

团体标准

T/ITS 0289-2024

混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价指标体系

Evaluation index system for simulations of autonomous driving platoons in a mixed
Traffic flow environment

2024-12-26 发布

2025-01-01 实施

中国智能交通产业联盟 发布

目 次

目 次..... I

前 言..... II

引 言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 自动驾驶编队仿真测试..... 2

5 测试评价指标体系..... 2

6 评价方法..... 5

附 录 A （资料性附录） 混合交通流场景..... 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国智能交通产业联盟（C-ITS）提出并归口。

本文件起草单位：上海市城市建设设计研究总院（集团）有限公司、北京交通大学、中路高科交通科技集团有限公司、交通运输部公路科学研究院、东软睿驰汽车技术（沈阳）有限公司、辽宁工业大学、同济大学、北京百度智行科技有限公司。

本文件主要起草人员：谢东繁、陈希、杨毅、张纪升、王荣健、李宏海、黄林煊、张凡、李骁一、李永明、刘威、张春民、党利冈、李克文、彭伟、任贵超、董国伟、刘艺。

引 言

随着自动驾驶技术的迅速发展，自动驾驶车辆已逐渐从实验室走向现实世界。然而，在现有的交通环境中，实现自动驾驶车辆的安全、高效运行仍面临诸多挑战。特别是在混合交通流环境中，自动驾驶车辆与传统人驾驶车辆混合行驶，这对其感知、决策、控制能力提出了更高要求。

自动驾驶编队作为自动驾驶技术的一个重要应用场景，通过车辆间的协同和信息共享，可以有效提升交通效率、降低能耗、改善行车安全。在混合交通流环境中，自动驾驶编队的性能和可靠性评估显得尤为重要。科学、系统的仿真测试评价技术，能够为自动驾驶编队的研发和应用提供重要的技术支持和保障。

本文件适用于在高速公路及快速路下的混合交通流环境中的自动驾驶编队仿真测试评价，为相关研发机构、测试机构和行业从业者提供科学、统一的指导和依据。通过本文件的实施，有助于推动自动驾驶编队技术的成熟与应用，促进智能交通系统的发展和普及，为构建安全、高效、绿色的交通出行环境提供有力支持。

混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价指标体系

1 范围

本文件规定了混合交通流仿真环境下的自动驾驶编队评价指标体系的术语和定义，评价维度，指标释义和计算方式，评价权重及评分标准要求。

本文件适用于在混合交通流仿真环境中对自动驾驶车辆编队的性能进行评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 40429-2021 汽车驾驶自动化分级

JTG/T 2430-2023 公路工程施工支持自动驾驶技术指南

T/CMAX 121-2019 自动驾驶车辆模拟仿真测试平台技术要求

T/CHTS 10067-2024 高速公路封闭场景下自动驾驶卡车队列仿真测试技术指南

T/CHTS 10068-2024 高速公路封闭场景下自动驾驶卡车队列仿真测试评价指标与方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

混合交通流环境 mixed traffic flow environment

是指在同一交通系统或道路网络中，不同速度、尺寸和操作特性的交通参与者（包括自动驾驶车辆、非自动驾驶车辆、公共交通工具等）同时存在并相互影响的环境。

3.2

自动驾驶编队 autonomous driving platoon

两辆及以上的自动驾驶车辆，借助于自身感知和协调感知以及决策控制等技术等，以显著小于通常行驶的车间距进行协作跟驰行驶的情景。

3.3

自动驾驶编队仿真测试 simulation test of autonomous driving platoon

在计算机模拟环境中，对自动驾驶编队的运行进行模拟和测试。

3.4

自动驾驶编队仿真测试评价 evaluation of autonomous driving platoon simulation tests

根据仿真测试实验采集的数据，计算评价指标并采用评价方法给出评价等级的过程。

3.5

车队修正碰撞时间 autonomous driving platoons corrected collision time

在自动驾驶编队中，当系统检测到潜在的碰撞风险时，从识别风险到采取必要的修正措施所需的时间。

3.6

车队避免碰撞减速率 autonomous driving platoons collision avoidance deceleration rate

在自动驾驶编队中，为了避免车队之间的碰撞而实施的车队减速措施的速率变化。

3.7

风险碰撞时间倒数观测值 risk collision time reciprocal observation value

在当前速度和相对位置下，车辆与障碍物发生碰撞的时间倒数。

3.8

纵向误差传递稳定性 longitudinal error propagation stability

自动驾驶编队在受到扰动后，能够迅速减小与目标速度之间的偏差并回归到稳定状态的能力。

4 自动驾驶编队仿真测试

按照资料性附录 A 中的混合交通流场景，开展自动驾驶编队在混合交通流环境下的仿真测试。

5 测试评价指标体系

5.1 评价维度及对应指标

混合交通流环境下的自动驾驶编队测试仿真评价指标体系共划分为二级，分为 3 个评价维度、7 个一级指标。各评价维度及各指标之间的关系及各指标的计算方式对应章节见表 1。

表 1 自动驾驶编队运行综合评价指标

评价维度	一级指标	对应章节
安全性	编队修正的碰撞时间	5.2.1
	编队避免碰撞减速率	5.2.2
	风险碰撞时间倒数观测值	5.2.3
稳定性	纵向误差传递稳定性	5.2.4
	平均车头间距改变量	5.2.5
	最大水平偏移量	5.2.6
协调性	自动驾驶编队与前车速度差的绝对值	5.2.7

5.2 一级指标释义及计算方式

5.2.1 编队修正的碰撞时间

5.2.1.1 释义

跟随车辆与前车之间可能发生碰撞的最短修正时间，用以衡量车辆间安全距离的调整能力，数值越大表示越安全。

5.2.1.2 计算公式

编队修正的碰撞时间 $minimumMTTC$ （正向性指标）应按式（1）、式（2）和式（3）计算，并将符合式（1）规定的状态视为非安全状态：

$$minimumMTTC = \min (MTTC^1, MTTC^2, \dots, MTTC^i, \dots, MTTC^N) < 1.5s \quad (1)$$

$$MTTC^i = \min (MTTC_1, MTTC_2, \dots, MTTC_t, \dots, MTTC_T) \quad (2)$$

$$MTTC_t = \frac{\Delta V_i(t) \pm \sqrt{\Delta V_i(t)^2 + 2\Delta a_i(t)\Delta x_i(t)}}{\Delta a_i(t)} \quad (3)$$

式中： $MTTC^i$ ——跟随车 i 在整个仿真测试过程中的最小修正的碰撞时间，s；

$MTTC_t$ ——每辆车在时间步 t 修正的碰撞时间，s；

$\Delta V_i(t)$ ——跟随车 i 与前车 $i-1$ 在时间步 t 的相对速度，m/s；

$\Delta a_i(t)$ ——跟随车 i 与前车 $i-1$ 在时间步 t 的相对加速度，m/s²；

$\Delta x_i(t)$ ——跟随车 i 与前车 $i-1$ 在时间步 t 的相对距离，m；

T ——仿真测试的总时间步；

N ——车队的车辆数。

5.2.2 编队避免碰撞减速率

5.2.2.1 释义

指自动驾驶车辆为了避免碰撞所需的最大减速度，反映车辆在紧急情况下的制动能力，数值越小表示越安全。

5.2.2.2 计算公式

编队避免碰撞减速率 $minimumMRTTC$ （负向性指标）应按式（4）、式（5）和式（6）计算，并将符合式（4）规定的状态视为非安全状态：

$$maximumDRAC = \max (DRAC^1, DRAC^2, \dots, DRAC^i, \dots, DRAC^N) > 3.4m/s^2 \quad (1)$$

$$DRAC^i = \max (DRAC_1, DRAC_2, \dots, DRAC_t, \dots, DRAC_T) \quad (2)$$

$$DRAC_t = \frac{(\Delta V_i(t))^2}{\Delta x_i(t)} \quad (3)$$

式中： $DRAC^i$ ——跟随车 i 在整个仿真过程中的最大的避免碰撞减速率，m/s²；

$DRAC_t$ ——每辆车在时间步 t 的避免碰撞减速率，m/s²。

5.2.3 风险碰撞时间倒数观测值

5.2.3.1 释义

通过车辆间的碰撞时间倒数来衡量潜在碰撞风险，数值越大表示风险越高。

5.2.3.2 计算公式

风险碰撞时间倒数观测值 $RTTC_{obs}$ （负向性指标）应按式（7）和式（8）计算：

$$RTTC_{i,t} = \frac{\Delta V_i(t)}{\Delta x_i(t) - l_i}; \forall (v_i(t) - v_{i-1}(t)) \geq 0 \quad (1)$$

$$RTTC_{obs} = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} RTTC_{i,t}; \forall RTTC_{i,t} > 0.25s^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

式中： $RTTC_{i,t}$ ——跟随车*i*与前车*i-1*在时间步*t*的碰撞时间倒数， s^{-1} ；

$v_i(t)$ ——跟随车*i*在时间步*t*的速度， m/s ；

$v_{i-1}(t)$ ——前车*i-1*在时间步*t*的速度， m/s ；

l_i ——跟随车*i*的长度， m 。

5.2.4 纵向误差传递稳定性

5.2.4.1 释义

描述跟随车辆对领头车速度变化的响应稳定性，衡量车辆纵向控制系统在编队运行中的扰动传递能力。

5.2.4.2 计算公式

纵向误差传递稳定性 $G_i(t) = \frac{\Delta x_{i+1}(t) - v_{i+1}(t) \cdot TH_{safe}}{\Delta x_i(t) - v_i(t) \cdot TH_{safe}}$ （负向性指标）应按式（9）计算，并符合式（10）

的阈值规定：

$$G_i(t) = \frac{\Delta x_{i+1}(t) - v_{i+1}(t) \cdot TH_{safe}}{\Delta x_i(t) - v_i(t) \cdot TH_{safe}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\|G_i(t)\|_{\infty}^I = \sup_{t \in I} \|G_i(t)\|_{\infty} \leq 1 \dots\dots\dots (2)$$

式中： $\Delta x_{i+1}(t)$ ——后车*i+1*与跟随车*i*在时间步*t*的相对距离， m ；

$v_{i+1}(t)$ ——后车*i+1*在时间步*t*的速度， m/s ；

TH_{safe} ——安全时距， s ；

I ——以扰动发生或领头车速度改变的時刻为起点的一个时间区间，设置为时间步长的整数倍*k*；

$\|\cdot\|_{\infty}$ ——无穷范数。

5.2.5 平均车头间距改变量

5.2.5.1 释义

指车辆间初始车头间距和运行中车头间距的平均变化量，用以评估编队的队列保持能力，数值越小表示队列稳定性越高。

5.2.5.2 计算公式

平均车头间距改变量 $\Delta \bar{s}$ （负向性指标）应按式（11）计算，并符合该式的阈值规定：

$$\Delta \bar{s} = \frac{\sum_{i=2}^N \sum_{t=1}^k |\Delta x_i(t) - \Delta x_i(0)|}{(N-1) \cdot I} \leq 2m \dots\dots\dots (1)$$

式中： $\Delta x_i(0)$ ——跟随车*i*与前车*i-1*的在扰动发生时的初始车间距， m 。

5.2.6 最大水平偏移量

5.2.6.1 释义

衡量跟随车辆在与领头车行驶时，横向偏离轨迹的最大值，用于评估车辆在车道保持方面的稳定性。

5.2.6.2 计算公式

最大水平偏移量 h_{max} （负向性指标）应按式（12）和式（13）计算，并符合公式（13）的阈值规定：

$$\Delta \bar{h}_i = \frac{\sum_{t=0}^k |h_i(t)|}{I} \dots\dots\dots (1)$$

$$h_{\max} = \|\Delta \bar{h}_i\|_{\infty} \leq 0.2\text{m} \dots\dots\dots (2)$$

式中： $h_i(t)$ ——跟随车*i*相对于头车中轴线的水平位移量，m。

5.2.7 自动驾驶编队与前车速度差的绝对值

5.2.7.1 释义

指编队内跟随车辆与其前车之间速度差的绝对值，反映车辆在编队中速度协调性，数值越小表示协调性越好。

5.2.7.2 计算公式

协调性评价指标基于预测相对速度 v_{opp} 表示，（负向性指标），应按式（6.2.6-1）计算。根据JT/T124-2019与GB/T 33195-2016中相关标准，要求3s内自动驾驶编队预测相对速度 $v_{opp} < 1.5\text{m/s}$ 。

$$v_{opp} = |v_{pla} - v_{for}| \dots\dots\dots (1)$$

式中： v_{pla} ——自动驾驶编队的行驶速度，可以使用头车速度，m/s；

v_{for} ——自动驾驶编队的预测速度，m/s。

6 评价方法

6.1 综合评价方法

6.1.1 混合交通流环境下自动驾驶编队仿真的综合评价方法应能满足下列基本要求：

- 能够进行多目标评价。
- 对数据分布没有严格要求，且最好能充分利用原始数据信息。
- 对样本数量、指标数量没有约束。
- 指标评估计算简单，评价方法容易实现。

6.1.2 在混合交通流情况下，对混合交通流仿真环境下的自动驾驶编队的指标综合评价的具体步骤如下：

- 输入*n*个评价对象，*m*个评价指标。
- 原始矩阵正向化：

1) 规定评价对象为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，评价对象的指标矩阵为 $X = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

2) 当指标*j*是正向性指标时，正向化应按式（15）计算：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \dots\dots\dots (1)$$

3) 当指标*j*是负向性指标时，正向化应按式（16）计算：

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \dots\dots\dots (2)$$

c) 正向化矩阵标准化：

1) 假定共有*n*条车队运行数据作为评价对象，正向化后的*m*个评价指标构成的正向化矩阵为：

$$X' = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1m} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \cdots & x'_{nm} \end{bmatrix}$$

2) 对其标准化的矩阵记作 Z , Z 中元素应按式(17)计算:

$$z_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x'_{ij}{}^2}} \quad (3)$$

d) 确定最优解和最劣解, 即正、负理想解:

1) 由上述步骤将所有指标转换成正向性指标, 得到标准化矩阵 Z ,

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}$$

2) 最优解是在所有运行数据的评价指标中最大的解, 即最优行为的集合, 定义为 Z^+ , 应按式(18)计算:

$$Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \cdots, Z_m^+) = (\max\{z_{11}, z_{21}, \cdots, z_{n1}\}, \cdots, \max\{z_{1m}, z_{2m}, \cdots, z_{nm}\}) \quad (4)$$

3) 最劣解即所有运行数据评价指标中最小的解, 为最劣行为的集合, 定义为 Z^- , 应按式(19)计算:

$$Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \cdots, Z_m^-) = (\min\{z_{11}, z_{21}, \cdots, z_{n1}\}, \cdots, \min\{z_{1m}, z_{2m}, \cdots, z_{nm}\}) \quad (5)$$

e) 计算车队运行数据到最优和最劣解的距离。评价指标权重为 $W = \{w_1, w_2, \cdots, w_m\}$ 。定义第 i 条车队运行数据所有指标与两类解的距离分别为 D_i^+ 和 D_i^- , 两项应分别按式(20)和(21)计算:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^- - z_{ij})^2} \quad (7)$$

f) 计算车队运行综合评价。第 i 个自动驾驶编队运行数据的综合得分记作 S_i , 应按公式(22)计算:

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

6.2 评价结果判定

6.2.1 综合评价结果判定

依据综合评价值将混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真运行情况分为一级、二级、三级、四级4个等级, 一级为最高, 如表3所示, 等级越高(评价值越大)表示自动驾驶编队运行状态越好。

表2 自动驾驶编队运行情况等级划分

评价分数	$[0, 0.60)$	$[0.60, 0.80)$	$[0.80, 0.90)$	$[0.90, 1.00]$
等级	四级	三级	二级	一级

6.2.2 评价结果应用:

评价结果等价所代表的含义具体如下:

a) 如果评价等级为“四级”, 则认为仿真结果未达到实车测试要求, 应重新设计自动驾驶编队运行控制策略。

- b) 如果评价等级为“三级”，则仿真结果未达到实车测试要求，应充分改进自动驾驶编队运行控制策略后再次进行仿真测试。
- c) 如果评价等级为“二级”，则仿真结果未达到实车测试要求，应适当改进自动驾驶编队运行控制策略再次进行仿真测试。
- d) 如果评价等级为“一级”，仿真测试结果表明混合交通流环境下自动驾驶编队运行的综合状态良好，可以开展自动驾驶编队封闭场地实车测试。

中国智能交通产业联盟

附录 A

（资料性附录）

混合交通流场景

A.1 混合交通流初始场景设置

以使用交通系统微观仿真软件SUMO为例,对由非自动驾驶车辆和自动驾驶车辆组成的混合交通流场景,进行仿真设置如下:

- 设置道路文件:道路为直行单向三车道高速公路,长度为20km,分为3段,其中路段1(2.5km)为开始路段,路段2(15km)为仿真测试路段,路段3(2.5km)为结束路段。道路各车道最大速度设置为100km/h(33.3m/s)。
- 定义混合交通流车辆类型及参数:非自动驾驶车辆使用车辆跟驰模型进行纵向控制,自动驾驶车辆采用CACC协同跟驰模型实现纵向控制。
- 控制编队:编队控制可通过Traci接口实现,使用封装在Plexe的函数中的伪时隙方法进行队列通信。
- 生成车流:按照给定的非自动驾驶车辆和自动驾驶车辆的比例和车辆参数以及交通流量生成车流。
- 预仿真交通流:仿真运行720s后形成混合交通流环境后,可令控制的自动驾驶编队进入仿真测试路段。
- 仿真测试:连续测试7200s,进入仿真测试路段后测试各个试验场景,持续记录评价指标所需要的基本参数。

A.2 混合交通流环境下自动驾驶编队仿真测试场景设计要求

A.2.1 流量变化场景设置

加载A.1中初始交通流环境文件。根据提供的流量变化需求,确定生成流量变化范围,生成高流量-中流量(或中流量-低流量或低流量-中流量或中流量-高流量)场景下随机车流进入道路。设置自动驾驶车辆(两辆及以上),以自动驾驶编队形式进入测试道路开始试验。

A.2.2 动态障碍物

A.2.2.1 非自动驾驶车辆插入场景设置。

加载A.1中初始交通流环境文件。设置自动驾驶车辆(两辆及以上),以自动驾驶编队形式稳态行驶。当编队运行在测试路段开始试验时,设置距编队最近的非自动驾驶车辆强制插入编队。之后该背景车辆可保持以下3种状态:1)即刻离开自动驾驶编队所在车道;2)在该车道行驶一段时间后(120s以上)后离开自动驾驶编队所在车道;3)一直保持行驶在自动驾驶编队所在车道。

A.2.2.2 突发障碍物场景设置

加载A.1中初始交通流环境文件。设置自动驾驶车辆(两辆及以上),以自动驾驶编队形式稳态行驶。当编队运行在测试路段开始试验时,在自动驾驶编队所在车道前方(如800m处)增加障碍物。

A.2.2.3 前方车辆紧急制动场景设置

加载A.1中初始交通流环境文件。设置自动驾驶车辆(两辆及以上),以自动驾驶编队形式稳态行驶。当编队运行在测试路段开始试验时,在自动驾驶编队头车的前车突然进行紧急制动。

A.3 自动驾驶编队的预期速度、制动减速度受道路等级和车辆性能等因素影响,建议高速公路上的预期速度设置为80km/h-120km/h范围内,小型车辆的制动减速度在 5m/s^2 到 8m/s^2 之间,重型车辆的制动

减速度在 4m/s^2 到 6m/s^2 之间。一个场景建议进行 20 次以上仿真测试。

中国智能交通产业联盟

T/ITS 0289-2024

中国智能交通产业联盟

标准

**混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价
指标体系**

T/ITS 0289-2024

北京市海淀区西土城路 8 号（100088）

中国智能交通产业联盟印刷

网址：<http://www.c-its.org.cn>

2025 年 1 月第一版 2025 年 1 月第一次印刷