

文章编号:1671-1637(2015)01-0092-08

最小安全间距约束下拥挤交通流速度-密度关系模型

邵春福¹,肖崇紫²,王博彬¹,孟 梦³

(1. 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; 2. 广州市城市规划勘测设计研究院,广东 广州 510060; 3. 南洋理工大学 土木与环境工程学院,新加坡 639798)

摘要:根据交通拥挤状态下交通流速度与密度一致性变化的特点,分析了拥挤交通流的平均车间时距为定值的原因,并结合最小安全间距约束提出了交通拥挤状态下的速度-密度关系模型。研究了驾驶人的平均反应时间和交通拥挤状态下的最小车间时距的关系,对速度-密度关系模型的反应时间进行参数标定。分析了不同车辆长度、阻塞停车间距和反应时间下的速度-密度关系,利用提出的速度-密度关系模型、Greenshields模型、Greenberg模型、Underwood模型、Northwest模型、Edie模型对美国US-101、I-80两条高速公路的交通数据进行拟合,得到了拟合结果和绝对误差。分析结果表明:提出的速度-密度关系模型能够从理论上解释交通拥挤状态下速度与密度的变化关系和速度-密度数据的离散现象;和其他模型相比,提出的速度-密度关系模型在拟合2条高速公路交通数据时的绝对误差最小,分别为4.91、7.50 veh·km⁻¹。基于最小安全间距约束的速度-密度模型刻画了拥挤交通流的本质特征,且对现实数据能够取得更好的拟合效果。

关键词:交通规划;交通流;速度-密度曲线;拥挤状态;反应时间;最小安全间距

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Speed-density relation model of congested traffic flow under minimum safety distance constraint

SHAO Chun-fu¹, XIAO Chong-zi², WANG Bo-bin¹, MENG Meng³

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, Guangdong, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: Based on the conforming change characteristic of speed and density for traffic flow under traffic congestion state, the reason that the average headway-distance of congested traffic flow was a fixed value was analyzed, and the speed-density relation model under traffic congestion state was put out combined with minimum safety distance constraint. The relation between the average reaction time of driver and the minimum headway-distance under traffic congestion state was discussed, and the parameter calibration of reaction time for speed-density relation model was carried out. The speed-density relations with different vehicle lengths, blocking parking distances and reaction times were analyzed, the traffic data of US-101 Highway and I-80 Highway in America were fitted by using the proposed speed-density relation model, Greenshields model, Greenberg model, Underwood model, Northwest model and Edie model respectively, and the

收稿日期:2014-10-11

基金项目:国家973计划项目(2012CB725403);国家自然科学基金项目(71210001,51178032);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015YJS087)

作者简介:邵春福(1957-),男,河北沧州人,北京交通大学教授,工学博士,从事道路交通运输规划研究。

fitting results and absolute errors were obtained. Analysis result shows that by using the proposed speed-density relation model, the change relation of speed and density under traffic congestion state can be explained in theory, and the discrete phenomena of speed-density data can be described. Compared with the other models, the absolute errors of fitting results for US-101 Highway and I-80 Highway are minimum by using the proposed speed-density relation model, and are 4.91, 7.50 veh · km⁻¹ respectively. So the proposed speed-density relation model based on minimum safety distance constrain reveals the substantive characteristic of congested traffic flow, and the fitting effect on actual data is better. 1 tab, 12 figs, 24 refs.

Key words: traffic planning; traffic flow; speed-density curve; congested condition; reaction time; minimum safety distance

Author resume: SHAO Chun-fu(1957-), male, professor, PhD, +86-10-51688344, cfshao@bjtu.edu.cn.

0 引言

关于交通流模型的研究大致集中在宏观模型、微观模型和其他交通流模型^[1-2],在宏观模型研究过程中,阻塞流得到了更多的关注^[3-4]。研究者往往将车流看作是类似于管束中流动的流体,并认为它们具有一些相似的性质。流量、速度和密度是车流最基本的 3 个参数,根据空间平均速度和密集度的定义,得出了类似于流体守恒定律的交通流守恒关系,即流量等于速度和密集度的乘积。车流作为一种非严格意义上的流体,具有和其他流体相异的性质,且具有不同的速度-流量-密度基本关系。在 LWR 模型中,使用流量-密度的一维数值关系确定道路的服务水平^[5-6],一个物理意义明确、鲁棒性强的速度-流量-密度模型无论是对交通流理论分析还是交通工程实践均具有重要意义。

研究者对于速度-密度模型的不断追求主要基于两点:简明的数学形式和较高的统计精度。因而一个好的模型应当具有简明的数学表达式、意义明确的物理参数、严谨的理论推导、对于实际数据的高拟合精度和较强的鲁棒性。虽然目前已经有多种类型的速度-密度模型,但是大都难以同时具备上述 4 个条件,因此,有必要从理论推导和数学统计两方面入手进行研究。

自 Greenshields 单段式速度-密度线性模型面世以来^[7],已经有大量的研究者对其进行改进研究,使得速度-密度模型得到进一步的完善和丰富。其中比较有代表性的速度-密度模型包括: Greenberg 模型、Underwood 模型、Northwest 模型、Drew 模型、Pipes-Munjaj 模型、Newell 模型、改进的 Greenshields 模型、Del Castillo 模型、Van Aerde 模型、

MacNicholas 模型和逻辑模型等^[8-16]。

Greenshields 等建立了首个速度-密度统计模型^[7],虽然具有里程碑意义,但在自由流状态下存在速度随密度的增加而明显减小这种不合理现象; Greenberg 通过微观交通流模型推导出了速度-密度模型^[8],但是该模型却拥有无穷大的自由流车速; Wang 等提出的逻辑模型具备并不复杂的数学表达式和较强的鲁棒性^[16],但是缺乏严格的理论推导依据,只是对速度-密度关系进行了一种简单数学模型套用; Van Aerde 等利用车头时距模型推导出了速度-密度模型,其数学形式简单,鲁棒性很强^[17],但模型标定比较复杂,本质上是一种统计模型; Edie 等鉴于单段式速度-密度线性模型拟合效果不理想的问题,分别使用 Underwood 模型和 Greenberg 模型建立了多段式速度-密度模型^[18-19]。

速度-密度关系模型都是使用特定条件下的数据来验证和推导的,并不具备一般性,因此,在使用不同的数据来验证相应模型的时候,往往不能取得模型提出者所给出的拟合精度,这也进一步说明了模型缺乏一般性和通用的理论推导基础。另外,很多研究者只是通过数据散点来观察参数的变化趋势,从而给出具有相近变化趋势的模型,这些模型虽然能够得出不错的拟合效果,但其本质均为对现象的描述,难以解释速度-密度关系的变化趋势。

1 速度-密度关系模型推导

速度-密度关系模型可由速度-流量模型推导得出,而速度-流量模型在自由流状态下具有很大的差异性。实测数据表明,虽然自由流状态下的速度可以是缓慢减小的^[20](图 1),也可以是显著减小的^[21](图 2),还可以是固定不变的^[17](图 3),但是拥挤状

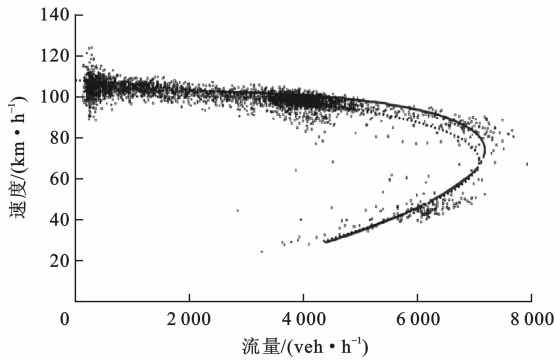


图 1 自由流速度缓慢减小的速度-流量数据
Fig. 1 Speed-flow data when speed of free flow slowly decreases

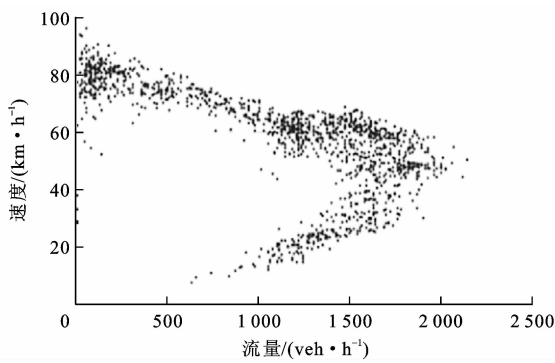


图 2 自由流速度显著减小的速度-流量数据
Fig. 2 Speed-flow data when speed of free flow significantly decreases

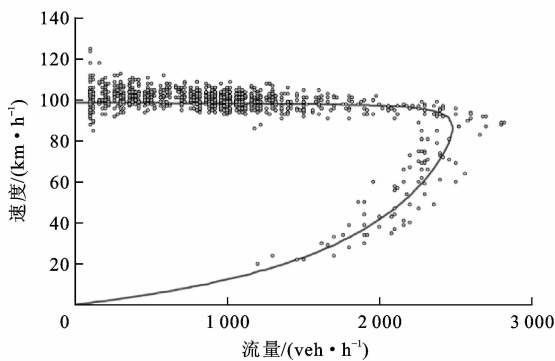


图 3 自由流速度不变的速度-流量数据
Fig. 3 Speed-flow data with constant speed of free flow

态下的速度-流量却表现出了比较一致的变化关系。在拥挤状态下,速度是随着流量的增加而增大的(某个流量区间内),这种变化关系会随流量的增加而变得愈加明显。

车流在自由流状态下受外界干扰比较小,密度相对较低,车辆能够根据驾驶人的意愿行驶,在行驶的过程中外界干扰因素起到较小作用或者不起作用。此时,车辆的构成比例、道路的几何形状、驾驶人自身特点等都会影响到速度-流量分支的几何形状。一旦进入了拥挤状态,车辆在绝大多数时间会

处于严格的跟驰状态,车辆的自由性将会丧失。图 1~3 反映了速度-流量在拥挤状态下具有较为一致的状态,因此,速度-密度在拥挤状态也应该具备较为一致的状态。拥挤状态下的车流具有恒定的平均车间时距(跟随车辆车头和被跟随车辆车尾之间的时间间隔),车间时距是反映驾驶人对被跟随车辆减速行为做出反应的体现^[22]。为了使车辆保持安全的运行状态,车间时距 t_g 应大于等于驾驶人的反应时间 t_r ,即

$$t_g \geq t_r \quad (1)$$

在极端情况下,被跟随车辆突然以最大减速度减速,为了不发生碰撞,此时的最小车间时距和驾驶人的反应时间应该相等。在拥挤状态下,由于实际车速要小于期望车速,因此,车辆往往会选择紧跟被跟随车辆来寻找提高车速的机会,但驾驶人又必须保证车辆运行的安全性,车间时距应当无限接近反应时间。

图 4 为两车在拥挤状态下的时空轨迹,横坐标表示时间 t ,纵坐标表示空间位置 x ,如点 A 的坐标表示为 (t_A, x_A) , $A, A_1, A'_1, A''_1, B, B_1, C, C', C'', C_1, D, D_1$ 均为车头或者车尾轨迹及其延伸线上的时间(空间)点。假设前后相邻两车稳定运行,运行速度为 v_b ,之后被跟随车辆在某一时刻突然减速至 v_a 并保持该速度运行,跟随车辆的速度也应变换至 v_a 并一直保持该速度运行。相邻车辆之间的车间时距在变化前和变化后分别为 t_{gb} 和 t_{ga} ,由文献[22]可知 $t_{gb} = t_{ga}$ 。曲线 A_1B_1 表示跟随车辆减速的车头时空轨迹,曲线 CD 表示被跟随车辆减速的车尾时空轨迹,由于车辆处于减速状态,故前后两车在点 C 和 A_1 后的速度均要小于 v_b 。在理想状态下,车辆性能应该是一样的,第 1 辆车辆的减速动作在车流中不断向后传播,那么所有跟随车辆的减速轨迹曲线(例如 CD)应该是一样的,因而,所有跟随车辆之间的车头时距在任意时刻均相等。

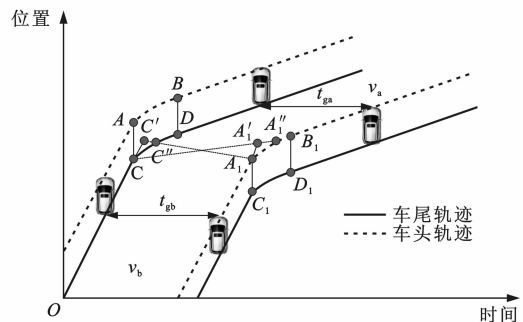


图 4 时空轨迹
Fig. 4 Temporal-spatial trajectories

假设 $x_{A_1} > x_C$, 则必然存在一点 $C'(t_{C'}, x_{A_1})$, 且该点位于被跟随车辆减速前的车尾轨迹延长线上, 使得 $t_{A_1} - t_{C'} = t_{gb}$, 由图 4 可知, 线段 A_1C' 与开始减速后的被跟随车辆车尾轨迹线必然存在 1 个交点, 设为点 $C''(t_{C''}, x_{A_1})$, 显然 $t_{C''} > t_{C'}$, 且车间时距又可表示为 $t_{gb} = t_{A_1} - t_{C''}$, 这与 $t_{A_1} - t_{C'} = t_{gb}$ 相矛盾, 所以 $x_{A_1} \leq x_C$ 。若 $x_{A_1} < x_C$, 则必然存在 1 个点 $A'_1(t_{A'_1}, x_C)$, 且该点位于跟随车辆减速前的车头轨迹延长线上, 使得 $t_{A'_1} - t_C = t_{gb}$, 由图 4 可知, 直线 CA'_1 与开始减速后的跟随车辆车头轨迹线必然存在 1 个交点, 设为点 A''_1 , 坐标为 $(t_{A''_1}, x_C)$, 显然 $t_{A''_1} > t_{A'_1}$, 且车间时距又可表示为 $t_{gb} = t_{A''_1} - t_C$, 这与 $t_{A'_1} - t_C = t_{gb}$ 相矛盾, 故 $x_{A_1} \geq x_C$ 。由于 $x_{A_1} \leq x_C$ 且 $x_{A_1} \geq x_C$, 故 $x_{A_1} = x_C$, 即点 A_1, C 的纵坐标相同, 均为 x_{A_1} 。由于拥挤状态下车间时距为常数^[22], 故 $t_{A_1} - t_C = t_{gb} = t_{ga}$ 。对于拥挤状态下的车辆, 由于前后跟随的车辆紧密相随, 故被跟随车辆突然减速的视觉信号会无延迟地被跟随车辆驾驶人捕获到, 所以跟随车辆的反应时间为 $t_r = t_{A_1} - t_C = t_{gb} = t_{ga}$, 因此, 可知在拥挤状态下有

$$t_g = t_r \tag{2}$$

从另一个方面来讲, 式(2)表示在拥挤状态下, 车辆之间的车间距均为最小安全间距, 因而车辆间保持着最小安全间距运行便是拥挤交通流的一个共性。

速度-密度曲线模型是宏观模型, 反映的宏观数据实际上是大量微观交通数据经由一定的统计学方法变换得到的, 因此, 要确定速度-密度的本质关系还需从微观角度入手。由于车辆在拥挤状态下具有保持最小安全间距运行这一特点, 故选择最小安全间距模型作为微观向宏观过渡的媒介。

假设拥挤状态下某一条路段上有 n 辆车辆 (图 5), 车辆 i 的速度和最大减速度分别为 v_i 和 a_i , 车辆长度为 l_i , 路段总长度为 L , 第 $i, i-1$ 辆车之间的最小安全间距 d_{i-1} 为

$$d_{i-1} = v_i t_r + \frac{v_i^2}{2a_i} - \frac{v_{i-1}^2}{2a_{i-1}} \tag{3}$$

路段的车流密度 k 为

$$k = n/L \tag{4}$$

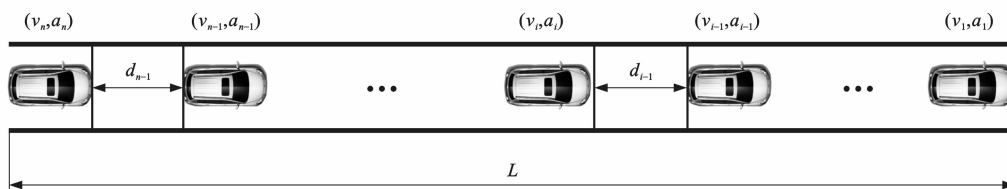


图 5 拥挤状态下的车辆状态

Fig. 5 Vehicle status under congested condition

由式(2)可知, 相邻两车之间的间距即为最小安全间距, 故式(4)可变换为

$$k = n / \left(\sum_{i=1}^n l_i + \sum_{i=1}^{n-1} d_i \right) \tag{5}$$

将式(3)代入式(5)可得

$$k = n / \left[\sum_{i=1}^n l_i + \sum_{i=1}^{n-1} \left(v_{i+1} t_r + \frac{v_{i+1}^2}{2a_{i+1}} - \frac{v_i^2}{2a_i} \right) \right] = \left[\sum_{i=1}^n l_i / n + \sum_{i=1}^n t_r v_i / n + \left(\frac{v_n^2}{2a_n} - \frac{v_1^2}{2a_1} \right) / n \right]^{-1} \tag{6}$$

在相同交通状态下, v_n 和 v_1, a_n 和 a_1 应该是各自近似相等的, 故 $v_n^2 / 2a_n - v_1^2 / 2a_1$ 趋于 0, 且

$$|v_n^2 / 2a_n - v_1^2 / 2a_1| \gg |(v_n^2 / 2a_n - v_1^2 / 2a_1) / n| \approx 0$$

故式(6)可表示为

$$k = 1 / \left(\sum_{i=1}^n l_i / n + \sum_{i=1}^n t_r v_i / n \right) = 1 / (l + t_r v) \tag{7}$$

式中: l 为车辆的平均长度; v 为车辆的平均速度。

由最小安全间距推导出的拥挤状态速度-密度关系模型可表示为

$$v = \frac{1 - lk}{t_r k} \tag{8}$$

式(8)反映的是一个理想化的状态, 并未考虑到车辆在速度为 0 时, 相互之间会有一个阻塞停车间距 g 。另外, 现实中车流在阻塞密度下的速度并非为 0, 而是以一个较小的平均速度 c 走走停停^[11]。这是因为在数据采集过程之中的采集间隔时间不能够太小, 在这足够的时间内车辆一般会呈现出多种运动状态, 在一个时刻车辆可能是停止的, 而在另一个时刻车辆却是运动的, 而速度 c 便是这种静止和运动的加权平均值。参照文献[16], 可得实际情形下的速度-密度关系模型为

$$v = \frac{1 - (l + g)k}{t_r k} + c \tag{9}$$

式(9)表示的速度-密度关系模型有 4 个参数, 即统计时段内的车辆平均长度 l 、反应时间 t_r 、阻塞停车间距 g 与走走停停时的速度 c 。平均车辆长度和阻塞停车间距都比较容易获取, 而走走停停时的

速度可以通过阻塞密度下的车流平均速度统计得出,反应时间实际上就是拥挤状态下的车间时距,也可以通过交通波的传播速度来获取(两者之间具有一定的比例关系^[24])。与以往的模型不同的是,该模型并不需要进行复杂的拟合标定,只需要根据测量数据便可得出实际的速度-密度关系,另外,上述模型还具有较为简明的数学表达式。

2 模型特性分析

2.1 理论特性分析

以往的模型大多是从观测数据出发,基本上是致力于描述交通流现象。本文的特点是从理论分析入手解释一些交通流现象。

简单起见,假设车均长度为 4 m,反应时间为 1.5 s,阻塞停车间距为 3 m,走走停停时的速度 c 为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据式(8)可得出拥挤状态下的速度-密度关系,见图 6(虚线为自由流下的速度-密度关系)。另外,再分别取固定的反应时间(1.5 s)和平均车辆长度(4 m),同时改变另一个参数(车辆平均长度在 3~8 m 之间变化,反应时间在 1.0~2.5 s 之间变化),分别见图 7、8。一般而言,越激进型的驾驶人对被跟随车辆的跟随会更加紧密,停车间距较小,同时激进驾驶人的反应时间较短。将反应时

间从 1.0 s 逐渐增大,同时将停车间距从 2 m 逐渐增大,得出对应的速度-密度曲线见图 9。

从图 6~9 可以看出,在拥挤状态下,速度和密度实际上是呈现出一个变形的反函数关系,且速度-密度曲线是一条斜率为负数且逐渐增大的曲线。由于在拥挤状态下,车辆为了保证运行的安全,必须保持一定的车辆间距。实际上,车辆在拥挤状态下最本质的关系是车间时距为一定值,而该定值又是最小安全间距的一个体现。正是因为这样,拥挤状态下的速度-密度曲线的斜率才不会有其他的变化关系。在自由流状态下,速度-密度曲线受自由流速度影响较大,而拥挤状态下的速度-密度曲线实际上和自由流速度无关,自由流速度的不同只会改变拥挤状态下曲线的长度。当自由流速度较小时,拥挤状态下的速度-密度曲线只会呈现高密度下较为平滑的一部分。以往的很多研究正是由于没有考虑这一点,才会在不同自由流速度的影响下得出各种各样形状的速度-密度曲线。Edie 模型是在自由流速度不足 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况下验证的,并且取得了相对满意的拟合结果^[23]。由图 6 可以看出,低自由流速度下拥挤阶段的速度-密度曲线比较平缓,曲线斜率近似为一个定值,此时用 Edie 模型拟合可以取得相对满意的结果,一旦自由流速度较大,Edie 模型的

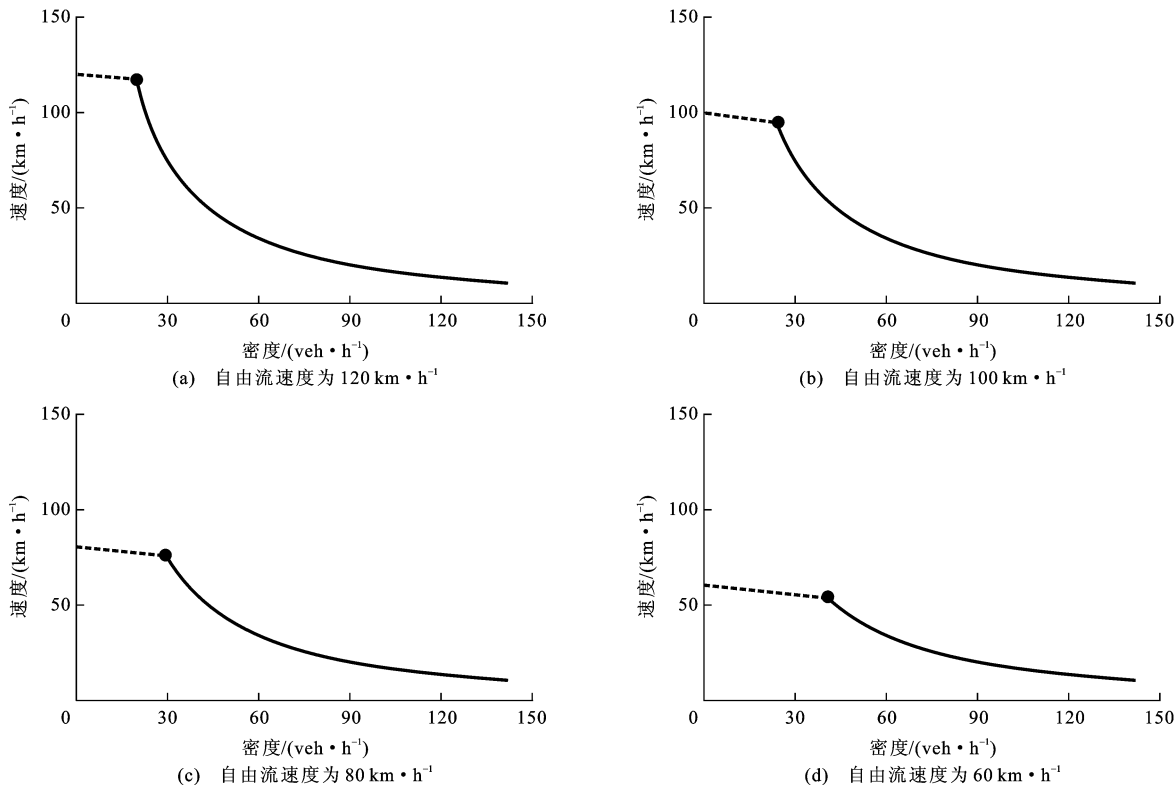


图 6 速度-密度曲线
Fig. 6 Speed-density curves

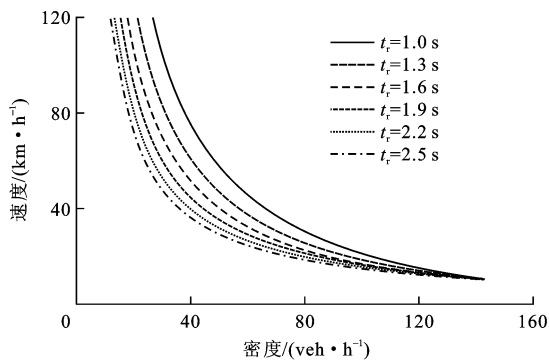


图 7 反应时间变化时的速度-密度曲线

Fig. 7 Speed-density curves when reaction time changes

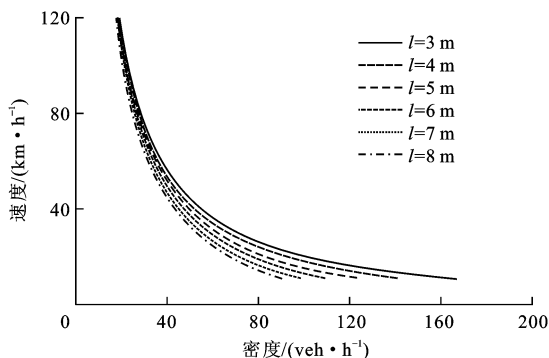


图 8 平均车辆长度变化时的速度-密度曲线

Fig. 8 Speed-density curves when average vehicle length changes

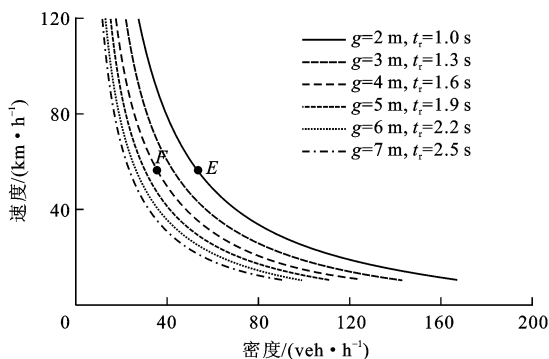


图 9 阻塞停车间距和反应时间变化时的速度-密度曲线

Fig. 9 Speed-density curves when jam stop distance and reaction time change

拟合效果就会变得非常差^[16]。很多研究结果都和 Edie 模型拥有相似的问题,最主要的原因就是受到了低自由流速度的影响,因此,在低自由流速度下提出的速度-密度关系模型很难具备一般性。

式(8)、(9)中的长度和时间参数实际上是一个宏观意义上的平均值。实际上,平均车辆长度和反应时间并不是一个定值,当这些值发生变化时,速度-密度曲线就会发生偏移。当车流中车辆长度不均匀,且驾驶人的反应时间差别较大时,速度-密度

数据点就会散落在均值点附近,形成一个速度-密度数据点的二维平面空间。若各个参数均为定值,速度-密度数据点将会落在同一条曲线附近,表现出较小的离散性。在实际研究过程中,相关系数常被用来作为评价模型优劣的一个标准,相关系数越高,模型的说服力越强,反之,则模型说服力越差^[23]。事实上,由于各个参数并不恒定,因此,速度-密度数据点实际上是散落在一系列参数值不同的速度-密度曲线上,这些曲线紧密相挨,构成一个狭长的二维密闭空间(图 9 中点 E、F),故模型的相关系数低并不一定能够说明模型不够好,因而使用一条特定曲线去拟合拥挤状态下的速度-密度数据具备一定的统计意义,但其物理意义并不完善,无法解释速度-密度数据的离散现象。

2.2 实际特性验证

为了进一步验证该模型的特性,选用美国的 I-80 和 US-101 高速公路的交通数据进行分析。Yeo 等在 NGSIM 项目的基础上已经测出了 US-101 和 I-80 两条高速公路的实际平均反应时间、车长、阻塞停车间距等参数^[24],故本文直接采用这些实测参数。2 条高速公路的自由流速度差异较大,其中 I-80 高速公路采用 30 s 作为数据统计间隔,US-101 高速公路采用 5 min 作为数据统计间隔,统计时长均为连续的 24 h。本文分别运用 Greenshields 模型(GS 模型)、Greenberg 模型(GB 模型)、Underwood 模型(UW 模型)、Northwest 模型(NW 模型)和 Edie 模型来分析拥挤状态下的数据,而本文中的速度-密度数据均为剔除了自由流数据之后的拥挤状态数据。2 条高速公路对应的拟合结果分别见图 10、11,表 1 为 2 条高速公路数据所对应的模型参数, v_c 为临界速度(交通流从自由状态转向拥挤状态时的速度); v_f 为流量为 0 时的自由流速度; k_c 为临界密度(交通流从自由状态转向拥挤状态时的密度); k_j 为

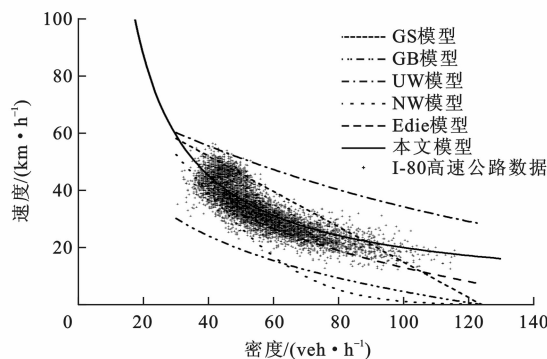


图 10 I-80 高速公路对应的拟合结果

Fig. 10 Fitting results for I-80 Highway

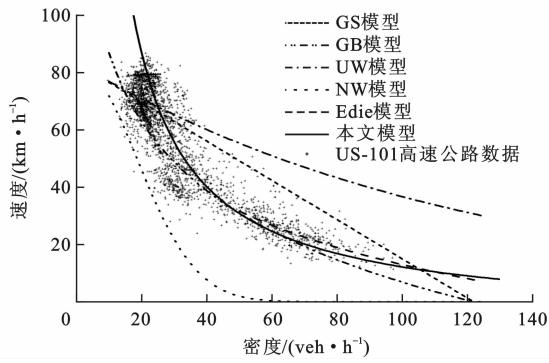


图 11 US-101 高速公路对应的拟合结果
Fig. 11 Fitting results for US-101 Highway

阻塞密度; $v_1 \sim v_6$ 分别为 6 种模型的速度; $k_1 \sim k_6$ 分别为 6 种模型的车流密度; 下标 1~6 分别对应 GS 模型、GB 模型、UW 模型、NW 模型、Edie 模型和本文模型。

在拥挤状态下, 由于观察到的低密度数据要远多于高密度数据, 且在拥堵状态下速度-密度曲线的斜率基本随密度增大而逐渐增大, 最后趋向于 0, 为了减小数据处理的误差, 故选定密度的绝对误差作为曲线拟合的评价指标, 5 种模型对应的绝对误差见图 12。由图 10~12 可以看出, 本文的速度-密度关系模型拟合 US-101 高速公路交通数据所对应的

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

模型数值方程	高速公路	$v_l/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$k_c/$ ($\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$)	$v_c/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$k_j/$ ($\text{veh} \cdot \text{km}^{-1}$)	t_r/s	$l+g/$ m	$c/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
GS 模型 $v_1 = v_{l1}(1 - k_1/k_{j1})$	US-101	83.4			121.9			
	I-80	76.8			124.1			
GB 模型 $v_2 = v_{c2} \lg(k_{j2}/k_2)$	US-101			80.0	121.9			
	I-80			49.0	124.1			
UW 模型 $v_3 = v_{l3} \exp(-k_3/k_{j3})$	US-101	83.4			121.9			
	I-80	76.8			124.1			
NW 模型 $v_4 = v_{l4} [\exp(-0.5(k_4/k_{c4})^2)]$	US-101	83.4	18.3					
	I-80	76.8	34.5					
Edie 模型 $v_5 = 26.8 \ln(162.5/k_5)$ $k_5 \geq 50$	US-101							
	I-80							
本文模型 $v_6 = [1 - (l+g)k_6] \cdot [(t_r k_6) + c]^{-1}$	US-101					1.93	8.30	9
	I-80					2.14	8.20	17

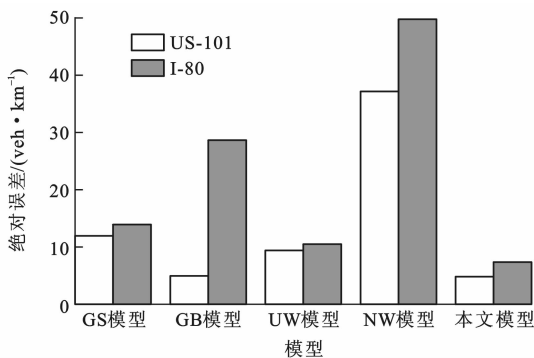


图 12 绝对误差

Fig. 12 Absolute errors

绝对误差为 $4.91 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$, 拟合 I-80 高速公路交通数据所对应的绝对误差为 $7.50 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$, 两者均为最小值。Greenberg 模型虽然在拟合 US-101 高速公路的数据时拥有不错的拟合效果(绝对误差为 $4.99 \text{ veh} \cdot \text{km}^{-1}$), 但在拟合 I-80 高速公路数据时效果并不理想, 这也表明了 Greenberg 模型有其

局限性。由于 Edie 模型只能拟合部分拥挤状态下的速度-密度关系, 因而对应的绝对误差并未给出。

4 结 语

通过对拥挤状态下速度-密度关系模型的验证和分析, 本文模型具有较为严谨的理论基础与简明的数学形式, 在使用过程中只需知道平均车辆长度和反应时间等参数, 并且不需要进行复杂的数据拟合。虽然速度-密度曲线的表现形式有差异, 但本质上都严格遵循了车间时距在拥挤状态下为定值这一规律。自由流速度决定了拥挤状态下速度-密度分支的长度, 因此, 对自由流速度的选择尤为重要, 低自由流速度下得出的模型很难具备一般性。本文模型能够明确解释速度-密度关系的变化趋势。速度和密度的变化实际上要遵循车间时距为定值(或车辆间要保持最小安全间距)这一规律, 正因如此, 才使得速度-密度曲线的斜率会逐渐增大且趋于 0。此

外,本文模型还能解释速度-密度数据的离散化现象。在拥挤状态下,本文模型显著优于其他几个常用模型,但未能体现非拥挤状态下的交通流特性,这使得本模型仅适用于拥挤状态下的交通流,因此,在将来有必要继续对非拥挤状态下的速度-密度关系进行研究。

参考文献:

References:

- [1] 张亚平,张起森. 高速公路速度-流量模型研究[J]. 中国公路学报,2000,13(3):73-77.
ZHANG Ya-ping, ZHANG Qi-sen. A study of models of speed-flow for freeways[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 73-77. (in Chinese)
- [2] 谭满春,唐松安,徐建闽. 多车道高速公路的动态离散交通流模型[J]. 中国公路学报,2002,15(2):91-94.
TAN Man-chun, TANG Song-an, XU Jian-min. Dynamic discrete traffic model of freeway with multiple lanes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 91-94. (in Chinese)
- [3] 何蜀燕,关伟. 城市快速路交通流状态跃迁的实证分析[J]. 中国公路学报,2008,21(5):81-86.
HE Shu-yan, GUAN Wei. Empirical analysis of phase transitions of traffic flow at urban expressway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 81-86. (in Chinese)
- [4] 董春娇,邵春福,马壮林,等. 阻塞流状态下城市快速路交通流时空特性[J]. 交通运输工程学报,2012,12(3):73-79.
DONG Chun-jiao, SHAO Chun-fu, MA Zhuang-lin, et al. Temporal-spatial characteristic of urban expressway under jam flow condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 73-79. (in Chinese)
- [5] LIGHTHILL M J, WHITHAM G B. On kinematic waves. II: a theory of traffic flow on long crowded roads[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1955, 229(5): 317-345.
- [6] RICHARDS P I. Shock waves on the highway[J]. Operations Research, 1956, 4(1): 42-51.
- [7] GREENSHIELDS B D, BIBBINS J R, CHANNING W S, et al. A study in highway capacity[J]. Highway Research Board Proceedings, 1935, 14(1): 448-477.
- [8] GREENBERG H. An analysis of traffic flow[J]. Operations Research, 1959, 7(1): 79-85.
- [9] DRAKE J S, SCHOFFER J L, MAY A D. A statistical analysis of speed-density hypotheses. in vehicular traffic science[C]//TRB. TRB 45th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 1967: 112-117.
- [10] PIPES L A. Car following models and the fundamental diagram of road traffic[J]. Transportation Research, 1967, 1(1): 21-29.
- [11] NEWELL G F. Nonlinear effects in the dynamics of car following[J]. Operations Research, 1961, 9(2): 209-229.
- [12] JAYAKRISHNAN A, TSAI W K, CHEN A. A dynamic traffic assignment model with traffic flow relationships[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1995, 3(1): 51-72.
- [13] CASTILLO J M, BENITEZ F G. On the functional form of the speed-density relationship. I: general theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1995, 29(5): 373-389.
- [14] VAN AERDE M W. Single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested highways[C]//TRB. TRB 74th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 1995: 1-26.
- [15] MACNICHOLAS M J. A simple and pragmatic representation of traffic flow[C]//TRB. 75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory: Greenshields Symposium. Washington DC: TRB, 2008: 161-177.
- [16] WANG Hai-zhong, LI Jia, CHEN Qian-yong, et al. Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(6): 554-566.
- [17] VAN AERDE M, RAKHA H. Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships [C]//IEEE. Proceedings of the 6th Vehicle Navigation and Information Systems Conference. New York: IEEE, 1995: 334-341.
- [18] EDIE L C. Car-following and steady-state theory for noncongested traffic[J]. Operations Research, 1961, 9(1): 66-76.
- [19] SUN Lu, ZHOU Jie. Developing multi-regime speed-density relationships using cluster analysis[J]. Transportation Research Record, 2005(1934): 64-71.
- [20] BRILON W, LOHOFF J. Speed-flow models for freeways[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 16(2): 26-36.
- [21] HUANG Zhao-yi, CHEN Xiao-hong, LIN Hang-fei, et al. Movement nature of speed-flow relationship on congested expressway[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(3): 137-145.
- [22] BANKS J H. Average time gaps in congested freeway flow[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(6): 539-554.
- [23] GARTNER N, MESSER C J, RATHI A K. Traffic flow theory: a state of the art report[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2001.
- [24] YEO H, SKABARDONIS A. Oversaturated freeway flow algorithm[R]. Berkeley: University of California-Berkeley, 2006.