• 2026 中国汽车工程学会年会优秀论文(选登) •

面向自动紧急制动系统预期功能安全的触发条件叠加评估与仿真验证

张素民[1]　王瑞[1]　李海霞[2]　何磊[1]

(1.吉林大学,长春 130012;2.中国第一汽车股份有限公司研发总院,长春 130013)

【摘要】针对自动紧急制动(AEB)系统在复杂道路环境下的预期功能安全(SOTIF)风险识别与场景优先级排序问题,提出一种基于贝叶斯网络与多指标评分融合的触发条件叠加评估方法。选取天气状况、路面条件、交通交互行为和摄像头帧率4类触发条件,构建由触发条件到感知退化、制动裕度下降及危险事件发生的风险传播模型,并结合严重度、暴露度、可控性、感知退化度和耦合复杂度建立场景重要性评分体系。在晴天-干燥、中雨-湿滑、大雨-积水低附着系数3类平直路面下分别设计行人横穿、前车紧急制动和车辆切入3类交互行为,同时设置30 帧/s、15 帧/s和10 帧/s 3种摄像头帧率,形成27组组合仿真场景。仿真结果显示,天气恶化与路面附着系数降低会显著削弱AEB系统的制动能力,摄像头帧率下降会增加目标确认延迟并压缩系统安全裕度。其中,大雨-积水低附着系数路面-行人横穿场景危险度最高,中雨-湿滑路面下的前车紧急制动和行人横穿场景亦表现出明显的边界风险。结果表明,所提出的方法能够有效识别AEB系统在SOTIF视角下的高风险叠加场景,可为场景库构建、虚拟仿真测试排序和安全论证提供参考。

关键词:预期功能安全　自动紧急制动　触发条件叠加　贝叶斯网络

中图分类号:U461.91;TP391.9　　**文献标志码:**A　　**DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260288

Trigger Condition Superposition Assessment and Simulation Validation for the Safety of the Intended Functionality of Automatic Emergency Braking

Zhang Sumin[1], Wang Rui[1], Li Haixia[2], He Lei[1]

(1. Jilin University, Changchun 130012; 2. Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】To address the identification and prioritization of Safety of the Intended Functionality (SOTIF)-related risks for Automatic Emergency Braking (AEB) systems in complex road environments, a triggering-condition superposition assessment method integrating Bayesian networks and multi-index scoring is proposed. 4 triggering conditions (weather condition, road surface condition, traffic interaction behavior and camera frame rate) are selected. A probabilistic propagation model is constructed from triggering conditions to perception degradation, braking-margin reduction and hazardous events. A scenario-importance scoring system is established by incorporating severity, exposure, controllability, perception degradation and coupling complexity. 3 types of straight road environments are considered, including clear - dry, moderate rain - wet/slippery as well as heavy rain with ponding and low adhesion coefficient. Under each road surface category, 3 types of interaction behaviors (pedestrian crossing, lead vehicle emergency braking and vehicle cut-in) are designed. 3 camera frame rates (30 fps, 15 fps, and 10 fps) are set, forming 27 combined simulation scenarios. The simulation results show that deteriorating weather and reduced road adhesion significantly weaken the braking capability of the AEB system, while a lower camera frame rate increases target-confirmation delay and further compresses the system safety margin. Among the scenarios, heavy rain with ponding and low adhesion coefficient road - pedestrian crossing has the highest risk level, and the lead vehicle emergency braking and pedestrian crossing scenarios under moderate rain - wet/slippery road conditions also exhibit borderline risk. The results demonstrate that the proposed method can effectively identify high-risk superposed scenarios of AEB from the SOTIF perspective and can provide a reference for scenario-library construction, virtual-test prioritization, and safety argumentation.

Key words: Safety Of The Intended Functionality (SOTIF), Automatic Emergency Braking (AEB), Triggering-condition superposition, Bayesian network

【引用格式】张素民，王瑞，李海霞，等. 面向自动紧急制动系统预期功能安全的触发条件叠加评估与仿真验证[J]. 汽车工程师，2026(10)：11-18.

ZHANG S M, WANG R, LI H X, et al. Trigger Condition Superposition Assessment and Simulation Validation for the Safety of the Intended Functionality of Automatic Emergency Braking[J]. Automotive Engineer, 2026(10): 11-18.

1 前言

随着高级驾驶辅助系统（Advanced Driver Assistance Systems，ADAS）在量产车辆中的广泛应用，自动紧急制动（Automatic Emergency Braking，AEB）系统已成为重要的车辆主动安全功能之一。AEB系统通常通过摄像头、毫米波雷达或多传感器融合方式感知前方车辆、行人及其他障碍物，并基于相对距离、相对速度和碰撞时间（Time to Collision，TTC）等指标判断碰撞风险。当系统判定碰撞风险超过预设阈值时，系统自动施加制动，以避免碰撞或减轻碰撞后果。

传统的功能安全研究主要关注由硬件随机故障或系统性失效导致的安全问题，如传感器失效、控制器异常或执行器故障等。然而，在实际道路运行过程中，AEB系统面临的部分安全风险并非源于明确故障，而是来自复杂环境下的功能性能不足。ISO 21448指出，预期功能安全（Safety of the Intended Functionality，SOTIF）适用于需要复杂传感器和处理算法获得态势感知、且该态势感知对安全至关重要的预期功能，典型对象包括紧急干预系统和不同等级的自动驾驶功能[1]。因此，AEB系统作为感知驱动型紧急干预系统，是SOTIF分析的重要研究对象。

在实际道路环境中，AEB系统的风险往往并非由单一因素造成，而是由多类触发条件共同作用形成。例如：雨天会降低摄像头图像质量并缩短有效检测距离；湿滑或积水路面会降低轮胎的附着力，从而增加制动距离；行人横穿、前车紧急制动和车辆切入会使碰撞时间迅速缩短；摄像头帧率下降则可能导致目标采样延迟时间增加。当上述因素叠加时，系统即使未发生硬件或软件故障，也可能出现“看见得晚、判断得慢、制动距离不足”的SOTIF风险。

现有AEB系统测试与场景分析方法主要包括全因子场景枚举、专家经验评分、危险与可操作性分析、故障树分析以及基于仿真的场景验证等。这些方法在特定条件下具有一定有效性，但仍存在一些不足：一是全因子枚举会使场景数量随变量维度快速膨胀，导致测试成本较高；二是纯专家评分难以描述触发条件之间的条件依赖关系；三是单一典型场景仿真难以揭示多触发条件叠加时的风险放大规律。

基于此，本文以AEB系统为研究对象，提出一种面向SOTIF分析的触发条件叠加评估方法。通过贝叶斯网络描述天气、路面、交通交互和摄像头帧率之间的风险传播关系，结合多指标评分体系实现组合场景的重要性排序，并通过设计27组仿真场景，对不同天气-路面组合、交通交互行为及摄像头帧率下的AEB系统安全表现进行验证。

2 AEB系统预期功能安全问题分析

2.1 AEB系统功能结构

AEB系统通常由环境感知模块、风险判断模块、制动决策模块和执行控制模块组成。环境感知模块负责识别前方车辆、行人及其他障碍物，并输出目标距离、相对速度、目标类别等信息；风险判断模块根据感知结果计算TTC等指标；制动决策模块根据风险等级触发预警、预制动或紧急制动；执行控制模块通过制动系统完成车辆减速。

从功能链条看，AEB系统的安全表现依赖于3个关键条件：第一，目标能够被及时、稳定地识别；第二，风险判断能够在有限时间内准确完成；第三，车辆具备足够的制动能力，以在冲突点前停止或显著降低碰撞速度。任一条件不足，都可能导致AEB系统无法达到预期安全效果。

2.2 SOTIF视角下的AEB系统风险来源

从SOTIF角度看，AEB系统风险并非主要表现为传统意义上的故障，而是表现为功能性能边界不足。其风险来源主要包括感知性能不足、车辆制动能力不足和交通交互复杂3类。

感知性能不足主要体现在雨天、雾天、逆光或低照度条件下摄像头可能出现图像模糊、目标对比度降低和检测稳定性下降等问题。摄像头帧率下降还会导致单位时间内可用图像帧数减少，从而增加目标采样延迟时间。

车辆制动能力不足主要与路面附着系数有关。

在干燥路面上，车辆通常可以获得较大的制动减速度；而在湿滑或积水路面上，轮胎与路面间的摩擦力下降，导致车辆制动距离增加。即使AEB系统及时触发，车辆也可能因制动能力不足而无法避免碰撞。

交通交互复杂主要体现在行人横穿、前车紧急制动和车辆切入等行为会导致相对距离与相对速度之间的关系快速变化。其中，行人横穿具有较高的事故后果严重度，前车紧急制动具有较高的道路暴露度，车辆切入则具有较强的突发性和交互不确定性。

2.3 传统叠加分析方法的局限性

目前，复杂场景下的AEB系统测试通常采用全因子枚举或专家评分方法。全因子枚举方法能够覆盖大量组合工况，但随着变量维度增加，场景数量将呈指数增长，导致测试资源消耗过大。专家评分方法具有较强的工程可操作性，但评分过程依赖主观经验，难以准确表达天气、路面、传感器状态和交通行为之间的相互依赖关系。

例如：雨天既会降低摄像头感知质量，又会使路面趋于湿滑；低帧率主要影响目标采样延迟时间；前车紧急制动和行人横穿则会显著压缩TTC。若采用简单线性加权，可能无法区分不同触发条件的作用路径。因此，有必要构建一种既能表达条件依赖关系，又便于工程应用的触发条件叠加评估方法。

3 触发条件叠加评估方法

3.1 触发条件定义

本文选取天气状况、路面条件、交通交互行为和摄像头帧率作为AEB系统SOTIF分析中的4类关键触发条件，其定义如表1所示。

表1 AEB系统触发条件定义

触发条件	典型取值	对AEB系统功能的主要影响
天气状况	晴天、中雨、大雨	影响目标可见性、图像质量和检测距离
路面条件	干燥、湿滑、积水（附着系数降低）	影响轮胎附着能力和最大制动减速度
交通交互行为	行人横穿、前车紧急制动、车辆切入	影响碰撞类型、TTC变化速率和事故后果
摄像头帧率	30帧/s、15帧/s、10帧/s	影响采样延迟时间

天气状况与路面条件之间存在明显的耦合关系。美国联邦公路管理局（Federal Highway Administration，FHWA）道路天气研究表明，降水不仅会降低能见距离，还会改变路面摩擦条件和车辆牵引性能，并进一步影响车辆运行速度与事故风险[2]。因此，本文将天气与路面状态进行组合建模：晴天对应干燥路面，中雨对应湿滑路面，大雨对应积水低附着系数路面，以更贴近实际道路环境。

3.2 贝叶斯网络风险传播模型

为描述多触发条件叠加下的风险传播关系，本文构建了贝叶斯网络模型。设触发条件组合为：

$$T=(W,R,A,F) \tag{1}$$

式中：W为天气状况，R为路面条件，A为交通交互行为，F为摄像头帧率。

进一步引入3个中间状态变量：感知质量Q、制动裕度M和冲突紧迫度I。其中，感知质量主要受天气和摄像头帧率影响，制动裕度主要受路面附着条件影响，冲突紧迫度主要由交通交互行为与车辆速度决定。危险事件H的后验概率可表示为：

$$P(H|W,R,A,F)=\sum_{QMI}P(H|Q,M,I)P(Q|W,F)P(M|R,W)P(I|A,V) \tag{2}$$

式中：V为自车速度。

式（2）体现了触发条件到危险事件的传播路径：天气和帧率影响感知质量，天气和路面影响制动裕度，交通交互行为和车速影响冲突紧迫度，最终共同决定危险事件的发生概率。

与简单线性评分相比，贝叶斯网络模型能够更清晰地描述不同触发条件之间的条件依赖关系。例如：雨天不仅影响感知质量，还会通过改变路面状态降低制动能力；低帧率主要影响采样延迟时间；行人横穿和前车紧急制动主要提高冲突紧迫度。因此，该模型更适合分析AEB系统在复杂叠加场景中的SOTIF风险。

3.3 场景重要性评分方法

为便于对组合场景进行排序，本文在贝叶斯后验危险概率基础上构建多指标重要性评分体系，评价指标如表2所示。

表2 场景重要性评分指标

指标	取值范围	含义
危险后验概率B	0~1	危险事件发生概率，由贝叶斯网络输出
严重度S	1~5	事故后果严重程度，行人事故通常更高
暴露度E	1~5	对应场景在真实道路中出现的频率
可控性C	1~5	驾驶员或系统规避危险的难度
感知退化度D	1~5	天气、帧率等因素导致的传感器性能下降程度
耦合复杂度K	1~5	多个触发条件之间相互放大的程度

综合重要性评分定义为：

$$I(T)=100[0.32B+0.20S'+0.15E'+0.13C'+0.12D'+0.08K'] \quad (3)$$

式中：S'、E'、C'、D'、K'分别为归一化后的严重度、暴露度、可控性、感知退化度、耦合复杂度。

评分越高，表明该场景越应优先纳入AEB系统SOTIF测试与仿真验证。权重设置以危险概率为核心，兼顾事故后果、实际暴露度、可控性、感知退化和触发条件耦合程度。

4　AEB系统叠加场景重要性分析

基于第3章建立的触发条件体系和重要性评分方法对AEB系统典型组合场景进行初步重要性分析可知，高风险场景通常具备以下特征：一是环境条件导致感知性能显著下降；二是路面附着系数降低使制动距离增加；三是交通交互行为引发TTC快速下降；四是低帧率感知进一步延长目标采样延迟时间。

依据上述规律，行人横穿和前车紧急制动被判定为较高优先级的交通交互场景：行人横穿场景涉及弱势交通参与者，事故后果严重度较高；前车紧急制动场景与追尾事故密切相关，暴露度较高，且对AEB系统制动响应时间较为敏感。车辆切入场景虽然在部分参数组合条件下不会直接导致碰撞，但其突发性较强，适合作为中高优先级边界场景开展进一步分析。

与全因子枚举方法相比，本文方法并未否定组合场景覆盖的必要性，而是先借助贝叶斯网络和评分模型识别优先级，再将仿真资源集中于最可能暴露SOTIF风险的场景。与纯专家评分方法相比，本文方法保留概率传播结构，能够反映天气–路面、天气–感知、帧率–延迟等条件依赖关系。与单一典型场景仿真相比，本文方法可在多条件叠加时揭示风险放大趋势，因而更适合在AEB系统场景库构建和仿真测试排序中应用。

综上所述，本文将天气–路面组合、交通交互行为和摄像头帧率进行组合，构建27组仿真场景，以验证评分模型能否有效识别高风险叠加条件。

5　AEB系统仿真过程与结果分析

5.1　仿真总体设计

为验证本文提出的触发条件叠加评估方法，采用PreScan/MATLAB等效联合仿真思路开展AEB系统场景验证。PreScan用于构建道路环境、天气状态、交通参与者及传感器参数化场景，MATLAB用于实现AEB系统纵向控制逻辑，包括TTC计算、制动触发、制动延迟建模和结果统计。

鉴于本文研究的重点在于分析多触发条件叠加对AEB系统安全裕度的影响，仿真主要关注纵向制动过程，包括目标检测、风险判断、AEB系统触发、车辆减速和安全裕度变化。仿真共配置3类天气–路面环境、3类交通交互行为和3种摄像头帧率，故总场景数量为27个。部分仿真场景如图1所示。



(a)前车紧急制动



(b)行人横穿

图1　仿真场景示意

5.2　天气–路面组合参数

本文将天气与路面状态进行耦合设置，形成3类环境组合，具体参数如表3所示。

表3　天气–路面组合参数

环境编号	天气状况	路面条件	附着系数μ	检测距离修正系数	环境感知延迟时间/s
E1	晴天	干燥平直路面	0.85	1.00	0
E2	中雨	湿滑平直路面	0.55	0.80	0.05
E3	大雨	积水低附着系数平直路面	0.40	0.68	0.10

由表3可知，随着天气状况由晴天逐步恶化至中雨和大雨，路面附着能力持续下降，检测距离缩短，环境感知延迟时间相应增加。此设置旨在反映天气条件对感知性能和路面制动能力的双重影响。

车辆最大可用制动减速度为：

$$a_{brake}=\min(8.0,k\mu g) \tag{4}$$

式中：μ为路面附着系数，g为重力加速度，k=0.85为制动控制保守系数。

感知-制动总延迟时间为：

$$t_{delay}=N_{conf}/F+t_{proc}+t_{brk}+t_{env} \tag{5}$$

式中：N_{conf}为目标确认所需帧数，t_{proc}为基础处理延迟时间，t_{brk}为制动建立延迟时间，t_{env}为因环境恶化引起的环境感知延迟时间。

5.3 交通交互场景设置

本文设置3类典型AEB系统交互场景，分别为行人横穿、前车紧急制动和车辆切入。NHTSA对乘用车碰撞避免技术目标事故群体的研究表明，前向碰撞预防系统主要面向前车停止、低速及减速等追尾冲突，而行人自动紧急制动（Pedestrian Automatic Emergency Braking，PAEB）功能则主要针对车辆与行人之间的前向碰撞场景[3]。因此，本文选取前车紧急制动和行人横穿作为代表性前向冲突场景，并进一步引入具有突发性的车辆切入场景，以考察不同交通交互条件下AEB系统的安全表现。自车初始速度统一设置为50 km/h，AEB系统触发阈值统一设定为TTC≤2.2 s，具体参数如表4所示。

表4 交通交互场景参数

场景类型	主要参数	参数值
行人横穿	冲突点距离/m	45
	晴天基础检测距离/m	40
前车紧急制动	前车初始距离/m	50
	前车紧急制动开始时刻/s	1.0
	前车减速度/m·s^{-2}	5.5
车辆切入	切入时刻/s	1.2
	切入后距离/m	28
	切入车辆速度/km·h^{-1}	35

仿真评价指标包括检测距离、感知-制动总延迟时间、最大制动减速度、最小TTC、安全裕度、是否碰撞和碰撞/冲突速度。其中，安全裕度大于0表示系统成功避免碰撞并保留一定余量；安全裕度小于0表明车辆已经越过冲突边界或无法维持设定的安全距离。

5.4 仿真结果

27组仿真场景的仿真结果如表5~表7所示。

表5 晴天-干燥平直路面下的AEB系统仿真结果

交互类型	帧率/帧·s^{-1}	检测距离/m	总延迟时间/s	最大制动减速度/m·s^{-2}	最小TTC/s	安全裕度/m	是否碰撞	碰撞速度/km·h^{-1}
行人横穿	30	40.00	0.55	7.09	1.62	9.31	否	
	15	40.00	0.65	7.09	1.49	7.92	否	
	10	40.00	0.75	7.09	1.36	6.53	否	
前车紧急制动	30	50.00	0.53	7.09	1.50	7.96	否	
	15	50.00	0.63	7.09	1.36	6.57	否	
	10	50.00	0.73	7.09	1.21	5.18	否	
车辆切入	30	28.00	0.57	7.09	1.61	5.48	否	
	15	28.00	0.67	7.09	1.51	5.07	否	
	10	28.00	0.77	7.09	1.41	4.65	否	

表6 中雨-湿滑平直路面下的AEB系统仿真结果

交互类型	帧率/帧·s^{-1}	检测距离/m	总延迟时间/s	最大制动减速度/m·s^{-2}	最小TTC/s	安全裕度/m	是否碰撞	碰撞速度/km·h^{-1}
行人横穿	30	32.00	0.60	4.59	0.72	1.19	否	
	15	32.00	0.70	4.59	0.00	−0.19	是	4.76
	10	32.00	0.80	4.59	0.01	−1.57	是	13.68
前车紧急制动	30	50.00	0.58	4.59	0.00	−0.01	是	4.27
	15	50.00	0.68	4.59	0.01	−0.01	是	13.51
	10	50.00	0.78	4.59	0.01	−0.02	是	18.63
车辆切入	30	22.40	0.62	4.59	1.56	4.61	否	
	15	22.40	0.72	4.59	1.46	4.19	否	
	10	22.40	0.82	4.59	1.36	3.77	否	

表7　大雨-积水低附着系数平直路面下的AEB系统仿真结果

交互类型	帧率/帧·s^{-1}	检测距离/m	总延迟时间/s	最大制动减速度/m·s^{-2}	最小TTC/s	安全裕度/m	是否碰撞	碰撞速度/km·h^{-1}
行人横穿	30	27.20	0.65	3.34	0.00	−10.78	是	30.55
	15	27.20	0.75	3.34	0.01	−12.36	是	32.71
	10	27.20	0.85	3.34	0.01	−13.76	是	34.51
前车紧急制动	30	50.00	0.63	3.34	0.00	−0.04	是	27.43
	15	50.00	0.73	3.34	0.01	−0.00	是	29.59
	10	50.00	0.83	3.34	0.01	−0.04	是	31.51
车辆切入	30	19.04	0.67	3.34	1.51	3.69	否	
	15	19.04	0.77	3.34	1.41	3.27	否	
	10	19.04	0.87	3.34	1.31	2.86	否	

由表5可知，在晴天-干燥平直路面条件下，AEB系统在全部9组测试场景中均未发生碰撞。随着摄像头帧率的降低，各场景的安全裕度均呈下降趋势，但整体仍保留较充足的安全余量。

由表6可知，在中雨-湿滑平直路面条件下，AEB系统的风险显著上升。在行人横穿场景中，当摄像头帧率为30 帧/s时，系统虽未发生碰撞，但安全裕度仅为1.19 m；若前车紧急制动或摄像头帧率进一步降低，系统将进入碰撞或临界碰撞状态。

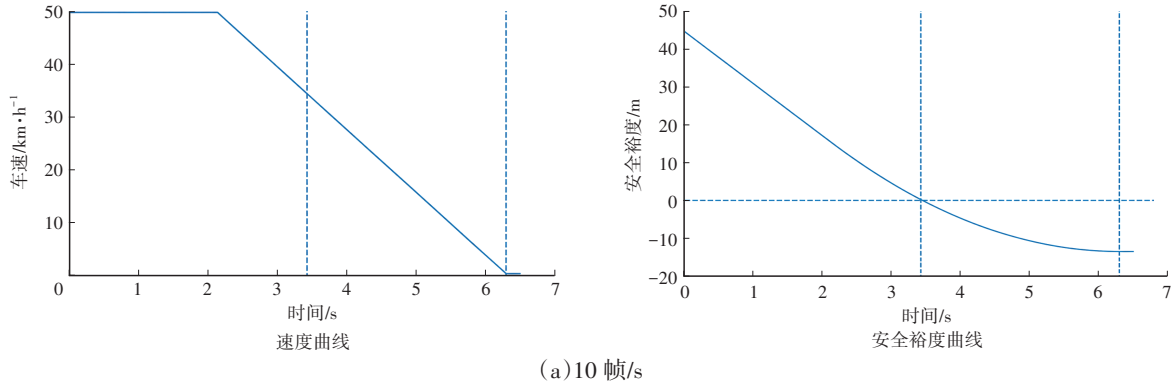
由表7可知，在大雨-积水低附着系数平直路面条件下，AEB系统避险能力急剧恶化，受限于3.34 m/s^{2}的最大制动减速度，行人横穿和前车紧急制动场景均发生碰撞，随着摄像头帧率降低，碰撞速度进一步升高。

5.5　典型高风险场景分析

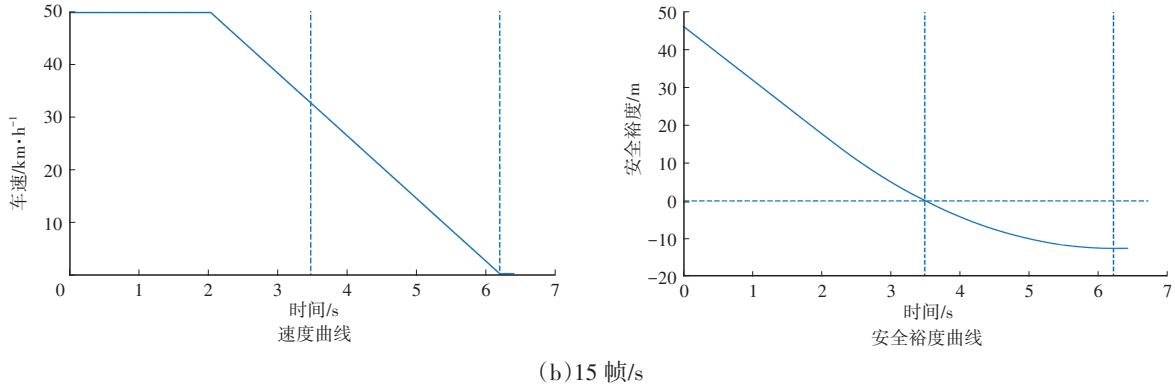
基于危险度评分结果，本文选取危险度评分最高的3组场景进行深入分析，结果如表8和图2所示。

表8　危险度最高的3组场景

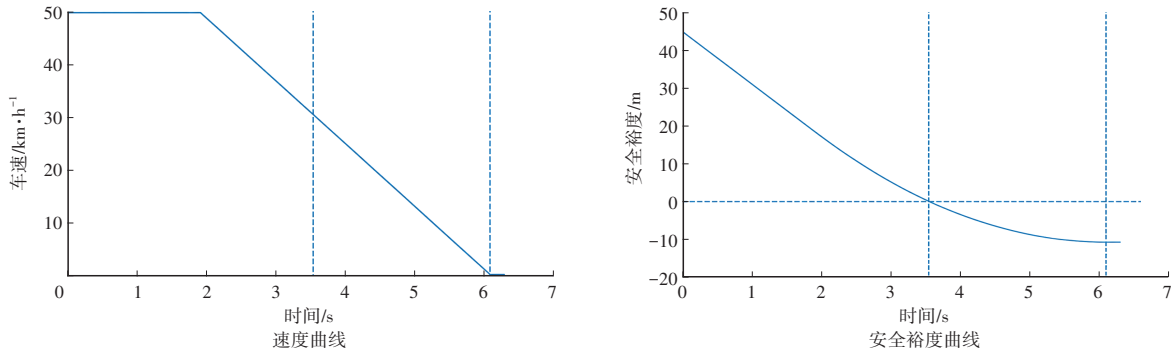
排名	环境	交互类型	帧率/帧·s^{-1}	最小TTC/s	安全裕度/m	碰撞速度/km·h^{-1}	危险度评分
1	大雨-积水低附着系数平直路面	行人横穿	10	0.01	−13.76	34.51	157.43
2	大雨-积水低附着系数平直路面	行人横穿	15	0.01	−12.36	32.71	149.67
3	大雨-积水低附着系数平直路面	行人横穿	30	0.00	−10.78	30.55	140.82



(a)10 帧/s



(b)15 帧/s



（c）30 帧/s

图2　大雨-积水低附着系数路面-行人横穿场景不同摄像头帧率下的仿真结果

在最高风险场景中，摄像头帧率为 10 帧/s 时，目标采样延迟时间达到最大值。同时，大雨导致检测距离显著缩短，而积水低附着系数路面严重削弱了车辆制动能力。速度曲线显示，尽管 AEB 系统触发了制动功能，但减速过程不足以避免碰撞，最终碰撞速度达到 34.51 km/h。安全裕度曲线在降至零以下后继续下降，表明车辆越过冲突点后仍需较长距离才能完全停止。

当摄像头帧率提高至 15 帧/s 时，目标采样延迟时间略有缩短，碰撞速度降至 32.71 km/h，安全裕度由-13.78 m 改善至-12.38 m。然而，该场景仍发生严重碰撞，表明在极端天气和低附着系数路面叠加条件下，仅有限提升帧率不足以从根本上消除风险。

在 30 帧/s 正常帧率下，该场景仍发生碰撞，碰撞速度为 30.55 km/h。这一结果表明，当天气、路面和行人横穿行为同时构成极端叠加风险时，AEB 系统性能瓶颈已不再仅由传感器帧率决定，而是由检测距离缩短、制动能力下降和冲突时间不足共同作用所致。

5.6　仿真结果综合讨论

从 27 组仿真结果可以看出，天气-路面耦合对 AEB 系统安全表现具有显著影响。在晴天-干燥路面条件下，AEB 系统能够在所有场景中避免碰撞；在中雨-湿滑路面条件下，行人横穿和前车紧急制动场景开始出现碰撞或接近碰撞状态；在大雨-积水低附着系数路面条件下，行人横穿和前车紧急制动场景风险显著升高。

摄像头帧率降低对安全裕度的影响也较为明显。对于同一环境和交互类型，帧率由 30 帧/s 降至 10 帧/s 时，感知-制动总延迟时间增加，导致 AEB 系统制动开始时刻推迟，安全裕度逐渐减小。尤其是在中雨和大雨条件下，低帧率与低附着系数路面叠加，会使系统更容易由边界安全状态转变为碰撞状态。

此外，不同交通交互行为的风险表现亦存在差异。行人横穿场景具有最高严重度和较强突发性，在恶劣天气下最易形成高风险；前车紧急制动场景与追尾事故高度相关，对制动延迟和路面附着条件极为敏感；车辆切入场景在本文参数设置下未发生碰撞，但其安全裕度随环境恶化持续下降，仍具有进一步研究价值。

6　事故统计对照与方法有效性分析

为验证本文评分结果的合理性，将高风险仿真场景与公开交通事故统计资料进行对照。FHWA 道路天气资料显示：在天气相关车辆事故中，每年约 75% 的事故发生在湿滑路面，约 47% 发生在降雨期间；湿滑路面事故每年造成近 5 700 人死亡、超过 544 700 人受伤，降雨期间事故每年造成超过 3 400 人死亡、超过 357 300 人受伤[4]。这表明雨天和湿滑路面对交通事故具有显著影响，与本文将“中雨-湿滑路面”和“大雨-积水低附着系数路面”设为高风险环境的思路一致。

美国国家公路交通安全管理局（National Highway Traffic Safety Administration，NHTSA）在 AEB 系统相关规则制定资料中，将轻型车辆之间的前向碰撞目标群体限定为追尾碰撞等典型前向冲突场景[5]。本文仿真结果显示，前车紧急制动场景在中雨-湿滑路面和大雨-低附着系数路面下均出现碰撞，说明该类追尾相关场景确应作为 AEB 系统功能验证的重要对象。

对于行人场景，NHTSA 报告显示，2023 年美国共有 7 314 名行人在交通事故中死亡，行人死亡人数占全部交通事故死亡人数的 18%，同时，89% 的行人死亡事故发生在单车碰撞中[6]。这些数据表明，

车辆与行人之间的前向冲突具有较高的后果严重度，与本文评分体系中对行人横穿场景赋予较高严重度的处理一致。

从对照关系看，本文重要性分析中排名靠前的场景主要集中在“大雨/中雨-湿滑或低附着系数路面-行人横穿/前车紧急制动”组合，这与公开事故统计中雨天湿滑、追尾碰撞和行人事故的高发特征相吻合。由此可以说明，本文所建立的贝叶斯网络与多指标评分方法并非仅反映仿真参数变化，而是能够在一定程度上映射真实道路事故风险规律。

7 结束语

本文面向AEB系统的预期功能安全问题，提出了一种基于贝叶斯网络与多指标评分融合的触发条件叠加评估方法，并通过27组仿真场景对方法进行了验证，获得的主要结论如下：

a. AEB系统的SOTIF风险并非由单一触发条件决定，而是由天气状况、路面条件、交通交互行为和摄像头帧率共同作用形成。天气恶化会降低感知质量，路面附着系数下降会增加制动距离，复杂交互行为会压缩TTC，低帧率则会进一步增加目标采样延迟时间。

b. 贝叶斯网络能够较好地描述多个触发条件之间的条件依赖关系。相较于简单线性加权方法，本文方法能够区分天气、路面、感知和交互行为的不同作用路径，更适合用于AEB系统SOTIF场景风险分析。

c. 27组仿真结果表明：晴天-干燥路面条件下AEB系统整体表现较好；中雨-湿滑路面条件下，行人横穿和前车紧急制动场景已表现出明显边界风险；大雨-积水低附着系数路面条件下，行人横穿和前车紧急制动在多种帧率下均发生碰撞，属于高优先级验证场景。

d. 危险度最高的3组场景均为大雨-积水低附着系数平直路面-行人横穿场景，且即使在30 帧/s正常帧率下仍发生碰撞。这说明在极端叠加工况下，AEB系统需要进一步结合更保守的触发阈值、更强的多传感器融合策略或运行设计域限制，以降低不合理风险。

综上所述，本文所提出的触发条件叠加评估方法能够有效识别AEB系统在复杂环境下的高风险SOTIF场景，并可为AEB系统场景库构建、虚拟仿真测试排序和安全设计优化提供参考。后续研究可进一步引入夜间、弯道、遮挡、逆光等触发条件，并结合更高保真度的PreScan传感器模型和实车数据对模型参数进行校准。

参考文献

[1] ISO. Road Vehicles — Safety of the Intended Functionality: ISO 21448: 2022[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.

[2] Federal Highway Administration. How Do Weather Events Affect Roads?[EB/OL]. (2025-07-15)[2026-09-16]. https://ops.fhwa.dot.gov/weather/roadimpact.htm.

[3] WANG J S. Target Crash Population for Crash Avoidance Technologies in Passenger Vehicles: DOT HS 812 653[R]. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2019.

[4] Federal Highway Administration. Rain & Flooding: Road Weather Management Program[EB/OL]. (2024-09-06)[2026-09-16]. https://ops. fhwa. dot. gov/Weather/weather_events/rain_flooding.htm.

[5] National Highway Traffic Safety Administration. Federal Motor Vehicle Safety Standards; Automatic Emergency Braking Systems for Light Vehicles; Notice of Proposed Rulemaking[J]. Federal Register, 2024, 89(91): 39686-39795.

[6] National Highway Traffic Safety Administration. Traffic Safety Facts 2023 Data: Pedestrians: DOT HS 813 727[R]. Washington, DC: NHTSA, 2025.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年9月16日。