

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.06.001

# 自动驾驶与常规交通混合条件下通行能力研究

张焱

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 随着自动驾驶技术不断升级,现有交通设施的容量也相应随着技术的革新发生变化,传统车辆不会立即退出历史舞台,在未来一段时间内自动驾驶车辆将和传统车辆共用现有的基础设施,因此开展混合交通条件下通行能力的研究有助于重新审视既有交通设施的容量,并对这种场景下管理及技术发展方向提供一定的指导作用。结合自动驾驶车辆的运行特征,研究不同自动驾驶混入率条件下各参数对宏观道路潜在通行的影响,利用概率论及蒙特卡洛方法进行理论计算,模拟自动驾驶车辆出现在车队的位置和时空需求,并对不同的组队策略进行详细分析,粗略估计在混合交通状况下交通能力提升的趋势和影响程度,为混合通行能力的测算提供了一种方法,并提出管理和自动驾驶技术的发展方向,为进一步适应自动驾驶技术的变革提供了有益参考。

**关键词:** 自动驾驶;混合交通;通行能力;排队长度

中图分类号: U452.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0001-04

## 0 引言

近年来,汽车技术发展迅速,这主要体现在引入先进的驾驶员辅助系统和开发更高效的动力系统。后者将在能源消耗和污染物排放方面产生影响;前者有可能改变驾驶行为,解决拥堵和交通安全问题。

电子驾驶员辅助系统的早期版本是为了提高安全性而开发的,例如防抱死制动系统(ABS)或电子稳定控制系统(ESC)。目前发展已远不止这些,正在逐步实现自动化驾驶任务或者是部分实现,如自适应巡航控制(ACC)或车道保持系统(LKAS)。最终目标是以自动驾驶汽车的形式实现全自动驾驶。从国内来看,除了近年来在上海、北京等城市的试点测试区域之外,关于自动驾驶车辆(AVs)何时上路目前还存在激烈的争论,但存在一些共识,即技术上的难题将逐渐被克服,AVs最终将成为现实<sup>[1]</sup>。

AVs的引入是渐进的,在很长一段时间内,他们将与传统的人工驾驶车辆一起在同一基础设施中共存<sup>[1]</sup>。针对这种混合交通,以往的研究表明,单纯引入AVs并不能提高交通效率;相反,甚至可能不利。例如,自适应巡航控制(ACC)中通常使用较大的时间间隔和较低的加速度,这意味着车辆在高速公路

中的通行能力显著降低。要增加道路容量,车辆之间的平均时间间隔必须减小。当前ACC系统的反应时间为0.1~0.2 s,随着5G技术的进一步普及,这个数值甚至更低,远远低于人类的反应时间,因此技术上的障碍并不大。该问题更多地与使用这些技术可能在短延时的安全和舒适感有关。通过CACC(协作式ACC)和形成车列,尤其是通过创建一系列连续连接的自动驾驶车辆(CAV)在极短的时间间隔内一起行驶,可以在极短的间隙内安全舒适地行驶。车列不仅增加了容量,而且由于空气阻力减小,也降低了车辆的能耗<sup>[2]</sup>。为显著提升能力,有必要构建尽可能长的车列。车列中的第一辆车(即头车)将作为间隙较大的不协调AV行驶,主要是因为其与前一辆车没有直接通信。因此,可以确定平均车列长度(定义为短间隙连续CAV行驶的平均数量)与高速公路通行能力潜在增长之间有直接关系。根据交通状况估计CAVs车列长成为研究关键<sup>[3]</sup>。

宏观分析在获取理论知识和推导交通流基本参数之间的主要关系方面一直是常用的分析方法。宏观模型依赖于实际场景,其力求通过较少的输入,获得更简单的输出,由此产生的综合结论是制定更优交通管理策略的基础。这种研究模式适用于目前这种混合交通情况,即CAV车列与常规车辆(RVs)一起行驶,由于车列中的CAV作为一个单独单元,就像“公路列车”,具有与常规交通完全不同的跟车规则和参数,这

收稿日期: 2023-08-04

作者简介: 张焱(1979—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通设计工作。

需要一个特定模型。这种宏观方法的应用有助于揭示混合交通宏观行为中车队长度和 CAV 混入率影响的程度,特别是在高速公路通行能力方面。

本文通过建立一个确定 CAV 队列长分布的概率模型,假设 CAV 在交通流中的存在符合泊松分布<sup>[4]</sup>,在此基础上进行高速公路混合交通的宏观建模。分析两种不同车队形成策略(即随机策略和主动策略),其代表了实际可能的两个较为极端的可能情况。此外,通过对 RVs 和 CAV 车队实施特定的跟车模型,评估和分析了不同 CAV 混入率下混合交通高速公路车道的潜在通行能力。

### 1 模型描述

如图 1 所示,一条混合交通的多车道高速公路,自动驾驶车辆与普通车辆共享道路通行。模型考虑其中的一条车道,在这条车道上自动驾驶车辆(CAV)的目标是组成车队,其共享信息并协同行动,与单独的自动驾驶车辆和常规车辆相比以更短的间隙协同行进。在这个车道中车辆被分为三类:一是自动驾驶(头车);二是自动驾驶(跟车);三是普通。在这样的定义下,独立的 CAV 被认为只有头车的车队,只有 CAV(跟车)才能在减少间隙的情况下出行。此外,所有的 CAV 都需要在车载设备的通信范围内以便成为一个单独的工作单元,并在一定的延迟内与头车通信,本文中这个队列长度为  $l_d$  且不大于 300 m。根据定义,只有当连续的 CAV 偶然出现在这条车道内才会创建车队,车队创建可以是随机创建也可以是主动创建(即所有 CAV 车辆会主动形成车队),这是两个不同的策略。当自动驾驶车辆比较集中时有可能创建很长的车队,有研究表明当车队长度很长时会出现车队间数据传输不稳定的情况,因此有必要规定为保证数据传输稳定的最大车队长度  $k_p$ ,通常认为 20 辆以内是稳定的。车队创建及其可能的长度取决于队列长度内自动驾驶车辆的数量,同时还取决于车道上的交通流量  $q$ 、CAV 在该车道内的混入率  $\beta$  和队列长度  $l_d$ 。

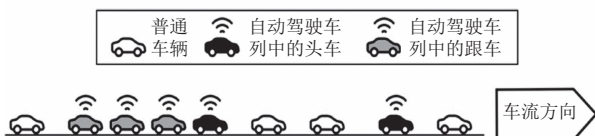


图 1 混合车队构建示意图

(1)模型主要输入参数

$V_f$  为自由流车速,取值 100 km/h;

$\beta$  为自动驾驶车辆混入率,取值 0~100%;

$l_d$  为队列长度(考虑通讯距离限制);

$k_p$  为自动驾驶最大车队排队长度,取值为 20 辆;

$t_R$  为人类驾驶员跟车过程平均反应时间,取值为 1.0 s;

$\tau$  为平均车辆长度,取值为 5 m;

$\delta$  为车辆通信延时,取值为 0~0.2 s;

$d_{max}$  为紧急情况下自动驾驶车辆最大加速度值,取值为 10.0 m/s<sup>2</sup>;

$\gamma$  为自动驾驶车辆可接受的加速度差异,取值为 0.05~0.3;

$f_{min}$  为安全冗余距离,取值为 0.5 m。

(2)模型主要变量参数

$q$  为混合车道内交通流量,单位为辆/h;

$q_{max}$  为混合车道潜在通行能力,单位为辆/h;

$v$  为行驶速度,单位为 km/h;

$k$  为随机排队长度(受最大排队长度控制),单位为辆;

$K$  为平均排队长度,单位为辆;

$\lambda$  为在列队长度  $l_d$  范围内平均车辆数,单位为辆;

$n$  为随机车辆数,单位为辆;

$P(n, \lambda)$  为在  $n, \lambda$  为参数的泊松分布概率。

本文主要研究高速公路路段上平衡时的平稳自由流动交通,不考虑单车辆的行为,也没有考虑 CAV 在微观层面排成车队的详细动态影响,即不考虑单个车辆在形成车队前的驾驶行为。这种假设与经典宏观交通流模型一致,既不考虑详细的车道变化,也不考虑单个车辆的速度,这不会对最终的宏观结果产生重大影响。

### 2 排队长度估计方法

高速公路上自由流动车辆的分布可以认为是泊松分布。泊松参数(对应于车队长度  $l_d$  内车辆(含自动驾驶车辆和常规车辆)的平均数量,而  $n$  表示  $l_d$  中车辆数量的随机数。

$$P(n, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^n}{n! (1 - e^{-\lambda})} \quad (1)$$

$$\lambda = q \cdot \frac{L_d}{v} \quad (2)$$

显然当 CAV 车队创建采用主动和随机两种不同策略时会影响平均排队长度。

在主动策略且排队长度不受限制时,所有的 CAV 车辆都将创建进同一个车队,如果强制执行最大排队长度  $k_p$ ,则超过的车队将被分到下一个车队中。

在随机策略下 CAV 车辆随机出现在车队中,当自动驾驶车辆混入率较低时其超过最大排队长度的概率并形成较长车列的概率也低。

在一定的 CAV 车辆混入率下,通过随机函数模拟车辆出现在车队中的位置,并根据相关跟车模型测算出单车、车列和车队占用高速公路车道的长度即排队长度,从而计算出车队的总长度,据此可以推算出在稳定流状态下一个车道潜在的通行能力。

### 3 混合交通车道潜在通行能力估计

连续流车道上的流量  $q$  可以计算出平均的车头时距,其中车头时距的定义为给定位置两辆连续车辆通过的时间间隔,同样根据给定的车头时距可以反推出车辆间距,即两辆连续车辆之间的距离。高速公路车道的通行能力  $q_{max}$  是指道路能够维持的最大稳定流量:

$$q_{max} = \frac{v}{l+g} \quad (3)$$

式中: $g$  为了保障车辆安全行驶而需要保证的必要空隙。

对普通车辆而言高速公路的通行能力,考虑到人类的平均反应速度  $t_R$  并加上必要的制动时间,一般车头时距取 1.6~1.8 s,故基准通行能力为 2 000~2 200 pcu/(h·ln),现行《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)也是在此基础上取值的<sup>[5]</sup>。

对自动驾驶车辆而言,尤其是当自动驾驶车辆形成车队后其两车间的空隙可以大幅缩小, $g$  的取值主要由以下三部分组成。

(1)通信延时:由于车辆之间通信及数据交换受电子设备性能影响存在一定的延迟。 $\delta$  为最大延时,因此由于延时需要的空隙为  $v\delta$ ,其中  $v$  为行驶车速。

(2)前后车之间制动性能差异:由于自动驾驶车辆制动性能上的差异,最不利的情况是制动性能最低的车辆跟随在制动性能最高的车辆之后。在紧急制动情况下两车的空隙将减小,为避免碰撞需要提供额外的空隙。定义车辆最大减速度为  $d_{max}$ ,可接受的最小减速度为  $d_{max}(1-\gamma)$ ,则所需的额外空隙为:

$$\frac{v^2}{2d_{max}} \left( \frac{\gamma}{1-\gamma} \right) \quad (4)$$

(3)安全冗余:在最不利的情况下,最小空隙将缩小至零。为避免这种情况出现,最小空隙应包含一定的安全冗余  $f_{min}$ 。

因此在自动驾驶车列中跟车和前车的空隙:

$$g = v\delta + \frac{v^2}{2d_{max}} \left( \frac{\gamma}{1-\gamma} \right) + f_{min} \quad (5)$$

利用概率论的分析方法可计算出不同工况下单个车道的潜在通行能力,并且利用蒙特卡洛法对结果进行验证,结果与理论计算趋于一致,经修正后的数据图如图 2 至图 5 所示。

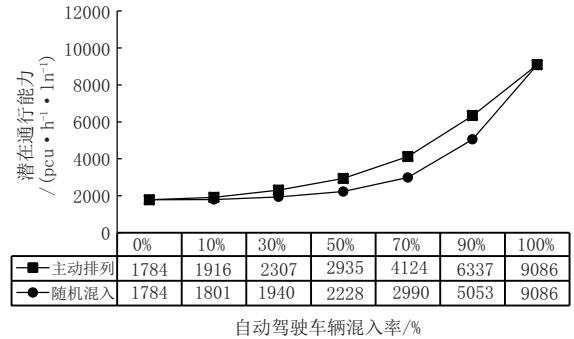


图2 不同策略对潜在通行的影响

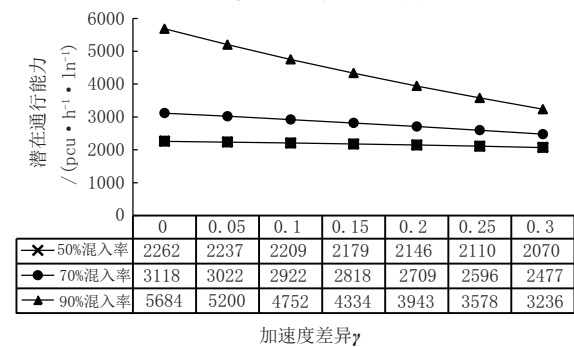


图3 制动性能对潜在通行能力的影响

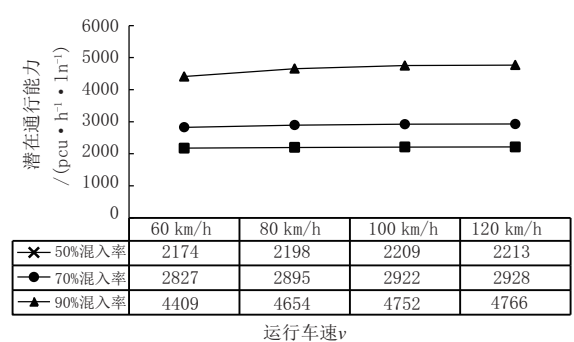


图4 运行车速对潜在通行能力的影响

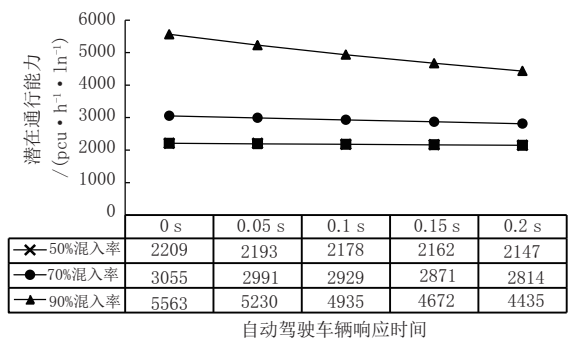


图5 响应时间对潜在通行能力的影响

## 4 结 语

本文提出了一种基于概率论的分析方法,用于在 CAV 和 RVs 共享相同道路的混合交通环境下估



计通行能力,该方法用于估计混合排队道的潜在通行能力。车列是一连串连续的自动驾驶车辆,由一个头车和其他跟车组成,只有跟车在减少间隙的情况下以车列模式行进才能提升车道通行能力。因此,车列长度对提高混合车道通行能力至关重要,平均车列长度越长,该策略实现的容量增加效果越明显。除了分析不同策略对潜在能力通行的影响外,还针对自动驾驶车辆重点性能参数进行分析。

结果表明,在混合车道上随着CAV车列的加入,其通行能力发生较大的变化,主要表现为以下几个方面。

(1)随着加入的CAV车列数量和车列平均长度的变化通行能力大幅提高,由图2可知,CAV混入率的提升对通行能力的提升关系非常密切,极端情况下通行能力可提升5倍以上,另外在相同的混入率下,主动策略和随机策略相比,提升也非常明显。

大力发展自动驾驶并努力主动提升CAV的平均车列长度可有效缓解交通基础设施供给与需求的矛盾。当混入率达到一定水平时,多车道高速公路管理上考虑设置自动驾驶专用车道能进一步提升整体效率(三车道达60%,四车道达50%,双车道不建议)。

(2)在较高CAV混入率条件下,队内自动驾驶车辆制动性能的差异对通行能力的影响是显著的,如图3所示,制动性能的差异可使相同条件通行能力下降10%~40%,混入率越高其影响程度越大。

自动驾驶车辆其制动性能应保持在一个比较平均的水平才能使CAV车队的通行效率更高,制定下限规定的同时也应考虑对部分过于优秀的制动性能有所约束,避免在车列中频繁出现,这不仅仅是出于舒适性的考虑也是从整体效率上的考虑。

(3)运行车速在相同的CAV混入率情况下对整体效能影响有限,如图4所示,随着运行车速的提高通行能力略有提升,但提升有限不足10%。

现有的车速管理模式同样适用于CAV混入的情景,可继续维持。

(4)车辆通信延时对整体的通行能力有一定影响,如图5所示,当平均延时达到较高水平时可使90%混入率的混合车道通行能力下降约20%。

路基和车基础设施的处理能力决定了整体的延时水平,应在设施上推广高效且稳定的设备以降低延时水平。数据方面应采用更优的数据结构和传输协议,出于安全上的考虑应提供多渠道的数据校验。

(5)在随机策略情况下,车列组成长度对混入率的依赖非常明显,当混入率低于0.6时形成有效车列的概率非常低,也不可能受20辆队列长度的限制,这从不同混入率的潜在通行能力可以看出。

从管理和自动驾驶车辆行为上应鼓励主动形成车列的措施和手段,这需要自动驾驶车辆通过驾驶行为来排除车列内的普通车辆。

综上所述,本文并未讨论车队形成的具体微观行为,其目的仅在于为高速公路路段的平均车队长度和通行能力估计获得宏观模型。交通流不稳定性和车辆变道对CAV的详细影响也没有得到解决,仍然是有待进一步研究的问题。队列形成主要通过概率论方法和蒙特卡洛法加以一定的策略约束达到目的,旨在将车辆分配到不同车道,以实现尽可能长的车列,但在更复杂的道路条件(如车道缩减、合并和分流或平面交叉口)中进行车辆分配和管理有待进一步研究,使整体通行能力在交通系统中得到匹配。

#### 参考文献:

- [1] 黎飞龙. 浅析国内汽车自动驾驶发展现状及未来趋势[J]. 电信快报, 2023(5):35-37.
- [2] 杨志发,孙勃,樊贤俊,等. 车路协同背景下高速公路货车车队的能耗仿真[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), (2023-07-05):1-8 [2023-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230705.1321.001.html>
- [3] 秦严严,朱宜文,朱立,等. 智能网联卡车车队混合流通行能力分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4):275-282.
- [4] 王伟,陈峻,过秀成,等. 交通工程学(第3版)[M]. 南京:东南大学出版社, 2019.
- [5] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smmedi.com 电话:021-55008850 联系网站:<http://www.csdqyfh.com>