

杭州湾跨海大桥道路交通流的建模与模拟

祝会兵¹, 张 鹏¹, 陈 健², 于 颖³, 沈 翔², 郑哲溢¹, 尤哲楷¹, 钱发胜¹, 李青松¹

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波杭州湾大桥发展有限公司, 浙江 宁波 315001;

3. 宁波甬港拖轮有限公司, 浙江 宁波 315299)

摘要: 在杭州湾跨海大桥道路交通流实测数据统计分析的基础上, 提出了开放式边界的单向三车道元胞自动机交通流模型, 考虑了小车和大车的不同运动性能, 并区分激进型司机与谨慎型司机的不同驾驶特征, 根据杭州湾跨海大桥不同时段的实测车流量, 对模型中开放式边界的进车率进行了识别. 依据提出的模型模拟得到杭州湾跨海大桥路段不同密度时的车流量, 经与实测数据比较, 两者吻合良好, 表明本文提出的交通流模型符合杭州湾跨海大桥交通流的实际情况. 同时, 通过展示车辆的时空演化图, 从微观的角度分析了杭州湾跨海大桥路面交通流所表现出的宏观特征, 有望为杭州湾跨海大桥的交通优化与管理提供理论依据.

关键词: 交通流模型; 元胞自动机; 杭州湾跨海大桥; 交通实测数据; 开放式边界

中图分类号: O242

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 04-0101-07

杭州湾跨海大桥连接嘉兴市与宁波市, 极大缩短了宁波、舟山与杭州湾北岸城市的距离, 节约了运输时间, 具有十分明显的经济效益和社会效益. 但由于杭州湾跨海大桥上的车流量逐渐增大, 尤其在节假日等出行高峰时段容易出现交通拥堵现象, 因此如何正确认识杭州湾跨海大桥上的交通流特征并进行有效管理, 进而对可能出现的大流量提出预警, 是值得研究的实际问题.

开展交通流实测, 并基于实测数据进行交通流特性分析是获得道路交通流基本特质的有效途径^[1-3]. 但限于场地条件, 不可能对实际交通中可能出现的各种交通场景逐一进行测试. 视频录像虽然可以收集即时交通信息, 但不能预测交通流量, 尤其对于需要开展道路施工的路段, 预测交通流量并提前采取必要的交通管理手段是保持道路交通畅通的必要手段, 而交通流建模是研究交通流宏观特征的有效途径.

交通流模型是通过揭示交通流状态变量随时空变化的规律来研究高速公路上各种复杂交通现象的基本数学工具, 当前交通流模型有较大发展,

尤以微观模型中的元胞自动机模型发展迅速. 自1992年 Nagel 等^[4]提出 NaSch 元胞自动机模型以来, 由于其可模拟出“幽灵堵塞”现象以及拥堵情况下的时走时停波等交通现象, 引起学界广泛关注, 并得到不断拓展^[5-8]. 有关学者通过引入合理的换道规则, 提出了模拟双车道^[9-10]乃至多车道、多车种的交通流模型^[11], 并针对不同的实际交通场景, 如高速公路施工区^[12-13]、爬坡路段^[14]、上匝道^[15]、含公交站点的路段^[16-18]等建立了大量改进的元胞自动机交通流模型. 但目前还没有一个普适的模型可以模拟任意交通场景, 而是需要针对实际道路交通情况, 建立个性化的交通流模型, 使其能较精确地刻画实际交通现象.

当前交通流模型一般采用周期性边界条件^[4-15]和开放式边界条件^[16-18], 前者更便于理论分析, 但与实际道路有差别, 后者则较符合实际的交通场景. 然而, 当前针对开放式边界的交通流建模, 很少见涉及进车率识别的研究, 如果模型中进车率与实际交通的车辆情况不符, 数值模拟结果就会失去实际参考价值.

收稿日期: 2021-02-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市公益性计划项目(202002N3199).

第一作者: 祝会兵(1966-), 女, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 交通流建模与交通优化. E-mail: zhuhuibing@nbu.edu.cn

本文通过对杭州湾跨海大桥路面实测交通数据的统计分析, 基于元胞自动机交通流模型, 利用熵权法对模型中开放式边界的进车率进行了识别, 进而建立单向三车道交通流模型. 将模拟结果与实测数据进行比较来验证模型的有效性, 旨在为利用交通流模型开展杭州湾跨海大桥通行能力预测和交通管理提供参考.

1 交通流数据采集与分析

利用杭州湾跨海大桥的摄像装置拍摄的交通流录像资料, 统计交通流的特征参数. 提取 2019 年 10 月 9 日杭州湾跨海大桥 K1381+529 处的录像资料, 选取 07:00—20:00 共计 780 min 观测断面(图 1 为其中 1 幅录像截图). 从图 1 可看到, 杭州湾跨海大桥为双向六车道, 右边是宁波方向的交通流, 也是本文的研究对象; 从中央护栏至硬路肩依次为车道 1、车道 2、车道 3, 车道最高限速为 100 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$; 大巴车、货车等大型车的最高限速为 80 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 且不可驶入车道 1. 轿车等小型车可在任何车道行驶, 最高行驶速度为 100 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. 图 1 中断面 1 和断面 2 间距 152 m. 任选一个观测断面, 记录通过各车道的车辆数, 区分大车和小车, 得到车流量与大巴比例. 同时, 分别记录车辆通过断面 1 和断面 2 所需的时间, 根据标线之间的距离与通过时间, 计算出车辆的速度. 根据上述统计方法, 得



图 1 杭州湾跨海大桥交通流场景示意图

到正常天气条件下杭州湾跨海大桥各车道的实测车流量及大巴比例, 结果见表 1.

从表 1 可知, 09:00 以后杭州湾跨海大桥上的车流量开始增大, 尤其在 15:00—18:00, 是车辆通行的繁忙时段. 此外, 3 条车道的车流量和大车比例差异较大. 车道 1 上车辆均为小型车, 大巴比例为 0, 车流量最大; 车道 2 上大小型车辆均有, 大巴比例随时段而变化, 车流量小于车道 1; 车道 3 上车辆以大巴为主, 车流量最小.

统计结果表明, 单向 3 条车道上车辆的构成、车流量均不同, 即使在同一天, 不同时段交通流也呈现不同的特征. 借助录像资料提取交通流特征值, 建立元胞自动机交通流模型, 利用交通流模型计算不同交通状况下的车速和车流量, 从而实现交通流量的预测和分析, 这对杭州湾跨海大桥的交通优化和管理意义重大.

表 1 杭州湾跨海大桥 3 条车道实测交通流量及大巴比例

序号	时段	车道 1		车道 2		车道 3		总流量/ (辆·h ⁻¹)
		车流/(辆·h ⁻¹)	大巴比例	车流/(辆·h ⁻¹)	大巴比例	车流/(辆·h ⁻¹)	大巴比例	
1	07:00—08:00	244	0	266	0.59	169	1.00	679
2	08:00—09:00	354	0	312	0.32	165	0.93	831
3	09:00—10:00	512	0	448	0.24	208	0.77	1 168
4	10:00—11:00	600	0	512	0.40	236	0.92	1 348
5	11:00—12:00	600	0	500	0.22	216	0.89	1 316
6	12:00—13:00	556	0	412	0.39	240	0.95	1 208
7	13:00—14:00	636	0	480	0.41	252	0.87	1 368
8	14:00—15:00	540	0	472	0.32	232	0.79	1 244
9	15:00—16:00	740	0	540	0.37	228	0.70	1 508
10	16:00—17:00	712	0	484	0.37	248	0.82	1 444
11	17:00—18:00	740	0	576	0.43	268	0.88	1 584
12	18:00—19:00	508	0	376	0.47	236	0.93	1 120
13	19:00—20:00	428	0	384	0.55	228	0.95	1 040

2 交通流建模

2.1 模型提出

杭州湾跨海大桥三车道交通流的建模场景如图2所示. 车道长度由 L 个元胞组成, 车道2上带星形标记的车辆为指定的当前车辆, d_n 、 d_{pred} 和 d_{succ} 分别表示当前车辆与前车、邻道前车以及邻道后车的车间距. V_{max} 为车辆可能达到的最大速度. 假定车道上有2种车型, 即轿车等小型车以及卡车、大巴等大型车, 它们所能达到的最大速度不同, 小车的最大车速为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 大车的最大车速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

模型采用开放式边界, 左侧进车率为 α , 右侧出车率为 β . 设每条车道上最左侧的 L_1 个元胞为进车区域, 在每个时间步判断每条车道上第1辆车的位置 $x(1)$, 如果 $x(1) > L_1$, 即该车辆不在进车区域, 表示进车区域内无车, 此时以进车率 α 在位置 $\min(x(1) - V_{\text{max}}, V_{\text{max}})$ 处进一辆车, 按照实测数据确定大车比例. 在出口边界, 每个时间步的速度和位置更新完成后, 以概率 $(1-\beta)$ 在车道右边界处设置一辆速度为0的车, 使接近车道右边界的车辆以概率 $(1-\beta)$ 减速. 特殊地, 当 $\beta=1$ 时, 即表示出口边界为全开放, 此时车辆可以自由驶出右边界. 当车道上最后一辆车的位置大于道路总长度时, 认为该车已驶离本车道.

由于司机的驾驶行为往往会对交通流的特性产生重要影响, 本文将驾驶小车的司机分为激进型和谨慎型, 前者通常具有激进的性格特征和熟练的驾驶技能, 后者通常小心驾驶车辆; 同时认为大车司机都为谨慎型. 实测数据显示, 小型车中激进司机所占比例为 25%^[1]. 在模型中, 司机性格的差异体现在车辆位置更新规则和换道规则中, 即不同类型司机所驾驶的车辆采取不同的纵向位置更新规则和横向换道规则. 在车辆的纵向位置更

新规则中, 谨慎型司机采用 NaSch 模型^[4]中的位置更新规则, 而激进型司机则采用考虑动态车间距的 DHD 模型^[7]中的位置更新规则. 在车辆的换道规则中, 谨慎型司机采用 Chowdhury 等^[9]提出的 STCA 模型中的横向换道规则, 激进型司机则采用 MR-STCA 模型^[12]中的横向换道规则.

假设模拟的车道长度为 3 500 m, 每个元胞格长度为 1 m, 则1条车道的总元胞数 L 为 3 500. 模型中车辆位置更新的时间步长为 1 s, 代表人的正常反应时间. 根据杭州湾跨海大桥的实际情况, 3条车道的限速值都取 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 小车的最大速度即为车道的限速值, 在模型中取无量纲数 $V_{\text{max}}^c = 28$, 对应实际车速 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 模型中所有小车的速度均在 0 到 V_{max}^c 之间取整数值. 货车、卡车等大车的最大速度取 $V_{\text{max}}^t = 22$, 对应实际车速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 模型中所有大车的速度均在 0 到 V_{max}^t 之间取整数值. 在实际情况下, 大车与小车的加速度不同, 且车辆在起步状态和行驶状态下的加速度也不同, 因此这里需要区分不同车型和不同状态下的加速度. 在起步状态下, 取大车的加速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 小车的加速度为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; 在行驶状态下, 取大车和小车的加速度均为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 另外, 大车的车身长取 14 m, 小车的车身长取 7 m.

在数值模拟中, 每一时间步中车辆首先按照横向换道规则进行换道, 然后按照纵向运动规则进行位置与速度的更新. 初始时刻车辆的位置和速度均为随机分布. 此外, 进车区域 L_1 取 50 m. 数值计算公式为:

$$J = (N/L) \cdot v,$$

$$v = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{T+t_0-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t),$$

式中: J 为 3 条车道上总流量; v 为车辆平均速度; N 为总车辆数; L 为每条车道模拟长度; $v_n(t)$ 为第 n

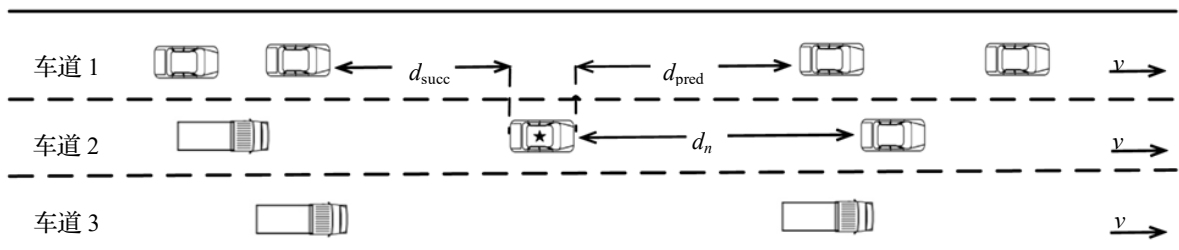


图2 杭州湾跨海大桥三车道交通流建模场景

车辆在 t 时刻的速度; T 为所选样本总时间.

在实际数值模拟中, 每个样本每次运行 2×10^4 个时间步. 为了消除暂态影响, 即消除初始时刻车辆随机分布引起的误差, 每次运行前 1×10^4 个时间步的模拟结果不计入实际统计中, 只取后 1×10^4 个时间步的运行结果进行时间平均. 此外, 为消除随机性影响, 共取 20 组样本结果进行系统平均.

2.2 进车率识别

采用开放式边界建立交通流模型来模拟杭州湾跨海大桥的实际交通情况时, 进车率 α 和出车率 β 是 2 个重要参数. 从交通录像记录中发现, 非节假日正常天气情况下, 交通比较通畅, 即车辆可以自由驶离车道, 因此在模型中设定 3 条车道的出车率 β 为 1. 设 3 条车道的进车率分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 .

识别时设定 3 条车道进车率的优化函数为:

$$U = A|Q_1 - q_1(\alpha_1)| + B|Q_2 - q_2(\alpha_2)| + C|Q_3 - q_3(\alpha_3)|,$$

式中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为车道 1、车道 2、车道 3 实测车流量; $q_1(\alpha_1)$ 、 $q_2(\alpha_2)$ 、 $q_3(\alpha_3)$ 分别为通过交通流模型计算得到的车道 1、车道 2、车道 3 模拟流量; $|Q_1 - q_1(\alpha_1)|$ 、 $|Q_2 - q_2(\alpha_2)|$ 、 $|Q_3 - q_3(\alpha_3)|$ 分别为车道 1、车道 2、车道 3 的模拟流量较实测流量的误差; A 、 B 、 C 分别为车道 1、车道 2、车道 3 模拟流量误差在目标函数中所占的权重; U 为总优化目标, U 值越小表示流量模拟结果与实测结果越接近.

本文的目标是使模拟得到的流量与实测流量的误差最小. 由于 3 条车道的进车率相互独立, 且各个时段有不同值, 为使 3 条车道的模拟流量总误差尽可能小, 需要对各车道流量的模拟误差设置权重, 使独立的 3 条车道的模拟误差转化为一个总误差, 即总优化目标 U . A 、 B 、 C 权重的确定方法为: 选择主观性相对较小并可充分利用模拟结果的熵权法^[19], 对多个不同的进车率组合进行多次模拟, 得到各车道多组的模拟流量的误差数据, 根据其变异程度, 利用信息熵计算其客观权重值. 若某条车道的模拟流量误差的数据集的变异程度越大, 则其信息熵越小, 说明该条车道误差数据的特征更能反映 U 的变化特征, 则该车道的模拟误差所占的权重就越大.

熵权法应用的具体步骤为: 首先进行指标的

标准化处理. 通常有 n 个样本, 每个样本有 m 个指标, 则设 x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标值 ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$). 为使 3 条车道的模拟车流量与实际车流量间的误差尽可能小, 每条车道的实际流量与理论流量间的误差代表一个指标, 3 条车道共有 3 个指标, 即 $m=3$. 样本数据由所取的 1×10^4 个时间步(已舍去初始 1×10^4 个时间步)的模拟结果取平均产生, 共取 100 组模拟结果($n=100$).

由于指标均有计量单位, 需标准化处理去除量纲. 采用极值标准化法进行标准化处理, 指标分正向指标和负向指标^[19].

正向指标:

$$t_{ij}^+ = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}},$$

负向指标:

$$t_{ij}^- = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}.$$

正向指标值越大则结果越优, 负向指标值越小则结果越优. 本文期望 3 条车道的实际车流量与模拟车流量之差能尽量小, 即期望指标尽量小, 故采用负向指标进行标准化处理.

首先计算处理后各次模拟的指标数据 t_{ij}^- 占本车道 n 组模拟结果之和的比重 p_{ij} :

$$p_{ij} = \frac{t_{ij}^-}{\sum_{i=1}^n t_{ij}^-},$$

$$i=1, \dots, 100; j=1, 2, 3; n=100.$$

然后计算第 j 条车道的负向指标的熵值 e_j , 熵值 e_j 反映了第 j 条车道的模拟流量误差在 n 组模拟结果中的变异程度, 其计算公式为^[19]:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, j=1, 2, 3,$$

其中: $k=1/\ln n > 0$; n 为模拟结果数, 取 100.

最后计算各条车道的模拟流量误差所占的权重, 其计算公式为^[19]:

$$S_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j}, j=1, 2, 3, m=3,$$

式中: S_j 为第 j 条车道的模拟流量误差所占的权重.

在实际模拟中, 将 3 条车道进车率 α_1 、 α_2 、 α_3 从 0 开始, 各自以 0.002 递增, 直至 1. 由于 3 条车

表2 杭州湾跨海大桥3条车道不同时刻的权重与进车率模拟结果

序号	时段	车道1		车道2		车道3	
		权重 A	进车率 α_1	权重 B	进车率 α_2	权重 C	进车率 α_3
1	07:00—08:00	0.263	0.046	0.373	0.105	0.364	0.050
2	08:00—09:00	0.387	0.057	0.249	0.137	0.364	0.050
3	09:00—10:00	0.294	0.052	0.486	0.221	0.220	0.069
4	10:00—11:00	0.276	0.047	0.436	0.295	0.288	0.073
5	11:00—12:00	0.266	0.038	0.428	0.287	0.306	0.068
6	12:00—13:00	0.372	0.082	0.361	0.205	0.267	0.074
7	13:00—14:00	0.381	0.073	0.400	0.263	0.219	0.068
8	14:00—15:00	0.350	0.036	0.392	0.262	0.258	0.076
9	15:00—16:00	0.442	0.069	0.315	0.315	0.243	0.077
10	16:00—17:00	0.342	0.093	0.395	0.264	0.263	0.082
11	17:00—18:00	0.353	0.078	0.405	0.329	0.242	0.084
12	18:00—19:00	0.293	0.087	0.354	0.171	0.353	0.073
13	19:00—20:00	0.270	0.072	0.356	0.172	0.374	0.069

道的进车率相对独立, 故先固定 2 条车道的进车率, 改变另一车道进车率, 利用建立的交通流模型开展数值模拟, 计算各条车道的流量. 依次变换 3 条车道的进车率, 选择使优化目标 U 最小的一组进车率为最优进车率.

依据统计得到的正常天气情况下杭州湾跨海大桥共 13 个时段的车流量(表 1), 利用提出的交通流模型开展数值模拟, 结合熵权法确定每个时段 3 条车道各自权重, 依照权重计算不同进车率下各条车道的车流量. 通过与实测流量的比较, 筛选出 13 个时段 3 条车道各自的进车率, 最终可得 3 条车道的权重与进车率(表 2).

3 数值模拟及交通流特性分析

利用提出的杭州湾跨海大桥三车道交通流模型, 结合计算得到的各个时段 3 条车道上的进车率(表 2), 通过数值模拟计算了 3 条车道不同密度时的流量值, 并与实测流量值进行比较, 结果如图 3 所示. 从图 3 可看出, 3 条车道上流量的模拟值与实测值吻合较好, 说明本文提出的杭州湾跨海大桥交通流模型能较好地反映实际交通状况.

为更直观地展示杭州湾跨海大桥上的交通流特征, 以 07:00—08:00 和 15:00—16:00 两个时段为例, 模拟得到了车辆时空演化图(图 4). 图 4 中横坐标表示车道长度, 纵坐标表示时间, 从左至右 3 个

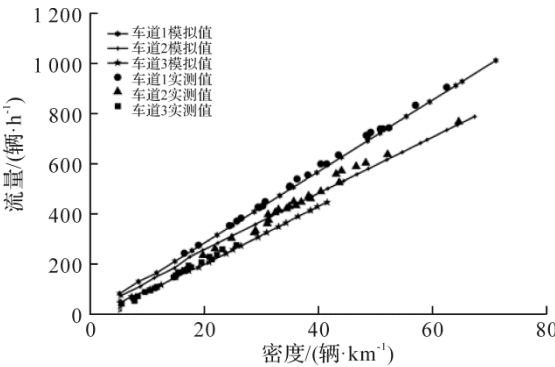


图3 杭州湾跨海大桥3条车道流量模拟值与实测值比较

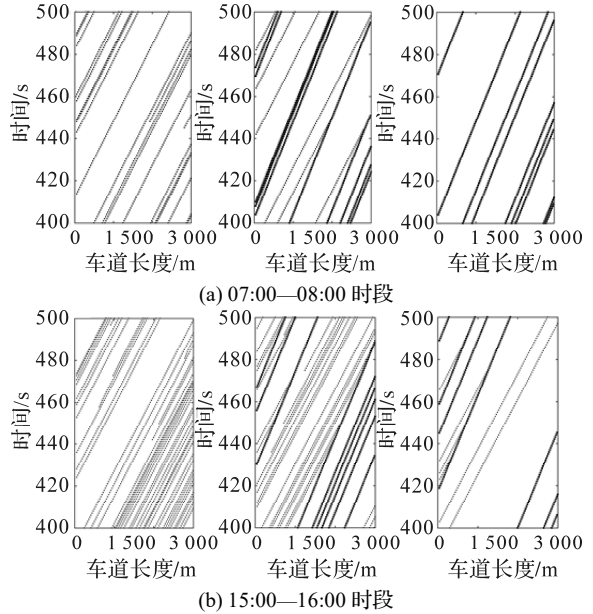


图4 杭州湾跨海大桥车辆的时空演化

图分别表示车道 1、车道 2 和车道 3 上的车辆运动轨迹. 其中, 大车轨迹线采用加粗的线条表示, 以区分线条较细的小车轨迹线.

从图 4(a)中可看到, 07:00—08:00 时段杭州湾跨海大桥 3 条车道上车辆均较少, 车道 1 和车道 3 上的车辆轨迹线都接近平行, 且前者比后者平缓, 原因是这一时段车道 1 至车道 3 上大巴比例分别为 0、0.59 和 1, 即车道 1 上全部是小车, 速度都接近限速值 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车道 3 上全部是大车, 速度介于 $70 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 所以轨迹线都几乎平行; 由于车道 1 上的车速高于车道 3 上的车速, 从而前者的轨迹线比后者平缓. 车道 2 小车与大车混合通行, 可以看到轨迹线有交叉现象, 小车轨迹线与大车轨迹线相交后不再延续, 表示小车受阻于大车后, 实施了换道.

从图 4(b)可发现, 15:00—16:00 时段 3 条车道上的轨迹线均比 07:00—08:00 时段增多, 表明 15:00—16:00 时段杭州湾跨海大桥上车流量增加, 这与表 2 中进车率的模拟结果一致. 07:00—08:00 时段车道 1 至车道 3 的进车率分别为 0.046、0.105 和 0.050, 而 15:00—16:00 时段 3 条车道的进车率分别为 0.060、0.315 和 0.077, 即 15:00—16:00 时段各条车道上车辆密度更大, 所以在图 4(b)中表现为轨迹线更密. 同时可看到, 15:00—16:00 时段车道 1 是单一小车通行, 车道 2 和车道 3 是大车小车混合通行, 与表 1 中的实测结果吻合, 即车道 1 至车道 3 的大车比例分别为 0、0.37 和 0.70. 从图 3 可发现, 车道 3 的流量最小, 车道 2 次之, 车道 1 流量最大, 即大巴比例越大, 车流量越小, 这是因为大巴本身速度低, 从而造成整条车道的通行能力降低. 因此, 大巴的存在会影响车道的通行能力, 大巴比例越大, 造成的影响越严重.

4 结语

利用杭州湾跨海大桥上的摄像设备获得道路交通流的实测资料, 通过统计分析, 得到了车流量、大巴比例等交通流参数, 进而利用元胞自动机交通流模型, 采用开放式边界条件. 借助熵权法识别各条车道各个时段的进车率, 考虑到小车和大车的不同运动性能, 采用不同的最大速度、加速度以及车身长度, 提出了杭州湾跨海大桥三车道交

通流模型. 模型区分激进型司机与谨慎型司机的不同驾驶特征, 制定各自的纵向前进规则和横向换道规则, 以期能够真实描述车辆的运动规律. 通过数值模拟, 得到了杭州湾跨海大桥 3 条车道的基本图(图 3), 与实测数据比较, 两者吻合较好, 表明提出的交通流模型可以模拟杭州湾跨海大桥上的实际交通流特征. 通过展示车辆的时空演化图, 从微观角度分析了杭州湾跨海大桥路面交通流所表现出来的宏观特征, 发现大巴的比例是影响道路通行能力的重要因素.

本文仅对正常通行情况下杭州湾跨海大桥的交通流特性进行了研究, 没有涉及由于道路维修、车辆故障而封道时的交通流数值模拟. 后续将在本研究成果的基础上, 通过建立各种道路封道情形时的交通流模型, 揭示杭州湾跨海大桥路段交通流的非线性特征, 以期为道路施工期间的交通管理和优化提供理论依据.

参考文献:

- [1] 吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 等. 国内典型大城市快速路交通流实测[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2011, 41(6):791-800.
- [2] Guo M M, Wu Z, Zhu H B. Empirical study of lane-changing behavior on three Chinese freeways[J]. PLoS One, 2018, 13(1):e0191466.
- [3] Kerner B S. Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks[J]. Physical Review E, 2002, 65:046138.
- [4] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de Physique I, 1992, 2(12):2221-2229.
- [5] 康瑞, 彭莉娟, 杨凯. 考虑驾驶方式改变的一维元胞自动机交通流模型[J]. 物理学报, 2009, 58(7):4514-4522.
- [6] Li X, Wu Q, Jiang R. Cellular automaton model considering the velocity effect of a car on the successive car[J]. Physical Review E, 2001, 64:066128.
- [7] 张柠溪, 祝会兵, 林亨, 等. 考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型[J]. 物理学报, 2015, 64(2):303-309.
- [8] Guzmán H A, Lárraga M E, Alvarez-Icaza L, et al. A cellular automata model for traffic flow based on kinetics theory, vehicles capabilities and driver reactions[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 491:528-548.
- [9] Chowdhury D, Wolf D E, Schreckenberg M. Particle

- hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1997, 235: 417-439.
- [10] Knospe W, Santen L, Schadschneider A, et al. A realistic two-lane traffic model for highway traffic[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 2002, 35(15): 3369-3388.
- [11] Zhu H B, Chen G Y, Lin H, et al. The impact of aggressive driving behaviors on multi-lane highway traffic flow[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2018, 29(7):1850056.
- [12] Fei L, Zhu H B, Han X L. Analysis of traffic congestion induced by the work zone[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 450:497-505.
- [13] Weng J X, Li G R, Yu Y. Time-dependent drivers' merging behavior model in work zone merging areas[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 80:409-422.
- [14] Yang L, Zheng J L, Cheng Y, et al. An asymmetric cellular automata model for heterogeneous traffic flow on freeways with a climbing lane[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2019, 535:122277.
- [15] 华雪东, 王伟, 王昊. 考虑自适应巡航车辆影响的上匝道系统混合交通流模型[J]. *物理学报*, 2016, 65(8): 223-235.
- [16] 阳丽, 孔令江, 刘慕仁. 城市主干道有公交停靠站的混合交通流模拟[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 26(1):15-18.
- [17] 康三军, 薛郁. 非港湾式公交车站站点设置的研究[J]. *力学学报*, 2012, 44(4):718-726.
- [18] 李庆定, 董力耘, 戴世强. 公交车停靠诱发交通瓶颈的元胞自动机模拟[J]. *物理学报*, 2009, 58(11):7584-7590.
- [19] 张继国, 辛格. 信息熵: 理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

Modeling and simulation of traffic flow on road section of Hangzhou Bay Bridge

ZHU Huibing¹, ZHANG Peng¹, CHEN Jian², YU Ying³, SHEN Xiang², ZHENG Zheyi¹,
YOU Zhekai¹, QIAN Fasheng¹, LI Qingsong¹

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Hangzhou Bay Bridge Development Co., Ltd., Ningbo 315001, China;

3.Ningbo Yonggang Tugboat Limited Company, Ningbo 315299, China)

Abstract: Based on the statistical analysis of the traffic flow data collected from Hangzhou Bay Bridge, a one-way three-lane cellular automata traffic flow model with open boundary is proposed, which takes into account the different moving performance of cars and trucks, and differentiates the driving characteristics of aggressive drivers from cautious drivers. The vehicles' throughput in the open boundary system is identified according to the real data of traffic flow collected at Hangzhou Bay Bridge in different timespans. Then the traffic flows are obtained after the numerical simulation with the traffic model. The results are in good agreement with those obtained from the real traffic data. It indicates that the proposed traffic model fits the real traffic situations on Hangzhou Bay Bridge. From the spatial-temporal profiles of the traffic flow, the macroscopic characteristics of the traffic flow are analyzed in the view of the microscopic perspective. And it is expected to provide the theoretical basis for the traffic optimization and management at the road section of Hangzhou Bay Bridge.

Key words: traffic flow model; cellular automata; Hangzhou Bay Bridge; real traffic data; open boundary

(责任编辑 史小丽)