基于LTE-V2X预警类应用的功能安全分析

Functional safety analysis of LTE-V2X based warning applications

2025年05月

摘要

本研究基于 LTE-V2X 直连通信技术，对预警类应用的功能安全进行了系统分析。研究背景指出，传统的功能安全分析方法主要针对单车系统，近年来 V2X 技术逐渐发展，智能网联汽车应用不断增加，但缺乏系统性的功能安全分析方法。本研究选取前向碰撞预警（FCW）、交叉路口碰撞预警（ICW）和闯红灯预警（RLVW）三个典型应用场景，对基于 LTE-V2X 预警类应用的功能安全分析进行了技术探索。

在研究现状部分，本研究总结了国内外的相关研究和标准，包括 5GAA 的 STiCAD 项目、中国汽车工程学会的 T/CSAE 53 标准、汽标委的预警类应用技术要求和试验方法，以及 C-NCAP 2024 版测试规程中的相关场景。本研究还对 V2X 预警类应用进行了分类，分为安全类和效率类应用，并指出安全类应用与功能安全的相关性更大，因此本研究以安全类的三个典型应用场景为目标展开分析。

在功能安全分析方法论部分，本研究基于 GB/T 34590 的框架，详细阐述了相关项定义、危害分析和风险评估、功能安全概念等步骤。

在第 5 章到第 7 章的三个章节，本研究针对前向碰撞预警（FCW）、交叉路口碰撞预警（ICW）、闯红灯预警（RLVW）应用，分别进行了相关项定义、潜在危害识别、ASIL 分析等工作，提出了针对安全目标的功能安全要求。

在总结及展望部分，建议以本研究为开端，将 GB/T 34590 的功能安全分析方法拓展至 V2X 系统。本研究的主要结论为：QM 级别的功能安全设计能够满足 V2X 预警类应用的需求。

Executive Summary

This study conducts a systematic functional safety analysis for LTE-V2X warning applications based on the ISO 26262 (GB/T 34590) methodology. The background highlights the need for systematic functional safety analysis for V2X applications as traditional methods only cover ego-vehicle systems. With the advancement of V2X technology, there is an increasing number of intelligent connected vehicle applications requiring such analysis.

The scope of the study includes functional safety analysis for warning applications based on LTE-V2X direct communication, focusing on three typical scenarios: Forward Collision Warning (FCW), Intersection Collision Warning (ICW), and Red Light Violation Warning (RLVW). These applications provide warning information without vehicle control intervention, leaving the driver to take appropriate actions based on the warnings.

The current status chapter reviews global and domestic advancements in V2X functional safety, including the 5GAA's STiCAD project, standards from the China Society of Automotive Engineers, and V2X warning application scenarios in the C-NCAP 2024 test procedures.

The functional safety analysis methodology section details the steps based on GB/T 34590, including item definition, hazard analysis and risk assessment, and functional safety concepts. Through detailed analysis of the three typical scenarios, potential hazards are identified, and corresponding functional safety requirements are proposed.

In the following three chapters, this study conducts the following work for Forward Collision Warning (FCW), Intersection Collision Warning (ICW), and Red Light Violation Warning (RLVW) applications respectively: item definition, hazard analysis and risk assessment, ASIL analysis and functional safety requirements.

The study concludes that V2X functional safety analysis should be integrated into the ISO 26262 framework. The potential hazards in typical V2X warning scenarios can be managed with QM-level safety measures.

目 录

摘 要 2

Executive Summary 3

1. 背景及范围 5

1.1 研究背景 5

1.2 研究范围 5

2. 研究现状 6

2.1 国内外现阶段研究概述 6

3. V2X 预警类应用总结 8

4. 功能安全分析方法论 11

4.1 概述 11

4.2 相关项定义 11

4.3 危害分析和风险评估 12

4.4 功能安全概念 13

5. 前向碰撞预警（FCW）——高速度差追尾 13

5.1 相关项定义 13

5.2 危害分析和风险评估 14

5.3 功能安全概念 19

6. 交叉路口碰撞预警（ICW） 22

6.1 相关项定义 22

6.2 危害分析和风险评估 24

6.3 功能安全概念 28

7. 闯红灯预警（RLVW） 29

7.1 相关项定义 29

7.2 危害分析和风险评估 30

7.3 功能安全概念 34

8. 总结及展望 37

9. 参考文献 39

致 谢 40

1. 背景及范围

1.1 研究背景

以 ISO 26262（GB/T 34590）为纲领性文件的功能安全分析方法传统上只局限于单车范围，即功能安全的责任主体是车辆内部的某个系统或功能。近年来，随着车联网（V2X）标准和技术的不断完善、网联协同相关应用不断被提出、相关验证工作逐步展开，为保证安全性，一些企业和组织陆续展开针对 V2X 相关应用的功能安全分析的初步探索，但缺乏系统性，无法作为通用性指导。

对于安全预警类的场景，中国汽车工程学会在 T/CSAE 53 《合作式智能运输系统车用通信系统应用层及应用数据交互标准（第一阶段）》中提出了 17 个一阶段应用，汽标委开展了国标《基于网联技术的汽车安全预警类应用场景技术要求及试验方法》研究，C-NCAP 发布的 2024 版测试规程中也提出了涉及 V2X 预警应用相关的场景，并规定了测试条件和通过条件。然而，这些场景的功能安全分析尚未完善，因此亟需进一步研究，以补充技术要求，使汽车 OEM 能够更好地处理超越单车系统之外的 V2X 的功能安全问题。

1.2 研究范围

本研究范围为基于 LTE-V2X 直连通信提供预警类应用的功能安全分析。“预警类应用”指 V2X 应用只给驾驶员提供声光等形式的预警而不参与车辆控制，由 V2X 预警触发的车辆制动或转向等控制仍由人类驾驶员执行。

为使研究具体化，本文选取了三个典型的应用场景作为举例性质的分析，以验证 V2X 概念级功能分析的方法论。典型应用包括：

- 前向碰撞预警（FCW）——高速度差追尾
- 交叉路口碰撞预警（ICW）
- 闯红灯预警（RLVW）

2. 研究现状

2.1 国内外现阶段研究概述

2.1.1 5GAA STiCAD

为应对 V2X 在功能安全领域的新挑战，5GAA 成立了专门的技术工作组，对 STiCAD（Safety Treatment in Connected and Automated Driving）进行了详细分析，为汽车 OEM 提供应对 V2X 新用例功能安全需求的关键指导。

5GAA 的 STiCAD 选取了两个典型的 V2X 用例进行研究：基于 V2N 的远程遥控驾驶（ToD）和基于 V2V 的急刹车预警（EBW）。

2.1.2 中国汽车工程学会一阶段应用

中国汽车工程学会的 T/CSAE 53 《合作式智能运输系统车用通信系统应用层及应用数据交互标准（第一阶段）》提出 17 个一阶段应用，可作为本研究预警类应用的基础用例集。

序号	类别	主要通信方式	应用名称
1	安全	V2V	前向碰撞预警
2		V2V/V2I	交叉路口碰撞预警
3		V2V/V2I	左转辅助
4		V2V	盲区预警/变道预警
5		V2V	逆向超车预警
6		V2V-Event	紧急制动预警
7		V2V-Event	异常车辆提醒
8		V2V-Event	车辆失控预警
9		V2I	道路危险状况提示
10		V2I	限速预警
11		V2I	闯红灯预警
12		V2P/V2I	弱势交通参与者碰撞预警
13	效率	V2I	绿波车速引导
14		V2I	车内标牌
15		V2I	前方拥堵提醒
16		V2V	紧急车辆提醒
17	信息服务	V2I	汽车近场支付

图 1： 一阶段应用列表

2.1.3 汽标委预警类应用技术要求和试验方法

汽标委正在开展《基于网联技术的汽车安全预警类应用场景技术要求及试验方法》的国家标准制定，其中定义了三个重点应用：路口碰撞预警、车辆安全状态提示、路侧信息提醒。

2.1.4 C-NCAP

为了促进中国汽车产业的健康发展，加速国内汽车市场的全球化进程，中国汽车技术研究中心于 2006 年 3 月 2 日正式发布了首版中国新车评价规程（C-NCAP）。C-NCAP 每三年进行一次规程改版，15 年来先后完成 6 个版本的制修订。在其最新的 C-NCAP 2024 版 ADAS 测试规程中提出涉及 V2X 预警应用相关的场景，将作为本文分析的重点。

C-NCAP 2024 版中 V2X 预警应用相关的场景如下：

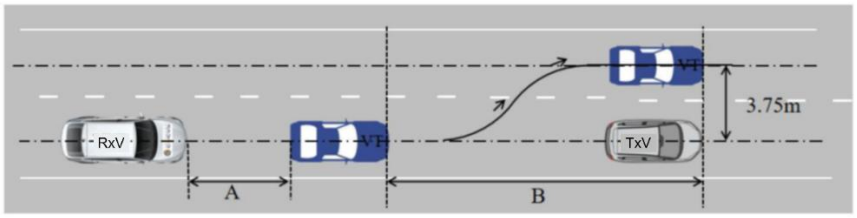


图 2：C-NCAP CCRH 场景：车辆高速直行与前方静止目标车辆测试场景（高速度差追尾）

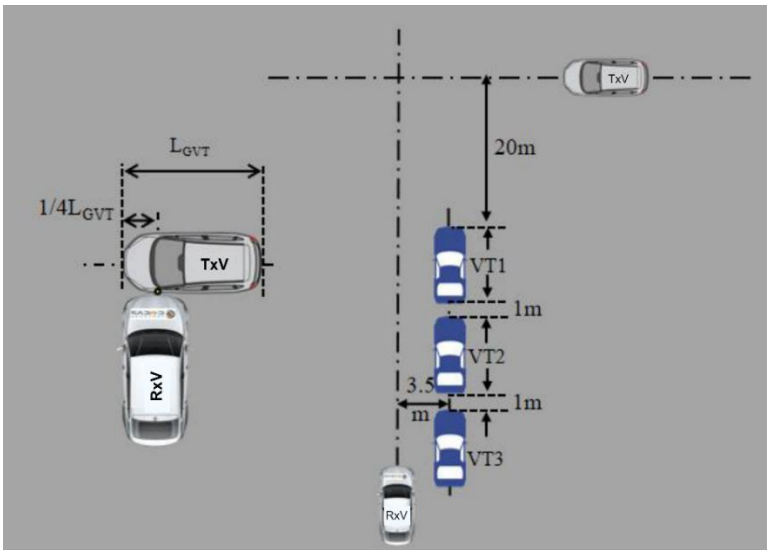


图 3：C-NCAP SCPO 场景：车辆直行与前方被遮挡的横穿目标车辆

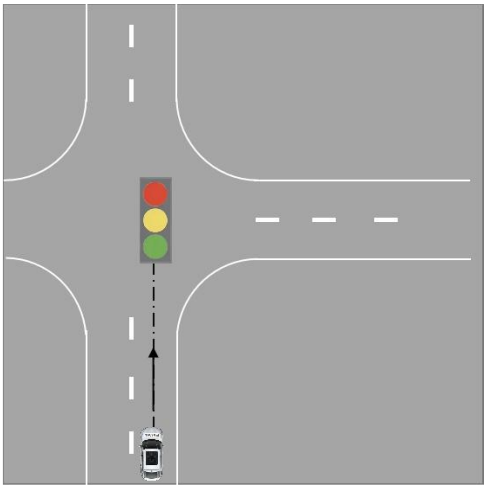


图 4：C-NCAP TSR 场景：闯红灯预警

3. V2X 预警类应用总结

本章尝试将 V2X 预警类应用进行汇总，并标明每个应用在相关标准及研究中的出现情况，作为后续 V2X 预警类应用研究的参考。

本研究的重点在于阐述 V2X 功能安全分析的方法论，由于篇幅及时间所限，虽然本章列出了丰富的应用，但在后面章节分析中，仅能选取重点应用进行分析，无法穷尽当前的列表，后续可遵循本研究的方法论进行更多应用的分析。

为区分 V2X 应用与功能安全的紧密联系程度，下面将 V2X 预警类应用归类为“安全类”和“效率类”两类。通过表中的总结可以看到，安全类应用在之前的研究中分析得较多，与功能安全的主题相关性更大，因此本研究中将选取安全类应用进行分析。

本研究重点参考的相关标准和技术报告具体包括：

- CSAE. T/CSAE 53/2020 合作式智能运输系统车用通信系统应用层及应用数据交互标准（第一阶段）
- 5GAA. Safety Treatment in Connected and Automated Driving Functions Report
- 汽标委. GB/T《基于网联技术的汽车安全预警类应用场景技术要求及试验方法》
- C-NCAP. C-NCAP 管理规范（2024 年版）
- IMT-2020（5G）推进组 C-V2X 工作组.C-V2X 与单车智能融合功能及应用白皮书
- Euro-NCAP. Euro NCAP Protocol - Safe Driving -Vehicle Assistance

表 1 安全类预警应用列表

序号	预警类应用(参考 T/CSAE 53)	5GAA	汽标委	C-NCAP	IMT2020（5G）推进组 C-V2X 工作组	Euro-NCAP
1	前向碰撞预警	无	无	CCRs-FCW	无	无
2		无	无	无	无	无
3		无	EBW-同车道行驶	无	无	无
4		无	无	CCRH（高速行驶）	无	无
5	交叉路口碰撞预警	无	ICW-左侧来车	SCP	SCPO	无
6		无	ICW-右侧来车	SCPO	无	无
7	左转辅助	无	LTA	CCFT	无	无
8	盲区预警/变道预警	无	无	无	无	无
9	逆向超车预警	无	无	无	无	无
10	紧急制动预警	EBW-multiple vehicles	无	无	无	无
11	异常车辆提醒	无	AVW-同车道	无	无	无
12		无	AVW-临近车道	无	无	无

13	车辆失控预警	无	CLW-同向车道	无	无	无
14		无	CLW-对向车道	无	无	无
15	道路危险状况提示	无	无	无	无	Local Hazards
16	限速预警	无	无	无	无	Advanced Speed Limits
17	闯红灯预警	无	RLVW	TSR	RLVW	无
18	弱势交通参与者碰撞预警	无	无	无	无	无

表 2 效率类预警应用列表

序号	预警类应用(参考 T/CSAE 53)	5GAA	汽标委	C-NCAP 2024	IMT2020（5G）推进组 C-V2X 工作组	Euro-NCAP
1	绿波车速引导	无	无	无	无	无
2	车内标牌	无	无	无	无	无
3	前方拥堵提醒	无	无	无	无	Local Hazard
4	紧急车辆提醒	无	无	无	无	无

4. 功能安全分析方法论

4.1 概述

本章给出的功能安全分析方法论将作为后续各应用功能安全分析的通用方法。该方法论符合 GB/T 34590 的基本框架，与 GB/T 34590 的各章存在直接的对应关系，并且重用了 GB/T 34590 的术语，如“ASIL”等。本研究方法论的各步骤与 GB/T 34590 各章节的对应如下：

- 相关项定义：GB/T 34590 第 3 部分第 5 章
- 危害分析和风险评估：GB/T 34590 第 3 部分第 6 章
- 功能安全概念：GB/T 34590 第 3 部分第 7 章

4.2 相关项定义

“相关项定义”在 GB/T 34590 中的描述见 GB/T 34590 第 3 部分第 5 章。根据 GB/T 34590，相关项定义的目的是：

- 在整车层面对相关项进行定义和描述，包括功能、与驾驶员、环境和其他相关项的依赖性和交互；
- 对充分理解相关项提供支持，以便执行后续阶段的活动。

在本研究后续第 5、6、7 章的具体应用章节中，将针对具体应用进行更详细的相关项定义，但总的来说，本研究的待分析系统可由下图粗略表示：

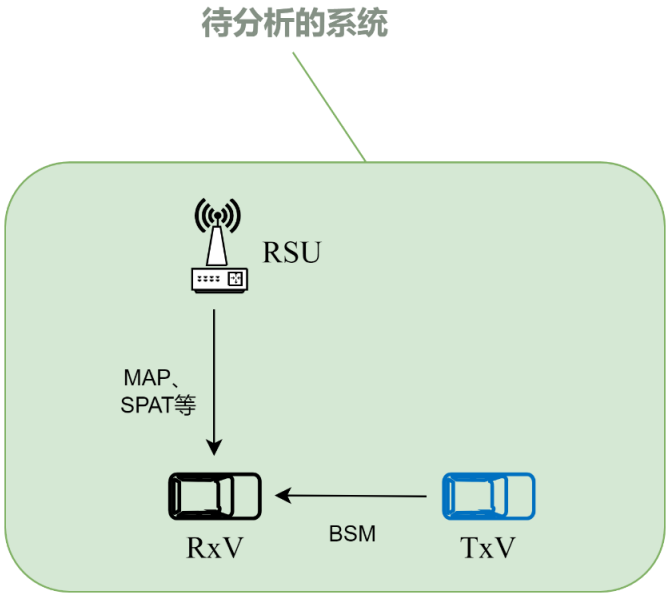


图 5 待分析系统的通用图示

其中，RxV 与 TxV（V2V）、RxV 与 RSU（I2V）之间是基于 LTE-V2X PC5 接口的直连通信。本研究不考虑蜂窝网络（Uu）接口的相关通信。

除 RxV 与 TxV 外，道路上可能有其他交通参与者，包括其他车辆、自行车、行人等，对于他们的 V2X 通信能力并没有前提假设。

4.3 危害分析和风险评估

根据 GB/T 34590 第 3 部分第 6 章，危害分析和风险评估主要包括运行条件分析、危害识别、确定安全目标三个部分。

- 运行条件分析：“应对相关项的功能异常表现导致一个危害事件发生时所处的运行场景及运行模式进行描述，包括正确使用的车辆和可合理预见的不正确使用车辆的情况”。在本研究中，仅针对每个应用的某种典型的运行条件进行举例，并不会穷举所有适用的运行条件。
- 危害识别：“应基于相关项可能的功能异常表现，系统性地确定危害”。

- 确定安全目标：“应为具有 ASIL 等级的每个危害事件确定一个安全目标，该 ASIL 等级从危害分析和风险评估中得出。如果所确定的安全目标是类似的，可将其合并为一个安全目标。”

4.4 功能安全概念

根据 GB/T 34590 第 3 部分第 7 章，在功能安全概念分析中，将根据前面的危害分析和安全目标，提出相应的功能安全要求。

5. 前向碰撞预警（FCW）——高速度差追尾

5.1 相关项定义

5.1.1 系统框图及相关组件

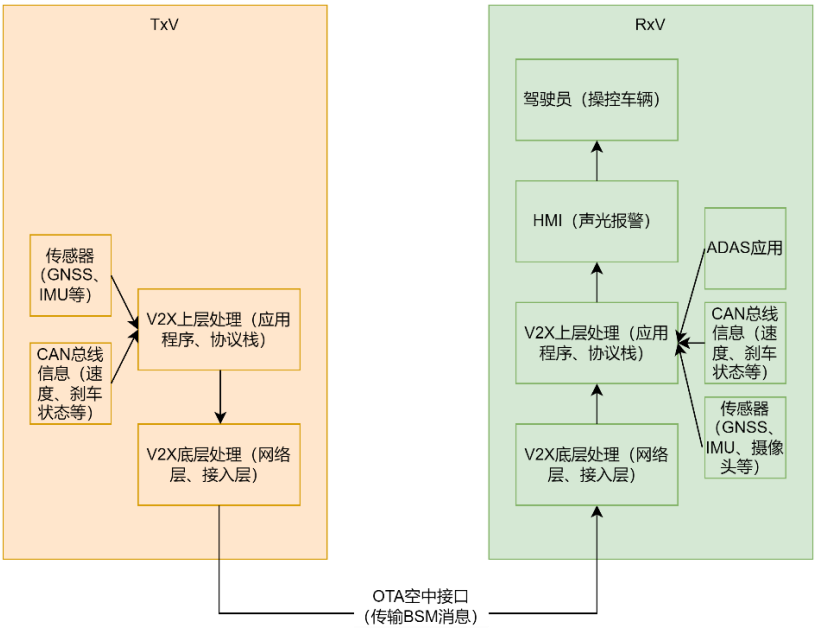


图 6 前向碰撞预警（FCW）——高速度差追尾场景的系统框图及相关组件

5.1.2 场景描述及参数定义

前向碰撞预警（FCW）——高速度差追尾场景描述为：

1）TxV（在 C-NCAP 中也称为 GVT）与 RxV（在 C-NCAP 中也称为 VUT）处于同一车道，中间存在其它车辆遮挡。

2）TxV 处于静止状态，一直发送 BSM 消息。

3）RxV 接收到 TxV 发送的 BSM 消息。

4）RxV 通过 V2X 应用判断，识别与 TxV 存在碰撞风险。

5）RxV 以声光等方式对驾驶员发出预警。

6）驾驶员识别预警，采取减速或转向等措施。

此场景的具体量化参数及条件可参考 C-NCAP 2024 版测试规程中的定义：CCRH 测试场景下，TxV、VT 和 RxV 在同一车道，RxV 与 VT 以相同的速度保持固定的相对距离沿车道中间匀速行驶，在距离为 A 时，达到稳定车速，测试车速分别为 80km/h、120km/h，对应两者之间的距离 A 分别为 50m，100m，如图 7 所示。当 VT 和 TxV 车头的距离 B 分别达到 49m，73m 时 VT 切出至相邻车道，VT 车头位置与 TxV 车头位置平行，切出过程持续时间为 2.2s。

本研究中取相对苛刻的一组条件，即测试车速为 120km/h，跟车距离 A 为 100m，距离 B 为 73m 时 VT 切出。

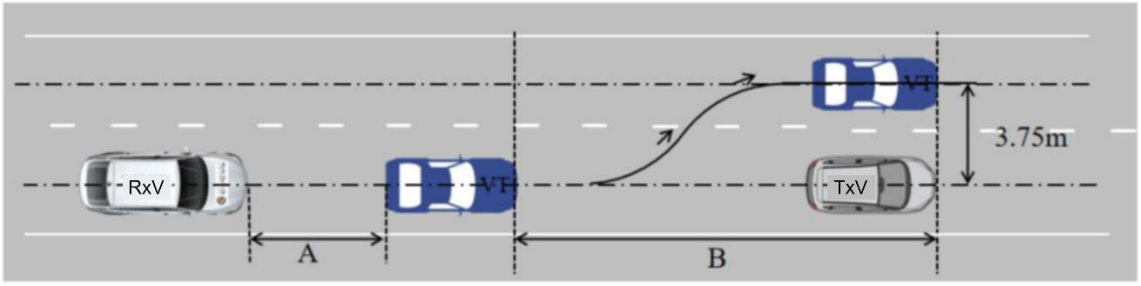


图 7 C-NCAP 2024 CCRH 测试场景示意图

5.2 危害分析和风险评估

5.2.1 运行条件分析

针对本应用的一种典型运行条件为：

- 路况条件和天气良好

- 高速公路：车速最高为 120km/h
- RxV 无配置使用单车的 FCW 应用
- 高速路上存在除 TxV 及 RxV 外的其他车辆，例如 VT，为简化起见，假设 VT 均没有配备 V2X
- RxV 的驾驶员注意力集中
- RxV 的驾驶员对该 V2X 应用具有经验，懂得对预警做出反应。例如，RxV 驾驶员收到预警后，会结合自身的判断采取减速或转向等措施
- RxV 的驾驶员了解 V2X 的超视距作用，即，V2X 会根据视距范围外的潜在危害发出预警

5.2.2 危害场景识别

表 3 前向碰撞预警的危害场景识别

编号	危害描述	危害事件及其后果
H#1	由于 TxV 的 V2X 模块硬件故障（例如宕机），导致 TxV 没有发出 V2X 消息	• RxV 的驾驶员无法收到 V2X 预警 • 因此，RxV 驾驶员只能依赖下一步的视觉判断以识别危害。当驾驶员依靠视觉看到 TxV 后，可能无充足的时间刹车或变道 • RxV 与 TxV 发生碰撞
H#2	由于 RxV 的 V2X 模块硬件故障（例如宕机），RxV 没有收到 TxV 发出的 V2X 消息	同 H#1
H#3	RxV 底层收到了 V2X 消息，但应用处理错误（例如协议栈不兼容），导致预警未发生	同 H#1
H#4	TxV 发送的 V2X 消息内容错误，例如位置错误，导致预警未发生	同 H#1

H#5	TxV 发送的 V2X 消息内容错误，例如位置错误，导致误报警	• RxV 收到的 V2X 消息中含有错误的 TxV 位置，经过 RxV 计算，存在碰撞风险 • RxV 的 HMI 对驾驶员做出提示 • 驾驶员进行刹车或变道 • RxV 后方车辆由于 RxV 的刹车或变道，与 RxV 发生追尾碰撞
H#6	TxV 发送的 V2X 消息内容正确，但 RxV 的定位错误，导致误报警	同 H#5
H#7	TxV 发送的 V2X 消息内容正确，但 RxV 的解读错误（例如对协议栈理解不一致），导致误报警	同 H#5

5.2.3 危害归类及 ASIL 分析

表 4 前向碰撞预警的危害归类及 ASIL 分析

危害编号	危害类别	Exposure	Severity	Controllability	ASIL 分析（ASIL 的可能范围）
H#1 H#2 H#3 H#4	由于 TxV 或 RxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 没有发出 V2X 消息或 RxV 没有收到 V2X 消息	Exposure: E1 • 在高速路以 120km/h 的速度驾驶发生概率 > 10% • RxV 跟车距离为 100m 的发生概率 > 10% • TxV 在高速路中间停止、VT 直到 73m 才切出的概率很低	Severity: S2~S3 • RxV 未收到 V2X 消息会导致 RxV 未及时减速或转向，与静止的 TxV 追尾。高速路追尾的 Severity 很高，会导致生命危险	该危害可控性为“可控”，即 C0，理由如下： • 根据 GB/T 34590.3 6.4.3.8 注 2，可控性评估“假设驾驶员在正常的条件下驾驶 (例如:他/她不疲劳),经过相应的驾驶员培训 (他/她有驾驶执照)并遵守所有适用的法律法规,包括应有的谨慎以避免为其他交通参与者带来风险”。驾驶员应按照交通法规，时刻观察前方路况，避免伤害发生 • FCW 没有报警，并没有影响到车辆的驾驶功能以及车辆上其他的 ADAS 功能。根据 GB/T 34590.3 6.4.3.9 “如果相关项失效的危害不影响车辆的安全运行(例如一些驾驶员辅助系统)，可控性等级可为 C0”	无功能安全要求，无需分配 ASIL 等级
H#5	V2X 消息内容错误，例如	Exposure: E4	Severity: S1	Controllability: C1	QM

H#6 H#7	位置错误，导致误报警。 由于 FCW 误报警导致 RxV 驾驶员进行误制动或转向，导致后车与其追尾	• RxV 在高速公路行驶,跟车运行 • 后方有其他车辆跟随，导致后车与其追尾危害	• RxV 驾驶员可以观察前车情况，发现无碰撞风险即取消制动或转向。误制动/转向造成的 RxV 动态变化较小，因此即使被追尾，碰撞相对速度较小	• 根据 GB/T 34590.3 6.4.3.8 注 2,可控性评估“假设驾驶员在正常的条件下驾驶 (例如:他/她不疲劳),经过相应的驾驶员培训 (他/她有驾驶执照)并遵守所有适用的法律法规,包括应有的谨慎以避免为其他交通参与者带来风险”。驾驶员应按照交通法规，时刻观察前方路况，避免伤害发生 • 从 RxV 的角度，由于 RxV 有前车遮挡，因此可以通过前车是否减速/转向来判断是否需要刹车或变道，因此一般来说处于可控状态 • 从 RxV 后方车辆的角度，RxV 的后方车辆可借助司机反应或其他 ADAS 功能（例如 AEB）以避免和 RxV 碰撞	

5.2.4 安全目标

注：一般 QM 的危害无需定义安全目标，本节（以及 6.2.4、7.2.4 节）仅为展示完整的功能安全分析流程，展示如有 ASIL 要求，该如何定义安全目标。

表 5 前向碰撞预警的安全目标

危害事件及相关风险	安全目标	相关的 ASIL 等级
由于 TxV 或 RxV 的问题产生漏报警，导致 RxV 没有及时收到 V2X 消息，RxV 与 TxV 相撞	SG1：避免 V2X FCW 功能漏报警，或减轻漏报警的影响	无需分配 ASIL 等级
由于 TxV 或 RxV 的问题产生误报警，导致 RxV 刹车或变道， RxV 的后车与 RxV 相撞	SG2：避免 V2X FCW 功能误报警，或减轻误报警的影响	QM

5.3 功能安全概念

注：一般无安全目标定义（QM 等级）的危害不需要继续往下分解并得出功能安全要求，因此如果 ASIL 分析的结果为 QM，5.3.1 和 5.3.2 节（以及 6.3.1、6.3.2、7.3.1、7.3.2 节）均不需要。本文仅为展示完整的功能安全分析流程，展示如有 ASIL 要求，该如何进行后续的功能安全概念分析。

5.3.1 针对安全目标 1（SG1）提出的功能安全要求

表 6 前向碰撞预警的安全目标 1 的功能安全要求

故障位置	故障类别	潜在的功能安全要求
TxV	FC1：由于 TxV 的原因，V2X 消息未正常发出	故障避免策略： • PSFR-FC1-1（对 TxV 的要求）：TxV 发送的 V2X 消息应准确及时，时延满足相关标准要求 故障容错策略： • PSFR-FC1-2（对 TxV 的要求）：TxV 应在硬件或软件层面具备一定的冗余机制，使得当硬件或软件层面出现宕

		机等问题时，V2X 消息的发送能够不受影响，发送的消息及时延能满足相关标准的要求 故障避免或减轻策略： • PSFR-FC1-3（对其它车辆及 RxV 的要求）：若除 RxV 与 TxV 以外的车辆（例如 RxV 与 TxV 之间的车辆）也同时发送了 V2X 消息，则 RxV 应同时使用这些消息进行核对，以确保是否确实需要对驾驶员预警 • PSFR-FC1-4（对 RxV 的要求）：RxV 应尽可能地同时使用自身的传感器信息（摄像头、毫米波雷达、激光雷达）对 TxV 的 V2X 消息进行核对，用 V2X 与 ADAS 的融合结果对是否预警进行确认
RxV 或 TxV	FC2：TxV 发出的消息未能被 RxV 正确解析（例如协议栈不匹配）	故障避免策略： • PSFR-FC2-1（对 RxV 及 TxV 的要求）：应在系统层面确保 RxV 与 TxV 的消息兼容性（V2X 功能商用上市前加入 message conformance 准入测试）
RxV 或 TxV	FC3：由于发射机、接收机的性能不足，TxV 发出的消息在空口丢失，未能被 RxV 正确及时接收	故障避免策略： • PSFR-FC3-1（对 RxV 及 TxV 的要求）：应确保发射机、接收机的丢包率、发射功率、接收灵敏度等指标满足相关标准要求。具体标准可参考汽标委《基于 LTE-V2X 直连通信的车载信息交互系统技术要求及试验方法》第 8 章中的相关要求
TxV	FC4：由于 TxV 的定位、CAN 信息故障或无法获取，导致 V2X 模块未能发送 V2X 消息或消息错误	故障避免策略： • PSFR-FC4-1（对 TxV 的要求）：向 TxV V2X 模块提供信息的模块（定位、CAN 信息等）应一直可用，且信息准确
RxV	FC5：RxV 底层收到 V2X 消息，但由于应用层故障而丢弃；或者 RxV 应用层处理后，由于 RxV 的 HMI 故障而无法显示预警	故障避免策略： • PSFR-FC5-1（对 RxV 的要求）：RxV 的应用软件及 HMI 软硬件应具有足够等级的可靠性，确保 V2X 信息的及时处理与显示

5.3.2 针对安全目标 2（SG2）提出的功能安全要求

表 7 前向碰撞预警的安全目标 2 的功能安全要求

故障位置	故障类别	潜在的功能安全要求
TxV	FC6：由于 TxV 发送的 V2X 消息内容错误（例如位置错误），产生误报警	故障避免策略： • PSFR-FC6-1（对 TxV 的要求）：TxV 发送的 V2X 消息应具有准确的位置信息及车辆运动状态信息 故障避免或减轻策略： • PSFR-FC6-2（对其它车辆及 RxV 的要求）：若除 RxV 与 TxV 以外的车辆（例如 RxV 与 TxV 之间的车辆）也同时发送了 V2X 消息，则 RxV 应同时使用这些消息进行核对，以确保是否确实需要对驾驶员预警 • PSFR-FC6-3（对 RxV 的要求）：RxV 应尽可能地同时使用自身的传感器信息（摄像头、毫米波雷达、激光雷达）对 TxV 的 V2X 消息进行核对，用 V2X 与 ADAS 的融合结果对是否预警进行确认 故障探测或过渡到安全状态策略： • PSFR-FC6-4（对 MA 系统及所有车辆的要求）：系统应设置 MA（Misbehaviour Authority），当 RxV 探测到 TxV 发送的消息内容不符合实际时，应生成 MBR（Misbehaviour Report）并报告给 MA。MA 核实后，应将 TxV 的证书链加入证书吊销列表（CRL）并通知所有车辆。当 TxV 发现自己的证书已被吊销后，应停止继续发送错误的消息；若 RxV 继续收到已吊销证书的车辆发送的消息，RxV 应忽略该错误消息
RxV 或 TxV	FC7：TxV 发出的消息未能被 RxV 正确解析（例如协议栈不匹配，对位置、速度字段的含义理解不同），产生误报警	故障避免策略： • PSFR-FC7-1（对 RxV 及 TxV 的要求）：应在系统层面确保 RxV 与 TxV 的消息兼容性（V2X 功能商用上市前加入 message conformance 准入测试）
RxV	FC8：RxV 自身传感器错误（例如定	故障避免策略：

	位错误），产生误报警	• PSFR-FC8-1（对 RxV 的要求）：向 RxV V2X 模块提供信息的模块（定位、CAN 信息等）应一直可用，且信息准确
RxV	FC9：RxV 底层收到的 V2X 消息不应产生报警，但由于应用层处理错误而误报警；或者 RxV 应用层处理后，由于 RxV 的 HMI 处理错误而产生误报警	故障避免策略： • PSFR-FC9-1（对 RxV 的要求）：RxV 的应用软件及 HMI 软硬件应具有正确的判断逻辑，以避免误报警情况的发生
RxV	FC10：N/A	故障减轻策略： • PSFR-FC10-1（对 RxV 的要求）：当 RxV 由于收到报警而进行刹车或变道时，应同时发送相关的 BSM 消息，这样若 RxV 后方的车辆具有网联功能，RxV 发送的消息可帮助 RxV 后方的车辆识别追尾的风险，采取相关措施。
RxV	FC11：在 TxV 发送的 BSM 消息中，某些个别消息的数据（例如位置数据）存在异常，产生漏报警或误报警	故障减轻策略： • PSFR-FC11-1（对 RxV 的要求）：RxV 结合 TxV 发送的多条 BSM 消息（例如连续 3 条 BSM 消息）综合判断是否报警，而不是仅依据一条消息进行判断。

6. 交叉路口碰撞预警（ICW）

6.1 相关项定义

6.1.1 系统框图及相关组件

同 5.1.1。

6.1.2 场景描述及参数定义

在存在障碍物遮挡的情形下，RxV 在交叉路口直行与垂直角度路径穿行的目标车辆 TxV 发生碰撞冲突的场景描述为：

1）RxV 直行，TxV 横穿。TxV 一直发送 V2V BSM 消息。

2）VT1、VT2、VT3 为 3 辆静止车辆。

3）RxV 接收到 TxV 发送的 BSM 消息。

4）RxV 根据接收到的 BSM 消息判断，识别与被遮挡横穿车辆的碰撞风险。

5）RxV 中 V2X 设备对驾驶员发出碰撞预警提示。

6）驾驶员识别预警，采取减速等措施。

此场景的条件及参数可参考 C-NCAP2024 版主动安全 ADAS 版测试规程中 SCPO 的定义：C2C SCPO 测试场景下，VT1、VT2、VT3 为 3 辆静止车辆，是普通大批量生产的汽车，轴距应满足 2.3 m～2.9 m 的范围。TxV 可具备 C-V2X 网联通信能力，VT1、VT2、VT3 不做要求。RxV 以所在车道的中心线为轨迹行驶，TxV 沿垂直于 RxV 方向移动且以车道中心线为行驶轨迹，RxV 分别以 50km/h 和 60km/h 的匀速行驶开展测试，TxV 分别以 40km/h 和 50km/h 的速度进行测试。

本研究中取相对苛刻的一组条件，即 RxV 车速为 60km/h，TxV 车速为 50km/h。

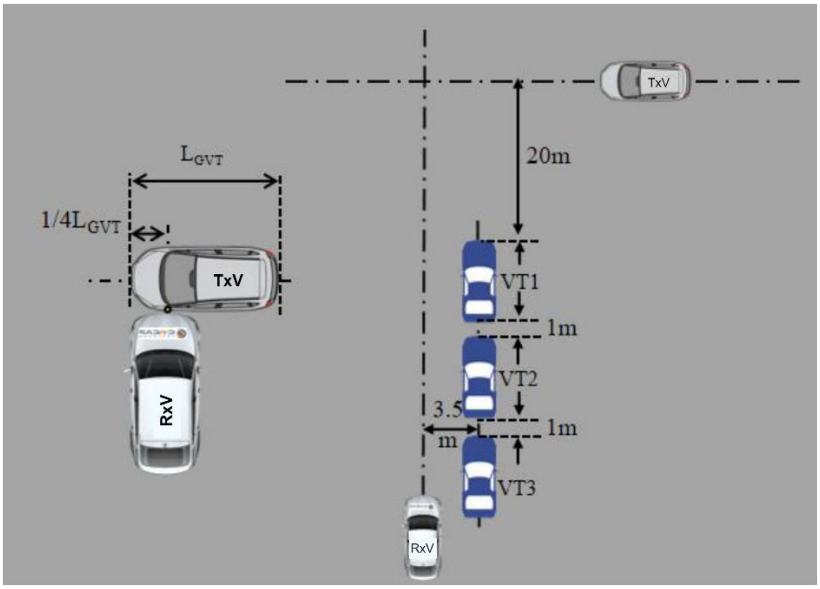


图 8 C-NCAP 2024 SCPO 测试场景示意图

6.2 危害分析和风险评估

6.2.1 运行条件分析

针对本场景的一种运行条件为：

- 路况条件和天气良好
- 市区道路
- RxV 车速为 60km/h，TxV 车速为 50km/h
- RxV 无配置使用单车的 ICW 应用
- 行驶道路上除 RxV、TxV、VT1、VT2、VT3 外可能还有其它车辆，为简化起见，假设其它车辆没有配置 V2X 设备
- RxV 驾驶员驾驶经验丰富，了解 V2X 应用的使用
- RxV 收到 V2X 设备发出的预警后，会根据预警情况和自身判断采取减速等措施

6.2.2 危害场景识别

表 8 交叉路口碰撞预警的危害场景识别

编号	危害描述	危害事件及其后果
H#1	TxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 未发出 V2X 消息	• 丢失目标车辆信息，RxV 驾驶员未收到 V2X 预警 • 因障碍物遮挡，RxV 驾驶员依靠视觉较晚才观察到横穿车辆 TxV，未来得及刹车 • RxV 与 TxV 发生碰撞
H#2	TxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 发出错误的 V2X 消息，如位置信息，导致预警未发生	同 H#1
H#3	TxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 发出错误的 V2X 消息，如位置信息，导致预警发生错误	• RxV 错误识别目标车辆信息 • RxV 驾驶员根据预警做出刹车行为 • RxV 的后车与 RxV 追尾
H#4	RxV 的 V2X 模块故障，导致无法接收 V2X 消息	同 H#1

H#5	RxV 的底层接收了 V2X 模块，应用层处理错误，导致预警未发生	同 H#1
H#6	RxV 的底层接受了 V2X 模块，应用层处理错误，导致预警发生错误	同 H#3

6.2.3 危害归类及 ASIL 分析

表 9 交叉路口碰撞预警的危害归类及 ASIL 分析

编号	危害类别	Exposure	Severity	Controllability	ASIL 分析（ASIL 的可能范围）
H#1 H#2 H#4 H#5	由于 TxV 或 RxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 没有发出 V2X 消息或 RxV 没有收到 V2X 消息	Exposure: E4 • 通过路口为常见工况	Severity：S2 • RxV 驾驶员未收到 V2X 预警，因障碍物遮挡，RxV 驾驶员依靠视觉较晚才观察到横穿车辆 TxV，未来得及刹车，RxV 与 TxV 发生碰撞，会导致危险	该危害可控性为“可控”，即 C0，理由如下： • 根据 GB/T 34590.3 6.4.3.8 注 2, 可控性评估“假设驾驶员在正常的条件下驾驶(例如:他/她不疲劳),经过相应的驾驶员培训(他/她有驾驶执照)并遵守所有适用的法律法规,包括应有的谨 慎以避免为其他交通参与者带来风险”。驾驶员应按照交通法规，时刻观察前方路况，避免伤害发生 • ICW 没有报警，并没有影响到车辆的驾驶功能以及车辆上其他的 ADAS 功能。根据 GB/T 34590.3 6.4.3.9 “如果相关项失效的危害不影响车辆的安全运行(例如一些驾驶员辅助系统),可控性等级可为 C0”	无功能安全要求，无需分配 ASIL 等级
H#3 H#6	TxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 发出错误的 V2X 消息，如位置信息，导致预警发	Exposure: E4 • 通过路口为常见工况	Severity: S1 • RxV 驾驶员可以观察前车情况，发现无碰撞风险即取消制	Controllability: C1 • 根据 GB/T 34590.3 6.4.3.8 注 2, 可控性评估“假设驾驶员在正常的条件下驾驶(例如:他/她不疲劳),经过相应的驾驶员培训(他/她有驾驶执照)并遵守所有适用	QM

	生错误，错误识别目标车辆信息。 由于 ICW 误报警导致 RxV 驾驶员进行误制动，导致后车与其追尾		动。误制动造成的减速度以及速度降较小，即使追尾，碰撞相对速度较小	的法律法规,包括应有的谨 慎以避免为其他交通参与者带来风险”。驾驶员应按照交通法规，时刻观察前方路况，避免伤害发生 • 从 RxV 后方车辆的角度，RxV 的后方车辆可借助司机反应或其他 ADAS 功能（例如 AEB）以避免和 RxV 碰撞	

6.2.4 安全目标

基于上述分析，结合实际项目开发经验，在基于 V2V 的交叉路口遮挡横穿制动场景下，车车协同系统的安全目标可包含两个：

表 10 交叉路口碰撞预警的安全目标

危害事件及相关风险	安全目标	相关的 ASIL 等级
由于 TxV 或 RxV 的 V2X 模块故障，导致 TxV 没有发出 V2X 消息或 RxV 没有收到 V2X 消息，RxV 与 TxV 相撞	SG1：避免 V2X ICW 功能漏报警，或减轻漏报警的影响	无需分配 ASIL 等级
由于 TxV 或 RxV 的问题产生误报警，导致 RxV 刹车， RxV 的后车与 RxV 相撞	SG2：避免 V2X ICW 功能误报警，或减轻误报警的影响	QM

6.3 功能安全概念

6.3.1 针对安全目标 1（SG1）提出的功能安全要求

表 11 交叉路口碰撞预警的安全目标 1 的功能安全要求

安全目标	功能安全等级	功能安全要求
避免 V2X ICW 功能漏报警，或减轻漏报警的影响	无功能安全等级要求	略

6.3.2 针对安全目标 2（SG2）提出的功能安全要求

表 12 交叉路口碰撞预警的安全目标 2 的功能安全要求

安全目标	功能安全等级	功能安全要求
避免 V2X ICW 功能误报警，或减轻误报警的影响	QM	略

7. 闯红灯预警（RLVW）

7.1 相关项定义

7.1.1 系统框图及相关组件

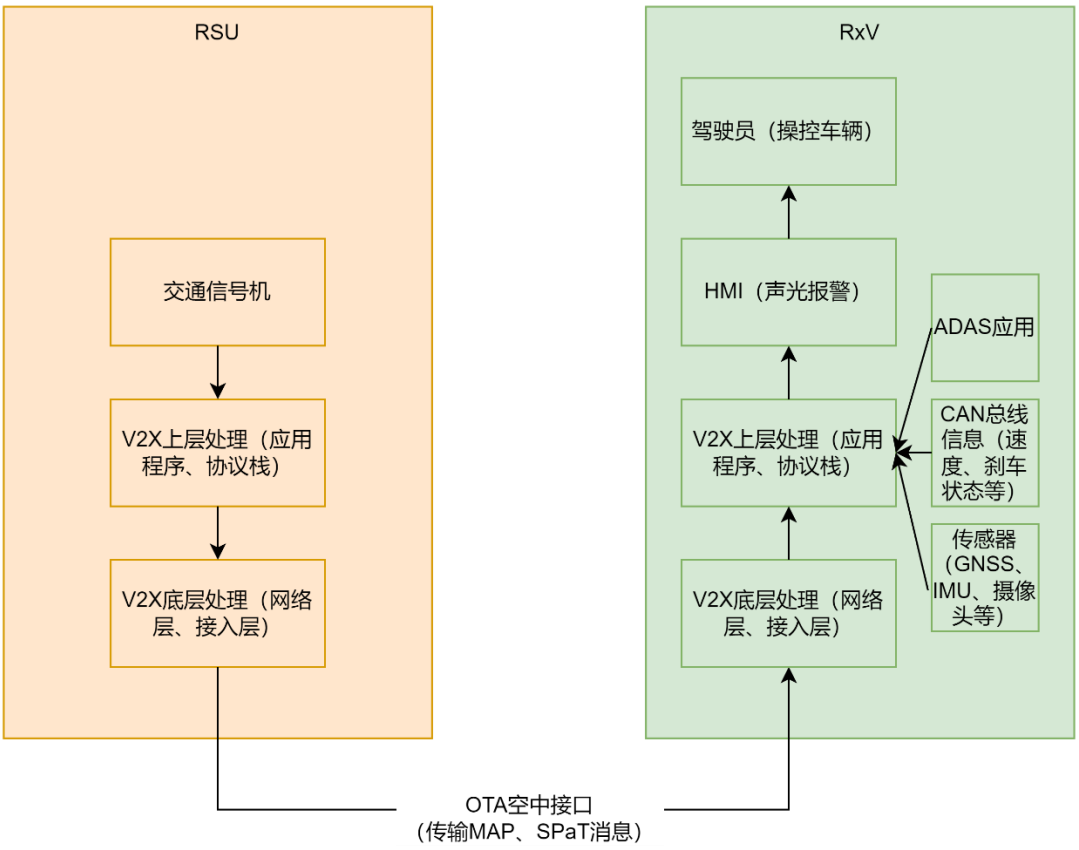


图 9 闯红灯预警（RLVW）场景的系统框图及相关组件

7.1.2 场景描述及参数定义

闯红灯预警（RLVW）场景描述为：

1）信号灯系统具有 V2X 网联通信（RSU）能力，RSU 一直向外播发 MAP、SPAT 消息。

2）RxV 驶向配有信号灯的路口。

3）按照 RxV 当前车速，如 RxV 一直没有减速，RxV 将发生闯红灯行为。

4）RxV 通过 V2X 应用判断，识别闯红灯风险。

5）RxV 的 V2X 设备以声光等方式对驾驶员发出闯红灯预警。

6）驾驶员识别预警，采取减速等措施。

此场景的具体量化参数及条件可参考 C-NCAP 2024 版测试规程中的定义：道路交通信号灯始终置为红色，RxV 按照规划行驶路径沿车道中心线行驶，分别在直行道以 40km/h，50km/h 和 60km/h 的速度测试。本研究中取相对苛刻的一组条件，即测试车速为 60km/h。

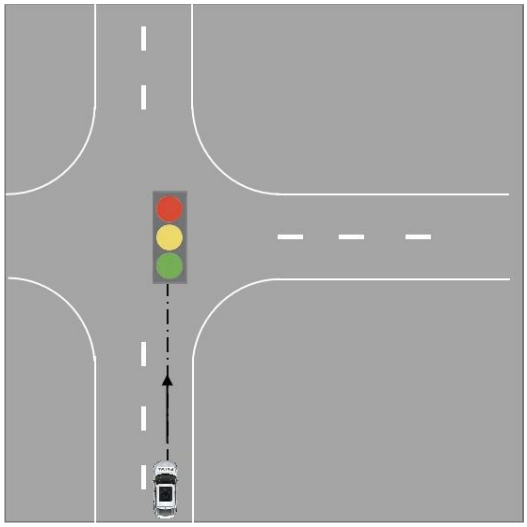


图 10 C-NCAP 2024 TSR 测试场景示意图

7.2 危害分析和风险评估

7.2.1 运行条件分析

针对本应用的一种典型运行条件为：

- 城区道路：车速最高为 60km/h
- 路况条件和天气良好
- RxV 无配置使用单车的 RLVW 应用
- 道路上可能存在除 RxV 外的其他车辆，为简化起见，假设其他车辆均没有配备 V2X
- RxV 的驾驶员注意力集中
- RxV 的驾驶员对该 V2X 应用具有经验，懂得对预警做出反应。例如，RxV 驾驶员收到预警后，会结合自身的判断采取减速等措施
- RxV 了解 V2X 的超视距作用，即 V2X 会对视距范围外的潜在危害发出预警

7.2.2 危害场景识别

表 13 闯红灯预警的危害场景识别

编号	危害描述	危害事件及其后果
H#1	由于 RSU 的 V2X 模块故障，导致 RSU 没有发出 V2X 消息	• RxV 的驾驶员无法收到 V2X 预警 • RxV 发生闯红灯行为
H#2	由于 RxV 的 V2X 模块故障，RxV 没有收到 RSU 发出的 V2X 消息	同 H#1
H#3	RxV 底层收到了 V2X 消息，但应用处理错误（例如协议栈不兼容）	同 H#1
H#4	RSU 发送的 V2X 消息内容错误，例如信号灯的相位或配时错误，导致预警未发生	同 H#1
H#5	RSU 发送的 V2X 消息内容错误，例如信号灯的相位或配时错误，导致误报警	• RxV 收到的 V2X 消息中含有错误的信号灯相位或配时，经过 RxV 计算，存在碰撞风险 • RxV 的 HMI 对驾驶员做出提示 • 驾驶员进行急刹车 • RxV 后方车辆由于 RxV 的急刹车，与 RxV 发生追尾碰撞
H#6	RSU 发送的 V2X 消息内容正确，但 RxV 的定位错误，导致误报警	同 H#5
H#7	RSU 发送的 V2X 消息内容正确，但 RxV 的解读错误（例如对协议栈理解不一致），导致误报警	同 H#5

7.2.3 危害归类及 ASIL 分析

表 14 闯红灯预警的危害归类及 ASIL 分析

编号	危害类别	Exposure	Severity	Controllability	ASIL 分析（ASIL 的可能范围）
H#1 H#2 H#3 H#4	由于 RSU 或 RxV 的 V2X 模块故障，导致 RSU 没有发出 V2X 消息，或RxV没有收到 V2X 消息	Exposure: E4 • 行驶至交通灯前 (城市街道) 为常见工况	Severity：S0-S1 • RxV 未收到 V2X 消息会导致 RxV 未及时减速，产生闯红灯风险，但闯红灯行为只有一定概率会转化为交通事故 • 在此场景中的车速相对较低，因此事故影响相对较低	此场景可由驾驶员通过例行的驾驶操作完全控制，Controllability 为 C0： • 由于此场景中没有遮挡，驾驶员一直视觉可见红绿灯，所以此场景完全可控 • 根据 GB/T 34590.3 6.4.3.8 注 2, 可控性评估“假设驾驶员在正常的条件下驾驶 (例如:他/她不疲劳),经过相应的驾驶员培训(他/她有驾驶执照)并遵守所有适用的法律法规,包括应有的谨 慎以避免为其他交通参与者带来风险”。驾驶员应按照交通法规，时刻观察前方路况，避免伤害发生 • RLVW 没有报警，并没有影响到车辆的驾驶功能以及车辆上其他的 ADAS 功能。根据 GB/T 34590.3 6.4.3.9 “如果相关项失效的危害不影响车辆的安全运行(例如一些驾驶员辅助系统)，可控性等级可为 C0”	无功能安全要求，无需分配 ASIL 等级

H#5 H#6 H#7	V2X 消息内容错误，例如信号灯配时/相位信息错误，导致误报警。RxV 收到错误（误报警）的 V2X 消息后会进行紧急制动，导致后车与其追尾	Exposure: E4 • 行驶至交通灯前 (城市街道) 为常见工况	Severity: S1 • 在此场景中的车速相对较低，因此事故影响相对较低 • RxV 驾驶员可以观察路口信号灯情况，发现无碰撞风险即取消制动。误制动造成的减速度，以及速度降较小 • 即使追尾，碰撞相对速度较小	Controllability: C0~C1 • 根据 GB/T 34590.3 6.4.3.8 注 2, 可控性评估“假设驾驶员在正常的条件下驾驶 (例如:他/她不疲劳),经过相应的驾驶员培训(他/她有驾驶执照)并遵守所有适用的法律法规,包括应有的谨 慎以避免为其他交通参与者带来风险”。驾驶员应按照交通法规，时刻观察前方路况，避免伤害发生 • 从 RxV 的角度，由于此场景中没有遮挡，驾驶员一直视觉可见红绿灯，所以此场景基本在可控范围内 • 从 RxV 后方车辆的角度，RxV 的后方车辆也可借助司机视觉或其他 ADAS 功能防止追尾	无功能安全要求 ~QM

7.2.4 安全目标

表 15 闯红灯预警的安全目标

危害事件及相关风险	安全目标	相关的 ASIL 等级
由于 RSU 或 RxV 的问题产生漏报警，导致 RxV 没有及时收到 V2X 消息，RxV 发生闯红灯行为	SG1：避免 V2X RLVW 功能漏报警，或减轻漏报警的影响	无功能安全要求
由于 RSU 或 RxV 的问题产生误报警，导致 RxV 急刹车，RxV 与 RxV 的后车相撞	SG2：避免 V2X RLVW 功能误报警，或减轻误报警的影响	无功能安全要求~QM

7.3 功能安全概念

7.3.1 针对安全目标 1（SG1）提出的功能安全要求

表 16 闯红灯预警安全目标 1 的功能安全要求

故障位置	故障类别	潜在的功能安全要求
RSU	FC1：由于 RSU 的原因，V2X 消息未正常发出	故障避免策略： • PSFR-FC1-1（对 RSU 的要求）：RSU 发送的 V2X 消息应准确及时，时延满足相关标准要求 故障容错策略： • PSFR-FC1-2（对 RSU 的要求）：RSU 应在硬件或软件层面具备一定的冗余机制，使得当硬件或软件层面出现宕机等问题时，V2X 消息的发送能够不受影响，发送的消息及时延能满足相关标准的要求 故障避免或减轻策略： • PSFR-FC1-3（对 RxV 的要求）：RxV 应尽可能地同时使用自身的传感器信息（摄像头、毫米波雷达、激光雷达）对 TxV 的 V2X 消息进行核对，用 V2X 与 ADAS 的融合结果对是否预警进行确认

RSU 或 RxV	FC2：RSU 发出的消息未能被 RxV 正确解析（例如协议栈不匹配）	故障避免策略： • PSFR-FC2-1（对 RSU 及 RxV 的要求）：应在系统层面确保 RSU 与 TxV 的消息兼容性（V2X 功能商用上市前加入 message conformance 准入测试）
RSU 或 RxV	FC3：由于发射机、接收机的性能不足，消息在空口丢失，RSU 发出的消息未能被 RxV 正确接收	故障避免策略： • PSFR-FC3-1（对 RSU 及 RxV 的要求）：应确保发射机、接收机的丢包率、发射功率、接收灵敏度等指标满足相关标准要求
RSU	FC4：由于 RSU 无法准确、可靠地获得信号灯信息，导致 RSU 未能发送 V2X 消息，或消息错误	故障避免策略： • PSFR-FC4-1（对 RSU 的要求）：向 RSU V2X 模块提供信息的模块（信号机）应能稳定、可靠地向 RSU 提供信息，信号机与 RSU 之间的接口满足相关标准要求
RxV	FC5：RxV 底层收到 V2X 消息，但由于应用层故障而丢弃；或者 RxV 应用层处理后，由于 RxV 的 HMI 故障而无法显示预警	故障避免策略： • PSFR-FC5-1（对 RxV 的要求）：RxV 的应用软件及 HMI 软硬件应具有足够等级的可靠性，确保 V2X 信息的及时处理与显示

7.3.2 针对安全目标 2（SG2）提出的功能安全要求

表 17 闯红灯预警安全目标 2 的功能安全要求

故障位置	故障类别	潜在的功能安全要求
RSU	FC6：由于 RSU 发送的	故障避免策略：

	V2X 消息内容错误（例如信号灯相位和配时错误），产生误报警	• PSFR-FC6-1（对 RSU 的要求）：RSU 发送的 V2X 消息应具有准确的位置信息及车辆运动状态信息 故障避免或减轻策略： • PSFR-FC6-2（对 RxV 的要求）：RxV 应尽可能地同时使用自身的传感器信息（摄像头、毫米波雷达、激光雷达）对 TxV 的 V2X 消息进行核对，用 V2X 与 ADAS 的融合结果对是否预警进行确认 故障探测或过渡到安全状态策略： • PSFR-FC6-3（对 MA 系统及所有车辆的要求）：系统应设置 MA（Misbehaviour Authority），当 RxV 探测到 RSU 发送的消息内容不符合实际时，应生成 MBR（Misbehaviour Report）并报告给 MA。MA 核实后，应将 RSU 的证书链加入证书吊销列表（CRL）并通知所有车辆。当 RSU 发现自己的证书已被吊销后，应停止继续发送错误的消息；若 RxV 继续收到已吊销证书的车辆发送的消息，RxV 应忽略该错误消息
RSU 或 RxV	FC7：RSU 发出的消息未能被 RxV 正确解析（例如由于协议栈不匹配，对配时、相位字段的含义理解不同），产生误报警	故障避免策略： • PSFR-FC7-1（对 RSU 及 RxV 的要求）：应在系统层面确保 RxV 与 TxV 的消息兼容性（V2X 功能商用上市前加入 message conformance 准入测试）
RxV	FC8：RxV 自身传感器错误（例如定位错误），产生误报警	故障避免策略： • PSFR-FC8-1（对 RxV 的要求）：向 RxV V2X 模块提供信息的模块（定位、CAN 信息等）应一直可用，且信息准确
RxV	FC9：RxV 底层收到的 V2X 消息不应产生报警，但由于应用层处理错误而误报警；或者 RxV 应用	故障避免策略： • PSFR-FC9-1（对 RxV 的要求）：RxV 的应用软件及 HMI 软硬件应具有正确的判断逻辑，以避免误报警情况的发生

	层处理后，由于RxV的HMI处理错误而产生误报警	
RxV	N/A	故障减轻策略： • PSFR-FC10-1（对RxV的要求）：当RxV由于收到报警而进行急刹车时，应同时发送相关的BSM消息，这样若RxV后方的车辆具有网联功能，RxV发送的消息可帮助RxV后方的车辆识别追尾的风险，采取相关措施。

8. 总结及展望

本研究选取了三类典型的 V2X 安全预警类场景进行功能安全分析，包括前向碰撞预警（FCW）——高速度差追尾、交叉路口碰撞预警和闯红灯预警。本研究虽然在框架上遵从了 GB/T 34590 的功能安全概念级分析方法论，但待分析的系统已经从 GB/T 34590 中的单车变为由 RSU、TxV、RxV 等组成的 V2X 系统。随着 V2X 逐渐商用，在汽车功能安全中所起的作用逐渐加强，建议 GB/T 34590 参考本研究中的方法，完善其功能安全体系，将 V2X 纳入其框架范围。

结论1：GB/T 34590的功能安全分析方法论应进行拓展，完善整个功能安全体系，将V2X纳入GB/T 34590的框架范围。

以下是本研究所选三类场景 ASIL 分析的简要总结：

- FCW，漏报警类别的危害：无功能安全要求
- FCW，误报警类别的危害：QM
- ICW，漏报警类别的危害：无功能安全要求
- ICW，误报警类别的危害：QM
- RLVW，漏报警类别的危害：无功能安全要求
- RLVW，误报警类别的危害：无功能安全要求~QM

结论 2：从本研究选取的三类 V2X 典型场景来看，潜在危害的 ASIL 级别普遍在“无功能安全要求”到“QM”之间，即 QM 级别的功能安全设计能够满足 V2X 预警类应用功能安全的需要。

虽然本研究仅选取了三类 LTE-V2X 预警类应用进行讨论，但从危害类型（漏报警类、误报警类）及相关的 ASIL 分析来看，它们的功能安全分析及结论具有普遍性，结论 2 可以作为 LTE-V2X 预警类应用的普适性结论。例如，对于可控性（Controllability）的分析可以推广到所有 V2X 预警类应用，因为车辆、驾驶员的驾驶状况完全正常，控制权一直在驾驶员手里，所以可控性取值都很低。

结论 3：本研究中针对三类 LTE-V2X 预警类应用的分析过程及结果对所有 LTE-V2X 预警类应用具有普适性。

从具体的 Hazard 分析及 ASIL 分析来看，由 TxV/RSU 故障造成的危害种类比由 RxV 故障造成的危害多，且由于是一对多的广播传输，所以 TxV/RSU 故障会影响到周围的多台车辆，而 RxV 即使自身接收错误，也能从周边车辆接收相同消息后的反应获得冗余信息。因此，TxV/RSU 发送消息的及时性和准确性相对更加重要，可以认为在后续 V2X 的功能安全分析工作中，例如 ASIL 的分解工作中，应把重点更多地放在 TxV 及 RSU 侧。

结论 4：在后续 V2X 的功能安全分析工作中，例如将 ASIL 在 V2X 消息发送端和接收端的分解工作中，应把重点放在 TxV 及 RSU 侧消息发送的及时性和准确性，包括 TxV/RSU 使用正确的协议栈版本、按标准要求正确填充消息、确保消息及时发送等。

9. 参考文献

[1]. 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 34590.3-2022 道路车辆 功能安全 第 3 部分：概念阶段[S]. 2022.

[2]. 5GAA. Safety Treatment in Connected and Automated Driving Functions Report [R]. 2019

[3]. 中国汽车工程学会. T/CSAE 53－2020 合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准（第一阶段）[S]. 2020.

[4]. 中国智能网联汽车产业创新联盟. 智能网联汽车预期功能安全前沿技术研究报告[R]. 2023. 本报告中的“V2X 触发分析与评估”一节详细分析了 V2X 的危害触发条件，包括触发源分析和触发机制分析等

致 谢

责任编辑：

李俨、陈书平、殷悦

核心贡献单位：

高通：李俨、陈书平、殷悦、韩文淏
中信科智联：张学艳、周哲人
星云互联：王易之、吴宇涵
国汽智联：王俊明、纪蕴家
方库：陈平
是德科技：封翔
江淮：朱陈伟
一汽：孙博逊
小米汽车：李璇
宝马：张图南
大众：邓棋文
丰田：姜美尧
蔚来：刘建行
通用：丛飞宇
福特：李翊飞
博世：钦立坚、傅靖江
西安电子科技大学：刘子烨、陈晨
移远：侯海燕、崔伟
宸芯：余霞、徐畅
高新兴网联：刘晓青、曾少旭
东软：马健超
安富科技：王晓东
上研智联：汪大明
华砺智行：任学锋、黄峰
上汽零束：侍兴华、王雪亚
摩栗科技：王皓、陈山虎、王龙