

自动驾驶接管中的分层振动警示设计研究

姜立军, 张泽权, 李哲林
(华南理工大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 驾驶员在自动驾驶系统遇到无法处理的交通情况时需要尽快恢复情景意识, 进行驾驶操控权的接管, 由于自动驾驶中驾驶员将更多的从事驾驶次任务, 需要进行有效的自动驾驶接管信息提示设计, 降低认知负荷, 提高接管绩效, 改善驾驶体验。 **方法** 触觉显示是在视听通道失效的情况下, 获取驾驶情景信息的有效方式。基于自主开发的触觉坐垫, 研究分层振动警示接管策略对情景意识恢复和用户体验的影响。实验共有 24 名被试, 每个被试将进行单层级、双层级和三层级接管实验。被试在接收到振动警示后, 需要中止当前的非驾驶相关任务, 接管汽车的控制, 并躲过风险情境。 **结论** 实验结果表明, 相对于单层级振动警示, 多层振动警示能提高接管绩效, 尤其在高负荷道路和低负荷道路中。三层级振动警示的综合评价最高, 但同时也带来了额外的认知负荷。

关键词: 自动驾驶; 接管系统; 触觉显示; 分层警示

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)02-0044-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.02.007

Layered Vibration Warning of Take-over Requests for Automated Driving

JIANG Li-jun, ZHANG Ze-quan, LI Zhe-lin
(South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: When the automatic driving system is unable to deal with the traffic situation, the driver needs to resume the control of the vehicle to restore the situational awareness as soon as possible. During automatic driving, the driver is more engaged in subtask of driving. It is required to design the information prompt of taking over automatic driving, to reduce cognitive load, promote takeover performance and improve the driving experience. The tactile display is a supplement to the information acquisition mode when the audio-visual channel fails. Based on the developed tactile cushion, the effects of layered vibration warning takeover strategy on situational awareness recovery and user experience were studied. There were 24 subjects in the experiment, each of whom would carry out single-level, double-level and three-level takeover experiments. After receiving the vibration warning, the subjects needed to stop the current non-driving related tasks, take over the control of the vehicle and avoid the risk situation. The experimental results show that compared with single-level vibration warning, multi-level vibration warning can improve takeover performance, especially in high-load and low-load roads. The comprehensive evaluation of three-level vibration warning is the highest, but it also brings additional cognitive load.

KEY WORDS: automatic driving; take-over system; tactile display; layered warning

对于 Level3 自动驾驶, 自动驾驶系统虽然能够在特定的路况环境下完全代替驾驶者承担操控车辆的职责, 但是仍需驾驶者偶尔的对驾驶活动进行监控, 以便在遇到自动系统无法处理的情况时能够恢复对汽车的控制。研究证明, 驾驶员在驾驶自动驾驶汽

车时, 很有可能会进行休息或打电话等非驾驶相关任务, 从而错过请求警示^[1], 触觉通道则被认为是一种在驾驶中相对未被充分利用的吸引注意力的提醒模式^[2-5]。与视觉和听觉相比, 触觉有其显著的优势, 如触觉遍布全身、不需要特别关注能连续产生信息、

收稿日期: 2019-09-30

作者简介: 姜立军 (1968—), 男, 湖南人, 博士, 华南理工大学教授, 主要研究方向为增强现实、智能化产品设计与开发、人机交互、先进设计与先进制造等。

通过触觉刺激能有效感知物体的轮廓方位等^[6-7]。在 Bolanowski 的研究中,根据人类皮肤感受器的不同功能特征,定义了四种振动触觉的通道,分别为 P、NPI、NPII、NPIII,一共覆盖了 0.4~1000 Hz 的频率感受范围^[8]。其中, P 通道也被称为“振动”通道^[9],适用于振动触觉相关的应用,因此 P 通道是最适用于接收振动警示的。考虑到 P 通道对快速刺激和高频振动比较敏感,在 40~800 Hz 之间呈现一个 U 形的灵敏度曲线,其最小绝对阈值在 250~300 Hz 左右^[10]。为此,本文采用触觉显示,作为视听通道的补充,进行接管信息提示设计,所使用的振动触觉信息频率在 250 Hz 左右。驾驶员在感知到接管请求后,需要迅速恢复情景意识,分析风险程度,再做出相应的决策并执行。接管情境的随机性与多样性决定了接管情境的复杂性。在接管时将风险程度的信息提示驾驶员,能够让驾驶员对路况情境有个预期,更快地做出恰当的决策,提高接管绩效。可以将接管请求警示的信息分为多个层级,不同层级的警示信息代表不同的风险程度,以此来向驾驶员传递风险程度信息。道路负荷度可用于交通运行状态动态分析^[11]。研究表明,高负荷路况会导致接管时间变长^[12]。当在高负荷路况中进行自动驾驶时,有更大的概率遇到高风险程度的情境。在自动驾驶接管系统中,可以根据道路负荷将接管风险程度分层,并通过分层警示的方式将风险程度信息传递给驾驶员。振动警示紧迫度越高,代表道路负荷越高,接管风险程度越高。本文使用接管绩效来度量接管的质量,一般认为接管时间和反应时间越短,接管成功率越高,接管绩效越高。接管分层振动警示在提高驾驶员的风险认知和接管情境意识的同时,也会带来额外的认知负荷,可能因此会增加反应时间与接管时间。因此本实验将对比单层、双层、三层振动警示对接管的影响,并得出最佳的分层警示策略。

1 实验

1.1 被试

实验共有二十四名被试,随机平均分为三组,分别为 A 组、B 组、C 组,每组八人,每组被试的男女比例接近,以消除性别因素对实验的影响。所有被试均取得驾照且能熟练驾驶。每个被试将进行三次小实验,分别为单层级、双层级和三层级接管实验,每次小实验有六次接管,三组被试除了三次小实验与风险场景出现顺序不同,其余均相同。通过随机算法得到三组数字,分别是:123、231、312,三个实验组的实验顺序根据数字进行排序,不同层级的振动警示实验分组见表 1。

1.2 实验系统

实验采用自主研发的自动驾驶模拟系统进行实验,驾驶模拟系统实验现场见图 1。使用笔记本电脑

作为计算机控制端,声音输出端为独立音箱,模拟道路环境噪音。图像输出端为一个大屏显示器,驾驶员的位置于屏幕左侧 1/3 处。使用 Logitech G27 模拟驾驶器进行输入。八个振动电机位于坐垫上,坐垫上的振动触觉显示振动点分布见图 2。振动电机由 DRV2605LEVM-MD 触觉驱动芯片控制,经过实际路面行驶实验,振动电机使用 NFP-ELV1030AL、谐振频率为 205 Hz,振幅为 2.2 m/s²(AR63A 振动测量仪测量)时,所发出的振动警示综合评价是最高的。

1.3 虚拟交通环境

本实验的自动驾驶模拟系统使用 Unity3D 引擎和 C#脚本语言制作。系统的道路环境将设计为三种不同负荷,分析不同层级的振动警示分别在三种不同道路负荷环境中对接管绩效的影响。不同负荷道路的路面情况见图 3。

表 1 不同层级的振动警示实验分组
Tab.1 Different levels of vibration warning experiment groups

实验顺序	1	2	3
A 组	单层级	双层级	三层级
B 组	双层级	三层级	单层级
C 组	三层级	单层级	双层级



图 1 驾驶模拟系统实验现场
Fig.1 Test site of driving simulation system

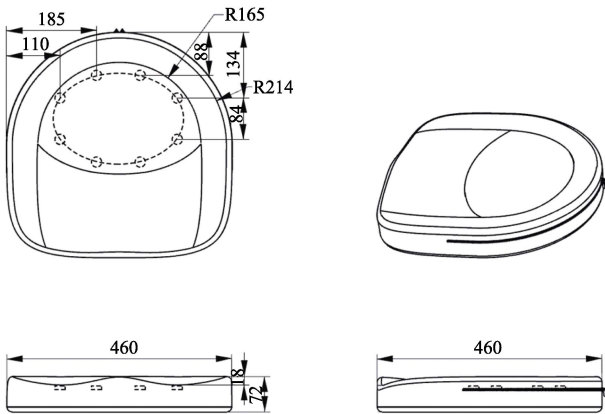


图 2 坐垫上的振动触觉显示振动点分布(单位:mm)
Fig.2 Tactile sense of vibration on cushion showing distribution of vibration points (mm)

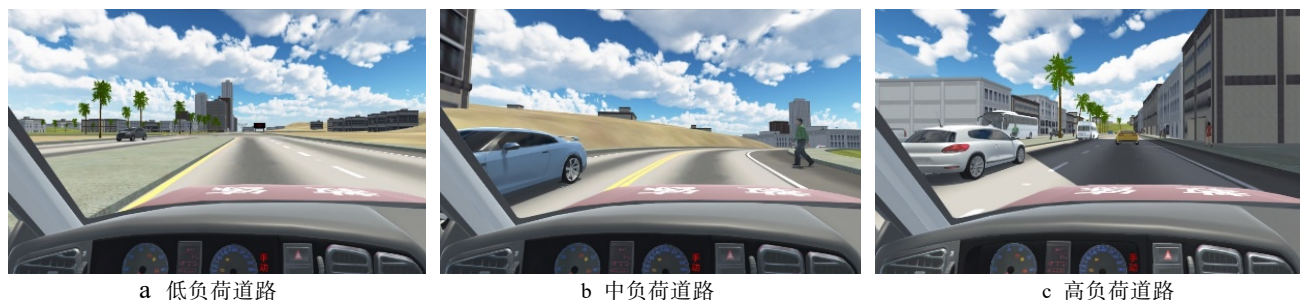


图3 不同负荷道路的路面情况
Fig.3 Pavement conditions of roads with different loads

在系统的道路上和路边会分别随机生成车辆或行人,生成的概率由道路负荷决定,负荷越高的道路,生成的概率越大。生成的车辆和行人都有简单的自动前进功能和寻路功能。

需要被试进行接管的风险情境包含了交通事故、环境设施破坏、道路指示信息变化、车辆行人危险行为、公共车辆占道等情境。每种风险情境都会设计成多种不同形式的事件,系统中部分风险情境的路面情况见图4,以避免被试遇到相同的风险情境从而产生经验,影响实验数据。

1.4 实验任务

本实验要求被试在实验过程中完成三种任务:(1)分心任务,为了被试在实验中能达到相近的分心状态,被试在实验过程中需要在手机上进行 N-back 分心任务,N-back 任务是被证实能够有效代替自动驾驶中的非驾驶相关任务^[13];(2)接管任务,在被试进行分心任务时,自动驾驶模拟系统中的实验车辆将会在模拟交通环境中进行自动驾驶,当到达风险场景时,触觉显示器会发出接管请求警示,同时车辆开始自动减速,此时驾驶员需要放下手机,点击方向盘上的按钮,将汽车切换为手动模式,然后开始接管汽车,避开风险场景并确认道路安全后,再次点击按钮将汽车切换为自动模式,完成接管后继续进行分心任务;(3)DRT 目标击中测试,检测响应任务(DRT)是评估驾驶中认知负荷的注意力影响的有效方法^[14],本实验中采用模拟远光灯的形式来进行 DRT 目标击中测试实验,当被试在进行 N-back 任务时,车前会随

机产生类似远光灯的闪光,闪光共出现六次,若被试感知到了闪光,则点击 N-back 任务界面上的一个按钮做记录,本测试目的是检测被试在进行分心任务时的注意力资源占用。

1.5 实验流程

被试在经过 N-back 任务和自动驾驶系统接管的练习后开始正式实验。实验过程中,车辆进行自动驾驶的同时,被试进行 N-back 任务,系统发出接管警示后,被试放下手机,立刻点击方向盘上的按钮进行接管,此时汽车从自动驾驶状态转为手动。开始接管后,被试需要分析风险情境,并控制车辆躲避并通过,安全后点击方向盘上的按钮结束接管,此时汽车从手动驾驶状态转为自动,被试重新回归到 N-back 任务中,并等待下次接管警示,直到结束实验。

1.6 自变量

研究建议,可以通过不同的振动幅度、振动接触面积大小^[15]、振动脉冲间隔、脉冲持续时间和脉冲数来编码不同紧迫度的振动^[16],而不建议使用不同频率来编码,因此本实验的分层振动警示通过固定脉冲持续时间,改变脉冲数来进行分层,分别为 3 脉冲、4 脉冲和 5 脉冲振动警示,三种层级的警示振动总时长均为 1000 ms。

为了防止经验性误差,三次实验的路线是不同的,且风险场景的分布与出现顺序也不同。但风险场景是一样的,以免不同的接管情境导致接管时间出现误差。三个实验的风险场景分布于相应的警示层级见图5。



图4 系统中部分风险情境的路面情况
Fig.4 Road conditions in some risk scenarios in the system

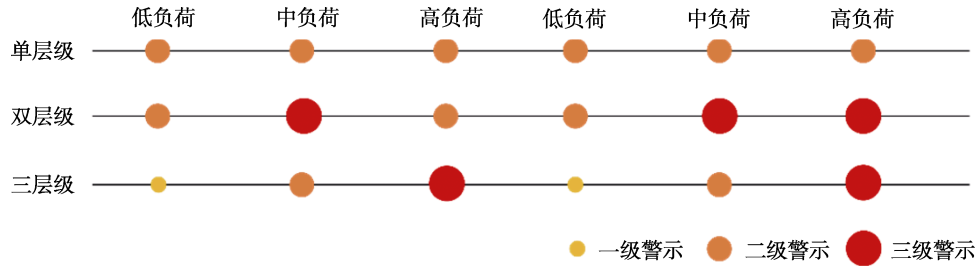


图 5 风险场景分布于相应的警示层级

Fig.5 Risk scenarios distributed at the appropriate level of warning

1.7 实验数据

反应时间。指自动驾驶系统发出接管请求，到驾驶员点击按钮接管汽车所花费的时间。

接管时间。指自动驾驶系统发出接管请求，到驾驶员开始执行接管决策（方向盘转动角度超过 2° ，或者脚踏踩下超过 10%）花费的时间。

DRT 目标击中数。被试感知到车前闪光的次数。

视线转移时间。指被试视线从 N-back 任务中转移到路面上的持续时间。在驾驶汽车时，80% 以上的路况信息是由驾驶员的视觉通道获取的，驾驶过程中的视线特性直接影响到获取信息的广度、准确度，直接影响驾驶的安全^[17]。本实验通过录像计算视线转移时间。

接管成功率。接管过程中发生碰撞即接管失败。

N-back 任务正确率与反应时间。任务绩效则通过被试得 N-back 任务正确率与反应时间评估，任务绩效越高，证明被试的认知负荷越小。

1.8 统计分析

采用单因素重复测量方差对实验数据进行分析，实验数据分析软件采用 SPSS Statistics 22，所有分析均采用 95% 的置信水平。

2 结果

2.1 缺失值处理

实验数据中存在少量被试误操作或者系统没有正确获取的数据，经过 SPSS 的缺失值分析，数据属于完全随机缺失，因此使用 SPSS 的 EM 法对缺失值进行填充。

2.2 接管成功率与 DRT 击中率

不同分层振动警示的接管成功率和 DRT 击中率平均值对比见图 6。

采用单因素重复测量方差分析不同分层振动警示下，接管成功率和 DRT 击中率是否有显著性差异。结果显示双层级、三层级振动警示的接管成功率比单层级高，但实验数据不支持其差异显著性 ($P=0.063$)，同时实验数据不支持组别之间的差异显著性 ($P=0.700$)。三层级振动警示的 DRT 命中率比单层级、

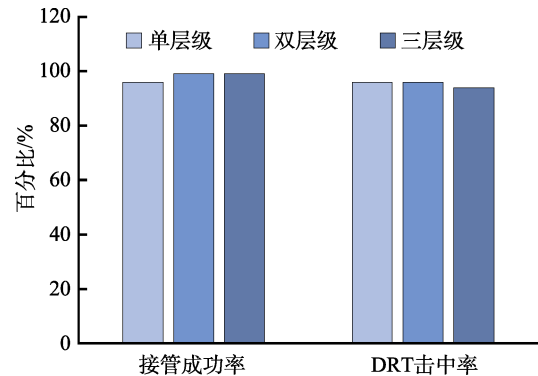


图 6 不同分层振动警示的接管成功率和 DRT 命中率平均值对比

Fig.6 Average comparison of takeover success rate and DRT hit rate of different layered vibration warnings

双层级低，但实验数据不支持其差异显著性 ($P=0.674$)，同时实验数据不支持组别之间的差异显著性 ($P=0.366$)。

2.3 反应时间、接管时间与视线转移时间

不同分层振动警示和负荷的反应时间、接管时间和视线转移时间平均值对比见图 7。

采用单因素重复测量方差分析不同分层振动警示和负荷下，反应时间、接管时间和视线转移时间是否有显著性差异，结果如下。

双层级、三层级振动警示的反应时间比单层级短，但实验数据不支持其差异显著性 ($P=0.081$)。但在高负荷风险情境中，三层级振动警示的反应时间最短，单层级振动警示的反应时间最长，实验数据支持其差异显著性 ($P=0.000$)。中负荷 ($P=0.984$)、低负荷 ($P=0.958$) 风险情境中，实验数据不支持不同分层振动警示之间反应时间的差异显著性。

双层级振动警示的接管时间最短，单层级的最长，但实验数据不支持其差异显著性 ($P=0.371$)。但在高负荷风险情境中，双层级振动警示的接管时间最短，单层级的最长，实验数据支持其差异显著性 ($P=0.020$)。但在低负荷风险情境中，三层级振动警示的反应时间最短，单层级的最长，实验数据支持其差异显著性 ($P=0.000$)。而中负荷风险情境中，实验数据不支持不同分层振动警示之间接管时间的差异显著性 ($P=0.944$)。

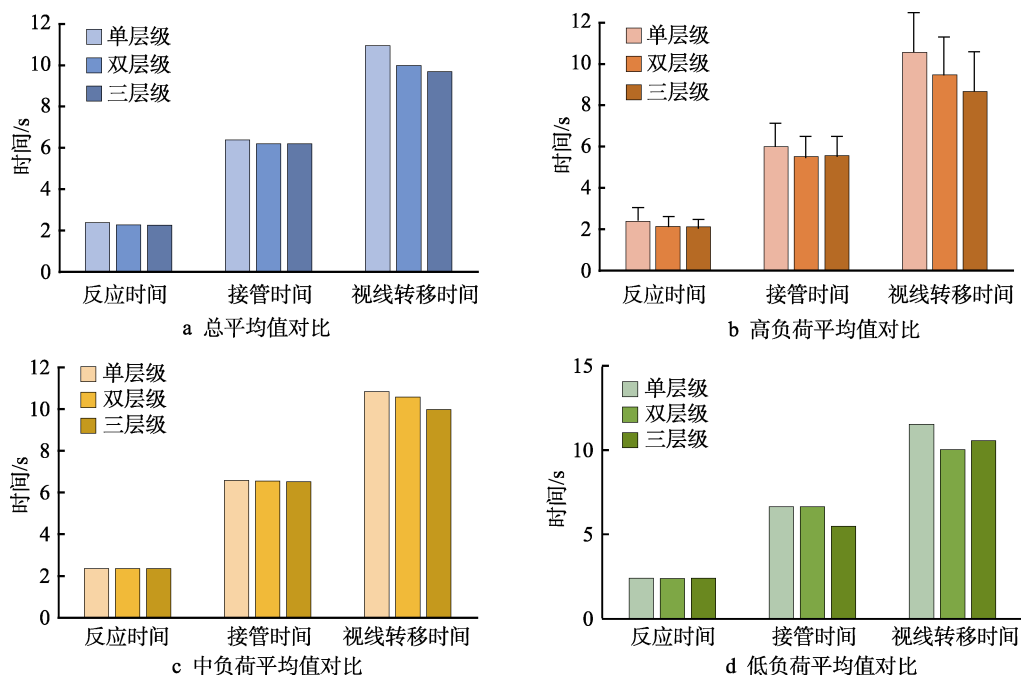


图7 不同分层振动警示和负荷的反应时间、接管时间和视线转移时间平均值对比
Fig.7 Average comparison of response time, taking-over time and line-of-sight transfer time of different layered vibration warnings and loads

三层级振动警示的视线转移时间最短,单层级的最长,实验数据支持其差异显著性 ($P=0.006$)。高负荷风险情境中,三层级振动警示的视线转移时间最短,单层级的最长,实验数据支持其差异显著性 ($P=0.001$)。而在低负荷风险情境中,三层级振动警示的视线转移时间最短,单层级的最长,实验数据支持其差异显著性 ($P=0.039$)。中负荷风险情境中,实验数据不支持不同分层振动警示之间视线转移时间的差异显著性 ($P=0.216$)。

组别之间的所有分析结果在统计学上均无显著性差异。

2.4 任务绩效

不同分层振动警示下的任务绩效平均值对比见图8。

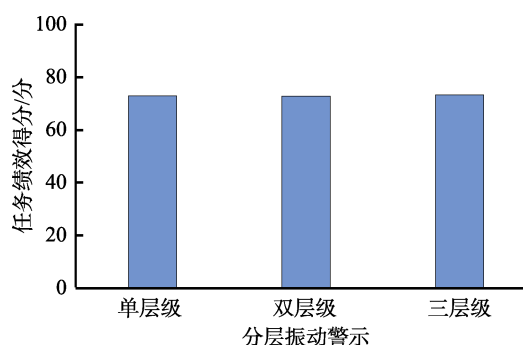


图8 不同分层振动警示下的任务绩效平均值对比
Fig.8 Average comparison of task performance under different hierarchical vibration warnings

采用单因素重复测量方差分析不同的振动分层振动警示下,任务绩效是否有显著性差异,结果为三层级振动警示的平均任务绩效最高,双层级的最低,但实验数据不支持其差异显著性 ($P=0.765$)。同时实验数据不支持组别之间的差异显著性 ($P=0.746$)。

3 结语

实验没有证据表明不同分层振动警示的接管成功率、反应时间、接管时间均有显著性差异。但在高负荷风险情境中,反应时间和接管时间具有显著性差异,三层级振动警示的反应时间最短、双层级振动警示的接管时间最短,单层级的反应时间和接管时间均最长,因此高负荷风险情境中的三层级振动警示与双层级相比有更短的反应时间,但接管时间却略长,可能是三层级振动警示带来了额外的认知负荷或者5脉冲振动带来了惊吓,导致恢复情境意识的速度比双层级慢。而在低负荷风险情境中,三层级振动警示的接管时间显著低于单层级和双层级,可能是三层级中的3脉冲振动提高了风险认知,从而使情境意识恢复更快;三层级振动警示的DRT击中率最低,任务绩效最高,但实验数据不支持其差异显著性。而三层级振动警示的视线转移时间最短,实验数据支持其差异显著性,尤其在高负荷风险情境差异更显著。这意味着三层级振动警示让驾驶员视线停留在路面的时间更短,三层级振动提高了驾驶员的接管态度,让驾驶员更快的通过了风险情境;实验均没有证据表明组别之间的接管成功率、DRT击中率、反应时间、接管时

间、视线转移时间、任务绩效等数据有显著差异性,证明分组是合理的,组别之间的分心状态与认知负荷也达到相似的程度。

最终实验结果表明:相对于单层级振动警示,多层振动警示能提高接管绩效,尤其在高负荷道路和低负荷道路中。三层级振动警示的综合评价最高,同时也带来了额外的认知负荷。

接管请求作为接管过程的第一步,需要能够明确提醒到驾驶员的同时,还需要能够帮助驾驶员保持情境意识,快速掌握路况信息,避免发生安全事故。在接管请求警示中,触觉刺激是对视觉和听觉通道的有效补充,能够增加提示的冗余性,减少驾驶员错过警示的概率。本文通过实验研究汽车行驶情境下驾驶员对振动触觉的感知,并得到适合用在自动驾驶接管情境下的振动参数,提出了合适的振动警示测率,可以显著提高接管绩效,改善用户体验与增强情景认知,可为接管自动驾驶汽车人机交互设计研究提供数据参考。

参考文献:

- [1] LANERAS L. Human Factors Issues Associated with Limited Ability Autonomous Driving System: Drivers' Allocation of Visual Attention to the Forwards Roadway Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design[J]. Bolton Landing, 2013(9): 92-98.
- [2] MENG F. Tactile Warning Signals for In-vehicle Systems[J]. Accident Analysis and Prevention, 2015(75): 333-346.
- [3] SARTER N. The Need for Multisensory Interfaces in Support of Effective Attention Allocation in Highly Dynamic Event-driven Domains: The Case of Cockpit Automation[J]. International Journal of Aviation Psychology, 2000, 10(3): 231-245.
- [4] MOHEBBI R. Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-end Collision Warnings While Talking on a Cell Phone[J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2009, 51(1): 102-110.
- [5] GRAY R. A Comparison of Different Informative Vibrotactile Forward Collision Warnings: Does the Warning Need to be Linked to the Collision Event[J]. 2014, 9(1): 870.
- [6] 刘少强, 黄惟一, 王爱民. 机器人触觉传感技术研发的历史现状与趋势[J]. 机器人, 2001, 24(4): 362-366.
- LIU Shao-qiang, HUANG Wei-yi, WANG Ai-min. Overview and Prospect of Research and Development on Robot Tactile Sensory Technology[J]. Robot, 2001, 24(4): 362-366.
- [7] MAENO T, KOBAYASHI K, YAMAZAKI N. Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors[J]. Bulletin of JSME International, 1998, 41(1): 94-100.
- [8] S J. Checkosky, Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch[J]. Acoustical Society of America, 1988, 8(5): 1680-1694.
- [9] S J. Hairy Skin: Psychophysical Channels and Their Physiological Substrates[J]. Somatosensory & Motor Research, 1994, 11(3): 279-290.
- [10] G A. Some Characteristics of Tactile Channels[J]. Behavioural Brain Research, 2004, 148(1): 35-40.
- [11] 廖涌泉, 孙晓亮, 贾利民. 基于道路负荷度的北京城市快速路交通状态评价[J]. 物流技术, 2012, 31(3): 87-89.
- LIAO Yong-quan, SUN Xiao-liang, JIA Li-min. Evaluating Traffic Status of Urban Expressway in Beijing Based on Road Vehicle Capacity[J]. Logistics Technology, 2012, 31(2): 87-89.
- [12] CHRISTIAN G, MORITZ K, DAVID L. Taking Over Control From Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations: The Role of Traffic Density[J]. Human Factors, 2016, 58(4): 642-652.
- [13] RADLMAYR J. How Traffic Situations and Non-driving Related Tasks Affect the Take-over Quality in Highly Automated Driving[J]. Santa Monica, 2014(8): 2063-2067.
- [14] 施臻彦, 葛列众, 胡晓晴. 驾驶分心行为的测量方法及其应用研究进展[J]. 人类工效学, 2010, 16(3): 70-74.
- SHI Zhen-yan, GE Lie-zhong, HU Xiao-qing. Progress in the Measurement of Distracted Driving Behavior and Its Application[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2010, 16(3): 70-74.
- [15] Human Factors. Guidelines on the Multimodality of Icons, Symbols and Pictograms European Telecommunications Standards Institute[R]. France: 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex, 2002.
- [16] PETERMEIJER S. Vibrotactile Displays: A Survey with a View on Highly Automated Driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(4): 897-907.
- [17] 张瑜. 基于用户体验的自动驾驶接管系统人机交互策略设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- ZHANG Yu. Research on Human-computer Interaction Strategy Design of Autopilot Takeover System Based on User Experience[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.