

认知负荷视角下的商用车AR-HUD研究

Study on commercial vehicle AR-HUD from the perspective of cognitive load

高 曷 西安理工大学 上海工程技术大学
朱志欣 尹庆华 安书含 西安理工大学

【摘要】基于认知负荷理论,探讨了商用车增强现实抬头显示器(AR-HUD)的设计优化与实践。通过对商用车人机交互(HMI)的深入研究与分析,构建了乘用车现有AR-HUD显示布局,并提出了一种适用于商用车的新型AR-HUD布局(PT-HUD)。依据认知负荷理论的核心原理,提出商用车AR-HUD的优化策略,并开展了设计实践。研究结果为未来的商用车AR-HUD布局设计提供了理论依据和实践参考,具有重要的学术价值和应用意义。

【关键词】AR-HUD; 认知负荷理论; 商用车; 人机交互(HMI); 增强现实; HUD布局设计

[Abstract] Based on cognitive load theory, the design optimization and practices of augmented reality head-up displays (AR-HUDs) for commercial vehicles were investigated. Through in-depth research and analysis of human-machine interaction (HMI) in commercial vehicles, the existing AR-HUD display layouts for passenger vehicles were constructed, and a novel AR-HUD layout (PT-HUD) specifically designed for commercial vehicles was proposed. Grounded in the core principles of cognitive load theory, optimization strategies for commercial vehicle AR-HUDs were developed and implemented in design practices. The research findings provided theoretical and practical references for future commercial vehicle AR-HUD layout designs, holding significant academic and practical value.

[Key words] AR-HUD; cognitive load theory; commercial vehicles; human-machine interaction (HMI); augmented reality; HUD layout design

0 前言

商用车作为国民经济的重要组成部分,其安全性与高效性引起了广泛关注。近年来,随着高级辅助驾驶系统(ADAS)与增强现实抬头显示器(AR-HUD)技术的迅速发展,商用车的智能化水平得到显著提升。值得注意的是,2024年上半年,乘用车领域的AR-HUD前装标配搭载比例已突破25%,这一数据不仅反映了市场对该技术的高度认可,也预示着AR-HUD将成为商用车ADAS系统中关键的人机交互界面。其显示界面设计直接影响驾驶安全效能与用户体验。

1 认知负荷理论与AR-HUD

1.1 认知负荷理论

Paas将认知负荷分为内在认知负荷(intrinsic load)、外在认知负荷(extraneous load)以及相关认知负荷(germane load)3个部分^[1]。在商用车领域,通过减少内在认知负荷、优化外在认知负荷的处理、提升相关认知负荷的效应,并结合多模态主客观协同预测认知负荷^[2],抬头显示器(HUD)可以在不影响安全性和效率的前提下,显著改善用户体验。

1.2 AR-HUD

HUD经过从传统组合式抬头显示器(C-HUD)到风挡式抬头显示器(W-HUD)再到AR-HUD的迭代升级,AR-HUD通过传感器融合与车联网数据实现了“人—车—环境”的沉浸式交互^[3]。在CES2025上,视

平线全景显示(P-HUD)成为行业新趋势。值得注意的是,Maxell公司曾研发了一款适用于商用车的HUD产品(T-HUD)。该产品通过与ADAS设备及导航信息相结合,将车辆盲区信息通过HUD显示,从而有效降低驾驶员的认知负担。

2 商用车PT-HUD显示内容探究

2.1 乘用车AR-HUD案例分析

乘用车AR-HUD代表了其民用技术的最高水平。本研究分析了几款典型乘用车AR-HUD的信息布局。从简化的信息界面来看,主要由AR动态箭头、车辆基础信息、地图、车道引导、路况几个板块构成;宝马P-HUD由实时AR导航和车辆基本信息及自定义信息构成,见图1。基于此,本研究对商用车AR-HUD进行相似性整合设计,即结合P-HUD的先进性和常规AR-HUD布局为商用车进行AR-HUD设计。

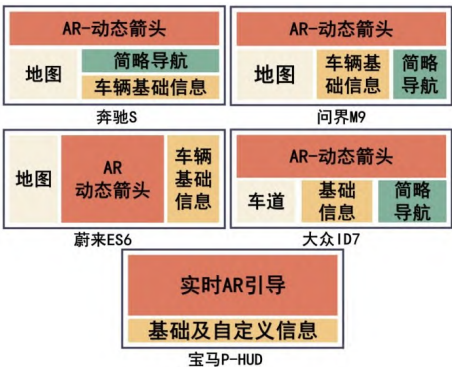


图1 乘用车信息分布

2.2 商用车HMI案例分析

商用车的人机界面(HMI)设计是驾驶员与车辆系统交互的核心载体。考虑到操作可靠性和驾驶安全性,商用车AR-HUD与物理控制两者之间的关系是结合非替代关系。因此,在商用车HUD设计中,物理按键和控制器应予以保留,同时将相关信息集成到HUD上。这种设计可降低驾驶员视线偏离前方路面、低头查看中控信息的操作风险。部分仅须知晓开关状态的信息应放置在视线高显度区域,P-HUD符合放置要求。商用车中控信息总结见表1。

表1 中控信息

类别	内容
安全	紧急停车、手刹、警示灯
驾驶辅助	LDW、DAS、ACC、ESP、FCW、TCS、行人碰撞、导航、坡道辅助、自动启停
舒适性	音乐、音量、电话、温度、风速、空调
手拨控制	转向灯、远近光灯、雨刮器、档位

乘用车车头较长,驾驶员坐姿较低,视线与前方发动机盖形成盲区,利用此盲区进行自定义的P-HUD是合理的。商用车前风挡近乎垂直且驾驶视野开阔,若直接移植乘用车P-HUD结构,其显示区域会与车辆前方视野重叠,导致关键路况观测缺失,增加安全隐患。因此,商用车视平线全景显示器应放置在挡风玻璃上方,以避免与驾驶视野重叠。

本研究基于P-HUD和商用车T-HUD,提出了一种适用于商用车的第二代AR-HUD商用车驾驶模式:PT-HUD(panoramic&truck head up display),其布局为上方视平线全景显示,下方AR-HUD显示区域结合,见图2。



图2 商用车PT-HUD布局

2.3 驾驶员用户旅途研究

采用用户旅途法对商用车驾驶员多个关键阶段的使用习惯和需求进行研究。

- 车辆启动前:全面检查车辆并规划行程。
- 行驶中:监控驾驶操作与货物状态。
- 停车休息时:寻找合适停车场,休息后再次检查车辆。
- 运输任务完成交货阶段:准备好货物及单据,完

成交接。

表2 驾驶员需求信息概要

类别	需求
核心	车速、转速、水温、续航
警报	自动驾驶接管、车门、胎压
安全	超速、碰撞、信号灯
出行	导航、路况
车辆状态	档位、空调
生活	便利、停车场
办公	通讯、运输、文档、车队
货物	温度、摆放、警报
娱乐	电台、音乐、视频、电影

2.4 商用车常规AR-HUD信息汇总

结合乘用车AR-HUD的信息内容及用户旅途研究,本研究提出了商用车AR-HUD信息界面架构,见图3。



图3 商用车AR-HUD信息界面架构

2.5 信息重要度问卷研究

为优化驾驶员使用AR-HUD时的认知负荷水平,对前文提及的架构开展信息优先级评估。经过预调研优化后形成正式问卷,并对152名驾驶员进行Likert量表调查,运用T检验与因子分析筛选关键变量,结合SPSS26.0统计分析,结果如下:

各项变量的均值在3.61~4.35,表明驾驶员对不同信息的需求程度有所不同。核心信息、安全信息、警报信息的均值分别为4.35、4.32、4.22,在AR-HUD设计时应优先显示;车辆状态、出行信息、货物安全的均值分别为4.16、4.07、3.91,应编排在重要信息周围;生活信息、办公信息、娱乐信息的均值分别为3.89、3.72和3.61,应放置在边缘位置。

对量表进行信度与效度分析,总体量表的标准化克朗巴赫系数为0.8。探索性因子分析得到KMO取样适切性量数为0.677(KMO>0.5,符合效度要求)。

巴特利特球形检验显著性无限接近于0,拒绝原假设,说明问卷具有良好的效度。

从表3相关性分析可以发现:核心信息与安全、出行、警报等信息显著正相关。车辆状态与出行、货物信息正相关,表明运营中应综合考量。安全信息与警报、货物、办公等信息的关联,表明应全面防控风险。出行信息与多类信息相关,显示出行体验是多种因素融合的结果,应顾及多方面优化服务。

表3 相关性分析

项目	核心	车辆	安全	出行	警报	货物	生活	办公	娱乐
核心	1								
车辆	0.036	1							
安全	0.074	0.281	1						
出行	0.130	0.086	0.130	1					
警报	0.223	0.376	0.223	0.071	1				
货物	0.325	0.288	0.325	0.219	0.179	1			
生活	-0.074	0.096	0.151	0.185	0.085	0.189	1		
办公	-0.001	0.029	0.284	0.106	0.046	0.161	0.434	1	
娱乐	0.007	-0.104	-0.061	0.206	0.079	0.053	0.407	0.309	1

2.6 商用车AR-HUD设计信息总结

从安全方面考量,在车辆AR-HUD设计过程中,必须遵循席克定律和三秒原则。席克定律认为人能同时接受的信息为 (7 ± 2) 个。三秒原则要求AR-HUD在极短时间内完成判断,确保驾驶安全。基于此,最终将商用车AR-HUD信息按照常显、动态常显、低频非动态显分为三类,见表4。

表4 商用车AR-HUD信息总结

分类	信息细分
常显	车速、油耗、总里程、档位、导航、路况、胎压、转速、水温
动态常显示	分心驾驶、碰撞、超速、车距、交通、3D导航、驾驶接管、路线建议
低频非动态显示	任务、文档、通讯、车队、货物摆放、货物温度、货物安全、货物重量

3 商用车PT-HUD信息界面认知负荷优化策略

认知负荷优化的目的是在驾驶过程中最大限度减少驾驶员的认知负荷,从而有效提升驾驶安全性。

3.1 内在认知负荷优化策略

为降低驾驶员的内在认知负荷,提出以下优化策略,见图4。



图4 内在认知负荷优化策略

操作引导可视化:在驾驶过程中,叠加增强现实(AR)车辆预测路径线与安全边界,直观呈现车辆行驶状态。

控制指令整合:在HUD边缘区域投影虚拟面板,通过语音或手势操作减少对传统按键的依赖。

触觉反馈优化:采用震动反馈,对低紧迫性提示进行提醒。

交通规则视觉化:通过AR标注在道路上,直观显示交通规则。

风险预判与进度条呈现:通过风险预判功能,取消传统的数字提示,采用进度条形式展示风险程度。

状态信息整合:状态异常时,使用语义化提示代替代码提示。

多模态预警:根据紧急程度,采用不同方式进行提示:一般紧急状态以边缘静态图标呈现,严重紧急状态下以中央黄色弹窗和震动呈现,致命紧急状态则全屏红光闪烁并配合语音提示,同时执行强制降挡和限速操作。

3.2 外在认知负荷优化策略

优化外在认知负荷的策略,见图5。



图5 外在认知负荷优化策略

动态环境重构:在恶劣驾驶环境中动态调整AR投影的亮度和色温,确保信息清晰可见。

视觉焦点引导:面临障碍物时,通过视觉引导功能提醒驾驶员注意危险。

信息层级管理:定义主信息层和辅助信息层,使用空间环形菜单降低驾驶员的学习成本。

信息流动态管理:根据实时情境,动态调整AR-HUD显示内容,确保信息呈现与当前驾驶需求相匹配。

压力可视化:利用时间线和色彩变化帮助驾驶员判断任务紧迫程度。

合规性自动化:在禁行区域边界叠加虚拟光墙,提供直观的视觉提示。

3.3 相关认知负荷优化策略

提升相关认知负荷效应的策略,见图6。



图6 相关认知负荷优化策略

渐进式学习引导:通过智能系统指导驾驶员逐步掌握复杂功能。

智能策略优化:结合驾驶模式切换和策略学习闭环,动态推荐适合的驾驶策略。

符号语义强化:多用现实中存在的符号表达,减少文字使用,降低认知负担。

AR 驾驶模式切换:在不同驾驶场景中,AR 提示侧重点应有所不同,适应不同场景需求。

学习策略闭环:对驾驶员的驾驶行为进行分析,帮助其优化驾驶策略。

多源信息整合:通过雷达、车联网等多源信息获取渠道为AR提供数据支持。

AR 决策时间压缩:在安全场景下,投影倒计时箭头,强制引导驾驶员快速决策。

4 商用车PT-HUD设计实践

商用车PT-HUD的驾驶场景效果见图7,采用全景视域桥在上,常规AR-HUD在下组合的方式。全景视域桥分上下两层,均不作为常显,上层为原商用车驾驶仪表和中控显示图标,在辅助驾驶打开、车辆故障、操作时点亮显示图标,其余时间不显示;下层为原中控内容,在进行舒适性调整时显示。



图7 商用车PT-HUD效果图

认知负荷优化策略下的商用车PT-HUD,见图8,包括内在、外在以及相关认知负荷的优化。



图8 认知负荷优化策略下的商用车PT-HUD

5 结束语

本研究对商用车HMI进行了系统梳理,对乘用车AR-HUD布局进行了深入分析,并提出了一种适用于商用车的新型AR-HUD:PT-HUD。在认知负荷理论的指导下,本文为商用车PT-HUD提出了设计优化策略,并通过实际设计实践进行了验证。这些研究成果不仅为商用车AR-HUD界面布局设计提供了理论支持和实践参考,也为未来的研究和应用奠定了坚实基础。然而,本文仍存在一些局限性,如对实际驾驶场景的适应性尚需进一步验证。未来的研究可以进一步优化AR-HUD的交互设计,提升其在复杂驾驶环境中的应用效果。

参考文献:

[1] 朱明洁,沈千惠,李亚婷.基于驾驶认知负荷的自动化车辆界面视觉舒适研究综述[J].包装工程,2025,46(4):486-501.
[2] 米良宇,陈阁.基于认知负荷理论的汽车HMI设计及发展趋势研究[J].设计,2022,35(10):94-96.
[3] 陈熠璇,徐娟芳.增强现实在汽车设计中的应用研究[J].设计,2021,34(16):82-85.

作者简介:

高曷(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为载运工具及其座舱设计研究、城乡创新及可持续设计研究、产品&信息交互设计。
朱志欣(2000—),男,硕士,主要研究方向为工业设计工程。
尹庆华(2000—),女,硕士,主要研究方向为工业设计工程。
安书含(1999—),女,硕士,主要研究方向为设计学。

绿化祖国山青水碧千秋美 平衡生态人杰地灵万里春