

宏观交通流模型的能耗研究*

梁家源 滕维中 薛郁†

(广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

(2012年4月9日收到; 2012年8月8日收到修改稿)

本文在几种典型的宏观交通流模型的基础上, 导出能量耗散的计算公式, 宏观交通流模型能耗不同于元胞自动机交通模型, 其能耗不仅考虑车流速度减少, 而且还要计及通过路段的车流量引起的能耗. 通过对满足黎曼初始条件的道路能耗和道路交通瓶颈处能耗的计算和理论分析, 表明交通拥堵处, 能量耗散比较高, 而且能量耗散的变化也能反映交通拥堵产生及消散的情况.

关键词: 能量耗散, 交通流, 宏观交通流模型, 流体力学

PACS: 47.54.-r, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.62.024706

1 引言

当前, 社会经济正以一种高增长的态势向前发展着, 人民生活水平普遍提高, 车辆的人均保有量连年攀升, 而道路建设相对发展缓慢, 车多路少的局面将会一直持续着, 如何最大限度地挖掘出现有道路设施的通行能力, 及时制止交通堵塞的发生, 如何规划未来道路建设使交通达到最优化. 这是交通流理论所要解决的问题. 交通流理论是一门以实际观测为基础描述车辆交通运动规律的学科. 交通流呈现出许多非平衡、非线性特征例如: 交通相变、交通激波、同步流、交通滞后、“时停时走”现象等^[14]. 人们提出许多交通流模型来从理论上研究这些问题^[5]. 典型的交通流模型有微观的车辆跟驰模型和元胞自动机模型、介观的气体动力论、宏观的流体力学模型等^[6-17]. 宏观交通流模型是一种在空间、时间和状态变量上都是连续的模式. 它们从总体上把握车辆的整体行为, 具有算法简单、计算量小且速度快的优点. 利用它们可以快速预测出将要发生的交通状况并加以实时控制, 在实际的城市道路交通控制管理中得以广泛应用. 常见的宏观交通流流体力学模型有: LWR 模型、Payne

模型、Kühne 模型和各向异性交通流模型等^[13-21], 这些模型在基本上反映了实际交通特性.

当前城市化进程的加快, 交通车辆越来越多, 车辆消耗的能量越来越大, 排放的尾气导致环境污染越来越严重. 据国际能源机构 (IEA) 的统计数据显示, 2001 年全球 57% 的石油消耗在交通领域, 预计到 2020 年交通用油占全球石油总消耗的 62% 以上^[22]. 更有研究表明其中有超过 20% 的原油消耗和空气污染发生在交通堵塞和“时停时走”交通上^[12]. 2002 年, Nakayama 等首先提出了在外界小扰动条件下车流附加能耗的估算方法^[23], 时伟等分析了几种典型跟驰模型的稳定性与附加能耗的关系^[24], Zhang 等研究了元胞自动机确定性和非确定性 NaSch 模型能耗的问题, 研究表明延迟概率对能耗的影响较大^[25]. 田欢欢等考虑车长、最大速度和延迟概率的不同影响, 研究了元胞自动机混合交通流的能耗问题^[26]. 王涛等研究了跟驰模型的能耗问题^[27]. 但是, 采用微观模型要考虑每辆车的运动状态、环境制约等因素, 虽然能够给出精确的结果, 但是计算量大, 耗费时间长, 不便于实时监控道路交通状况, 而且迄今为止尚未有应用宏观交通流模型讨论能耗问题.

因此, 本文在几种宏观交通流模型的基础上,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11262003 和 11047003)、广西壮族自治区“十百千人才工程”专项基金 (批准号: 2005205)、香港城市大学战略研究基金 (批准号: 7002718 (CA)) 和广西壮族自治区研究生创新项目 (批准号: 105930903077) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yuxuegu@gxu.edu.cn

讨论能量耗散的计算公式, 并对两个经典交通流算例的能量耗散进行计算, 通过对能量耗散的分析、讨论在整体上了解交通能耗的状况以及与交通拥堵的关系以达到缓解交通拥堵、控制交通污染的目的.

2 能量耗散的定义

交通流中微观模型对能量耗散的定义是发生在车辆速度减小的时候, 也就是说在水平道路上行驶车辆的动能损失定义为能量耗散量. 设道路上 t 时刻第 i 辆车速度为 $v_i(t)$, 质量 m , 则动能为 $mv_i^2(t)/2$, 从 $t-1$ 到 t 这段时间内发生的能量耗散 $e_i(t)$ 为 [25,26]

$$e_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}[v_i^2(t-1) - v_i^2(t)], & v_i(t) < v_i(t-1) \\ 0, & v_i(t) \geq v_i(t-1). \end{cases} \quad (1)$$

在总时间 T_{total} 内道路上 N 辆车发生的平均能量耗散 Ed 为

$$Ed = \frac{1}{T_{\text{total}}} \frac{1}{N} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \sum_{i=1}^N e_i(t), \quad (2)$$

其中 t_0 表示车辆速度变化所需的弛豫时间.

而郎道对不可压缩流体能量耗散进行了讨论, 用流体动能的变化率来反映能量耗散, 得出流体的能量耗散是由于流体的黏性所造成的, 流体动能的变化率为 [28]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) = -\text{div} \left[\rho v \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} \right) - v \cdot \sigma' \right] - \sigma'_{ik} \frac{\partial v_i}{\partial x_k}, \quad (3)$$

其中方程右边第一项表示体积为 V 的流体中由于能量通量通过流体体积 V 界面时引起的流体动能变化, 第二项表示由于流体黏性引起的单位时间内流体动能的减少, 即能量耗散. 再对整个空间积分, 便得出了单位时间的流体的能量耗散 [1]. 但是, 在宏观道路交通中, 多车辆沿道路向前行驶, 在较大尺度上呈现车流的流动, 应用流体力学理论来描述这样的一维运动的流体, 具有可压缩性, 由于从宏观来描述交通流, 交通流的能量耗散显然不同于微观模型. 因此, 根据宏观交通流的特性, 将能量耗散定义为动能的减少或动能损失, 基于几种典型的宏观流体力学模型, 导出能量耗散的计算公式.

3 宏观交通流模型

宏观交通流模型把整条道路上的全部车辆视作可压缩的连续流体来考虑, 从宏观上研究道路上的车辆的行驶状况, 常用到的物理量有: 车辆密度 ρ , 车辆平均速度 u 和流量 q 等.

1955 年 Lighthill 和 Whitham 发表了交通流理论中具有里程碑意义的论文 [13]. 不久 Richards 也独立地提出了相类似的理论 [14]. 他们把流体力学中的连续性方程应用到交通流中, 保证了道路中的车辆数守恒, 并假定道路中车辆流动始终处于一种运动平衡状态. 当描述的道路中没有上下匝道使道路车流量流进流出时, 车辆密度 ρ 随时间 t 的变化和流量 q 随道路位置 x 的变化可用如下连续性方程来描述:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

结合如下的平衡速度 - 密度关系 $U_e(\rho)$:

$$u(\rho(x, t)) = U_e(\rho(x, t)), \quad (5)$$

便构成了著名的 LWR 模型. 它成功描述了交通密度波及激波的形成和消散, 由于 LWR 模型假设了平衡的速度与密度关系 $U_e(\rho)$, 因此, 无法精确地描述非平衡的交通过程. 此后, 许多专家学者用动力学方程取代 LWR 模型中的平衡速度 - 密度关系 $U_e(\rho)$, 得出几种不同的交通流动力学方程.

Payne 等在 Pipes 给出的交通流加速度方程的基础上 [15], 考虑到车流速度的改变有一个弛豫过程以及驾驶员行驶时对前方交通状况的反应, 提出如下动量方程 [16]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T} - \frac{v}{\rho T} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (6)$$

其中, v 为期望指数, T 为弛豫时间. 应用 Payne 模型可以分析交通流的失稳引起的时停时走现象. 该模型广泛应用于上世纪七八十年代, 著名的交通 FREFLO 程序就是将 Payne 模型离散化后编制而成的.

Kühue 考虑交通中车流黏性的影响提出动量方程如下 [17]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_e - u}{T} - c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (7)$$

其中, γ 为黏滞系数, c_0 为与车辆跟驰有关的等效音速, 其计算公式为: $c_0^2 = v/(\rho T)$. 应用 Kühue 模型, 可分析非常拥挤状态下的交通状况.

冯苏苇考虑车道数变化时对交通的影响, 提出如下动力学方程 (简称 FD 模型)^[18]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \varphi_e \frac{u_c - u}{T} - \frac{v}{\rho T} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \varphi_A \frac{\rho}{\rho_{cr} A_{ahead}} u^2, \quad (8)$$

其中, φ_A 为车道缩减因子, 其计算公式为

$$\varphi_A = \begin{cases} 1 - \frac{A_{ahead}}{A}, & (A_{ahead} < A), \\ 0, & (A_{ahead} > A), \end{cases}$$

式中, A 为当前道路宽度, A_{ahead} 为前方道路宽度, φ_e 为弛豫系数, ρ_{cr} 为单车道中车辆的临界密度. FD 模型能较好地反映交通瓶颈处的交通演化和“孤立波”的传播过程.

Zhang 考虑驾驶员行驶时更多地只关注前方车辆的运动状况和反应, 极少受后方车辆的影响, 得出了如下的各向异性的动力学方程^[19](简称 Zhang 模型)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_c - u}{T} - \rho \frac{du_c}{d\rho} \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (9)$$

Jiang 等对 Payne 模型进行改进, 用速度梯度代替 (6) 式中的密度梯度得出如下的各向异性动力学方程^[20]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_c - u}{T} + c_0 \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (10)$$

Xue 等考虑驾驶员根据前方交通情况作出反应时间 t_r 不同于车辆达到平衡状态的弛豫时间 $T(\rho)$, 通过平衡速 - 密关系 $U_c(\rho)$, 提出如下的各向异性动力学方程^[21], 该模型简称 XD 模型,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_c - u}{T(\rho)} - \rho \frac{t_r}{T(\rho)} \frac{du_c}{d\rho} \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (11)$$

这些各向异性的交通流模型, 能更真实地反映交通流的各种特征, 而且不存在类气体现象和车流特征速度大于车速的现象, 克服了许多高阶连续性模型中车辆后退以及车辆受到后车影响的问题, 能反映出实际交通流特征. 基于这几种典型宏观交通流模型的特点, 基于 Payne 模型、Kühue 模型、FD 模型、Zhang 模型和 XD 模型, 导出这些宏观交通流模型的能量耗散. 这几种宏观交通流模型的动能变化率分别为

Payne 模型

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = \rho u \frac{u_c - u}{T} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho u u^2 + \rho u \frac{v}{T} \right) + \rho \frac{v}{T} \frac{\partial}{\partial x} u; \quad (12)$$

Kühue 模型

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = \rho u \frac{u_c - u}{T} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho u u^2 + \rho u \frac{v}{T} - \rho u \gamma \frac{\partial}{\partial x} u \right) + \left[\rho \frac{v}{T} - \gamma \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) \right] \frac{\partial}{\partial x} u; \quad (13)$$

FD 模型

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = \left(\varphi_e \rho u \frac{u_c - u}{T} - \varphi_A \frac{\rho^2}{\rho_{cr} A_{ahead} u^3} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho u u^2 + \rho u \frac{v}{T} \right) + \rho \frac{v}{T} \frac{\partial}{\partial x} u; \quad (14)$$

Zhang 模型

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = \rho u \frac{u_c - u}{T} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho u u^2 \right) - \rho^2 u \frac{du_c}{d\rho} \frac{\partial u}{\partial x}; \quad (15)$$

XD 模型

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = \rho u \frac{u_c - u}{T(\rho)} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho u u^2 \right) - \rho^2 u \frac{t_r}{T(\rho)} \frac{du_c}{d\rho} \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (16)$$

上述公式右边有三项, 第一项是驾驶员对前方拥堵或畅通的交通状况作出反应期望车流达到平衡流动的弛豫能量通量, 当该项减少时, 车流的能量被耗散; 第二项是流体能量通量沿道路的梯度项, 车流进出这一段路的能量变化; 第三项由车流速度沿道路的变化所引起的能量改变. 在宏观交通流模型中, 车流动能的减少即为能量耗散. 因此, 当在 (12)—(16) 各式中, 第一、二、三项减少时, 即可计入能量耗散量, 否则, 不计入. 从上述分析可以看出 Kühue 模型不同于 Payne 模型, 多出交通黏性项, 而 Zhang 模型与 XD 模型的能耗公式相同.

4 算例及其能量耗散分析

4.1 交通拥堵与消散的能量耗散

本文首先研究在堵塞和稀疏状态下交通流的能量耗散, 这样的状态对应于两个黎曼初始条件:

$$\rho_1 = 0.04 \text{ veh/m}, \quad \rho_2 = 0.18 \text{ veh/m}, \quad (17a)$$

$$\rho_1 = 0.18 \text{ veh/m}, \quad \rho_2 = 0.04 \text{ veh/m}, \quad (17b)$$

其中, ρ_1 为上游车辆密度, ρ_2 为下游车辆密度. (17a) 式表示交通流从畅行到拥堵, 交通密度波呈现激波传播. (17b) 式表示当拥堵交通流的消散过程, 交通密度波以稀疏波传播. 与黎曼初始条件对应的速度初始条件分别为

$$u_1 = u_c(\rho_1), \quad (18a)$$

$$u_2 = u_c(\rho_2). \quad (18b)$$

边界条件为自由边界条件, 即道路两端交通流的密度梯度 $\partial\rho/\partial x$ 和速度梯度 $\partial u/\partial x$ 为 0. 采用文献 [29] 的速度 - 密度平衡关系:

$$u_c = u_f \left[1 - \exp \left(1 - \exp \left(\frac{c_j}{u_f} \left(\frac{\rho_j}{\rho} - 1 \right) \right) \right) \right], \quad (19)$$

其中 u_f 为畅行速度, ρ_j 道路阻塞时的车辆密度, c_j 为阻塞状态下密度波的传播速度. 高速公路道路全长 20 km, 将其分成 100 个等长单元, 每一时步 Δt 为 1 s, 使用如下其他参数值: $u_f = 30$ m/s, $\rho_j = 0.2$ veh/m, $c_j = 6.0$ m/s, $t_r = 0.75$ s, $T_o = 7$ s, $\rho_m = 0.168$ veh/m. 采用迎风格式进行计算 [21], Payne 模型、Kühue 模型、Zhang 模型、XD 模型在两个黎曼初始条件下总能量耗散随时间变化分别如图 1(a) 和 (b) 所示. 图 2(a) 和 (b) 是 XD 模型对应于道路各单元的能量耗散随时间的分布. 图 2(a) 反映了交通阻塞中激波的形成过程中能量的耗散, 图 2(b) 则反映了稀疏波的形成过程中能量的耗散, 其他模型也有类似的能量耗散随时间的变化图.

从图 1(a) 可以看出, 交通流从畅行到拥堵, 初始时能量耗散非常大, 其中通过 Zhang 模型计算出来的能耗最大, 次之是 Kühue 模型和 XD 模型, 最小是 Payne 模型, 其中 Zhang 模型和 XD 模型是各向异性交通流模型, 考虑了车流的速度梯度, 速度的减少引起能耗的产生. 而 Kühue 模型考虑车流的黏性, 其能耗比 Payne 模型的要大, 而且在 $t \approx 30$ min 前, Payne 模型、Zhang 模型和 XD 模型很快就下降到最小值, Kühue 模型由于黏性的作用在 $t \approx 30$ min 后才下降到最小值. 由于开始时上游交通是畅通的, 下游交通是阻塞的, 上游畅行的车流遇到下游阻塞态时, 上游车辆陆陆续续减速, 导致能量耗散持续在一个高数值. 当道路全部处于完全阻塞状态时, 所有车辆都几乎停止行驶时, 能量耗散下降为零. 其对应的各单元密度随时间变化的分布图如图 3(a) 所示.

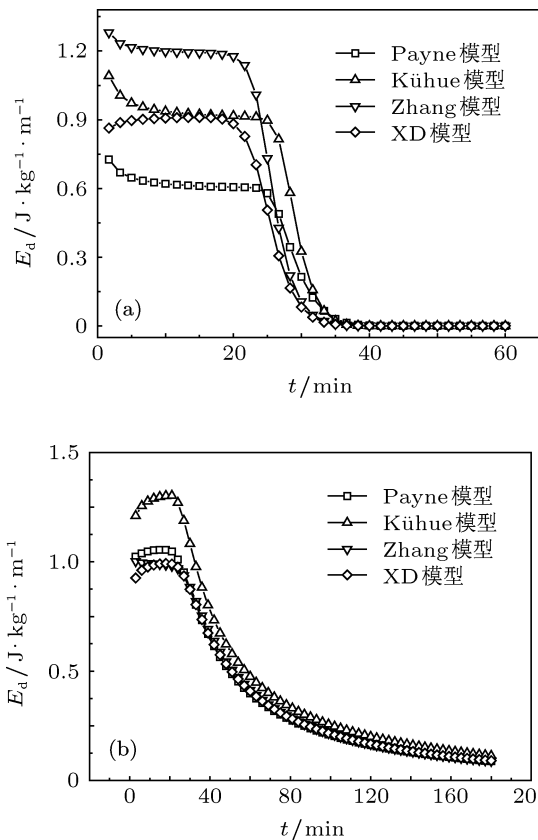


图 1 (a) 交通从畅行到拥堵的能耗; (b) 交通从拥堵到畅行的能耗

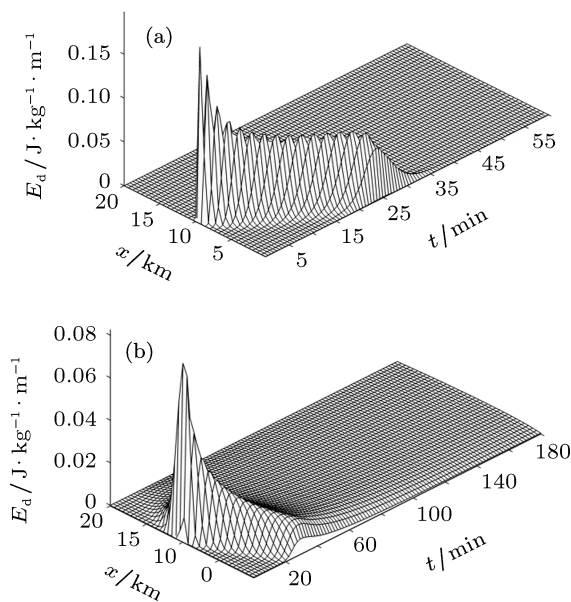


图 2 (a) 畅行到拥堵各单元能耗随时间变化分布图; (b) 拥堵到畅行各单元能耗随时间变化分布图

相反地, 在交通流拥堵的消散过程中, 从图 1(b) 可以看出, 交通流初始具有较大的能量耗散, 在这

几个模型中由于车流的黏性效应使得 Kühue 模型的能耗最大, 其次是 Payne 模型, 而 Zhang 模型和 XD 模型是各向异性交通流模型, 由于拥堵消散, 车流速度是在增加. 但单元的车辆减少使得车流能量通量减少而产生能耗, 在 $t \approx 30 \text{ min}$ 后这几个模型的能耗逐渐减小, 随着时间的推移, 这几个模型的能耗逐渐重合. 这是由于开始时上游交通是阻塞的, 下游交通是畅通的, 上游车辆可以加速离开阻塞区. 对比元胞自动机模型, 这种情况下是没有能量耗散的, 因为元胞自动机模型中, 能量耗散考虑单个车辆. 但是, 对于宏观交通流模型, 在道路每一个单元, 可以容纳多车辆, 由于车辆密度减小引起能量通量减少, 就呈现一定的能量耗散. 图 2(b) 明显看到开始道路中间单元的能量耗散较大, 然后逐渐向后并两边扩散传递, 并缓慢减小. 因此, 只要上游的阻塞车辆没有完全消散, 能量耗散会一直持续着. 由于采用开放边界条件, 上游拥堵的车辆相继消散的过程中, 还会有高密度车辆从道路入口进入, 但是高密度的车辆速度小于前面消散的车辆速度, 上游拥堵车辆很快消散, 进入道路入口的车辆密度随着入口处车辆消散而迅速减小, 这样道路中就会存在着一个密度梯度, 从上游到下游车辆密度逐渐减小. 因此, 由密度引起能量通量减小的能耗随一开始车辆密度梯度较大而迅速减小, 随着时间的推移, 道路中车辆密度越来越小, 而密度梯度随着减小, 在图 2(b) 中可以看到整条道路的能量耗散逐渐趋于零, 相应的各单元密度如图 3(b) 所示. 能耗公式 (16) 右边三项对应图 4(a) 和 (b) 所示, 从图可以看出在两个黎曼初始条件 (17a) 和 (17b) 下, 从畅通到拥堵和拥堵到畅通时, 能耗公式 (16) 右边三项是不同的. 从畅通到拥堵进入道路各单元的能量通量减少没有引起能耗, 而第一项弛豫能流项和第三项速度梯度引起的能流项, 在 $t \approx 30 \text{ min}$ 时由于速度减小引起能量耗散. 相反地, 从堵塞到畅通时由于开始时上游交通是拥堵的, 下游交通是畅通的, 上游由于拥堵的车辆逐渐加速行驶, 流出单元的能量比流入的大很多, 导致第二项能耗一开始就很大, 在 $t \approx 30 \text{ min}$ 时逐渐减少. 弛豫能流项和进出道路各单元的能量通量增加, 在 $t \approx 30 \text{ min}$ 后逐渐减少, 而车流速度增加, 速度梯度造成的能耗为零.

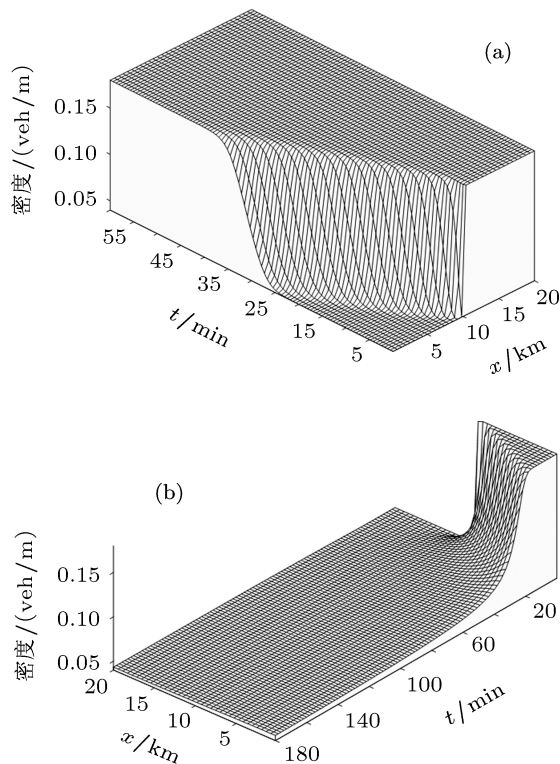


图 3 (a) 拥堵到畅行各单元密度随时间变化分布图; (b) 畅行到拥堵各单元密度随时间变化分布图

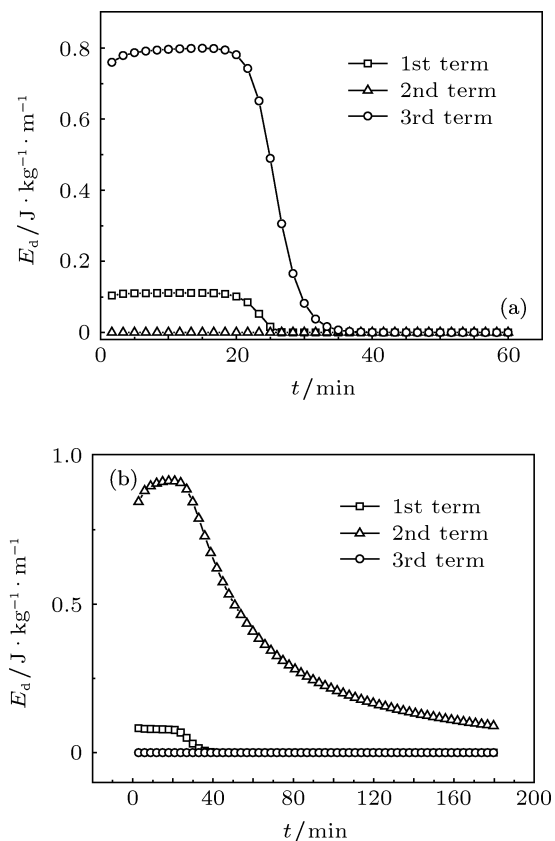


图 4 (a) 畅行到拥堵 (16) 式各项随时间变化图; (b) 拥堵到畅行 (16) 式各项随时间变化图

4.2 道路交通瓶颈的能量耗散

文章采用 Babcock 等在 1984 年在一条高速公路的实测做算例, 由于实测数据是英制单位, 本文将其转换为国际单位. 高速公路全长 1609.34 m, 上半部分是 3 车道, 下半部分是 2 车道. 如图 5 所示^[30].

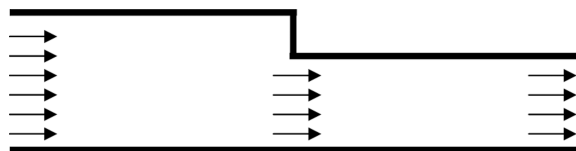


图 5 道路中间存在瓶颈示意图

初始时, 道路密度和车辆速度分别为

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 0.0168 \text{ veh/m/ln}, \\ \rho_2 &= 0.0311 \text{ veh/m/ln}, \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= 24.58 \text{ m/s}, \\ u_2 &= 17.88 \text{ m/s}, \end{aligned} \quad (20b)$$

道路交通中的平衡速度 - 密度关系为

$$u_e(\rho) = -137866\rho^3 + 24893\rho^2 - 1662\rho + 48. \quad (21)$$

采用自由边界条件. 将整条道路分成 10 个单元, 每个单元长 160.934 m, 每个时步 Δt 为 1 s, 过程持续 60 min. 本文将采用考虑道路横截面积变化的 FD 模型, 将演化方程用具有更高稳定性的交错网格格式离散. 其他使用到的参数如下所示:

$$T = 0.75 \text{ s}, c_0^2 = 239.8(\text{m/s})^2.$$

图 6 和图 7 分别是道路各单元能耗随时间变化和道路各单元在 1 min, 3 min, 5 min, 7 min, 10 min 和 30 min 的能耗. 从图可以看出, 在瓶颈处能耗非常大, 并一直持续着不消散. 上下游各单元开始的时候存在能耗, 后来减少为零. 从图 8 可以看出, 道路的上游, 一开始能量耗散非常大, 几乎占整条路能量耗散的全部. 而下游的能量耗散为零. 随着时步演化到十分钟的时候, 上游的能量耗散迅速减小到某一数值, 下游能量耗散快速增大到最大值后又迅速减小到某一数值, 然后缓慢减小. 这是由于一开始, 上游畅行的车辆在道路中段遇到道路突然由 3 车道变成 2 车道及前方的下游拥挤缓慢前进的车辆, 上游车辆被迫迅速减速以缓慢前进通过瓶颈, 导致产生很大能耗. 而上游车辆的减速行驶致使后

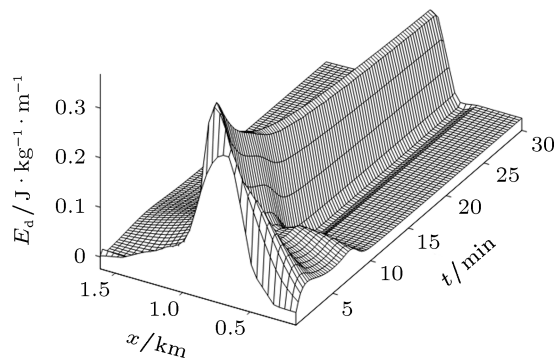


图 6 道路各单元能耗随时间变化图

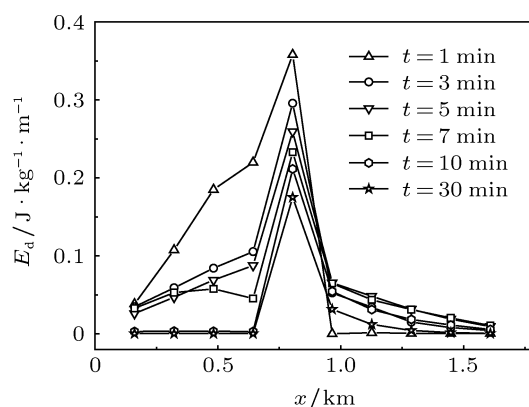


图 7 道路各单元某几个时刻的能耗截图

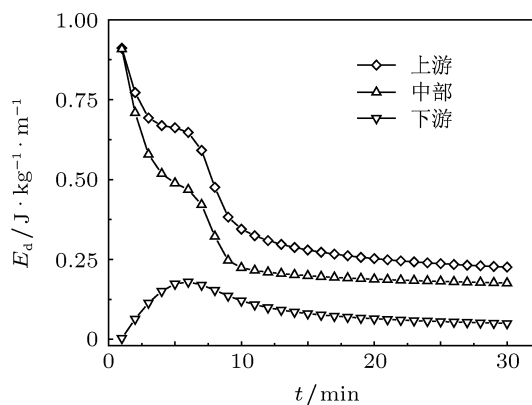


图 8 整段路、上游和下游的总能耗随时间变化图

方车辆为避免撞到前方车辆也会快速减速. 这时车辆减速及速度梯度很大且为负引起上游的能量耗散很大并且会持续一段时间. 当上游车辆全部减速, 上游道路全部处于完全拥堵状态时, 能量耗散快速下降为零. 在瓶颈处, 当上游车辆在瓶颈出口处通过道路中部瓶颈进入下游时, 前方车辆速度较快并

且已前行了一段距离,上游车辆的近前方车辆密度小,上游车辆会加速至最大行驶.瓶颈上游拥堵车辆速度较小,导致流出单元的能量比流入的大,导致能耗很大.随着上游车辆不断进入下游,下游密度在增加,由瓶颈进入下游的车辆速度也在减小,瓶颈上游单元的能耗也在不断减小.

5 结论

本文依据车流动能的减少为车流能量耗散,对

几种典型的宏观交通流模型,导出能量耗散的计算公式,宏观交通流模型能耗不同于元胞自动机交通模型,其能耗不仅考虑车流速度减少,而且还要计及通过路段的车流量引起的能耗.通过对满足黎曼初始条件的道路能耗和道路交通瓶颈处能耗的计算和讨论分析,表明交通拥堵拥堵处,能量耗散比较高,与实际交通能耗的情况一致,而且能量耗散的变化也能反映交通拥堵产生及消散的情况.

- [1] Helbing D, Hennecke A, Treiber M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 4360
- [2] Helbing D, Hennecke A, Shvetsov V, Treiber M 2001 *Transp. Res. B* **35** 180
- [3] Kerner B S, Konhäuser P 1997 *Phys. Rev. Lett.* **49** 4030
- [4] Kerner B S, Rehborn H 1996 *Phys. Rev. E* **53** R4275
- [5] Chowdhury D, Santen L, Schreckenberg A 2000 *Phys. Rept.* **329** 199
- [6] Biham O, Middleton A, Levine D 1992 *Phys. Rev. A* **46** R6124
- [7] Fukui M, Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Jpn.* **65** 1868
- [8] Wang B H, Kuang Y Q, Xu B M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 906 (in Chinese) [汪秉宏, 邝乐琪, 许伯铭 1998 物理学报 **47** 906]
- [9] Xue Y, Dong L Y, Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese) [薛郁, 董力耘 2001 物理学报 **50** 445]
- [10] Maerivoet S, De Moor B 2005 *Phys. Rep.* **419** 1
- [11] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221
- [12] Helbing D 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3735
- [13] Lighthill M J, Whitham G B 1955 *Proc. Roy. Soc. Ser. A* **22** 317
- [14] Richards P I 1956 *Oper. Res.* **4** 42
- [15] Pipes L A 1969 *Transp. Res.* **3** 229
- [16] Payne H J 1971 *Math. Meth. of Pub. Sys.* **1** p51
- [17] Kühne R D 1984 *Proc 9th Int on Trans and Traff. Theor.* Delft, Netherlands, July 11–13, 1984 p21
- [18] Feng S W 1998 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai University) (in Chinese) [冯苏苇 1998 博士学位论文 (上海: 上海大学)]
- [19] Zhang H M 1998 *Transp. Res. B* **32** 485
- [20] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2002 *Transp. Res. B* **36** 405
- [21] Xue Y, Dai S Q 2003 *Phys. Rev. E* **68** 066123
- [22] Ou Yang M G 2006 *Sci. & Tech. Industry of China* **2** 8 (in Chinese) [欧阳明高 2006 中国科技产业 **2** 8]
- [23] Nakayama Y, Sugiyama Y, Hasebe K 2002 *Phys. Rev. E* **65** 016112
- [24] Shi W, Xue Y 2007 *Physica A* **381** 399
- [25] Zhang W, Yang X Q 2008 *Physica A* **387** 4657
- [26] Tian H H, Xue Y, Kang S J, Liang Y J. 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4506 (in Chinese) [田欢欢, 薛郁, 康三军, 梁玉娟 2009 物理学报 **58** 4506]
- [27] Wang T, Gao Z Y, Zhao X M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 634 (in Chinese) [王涛, 高自友, 赵小梅 2006 物理学报 **55** 634]
- [28] Landau L D, Lifshitz E M 1987 *Fluid Mechanics* (2th Ed.) (Oxford: Pergamon Press) p50
- [29] Del Castillo J M, Bentez F G 1995 *Transp. Res. B* **29** 373
- [30] Babcock P S, Auslander D M, Tomizuka M, May A D 1984 *Transp. Res. Rec.* **971** 80

Study on the energy dissipation of macroscopic traffic models*

Liang Jia-Yuan Ten Wei-Zhong Xue Yu[†]

1) (*Institute of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 53004, China*)

(Received 9 April 2012; revised manuscript received 8 August 2012)

Abstract

In this paper, the energy dissipation formulas of the several typical macroscopic continuum models of traffic flow are derived according to the loss of the kinetic energy of traffic flow on road. The calculation of energy dissipation via two traffic cases: two Riemann initial conditions and the traffic bottleneck on the road indicates the energy dissipation of macroscopic traffic mode is influenced by not only the velocity reduction of the vehicle, but also the velocity gradient of the vehicle and the traffic density along the road, which is different from the result obtained from the CA model.

Keywords: energy dissipation, traffic flow, macroscopic traffic model, fluid mechanics

PACS: 45.70.Vn, 89.40, 47.85.ld

DOI: 10.7498/aps.62.024706

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11262003 and 11047003), the Special Foundation for the New Century Talents Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Grant No. 2005205), CityU Strategic Research Grant (SRG) of HK (PROJECT NO.: 7002718 (CA)), and the Graduate Student Innovative Foundation of Guangxi Zhuang Autonomous Region (No. 105930903077).

[†] Corresponding author. E-mail: yuxuegxu@gxu.edu.cn