



申请同济大学工学博士学位论文

灾变条件下道路网运营 安全管理及应急处置研究

培养单位：交通运输工程学院

一级学科：交通运输工程

二级学科：道路与铁道工程

研 究 生：王晓飞

指导教师：郭忠印 教授

二〇〇八年二月



A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

**Research on Operation Safety
Management and Emergency Disposal
against Disastrous Conditions of
Freeway Corridor**

School/Department: School of Transportation
Engineering

Discipline: Transportation Engineering

Major: Road and Railway Engineering

Candidate: Wang Xiaofei

Supervisor: Prof. Zhong-yin Guo

FEBRUARY, 2008

灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置研究

王晓飞

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：

年 月 日

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

在“五纵七横”国道主干线和国家高速公路网系统规划下，我国公路运输网由疏到密，逐步形成和完善。但因灾害性天气、不良交通状况和交通事件等引发公路交通拥挤、交通中断和交通延误以及伤亡惨重的交通事故也随着路网里程的增多而增加。造成这种情形的很大一部分原因在于管理水平没有跟上路网建设的发展水平。因此，有必要适时、超前地研究路网运营安全管理问题。

论文以通道路网为研究对象，以路网运营安全为基本目标，依托济青南线相关路网，在各类灾变条件下（灾害性天气事件、不良交通状态事件、交通事件），研究事件影响范围内路网运营安全管理及应急处置方法，对部分关键技术进行深入理论研究，并将结果应用于青岛～新疆红旗拉甫公路青岛至莱芜段（以下简称济青南线）工程实践。

高速公路通道运营安全管理路网构建方面，在分析影响道路运营安全的三类灾变事件基础上，提出高速公路通道管理路网确定的基本原则，并提出完整的路网构建流程和管理单元划分方法。

在高速公路管理单元属性分析方面，全面分析了影响道路运营安全以及影响运营管理决策的各类静态属性和动态属性，建立了静态属性矩阵和动态属性矩阵。

在灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置研究方面，主要包括以下几个方面的内容：

首先，提出对策类型和决策依据（灾变事件类型、灾变事件等级、交通流状况、运营安全性、用户行程时间）；

然后，重点分析表征管理单元运营安全性的实时安全可靠度确定方法，和作为路阻函数的管理单元行程时间确定方法。实时安全可靠度确定方法根据交通流状态不同而不同，自由流下采用模糊综合评判的方法，主要考虑道路设施因素、交通工程及沿线设施因素和环境因素；非自由流下实时安全可靠度包括静态安全可靠度和动态安全可靠度，静态安全可靠度仍采用模糊综合评判方法，动态安全可靠度以单车行车风险为基础，采用可靠性图能分析方法。行程时间的计算方法分为未发生交通事件和发生交通事件两种情形；

其次，对各类灾变事件的影响范围确定方法进行了探讨。灾变事件的影响

范围分为两类：主线高速公路事发单元：出现灾害性天气、不良交通状况、交通事件等灾变事件的主线高速公路管理单元；事发点上游单元：上游事件影响范围。

再次，针对高速公路上各类灾变事件的不同影响范围，针对性的采取实时安全管理对策，并对各类管理对策研究决策模型，即灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置决策模型研究。对于第一类影响范围，根据灾变事件类型、事件等级和实时交通流状况，提出相应的车速控制、车道控制、限流管理等对策，以防止交通事件的发生或再发生。对于第二类影响范围，以实时安全可靠度为基本约束条件，行程时间为路阻函数，研究基于运营安全的通道路网交通诱导决策模型。

最后，设计简单路网，举例说明决策流程。

工程应用方面，结合济青南线依托工程，以济青南线为主线高速公路，将灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置研究成果应用于工程实践。

关键词：灾变条件，高速公路通道路网，属性矩阵，运营安全，安全可靠度，行程时间，对策，决策，交通诱导，k 条可绕行路径

ABSTRACT

With the systemic plan and layout of “5 Vertical and 7 Horizontal” main-line highway and national Freeway Network, highway transportation network of China is steadily improved and perfected. Unfortunately, highway traffic jam and traffic interruption and traffic delay, which caused by disaster weather, bad traffic status and traffic events, are becoming more and more serious. These highway safety problems mainly lie in the disparity between low-level management measure and rapid highway network construction. Therefore it is urgent to study on timely and advance highway network operation safety management system.

Relied on the freeway corridor based on Ji-Qing Nan Xian, regarded freeway corridor operation safety as basic object, operation safety management and emergency disposal against disastrous conditions (disaster weather, bad traffic status, traffic events) within influenced network has been discussed. Much deep research has been taken out on some key technologies, and the results have been applied to Qingdao-Laiwu freeway (Ji-Qing Nan Xian) .

At establishment of freeway management corridor, basic principle of network determination and complete process of network establishment and management unit division has been put forward.

At analysis of freeway management unit property, static and dynamic properties, which influencing highway operation safety or decision-making, have been comprehensively analyzed, static and dynamic matrixes have been established.

At research on operation safety management and emergency disposal against disastrous conditions of freeway corridor, the main content is as follows:

Firstly, the kinds of countermeasure and foundation of decision-making (disaster event type, disaster event severity, traffic condition, operation safety, travel time) have been put forward;

Secondly, determination method of unit real-time safety reliability (which indicating unit safety) and unit travel time (as impedance functions) have been discussed. Determination method of unit real-time safety reliability varies at different

traffic condition. For free flow, fuzzy comprehensive judgment has been applied, and highway facility, traffic and circumstance factors have been taken into consideration. For non-free flow, unit real-time safety reliability consists of static safety reliability and dynamic safety reliability. Fuzzy comprehensive judgment has been applied to determine static safety reliability. Based on single vehicle driving risk, reliability graph analysis has been applied to determine dynamic safety reliability. Travel time determination method is divided into two situations: unit without traffic event and unit with traffic event;

Thirdly, determination method of disaster event influencing scope has been studied. Disaster event influencing scope is divided into two kinds: unit with disaster event within the main freeway and upstream unit which is influenced by the spread traffic flow.

Then, targeted real-time countermeasure has been put forward against different kinds of disastrous events to different influencing scope, and different decision-making model has been discussed. To the unit with disaster event, in order to prevent traffic event occurrence or reoccurrence, countermeasure determination method has been put forward according to event type, severity and traffic condition. To another kind of scope, taking real-time safety reliability as basic constraint condition, taking travel time as impedance function, dynamic route guidance decision-making model of corridor has been researched on.

Finally, simple network has been designed to illustrate decision-making process.

At project application, results of operation safety management and emergency disposal against disastrous conditions of freeway corridor have been used in the corridor of Ji-Qing Nan Xian(the main freeway).

Key Words: disastrous conditions, freeway corridor, property matrix, operation safety, safety reliability, travel time, countermeasure, decision-making, traffic Guidance, k-diversion paths.

目录

第 1 章 引言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 国内公路网建设现状.....	1
1.1.2 国内道路运营安全现状.....	1
1.1.3 研究的必要性	3
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 国内外相关管理系统的研究现状.....	4
1.2.2 国内外灾变条件下的管理对策研究现状.....	13
1.2.3 动态路径诱导系统的国内外研究现状与发展.....	17
1.3 本文主要研究内容.....	20
1.3.1 高速公路通道运营安全管理路网构建.....	21
1.3.2 高速公路通道路网管理单元属性分析.....	21
1.3.3 灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置决策依据研究.....	22
1.3.4 灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置决策模型及算法.....	22
1.3.5 工程应用	22
1.4 技术路线.....	23
第 2 章 高速公路通道运营安全管理路网构建.....	24
2.1 高速公路通道管理路网的确定.....	24
2.1.1 影响道路运营安全的灾变事件.....	24
2.1.2 高速公路通道管理路网确定需考虑的因素和基本原则.....	28
2.1.3 高速公路结点的确定.....	30
2.1.4 高速公路并行辅助线的确定.....	30
2.2 路网管理系统的构成——管理单元划分.....	34
2.2.1 划分目标和划分层次.....	35

2.2.2	管理单元划分方法.....	36
2.3	路网拓扑结构的建立.....	38
2.3.1	立交枢纽的表示方法.....	38
2.3.2	并行辅助线与高速公路组成的通道表示方法.....	39
2.3.3	路网图论模型的表示方法.....	40
2.3.4	路网的矩阵表示方法.....	41
2.4	本章小结.....	42
第3章	高速公路通道路网管理单元属性分析.....	43
3.1	静态属性.....	43
3.1.1	管理单元道路设施类型.....	44
3.1.2	普通路段设施属性集.....	44
3.1.3	桥梁设施属性集	47
3.1.4	隧道设施属性集	48
3.1.5	立交设施属性集	51
3.1.6	管理单元交通工程及沿线设施属性.....	54
3.1.7	其它静态属性	55
3.1.8	静态属性矩阵	57
3.2	动态属性.....	57
3.2.1	管理单元交通事件等级属性.....	59
3.2.2	管理单元水膜厚度.....	65
3.2.3	管理单元路面附着系数属性.....	65
3.2.4	管理单元驾驶员可视距离.....	68
3.2.5	管理单元驾驶员反应时间属性.....	68
3.2.6	高速公路管理单元通行能力属性.....	72
3.2.7	动态属性矩阵	76
3.3	本章小结.....	77
第4章	灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置决策依据..	78

4.1	灾变事件下通道路网运营安全管理及应急处置对策类型.....	78
4.2	灾变事件下通道路网运营安全管理及应急处置决策依据.....	79
4.3	管理单元实时安全可靠度.....	80
4.3.1	自由流下管理单元运营安全可靠度确定方法 P1	81
4.3.2	非自由流下管理单元运营安全可靠度确定方法 P2	87
4.4	用户行程时间.....	95
4.4.1	未发生交通事件情形下管理单元行程时间.....	95
4.4.2	发生交通事件情形下管理单元行程时间.....	96
4.5	算例.....	101
4.6	本章小结.....	105
第 5 章 灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置决策模型与算		
	法.....	106
5.1	主线高速公路灾变事件影响范围研究.....	106
5.1.1	灾变事件的辨识及等级判定.....	107
5.1.2	事发单元上游影响范围确定.....	108
5.2	主线高速公路事发单元运营安全管理及应急处置对策.....	116
5.2.1	灾害性天气下事发单元运营安全管理对策.....	117
5.2.2	不良交通状况下事发单元运营安全管理对策.....	122
5.2.3	交通事件下事发单元运营安全管理对策.....	123
5.2.4	事发单元可逆车道交通组织对策及决策.....	124
5.3	基于运营安全的通道路网交通诱导决策模型.....	126
5.3.1	交通诱导范围	128
5.3.2	路径诱导决策模型.....	130
5.4	算例.....	139
5.5	本章小结.....	141
第 6 章 工程应用.....		143
6.1	工程背景	143

目录

6.2 路网构建	143
6.2.1 路网的确定	143
6.2.2 管理单元划分	144
6.2.3 拓扑结构的建立	144
6.3 管理单元属性分析	146
6.4 高速公路通道路网运营安全管理及应急处置对策应用	146
6.4.1 济青南线事发单元运营安全管理对策库.....	146
6.4.2 高速公路通道路网交通诱导管理对策应用.....	146
第 7 章 结论与展望.....	157
7.1 主要内容及结论.....	157
7.2 本文创新点.....	160
7.3 发展与展望.....	161
致谢.....	162
参考文献.....	163
附录 A	169
附录 B	172
个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果.....	175

第 1 章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 国内公路网建设现状

据交通部最新的《2006 年公路水路交通行业发展统计公报》显示,截至 2006 年底,全国公路总里程达 345.70 万公里。路网结构进一步改善,上述公路里程中,国道 13.34 万公里,省道 23.96 万公里,县道 50.65 万公里,乡道 98.76 万公里,专用公路 5.80 万公里,村道 153.20 万公里,分别占公路总里程的 3.9%、6.9%、14.7%、28.6%、1.7%和 44.3%。2006 年底,全国高速公路总里程达到 45335 公里,其中,东部地区高速公路 20279 公里,中部地区高速公路 13339 公里,西部地区高速公路 11717 公里。2006 年,全国新增高速公路通车里程 4334 公里,其中,河南、浙江、江苏和陕西四省全年新增高速公路通车里程均超过 300 公里。^[1]2007 年,全国的高速公路里程已达到 5.3 万公里。

不仅如此,在“五纵七横”国道主干线系统规划的指导下,2005 年 1 月份交通部出台了《国家高速公路网规划》,规划了 7 条首都放射线、9 条南北纵向线和 18 条东西横向线,简称为“7918 网”,到 2010 年,国家高速公路网总体上将实现“东网、中联、西通”的目标。从 2005 年起到 2030 年,国家将斥资 2 万亿元,新建 5.1 万公里高速公路,使我国高速公路里程达到 8.5 万公里。^[1]

由此可见,我国高速公路的密度不断提高,公路网规模逐渐扩大,通达深度也进一步改善。以山东省的公路网为例,山东省的公路网遍布全省,以路面质量和公路里程位居全国之首,截止 2006 年底,山东省高速公路总里程达到 3280 公里。预计到 2007 年底,全省高速公路通车里程突破 4000 公里,到 2010 年,全省公路通车里程达到 90000 公里,其中高速公路 5000 公里,一级公路 6000 公里,二级公路 27000 公里。公路密度达到每百平方公里 57.7 公里,公路平均好路率达到 80%,基本建成“五纵连四横、一环绕山东”的高速公路网和布局合理、结构优化的公路网络,干线网络聚集效应将日趋显现。^{[3]、[4]}

1.1.2 国内道路运营安全现状

在公路建设大发展的同时,我国已建成通车的公路在运营中也出现了较为

严重的交通安全问题。

从中国各类事故伤亡来看，2004年，各类事故统计中，安全生产领域道路交通事故成为“第一杀手”。^[8]2004年共发生道路交通事故51万7889起，死亡10万7077人(占各类事故死亡人数的78.3%)，见表1.1。2007年全国群众安全感调查主要数据显示，在影响群众安全感受的问题中，选择“交通事故”的占38.2%，与2006年相比，上升了5个百分点，位居榜首。

表 1.1 2004 年中国各类事故数及伤亡人数

类别	事故数(起)	死亡人数(人)	类别	事故数(起)	死亡人数(人)
道路运输	517889	107077	消防火灾	252701	2557
铁路运输	11921	7992	农业机械	5047	1431
民航	4	61	渔业船舶	682	570
煤矿	3639	6027	水上交通	562	489
建筑业	2582	2789	烟花爆竹	138	322
金属与非金属矿	2248	2699	化学品	193	291
			其他	5965	4450

从历年的交通事故及死亡人数看，随着道路安全工作者对安全问题的日益重视，近两年来，全国道路交通事故有所下降，但形势仍然十分严峻，见图1.1。2007年，全国共发生道路交通事故327209起，造成81649人死亡、380442人受伤，直接财产损失12亿元。与2006年相比，事故起数减少51572起，下降13.6%；死亡人数减少7806人，下降8.7%；受伤人数减少50697人，下降11.8%；直接财产损失减少3.0亿元，下降19.5%。^[2]

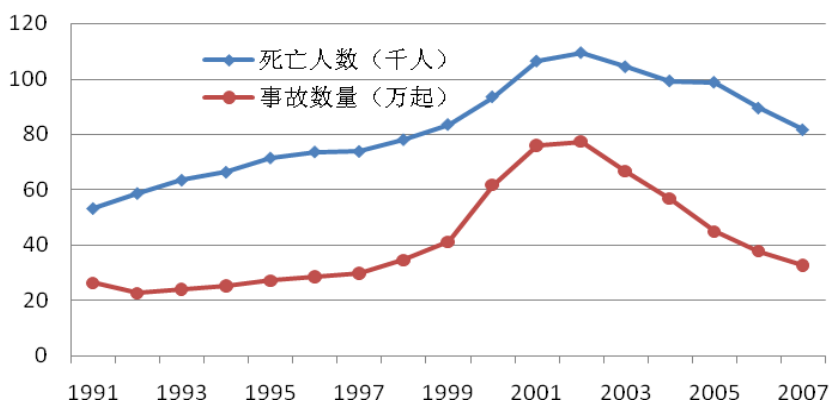


图 1.1 1990~2006 年道路交通安全状况

从国内外交通安全对比来看，我国道路交通安全形势的严峻主要表现在人

员较高的伤亡率上，平均是西方国家的10倍以上。与美国相比，美国汽车保有量超过2亿辆，公路通车里程超过700万公里，每年交通事故数量约250万起，但每年交通事故人员死亡只有约4万人，日本每年交通事故死亡9000人，瑞典只有600人等。如果再将道路长度、交通量等因素考虑进去，中国的交通安全状况将更令人堪忧，从万车死亡率来看：1992年美国为每万车死亡2.1人，德国为每万车死亡2.7人，日本为每万车死亡1.9人，而中国每万车死亡84.9人。再从亿车公里死亡率来看：1992年美国为亿车公里死亡1.1人，德国为亿车公里死亡2人，日本为亿车公里死亡1.7人。而中国为亿车公里死亡13.7人，上述各项指标均远远超过这些发达国家。

从各等级道路的安全状况对比来看，一般而言，高速公路由于采取了一系列确保行车安全的措施，行车事故大大减少。据统计各国高速公路的交通事故率和死亡率平均分别只有普通公路的1/3和1/2。日本一般公路上每亿车公里交通事故为195起，而在高速公路上只有27起，美国1980年在一般公路上交通事故死亡人数为51153人，平均每亿车公里死亡2.1人，而高速公路的死亡人数为4643人，平均每亿车公里仅1人，减少了一半。^[5]而我国高速公路交通事故频繁，事故率大大高于日本、美国等发达国家，在全国高速公路上，2006年死亡人数为6631人，^[2]事故死亡率为0.146人/km，二级、三级公路的事故死亡率为0.066人/km，高速公路的事故死亡率是二、三级公路的2.12倍。可见，国内的高速公路运营安全状况仍然不容乐观。

1.1.3 研究的必要性

通过最近十几年高等级公路的全面建设，我国公路路网整体功能和技术水平有了极大的提高，特别在东部地区，一些省份的公路网水平已接近发达国家的水平。大规模的公路建设促成了公路网的形成，对道路管理提出了新的要求。但目前的道路管理水平还不能在灾变条件下应对自如，例如2008年1-2月份春运期间，发生在南方各省市的雪灾，导致了严重的交通拥堵和一系列重大交通事故，部分高速公路也因此关闭。而得不到及时疏散、救援的车辆、物资和人员，更进一步地加大了旅客、货物滞留，使得资源浪费，生命受到威胁，经济蒙受巨大损失，对我国的道路运营安全管理形成了严峻考验，提出了更加紧迫的要求。为了适应公路网建设发展的趋势，有效利用、发挥现有公路设施整体效能，有必要研究适时、超前地路网运营安全管理问题。^[6]将对高速公路的管理

着眼于其所处的局域路网，从通道路网的角度进行全天候运营安全管理，体现公路的网络服务特性，真正发挥路网的整体效率。

高速公路面临的灾变条件包括灾害性天气、不良交通状况、交通事件等，在这三类灾变条件下，良好的运营安全性是保证运营效益的基本前提，交通事故不仅造成交通拥挤和阻塞，带来直接的人员伤亡和经济损失，还将造成巨大的社会负面影响。在一定的道路交通和自然环境下，应保持较高的路网管理水平，及时有效地疏通和诱导交通，使路网上的交通流运行处于最佳状态，改善交通拥挤和阻塞，最大限度地提高路网的通行能力，减少环境污染，节约旅行时间和运输费用，提高运输系统的效率和效益，从而提高整个公路运输系统的机动性、安全性和生产效率，并对社会经济发展的各方面都将产生积极的影响。因此，通过灾变条件下通道路网运营安全管理及应急处置研究，对高速公路进行智能化和系统性管理，发挥沿线道路交通工程及沿线设施的作用，充分利用高速公路周边主干线道路，能有效保证高速公路自身和相关路网安全畅通，具有重要的经济及社会效益和政治意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外相关管理系统的研究现状

在国外，尤其是发达国家，安全问题受到政府和公众的重视。政府通过法制、法规和行政指导来引导安全管理活动的走向，使安全管理活动走上了统一、协调、系统的轨道。

1.2.1.1 美国的公路安全信息系统、气象信息系统和道路安全管理系统

1. 公路安全信息系统

公路管理者总是面临着有关公路运营的决策问题，决策过程中一个重要部分就是研究所运营的公路对使用者的安全造成的潜在影响。因此，有依据的安全管理决策需要具备以下前提：了解道路几何设计对安全的影响；路侧设施的选择与布设对安全的影响；交通控制措施对安全的影响；车辆性能与类型对安全的影响以及道路用户的能力与需求对安全的影响等^[9]。而对这些问题的研究是通过合理分析交通事故、道路几何特征、交通控制措施、交通流数据以及路侧设施和障碍物的位置等信息来实现的，并且要求上述信息必须按规定格式存储，以便快速地获取后用于分析^[9]。