

团体标准

T/ITS 0289-XXXX

混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价技术规范

Technical specification for simulation test and evaluation of autonomous driving formation in mixed traffic flow environment

(征求意见稿)

本草案完成时间：2024年07月17日

“在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。”

2024-**-**发布

2024-**-**实施

中国智能交通产业联盟 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
4 测试评价流程	3
5 仿真环境设计要求	5
6 测试评价指标体系	11
7 测试评价方法	17
8 测试评价报告	21

中国智能交通产业联盟

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。

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提出并归口。

本文件主要起草单位：

本文件主要起草人员：

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，自动驾驶车辆必须与各类传统车辆、非机动车以及行人共享道路资源，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。

本标准《混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价技术规范》旨在规范自动驾驶编队在混合交通流环境中的仿真测试和评价过程。主要内容包括测试评价流程、仿真环境设计要求、测试评价指标体系、测试评价方法以及测试评价报告等。通过对各种公路等级条件下的混合交通流环境进行详细的仿真测试和评价，可以全面评估自动驾驶编队在不同交通情境下的性能表现和适应能力。

本标准适用于在各种公路等级条件下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。通过本标准的实施，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

混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价技术规范

1 范围

本文规定了混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价技术规范的测试评价流程、仿真环境设计要求、测试评价指标体系、测试评价方法以及测试评价报告。

本文件适用于各种公路等级条件混合交通流环境下的自动驾驶编队仿真测试评价。

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

GB 5768.2-2022 道路交通标志和标线 第2部分：道路交通标志

JTG/T 2430-2023 公路工程施工支持自动驾驶技术指南

T/CMAA 121-2019 自动驾驶车辆模拟仿真测试平台技术要求

T/ITS 0182.2-2021 自动驾驶公交车 第2部分：自动驾驶功能测试方法与要求

(XXX) 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

(XXX) 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、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

混合交通流环境 mixed traffic flow environment

是指道路环境中存在机动车、非机动车、行人等具有不同的速度、尺寸和操作特性的要素。

3.1.2

自动驾驶编队 autonomous driving platoon

两辆及以上的自动驾驶车辆，借助自动驾驶技术或车辆间的短程通信技术，以显著小于通常行驶的车间距进行协作跟驰行驶的情景。

3.1.3

仿真测试 simulation test

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。

3.1.4

仿真测试评价 evaluation of 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。

3.1.5

自动驾驶编队形成 autonomous driving platoon formation

两辆及以上自动驾驶车辆在同一车道或者不同车道以非车队状态行驶，其中一辆自动驾驶车辆发起编队申请，进而形成自动驾驶编队的情景。

3.1.6

自动驾驶编队重组 autonomous driving platoon reorganization

一个由四辆及以上自动驾驶车辆组成的自动驾驶编队以稳态行驶，其中一辆自动驾驶车辆提出车队重组申请，将自动驾驶编队拆分重组为两个或两个以上自动驾驶编队的情景。

3.1.7

自动驾驶编队解散 autonomous driving platoon dissolving

自动驾驶编队中头车发起车队解散指令，解除自动驾驶编队行驶状态的情景。

3.1.8

加入自动驾驶编队 join the autonomous driving platoon

自由行驶自动驾驶车辆申请加入自动驾驶编队，同意申请后将其编入队尾，以车队状态行驶的情景。

3.1.9

离开自动驾驶编队 leave the autonomous driving platoon

一辆自动驾驶车辆申请离开自动驾驶编队，同意申请后解除该车的编队行驶状态，变更为自由车辆；车队中其他车辆仍以编队状态行驶的情景。

3.2 缩略语

TOPSIS: 逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)

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

CACC: 协同式自适应巡航 (Cooperative Adaptive Cruise Control)

SUMO: 交通出行仿真软件 (Simulation of Urban Mobility, SUMO)

4 测试评价流程

混合交通流环境下自动驾驶编队仿真测试评价流程如图1所示，包含下列步骤：

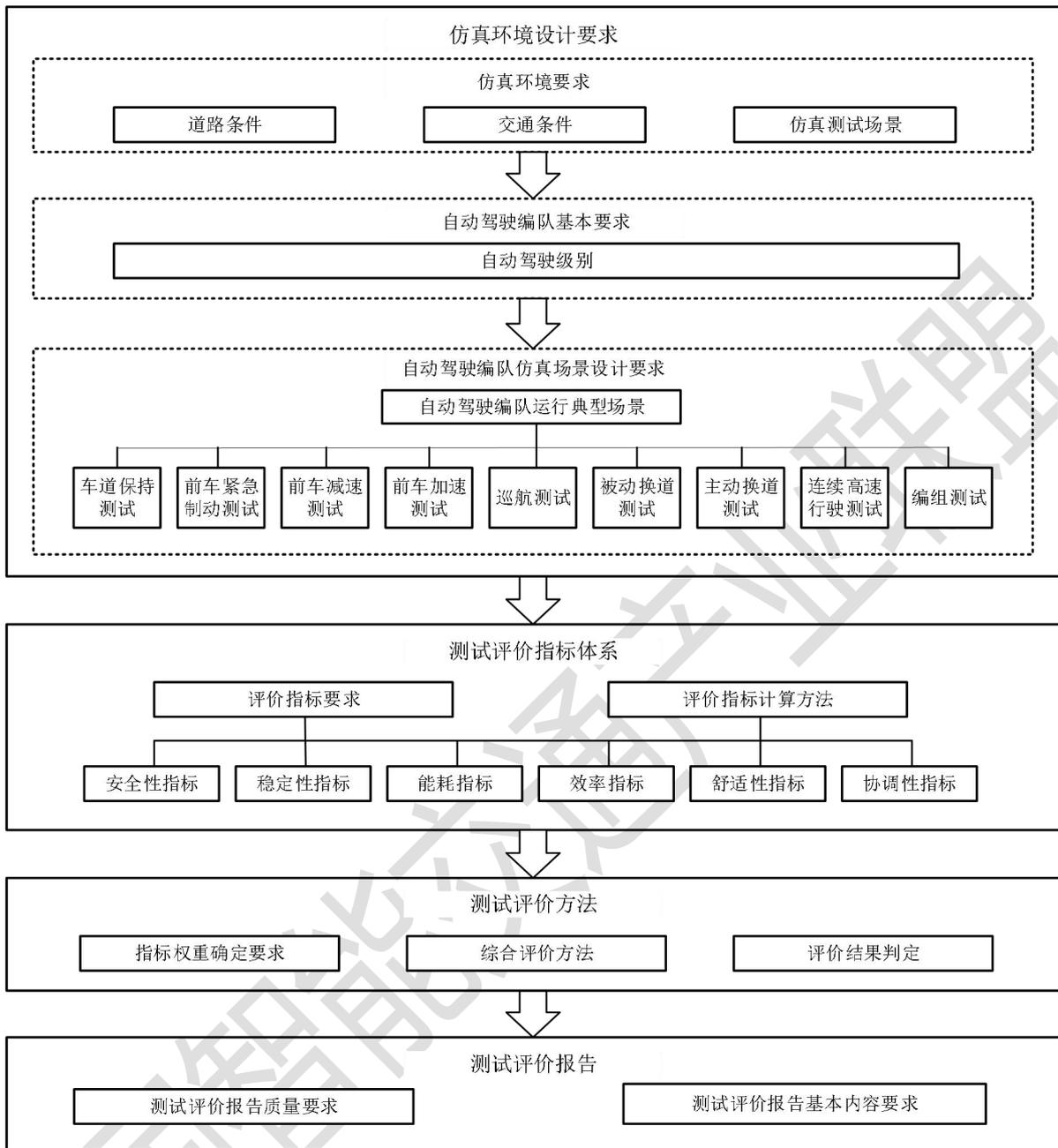


图1 混合交通流环境下自动驾驶编队仿真测试评价流程

- a) 仿真环境设计要求：包含仿真环境要求、自动驾驶编队基本要求以及自动驾驶编队仿真场景设计要求。
- b) 测试评价指标体系：包含自动驾驶编队运行评价的指标要求以及计算方法。指标包含安全性指标、稳定性指标、能耗指标、效率指标、舒适性指标和协调性指标。
- c) 测试评价方法：包含指标权重确定要求、综合评价方法以及评价结果判定。
- d) 测试评价报告：包含测试评价报告质量要求以及测试评价报告基本内容。

5 仿真环境设计要求

5.1 仿真环境要求

5.1.1 道路条件

道路测试路段应符合道路设计标准。

5.1.2 交通条件

自动驾驶编队运行测试的交通环境：

- a) 自动驾驶编队应符合下列要求：
 - 1) 所有车辆应为 L3 级及以上自动驾驶车辆；
 - 2) 所有车辆的驾驶操作系统相同；
 - 3) 具备根据测试对象和测试目标设定自动驾驶编队中的行驶速度和车辆间距限值的功能。
- b) 测试环境为混合交通流环境，即测试环境中包含非自动驾驶的机动车、非机动车、行人等交通环境因素。
- c) 不考虑雨、雪、雾、霾等自然天气影响；不考虑高温、高湿等其他极端天气与气候因素影响。

5.1.3 仿真测试环境

以下编队测试场景均在混合交通流环境下进行。编队测试场景包括自动驾驶编队形成、自动驾驶编队重组、自动驾驶编队解散、加入自动驾驶编队、离开自动驾驶编队五类，各场景测试步骤如下：

- a) 自动驾驶编队形成的测试步骤：
 - 1) 设置自动驾驶车辆数量（两辆及以上），以非车队状态随机分布在相同或不同车道；
 - 2) 设置仿真路段起点；
 - 3) 自动驾驶车辆加速到预期速度；
 - 4) 在设定时刻，其中一辆自动驾驶车辆发起编队申请，自动驾驶车辆开始形成自动驾驶编队；
 - 5) 完成自动驾驶编队编组，并继续开展 2min 及以上仿真测试；
 - 6) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；

- 7) 重复进行不少于 20 次测试。
- b) 自动驾驶编队重组的测试步骤：
 - 1) 设置自动驾驶车辆数量（四辆及以上），以自动驾驶编队形式稳态行驶；
 - 2) 设置仿真路段起点；
 - 3) 在设定时刻，其中一辆自动驾驶车辆发起重组申请；
 - 4) 将自动驾驶编队重组拆分为两个自动驾驶编队，并继续开展 2min 及以上仿真测试；
 - 5) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
 - 6) 重复进行不少于 20 次测试。
- c) 自动驾驶编队解散的测试步骤：
 - 1) 设置自动驾驶车辆数量（两辆及以上），以自动驾驶编队形式稳态行驶；
 - 2) 设置仿真路段起点；
 - 3) 在设定时刻，自动驾驶编队中头车发起车队解散指令；
 - 4) 解除自动驾驶编队行驶状态，自动驾驶车辆进入自由行驶状态，并继续开展 2min 及以上仿真测试；
 - 5) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
 - 6) 重复进行不少于 20 次测试。
- d) 加入自动驾驶编队的测试步骤：
 - 1) 设置自动驾驶车辆数量（两辆及以上），以自动驾驶编队形式稳态行驶；
 - 2) 设置仿真路段起点；
 - 3) 在设定时刻，自由行驶自动驾驶车辆申请加入自动驾驶编队；
 - 4) 同意申请后将其编入队尾，以自动驾驶编队的状态行驶，并继续开展 2min 及以上仿真测试；
 - 5) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
 - 6) 重复进行不少于 20 次测试。
- e) 离开自动驾驶编队的测试步骤：
 - 1) 设置自动驾驶车辆数量（两辆及以上），以自动驾驶编队形式稳态行驶；

- 2) 设置仿真路段起点;
- 3) 在设定时刻, 一辆自动驾驶车辆申请离开自动驾驶编队;
- 4) 头车同意申请后解除该自动驾驶车辆编队行驶状态, 进入自由行驶状态;
- 5) 车队中其他车辆仍以编队状态行驶, 并继续开展 2min 及以上仿真测试;
- 6) 一次仿真测试结束, 导出所有自动驾驶车辆每个时刻 (0.1s) 的速度、加速度、位置等数据;
- 7) 重复进行不少于 20 次测试。

5.2 自动驾驶编队基本要求

由于L0、L1以及L2级别的自动驾驶均为驾驶员为主导对车辆进行驾驶, 不能满足自动驾驶编队中自动驾驶车辆的要求, 故本标准仅考虑较高级别自动驾驶车辆构成的编队, 分为L3、L4和L5三个级别, 具体定义如下:

- a) L3 级自动驾驶编队: 有条件自动驾驶车辆编队。在有限的设计运行条件内, 持续执行全部动态驾驶任务, 但不执行动态驾驶任务接管。
- b) L4 级自动驾驶编队: 高度自动驾驶编队。在有限的设计运行条件内, 持续执行全部动态驾驶任务和执行动态驾驶任务接管。
- c) L5 级自动驾驶编队: 完全自动驾驶编队。可持续执行全部动态驾驶任务和执行动态驾驶任务接管, 没有设计运行条件限制。

5.3 自动驾驶编队仿真场景设计要求

以下自动驾驶编队运行典型场景均在混合交通流环境下进行。自动驾驶编队运行典型场景包括车道保持、前方慢行车、前车加减速、车队走停、主动换道超车、被动换道、连续高速行驶、前方占道静止障碍物、前方有紧急制动车辆、前方切入低速车辆, 各场景测试步骤如下:

5.3.1 车道保持测试

车道保持测试的测试步骤如下:

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队, 初始位置为仿真路段起点;
- b) 设置自动驾驶编队的预期速度 (如 60km/h);
- c) 领头车启动并开始加速直至达到预期速度, 跟随车同步启动并跟随行驶;
- d) 自动驾驶编队达到预期车速, 进入稳态运行, 记录当前时刻;

- e) 保持自动驾驶编队稳态运行，一定时间后（如 10min），停止数据记录；
- f) 仿真测试结束，导出所有车辆每个时刻的速度、加速度、位置等数据。

5.3.2 前车紧急制动测试

前车紧急制动的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 自动驾驶编队设置车队的预期速度（如 60km/h）；
- c) 领头车启动并开始加速直至预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速，进入稳态运行，记录当前时间；
- e) 在自动驾驶编队进入稳态状态后的一段时间（如 10min）后，设定领头车以制动减速度减速到设定速度（如 30km/h），进而保持该速度行驶；
- f) 自动驾驶编队调整至重新与前车保持设定的车头时距（如 0.8s），并行驶一定时间（如 10min）；
- g) 仿真测试结束，导出所有车辆每个时刻的速度、加速度、位置等数据。

5.3.3 前车减速测试：

前车减速测试的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 自动驾驶编队设置车队的预期速度（如 60km/h）；
- c) 领头车启动并开始加速直至预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速，进入稳态运行，记录当前时刻；
- e) 在自动驾驶编队进入稳态状态一段时间（如 10min）后，设定领头车缓慢减速至设定速度（如 30km/h），进而保持该速度；
- f) 自动驾驶编队重新达到平稳运行状态并持续一段时间（如 10min）；
- g) 仿真测试结束，导出所有车辆每个时刻的速度、加速度、位置等数据。

5.3.4 前车加速测试：

前车加速测试的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 设置自动驾驶编队的预期速度；

- c) 头车启动并开始加速直至达到预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速，进入稳态运行，记录当前时刻；
- e) 在自动驾驶编队进入稳态状态一段时间（如 2min）后，设定头车缓慢减速至 0，随后加速恢复至预期速度，一次仿真过程中可进行多次（如 3 次）车队走停测试；
- f) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
- g) 重复进行不少于 20 次测试。

5.3.5 巡航测试：

巡航测试的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 自动驾驶编队设置车队的预期速度（如 60km/h）；
- c) 领头车启动并开始加速直至预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速并以巡航模式行驶，记录当前时刻；
- e) 自动驾驶编队行驶里程大于等于 30km，且车辆与前车保持设定的时间间隔 1.6s（相当于 32m 的间隙）行驶；
- f) 仿真测试结束，导出所有车辆每个时刻的速度、加速度、位置等数据；
- g) 对车队进行巡航测试，测试里程需大于等于 30km；
 - 1) 后车 A 和前车 B 在队列中以巡航模式行驶，后车 A 在 CACC 模式中跟随前车 B；
 - 2) 两辆车辆在同一车道上以 60km/h 的速度行驶，后车 A 以设定的车头时距 1.6s（相当于 32m 的间隙）行驶。

5.3.6 被动换道测试：

被动换道测试的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 设置自动驾驶编队的预期速度；
- c) 头车启动并开始加速直至达到预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速，进入稳态运行，记录当前时刻；
- e) 在自动驾驶编队进入稳态状态一段时间（如 2min）后，设置自动驾驶编队道路前方某处设置障碍物，自动驾驶编队在感知到前方障碍物时立刻减速并在条件允许情况下强制换道，换道

之后绕过障碍物在条件允许的情况下换回原车道并达到稳态。一次仿真测试过程中可进行多次（如 3 次）车队被动换道超车测试；

- f) 一次仿真测试结束，导出所有车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
- g) 重复进行不少于 20 次测试。

5.3.7 主动换道测试：

主动换道测试的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 设置自动驾驶编队的预期速度；
- c) 头车启动并开始加速直至达到预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速，进入稳态运行，记录当前时刻；
- e) 在自动驾驶编队进入稳态状态一段时间（如 2min）后，设定头车前方遇到车速低于队列稳态运行车速的慢车车辆，自动驾驶编队主动换道超车并返回原车道并达到稳态。一次仿真测试过程中可进行多次（如 3 次）车队主动换道超车测试；
- f) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
- g) 重复进行不少于 20 次测试。

5.3.8 连续高速行驶测试：

连续高速行驶的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶车辆顺序排列形成自动驾驶编队，初始位置为仿真路段起点；
- b) 设置自动驾驶编队的预期速度；
- c) 头车启动并开始加速直至达到预期速度，跟随车同步启动并跟随行驶；
- d) 自动驾驶编队达到预期车速，进入稳态运行，记录当前时刻；
- e) 在自动驾驶编队进入稳态状态一段时间（如 2min）后，当自动驾驶编队平均速度稳定在道路限速值及上浮 20%以内时，认为自动驾驶编队处于高速行驶状态，此时开始对自动驾驶编队进行连续高速行驶测试；
- f) 一次仿真测试结束，导出所有自动驾驶车辆每个时刻（0.1s）的速度、加速度、位置等数据；
- g) 重复进行不少于 20 次测试。

5.3.9 编组测试：

编组测试的测试步骤如下：

- a) 自动驾驶编队形成。两辆自动驾驶车辆在同一车道或者不同车道以非车队状态行驶；。其中一辆自动驾驶车辆发起车队申请，判断是否能形成自动驾驶编队运行；
- b) 自动驾驶编队重组。一个四辆以上的自动驾驶编队以稳态运行，其中一辆自动驾驶车辆提出车队重组申请，判断是否能够重组拆分成两个车队；
- c) 自动驾驶编队解散。当形成自动驾驶编队运行后，其中一辆自动驾驶车辆发起离开申请，判断是否能执行车队解散。

6 测试评价指标体系

6.1 评价指标要求

6.1.1 本标准规定了自动驾驶编队运行评价的指标体系，包括安全性、稳定性、能耗、效率、舒适性、协调性共6项一级指标，每项一级指标包含一项或多项二级指标，二级指标共14项。

6.1.2 指标体系见表1，具体规定了每个指标的符号表示以及含义。

表1 自动驾驶编队运行综合评价指标

标准层	指标层	指标含义
安全性	$minimumMTTC$	编队修正的碰撞时间
	$maximumDRAC$	编队避免碰撞减速率
	$RTTC_{obs}$	风险碰撞时间倒数观测值
稳定性	$\ G_i(t)\ _{\infty}^1$	纵向误差传递稳定性
	$\Delta\bar{s}$	平均车头间距改变量
	h_{max}	最大水平偏移量
能耗	W_{100km}	电动汽车队列百公里电耗
	$C_{e,f}^{Fuel}$	燃油汽车队列百公里油耗
效率	\bar{t}	单位距离的平均行驶时间
	ϕ	区域行程速度
	η	通行效率指数
舒适性	a_w	自动驾驶编队中所有车辆加权加速度方均根的最大值
	$ jerk_{pla}$	自动驾驶编队中所有车辆中加速度变化最大值
协调性	v_{opp}	自动驾驶编队与前车速度差的绝对值

6.2 评价指标计算方法

6.2.1 安全性指标

评价指标中安全性指标的计算方法如下：

- a) 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：

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

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

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

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。

- b) 编队避免碰撞减速率 $maximumDRAC$ （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：

$$maximumDRAC = \max (DRAC^1, DRAC^2, \dots, DRAC^i, \dots, DRAC^N) > 3.4m/s^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$DRAC^i = \max (DRAC_1, DRAC_2, \dots, DRAC_t, \dots, DRAC_T) \dots\dots\dots (5)$$

$$DRAC_t = \frac{(\Delta V_i(t))^2}{\Delta x_i(t)} \dots\dots\dots (6)$$

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。

- c) 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：

$$RTTC_{i,t} = \frac{\Delta V_i(t)}{\Delta x_i(t) - l_i}; \forall (v_i(t) - v_{i-1}(t)) \geq 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$RTTC_{obs} = \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} RTTC_{i,t}; \forall RTTC_{i,t} > 0.25s^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

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。

6.2.2 稳定性指标

评价指标中稳定性指标的计算方法如下：

- a) 1 纵向误差传递稳定性 $G_i(t)$ (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。

- b) 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:

$$\Delta \bar{s} = \frac{\sum_{i=2}^N \sum_{t=1}^k |\Delta x_i(t) - \Delta x_i(0)|}{(N-1) \cdot I} \leq 2m \dots\dots\dots (3)$$

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。

- c) 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:

$$\Delta \bar{h}_1 = \frac{\sum_{t=0}^k |h_1(t)|}{I} \dots\dots\dots (4)$$

$$h_{max} = \|\Delta \bar{h}_1\|_{\infty} \leq 0.2m \dots\dots\dots (5)$$

式中: $h_1(t)$ ——跟随车 i 相对于头车中轴线的水平位移量, m。

6.2.3 能耗指标

评价指标中能耗指标的计算方法如下:

- a) 电动汽车队列百公里总电耗 (负向性指标) 由电池输入能量、PTC 耗能、空调压缩机耗能、道路阻力耗能、风阻耗能等影响整体能耗的因素构成, 应按式 (14) 和式 (15) 计算:

$$W_{100km} = w_{100km} + (\omega - 1)(1 - \beta)w_{100km} \dots\dots\dots (1)$$

$$w_{100km} = \frac{W_B - W_{PTC} - W_{AC}}{\Delta L} \times 100 - W_f - W_w \dots\dots\dots (2)$$

式中: w_{100km} ——电动汽车队列头车百公里总电耗, KW·h;

ω ——队列中汽车的数量;

β ——节能系数, 表示队列中的车辆对相邻车辆气动性能的改善。

W_{100km} ——电动自动驾驶编队百公里总电耗, KW·h;

W_B ——电池输入能量, KW·h;

W_{PTC} ——此计算周期PTC耗能, KW·h;

W_{AC} ——此计算周期空调压缩机耗能, KW·h;

W_f ——道路阻力消耗的能量, KW·h;

W_w ——风阻耗能, KW·h;

ΔL ——该计算周期里程的变化, km。

- 1) 电池输入能量 W_B 为电池输入到车辆的能量包括整车驱动时电池放出的能量与制动时电池回收的能量, 应按式(16)、式(17)和式(18)计算:

$$W_B = W_{B_in} + W_{B_out} \dots\dots\dots (3)$$

$$W_{B_in} = \frac{UI_{in}\Delta t}{3600 \times 1000} \dots\dots\dots (4)$$

$$W_{B_out} = \frac{UI_{out}\Delta t}{3600 \times 1000} \dots\dots\dots (5)$$

式中: W_{B_in} ——制动时回收的能量, KW·h;

W_{B_out} ——驱动时放出的能量, KW·h;

U ——电池的端电压, V;

I_{out} ——驱动时的电流, 驱动时电流为正, A;

I_{in} ——制动时的电流, 制动时为负, A;

Δt ——计算周期, ms。

- 2) 行驶阻力耗能的坡度阻力和滚动阻力均与道路相关, 故把两种阻力合在一起考虑为道路阻力, 应按式(19)和式(20)计算:

$$W_f = \sum F_N f v_i \Delta t / 3600 \dots\dots\dots (6)$$

$$W_w = \sum \frac{C_D M v_i^3 \Delta t}{21.15 \times 3600} \dots\dots\dots (7)$$

式中: W_f ——道路阻力消耗的能量, KW·h;

W_w ——风阻耗能, KW·h;

F_N ——车轮负荷, N;

C_D ——空气阻力系数;

M ——迎风面积, m²。

- b) 燃油汽车队列百公里总能耗(负向性指标)表示车队中车辆的每百公里的总燃料消耗, 应按式(21)计算:

$$C_{e,f}^{Fuel}(\omega) = \varphi d_{ef} + (\omega - 1)(1 - \beta)\varphi d_{ef}; \forall (e, f \in K) \dots\dots\dots (8)$$

式中: $C_{e,f}^{Fuel}$ ——从节点 e 到相邻节点 f 的自动驾驶队列的燃料消耗;

φ ——单位燃料消耗, L/100km, 设定为 15L/100km;

d_{ef} ——从节点 e 到相邻节点 f 的距离(公里), 道路链路集合由 K 表示。

- c) 参数取值。表2为不同车辆的基本属性参数取值, 表3为不同跟驰组合下车辆的节能系数 $(1 - \beta)$ 取值。

表 2 不同车辆的指标参数取值

车辆类型	轿车	小客车	卡车
车身长度/m	5.0	6.5	16.5
整车质量/kg	1500	5000	15000
车前迎风面积/m ²	2.7	6.2	10.2

表 3 节能系数取值

前方车型	后方车型		
	轿车	小客车	卡车
轿车	0.93	/	/
小客车	/	0.93	/
卡车	/	/	0.93

6.2.4 效率指标

评价指标中效率指标的计算方法如下：

- a) 单位距离的平均行驶时间 \bar{t} (负向性指标) 应按公式 (22) 计算, 该指标的范围为 $[\frac{L}{v_{\max}}, +\infty]$:

$$\bar{t} = \frac{TT}{TS} \dots\dots\dots (1)$$

式中: TT ——编队行程时间之和, h;

TS ——编队行驶距离之和, km;

L ——路径总长度, km;

v_{\max} ——车辆的最大速度, km/h。

- b) 区域行程速度 ϕ (正向性指标) 指以区域内各路段的交通流量和长度作为权值, 进行路段行程速度的加权计算, 应按公式 (23) 计算, 该指标的范围为 $[0, v_{\max}]$:

$$\phi = \sum_{j=1}^m \left(\frac{l_j}{L} * \frac{\xi_j}{\Sigma} * \bar{v}_j \right) \dots\dots\dots (2)$$

式中: Σ ——各路段流量之和, pcu/h;

m ——路径上的路段划分个数;

l_j ——路段 j 的长度, km;

ξ_j ——路段 j 上的流量, pcu/h;

\bar{v}_j ——路段 j 上的平均行程车速, km/h;

- c) 通行效率指数 η (正向性指标): 计算通行效率指数的时间窗长度推荐为 5min, 以无量纲数字 $[0, 100]$ 表征当前通行效率状态, 其值越大表示通行效率越高, 应按公式 (24) 计算:

$$\eta = 100 * \left(\frac{v_{\text{real}}}{v_{\text{limit}}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式中： v_{real} ——时间窗内路段平均行程车速；
 v_{limit} ——路段最高限速。

6.2.5 舒适性指标

评价指标中舒适性指标的计算方法如下：

- a) 车队加权加速度方均根 a_w 表示自动驾驶编队中所有车辆中加权加速度方均根的最大值（负向性指标），应按式（25）计算。自动驾驶编队的 a_w 分类阈值参考准 ISO2631 中相关标准进行划分，如表 4 所示。

$$a_w = \max_{i \in N} \left(\sqrt{\frac{1}{M} \sum_0^M a_{i,w}^2(t)} \right) \dots\dots\dots (1)$$

式中： i ——自动驾驶编队中的车辆编号；
 M ——测试选取的时间步个数；

$a_{i,w}(t)$ ——车辆 i 的加权加速度时间历程， m/s^2 。

表 4 车队加速度均方根 a_w 与舒适度关系

a_w (m/s^2)	舒适度
<0.315	舒适
0.315~0.63	较为不舒适
0.5~1.0	有些不舒适
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.5	非常不舒适
>2	极不舒适

- b) 车队加加速度 $jerk_{\text{pla}}$ 表示自动驾驶编队中所有车辆中加速度变化最大值，（负向性指标），应按式（26）和式（27）计算。根据时间窗（推荐采用 3s）基于 ISO 4272:2022 中相关标准进行划分，结果如表 5 所示。

$$jerk_{\text{pla}} = \max_{1 \leq i \leq N} \{jerk_i\} \dots\dots\dots (2)$$

$$jerk_i = \dot{a}_i(t) \dots\dots\dots (3)$$

式中： $jerk_i$ ——车辆 i 的加加速度， m/s^3 。

表5 不同速度区间自动驾驶编队的加加速度阈值

速度区间 (km/h)	加加速度区间 (m/s ³)
(60,80]	(0,0.5]
(40,60]	(0,0.7]
(30,40]	(0,0.9]
(0,30]	(0,1.0]

6.2.6 协调性指标

评价指标中协调性指标的计算方法如下：

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。

7 测试评价方法

7.1 指标权重确定要求

7.1.1 选用合适的方法确定评价指标权重。对于第6章给出的测试评价指标体系，推荐使用的指标权重确定步骤如下：

- a) 采用熵权法计算指标熵权值，确定客观权重。
- b) 采用层次分析法按照1~9标度法对指标重要程度进行主观赋值，宜赋予安全性指标最高标度。
- c) 依据客观权重和主观权重，采用最优加权法确定所有指标的最优权重值，其中可以将最小相对熵作为优化目标。

7.1.2 建议的各指标权重赋值情况见表6。

表 6 自动驾驶编队仿真评价指标权重

标准层	指标	权重
安全性	车队修正的碰撞时间 $minimumMTTC$	0.15
	车队避免碰撞减速率 $maximumDRAC$	0.15
	风险碰撞时间倒数观测值 $RTTC_{obs}$	0.15
稳定性	纵向误差传递稳定性 $\ G_i(t)\ _{\infty}^L$	0.05
	平均车头间距改变量 $\Delta\bar{s}$	0.05
	最大水平偏移量 h_{max}	0.05
能耗	电动自动驾驶编队百公里电耗 W_{100km}	0.05
	燃油自动驾驶编队百公里油耗 $C_{e,f}^{Fuel}$	0.05
效率	单位距离的平均行驶时间 \bar{t}	0.05
	区域行程速度 ϕ	0.05
	通行效率指数 η	0.05
舒适性	自动驾驶编队中所有车辆加权加速度方均根的最大值 a_w	0.05
	自动驾驶编队中所有车辆中加速度变化最大值 $jerk_{pla}$	0.05
协调性	自动驾驶编队与前车速度差的绝对值 v_{opp}	0.05

7.2 综合评价方法

7.2.1 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。

7.2.2 在混合交通流情况下，宜选择 TOPSIS 方法计算自动驾驶编队仿真的综合评价值。采用 TOPSIS 法对混合交通流环境下自动驾驶编队仿真测试结果的综合评价流程如图 2 所示，具体包含下列步骤：

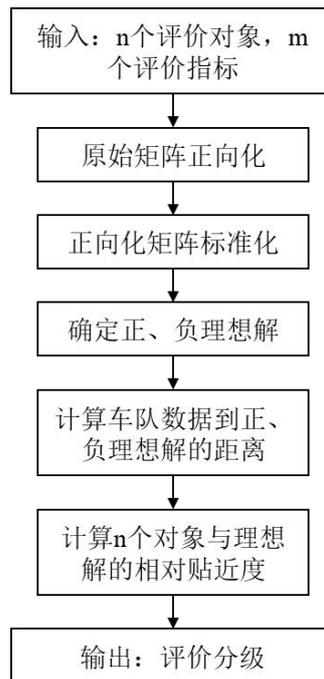


图2 基于TOPSIS法的混合交通流环境下自动驾驶编队仿真测试评价流程图

a) 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 属于正向性指标时，正向化应按式 (29) 计算:

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

3) 当指标 j 属于负向性指标时，正向化应按式 (30) 计算:

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

b) 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:

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

2) 对其标准化的矩阵记作 Z ， Z 中元素应按式 (31) 计算:

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

c) 确定最优解和最劣解

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 :

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

- 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(32)计算：

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

- 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(33)计算：

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

- d) 计算车队运行数据到最优和最劣解的距离。7.1节中确定的评价指标权重为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ 。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(34)和(35)计算：

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

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

- e) 计算车队运行综合评价价值。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(36)计算：

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

7.3 评价结果判定

7.3.1 综合评价结果判定。依据综合评价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7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7 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

7.3.2 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景实车测试。

8 测试评价报告

8.1 测试评价报告质量要求

测试评价报告质量要求具体如下：

- a) 真实性。应基于准确的模型、合理的假设以及真实的数据进行仿真，报告中所提供的信息、数据以及结果应与实际情况相符合，不得夸大或歪曲事实。
- b) 完整性。报告中所包含的信息、数据和分析能够全面覆盖仿真过程的各个方面，不遗漏重要的细节或结果。
- c) 清晰性。报告应以简洁清晰的语言表达仿真过程、方法和结果，使读者能够轻松理解和评估仿真过程中所涉及的内容。
- d) 可验证性。报告中提供的仿真方法和结果应具有可验证性，即他人可以通过相同的方法和数据重复仿真过程，以验证结果的准确性和可靠性。
- e) 客观性。报告应遵循客观、公正的原则，不受主观偏见或利益影响，对仿真结果进行客观分析和评价。

8.2 测试评价报告内容要求

测试评价报告内容要求具体如下：

- a) 测试内容中应说明测试时间、测试人、测试目的、测试范围（功能与边界）。
- b) 测试内容中应包含仿真测试使用的软硬件条件、模型与仿真参数、仿真测试场景、场景要素、关键场景参数等。
- c) 测试结果中应给出相应指标的计算结果，采用评价方法给出评价等级。
- d) 在测试评价报告的结尾部分，应根据测试结果以及测试过程中遇到的问题给出适当建议。可以从数据采集、参数设置优化、模型改进、场景改进、策略调整等方面给出。
- e) 测试评价报告的内容和格式见表 8 和表 9。

表8 测试评价报告基本信息

基本要素	记录的具体内容
测试时间	测试开始时间和结束时间
测试人	测试人的姓名
测试目的	测试想达到的目的及意义
测试范围	包含功能与边界等

表9 测试评价报告表

测试工具及软硬件条件	测试类型	测试场景	测试场景要素	关键场景参数选取	测试结果					
					安全性	稳定性				
记录仿真测试使用的工具及软硬件条件、仿真模型及参数等	编组测试场景	自动驾驶编队形成	自动驾驶车辆数量（两辆及以上）	速度	安全性	采用评价方法给出评价等级并给出建议				
				加速度	稳定性					
					位置		能耗效率			
		自动驾驶编队重组	四辆及以上自动驾驶车辆	同上			舒适性			
					自动驾驶编队解散		自动驾驶编队	同上	协调性	
									加入自动驾驶编队	自动驾驶编队、自由行驶车辆
	离开自动驾驶编队	自动驾驶编队	同上	同上						
					自动驾驶编队典型场景		连续高速行驶	自动驾驶编队	同上	同上
	车道保持	自动驾驶编队	同上	同上						
	前车紧急制动	自动驾驶编队、紧急制动车辆	同上	同上						
	前车减速	自动驾驶编队、减速车辆	同上	同上						
	前车加速	自动驾驶编队、加速车辆	同上	同上						
	巡航	自动驾驶编队	同上	同上						
	被动换道	自动驾驶编队、障碍物	同上	同上						
	主动换道	自动驾驶编队、慢速行驶自由车辆	同上	同上						

T/ITS 0289-XXXX

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
技术规范

T/ITS 0289-XXXX

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>

20XX 年 X 月第一版 20XX 年 X 月第一次印刷