

文章编号: 1002-0268 (2005) 07-0118-05

# 城市道路网络容量、交通规划和交通管理

程琳, 王炜, 王京元, 邵昀泓, 鲁亚晨  
(东南大学交通学院, 江苏, 南京 210096)

**摘要:** 在分析城市道路交通网络 OD 结构特征的基础上, 提出表达道路网络容量的基本思想和模型, 阐明交通网络容量受到交通流特性、网络要素容量等因素的影响, 基于不同的考虑方法可以建立不同的网络容量模型。本文进一步分析了路网容量对交通规划与管理的指导作用, 交通规划和交通管理对道路系统容量的影响。交通规划着眼于提高整个道路系统的交通承载能力, 交通管理着眼于挖掘系统的潜力。运用网络容量对城市交通网络进行诊断, 根据不同容量的要求, 在交通规划或交通管理方面采取相应的措施, 解决城市交通问题。

**关键词:** 道路网络; OD 结构; 网络容量; 交通规划; 交通管理

**中图分类号:** U212      **文献标识码:** A

## Urban Road Network Capacity, Traffic Planning and Traffic Management

CHENG Lin, WANG Wei, WANG Jing-yuan, SHAO Yun-hong, LU Ya-chen  
(Transportation College, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing origin-destination flow pattern of traffic network, the basic ideas on the road network capacity were suggested and formulated in the mathematical programming. The network capacity was analyzed taking into account of network flow characteristics, network element capacity, etc. The different models of network capacity were proposed with corresponding requirement. The relationship among traffic network capacity, traffic planning and traffic management was further discussed. It demonstrates that traffic planning aims at the improvement of the whole road system while traffic management adjusts the flow distribution to utilize the potential of the traffic network capacity.

**Key words:** Traffic network; Origin-destination flow pattern; Network capacity; Traffic planning; Traffic management

城市道路网容量描述了道路网对交通需求的处理能力, 研究路网容量问题在城市交通规划与交通工程中有着极其重要的意义, 例如, 对于城市道路系统规划, 规划的道路是否满足路网容量的要求? 在系统容量不足的情况下, 应当对哪些部分进行改造、扩容? 大规模的建设项目常常带来巨大的发生、吸引交通量, 兴建大型建筑物的规划建筑面积与周边交通设施容量应当如何平衡? 在实施单行线、禁止交叉口左转等交通管理措施时, 如何对交通管理方案进行优化? 从交通环境的角度来讲, 道路网络的环境交通容量应

如何估计, 等等。这些问题都涉及到城市道路网容量这个基本问题, 因此, 道路网容量的研究对指导交通规划与交通管理具有非常重要的现实意义。但是, 目前在交通规划和管理中并没有量化网络容量指标, 原因在于: (1) 交通网络容量定义不明确; (2) 求解交通网络容量的复杂性; (3) 应用交通网络容量上的问题。

本文在分析城市道路交通网络的固定 OD 结构特征的基础上, 提出道路表述交通网络容量的基本思想和数学表达方法, 阐明交通网络容量受到交通流特性

收稿日期: 2004-05-15

基金项目: 科技部十五攻关项目 (2002BA404A04)

作者简介: 程琳 (1963-), 男, 江苏泰州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为交通规划、最优化理论和交通经济. (chengist@hotmail.com)

和网络要素容量等因素的影响。最后进一步分析了交通规划和交通管理对道路系统容量的影响、路网容量对交通规划与管理的指导作用。利用网络容量对交通网络进行诊断,并根据不同网络容量的要求,在交通规划和交通管理方面采取相应的措施,解决城市交通问题。

## 1 OD 交通量结构性

为了定义道路网容量,首先必须弄清路网上交通流的性质。网络流(Network flow)分为单品种流(Single commodity flow)和多品种流(Multi-commodity flow)<sup>[2]</sup>。单品种流的特征为:承载对象是单一物质,如水流、电流,而且来自发生源的物质可以流向任何吸收源,同时终止于吸收源的物质可以来自任何一个发生源。多品种流的特征为:承载对象不是单一物质,而且按照发生源和吸收源之间的点对来区分流量,例如,交通流可以由多个类型的车辆来表示,每个交通个体(指由人驾驶的车辆)拥有自己的出发地和目的地。对于单品种流的网络,其容量等于具有固定路段容量的网络最大流的大小。因为道路交通网络通常是多品种流的网络,表现为拥有多个OD交通量,所以,道路网络容量问题就成为在拥有OD交通量的前提下,如何估计拥有固定路段容量的交通网络的最大流问题。

OD结构这个概念将在本文中频繁使用,OD结构<sup>[5,6]</sup>是指OD交通量构成的比例关系,或者说构成OD矩阵的要素的大小存在一种结构上的关联性。根据OD结构的可变性,道路网络容量问题可以分为固定OD结构的最大网络流问题和弹性OD结构的最大网络流问题。交通工程学认为,城市机动车交通需求在什么OD之间发生以及发生多少不是任意的,而是与城市的土地利用的布局与强度有着密切关联性。在一个较长时期内,土地利用格局与城市经济活动的变迁,会导致OD结构的变化,因此,在进行未来道路系统规划时,必须对规划目标年的OD交通量分布进行预测,未来OD交通量分布是制定规划方案的基础资料。然而,在较短的时期内,通常认为OD交通量分布又是相对固定的,例如,通常所说的现状OD交通量是指现阶段的OD交通量的分布,在现阶段保持OD结构的不变性。

这里假定现阶段的道路网络拥有固定OD结构,探讨城市发展的现阶段的道路网容量问题。考虑一个城市道路交通路网 $G=(N, A)$ ,其中 $N$ 是网络结点集合, $A$ 是有向路段集合。每个有向路段拥有一个

固定容量 $c$ ,并且路段上的旅行时间与其交通量存在一种函数关系。这里不考虑结点容量,因为在交通工程学中,交叉口容量已经被分配到路段容量中<sup>[7]</sup>。

道路网络上的交通流量用具有固定OD结构的矩阵表示,例如,式(1)的单位OD矩阵描述了这种结构关系,其中,矩阵元素 $p_{rs}$ 描述了从结点 $r$ 流入结点 $s$ 的流量对全部交通网络流量的比率。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\sum_r \sum_s p_{rs} = 1$

而OD交通量 $q = \{q^{rs}\}$ 是全体发生交通量 $T$ 与单位OD矩阵 $P$ 的乘积,写成

$$q = T \circ P \quad (2a)$$

或者

$$q^{rs} = T \circ p_{rs} \quad (2b)$$

值得指出的是,如果在某种OD结构下,城市道路网络的交通承载能力得到充分发挥,那么这样的OD结构就称为“理想OD结构”,此时,OD结构与城市网络结构达成最佳匹配。然而,对于任何一个城市,在一定时期内相对固定的OD结构,不一定反映城市道路网络的要求。

## 2 道路系统的最大网络流

### 2.1 基于路段容量约束的最大网络流

关于道路网络容量最单纯的考虑方法是,在拥有固定OD结构的交通网络上,求解固定路段容量约束条件下的最大网络流问题<sup>[5]</sup>,道路网络容量就等于固定路段容量下的最大网络流,因为没有考虑到交通环境和交通服务水平,所以它是交通网络的物理容量。

因为现实中交通网络流不可能达到这样的极限流量,所以在具体计算时,应进一步考虑交叉口的容量约束、交通拥挤程度(如交通量与旅行速度的关系)。网络容量求解问题可以表达成OD矩阵的所有元素和的最大化问题,表示为

$$\text{maximize } z = \sum_r \sum_s q^{rs} = T \quad (3)$$

约束条件应包括

(1) 固定OD结构特性

$$p_{rs} = \frac{q^{rs}}{T} = \text{常数} \quad (4)$$

(2) 交通量守恒条件

用 $W$ 表示OD对集合; $K^{rs}$ 表示OD对 $rs \in W$ 之

间的所有路径集合;  $q^{rs}$  表示 OD 对  $rs \in W$  之间相应的分布交通量;  $f_k^{rs}$  表示  $k \in K^{rs}$  的路径交通量;  $x_a$  表示路段  $a \in A$  上的交通量, OD 交通量守恒条件与路段交通量守恒条件<sup>[2,3,4]</sup> 分别写成

$$\sum_{k \in K^{rs}} f_k^{rs} = q^{rs}, \forall rs \in W \quad (5)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k Q_{k|a}^{rs} f_k^{rs}, \forall a \in A \quad (6)$$

### (3) 路段容量条件

$$x_a \leq c_a, \forall a \in A \quad (7)$$

### (4) 交通量非负条件

$$x_a \geq 0, \forall a \in A \quad (8)$$

这是一个线性规划问题。在此问题中, 如果交通网络有  $n \times n$  个 OD 对, 那么变量个数  $m$  等于路网上路段的个数, 约束条件包括:  $n \times n$  个固定 OD 结构特性条件,  $n \times n + m$  个交通量守恒条件,  $m$  个路段容量条件,  $m$  个交通量非负条件。

城市交通网络往往拥有大量的路段和结点, 求解上述线性规划模型存在计算量和实用性上的问题, 因此, 有必要寻找能够求解大型交通网络容量问题的实用算法, 例如, 以交通量分配理论为基础, 用数值模拟的方法寻找城市交通网络能够承载的 OD 交通量的极限。

## 2.2 基于路段容量约束和交通环境约束的最大网络流

道路交通网络与机动车的关系其实不是简单的容器与溶液的关系, 机动车在路网上不断增加, 必然导致有害废弃物排放量加大, 直接影响着人类活动的交通环境。因此, 城市交通网络容量模型除了包括固定路段容量的约束以外, 还要追加其它约束条件, 其它约束条件可能包括总的行走距离限制, 总的能源消耗量限制, 停车限制以及其它的交通管制。因为行走距离与机动车排出废气量有一定的关系, 所以, 行走距离约束下的最大网络流, 等同于限制排出废气量的最大网络流, 由于考虑到对交通环境的影响, 所以, 这样的考虑方法便成为环境容量问题的基础。关于机动车废弃物排放量与行走距离的关系, 以及对城市交通环境的影响, 可以用试验方法获得一个控制标准<sup>[8,9]</sup>。

假设一个城市的容许行驶距离的总量为  $L$ , 路段长度是  $l_a$ , 那么, 总的机动车行走距离应满足条件

$$\sum_a l_a \cdot x_a \leq L \quad (9)$$

因此, 在目标函数 (3) 最大化问题中, 追加上述约束条件, 可以获得限制排出污染物质总量的道路网络最大流。

## 3 网络容量在城市交通规划与管理中的作用

道路交通系统的容量是城市交通规划与管理的理论基础, 是衡量交通供需是否平衡、决定投资方向的重要决策指标。但是, 目前在交通规划和管理中并没有量化网络容量指标, 对于一个给定的交通网络, 根本不知道其交通承载能力, 更谈不上如何发掘道路网络容量和利用剩余容量。在前面两节中网络容量问题的定义与建模, 为量化交通网络问题提供了有效途径。对于一个给定 OD 结构的交通网络, 通过网络总体容量的求解, 可以找到制约网络容量的关键路段或关键区域。根据发现的问题, 对现状交通网络进行诊断, 根据实际情况通过规划和管理措施, 改善城市道路系统的承载能力。如果城市交通网络容量是  $T$ , 那么表明城市道路系统能够容纳具有 OD 结构  $P$  的  $T$  个交通量。假设规划年的交通需求是  $T'$ , 如果  $T'$  高于  $T$ , 那么必须通过交通规划或者交通管理的手段, 适当调整城市道路系统的需求或者供给的任何一方, 来维持系统的供给平衡。有些城市的交通需求  $T'$  小于其交通网络容量  $T$ , 由于实际 OD 结构与理想 OD 结构不相似, 也会造成道路网络交通拥堵。

总体来说, 可以从两个方面来改善城市道路网络的交通承载能力: 一是交通规划, 二是交通管理。交通规划是在设施上合理地增加道路资源的供给, 扩大交通网络容量; 交通管理着眼于挖掘系统的交通承载能力, 通过交通政策或措施调控交通流在系统中的分布, 最大限度地利用已有道路网络的容量。图 1 描述道路网络容量、交通规划和交通管理的相互关系, 以下就这些关系做详细阐述。

### 3.1 道路网络容量与交通规划

随着城市化进程加快和机动车拥有量的急剧增长, 现有道路系统的容量已经成为制约城市经济发展的重大问题。未来交通需求总量的增长在道路网络上表现为各个交通小区之间分布交通量的增加, 即 OD 交通量的增加。未来 OD 交通量在路网上的相互作用, 使得部分路段交通量超过了现状路段容量, 出现交通拥挤甚至堵塞。交通规划是对道路网络进行改造、扩容、调整, 使得未来道路系统容量与交通需求增长相协调, 缓解道路资源的紧张局面。

近期交通规划的表象是对部分路段或结点进行改造, 实际上是通过局部改造扩大整个道路系统的交通承载能力。根据网络容量的计算发现交通矛盾比较突出的关键区域和关键路段, 从而决定规划建设的优先权, 优先对这种地方进行疏通改造, 从交通供给的源

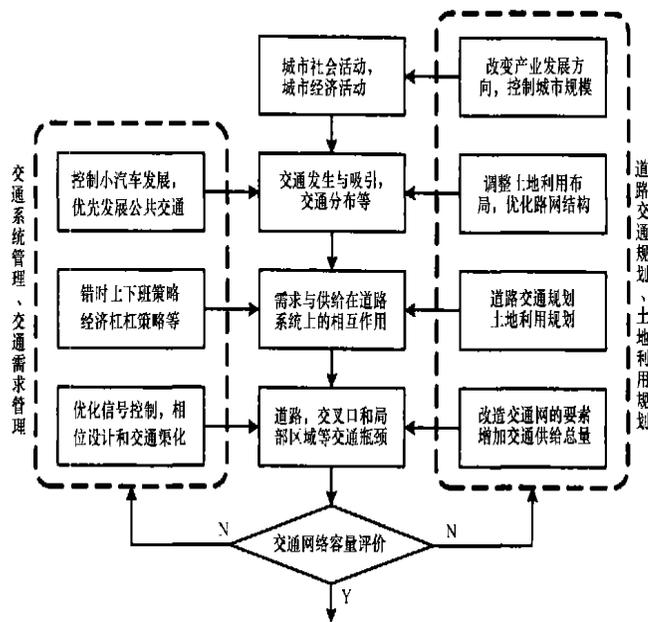


图1 交通规划和交通管理对交通网络上需求和供给关系的影响

头上消除可能的交通瓶颈。例如, 扩宽路幅来增加车道数, 打通断头道路来分解交通压力, 拉直道路来减少迂回交通, 等等。

中长期的交通规划则不仅仅停留在道路网络要素的改造上, 参照理想的OD结构进一步探究城市土地利用布局与道路交通网络之间的耦合关系, 放眼于未来城市的规模、人口总量和产业发展方向, 在更深层次上挖掘影响交通发生、吸引和交通出行的因素, 从结构上改善城市道路系统的交通承载能力。从而影响居民出行的OD结构分布, 使实际的OD结构与理想的OD结构相匹配, 最大限度地发挥交通网络容量。

大规模的建设项目会导致巨大的发生、吸引交通量, 引起交通需求在道路网局部地区绝对超过交通设施供给, 造成局部交通环境恶化, 如停车矛盾等, 影响交通网络整体机能的正常发挥。特别是在城市CBD地区、城市干线道路附近和城市组团的连接线上, 应通过交通设施调整和交通组织, 平衡大型建筑物的规划建筑面积与周边交通设施容量之间的关系, 缓冲局部交通需求剧增对交通网络系统的影响。

### 3.2 道路网络容量与交通管理

除了提高道路系统的交通承载能力之外, 交通管理措施在解决交通需求与供给矛盾中也有着极其重要的作用。在网络现有容量不变的情况下, 通过交通管理措施来解决局部网络容量不足和OD结构分布不合理的状况。

交通管理大体上分为交通系统管理和交通需求管理, 交通需求管理是针对交通发生源的政策性管理,

通过政策或经济杠杆影响交通需求的结构、重建OD交通量在城市道路系统的时空分布, 缓解交通状况; 交通系统管理是针对交通流的技术性管理, 通过交通控制和整治交通秩序, 减少道路系统资源的低效率使用, 提高道路系统的服务水平和运营效率。因此, 交通需求管理侧重于通过交通政策调控交通流在系统中的分布, 影响网络的OD结构, 使之与理想的OD结构相适应; 交通系统管理侧重于通过规范化的日常交通管理, 最大限度地利用已有道路网络的容量。

我国正处于交通管理规范化、科学化、智能化的并行发展时期, 许多城市通过实施“畅通工程”, 在规范化的交通管理方面做了许多有益的工作, 大大改善了城市交通的通行环境。目前实施的管理措施多以系统管理为主, 如信号交叉口控制、交叉口渠化等。尽管交通系统管理对充分发挥现有道路系统的潜力具有重要作用, 但其仅是对交通需求增长的被动反映, 交通系统管理和交通秩序整顿不能从根本上解决交通需求超过道路交通系统容量的矛盾。

城市的社会经济特征决定了城市不可能无限制地把土地资源用于道路建设, 在机动车需求不断增长的情况下, 城市交通拥堵不断加剧, 而且机动车产生的噪声、废气、振动等还严重影响城市生活环境。鉴于城市交通建设、交通系统管理对道路系统容量的改善的局限性, 适时地采取交通需求管理策略, 从被动地增加交通设施供给转变为调控机动车交通需求, 从时间、空间上平滑并抑制机动车交通的发生, 适应现有道路系统的承载能力。例如, 培育电子商务, 减少出

行发生量; 错开不同工作单位的上下班时间, 从时间上分解高峰时期的交通量; 运用诱导信息和拥挤收费政策调节交通量在道路网络上的空间分布; 扶持发展大容量公交系统, 减少系统中小汽车交通量; 发展物流系统提高货运效率等等。

#### 4 结 论

交通网络承载着具有意志行为的个体组成的交通流, 交通网络容量表示道路网络的交通承载能力, 与交通网络的 OD 结构密切相关。交通网络容量受到交通流特性和网络要素容量等因素的影响, 基于路段容量约束的网络容量描述了道路系统承载交通流的物理极限; 基于路段容量约束和交通环境约束的网络容量则描述了道路系统承载交通流的环境极限。在实际应用中可根据交通规划和管理确定的不同目标, 采取相应的模型。本文进一步阐述了网络容量在交通规划和管理中的应用, 利用网络容量对交通网络进行诊断, 并根据道路网络容量的要求, 在交通规划和交通管理中采取不同的措施。交通规划着眼于增加供给提高整个道路系统的交通承载能力; 交通系统管理着眼于挖掘系统的潜力, 最大限度地利用道路系统资源; 交通需求管理着眼于通过交通管理措施调控交通流在系统中的分布。无论是交通规划还是交通管理, 都是通过

交通需求与资源供给的平衡, 减少交通拥挤或较少资源的浪费。

#### 参 考 文 献:

- [1] Allsop, R E. Estimating the Traffic Capacity of a Signalized Road Junction [J]. Transportation Research B, 1972, 6 (3): 245—255.
- [2] Wong S C. On the Reserve Capacities of Priority Junctions and Roundabouts [J]. Transportation Research B, 1996, 30 (6): 441—453.
- [3] Ahuja, R K, Magnanti, T L, Orlin, J B. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [4] Gao Z Y, Song, Y F. A Reserve Capacity Model of Optimal Signal Control with User-equilibrium Route Choice [J], Transportation Research B, 2002, 36 (4): 313—323.
- [5] 饭田. 道路网络的最大容量评价方法 [C]. 日本土木学会论文报告集, 1972, (205).
- [6] Nishimura, Hino. On the Permission Level of the Traffic Volume in an Urban Road Network [C]. Proc. of PTRC Summer Annual Meeting, 1984 (12): 69—78.
- [7] Transportation Research Board Highway Capacity Manual 2000 [S], Washington, DC: 2002.
- [8] 王伟, 项乔君, 常玉林, 等. 城市交通系统能源消耗与环境影响分析 [M], 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 程琳, 王伟, 邵昀泓. 社会剩余最大化条件下的道路拥挤收费问题研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3 (2).