

T/SHJX

上海市交通运输行业协会团体标准

T/SHJX 047—2022

智能网联汽车匝道场景交通和谐性测试与 评价方法

Test and evaluation method of the harmony in ramp scenario for intelligent and
connected vehicles

2022 - 10 - 24 发布

2022 - 10 - 24 实施

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 测试与评价流程	5
5 测试场景	5
5.1 功能场景定义	5
5.2 测试工况参数定义	6
5.3 测试工况关键位置定义	6
6 测试要求	6
6.1 测试条件	6
6.2 测试执行	7
6.3 测试数据	8
7 评价方法	8
7.1 评价体系	8
7.2 单工况评价	12
7.3 多工况评价	13
7.4 等级评价	13
附 录 A （规范性） 测试工况参数设置	15
A.1 总则	15
A.2 测试工况参数设置	15
附 录 B （规范性） 仿真测试平台可信度评估方法	17
B.1 总则	17
B.2 仿真测试平台可信度评估方法	17
附 录 C （规范性） 背景车辆跟驰模型设置	18
C.1 总则	18
C.2 背景车辆跟驰模型	18
附 录 D （规范性） 评价指标归一化参数	20
D.1 总则	20
D.2 评价指标归一化参数	20
附 录 E （资料性） 智能网联汽车匝道场景交通和谐性评价示例	21
E.1 总则	21
E.2 评价示例	21
参 考 文 献	23

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。

本文件由上海市交通运输行业协会提出并归口。

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。

本文件起草单位：同济大学、上海淞泓智能汽车科技有限公司、中汽研汽车检验中心（天津）有限公司、北京百度智行科技有限公司、重庆长安汽车股份有限公司、上海汽车集团股份有限公司技术中心、上海国际汽车城（集团）有限公司、吉林大学、上海城市综合交通规划科技咨询有限公司。

本文件主要起草人：蒙昊蓝、陈君毅、霍燕燕、陈虹、张志强、杨扬、彭伟、贾通、陈磊、秦孔建、郭魁元、张珊、马百聪、王斌、吴新政、冯天悦、熊璐、孙剑、余卓平、闵海涛、田野、郭润清、左伏桃、程周、王瑞东、杨果、沈理荣、廖亚男、王天辰、朱昊。

本文件首次执行单位：同济大学、上海淞泓智能汽车科技有限公司、中汽研汽车检验中心（天津）有限公司、北京百度智行科技有限公司、上海汽车集团股份有限公司技术中心、上海国际汽车城（集团）有限公司、吉林大学。

本文件为首次制定。

引 言

智能网联汽车与自然交通的和谐性是指：智能网联汽车在完成行驶任务的过程中，在满足交通规则约束和不发生碰撞的前提下，使得自车行驶收益和周围交通收益总体最大化的能力。这是智能网联汽车在开放道路行驶时应具备的重要能力之一，缺失该能力将导致智能网联汽车难以融入自然交通系统，无法经由人机混合交通阶段的过渡，实现大规模自动驾驶交通。尤其在交通规则约束较弱的行驶场景中，该能力的高低决定了智能网联汽车融入自然交通的表现优劣，故应对其开展测试与评价。该类行驶场景中，比较常见的包括，前方车道数减少、具有加速车道的匝道汇入、匝道汇出等；其共性特征是，被测车辆需要在与自然交通动态交互的过程中，在具有一定裕度的限定空间距离内完成一个变道行为，从而实现既定的行驶路径和行驶目的。

基于此，本文件以高速公路具有加速车道的匝道汇入场景为例，规范相关测试与评价流程、测试场景及测试评价要求。本文件也可作为交通和谐性在其他如快速路、立交桥等场景中评价的参照。

智能网联汽车匝道场景交通和谐性测试与评价方法

1 范围

本文件规定了智能网联汽车匝道场景交通和谐性的测试与评价流程、测试场景、测试要求及评价方法。

本文件适用于具备2级及以上驾驶自动化功能且设计运行范围包括高速公路匝道汇入的M类、N类车辆，用于在匝道汇入场景下智能网联汽车与自然交通和谐性评价，其他车辆类型可参考执行。

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 5768 道路交通标志和标线

GB 7258 机动车运行安全技术条件

GB/T 3730.2-1996 道路车辆 质量 词汇和代码

GB/T 38186-2019 商用车辆自动紧急制动系统（AEBS）性能要求及试验方法

GB/T 40429-2021 汽车驾驶自动化分级

3 术语和定义

GB/T 40429-2021界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

被测车辆 vehicle under test; VUT

开展与自然交通和谐性测试与评价的车辆。

3.2

背景车辆 background vehicle; BV

位于主路中行驶的非被测车辆，即图1中位于主路最右侧车道行驶的多辆机动车。包括引导车辆、跟驰车辆。

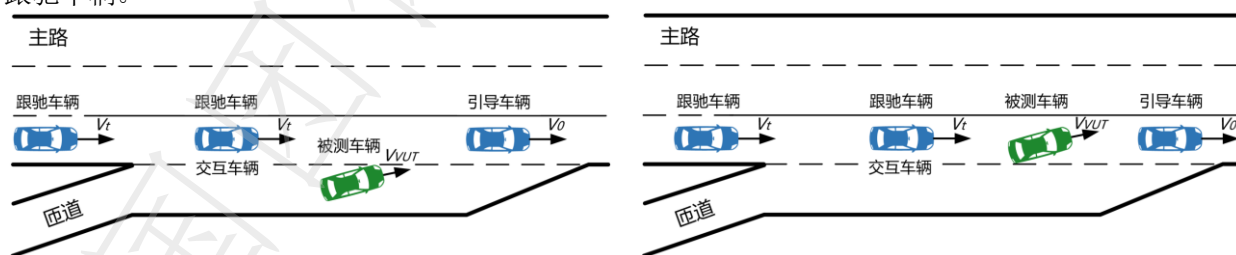


图1 变道过程示意图

3.3

引导车辆 leading vehicle

最前一辆背景车辆。

3.4

跟驰车辆 following vehicle

非引导车辆的背景车辆。

3.5

交互车辆 interacting vehicle

被测车辆位于变道初始位置时，主路中位于被测车辆后方的第一辆跟驰车辆。

3.6

交通协调性 harmony with traffic

在完成行驶任务的过程中，使得被测车辆和周围交通的行驶收益总体最大化的能力，行驶收益包含舒适、效率、能耗等。

3.7

匝道汇入 ramp merge

被测车辆由匝道加速车道变道驶入主路最右侧车道的过程。该变道过程中被测车辆任意轮廓越过主路车道线的位置为变道初始位置，被测车辆完全进入主路的位置为变道结束位置。

3.8

碰撞时间 time to collision; TTC

自车与目标之间的距离除以自车与目标的相对车速所得出的时间。

[来源：GB/T 38186-2019, 3.11]

3.9

跟驰模型 car-following model

根据同一车道或相邻车道的前车运动状态变化，计算处于跟随前车行驶的后车纵向运动状态的关系模型。

4 测试与评价流程

智能网联汽车与自然交通和谐性的测试与评价流程主要包括测试场景、测试和评价，见图2。

- 测试场景：设置测试场景，并定义测试工况参数和关键位置，结合参数和位置构建测试工况；
- 测试：根据测试条件搭建测试平台，执行测试（采用实车测试或仿真测试），获取测试数据；
- 评价：根据测试数据计算评价指标，基于评价体系输出 VUT 评价结果。

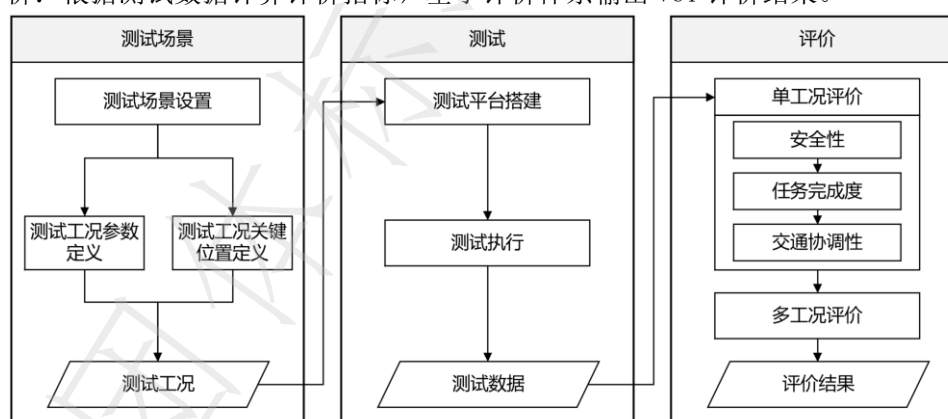


图2 智能网联汽车与自然交通和谐性的测试与评价流程

5 测试场景

5.1 功能场景定义

功能场景为匝道汇入场景，如图3所示，VUT由匝道加速车道汇入主路，BV位于主路最右侧车道行驶。与加速车道长度 D_1 对应的主路最右侧车道的左侧车道线为长实线，车辆不可向左变道。

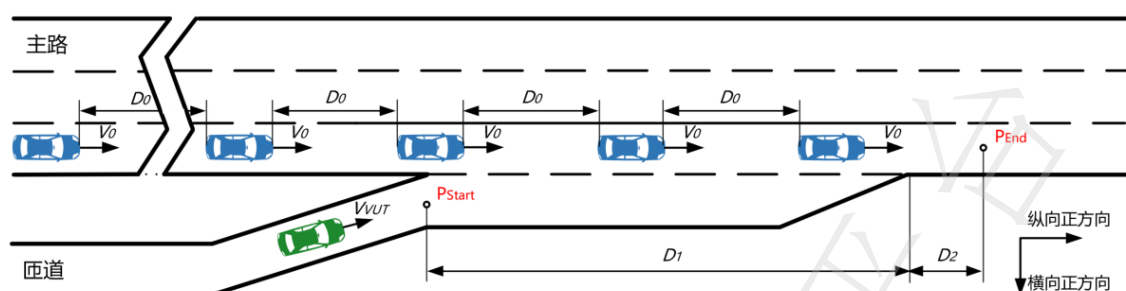


图3 功能场景示意图

5.2 测试工况参数定义

测试工况的参数包括：VUT到达测试初始位置 P_{Start} 的速度 V_{VUT} 、变道结束时刻位于VUT后的BV数量 N 、BV初始速度 V_0 、BV的车间距 D_0 和加速车道长度 D_1 ，参数取值如表1所示。

表1 测试工况参数定义

参数	单位	取值
V_{VUT}	km/h	见附录A
N	辆	$[5, +\infty)$ 范围内任意值
V_0	km/h	见附录A
D_0	m	见附录A
D_1	m	$[180, 230]$ 范围内任意值

5.3 测试工况关键位置定义

测试工况关键位置定义包括：

- 测试初始位置：测试初始位置 P_{Start} 位于加速车道起点所处的道路横断面；
- 测试结束位置：为保证VUT完全汇入主车道，测试结束位置 P_{End} 位于加速车道后 $D_2=10$ m所处的道路横断面。

6 测试要求

6.1 测试条件

6.1.1 被测车辆要求

VUT要求如下：

- VUT应具备2级及以上驾驶自动化功能且设计运行范围包括高速公路匝道汇入场景；
- VUT应符合GB 7258中有关机动车的整车及主要总成、安全防护装置等运行安全的基本技术检测要求；
- VUT应具备“人工操作”和“自动驾驶”两种模式，且能够以安全、快速、简单的方式实现模式转换并有相应的提示，保证在任何情况下都能够将车辆即时转换为“人工操作”模式；
- VUT应安装具备提醒功能的装置，当遇到驾驶自动化系统失效时，该装置应立即提醒测试驾驶员接管车辆；
- 若VUT为乘用车，VUT质量应处于整车整备质量加上驾驶员和试验设备的总质量（驾驶员和试验设备的总质量不超过150 kg）与最大允许总质量之间；
若VUT为商用车，VUT应在整车整备质量和最大允许总质量状态下分别进行试验，质量的描述应符合GB/T 3730.2-1996的要求。

6.1.2 测试平台要求

6.1.2.1 仿真测试平台要求

仿真测试平台要求如下：

- a) 测试平台应支持实时仿真测试；
- b) 测试平台应支持单一场景仿真试验和多场景连续仿真试验等多种试验模式；
- c) 测试平台应具备车辆动力学仿真建模能力，或支持外部车辆动力学模型设置和导入等；
- d) 测试平台应支持对仿真试验结果的可追溯性，具备测试过程回放功能，具备试验结果数据下载功能；
- e) 测试平台应具备一定可靠性；
- f) 测试结果应具备可信度，评估方法见附录 B；
- g) 测试平台应具备场景管理能力，支持场景导入、场景保存、场景标签和场景检索等；
- h) 测试场景交通标志、标线符合 GB 5768 的相关要求，单车道宽度为 3.5 m~3.75 m。

6.1.2.2 实车测试平台要求

实车测试平台要求如下：

- a) 测试平台能够满足测试场景搭建要求；
- b) 测试场景交通标志、标线清晰可见，符合 GB 5768 的相关要求；
- c) 测试道路为具有良好附着能力的平坦、干燥的沥青或混凝土路面，单车道宽度为 3.5 m~3.75 m；
- d) 测试平台无其他特殊因素干扰。

6.1.3 背景车辆要求

6.1.3.1 通用要求

所有 BV 通用要求如下：

- a) 长度限值 4650 mm 至 5000 mm；
- b) 宽度限值 1800 mm 至 1900 mm；
- c) 高度限值 1400 mm 至 1500 mm；
- d) 外观颜色为白色。

6.1.3.2 运动要求

不同 BV 运动要求如下：

- a) 引导车辆：在主路最右车道保持匀速行驶；
- b) 跟驰车辆：跟驰车辆的运动控制包含横向车道保持和纵向速度控制。横向车道保持使车辆在设定的车道范围内保持居中行驶，纵向速度控制的速度、加速度的计算方法由附录 C 中跟驰模型确定。

6.2 测试执行

6.2.1 仿真测试流程

仿真测试流程如下：

- a) 测试场景搭建：搭建匝道汇入测试场景，测试场景需满足可测试、可复现；
- b) 测试系统准备：将 VUT 控制逻辑接入仿真系统中的动力学模型，确保数据传输无误；
- c) 测试工况运行：运行仿真测试，单个工况按照附录 A 测试工况参数设置完成一次有效测试，测试开始于 VUT 到达测试初始位置 P_{Start} 时，结束于 VUT 发生碰撞或减速至 0 或变道结束时刻位于 VUT 后的第 5 辆跟驰车辆驶过测试结束位置 P_{End} 后；
- d) 全部工况测试：按 c) 完成附录 A 测试工况参数设置中全部工况测试；
- e) 输出测试数据：将总体过程中的 VUT 与 BV 测试数据导出。

6.2.2 实车测试流程

实车测试流程如下：

- a) 被测车辆准备：VUT 及 BV 装备数据记录模块；
- b) 测试场地准备：根据测试场景参数搭建测试场景，测试场景满足可测试、可重现；

- c) 实车测试执行：满足测试初始条件后开启自动驾驶功能及数据记录，单个工况按照附录 A 测试工况参数设置完成一次有效测试，测试开始于 VUT 到达测试初始位置 P_{Start} 时，结束于 VUT 发生碰撞或减速至 0 或变道结束时刻位于 VUT 后的第 5 辆跟驰车辆驶过测试结束位置 P_{End} 后；
- d) 全部工况测试：按 c) 完成附录 A 测试工况参数设置中全部工况测试；
- e) 输出测试数据：将总体过程中的 VUT 与 BV 测试数据导出。

6.3 测试数据

6.3.1 测试数据内容

输出测试数据至少包含以下内容：

- a) 数据时间戳： t_i ，单位为 s；
- b) VUT 与前方临近 BV 的 TTC： TTC_{VUT_t} ，单位为 s；
- c) VUT 与前方临近 BV 的纵向距离： d_{VUT_t} ，单位为 m；
- d) VUT 的纵向加速度： a_{VUT_t} ，单位为 m/s^2 ；
- e) VUT 的纵向速度： V_{VUT_t} ，单位为 m/s；
- f) 交互车辆与 VUT 的 TTC： TTC_{0_t} ，单位为 s；
- g) 交互车辆与 VUT 的纵向距离： d_{0_t} ，单位为 m；
- h) BV 的纵向速度： V_{0_t} ，单位为 m/s。

6.3.2 测试数据采集要求

测试数据采集要求如下：

- a) 运动状态采样和存储的频率至少为 50 Hz；
- b) 速度精度至少为 0.03 m/s；
- c) 纵向位置精度至少为 0.1 m；
- d) 横向位置精度至少为 0.05 m；
- e) 加速度精度至少为 0.1 m/s^2 。

7 评价方法

7.1 评价体系

7.1.1 评价体系架构与流程

交通和谐性评价体系架构分为三个层次：单工况评价、多工况评价和等级评价。评价体系架构(左)和流程(右)如图5所示。用于评价的测试数据应由仿真测试或实车测试输出，且所有测试数据应属于同一被测车辆，并经同一测试平台测试获得。

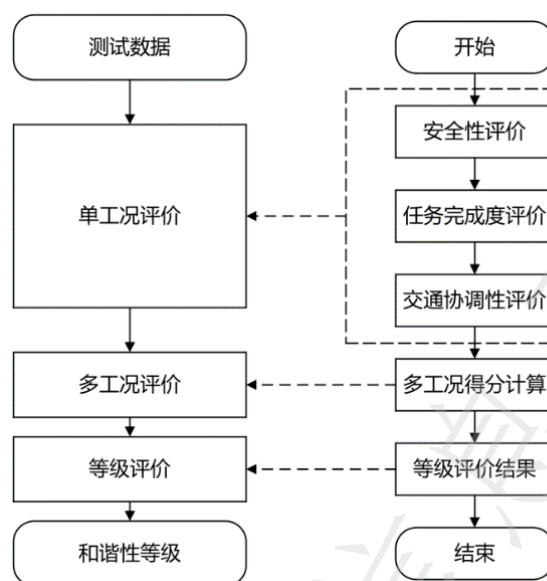


图4 评价体系架构与流程

7.1.2 评价过程定义

评价过程定义包括：

- 总体过程：测试初始位置 P_{Start} 至测试结束位置 P_{End} ，如图5所示；
- 变道过程：VUT任意轮廓越过主路车道线的位置至VUT完全进入主路的位置，即变道初始位置至变道结束位置，如图5所示；
- 汇入过程：变道初始位置至测试结束位置 P_{End} ，如图5所示。

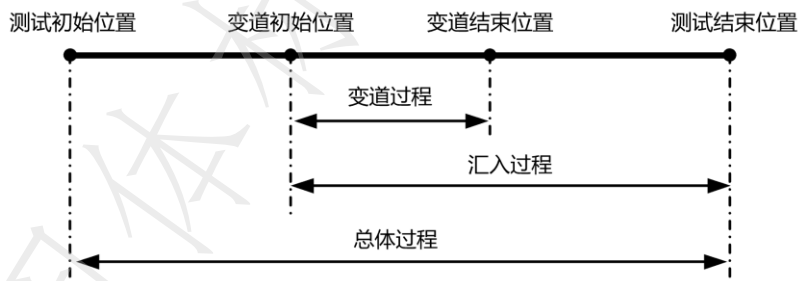


图5 评价过程示意图

7.1.3 单工况评价指标体系架构

交通和谐性单工况综合评价包含安全性、任务完成度、交通协调性等三方面评价结果，单工况评价指标体系架构见表2。

表2 单工况评价指标体系架构

评价目标	评价准则	评价视角	评价维度	评价指标	单位	评价过程	
交通和谐性 单工况综合评价	安全性	/	安全性	CC _{VUT} 碰撞计数	/	总体过程	
	任务完成度	/	任务完成度	LC _{VUT} 变道计数	/	总体过程	
	交通协调性	L1: 被测车辆 VUT	L11: 舒适性	认知舒适性*	L111最小纵向间距	m	汇入过程
					L112最小纵向时距	s	汇入过程
			运动舒适性**	L113峰值加速度	m/s ²	总体过程	
				L114峰值减速度	m/s ²	总体过程	
				L115峰值加速度变化率	m/s ³	总体过程	
				L12: 高效性	L121完成时间	s	总体过程
		L13: 能耗性	L131动能变化	m ² /s ²	总体过程		
		L2: 交互车辆	L21: 舒适性	认知舒适性*	L211最小纵向间距	m	变道过程

评价目标	评价准则	评价视角	评价维度	评价指标	单位	评价过程	
				L212最小纵向时距	s	变道过程	
				L22: 高效性	L221完成时间	s	总体过程
				L23: 能耗性	L231动能变化	m ² /s ²	总体过程
		L3: 背景车辆 BV	L31: 影响范围	L311制动BV计数	辆	汇入过程	
注: 认知舒适性*指由车辆与障碍物相对关系引起的视觉信息, 导致的不舒适问题; 运动舒适性**指由车辆加减速引起的平衡觉、压觉等信息, 导致的不舒适问题。							

7.1.4 单工况评价指标定义及计算方法

交通和谐性单工况评价指标定义及计算方法如下:

a) 碰撞计数 (CC_{VUT})

本指标衡量VUT在总体过程中的安全性, 即完成行驶任务过程中不发生碰撞的能力, 用VUT与BV发生碰撞次数表征, 单工况评价指标计算时, 当CC_{VUT} = 0, 计算7.1.3中剩余指标; 当CC_{VUT} ≥ 1, 7.1.3中剩余所有指标赋0。

b) 变道计数 (LC_{VUT})

本指标衡量VUT在总体过程中的任务完成度, 即完成行驶任务的能力, 用VUT越过主路与加速车道之间车道线的次数表征, 单工况评价指标计算时, 当LC_{VUT} = 1, 计算7.1.3中剩余指标; 当LC_{VUT} ≠ 1, 7.1.3中剩余除CC_{VUT}外的指标赋1。

c) 最小纵向间距 (L111)

本指标衡量VUT在汇入过程中形成的对车内人员风险认知舒适性的影响程度, 用VUT与前方临近BV的最小纵向距离表征, 计算公式如下:

$$L111 = \min\{d_{VUT_t} | t_{start_LC} \leq t \leq t_{End}\} \dots \dots \dots (1)$$

式中:

d_{VUT_t} ——即在VUT车辆坐标系下, VUT汇入过程中VUT与前方临近BV的纵向距离;

t_{start_LC} ——即VUT位于变道初始位置的时间戳;

t_{End} ——即VUT位于测试结束位置 P_{End} 的时间戳。

d) 最小纵向时距 (L112)

本指标衡量VUT在汇入过程中形成的对车内人员风险认知舒适性的影响程度, 用VUT在汇入过程中与前方临近BV的最小纵向TTC表征, 计算公式如下:

$$L112 = \min\{TTC_{VUT_t} | t_{start_LC} \leq t \leq t_{End}\} \dots \dots \dots (2)$$

式中:

TTC_{VUT_t} ——即VUT汇入过程中VUT与前方临近BV的TTC。

e) 峰值加速度 (L113)

本指标衡量VUT在总体过程中对车内人员运动舒适性的影响程度, 用VUT在总体过程中最大加速度表征, 计算公式如下:

$$L113 = \max\{a_{VUT_t} | t_{start} \leq t \leq t_{End}\} \dots \dots \dots (3)$$

式中:

a_{VUT_t} ——即VUT总体过程中VUT的纵向加速度;

t_{start} ——即VUT位于测试初始位置 P_{start} 的时间戳。

f) 峰值减速度 (L114)

本指标衡量VUT在总体过程中对车内人员运动舒适性的影响程度, 用VUT总体过程中最大减速度表征, 计算公式如下:

$$L114 = \min\{a_{VUT_t} | t_{start} \leq t \leq t_{End}\} \dots \dots \dots (4)$$

g) 峰值加速度变化率 (L115)

本指标衡量VUT在总体过程中对车内人员运动舒适性的影响程度, 用VUT总体过程中最大加速度变化率绝对值表征, 计算公式如下:

$$L115 = \max\{|j_{VUT_t}| | t_{Start} \leq t \leq t_{End}\} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

j_{VUT_t} ——即VUT汇入过程中VUT的纵向加速度变化率, $j_{VUT_t} = \frac{\Delta a_{VUT_t}}{\Delta t}$, $\Delta t = 1 \text{ s}$ 。

h) 完成时间 (L121)

本指标衡量VUT在总体过程中的行驶高效性, 用VUT的总体过程行驶时间表征, 计算公式如下:

$$L121 = t_{End} - t_{Start} \dots\dots\dots (6)$$

i) 动能变化 (L131)

本指标衡量VUT在总体过程中的能耗情况, 用两部分动能之和表征, 计算公式如下:

$$L131 = E_{inc_{VUT}} + E_{dif_{VUT}} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$E_{inc_{VUT}}$ ——即VUT在总体过程中累计动能增加量; $E_{inc_{VUT}} = \sum \Delta V_{VUT_t}^2$, ΔV_{VUT_t} 即VUT速度增加过程中的速度增量;

$E_{dif_{VUT}}$ ——即VUT在测试结束位置 P_{End} 的动能与BV初始动能差值, 计算公式如下:

$$E_{dif_{VUT}} = \begin{cases} V_0^2 - V_{VUT_{End}}^2 & V_{VUT_{End}} \leq V_0 \\ 0 & V_{VUT_{End}} > V_0 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$V_{VUT_{End}}$ ——即VUT在测试结束位置 P_{End} 的速度;

V_0 ——即BV汇入初始时速度。

注: 为简化计算, 本文件以速度的平方值表征车辆动能大小, 而不是动能的实际物理意义。

j) 最小纵向间距 (L211)

本指标衡量在VUT变道过程中, VUT对交互车辆车内人员风险认知舒适性的影响程度, 用VUT变道过程中, 交互车辆与VUT的最小纵向距离表征, 计算公式如下:

$$L211 = \min\{d_{0_t} | t_{Start_{LC}} \leq t \leq t_{End_{LC}}\} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

d_{0_t} ——即在交互车辆坐标系下, VUT汇入过程中交互车辆与VUT的纵向距离;

$t_{End_{LC}}$ ——即VUT变道结束时刻的时间戳。

k) 最小纵向时距 (L212)

本指标衡量在VUT变道过程中, VUT对交互车辆车内人员风险认知舒适性的影响程度, 用VUT变道过程中, 交互车辆与VUT的最小纵向TTC表征, 计算公式如下:

$$L212 = \min\{TTC_{0_t} | t_{Start_{LC}} \leq t \leq t_{End_{LC}}\} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

TTC_{0_t} ——即VUT变道过程中交互车辆与VUT的TTC。

l) 完成时间 (L221)

本指标衡量在总体过程中, VUT对交互车辆行驶效率的影响程度, 用交互车辆的行驶时间表征, 计算公式如下:

$$L221 = t_{End_0} - t_{Start_0} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

t_{End_0} ——即交互车辆位于测试结束位置的时间戳

t_{Start_0} ——即交互车辆位于测试初始位置的时间戳。

m) 动能变化 (L231)

本指标衡量在总体过程中, VUT对交互车辆行驶能耗的影响程度, 即交互车辆的累计动能增加量与交互车辆在测试结束位置与测试初始位置动能之差的和, 计算公式如下:

$$L231 = E_{inc_0} + E_{dif_0} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$Einc_0$ ——即在总体过程中，交互车辆的累计动能增加量，仅对在VUT变道前的部分，和在VUT变道后且交互车辆速度小于初始速度时的部分进行累计； $Einc_0 = \sum \Delta V_{0t}^2$ ， ΔV_{0t} 即交互车辆增加过程中的速度增加量，仅对VUT变道前的部分，和在VUT变道后且交互车辆速度小于初始速度时的部分取值；

$Edif_0$ ——即在总体过程中，交互车辆在测试结束位置动能与测试初始位置的动能差值，计算方法为：

$$Edif_0 = \begin{cases} V_0^2 - V_{0End}^2 & V_{0End} \leq V_0 \\ 0 & V_{0End} > V_0 \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

V_{0End} 为交互车辆在测试结束位置 P_{End} 的速度。

n) 制动BV计数 (L311)

本指标衡量VUT汇入过程中，受VUT汇入影响的BV车流范围；用VUT汇入过程中交互车辆及其后方4辆BV中，做出制动动作且车速与初始速度相比降低超过5%的车辆数表征。

7.2 单工况评价

7.2.1 安全性评价

安全性评价即判断该测试工况是否安全性要求，计算公式如下：

$$Safety_{Scenario} = \begin{cases} 1 & CC_{VUT} = 0 \\ 0 & CC_{VUT} \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$Safety_{Scenario}$ ——即单工况安全性维度评价结果。

7.2.2 任务完成度评价

任务完成度评价即判断VUT能否单次完成汇入主路，计算公式如下：

$$Completion_{Scenario} = \begin{cases} 1 & LC_{VUT} = 1 \\ -1 & LC_{VUT} \neq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$Completion_{Scenario}$ ——即单工况任务完成度维度评价结果。

7.2.3 交通协调性评价

7.2.3.1 评价指标归一化

本文件对评价指标L115采用两段分段函数进归一化，计算公式如下：

$$Score_{Index_{L115}} = \begin{cases} 1 & L115 \leq 2.5 \\ 0 & L115 > 2.5 \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

针对其余评价指标，本文件采用三段分段函数进行归一化。计算公式如下：

$$Score_{Index_j} = \begin{cases} 1 & 1 \leq \frac{x-X_1}{X_2-X_1} \\ \frac{x-X_1}{X_2-X_1} & 0 < \frac{x-X_1}{X_2-X_1} < 1 \\ 0 & \frac{x-X_1}{X_2-X_1} \leq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

x ——即交通协调性评价指标的计算结果；

X_1 ——即满足评价指标归一化下限参数；

X_2 ——即满足评价指标归一化上限参数；

$Score_{Index_{L115}}$ ——即峰值加速度变化率评价指标归一化结果；

$Score_{Index_j}$ ——即交通协调性其余评价指标归一化结果。

注：各评价指标归一化函数具体参数见附录D。

7.2.3.2 交通协调性综合评价

交通协调性综合评价由交通协调性评价指标归一化结果进一步计算确定，计算公式如下：

$$Harmony_{Scenario} = \frac{\sum_{i=1}^k Score_{Index_i}}{k} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$Harmony_{Scenario}$ ——即单工况交通协调性维度评价结果；

k ——即交通协调性评价指标个数， $k = 12$ ；

$Score_{Index_i}$ ——即各个交通协调性评价指标归一化结果。

7.2.4 交通和谐性综合评价

智能网联汽车与自然交通和谐性单工况综合评价结果由安全性、任务完成度和交通协调性评价结果构成，计算公式如下：

$$Score_{SingleScenario} = Safety_{Scenario} * Completion_{Scenario} * Harmony_{Scenario} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

$Score_{SingleScenario}$ ——即单工况综合评价结果。

所有单工况综合评价结果中， $Score_{SingleScenario} = 0$ 的称为零分单工况综合评价结果，数量计为 l ； $Score_{SingleScenario} < 0$ 的称为负分单工况综合评价结果，数量计为 m ； $Score_{SingleScenario} > 0$ 的称为正分单工况综合评价结果，数量计为 n ；三种评价结果数量和 $l + m + n = 48$ 。

7.3 多工况评价

7.3.1 多工况平均性能

智能网联汽车与自然交通和谐性多工况平均性能即VUT在各测试工况下的正分评价结果平均值，计算公式如下：

$$Score_{MultiScenario} = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Score_{SingleScenario_i} & n \geq 1 \\ 0 & n = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

$Score_{MultiScenario}$ ——即VUT的多工况平均性能评价结果；

$Score_{SingleScenario_i}$ ——即某正分单工况综合评价结果；

n ——即正分单工况综合评价结果数量。

7.3.2 多工况稳定性

多工况稳定性评价VUT在各测试工况下的智能网联汽车与自然交通和谐性正分评价结果波动程度，计算公式如下：

$$Score_{deviation} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Score_{SingleScenario_i} - Score_{MultiScenario})^2}{n}} & n \geq 1 \\ 0 & n = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

$Score_{deviation}$ ——即VUT的多工况稳定性评价结果。

7.4 等级评价

对于存在零分单工况综合评价结果的VUT（即 $l < 0$ ），认为其不具备智能网联汽车与自然交通和谐性的安全性前提，认定其不具备与自然交通的和谐性。

对于不存在零分单工况综合评价结果的VUT（即 $l = 0$ ），根据VUT多工况评价的多工况平均性能 $Score_{MultiScenario}$ 、多工况稳定性 $Score_{deviation}$ 以及负分单工况综合评价结果数量 m ，将智能网联汽车与自然交通和谐性等级共分为5级，其中第5级代表最优，第1级代表最差。依据如表3所示的初始等级评估矩阵和表4所示的等级修正矩阵，依次确定VUT与自然交通和谐性的初始等级和最终等级。

表3 初始等级评估矩阵

		多工况稳定性 $Score_{deviation}$				
		[0, 0.05)	[0.05, 0.15)	[0.15, 0.25)	[0.25, 0.35)	[0.35, 0.50]
多工况平均性能 $Score_{MultiScenario}$	[0.90, 1.00]	4	4	3	2	1
	[0.70, 0.90)	4	3	2	1	1
	[0.50, 0.70)	3	2	1	1	1
	[0.30, 0.50)	2	1	1	1	1
	[0, 0.30)	1	1	1	1	1

注：该矩阵的评估结果将作为等级修正矩阵的输入。以某智能网联汽车多工况平均性能评价结果位于[0.90, 1.00]，多工况稳定性评价结果位于[0, 0.05)为例，则该VUT与自然交通和谐性的初始等级属于第4级。

表4 等级修正矩阵

		负分单工况综合评价结果数量 m			
		[0, 3]	[4, 7]	[8, 16]	[17, 48]
初始等级评估矩阵结果	4	5	4	3	1
	3	4	3	2	1
	2	2	2	1	1
	1	1	1	1	1

注1：该矩阵的修正结果为智能网联汽车与自然交通和谐性的最终等级评价结果。以某智能网联汽车与自然交通和谐性初始等级是第4级为例，若存在0-3个负分单工况综合评价结果，则该VUT与自然交通和谐性最终等级属于第5级。

注2：以某智能网联汽车为VUT的评价过程与结果参见附录E。

附录 A
(规范性)
测试工况参数设置

A.1 总则

本附录规定了各测试工况的参数设置。

A.2 测试工况参数设置

不同测试工况参数设置如表A.1所示。测试过程中，VUT到达测试初始位置 P_{start} 时，主路最右车道应存在一辆BV与VUT同时经过该处道路横断面。

在VUT和BV达到测试场景所规定的稳定运动状态时，应满足以下数据精度要求：

- V_{VUT} 和 V_0 控制精度为 ± 1.0 km/h；
- D_0 控制精度为 ± 1.0 m。

表A.1 测试工况参数设置

测试工况序号	V_{VUT} (km/h)	V_0 (km/h)	D_0 (m)
1	40	60	40
2	40	60	60
3	40	60	80
4	40	60	100
5	40	80	40
6	40	80	60
7	40	80	80
8	40	80	100
9	40	100	40
10	40	100	60
11	40	100	80
12	40	100	100
13	40	120	40
14	40	120	60
15	40	120	80
16	40	120	100
17	60	60	40
18	60	60	60
19	60	60	80
20	60	60	100
21	60	80	40
22	60	80	60
23	60	80	80
24	60	80	100
25	60	100	40
26	60	100	60
27	60	100	80
28	60	100	100
29	60	120	40
30	60	120	60
31	60	120	80
32	60	120	100
33	80	60	40
34	80	60	60
35	80	60	80

表A.1 测试工况参数设置 (续)

测试工况序号	V_{VUT} (km/h)	V_0 (km/h)	D_0 (m)
36	80	60	100
37	80	80	40
38	80	80	60
39	80	80	80
40	80	80	100
41	80	100	40
42	80	100	60
43	80	100	80
44	80	100	100
45	80	120	40
46	80	120	60
47	80	120	80
48	80	120	100

附录 B
(规范性)
仿真测试平台可信度评估方法

B.1 总则

本附录规定了仿真测试平台可信度评估方法。

B.2 仿真测试平台可信度评估方法

本附录中，除特别说明外，场景参照本文件第5章的相关要求定义，仿真测试和实车测试参照本文件第6章的相关要求执行，指标参照本文件第7章的相关要求计算。

根据如表B.1所示的评估工况，开展工况参数一致的仿真测试和实车测试。

评估工况中，仅设置一辆背景车辆，该背景车辆在主路最右车道保持居中行驶，纵向速度控制的速度、加速度的计算方法由附录C中的跟驰模型确定。

在跟驰模型计算中，当VUT不满足有效车辆的判断条件，或VUT满足有效车辆的判断条件但 $g(t) > 100$ 时，对跟驰模型中的 $g(t)$ 、 v_{fd} 、 m 分别赋值100m、60km/h、0。

测试过程中，VUT到达测试初始位置 P_{Start} 时，BV在主路最右车道与VUT同时经过该处道路横断面。

在VUT和BV达到测试场景所规定的稳定运动状态时，应满足以下数据精度要求：

—— V_{VUT} 和 V_0 控制精度为 ± 1.0 km/h。

表 B.1 评估工况参数设置

参数	单位	取值
V_{VUT}	km/h	60
N	辆	1
V_0	km/h	60
D_0	m	/
D_1	m	[180, 230] 范围内任意值

在测试过程中，记录VUT和BV位于变道初始位置、变道结束位置、测试结束位置时的速度、纵向位置，并计算7.1.3表2中L1、L2中的11项指标的归一化结果。

以该工况的实车测试结果为准，将指标归一化结果、速度和位置结果，与该工况的仿真测试结果进行比较，计算误差。

当同时满足以下三个条件时，认为仿真测试平台具备可信度：

- a) 指标的归一化结果，11个指标中单个误差不超过0.1，平均误差不超过0.05；
- b) 变道初始位置、变道结束位置、测试结束位置时VUT和BV的车速，误差不超过0.5m/s；
- c) 变道初始位置、变道结束位置、测试结束位置时VUT和BV的纵向位置，误差不超过1m。

附录 C
(规范性)
背景车辆跟驰模型设置

C.1 总则

本附录规定了背景车辆跟驰模型。

C.2 背景车辆跟驰模型

在背景车跟驰模型中，定义有被控车和前导车。其中，被控车指跟驰模型中处于跟随行驶状态的后车，该车的纵向运动状态由跟驰模型决定；前导车指跟驰模型中的前车，具体由C.2 a) 中的方法确定。

在设定的速度范围[0, 40] m/s内，跟驰模型将根据被控车的速度、被控车与前导车的等效间距、前导车的速度，计算被控车的期望速度和期望加速度，并据此实时调整速度。

计算公式如下：

$$\dot{v} = \max \left(\dot{v}_{eb}, \min \left(\dot{v}_{max}, \left| 0.5b \left[1 - \left(\frac{v}{v_l(t)} \right)^4 \right] \right| \right) \right) * \frac{1 - \left(\frac{v}{v_l(t)} \right)^4}{\left| 1 - \left(\frac{v}{v_l(t)} \right)^4 \right|} \quad \text{..... (C. 1)}$$

$$\dot{v}_{max} = \begin{cases} \min \left(\dot{v}_g, b \left(\frac{v_l(t)\tau}{g(t)} \right)^{1.2} \left(\frac{v-v_l(t)}{v} \right)^{0.1} \right) & g(t) > v_l(t)\tau & v > v_l(t) \\ \min(\dot{v}_g, 2b) & g(t) \leq v_l(t)\tau & v > v_l(t) \\ 0.5b & & v \leq v_l(t) \end{cases} \quad \text{..... (C. 2)}$$

$$\dot{v}_g = \begin{cases} 10 & \frac{g(t)}{v-v_l(t)} \leq 1.5 \\ 3 + 7 \left(2.5 - \frac{g(t)}{v-v_l(t)} \right)^3 & 1.5 < \frac{g(t)}{v-v_l(t)} < 2.5 & v > v_l(t) \\ 3 & 2.5 \leq \frac{g(t)}{v-v_l(t)} & v > v_l(t) \\ 3 & & v \leq v_l(t) \end{cases} \quad \text{..... (C. 3)}$$

$$\dot{v}_{eb} = \begin{cases} 10 & \frac{D}{v-v_l(t)} \leq 1 \\ 15 - 5 \frac{D}{v-v_l(t)} & 1 < \frac{D}{v-v_l(t)} < 3 & W \leq 0.1 \\ 0 & 3 \leq \frac{D}{v-v_l(t)} & W \leq 0.1 \\ 0 & & W > 0.1 \end{cases} \quad \text{..... (C. 4)}$$

$$v(t) = \begin{cases} \begin{cases} \frac{v_f+v_{fd}}{2} & m=0 \\ \frac{3v_f+v_{fd}}{4} & m=1 \end{cases} & g(t) > v_l(t)\tau & g(t) \leq 120 \\ \min \left(40, v_l(t) + \frac{g(t)-v_l(t)\tau}{\frac{v}{b}+\tau} \right) & g(t) \leq v_l(t)\tau & g(t) \leq 120 \\ \frac{v_f+V_0}{2} & & g(t) > 120 \end{cases} \quad \text{..... (C. 5)}$$

式中：

\dot{v} ——被控车期望纵向加速度，m/s²；

\dot{v}_{max} ——被控车期望纵向加速度最大值，m/s²；

\dot{v}_g ——被控车跟随行驶制动纵向加速度最大值，m/s²；

\dot{v}_{eb} ——被控车紧急制动纵向加速度参考值，m/s²；

- b ——被控车基准纵向加速度，设定为 5 m/s^2 ；
- v ——被控车实时纵向速度， m/s ；
- $v(t)$ ——被控车期望纵向速度， m/s ；
- $v_l(t)$ ——前导车实时纵向速度， m/s ；
- $g(t)$ ——被控车与前导车的等效间距， m ；
- τ ——驾驶员反应时间，设定为 1.2 s ；
- D ——被控车与前导车的间距在被控车所在车道中心线上的投影长度， m ；
- W ——前导车车身左轮廓距被控车所在车道右侧车道线的最小距离， m ，前导车车身左轮廓位于被控车所在车道右侧车道线右侧为正；
- v_f ——被控车上一时刻的纵向速度，初始值为 V_0 ， m/s ；
- v_{fd} ——前导车 Ω 时间前的纵向速度，初始值为 V_0 ， m/s ； $\Omega = \tau \left(\frac{2D}{D_1}\right)^4$ ， s ；
- V_0 ——被控车初始纵向速度， m/s ；
- D_1 ——加速车道长度， m ；
- \bar{v} ——被控车纵向速度与前导车纵向速度的平均值， m/s ；
- m ——跟驰模式，前导车为BV时， $m = 0$ ，前导车为VUT时， $m = 1$ 。

注：跟驰模型的设计见参考文献[1]和[2]。

其中前导车和等效间距确定方法如下

- a) 前导车：在被控车行驶方向，存在如图C.1所示的沿车道中心线的纵向长度 120 m ，横向宽度左侧 0.5 倍车道宽 (W_l)，右侧 0.7 倍车道宽的有效跟随行驶范围；任何BV或VUT的任意车身轮廓位于该有效跟随行驶范围内时（其中，车身轮廓仅位于右侧 $0.5\sim 0.7$ 倍车道宽范围内的车辆纵向速度须大于 6 m/s ），视为有效车辆；所有有效车辆中，等效间距最小的即为前导车。

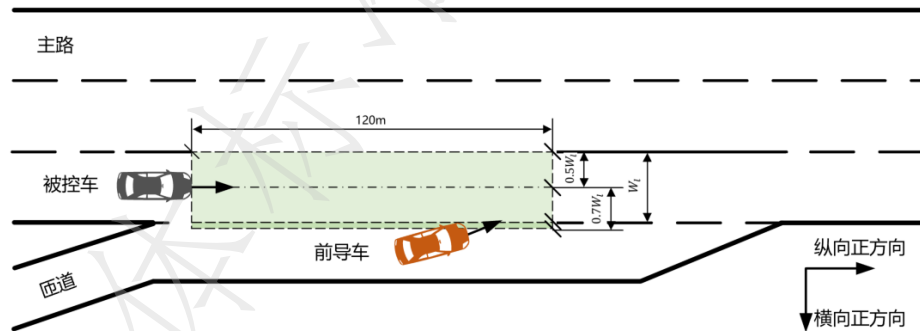


图 C.1 跟驰模型有效跟随行驶范围及前导车示意图

- b) 等效间距：为增加跟驰模型对相邻车道车辆的感知，采用等效间距 $g(t)$ 表征被控车与前导车的距离，计算公式如下：

$$g(t) = \begin{cases} \sqrt{D^2 + 6.25 \frac{D_1^2 W^2}{W_l^2}} & W > 0 \dots\dots\dots (C.6) \\ D & W \leq 0 \end{cases}$$

式中：

- D ——被控车与前导车的间距在被控车所在车道中心线上的投影长度， m ；
- D_1 ——加速车道长度， m ；
- W ——前导车车身左轮廓距被控车所在车道右侧车道线的最小距离， m ，前导车车身左轮廓位于被控车所在车道右侧车道线右侧为正；
- W_l ——车道宽度， m 。

附录 D
(规范性)
评价指标归一化参数

D.1 总则

本附录规定了评价指标归一化参数。

D.2 评价指标归一化参数

针对不同评价指标需设定不同的评价指标归一化参数。不同评价指标归一化参数如表D.1所示。

表 D.1 评价指标归一化参数

序号	符号	评价指标	单位	X_1	X_2	备注
1	L111	最小纵向间距	m	10.0	20.0	/
2	L112	最小纵向时距	s	1.3	2.6	/
3	L113	峰值加速度	m/s ²	2.0	1.0	/
4	L114	峰值减速度	m/s ²	-2.5	-1.3	/
5	L115	峰值加速度变化率	m/s ³	归一化方法见公式18		/
6	L121	完成时间	s	$1.25 \cdot t_1$	t_1	$t_1 = \begin{cases} \frac{D_1 + D_2 - \frac{V_0^2 - V_{VUT}^2}{4}}{V_0} + \frac{V_0 - V_{VUT}}{2} & V_0 > V_{VUT} \\ \frac{D_1 + D_2 - \frac{V_{VUT}^2 - V_0^2}{2.6}}{V_0} + \frac{V_{VUT} - V_0}{1.3} & V_0 \leq V_{VUT} \end{cases}$
7	L131	动能变化	m ² /s ²	$2 \cdot e_1$	e_1	$e_1 = \begin{cases} V_0^2 - V_{VUT}^2 & V_0 > V_{VUT} \\ (1.25 \cdot V_{VUT})^2 - V_{VUT}^2 & V_0 \leq V_{VUT} \end{cases}$
8	L211	最小纵向间距	m	10.0	20.0	/
9	L212	最小纵向时距	s	1.3	2.6	/
10	L221	完成时间	s	$1.25 \cdot t_2$	t_2	$t_2 = \frac{D_1 + D_2}{V_0}$
11	L231	动能变化	m ² /s ²	$\frac{7}{16} V_0^2$	0.0	/
12	L311	制动BV计数	辆	5.0	1.0	/

附 录 E
(资料性)
智能网联汽车匝道场景交通和谐性评价示例

E.1 总则

本附录提供了以某驾驶自动化系统为VUT的智能网联汽车与自然交通和谐性评价示例。

E.2 评价示例

48个测试工况下的评价结果如表E.1所示。

表 E.1 各测试工况评价结果

测试工况序号	安全性评价结果	任务完成度评价结果	交通协调性评价结果	单工况综合评价结果
1	1.000	1.000	0.624	0.670
2	1.000	1.000	0.773	0.634
3	1.000	1.000	0.707	0.661
4	1.000	1.000	0.710	0.661
5	1.000	1.000	0.731	0.660
6	1.000	1.000	0.800	0.809
7	1.000	1.000	0.805	0.912
8	1.000	1.000	0.808	0.935
9	1.000	1.000	0.581	0.584
10	1.000	1.000	0.857	0.800
11	1.000	1.000	0.868	0.916
12	1.000	1.000	0.880	0.959
13	1.000	1.000	0.627	0.655
14	1.000	-1.000	1.000	-1.000
15	1.000	-1.000	1.000	-1.000
16	1.000	-1.000	1.000	-1.000
17	1.000	1.000	0.614	0.651
18	1.000	1.000	0.765	0.708
19	1.000	1.000	0.766	0.711
20	1.000	1.000	0.773	0.715
21	1.000	1.000	0.629	0.570
22	1.000	1.000	0.651	0.633
23	1.000	1.000	0.625	0.715
24	1.000	1.000	0.622	0.764
25	1.000	1.000	0.718	0.607
26	1.000	1.000	0.846	0.767
27	1.000	1.000	0.855	0.883
28	1.000	1.000	0.856	0.917
29	1.000	1.000	0.600	0.542
30	1.000	-1.000	1.000	-1.000
31	1.000	1.000	0.860	0.797
32	1.000	1.000	0.851	0.862
33	1.000	1.000	0.705	0.769
34	1.000	1.000	0.879	0.889
35	1.000	1.000	0.882	0.889
36	1.000	1.000	0.886	0.889
37	1.000	-1.000	1.000	-1.000
38	1.000	-1.000	1.000	-1.000
39	1.000	1.000	0.847	0.727
40	1.000	1.000	0.784	0.684

表E.1 各测试工况评价结果（续）

测试工况序号	安全性评价结果	任务完成度评价结果	交通协调性评价结果	单工况综合评价结果
41	1.000	1.000	0.507	0.602
42	1.000	1.000	0.632	0.750
43	1.000	1.000	0.717	0.726
44	1.000	1.000	0.757	0.707
45	1.000	1.000	0.535	0.546
46	1.000	1.000	0.625	0.816
47	1.000	1.000	0.768	0.841
48	1.000	1.000	0.827	0.850

由表E.1可知 $l = 0$, $m = 6$, $n = 42$, 故多工况平均性能评价结果为:

$$Score_{multiScenario} = \frac{1}{42} \sum_{i=1}^{42} Score_{singleScenario_i} = 0.753 \dots\dots\dots (E.1)$$

多工况稳定性评价结果为:

$$Score_{deviation} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{42} (Score_{singleScenario_i} - Score_{average})^2}{42}} = 0.100 \dots\dots\dots (E.2)$$

由多工况平均性能评价结果和多工况稳定性评价结果查询初始等级评估矩阵可知, 多工况平均性能评价结果位于 $[0.70, 0.90]$ 分级, 多工况稳定性评价结果位于 $[0.05, 0.15]$ 分级; 故该VUT与自然交通和谐性的初始等级属于第3级。进一步由 $m = 6$ 查询等级修正矩阵可知, 负分单工况综合评价结果数量位于 $[4, 7]$ 分级; 故, 该VUT与自然交通和谐性的最终等级属于第3级, 等级评价结果如表E.2所示。

表E.2 等级评价结果示例

基本信息						
被测车辆	xxx	测试日期	xxxx. xx. xx			
评价结果						
单工况评价结果	零分单工况数量 l	<u>0</u>	负分单工况数量 m	<u>6</u>	正分单工况数量 n	<u>42</u>
多工况评价结果	多工况平均性能评价结果		<u>0.753</u>	多工况稳定性评价结果		<u>0.100</u>
等级评价结果	初始等级		第 <u>3</u> 级	最终等级		第 <u>3</u> 级
评价结论						
是否具备 智能网联汽车与自然交通和谐性	是 <input checked="" type="checkbox"/>		智能网联汽车与自然交通和谐性等级: 第 <u>3</u> 级			
	否 <input type="checkbox"/>		不具备智能网联汽车与自然交通和谐性			

参 考 文 献

- [1] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical review E, 2000, 62(2): 1805.
 - [2] Krauß S, Wagner P, Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow[J]. Physical Review E, 1997, 55(5): 5597.
-

全国团体标准信息平台