

城市道路交通系统可靠性研究综述*

林徐勋¹, 隗志才¹, 倪安宁²

(1. 上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200052; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要: 总结了目前城市道路交通系统可靠性研究方法的主要特点, 介绍了连通可靠性、容量可靠性、行程时间可靠性与出行行为可靠性等几种主要可靠性指标的定义和研究方法, 并对各种指标和研究方法进行了比较分析。综述了城市道路交通系统可靠性研究的发展及该领域的一些主要研究成果, 讨论了该领域现有研究的局限性, 最后结合现有的系统可靠性研究理论, 提出了几点进一步深入研究的思路。

关键词: 交通系统; 连通可靠性; 容量可靠性; 行程时间可靠性; 出行行为可靠性; 退化规律; 预案仿真

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-2817-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.004

Review of reliability of urban network transportation system

LIN Xu-xun¹, JUAN Zhi-cai¹, NI An-ning²

(1. Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200052, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper summarized the main features of the current research on urban road traffic system reliability problem. It introduced the definition and research methods of the main reliability indicators including connectivity reliability, capacity related reliability, travel time reliability and travel behavior reliability. It made comparisons among current research methods and reliability indicators. And it reviewed the development and main results of the current research, discussed the limitations of existing research and finally put forward some further research ideas based on current system reliability theory.

Key words: transportation system; connectivity reliability; capacity related reliability; travel time reliability; travel behavior reliability; degradation law; plan simulation

城市交通系统的可靠性越来越受到重视, 因为显著的出行不确定性不仅增加了个人出行决策的难度和出行成本, 也降低了交通系统的效率, 影响了系统的性能, 甚至导致管理措施的失效。可靠性是城市交通系统的重要性能指标, 是对该系统完成运输功能的概率描述, 它不仅受到路网设施等静态要素的影响, 而且更易受动态随机需求的影响, 这使得可靠性本身的不确定性更加难以刻画; 另一方面, 在许多特大城市中, 频繁出现的交通事故与道路维修等临时事件和自然灾害等突发事件, 又要求在满足可达性的前提下, 保证救援车辆快速及时地到达事故地点。由此可见, 可靠性不同于描述城市交通系统运行状态的一般常用指标, 它集短时和长期指标于一体, 既代表评价准则, 又具有政策内涵, 是一个建立在广泛基础上的系统性能指标, 属于多学科交叉的研究领域, 因而需要从交通科学、系统科学、计算机科学、经济学、行为科学等不同角度深入讨论。

城市交通系统可靠性不仅是对交通系统性能的综合反映, 也是构建 ITS 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。此外, 在资源有限的情况下, 研究城市交通系统的可靠性, 可以最大程度地合理配置现有资源, 有效发掘路网潜力, 对提高城市交通管理水平, 应对突发灾害及紧急事件所造成的危害

具有重大理论意义和应用价值。

1 国内外研究现状

交通系统可靠性研究始于 20 世纪 80 年代, 目前在交通运营管理和抗灾规划中得到了应用^[1], 其主要研究集中在连通可靠性、行程时间可靠性、容量可靠性、出行行为可靠性等方面。

1.1 连通可靠性

连通可靠性(connectivity reliability)的定义是网络中的节点保持连通的概率。连通可靠性反映了网络中各节点的连通状况。连通可靠性最早是由日本的 Mine 等人^[2]在 1982 年提出的, 饭田恭敬等人^[3]作了进一步的研究。连通可靠性研究最初较多采用二值法, 主要应用在地震和恐怖事件等极端条件下的路网运行状态评价中^[4]。Bell 等人^[5]扩展了路段的二元状态, 使管理者可主观定义路段的连通与否。

由于连通可靠性是一个 NP 难题, 主要研究方法是图论、布尔代数或整数规划。Wakabayshi^[6]将现有计算方法按计算量分为四类, 提出了计算复杂性的衡量标准。Du 等人^[7,8]建立了受损交通系统可靠度分析的理论框架, 提出了因灾害造成交通系统受损所带来的社会经济影响的评价方法, 所建立的单

收稿日期: 2012-02-29; 修回日期: 2012-04-03 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978163, 71001067)

作者简介: 林徐勋(1984-), 男, 浙江温州人, 博士研究生, 主要研究方向为运输系统规划与管理(linuxun2002@gmail.com); 隗志才(1954-), 男, 吉林长春人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为运输系统规划与管理; 倪安宁(1981-), 男, 山东济宁人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为交通仿真系统优化。

元状态结构函数弥补了连通可靠度二值法的缺陷。朱顺应等人^[9]模仿树木的生长规则,提出适合大型网络通路的产生算法,探讨了路段可靠度等计算问题。范海雁等人^[10]给出了路网可靠性的评价指标和基于路网拓扑结构的可靠性计算模型,确定了弧、路径、节点对及网络结构的可靠性计算方法。杨东援^[11]采用饱和度确定法来计算路段的可靠度,利用串并联系系统可靠度理论计算交通网络的可靠度。许良等人^[12]将连通可靠性作为系统优化目标,建立了基于连通可靠性的城市道路交通网络设计模型,运用分支定界法对其求解,并通过算例验证模型的合理性和求解算法的有效性。

1.2 行程时间可靠性

行程时间可靠性(travel time reliability)定义为在给定的服务水平的时间内从出发地到目的地成功出行的概率。其揭示了行程时间易变性的规律,是当前衡量交通系统绩效的重要指标。第一次明确系统地阐述这一概念及模型的是 Asakura 等人^[13];Chen 等人^[14]根据该概念利用实际数据解释了作为快速路疏解能力衡量指标的行程时间易变性,证明了 TTR 的实用性;Bell 等人^[5]建立了基于正态分布的 TTR 模型,这成为后来许多研究的基础。有些学者将路径选择行为考虑到 TTR 研究中,Chen 在考虑了出行者风险态度和对行程时间的判断误差及行程时间随机性的前提下研究路径选择行为对 TTR 的影响^[15,16]。Liu 等人^[17]利用实际数据研究了 TTR 对路径选择决策的贡献,发现行程时间易变性的降低比减少行程时间本身对出行者而言更有意义。

TTR 对公共交通研究也很有价值,Rietveld 等人^[18,19]分别从乘客和公交时刻表的角度定量研究了行程时间不可靠导致的客户价值损失及不可靠信息的影响程度,指出提高 TTR 应采取的对策。

不论出行者行为如何,TTR 的建模和计算最终都要与交通量联系起来。Bell 等人^[20,21]根据不同的 SUE 模型,通过考察 OD 对之间交通量的微小变化,研究了 TTR 对交通量的敏感性。König^[22]研究的价值不仅是利用调查问卷收集了大量反映人们对 TTR 态度的数据,更重要的是其近似估计方法计算出了不同路径的 TTR。Clark 等人^[23]根据标准分配模型,采用两阶段法建立了基于正常交通流条件下路网行程时间的分布模型,并在小规模路网上进行了实验。

高爱霞等人^[24]分析了快速路交通系统 TTR 的影响因素,构筑了快速路 TTR 模型,在分析和处理道路实时交通数据的基础上,统计其行程时间的分布并拟合行程时间的分布曲线。余艳春等人^[25]构建了基于实时数据的 TTR 模型,并进行案例分析。许良等人^[26]在假设行程时间和出行需求变动服从正态分布的情况下,建立了基于 TTR 的城市道路交通连续网络设计模型。姜乙甲等人^[27]设计了行程时间稳定性指数,分析了不同交通管理和控制策略对于路网可靠性的影响程度。

1.3 容量可靠性

容量可靠性(capacity related reliability)的定义是在一定服务水平下路网容量能够满足一定交通需求水平的概率。Chen 等人^[28]分析了连通可靠性存在的缺陷,提出了路网容量可靠性的概念,指出路段通行能力下降与出行者路径选择行为是影响容量可靠性的主要因素,建立了路网容量可靠性的双层规划模型,基于灵敏度分析和 Monte-Carlo 技术来求解模型^[29]。Lo

等人^[30]提出 PUE(概率用户平衡)模型来反映随机路网中出行者的路径选择行为,以此为基础计算路网的容量可靠性。Sumalee 等人^[31]分析了重大灾害事件后各种交通管制措施对路网容量可靠性的影响,并采用 Monte-Carlo 方法对容量可靠性进行估计,在小型实验网络上进行了测试。Lo 等人^[32]在路网不确定性和通行能力随机性的基础上,建立了基于机会限制的路网通行能力模型,以路网最大需求系数为目标,在可靠度约束的限制下,得到路网最大的交通需求。Yang 等人^[33]对 TTR 和容量可靠性进行整合,提出一个全面的评价指标,采用这种整合方法来评价路网运行状态的方法具有直观性和有效性。

Chen 等人^[34]从道路单元服务水平和行程时间两个角度对路网进行了研究,提出了畅通可靠度测度指标。陈晓明等人^[35]研究了混合交通条件下信号交叉口通行能力的随机性,分析了混合交通条件下交叉口通行能力可靠度对行人、非机动车流量均值的灵敏度。刘海旭等人^[36]建立了信息条件下路网容量可靠性和行程时间可靠性评价模型,并给出了相应的 Monte Carlo 算法和近似算法。

1.4 出行行为可靠性(travel behavior reliability)

Abdel 等人^[37,38]首先提出由于交通系统的随机波动导致出行时间的不稳定性,出行者通常会因此调整自己的出行行为,并根据出行者面对风险的不同表现将出行者分为风险偏好、风险适中、风险规避三种类型,建立多类型风险偏好出行时间和路径选择模型。Srinivasa^[39]假定所有出行者都是风险厌恶者,将路段行程时间波动考虑进路段出行成本函数中,建立用户平衡交通分配模型,并与传统的用户均衡模型进行了比较分析。Franklin^[40]通过实际数据拟合路径出行时间随机分布函数;以早到/迟到惩罚因子为出行者效用函数,建立了基于时间窗和最佳出发时间选择的模型,并对瑞典 Stockholm 市区进行实例分析。Chen 等人^[41]在出行时间预算理论的基础上提出了 α -超出均值可靠性交通分配模型(METE),以出行时间超过时间预算值的条件期望作为出行者最小化目标,分别模拟了在可靠性和非可靠性条件下出行者路径选择行为。Zhou 等人^[42]将 α -超出均值可靠性交通分配模型与另外两种传统的交通分配模型在随机交通需求条件下的分配结果作了比较,表现了出行者对风险的不同偏好对其路径选择的影响。Shao 等人^[43]建立基于随机需求出行的分配模型,并提出了出行时间预算(travel time budget)的成本计算指标,将出行时间表示成均值一方差的线性组合表达式,模拟在可靠性条件下出行者路径选择行为。

1.5 其他路网可靠性分析方法

此外,Bell^[44,45]基于最不利假设,利用博弈论的方法来估计路网可靠度,建立了混合策略下的纳什均衡模型。彭斯俊等人^[46]提出了全局意义上的路网可靠性模型,并进行变结构交通网络优化设计,将可靠性概念应用于道路网络规划。金键^[47]从动态时变性研究了道路交通网络结构可靠性的时间冗余性、空间冗余性以及时间经济性和空间经济性。

2 相关研究发展动态分析

根据交通系统可靠性国内外相关研究综述,总结出目前的研究主要存在以下局限:

a)理论研究还不够完善,缺乏整体框架支持。

大多数研究侧重于将可靠性分析与路网规划方案评价、公交调度管理等实际应用相结合,交通系统可靠性分析的基础理论及方法研究还有待深入完善,并且现有研究缺乏综合考虑路网结构、运营策略及出行者行为对可靠性影响的整体研究框架设计。

b) 紧急事件下的可靠性研究较少,没有认识到路网重构的影响。

紧急事件下的交通系统可靠性研究目前只是在连通可靠性方面有所涉及,而从运营策略及出行行为角度考虑的研究较少,紧急事件后路网重构的可靠性评估及预测也有待探索。

c) 缺乏对心理和行为因素影响的分析,忽视路网知识的价值。

交通行为与系统可靠性之间具有明显的双向影响关系,目前还很少有文献探讨如何将二者结合起来进行深入研究,现有的研究只涉及到路线和出发时间选择,没有考虑到综合各种出行信息的路网知识对交通系统可靠性产生的重要影响。

d) 可靠性改善途径的研究还不够,社会经济评价还不全面。

已有的交通系统可靠性研究大多是从现状分析及评估出发,而缺乏日常及应急条件下可靠性优化和改善措施的研究,更缺少从效益和成本的角度对优化策略及改善方案的评价。

e) 缺乏大规模路网计算工具和实际网络应用,不能为实际管理提供支持。

现有研究基本是以小型实验网络来验证可靠性估计方法,缺少求解大型网络的有效算法,缺少交通行为调查数据以及大规模城市路网上实际交通流数据的支持,因而无法通过实际应用结果的分析和案例研究来对现有算法和模型进行实例验证。

3 研究展望

现有大多数研究根据对象以及系统结构与功能的不同,主要考虑路网连通可靠性、行程时间可靠性、容量可靠性、出行行为可靠性等四个主要研究方向,然而这样的研究既缺乏系统整体性能的考虑,又没有给出这四者之间的关系,因此存在进一步完善的空间。针对以上交通系统可靠性现状研究的不足,有必要从系统性能及其与可靠性的关系入手,研究系统可靠性建模及其求解问题,为全面分析评价交通系统可靠性、探索可靠性分析与改善策略提供理论支撑和引导;结合出行者社会经济特征及出行行为特征,构建交通系统可靠性优化模型及方法,提供突发事件下可靠性的保障策略。未来研究方向以系统科学为方法论,建立完整的研究框架,将可靠性与整个城市社会经济系统联系起来,探索改善交通系统性能的新途径,从整体系统的角度来分析可靠性大小,本文根据目前的研究趋势提供以下几个方面的研究思路。

3.1 城市交通系统可靠性演化规律研究

交通系统的功能不存在能否实现的问题,但却有实现程度的差别,系统性能是对这一差别的准确描述。交通系统可靠性随着时间推移、道路流量的变化逐步发生变化,而界定交通系统性能、选取主客观指标、找到关键影响因素、分析退化机理、揭示可靠性和系统性能之间的映射关系,反映整个交通系统性能的变化规律是进一步深入研究的方向之一。在此基础上,可以进一步分析路网结构、交通运营策略与出行行为对系统可靠性的影响,为设计城市交通系统可靠性优化策略提供参考。

3.2 基于出行行为的城市交通系统行程时间可靠性研究

通过各种数据挖掘方法,从活动模式、人口特征(包括风险态度、职业特征和车辆拥有状况)和出行选择三个方面反映行为特征,分别讨论它们与行程时间可靠性的作用关系,分析行程时间可靠性与活动模式的交叉影响,根据出行者社会经济属性预测其可靠性风险偏好,并进一步应用到基于行程时间可靠性的公交调度策略优化及基于可靠性的交通信息服务消费者剩余分析。

3.3 城市交通系统可靠性数据获取方法技术

交通系统可靠性的实证研究对路网数据的需求量较大,大规模路网流量和时间数据的获取、处理和融合是进一步深入研究可靠性问题的基础。

通常利用道路检测线圈、视频、GIS、GPS等获得多源实时数据,但完整获取大规模路网动态流量、通行速度、道路密度等数据难度较大。因此需要通过一定的技术方法运用历史信息和实时信息对路网交通状态进行预测,以获得长期动态数据,并对所获取的数据进行融合。

3.4 城市交通系统可靠性仿真及预案评估

计算机仿真是研究城市交通这样的复杂系统的有效手段之一。但是现有的大多数交通仿真软件缺少可靠性指标的计算方法,无法对基于可靠性的交通管理政策进行仿真评估。因此,开发基于交通系统可靠性评估的仿真平台是未来交通仿真技术发展的趋势之一;在此基础上设计并实现相应的数值算法,即可对高峰拥堵、交通事故^[48]、大型活动^[49]、不同用户类型、雨雪天气等环境下的交通可靠性进行预案仿真和政策评价。

4 结束语

城市道路交通可靠性越来越受到出行者的关注,现有的可靠性研究方法存在着一定的局限性,本文提供了一些关于可靠性问题的进一步研究思路。随着交叉学科的发展,越来越多的方法将会被应用到可靠性的研究中来。

参考文献:

- [1] YIN Ya-feng, LAM W H K, IEDA H. Reliability assessment on transit network service [C]//Proc of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability. London: Oxford Press, 2003: 89-93.
- [2] MINE H, KAWAI H. Mathematics for reliability analysis [M]. Tokyo: Asakura-Shoten, 1982: 12-14.
- [3] 饭田恭敬. 交通工程学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [4] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done [J]. *Transport Policy*, 2002, 9 (2): 117-127.
- [5] BELL M G H, HIDA Y. Transportation network analysis [M]. New York: Wiley, 1997: 179-192.
- [6] WAKABAYASHI H. Snowfall weather forecast and expressway network reliability assessment [C]//MICHAEL G H B, CHRIS C. Reliability of Transport Networks. New York: Research Studies Press, 2000: 103-118.
- [7] DU Zheng-ping, NICHOLSON A J. Degradable transportation systems: sensitivity and reliability analysis [J]. *Transportation Research B*, 1997, 31 (3): 225-237.
- [8] NICHOLSON A, DU Zheng-ping. Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model [J]. *Transportation Research B*, 1997, 31 (3): 209-223.

- [9] 朱顺应,王炜,邓卫,等. 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):91-94.
- [10] 范海雁,吴志周,杨晓光. 基于道路交通网络拓扑结构的可靠性研究[J]. 中国矿业大学学报,2005,34(4):482-485.
- [11] 杨东援. 交通规划决策支持系统[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [12] 许良,高自友. 基于连通可靠性的城市道路交通离散网络设计问题[J]. 燕山大学学报,2007,31(2):159-163.
- [13] ASAKURA Y, KASHIWADANI M. Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow[C]//Proc of the 19th PTRC Summer Annual Meeting. 1991:73-84.
- [14] CHEN Chao, SKABARDONIS A, VARAIYA P. Travel time reliability as a measure of service[C]//Transportation Research Records. Washington DC:Transportation Research Board,2003:74-79.
- [15] ANTHONY C, RECKER W. Considering risk-taking behavior in travel time reliability[C]//Proc of the 80th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC:TRB Publisher, 2000:1718-1733.
- [16] CHEN A, JI Z, RECKER W. Travel time reliability with risk-sensitive travelers[C]//Transportation Research Record. Washington DC:Transportation Research Board,2002:27-33.
- [17] LIU H X, RECKER W, CHEN A. Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data[J]. Transportation Research A,2004,38(6):435-453.
- [18] RIETVELD P, BRUINSMA F R, Van VUUREN D J. Coping with unreliability in public transport chains: a case study for Netherlands[J]. Transportation Research A,2001,35(6):539-559.
- [19] CAREY M. Ex ante heuristic measures of schedule reliability[J]. Transportation Research B,1999,33(7):473-494.
- [20] BELL M G H, SHIELD C M, BUSCH F. A stochastic user equilibrium path flow estimator[J]. Transportation Research C,1997,5(2):197-210.
- [21] LAM W K, XU G. A traffic flows simulator for network reliability assessment[J]. Journal of Advanced Transportation,1999,33(2):159-182.
- [22] KÖNIG A. The reliability of the transportation system and its influence on the choice behavior[C]//Proc of the 2nd Swiss Transport Research Conference. 2002.
- [23] CLARK S, WATLING D. Modeling network travel time reliability under stochastic demand[J]. Transportation Research B,2005,39(2):119-140.
- [24] 高爱霞,陈艳艳,任福田. 基于蒙特卡罗模拟方法的快速路运行时间可靠度研究[J]. 公路交通科技,2006,23(11):126-132.
- [25] 余艳春,邵春福,郭钰慷,等. 基于实时数据的路网行程时间可靠度模型研究[J]. 现代交通技术,2006(2):70-73.
- [26] 许良,高自友. 基于出行时间可靠性的城市交通网络设计[J]. 系统仿真学报,2008,20(2):494-498.
- [27] 姜乙甲,于雷,陈琨,等. 基于可靠性的奥运会开幕式交通管理与控制措施评价[J]. 交通与计算机,2007,25(4):1-4.
- [28] CHEN A, YANG H, LO H K, *et al.* A capacity related reliability for transportation networks[J]. Journal of Advanced Transportation,1999,33(2):183-200.
- [29] ANTHONY C, YANG Hai, HONG K L, *et al.* Capacity reliability of a road network:an assessment methodology and numerical results[J]. Transportation Research B,2002,36(3):1-28.
- [30] LO H K, TUNG Y K. Network with degradable links: capacity analysis and design[J]. Transportation Research B,2003,37(4):345-363.
- [31] SUMALEE A, KURAUCHI F. Network capacity reliability analysis considering traffic regulation after a major disaster[J]. Networks & Spatial Economics,2006,6(3):205-219.
- [32] LO H K, TUNG Y K. A chance constrained network capacity model reliability of transport networks[C]//Reliability of Transport Networks. New York:Research Studies Press,2000:159-172.
- [33] YANG Hai, LO K K, TANG W H. Travel time versus capacity reliability of a road network[C]//Proc of the 79th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC:TRB Publisher, 2000:105-110.
- [34] CHEN Yan-yan, LIANG Ying, DU Hua-bing. The application of unblocking reliability in the performance appraisal and expansion of urban road network[C]//Proc of the 8th International Conference Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering. 2004:286-290.
- [35] 陈晓明,邵春福,熊志华. 混合交通信号交叉口的通行能力可靠度[J]. 中国公路学报,2008,21(4):99-104.
- [36] 刘海旭,蒲云. 基于路段走行时间可靠性的路网容量可靠性[J]. 西南交通大学学报,2004,39(5):573-576.
- [37] ABDEL M, KITAMURA R, JOVANIS P. Investigating effect of travel time variability on route choice using repeated measurement stated preference data[C]//Transportation Research Records. Washington DC:Transportation Research Board,1995:39-45.
- [38] ABDEL M, KITAMURA R, JOVANIS P. Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies,1997,5(1):39-50.
- [39] SRINIVASA R M. Traffic assignment model with travel time reliability consideration[D]. El Paso:University of Texas,2007.
- [40] FRANKLIN J P. Travel time reliability for stockholm roadways: modeling the mean lateness factor[C]//Transportation Researchs Records. 2009:106-113.
- [41] CHEN A, ZHOU Zhong. The α -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times[J]. Transportation Research Part B,2010,44(4):493-513.
- [42] ZHOU Zhong, CHEN A. Comparative analysis of three user equilibrium models under stochastic demand[J]. Journal of Advanced Transportation,2008,42(3):239-263.
- [43] SHAO H, LAM W H K, MENG Q, *et al.* Demand-driven traffic assignment problem based on travel time reliability in transportation research record[C]//Transportation Researchs Records. Washington DC:Transportation Research Board,2006:220-230.
- [44] BELL M G H. Measuring network reliability: a game theoretic approach[J]. Journal of Advanced Transportation,1999,33(2):135-146.
- [45] BELL M G H. A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks[J]. Transportation Research B,2000,34(6):535-545.
- [46] 彭斯俊,余新华,万丽军. 变结构交通网的优化设计[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(5):105-108.
- [47] 金键. 城市道路交通网络可靠性探讨[J]. 交通运输工程与信息学报,2004,2(2):76-81.
- [48] FANG Shu-ming, WAKABAYASHI H. Travel time reliability for recovery activity immediately after disaster[C]//Procedia: Social and Behavioral Sciences. [S. l.]:Elsevier,2011:621-629.
- [49] MICHIEL J C, VROMANS M. Reliability and heterogeneity of railway services[J]. European Journal of Operational Research,2006,172(2):647-655.