



国家科技支撑计划城市交通研究项目丛书

高可靠性城市路网保障技术

■ 陈艳艳 高爱霞 唐夕茹 著

中国建筑工业出版社

国家科技支撑计划城市交通研究项目丛书

高可靠性城市路网保障技术

陈艳艳 高爱霞 唐夕茹 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高可靠性城市路网保障技术 / 陈艳艳, 高爱霞, 唐夕茹著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012.3
(国家科技支撑计划城市交通研究项目丛书)
ISBN 978-7-112-13978-1

I. ①高… II. ①陈… ②高… ③唐… III. ①城市道路—道路网—道路保障 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 012191 号

路网可靠性作为一种概率型评价指标, 在城市道路交通系统运行状态评价领域得到了快速发展。由于它能够准确地描述路网的随机性特性, 从而得到出行者、政府管理部门和交通专家的广泛重视, 成为路网可靠性研究的热点问题。本书在已有研究的基础上, 对目前的可靠度评估指标及方法进行了梳理总结, 建立了常态和异常事件下路网可靠性评价指标体系, 并根据目前先进的数据采集手段及仿真手段提出了实用的可靠度评估方法。同时, 在常态和异常事件下路网可靠性影响因素分析的基础上, 通过高应变路网规划及预警体系构建, 有效保障路网的可靠性。

本书由国家科技支撑计划项目 (2006BAJ18B01) 资助。

* * *

责任编辑: 焦扬 陆新之 徐冉
责任设计: 董建平
责任校对: 刘梦然 刘钰

国家科技支撑计划城市交通研究项目丛书

高可靠性城市路网保障技术

陈艳艳 高爱霞 唐夕茹 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 260千字

2012年5月第一版 2012年5月第一次印刷

定价: 35.00元

ISBN 978-7-112-13978-1

(22006)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

自 20 世纪 80 年代以来，路网可靠性评估技术作为世界交通领域的前沿技术，得到了世界范围内交通工作者和决策者的高度重视，并在日本、美国和欧洲等国家和地区快速发展起来。目前，我国不少城市的路网因交通需求增长较快，路网缺乏足够的冗余容量，道路交通系统的运行状态不稳定，城市路网可靠性水平较低。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拥堵，甚至瘫痪，引发难以估量的政治和经济损失。

21 世纪的人们渴望更稳定可靠的交通系统，以尽可能地减少出行时间的不确定性。交通系统可靠性分析在交通系统规划、设计及设施管理、智能化交通中扮演着越来越重要的角色。研究和应用城市路网可靠性保障技术，能够有效地挖掘路网潜力，提高交通系统运行的稳定性，提高交通系统应对大型活动和突发事件的免疫力。但是目前交通网络的可靠性保障技术研究距实用化仍有相当的距离，亟待完善与健全。

本书主要从路网可靠性评价和可靠性保障技术两方面介绍了最新研究成果。其中，可靠性评价研究在可靠性评价指标体系建立的基础上，分析了路网可靠性的影响因素，明确了城市路网可靠性研究的内涵，利用实测和仿真数据，建立了适用于评价常态和异常事件下路网可靠性的评价指标和计算模型。可靠性保障技术研究在可靠性评价的基础上，进一步研究可靠性评价技术在实际路网规划及管理中的应用问题。本部分分为两个方面展开研究，即基于可靠性分析的交通网络规划及优化设计和交通网络的可靠性预警及应急管理研究。将可靠性目标作为现有规划目标的补充，对交通规划理论及方法进行了扩展，并在对潮汐式交通流特点及出行者路径选择分析的基础上，设计了以畅通可靠性为优化目标的交通网络设计双层规划模型，从而有效提高了路网的应变能力。同时，将可靠性指标融入应急预警警度确定及应急路径规划中，从而有效提高了路网应急能力，为路网高可靠性提供了保障。

尽管可靠性研究还不够成熟，本书也不乏纰漏之处，但希望本书能抛砖引玉，吸引更多的科研人员致力于系统可靠性的研究，以促进其发展。

本书依托的科研项目为“十一五”国家科技支撑计划课题“城市综合交通系统功能整合与规划设计关键技术研究”中的子课题“大城市综合交通系统可靠性保障技术研究”（项目编号：2006BAJ18B01-06）。感谢课题主持单位中国城市规划设计研究院为本书出版给予的帮助和资助。本书在撰写过程中，硕士研究生康浩、段卫静等参与了图表制作及校稿工作，在此一并表示感谢。

作者

2011年10月于北京

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 国内外研究综述	4
1.4 本书主要内容	9
1.5 章节结构	11
第 2 章 路网运行随机性分析	13
2.1 城市路网运行随机性分布分析	13
2.2 城市路网随机性影响因素分析	24
第 3 章 路网可靠性评估指标体系及方法概述	29
3.1 路网可靠性定义	29
3.2 路网可靠性评价指标体系概述	30
3.3 常态下可靠性评价指标体系	31
3.4 异常事件下可靠性评价指标	32
3.5 路网的恢复可靠性评价指标	35
3.6 可靠性评价常用方法	36
第 4 章 常态下路网可靠性评价	43
4.1 基于统计数据的路段可靠度评估	43
4.2 常态下路段可靠性变化规律及影响因素分析	50
4.3 基于解析法的大型路网畅通可靠度近似算法	58
4.4 基于统计法的大型路网可靠度近似算法	64
第 5 章 常态下高可靠路网规划方法	71
5.1 交通负荷对路网可靠性的影响	71
5.2 路网结构对可靠性的影响	73
5.3 影响路网可靠性的关键单元识别方法	76

5.4	实例分析——北京市路网关键单元识别	80
5.5	高可靠性路网规划方法	86
第 6 章	基于可靠性分析的城市交通网络优化设计	91
6.1	交通网络优化设计概述	91
6.2	基于畅通可靠性分析的双向道路交通网络设计模型	93
6.3	模型求解算法	98
第 7 章	突发事件下路网可靠性研究	103
7.1	突发事件对道路交通的影响分析	103
7.2	基于 DYNASMART 仿真技术的交通恢复时间 影响因素分析	111
7.3	基于神经网络技术恢复时间的预测	119
7.4	路网恢复可靠性指标	124
7.5	路网恢复可靠性影响因素分析及对策	127
第 8 章	异常天气及自然灾害下的路网可靠性研究	131
8.1	异常天气对道路交通的影响分析	131
8.2	地震对道路交通的影响分析	135
8.3	交通系统抗震连通可靠度评价	141
8.4	城市抗震救灾路网规划方法	149
8.5	城市路网抗震加固扩建优化策略	152
第 9 章	基于可靠性分析的城市交通管理预警及应急技术	159
9.1	交通运行可靠性预警系统概述	159
9.2	常态下路网的可靠性预警管理	161
9.3	突发事件及异常天气下路网的可靠性预警管理	164
9.4	高可靠性路网保障的车辆诱导技术	167
9.5	高可靠性御灾应急备选路径构建技术	173
9.6	灾后路网可靠性保障交通管理策略	180
第 10 章	基于 GIS 的路网可靠性空间数据库及评估平台	183
10.1	空间数据库概述	183
10.2	路网可靠性空间数据库及评估平台	185
	参考文献	198

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

随着我国改革开放的不断深入,社会经济高速发展,城市规模日益扩大,城市机动车保有量和道路交通需求迅速增加,导致目前城市道路网络普遍存在交通拥堵、车速下降、居民出行效率降低等现象。尤其在大城市,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问题,也是亟待解决的迫切问题。

道路网络系统的一个重要特征就是动态随机性。一方面,出行者的出行受出行目的、气候条件等多种因素的影响,导致交通需求发生随机性波动;另一方面,由于道路改造维护、交通事故、交通管制等因素的随机影响,其通行能力也发生随机变化。道路网络系统的这种随机动态性使得交通网络状态具有较大的不确定性。以往描述路网运行状态的确定性指标难以准确评价路网运行状态的随机性,因此有必要应用概率型评价指标来分析和研究城市路网运行质量。

路网可靠性是衡量城市路网交通系统功效的重要概率指标^[1],其含义是路网在规定的条件下完成预定功能的能力。无论是在“常态”交通条件(日常条件)还是在“非常态”(有异常事件)交通条件下,在交通系统分析中都应合理地反映道路网络系统的随机动态特征,以便提高系统的应变能力,减少堵塞的发生。自 20 世纪 80 年代以来,路网可靠性评估技术作为世界交通领域的前沿技术,得到了世界范围内交通工作者和决策者的高度重视,并在日本、美国和欧洲等国家和地区快速发展起来。目前,我国不少城市交通需求增长迅速,路网缺乏足够的冗余容量,城市道路交通系统的运行状态不稳定,城市路网可靠性水平较低。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拥堵,甚至瘫痪,引发难以估量的政治和经济损失。对城市路网可靠性评价技术的研究,能够为准确而全面地评价城市路网的运行状态提供一套有效的分析工具。应用城市路网可靠性评估技术,能够探寻城市路网可靠性的变化趋势及规律,识别城市路网可靠性的薄弱环节,分析突发事件或大型活动对城市路网可靠性的影响,从而为合理地进行路网规划和建设、交通

组织和管理提供技术支持。毫无疑问,研究和应用城市路网可靠性评估技术,能够有效地挖掘路网潜力,提高交通系统运行的稳定性,提高交通系统应对突发事件和大型活动的能力,从而具有重大的社会意义和经济意义。

虽然网络可靠性分析应用于交通网络尚处于研究阶段,还未成熟,有许多需要解决的问题,但城市交通网络的可靠性分析必将给传统的城市交通规划和管理等体系带来深远的影响。结合我国的国情,将可靠性分析有机地融入到现有的交通规划和管理中来,可以在很大程度上改善现有的交通状况,具有广阔的应用前景。

1.2 研究意义

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。然而我国交通基础设施建设长期落后于交通需求增长,出现诸如交通堵塞、车多路少、出行困难、交通事故频发等一系列的交通问题。对城市道路网络进行可靠性研究,分析各影响因素的发生规律及其对城市道路网可靠性的作用机理,建立路网可靠性评价指标和计算模型,将可靠性理念和可靠性技术渗透到道路网络的规划、建设和管理中,是建立适合社会城市化、城市机动化趋势的高效、经济、可持续发展和谐交通系统的必然要求。

交通系统运行状态的可靠度作为衡量城市交通路网应变能力大小的一种度量指标,它表示的是车辆从网络一节点到另一节点在一定服务水平以上的通达概率^[2]。交通规划师可通过调整路网布局或增大路网容量来提高路网的可靠度;交通管理者可借助对路网的可靠度分析,确定敏感路段,优化管理措施,预防交通拥挤、交通事故的发生。因此,将可靠度分析技术应用于交通系统中,结合交通流特性,分析研究城市路网交通状态非常重要,其意义主要有以下几点。

1) 评价路网现状,理性分析交通问题

要改善、解决城市交通问题,就必须先认清这些交通问题的现状与根源,从而有必要对路网运行状况进行合理的评价。应用路网可靠性技术,可以分析城市路网交通运行状态的变化规律,明确路网结构存在的问题,分析路网运行可靠性的时空分布特征,能够量化地评价既有路网的交通服务能力,从而使得交通管理者认清城市交通现状所面临的问题,为制订切实可行的改善方案和解决方法提供支持。

2) 为合理规划路网布局和路网建设提供决策支持

利用路网可靠性评估技术,通过对现实交通数据的分析研究,可识别路网的薄弱点、段,从而为路网改、扩建和新建路网提供依据。通过对这些薄弱点、段进行改善,能够有效提高整体路网的性能。此外,路网可靠性评估技术能够分析和计算路网中各个路段发生拥堵的可能性或提供期望交通服务的可能性,从而明确路网的建设需求,使基础设施建设有的放矢,

获得最大的建设成本效益比，保障未来路网的可靠性。

3) 辅助交通管理部门，提高城市交通管理效率

在明确路网现状和相关交通问题以后，如何进行有效的城市交通管理对于相关交通管理部门而言是急需解决的问题。路网可靠性指标不仅能够宏观地反映城市路网的综合交通状态，还能够微观地标识路网内区域间、路段以及节点上的局部交通状态，可以为交通管理部门进行交通管理、堵塞疏导和信息诱导提供更准确、量化的参考依据，使交通管理更能够因地制宜、切中要害，实现城市交通管理的高效率。

4) 预防和应对紧急事件与大型活动的交通影响

紧急事件和大型活动是城市交通系统所面临的特殊情况，将对城市交通产生冲击性的影响，导致局部路网通行能力的折减或需求的超负荷，进而引发路网局部乃至大面积瘫痪。现代成熟的路网结构和交通管理服务必须能够预防、应对紧急事件和大型活动的交通影响，减少紧急事件和大型活动对路网的冲击。利用路网可靠性评估技术，能够分析紧急事件和大型活动对周边路网的影响程度与影响规律，能够识别出紧急事件和大型活动情况下，交通系统的关键路段、关键时段等薄弱环节，从而为针对性地进行事前预防建设和实时的交通组织与管理提供指导，提高交通系统的服务能力。在满足大型活动交通需求的同时，尽可能地保障城市整体交通系统的运转，从而减少大型活动对城市交通系统的不利影响，进而提高城市应对大型活动的交通服务能力。

5) 为智能交通系统建设提供数据和技术支持

随着智能交通系统的迅速发展，智能交通系统已经成为解决城市交通管理问题的重要手段。应用路网可靠性评估技术对基础数据进行深加工，能够为综合交通信息系统、动态路径诱导系统、停车诱导系统等提供数据支持，从而为出行者提供更加丰富、全面的出行信息服务，进而合理地调整路网中交通流的时空分布，提高整个路网的运行效率。

6) 实现城市交通的可持续发展

路网可靠性作为评价路网功能结构、交通运输系统整体建设水平的重要指标，在明确城市路网现状、存在的问题以及改进方向等方面，具有重大的应用价值。应用路网可靠性评估技术，能够辅助政府部门充分认识城市交通的供需矛盾，实现有限资源的合理整合和路网潜能的充分发挥，从而从根本上解决城市交通问题，最终推动城市交通体系的可持续发展。

综上所述，城市路网可靠性作为一个概率性的评价指标，能够弥补其他确定性评价指标的不足，对路网性能进行准确、全面、综合的评价，从而能够切实指导路网整体规划、优化，道路新建和改建，以及交通流组织管理和诱导交通出行，预防和应对突发事件或大型活动对路网的影响。因此，该指标能够广泛应用于我国各个城市的交通建设和管理部门，进而为我国城市交通系统规划和管理事业带来社会效益。

1.3 国内外研究综述

可靠性概念本身属于系统工程学科的范畴,描述的是在工程系统里提供高质量服务水平的稳定性,一般通过在特定的时间和给定的环境、运行条件下,实现某种预期的功能并达到可接受的服务水平的概率来计算。路网可靠性是可靠性概念在道路交通系统中的应用,其作用在于评价道路网络达到某种预期功能的概率,也就是达到某种交通服务水平的可靠程度。它起源于交通服务水平评价和路网容量评价,并伴随着人们对路网交通状态、交通服务水平更加准确、动态化评价的需求而发展。

路网可靠性研究始于20世纪80年代。在研究初期,主要限于对发生灾害时路网连通性的研究。随着社会的进步,人们对交通网络在日常条件下的应变能力提出了更高的要求,对路网在日常交通状态下的运行可靠性研究越来越重视,行程时间可靠性、畅通可靠性、路网容量可靠性等概念随即被提出并广泛应用于路网交通运行状态评价中。本节将从路网可靠性评价技术的国内外发展历程入手,分析目前国内外在研究路网可靠性过程中形成的主要评价指标和评价方法,并对这些关键技术进行分析,为我国城市路网可靠性评估技术的建立提供参考和依据。

1.3.1 国外研究现状

路网的可靠性评价不仅仅用于衡量紧急灾害情况下交通系统的功效,对交通阻塞、事故、异常天气等,甚至某些道路发生不畅通的情况也可以进行有效评价。利用该指标来衡量路网的状况,有助于管理者提供更好的交通服务。

尽管路网可靠性分析如此重要,但由于很难对其进行定义和计算,所以关于可靠性的研究一直没有引入到路网评价中。直到20世纪80年代,日本和英国等国家才开始了路网可靠性方面的初步研究。在研究初期,主要限于对发生灾害时路网连通性的研究,即基于道路网的物理结构分析。

路网连通可靠性或者称终端可靠性是基于抽象道路网络的可靠性测度,最早是由日本的 Mine 和 Kawai^[3]于1982年提出的。它反映的是交通网络节点两两之间保持连通的概率。它可以定义为路网中任意两个节点之间至少存在一条路径连通的概率。利用连通性指标对路段进行分析时,只考虑两种极端状态,即连通和中断,而不考虑路段通行能力的限制。也就是说,在其求解过程中,一般只研究路段或节点的0、1两种状态,即连通或不连通。因此,连通可靠性是路网可靠性研究的基础,它直观地反映了路网的拓扑结构。它的优点是计算简单,所需数据少,可以通过便捷的数学运算对整个路网的连通可靠性进行直接计算。但是,连通可靠性这种衡量方式存在本质上的不足,因为它只允许两种状态存在,要么连通要么中断。对路段上处于这两种极端情况之间的交通状态无法描述。因此,连

通可靠性适用于特殊情况下,如地震等自然灾害发生时的路网状态评价,对于正常交通状态下的评价不适用。在两点间连通可靠度研究的基础上,1989年 Iida 和 Takayama^[4]进一步补充了 Mine 和 Kawai 的研究,将连通可靠性从两点的连通性,拓展到 K 点的连通性,以及网络的连通性。但是此时的研究仍然忽略路段上通行能力的限制,而只考虑两种运行状态,即全负荷能力运行和完全中断。这种假定的缺陷限制了连通可靠性分析的应用范围,因为它假定不论通行能力和旅程长短如何,只要连通就能满足路网的功能,基于这样假定的可靠性分析显然可能带来对路网的错误评价。虽然连通可靠性不适用于日常路网运行状态的评价,但对地震等灾害发生的极端条件下的路网运行状态,其评价或预测结果还是可以满足精度要求的。总之,连通可靠性本质是反映路网在灾害或者突发事件导致部分点段断开或容量衰退的情况下剩余路网继续承担交通运输功能的能力,它着重反映路网在拓扑结构或者是供给上承受冲击、破坏的能力。

此后,路网可靠性研究逐渐从抽象的道路网转向加载交通流的道路网。这一突破,是路网可靠性研究的一大进步。它不再单纯地考虑路网的物理结构,而是同时兼顾了出行需求和路网容量的相互影响,以及道路使用者的出行行为。

在此研究背景下,1991年 Asakura 和 Kashiwadani^[5]提出了行程时间可靠性的概念。它是路网可靠性的另一种评价方法,充分考虑了路网的出行需求以及出行者的出行行为。尽管行程时间可靠性是一个非常重要的衡量路网可靠性的指标,但是在初期研究阶段,由于行程时间数据难以获取,因此,行程时间可靠性的计算成为研究的难点问题。

1996年,Asakura^[6]提出研究行程时间可靠性时应考虑由于道路条件恶化而导致的路网容量衰退,并认为行程时间可靠性是路网容量衰退状态下的行程时间与路网容量没发生衰退状态下的行程时间之比的函数。当它们的比值接近于 1 时,路网基本上在理想状态下运行;当这个值趋于无穷大时,说明某段路发生严重堵塞而不能到达目的地。

1997年,Nicholson 和 Du^[7]指出:当路段能力衰退时,会直接影响到一个或多个路网 OD 对。由于供给和需求的相互影响,这些 OD 对之间的流量也会相应地受到影响。基于此,Nicholson 和 Du 定义了交通流衰退可靠性,即 OD 对或者路网中交通流的衰退不超过某一极值的概率。2000年 Lam^[8]关于这一概念进一步指出,出行需求不仅仅是关于行程时间的函数,它也包含由于潜在需求事件导致的需求变化。

虽然路网可靠性的概念在不断扩展,然而在 20 世纪末,路网可靠性研究的主流仍然是行程时间可靠性。

Bell 等于 1999 年提出用灵敏度分析方法来估计由于交通需求变化导致运行时间的变化,该方法所采用的路径流量估计模型^[9](path flow estimator, PFE)是一种基于 Logit 的 SUE 分配方法,该模型的出行时间

误差服从 Gumble 分布。通过 PFE 可以得到路径流量、路段流量及出行时间和路网的 OD 矩阵, 以此估计运行时间可靠度。

William H.K.Lam 等 1999 年在 Bell 之后提出了计算运行时间可靠度的交通流模拟器 (traffic flow simulator, TFS) 模型^[10, 11]。在该模型中, 一部分路段的流量由安装在这些路段的探测器提供, 而其他路段的流量则依据这些探测到的数据经 SUE 法推算确定, 此后再求得路段的通行时间, 进而确定路径的可靠性。TFS 模型的目标函数实际上是基于 Probit 的 SUE 函数表达式。通过该模型可得到运行时间可靠度、校核后的 OD 矩阵、整个网络估计的路段流量、路段或路径出行时间及其相应的均值和偏差。使用该模型计算运行时间可靠度时, 假定路段和路径的运行时间服从正态分布, 路段出行时间的均值和方差可通过多次模拟的方法得到, 运行时间可靠度的计算方法与 Bell 的计算方法相同。

Iida 等 2001 年又对上述 PFE 模型进行了改进^[12]: 将出行时间表示为流量的函数; 利用排队的等待时间来表示出行延误, 而服务流率则与通行能力相当。通过这些改进及 Monte Carlo 模拟法估计出行时间分布情况, 最终得到了路径的运行时间可靠度、OD 对运行时间可靠度。

2000 年 Seungjae Lee 等建立了基于运行时间可靠度的大范围交通网络分配模型^[13]。该模型在分析交通供给与交通需求的基础上, 得到了相应的运行时间可靠度, 并反映了运行时间的变化; 同时, 该模型也体现了交通拥挤状态下的出行行为特性。

Hiroshi Inouye^[14] 根据 SUE 均衡分配模型的特点, 提出利用该模型分配得到的路径出行时间均值和方差、路段流量等计算运行时间可靠度; 在此基础上, 将出行时间的不同变化范围进行划分, 以此为依据, 对交通流状态服务水平进行了分级讨论。Tien-Pen Hsu 等利用可靠度方法, 提出了一种新方法来计算动态随机的交通网络最短路模型^[15], 以此生成的路径虽然不是网络中的距离最短路, 但却是最可靠路径; 在此基础上, 计算相应路径的运行时间可靠度。

在进行日常状态下的路网运行时间可靠度研究的同时, Hiroshi Wakabayashi 建立了在不确定的雨雪天气下的运行时间可靠度计算方法的框架^[16], 并将其应用于实际的快速路网络中。该研究不仅建立估计路网运行状态的方法, 而且, 也对相关的交通控制策略进行了评价。其研究思路是, 在预测天气状况的基础上, 根据实际的天气状况推算采用何种交通控制策略; 进而, 得到不同天气状况和交通控制策略下路网的运行时间可靠度。该方法为偶发事件下路网运行状态的评价方法奠定了基础。

1999 年, 美国犹他州州立大学的 Anthony Chen^[17, 18] 提出了路网容量可靠性的概念, 即指路网能够成功满足一定 OD 需求水平的概率。Chen 提出了一种计算该指标的方法, 即基于灵敏度分析和 Monte Carlo 法来估计路网的容量。2000 年, Hai Yang、Lo 和 Tang^[19-21] 等将路网容量可靠性

看做是路网在路段通行能力和行程时间可靠性的约束条件下能够承受的最大交通流量,并提出路网容量可借助于随机约束线性规划模型来获得。尽管 Chen 和 Lo 的方法能够获得路网容量可靠性指标值,但是它们主要从路网角度进行宏观评价,体现不出道路单元的可靠度与系统可靠度的联系。另外,路网容量存储系数(1997年由 Wong 和 Yang 提出)依赖于路段的通行能力,而实际通行能力的实测数据很难得到。此外,模型没有考虑使用者的路径选择行为。

1999年,Michael G.H.Bell 将博弈论引入到路网可靠性研究领域^[22, 23],将路网使用者定义为一个人,不考虑其他使用者的行为,并将路段费用看做常数,同时,假定存在一个路网破坏者为对弈者。路网使用者的行为是使期望的路网效用最大,而假定的对弈者是尽量使期望的路网效用最小,最终达到 Nash 平衡状态,即对弈的双方都不能够通过改变单方面的行为而改变路网效用。该方法的计算结果反映的是使用者对路网状态极度悲观时的效用。在上述基础上,Cassir 和 Bell^[24, 25]于2000年进一步引入其他对弈者,然后将对弈者扩展为 $N+M$ 人,不再将路段费用看做是常数,使研究更趋于现实状况。

2000年 Lam 和 Zhang 研究并提出了需求满意度可靠性^[26],反映的是路网提供潜在出行需求的能力。它描述的是出行需求满意率不小于某一特定值的概率。

考虑到可靠性的对立面,1997年 Nicholson^[27]和 Du、2002年 Berdica^[28]相继定义了两种关于脆弱点的概念,即导致路径关闭的路段和事件造成严重后果的路段。脆弱点可靠性包含了事件发生的概率和事件引起的后果。2001年,D'Este 和 Taylor^[29]将脆弱点可靠性定义为由于一小部分路段衰退而导致产生严重后果的概率。基于以上关于脆弱点可靠性的研究,可以得出结论:关键路段就是既重要又脆弱的路段。

随着智能交通系统在交通管理中的应用越来越广泛,交通信息服务对交通需求和供给的影响也越来越大。因此,对路网可靠性的研究也逐渐考虑了信息诱导和驾驶员路径选择行为,将路网可靠性的概念和动态信息诱导等紧密结合,获得了许多研究成果。

将路网容量和出行信息联系起来研究的是 Bell 和 Schmoker^[30],他们于2002年提出了遭遇可靠度的概念,指在使用最低的路径上不遭遇容量衰退路段的概率。通过 Bell 和 Schmoker 的研究表明,路网能够提供的信息水平对道路使用者非常重要。此外,出行者对待冒险的态度也对遭遇可靠性有较大影响,出行者反对冒险的程度越明显,则遭遇可靠性越大,即出行者遇到衰退路段(路段功能失效或减弱)的概率越小。

随着网络可靠性研究的进展,国际社会对路网可靠性评价技术更加关注。进入21世纪以来,可靠性评价技术在相关国际会议的推动下处于浓厚的研究氛围下。2000~2004年,在英国伦敦帝国学院的 Bell 和日本京都

大学的 Iida 等一批知名学者的推动下,在英国、日本和新西兰分别组织了三次大型路网可靠性领域的国际研讨会,大会研讨并发表了数百篇路网可靠性领域基础研究和技术的学术论文,有力地推动了国际路网可靠性研究的进展。

1.3.2 国内研究现状

国内对路网可靠性的研究在近 10 年才刚刚开始,目前的研究主要还停留在理论研究的层面,主要是一批交通院所的学者在进行这方面的研究。

北京工业大学交通研究中心的陈艳艳等展开的路网畅通可靠性研究^[31, 32],借鉴可靠度理论,从交通供需随机性出发,以达到预期服务水平作为道路单元及系统运行可靠的标准,从道路单元服务水平和出行时间两个角度对路网进行研究,并建立了道路运行状态的概率型评价指标——畅通可靠度。畅通可靠度的计算考虑了交通供需随机性,以道路畅通作为系统运行的正常状态,进行系统可靠性评价,这与连通可靠度相比是一次改进。此外,陈艳艳等^[33-37]将畅通可靠度的概念运用到实际路网中,分别对路网运营状态、车辆自动导航路线和道路改、扩建以及路网系统的抗震和减灾问题进行了研究。

北京交通大学的熊志华、邵春福等针对路段之间的相互影响模式进行了路网行程时间可靠度的研究^[38, 39],针对路段之间的相互影响模式所适应条件的不同,按场景将路段间的相互影响模式关系分成不相互影响、同步影响以及弱影响三种模式。在此基础上,利用 Monte Carlo 模拟法进行模拟,得出不考虑路段相关性,会高估路网的可靠性,路段间相互影响的程度越深,行程时间的可靠性值越小等结论。陈琨^[40-42]在对移动源数据进行分析、挖掘的基础上,建立了城市路网行程时间可靠性评价模型与算法,从而为我国城市路网的运行状态评价提供了一种新的方法。

此外,燕山大学的王海超等^[43]用 Monte Carlo 模拟法对公路网的连通可靠性进行了分析,提出了路段容量估计及可行最大流的估计计算方法,以此通过最佳流的计算,估计出交通网络可靠性。东南大学的朱顺应、王炜等^[2]提出了用交通网络的可靠度来评价路网的方法,将交通网络的可靠度定义为从网络一个节点到另一节点在一定服务水平以上的通达概率。上海交通大学的侯立文、蒋馥等^[44, 45],在分析路网可靠性与服务水平关系的基础上,对城市道路网进行了可靠性研究。陈建壮等于 2002 年提出了公路网路段可靠性^[46],公路网路段可靠度的定义为:在一定时期内,保证该路段上的车辆能在某一等级以上的服务水平下畅通行驶的天数占全年天数(取 365 天)的百分比。西南交通大学的金键对交通网络进行了系统分析,研究了道路交通网络结构的时间冗余性、空间冗余性以及时间经济性和空间经济性^[47]。西南交通大学的刘海旭^[48, 49]基于路网容量可靠性概念的分析,构造了基于路段走行时间可靠性的路网容量可靠性双层规划模

型, 并采用灵敏度分析方法进行了求解。哈尔滨工业大学的裴玉龙等^[50]用行程时间可靠性对公路网运营可靠度进行了分析, 并用 Monte Carlo 模拟法进行了模拟计算。

由上可知, 国内对交通运输网络的可靠性研究起步较晚, 有关交通网络可靠性方面的研究比较零散, 不够系统。但这些研究还是具有相当重要的价值, 为我国在这一领域的研究迈出了坚实的一步。

1.3.3 有待研究的问题

路网可靠性研究还处于起步阶段, 无论从可靠性指标的概念、计算方法还是实际运用都还不太成熟, 需进一步完善。

(1) 路网可靠性评价指标体系不完善。尽管已经提出了很多路网可靠性的评价指标, 但是大部分研究还只是针对常态条件, 即不考虑异常事件对路网可靠性的影响。因此, 需要明确界定路网所处的状态及功能, 定义合理的路网可靠性评价指标, 以对路网的整体性能进行评价。

(2) 缺乏可运用于实际路网的有效算法。以往的可靠性算法, 大多只在小型的网络上测试过, 并没有真正用于实际的路网。随着网络规模的扩大, 这些算法的计算量会呈指数级增长, 很难适用于实际大规模城市路网可靠性评价。因此, 针对现实的城市大规模路网而言, 需要研究更加实用的路网可靠性计算方法。

(3) 可靠性评价指标还没有真正得到实际运用。路网可靠性研究的目的是用于指导路网的规划、设计和管理, 使现有的路网更可靠; 但是在以往的道路交通管理和网络设计研究中忽略了路网可靠性因素。如何考虑网络的可靠性因素, 以使改善后的交通网络具有最佳的可靠性能, 是今后值得研究的问题。

1.4 本书主要内容

城市路网可靠性及其保障技术研究包括路网可靠性理论研究和可靠性保障技术研究两部分。

可靠性理论研究是在可靠性评价指标体系建立的基础上, 分析路网可靠性的影响因素, 明确城市路网可靠性研究的内涵, 利用实测和仿真数据, 进而建立了适用于评价常态和异常事件下路网可靠性的评价指标和计算模型, 主要内容如下。

(1) 路网可靠性的评价指标体系研究。依据路网所处的状态, 该体系分为常态下的路网可靠性评价指标和异常事件下的路网可靠性评价指标。常态下路网可靠性的评价指标仅适用于评价考虑日常交通需求波动下路网的可靠性, 本书依据评价指标的定义和适用性, 将其分为微观指标和宏观指标。异常事件下路网可靠性评价指标, 根据异常事件对路网影响的范围

和时间将其分成三类,第一类是交通事故类事件,该类事件对路网的影响时间短,影响范围小,路网能在较短的时间内恢复正常,本书提出用恢复时间可靠性指标来评价该类事件发生情况下路网的可靠性;第二类是异常天气类事件,该类事件对路网的影响时间相对较长,影响范围大,该类事件对路网的容量影响大,可用容量可靠性指标评价该类事件下路网的可靠性;第三类是自然灾害类事件,该类事件对路网的影响是破坏性的,影响范围大,影响时间长,该类事件发生后路网功能发生变化,适合用连通可靠性指标评价。

(2) 常态下路网可靠性计算方法研究。首先利用实测数据对路段交通流量和平均行程车速的波动性进行分析;进而,采用统计法对北京市二环路的宏观可靠度进行了计算,并对计算结果进行了一致性验证。对路段流量的概率分布特征进行量化研究,确定了路段交通流量的概率分布模型;根据流量和车速的散点图,建立了流量和车速的函数关系式;在此基础上,确定了在流量波动范围一定的情况下,路段饱和度和可靠度一一对应关系,通过曲线拟合建立了路段可靠度和饱和度的函数关系模型。根据路段可靠性的算法推导出路网可靠性的近似计算方法;最后,进行了实例计算。

(3) 异常事件下路网的可靠性研究。本书分为突发事件、异常天气和自然灾害下路网可靠性的研究。突发事件下路网可靠性,主要研究交通事故下路网的可靠性,利用恢复时间可靠度指标进行评价。首先分析了交通事故对路网时空的影响,利用仿真技术定量分析了事故的持续时间、事故的严重程度、事故发生地的交通状况、道路等级及路网密度因素对路网恢复时间的影响,建立了基于BP神经网络技术的恢复时间计算模型。通过Monte Carlo模拟方法和全概率公式,计算不同类型事故的恢复时间可靠度。最后,运用实例对该算法进行了验证。

异常天气和自然灾害下路网可靠性,主要研究降水、地震条件下路网可靠性,利用连通可靠度和容量可靠度指标进行评价。首先分析北京市主要异常天气类型及发生频次,根据统计数据不同降水强度对道路网交通通行能力的影响,由此以容量可靠度作为异常天气下道路网承载交通的评价指标;然后分析地震对道路网通行能力的影响,在常规的交通规划四阶段模型基础上建立地震条件下道路网交通规划四阶段模型,以连通可靠度作为地震条件下道路网评价指标,提出考虑地震条件的道路网交通规划方法。

可靠性保障技术研究在可靠性理论研究的基础上,进一步研究可靠性评价技术在实际路网中的运用问题。本部分内容分为两章展开,即基于可靠性分析的城市交通网络优化设计和基于可靠性分析的城市交通管理预警及应急技术研究。

(1) 基于可靠性分析的城市交通网络优化设计技术研究。将可靠性目