

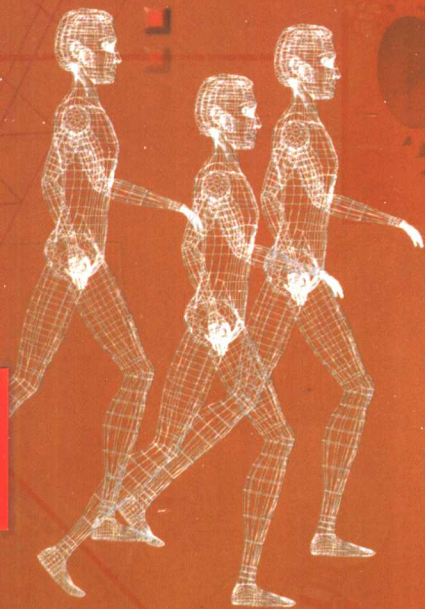
中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

OPTIMIZATION MODELS AND ITS ALGORITHMS
FOR HIGHWAY TOLL COLLECTION SYSTEM

道路收费系统的优化模型及算法

—— 路网收费费率、收费道路网及收费系统的优化

刘伟铭 著



人民交通出版社

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

Optimization Models and Its Algorithms for Highway Toll Collection System

道路收费系统的优化模型及算法

——路网收费费率、收费道路网及收费系统的优化

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统地总结了作者近几年在此领域的主要研究成果,是作者出版的专著《高速公路收费系统理论与方法》的后续研究成果。本书的主要内容包括:道路收费系统的概念及优化,收费道路的多车型多准则交通均衡模型及算法,收费道路分车型费率优化,多车型高速公路平衡网络设计,收费系统方案评估准则,以及多收费方式收费系统的优化模型及算法等。

本专著可作为大专院校有关交通信息工程与控制、交通运输规划与管理、交通工程、交通经济、系统科学、系统工程、工业工程及经济管理等专业研究生教材和高年级本科生选修教材,也可作为政府有关部门、交通规划与设计单位、经济部门,特别是智能运输系统研究单位、物价部门、公路部门、交通管理部门、收费道路营运部门、收费道路投资公司、交通机电集成公司等单位的管理及科研部门的科学研究人员和技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

道路收费系统的优化模型及算法/刘伟铭著. —北京:
人民交通出版社, 2004.2
ISBN 7-114-04916-1

I.道... II.刘... III.公路费用-征收-系统模型-最优化算法 IV.F540.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第119483号

中华人民共和国交通部资助出版

交通类学科(专业)学术著作

道路收费系统的优化模型及算法

——路网收费费率、收费道路网及收费系统的优化

刘伟铭 著

正文设计:孙立宁 责任校对:刘高彤 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100011 北京市朝阳区安定门内外馆斜街3号)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×980 1/16 印张:22.75 字数:365千

2004年5月 第1版

2004年5月 第1版 第1次印刷

印数:0001—3000册 定价:42.00元

ISBN 7-114-04916-1

前 言

交通运输业是国民经济中具有全局性和先导性的基础产业。高速公路作为现代化交通基础设施,以其通行能力大、行车速度高和安全的显著特点,成为适应现代产业结构发展需要的骨干运输方式和重要运输通道。而高速公路的建设与养护需巨额资金,往往难由政府一般税收所能负担,因此我国的高速公路都是收费道路,采用收取通行费的方式以偿还贷款、提供养护所需费用,或实行收费经营,为高速公路路网建设筹集资金,这样不但能大幅度地减轻其对政府一般税收的依赖程度,也符合“谁受益,谁负担”的经济原则。

收费道路(高速公路)的建设与养护需要巨额资金,而目前我国高速公路建设处于大发展阶段,交通投资的短缺及投资合理分配问题日益突出,限于政府财力的不足,不可能满足各方面对投资的所有需要,必然带来投资的有限性。其次,由于对这些宝贵的有限投资资金的取向、分配、规模及管理等方面在很大程度上还缺少系统性、科学性、合理性,有些投资项目的效果难尽人意。另外,B-O-T方式是解决基础建设资金不足的有效方式,投资者也会从自身利益出发,同样也需研究投资项目的位置、投资规模、收费费率和收费道路的赢利预测及风险分析,以便确定和政府的协定,制定经营与投资的对策。因此,研究用最少的资金投入,寻求最佳新修或改建收费道路的位置、容量和相应的收费费率(即收费道路网设计问题),以期取得最大的经济效益和社会效益就显得格外重要了,这些研究对政府、收费道路投资与经营者、民众和社会都有重大的理论与应用价值。

目前我国高速公路路网逐渐形成,为减少高速公路路网中众多不合理的主线收费站问题,以提高高速公路使用效率、服务质量和减少环境污染,按交通部规定,将根据实际情况逐步实现区域或省域或跨省市联网收费。联网收费是智能运输系统(ITS)解决因收费带来许多负面影响的重要手段。由于联网后各路段的交通流相互影响,以及网络下多路径问题,路网下的收费道路费率与各高速公路经营公司获得利润或保证还贷、政府解决交通问题而发展经济这些目的密切相关,会显著地影响用路者的出行行为和出行成本,如何确定联网收费形式下合适的路网收费道路费率就成为一个目前

十分重要而且迫切需要解决的理论与实践问题。

收费道路增加了收费设施,导致高速公路的建设成本增加。而大量采用人工或半自动收费方式,收费管理机构及管理人员队伍庞大,使得用于收费业务本身的投资及运营费用占整个高速公路运营费用中相当高的比例。同时,因缴费给用路者带来了额外的延误和油耗成本,以及给环境带来的污染等一些问题。目前,我国高速公路普遍采用封闭式收费制式和半自动收费方式,系统是否合理经济,以及如何根据当地经济状况、路网结构及交通量分布等因素提出最佳收费系统,有效地减少因收费系统产生的各项成本是目前收费系统建设与营运管理亟待解决的重大问题。

然而,目前国内外采用系统分析的方法研究道路收费系统的优化问题(收费道路平衡网络设计问题、收费道路网收费费率优化与收费系统的优化)几乎是空白。本书是一本专门研究道路收费系统优化问题的应用基础性著作,其主要依据是收费道路属于准公共或准私有物品,收费道路的消费主体是用路者,不同类驾驶员的路径选择存在较大差异,用路者可自行选择出行路径和缴费方式(如存在多收费方式)。其主要内容之一是研究有收费道路情况下的多车型多准则交通均衡模型与算法和基于联网收费道路网出入口点收费的多车型多准则交通均衡模型与算法。由于不同车型对道路的占用、对路面的破坏和营运效益的差异,以及不同车型的用户对时间价值和运输成本认识不同,无论从收费的公平性考虑,还是从不同车型的用户路径选择行为不同考虑,有收费道路的路网交通流分配不同于普通路网的交通流分配问题,必须考虑不同车型的路阻函数的差别,必须考虑路径选择具有多准则特性和路段与路径相依性。因此,本书考虑了不同车型对交通流影响不同,建立了考虑收费、时间、运输成本和个人偏好的多准则和路段相依的分车型的广义路阻函数和广义路径费用函数,在此基础上,提出了有收费道路情况下的分车型多准则的四种交通均衡模型和基于联网收费道路网出入口点收费的多车型多准则四种交通均衡模型,证明了这些模型与 Wardrop 均衡条件之间的等价性,讨论了模型解的唯一性问题,给出了模型的求解算法。

本书的主要内容之二就是将路网管理者、收费道路经营者或投资者和道路使用者纳入一个统一框架中,采用双层规划模型和多车型多准则交通均衡模型研究他们在收费道路平衡网络设计、收费道路费率优化问题上的地位、目标、决策作用和路径选择行为,通过优化计算方法寻找最优的用于收费道路网络新建或改善的交通建设投资方案和各收费路段的分车型收费

费率,已建收费道路联网收费后各路段费率等问题,即研究如何能用最少的资金投入和合理的收费道路费率达到使整个交通网络中某种或一些指标最优的目的和实现收费道路经营与投资者的财务目标,实现兼顾效率最大化原则、成本原则、效益原则、公平原则和用路者路径选择行为准则的目标。同时,可以预测新增或改善收费路段及配合的收费费率,以及已收费道路网的收费策略改变(如费率调整、车型分类标准改变)对收费收入、社会效益和用路者效益的影响;B-O-T项目投标者可实现仔细选择投资项目和决策投资规模,预测投资风险和赢利情况。从而为交通规划部门、收费道路投资部门、收费道路营运管理部门和决策人员提供科学、系统、合理、有效的决策方案和决策数据,使有限的资金投入能取得最佳的投资效益,实现收费道路永续发展和收费道路网的社会效益最大化目的。

本书的主要内容之三是收费系统的优化问题。新建收费道路在决定收费方案或对现有收费系统进行改造时,应考虑采用何种收费制式(封闭式、开放式、均一式或主线/匝道栏栅式)、何种收费方式(如人工收费方式、半自动收费方式、全自动收费方式或不停车收费方式或组合收费方式),由此可进一步组成许多收费系统方案。而收费系统方案的选择会涉及到政府、收费道路经营者、收费道路使用者和非使用者的利益,除了经济层面的考虑之外,还必须兼顾公共设施的特性,以社会福利为着眼点,追求效益与公平性,其所需考虑的因素、准则众多;同时我们所处的社会日趋复杂,收费道路的未来发展充满了不确定性,不同层面的评估者对评估准则的认定与评分充满着模糊评量的特性;若再就收费系统的可行性、公平性、经济性、先进性、适用性、交通流畅性、漏收率与对环境的影响程度等不同因素作综合评估(定性和定量),则可决定较理想的收费方案,使收费系统方案决策过程符合科学方法,减少无谓纷争与困扰。因此,收费系统的方案选择具有“多准则”、“模糊”以及“群体决策”的特性,具有高度复杂性与专业性。故本书的研究采用了系统分析的方法,提出了一套在复杂与不确定性环境下的收费系统优化模型与算法,包括收费系统方案评估准则体系、缴费方式随机选择模型及多收费方式的站资源优化方法和多收费方式收费系统的优化模型及算法等内容,以提高决策品质。可根据当地经济状况、路网结构及交通量分布等情况,定量估算出不同缴费方式的车辆比例,预测拥有TAG(电子标签)与预付卡等非现金付款的车辆比例,计算出最佳收费制式、收费站位置与数量、收费方式、收费站不同收费方式车道数、收费广场几何形状和面积等技术参数,以及最佳收费折扣率(对ETC或储值卡等用户),同时也可用于评

价现有系统的绩效;采用模拟退火遗传算法(Simulated Annealing Genetic Algorithm, SAGA)进行系统寻优,极大地提高了系统的优化速度和优化精度;为了提高决策的科学性与可靠性,提出了采用层次结构分析法(AHP)求算各专家对于评估准则的权重,采用模糊三角函数来表示专家群体对各评价指标权重的共识。在不同的 α 截集下,以不同乐观系数 λ 整合决策群体的意见,并用之模拟不同决策情况下的最佳系统资源配置方案。

为方便工科及管理学科的学生能够顺利阅读全书的绝大部分内容,本书在最后一章介绍了一些最优化和统计技术方面的数学基础知识,还有在交通问题中常用到的 Frank-Wolfe 算法、连续平均法(MSA)和最短路径求解方法。它们构成了本书的最后一个主要内容。

本书的中心内容就是应用系统科学方法论,从量化角度系统深入地研究了道路收费系统的优化问题,所给出的优化模型及求解方法不仅在理论研究上具有前沿性和重要学术价值,而且可以在实际路网下的收费道路费率制定、收费道路平衡网络设计和收费系统方案选择中使用,应该说在实际方面有着宽广的应用前景。故本专著可作为大专院校有关交通信息工程与控制、交通运输规划与管理、系统科学、系统工程、工业工程及经济管理等专业的研究生教材和高年级本科生选修教材,也可作为政府有关部门、交通规划设计与经济部门,特别是公路部门、收费道路营运部门、收费道路投资公司等单位的管理及科研部门的技术人员的参考用书。

本书的主要内容绝大部分取自作者近年来的一些开创性研究成果,在写作本书时作者又查阅了大量的国内外相关文献,力争使本书内容新颖。借此能引起从政府有关部门到收费道路投资公司或收费道路经营者以及有关专家学者和研究生对用定量及系统科学方法论研究网络下的收费道路费率、联网收费道路的费率、离散和连续收费道路网络设计、收费系统的合理配置等问题的重视,从而真正起到抛砖引玉的作用。然而由于道路收费系统优化问题的复杂性与多样性,涉及到国家政策法规、收费道路成本核算及消费者的实际需求等各种复杂因素,它又是交通研究领域难度最大、最具挑战性的前沿问题之一,况且作者才疏学浅,书中疏漏难免,敬请广大读者以及各界专家、学者批评指正,以期能不断改进和完善。

本书撰写及出版得益于国家“十五”重大科技攻关项目、交通部西部科研项目、湖南省科技厅项目和中华人民共和国交通部对交通学术专著出版资助等项目的资助;姜山、李蓉和赵雪平参与了本书中的部分研究工作,完成了部分算例;王倩、黄亚飞和李曙红完成了本书的部分内容计算机输入、

排版工作,谨此致谢。

本书在写作过程中参阅了许多有关资料,特别是香港科技大学 Yang Hai 教授、国家自然科学基金委管理学部副主任黄海军教授、台湾海洋大学赖桢秀(Chen-Hsiu Laih)教授和台湾大学张学孔教授提供给作者的论文与资料,有些已为本书所引用,在此向原作者表示衷心感谢。

本书的完成得益于多年来与国内外同行的广泛学术交流与探讨,特别是得到了国家自然科学基金委管理学部副主任黄海军教授、香港科技大学 Yang Hai 教授、国防科学技术大学罗雪山教授、哈尔滨工业大学王哲人教授、长沙理工大学胡列格教授等的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

作者 刘伟铭

2003 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究动机和目的	1
1.2 问题的透视	4
1.3 本书研究的主要内容	6
1.4 全书的组织	7
第 2 章 道路收费系统优化的文献回顾	11
2.1 道路的特性	11
2.1.1 公共物品、准公共物品、准私有物品和私有物品 的概念	11
2.1.2 高速公路具有级差效益	12
2.1.3 道路的经济属性	13
2.1.4 道路使用者的差异性	14
2.1.5 道路的自然垄断	14
2.1.6 道路的容量不可储存	15
2.1.7 道路的容量不可输送	15
2.1.8 道路的使用存在外部费用	15
2.2 道路收费系统中的一些概念	15
2.2.1 道路收费与收费道路的概念	16
2.2.2 道路收费中的效率与公平的概念	17
2.2.3 定价理论	18
2.2.4 道路收费费率结构	26
2.2.5 收费制式	27
2.2.6 收费方式	29
2.2.7 收费标准	35
2.3 交通分配	38
2.3.1 单一用户类的交通分配问题	38
2.3.2 多用户类的交通分配问题	41
2.4 传统道路收费标准测算方法评述	43

2.4.1	成本反算法	43
2.4.2	收益法	45
2.4.3	类比法	45
2.4.4	消费水平测算法	45
2.4.5	收费弹性法	46
2.4.6	收费额最大法	46
2.4.7	系统动力学(System Dynamics)法	46
2.4.8	路网下的收费道路标准测算方法	47
2.5	用双层规划模型研究收费标准与交通网络设计的进展	48
2.6	收费站优化技术进展	49
2.7	收费系统优化方法研究进展	52
2.8	本章小结	55
第3章 有收费道路情形下的多车型多准则交通		
	均衡模型及算法	60
3.1	引言	60
3.2	符号定义	61
3.3	道路使用者的广义行程费用	63
3.4	多车型多准则固定需求用户均衡模型及算法	65
3.4.1	有收费道路情形下的多车型多准则固定需求 用户均衡模型	66
3.4.2	模型与用户平衡条件之间的等价性证明	66
3.4.3	解的唯一性讨论	68
3.4.4	求解算法	71
3.5	多车型多准则弹性需求用户均衡模型及算法	72
3.5.1	有收费道路情形下的多车型多准则弹性需求 用户均衡模型	73
3.5.2	模型与用户平衡条件之间的等价性证明	73
3.5.3	解的唯一性讨论	75
3.5.4	求解算法	76
3.6	多车型多准则随机用户均衡模型及算法	78
3.6.1	有收费道路情况下的多车型多准则随机 用户均衡模型	79
3.6.2	模型对应于与 Logit 形式的路径选择的证明	79

3.6.3	解的唯一性讨论	80
3.6.4	求解算法	81
3.7	多车型多准则系统最优交通分配模型及算法	82
3.7.1	有收费道路情形下的多车型多准则系统最优的 交通分配模型	82
3.7.2	模型与系统最优条件之间的等价性证明	83
3.7.3	解的唯一性讨论	84
3.7.4	求解算法	85
3.8	小结	85
第 4 章	基于联网收费道路网入出口点收费的多车型多准则交通 均衡模型及算法	87
4.1	符号定义	87
4.2	基于联网收费道路网入出口点收费的广义路径 行程费用函数	90
4.3	基于联网收费道路网入出口点收费的多车型多准则固定需求 用户均衡模型及算法	91
4.3.1	多车型多准则固定需求用户均衡模型	92
4.3.2	模型与用户平衡条件之间的等价性证明	92
4.3.3	解的唯一性讨论	94
4.3.4	求解算法	95
4.4	基于联网收费道路网入出口点收费的多车型多准则弹性需求 用户均衡模型及算法	95
4.4.1	多车型多准则弹性需求用户均衡模型	97
4.4.2	模型与用户平衡条件之间的等价性证明	97
4.4.3	解的唯一性讨论	99
4.4.4	求解算法	100
4.5	基于联网收费道路网入出口点收费的多车型多准则随机 用户均衡模型及算法	100
4.5.1	多车型多准则随机用户均衡模型	100
4.5.2	模型对应于与 Logit 形式的路径选择的证明	101
4.5.3	解的唯一性讨论	102
4.5.4	求解算法	102
4.6	基于联网收费道路网入出口点收费的多车型多准则系统最优	

交通分配模型及算法	102
4.6.1 多车型多准则系统最优的交通分配模型	102
4.6.2 模型与系统最优条件之间的等价性证明	103
4.6.3 解的唯一性讨论	104
4.6.4 求解算法	105
4.7 可供选择的收费方案	105
4.8 小结	106
第5章 路网下的收费道路分车型费率优化	109
5.1 引言	109
5.2 能力诡异现象简介	111
5.3 双层规划模型简介	113
5.4 路网下的收费道路分车型费率优化的双层规划模型	115
5.4.1 固定需求下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	116
5.4.2 弹性需求下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	118
5.4.3 随机模式下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	120
5.4.4 市场机制下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	121
5.5 基于联网收费道路网出入口点收费的收费道路网分车型费率 优化的双层规划模型	123
5.5.1 固定需求下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	123
5.5.2 弹性需求下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	125
5.5.3 随机模式下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	127
5.5.4 市场机制下的收费道路分车型费率优化的双层 规划模型	127
5.6 双层规划模型的解法	128
5.6.1 双层规划模型的解法综述	129
5.6.2 迭代优化算法(IOA)	130

5.6.3	Hooke - Jeeves 算法	130
5.6.4	分解平衡优化算法(EDO)	131
5.6.5	模拟退火算法(SA)	133
5.6.6	遗传算法(GAs)	135
5.7	基于 GASA 求解双层规划模型的算法	137
5.7.1	遗传—模拟退火混合优化策略(GASA)的优点	138
5.7.2	GASA 混合优化策略求解双层规划模型的步骤	138
5.8	路网下的收费道路费率优化算例分析	141
5.8.1	路网状况	141
5.8.2	固定需求模式下测算收费费率	144
5.8.3	弹性需求模式下测算收费费率	146
5.8.4	GASA 算法性能评估	150
5.9	小结	151
第 6 章	多车型高速公路平衡网络设计问题	155
6.1	多车型离散高速公路平衡网络设计问题的双层规划模型	155
6.1.1	固定需求下的离散高速公路平衡网络设计问题的 双层规划模型	157
6.1.2	弹性需求下的离散高速公路平衡网络设计问题的 双层规划模型	159
6.1.3	随机模式下的离散高速公路平衡网络设计问题的 双层规划模型	161
6.1.4	B-O-T 模式下的离散高速公路平衡网络设计问题的 双层规划模型	162
6.2	多车型连续高速公路平衡网络设计问题的双层规划模型	164
6.2.1	固定需求下的连续高速公路平衡网络设计问题 的双层规划模型	165
6.2.2	弹性需求下的连续高速公路平衡网络设计问题 的双层规划模型	166
6.2.3	随机模式下的连续高速公路平衡网络设计问题 的双层规划模型	167
6.3	多目标 MVDETNDP 和 MVCETNDP	168
6.4	多车型离散高速公路平衡网络设计问题算例	169
6.4.1	固定需求模式	170

6.4.2 弹性需求模式	172
6.5 多车型连续高速公路平衡网络设计问题算例	175
6.5.1 固定需求模式	176
6.5.2 弹性需求模式	178
6.6 小结	181
第7章 收费系统方案评估准则体系	183
7.1 收费系统方案评估准则体系的建立	184
7.1.1 建立收费系统评估准则体系的原则	184
7.1.2 初拟评估准则集	185
7.1.3 用模糊德菲法萃取重要评估准则	187
7.1.4 用灰色统计法萃取重要评估准则	190
7.1.5 两种评估准则选择方法的比较	192
7.1.6 用灰色关联度分析来剔除相关程度高的评估准则	194
7.2 收费系统方案评估准则体系	197
7.2.1 经济目标	198
7.2.2 流畅目标	199
7.2.3 公平目标	199
7.2.4 漏收目标	199
7.2.5 环境目标	200
7.3 收费广场通行能力与服务水平	200
7.3.1 收费广场通行能力概念	200
7.3.2 收费广场的服务水平	201
7.3.3 收费广场通行能力的计算公式	204
7.3.4 收费广场服务水平估算的密度—— V/C_a 模型	205
7.3.5 基于排队理论进行收费广场服务水平分析	208
7.3.6 基于神经网络的 ETC 收费广场服务水平分类	211
7.4 公平性指标与收入评价指标	215
7.4.1 公平性指标的定义	215
7.4.2 公平性指标的特性	217
7.4.3 公平性指标与收费制式的关系	220
7.4.4 收费道路公平性的评价	220
7.4.5 收入指标的定义	223
7.4.6 收入指标的特性	225

7.4.7	收费站位置组合与公平性指标值之间的关系	226
7.5	收费站成本模型	227
7.5.1	符号定义	227
7.5.2	建造成本指标	229
7.5.3	日常的营运成本指标	231
7.5.4	漏收指标	231
7.5.5	用户成本指标	232
7.5.6	环境污染成本指标	232
7.6	财务评价指标	233
7.6.1	折算费用指标	234
7.6.2	费用现值评价	234
7.6.3	净现值指标	235
7.6.4	效益费用比	235
7.6.5	内部收益率	236
7.6.6	投资回收期指标	237
7.6.7	追加投资回收期指标	237
7.6.8	收费系统费用及其效益	237
7.7	小结	238
第8章	缴费方式随机选择模型及多收费方式	
	的站资源优化方法	239
8.1	问题的提出	239
8.2	收费站的延误与驾驶员缴费车道确定性选择模型	241
8.2.1	收费排队模型的选择	242
8.2.2	混合收费车道平均延误的计算	243
8.2.3	ETC 收费车道、人工收费车道与混合收费车道组合时的延误 模型及缴费车道确定性选择模型	244
8.2.4	ETC 收费车道与人工收费车道组合时的延误模型及缴费 车道确定性选择模型	245
8.2.5	收费站的延误与驾驶员缴费车道确定性选择模型 的分析示例	246
8.3	驾驶员缴费方式随机选择模型	249
8.3.1	驾驶员缴费方式随机选择模型	249
8.3.2	缴费方式随机选择模型参数的标定	256

8.3.3	市场均衡状态的求解算法	256
8.3.4	驾驶员缴费方式随机选择模型的分析示例	257
8.4	多收费方式的站资源优化模型及算法	260
8.4.1	收费站成本结构与多收费方式收费系统的效益	260
8.4.2	基于系统成本加权和最小模型的站资源优化 模型及算法	261
8.4.3	基于成本效益比最小模型的收费站资源优化模型	262
8.4.4	收费折扣率的优化方法	263
8.4.5	多收费方式的站资源优化算例分析	264
8.5	敏感性分析	270
8.5.1	变动车流量	270
8.5.2	变动车道配置	270
8.5.3	变动 ETC 用户安装使用费	272
8.5.4	变动 ETC 用户优惠费率	272
8.5.5	变动 ETC 技术水平	272
8.5.6	ETC 用户折扣率与系统平均延误的关系	272
8.5.7	TAG 设备安装率与系统平均延误的关系	275
8.5.8	ETC 收费车道容量与 TAG 设备使用率的关系	275
8.5.9	车流量与各车道使用率的关系	275
8.5.10	车流量与装有 TAG 设备的车辆使用各收费车道 比率的关系	275
8.6	本章小结	278
第 9 章	多收费方式收费系统的优化模型及算法	280
9.1	引言	280
9.2	收费系统备选方案的产生	282
9.2.1	资料的收集	282
9.2.2	筛选符合收费站设置位置的区位	283
9.2.3	收费系统的约束条件	284
9.2.4	方案筛选方法	285
9.3	用模糊层次分析法求取评价指标的权值	286
9.3.1	引言	286
9.3.2	建立判断矩阵	288
9.3.3	权系数计算方法	290

9.3.4 层次总排序的计算	293
9.3.5 求评估权重模糊三角函数	294
9.4 多收费方式收费系统的优化模型及算法	296
9.4.1 多收费方式收费系统的优化模型	297
9.4.2 基于 SAGA 的系统优化模型的求解算法	298
9.4.3 决策环境模拟	303
9.4.4 敏感性分析	303
9.4.5 建议方案	305
9.5 本章小结	305
第 10 章 有关理论基础	307
10.1 最优化理论	307
10.1.1 凸集与凸函数概念	307
10.1.2 最优化问题的数学模型及分类	309
10.1.3 凸规划	310
10.1.4 无约束问题的极值条件	311
10.1.5 等式约束最优化问题	311
10.1.6 有不等式约束的最优化问题	312
10.1.7 一般约束的最优化问题	313
10.1.8 Frank - Wolfe 方法	313
10.1.9 MSA 方法	317
10.2 需求函数及 Logit 选择模型的参数估计问题	318
10.2.1 曲线拟和与最小二乘法估计技术	318
10.2.2 极大似然估计技术	319
10.2.3 关于 Logit 选择模型的参数估计	320
10.2.4 鉴定估计量好坏的准则	323
10.3 最短路径的计算方法	325
10.4 小结	328
结束语	329
参考文献	331