

交通系统 分析方法

JIAOTONG XITONG
FENXI FANGFA

主 编 ● 艾 瑶 邓明君 王淑芳
副主编 ● 薛运强 刘 爽 仲先飞

✘ 华东交通大学教材（专著）基金资助项目

交通系统 分析方法

JIAOTONG XITONG
FENXI FANGFA

主 编 ⊙ 艾 瑶 邓明君 王淑芳
副主编 ⊙ 薛运强 刘 爽 仲先飞

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容提要

本书作为高等学校教材,介绍了延误模型、交通流概率统计、跟驰理论、排队论、交通波理论、车队离散理论等交通系统状态分析方法,介绍了交通系统供需平衡分析与需求预测分析方法,介绍了线性规划、非线性规划、动态规划等系统优化方法、网络优化分析方法以及交通系统评价与决策分析方法,对交通系统模拟分析、交通大数据分析也进行了简要介绍。

本书可作为交通工程专业的本科生教材,也可供交通运输、道路交通管理等相关专业及有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

交通系统分析方法 / 艾瑶, 邓明君, 王淑芳主编

· 一成都: 西南交通大学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-5643-6405-2

I. ①交… II. ①艾… ②邓… ③王… III. ①交通系统-系统分析法 IV. ①U491.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第207397号

交通系统分析方法

主 编 / 艾 瑶 邓明君 王淑芳

责任编辑 / 穆 丰

助理编辑 / 宋浩田

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 18.5 字数 462 千

版次 2018年8月第1版 印次 2018年8月第1次

书号 ISBN 978-7-5643-6405-2

定价 48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言 _ PREFACE

交通系统是一个庞大复杂的大系统，在交通系统中还存在着效率、安全、环境、能源等诸多当今社会急需解决的问题。为了有效地解决交通问题，需要有关学者、工程技术人员和交通管理者对交通系统进行优化设计和改造。为构建良好的交通运行系统，对系统组成要素及系统整体进行特性了解、对交通问题进行最优化方案分析等具有重要意义。

交通系统分析首先应清楚地了解交通系统的各方面属性，然后寻找使得系统达到最优目标的方案或策略，并对不同方案系统性能进行评价，为系统决策提供依据，以上各方面的分析采用的方法技术不尽相同，需根据具体问题选择合适的分析方法。本书针对交通系统或子系统，既从系统整体分析的角度、也从系统局部要素分析的角度，给出描述、分析、优化和评价各研究对象的理论和方法体系。涉及的分析方法包括定性分析或经验、逻辑判断，数学模型，模拟技术，智能技术，大数据技术等。

本书共分 9 章并附有习题与思考题。在内容安排上着重介绍各种分析方法的基本原理和方法步骤，并通过实例介绍分析方法的应用。第 1 章介绍系统的基本概念、交通系统分析意义及方法概述；第 2 章介绍交通系统状态分析方法；第 3 章介绍系统优化分析方法；第 4 章介绍网络优化分析方法；第 5 章介绍交通供需平衡分析；第 6 章介绍交通预测分析方法；第 7 章介绍交通系统评价与决策分析方法；第 8 章、第 9 章为交通系统模拟、交通大数据分析简介。

本书主要编写人员包括：华东交通大学艾瑶、邓明君、王淑芳、薛运强、仲先飞、华东交通大学理工学院刘爽。第 1 章由艾瑶编写；第 2 章由艾瑶、王淑芳、刘爽编写；第 3 章由艾瑶、邓明君编写，第 4 章由艾瑶、薛运强编写；第 5 章由王淑芳编写，第 6 章由邓明君编写；第 7 章由艾瑶、薛运强、刘爽编写，第 8 章、第 9 章由邓明君、仲先飞编写。华东交通大学秦鸣教授、桂林电子科技大学李文勇教授对本书编写提出了宝贵意见。

交通工程领域的系统分析方法涉及多学科、多领域的相关知识，而且新知识、新理论和新方法不断涌现、发展和完善。限于笔者的理论水平及实践经验，书中不妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2018 年 4 月

目录 CONTENTS

第 1 章 交通系统分析概述	1
1.1 系 统	1
1.2 交通系统	2
1.3 交通系统分析	4
第 2 章 交通系统状态分析	8
2.1 交通流状态参数及关系模型	8
2.2 信号交叉口延误模型	15
2.3 交通流概率统计分析	27
2.4 跟驰理论	30
2.5 排队论	38
2.6 交通波理论	51
2.7 车队离散理论	54
2.8 交通状态分析应用实例	60
思考题	70
习 题	70
第 3 章 交通系统优化分析	72
3.1 线性规划	72
3.2 特殊类型线性规划	85
3.3 动态规划	101
3.4 非线性规划	109
3.5 其他优化方法简介	132
3.6 求解优化问题的常用软件工具	135
3.7 系统优化方法在道路交通工程中的应用	142
思考题	146
习 题	147
第 4 章 交通网络优化分析	149
4.1 网络优化概述	149
4.2 最小树问题	150
4.3 最短路问题	151
4.4 最大流问题	155

4.5	网络优化方法在道路交通工程中的应用	161
	思考题	163
	习题	163
第5章	交通系统供需平衡分析	166
5.1	交通供给分析	166
5.2	交通需求分析	169
5.3	交通供需平衡理论	173
	思考题	177
第6章	交通预测分析	178
6.1	预测分析概述	178
6.2	预测分析方法	180
6.3	交通预测分析应用及软件简介	198
	思考题	207
	习题	207
第7章	交通系统评价与方案决策分析	209
7.1	概述	209
7.2	工程经济分析基础知识	218
7.3	系统评价方法	222
7.4	决策分析方法	243
7.5	系统评价与决策分析在道路交通工程中的应用	253
	思考题	259
	习题	259
第8章	交通系统模拟分析简介	261
8.1	概述	261
8.2	分析示例	266
8.3	软件简介	274
	思考题	276
第9章	交通大数据分析简介	277
9.1	概述	277
9.2	分析示例	279
9.3	工具软件简介	287
	思考题	288
	参考文献	289

第 1 章 交通系统分析概述

1.1 系 统

系统这一概念来源于人类的长期社会实践,20 世纪 40 年代开始在工程设计中应用这一概念。20 世纪 50 年代以后,人们开始把系统的概念逐步明确化、具体化,并在工程技术系统的研究和管理中广泛应用。

所谓系统是指由相互作用、相互依赖又相互区别的若干组成部分(单元)组合而成的具有特定功能的有机整体。如人体是一个系统,由神经、呼吸、消化、循环、运动、生殖等子系统构成一个有机整体。交通运输系统由铁路运输、公路运输、水路运输、航空运输、管道运输等子系统构成一个有机整体。城市道路交通也是一个庞大的动态交通综合系统,由人、车、道路、设施、管理、环境等许多子系统组成。

可以看出,系统是由两个以上的要素组成的整体。系统的诸要素之间、要素与整体之间、以及整体与环境(指系统以外,与系统发生作用的部分)之间存在着一定的有机联系。系统要素之间的联系与作用必产生一定的功能。当然系统与要素的概念是相对的,例如由车辆、场站、路网等要素组成了公路系统,而对于整个交通运输系统而言,公路系统又是整个交通运输系统的组成要素。

一般来说系统具有以下特征。

1. 整体性

系统由若干单元组成,每个单元都具有独立的功能。具有独立功能的单元以及单元之间的相互联系,只有逻辑地统一和协调于系统的整体之中,才能发挥系统的整体功能。因此,即使每个单元并不都很完善,它们也可以综合起来,统一成为具有良好功能的系统。反之,即使每个单元都是良好的,但作为整体却不具有某种良好的功能,也就不能被称为完善的系统。系统整体的功能不是各组成要素功能的简单叠加,一般系统的整体功能大于各组成要素的功能总和。

2. 相关性

组成系统各要素是相互联系、相互作用、相互依存、又相互制约的。例如,城市道路交通系统,由道路网、车辆、信号控制系统、交通规则等单元或子系统组成,它们之间是相互关联的,它们之间的协调关系使道路上的车辆有条不紊地行驶。如果各个组成部分各自为政,那么它们就不能组成互相协调的整体,势必造成交通混乱。

3. 目的性

任何一个系统都有它的目的,否则就失去了这个系统存在的价值和意义,系统单元正是按照这种目的性组织起来的。

4. 层次性

一个系统由一些单元组成，而其中任一单元又可分为更小的单元。如：交通运输系统由铁路、道路、航空、水路、管道几个运输子系统组成；其中航空运输系统又由航空公司、机场、空中交通管制等子系统组成。

5. 环境适应性

系统总是存在于一定的环境之中，与环境不断进行物质、能量、信息的交换。系统必须适应外部环境的变化。

在自然界和人类社会中，系统是普遍存在的。根据系统的性质，系统形态可分为：自然系统与人工系统；实体系统与概念系统；动态系统（系统状态随时间变化）与静态系统；控制系统与行为系统等。各种交通系统大都属于自然-人工复合系统，并且是动态、实体系统。

1.2 交通系统

1.2.1 交通系统

交通是一个系统，由多个子系统构成，子系统之间相互联系、相互影响，形成了极其复杂的关系。当我们带着不同的问题去研究交通系统时，系统的范围、系统的结构、各子系统的关系等都将不同。例如，当我们从交通工具的角度来研究交通系统时，就会把交通系统划分为轨道交通、汽车交通、自行车交通、步行交通等；当我们从出行者的角度来研究交通时，就可能会把交通系统划分为上班出行、上学出行、购物出行、娱乐出行等。

交通系统非常复杂，尤其是城市交通系统，我们很难用某种或某几种简单的方法表达或说明系统间的复杂关系。图 1.2-1 是城市交通系统的各要素关系图的一种表示。

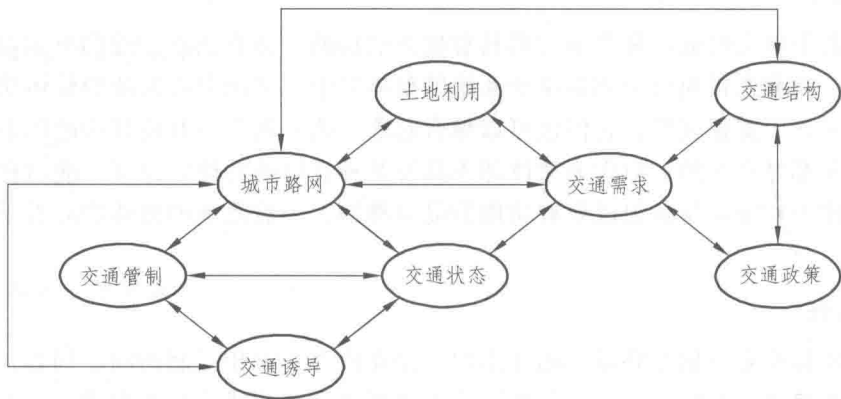


图 1.2-1 影响城市交通的要素关系图

城市在其规划建设阶段就已经从总量上决定了交通需求和交通供给两大要素。在该阶段，规划者将根据城市的人口规模、经济水平和人们的社会活动特征等规划城市的用地规模、用地性质、用地强度和用地布局，这一方面决定了城市居民出行和货物流通的总量，另一方面也决定了城市的路网框架。因此，不同的土地利用特征对应着不同的交通需求特征。城市交

通需求受多方面因素的影响：首先，它与城市路网结构有关。在一定的城市土地利用形态下，不同的路网结构（如棋盘状、放射状、放射与环路相结合）对应着不同的出行效率，表现在路网交通流状态上，即为不同的交通需求总量。其次，交通需求还与交通政策相关，在出行需求一定的情况下，不同的交通政策（如公交优先政策、限制私人小汽车政策等）将带来截然不同的交通需求。最后，交通结构（地铁、轻轨、公共汽车、自行车、小汽车等各种方式出行比例）对交通需求也有着重要的影响。研究表明，合理的交通结构会大大降低交通需求。实际上交通需求、交通结构和交通政策之间相互作用，对城市交通状态产生着重要影响。城市路网、交通需求、交通结构综合作用便产生了城市交通流。交通流在交通组织、交通控制和交通诱导的支配和作用下，便构成了路网交通流状态。在这里，借助路网信息和交通状态信息所进行的交通组织、控制和诱导，对交通流运行效率起着重要作用，进而影响城市交通需求，城市路网交通状态最终要影响甚至改变城市土地利用。

从上例足以看出，交通系统极其复杂，甚至很多系统关系很难量化表达。但交通系统并不是不可以认识的，我们总可以通过各种手段不断地揭示和描述系统的运行规律、评价系统运行效果，确定改善系统方案，最终达到改善系统的目的。

1.2.2 交通问题

在交通系统中还存在着许多问题，其中效率、安全、环境、能源等问题尤为突出，是当今社会急需解决的问题。

建立交通运输系统的目的在于快速、高效地实现人、货、车的空间移动。以城市交通为例，汽车的出现和汽车工业的发展，使整个交通运输格局发生了巨大变化，极大地推动了人类社会的过程。然而，事情总是一分为二的，现代交通工具在提高人们生活水平的同时，也带来了各种各样的城市交通问题。随着经济的发展，汽车保有量的急剧增加，如何降低交通的负面效应已成为全球面临的共同难题。

在这种背景下，传统的道路交通设施已经不能适应现代社会的交通需要，城市机动化的快速发展、城市布局形态扩张和城市功能聚集，使得城市交通出行总量、出行密度、出行距离大幅度增长、交通拥堵正在中国大多数城市中迅速蔓延。交通拥堵不仅带来了交通系统的服务水平下降、交通延误增加、行车速度降低、出行时间大幅度增加等直接危害，还导致了交通事故频繁、能源浪费严重、汽车尾气排放量增大、环境恶化等诸多问题出现，造成社会成本增加，经济损失严重。针对当前我国城市特别是大城市的交通问题极其严重的现状，如果不能得到有效解决和根本治理，必将对我国经济的持续、快速、健康发展构成严重威胁。

1.2.3 解决交通问题的系统观念

为了更好地解决城市交通系统存在的日益严重的诸多问题，相关政府职能部门、交通专家学者们等已形成了共识，解决城市交通问题要动态和广泛地综合各方面的行动和利益，采取综合措施，采取系统的对策，构筑一体化综合交通体系。如：（1）从城市规划、土地利用的角度，将土地利用规划与交通规划进行综合化考虑。交通规划不仅要处理目前的交通问题，还要寻求根本的改善措施。通过土地利用规划的实施严格控制土地的使用方法，进而控制交通发生与交通吸引。避免城市人口、城市功能过度集中，造成交通总需求超过城市的交通容

量极限，避免城市商务区土地利用强度过大而使城市交通问题无法解决。积极提倡多中心分散形式的土地利用形态。(2)从交通结构的角，采取优先发展公交，形成以公交为骨干的快速交通运输系统，合理利用城市有限的土地资源和交通设施。(3)通过基础设施建设提高路网容量、通过实现城市交通的科学化、智能化管理等，充分有效地利用道路网，发挥交通设施的最大作用。

要想从不同层次解决城市交通问题，应加强城市综合交通规划的制定和实施，考虑将交通建设与交通管理一体化。道路设施、轨道设施、枢纽设施、停车设施、管理设施等应平衡发展，注重互相之间关联性，发挥整体效益。随着居民出行距离的增长，出行方式多样化，越来越多的出行以多方式组合的形式完成，应突出交通枢纽的特殊地位，实现各方式有效转换的“运行联运化”。重视科学化、智能化交通管理，整合多种交通设施运行、均衡流量分布、发挥系统整体效益。

因此，解决城市交通问题是一个系统工程，为构建良好的交通运行系统，对系统组成要素及系统整体进行特性了解、对交通问题进行最优化方案分析等具有重要意义。

1.3 交通系统分析

交通是一个庞大复杂的大系统，其组成要素（单元）往往又可以看成是一个个子系统。本书针对交通系统或子系统，既从系统整体分析的角度、也从系统局部要素分析的角度，给出描述、分析、优化和评价各研究对象的理论和方法。

1.3.1 交通系统分析的意义

采用科学的方法对交通系统进行分析，对于解决交通问题具有重要意义。

1. 为交通系统规划提供依据

交通系统分析为交通系统规划提供必要的理论依据。例如，在城市道路网规划中，要预测规划期内的交通需求、交通分布和居民的出行方式分担比例，从而计算出各条道路上分配的交通量，确定交通需求，并依此设计道路。

2. 为交通设施设计及改造提供依据

交通系统分析为设计新的交通设施或改造原有交通设施提供理论依据。例如设置标志牌（如限速标志、停车标志等）时要考虑路段上车流的行驶速度、驾驶员的反应速度等，从而确定标志的形式、文字的大小、布设的位置等；在决定交叉口是否设置信号灯时，需要考虑交叉口交通量的大小、冲突情况等；在决定是否要设置行人过街按钮灯时，需要考虑行人交通量的大小、分布和机动车流量大小及其分布规律等。这些交通设施的设计及改造都离不开交通系统分析。

3. 为交通管理提供依据

交通系统分析可以为交通管理提供依据。例如，有些城市通过停车收费来调整交通需求，而收费价格就要运用供求关系理论经定量分析而定；又如，在进行信号交叉口配时设计时，

各项配时参数（信号周期、绿灯时长、黄灯时长、全红时间等）需要根据交通流规律、交叉口几何特征等经定量优化获得。应该说，没有科学的具体分析，就难有科学的管理。

4. 为交通政策和法规的制定提供依据

交通系统分析可以为制定交通政策和法规提供理论依据。例如，在发达国家确定公共交通票价时，要运用价格需求弹性理论来分析票价的涨跌对乘客的影响，进而分析对私人小汽车使用量的影响。有的国家根据这些分析的结果来制定和修订交通政策，优先发展公共交通，使城市交通大大改善。

1.3.2 交通系统分析方法

交通系统分析首先需要对交通系统进行一个定性或定量的描述，以便清楚地了解系统的各方面属性，然后根据系统分析的目的寻找使得系统达到最优目标的方案或策略，通过某些指标对不同方案系统性能进行评价，为系统决策提供依据。以上各方面的分析采用的方法技术不尽相同，需根据具体问题选择合适的方法，归纳起来概括为如下几类。

1. 定性分析或经验、逻辑判断

在进行系统描述时，根据系统要素之间的逻辑关系，建立描述系统要素的逻辑模型。在进行系统优化分析时，通过对不同系统方案进行逻辑判断来确定系统最优方案。在对比分析不同优化方案的各项指标的基础上，通过对每种方案各项性能优劣的综合分析来获得对方案的整体优劣评价，为系统决策提供依据。

以上方法主要是定性分析，因该方法缺少定量指标，较多地受人为主观因素的影响，通常需要与定量分析方法结合使用。

2. 数学模型

在进行系统描述时，通过数学方法建立描述系统要素之间定量关系的模型，该类模型是一些具体模型，比如，描述居民出行分布的重力模型等。在进行系统优化分析时，通过数学模型来获得系统的优化目标值，根据目标值的大小来确定系统的最优方案，该方法能够给出具体的目标值，从而可以确定唯一的最优方案，可减少人为主观因素对系统决策的影响。比如线性规划、网络图优化等方法。在进行系统评价时，通过要素之间的关联关系建立系统性能指标的数学模型，实现系统各项性能的综合评价，从而实现系统的整体评价。比如层次分析法、模糊综合评判法等。

建立数学模型的定量分析方法在交通系统分析中是比较常用的。

3. 模拟技术

模拟也称为仿真，它是为了求解问题而人为地模拟真实系统的部分或整个运行过程。交通模拟技术作为一种交通分析工具，已经渗透到交通工程领域的方方面面。

系统模拟的过程就是建立系统模型并通过模型在计算机上运行来对模型进行检验和修正，使模型不断趋于完善的过程。因此系统模拟包括三个基本活动：系统模型的建立、模拟模型的建立、模拟试验。

交通模拟模型是进行交通模拟的核心内容，它不是使用解析方法，而是使用计算机技术

采用数值求解的方法进行分析，在假设的基础上产生与实际交通相符合的随机数，并且对其进行排序、检验，形成随机变量，经过数值计算及逻辑推演、检验，来模仿实际交通运行状况，并分析和估计模拟系统的性能测度。比如，模拟车辆跟驰行为的元胞自动机模型。

4. 智能技术

智能技术指不依赖于或不完全依赖对象数学模型，主要利用人的经验、知识和推理，来解决一系列复杂性、不完全性、模糊性或不确定性问题的分析技术，具体如下。

神经网络法：模拟生物神经网络的某些结构和功能，仿造大脑神经元的特点，提出人工神经网络的结构模式，利用人工神经网络的某种学习规则，通过对历史数据的学习、识别，掌握历史数据的关系规律，从而进行未来交通系统预测或实时交通优化控制等。

遗传算法：模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程（适者生存、优胜劣汰）形成一种自适应全局优化概率搜索算法。可利用遗传算法进行交通系统优化分析、优化控制等。

模糊数学的应用：交通系统是一种对象不确定、结构十分复杂的大系统。对象的不确定性和复杂性决定了系统建模和模型求解的难度，有的很难用数学模型来描述。而利用模糊数学有关原理，进行交通系统评价、系统优化分析，不需要建立对象的精确数学模型，就能获得其他方法无法替代的效果。如模糊评价、模糊控制优化。

以上各种智能技术或不同技术方法的组合使用，在交通系统分析中有着广泛的应用前景。

5. 大数据技术

大数据技术就是对大数据进行处理的技术的集合。大数据技术与传统信息处理技术不同：大数据技术通过使用分布式技术实现的海量数据的处理，通过将分散于各地的存储、处理设备整合在一起，实现可与巨型计算机媲美的海量数据处理能力。大数据技术善于由结果推断模型，不同于传统技术需要完善地建立数据模型，通过条件推导结果。

大数据条件下的交通系统分析不是将大数据技术简单套用或移植到交通领域，而是将大数据技术融入交通系统分析体系中，是将数据组织成为信息，从信息提炼特征，从特征变化中发现规律，并就对策进行追踪评估的信息处理过程。交通大数据的融合和利用是未来的发展趋势。

1.3.3 交通系统分析内容

交通系统分析研究的内容非常广泛，本书主要根据交通工程专业本科生应掌握和了解的相关知识，选择以下几个方面进行交通系统分析技术方法的介绍。

1. 交通参数与交通系统状态分析

系统分析的首要任务是对系统进行一个定性或定量的描述，以便清楚地了解系统的各方面属性。交通系统是一个包含人、车、路、环境等多种因素的复杂系统，交通系统状态主要是指交通流状态。了解交通流特性以及分析交通系统状态是交通系统评价、优化的基础。

有关交通参数、交通系统状态可以通过实际调查的方法掌握，而本书侧重于各种理论、数学模型方法的介绍及其应用。通过交通流量、速度、密度三参数之间的关系模型、延误分析模型、交通流概率统计分析、跟驰理论、排队理论、交通波理论、车队离散理论等，进行交通系统状态的描述。

2. 交通系统优化与网络优化分析

交通系统优化，就是应用最优化理论和方法，对备选方案进行优化分析，找出最优方案。系统优化方法很多，根据具体问题，随所建立的模型的不同而不同。本书主要介绍线性规划、运输问题、指派问题、整数规划、0-1 规划、动态规划的基本方法及其在道路交通领域的应用。网络优化分析是利用图与网络的特点，研究如何有效地计划、管理和控制网络系统，使之发挥最大效益。本书针对最小树问题、最短路问题、最大流问题介绍其求解方法及其在交通运输领域的应用。

3. 交通系统供求分析与需求预测分析

交通系统供求分析包括交通资源供应和交通出行需求两方面的内容。随着交通量的不断增长，道路资源显得越来越紧张，供求矛盾日益突出。交通系统供求分析与需求预测分析有助于寻找解决供求矛盾的方案。本书主要介绍交通需求和交通供给的特性及供需平衡关系宏观理论，以及时间序列、回归分析、灰色模型、神经网络等具体需求预测分析方法及其应用。

4. 交通系统评价与方案决策分析

在系统分析时，为实现某一系统的目的或目标，往往可建立多个备选方案。系统评价就是要对各备选方案进行综合评价，以便获得最佳方案。在了解系统评价指标体系有关知识的基础上，主要介绍费用-效益分析、关联矩阵评价法、层次分析法、聚类分析法、模糊综合评判法等交通系统评价方法，以及不确定型问题、风险型问题的决策分析方法，并列举交通系统评价与方案决策分析方法在道路交通领域的应用。

5. 交通系统模拟与大数据分析

交通系统是一个复杂、动态、随机的系统，模拟分析方法以理论模型为基础，兼顾实测参数及交通状态的随机性特点，根据被研究的真实系统，利用计算机进行实验研究。交通系统模拟分析技术为交通系统提供了一个迅速而方便的构造和重现复杂的交通现象并全面记录现象发生过程的平台，是当今交通系统分析中较为常用的工具。

近年来，随着手机网络、全球定位系统、车联网、交通物联网等的发展，交通要素的人、车、路等信息都能够实时采集，交通大数据来源日益丰富。在日益成熟的物联网和云计算平台等技术的支持下，大数据技术已在智能交通领域深入人心。未来活化数据的广泛应用是国内交通大数据的发展热点，也是改善交通的必由之路。

本书针对交通模拟、大数据技术两个方面的内容，主要进行概念性介绍，具体分析技术方法通过简单案例进行初步了解。

第2章 交通系统状态分析

交通系统是一个包含“人、车、路、环境”等多种因素的复杂系统，根据研究问题的不同需要从不同角度和不同层面分析交通系统状态。用来描述和反映交通流运行状态特征的交通参数主要有交通流量、速度、密度以及延误等。通过延误理论、交通流概率统计分析、排队理论、跟驰理论、交通波理论、车队离散理论等，可分别从微观和宏观两个层面，时间和空间两个维度上对交通系统状态进行分析。准确地把握交通系统状态是交通系统优化、评价的基础，也是制定交通管理及控制措施的依据。

2.1 交通流状态参数及关系模型

2.1.1 交通流基本参数关系模型

有关交通流基本参数定义如下：

交通量 q (或 Q)：又称流量，是指单位时间内通过道路（或道路上某一条车道）指定地点或断面的交通实体数（对于机动车而言就是车辆数）。

地点车速 v_l ：又称瞬时车速，是车辆通过某一地点的瞬时车速。

行程车速 v_s ：又称区间车速，是车辆行驶路程与通过该路程的总时间（包括停车时间）之比。

时间平均速度 \bar{v}_t ：指在一定时间内，通过道路某一地点的所有车辆地点速度的算术平均值。

区间平均速度 \bar{v}_s ：指某路段的长度与通过该路段所有车辆的平均行程时间之比。在数学上，区间平均速度是通过路段的所有车辆行程速度的调和平均值。

交通流密度 k ：指某一瞬间，道路上单位长度存在的车辆数。

车头间距 h_s ：指一条车道上前后相邻两辆车的车头或者车尾之间的距离。

车头时距 h_t ：指前后两辆车的车头或者车尾通过车道上某一点的时间差。

延误 d ：指行驶在道路上的车辆受到道路环境、交通管理与控制及其他车辆的干扰等因素的影响而损失的时间。

从基本定义出发，可证明平均车头间距 \bar{h}_s 和平均车头时距 \bar{h}_t 分别为交通密度 k 及流量 q 的倒数。

以上交通流参数之间还存在以下一些关系模型，这些模型大多是基于数学模型建立的，也有一些是根据实践经验建立的。

1. 交通流量 q 、速度 \bar{v}_s 、密度 k 之间的基本关系式

$$q = k \cdot \bar{v}_s \quad (2.1-1)$$

交通流量、密度、速度三者之间的关系式可以用三维空间中的图像（图 2.1-1）来表示，将这个三维空间曲线投影到二维空间中，可获得 $q-k$ 、 $v-k$ 、 $q-v$ 关系曲线，如图 2.1-2 所示。

由图 2.1-2, 可以找出反映交通流特性的一些特征变量:

最大交通流量 Q_m : 就是 $q-k$ 曲线上的峰值。

最佳速度 v_m : 即交通流量达到最大时的速度。

最佳密度 k_m : 即交通流量达到最大时的密度。

阻塞密度 k_j : 车流密集到所有车辆无法移动 ($v \rightarrow 0$) 时的密度。

自由流速度 v_f : 车流密度趋于零, 车辆可以畅行无阻时的速度。

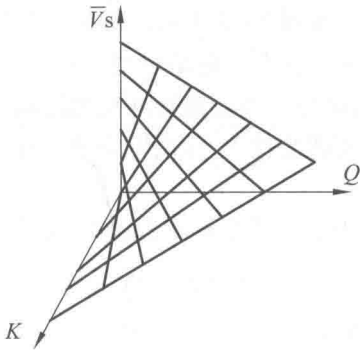


图 2.1-1 交通流的基本模型曲线图

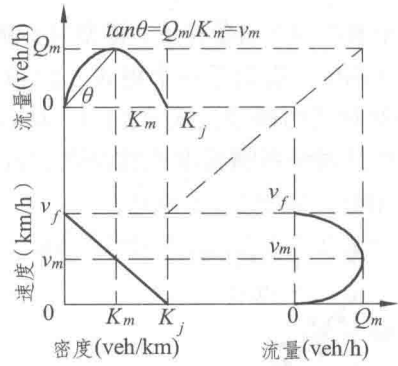


图 2.1-2 $q-k$ 、 $v-q$ 、 $v-k$ 关系曲线图

2. 速度-密度关系模型

1933 年, 格林希尔治 (Green shields) 提出了速度-密度的线性模型 (图 2.1-3)。

$$\bar{v}_s = v_f (1 - k / k_j) \quad (2.1-2)$$

这一模型简单直观。研究表明, 在通常的交通流密度下, 该模型与实测数据的拟合较好。由图 2.1-3 可知, 当 $k=0$ 时, $\bar{v}_s = v_f$, 即在交通流量很小的情况下, 车辆以自由流速度行驶。当 $k=k_j$ 时, $\bar{v}_s = 0$, 即在交通流密度很大时, 车辆速度就趋向于零。交通流量变化也可以用速度-密度图来说明, 例如: 已知 C 点的速度为 v , 密度为 k , 则交通量 $q = kv$, 它就是曲线下面的矩形阴影部分的面积。

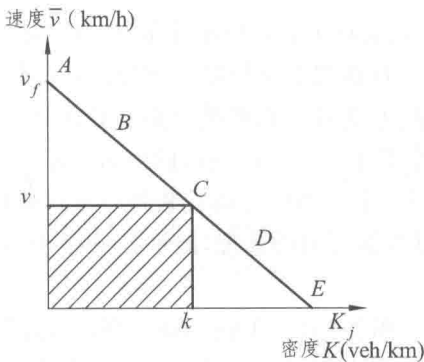


图 2.1-3 格林希尔治线性模型

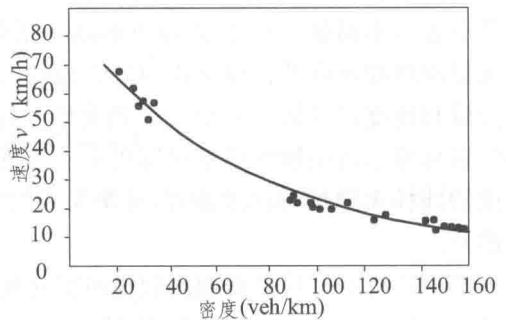


图 2.1-4 格林伯对数模型

当交通流密度很大时, 速度-密度关系模型可以采用格林伯 (Greenberg) 提出的对数模型。

$$\bar{v}_s = v_m \ln \frac{k_j}{k} \quad (2.1-3)$$

此模型和交通流拥挤时的数据很符合，适用于较大密度的交通条件，如图 2.1-4 所示。当交通密度较小时 ($k \rightarrow 0, \bar{v}_s \rightarrow \infty$)，这一模型不适用。

当交通流密度较小时，可采用安德伍德 (Underwood) 提出的指数模型：

$$\bar{v}_s = v_f e^{-k/k_m} \quad (2.1-4)$$

在较小密度的交通条件下，模型与实测数据拟合较好，如图 2.1-5 所示，图中 r^2 为相关系数。

伊迪 (Edie) 提出了一个将式 (2.1-3) 和式 (2.1-4) 组合在一起的模型，其中式 (2.1-4) 取较小密度对应的部分，式 (2.1-3) 取较大密度对应的部分。当绘制标准化速度对标准化密度的关系曲线时 (所谓标准化就是观测值与最佳值或最大值之比)，这两个模型曲线在密度的中部范围相交，如图 2.1-6 所示。

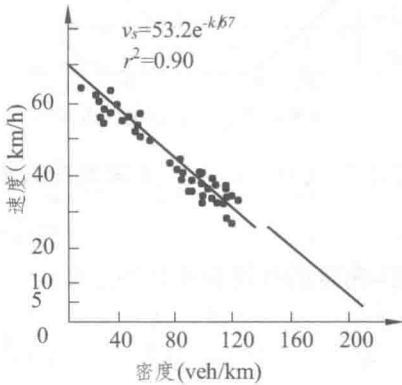


图 2.1-5 安德伍德模型

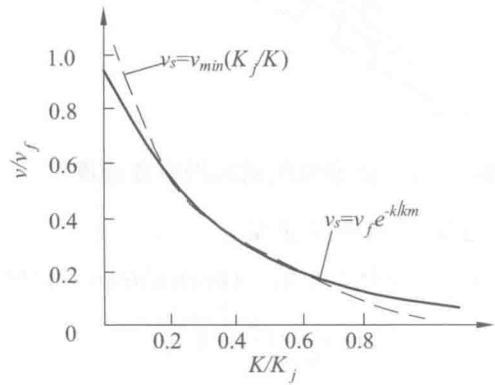


图 2.1-6 伊迪模型

3. 速度-流量关系模型

在格林希尔治速度-密度的线性模型基础上得到速度-流量关系模型公式如下：

$$q = k_j \left(\bar{v}_s - \frac{\bar{v}_s^2}{v_f} \right) \quad (2.1-15)$$

由图 2.1-7 可知，速度-流量曲线表现为抛物线， C 点流量最大，对应速度最佳。 C 点以上的部分表示不拥挤，而 C 点以下的部分则表示拥挤状态。在曲线上不拥挤的部分，速度随交通流量的增加而降低，直至达到最大通行能力的交通流量 Q_m 为止。在曲线上拥挤的部分，交通流量和速度都降低。从原点 E 到曲线上各点矢量的斜率表示那一点的密度的倒数 $1/K$ 。

格林希尔治抛物线模型只适用于中等密度的交通状态，不具备广泛的代表性。通过速度-密度的线性关系推导出的速度-流量关系与直接利用实际数据得出的速度-流量关系存在一定的偏差。

不少研究者直接根据观测数据研究速度-流量的关系。图 2.1-8 为美国 2000 年版《道路通行能力手册》中所采用的速度-流量曲线 (HCM 模型)，该图反映了密度较小时随着交通流量的增加速度保持不变，直到交通流量接近通行能力的 $1/2$ 或 $2/3$ 时，才开始有一个较小程度的下降。图中的曲线虽然不能通过确切的数学模型来描述，但我们从中可以清晰地归纳出交通流量与速度两参数之间的关系。

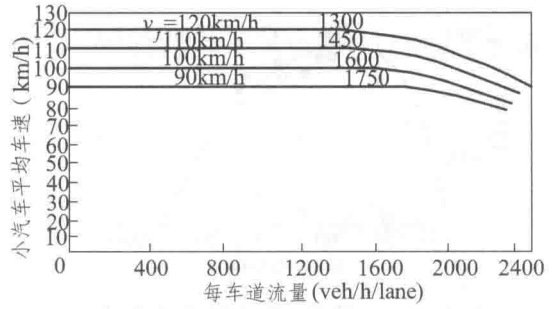
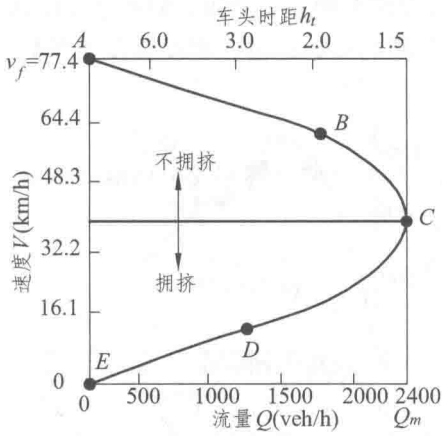


图 2.1-7 格林希尔治速度-流量抛物线关系图 图 2.1-8 《道路通行能力手册》采用的速度-流量曲线

4. 流量-密度关系模型

根据格林希尔治模型，得到交通流的流量-密度抛物线模型：

$$q = k\bar{v}_s = kv_f(1 - k/k_j) \quad (2.1-6)$$

如图 2.1-9 所示。图上 C 点代表最大交通流量 Q_m ，相应的密度为 k_m 。从 C 点起，交通流量随密度的增加而减小，直至达到阻塞密度 k_j ，此时交通流量 $Q=0$ 。从原点 A 至曲线上的 B、C 和 D 点的箭头为矢量，这些矢量的斜率表示速度。通过 A 点且与曲线相切的矢量，其斜率为自由流速度 v_f 。在流量-密度曲线上，密度比 k_m 小的点表示不拥挤，而密度比 k_m 大的点则表示拥挤状态。

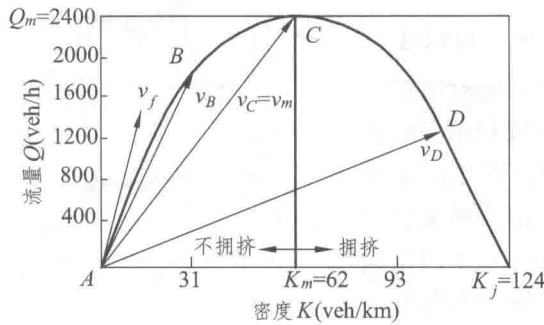


图 2.1-9 流量-密度抛物线关系图

格林希尔治流量-密度抛物线模型适用于中等密度的交通条件。对于较大密度交通情况，采用格林伯流量-密度模型：

$$q = k\bar{v}_s = kv_m \ln \frac{k_j}{k} \quad (2.1-7)$$

图 2.1-10 为模型与实际拟合情况。

对于较小密度交通情况，采用安德伍德流量-密度模型：

$$q = kv_f e^{-k/k_m} \quad (2.1-8)$$