

未来交通 | 自动驾驶系统安全性评估指标和方法的最佳实践

导读： 安全性一直是无人驾驶车辆部署和公众接受的主要关注点，尤其在发生了无人驾驶车辆与行人的碰撞事件之后。虽然在 COVID-19 大流行期间，公众对无人驾驶车辆的接受度有所提高，但仍低于整车厂、技术方和政府的预期。此前，各技术公司、车辆制造商及其他行业参与者急于争夺市场，虽已提出若干种评估 ADS 安全性的方法框架，但均未被广泛采用。然而，只有用可靠、可行及一致的方法衡量自动驾驶系统（Automated Driving System, ADS）的安全性，才有助于 ADS 开发者协作以及赢得公众的信任和信心。

本报告是由无人驾驶行业联盟发布的一份针对 ADS 安全性评价的最佳实践指南。该联盟由技术公司、汽车制造商、互联网出租车公司和标准制定公司（SAE International）组成。本指南在促进行业标准收敛方面意义重大，若企业的安全标准基线能达成一致，将迈出积极的一步。如果在制定新标准时能在现有标准的基础上进一步讨论从而获得更多细节，行业参与者就可以在同一轨道上对话，并不断改进。

支持 ADS 开发者测试过程的指标包括基于场景的测试和支持公司在给定设计运行区域（Operating Design Domains, ODD）的测试。跨行业、跨运行设计区域和跨产品全生命周期使用的安全性指标的一致性有助于促进安全评估的一致性。同时，各技术开发者和制造商可用定制的指标测试他们的系统，并提供系统安全性的证据。

衡量任何领域的具有统计意义的实际安全性（后果性安全），都需要相当长的时间。因此，需要 ADS 安全性的预测性指标体系予以补充。这样，在商业部署之前及期间，ADS 商即可利用预测性指标跟踪安全性并基于此进行风险管理。在 ADS 部署并产生实际数据后则可用后果性安全指标评估实际安全性。两者在 ADS 安全性评估和监测中均承担关键角色。因此，指南建议 ADS 开发者一方面追踪后果性安全指标：车辆碰撞和违背交通规则行为的频率和严重程度。另一方面也要追踪预测性安全指标：车辆安全范围突破情况；车辆安全行驶的控制能力；ADS 检测、识别物体和事件时的响应时长等。

基于已有数据的测量指标易被业界接受。依 SAE J1698 和 SAE J3197 等标准收集的车辆数据已用于事件和车辆分析中，且价值也已被充分证实。自动驾驶系统专用车辆（ADS-DV）数据收集的最佳实践可支持风险事件分析，同时也为 ADS 安全性指标的数据支持提供了可行起点。基于设施的数据能会补充基于车辆的数据，但对数据拓展性提出了挑战：如果必须用基于设施的数据，则那些无法支持 ADS 车辆的

地区将被排除在数据集外。因此，至少在近期，与 ADS 安全性相关的最广泛的可行、可靠的测量数据将来自 ADS-DV 本身。

本报告为支持长期的安全目标，提出一种基于车辆运行表现、技术中立的测度以及分析安全性的方法。本报告提出的最佳实践建议对一组安全性指标进行测量和分析，并支持新兴的 ADS 标准。

一、支持自动驾驶系统安全性的指标

自动驾驶系统（ADS）开发者和制造商应提供充足依据证明 ADS 能在公路上可安全运行。设立安全指标有助于通过定量评估的方式判断 ADS 是否达到安全标准。本指南倡导一种为安全性提供证据的流程，如图一所示。该流程从制定被社会层面的安全目标开始，以预测性安全指标和后果性安全指标支持风险管理，并最终使安全目标具体化。

制定安全	定义	描述操作	应用分析	评估
<ul style="list-style-type: none"> 明确阐述目标 关注公众担心的问题 可基于时间维度测量 	<ul style="list-style-type: none"> 指标应呼应安全目标 通常是可预测的指标 以数学的方式表达 	<ul style="list-style-type: none"> 描述内容应包括自动驾驶车辆安全联盟 (AVSC) 发布的安全词典 	<ul style="list-style-type: none"> 获得数据来源 数据分割 数据标准化 	<ul style="list-style-type: none"> 汇总并解释检测结果 证实安全目标

在应用到现实世界之前，ADS 性能应由 ADS 开发者和制造商进行衡量和评估。

这些指标和相关方法在技术性上是中立的，可以一致地应用于不同的 ADS 使用规范和不同的测试场地。

2.1 安全目标

以下是期望实现的安全目标，引导未来实践的方向：

- (1) 减少事故数量及严重程度。
- (2) 控制车辆在安全环境中行驶。

对于第一个安全目标，最直接的指标因驾驶造成碰撞的严重程度和频率；在全球范围内，降低道路风险通常依靠降低车祸频率和严重程度。本指南侧重于与动态驾驶任务有关的车祸事故。

设置第二个安全目标旨在传达 ADS 应寻求以降低安全风险的方式执行驾驶任务。能否控制无人驾驶车辆的安全行驶环境取决于许多因素，包括是否存在其他道路使用者、与其他道路使用者之间的距离以及他们移动的可预测性（如加减速和急动性）、以及附近的基础设施、交通标识和交通控制装置的类型和状态。

2.2 安全性指标

安全性指标的制定应该支撑安全目标。表一提供了一些建议的安全性指标，供 ADS 开发者和制造商参考。

表一、建议的安全性指标

类别	安全性指标	说明
碰撞	碰撞严重程度和频率	目标车辆以任何速度与移动中或固定的物体接触，导致其死亡、受伤或财产损失。
是否遵守交通规则	违反规则的严重性和频率	违反与 DDT 性能有关的交通法规。
驾驶环境是否安全（1）	与其他道路使用者之间纵向和横向的距离	指违反主体车辆和环境中其他对象之间的缓冲区。距离阈值可以根据不同指标进行设定和调整，例如，可以基于车辆和其他物体之间发生碰撞的时间（TTC），也可以基于 ADS 或其他道路使用者在具体环境中的绝对速度。
驾驶环境是否安全（2）	加速度； 急动度（加速度的变化率）	加速度（包括正加速和负加速）可以基于自动驾驶车辆或者其他道路使用者的速率和持续时间来测量； 急动度（包括正和负）也可以根据速率和持续时间来测量的，与加速度的方法相似。
对突发事件的检测与响应（OEDR）	响应时间	在基于真实场景的测试环境中，事件发生后，ADS 启动响应所需的时间。

车祸事故的经济和社会成本通常有据可查，比如可以依据财产损失、碰撞严重程度和碰撞频率的指标来评估其造成的社会危害程度，这呼应了第一条安全目标。对于第二条安全目标，有关遵守行车规范的安全指标为 ADS 提供了在相对安全的环境中行驶的措施。此外，ADS 开发者和制造商还建议使用一些关键的性能指标（KPIs）来支持 ADS 的开发和部署决策，并提供与安全指标相关的典型风险以作为警示。

二、建议的后果性安全指标

后果性安全指标为 ADS 的安全性提供了实际发生碰撞事件的定量证据。表二所列建议的后果性安全指标，可用于支撑第一个安全目标。

表二、建议的后果性安全指标

类别	安全性指标	说明
碰撞	碰撞的严重程度， I ；以及频率 f_i	<p>目标车辆以任何速度与移动中或固定的物体发生接触，导致受伤或财产损失。在比较 ADS 和其他道路使用者的碰撞严重程度时，应注意确保适当的可比性。</p> <p>此外，应该对碰撞事件并进行详细的分析（例如，思考碰撞的因果关系），并测量碰撞不确定性的置信区间，旨在能让 ADS 开发者和制造商根据 ADS 在设计和使用规范中设定的性能阈值进行比较。</p>
是否遵守交通规则	违反规则的严重程度， C_i ；以及频繁程度 C_f	<p>违反与 DDT 性能有关的交通法规，包括违反标志、信号和道路标记。</p> <p>一些常见的违规行为可作为预测指标。被指控的违规行为应被标准化，并测量不确定性的置信区间，并与 ADS 开发者和制造商设定的 ADS 性能阈值进行比较。</p>

就其本质而言，实际安全后果具有重要意义，它不仅是当今交通安全指标的基础，也代表交通安全对社会影响的国际标准。为此，实际安全后果需要基于时间维度进行连续测量，以量化的方式监管实现安全目标的过程。

2.1 碰撞事故的严重程度和频率

有关碰撞严重性和频率的指标不仅能为实际安全后果提供定量证据，还有助于提供 ADS 公司为客户展示 ADS 安全性的证据。碰撞可定义为目标车辆以任何速度与

移动中或固定的物体发生接触，从而导致其受伤或财产损失。此外，碰撞带来的社会危害通常指意外事故中的死伤总人数以及车祸严重程度和发生频率的组合，制定的安全目标旨在减少这二者的发生。

情绪化、分心驾驶以及身体不适都可能导致人类发生交通事故，但 ADS 不受这些因素的影响。随时间推移，ADS-DV 在所有交通工具中的占逐渐提高，ADS 开发者和制造商可通过分析相应数据，确定具有潜在危险的驾驶场景，并有针对性地制定改善措施，从而最大程度地避免交通事故。随着 ADS 的逐渐介入及其安全性的提升，预计未来由人因导致的事故会逐渐减少。

2.2 违反交通法规的严重性和频率

ADS-DVs 的设计应适用于 ODD 相关的规范性交通法规，在需要临时偏离以避免撞车的情况下，允许例外出现。交通法规旨在提醒 ADS 以及其他道路使用者避免与车祸相关的因素和风险，从而提高 ADS 安全性。2017 年，26% 的车祸与超速有关，限速的交通规则就可以减少此类车祸。ADS 的违规行为可通过违反交规的严重程度 (C_i) 和违反频率 (C_f) 来衡量。因此为实现安全目标，应记录与 DDT 性能相关的违规行为，以及其严重程度和频率。

违规严重程度 (C_i) 指的是一个特定的违法行为对交通安全造成的巨大风险，可以用不同的尺度来衡量。对于人类驾驶员的违规行为，美国各州用不同的计分体系衡量车祸的严重程度。交通罚单会给人类司机带来不良后果，如驾照被吊销或高额保险费。类似地，ADS 开发者也应制定一套衡量 ADS 车祸严重程度的量表，以跟踪 ADS 的违规行为。违规频率 (C_f) 指的是基于一系列数据 (如时间、距离、场景)，将违规发生的次数计量化和标准化。

三、建议的预测性安全指标

后果性安全指标可用于衡量总体安全目标的实际进展情况。然而，这类指标需要足够长的时间以保证足够的曝光量才具有统计意义。确定预测性指标通常与直接测度安全性有所不同，但可以起到预测安全后果的作用。

评估动态驾驶任务 (DDT) 的指标可作为安全性的预测性指标，可用于衡量对安全驾驶环境有益或者有害的行为。与评估实际安全性所需的事件曝光量相比，可更早地获取预测性指标评估结果。

随着自动驾驶系统车辆 (ADS-DVs) 逐渐普及，这些表明动态驾驶任务性能合格的指标，如车辆安全范围；可预测的车辆运动控制；以及检测、识别物体和事件

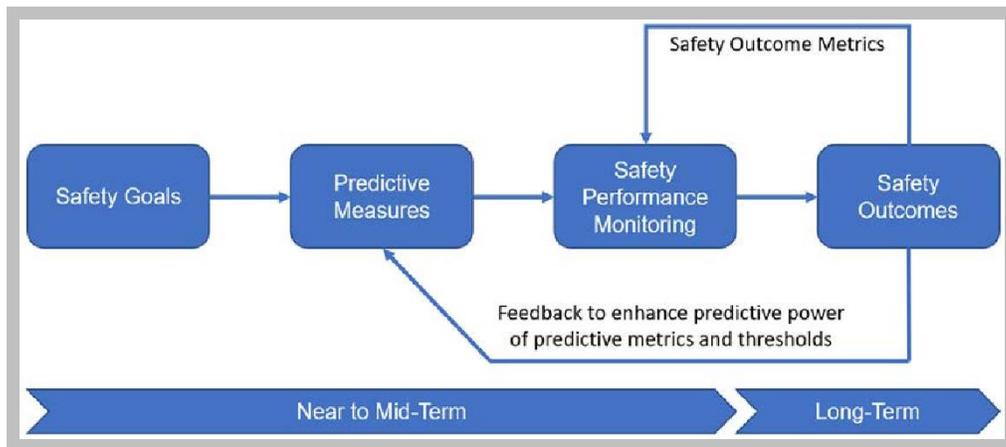
的响应时间，都应在评估安全风险时作为考虑因素。类似的测量方法也存在于评估人类驾驶车辆的交通安全性的方法中，包括碰撞时间、硬制动和突然转向行为。由于SAE 4级或5级的自动驾驶系统代替人类驾驶员执行完整的动态驾驶任务，应当假定，这些也应该是自动驾驶安全性的有效指标。

自动驾驶系统的开发者和制造商应根据预测性安全指标与实际安全后果的相关性使用表三中总结的预测性安全指标。

表三、建议的预测性安全指标

种类	预测指标	与实际安全后果的潜在相关性
维持车辆安全范围	纵向和横向距离	超出安全距离事件可能与某些碰撞类型相关，包括涉及骑自行车者的碰撞，以及追尾、转弯、变道、撞到物体或停放车辆、横穿和撞到行人。例如，碰撞时间违规率（碰撞时间是根据情境改善安全范围的一个例子）已被证明与若干与动态驾驶任务相关的碰撞事故相关，包括追尾、转弯/变道、撞到物体或停放的车辆、横穿和撞到行人。基于碰撞时间车辆安全功能 ¹⁰ 已被证明与降低碰撞率相关。
展示情境安全的车辆运动控制	加速度(纵向和横向)	高加速度事件已被证明与碰撞率相关
	急动(加速度变化率)(纵向和横向)	高急动事件已被证明与碰撞率相关。
目标和事件检测及响应(OEDR)	目标和事件检测响应时长	驾驶员的感知和反应时间已被证明与碰撞率相关。

作为稳健风险管理战略的一部分，预测性安全指标可支持在不同阶段做出决策。随着自动驾驶技术进步，为了建立总体安全性指标的有效性，需定期重新评估预测性安全指标的效力，如图二所示。



图二、预测指标和安全结果指标通过帮助预测未来的安全结果来支持风险管理

3.1 维持安全范围

安全范围是由运动学定义的车辆周围的空间，它是主体车辆与环境中的其他物体间的缓冲区。使车辆维持在安全范围内使驾驶环境更安全，因为自动驾驶系统可有更充分的时间和空间对邻近的其他道路使用者和物体作出反应，同时其他道路使用者也有机会纠正错误的行为。足够的时间和空间使自动驾驶车辆采取行动（如制动或转向），从而降低碰撞可能性或潜在严重性。

安全范围并非预先固定，安全驾驶需根据以下因素调整“安全范围”。

绝对速度。遵守规定的速度限制，并结合考虑当前的交通状况（包括路面和环境条件），较高的车速要求与其他道路使用者保持更远距离（即横向/纵向距离）；

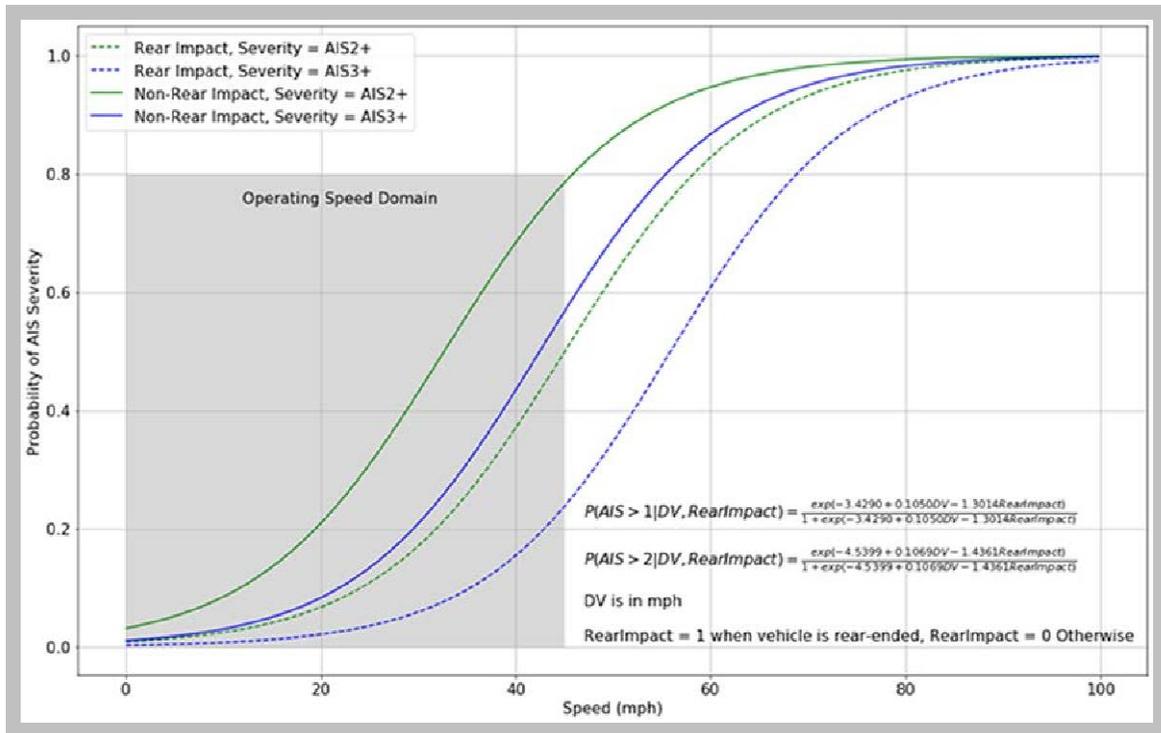
相对速度。对距离减少后的即时反应，与其他道路使用者的速度有关。

脆弱的道路使用者。需与行人和骑行者保持安全距离（即横向/纵向距离）。

其他道路使用者可预测性行为的不确定性。在其他道路使用者因行为不稳定和/或能见度/感知力差而意图不明的情况下，需与他们保持更远的距离。

突破车辆安全范围的行为意味着车辆进入了潜在的危險驾驶条件。例如，减速或停止的前车、车辆切入、同向漂移或逆向行驶的车辆、各种交叉路口和转弯场景，以及脆弱的道路使用者场景。使车辆维持在安全范围内与防御性驾驶的做法从根本上是一致的，防御性驾驶被普遍认为是更安全的驾驶方式。

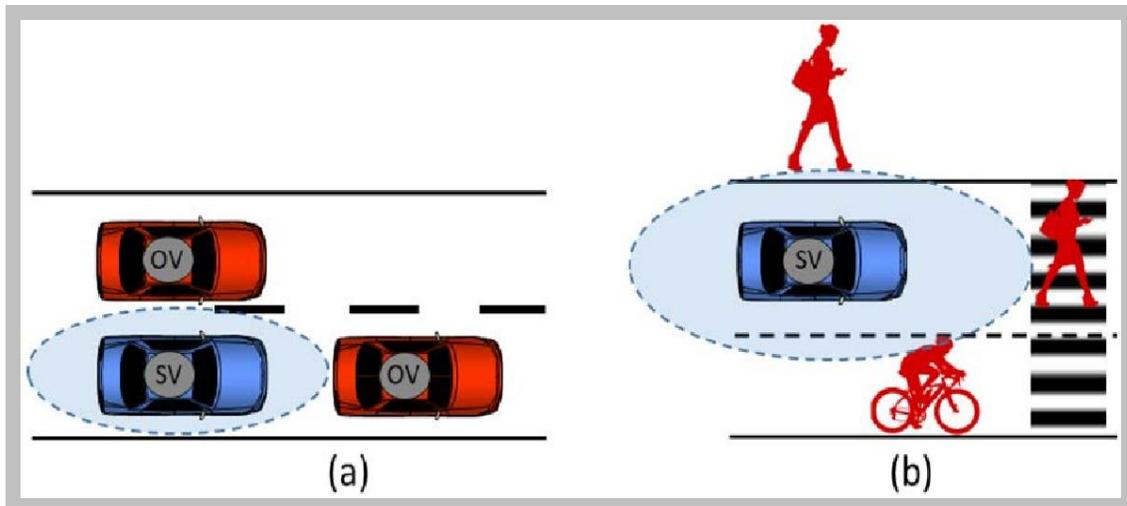
根据场景调整安全距离的一个例子是碰撞时间，其场景包括相关者间的动态关系。事实证明，违反碰撞时间的比率与几种与动态驾驶任务性能相关的碰撞类型相关，包括追尾、转弯或变道、撞到物体或停放的车辆、横穿马路和撞到行人。基于碰撞时间的车辆安全功能也被证明与降低碰撞率和降低行人碰撞的严重程度相关，因为基于碰撞时间的干预行为可以降低撞击速度。降低撞击速度已被证明可以降低行人的死亡和受伤风险。如图三所示，后方碰撞事故的严重程度与碰撞前到碰撞后的车辆速度变化（ ΔV ）相关。



图三、MAIS 2+和 3+伤害与 ΔV 的相关性 (基于 CISS)

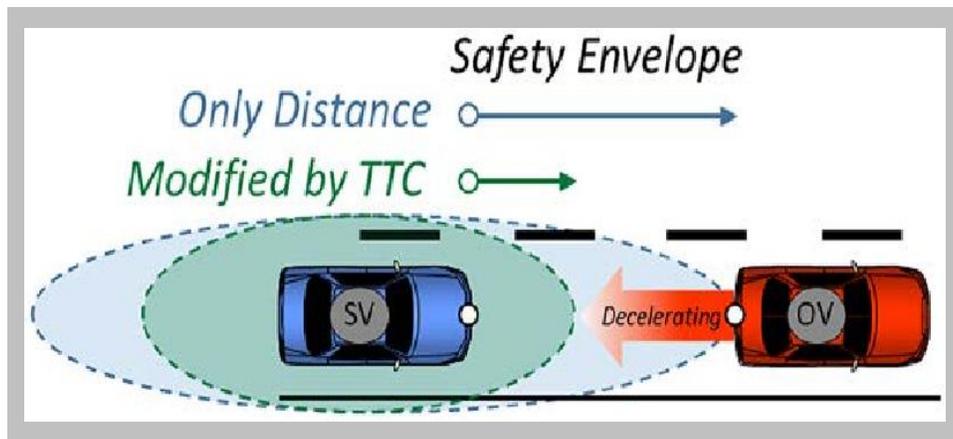
并非任何突破安全范围的情况均是错误，比如其他车辆侵入自动驾驶车辆的车道。在这个例子中，自动驾驶系统可完成目标和事件识别及反应，动态驾驶任务表现正常，但依然违反了安全范围临界值。在某些情况下，作为正确执行动态驾驶任务的一部分，可能需要超过安全范围临界值。这些潜在危险事件的发生率由指标反映。自动驾驶车辆在 DDT 中对某一特定情况的反应是否适当，将在分析测度数据时临时确定。

自动驾驶车辆的开发者和制造商应记录当自动驾驶车辆与其他道路使用者之间的距离违反安全范围时的实例，距离临界值可能会根据几个因素而变化，包括道路使用者类型（图四）、主体车辆速度和适用的交通法规。



图四、描绘了主体车辆(SV)之间的纵向和横向距离阈值, 该阈值可因(a)其他车辆(OV)和(b)脆弱的道路使用者而变化。

如前所述, 车辆碰撞时间是指主体车辆与其他客体对象在继续保持现有速度、加速度和轨迹的情况下发生碰撞的时间, 该指标是主体车辆与客体车辆之间相对运动的表征。ADS 的开发者和制造商应该记录主体车辆与在主体车辆行驶路径上的显著的客体车辆之间的临界车辆碰撞时间。车辆碰撞时间提供了一种表示距离的实用方式, 并附加了相对车辆速度和加速度。当碰撞时间用于制定安全范围时, 涵盖了各种情景。例如, 当主体车辆速度为零时, 距离更有效, 而当主体车辆正在接近一个物体时, 车辆碰撞时间更有效。图五显示了这一例子。



图五、描绘了车辆碰撞时间如何通过考虑主体车辆(SV)和其他车辆(OV)的速度和加速度等因素, 描述了一个更具象的安全范围场景。

安全范围的计算方法多种多样, 其他计算方法只要可靠地达到同样的目的, 也都可以被采纳。

3.2 车辆运动控制

不安全的驾驶行为是绝大多数驾驶员驾驶的车辆出现事故的原因或诱因。在自动驾驶系统中, 这表明了良好的目标和事件识别及响应性能。就 OEDR 而言, 可预测的车辆运动控制是用除典型动态行为之外的行为出现频率来描述的。

人类驾驶的车辆以不稳定的方式运行或突然改变速度是导致致命事故的诱因之一。安全性与可预测的车辆运动控制显著相关, 当驾驶员更多地猛烈加、减速和转向时, 其安全性更差。突然变道和急速减速被发现均与事故频率相关。高加速度事件与不同类型的车辆和驾驶员的事故率相关, 包括执法车辆和公共汽车。此外, 研

究表明，猛然加速事件发生率高的地区与碰撞率的增加有关。这一指标旨在阻止不当驾驶行为。

ADS 的硬减速事件可能是由于对潜在的碰撞风险设置了高敏感度而造成的。开发人员应允许一定的硬减速率，以确保系统可足够敏感地检测到实际的碰撞风险，以平衡高风险事件的漏报率。在利用情境安全车辆运动控制指标时，开发者应注意，指标性能的变化应该促使安全性的提高，而不是碰撞风险敏感性的降低。

情境安全、可预测的车辆运动控制的建议指标是：

① 可预测的加速度

② 可预测的急动性

(1) 可预测的加速度

加速度是以每一时间平方的距离为单位表示的速度变化率(m/s^2)。汽车使用高加速度的情况包括急刹车(负加速度)、转弯和急转弯(侧向加速度)，以及时间不足时高速公路的汇入(正加速度或负加速度)。

在不需要突然行动的情况下，车辆在纵向和横向进行加速度将构成不可预测的行为。纵向和横向的加速度都是衡量车辆急动性的良好指标。另外，可以对纵向和横向设置不同阈值。

(2) 可预测的急动性

急动性是加速度的变化率，以每三次方时间的距离为单位表示(m/s^3)。横向高急动性动作表现为类似于为避开障碍物而转弯，或在车道间开始来回变道的车道保持功能；纵向高急动性可由接近交叉路口时的突然减速曲线表示。与加速度一样，纵向和横向的急动性也是衡量车辆运动突然性的良好指标。

这些指标采集到了可能表明不良驾驶行为的突然行动的发生。在对安全至关重要的情况下，剧烈变化的驾驶行为可能是适当的，但无论是人类还是 ADS 操作的车辆，紧急事件都是相对罕见的。应在各种 ODD 中设置识别这些紧急事件的阈值，以避免在 ADS 能够胜任 DDT 的情况下过度误触发事件。

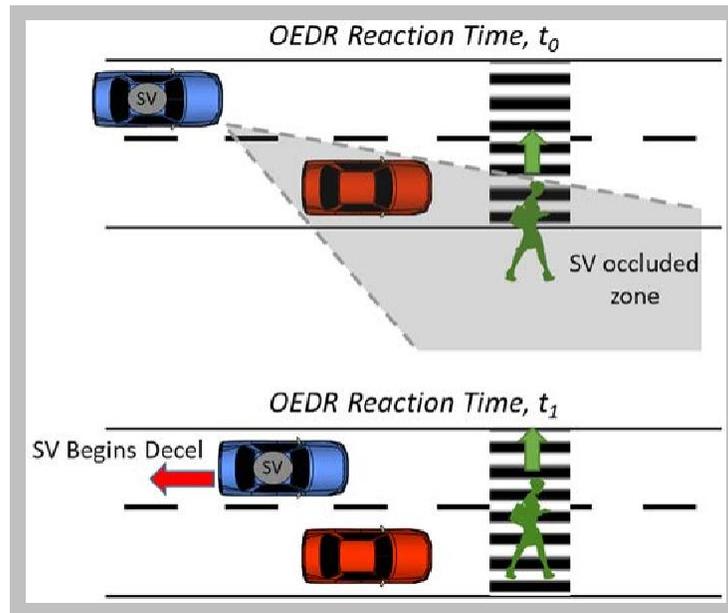
3.3 OEDR 反应时长

OEDR 反应时间是指在基于场景的测试中，ADS 在事件发生后执行可测量的响应所需的时长。这是系统延迟指标，也是对系统能力的间接衡量。该指标衡量的是系

统处理一个单位工作所需的时间。这是 DDT 性能的一个关键指标，正常运行的系统应该将延时保持在容许范围内。

碰撞事故发生率与驾驶员不良的感知和反应时间有关。例如，与驾驶员认知相关的错误，如驾驶员注意力不集中、内外分心、监控不足等，与 41% 的交通事故有关；与驾驶员决策相关的错误，如驾驶速度过快或过快过弯、对他人行为的错误假设、非法操作和对空隙或他人速度的错误判断等，与 33% 的交通事故有关。OEDR 是与以上相似的 ADS 的指标，同样与碰撞的可能性和严重性有关。OEDR 反应时间也能预测以下可判处的违法行为：不当转弯、不当变道、不当通过、妨碍紧急车辆、未对交通控制设备和其他道路使用者让行或停车。

定义延时的开始时刻和结束时刻基于情景标准。例如，开始时刻为 ADS 首次可靠地检测到物体的时间（例如，行人从红色车辆后面走出来，如图六所示），而结束时刻可定义为 ADS 首次采取纵向或横向控制行动的时间（例如，通过制动减速）。重要的是要明确定义测量这个时间的起始点和结束点，并且要一致地、重复地测量，以确保指标的可比性。



图六、描绘行人揭示事件的 OEDR 反应时间

ADS 开发者也可以选择利用来自子系统组件与 ADS 实现的延迟指标（即感知、预测、规划、执行）进行整合，以计算和验证观察到的 OEDR 反应时间。

OEDR 反应时间是对安全范围维护指标的补充，有助于衡量 ADS 对他者产生违规行为时做出的反应（如，其他车辆侵入 ADS 的行车道）。如果 ADS 的反应时间对于 ODD 中所经历的场景来说太长，可能会导致猛冲、加速违规或突破车辆安全范围，以及因 ADS 对他者的响应太慢而发生碰撞。OEDR 反应时间指标的优点是可以评估与延迟相关和与感知相关的性能。

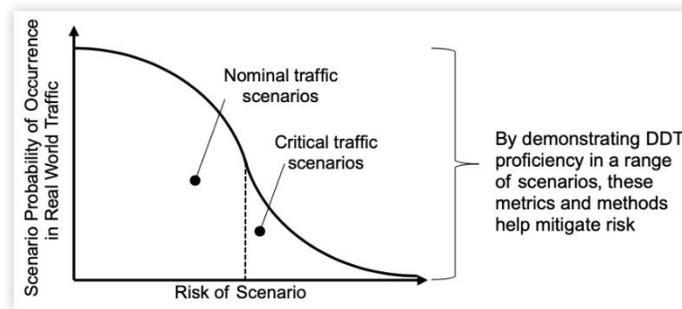
OEDR 反应时间通常在封闭测试环境中评估。OEDR 反应时间阈值应根据特定情景或一组情景来确定，包括考虑道路使用者分类、视觉障碍物、车速、路面状况和其他 ODD 要素。在尽可能相似的条件 下，获取典型人类反应时长数据作为参考阈值。

四、评估动态驾驶测试（DDT）性能指标的方法

4.1 与动态驾驶测试性能有关的风险

表三中的安全性指标可用于评估各种场景中的自动驾驶系统安全。一个实用的场景分类方法是评估风险场景发生的可能性（图七）。典型驾驶场景是频现且低风险的；关键驾驶场景是低频但风险较高的；边缘案例，如紧急响应较罕见，但并非总是风险很高。

FIGURE 7 Categorization of possible operating scenarios by risk.



图七、按风险对可能的车辆运行场景进行分类

安全性指标可以在各种测试方案中被监测，每种测试测试都可以侧重于不同的场景类别。例如，仿真适于覆盖各类场景空间（仿真结果的意义依赖于正确标定的仿真器）。轨迹测试被高度控制，可能适于关键或边缘情况。在路综合性能监测数据可以支持对典型交通场景的评估，而在路的案例研究可支持关键或边缘场景的评估。

4.2 动态驾驶测试性能评估地点和方法的考虑因素

如果安全度量标准可用于多种测试方法和场地，则可增强该度量标准对支持安全目标的适用性。本指南中建议的指标在车辆部署前的测试、开发和后期部署监测中均可以跨仿真测试、车辆轨迹和道路测试场一致性地使用，因而非常有效。以下是一些示例方法，可用于帮助评估在本最佳实践指南中建议的安全性指标。

仿真方法可能会在循环研究中涉及软件或硬件，以分析自动驾驶系统性能 在代表真实世界环境和条件的模拟环境中。

受控测试表示在封闭场景中完成的所有测试，其中参数可以被实验者设置。

基于实际场景的清单类似于当前的人类驾驶测试，并且需完成一组定义的行为能力或驾驶条件（例如，在信号交叉路口左转，交通拥挤）通过设置 ODD 内的在路驾驶测试。

案例研究和事件分析是使用工具和比汇总公路数据更丰富的数据集对关键交通场景或边缘案例进行事后分析以分析因果关系和诱发因素。支持事件分析针对自动驾驶系统专用车辆（ADS-DV）的 AVSC 最佳数据收集实践描述了数据收集用于案例研究分析例如不可逆限制的部署，超过指定的 ΔV 阈值，动态驾驶测试后备事件或其他与驾驶条款和规则有关的事件。

汇总公路数据收集表示在执行操作测试或可能会或可能不会涉及车内后备测试驾驶员的商业部署（即自然和开发测试）的数据收集，并旨在捕获操作设计场景内典型交通场景的范围。

各指标都具有其优势和局限性，适用于不同的测试方法和地点。如，OEDR 响应时长非常适于仿真、基于实际场景的清单或受控测试。但是，道路测量汇总收集存在实际的资源密集挑战，包括有效地对情况进行分类并客观地确定大量测试数据测量的开始时间和结束时间。

4.3 在路动态驾驶测试性能的方法

在路自动驾驶系统运营的汇总指标可以提供广泛条件下（典型、关键和边缘情况）的安全性评估。汇总分析的优势在于真实的保真度和条件覆盖范围。有效的指标分析包括足够多典型情况的数据收集，根据发生可能性对结果进行标准化，考虑风险类别，建立目标阈值，并获得结果的统计置信度。此外，这类测试可能会发现罕见的关键和边缘案例。

4.3.1 指标在综合公路动态驾驶测试性能方法中的应用

基于自动驾驶系统在测试运行中经历的与安全相关的事件发生率和持续时长可以评估安全性（表四）。安全范围和驾驶环境相关的车辆运动控制指标应使用两种方法进行评估，其中确定安全相关事件是基于超出运动学定义的阈值。违反阈值事件不常见且持续时长短。碰撞和违背行驶规则事件使用发生率评估。

表四、指标在综合公路动态驾驶测试性能方法中的应用

Representation of Exposure	Safety Envelope Violations	Contextually Safe Vehicle Motion Control Violations	Crashes	Citable Offenses
Rate of Occurrences	X	X	X	X
Percent of Travel Time of Occurrences	X	X		

发生率（Rate of Occurrences）：评估观察到的参数 p_i 大于阈值 p_{ref} 的频率。这可以作为重大事件（如，撞车、突破安全范围或不可预测的事件）的良好指示。

发生期间的行驶时间百分比（Percent of Travel Time of Occurrences）：评估所观察到的参数 p_i 大于阈值 p_{ref} 时行驶时间百分比 Δt 。

4.3.2 数据来源和收集

相关数据源根据度量标准、使用的分析方法和适用的安全目标而有所不同。数据来源可能包括公共事故数据库，执法数据，来自车外设备的数据，以及通过适当验证从车载系统收集的数据。

为了安全起见，数据源将包括车外数据源，例如碰撞统计数据，自然驾驶数据，以及特定于 ODD 的状态安全数据。事故和引文数据的收集可能从公共数据库、直接由自动驾驶系统开发者和制造商提供的可用数据库，或与当地执法部门合作。对于引用的交通违法行为，数据来源因管辖区和 ODD 而异。

使用不同的数据源时应格外小心，以确保记录的参数一致且可翻译以进行比较。同时应注意与分析有关的任何已知限制和假设。此外，应考虑任何给定的 ADS-DV 车队应用的 ODD 和使用规范，以及用于建立阈值的任何数据源。

数据应与特定主题的 ODD 相关，以确定在相同环境和运行条件下恰当的人类表现基准，并且可能从车辆、车队、乘车共享服务和/或基础设施中收集。车辆数据可以来自 ADS-DV 运行或可用的人类驾驶数据（如，事故数据库、状态数据库或本地数据库，以及自然驾驶数据库）。附加数据源可能包括适当匹配的自然驾驶数据集，只要这些来源支持所需指标的计算即可。人类性能数据可作为参考，并与其他数据组合以建立阈值。

4.3.3 阈值

阈值特定效应产生的门槛级别或值。超过阈值的事件将触发记录。对于汇总指标，阈值可用于描述动态自动驾驶任务中合理安全与不可接受的分界。

ADS 开发者应为 ADS 建立可行的安全性阈值。阈值应支持联邦、州和地方法律。一定程度的误报率是可接受的（目标事件的发生率不可能为零）。这承认了 ADS 将运行在混合动力驾驶环境中，ADS 可能会正确地做出回避动作，以应对其他道路使用者的异常行为。

行业相关者应该理解阈值的含义。人类驾驶性能数据可以从自然驾驶研究（NDS）和模拟驾驶中收集。人类表现数据对设置阈值有用，但应与用途和目的相匹配在可能的范围内对 ADS 进行调整。使用来自 NDS 和仿真的人类驾驶性能数据的阈值使用与平均人类驾驶能力之间的标准偏差。在这种情况下，阈值取决于所使用的数据集，即意味着它不能简单地扩展至多个 ODD。

4.3.4 分析和背景

未给定正确的场景，则安全指标无意义，没有单一的指标可以完整评价 ADS 安全性。因此，ADS 制造商和开发者应基于多个指标，结合场景进行综合评估，以进行风险管理计划，系统工程验证和确认。

（1）暴露量

指标和测度数据必须代表运行条件和风险范围：在制造商的使用规范中合理预期。最初的 ADS-DV 车队将积累比所有常规车辆更少的车辆行驶里程数，并且会限制其操作行动。有意义的分析可以通过考虑其他暴露度量完成，即使在有限的操作域中进行部署。

（2）数据分段

数据分段是指将数据划分为离散类别以根据风险类型对数据进行标准化。与安全相关的事件可以按暴露因素进行分段，例如与其他道路使用者或场景的交互作用，并通过车辆经历这些类型的互动的次数进行标准化。一些对安全分析有用的示例包括：

道路使用者类型（如，车辆、脆弱的道路使用者）；

一天中的不同时段

ODD 特性（如，城市与农村、道路类型、天气状况）；

运行特性（如，纵向参考车速）；

事故类型（如，后端、切入）及事故易发因素。

（3）标准化

标准化结果是指通过调整不同测量范围和风险的数据，以实现跨数据集的比较并纠正已知局限。曝光标准化通过创建数据集提高结果在不同数据集之间的可比性，提高了结果的可解释性和可移植性。例如，总事故次数无法进行安全性评估，除非同时知道暴露程度（例如，行人互动的次数）。

事故数据的丰富程度和格式存在很大差异，在某些 ODD 中获取风险因素要比在其他 ODD 中更难。为了风险暴露标准化数据，实践建议最好按提供的服务类型对事故数据进行细分：

如果服务是客运，则出租车的事故率可能是相关的。

如果服务是货运，则包裹运输服务的事故率可能是相关的。

如果服务是长途卡车运输，则城市道路事故率分析中可能会排除（2017 年，联邦公路管理局（FHWA）确定有 32,120 亿车辆总行驶公里数，其中 70% 是在城市范围内。

（4）统计置信度和趋势的注意事项

统计置信度是得出结论或根据收集的证据进行推断的依据。统计置信度定量描述不确定性以及在一定时间段内（例如时间，VMT，曝光等）事件再次发生的可能性。

可以通过以下方法计算事故指标代表总体系统性能的置信度，如 RAND 方法，对 ADS 安全性稳定性的置信度相对于指标可以使用随时间推移衡量性能的移动平均值进行评估。

交通和许多与交通安全有关的指标受国家和地区趋势的影响。车辆拥有量、土地使用、经济波动和人口老龄化等因素可能反映在国家事故数据指标上。与此类因素相关的趋势需要受到监控，因为它们可能会影响可用于与自动驾驶系统安全性进行比较的基准。

五 总结

本指南旨在提出一组基本而通用的系统级安全性指标，该组指标有助于评估 ADS 在动态驾驶任务（DDT）中的总体安全性。我们设想未来这些通用指标可与其

他结合应用，以补充产品开发和部署不同阶段的安全性证据。与其他 AVSC 最佳实践相一致，本指南支持标准开发社区中以行业为主导的自愿方法，并有望随着技术的成熟而发展。将定制指标与这一共同的基本指标集相结合，可以增强利益相关者之间的 ADS-DV 安全态势沟通，并加速公众接受。公共机构可使用本文件更好地了解 ADS 部署的安全态势。除了技术开发团体之外，本最佳实践开发过程中考虑的其他受众包括标准机构、公共机构和其他可能影响 ADS-dv 部署的决策者。