的调查问卷和数据分析得到准确的结论, 无法给出各种因素权重系数, 未能得到一套可靠的绕行提示方案。在以后的研究中希望能对实际的各种因素做综合分析, 从而制定出一套事故预报及绕行提示的可靠方案。

(3) 在研究分流措施的三个方面时, 只是得到了理论上分流的最佳流量和开始时间, 但分流作为高速公路管理者的一种组织措施, 本文只考虑了理论的结果, 没有从管理者的角度综合考虑道路网的实际情况, 措施实施的经济成本, 和措施的实际可操作性等问题。在以后的研究过程中, 希望通过对各种实际问题的考虑和处理, 使分流措施理论能很好的运用到实际管理中。

参考文献

- [1] <http://www.bk.baidu.com>
- [2] <http://www.chinahighway.com> 2014-09-10
- [3] <http://www.chinanews.gov.cn> 2014-10-20
- [4] 王殿海.交通流理论[M].北京:人民交通出版社,2002
- [5] Michalopoulos P.G, Pishaody V.B , Derivation of delays based on improved macroscopic traffic models[J].Transportation Research,1981,15B:299-317
- [6] 郑黎黎.高速公路交通事件排队长度的模糊预测[C].第一届同济交通论坛文集,上海:2004: 70-77
- [7] 宫晓燕,汤淑明,王知学等.高速公路交通流建模综述[J].交通运输工程学报,2002,2(1):75-78
- [8] 撤元功,胡郁葱.高速公路动态交通流的神经网络模型[J].华南理工大学学报,2002,30(8):91-95
- [9] Lawson,T.W,D.J.Lovell and C.F.Daganzo. Using the Input-Output Diagram to Determine the Spatial and Temporal Extents of a Queue Upstream of a Bottleneck [J].In Transportation Research Record 1572,TRB,National Research Council ,Washington,D.C,1997
- [10] SheuJB,Chou YH. Stochastic modeling and real-time prediction of incident effects on surface traffic congestion[J].Applied Mathematical Modeling,2004,28:445-468
- [11] 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
- [12] 王建军,交通事件和干涉作用影响下的高速公路车流波分析[J].重庆交通学院学报,2006,25(6):104-107
- [13] 龙建成,城市道路交通拥堵传播规律及消散控制策略研究[D].北京:北京交通大学博士学位论文,2009
- [14] 王永明,非常态事件影响下的交通组织规划及交通流模拟研究[D].北京:北京交通大学博士学位论文,2009

- [15] 张敖木翰.突发事件下非重复性交通拥堵传播规律与控制策略研究[D].北京:北京交通大学博士学位论文,2012
- [16] 吴正.低速混合型城市交通的流体力学模型[J].综合交通运输及物流,1994
- [17] 陈斌,魏郎.高速公路意外事件影响下的车辆跟驰模型[J].交通运输工程学报,2006,6(3):103-106
- [18] 张晶晶.路网环境下高速公路交通事故影响传播分析[D].西安:长安大学硕士学位论文,2010
- [19] 王俊骅,赵新勇.高速公路网突发交通事件时空影响预测模型[J].交通信息与安全,2013,1(31):77-82
- [20] 徐程,陈晓明.交通流速度-密度模型特征分析[J].公路交通科技,2014,31(3):114-117
- [21] 王炜,过秀成.交通工程学[M].南京:东南大学出版社,2000
- [22] 范俊玲.高速公路事故影响传播研究[D].西安:长安大学硕士学位论文,2009
- [23] 王建军,周伟.线性模型下高速公路交通事故和干涉车流波模拟理论研究[J].西安公路交通大学学报,1998:283-289
- [24] 张恩亮,肖贵平.交通环境对驾驶员心理的影响分析及对策研究[J].公路交通科技,2006,11:164-165
- [25] 付鹏勃,吕永波.高度公路意外事故所致拥堵的消散策略研究[D].北京:北京理工大学学报,2010
- [26] 刘波.蚁群算法改进及应用研究[D].秦皇岛:燕山大学博士学位论文,2006
- [27] 王茜茜.基于信息熵的加权蚁群算法的研究与应用[D].昆明:昆明理工大学硕士学位论文,2012

致谢

本文是在我的导师杨少伟教授的悉心指导下完成的。导师不仅在专业领域给予我明确而清晰的指导，更以严谨求实的治学理念、睿智从容的工作方式，为我树立了追求的坐标，是激励我不断进取的一笔宝贵精神财富！我将牢记恩师的教诲，不断督促自己在今后的工作和学习中努力进取。此外还要感谢许金良老师在论文和学术问题上对我的指导和帮助，希望在以后的学习工作中不辜负老师们对我的期望。

在此，还要感谢鲁娥师姐以及同门的其他兄弟姐妹们在课题研究过程中所给予的指导和建议，师兄师姐们对科研学术的严谨和对学习的热情都值得我认真的学习，为自己在以后的学习生活树立了优秀的榜样，在此，我向师兄师姐们表示最诚恳的感谢。

感谢读研期间给予我帮助和支持的其他老师、同学和朋友，在我的学习中给予了莫大的帮助，你们无私的相助是我完成论文的重要保证。