

第一章 绪论

§ 1.1 交通运输在社会经济发展中的重要性

众所周知，作为国民经济综合体重要组成部分之一的交通运输业与政治活动、经济活动和科技进步相互联系，早已渗透到人们的日常生活及社会活动中的方方面面，影响着客观世界的演变及微观领域的运动。随着我国改革开放的不断深入，根据生产发展和人民生活的需要，作为服务于社会化生产和人民生活的交通运输业，以一个独立的生产部门立足于社会。交通运输业的基本任务就是通过提高整个交通运输系统的能力和服务质量，改善国家不同经济地区之间的运输联系，安全迅速而又经济合理地组织旅客和货物运输，保证最大限度地满足社会、国防建设及其它各个方面对交通运输的需求。

我们知道，国民经济是一个复杂而庞大的系统，它是由各地区、各部门和各产业组成的相互联系、相互促进、相互制约的统一体。交通运输业在其中具有相当重要的地位，具体表现为以下几点：

首先 交通运输业是国民经济正常、高效运行的载体。科技进步与经济发展相互促进，社会进步需要依靠经济基础推动，而经济发展离不开人员和物品的流动。在此一系列连带关系中，交通运输业起着纽带和桥梁作用，它把社会生产、分配、交换和消费各个环节有机的联系起来，是保证社会经济活动得以正常进行和发展的前提条件。交通运输为国民经济提供服务，而国民经济发展在客观上对交通运输提出需求。

其次，交通运输业是国民经济中的一个重要的物质生产部门。一方面，它是社会生产力的组成部分；另一方面，它又以运输生产

过程中所形成的生产关系为其特点。

第三，交通运输业是国民经济系统中最基本的子系统之一。它的基本性表现为：工农业生产、人民生活、国防建设及其他社会活动诸方面对交通运输有着普遍的需求，并且随着社会、经济的发展，国民经济各地区、各部门和各产业，社会各方面对交通运输需求的增长愈来愈快。因此交通运输业成为保障国民经济大系统充满生机和活力、人民安居乐业的基本条件。

交通运输状况的改变在很大程度上会影响社会经济机制的正常运行，随着社会的进步和商品经济的发展，经济的区域化和专业化会得到更进一步的增强，社会经济各个方面对交通运输的依赖性会愈来愈强，交通运输业的作用和地位会更加突出。许多国家的经验表明：一个经济发达的国家也同时具有完善的交通运输系统，并且交通运输手段越完善，其经济活力也越具有高效率和高效益的特征。无论是西方发达国家经济的快速增长阶段，还是发展中国家建立新经济秩序的经济起飞阶段都十分重视交通运输的战略地位。正确处理好交通运输与国民经济发展的关系有利于搞好交通运输发展水平与国民经济发展速度之间的综合平衡，有利于搞好交通运输内部不同运输方式之间有效的运输需求和运输供给的平衡、以及资源利用方面的布局平衡，有利于搞好每种运输方式内部多种经济关系的平衡。所有这些都是增强一个国家综合国力、加速国民经济腾飞的关键因素。

§ 1.2 城市交通问题及对策

城市交通就是在城市区域系统内和城际区域利用交通工具，通过时间的延迟和空间的占用，将客货的发生点和消失点联系起来使客货发生位移的活动。现代的大交通运输业包括铁路、公路、水运、航空和管道五种基本的运输方式，它们以人或货物在空间上的移动即位移为其产品。然而，这些产品中的绝大部分的发生和结束需要在城市中进行，借助城市的交通运输系统来完成，特别是这几种运输方式之间的相互补充、相互协调，则更加坚定地依靠城市

交通系统来实现。否则的话，大交通运输系统将变为孤立的线和网，形成不了客流和物流的集散，运输也将成为一句空话。并且由于大量的客流和货流多由城市集散，因此如果没有城市交通的保障和结合，全国的大交通运输网络就不可能畅通无阻。具体而言，城市交通系统有如下三项功能：

- (1)保证和促进城市生产活动；
- (2)保证城市居民正常生活工作；
- (3)保证城市外部循环输送。

城市交通系统是一个国家或地区统一的大交通运输系统的重要组成部分，是全国大交通运输网络的枢纽，它是由城市市内交通系统和城市对外交通系统两部分组成的。市内交通系统的交通方式有轨道、地铁和轻轨和公路两种，个别城市还有水路运输方式；城市对外交通系统中有五种运输方式，即铁路、公路、水运、航空和管道。习惯上，人们将市内交通系统通称为城市交通系统（本书所研究的城市交通问题指的就是市内交通，并且主要是市内道路交通。如果不特别注明，则城市交通指的就是城市市内道路交通）。

由于城市对外交通系统中的各种交通方式汇集于城市中的车站、港口和机场，从而对市内交通造成压力。而市内交通起着内外交通的“消化”作用。这样一来，城市就形成了庞杂的运输枢纽。判断一个城市，或者说一个中心城市的发展是否强劲的关键在于它本身是否拥有强大的“消化能力”、“凝聚能力”和“反馈辐射能力”。其中，交通运输则是一个不可缺少的重要条件。城市内部交通和对外交通对城市社会、经济的发展起着重要的作用。然而，其中起着直接作用的是城市内部交通，它同工作、居住和休憩一起构成了城市的四大活动。这四大活动影响着城市的“消化能力”，而“消化能力”又是城市“凝聚能力”和“反馈辐射能力”的前提。因此，城市内部交通是城市社会和经济发展的动脉，是城市重要的基础设施，是建设现代化城市的基本条件，是城市发展水平的重要标志之一。随着城市的发展，城市交通对城市社会和经济等各个方面将发挥着越来越重要的作用。

交通事业的发展，有利于生活质量和生产效率的提高。同时，高水平的生产活动和生活质量又对交通条件提出更高的要求。在这种循环作用下，交通供需之间的矛盾越发突出。由于城市人口、车辆及出行活动的增加，产生了更多的人、车交通量，而城市有限的空间又不可能无限的满足交通需求，由此导致世界上大多数城市的交通条件日益恶化。不论是纽约还是孟买，北京还是上海，东京还是巴黎，都能见到缓缓流动的车流、满腹怨言的乘客和与运输工具现代化极不相称的狭窄坑洼的道路与原始落后的管理控制方法和手段。几乎所有的市政当局每年都要为交通系统提供巨额的、越来越难以负担的财政补贴。所有这一切，都促使政府官员、专家学者和一切关心城市发展的人们，积极研究城市交通系统和与之相关的各种问题，不断探索解决城市交通问题的各种有效途径，以缓解城市交通的拥挤状况。一般来说，在城市交通中存在的主要问题有：

(1) 道路负荷过重 交通拥挤严重。交通量过大 造成道路负荷过重，车速随之下降，由道路上车速与密度之间的关系可知，随着道路上车流密度的增加，车速呈下降趋势，直至为零，从而造成交通阻塞。产生交通阻塞的根本原因在于道路上实际的交通流量大于道路能够提供的通行能力。具体表现为：车行道宽度不够；平面交叉路口通行能力有限，造成路口及路段上交通阻塞；道路上各种车辆和行人混行 相互干扰 造成交通阻塞 立交桥形式选择不当，或匝道设计通行能力不足，也有可能造成交通阻塞；机动车辆的大幅度增加，加大了道路的负荷；出行方式的不合理分布，会加剧交通拥挤程度；缺乏严格的交通管理，道路空间被占现象严重等。

(2) 交通安全。现代化的交通运输是城市生产和生活的重要支柱，但随之而发生的交通事故给人民的生命财产带来了巨大的损失。据统计 全世界每年在交通事故中丧生的人数在 25 万左右 仅 1988 年在我国交通事故中死亡的人数就为 54814 人 是交通事故死亡人数比较高的国家之一。影响交通事故的因素很多，涉及人、车、路和环境等各个方面。由于城市人口密集 机动车辆多 还有大

量横过街道的行人，自然，发生交通事故的机率比乡村大得多。一个美好的城市首先应使居住在其中的人们有安全感。因此，减少城市道路交通事故是城市交通规划和管理工作中的一项重要内容。

(3)交通造成的城市污染。城市中大量的机动车辆会给城市带来非常严重的空气污染和噪音污染，其中汽车废气中包含有一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物、硫的氧化物、铅的氧化物及烟尘等。不同车辆和不同的燃油类型所排放的废气成分和数量有所不同，但无论什么车辆、无论何种燃油类型，当交通拥挤时，车辆运行速度放慢，排放出的废气总量就更大。同样，道路上的交通量越大，距离道路越近，感受到的噪声级就越高。此外，车辆行驶时的震动和飞尘也都会造成城市的污染。

§ 1.3 我国城市交通的现状、问题及解决策略

经济的繁荣带动城市及城市之间的社会交往和经济贸易日益频繁，加之我国人口稠密，交通设施原本不发达，以及作为发展中国家工业化过程中的机动车高增长率（年 10% 以上）导致交通供需矛盾日益尖锐。据统计，1978~1995 年我国的机动车辆的增长速度是公路里程增长速度的 81 倍。1978~1993 年我国城市道路面积和长度增加了 3.7 倍和 2.9 倍，人均道路面积从 3.4 平方米增长至 6.5 平方米，公交车辆和线路分别增长了 2.4 倍和 2.8 倍。但同期城市汽车增长了 5~7 倍。并且近年来我国汽车年增长率普遍保持在 15%~20%，有的城市高达 30% 并且有继续增长的趋势。另外，由于我国城市交通是一种包括行人、非机动车辆和机动车辆在内的混合交通，从而使交通组织、交通管理和交通控制之间的矛盾更加突出，因而导致严重的城市交通拥挤和堵塞。具体表现为：乘车出行拥挤，道路超负荷，平均车速下降，交通事故频发，交通污染严重等。据统计，我国市区机动车平均行驶速度已由 60 年代的 25~30km/h 下降为现在的 10~15km/h；1978~1993 年全国发生交通事故 310 万余起，死亡 63.2 万余人。

具体而言，我国城市交通和道路系统存在的问题有：

(1) 长期以来在城市规划建设中缺乏对城市交通问题的重视。建国初期，汽车交通发展缓慢，城市交通的矛盾不明显。60年代以后，随着我国石油工业和国民经济其它产业的发展，汽车发展速度大大加快，运输量也随之增加，铁路和水运逐渐饱和，汽车运输逐渐占据十分重要的地位。尤其是文革后期，城市交通迅速增长，城市中心地区的交通矛盾很快激化。1978年以来虽然重视了道路交通设施的建设，但由于城市中心地区改造困难，新区建设量比较大，交通基础设施的建设和规划仍相对滞后。进入20世纪90年代后，虽然政府加大了对交通基础设施的投资力度，但由于多年来欠账太多，远远比不上同期我国城市交通需求的增长速度。

(2) 城市发展的基本模式一般是单一中心的同心圆式的发展。由于在城市发展建设上缺乏远见，没有清晰的、超前的规划思想，而主要是继承了中国古代城市集中式布局的传统，从而使城市像滚雪球一样越滚越大。城市布局的不合理性造成工作与居住、生产与生活联系的不方便，人和车的平均出行距离越来越大，加大了交通流量，使得城市生产和生活周转减慢，越来越不经济。

(3) 城市建设中忽视道路系统的建设。大多数的城市道路系统不完整，交通流过于集中在少数干道上，迂回运输现象比较普遍；城市交通结构不合理，各种交通工具没有合理地负担各自的运输任务，以及自行车交通量的不合理发展；同时，城市中缺少各种车辆的停车场，各种车辆的乱停乱放及其它堆放物占用道路和人行道的现象十分严重。这也是造成城市交通拥挤和阻塞的重要原因之一。

(4) 交通流的混杂和相互干扰。由于我国城市的整体经济水平比较低，交通工具种类繁多，差异很大。不同性能和不同功能的交通流在同一平面上混杂在一起，互相干扰，特别是机动车受到非机动车和行人的干扰，使得机动车流量的速度降低，带来的是城市道路利用率降低，从而导致城市交通效率大大下降。

(5) 城市交通管理落后。城市中社会车辆比例过高，而专业车辆比例较小，造成了车辆空驶率很高，无形之中加大了交通量。

(6)解决交通问题的指导思想缺乏远见。具体表现为：忙于治标 忽视治本 缺乏从全局观点出发、从系统工程的角度出发、从城市布局和整个道路系统出发的行之有效的的方法和手段。往往就事论事 从一条道路、一个交叉路口去解决眼下的问题 这样一来 经常会在解决当前问题的同时又产生新的问题。

所以 城市交通问题是当今世界上所有城市共同关注 并为此付出了极大精力的重要课题。针对我国的具体情况，有关专家学者提出了解决我国城市交通问题的宏观对策，主要内容有：

(1)要从我国城市人口多、客运量大的特点出发。我国城市人口密集，很少有像西欧或美国中西部那样的布局比较分散、规模比较小、密度比较低的城市。此外 我国现又实行劳动密集、广就业、低工资的政策，所以城市客运量大是普遍规律，这是我国城市交通的特点，并将长期存在下去。即使发展技术密集型工业，以中心城市为核心的城镇体系仍将是我国城市化的特点。

(2)要从根本布局上解决城市问题。从控制大城市的发展出发，结合建立先进的综合交通运输系统，引导城市用地总布局向合理状态转化而进行必要的调整，改变单一中心的布局结构，减少跨区性的交通生成量 缩短出行距离 使交通均衡分布。

(3)搞好城市交通规划工作 将规划、设计和综合治理相结合，缓解交通拥挤局面。

(4)注重完善道路系统。城市道路系统规划和建设要立足于逐步改革城市道路系统结构，逐渐形成一个完整的、合理的、分流的道路系统。在此前提下，有目的、有计划的安排路段和交叉路口的改造。

(5)加强交通的科学化、法律化管理。认真研究城市规划中的交通问题，做好城市道路交通组织规划，根据现实的交通状况提出科学、系统、合理、有效的交通整治和管理方案 把交通管理与城市规划、城市道路系统规划、城市道路设计结合起来，做到交通管理的科学化；加强交通立法并配合其它措施减少交通事故和降低交通污染。

综合上述 对于新建城市、城市布局还没有完全形成的城市及道路交通基础设施还比较薄弱的中小城市而言，必须严格按照上述方法和对策认真进行城市规划和城市交通规划，以保证城市未来的交通顺畅，促进城市社会和经济的长期、快速和持续的发展。但对于我国的大城市（尤其是北京、上海和广州等特大中心城市）来说，一方面城市布局和用地已基本成型，中心地区改造极其困难，交通基础设施欠账太多；而另一方面城市交通需求量急剧增长，导致城市交通拥挤状况愈来愈严重。因此针对这些大城市，最迫切的而且是最行之有效的旨在缓解整个或局部交通网络中拥挤局面的对策方法就是：一定要从全局观点出发、从系统工程的角度考虑，在挖掘现有设施的潜力、通过严格的组织管理和提高现有道路系统通行能力的同时，对已不适应现代化交通需求的道路交通设施应及时更新、完善城市道路网络 增强其通行能力。

这种基于整个或局部交通网络的道路更新、改进工作可以避免上述所提到的忙于治标，忽视治本，头疼治头，脚疼医脚的就事论事的工作思想和工作方法，即可以避免从一条道路、一个交叉路口去解决眼下的交通拥挤问题的思想和方法而带来的种种弊端。而这种从全局观点出发、从系统工程的角度出发的基于整个或局部交通网络的道路更新、改进对策和方法正是本书所研究的城市交通网络设计问题的主要内容。

§ 1.4 城市道路交通规划

为使交通运输适应国民经济发展和人民生活需要，必须对交通发展制定出全面的规划。城市道路交通规划是城市综合交通规划的一个组成部分，在综合交通规划的基础上，为城市道路网络的建设和投资提供科学、系统的决策依据。城市交通规划的目的在于协调各种运输方式之间的关系，在可能的资金及资源条件下，对城市交通系统的建设、布局和运营从整体上作出最佳的安排，以适应社会、政治及经济的发展需要。现代交通系统是一个复杂的大系统，因此，交通规划也是一项需要借助系统工程和大型计算机来完

成的复杂工作。一般来说，交通规划的具体过程包括如下几个步骤：

(1)组织准备。由于现代交通系统是一个复杂的大系统，在交通规划中要制订整个交通规划的工作计划，提出规划工作的任务，明确有一定权威性的负责单位建立一个能够胜任这项工作的技术小组，并与政府决策人员建立正常的工作关系，与其他部门取得联系和协调。因此，进行城市交通规划的第一步就是做好组织工作。

(2)制订规划目标。为使规划方向明确，必须对规划提出明确的目标。城市交通规划的总目标有两个：其一是使旅客和货物具有适当的可动性，可将其分解为使出行时间最短；出行费用最少；提供充分的系统容量；提供充分的系统安全性；提供充分的系统可靠性等子目标；其二是达到环境平衡，也可将其分解为提供区域内生产、就业、教育、生活等的可达性分布 促进土地利用和运输设施按期望的方向组织；减少社会纠纷；减少空气和噪声污染等。

(3)数据收集。城市交通规划的综合性要求收集各方面大量的数据，其目的是为弄清城市内的交通特性而提供必要的信息。社会经济系统、运输服务系统和交通活动系统是运输系统分析的三个基本要素。交通规划的任务归根到底是要建立这三者之间的定性、定量关系，求得它们之间的协调与平衡发展。在进行定量分析和预测之前，首先需要进行这三方面的调查研究，收集必要的基础数据。至于调查的规模和深度主要取决于所做研究要达到的目的。

(4)分析预测。调查为进行规划奠定了基础，但还不够，还需要在分析预测阶段对调查所取得的数据进行分析，并研究用于预测未来交通需求的预测技术和预测模型。交通预测的任务就是利用这些预测技术和预测模型，根据对历史的和现实的社会经济、交通供给和交通特征资料的分析研究，推算所研究区域未来若干年内的交通需求。交通预测通常分为四个阶段进行：交通发生、交通分布、交通方式划分和交通分配。上述四个阶段又称 运量产生、运量分布、方式分离和配流。

(5)制订方案。利用系统分析方法，根据现状分析和交通预测

对未来的交通网络提出若干可行的方案。城市道路规划的落脚点是城市道路网络规划与设计，制定一个科学、合理、可行的道路网络规划设计方案比单纯的交通分析和预测要复杂的多。由于研究制订道路网络规划设计方案及相应的交通对策，需要考虑的因素很多，其实施结果将对城市内的社会经济发展、土地利用开发、人民生活水平和运输系统本身的效益和效果有着深远的影响。因此 必须遵循如下原则 其一 要有明确的目标和必要的前提。在对所研究区域内的土地使用性质、社会经济特征、国民经济发展计划、区域或城市总体规划有很好的理解和掌握基础上，明确提出区域内道路网络规划与设计的战略目标；其二，要有全局观点和发展的眼光。现代交通是一个复杂的系统工程，必须从全局和整体出发 进行全面的综合分析 从整体上、系统上进行宏观控制和规划，达到系统最优的综合效益；其三，要有工程经济的观点。在制订道路网络规划和对策时，在不影响交通规划战略目标的前提下，应认真考虑如何充分利用现有的基础设施，做到少花钱，多办事。对经济比较落后而又需要迅速发展的我国来说，这一点是有很现实意义的；其四，要有群众的观点。现在的交通问题已成为一个涉及到各行各业和千家万户的社会问题，因此所制订交通规划方案和对策应该考虑到社会各界的意见和利益。

(6)评价和选择。合理的交通规划方案可以有效地提高交通效率、减少交通事故和防止环境污染，并且可以有力地促进社会经济的发展 and 人民物质文化生活的提高。反之，就有可能带来运输效率降低、交通拥挤、交通事故增多和环境恶化等后果。因此 在确定待实施方案之前，需要对各种各样的可行方案进行慎重的评价、比较和选择。

从上述可知：城市道路规划的落脚点是城市道路网络规划与设计，说明城市交通规划过程中最重要的一步就是制订方案。制定一个科学、合理、可行的道路网络规划设计方案必须从全局和整体出发，进行全面的综合分析，从而达到系统最优的综合效益。

本书所研究的城市交通网络设计问题的指导思想就是从全局

的观点出发、从系统工程的角度考虑，通过优化计算寻找基于系统最优的交通网络建设方案，以供交通规划部门和决策、研究人员参考。

§ 1.5 研究城市交通网络设计问题的意义

交通运输供给能力的不足，已严重影响了经济发展中旅客和各种商品在自然空间上的合理流动，阻碍了一个国家或地区的国民经济的快速发展，成为制约一个国家或地区的国民经济快速发展的瓶颈。为了克服这一瓶颈现象，就需要增加交通运输能力，为此必须增加对交通基础设施建设的投资力度，因为交通基础设施发展资金的多少是影响交通运输能力增长的诸多因素中最重要的一个。但是目前在世界各国中，无论是发展中国家还是发达国家，资金不足问题都是交通运输发展中最大的障碍。有关研究指出，在交通运输基础设施发展资金方面存在的主要问题有三点，其一是建设资金缺口太大，但又缺乏定量的表示；其二是社会资金流向的政策性合理引导尚无量化依据，尚待深入探讨；其三是依靠市场力量引导资金流向来调整运输结构的不同运输方式的平衡力量需要揭示，而且资金来源渠道和筹集方法需要进一步拓展。

由于国家总体发展需要各行各业通盘规划、同步协调，国民经济各个部门、各个单位、各种产业经济之间应当保持合理的发展比例，因此任何国家或地区都不可能长期将建设投资过多的用于交通运输业。

为了解决交通运输发展资金短缺的问题，为了克服交通运输供给能力的瓶颈障碍，必须采取积极、有效的措施。一方面要广开思路，制定相关政策，面向社会、面向市场寻求发展契机，积极利用国家宏观调控和市场资源配置两种力量，吸引多方面的资金流入，从而达到增加交通基础设施建设所需资金数量、推动交通运输供给能力合理增长的目的；另一方面需要合理分配、用好、管好这些有限的资金，在资金投入决策之前，一定要全面比较各种投资建设方案，要注意考察一定的建设资金是否产生了最大的运输能力，是

否最大程度的减少了交通拥挤、是否最大限度的方便了旅客和车辆的出行，即力争使其发挥最佳的投资效益，使有限的资金投入产生最大的经济效益、取得最佳的社会效益。

因此 如何从城市总体交通状况出发 提出适当的、科学的、系统的、最佳的交通投资改进方案，并希望通过这些合理的交通投资分配方案能进一步促进城市交通状况的改善，带动城市各项经济活动的发展，达到交通建设与有限资金的和谐统一，这是一个关系到国民经济长期、持续、快速、稳定而又协调发展的大问题。

城市交通网络设计问题研究的主要内容就是通过优化计算方法寻找最优的用于道路网络新建或改善的交通建设投资方案，即研究如何能用最少的资金投入达到使整个交通网络中某种指标最优的目的，这些指标可以是使整个交通网络中的系统总阻抗最小，也可以是使整个交通网络所能容纳的出行量最大等等，从而为交通规划决策部门和有关人员提供科学、系统、合理、有效的决策方案和决策数据，使政府的有限资金投入能取得最佳的投资效益。

综上所述，可以得出研究城市交通网络设计问题的重要性有以下几点：

(1)从解决目前在我国特大中心城市普遍存在的交通拥挤状况的角度来说，研究城市交通网络设计问题是最迫切的而且是最行之有效的、从系统工程观点出发的以达到缓解整个或局部交通网络拥挤局面的对策和方法。

(2)从城市道路总体规划的角度来说，研究城市交通网络设计问题可以得出最优的交通网络建设投资方案，供交通规划部门和决策、研究人员比较、参考。而这一步是决定整个城市道路总体规划过程是否成功的相当关键的一步。

(3)从我国的经济基础薄弱而导致的城市交通投资的有限性来说，研究城市交通网络设计问题可以使政府有限的资金投入能取得最佳的投资效益。

因此，研究城市交通网络设计问题不仅在理论研究上有着重要的价值，而且能够用于解决实际的交通问题，在实际应用中有着

广阔的应用前景。

§ 1.6 城市交通网络设计问题

改进交通网络的途径有许多，例如拓宽道路、新建路段、调整路口的交通信号、建设立交桥、新建改善停车场等。城市交通网络设计问题 NDP—Network Design Problem 研究内容就是通过通过在现有交通网络中增加新的路段或更新、改善已有路段的能力从而达到使整个交通网络某种系统性能最优的目的。实质上是在一定约束条件下的最优投资决策问题。长期以来，城市交通网络设计问题一直被公认为是交通研究领域难度最大、最具挑战性的问题之一。

1.6.1 模型概述

在城市交通规划与管理中，有关规划部门和决策人员需要考虑的内容主要有三个方面：其一是道路网络配置（Network Configuration），包括网络的拓扑结构和路段能力等；其二是信号参数设置（Signal Setting Parameters）包括循环时间（Cycle Time）、绿灯时间（Green Time）等；其三是交通流模式（Flow Pattern）。为此，在研究城市交通网络设计模型时必须同时考虑网络中用户的路径选择行为。由于交通信号设置对网络中用户的出行费用（指的是广义的费用，包括时间、金钱费用、拥挤等因素，又称为出行阻抗）有很大的影响。因此，有必要在城市交通网络设计模型中包含交通信号的有关内容，以便考虑交通信号对交通流的影响。

在城市交通规划与管理领域，通过对城市交通网络设计模型进行优化计算能够得出使某种网络系统性能指标达到最优的网络拓扑结构和路段能力（以某一参考网络作为计算的起始点），具体的系统性能指标可以是使整个网络中的系统总阻抗最小、网络中所能容纳的 O-D 需求量最大、城市交通所造成的污染程度最低等。一般地说，城市交通网络设计模型要求的输入参数有：

(1) 供参考用的网络配置；

- (2) 出行需求；
- (3) 每条路段的最大能力和投资函数；
- (4) 每条路段的阻抗函数和零流时间 (Free-Flow Time)。

一般来说,在城市交通网络设计模型中,变量包括决策变量和普通变量两种,决策变量指的是路段能力,取决于网络拓扑结构和道路的几何特征,既可以是连续变量(例如道路的宽度)又可以是离散变量(例如用 0-1 变量表示是否修建某条路段);路段流量就是连续的普通变量。在城市交通中路段实际通过能力受路口的信号设置影响,因此,决策变量中应进一步包含有关的信号设置参数,信号设置变量是连续的决策变量。对于给定的输入参数、有关决策变量及目标函数,交通网络设计模型可以表示为如下的优化问题:

$$\min_{y, \lambda} Z(y, \lambda, f) \quad (1-1)$$

$$\text{s. t. } f = f(y, \lambda) \quad (1-2)$$

其中: y 表示路段能力向量, f 表示路段流量向量, λ 表示路口信号参数向量,函数 $f=f(y, \lambda)$ 表示网络中用户的路径选择行为。如果路段阻抗为常数,则意味着网络中不存在拥挤现象,每个 O-D 对之间的需求量被加载到 O-D 对之间的最短路径上(全有全无配流)或者按一定的比例加载到 O-D 对之间某几条路径上(概率比例配流)如果路段阻抗随着路段流量而发生变化,则意味着网络中存在拥挤现象,每个 O-D 对之间的需求量按用户最优的平衡分配原则加载到 O-D 对之间的所有路径上(平衡配流)平衡配流又可以分为确定性平衡配流和随机平衡配流两种。如果 O-D 矩阵是时变函数,则对应的配流问题就是动态平衡配流。当然,在拥挤的道路网络中也可以使用系统最优准则进行配流。

最为大家所熟知的城市交通网络设计模型就是平衡网络设计模型 ENDM(Equilibrium Network Design Model)即网络用户的路径选择行为符合 Wardrop 的平衡准则。决策变量为路段能力,既可以是连续变量,又可以是离散变量。平衡网络设计模型可以表示为如下的优化问题:

$$\min_y Z(y, f^*) \quad (1-3)$$

$$\text{s. t. } y \in Y \quad (1-4)$$

$$f^* \in F \quad (1-5)$$

$$f^* = f(y) \quad (1-6)$$

$$g^T y \leq B \quad (1-7)$$

其中 Y 是用网络拓扑结构或路段能力表示的可行决策变量集合, F 是可行路段流量集合, $f^* = f(y)$ 表示对于给定的路段能力而得出的平衡路段流量向量, g 表示路段投资费用向量, $g^T y \leq B$ 是投资约束, B 为投资预算总额。

如上所述, 研究城市交通问题必须考虑城市交通网络中的信号控制问题, 由于路段实际通过能力受路口的信号设置影响, 因此交通信号设置是影响用户出行阻抗的诸多因素之一, 即交通信号影响网络中用户的路径选择行为。如果不考虑路段能力这一决策变量, 即认为网络拓扑结构和路段能力是固定的, 而单独考虑通过信号设置使某种系统性能指标达到最优之目的, 同时又要考虑网络中用户的路径选择行为, 则称此问题为平衡网络信号设置问题 ENSSP (Equilibrium Network Signal Setting Problem) 对应的优化模型如下:

$$\min_{\lambda} Z(\lambda, f^*) \quad (1-8)$$

$$\text{s. t. } \lambda \in \Omega \quad (1-9)$$

$$f^* \in F \quad (1-10)$$

$$f^* = f(\lambda) \quad (1-11)$$

其中 Ω 是可行信号决策变量集合, $f^* = f(\lambda)$ 表示对于给定的信号参数而得出的平衡路段流量向量。

在城市交通网络设计问题中单独考虑信号设置或路段能力都是不全面的, 有必要将信号设置和路段能力结合起来, 进行综合优化, 以期达到使某种系统性能指标最优的目的, 并且又要同时考虑它们对网络用户的路径选择行为的影响。与此对应的问题就是平衡网络设计和信号设置问题 ENDSSP (Equilibrium Network De-

sign and Signal Setting Problem) 可用如下的模型表示：

$$\min_{\lambda} Z(\lambda, \mathbf{y}, \mathbf{f}^*) \quad (1-12)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{y} \in Y \quad (1-13)$$

$$\lambda \in \Omega \quad (1-14)$$

$$\mathbf{f}^* \in F \quad (1-15)$$

$$\mathbf{f}^* = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \lambda) \quad (1-16)$$

$$\mathbf{g}^T \mathbf{y} \leq B \quad (1-17)$$

其中 $\mathbf{f}^* = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \lambda)$ 表示对于给定的信号参数和路段能力而得出的平衡路段流量向量。

1.6.2 算法概述

1975 年 Leblanc 首先开始比较系统的研究城市交通网络设计问题，用混合整型优化模型 (Mixed Integer Model) 表示城市交通网络设计问题，其中的整型决策变量用于表示是否新建一条路段。这个模型是一个离散网络设计模型，可供选择的模型的解有 2^L (其中 L 为网络中路段的数量) 个。可见随着网络的增大，可行解集过于巨大，不存在有效的搜索算法，因而是一个 NP-hard 问题。城市交通离散网络设计问题的优点是能够反映实际，特别适合于网络的新建工作，它的缺点是即使对于很小的网络而言，相应的计算量也十分大，很难应用于实际。

Abdulaal 和 Leblanc (1979 年) 对 Leblanc 的工作做了改进，提出了一个新的城市交通网络设计模型，其模型的特点是不使用混合整型变量，而使用连续变量作为决策变量，并且在模型中用平衡流量约束表示网络中用户的路径选择行为。对此模型，他们设计了两种求解算法，其一是基于 Powell 的工作，另一个是基于 Hooke-Jeeves 搜索的直接搜索算法，通常称其为 H-J 算法。这个模型就是著名的城市交通连续平衡网络设计模型的鼻祖，为后续的工作奠定了基础。从此以后，各国学者研究城市交通网络设计问题主要采用的研究模型是连续平衡网络设计模型。

1979 年，Tan 等使用 MINOS (Modular In-Core Nonlinear

Optimization System 算法求解同一问题。在 MINOS 算法中 将平衡配流问题用一个等同的路径流量约束集来代替，使用 MINOS 软件包中的增广拉格朗日算法 (Augmented Lagrangian Method 求解变换后的问题。因此称上述算法为 MINOS 算法。它被认为是求解连续平衡网络设计问题的最为精确的算法，但是上述算法要求计算所有的路径流量，因此只适应于很小的网络。

1981 年 Marcotte 将上述连续平衡网络设计模型中的平衡流量约束用一个等同的变分不等式代替，设计了 CAA (Constraint Accumulation Algorithm 算法 利用‘全有全无’方法进行配流，如果路径上有流量 称此有流量的路径为‘主动’或‘紧’ (Active) 的路径 则将变分不等式约束加上 否则 就可以省略此约束。然而 CAA 算法有一个致命缺点 就是要求‘主动的’约束条件数量不能多。正如他本人所言 即使是很少的‘主动’约束条件 CAA 算法也很难应用。

1985 年 Friesz 和 Harker 使用 IOA (Iteration-Optimization Assignment) 算法，即迭代优化配流算法求解连续平衡网络设计问题。IOA 算法首先是由 Allsop (1974 年) 和 Steenbrink (1974 年) 设计和应用的，其中心思想就是将整个问题分为两个子问题，一个是路段能力固定条件下的平衡配流问题，另一个是平衡路段流量固定条件下的以路段能力为变量的普通优化问题，交替求解这两个子问题，直到满足某种收敛条件。IOA 算法的突出优点是其计算上的高效性，但其缺点也是致命的，即 IOA 算法有可能不收敛。无论是从算例上 (Tan 等, 1979 年)，还是从理论上 (Marcotte, 1985 年) 都证明了此点。

1987 年 Suwansirikul, Friesz 和 Tobin 等三人设计了 EDO (Equilibrium Decomposed Optimization) 算法。EDO 算法的主要思想是：将问题分解为若干个相互作用的子问题，一条路段对应一个子问题，对于每一个子问题只考虑该条路段上的能力增加。所以说这些子问题是相互作用的，是因为每一条路段上的平衡流量是由所有路段上的能力增加量共同决定的。使用现有的一维搜索