

自动驾驶课程项目 Corner Case 场景库与落地复现方案 (2021-2026)

执行摘要

本报告面向“两人小组需交付 4 个场景（其中 2 个必须与玻璃/反射相关）”的自动驾驶课程项目，基于近五年（2021-2026）学术论文、监管/评测协议（NHTSA、Euro NCAP）、企业召回与事故材料（Waymo、Tesla 等）及权威新闻，提炼出一组现实可发生、定义清晰、可在仿真中复现的 corner case。核心结论是：玻璃/反射类问题并非“偶发噪声”，而是会通过“多模态不一致→融合置信度误用→规划误动作”形成系统性风险；与此同时，非玻璃类长尾同样能提供扎实的官方证据链（例如：Waymo 对链条/闸杆类障碍的召回、NHTSA 对施工区与交通控制装置相关行为的调查与资料、Tesla 与静止应急车辆事故场景的官方调查）。¹

按“严重度×发生概率×证据强度×可复现实用性”综合排序，建议你们最终落地实现的 4 个场景为（每人 2 个）：

- 成员 A（玻璃/反射专题，两场同一研究主线，写作与实验复用度最高）
 - 1) 玻璃幕墙反射“幽灵车辆”触发误制动/误避让（玻璃/反射）²
 - 2) 出入口玻璃门/橱窗“透明障碍”导致深度空洞与可行驶空间误判（玻璃/透明体）³
- 成员 B（非玻璃、但官方证据非常硬，且在 CARLA 易构造）
 - 3) 施工区临时导改：锥桶+残留标线+临时信号导致车道/优先权判断错误（施工区/交通控制）⁴
 - 4) 链条/闸杆/门式障碍等“细长栅栏类”目标误检/漏检（细长障碍/shape 边界）⁵

若你们希望把“现实事故报道”更强地写进报告，可将“静止应急车辆事故现场”或“雷达多径幽灵目标→误 AEB/鬼刹车”作为备选/扩展（本报告在 Top 6 详细分析中也覆盖）。⁶

未指定项说明：课程 handout / rubric 细节、你们项目代码栈与传感器套件均未提供；报告中凡涉及道路等级、速度、传感器型号等若无官方材料支撑，一律标注为“未指定”。

研究范围与证据来源

本报告优先使用可追溯、可引用的第一手材料：

- NHTSA：FMVSS 127（AEB 强制标准）明确引入“误触发/false activation”测试（钢板与“车辆从旁通过”两类），并指出过量误触发可能构成不合理风险；这为“幽灵目标→硬刹车→追尾风险”的工程叙事提供了法规级依据。⁷
- Euro NCAP：其 AEB/碰撞避免测试协议明确要求测试场地视野中不得出现“高反射表面或类似目标轮廓”，还不允许在门架/桥下等结构处测试——这在反面说明：高反射与结构阴影确实可能导致异常传感器测量/误触发，因此标准化测试刻意回避。⁸
- Waymo（召回与调查）：NHTSA 的 25E-034 召回报告明确指出 Waymo 车辆曾与“链条、闸门等 gate-like barriers”发生碰撞，并说明与“目标检测方式/系统响应方式”有关；NHTSA 对 Waymo 的 PE24016 调查材料也聚焦“交通控制装置识别与在施工区/静态物体附近的表现”。⁹
- Tesla（调查与召回）：NHTSA 的 EA22-002 文件将“Autopilot 启用时撞上静止应急车辆”作为调查动因，并在后

续材料中关联到 23V-838 召回（驾驶员参与/监控不足与系统使用边界）。 10

- 学术侧（反射/透明体/多径）：

- 反射表面会在占据栅格中产生“phantom walls/虚假障碍”，导致规划失败，是跨机器人与自动驾驶的长期难题；3DRef 等数据集/基准专门针对反射检测提出系统评测。 11
- LiDAR 在玻璃/镜面附近可能出现不一致测量（测到玻璃、测到玻璃后方、或测到反射目标），并有工作提出用平面优化/SLAM 来识别与利用反射。 12
- 车载毫米波雷达多径会导致“ghost targets”，并有 2023-2024 的论文将其作为可检测的统计检验问题来处理。 13

此外，报告在“车道线/标线质量”“恶劣天气传感器退化”“低速远程召唤碰撞”等场景中补充了近两年的论文/召回/新闻证据；并在玻璃检测方向补充了中文资料（注意：中文资料的学术与同行评议强度不一，已在引用时尽量以国际一手论文/官方报告为主）。 14

Corner Case 场景库与优先级

下表给出 15 个可直接作为课程项目“Unsafe Corner Scenario”段落使用的场景定义。每条均包含：环境、参与者、传感器模态、触发条件；若细节未在官方材料中明确，标为“未指定”。

优先级解释：越靠前越适合作为你们最终 4 个交付场景（证据更硬、风险更清晰、可复现性更强）。

| 优先级 | 场景标题（单句） | 2-3 句场景定义（环境/参与者/模态/触发） | 代表性证据来源 |
|-----|-------------------------------|--|---|
| 1 | 玻璃幕墙反射“幽灵车辆”触发误制动/误避让 | 城市 CBD（道路类型未指定）一侧连续玻璃幕墙/玻璃隔音屏，自车直行；相邻或对向交通参与者被镜面反射进入相机视野。LiDAR 在玻璃处可能点云空洞/异常回波，雷达在强反射几何下可能多径；触发条件是融合未能用“跨模态几何一致性”否定反射目标，形成高置信障碍并触发硬刹或横向避让。 | 反射导致“phantom walls”与规划失败、反射检测数据基准与动机 11；LiDAR 反射不一致读数 12；Euro NCAP 明确回避高反射环境 15 |
| 2 | 出入口玻璃门/橱窗“透明障碍”导致深度空洞与可行驶空间误判 | 地下车库出口、商场入口等（道路类型未指定），存在大面积玻璃门/落地窗；自车低速转弯/直行接近。相机可见背景但深度（LiDAR/ToF/立体视觉）在玻璃处失效或“看穿”，导致占据/可行驶空间推断错误（把玻璃当可通行或把室内反射当障碍）；触发条件是近距离+较大入射角+规划强依赖占据栅格。 | 透明障碍对深度传感器的挑战与实时检测/重投影框架 16；LiDAR 在玻璃/镜面下的不一致测量机制 17 |

| 优先级 | 场景标题（单句） | 2-3 句场景定义（环境/参与者/模态/触发） | 代表性证据来源 |
|-----|-------------------------------------|---|---|
| 3 | 毫米波雷达多径“幽灵目标”→误 AEB/鬼刹车 | 城市峡谷/高架/护栏等强反射环境（道路类型未指定），自车 ACC/AEB 开启巡航。雷达多径生成虚假点迹并被跟踪成轨迹，融合“宁可信其有”策略下被当作本车道静止/低速目标，触发急减速；触发条件是多散射体布局导致 DOD≠DOA 幽灵出现且相机/LiDAR 反证不足。 | 雷达多径幽灵目标检测（2023 预印本/2024 TSP 正式发表） ¹³ ；NHTSA 对“意外制动/phantom braking”投诉的官方立案 ¹⁸ ；FMVSS 127 将 false activation 纳入强制测试 ¹⁹ |
| 4 | 施工区临时导改：锥桶+残留标线+临时信号导致车道/优先权判断错误 | 高速/城市道路施工区（未指定），锥桶、临时路牌、残留旧标线与新标线共存，可能有工人/施工车辆。感知需理解临时交通控制与可行驶区域；触发条件是地图/车道模型过度信任旧拓扑，规划在“跟旧线/避锥桶/遵临时牌”间抖动或驶入封闭区，夜间/雨天反光更放大歧义。 | NHTSA 对 Waymo PE24016 调查：涉及交通控制装置、施工区、静态物体碰撞与异常行为 ²⁰ ；FHWA 关于自动化车辆在施工区的人机/系统要求与风险（HRT 报告） ²¹ ；ICCV 2025 施工区数据集/benchmark 指出数据稀缺与挑战性 ²² |
| 5 | 链条/闸杆/门式障碍等“细长栅栏类”目标误检/漏检 | 停车场/小路出入口（道路类型未指定），车道中横向拉起链条或闸杆（gate-like barrier），目标细、对比弱并可能摆动。触发条件是感知把其当可忽略物体或误估高度/占据，且规划缺乏对“细长横向障碍”的专门安全壳，导致低速或中速碰撞。 | Waymo 25E-034 召回：因目标检测方式/系统响应方式导致与 chains、gates 等障碍碰撞 ⁵ |
| 6 | 事故现场/静止应急车辆：警灯、锥桶与遮挡导致系统未能速度管理或变道避让 | 高速/主干道（未指定），前方事故现场有静止应急车辆与闪烁灯光，周围密集锥桶/车辆/人员。触发条件是系统未能在远距离稳定识别静止障碍与“临时封闭/绕行”语义，或在 L2 场景下驾驶员监控不足导致碰撞。 | NHTSA EA22-002：调查动因即 Autopilot 启用时撞上静止应急车辆 ²³ ；EA22-002 后续材料关联 23V-838 召回与驾驶员参与问题 ²⁴ |
| 7 | 异常拖曳车辆（被倒拖/角度异常）导致预测模型失效 | 城市道路（未指定），拖车以异常姿态拖曳被拖车（夹角持续且不跟随常规拖曳几何）。触发条件是预测模块按常规车辆运动外推，低估被拖车扫掠区域，规划穿越其潜在路径发生碰撞。 | Waymo 24E-013 召回：明确“罕见拖曳构型下预测可能错误” ²⁵ |
| 8 | 停靠校车伸出 Stop Arm：系统对法规对象/区域理解失败 | 城郊道路（未指定），校车停靠上下学生并伸出 stop arm、闪灯；自车按法规应停。触发条件是校车状态识别/法规状态机或远程协助策略错误，导致在 stop arm 未收回时越过。 | NHTSA 对 Waymo 围绕停靠校车的 PE25013 调查 ²⁶ ；Waymo 后续召回/修复（官方召回与报道） ²⁷ |

| 优先级 | 场景标题（单句） | 2-3 句场景定义（环境/参与者/模态/触发） | 代表性证据来源 |
|-----|------------------------------------|---|---|
| 9 | 大面积停电导致信号灯熄灭：远程确认/策略过保守引发路口拥堵与二次风险 | 城市路网（未指定），大范围停电使路口信号灯变黑灯；多车同时进入“需要确认”的保守策略。触发条件是远程确认队列拥塞或规则过保守导致车辆停滞在路口/车道中间，引发拥堵与次生风险。 | Reuters 对 Waymo 停电事件与应急协议改进的报道 ²⁸ ；事件讨论与现象描述（辅助） ²⁹ |
| 10 | 行人被他车撞入自车路径+事后自动靠边导致拖拽/二次伤害 | 闹市路口（未指定），行人先被旁侧人类驾驶车辆撞击并抛入自动车路径；自动车初次停车后执行“靠边/清障”策略。触发条件是对“行人处于车底/车侧低姿态”状态估计不足，后处理状态机缺少“人身安全优先”的终止条件。 | Cruise ³⁰ 的 573 报告：指出碰撞后“尝试靠边而非保持静止”可能增加伤害风险 ³¹ ；NHTSA 对其 crash reporting 的执法信息（佐证事件性质） ³² |
| 11 | 近距离摩托/自行车接近时系统过度保守急刹，诱发两轮追尾/摔倒 | 城市道路（未指定），两轮车从后方或侧后方快速接近、处于盲区/边缘视野。触发条件是系统误判其意图或对相对速度估计不稳而硬刹，后方两轮来不及反应产生追尾/摔倒风险。 | Zoox ³³ 因“unexpected hard braking”召回与 NHTSA 结案报道（说明硬刹可带来追尾伤害风险） ³⁴ |
| 12 | 低速远程召唤/自动泊车：立柱/矮墙静态目标检测不足导致轻度碰撞 | 停车场/住宅车道（未指定），车辆在无乘员状态由手机远程召唤或低速自动泊车移动。触发条件是细窄立柱、路沿、花坛等静态障碍在感知中漏检/误距，叠加网络延迟/人类难以及时接管导致碰撞。 | Reuters：NHTSA 对“远程召唤/Actually Smart Summon”相关碰撞开启调查 ³⁵ |
| 13 | 桥下阴影/门架结构导致误识别与误 AEB，属于标准化测试刻意回避区域 | 高速/快速路（未指定），车辆经过桥下/门架/标志结构，光照突变与巨大结构轮廓进入视场。触发条件是视觉阈值与时序滤波不当把阴影/结构边缘当障碍，或融合短时虚假目标触发制动；该类环境在标准化 AEB 场地要求中被明确排除。 | Euro NCAP 测试协议：不允许在桥梁/门架/高反射背景下测试 ³⁶ ；NHTSA 对意外制动投诉的官方立案（作为误判风险背景） ¹⁸ |
| 14 | 恶劣天气退化：大雨/雾/水花导致多模式同时降级且不确定性未传递 | 暴雨/浓雾（未指定），相机受水滴与对向灯光眩光影响，LiDAR 受雨滴噪声与衰减影响，雷达受杂波影响。触发条件是系统仍按晴天置信度做预测/规划、未收缩 ODD 或未降速。 | 传感器在恶劣天气下退化与对策综述（2023，高被引） ³⁷ |

| 优先级 | 场景标题（单句） | 2-3 句场景定义（环境/参与者/模态/触发） | 代表性证据来源 |
|-----|------------------------|---|--|
| 15 | 车道线缺失/新旧线并行导致车道保持与换道抖动 | 夜间或雨后道路（未指定），旧标线残留、新标线临时覆盖、反光材料导致多条线竞争。触发条件是车道保持在不同线之间切换产生横向抖动，或在并线处误入相邻车道。 | 车道标线“机器可检测性”研究（2025） ³⁸ ；夜间发光标线可能引入新型风险/脆弱性（VehicleSec 2025） ³⁹ ；Euro NCAP 也强调对不同标线/无标线的车道辅助评估（背景） ⁴⁰ |

六个重点场景深度分析

以下 Top 6 场景按统一 6 段模板展开，并给出可用于报告的“图示建议 + mermaid 结构图”。其中两条为玻璃/反射相关，其余四条为显著不同的长尾类型。

重点场景一：玻璃幕墙反射“幽灵车辆”触发误制动/误避让（玻璃/反射）

场景设定（Scenario setup）

城市 CBD（道路类型与限速均未指定），道路一侧为连续玻璃幕墙或玻璃隔音屏；自车直行。相邻/对向车道存在真实车辆或行人，其镜像反射进入相机视野；同时 LiDAR 在玻璃处可能出现“空洞/异常回波”，雷达在特定几何下可能产生多径回波。触发条件：反射目标在自车路经投影上形成高置信“本车道障碍”且融合门控无法否定（例如“相机强阳性 + 雷达弱阳性”使系统误判为真）。⁴¹

期望安全行为（Expected safe behavior）

系统应对“仅在反射区域出现、且几何/深度一致性不足”的目标保持谨慎：优先平滑减速、保持车道、增大时距，并记录/显式传递“观测不一致性”给规划层；不应在无确证碰撞威胁时触发高减速度急刹或突然横向躲避（这类误动作更易引发追尾/侧向冲突）。标准化评测（Euro NCAP）甚至要求测试环境避免高反射背景，侧面印证其对传感器异常测量的影响不可忽视。⁸

失败假设（Failure hypothesis：Perception / Prediction / Planning）

感知层：视觉目标检测将反射车辆当作实体车辆；LiDAR 在玻璃处回波不一致（可能测到玻璃、测到玻璃后方、或测到镜面反射目标），导致占据栅格出现“虚假墙体/虚假障碍”；雷达多径可能产生与反射方向相关的回波，进一步“加固”错误。反射造成“phantom walls”并导致规划失败在反射检测基准与 LiDAR 反射研究中被明确提出。⁴²

预测层：一旦幽灵目标进入跟踪，预测会为其生成若干可能轨迹（例如“将切入/静止在前方”），并因距离较近而给出高 TTC 风险。

规划层：若代价函数对碰撞惩罚极高且缺乏“观测不一致性惩罚”，会触发急刹或突然避让，产生次生风险（后车追尾/侧向冲突）。¹⁹

Camera-only vs Camera+LiDAR+Radar 对比

Camera-only：更容易把“反射画面”当作实体目标，因为缺少独立几何交叉验证；但不会遭遇雷达多径幽灵回波的加成。¹⁵

Camera+LiDAR+Radar：理论上可用多模态一致性降低误检，但玻璃恰好会让 LiDAR/Radar 产生“非直观”观测（不一致回波/多径），若融合策略偏向“宁可信其有”或缺少反射显式建模，反而可能把幽灵目标融合成更稳定的轨迹。

⁴³

定性风险评估 (Severity / Probability)

严重度：中到高（误判在车流中带来追尾风险；误避让可能侵犯相邻车道）。

概率：低到中，但在现代城市玻璃立面密集区域可重复出现；标准化测试明确回避高反射背景也表明其并非工程可忽略因素。 44

缓解措施 (Mitigation：短期补丁 / 长期系统改造)

短期补丁：

- 在感知侧加入“反射/玻璃区域”语义分割或反射检测，对该区域内的目标下调置信度或提高确认门槛（需要与跟踪一起做多帧一致性验证）。 45
- 在融合侧引入“反证逻辑”：当 LiDAR 在可用条件下持续缺乏几何支持、或相机目标违反多视角/运动一致性，则快速衰减轨迹。 43
- 规划侧引入“不确定性安全壳”：当障碍仅由单一模态强支持时，优先温和减速与保持车道，不直接触发最大制动；并记录可解释日志以便数据闭环。 19

长期改造：

- 建立“反射场景数据闭环”与带标注的反射/透明体基准（类似 3DRef 的思路）并覆盖户外玻璃幕墙场景；对融合模型加入显式反射先验（如反射平面估计）。 45
- 引入偏振成像/反射抑制等硬件或算法增强，降低反射对视觉语义的污染（近年 CVPR/MDPI 等已有方法与证据）。 46

可视化与图表示例 (建议放入报告)

- 草图：俯视图标注“真实车辆 vs 玻璃反射像”，以及传感器视锥与融合目标位置偏差。
- CARLA 截图：相机画面中的反射目标、LiDAR 点云空洞/异常、融合后的占据栅格（幽灵占据）。
- 图表：同一路段多次复现的“误触发次数/最大减速度/jerk 峰值”对比柱状图；以及“跨模态一致性分数 vs 规划制动强度”散点图。

```
flowchart LR
    A[玻璃幕墙/高反射平面] --> B[相机：反射目标进入检测]
    A --> C[LiDAR：空洞/不一致回波]
    A --> D[雷达：多径弱回波]
    B --> E[融合/跟踪：幽灵轨迹置信度升高]
    C --> E
    D --> E
    E --> F[预测：高TTC风险]
    F --> G[规划：急刹/误避让]
    G --> H[风险：追尾/侧向冲突]
```

重点场景二：出入口玻璃门/橱窗“透明障碍”导致深度空洞与可行驶空间误判（玻璃/透明体）

场景设定

地下车库出口、商场入口或玻璃隔断通道（道路类型未指定），自行车低速接近玻璃门/落地窗。相机可看到玻璃后方背景；深度传感器可能在玻璃处失效（点云缺失或“穿透看见后方”），触发条件是规划依据占据/可通行空间推断，把玻璃区域当作可通行，或在“看见背景”时错误加速。透明障碍对传统深度感知的挑战在近年研究中被明确强调，并出现了专门的实时检测与深度补全/重投影框架。 16

期望安全行为

系统应把“可见但深度缺失”的近距离区域视为高风险：保持低速、逐步接近、必要时停车；在无法确认玻璃是否存在的情况下禁止进入该区域（等价于将其临时视为不可通行）。 47

失败假设（感知/预测/规划）

感知：玻璃在 RGB 上并非“不可见”，但对深度传感器可能造成空洞或不一致读数；若语义分割未能识别玻璃平面，占据栅格会出现“可通行洞”。LiDAR 在玻璃/镜面下可能测到“玻璃本身/玻璃后物体/反射物体”，加剧不一致。 12

预测：在低速出入口场景，预测往往较弱（交互对象少），问题更多来自“静态可通行空间”的误推断。

规划：把玻璃区域当作 free space，生成穿越玻璃的轨迹并执行，最终碰撞；或相反，把玻璃后室内物体/反射当作障碍导致不必要卡死。 47

Camera-only vs Camera+LiDAR+Radar 对比

Camera-only：理论上可通过“玻璃表面语义分割/反射特征”直接识别玻璃，但需训练对各种玻璃材质泛化；缺少可靠深度时更依赖学习先验。

Camera+LiDAR+Radar：多模态不一定更简单，因为玻璃会让深度模态出现失效或穿透，融合若没显式建模“透明体失效模式”，容易把空洞当 free space。近年的研究正是通过“多传感器融合 + 对透明体特化检测”来补偿这一缺陷。 3

定性风险评估

严重度：中（典型发生在低速，但也可能造成行人夹击或玻璃碎裂伤害）。

概率：中（玻璃门/橱窗/玻璃护栏在出入口极常见，且深度空洞是物理机制导致的长期问题）。 3

缓解措施

短期补丁：

- 语义层加入玻璃检测；遇到“RGB 可见但深度缺失”区域，将其标记为 unknown 或 occupied-by-default。 47
- 引入极近距冗余（例如超声/短距 ToF）做“最后一道墙”，与玻璃检测联动；该思路在实时透明障碍 mapping 框架中已有验证。 47

长期改造：

- 把“透明体/反射体”作为 ODD 的显式维度，构建覆盖室外玻璃立面与室内玻璃隔断的训练与测试集；在融合中显式表示“每种模态对透明体的可靠性”。 48
- 采用偏振成像或反射抑制等技术路线降低反射与透射带来的混淆。 46

可视化与图表示例

- 草图：玻璃门位置、相机能看到的“后方背景”、以及深度空洞区域。
- CARLA 截图：将玻璃设为“视觉透明但物理可碰撞”的 mesh，并展示点云在玻璃处缺失的效果（若仿真本身不支持，可用注入方式）。 49
- 图表：玻璃检测模块的 IoU/误检率；以及“unknown 区域比例 vs 撞障/卡死率”的关系曲线。

flowchart LR

A[玻璃门/落地窗] --> B[RGB: 背景可见+反射纹理]

A --> C[深度: 空洞/穿透/不一致]

B --> D[语义: 未识别玻璃]

C --> E[占据/可行驶空间: 误判为free]

E --> F[规划：穿越玻璃轨迹]
F --> G[结果：碰撞或卡死]

重点场景三：毫米波雷达多径“幽灵目标”→误 AEB/鬼刹车（非玻璃但反射机理显著不同）

场景设定

强反射几何（城市峡谷/护栏/高架等，道路类型未指定），自车以未指定速度巡航，ACC/AEB 开启。雷达多径在多散射体条件下产生 ghost targets（DOD 与 DOA 不一致是典型判据），点迹进入跟踪后变成“稳定障碍”，触发条件是 AEB 把非威胁当威胁并硬刹。¹³

期望安全行为

法规与评测体系越来越强调“误触发风险”：FMVSS 127 明确引入两类 false activation 测试（钢板场景与“车辆从旁通过”场景），并给出制动阈值约束，强调系统需区分真实威胁与非威胁以避免不必要硬刹。⁷

失败假设（感知/预测/规划）

感知：雷达多径生成虚假目标并被 CS/角估计误差加剧；跟踪把短暂点迹串成轨迹。¹³

预测：把幽灵轨迹当作静止/慢车，TTC 快速下降，预测输出高碰撞概率。

规划：AEB/制动控制以“最小化碰撞风险”为主，会在高 TTC 风险下触发强减速；若后车跟驰密集，则次生风险增大。NHTSA 也对“外界投诉的意外制动”进行过官方立案评估。⁵⁰

Camera-only vs Camera+LiDAR+Radar 对比

Camera-only：不会遇到雷达多径 ghost，但会遇到视觉假阳性（阴影、眩光、结构线等）。Euro NCAP/标准化场地要求的“避免高反射/结构”说明视觉传感也会被环境强烈干扰。⁴⁴

Camera+LiDAR+Radar：如果融合支持“反证”，可用相机/LiDAR 否定雷达幽灵；但若融合策略偏保守（单模态强阳性即触发），多径幽灵更容易转化为错误制动。¹³

定性风险评估

严重度：中到高（高速硬刹→被追尾概率上升）。

概率：中（多径是雷达物理属性，强反射道路设施普遍存在）。¹³

缓解措施

短期补丁：

- 雷达前端加入幽灵检测/抑制（以 DOD≠DOA、稀疏约束估计与统计检验为代表的一类方法已形成系统研究）。¹³

- 融合层设计“强制反证门控”：当相机/LiDAR 在可用条件下持续否定该目标，迅速降低 AEB 触发权重。

- 控制层引入“渐进制动 + 二次确认”策略：对不确定威胁先释放油门/轻制动，避免直接进入最大减速度区间（与 FMVSS 127 对误触发风险的关注一致）。¹⁹

长期改造：

- 引入更高分辨率的成像雷达路线，或在系统级把“误触发事件率”作为关键 KPI 与回归测试集的一部分（监管与 NCAP 也在推进 false positive/false activation 相关评测）。⁵¹

可视化与图表示例

- 图表：速度-时间、减速度-时间曲线对比（真威胁 vs 幽灵威胁）；误触发事件统计（每 1000km）。

- 示意图：雷达多径路径（一次反射 vs 二次反射）。

- CARLA 扩展：使用更逼真的雷达模型（例如面向 CARLA 的现实雷达仿真框架）以复现多径特征，而不是仅用 CARLA 默认雷达。 52

```
sequenceDiagram
    participant Env as 强反射环境
    participant R as Radar
    participant F as 融合/跟踪
    participant P as AEB/规划
    Env->>R: 多径回波
    R->>F: 虚假点迹/速度估计
    F->>F: 轨迹生成(幽灵目标)
    F->>P: 高置信前向障碍
    P->>P: 触发强减速/误AEB
```

重点场景四：施工区临时导改（非玻璃，交通控制与语义理解）

场景设定

施工区（高速或城市道路未指定），存在锥桶、临时路牌、临时车道偏移、残留旧标线与新标线并存，可能有施工车辆与工人。触发条件是系统在“识别临时交通控制装置 + 生成可行驶区域 + 遵守临时优先权”任一环节失败，导致车道选择错误、进入封闭区或在导改区域抖动。NHTSA 对 Waymo 的 PE24016 调查与信息请求材料明确把“交通控制装置与进入施工区行为”作为焦点之一。 53

期望安全行为

系统应在施工区自动进入“work zone mode”：降速、增大时距、优先遵守临时交通控制（标志牌、锥桶、临时信号），并对不确定性更敏感（必要时停车等待或请求远程协助）；同时避免“卡在导改入口”造成交通阻塞。FHWA 相关研究也强调：自动化功能要么需要驾驶员及时接管（部分自动化），要么系统要能发出接管请求与安全通过施工区。 54

失败假设（感知/预测/规划）

感知：临时标志、锥桶与工人属于长尾组合，且夜间照明/反光会影响视觉；可行驶区域分割在“新旧标线冲突”时易出错。学术侧也指出施工区是长尾、动态且数据稀缺的场景，并推出专门数据集与 benchmark。 55

预测：施工区内车辆行为更不规则（突然并线、减速），若预测仍采用常规车道模型可能低估交互风险。

规划：地图拓扑/规则引擎若与临时道路布局冲突，会造成轨迹在两套“可行路径”之间来回切换（抖动），甚至驶入封闭区或压锥桶。 56

Camera-only vs Camera+LiDAR+Radar 对比

Camera-only：对临时标志/锥桶视觉特征依赖强，夜间/雨天更脆弱；但对锥桶的语义识别可以做得很强。

Camera+LiDAR+Radar：LiDAR 可提升几何可行驶区域估计，但在雨夜点云中噪声上升；融合系统若缺少“临时交通控制”语义层，几何再准也可能走错规则。 57

定性风险评估

严重度：中到高（进入封闭区/贴近工人可造成重大伤害）。

概率：中（施工区普遍存在，且组合复杂）；NHTSA 调查材料与学术数据集都说明这是系统性难点而非孤例。 58

缓解措施

短期补丁：

- “施工区检测”触发专用策略：降速、增大横向安全裕度、限制变道、必要时请求远程协助；
- 感知侧加入“临时交通控制优先级”机制（临时标志/锥桶可覆盖地图/常规标线推断）。 59

长期改造：

- 引入数字化施工区信息（动态地图/车路协同/V2X）来更新内部地图；FHWA 也在讨论通过 cooperative ITS 提升施工区管理与信息同步。 60
- 建立施工区专项场景库与回归测试：用“新旧标线冲突、夜间照明干扰、工人/施工车”组合做系统化覆盖（数据集/benchmark 提供了方向）。 55

可视化与图表示例

- 俯视图：导改前后车道拓扑；锥桶与临时标志位置。
- CARLA 截图：残留旧标线与新标线并存的画面、可行驶区域分割结果叠加。
- 图表：车辆横向抖动（lateral jerk）随“标线冲突强度”变化曲线；以及“进入封闭区/触碰锥桶”事件率。

flowchart LR

A[检测到施工区] --> B{临时控制装置识别?}

B -- 否 --> C[沿旧地图/旧标线行驶]

B -- 是 --> D[更新可行驶区域+规则]

C --> E[规划抖动/驶入封闭区]

D --> F[安全通过(降速/限变道)]

E --> G[风险：贴近工人/碰撞锥桶]

重点场景五：链条/闸杆/门式障碍（非玻璃，细长障碍与响应策略）

场景设定

停车场或小路入口（道路类型未指定），横向链条/闸杆等 gate-like barrier 横跨行驶路径；目标细长、可能摆动、在某些背景/光照下对比度低。触发条件是感知漏检或检测到但分类/响应不当，导致车辆继续前进发生碰撞。

Waymo 的官方召回报告明确把该类障碍（chains、gates、gate-like barriers）作为缺陷涉及对象，并提到与“目标检测方式或 ADS 响应方式”有关。 5

期望安全行为

系统应在入口区域以低速行驶并对“横向细长障碍”采取极保守策略：一旦感知不确定，宁可爬行接近并停车等待确认，也不应以常规城市速度通过。 61

失败假设（感知/预测/规划）

感知：细长目标在像素与点云级都容易“稀疏化”；雷达对细线状物体回波也可能弱；若训练集中该类目标稀缺，检测器可能把其当背景。

预测：该目标多为静态/半静态，预测不是主因。

规划：若把入口当作“低风险可通行”，且未给“细长横向遮挡”的特殊约束，则继续前进直至碰撞。Waymo 召回文件强调“系统对该类障碍的响应方式”是关键。 61

Camera-only vs Camera+LiDAR+Radar 对比

Camera-only：在光照好、对比高时能看见链条，但在逆光/夜间易丢失；很依赖训练和阈值。

Camera+LiDAR+Radar：几何上可能更有优势（尤其闸杆对 LiDAR 回波更明显），但链条仍可能稀疏；更关键的是融合与规划必须把“细长横向障碍”的风险显式提高，而不是只看“占据面积”。⁶²

定性风险评估

严重度：中（多发生在低速，但可能造成乘客伤害或引发后续交通冲突）。

概率：中（出入口常见，且已在真实运营中触发到“需要召回”的程度）。⁵

缓解措施

短期补丁：

- 入口区域速度策略：把“疑似 gate 区域”纳入地理围栏/地图语义，默认低速爬行；
- 感知侧增加“横向细长结构”专门检测（可用线段/杆件先验 + 深度一致性），并在融合中赋予更高安全权重；
- 规划侧增加“横向遮挡安全壳”：即使占据面积小，只要横跨可行驶走廊就视为硬约束。⁶¹

长期改造：

- 数据闭环：系统性采集不同材质链条/闸杆（反光/非反光、摆动/静止）并构建专项测试集；
- 对细长障碍引入更强的物理表达（线结构地图、可动障碍建模）。⁶³

可视化与图表示例

- 草图：链条横跨可行驶走廊，标注“占据面积虽小但切断通道”。
- CARLA：用 thin mesh/rope actor 构建链条，并做“漏检注入 vs 正常检测”对比。⁶⁴
- 图表：在不同链条反光系数（未指定）下的检测召回率；以及“停车距离分布”。

flowchart LR

A[出入口区域] --> B[感知：细长横向障碍]

B --> C{是否横跨可行驶走廊?}

C -- 是 --> D[规划：视为硬约束->停车]

C -- 否/漏检 --> E[继续前进]

E --> F[碰撞链条/闸杆]

重点场景六：事故现场/静止应急车辆（非玻璃，强官方调查链）

场景设定

高速或主干道（未指定），前方事故现场有静止应急车辆（警车/消防/救援）与闪灯，可能伴随锥桶与人员。触发条件包括：对静止车辆识别不足、对“事故现场语义”理解不足、或（在 L2 辅助驾驶场景）驾驶员参与不足导致未及时接管。NHTSA 的 EA22-002 文件明确指出：其调查动因就是“Autopilot 启用时撞上静止应急车辆”。²³

期望安全行为

系统在远距就应检测到静止车与场景风险，进入“减速+变道绕行/保持安全距离”策略；若属于 L2 功能，还应通过强驾驶员监控与功能限制，避免在不适用道路/场景中长期放任使用。EA22-002 的后续材料也讨论了驾驶员参与/监控与控制权问题，并关联到 23V-838 召回。²⁴

失败假设（感知/预测/规划）

感知：闪烁灯光可能造成相机曝光与眩光问题，场景中静止/半静止目标多、反射强；若系统对静止目标的处理策略（例如静止杂波抑制、或把静止误当路侧设施）不当，会降低检测稳定性。⁶⁵

预测：事故现场的其他交通参与者会出现非常规行为（突然并线、减速），常规模型可能低估危险。

规划：未能提前减速变道，或在驾驶员未接管情况下继续前进直至碰撞。⁶⁵

Camera-only vs Camera+LiDAR+Radar 对比

Camera-only：受眩光/对比影响更大，但对“警灯颜色/闪烁模式/应急车辆外观”和锥桶标识更直接。

Camera+LiDAR+Radar：几何上更容易在远距看到静止车辆，但强反射与多目标仍会挑战融合；更重要的是系统级策略必须把“事故现场语义”升格为高风险 ODD，不能只当普通静态障碍。⁶⁶

定性风险评估

严重度：高（高速碰撞静止车辆往往后果严重）。

概率：低到中（相对少见但并非零；已足以触发长期官方调查与召回/整改）。⁶⁷

缓解措施

短期补丁：

- 事故现场识别与降速变道策略：一旦检测到应急灯/锥桶群，放大安全裕度；
- 若为 L2，强化驾驶员监控与使用边界约束（与召回整改方向一致）。⁶⁸

长期改造：

- 把“应急车辆/事故现场”纳入强制回归测试与 ODD 风险模型；
- 引入更强的场景理解（交通控制、人员活动、临时车道封闭语义）并与规划耦合。⁶⁹

可视化与图表示例

- 时间线：从首次检测到最终碰撞/绕行的关键节点（T0...Tn）。
- 指标图：减速度曲线与最小 TTC；“提前变道成功率”。
- CARLA：构造路侧事故现场（应急车+锥桶+行人），测试“仅靠障碍检测”与“带事故语义”两种策略差异。⁷⁰

```
timeline
    title 事故现场应对关键节点（示例）
    T0 : 远距出现应急灯/锥桶
    T1 : 感知输出应急车辆/风险区域
    T2 : 规划决策：降速并变道/保持
    T3 : 执行控制：制动与横向机动
    T4 : 通过事故现场/或发生碰撞（负例）
```

四个场景落地建议与分工

结合“必须两条玻璃/反射 + 两条显著不同”的需求、证据强度与可复现性，建议最终交付 4 场景如下（并给出每人负责 2 个的合理分配）：

- 成员 A（玻璃/反射主线，建议你负责）
- 场景 1：玻璃幕墙反射幽灵车辆（重点研究“反射→多模态不一致→融合误确认”）。⁴²

- 场景 2：玻璃门/橱窗透明障碍（重点研究“深度空洞→free space 误判→低速撞障/卡死”）。 16

• 成员 B（非玻璃，官方材料硬且可在 CARLA 明确搭建）

- 场景 3：施工区临时导改（锥桶/残留标线/临时牌/工人）。 58
- 场景 4：链条/闸杆 gate-like barrier（细长横向障碍）。 5

为什么这 4 个组合“性价比最高”：

- 覆盖了**两类感知边界**（反射幽灵 vs 透明体深度失效）与**两类显著不同的非玻璃长尾**（施工区临时规则语义 vs 细长障碍几何表达）。 71
- 每个场景都能在报告里形成“官方材料（法规/召回/调查）+ 学术机理（论文/基准）+ 可复现实验（CARLA/注入）”三段式证据链，写作稳、答辩抗质疑。 72

最小仿真复现与评估计划

仿真平台与场景表达建议

- CARLA 提供相机、LiDAR、Radar 等多传感器模型与数据接口；可用于闭环（控制车辆）或开环（产出传感器数据）验证。 73
- 对于“雷达多径/玻璃反射”这类物理细节，CARLA 默认模型未必足够逼真；可采用“传感器层注入（inject artifacts）”或引入更真实的雷达模型框架（例如面向 CARLA 的现实雷达仿真集成）以提升可信度。 52
- 场景脚本可参考 ASAM e.V. 74 的 OpenSCENARIO（描述动态交通参与者行为）理念来组织“初始条件→触发条件→预期行为→度量输出”。 75

四场景最小复现计划表

核心原则：课程项目通常不要求你做“物理级真实反射”，但要求你能**清楚解释：哪个环节错、为什么错、如何修**。因此最小方案以“可解释的注入 + 可量化指标”优先。

| 场景 | 在 CARLA 里要“模拟什么” | 要“注入什么”才能稳定复现 corner case | 关键可量化指标（最低配） |
|--------------------|--|--|---|
| 玻璃幕墙 反射幽灵 车辆 | 建一段城市直路或轻弯（道路未指定），路侧放置高反光建筑立面（材质尽量接近镜面），并在相邻/对向车道放 NPC 车辆；设置日落/逆光等光照。 70 | 两种注入二选一 ：A) 传感器层：在相机画面中叠加“镜像车”或在检测输出中添加一条“幽灵轨迹”（更稳）；B) 融合层：规定“相机强阳性 + 雷达弱阳性即确认”，并人为加入雷达虚假点迹。注入的合理性由“反射可致 phantom obstacles / 观测不一致”机理支撑。 76 | 误制动次数/100 次通过；峰值减速度与 jerk；最小 TTC；幽灵轨迹持续时间；跨模态一致性分数（自定义，未指定阈值） |

| 场景 | 在 CARLA 里要“模拟什么” | 要“注入什么”才能稳定复现 corner case | 关键可量化指标（最低配） |
|-------------------------|--|--|--|
| 玻璃门/橱窗透明障碍 | 低速出入口场景：停车场出口或商场门口，创建一段车行通道，终点放置“物理可碰撞但视觉透明”的玻璃门/玻璃墙。 64 | 传感器层：对玻璃区域 剔除/稀疏化 LiDAR 点云 或将深度置空，模拟透明体导致深度失效；感知层：不提供玻璃语义标签，使占据栅格把该区域当 free；对照组启用玻璃检测/unknown 标记。该注入与“透明体使深度传感失败”研究动机一致。 16 | 撞障/卡死率；到玻璃停止距离；unknown 区域比例；达到目标点成功率；低速舒适性（不过度急刹） |
| 施工区临时导改 | 在一段双车道道路上用锥桶做车道收窄与横向偏移；地面同时画“旧标线 + 新标线”，并放置临时限速牌/施工牌与工人 NPC。 77 | 语义/地图层：提供一份“过期 HD 拓扑”（仍按旧车道走）或在车道线检测中随机切换新旧标线优先级，制造规划抖动；再对照加入“work zone mode（降速+遵临时控制优先）”。该注入与施工区研究与监管关注一致。 78 | 触锥桶/驶入封闭区次数；横向抖动 RMS 与 jerk；平均通过时间；与工人最小距离；是否触发降级/停车策略 |
| 链条/闸杆 gate-like barrier | 在出入口或小路终点放置“横向闸杆/链条”，可做成细长杆件或多个小段组合（模拟链条）；车辆以低速接近。 49 | 感知层：人为降低该目标检测召回（例如低置信过滤），或在 LiDAR 返回中随机丢点，使占据面积变小；规划层不做“横跨走廊硬约束”时产生碰撞，对照组加入该约束后应可靠停车。该场景与 Waymo 官方召回类型直接对齐。 5 | 碰撞率；停车距离；对细长障碍的检测召回/误检；近距速度曲线（是否爬行接近）；安全停靠一致性 |

统一评估输出建议（写进报告最省力）

为了让 4 个场景在报告中“可比较”，建议统一输出三类图表：

- 1) **安全性**：最小 TTC、碰撞/触障事件率、与行人/工人最小距离（施工区）。
79
- 2) **误触发/舒适性**：峰值减速度、jerk、误制动次数；与监管/标准对“误触发风险”的关注建立呼应（尤其对幽灵目标类）。
7
- 3) **感知一致性**：跨模态一致性分数（自定义）、unknown/free/occupied 的面积占比（透明玻璃场景尤关键）。
80

最后，建议在报告中显式说明：这些场景并非“标准化 AEB/ELK 的常规测试”，恰恰是标准化协议常常回避或难以完全覆盖的现实组合（例如 Euro NCAP 明确回避高反射背景/桥下门架；FMVSS 127 明确强调 false activation 但也承认无法覆盖全部真实误触发情形），这能帮助你们在答辩时解释“为什么做这些 corner cases 有意义”。
81

1 2 11 42 76 3DRef: 3D Dataset and Benchmark for Reflection Detection ...
https://arxiv.org/html/2403.06538v1?utm_source=chatgpt.com

3 16 47 Real-Time Glass Detection and Reprojection using Sensor Fusion Onboard Aerial Robots
https://arxiv.org/abs/2510.06518?utm_source=chatgpt.com

4 20 53 58 69 Investigation
https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2024/INOA-PE24016-12382.pdf?utm_source=chatgpt.com

- 5 9 61 62 63 **static.nhtsa.gov**
<https://static.nhtsa.gov/odi/rcl/2025/RCLRPT-25E034-2471.PDF>
- 6 10 23 65 67 **DOT NHTSA ODI Document**
<https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2022/INOA-EA22002-3184.PDF>
- 7 19 33 72 81 **Final Rule: Automatic Emergency Braking Systems for Light Vehicles | Web Version**
https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/2024-04/final-rule-automatic-emergency-braking-systems-light-vehicles_web-version.pdf
- 8 15 36 44 **Euro NCAP Protocol - Crash Avoidance - Frontal Collisions**
https://www.euroncap.com/media/91710/euro-ncap-protocol-crash-avoidance-frontal-collisions-v11.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 12 17 30 43 80 **Detection and Utilization of Reflections in LiDAR Scans Through Plane Optimization and Plane SLAM**
https://arxiv.org/abs/2406.10494?utm_source=chatgpt.com
- 13 74 **Detection of Ghost Targets for Automotive Radar in the Presence of Multipath**
https://arxiv.org/abs/2309.13585?utm_source=chatgpt.com
- 14 38 **Machine detectability of road markings analysed with ...**
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756425000819?utm_source=chatgpt.com
- 18 50 **phantom braking**
https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2022/INOA-PE22002-4385.PDF?utm_source=chatgpt.com
- 21 54 59 78 79 **FHWA-HRT-24-117 - Department of Transportation**
https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/FHWA-HRT-24-117_0.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 22 55 77 **A Dataset and Benchmark for Learning to Recognize, Observe ...**
https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2025/papers/Ghosh_ROADWork_A_Dataset_and_Benchmark_for_Learning_to_Recognize_Observe_ICCV_2025_paper.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 24 66 **Additional Information Regarding EA22002 Investigation**
https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2022/INCR-EA22002-14496.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 25 **static.nhtsa.gov**
<https://static.nhtsa.gov/odi/rcl/2024/RCLRPT-24E013-2218.PDF>
- 26 **Investigation**
https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2025/INOA-PE25013-23069.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 27 **Part 573 Safety Recall Report 25E084**
https://static.nhtsa.gov/odi/rcl/2025/RCLRPT-25E084-7732.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 28 **Waymo to update software after San Francisco power ...**
https://www.reuters.com/business/autos-transportation/waymo-vows-improve-emergency-response-protocols-after-san-francisco-power-outage-2025-12-24/?utm_source=chatgpt.com
- 29 **The Huge Problem Waymo Didn't See Coming**
https://www.theatlantic.com/technology/2025/12/waymo-robotaxi-san-francisco-blackout/685393/?utm_source=chatgpt.com
- 31 **Cruise 573 Report - Final**
<https://static.nhtsa.gov/odi/rcl/2023/RMISC-23E086-4326.pdf>

32 GM's Cruise Failed to Fully Report Pedestrian Crash

https://www.nhtsa.gov/press-releases/consent-order-cruise-crash-reporting?utm_source=chatgpt.com

34 Amazon's robotaxi unit Zoox agrees recall over braking issue

https://www.reuters.com/business/autos-transportation/amazons-robotaxi-unit-zoox-recalls-258-vehicles-over-unexpected-braking-issue-2025-03-19/?utm_source=chatgpt.com

35 US opens probe into 2.6 million Tesla vehicles over remote driving feature

https://www.reuters.com/business/autos-transportation/us-traffic-safety-regulator-opens-probe-into-about-26-mln-tesla-vehicles-2025-01-07/?utm_source=chatgpt.com

37 57 Perception and sensing for autonomous vehicles under ...

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271622003367?utm_source=chatgpt.com

39 Beyond the Glow: Understanding Luminescent Marker ...

https://www.usenix.org/system/files/vehiclesec25-mitra.pdf?utm_source=chatgpt.com

40 Lane Support

https://www.euroncap.com/en/car-safety/the-ratings-explained/safety-assist/lane-support/?utm_source=chatgpt.com

41 Detection and Utilization of Reflections in LiDAR Scans ... - PMC

https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11314935/?utm_source=chatgpt.com

45 48 71 3DRef: 3D Dataset and Benchmark for Reflection Detection in RGB and Lidar Data

https://arxiv.org/abs/2403.06538?utm_source=chatgpt.com

46 PolarFree: Polarization-based Reflection-Free Imaging

https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2025/papers/Yao_PolarFree_Polarization-based_Reflection-Free_Imaging_CVPR_2025_paper.pdf?utm_source=chatgpt.com

49 Sensors reference - CARLA Simulator - Read the Docs

https://carla.readthedocs.io/en/latest/ref_sensors/?utm_source=chatgpt.com

51 Mobileye Imaging Radar chosen by global automaker for ...

https://www.mobileye.com/news/mobileye-imaging-radar-chosen-by-global-automaker-for-eyes-off-driving/?utm_source=chatgpt.com

52 A Realistic Radar Simulation Framework for CARLA

https://wicsng.ucsd.edu/files/c-shenron_paper.pdf?utm_source=chatgpt.com

56 Work Zones challenge VLM Trajectory Planning

https://arxiv.org/pdf/2510.02803?utm_source=chatgpt.com

60 Work Zone Management for Light Vehicles Using Cooperative ...

https://highways.dot.gov/media/34676?utm_source=chatgpt.com

64 73 Sensors and data - CARLA Simulator - Read the Docs

https://carla.readthedocs.io/en/latest/core_sensors/?utm_source=chatgpt.com

68 Part 573 Safety Recall Report 23V-838

https://static.nhtsa.gov/odi/rcl/2023/RCLRPT-23V838-8276.PDF?utm_source=chatgpt.com

70 CARLA Simulator

https://carla.org/?utm_source=chatgpt.com

75 ASAM OpenSCENARIO: User Guide

[https://www.asam.net/fileadmin/Standards/OpenSCENARIO/ASAM_OpenSCENARIO_BS-1-2_User-Guide_V1-2-0.html?
utm_source=chatgpt.com](https://www.asam.net/fileadmin/Standards/OpenSCENARIO/ASAM_OpenSCENARIO_BS-1-2_User-Guide_V1-2-0.html?utm_source=chatgpt.com)