

团 体 标 准

T/ITS 0116-2019

自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求

Technical Requirement of Safety Assurance of AV Decision Making

2019-12-27 发布

2020-03-01 实施

中国智能交通产业联盟 发布

目 次

前言..... III

自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求.....1

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 缩略语..... 3

5 自动驾驶车辆决策安全的基本原则.....3

6 最小安全距离..... 4

7 危险工况及适当响应.....8

附录 A （资料性附录）不同参数下的最小纵向安全距离..... 11

参考文献..... 11

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由中国智能交通产业联盟（C-ITS）提出并归口。

本标准起草单位：英特尔(中国)有限公司、交通运输部公路科学研究院、深圳市金溢科技股份有限公司、清华大学、威马汽车科技集团有限公司、北京市交通信息中心、上海蔚来汽车有限公司、华为技术有限公司、同济大学、北京百度网讯科技有限公司、上海智蔚智能科技、中兴技术有限公司。

本标准主要起草人：吴向斌、朱倩影、田忠、杰克·韦斯特、焦伟赟、李茹、李欣、何宁、唐光颖、王建强、刘建锋、冯雪峰、王宇、陈炯、王长胜、刘航、毕欣、彭伟、徐宝强、潘屹峰、王骞、贾萌、曹力、张慧。

自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求

1 范围

本标准规定了自动驾驶车辆决策安全的基本原则、最小安全距离、危险工况以及该工况下应该采取的合理措施。本标准不涉及道德伦理相关的安全决策。

本标准适用于汽车工程学会定义的3级及以上自动驾驶车辆的决策系统，用以帮助自动驾驶车辆避免引发事故。

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。

SAE J3016_201806: 道路机动车驾驶自动化系统相关术语的分类与定义(Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

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。

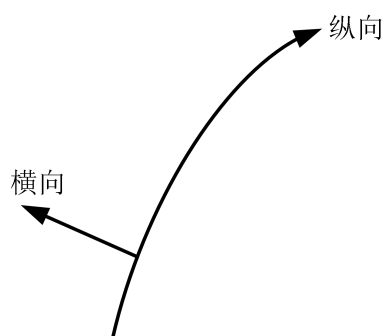


图1 车道线坐标系

3.2

最小纵向安全距离 minimum longitudinal distance

跟车场景下，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，采取本标准定义的适当响应即可避免发生碰撞。

3.3

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，左右两车采取本标准定义的适当响应即可避免车辆发生横向碰撞。

3.4

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。

3.5

预期最大制动加速度 estimated maximum braking acceleration

跟车场景下，后车预期前车刹车时采用的最大制动加速度，行业需要制定合理参考值。

3.6

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。

3.7

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。

3.8

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。

3.9

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。

3.10

适当响应 proper response

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

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AV：自动驾驶车辆 (Automated Vehicle)

5 自动驾驶车辆决策安全的基本原则

5.1 概述

自动驾驶系统由三大部分组成：感知、决策和执行。感知系统负责感知周边环境，并进行识别和分析；决策系统负责决定后续的执行策略；执行系统则负责根据决策系统的指令操纵车辆。本标准所定义的自动驾驶车辆的决策安全，用以检查决策系统发出的指令是否符合本标准定义的安全性准则，从而避免自动驾驶车辆导致危险状况的发生；并根据本标准判定是否由于其它车辆的行为进入了危险工况，如果是，则自动驾驶车辆应遵循本标准的定义进行适当响应。决策安全在自动驾驶系统中的位置见图2。

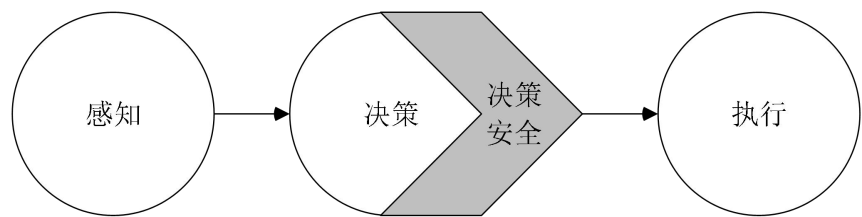


图 2 决策安全在自动驾驶系统中的位置

5.2 决策安全遵循的基本原则

本标准定义了如下的安全原则：

- a) **自动驾驶车辆应该始终保持纵向安全距离**
自动驾驶车辆必须和前车保持安全的纵向跟车距离，以防前车突然刹车而发生碰撞。
- b) **自动驾驶车辆应该始终保持横向安全距离**
自动驾驶车辆应该保证与其它车辆横向方向上的安全距离，从而避免碰撞。
- c) **自动驾驶车辆应该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**
自动驾驶车辆在行驶中应遵循交通法规按照优先级通行，但是如果其它车辆违背了通行优先级原则，也需要考虑强行使用通行优先权是否会带来不安全的因素，从而决定是否让行。
- d) **自动驾驶车辆要谨慎对待视野受限区域**
由于物理遮挡，自动驾驶的车辆会面临视野受限的情况，所以应当谨慎对待这些区域。因此通过设定一些合理的假设，比如被遮挡的其它交通参与者的合理速度和加速度，从而使自动驾驶车辆能够在这些合理的条件下做出最佳应对。
- 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**
在某些危险状况下，自动驾驶车辆如果可以通过合理的躲避措施来避免事故，且不会引发其它事故，则自动驾驶车辆应当采取躲避措施。

6 最小安全距离

6.1 概述

本标准定义的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间距，分为最小纵向安全距离和最小横向安全距离。

6.2 最小纵向安全距离

6.2.1 场景描述

两车以相同方向行驶，后车需要和前车保持一定的跟车距离，以防前车突然刹车而出现追尾情况。最小跟车距离可以让后车在恶劣的跟车场景下仍然可以避免追尾事故。恶劣的跟车场景可描述如下：

- 1) 后车正在以最大加速度跟随前车前行；
- 2) 前车突然采取最大制动加速度进行减速；
- 3) 后车在反应时间内依然以最大加速度前行，在反应过来后改用最小制动加速度进行减速；
- 4) 两车停止时，间距为零。

该恶劣场景中提到后车在反应过来后采用的最小制动加速度，是综合考虑乘客安全、舒适性及车辆通行能力的一个指标，因此并不是越小越好，该值越小意味着后车需要和前车保持的安全距离越长，因此车辆的通行能力会下降，所以厂商应该根据自车的性能，制定合理的制动加速度下限，既要保证车辆停止时避免追尾事故，又需要保证合理的通行能力。

6.2.2 最小纵向安全距离的计算

根据上述恶劣跟车场景，可以推算出该场景下的最小纵向安全距离如下：

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

注： $[X]_+ := \max\{X, 0\}$ 。

式中：

v_f 一前车纵向速度；

$a_{max,brake}^{long}$ 一前车最大制动加速度；

v_r 一后车纵向速度；

ρ 一后车反应时间；

$a_{max,accel}^{long}$ 一后车最大前进加速度；

$a_{min,brake}^{long}$ 一后车最小制动加速度。

公式（1）中前车的刹车距离为： $\frac{v_f^2}{2a_{max,brake}^{long}}$ ，后车在反应时间内的行驶距离为： $v_r \rho + \frac{a_{max,accel}^{long} \rho^2}{2}$ ，反应时间后的刹车距离为： $\frac{(v_r + \rho a_{max,accel}^{long})^2}{2a_{min,brake}^{long}}$ 。

另外，需要强调的是该公式计算的是恶劣场景下的最小安全距离，实际跟车场景时，如果前车的制动加速度和后车反应时间内的加速度不是公式中的最大值，理论上其最小安全距离小于公式（1）中的结果，即本标准中定义的最小安全距离满足恶劣场景要求，因此对于正常跟车场景更加安全。

6.2.3 相关参数设置

公式（1）中最小安全纵向距离取决于以下参数：前车最大制动加速度 $a_{max,brake}^{long}$ ，后车反应时间 ρ ，后车最大前进加速度 $a_{max,accel}^{long}$ ，后车最小制动加速度 $a_{min,brake}^{long}$ ，这些参数取决于车辆的实际性能。但是如果行业内没有一个可以参考的值，后车就无法设定与前车的合理安全距离，例如不同车型的最大刹车能力 $a_{max,brake}^{long}$ 是不同的，显然 $a_{max,brake}^{long}$ 越大，需要预留的跟车距离越大，因此需要制定出一个参考值，既能保证通行能力，又需要考虑车辆的物理实现能力。本标准在充分仿真后^[4]提出如下参考值：

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： $(a_{max,brake}^{long})$	6.1 m/s ²
后车反应时间： (ρ)	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

以仿真中采用的一套参数为例（不同参数下的最小安全距离值请参见资料性附录）：

$$\rho = 0.2s; a_{max,accel}^{long} = 1.8m/s^2; a_{min,brake}^{long} = 3.6m/s^2; a_{max,brake}^{long} = 6.1m/s^2。$$

假定前后车的初始速度为100km/h，即27.8m/s，则根据公式（1），该参数值下最小纵向安全距离为：

$$\left[27.8 * 0.2 + \frac{1.8 * 0.2^2}{2} + \frac{(27.8 + 0.2 * 1.8)^2}{2 * 3.6} - \frac{27.8^2}{2 * 6.1} \right] = 52.4m$$

注：以上参数是正常路况下的推荐值，湿滑路段、冰雪路段需另行选择其它参数。

6.3 最小横向安全距离

车辆行驶在多车道道路上，还必须保持安全的横向距离。与纵向安全距离一样，横向也需要保证合理条件下恶劣场景中的安全性。此外，与纵向安全距离不同，横向方向经常会由于路面状况等原因出现一些扰动，本标准将可能出现的扰动范围也考虑了进去。

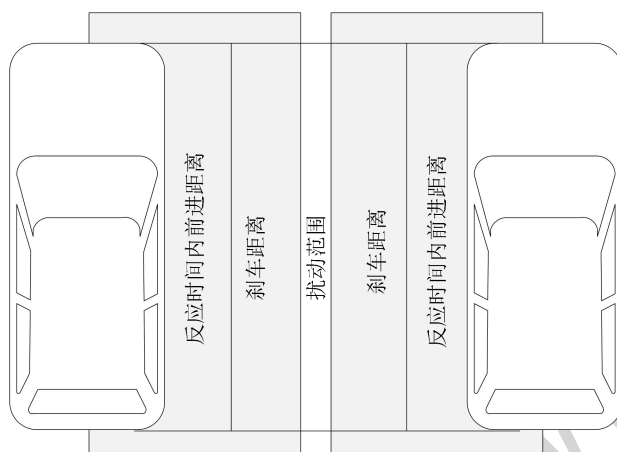


图3 安全横向距离

6.3.1 场景描述

横向恶劣场景下车辆的行为可描述为：

- 1) 左车和右车分别以最大横向加速度趋近，直到达到最小横向安全距离；
- 2) 在反应时间内，两车依然以最大横向加速度趋近；
- 3) 反应过来后自动驾驶车辆以横向最小制动加速度进行减速；
- 4) 直到两车的横向速度变成零，其间距至少满足扰动距离。

6.3.2 最小横向安全距离的计算

根据上述恶劣场景，推算出该场景下左右两车之间的最小的横向安全距离为：

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

式中：

v_1 — 自车的横向速度；

v_2 — 目标车辆的横向速度；

ρ_1 — 自车的反应时间；

ρ_2 —目标车辆的反应时间；

μ —横向扰动范围；

$a_{1,max,accel}^{lat}$ —自车最大横向加速度；

$a_{2,max,accel}^{lat}$ —目标车辆最大横向加速度；

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

$a_{2,min,brake}^{lat}$ —目标车辆最小制动加速度的横向分量；

$v_{1,\rho} = v_1 + \rho_1 a_{1,max,accel}^{lat}$ —反应时间结束时刻自车的横向车速；

$v_{2,\rho} = v_2 - \rho_2 a_{2,max,accel}^{lat}$ —反应时间结束时刻目标车的横向车速。

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

6.3.3 相关参数设置

和纵向距离类似，为了预测目标车辆的行为，也需要对最小横向安全距离的参数制定一套参考值。横向最小安全距离阈值一般在并线场景下出现，因此针对并线场景进行充分仿真后，提出如下参考值：

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 (μ)：	10cm
目标车辆反应时间：(ρ_2)	0.2s
目标车辆横向最大加速度：($a_{2,max,accel}^{lat}$)	0.2m/s ²
目标车辆合理横向制动加速度：($a_{2,min,brake}^{lat}$)	0.8m/s ²
本车反应时间：(ρ_1)	厂商根据车辆实际性能确定
本车横向最大加速度：($a_{1,max,accel}^{lat}$)	厂商根据车辆实际性能确定
本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

7 危险工况及适当响应

7.1 危险工况定义

当两车之间的横向距离不满足最小横向安全距离，就认为车辆进入了横向危险工况；当两车之间的纵向距离不满足最小纵向安全距离，就认为车辆进入了纵向危险工况；当两车之间的横向和纵向距离都不满足该方向上的最小安全距离时，就认为车辆进入了危险工况。

7.2 纵向适当响应

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。

7.3 横向适当响应

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^{lat} ，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。

7.4 危险工况的适当响应

正常情况下车辆之间的相对位置如下图所示：

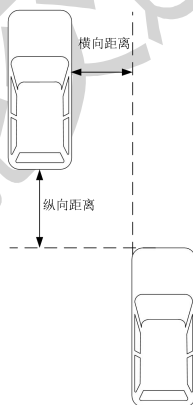


图4 车辆之间的相对距离

当横向距离和纵向距离都满足最小安全距离要求时，不会触发危险工况，而当车距发生变化时，可分为如下两种情况：

a) **横向距离大于最小横向安全距离，纵向距离小于最小纵向安全距离**

由于横向安全车距的存在，即便纵向距离为零也不会导致事故的发生，因此只有当它们之间的横向距离也不安全时，才会认定进入了危险工况，这种情况下，需要采取横向适当响应。

b) **纵向距离大于最小纵向安全距离，横向距离小于最小横向安全距离**

由于纵向安全车距的存在,即便横向距离为零也不会导致事故的发生,因此只有当它们之间的纵向距离也不安全时,才会认定进入了危险工况,这种情况下,需要采取纵向适当响应。

因此,车辆进入危险工况是指两车之间的横向和纵向距离均不满足最小安全距离的情况。进入危险工况的第一时刻为危险阈值时刻 t_b ,其取值应为横向危险阈值时刻 t_b^{lat} 和纵向危险阈值时刻 t_b^{long} 中的最大值,即 $t_b = \max\{t_b^{long}, t_b^{lat}\}$,危险工况下的适当响应则定义为:

- a) 如果 $t_b = t_b^{long}$,则需要根据纵向适当响应 7.2 节定义对纵向速度进行限制。
- b) 如果 $t_b = t_b^{lat}$,则需要根据横向适当响应 7.3 节定义对横向速度进行限制。

附录A

(资料性附录)

不同参数下的最小纵向安全距离

表A.1代表不同参数对应的最小纵向安全距离，假定前后车速度均为100km/h：

表A.1 不同参数下的最小纵向安全距离

参数组合	后车反应时间 (s)	后车最大纵向加速度 (m/s^2)	后车最小制动加速度 (m/s^2)	前车最大制动加速度 (m/s^2)	最小纵向安全距离(m)
1	0.2	1.8	3.6	6.1	52.4
2	0.2	1.8	3.6	9.8	76.3
3	1	1.8	3.6	6.1	87.0
4	1	1.8	3.6	9.8	111.0
5	1	9.8	3.6	9.8	190.0
6	0.2	9.8	3.6	9.8	89.3

1: 正文中提到的仿真时采用的一套参数，该仿真提取了人类驾驶数据库中的219个跟车场景，具体筛选标准参见参考文献^[1]，比如刹车加速度大于 $4.9m/s^2$ ，TTC (time to collision) 小于4秒等。然后仿真中将人类驾驶模型替换为嵌入RSS^[2]的自动驾驶模型，以最低的TIT (time integrated TTC) 为目标，得到的一组参数值。

2: 前车最大制动加速度改为 $9.8m/s^2$ ，后车参数同1，最小纵向安全距离由52.4m增加为76.3m。

3: 反应时间改为1s，模拟人类驾驶，其它参数同1，最小纵向安全距离由52.4m增加为87.0m。

4: 反应时间改为1s，模拟人类驾驶，前车最大制动加速度改为 $9.8m/s^2$ ，后车参数同1，最小纵向安全距离由52.4m增加为111.0m。

5: 反应时间改为1s，模拟人类驾驶，前车最大制动加速度改为 $9.8m/s^2$ ，后车最大纵向加速度改为 $9.8m/s^2$ ，其它参数同1，最小纵向安全距离由52.4m增加为190.0m。

6: 反应时间恢复为0.2s，模拟自动驾驶，前车最大制动加速度改为 $9.8m/s^2$ ，后车最大纵向加速度改为 $9.8m/s^2$ ，其它参数同1，最小纵向安全距离由52.4m增加为89.3m。

参 考 文 献

[1] Xiaoyan Xu, Xuesong Wang, Xiangbin Wu, “Calibration and Evaluation of Responsibility-Sensitive Safety Model on Autonomous Car-Following Maneuvers Using Naturalistic Driving Study Data”, *Transportation Research Board*, Jan. 2020.

[2] Shai Shalev-Shwartz, Shaked Shammah, Amnon Shashua, “On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars”, *arXiv:1708.06374*.

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟

标准

自动驾驶车辆决策的安全保障技术要求

T/ITS 0116-2019

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>

2019 年 12 月第一版 2019 年 12 月第一次印刷