

空气悬架的功能安全分析

向羽 刘永豪 张蕾

(东风汽车集团股份有限公司猛士汽车科技公司,武汉 430050)

【欢迎引用】向羽,刘永豪,张蕾.空气悬架的功能安全分析[J].汽车文摘,2025(5):16-26.

【Cite this paper】XIANG Y, LIU Y H, ZHANG L. Functional Safety Analysis of Air Suspension[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(5): 16-26.

【摘要】为了提升装配空气悬架车辆的安全性,防止车辆在行驶过程中因空气悬架故障而造成对交通参与者的伤害,对空气悬架系统进行功能安全分析。基于ISO 26262功能安全标准,对空气悬架系统进行相关项定义,并利用危害分析和风险评估法分析得出空气悬架的功能安全目标,再将功能安全目标逐级分解至子系统及软硬件层级,建立完整的安全架构。结合车辆侧翻理论模型分析车辆侧翻风险,分析空气悬架高度调节对侧倾力臂及横向载荷转移率的影响。提出分级响应机制:若悬架失效但无侧翻风险,触发警报并持续监测;若存在侧翻风险,则强制停止高度调节功能,确保系统进入安全状态。所设计的策略有效平衡了功能安全与系统可用性,保障了空气悬架的功能安全及整车稳定性。

关键词:空气悬架;功能安全;侧向稳定性;危害分析及风险评估

中图分类号:U469.7 文献标志码:A DOI:10.19822/j.cnki.1671-6329.20240216

Functional Safety Analysis of Air Suspension

Xiang Yu, Liu Yonghao, Zhang Lei

(Mengshi Automobile Technology Company, Dongfeng Motor Group Co., Ltd., Wuhan 430050)

【Abstract】In order to enhance the safety of vehicles equipped with air suspension and to prevent injuries to road users caused by air suspension failures during operation, a functional safety analysis of the air suspension system is conducted. Based on the ISO 26262 functional safety standard, relevant items of the air suspension system are defined, and a hazard analysis and risk assessment method are used to derive the functional safety objectives for the air suspension. These functional safety objectives are then decomposed step by step to the subsystem and hardware/software levels, establishing a complete safety architecture. Combining the vehicle rollover theoretical model, the risk of vehicle rollover is analyzed, along with the impact of air suspension height adjustment on the roll moment arm and lateral load transfer rate. A graded response mechanism is proposed: if the suspension fails but there is no rollover risk, an alarm is triggered and continuous monitoring is maintained; if there is a rollover risk, the height adjustment function is forcibly stopped to ensure the system enters a safe state. The designed strategy effectively balances functional safety with system availability, ensuring the functional safety of the air suspension and the overall stability of the vehicle.

Key words: Air suspension, Functional safety, Lateral stability, Hazard analysis and risk assessment

0 引言

空气悬架作为一种先进的悬架系统,能够通过主动调节悬架高度与阻尼特性,显著提升车辆的行驶平顺性和操纵稳定性,因此被广泛应用于中高端乘用车型。国际标准化组织颁布的ISO 26262:2018《道路车辆功能安全》(Road Vehicles—Functional Safety)标准,为汽车电子电气系统的功能安全开发提供了重要依

据,特别加强了对新能源汽车安全性的规范要求^[1]。该标准要求电子电气系统在设计过程中,需要兼顾基本功能实现与功能安全保障,以避免系统功能性故障,确保系统在发生故障时能够维持安全状态或将风险控制可在可接受范围^[2]。ISO 26262对安全相关功能进行了明确定义和系统化要求^[3],基于功能安全设计的汽车空气悬架将具有更高的安全性和可靠性。

随着广大用户对新能源汽车功能安全要求的不断

提升,功能安全开发方法已成为国内外学者和工程师进行汽车系统设计的重要依据。李波等^[4]对中国功能安全发展现状及趋势进行了分析,提出了合理的量化安全准则,强调在设计开发初期就应确保车辆不会因系统故障对驾乘人员及周边环境造成不可接受的风险。伍理勋等^[5]通过危害分析与风险评估方法,确定了电动汽车电机控制器的安全目标和汽车安全完整性等级(Automotive Safety Integrity Level, ASIL)。苏晨曦^[6]基于功能安全开发流程,对电子换挡系统进行了安全分析,并设计了相应的控制器的软硬件架构。Nouri等^[7],通过对比研究指出,相较于IEC 61508标准,ISO 26262更适用于汽车领域,并有效解决了前者的局限性问题。Rivastava等^[8]详细阐述了ISO 26262标准阐述了功能安全标准在电动助力转向系统(Electric Power Assisted Steering, EPAS)电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)设计中的具体应用。Lee等^[9]开发了一种符合ISO 26262要求的电动助力转向(Electric Power Steering, EPS)模块,并设计了相应的软硬件架构。Ikram^[10]的研究表明,空气悬架通过多轴气压调节可实现行驶工况自适应高度调节功能。Termous等^[11]则通过集成控制策略,协同控制主动悬架、主动转向和差动制动系统,进一步提升了车辆行驶稳定性。

尽管空气悬架系统能显著改善车辆行驶性能,且功能安全的应用可有效提升系统安全性和可追溯性,但当前针对空气悬架功能安全设计的研究仍较为匮乏。本文基于ISO 26262功能安全标准系统化设计,旨在实现兼具舒适性和安全性的悬架系统解决方案。

1 相关项定义

空气悬架系统可主动调节悬架高度与刚度等参数,可显著提升驾乘舒适性及操控性。与传统被动悬架系统相比,空气悬架的主要区别体现在以下3个方面:采用可调气压的空气弹簧取代传统钢制螺旋弹簧作为弹性元件;新增了空气压缩机(气泵)及储气罐等气压供给装置;配备了高度传感器、ECU及电磁阀等组成的闭环控制系统。该空气悬架系统整车布置方案如图1所示。

1.1 整车级功能

空气悬架系统能够基于驾驶模式选择、车辆动态工况及行驶速度等参数,实时调节最优车身高度。该系统通过高度可调功能显著提升了车辆对不同驾驶场景的适应性,可适应更多的驾驶工况,其整车级功能如表1所示。

驾驶员可通过旋钮设置整车驾驶模式,为保证行驶过程中车辆的安全性,系统采用分级高度调整策略进行模式切换。各预设挡位定义如下:启示挡(Entry)、飞行挡(Aero)、一般道路挡(NRH)、高挡1(High/R1)、高挡2(High/R2)、越野高挡3(Off_Road High/R3),其挡位高度如图2所示。

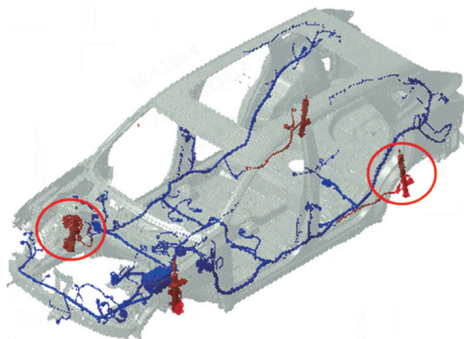


图1 空气悬架系统整车布置

表1 空气悬架整车级功能

功能名称	说明
驾驶模式调节	根据驾驶模式,调节悬架高度
分级调节	分级策略调节悬架高度
随速调节	根据行驶速度,调节悬架高度

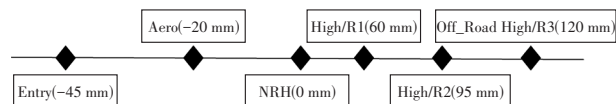


图2 空气悬架高度分级调节

当驾驶员激活车速自适应调节功能时,系统将基于实时车速动态调整悬架高度。高速工况:在车速 >80 km/h且持续15 s以上,悬架高度自动下降到Aero高度,以优化空气动力学性能。中速工况:车速 ≤ 50 km/h且持续5 s以上,悬架高度调节到NRH高度,如图3所示。

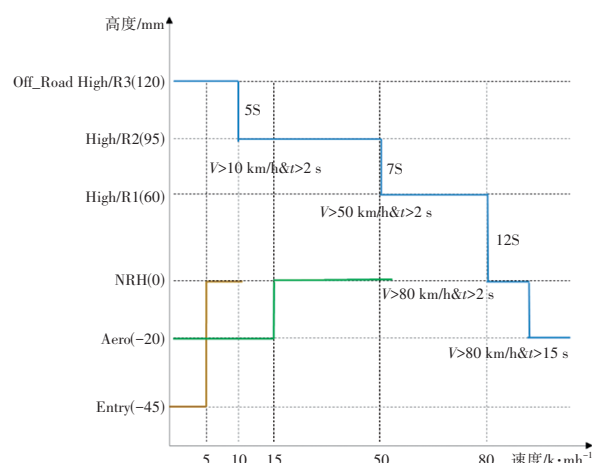


图3 随速调节控制逻辑

以运动模式为例,空气悬架系统忽视当前悬架高度随速调节开闭状态,默认悬架高度根据当前车速自

动调节。如果悬架初始高度位置在NRH,当驾驶模式切换到运动模式时,悬架高度自动调节到Aero高度,如图4所示。

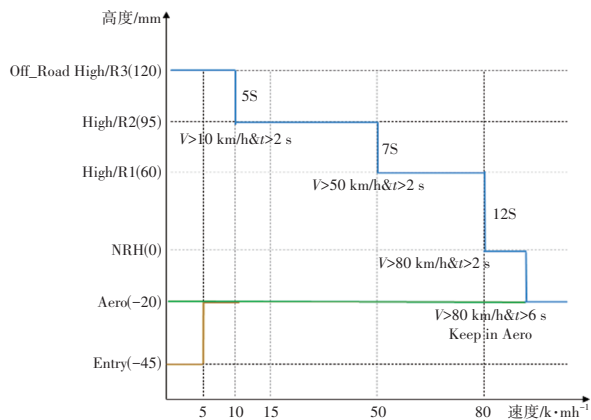


图4 运动模式控制逻辑

1.2 功能分配

根据空气悬架系统整车级功能定义,提出空气悬架系统的系统架构,如图5所示。空气悬架主要由压缩机、储气罐、空气弹簧以及动力与电机控制单元组成,其外部结构有车身域控制器、电子制动控制模块、电机控制模块、信号采集模块、仪表控制模块组成,其功能分配如表2、表3所示。

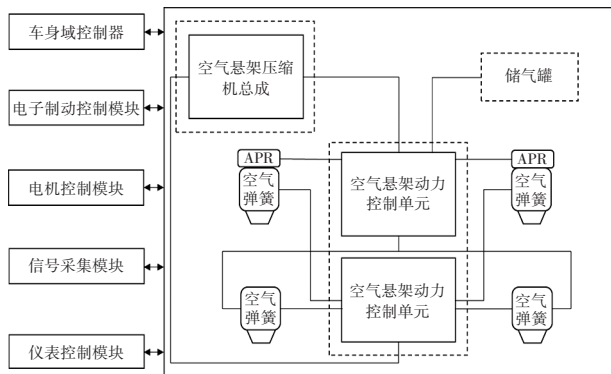


图5 空气悬架系统架构

表2 空气悬架外部元素功能分配

相关的元素	功能描述
车身域控制器	检测车身姿态,为空气悬架系统提供调节依据
电子制动控制模块	为车辆提供制动力
电机控制模块	控制车辆车速扭矩,提供车速等信号
信号采集模块	为空气悬架系统采集各模块信号数据
仪表控制模块	为驾驶员提供驾驶模式选项控制,并在系统故障时报警

2 危害分析与风险评估

2.1 功能安全标准 ISO 26262 开发流程

ISO 26262 适用于道路车辆生命周期的功能安全

开发,其开发流程可分为以下3个阶段:概念阶段、系统阶段和软硬件阶段。在概念阶段通过危害分析和风险评估得到整车级功能安全需求,随后在系统阶段和软硬件阶段将功能安全需求分配到对应的系统并逐级分解落实各软硬件功能,最后对软硬件、系统、整车级进行测试验证。道路汽车功能安全开发层级如图6所示。

表3 系统边界内元素/组件/系统

相关元素	功能安全需求
空气悬架电子控制单元	执行空气悬架算法,提供准确的空气悬架电子控制单元功能和服务
空气悬架应用软件	判断车辆是否存在侧翻风险,及时进入安全状态
空气悬架控制模块	确执行调节命令,精准调节悬架高度
空气悬架接口	接收内外部数据信号

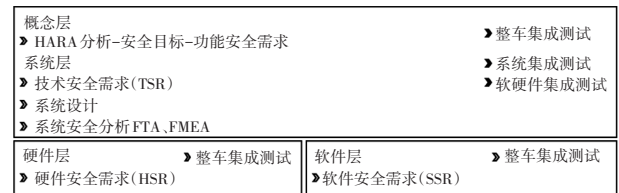


图6 道路汽车功能安全开发层级

从电动汽车整车层级分析功能与非功能需求,并根据初始整车电控系统架构定义相关项(Item)范围并描述各项功能。在不同工况和驾驶场景下对整车危害引起的风险进行评估,评估主要包括以下3个方面:工况和驾驶场景的暴露度(Exposure-Operational Situation, E);危害发生时的严重度(Severity, S);危害发生时驾驶员避免风险的可控度(Controllability, C)。通过3个维度综合评定汽车安全完整性等级(ASIL)。根据系统对人身安全的影响程度,将安全完整性划分为4个等级:ASIL A、ASIL B、ASIL C和ASIL D。ASIL A为最低的安全完整性等级,适用于对人身安全影响最小的系统。在ASIL A级别下,系统的故障会对人身安全产生较小的风险。ASIL B适用于一些对人身安全造成适中风险的系统。在ASIL B级别下,系统的故障会对人身安全产生中等风险。ASIL C适用于一些具有较高安全要求的系统。在ASIL C级别下,系统的故障会对人身安全产生较大风险。ASIL D为最高的安全完整性等级,适用于对人身安全影响最大的系统。在ASIL D级别下,系统的故障会对人身安全产生最严重的风险。ASIL A、B、C、D都是与功能安全相关的,质量管理(Quality Management, QM)为非安全相关功能,无需遵循ASIL流程,仅需通过ISO 9001等质量管理认证。每个ASIL级别都有不同的安全完整性要求和相关的安全性分析、验证方法,以确保系统在不同的风险水平下达到功能安全性,如表4所示。

表4 汽车安全完整性等级(ASIL)

严重度 (Severity, S)	暴露度 (Exposure-Operational Situation, E)	可控度(Controllability, C)		
		C1 简单(Simple)	C2 正常(Normal)	C3 困难(Difficult)
S1 轻度和中度伤害 (Light and Moderate Injuries)	E1:非常低(Very Low)	QM	QM	QM
	E2:低(Low)	QM	QM	QM
	E3:中等(Medium)	QM	QM	A
	E4:高(High)	QM	A	B
S2 生命的伤害严重和危机生命的伤害 (Severe and Life Threatening Injuries)	E1:非常低(Very Low)	QM	QM	QM
	E2:低(Low)	QM	QM	A
	E3:中等(Medium)	QM	A	B
	E4:高(High)	A	B	C
S3 危及生命/致命的伤害 (Life Threatening/Fatal Injuries)	E1:非常低(Very Low)	QM	QM	A
	E2:低(Low)	QM	A	B
	E3:中等(Medium)	A	B	C
	E4:高(High)	B	C	D

2.2 危害分析

根据整车级功能定义可将驾驶模式调节、分级调节、随速调节归纳为:高速时降低悬架高度、悬架自动高度调节、手动调节。采用ISO 26262推荐的分析方法,对以下失效模式进行危害分析:功能丢失、功能不足预期、功能超出预期、功能方向错误、功能非预期激活、功能卡滞,如表5所示。

表5 空气悬架功能失效危害分析

功能	失效原因	危害
高速时降低悬架高度	丢失	车辆稳定性下降,造成失稳
	不足预期	车辆稳定性下降,造成失稳
	超出预期	无明显影响
	方向错误	车辆稳定性下降,造成失稳
	非预期激活	无明显影响
	卡滞	车辆稳定性下降,造成失稳
悬架自动高度调节	丢失	车辆稳定性下降,造成失稳
	不足预期	无明显影响
	超出预期	车辆稳定性下降,造成失稳
	方向错误	前后悬架高度不一致,造成失稳
	非预期激活	车辆稳定性下降,造成失稳
	卡滞	车辆姿态错误,造成失稳
手动调节	丢失	车辆姿态无法调整,影响驾驶
	不足预期	姿态过低,影响驾驶
	超出预期	姿态过高,影响驾驶
	方向错误	无明显影响
	非预期激活	无明显影响
	卡滞	无明显影响

2.3 风险评估及安全目标

结合危害分析与风险评估(Hazard Analysis and Risk Assessment, HARA)和ASIL功能安全分析法,可确立相关项的安全目标(Safety Goals),从而有效规避不合理风险。通过对危害事件进行系统性的评估,确定安全目标并为其分配ASIL等级。由危害分析可知,在“高速工况悬架高度下降功能不足”或“悬架高度自动调节方向错误”等功能失效时,将直接导致车辆失稳这一高风险危害。结合驾驶场景、环境条件、危险人员等因素确定功能安全目标及其ASIL等级、安全状态和故障容错时间。

基于表6所示的工况分析,在湿润高速公路转弯场景下,空气悬架系统存在以下典型功能安全风险:(1)若高度调节功能失效、卡滞或高度调节错误则会使空气悬架无法按需调低或出现反向调高,从而违反功能安全目标SG01。(2)车辆在湿润的高速公路转弯时,若高度调节错误、卡滞则会使空气悬架左右侧或前后侧高度差过大,从而违反功能安全目标SG02。(3)车辆在湿润的高速公路转弯或加速时,若空气悬架非预期高度调节,则会违反功能安全目标SG03。

3 功能安全及技术安全要求

基于危害分析与风险评估(HARA)的系统性研究,本文对空气悬架系统的潜在失效模式及其风险进行了全面评估,并据此确立了关键安全目标及其对应的汽车安全完整性等级(ASIL)。为了实现既定的安全目标(SG01-SG03),必须通过严格的需求分解流

表6 空气悬架功能安全目标

安全目标	功能故障描述	失效的影响	情景表述				ASIL等级	安全状态	故障容错时间/ms
			驾驶情景		环境条件	危害人员			
			场地	操作					
SG01 空气悬架系统要避免汽车在中高速时全部悬架不能降低或者全部调高	高度调节失效或卡滞	转弯过程,在某个位置上无法调低,车辆稳定性下降,造成失稳	高速公路	转弯	湿滑路面摩擦因数 $0.5 < \mu < 0.8$	车内人员 车外行人	ASIL B	停止悬架高度调节给出告警信号	300

程,将高层安全目标转化为实施的功能安全需求(Function Safety Requirement, FSR)。如图7所示,本研究采用形式化的需求映射方法,从安全目标SG01、SG02和SG03逐级推导出具体的功能安全需求。系统内部及外部均继承安全目标的ASIL B安全等级要求。为了确保系统内外部建立相应输入、输出的安全机制,系统发生故障时对应的控制器可以复位,违反安全目标使系统进入安全状态。

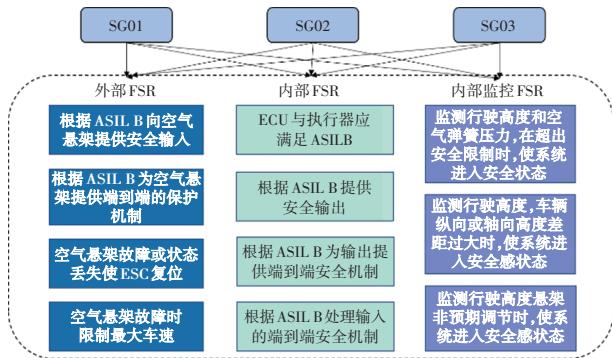


图7 安全目标映射和功能安全需求

3.1 系统层级

在系统开发阶段,基于既定的功能安全需求,本研究设计并实现了一套符合ASIL B等级要求的系统架构方案。如图5所示,该架构采用模块化设计理念,将功能安全需求系统性地分解至各功能模块,确保安全机制的完整性和可追溯性。

根据功能安全需求,系统边界内强相关的有空气悬架的ECU、应用软件、空气悬架控制模块、电子控制模块、接口、传感器等组件或系统。其功能安全需求描述如表7所示。

表7 系统边界内元素/组件/系统

元素/部件/子系统	功能安全需求
空气悬架电子控制单元	正确执行空气悬架算法,提供准确的空气悬架电子控制单元功能和服务
空气悬架应用软件	正确判断车辆是否存在侧翻风险,及时进入安全状态
空气悬架控制模块	应正确执行调节命令,精准调节悬架高度
空气悬架接口	应正确接收内外部数据信号

3.2 硬件层级

硬件设计阶段将系统阶段设计进一步细化,使系统阶段设计可追溯,保证系统在硬件层面能够应对各类故障,使系统安全稳定运行。本文硬件功能安全设计基于ASIL B等级要求,结合安全目标与技术安全需求,可量化硬件需求。部分组件见表8。

表8 硬件安全需求量化

SG ID	ASIL	组件	安全相关的功能和接口	安全目标 SPF	安全目标 LPF
SG01 SG02 SG03	B	微控制器 电源管理芯片	安全管理单元 安全监控单元 电力供应 时间监控 安全状态控制 输出控制驱动器	>90%	>60%

为了在硬件出现故障时使系统及时转换至硬件安全状态,部分针对故障的硬件功能安全保护如下:

(1)电磁安全开关使能:ECU硬件应具有高低两侧控制的电磁线圈,失效保护线与独立安全开关的命令必须可以激活电磁安全开关。

(2)微控制器(Micro Controller Unit, MCU):微控制器发生故障时应进入微安全控制状态,禁用电磁线圈高低侧驱动器与电机高低侧驱动器等。

(3)微处理器误差:当微处理器触发安全管理单元(Safety Management Unit, SMU)硬件安全完整性故障时,引脚状态为低电平。

3.3 软件层级

基于系统阶段功能安全需求级,软件功能可分为QM等级与ASIL等级。将悬架应用程序监控、安全信号输入、I/O微控制器监控、ECU信号检测、中央处理器(Central Processing Unit, CPU)完整性监控、ECU外设完整性监控、内存保护、看门狗等ASIL B等级软件模块,与硬件诊断等QM等级的软件模块做基于AUTOSAR架构的分区,使软件系统确保QM和ASIL B分区之间的互不干扰,且可以资源共享和定时通信,其安全分区软件架构如图8所示。

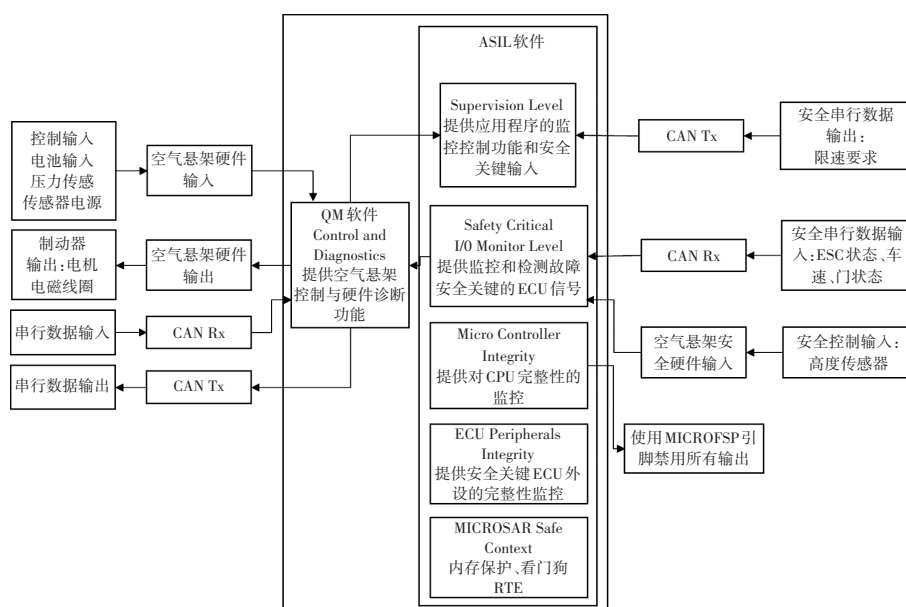


图8 基于AUTOSAR与ASIL等级的软件分区架构

部分空气悬架监管级别策略：

(1) 监控上升与下降状态、车辆状态和驾驶员命令，以确定是否存在危险状况。

(2) 监视QM软件操作，以确定在发生内部硬件故障时是否采取了适当的危害缓解措施。

(3) 如果存在危险并且QM软件无法减轻，则根据故障启动系统安全状态或车辆缓解措施。

(4) 监测车身高度等横向稳定性参数，判断车辆侧翻风险，防止车辆侧翻。

微控制器监控电平提供了检验处理器完整性的功能，这些监控功能包括锁步长监控单元、内存检查、程序序列执行检查。故障被报告给安全管理单元，以便采取适当的措施，内部监控安全机制如表9所示。

表9 功能安全需求

监测信号	安全机制FSR
监测底盘高度和空气弹簧压力	在超出安全限制的情况下，通过ASIL B安全机制将系统置于安全状态
	在非预期功能触发时，通过ASIL B安全机制将系统置于安全状态
	在功能使能不足时，通过ASIL B安全机制将系统置于安全状态
	在功能使能过度，通过ASIL B安全机制将系统置于安全状态

4 车辆侧翻运动学与安全状态策略

前文基于道路车辆功能安全ISO 26262，对车辆空气悬架进行了分析。在相关项定义中阐述了空气悬架的整车级功能，将其功能分配到空气悬架的各子系统及其相关的外部模块。通过危害分析与风险评

估得出空气悬架的功能安全目标，进一步的分析得出系统的功能安全需求以及软硬件安全需求。为了更加准确的识别空气悬架系统违反功能安全目标时对整车的影响，判失效影响是否会导致车辆失稳侧翻，以防止系统过于敏感的进入安全状态，本章将对车辆进行运动学分析以优化安全状态策略。

4.1 空气弹簧建模

空气弹簧调节高度时，由热力学第一定律可得此过程的能量变化^[12]：

$$\dot{U}_{sp} = \dot{Q}_{ex} + \dot{W} + H_{in}m_{in} - H_{out}m_{out} \quad (1)$$

式中： U_{sp} 为空气弹簧内部气体内能， W 为空气弹簧调节高度时对外做的功， Q_{ex} 为空气弹簧做功时对外传递的热量， m_{in} 和 m_{out} 分别表示进出空气弹簧的空气流量， H_{in} 和 H_{out} 分别表示进出空气弹簧气体的焓。忽略空气弹簧对外做功时对外热传递即 $Q_{ex}=0$ 则有：

$$\dot{U}_{sp} = c_v d(T_{sp} m_{sp})/dt = \dot{W} + H_{in}m_{in} - H_{out}m_{out} \quad (2)$$

式中： c_v 为空气弹簧内部气体比热容是， m_{sp} 为簧内气体质量， T_{sp} 为簧内气体温度。空气弹簧容积变化做的功为：

$$\dot{W} = -P_{sp} \dot{V}_{sp} \quad (3)$$

式中： P_{sp} 为空气弹簧内气体压强， V_{sp} 为空气弹簧内气体容积。若设空气弹簧内为理想气体则气体常数 $R=287 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \times \text{K})$ ，气体状态为：

$$P_{sp} V_{sp} = mRT_{sp} \quad (4)$$

合并式(1)~式(4)，则空气弹簧内气体能量转换为：

$$c_v d(P_{sp} V_{sp})/Rdt = -P_{sp} \dot{V}_{sp} + H_{in}m_{in} - H_{out}m_{out} \quad (5)$$

利用定压比热容气体温度可推导焓变公式：

$$H_{in} = H_{out} = c_p T_{sp} \quad (6)$$

根据迈耶公式可得:

$$c_p - c_v = R, c_p/c_v = k \quad (7)$$

合并式(5)~式(7)即可得出空气弹簧调节时的能量模型:

$$\dot{P}_{sp} V_{sp} = kRT(m_{in} - m_{out}) - kP_{sp} \dot{V}_{sp} \quad (8)$$

4.2 空气悬架单轮动力学建模

空气悬架区别于传统悬架的不同是可调节悬架刚度和高度,对车辆的行驶稳定性、平顺性有一定的提升,简化空气悬架单轮力学模型如图9所示,单轮空气弹簧力学模型^[13]可表示为:

$$\begin{cases} (P - P_{sp})A_{sp} - cz_{sp} - m_s g = m_s \ddot{z}_2 \\ k_1(z_0 - z_1) - P_{sp}A_{sp} + cz_{sp} = m_u \ddot{z}_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: P 、 k_1 、 c 分别为大气压、轮胎垂直刚度、悬架阻尼系数, P_{sp} 为空气弹簧内气压, A_{sp} 为空气弹簧内有效作用面积, z_{sp} 表示空气弹簧位移, z_0 为路面不平度输入, z_1 、 z_2 分别为非簧载质量与簧载质量垂直位移, m_s 、 m_u 分别为簧载质量与非簧载质量。

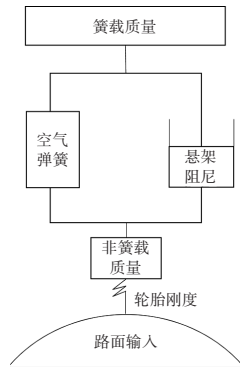


图9 空气悬架单轮动力学模型

4.3 空气悬架车辆侧翻动力学建模

4.3.1 六自由度车辆侧翻建模

如图10所示,建立线性六自由度车辆侧翻模型^[14],包括两侧车轮的垂向运动、侧倾运动、簧载质量垂向运动、侧向运动、横摆运动,忽略车辆俯仰运动、非簧载质量侧倾特性;若车辆关于 x 轴对称、侧向速度和侧倾角与横摆角速度可线性化。

则由图10及牛顿第二定律,可得其簧载质量位移方程:

$$m_s \ddot{z} = F_{sl} + F_{sr} \quad (10)$$

式中: m_s 为簧上质量, z 为簧上质量位移, F_{sl} 、 F_{sr} 分别为左、右侧悬架力。

簧载质量侧倾动力学方程为:

$$I_x \ddot{\varphi} = m_s h a_y + (F_{sr} - F_{sl})T_w/2 + m_s g h \varphi \quad (11)$$

式中: h 为侧倾力臂, T_w 表示轮距, a_y 、 I_x 、 φ 分别为横向

加速度、绕 x 轴转动惯量、侧倾角。

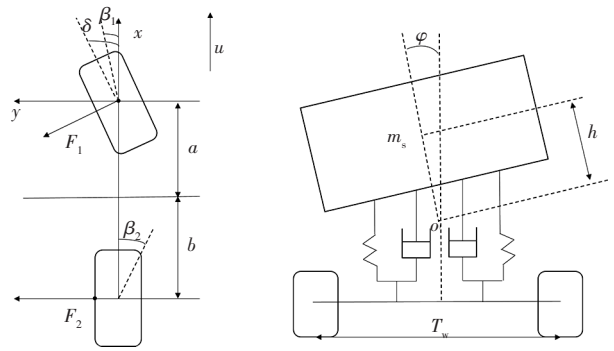


图10 六自由度车辆侧翻模型

车辆绕 z 轴的横摆运动学方程为:

$$I_z \dot{r} = 2aF_l \cos \delta - 2bF_r \quad (12)$$

式中: I_z 为绕 z 轴的转动变量, r 为横摆角速度, a 为前轴到质心得距离, b 为后轴到质心得距离, F_l 、 F_r 分别为左侧车轮侧向力与右侧车轮侧向力, δ 为前轮转角。

车辆的侧向运动动力学方程为:

$$m a_y - m_s h \ddot{\varphi} = 2(F_l + F_r) \quad (13)$$

车辆质心位置的横向加速度为:

$$a_y = \dot{v}_y + v_x r \quad (14)$$

式中: v_x 为纵向速度, v_y 为侧向速度。

车轮的垂向运动动力学方程为:

$$\begin{cases} m_u \ddot{z}_{1l} = -F_{sr} - k_1(z_{1l} - z_0) \\ m_u \ddot{z}_{1r} = -F_{sl} - k_1(z_{1r} - z_0) \end{cases} \quad (15)$$

综上所述可得车辆六自由度侧翻模型:

$$\begin{cases} m_s \ddot{z} = F_{sl} + F_{sr} \\ I_x \ddot{\varphi} = m_s h a_y + (F_{sr} - F_{sl})T_w/2 + m_s g h \varphi \\ I_z \dot{r} = 2aF_l \cos \delta - 2bF_r \\ m a_y - m_s h \ddot{\varphi} = 2(F_l + F_r) \\ m_u \ddot{z}_{1l} = -F_{sr} - k_1(z_{1l} - z_0) \\ m_u \ddot{z}_{1r} = -F_{sl} - k_1(z_{1r} - z_0) \end{cases} \quad (16)$$

4.3.2 空气悬架车辆侧倾力臂

上述车辆动力学模型默认车辆的悬架不会主动调节高度,所以需要结合侧倾力臂的定义与空气悬架主动调节高度的特性重新推导侧倾力臂的运动学公式。

其中,侧倾中心为车厢侧倾轴线通过车厢在前后轴处横断面上的瞬时转动中心^[15]。悬架的高度与结构决定了侧倾中心。侧倾力臂为静止状态下,簧上质心到侧倾轴的铅锤距离。为了便于研究,假设空气悬架的位移垂直于地面,则簧载质量的侧倾运动如图11所示。

结合侧倾力臂定义可知,侧倾中心、簧载质量质心、侧倾中心高度和悬架结构共同决定了侧倾力臂的大小,且在运动过程中不发生改变,则:

$$h = h_0 + Z_{as} \cos \varphi \quad (17)$$

式中： h_0 、 Z_{as} 、 φ 分别表示初始侧倾力臂高度、簧载质量距侧倾中心水平线的垂向位移、侧倾角。

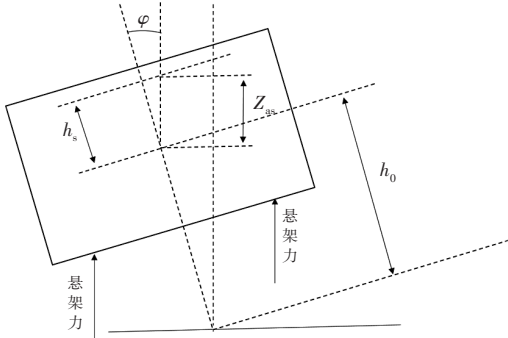


图11 侧倾力臂模型

4.3.3 轮胎侧向力建模

路面对车轮的侧向力会产生非零的侧向速度,轮胎动力学模型如图12所示。

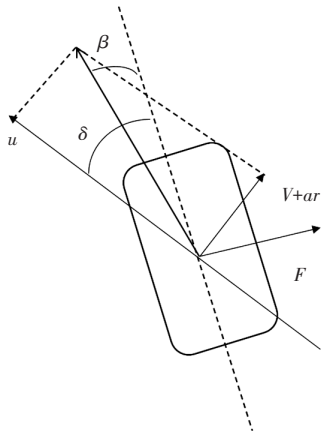


图12 轮胎侧向力模型

轮胎线性侧向力方程^[16]:

$$\begin{cases} F_1 = -k_1 \beta_1 \\ F_2 = -k_2 \beta_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中： F_1 、 F_2 分别为前轮侧偏力与后轮侧偏力, k_1 、 k_2 分别为前轮侧偏刚度与后轮侧偏刚度, β_1 、 β_2 分别为前轮侧偏角和后轮侧偏角。

由图12可得前后轮的侧偏角:

$$\begin{cases} \beta_1 = \arctan\left(\frac{v_y + ar}{v_x}\right) - \delta \\ \beta_2 = \arctan\left(\frac{v_y - br}{v_x}\right) \end{cases} \quad (19)$$

结合车辆实际行驶情景,考虑侧倾转向和侧倾外侧则有:

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{v_y + ar}{v_x} - \delta - c_t \varphi - c_{r1} F_1 \\ \beta_2 = \frac{v_y - br}{v_x} - c_t \varphi - c_{r1} F_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中： c_{r1} 、 c_{r2} 分别为变形转向与变形外倾对前后轮的影响系数, c_t 、 c_r 分别为侧倾外倾与侧倾转向对前后轮的影响系数。

可推导等效刚度为:

$$\begin{cases} k_r = \frac{-2k_1}{1 - c_{r1} k_1} \\ k_r = \frac{-2k_2}{1 - c_{r1} k_2} \end{cases} \quad (21)$$

4.3.4 车辆侧翻指标

横向载荷转移率 (Lateral Load Transfer Ratio, LTR)、静态稳定因子 (Static Stability Factor, SSF)、零力矩点 (Zero Moment Point, ZMP), 共同作为车辆侧翻评价的3个指标, 其中横向载荷转移率为:

$$LTR = \frac{F_R - F_L}{F_R + F_L} \quad (22)$$

式中： F_L 、 F_R 分别为左右侧车轮的垂直载荷, 若左右车轮载荷相等则 $LTR=0$, $LTR \neq 0$ 时说明车辆发生侧倾, 当一侧车轮载荷为零则车辆会侧翻, 此时 LTR 的值为1或-1。

静态稳定因子将车辆视作刚体, 则:

$$SSF = \frac{T}{2h} \quad (23)$$

式中： T 为左右轮距, h 为车辆质心高度。

零点力矩为通过地面一点, 反作用力合力为0的点, 在研究车辆侧翻问题时, 只要零力矩点在以汽车的车轮形成的多边形内, 则汽车为安全状态, 其表达式为:

$$Y_{zmp} = \frac{1}{mg} [-m_u a_y h_u + m_s gh \sin \varphi - m_s a_y (h_r + h \cos \varphi) + I_x \varphi] \quad (24)$$

式中： Y_{zmp} 、 m 、 h_u 分别为零力矩点、整车质量、簧下质量质心高度。

若选取横向载荷转移率做参考, 当 $-1 < LTR < 1$ 时, 车辆不侧翻, 为了安全起见一般设定预警值为0.7。

一般在实车试验中, 垂直载荷是一个难以测量的值, 利用侧翻模型计算, 以侧倾中心为原点取矩忽略前后轴轮距差异和非簧载质量, 此时的侧倾角较小, 推导可得:

$$T_z T_w / 2 + m_s a_y h \cos \varphi + m_s gh \sin \varphi - F_{zr} T_w / 2 = 0 \quad (25)$$

式中： $m_s \approx m$, $h \cos \varphi \approx h(1 - \varphi)$, $h \sin \varphi \approx h\varphi$ 。

整理得:

$$LTR = [2\varphi a_y h - 2a_y h - 2g\varphi h] / gT_w \quad (26)$$

结合侧倾力臂因空气悬架车辆高度调节的变化, 则有:

$$LTR^a = (h_0 + z_{as} \cos \varphi) (2\varphi a_y - 2a_y - 2g\varphi) / gT_w \quad (27)$$

对于车辆不同的行驶状态,一般会设置相应的横向载荷转移率阈值以防止车辆发生侧翻。随着车辆行驶速度的增加车辆的侧翻风险也会随之增加^[17],所以设定的阈值也应该随之减小。从安全角度出发,本文规定车速低于20 km/h时,横向载荷转移率的阈值为0.9,车速在20~60 km/h时横向载荷转移率的阈值为0.8,车速在60 km/h以上时横向载荷转移率的阈值为0.7,如表8所示。在各车速下若横向载荷转移率大于设定阈值时则说明车辆存在侧翻风险。

表10 车速与LTR的关系

车速/km·h ⁻¹	LTR
<20	0.9
20~60	0.8
>60	0.7

4.3.5 卡尔曼滤波估算侧倾角

利用卡尔曼滤波估算车身侧倾角,卡尔曼增益:

$$K_k = \frac{e_{\text{estk}} - 1}{e_{\text{estk}} - 1 + e_{\text{meak}}} \quad (28)$$

式中: $e_{\text{estk}-1}$ 为估计误差, e_{meak} 为测量误差。

则有卡尔曼估算值^[18]:

$$\bar{x}_k = \bar{x}_{k-1} + K_k(Z_k - \bar{x}_{k-1}) \quad (29)$$

式中: \bar{x}_k 为测量平均值, K_k 为卡尔曼增益。

估算误差:

$$e_{\text{est}} = (1 - K_k)e_{\text{estk}-1} \quad (30)$$

结合侧倾角和横向加速度与侧倾角加速度,可建立空间状态方程:

$$\begin{pmatrix} \varphi(k+1) \\ \dot{\varphi}(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi(k) \\ \dot{\varphi}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.5T^2 \\ T \end{pmatrix} \ddot{\varphi} + \begin{pmatrix} 0.5T^2 \\ T \end{pmatrix} w(k) \quad (31)$$

式中: $\begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 为状态转移矩阵, $\begin{pmatrix} 0.5T^2 \\ T \end{pmatrix}$ 为输入矩阵,利用卡尔曼估算法估算动态侧倾角。

4.3.6 侧翻预警时间

当车辆外部输入保持稳定时,侧翻预警时间(Time To Rollover, TTR)表示根据当前车辆动力学状态推算至侧翻发生的时间间隔^[19]。TTR越小,表明车辆越接近侧翻临界状态;当TTR=0时,车辆正在侧翻。若车速>60 km/h,通过动力学模型预测LTR达到设定阈值所需的时间,基于当前侧倾角和侧倾角速度计算TTR。该时间反映了车辆在现有运动趋势下的侧翻风险,可用于主动安全系统的预警或干预。

$$TTR = (\varphi_{\text{max}} - \varphi) / \dot{\varphi} \quad (32)$$

结合式(27),可以由最大侧倾角 φ_{max} ,侧倾力臂 h ,推导TTR。

$$TTR = \left[\frac{0.7gT_w + 2a_y h}{2(a_y - g)h} - \varphi \right] / \dot{\varphi} \quad (33)$$

4.3.7 空气悬架实时横向载荷转移率验证

如前所述,空气悬架车辆可通过主动调节车身高度改变侧倾力臂,其侧倾力臂随悬架的调节而改变,与普通悬架车辆存在显著差异。基于此特性,本研究推导了空气悬架车辆的实时横向载荷转移率— LTR^a 。为验证 LTR^a 的有效性,设定车辆在高速工况下行驶,并分别进行高速过弯与“S”路线工况,即转向盘角阶跃与正弦输入验证,如图13~图16所示。

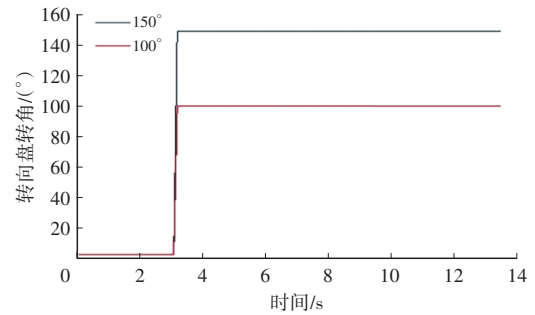


图13 角阶跃转向盘角输入

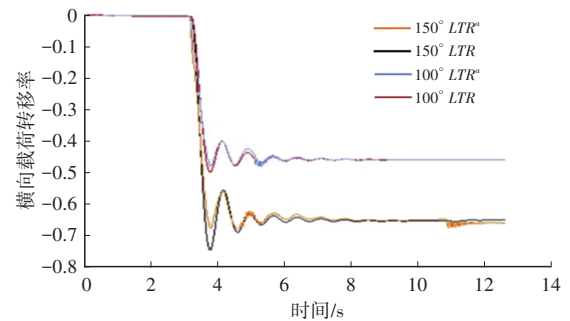


图14 角阶跃输入横向载荷转移率

在转向盘角阶跃输入工况下,空气悬架车辆的 LTR^a 相较于一般的LTR在峰值时略有差异但对于转向角的输入的相应速度与变化趋势基本相同。

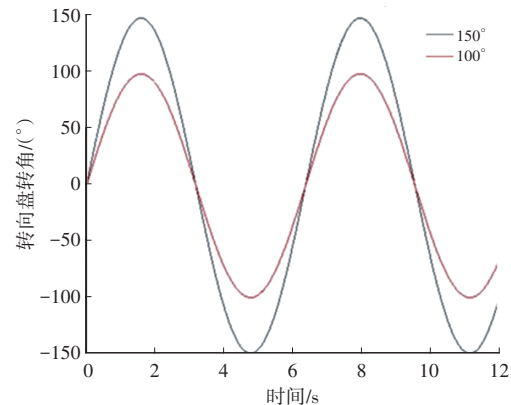


图15 正弦转向盘角输入

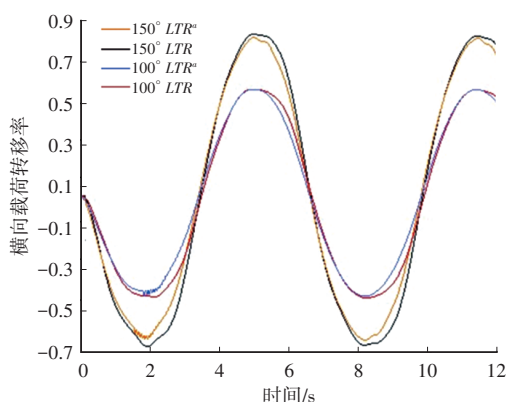


图16 正弦角输入横向载荷转移率

在正弦角输入工况下,空气悬架车辆的横向载荷转移率也是在峰值时较小且相应速度变化趋势基本相同, LTR° 能够反应车辆的侧翻趋势。

4.4 安全状态策略设计

4.4.1 空气悬架功能安全目标分析

前文所述,空气悬架的功能安全目标SG01是空气悬架系统要避免汽车在中高速时全部悬架不能降低或者错误的全部调高,功能安全目标SG02是空气悬架系统要避免汽车在中高速时因为各个悬架调节错误或者卡滞造成的高度差过大,功能安全目标SG03是空气悬架系统要避免汽车在急加速或急转弯时意外激活悬架高度调节功能。若违反安全目标则会导致车辆发生失稳侧翻的风险,可将3个安全目标视为整车级安全目标车辆不应在行驶过程中侧翻的分解。

本文第3章所述,分析了空气悬架车辆横向载荷转移率的侧翻预警时间的计算方法,本文以安全角度出发,设定侧翻预警时间 TTR 为4s,即横向载荷转移率 LTR° 以当前状态增加到0.7时所需要的时间为4s,若小于4s则有违反整车级功能安全目标(车辆不应在行驶过程中侧翻)的风险。

4.4.2 安全状态策略算法逻辑

与普通悬架不同,由于空气悬架车辆车身高度主动可调,所以系统需要实时监测空气悬架的调节高度以得到车辆的侧倾力臂,以防止空气悬架在车辆行驶过程中因功能使能过度或不足、功能失效、功能意外触发而导致车身姿态不合理使得车辆发生侧翻,如图17所示为安全状态策略算法逻辑。

通过对空气悬架功能安全进行分析,对其系统及其软硬件设计提出了相应的安全要求,尽量避免空气悬架系统违反安全目标。若空气悬架系统违反安全目标,安全状态策略的算法思路如下:根据车速、转向盘转角、空气悬架高度等数据,通过前文所述的空气

悬架车辆侧翻动力学模型计算状态变量以及侧倾力臂,并利用卡尔曼估算法估算侧倾角,推算出横向载荷转移率,最后计算出对应的侧翻预警时间,若大于设定阈值则报警空气悬架故障提醒驾驶员减速行驶并继续实时检测,若小于设定阈值则停止空气悬架高度调节,以减轻失效造成的安全风险。

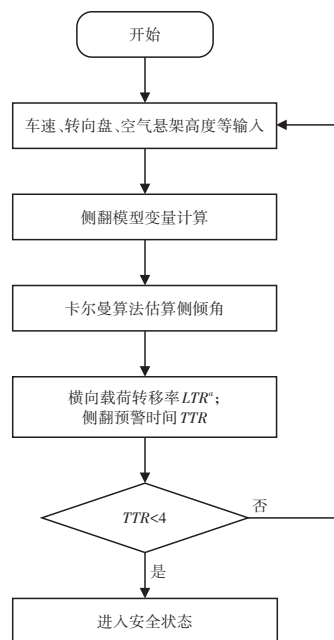


图17 算法流程

5 总结与展望

本文基于ISO 26262针对空气悬架进行了功能安全分析,将功能安全目标逐级分解到软硬件阶段,建立了完整的功能安全软硬件架构,分析了车辆侧向稳定性对空气悬架的功能安全需求与车辆行驶侧向稳定性模型,基于空气悬架高度可调节以致侧倾力臂可变的横向载荷转移率设计了系统进入安全状态的策略既当空气悬架功能失效时若整车尚未有侧翻风险则发送空气悬架功能失效警报并继续实时检测,若整车有侧翻风险则停止空气悬架高度调节,保障空气悬架功能安全及整车稳定性的同时也防止了系统产生不必要的功能限制。然而,本文侧重于空气悬架功能安全及整车稳定性的分析及设计方法,并未进行详尽的验证测试试验,对进入安全状态的策略进行相应的验证分析,有待未来进行深入研究分析。

参考文献

- [1] ISO. Road Vehicles — Functional Safety: ISO 26262: 2018[S]. Switzerland: ISO, 2018.
- [2] XU G, DU X, LI Z, et al. Reliability Design of Battery Management System for Power Battery[J]. Microelectronics

- Reliability, 2018, 88-90: 1286-1292.
- [3] 郭建. 基于ISO 26262的汽车电子功能安全: 方法与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [4] 李波, 付越, 王兆, 等. 中国功能安全(Functional Safety)和预期功能安全(SOTIF)技术和标准体系研究及进展[J]. 中国汽车, 2020(7): 34-39.
- [5] 伍理勋, 陈建明, 陈磊, 等. 电动汽车电机驱动控制器功能安全架构研究[J]. 控制与信息技术, 2018(3): 1-5.
- [6] 苏晨曦. 基于功能安全的电子换挡器电控平台硬件开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [7] NOURI A, WARMUTH J. IEC 61508 and ISO 26262-A Comparison Study[C]// 2021 5th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), 2021: 138-142.
- [8] SRIVASTAVA P, KARLE M L, KARLE U S, et al. Development of Electrical Power Assisted Steering (EPAS) Considering Safety and Reliability Aspects as per ISO 26262[C]// Symposium on International Automotive Technology. Pune, India: TRB, 2015.
- [9] LEE K J, LEE K H, MOON C, et al. Development of Active Air Suspension System For Small Agricultural Vehicles. Big Data In Agriculture[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(4): 1915-1920.
- [10] IKRAM K, NIAZ Y, HAMID S, et al. Development of Active Air Suspension System for Small Agricultural Vehicles. Big Data In Agriculture[J]. Big Data In Agriculture(BDA), 2020, 2(2): 41-46.
- [11] TERMOUS H, SHRAIM H, TALJ R, et al. Coordinated Control Strategies for Active Steering, Differential Braking and Active Suspension for Vehicle Stability, Handling and Safety Improvement[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(11): 1-36.
- [12] 刘超. 基于模型预测控制的客车电控空气悬架车身高度控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [13] 肖飞. 基于AMESim的客车ECAS车身高度及整车姿态控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [14] 张甲乐. 客车侧翻稳定性分析与防侧翻控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [15] 管欣, 田磊, 逢淑一, 等. 基于侧倾中心的悬架导向机构模型[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 249-254.
- [16] 曾小华, 李广含, 宋大风, 等. 基于遗传算法优化的BP神经网络侧翻预警算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 30-38.
- [17] 宗长富, 韩小健, 赵伟强, 等. 基于动态LTR的客车防侧翻控制[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 136-142.
- [18] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32-34.
- [19] YU H, GUVENC L, OZGUNER U. Heavy Duty Vehicle Rollover Detection and Active Roll Control[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 38(1): 128-133.

(责任编辑 明慧)