

网联背景下货运通道混合交通流安全性研究

司海鹏^{1*}, 程智鹏¹, 干宏程^{1,2#}

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学超网络研究中心, 上海

收稿日期: 2025年3月1日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月2日

摘要

随着智能网联技术的发展, 自动驾驶车辆开始普及, 但仍将长期处于智能网联车辆与人工驾驶车辆混合的交通流状态。为了探究网联车辆的不同渗透率以及重型卡车比例对交通尾部碰撞安全风险水平(TTC)的影响, 本文采用Python执行模拟数值仿真实验, 引入IDM模型、CACC模型来分别表征人工驾驶和自动驾驶跟驰行为, 考虑CACC退化为ACC跟驰模式, 量化汽车与重卡、人工驾驶与自动驾驶之间的参数差异, 包含反应延迟、安全间距与最大加减速度等, 分别建立不同车辆之间的跟驰模型。结果表明: 当网联车渗透率大于10%, 随着网联车渗透率的升高或重卡比例的下降, TIT不断下降, 安全水平不断提高, 说明货运重卡因本身重载的特性会提高危险系数, 而网联车的引入可以通过提高车辆反应速度来改善安全水平; 随着货运重卡比例的上升, 网联车渗透率的增加所带来的TIT变化斜率变小, 说明网联技术对汽车的改善幅度大于重卡。本研究根据实验结果评估了不同智能网联车辆渗透率、重卡比例下的碰撞风险指标。网联车辆的引入最高可以将通道内的整体安全水平提升53%。

关键词

智能交通, 混合交通流, 数值仿真, 网联重卡, 安全性

Research on the Safety of Mixed Traffic Flow in Freight Channels under the Background of Network Connection

Haipeng Si^{1*}, Zhipeng Cheng¹, Hongcheng Gan^{1,2#}

¹Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Center for Super Networks Research, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 1st, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 2nd, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 司海鹏, 程智鹏, 干宏程. 网联背景下货运通道混合交通流安全性研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 19-29.
DOI: 10.12677/mos.2025.144261

Abstract

With the development of intelligent connected technologies, autonomous vehicles are increasingly prevalent; however, the traffic flow is expected to remain in a mixed state of intelligent connected vehicles and manually driven vehicles for the foreseeable future. To investigate the impact of varying penetration rates of connected vehicles and the proportion of heavy trucks on traffic rear-end collision safety risk levels (Time-to-Collision, TTC), this study employs Python to conduct numerical simulation experiments. The Intelligent Driver Model (IDM) and Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) model are introduced to represent the following behaviors of manually driven and autonomous vehicles, respectively. The study considers the degradation of CACC to an Adaptive Cruise Control (ACC) following mode, quantifying the parameter differences between cars and heavy trucks, as well as between manually driven and autonomous vehicles, which include reaction delays, safety gaps, and maximum acceleration and deceleration rates. Different following models between vehicles are established accordingly. The results indicate that when the penetration rate of connected vehicles exceeds 10%, both an increase in the penetration rate of connected vehicles and a decrease in the proportion of heavy trucks lead to a continuous reduction in the Time-to-Collision (TTC), thereby improving safety levels. This finding suggests that the inherent characteristics of heavy trucks, due to their loaded nature, increase the hazard factor, while the introduction of connected vehicles enhances safety levels by increasing vehicle reaction speeds. Furthermore, as the proportion of heavy trucks rises, the slope of the TTC variation due to an increase in connected vehicle penetration rate diminishes, indicating that the improvements brought about by connected technologies are more significant for passenger cars than for heavy trucks. This research assesses collision risk indicators under varying penetration rates of intelligent connected vehicles and proportions of heavy trucks based on the experimental results. The incorporation of connected vehicles can improve the overall safety level within a corridor by up to 53%.

Keywords

Intelligent Transport, Mixed Traffic Flow, Numerical Simulation, Connected Trucks, Safety

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

随着信息技术和汽车工业的持续进步,智能网联自动驾驶车辆(Connected and Autonomous Vehicles, CAV)已成为该研究领域的焦点,且对提升交通安全性产生了积极影响。具体而言,CAV通过车辆间的通信与信息共享,能够自动调节车辆间的距离并同步行驶速度,同时快速、准确地识别交通环境,以较低的延迟做出反应。这些特性不仅增强了车辆行驶的稳定性 and 流畅性,还有助于减少交通事故的发生[1]。

目前 CAV 的跟驰模型主要包括自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)和协同自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)两种模式。CACC 和 ACC 虽然相关,但在功能和技术实现上有明显的区别:ACC 系统主要依赖于车辆上的传感器(如雷达或激光)来监测前方交通情况,并自动加速或减速。CACC 在 ACC 系统的基础上,增强了车辆间的通信能力。借助车辆与车辆之间(V2V)的通信技术,CACC 系统能够实时交换位置信息、速度和加速度等数据等。这使得该系统可以在更复杂的交通环境中更有效地进行车辆跟随,从而以更紧密的间距行驶。CACC 模型突破了传统自适应巡航控制 ACC

模型只能获取前车信息的局限性,实现了更加高效和智能的车辆跟驰控制[2]。卡车编队是指由一辆 ACC 领头卡车和若干辆 CACC 卡车组成的集装箱运输队伍。这种编组形式在提升货运道路容量、增强交通稳定性与安全性、减少燃料消耗及污染物排放方面展现出巨大的潜力[3]。卡车编组的这些优势不仅能够有效降低物流成本,还将推动港口物流业和货运系统的智能化发展。

近年来,随着智能网联技术的持续发展,对于与网联车辆相关的混合交通流的安全性的担忧越来越受到关注[4]。提高 CAV 渗透率或形成 CACC 编队模式在大多数情况下能显著增加道路的通行安全性。Lee 等[5]通过对 ACC 车辆的实地测试,结合多组测试人员的评估,验证了 ACC 车辆在应对交通安全隐患方面的有效性;李霞等[6]等对搭载不同通信技术的网联车辆与传统人工车辆构成的复杂混合交通流进行了稳定性研究,基于 V2V 的网联车辆在较低的渗透率时不会显著改善交通流安全性;刘新雨等[7]应用驾驶模拟器研究了 ACC 车辆在中国典型道路场景中的交通安全特性,认为 ACC 车辆的交通安全碰撞时间明显优于常规车辆;秦严严[8]针对 ACC 车辆比较了不同网联渗透率下的尾部碰撞风险,只有网联车比例达到一定程度时才能显著提升通道安全。在相同 CAV 渗透率条件下,采用 CACC 模式的 CAV 还能进一步提升通行安全。已有研究如 Jiang 等人[9]对于协同自适应巡航控制的卡车队列混合交通流的研究,经数值仿真验证,表明在其他条件相同的情况下,混合交通流的振荡分别随着渗透率和卡车编队长度的增加而减小。混合交通流的安全水平随着卡车编队的增加而提高,但随着总体交通流量的增加而恶化;Li 等人[10]对协同式自适应巡航控制模型的安全效应进行了分析,研究表明 CACC 系统对降低高速公路追尾碰撞风险具有显著作用;Talebpour 等人[11]针对由 CACC 车辆、ACC 车辆和人工驾驶车辆构成的混合交通流,仿真分析了 3 种类型车辆不同占比对混合交通流稳定性的影响,研究表明 CACC 的加入可以显著提升交通安全;Van Nunen 等人[12]关注卡车渗透率为 100%的卡车编队的安全性研究并验证了其安全性随着 CAV 的加入而显著提升;Ramezani 等人[13]考虑了涉及人工驾驶汽车和卡车编队的混合交通流的安全性,但并未考虑网联小汽车和人工驾驶卡车。此外,杜文举[14]研究了前后多车信息对复杂混合交通流稳定性与安全性的影响,证明了相比于仅考虑紧邻前后车信息的情形,考虑前后两辆车信息时,对复杂混合交通流的稳定性与安全性具有较好的改善效果;蒋阳升等[15]研究了由人工驾驶车辆和智能网联车辆构成的异质交通流的稳定性与安全性,研究表明 CAV 有助于提升交通安全;Li 等人[16]利用 TET 和 TIT 研究了 ACC 和 CACC 车辆在不同 CAV 渗透率下对后端碰撞风险的影响,模拟结果表明,随着 CACC 车辆渗透率的提高,公路上 CAV 之间的后端碰撞风险可以显著降低。该些研究均证明了通过引入网联车辆或形成 CAV 编队来改善混合车流通行稳定性与安全性的潜力,但对于针对货运通道混合交通流的安全性研究相对较少。

虽然已有很多研究对混合 CAV 的交通流和 CAV 编队进行了广泛研究,验证了 CAV 对于交通安全和稳定具有重要意义,但关于包括网联重卡(Connected and Autonomous Trucks, CAT)在内的网联汽车(Connected and Autonomous Vehicles, CAV),人工驾驶卡车(Human-Driven Trucks, HDT)与人工驾驶汽车(Human-Driven Vehicles, HDV)四种车型的混合交通流特性的研究仍相对有限。因此,本研究旨在探讨该混合交通流情景下 CAT 在不同网联渗透率对交通安全特性的影响,进而提升货运道路的交通能力。本研究填补了智能网联系统中包含重型卡车的新型混合交通流安全性影响研究的空白,并为网联卡车的大规模实地测试提供了科学依据。

2. 交通流模型

2.1. 混合交通流的构成

本研究利用基于数值仿真模拟的模型来验证两港大道货运通道上包含传统人工驾驶汽车 HDV、人工驾驶卡车 HDT、网联汽车 CAV 和网联卡车 CAT 编队的新型复杂混合交通流的安全性能。更具体地说,

如图 1 所示, 本研究考虑的混合交通流包括四种类型的车辆, 即人工驾驶汽车(HDV, 灰色汽车), 人工驾驶卡车(HDT, 灰色卡车), 网联自动驾驶汽车(CAV, 蓝色汽车)和网联自动驾驶卡车(CAT, 蓝色卡车)。

本实验所分析的单车道混合交通流模型, 涉及到 CACC(协同自适应巡航控制)卡车编队, 如图 1 中蓝色虚线框内所示。在此模型中, 人工驾驶车辆依托驾驶员的操作进行跟随行驶。对于 CAT 编队而言, 领航车辆利用车载雷达和其他传感器, 自动探测与前方车辆的相对速度和行车间距, 从而实现自动跟随。编队中的其他车辆, 既通过自身的车载传感器探测与前车的相对速度和间距信息, 也通过车对车(V2V)通信技术接收来自领航车的运动信息, 以实现从前车及领航车的自动跟随。如图 1 所示, 这里的卡车编队由一个具有通行功能的领航车和若干个卡车组成。假设卡车编队的领航车是基于 ACC 的卡车, 它是从 CACC 卡车降级的, 这意味着领航车无法与前方车辆通信, 但无论前方车辆是哪种车辆, 领航车仍然可以将其运动学参数(例如加速度、位置和速度等)传输给其相邻的跟随者。相比之下, 卡车编队内的追随者可以通过 CACC 技术与相邻队友进行通信。一个卡车编队通常由不超过 10 辆卡车组成[17], 由于卡车体积、车身尺寸和卡车车头间距比汽车大, 编队总长可达 100 米, 每个卡车编队包含 1 辆 ACC 领航车和若干辆 CACC 卡车。

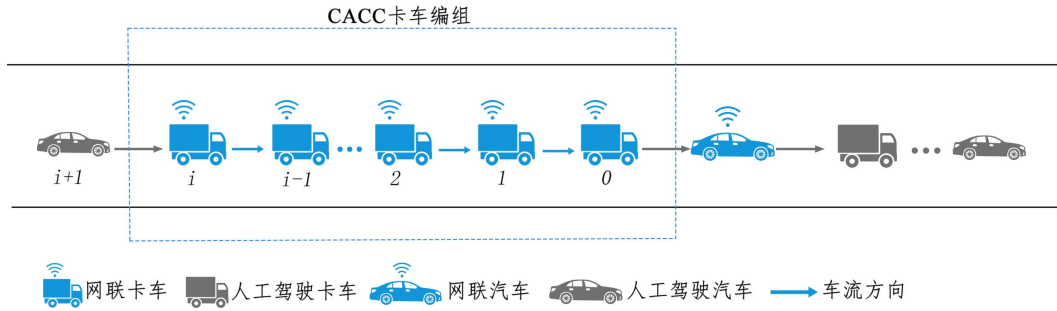


Figure 1. Scene of mixed traffic flow composition
图 1. 混合交通流组成的场景

2.2. 网联车辆的跟驰模型

本研究网联车模型主要涉及 CACC 和 ACC 系统。CACC 可以在没有车间通信环境的情况下运行此系统, 因此在特定条件下(如通信故障或受到限制的环境), CACC 可能会退回到类似于以及 ACC 的工作模式。在这种情况下, CACC 依然能利用车辆自身的传感器来维持安全距离和速度。简单来说, CACC 在功能上高于 ACC, 但在特定情况下能够以 ACC 的方式继续运行。ACC 注重的是单一车辆的自动控制, 而 CACC 则通过协同多个车辆之间的通信来实现更高效的交通管理。本实验的智能网联车辆包括 CAT 和 CAV, 其中 CAT 包括 CACC 卡车和 ACC 卡车, CAV 包括 CACC 汽车和 ACC 汽车。由于卡车与汽车物理性质的差异, 他们的运动学参数也有所不同[18]。

2.2.1. ACC 跟驰模型

ACC 可以用模型(1)表示, $a_n^{ACC}(t)$ 是 ACC 车辆 n 在时间 t 的加速度。

$$a_n^{ACC}(t) = k_1 [\Delta x_n(t) - l - s_0 - t_a v_n(t)] + k_2 \Delta v_n(t) \quad (1)$$

其中 k_1 和 k_2 为模型控制参数。 $\Delta v_n(t) = v_n(t) - v_{n-1}(t)$ 为前车 $n-1$ 与 ACC 跟随车辆 n 在 t 时刻的速度差值。 $e_{n,a}(t) = \Delta x_n(t) - l - s_0 - t_a v_n(t)$ 为 ACC 车辆 n 在 t 时刻的实际跟随状态与期望跟随状态之间的距离偏差。

$e_{n,a}(t)$ 直接影响跟随车辆的加速度计算: 跟随车辆会根据该偏差进行调整, 以便增大或减小与前车

的距离,从而实现平稳的跟车行为。例如,如果 $e_{n,a}(t)$ 为负值,说明跟随车辆需要减速以增加距离,反之后车可以考虑加速。其中 $v_n(t)$ 是当前 ACC 车辆 n 在时间 t 的速度。 $\Delta x_n(t) - l - s_0$ 为实际跟随状态距离,其中 $\Delta x_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ 为 ACC 跟随车辆 n 与前车 $n-1$ (汽车或卡车) 之间在 t 时刻的车距。 t_a 为 ACC 追随车辆对前车行为(如减速或加速)做出反应所需的时间,在该时间内,车辆需要考虑当前速度和与前车的距离,以安全、平稳地调整自己的速度。 l 是前车 $n-1$ 的长度, s_0 为车辆间静止状态下的最小安全距离。

2.2.2. CACC 跟驰模型

CACC 可以用模型(2)表示, $a_n^{CACC}(t)$ 是 CACC 车辆 n 在时间 t 的加速度。

$$a_n^{CACC}(t) = k_p [\Delta x_n(t) - l - s_0 - t_c v_n(t)] + k_d \Delta v_n(t) + k_a a_{n-1}(t) \quad (2)$$

其中 k_p , k_d 和 k_a 为模型控制参数。 $e_{n,c}(t) = \Delta x_n(t) - l - s_0 - t_c v_n(t)$ 为 CACC 车辆 n 在 t 时刻的实际跟随状态与期望跟随状态之间的距离偏差。 t_c 为 CACC 追随车辆对前车行为(如减速或加速)做出反应所需的时间。 $a_{n-1}(t)$ 为前车 $n-1$ 的加速度,因为该模型需考虑 V2V 通信,以此可以接收前 CACC 卡车 $n-1$ 加速度 $a_{n-1}(t)$ 的附加信息。 $\Delta v_n(t)$, $v_n(t)$, $\Delta x_n(t)$, l 和 s_0 如先前所定义。

2.3. 人工驾驶车辆的跟驰模型

智能驾驶员模型(Intelligent Driver Model, IDM)是一种用于模拟人工驾驶车辆运动行为的数学模型,它通过模拟驾驶员的决策过程来预测车辆的加速度等运动数值。IDM 模型考虑了多种因素,包括车辆当前速度、与前车的相对速度以及车辆间的间距,旨在实现平滑的车辆跟随行驶,同时避免碰撞和不必要的加速或减速。IDM 模型的一个关键特点是它能够根据交通状况的变化自适应调整车辆行为,从而优化车辆的行驶效率和安全性。在混合交通流环境下, IDM 模型被广泛应用于模拟传统驾驶车辆的行为,为研究 CACC 系统与传统驾驶车辆共行时的混合交通安全影响提供了重要的理论基础。

IDM 模型使用后车加速度变化来反映车辆的跟驰状态,如模型(6)所示。 $a_n^{IDM}(t)$ 表示车辆 n 在时间 t 的加速度,模型(7)中的 s^* 表示车辆所需的时间间隙。

$$a_n^{IDM}(t) = a \left[1 - \left(\frac{v_n(t)}{v_f} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n(t), \Delta v(t))}{s_n(t)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$s^*(v_n, \Delta v) = s_0 + v_n(t)T + \frac{v_n(t)\Delta v(t)}{2\sqrt{ab}} \quad (4)$$

其中, a 和 b 分别是车辆的最高加速度和舒适减速度。 $v_n(t)$ 是车辆 n 在时间 t 的瞬时速度。 v_f 是车辆自由流动交通条件下的最大速度; $s_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t) - l$ 是本车 n 的车头与前车 $n-1$ 后保险杠之间的距离, l 是前车 $n-1$ 的长度。方程(10)中的 s_0 为静止状态下的最小安全距离, T 为安车头时距, $\Delta v(t) = v_n(t) - v_{n-1}(t)$ 为领先车辆 $n-1$ 与本车 n 在 t 时刻的速度差。

3. 安全性分析方法

基于数值仿真实验评价交通安全水平要求评价指标应能够体现车辆的跟驰特性,为了评价不同网联车渗透率对混合交通流交通安全的影响,本研究采用交通尾部碰撞安全风险水平(TTC, Time to Collision)作为评价指标。在进行风险评估或安全管理时,通常采用一些替代方案或技术来降低风险和提高安全性,即替代安全措施(SSM)。在基于车辆轨迹仿真数据的帮助下,证明了替代安全措施(SSM)的量化指标 TTC

有利于评估所提出的混合交通流的安全性能。当本车速度 n 大于前车 $n-1$ 时, 即 $v_n(t) > v_{n-1}(t)$, 并假设它们之间的速度差保持不变, 则两车发生碰撞所需的时间定义为碰撞时间(TTC)。碰撞时间 TTC 是交通安全的重要指标, 广泛应用于交通安全评价[17], 计算公式如式(5)所示。

$$TTC = x_{n-1}(t) - x_n(t) - l / v_n(t) - v_{n-1}(t), \forall v_n(t) > v_{n-1}(t) \quad (5)$$

其中 $v_n(t)$ 和 $v_{n-1}(t)$ 分别表示时刻 t 时前方 $n-1$ 辆和后方 $n-1$ 辆相邻车辆的速度。而 $x_{n-1}(t)$ 和 $x_n(t)$ 分别表示上述两辆相邻车辆在时间 t 时的位置。 l 是前车 $n-1$ 的长度。然而, 假定公式(5)中的速度差 $v_n(t) - v_{n-1}(t)$ 恒定, 则当速度变化时, TTC 是时间不稳定的。因此, Minderhoud 等人[19]提出了两个基于 TTC 的新的量化指标, 即时间暴露 TTC (TET) 和时间积分 TTC (TIT), 并引入阈值 TTC^* 来区分安全和不安全状态, 本研究选取 TIT 作为实验的量化指标。TIT 计算公式如式(6)所示。

$$TIT(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [TTC^* - TTC(t)] \Delta t, 0 < TTC(t) < TTC^* \quad (6)$$

TIT 定义为 TTC 与 TTC^* 之差的积分。更具体地, TIT 表示当低于阈值 TTC^* 时, 在不同 TTC 下安全水平的变化。TIT 的增加表示暴露于 TTC 的时间增加, 表明混合交通流的安全性降低。与 TTC 相比, TIT 更侧重于衡量与危险驾驶条件持续时间相关的风险, 即反应尾部碰撞风险的可能性, TIT 指标值越小, 表明尾部碰撞交通安全水平越高。

4. 仿真实验设计与分析

4.1. 仿真实验设计

本实验基于上海两港大道货运通道为研究载体, 因此以货运通道的一个客货车道为模拟仿真路段, 进行上述交通流的安全特性分析, 并应用 ACC, CACC 和 IDM 车辆跟驰模型进行数值仿真实验。仿真过程为: 首先令车队全部发车并根据不同跟驰模型调整车辆间的间距, 使车队稳定后再开始记录数据; 其次在整个模拟过程中, 更新车队状态, 并记录位置、速度、加速度和车辆状态等信息; 然后计算车队的平均交通干扰时间(TIT), 将车速、位置、加速度和状态等数据写入文件。最后输出模拟结果。

如图 2 所示, 在仿真实验中, 路段总体长 6 km, 实验数据记录路段为 2 km 至 4 km。为了模拟现实中由于前车减速或刹车的情况[20], 本实验设置第 1 辆车行驶到 3 km 处时会有刹车并减速的行为, 其他跟随车辆也随之进行适应的减速行为。实验中共设置 100 辆车并对卡车进行编组, 卡车编队由 3 到 10 辆卡车组成, 其中包括 1 辆 ACC 领头卡车和若干辆 CACC 跟随卡车。实验路段分别考虑并设置为全重卡情况(卡车渗透率 100%)、90 辆卡车和 10 辆汽车(卡车渗透率 90%)、70 辆卡车和 30 辆汽车(卡车渗透率 70%)、50 辆卡车和 50 辆汽车(卡车渗透率 50%), 30 辆卡车和 70 辆汽车(卡车渗透率 30%)共 5 种情景。其中人工驾驶车辆和 CACC 车辆的相对数量以及相对空间分布由 CACC 车辆渗透率随机确定, 以 10% 为间隔选取 CACC 车辆渗透率。实验仿真时间为 600 s, 仿真步长为 0.1 s。

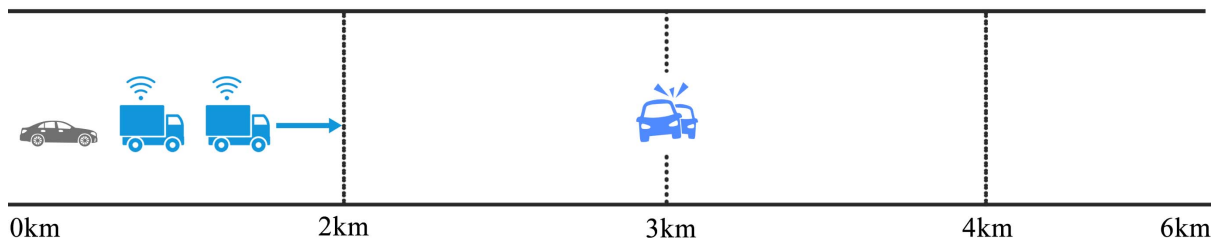


Figure 2. Schematic diagram of the experimental simulation section
图 2. 实验模拟路段示意图

本研究的混合交通流中考虑了两种类型的人类驾驶车辆(HDC和HDT)和两种网联车辆(CAV和CAT)。仿真实验中假设汽车长度为5 m, 卡车长度为12 m。汽车和卡车的最大速度为22.2 m/s (80 km/h), 最大加速度为3 m/s², 最大减速度为-3 m/s²。实验中CACC车辆根据模型(2)进行建模, 人工驾驶车辆根据模型(3)进行建模。

Ramezani 等人[13]在PATH实验室校准了网联汽车和卡车编队中CAT跟车模型的参数。Shladover 等人[21]通过现场测试报告了CAT不同车头间距的接受率。其中CACC车辆的物理模型参数如表1所示, 人工驾驶车辆的物理性能参数如表2所示。

Table 1. Physical model parameters of CACC trucks in truck platooning
表 1. CACC 车辆的物理模型参数

参数	CACC 汽车	CACC 卡车
k_p (s ⁻²)	0.45	0.0038
k_d (s ⁻¹)	0.25	0.065
k_a	0.5	0.5
l (m)	5.0	12.0
s_0 (m)	2.0	3.0
t_c (s)	0.6	1.2

Table 2. Physical model parameters of HDC and HDT
表 2. HDC 和 HDT 的物理模型参数

参数	人工驾驶汽车(HDV)	人工驾驶卡车(HDT)
a (m/s ²)	1.25	0.4
b (m/s ²)	-2.09	-1.77
T (s)	1.5	2.5
v_f (m/s)	33.3	22.2
s_0 (m)	2.0	3.0
l (m)	5.0	12.0

在混合交通流中车辆空间分布具有随机性, 对于CACC车辆而言, 当其前车也为CACC车辆时, 基于车辆间的通信, CACC车辆可获悉前车行驶状态, 起到辅助人工驾驶的作用。然而在CACC车辆跟随人工驾驶车辆行驶的情形下, 人工驾驶车辆缺乏车车通信设备的固有属性使得CACC车辆无法接收人工驾驶车辆的行车状态。此时, CACC车辆的辅助驾驶系统将无法得到有效应用, 其将发生功能退化, 转变为ACC车辆, 如图3所示。在图中, 以卡车退化现象为例, 由CACC卡车退化为ACC卡车的车辆继续保留车车通信系统, 使得紧跟其后的CACC车辆不再发生功能退化现象。这里的ACC车辆根据模型(1)进行建模。其中, ACC车辆的物理模型参数如表3所示。

在各CACC车辆渗透率下, 均重复仿真5次并计算TIT交通安全指标的均值, 然后取此均值作为该CACC车辆渗透率下的交通安全水平, 此举为了输出平均性能指标并用于减轻模拟随机性。

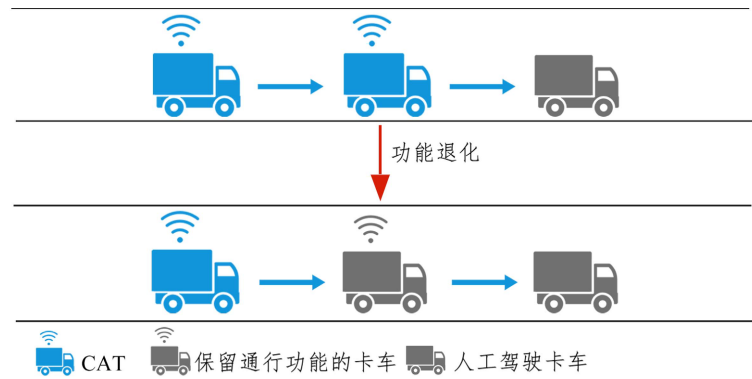


Figure 3. Degradation phenomenon
图 3. 退化现象

Table 3. Physical model parameters of ACC vehicles
表 3. ACC 车辆的物理模型参数

参数	ACC 汽车	ACC 卡车
k_1 (s^{-2})	0.23	0.0561
k_2 (s^{-1})	0.07	0.3393
l (m)	5.0	12.0
s_0 (m)	2.0	3.0
t_a (s)	0.6	1.2

4.2. 仿真结果分析

基于上述仿真实验，得到了不同卡车渗透率下 CACC 网联车渗透率与 TIT 值的变化趋势，即交通安全性与 CACC 卡车渗透率的仿真结果。当卡车渗透率为 70% 时，交通安全性变化趋势如图 4 所示。由图 4 可以看出，随着网联车比例的增加，TIT 总是呈下降趋势，也就是说随着 CACC 网联车比例的增加，通道中车队的总体交通安全水平显著提升。这表明了 CACC 车辆有利于降低交通尾部碰撞安全风险。

将不同卡车渗透率下的交通安全性变化趋势综合比较，如图 5 所示。可以看出无论卡车渗透率为何值时，TIT 值总是和网联车渗透率呈负相关，这也进一步验证了 CACC 车辆有利于提升通道的交通安全水平。随着网联车渗透率的增加，TIT 指标变得相对平缓且稳定，说明网联车能够提升通道内的交通流的整体稳定性。随着网联车比例的增加，车辆之间的信息共享和协同控制的效果显著提升并减少了交通流动中的波动。而稳定的车辆行驶状态有助于防止交通堵塞和起伏，从而使得交通事故的风险降低。

将图 5 中不同卡车渗透率下的 TIT 值进行纵向比较分析。在纵向比较下，当卡车渗透率高于 10% 时，随着卡车渗透率的提高，TIT 的值随之增加，也就是说卡车数量的增加会导致车道安全性的降低，即卡车越多越危险。当网联车渗透率在 10% 以下时，不同卡车渗透率下的 TIT 值变化相对不稳定，这是由于车流中车辆的随机性和车辆之间彼此差异性较大导致的。

如图 6 所示，将网联车渗透率为 0% 至 10% 时称为低网联渗透率区，而高于 10% 称为高网联渗透率区。在低渗透率区纵向比较下，随着卡车比例的增加，TIT 斜率递减，说明卡车比例的增加能够减少这种差异性。在低网联渗透率区 TIT 值的变化较大波动性也进一步证明了网联车的加入可以显著提升通道内的交通流稳定性，进而提升通道安全性。当通道处于高网联渗透率区时，交通流的整体安全水平变得稳定。如表 4 所示，最高可以使交通流安全性提升约 53%。

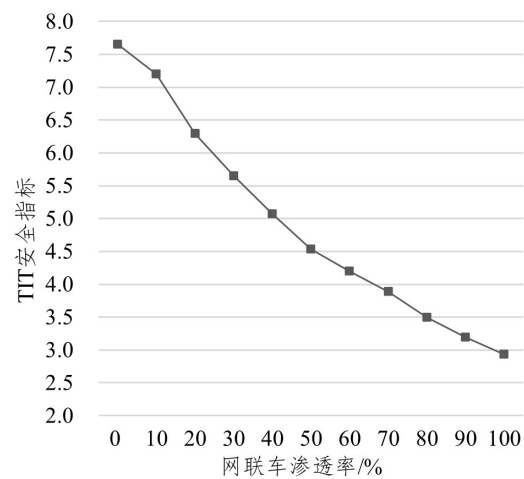


Figure 4. Safety variation trend at a truck penetration rate of 70%

图 4. 卡车渗透率 70%下的安全变化趋势

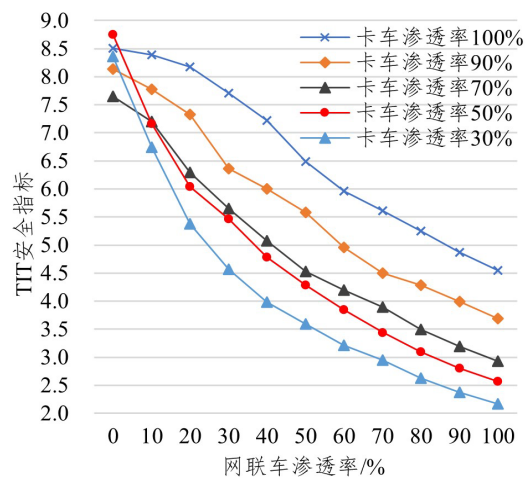


Figure 5. Comparison of safety indicators TIT at different truck penetration rates

图 5. 不同卡车渗透率下的安全指标 TIT

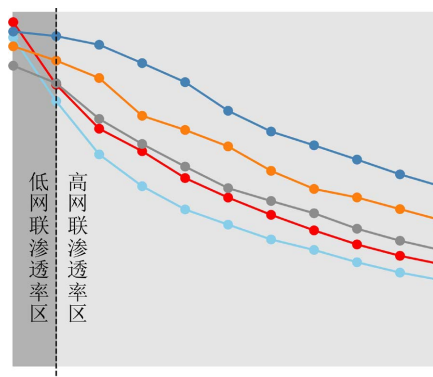


Figure 6. High and low connectivity penetration zones

图 6. 高、低网联渗透率区

Table 4. Maximum safety improvement percentage under different truck ratios
表 4. 不同卡车比例下的最大安全提升百分比

卡车比例/%	网联渗透率 0%的 TIT	100%网联渗透率的 TIT	提升百分比/%
30	8.36	2.17	25
50	8.75	2.57	29
70	7.64	2.93	38
90	8.14	3.69	45
100	8.51	4.55	53

5. 结论

本研究考虑了一种新型的混合交通流，混合了人工驾驶汽车与卡车，网联汽车与卡车共四种车型。应用常规人工驾驶车辆与网联车辆的跟驰模型，以计算机数值仿真实验为手段，研究了不同网联车渗透率对货运通道车辆尾部碰撞交通安全的影响。研究表明网联车渗透率的增加可以显著提升货运通道的整体交通安全水平与交通流稳定性，使得交通流体系统更加安全，稳定和可靠。这对于促进智能交通系统的进一步发展和实现更高水平的交通安全具有重要的意义。为了使场景更加真实并适用于港口或物流等实际系统，未来的研究可以将基本的单车道场景扩展到多车道高速公路场景，并考虑更复杂的驾驶行为，例如变道、制动、超车和卡车编队重组。综上所述，研究更复杂情况下的各种车流组合对混合交通流安全性的影响依然具有挑战性，但具有重要意义。

基金项目

上海市 2022 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目、空港智慧货运通道动态管控策略研究(22dz1203405)。

参考文献

[1] 李海舰, 刘中华, 陈开群, 等. 高速公路风险防控设施应用研究综述与展望[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(1): 54-78.

[2] 程泽阳, 孙凌霞, 丁恒, 等. 车路协同环境下道路交通安全研究进展[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(3): 14-33.

[3] Zhao, W., Ngoduy, D., Shepherd, S., Liu, R. and Papageorgiou, M. (2018) A Platoon Based Cooperative Eco-Driving Model for Mixed Automated and Human-Driven Vehicles at a Signalised Intersection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **95**, 802-821. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.025>

[4] Ma, Y., Liu, Q., Fu, J., Liufu, K. and Li, Q. (2023) Collision-Avoidance Lane Change Control Method for Enhancing Safety for Connected Vehicle Platoon in Mixed Traffic Environment. *Accident Analysis & Prevention*, **184**, Article ID: 106999. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.106999>

[5] Lee, J.D., McGehee, D.V., Brown, T.L. and Marshall, D. (2006) Effects of Adaptive Cruise Control and Alert Modality on Driver Performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1980**, 49-56. <https://doi.org/10.1177/0361198106198000108>

[6] 李霞, 汪一戈, 崔洪军, 等. 智能网联环境下复杂异质交通流稳定性解析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(6): 114-120.

[7] 刘新雨, 吴学勤, 王畅, 等. 自适应巡航控制系统对驾驶安全性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(4): 43-48.

[8] 秦严严, 肖腾飞, 罗钦中, 等. 雾天高速公路车辆跟驰安全分析及控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 11(5): 1-7.

[9] Jiang, C., Yin, S., Yao, Z., He, J., Jiang, R. and Jiang, Y. (2024) Safety Evaluation of Mixed Traffic Flow with Truck

- Platoons Equipped with (Cooperative) Adaptive Cruise Control, Stochastic Human-Driven Cars and Trucks on Port Freeways. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **643**, Article ID: 129802. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129802>
- [10] Li, Z., Li, W., Xu, S. and Qian, Y. (2015) Stability Analysis of an Extended Intelligent Driver Model and Its Simulations under Open Boundary Condition. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **419**, 526-536. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.10.063>
- [11] Talebpour, A. and Mahmassani, H.S. (2016) Influence of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Stability and Throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **71**, 143-163. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>
- [12] van Nunen, E., Esposto, F., Saberi, A.K. and Paardekooper, J. (2017) Evaluation of Safety Indicators for Truck Platooning. 2017 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Los Angeles, 11-14 June 2017, 1013-1018. <https://doi.org/10.1109/ivs.2017.7995847>
- [13] Ramezani, H., Shladover, S.E., Lu, X. and Altan, O.D. (2018) Micro-Simulation of Truck Platooning with Cooperative Adaptive Cruise Control: Model Development and a Case Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2672**, 55-65. <https://doi.org/10.1177/0361198118793257>
- [14] 杜文举, 赵尚飞, 李引珍, 等. 考虑前后多车的混合交通流稳定性与安全性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 206-218.
- [15] 蒋阳升, 胡蓉, 姚志洪, 等. 智能网联车环境下异质交通流稳定性及安全性分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 27-33.
- [16] Li, Y., Li, Z., Wang, H., Wang, W. and Xing, L. (2017) Evaluating the Safety Impact of Adaptive Cruise Control in Traffic Oscillations on Freeways. *Accident Analysis & Prevention*, **104**, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.04.025>
- [17] Lee, Y., Ahn, T., Lee, C., Kim, S. and Park, K. (2020) A Novel Path Planning Algorithm for Truck Platooning Using V2V Communication. *Sensors*, **20**, Article 7022. <https://doi.org/10.3390/s20247022>
- [18] 洪家乐, 曲大义, 贾彦峰, 等. 智能网联混合车流的动态特性及稳态控制策略[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 125-132.
- [19] Minderhoud, M.M. and Bovy, P.H.L. (2001) Extended Time-To-Collision Measures for Road Traffic Safety Assessment. *Accident Analysis & Prevention*, **33**, 89-97. [https://doi.org/10.1016/s0001-4575\(00\)00019-1](https://doi.org/10.1016/s0001-4575(00)00019-1)
- [20] 曲大义, 李娟, 刘聪, 等. 基于分子动力学的车流运行动态特性及其模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(4): 188-194.
- [21] Shladover, S., Lu, X.Y., et al. (2018) Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) For Partially Automated Truck Platooning: Final Report. *Federal Highway Administration-Exploratory Advanced Research Program*, **24**, 27-55.