

Tests and evaluations on Lane Departure Warning System and Lane Keeping Assist System based on driving simulator

Zhou Pengfei, Zhu Xichan, Ma Zhixiong, Li lin, Liu Xingliang

School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, China, 201804

Email: zpfzpf2010@126.com

Abstract: In the first place, this paper concludes and compares testing regulations on Lane Departure Warning System and Lane Keeping Assist System from different countries and organizations; After that, the steps of evaluating all products of Advanced Driver Assistant System are introduced, which plays a dominant role in evaluation system; In the last place, this paper provides an overall and detailed evaluation on Lane Departure Warning System and Lane Keeping Assist System based on driving simulator according to physical evaluation, mental evaluation, margin evaluation and subjective evaluation, which will provide an evaluation method for enterprises to develop Lane Departure Warning System products effectively.

Keywords: Driving simulator, LDW/LKA, Physical evaluation, Subjective evaluation.

基于驾驶模拟器的 LDW/LKA 测试评价方法研究

周鹏飞, 朱西产, 马志雄, 李霖, 刘兴亮

同济大学汽车学院, 上海, 中国, 201804

Email: zpfzpf2010@126.com

摘要: 本文首先总结对比各国对车道偏离警示系统 LDW (Lane Departure Warning) 和车道保持辅助系统 LKA (Lane Keeping Assist) 的法规测试标准; 在此基础上, 接着阐述了所有高级驾驶辅助 ADAS (Advanced Driver Assistant System) 产品的测试评价流程; 最后基于驾驶模拟器, 详细提出了从物理评价、心理评价、安全裕度评价和主观评价等四个方面综合评价 LDW/LKA 产品, 为企业开发产品提供测试评价思路。

关键词: 驾驶模拟器; LDW/LKA; 物理评价; 主观评价

1 引言

近年来高速公路上由于驾驶员过度疲劳、疏忽或突发疾病, 使车辆偏离车道造成重大交通事故的比例逐年增长。因此研究车道偏离预警系统, 辅助驾驶员在单调驾驶环境如高速公路中保持车辆在车道内行驶, 成为国内外的研究重点^[1]。

LDW 是车道偏离警示系统(Lane Departure Warning)的缩写, 车道偏离警示系统通过在中控台上的一个按钮被激活, 如果驾驶员在行车过程中跨越原来的车道, 但没有转向的操作(如打转向灯), 该系统会发出轻微的警示音。LKA 是车道保持辅助系统 (Lane Keeping Assist) 的简称, 这个系统的功能是驾驶者没有打转向灯的情况下并线, 或者非主动并线时, 系统就会对车辆进行调整, 以保持车辆行驶在原行车线上。常见的 LDW/LKA 警报形式有声音、方向盘的振动、方向盘的回正力、安全带的缩紧等。如图 1 所示。

如何评价这些 LDW 和 LKA 系统性能的优劣, 帮助用户在购车时做出选择, 并为研发提供改进依据, 成为了一个关键问题。本论文将基于驾驶模拟器, 建立起一套全面评价 LDW/LKA 的综合测试评价方法。

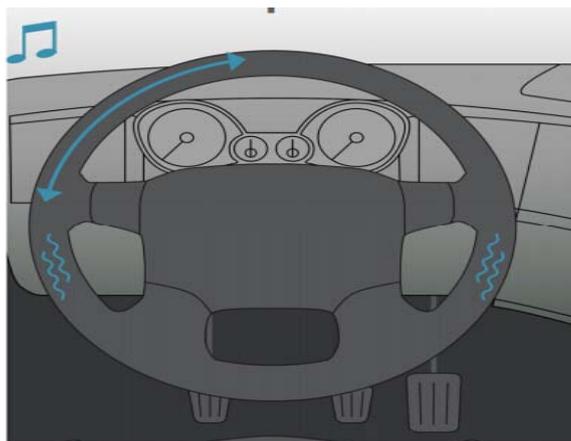


Figure 1. LDW's alarm form
图 1. LDW 的警报形式

2 LDW/LKA 的法规测试

在对 LDW 和 LKA 进行综合评价时,首先要综合阐述各国对 LDW 的法规测试方法,因为车辆必须通过 LDW 的测试法规,进行之后的评价才显得有意义。LDW 的检测方法主要来自三部分,包括美国高速公路安全管理局 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)、GB 和 ISO,其中 GB 主要参照 ISO 制定的标准,两者内容相近。

GB 和 ISO 针对 LDW 的测试,要进行两种不同曲率半径的弯道测试,要求车辆至少在一种情况下报警。其中弯道测试共有 2(种不同弯道半径)×2(左、右转弯)×2(左、右偏离)=8 种测试场景;直道可重复性测试有 2 种(左、右转弯)测试场景;虚警测试有 1 种场景,因此共提供了 11 种测试场景。

NHTSA 针对 LDW 的测试,主要测试了 LDW 系统对不同车道线的识别能力,要求对三种车道线(白色连续实线,黄色不连续虚线,凸起的不连续人行道标记)进行测试。因此,直道测试应有 3×2(左、右偏离)=6 种场景。

2.1 GB/ISO 针对 LDW 的测试方法^[2]

此测试要求在干燥、平整、坚实的路面上进行。如果路面有不规则的表面,如坑、大裂缝等,则不适合进行测试,因为会影响测试结果。同时,针对测试的条件,周围环境温度应在 0℃到 38℃之间,最大风速不大于 35km/h,测试不应在极端天气情况(雨、雪、雾、冰雹等)下进行。总体测试具体分为弯道测试、可重复性测试和虚警测试等三种。

2.1.1 弯道报警测试

弯道报警测试,主要测试 LDW 对弯道的适应能力。当测试车辆进入测试车道跟踪行驶并且达到稳定状态后,车辆可以向弯道内侧和外侧逐渐偏离。车辆速度由弯道半径确定,分为两类。车辆以 20 m/s 和 17 m/s 的速度分别在两种不同曲率半径(500 m 和 250 m)的弯道测试,侧向偏离速度在 0—0.4 m/s 和 0.4—0.8 m/s 两组速度组合下,要求车辆至少在一种情况下报警,则测试通过。

报警产生测试的评价标准是:在每次测试中,系统应保证车辆在越过最早的报警线之后,未越过最迟报警线之前发出报警。

Table 1. Classification of curve test radius
表 1.弯道测试半径分类情况

参数分类	I	II
曲率半径	500m	250m
车辆测试速度	20-22m/s	17-19m/s

Table 2. Classification of corner test
表 2. 弯道测试左右分类情况

偏离速度	左转弯		右转弯	
	向左偏离	向右偏离	向左偏离	向右偏离
0.0 m/s-0.4 m/s	测试一次	测试一次	测试一次	测试一次
0.4 m/s-0.8 m/s	测试一次	测试一次	测试一次	测试一次

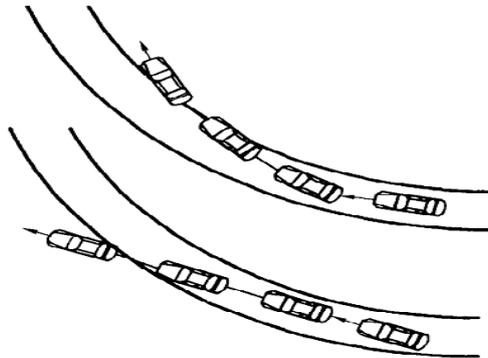


Figure 2. Diagram of bend test

图 2. 弯道测试示意图

2.1.2 可重复性测试

可重复性测试是指在给定的相同条件范围内，系统能重复发出报警的能力。该测试应该在一段直线路段进行。车辆速度控制在 20-22m/s（在 2.1.1 测试中 I 型情况报警）或 17-19m/s（在 2.1.1 测试中 II 型情况报警），进行如下 16 次测试。车辆可以沿着车道中央行驶，或者靠近与车辆即将偏离越过车道标识想对应的另一侧车道行驶。例如，如果将要向车道右侧偏离，则车辆可以沿着左侧的车道标识行驶，反之亦然，如图 3 所示。

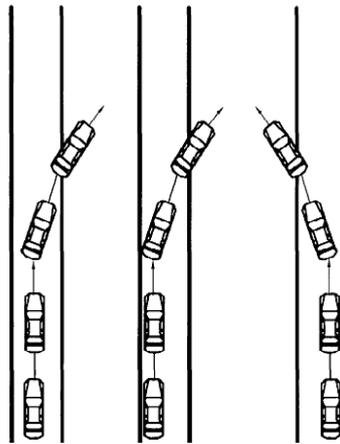


Figure 3. Direct path repeatability test

图 3. 直道可重复性测试

可重复性测试的评价标准是：对于每一个测试组，系统报警临界线应该始终位于一个 0.3m 宽的固定区域内。当车辆位于报警临界线设置区域外时，系统应该不发出报警。

2.1.3 虚警测试

测试车道为直道，在总长为 1000 米的直道进行测试，当车辆在非报警区域行驶时，系统应不发出报警，并记录系统报警情况。

评价标准是：当车辆位于左右两条最早报警线之间（即非报警区域）时，系统不应该发出报警。直道可重复性测试如表 3 所示。

Table 3. Direct path repeatability test
表 3.直道可重复性测试

偏离速度	偏离方向	
	左	右
0.1m/s < (V1 ± 0.05) ≤ 0.3m/s	第一组测试 4 次	第二组测试 4 次
0.6m/s < (V1 ± 0.05) ≤ 0.8m/s	第三组测试 4 次	第四组测试 4 次

2.2 NHTSA 针对 LDW 和 LKA 的测试方法^[3]

此测试也应在干燥、平整、坚实的路面上进行。如果路面有不规则的表面，如坑、大裂缝等，则不适合进行测试，因为会影响测试结果。车道线的宽度应该在 10 到 15cm 之间。测试使用三种车道线：白色连续实线，黄色不连续虚线，和凸起的不连续人行道标记。

关于测试环境条件，周围环境温度应在 0°C 到 38°C 之间，最大风速不大于 35km/h。

针对 LDW 测试时，车辆纵向车速为 72 km/h (20 m/s)，低侧向速度定义为相对于车道线的车道偏离速度为 0.1-0.6m/s，目标侧向速度 0.5m/s。针对 LKA 测试，在直道上进行测试，本车车速控制在 72 ± 2km/h，偏离速度从 0.5m/s 开始，并每次以 0.5-0.6m/s 的大小叠加，直达 LKA 无法避免车道偏离为止。LDW 和 LKA 直道测试如表 4、表 5 所示。

Table 4. LDW's straight road test
表 4.LDW 直道测试

车道类型	侧向速度	线型	偏离方向	测试次数
直线	低	实线	左	5
			右	5
		虚线	左	5
			右	5
		凸起标记	左	5
			右	5

Table 5. LKA's straight road test
表 5.LKA 直道测试

车道类型	侧向速度	线型	偏离方向	测试次数
直线	低	实线	左	5
			右	5
直线	迭代增加	实线	左	10
			右	10

LDW 的每一个测试的评价标准是：测试速度和横摆角速度有效性必须得到满足；在 LDW 发出警告时刻车辆的侧向速度应该在 0.1-0.6m/s 之间；LDW 在离车道线距离大于 0.75m 时不能发出警告；LDW 发出警告的时间必须在越过车道线 0.3m 之前。

总结，如果 LDW 系统在离车道线 0.75m 到越过车道线 0.3m 的区域内没有发出警告，认为 LDW 无效。

3 ADAS 产品整体评价思路^[4]

高级驾驶辅助 (Advanced Driver Assistant System) 简称 ADAS，是利用安装于车上的各式各样的传感器，在第一时间收集车内外的环境数据，进行静、动态物体的辨识、侦测与追踪等技术上的处理，从而能够让驾驶者在最快的时间察觉可能发生的危险，以引起注意和提高安全性的主动安全技术。

从整个层面来讲，可以说 ADAS 所有产品的测试评价，总体根据以下三个层面来研究：1.安全收益评价、2.用户相关评价、3.技术评价。具体来看的话，其中安全收益评价主要是基于驾驶员行为及道路环境研究项目 FOT (Field Operational Tests) 来评价，而用户相关评价和技术评价则可以用驾驶模拟器来评价。而从评价思路来说，任何一个 ADAS 产品，都有以下的评价过程：从 1.系统及功能的定义→2.确定目标场景→3.相应的用户工况→4.测试的评价方法→5.采用的测试工具→6.关键的性能指标。

也就是说，针对所有的 ADAS 产品评价，首先提出研究问题；然后针对这个研究问题，提出一个相对应的研究假设；接着根据假设，提出相应的性能指标；然后通过进行测试，检验这个性能指标；最终根据性能指标

做出综合评价。以上属于 ADAS 产品的评价总体思路。

4 基于驾驶模拟器的 LDW/LKA 测试评价方法研究^[5]

上面只是阐述了 ADAS 产品的整体评价思路过程，但如果运用到驾驶模拟器上面评价的话，需要在此基础上更加细化才行。总的来说大致分为以下流程：1.提出研究问题→2.提出假设→3.定义性能指标→4.制定数据采集方案→5.制定测试方案→6.执行测试→7.计算性能指标→8.检验假设→9.分析研究问题。需要强调的是，这九个步骤始终贯穿在驾驶模拟器上面的 LDW/LKA 的测试评价体系中。

基于驾驶模拟器的 LDW/LKA 测试评价方法研究，是从物理评价，心理评价，安全裕度评价和主观评价等四个方面来综合评价。无论是物理评价、心理评价、安全裕度评价还是主观评价，都遵循上述的评价流程。因为四方面评价内容流程一致，所以本论文只重点详细阐述物理评价的每一部分，其他心理评价、安全裕度评价和主观评价等只阐述与物理评价存在差异的地方，不再赘述。

4.1 物理评价^{[6][7][8][9][10]}

物理评价是针对 LDW/LKA 最基本的评价，主要是针对车辆本身的一些参数等，具体评价思路如表 6 所示。

Table 6. LDW/LKA physical evaluation process
表 6.LDW/LKA 物理评价流程

评价流程	详细说明
1.研究问题	两种 LKA 方案下驾驶员的车道保持行为是否存在差异？
2.假设	采用两种 LKA 时驾驶员的车道保持行为不存在差异（零假设）
3.定义性能指标	相对于车道中心线的侧向距离标差，在车道内的平均侧向位置
4.制定测量方案	车辆质心坐标，车道线坐标
5.制定测试方案	驾驶模拟器测试，24 名驾驶员分为两（对比组和测试组），确定测试场景举例如下：场景 1：直道，小雨，连续车道线，纵向速度：65km/h，横向速度：0.2km/h。场景 2：弯道（曲率 R=250m），断续车道线，晴朗，纵向速度：65km/h，横向速度：0.2km/h
6.执行测试	通过视频监控驾驶员的操作，不干扰驾驶员的驾驶行为
7.计算性能指标	相对于车道中心线的侧向距离标差，在车道内的平均侧向位置
8.检验假设	统计检验（t 检验）
9.分析研究问题	零假设成立，不存在差异；否则存在差异

针对物理评价表 6 所示的每一项，接下来做具体的分析。

4.1.1 研究问题

要想针对性的提出研究问题，主要从两个方面来考虑，一个是考虑目标场景，另一个是考虑系统本身功能。研究问题举例如下：两种 LKA 方案下驾驶员的车道保持行为是否存在差异？

4.1.2 提出假设

根据研究问题提出假设，假设一般分为零假设和备选假设。零假设（Null Hypotheses）： $A=B$ ；备选假设（Alternative Hypotheses）： $A \neq B/A > B/A < B$ 。需要强调的一点是，在驾驶模拟器中，我们一般采用零假设，零假设举例如下：在分别使用 LDW 预警方案一和方案二时，驾驶员在无意识偏离车道工况中的反应没有差异。

4.1.3 定义性能指标

定义性能指标主要是根据假设来确定，假设是什么样的，性能指标就应该是怎样的，具有相互配对性。根据分析可定义 LDW 和 LKA 常用的性能指标有：跨越车道线的时间 TLC(Time to collisions)，其中 TLC=侧向相对距离/侧向相对速度；最小 TLC,就是驾驶员在马上要跨越车道线的时候，需要回正的最小时间；与车道线的侧向距离；最大侧向偏移距离；驾驶员反应时间等等。

4.1.4 制定数据的采集方案

在驾驶模拟器上面，数据的主要来源是：模拟器直接输出，视频分析（任何驾驶模拟器都是有视频监控的），问卷调查，人工记录，眼动仪等。根据性能指标确定数据采集方案，具体举例：计算 TLC 需要确定与车道线的侧向距离及相对于车道线的侧向速度，因此需要采集车辆质心坐标、车道线坐标、车辆速度。

4.1.5 制定测试方案

制定测试方案，是很关键的一部分，需要根据研究问题决定。而需要注意的是，针对受试者群体和样本量的选择，也是很重要的。一般而言，对于 LDW、LKA 这类 ADAS 系统的评价，受试者群体应该选择普通驾驶员。同时受试者样本量必须保证测试得到的实验数据具有统计显著性，一般要求至少 20 名受试者。并且考虑数据失效的可能性，这是因为有可能测试时部分数据采集不上，有些驾驶员用驾驶模拟器还会犯晕。同时如果驾驶员特征（如年龄、性别等）为因变量，则受试者样本量成倍增大。因为需要考核驾驶员的指标越多，则因变量越多，样本量也就越多。

4.1.6 执行测试

在执行测试的时候，需要检查驾驶模拟器及数据采集是否工作正常；对受试者提前进行测试介绍；让受试者填写问卷了解受试者基本信息及对系统的初步印象；让受试者进行测试，测试过程中做好视频记录；测试完成后让受试者填写主观问卷让受试者回答规定问题。

4.1.7 假设检验

在执行测试完成之后，根据数据采集方案获得想对应的数据，以此来计算性能指标，最终通过统计分析进行检验。

需要补充的是，驾驶模拟器获得的数据必须通过统计学方法进行检验，这是为了避免偶然因素对结果造成影响。检验方法一般包括：T 检验，多元方差分析。其中 T 检验用于两组数据之间差异的检验；多元方差分析用于三组或三组以上数据差异的检验。根据统计学检验结果，若差异显著，则拒绝“驾驶员在无意识偏离车道工况中的反应没有差异”的零假设，接收备选假设。T 检验是用 T 分布理论来推论差异发生的概率，从而比较两个平均数的差异是否显著，一般显著性水品取 0.05，也有采用 0.1。

4.1.8 计算性能指标

计算相对于车道中心线的侧向距离标准差，在车道内的平均侧向位置等性能指标。

4.1.9 分析研究问题

根据计算的性能指标测试结果，分析研究问题，对系统性能进行评价。通常情况下，测试中可能会出现一些非期望效应，此时需要分析出现的原因和改进的方法。

总结：上述九个步骤，只是针对物理评价其中的一个研究问题“两种 LKA 方案下驾驶员的车道保持行为是否存在差异？”进行评价，物理评价还有很多研究问题，部分物理评价问题及相关指标如表格 7 所示。

Table 7. Other questions and hypotheses about physical evaluation
表 7.物理评价其他问题及假设

其他问题假设	相关指标
使用不同产商 LDW, 车道偏离错误报警的次数有差异	车道偏离错误报警的次数, 车道偏离错误报警的百分比
使用不同厂商 LDW, 车辆越界时间存在差异	前轮坐标, 车道线坐标, 侧向速度
使用不同产商 LDW, 驾驶员都有足够的时间来反应	越界时间 TLC, 驾驶员反应时间
在雨天和晴朗天气条件下, LDW 的表现存在差异	雨天条件下, 警报正确次数及百分比; 晴朗天气下, 警报正确次数及百分比
重复在同一种场景下测试 LDW, 驾驶员反应时间会提高。	收到警告后到方向盘开始回正的反应时间、方形盘回正时间

4.2 心理评价

本质上，心理评价和物理评价的整体思路一样，也是遵从以下评价思路：1.提出研究问题→2.提出假设→3.定义性能指标→4.定义数据的采集方案→5.制定测试方案→6.执行测试→7.计算性能指标→8.检验假设→9.分析研究问题。在物理评价中已经详述此评价思路，心理评价思路可以同理分析出，此处不再赘述。

区别是：心理评价的性能指标跟物理评价指标完全不同，心理评价主要考虑驾驶员的精神状态。心理评价的指标有：初始任务负荷指数 RTLX (Raw Task Load Index)，RSME 评测表(Rating Scale Mental Effort)，NASA 任务负荷指数 NASA Task Load Index (NASA-TLX)。其中 NASA-TLX 涉及的参数有劳动力，完成任务时的紧急程度，完成任务时的表现，完成任务时付出的努力。

心理评价的指标其实涉及多方面参数，为了更好的进行心理评价，可以用的参数有脑电图，眼电图，眨眼频率，呼吸速率，血压，耗氧量，心电图，心率变异性等，甚至皮肤上特殊部位的肌电图等^{[11][12]}

其中研究最多的，影响最大的目前仍然是脑电图。在很多早期的研究中，从脑电图中获得信息是相当有限的，这主要是因为用于取样的头皮位点太少，随着技术的进步，现在的睡眠脑电和睡眠分期的研究已经达到了比较成熟的阶段。这样一来，就大大增加了脑电图在驾驶员面对车道偏离警告时的研究价值。脑电图中主要有四种节律波 α ， β ， θ ， δ ，如图 4 所示，各波形的频率范围分别是 α :0-3.5Hz; β :4-7.5Hz; θ :8-13Hz; δ :13Hz。在心理评价中，脑电图已经是最广泛采用的用于评定中枢神经系统变化的指标之一。

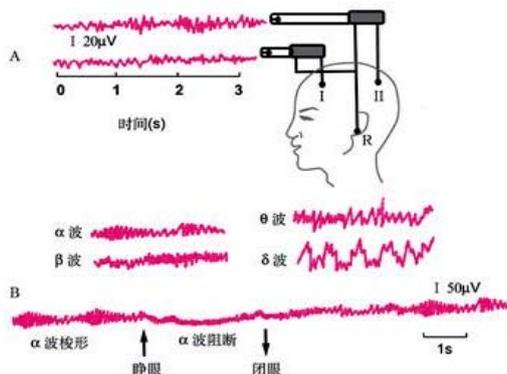


Figure 4. EEG signal
图 4.脑电图示意图

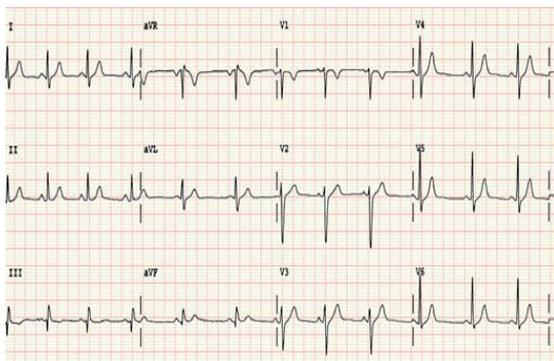


Figure 5. ECG signal
图 5.心电图示意图

心电图也是进行心理评价的指标之一，当驾驶员疲劳注意力分散时，心率会降低，而心率变异性则会增加。通过分析驾驶员的心率和心率变异性，则基本可以判断驾驶员面对 LDW/LKA 警报时的心理状态。

4.3 安全裕度评价

安全裕度的评价，主要是分析驾驶员的视线状态和分配情况。安全评价和物理评价的整体思路一样，也是遵从上述评价思路，安全裕度评价思路可以同理分析出，此处不再赘述。



Figure 6. The driver's head is on the simulator and the test is carried out
图 6.驾驶员头戴眼动仪, 在模拟器上面进行测试



Figure 7. Front illumination of the eye tracking system
图 7.眼动仪的正面照

2009 年 Anup Doshi 等人根据真实状态下驾驶人头部和眼动行为特征,将驾驶人前方视野区域划分为道路 5, 左视 3, 右视 1, 左右后视镜 6 和 4, 内视镜 8, 左右视线过肩区域 9 和 7, 仪表盘 2 九个注视区域^[13],如图 8 所示。



Figure 8. Division of the visual area of the driver by Doshi Anup
图 8.Anup Doshi 对驾驶人视野区域的划分

需要补充说明的是,除了眼动仪之外,还有眼电图的分析来辅助安全裕度的评价。眼电图也是分析驾驶员行为的一种方法,由于眼睛和大脑之间有着丰富的感觉运动联系,因此,眼动能够提供有关困倦的,有价值的警告标识,可以被用于工作负荷的测量,尤其是驾驶条件下的工作负荷。虽然眼电图这种评估方法很有潜力,但是对于这方面的研究仍然处于起步阶段,还有待于更加深入的分析研究。

4.4 主观评价^{[14][15][16]}

主观评价的整体思路和物理评价一样,只是性能指标改成问卷调查,其他都类似,评价流程不再赘述。针对问卷调查的设计,截止到目前为止,相对科学的主观评价方法是 Van Der Laan 打分表。经过主成分分

析, 主观评价打分表主要由“可用性”和“用户满意度”两部分组成, 其中可用性的性能指标和用户满意度的性能指标分别如表 8、表 9 所示。最终根据打分情况, 来得出用户对 LDW/LKA 系统的主观感受情况。

Table 8. LDW's usability rating scale
表 8.LDW 可用性打分表

LDW 可用性性能指标	打分	打分说明
不实用	实用	第一列“不实用”为-2
不好	好	分, 第二列“实用”为 2
多余	有效	分, 以此类推, 间隔为 1
无用	有帮助	分, 从-2, -1, 0, 1, 2
引人入睡	提高警惕	这五个分数选择打分

Table 9. LDW's user satisfaction rating scale
表 9.LDW 用户满意度打分表

LDW 用户满意度性能指标	打分	打分说明
令人不愉悦	令人愉悦	第一列“令人不愉悦”
令人反感	令人喜欢	为-2分, 第二列“令人
讨厌的	可爱	愉悦的”为 2 分, 以此
不合乎期待	合乎期待	类推, 间隔为 1 分, 从
		-2, -1, 0, 1, 2 这五个
		分数选择打分

除了 Van Der Laan 打分表之外, 还有其他可供参考的问卷调查如表。

Table 10. Subjective evaluation of other reference questions
表 10.主观评价其他参考问卷问题

问题	选项说明
您开车时, 一个月几次无意识的离开车道?	A:从不 B:一两次 C:两三次 D: 50-100 次 E:非常频繁
您有没有遇到过 LDW 误报的情况? 如果有的话, 误报一般发生在什么情况下呢? 您是如何反应的?	面对误报, 驾驶员的反应一般有减速、更专注于路面、试图找出误报的原因
总体来看, 您认为 LDW 是有用的吗? 您一般认为 LDW 在什么情况下有用呢?	有用的情况举例如下: 夜间行驶, 开车打电话时等
您为关闭 LDW 这一功能吗? 如果会的话, 您会在什么时候关闭 LDW 功能?	防止打扰睡觉的乘客, 下暴雨的时候
随着 LDW 体验的增加, 您是如何反应的?	如果警告是正确的话, 以后面对 LDW, 会更信任, 会变得很习惯
您认为 LDW 会让您成为一个安全的驾驶员吗?	比如说驾驶安全的意识是否提高, 是否会更注意转向灯的使用, 是否会更注意速度, 更谨慎
您认为 LDW 改变了您哪些驾驶行为?	开车打手机的行为增加了, 对相向行驶过来的汽车是否会进入本车的车道更敏感。

5 综合总结

基于驾驶模拟器的 LDW/LKA 测试评价研究, 是综合物理评价、心理评价、安全裕度评价和用户主观评价的, 并不能仅凭一个评价就能说明的。综合评价存在以下公式,

$$M = \sum_{i=1}^{n=4} X_i P_i$$

X_i ($i=1,2,3,4$) 分别表示物理评价、心理评价、安全裕度评价和主观评价等在整个 LDW/LKA 系统中的权重系数, 这个暂时并没有固定的权重系数, 需要根据企业重视哪种评价而确定, 还有待后续的研究; P_i ($i=1,2,3,4$) 分别表示物理评价、心理评价、安全裕度评价和主观评价的相对得分。最终基于驾驶模拟器上面的 LDW/LKA 的测试评价得分 M, 是结合各权重系数和各评价得分综合而得, 从而为企业开 LDW/LKA 产品提供依据。

致 谢

感谢我的导师朱西产老师给我提供课题项目, 给我提供建议, 感谢马志雄老师, 李霖师兄, 刘兴亮师兄给我的耐心指导。

参考文献

- [1] Dong Yinping, *A review of Lane Departure Warning Highway System*, Journal of Changchun University of Science and Technology, Mar. 2004: Vol. 27 No. 1
(董因平. 高速汽车车道偏离预警系统研究. 长春理工大学学报, 2004年, 卷 27, 期 1: 1-2 页)
- [2] GB/T 26773-2011, *Intelligent transport systems-Lane departure warning systems-Performance requirements and test procedures*, Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2011
(GBT 26773-2011 智能运输系统-车道偏离报警系统-性能要求与检测方法. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2011年)
- [3] National Highway Traffic Safety Administration, *Lane Departure Warning System Confirmation Test And Lane Keeping Support Performance Documentation*, 2013: 23-26
- [4] Freek Faber, TNO, *Analysis methods for user related aspects and impact assessment on traffic safety, traffic efficiency and environment*, euro-FOT Consortium 2011
- [5] Ishida S, Gayko J E. *Development, evaluation and introduction of a lane keeping assistance system*[C]/Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE. IEEE, 2004: 943-944.
- [6] LeBlanc D. *Road departure crash warning system field operational test: methodology and results*. volume 1: technical report[J]. 2006.
- [7] Visvikis C, Smith T L, Pitcher M, et al. *Study on lane departure warning and lane change assistant systems*[J]. Transpor Research Laboratory, Tech. Rep., November, 2008.
- [8] Taubel G, Yang J S. *A lane departure warning system based on the integration of the optical flow and Hough transform methods*. *Control and Automation (ICCA)*, 2013 10th IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 1352-1357.
- [9] Eriksson L, Bolling A, Alm T, et al. *Driver acceptance and performance with LDW and rumble strips assistance in unintentional lane departures*[J]. 2013.
- [10] Forkenbrock G J, Barickman F S. *Lane departure warning (LDW) performance evaluation*[J]. National Highway Traffic Safety Administration, 2009.
- [11] Xiang Wang, Yan Xuedong. *Applications of a driving simulator in influential factors of driving behavior and psychology*, Shangdong Science, 2013. Vol. 26 No. 6
(向往, 闫学东, 王江锋. 驾驶模拟器在驾驶行为和心理影响因素研究方面的应用[J]. 山东科学, 2013, 26(6): 69-76.)
- [12] Jiang Zhaohui, Xiong Jin, *The Experimental Study on Driving Fatigue Based on Driving Simulator*, Chinese Journal of Biomedical Engineering 2008, Vol. 27 No. 6
(江朝晖, 熊进, . 基于模拟座舱的驾驶疲劳实验研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2008, 27(6): 832-837.)
- [13] Doshi A, Trivedi M M. *On the roles of eye gaze and head dynamics in predicting driver's intent to change lanes*[J]. *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Transactions on, 2009, 10(3): 453-462.
- [14] N. Harish and D. LeBlanc. *Advanced Crash Avoidance Technologies Program. National Highway Traffic Safety Administration*. 2010: 129-149.
- [15] David Sanchez, Eva Garcia. *Final results: User acceptance and user-related aspects, European Large-Scale Field Operational Tests on In-Vehicle Systems*, 2012: 84-94.
- [16] LeBlanc, Sayer. *Road Departure Crash Warning System Field Operational Test: Methodology and Results*. *The University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI)*, 2006: 275-287