

团体标准

自动驾驶卡车队列运行封闭场景仿真测试技术指南

Technical Guide for Simulation Test of Autonomous Truck Platoon
in Closed Scenarios

T/CHTS XXXXX-20XX

主编单位：山东高速集团有限公司

发布单位：中国公路学会

实施日期：xxxx年xx月xx日

xxxxxx(出版单位)

前 言

本指南主要用于规范高速公路自动驾驶卡车队列的组织与运行，保证卡车队列运行时的节能水平和安全水平，提高高速公路对卡车运行的管控能力。

本指南按照《中国公路学会标准编写规则》(T/CHTS 10001)编写。共分为7章、1个附录，主要包括：总则、规范性引用文件、术语和缩略语、测试环境设计要求、卡车队列分级、运行测试指标、仿真测试方法和基于SUMO的仿真测试方法案例。

本指南由山东高速集团有限公司提出，受中国公路学会委托，由山东高速集团有限公司负责具体解释工作。请有关单位将实施中发现的问题与建议，反馈至山东高速集团有限公司（主编单位）（地址：济南市历下区全运村中央广场A1座1120室，联系电话：0531-89250366），供修订时参考。

主编单位：山东高速集团有限公司

参编单位：北京交通大学、中国重汽集团有限公司、百度阿波罗智联（北京）科技有限公司、山东数升网络科技有限公司、中国公路学会自动驾驶工作委员会。

主要起草人：周勇，左志武，栗剑，王孜健，毕军，赵小梅，谢东繁，乔云，管妮娜，么新鹏，张涵，刘梦菲，田磊，朱聪，程周，刘婷，毕咏芳。

主要审查人：

目次

1	总则.....	1
2	术语和缩略语.....	2
2.1	术语.....	2
2.2	缩略语.....	3
3	测试环境设计要求.....	4
3.1	自动驾驶卡车队列运行测试的交通环境.....	4
3.2	自动驾驶卡车队列车辆能源类型.....	4
3.3	自动驾驶卡车队列评测场景.....	4
4	卡车队列分级.....	7
5	运行测试指标.....	8
5.1	安全性指标要求.....	8
5.2	稳定性指标要求.....	11
5.3	能耗指标要求.....	12
6	仿真测试方法.....	17
6.1	仿真测试环境.....	17
6.2	仿真测试流程.....	17
6.3	单一场景卡车队列仿真测试.....	18
附录 A	基于 SUMO 的仿真测试方法案例.....	20
A.1	主动换道自动驾驶卡车队列仿真测试案例.....	20
A.2	被动换道制动自动驾驶卡车队列仿真测试案例.....	22
A.3	前车紧急制动自动驾驶卡车队列仿真测试案例.....	25
	用词说明.....	29

1 总则

1.0.1 为规范高速公路自动驾驶卡车队列的组织与运行，评测卡车队列运行时的效率、能耗与安全水平等，提升高速公路对卡车队列运行的管控能力，制定本指南。

1.0.2 本指南适用于高速公路自动驾驶卡车队列在前方静车、前车紧急制动、前车减速、被动换道、主动换道等多种场景下的仿真测试评价。

1.0.3 开展自动驾驶卡车队列运行封闭场景仿真测试时，不仅应符合本指南的规定，同时也应符合有关法律法规及国家、行业现行有关标准的规定。

2 术语和缩略语

2.1 术语

2.1.1 自动驾驶卡车 automatous driving truck

配备有自动驾驶系统，能够由机器部分或完全取代驾驶员进行驾驶操作的卡车。

2.1.2 卡车队列 truck platoon

两辆或两辆以上的卡车，借助自动驾驶技术和车辆与车辆间的短程通信技术，以极低的车间距进行协作跟驰行驶的卡车队列。

2.1.3 车队编组 platoon formation

两辆或多辆卡车顺序排列形成卡车队列。

2.1.4 车队稳态 steady state of platoon

车队成员全部达到预期车速，且车队成员速度波动小于 $\pm 5\text{km/h}$ 。

2.1.5 车路协同 vehicle-infrastructure cooperation

采用先进的无线通信和新一代互联网等技术，在全时空动态交通信息采集与融合的基础上开展车辆主动安全控制和道路协同管理，充分实现人车路有效协同的相关技术。

2.1.6 车路协同系统 cooperative vehicle-infrastructure systems

车路协同系统包括车车通讯（Vehicle to vehicle, V2V）、车辆与路侧智能体通讯（Vehicle to infrastructure, V2I）等系统。

2.1.7 车队间距稳定性 stability of platoon headway

卡车队列中各车辆间距在正常行驶过程中应保持在一恒定值附近，且不随时间产生较大的变化。

2.1.8 车队速度稳定性 stability of platoon speed

车队对平衡态下速度微小扰动的响应能力，利用车队速度的标准差表示。

2.1.9 碰撞时间 time to collision

自车与前方车辆发生碰撞的时间，定义为自车与前方车辆之间的距离除以相对速度。

2.1.10 碰撞距离 distance to collision

自车与前方车辆发生碰撞的距离。

2.2 缩略语

V2X——车与任何事物的通信(Vehicle to Everything);

V2V——车车通信 (Vehicle to Vehicle);

V2I——车路通信 (Vehicle to Infrastructure);

TTC——车队的碰撞时间 (Time to Collision);

DTC——碰撞距离 (Distance to Collision)。

3 测试环境设计要求

3.1 自动驾驶卡车队列运行测试的交通环境

3.1.1 工作模式应符合下列要求：

- 1 自动驾驶卡车队列中所有车辆为全自动驾驶卡车。
- 2 卡车队列需要在固定地点形成。
- 3 车队中卡车的间距只受车队安全车间距限制。

3.1.2 仅考虑封闭环境下的卡车队列运行状态评测，没有社会车辆的干扰。

3.1.3 高速公路条件及环境条件应符合下列要求：

- 1 要求高速公路测试路段坡度平缓，视野开阔，平面线形和路面状况良好，最大坡长、停车视距等均应符合设计规范。
- 2 不考虑雨雪与雾天天气影响。
- 3 不考虑高温、高湿等其他极端天气与气候因素影响。

3.2 自动驾驶卡车队列车辆能源类型

3.2.1 车队中所有车辆均为燃油卡车，或均为电动卡车。

3.3 自动驾驶卡车队列评测场景

3.3.1 车道保持评测场景应符合下列要求：

- 1 设置卡车队列在平直高速公路路段以预期速度（如 60km/h）保持当前车道行驶。
- 2 测试距离不少于 2km。

3.3.2 分合流区域评测场景应符合下列要求：

- 1 设置卡车队列在平直高速公路路段以预期速度（如 60km/h）通过分合流区测试范围。
- 2 分合流区包含出入匝道，以及距离匝道出入口 1km 范围内的主干道路。

3.3.3 前方静车评测场景应符合下列要求：

- 1 设置卡车队列在平直高速公路路段以预期速度（如 60km/h）行驶，中途设置静止车辆迫使车队减速并最终停止。

2 测试距离不小于 2km。

3.3.4 前车紧急制动评测场景。包括前方有静止障碍物、前方有紧急制动车辆两类，并应符合下列要求：

1 前方有静止障碍物。卡车队列沿车道匀速行驶时，突然遇到前方静止障碍物。

2 前方有紧急制动车辆。领头卡车跟随前方车辆以相同速度在车道匀速行驶，前方车辆以恒定减速度紧急制动停车。

3.3.5 前车减速测评场景应符合下列要求：

1 设置卡车队列在平直高速公路路段以预期速度（如 60km/h）行驶，达到稳定状态一段距离后，设置车队领头车减速至设定速度（如 30km），并保持该速度行驶。

2 测试距离不小于 10km。

3.3.6 被动换道测评场景应符合下列要求：

1 设置卡车队列在平直高速公路路段以预期速度（如 60km/h）行驶，在测试路段前方某处（如 1km 处）设置障碍物，车队在到达障碍物前适当距离内强制换道。

2 测试距离不小于 10km。

3.3.7 主动换道测评场景应符合下列要求：

1 设置卡车队列在平直高速公路路段以预期速度（如 60km/h）行驶，在领头卡车前方一定距离（如 1km）切入一辆卡车，该车以低于卡车队列预期速度的速度（如 40km/h）行驶，卡车队列主动换道至相邻车道行驶。

2 测试距离不小于 10km。

3.3.8 连续高速行驶测评场景应符合下列要求：

1 当卡车队列平均速度稳定在“设计车速以下 20km/h”到“设计车速”之间时，认为卡车队列处于高速行驶状态，此时开始对车队进行连续高速行驶测试。

2 测试里程不小于等于 50km。

3.3.9 编组测试测评场景应符合下列要求：

1 卡车队列形成。两辆卡车在同一车道或者不同车道以非车队状态行驶，其中一辆卡车发起编队申请，进而形成卡车队列。

2 卡车队列重组。一个四辆以上的卡车队列以稳态运行，其中一辆卡车提出车队重组

申请，将卡车队列重组拆分为两个卡车队列。

3 卡车队列解散。卡车队列中一辆卡车发起离开申请，解除卡车队列行驶状态。

中国公路学会团体标准征求意见稿

4 卡车队列分级

4.0.1 本指南仅考虑较高级别且技术较为成熟的自动驾驶卡车构成的队列，分为 L3 和 L4 两个级别，并符合下列要求：

1 L3 级卡车队列：有条件自动化卡车队列。在当前高精地图能够覆盖的高速公路的全路段范围内，能够实现 0-120km/h 全速域脱手、脱脚自动驾驶。在一定条件下由系统完成所有驾驶操作，驾驶者根据系统请求提供适应的应答。

2 L4 级卡车队列：高度自动化卡车队列。卡车队列中的自动驾驶卡车可在所有高速公路上单独或列队行驶，全程无需司机参与，在天气恶劣或路况较差路段由人工接手。

5 运行测试指标

5.1 安全性指标要求

5.1.1 领头卡车安全性应符合下列要求：

- 1 领头卡车应具备监控整个编队行驶状态的功能，并能够在编队行驶状态出现问题时及时做出警告和应急措施。
- 2 领头卡车应能够通过 V2X 通信设备与编队其他车辆进行必要的信息交互和指令传递以执行动作和满足编队监管要求。
- 3 领头卡车应能够与信息中心进行必要的信息交互以满足编队监控和管理运营的要求。
- 4 当卡车队列因发生分裂而产生两个及以上领头卡车时，每个卡车队列的领头卡车也都应满足上述安全性条件要求。

5.1.2 跟随卡车安全性应符合下列要求：

- 1 跟随卡车应具备根据自身车辆和前方车辆的性能参数，确定自身跟前方车辆保持合理安全车间距的能力。
- 2 跟随卡车应具备识别前方障碍物，并具有与其保持安全距离的能力。
- 3 跟随卡车应具备监控自身行驶状态的功能，并能够在出现问题时及时做出警告和应急措施的能力。
- 4 跟随卡车可通过 V2X 通信设备与领头卡车以及卡车队列中其他卡车进行信息交互，获取队列中所有车辆共享的位置、状态等信息，并在脱离驾驶员干预的情况下，通过自动驾驶系统进行感知、决策、规划和控制，实现对领头卡车的跟驰行驶。
- 5 跟随卡车应能够与云平台进行必要的信息交互以满足编队监控和管理运营的要求。
- 6 跟随卡车可对车辆自身行为进行管控和决策。

5.1.3 安全性评测指标应符合下列要求：

- 1 卡车队列碰撞时间应按下式计算，符合表 5.1.3-1 的规定：

$$\frac{1}{TTC(t)} = \max_{1 \leq n \leq N} \left\{ \frac{1}{TTC_n(t)} = \frac{v_n(t) - v_{n-1}(t)}{x_{n-1}(t) - x_n(t) - l} \right\} \quad (5.1.3-1)$$

式中：N——卡车队列中的车辆数；

$x_{n-1}(t)$ ， $x_n(t)$ ——分别为前车和自车的位置；

$v_{n-1}(t)$, $v_n(t)$ ——分别为前车和自车的速度;

l ——卡车的长度。

表 5.1.3-1 卡车队列碰撞时间判定标准

速度区间 (km/h)	高风险 (s)	中风险 (s)	低风险 (s)
(60,80]	$\frac{1}{TTC} \geq 1.00$	$0.33 \leq \frac{1}{TTC} < 1.00$	$\frac{1}{TTC} < 0.33$
(40,60]	$\frac{1}{TTC} \geq 0.33$	$0.20 \leq \frac{1}{TTC} < 0.33$	$\frac{1}{TTC} < 0.20$
(30,40]	$\frac{1}{TTC} \geq 0.22$	$0.15 \leq \frac{1}{TTC} < 0.22$	$\frac{1}{TTC} < 0.15$
(0,30]			

2 卡车队列临界加减速速度应符合下列要求:

1) 自动驾驶燃油卡车队列加速度应符合表 5.1.3-2 和表 5.1.3-3 的规定。

表 5.1.3-2 自动驾驶燃油卡车队列急加速行为不同安全等级瞬时加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通加速 (m/s ²)	急加速 (m/s ²)
(60,80]	(0,1.7]	(1.7,+∞)
(40,60]	(0,1.9]	(1.9,+∞)
(30,40]	(0,2]	(2,+∞)
(0,30]	(0,2.6]	(2.6,+∞)

表 5.1.3-3 自动驾驶燃油卡车队列急加速行为不同等级平均加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通加速 (m/s ²)	急加速 (m/s ²)
(60,80]	(0,1.6]	(1.6,+∞)
(40,60]	(0,1.7]	(1.7,+∞)
(30,40]	(0,1.9]	(1.9,+∞)
(0,30]	(0,2.1]	(2.1,+∞)

2) 自动驾驶电动卡车队列加速度应符合表 5.1.3-4 和表 5.1.3-5 的规定。

表 5.1.3-4 自动驾驶电动卡车队列急加速行为不同安全等级瞬时加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通加速 (m/s ²)	急加速 (m/s ²)
(60,80]	(0,1.8]	(1.8,+∞)

(40,60]	(0,2.4]	(2.4,+∞)
(30,40]	(0,2.7]	(2.7,+∞)
(0,30]	(0,3.2]	(3.2,+∞)

表 5.1.3-5 自动驾驶电动卡车队列急加速行为不同等级平均加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通加速 (m/s^2)	急加速 (m/s^2)
(60,80]	(0,1.7]	(1.7,+∞)
(40,60]	(0,2.0]	(2.0,+∞)
(30,40]	(0,2.1]	(2.1,+∞)
(0,30]	(0,2.7]	(2.7,+∞)

3) 自动驾驶燃油卡车队列加速度应符合表 5.1.3-6 和表 5.1.3-7 的规定。

表 5.1.3-6 自动驾驶燃油卡车队列急减速行为不同安全等级瞬时加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通减速 (m/s^2)	急减速 (m/s^2)
(60,80]	$[-1.4,0)$	$(-\infty,-1.4)$
(40,60]	$[-1.6,0)$	$(-\infty,-1.6)$
(30,40]	$[-1.7,0)$	$(-\infty,-1.7)$
(0,30]	$[-2.0,0)$	$(-\infty,-2.0)$

表 5.1.3-7 自动驾驶燃油卡车队列急减速行为不同等级平均加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通减速 (m/s^2)	急减速 (m/s^2)
(60,80]	$[-1.3,0)$	$(-\infty,-1.3)$
(40,60]	$[-1.4,0)$	$(-\infty,-1.4)$
(30,40]	$[-1.6,0)$	$(-\infty,-1.6)$
(0,30]	$[-1.8,0)$	$(-\infty,-1.8)$

4) 自动驾驶电动卡车队列加速度应符合表 5.1.3-8 和表 5.1.3-9 的规定。

表 5.1.3-8 自动驾驶电动卡车队列急减速行为不同安全等级瞬时加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通减速 (m/s^2)	急减速 (m/s^2)
(60,80]	$[-1.7,0)$	$(-\infty,-1.7)$
(40,60]	$[-1.9,0)$	$(-\infty,-1.9)$
(30,40]	$[-2.4,0)$	$(-\infty,-2.4)$
(0,30]	$[-2.6,0)$	$(-\infty,-2.6)$

表 5.1.3-9 自动驾驶电动卡车队列急减速行为不同等级平均加速度分类阈值

速度区间 (km/h)	普通减速 (m/s ²)	急减速 (m/s ²)
(60,80]	[-1.5,0)	(-∞,-1.5)
(40,60]	[-1.8,0)	(-∞,-1.8)
(30,40]	[-2.1,0)	(-∞,-2.1)
(0,30]	[-2.3,0)	(-∞,-2.3)

3 车辆反应延迟时间应符合下列要求：

- 1) L3 阶段延时应在 20~40ms 范围内。
- 2) L4 阶段延时应在 10~20ms 范围内。

4 车辆切入车队完成时间应符合下列要求：

- 1) 当有非队列内车辆切入卡车队列中间时，其后的跟随车应立刻加长与该非车队车辆的车距，加长距离不小于 30m，以使降低切入行为对车队稳定性的影响。
- 2) 车辆切入车队的完成时间应在 6s 以内。

5.2 稳定性指标要求

5.2.1 速度稳定性。速度稳定性应按下式计算，符合表 5.2.1-1 的规定：

$$v_d(t) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N (v_n(t) - \bar{v}(t))^2} \tag{5.2.1-1}$$

式中：N——卡车队列中的车辆数；

$v_d(t)$ —— t 时刻的车队速度扰动；

$v_n(t)$ —— t 时刻第 n 辆卡车的速度；

$\bar{v}(t)$ —— t 时刻卡车队列中所有车辆的平均速度。

表 5.2.1-1 不同卡车队列速度区间下卡车队列速度稳定性要求

卡车队列平均速度区间 (km/h)	卡车队列速度波动(km/h)
(40,60]	12.24-17.31
(60,80]	12.38-23.65
(80,100]	13.14-26.64
(100,120]	13.21-29.95

5.2.2 加速度稳定性。加速度稳定性应符合下列要求：

1 车辆加速度稳定性应按下式计算：

$$TVD_n(t) = \sqrt{\sum_{t=1}^T a_n^2(t)} \quad (5.2.2-1)$$

式中： $TVD_n(t)$ ——车辆 n 在 T 时段内受到交通扰动时的加速度稳定性指标；

a_n ——车辆 n 在 t 时刻的加速度。

2 车队加速度稳定性应按下式计算，符合表 5.2.2-1 的规定：

$$TCD(t) = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{\sum_{t=1}^T a_n^2(t)}}{N} = \frac{\sum_{n=1}^N TVD_n(t)}{N} \quad (5.2.2-2)$$

式中： $TCD(t)$ ——卡车队列在 T 时段内受到的交通扰动速度波动值；

N ——卡车队列包含的车辆数。

表 5.2.2-1 不同卡车队列速度区间下卡车队列加速度稳定性要求

卡车队列平均速度区间 (km/h)	卡车队列加速度稳定性(m/s ²)
(40,60]	0.41-0.45
(60,80]	0.43-0.47
(80,100]	0.44-0.49
(100,120]	0.47-0.54

5.2.3 平顺性。平顺性应按下式计算，符合表 5.2.3-1 的规定：

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{\sum_{n=1}^N a_n^2(t)}{N} \right)} \quad (5.2.3-1)$$

表 5.2.3-1 不同卡车队列平均速度区间下车队平顺性要求

卡车队列平均速度区间 (km/h)	卡车队列平顺性(m/s ²)
(40,60]	0.32-0.40
(60,80]	0.40-0.46
(80,100]	0.46-0.51
(100,120]	0.51-0.55

5.3 能耗指标要求

5.3.1 自动驾驶燃油卡车队列能耗指标计算：

1 自动驾驶燃油卡车能耗计算：

1) 自动驾驶燃油卡车能耗应按下式计算:

$$W_n^{fuel} = W_{a,n} + W_{f,n} + W_{w,n} \quad (5.3.1-1)$$

式中: W_n^{fuel} ——自动驾驶燃油卡车 n 能耗;

$W_{a,n}$ ——自动驾驶燃油卡车 n 加速度能耗;

$W_{f,n}$ ——自动驾驶燃油卡车 n 空气阻力能耗;

$W_{w,n}$ ——自动驾驶燃油卡车 n 滚动阻力能耗。

2) 加速度能耗应按下式计算:

$$W_{a,n} = m_n \cdot a_n \cdot v_n \quad (5.3.1-2)$$

式中: $W_{a,n}$ ——自动驾驶燃油卡车 n 加速度能耗;

m_n ——自动驾驶燃油卡车 n 的质量;

a_n ——自动驾驶燃油卡车 n 的加速度;

v_n ——自动驾驶燃油卡车 n 的速度。

3) 空气阻力能耗应按下式计算:

$$W_{f,n} = \frac{\rho \cdot C_D \cdot A \cdot (v_n)^2}{2} \quad (5.3.1-3)$$

式中: $W_{f,n}$ ——自动驾驶燃油卡车 n 空气阻力能耗;

ρ ——空气密度;

C_D ——阻力系数;

A ——车辆正面面积;

v_n ——自动驾驶燃油卡车 n 的速度。

4) 滚动力能耗应按下式计算:

$$W_{w,n} = C_r \cdot m_n \cdot g \quad (5.3.1-4)$$

式中: $W_{w,n}$ ——自动驾驶燃油卡车 n 滚动阻力能耗;

C_r ——阻力系数;

m_n ——自动驾驶燃油卡车 n 的质量；

g ——重力加速度。

2 自动驾驶燃油卡车队列的能耗评价指标应按下式计算：

$$W^{fuel} = \sum_{n=1}^N W_n^{fuel} \quad (5.3.1-5)$$

式中： W^{fuel} ——自动驾驶燃油卡车队列能耗；

W_n^{fuel} ——自动驾驶燃油卡车 n 的能耗。

5.3.2 自动驾驶电动卡车队列能耗指标计算：

1 自动驾驶电动卡车能耗计算：

1) 自动驾驶电动卡车能耗应按下式计算：

$$W_n^{ele} = W_{o,n} + W_{l,n} \quad (5.3.2-1)$$

式中： W_n^{ele} ——自动驾驶电动卡车 n 能耗；

$W_{o,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 电机输出能耗；

$W_{l,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 电机损耗能耗；

2) 电机输出能耗 $W_{o,n}$ 应按下式计算：

$$W_{o,n} = W_{a,n} + W_{f,n} + W_{w,n} \quad (5.3.2-2)$$

式中： $W_{o,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 输出能耗；

$W_{a,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 加速度能耗；

$W_{f,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 空气阻力能耗；

$W_{w,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 滚动阻力能耗。

3) 加速度能耗应按下式计算：

$$W_{a,n} = m_n \cdot a_n \cdot v_n \quad (5.3.2-3)$$

式中： $W_{a,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 加速度能耗；

m_n ——自动驾驶电动卡车 n 的质量；

a_n ——自动驾驶电动卡车 n 的加速度；

v_n ——自动驾驶电动卡车 n 的速度。

4) 空气阻力能耗应按下式计算：

$$W_{f,n} = \frac{\rho \cdot C_D \cdot A \cdot (v_n)^2}{2} \quad (5.3.2-4)$$

式中： $W_{f,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 空气阻力能耗；

ρ ——空气密度；

C_D ——阻力系数；

A ——车辆正面面积；

v_n ——自动驾驶电动卡车 n 的速度。

5) 滚动力能耗应按下式计算：

$$W_{w,n} = C_r \cdot m_n \cdot g \quad (5.3.2-5)$$

式中： $W_{w,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 滚动阻力能耗；

C_r ——阻力系数；

m_n ——自动驾驶电动卡车 n 的质量；

g ——重力加速度。

6) 电机损耗能耗应按下式计算：

$$W_{l,n} = I_n^2 \cdot r_n \quad (5.3.2-6)$$

式中： $W_{l,n}$ ——自动驾驶电动卡车 n 电机损耗能耗；

I_n ——自动驾驶电动卡车 n 等效电路的电流；

r_n ——自动驾驶电动卡车 n 等效电路的电阻。

2 自动驾驶电动卡车队列的能耗评价指标应按下式计算：

$$W^{ele} = \sum_{n=1}^N W_n^{ele} \quad (5.3.2-7)$$

式中： W^{ele} ——自动驾驶电动卡车队列能耗；

W_n^{ele} ——自动驾驶电动卡车 n 能耗。

中国公路学会团体标准征求意见稿

6 仿真测试方法

6.1 仿真测试环境

6.1.1 工具链应符合下列要求：

- 1 应支持实时仿真试验。
- 2 应支持高速公路多种测试场景。
- 3 应支持静态固定场景与动态车辆状态场景搭建。
- 4 应具备传感器模型、车辆动力学模型、车辆编队控制模型等关键模型的仿真建模能力。
- 5 应支持交通流仿真建模功能。

6.1.2 软硬件应符合下列要求：

- 1 仿真软件应满足 6.1.1 要求。
- 2 仿真测试硬件配置应包括但不限于含 CPU、内存、显卡，以及与在环测试配套的设施、设备等。

6.1.3 接口应符合下列要求：

1 仿真测试环境与场景库的接口数据包括但不限于：

- 1) 道路层信息。
- 2) 交通设施信息。
- 3) 交通标志标线信息。
- 4) 车辆运行状态信息。

2 仿真测试平台的接口应包括但不限于：

- 1) 自动驾驶算法接口。
- 2) 传感器数据接收接口。
- 3) 控制策略输入接口等。

6.2 仿真测试流程

6.2.1 仿真测试具体流程如图 6.2.1-1 所示，宜包含下列步骤：

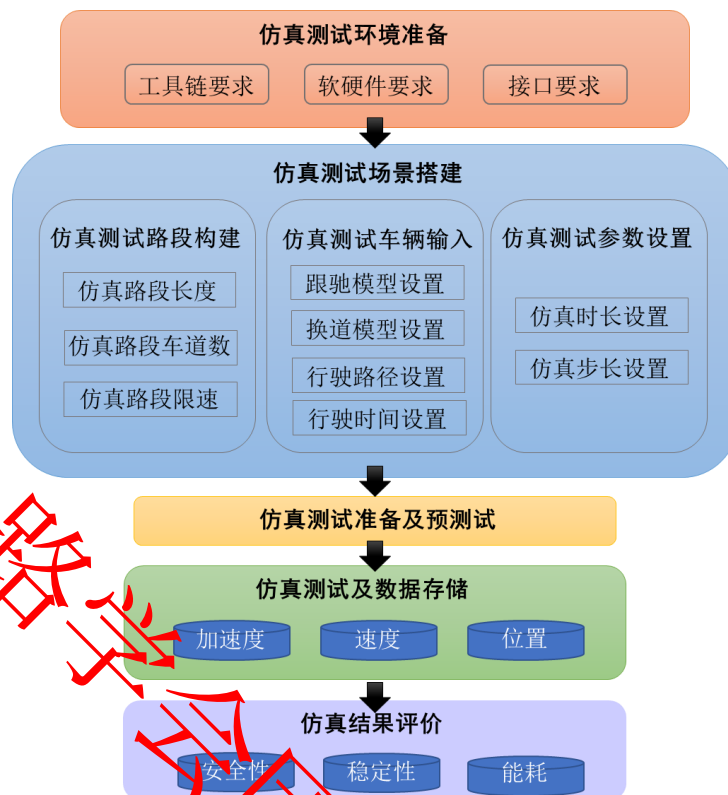


图 6.2.1-1 仿真测试流程图

- 1 仿真测试环境准备。根据 6.1 仿真测试环境要求，进行系统软硬件及控制器的选用，检测软硬件的配合是否完好。
- 2 仿真测试场景搭建。根据测试任务，使用仿真软件搭建仿真测试场景，包括仿真路网构建、仿真车辆生成以及仿真参数设置等。
- 3 仿真测试准备及预测试。完成仿真测试环境搭建与接口设置后，进行仿真环境预测试，确保测试过程的稳定性及测试结果的可靠性。
- 4 仿真测试及数据存储。针对仿真任务开展仿真测试，对仿真测试过程的中间数据及最终数据进行采集与存储。数据采集的开始时刻为仿真开始时刻，结束时刻为仿真测试结束时刻。
- 5 仿真结果评价。根据仿真测试实验采集的数据，基于运行测试指标规定进行指标计算，完成仿真测试任务评价表并编写仿真结果分析报告。

6.3 单一场景卡车队列仿真测试

6.3.1 单一卡车队列仿真测试的功能场景以及相应的测试方法与通过条件符合表 6.3.1-1 的规定。

表 6.3.1-1 仿真场景、测试方法和通过条件

功能场景	测试方法	通过条件
车道保持	初始状态时，使车队偏离车道行驶，实验车队是否能自动调整方向驶入车道内，试验次数各 200 次。	a) 车队能够自动调整方向在固定车道内行驶； b) 无碰撞。
车队分合流	设置汇入车辆在合流区域等待车队驶入时汇入，设置车队中某辆车在车队驶入分流区域时驶出车队，试验次数各 200 次。	a) 车队能够顺利完成分合流任务； b) 无碰撞。
前方静车	在正常行驶的车队前方设置一个速度为 0 的车辆，试验次数各 200 次。	a) 车队能够识别前方静车自动减速、制动； b) 无碰撞。
前车紧急制动	设置车辆在车队前方行驶时紧急制动，试验次数各 200 次。	a) 车队能够识别前方车辆在紧急制动并自动执行紧急制动； b) 无碰撞。
前方减速测试	设置车辆在车队前方行驶时减速行驶，试验次数各 200 次。	a) 车队能够自动减速行驶或换道； b) 无碰撞。
被动换道	自动驾驶卡车因其他因素被动驶离原车道进行车道改变，试验次数各 200 次。	a) 车辆通过换道避免安全事故发生，自动识别换道后的前车并顺利跟车； b) 无碰撞。
主动换道	自动驾驶卡车为寻求更大行驶速度或其他因素主动驶离原车道进行车道改变，试验次数各 200 次。	a) 车辆平稳完成换道，自动识别换道后的前车并顺利跟车，达到预期速度； b) 无碰撞。
连续高速行驶	试验车辆保持期望速度高速行驶，并沿车道中间行驶。试验次数各 200 次。	a) 实验卡车能保持期望速度连续平稳行驶； b) 行驶过程无碰撞产生。
车队编组形成	数辆不在同一车道的自动驾驶卡车通过换道进行编队。试验次数各 200 次。	a) 车队能自动完成编组重排； b) 无碰撞。
车队编组解散	同一车队的自动驾驶卡车进行解编。试验次数各 200 次。	a) 车队能平稳完成编组解散； b) 无碰撞。

附录 A：基于 SUMO 的仿真测试方法案例

A.1 主动换道自动驾驶卡车队列仿真测试案例

A.1.1 仿真流程包括：

1 仿真测试路段构建。本案例选取长直高速公路，路段车道数量设置为 4，长度设置为 3km，参考《公路工程技术标准》（JTG B01-2019），车道设计速度为 120km/h。

2 仿真测试车辆输入。在本案例中，选用智能驾驶员模型（Intelligent Driver Model, IDM）作为自动驾驶卡车的跟驰模型，SUMO 中跟驰模型参数设置如表 A.1.1-1 所示。对于换道模型，自动驾驶卡车队列均采用 SUMO 默认的 SL2015 换道模型。以载重卡车标准尺寸为例，设置卡车尺寸为 12m×2.5m×4.7m。

表 A.1.1-1 SUMO 自动驾驶卡车跟驰模型参数设置

参数	描述	取值
MinGap	车辆停止时的最小间距（m）	1
accel	车辆加速能力值（m/s ² ）	2
decel	车辆减速能力值（m/s ² ）	2
emergencyDecel	紧急情况最大减速能力值（m/s ² ）	9
tau	期望车头时距（s）	1
length	车身净长（m）	12
maxSpeed	最大车速（m/s）	13.89
Steeping	计算跟车速度时的内部步长（s）	1
vClass	车辆类别（卡车）	truck

3 仿真测试参数设置。本案例设置仿真起始时间为 0s，结束时间为 250s，仿真测试总时长为 250s。

4 仿真测试准备。基于 SUMO 配置文件将道路场景与初始交通状态关联起来，并基于 SUMO 中的“Traci”接口定义车辆的行为与采集仿真测试中的车辆速度、位置和加速度等信息，用于仿真测试后的指标验证。

5 仿真预测试。在仿真测试之前进行 10 次仿真预测试，基于仿真结果分析确保测试过程的稳定性及测试结果的可靠性。

6 仿真测试及信息存储。考虑主动换道的交通场景，本案例设置自动驾驶卡车队列领头卡车前方切入一辆卡车，该车辆以 8m/s 的速度行驶。自动驾驶卡车队列主动换道，无碰撞现象发生（图 A.1.1-1）。在仿真进行过程中，对仿真测试中的车辆速度、位置和加速度等

信息进行实时存储。



图 A.1.1-1 自动驾驶卡车队列开始换道仿真图

A.1.2 仿真结果评价包括：

1 对安全性指标进行计算：基于 5.1 安全性指标要求对仿真自动驾驶卡车队列碰撞时间进行计算，计算结果如图 A.1.2-1 所示，在仿真全过程中， $\frac{1}{TTC}$ 值小于 0.20s，如表 5.1.3-1 所示，属于低风险，卡车队列符合安全性要求。

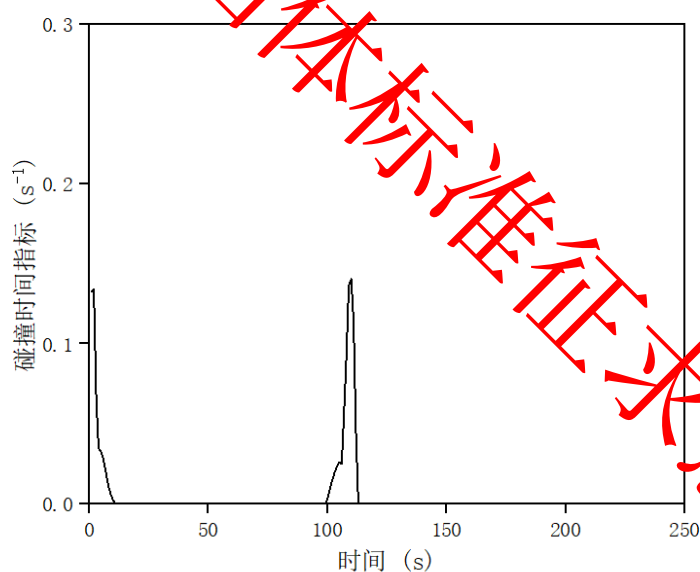


图 A.1.2-1 卡车队列车辆碰撞时间计算结果

2 对稳定性指标进行计算：

1) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对仿真自动驾驶卡车队列速度稳定性进行计算，计算结果如图 A.1.2-2 所示，速度波动 $v_d(t)$ 在整个仿真过程中都小于 2.5m/s，如表 5.2.1-1 所示，小于车队平均速度区间在 40-60km/h 时的车队速度波动最大值 4.81m/s，卡车队列符合稳定

性要求。

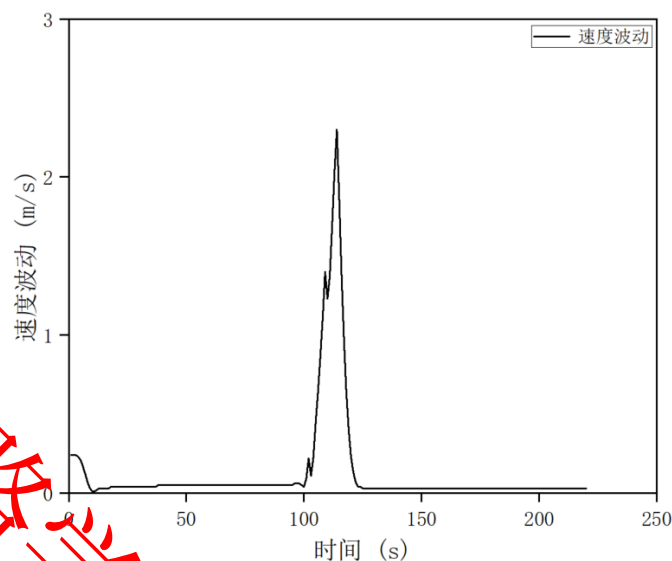


图 A.1.2-2 卡车队列速度稳定性计算结果

2) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对自动驾驶卡车队列速度波动性进行计算, 车队在 t 时段内加速度稳定性指标 $TCD(t)$ 为 0.575m/s^2 , 如表 5.2.2-1 所示, 小于车队平均速度区间在 40-60km/h 时的加速度稳定性指标最大值 0.45m/s^2 , 卡车队列符合稳定性要求。

3) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对自动驾驶卡车队列平顺性进行计算, 车队平顺性指标 A_{RMS} 平均值为 0.3749m/s^2 , 如表 5.2.3-1 所示在正常区间内, 可认为卡车队列符合平顺性要求。

3 对能耗指标进行计算: 基于 5.3 能耗指标要求对车队车辆能耗进行计算, 车队中三辆车的风阻能耗分别为 $789.7\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $754.9\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $733.2\text{kW}\cdot\text{h}$ 。当对车辆没有形成车队的仿真场景进行能耗计算, 三辆车的风阻能耗分别为 $915.4\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $914.7\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $915.1\text{kW}\cdot\text{h}$ 。由此可见, 由于形成了车队, 车辆可减少一定风阻, 因此减少了能耗。

A.2 被动换道制动自动驾驶卡车队列仿真测试案例

A.2.1 仿真流程包括:

1 仿真测试路段构建。本案例选取长直高速公路, 路段车道数量设置为 4, 长度设置为 3km, 参考《公路工程技术标准》(JTG B01-2019), 车道设计速度为 120km/h。

2 仿真测试车辆输入。在本案例中, 选用智能驾驶员模型 (Intelligent Driver Model, IDM) 作为自动驾驶卡车的跟驰模型, SUMO 中跟驰模型参数设置如表 A.1.1-1 所示。对于换道模

型，自动驾驶卡车队列均采用 SUMO 默认的 SL2015 换道模型。以载重卡车标准尺寸为例，设置卡车尺寸为 12m×2.5m×4.7m。

3 仿真测试参数设置。本案例设置仿真起始时间为 0s，结束时间为 250s，仿真测试总时长为 250s。

4 仿真测试准备。基于 SUMO 中的“Traci”接口对车辆进行实时控制并采集仿真测试中的车辆速度、位置和加速度等信息，用于仿真测试后的指标验证。

5 仿真预测试。在仿真测试之前进行 10 次仿真预测试，基于仿真结果分析确保测试过程的稳定性及测试结果的可靠性。

6 仿真测试及信息存储。考虑被动换道的交通场景，本案例在车道 1500m 处设置一静止车辆（图 A.2.1-1）。在仿真进行过程中，对仿真测试中的车辆速度、位置和加速度等信息进行实时存储。

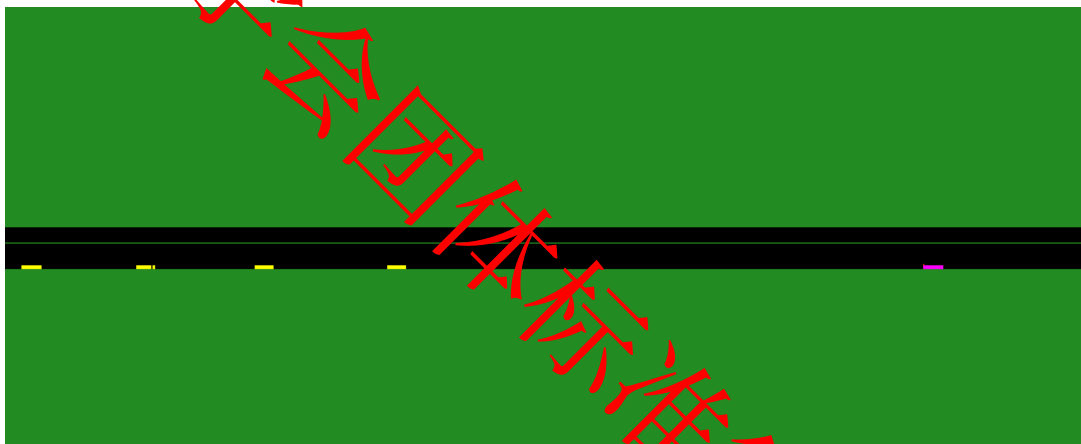


图 A.2.1-1 前方静车仿真场景

A.2.2 仿真结果评价包括：

1 对安全性指标进行计算：基于 5.1 安全性指标要求对仿真自动驾驶卡车队列碰撞时间进行计算，计算结果如图 A.2.2-1 所示，在仿真全过程中， $\frac{1}{TTC}$ 值小于 0.20s，如表 5.1.3-1 所示，属于低风险，卡车队列符合安全性要求。

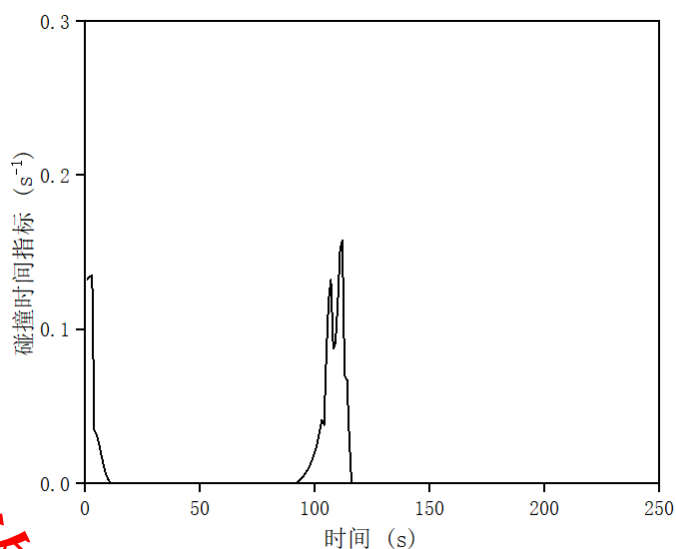


图 A.2.2-1 卡车队列车辆碰撞时间计算结果

2 对稳定性指标进行计算:

1) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对仿真自动驾驶卡车队列速度稳定性进行计算, 计算结果如图 A.2.2-2 所示, 速度波动 $v_d(t)$ 在整个仿真过程中都小于 3m/s, 如表 5.2.1-1 所示, 小于车队平均速度区间在 40-60km/h 时的车队速度波动最大值 4.81m/s, 卡车队列符合稳定性要求。

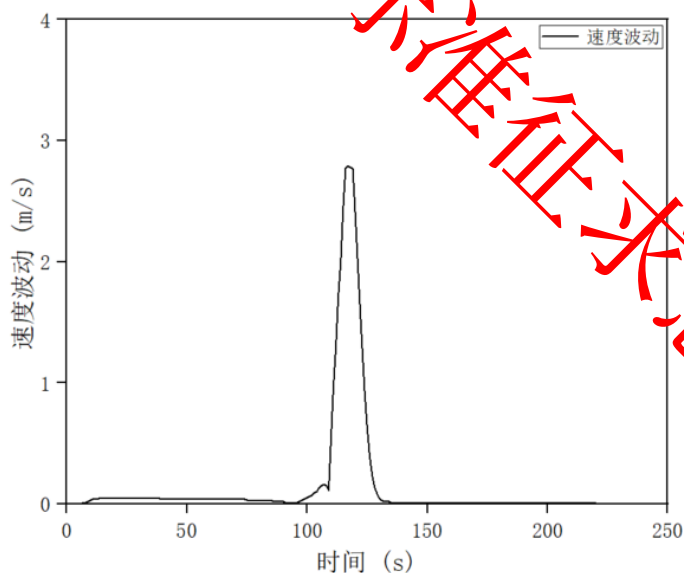


图 A.2.2-2 卡车队列速度稳定性计算结果

2) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对自动驾驶卡车队列速度波动性进行计算, 车队在 t 时段内加速度稳定性指标 $TCD(t)$ 为 0.4495m/s², 如表 5.2.2-1 所示, 小于车队平均速度区间在

40-60km/h 时的加速度稳定性指标最大值 0.45m/s^2 ，卡车队列符合稳定性要求。

3) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对自动驾驶卡车队列平顺性进行计算，车队平顺性指标 A_{RMS} 平均值为 0.356m/s^2 ，如表 5.2.3-1 所示，小于卡车队列平顺性最大值 0.4m/s^2 ，卡车队列符合稳定性要求。

3 对能耗指标进行计算：基于 5.3 能耗指标要求对车队车辆能耗进行计算，车队中四辆车的空气阻力能耗分别为 $800.7\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $767.2\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $746.9\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $730.8\text{kW}\cdot\text{h}$ 。当对车辆没有形成车队的仿真场景进行能耗计算，四辆车的风阻能耗分别为 $914.6\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $914.8\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $916.2\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $919.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 。由此可见，由于形成了车队，车辆可减少一定风阻，因此减少了能耗。

A.3 前车紧急制动自动驾驶卡车队列仿真测试案例

A.3.1 仿真流程包括：

1 仿真测试路段构建。本案例选取长直高速公路，路段车道数量设置为 4，长度设置为 3km，参考《公路工程技术标准》(JTG B01-2019)，车道设计速度为 120km/h。

2 仿真测试车辆输入。在本案例中，选用智能驾驶员模型 (Intelligent Driver Model, IDM) 作为自动驾驶卡车的跟驰模型，SUMO 中跟驰模型参数设置如表 A.1.1-1 所示。对于换道模型，自动驾驶卡车队列均采用 SUMO 默认的 SL2015 换道模型。以载重卡车标准尺寸为例，设置卡车尺寸为 $12\text{m}\times 2.5\text{m}\times 4.7\text{m}$ 。

3 仿真测试参数设置。本案例设置仿真起始时间为 0s，结束时间为 250s，仿真测试总时长为 250s。

4 仿真测试准备。基于 SUMO 中的“Traci”接口对车辆进行实时控制并采集仿真测试中的车辆速度、位置和加速度等信息，用于仿真测试后的指标验证。

5 仿真预测试。在仿真测试之前进行 10 次仿真预测试，基于仿真结果分析确保测试过程的稳定性及测试结果的可靠性。

6 仿真测试及信息存储。考虑前方紧急制动的交通场景，本案例设置自动驾驶卡车队列前方车辆在仿真时间为 100s 时，以紧急情况最大减速能力值 9m/s^2 进行减速，减速时间持续时长为 1s (图 A.3.1-1)。自动驾驶卡车队列前方车辆减速时，自动驾驶卡车队列将换道行驶，无碰撞现象发生 (图 A.3.1-2)。在仿真进行过程中，对仿真测试中的车辆速度、位置和加速度等信息进行实时存储。

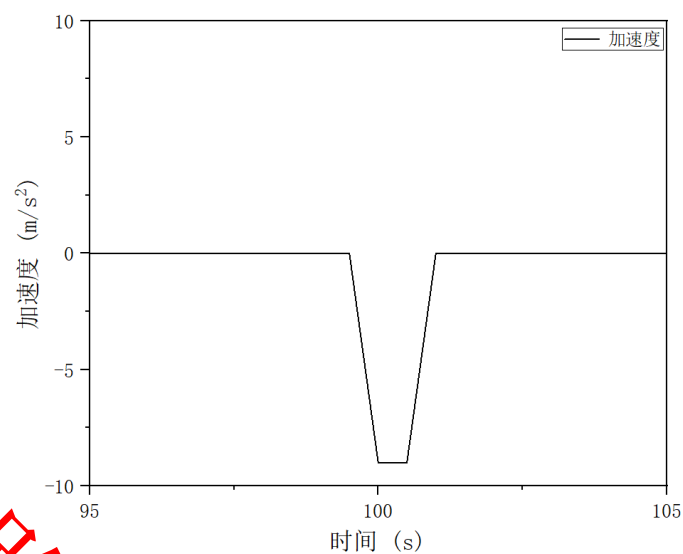


图 A.3.1-1 卡车队列前方车辆加速度曲线



图 A.3.1-2 自动驾驶卡车队列换道仿真图

A.3.2 仿真结果评价包括：

1 对安全性指标进行计算：基于 5.1 安全性指标要求对仿真自动驾驶卡车队列碰撞时间进行计算，计算结果如图 A.3.2-1 所示， $TTC(t)$ 表示某时刻卡车队列中任意两辆相邻的车之间碰撞时间的最小值。在仿真全过程中， $\frac{1}{TTC}$ 值小于 0.20s，如表 5.1.3-1 所示，属于低风险，卡车队列符合安全性要求。

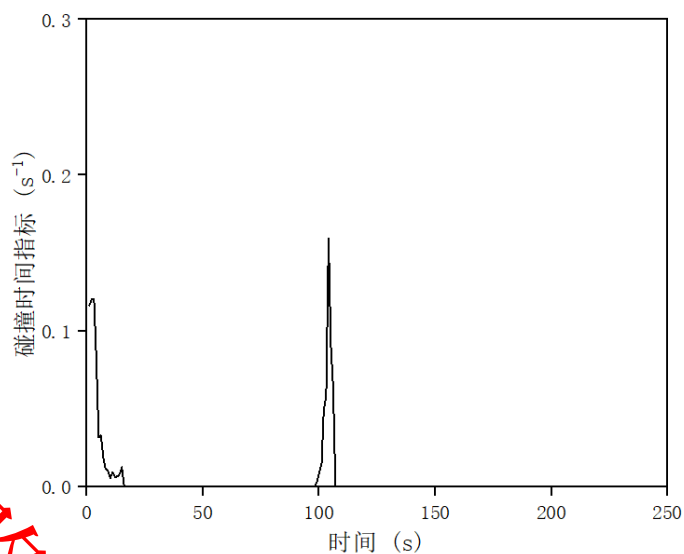


图 A.3.2-1 卡车队列车碰撞时间计算结果

2 对稳定性指标进行计算:

1) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对仿真自动驾驶卡车队列速度稳定性进行计算, 计算结果如图 A.3.2-2 所示, 速度波动 $v_d(t)$ 在整个仿真过程中都小于 3.5m/s, 如表 5.2.1-1 所示, 小于车队平均速度区间在 40-60km/h 时的车队速度波动最大值 4.81m/s, 卡车队列符合稳定性要求。

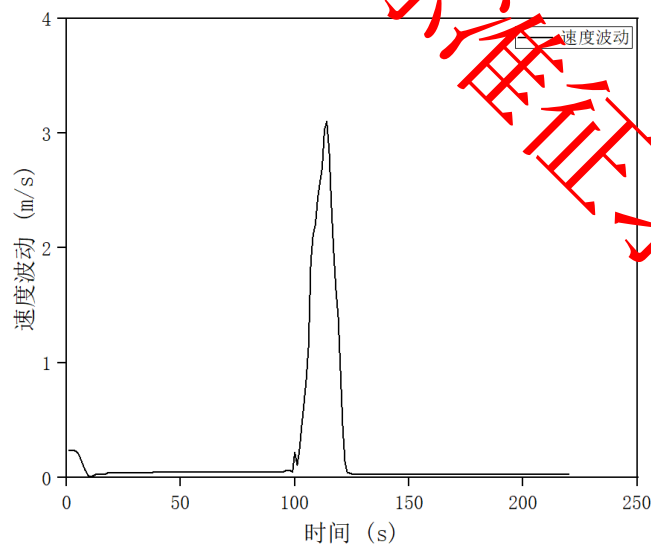


图 A.3.2-2 卡车队列速度稳定性计算结果

2) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对自动驾驶卡车队列速度波动性进行计算, 车队在 t 时段内加速度稳定性指标 $TCD(t)$ 为 0.412m/s^2 , 如表 5.2.2-1 所示, 小于车队平均速度区间在

40-60km/h 时的加速度稳定性指标最大值 0.45m/s^2 ，卡车队列符合稳定性要求。

3) 基于 5.2 车队稳定性指标要求对自动驾驶卡车队列平顺性进行计算，车队平顺性指标 A_{RMS} 平均值为 0.3814m/s^2 ，如表 5.2.3-1 所示在正常区间内，可认为卡车队列符合平顺性要求。

3 对能耗指标进行计算：基于 5.3 能耗指标要求对车队车辆能耗进行计算，车队中三辆车的风阻能耗分别为 $819.4\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $794.8\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $778.1\text{kW}\cdot\text{h}$ 。当对车辆没有形成车队的仿真场景进行能耗计算，三辆车的风阻能耗分别为 $918.4\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $918.1\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $914.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 。由此可见，由于形成了车队，车辆可减少一定风阻，因此减少了能耗。

用词说明

1 本标准执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合×××××的有关规定”。(×××××为标准编号)

2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应按本标准第×.×.×条的有关规定执行”