

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.005

网联自动驾驶混行状态下信号交叉口通行能力分析*

徐菡¹, 李树彬^{1,2}, 林兆丰¹

(1.山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 2.山东警察学院 交通管理系, 山东 济南 250200)

摘要: 车头时距是表征交叉口通行能力的主要参数。为探讨网联自动驾驶混行状态下交叉口的通行能力,通过网联自动驾驶跟驰模型推导通过停止线的安全车头时距,分析混行状态下 4 种跟驰行为,针对是否考虑前车类型,基于概率模型构建混合交通流背景下交叉口通行能力模型,通过参数标定分析网联自动驾驶速度、车头时距、渗透率及信号控制对交叉口通行能力的影响,其中人工驾驶车辆的相关参数和模拟场景中涉及的数据均为实测所得。结果表明,网联自动驾驶速度增加、车头时距减小、渗透率增加、不考虑前车类型都会提升交叉口的通行能力,混合交通流背景下提升交叉口通行能力的根本原因在于车辆通过停止线的均衡态车头时距减小;交叉口受信号控制时的均衡态车头时距越小,通行能力降低幅度越显著。

关键词: 城市交通;交叉口;网联自动驾驶;混合交通流;跟驰行为;通行能力;信号控制

中图分类号:U491.122

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0017-05

随着车辆技术的发展,网联自动驾驶环境下道路通行能力研究受到广泛关注。文献[1]指出全自动驾驶技术的普及需要到 2060 年以后。文献[2]认为中国道路会长期处于网联自动驾驶与人工驾驶车辆混行状态。文献[3-4]通过传感技术实现车路协同,主要研究可变导向车道、信号灯感应式与自适应控制实时变化,通过对交通流的实时分配提升通行能力。文献[5-6]集中于高速公路通行能力研究,通过改变驾驶行为参数与渗透率提高道路系统通行能力。文献[7]通过仿真验证了车辆以较小车头时距通过交叉口时会增加通行能力并降低油耗。目前对网联自动驾驶与人工驾驶车辆混合交通流背景下交叉口通行能力的理论研究较少。本文通过网联自动驾驶跟驰模型推导网联自动驾驶通过交叉口停止线时的安全车头时距,分析混行状态下 4 种跟驰行为,对是否考虑前车类型,基于概率模型构建混合交通流下交叉口通行能力模型,根据实地调查情况构建模拟场景,收集人工驾驶车辆相关参数,通过参数标定模拟混合交通流,进而分析网联自动驾驶速度、车头时距、渗透率及信号控制对交叉口通行能力的影响。

1 模型建立

1.1 网联自动驾驶车头时距确定

当前并不具备网联自动驾驶与人工驾驶车辆混行

状态下在真实场景进行试验的条件,只有加州大学提出的网联自动驾驶跟驰模型得到了真车试验验证^[8],被广泛接受并应用于理论研究。该模型中网联自动驾驶车辆的安全车头间距 h 为:

$$h = t_q v + s_0 + l \quad (1)$$

式中: t_q 为期望车头时距(s); v 为网联自动驾驶通过停止线时的速度(m/s); s_0 为安全间距,一般取 2.62 m; l 为车辆长度,取 5 m。

车辆通过交叉口时需考虑多方面因素,而混行状态使交通状况变得更复杂。为保证车辆行驶安全性,利用安全车头间距计算网联自动驾驶通过停止线时的车头时距,公式如下:

$$t_g = \frac{h}{v} = \frac{t_q v + s_0 + l}{v} \quad (2)$$

1.2 构建混合交通流背景下通行能力模型

设混行车辆中出现网联自动驾驶的比例为 p ,出现人工驾驶车辆的比例为 $1-p$ 。混合交通流背景下存在网联车跟驰网联车、网联车跟驰人工驾驶车辆、人工驾驶车辆跟驰人工驾驶车辆、人工驾驶车辆跟驰网联车 4 种跟驰行为^[9-11],其出现概率分别为 p^2 、 $p(1-p)$ 、 $(1-p)^2$ 、 $p(1-p)$ 。分析网联自动驾驶与人工驾驶车辆混合交通流背景下网联车的渗透率、车头时距及速度等因素对交叉口通行能力的影响时,需讨论不考虑前车类型与考虑前车类型两种

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(71971125;71871130);山东警察学院科研计划项目(YSKYB202108)

情况。考虑前车类型时,网联自动车的车头时距与人工驾驶车辆一致。

考虑网联自动车跟车类型时,混合交通流的交叉口通行能力估计模型为:

$$S = \frac{1}{[p^2(t_q v + s_0 + l)]/v + (1-p)t_s} \quad (3)$$

式中: t_s 为人工驾驶车辆的平均车头时距(s)。

不考虑网联自动车跟车类型时,混合交通流的交叉口通行能力估计模型为:

$$S = \frac{1}{[p(t_q v + s_0 + l)]/v + (1-p)t_s} \quad (4)$$

1.3 混合交通流下信号控制交叉口的通行能力

饱和流率和有效绿信比是影响交叉口通行能力估计的重要参数^[12],信号控制是影响交叉口通行能力的重要外部因素。信号控制交叉口通行能力估计公式为:

$$S_{CAP} = S \cdot \frac{g}{C} \quad (5)$$

式中: g 为总的绿灯时间(s), $g = C - L$; L 为每个周期内浪费的总时间(s); C 为周期时长(s)。

当网联自动车与人工驾驶车辆在道路上混行通过交叉口时会导致交叉口各进口车道的饱和度发生变化,如果信号配时方案不能满足当前驾驶环境,会导致信号灯的管控效能下降,此时应对交叉口信号配时进行优化以提高交叉口的通行效率。由 Webster 法^[13]和式(3)、式(4)可得混合交通流背景下最优周期长度为:

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n a_i / S} \quad (6)$$

式中: n 为相位数目; a_i 为第 i 个相位的车道交通流量比的最大值。

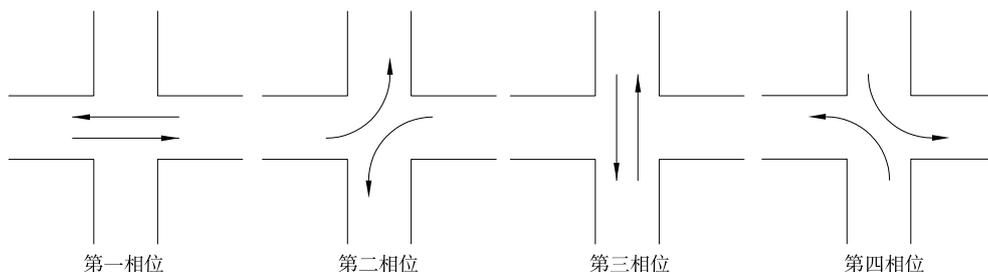


图2 交叉口的信号相位示意图

收集该交叉口 17:15—19:15 的交通量,通过对数据的整理与计算,得该交叉口晚高峰小时为 17:30—18:30。利用晚高峰小时交通流量对前述模

混合交通流背景下交叉口饱和度发生改变时利用式(6)对信号周期时长进行优化,将计算结果代入式(5)即可对混合交通流背景下信号控制对交叉口通行能力的影响进行分析。

2 场景构建与参数标定

选取山东德州市某四相交路口作为研究场景,路口流量与人工驾驶车辆相关参数为现场采集所得,网联自动车相关参数根据已有理论研究结合实际场景进行标定。

2.1 静态场景

经现场调查与测量,在数据收集时段内无工程车辆通过,公共汽车数量较少,高峰时段非机动车流量较大。路口内设有非机动车道与人行道,非机动车对机动车的干扰较小。每个方向上均为 3 个入口和 2 个出口,进口道宽度为 3.2 m。抽象处理后,该交叉口的布局与车道分布见图 1。

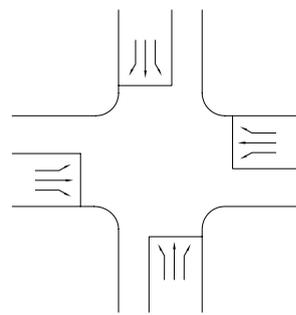


图1 研究场景布局示意图

2.2 动态场景

该交叉口为典型的对称放行四相位交叉口,右转无限制,南北方向车流量比东西方向车流量大,每个相位的前启动时间为 3 s,后损失时间为 1 s,共 4 s。信号相位见图 2。

型进行分析。根据相位划分,该路口流量由大到小分别为第三相位、第二相位、第四相位、第一相位。该交叉口无右转信号灯但有右转专用车道,分析中

不考虑右转车流量。高峰小时各进口道的车流量见表1。

表1 高峰小时各进口道的车流量 单位:veh/h

| 行驶方向 | 各进口道的车流量 | | | |
|------|----------|-----|-----|-----|
| | 东 | 西 | 南 | 北 |
| 左转 | 334 | 317 | 248 | 225 |
| 直行 | 192 | 266 | 559 | 461 |
| 右转 | 138 | 265 | 289 | 155 |

2.3 参数标定

该交叉口所在城市道路限速为50 km/h,为保证行驶安全,车辆通过交叉口时降低速度。网联自动车具备良好的驾驶和行驶行为,通过多源传感器的感应识别能对外界变化作出及时反应,故认为网联自动车能按照期望速度行驶。网联自动车的速度根据收集的人工驾驶车辆速度在合理范围内进行标定。

利用测速仪与秒表测量通过交叉口的饱和车头时距与饱和流速度,对人工驾驶车辆的相关参数进行标定。分析模型中仅需车辆通过停止线时的饱和车头时距与平均速度,在此不对误差与精确度进行具体分析。数据处理结果与网联自动车参数标定结果见表2。表中网联车车头时距为理想车头时距,通过停止线时的车头时距需通过计算确定。

表2 参数标定

| 车辆类型 | 饱和流速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | 车头时距/s |
|--------|---|---------------------------|
| 人工驾驶车辆 | 26.1 | 2.13 |
| 网联自动车 | 26.1,30.0 | 0.60~1.00 ^[14] |

3 参数敏感性分析

3.1 网联自动车不同速度时交叉口通行能力

网联自动车混行状态下交叉口通行能力分析结果见图3。

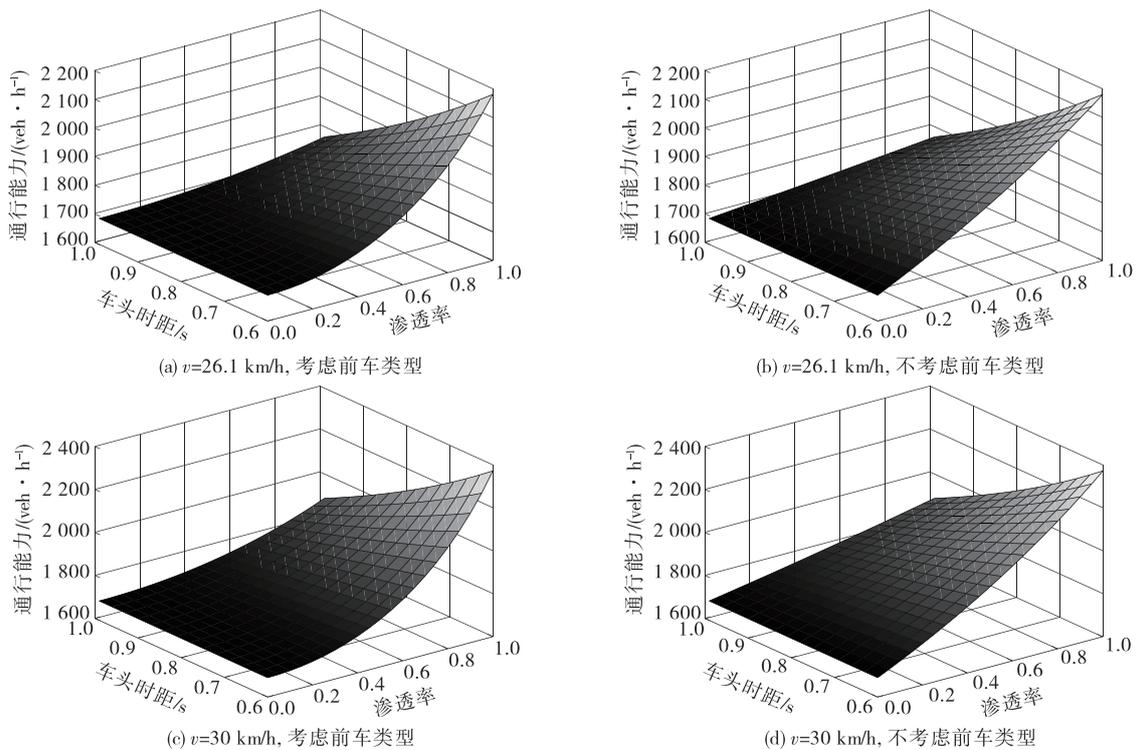


图3 网联自动车不同速度时交叉口通行能力

由图3可知:网联自动车渗透率、车头时距、速度及是否考虑前车跟车类型都会影响交叉口的通行能力。整体来看,随着网联自动车渗透率的增加与车头时距的减小,即随着均衡态车头时距的减小,交叉口通行能力的反应程度逐渐增强。考虑前车类型时,渗透率达到60%时通行能力才明显提升,渗透

率较低时获得的边际效益较低;不考虑前车跟车类型时,即使渗透率处在较低水平,通行能力提升幅度也较明显。网联自动车以较快速度通过交叉口能从整体上提升交叉口的通行能力,网联自动车速度从26.1 km/h提升至30 km/h时,交叉口最大通行能力由2 200 veh/h提升至2 400 veh/h;最低通行能

力时没有网联自动车混入,所以没有发生变化。即使车头时距较大,网联自动车速度提升也能在很大程度上提升交叉口的通行能力。综上,混合交通流背景下,提高网联自动车的渗透率、降低车头时距、提高车速等能有效提升道路交叉口的通行能力;车头时距是描述车辆驾驶行为的重要参数,车流速度可反映道路环境的约束,而车流速度能影响网联自动车通过停止线时的车头时距,所以混行状态下交叉口通行能力提升的根本原因是通过停止线时的均

衡态车头时距减小。

3.2 信号控制对交叉口通行能力的影响

网联自动车的渗透率、通过停止线时的车流速度和车头时距的改变能使交叉口通行能力的整体变化趋势发生变化。有效绿信比是一个常数,只能在数值上改变交叉口的通行能力,不会改变通行能力的整体变化趋势。此处分析网联自动车速度 v 为 26.1 km/h、30 km/h,考虑前车类型时信号控制对交叉口通行能力的影响,分析结果见图 4。

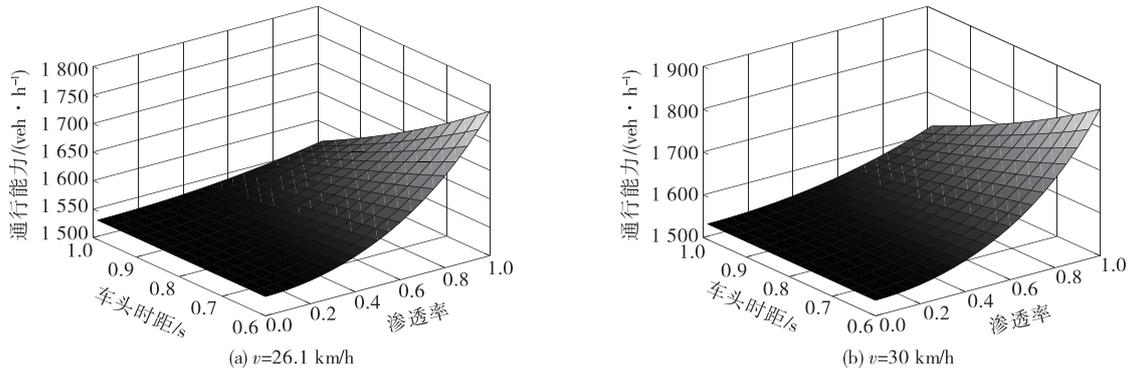


图 4 信号控制对交叉口通行能力的影响

对比图 4 与图 3(a)、图 3(c),车速 $v = 26.1$ km/h 时,混合交通流交叉口最高通行能力由 2 200 veh/h 降到 1 750 veh/h,最低通行能力由 1 700 veh/h 降到 1 530 veh/h; $v = 30$ km/h 时,混合交通流交叉口最高通行能力由 2 400 veh/h 降到 1 840 veh/h 左右,最低通行能力因为不受网联车的影响与 $v = 26.1$ km/h 时的变化一致。 $v = 30$ km/h 时通行能力降低幅度高于 $v = 26.1$ km/h 时,主要是因为通过交叉口的车流量固定, $v = 30$ km/h 时饱和度低于 $v = 26.1$ km/h 时饱和度,而每个周期内启动延误固定,这部分时间在单位时间内的占比增多会使交叉口通行能力降低幅度更明显。

4 结论

网联自动车速度增加、车头时距减小及渗透率增加都会提升交叉口的通行能力;不考虑前车类型时,通行能力提升幅度更明显;交叉口受信号控制时,均衡态车头时距越小,通行能力降低幅度更显著;交叉口通行能力提升的根本原因在于车流通过停止线时的均衡态车头时距减小。

以往关于网联自动车混行状态下通行能力的分析更倾向于路段,缺乏混合交通流背景下交叉口通行能力分析。对网联自动车相关参数的分析表明网

联自动车的引入能有效提升交叉口的通行能力。上述研究结论可为制定混合交通流背景下网联自动车与人工驾驶车辆的发展与管理政策、进行道路规划与设计提供理论参考,同时为缓解交通拥堵提供有效途径。

参考文献:

- [1] 中国汽车工程学会.节能与新能源汽车技术路线图年度评估报告 2019[M].2 版.北京:机械工业出版社,2020:43-45.
- [2] 吴文皓.智能网联汽车发展对交通管理业态的影响探讨[J].道路交通管理,2022(3):50-53.
- [3] 王连震,王宇萍,姚丽.基于可变导向车道的交叉口时空资源协同优化方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(6):1005-1009.
- [4] GULER S I, MENENDEZ M, MEIER L. Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 46:121-131.
- [5] 张敏.混入智能车辆的道路通行能力分析[J].公路,2019,64(12):198-203.
- [6] YE L H, YAMAMOTO T. Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 490:269-277.

[7] DARBHA S,KONDURI S,PAGILLA P R.Benefits of V2V communication for autonomous and connected vehicles[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2019,20(5):1954-1963.

[8] MILANÉS V,SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48: 285-300.

[9] 钱国敏,凡俊生,何春光,等.智能网联混行环境下交叉口时空资源配置优化[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(6):1019-1026.

[10] 秦严严,唐鸿辉,杨金滢,等.混有网联车队的道路通行能力分析[J].北京交通大学学报,2022,46(1):79-87.

[11] 常鑫,李海舰,荣建,等.混有网联车队的高速公路通

行能力分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(4):142-148.

[12] 杨晓光,赵靖,马万经,等.信号控制交叉口通行能力计算方法研究综述[J].中国公路学报,2014,27(5):148-157.

[13] WEBSTER F V.Traffic signal settings[R].Road Research Technical Paper No.39, Department of Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory,1958.

[14] SHLADOVER S E,SU D Y,LU X Y.Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J].Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2012,2324(1):63-70.

收稿日期:2022-03-11

(上接第 7 页)

$$F_{C,J} = \min[F_{C,T}, 0.2] \tag{4}$$

式中: $F_{C,J}$ 为汽车空调节能效果值[L/(100 km)]。

表 5 汽车高效空调节能效果 单位:L/(100 km)

| 项目 | 燃料消耗量 | 项目 | 燃料消耗量 |
|-------------|-------|-----------|-------|
| $F_{C,ON}$ | 8.29 | T_{AC} | 1.88 |
| $F_{C,OFF}$ | 6.87 | $F_{C,T}$ | 0.14 |
| $F_{C,AC}$ | 1.42 | $F_{C,J}$ | 0.14 |

3 结论

以 Jeep 指南者车型为研究对象,对其高效空调性能进行试验研究,得出以下结论:

(1) 指南者车型配备了高效空调,自动空调温度设置越低,车辆油耗越高。21℃是高效空调试验的最佳空调设置温度。

(2) 空调设置温度影响燃料消耗量,最佳的空调温度设置能保证车辆在燃料消耗量试验中取得理想的结果。该车型的空调燃料消耗量为 1.42 L/(100 km),空调节能效果值为 0.14 L/(100 km)。

配备高效空调的指南者车型的节能效果明显。但试验中发现自动空调节能策略、智能内外风门策略与循环外法规的匹配性仍有提升空间,下一步的研究将针对高效空调的智能风门策略优化展开。

参考文献:

[1] 覃峰,黄国强.乘用车的高效空调技术及其效果评估

[J].制冷与空调,2018,18(5):62-68.

[2] 曹磊,解难,钱国刚.MACTP 车用空调油耗测试评价研究[C]//中国内燃机学会燃烧节能净化分会.中国内燃机学会燃烧节能净化分会学术年会暨先进发动机节能及测试技术论坛.中国内燃机学会燃烧节能净化分会,2014:37-43.

[3] 中国汽车技术研究中心有限公司,重庆长安汽车股份有限公司,中国第一汽车集团有限公司,等.乘用车循环外技术/装置节能效果评价方法 第 3 部分:汽车空调:GB/T 40711.3-2021[S].北京:中国标准出版社,2021.

[4] 彭海丽.2021 年行业燃料消耗量与新能源汽车积分情况分析[R].天津:中汽数据有限公司,2022.

[5] 钱国刚,赵伟.高效空调及怠速起停的循环外油耗测试评价[J].制冷与空调,2015,15(5):68-73+78.

[6] 郭超.基于 CLTC-P 的高效空调循环外油耗测试分析[J].制冷与空调,2021,21(10):21-25.

[7] 中国汽车技术研究中心有限公司.中国汽车行驶工况第 1 部分:轻型汽车:GB/T 38146.1-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

[8] 黄国强.新能源汽车高效空调的研究开发思路初探[J].制冷与空调,2016,16(5):69-78.

[9] 中国汽车技术研究中心有限公司,北汽福田汽车股份有限公司,中国第一汽车集团有限公司,等.轻型汽车燃料消耗量试验方法:GB/T 19233-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

收稿日期:2022-04-19