

文章编号: 1005-0523(2005)05-0030-05

交通运输网络可靠性研究现状及展望

杨小宝, 张 宁

(北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 首先阐述了交通运输网络可靠性研究的意义, 并介绍了连通可靠性, 出行时间可靠性, 通行能力可靠性和出行需求满意可靠性等的基本概念, 紧接着简述了国内外有关交通运输网络可靠性的研究概况, 指出了交通运输网络可靠性研究的关键技术, 最后探讨了交通运输网络可靠性研究的一些未来发展方向.

关键词: 交通运输网络; 出行时间可靠性; 通行能力可靠性; 研究现状

中图分类号: U491

文献标识码: A

0 引言

当前国内外许多大中城市交通阻塞, 事故丛生, “城市交通病”已成为现代城市最棘手的痼疾之一, 交通问题是世界上所有城市共同关注、并为此付出极大精力的重要课题. 因此, 作为解决交通问题的最根本措施—交通规划, 尤其受到交通管理者和研究人员的重视.

以前的交通规划研究大多数是基于名义上的“典型”交通状况下的分析^[1], 现有的交通规划模型也几乎聚焦于出行时间或出行距离, 很少关注交通系统的可靠性或决定服务质量的其它因素. 这些模型通常假定路段总是以最大的通行能力在服务, 并认为网络结构一直是固定不变的^[2]. 交通运输网络的可靠性分析对这一观念提出了挑战, 这一研究最初的驱动力来源于地震等自然灾害对道路网络连通性的影响. 同时, 还有许多诸如洪水、山崩、交通事故、道路破坏、上下班和节假日等因素, 都会导致网络通行能力的下降. 交通运输网络的可靠性研究主要就是探讨这些不确定性因素对交通运输网络的影响.

1 交通运输网络可靠性的研究意义

最近几年, 交通运输网络可靠性的理论研究和实际应用一致被人们认为是未来交通研究的一个新的重要领域. 许多学者在研究交通运输网络可靠性的过程中都指出了它的重要性. Nicholson 和 Du 指出交通运输系统是一个生命线系统, 它的可靠性研究尤为重要^[2]. Iida 认为 21 世纪的道路使用者将会对道路系统的可靠性提出更高的要求, 道路网络必须能让他们按时到达目的地^[3]. 总而言之, 研究交通运输网络可靠性具有以下几个重要意义:

1) 一个国家或地区的经济发展非常依赖于它的交通运输系统. 尤其是随着 JIT 生产方式的兴起, 使得经济的发展更加依赖于快捷可靠的交通运输系统.

2) 一个可靠的交通运输系统对其它生命系统的维修是极为重要的. 在一些地震、洪水、飓风等自然灾害中, 只有救援的人力和设备能到达灾害发生地点的前提下, 其它的生命线系统才有可能得到修复.

3) 可靠的交通系统将会提高旅行伪间的可预

收稿日期: 2005-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(70131160744)和教育部博士研究基金项目(20010006003)

作者简介: 杨小宝(1981-), 男, 江西新干人, 博士生, 研究方向: 交通规划及管理.

测性及稳定性.旅行时间的变异使得货运司机们经常要增加额外的时间预算.因为货运的延迟不仅会增加运输成本,更为严重地是会导致客户的丢失.

4) 可靠的交通系统能提高人们出行的满意度.对一些影响出行可靠性的主要事件(如交通事故、道路破坏等)进行处理,可以降低交通的总拥挤,总拥挤的降低又会减少出行时间、汽油燃料和尾气的排放量等,从而使人们的出行变得更为安全舒适.

2 交通运输网络可靠性的几种定义

尽管交通运输系统的可靠性具有如此重要的意义,但迄今为止这方面的研究仍非常有限,只是近十年来才逐渐受到人们的重视.现有的关于交通运输网络可靠性的定义主要包括以下几种.

2.1 连通可靠性

连通可靠性指的是网络节点间连通的概率.终点可靠性是它的一个特殊例子,指的是在具体的起讫点之间至少存在一条路径的概率^[4].对每对起讫点而言,只要有一条路径正常服务就认为网络是可靠的.连通可靠性反映了起点到终点的拓扑可及性以及连通的可能性,但没有考虑到路段通行能力的约束.这一定义可适合于地震等非正常的状况,它的本质缺陷是只允许路段有两个状态:要么最大能力的运转,要么完全瘫痪,因此,它不适用于正常状况下交通网络可靠性的分析.

2.2 出行时间可靠性

出行时间可靠性是用来反映出行时间的变异性,它指的是在具体的服务水平下和给定的时间内,从起点到终点出行成功的概率^[4].这一定义可以很好地用来估计日常流量变动下的网络可靠性.Asakura 用网络服务水平作为出行时间可靠性的绩效,把出行时间可靠性概念延伸到能考虑道路低劣化时通行能力下降的情况,其中网络服务水平指的是在网络处于低劣化和无低劣化两种状况下出行时间的比值.此时出行时间可靠性被定义为当前的网络服务水平小于某一具体的网络服务水平的概率^[5],这一可靠性可用作确定道路服务水平标准.

2.3 系统和OD子系统可靠性

OD子系统可靠性指的是网络低劣化而导致出行需求下降时,OD流量的下降率小于某一具体的网络服务水平(最大的可接受的流量下降率)的概率^[6].Du 和 Nicholson 并相应地给出了系统可靠性

的定义.

2.4 通行能力可靠性

通行能力可靠性指的是在具体的服务水平下,网络能满足给定的交通需求值的概率^[7].这一定义的缺陷是所求的储备容量是对所有的OD对而言的,而且没有考虑到路段通行能力间的相互关联性.但由于把路段通行能力当作连续的随机变量,而不只是考虑两种离散的边缘值,它较好地反映了路段通行能力的不确定性.由于出行时间是路段流量和通行能力的函数,出行时间可靠性将是估计通行能力可靠性时的一个“副产品”.

2.5 出行需求满意可靠性

出行需求满意可靠性描述了网络能够满足潜在出行需求的能力,其中潜在出行需求指的是当诸如经济发展、高峰期的非公务出行等周期性的潜在出行事件发生时的出行需求.当潜在的出行事件发生时,道路网络能满足一些出行需求,但仍有些需求将被抑止或被迫推迟,网络能满足的那部分需求被称之为均衡的出行需求.出行需求满意可靠性指的是道路网络能满足某一给定的出行需求满意率的概率,其中,出行需求满意率是均衡出行需求与潜在出行需求的比值^[8].这一定义与前面几种定义的区别是:它不仅考虑了网络通行能力的不确定性,而且考虑了由潜在事件所致的出行需求的不确定性.虽然通行能力可靠性和出行需求满意可靠性都聚焦于网络满足出行需求的能力,但前者只考虑了周期性出行需求是常数且固定的情况,而后者则考虑了周期性需求的变异性.

2.6 其它几种定义

1) 遭遇可靠性.它指的是用户从起点到终点在最小期望出行成本的路径上没有遭遇到任何的低劣化路段的概率.2) 用博弈论方法定义交通网络的可靠性.Bell 假设用户寻求期望出行成本最小的路径的同时,一个潜在的“鬼”通过破坏关键路段而使期望出行成本最大,从而构成了两者间的博弈^[9].这一方法估计的是所有用户对网络的状态都极度悲观时的可靠性值.它可以作为一个谨慎的网络设计方法的理论基础.3) 交通网络的脆弱性.交通网络的脆弱性指的是那些能使网络服务质量有较大下降的事件对交通网络的影响或损害程度^[10].可靠性更强调连通性和概率,而脆弱性更强调网络低劣化的结果,交通网络脆弱性的分析能提高那些发生概率微小但后果非常严重的事件的重要性,这一分析更有利于交通网络的风险评估和风险转移的研

究.

2.7 各种定义的比较

目前运用最多的是出行时间可靠性和通行能力可靠性,出行时间可靠性反映了网络的服务质量,而通行能力可靠性更多地反映了整个系统的绩效.用户感兴趣的是出行时间可靠性,而系统管理者更感兴趣的是通行能力可靠性.出行时间可靠性可作为一种需求满足的绩效,而通行能力可靠性可作为一种网络供给能力的绩效,Yang et al.用两个参

数(出行时间的阈限值和出行需求的阈限值)把出行时间可靠性和通行能力可靠性有机地联系在一起,提出了一个基于上述两种可靠性统筹考虑的二维图示可靠性分析方法^[11].该方法不仅达到了出行时间可靠性和通行能力可靠性的整体化研究之目的,更为重要的是它可以很好地运用到网络的规划和设计之中.上述几种定义的主要特征可简单地总结于表1中.

表1 交通运输网络可靠性的各种定义之主要特征

可靠性	绩效指标	不确定性的来源	约束条件	概率定义
连通性	相同 $\theta_c=1$, 否则 $\theta_c=0$	路段的低劣化	无	连通、不连通网络
出行时间 I	具体的出行时间 θ_t	日常流量的波动	固定需求	出行时间小于 θ_t
出行时间 II	具体的网络服务水平 θ_s	可退化的路段通行能力	固定需求或弹性需求函数和路段通行约束	服务水平小于 θ_s
系统和 OD 子系统	可接受的 OD 流量的下降率 θ_0	可退化的路段通行能力	弹性需求函数和路段通行能力约束	下降率小于 θ_0
通行能力	必需的需求水平 θ_D	可退化的路段通行能力	按比例的 OD 出行和路段通行能力约束	网络储存容量大于 θ_D
出行需求满意	具体的出行需求满意度 θ_s	出行需求和可退化的路段通行力	弹性需求函数	出行需求满意度小于 θ_s

3 国内外研究现状

3.1 国外研究概况

近十年来,交通运输网络可靠性逐渐成为了运输管理理论及实践研究的一个崭新热点.1987年 Mirchandani 和 Soroush 发表了不确定时间及费用情况下的出行者行为问题.1993年, Uchida 和 Iida 建议用边际安全率来确冬出行者对出行的决策.1997年, Du 和 Nicholson 关于低劣化条件下的交通生命线研究,正式点燃了国际学术界开展交通网络可靠性研究的火炬.1999年,在澳大利亚悉尼召开了一次交通网络可靠性的研讨会,重点探讨了交通网络可靠性的内涵及研究内容等问题,《Journal of Advanced Transportation》(Vol. 33, No. 2) 并为此专门出了一个专集.2001年,在日本京都召开了第一次关于交通运输网络可靠性研究的正式国际会议(The 1st International Symposium on Transportation Network Reliability, INSTR).2004年8月在新西兰召开了第二次关于交通运输网络可靠性研究的国际会议,此次会议共收录了40篇这一领域的最新研究论文.

从已有的研究概况可知,交通网络可靠性的研究尚属起步过程,无论是定义、方法、模型及理论都尚未定型,正处于成长时期.目前,交通运输网络的

可靠性研究正是百花齐放、百家争鸣、方兴未艾.

3.2 国内研究概况

国内对这方面的研究只是在近几年才刚刚开始,目前的研究还没有广泛展开,主要是一些交通院所的学者们在进行这方面的研究.北京交通大学的陈艳艳等建立道路单元畅通服务水平的概率测度指标—畅通可靠度,在此基础上给出了单元畅通可靠度和路网系统畅通可靠度的计算方法^[12].北京交通大学的熊志华等通过分析路网可靠性的层次性,把路网可靠性的研究分为三个等级和五个研究层次,并明确了各层次的研究任务^[13].东南大学的朱顺应等对连通可靠性进行了扩展,使用了饱和度确定法来确定路段的可靠度^[14].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^[15].西南交通大学的刘海旭等综合了行程时间和行程时间可靠性两个因素,建立了基于行程质量的随机用户平衡分配模型^[16].

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,它们点燃了我国交通网络可靠性研究的“星星之火”,为我国在这一领域的研究迈出了坚实有益的一步.

4 交通运输网络可靠性研究的关键技术

在系统工程和管理科学的研究领域中,可靠性一直是一个热点问题,但交通运输网络有别于一般网络,它的可靠性研究比一般网络更复杂,更具挑战性.下面简单阐述交通运输网络可靠性研究的几个关键技术.

1) 一般系统的可靠性研究通常假定系统的各个元素只有两种状态(要么是最大流量的运转,要么完全瘫痪),而交通运输网络的各个元素(每条路段)在其通行能力部分下降的情况下仍能服务.同时,每条路段的状态变化往往多于两个,并且各状态间的转换可能是随机的.这样就大大增加了变量的自由度,对这些变量如何降价,对模型的简化是至关重要的.

2) 一般的可靠性分析常假定系统的各个元素之间具有统计独立性,这一假设在交通运输网络中是不成立的.影响道路可靠性的许多事件通常是同时发生在多条路段上,如恶劣天气、地震等.如何判断、处理这些低劣化路段之间的相关性,对交通运输网络可靠性的分析也是十分重要的.

3) 交通是一个人、车、路三者互动的复杂系统.交通流具有人的行为选择特征,交通网络的流量分配将涉及到出行者选择行为的互动,包括出行发生、方式选择、运量分布以及交通配流等诸多问题.交通网络的分析不仅要研究交通流的特性,还要研究道路的交通特性、人的交通特性等.这就使得研究问题更复杂、更具挑战性.

5 展望

随着城市的发展,交通问题日趋严重,交通运输网络可靠性的研究已越来越被人们所重视.对这一领域的研究目前仍处在初步阶段,还有很多方面值得深入探讨.目前的研究还没有对基于出行活动的交通可靠性进行分析,未能阐述清楚交通网络可靠性与人们的出行活动的互动关系,也缺乏在道路维修和网络设计中可靠性的实际应用,以及诸如洪水、恐怖袭击等偶发事件下路网可靠性的研究.

5.1 基于出行活动的交通可靠性

现有的交通可靠性研究运用的都是基于出行的方法,这一方法把出行当作分析的单元,个人的出行链中的每个出行被看作为独立的、不相关的实

体.然而实际上,出行链中的每个出行是相关的,传统的基于出行的研究未能考虑到这些出行的相关性,为此,有必要研究基于活动的可靠性.Lam和Yin研究了基于活动的时变交通分配模型^[17],可在此基础上,研究包含可靠性的基于活动的时变交通分配模型.同时,也可依托出行者道路选择与交通网络的互动关系,研究出行者的活动及空间分布的统计规律,研究交通网络满足出行者的活动需要的状态及能力,按照活动类型的划分及其在交通运输中的重要性和地位,确定交通运输网络的可靠性.

5.2 考虑路网可靠性的道路维修策略

在道路发生低劣化的情况下,其通行能力的可靠性也在改变.一项维修决策,将会改变交通运输网络的低劣化状态,并影响到其可靠性.对低劣化的道路进行维修,又可能引发一些新的交通需求,进而反馈到整个道路网络的可靠性.道路的维修与其通行能力可靠性之间存在一种互动的关系,而且,由于交通运输网络上各路段发生低劣化的相关性较高,选择维修时间及维修地点的决策也相互影响.因此,在交通网络的维修决策中如何综合考虑上述因素将是一个值得深入研究的课题.

5.3 交通运输网络可靠性在网络规划中的应用

研究交通网络的可靠性的最终目的就是要要把它的理论应用到交通运输网络的规划和设计中.交通网络的可靠性与交通网络设计的优化存在什么关系,如何在交通网络设计中考虑可靠性,都是非常有意义的研究方向.尤其值得注意的是,在考虑到可能发生的交通事故及道路低劣化情况下,网络交通流会有一些与过去研究不同的变化规律,研究此条件下的网络设计与网络通行能力可靠性的关系具有深远的意义.一般而言,改变交通运输网络的物理性质,将影响到出行者对目的地、交通工具和路径选择的变化,进而反馈到交通总需求、交通流分布的变化以及网络满足需求之可靠性的变化.

5.4 偶发事件下的路网可靠性

在发生自然灾害或恐怖袭击等偶发事件时,不可靠的交通网络不仅会阻碍该区域的修复过程,而且会导致更多的间接经济损失.比如,1995年日本神户的地震,1999年土耳其、台湾和墨西哥的地震,2001年的美国9.11恐怖事件,2005年的印尼大海啸,最典型的是地震后神户地区的道路网遭到严重的破坏,以致整个区域的运转几乎处于瘫痪状态.我国长江中下游的洪水灾害,也是时有发生,而且每次都给周边的居民造成重大损失.如何保证某些

路段遭受破坏时,整个区域的交通网络仍能正常运行,将是我们需要迫切解决的一个难题.

参考文献:

- [1] Clark, S., Watling, D. Modeling network travel time reliability under stochastic demand [J], *Transportation Research*, 2005, 39B (2): 119—140.
- [2] Nicholson, A. J., Du, Z. P. Degradable Transportation systems: an integrated equilibrium Model [J], *Transportation Research*, 1997, 31B (3): 209—224.
- [3] Iida, Y. Basic Concepts and Future Directions of Road Network Reliability Analysis [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1999, 33(2), 125—134.
- [4] Bell, M. G. H., Iida, Y. *Transportation network analysis* [B], New York: John Wiley and Sons, 1997: 179—192.
- [5] Asakura, Y. Reliability measures of an origin and destination pair in a deteriorated road network with variable flows. In: Bell, M. G. H. Eds., *Transportation Networks: Recent Methodological Advances* [B], Oxford: Pergamon Press, 1998: 273—287.
- [6] Du, Z. P., Nicholson, A. J. Degradable Transportation systems: sensitivity and reliability analysis [J], *Transportation Research*, 1997, 31B (3): 225—237.
- [7] Chen, A., Yang, H., Lo, H. K., Tang, W. H. Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results [J], *Transportation Research* 2002, 36B (3), 225—252.
- [8] Lam, W. H. K., Zhang, N. A new concept of travel demand satisfaction reliability for assessing road network performance [P], Presented at the Matsuyama Workshop on Transport network Analysis, August, 2000.
- [9] Bell, M. G. H. A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks [J], *Transportation Research*, 2000, 34B(6), 533—545.
- [10] Berdica, K. An Introduction to Vulnerability: What has been done, is done and should be done [J]. *Transport Policy*, 2002, 9(2), 117—127.
- [11] Yang, H., Lo, H. K., Tang, W. H. Travel time versus capacity reliability of a road network, In: Bell, M. G. H. and Cassir, C. Eds, *Reliability of Transport networks* [B], Research Studies Press LTD., 2000: 119—138.
- [12] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠度在路网运营状态评价中的应用 [J]. *土木工程学报*, 2003, 36 (1), 36—40.
- [13] 熊志华, 姚智胜. 路网可靠性及其层次分析 [J]. *交通科技与经济*, 2004, 24(4), 1—3.
- [14] 朱顺应, 王炜, 邓卫, 唐勇, 王波. 交通网络可靠度及其通路算法研究 [J]. *中国公路学报*, 2000, 13(1), 92—94.
- [15] 金键. 城市道路交通网络可靠性探讨 [J]. *土木工程学报*, 2004, 2(2), 76—81.
- [16] 刘海旭, 卜雷. 基于行程质量的随机用户平衡分配模型 [J]. *中国公路学报*. 2004, 17(4), 93—95.
- [17] Lam, W. H. K., Yin, Y. F. An Activity-based Time-dependent Traffic Assignment Model [J]. *Transportation Research*, 2001, 35B (6), 549—574.

Current Situation and Prospect on Transport Network Reliability

YANG Xiao-bao, ZHANG Ning

(School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The importance of transport network reliability research is firstly highlighted. Then, the basic concepts of connectivity reliability, travel time reliability, capacity reliability and travel demand satisfaction reliability are presented. Next, the current situation in China and abroad and the key technology about transport network reliability research are introduced and analyzed. Finally, some topics of transport network reliability research in the future are put forward.

Key words: transport network; travel time reliability; capacity reliability; current situation