

# 自动驾驶混合流和交织区长度影响下的交织区交通特性分析

康楠\*, 王磊, 马世成, 罗文婷

南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年8月24日; 发布日期: 2025年9月3日

## 摘要

交织区是路段的重要组成部分。本文通过VISSIM交通仿真软件分析A型交织区在自动驾驶混合流和交织区长度影响下的交织区交通特性。结果显示: 在过饱和条件下, 首先交织车道和非交织车道的通行能力和密度随AV渗透率的增加而提升, 但是速度随之下降, 并且速度的下降导致了延误的升高; 其次, 交织车道的速度虽然随交织区长度的增加而增加, 但是并不足以弥补过饱和和需求带来的对延误的负面效果, 结果导致过饱和状态下延误随交织区长度的增加有小幅增长; 同时, 非交织区车道的通行能力和速度没有随交织区长度的增加产生明显的波动。同样交织区长度的情况下, AV渗透率越高交织区通行能力越高, 自动驾驶车辆的应用能够有助于改善由于地理环境条件不足带来的设计问题。

## 关键词

交织区, 交通特性, 自动驾驶混合流, 交织区长度

# An Analysis on Traffic Characteristics of Weaving Segment Considering Mixed Autonomous Flow and Length of Weaving Segment

Nan Kang\*, Lei Wang, Shicheng Ma, Wenting Luo

College of Transportation Engineering of Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu

Received: Jul. 1<sup>st</sup>, 2025; accepted: Aug. 24<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 康楠, 王磊, 马世成, 罗文婷. 自动驾驶混合流和交织区长度影响下的交织区交通特性分析[J]. 交通技术, 2025, 14(5): 597-606. DOI: 10.12677/ojtt.2025.145059

## Abstract

Weaving segment is an important part of roadway section. In this paper, the traffic characteristics of A-type weaving segment are analyzed considering mixed autonomous flow and the length of weaving segment through applying microscopic simulation VISSIM. It is found that firstly under the oversaturated situation, the capacity and density of weaving lanes and non-weaving lanes are increased with the increase of AV% while the speed decreased with it. The decrease of speed caused the increase of delay. Secondly, the speed of interweaving lanes is increased with the increase of the length of weaving segment, but the increase is not enough to compensate for the increase of delay caused by the over-saturated demand. As a result, the delay is slightly increased with the increase of the length of weaving segment. Additionally, the capacity and speed of the non-weaving lane are not significantly influenced by the length of weaving segment. For the future, since AV% shows the positive results on the capacity of weaving segment under the condition of the same length of weaving segment, it is expected that the application of AV may help improve the design problems due to the insufficient geographic conditions.

## Keywords

Weaving Segment, Traffic Characteristics, Mixed Autonomous Flow, Length of Weaving Segment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

交织区是高速公路和城市快速路的重要组成部分, 承担了车辆汇入和流出的功能。由于在交织区内会产生大量的换道行为, 交织区往往是路段的瓶颈区域。交织区的通行特性受交织区交通量及交织区长度影响较大。总的来说, 一方面交织区交通量越大, 尤其是发生交织行为的交织交通量越大, 交织区内的紊乱发生越频繁, 交织区的通行能力越低, 同时通过交织区的车辆速度也越低[1]-[5]; 另一方面, 增加交织区的长度可以改善交织区的通行能力, 但是超过一定长度后, 交织区的通行能力不会再有提高[6]-[9]。

传统驾驶环境下, 交织区内车辆类型仅有人工驾驶车辆(Human Vehicle, 后简称 HV), 然而, 随着信息技术的发展, 自动驾驶汽车(Autonomous Vehicle, 后简称 AV)将逐步进入应用阶段。随着 AV 渗透率的提高, 由 HV 与 AV 组成的混合自动驾驶状态也将成为交织区运转的必经阶段[10]。与 HV 车辆相比, AV 车辆具有更短的反应时间, 能提供更安全的跟随和变道距离, 这将对交织区通行能力的提升产生积极影响[11]-[14]。由于自动驾驶车辆的观测值不易获得, 交通仿真被广泛应用于测试自动驾驶混合流在交织区的交通特性[7] [9] [15]。在自动驾驶混入的环境下, 在交织区内的车辆驾驶行为特征不再单一, 交通流特征及其演变形式的不确定性也更高[15], 已知的交织区长度和交织区通行能力的关系也将发生改变。

现有研究中张卫华等[15]采用 IDM 模型[16]和 CACC 模型[17]分别作为 HV 与 CAV 车辆的跟驰模型, 采用 Rakha 等提出的交织区通行能力计算模型[18], 探究了 CAV 渗透率的改变对通行能力的影响, 结果表明, 相较于基本路段, CAV 的加入对交织区通行能力的提升更加显著, 但是该模型假设的前提是交通流稳定, 而实际过程中车辆换道行为所产生的扰动会使交通流的稳定状态被破坏, 难以得出准确结论。

基于此,本研究在自动驾驶混合流的场景下通过微观仿真 VISSIM 搭建不同交织区长度的仿真环境,在过饱和交通量输入的条件下初步探究了交织区长度和 AV 混入率对交织区通行能力和通行时间等交通流特性的综合影响。研究发现 AV 渗透率的提高会增加交织区通行能力和密度,但同时降低车速并增加延误。交织区长度的增加对交织车道车速有提升作用,但不足以抵消过饱和带来的延误增加。非交织车道的通行能力和速度受交织区长度影响较小。

## 2. 仿真环境设置及车辆驾驶行为参数设置

本文使用交通微观仿真平台 VISSIM 构建交织区环境,通过车辆的参数设定模拟 HV 和 AV 的驾驶行为,最后对仿真的输出结果进行分析。

### 2.1. 交织区几何条件设置

本文的研究对象为 A 类交织区。在 A 类交织区内,无论是从匝道进入主线的车辆还是从主线驶入匝道的车辆,都至少发生一次换道行为。本文研究的 A 类交织区的设置为 2 车道主线和 1 车道匝道,流入和流出位于主线道路的同一侧,如图 1 所示。交织区长度  $L_s$  是指交织区入口处三角端宽度 0.6 m 位置到出口处三角端宽度为 3.7 m 处之间的距离;合流角与分流角均设置为  $13^\circ$ 。交织区主线车道宽度均为 3.75 m,匝道车道宽 3.5 m。

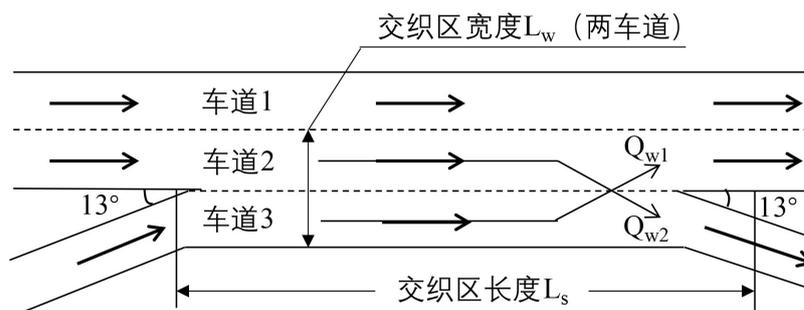


Figure 1. This paper studies the class A interweaved area diagram  
图 1. 本文所研究的 A 类交织区示意图

### 2.2. 交织区行车规则设置

分别定义交织区由内向外的三条车道为车道 1、车道 2 和车道 3,其中车道 1 和 2 为主线车道,车道 3 为辅助车道。本文设定车道 1 的车辆不参与任何交织行为;车道 2 的车辆含有保持主线行驶和流出两种行为,流出车辆变道至车道 3 然后流出,流出比设置为 0.18;匝道流入的车辆也包含两种行为,在车道 3 上行驶然后通过匝道流出以及汇入至车道 2 然后保持主线行驶,汇入比设置为 0.18,因此,本文中交织区内的交通流共有 5 个 OD,分别是车道 1-车道 1、车道 2-车道 2、车道 2-车道 3-流出、车道 3-车道 2 和流入-车道 3-流出。根据车道内行驶的车辆是否含有交织车辆可以将本文中的车道 1 定义为非交织车道,车道 2 和车道 3 定义为交织车道。

### 2.3. 驾驶行为参数设定

交织区内的车辆驾驶行为主要包括跟驰行为和换道行为。关于 AV 的参数设置,VISSIM 结合欧洲 CO-EXIST 项目更新了自动驾驶模型参数设置,由于该项目所提供的自动驾驶车辆驾驶行为参数是根据

大量实测驾驶数据标定而得<sup>1</sup>，该组参数被认定为能够反映实际的车辆运行特征，因此，本文使用 VISSIM 中的默认自动驾驶参数作为 AV 的各项设置参数。HV 的驾驶行为模型与 AV 相同，模型参数设置采用 VISSIM 中车辆行为默认设置。HV 与 AV 车辆的跟驰与换道行为参数分别见表 1 和表 2。

**Table 1.** Parameter setting of HV and AV vehicle following model

**表 1.** HV 与 AV 车辆跟驰模型的参数设置

跟驰模型参数	HV 车辆	AV 车辆
CC0 (m)	1.50	1.00
CC1 (s)	1.60	0.90
CC2 (m)	4.00	0.00
CC3	-8.00	-8.00
CC4	-0.35	-1.00
CC5	0.35	1.00
CC6	11.44	0.00
CC7 (m/s <sup>2</sup> )	0.25	0.10
CC8 (m/s <sup>2</sup> )	3.50	3.50
CC9 (m/s <sup>2</sup> )	1.50	1.50

**Table 2.** Parameter setting of lane change behavior of HV and AV vehicles

**表 2.** HV 与 AV 车辆换道行为参数设置

车辆类型	必要的变道行为			消失前的等待时间(s)	最小车头时距(s)	安全距离折减系数	协调刹车的最大折减速度(m/s <sup>2</sup> )	协调车道变换
	参数	进行超车的车	被超越的车					
HV 车辆	最大减速度 (m/s <sup>2</sup> )	-4.00	-3.00	60.00	0.50	0.60	-3.00	无
	距离(m)	100.00	100.00					
	可接受的减速度(m/s <sup>2</sup> )	-1.00	-1.00					
AV 车辆	最大减速度 (m/s <sup>2</sup> )	-4.00	-4.00	60.00	0.50	0.75	-6.00	最大的速度差 10.80 (km/h)
	距离(m)	100.00	100.00					冲突时间的最大值 10.00 (s)
	可接受的减速度(m/s <sup>2</sup> )	-1.00	-1.50					

本文不考虑驾驶员情况对于交织区跟驰与换道行为的影响，故驾驶中驾驶员走神的时间与概率都为 0。

#### 2.4. 其他输入参数设置

本文车辆期望速度的分布使用均匀分布，速度区间设置为 60~80 km/h。本文的仿真车辆均为小汽车，

<sup>1</sup>PTV-VISSIM Guideline, 2023.

大型车混入率设置为 0%。为了提供过饱和和交通量输入条件, 设置主线车道的交通量水平为每车道 5000 pcu/h, 匝道流入交通量为 2500 pcu/h。

## 2.5. 仿真设计与运行

本文在自动驾驶渗透率和交织区长度的两个条件下进行交织区交通特性研究。自动驾驶渗透率变化范围为 0%~100%共 11 个案例, 交织区长度的变化范围为 60~330 m 间隔 30 m 共 10 个案例, 总计共  $11 \times 10 = 110$  个案例。各车道的自动驾驶混入率的输入始终保持一致。

仿真每次运行 4600 s, 前 1000 s 为预热时间。每个案例使用不同的随机数不重复的运行 5 次仿真, 取 5 次仿真结果的平均值作为最终展示结果。

在本文的测试中, 对仿真环境做出假设: (1) 仿真输入的所有的 HV 车辆均为同质车辆, 其车辆大小及车辆动力特性完全一致, AV 车辆亦然; (2) 仿真所用的 AV 车辆相较于 HV 车辆, 能接受更小的期望车头时距与加速度振动幅度; (3) 交织区内所有的 AV 车辆较常规车辆均拥有更大的前后视距离, 车辆行驶过程中能够交互更多的车辆; (4) 交织区内 AV 的加入不会对 HV 驾驶员的驾驶行为产生影响。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. AV 渗透率变化对交织区交通流三参数的影响

流量、密度和速度三参数是交通流特性的基本体现。在交织区长度为 210 m 的条件下, 采集交织车道和非交织车道的流量、密度和区间平均速度随 AV 渗透率变化的结果并绘制变化曲线, 如图 2(a)~(c) 所示。

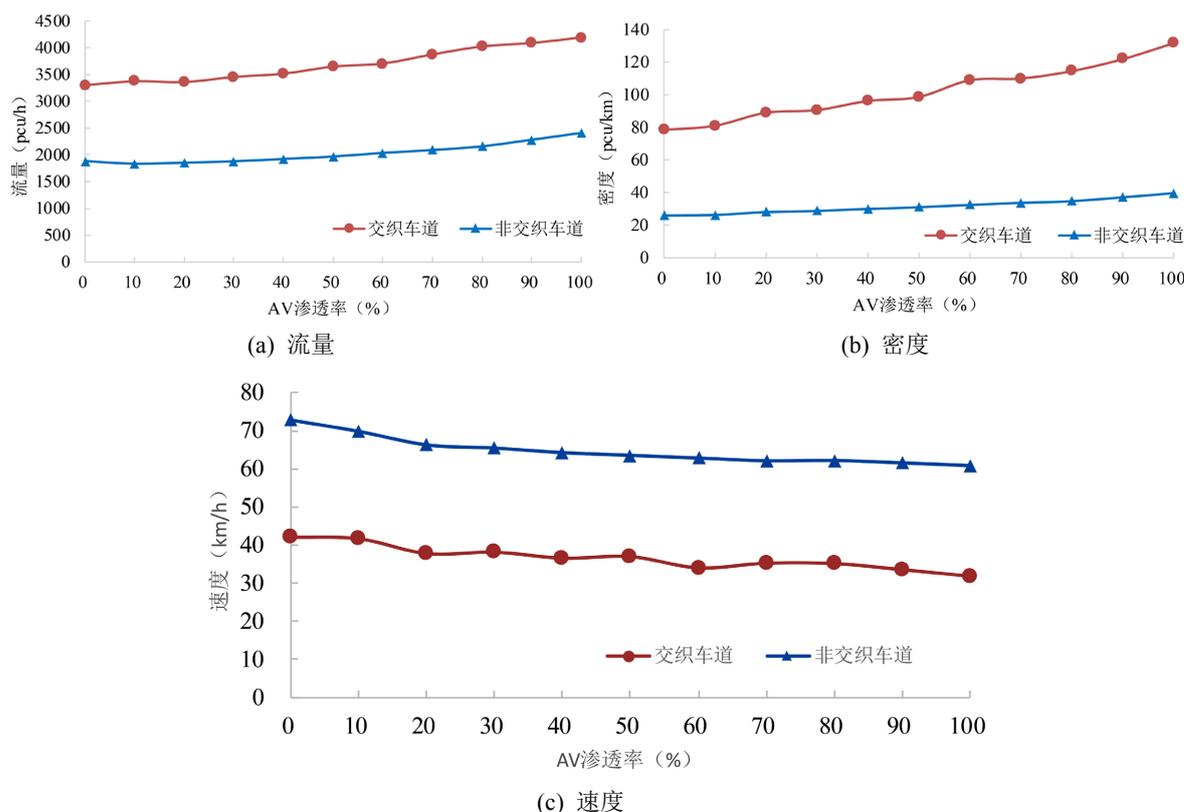


Figure 2. Results of flow density and speed of traffic flow with AV permeability  
图 2. 交通流流量密度速度随 AV 渗透率变化的结果

由于交织区的交通量输入为过饱和状态,因此流量的结果可认为是通行能力的结果,从图 2(a)可知,在交织区长度为 210 m 时,随着 AV 渗透率的增加,交织车道和非交织车道的通行能力均有所提升。通行能力的提升是由于 AV 的车头间距的设置要小于 HV,因此,当车道上的 AV 车辆增加,单位时间内通过的车辆也增加,最终通行能力也随之提高。车头间距减小带来通行能力增加的同时也带来密度的增加,图 2(b)的密度结果显示密度和流量有相同的增加趋势。由流量、密度和速度三者的关系可知,在过饱和的状态下,速度随密度的增加而降低,图 2(c)速度的结果正好验证了此规律。从速度的结果中可知,交织车道的速度在 AV%=0 时为 40 km/h, AV%=100% 时速度降到 30 km/h,降幅为 33.3%,同样的情况下非交织车道的速度值由 70 km/h 下降到 60 km/h,降幅为 16.7%,由速度降幅可得自动驾驶对交织车道的速度影响要大于对非交织车道的影响。由上述三个结果可知,在过饱和的情况下,通行能力的增加会带来速度的下降,速度的下降必然会引起延误的升高,从而会导致道路服务水平下降的结果,因此在交织区内随着 AV 渗透率的增加可以提高通行能力,但是也可能会导致在过饱和时道路服务水平下降。

### 3.2. AV 渗透率变化对车辆延误影响的分析

不同 AV 渗透率的条件下,检测交织区长度 210 m 时的各 OD 的平均行程时间和平均车辆延误,结果如图 3(a)和图 3(b)所示。

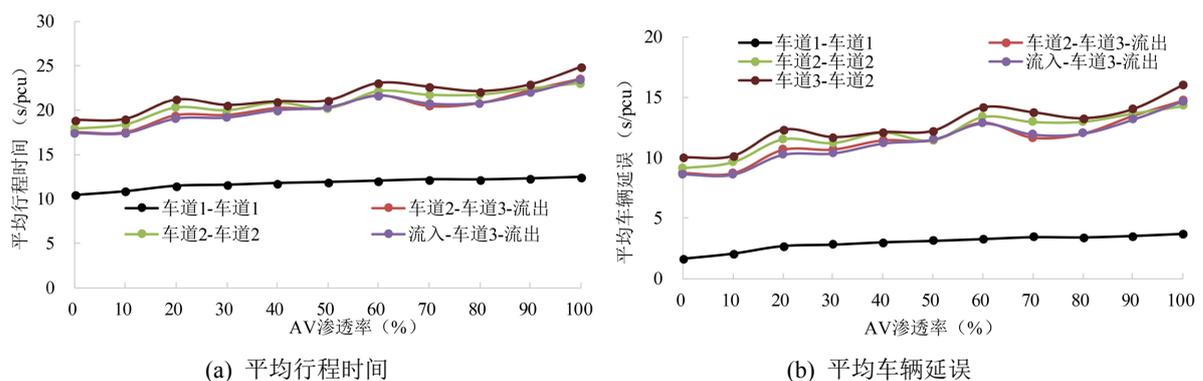


Figure 3. Vehicle travel time and delay as a result of AV penetration  
图 3. 车辆行程时间和延误随 AV 渗透率变化的结果

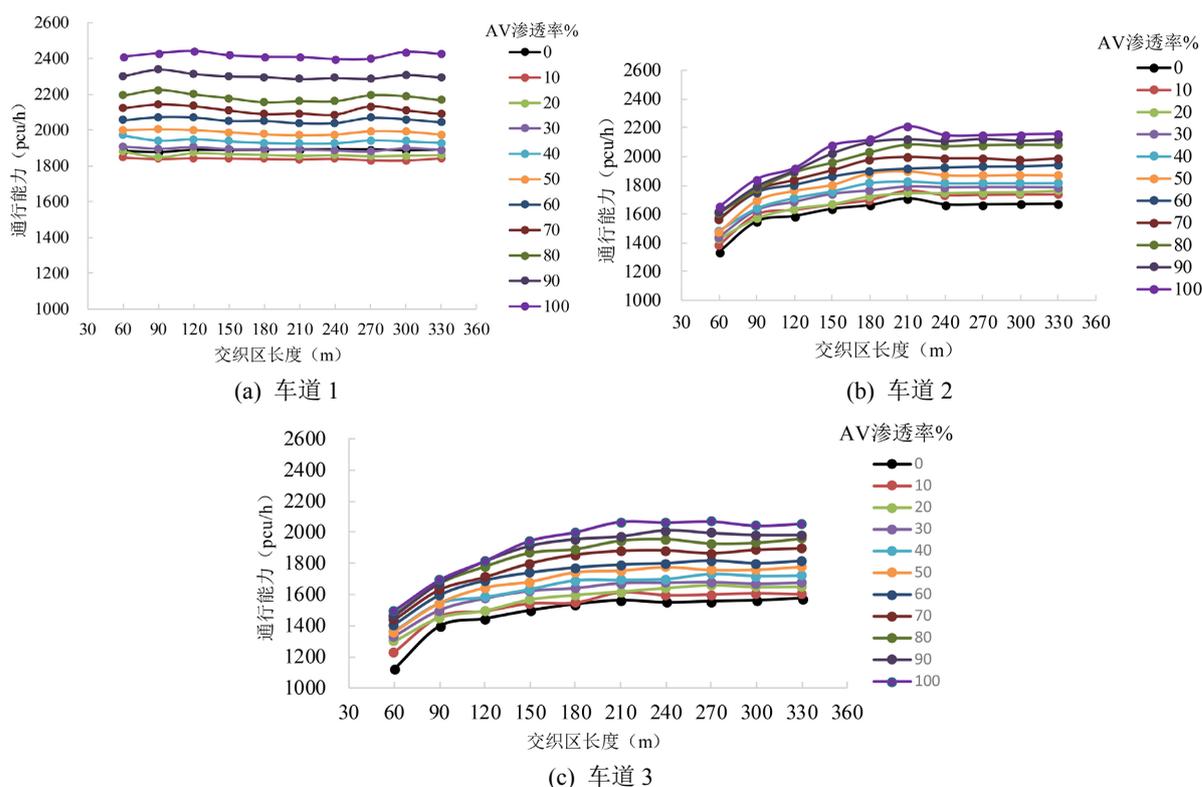
仿真结果表明,平均行程时间与平均车辆延误均随 AV 渗透率的增加而呈上升趋势。该现象源于通行能力提升引发的车流密度增大:当交织区长度为 210 m 时,密度增加导致平均车速下降,进而延长行程时间并推高延误。从 OD 来看,非交织车道(车道 1-车道 1)因无换道需求,其行程时间与延误在所有 AV 渗透率下均低于其他 4 条涉及交织区的路径;途径交织区但无换道需求的路径(车道 2-车道 2)受交织车辆干扰,行程时间与延误显著高于车道 1-车道 1 路径,且和其他有换道需求的 OD 的结果接近;需换道的路径中,汇入主线的路径(车道 3-车道 2)的行程时间和平均延误均要大于流出主线的其余 2 个 OD,由此可知车辆流入交织区内产生的延误要大于流出产生的延误。行程时间和延误的结果验证了上一节中提到的通行能力的提高可能会带来的延误增加的猜想。

### 3.3. AV 渗透率和交织区长度变化对交织区交通特性的影响

#### (1) 通行能力

本次仿真实验建立了过饱和的交通环境,因此采集到的交通量结果可以认为是交织区的通行能力。不同 AV 渗透率和交织区长度下交织区各车道通行能力的结果如图 4(a)~(c)所示。

由图中所示结果可知, 车道 1 由于是非交织车道, 首先在相同 AV 渗透率的条件下通行能力随交织区长度的变化有小幅波动, 但整体没有明显变化; 其次, 在相同交织区长度的条件下, 当  $AV\% \leq 30\%$  时, 通行能力的变化不明显, 甚至有小幅回落, 但当  $AV\% > 30\%$  时, 随 AV 渗透率的增加而增加, 通行能力呈现稳定增长的趋势。这说明对于非交织车道 AV 的少量渗透并不一定会带来通行能力的提升。车道 2 和车道 3 属于交织车道, 首先在相同 AV 渗透率的条件下, 两车道的通行能力都随交织区长度的增加而增加, 当长度超过 240 m 时, 通行能力值处于稳定状态, 不再随交织区长度的增加而大幅提高; 其次, 在同一交织区长度的条件下, 两车道的通行能力都随 AV 渗透率的增加而提高, 并且在交织车道上没有发生与车道 1 类似的 AV 少量渗透通行能力回落的现象, 由此可见, 在相同的交织区长度的条件下。在相同 AV 渗透率的情况下比较车道 1、2 和 3 的通行能力可知, 在相同交织区长度的情况下, 车道 1 由于是非交织车道, 通行能力整体比交织车道的车道 2 和 3 都要高, 而车道 3 上包含流入主线、流出主线、保持车道行驶三种车辆, 过多的 OD 引起了更多的换道行为从而导致了更低的通行能力。



**Figure 4.** Results of the change of traffic capacity with the length of interweaved zone and AV permeability  
**图 4.** 通行能力随交织区长度和 AV 渗透率的变化结果

总的来说, 自动驾驶车辆(AV)能够有效提升交织车道的通行能力, 在 AV 实现规模化应用后, 交织区的交通设计标准可进行适应性优化。特别是在 AV 渗透率较高的区域, 可考虑适度缩减交织区长度设计。这一调整策略既能显著缓解土地资源紧张问题, 同时也能依托 AV 带来的通行效率增益, 保障交织区整体通行能力维持在较高水平。

## (2) 密度和速度

根据仿真输出结果计算得出交织车道和非交织车道整体的密度和速度的结果, 并根据 AV 渗透率和交织区长度的变化和绘制曲线如图 5(a)和图 5(b)所示。

由图 5 可知, 交织车道由于有两条车道组成, 其密度整体大于非交织车道的密度; 交织车道的密度随 AV 渗透率的减小而减小, 并且随着交织区长度的增加而减小, 而非交织区的密度只受 AV 渗透率的影响, 并不随交织区长度的变化而发生变化。在速度的表现上, 非交织车道的车速整体要高于交织车道, 这是由于交织车道上的换道行为会导致车辆减速, 进而影响平均车速; 交织车道和非交织车道的速度均随 AV 渗透率的增加而增加, 同时随交织区长度的增加而增加, 这说明交织区长度增加可以缓和过饱和和情况下 AV 渗透带来的更多车辆流入导致的速度下降的情况; 交织车道和非交织车道在 AV% = 0 时的车速要明显高于相同交织区长度下 AV% > 0 时的车速, 这是由于 AV 车辆的参数设置了更小的车头间距, 在过饱和的情况下路段上虽然能容纳更多的车辆, 但是却导致车辆速度不断下降。

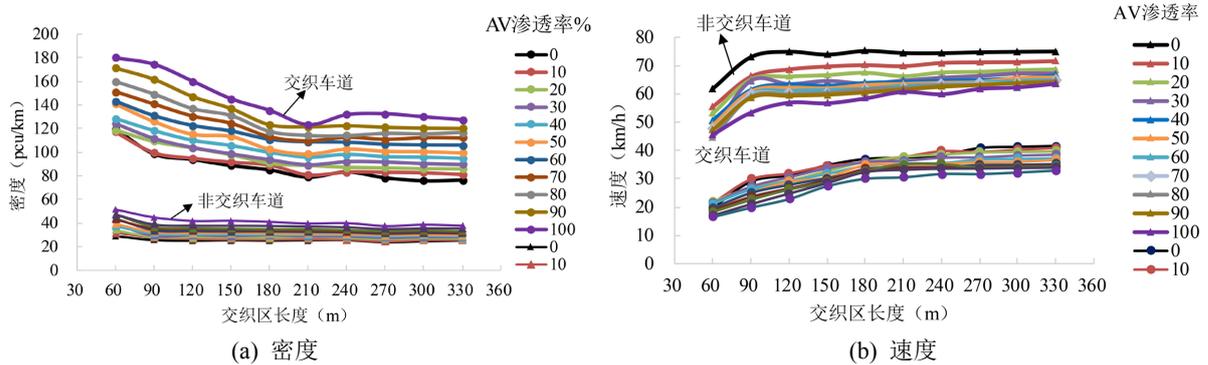


Figure 5. Results of density and velocity variation of interwoven and non interwoven lanes with interleaved zone length and AV permeability

图 5. 交织与非交织车道密度和速度随交织区长度和 AV 渗透率的变化结果

### (3) 车辆平均延误

车辆平均延误的统计按照交织车道和非交织车道分别进行, 结果如图 6(a)和图 6(b)所示。

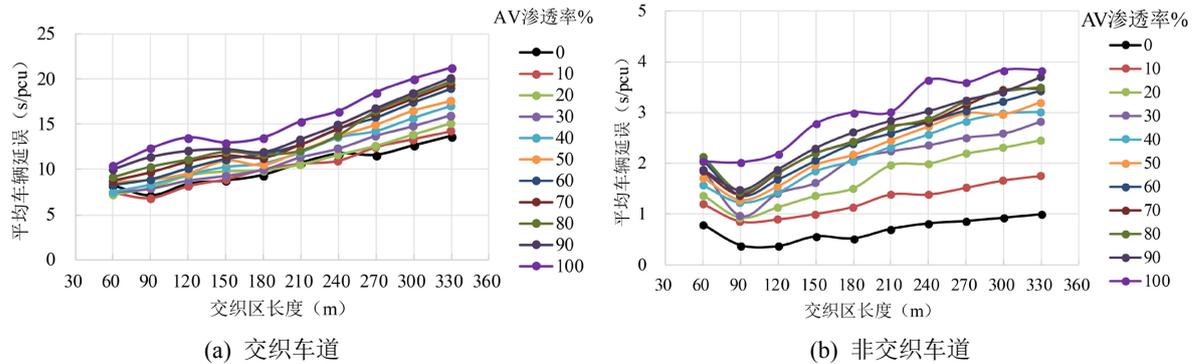


Figure 6. Average vehicle delay as a result of interleaved zone length and AV penetration

图 6. 平均车辆延误随交织区长度和 AV 渗透率变化的结果

由结果可知, 无论交织区或非交织区, 车辆平均延误均随 AV 渗透率提高而增加, 同时表现出随交织区长度增大而上升的趋势。在非交织车道延误始终低于交织车道。在 60~120 m 的交织区范围内, 非交织车道平均延误出现轻微的先减小后增加的趋势, 而交织车道未出现类似波动。这表明短交织区存在临界长度阈值, 可能源于车辆变道行为的空间约束突变。AV 渗透率提升虽通过协同跟驰行为提高通行能力, 但同步引发车流密度增加与平均速度下降最终导致延误上升。尽管延长交织区可提升平均速度但在过饱和状态下, 其带来的速度增益不足以抵消交通超载引发的延误增长。

## 4. 结论

本文通过 VISSIM 仿真平台建立了 2 车道主线 + 1 车道匝道的 A 型交织区, 并使用仿真平台内的自动驾驶模型测试了 AV 渗透率和交织区长度两种因素对 A 型交织区交通特性的影响。结果发现, 首先在过饱和条件下, 交织车道和非交织车道的通行能力和密度随 AV 渗透率的增加而增加, 而速度却随之下降, 速度的下降导致了延误的升高, 交织车道通行能力的提高有可能带来服务水平的下降。其次, 交织车道的速度随交织区长度的增加而增加, 换道引起的降速现象随交织区长度的增加而有所缓解, 但是并不足以弥补过饱和和需求带来的延误增加的结果; 非交织区车道的通行能力和速度没有随交织区长度的增加产生明显的波动。本文结果显示, 同样交织区长度的情况下, AV 渗透率越高交织区通行能力越高, 因此, 自动驾驶车辆的增加可以帮助提高短交织区长度的交织区的通行能力, 进一步可以扩大短交织区长度设计的应用范围, 也有助于改善由于地理环境条件不足带来的设计不达标等问题。

本文发现在过饱和条件下, 通行能力的提高会带来速度的下降, 从而导致延误的增加, 宏观交通流评价和道路服务水平评价之间存在矛盾, 如果驾驶员注重道路的服务水平, 有可能会放弃使用自动驾驶, 这将降低自动驾驶应用的范围, 因此, 在调整自动驾驶参数时, 如何平衡宏观交通流指标和个人使用感受将是一个新的挑战。

本文的仿真实验是在默认参数下开展的, 虽然没有通过实测数据进行参数校正, 但是不同设置条件下的相对结果仍然具有分析的价值, 在下一步的研究中将开展实测数据参数校正以求得到更加精确的分析结果。

本文的仿真设计虽然假设所有 HV 和 AV 车辆是同质车辆, 但仿真结果仍然具有分析的价值, 未来可以通过完善仿真实验设计, 进行不同交通量水平下的仿真实验, 开展敏感性分析, 并考虑更真实的交通环境, 例如驾驶员异质性、不同车型等。

本文研究结果主要讨论了自动驾驶车辆(AV)混入率和交织区长度对 A 类交织区流量、密度、速度的影响, 未来可以深入分析研究结果, 拓展研究的深度和广度, 分析排队长度、油耗、污染物排放等, 并探讨 AV 渗透率和交织区长度对交通安全的影响, 提出相应的优化策略。

本文研究采用的是 VISSIM 内置的跟驰与换道模型, 所以各参数也是 VISSIM 内置的默认参数, 未来可以使用实测数据对模型参数进行校正, 以验证模型的有效性。

## 基金项目

国家重点研发计划课题(2021YFB3202901)。

## 参考文献

- [1] Transportation Research Board (2010) Highway Capacity Manual. TRB, National Research Council.
- [2] Roess, R.P. and Ulerio, J.M. (2009) Capacity of Freeway Weaving Segments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2130**, 34-41. <https://doi.org/10.3141/2130-05>
- [3] 冯星宇, 周晨静, 荣建, 等. 快速路交织区通行能力分析对比研究[J]. 道路与安全, 2015, 15(6): 43-49.
- [4] 周晨静, 荣建, 冯星宇. 2010 HCM 交织区通行能力分析适用性研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(4): 118-123.
- [5] 马晓旦, 安旭. 基于容量估算模型的交织区通行能力估计[J]. 物流科技, 2019, 42(2): 86-89.
- [6] 孙剑, 胡家琦, 孙杰. 城市快速路交织区通行能力估计模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 114-122.
- [7] Tilg, G., Yang, K. and Menendez, M. (2018) Evaluating the Effects of Automated Vehicle Technology on the Capacity of Freeway Weaving Sections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **96**, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.014>
- [8] 赵靖, 白玉, 杨晓光. 基于回归分析的交织区通行能力模型[J]. 城市交通, 2009, 7(5): 85-90.

- [9] 包家烁. 城市快速路交织区通行能力分析 with 改善策略研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2022, 31(3): 45-50.
- [10] Yao, Z., Xu, T., Jiang, Y. and Hu, R. (2021) Linear Stability Analysis of Heterogeneous Traffic Flow Considering Degradations of Connected Automated Vehicles and Reaction Time. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **561**, Article ID: 125218. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125218>
- [11] 孙剑, 李克平, 杨晓光. 拥挤交通流交织区车道变换行为仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(13): 3970-3974.
- [12] 彭博, 王玉婷, 谢济铭, 等. 城市干线短交织区元胞自动机多级换道决策模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 41-48.
- [13] 李霞, 李明焯, 张孝铭, 等. 人机混驾交通流交织区换道模型切换控制策略[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(6): 95-102.
- [14] Amini, E., Omidvar, A. and Elefteriadou, L. (2021) Optimizing Operations at Freeway Weaves with Connected and Automated Vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **126**, Article ID: 103072. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103072>
- [15] 张卫华, 刘嘉茗, 解立鹏, 等. 混合环境快速路交织区交通流特性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 156-164.
- [16] Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D. (2000) Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. *Physical Review E*, **62**, 1805-1824. <https://doi.org/10.1103/physreve.62.1805>
- [17] Milanés, V. and Shladover, S.E. (2014) Modeling Cooperative and Autonomous Adaptive Cruise Control Dynamic Responses Using Experimental Data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **48**, 285-300. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.001>
- [18] Rakha, H. and Zhang, Y. (2006) Analytical Procedures for Estimating Capacity of Freeway Weaving, Merge, and Diverge Sections. *Journal of Transportation Engineering*, **132**, 618-628. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2006\)132:8\(618\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:8(618))