

交通发生吸引源集聚影响下路网宏观基本特性*

丁恒 周静文 郑小燕[†] 柏海舰 张卫华

(合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥 230009)

(2019年10月28日收到; 2020年1月14日收到修改稿)

宏观基本图不受路网外部交通发生吸引源的影响, 描述了匀质性路网内累积车辆数与路网旅行完成率之间的关系, 可直观表达路网宏观基本特性. 然而, 当路网内交通发生吸引源发生变化时, 会影响路网交通密度, 从而对宏观基本特性产生影响. 为了分析交通发生吸引源不同集聚状态对宏观基本图的影响规律, 以交通发生吸引源发生吸引量和路段阻抗为参数, 建立交通发生吸引源聚集度模型. 以方格式路网为分析对象, 设计9组不同交通发生吸引源方案, 通过对比交通发生吸引源聚集度与路网宏观基本图曲线, 发现只有当路网处于拥挤流状态时, 交通发生吸引源聚集现象才会对宏观基本图产生影响, 并且路网中交通发生吸引源聚集度越低(交通发生吸引量分布越均衡), 路网旅行完成率就会越高.

关键词: 宏观基本图, 交通发生吸引源, 聚集度, 交通仿真

PACS: 45.70.Vn, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.69.20191641

1 引言

宏观基本图 (macroscopic fundamental diagram, MFD) 描述了均质性区域路网内车辆密度 ($\text{veh}\cdot\text{km}^{-1}$) 与空间平均流量 ($\text{veh}\cdot\text{h}^{-1}$) 之间单峰低散射关系, 即该区域内累积车辆数 $n(t)$ 与路网旅行完成率 $G(n(t))$ 之间的固有物理特性, 如图 1(a) 所示. 在该特性中, 路网旅行完成率 $G(n(t))$ 随着累积车辆数 $n(t)$ 变化而变化. 当 $n(t) < n_{\text{cr}}$ 时, 路网旅行完成率 $G(n(t))$ 随着累积车辆数 $n(t)$ 增大而增大; 当 $n(t) > n_{\text{cr}}$ 时, 路网旅行完成率 $G(n(t))$ 又随着累积车辆数 $n(t)$ 增大而减小, 其中 n_{cr} 是临界累积车辆数. Gerolimins 和 Daganzo^[1] 及 Gonzales 等^[2] 根据路网宏观交通流的运行状态, 将 MFD 划分为自由流、临界流和拥挤流 3 种状态, 如图 1(b) 的 I、II 和 III. 由于 MFD 可直观地描述区域路网的宏观交通状态, 简化了采用复杂 OD 数据对大规模

交通网络建模过程, 被广泛应用于分析大范围交通网络. 例如 Haddad、Yang、Ding 和 Kim 等根据 MFD 描述的路网状态, 提出了单个区域^[3-4]、两个区域^[5-6] 和多个区域^[7-9] 的边界限流控制方法, 有效地解决了大范围交通网络拥堵区交通控制问题.

MFD 的概念由 Godfrey^[10] 在 1969 年首次提出, 但限于当时的交通流检测手段, 其存在性并未得到验证. 近些年随着数据采集及仿真手段的进步, 2008 年 Geroliminis 和 Daganzo^[1] 根据日本横滨路网数据、Gonzales 等^[2] 根据肯尼亚内罗毕路网数据验证了 MFD 的存在性, 此外 Gao^[11] 运用斯德哥尔摩的交通数据发现了该城市路网也存在 MFD. 除了上述通过数据分析研究 MFD 存在外, 也有部分学者通过解析模型分析 MFD. 如 Leclercq 等^[12] 利用变分法对不同路径上的 MFD 进行估计, 然后将其聚合成一个统一的 MFD, 进而确定与系统最优值相对应的 MFD, 该方法对许多“非同质性”网络也适用; Daganzo 等^[13] 利用旧金山路网数

* 国家自然科学基金 (批准号: 61304195, 51878236, 51675151) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: JZ2019HGBZ0141) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhengxiaoyan@hfut.edu.cn

据提出了 MFD 的解析近似表达式; Courbon 等^[14] 对比分析了获取 MFD 的 3 种方法: 分析法、基于路径的方法、检测器法, 并对该三种方法进行了仿真评价.

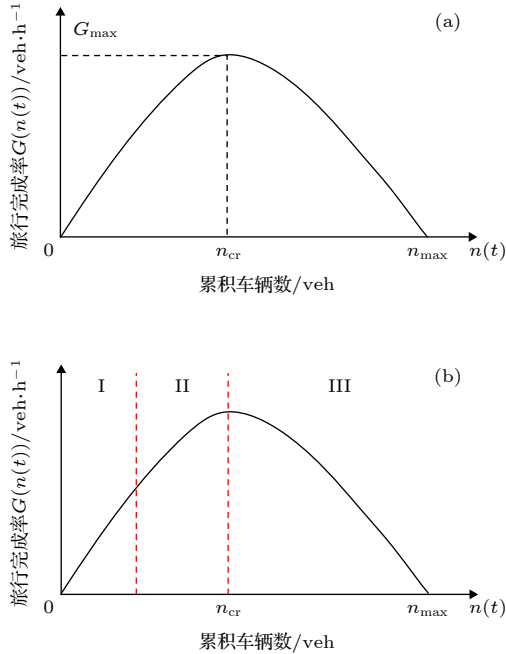


图 1 MFD (a) MFD 的基本特征; (b) 路网状态划分
Fig. 1. MFD: (a) Basic characteristics of MFD; (b) state classification of MFD curve.

虽然 MFD 是特定路网的固有属性, 但其分布仍然受到路网一些特征参数的影响. 相关学者对影响 MFD 因素的研究主要从交通条件、道路条件、管控条件以及选择行为 4 个方面进行. 首先, 关于交通条件对 MFD 的影响^[15-17], 典型的有 Gayah 和 Daganzo^[18] 提出交通拥堵分布不均匀会导致 MFD 的“滞回现象”; 许菲菲等^[19] 采用不同的交通管控措施, 得出交通需求的剧烈变化、公交专用道的设置、车道禁行都会不同程度的影响 MFD; 朱琳等^[20] 通过对比分析路网平均流量-平均密度关系的时段分布差异, 证明了交通密度分布的不均衡性是影响路网宏观交通状态的根本因素; Geroliminis 和 Sun^[21] 提出路网中车辆密度的空间分布是影响 MFD 散射特性及其形状的关键因素之一; Geroliminis 等^[22] 发现交叉口处左转交通流的存在降低了 MFD 的最大值. 其次道路条件对 MFD 的影响研究, 如 Buisson 等^[23] 分析了城市路网、穿越城市的高速路网与环城高速路网对 MFD 的影响, 并认为高速网络不存在 MFD, 并且外部 OD 需求对 MFD

是没有影响的. 再次, 不同的交通管控条件也会影响 MFD, 其中管控措施和参数的研究受到重点关注. Jin 等^[24] 通过元胞传输模型发现在自由流状态下, MFD 比较稳定, 而间断流状态下信号控制使得网络交通流不稳定, 进而影响 MFD 形状; Alonso 等^[25] 基于真实数据的统计分析, 得出交通管制影响链路和路网级别的交通流变化. 最后, 针对出行者不同的选择行为, Leclercq 和 Geroliminis^[26] 通过研究局部非均质性交通流对 MFD 形状的影响, 可知路径选择和异构的局部交通容量可能会导致交通拥堵的时空分布不一致, 进而影响路网 MFD 的形状和分布; Mazlounian 等^[27] 基于对 MFD 空间分布不均匀的研究, 可知路径选择和交通需求是影响 MFD 散射的重要因素. 总体而言, 不同的影响因素归根结底都是影响路网密度, 进而对 MFD 产生影响. 在交通发生吸引源分析方面, 虽然 Buisson 等^[23] 证明了外部 OD 需求对区域路网的 MFD 是没有影响的, 但并没有说明路网内部的交通发生吸引源分布是否对 MFD 产生影响. 而实际上, 路网内交通发生吸引源分布不均匀时, 其产生的交通量会改变局部路网的交通密度, 进而可能影响 MFD 分布.

为了分析交通发生吸引源对路网 MFD 产生的影响规律, 本文主要开展以下两个方面工作: 1) 根据区域路网内交通发生吸引源的时空分布, 以交通发生吸引源发生吸引量和路段阻抗为动态参数, 提出交通发生吸引源聚集度分析模型; 2) 以 4×4 方格网状的区域路网为研究对象, 根据不同发生吸引源的分布, 通过数据验证不同聚集度条件下交通发生吸引源对 MFD 的影响规律.

2 交通发生吸引源聚集度模型

聚集度的概念在经济学和地理学等领域中应用比较广泛, 一般用来形容某个区域内某个经济产业或某个地理指标的聚集程度. 与产业在空间和发生吸引强度上分布类似, 路网中交通发生吸引源也存在着一一定的聚集形态. 因此将聚集度概念引入交通领域, 用来描述交通发生吸引源的集聚状态. 然而, 与产业分布不同在于, 路网中各个路段的阻抗是实时变化的, 因此交通发生吸引源聚集程度也变化的较为频繁. 因此, 在分析交通发生吸引源聚集形态时, 必须考虑到时间因素.

假设路网内有 N 个交通发生吸引源, 路网可划分为 M 个区域. 根据发生吸引源数量、发生吸引源规模、路网容量, 建立交通发生吸引源聚集度评估模型, 步骤如下:

首先, 根据 N 个交通发生吸引源空间位置坐标, 通过 M 个区域划分对交通发生吸引源进行分类. 分类方法是根据路段密度和路段速度, 通过路网交通状态识别^[28] 获得交通发生吸引源影响下的路段交通状态, 分为非常畅通、畅通、轻度拥堵、中度拥堵以及严重拥堵 5 种状态等级, 通过最小生成树法初始划分、归一化割法深度划分以及反向动态合并的过程得到对交通发生吸引源分类的 M 个区域^[29].

其次, 计算交通发生吸引源空间分布基尼系数:

$$G = \sum_i (P_i - x_i)^2, \quad (1)$$

式中, P_i 表示划分的 M 个区域中第 i 个区域交通发生吸引源容量 (停车需求) 占整个路网所有发生吸引源容量 (停车需求) 的比重, x_i 表示第 i 个区域路网交通容量占整个路网交通容量的比重. 基尼系数 $G = 0$ 时, 表明停车需求在空间分布是均匀的, G 越大 (最大值为 1), 表明停车需求在空间分布越不均匀.

再次, 采用 Ellision 和 Glaeser^[30] 提出的 EG 集聚指数来测定交通发生吸引源聚集度指数, 即评估模型为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{G - \left(1 - \sum_i x_i^2\right) H}{\left(1 - \sum_i x_i^2\right) (1 - H)} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^M (P_i - x_i)^2 - \left(1 - \sum_{i=1}^M x_i^2\right) \sum_{j=1}^N Z_j^2}{\left(1 - \sum_{i=1}^M x_i^2\right) \left(1 - \sum_{j=1}^N Z_j^2\right)}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中: γ 为交通发生吸引源聚集度指数; H 为赫芬达尔指数, $H = \sum_{j=1}^N Z_j^2$; Z_j 表示 N 个交通吸引源中第 j 个区域交通发生吸引源总容量 (停车需求) 占整个路网所有发生吸引源容量 (停车需求) 的比重.

考虑到交通流的动态变化, (2) 式中的空间分布基尼系数 G 以及赫芬达尔指数 H 也会随着路网

交通状态即路网交通阻抗的变化而变化. 交通越拥堵的地方, 交通发生吸引强度越大. 为了更好地描述路网聚集状态, 假设交通发生吸引源的聚集状态与道路交通阻抗呈正相关, 即交通发生吸引源配置越聚集, 道路交通阻抗越大, 且道路交通阻抗在聚集度模型中属于正向因子, 则考虑交通阻抗的聚集度评估改进模型为

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\left[\sum_{i=1}^M (P_i - x_i)^2 - \left(1 - \sum_{i=1}^M x_i^2\right) \sum_{j=1}^N Z_j^2\right]}{\left(1 - \sum_{i=1}^M x_i^2\right) \left(1 - \sum_{j=1}^N Z_j^2\right)} \\ &\quad \times \frac{\sum_{q=0} t_{a_q}}{\sum_{q=0} t_{a_q}^0}, \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $\sum_{q=0} t_{a_q}$ 表示路网子区内不同路面的路段阻抗之和, $\sum_{q=0} t_{a_q}^0$ 表示各个子区内不同路面的路段平均零流阻抗之和.

考虑路网实时状态, (3) 式中引入了路网交通阻抗 t_a , 其计算需要考虑路段不同交通参数. 根据四兵锋等^[31] 提出的道路阻抗模型, 建立考虑多种路面的道路阻抗函数模型:

$$\begin{aligned} t_a &= t_a^0 \left[1 + \alpha_1 \left(\frac{b_{\text{car}} v_a^{\text{car}}}{C_a}\right)^{\beta_1}\right] \\ &\quad \times \left[1 + \alpha_2 \left(\frac{b_{\text{bus}} v_a^{\text{bus}}}{C_a}\right)^{\beta_2}\right]^\phi \\ &\quad \times \left[1 + \alpha_3 \left(\frac{v_a^{\text{bike}}}{\bar{C}_a}\right)^{\beta_3}\right]^\varphi \\ &\quad \times \left[1 + \alpha_4 \left(\frac{\tilde{v}_a^{\text{motor}}}{\tilde{C}_a}\right)^{\beta_4}\right]^\eta, \quad (4) \end{aligned}$$

式中: t_a^0 是路段 a 上一般机动车的平均零流阻抗; v_a^{car} , v_a^{bus} 和 v_a^{bike} 分别表示小汽车、公交车和自行车 (非机动车) 3 种交通方式的道路流量; b_{car} 和 b_{bus} 分别表示小汽车与公交车的标准车当量数 (passenger car unit, pcu) 折算系数; $\tilde{v}_a^{\text{motor}}$ 是对向的一般机动车流量; C_a 是路段的实际通行能力; \bar{C}_a 是路段上非机动车的通行能力; \tilde{C}_a 是对向的道路通行能力; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 是待标定的参数; ϕ, φ, η 分别取值 0 或 1. ϕ, φ, η 取值情况

为: 单幅路: $\phi = 1, \varphi = 1, \eta = 1$; 两幅路: $\phi = 1, \varphi = 1, \eta = 0$; 三幅路: $\phi = 1, \varphi = 0, \eta = 1$; 四幅路: $\phi = 1, \varphi = 0, \eta = 0$.

3 聚集度指数计算过程

为满足实际交通管控的需要, 在交通发生吸引源聚集度模型基础上, 计算路网交通发生吸引源聚集指数, 并以此分析路网交通发生吸引源的动态聚集状态. 步骤如下:

Step1 选择一个路网, 确定路网内交通发生吸引源的分布、规模.

Step2 划分子区. 在保证空间连续和子区内密度异质性最小化的前提下, 根据交通流数据, 然后考虑区域路网内的交通发生吸引源、交通拥堵状态以及交通流大小等因素将分布不均匀的区域路网划分为几个密度均匀的子区.

Step3 计算路段交通阻抗. 路段阻抗与断面形式有关. 路段的阻抗函数的计算步骤基本类似, 由于单幅路面的阻抗函数最复杂, 本文以单幅路为例给出段阻抗函数计算步骤如下:

首先, 由 (4) 式道路交通阻抗模型的定义, 需要确定路段零流量条件下的阻抗. 根据 1976 年 Branston^[32] 路段阻抗函数的理论特性: 1) 当流量充分小时, 路段阻抗接近于“零流”阻抗; 2) 在流量远小于道路通行能力时, 路段阻抗随流量变化而缓慢变化; 3) 在“稳态”系统状态下, 阻抗函数曲线变成饱和和流量纵坐标的渐近线. 可以通过交通调查或者仿真的手段获得不同路段上一般机动车的平均零流阻抗 t_a^0 .

其次, 根据交通流参数, 确定 $v_a^{\text{car}}, v_a^{\text{bus}}, v_a^{\text{bike}}, b_{\text{car}}, b_{\text{bus}}, \tilde{v}_a^{\text{motor}}, C_a, \bar{C}_a, \tilde{C}_a$ 的取值.

然后, 标定参数. 对于单幅路面的路段, 假定共观测到 Z 组样本值, 其中第 k 组样本值为 $t_a^{(k)} (v_a^{\text{car}(k)}, v_a^{\text{bus}(k)}, v_a^{\text{bike}(k)}, \tilde{v}_a^{\text{motor}(k)})$, t_a^0 以及 $C_a, \bar{C}_a, \tilde{C}_a$ 是确定的. 为便于描述作如下变换:

$$\begin{aligned} \frac{t_a^{(k)}}{t_a^0} &= m^{(k)}, \quad \frac{b_{\text{car}} v_a^{\text{car}(k)}}{C_a} = l_1^{(k)}, \quad \frac{b_{\text{bus}} v_a^{\text{bus}(k)}}{C_a} = l_2^{(k)}, \\ \frac{v_a^{\text{bike}(k)}}{\tilde{C}_a} &= l_3^{(k)}, \quad \frac{\tilde{v}_a^{\text{motor}(k)}}{\tilde{C}_a} = l_4^{(k)}, \quad \forall k. \end{aligned} \quad (5)$$

确定 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 参数, 满足:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^Z [m^{(k)} - (1 + \alpha_1 l_1^{(k)\beta_1})(1 + \alpha_2 l_2^{(k)\beta_2}) \\ \times (1 + \alpha_3 l_3^{(k)\beta_3})(1 + \alpha_4 l_4^{(k)\beta_4})]^2. \end{aligned} \quad (6)$$

根据一阶极值条件可得关于参数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 的非线性方程组. 按照常规的方法求解非线性方程组的解析解难度较大, 本文采用 Broyden 求解方法^[33]. 为了降低求解误差的影响, 提高 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \tilde{\alpha}_4, \tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \tilde{\beta}_3, \tilde{\beta}_4$ 参数数值解的准确性, 设置求解精度为 10^{-8} , 可得满足精度要求的 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \tilde{\alpha}_4, \tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \tilde{\beta}_3, \tilde{\beta}_4$ 参数数值解. 由于该非线性方程组存在多组解, 所以在计算迭代时, 对初始迭代值的选取有一定要求. 因此,

$$\begin{aligned} t_a'^{(k)} &= t_a^0 (1 + \tilde{\alpha}_1 l_1^{(k)\tilde{\beta}_1})(1 + \tilde{\alpha}_2 l_2^{(k)\tilde{\beta}_2}) \\ &\times (1 + \tilde{\alpha}_3 l_3^{(k)\tilde{\beta}_3})(1 + \tilde{\alpha}_4 l_4^{(k)\tilde{\beta}_4}), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\hat{\chi}^2 = \sum_{k=1}^Z \frac{(t_a^{(k)} - t_a'^{(k)})^2}{t_a^{(k)}}, \quad (8)$$

$$RP = \sum_{k=1}^Z \frac{|t_a^{(k)} - t_a'^{(k)}|}{N \cdot t_a^{(k)}} \times 100. \quad (9)$$

在进行数值求解时, 求一组满足 $\hat{\chi}^2 \leq \chi_{\alpha=0.05}^2$ 及 $RP < 15$ 的 $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \tilde{\alpha}_4, \tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \tilde{\beta}_3, \tilde{\beta}_4$ 参数近似解. $\chi_{\alpha=0.05}^2$ 是自由度为 $Z - 1$ 的 χ^2 检验临界值.

最后, 获得每条路段的交通阻抗, 进而得到路网整体交通阻抗.

Step4 由 Step2 获得各子区的交通发生吸引源的相关信息, 然后根据 (1) 式计算得到空间分布基尼系数 G , 并计算赫芬达尔指数 H , 将 Step3 得到的路网交通阻抗带入 (3) 式, 进而可以获得实时的路网交通发生吸引源的聚集度指数.

Step5 结束.

4 交通发生吸引源聚集效应对路网 MFD 的影响分析

根据 Gerolimins 等^[1] 的研究结果, 存在理想 MFD 的子区范围一般在 $4-8 \text{ km}^2$. 在该区域范围内, 路网结构较为单一, 一般接近于方格网状路网. 因此, 为了分析交通发生吸引源聚集度指数变化对路网宏观基本特性的影响, 本文采用 4×4 方格形路网进行交通仿真, 如图 2. 该路网有 16 个交叉

口, 96 条路段, 且每条路段均为三车道. 将该路网外围的 16 个路口作为路网背景交通量输入点, 然后在路网内部设置 8 个车流输入点作为交通发生吸引源, 每 300 s 采集交通流数据一次, 并得到路网 MFD 数据以及相应的聚集度指数.

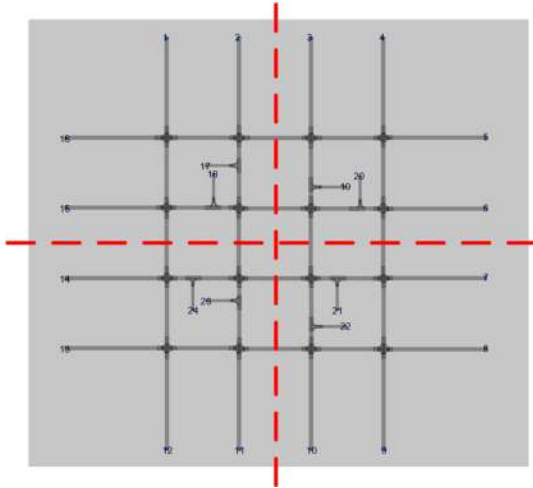


图 2 仿真路网

Fig. 2. Simulation road network.

4.1 交通发生吸引源聚集效应对路网密度影响分析

路网内交通发生吸引源的聚集状态一定程度上可以由路网中交通密度分布状态体现. 在上述路网中设置不同配置的交通发生吸引源, 如表 1 所示, 在相同的背景交通流的影响下获得某一个信号周期 (150 s) 内的路网交通密度分布, 如图 3 所示.

图 3 中 (a1)、(a2)、(a3)、(a4) 和 (a5) 是相同

表 1 交通发生吸引源配置参数

Table 1. Traffic generation and attraction source configuration parameters.

交通发生吸引源配置方案	1	2	3	4	5
初始聚集度	-0.142	-0.146	-0.182	-0.082	-0.009
	20	38	93	272	38
	40	72	58	203	71
	60	279	121	50	50
停车场规模配置情况/pcu·h ⁻¹	80	123	74	49	86
	100	46	80	322	408
	120	38	132	150	530
	140	108	147	49	389
	240	96	95	105	428

的, 均表示在未加载交通发生吸引源情况下路网交通密度分布. 图 3 中 (b1)、(b2)、(b3)、(b4) 和 (b5) 分别表示 5 种总规模相同但分布不同的交通发生吸引源配置情况. 图 3 中 (c1)、(c2)、(c3)、(c4) 和 (c5) 分别表示在路网背景交通密度和不同配置的交通发生吸引源条件联合影响下, 某一个信号周期 (150 s) 内发生吸引交通量影响下路网交通密度分布. 可以发现, 在未加载交通发生吸引源的情况下, 路网交通密度分布是比较均匀的, 最大的单车道交通密度大约是 5 pcu·km⁻¹; 当路网中加载交通发生吸引源之后, 路网交通密度分布明显发生变化, 并且局部最大单车道交通密度达到 134.7 pcu·km⁻¹, 远超过 5 pcu·km⁻¹, 并且交通密度较大的路段都是与交通发生吸引源相连或邻近的路段. 因此, 交通发生吸引源的聚集效应会改变路网交通密度的分布.

4.2 交通发生吸引源聚集效应对路网 MFD 动态影响分析

4.2.1 参数标定

由 4.1 节可知, 交通发生吸引源的聚集效应会影响路网交通密度的分布, 所以进而会影响路网 MFD 的基本特性. 根据 (3) 式, 在不同的交通发生吸引源分布条件下, 分析路网内交通发生吸引源的聚集状态对路网 MFD 的动态影响. 将路网内的 8 个交通发生吸引源的总规模分别设置为 800, 1200, 2000 pcu·h⁻¹ 3 种情况, 获得路网累积车辆数 (n) 与路网旅行完成率 (G) 之间的关系, 即路网 MFD, 如图 4 所示.

根据 Gonzales 和 Chavis^[34] 的研究发现, 尽管 MFD 的形状依赖于 OD 需求, 然而此关系并不随时间变化, 在一定交通范围内可以采用如 $G(n(t)) = a \cdot (n(t))^3 + b \cdot (n(t))^2 + c \cdot n(t) + d$ 的 3 次方程式近似表示. 由实验数据可得, 路网 MFD 拟合曲线参数标定如表 2 所示.

根据不同交通发生吸引源条件下 MFD 数据在 I、II 和 III 3 种状态分布可知, 在 I、II 状态, MFD 并没有明显的波动; 在状态 III, 800 pcu·h⁻¹ 和 1200 pcu·h⁻¹ 两组数据的 MFD 有明显的较大波动, 而 2000 pcu·h⁻¹ 组仿真得到的 MFD 波动幅度较小. 因此, 一定程度上路网宏观基本图会受到交通发生吸引源的影响.

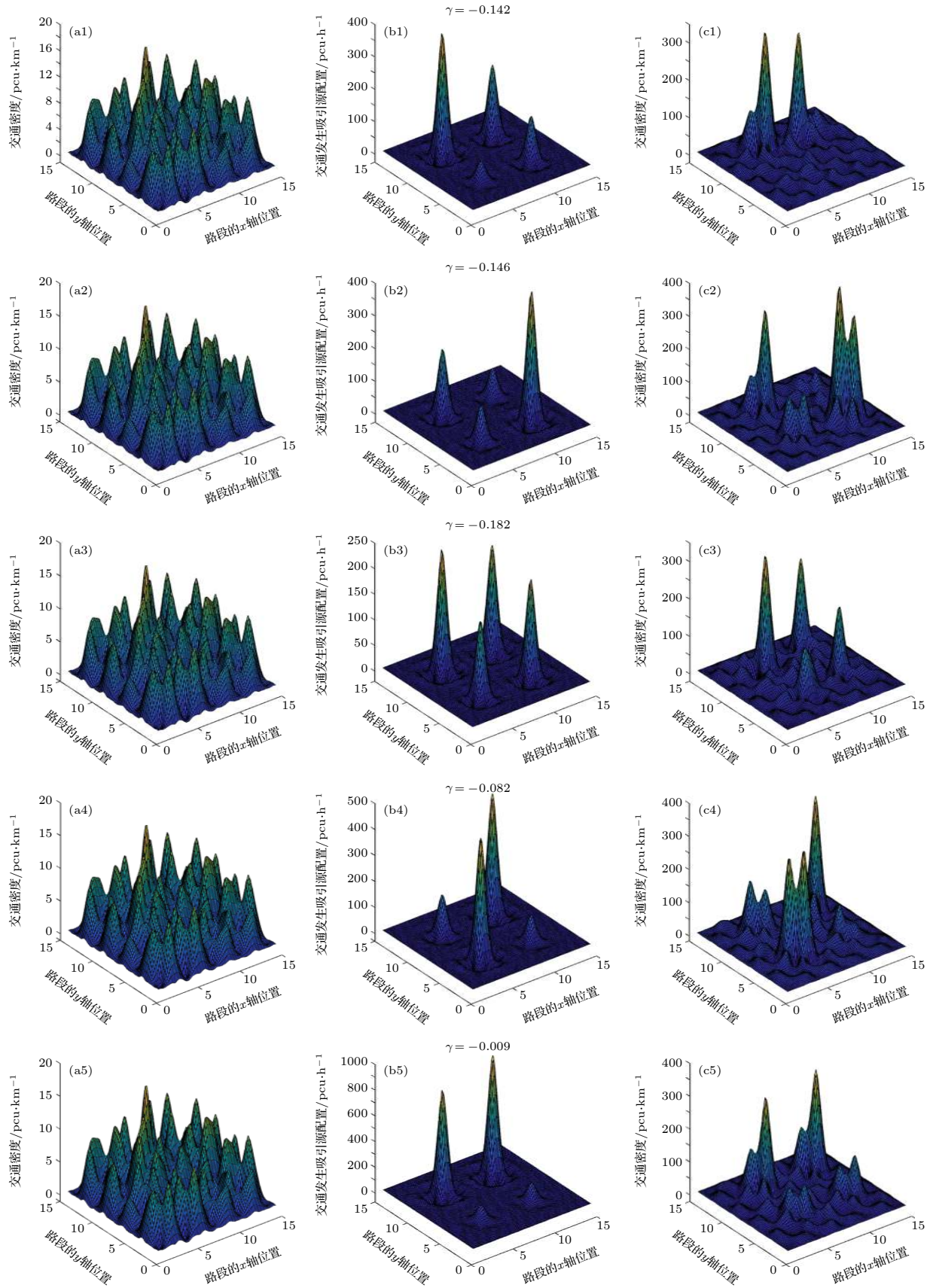


图 3 不同交通发生吸引源集聚影响下交通密度分布

Fig. 3. Traffic density distribution under different traffic generation and attraction sources.

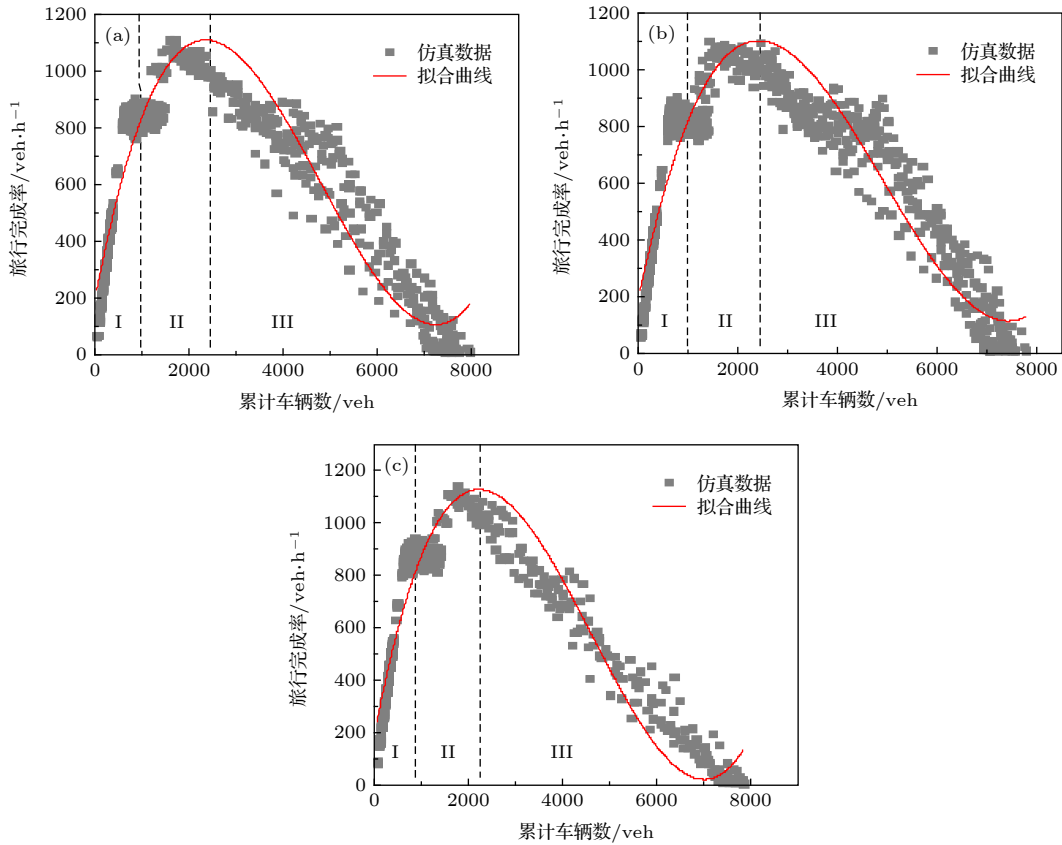


图 4 不同交通发生吸引源规模下路网 MFDs (a) 800 pcu·h⁻¹; (b) 1200 pcu·h⁻¹; (c) 2000 pcu·h⁻¹
 Fig. 4. MFDs under different traffic generation and attraction source scale: (a) 800 pcu·h⁻¹; (b) 1200 pcu·h⁻¹; (c) 2000 pcu·h⁻¹.

表 2 不同交通发生吸引源规模下 MFD 参数
 Table 2. MFD parameters under different traffic generation and attraction sourcescale.

吸引源规模 /pcu·h ⁻¹	MFD拟合参数				R ²
	a _i	b _i	c _i	d _i	
800	2 × 10 ⁻⁸	-0.0002	0.8434	192.34	0.876
1200	2 × 10 ⁻⁸	-0.0002	0.8742	190.75	0.888
2000	2 × 10 ⁻⁸	-0.0003	0.9424	188.86	0.901

4.2.2 动态分析

为了进一步研究交通发生吸引源聚集度模型与路网宏观基本图波动的动态关系,通过动态加载交通流量,并且每 300 s 采集交通流数据一次,开展实验分析.

在初始状态,路网交通流为自由流,路网交通阻抗可认为零流阻抗.再由聚集度模型的定义,将路网划分为 4 个子区,每个子区包含 2 个交通发生吸引源,如图 2 所示.设计的 9 组仿真实验按照交通发生吸引源总规模分为 3 大组,分别为 A 组、B 组和 C 组,每组包含三个实验方案,然后依据交通发生吸引源聚集度模型计算 9 组仿真实验的

初始聚集度指数,且每大组的 3 个实验方案的初始聚集度指数依次递减,如表 3 所示. 3 大组实验的 MFD 及动态聚集度指数曲线如图 5 所示.

根据路网的聚集度曲线的变化趋势可知,随着路网密度的变化,聚集度曲线有明显的 3 个变化阶段,如图 5 所示.参考图 1(b) 中 MFD 的状态划分可知,聚集度曲线在状态 I 时基本没有变化,在状态 II 时开始有小幅的变化,在状态 III 时开始急剧变化并逐步平稳(路网全部阻塞).

为了更好地对比分析交通发生吸引源不同集聚影响下的 MFD 波动特性,将上述 9 组仿真实验 MFD 数据进行三次多项式拟合,相关参数标定如表 4 所示.从 A 组、B 组和 C 组仿真实验中每一份实验数据的拟合效果来看,R² 值都大于 0.9,表明每份数据的拟合效果都比较好.

A 组、B 组和 C 组的 MFD 拟合曲线与相应的聚集度曲线如图 5 所示.仿真实验中基本参数都保持一致,交通发生吸引源相同规模下不同分布是唯一变量,即交通发生吸引源不同的聚集度是唯一变量.因此,路网 MFD 的变化就是由交通发生吸引

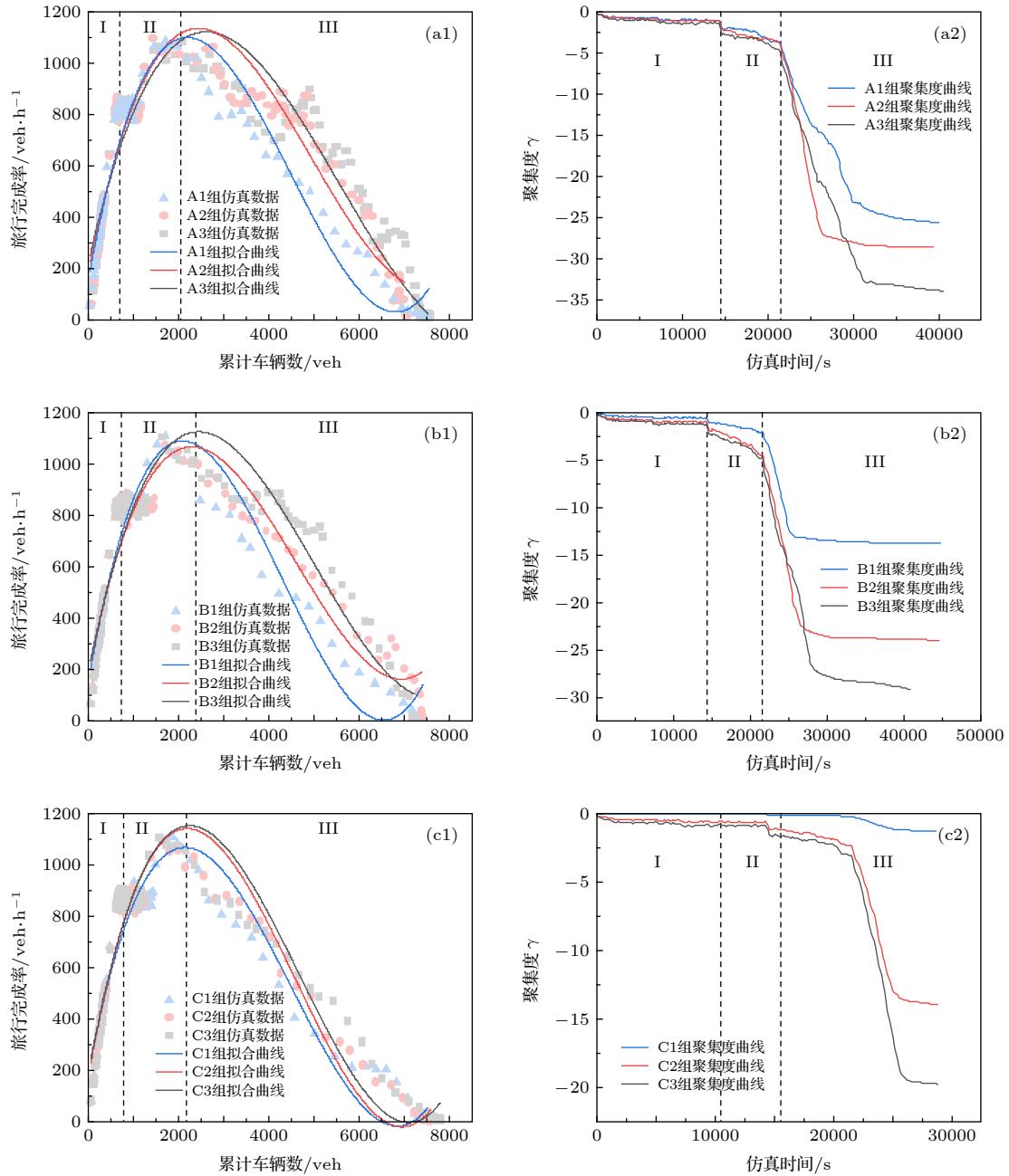


图 5 不同交通发生吸引源配置条件下 MFDs 和聚集度曲线 (a1) A 组仿真实验 MFD; (a2) A 组仿真实验聚集度曲线; (b1) B 组仿真实验 MFD; (b2) B 组仿真实验聚集度曲线; (c1) C 组仿真实验 MFD; (c2) C 组仿真实验聚集度曲线

Fig. 5. MFDs and aggregation degree curves under different traffic generation and attraction source configuration: (a1) MFD of group A simulation scheme; (a2) aggregation degree curve of group A simulation scheme; (b1) MFD of group B simulation scheme; (b2) aggregation degree curve of group B simulation scheme; (b1) MFD of group C simulation scheme; (b2) aggregation degree curve of group C simulation scheme.

源的聚集效应导致的, 而交通发生吸引源聚集度体现了交通发生吸引源的聚集效应, 且仿真过程中每 300 s 采集一次路网数据, 可获得相应的 MFD 数据点以及聚集度指数, 则保证了 MFD 曲线与聚集度曲线基本实时对应。

综合图 5 和表 5 可知, 在状态 I 时, 路网累积车辆数在 0—600 veh 之间, A3 组平均旅行完成率

相比 A1 组增加了 0.77%, 相比于 A2 组增加了 0.61%, A2 组平均旅行完成率相比 A1 组增加了 0.16%, A 组、B 组和 C 组仿真实验的 MFD 拟合曲线都几乎重叠, 没有明显差异, 说明交通发生吸引源的集聚效应对此状态下的 MFD 几乎没有影响; 在状态 II 时, 路网累积车辆数在 600—2000 veh 之间, A 组、B 组和 C 组仿真实验的 MFD 拟合曲

表 3 仿真实验基本参数
Table 3. Basic parameters of simulation experiment.

实验编号	A			B			C		
停车场总规模/pcu·h ⁻¹	800			1200			2000		
实验组数	1	2	3	1	2	3	1	2	3
初始聚集度	-0.142	-0.146	-0.182	-0.082	-0.144	-0.171	-0.009	-0.104	-0.151
停车场规模/pcu·h ⁻¹	20	38	93	272	138	70	38	100	268
	40	72	58	203	245	300	71	170	189
	60	279	121	50	367	210	50	140	99
	80	123	74	49	103	65	86	200	304
	100	46	80	322	179	70	408	260	341
	120	38	132	150	48	130	530	290	107
	140	108	147	49	37	220	389	350	402
	240	96	95	105	83	135	428	490	290

表 4 不同交通发生吸引源配置条件下 MFD 参数
Table 4. MFD parameters under different traffic generation and attraction source configuration.

实验组	MFD拟合参数				R ²
	a _i	b _i	c _i	d _i	
A1组	3 × 10 ⁻⁸	-0.0003	1.0743	111.66	0.951
A2组	3 × 10 ⁻⁸	-0.0004	1.0819	111.44	0.960
A3组	3 × 10 ⁻⁸	-0.0003	1.0588	116.9	0.953
B1组	5 × 10 ⁻⁸	-0.0005	1.3327	61.38	0.982
B2组	3 × 10 ⁻⁸	-0.0004	1.0518	125.81	0.967
B3组	2 × 10 ⁻⁸	-0.0003	0.9445	152.79	0.934
C1组	5 × 10 ⁻⁸	-0.0005	1.3081	84.82	0.942
C2组	4 × 10 ⁻⁸	-0.0005	1.2132	110	0.929
C3组	4 × 10 ⁻⁸	-0.0005	1.2579	100.65	0.927

表 5 各组仿真实验平均旅行完成率评估参数
Table 5. Evaluation parameters of the average trip completion flow of simulation experiment.

实验编号	平均旅行完成率 变化率/%	交通流状态		
		I	II	III
A	(A3-A1)/A1	0.77	3.13	30.96
	(A3-A2)/A2	0.61	1.14	3.29
	(A2-A1)/A1	0.16	1.96	26.79
B	(B3-B1)/B1	-0.11	-0.51	34.36
	(B3-B2)/B2	-0.02	0.24	7.45
	(B2-B1)/B1	-0.09	-0.74	25.05
C	(C3-C1)/C1	0.10	1.52	14.87
	(C3-C2)/C2	0.41	1.17	6.01
	(C2-C1)/C1	-0.31	0.34	8.36

线产生一定的差异, A3组平均旅行完成率相比 A1组增加了 3.13%, 相比于 A2组增加了 1.14%, A2组平均旅行完成率相比 A1组增加了 1.96%,

说明交通发生吸引源的集聚效应对此状态下的 MFD 已经产生影响, 但影响有限; 在状态 III 时, 路网累积车辆数在 2000—8000 veh 之间, A3组平均旅行完成率相比 A1组增加了 30.96%, 相比于 A2组增加了 3.29%, A2组平均旅行完成率相比 A1组增加了 26.79%, 不同交通发生吸引源条件下 MFD 拟合曲线之间有明显的差异, 且 A1组 MFD 拟合曲线偏低、A2组 MFD 拟合曲线居中、A3组 MFD 拟合曲线偏高, 对应状态 III 的聚集度曲线可知, A1组聚集度曲线值最大、A2组聚集度曲线值相对次之、A3组聚集度曲线值最小. 由表 5 可知, B组、C组结果类似, 说明交通发生吸引源的集聚效应对状态 III 下的 MFD 影响较大, 且交通发生吸引源聚集度指数越小, 路网旅行完成率越高, MFD 波动值越高.

5 结 论

本文在 MFD 波动特性的基础上, 从交通发生吸引源集聚现象出发, 提出了一种考虑交通阻抗的交通发生吸引源聚集度模型; 并以 9 组仿真实验为例, 获得路网在不同交通发生吸引源聚集状态下的 MFD 和聚集度曲线变化特征. 对比不同交通发生吸引源条件下 MFD 变化规律, 有以下结论:

1) 当路网交通流处于自由流状态时, 路网交通发生吸引源集聚不会对 MFD 产生影响; 在临界流状态时, 交通发生吸引源集聚对 MFD 有一定的影响; 当路网处于拥挤流状态时, 交通发生吸引源集聚对 MFD 有显著的影响.

2) 在相同的路网流量条件下, 当路网处于拥挤流状态时, 交通发生吸引源聚集状态越均衡, 即聚集度指数越小, 路网旅行完成率越高 (MFD 曲线向上波动).

3) 交通发生吸引源聚集度指数随着路网内交通发生吸引源的配置以及路网交通流的变化而变化; 在路网交通发生吸引源配置不变的情况下, 路网交通发生吸引源聚集度指数在自由流状态下没有较大的变化, 在临界流状态下开始有一定的变化, 在拥挤流状态下开始急剧下降并逐步平稳.

通过本文的研究, 建立了路网交通发生吸引源与 MFD 变化之间的宏观动态变化关系. 依据该关系, 可通过调节路网内各个停车场交通发生吸引强度, 改变路网交通发生吸引源聚集度指数提高路网旅行完成率, 从而提高路网运行效率, 为城市路网内大型交通发生吸引源 (停车场、医院、学校、商场等) 的配置, 以及交通管控 (停车收费、路段管制、信号灯控制等) 提供一定的理论支持. 由于本文是在一个规则的方格形路网分析交通发生吸引源聚集规律的, 而实际路网是比较复杂的. 实际路网特征的相关 MFD 特性还有待进一步研究.

参考文献

- [1] Geroliminis N, Daganzo C F 2008 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **42** 759
- [2] Gonzales E J, Chavis C, Li Y, Daganzo C F 2009 *Multimodal transport modeling for Nairobi, Kenya: Insights and recommendations with an evidencebased mode* (Berkeley: UC Berkeley Center for Future Urban Transport) pp1—36
- [3] Haddad J 2017 *Control Eng. Practice* **61** 134
- [4] Yang K D, Zheng N, Menendez M 2018 *Transp. Res. Pt. C-Emerg. Technol.* **94** 32
- [5] Ding H, Zhang Y, Zheng X Y, Yuan H Y, Zhang W H 2018 *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **26** 2049
- [6] Kim S, Tak S, Yeo H 2018 *Transp. Res. Pt. C-Emerg. Technol.* **93** 79
- [7] Haddad J, Mirkin B 2017 *Transp. Res. Pt. C-Emerg. Technol.* **77** 495
- [8] Ding H, Zhu L Y, Jiang C B, Yuan H Y 2017 *J. Transport. Syst. Engineer. Inform. Technol.* **17** 104 (in Chinese) [丁恒, 朱良元, 蒋程镔, 袁含雨 2017 交通运输系统工程与信息 **17** 104]
- [9] Ding H, Guo F, Zheng X Y, Zhang W H 2017 *Transp. Res. Pt. C-Emerg. Technol.* **81** 300
- [10] Godfrey J W 1969 *Traffic Engineer. Control.* **11** 323
- [11] Gao F 2011 *Ph. D. Dissertation* (Stockholm: School of Architecture and the Built Environment)
- [12] Leclercq L, Geroliminis N 2013 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **57** 468
- [13] Daganzo C F, Geroliminis N 2008 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **42** 771
- [14] Courbon T, Leclercq L 2011 *Procedia Soc. Behav Sci* **20** 417
- [15] Geroliminis N, Danes J, Estrada M A 2013 *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting* Washington DC, United States, January 13–17, 2013 p1013
- [16] Zheng N, Geroliminis N 2013 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **57** 326
- [17] Wang Y, Duan Z Y 2012 *The 7th Annual Conference of ITS China* Beijing, China, September 26, 2012 p112
- [18] Gayah V V, Daganzo C F 2011 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **45** 643
- [19] Xu F F, He Z C, Sha Z R 2013 *J. Transport. Syst. Engineer. Inform. Technol.* **13** 185 (in Chinese) [许菲菲, 何兆成, 沙志仁 2013 交通运输系统工程与信息 **13** 185]
- [20] Zhu L, Yu L, Song G H 2012 *J. South Chin Univ. Technol. (Nat. Sci.)* **40** 138 (in Chinese) [朱琳, 于雷, 宋国华 2012 华南理工大学学报(自然科学版) **40** 138]
- [21] Geroliminis N, Sun J 2011 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **45** 605
- [22] Geroliminis N, Boyaci B 2012 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **46** 1607
- [23] Buisson C, Ladier C 2009 *Transp. Res. Record* **2124** 127
- [24] Jin W L, Gan Q J, Gayah V V 2013 *Transp. Res. Pt. B-Methodol.* **57** 114
- [25] Alonso B, Ibeas A, Musolino G, Rindone C, Vitetta A 2019 *Transp. Res. Pt. A-Policy Pract.* **126** 136
- [26] Leclercq L, Geroliminis N 2013 *Procedia Soc. Behav Sci* **80** 960
- [27] Mazlounian A, Geroliminis N, Helbing D 2010 *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* **368** 4627
- [28] Ding H, Zhu L Y, Jiang C B, Zheng X Y 2018 *J. Chongqing Jiaotong Univ. (Nat. Sci.)* **37** 77 (in Chinese) [丁恒, 朱良元, 蒋程镔, 郑小燕 2018 重庆交通大学学报(自然科学版) **37** 77]
- [29] Ma H Y 2016 *M. S. Thesis* (Hefei: Hefei University of Technology) (in Chinese) [马寒月 2016 硕士学位论文 (合肥: 合肥工业大学)]
- [30] Elilision G, Glaeser E 1997 *J. Polit. Econ.* **105** 889
- [31] Si B F, Zhong M, Gao Z Y 2008 *J. Transport. Syst. Engineer. Inform. Technol.* **8** 68 (in Chinese) [四兵锋, 钟鸣, 高自友 2008 交通运输系统工程与信息 **8** 68]
- [32] Branston D 1976 *Transp. Res.* **10** 223
- [33] Bates D M, Watts D G 1988 *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications* (New York: Wiley) pp1–372
- [34] Gonzales E J, Chavis C, Li Y, Daganzo C F 2011 *Transportation Research Board 90th Annual Meeting* Washington DC, United States, January 23–27, 2011 p11

Macroscopic basic characteristics of a road network under the influence of traffic generation and attraction source agglomeration*

Ding Heng Zhou Jing-Wen Zheng Xiao-Yan[†]
Bai Hai-Jian Zhang Wei-Hua

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)
(Received 28 October 2019; revised manuscript received 14 January 2020)

Abstract

The macroscopic fundamental diagram (MFD), which can describe the macroscopic state of a regional network intuitively, describes a unimodal, statistical and reproducible relationship between accumulation and the trip completion flow of a region. Existing researches have proved that using MFD characteristics can ‘metering’ the boundary flow and relieve the traffic congestion problem effectively. As the foundation of traffic control, existing studies on the characteristic of MFD have proved that external origin to destination demand does not influence the MFD distribution. However, the traffic generation and attraction sources in the regional road network will change the distribution of traffic density of the road network, thus affecting the characteristic of MFD. However, to date, no related analysis explored the influence of the traffic generation and attraction sources in the regional road network. To solve this problem, according to the spatial and temporal distribution of traffic generation and attraction sources in the regional road network, this paper puts forward an aggregation degree index analysis model of traffic generation and attraction sources, based on the dynamic parameters of traffic generation and attraction sources, and section traffic impedance. Taking a square-format road network as the target, nine groups of schemes for different traffic generation and attraction sources are designed. Two conclusions can be drawn after comparing the MFD curve of the road network under different aggregation degree index of traffic generation and attraction sources: (1) when the traffic flow of the road network is in the state of free flow or critical flow, the aggregation effect of traffic generation and attraction sources has no effect on MFD distribution; (2) when the traffic flow of the road network is in the congestion flow state, the aggregation effect of traffic generation and attraction sources influences MFD distribution. Moreover, under the same road network flow conditions, the aggregation degree of traffic generation and attraction sources is lower in the road network (the distribution of traffic generation and attraction volume is more balanced), the trip completion flow of road network will be higher. Otherwise, the aggregation degree of traffic generation and attraction sources is higher in the road network (the distribution of traffic generation and attraction volume is more unbalanced), the trip completion flow of road network will be lower.

Keywords: macroscopic fundamental diagram, traffic generation and attraction source, aggregation degree, traffic simulation

PACS: 45.70.Vn, 89.40.–a

DOI: 10.7498/aps.69.20191641

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61304195, 51878236, 51675151), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. JZ2019HGBZ0141).

[†] Corresponding author. E-mail: zhengxiaoyan@hfut.edu.cn