

# 团 体 标 准

T/ITS XXXX-XXXX

---

## 营运车辆自动紧急制动系统仿真测试与评价方法

Simulation test and evaluation method for advanced emergency braking system of commercial vehicles

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2021 年 8 月)

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。

发布

实施

---

中国智能交通产业联盟 发布



## 目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义、缩略语.....	1
4 一般要求.....	3
5 平台要求.....	4
6 场景工况要求.....	8
7 评价方法.....	26
8 测试流程.....	28

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》给出的规则起草。

本文件由中国智能交通产业联盟（C-ITS）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这些专利的责任。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 营运车辆自动紧急制动系统仿真测试与评价方法

## 1 范围

本文件规定了营运车辆自动紧急制动系统仿真测试的一般要求、平台要求、场景工况要求、评价方法和评价流程。

本文件适用于提出仿真测试申请的营运车辆自动紧急制动系统。

## 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 6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法

GB/T 12428 客车装载质量计算方法

GB/T 12534 汽车道路试验方法通则

JT/T 1242 营运车辆自动紧急制动系统性能要求和测试规程

QX/T111-2010 高速公路交通气象条件等级

## 3 术语和定义、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

**自动紧急制动系统** advanced emergency braking system; AEBS

自动探测目标车辆或障碍物，检测潜在的前向碰撞危险，发出预警信号提醒驾驶员，并激活本车制动系统，通过降速来避免碰撞或减轻碰撞的系统。

[JT/T 1242-2019, 定义 3.1.1]

#### 3.1.2

**仿真测试** simulation test

通过传感器仿真、车辆动力学仿真、交通参与者仿真、道路建模等技术模拟真实测试环境，完成AEBS测试工作的一种测试方法。

3.1.3

**自车 subject vehicle**

配有本标准所定义的自动紧急制动系统的车辆，或在仿真场景中模拟或代表配有本标准所定义的自动紧急制动系统的车辆。

3.1.4

**前车 forward vehicle**

位于自车行驶道路前方的车辆，或在仿真场景中模拟或代表位于自车行驶道路前方的车辆。

3.1.5

**目标车 target vehicle**

在自车前方行驶轨迹线上，距离自车最近的前车，它是自动紧急制动系统工作时所针对的对象。

3.1.6

**碰撞预警 collision warning**

AEBS 向驾驶员发出碰撞危险提醒信息。

[JT/T 1242-2019, 定义 3.1.5]

3.1.7

**相邻车道 adjacent lane**

和自车所行驶的车道共用一条车道边界的行车车道，并且与自车行驶方向相同。

[JT/T 1242-2019, 定义 3.1.7]

3.1.8

**车间距离 clearance**

从目标车辆车尾到自车车头的距离。

[JT/T 1242-2019, 定义 3.1.8]

3.1.9

**紧急制动阶段 emergency braking phase**

AEBS 向自车发出制动指令要求，自车以至少  $4 \text{ m/s}^2$  的减速度开始减速的阶段。

[JT/T 1242-2019, 定义 3.1.9]

3.1.10

**相对车速 relative velocity**

自车与目标车辆的纵向车速之差，计算方法见公式 (1)：

$$v_r(t) = v_{SV}(t) - v_{TV}(t) \quad (1)$$

式中：

$v_r(t)$ ——相对车速，单位为米每秒 (m/s)；

$v_{SV}(t)$ ——自车车速，单位为米每秒（m/s）；

$v_{TV}(t)$ ——目标车辆的车速，单位为米每秒（m/s）。

[JT/T 1242-2019，定义 3.1.12]

### 3.1.11

**距离碰撞时间 time to collision**

在  $t$  时刻，自车与目标障碍物发生碰撞所需的时间，计算方法见公式（2）：

$$T_{cr} = \frac{x_c(t)}{v_r(t)} \quad (2)$$

式中：

$T_{cr}$ ——距离碰撞时间，单位为秒（s）；

$x_c(t)$ ——车间距离，单位为米（m）。

[JT/T 1242-2019，定义 3.1.13]

## 3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AEBS：自动紧急制动系统（Advanced Emergency Braking System）

TTC：距离碰撞时间（Time To Collision）

## 4 一般要求

### 4.1 被测对象要求

#### 4.1.1 被测对象构成

被测对象构成应符合 JT/T1242-2019 中 4.1 的规定。

#### 4.1.2 被测对象感知

被测对象的感知系统可由软、硬件模拟信号的方式进行场景模拟，例如毫米波雷达、摄像头、激光雷达、超声波雷达、GPS 定位。被测对象的感知系统也可以通过车路通信的方式接收仿真系统模拟的场景信息。

#### 4.1.3 被测对象接口

被测对象应具备相应的在环仿真测试信号接口。

### 4.2 被测对象分类

根据需要的功能配置对 AEBS 进行分类，如表 1 所示。每行代表一种不同的系统类型，“√”表示需要这种功能配置，“×”表示不需要这种功能配置。

表 1 被测对象分类

功能配置 系统类型	碰撞预警	紧急制动	车内通信	车路通信
I	√	√	√	×
II	√	√	√	√

### 4.3 测试完整性要求

#### 4.3.1 被测对象的完整性

被测对象的功能应符合 JT/T 1242-2019 中 4.4、4.5、4.6、4.7、4.8、4.9、4.10、4.11 的规定。

#### 4.3.2 测试场景的完整性

- 4.3.2.1 测试场景应覆盖典型的车—车、车—人、车—非机动车、车—道路设施的场景；
- 4.3.2.2 组成具体场景的道路条件、交通标志、天气环境参数范围应目标感知有一定挑战性；
- 4.3.2.3 动态交通参与者的运动轨迹、速度、加速度参数范围应具有代表性；

### 4.4 测试记录及备份要求

#### 4.4.1 测试记录

测试应使用功能齐全的测试管理、测试自动化平台，对测试过程中测试产生的测试结果进行记录。

#### 4.4.2 测试备份

测试过程中使用的仿真测试模型应进行保存与备份。

## 5 平台要求

### 5.1 动力学模型

#### 5.1.1 动力学模型准确性

##### 5.1.1.1 HIL 测试平台的执行端为动力学模型，动力学模型的制动性能应达到以下条件：

a) 参照 8.3 的场地制动测试方法，试验车速从 10km/h 开始，每次试验增加 10km/h 的车速，最大车速为 100km/h。在仿真环境中仿真车辆的制动能力，从减速度达到最大值  $S_{a_{max}}$  的阶跃时间为  $S_t$ ，从制动开始到车辆停止的制动距离为  $S_d$ ，平均制动减速度  $S_{a_{ii}}$ ；

b) 参照 8.3 的场地制动测试方法，试验车速从 10km/h 开始，每次试验增加 10km/h 的车速，最大车速为 100km/h。从减速度达到最大值  $F_{a_{max}}$  的阶跃时间为  $F_t$ ，从制动开始到车辆停止的制动距离为  $F_d$ ，平均制动减速度  $F_{a_{ii}}$ ；

##### 5.1.1.2 对 HIL 测试平台的执行端动力学模型的制动性能进行评价时，10 次仿真与实车制动试验对比的结果，均应满足以下 4 项条件：

- a) 动力学模型符合  $|S_{a_{max}} - F_{a_{max}}| < 0.2 \text{ m/s}^2$ ；

- b) 动力学模型符合 $|St-Ft| < 0.3 \text{ s}$ ;
- c) 动力学模型符合 $|Sd-Fd| < 2.0 \text{ m}$ 。
- d) 平均制动减速度符合 $|Sa_u - Fa_u| < 0.2 \text{ m/s}^2$

注：式中的平均制动减速度计算方法： $Sa_u = \frac{u_b^2 - u_e^2}{25.92(S_e - S_b)}$ ；式中， $u_b$  为  $0.8u_0$  的车速； $u_0$  为起始车速 (km/h)， $u_e$  为  $0.1u_0$  的车速 (km/h)； $S_b$  为  $u_0$  到  $u_b$  车辆经过的距离 (m)； $S_e$  为  $u_0$  到  $u_b$  车辆经过的距离 (m)。

### 5.1.1.3 HIL 测试平台的执行端动力学模型的操纵稳定性要求及测试方法

#### 5.1.1.3.1 蛇形试验

##### 5.1.1.3.1.1 蛇形试验测试方法

蛇形试验工况参考 GB/T 6323-2014 《汽车操纵稳定性试验方法》的第 5.3 章的试验方法，每组基准试验车速参考 GB/T 6323-2014 的第 5.4.1 章，参数的计算方法参考 GB/T 6323-2014 《汽车操纵稳定性试验方法》的第 5.4 章的数据处理方法。

##### 5.1.1.3.1.2 蛇形试验测试方法的操纵稳定性要求

各组基准车速试验的评价参数误差范围应满足表 2 的模型仿真与测试值误差范围。

表 2 蛇形试验数据对比表

序号	评价参数	模型仿真值	测试值	误差范围
1	基准车速 $V / \text{km/h}$	$V_m$	$V_t$	$\leq 5\%$
2	平均转向盘转角 $\delta / ^\circ$	$\delta_m$	$\delta_t$	$\leq 6\%$
3	平均横摆角速度 $\gamma / (^\circ)/\text{s}$	$\gamma_m$	$\gamma_t$	$\leq 8\%$
4	平均车身倾斜角度 $\phi / ^\circ$	$\phi_m$	$\phi_t$	$\leq 10\%$
5	平均侧向加速度 $\alpha / \text{m/s}^2$	$a_y$	$a_t$	$\leq 10\%$

##### 5.1.1.3.2 路径跟随试验

##### 5.1.1.3.2.1 路径跟随试验方法如下

- a) 试验工况描述：车辆在进入长度为至少为 100m 长的 250m 或 500 弯道半径的弯道之前，须达到稳定车速 5s 以上；
- b) 评价参数的计算参考 GB/T 6323-2014 《汽车操纵稳定性试验方法》的第 5.4 章的数据处理计算方法。
- c) 有效数据取值的行驶距离为 100m 的弯道路径。

##### 5.1.1.3.2.2 路径跟随试验方法模型操纵稳定性要求

各组试验车速试验的评价参数误差范围应满足表 3 的模型仿真与测试值误差范围。

表 3 路径跟随试验数据对比表

参数			评价指标		
试验车速/km/h	弯道半径/m	评价参数	模型	测试	误差
20	250	1. 平均转向盘转 角度 $\delta / ^\circ$ 2. 平均横摆角速 度 $\gamma / (^\circ)/s$ 3. 平均车身倾斜 角度 $\phi / ^\circ$ 4. 平均侧向加速 度 $\alpha / m/s^2$	$\delta_m20$	$\delta_t20$	$\leq 4\%$
			$\gamma_m20$	$\gamma_t20$	$\leq 6\%$
			$\phi_m20$	$\phi_t20$	$\leq 7\%$
			$a_m20$	$a_t20$	$\leq 8\%$
40	250		$\delta_m40$	$\delta_t40$	$\leq 4\%$
			$\gamma_m40$	$\gamma_t40$	$\leq 6\%$
			$\phi_m40$	$\phi_t40$	$\leq 7\%$
			$a_m40$	$a_t40$	$\leq 8\%$
60	500		$\delta_m60$	$\delta_t60$	$\leq 4\%$
			$\gamma_m60$	$\gamma_t60$	$\leq 6\%$
			$\phi_m60$	$\phi_t60$	$\leq 8\%$
			$a_m60$	$a_t60$	$\leq 10\%$
80	500		$\delta_m80$	$\delta_t80$	$\leq 8\%$
			$\gamma_m80$	$\gamma_t80$	$\leq 8\%$
			$\phi_m80$	$\phi_t80$	$\leq 10\%$
			$a_m80$	$a_t80$	$\leq 12\%$

### 5.1.2 动力学模型仿真频率

仿真测试过程中，动力学模型的仿真频率不低于 1000Hz。

## 5.2 传感器信号仿真真实性

### 5.2.1 摄像头

#### 5.2.1.1 视频注入方式应满足以下要求

a) 应在场景软件中建立起精确的摄像头模型,摄像头模型与实际摄像头识别相同距离的目标时,对目标识别的畸变的误差应不大于 10%,测试方法参考 8.4;

b) 摄像头仿真频率应与实际摄像头模组一致。

#### 5.2.1.2 摄像头暗箱方式应满足以下要求

a) 摄像头应置于可电动模拟俯仰姿态的转台上;

b) 暗箱应达到全遮光;

c) 显示景图像的显示屏刷新频率应不低于被测对象的刷新频率,宜 144Hz (2K) 以上;

d) 根据 8.4 进行测试,摄像头识别目标的距离与实际识别目标距离的误差应小于 10%。

### 5.2.2 毫米波雷达

#### 5.2.2.1 使用 CAN 总线直接模拟毫米波雷达目标信号,CAN 总线的目标信号模拟频率应与实际雷达目

标输出频率一致；

5.2.2.2 使用雷达模拟器模拟雷达目标信号，雷达暗箱的电磁环境应满足以下要求：

- a) 能吸收 81GHz 及以下的毫米波信号；
- b) 对毫米波信号衰减强度应不小于 25dB；
- c) 在雷达模拟器未工作之前，被测雷达在暗箱中应检测不到雷达目标；
- d) 雷达模拟器正常工作之后，被测雷达不应检测到雷达模拟器模拟的目标以外的目标；
- e) 雷达模拟器正常工作之后，至少能模拟 2 个方向的目标，每个方向上至少 1 个目标，同时至少能够模拟目标车辆切入和切出的场景。

### 5.2.3 激光雷达

5.2.3.1 按照 8.5 测试，在场景软件中，设置好激光雷达模型，激光雷达模拟将场景中的反射点云数据通过以太网端口发送至激光雷达目标识别后端。

5.2.3.2 按照 8.5 测试，场景软件中激光雷达模型输出的描述车辆外型轮廓点云的数量应与实际测试结果误差小于 10%。

## 5.3 气象环境参数

### 5.3.1 气象情况

5.3.1.1 应能按照 QX/T111-2010 中 3.1 的分级模拟不同等级的能见度影响情况。

5.3.1.2 应能按照 QX/T111-2010 中 3.2 的分级模拟不同等级的降雨强度影响情况。

5.3.1.3 应能按照 QX/T111-2010 中 3.5 的分级模拟不同等级的降雪影响情况。

### 5.3.2 光线情况

应能模拟以下部分不同级别的照度情况。

表 4 照度分级表

序号	级别	照度范围
1	1 级	照度 $\leq$ 30 (lux)
2	2 级	30<照度 $\leq$ 50 (lux)
3	3 级	50<照度 $\leq$ 100 (lux)
4	4 级	100<照度 $\leq$ 3,000 (lux)
5	5 级	3,000<照度 $\leq$ 100,000 (lux)

## 5.4 信息交互要求

5.4.1 测试平台应向被测样机传输场景信息，包括但不限于交通目标位置、交通目标角度、交通目标速度以及交通目标置信度等。

5.4.2 被测样机以一定频率向测试平台传输车辆自身信息，包括但不限于发动机转速、油门开度、挡位信息、轮速、车速、车身加速度、主缸压力、制动踏板开度、碰撞时间（TTC）等。

5.4.3 动力学模型以一定频率向测试平台传输车辆自身信息，包括但不限于发动机转速、油门开度、挡位信息、轮速、车速、车身加速度、制动踏板开度、碰撞时间（TTC）等。

5.4.4 被测样机向测试平台传输 AEBS 系统的状态信息，包括但不限于 AEBS 功能激活、预警信息、制动请求信息以及 AEBS 故障状态。

5.4.5 进行故障注入测试时，交互信息应包括被测样机硬线的开路、短路以及总线上关键信号的失效等。

## 6 场景工况要求

### 6.1 车-车碰撞场景

#### 6.1.1 追尾碰撞场景

6.1.1.1 自车在直道上行驶，旁边车道的目标车辆向左换道，导致自车追尾撞上目标车发生事故，如图 1，测试过程如下：

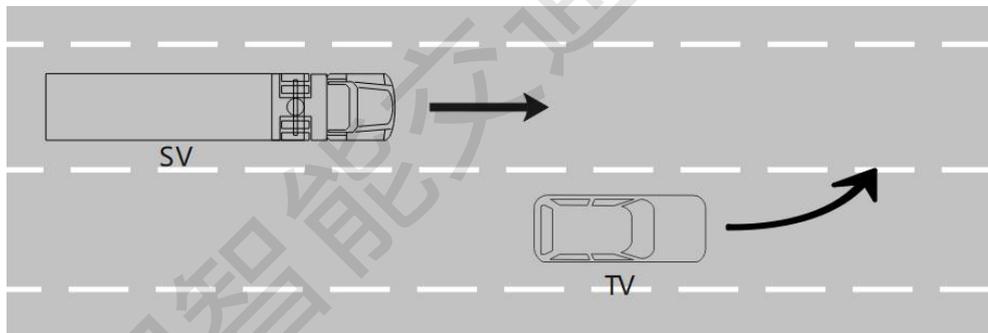


图 1 追尾碰撞场景 1

- a) 自车和目标车的行驶方向一致，两车横向距离为 1.8m，纵向距离为 200m；
- b) 测试过程中，自车保持在 70 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车保持在 60 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- c) 自车和目标车纵向距离等于 50 m 时，开始记录实验数据，目标车向左换道进入自车行驶的车道，而自车保持原速度行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.1.2 自车在直道上行驶，行驶在自车前方且与自车同车道的目标车突然减速，导致自车追尾撞目标车发生事故，如图 2，测试过程如下：

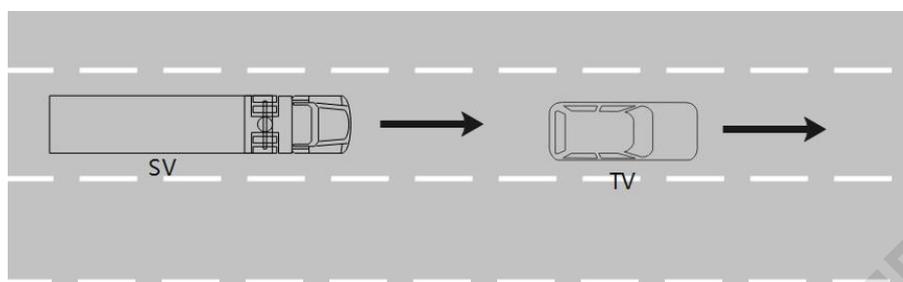


图 2 追尾碰撞场景 2

- a) 自车和目标的行驶方向一致且在相同车道内行驶，两车纵向距离为 200 米；
- b) 测试过程中，自车保持在 60 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车保持在 60 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- c) 自车和目标车纵向距离等于 50 m 时，开始记录实验数据，目标车以 4g 的减速度减速行驶，而自车保持原速度行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.1.3 自车在直道上行驶，追尾撞上了同车道停止的目标车，发生事故，如图 3，测试过程如下：

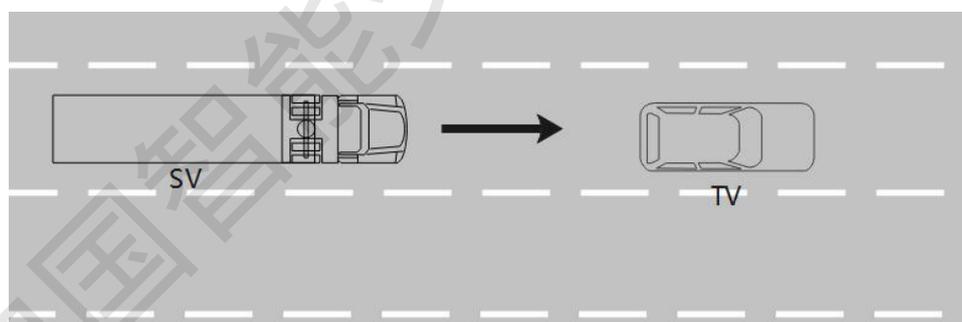


图 3 追尾碰撞场景 3

- a) 目标车应静止放置在试验道路的中间，目标车纵轴线应与测试车道中心线重合，摆放与自车的方向一致，即自车驶往目标车的尾端；
- b) 自车在距离目标车大于 150m 的距离开始慢慢加速至 40km/h，逐渐靠近目标车；
- c) 两车车间距缩小至 60m 时，达到 40km/h 稳定车速，试验开始并记录数据；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.1.4 在半径为 250m 的弯道中，邻车道同方向行驶的目标车右转换道驶入自车行驶的车道，自车来不及躲避，追尾撞上目标车，如图 4，测试过程如下：

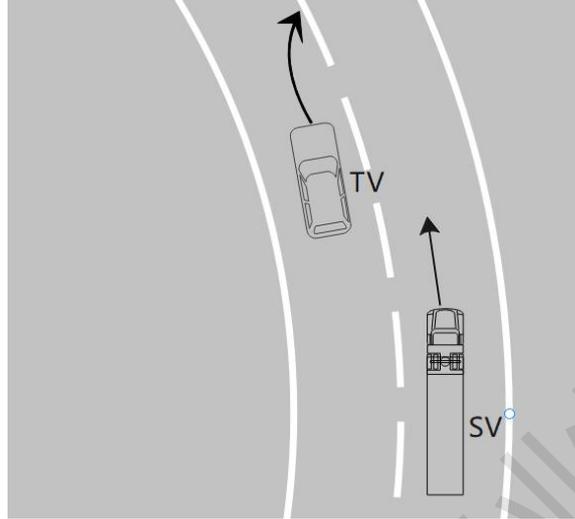


图 4 追尾碰撞场景 4

- a) 自车和目标车均在半径为 250m 的弯道中同向行驶，两车横向距离为 1.8m，纵向距离为 100m；
- b) 测试过程中，自车保持在 50 km/h 的速度沿弯道行驶，目标车保持在 40 km/h 的速度沿弯道行驶；
- c) 自车和目标车纵向距离等于 50 m 时，开始记录实验数据，目标车向右换道进入自车行驶的车道，而自车保持原速度行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.1.5 自车在弯道上跟随前面目标车行驶，前方目标车突然减速，自车来不及反应，追尾撞上前面目标车，如图 5，测试过程：

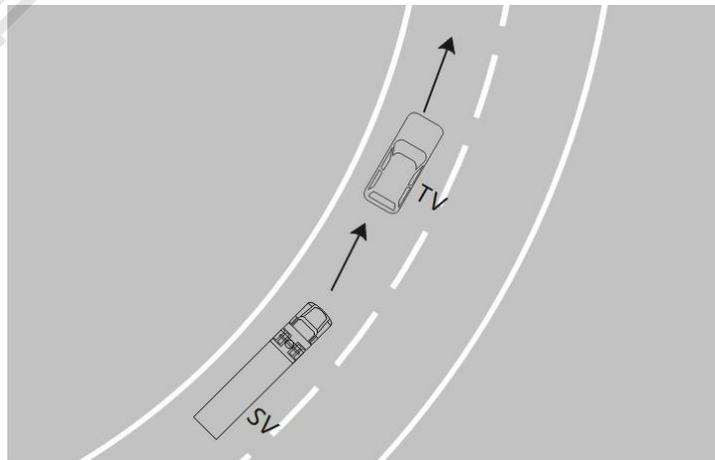


图 5 追尾碰撞场景 5

- a) 自车和目标车均在半径为 250m 的弯道中同车道同向行驶，两车纵向距离为 100m；
- b) 测试过程中，自车保持在 50 km/h 的速度沿弯道行驶，目标车保持在 50 km/h 的速度沿弯道行驶；
- c) 当目标车以 4g 的减速度减速行驶时，开始记录实验数据，而自车保持原速度行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.1.1.6 自车在半径为 500m 的弯道上行驶，追尾撞上了同车道停止的目标车，如图 6，测试过程如下：

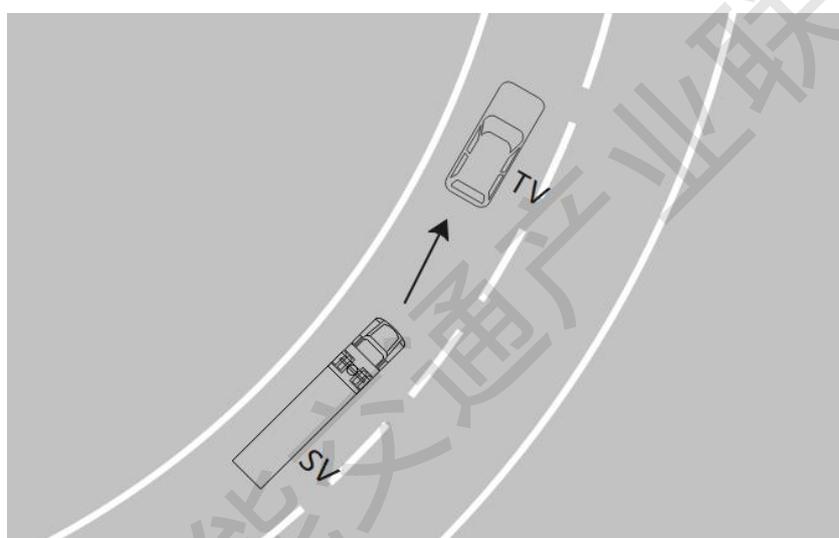


图 6 追尾碰撞场景 6

- a) 目标车应静止放置在试半径为 500 米的弯道上，目标车摆放与自车的方向一致，即自车驶往目标车的尾端；
- b) 自车在距离目标车大于 150m 的距离开始慢慢加速至 40km/h，逐渐靠近目标车；
- c) 两车车间距缩小至 60m 时，达到 40km/h 稳定车速，试验开始并记录数据；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

## 6.1.2 正面碰撞场景

6.1.2.1 自车在直道上行驶，目标车在左转换道时与对向直行的自车相撞，如图 7，测试过程如下：

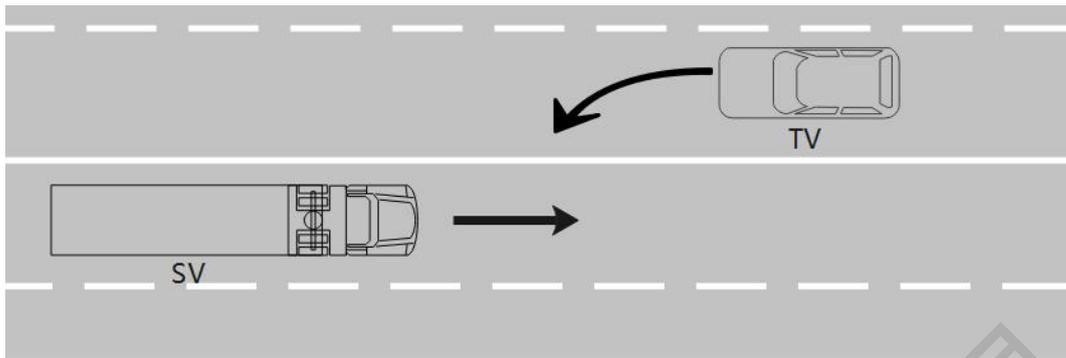


图 7 正面碰撞场景 1

- a) 自车和目标车的行驶方向相反，两车横向距离为 1.8m，纵向距离为 200m；
- b) 测试过程中，自车保持在 60 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车保持在 70 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- c) 自车和目标车纵向距离等于 50 m 时，开始记录实验数据，目标车向左换道进入自车行驶的车道，而自车保持原速度行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.2.2 在自车进入半径为 500m 的弯道时，与对向行驶在同一弯道中的目标车相撞，如图 8，测试过程如下：

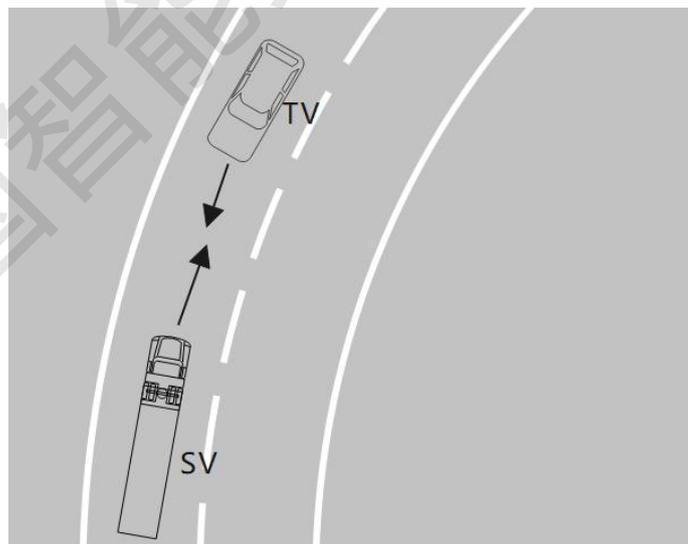


图 8 正面碰撞场景 2

- a) 自车和目标车的行驶方向相反且在同车道上行驶；
- b) 自车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车 30km/h 的速度沿弯道行驶；
- c) 当自车即将进入半径为 500m 的弯道时，开始记录实验数据，目标车仍以 30km/h 的速度沿弯

道行驶；

d) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

6.1.2.3 在自车进入半径为 500 米的弯道时,与对向行驶在弯道中左转换道进入自车行驶的车道中的目标车相撞,如图 9,测试过程如下:

a) 自车和目标车的行驶方向相反且横向距离为 1.8m,自车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶,目标车加速至 30km/h 的速度沿弯道行驶;

b) 当自车即将进入半径为 500m 的弯道时,开始记录实验数据,目标车仍以 30km/h 的速度左换道进入自车行驶的车道;

c) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

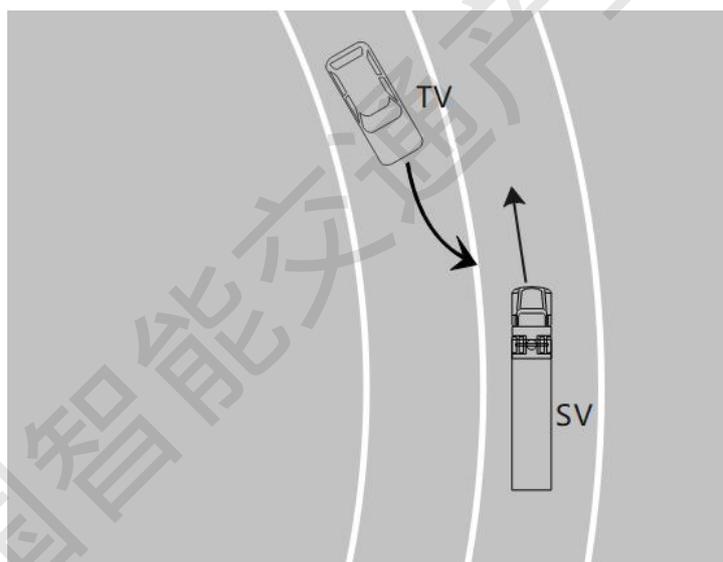


图 9 正面碰撞场景 3

### 6.1.3 侧面碰撞场景

6.1.3.1 左转信号灯为绿色,直行的信号灯为红色时,自车左转穿过十字路口与从相反道路方向驶来的闯红灯的目标车相撞,发生事故,如图 10,测试过程如下:

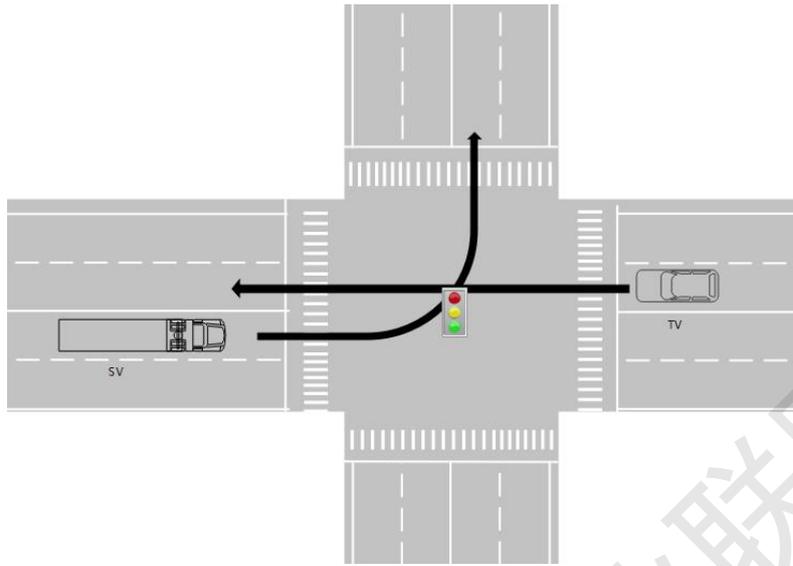


图 10 侧面碰撞场景 1

- a) 自车和目标车的行驶方向相反且横向距离为 1.8m，自车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- b) 在即将进入十字路口时，左转信号灯为绿色，直行的信号灯为红色时，开始记录实验数据，自车以原车速左转穿过十字路口，目标车以 50km/h 的速度直行通过路口；
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.3.2 目标车没注意到停车让行的标志，没停车观望然后直行过路口，与垂直方向上直行过路口的自车相撞，发生事故，如图 11，测试过程如下：

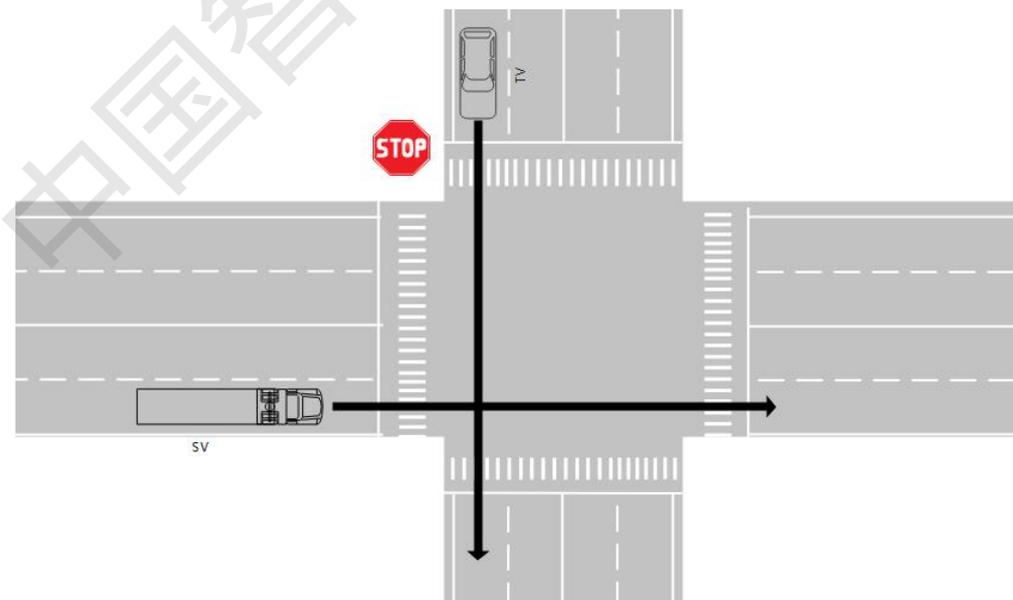


图 11 侧面碰撞场景 2

- a) 自车和目标车的行驶方向垂直，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- b) 目标车在即将进入带有停车让行的标志牌时，开始记录实验数据，自车以原速度直行通过十字路口，目标车以原速度直行通过十字路口；
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.3.3 目标车在经过无信号灯的路口时，没有注意到停车让行的标志，没停车观望然后左转弯过路口，与垂直方向上直行过路口的自车相撞，发生事故，如图 12，测试过程如下：

- a) 自车和目标车的行驶方向垂直，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- b) 目标车在即将进入带有停车让行的标志牌时，开始记录实验数据，目标车以原速度左转通过十字路口，自车以原速度直行通过十字路口；
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

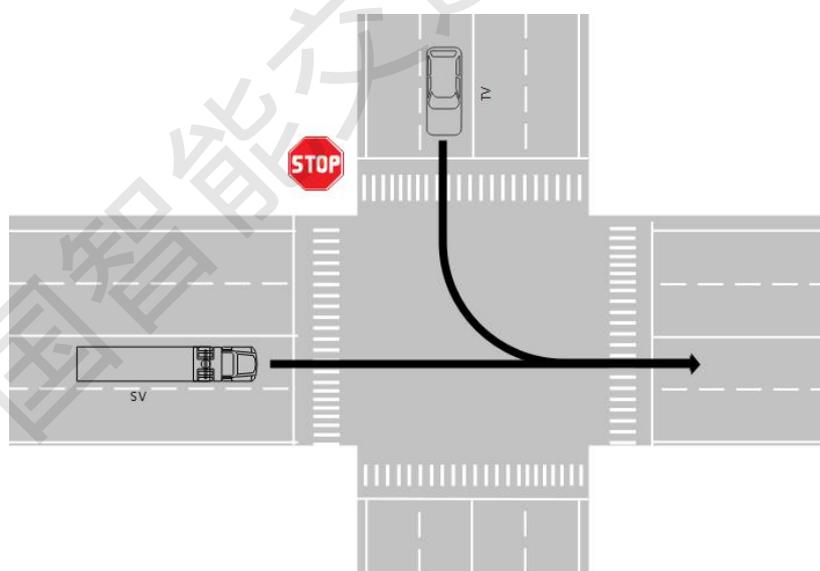


图 12 侧面碰撞场景 3

6.1.3.4 红绿灯直行的信号灯为绿时，自车在有红路灯的十字路口直行，与垂直道路上右转的目标车相撞，如图 13，测试过程如下：

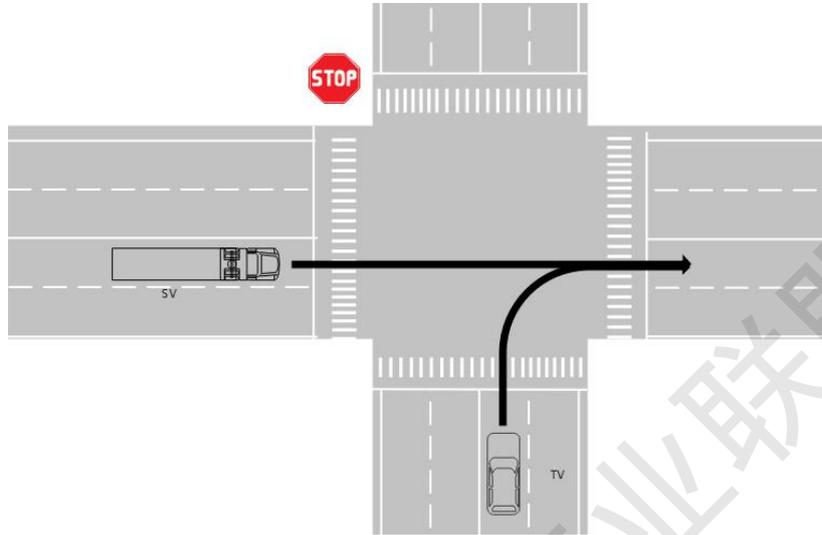


图 13 侧面碰撞场景 4

- a) 自车和目标车的行驶方向垂直，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 55km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- b) 当自车所在车道直行的信号灯为绿时，开始记录实验数据，自车以原速度直行通过十字路口，目标车以原速度右转进入与自车相同的车道；
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.3.5 十字路口对向车道的目标车左转弯驶入自车行驶的车道，自车在直行经过路口时撞上目标车，如图 14，测试过程如下：

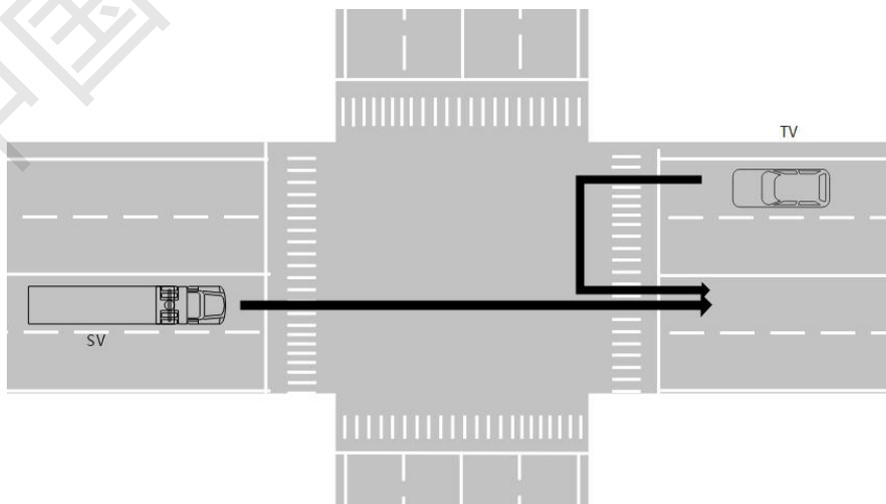


图 14 侧面碰撞场景 5

- a) 自车和目标车的行驶方向相反，两车横向距离为 1.8m，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- b) 在两车即将进入十字路口时，开始记录实验数据，自车以原始速度选择直行通过路口，1s 后目标车往自车行驶车道的方向掉头；
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

## 6.2 车-二轮车碰撞场景

### 6.2.1 二轮车追尾碰撞场景

6.2.1.1 在直道中，自车直行，与邻道左转换道的二轮车追尾相撞，如图 115，测试过程如下：

- a) 自车和目标车的行驶方向一致，两车横向距离为 1.8m，纵向距离为 200m；
- b) 测试过程中，自车保持在 70 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车保持在 20 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- c) 自车和二轮车纵向距离等于 40 m 时，开始记录实验数据，目标车向左换道进入自车行驶的车道，而自车保持原速度行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

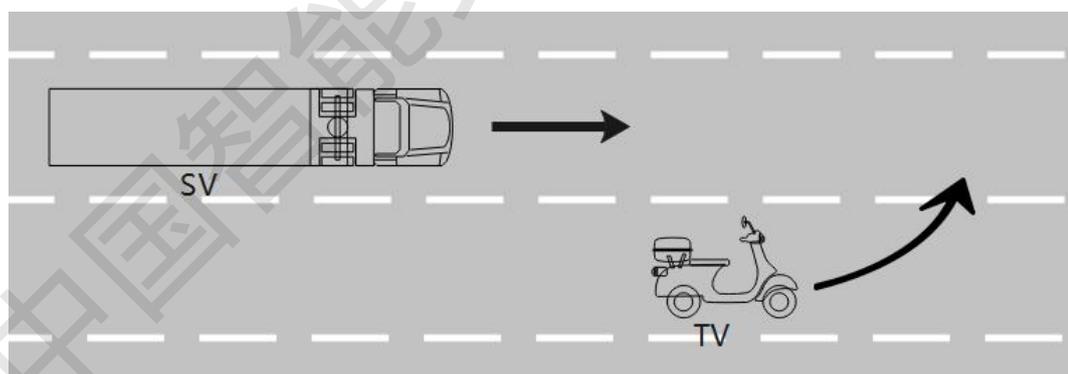


图 15 二轮车追尾场景 1

6.2.1.2 自车在直道上行驶，二轮车沿道路直行，自车追尾撞上二轮车，发生事故，如图 16，测试过程如下：

- a) 自车和二轮车的行驶方向一致，两者纵向距离为 200m；
- b) 自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，二轮车以 20km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- c) 当两者纵向距离为 50m 时，开始记录实验数据，自车和二轮车仍以原始速度行驶；

d) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

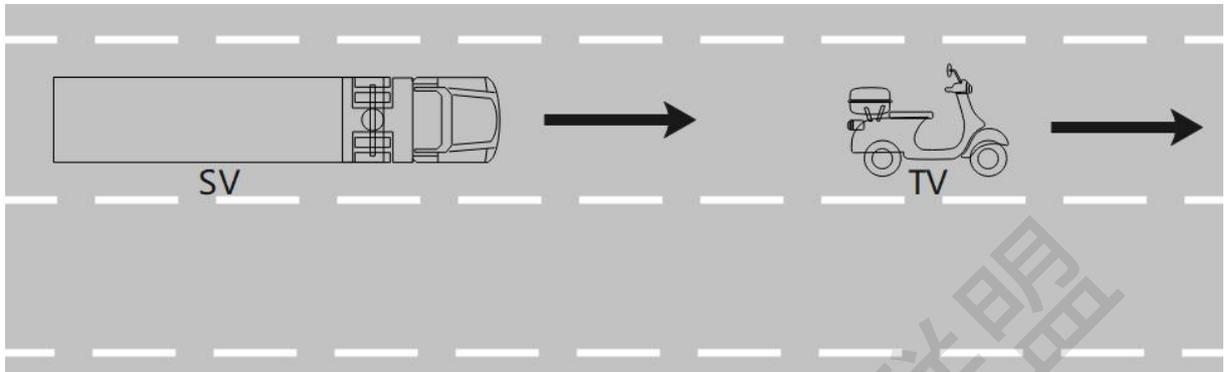


图 16 二轮车追尾场景 2

6.2.1.3 自车在直道上行驶,二轮车靠近自车所在的车道线直行,自车刮蹭二轮车,发生事故,如图 17,测试过程如下:

- a) 自车和二轮车的行驶方向一致,两者纵向距离为 200m;
- b) 自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶,二轮车以 20km/h 的速度沿自车车道线压线行驶;
- c) 当两者纵向距离为 50m 时,开始记录实验数据,自车和二轮车仍以原始速度行驶;
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

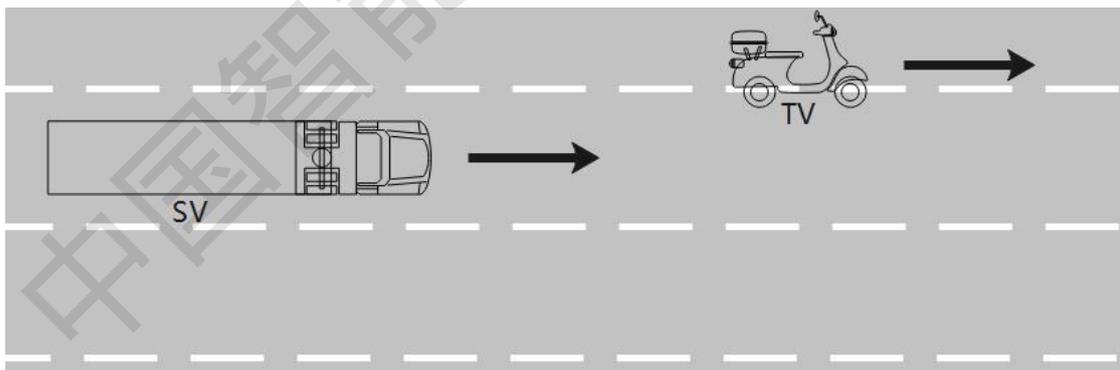


图 17 二轮车追尾场景 3

6.2.1.4 自车在直道上行驶,右转换道时追尾撞到了正在直行的目标车,发生事故,如图 18,测试过程如下:

- a) 自车和目标车的行驶方向一致,两车横向距离为 1.8m,纵向距离为 200m;
- b) 测试过程中,自车保持在 70 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶,目标车保持在 20 km/h 的速度沿车道中心线直线行驶;

c) 自车和目标车纵向距离等于 100 m 时,开始记录实验数据,自车换道进入目标车行驶的车道,而目标车保持原速度行驶;

d) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

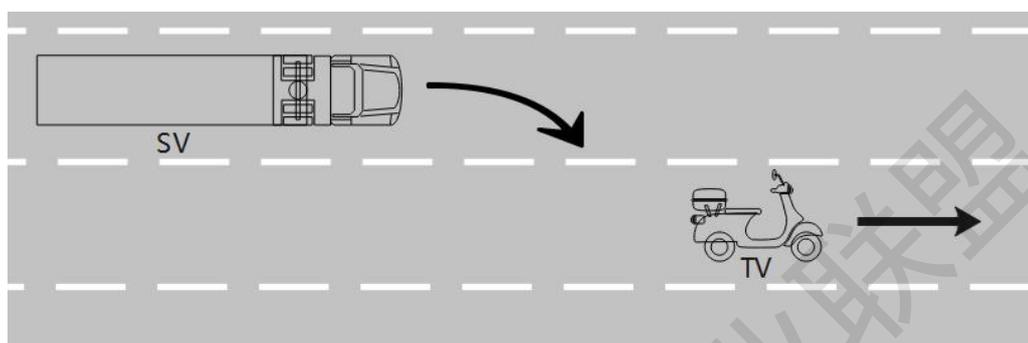


图 18 二轮车追尾场景 4

6.2.1.5 自车在十字路口右转,追尾碰上直行的目标车,发生事故,如图 19,测试过程如下:

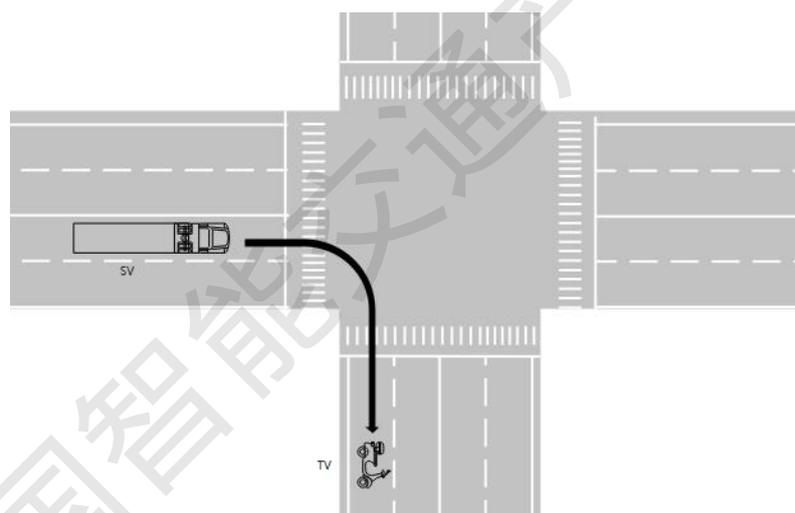


图 19 二轮车追尾场景 5

a) 自车和目标车的行驶方向垂直,自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶,目标车以 20km/h 的速度沿车道中心线直线行驶;

b) 在自车即将进入十字路口目标车刚通过十字路口直行时,开始记录实验数据,自车以原始速度选择右转通过路口,目标车以原始速度选择直行;

c) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

## 6.2.2 二轮车正面碰撞场景

6.1.2.2.1 在弯道中，自车直行，与对向在弯道中行驶的二轮车相撞，如图 20，测试过程如下：

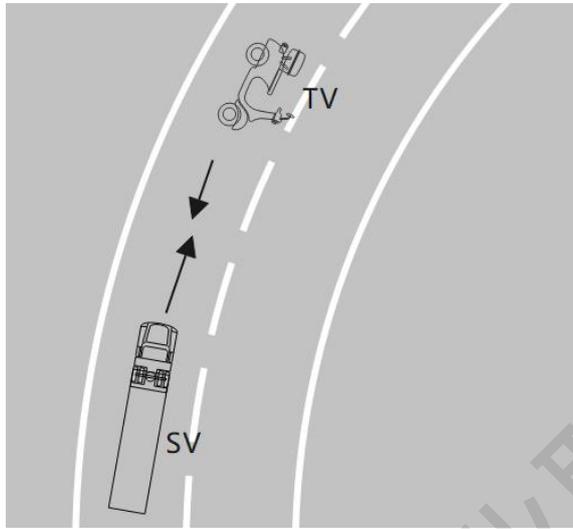


图 20 二轮车正面碰撞场景 1

- a) 自车和目标的行驶方向相反且在同车道上行驶；
- b) 自车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 20km/h 的速度沿弯道行驶；
- c) 当自车即将进入半径为 500m 的弯道时，开始记录实验数据，目标车仍以 20km/h 的速度沿弯道行驶；
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

6.1.2.2.2 目标车在弯道中左转换道进入邻车道，与邻车道上对向直行的自车相撞，如图 21，测试过程如下：

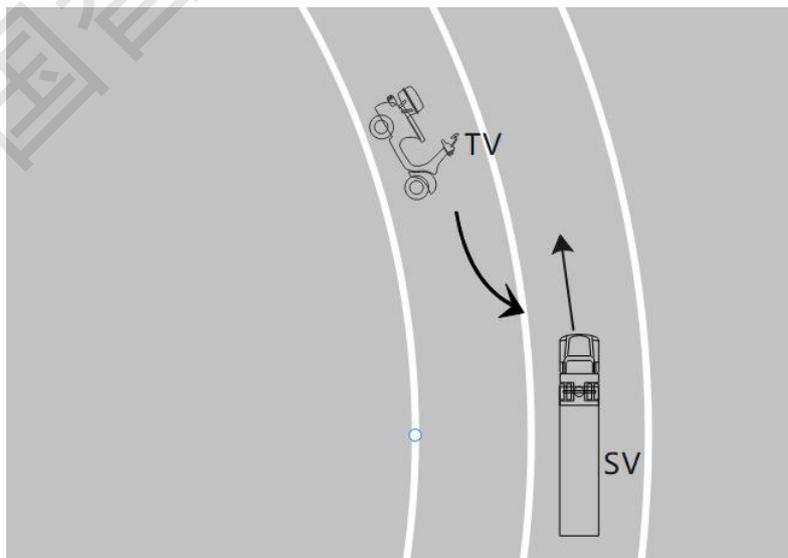


图 21 二轮车正面碰撞场景 2

- a) 自车和目标车的行驶方向相反且两车横向距离为 1.8m;
- b) 自车以 40km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 20km/h 的速度沿弯道行驶;
- c) 当自车即将进入半径为 500m 的弯道时，开始记录实验数据，目标车仍以 20km/h 的速度左转进入自车行驶的车道行驶;
- d) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

### 6.2.3 二轮车侧面碰撞场景

6.2.3.1 自车所在那侧的绿灯亮了，自车直行，邻车道货车等待左转，与货车垂直方向上的目标车闯红灯直行通过路口，自车因为视线遮挡没看到目标车，导致相撞，如图 23，测试过程如下：

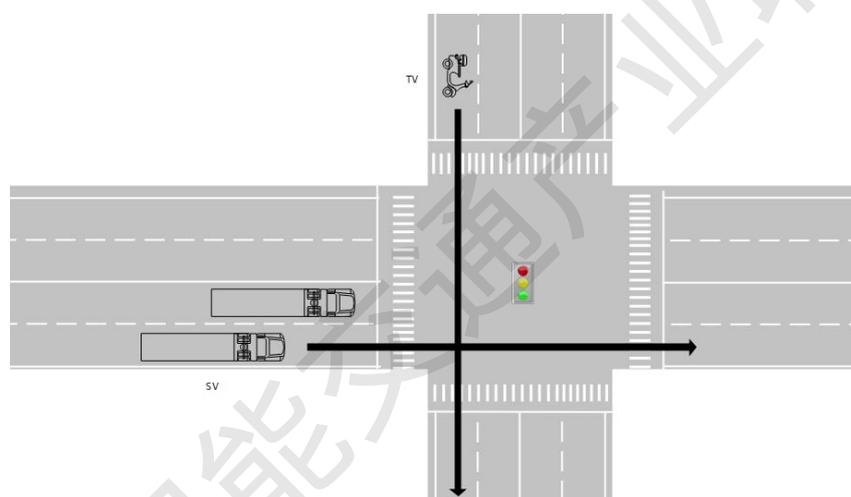


图 23 二轮车侧面碰撞场景 1

- a) 自车和目标车的行驶方向垂直，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 20km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，十字路口自车邻车道有等待左转的货车;
- b) 当目标车即将进入十字路口，自车行驶方向上直行信号灯为绿色，目标车行驶方向上直行红绿灯为红色时，开始记录实验数据，目标车以 20km/h 的速度直行通过路口，2s 后自车以 50km/h 的速度直行通过路口;
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动,或当  $TTC \leq 2.1s$  时,自车应转向或制动以避免撞上目标车,试验结束。

6.2.3.2 自车所在那侧的绿灯亮了，自车直行过十字路口，目标行驶在与货车所在车道垂直方向上车道上，目标车不遵守交通规则，闯红灯左转行驶，与直行的自车相撞，如图 24，测试过程如下：

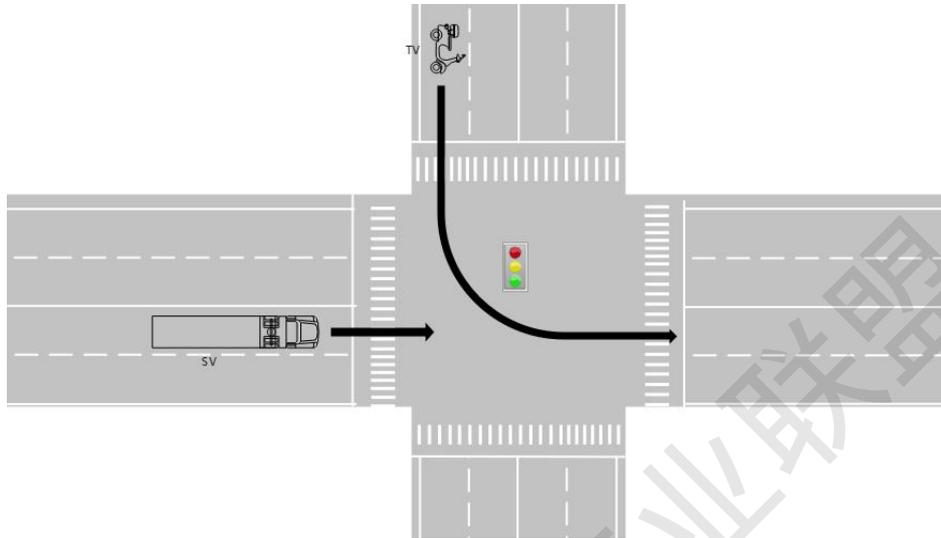


图 24 二轮车侧面碰撞场景 2

- a) 自车和目标车的行驶方向垂直，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，目标车以 20km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；
- b) 当目标车即将进入十字路口，自车行驶方向上直行信号灯为绿色，目标车行驶方向上左转红绿灯为红色时，开始记录实验数据，目标车以 20km/h 的速度左转通过路口，2s 后自车以 50km/h 的速度直行通过路口；
- c) 自车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

### 6.3 车-行人碰撞场景

6.3.1 自车在直道上直行，行人横穿道路行驶，自车撞上行人，如图 25，测试过程如下：

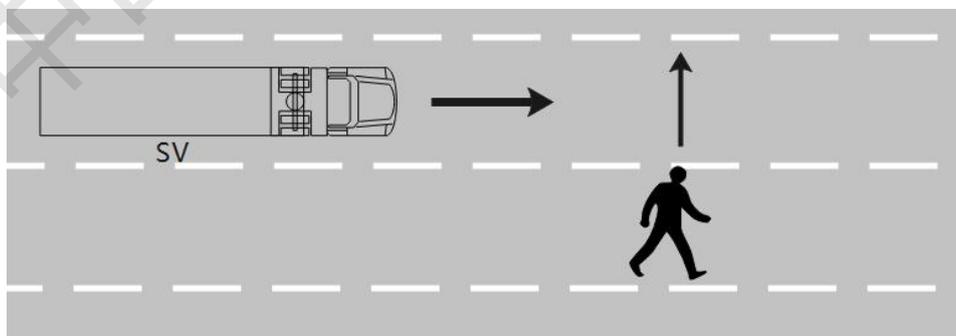


图 25 碰撞行人场景 1

- a) 自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，行人的行驶方向与自车垂直；

b) 当自车和行人的纵向距离为 15m 时，开始记录实验数据，行人以 5km/h 的速度横穿马路，目标车仍以 50km/h 的速度直行；

c) 自车检测到行人后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上行人，试验结束。

6.3.2 自车在直道上直行，行人沿道路直行，自车撞上行人，图 26，测试过程如下：

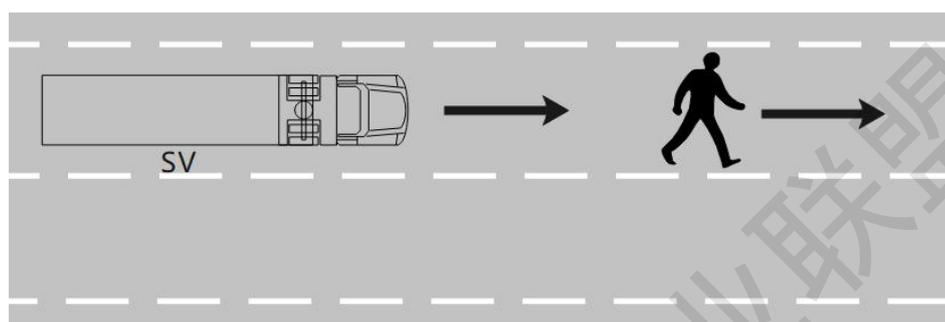


图 26 碰撞行人场景 2

a) 自车和行人的行驶方向一致，两者纵向距离为 200m；

b) 自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，行人以 5km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；

c) 当两者纵向距离为 50m 时，开始记录实验数据，自车和行人仍以原始速度行驶；

d) 自车检测到行人后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自车应转向或制动以避免撞上行人，试验结束。

6.3.3 自车在十字路口右转，与横穿道路直行的行人相撞，图 27，测试过程如下：

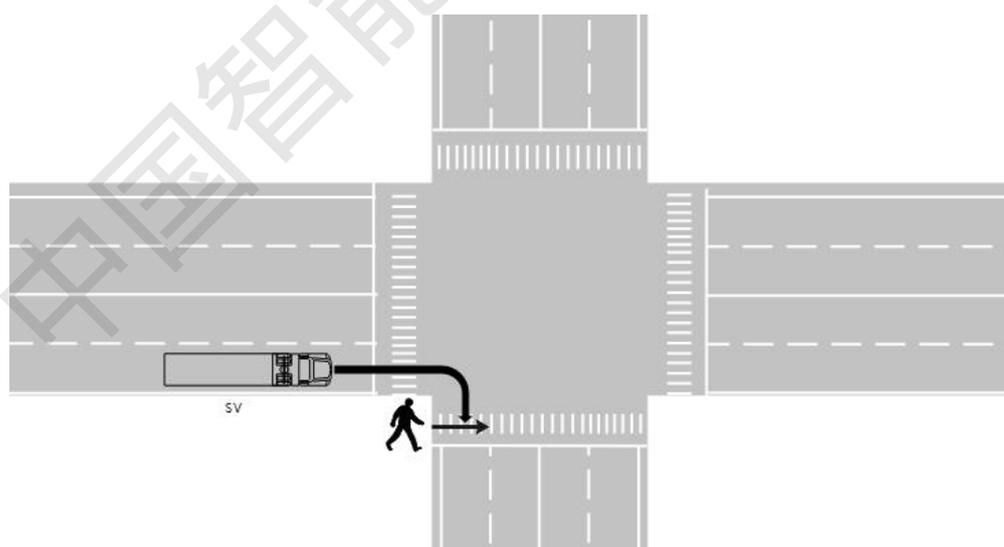


图 27 碰撞行人场景 3

a) 自车和行人的行驶方向垂直，自车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶；

b) 当自车进入十字路口时，开始记录实验数据，自车以 50km/h 的速度右转行驶，行人以 5km/h

的速度横穿过马路；

c) 自行车检测到行人后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自行车应转向或制动以避免撞上行人，试验结束。

6.3.4 在有红绿灯的路口，自行车因为直行绿灯亮了，选择直行，相邻车道的货车等待左转，自行车因为视线遮挡没有看到闯红灯过马路的行人，导致相撞，如图 28，测试过程如下：

a) 自行车和行人的行驶方向垂直，自行车以 50km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，行人以 5km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，十字路口自行车邻车道有等待左转的货车；

b) 当行人即将进入十字路口，自行车行驶方向上直行信号灯为绿色时，开始记录实验数据，行人以 5km/h 的速度直行通过路口，3s 后自行车以 50km/h 的速度直行通过路口；

c) 自行车检测到行人后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自行车应转向或制动以避免撞上行人，试验结束。

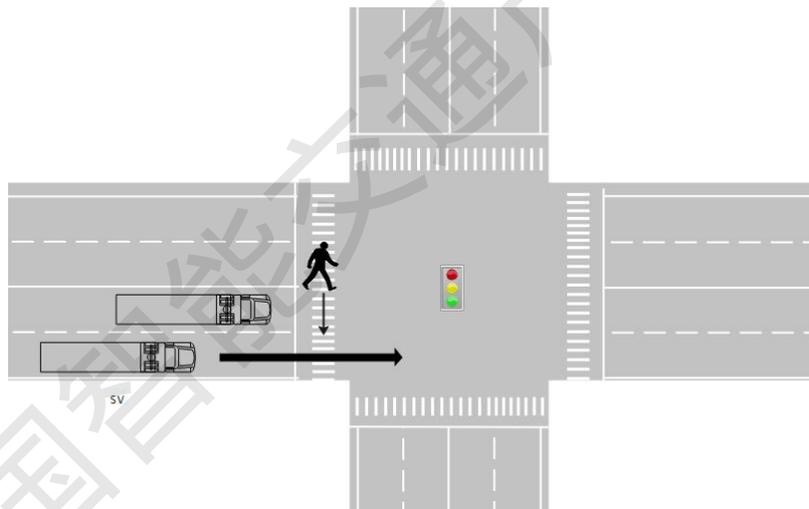


图 28 碰撞行人场景 4

6.3.5 自行车在半径为 250 米的弯道上行驶，撞上在路边行走的行人，如图 29，测试过程如下：

a) 自行车和目标车的行驶方向相同且在同车道上行驶；

b) 自行车以 60km/h 的速度沿车道中心线直线行驶，行人以 5km/h 的速度沿弯道行驶；

c) 当自行车即将进入半径为 500m 的弯道时，开始记录数据，目标车仍以 5km/h 的速度沿弯道行驶；

d) 自行车检测到目标车后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自行车应转向或制动以避免撞上目标车，试验结束。

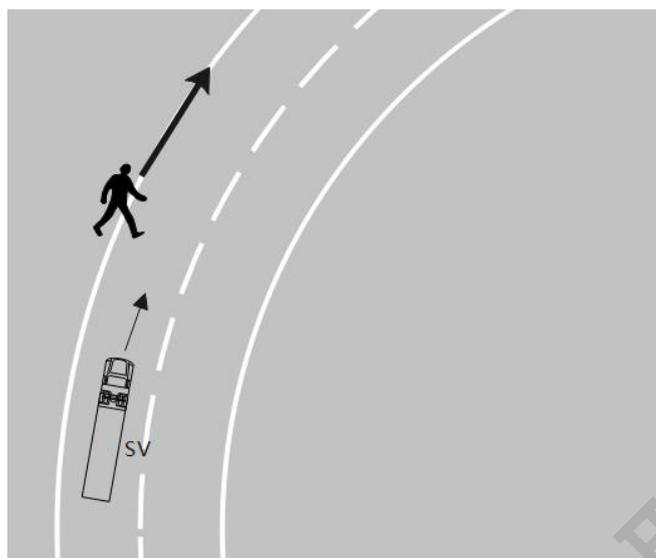


图 29 碰撞行人场景 5

#### 6.4 车-道路设施碰撞场景

6.4.1 碰撞隧道壁测试如图 30，过程如下：

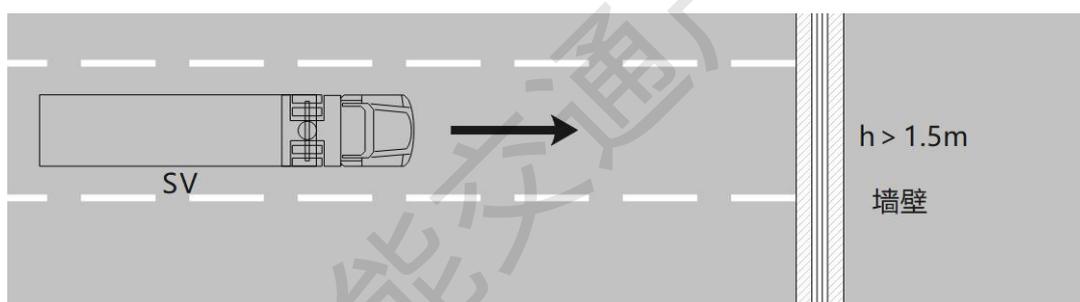


图 30 碰撞隧道壁

- 试验道路上放置模拟墙壁特性的实验墙壁，实验墙壁不低于 1.5m，且纵轴线应与测试车道中心线重合；
- 自在距离实验墙壁大于 150m 的距离开始慢慢加速至 40km/h，逐渐靠近实验墙壁；
- 自在与实验墙壁间距缩小至 60m 时，达到 40km/h 稳定车速，试验开始并记录数据；
- 自在检测到实验墙壁后触发紧急制动，或当  $TTC \leq 2.1s$  时，自在应转向或制动以避免撞上实验墙壁，试验结束。

6.4.2 碰撞隔离墩测试如图 31，过程如下：

- 试验道路上放置模拟隔离墩特性的实验隔离墩，实验隔离墩不低于 1.5m，相距 2m，且纵轴线应与测试车道中心线重合；
- 自在距离实验隔离墩大于 150m 的距离开始慢慢加速至 40km/h，逐渐靠近实验隔离墩；
- 自在与实验隔离墩间距缩小至 60m 时，达到 40km/h 稳定车速，试验开始并记录数据；

d) 自车检测到实验隔离墩后触发紧急制动, 或当  $TTC \leq 2.1s$  时, 自车应转向或制动以避免撞上实验隔离墩, 试验结束。

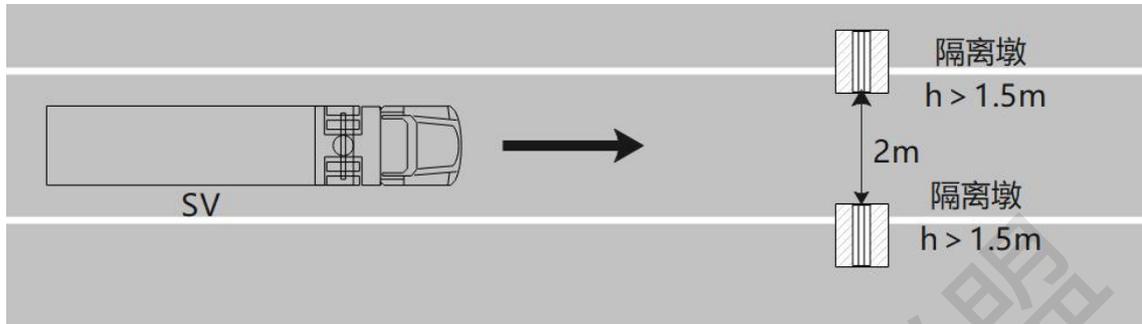


图 31 碰撞隔离墩

6.4.3 碰撞限高杆测试如图 32, 过程如下:

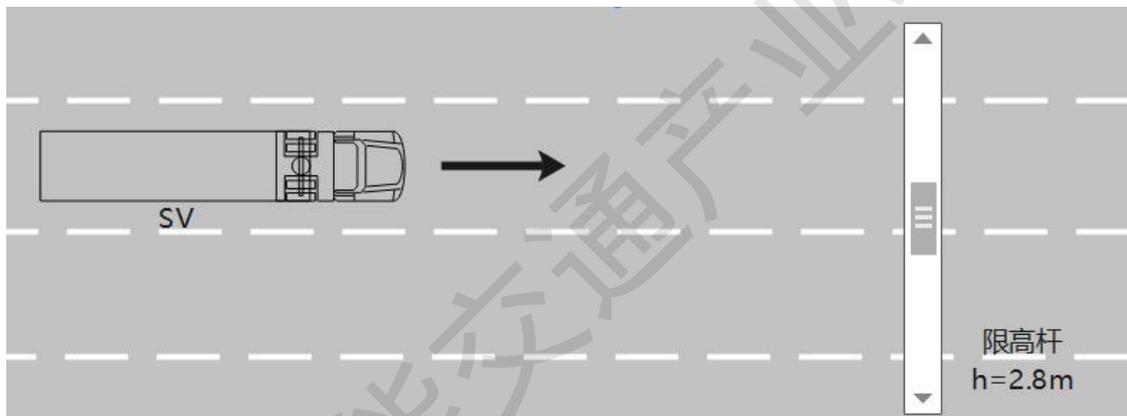


图 32 碰撞限高杆

- 试验道路上放置模拟限高杆特性的实验限高杆, 高度为 2.8m, 且纵轴线应与测试车道中心线重合;
- 自车在距离实验限高杆大于 150m 的距离开始慢慢加速至 40km/h, 逐渐靠近实验限高杆;
- 自车与实验限高杆间距缩小至 60m 时, 达到 40km/h 稳定车速, 试验开始并记录数据;
- 自车检测到实验限高杆后触发紧急制动, 或当  $TTC \leq 2.1s$  时, 自车应转向或制动以避免撞上实验限高杆, 试验结束。

## 7 评价方法

### 7.1 评价指标

#### 7.1.1 触发识别评价指标

测试应满足以下要求:

- a) TTC 大于 4.4s 不进行预警；
- b) TTC 大于 3s 不进行紧急制动；
- c) 紧急制动的减速度应不小于 0.4g；
- d) 紧急制动 1.4s 前应进行一级预警，0.8s 前应进行二级预警；
- e) 应全部能够避免碰撞发生。

### 7.1.2 误触发识别评价指标

误触发识别应满足以下要求：

- a) 不应引起误触发预警；
- b) 不应引起误触发制动。

## 7.2 评价方法

### 7.2.1 标准功能场景

7.2.1.1 预警阶段，系统在 7.1.1 中所述 TTC 范围进行预警，即为预警功能有效，评价通过；

7.2.1.2 紧急制动阶段，系统在 7.1.1 中所述 TTC 范围进行制动，避免碰撞或减速度满足 7.1.2 相关指标，评价通过。

### 7.2.2 危险交通场景

7.2.2.1 预警阶段，系统在 7.1.1 和 7.1.3 中所述 TTC 范围进行预警，即为预警功能有效，评价通过；

7.2.2.2 紧急制动阶段，系统在 7.1.1 和 7.1.3 中所述 TTC 范围进行制动，避免碰撞或减速度满足 7.1.3 相关指标，评价通过。

### 7.2.3 不同光照场景

7.2.3.1 预警阶段，系统在 7.1.1 和 7.1.4 中所述 TTC 范围进行预警，即为预警功能有效，评价通过；

7.2.3.2 急制动阶段，系统在 7.1.4 中所述 TTC 范围进行制动，避免碰撞或减速度满足 7.1.4 相关指标，评价通过。

### 7.2.4 不同天气场景

7.2.4.1 预警阶段，系统在 7.1.5 中所述 TTC 范围进行预警，即为预警功能有效，评价通过；

7.2.4.2 紧急制动阶段，系统在 7.1.5 中所述 TTC 范围进行制动，避免碰撞或减速度满足 7.1.5 相关指标，评价通过。

### 7.2.5 误触发

7.2.5.1 参考测试结果，系统在所有场景均未触发预警报警，评价通过；

7.2.5.2 参考测试结果，系统在所有场景均未触发制动，评价通过。

## 8 测试流程

### 8.1 总体测试流程

搭建好完整的测试平台后，测试展开前应根据相应测试方法对仿真测试所需的各个被测对象的模型进行校核，总体测试流程如下：

- a) 动力学模型校核；
- b) 动力学模型输入输出确定；
- c) 传感器信号模拟方式确定；
- d) 传感器模型校核；
- e) 测试场景边界参数确定；
- f) 测试接口联合接入；
- g) 测试自动化执行。

### 8.2 仿真测试执行流程

仿真测试执行流程如下：

- a) 校核完相应被测对象模型后，搭建将被测对象通过软、硬件接口与测试平台联接；
- b) 执行 6.1.1 的车—车测试场景；
- c) 执行 6.1.2 的车—两轮车测试场景；
- d) 执行 6.1.3 的车—行人测试场景；
- e) 执行 6.1.4 的车—道路设施测试场景；
- f) 执行 6.2 的误触发场景。

### 8.3 场地制动试验测试流程

本部分评价含常规制动性能试验均在车辆满载条件下进行。

#### 8.3.1 基本试验条件

试验条件如下：

- a) 载荷条件：车辆按 GB/T 12428 的规定进行加载至厂定最大总质量状态，载荷固定牢靠；
- b) 环境条件：环境温度 0℃~40℃，风速小于 5m/s；
- c) 道路条件：路面干燥、平整（ABS 试验除外），峰值附着系数大于 0.8，路面纵向；

- d) 坡度和横向坡度均不大于 1%；
- e) 车辆条件：车辆技术状况需符合 GB/T 12534 和出厂技术要求，并须进行不低于 1000km 行驶或 100 次制动器磨合（对于不足 1000km 里程时，可按 10km=1 次磨合折算），轮胎花纹深度不低于新胎时的 50%，轮胎气压为厂定气压，确保车辆制动及其他安全系统处于正常工作状态；
- f) 常规制动条件：制动机器人操作，制动机器人从触动制动踏板到踏板行程位置最大时的时间为 0.2s。

### 8.3.2 测试流程：

车辆制动初速度为  $80 \pm 2$  km/h，测量车辆的制动距离，试验程序如下：

- a) 设备安装，安装转向机器人和制动机器人，调整转向机器人路径跟随控制误差，使 60km/h 速度下直线路径跟随控制横向误差不大于 15cm；制动机器人从触动制动踏板到踏板行程位置最大时的时间为 0.2s；
- b) 制动器预热，但应保证制动器处于冷态（制动盘/鼓温度处于  $65^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  之间）；
- c) 设定制动机器人制动速度 80km/h，试验车辆加速至高于 83km/h 后，车辆在正常行 31 驶挡位滑行，触发转向机器人和制动机器人进入待执行状态，等待制动机器人进行全行程制动，使车辆停住（此时发动机不应熄火）；
- d) 记录触发车速、制动缸压力、踏板行程等总线数据以及制动距离等试验数据；
- e) 试验往返方向各进行一次；
- b) 应急情况处置：当车辆在试验过程中出现不稳定状态时，应立即终止机器人执行试验，停止紧急制动状态，由驾驶员控制车辆安全行驶，并查找分析原因，由试验负责人员确定危险状况后决定是否继续试验。

### 8.4 摄像头模型测试流程

摄像头模型测试流程如下

- a) 在场景软件中建立起与实际被测车辆相同外观尺寸的车辆模型；
- b) 在同 8.3 相同测试条件场地中，将实际车辆放置于摄像头前方距离 80 米的正前方位置，并拍摄至少 10 组图片，记录输出的距离 DF、车辆类型信息；
- c) 在场景软件中，建立同 8.3 相同测试条件，将建立起的车辆模型置于摄像头正前方 80 米的位置，并拍摄至少 10 组图片，记录输出的距离 DS、车辆类型信息；
- d)  $|DF-DS|/DF < 10\%$ 。

### 8.5 激光雷达模型测试流程

激光雷达模型测试流程如下：

- a) 在场景软件中建立起相应的激光雷达模型；
  - b) 在场景软件中建立起与实际被测车辆相同外观尺寸的车辆模型；
  - c) 在同 8.3 相同测试条件场地中，将实际车辆静置于直径为 300 米的空旷圆形广场中间位置，被测激光雷达安装位置与实际应用安装位置相同，激光雷达距离车辆 50 米；
  - d) 对标车辆车头按照 0、90、180、270 度的朝向相对激光雷达，记录不同朝向下的输出点云数量  $LF_i$ ；
  - e) 在同 8.3 相同测试条件场地中，将仿真用的车辆模型静置于直径为 300 米的空旷圆形广场中间位置，被测激光雷达安装位置与实际应用安装位置相同，激光雷达距离车辆 50 米；
  - f) 仿真模型车辆车头按照 0、90、180、270 度的朝向相对激光雷达，记录不同朝向下的输出点云数量  $LS_i$ ；
  - g)  $|LF_i - LS_i| / LF_i < 10\%$ 。
-

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟  
标准

营运车辆自动紧急制动系统仿真测试与评价方法

T/ITS XXXX-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>

2021 年 X 月第一版 2021 年 X 月第一次印刷