



The Application of Reliability in Transport
System Plan and Management

北京工业大学

“211 工程”资助出版

可靠度 在交通系统 规划与管理中的应用

陈艳艳
刘小明
梁颖

著



人民交通出版社

China Communications Press



北京工业大学

“211 工程”资助出版

可靠度在交通系统 规划与管理中的应用

著

陈艳艳
刘小明
梁颖



人民交通出版社

China Communications Press

图书在版编目 (CIP) 数据

可靠度在交通系统规划与管理中的应用 / 陈艳艳, 刘小明, 梁颖著. — 北京: 人民交通出版社, 2005.10
ISBN 7-114-05785-7

I. 可 ... II. ①陈 ... ②刘 ... ③梁 ... III. ①可靠性—应用—交通规划②可靠性—应用—交通运输管理
IV. U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 111316 号

书 名: 可靠度在交通系统规划与管理中的应用

著 作 者: 陈艳艳 刘小明 梁 颖

责任编辑: 师 云

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店、交通书店、建筑书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787 × 960 1/16

印 张: 14.75

字 数: 194 千

版 次: 2006 年 3 月 第 1 版

印 次: 2006 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05785-7

印 数: 0001-3000 册

定 价: 30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

内 容 提 要

本书内容为国家自然科学基金项目“城市交通系统抗震规划及震后管理优化方法研究”、北京市自然科学基金重点项目“智能交通系统交通流特征参数及模型研究”及北京市自然科学基金项目“大城市道路交通系统运营状态评价、模拟及对策”的研究成果。

本书是一本以交通系统供需随机性分析为基础,以网络可靠性分析为手段,以系统畅通可靠度为优化目标进行道路交通系统规划及管理的专著。该书考虑到交通需求与通行能力的随机性,提出了系统日常及灾时畅通可靠度的概念及评估方法,并以系统畅通可靠度为优化目标,进行交通系统改扩建规划或抗震规划。

本书的特点是借助可靠性理论,建立起了描述及解决交通系统随机性及不确定性的数学模型,从而更好地描述了城市日常常发阻塞及灾时偶发阻塞发生的可能性,并且利用单元重要性分析及遗传算法等技术研究了基于可靠性分析的交通网络系统优化的实用方法。

本书的读者对象是城市规划、交通工程、土木工程、地震工程、系统优化等专业的技术人员、管理人员、科研工作者、研究生、教师及高年级本科生。

序

Foreword

“211 工程”是我国建国以来教育领域惟一的国家重点建设工程,面向 21 世纪重点建设一百所高水平大学,使其成为我国培养高层次人才,解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地,形成我国高等学校重点学科的整体优势,增强和完善国家科技创新体系,跟上和占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛,尤其是 1400 所地方高校已经占全国高校总数的 90%,成为我国高等教育实现大众化的重要力量,成为区域经济社会服务的重要生力军。“211 工程”建设对于我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用。

在北京市委市政府的高度重视和大力支持下,1996 年 12 月我校通过了“211 工程”部门预审,成为北京市属高校惟一进入国家“211 工程”重点建设的百所大学之一,2001 年 6 月以优异成绩通过国家“211 工程”一期建设验收,2002 年 10 月顺利通过国家“211 工程”二期建设可行性论证。我校紧紧抓住这一难得的历史性发展机遇,根据首都经济和社会发展的需要,坚持“科学定位,找准目标,发挥优势,办出特色”的办学方针和“立足北京,融入北京,辐射全国,面向世界”的定位指导思想,以学科建设为龙头,师资队伍建设为关键,重点建设了电子信息、新

材料、光机电一体化、城市建设与交通、生物医药、环境与能源、经济与管理类学科,积极发展了人文社会科学类学科,加强了基础类学科,形成了规模、层次及布局合理的学科体系,实现了从工科大学向以工为主,理、工、经、管、文、法相结合的多科性大学转变,从教学型大学向教学研究型大学的转变。

我校现有9个博士后科研流动站,6个一级学科博士学位授权点,25个二级学科博士学位授权点,55个硕士学位授权点。教师中有院士6人,博士生导师150人,教授230人,专任教师中具有博士学位的教师比例达到30%。我校年科研经费已达到23000万元,年获得国家自然科学基金资助项目近40项,材料学科获全国百篇优秀博士学位论文奖,抗震减灾学科与交通学科2002年分别获得国家科技进步二等奖,计算机学科2003年获得国家科技进步二等奖,光电子学科在新型高效高亮度半导体发光二极管、新医药与生物工程学科在国家P3实验室建设和抗HIV药物的研制、环境与能源工程学科在奥运绿色建筑标准与大气环境治理、光学学科在大功率激光器研制、管理科学与工程学科在国家中长期能源规划等方面均取得了特色鲜明的科研成果。

为了总结和交流北京工业大学“211工程”建设的科研成果,学校设立“211工程”专项资金,资助出版系列学术专著,这些专著从一个侧面代表了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北工大未来,我们任重而道远。我坚信,只要我们珍惜“211工程”建设和奥运羽毛球馆建设这两大机遇,构建高层次学科体系,营造优美的大学校园,我校在建设成为国内一流大学的进程中就一定能够为“新北京、新奥运”的宏伟蓝图做出自己应有的贡献。

北京工业大学校长

中国科协副主席

左铁镛

中国工程院院士

二〇〇六年一月

前言

Preface

20 世纪 80 年代以来,我国国民经济的高速发展和城市化进程的推进带来了城市交通量的迅速增长。但机动车拥有量及道路交通量的急剧增加带来的是:交通拥挤、堵塞以及由此导致的交通事故的增加、环境污染的加剧。城市交通问题尤其是拥堵问题现已成为影响城市功能正常发挥和城市可持续发展的一个全局性问题,也是亟待解决的城市问题之一。

许多交通系统都面临不确定性问题,如灾害和紧急事件发生的时间、类型、位置及交通需求数量等。这些不确定因素很难准确预测。由于这些不确定性因素的存在,即使道路系统在正常条件下有足够的通行能力,也难免在供需异常变化时发生交通阻塞。换言之,道路容量和交通需求的随机变化使得交通系统的运行状态及阻塞发生也在随机变化。而目前国内外对交通系统运行状态的研究指标多限于常态的确定性指标。这些确定性指标往往仅来自某一次或短期观测结果,以此作为一定时期的交通系统运行状态的评价依据,难免存在较大的任意性,并将给交通系统的管理、布局 and 规划带来一定的困难。因此,有必要应用城市道路系统运行状态的概率型评价指标来分析和研究城市道路网络。

自20世纪20年代以来,网络可靠性理论在许多系统(如电力系统、供水系统、通信系统等)的研究中,尤其是生命线系统研究中,已经有了比较广泛的应用。作为生命线的一个重要组成部分,交通系统的可靠性研究初期主要限于发生灾害时交通系统的连通可靠性研究。但随着社会的进步,人们对交通网络日常条件下的应变能力提出了更高的要求,由此也越来越重视交通系统在日常交通状态下的运行可靠性研究。路网可靠性作为概率型的指标是对城市道路状况更准确、更全面的评价,它可用于评价复杂系统的鲁棒性,通过它考察交通系统的运行质量,以作为路网管理的依据。这比以往所采用的确定性指标(如拥挤程度、平均行驶时间等)更具有适用性。因此,路网可靠性的研究引起了国内外学者的广泛关注。

交通系统可靠性研究始于20世纪80年代。目前可靠性技术已经在道路交通系统以及公共交通系统中得到了初步的应用,包括日常交通规划、运营和抗灾规划与应急管理,近年来在智能交通系统中也有所应用。本书介绍了交通系统可靠度在交通规划及管理应用中的研究现状,以及作者近年来的研究成果,内容涵盖了交通路网可靠性研究的各个方面,包括路网畅通可靠性评价指标定义及评估方法、路网抗灾能力分析、路网应变性交通规划、管理优化模型及应用。

本书的主要目的是借助可靠性理论,建立描述及解决交通不确定性的数学模型。为达到此目的,本书还介绍了大量例子,并在每章后面给出了若干由易到难的算例。

随着交通的发展,交通系统可靠度研究将引起更多人的关注。路径的选择及出行时间的安排都需要考虑到各种不确定事件发生的可能性。21世纪的人们渴望更稳定可靠的交通系统,从而尽可能地减少出行时间的不确定性。可以预计,交通系统可靠性分析未来将在交通系统规划、设计及设施管理、智能化交通中扮演着越来越重要的角色。

尽管可靠性研究还不够成熟、本书亦不乏纰漏之处,但希望本书能抛砖引玉,吸引更多的人致力于系统可靠性的研究,以促进其发展。

前 言

本书在撰写过程中,博士生史建港、硕士生杜华兵、高爱霞参与了部分章节的撰写,硕士生王振报、张鑫、李德芬、韩伟等参与了图表制作及校稿工作,在此一并表示感谢。

作 者

2005 年 8 月于北京

目 录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 城市交通拥挤概述	1
1.2 城市路网可靠性研究概述	3
1.3 城市路网可靠性研究现状及局限	4
1.4 路网可靠性评价及优化的应用	6
1.5 本书章节概要	8
第2章 网络与网络可靠性基本知识	10
2.1 图、网络与交通网络系统	10
2.1.1 图论方法简介	10
2.1.2 网络及交通网络系统	18
2.2 网络系统可靠性分析技术	20
2.2.1 系统及单元可靠度概念	20
2.2.2 结构函数	20
2.2.3 网络可靠度与连通可靠度	21
2.2.4 简单系统可靠度计算简述	22
2.2.5 复杂系统可靠度计算简述	24
第3章 交通系统可靠性研究综述	29
3.1 国外交通系统可靠性研究综述	29

3.1.1	连通可靠度(Connectivity Reliability)	29
3.1.2	运行时间可靠度(Travel Time Reliability)	31
3.1.3	容量可靠度(Capacity Related Reliability)	34
3.1.4	其他路网可靠度分析方法	36
3.2	国内交通系统可靠性研究综述	41
3.3	本章小结	44
第4章	畅通的标准	50
4.1	现有交通运行状态评价指标	50
4.2	交通畅通运行状态的划分	54
4.3	特大城市交通流运行状态划分	56
4.3.1	基本路段交通流运行状态划分	56
4.3.2	平面交叉口交通流运行状态划分	64
4.4	城市道路交通运行畅通状态二元标准	67
第5章	城市道路单元畅通可靠度分析	71
5.1	道路单元(路段或交叉口)畅通可靠度	71
5.1.1	畅通可靠度定义	71
5.1.2	交通流状态参数变化宏观规律及畅通 可靠度评价预定条件分析	71
5.1.3	道路单元的功能函数	74
5.1.4	道路畅通可靠度的计算方法简述	74
5.2	基于供需随机性分析的畅通可靠度计算方法	75
5.2.1	交通供需随机性分析	75
5.2.2	高峰时段路网流量分布统计	76
5.2.3	基于供需随机性分析的道路畅通可靠度的 计算方法	85
5.2.4	基于供需随机分析的畅通可靠度计算实例	90
5.2.5	小结	93
5.3	基于交通统计的畅通可靠度计算方法	93
5.3.1	计算方法	94
5.3.2	基于交通统计的畅通可靠度计算实例	95

5.4 基于模糊估计的畅通可靠度计算方法	95
5.4.1 相关的模糊数学概念	96
5.4.2 道路畅通可靠性的语言评价	97
5.5 计算方法结果的差异性分析	99
5.6 道路单元畅通可靠度与饱和度的关系	101
5.7 本章小结	106
第6章 城市道路交通系统畅通可靠性分析	108
6.1 高峰时段路段畅通可靠度	108
6.2 高峰时段出行 OD 对间的畅通可靠度	109
6.2.1 出行 OD 对间的合理路径的确定	109
6.2.2 高峰时段 OD 对间交通系统畅通可靠度计算方法	110
6.3 高峰时段路网畅通可靠度	111
6.4 考虑单元间堵塞相关性的交通系统畅通可靠度计算流程	112
6.5 实例分析——北京市内城路网	116
第7章 交通供需随机变化与路网畅通可靠度的关系研究	126
7.1 确定研究路网	126
7.2 研究思路及计算流程	127
7.2.1 确定交通分配方法	128
7.2.2 道路单元车速计算方法	129
7.3 不同路网供需分布下的路网畅通可靠度分析	129
7.3.1 交通需求改变而供给不变的路网畅通可靠度分析	129
7.3.2 交通供给需求均变化的路网畅通可靠度分析	139
7.4 本章小结	144
第8章 基于畅通可靠性分析的路网优化策略	145
8.1 基于方案比选的路网优化概述	145
8.2 单元重要度分析	146
8.3 以路网综合效益最大为目标的路网优化模型	149
8.4 路网优化设计的正交枚举法	150
8.5 交通网络系统可靠度优化设计模型	152

8.6 路网可靠度优化遗传算法	153
8.7 基于单元重要度分析的建设项目排序	157
第9章 交通系统抗震可靠性分析及优化设计	164
9.1 交通系统震害特点及抗震设计概述	164
9.2 交通系统单元的抗震连通可靠度预测	165
9.2.1 城市交通网络抗震连通可靠度的影响因素	165
9.2.2 交通系统单元抗震可靠度的简化评估	167
9.2.3 道路交通系统单元地震环境下失效相关性分析	169
9.3 城市道路交通网络系统抗震连通可靠性分析	173
9.3.1 道路交通系统的抗震可靠度网络模型	173
9.3.2 道路交通系统的抗震连通可靠性分析	176
9.4 震后交通需求预测的修正四阶段法	181
9.4.1 交通的发生与吸引	182
9.4.2 交通分布	184
9.4.3 交通方式分担	186
9.4.4 交通量分配	186
9.5 震后异常供需下道路阻塞概率研究	189
9.5.1 震后交通供需随机性分析	189
9.5.2 道路灾后阻塞概率分析	190
9.6 考虑容量限制的交通网络抗震加固扩建优化策略	192
9.6.1 路网系统震后通行能力预测及待增集确定	193
9.6.2 源汇间合理割集的选择	195
9.6.3 单元增流重要度参数及改建优化原则	195
9.7 本章小结	201
附录1 不交型布尔代数简介	204
附录2 正交试验法简介	208

第1章 绪 论

1.1 城市交通拥挤概述

随着我国改革开放的不断深入,城乡经济进一步繁荣,城市规模日益扩大,我国机动车拥有量及道路交通量也迅速增加。虽然我国各省市的道路建设和交通管理也在不断改善和发展,但由于以前的道路建设欠账太多,加上一些道路设施及交通管理设备得不到及时更新,交通管理手段相对落后,以及交通参与者的安全意识淡薄,致使目前城市道路交通普遍存在交通拥挤,交通事故增多,车速下降,居民乘车难、出行难的现象。尤其是在大城市,交通问题已经成为影响城市功能正常发挥和城市可持续发展的一个全局性问题。

交通拥挤程度是路网运行状态的一个主要评价指标。交通拥挤的直接危害是使交通延误增大,行车速度降低,带来时间损失;低速行驶还导致耗油量增加及出行成本增加。美国德州运输研究所通过研究美国39个主要城市,估算美国每年因交通阻塞而造成的经济损失约为410亿美元,12个最大城市每年的损失均超过10亿美元。在日本,仅首都圈,严重拥挤地点就有219处,在首都高速道路拥挤严重的路段,其拥挤持续时间长达17小时,拥挤长度达9.87km。日本东京每年因交通拥挤造成交通参与者的时间损失相当于123000亿日元。欧洲每年因交通事故、交通拥挤和环境污染造成的经济损失分别为500亿欧元、5000亿欧元和50亿~500亿欧元^[1]。

交通拥挤、城市道路流量剧增,使得汽车尾气排污量增加,导致环境恶化,人民生活质量下降。环境污染主要体现在大气污染和噪声污染两个方面。目前各国城市大气污染物主要是浮尘、SO₂、NO_x、CO等,

而汽车是这些污染物的主要排放源(达 35% 左右)。据有关研究发现, CO_2 排放量在所有运输工具中, 汽车排放占 78% (56% 为小型汽车, 22% 为大型汽车), 并逐年递增, 温室效应严重, 城市多发酸雨; CO 的排放系数随车辆行驶速度的下降而增大, 信号交叉口 CO 污染日益严重; NO_x 也随汽车频繁变速排放量明显增大^[2]。同时, 我国城市道路交通噪声污染也日益严重。据《中国环境年鉴》^[3], 2000 年统计了 40 个重点城市道路交通流量, 其中白天平均每小时流量超过 2000 辆的城市有 18 个, 超过 3000 辆的有 3 个城市, 大部分城市的监测道路车流量呈现上升趋势。根据经验, 道路车流量增加一倍, 交通噪声值增加 3dB。一般情况下, 即使严格执行禁鸣, 车流量达到一定水平后也会出现交通噪声超过国家标准 70dB 的现象。从全国城市道路交通噪声的调查结果分析, 目前全国有 16% 的居民住在道路两边, 受影响的人群约 3400 万人, 其中 80% 的人群, 约 2700 万人, 白天在平均噪声级超过 70dB, 夜间在超过 55dB 的高噪声干扰下生活。城市道路交通噪声现已成为我国城市噪声污染的一个重要来源, 它也是城市各类噪声中污染强度最大的声源。

此外, 交通拥挤使交通事故增多, 而交通事故的发生又使交通阻塞加剧, 从而形成恶性循环。据《2004 中国汽车工业年鉴》^[4] 统计, 我国属于汽车交通事故严重发生区, 每万辆车辆保有量导致死亡的人数高达 44.58 人, 而美国仅 1.83 人, 全球平均约 4 人。从 1998 年至 2003 年, 因交通事故造成的死亡人数累计达 57.51 万人, 受伤人数达 253.03 万, 直接经济损失 165.03 亿元^[4]。由于车辆、人口数量的增长和人们出行率的提高, 北京市交通事故的发生次数和伤亡人数也很可观, 1996 年, 全市死亡 851 人, 其中机动车事故次数、死伤、死亡数分别为全市事故次数、死伤、死亡人数的 91.24%、74.84% 和 72.97%, 经济损失 9878.4 万元; 由于交通拥挤、堵塞导致的交通事故次数、死伤、死亡数分别占 42.01%、51.77% 和 53.57%^[5]。

中国是自然灾害较重(历史上受害较重)的地区, 而道路交通系统是分布区域很广的网状系统, 极易遭受地震、洪水、恶劣天气等自然灾害的破坏。灾后由于供需矛盾激化将造成路网大面积拥阻, 系统运输

功能失效,不仅直接经济损失巨大,还会因交通阻断造成救援延误而引起更为惨重的间接损失。在日本神户、旧金山、台湾等大地震中均有惨痛的历史教训。

由此可见,无论是日常条件还是灾害条件下的交通拥挤或拥堵的加剧,不仅会造成巨额的经济损失,而且如果发展严重甚至还会导致城市功能的瘫痪及次生灾害的蔓延。因此,本书将城市交通系统在日常及灾害(本书主要研究地震)条件下发生拥挤的可能性及后果作为城市交通运行状态评价的主要内容,希望通过对交通系统运行状态的评价,及时发现问题,并通过一定的可行方法对城市道路网络进行改善,提高系统应变能力,减少阻塞的发生,避免延误的蔓延。

1.2 城市路网可靠性研究概述

交通系统的运行状态取决于路网的供需条件。在灾害及突发事件下,道路的供给及交通需求将发生重大变化,以往的抗灾应急策略多基于最不利情形的确定性分析,其结果往往导致资源分配的不合理。事实上,由于各种灾害及突发事件发生规模及发生可能性不同,致使未来路网供给能力具有很强的随机性,而灾后及突发事件发生后由于交通需求异常变化,加之车辆的盲目流动,交通需求的变化也将具有明显的随机性。供需的随机性导致实时路网运行状态也具有强烈的随机性及不确定性。而在非自然灾害条件下,由于近几年交通需求激增,供需矛盾日益加剧,从而造成阻塞频发,而随机发生的交通事故等紧急事件的发生进一步恶化了路网运行状态,不仅加重了城市交通拥挤,也增大了出行时间的不确定性。因此,拥挤路网在日常条件下的供需 also 具有很强的随机性。而目前国内外对交通系统运行状态的研究指标,如饱和度、路网容量、行驶时间、拥挤度、延误、用户满意度、服务水平等多为非概率测度参数。这些常态指标往往仅来自某一次或短期观测结果,以此作为一定时期的交通系统运行状态的评价依据,难免有较大的任意性,而且这些确定性指标难以正确描述和评价未来路网运行的期望状态,准确的预测道路拥挤、堵塞发生的可能性。这将给交通系统的应变

性规划及管理带来一定的困难。因此,有必要应用城市道路系统运行状态的概率型评价指标来分析和研究城市道路网络^[6]。

城市路网可靠性反映的是路网在规定时间、规定条件下完成预定功能的能力。路网可靠性的概率测度,即路网可靠度。它反映的是路网在规定时间、规定条件下完成预定功能的概率。它是衡量城市路网,特别是在紧急灾害情况下,交通系统功效能否正常发挥、运行状态是否达到预期要求的重要指标,因此也可称为路网运行可靠性。它不仅是对路网应变性能的综合反映,也是构建智能交通系统的理论基础之一,是路网整体规划、设计、交通流组织管理和制订重大突发事件处理预案的基础和重要组成部分。

目前我国不少城市的路网因先天不足,缺乏冗余容量,加之应急管理措施不力,造成了路网运行可靠性及应变能力低下,系统运行状态极不稳定。若不采取有效措施防止并及时弥补路网缺陷,一旦灾害及紧急事件发生,将造成路网的大面积、长时间拥堵,甚至瘫痪,引发难以估量的政治及经济损失。对城市路网进行可靠性的研究,并在此基础上进行合理的改扩建规划、抗灾应变规划,制订应急交通管理策略,无疑能有效地发掘路网潜力,提高交通系统对突发灾害及紧急事件的免疫力,控制灾后次生灾害发生,减少紧急事件造成的延误大面积扩散,减少间接损失,从而具有重大的社会意义和经济意义。

1.3 城市路网可靠性研究现状及局限

城市交通是城市的命脉,其作用是保障城市各项基本功能的正常运转,保障社会经济的发展。随着我国经济的持续发展及对交通系统的依赖日益加强,人们对交通网络处理日常及灾害情况下交通问题的可靠性及应变能力提出了更高的要求。如何在现有的资源条件下,通过对道路系统的可靠性进行评价,进而采取有效布局和改扩建措施以及交通管理手段以改变交通现状,最大程度地发挥城市交通网络的功效是急需解决的重大工程问题之一。

交通系统可靠性研究始于 20 世纪 80 年代,但运用可靠性技术进行路