

应急车道开放条件下高速公路交通运行特性分析

刘强^{1,2}, 丁璠³, 张志祥², 杨阳²

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 211106; 2. 江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 211008;

3. 东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要:高速公路应急车道可供应急事件下车辆通行使用,在中国尚未有应对大流量交通通行需求而开放使用的先例。针对沪宁高速公路大流量通行能力提升需求,面向2019年“五一”小长假工况开展应急车道开放试验设计和现场测试,基于理论分析方法和交通流现场监测数据,进行应急车道开放条件下的交通运行参数分析,总结评价应急车道开放对于断面交通通行能力的影响。研究表明:应急车道开放条件下对其他车道交通流产生了较为明显的影响,受制于法律法规、驾驶行为等因素,应急车道的自由流速度和通行能力均未达到单车道设计水平,在试验工况下开放应急车道可提升断面通行能力约10%。

关键词: 应急车道; 交通特性; 通行能力; 开放试验; 高速公路

中图分类号: U491

文献标志码: A

中国经济的高速增长带动了高速公路流量的剧增,长三角、珠三角、京津冀等经济发达地区高速公路拥堵已呈现常态化特征,严重影响了社会运行效率和公众出行,尤其是在节假日免费通行政策下交通拥堵已成为一种社会现象。

应对交通拥堵更多需要依赖基础设施和交通管理,传统的匝道控制、可变限速等措施只能在常规拥堵条件下释放一定的交通压力^[1-3],然而面向极限超大流量情况其幅度有限。缓解拥堵压力的最直接途径是扩容增加车道数,但受土地、经济等根本因素制约。开放应急车道开拓了扩容方式的思路。

高速公路的应急车道,是指与右侧行车道相邻,包括硬路肩在内的宽度3 m以上,有效长度大于等于30 m,可以满足机动车停靠需要的路面部分。在紧急情况下,车辆可以在应急车道上行驶或者停车^[4]。

欧美等国已有利用应急车道来提升通行效率的先例,但应用效果不一,部分案例也有负面效应^[5-7],由于国情、公众驾驶行为、交管政策等方面的差异,中国在该方面的研究与实践一直处于空白。该文基于G42沪宁高速公路无锡段通行效率提升需求,进行应急车道开放试验测试,采集分析断面交通运行参数,总结评估开发试验效果,探讨应对交通拥堵的应急车道开放的可行性,以便为同类大流量高速公路交通管理提供重要参考借鉴。

1 应急车道开放试验

1.1 试验场景

沪宁高速公路无锡段为G42沪蓉高速公路和G2京沪高速公路的共线段,双向八车道,年平均断面交通

[10] 温长鹏,周磊,潘兵宏. 基于交通流稳定距离的匝道连续入口最小间距研究[J]. 中外公路,2021,41(3):392-397.

[11] 吕纪云,徐宇峰,熊威. 基于视距需求的互通范围内主线圆曲线半径指标研究[J]. 中外公路,2021,41(6):309-313.

[12] 白浩晨,柳银芳. 互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度研究[J]. 中外公路,2020,40(1):262-267.

[13] 钟伟斌,曹骏骏,张江洪,等. 互通式立交主线同侧相邻入口最小间距研究[J]. 公路交通科技,2021,38(9):

149-158.

[14] 中国公路工程咨询集团有限公司. 公路立体交叉设计细则:JTG/T D21-2014 [S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

[15] 刘子剑. 互通式立体交叉设计原理与应用[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

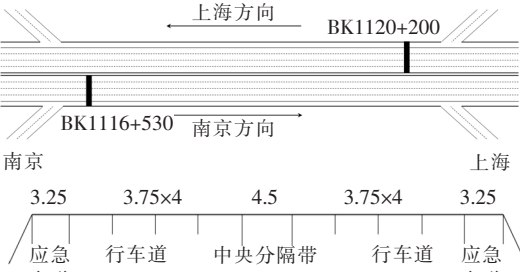
[16] 孙家骊. 道路勘测设计 [M]. 3版. 北京:人民交通出版社,2012.

量超过 16 万 veh/d,交通拥堵已呈常态化。

试验选择该路段范围内硕放—东桥枢纽区间双向约 7 km 路段进行,区间无任何匝道互通,如图 1 所示。单向常规通行 4 条车道分为 2 条小型客车车道和 2 条客货车车道,内侧 2 条车道仅供小型客车通行,限速 120 km/h;外侧 2 条车道允许所有车辆通行,大型客货车限速 100 km/h,常规行车道道宽均为 3.75 m。上海至南京方向,应急车道在 K1121+200~K1114+200 区间开通,在上游 K1123+500 和 K1124+500 两个位置通过门架情报板发出应急车道允许通行提示;南京至上海方向,应急车道在 K1116+200~K1123+000 区间开通,在 K1112+930 和 K1114+400 处有应急车道开放通行信息提示。为更好体现超大流量环境,应急车道开放试验时间选择 2019 年“五一”小长假。



(a) 地理位置



(b) 断面分布

图 1 试验路段特征(单位:m)

1.2 试验方案

(1) 交通参数监测

为获得精确的断面分车道交通流数据,在试验路段 K1116+530、K1120+600 位置分别设置两台毫米波雷达^[8],获取特定车道的车流量、车型、速度、占有率等交通流参数,如图 2 所示。其中对于车型判定数据按车辆长度分为 4.8 和 8.4 m 两类,分别表征小客车和货车(含大客车)。

(2) 测试方案

试验时间为 2019 年 4 月 29 日至 5 月 4 日,为期 6 d,

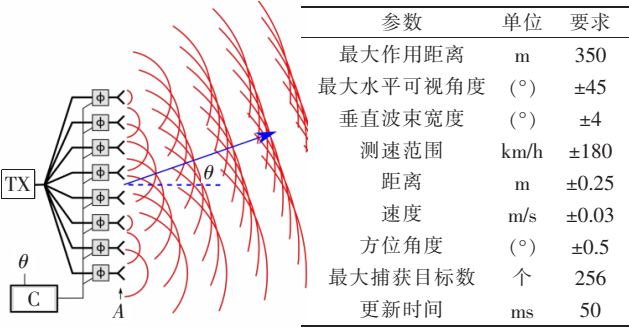


图 2 毫米波雷达原理及其测试参数要求

其中应急车道开放时间为 5 月 1 日 08:20—19:05、5 月 2 日 08:50—21:05、5 月 3 日 09:20—22:45。4 条常规车道在试验期间每天 24 h 不间断采集交通数据,而应急车道仅在其开放期间采集累计 37 h 的交通流数据。该试验为中国第一次,其目的是为长期开放应急车道进行探索与尝试。

2 理论分析方法

为研究交通流密度与速度关系,需将原始时间占有率数据转换成密度参数。理论上,占有率 o 是指所有车辆通过某一路段所需的累计时间和某一时间段内观测时间的百分比,见式(1):

$$o = (t_1 + t_2 + \dots + t_n) / T \tag{1}$$

式中: t_i 为车辆 i 通过检测器的时间; T 为观察时间的长度。对于单个车辆 i ,时间 t_i 与车辆长度、速度 u_i 和探测器长度 d 有关。在该文中, d 取 0.5 m。同时,密度表示在给定时间内单位截面长度内出现的车辆数量。通过对已有大数据离散拟合分析可知,占有率与密度的关系基本成比例。该文依据车型分类基础,从理论上推导了车辆占用率和密度之间的转换方程,占有率通过车辆通过检测器的时间与总时间来确定,其中车辆通过检测器的时间等于车辆长度与车检器长度除以单个目标的速度求得,见式(2):

$$o = \frac{\sum_i (l_i + d) / u_i}{T} = \frac{1}{T} \sum_i \frac{l_i}{u_i} + \frac{d \cdot N}{T} \cdot \frac{1}{N} \sum_i \frac{1}{u_i} \tag{2}$$

式中: N 为探测周期内所探测的所有目标数; l 为目标物长度。

用参数区间平均速度 \bar{u} 来表征所有车辆的截面长度与平均行驶时间之比,路段平均行驶速度等于总的探测器长度除以探测周期内若干个目标通过的时间

之和,如式(3)所示:

$$\bar{u}_s = \frac{D}{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N t_i} = \frac{D}{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{D}{u_i}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{1}{u_i}} \tag{3}$$

其中 D 表示特定截面的长度。然后,将区间平均速度代入占有率,可以将其简化为式(4):

$$o = \frac{1}{T} \cdot \sum_i^N \frac{l_i}{u_i} + d \cdot \frac{N}{T} \cdot \frac{D}{\bar{u}_s} = \sum_i^N \frac{l_i}{u_i} + d \cdot \frac{q}{\bar{u}_s} \tag{4}$$

因 $q = kv$,将 $q = k\bar{u}_s$ 代入式(4),则有:

$$o = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{l_i}{u_i}}{\frac{1}{N} \cdot T} + d \cdot k = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{l_i}{u_i}}{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N h_i} + d \cdot k \tag{5}$$

在实际交通环境中,由于小客车与货车具有不同的车头时距和速度,车型对于交通流特性存在显著的影响。假设交通流中小客车数量为 m 、货车数量为 n ,车长分别为 l_m (4.8 m)、 l_n (8.4 m),平均速度分别为 \bar{u}_{sm} 、 \bar{u}_{sn} ,小客车占比为 α ,则占有率可进一步简化为:

$$o = \frac{\frac{1}{N} \cdot \left(\sum_m^m \frac{l_m}{u_i} + \sum_n^n \frac{l_n}{u_j} \right)}{\frac{1}{N} \cdot \left(\frac{m \cdot l_m \cdot \frac{1}{\bar{u}_{sm}} + n \cdot l_n \cdot \frac{1}{\bar{u}_{sn}}}{\bar{u}_{sm}} + d \cdot k \right)} + d \cdot k \tag{6}$$

将 α 、流量、密度和速度之间的关系代入式(6)即可得占有率计算公式:

$$o = \frac{\frac{1}{N} \cdot \left[\alpha \cdot N \cdot l_m \cdot \frac{k_m}{\alpha \cdot q} + (1-\alpha) \cdot N \cdot l_n \cdot \frac{k_n}{(1-\alpha)q} \right]}{h} + d \cdot k = [\alpha \cdot l_m + (1-\alpha) \cdot l_n] \cdot k + d \cdot k = C_k \cdot k \tag{7}$$

3 数据分析

3.1 流量与速度分布

为了更好地对比应急车道关闭与开放两种工况试验断面交通流特性,选择上游断面总体流量相当时段下的交通流监测参数进行对比分析,探析应急车道开放条件下交通流特征。

3.1.1 应急车道关闭条件下交通特征

一般情况下,第1、2车道为小客车车道,第3、4车道存在客货混行状态。下文分析常规状态下(应急车

道关闭)的车流和速度分布情况,如图3所示。

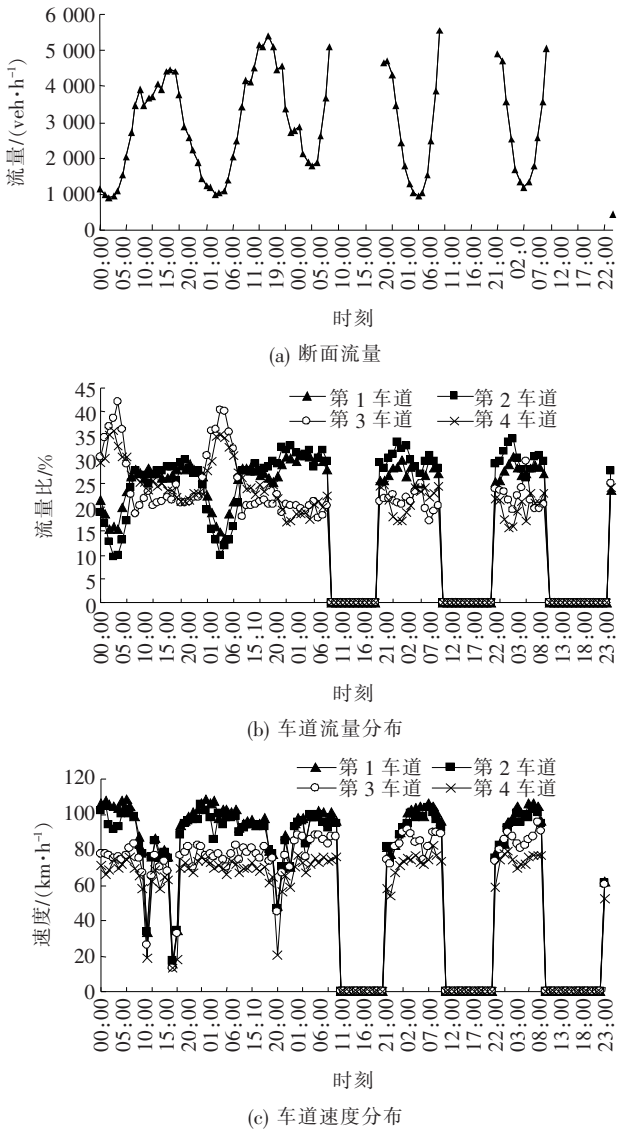


图3 常规状态下(应急车道关闭)车流与速度分布情况

由图3可得:

(1) 2019年4月30日至5月3日期间断面平均交通流量较平时增长约34%,受高速公路小长假免费放行政策及公众出行习惯的影响,5月1日至3日较4月30日有一定程度的增长;同一天内,出行高峰主要分布在10:00—18:00,不同时段流量呈现出的显著差异符合公众出行的习惯。

(2) 4条车道的总流量趋势相同,第1、2车道由于货车比例几乎为0,因此在车道分布上几乎一致,没有明显差异,但由于第2车道具备更好的变道机动性,其流量略大于第1车道。对于混行的第3、4车道,货车比例分别为6%和10%,车道越靠近内侧,货车比例越低,车辆的速度就越高。

(3) 4个车道的速度分布与车道流量分布非常相似,第1、2车道基本相同,第3车道速度介于第2车道和第4车道之间;宏观流速以天为单位总体上呈现出可复制性,而同一天内不同时段速度波动性明显,速度低谷与流量高峰时段相匹配。

3.1.2 应急车道开放条件下交通特征

根据应急车道开放试验方案和监测数据,分析其断面交通特征,如图4所示,相关参数与常规条件下存在显著的差异。

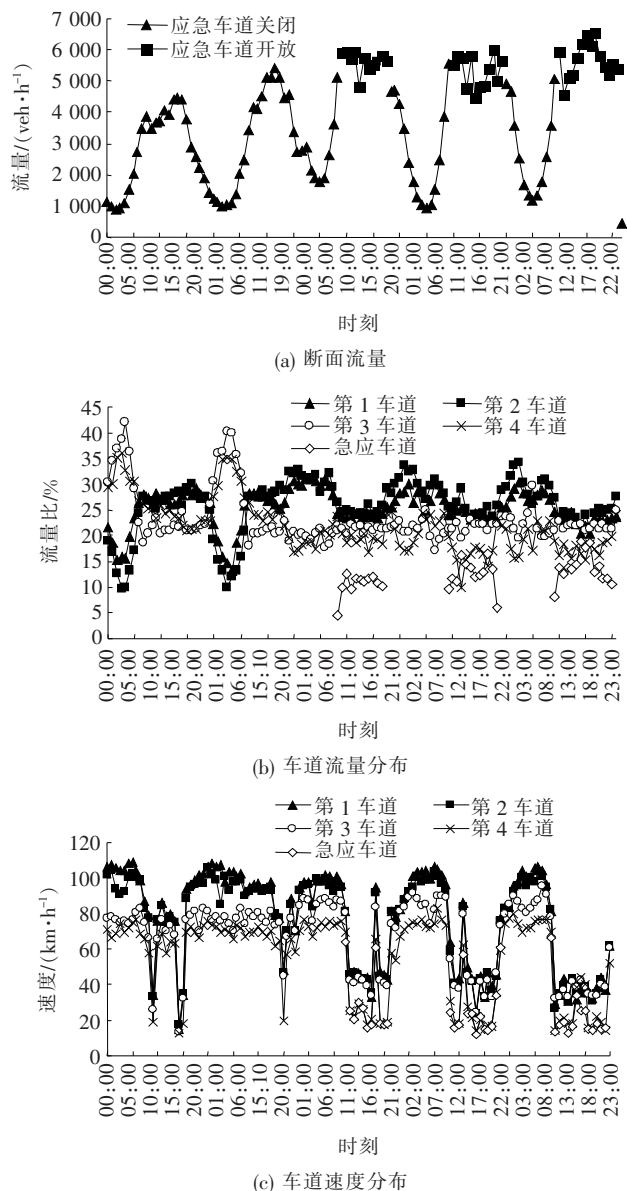


图4 应急车道开放时交通特征

由图4可知:

(1) 与图3相比,应急车道的运行分散了部分断面交通,不论是车道流量分布还是速度分布都对第

1~4车道造成了影响。

(2) 内侧3条车道在较高的流量下保持稳定,车道流量排名为:第2车道>第1车道>第3车道;从第3车道流量来看,其变化影响最大,小客车比例比应急车道开放前显著提高,应急车道开放时对不同车型产生了新的车道划分心理效应;与应急车道开放前相比,第4车道流量受应急车道影响,出现频繁的车辆变道降低了其平均流速,同时从现场视频来看,第4车道车辆具备了向应急车道变道的机动性,其与第3车道车辆横向间距也呈现增大趋势;对于应急车道,受中国高速公路交通管理政策法规影响,尽管试验路段有信息指引,但该试验是中国首次计划性开放应急车道,所以从视频观测来看,驾驶员对于应急车道占用的心理决策出现犹豫与跟从现象,其流量占比始终在15%左右,根据3d应急车道开放试验观察,随着相关新闻媒体的宣传,应急车道流量也呈现增长的趋势,同时应急车道的流量也受制于3.25m车道宽度影响。

(3) 与车道流量分布相似,第3车道速度逐渐向第2车道速度逼近,第4车道由于货车比提高,与其他3条车道的速度差异更加明显,其速度分布线与应急车道的速度分布线基本一致。分析认为:应急车道开放后第4车道更加倾向于单独的货车车道,部分原第3、4车道的小车逐渐向应急车道变道,但受限于应急车道3.25m的宽度,其速度始终无法得到大幅提升。

3.1.3 两种工况绝对数分析

根据毫米波雷达实测数据,选择试验路段相邻互通前某一段断面作为对比路段,开放应急车道的条件下,试验路段高峰小时断面通行绝对数较开放前提升约11.24%。

3.2 交通流参数分析

为了进一步探讨应急车道与常规车道在通行能力、临界密度等特性上的差异,以及其对整个断面的影响,通过对交通基本图的拟合,探讨该路段的车流密度关系。对于第1~4车道,5d内检测到的数据均可用于绘制基本图,应急车道仅采用开放的37h原始数据。将每5min的流量和密度单位转换为每小时每车道的车辆数和每公里每车道的车辆数,分别绘制散点图如图5所示。

从图5可以看出:交通基本图被分割成两部分,以接近最大流量的点表示两种不同的交通状态。左半部分处于自由流动状态,流量与密度成正比关系,其速度即为自由流速度;右半部分表示不同拥挤程度下的交通流状态,流量随着密度的增加而减小,直至达到0,

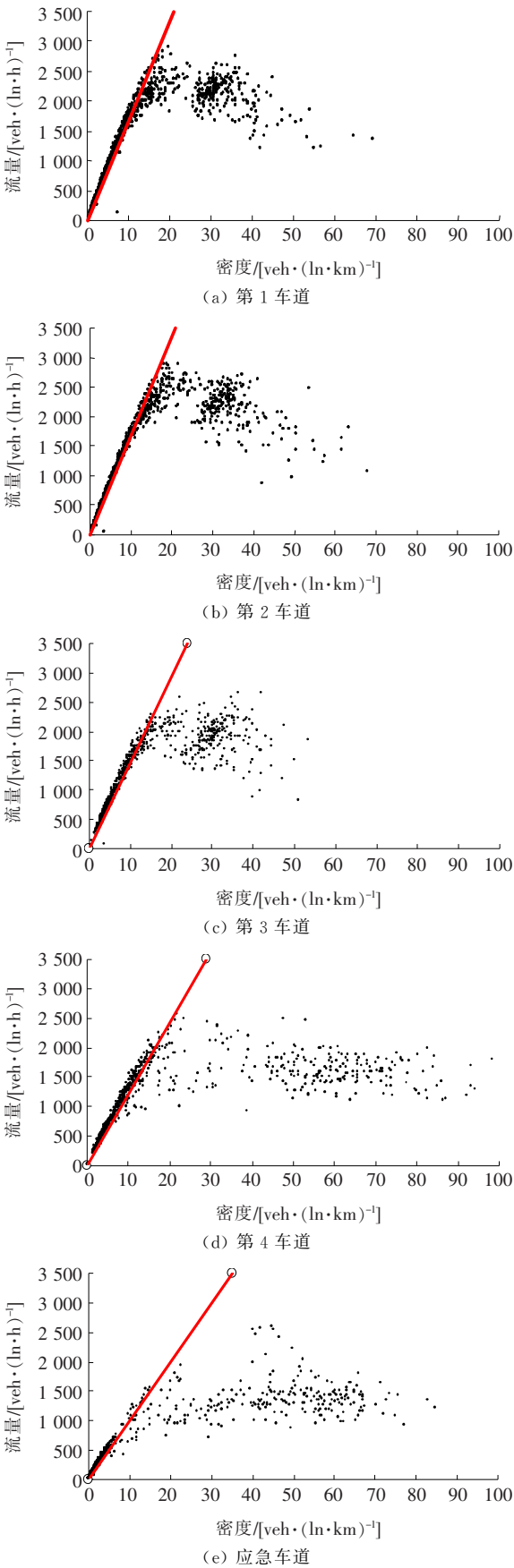


图 5 各车道流量—密度散点图

而通行能力即指散点图中两个部分的临界密度下的流量。同时,以交通流三角形为理论模型拟合各车道流速—密度关系^[9],拟合结果如表 1 所示。

表 1 车道交通流基本参数拟合结果

车道	自由流速度/ (km·h ⁻¹)	临界密度/ (veh·km ⁻¹)	通行能力/ (veh·h ⁻¹)	小客车 占比
第 1 车道	128.90	18.54	2 389.8	1
第 2 车道	129.10	17.92	2 313.5	1
第 3 车道	116.00	17.55	2 035.8	0.94
第 4 车道	98.63	19.60	1 933.1	0.90
应急车道	84.08	14.20	1 193.9	0.97

表 1 表明:第 1、2 车道,由于为小客车车道,其交通流参数较为相似;第 3、4 车道客车占比分别为 0.94 和 0.90,自由流速度较第 1、2 车道而言有明显下降,平均货车比例每增加 1%,自由流速度下降 2.94%;在应急车道上,尽管客货比较高,但由于车道宽度有限(3.25 m),车道的自由流速度和临界密度与其他车道相比还有较大的差距。不同车型车辆在自由流状态对于驾驶空间上的需求差异以理想车头时距为变量反映在交通流基本图上即为自由流车速的差异。通行能力上,不同类型车道间差异明显,1、2 车道、3、4 车道间彼此差异性较小,而小型车车道、客货混行车道和应急车道存在断崖式的差距。分析认为原因包括:① 试验时间安排在“五一”劳动节,本身交通流量就非常大,应急车道的车辆主要来自第 4 车道及邻近上行匝道,车辆间相互干扰较大,对交通流特性有明显影响;② 应急车道占用的交通规则约束效应导致驾驶心理障碍,随着相关政策完善,其通行能力会有一定幅度的提升。

同时,为了进一步探讨应急车道的使用对全断面交通流的影响,绘制应急车道开放前后断面道路的交通基本图,并进行拟合,如表 2、图 6 所示。

表 2 断面交通流基本参数拟合结果

项目	自由流速度/ (km·h ⁻¹)	临界密度/ (veh·km ⁻¹)	通行能力/ (veh·h ⁻¹)
应急车道关闭	107.5	102.0	10 965
应急车道开放	111.4	109.6	12 198

由表 2 可知:当应急车道关闭时,4 车道的总自由流速度约为 107.5 km/h,道路通行能力约为 10 965 veh/h;当应急车道开放时,道路通行能力和自由流速

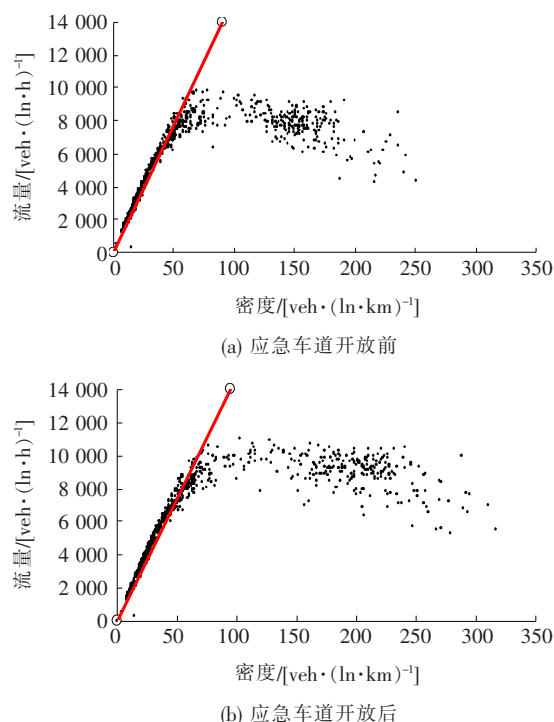


图6 断面流量—密度散点图

度分别接近 12 198 veh/h 和 111.4 km/h,断面通行能力值比应急车道不开放时高 10%左右,大体与绝对数提升值 11.24%相当。正如前文所述,该试验是在“五一”劳动节期间进行,极限交通压力较大,在一定程度上影响了通行能力提升,同时加之法律法规给驾驶员心理带来的影响,排除这两方面影响的话,其通行能力提升幅度将进一步提高。

4 结论

基于应急车道开放试验,研究分析了应急车道开放和关闭条件下的交通流参数特征,研究结果表明:

(1) 尽管应急车道开放条件下对于各个车道的交通流特性造成不同程度的影响,但其与普通常规车道一样,可以承担一定的交通功能,在一定程度上可提升总体断面的通行能力。

(2) 应急车道开放条件下,应急车道上的自由流速度和临界密度相比于其他车道较低,在外界因素干扰情况下其并不能完全发挥车道扩容的效果,但相比于拓宽改造增加车道而言,其是当前最直接最有效的

通行能力扩容方式。

(3) 应急车道开放是一项系统工程,要充分发挥其功效,需要匹配完善相应的交通法规、应急保障、控制机制等方面的体系建设工作。

(4) 该次试验是中国高速公路首次进行系统性应急车道开放探索,尽管试验场景等并不完善,但对于大流量高速公路交通管理以及下一步深入研究可提供重要参考借鉴。

参考文献:

- [1] LI Y, CHOW D L, Cassel. Optimal Control of Motorways by Ramp Metering, Variable Speed Limits, and Hard-Shoulder Running[J]. Transportation Research Record, 2014, 2 470(1): 122—130.
- [2] GUERRIERI M, MAURO R. Capacity and Safety Analysis of Hard-Shoulder Running (HSR). A Motorway Case Study[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2016, 92: 162—183.
- [3] JENIDR P, DOWLING R, NEVERS B, et al. Use of Freeway Shoulders for Travel: Guide for Planning, Evaluating, and Designing Part-Time Shoulder Use as a Traffic Management Strategy[Z]. Federal Highway Administration, FHWA-HOP-15-023, 2017.
- [4] 全国人民代表大会常务委员会.《中华人民共和国道路交通安全法》[Z], 2011.
- [5] BERGER, W, MAURER P. Emergency Bays Versus Emergency Lanes on Motorways—A Cost Benefit Analysis [C]. Traffic Safety on Two Continents—10th International Conference, 2000.
- [6] BAUER K M, HARWOOD D W, HUGHES W E, et al. Safety Effects of Narrow Lanes and Shoulder-Use Lanes to Increase Capacity of Urban Freeways[J]. Transportation Research Record, 2004(1 897): 71—80.
- [7] CHASE P, AVINERI E. Maximizing Motorway Capacity through Hard Shoulder Running: UK Perspective. The Open Transportation Journal, 2008, 2(1): 7—18.
- [8] 郭蓬, 郭敏锐, 戎辉, 等. 毫米波雷达研究现状及其测试项目[J]. 汽车电器, 2018(10): 56—59.
- [9] KOSHI M, IWASAKI M, OHKURA I. Some Findings and an Overview on Vehicular Flow Characteristics (Tokyo)[C]. Proc. 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Toronto, 1981.