



# 城市交通网络 可靠性分析 理论与实践

袁鹏程 林徐勋 韩印◎著

↑  
CHENGSHI JIAOTONG WANGLUO  
KEKAOXING FENXI  
LILUN YU SHIJIAN



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

# 城市交通网络可靠性 分析理论与实践

袁鹏程 林徐勋 韩 印 著

中国铁道出版社

2018年·北京

## 图书在版编目(CIP)数据

城市交通网络可靠性分析理论与实践/袁鹏程,林徐勋,韩印著. —北京:中国铁道出版社,2018. 11  
ISBN 978-7-113-25078-2

I. ①城… II. ①袁… ②林… ③韩… III. ①城市交通网-网络系统-可靠性-研究 IV. ①U491. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 247546 号

书 名: 城市交通网络可靠性分析理论与实践  
作 者: 袁鹏程 林徐勋 韩 印

---

责任编辑: 许士杰      编辑部电话: (010)51873204      电子信箱: syxu99@163.com  
版式设计: 田冰霞  
封面设计: 崔丽芳  
责任校对: 王 杰  
责任印制: 赵星辰

---

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)  
网 址: <http://www.tdpress.com>  
印 刷: 中煤(北京)印务有限公司  
版 次: 2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷  
开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16 印张: 9.25 字数: 168千  
书 号: ISBN 978-7-113-25078-2  
定 价: 45.00元

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)  
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

1 绪 论 .....	1
2 交通网络可靠性研究现状 .....	5
2.1 交通网络可靠性评价 .....	5
2.1.1 网络连通可靠度 .....	5
2.1.2 网络行程时间可靠性 .....	6
2.1.3 路网容量可靠性 .....	9
2.1.4 其他可靠性评价研究 .....	10
2.2 基于可靠性的网络均衡分析 .....	11
2.3 交通网络动态可靠性 .....	13
3 基于行程时间可靠的基本概念 .....	18
3.1 城市交通网络的表示 .....	18
3.1.1 图、图论及其方法简介 .....	18
3.1.2 基于图论的交通网络 .....	18
3.2 交通网络的不确定性 .....	19
3.2.1 交通需求的不确定性 .....	19
3.2.2 交通供给的不确定性 .....	20
3.2.3 行程时间的不确定性 .....	20
3.2.4 出行者认识的不确定性 .....	21
3.3 行程时间阻抗及分布函数 .....	21
3.3.1 路段行程时间函数 .....	21
3.3.2 交叉口行程时间延误函数 .....	22
3.3.3 交通需求的随机分布拟合 .....	24
3.4 行程时间的随机分布 .....	25
3.5 交通网络行程时间可靠性的计算方法 .....	28
3.6 本章小结 .....	31

4	基于行程时间可靠的交通网络均衡模型	32
4.1	城市交通网络的平衡分析的理论基础	32
4.1.1	符号及相关变量	32
4.1.2	交通网络的确定与随机分配理论	33
4.2	基于行程时间可靠性的路径选择模型	34
4.2.1	问题的引出	34
4.2.2	行程时间相关定义	35
4.3	基于行程时间可靠性的网络平衡条件	37
4.3.1	基于行程时间可靠的确定型网络平衡条件	37
4.3.2	基于行程时间可靠的随机网络平衡条件	38
4.4	基于行程时间可靠的网络平衡分析	38
4.4.1	采用模型及算法	38
4.4.2	不同可靠度水平下的网络平衡算例比较分析	41
4.5	网络的不确定性对交通需求的影响分析	44
4.5.1	分析所采用的配流模型及相关算法	44
4.5.2	不同可靠度水平对网络交通需求的影响	46
4.6	弹性需求下基于行程时间可靠的随机交通平衡分配模型	47
4.6.1	基于行程时间可靠的随机交通平衡分配模型	47
4.6.2	模型求解算法	48
4.7	本章小结	49
5	基于停车换乘的行程时间可靠性评价分析	51
5.1	行程时间可靠性计算方法	51
5.1.1	参数变量及模型条件描述	51
5.1.2	机动车路段行程时间可靠性计算方法	52
5.1.3	停车换乘行程时间可靠性计算方法	53
5.1.4	各方式路径行程时间可靠性计算方法	56
5.1.5	出行成本函数	56
5.2	模型建立	57
5.2.1	出行方式与路径选择	57
5.2.2	模型解析表达式	58
5.2.3	模型求解算法	60

5.3	算例分析	60
5.3.1	路网结构与参数	60
5.3.2	停车换乘政策评估	63
5.3.3	出行者可靠性偏好因子敏感性分析	66
5.3.4	地铁发车频率敏感性分析	67
5.3.5	出行需求弹性系数敏感性分析	69
5.4	本章小结	71
6	拥挤条件下停车换乘行程时间可靠性演化分析	73
6.1	引 言	73
6.2	模型假设和定义	74
6.2.1	变量定义与相关约束条件	74
6.2.2	机动车道路行程时间可靠性计算方法	77
6.2.3	机动车换乘地铁行程时间可靠性计算方法	78
6.3	模型建立	81
6.3.1	出行方式选择	82
6.3.2	出行路径选择	82
6.3.3	不稳定条件下停车换乘动态交通分配模型	82
6.3.4	模型求解算法	83
6.4	算例分析	84
6.4.1	路网结构与参数	84
6.4.2	模型收敛条件判断	86
6.4.3	路段流入流出率分析	86
6.4.4	拥挤条件下停车换乘对行程时间可靠性演化规律作用 分析	89
6.4.5	地铁发车时间间隔敏感性分析	92
6.4.6	路网整体行程时间可靠性动态演化规律分析	93
6.5	本章小结	95
7	交通网络的动态可靠性评价	96
7.1	引 言	96
7.2	交通系统单元失效评价	97
7.2.1	路段单元失效定义	97

7.2.2	路段单元失效评价模型 .....	100
7.2.3	算例分析 .....	102
7.3	独立单元交通系统的失效评价 .....	107
7.3.1	基本交通系统网络结构 .....	107
7.3.2	复杂交通网络结构及分解 .....	108
7.3.3	系统失效模型 .....	110
7.4	非独立单元交通系统的失效评价 .....	111
7.4.1	Copula 理论 .....	112
7.4.2	Copula 函数的参数估计 .....	114
7.4.3	基于 Copula 函数的评价模型 .....	115
7.4.4	算例分析 .....	116
8	交通网络的长时失效可靠性评价 .....	119
8.1	交通系统的长时失效评价 .....	119
8.1.1	路段单元的长时失效评价 .....	119
8.1.2	交通网络系统的长时失效评价 .....	121
8.1.3	算例与分析 .....	122
	参考文献 .....	131

# 1 绪 论

社会经济的快速持续发展带动了我国城市化、汽车化的迅猛发展,进而使交通需求尤其是道路交通量急剧增加。为满足日益增加的交通需求,近年来城市交通基础设施建设投资加大、速度加快,取得了长足的发展。然而交通问题不但依然尖锐,而且愈演愈烈。交通拥挤、秩序混乱、事故频发、污染加剧。城市交通问题已经成为制约社会经济发展的瓶颈问题<sup>[1]</sup>。

交通需求的激增,供需矛盾的加剧,而造成阻塞频发,而随机发生的交通事故等紧急事件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<sup>[2]</sup>。交通网络的随机性一方面表现为需求方的随机变动,由出行目的、个人偏好、路网状况等引起;另一方面是供给方的随机变动,由多种不确定因素随机改变着路网的状况,比如交通事故、自然灾害乃至日常的交通拥堵、道路改造维护等。另外,由于人们对出行信息的掌握的不确切性致使人们在路径选择也带有很大的随机性。但是现有的交通模型往往缺乏对影响交通网络的随机因素的度量,同时用于评价交通运输网络服务水平的指标多为常态性能指标,如饱和度和路网容量、行驶时间、拥挤度、延误、用户满意度、服务水平等非概率测度参数。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,难免有较大的局限性。要合理反映交通运输系统的随机特征,就必须对现有交通评价理论进行补充完善,引入可靠性分析<sup>[2~3]</sup>。

与静态可靠性评价方法对立的便是动态可靠性,也即失效性。如果交通网络中包含的所有路段(或者某些关键路段)因堵塞而失去道路通行的功能时,我们便认为这个网络失去了其应有的功能,即发生失效了。那么,我们的问题是,这个失效的机制如何被动态地(随时间变化)描述和刻画;现实交通系统在拓扑结构上是否有着共同的特征,拓扑结构又会对交通系统的失效产生怎样的影响;现实中我们采取的诸如交通的诱导、道路拥挤收费等政策及管理措施会对交通系统的失效特征造成怎样的影响,是否可以设计出一套信息提供及拥堵收费管理的机制,使得最大限度地降低交通系统的失效概率? 遗憾

的是,到目前为止,虽然交通网络可靠性方面的研究已经非常丰富,但对与之密切相关的交通网络失效问题的研究却相对较少。

交通网络失效机制的研究是对不确定交通系统演化机理理论体系的完善,更是对交通网络可靠性理论的深入和补充。现实中,交通网络的恶化的原因一方面是由于交通需求的激增,供需矛盾的加剧。另一方面便是由于复杂交通系统所涌现出的不确定因素的作用。交通网络的不确定性主要由交通供需的随机变动引起。早期的研究工作主要集中在对于确定性交通系统的研究上,缺乏对影响交通网络的随机因素的度量<sup>[4]</sup>,具有较大的局限性。为了克服传统确定性模型在描述实际问题时的缺陷,学者们从各个角度对不确定性的交通系统的描述及评价模型进行了完善,建立了不确定性交通系统的描述和评价方法体系。主要包括两个方面,一是对不确定条件下的交通系统均衡理论的完善,另一方面便是将可靠性引入到交通系统的评价中。

城市交通系统是一个涉及“人-车-路-环境”四者之间的关系的复杂巨系统<sup>[5]</sup>,对城市交通系统失效规律的探讨需要首先弄明白的就是这个系统中“人-车-路-环境”四者之间的相互作用机理。简单地讲,就是要弄明白在面对不同环境条件时,出行者的出行决策态度会如何改变,这种变化又会对道路交通流量的时空分布规律产生怎样的影响。掌握城市道路交通流的时空分布规律是进行城市交通系统失效研究的基础,而交通系统均衡分析理论正是为找出这种规律的有效理论。交通系统均衡分析的目的是为了解网络上交通流量的分布情况,从而确定网络流量的时空分布状态,为交通系统的改善设计提供理论依据。其过程是通过分析网络上旅行者的路径选择行为,按照一定的路径选择规则将一定交通需求分配到交通系统上,并且使网络最终满足一定的均衡条件。由此看来,旅行者的路径选择行为就自然成为网络分析的关键,其规则将最终影响着网络均衡时的状态。交通系统均衡理论研究的方向就是不断地将影响人们行为的因素考虑到网络均衡的分配模型中,建立与事实最为接近的网络分析模型。自1956年Backman提出等价的交通流分配模型以后,基于更为合理的交通系统行为方面的研究就一直是交通工程和规划研究人员关注和研究的热点问题。根据交通系统流状态和人们对交通信息的掌握情况,关于交通系统均衡问题的研究大致可以分为三个阶段,每一个阶段到下一个阶段的过渡更加真实地反映了现实的交通系统状态。第一阶段为DN-DE(Deterministic Networks-Deterministic Equilibrium)阶段,这个阶段认为交通系统的状态是确定的,出行者对交通系统的了解也是确定的,即所有出行

者都能完全了解交通系统的状况。第二阶段为 DN-SE (Deterministic Networks-Stochastic Equilibrium) 阶段, 这个阶段也认为交通系统的状态是确定的, 并且出行者对交通系统的了解有一定的认识误差, 所有出行者的认识误差在统计意义上服从一定的随机分布。第三阶段为 SN-DE/SE (Stochastic Networks-Deterministic/Stochastic Equilibrium) 阶段, 即出行者所面临的决策环境(交通系统)也是不确定的。当出行者面临的决策环境是确定的时, 出行者进行确定性决策; 当出行者面临的决策环境是不确定的时, 决策过程就变得比较复杂, 通常认为出行者进行风险决策。到目前为止, 学者们已经从各个角度提出了各种各样的风险决策理论用于风险环境下的出行决策分析, 这其中最重要、最经典仍是期望效用理论<sup>[6~10]</sup>。然而, 由于期望效用最大化要求出行者对必须‘绝对理性’, 而事实上, 出行者并非能够做到‘绝对理性’。为了弥补期望效用理论的缺陷, 一种基于‘有限理性’的前景理论 (Prospect Theory) 的风险决策理论被引入交通系统的分析中<sup>[11~15]</sup>, 前景理论从一定程度上较好地解释了出行者风险路径选择的一种行为, 但还是引起学术界的一些争论, 主要原因在于前景理论的路径选择行为并不能在实证中找到足够的证据, 甚至与实证结果相悖<sup>[16~17]</sup>。因此, 寻找更为确切的风险决策理论便成为当前交通系统均衡理论研究的一个主要内容。在这个大的理论背景下, 对交通系统失效机制进行研究, 有助于推动交通均衡理论的进一步完善, 促进相关领域基础理论的研究与发展。

对不确定环境下的交通系统描述和评价的另外一项工作, 便是将可靠性概念引入交通研究, 现已形成了一系列研究成果<sup>[18]</sup>。如, 在交通方式上, 涉及轨道交通运行、公交运行、出租车运行等的可靠性<sup>[19~21]</sup>; 在研究对象上, 涉及路段通行能力、交叉口通行能力以及道路网络的可靠性<sup>[22~23]</sup>; 在评价指标方面, 定义了路网连通可靠度、行程时间可靠度、通行能力可靠度、畅通可靠度、计划可靠度、停车可靠度等指标<sup>[4, 24~29]</sup>; 在可靠性计算方面, 一方面可利用线圈检测器数据、交通管理中心数据或 SP 调查等来获取数据进行交通可靠性计算, 另一方面利用蒙特卡罗等方法通过模拟仿真以及理论推导计算交通可靠性指标<sup>[30~31]</sup>。在行程时间可靠性框架下, 学者们研究了行程时间可靠性对出行行为的影响, 从而提出了考虑行程时间可靠性的交通分配方法<sup>[32~37]</sup>, 并开展了考虑可靠性的路网优化和交通管理措施等方面的研究<sup>[31, 37, 38]</sup>。总体看来, 尽管对交通系统运行可靠性的研究已有不少工作, 但其对交通系统的描述仍是静态的, 无法刻画出交通系统的动态特征。因此, 需要从动态角度对交通

系统可靠性理论进行深入,建立能够反映动态交通系统特征的交通系统的失效模型,并对其失效机制进行探讨。同时,从以上的论述也可以看出,对交通系统失效机制的研究也是对交通系统不确定性理论体系的补充,对于完善不确定交通系统的演化理论体系有着较大的意义。

在实践中,众所周知,交通系统的拥堵问题已经成为目前国内外许多城市最重要的“城市病”。尤其是我国的一些特大型城市,交通拥堵的问题已经相当严峻。随着我国城市化进程的加快,一些大城市,尤其是北京、上海、重庆等超大城市相继出现了资源短缺、环境污染、交通拥堵等“城市病”,其中因出行机动化产生的交通拥堵而导致整个或局部交通系统失效的问题尤为突出。交通系统的失效引发了各种各样的社会问题,已经成为社会经济发展的主要影响因素。根据2006年的调查数据,北京市区快速路和主干道负荷度在0.8以上的路段约占80%,在城市中心区域,部分路段机动车平均时速已下降到10 km/h,有时甚至处于半瘫痪(失效)状态。2010年,北京市区早、晚高峰路网平均车速与2009年同期相比分别降低了3.6%和4.8%。我国15座大城市的居民每天上班比欧洲发达国家多消耗28.8亿分钟,造成的时间损失每天近9亿元。根据最新研究结果,若车辆时速小于55公里,污染排放随车速降低而增加。高峰期,北京市主干线上300万辆机动车拥堵1小时所需燃油为240万至330万升,合1600万至2200万元。不仅如此,交通系统的失效往往还会对城市居民生活造成很大的影响。例如2004年7月10日,北京市受暴风雨袭击的影响,41处道路出现不同程度的积水情况,交通严重受阻,北京市的交通几乎瘫痪<sup>[3]</sup>。更为严重的情况是2007年7月18日,济南市由于受到暴风雨的袭击,整个交通网络陷于瘫痪,造成了巨大的经济损失,更为重要的是人们开始怀疑政府面对突发事件的紧急处理能力,开始抱怨交通网络的脆弱性<sup>[3]</sup>。这件事也引起了国内专家学者对于交通网络失效的重新思考。由此可见,对交通系统失效问题进行研究,找出交通系统的失效规律,对于研究制定“降低交通系统失效机率”的最优政策及管理措施制定,有着非常重要的实际意义。

## 2 交通网络可靠性研究现状

### 2.1 交通网络可靠性评价

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初步研究。城市交通系统可靠性研究主要应用于突发事件规划中,近年来在智能交通系统中也有所应用。在道路交通系统中,其可靠度评价指标主要限定在以下几个方面:连通可靠度、运行时间可靠度、容量可靠度<sup>[2~3]</sup>。

#### 2.1.1 网络连通可靠度

连通可靠性是最早被研究的交通网络可靠性指标。简单地说,连通可靠性是指网络节点间仍然连通的概率<sup>[39]</sup>。它主要借鉴通信网络系统、电力系统等的研究成果,研究双终端、k-终端和全终端连通可靠性。其中双终端连通可靠性是其他连通可靠性的基础。

1982 年, Ming Kawai 提出交通网络连通可靠性的概念<sup>[40]</sup>。连通反映的是交通网络结点两两保持连通的概率。连通可靠性反映了网络中各节点的连通状况,是从网络的拓扑结构来描述网络的可靠性。终端可靠性是连通可靠性的一个特例,用于表示在给定的 OD 对之间至少有一条路径保持连通的概率。只有当每一对 OD 对之间至少存在一条可行的路径,才可认定整个网络是运行良好的。当确定连通可靠性时,只考虑路段的两种运行状态:最大通行能力或者通行能力为零。当路段通行能力为零时表示路段是不连通的,否则是连通的。由于 0-1 连通可靠性不能真正反映系统中存在多种状态的情况, Du, Nicholson, Asakura 等对其改进并进一步扩展<sup>[41,42]</sup>。他们的可靠性定义一般可以表示为:

$$R_p = \sum_y \prod_{j=1}^n r_j^{y_j} (1 - r_j)^{1-y_j} \phi(Y) \quad (2-1)$$

其中  $y_j$  表示路段  $j$  的状态,取 0-1 变量。 $r_j$  是路段  $s$  正常运行的概率, $y$  是状

态变量向量,  $\phi(Y) = \phi(y_1, y_2, \dots, y_n)$

$$\phi(y) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } PI(Y) \leq c \\ 0 & \text{如果 } PI(Y) > c \end{cases} \quad (2-2)$$

上式表示, 如果性能指标  $PI(Y)$  小于等于给定的阈值, 则系统状态  $\phi(Y)$  为 1, 否则为 0。使用不同的性能指标, 可以计算出不同种类的连通可靠性指标。虽然这个定义是从传统的可靠性工程推出的, 但是却不能作为网络可靠性的一般定义。

连通可靠度目前主要算法有图论法、布尔运算法、连通概率法、割集法和近似法等。这些算法差别仅在于计算的效率方面, 但总的说来, 多数算法在路网连通可靠度的研究中都难以令人满意<sup>[43]</sup>。

除上述国外的研究外, 国内也对连通可靠性做了大量研究工作。如陈艳艳等<sup>[3]</sup>在阻塞概率条件下, 引入了畅通可靠度的概念, 分别对路网运营状态、车辆自动导航路线和道路改扩建进行了研究。将连通可靠性应用到公交中的是毛林繁所提出的城市公交网络可靠性模型, 他构建了城市公共交通网络的重图模型, 并依此建立了城市公交网络可靠性的双层规划模型, 其上层模型使整个网络系统可靠且达到最优, 而下层模型是用户平衡模型。

对于连通可靠性来说, 其主要研究对象是系统的物理结构, 因此, 是一种“纯网络”可靠性, 它适用于研究灾后(地震、暴风雨、台风等)与大型事故后网络的可靠性, 主要考虑的是系统的连通性。但是, 连通可靠性没有考虑用户出行行为的影响, 而这正是交通网络不同于其他网络的重要特征。

## 2.1.2 网络行程时间可靠性

与连通可靠性不同, 行程时间可靠性必须明确考虑出行者的路径选择行为。行程时间可靠性是衡量路网服务水平最直观的一种指标之一, 在行程时间变动的情况下, 出行者希望能预测自己的出行时间, 管理者也试图减少行程时间的波动以提供稳定的服务, 国内外很多学者研究了行程时间的预测, 包括长短期的预测等。

Asakura 和 Kashiwasani 于 1991 年提出了运行时间可靠度的概念<sup>[42,44]</sup>。将运行时间的可靠度定义为: 在规定时间内车辆能从起点  $O$  到达终点  $D$  的概率, 用表达式为:  $R_t = p(t \leq t_m)$ 。式中,  $R_t$  是  $OD$  对  $\omega$  间出行时间可靠性,  $t$  是  $OD$  对  $\omega$  间最小出行时间,  $t_m$  是给定的阈值。

在此基础上, 1996 年 Asakura 又提出了由于道路条件恶化而导致的容量

下降的运行时间可靠度的计算方法<sup>[45]</sup>。该运行时间可靠度定义为阻塞状态运行时间与畅通状态运行时间之比的函数,根据这一定义计算的可靠度可作为标准来确定服务水平等级。按照不同的要求,无论是否路段发生拥挤,整个网络都应保持在一定的服务水平上。当它们的比值接近于 1 时,说明路网流量接近于其通行能力;当这个值趋于无穷大时,说明路段发生严重堵塞而不能到达目的地。这一特殊情况与连通可靠度是一致的。

Bell 等于 1997 年提出用灵敏度分析方法来估计由于交通需求的变化导致的运行时间的变化,该方法所采用的路径流量估计模型(The path flow estimator, PEF)是一种基于 logit 的 SUE 分配方法<sup>[46]</sup>,该模型的出行时间误差服从 Cumble 分布。其计算模型为:

$$\min h^T [\ln(f) - 1] + \alpha g^T f \quad (2-3a)$$

$$s. t. m(1-\delta) \leq Af \leq m(1+\delta) \quad (2-3b)$$

$$q(1-\delta) \leq Bf \leq q(1+\delta) \quad (2-3c)$$

$$f \geq 0 \quad (2-3d)$$

其中  $f$  是路径流量,  $g$  是对应的路径费用,  $A$  是路段一路径相关变量矩阵,  $B$  是起讫点对与路径相关变量矩阵,  $q$  是 OD 对间的交通流量,  $m$  是通过检测器检测到的路径流量,  $s$  是容差系数。PFE 的目标函数等价于基于 logit 的 SUE 模型。式(2-3b)用来限制路段的估计流量与其实测流量的差距须在规定的范围内。式(2-3c)表明路径的估计流量与 OD 流量应一致。PFE 模型最后可以求解出路径、路段流量,出行时间以及 OD 矩阵。假定出行时间服从正态分布,通过 PFE 求解的出行时间  $\mu$  为其均值,其方差  $\delta^2$  可通过灵敏度的方法求解。根据下面的运行时间的可靠度的计算公式,可求得运行时间的可靠度。

$$R_j = P_r(g_j \leq g_j^0) = \Phi\left(\frac{g_j^0 - \mu}{\delta}\right) \quad (2-4)$$

其中  $R_j$  为路径  $j$  运行时间可靠度,  $g_j$  指路径  $j$  的出行时间,  $g_j^0$  指规定出行时间。

William H. K. Lam 等人 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模型 TFS(Traffic Flow Simulator)<sup>[47,48]</sup>。在该模型中,一部分路段的流量由安装在这些路段的检测器提供,而其他路段的流量则依据这些检测到的数据经 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概率的 SUE 函数表达

式。其数学模型为:

$$\min F = - \sum_w q_w s_w [c^w(v)] + \sum_a v_a t_a(v_a) - \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (2-5a)$$

$$s. t. \quad \sum_w q_w p_c^w = v_c \quad (2-5b)$$

$$\sum_w q_w p_d^w = \hat{v}_d \quad (2-5c)$$

$$(1-\delta)\bar{q}_w \leq q_w \leq (1+\delta)\bar{q}_w \quad (2-5d)$$

其中,  $\bar{q}_w$  为 OD 对  $w$  间流量的平均值,  $q_w$  OD 对  $w$  间的先验流量,  $s_w$  对  $w$  间的最小期望行程时间,  $c^w$  为 OD 对  $w$  间实际行程时间,  $v_a$  为路段  $a$  的交通流量,  $t_a(v_a)$  为路段  $a$  的行程时间函数,  $v_c$  为没有安装检测器的路段流量,  $\hat{v}_d$  为检测到的路段流量,  $p_c^w$ 、 $p_d^w$  分别为未安装与安装检测器的路段的比例,  $\delta$  为 OD 的容差参数。

通过该模型可以得到运行时间可靠度、校核后的 OD 矩阵, 整个网络的估计路段流量、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, 假设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同 Bell 的计算方法一样。

Chen 等考虑了出行者对行程时间的误差和行程时间本身的随机性, 将路径选择模型进行了分类, 基于 Monte Carlo 技术, Chen 计算了不同路径选择模型下的运行时间可靠性, 并进行了比较, 结果表明不同路径选择行为对行程时间可靠性的估计影响是不同的<sup>[49]</sup>。

Yasunori Iida 等人又对上述 PFE 模型进行了改进, 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, 最终得到路径运行时间可靠度、OD 对运行时间可靠度<sup>[50]</sup>。

2000 年, Seungjae Lee 等人建立了基于运行时间可靠度的大范围交通网络交通分配模型。该模型在分析交通供给与交通需求的基础上, 得到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征<sup>[51]</sup>。

Hiroshi Inouye 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、方差和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, 以此为据, 对交通流服务水平进行

分级讨论<sup>[52]</sup>。Tien-PenHsu 等人利用可靠度方法,提出了一种新方法来计算动态随机网的交通网络最短路模型,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可靠度。

### 2.1.3 路网容量可靠性

在现实中,可能网络容量可靠性受到更多关注。Chen 等分析了连通可靠性存在的缺陷,即没有考虑出行者的路径选择行为以及只能应用于路段处于两种极端的状态的情形<sup>[48]</sup>。针对连通可靠性在分析道路交通网络中的不足,Chen 等提出容量可靠性指标。其含义是:在一定服务水平下,路网容量能满足一定交通需求水平的概率。这个定义是建立在备用能力基础上的。

Chen 等在灵敏度分析和 Monte Carlo 模拟方法基础上,首先提出能力可靠性的概念,用来评价能力下降(恶化)道路网络的性能<sup>[49]</sup>。后来 Chen 等综合多种因素进一步全面分析了能力可靠性的深层含义,并指出连通可靠性也是能力可靠性的一个特例,而且出行时间可靠性与能力可靠性之间存在一定关系<sup>[30,53]</sup>。传统的路网容量概念是指在路段通行能力约束条件并满足路网系统最优的情况下,路网所能承担的最大交通流量。与传统的路网容量概念相比较,Chen 明确考虑了路网中存在的随机因素。路网容量可靠性也可定义为满足路段通行能力及路段走行时间可靠性约束下,路网所能容纳的最大交通流量。与行程时间可靠性相比,容量可靠性是一个更为综合的路网性能指标,为管理者提供了有效控制交通流、增加路段容量的重要信息,也是交通工程师进行道路规划等的重要工具。

Lo 和 Tung 在 Chen 等基础上应用机会约束线性规划,提出了概率用户平衡(Probability User Equilibrium, PUE)概念,认为用户在选择路径时,不仅考虑平均出行时间最短,而且也希望出行时间波动最小,同时为可靠的交通网络设计提供了很好的依据<sup>[31]</sup>。

刘海旭和蒲云构造了基于路段出行时间可靠性的双层规划模型,该模型能够用于评估随机环境下的路网性能,并为路网性能的改善提供依据,适用于长期的能力可靠性研究<sup>[54]</sup>。许良和高自友在介绍城市交通网络设计和 PUE 基本思想和内容的基础上,建立了考虑可靠性条件的城市交通网络设计双层规划模型,兼顾路段能力可靠性与 Wardrop 条件使城市交通网络备用能力最大,将可靠性引入了城市交通网络设计中<sup>[55]</sup>。对出行时间可靠性和能力可靠性的定义比较分析可知,出行时间可靠性适用于出行者对系统服务质量的评

价,而能力可靠性则更适用于系统管理者对系统能力的评价。

#### 2.1.4 其他可靠性评价研究

除了上面所阐述的几种可靠性研究以外,目前许多人开始对行为可靠性、潜在可靠性等进行了研究。所谓行为可靠性研究主要指用户出行行为与网络条件变动之间的交互关系。由于网络中存在无法预测的变动(如交通事故等),这会造成出行者出行行为改变,从而会影响网络的性能。该类的可靠性研究都可以看成是行为可靠性。在 Wardrop 条件下,一般研究各种路径选择行为模式对网络可靠性的影响或时间变动对出行行为的影响。

出行行为决策一般使用量化模型。目前研究不确定性条件下用户出行行为的量化模型主要有期望效用理论(Expected Utility Theory)、随机效用理论(Random Utility Theory)和累积视野理论(Cumulative Prospect Theory),但前二者为国际上绝大部分学者所采用,因为其简单并易于理解与掌握,而后的理论假设没有得到实际事例验证。一般效用理论都假设效用最大化<sup>[56]</sup>。

Noland 和 Polak 研究了随出行时间变动,用户出行行为及期望成本相应发生改变情况下,考虑出发时间的计划表选择问题,指出了时间变动与用户出行行为之间存在直接的联系<sup>[57]</sup>。Avineri 和 Prashke 则进行了具有反馈学习机制的路径选择行为的计算机模拟试验,对比了随机效用最大化和累积视野理论及随机角色扮演和强化学习机理下的路径选择。结果表明出行时间变动越大,出行者对出行时间的差异关注越小,进一步强调了可靠性的意义<sup>[58]</sup>。

Clark 和 Watling 将从“悲观”角度出发研究的可靠性都归为潜在可靠性<sup>[42]</sup>。例如系统薄弱环节的存在及其对整个系统和用户影响的研究。因为交通系统总是存在一些关键设施或关键线路,这些设施或线路一旦发生故障,将对整个交通系统造成巨大的影响。

目前潜在可靠性的研究主要有两个方面:一是脆弱性(vulnerability)概念的提出,脆弱性不仅从安全的角度出发反映了系统的安全程度,而且也反映了系统服务水平的等级。二是博弈论在可靠性分析中的应用,典型的代表是 Bell 和 Cassir 用混合 Nash 均衡来评价网络可靠性<sup>[59]</sup>。

除了上面提到的主要研究内容外,国内外还对其他交通网络可靠性的研究也在相应展开和深入,如成本与可靠性的关系,可靠性的价值估计,风险与危机管理思想在可靠性中的应用,需求满意可靠性评价,服务可靠性的评测,成本效益分析方法在可靠性中的应用等。