

通行自动驾驶车辆公路  
安全性评价标准（征求意见稿）  
条文说明

2019-XX-XX 发布

2019-XX-XX 实施

中国工程建设标准化协会发布

---

## 1 总则

**1.01-1.02** 制定本标准的目的是为给逐步对自动驾驶汽车开发交通的公路提供安全性评价的技术要求和内容；也为拟通行公路的自动汽车企业提供评价其特定车型通行公路的安全性的评价方法。

**1.03-1.0.5** 自动驾驶汽车全部取代人驾驶的车辆尚需很长的时期，公路项目安全性需满足《公路项目安全性评价规范》的要求，因此《公路项目安全性评价规范》为本标准上位规范。

## 2 术语与符号

无。

## 3 总体

### 3.1 公路信息化程度适用性方案

**3.1.1** 目前或今后一定时期，我国公路信息化程度将仍有很大差异；高速公路和城市快速路信息化程度远高于县乡道路和城市支路。评价参照以上分级，重点是评价出自动驾驶汽车应感知、判断与决策的影响安全的因素，明确公路可为自动驾驶汽车提供的公路运行环境信息。

**3.1.2** 该项评价包含两个对应的方面，第一评价满足一定的自动驾驶汽车性能相关标准或规范的自动驾驶汽车对公路运行环境的感知、判断、决策与行动能力；第二评价特定公路环境是否适用于某特定自动驾驶汽车的安全行驶。

**3.1.3** 应采用就高不就低的原则，同时需要对信息处理能力进行重新评估。如 AV 车辆能在信息化等级一的公路上安全行驶，通常能够在满足信息化水平等级三的公路安全行驶，但同时要评估车辆在信息化水平等级三的公路上按照运行车速行驶时的交通环境感知和识别处理能力，要评估是否具备动态交通环境感知能力。

### 3.2 AV 车辆信息感知、判断、决策与行动能力

自动驾驶汽车或辅助驾驶汽车实际上是由智能计算器在操控，可以称之为“智能元”，可定义“智能元”为一类“驾驶员”。所以对于公路项目安全性评价，在这里相当于增加

了一类“驾驶员”；安全性评价需要知道该“驾驶员”的车辆信息感知、判断、决策与行动指令能力，但安全性评价不涉及自动驾驶汽车感知、判断、决策与行动指令的实现技术。

**3.2.1** 应逐项评价 AV 车辆对道路运行环境的感知和识别能力,评价潜在的安全风险；包括但不限于边界感知、标志牌感知、标志牌内容识别、标线感知与识别、静态障碍物识别距离、静态障碍物识别视角、机动车相对距离方位感知、机动车相对速度感知、行人及牲畜感知、非机动车感知、电动自行车、道路行驶质量感知、前方道路坑槽感知、前方道路车道数变化感知、交通信号灯感知、周边车辆转向灯感知等。

对于公路路界内符合相关标准规范（如 GB5768，公路交通安全设施设计细则等）无破损的标志、标线、信号灯、交通安全设施等，AV 车辆应能全面感知，不能遗漏，并正确理解其含义。

AV 车辆的感知判断能力可以是单一设施的感知能力，也可以是多个设备信息融合后达到的感知能力。

**3.2.2** 该项评价可依据自动驾驶汽车配置技术条件评价。特别重点评价突发交通事件或道路用户不良交通行为条件下，自动驾驶汽车的感知、判断、决策和行动能力。公路路界内的符合相关标准规范、交通法规的标志、标线、信号和交通安全设施等是保障安全的最低技术要求，AV 车辆必须能够全面正确感知、判断、决策与行动；否则安全风险极大。

AV 车辆获取的信息包括车辆自身感知的信息和通过离线或在线实时获取的道路交通环境信息。AV 车辆对信息的需求需考虑道路本身的信息化水平和自动驾驶中驾驶员的参与程度。AV 车辆对信息的感知、判断、决策与行动能力可参照表 3.2.2 进行评估。

表 3.2.2 AV 车辆对信息的感知、判断、决策与行动能力评估

公路信 息化 水平	道路可提供 的信息	AV 车辆自 动化水平	AV 车辆需获取的信息
一级	无	全自动化	所有交通环境与道路信息。
		复杂交通条件下需要驾驶员介入	几乎所有交通环境与道路信息。需要评估特定条件介入提示时，留给驾驶员操控切换及安全处理所需要的时间是否足够。

		车速控制、 车道保持	本车道前方车辆运动状态信息、前方的障碍物及路面坑槽。需评估信息获取的及时性和准确性。
二级	静态交通信息	全自动化	高可靠动态交通事件信息，周边交通环境运动状态。
		复杂交通条件下需要驾驶员介入	高可靠动态交通事件信息，周边交通环境运动状态。需要评估特定条件介入提示时，留给驾驶员操控切换及安全处理所需要的时间是否足够。
		车速控制、 车道保持	本车道前方车辆运动状态信息、前方的障碍物及路面坑槽。需评估信息获取的及时性和准确性。
三级	静态交通信息+动态交通信息	全自动化	周边交通环境运动状态。
		复杂交通条件下需要驾驶员介入	周边交通环境运动状态。需要评估特定条件介入提示时，留给驾驶员操控切换及安全处理所需要的时间是否足够。
		车速控制、 车道保持	本车道前方车辆运动状态信息、前方的障碍物及路面坑槽。需评估信息获取的及时性和准确性。
四级	静态交通信息+动态交通信息+临近区交通环境运动状态实时信息	全自动化	周边交通环境运动状态（通过路侧车路协同系统获取）+交通动态信息（通过移动互联获得）
		复杂交通条件下需要驾驶员介入	周边交通环境运动状态（通过路侧车路协同系统获取）+交通动态信息（通过移动互联获得）。需要评估特定条件介入提示时，留给驾驶员操控切换及安全处理所需要的时间是否足够。
		车速控制、 车道保持	周边交通环境运动状态（通过路侧车路协同系统获取）

### 3.3 AV 车辆运行速度

#### 3.3.1 运行速度是通行自动驾驶汽车公路安全性评价的重要依据。

对于 AV 车辆与普通车辆混合通行公路、具有混合通行专用车道的公路、具有 AV 车辆专用车道的多车道公路，首先要满足《公路项目安全性评价规范》的要求，需要按照《公路项目安全性评价规范》提出的运行速度测算方法对整条公路上下行两个行车方向进行运行速度预测，并评价各项指标的安全性。

无干扰情况下 AV 车辆运行速度预测应根据 AV 车辆的自动化水平，分析感知、判断、决策、响应过程，并由车辆的速度控制算法对沿线道路条件下的运行速度推演来确定。

存在其它车辆干扰的情况下，AV 车辆运行速度预测需要考虑多工况下的仿真推演来确定，或者根据不同位置的交通干扰程度进行相应的折算，折算系数按 0.7~0.9 进行取值。

有条件的也可通过驾驶模拟实验确定自动驾驶车辆的运行速度。

---

**3.3.2** 由于 AV 车辆和人的感知、判断、决策与行动能力存在差异，将导致 AV 车辆与普通车辆的运行速度差异性，该差异性较大时对普通车辆构成行驶风险。构成的行车安全风险包括 AV 车辆超车、变道、跟驰等对普通车辆构成的行驶安全风险、AV 车辆减速度过大或遇前方事件刹车过晚对后跟普通车辆的行车安全风险等。

### 3.4

AV 车辆对公路运行环境信息的感知判断决策与行动能力参数见公路相关设计技术规范，如感知时间、刹车距离等。鉴于自动驾驶车辆需要较长时间逐步通行公路，初步其运行速度无法通过野外观测获取，因此，对于拟获取公路通行权的自动驾驶汽车应提供车辆速度决策模型或算法，特别是在线形极限指标路段的速度选择算法。

## 4 标志标线

尽管自动驾驶汽车具有精准定位系统和导航系统，但仍需多标志标线具有准确感知、判断和决策能力。本章把标志标线作为统一的道路信息进行评价。

**4.1.1-4.1.2** 《公路项目安全性评价规范》对标志标线的安全性评价做了非常细的规定。该评价可重点评价自动驾驶汽车对不可变标志标线信息奇异、不同程度的破损的感知判断能力。特别要评价自动驾驶汽车对破损禁令标志标线的感知判断能力；对于指路信息，应评价对错判导致的行为纠正模式及其对其自身和周边车辆安全性的影响。

## 5 车路协同

本标准在评价车路协同对自动驾驶汽车通行公路安全性的评价不涉及车路协同技术本身如何实现。

### 5.0 系统方案

车路协同总体系统方案对无人驾驶体系的安全性具有重大影响。

**5.01** 总体思路上有两种方式来实现自动驾驶车辆间协同：一种是提高车车通讯和交互的能力，或者提高车与道路设施的交互能力，从而使每辆车获得足够多的信息，并通

---

过各自车辆自动驾驶控制系统依据一定的规则和协议实现驾驶意图的协同；另一种是提高路侧道路设施与车辆的交互性能，通过路侧单元的信息收集、分析和处理并对短程联网车辆发出控制指令，从而实现协同。

**5.02** 车路协同控制包括路段（甚至节点）类、全线类和路网类，不同类别其控制范围和对交通安全的保障效果也有差异。在实现上，需要与系统的体系架构相匹配。通常路段或节点类的仅仅需要路侧单元形成的局域网范围内进行信息交互与协同，而全线和路网级的需要采用云雾融合的体系架构，实现多点协同控制，提升道路的通行能力和安全性。

**5.03** 车辆进入到路侧单元区，需要与单元设施及周边车辆进行组网，通常采用自组网路由协议。由于车速快，对动态组网效率及网络无线通讯覆盖的范围都有相应的要求。此外，车辆在处于跨路侧单元网络时，突然加入或消失会对安全辨识与决策会有影响。另外不同的通讯方式其实时性、作用距离等都有差异，需要考虑根据不同的需求采用合理的或多模式通讯方式。

**5.04** 路侧单元范围内的动态交通信息的实时感知有多种模式：模式一，以道路本身感知为主，通过路侧或路面埋设的传感器对车辆的车速、位置甚至重力进行感知；模式二，所有的车辆（智能车）将信息通过无线通讯方式传递给路侧单元，路侧单元汇总后进行综合处理获取所有车辆的实时交通信息；模式三，多源数据融合，即两种模式获得的数据甚至再加上智能车感知的周边交通动态信息混合在一起进行综合处理。信息感知的准确与否，不仅与感知模式有关，也与交通混行程度有关。

## **5.1 AV 专用公路**

**5.1.1** 路侧控制层是指分布在道路两侧或路口的控制单元，对上级交通控制层发送的控制任务进行分解，负责动态交通信息采集、指令发布以及信号灯控制。动态交通信息如车流量、车道占用率和车队状态信息，具有时变、瞬态和难以预测的特点。因此需要通过高水平的传感探测技术进行实时采集。

按一定的路段间距对专用公路系统的交通流进行分段管理与控制，路侧控制器实时采集车辆通过路段时的信息，如车辆基本信息、车速、车道位置等。对进行评价。

**5.1.3~5.1.4** 从保障 AV 专用公路运行安全的角度，对路侧设施（或路-路设施）信息通讯系统和车路协同信息通讯系统进行评价。

**5.1.5** 在无人驾驶车流协同行驶过程中，行驶目的地相同的多辆车组成一个汽车队列，

---

通过车车通信网络向跟随车辆发布协同策略和控制指令，其他车辆跟随行驶。

定速巡航是指车辆通过车路通信从路侧控制单元获取车队在行驶路段上的规定车速、车辆间距和车道位置等信息，通过车车通信管理和控制各车辆保持等速与等车距的行驶，可达到控制交通流量的目的。

跟随行驶工况安全性评价的内容包括但不限于 1) 车载传感器和无线通信网络获得前车的行驶速度、加速度、位移等状态信息；2) 为以保持合理的车速与车辆间距，应对响应跟随方案；3) 为减小车队从静止启动并加速过程中各车辆的时间响应间隔、车车通信的同步性信息；4) 在交通控制中心的综合管理控制下，不同路段控制器实时发布车速和车辆间距控制指令，跟随车辆在领航车辆的控制与协同下，迅速控制行驶车速和车辆间距，车队恢复稳定行驶过程的安全性。

跟随、变道或超车可从车辆驶离原有位置距车队的距离、超车加速度、驶入原车道的安全距离、驶入原车道的时间和加速度等对安全的影响进行评价，评价车路协同技术性能对以上行驶过程安全性的适用性。

## 5.4 平面交叉口

**5.4.1** 本节评价的内容是针对 AV 车辆通过平面交叉口时必须通过车路协同所需要的平面交叉特征信息是否满足 AV 车辆通过平面交叉口的安全性。

评价重点是路侧单元及 AV 车辆对各类交通动态信息感知的全面、准确和时效性。这些信息包括车辆的位置、速度、行驶方向、交通信号、行人和非机动车的位置、移动速度、移动目标等。同时，需要考虑对天气事件、道路异物侵入、路面湿滑状态、改变车道、准备停车、道路施工和其他异常事件等信息的获取能力。

**5.4.2** 本节评价的内容是评价交叉口在交通状态变化、气象条件、突发事件各种工况下的控制逻辑是否存在不合理的地方，是否有必要的安全冗余。

## 5.5 互通立交区

针对互通立交冲突区范围的动态交通对交通安全的影响，从信息获取和控制逻辑两个方面进行评估。

**5.5.1** 本节评价的内容是临近区范围主线和匝道车辆的实时交通信息（位置、车速、是否 AV 车、合流分类意图、各类交通事件）是否能精准获取，获取的可靠性和时效性是否能满足车路协同控制的要求。

---

### 5.5.2 应符合下列规定：

1 AV 车辆驶进合流区时，需要获得即将通过匝道等的预警信息，如匝道入口位置、匝道走向、是否有车辆汇入、匝道来车的类型、定位、速度、加速度、方向、车距等信息等；应评价是否有可穿越间隙，是否必要在合流前置区发布预先向左变道的信息提示；当 AV 车辆在主路内侧车道行驶至合流区，是否需要发布交通流量发布尽量保持行驶路径通过匝道的提示信息。

2 AV 车辆从匝道进入合流区并汇入主线的行驶可能需要获取应发布即将汇入主路等预警信息，提供匝道入口位置、匝道走向、主路来车的类型、定位、速度、加速度、方向、车距等信息，向 AV 车辆发布预警信息；应评价是否具有可穿越间隙，必要时发布加速汇入主路的信息提示。

3 AV 车辆进入分流区所需的信息可能包括驶出主路进入匝道的信息提示，主路车速、车道占有率、交通量、车道数、车距、出口位置、匝道走向、匝道限速等信息，可穿越间隙，必要时的减速行驶与预先变道的信息、视距遮挡等。

4 应平衡交通需求，评价当专用车道发生事故或其他突发事件时，使用附近的或平行车道或采取换道行驶等控制策略的运营安全性；可根据实时交通流状况改变匝道配时方案，并评估其对 AV 车辆运营安全性的影响，发布不同路径的诱导信息。

5 应考虑交通时变信息对系统运行的影响，包括车辆运动状态变异性、控制指令的滞后性等。

## 5.6 隧道

5.6.1 本节评价的内容是针对 AV 车辆通过隧道段时必须通过车路协同所需要的隧道段的道路交通设施特征信息是否满足 AV 车辆通过隧道段的安全性，包括考虑 AV 车辆在卫星信号失效下如何定位或被感知、AV 车辆在洞口光线剧烈变化下的目标感知或被感知。

5.6.2 本节评价内容针对在隧道封闭环境下动态组网和通讯的可靠性和覆盖范围的影响。

5.6.2 本节评价的内容是针对隧道环境下应对交通事件的车路协同控制逻辑。包括出入口图像感知失效下的协同控制逻辑，火灾、施工、事故等事件下的协同控制逻辑，行人、非机动车、异物入侵等情况下的协同控制逻辑。



5.7 大跨度桥梁

评价大跨度桥梁特有的侧风、局部团雾、桥面结冰（相对连接的路基路面状况良好）等工况下的信息感知和协同控制逻辑。

6 事件

6.1 不良气象条件

6.1.1 自动驾驶车辆对标志、标线以及车辆等交通环境的辨识，可以通过视频、激光、雷达等传感器进行监测。在低能见度天气时，应根据自动驾驶车辆获取信息的主要传感器特征，对标志、标线以及交通环境的信息获取的识别性以及准确率，对低能见度环境下自动驾驶车辆安全行驶的等级进行划分。依据对信息获取的判断准确率，对车路协同控制系统设置的必要性、交通管控措施对自动驾驶车辆控制的可靠性等进行重点评价。

对于混行、只设专用车道的公路，若 AV 车辆采用精准定位等技术或车路协同技术获取信息，或在低能见度条件下 AV 车辆感知能力准确性不受影响，评价应充分考虑人的感知决策判断行动能力与 AV 车辆的差异，评价运行速度、车头时距等对正常车辆行驶安全性的影响。

低能见度气象条件对自动驾驶车辆行车安全的影响可参照表 6.1.1 进行评价或提出建议。

表 6.1.1 低能见度天气对自动驾驶车辆行车安全的影响等级划分

影响等级	状况描述	道路控制措施
一级	<b>影响极大：</b> 能见度极低，安全停车视距范围内基本不能检测到标志信息或其他交通信息，误判及漏读信息风险极高	①应采取道路交通管制 ②通过车路协同系统向自动驾驶车辆提供通行规则信息
二级	<b>影响大：</b> 能见度低，安全停车视距范围内可检测标志信息和其他交通信息，但误判可能性较高（误判率在 10% 及以上）	①二级及以上公路应设置车路协同控制系统 ②三级及以下公路宜采取交通管制
三级	<b>影响较大：</b> 能见度低，安全停车视距范围内能检测标志信息和其他交通信息，但存在误判的可能性（误判率低于 10%）	①二级及以上公路宜设置车路协同控制系统 ②三级及以下公路可采取交通管制

四级	<b>影响较小：</b> 能见度较低，安全停车视距范围内基本可准确检测标志信息和其他交通信息（误判率低于3%）	特殊路段可根据需要设置智能诱导设施
----	---	-------------------

依据公路沿线历史气象信息，基于低能见度天气频率及影响级别，评价自动驾驶车辆对标志、标线、可变情报板等安全设施在低能见度天气下的可识别性以及信息的有效性。评价低能见度路段车路协同控制系统设置的必要性以及对自动驾驶车辆控制的可靠性。根据低能见度天气对行车安全的影响等级，评价重点应符合下列规定：

**1** 影响等级为一级时，低能见度天气对行车安全影响极大，应重点对道路交通管理及控制策略的合理性进行评价，并对车路协同系统信息采集、处理、发布策略以及对自动驾驶车辆控制的可靠性进行评价。

**2** 影响等级为二级时，低能见度天气对行车安全影响大，应重点对低能见度天气下速度控制方案、可变情报板信息发布内容、交通管理与控制策略的合理性进行评价，对设置了车路协同控制系统的路段，应对控制规则有效性进行评价。

**3** 影响等级为三级时，低能见度天气对行车安全影响较大，应重点对低能见度天气下速度控制方案、路侧信息发布内容的合理性进行评价；应对设置车路协同控制系统的必要性进行评价。应对互通立交、平交口等重点路段设置电子标志的必要性进行评价。

**4** 影响等级为四级时，低能见度天气对行车安全影响较小，应重点对低能见度天气下的标志、标线、可变情报板信息发布内容以及路段速度控制策略的合理性进行评价。在急弯、陡坡、隧道出入口、互通立交连接部、平面交叉等路段应对设置低能见度条件下行车智能行车诱导系统的必要性及合理性进行评价。

针对低能见度下的通行自动驾驶车辆与人工驾驶车辆的道路，应对道路的交通管理控制策略与自动驾驶车辆的速度控制、路径引导、车距控制、跟车通行等驾驶行为协调性进行评价。

**6.1.2** 在湿滑路面条件下，应依据自动驾驶车辆对的标线识别特性以及行车稳定性控制的特征，综合考虑不同路面状态、附着物种类及厚度（水，雪，冰）等指标，可参照表 6.1.2 的建议进行。

表 6.1.2 湿滑路面对自动驾驶车辆行车安全的影响等级划分

影响等级	状况描述	道路控制措施
一级	<b>影响极大：</b> 路面结冰或积雪，基本不能检测标线，且对行车稳定性影响极大	①应采取道路交通管制

		②通过车路协同系统向自动驾驶车辆提供通行规则信息
二级	<b>影响大：</b> 路面积雪或积水，标线检测受到较大影响，对行车稳定性影响较大	①二级及以上公路应设置车路协同控制系统 ②三级及以下公路宜采取交通管制
三级	<b>影响较大：</b> 路面积水较深，标线检测受到一定影响，对行车稳定性有一定影响	①二级及以上公路宜设置车路协同控制系统 ②三级及以下公路可采取交通管制
四级	<b>影响较小：</b> 路面积水较少，标线检测基本准确，对行车稳定性影响较小	特殊路段可根据需要设置智能诱导设施

自动驾驶车辆在保持车道行驶、换道超车、加减速等行驶过程中，可以通过对传统标线信息的判读或高精地图导航等方式控制驾驶行为。但在湿滑路面条件下，由于路面积水、积雪等覆盖物的影响，会对车道的判断产生影响。此外路面状态、附着物厚度等影响下还可能对自动车辆在转弯、变道、加减速等行驶过程中的行车稳定性以及安全性造成直接的影响。因此，在湿滑路面条件下，应根据路面状态、附着物种类、厚度、路面温度等信息，综合判断湿滑路面对车道检测以及行车稳定性的影响等级。并依据影响等级，对车路协同控制系统设置的必要性、交通管控措施对自动驾驶车辆控制的可靠性等进行重点评价。

依据湿滑路面对行车安全的影响级别，评价标线、路侧设施等安全设施在湿滑路面下的可识别性，以及路面抗滑性能、行车稳定性等。依据自动驾驶车辆对信息获取以及制动行为控制的特性，评价湿滑路面影响路段车路协同控制系统设置的必要性以及对自动驾驶车辆控制的可靠性。根据湿滑路面对行车安全的影响等级，评价重点应符合下列规定：

1 影响等级为一级时，湿滑路面对行车安全影响极大，应重点对道路交通管理及控制策略的合理性进行评价，并对车路协同系统信息采集、处理、发布策略以及对自动驾驶车辆控制的可靠性进行评价。

2 影响等级为二级时，湿滑路面对行车安全影响大，应重点对湿滑路面下路面抗滑以及防水滑性能、速度控制方案、分车型交通管控措施、可变情报板信息发布内容的合理性进行评价，在设置了车路协同控制系统的情况下，对控制规则有效性进行评价。

3 影响等级为三级时，湿滑路面对行车安全影响较大，应重点对湿滑路面下路面抗滑性能、速度控制方案、路侧信息发布内容的合理性进行评价；对设置车路协同控制系统的必要性进行评价。

---

4 影响等级为四级时，湿滑路面对行车安全影响较小，应重点对湿滑路面下的道路排水、路面抗滑能力、标志、标线、路侧信息发布内容以及路段速度控制策略的合理性进行评价。在隧道出入口、桥梁、互通立交连接部、平面交叉等路段应对设置智能行车诱导系统的必要性及合理性进行评价。

针对湿滑路面下的通行自动驾驶车辆与人工驾驶车辆的道路，应对道路排水系统、交通管理控制策略等与自动驾驶车辆的速度控制、路径引导、车距控制、跟车通行等驾驶行为的协调性进行评价。

**6.1.3** 对于侧风、雷电、风吹雪、沙尘暴等其他恶劣天气影响时，应根据自动驾驶车辆对环境的适应性以及行车稳定性，判断其他恶劣天气对自动驾驶车辆行车安全的影响等级。并依据影响等级，对车路协同控制系统设置的必要性、交通管控措施对自动驾驶车辆控制的可靠性等进行重点评价。对易受侧风、雷电、风吹雪、沙尘暴等恶劣天气影响的路段，应根据自动驾驶车辆对环境的适应性、行车稳定性等特征，对其他恶劣天气对自动驾驶车辆的影响可参照表 6.1.3 进行评价。

根据区域不良天气类型，对经常受侧风、雷电、风吹雪等恶劣天气影响的路段，应根据不良天气对行车安全的影响级别，对影响路段的监控设施、交通安全设施以及速度控制策略的合理性进行评价，并对设置车路协同系统的必要性、以及道路交通管理与控制策略对自动驾驶车辆控制的有效性和可靠性进行评价。根据其他不良天气对行车安全的影响等级，评价重点应符合下列规定：

1 影响等级为一级时，其他不良天气对行车安全影响极大，应重点对道路交通管理及控制策略的合理性进行评价，并对车路协同系统信息采集、处理、发布策略以及对自动驾驶车辆控制的可靠性进行评价。

2 影响等级为二级时，其他不良天气对行车安全影响大，应重点对速度控制方案、可变情报板信息发布内容、交通管理与控制策略的合理性进行评价，在设置了车路协同控制系统的情况下，对控制规则有效性进行评价。

3 影响等级为三级时，其他不良天气对行车安全影响较大，应重点对速度控制方案、路侧信息发布内容的合理性进行评价；对设置车路协同控制系统的必要性进行评价。

4 影响等级为四级时，其他不良天气对行车安全影响较小，应重点对标志、标线、路侧信息发布内容以及路段速度控制策略的合理性进行评价。在隧道出入口、桥梁、互通立交连接部、平面交叉等路段应对设置智能行车诱导系统的必要性及合理性进行评价。

针对其他不良天气下的通行自动驾驶车辆与人工驾驶车辆的道路，应对交通管理控

制策略等与自动驾驶车辆的速度控制、路径引导、车距控制、跟车通行等驾驶行为的协调性进行评价。

表 6.1.3 其他恶劣天气对自动驾驶车辆行车安全的影响等级划分

影响等级	状况描述	道路控制措施
一级	<b>影响极大：</b> 自动驾驶车辆无法适应恶劣环境，或对行车稳定性影响极大	①应采取道路交通管制 ②通过车路协同系统向自动驾驶车辆提供通行规则信息
二级	<b>影响大：</b> 自动驾驶车辆受恶劣环境影响大，或对行车稳定性影响大	应设置车路协同控制系统
三级	<b>影响较大：</b> 自动驾驶车辆受恶劣环境影响较大，或对行车稳定性影响较大	宜设置车路协同控制系统
四级	<b>影响较小：</b> 自动驾驶车辆受恶劣环境影响不大，且对行车稳定性影响不大	特殊路段可根据需要设置智能诱导设施

**6.1.4** 依据路段恶劣气象种类及分布特征，应对固定交通气象在道路沿线的设置间距、位置进行评价。其布设要求应满足《公路交通气象站网建设暂行技术要求》等交通气象相关行业标准、及地方指南的要求。

依据路段恶劣气象对行车安全的影响，应对固定交通气象的监测要素与恶劣天气影响要素的匹配性进行评价。如，对于大雾多发路段，应重点对能见度进行监测；在降雨多发路段，应重点对路面状态、水膜厚度、湿滑系数等要素进行监测；在冰雪影响路段，应重点对路面状态、湿滑系数、路面温度、覆盖物厚度等进行监测；在沙尘暴影响路段，应重点对能见度、风力风速等要素进行监测；在横风影响路段，应重点对风力、风速等要素进行监测。各监测要素的具体要求应满足《公路交通气象站网建设暂行技术要求》中的相关规定。

**6.1.5** 道路中的警告标志、禁令标志等颜色、字符、图形，应严格参照《道路交通标志和标线》GB 5768.2-2009 等相关行业规范，为自动驾驶车辆提供规范的警示信息。此外，应评价标志中指向明确及模糊信息的有效性。指向明确的信息包括限速、禁止变道超车、确认跟车距离等有较为明确的交通控制信息的标志内容；模糊信息包括注意雾天、注意结冰、谨慎慢行等需要驾驶员或自动驾驶车辆通过驾驶经验等进行判断再采取行动的信息。评价时，应根据自动驾驶车辆对信息提取、处理特性判断标志内容的有效性。

6.2 交通事件

**6.2.1** 交通事件为偶发性因素，公路事件监测系统可监测事件并通过一定的方式发布

---

事件信息；信息发布可以是针对 AV 车辆的，也可能是通用的。事件信息发布的时效性等与 AV 车辆信息获取系统有关。

**6.2.2** 在通行自动驾驶车辆与人工驾驶车辆的混行道路中，可参照《公路养护安全作业规程》中各等级公路养护作业控制区布置方案的相关规定进行评价，同时应综合考虑自动驾驶车辆与人工驾驶车辆对信息的处理时间、采取行动的反应时间、减速特性等，综合确定适合的临时设施的布设位置。在自动驾驶车辆专用道路或者专用道中，应重点考虑自动驾驶车辆对临时信息的处理反应时间，评价临时设施的布置方案合理性。

综合考虑自动驾驶车辆与人工驾驶车辆的反应时间及减速特性，对警告标志的设置位置合理性进行评价。

是否需要采用逐级限速的方式进行速度控制，并根据自动驾驶车辆以及人工驾驶车辆的运行速度，对速度控制方案的合理性进行评价。

除评价警告区、过渡区、缓冲区以及工作区等设置的合理性外应对临时警告标志、并道标志、标线及其他渠化、夜间照明、语音提示、移动式护栏、车载式防撞垫等安全设施的布设位置合理性进行评价，并对标志内的图形、文字等规范性进行评价，确保能够为自动驾驶车辆提供标准化的路段通行信息。

## **6.3 行人、动物等闯入**

本条评价的是 AV 车辆对于非正常冲突条件下的公路安全性。对于不同的公路，闯入公路的事件类别非常多，建议评价人员积累评价清单。

## **6.4 养护作业**

**6.4.1** 考虑到自动驾驶车辆与非自动驾驶车辆混行的状态，所以对于普通道路使用者所必须的标志设施等还是要按照《公路养护安全作业规程》进行设置。根据最新的《公路养护安全作业规程》（JTG H30-2015）规定，公路养护作业控制区应按照，如图 6.4.1 所示。

《公路养护安全作业规程》（JTG H30-2015）对养护作业控制区长度等几何参数做了具体规定。评价时可考虑自动驾驶汽车运行速度特性评价养护作业控制区长度等几何参数、控制区设置模式是否满足自动驾驶汽车行驶安全性的要求。

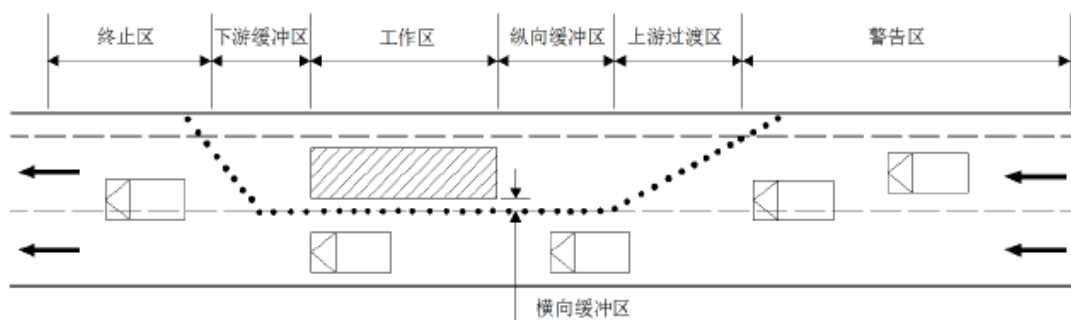


图 6.4.1 养护作业控制区示例

#### 6.4.2 应符合下列规定：

1 车辆在高速公路养护作业区行驶时，与前车车头间距在不同区域变化特性不同。具体而言，在警告区车头间距较大，基本能保证安全行车需求；合流区和作业区内，由于车道数减少，车流密度在短距离内增大，车头间距相应减小（非拥挤状态下，平均车头间距保持在 30m 左右）。分流区后车道数恢复正常，车流密度降低，车头间距逐渐增大。

在现行高速公路交通管理中，为了行车安全，一般依据《公路工程技术标准》中行车视距要求，规定车辆在不同行车速度下必须与前车保持相应的安全间距，如表 6.4.2-1 所示。而道路养护作业区路况多变，不同作业区域车流密度不同，所以，车头间距变化对行车安全性存在显著性影响，车辆间应保持足够的车头间距。

表 6.4.2-1 不同车速下最小安全行车间距

车速 (km/h) ≥	120	100	80	60
间距 (m) ≥	200	150	100	70

#### 2 自动驾驶车辆对限速控制的要求

在完全车联网的环境下，网联自动驾驶车辆要求与路侧设施之间实时信息交互。养护作业区一般采用层级限速，所以对于养护作业控制区域内需要配备一个区域中心控制单元（central control unit, CCU），用于接收与处理作业区各速度控制单元发送来的车辆运动状态与速度控制信息；每个限速起点还需配备一个速度控制单元（speed control unit, SCU），用于将速度信息传输给即将通过该限速起点的自动驾驶车辆。对于每辆即将进入限速区域的自动驾驶车辆全部配备一个车载单元（vehicle unit, VU），用于采集车辆运动状态信息，并接收区域中心控制单元发送的车速调整信息并执行对网联自动驾驶车辆的速度控制。

3 自动驾驶车辆对标志的识别要求

自动驾驶车辆的物理传感器感知范围在 200m 内，所以道路宽度范围和一定距离范围内的标志设施都能被感知到。但是夜间和隧道内行驶时，自动驾驶车辆要求养护作业区的照明设施必须满足机器视觉系统对照明的要求。

对于需要设置临时交通控制信号系统的养护作业区，信号交叉口需配备一个交叉口控制单元（intersection control unit, ICU），自动驾驶车辆配备车载单元用于接收交叉口的信号情况，根据车辆距交叉口的距离以及信号相位信息，计算出目标控制车速以及最优加速度并向自动驾驶车辆发布，车载单元即控制车辆做出加速或减速的调整。

利用自动驾驶车辆的通信和物理传感系统对养护作业区的标志标线、安全设施顺利识别，对周围车辆信息及时感知，最终安全通过养护作业区域。

4 养护作业区的限速过程应在警告区内完成，限速宜采用逐级限速，每 100m 降低 10km/h。相邻的限速标志间距不宜小于 200m。各级公路最终限速值不应大于表 6.4.2-2 所示规定。当最终限速值对应的预留行车宽度不符合要求时，应降低最终限速值。高速公路及一级公路封闭路肩养护作业，最终限速可提高 10km/h 或 20km/h。不满足视距要求的二、三级公路弯道或纵坡路段养护作业，最终限速值宜取 20km/h。隧道作业最终限速可降低 10km/h 或 20km/h，但不宜小于 20km/h。

表 6.4.2-2 公路养护作业限速值

设计速度（km/h）	限速最大值（km/h）	预留行车宽度（m）
120	80	3.75
100	60	3.50
80	40	3.50
60	30	3.25
40	30	3.25
30	20	3.00
20	20	3.00

6.4.3 自动驾驶车辆通过养护作业区时，首先需考虑自动驾驶车辆对养护作业区安全设施、标志、标线以及车辆等交通环境的辨识问题。自动驾驶车辆对标志、标线以及车辆等交通环境的辨识，可以通过视频、激光、雷达等传感器进行监测。对标识的准确辨识是顺利通过养护作业区的前提。对于夜间作业而言，自动驾驶车辆的大部分信息感知是靠机器视觉获取的，具备良好的视觉条件是获得视觉信息的基本保证，良好的视觉条件依赖于照明设施，所以对于夜间作业的养护作业区应该尤其注意照明问题。所以，在



---

养护作业区段，应根据自动驾驶车对标志、标线以及交通环境的信息获取的识别性和准确率，和操作过程中的行车稳定性进行等级划分。并依据影响等级，对车路协同控制系统设置的必要性、交通管控措施对自动驾驶车辆控制的可靠性等进行重点评价。

## 7 道路交通基础设施技术指标与 AV 车辆适应性评价

### 7.1 路段

**7.1.1** 全面评价专用车道几何线形技术指标，技术指标的类别见公路几何线形设计相关技术标准规范。总体上包括但平曲线半径、曲线超高加宽、回旋线参数、最大坡度/坡长、竖曲线半径或长度、合成坡度、专用车道数量和宽度等等。

对于 AV 车辆，评价视距为评价专用车道几何线形对 AV 车辆感知路域信息的影响。

**7.1.2** 从 AV 车辆对公路线形的适应性、路侧防护或引导设置的合理性、路侧环境的干扰排除等方面评价。

**7.1.3** 应根据公路功能和技术等级下 AV 车辆和常规（或人为）车辆的交通组成和交通特点，对常规车辆行驶速度控制管理。混行公路安全性评价应考虑 AV 车辆与普通车辆驾驶员在感知判断决策行动能力方面的差异，该差异导致两者在一些使用接近极限指标或毗邻路段线形指标差异大的路段速度差较大。

### 7.2 平面交叉口

**7.2.1** 尽管自动驾驶汽车具有精准定位与导航系统，仍需对交叉口位置和形式的可认知性进行评价。

**7.2.4** 在我国目前行人、非机动车交通量大、安全意识淡薄的条件下，应对平面交叉口交通弱势群体的安全给与足够重视。

### 7.3 互通立交

**7.3.1** 应符合下列规定：

1 速度协调性包括分流区减速车道、匝道的运行速度协调性；分流区减速车道线形连续性与主线线形、普通车辆、AV 车辆减速特性等有关。

2 主线设计速度、匝道设计速度等与分流区渐变段长度、减速车道长度有关。减速车道度取值还应考虑分流区转向交通量、大型车比例、AV 车辆感知判断库决策与行动

---

能力及 AV 车辆减速特性等有关。

**3** 警告标志至危险点的距离、标志信息的合理性、可接受性、连续性及其有效性与运行速度、标志的反光特性、光线照射方向、天气条件有关。对自动驾驶汽车的感知是否受该因素的影响及影响程度给与评价。

**4** 电子交通标志的识别特性、交通标识设置方式和设置距离的合理性及可靠性与 AV 车辆减速特性、制动特性、大型车比例、AV 车辆在车流干扰下的交通标志识别准确性有关。

## **7.4 隧道**

**7.4.1** 隧道进出口路段线形存在反向曲线且半径较小等线形条件时，可能影响 AV 车辆对隧道的感知。应对类似的情况给与评价。由于公路建设具有典型的历史演变性，我国公路隧道，特别是公路等级较低的隧道，隧道横断面与路段横断面可能存在突变且无有效的标志标线等信息，此类情况下应从 AV 车辆道路环境信息感知能力等方面评价横断面突变对 AV 车辆行驶安全的影响。

**7.4.2** 隧道进出口亮度过渡对 AV 车辆行驶安全性的影响主要表现在 AV 车辆对隧道运行环境信息（如标志标线、隧道洞口横断面等）的感知判断决策与行动，这与 AV 车辆对环境信息的感知技术类别有关。今后很长一段时期，我国公路隧道全面实现车路协同的可能性不大，因此 AV 车辆对标志标线等感知受亮度过渡的影响不应影响行驶安全性。隧道内照明方式（照明角度、光的特性等）及亮度可能影响 AV 车辆对隧道内标志标线等运行环境信息的感知与判断。

**7.4.3** 隧道进出口路面抗滑性能有差异，应根据 AV 车辆的运行速度、对抗滑性能的感知能力、刹车性能等给出评价。必要时应做行驶稳定性分析。

## **7.6 服务区**

**7.6.3** 该行驶过程的安全性及其对普通车辆行驶的影响与 AV 车辆车道识别特性、对交通冲突的感知时间，专用车道与混合车道转换段长度、交通标志设置合理性等有关。转换车道长度设置的必要性与长度与 AV 车辆车道识别特性、对交通冲突的感知时间、AV 车辆对交通标志标线的识别特性、驾驶人交通标志标线的识别特性及标志标线的合理性等有关。

## 附录：无人驾驶车辆停车视距计算

### 1. 我国规范停车视距算法

我国《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)定义停车视距为车辆以一定速度行驶中,驾驶员自看到前方障碍物起,至到达障碍物前安全停车所需要的最短行驶距离<sup>[1]</sup>。如图 3.5 所示,我国采用的停车视距包括反应距离和制动距离,并另加上 5~10m 的安全距离构成,见式 (1)。



图 1 停车视距图示

$$SSD = S_1 + S_2 = \frac{v}{3.6} t_r + \frac{v^2}{254(f+i)} \quad (1)$$

式中:  $SSD$ ——停车视距 (m);

$v$ ——行驶速度 (km/h);

$t_r$ ——驾驶人反应时间 (s);

$f$ ——路面纵向摩擦系数;

$i$ ——道路纵坡坡度 (%)。

由上式可知,我国规范中停车视距计算主要取决于反应时间、行驶速度、道路附着系数、道路纵坡等参数。其中行驶速度取运行速度值,我国规范中运行速度取值:设计速度为 120~80km/h 时,采用设计速度的 85%; 60~40km/h 时,采用设计速度的 90%; 30~20km/h 时,采用设计速度。

但无人驾驶车辆采用激光雷达探测技术,其对前方障碍物的识别、判断时间非常微小,可不计反应时间。则无人驾驶车辆停车视距计算公式为:

$$SSD = \frac{v^2}{254(f+i)} \quad (2)$$

#### 1) 一般地区无人驾驶小客车停车视距

无人驾驶车辆行驶速度基于对路段限速标志的识别,其行驶速度为路段限制速度,

取设计速度值。根据式（2）可计算得到一般地区路面处于潮湿状态的无人驾驶小客车停车视距，见表 1。

表 1 无人驾驶小客车停车视距计算表

设计速度 (km/h)	行驶速度 (km/h)	附着 系数	停车视距 计算值(m)	停车视距推荐 值(m)	规范取值 (m)
120	120	0.29	195.49	200	210
100	100	0.3	131.23	135	160
80	80	0.31	81.28	85	110
60	60	0.33	42.95	45	75
40	40	0.38	16.58	20	40
30	30	0.44	8.05	10	30
20	20	0.44	3.58	5	20

制动停车距离随纵坡不同而变化，上表列出小客车停车视距计算值采用纵坡为零时的平坦路面求得，理论下坡路段是危险的，上坡则比较有保障。但因采用值尚较富裕，当属安全。

2) 一般地区无人驾驶货车停车视距

我国公路停车视距计算中没有考虑纵坡对货车制动的影响。但货车空载时存在行驶惯性较大、制动性能差、轴间荷载难以保证均匀分布等问题，应考虑纵坡对其制动停车距离的影响。尽管货车驾驶员因眼睛位置高，比小客车驾驶员看得更远，但仍需要比小客车更长的停车视距。在大型车比例比较高的下坡路段，应按货车停车视距对相关路段进行检验。根据式（2）可计算取整得到一般地区路面处于潮湿状态的无人驾驶货车停车视距，见表 2。

表 2 无人驾驶货车停车视距计算表

设计速度	120	100	80	60	40	30	20
0	200	135	85	45	20	10	5
3	218	146	90	48	20	10	5
4	227	152	95	49	20	10	5
下坡坡度		158	97	51	20	10	5
(%)	6		101	53	20	10	5
	7			55	20	10	5
	8					10	5
	9						5

对比表 1 与表 2 的计算结果，当设计速度大于等于 60km/h 时，道路纵坡对车辆的停车视距影响显著。

2. 考虑驾乘舒适性停车视距计算方法（AASHTO 法）

由于道路摩阻系数与轮胎条件、路面条件及制动条件相关，其规定值是在实验值的基础上得来。随着现代汽车工业的发展，新的轮胎和路面材料，以及汽车防抱死系统 ABS 的应用，并且我国《机动车运行安全技术条件》（GB7258-2012）规定我国的大型货车必须安装 ABS 系统，这些设备的产生与应用都大大提升了汽车的制动性能。道路附着系数不再能准确的反映出车辆的制动情况。美国绿皮书从 2001 版开始，运用汽车制动减速度来代替道路摩阻系数<sup>[2]</sup>。

$$SSD = S_1 + S_2 = \frac{v}{3.6}t_r + \frac{v^2}{25.92a}$$

(3)

式中：SSD——停车视距（m）；  
v——设计速度（km/h）；  
a——制动减速度（m/s<sup>2</sup>）；

AASHTO 对 45 名驾驶人 3000 次制动试验中，发现 90%的驾驶人意外识别障碍物时紧急刹车所采用的减速度大于 3.4 m/s<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。本文参考各国路线设计规范（表 2），一般地区 a<sub>max</sub> 拟选用较为舒适的 3.4m/s<sup>2</sup>。

表 2 国外路线指南中制动减速度参考

参数	美国指南（AASHTO， 2011 6 <sup>th</sup> Edition）	德国指南 （RAA，2008）	澳大利亚指南 （Australia，2009）	
平均制动减速  (m·s <sup>-2</sup> )	3.40	3.70	2.55	舒适制动
			3.53	舒适紧急制动
			4.51	紧急制动
			0.26	舒适制动
纵向摩阻系数	0.35	0.38	0.36	舒适紧急制动
			0.46	紧急制动

1) 一般地区无人驾驶小客车停车视距

无人驾驶车辆不考虑反应时间，行驶速度取设计速度，根据对减速度取值分析和式（3）可计算出一般地区无人驾驶车辆的停车视距值，见表 3。

表 3 无人驾驶小客车停车视距计算表

设计速度 (km/h)	行驶速度 (km/h)	制动 减速度 (m/s <sup>2</sup> )	停车视距 计算值(m)	停车视距推 荐值(m)	AASHTO 推荐值 (m)
----------------	----------------	----------------------------------	----------------	----------------	----------------------

120	120	3.4	163.40	165	250
100	100	3.4	113.47	115	185
80	80	3.4	72.62	75	130
60	60	3.4	40.85	45	85
40	40	3.4	18.16	20	50
30	30	3.4	10.21	15	35
20	20	3.4	4.53	5	20

注：表中蓝色部分为传统人工驾驶状态下规范的标准值。

2) 一般地区无人驾驶货车停车视距

AASHTO 同样提出在有坡度的道路上，应该考虑纵坡坡度对停车视距的影响，根据对于无人驾驶车辆考虑制动减速度和坡度的停车视距计算公式如下：

$$SSD = \frac{v^2}{254(\frac{a}{9.8} \pm i)} \tag{4}$$

根据式（4）对下坡路段停车视距值进行计算取整，见表 。

表 4 无人驾驶货车停车视距计算表

设计速度	120	100	80	60	40	30	20
0	165	115	75	45	20	15	5
3	179	125	80	45	20	15	5
4	185	130	83	47	21	15	6
下坡坡度	5	133	85	48	22	15	6
(%)	6		88	50	22	15	6
	7			52	23	15	6
	8					15	6
	9						6

对比表 3 与表 4 的计算结果，当设计速度大于等于 60km/h 时，道路纵坡对车辆的停车视距影响显著。

3. 紧急制动情况下停车视距计算值

我国《机动车运行安全技术条件》（GB7258-2012）规定我国的大型货车也必须安装 ABS 系统，这些设备的产生与应用都大大提升了汽车的制动性能。ABS 系统能够防止车轮被制动抱死，提高了汽车制动时的方向稳定性和转向操纵能力。根据静摩擦系数大于动摩擦系数的原理，ABS 提高路面制动力，缩短了汽车制动距离。若不考虑驾驶员舒适性因素，仅仅考虑保证安全性条件下的汽车紧急制动，车辆的制动距离更近，所需停

车视距值更小。

考虑 ABS 系统参数对制动距离和制动减速度的影响，即考虑制动器的压力调节频率和调节幅度，并用余弦函数模拟 ABS 的制动压力调节过程，建立 ABS 汽车制动距离计算模型。

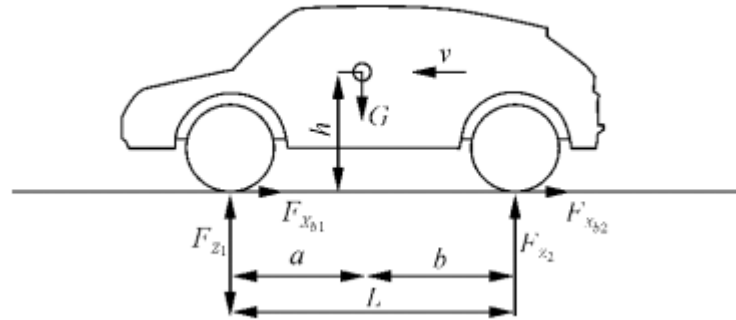


图 2 制动时的汽车受力分析图示

$$\begin{aligned} F_{z_1} &= G(b + \frac{dv}{dt} \cdot \frac{h}{g}) / L \\ F_{z_2} &= G(a - \frac{dv}{dt} \cdot \frac{h}{g}) / L \end{aligned} \quad (5)$$

对汽车行驶方向进行动力学分析，可得：

$$F_{x_{b1}} + F_{x_{b2}} = \frac{G}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

在持续制动阶段内，认为 ABS 处于工作状态，根据滑移率的变化特征，取各车轮滑移率的变化为时间的余弦函数，可得到各个车轮滑移率随时间  $t$  的变化公式为：

$$S_i = A_0 + A_i \cos(\frac{2\pi}{T_i} \cdot t) \quad (7)$$

一般情况下，车轮的滑移率为 10%~30%时车辆能达到最佳的制动效果<sup>[4]</sup>。选取 20% 作为小客车 ABS 控制滑移率的目标值，并选定前后轮滑移率的幅值为 10%和 15%，理想状态下前后轮滑移率变化的周期分别为 0.16s 和 0.35s<sup>[5]</sup>。

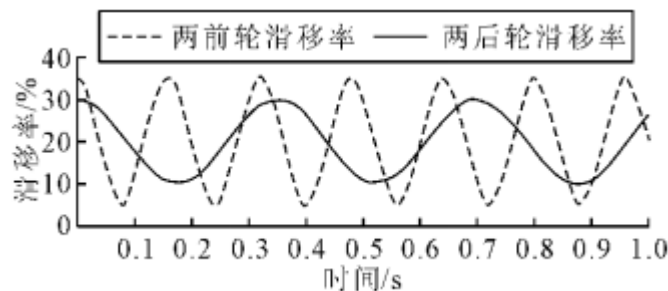


图 3 滑移率随制动时间变化关系

决定汽车制动距离的主要因素有制动器起作用时间、附着力及起始制动车速，同时，制动过程中受路面附着力限制的地面制动力起着决定性作用，其是使汽车制动而减速行驶的外力。附着系数的数值主要取决于道路的材料、路面的状况与轮胎结构、胎面花纹与材料，以及汽车运动的速度等因素，当行驶工况一定时，可将其取为定值，见表 5。

表 5 各种路面的平均附着系数

路面	峰值附着系数	滑动附着系数
沥青或混凝土（干燥）	0.8~0.9	0.75
沥青（潮湿）	0.5~0.7	0.45~0.6
水泥混凝土（潮湿）	0.8	0.7
雪（压实）	0.2	0.15
冰	0.1	0.07

由于滑移率与制动力系数关系要用曲线才能精确拟合，计算量较大，不适宜实时控制，为了获得简单的解析解，用双直线来拟合，得到滑移率与制动力简化模型，如图 4 所示，定量关系式如式（8）所示。

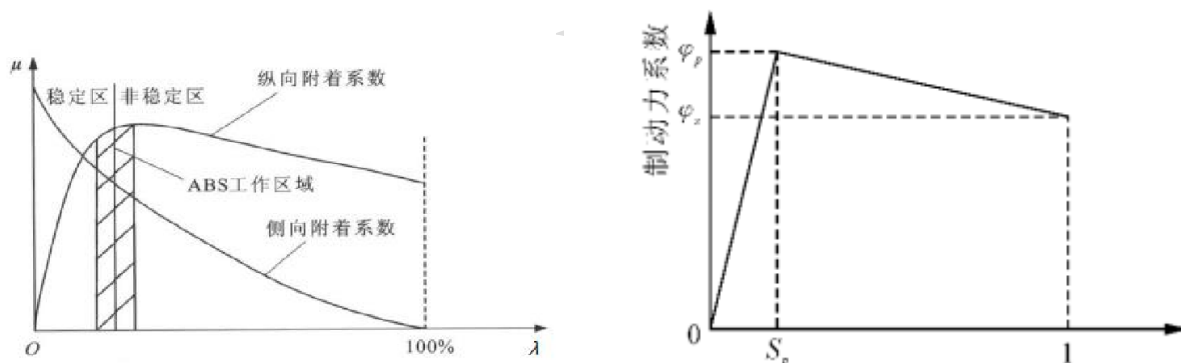


图 4 地面制动力与滑移率计算模型

$$\varphi_b = \begin{cases} \frac{\varphi_p}{S_p} \cdot S & 0 \leq S \leq S_p \\ \frac{\varphi_p - \varphi_s S_p}{1 - S_p} - \frac{\varphi_p - \varphi_s}{1 - S_p} \cdot S & S_p < S \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中， $\varphi_p$  为峰值附着系数， $\varphi_s$  为滚动附着系数， $S$  为滑动率， $S_p$  为最佳滑动率。为简化计算可选取第二段分段函数进行计算。

制动力系数为地面制动力与垂直荷载之比，可得前后轮的地面制动力分别为：



$$\begin{aligned} F_{X_{b1}} &= \frac{F_{Z_1}}{2} \cdot \varphi_{b1} + \frac{F_{Z_1}}{2} \cdot \varphi_{b2} \\ F_{X_{b2}} &= \frac{F_{Z_2}}{2} \cdot \varphi_{b3} + \frac{F_{Z_2}}{2} \cdot \varphi_{b4} \end{aligned} \quad (9)$$

假设车辆左右轮的制动分配是相同的, 即  $\varphi_{b1} = \varphi_{b2}$ ,  $\varphi_{b3} = \varphi_{b4}$ 。联立式 (8)、式 (9)、可解得车辆瞬时减速度为:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{b(\varphi_{b1} + \varphi_{b2}) + a(\varphi_{b3} + \varphi_{b4})}{2L + h(\varphi_{b3} + \varphi_{b4} - \varphi_{b1} - \varphi_{b2})} \cdot g = \frac{b\varphi_{b1} + a\varphi_{b3}}{L + h(\varphi_{b3} - \varphi_{b1})} \cdot g \quad (10)$$

偏于安全考虑, 假设在持续制动阶段制动减速度恒定, 并取其最小值。由式 (7)、式 (8)、式 (10) 可 ABS 作用时车辆的最小制动减速度为:

$$a_{\min} = \frac{b\varphi'_{b1} + a\varphi'_{b3}}{L + h(\varphi'_{b3} - \varphi'_{b1})} \cdot g \quad (11)$$

式中:  $\varphi'_{b1}$ 、 $\varphi'_{b3}$  分别为前后轮制动力系数的最小值。

$$\begin{aligned} \varphi'_{b1} &= \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_s}{1 - 0.2} \times 0.1 \\ \varphi'_{b3} &= \varphi_p - \frac{\varphi_p - \varphi_s}{1 - 0.2} \times 0.15 \end{aligned} \quad (12)$$

紧急停车情况下的无人驾驶车辆停车视距等于车辆持续制动阶段的制动距离, 使用最佳滑移率对应的最小制动减速度, 其计算值略大于实际值, 计算值更加偏于安全, 见式 (13)。

$$SSD = \int_0^t \frac{dv}{dt} dt = \int_0^t a_{\min} dt = \frac{v^2}{25.92a_{\min}} \quad (13)$$

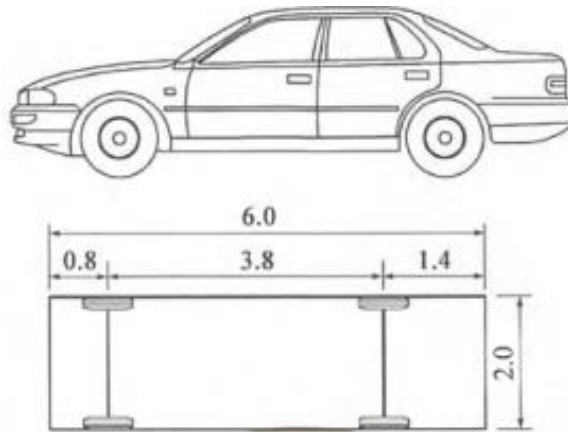


图 5 小客车代表车辆参数

如图 5 所示，计算模型中小客车参数  $a$ ,  $b$ ,  $L$  按照我国《公路工程技术标准》(JTG B01-2014) 中小型车代表车型取值， $h$  取 0.75m。根据表的路面峰值附着系数和滑动附着系数的情况，选取潮湿沥青路面的峰值附着系数 0.5 作为模型计算值，可计算得到 ABS 系统作用时无人驾驶车辆的停车视距值，见表 6。

表 6 紧急制动情况下无人驾驶车辆停车视距计算表

设计速度 (km/h)	行驶速度 (km/h)	小客车 $a_{\min}$ (m/s <sup>2</sup> )	停车视距 计算值 (m)	停车视距 推荐值 (m)	《规范》法 计算取值 (m)	AASHTO 法 计算取值 (m)
120	120	4.95	112.23	115	200	165
100	100	4.95	77.94	80	135	115
80	80	4.95	49.88	50	85	75
60	60	4.95	28.06	30	45	45
40	40	4.95	12.47	15	20	20
30	30	4.95	7.01	10	10	15
20	20	4.95	3.12	5	5	5

注：表中蓝色部分为传统人工驾驶状态下规范的标准值。

2) 大货车紧急制动停车视距仿真研究

因铰接列车轴数较多，制动力分配复杂，且实车试验存在一定的危险性，则目前国内外对于铰接货车 ABS 系统紧急制动的研究甚少，没有铰接列车紧急制动距离计算模型可参考。文中使用 Trucksim 汽车仿真软件对装有 ABS 系统的铰接列车紧急制动距离进行仿真研究。

Trucksim 是由美国机械仿真公司(Mechanical Simulation Corporation，即 MSC)，在密歇根大学公路交通研究所 UMTRI 多年的试验及车辆动态研究经验基础之上，开发的一种动态模拟汽车整车动力学的仿真软件。在整车性能仿真预测时，可根据初始理论设计参数，进行参数化模型搭建，可分析车辆的动力性、燃油经济性、操纵稳定性、制动性等方面指标。

(1) Trucksim 仿真建模

根据《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)，我国公路设计所采用铰接列车外廓尺寸为：总长 18.1m，总宽 2.55m，总高 4m，前悬 1.5m，轴距 7.0m，后悬 2.3m。根据上述计算车辆参数在 TruckSim 中建立车辆模型，车型为 3A Cab Over w/3A Euro Trailer 的六轴半挂汽车列车。

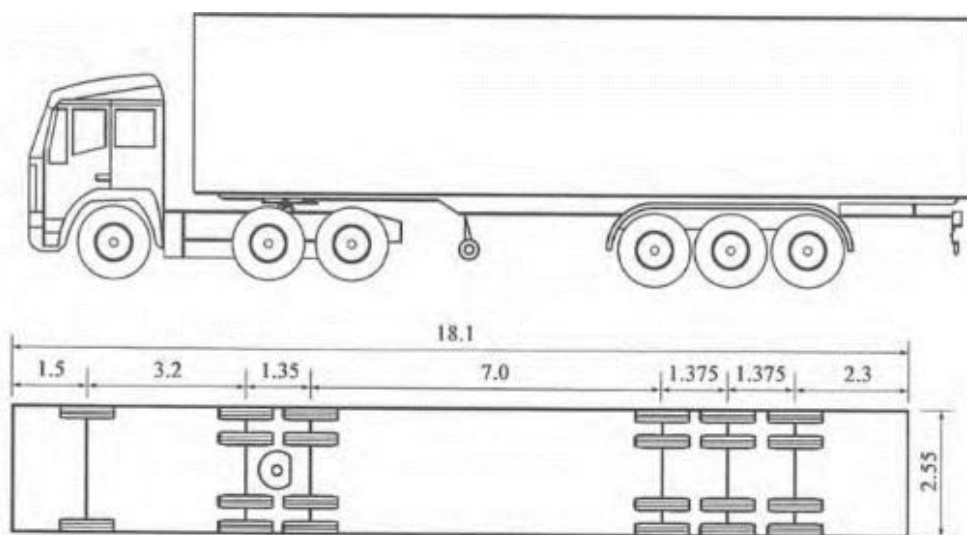


图 6 我国规范中铰接列车设计代表车辆车身尺寸



图 7 TruckSim 中铰接列车车辆建模

轮胎是整车动力学模型的重要组成部分，轮胎力学特性直接影响着车辆的动力性、制动性能、操纵稳定性。车辆悬架的建模主要是建立悬架的运动学特性（Kinematics）和弹性运动学特性（Compliance）。按照文中对计算车型的要求，使用 Magic Formula 轮胎模型，轮胎半径取 550mm，宽度取 315mm，双胎中心线间距取 310mm 作为仿真输入参数。车辆后两轴每侧都为双胎模式，并单独输入轮胎特性参数，Trucksim 会根据具体的设置自动转化为当量双胎受力模块。

悬架特性数据通过试验获得，车辆前轴选用 5.5T 的 K&C 特性悬架，后轴选用 15.5T 的 K&C 特性悬架。钢板弹簧和阻尼器本身的特性曲线，以及悬架系统 K&C 特性对转向系统、轮胎系统和操纵稳定性等整车动力学的影响因素，采用软件提供的默认值。

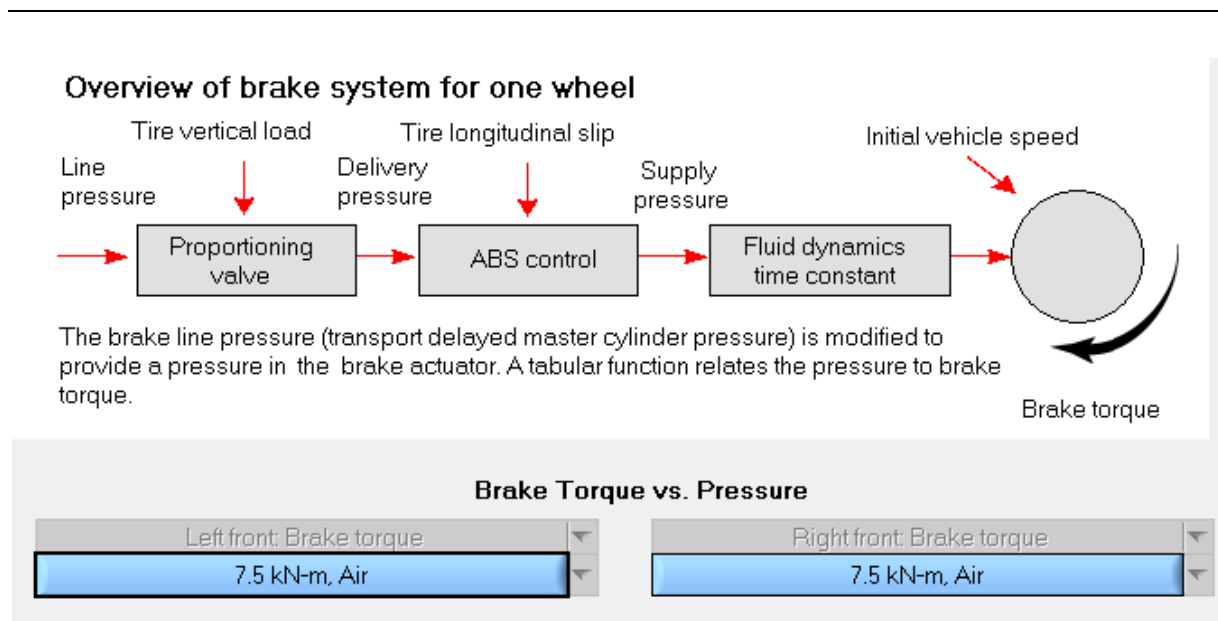


图 8 刹车模块参数配置

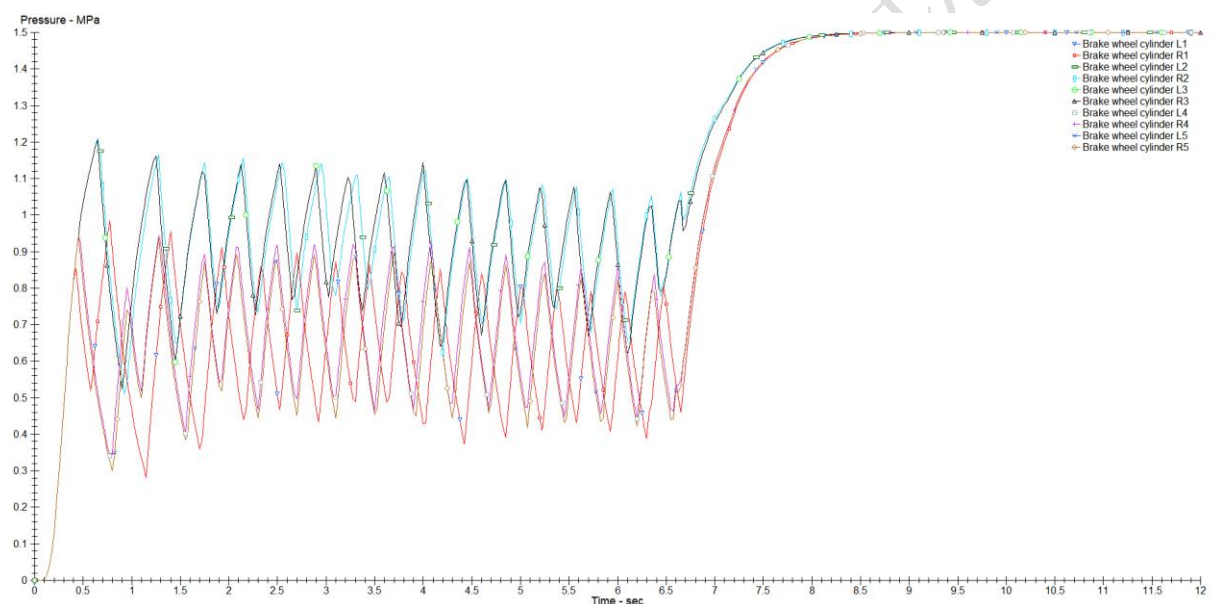


图 9 制动力变化曲线图

## (2) ABS 货车制动距离仿真

仿真路面的摩擦系数  $f$  取潮湿沥青路面的峰值附着系数 0.5，分别建立不同设计速度和下坡坡度仿真场景，进行无人驾驶货车紧急制动停车视距值仿真，见下表。

表 7 无人驾驶货车停车视距计算表

设计速度		120	100	80	60	40	30	20
下坡坡度 (%)	0	143.15	101.5	67.91	40.48	19.55	11.72	5.7
	3	154.15	109.45	73.21	43.65	20.88	12.5	6.15
	4	157.35	111.8	74.82	44.75	21.74	13.01	6.34
	5		114.7	76.77	45.95	22.32	13.33	6.53
	6			78.76	47.22	22.98	13.7	6.71

7	48.59	23.69	14.1	6.85
8			14.54	7.06
9				7.35

4. 无人驾驶车辆停车视距取值

对比我国《规范》停车视距计算法同 AASHTO 法的计算结果发现，设计速度小于等于 60km/h 时，两者的计算结果是一致的，设计速度大于 60km/h 时我国《规范》中计算结果稍大于 AASHTO 法，如图 10 所示。由于汽车制动性能的不断提升，道路附着系数已不再能准确的反映出车辆的制动情况，所以考虑驾乘舒适性制动减速度代替道路附着系数计算停车视距更加合理。

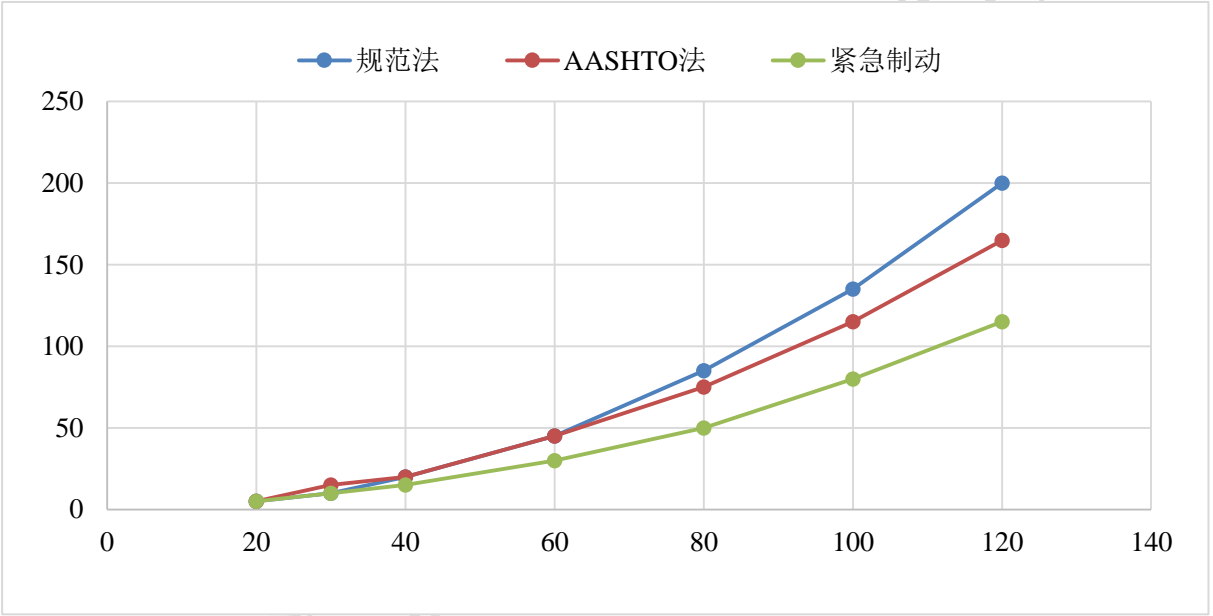


图 10 小客车停车视距取值对比

由于无人驾驶车辆对道路信息感知和障碍物识别迅速准确，其停车视距仅受路面摩擦条件、车辆制动性能、人的驾乘感受限制，故建议将紧急情况下制动距离作为其停车视距的极限值，考虑驾乘舒适性的制动距离作为一般值，见下表。

表 8 无人驾驶车辆停车视距取值表

设计速度 (km/h)	120	100	90	80	70	60	50	40	30
极限值 (m)	115	80	65	50	40	30	20	15	10
一般值 (m)	165	115	95	75	60	45	30	20	15

由于货车空载时存在行驶惯性较大、制动性能差、轴间荷载难以保证均匀分布等问题，应考虑纵坡对其制动停车距离的影响。尽管货车驾驶员因眼睛位置高，比小客车驾

---

驶员看得更远，但仍需要比小客车更长的停车视距。在大型车比例比较高的下坡路段，应按表 中货车停车视距对相关路段进行检验。

征求意见稿条文说明

---

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准, JTG D20-2017 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [2] AASHTO. A Policy on geometric design of highways and streets[J]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011, 1(990): 158.
- [3] 中华人民共和国行业标准. JTG/T D21-2014 公路立体交叉设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
- [4] Kaltsounis A, Vardaki S, Roussiamanis N, et al. A review of stopping sight distance in road design guidelines[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport, 2013, 166(5):305-312.
- [5] 郑太雄, 马付雷. 基于逻辑门限值的汽车 ABS 控制策略[J]. 交通运输工程学报, 2010(2):69-74.
- [6] 沈晨, 秦训鹏, 刘昌业, et al. 基于滑移率变化模型的 ABS 汽车制动距离计算[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2015(6):865-869.