

基于DIL的转向系统SOTIF场景开发分析

陆俊文 高立臣 黄伟

(博世华域转向系统有限公司, 上海 201821)

【欢迎引用】陆俊文, 高立臣, 黄伟. 基于DIL的转向系统SOTIF场景开发分析[J]. 汽车文摘, 2025(6): 35-41.

【Cite this paper】LU J W, GAO L C, HUANG W. Analysis on Electric Power Steering SOTIF Scenario Development Based on DIL [J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(6): 35-41.

【摘要】为了提高智能网联汽车横向主动安全, 将转向系统(EPS)的非预期功能安全场景识别和定义融入系统设计与开发环节。结合场景域分析、等价类和边界值技术, 通过解构EPS相关车辆模型变体和横向运动场景, 从EPS已知的运行场景中拓展出更多可能存在风险的工作场景。同时, 利用基于半实物仿真的驾驶员在环系统(DIL), 凭借其“人-车-环境”闭环的优势, 使得更多未知风险场景转变为有效的已知场景, 进而优化现有安全技术要求, 进一步提高EPS的系统表现。

关键词: 转向系统; 预期功能安全; 场景; 驾驶员在环

中图分类号: U467.5; U461.91 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240232

Analysis on Electric Power Steering SOTIF Scenario Development Based on DIL

Lu Junwen, Gao Lichen, Huang Wei

(Bosch Huayu Steering Systems Co. Ltd., Shanghai 201821)

【Abstract】To enhance lateral active safety in intelligent connected vehicles, the identification and definition of unintended functional safety scenarios for the Electric Power Steering (EPS) system are integrated into system design and development process. By combining scenario domain analysis, equivalence partitioning, and boundary value analysis with the deconstruction of vehicle model variants and lateral motion scenarios related to EPS, more potential hazardous operational scenarios are expanded from known operational scenarios. Meanwhile, the Driver-In-the-Loop (DIL) system based on hardware-in-the-loop simulation is utilized. Relying on its advantages of “driver-vehicle-environment” closed-loop, more unknown risk scenarios are transformed into valid known scenarios. Subsequently, the existing safety technical requirements are optimized and the overall performance of the EPS system is further improved.

Key words: Electric Power Steering (EPS), Safety of the Intended Functionality (SOTIF), Scenarios, Driver In-the-Loop (DIL)

0 引言

汽车电动助力转向系统(Electric Power Steering, EPS)对汽车的操控稳定性和舒适性有至关重要的影响。随着汽车技术的不断发展, 电子控制系统在EPS中的应用日益广泛, 使EPS对算法的依赖性和复杂性也在不断增加。在此背景下, 功能安全(Functional Safety)和预期功能安全(Safety of the Intended Functionality, SOTIF)已成为EPS系统开发过程中不可忽视的重要课题。因此, 深入研究EPS系统的功能安全与预期功能安全, 对于提升汽车的整体安全性和可靠性具有极为

重要的意义。功能安全主要针对已知电控系统故障可能引发的危害行为所导致的安全事故, 旨在通过有效的安全设计和故障诊断机制, 降低此类事故的发生概率。而预期功能安全则侧重于解决自动驾驶系统功能不足所引发的车辆危害行为, 进而预防由此导致的安全事故。通过对这两个方面的研究, 能够确保EPS系统在各种复杂工况下都能稳定、可靠地运行, 从而为驾驶者提供更安全、更舒适的驾驶体验, 同时也有助于推动汽车行业的技术进步和可持续发展。

刘逸恒^[1]和白先旭^[2]等通过系统理论过程分析(System-Theoretic Process Analysis, STPA)方法对制动

系统(Advanced Emergency Braking, AEB)进行了风险评估和失效场景建模,提出了分析未知不安全场景并开展决策验证需要依托海量的实车路试数据。然而,实车路试面临周期长、成本高、场地单一且有局限性、人身安全等风险,严重制约了快速研发和产品升级迭代的进程。为了解决以上问题,借助数字虚拟仿真技术来生成丰富的虚拟仿真场景已经成为研究趋势。余卓平等^[3]研究了虚拟仿真、硬件在环和封闭场地车辆在环技术,加速了自动驾驶汽车测试方面的研究进展。尚世亮等^[4]基于dSPACE实时在环系统,将SOTIF技术标准集成到现有开发测试体系中,为转向系统的开发提供了新的思路和方法。对于转向系统的开发,驾驶员在环系统(Driver In-the-Loop, DIL)结合了真实的研究对象(即EPS)及虚拟仿真模型,能够直观而高效地实现“人-车-EPS系统-环境”闭环场景。在仿真系统中,利用车辆信息道路等数据,可灵活、高效地重构具有复杂性、危险性、随机性的虚拟仿真场景,覆盖测试成本高、难度大、危险性高甚至无法进行实车测试的场景。目前,在挖掘零部件SOTIF场景、确定系统安全边界及算法可靠性等方面,DIL逐渐成为基于测试开发的主流手段。

为了深入挖掘并且开发转向系统的SOTIF场景,本文采用场景域分析方法,结合DIL半实物仿真技术,通过改变场景特征值,系统地评估并优化助力或

全动力转向系统的功能和性能,旨在提升转向系统的可靠性和可控性。

1 驾驶员在环DIL的系统架构

DIL系统是一种半实物仿真系统,它将EPS系统、车辆及其运行环境仿真模型和驾驶员连接在一起,其构成示意如图1所示。DIL系统主要由转向盘输入装置、转向器左右拉杆负载电机、转向节模拟器、EPS硬点调节机构、控制柜及上位机组成^[5]。转向盘输入切换装置由带有离合器的空心轴电机^[6]组成,可以提供角度或扭矩输入2种输入模式:自动转向和驾驶人控制。在转向盘输入装置装有角度传感器和扭矩传感器,用于采集输入装置的输出角度和力矩,并将这些数据实时提供给系统进行处理和分析。转向器左右拉杆负载电机配合转向节模拟器协同工作,能够在转向器左右横拉杆端动态施加齿条力或位移载荷。同时,在横拉杆安装了力传感器及位移传感器,实时采集左右两边拉杆力和拉杆位移,从而为系统的精确仿真和测试提供有力支持。

2 EPS系统SOTIF场景分析理论

2.1 场景及场景域的定义

在产品功能设计、研发测试和风险评价阶段,场

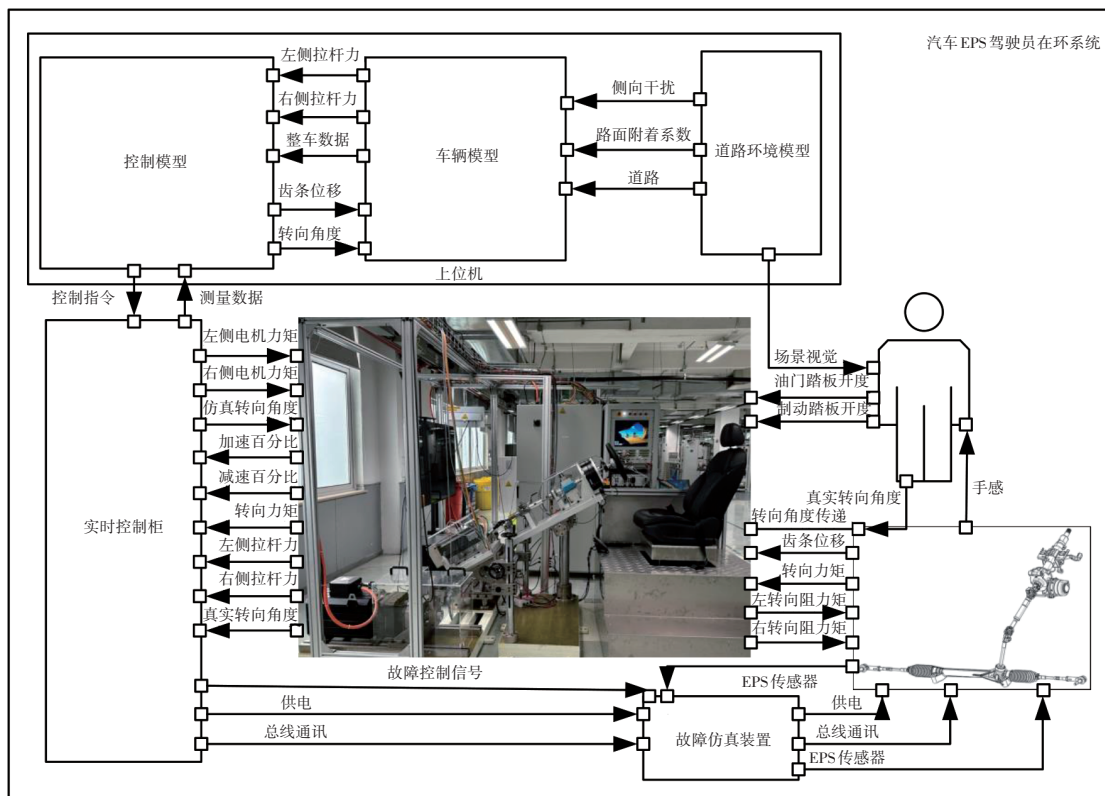


图1 驾驶员在环实时系统机电耦合集成示意

景的分析、创建、仿真和实现都发挥了关键性作用。

预期功能安全场景(SOTIF Scenarios)^[7]是指那些能够引发SOTIF风险,并且在实施不恰当控制的情况下可能会引发危害的场景。对于EPS系统而言,需要从零部件的视角分析其预期功能安全场景,并且保持或最大化已知场景,同时最小化未知场景。

任意的随机组合往往会导致场景参数空间出现爆炸式增长,使分析效率非常低下。因此,如何挖掘有效场景成为了研究热点。为了避免无意义且无序的场景组合,结合基础场景、标准场景和经验数据库,对EPS系统进行场景解构,从而提炼出场景关键元素及其关联关系,并构建一个多源异构体来实现对场景的精确描述。场景的生成方法主要分为2种:场景机理建模和数据驱动^[8]。场景机理建模通过数学理论和模型来描述物理机理过程,是实现仿真的基础。综上,本文基于场景机理建模方法进行场景组合的创建。

其中,根据场景快照 SS_i 、场景 S_i 、用例 U_x 和优先度子集的定义,本文进一步提出了场景域 F_{EPS} ,其覆盖一组来自于相同对象 O_i 且相互独立的场景:

$$S_i = [SS_1, SS_2, \dots, SS_j, \text{关系集}] \quad (1)$$

$$U_x = [[S_1, S_2, \dots, S_l], \text{优先度子集}] \quad (2)$$

$$F_{EPS} = \{O_1: S_1, O_2: S_2, \dots, O_i: S_i\} \quad (3)$$

把场景域解构至特征值,基于式(3),场景域又可由若干特征 A_x 进行描述,即每个对象 O_i 的表现或特性的事项,而每个特征都由若干特征值 v_{mn} 组成,如:

$$F_{EPS} = \{A_1, A_2, \dots, A_m\} \quad (4)$$

$$A_x = \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{x2} \\ \vdots \\ v_{xn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可导出 F_{EPS} 为一个 $n \times m$ 的矩阵:

$$F_{EPS} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{m1} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{2n} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (6)$$

式(6)中场景域 F_{EPS} 可展开为由 m 个特征组成的特征集,而每个特征由 n 个特征值组成,如果没有特征值可以由0代替。

数据表明大多数失效是由单因素故障或两个因素的联合组成效应引起的,那么根据双项拓展思想,定义特殊函数 $f(F_{EPS})$,如式(7)所示,函数使场景域的特征两两融合且去掉重复的元素,又定义特殊运算符 $@$ 使特征值又两两成组为单个独立场景,如式(8)所示。

$$f(F_{EPS}) = \begin{bmatrix} 0 & A_1 @ A_2^T & \dots & A_1 @ A_m^T \\ 0 & 0 & \dots & A_2 @ A_m^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{m-1} @ A_m^T \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (7)$$

$$A_x @ A_y^T = \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{x2} \\ \vdots \\ v_{xn} \end{bmatrix} @ \begin{bmatrix} v_{y1} & v_{y2} & \dots & v_{y(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} v_{x1} \cup v_{y1} & \dots & v_{x1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{xn} \cup v_{y1} & \dots & v_{xn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{x1y1} & \dots & S_{x1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{xny1} & \dots & S_{xn} \end{bmatrix}$$

2.2 基于DIL的SOTIF场景分析方法论

潜在功能不足和触发条件^[9]的分析主要从2方面展开:一方面,基于已知的潜在规范定义不足和性能局限,确定导致已识别出的危害行为的场景;另一方面,基于已识别出的环境条件和可合理预见误用,确定潜在的规范定义不足和性能局限。

鉴于DIL的虚拟仿真技术在场景构建方面的优势,转向系统的SOTIF场景分析方法可以重组为4个方法组,如图2和表1所示。

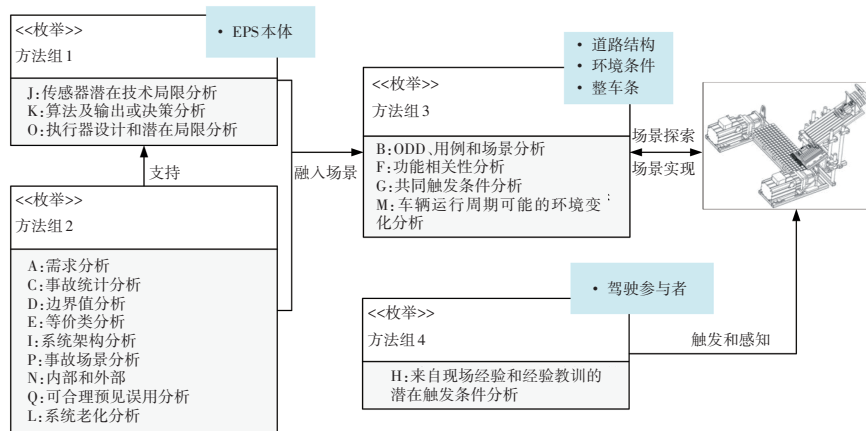


图2 驾驶员在环在EPS系统SOTIF场景的应用示意

方法组3的输出产物结合DIL的虚拟仿真技术,能够模拟道路、环境及其他车辆相关系统,进而实现道路环境和整车条件场景域覆盖。在方法组1的支持下,借助方法组2可以获得EPS电控子系统的性能局限,并利用DIL的故障注入模块,在特定工况和触发时间点注入故障,能够覆盖EPS自身潜在功能不足。此外,方法组4可以通过DIL的人/机驾驶舱实现约定或探索更多操控序列,以覆盖驾驶操控场景域。

表1 EPS系统潜在功能不足和触发条件分析方法组

方法组	方法序号	相关输出
1	A/C/D/E/I/P/N/Q/L	EPS系统的需求、架构及验证准则
2	J/K/O	EPS系统的子系统性能局限
3	B/F/G/M	EPS系统相关的道路结构、环境条件和车辆子系统的影响
4	H	EPS系统相关的驾驶员或自动驾驶模块的操作

2.3 EPS系统场景域的描述

EPS系统场景域涵盖4个主要对象:道路环境、整车条件、驾驶操控和EPS系统本体。每个对象又可以划分若干个特征以及对应的特征值,如表2所示。

表2 EPS系统的非穷举场景域

对象O	特征A	非穷举特征值v	实现方法
道路环境	道路拓扑	直线、圆弧、双道	仿真
	道路坡度	横坡、纵坡	
	路面覆盖	沥青、冰面、沙滩	
	平整程度	比利时路、凹陷	
	侧向干扰	(等效)侧向垂直风力	
整车条件	联动系统	四轮定位异常	仿真
	网络通讯	车速信号不正常	
驾驶操控	驾驶人/ADAS	瞬间转向、非预期、ADAS指令	实物/间接模拟
EPS系统	传感器	角度偏差、扭矩干扰	实物/间接模拟
	控制器	前馈控制偏差、溢出	
	电机	电机温度异常	
	其他配件	电器件老化	

注:“间接模拟”是通过其他机构等效作用模拟实车运行场景,例如通过电机模拟驾驶员输入、传感器仿真等。

2.4 EPS系统场景域的覆盖

为拓展EPS已识别的环境条件及可预见误用场景,并覆盖未知安全或不安全场景,本文提出基于场景域SOTIF场景分析方法,其模型如图3所示。

在该方法中,所有相关对象的特征值共同构成EPS系统的完整场景域,涵盖已知与未知场景。在已

知场景的基础上,依据场景域中各对象的特征值进行扩展,实现对未知场景的覆盖。借助自动化技术^[10],能够快速组合和筛选这些场景,形成场景库,并基于优先级生成用例,在驾驶员在环系统中进行实时运行。通过设定失效判定条件,可训练出之前未知的危害场景,以迭代方式逐步近似覆盖整个场景域。需要注意的是,所有场景均应在车辆的设计运行范围内(即图3虚线框)。

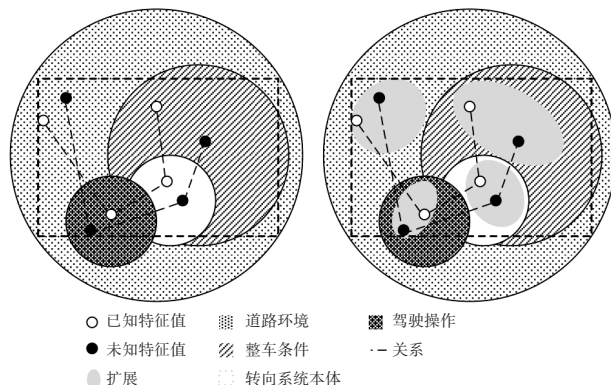


图3 基于场景域SOTIF场景分析方法

其中,DIL中的“整车条件”对象由动力学仿真模型实现。鉴于难以精确获取实车的外特性曲线,本文采用等价类边界值分析及仿真技术对整车条件的特征值进行扩展,以弥补这一不足。

3 EPS系统场景域的分析

3.1 EPS系统的整车边界条件

EPS系统的边界包括4部分:(1)横拉杆运动:移动位移、移动速度、移动加速度、横拉杆力;(2)转向盘运动:转向角度、转向角速度、转向角加速度、转向力矩;(3)供电系统;(4)整车通讯系统。其中,横拉杆运动直接受到仿真模型的影响,也是EPS设计运行范围中的重要组成部分。因此,本文以横拉杆运动受到的一对平衡力矩为模型。EPS的力矩平衡^[11]公式为:

$$M_f = M_H \times A_s \times i_s \quad (9)$$

式中: M_f 为转向阻力矩, M_H 为转向盘力矩, A_s 为转向助力系数, i_s 为转向系统角传动比。

转向阻力矩是结合悬架动态情况,转向轮与地面之间的相互作用产生的等效力矩,它是驾驶员在环系统中负载的输出中EPS的输入。其中,由于EPS以实物存在不考虑转向系统内部的摩擦阻力矩的影响。因此,EPS需要克服的转向阻力矩概括如下^[12](其中 $j=1$,对应左轮; $j=2$,对应右轮):

- (1) M_{1j} 为轮胎静态转向力矩(滑动摩擦力矩);
- (2) M_{2j} 为转向轮绕主销垂直方向抬高形成的垂

直力绕主销内倾形成的阻力矩;

(3) M_{3j} 为车辆受到侧向外力或转弯行驶的离心力等使地面对轮胎在侧向合力产生的作用反力和轮胎拖矩及后倾拖矩之间的乘积而形成的侧向力绕主销后倾形成的阻力矩;

(4) M_{4j} 为在路面附着情况下, 两侧车轮纵向力差异形成的纵向力绕主销形成的阻力矩, 对于前轮转向一般可以忽略不计;

(5) M_{5j} 为路面与轮胎之间的摩擦力产生的阻力矩。

通过力学推导可求得以下经验公式:

$$M_{1j} = \frac{f}{3} \cdot \sqrt{\frac{W_{zj}^3}{p}} \quad (10)$$

$$M_{2j} = W_{zj} \cdot \cos \tau_j \cdot \sin \sigma_j \cdot \sin \left(\frac{\delta_{sw}}{k} \right) \cdot (D_{yj} + r_w \cdot \tan \sigma_j) \cdot \cos \sigma_j \quad (11)$$

$$M_{3j} = k_j \cdot \alpha_j \cdot \cos \sigma_j \cdot (r_w \cdot \sin \tau_j + n_R \cdot \cos \tau_j) \quad (12)$$

$$M_5 = 0.001 \cdot W_{zj} \cdot K \cdot r_w \quad (13)$$

式(12)中轮胎拖矩公式为:

$$n_R = \frac{1.7 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_w - \Delta) \cdot \Delta}}{6} \quad (14)$$

$$\Delta = c_1 \frac{W^{0.85}}{S_0^{0.7} \cdot (2 \cdot r_w)^{0.43} \cdot p^{0.6}} \cdot (15000 \cdot S_0 + 0.42) \quad (15)$$

以前转向为例, 在EPS不同的工况下, 对应的总阻力矩值为:

原地转向工况下EPS横拉杆受到的总阻力矩:

$$M_{ff} = M_{1j} + M_{2j} + M_{5j} \quad (16)$$

行驶转向工况下EPS横拉杆受到的总阻力矩:

$$M_{ff} = M_{1j} + M_{2j} + M_{3j} + M_{5j} \quad (17)$$

转向保持工况下, EPS横拉杆受到的总阻力矩:

$$M_{ff} = M_{2j} + M_{3j} + M_{5j} \quad (18)$$

通过式(9)~式(13)可知, 整车条件的特征值及可扩展区间见表3。

3.2 EPS系统的道路环境和驾驶操作

针对已知场景^[13]可归纳的特征和特征值, 如表4所示。

根据场景在公共道路上的暴露率筛选出S2、S3和S4, 和已知场景的特征进行扩展如表5~表8所示。

基于对EPS系统运行环境的机理模型可知, 车速, 转向角度, 车辆质心侧向加速度和车辆转向半径之间相互关联, 其等效公式如式(19)、式(20)所示^[12-13], 在分析过程中应遵守运行规律并以单点等价类进行特征值扩展:

$$a_y = \frac{u^2}{R_s} \quad (19)$$

$$R_s = D_y + \frac{L}{\sin \frac{\delta_{sw}}{k}} \quad (20)$$

式中: u 为瞬时车辆质心的纵向速度(车速), δ_{sw} 为转向盘角度, L 为轴距, k 为转向比, D_y 为主销偏移距。

表3 EPS系统相关的整车特征值

参数/单位	含义	可扩展值区间
W_{zj}/N	左右轮的车轮载荷	2 900~14 000
p/kPa	轮胎气压	250~340
f	地面附着系数	0.5~0.95
D_{yj}/mm	主销偏移距	-18~79
$\tau_j/(\circ)$	主销后倾角	0~3(前驱)
$\sigma_j/(\circ)$	主销内角	6~8
k	转向比	12~30
$\alpha_j/(\circ)$	车轮的侧偏角(参考)	11.3~26.6
r_w/mm	轮胎动态滚动半径	222~456
$k_j/kN \cdot rad^{-1}$	左右车轮的侧偏刚度	28~80
c_1	轮胎花纹参数	1.5(子午线)
S_0/mm	轮胎宽度	118~381
K	前桥动载荷系数	1.0~1.5

表4 非穷举EPS系统已知场景

场景序号	道路结构	驾驶参与者	暴露率E
S1	间距30 m蛇形车道	车速/ $km \cdot h^{-1}$: 50~80 侧向加速度/ g : 0.1~0.5	低
S2	半径15 m的圆周车道	车速/ $km \cdot h^{-1}$: 0~35 侧向加速度/ g : 0~0.65	高
S3	间距为3.5 m和入弯长度30 m的双移线车道	车速/ $km \cdot h^{-1}$: 40~80	高
S4	足够大的驾驶动力学区域	车速: $0.7v_{max}$ 稳态侧向加速度/ g : 0.1~0.3 驾驶员输入阶跃转角	高

表5 道路结构的非穷举扩展

场景序号	道路形状	道路坡度/%
S2	圆周半径/m: 10~150	横坡: 0~5 纵坡: 0~10
S3	缓冲长度/m: 10~30	

表6 环境条件的非穷举扩展

场景序号	侧向干扰	路面情况
S2~S4	侧向风速/ $m \cdot s^{-1}$: -20~20	冰面/沙滩/搓板路面/石子路面

针对场景S2, 在正常运行范围内且根据某车型数据所得的场景快照如表9所示。

表7 驾驶参与者的非穷举扩展

场景序号	车速	转向盘操作
S2	侧向加速度 0.6 g、0.65 g 和 0.7 g 对应的车速和转向角度	非驾驶意图撞击 非驾驶意图脱手 非驾驶意图推拉转角偏差 > 30°
S3	车速/km·h ⁻¹ : 80、85、90	

表8 子系统状态的非穷举扩展

场景序号	传感器	执行器及其他
S2~S4	传感器角度精度误差 ±1~15° 传感器响应滞后	电机响应滞后 电机响应扭矩不足

表9 针对某车型的驾驶操作扩展特征值非穷举示例

场景快照序列	圆周半径/m	侧向加速度/m·s ⁻²	转向角度/(°)	车速/km·h ⁻¹
S2-SSE-1	10	6	373.15	29.04
S2-SSE-3	150	6	26.5	108.30
S2-SSE-5	10	6.5	373.15	30.23
S2-SSE-8	10	7	373.15	31.37

3.3 案例分析

某款新转向产品需基于原有的老产品进行迭代更新并且后续应用到 L3 智能汽车平台中。本案例针对双移线车道这个已知测试场景(图4)来覆盖障碍物避让、紧急避让等实际工况。其中,可以解构出双移线之间过渡段的纵向长度为关键特征。

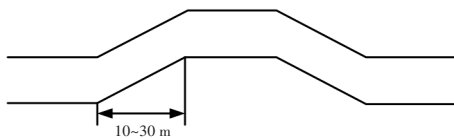


图4 双移线及其关键特征值

基于场景域 SOTIF 场景分析方法,针对“道路环境”可获得扩展场景,如表 10 所示。

表10 基于DIL的双移线扩展场景

序列	场景描述
U1	干燥路面车辆以 80 km/h 高速通过前方 30 m 的双移线车道
U2	干燥路面车辆以 80 km/h 高速通过前方 10 m 的双移线车道
U3	潮湿路面车辆以 80 km/h 高速通过前方 30 m 的双移线车道

驾驶员在环系统实现了 3 个场景(U1~U3),设置恒定车速 80 km/h,人工或者转向模拟器进行转向并且试图通过道路。车辆可以顺利驶入和驶出双移线并且可以保持车辆在车道内,如图 5 所示;当入弯长度从 30 m 缩短至 10 m,保持相同的车速,车辆驶出车道边界,如图 6 所示;当车道距离不变,改变车道环境为潮湿路面即附着系数从 0.7~0.8 降为 0.5~0.6,同样车

辆也无法正常通过双移线,如图 7 所示。

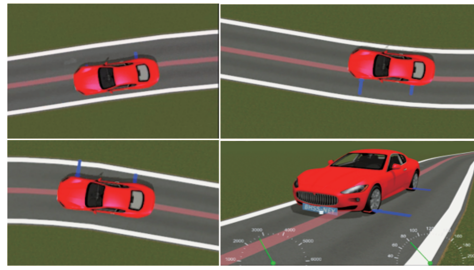


图5 U1场景驾驶员在环系统的实时动图快照

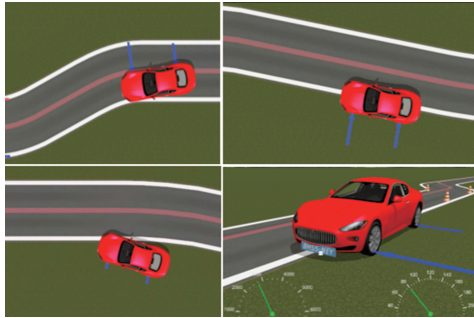


图6 U2场景驾驶员在环系统的实时动图快照

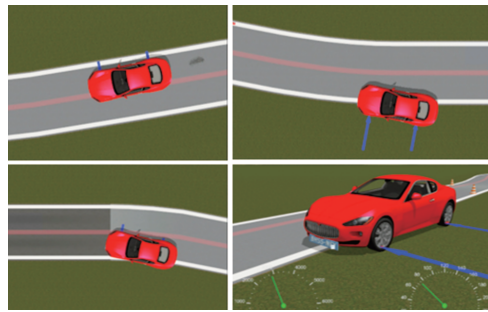


图7 U3场景驾驶员在环系统的实时动图快照

对比 U1 和 U2 的数据(图 8)可知,进入双车道时,U1 下转向角速度为 1 000 (°)/s,而 U2 若顺利通过,则转向角速度为 1 500 (°)/s。对比 EPS 电控单元的助力矩与实际转向力矩(图 9),EPS 电控单元的力矩和转向力矩之间有关键点缺失,并且在 0.9 s、1.8 s、3.3 s 及 4.8 s 处有一定的滞后。

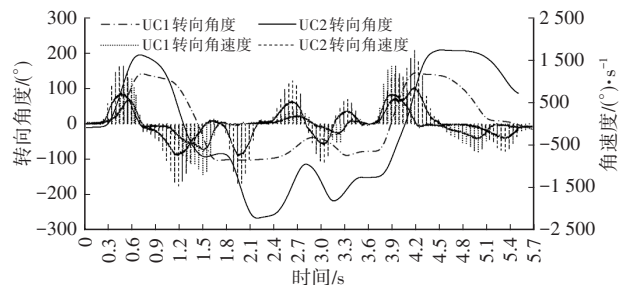


图8 U1和U2转向角度与转向角速度对比

在道路形状和转向盘转角一致的情况下,由于道路附着系数减小导致轮胎的侧向力下降,如图 10 所示。对比 U1 和 U3 情况下 EPS 的电机助力矩,在湿滑路面由于 EPS 电机助力矩在 2.3~3.5 s 处轮胎转向角

对转向盘转角微小变化较敏感,如图11所示。因此,在功能迭代上需考虑调整新的助力特性;除了力矩限制之外,在安全机制上应添加频率特性限制;增加助力反向补偿功能来确保操纵稳定和较为平顺的手感。

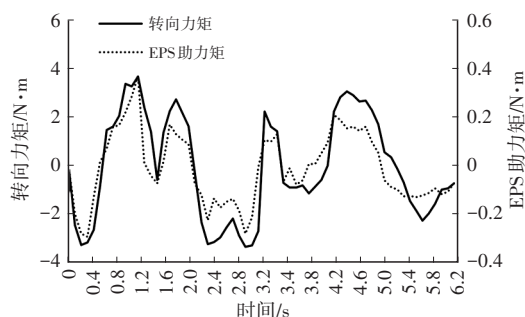


图9 U1和U2实际转矩与EPS助力矩对比

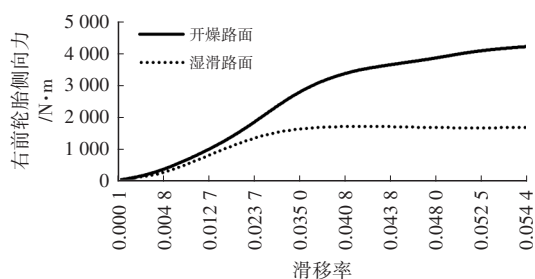


图10 U1和U3滑移率-轮胎侧向力对比

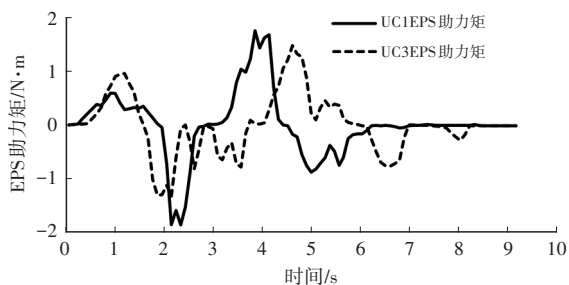


图11 U1和U3 EPS电机助力矩对比

4 结束语

基于场景的分析和测评已经成为自动驾驶汽车及其零部件产品开发的主要手段。本文在场景机理建模基础上,提出了基于场景域的SOTIF场景分析方法,并创建了EPS系统SOTIF场景案例。同时,又自主开发了驾驶员在环系统,利用半实物仿真技术兼并仿真和实车路试的优势,高效而精确地实现闭环驾驶环境,支持SOTIF场景客观分析、扩展和优化。当前的

研究边界特征提取仍然不全面,车辆其他关联零部件的仿真模型特征提取仍然在进行中,未来还将会研究耦合性更复杂的驾驶工况,扩展出更多的EPS系统SOTIF场景。

参考文献

- [1] 刘逸恒. 基于预期功能安全的AEB系统设计与验证[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [2] 白先旭, 左瑜, 李维汉, 等. 自动紧急制动系统控制模块的SOTIF量化评价[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1655-1665.
- [3] 余卓平, 邢星宇, 陈君毅. 自动驾驶汽车测试技术与应用进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 542-543.
- [4] 尚世亮, 崔海峰, 郭梦鸽, 等. 自动化测试在SOTIF开发中的应用[J]. 汽车技术, 2018 (11): 23-26.
- [5] 陆俊文, 高立臣, 黄伟, 等. 一种多功能汽车转向系统在环测试试验台: ZL202223208540.8[P]. 2023-06-16.
- [6] 高立臣, 陆俊文, 黄伟. 一种手自一体转向输入装置: ZL202322789716.1[P]. 2024-05-17.
- [7] 吴思宇, 于文浩, 邢星宇, 等. 基于关键场景的预期功能安全双闭环测试验证方法[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1586-1589.
- [8] 邓伟文, 李江坤, 任秉韬, 等. 面向自动驾驶的仿真场景自动生成方法综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 319-321.
- [9] ISO. Road Vehicles—Safety of the Intended Functionality: ISO 21448: 2022 [S/OL]. (2022-06)[2025-05-22]. <https://www.iso.org/standard/77490.html>.
- [10] 陆俊文, 李斌. 基于ASAM标准的半实物仿真测试系统设计与实现[J]. 上海汽车, 2020(5): 38-43.
- [11] 周精浩, 冯军, 徐明, 等. 电动助力转向系统力学特性的研究[J]. 汽车零部件, 2023(1): 36-40.
- [12] 郭猛. 汽车前轮定位参数分析与优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 汽车操纵稳定性试验方法: GB/T 6323—2014 [S/OL]. (2024-02-19)[2025-05-22]. <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D7F03FD3A7E05397BE0A0AB82A>.

(责任编辑 明慧)