

一种实用的混合交通流 BPR 模型

郭中华¹,王 炜²

(1.南京航空航天大学民航学院,江苏 南京 210016;2.东南大学交通学院,江苏 南京 210096)

摘要 针对城市道路混合交通问题,分析了小、中、大 3 类车型的车道、区位、断面分布特征,依据各车型车辆的道路路段固有阻抗和车型比例仿真构建了三幅路、四幅路、三幅路单行且公交可逆行等典型道路路段机动车流的车速流量实用模型(BPR 模型),并以小、大型车比例差为变量对模型进行了修正.预测结果表明,修正模型能够适应各种交通组成情况,且具有相当高的计算精度,可以较准确地预测缺乏实地调查资料的道路路段交通流参数.

关键词 道路路段;混合交通流;空间性;车速;流量;BPR 模型

中图分类号:U491.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2007)01-0113-05

目前,我国城市道路上车种繁多、车型复杂、性能不一,其行驶状态也各异,因此在分析交通流状况时应考虑到车辆类型的不同.车型一般依据车辆轴距和结构特征来划分,这样划分出的车型会有 10 多种.这种划分方法既会产生运行特性相似和构成比例很小的车型,又会增加一些无效的数据分析工作量,何况该方法主要适用于公路交通流的研究^[1-3].而对于城市道路,一般来说,道路交通规划决定了道路交通功能,交通管理手段赋予了车辆的出行权限,故其车型结构相对比较简单,主要车型所占比例很高.另外,在道路交叉口的影响范围内,各种不同车型车辆的加减速性能差异是很明显的,研究其混合交通流特性时宜采用具体车型.至于道路路段,为了便于研究,则可以简单地将车辆划分为小型车(含小汽车、出租车、微型面包车、吉普车等,一般为 9 座以下)、中型车(一般为 9~25 座的面包车或车长 6~10 m 的客车等)和大型车(含单、双层公交及大客车等)3 种(白天主要道路上货车很少,可不予考虑).目前,由于我国很多大城市中心城区均采取了“禁摩”举措,重要主次干道上的摩托车并不多,白天交通高峰期间也同样如此,而且有相当比例的轻摩往往行驶在非机动车道上.因此,在研究道路机动车道混合交通流时摩托车可不予考虑.由于道路路段混合交通流与交通组成关系密切,故有必要研究交通组成的时空发展规律,特别是道路车辆车型分布的空间性.为此,本文针对城市道路混合交通问题,分析了小、中、大 3 类车型的车道、区位、断面分布特征,依据各车型车辆的道路路段固有阻抗和车型比例仿真构建了三幅路、四幅路、三幅路单行且公交可逆行等典型道路路段机动车流的车速流量实用模型(BPR 模型),并以小、大型车比例差为变量对模型进行了修正.

1 车型分布的空间性

1.1 车道分布

考虑到问题研究的典型性,调查了若干中心市区三、四幅路三车道(单向,下同)道路(含三幅路单行且公交可逆行情形)的车型比例.分析结果表明,各车道上各车型所占比例差别很大,小型车所占比例较高,中、大型车所占比例都很小,且第 1、第 2 车道的情况相近,而因大量的公交车在最外侧车道行驶,故第 3 车道上大型车所占比例也比中型车所占比例高许多(图 1).

1.2 区位分布

车型比例与区位 为了研究的需要,针对三、四幅路三车道进行调查,且二者调查样本量相等)的关系说明:对于中心市区、次中心市区和市区外围 3 种不同区位,小型车均最多,但其比例依次减小,相应地,中、大型车比例则依次增大.中、大型车的比例相差不多,且由于公交车较多,致使中心市区大型车比中型车多 2 倍;次中心

市区和市区外围的中型车的比例则相对有所提高,这应是中型货车以及中巴车增多引起的.另外,市区外围车型分布相对比较均衡,这与以小汽车和出租车为主的小型车进出城相对较少,而大中型货车较多有关(图2).

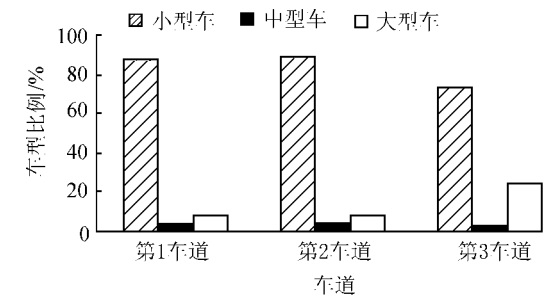


图1 各车道的车型比例

Fig.1 Vehicle proportions of different lanes

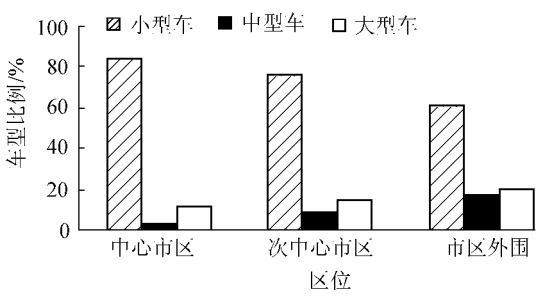


图2 各区位的车型比例

Fig.2 Vehicle proportions of different locations

1.3 断面分布

目前,在一般的大城市内,三幅路二车道、三幅路三车道、四幅路三车道在中心市区分布较广,小型车的比例较高,均在80%左右;而四幅路四车道大多位于次中心市区和市区外围等地,小型车的比例降低了10%,相应地,中、大型车的比例上调.此外,对道路功能而言,三幅路二车道应为次干道,公交车和大型客车较少,中型客车较多,使得中、大型车比例相当;三幅路三车道是生活性的主干道,公交车数量明显增加,而机动车总数并不多,故大型车比例大幅提高;四幅路三车道则是交通性主干道的典型断面形式,虽然公交车数量进一步增加,但小汽车数量则大大增加,故大型车的比例相对三幅路三车道有所下降(图3).

2 典型道路空间的车速流量模型

受实验手段、人力和时间等条件的限制,未能实施各种车型分布不同道路的交通流调查,因而未能构建考虑交通组成的车速流量模型,故本文试用仿真推理方法来进行相应的研究.应该说明的是,基于车型分布时效性(时段、调查日性质)的车速流量建模可不予考虑.这是因为:一是车型差异在流量大时不太明显,故较为适合研究交通平峰时段;二是随着社会经济的发展,人们的生活节奏明显加快,双休日和工作日的区别逐渐淡化,其差异反映在道路交通流上就是双休日交通量比较分散、工作日交通高峰比较明显,但机动车总量和各车型分布差别甚微(图4).

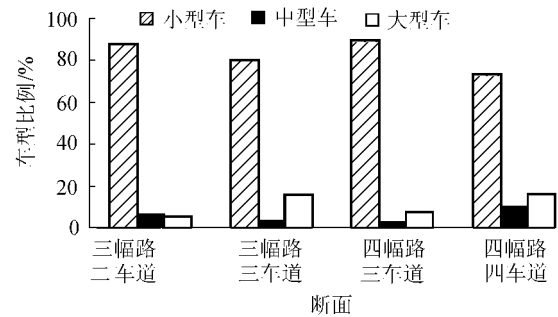


图3 各断面的车型比例

Fig.3 Vehicle proportions of different cross sections

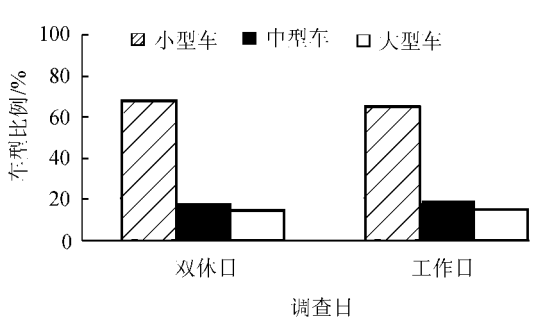


图4 各调查日的车型比例

Fig.4 Vehicle proportions of different investigation days

作为一种道路交通流的固有特征,相同路幅形式(且区分是否单向通行)的不同道路上同一车型车辆的道路阻抗特征还是一样的,即各车型车辆的路阻函数关系仍然成立.由于美国公路局提出的BPR函数在描述道路阻抗方面具有许多优势,因而BPR函数应用最广^[4-7].因此,本文在获得各种道路交通组成的前提下借助BPR函数来预估道路总的路阻,同时为了全面考虑各种车型的影响,特构建道路路段机动车车速流量模型(前已述及,因各车型车辆车速趋同,故暂不考虑拥挤状态).值得指出的是,由小、中型车合成为中小型车辆(而由小、中、大型车合成为机动车时亦进行类似的处理)时,车速比应为 $(av_1 + bv_2)(av_{n1} + bv_{n2})$.其中 a, b, v_1, v_2, v_{n1} 和 v_{n2} 分别为小型车和中型车的比例($a + b = 1$)、车速、畅行车速.考虑到小、中型车的车速与畅行车速均未知,故用 $av_1/v_{n1} + bv_2/v_{n2}$ 近似替代.其误差为

$$a \frac{v_1}{v_{\Pi}} + b \frac{v_2}{v_{\Pi}} - \frac{av_1 + bv_2}{av_{\Pi} + bv_{\Pi}} = \frac{a(1 - \frac{v_{\Pi}}{v_1}) (\frac{v_2}{v_{\Pi}} - \frac{v_1}{v_{\Pi}})}{a + b \frac{v_{\Pi}}{v_1}} = \frac{a(1 - \frac{v_{\Pi}}{v_1}) (\frac{v_2}{v_{\Pi}} - \frac{v_1}{v_{\Pi}})}{\frac{v_{\Pi}}{v_1} + a(1 - \frac{v_{\Pi}}{v_1})}$$

(1)

显然,对于所有可能的 a, b , 当 v_{Π} 最大、 v_{Π} 最小、 $v_2/v_{\Pi} - v_1/v_{\Pi}$ 最大(负荷水平为 1)时,误差最大. 而当 v_{Π}/v_{Π} 最小(取定)时,不难发现, $a = b = 0.5$ ($a \geq b$)时误差最大. 综上所述, 近似处理的最大误差出现在 $a = b = 0.5$, v_{Π} 最大、 v_{Π} 最小、负荷水平为 1 时. 而对于小、中、大型车合成为机动车时, 不妨将中小型车归为一种“ 车型”, 且与大型车的比例分别为 $a' = a + b, b' = c$ ($a + b + c = 1$), 进而可进行类似的处理.

鉴于三幅路、四幅路、三幅路单行且公交可逆行是非常普遍的道路形式, 分别给出其道路路段机动车车速流量模型的误差上限. 一般地, 小型车在道路上的最大车速不超过 120 km/h, 故可取 $v_{\Pi} = 120$ km/h. 而次中心市区、市区外围的畅行车速要高于中心市区, 依据文献 [8], 可令中心市区三幅路、四幅路、三幅路单行且公交可逆行的中型车畅行车速分别为 $v_{\Pi} = 56.07$ km/h, 61.83 km/h, 59.05 km/h, 大型车畅行车速分别为 $v_{\Pi}' = 47.13$ km/h, 47.57 km/h, 47.41 km/h. 另外, 道路上小型车的比例实际上远远超过中、大型车, 从而使得小、中、大型车合成为机动车时的误差小于小、中型车合成误差与小、大型车合成误差之和, 为简便起见, 不妨取其相等. 从而, $q/c = 1$ 时 $v_2/v_{\Pi} - v_1/v_{\Pi} = 0.081\ 81, 0.115\ 58, 0.107\ 81, v_2'/v_{\Pi}' - v_1'/v_{\Pi}' = 0.195\ 32, 0.302\ 51, 0.268\ 62$. 于是, 三类道路路段机动车车速流量模型的误差上限分别为 $5.74 \times 10^{-2}, 8.39 \times 10^{-2}, 7.66 \times 10^{-2}$, 其值都非常小, 故道路路段机动车路阻函数的近似替代完全可行.

限于篇幅, 仅研究中心市区三幅路三车道及其单行且公交可逆行道路(调查显示, 道路实施单行后主要影响的是交通流参数, 对道路交通组成影响甚微, 故其车型分布也适用于单行情形). 四幅路三车道道路的第 1 ~ 第 3 车道(车道特征), 次中心市区、市区外围的三幅路三车道及其单行且公交可逆行道路、四幅路三车道道路(区位特征), 中心市区三幅路二车道及其单行且公交可逆行道路, 非中心市区四幅路四车道道路(断面特征), 而不考虑其他空间特征影响下的交通流车速流量模型. 以上若干比较典型的道路车型分布的空间特征调查结果见表 1.

参考文献 [8] 可以仿真得到各种典型路幅形式下车道、区位与断面空间特征的道路路段混合交通流车速流量实用模型(表 2).

表 1 车型分布的空间特征

Table 1 Spatiality of vehicle distribution

空 间 分 类			车型比例/%		
			小型车	中型车	大型车
中心市区	三幅路	第 1 车道	82.65	3.94	13.41
		第 2 车道	84.03	4.27	11.70
		第 3 车道	68.19	3.74	28.07
	四幅路	第 1 车道	92.90	3.31	3.79
		第 2 车道	92.91	3.27	3.82
		第 3 车道	78.17	1.66	20.17
次中心市区	三幅路	三车道	71.36	10.28	18.36
	四幅路	三车道	81.18	7.18	11.64
市区外围	三幅路	三车道	58.95	18.67	22.38
	四幅路	三车道	63.82	16.62	19.56
中心市区	三幅路	二车道	87.32	6.49	6.19
非中心市区	四幅路	四车道	73.33	10.59	16.08

表 2 车速流量实用模型

Table 2 Practical speed-flow models

分 类			模 型			分 类			模 型			
三幅路	车道	第 1 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.48 (q/c)^{.339}]$			四幅路	车道	第 1 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.80 (q/c)^{.418}]$			
		第 2 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.49 (q/c)^{.350}]$					第 2 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.80 (q/c)^{.418}]$			
		第 3 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.42 (q/c)^{.221}]$					第 3 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.66 (q/c)^{.293}]$			
	区位	次中心市区	$v = v_{\Pi} [1 + 0.45 (q/c)^{.264}]$				区位	次中心市区	$v = v_{\Pi} [1 + 0.72 (q/c)^{.340}]$			
		市区外围	$v = v_{\Pi} [1 + 0.42 (q/c)^{.182}]$					市区外围	$v = v_{\Pi} [1 + 0.62 (q/c)^{.236}]$			
	断面	二车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.51 (q/c)^{.381}]$				断面	四车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.67 (q/c)^{.290}]$			
三幅路 [*]	车道	第 1 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.71 (q/c)^{.393}]$			三幅路 [*]	区位	次中心市区	$v = v_{\Pi} [1 + 0.66 (q/c)^{.339}]$			
		第 2 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.73 (q/c)^{.402}]$					市区外围	$v = v_{\Pi} [1 + 0.61 (q/c)^{.282}]$			
		第 3 车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.61 (q/c)^{.302}]$					断面	二车道	$v = v_{\Pi} [1 + 0.76 (q/c)^{.428}]$		

注: * 表示道路单行且公交可逆行, 下同.

3 考虑各种车型分布的 BPR 统一模型

事实上,BPR 模型也存在一些值得改进的地方^[9-12].本文在合理设定各种车型比例的基础上,按上述方法进行了道路交通流参数仿真,并得到了理论上适用于各种交通组成、基于 BPR 函数的车速流量改造模型(称为 BPR 统一模型).根据分析,该模型可表示为 $v/v_f = \lambda [1 + \alpha (q/c)^\beta]$.其中 λ 、 α 、 β 均为 $\gamma_1 - \gamma_3$ 的函数,而 γ_1 和 γ_3 分别为小、大型车的比例(因中型车相对小、大型车而言,对整个交通流车速影响不甚明显,而其车型比例 $\gamma_2 = 1 - \gamma_1 - \gamma_3$,也可隐含体现).回归分析表明 λ 、 α 、 β 都可用线性关系来描述,且相关系数大多高达 1^[8].即 $\lambda = \xi_1(\gamma_1 - \gamma_3) + \eta_1$ 、 $\alpha = \xi_2(\gamma_1 - \gamma_3) + \eta_2$ 、 $\beta = \xi_3(\gamma_1 - \gamma_3) + \eta_3$.其中: $\gamma_1 \geq 0.5$ 、 $\gamma_3 < 0.5$; ξ_i 和 η_i ($i = 1, 2, 3$) 为待定模型参数.调查发现, γ_1 增大(减小)时 γ_3 减小(增大),故能避免 $\gamma_1 - \gamma_3$ 相等而 γ_2 不同情形的发生,即确保模型是合理的.下面分别给出三幅路、四幅路、三幅路单行且公交可逆行 3 种道路的 BPR 统一模型关系式.

a. 三幅路

$$\begin{cases} v/v_f = \lambda [1 + \alpha (q/c)^\beta] \\ \alpha = 0.3413 + 0.2039(\gamma_1 - \gamma_3) \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda = 0.9733 + 0.0034(\gamma_1 - \gamma_3) \\ \beta = 2.5364 + 0.3225(\gamma_1 - \gamma_3) \end{cases}$$

(2)

b. 四幅路

$$\begin{cases} v/v_f = \lambda [1 + \alpha (q/c)^\beta] \\ \alpha = 0.4560 + 0.3872(\gamma_1 - \gamma_3) \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda = 0.9998 + 0.0002(\gamma_1 - \gamma_3) \\ \beta = 2.0559 + 0.4075(\gamma_1 - \gamma_3) \end{cases}$$

(3)

c. 三幅路单行且公交可逆行

$$\begin{cases} v/v_f = \lambda [1 + \alpha (q/c)^\beta] \\ \alpha = 0.4837 + 0.3484(\gamma_1 - \gamma_3) \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda = 0.9998 + 0.0047(\gamma_1 - \gamma_3) \\ \beta = 2.1605 + 0.2741(\gamma_1 - \gamma_3) \end{cases}$$

(4)

从 3 类常见道路的车道、区位、断面特征车速流量模型回归参数与 BPR 统一模型所反演出来的主要参数(即其值对模型因变量影响占优) α (实为 BPR 函数参数)比较来看,三幅路道路的相对差异较大、四幅路道路与三幅路单行且公交可逆行道路差异较小,这是由于 BPR 统一模型得到的三幅路道路畅行车速比原车速流量模型标定值降低幅度要大些,但最大相对误差也仅为 2.35%.而另一 BPR 函数参数 β 的相对误差亦有相同特点,且比 α 还要大点.不过,其敏感性要差很多.2 种模型参数实际上具有很强的一致性,这也说明考虑各种车型分布的道路路段 BPR 统一模型精确性较高、实用性较强(表 3).

表 3 典型道路空间模型回归参数与反演参数

Table 3 Regression parameters and inversion parameters of typical road models										
分 类		<i>a</i>				<i>b</i>				
		回归值	反演值	误差	相对误差/%	回归值	反演值	误差	相对误差/%	
三幅路	车道	第 1 车道	0.489	0.482	0.007	1.43	2.339	2.760	0.421	18.00
		第 2 车道	0.495	0.489	0.006	1.21	2.350	2.770	0.420	17.87
		第 3 车道	0.429	0.423	0.006	1.40	2.221	2.666	0.445	20.04
	区位	次中心市区	0.457	0.449	0.008	1.75	2.264	2.707	0.443	19.57
		市区外围	0.426	0.416	0.010	2.35	2.182	2.654	0.472	21.63
	断面	二车道	0.515	0.507	0.008	1.55	2.381	2.798	0.417	17.51
四幅路	车道	第 1 车道	0.803	0.801	0.002	0.25	2.418	2.419	0.001	0.04
		第 2 车道	0.802	0.801	0.001	0.12	2.418	2.419	0.001	0.04
		第 3 车道	0.668	0.681	0.013	1.95	2.293	2.292	0.001	0.04
	区位	次中心市区	0.720	0.725	0.005	0.69	2.340	2.339	0.001	0.04
		市区外围	0.625	0.627	0.002	0.32	2.236	2.236	0	0
	断面	四车道	0.672	0.678	0.006	0.89	2.290	2.289	0.001	0.04
三幅路*	车道	第 1 车道	0.719	0.725	0.006	0.83	2.393	2.350	0.043	1.80
		第 2 车道	0.731	0.736	0.005	0.68	2.402	2.359	0.043	1.79
		第 3 车道	0.615	0.623	0.008	1.30	2.302	2.270	0.032	1.39
	区位	次中心市区	0.663	0.668	0.005	0.75	2.339	2.306	0.033	1.41
		市区外围	0.611	0.611	0	0	2.282	2.261	0.021	0.92
	断面	二车道	0.766	0.766	0	0	2.428	2.383	0.045	1.85

4 结 语

一般而言,欧美发达国家城市交通构成相对单一,而我国的道路交通组成非常复杂,并且这种情况还将持续相当长的一段时间.因此,应在借鉴国外经典模型以及结合我国实际情况的基础上,建立与低速混合交通相符的交通流模型并进行相应的数值模拟.

熵理论能够描述系统微观和宏观状态的相互关系,更能表征系统的变化.从物理学意义上讲,当物体处于熵(可用能量表征)最小状态时,物体的物理状态最为稳定.对道路混行车流整体而言,根据熵理论建立交通流模型主要是侧重于机理研究.毫无疑问,应用交通熵理论来研究道路路段混合交通流问题,所得出的结果会比本文结果精确些.由于缺乏大量实地采集到的混合交通流数据,本文采用一种尽量减小误差以体现一定合理性、操作上比较可行的方法,建立了比较适合我国混合交通特点的道路路段车速流量实用模型.该模型可在一定程度上真实地反映城市道路路段交通流的运行规律,提高交通规划与控制中有关交通流参数的精度,弥补国内混合交通流研究中的不足.应当指出的是,交通熵理论主要用于描述一种无序度高、不平衡状态下的交通流问题,用交通熵理论来描述车辆相互干扰严重的道路交叉口和拥挤状态的交通流是比较合适的,而城市道路纯路段往往是消除了交叉口和公交站点复杂影响后的一段区域,至于非拥挤状态,交通流的稳定性亦是比较高的,故忽视交通熵所产生的误差很小.

参考文献:

[1] 荣建,刘小明,任福田,等.基于高速公路通行能力分析的 vehicle 分类研究[J].中国公路学报,1999,11(3):82-89.

[2] 朱海滨.公路基本路段车流运行仿真和车辆折算系数研究[D].西安:长安大学,1999.

[3] 何民,刘小明,荣建.交通流跟驰模型研究进展[J].人类工效学,2000,10(2):46-50.

[4] 杨东援.交通均衡模型理论的发展与展望[J].中国公路学报,1992,5(4):76-82.

[5] 杨佩昆,黄文忠.城市道路车队离散过程中的交通流模型[J].同济大学学报,1994,22(3):294-299.

[6] 陆化普,殷亚峰.均衡交通分配模型与应用[J].公路交通科技,1995,11(4):18-23.

[7] 靳文舟,张杰,张旭莉.路阻函数的最大似然标定法[J].公路交通科技,1996,13(4):24-28,35.

[8] 郭中华.城市道路路段交通流特性分析与模型研究[D].南京:东南大学,2005.

[9] 王炜,张桂红.城市道路路阻函数研究[J].重庆交通学院学报,1992,11(3):84-92.

[10] 袁振洲.动态交通分配中道路阻抗模型的研究[J].中国公路学报,2002,15(3):92-95,100.

[11] 王元庆,周伟,吕连恩.道路阻抗函数理论与应用研究[J].公路交通科技,2004,21(9):82-85.

[12] 王树盛,黄卫,陆振波.路阻函数关系式推导及其拟合分析研究[J].公路交通科技,2006,23(4):107-110.

Practical BPR model of mixed traffic flow

GUO Zhong-hua¹, WANG Wei²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Naning 210016, China;
2. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Aiming at the mixed traffic on urban roads, an analysis was performed of the attributes of lanes, locations, and cross sections of small, medium, and large vehicles. Based on the intrinsic resistance and vehicle proportions of different traffic links, a link speed-flow model, i. e. the BPR model, was developed for simulating the vehicle traffic flow on the typical roads consisting of three-carriageway road, four-carriageway road, and one-way three-carriageway road with a two-way-bus lane, respectively, and the model was modified with the variable of the difference between the proportions of small vehicles and large vehicles. The results of study demonstrate that the modified model is suitable for any mixed traffic condition and is of high accuracy; therefore it can predict the traffic flow parameters for traffic links in the absence of investigation data.

Key words link; mixed traffic flow; spatiality; speed; flow; BPR model