考虑弯道条件的同质与异质交通流稳定性分析

赵红星[1]，刘书英[1]，聂江龙[2]，梁瑞艳[3]，何瑞春[1]

（1. 兰州交通大学 交通运输学院，兰州 730070；2. 国网甘肃省电力公司建设事业部，兰州 730000；3. 国网甘肃省电力公司数字化事业部，兰州 730000）

摘　要：为研究车辆在弯曲道路上的跟驰特性及稳定条件，在智能驾驶员模型（IDM）的基础上，综合考虑弯道半径及超高等因素的影响，结合道路力学特性建立了扩展模型。通过分析弯道对交通流稳定性的影响，推导出适用于人工驾驶车辆（HDVs）、智能车辆（AVs）和智能网联车辆（CAVs）的同质与异质交通流的稳定性条件，并进行参数灵敏度分析与数值验证。研究结果显示，工况2（$R=250$ m，$i_e=8\%$）的交通流稳定性最好。增加平衡态速度有助于提升交通流的稳定性，自由流速度的增加对稳定性不利。此外，随着CAVs渗透率的增加，混合交通流的稳定性逐步改善，而最大车队规模的增加会使交通流变得不稳定。在同质交通流中，低速行驶时速度越低越有利于稳定性；在高速行驶时，HDVs以29.9 m/s、AVs以26.8 m/s、CAVs以26.9 m/s的速度行驶稳定性最优。在混合交通流中，当CAVs渗透率超过0.72时，混合交通流能保持稳定。

关键词：智能交通；跟驰模型；数值仿真；同质与异质交通流；弯曲道路

中图分类号：U463.6　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-5497（2026）02-0393-14

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240754

Stability analysis of homogeneous and heterogeneous traffic flows considering curved conditions

ZHAO Hong-xing[1]，LIU Shu-ying[1]，NIE Jiang-long[2]，LIANG Rui-yan[3]，HE Rui-chun[1]

（1. *School of Traffic and Transportation，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou* 730070，*China*；2. *Construction Business Department of State Grid Gansu Electric Power Company，Lanzhou* 730000，*China*；3. *Digital Business Department of State Grid Gansu Electric Power Company，Lanzhou* 730000，*China*）

Abstract：To study the following characteristics and stability conditions of vehicles on curved roads，this paper builds upon an intelligent driver model（IDM），integrating considerations of factors such as curve radius and super-elevation，and incorporating road mechanics to establish an extended model. By analyzing the influence of curves on traffic flow stability，the study derives stability conditions applicable to both homogeneous and heterogeneous traffic flows comprising human driven vehicles（HDVs），automated vehicles（AVs），and connected automated vehicles（CAVs）. Parameter sensitivity analyses and numerical

收稿日期：2024-07-08.

基金项目：国家自然科学基金项目（52162041）；甘肃省科技计划项目（24JRRA255）；兰州市青年科技人才创新项目（2023-QN-125）.

作者简介：赵红星（1989-），男，副教授，博士. 研究方向：智能交通. E-mail：zhaohx@mail.lzjtu.cn

通信作者：何瑞春（1969-），女，教授，博士. 研究方向：智能交通. E-mail：tranman@163.com

validations are conducted. The findings indicate that traffic flow stability is highest under Condition 2 (R = 250 m, i_e = 8%). Increasing equilibrium speeds enhances traffic flow stability, while increasing free-flow speeds is detrimental to stability. Moreover, as CAVs penetration rates increase, the stability of mixed traffic flows gradually improves, although increasing maximum platoon sizes may destabilize traffic flows. In homogeneous traffic flows, lower speeds are advantageous for stability at low speeds; for high-speed conditions, stability is optimized at speeds of 29.9 m/s for HDVs, 26.8 m/s for AVs, and 26.9 m/s for CAVs. In mixed traffic flows, stability can be maintained when the penetration rates of CAVs exceed 0.72.

Key words: intelligent transportation; car-following model; numerical simulation; homogeneous and heterogeneous traffic flows; curved roads

0 引 言

随着车辆自动化和通信技术的快速发展,高级驾驶辅助系统(Advanced driver assistance systems, ADAS)已在许多车辆中得到应用,传统的人工驾驶车辆(Human driven vehicles, HDVs)逐渐难以满足社会需求。因此,学者们提出了自适应巡航控制(Adaptive cruise control, ACC)与协同自适应巡航控制(Cooperative adaptive cruise control, CACC)系统[1,2]。ACC车辆利用车载传感器自动调节速度并保持安全距离,实现自动跟车行驶[3-5]。CACC车辆则能结合ADAS和车-车(Vehicle-to-vehicle, V2V)通信技术[6],这有助于减少跟随车辆的车头时距,进而增强交通的稳定性和安全性[7-9]。ACC与CACC车辆作为智能车辆(Automated vehicles, AVs)及智能网联车辆(Connected automated vehicles, CAVs)的典型代表,被许多学者用于模拟AVs与CAVs的跟车特性[10,11]。可以设想,AVs、CAVs和HDVs将在不久的将来共存[12],这将使纯HDVs的交通流转变为AVs、CAVs和HDVs的混合交通流[13-16]。

在AVs与CAVs跟驰行为中,保持稳定的前后车间距至关重要。由Treiber等[17]提出的智能驾驶模型(Intelligent driver model, IDM)包含了车头时距这一参数,通过调整该参数,可以将传统车辆的跟驰模型转换为适用于AVs和CAVs的模型[18,19],因此IDM被广泛应用于描述AVs与CAVs的跟驰特性[20]。Yi等[21]基于回望距离改进了IDM,研究表明该模型能够改善交通流的稳定性。然而,该模型仅考虑了主车和后车之间的期望距离,未考虑前方多车之间的速度差。随后,王树凤等[22]引入了头车及前车、后车的信息,进一步改进了IDM,有效提高了混合车辆编队的响应速度和稳定性。Cui等[23]在IDM的基础上综合考虑了前车、次前车在非均匀交通流中的位置、速度和加速度信息,提出一种改进的跟车模型,显著提升了交通流的稳定性。蒲云等[24]考虑到后车与多前车的速度差,提出了适用于CAVs的IDM改进模型,从而增强了交通流的稳定性和安全性。

然而,在实际交通中,道路往往并非完全平直,而是存在弯曲。弯曲道路不仅增加了驾驶的复杂性,也对交通流特性产生了显著影响。考虑到这一点,Zhu等[25]提出了一种改进的弯道跟驰模型,探讨了摩擦系数和曲率半径对交通流的影响。Cheng等[26]通过建立改进的弯道模型,从非线性密度波和能量消耗的角度研究了交通流的稳定性。陈秀锋等[27]考虑路面摩擦、弯道半径及超高的影响,构建弯道优化速度模型,发现在初始密度不变的情况下,弯道车流稳定性随弯道弧度的增大而逐渐降低。Zhai等[28]针对山区高速螺旋公路上实际车距与预期车距的误差,考虑电子节气门角度信息对V2V通信技术的重要性,提出了协同控制策略。Wang等[29]讨论了道路几何特性对交通安全的复杂动态影响,提出了一种结合电子节气门动态效应的螺旋道路扩展宏观模型。

综上所述,虽然已有研究对道路几何条件下的跟驰模型进行了探讨,但主要集中在单一类型车辆构成的交通流分析上,尚未深入探讨弯曲道路上混合交通流的稳定性。为揭示智能网联环境下弯曲道路混合交通流的行驶情况,提高交通流稳定性,本文基于IDM,结合弯道力学特性,考虑弯道半径、超高等因素,提出了适用于弯曲道路的扩展模型。进一步针对弯道上HDVs、AVs与CAVs构成的同质与异质交通流,推导其稳定性条件,并分析CAVs的退化及车队列强度对不同道路几何条件下同质交通流与异质交通流稳定性的影响。

1　跟驰模型

1.1　人工驾驶车辆(HDVs)

当车辆运行过程中发生干扰时,IDM可通过期望速度限制和车头时距约束确保车辆安全行驶,并能准确描述人工车辆驾驶特性[30,31],故本文选择IDM模拟HDVs的跟驰特性。该模型的加速度由自由行驶状态下的加速趋势和考虑前车距离的减速趋势两部分组成[17],如式(1)～式(3)所示:

$$a_{\mathrm{H}}=\frac{\mathrm{d}v_n(t)}{\mathrm{d}t}=a\left\{1-\left[\frac{v_n(t)}{v_{\mathrm{f}}}\right]^{\delta}-\left[\frac{s^*\left[v_n(t),\Delta v_n(t)\right]}{s_{\mathrm{a}}}\right]^2\right\} \tag{1}$$

$$s^*\left[v_n(t),\Delta v_n(t)\right]=s_0+Tv_n(t)+\frac{v_n(t)\cdot\Delta v_n(t)}{2\sqrt{ab}} \tag{2}$$

$$s_{\mathrm{a}}=x_{n-1}(t)-x_n(t)-l \tag{3}$$

式中:a为最大加速度,m/s^2;$v_n(t)$为车辆n在t时刻的速度,m/s;v_{f}为期望速度,m/s;δ为加速指数,通常取4;s_{a}为车辆n头部与车辆$n-1$尾部之间的实际距离,m;s^*为车辆n与车辆$n-1$的期望间隔,m;s_0为拥堵情况下车辆之间的最小安全距离,m;$Tv_n(t)$为与速度有关的距离,其中T为安全车头时距,s;$\Delta v_n(t)$为t时刻车辆n与车辆$n-1$之间的速度差,m/s;b为舒适的减速度,m/s^2;$x_n(t)$为车辆n在t时刻的位置,m;$x_{n-1}(t)$为车辆$n-1$在t时刻的位置,m;l为车辆的长度,m。

1.2　智能车辆(AVs)

Cui等[23]考虑了前车和次前车的位置和速度对主车辆的影响,引入车辆影响系数,提出了改进的IDM,用于描述AVs的跟驰特性。为了方便描述,本文将其简称为A-IDM,如式(4)～(6)所示:

$$a_{\mathrm{A}}=\frac{\mathrm{d}v_n(t+t_{\mathrm{d}})}{\mathrm{d}t}=a_0\left\{1-\left[\frac{v_n(t)}{v_{\mathrm{f}}}\right]^4-\left[\frac{s_0+Tv_n(t)+\dfrac{v_n(t)\cdot\sum_{j=1}^{2}m_j\Delta v_{n-j+1}(t)}{2\sqrt{a_0b}}}{\sum_{j=1}^{2}m_j\Delta x_{n-j+1}(t)-l}\right]^2\right\} \tag{4}$$

$$s_{n-j+1}(t)=\sum_{j=1}^{2}m_j\left(x_{n-j+1}(t)-x_{n-j}(t)\right)-l=\sum_{j=1}^{2}m_j\Delta x_{n-j+1}(t)-l \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{2}m_j\Delta v_{n-j+1}(t)=\left[m_1\left(v_n(t)-v_{n-1}(t)\right)+m_2\left(v_{n-1}(t)-v_{n-2}(t)\right)\right] \tag{6}$$

式中:m_j为车辆影响系数,$j=1,2$;m_1与m_2分别为前车和次前车对主车辆的影响系数,满足$m_1+m_2=1$。由于主车辆受紧邻前车的影响更大,因此通常$m_1>m_2$。

1.3　智能网联车辆(CAVs)

由于CAVs具有V2V通信功能,能够获取前车的速度与加速度信息。Cui等[23]在A-IDM基础上,考虑了前车的加速度对主车辆的影响,引入加速度灵敏度系数,提出了改进的IDM,用于描述CAVs的跟驰特性。为了方便描述,本文将其简称为C-IDM,如式(7)所示:

$$a_{\mathrm{C}}=\frac{\mathrm{d}v_n(t+t_{\mathrm{d}})}{\mathrm{d}t}=a_0\left\{1-\left[\frac{v_n(t)}{v_{\mathrm{f}}}\right]^4-\left[\frac{s_0+Tv_n(t)+\dfrac{v_n(t)\cdot\sum_{j=1}^{2}m_j\Delta v_{n-j+1}(t)}{2\sqrt{a_0b}}}{\sum_{j=1}^{2}m_j\Delta x_{n-j+1}(t)-l}\right]^2\right\}+\lambda a_{n-1}(t) \tag{7}$$

式中:λ为加速度灵敏度系数。根据文献[23],$m_1=0.9$,$\lambda=0.1$。其他参数值设置见表1。

由于IDM、A-IDM与C-IDM模型更适用于描述车辆在直线道路上的行驶特征,其在反映车辆在弯曲道路上的行驶特性时还存在一些不足。特别是在弯道情况下,车辆的转向对其行驶有显著影响,而当前模型未充分考虑这些因素。因此,

表1　参数取值

Table 1　Parameter values

参数	IDM	A-IDM	C-IDM
l/m	5	5	5
a/(m·s^{-2})	1	3	3
b/(m·s^{-2})	2	2	2
v_{f}/(m·s^{-1})	33.3	33.3	33.3
s_0/m	2	2	2
T/s	1.5	1.2	1.0

需要对这些模型进行改进,以更准确地模拟和预测车辆在弯曲道路上的行驶行为。

2 弯道跟驰模型

针对弯曲道路上车辆行驶特性,文献[32]对IDM进行改进,结果显示,改进后的模型能更精确地描述道路几何设计对车辆跟驰行为的影响。然而,该模型并未考虑混合交通流中不同类型车辆(HDVs、AVs和CAVs)的跟驰特性差异。因此,本文沿用此方法对IDM、A-IDM与C-IDM进行扩展,以更好地描述混合交通流在弯道上的跟驰行为。

在弯曲道路上,车辆通过圆曲线时会受到离心力的影响,可能导致打滑。为了确保安全,通过设计一种由外向内的单向横坡来平衡离心力,从而保证车辆稳定通过圆曲线,该设计称为路面超高[33]。

车辆在一定弯度和超高的道路上行驶时,其所需的最小转弯半径为:

$$R=v_{\mathrm{d}}^{2}/127(\mu+i_{\mathrm{e}}) \tag{8}$$

式中:v_{d}为道路设计速度,m/s;μ为横向力系数;R为道路平曲线半径,m;i_{e}为道路超高。

车辆转弯时的安全行驶速度应满足:

$$v\leqslant v_{\mathrm{d}}=\sqrt{127\cdot R(\mu+i_{\mathrm{e}})} \tag{9}$$

由于车辆在弯道行驶与直线行驶时有所不同,为了反映这些差异,本文对原有模型进行了改进,引入了曲率半径的影响:

$$a=a_{\mathrm{I}}\times(1+\beta\cdot R_0/R) \tag{10}$$

式中:R_0为汽车最小安全转弯半径,m;a_{I}为由式(1)~式(7)IDM、A-IDM、C-IDM计算的车辆加速度;β为与R_0相关的常数,与前车的行驶状态有关。当前车减速时,$\beta>0$,此时R_0越大β越小,曲线对跟驰行为影响越小;当前车加速时,$\beta<0$,此时R_0越大β越大,曲线对跟驰行为影响越大[32]。根据文献[32],车辆在弯道上行驶时,有:

$$\beta=\begin{cases}0.5, & a_{n-1}<0\\ 0, & a_{n-1}=0\\ -0.5, & a_{n-1}>0\end{cases} \tag{11}$$

为了方便描述弯曲道路条件下的改进IDM、A-IDM与C-IDM,本文分别将其简称为R-IDM、RA-IDM与RC-IDM。

3 稳定性分析

稳定性分析是研究路面随机干扰对交通流状态影响规律的重要手段,不稳定的交通流容易引发交通堵塞,从而降低道路通行效率。因此,稳定性分析是道路交通安全评估的关键[34]。在弯道交通组织中,需要充分考虑不同类型车辆的行驶特性差异,以减少车辆间的相互干扰,提高整体交通流的稳定性。为了更好地分析不同类型车辆在弯曲道路上的行驶特性,本文采用了R-IDM、RA-IDM与RC-IDM,分别对应描述HDVs、AVs和CAVs的跟驰特性,并在全速域范围内对同质和异质交通流的稳定性进行分析。通过理论推导,本节探讨了这3种车辆跟驰模型在不同交通流条件下的稳定性,并分析了弯道半径、超高、渗透率及最大车队规模等因素对混合交通流稳定性的影响。

3.1 同质交通流

同质交通流稳定性条件如式(12)[35]所示:

$$F=\frac{1}{2}\left(f_v\right)^2-f_{\Delta v}f_v-f_{\Delta x}>0 \tag{12}$$

式中:当$F>0$时交通流稳定;f_v、$f_{\Delta v}$和$f_{\Delta x}$分别为跟驰模型对车辆速度、前后车速度差、车头间距求一阶偏导,具体公式如式(13)所示。

$$\begin{cases}f_v=\dfrac{\partial f(v,\Delta v,\Delta x)}{\partial v}\Big|_{(v^*,0,s^*)}\\ f_{\Delta v}=\dfrac{\partial f(v,\Delta v,\Delta x)}{\partial \Delta v}\Big|_{(v^*,0,s^*)}\\ f_s=\dfrac{\partial f(v,\Delta v,\Delta x)}{\partial \Delta x}\Big|_{(v^*,0,s^*)}\end{cases} \tag{13}$$

式中:v^*为平衡态下的速度,m/s;s^*为平衡态下的车头间距,m。

根据上述定义,可推导各模型的偏微分项如下。

对于R-IDM:

$$\begin{cases}f_s^{\mathrm{H}}=\dfrac{2a}{s_n(t)}\left[\dfrac{s_0+Tv_n(t)}{s_n(t)}\right]^2\\ f_v^{\mathrm{H}}=-2a\left\{\dfrac{2}{v_{\mathrm{e}}}\left[\dfrac{v_n(t)}{v_{\mathrm{e}}}\right]^3+\left[\dfrac{T\left[s_0+Tv_n(t)\right]}{\left[s_n(t)\right]^2}\right]\right\}\\ f_{\Delta v}^{\mathrm{H}}=\dfrac{v_n(t)\left[s_0+Tv_n(t)\right]}{\left[s_n(t)\right]^2}\sqrt{\dfrac{a}{b}}\end{cases} \tag{14}$$

对于R-IDM和RC-IDM:

$$\begin{cases} f_s^{\mathrm{A,C}} = \dfrac{2a_0}{s_n(t)}\displaystyle\sum_{j=1}^{2} m_j \left[\dfrac{s_0 + Tv_n(t)}{s_{n-j+1}(t)}\right]^2 \\ f_v^{\mathrm{A,C}} = \\ -2a_0\left\{\dfrac{2}{v_e}\left[\dfrac{v_n(t)}{v_e}\right]^3 + \left[\displaystyle\sum_{j=1}^{2} m_j \dfrac{T\left[s_0 + Tv_n(t)\right]}{\left[s_{n-j+1}(t)\right]^2}\right]\right\} \\ f_{\Delta v}^{\mathrm{A,C}} = \displaystyle\sum_{j=1}^{2} m_j \dfrac{v_n(t)\left[s_0 + Tv_n(t)\right]}{\left[s_{n-j+1}(t)\right]^2}\sqrt{\dfrac{a_0}{b}} \end{cases} \tag{15}$$

式中：f_s^{H}、f_v^{H}与$f_{\Delta v}^{\mathrm{H}}$分别为R-IDM关于车辆速度$v$、速度差$\Delta v$与车头间距$s$的偏微分项；$f_s^{\mathrm{A,C}}$、$f_v^{\mathrm{A,C}}$与$f_{\Delta v}^{\mathrm{A,C}}$分别为RA-IDM与RC-IDM关于车辆速度$v$、速度差$\Delta v$与车头间距$s$的偏微分项。

根据公路路线设计规范[36]，不同弯道半径对应的超高设置如下：当弯道半径为220 m时，超高应设置为10%，称为工况1；当弯道半径为250 m时，超高应设置为8%，称为工况2；当弯道半径为270 m时，超高应设置为6%，称为工况3；当弯道半径为300 m时，超高应设置为4%，称为工况4。

根据式(14)和式(15)，可以得到由单一HDVs、AVs与CAVs组成的同质交通流在不同工况下的稳定性情况，如图1所示。

从图1可以看出，当$F<0$时，工况2($R=250$ m，$i_e=8\%$)下的稳定性最差，而工况1($R=220$ m，$i_e=10\%$)下的稳定性最好；相反，当$F>0$时，工况2表现出最强的稳定性，而工况1表现最差。工况3($R=270$ m，$i_e=6\%$)与工况4($R=300$ m，$i_e=4\%$)下的稳定性介于工况1与工况2之间。当$F<0$时，工况3的稳定性优于工况4；而当$F>0$时，工况4的稳定性优于工况3。工况4因其较大的弯道半径与较小的超高，有助于提升交通流的稳定性。此外，图1显示，当速度范围为0～33.3 m/s时，HDVs交通流存在稳定和不稳定的区域。AVs和CAVs组成的交通流在同样的速度范围内表现稳定，且CAVs的整体稳定性高于AVs。这表明HDVs交通流通常表现出车队不稳定性，而AVs和CAVs交通流则表现出队列稳定性，且CAVs比AVs更有利于提高交通流稳定性。

从图1(a)可以看出，HDVs交通流在0～0.57 m/s和21.49～33.30 m/s速度范围内稳定，而在0.57～21.50 m/s范围内不稳定。在0～2.5 m/s和29.9～33.3 m/s内，HDVs交通流稳定性随着速度v的增加逐渐减小；在2.5～29.9 m/s内，稳定性随着v的增加逐渐增强。从图1(b)可见，AVs交通流稳定性随v增加呈现先减小后增大再减小的趋势。在0～16.9 m/s和26.8～33.3 m/s内，稳定性随v增加逐渐减小；在16.9～26.8 m/s内，稳定性随v增加逐渐增强。从图1(c)可以看出，CAVs交通流稳定性随v增加也呈现先减小后增大再减小的趋势。在0～15.3 m/s和26.9～33.3 m/s内，稳定性随v增加逐渐减小；在15.3～26.9 m/s内，稳定性随v增加逐渐增强。

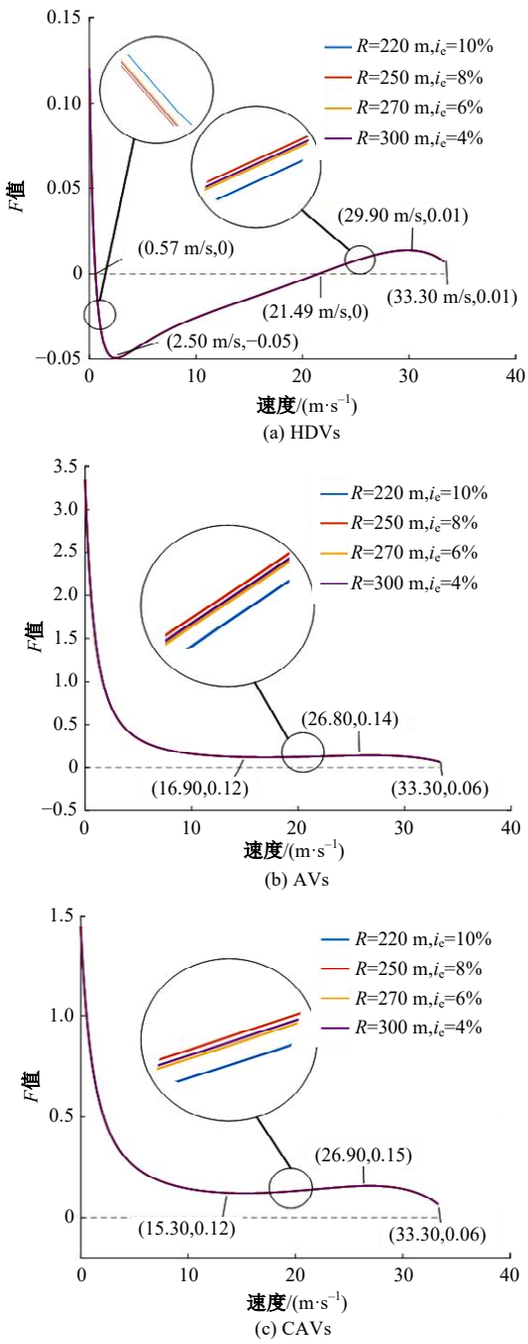


图1　不同工况下的同质交通流

Fig. 1　Homogeneous traffic flow under different conditions

综上,在交通流处于不稳定状态($F<0$)时,工况1展现出较好的稳定性;而在交通流处于稳定状态($F>0$)时,工况2对同质交通流的稳定性最有利。车辆在弯曲道路上行驶时,对于仅由HDVs组成的同质交通流,在低速行驶阶段(0~10 m/s),当速度<0.57 m/s时交通流表现稳定;在中速行驶阶段(10~20 m/s),交通流不稳定;在高速行驶阶段(20~33.3 m/s),当速度>21.5 m/s时,交通流逐渐趋向稳定,并在速度为29.9 m/s时表现出最强的稳定性。对于AVs同质交通流,低速行驶时,交通流稳定性随v增加逐渐减弱;中速行驶时,稳定性在速度为16.9 m/s时达到最低点;高速行驶时,稳定性在车速为26.8 m/s时最强。对于CAVs同质交通流,低速行驶时,交通流稳定性随v增加逐渐变差;中速行驶时,稳定性在速度为15.3 m/s时最差;高速行驶时,稳定性在车速为26.9 m/s时最强。

3.2 异质交通流

异质交通流稳定性条件如式(16)[37]所示:

$$F=\sum_{n=1}^{N}\left[\frac{1}{2}\left(f_v^n\right)^2-f_{\Delta v}^n f_v^n-f_{\Delta x}^n\right]\left(\prod_{m\neq n}f_{\Delta x}^m\right)\geqslant 0 \tag{16}$$

式中:n、m为车辆编号;f_v^n、$f_{\Delta v}^n$、$f_{\Delta x}^n$为第n辆车的跟驰模型关于车辆速度、速度差与车头间距的求偏微分项。

根据跟车的顺序及最大的CAVs队列规模,确定了4种跟车模式,其空间分布概率分别为P_{A}、P_{H}、P_{P}和P_{C}[38-40]。假设异质交通流中CAVs的最大车队列数为N,渗透率为p,则4种跟车模式的空间分布概率如式(17)所示:

$$\begin{cases}P_{\mathrm{H}}=1-p\\ P_{\mathrm{A}}=p(1-p)\\ P_{\mathrm{P}}=\dfrac{(1-p)p^{N+1}}{1-P^N}\\ P_{\mathrm{C}}=\dfrac{p^2(1-p^{N-1})}{1-P^N}\end{cases} \tag{17}$$

式中:p为混合交通流中CAVs的渗透率;N为CAVs的最大车队规模;P_{H}、P_{A}、P_{P}与P_{C}分别为4种跟车模式的空间分布概率,且$P_{\mathrm{H}}+P_{\mathrm{A}}+P_{\mathrm{P}}+P_{\mathrm{C}}=1$。

可以得到3种类型车辆的稳定性判别值如式(18)所示:

$$\begin{aligned}&(1-p)\left[\frac{1}{2}\left(f_v^{\mathrm{H}}\right)^2-f_{\Delta v}^{\mathrm{H}}f_v^{\mathrm{H}}-f_{\Delta x}^{\mathrm{H}}\right]\cdot\\ &\left[\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{H}}\right)^{N_{\mathrm{H}}-1}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{A}}\right)^{N_{\mathrm{A}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{P}}\right)^{N_{\mathrm{P}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{C}}\right)^{N_{\mathrm{C}}}\right]^2+\\ &p(1-p)\left[\frac{1}{2}\left(f_v^{\mathrm{A}}\right)^2-f_{\Delta v}^{\mathrm{A}}f_v^{\mathrm{A}}-f_{\Delta x}^{\mathrm{A}}\right]\cdot\\ &\left[\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{A}}\right)^{N_{\mathrm{A}}-1}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{H}}\right)^{N_{\mathrm{H}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{P}}\right)^{N_{\mathrm{P}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{C}}\right)^{N_{\mathrm{C}}}\right]^2+\\ &\frac{(1-p)p^{N+1}}{1-p^N}\left[\frac{1}{2}\left(f_v^{\mathrm{P}}\right)^2-f_{\Delta v}^{\mathrm{P}}f_v^{\mathrm{P}}-f_{\Delta x}^{\mathrm{P}}\right]\cdot\\ &\left[\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{P}}\right)^{N_{\mathrm{P}}-1}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{C}}\right)^{N_{\mathrm{C}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{H}}\right)^{N_{\mathrm{H}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{A}}\right)^{N_{\mathrm{A}}}\right]^2+\\ &\frac{p^2(1-p^{N-1})}{1-p^N}\left[\frac{1}{2}\left(f_v^{\mathrm{C}}\right)^2-f_{\Delta v}^{\mathrm{C}}f_v^{\mathrm{C}}-f_{\Delta x}^{\mathrm{C}}\right]\cdot\\ &\left[\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{C}}\right)^{N_{\mathrm{C}}-1}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{P}}\right)^{N_{\mathrm{P}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{H}}\right)^{N_{\mathrm{H}}}\left(f_{\Delta x}^{\mathrm{A}}\right)^{N_{\mathrm{A}}}\right]^2\geqslant 0\end{aligned} \tag{18}$$

式(18)可以简化为:

$$\begin{aligned}F=&(1-p)\times\frac{F_{\mathrm{H}}}{\left(F_{\Delta x}^{\mathrm{H}}\right)^2}+p(1-p)\times\frac{F_{\mathrm{A}}}{\left(F_{\Delta x}^{\mathrm{A}}\right)^2}+\\ &\frac{(1-p)p^{N+1}}{1-p^N}\times\frac{F_{\mathrm{P}}}{\left(F_{\Delta x}^{\mathrm{P}}\right)^2}+\frac{p^2(1-p^{N-1})}{1-p^N}\times\\ &\frac{F_{\mathrm{C}}}{\left(F_{\Delta x}^{\mathrm{C}}\right)^2}\geqslant 0\end{aligned} \tag{19}$$

基于式(19),图2展示了异质交通流在不同工况下的稳定性分析结果。其中,不同的颜色深度表示混合交通流稳定性F值,黑色曲线为稳定性基线($F=0$)。从图2(a)可以看出,混合交通流的不稳定速度范围随着CAVs渗透率的增加而逐渐扩大。这是因为本文考虑了CAVs的功能退化,即在某些情况下CAVs将退化为AVs。随着CAVs渗透率的增加,AVs逐渐增加,导致混合交通流的不稳定速度范围逐渐扩大。当$p=0$时,

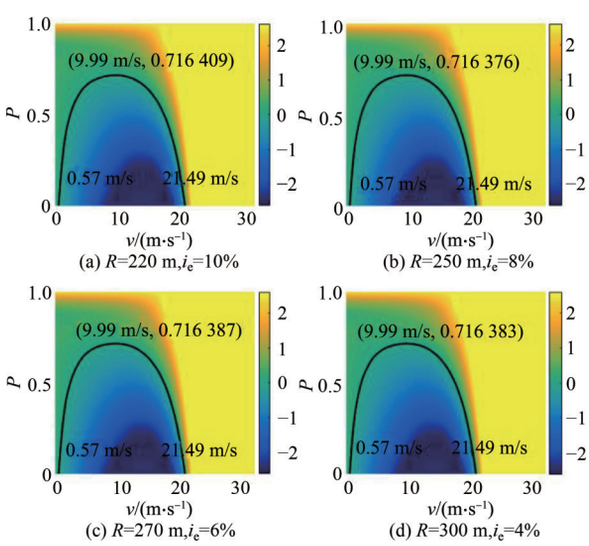


图2 不同工况下的异质交通流

Fig. 2 Heterogeneous traffic flow under different conditions

交通流仅由 HDVs 组成，其在速度为 0.57～21.49 m/s范围内不稳定，与前文分析结果一致。图 2(a)还显示，当CAVs渗透率$p>0.716\,4$时，混合交通流中不再出现不稳定速度区域。这表明，当CAVs的渗透率达到较高水平时，混合交通流有望逐渐恢复到稳定状态。从图 2(a)～(d)可以看出，工况 2 下交通流表现出最佳的稳定性，而工况 1 则表现最差，与前文分析结果一致。

由于工况 2 下异质交通流的稳定性表现最佳，因此本文在此工况下分析不同最大车队规模对混合交通流稳定性的影响，结果如图 3 所示。可以看出，随着CAVs最大队列规模的增加，黑色曲线覆盖的区域逐渐扩大。这表明混合交通流的稳定性在CAVs渗透率逐渐趋向稳定的过程中，随着最大车队规模的增加而逐渐减弱。

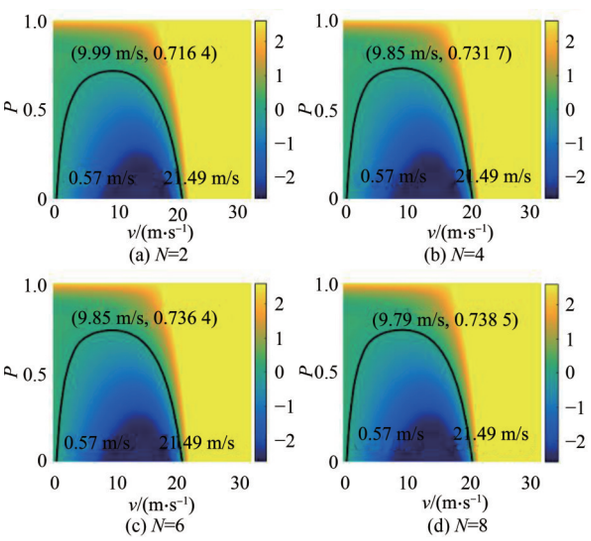


图 3　不同最大车队列下的异质交通流

Fig. 3　Heterogeneous traffic flows under different maximum platoon size

为了进一步探讨弯道条件下混合交通流的稳定性，在工况 2 及$N=2$条件下，研究了混合交通流稳定性随自由流速度v_f变化的情况，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，随着自由流速度v_f的增大，混合交通流的稳定性区域逐渐缩小。这表明自由流速度的增大削弱混合交通流的稳定性。

在固定平衡态速度为 5、10、15、20 m/s，且其余参数条件不变的情况下，分析自由流速度v_f对交通流稳定性的影响，结果如图 5 所示。

从图 5 的曲线变化趋势可以看出，当平衡态速度恒定且自由流速度v_f的数值变化时，随着v_f增大，交通流不稳定性区域逐渐扩大。同时，混合

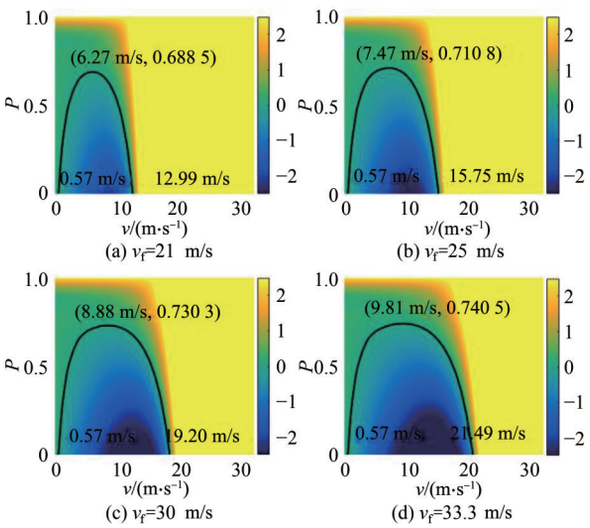


图 4　不同自由流速度下的异质交通流

Fig. 4　Heterogeneous traffic flow under different free-flow speed

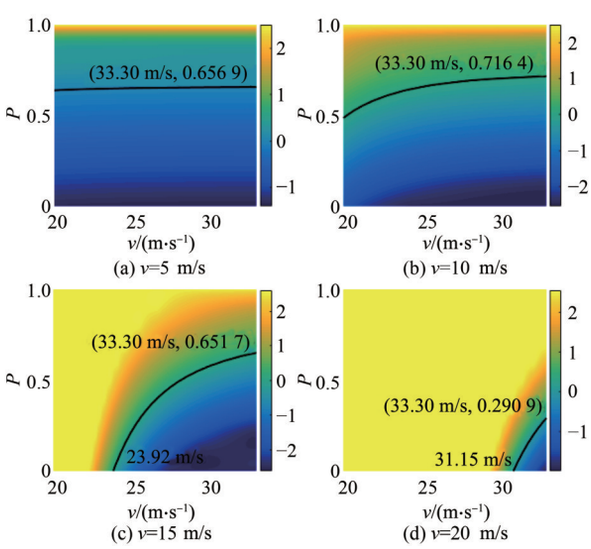


图 5　不同平衡态速度下的异质交通流

Fig. 5　Heterogeneous traffic flow under different equilibrium speeds

交通流稳定区域随着平衡态速度的增加而逐渐扩大。这表明自由流速度v_f的增大会削弱混合交通流的稳定性，而平衡态速度的增大有利于提升混合交通流的稳定性。

4　数值仿真

4.1　实验设计

本文利用 MATLAB 软件进行数值模拟，研究在不同工况下，车队第一辆车受到微小扰动后的车头间距波动。模拟设置如下：初始车数为N辆，路段长度为L，车身长度$l=5$ m，模拟步长为 3 000 s，时间步长$\Delta t=0.01$ s。采用周期边界条件，并

用欧拉法对数值模拟进行离散化,如式(20)所示[41]:

$$\begin{cases} v_n(t+\Delta t)=v_n(t)+\Delta t\cdot\dfrac{\mathrm{d}v_n(t)}{\mathrm{d}t} \\ x_n(t+\Delta t)=x_n(t)+\dfrac{1}{2}\Delta t\cdot\left[v_n(t+\Delta t)+v_n(t)\right] \end{cases} \tag{20}$$

初始状态($t=0$)定义为:

$$\begin{cases} \Delta x=h_e=L/N-l \\ \Delta x_n(t)=\begin{cases} \Delta x, n\neq 0.5N且n\neq 0.5N+1 \\ \Delta x+0.1, n=0.5N \\ \Delta x-0.1, n=0.5N-1 \end{cases} \end{cases} \tag{21}$$

4.2 实验仿真

由纯HDVs、AVs与CAVs分别组成的同质交通流在不同工况下车头间距的时空演化图与车头间距曲线分别如图6~图11所示。其中车头间距曲线展示了在2 500 s时车辆的车头间距,这一时刻能够充分展现交通流的稳定性和长期演化特征,从而准确反映车队在长期运行下的实际情况。为保持一致性,下文中的车头间距曲线均基于2 500 s时的数据。

从图6~图11可以看出,在工况2下,由纯HDVs、AVs和CAVs组成的同质交通流表现出最小

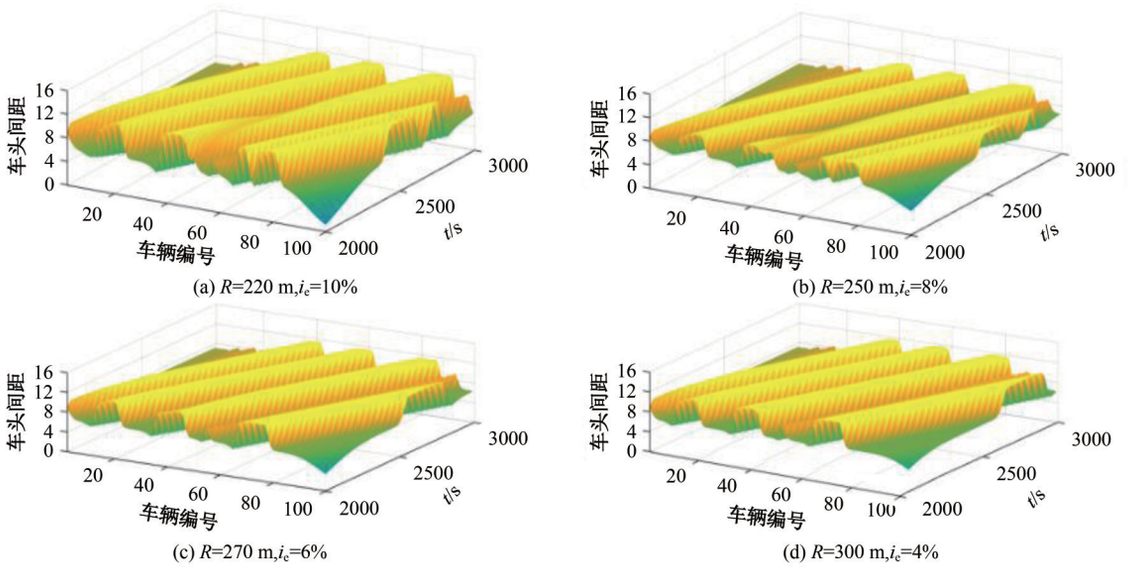


图6 不同工况下车头间距的时空演化(HDVs)

Fig. 6 Space-time evolution of the headway for different conditions (HDVs)

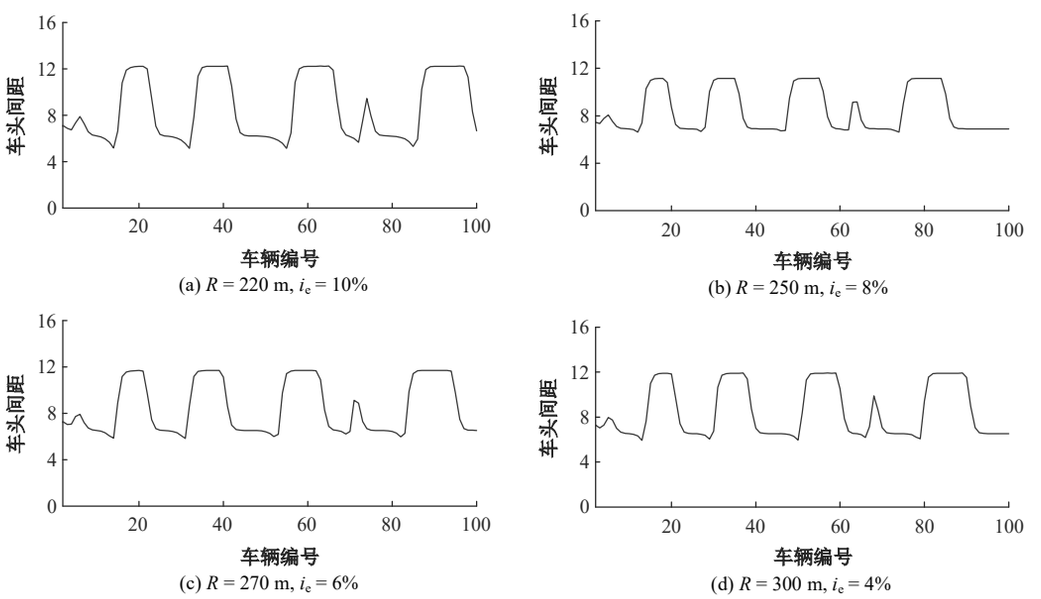
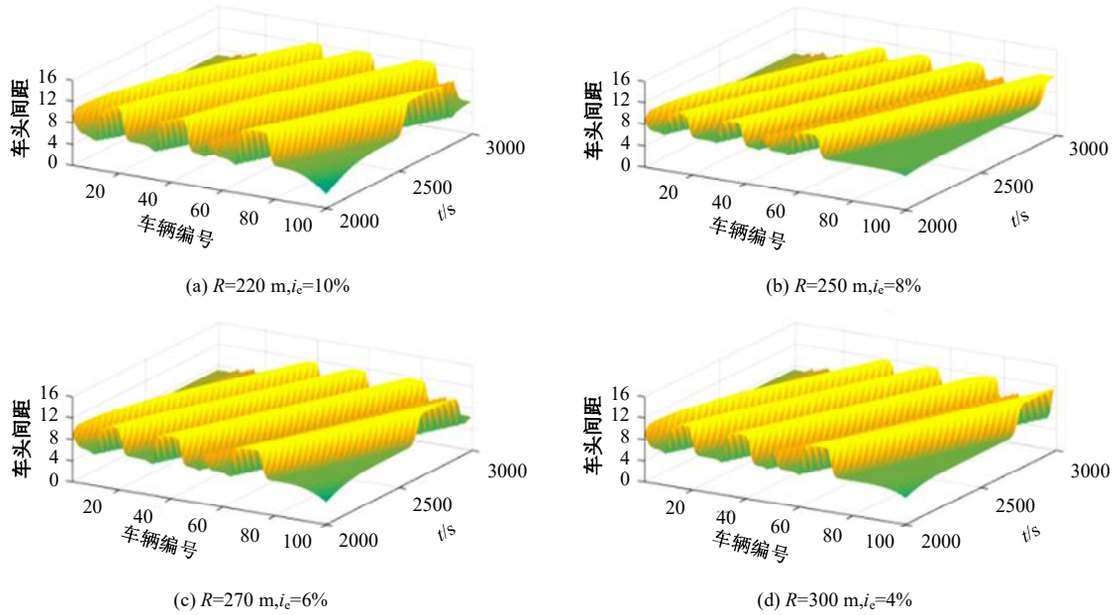


图7 不同工况下的车头间距曲线(HDVs)

Fig. 7 Headway profiles for different conditions (HDVs)

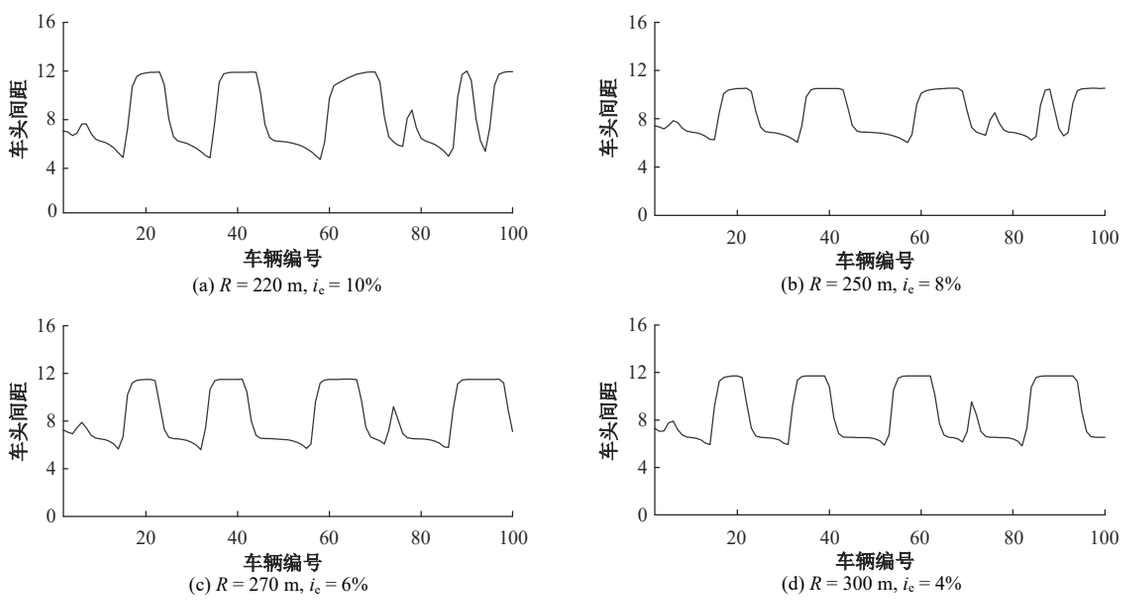


(a) R=220 m,i_e=10%　　(b) R=250 m,i_e=8%

(c) R=270 m,i_e=6%　　(d) R=300 m,i_e=4%

图 8　不同工况下车头间距的时空演化(AVs)

Fig. 8　Space-time evolution of the headway for different conditions (AVs)

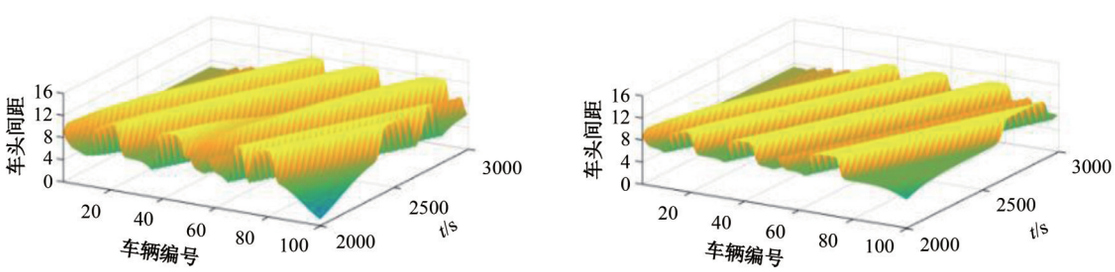


(a) R = 220 m, i_e = 10%　　(b) R = 250 m, i_e = 8%

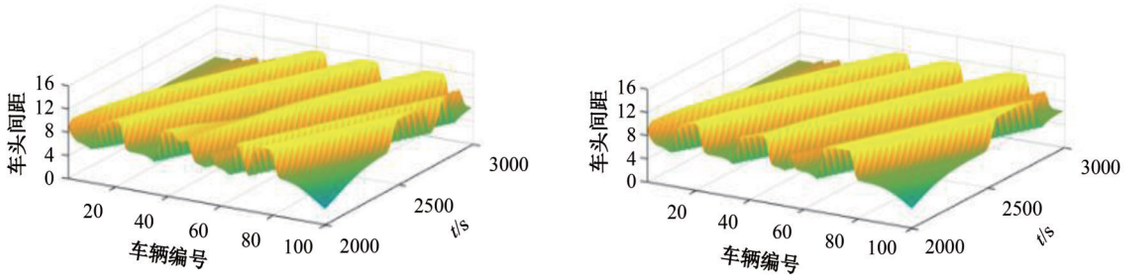
(c) R = 270 m, i_e = 6%　　(d) R = 300 m, i_e = 4%

图 9　不同工况下的车头间距曲线(AVs)

Fig. 9　Headway profiles for different conditions (AVs)



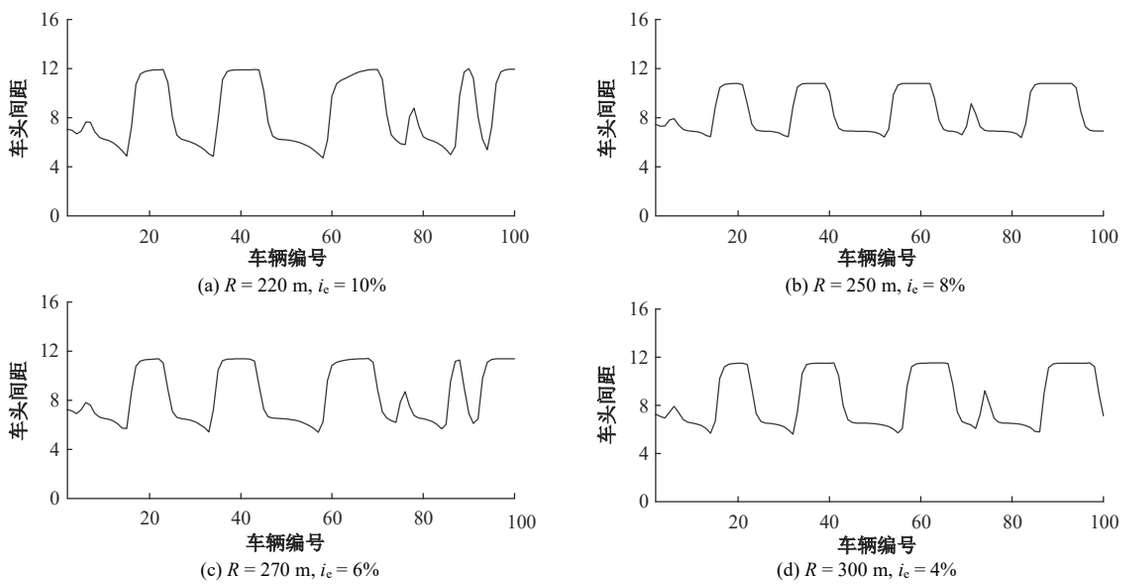
(a) R=220 m,i_e=10%　　(b) R=250 m,i_e=8%



(c) R=270 m,i_e=6%　　(d) R=300 m,i_e=4%

图 10　不同工况下车头间距的时空演化(CAVs)

Fig. 10　Space-time evolution of the headway for different conditions (CAVs)



(a) R = 220 m, i_e = 10%　　(b) R = 250 m, i_e = 8%

(c) R = 270 m, i_e = 6%　　(d) R = 300 m, i_e = 4%

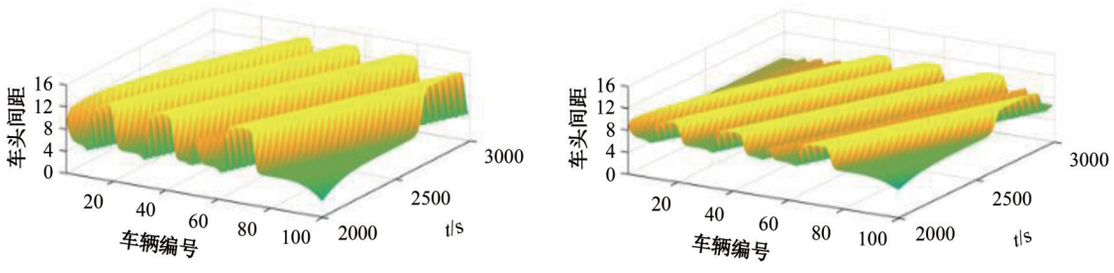
图 11　不同工况下的车头间距曲线(CAVs)

Fig. 11　Headway profiles for different conditions (CAVs)

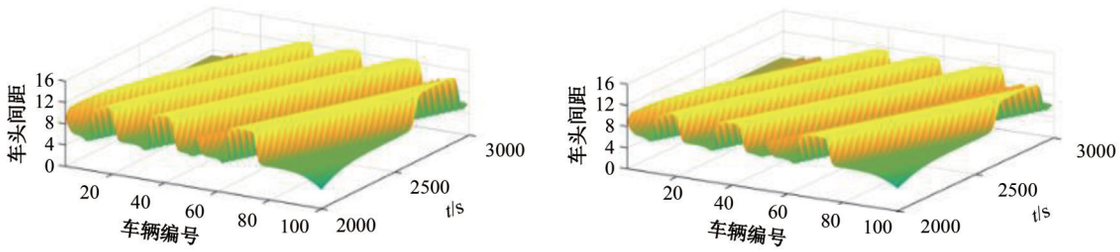
的密度波振荡幅度,从而提升了同质交通流的稳定性。而工况 1 的密度波振荡幅度最大,这是因为其弯道半径较小、超高过大,不利于交通流的稳定。这与前文的分析一致。

为了更深入地分析交通流的稳定性,本文进一步探讨了混合交通流环境下不同工况的影响。图 12 和图 13 显示了由 HDVs、AVs 与 CAVs 构成的异质交通流在不同工况下车头间距的时空演化图和曲线。从图 12(a)～(d)可以看出,在工况 1 条件下,密度波的振荡幅度最大,表明工况 1 下交通流的稳定性最差;而在工况 2 条件下,密度波的振幅减小,表明交通流在工况 2 下稳定性最强。图 13 的结果与图 12 一致,进一步验证了这一趋势。

从上述对不同工况下同质交通流和异质交通流的分析可知,不论是同质还是异质交通流,在工况 2 下均表现出最佳的稳定性,而工况 1 则表现最差。因此,为了深入分析混合交通流的稳定性,本文在工况 2 条件下研究了不同渗透率 p 下的车头间距时空演化图和曲线,如图 14 和图 15 所示。



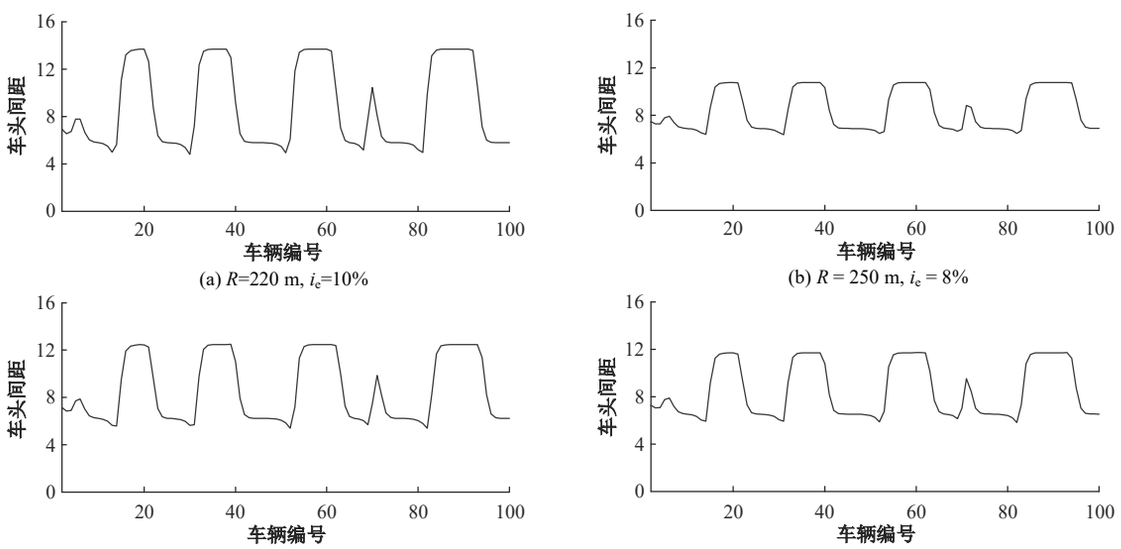
(a) R=220 m,i_e=10%　　(b) R=250 m,i_e=8%



(c) R=270 m,i_e=6%　　(d) R=300 m,i_e=4%

图 12　异质交通流在不同工况下车头间距的时空演化

Fig. 12　Space-time evolution of the headway for heterogeneous traffic flows under different conditions

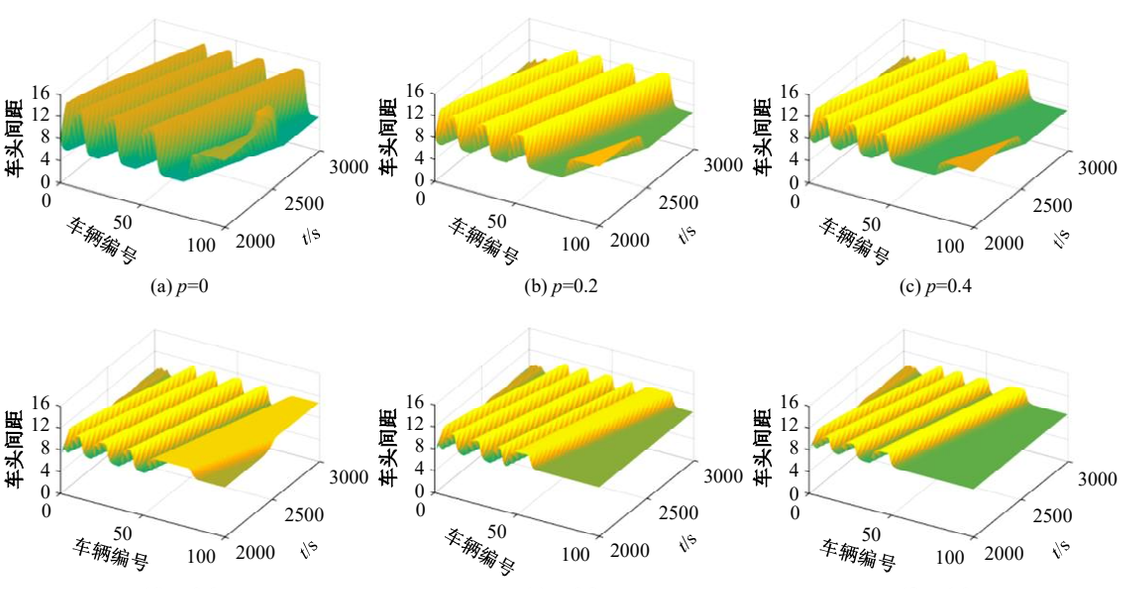


(a) R=220 m, i_e=10%　　(b) R = 250 m, i_e = 8%

(c) R=270 m, i_e=6%　　(d) R=300 m, i_e=4%

图 13　异质交通流在不同工况下的车头间距曲线

Fig. 13　Headway profiles for heterogeneous traffic flows under different conditions



(a) p=0　　(b) p=0.2　　(c) p=0.4

(d) p=0.6　　(e) p=0.8　　(f) p=1.0

图 14　不同 CAVs 渗透率下车头间距的时空演化

Fig. 14　Space-time evolution of the headway for different penetration rates of CAVs

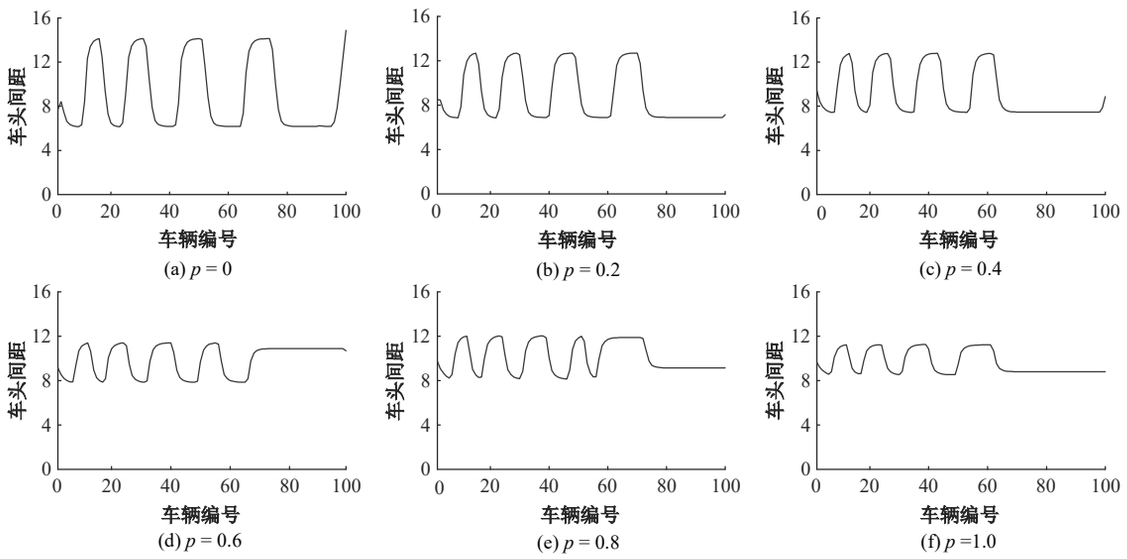


图15 不同CAVs渗透率下的车头间距曲线

Fig. 15 Headway profiles for different penetration rates of CAVs

从图14和图15可以看出,随着CAVs渗透率的增加,车头间距波动明显减小,表明混合交通流的稳定性逐渐提升。当CAVs渗透率为0时,交通流仅由HDVs组成,此时交通流不稳定。当CAVs渗透率达到0.2和0.4时,前方车辆的扰动增大,车队出现振荡,交通流仍不稳定。当CAVs渗透率达到0.6及以上时,车头间距波动逐渐缩小。当CAVs渗透率达到0.8时,扰动传播得到有效抑制。此后,随着渗透率进一步增加,车队整体趋于稳定。这表明CAVs能够维持交通流的稳定性。当CAVs渗透率较低时,车队中HDVs的比例较高,由于车辆位置分布的随机性,CAVs会分散在HDVs之间,易退化为AVs,从而降低了异质交通流的稳定性;随着CAVs渗透率的增加,CAVs退化为AVs的概率减小,从而改善了混合交通流的不稳定情况。仿真结果显示,交通流的稳定性得到了显著改善。数值仿真分析结果与理论分析的结论一致。

5 结 论

(1)在同质交通流中,工况2表现出最佳的交通流稳定性。研究表明,车辆低速(0~10 m/s)行驶时,速度越低越有利于稳定性;在高速(20~30 m/s)行驶时,HDVs以29.9 m/s、AVs以26.8 m/s、CAVs以26.9 m/s的速度行驶时稳定性最优。

(2)在异质交通流中,同样在工况2下,交通流稳定性最好。增加平衡态速度有利于提升混合交通流的稳定性,然而增加自由流速度v_f可能会加剧扰动的传播,对交通流的稳定性产生不利影响。当CAVs的渗透率较高(超过0.72)时,混合交通流能保持稳定。

(3)本文为今后智能网联环境下弯曲道路混合交通流的稳定性分析提供了理论参考,为车辆在弯曲道路上行驶提供了低、中、高速度稳定性最优的参考依据。然而,本文存在一定的局限性。若能精确标定模型参数,将使研究结论更有说服力。未来工作将结合实验室现有设备进行实验数据采集,并对跟驰模型的参数进行精确标定。

参考文献:

[1] Marsden G, Mcdonald M, Brackstone M. Towards an understanding of adaptive cruise control[J]. Transportation Research Part C, 2001, 9(1): 33-51.

[2] Xiao L Y, Gao F. A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(10): 1167-1192.

[3] Makridis M, Mattas K, Anesiadou A, et al. OpenACC: An open database of car-following experiments to study the properties of commercial ACC systems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: No. 103047.

[4] Shang M F, Stern R E. Impacts of commercially available adaptive cruise control vehicles on highway stability and throughput[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 122: No. 102897.

[5] Wissam K, Soyoung A. A strategic approach to handle

performance uncertainties in autonomous vehicle′s car-following behavior[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 160: No. 104499.

[6] 张毅, 姚丹亚, 李力, 等. 智能车路协同系统关键技术与应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 40-51.
Zhang Yi, Yao Dan-ya, Li Li, et al. Technologies and applications for intelligent vehicle-infrastructure cooperation systems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 40-51.

[7] Jiang Y S, Ren T T, Ma Y Q, et al. Traffic safety evaluation of mixed traffic flow considering the maximum platoon size of connected automated vehicles[J]. Physica A, 2023, 612: No. 128452.

[8] Ge Y M, Jiang R, Sun H J, et al. Environmental impact estimation of mixed traffic flow involving CAVs and Human-driven vehicles considering the non-equilibrium state[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 161: No. 104542.

[9] Luo L H, Liu Y, Feng Y H, et al. Stabilizing traffic flow by autonomous vehicles: stability analysis and implementation considerations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 158: No. 104449.

[10] Qin Y Y, Luo Q Z, Wang H. Stability analysis and connected vehicles management for mixed traffic flow with platoons of connected automated vehicles [J]. Transportation Research Part C, 2023, 157: No. 104370.

[11] Wang S T, Zhu W X, Ma X L. Mixed traffic system with multiple vehicle types and autonomous vehicle platoon: modeling, stability analysis and control strategy[J]. Physica A, 2023, 632: No. 129293.

[12] 宋成举, 贾洪飞, 秦昊溥. 网联车混入条件下混合交通流跟驰稳定性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(2): 419-426.
Song Cheng-ju, Jia Hong-fei, Qin Hao-bo. Car following stability in mixed traffic flow with CAVs mixing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(2): 419-426.

[13] 郝威, 龚雅馨, 张兆磊, 等. 面向高速公路混合交通流的车辆协同合流策略[J]. 交通运输系统工程与信息,2023, 23(1): 224-235.
Hao Wei, Gong Ya-xin, Zhang Zhao-lei, et al. Cooperative merging strategy for freeway ramp in a mixed traffic environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(1): 224-235.

[14] 马万经, 李金珏, 俞春辉. 智能网联混合交通流交叉口控制: 研究进展与前沿[J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 22-40.
Ma Wan-jing, Li Jin-yu, Yu Chun-hui. Intersection control in mixed traffic with connected automated vehicles: a review of recent developments and research frontiers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 22-40.

[15] Zhang Y, Yang X F. Discrete macroscopic traffic flow model considering the lane-changing behaviors in the mixed traffic environment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 164: No. 104672.

[16] Shang Y, Zhu F, Jiang R, et al. Trajectory planning at a signalized road section in a mixed traffic environment considering lane-changing of CAVs and stochasticity of HDVs[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 158: No. 104441.

[17] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Phys Rev E, 2000, 62(2): 1805.

[18] Vanderwerf J, Shladover S, Kourjanskaia N, et al. Modeling effects of driver control assistance systems on traffic[J]. Transportation Research Record, 2001, 1748(1): 167-174.

[19] Kesting A, Treiber M, Schoenhof M, et al. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2008, 16: 668-683.

[20] Kesting A, Treiber M, Helbing D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2010, 368(1928): 4585-4605.

[21] Yi Z W, Lu W Q, Xu L H, et al. Intelligent back looking distance driver model and stability analysis for connected and automated vehicles[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3499-3512.

[22] 王树凤, 王世皓, 王新凯. 基于改进跟驰模型的混合车辆编队研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 289-297.
Wang Shu-feng, Wang Shi-hao, Wang Xin-kai. Research on hybrid vehicle formation based on improved car-following[J]. Highway, 2023, 68(6): 289-297.

[23] Cui Z Y, Wang X N, Ci Y S, et al. Modeling and analysis of car-following models incorporating multiple lead vehicles and acceleration information in heterogeneous traffic flow[J]. Physica A, 2023, 630:

129259.

[24] 蒲云, 徐银, 刘海旭, 等. 考虑多车影响的智能网联车跟驰模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(5): 1285-1292.
Pu Yun, Xu Yin, Liu Hai-xu, et al. An improved car-following model for connected and automated vehicles considering impact of multiple vehicles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(5): 1285-1292.

[25] Zhu W X, Zhang L D. Friction coefficient and radius of curvature effects upon traffic flow on a curved road [J]. Physica A, 2012, 20(391): 4597-4605.

[26] Cheng R J, Wang Y H. An extended lattice hydrodynamic model considering the delayed feedback control on a curved road[J]. Physica A, 2019, 513: 510-517.

[27] 陈秀锋, 高艳艳, 石英杰, 等. 基于最优速度的弯道跟驰模型及其稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2020, 39(1): 126-130.
Chen Xiu-feng, Gao Yan-yan, Shi Ying-jie, et al. Curve car following model based on optimal velocity and its stability analysis[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(1): 126-130.

[28] Zhai C, Wu W W, Xiao Y P. Cooperative car-following control with electronic throttle and perceived headway errors on gyroidal roads[J]. Applied Mathematical Modeling, 2022, 108: 770-786.

[29] Wang Z, Zhu W X. Modeling and stability analysis of traffic flow considering electronic throttle dynamics on a curved road with slope[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 597: No. 127225.

[30] 罗瑞发, 郝慧君, 徐桃让, 等. 考虑时延的网联车混合交通流基本图模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2023, 51(1): 106-113.
Luo Rui-fa, Hao Hui-jun, Xu Tao-rang, et al. Fundamental diagram model of mixed traffic flow of connected vehicles considering time delay[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 106-113.

[31] 吴德华, 陈荣峰. 智能网联客货混合交通流特性及集聚换道策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(8):2588-2596.
Wu De-hua, Chen Rong-feng. Characteristics and agglomeration lane-changing strategies of intelligent connected passenger and freight mixed traffic flow [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 55(8): 2588-2596.

[32] 覃频频, 吴锋民, 覃光毅, 等. 考虑道路几何条件的ACC系统上层速度控制模型[J]. 机械设计与制造, 2021(5): 235-240.
Qin Pin-pin, Wu Feng-min, Qin Guang-yi, et al. The upper-layer speed control model of adaptive cruise control (ACC) system considering road geometry[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(5): 235-240.

[33] 许金良, 曾卓, 穆明浩, 等. 考虑制动、荷载转移、纵坡的雨天小客车弯道安全车速模型[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2024, 43(2): 75-83.
Xu Jin-liang, Zeng Zhuo, Mu Ming-hao, et al. Safe speed model of passenger cars on bends in rainy days considering braking, load transfer and longitudinal slope[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(2): 75-83.

[34] Qin Y Y, Luo Q Z, Wang H. Stability analysis and connected vehicles management for mixed traffic flow with platoons of connected automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 157: No. 104370.

[35] Wilson R E. Mechanisms for spatio-temporal pattern formation in highway traffic models[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2008, 366(1872): 2017-2032.

[36] JTG D20201. 公路路线设计规范[S].

[37] Ward J A. Heterogeneity, lane-changing and instability in traffic: a mathematical approach[J]. Pure mathematics12C-Applied Mathematics, 2009, 1: 40050067.

[38] Yao Z B, Wu Y X, Wang Y, et al. Analysis of the impact of maximum platoon size of CAVs on mixed traffic flow: an analytical and simulation method[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 147: 103989.

[39] Zhou J Z, Zhu F. Modeling the fundamental diagram of mixed human-driven and connected automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 115: 102614.

[40] Zhou J Z, Zhu F. Analytical analysis of the effect of maximum platoon size of connected and automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 122: 102882.

[41] Zhang X Z, Shi Z K, Yu S W, et al. A new car-following model considering driver's desired visual angle on sharp curves[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2023, 615: 128551.