



动态 **与** 随机

交通网络模型与应用

■ 李 硕 范炳全 著

同济大学出版社

# 动态与随机交通网络模型与应用

李 硕 范炳全 著

同济大学出版社

## 内容提要

动态与随机交通网络模型是交通控制和智能交通系统(ITS)的基础。本书是作者近几年在充分掌握了国内外前沿研究的基础上,在该领域开展的一项系统研究的成果总结。主要内容包括:动态与随机交通网络模型研究的最新发展、动态交通网络的变分不等式(VIP)类模型及其算法、动态路段行程时间宏观模型、基于路径的大型交通网络动态平衡分配问题算法研究、随机型动态交通分配模型及其应用等。

本书可作为交通工程、交通运输规划等专业的高年级本科生和交通信息工程及控制、交通规划与管理、交通系统工程专业硕士生、博士生的参考教材,也可供从事智能交通系统、交通信息工程及控制、交通运输规划等领域的科技工作者、高层管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

动态与随机交通网络模型及其应用/李硕,范炳全著.

上海:同济大学出版社,2005.4

ISBN 7-5608-2971-6

I. 动… II. ①李…②范… III. ①交通网—动态模型②交通网—随机模式 IV. U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 018593 号

### 动态与随机交通网络模型与应用

李 硕 范炳全 著

责任编辑 杨宁霞 责任校对 杨江淮 封面设计 潘向葵

---

出 版 行 同济大学出版社  
(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏句容印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.25

字 数 365000

印 数 1—1000

版 次 2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2971-6/U·48

定 价 30.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

# 前 言

动态与随机交通网络理论和模型及其在智能交通系统中应用的研究,在国内外特别是在国外正处于高峰时期,虽然有很多的研究成果问世,但仍难以在诸如大型交通网络中算法的计算效率、基于路径的算法、交通网络的随机性、时空路网的概念、动态路段行程时间函数的实用性以及在智能交通系统应用上有所突破。本著作对上述问题作了一些尝试性的研究,取得了以下主要的研究成果。

(1) 本书在第三章中针对动态用户最优(DUO)的各种情况建立了与其相应 VIP 模型、VIP 理论与 DUO 交通网络动态状况的平衡条件之间的等价性、VIP 理论在建立动态交通网络模型上的通用性以及考虑更多的和复杂的交通因素所存在的优势。该章还指出,绝大多数情况的 DUO 类的交通网络问题可以采用 VIP 来构模,像该章讨论到的 DUO 路线选择问题、DUO 出发时间/路线选择二重联合问题、DUO 变出行需求/路线选择问题、DUO 变出行需求/出发时间/路线选择问题;像该章没有讨论到的如 DUO 交通方式选择问题仍然可以用 VIP 来构模。该章还证明了离散型的 VIP 类的动态交通网络模型与最优化方法可通过一个时-空交通网络的概念来转换,使得 VIP 模型转换为最优化的问题,因而可以采用后者来求解离散型 VIP 类的动态交通网络模型。该章重点讨论了凸组合法类的求解算法,设计了像嵌入式对角化算法、嵌入式投影算法和 F-W 算法等。

(2) 本书在第四章中深入分析了交通网络系统的动态与随机性特点,提出了交通网络系统与热力学系统的相似原理,并采用一个实例阐述这种相似性。在此基础上该章建立了一整套的负交通选择熵模型。经过对该模型一阶条件的分析和推导,说明模型存在一阶条件,充分证明了热力学最大熵原理完全可应用到动态与随机交通网络理论中。虽然这一模型还处在初步探索中,目前仍然存在着很多未知的东西,模型也还不完善,但是它与目前其他模型相比较采用了一种全新的思路,与第三章所论述的模型和方法完全不同,走上了一条完全不同的发展动态与随机交通网络理论的途径。

(3) 本书在第五章提出了一个有度排队(SQ)模型用于计算信号动态交通网络的动态路段行程时间函数,并一一求解四种传统模型和 SQ 模型,对它们进行了定量评价。从各种不同的标准和解法,如算法的实现、模型的标定、模型的精确度、FIFO 规则、算法效率以及占用计算机存储空间等诸方面,分析了各种不同模型的特征并加以相互比较。在对比研究的基础上找出各种模型的优缺点,可得出本书所提出的 SQ 模型比四种传统的动态路段行程时间模型在算法的实现、模型的标定、模型的精确度、遵守 FIFO 规则、算法效率以及占用计算机存储空间等诸方面要优越些。该模型还在除自由流和超饱和流之外非常适用于这两种极端情况之间的任何路段驶入流,并且表现出各种比传统的四种模型更优越的特点。此外,由于模型的离散化和标定极大地影响到动态路段模型的行为,而本书所提出的 SQ 模型研究则解决了这两个问题。该章还采用交通仿真系统对路段动态指标进行微观仿真,从而获得这些指标的微观运算结果,然后利用回归分析建立相应的模型。研究表明,交通量构成对路段动态特征指标具有比较大的影响,以往交通流建模研究将车型转化为标准当量车,忽

略了车辆本身的动力特性差异,不同车辆的性能所具有的各自特性被统一的具有相同参数的当量车所掩盖,这与宏观交通流将车流看成由相同性质的元素构成的流体是一致的,在宏观领域的交通流模型中这种差异无法得到反映。但随着智能交通系统的发展,动态交通分配建模中需要考虑交通量构成因素对路段动态行程时间、动态行程车速等的影响,以期更能真实、准确地反映现实交通流的各项特性,满足智能交通系统实时计算的需要。

(4) 本书在第六章试图通过非集计单纯形分解法(DSD)和梯度投影法(GP)两种方法作适用于动态交通网络问题的修改,来达到将基于路径的 DUO 模型算法应用于 DTA 的研究之中的目的。虽然这两种方法已经被广泛地与通用的基于路段的 F-W 算法进行对比研究,所得出的结论均是前者优于后者,但是到目前为止,还没有一项研究涉及针对实际交通网络的动态 DSD 算法和 GP 算法之间的对比研究。本章的另外一个目的就是首先比较静态的 DSD 算法和 GP 算法之间在解决实际规模交通网络问题时的计算效率的优劣,对它们作出实质性的评价,然后针对动态交通网络问题的需要进行修改。采用随机产生的动态交通网络用于敏感性分析,评价算法关于网络规模、交通拥挤程度、OD 点对数以及精确度水平的稳重性(非敏感程度)。另外,针对计算效率的对比分析,评价了这些算法在求解大规模交通网络动态问题的质量水平。如果采用传统的凸组合法如 F-W 算法,要想实时地求解 DTA 问题是不可能的,因为 F-W 算法是按照路段算法设计的,而其路径算法需要很大的计算机存储空间,这对于大型交通网络而言是不可行的。如果使用路径存储器,则将路径流量解从 F-W 算法中抽取出来是可能的。这样虽然解决了计算机存储空间不足的问题,但是如果计算到达收敛时的迭代次数不能相当程度地减少的话,该算法仍然由于计算量过大而不可行。本书的研究结果显示:基于路径的动态交通网络模型及其算法在当前的计算机软硬件技术条件下应用于大型交通网络是可行的。

(5) 可变信息标志(CMS)正在成为智能交通系统(ITS)范畴内的先进的交通管理和旅行者信息系统(ATMS/ATIS)中的一个重要组成部分。通过向出行者提供准确的、及时的、可靠的交通信息,道路网络的运行效率和安全性能就能够得到改进。但是 CMS 系统的运行效率取决于安装多少 CMS 以及它们的安装位置。本书在第七章中提出了能系统地将 CMS 组设置于由高速公路和城市干道组合成的道路网中的优化模型。所提出的模型有五个主要的组成部分:① 一个多时段的交通分配模型及算法,用于估算各 OD 对之间的路径流量和路段交通量;② 一个动态交通转移模型,它将车辆从发生交通事件的路线转移到备选路线上,它与由于交通转移而带来的行程时间的节省率联系在一起;③ 一个时变的排队模型,用于估算在有和无 CMS 信息引导下的车辆延误;④ 一个序列最优化模型,用于在给定量数的 CMS 组的情况下确定其最优化的设置位置;⑤ 一个确定动态系统最优(DSO)的交通量转移率的模型及其算法。

对在基本情形下各种模型参数的随机变化影响,CMS 在道路网中的最优设置位置的敏感性分析得出以下三项发现:① 本书采用的在道路网中最优化地设置 CMS 系统位置的方法,其结果对交通需求和路段交通事件特征参数的随机变化或估算误差是不敏感的,除非路段交通事件特征参数的变化特别的大;② 本书将 CMS 系统设置于路网的优化方法对所处的不同的时间段是非常敏感的,但是,平峰期时间段对最优的 CMS 系统的设置位置几乎没有影响;③ 本书提出的设置 CMS 系统的算法还对交通转移模型参数高度敏感。

本书还得出一个结论,采用动态系统最优交通转移率模型方法用于发生交通事件时的

交通网络流量的最优转移率能大大提高网络的运行效率,可将智能交通系统应用于实时的交通网络运营管理之中。这就充分说明了动态交通网络理论与模型在智能交通系统应用中是大有用武之地的。

(6) 本书在第八章中讨论了 DTA 的另一项可能的应用领域,研究的是随机型动态交通网络模型及其算法。本章提出了一个具有概率行程时间感觉函数的随机型 DTA 模型,它是在随机型动态交通网络环境下出行者感觉函数的基础上而建立的模型。本章假设出行者对出行路径行程时间的感觉及其选择路径的行为可分三大类,即:规避风险型、冒险型以及中庸型。各种感觉函数的概率分布取决于感觉误差函数的分布,后者的概率分布分别是正态分布和 Gamma 分布。然后根据这个时间感觉函数定义各种类型的负效用函数。如果假设出行者选择路径的标准是被选择路径的负效用极小化,则某一路径被选中的概率就由本书的模型确定,则随机型的 DUO 路径选择条件就可由本文的模型来确定。在此基础上,可以建立随机型 DTA 的变分不等式(VIP)模型。本书还对上述模型设计了求解算法,并且针对一个实验道路网络进行了实验计算。计算结果表明:本书提出的模型是可行的。但是对大型交通网络的计算还有待于进一步的完善和检验。

动态与随机交通网络模型是交通研究的前沿,尽管本专著所阐述的模型已取得了一些重大成果,但由于本问题的复杂性还有待於进一步探索。由于受作者水平所限,本专著不足之处在所难免,敬请读者不吝批评指正。

李 硕 范炳全

2004 年 10 月

# 目 录

## 前 言

第 1 章 动态与随机交通网络模型绪论及其应用领域 .....	(1)
1.1 动态与随机交通网络模型的基本概念及其应用领域 .....	(1)
1.1.1 静态交通网络流量平衡概念 .....	(1)
1.1.2 动态交通网络流量的推广 .....	(2)
1.1.3 预测型动态用户最优 DUO 条件 .....	(3)
1.1.4 预测型动态系统最优(DSO)条件 .....	(3)
1.1.5 随机型 DUO 条件 .....	(4)
1.1.6 模糊型 DUO 条件 .....	(5)
1.1.7 动态交通流量分配(DTA) .....	(6)
1.2 DTA 在智能交通系统(ITS)中的应用 .....	(7)
1.2.1 动态交通网络模型的应用意义 .....	(7)
1.2.2 DTA 的应用领域 .....	(8)
第 2 章 DTA 文献综述 .....	(10)
2.1 DTA 文献的回顾 .....	(10)
2.1.1 数学规划类模型 .....	(10)
2.1.2 最优控制模型 .....	(12)
2.1.3 变分不等式(VI)模型 .....	(13)
2.1.4 基于交通仿真的模型 .....	(15)
2.2 其他基本的建模问题 .....	(17)
2.2.1 描述平衡及其行为的问题 .....	(17)
2.2.2 交通流传播建模 .....	(18)
2.3 出行需求的不确定性 .....	(20)
2.4 动态交通网络计算中的路径处理 .....	(21)
2.5 数学可处理性的方法、FIFO 违规现象以及高效率 分解方法 .....	(22)
2.6 本研究的技术路线 .....	(23)
2.6.1 DUE/DUO 模型的改进 .....	(23)
2.6.2 DUE/DUO 模型算法的改进 .....	(23)
2.7 文献综述结束语 .....	(24)

<b>第 3 章</b>	<b>动态交通网络变分不等式 (VIP) 类模型及其算法</b>	(25)
3.1	DUO 条件下的动态路线选择问题建模及其求解算法	(25)
3.1.1	动态平衡条件及其建模	(25)
3.1.2	VIP 问题(3-32)的求解算法	(35)
3.2	动态 DUO 出发时间/路线选择联合模型	(44)
3.2.1	DUO-DT/RC 联合问题的平衡条件	(44)
3.2.2	DUO-DT/RC 联合问题的 VIP 建模	(44)
3.2.3	等价性分析	(45)
3.2.4	求解 DUO-DT/RC-VIP 模型的算法	(46)
3.3	具有变出行需求的 DUO 模型	(48)
3.3.1	DUO 可变出行需求/路线选择的联合模型	(48)
3.3.2	DUO-VD/RC 构模的求解算法	(50)
3.3.3	DUO 可变出行需求/出发时间/路线选择三重联合模型	(52)
3.4	动态系统最优路线选择模型	(54)
3.4.1	动态边际路段行程时间	(55)
3.4.2	DSO 条件	(55)
3.4.3	DSO 的最优化构模	(56)
3.5	本章结论	(58)
<b>第 4 章</b>	<b>基于最大熵原理的动态与随机交通选择模型</b>	(59)
4.1	热力学概念简介	(59)
4.2	交通行为熵——出行者选择交通活动决策行为的随机性和无序性	(61)
4.3	交通选择行为的微观状态与交通选择熵的物理意义	(62)
4.4	交通选择熵模型	(63)
4.5	负交通选择熵模型的一阶条件	(68)
4.6	参数 $\theta_n$ 的标定	(73)
4.7	本章结论	(75)
<b>第 5 章</b>	<b>动态路段行程时间宏观模型研究及其在信号道路网中的应用</b>	(76)
5.1	动态路段行程时间问题的提出	(76)
5.1.1	离散化的动态路段特征参数	(78)
5.1.2	离散的动态路段状态变量	(78)
5.2	离散型动态路段模型	(79)
5.2.1	M-N 模型	(79)
5.2.2	动态路段延误函数模型	(80)
5.2.3	质点排队模型(PQ)	(82)

5.2.4	单元传播模型(CTM)	(83)
5.3	不同的驶入流形态和不同的路网加载结果	(84)
5.4	模型的定性评价	(91)
5.4.1	模型离散化和标定的难易程度	(92)
5.4.2	精确度	(92)
5.4.3	计算效率之一:CPU 时间	(93)
5.4.4	计算效率之二:占用存储空间的大小	(94)
5.5	考虑排队长度的有度排队模型(SQ)	(94)
5.5.1	有度排队 SQ 模型的建模基础	(95)
5.5.2	车辆在信号交叉口处排队与驶离的集散波分析	(96)
5.5.3	具有信号交叉口的动态路段行程时间有度排队模型(SQ)	(99)
5.5.4	对 SQ 模型的定性评价与检验	(104)
5.6	交通量构成对路段动态特征指标的影响研究	(118)
5.6.1	引言	(118)
5.6.2	问题的提出	(118)
5.6.3	交通流模型	(119)
5.6.4	交通量构成对路段动态特征的影响	(121)
5.6.5	动态路段行程时间函数模型	(124)
5.7	本章结论	(125)
<b>第 6 章</b>	<b>基于路径的大型交通网络动态平衡分配问题算法研究</b>	<b>(127)</b>
6.1	基于路径流量的动态与静态交通分配模型	(128)
6.2	采用基于路径算法求解基于路径流量的交通分配问题	(129)
6.2.1	静态型非集计单纯形分解算法(DSD)	(129)
6.2.2	静态型梯度投影算法(GP 法)	(130)
6.2.3	静态型 DSD 和 GP 算法的框架	(131)
6.3	静态型 DSD 算法和 GP 算法的实际应用议题	(136)
6.3.1	算法对计算机内存需求量及其编程	(136)
6.3.2	路径流量更新算法	(137)
6.3.3	算法的搜索方向计算	(137)
6.3.4	算法搜索步长	(137)
6.4	静态型基于路径算法的应用实例	(138)
6.4.1	敏感性分析	(138)
6.4.2	真实道路交通网络计算结果分析	(141)
6.5	基于路径算法的动态扩展	(145)
6.5.1	静态型非集计单纯形分解算法的动态推广(DDSD)	(145)
6.5.2	静态型基于路径算法的动态推广(DGP)	(147)
6.5.3	动态型的 DDSD 算法和 DGP 算法的框架	(148)

6.6	本章结论 .....	(155)
<b>第7章</b>	<b>优化可变信息标志(CMS)系统选址模型——DTA 应用研究之一 .....</b>	<b>(157)</b>
7.1	优化可变信息标志(CMS)系统选址问题的提出 .....	(157)
7.2	交通事件引发车辆延误和交通量转移的模型 .....	(158)
7.2.1	无信息(不安装 CMS)条件下的交通事件延误模型 .....	(159)
7.2.2	交通量转移模型 .....	(161)
7.2.3	提供交通信息条件下的交通事件延误模型 .....	(162)
7.2.4	模型求解算法 .....	(165)
7.3	确定 CMS 系统最优转移率的问题 .....	(165)
7.3.1	CMS 最优转移率的问题及其求解方法 .....	(166)
7.3.2	最优动态时变 CMS 交通量转移率问题的模型 .....	(167)
7.3.3	模型的求解算法 .....	(170)
7.4	敏感性分析 .....	(173)
7.4.1	简单的道路网络算例 .....	(173)
7.4.2	与经验做法之比较 .....	(174)
7.4.3	考虑多个时间段 .....	(175)
7.4.4	交通需求量的不确定性 .....	(177)
7.4.5	交通事件特征参数的不确定性 .....	(178)
7.4.6	交通转移模型参数的不确定性 .....	(179)
7.4.7	动态系统最优交通量转移率的计算结果 .....	(180)
7.5	本章结论 .....	(185)
<b>第8章</b>	<b>随机型 DTA 模型及其应用研究——DTA 应用研究之二 .....</b>	<b>(187)</b>
8.1	具有概率行程时间感觉函数的随机型 DTA 模型应用 .....	(187)
8.1.1	在随机型动态交通网络环境下的出行者感觉函数 .....	(187)
8.1.2	用路者的冒险行为 .....	(189)
8.1.3	随机型动态交通网络模型约束条件 .....	(191)
8.1.4	随机型动态路段行程时间和延误函数 .....	(191)
8.1.5	随机型 DTA 变分不等式(VIP)建模 .....	(192)
8.1.6	随机型 DUO 路线选择问题 VIP 模型求解算法 .....	(192)
8.1.7	实验交通网络的试算 .....	(193)
8.2	本章结论 .....	(204)
	主要变量符号 .....	(205)
	参考文献 .....	(208)
	后 记 .....	(215)

# 第 1 章 动态与随机交通网络模型绪论及其应用领域

动态与随机交通网络模型的概念是在静态与确定型交通网络模型的基础上提出的。其实质就是将时间维和不确定因素加入到后者中去。由于交通出行需求的时变性和随机性,因此,动态与随机交通网络模型能更真实地描述交通流在道路网中的运行形态(Pattern),为实时预测道路网络交通状态提供了理论基础及其应用的可能。它在需要对道路网络交通流作短期快速预测的智能交通系统(ITS),特别是在行车路线引导系统中具有广泛的应用前景。

## 1.1 动态与随机交通网络模型的基本概念及其应用领域

### 1.1.1 静态交通网络流量平衡概念

在提出动态与随机交通网络模型之前,不得不先回顾一下静态用户平衡(UE)交通分配问题。J. G. Wardrop 于 1952 年首先提出 UE 交通分配问题,他考虑的是将一个静态的也就是不随时间发生变化的 OD 矩阵,如一天或一个高峰小时的交通需求如何分配到道路网络中去的问题。他提出了两个原理(Wardrop,1952)<sup>[1]</sup>,一个是用户平衡(UE)原理,另一个是系统最优(SO)原理,分别叙述如下。

UE 原理:在交通流量与行程时间相互影响的(即交通拥挤的)道路网中,若出行者(用户)总是选择他们出行起讫点之间的最短路径作为路径选择的行为准则,则经过日复一日的运行会达到一种平衡状态,即当道路网交通流量平衡时,每对 OD 点对之间所有的已被使用的路径行程时间相等且为最小,而未被使用的路径行程时间大于或等于最小路径行程时间;

SO 原理:在交通流量与行程时间相互影响的道路网中,若出行者总是选择使道路网总的行程时间最小作为他们路径选择的行为准则,则经过日复一日的运行会达到一种系统最优的状态,在该状态之下道路网总的行程时间为最小,并且每一 OD 点对之间所有被使用路径上的边际行程时间相等且为最小,而未被使用的路径上的边际行程时间大于或等于最小边际行程时间。

Beckmann(1956)<sup>[2]</sup>针对 Wardrop 的 UE 原理首先提出了 UE 问题的数学规划建模及其相应的算法;Sheffi(1985)很好地总结了 UE 问题的建模方法及其求解算法,将 Beckmann 提出的非线性数学规划问题用凸组合法加以分解,从而转化为线性的数学规划问题,并且用 Frank-Wolfe 算法求解。Smith(1979)和 Dafermos(1980)提出了用变分不等式对 UE 问题构模,使得 UE 问题的建模框架从数学规划转到了采用更高级的数学工具上。从 20 世纪 50 年代初到 80 年代末,除了上述学者外,大量的学者如 Florian, Ben-Akiva, Bell, Nagurney, Daganzo, Ho, Janson, Merchant, 以及 Nemhauser 等都对 UE 问题的建模和算法做出了大量的贡献,从而使 UE 问题无论在理论上还是在应用上都已达到了一个空前的水平。

## 1.1.2 动态交通网络流量的推广

上述静态 UE 问题可以用下列数学方法来描述:对于任一 OD 点对  $rs$ , 如果路线  $p$  上的流量  $h_p^{rs}$  为正值, 即  $h_p^{rs} > 0$ , 则与其相应的实际路线行程时间  $C_p^{rs}$  为最小, 即  $C_p^{rs} = C_{rs}^*$ , 且若有  $h_{p_1}^{rs} > 0$ , 对于所有满足  $h_p^{rs} > 0$  的  $p$  和  $p_1$ , 则有  $C_p^{rs} = C_{p_1}^{rs} = C_{rs}^*$ 。但是, 若路线  $p$  上的流量为 0, 即  $h_p^{rs} = 0$ , 则与其相应的实际路线行程时间  $C_p^{rs} \geq C_{rs}^*$ 。上述两种情况可以归结于下面一个统一的式子之中:

$$C_p^{rs} \begin{cases} = C_{rs}^*, & \text{若 } h_p^{rs} > 0; \\ \geq C_{rs}^*, & \text{若 } h_p^{rs} = 0. \end{cases} \quad \forall r, s, p \quad (1-1)$$

式中, 
$$C_p^{rs} = \sum_a t_a \delta_{ap}^{rs}, \quad \forall r, s, p \quad (1-2)$$

其中,  $t_a$  为路段  $a$  的行程时间(或路阻), 而  $\delta_{ap}^{rs}$  为静态的路段-路线关联函数, 且

$$\delta_{ap}^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{当路段 } a \text{ 为起讫点对 } rs \text{ 之间路线 } p \text{ 上的一个组成路段时;} \\ 0, & \text{当路段 } a \text{ 不是起讫点对 } rs \text{ 之间路线 } p \text{ 上的一个组成路段时。} \end{cases} \quad (1-3)$$

静态的 SO 问题也可以用与上述相类似的方法来描述, 即

$$\tilde{C}_p^{rs} \begin{cases} = \tilde{C}_{rs}^*, & \text{若 } h_p^{rs} > 0; \\ \geq \tilde{C}_{rs}^*, & \text{若 } h_p^{rs} = 0. \end{cases} \quad \forall r, s, p \quad (1-4)$$

式中,  $\tilde{C}_p^{rs}$  为起讫点对  $rs$  之间路线  $p$  上的边际行程时间,  $\tilde{C}_{rs}^*$  为起讫点对  $rs$  之间的最小边际行程时间, 并且

$$\tilde{C}_p^{rs} = \sum_a \tilde{t}_a \delta_{ap}^{rs}, \quad \forall r, s, p \quad (1-5)$$

$$\tilde{t}_a = t_a + x_a \cdot \frac{dt_a}{dx_a}, \quad \forall a \quad (1-6)$$

其中,  $\tilde{t}_a$  为路段  $a$  的边际行程时间(边际路阻);  $x_a$  为路段  $a$  的交通量;  $\tilde{t}_a = \frac{dt_a}{dx_a}$  为路段行程时间的一阶导数。

### 1.1.2.1 静态 UE 问题的动态推广

静态 UE 问题在加入随时间变化(以后简称时变)的因素之后就动态化了。是否存在动态用户平衡的问题呢? 研究表明:在现实交通网络中不存在真正意义上的动态 UE(简称 DUE)问题, 也不存在动态用户最优(简称 DUO)问题(Chen, 1998)<sup>[3]</sup>, 因此最科学地称呼此类问题的术语是动态交通分配(DTA)问题。但是, 由于传统称呼的原因, 本书仍将一如既往的将其称为 DUO 或 DTA 问题。

在动态交通网络系统中, 系统总是在运动中趋于平衡的, 却总也达不到平衡。因此, 对 DUO 问题的定义自 20 世纪 90 年代开始起就五花八门, 但从目前的研究成果来看主要有两大类: 其一是以 Ran 等(1993)<sup>[4]</sup> 为代表的定义, 即对于每一 OD 点对而言, 每一瞬间在每一

个决策点上,如果所有被使用的路线上的瞬间行程时间相等并且等于最小的瞬间路线行程时间,则此时路网中的动态交通流处于一种被称之为瞬间型或反应型的动态用户最优(DUO)状态;其二为以 Friesz 等(1993)<sup>[5]</sup>, Ran 等(1996)<sup>[6]</sup>,以及 Tong 等(2000)<sup>[7]</sup>为代表的定义,即对于每一 OD 点对而言,在指定的出发时间条件下,每一驾驶员寻求使她或她的实际路线行程时间最小化,也即每一条被使用的路线上的实际路线行程时间相等并且等于最小的实际路线行程时间,则此时道路网中的动态交通流处于一种被称之为预测型的动态用户最优(DUO)状态。本书将采用预测型的 DUO 问题作为主要的研究对象。

### 1.1.2.2 静态 SO 问题的动态推广

在道路网络中若所有使用该路网的驾驶员都达成一种协议,使得在他或她的指定出发时刻接受一条能在较长的时间内使得所有在路网行驶的车辆行程时间的总和达到最小化,则此时该路网处于动态系统最优(DSO)的状态。20 世纪 70 年代末期的 Merchant 和 Nemhauser(1978a,b)<sup>[8][9]</sup>就对此进行过研究。与 DUO 一样,DSO 也有反应型和预测型之分,其主要区别在于用户对路线进行选择时所采用的原则不同。

### 1.1.3 预测型动态用户最优 DUO 条件

预测型动态用户最优(DUO)条件是:对于每一 OD 点对,所有在相同时间段出发的出行者所经历的实际路线行程时间都相等且等于最小的路线行程时间;没有人能够通过单独地改变他或她的行车路线来减少他或她的行程时间。换句话说,对于每一 OD 点对,任何未被使用路线的实际行程时间大于或者等于最小的实际行程时间。因此,用数学语言描述则是:对于每一 OD 点对  $rs$ ,如果所有在时间段  $k$  出发的在路线  $p$  上的流量为正值,即  $h_p^{rs}(k) > 0$ ,则与其相应的实际路线行程时间为最小值,即  $C_p^{rs}(k) = C_{rs}^*(k)$ 。但是,如果此时路线  $p$  上无流量, $h_p^{rs}(k) = 0$ ,则与其相应的实际路线行程时间大于或者等于最小的实际路线行程时间,即  $C_p^{rs}(k) \geq C_{rs}^*(k)$ ,其统一的数学表达式为

$$C_p^{rs}(k) \begin{cases} = C_{rs}^*(k), & \text{若 } h_p^{rs}(k) > 0; \\ \geq C_{rs}^*(k), & \text{若 } h_p^{rs}(k) = 0. \end{cases} \quad \forall r, s, p, k \quad (1-7)$$

式中, 
$$C_p^{rs}(k) = \sum_a \sum_t C_a(t) \cdot \delta_{apk}^{rs}(t), \quad \forall r, s, p, k, \quad \text{且 } t \geq k, \quad (1-8)$$

$$C_{rs}^*(k) = \min_{p,k} \{C_p^{rs}(k)\}, \quad \forall r, s, \quad (1-9)$$

其中, $C_a(t)$ 为路段  $a$  在时间段  $t$  内的行程时间(或路阻),而  $\delta_{apk}^{rs}(t)$ 为动态路段-路线关联函数,且

$$\delta_{apk}^{rs}(t) = \begin{cases} 1, & \text{若 } a, p, k, r, s \text{ 相互关联;} \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (1-10)$$

$t$  表示流量进入路段  $a$  的时间段,而  $k$  表示起讫点对  $rs$  流量沿路线  $p$  出发的时间段。

### 1.1.4 预测型动态系统最优(DSO)条件

对于动态系统最优(DSO)问题的目标函数可以有多种定义,如 Ran 和 Boyce(1994)<sup>[10]</sup>列出了五种被广泛研究的 DSO 目标函数。但本书采用交通网络的实际总行程时间极小化

为 DSO 的目标函数,这是一种最常用的形式。因此,DSO 的条件是:对于每一对 OD 点对,所有在相同时间段出发的出行者所经历的实际边际路线行程时间相等且等于最小值;而任何出行者个人都不可能通过单独地改变他或她的出行路线来获得减少实际边际行程时间的好处。换句话说,每一 OD 点对之间的任何未被使用路线的实际边际行程时间大于或等于最小边际路线行程时间。因此,用数学语言描述则为:对于每一 OD 点对,若所有在时间段  $k$  出发且行驶在路线  $p$  上的流量为正值,即,  $h_p^r(k) > 0$ , 则与其相应的实际边际路线行程时间等于最小值,即,  $\tilde{C}_p^r(k) = \tilde{C}_{rs}^*(k)$ 。如果路线  $p$  上无流量,即,  $h_p^r(k) = 0$ , 则与其相应的实际边际路线行程时间大于或等于最小边际路线行程时间,即,  $\tilde{C}_p^r(k) \geq \tilde{C}_{rs}^*(k)$ 。DSO 条件的数学表达式如下

$$\tilde{C}_p^r(k) \begin{cases} = \tilde{C}_{rs}^*(k), & \text{若 } h_p^r(k) > 0; \\ \geq \tilde{C}_{rs}^*(k), & \text{若 } h_p^r(k) = 0. \end{cases} \quad \forall r, s, p, k \quad (1-11)$$

式中, 
$$\tilde{C}_p^r(k) = \sum_a \sum_t \tilde{C}_a(t) \cdot \delta_{apk}^{rs}(t), \quad \forall r, s, p, k, \quad \text{且 } t \geq k \quad (1-12)$$

动态边际路段行程时间函数  $\tilde{C}_a(t)$  可采取对道路网实际总行程时间求偏导数的方法获得,即

$$\tilde{C}_a(t) = \frac{\partial [\sum_a \sum_t C_a(t') u_a(t')]}{\partial u_a(t)} = C_a(t) + \sum_a \sum_t u_a(t') \cdot \frac{\partial C_a(t')}{\partial u_a(t)}, \quad t' < t \quad (1-13)$$

上述函数可解释为在时间段  $t$  内在路段  $a$  上增加一个单位出行者而产生的对所有的时间段和所有路段的总行程时间的影响。注意:此处  $u_a(t') \neq u_a(t)$ , 且  $C_a(t') \neq C_a(t)$ , 但是有  $u_a(t')$  或  $u_a(t)$  和  $C_a(t')$  或  $C_a(t)$  出现。如果道路网中各路段之间的相互影响可以忽略不计的话,即  $\frac{\partial C_b(t')}{\partial u_a(t)} = 0$ , 对所有的  $a \neq b$  均成立,这时式(1-13)可简化为

$$\tilde{C}_a(t) = C_a(t) + \sum_t u_a(t') \cdot \frac{\partial C_a(t')}{\partial u_a(t)}, \quad t' < t \quad (1-14)$$

### 1.1.5 随机型 DUO 条件

Wardrop 平衡原理的基本假设是:出行者在选择他们最短行程时间路线时所依据的交通信息是完整的。在实际问题中,由于不同的出行者在对行程时间的感觉上会存在着差异,因此交通信息并不是完整的,上述基本假设一般而言是不正确的。当将这种感觉上的差异与一个目标概率分布相联系时,则产生一个随机型模型。例如,若假设存在 Gumbel 分布,就产生一个 Logit 模型。与随机型 DUO(SDUO)问题相应的平衡条件数学表达式为

$$\tilde{C}_p^r(k) \begin{cases} = \tilde{C}_{rs}^*(k), & \text{若 } h_p^r(k) > 0; \\ \geq \tilde{C}_{rs}^*(k), & \text{若 } h_p^r(k) = 0. \end{cases} \quad \forall r, s, p, k \quad (1-15)$$

式中, 
$$\tilde{C}_p^{rs}(k) = C_p^{rs}(k) + \frac{1}{\theta} \cdot \ln h_p^{rs}(k), \quad \forall r, s, p, k \quad (1-16-1)$$

$$\tilde{C}_{rs}^*(k) = \min_p \{ \tilde{C}_p^{rs}(k) \}, \quad \forall r, s, k \quad (1-16-2)$$

$\theta$  为一参数, 反映交通信息不确定性的程度, 意即当  $\theta$  越大 (则交通信息越确定),  $\tilde{C}_p^{rs}(k)$  就越趋近于确定型的路阻  $C_p^{rs}(k)$ ; 反之, 当  $\theta \rightarrow 0$  (则交通信息越不确定) 时, 上式第二项趋近于  $\infty$ , 因而确定型路阻已不再成为随机型路阻  $\tilde{C}_p^{rs}(k)$  的主要部分。一般而言, 有

$$\tilde{C}_p^{rs}(k) = C_p^{rs}(k) + \varepsilon_p^{rs}(k), \quad \forall r, s, p, k \quad (1-17)$$

式中,  $\varepsilon_p^{rs}(k)$  为误差项。采用不同的概率分布可获得不同的  $\varepsilon_p^{rs}(k)$ 。当采用正态分布作为平均路线行程时间的误差项的分布, 则可产生 Probit 模型。式 (1-16-1) 和式 (1-17) 中的  $C_p^{rs}(k)$  可作为平均路线行程时间。因此当误差项趋于 0 时, 随机型 DUO 趋向于确定型 DUO, 因为  $\tilde{C}_p^{rs}(k) \rightarrow C_p^{rs}(k)$ , 故确定型 DUO 是随机型 DUO 的一个特例。

### 1.1.6 模糊型 DUO 条件

与随机型 DUO 问题中采用客观的概率分布来描述平均路线行程时间的误差项所不同的是, 模糊型 DUO 问题则采用主观的几率分布来描述类似的客观体。每一个模糊数  $\tilde{C}_a$  分别由一个实数  $C_a$  和一个隶属度函数  $\eta_{\tilde{C}_a}(C_a)$  来表示, 即

$$\tilde{C}_a = (C_a, \eta_{\tilde{C}_a}(C_a) | C_a \in R^n, \eta_{\tilde{C}_a}(C_a) \in [0, 1]) \quad (1-18)$$

隶属度函数遵从一个几率分布规律, 使得它受限于由一个上限和下限所构成的范围。一般而言, 几率的分布有三角形和梯形等形式, 若为三角形 (图 1-1), 则

$$\tilde{C}_a(t) = (\tilde{C}_a^L(t), \tilde{C}_a^M(t), \tilde{C}_a^U(t)) \quad (1-19)$$

若为梯形 (图 1-2), 则

$$\tilde{C}_a(t) = (\tilde{C}_a^L(t), \tilde{C}_a^{M_1}(t), \tilde{C}_a^{M_2}(t), \tilde{C}_a^U(t)) \quad (1-20)$$

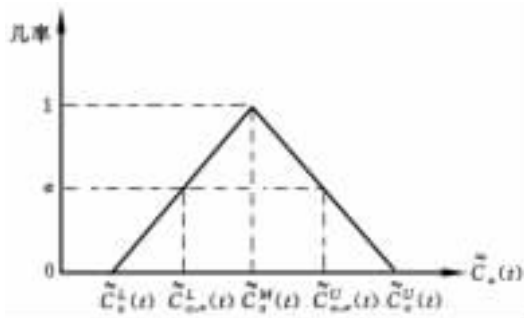


图 1-1 三角形几率分布

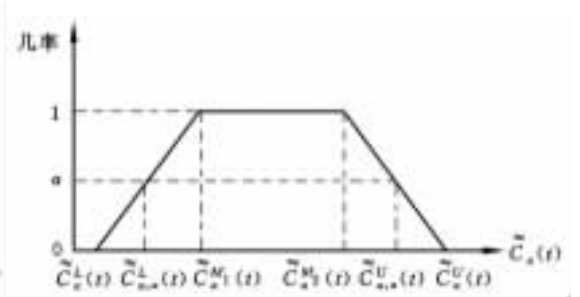


图 1-2 梯形几率分布

若取几率  $\eta = \alpha (0 < \alpha < 1)$ , 并且用  $\eta = \alpha$  的直线去切割上述图中的三角形和梯形, 可分别得到两点  $\tilde{C}_{a,\alpha}^L(t)$  和  $\tilde{C}_{a,\alpha}^U(t)$ 。如果最小可接受的几率设置为  $\alpha$  割线水平, 则受  $\alpha$  割线约束的三角形几率分布为式(1-21), 可简记为

$$\tilde{C}_{a,\alpha}(t) = (\tilde{C}_{a,\alpha}^L(t), \tilde{C}_a^M(t), \tilde{C}_{a,\alpha}^U(t)) = \{[\chi, \eta_{\tilde{C}_{a,\alpha}^L(t)}(\chi)] | \eta_{\tilde{C}_{a,\alpha}^U(t)}(\chi) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in [0, 1], \quad \forall a, t$$

以及 
$$\tilde{C}_{a,\alpha}^L(t) = \min\{\chi\}, \quad \tilde{C}_{a,\alpha}^U(t) = \max\{\chi\}, \quad \text{且 } \eta_{\tilde{C}_{a,\alpha}^L(t)}(\chi) = \eta_{\tilde{C}_{a,\alpha}^U(t)}(\chi) = \alpha \quad (1-21)$$

同样地, 也可类似地写出梯形的几率分布函数, 但由于梯形分为正梯形和一般梯形, 其函数差异很大, 限于篇幅, 不在此处一一列出。  $\alpha$  割线水平有时又称为几率的置信度。

$$\eta_{\tilde{C}_{a,\alpha}(t)}(\chi) = \begin{cases} 0, & \chi \leq \tilde{C}_{a,\alpha}^L(t) \\ \alpha + \frac{\chi - \tilde{C}_{a,\alpha}^L(t)}{\tilde{C}_a^M(t) - \tilde{C}_{a,\alpha}^L(t)}, & \tilde{C}_{a,\alpha}^L(t) \leq \chi \leq \tilde{C}_a^M(t) \\ \alpha + \frac{\tilde{C}_{a,\alpha}^U(t) - \chi}{\tilde{C}_{a,\alpha}^U(t) - \tilde{C}_a^M(t)}, & \tilde{C}_a^M(t) \leq \chi \leq \tilde{C}_{a,\alpha}^U(t) \\ 0, & \chi \geq \tilde{C}_{a,\alpha}^U(t) \end{cases}, \quad \forall a, t, \quad (1-22)$$

模糊型 DUO 条件则是在一定的  $\alpha$  割线水平(或一定的置信度)上, 对于每一 OD 点对, 从相同时间段出发的所有出行者所感觉的路线行程时间是相同的且为最小值; 没有人能够通过单独地改变他或她的出行路线来获得其所感觉的路线行程时间被减少的好处。换句话说, 对于每一 OD 点对, 在  $\alpha$  割线水平之上, 任何未被使用路线的感觉行程时间大于或等于最小的感觉路线行程时间。因此, 在一定的割线水平之上, 对于每一 OD 点对  $rs$ , 若在时间段  $k$  出发的行驶在路线  $p$  上的流量为正值, 即,  $h_p^{rs}(k) > 0$ , 则与其相应的感觉路线行程时间为最小。但是, 若无流量在路线  $p$  上, 即,  $h_p^{rs}(k) = 0$ , 则与其相应的感觉路线行程时间大于或等于最小的感觉路线行程时间, 其数学表达式如下所示

$$\tilde{C}_{p,\alpha}^{rs}(k) \begin{cases} = \tilde{C}_a^{rs*}(k), & \text{若 } h_p^{rs}(k) > 0; \\ \geq \tilde{C}_a^{rs*}(k), & \text{若 } h_p^{rs}(k) = 0. \end{cases} \quad \forall r, s, p, k, \alpha \quad (1-23)$$

式中, 
$$\tilde{C}_{p,\alpha}^{rs}(k) = \sum_a \sum_t \tilde{C}_{a,\alpha}^{rs}(t) \cdot \delta_{apk}^{rs,B*}(t), \quad \forall r, s, p, k, \alpha, \quad \text{且 } t \geq k \quad (1-24)$$

### 1.1.7 动态交通流量分配(DTA)

因为动态用户最优(DUO)模型和动态系统最优(DSO)模型都是解决在动态和时变 OD 矩阵的条件下提出的交通流量分配问题, 只是对出行者选择出行路线行为决策的原则不同而已。故将二者统称为动态交通流量分配(DTA)或动态交通网络模型是合理的。针对不同类型的出行决策有不同的 DTA, 例如有: ① 出行生成类。DUO 可变交通需求/路线选择、DUO 可变交通需求/出发时间/路线选择; ② OD 点对选择类。DUO -OD 点对选择/路

线选择、DUO-OD 点对选择/出发时间/路线选择;③ 交通方式选择类。DUO 交通方式选择/路线选择,DUO 交通方式选择/出发时间/路线选择;④ 出行路线选择类。DUO 出行路线选择、DUO 出发时间/出行路线选择;⑤ DSO 选择类。DSO 出行路线选择、动态道路网交通信号控制系统以及动态交通量感应式交通信号控制系统等。当然上述五大类模型系统还可以放到随机和/或模糊的环境中加以考虑,形成随机型的和/或模糊型的 DTA 模型。

## 1.2 DTA 在智能交通系统 (ITS) 中的应用

从全世界的范围内来看,过去的十几年智能交通系统(ITS)已经吸引了很多学者和工程师们的兴趣和注意力。早在 20 世纪 70 年代西方的学者们就发现一味地修筑道路永远也无法解决道路网络的交通拥挤问题。因此,从那时起他们就将很大一部分注意力放在以下两个方面:其一是对交通出行需求量的控制上;其二是提高交通网络的使用效率。特别是 20 世纪 90 年代初,美国国会通过了“多模式地面交通效率法案”(即 ISTE A 法案,俗称冰茶法案),明确地指出只有通过智能交通系统的运作才能提高现有交通网络的使用效率,保证网络的交通安全以及减少车辆行驶中的延误和对环境的负面影响。ITS 完成上述任务的重要功能在于它能够提供实时的或预测的交通信息和导航信息。ITS 一般有六个子系统,它们分别是:先进的旅行者信息系统(ATIS)、先进的交通管理系统(ATMS)、商务车辆营运系统(CVOS)、先进的车辆控制系统(AVCS)、先进的公共交通系统(APTS)以及先进的乡村交通系统(ARTS)。ITS 技术的应用特征在于它能在交通系统使用者、车辆、交通营运商以及交通基础设施之间交换大量的数据,使得系统能够对交通网络中可能出现的交通拥挤状况进行预警和规避;在自动收费、高效率的调度大货车和大客车、大规模的改善交通安全以及其他相关方面也大有用武之地。为推进这一技术的发展,其硬件和软件都必须大力地发展,否则就难以全面地发挥 ITS 的效用。如今 ITS 的硬件设备如通讯设备、自动化设备、控制设备、内置图像处理技术以及全球卫星定位系统(GPS)已经发展到了很成熟的阶段。有些软件系统的发展也很令人满意,如交通地理信息系统(TGIS)。但是像动态与随机交通网络模型、动态与随机路段行程时间模型、实时行车路线引导系统以及交通事件检测与交通流疏导系统软件目前还处于初级研究阶段,与硬件系统的先进水平相比较反差很大。关于这一点本书还会在文献综述一节中作详细说明。因此,没有 ITS 的软件配合,ITS 的硬件系统不能有效地发挥作用。为了整合智能交通系统的软硬件集成水平,有必要对 DTA 进行深入地研究。本书正是在这个大的背景下开展对动态与随机交通网络模型研究的。

### 1.2.1 动态交通网络模型的应用意义

动态交通网络模型由于描述的是道路网络交通量随时间的推移而发生的变化情况而与静态交通网络模型大不相同,因为前者将动态时变的因素引入交通网络模型之中,更能真实地反映交通流在道路网中的运行情况。例如,在一个大型的道路网络中有些出行的行程时间远远超过了 1h,而静态交通出行需求分析一般是以小时交通量或日交通量为基础的,而不考虑交通量随着时间的变化而发生的变化,明显地不符合实际情况。

动态交通网络模型的重要性的应用意义最好用它在智能交通系统发展中的重要作用来描述如下。