



申请同济大学工学博士学位论文

网络交通评价方法、指标体系及 影响因素研究

培养单位：交通运输工程学院

一级学科：交通运输工程

二级学科：道路与铁道工程

研究生：邵敏华

指导教师：孙立军 教授

二〇〇六年三月



A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

**Research on the Evaluation Method,
Index System and Influence Factors of
Urban Traffic Network**

School/Department: School of Transportation Engineering
Discipline: Transportation Engineering
Major: Road and Railway Engineering
Candidate: Min-Hua Shao
Supervisor: Prof. Lijun Sun

March, 2006

网络交通评价方法、指标体系及影响因素研究

邵敏华

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：

学位论文作者签名：

年 月 日

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：

年 月 日

摘要

本文针对目前城市路网服务水平研究中存在的系统研究薄弱、指标类型混杂、阈值多样等问题，从服务水平的概念和通行能力的定义入手，提出了面向城市路网服务水平的评价指标体系，并就其中一些指标给出了影响因素分析方法和分析结果。

作为服务水平评价的基础环节，本文首先对已有的城市道路通行能力的定义方法进行了分析，并针对其中存在的问题，提出了基于试验交通工程学的“等效通行能力”概念和模型。进而就其理论基础、现场调查和数据分析方法进行了研究，给出了模型形式和变量含义，并确定了调查道路长度和分析周期长度等推荐值。

接着论文给出了等效通行能力影响因素分析的方法程序——分析—标定法。在对理想模型中的变量与参数进行理论分析和调查标定的基础上，建立了影响因素理论分析模型。基于这一模型，采用分析—标定法对影响等效通行能力和等效自由流车速的七个影响因素进行了分析。其中六个为理论分析模型中的参数，采用理论分析法，基于设定的标准条件，回归得到了各因素的修正项公式，并进一步研究了其中主要影响因素间的交互作用，给出了修正值诺模图。对于“非机动车”影响因素，则采用理论分析和现场调查相结合的方法进行了分析，给出了其影响推荐值。

基于等效通行能力，论文对城市路网服务水平概念和评价方法、指标进行了重新阐述。新的概念从服务水平评价的目的出发，综合考虑人的感知机理和管理人员的决策过程，将其分为设施供给水平和现状交通运行水平两个方面进行论述。在新概念指导下，论文提出了面向设施供给水平和运行水平两个方面，交叉口、道路和网络三个层次的评价指标体系和各指标的计算方法。其中，基于实用性的考虑，面向网络层面提出了已知 OD 情况下的理论指标和未知 OD 情况下的实用指标，研究表明经过修正后的实用指标与理论指标具有良好的一致性。

基于等效通行能力影响因素分析，路网在路网设计问题中考虑了交叉口间距的影响：针对局部路网，讨论了“新建道路”和“现有干线道路交叉口改造立交”两类路网扩容措施中的合理交叉口间距的确定方法，并给出了简单的算

例；针对离散路网设计问题，在已有模型中引入了路网生成算子来考虑交叉口间距的影响，并给出了路网生成算子的算法程序和改进路网设计模型求解的退火遗传算法，同样给出了简单算例。

最后，关于进一步工作的方向进行了简要的讨论。

关键词：服务水平，等效通行能力，影响因素分析，交叉口间距，离散路网设计

ABSTRACT

Since 1950s, many evaluation indexes of urban traffic network have been proposed. Among these indexes, different criteria for defining level of service (LOS) are used for different facility types. And even for the same facility type, different threshold values are used for different grades. All these have made traffic engineers and decision-makers feel confused when they try to judge the traffic condition correctly. Trying to solve these problems, new evaluation index system of traffic of urban traffic network is suggested in this dissertation based on the analysis about the definition of LOS and capacity. As to some of the given indexes in this system, the effects of some factors are discussed. As the result, the analysis methods and some conclusions are given.

The definition of urban road capacity is analyzed firstly, which is the basis of the study on the LOS evaluation. Considering the limits of exist definitions, the concept and model of Equivalent Capacity is proposed. Then theoretic explanations of its variables are given. Also, appropriate values of length of survey road and analysis period are suggested.

After that, a method of integrating theoretic analysis and field survey is recommended to analyzing the effects of influence factors on equivalent capacity. Based on some results of analysis and survey about some parameters and variables, the analysis model is built. Using this model, results of effect of six factors, which are included in the model, and the corresponding abacs are given. Results of theoretic model are the basis of analyzing other factors. With them, effects of the six factors can be removed from data of survey so that the effect of other factors can be analyzed. As an example of this method, the effect of bicycles is given.

Based on equivalent capacity, the concept, evaluation method, and index system of LOS of urban traffic network are discussed: considering the mechanism of travelers' feeling about traffic condition and the process of traffic managers' decision about improving traffic condition, a new concept of LOS is expounded, which divides

LOS into two parts: level of facility supply and level of facility operation. Under the direction of this new concept, two categories of evaluation indexes for intersection, road and network are given accordingly in this dissertation. Comparing to single intersection or road section, evaluating LOS of road network is more complicated for existence of its own topology and distribution of demand on it. So modified applicable indexes are given for LOS of road network with the discussion about their consistency to theoretic indexes.

Based on the analysis of the effects of influence factors on equivalent capacity, effect of space between intersections is emphasized in Network Design Problem (NDP): the analysis methods of appropriate value of space between intersections of local network for two measurements of capacity improvement are given with simple examples. The effect of space between intersections is also considered in Discrete Network Design Problem (DNDP) by introducing network generation arithmetic operator into traditional model. The calculation method of this operator is given. Then the Simulated Annealing Genetic Approach (SAGA) is proposed to solve the whole DNDP. Also an example is given finally.

In the finality, the problems requiring further studies are discussed.

Key Words: Level Of Service, equivalent capacity, analysis of influence factors, space between intersections, Discrete Network Design Problem

目录

第 1 章 序言.....	1
1.1 研究背景与必要性.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 各国通行能力手册中的有关研究.....	2
1.2.2 通行能力手册以外的有关研究.....	7
1.2.3 总结.....	13
1.3 本文的研究内容和技术路线.....	14
1.3.1 研究范围设定.....	14
1.3.2 研究的主要内容.....	14
1.3.3 研究的技术路线.....	14
第 2 章 等效通行能力概念和调查方法.....	16
2.1 已有道路通行能力研究简述.....	16
2.1.1 道路通行能力理论研究.....	16
2.1.2 道路通行能力应用研究.....	17
2.2 已有研究问题分析.....	18
2.2.1 已有研究的基本假设.....	18
2.2.2 关于上述假设的分析.....	19
2.3 等效通行能力.....	25
2.3.1 等效通行能力概念.....	25
2.3.2 等效通行能力的理论基础——间断流下的流密速关系.....	26
2.3.3 等效通行能力的获得.....	28
第 3 章 等效通行能力影响因素分析方法.....	35
3.1 影响因素分析方法.....	35
3.2 影响因素分析理想模型的建立.....	37
3.2.1 路段行程时间.....	37
3.2.2 交叉口延误时间.....	38
3.2.3 总行程时间.....	41
3.2.4 理想模型的建立.....	42
3.3 模型参数和变量分析.....	43
3.3.1 参数分析.....	43

3.3.2 变量分析—— Q	48
3.4 理论分析模型的建立	52
3.5 理论分析模型的求解	53
3.6 本章小结	54
第 4 章 等效通行能力和等效自由流车速影响因素分析	55
4.1 基于理论分析的影响因素剥离	55
4.1.1 等效通行能力影响因素分析	55
4.1.2 等效自由流车速影响因素分析	71
4.2 基于理论分析和现场调查的影响因素剥离	77
4.2.1 \bar{R} 中影响因素剥离的一般方法	77
4.2.2 “非机动车”影响分析	78
4.3 本章小结	80
第 5 章 城市路网服务水平评价指标体系	82
5.1 服务水平研究目的解析	82
5.1.1 交通状况的形成机理	82
5.1.2 出行者对交通状况的感受	82
5.1.3 决策参考	82
5.2 服务水平概念新解	83
5.3 评价指标体系	84
5.3.1 指标选择的基本原则	84
5.3.2 评价指标	84
5.3.3 服务水平评价指标体系	102
5.4 本章小结	102
第 6 章 局部路网合理交叉口间距问题分析	104
6.1 增加道路的合理性判别	104
6.1.1 道路基本条件假设	104
6.1.2 增加道路的影响范围分析	104
6.1.3 增加道路的合理性判别	109
6.2 干线交叉口改建立交后的合理间距	113
6.2.1 合理间距的计算原理	113
6.2.2 合理间距的计算结果示例	116
6.3 本章小结	120
第 7 章 考虑交叉口间距的离散路网设计问题探讨	121

7.1 离散路网设计问题简述.....	121
7.1.1 预算约束的 DNDP.....	122
7.1.2 无预算约束的 DNDP.....	123
7.2 Braess 诡异 ^{【92】~【94】}	123
7.2.1 Braess 诡异出现条件分析.....	123
7.2.2 考虑交叉口间距影响的 Braess 诡异.....	125
7.3 考虑交叉口间距影响的离散路网设计模型.....	128
7.3.1 模型设计.....	128
7.3.2 路网生成算子.....	129
7.3.3 模型求解.....	132
7.3.3.1 模拟退火遗传算法简介 ^{【97】}	132
7.3.3.2 变量编码.....	133
7.3.3.3 适应度函数.....	133
7.3.3.4 算子设计.....	134
7.3.3.5 模型资金约束的处理.....	134
7.3.3.6 算法步骤.....	134
7.3.4 算例.....	135
7.3.4.1 道路基本条件设置.....	135
7.3.4.2 交通需求设置.....	135
7.3.4.3 计算参数设置与模型优化结果.....	135
7.4 本章小结.....	136
第 8 章 结论与展望.....	138
8.1 结论.....	138
8.2 研究展望.....	141

第 1 章 序言

1.1 研究背景与必要性

出行质量是衡量城市生活质量的重要指标之一，而伴随经济增长而生的交通拥挤问题几乎不可避免地成为国内外城市发展中所面临的瓶颈问题。一项针对美国 85 个城市交通畅通性评价的研究表明^[1]，从 1982 年到 2003 年的约 20 年间，采用机动车作为的交通工具的出行者的高峰时间年人均延误从 16 小时攀升到 47 小时，增加了近 2 倍，且拥挤的持续时间和分布范围也都有了明显的增长。而我国目前一般城市干道上机动车的运行速度只有 15~20km/h，大城市中心区仅为 10~15km/h^[2]，远低于国际上的交通标准——18 km/h。交通拥挤问题成为制约城市发展的关键问题之一。为此，国内外许多交通研究人员和交通工程师从理论和工程的角度提出了多种技术方法和工程措施：从简单的道路设施扩建到信号灯的优化控制，从公交优先政策到近年来在新加坡、伦敦等地陆续实施的拥挤收费管理，从交通信息发布到智能交通诱导等。在这一过程中，一系列问题摆在了人们的面前：如何评价路网的交通运行状态以判断交通改善技术实施的必要性？交通改善措施选用的依据是什么？如何评价这些技术方法和工程措施的实施效果？所有这些问题的解答都基于交通工程研究中的一个基础而重要的问题——交通系统评价问题。

交通数据的采集是进行有效评价的前提。目前我国许多城市都逐渐加大了在这一方面的投入。以上海为例^[3]：上海市政工程管理处于 2001 年在三纵三横主干道路网的 23 个交叉口安装了感应式交通流量检测线圈，在随后的四年期间又将检测交叉口数量增加到约 150 个。设施的建设无疑为及时掌握道路交通状况提供了很好的硬件基础。然而，只有将海量的数据转化成对管理人员和交通出行者有用的信息，这些设施才能真正发挥作用，建立合理的交通系统评价指标体系和评价方法将是完成这一转化的第一步，并可为后续设施的建设提供指导。

在进行交通评价分析时，长期以来，人们多是采用服务水平（Level Of

Service) 分级的方法进行的。现有研究意义下的服务水平可简单地定义为交通出行者对交通系统运行状况的感受, 较为严格的定义可以引用美国通行能力手册 (Highway Capacity Manual, HCM1985) 中的有关定义^[4]: 即描述交通流内的运行条件及驾驶员与乘客对其感受的一种质量标准。目前, 在这一定义指导下所提出的用于确定服务水平的评价指标种类繁多, 标准不一: 有采用绝对数值的绝对指标, 也有采用相对数值的相对指标; 有基本指标, 也有衍生指标。对于同一交通设施, 采用不同指标评价有时会得到不同的结果, 这就使得交通管理人员在进行决策时无所适从。应该如何科学地定义“服务水平”? 哪些指标能够客观、高效地反映服务水平, 从而为管理人员提供有益的决策帮助? 这些指标又该如何获得? 这些都是交通系统评价研究中亟待解决的问题。

对上述一系列问题的解决构成了本文的研究初衷。本文拟从交通管理者和出行者的角度对“服务水平”的概念进行重新诠释, 并在这一概念指导下分层次给出服务水平评价指标和评价方法, 以期能够建立一个较为合理、完整的城市交通系统评价指标体系, 实现对现有数据资源的有效利用, 为解决城市交通拥挤问题提供依据和指导。

1.2 国内外研究现状

对于交通系统服务水平的研究是以交通流理论的研究为基础的。关于交通流理论的研究开始于 20 世纪 30 年代^[5], 到 20 世纪 60 年代初, 包括流密速关系、交通波动理论、排队论等在内的交通流理论的基本框架已经形成。基于这些理论基础, 研究人员开始致力于建立面向交通系统的评价指标体系和评价方法。在过去的近 50 年中, 提出了众多的评价指标和评价方法, 而各国与其通行能力手册相关的研究则成为这一领域研究的主线。因此, 这里简单地将已有研究分为纳入各国通行能力手册的方法和其他方法两类进行综述^[6]。

1.2.1 各国通行能力手册中的有关研究

继美国于 1950 年出版了第一版通行能力手册 (Highway Capacity Manual, HCM) 以来, 加拿大、澳大利亚、日本、俄罗斯、德国等国家陆续出版了自己的通行能力手册。各国在研究编写其通行能力手册时, 广泛地采纳和参照了 HCM 中的概念、方法和程序。

1.2.1.1 HCM

HCM 的演化历程

HCM 由美国公路通行能力和服务水平委员会(Highway Capacity and Quality of Service Committee, HCQSC)组织编写,先后经过了大小九次改版,共形成了四个正式版本。于1950年出版的第一版^[7],针对一些类型设施给出了基本的设计指南。委员会于1957年对第一版进行了改进,出版的 Highway Research Bulletin 167^[8]被视为 $1\frac{1}{2}$ 版。在此基础上,于1965年正式出版了第二版^[9],在这一版中首次提出了服务水平的概念,取代了第一版中的基本通行能力、可能通行能力和实际通行能力的概念。改版还增加了许多高速公路的相关内容。1980年,TRB Circular 212^[10]对第二版的一些程序进行了改进,1985年出版的第三版由此诞生。从第三版到2000年出版的第四版中,HCM先后经历了三次修订,分别在1991、1994和1997年,这些修订主要是针对多车道公路和交叉口的相关内容的^{[11][12]}。修订后的HCM第四版在内容、格式等方面都与前几版有了很大的不同。它一方面反映了目前丰富的信息采集技术,为后续在新领域的发展奠定了基础,另一方面不再象前几版一样只关注单纯的设施,而是进一步转向了系统的角度。这反映在其第四部分中将点分析的结果融入线、面评价的方法^[13]。

“服务水平”概念的演化历程

1965年,美国运输研究所在第二版的道路通行能力手册中首次给出了“服务水平”的定义,并建议用于交通设施的设计和评价。其定义如下^[9]:

“服务水平是反映速度、行程时间、交通干扰、驾驶自由度、交通安全、驾驶方便舒适程度以及运营费用等多种因素影响的一种质量测度。”

1985年第三版形成了目前被各国广泛应用的服务水平概念^[4]:

“规定为描述交通流内的运行条件及驾驶员与乘客对其感受的一种质量测度。服务水平的定义,一般用速度和行驶时间、驾驶自由度、交通干扰、舒适、方便和安全、费用等因素来描述。”

在1997和2000版基本维持了这一定义,只做了两处修改:去掉了“安全”和“费用”两项,以使其定义的范围更为明确^{[12][14]}。

“服务水平”评价指标的演化历程

把用于量化设施服务水平的测度(如HCM中的延误、行程车速等)称为设施服务水平的评价指标。

➤ HCM1965^[9]

理论上来说,服务水平定义为出行者通过道路断面感受到的运行状况,但

1965 版 HCM 却采用饱和度 (v/c) 作为服务水平的评价指标。这一指标并不直接与出行者感受相关。其另一个严重的缺陷在于：由于饱和度的峰值为 1，不能用于评价公路系统所有状态的拥挤情况，不能区分过饱和和非饱和两种截然不同的运行状况。为此，后续版本进行了改进，尝试着忠实于其概念^[13]。

➤ HCM1985~HCM1997^{[4][11][12]}

HCM1985 到 HCM1997 使用不同的评价指标定义不同设施的服务水平。就公路而言，高速公路和多车道公路采用密度作为评价指标；两车道乡村公路则采用延误时间百分比作为评价指标。就城市道路而言，交叉口采用延误作为评价指标，主干道路采用评价行程车速作为评价指标。具体指标和分级标准见表 1.1 (以 HCM1994 为例)。

表 1.1 HCM1994 服务水平评价指标和分级标准

设施类型	评价指标	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E
高速公路基本段	密度	<6	<10	<15	<20	*
交织区	平均行程车速	>88/96**	>80/86	>72/77	>64/67	>56
汇入分流区	密度	<6	<12	<17	<22	***
高速公路总体	无	无	无	无	无	无
多车道公路	密度	<7	<12	<17	<21	<25
双车道公路	延误时间百分比	<30%	<45%	<60%	<75%	<100%
信号灯交叉口	平均停车延误	<5	<15	<25	<40	<60
非信号灯交叉口	平均总延误	<5	<10	<20	<30	<45
城市干道 (I, II, III级)	平均行程车速	>56	>45	>35	>27	>21
		>48	>38	>29	>22	>16
		>40	>30	>21	>14	>11

注：* 因自由流车速和车道数而异

** 交织车速/非交织车速

***LOS “E” 阈值为饱和度为 1 时的密度

在 HCM1997 中城市干道分为四级

密度单位为 pcu/km/lane；平均停车延误单位为 sec/pcu；平均行程车速单位为 km/h

可以看到，不但不同的设施选用了不同的评价指标，对同一种设施的不同等级也选用的不同的服务水平分级阈值。

➤ HCM2000^[14]

HCM2000 在前面版本的基础上有了较大的改进，不再像前几版那样只关注单纯的设施，而是进一步转向了系统的角度，然而这种转化还没有在 HCQSC 目前的组织机构中得到完全的体现，在手册中的体现也只是初步的，仅对评价指标

进行了讨论，并未给出服务水平的分级标准。因此其主要内容还是面向公路和城市道路的，且仍是对于不同类型的设施采用不同的评价指标和分级阈值，如表 1.2 所示。

表 1.2 HCM2000 服务水平评价指标和分级标准

设施类型	Service Measure	LOS A	LOS B	LOS C	LOS D	LOS E
高速公路基本段	密度	<9	<17	<22	<26	<28
交织区	密度	*				
汇入分流区	密度	<6	<12	<17	<22	**
高速公路总体	平均车速	>100	>90	>80	>70	>60
多车道公路	密度	<9	<16	<21	<24	<26
双车道公路	延误时间百分比	<30%	<45%	<60%	<75%	<90%
信号灯交叉口	平均延误	<10	<20	<30	<50	<75
非信号灯交叉口	平均延误	<5	<10	<20	<30	<45
城市干道 (I, II, III级)	平均行程车速	>55	>40	>30	>25	>20
		>50	>35	>25	>20	>15
		>40	>25	>20	>15	>10

注：* 此处分为两种类型，六级，这里略去，可参见【14】

** LOS “E” 阈值为饱和度为 1 时的密度

密度单位为 pcu/km/lane；平均延误单位为 sec/pcu；平均行程车速单位为 km/h

对 HCM “服务水平” 概念和方法的有关评价

HCQSC一直坚持对其提出的“服务水平”的概念和评价方法的应用效果进行跟踪评估，并总结如下^[13]：

- 对出行者的接受情况研究薄弱，认为应当深入研究公众对已有指标的反应情况。这一点现在已经受到普遍关注，TRB年会近几年多有这方面的论文。
- 当前的评价仍主要是面向道路设施的，应当更多地关注多种运输方式所形成系统的整体评价。针对这一点，早在1990s，当HCM1994形成的时候，HCQSC主席Adolf D. May Jr.就认为应当强调多种方式的交通而不仅仅是道路，建议将HCM中的“Highway”改为“Transportation”。
- 其应用已超出了HCQSC预期的范围，而现有概念和方法实际上不能满足一些应用的要求，比如：现在服务水平的评价指标没有与饱和度相关联，因此，LOS “F” 可能发生在畅通一侧，而许多HCM使用者仍采用LOS来判断设施供给是否充足，这显然是当前定义下的LOS所不能提供的。
- 会导致一些反常现象，主要表现在：