



交通信息化环境下随机道路 网络拥挤收费理论与方法

..... 钟绍鹏 赵胜川/著

Theory and Method of Road Congestion Pricing Under
Stochastic Network and Traffic Information Environment



科学出版社

交通信息化环境下随机道路网络 拥挤收费理论与方法

钟绍鹏 赵胜川 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在介绍运行时间可靠度、先进的出行者信息系统及随机交通网络分配理论的基础上,通过先进的出行者信息系统与道路拥挤收费有效融合,系统地阐述和研究交通信息化环境下城市道路网络随机性与边际成本收费之间的关系,提出若干随机道路网络下的边际成本收费模型,建立交通信息化环境下随机道路网络拥挤收费理论与方法。本书为深入理解和研究边际成本收费问题提供一个新的视角,也为交通管理部门有效地实施道路拥挤收费政策提供决策支持。

本书可供城市规划、交通规划、交通管理等领域的技术人员参考,也可作为交通工程、交通运输规划与管理、智能交通、系统工程等专业的研究生教材和高年级本科生教材。

图书在版编目(CIP)数据

交通信息化环境下随机道路网络拥挤收费理论与方法/钟绍鹏,赵胜川著.
—北京:科学出版社,2017.1
ISBN 978-7-03-050806-5

I. ①交… II. ①钟… ②赵… III. ①道路网—交通拥挤—公路费用—征收—研究 IV. ①F540.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 285279 号

责任编辑:张 震 杨慎欣 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:12

字数:235 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

城市道路网络的不确定性和交通智能化、信息化趋势赋予了城市道路拥挤收费研究新的内涵。改革开放以来，中国大城市交通拥堵问题日益严重，而且变得越来越不稳定。造成交通拥堵的主要因素包括瓶颈路段、交通事故、施工区域、天气、交通控制设施、特殊事件和交通需求的季节性和时间性波动。这些因素的变化造成道路上的出行时间每时每刻都在变化，且运行时间可靠度越来越低。为了掌握出行时间的准确信息，先进的出行者信息系统应运而生，它的出现使出行者对道路网络运行状况的认知大幅度提高，避免或降低交通拥堵带来的出行延误。然而，传统的道路拥挤收费研究没有考虑到道路网络的随机性及先进的出行者信息系统的影响，降低了道路拥挤收费的实施效果。在此前提下，对城市随机道路网络进行基于先进的出行者信息系统和运行时间可靠度的拥挤收费模型和方法研究是十分迫切和必要的。

为此，本书系统地阐述了交通信息化环境下随机道路网络拥挤收费理论、模型与方法，并对世界范围内已经实施的道路拥挤收费典型案例进行了分析和展望。本书的主要贡献是将道路拥挤收费的研究从确定性道路网络引入随机道路网络，同时考虑交通信息化的影响。鉴于随机道路网络下影响用户随机路线选择行为的因素主要分为四个方面，即交通需求的不确定性、道路供给（通行能力）的不确定性、先进的出行者信息系统及用户自身对于出行时间的随机感知判断。本书将由浅入深地将这四个因素逐步融入到模型当中，力图用数学语言更加真实地反映随机道路网络拥挤收费问题。本书的研究成果在一定程度上有助于人们加深认识和理解基于风险的随机网络边际成本收费及风险状态下道路拥挤收费对用户路线选择行为的影响，从而为交通管理部门科学、有效地制定道路拥挤收费政策提供理论基础和政策启示。

本书的完成得益于国家自然科学基金面上项目（编号：51278087、70571007）、

教育部人文社会科学研究青年基金项目（编号：12YJCZH309）、高等学校博士学科点专项科研基金（编号：20120041120006）、中国博士后科学基金资助项目（编号：2016M601313）、辽宁省自然科学基金项目（编号：201602187）、中央高校基本科研业务费专项资金项目（人文社科科研专题重点项目）（编号：DUT16RW208）的资助，在此一并表示感谢。

本书在成书过程中借鉴了部分国内外有代表性的文献，已将其列在参考文献中，在此向这些学者表示诚挚的感谢。由于作者学识有限，书中难免会有认识不足或纰漏之处，恳请各位专家、同仁和广大读者不吝指正。

钟绍鹏 赵胜川

2016年9月于大连理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 道路拥挤收费与边际成本定价	1
1.1.1 拥挤收费的起源、概念和分类	1
1.1.2 拥挤收费的边际成本定价分析	3
1.2 道路拥挤收费案例分析	6
1.2.1 新加坡	7
1.2.2 伦敦	9
1.2.3 奥斯陆	11
1.2.4 斯德哥尔摩	12
1.3 本书的研究意义、研究基础及主要研究内容	14
1.3.1 本书的研究意义	14
1.3.2 国内外研究现状及分析	17
1.3.3 本书的主要研究内容	23
参考文献	26
第 2 章 交通网络平衡模型概述	31
2.1 基本概念与分类	32
2.1.1 平衡的定义	32
2.1.2 网络平衡模型的分类	33
2.2 数学规划模型	35
2.2.1 符号定义	35
2.2.2 固定需求下的确定性网络用户平衡模型	36
2.2.3 弹性需求下的确定性网络用户平衡模型	37
2.2.4 确定性网络随机用户平衡模型	39
2.2.5 系统最优分配模型	40

2.3	变分不等式模型	43
2.4	非线性互补模型	46
2.5	不动点模型	47
	参考文献	50
第 3 章	道路拥挤收费模型概述	52
3.1	弹性需求下的拥挤收费模型	52
3.2	容量限制下的拥挤收费模型	54
3.3	多用户类型、多准则拥挤收费模型	56
3.4	随机系统最优拥挤收费模型	59
3.5	先进的出行者信息系统与拥挤收费整合模型	63
	参考文献	65
第 4 章	内生 ATIS 市场占有率下多用户类型随机系统最优拥挤收费模型	68
4.1	问题描述	69
4.2	模型构建	70
4.2.1	多用户种类混合平衡	70
4.2.2	市场占有率与总出行需求量	70
4.2.3	平衡条件与边际成本收费	72
4.3	求解算法	73
4.4	算例分析	74
4.4.1	问题设置	74
4.4.2	问题讨论	76
4.5	小结	83
	参考文献	83
第 5 章	内生 ATIS 市场占有率及遵从率下多用户类型随机系统最优拥挤收费模型	85
5.1	问题描述	86
5.2	模型构建	87
5.2.1	多用户种类混合平衡	87
5.2.2	市场占有率与总出行需求量	88

5.2.3 用户的 ATIS 遵从率	89
5.2.4 平衡条件与边际成本收费	90
5.3 求解算法	91
5.4 算例分析	92
5.4.1 问题设置	92
5.4.2 问题讨论	94
5.5 小结	96
参考文献	97
第 6 章 内生 ATIS 市场占有率下基于风险的随机网络平均边际成本收费模型	98
6.1 前提假设	100
6.2 问题描述	100
6.3 模型构建	104
6.3.1 基于风险的随机网络平均边际成本收费	104
6.3.2 市场占有率	107
6.3.3 平衡条件与变分不等式	108
6.4 求解算法	109
6.5 算例分析	110
6.5.1 问题设置	110
6.5.2 市场占有率分析	111
6.5.3 服务水平分析	111
6.5.4 有效运行时间分析	112
6.5.5 拥挤收费分析	113
6.6 小结	118
参考文献	118
第 7 章 内生 ATIS 市场占有率和遵从率下基于风险的随机网络平均边际成本收费模型	120
7.1 前提假设	120
7.2 问题描述	121
7.2.1 路段和路径出行时间分布	121

7.2.2	实际和感知有效运行时间	122
7.2.3	基于风险的随机网络平均边际成本收费	123
7.3	模型构建	124
7.3.1	有导航和无导航用户路径选择概率	124
7.3.2	市场占有率和总交通需求	125
7.3.3	装备 ATIS 用户的市场遵从率	126
7.3.4	平衡条件与变分不等式	127
7.4	求解算法	128
7.5	算例分析	129
7.5.1	交通需求水平和运行时间可靠度置信度水平影响分析	130
7.5.2	有导航和无导航用户出行成本感知变化影响分析	132
7.6	小结	136
	参考文献	137
第 8 章	随机交通需求下基于感知风险的随机网络边际成本收费模型	138
8.1	前提假设	139
8.2	PRSN-SSO 模型构建	139
8.3	PRSN-MCP 模型构建	142
8.3.1	PRSN-MCP 模型推导	142
8.3.2	对数正态需求下 PRSN-MCP 模型计算	143
8.4	算例分析	145
8.4.1	随机感知误差影响分析	146
8.4.2	道路拥挤收费影响分析	147
8.4.3	交通需求水平和可靠度价值水平对道路拥挤收费各组成部分的 影响分析	150
8.5	小结	152
	参考文献	153
	附录 A	154
	附录 B	155
	附录 C	156

第 9 章 供需两端不确定性下基于感知风险的随机网络边际成本收费模型.....	159
9.1 前提假设	159
9.2 道路网络供需两端不确定性下的随机出行时间	160
9.2.1 路段通行能力降级	160
9.2.2 交通需求的波动	161
9.2.3 路段通行能力和交通需求随机变化的共同影响	162
9.3 供需两端不确定性下随机网络边际成本收费	162
9.3.1 SN-MCP 分析	162
9.3.2 SN-MCP 计算	163
9.4 供需两端不确定性下基于风险的随机网络边际成本收费	164
9.4.1 RSN-MCP 分析	164
9.4.2 RSN-MCP 计算	164
9.5 供需两端不确定性下基于感知风险的随机网络边际成本收费	166
9.5.1 PRSN-MCP 分析	166
9.5.2 PRSN-MCP 计算	166
9.6 算例分析	172
9.6.1 考虑道路网络供需两端不确定性的重要性	173
9.6.2 考虑用户随机感知误差的必要性	176
9.6.3 PRSN-MCP 模型在 Sioux Falls 网络中的应用	177
9.7 小结	180
参考文献	180

第 1 章 绪 论

本章首先介绍道路拥挤收费（简称拥挤收费）的起源、概念、分类。随后介绍道路拥挤收费的边际成本定价机制，并对世界范围内已经实施的道路拥挤收费案例进行分析。最后，介绍本书的研究意义，评述国内外现有研究成果，并说明本书的主要研究内容。

1.1 道路拥挤收费与边际成本定价

1.1.1 拥挤收费的起源、概念和分类

1. 拥挤收费的起源

在 1920 年出版的《福利经济学》（第一版）中，Pigou 教授通过两条道路的例子，首次提出道路拥挤费（road congestion pricing）的概念（Pigou, 1920）。Pigou 假设甲地与乙地间有两条道路相连，其中一条道路距离长，但宽阔，通行能力很大；另一条道路距离短，但狭窄，通行能力小。用户将在两条道路上进行选择，最终分配的车流量达到平衡状态，两条道路的走行时间将会相等。Pigou 教授指出，如果按出行的边际社会成本与边际个人成本之差额，对使用狭窄道路的车辆征收拥挤费，狭窄道路上的过多车辆就会转移到宽阔的道路上去。这样两条道路上的车辆的总走行时间将会减少，社会的福利将增加。道路收费思想即源于此。

2. 拥挤收费的概念

道路拥挤收费是对特定时段和路段的车辆实行收费，从时间和空间上疏散交通量，减少繁忙时段和繁忙路段的交通负荷。同时，促使交通量向高容量的交通系统转移，抑制私人小汽车交通量的增加，促进小汽车的有效利用，推进多人合乘的实施，实现道路的最有效使用，达到缓解交通拥挤的目的。

城市道路拥挤收费可以分为广义的拥挤收费和狭义的拥挤收费。广义的道路拥挤收费是指为了解决城市严重的交通拥挤问题，对城市道路使用者从车辆拥到道路使用的全过程的收费，不仅包括道路使用费，而且包括为解决城市交通拥挤采取的其他形式的拥挤收费或税收。如增加车辆购置税、燃油税、车辆配额和用车证制度等。

狭义的拥挤收费是指用户在进入交通拥挤区域的时候，必须支付的那部分道路拥挤费用；是指在拥挤的城市道路上，对道路交通使用者征收一定的费用，使边际个人成本提高到边际社会成本，用于补偿由于该用户的加入而给社会带来的外部不经济；是指通过提高用户的出行成本，促使用户重新选择自己的出行行为，减少交通需求，使交通需求与交通供给相适应，最终实现缓解或者消除拥挤的一种交通需求管理措施。本书主要讨论的是狭义的道路拥挤收费。

3. 拥挤收费的分类

一般来说，高峰期拥挤主要是用户对出行时间和出行路线选择不当所致。为此，最优道路拥挤收费应当反映出时间和空间上需求的分布。但是多数已有的研究为了避开动态交通分配和网络结构的复杂性，而将道路拥挤收费的时间维和空间维分开处理。道路拥挤收费从时间维和空间维上可以分为静态收费和动态收费两大类。仅考虑空间维的道路拥挤收费称为静态收费。静态收费适用于稳态（OD^①矩阵是固定的，不具有时变性）条件下的交通网络，其不考虑收费的时变性，换句话说静态收费模型不考虑当前的收费对将来的交通拥挤水平的影响；动态收费是指将时间维和空间维综合考虑的收费。动态拥挤收费考虑出行需求和出行费用都是时变的，因而道路拥挤收费也是时变的。

道路拥挤收费就其研究的方法来说，可以将其分为第一最优道路拥挤收费（first-best congestion pricing）和次优道路拥挤收费（second-best congestion pricing）两大类。第一最优道路拥挤收费又称为边际成本定价（因经济学中的边际成本定

① OD（origin-destination）表示起讫点。

价原理而得名), 其假定路网中存在完善的收费体制, 在每个路段征收一个等价于边际社会成本与边际个人成本差值的费用, 从而达到社会网络效益最大化 (Smith, 1979; Yang and Huang, 1998; 王健等, 2005; 钟绍鹏和邓卫, 2008)。这个理论的关键在于, 用户不仅关心自己的成本, 而且应该注意到他(她)强加到其他用户的外部不经济。虽然边际成本定价原理在理论上很完美, 但是在实际应用上并不那么理想, 除了公众和行政上的抵制外, 主要原因是, 在整个网络上进行收费所花费的人员与设备的额外费用是相当高的。这促使很多人去研究各种各样的次优道路拥挤收费, 这类收费方法仅在部分路段进行收费。

次优道路拥挤收费考虑的是在一个路网存在约束(如资金预算约束、通行能力约束)、仅对部分路段或路径收费的道路拥挤收费问题。在道路网络(或称交通网络)中大体上有四种收费模式: 基于旅行距离的收费; 基于旅行时间或延误的收费; 基于路段的收费; 基于区域的收费。对于基于旅行距离或旅行时间的收费模式, 收费的费额与出行的距离或花费到网络上的时间成正比。对于基于路段的收费模式, 收费仅在部分选择的路段进行, 特别是有瓶颈的路段。在许多城市, 拥挤收费被选择在城市的桥梁、隧道或是高速公路进行。与对分开的个别路段进行收费不同, 20 世纪 70 年代开始一些国家或地区出现了基于区域的拥挤收费模式, 这种收费模式用来减少城市中心拥挤区域的交通需求。对于次优道路拥挤收费来说有许多合理的目标, 如最小化系统成本、最大化社会福利、最大化税收、最小化税收或最小化收费路段数目以达到系统最优。

1.1.2 拥挤收费的边际成本定价分析

运用边际成本定价理论解释道路拥挤收费, 如图 1-1 所示。假设标准同质(homogeneous)交通流, 它们在相同路段上沿相同的方向运动, 路段上仅有一个入口和出口, 并且除了通行能力约束外, 没有任何阻碍交通流移动的因素。

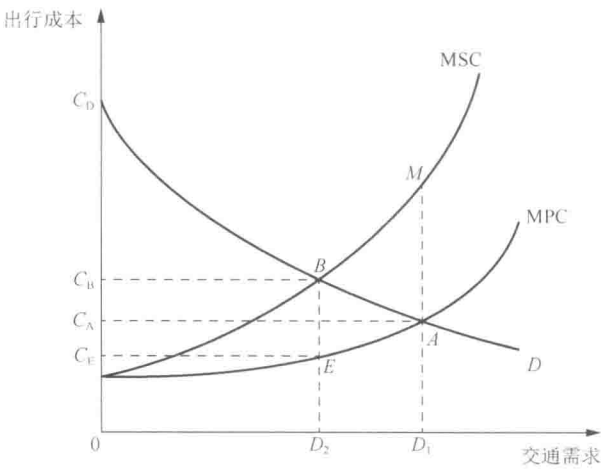


图 1-1 拥挤条件下的边际成本定价原理示意图 (Yang and Huang, 1998)

在不同的交通需求水平下，边际社会成本曲线 (marginal social cost, MSC) 与边际个人成本曲线 (marginal private cost, MPC) 的差反映该需求水平下的拥挤成本。当路网不收费时，由于用户仅考虑自身的成本，平衡在需求曲线 D 与边际个人成本曲线 MPC 的交点 A 处达到，此时用户忽略了他们强加给其他用户的外部不经济，任何用户将以大于他（她）所感知的费用 $\overline{D_1A}$ 出行，即以 $\overline{D_1M}$ 出行。结合经济学原理：完善的市场条件下，资源的有效配置发生在所有商品和服务的价格都是基于边际社会成本上定义的，且边际成本等于边际效益时的均衡价格是最优的。因此，从图 1-1 中可以看出，最优流在边际社会成本曲线与需求曲线 D 的交点 B 所对应的需求 D_2 处达到。从系统的角度来说，不收费情况下的实际需求是超负荷的，因为第 D_1 位用户得到的效益仅为 $\overline{D_1A}$ ，而他（她）的出行所引起的边际社会成本为 $\overline{D_1M}$ ，此时用户的出行给系统带来了 $\overline{AM}$ 的损失。超出最优流 D_2 的交通量 $\overline{D_2D_1}$ 所产生的总成本为 $\overline{D_1MBD_2}$ 所围成的面积，而这些出行所能获得的效益为 $\overline{D_1ABD_2}$ 所围成的面积，因此，福利损失为 $\overline{AMB}$ 所围成的面积。对于超出需求 D_2 的其他需求水平有类似的结果。低于 D_2 的需求也不是最优的，因为其将使得路网潜在消费者剩余没有被充分地利用。在最优需求 D_2 处，道路拥挤收费为 $\overline{BE} = \overline{D_2B} - \overline{D_2E}$ （边际社会成本减去边际个人成本），在这个收费情况下，路网的

经济效益 $\overline{EBC_D C_E}$ (总效益减去总成本或消费者剩余加上政府通过收费取得的收入) 将达到最大。应当指出, 道路拥挤收费会带来一定的经济收入。这是因为道路拥挤收费是通过让交通需求从 D_1 减少到 D_2 而使经济效益达到最大。流量从 D_1 变到 D_2 , 用户的旅行成本节省了 $\overline{C_A - C_E}$, 而为减少拥挤, 用户支付的拥挤费为 $\overline{C_B - C_E}$, 前者总是小于后者, 因此, 道路拥挤收费会带来一定的经济收入, 这些收入可用来改建交通基础设施和改善公共交通, 以减少道路拥挤收费所带来的社会不公平性。

在现实生活中, 道路网络一般是有容量限制的。为此, 在前面讨论的基础上进一步加上道路容量限制条件, 讨论道路容量限制条件下的最优收费。这里所说的道路容量一方面指道路的物理容量, 即通行能力; 另一方面指环境容量。一般而言, 环境容量小于道路的物理容量 (Yang and Bell, 1997)。拥挤收费不仅应该满足道路容量限制, 而且应该满足环境容量限制 (Ferrari, 1995)。这里为了讨论方便, 不区分道路容量与环境容量, 统一用 C 来表示道路容量, 环境容量的分析方法类似。

考虑只有一个出口和一个入口的单一路段。不考虑容量限制和收费时, A 为平衡点, 此时的流量为 D_A 。现在假设路段通行能力 (下文中路段通行能力指出口处的通行能力) 是 C ($C < D_A$)。因为需求超过路段的通行能力, 将会产生车辆排队。随着车辆排队延误的增长, 在排队状况稳定的条件下, 需求和通行能力之间达到平衡。如图 1-2 所示, B 即为不收费条件下的平衡点, 此时的平衡排队延误等于 $\overline{T_2 T_4} (= T_4 - T_2)$ 。

现在考虑排队延误条件下的边际成本定价原理。如果边际社会成本曲线是 MSC_2 , 那么最优拥挤收费将是 $\overline{T_1 T_5}$, 相应的平衡点为 E 。此时, 边际成本收费足够高, 使交通需求低于通行能力, 阻止了排队的产生。然而, 如果边际成本曲线是 MSC_1 , 在边际成本定价下的需求将超过通行能力, 车辆排队将会产生。产生的延误可以减少潜在的交通需求, 使交通需求满足路段通行能力。因此, 作为与非收费条件下相同的平衡点 B 达到了。从图 1-2 中可以看到, 当需求等于通行能力

时，边际成本收费是 $\overline{T_2T_3}$ ，平衡排队延误是 $\overline{T_3T_4}$ 。在这种情况下，边际成本收费不足以阻止排队的产生。由于排队延误属于纯浪费时间，通常希望通过收费来避免排队。这意味着最优拥挤收费将是 $\overline{T_2T_4}$ ，在这种情况下排队将会消失。注意，如果假设所有的用户拥有一样的时间价值，只要收费不超过排队延误，那么额外的收费 $\overline{T_3T_4}$ （甚至是收费 $\overline{T_2T_4}$ ）对道路使用者将不产生损失，因为这仅仅是用拥挤收费代替时间的浪费，这对于道路使用者来说没有什么差别（Yang and Huang, 1998）。

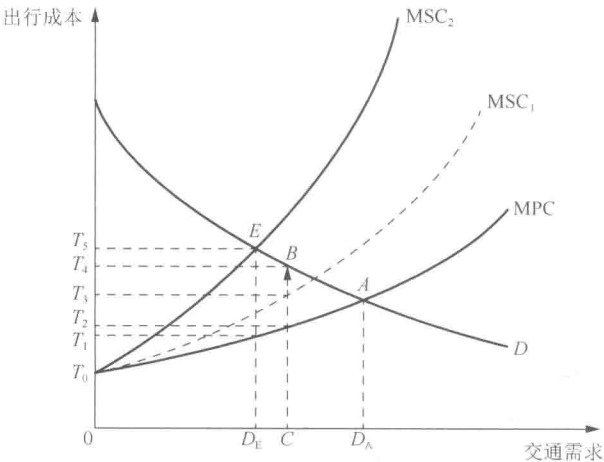


图 1-2 容量限制、拥挤排队下的边际成本定价原理示意图（Yang and Huang, 1998）

1.2 道路拥挤收费案例分析

自 20 世纪 70 年代首次在新加坡实施后，道路拥挤收费政策已陆续在伦敦、奥斯陆、斯德哥尔摩等 10 余个城市以及新加坡成功实施。与此同时，道路拥挤收费的理论、目标、技术和财务等方面也处在不断地深化和调整的过程当中。鉴于中国大城市交通状况的日益严峻，有必要对世界范围内已经实施的道路拥挤收费案例做出全面分析，从中提取已经实施的道路拥挤收费政策的共同特征和经验教训，为中国实施道路拥挤收费提供理论支持和现实参考。

1.2.1 新加坡

1. 发展历史

新加坡是最早实施道路拥挤收费的国家,其发展历程从最初的区域通行证方案到如今实时的动态电子道路收费系统两个阶段。1975年,新加坡开始在725公顷的城市中心商业区尝试实行区域通行证系统(area licensing scheme, ALS),主要在早晚高峰期针对成员不足4人的车辆实施收费,出入该区域的上述车辆需要出示纸质凭证。该系统于1989年将收费对象扩大到包含小汽车、出租车、货运卡车、公共汽车和摩托车;1994年又将收费的时段扩展至全天。经过20多年的运行,区域通行证方案被证明是控制高峰期拥挤的有效手段:早高峰期进入控制区的机动车辆从74 000辆/日下降到41 500辆/日;行驶速度提高了20%;乘坐公共交通的比例从33%增加到69%;并增加了财政收入。1995年,新加坡在其东海岸公园大道实施道路收费系统。随着电子信息技术的长足进步,新加坡从1998年5月开始实施动态电子道路收费系统(electronic road pricing, ERP)(Seik, 2000)。与区域通行证方案相比,ERP更公平、方便、可靠。1998年8月,新加坡政府将ERP扩充到整个中心商业区、高速公路和交通拥挤的区域(Goh, 2002; Phang, 1997)。新加坡拥挤收费的目的非常单一,就是为了控制交通拥挤现象,同时辅以高达130%的小汽车牌照税进一步限制小汽车的保有量。新加坡拥挤收费削弱了拥挤收费政策的负面影响,增强了拥挤收费政策实施的效果。

2. 技术手段

早期的ALS采取出入收费区域出示纸质凭证的方式运行。如今的电子道路收费系统主要由中央控制中心、电子收费道口检测和控制器(如图1-3所示)和车载读卡器构成。经过前期的宣传和测试,目前已经在将近70万辆车上安装了车载读卡器,这是一种集现金储值和感应为一体的设备。在工作日的上午8点到晚上7点间,当车辆通过电子收费道口时,道口感应器和车牌识别摄像机将车辆信息数据传送至中央控制中心,经过处理与银行结算系统联网扣除本次通行费。如遇