

基于排队论的城市路网模式选择

石飞¹, 于世军², 徐建刚¹

(1. 南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093; 2. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 假设相同道路用地面积下的4种路网模式, 基于交通工程学的基础理论之一, 排队论, 分别计算并讨论以下两种情形4种路网模式中车流沿横向或纵向行驶产生的总耗时变化趋势: 到达率相同, 道路用地面积率持续变化; 道路用地面积率相同, 到达率持续变化. 并对总耗时和趋势变化曲线进行比较、分析. 结果表明: 车流到达率不高, 即交通量不大的情况下, 低密度、红线较宽的路网模式(模式1)具备一定优势; 当交通量增多和出现拥堵时, 高密度的单行线路网系统(模式4)更具优势. 关键结论可直接指导规划实践.

关键词: 路网模式; 道路间距; 路网密度; 排队论

中图分类号: U 491.1

文献标识码: A

Research on Urban Road Network Mode Based on Queuing Theory

SHI Fei¹, YU Shijun², XU Jianguang¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the basic queuing theory in traffic engineering and the assumption that four kinds of road network modes under the same road land area ratio, a calculation was done on one vehicle's total time-consuming changing trends along horizontal or vertical roads in four kinds of road network modes under the following two situations: keeping the same traffic arriving rate, changing road land area ratio; keeping the same road land area ratio, changing arriving rate. And then, total time-consuming and curves changing trends were compared and analyzed. Results show that low density and wide road network system (Mode 1) has some advantage in case of lower traffic arriving rate; When the traffic volume increases and leads to light congestion, the high density and one-way street network system (Mode 4) is the best. Key conclusions can directly guide road network

planning.

Key words: road network mode; road space distance; road network density; queuing theory

20世纪90年代出台的《城市道路交通规划设计规范(GB50220—95)》对城市路网的规划建设提出了明确的要求, 是那个年代道路交通规划理论之于应用的集大成之作. 20世纪末, 有专家开始质疑源于前苏联建设模式下的该规范中的路网规划思路, 并对比美国曼哈顿和西班牙巴塞罗那地区的道路网模式, 认为规范要求的路网密度和道路面积率偏低^[1-2]. 此外, 有专家学者提出“支路网密度大, 微循环系统越发达, 如法国巴黎市中心的主干道数远小于北京老城市, 但由于其微循环系统发达, 交通运营状况要好于北京”的观点, 因此明确提出要加大支路网密度, 希望通过加密路网来缓解城市交通拥堵和建设可持续的城市交通体系^[3-5]. 陈小鸿等认为理论上路网密度存在一个最优值^[6]. 而在国外, 对于合理的路网密度和交叉口间距大小也存在着不同意见^[7], 美国《道路通行能力手册》(HCM2000)中认为减小路网密度可以提高街道的行程车速^[8], 沿途遇交叉口数量少, Kulash等则认为提高路网密度可以增加路网容量^[9]. 看好高密度路网的理由还有: 低密度路网的可靠性差, 一旦一条干道拥堵将引发区域性的道路交通瘫痪; 高密度路网可以分担更多的车流, 使得出行能有更多的路径选择, 避免过度集中带来的拥堵问题, 是典型的与低密度路网“集中论”相反的“分散论”; 引入单行线的动态路网运营效率更高.

总体上, 对于高密度和低密度路网模式, 是否前者的运行效率一定高于后者, 中国城市是否就不需要低密度路网, 对于城市的不同区域是否需要区别

收校日期: 2009-12-03

基金项目: 南京大学 985 工程三期项目; 中央高校基本科研业务费

第一作者: 石飞(1978—), 男, 博士, 主要研究方向为城市与交通规划. E-mail: shifei1979@gmail.com

通讯作者: 徐建刚(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字城市规划. E-mail: xjg129@sina.com

以待,等等问题,研究得还不深入,而这些问题又恰恰是交通规划建设时常碰到的,十分重要.本文基于运筹学的基础理论之一,排队论(可参考文献[10-11]等),从提高出行效率的角度分析不同路网模式的优劣,期望能够通过优劣比较来判定不同路网模式的适用范围.

1 基于排队论的路网模式研究方法

考虑相同的道路用地面积和比重,由于道路密度的不同导致道路宽度的不同,进而导致不同宽度道路的交叉口其通行能力也有所差异.因此,将交叉口视为“服务系统”,把到达的车辆看作“服务对象”,容易理解车流在不同密度的路网中“被服务”的等待时间和消耗时间也各不相同.首先按照道路宽度、密度,以及道路管制方式进行分类,形成4种路网模式,然后建立车流在均质空间中经历的总的消耗时间随道路面积率和车流到达率的函数,以消耗时间最小为目标,讨论合理的路网模式.假设:车流到达率服从泊松分布,则车头时距服从负指数分布;车流均匀分布在各条道路上;在一块正方形($L \times L$)的用地上考虑4种路网模式,分别是:均为双向6车道,等距布置,红线平均宽度45 m;均为双向4车道,等距布置,红线平均宽度30 m;均为双向2车道,等距布置,红线平均宽度15 m;均为单向2车道,间隔等距布置,红线平均宽度15 m;4种模式下的机动车行驶道路总面积 S 均等,则交叉口总数量之比为4:9:36,横向或纵向方向上每条道路沿线的交叉口数量之比为2:3:6.这4种路网模式及其服务方式如图1所示.

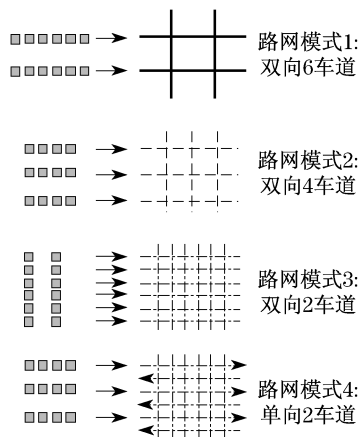


图1 4种路网模式

Fig.1 Four road network modes

这种情况即多路排队多通道服务,相当于由 N 个 $M/M/1$ 系统组成的系统,其计算公式由 $M/M/1$

系统的计算公式确定.设顾客平均到达率为 λ ,排队从单通道接受服务后通过的平均服务率为 μ ,系统下的平均排队长度: $\bar{q} = \rho^2 / (1 - \rho) = \lambda^2 / (\mu^2 - \mu\lambda)$,排队系统中的平均消耗时间: $\bar{d} = 1 / (\mu - \lambda)$.单位车辆在每一交叉口处的平均消耗时间(\bar{D}_{c1} 、 \bar{D}_{c2} 、 \bar{D}_{c3} 和 \bar{D}_{c4} 分别对应图1的4种路网模式)计算公式为

$$\begin{cases} \bar{D}_{c1} = 1 / (\mu_1 - \lambda_1) \\ \bar{D}_{c2} = 1 / (\mu_2 - \lambda_2) \\ \bar{D}_{c3} = 1 / (\mu_3 - \lambda_3) \\ \bar{D}_{c4} = 1 / (\mu_4 - \lambda_4) \end{cases} \quad (1)$$

设 λ_0 为到达交通量(辆· min^{-1}),则 $\lambda_1 = \lambda_0 / 2$, $\lambda_2 = \lambda_0 / 3$, $\lambda_3 = \lambda_0 / 6$, $\lambda_4 = \lambda_0 / 3$.交叉口车辆服务率也可理解为通行能力,交叉口通行能力的计算方法,较为常用的有美国的HCM(《道路通行能力手册》)法、英国的TRRL法、中国的停车线法和冲突点法等^[12-13].不考虑同一交叉口不同方法得到的通行能力数值,即将问题简化,这里仅根据规范,前3种路网模式下相同等级和宽度道路的交叉口其通行能力分别为:4.4~5.0千辆· h^{-1} ,2.8~3.4千辆· h^{-1} 和1.5~1.9千辆· h^{-1} ,则对应的每一交叉口进口道的通行能力为:18.3~20.8辆· min^{-1} ,11.7~14.2辆· min^{-1} 和6.25~7.9辆· min^{-1} ,为便于计算,取其中间值,则 μ_i ($i=1,2,3$)分别为19.6,13.0和7.1辆· min^{-1} .单行线与双行系统比较,交通处理能力增加30%~50%^[14],取中值40%进行计算,则路网模式4的服务率 $\mu_4 = (1.5 + 1.9)1000 / 2(1 + 40\%) / 60 / 2 = 19.8$ 辆· min^{-1} .

式(1)仅为考虑车流经过交叉口的耗时,两两交叉口之间的路段耗时计算公式为

$$\begin{cases} \bar{D}_{l1} = (l_1 - d_1 \bar{q}_1) / v_1 \\ \bar{D}_{l2} = (l_2 - d_2 \bar{q}_2) / v_2 \\ \bar{D}_{l3} = (l_3 - d_3 \bar{q}_3) / v_3 \\ \bar{D}_{l4} = (l_4 - d_4 \bar{q}_4) / v_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中: \bar{D}_{l1} 、 \bar{D}_{l2} 、 \bar{D}_{l3} 和 \bar{D}_{l4} 分别为4种模式下交叉口间除去排队长度的车流行驶时间; l_1 、 l_2 和 $l_3 = l_4$ 为4种路网模式下的交叉口间距,由于假设各种模式下的道路面积均等,各模式中的道路红平均线宽度为45 m,30 m和15 m,因此满足 $3/l_1 = 2/l_2 = 1/l_3$; d_i 为停车等候状态下的车头间距,根据各路网模式下主要行驶的车型特征,可分别取8 m,7 m,6 m,6 m; v_1 、 v_2 、 v_3 和 v_4 分别是4种路网模式下路

段平均行驶速度,取 $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. 由于间距与密度存在关系式 $k_i = 2000/l_i$, 路网模式1的道路红线宽度为 45 m , 则道路面积率(单位为百分比) $x_1 = 2000/l_1 \times 0.045 \times 100 = 9000/l_1$. 也即间距 l_1 可以换算

$$\begin{cases} \bar{D}_1 = 2(\bar{D}_{c1} + \bar{D}_{l1}) = 2 \left[\frac{1}{(19.6 - \lambda_0/2)} + \frac{9000/x - 8 \times \lambda_0^2/4/(19.6^2 - 19.6 \times \lambda_0/2)}{800} \right] \\ \bar{D}_2 = 3(\bar{D}_{c2} + \bar{D}_{l2}) = 3 \left[\frac{1}{(13.0 - \lambda_0/3)} + \frac{6000/x - 7 \times \lambda_0^2/9/(13.0^2 - 13.0 \times \lambda_0/3)}{500} \right] \\ \bar{D}_3 = 6(\bar{D}_{c3} + \bar{D}_{l3}) = 6 \left[\frac{1}{(7.1 - \lambda_0/6)} + \frac{3000/x - 6 \times \lambda_0^2/36/(7.1^2 - 7.1 \times \lambda_0/6)}{250} \right] \\ \bar{D}_4 = 3(\bar{D}_{c4} + \bar{D}_{l4}) = 3 \left[\frac{1}{(19.8 - \lambda_0/3)} + \frac{3000/x - 6 \times \lambda_0^2/9/(19.8^2 - 19.8 \times \lambda_0/3)}{350} \right] \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3), 车流总的耗时是道路用地面积率 x 及到达率 λ_0 的函数. 显然, 道路用地面积率越大则总的耗时越小, 暂不能看出到达率与总耗时的变化关系. 下文将详细讨论总耗时随道路面积率和到达率的变化趋势.

2 计算结果及分析

2.1 总耗时随道路用地面积率的变化趋势分析

由分析知 $\mu_1 = 19.6 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$, 由于排队论计算公式有效的前提条件是 $(\lambda_0/2) < \mu_1$, 故 $\lambda_0 < 39.2 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$. 考虑到路网服务水平通常所处的范围(饱和度在 $0.6 \sim 0.9$ 之间), 不难得到, 到达交通量 λ_0 的取值范围大致为 $23.5 \sim 35 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$. 计算

成道路面积率指标.

对于图1所示情形下的方形地块, 综合式(1)和式(2)及其它参数取值, 不同路网模式(但道路用地面积率相同)下的单位车辆横向行驶过该地块总耗时为

过程中将以 $4 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 为一间隔, 如图2所示.

从图2可以看出: 道路用地面积率越高, 则车流行驶越顺畅, 用时越省, 相同密度的路网3和4, 后者由于设置了单行线系统而大大减小了车流耗时和延误, 不设置单行线的高密度路网其运行效率比其它路网模式差很多. 在相同用地面积率条件下, 车流到达率较小时 ($< 27 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$), 模式1的总耗时总是最少, 模式4的曲线位于模式1和模式2之间, 模式1比模式4节省 $10\% \sim 15\%$ 的时间; 到达率稍高时 ($27 \sim 31 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$), 模式1和模式4的总耗时相当; 到达率较高时 ($> 31 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$), 模式4由于总耗时更小而具备优势, 比模式1节省 $10\% \sim 20\%$ 的时间. 体现出单行线系统的优势随着到达率或交通量的增长而逐步体现.

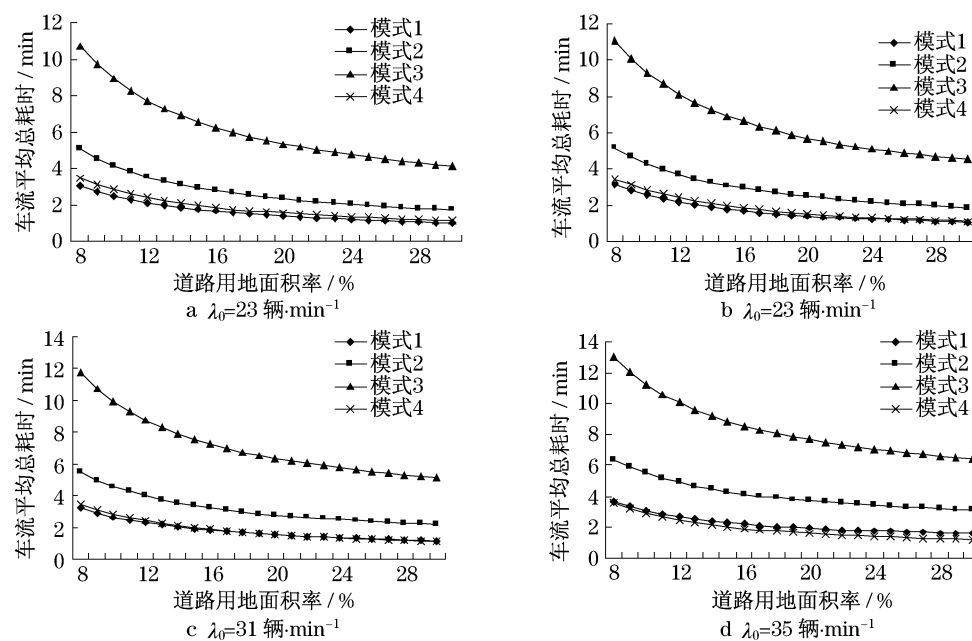


图2 总耗时随道路面积率的变化曲线图

Fig.2 Total time-consuming curve based on road land area ratio

2.2 总耗时随到达率的变化趋势分析

将规划常见的用地面积率(8%~25%)划分为

8%,15%,20%和 25%这 4 类,如图 3 所示.

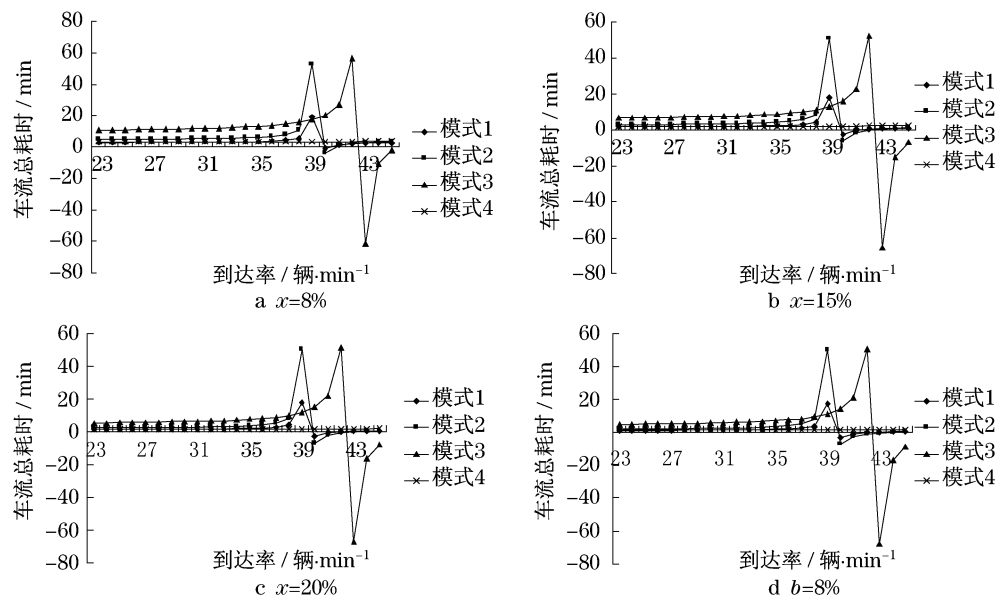


图 3 总耗时随到达率的变化曲线图

Fig.3 Total time-consuming curve based on arriving rate

从图 3 可以看到:到达率小于 $35 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 的区间,各种模式的总耗时均呈现缓慢增长的趋势,显然,到达车辆增多后耗时必然有所增长,因此计算结果与事实相符;小于 $30 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 的任意到达率,路网模式 1 的总耗时总是最少的,与分析结果吻合;到达率大于 $37 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 的区间,前 3 种模式下的总耗时均呈现剧烈波动,这是因为式(1)中的分母 μ_i 和 λ_i 越接近,耗时越大.这其中,在到达率取 $39 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右时,模式 1 和模式 2 的总耗时率先达到峰值,此时模式 3 的总耗时均小于模式 1 和模式 2,但仍远高于模式 4.到达率在 $40 \sim 42 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间时,模式 1 和 2 已然不能有效疏散交通(失效),交叉口处的排队车辆将越来越长而难以消散,相反模式 3 仍然能够疏散交通,尽管该模式下的总耗时很高(最高接近 60 min).导致这种情况的原因是,根据交通工程理论,前 3 种模式中,相同道路用地面积下模式 3 折减的通行能力最少,承载交通的能力最大,因此失效对应的到达率更高,相对于图 3 来讲,总耗时会更晚达到峰值(到达率在 $42 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右时).总体上,当车流到达率大于 $37 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 并逐步增大时,模式 1 和模式 2 首先失效,但模式 3 仍然能够起效,当到达率超过 $43 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,模式 3 也失效,而此过程中,模式 4 均有效,且均为最小耗时.各类模式的起效区段如图 4 所示.

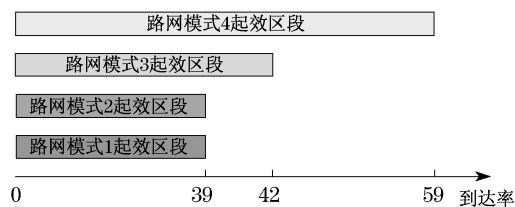


图 4 各路网模式起效区段示意图

Fig.4 Each road network mode valid range

4 种模式中,仅仅模式 4 的曲线变化非常缓慢且维持较低的耗时,体现出高密度的单行线系统的稳定性和疏散交通中的高效性.但模式 4 的曲线并非没有波动,根据 λ_4 和 μ_4 的关系可知,当到达率为 $59.4 \text{ 辆} \cdot \text{min}^{-1}$,曲线达到峰值,随后,式(1)失效.图 3 中部分总耗时为负值,是因为 $\mu_i < \lambda_i$,式 1 及式(3)不再适用,因此可以不用考虑.

3 结论

从运筹学最基本的排队论着手,假设同一用地面积率情况下,不同路网模式(兼有考虑动态路网模式)中车流行驶过程中的总耗时,旨在通过总耗时的对比来说明不同路网模式的优劣.得到如下能够直接指导道路网规划建设的关键结论:

(1) 并非高密度的路网模式就一定最佳,也并非低密度路网模式就需要否定,这要视交通量大小

而定.此外,高密度路网在不设置单行系统时的运行效率较差,一旦设置单行线效率将大大提升.

(2) 不考虑路网可靠性、交通安全性、临街面开发等因素,从减少车流耗时和延误的角度出发,车流到达率不高,即交通量不大的情况下,低密度、较宽的道路网具备较大优势(可理解为同等用地面积率下该路网模式车流总耗时最少,或者同等总耗时下

该路网模式用地最省);而当到达率逐步增多、交通量较大时,高密度的单行线路网系统更具优势.

(3) 对于城市道路交通规划实践,在城市中心区等容易发生拥堵的地区,应优先考虑小间距、高密度的单行线路网系统,而在城市外围等交通状况较好的地区则可设置相对较大间距、低密度的路网.

(4) 建议的路网密度取值见表1.

表1 城市中心区及外围区路网密度

Tab.1 Road network density in city center and periphery

| 道路面积率/% | 建议路网密度/(km·km ⁻²) | |
|---------|---|---|
| | 市中心等易发生拥堵地区/采用高密度单行线路网系统 (平均红线宽度 15 m) | 城市外围区等交通状况较好地区/采用低密度路网 (平均红线宽度 45 m) |
| 8~15 | 5.3~10.0 | 1.8~3.3 |
| 15~20 | 10.0~13.3 | 3.3~4.4 |
| 20~25 | 13.3~16.7 | 4.4~5.6 |

参考文献:

- [1] 石飞,王炜.城市路网结构分析[J].城市规划,2007,31(8):65.
SHI Fei, WANG Wei. Urban road network structure analysis [J]. City Planning Review, 2007, 31(8): 65.
- [2] 杨涛.城市交通:新世纪的挑战与对策[M].南京:东南大学出版社,2001.
YANG Tao. Urban transport: challenges and countermeasures of new century[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2001.
- [3] 刘望保.国内外城市交通微循环和支路网的研究进展和展望[J].规划师,2009,25(6):25.
LIU Wangbao. Micro transportation circulation and local street system research development[J]. Plannings, 2009, 25(6): 25.
- [4] 江苏省建设厅.江苏省城市综合交通规划导则研究[R].南京:江苏省建设厅,2005.
Department of Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu Province. Urban comprehensive transportation planning guide of Jiangsu Province[R]. Nanjing: Department of Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu Province, 2005.
- [5] 南京市人民政府.南京交通发展白皮书[M].南京:南京出版社,2007.
Nanjing Municipal People's Government. Nanjing transport development white paper consultant service [M]. Nanjing: Nanjing Press, 2007.
- [6] 叶彭姚,陈小鸿.基于交通效率的城市最佳路网密度研究[J].中国公路学报,2008,21(4):94.
YE Pengyao, CHEN Xiaohong. Study of urban optimal density of road network based on transportation efficiency [J]. China Journal of Highway and Transport. 2008, 21(4): 94.
- [7] Reid Ewing. Sketch planning a street network[R]. Washington D C: Rutgers University Transportation Policy Project New Brunswick, 2001.
- [8] Transportation Research Board. Highway capacity manual[M]. Washington D C: National Research Council, 2000.
- [9] Kulash W, Anglin J, Marks D. Traditional neighborhood development: will the traffic work[R]. Washington D C: ASCE, 1990.
- [10] Disney R L, Kiessler P C. Traffic processes in queuing networks: a markov renewal approach [M]. Baltimore: The Johns Hopkins University Press. 1987.
- [11] Gerlough D L, Huber M J. Traffic flow theory: a monograph [R]. Washington D C: Transportation Research Board Science Council, 1975.
- [12] 张亚平,冯桂炎.道路通行能力理论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
ZHANG Yaping, FENG Guiyan. Road capacity theory [M]. Haerbin: Harbin Industry University Press, 2007.
- [13] National Research Council. Highway capacity manual [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2000.
- [14] 饭田恭敬.交通工程学[M].邵春福,杨海,史其信,等译.北京:人民交通出版社,1993.
LIDA Yasunoyi. Traffic engineering [M]. Translated by SHAO Chunfu, YANG Hai, SHI Qixin, et al. Beijing: China Communications Press, 1993.