

路网宏观基本图中磁滞现象的产生机理

王鹏飞^{1,2}, 岳昊³, 关宏志²

(1.河北科技师范学院城市建设学院,河北秦皇岛066004;2.北京工业大学交通工程北京市重点实验室,北京100124;3.北京交通大学城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京100044)

摘要:为尽快将路网宏观基本图理论应用于实际交通管控中,利用车流波动理论从交通流状态演化的角度分析路网宏观基本图中磁滞现象的产生机理。以日本京都市的实际观测数据验证部分结论的可靠性。通过理论研究及案例分析发现:1)路网中低密度、高流量的交通流状态经过拥堵流状态后转化为低密度、低流量的交通流状态是磁滞现象产生的重要原因;2)在相同路网车辆数的条件下,相较形成过程,磁滞环的消除过程会使得路网中产生更多的拥堵路段及拥堵溢出点;3)当路网中存在非拥堵路段可供逐渐增加的车辆选择时,路网宏观基本图有可能在磁滞环形成过程中出现路网车辆数持续增加、但路网总流量保持不变的奇异现象。

关键词:交通工程;路网宏观基本图;磁滞现象;车流波动理论;拥堵溢出

Hysteresis Phenomenon in a Macroscopic Fundamental Diagram of Roadway Network

Wang Pengfei^{1,2}, Yue Hao³, Guan Hongzhi²

(1.College of Urban Construction, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao Hebei 066004, China; 2.Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3.MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To better apply the theory of macroscopic fundamental diagram (MFD) to traffic management and control, this paper analyzes the formation mechanism of hysteresis phenomenon in a macroscopic fundamental diagram using traffic flow wave theory. The paper verifies the reliability of partial conclusions using the detector data of urban roadway network in Kyoto. Based on the theoretical analysis and case study, the paper highlights the following findings: 1) the translation from traffic flow state with high volume and low density to the flow state with low volume and low density caused by congestion is a primary issue to generate the hysteresis phenomenon; 2) in comparison to the loading process (upper curve) of the loop, more congested links and queue-spill over exist in the recovery process (lower curve) under the same traffic volume; 3) if the roadway network can supply uncongested links for the increasing users, during the loading process of the loop, the phenomenon that the transportation production maintains a certain level while the traffic volume may increases.

Keywords: traffic engineering; macroscopic fundamental diagram of roadway network; hysteresis phenomenon; traffic flow wave theory; congestion spillover

收稿日期:2016-01-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目“城市交通供需结构演化机理及调控方法”(51338008)、国家自然科学基金面上项目“步行设施内障碍物的瓶颈阻滞与隔离保护机理”(71771013)、国家自然科学基金面上项目“突发大客流条件下轨道交通网络影响阈值研究”(71501011)、河北省自然科学基金青年科学基金项目“基于非清晰路网宏观基本图的区域交通流控制模型及算法研究”(E2018407051)

作者简介:王鹏飞(1985—),男,北京人,博士,讲师。主要研究方向:交通管理与控制、城市智能交通。E-mail:wpf_plan_civil@163.com

0 引言

为了实时把握路网中车辆的运行状态,

进而对交通流进行诱导与控制,交通工程师在道路网中布设了各式各样的检测器(例如线圈检测器、浮动车等)。但管理者想通过

各路段上零散的交通信息把握路网整体的车辆运行状态依旧十分困难,这是非线性的交通流现象与出行者路径选择行为相互作用的结果^[1]。

对此,文献[2]提出可以表征路网车辆数与路网总流量之间函数关系的路网宏观基本图(Macroscopic Fundamental Diagram, MFD)的概念。文献[3]通过对日本横滨商业中心的检测器数据进行分析,验证了MFD在真实城市道路网中的存在。近年来,针对法国图卢兹^[4]、美国明尼苏达州^[5]、波特兰^[6]、芝加哥与尔湾^[7]高速公路网络的研究发现,MFD会产生磁滞现象。同时,以中国北京^[8-10]、上海^[11-12]和日本仙台^[13]、京都^[14]的城市道路网为研究对象,也发现MFD会产生磁滞现象。其中,文献[13-14]使用1年的交通检测器数据验证了MFD中磁滞现象在一定条件下出现的稳定性。

针对MFD中磁滞现象的产生机理,在理论研究方面,文献[15-16]通过仿真实验,揭示了交通密度在时空上的不均匀分布是MFD出现磁滞现象的关键原因;文献[17]以2环模型从理论上给出了MFD中磁滞现象

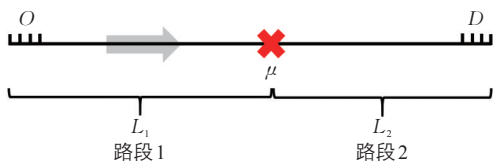


图1 交通网

Fig.1 Roadway network

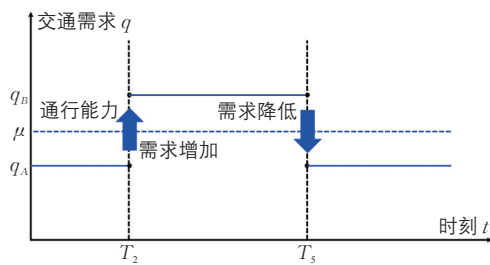


图2 交通需求时变图

Fig.2 Time-vary diagram of transportation demand

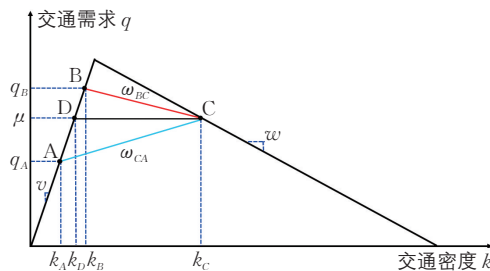


图3 每个路段的交通基本图

Fig.3 Fundamental diagram for different roadway segment 下,路网中交通状态的演化过程可由时空图

的产生条件。在实证研究方面,文献[5]使用检测器数据发现在出行高峰时段过后的一段时间内,路网中会出现车辆在空间上分布不均衡的现象;文献[8-9]认为高峰时段前后不同的车道变换率是产生磁滞现象的重要原因;文献[12]发现各个检测器检测到的交通状态并非同步,认为这是MFD磁滞现象产生的重要原因;此外,文献[14,18]以1年的检测器数据验证了文献[15-16]结论的正确性,即在同一平均交通密度下的交通密度标准差与平均流量之间呈现线性负相关。

但至今为止,鲜有研究从路网中高峰时段前后交通流状态演变的角度去揭示磁滞现象的产生机理并对其存在的普遍性进行说明,而这是将MFD应用于实际交通管控中的重要环节。现阶段,基于MFD的路网流入流出量控制策略(国内外代表研究见文献[19-20])全部以区域内存在明确路网宏观基本图(well-defined MFD)为前提,而这与大量的现实观测情况并不相符。

鉴于此,本文以存在单一交通瓶颈的、由若干同质路段串联而成的交通网为对象,利用车流波动理论从交通流状态演化的角度,对MFD中磁滞现象的产生机理及其存在的普遍性进行分析,并以日本京都市的实际观测数据来验证理论分析得到结论的可靠性。

1 模型建立

1.1 路网结构与交通需求的设定

所有车辆从O点(居住地)出发向D点(商业中心)移动,且在此过程中存在通行能力为 μ 的交通瓶颈(瓶颈可视为真实路网中的平面交叉口或通行能力较低的路段),从O到瓶颈的部分称为路段1,而从瓶颈到D的路段为路段2(见图1)。上游的交通需求在 T_2 时刻由 $q_A(q_A < \mu)$ 增加至 $(q_B(q_B > \mu))$,而后在 T_3 时下降至 q_A (见图2),此设定反映了(早晚)高峰时段前后的交通需求时变特性。路段1表示路网中在瓶颈上游受到拥堵流影响的路段,路段2代表在瓶颈下游未受到拥堵流影响的路段。此外,各路段的交通基本图如图3所示。

1.2 路网交通状态的演变过程

在上述设定的路网结构与交通需求的条件下,路网中交通状态的演化过程可由时空图

(见图4)表示。其中,各交通流状态(A, B, C, D)的交通量与交通密度可由下列公式计算得出: $q_A = k_A v$, $q_B = k_B v$, $q_D = \mu = k_D v$, $q_C = \mu$ 。另外,冲击波 ω_{BC} 与 ω_{CA} 的波速为

$$\omega_{BC} = \frac{q_C - q_B}{k_C - k_B}, \quad (1)$$

$$\omega_{CA} = \frac{q_A - q_C}{k_A - k_C}, \quad (2)$$

式中: q_A , q_B , q_C 为交通流状态 A, B, C 的交通量; k_A , k_B , k_C 为交通流状态 A, B, C 的交通密度。

由此可知,每一时段内路网中存在的交通流状态不尽相同,并且每一种状态所覆盖的路段数量与长度也不同。

2 MFD 中磁滞现象产生机理

2.1 MFD 的定义

MFD 表征路网总流量 $P(t)$ 与路网车辆数 $N(t)$ 之间的函数关系,即

$$P(t) = \sum_{i \in I} q_i(t) l_i, \quad (3)$$

$$N(t) = \sum_{i \in I} k_i(t) l_i, \quad (4)$$

式中: l_i 为第 i 条路段的长度/km; $q_i(t)$ 为第 i 个检测器在时段 t 内检测到的交通量/(辆·5 min⁻¹); $k_i(t)$ 为第 i 个检测器在时段 t 内检测到的平均交通密度/(辆·km⁻¹)。

根据上述定义,要求解每一时段的 MFD, 必须首先计算每种交通流状态在路网中所占有的路段总长度 $l(t)$ 。例如,在时段⑤,路网中存在三种交通流状态: B, C 与 D(见图4), 它们的分布如图5所示,因此,路网总流量与路网车辆数分别为

$$P_5(t) = q_B(t) l_B(t) + q_C(t) l_C(t) + q_D(t) l_D(t), \quad (5)$$

$$N_5(t) = k_B(t) l_B(t) + k_C(t) l_C(t) + k_D(t) l_D(t), \quad (6)$$

式中: 交通量 $q_C = q_D = \mu$ 。

2.2 各时段的 MFD 及其变化趋势

根据上述 MFD 的定义(公式(3), (4))计算得出的每一时段的路网总流量与路网车辆数,并通过对计算结果进行判别,得出每一时段的路网总流量与路网车辆数的变化趋势(见表1和表2)。其中,时段④的路网总流量与时段⑥的路网车辆数的变化趋势因无法从符号判定,所以需要分情况讨论,结果如表3与表4所示。

将表1~表4中的计算结果反映在 MFD (见图6)上则可明显的发现,在此模型的设

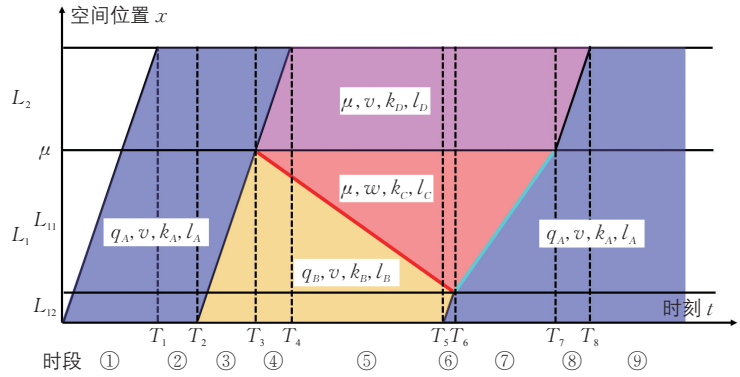


图4 时空图

Fig.4 Time-space diagram

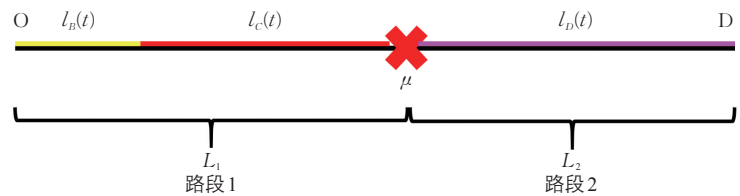


图5 时段⑤交通流状态的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of traffic flow state in roadway network during time period ⑤

表1 路网总流量及其变化趋势

Tab.1 Total traffic flow and its variation trend

时段	路网总流量	趋势
①	$q_A v t$	增加
②	$q_A L$	不变
③	$q_A L + (q_B - q_A)(t - T_2)v$	增加
④	$q_A L_2 + q_B L_1 + ((\mu - q_A)v + (\mu - q_B)\omega_{BC})(t - T_3)$	分情况
⑤	$q_B L_1 + \mu L_2 + (\mu - q_B)(t - T_3)\omega_{BC}$	减少
⑥	$q_B L_1 + \mu L_2 + (q_A - q_B)(t - T_3)v + (\mu - q_B)(t - T_3)\omega_{BC}$	减少
⑦	$\mu L + (q_A - \mu)((T_6 - T_3)v + (t - T_6)\omega_{CA})$	减少
⑧	$q_A L_1 + \mu L_2 + (q_A - \mu)(t - T_7)v$	减少
⑨	$q_A L$	减少

表2 路网车辆数及其变化趋势

Tab.2 Total number of vehicles and its variation trend

时段	路网车辆数	趋势
①	$k_A v t$	增加
②	$k_A L$	不变
③	$k_A L + (k_B - k_A)(t - T_2)v$	增加
④	$k_A L_2 + k_B L_1 + ((k_D - k_A)v + (k_C - k_B)\omega_{BC})(t - T_3)$	增加
⑤	$k_B L_1 + k_D L_2 + (k_C - k_B)(t - T_3)\omega_{BC}$	增加
⑥	$k_B L_1 + k_D L_2 + (k_A - k_B)(t - T_3)v + (k_C - k_B)(t - T_3)\omega_{BC}$	分情况
⑦	$k_C L_1 + k_D L_2 + (k_A - k_C)((T_6 - T_3)v + (t - T_6)\omega_{CA})$	减少
⑧	$k_A L_1 + k_D L_2 + (k_A - k_D)(t - T_7)v$	减少
⑨	$k_A L$	减少

定(存在交通瓶颈, 并且高峰时段的交通流量超过瓶颈容量)下MFD一定会出现磁滞现象, 其中, 时段④与时段⑥的变化趋势虽具有不确定性(图6中的红线), 但这些不确定性并不影响磁滞现象的出现。

2.3 磁滞现象的产生机理

首先, 需要对磁滞环形成过程(时段④与⑤, 上环用U表示)与消除过程(时段⑦与⑧, 下环用L表示)中的路网总流量及路网

车辆数的取值范围, 路网中存在的交通流状态进行比较分析。

$$P_U(t) \in [\mu L, q_B L_1 + \mu L_2], \quad (7)$$

$$N_U(t) \in [k_B L_1 + k_A L_2, k_C L_1 + k_D L_2], \quad (8)$$

$$P_L(t) \in [q_A L, \mu L], \quad (9)$$

$$N_L(t) \in [k_A L, k_C L_1 + k_D L_2]. \quad (10)$$

虽然两个过程中的路网车辆数的取值范围有所重合, 但上环的路网总流量却总是大于等于下环, 即 $P_U(t) \geq P_L(t)$ 。

对比公式(7)与公式(9)即可发现产生此结果的关键原因是因为磁滞环在消除过程中缺少低密度、高流量的交通流状态B。从磁滞环形成与消除过程中的交通流状态演变过程(见表5)分析, 在时段④⑤时, 交通流状态B逐渐被向上游蔓延的交通流状态C(拥堵流)所代替。而当路网的交通需求开始下降后(时段⑥以后), 交通流状态A(低流量、低密度)逐渐开始取代状态B与状态C。因此, 状态B的缺失是出行高峰时段的拥堵传播(拥堵溢出点增加)与出行高峰过后的出行者需求降低这两个原因接连作用的结果, 非人为强制干预(即恢复、增加路网容量的交通管制措施, 例如交通事故处理完毕或公交专用车道恢复为普通车道等交通管制措施^[21])不可避免, 这也就是为什么在很多城市路网的MFD中都观测到磁滞现象(见引言部分)的重要原因。

进一步对比磁滞环的形成过程与消除过程中存在的交通流状态即可发现: 在消除过程中, 低密度、低流量的交通流状态A与拥堵流状态C同时存在, 即路网中交通密度在空间上的分布(相较于形成过程)是不均匀的。此结论与文献[5, 14]中出行高峰前后交通密度在空间上的分布观测结果相一致, 从理论上阐述了此现象出现的机理。

此外, 在同一路网车辆数的条件(公式(11))下, 进一步定量分析磁滞环在形成与消除过程中的路网交通流状态, 即可得到 $l_{C,U}(t) < l_{C,L}(t)$ 的结论。即在同一路网车辆数的条件下, 在磁滞环消除过程中, 拥堵状态C所占据的路段总数量更多、总长度更长。而在真实路网中, 这意味着在比较相同路网车辆数条件下的拥堵模式时, 会发现在磁滞环的消除过程中存在更多的拥堵路段与拥堵溢出点。此结论与文献[14-15]中仿真实验所得结果相符。

$$\frac{k_B(t)l_{B,U}(t) + k_C(t)l_{C,U}(t) + k_D(t)L_2}{k_A(t)l_{A,L}(t) + k_C(t)l_{C,L}(t) + k_D(t)L_2} = \quad (11)$$

表3 时段④路网总流量的变化趋势

Tab.3 Variation trend of total traffic flow during time period ④

时段	条件	趋势
④	$(\mu - q_A)v + (\mu - q_B)\omega_{BC} > 0$	增加
④	$(\mu - q_A)v + (\mu - q_B)\omega_{BC} = 0$	不变
④	$(\mu - q_A)v + (\mu - q_B)\omega_{BC} < 0$	减少

表4 时段⑥路网车辆数的变化趋势

Tab.4 Variation trend of number of vehicles during time period ⑥

时段	条件	趋势
⑥	$(k_A - k_B)(t - T_s)v + (k_C - k_B)(t - T_s)\omega_{BC} > 0$	增加
⑥	$(k_A - k_B)(t - T_s)v + (k_C - k_B)(t - T_s)\omega_{BC} = 0$	不变
⑥	$(k_A - k_B)(t - T_s)v + (k_C - k_B)(t - T_s)\omega_{BC} < 0$	减少

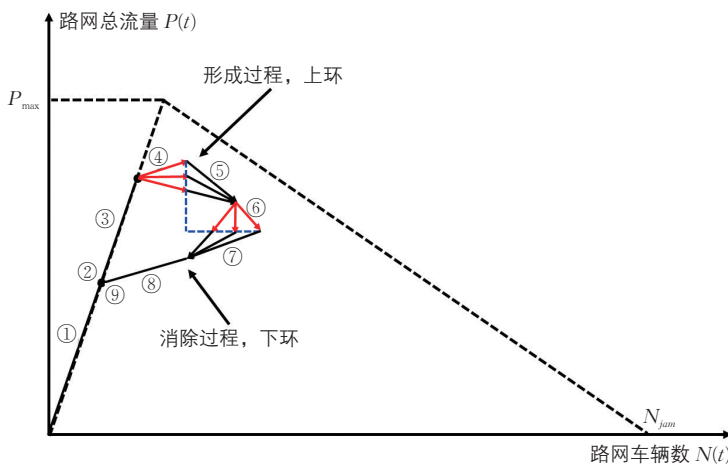


图6 路网宏观基本图的形状特征分析

Fig.6 Characteristics of macroscopic fundamental diagram of roadway network

表5 磁滞环形成与消除过程中交通流状态的演变

Tab.5 Evolution of traffic flow state in loading and recovery process in the hysteresis loop

时段	交通流状态的演变	MFD形状特征
④⑤	B → C; A → D	磁滞环形成过程
⑥	B → C与A	上环至下环的转换
⑦⑧	C与D → A	磁滞环消除过程

3 实例分析

大城市路网中MFD某种特征的产生机理受到交通数据采集方式、检测器的数量与位置以及众多因素的影响。本文以日本京都市为例，以实际的检测器数据对上述理论分析的可靠性进行验证，并非以研究京都市路网中MFD磁滞现象的真正产生机理为目的。

3.1 京都市路网中的路网宏观基本图

京都市是日本的古都也是著名的旅游胜地，截至2013年10月人口约147万。路网中的单向路段由1~3条车道组成，道路交叉口间距为100~500 m。在城市路网中分布着约800个检测器，记录各路段每5 min的断面交通量与车速^[14]。在剔除错误数据后，利用公式 $q = kv$ 即可得到交通密度，再依照公式(3)，(4)计算每5 min的路网总流量与路网车辆数即得到路网宏观基本图。研究发现在每年^①11月(红叶观光季节)的周末，京都市的MFD(见图7)都会呈现如下两个特点：1)具有一个巨大的磁滞环；2)在磁滞环形成的过程中(13:00—17:15)会出现罕见^②的水平推移现象(即磁滞环在形成过程中路网车辆数持续增加、但路网总流量保持不变的现象)。

3.2 磁滞现象分析

在对磁滞现象进行分析前，首先需要定义路网中的拥堵溢出数 S_t 进行定义。

$$S_t = \sum_{k \in K} S_t^k = \sum_{k \in K} \sum_{u \in IN(k)} \sum_{d \in OUT(k)} S_t^{k,(u,d)}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} S_t^{k,(u,d)} = 1, v_t^{k,u} \leq 20 \text{ 且 } v_t^{k,d} \leq 20 \\ S_t^{k,(u,d)} = 0, \text{ 其他} \end{cases}, \quad (13)$$

式中： K 为路网中交叉口的集合； $IN(k)$ ， $OUT(k)$ 为交叉口 k 的上游流入与下游流出路段的集合； $v_t^{k,u}$ ， $v_t^{k,d}$ 为交叉口 k 上游与下游路段的车速； S_t^k 为交叉口 k 处拥堵溢出点的个数。根据此定义，在时段 t ，某一交叉口处上游与下游路段同时陷入拥堵状态时，则计算为1个拥堵溢出点。本文将时段 t 的平均车速小于等于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的路段定义为拥堵路段。

依据公式(12)，(13)对全天每5 min整个路网中拥堵溢出点的数量进行计算，发现在同一路网车辆数的条件($Nt \approx 8250$ ， $t=13:00$ 与 $t=18:55$ ，见图7)下，拥堵溢出点数量在磁滞环形成过程中为15，而在消除过程中为29(见图8)。此实证结果验证了2.3节理论分

析得到的结论：在同一路网车辆数中，相较于形成过程，磁滞环在消除过程中会拥有更多的拥堵溢出点。

3.3 水平推移现象分析

对于京都市MFD中产生的水平推移现象，文献[14]并未从理论角度阐述其产生机理及意义。根据2.2节的理论分析，只要满足表3中 $(\mu - q_A)v + (\mu - q_B)\omega_{BC} = 0$ 这一条件，即交通流状态D代替状态A导致的路网总流量的增加量与状态C代替状态B导致的

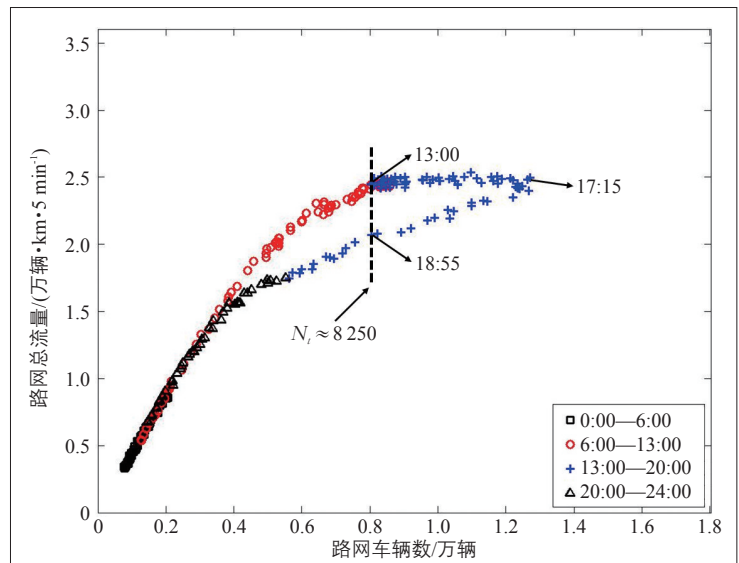


图7 京都市红叶观赏季周末的MFD

Fig.7 Macroscopic fundamental diagram in Kyoto roadway networks on weekends during the autumn maple viewing

资料来源：文献[14]。

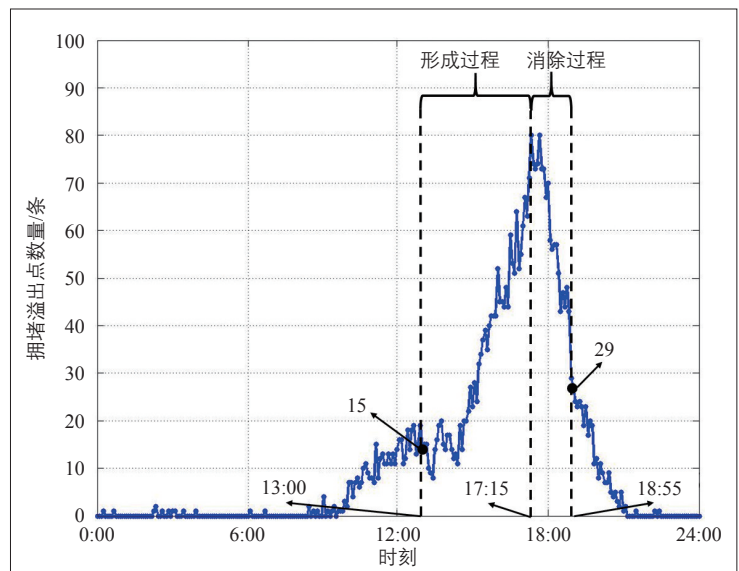


图8 拥堵溢出点数量的推移

Fig.8 Time-varying of the number of congestion spillover spots

资料来源：文献[14]。

路网总流量的减少量时刻等同, 则会出现水平推移现象。

在真实路网中, 状态 A 转化为状态 D, 意味着路网中不断增加的车辆选择了非拥堵路段(即拥堵可以回避, 图 1 中路段 2 上的车辆), 从而使得非拥堵路段的路网总流量(图 9a 中的蓝线)上升, 接近其交通容量。相反, 状态 C 代替状态 B 意味着车辆选择了拥堵路段(即拥堵无法回避, 图 1 中路段 1 上的车辆), 使得拥堵路段的路网总流量(图 9a 中的红线)下降, 低于交通容量。但无论怎样, 路网中车辆总数的增加总会使得拥堵路段与非拥堵路段的车辆数上升(见图 9b), 若两种选择使得路网总流量保持基本不变就会出现水平推移现象。此条件意味着路网中存在非拥堵路段可供不断增加的车辆选择, 而这即是京都市 MFD 中出现水平推移现象的直接原因。上述分析是否符合实际路网中出行者的路径选择行为还有待考证。

4 结语

本文利用车流波动理论, 从交通流状态演化的角度阐述了 MFD 中磁滞现象的产生机理并得出以下结论: 1) 低密度、高流量的交通流状态 B 经过拥堵流状态 C 后逐渐被低密度、低流量的交通状态 A 所代替, 是磁滞现象产生的重要原因; 2) 在相同路网车辆数的前提下, 磁滞环的消除过程将会产生更多的拥堵路段及拥堵溢出点; 3) 路网中尚存在非拥堵路段可供逐渐增加的车辆选择是

MFD 中水平推移现象产生的必要条件。以日本京都市的实际观测数据验证了上述部分理论分析的可靠性。

未来, 可以从以下几个方面进行拓展研究: 1) 追加考虑道路网布局、OD 的空间分布特性; 2) 追加考虑绝对理性或有限理性视野下的出行者路径选择行为^[22]; 3) 探讨网络交通流逐日动态演化^[23]与 MFD 特性再现的关系等。此外, 本文以存在单一交通瓶颈、属性相同的路段组成的串联路网为对象得到 MFD 中磁滞现象产生的机理及特性, 在应用于较大范围路网时还有待进一步的严谨证明。

注释:

Notes:

- ① 在此仅展示具有代表性的 2012 年 11 月 25 日(周日, 晴天)的路网宏观基本图。
- ② 在至今为止关于 MFD 的实证或仿真研究中, 尚未发现类似现象。

参考文献:

References:

- [1] Daganzo C F. Queue Spillovers in Transportation Networks with a Route Choice[J]. Transportation Science, 1998, 32(1): 3-11.
- [2] Daganzo C F. Urban Gridlock: Macroscopic Modeling and Mitigation Approaches[J]. Transportation Research Part B, 2007, 41(1): 49-62.
- [3] Geroliminis N, Daganzo C F. Existence of Ur-

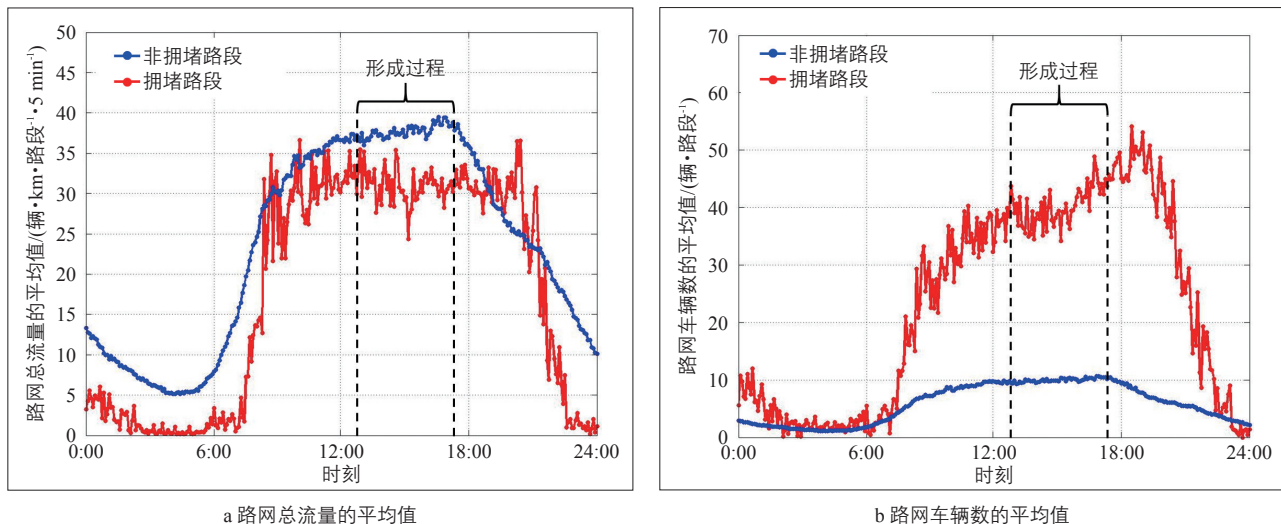


图9 路网总流量与路网车辆数的平均值推移

Fig.9 Time-vary of the average total traffic flow and number of vehicles

资料来源: 文献[14]。

- ban- Scale Macroscopic Fundamental Diagrams: Some Experimental Findings[J]. *Transportation Research Part B*, 2008, 42(9): 759-770.
- [4] Buisson C, Ladier C. Exploring the Impact of Homogeneity of Traffic Measurements on the Existence of Macroscopic Fundamental Diagrams[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2124(12): 127-136.
- [5] Geroliminis N, Sun J. Hysteresis Phenomena of a Macroscopic Fundamental Diagram in Freeway Networks[J]. *Transportation Research Part A*, 2011, 45(9): 966-979.
- [6] Saberi M, Mahmassani H S. Exploring Properties of Network Wide Flow-Density Relations in a Freeway Network[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2315(16): 153-163.
- [7] Saberi M, Mahmassani H S. Hysteresis and Capacity Drop Phenomena Freeway Networks: Empirical Characterization and Interpretation[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013, 2391(5): 44-55.
- [8] 贺正冰, 关伟, 樊玲玲, 等. 北京市快速环路宏观基本图特征研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(2): 199-205.
He Zhengbing, Guan Wei, Fan Lingling, et al. Characteristics of Macroscopic Fundamental Diagram for Beijing Urban Ring Freeways[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(2): 199-205.
- [9] He Zhengbing, He Shuyan, Guan Wei. A Figure-Eight Hysteresis Pattern in Macroscopic Fundamental Diagrams and Its Microscopic Causes[J]. *Transportation Letters*, 2015, 7(3): 133-142.
- [10] 朱琳, 于雷, 宋国华. 基于MFD的路网宏观交通状态及影响因素研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(11): 138-146.
Zhu Lin, Yu Lei, Song Guohua. MFD-Based Investigation into Macroscopic Traffic Status of Urban Networks and Its Influencing Factors[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(11): 138-146.
- [11] 姚崇富, 付强, 林航飞. 上海快速路网宏观基本图特征研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2016, 40(3): 519-525.
Yao Chongfu, Fu Qiang, Lin Hangfei. Research of Characteristics of Macroscopic Fundamental Diagram for Shanghai Expressway[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2016, 40(3): 519-525.
- [12] 付强, 田光华, 焦小龙. 基于实际数据的宏观基本图磁滞现象及分析[J]. *城市道桥与防洪*, 2017(1): 125-128+132.
Fu Qiang, Tian Guanghua, Jiao Xiaolong. Phenomenon and Analysis on Hysteresis of Macro Basic Graph Based on Actual Data [J]. *Urban Roads Bridges and Flood Control*, 2017(1): 125-128+132.
- [13] Wang P, Kentaro W, Akamatsu T, et al. An Empirical Analysis of Macroscopic Fundamental Diagrams for Sendai Road Networks [J]. *Interdisciplinary Information Sciences*, 2015, 21(1): 49-61.
- [14] Wang P, Kentaro W, Akamatsu T, et al. Characterization of Macroscopic Fundamental Diagrams Based on Long-Term Detector Data [J]. *JSTE Journal of Traffic Engineering (in Japanese)*, 2016, 2(5): 11-20.
- [15] Mazlounian A, Geroliminis N, Helbing D. The Spatial Variability of Vehicle Densities as Determinant of Urban Network Capacity [J]. *Philosophical Transactions of Royal Society A*, 2010, 368(1928): 4627-4647.
- [16] Mahmassani H S, Saberi M, Zockaie A. Urban Network Gridlock: Theory, Characteristics, and Dynamics[J]. *Transportation Research Part C*, 2013, 36(11): 480-497.
- [17] Gayah V V, Daganzo C F. Clockwise Hysteresis Loops in the Macroscopic Fundamental Diagram: An Effect of Network Instability [J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(4): 643-655.
- [18] Knoop V L, Hoogendoorn S P. Empirics of a Generalized Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Freeways[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013, 2391(13): 133-141.

(下转第102页)