

# 团 体 标 准

T/ITS

-xxxx

## 自动驾驶车辆决策安全保障系统 测试规程

Test procedures and evaluation rules for safety Assurance of AV Decision Making

(征求意见稿)

本稿完成日期：2021年11月

在提交意见反馈时，请讲您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国智能交通产业联盟 发布



## 目 次

前 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义、缩略语.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 缩略语.....	2
4 自动驾驶车辆决策安全的基本功能.....	3
4.1 概述.....	3
4.2 最小安全距离.....	3
4.3 适当响应.....	5
5 自动驾驶车辆决策安全的仿真测试.....	5
5.1 仿真参数格式定义.....	5
5.2 纵向场景测试.....	6
5.3 并线场景测试.....	13
6 自动驾驶车辆决策安全的场地测试.....	15
6.1 场地测试要求.....	15
6.2 纵向场地测试.....	15
6.3 并线场地测试.....	22
7 测试车辆数据记录要求.....	23
附录 A (资料性) 测试参数公式推导.....	错误! 未定义书签。
A.1 跟车初始距离.....	28
A.2 并线场景下目标车辆纵向加速度.....	31



## 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：英特尔、交通运输部公路科学研究院、上海蔚来汽车有限公司、同济大学、北京市交通信息中心、北京百度智行科技有限公司、北汽集团新技术研究院、威马汽车科技集团有限公司、潍柴动力股份有限公司、博世汽车部件（苏州）有限公司、北京智行者科技有限公司、腾讯云计算（北京）有限责任公司、武汉光昱明晟智能科技有限公司、北京赛目科技有限公司

本文件主要起草人：朱倩影、吴向斌、田忠、焦伟贇、李茹、陈炯、毕欣、刘建峰、彭伟、王亚丽、闫涛、赵学岩、王艳华、阳东波、傅靖江、赵勍、张卓筠、吴鑫、祝浪、薛晓卿



# 自动驾驶车辆决策安全保障系统测试规程

## 1 范围

本文件为T/ITS 0116-2019 自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求的配套测试标准，针对自动驾驶车辆决策安全中的关键技术制定测试规范，为自动驾驶车辆的决策安全提供明确的评价标准。

本文件适用于3级及以上自动驾驶乘用车。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

T/ITS 0116-2019 自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求

GB/T 40429-2021 汽车驾驶自动化分级

## 3 术语和定义、缩略语

### 3.1 术语和定义

#### 3.1.1

车道线坐标系 lane-based coordinate system

以道路的中心线作为参考线，使用参考线的切线向量和法线向量建立的坐标系称为车道线参考系；沿着参考线的方向被称为纵向，参考线当前的法向被称为横向。

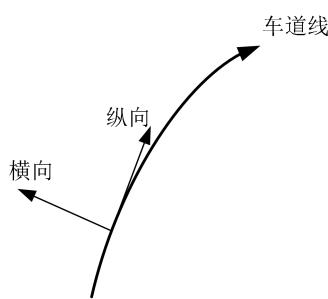


图 1 车道线坐标系

#### 3.1.2

最小纵向安全距离 minimum longitudinal distance

纵向上,如果两车之间的距离满足此最小纵向安全距离,自动驾驶车辆在前车以合理的最大的制动加速度刹车时,采取本文件定义的适当响应即可避免发生碰撞。

### 3.1.3

#### 最小横向安全距离 minimum lateral distance

横向方向如果产生了相对运动,当横向间距达到此距离时,左右两车采取本文件定义的适当响应即可避免车辆发生横向碰撞。

### 3.1.4

#### 危险工况 dangerous situation

危险工况指车辆之间的距离同时不满足最小纵向和最小横向安全距离的要求,存在碰撞可能性的状态。

### 3.1.5

#### 最小制动加速度 minimum braking acceleration

车辆进入危险工况后,采用的制动加速度的下限,由车厂根据车辆自身的性能确定。

### 3.1.6

#### 危险时间 dangerous time

危险时间包含车辆处在危险工况下的所有时刻。

### 3.1.7

#### 危险阈值时刻 danger threshold time

危险阈值时刻指车辆进入危险工况的第一时刻。

### 3.1.8

#### 反应时间 response time

车辆发现危险工况到采取适当回应之间的时间间隔。

### 3.1.9

#### 适当响应 proper response

适当回应是指进入危险工况后,车辆应采取什么措施使车辆脱离危险工况,从而避免引发碰撞。

## 3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AV: 自动驾驶车辆 (Automated Vehicle)

ODD: 运行设计域 (Operational Design Domain)

## 4 自动驾驶车辆决策安全的基本功能

### 4.1 概述

自动驾驶车辆的决策安全，是用来检查决策系统发出的指令是否符合安全性准则，从而避免自动驾驶车辆导致危险状况的发生。安全决策包括如下原则：

- a) 自动驾驶车辆应始终保持纵向安全距离；
- b) 自动驾驶车辆应始终保持横向安全距离；
- c) 自动驾驶车辆应遵循交通法规规定的通行优先级，但是某些场景下也需要考虑让行；
- d) 自动驾驶车辆要谨慎对待视野受限区域；
- e) 自动驾驶车辆如果可以通过躲避方式来避免事故，且不引发其它事故，则应当躲避。

详细描述参见T/ITS 0116-2019自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求。

### 4.2 最小安全距离

正常情况下车辆之间的相对位置如图2所示：

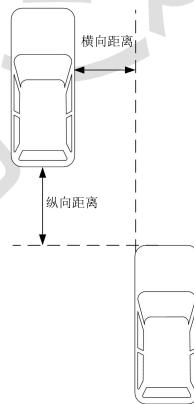


图 2 车辆之间的相对距离

最小安全距离是指自动驾驶车辆在行驶过程中需要和其他车辆保持的最小的纵向或者横向间距，即车辆与前车或者临车满足该最小间距时，前车突然以合理加速度刹车或者临车突然以合理加速度趋近时，通过自车的适当响应不会发生碰撞事故。最小安全距离的计算参见T/ITS 0116-2019自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求。这里仅列出结论和参数的参考值，以便后续测试用例使用。

最小纵向安全距离计算公式：

$$d_{min} = \left[ v_r \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} \right]_+ \dots \quad (1)$$

式中：

$\rho$ ——后车反应时间；

$a_{max,brake,ref}^{long}$  ——前车最大制动加速度；

$a_{max,accel}^{long}$ ——后车最大前进加速度；

$a_{min,brake}^{long}$ ——后车最小制动加速度；

公式(1)中各参数的参考值参见表1。

表1 最小纵向安全距离相关参数参考值

参数名称	参考值
前车最大制动加速度: ( $a_{max,brake,ref}^{long}$ )	6.1 m/s <sup>2</sup>
后车反应时间: ( $\rho$ )	厂商根据车辆实际性能确定
后车最大前进加速度: ( $a_{max,accel}^{long}$ )	厂商根据车辆实际性能确定
后车最小制动加速度: ( $a_{min,brake}^{long}$ )	厂商根据车辆实际性能确定

最小横向安全距离的计算公式：

$$d_{min} = \mu + \left[ \frac{v_1 + v_{1,\rho}}{2} \rho_1 + \frac{v_{1,\rho}^2}{2a_{1,min,brake}^{lat}} - \left( \frac{v_2 + v_{2,\rho}}{2} \rho_2 - \frac{v_{2,\rho}^2}{2a_{2,min,brake,ref}^{lat}} \right) \right]_+ \dots \quad (2)$$

$$v_{1,\rho} = v_1 + \rho_1 a_{1,max,accel}^{lat}$$

$$v_{2,\rho} = v_2 - \rho_2 a_{2,max,accel,ref}^{lat}$$

式中：

$v_1$ ——自行车的横向速度；

$v_2$ ——邻车车辆的横向速度；

$\rho_1$ ——自车的反应时间；

$\rho_{2,ref}$ ——邻车车辆的反应时间;

$\mu$ ——横向扰动范围；

$a_{1, max\ accel}^{lat}$ ——自车最大横向加速度；

$a_{2, max, accel}^{lat}$ ——邻车车辆最大横向加速度;

$a_{lat,1\min\brake}$ ——自行车最小制动加速度的横向分量；

$a_{3, min, brake, ref}^{lat}$ ——邻车车辆最小制动加速度的横向分量;

$v_{1,0}$ ——反应时间结束时刻自行车的横向车速;

$v_{2,\rho}$ ——反应时间结束时刻邻车车的横向车速。

注：考虑方向性， $v_{1,\rho} \geq 0$ ； $v_{2,\rho} \leq 0$ 。

公式（2）中各参数的参考值参见表2。

表2 最小横向安全距离相关参数参考值

参数名称	参考值
横向扰动范围 ( $\mu$ )：	20cm
邻车车辆反应时间：( $\rho_{2,ref}$ )	0.5s
邻车车辆横向最大加速度：( $a_{2,max,accel,ref}^{lat}$ )	0.68m/s <sup>2</sup>
邻车车辆合理横向制动加速度：( $a_{2,min,brake,ref}^{lat}$ )	0.45m/s <sup>2</sup>
自车反应时间：( $\rho_1$ )	厂商根据车辆实际性能确定
自车横向最大加速度：( $a_{1,max,accel}^{lat}$ )	厂商根据车辆实际性能确定
自车横向合理横向制动加速度：( $a_{1,min,brake}^{lat}$ )	厂商根据车辆实际性能确定

#### 4.3 适当响应

当两车之间的距离不满足最小安全距离要求时，会认为车辆进入了危险工况，具体判定条件参见T/ITS 0116-2019自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求。危险工况下的适当响应包括：

- 进入纵向危险工况的第一时刻称作纵向危险阈值时刻 $t_b^{long}$ ，从这一时刻起，后车在反应时间内以不大于最大纵向加速度加速，反应时间后应改用不小于最小纵向制动加速度减速，直到完全停止或者危险工况解除；
- 进入横向危险工况的第一时刻称作横向危险阈值时刻 $t_b^{lateral}$ ，从这一时刻起，自动驾驶车辆在反应时间内以不大于最大横向加速度加速，反应时间后应改用不小于最小横向制动加速度减速，直到横向速度为零或者危险工况解除。

### 5 自动驾驶车辆决策安全的仿真测试

#### 5.1 仿真参数格式定义

使用表达式对参数赋值范围及赋值方式进行描述。

示例 1：

参数V的赋值范围为1.0km/h-12.0km/h，步长选取为2.0km/h，应采用V=[1.0: 12.0: 2.0] km/h表达式进行描述；

示例 2:

参数V的赋值为赋值范围内的任意值时, 应采用V=[1.0:12.0] km/h表达式进行描述;

示例 3:

参数V的赋值方式非均匀分布, 如取值为1.0km/h、5.0km/h和12.0km/h三个值的任意值, 应采用V={1.0, 5.0, 12.0} km/h表达式进行描述。

## 5.2 纵向场景测试

### 5.2.1 直道跟车

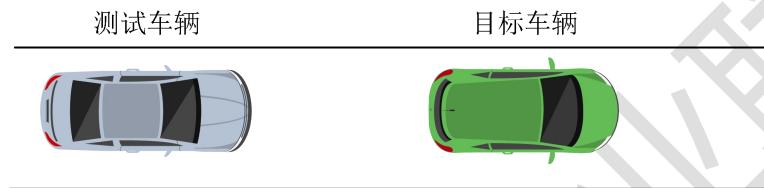


图 3 直线跟车测试

5.2.1.1 前后车均匀速行驶, 前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

#### 5.2.1.1.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、直道、车道线清晰。

#### 5.2.1.1.2 输入参数

- c) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- d) 测试车辆最大加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- e) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- f) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- g) 安全距离裕量 $\epsilon$ 。

注: 文中所提加速度, 代入公式计算时应采用无符号值; 所有速度代入公式时需换算成m/s。

#### 5.2.1.1.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度, 分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 50\%, v_{max} * 80\%, v_{max}\}$ km/h
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度, 设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0) - 5$  km/h;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度, 设定为  $6.1m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0\_min}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离;

$$d_{0\_min} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + d_{min}(t_0) \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$d_{min}(t_0) = \left[ v_r(t_0) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} \right]_+ + \epsilon$$

式中：

$t_1$ ——初始时刻  $t_0$  到前车开始刹车时刻  $t_{fb}$  经过的时间；

$v_r(t_0)$ ——测试车辆初始速度；

$v_f(t_0)$ ——目标车辆初始速度；

$\rho$ ——测试车辆反应时间；

$a_{max,accel}^{long}$ ——测试车辆最大加速度；

$a_{min,brake}^{long}$ ——测试车辆最小制动加速度；

$a_{max,brake}^{long}$ ——目标车辆减速度；

$\epsilon$ ——安全距离裕量。

注：该公式的推导过程详见资料性附录A.1.2.1。

f)  $d_{0\_max}$ ：测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离。

$$d_{0\_max} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + v_r(t_0) * \frac{v_f(t_0)}{a_{max,brake}^{long}} + d_{min}(t_0) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

$$d_{min}(t_0) = \left[ v_r(t_0) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} \right]_+ + \epsilon$$

式中：

$t_1$ ——初始时刻  $t_0$  到前车开始刹车时刻  $t_{fb}$  经过的时间；

$v_r(t_0)$ ——测试车辆初始速度；

$v_f(t_0)$ ——目标车辆初始速度；

$\rho$ ——测试车辆反应时间；

$a_{max,accel}^{long}$ ——测试车辆最大加速度；

$a_{min,brake}^{long}$ ——测试车辆最小制动加速度；

$a_{max,brake}^{long}$ ——目标车辆减速度；

$\epsilon$ ——安全距离裕量。

注：该公式的推导过程详见资料性附录A.1.2.2。

#### 5.2.1.1.4 测试步骤

- a)  $t_0$ 时刻, 测试车辆(后车)和目标车辆(前车)均匀速沿车道中心线行驶, 后车速率大于前车, 且两车的初始距离在 $[d_{0,min}: d_{0,max}]$ 之间。
- b)  $t_{fb}$ 时刻, 目标车辆以制动加速度 $a_{max,brake}^{long}$ 进行刹车(注:  $t_{fb}$ 为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间);
- c)  $t_s$ 时刻, 测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 5.2.1.1.5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$ 时间内目标车辆与测试车辆之间的距离 $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻 $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间 $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$ 时间内测试车辆的实时加速度 $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$ 时间内测试车辆的实时制动加速度 $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 5.2.1.1.6 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \epsilon, t \in [t_{fb}: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long}$ 。

### 5.2.1.2 后车以最大加速度加速时, 前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

#### 5.2.1.2.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、直道、车道线清晰

#### 5.2.1.2.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大前进加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆ODD运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量 $\epsilon$ 。

#### 5.2.1.2.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度, 分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 40\%, v_{max} * 60\%\} km/h$ ;
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度, 设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0)$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度, 设定为  $6.1 m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0\_min}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离;

$$d_{0\_min} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * t_1^2 + d_{min}(t_{fb}) \dots \dots \dots (5)$$

$$d_{min}(t_{fb}) = \left[ (v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * t_1) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * t_1 + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} \right]_+ + \epsilon$$

$$d_{0\_min} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * t_1^2 + d_{min}(t_{fb})$$

式中:

$t_1$ ——初始时刻  $t_0$  到前车开始刹车时刻  $t_{fb}$  经过的时间;

$v_r(t_0)$ ——测试车辆初始速度;

$v_f(t_0)$ ——目标车辆初始速度;

$\rho$ ——测试车辆反应时间;

$a_{max,accel}^{long}$ ——测试车辆最大加速度;

$a_{min,brake}^{long}$ ——测试车辆最小制动加速度;

$a_{max,brake}^{long}$ ——目标车辆减速度;

$\epsilon$ ——安全距离裕量。

注: 该公式的推导过程详见资料性附录 A. 1. 3. 1。

- f)  $d_{0\_max}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离;

$$d_{0\_max} = v_r(t_0) * t_2 + a_{max,accel}^{long} * t_1 * t_2 + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * (t_1^2 + t_2^2) - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} + d_{min}(t_{fs}) \dots \dots \dots (6)$$

$$d_{min}(t_{fs}) = \left[ (v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * (t_1 + t_2)) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * (t_1 + t_2) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} \right]_+ + \epsilon$$

式中:

$t_1$ ——初始时刻  $t_0$  到前车开始刹车时刻  $t_{fb}$  经过的时间;

$t_2$ ——前车开始刹车时刻  $t_{fb}$  到前车停止时刻  $t_{fs}$  经过的时间;

$v_r(t_0)$ ——测试车辆初始速度;

$v_f(t_0)$ ——目标车辆初始速度;

$\rho$ ——测试车辆反应时间;

$a_{max,accel}^{long}$ ——测试车辆最大加速度;

$a_{min,brake}^{long}$ ——测试车辆最小制动加速度;

$a_{max,brake}^{long}$ ——目标车辆减速度;

$\varepsilon$ ——安全距离裕量。

注: 该公式的推导过程详见资料性附录 A. 1. 3. 2。

#### 5. 2. 1. 2. 4 测试步骤

- a) 测试车辆(后车)和目标车辆(前车)以相同初速度行驶沿车道中心线, 两车的初始距离在  $[d_{0\_min}: d_{0\_max}]$  之间;
- b)  $t_0$ 时刻, 测试车辆开始以  $a_{max,accel}^{long}$  加速, 目标车辆继续匀速行驶;
- c)  $t_{fb}$ 时刻, 目标车辆以制动加速度  $a_{max,brake}^{long}$  进行刹车(注:  $t_{fb}$  为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间);
- d)  $t_s$ 时刻, 测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 5. 2. 1. 2. 5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$  时间内目标车辆与测试车辆之间的距离  $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻  $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间  $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$  时间内测试车辆的实时加速度  $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$  时间内测试车辆的实时制动加速度  $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 5. 2. 1. 2. 6 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \varepsilon, t \in [t_b: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long}$ 。

### 5.2.2 弯道跟车

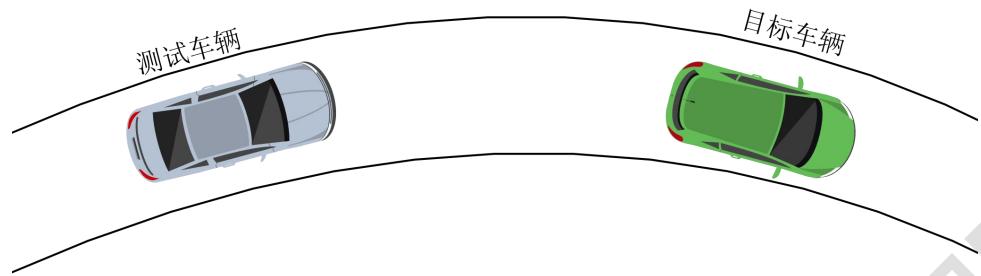


图 4 弯道跟车测试

#### 5.2.2.1 前后车均匀速行驶，前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

##### 5.2.2.1.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、弯道（道路曲率=[0.002, 0.0050]）、车道线清晰。

##### 5.2.2.1.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量 $\epsilon$ 。

注：文中所提加速度，代入公式计算时应采用无符号值；所有速度代入公式时需换算成 $m/s$ 。

##### 5.2.2.1.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度，分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 50\%, v_{max} * 80\%, v_{max}\} km/h$
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度，设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0) - 5 km/h$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度，设定为  $6.1 m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0\_min}$ : 开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离，由于采用车道线坐标系，所以初始距离计算方法同直道跟车场景中的公式（3）；
- f)  $d_{0\_max}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离，同直道跟车场景中的公式（4）。

##### 5.2.2.1.4 测试步骤

- a)  $t_0$ 时刻，测试车辆（后车）和目标车辆（前车）均匀速沿车道中心线行驶，后车速率大于前车，且两车的初始距离在 $[d_{0\_min}: d_{0\_max}]$ 之间。

- b)  $t_{fb}$ 时刻, 目标车辆以制动加速度 $a_{max,brake}^{long}$ 进行刹车(注:  $t_{fb}$ 为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间);
- c)  $t_s$ 时刻, 测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 5.2.2.1.5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$ 时间内目标车辆与测试车辆之间的距离 $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻 $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间 $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$ 时间内测试车辆的实时加速度 $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$ 时间内测试车辆的实时制动加速度 $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 5.2.2.1.6 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \varepsilon, t \in [t_{fb}: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long}$ 。

### 5.2.2.2 后车以最大加速度加速时, 前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

#### 5.2.2.2.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、弯道(道路曲率=[0.002, 0.0050])、车道线清晰。

#### 5.2.2.2.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大前进加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆ODD运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量 $\varepsilon$ 。

#### 5.2.2.2.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度, 分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 40\%, v_{max} * 60\%\} km/h$ ;
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度, 设定为 $v_f(t_0) = v_r(t_0)$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度, 设定为 $6.1 m/s^2$ ;

- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0\_min}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离, 同直道跟车场景中的公式 (5);
- f)  $d_{0\_max}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离, 同直道跟车场景中的公式 (6);

#### 5.2.2.4 测试步骤

- a) 测试车辆 (后车) 和目标车辆 (前车) 以相同初速度行驶沿车道中心线, 两车的初始距离在  $[d_{0\_min}: d_{0\_max}]$  之间;
- b)  $t_0$  时刻, 测试车辆开始以  $a_{max,accel}^{long}$  加速, 目标车辆继续匀速行驶;
- c)  $t_{fb}$  时刻, 目标车辆以制动加速度  $a_{max,brake}^{long}$  进行刹车 (注:  $t_{fb}$  为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间);
- d)  $t_s$  时刻, 测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 5.2.2.5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$  时间内目标车辆与测试车辆之间的距离  $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻  $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间  $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$  时间内测试车辆的实时加速度  $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$  时间内测试车辆的实时制动加速度  $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 5.2.2.6 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \varepsilon, t \in [t_b: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long}$ 。

### 5.3 并线场景测试

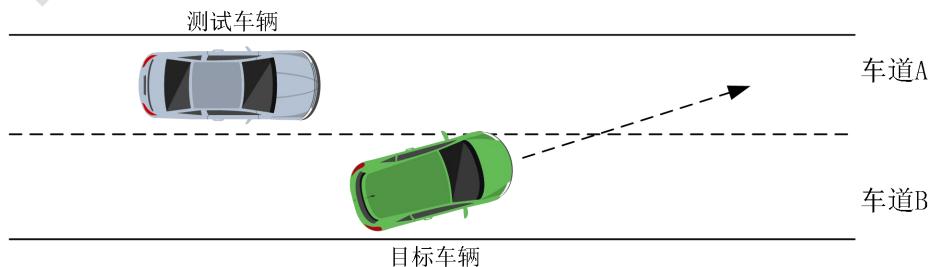


图 5 并线场景测试

### 5.3.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、直道、双车道、车道线清晰

### 5.3.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间  $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度  $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度  $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率  $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量  $\varepsilon$ 。

### 5.3.3 测试参数

- a)  $v_1^{long}(t_0)$ : 测试车辆纵向初始速度, 分别设定为  $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 40\%, v_{max} * 60\%\} km/h$ ;
- b)  $v_2^{long}(t_0)$ : 目标车辆纵向初始速度, 设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0)$ ;
- c)  $v_1^{lateral}(t_0)$ : 测试车辆横向初始速度, 设定为  $0 km/h$ ;
- d)  $v_2^{lateral}(t_0)$ : 目标车辆横向初始速度, 设定为  $0 km/h$ ;
- e)  $a_{2,accel}^{lateral}$ : 目标车辆横向加速度, 设定为  $0.6 m/s^2$ ;
- f)  $a_{2,accel,thrd}^{long}$ : 目标车辆并线过程中的纵向加速度阈值;

$$a_{2,accel,thrd}^{long} = \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A} m/s^2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

其中:

$$A = \frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{2a_{2,accel}^{lateral} * a_{max,brake,ref}^{long}}$$

$$B = \frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{2a_{2,accel}^{lateral}} + \frac{v_1^{long}(t_0) * \sqrt{\frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{a_{2,accel}^{lateral}}}}{a_{max,brake,ref}^{long}}$$

$$C = \frac{v_1^{long}(t_0)^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} - v_1^{long}(t_0)\rho - \frac{a_{max,accel}^{long} * \rho^2}{2} - \frac{(v_1^{long}(t_0) + \rho * a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \varepsilon$$

式中:

$w_{lane1}$ ——车道 A 宽度;

$w_{lane2}$ ——车道 B 宽度;

该公式的推导过程详见资料性附录 A.2。

### 5.3.4 测试步骤

- a) 测试车辆 $C_1$ 以及相邻车道上的目标车辆 $C_2$ 各自沿车道中心线以相同速度并排匀速行驶;
- b) 目标车辆 $C_2$ 突然加速并且快速并入测试车辆 $C_1$ 所在的车道, 加速度小于公式(7)中的纵向加速度阈值, 以保证并入时刻后车进入危险工况。

### 5.3.5 通过标准

邻车并入过程中, 测试车辆可以检测到危险工况的发生, 并采取适当响应, 则认定为通过。

## 6 自动驾驶车辆决策安全的场地测试

### 6.1 场地测试要求

#### 6.1.1 一般要求

- a) 试验场地具有良好附着能力的混凝土或沥青路面;
- b) 交通标志和标线清晰可见, 并符合 GB 5768 要求;
- c) 道路及基础设施符合 GB 14886、GB 14887、GB/T 24973 要求;
- d) 道路宽度不小于 3.0 m 且不大于 3.75 m;

#### 6.1.2 数据采集要求

由于决策安全测试通过的标准不仅仅是是否有碰撞, 还要求危险工况下的行为符合适当响应的要求, 因此需要监控并采集测试车辆的过程数据, 保证其正确执行安全策略。主要测采集数据包括:

- a) 测试车辆与目标车辆的实时距离
- b) 测试车辆和目标车辆的实时速度
- c) 测试车辆和目标车辆的实时加速度
- d) 测试车辆实际反应时间

从危险工况阈值时刻(测试车辆与目标车辆之间的距离等于最小安全距离时刻)开始计时, 测试车辆从当前状态(匀速或者加速)变化为减速的时刻停止计时, 该时间差即为测试车辆实际反应时间, 该参数的测量精度应达到20ms量级。

#### 6.1.3 测试设备要求

测试设备应满足以下要求:

- a) 运动状态采样和存储的频率不少于 50 Hz;
- b) 横向和纵向位置测量误差不大于 0.1 m;
- c) 速度测量误差不大于 0.1 km/h;
- d) 加速度测量误差不大于 0.1 m/s<sup>2</sup>。

### 6.2 纵向场地测试

#### 6.2.1 直道跟车场地测试

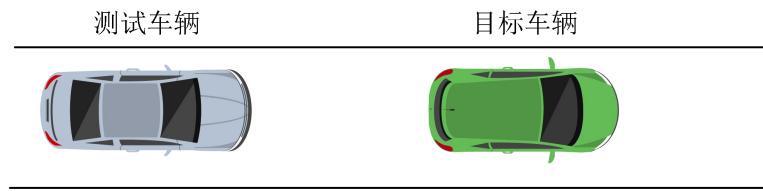


图 6 直道跟车场地测试

#### 6.2.1.1 前后车均匀速行驶，前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

##### 6.2.1.1.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、直道、车道线清晰。

##### 6.2.1.1.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间  $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度  $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度  $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率  $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量  $\epsilon$ 。

注：文中所提加速度，代入公式计算时应采用无符号值；所有速度代入公式时需换算成  $m/s$ 。

##### 6.2.1.1.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度，分别设定为  $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 50\%, v_{max} * 80\%, v_{max}\} km/h$
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度，设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0) - 5 km/h$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度，设定为  $6.1 m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0,min}$ : 开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离，参见公式 (3)；
- f)  $d_{0,max}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离，参见公式 (4)。

##### 6.2.1.1.4 测试步骤

- a)  $t_0$  时刻，测试车辆（后车）和目标车辆（前车）均匀速沿车道中心线行驶，后车速率大于前车，且两车的初始距离在  $[d_{0,min}; d_{0,max}]$  之间。
- b)  $t_{fb}$  时刻，目标车辆以制动加速度  $a_{max,brake}^{long}$  进行刹车（注： $t_{fb}$  为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间）；
- c)  $t_s$  时刻，测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

##### 6.2.1.1.5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$ 时间内目标车辆与测试车辆之间的距离 $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻 $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间 $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$ 时间内测试车辆的实时加速度 $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$ 时间内测试车辆的实时制动加速度 $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 6.2.1.1.6 计算参数

- a) 测试反应时间内的最大加速度 $a_{real,max,accel}^{long} = \max(a_{real,accel}^{long}(t))$ ;
- b) 测试反应时间后的最小制动加速度 $a_{real,min,brake}^{long} = \min(a_{real,brake}^{long}(t))$ 。

#### 6.2.1.1.7 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \epsilon, t \in [t_b: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho + \delta_\rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long} + \delta_{accel}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} - \delta_{brake} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long} + \delta_{accel}$ ;
- e) 注:  $\delta_\rho$ 为测量仪器带来的导致的偏差,  $\delta_{accel}$ ,  $\delta_{brake}$ 为实际路面导致的偏差(具体值根据测试场实际情况而定)。

#### 6.2.1.2 后车以最大加速度加速时, 前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

##### 6.2.1.2.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、直道、车道线清晰。

##### 6.2.1.2.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量 $\epsilon$ 。

注: 文中所提加速度, 代入公式计算时应采用无符号值; 所有速度代入公式时需换算成 $m/s$ 。

#### 6.2.1.2.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度, 分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 50\%, v_{max} * 80\%, v_{max}\} km/h$
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度, 设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0) - 5 km/h$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度, 设定为  $6.1 m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0,min}$ : 开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离, 参见公式 (5) ;
- f)  $d_{0,max}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离, 参见公式 (6) 。

#### 6.2.1.2.4 测试步骤

- a) 测试车辆 (后车) 和目标车辆 (前车) 以相同初速度行驶沿车道中心线, 两车的初始距离在  $[d_{0,min}: d_{0,max}]$  之间;
- b)  $t_0$  时刻, 测试车辆开始以  $a_{max,accel}^{long}$  加速, 目标车辆继续匀速行驶;
- c)  $t_{fb}$  时刻, 目标车辆以制动加速度  $a_{max,brake}^{long}$  进行刹车 (注:  $t_{fb}$  为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间);
- d)  $t_s$  时刻, 测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 6.2.1.2.5 记录参数

- a)  $[t_b: t_s]$  时间内目标车辆与测试车辆之间的距离  $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻  $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间  $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$  时间内测试车辆反应时间内的实时加速度  $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$  时间内测试车辆反应时间后的实时制动加速度  $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 6.2.1.2.6 计算参数

- a) 测试反应时间内的最大加速度  $a_{real,max,accel}^{long} = \max (a_{real,accel}^{long}(t))$ ;
- b) 测试反应时间后的最小制动加速度  $a_{real,min,brake}^{long} = \min (a_{real,brake}^{long}(t))$ 。

#### 6.2.1.2.7 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \varepsilon, t \in [t_b: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho + \delta_\rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long} + \delta_{accel}$ ;

d)  $a_{min,brake}^{long} - \delta_{brake} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long} + \delta_{accel}$ ;

注:  $\delta_{\rho}$ 为测量仪器带来的导致的偏差,  $\delta_{accel}$ ,  $\delta_{brake}$ 为实际路面导致的偏差(具体值根据测试场实际情况而定)。

### 6.2.2 弯道跟车场地测试

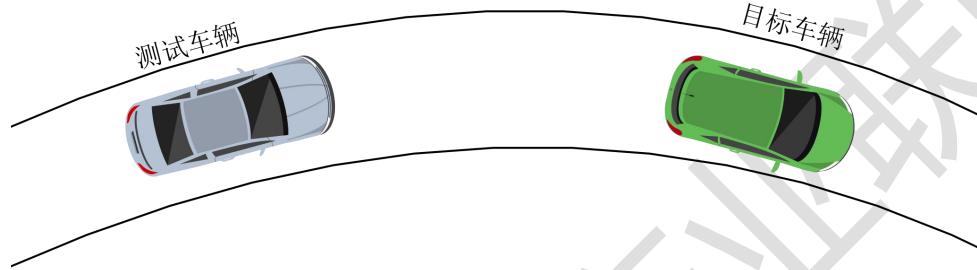


图 7 弯道跟车场地测试

#### 6.2.2.1 前后车均匀速行驶, 前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

##### 6.2.2.1.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、弯道(道路曲率=[0.002, 0.0050])、车道线清晰。

##### 6.2.2.1.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆ODD运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量 $\epsilon$ 。

注: 文中所提加速度, 代入公式计算时应采用无符号值; 所有速度代入公式时需换算成 $m/s$ 。

##### 6.2.2.1.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度, 分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 50\%, v_{max} * 80\%, v_{max}\} km/h$
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度, 设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0) - 5 km/h$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度, 设定为  $6.1 m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0,min}$ : 开始时刻( $t_0$ )两车之间的最小初始距离, 同直道跟车场景中的公式(3);
- f)  $d_{0,max}$ : 测试开始时刻( $t_0$ )两车之间的最大初始距离, 同直道跟车场景中的公式(4)。

#### 6.2.2.1.4 测试步骤

- a)  $t_0$ 时刻, 测试车辆(后车)和目标车辆(前车)均匀速沿车道中心线行驶, 后车速率大于前车, 且两车的初始距离在 $[d_{0,min}: d_{0,max}]$ 之间。
- b)  $t_{fb}$ 时刻, 目标车辆以制动加速度 $a_{max,brake}^{long}$ 进行刹车(注:  $t_{fb}$ 为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间);
- c)  $t_s$ 时刻, 测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 6.2.2.1.5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$ 时间内目标车辆与测试车辆之间的距离 $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻 $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间 $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$ 时间内测试车辆的实时加速度 $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$ 时间内测试车辆的实时制动加速度 $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 6.2.2.1.6 计算参数

- a) 测试反应时间内的最大加速度 $a_{real,max,accel}^{long} = \max (a_{real,accel}^{long}(t))$ ;
- b) 测试反应时间后的最小制动加速度 $a_{real,min,brake}^{long} = \min (a_{real,brake}^{long}(t))$ 。

#### 6.2.2.1.7 通过标准

以下条件必须同时满足:

- a)  $d(t) \geq \varepsilon, t \in [t_b: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho + \delta_\rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long} + \delta_{accel}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} - \delta_{brake} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long} + \delta_{accel}$ ;

注:  $\delta_\rho$ 为测量仪器带来的导致的偏差,  $\delta_{accel}$ ,  $\delta_{brake}$ 为实际路面导致的偏差(具体值根据测试场实际情况而定)。

#### 6.2.2.2 后车以最大加速度加速时, 前车刹车且刹车加速度等于最大制动加速度参考值

##### 6.2.2.2.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、弯道(道路曲率=[0.002, 0.0050])、车道线清晰。

##### 6.2.2.2.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间 $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率 $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量 $\epsilon$ 。

注：文中所提加速度，代入公式计算时应采用无符号值；所有速度代入公式时需换算成 $m/s$ 。

#### 6.2.2.3 测试参数

- a)  $v_r(t_0)$ : 测试车辆初始速度，分别设定为 $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 50\%, v_{max} * 80\%, v_{max}\} km/h$
- b)  $v_f(t_0)$ : 目标车辆初始速度，设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0) - 5 km/h$ ;
- c)  $a_{max,brake}^{long}$ : 目标车辆减速度，设定为  $6.1 m/s^2$ ;
- d)  $t_{fb}$ : 前车刹车时刻;
- e)  $d_{0\_min}$ : 开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最小初始距离，同直道跟车场景中的公式 (5)；
- f)  $d_{0\_max}$ : 测试开始时刻 ( $t_0$ ) 两车之间的最大初始距离，同直道跟车场景中的公式 (6)。

#### 6.2.2.4 测试步骤

- a) 测试车辆（后车）和目标车辆（前车）以相同初速度行驶沿车道中心线，两车的初始距离在  $[d_{0\_min}: d_{0\_max}]$  之间；
- b)  $t_0$  时刻，测试车辆开始以  $a_{max,accel}^{long}$  加速，目标车辆继续匀速行驶；
- c)  $t_{fb}$  时刻，目标车辆以制动加速度  $a_{max,brake}^{long}$  进行刹车（注： $t_{fb}$  为测试人员设定的目标车辆开始刹车时间）；
- d)  $t_s$  时刻，测试车辆与目标车辆均达到停止状态。

#### 6.2.2.5 记录参数

- a)  $[t_{fb}: t_s]$  时间内目标车辆与测试车辆之间的距离  $d(t)$ ;
- b) 危险工况触发时刻  $t_b$ ;
- c) 测试车辆从危险阈值时刻到开始刹车时刻的实际反应时间  $\rho_{real}$ ;
- d)  $[t_b: (t_b + \rho_{real})]$  时间内测试车辆的实时加速度  $a_{real,accel}^{long}(t)$ ;
- e)  $[t_b + \rho_{real}: t_s]$  时间内测试车辆的实时制动加速度  $a_{real,brake}^{long}(t)$ 。

#### 6.2.2.6 计算参数

- a) 测试反应时间内的最大加速度  $a_{real,max,accel}^{long} = \max(a_{real,accel}^{long}(t))$ ;

- b) 测试反应时间后的最小制动加速度  $a_{real,min,brake}^{long} = \min (a_{real,accel}^{long}(t))$ 。

#### 6.2.2.7 通过标准

以下条件必须同时满足：

- a)  $d(t) \geq \varepsilon, t \in [t_b: t_s]$ ;
- b)  $\rho_{real} \leq \rho + \delta_\rho$ ;
- c)  $a_{real,max,accel}^{long} \leq a_{max,accel}^{long} + \delta_{accel}$ ;
- d)  $a_{min,brake}^{long} - \delta_{brake} \leq a_{real,min,brake}^{long} \leq a_{max,brake}^{long} + \delta_{accel}$ ;

注： $\delta_\rho$ 为测量仪器带来的导致的偏差， $\delta_{accel}$ ， $\delta_{brake}$ 为实际路面导致的偏差（具体值根据测试场实际情况而定）。

### 6.3 并线场地测试

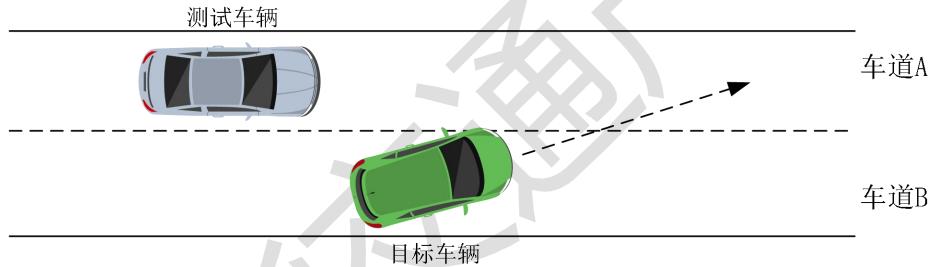


图 8 并线场地测试

#### 6.3.1 测试条件

白天、晴朗、柏油路面、干燥路况、直道、双车道、车道线清晰

#### 6.3.2 输入参数

- a) 测试车辆反应时间  $\rho$ ;
- b) 测试车辆最大加速度  $a_{max,accel}^{long}$ ;
- c) 测试车辆最小制动加速度  $a_{min,brake}^{long}$ ;
- d) 测试车辆 ODD 运行范围内的最高速率  $v_{max}$ ;
- e) 安全距离裕量  $\varepsilon$ 。

#### 6.3.3 测试参数

- a)  $v_1^{long}(t_0)$ : 测试车辆纵向初始速度，分别设定为  $\{v_{max} * 20\%, v_{max} * 40\%, v_{max} * 60\%\} km/h$ ;

- b)  $v_2^{long}(t_0)$ : 目标车辆纵向初始速度, 设定为  $v_f(t_0) = v_r(t_0)$ ;
- c)  $v_1^{lateral}(t_0)$ : 测试车辆横向初始速度, 设定为  $0 \text{ km/h}$ ;
- d)  $v_2^{lateral}(t_0)$ : 目标车辆横向初始速度, 设定为  $0 \text{ km/h}$ ;
- e)  $a_{2,accel}^{lateral}$ : 目标车辆横向加速度, 设定为  $0.6 \text{ m/s}^2$ ;
- f)  $a_{2,accel,thrd}^{long}$ : 目标车辆并线过程中的纵向加速度阈值, 参见公式 (7)。

#### 6.3.4 测试步骤

- a) 测试车辆  $C_1$  以及相邻车道上的目标车辆  $C_2$  各自沿车道中心线以相同速度并排匀速行驶;
- b) 目标车辆  $C_2$  突然加速并且快速并入测试车辆  $C_1$  所在的车道, 加速度小于公式 (7) 中的纵向加速度阈值, 以保证并入时刻后车进入危险工况。

#### 6.3.5 通过标准

邻车并入过程中, 测试车辆可以检测到危险工况的发生, 并采取适当响应, 则认定为通过。

### 7 测试车辆数据记录要求

本文件规定所有遵循T/ITS 0116-2019自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求的车辆, 在场测和路测过程中必须配备决策安全相关数据的记录装置, 并以10帧/秒的速率自动记录和存储车辆被触发危险工况前至少90秒及发生后30秒的下列各项信息数据, 以供后期做事故分析或者决策安全方面的分析。

为了便于不同厂家之间做横向对比, 本文件规定了结构化的记录方式 (表3): 采集到的数据根据数据的私密性分别存入公开数据桶和私有数据桶, 私有数据桶采用加密方式存储, 并控制访问权限, 加密算法由厂家自行选择。

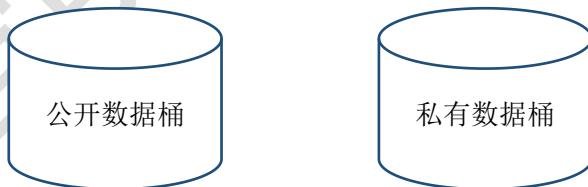


表3 公开数据字段定义

字段名称	字段含义	长度
Item sequence	日志项序号, 由ASCII码“ITEM”+序列号组成	ASCII码: 32bit 序列号: 32bit
Timestamp	时间戳	64bit
Vehicle ID	车辆ID (厂家自定义)	64bit

Ego Vehicle longitudinal Speed	测试车辆当前纵向速度值(km/h)	64bit
Ego Vehicle lateral Speed	测试车辆当前横向速度值(km/h)	64bit
Lane position	<p>测试车辆当前所在车道信息 (遵循 Opendrive 定义)</p> <p>同向车道:</p> <p>1: 行车方向最内侧车道</p> <p>2: 行车方向次内侧车道</p> <p>。 。 。</p> <p>对向车道:</p> <p>-1: 对向最内侧车道</p> <p>-2: 对向次内侧测到</p> <p>。 。 。</p>	16bit
Throttle	测试车辆当前油门控制量	Double, 64bit
Brake	测试车辆当前刹车控制量	Double, 64bit
Steering	测试车辆当前转向角	Double, 64bit
Inertial	<p>姿态信息, 由如下六个分量组成:</p> <p><math>\Delta x</math>: x轴方向的加速度(<math>m/s^2</math>)</p> <p><math>\Delta y</math>: y轴方向的加速度(<math>m/s^2</math>)</p> <p><math>\Delta z</math>: z轴方向的加速度(<math>m/s^2</math>)</p> <p><math>\Delta pitch</math>: x轴方向角速度(<math>rad/s</math>)</p> <p><math>\Delta roll</math>: y轴方向角速度(<math>rad/s</math>)</p> <p><math>\Delta yaw</math>: z轴方向角速度(<math>rad/s</math>)</p>	Double, 64bit (x6)
Parameter table index	<p>安全决策参数表索引 (安全决策参数表参见表5, 只有一套参数集时指针为0)</p>	integer_index, 16bit
Actuated	是否触发安全车辆进入危险工况响应	True or False
Target vehicle longitudinal Speed	目标车辆当前纵向速度值(km/h)	64bit

Target vehicle lateral Speed	目标车辆当前横向速度值(km/h)	64bit
Longitudinal distance to target	与目标车辆的纵向距离	Double, 64bit
Longitudinal distance to target	与目标车辆的横向距离	Double, 64bit

表4 私有数据字段定义

字段名称	字段含义	长度
Item sequence	日志项序号, 由ASCII码“ITEM”+序列号组成	ASCII码: 32bit 序列号: 32bit
Timestamp	时间戳	64bit
Vehicle ID	车辆ID (厂家自定义)	64bit
Driver ID	驾驶员ID	64bit
Position longitude	车辆位置经度	64bit
Position latitude	车辆位置纬度	64bit
Location method	定位方式: GPS = 0 Diff-GPS = 1 BeiDou = 2 GLONASS = 3 Galileo = 4 QZSS = 5 Inertial = 6 (隧道等情况)	integer, 16bit
Picture from camera 1	相机1采样数据, 由如下字段组成: size: 数据总长度 (bytes) data: 采样数据 (Blob in JPEG format)	size: integer, 32bit data: size*8bit
Picture from camera 2	相机2采样数据	size: integer, 32bit data: size*8bit
.....		

Picture from camera N	相机N采样数据	size: integer, 32bit data: size*8bit
-----------------------	---------	-----------------------------------------

为了保证数据的完整性，防止被篡改，每100个记录项做为一个数据块，对应一个1024bit的MD5摘要信息（计算摘要时需要包含上一个数据块的MD5数值），每个数据块为128字节的整数倍，如果不是，则需要在末尾填充字符串（"FF"）补足，最后一个字节为填充字符串的长度。

第1个数据块输入的MD5初始摘要数值为：当前时间（64bit）+ 车辆根证书（厂家自定义）+填充字符串（"FF"）共计128byte。

当5秒钟没有新的数据写入时，该数据块自动结束。

表 5 数据块格式定义（适用于公开数据和私有数据）

Block M-1
.....
Block M-1 MD5 摘要 (128 byte)
Block M
日志项 1（“ITEM” + 日志项序号.....）
日志项 2（“ITEM” + 日志项序号.....）
.....
日志项 100 或者 n（对应超时情况）+（填充）+（填充字符串长度）
Block M MD5 摘要 (128 byte)

每个厂家都有针对车辆的物理特性设计的安全决策参数，且可以根据车辆实际所处的环境选择不同的参数，因此决策安全参数表具体参数值由厂家根据车辆的实际性能填充，可以有一套或者多套参数。  
(注：计算安全距离时，所有的加速度都是无符号数)。

表 6 安全决策参数表

字段名称	字段含义	长度
$\rho_{long}$	本车纵向反应时间(ms)	16bit
$\rho_{lateral}$	本车横向反应时间(ms)	16bit
$a_{max,accel}^{long*}$	本车纵向最大加速度( $m/s^2$ )	Double, 64bit
$a_{max,accel}^{lateral*}$	本车横向最大加速度( $m/s^2$ )	Double, 64bit
$a_{min,brake}^{long*}$	本车纵向最小制动加速度( $m/s^2$ )	Double, 64bit
$a_{min,brake}^{lateral*}$	本车横向最小制动加速度( $m/s^2$ )	Double, 64bit

$a_{max,brake}^{long*}$	目标车辆纵向最大加速度( $m/s^2$ )	Double, 64bit
-------------------------	------------------------	---------------

中国智能交通

## 附录 A (资料性) 测试公式推导

### A. 1 跟车初始距离

#### A. 1. 1 初始距离定义

无论仿真还是实地进行跟车场景的测试，测试开始时，前后两车需保持一定的初始距离，该距离需要大于根据根据初始状态计算出的纵向最小安全距离。测试过程中前车进行刹车，刹车时刻由测试人员根据场地的情况进行预设，后车在向前车靠近的过程中，始终监测两车之间的距离，并在达到最小纵向安全距离时采取适当响应。

初始距离的设置需要保证后车进入危险阈值时刻时，前车正好处于刹车状态，这样才可以最充分地验证最小安全距离公式所示的情况。如果该初始距离设置太小，则前车还没开始刹车，后车就已经进入纵向危险工况；如果该初始距离太大，则前车刹车停止了，后车还没进入危险工况。

设初始时刻 ( $t_0$ ) 到前车开始刹车时刻 ( $t_{fb}$ ) 经过的时间为  $t_1$ ，前车开始刹车时刻 ( $t_{fb}$ ) 到前车停止时刻 ( $t_{fs}$ ) 经过的时间为  $t_2$ ，则满足上述要求的最小初始距离 ( $d_{0\_min}$ ) 定义为前车开始刹车时，两车之间的距离正好等于该时刻的最小纵向安全距离  $d_{min}(t_{fb})$ ；最大初始距离 ( $d_{0\_max}$ ) 定义为前车刹车时，两车之间的距离正好等于该时刻的最小纵向安全距离  $d_{min}(t_{fs})$ 。

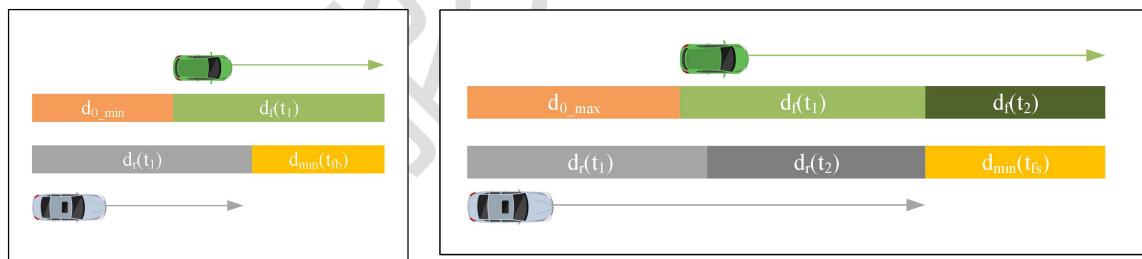


图 9 初始距离设定

以下为车辆在各种运行状态下初始距离的计算公式。

#### A. 1. 2 前后车均匀速行驶时初始距离设定

##### A. 1. 2. 1 最小初始距离

根据最小初始距离的定义可得到：

$$d_{0\_min} + d_f(t_1) = d_f(t_1) + d_{min}(t_{fb})$$

$$d_{min}(t_{fb}) = \left[ v_r(t_{fb}) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_{fb}) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2(t_{fb})}{2a_{max,brake}^{long}} \right]_+ + \varepsilon$$

式中：

$d_f(t_1)$ ——车从初始时刻到开始刹车时刻行驶的距离；

$d_r(t_1)$ ——后车从初始时刻到前车开始刹车时刻行驶的距离；

$d_{min}(t_{fb})$ ——前车开始刹车时刻对应的最小纵向安全距离；

$v_f(t_{fb})$ ——前车开始刹车时刻前车的速度；

$v_r(t_{fb})$ ——前车开始刹车时刻后车的速度；

由于  $t_{fb}$  之前两车都是匀速运动，则：

$$d_{min}(t_{fb}) = d_{min}(t_0) = \left[ v_r(t_0) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} \right]_+ + \varepsilon$$

式中：

$v_f(t_0)$ ——初始时刻前车的速度；

$v_r(t_0)$ ——初始时刻后车的速度；

$d_{min}(t_0)$ ——初始时刻对应的最小纵向安全距离。

因此：

$$d_{0\_min} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + d_{min}(t_0)$$

#### A. 1. 2. 2 最大初始距离

根据最大初始距离的定义可得到：

$$d_{0\_max} + d_f(t_1) + d_f(t_2) = d_r(t_1) + d_r(t_2) + d_{min}(t_{fs})$$

式中：

$d_f(t_1)$ ——车从初始时刻到开始刹车时刻行驶的距离；

$d_r(t_1)$ ——后车从初始时刻到前车开始刹车时刻行驶的距离；

$d_f(t_2)$ ——前车从开始刹车时刻到停止时刻行驶的距离；

$d_r(t_2)$ ——后车从前车开始刹车时刻到前车停止时刻行驶的距离；

$d_{min}(t_{fs})$ ——前车停止时刻对应的最小纵向安全距离。

由于  $t_2$  期间前车为匀减速运动，后车为匀速运动，则：

$$t_2 = \frac{v_f(t_0)}{a_{max,brake}^{long}}$$

$$d_f(t_2) = \frac{v_f^2(t_0)}{a_{max,brake}^{long}}$$

$$d_r(t_2) = v_r(t_0) * \frac{v_f(t_0)}{a_{max,brake}^{long}}$$

$$d_{min}(t_{fs}) = \left[ v_r(t_0) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} \right]_+ + \epsilon$$

因此：

$$d_{0\_max} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + v_r(t_0) * \frac{v_f(t_0)}{a_{max,brake}^{long}} + d_{min}(t_0)$$

### A. 1. 3 前车匀速行驶，后车加速行驶时初始距离设定

#### A. 1. 3. 1 最小初始距离

根据最小初始距离的定义可得到：

$$d_{0\_min} + d_f(t_1) = d_r(t_1) + d_{min}(t_{fb})$$

式中：

$d_f(t_1)$ ——车从初始时刻到开始刹车时刻行驶的距离；

$d_r(t_1)$ ——后车从初始时刻到前车开始刹车时刻行驶的距离；

因为前车是匀速运动，后车以  $a_{max,acce}^{long}$  加速行驶，故：

$$v_r(t_{fb}) = v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * t_1$$

$$d_r(t_1) = v_r(t_0) * t_1 + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * t_1^2$$

$$v_f(t_{fb}) = v_f(t_0)$$

$$d_f(t_1) = v_f(t_0) * t_1$$

因此：

$$d_{0\_min} = t_1 * (v_r(t_0) - v_f(t_0)) + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * t_1^2 + d_{min}(t_{fb})$$

$$d_{min}(t_{fb}) = \left[ (v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * t_1) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + a_{max,acce}^{long} * t_1 + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} \right]_+ + \epsilon$$

### A. 1. 3. 2 最大初始距离

根据最大初始距离的定义可得到:

$$d_{0\_max} + d_f(t_1) + d_f(t_2) = d_r(t_1) + d_r(t_2) + d_{min}(t_{fs})$$

式中:

$d_f(t_1)$ ——车从初始时刻到开始刹车时刻行驶的距离;

$d_r(t_1)$ ——后车从初始时刻到前车开始刹车时刻行驶的距离;

$d_f(t_2)$ ——前车从开始刹车时刻到停止时刻行驶的距离;

$d_r(t_2)$ ——后车从前车开始刹车时刻到前车停止时刻行驶的距离;

$d_{min}(t_{fs})$ ——前车停止时刻对应的最小纵向安全距离。

因为前车是匀速运动, 后车以  $a_{max,accel}^{long}$  加速行驶, 且两者初始速度相同, 故:

$$t_2 = \frac{v_f(t_0)}{a_{max,brake}^{long}}$$

$$v_r(t_{fb}) = v_r(t_0) + a_{max,accel}^{long} * t_1$$

$$v_r(t_{fs}) = v_r(t_0) + a_{max,accel}^{long} * (t_1 + t_2)$$

$$d_r(t_1) = v_r(t_0) * t_1 + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * t_1^2$$

$$d_r(t_2) = v_r(t_0) * t_2 + a_{max,accel}^{long} * t_1 * t_2 + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * t_2^2$$

$$v_f(t_{fb}) = v_f(t_0)$$

$$d_f(t_1) = v_f(t_0) * t_1$$

$$d_f(t_2) = \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}}$$

因此

$$d_{0\_max} = v_r(t_0) * t_2 + a_{max,accel}^{long} * t_1 * t_2 + \frac{1}{2} a_{max,accel}^{long} * (t_1^2 + t_2^2) - \frac{v_f^2(t_0)}{2a_{max,brake}^{long}} + d_{min}(t_{fs})$$

$$d_{min}(t_{fs}) = \left[ (v_r(t_0) + a_{max,accel}^{long} * (t_1 + t_2)) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_r(t_0) + a_{max,accel}^{long} * (t_1 + t_2) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} \right]_+ + \varepsilon$$

### A. 2 并线场景下目标车辆纵向加速度

设目标车辆  $C_2$  横向加速到测试车辆  $C_1$  所在车道所用的时间为  $t_c$ , 则:

$$t_c = \sqrt{\frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{a_{2,accel}^{lateral}}}$$

$w_{lane1}$ ——车道A宽度；

$w_{lane2}$ ——车道B宽度；

该段时间内， $C_2$ 纵向以 $a_{2,accel}^{long}$ 的加速度超过 $C_1$ ，如果 $t_c$ 时刻两车距离小于或等于 $C_1$ 计算的纵向最小安全距离，就会触发测试车辆 $C_1$ 进入危险工况，从而触发适当响应。因此 $C_2$ 并线后可以触发危险工况的纵向加速度阈值 $a_{2,accel,thrd}^{long}$ 应满足：

$$v_2^{long}(t_0) * t_c + \frac{1}{2} a_{2,accel,thrd}^{long} * t_c^2 = v_1^{long}(t_0) * t_c + d_{min}(t_c)$$

其中：

$$d_{min}(t_c) = \left[ v_1^{long}(t_c) * \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2} + \frac{(v_1^{long}(t_c) + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \frac{v_2^{long}(t_c)^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} \right]_+ + \varepsilon$$

因为 $C_1$ 匀速行驶， $C_2$ 以 $a_{2,accel,thrd}^{long}$ 加速行驶，故：

$$v_2^{long}(t_c) = v_2^{long}(t_0) + a_{2,accel,thrd}^{long} * t_c$$

$$v_1^{long}(t_c) = v_1^{long}(t_0)$$

$$\frac{t_c^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} * a_{2,accel,thrd}^{long} + \left( \frac{t_c^2}{2} + \frac{v_1^{long}(t_0) * t_c}{a_{max,brake,ref}^{long}} \right) * a_{2,accel,thrd}^{long} + \frac{v_1^{long}(t_0)^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} - v\rho - \frac{a_{max,accel}^{long} * \rho^2}{2} - \frac{(v_1^{long}(t_0) + \rho * a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \varepsilon = 0$$

因此：

$$a_{2,accel,thrd}^{long} = \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A} m/s^2$$

其中：

$$A = \frac{t_c^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} = \frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{2a_{2,accel}^{lateral} * a_{max,brake,ref}^{long}}$$

$$B = \frac{t_c^2}{2} + \frac{v_1^{long}(t_0) * t_c}{a_{max,brake,ref}^{long}} = \frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{2a_{2,accel}^{lateral}} + \frac{v_1^{long}(t_0) * \sqrt{\frac{w_{lane1} + w_{lane2}}{a_{2,accel}^{lateral}}}}{a_{max,brake,ref}^{long}}$$

$$C = \frac{v_1^{long}(t_0)^2}{2a_{max,brake,ref}^{long}} - v_1^{long}(t_0)\rho - \frac{a_{max,accel}^{long} * \rho^2}{2} - \frac{(v_1^{long}(t_0) + \rho * a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}} - \varepsilon$$

---

中国智能交通

T/ITS xxxx-20xx

中国智能交通产业联盟

标准

**自动驾驶决策的安全保障技术要求**

T/ITS xxxx-20xx

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 12 月第一版 20xx 年 12 月第一次印刷