辅助驾驶系统对重型卡车驾驶员长途驾驶中疲劳程度的影响

黄春喜 [1,2]，谢炜垠 [1]，黄奇浩 [3]，朱言 [3]，崔迪潇 [3]，贺登博 [1,2]

（1.香港科技大学（广州） 系统枢纽，广州 511466；2. 香港科技大学 跨学科学院，香港 999077；3. 智加科技有限公司，江苏苏州 215100）

摘要：乘用车领域的过往研究发现相较于手动驾驶，使用辅助驾驶系统的驾驶员会更容易出现疲劳。因此，有必要探究辅助驾驶系统对重型卡车驾驶员长途驾驶疲劳程度的影响。基于超过 120 h 的自然驾驶实验，采用多项生心理指标（如心率、心率变异性等）对比了重型卡车驾驶员手动驾驶车辆和在辅助驾驶系统帮助下驾驶车辆时的疲劳程度。辅助驾驶情况下驾驶员平均心率、呼吸频率、呼吸深度以及瞳孔直径均高于手动驾驶情况下驾驶员，辅助驾驶情况下驾驶员连续 RR 间隔均方根、低高频比例、眨眼频率、眨眼时长以及 PERCLOS 均低于手动驾驶情况下驾驶员。当驾驶员处于手动驾驶情况时，驾驶时间每增加 2 h，反应时间会增加 0.032 s，当驾驶员处于辅助驾驶情况时，反应时间不随驾驶时间发生显著变化。重型卡车驾驶员在辅助驾驶系统帮助下驾驶车辆时的疲劳程度低于手动驾驶，本研究可以为辅助驾驶系统在重型卡车中的安全应用提供理论支持。

关键词： 交通安全；辅助驾驶系统；重型卡车驾驶员；疲劳驾驶

中图分类号：（本网站首页链接可检索，交叉学科可列多个） **文献标志码：**A

The Effect of Advanced Driver Assistance Systems on Fatigue Levels of Heavy Truck Drivers in Prolonged Driving Tasks

HUANG Chunxi[1,2], *XIE Weiyin* [2], *HUANG Qihao* [3], *ZHU Yan* [3], *CUI Dixiao* [3], *HE Dengbo* [1,2]

(1. Systems Hub, The Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 511466, China; 2. Academy of Interdisciplinary Studies, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China; 3. Zhijia Technology, Jiangsu Suzhou 215100, China)

Abstract: Previous research in the passenger car domain has found that drivers using advanced driver assistance systems (ADAS) are more likely to experience fatigue compared to manual driving. Therefore, it is necessary to investigate the impact of ADAS on the fatigue levels of truck drivers during long-haul driving. Based on over 120 h of naturalistic driving experiments, multiple psychophysiological indicators (such as heart rate, heart rate variability, etc.) were used to compare the fatigue levels of heavy truck drivers when manually driving vehicles and when driving vehicles with ADAS. The average heart rate, respiratory rate, respiratory depth, and pupil diameter of drivers driving with ADAS are all higher than those under manual driving. When driving with ADAS, drivers' root mean square of continuous RR interval, low to high frequency ratio, blink frequency, blink duration and PERCLOS are all lower than those of drivers under manual driving. When the driver is driving manually, the reaction time will increase by 0.032 s for every 2 hours. When the driver is driving with ADAS, the reaction time does not change significantly with the increase of driving time. The fatigue levels of heavy truck drivers when driving vehicles with ADAS are lower than when manually driving, providing theoretical support for the safe use of ADAS in heavy trucks.

Keywords: traffic safety; advanced driver assistance systems; heavy truck drivers; driving fatigue.

驾驶疲劳是指驾驶员出现清醒程度下降、困倦程度上升的一种状态[1]，会造成驾驶员对前方道路的视觉处理变慢、对周围环境的感知和反应能力变差，进而造成驾驶表现下降[2]。驾驶疲劳广泛存在于日常驾驶过程中，不仅是追尾事故的主要原因之一，还是 20%~30%致命意外事故的罪魁祸首[3]，对道路交通

收稿日期：2024-02-29
基金项目：国家自然科学基金（52202425）
第一作者：黄春喜，博士生，主要研究方向为交通人因工程。Email: tracy.huang@connect.ust.hk
通信作者：贺登博，助理教授，博士生导师，主要研究方向为交通人因工程。Email: dengbohe@hkust-gz.edu.cn

安全造成了极大的威胁。根据 May 等[4]提出的框架，驾驶疲劳可分为两大类：睡眠相关的疲劳和任务相关的疲劳。睡眠相关的疲劳是指由昼夜节律、睡眠不足甚至睡眠剥夺所引起的疲劳，而任务相关的疲劳是指由驾驶任务和驾驶环境引起的疲劳。任务相关的疲劳又可以进一步分为主动疲劳和被动疲劳。Gimeno 等[5]认为主动疲劳是由驾驶任务认知负荷过高引起的，如车流量大、视线较差、需要完成除驾驶任务以外的额外分心任务等。被动疲劳则是由驾驶任务认知负荷过低所引起的，如当驾驶任务或道路环境高度可预测时，驾驶员倾向于减少分配到道路上的注意力，造成驾驶任务认知负荷过低而容易疲劳困倦。

驾驶疲劳在时效性要求较高的干线物流行业中（如快递等）更为突出。通常长途重型卡车驾驶员需要长时间（约 10~14 h）、长距离（约 800~1200 km）持续驾驶重型卡车运送货物，在此过程中驾驶员极易产生驾驶疲劳，对道路交通安全造成极大的潜在威胁[6]。Perttula 等[7]通过问卷研究发现 27.8%的重型卡车驾驶员经常在驾驶过程中感到疲劳。Friswell 等[8]发现相较于轻型卡车驾驶员，重型卡车驾驶员更容易产生驾驶疲劳。据公安部交通管理局统计，2023 年全国共发生道路交通事故 175 万起，其中由疲劳驾驶导致的事故占比最高，达到总事故的 15%[9]。一项在北京进行的问卷研究发现，过长的驾驶时间是导致卡车驾驶员产生疲劳的重要原因[10]。考虑到驾驶疲劳可能造成的严重后果，过往的研究大量探索了传统手动驾驶中驾驶疲劳产生机理以及驾驶疲劳对驾驶行为的影响[11-12]。

为了缓解重型卡车驾驶员长途驾驶过程中的驾驶疲劳，目前部分公司（如智加、图森、赢彻等）开始探索将辅助驾驶系统部署至重型卡车上，尝试在特定路段（如高速公路）通过辅助驾驶系统来替代驾驶员完成驾驶任务。然而，辅助驾驶系统的引入可能产生 2 个方面的影响。一方面，辅助驾驶系统替代驾驶员执行了驾驶任务，驾驶员由操控车辆所产生的主动疲劳会相应减少；另一方面，辅助驾驶系统使驾驶员转而执行监测系统的任务，驾驶员分配到道路上的注意力减少、处于低认知负荷状态，进而造成被动疲劳增加。因此，有必要探究辅助驾驶系统的引入对重型卡车驾驶员疲劳发展的影响。

近年来辅助驾驶系统的发展在某种程度上转变了驾驶员的角色，辅助驾驶系统开启时驾驶员从车辆的主动操控者变成了道路环境的被动观察者[13]。基于此，辅助驾驶系统将驾驶员从驾驶任务中解放出来，降低了驾驶员的主动疲劳。然而，脱离驾驶任务会降低驾驶员的警觉性、加剧驾驶员的易困程度。在当前的辅助驾驶车辆中，驾驶员的驾驶疲劳仍然会严重影响他们的警醒程度和他们对接管请求的反应时间。Lu 等[14]发现，场景意识更低的驾驶员更难正确地应对道路上存在的危险事件，并对道路上其他司机的速度和距离的感知变差，而且驾驶员的场景意识与他们的精神状态紧密相关，驾驶员疲劳时场景意识显著降低。因此，辅助驾驶车辆中驾驶员的疲劳程度依旧会影响道路交通安全。考虑到人机共驾的复杂性[15]，充分理解并缓解辅助驾驶车辆中驾驶员的疲劳对保障道路交通安全极为关键。

在驾驶领域，针对辅助驾驶系统与驾驶员疲劳的关系已经进行了大量的研究。一般认为，在有条件的自动驾驶环境下（如辅助驾驶系统等），不参与主动的驾驶任务以及单调的驾驶环境都使得驾驶员会更容易感到困倦[16-17]。Korber 等[18]进行长为 42.5 min 的驾驶模拟器实验时发现，辅助驾驶开启后，由于驾驶员缺乏对驾驶任务的主动参与，更容易导致被动疲劳，主要体现在眨眼频率和眨眼时长增加、瞳孔直径减小。类似地，Jarosch 等[19]进行长为 28 min 的驾驶模拟器实验时，发现驾驶员执行监测辅助驾驶的任务时更容易产生疲劳。随着实验的进行，驾驶员的眨眼频率、眨眼时长、眼睑闭合百分比（PERCLOS）

以及 KSS (Karolinska Sleepiness Scale)量表值均会增加，辅助驾驶中以上指标增长更加迅速。Vogelpohl 等[17]则发现，辅助驾驶开启 15~35 min 后，驾驶员出现了显著的面部疲劳特征，部分驾驶员甚至出现长时间眼睛闭合的情况，而手动驾驶情况下驾驶员出现显著面部疲劳特征的时间更加滞后（约为 40 min）。Ahlström 等[20]也发现，对比手动驾驶，辅助驾驶中的驾驶员 KSS 量表值更高、眨眼时长更长、瞳孔直径更小、脑电 α 和 β 活动更强。另一项研究也表明，执行监控辅助驾驶系统任务的司机会更快出现疲劳，在辅助驾驶系统开启时进行与驾驶无关的任务反而可以提高驾驶员的接管绩效[21]。

已有研究的主要存在两个亟待解决的问题：①大部份研究均基于非专业的乘用车驾驶员，考虑到乘用车驾驶员与重型卡车驾驶员在工作任务和驾驶经验上可能存在异质性，以上实验得到的结论并不能直接迁移到专业驾驶领域（如重型卡车长途司机）；②实验中用于诱导驾驶员产生疲劳的时长较短（均<2 h），而且大部分研究是基于驾驶模拟器进行的，因此可能无法反映真实的长时间真实驾驶中重型卡车驾驶员状态的变化。因此，在辅助驾驶系统大规模推广落地的同时，有必要基于实际道路实验和真实运营环境，探究辅助驾驶系统对重型卡车驾驶员长途驾驶疲劳程度的影响。

具体来说，本文探究：与手动驾驶相比，在使用辅助驾驶系统的情况下，重型卡车驾驶员长时间驾驶过程中的整体疲劳会如何变化？针对此问题，本文利用开放道路上的实车实验采集驾驶员在手动驾驶和辅助驾驶过程中的生心理数据、提取其中与疲劳程度相关的指标，对以下假设进行检验：

- **原假设**：辅助驾驶系统开启的情况下，重型卡车驾驶员整体疲劳程度会上升。本假设的基础是当驾驶员由从操控者变为监测者时，驾驶员的被动疲劳会显著增加，故重型卡车驾驶员整体疲劳程度可能会上升。
- **备择假设**：辅助驾驶系统开启的情况下，重型卡车驾驶员整体疲劳程度会下降。本假设的基础是长时间驾驶操控车辆的主动疲劳得到大幅降低，且重型卡车驾驶员作为专业驾驶员可能通过自我约束或恰当地分配注意力来减少被动疲劳的增加。故重型卡车驾驶员整体疲劳程度可能会下降。

1 方法

1.1 实验方案和被试情况

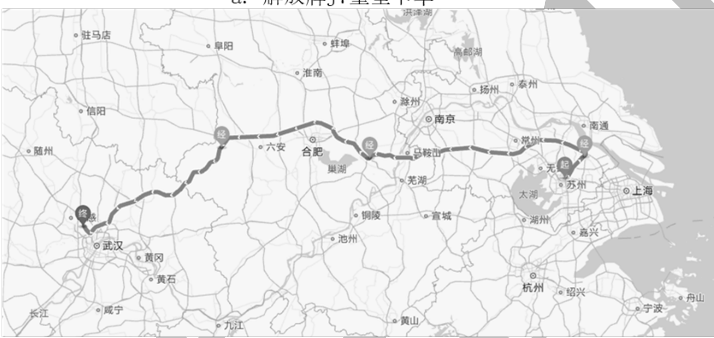
如图 1 所示，实验中采用一辆搭载智加领航辅助驾驶系统的解放牌 J7 重型卡车车头作为实验用车并配备固定质量的标准货箱，全车为五轴拖挂重型卡车，总长约 18 m、总重 31.75 t。智加领航辅助驾驶系统是由苏州智加科技有限公司研发的专用于重型卡车的国标二级辅助驾驶系统，应用场景为高速公路，智加领航辅助驾驶系统（解放 J7 版）包括自适应巡航（即自主控制车速以及与前车的距离）、车道偏离预警（即在偏离车道时提供声音警报）、车道居中保持（即自主跟随车道行驶）、车道内微调避让（即在车道中自动微调方向以躲避潜在风险）、驾驶员拨杆打灯后变道等辅助驾驶功能。

为反映真实运营情况，本次实验采用了某快递企业在华东至华中区域的真实运营路线（见图 1b）：往返江苏省苏州市某仓库和湖北省孝感市某仓库，单程长度 802 km，其中高速公路路程 785 千米。单程平均驾驶时长约 10.8 h（最短：10.1 h；最长 11.4 h；标准差：0.36 h），高速公路驾驶时长约 10.3 h（最短：9.7 h；最长：11.0 h；标准差：0.33 h）。为了尽可能避免由睡眠不足而引起的与睡眠有关的疲劳以及不同工作时间可能对实验的影响，实验过程中每天的出发时间均控制在上午 07:30 左右。此外，为尽可能避免

周末或节假日高速公路出现异常车流量对实验的影响，所有实验均在工作日进行。

为确保真实道路上使用辅助驾驶系统过程中的安全，经筛选后 3 名使用智加领航辅助驾驶系统超过 2 年的专业重型卡车司机（均为男性，平均年龄 43 岁）参与了本次实验。每名驾驶员进行了 4 天 2 轮（2 天内往返苏州和孝感算作 1 轮）的驾驶实验，每轮实验中每位驾驶员 1 天全手动驾驶、1 天在智加领航辅助驾驶系统的帮助下驾驶（高速道路上平均辅助驾驶比例为 96.59%）。基于此，整个实验由 3 位驾驶员共采集 12 d 的数据，每天约 10.5 h 左右。为了避免可能的疲劳累积，每位驾驶员 2 轮实验的间隔均大于 5 d。

a. 解放牌J7重型卡车



b. 驾驶路线图

图 1 实验中所用解放牌 J7 重型卡车和驾驶路线图

Fig.1 The JieFang J7 heavy truck used in the experiment and experimental route

1.2 数据采集

1.2.1 眼动数据

驾驶任务是一项高度依赖驾驶员视觉注意力的任务，恰当的视觉注意力分配能够有效规避道路风险、提升驾驶安全。过往研究中也发现部分眼动指标与驾驶员的工作负荷和疲劳程度紧密相关[16-17, 22]。这些指标包括但不限于眨眼频率、眨眼时长、瞳孔直径、PERCLOS（percentage of eyelid closure, 即驾驶过程中每 60 s 内眼睛闭上超过 80%的时间占比）。因此对驾驶员的眼动行为也进行了采集。

为了不影响驾驶员的正常驾驶，实验中使用固定式桌面眼动仪（SmartEye Pro）对驾驶员的眼动行为进行捕捉。如图 2 所示，实验中使用的 SmartEye Pro 系统由 3 个摄像头和 2 个红外灯构成。为稳定捕捉驾驶员的眼动行为，经前期测试，3 台摄像头（见图 2）被安装在驾驶舱内不同位置并均面向驾驶员头部（主要集中在面部），2 台红外灯则有效保证了眼动捕捉不受环境照明强度影响（如白天/晚上、隧道内/隧道外、逆光等）。由于视线捕捉受到众多因素影响（如眼部结构个体差异、眼镜折射、斜视等），因此为确保视线捕捉精准度，实验过程中每一次司机下车再上车后都会进行视线校准。驾驶中眼动数据的采集频率为 60 Hz。

a. 固定式桌面眼动仪

b. 生理传感器佩戴设置

图 2 固定式桌面眼动仪和生理传感器佩戴设置

Fig.2 Fixed dashboard-mounted eye tracker and settings for physiological sensors

1.2.2 生理数据

为了实时采集重型卡车驾驶员在驾驶过程中的生理数据，采用 Physiolabs 生理仪器套件结合 Human Research Tool 软件采集了驾驶员的心电（ECG）信号和呼吸（RESP）信号。生理数据的采集频率为 1,000 Hz，图 2b 展示了 2 种生理传感器在实验中的佩戴设置。

1.2.3 反应测试数据

为对比重型卡车驾驶员在手动驾驶和辅助驾驶过程中随着驾驶疲劳发展对外界刺激的反应快慢，驾驶过程中在保障安全的情况下（实验员观察无明显道路危险时）对驾驶员进行了反应测试。反应测试采用听觉刺激，由实验员手动发起测试。当实验员发起测试时，实验员携带的扩音器将会发出频率为 4,000 Hz、时长为 0.5 s、响度为 95 dB 的“嘀”声，驾驶员被要求在听到声音的第一时间按下固定于中控屏下方的按键，测试程序自动记录从测试发起到驾驶员做出反应的时间间隔。为了避免反应测试过于频繁而影响驾驶员疲劳发展，车辆上高速后每隔 2 h 进行 1 轮反应测试（每轮测试包含 2 次，2 次测试随机间隔 30~45 s 不等），每天的 10 h 驾驶过程中一共进行 5 次反应测试。

1.2.4 主观问卷数据

为了衡量驾驶过程中驾驶员的主观困倦程度，实验中采用 KSS 量表[23]。KSS 量表以单个问题的形式询问被试当前的主观状态，可能的答案从 1（极度警醒）到 9（极度困倦，需要努力保持清醒）共包含 9 个等级，实验员通过口头询问的方式获得驾驶员的回答。考虑到较长的实验时间、较高的问询频率可能会影响驾驶员的警觉程度，因此采取车辆上高速后开始计时、每隔 1 h 询问一次的方式，每次驾驶中总计询问 10 次。

1.3 实验流程

实验前，实验员对所有参与实验的驾驶员介绍实验流程（包括反应测试的介绍和训练）、回答相关问

题也获得了所有驾驶员书面签署的知情同意书。本实验已获得香港科技大学（广州）人类研究伦理委员会批准。实验中每天的具体流程如图 3 所示。

- 驾驶员到达后，先佩戴生理传感器、调试桌面眼动，仪器准备就绪后开始实验。
- 驾驶员手动驾驶车辆前往高速收费站准备驶入高速，以车辆通过收费站、驶入高速的时刻为零时刻，开始进行各项数据采集。在高速公路行驶过程中，驾驶员的生理数据和眼动数据全程采集，主观问卷数据和反应测试数据分别间隔 1 h（KSS 量表）或 2 h（反应测试）进行采集。

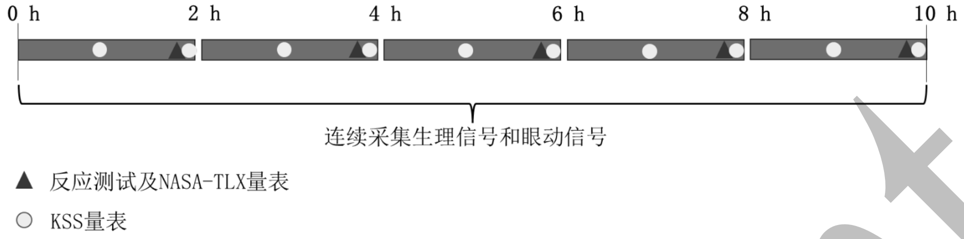


图 3 实验流程

Fig.3 Procedures of the experiment

1.4 数据处理与指标提取

参考过往的驾驶疲劳相关研究[20-21, 24-28]，提取了表 1 中的生理和眼动指标用于衡量重型卡车驾驶员在驾驶过程中的疲劳程度。生理数据（ECG 和 RESP 信号）的预处理和指标提取使用了 Python 中的 neurokit2 程序包，眼动数据的预处理和指标提取使用了自编程序。对于生理和眼动数据，计算了从实验开始后每小时的平均数值，即对于每个指标，每位驾驶员产生 10 个数据点。同时，考虑到重型卡车驾驶员驾驶时间较长，根据已经商用的部分驾驶员疲劳监测系统所采纳的方法[29]，假设重型卡车驾驶员在实验开始 1 小时内疲劳状态较轻，因此将实验当天第 1 个小时内的生理和眼动指标作为基线来标准化当天其余时间内对应指标的变化。图 4 以平均心率为例展示了数据标准化后某位驾驶员平均心率在驾驶过程中的变化。此外，驾驶中反应测试数据和主观问卷数据（KSS 量表）也被用于对比驾驶员在手动驾驶和辅助驾驶情况下的疲劳程度。

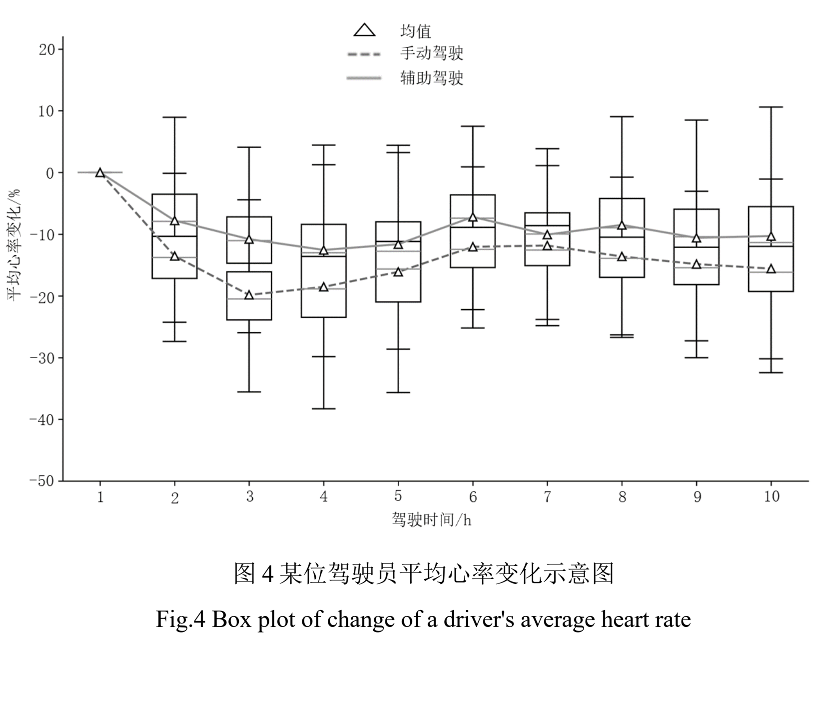


图 4 某位驾驶员平均心率变化示意图

Fig.4 Box plot of change of a driver's average heart rate

表 1 用于衡量疲劳程度的生理和眼动指标

Tab.1 Physiological and eye movement metrics used to evaluate the fatigue levels

指标	单位	定义	数据来源	随疲劳增加变化情况
平均心率	次·min^{-1}	驾驶过程中驾驶员的平均心率	ECG 传感器	下降[30-32]
连续两次心跳（RR）间隔均方根	ms	驾驶过程中驾驶员心电信号中连续 RR 间隔的均方根	ECG 传感器	上升[30-32]
低高频比例		驾驶过程中驾驶员心电信号中连续两次心跳的时间间隔序列的低高频比率（低频：0.04~0.15 Hz；高频：0.15~0.4 Hz）	ECG 传感器	上升[30, 32]
呼吸频率	次·min^{-1}	驾驶过程中驾驶员的呼吸频率	RESP 传感器	下降[21]
呼吸深度		驾驶过程中驾驶员的呼吸深度	RESP 传感器	下降[21]
眨眼时长	s	驾驶员在驾驶过程中的眨眼时长	SmartEye Pro	上升[18, 22, 33]
眨眼频率	次·min^{-1}	驾驶员在驾驶过程中的平均眨眼频率（窗口时长：2 min）	SmartEye Pro	上升[18, 22, 33]
瞳孔直径	m	驾驶员在驾驶过程中左右眼瞳孔直径的平均值	SmartEye Pro	下降[18, 33]
PERCLOS	%	驾驶员在驾驶过程中每 60 s 内眼睛闭上超过 80%所占的时间	SmartEye Pro	上升[18, 22]

1.5 统计分析

为了比较手动驾驶和辅助驾驶情况下各疲劳指标存在的差异，针对每个疲劳指标、反应时间以及 KSS 量表分数分别拟合了一个混合效应线性模型。模型中自变量为驾驶模式以及驾驶时间，其中驾驶模式为类别变量（手动驾驶或辅助驾驶）、驾驶时间为连续变量。模型中将不同驾驶员建模为随机效应，同时考虑驾驶模式与驾驶时间 2 个自变量间可能存在的交互效应。针对以上 9 个生理眼动疲劳指标、驾驶反应测试结果以及 KSS 量表结果，共拟合了 11 个混合效应线性模型，所有统计分析均基于 SAS OnDemand for Academics 完成，其中统计显著水平设置为 $p = 0.05$。

2 结果

2.1 生理和眼动指标

驾驶模式显著影响平均心率（$p < 0.0001$）、连续 RR 间隔均方根（$p < 0.0001$）、低高频比例（$p < 0.0001$）、呼吸频率（$p < 0.0001$）、呼吸深度（$p < 0.0001$）、眨眼时长（$p < 0.0001$）、眨眼频率（$p < 0.0001$）、瞳孔直径（$p = 0.0003$）、PERCLOS（$p < 0.0001$）。驾驶时间（$p > 0.05$）及驾驶模式和驾驶时间之间的交互效应（$p > 0.05$）对以上所列生理和眼动指标均无显著影响。各指标在不同驾驶模式下的组间对比如图 5 所示。

具体来说，辅助驾驶情况下驾驶员平均心率（辅助驾驶减手动驾驶的差值（Δ）= 7.34%, 95%置信区间: [5.80%, 8.88%], $p < 0.0001$）、呼吸频率（Δ = 7.40%, 95%置信区间: [5.60%，9.20%], $p < 0.0001$）、呼吸深度（Δ = 38.89%, 95%置信区间: [29.64%，48.14%], $p < 0.0001$）以及瞳孔直径（Δ = 17.61%, 95%置信区

间: [8.18%，27.04%], $p = 0.0003$）均高于手动驾驶情况下驾驶员。同时，辅助驾驶情况下驾驶员连续 RR 间隔均方根（Δ = -66.36%, 95%置信区间: [-88.99%，-43.73%], $p < 0.0001$）、心电低高频比例（Δ = -58.76%, 95%置信区间: [-41.77%，-75.75%], $p < 0.0001$）、驾驶员眨眼频率（Δ = -24.07%, 95%置信区间: [-32.27%，-15.87%], $p < 0.0001$)、眨眼时长（Δ = -9.28%, 95%置信区间: [-11.77%，-6.81%], $p < 0.0001$）以及 PERCLOS（Δ = -130.76%, 95%置信区间: [-165.20%，-96.32%], $p < 0.0001$）均低于手动驾驶情况下驾驶员。

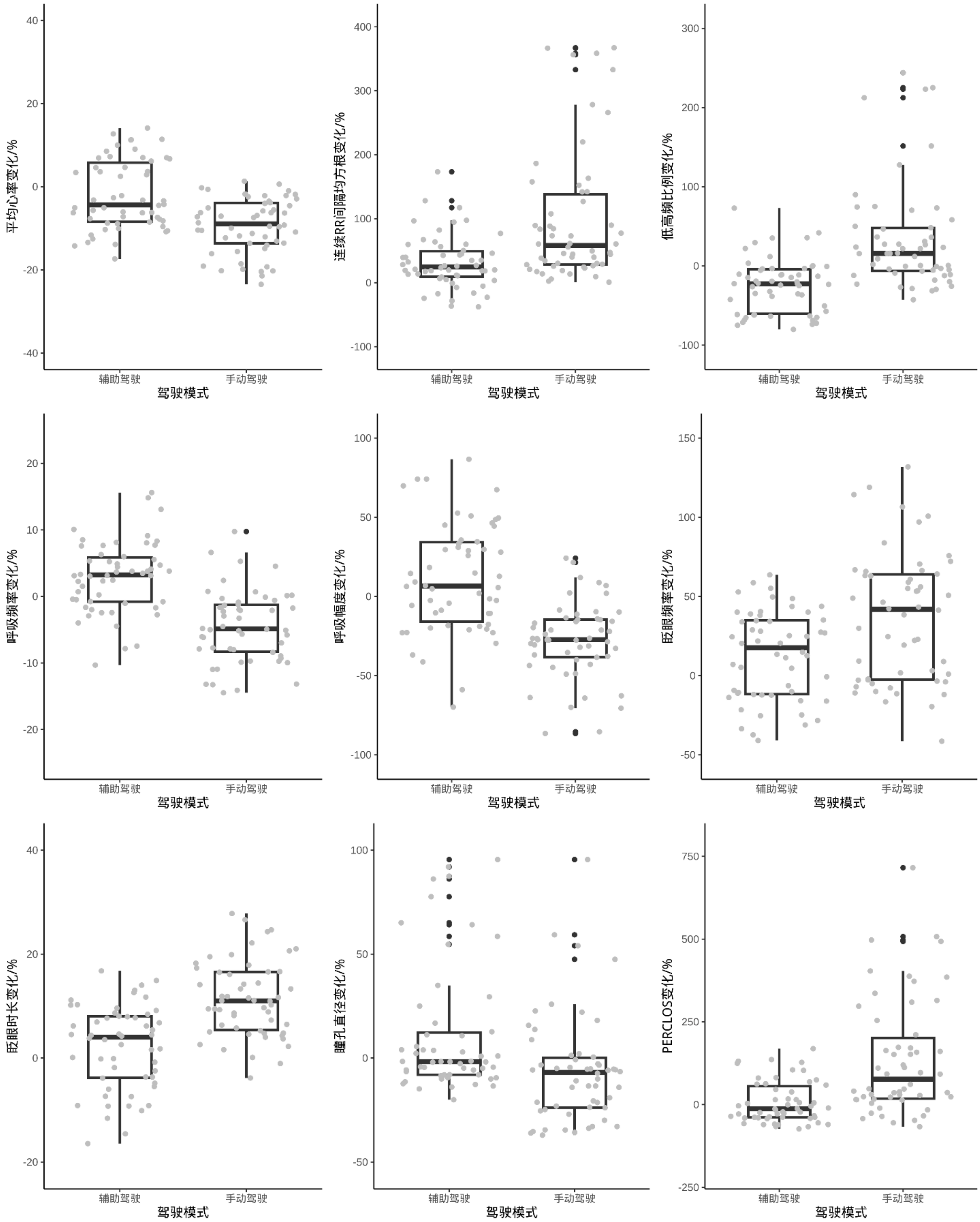


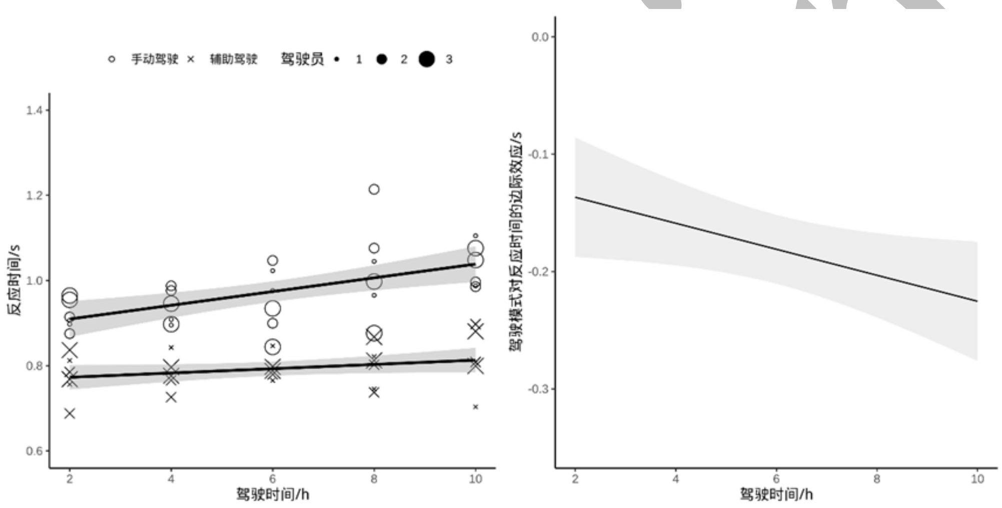
图 5 各生理和眼动指标在不同驾驶模式下的组间对比

Fig.5 Comparison of physiological and eye movement metrics across different driving modes.

2.2 反应测试和 KSS 量表

驾驶模式和驾驶时间的交互效应显著影响反应测试中的反应时间（p = 0.04），图 6a 展示了该交互效应。总体而言，随着驾驶时间的增加，驾驶员的反应时间会增加。当驾驶员处于手动驾驶情况时，驾驶时间每增加 2 h，反应时间会增加 0.032 s（95%置信区间: [0.017，0.047] s, p < 0.0001）；当驾驶员处于辅助驾驶情况时，反应时间不随驾驶时间发生显著变化（p = 0.2）。如图 6b 所示，随着驾驶时间的增加，驾驶模式对驾驶员反应时间的边际效应增强，即随着驾驶时间的增加，辅助驾驶对比手动驾驶会减少更多反应时间。

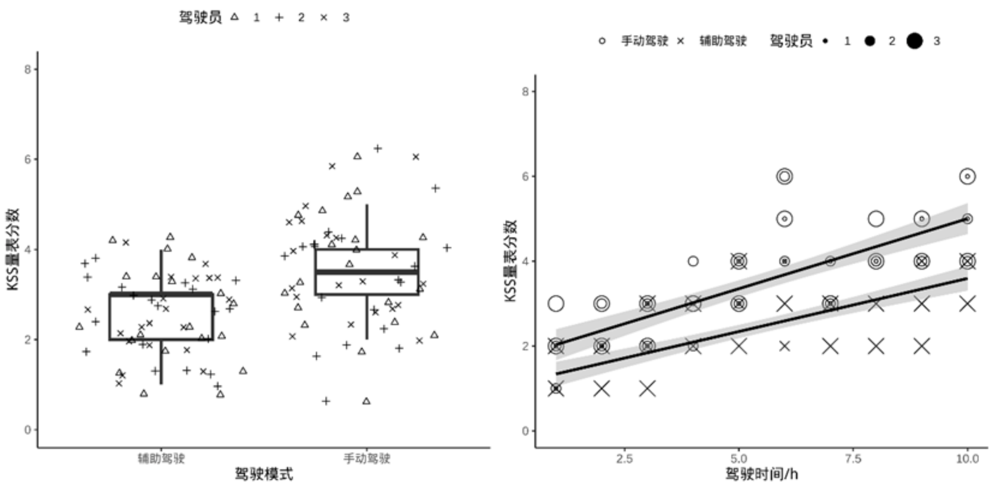
驾驶模式（p < 0.0001）和驾驶时间（p < 0.0001）均对 KSS 量表分数有显著影响，但驾驶模式与驾驶时间的交互效应未发现对 KSS 量表分数有影响。如图 7a 所示，辅助驾驶情况下驾驶员的 KSS 量表分数低于手动驾驶情况下驾驶员的 KSS 量表分数(Δ= -1.05, 95%置信区间: [-1.31，-0.79], p < 0.0001)。如图 7b 所示，驾驶时间每增加 1 h，KSS 量表分数增加 0.29。



a. 驾驶模式和驾驶时间的交互效应　　b. 驾驶模式对反应时间的边际效应（以手动驾驶为基准）

图 6 驾驶模式和驾驶时间的交互效应以及驾驶模式对反应时间的边际效应（以手动驾驶为基准）

Fig.6 Interaction effect between driving mode and driving time and marginal effect of driving mode on reaction time (with manual driving as the reference)



a. 不同驾驶模式的KSS量表分数对比　　b. 驾驶时间与KSS量表分数之间的关系

图 7 不同驾驶模式的 KSS 量表分数对比以及驾驶时间与 KSS 量表分数之间的关系

Fig.7 Comparison of KSS scale scores between driving modes and relationship between driving time and KSS scale

3 讨论

基于超过 120 h 的开放道路自然驾驶实验，探索了辅助驾驶系统对重型卡车驾驶员驾驶疲劳程度的影响。多项生心理疲劳指标均表明，辅助驾驶情况下重型卡车驾驶员的平均疲劳程度低于手动驾驶，主要体现在辅助驾驶情况下重型卡车驾驶员平均心率更高、连续 RR 间隔均方根更低、低高频比例更低、呼吸频率和呼吸深度更高、眨眼时长和眨眼频率更低、瞳孔直径更大以及 PERCLOS 更低。此外，辅助驾驶情况下驾驶员主观 KSS 量表分数也显著低于手动驾驶情况。以上结果均表明辅助驾驶系统能够降低重型卡车驾驶员长途驾驶过程中的疲劳程度。

本研究也观察到了驾驶员能力指标和驾驶时间的关联性。考虑到实际道路上危险事件的稀疏特性，使用了反应测试时间来间接反映驾驶员的反应能力。一般认为，疲劳会增加驾驶员的反应时间[34-35]。结果表明，随着驾驶时间的增加，手动驾驶情况下驾驶员的反应时间会显著增加，而辅助驾驶情况下驾驶员的反应时间未显著增加。同时，相较于手动驾驶，辅助驾驶系中驾驶员的反应时间较短，表明驾驶员在辅助驾驶中可以更好地保持较高的对突发事件的应对能力，并且辅助驾驶对降低驾驶员反应时间的边际效应会随着驾驶时长变长而增强。这些差异性可能来自 2 个方面的因素：一方面与手动驾驶相比，辅助驾驶情况下驾驶员在接收到反应刺激时手部有更多空闲，一定程度上解释了辅助驾驶中驾驶员的反应时间总体低于手动驾驶；另一方面，随着驾驶时间的增加，重型卡车驾驶员的疲劳发展速度可能是非线性的，在驾驶任务初期驾驶员未疲劳或疲劳发展较慢，故总体反应时间较短[18]。随着驾驶时长增加，手动驾驶情况下驾驶员疲劳发展较快，而辅助驾驶情况下驾驶员疲劳发展依旧较慢，从而造成了反应时间随驾驶时间的差异逐渐变大。

对比客观指标（如眼动和生理指标）、主观指标以及任务表现指标（即反应测试时间）时发现，主观指标和反应测试时间的变化趋势较为吻合，且随驾驶时长显著增加。客观指标并未表现出随驾驶时间增加而增加趋势。以往基于模拟器的研究中，客观的生理和眼动指标均表现出了和主观指标的一致性。这可能是因为自然驾驶实验过程中部分变量未能完全被控制，如在驾驶过程中驾驶员主动采取一些措施来缓解疲劳发展，如吸烟、播放音乐和进入服务区短暂休整等，主动控制疲劳的发展。需要注意的是，从实验变量控制的角度，需要保证所有的驾驶员均严格按照相同的方式进行所有的操作，而从实验安全、实验伦理和实际运营的角度出发，期望复刻真实的道路运营场景，即驾驶员在有真实行车风险的情况下状态的变化。因此，部分单一指标的变化在时间维度上可能难以简单地反映驾驶员状态和驾驶能力的变化。

此外，区别于时间维度上各类指标的不一致性，生理、眼动、反应时间以及主观问卷的指标均指向辅助驾驶中驾驶员的疲劳程度总体较低这个结论。这个发现不同于过往研究在乘用车驾驶员中得到的结论[17-20, 22]，即：在乘用车驾驶员群体中，相较于手动驾驶，辅助驾驶系统会引起驾驶员更高的疲劳程度。可能的原因主要有 2 个：一是重型卡车驾驶员作为专业驾驶员比起普通乘用车驾驶员更能够通过自我约束、工作责任感、安全意识等恰当地调整驾驶任务中的注意力分配[36-38]，从而避免因辅助驾驶系统执行驾驶任务而产生的被动疲劳；二是大部分已有的乘用车驾驶员的相关研究均基于模拟器，被试缺乏真实环境的刺激、默认了实验的安全性[39]，从而更容易产生被动疲劳。

最后，本项研究存在几点局限性：第一，尽管本研究已尝试通过重复采集数据来增大数据量，依旧

存在数据量较为有限的问题，未来研究可以招募更多重型卡车驾驶员参与实验、采集更多数据合并分析以进一步验证本研究得出的结论；第二，出于自然驾驶实验的安全考虑，本研究无法完全控制驾驶过程中的部分变量，未来研究可以考虑增加数据量以抵消自然驾驶实验中无法控制的随机变量的影响，也可以考虑缩短进行疲劳指标统计的时长以捕捉可能存在的驾驶员疲劳程度的更细节、更快速的变化；第三，本研究中的实验用车搭载了智加领航辅助驾驶系统，而驾驶员的疲劳程度可能受不同辅助驾驶系统的功能性影响，未来研究可以考虑对比不同厂家的辅助驾驶系统对驾驶员疲劳程度的影响、并量化辅助驾驶系统能力和驾驶员疲劳发展之间的关系。

4 结论

（1）客观生理指标、眼动、任务反应时间和主观 KSS 量表分数均表明辅助驾驶情况下重型卡车驾驶员的平均疲劳程度低于手动驾驶。

（2）长途驾驶中，重型卡车司机的主观 KSS 量表分数随驾驶时间显著增加，客观生理和眼动指标未随驾驶时间显著增加，表明在实际重型卡车驾驶中，单一的生理和眼动指标的变化可能难以准确预估驾驶员的疲劳发展。

（3）随着驾驶时间增加，手动驾驶情况下驾驶员的反应时间会显著增加，而辅助驾驶情况下驾驶员的反应时间不会显著增加，并且辅助驾驶对降低驾驶员反应时间的边际效应会随着驾驶时长变长而增加，表明辅助驾驶中驾驶员可以在长途驾驶中保持较好的任务反应能力。

作者贡献说明：

黄春喜：实验设计与执行、数据分析、论文撰写；

谢炜垠：数据分析、论文撰写；

黄奇浩：实验执行；

朱言：实验执行；

崔迪潇：实验执行；

贺登博：实验设计、论文审阅、基金支持。

参考文献：

[1] WÖRLE J, METZ B, OTHERSEN I, *et al*. Sleep in highly automated driving: Takeover performance after waking up[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 144: 105617.

[2] KRAUSE A J, SIMON E Ben, MANDER B A, *et al*. The sleep-deprived human brain[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2017, 18(7): 404-418.

[3] MURATA A. Proposal of a Method to Predict Subjective Rating on Drowsiness Using Physiological and Behavioral Measures[J]. IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, 2016, 4(2-3): 128-140.

[4] MAY J F, BALDWIN C L. Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2009, 12(3): 218-224.

[5] GIMENO P T, CEREZUELA G P, MONTANES M C. On the concept and measurement of driver drowsiness, fatigue and inattention: implications for countermeasures[J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 42(1/2): 67.

[6] ROMO A, HERNANDEZ S, CHEU R L. Identifying Precrash Factors for Cars and Trucks on Interstate Highways: Mixed Logit Model Approach[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(3).

[7] PERTTULA P, OJALA T, KUOSMA E. Factors in the Fatigue of Heavy Vehicle Drivers[J]. Psychological Reports, 2011, 108(2): 507-514.

[8] FRISWELL R, WILLIAMSON A. Comparison of the fatigue experiences of short haul light and long distance heavy vehicle drivers[J]. Safety Science, 2013, 57: 203-213.

[9] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报（2023年度）[R]. 2023.
TRAFFIC MANAGEMENT BUREAU, MINISTRY OF PUBLIC SECURITY, CHINA. China road traffic accidents annual statistical report (2023) [R]. 2023.

[10] MENG F, LI S, CAO L, *et al*. Driving Fatigue in Professional Drivers: A Survey of Truck and Taxi Drivers[J]. Traffic Injury Prevention, 2015, 16(5): 474-483.

[11] KWON S, KIM H, KIM G S, *et al*. Fatigue and poor sleep are associated with driving risk among Korean occupational drivers[J]. Journal of Transport & Health, 2019, 14: 100572.

[12] MENG F, WONG S C, YAN W, *et al*. Temporal patterns of driving fatigue and driving performance among male taxi drivers in Hong Kong: A driving simulator approach[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 125: 7-13.

[13] SHEN S, NEYENS D M. Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks[J]. Journal of Safety Research, 2017, 61: 149-155.

[14] LU Z, ZHANG B, FELDHÜTTER A, *et al*. Beyond mere take-over requests: The effects of monitoring requests on driver attention, take-over performance, and acceptance[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019, 63: 22-37.

[15] 张晖, 倪定安, 曾科,等. 人机共驾环境下驾驶疲劳研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 204.
ZHANG Hui, NI Dingan, ZENG Ke, *et al*. A review of driving fatigue research in human-machine co-driving environment, China Safety Science Journal[J], vol. 33, no. 3, p. 204, 2023.

[16] JAROSCH O, BELLEM H, BENGLER K. Effects of Task-Induced Fatigue in Prolonged Conditional Automated Driving[J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2019, 61(7): 1186-1199.

[17] VOGELPOHL T, KÜHN M, HUMMEL T, *et al*. Asleep at the automated wheel—Sleepiness and fatigue during highly automated driving[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 126: 70-84.

[18] KÖRBER M, CINGEL A, ZIMMERMANN M, *et al*. Vigilance Decrement and Passive Fatigue Caused by Monotony in Automated Driving[J/OL]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 2403-2409.

[19] JAROSCH O, KUHNT M, PARADIES S, *et al*. It's out of our hands now! Effects of non-driving related tasks during highly automated driving on drivers' fatigue[C]//Driving Assessment Conference: vol. 9, University of Iowa, 2017.

[20] AHLSTRÖM C, ZEMBLYS R, JANSSON H, *et al*. Effects of partially automated driving on the development of driver sleepiness[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 153: 106058.

[21] PAN H, HE H, WANG Y, *et al*. The impact of non-driving related tasks on the development of driver sleepiness and takeover performances in prolonged automated driving[J]. Journal of Safety Research, 2023, 86: 148-163.

[22] FELDHÜTTER A, HECHT T, KALB L, *et al*. Effect of prolonged periods of conditionally automated driving on the development of fatigue: with and without non-driving-related activities[J]. Cognition, Technology & Work, 2019, 21(1): 33-40.

[23] KAIDA K, TAKAHASHI M, ÅKERSTEDT T, *et al*. Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables[J]. Clinical Neurophysiology, 2006, 117(7): 1574-1581.

[24] GUO H, ZHANG Y, CAI S, *et al*. Effects of Level 3 Automated Vehicle Drivers' Fatigue on Their Take-Over Behaviour: A Literature Review[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021: 1-12.

[25] SCHÖMIG N, HARGUTT V, NEUKUM A, *et al*. The Interaction Between Highly Automated Driving and the Development of Drowsiness[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 6652-6659.

[26] 董占勋, 孙守迁, 吴群,等. 心率变异性与驾驶疲劳相关性研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010(1): 46-50.
DONG Zhanxun, SUN Shouqian, WU Qun, *et al*. Research on the correlation between heart rate variability and driving fatigue[J], Jounral of Zhejiang University (Engineering Science), no. 1, pp. 46–50, 2010.

[27] 李鑫, 张晖, 吴超仲,等. 基于脉搏波特征融合的驾驶疲劳检测方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 168-181.
LI Xin, ZHANG Hui, WU Chaozhong, *et al*. Driver fatigue detection model based on BPW feature fusion[J], China Journal of Highway and Transport, vol. 33, no. 6, pp. 168–181, 2020.

[28] 张驰, 马广露, 朱国华. 驾驶疲劳检测技术概述[J]. 交通工程, 2018, 18(1): 18-21.
ZHANG Chi, MA Guanglu, ZHU Guohua. Review of Driving Fatigue Detection Technology[J], Journal of Transportation Engineering, vol.

18, no. 1, pp. 18–21, 2018.

[29] ARCSOFT. ArcSoft Driver Monitoring Systems [EB]. (2024) [2024-02-26].

[30] BUENDIA R, FORCOLIN F, KARLSSON J, *et al*. Deriving heart rate variability indices from cardiac monitoring—An indicator of driver sleepiness[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 20(3): 249-254.

[31] ZENG C, WANG W, CHEN C, *et al*. Sex Differences in Time-Domain and Frequency-Domain Heart Rate Variability Measures of Fatigued Drivers[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(22): 8499.

[32] PERSSON A, JONASSON H, FREDRIKSSON I, *et al*. Heart Rate Variability for Classification of Alert Versus Sleep Deprived Drivers in Real Road Driving Conditions[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(6): 3316-3325.

[33] WANG Y, XIN M, BAI H, *et al*. Can variations in visual behavior measures be good predictors of driver sleepiness? A real driving test study[J]. Traffic Injury Prevention, 2017, 18(2): 132-138.

[34] TING P H, HWANG J R, DOONG J L, *et al*. Driver fatigue and highway driving: A simulator study[J]. Physiology & Behavior, 2008, 94(3): 448-453.

[35] WANG L, PEI Y. The impact of continuous driving time and rest time on commercial drivers' driving performance and recovery[J]. Journal of Safety Research, 2014, 50: 11-15.

[36] CHEN T, SZE N N, NEWNAM S, *et al*. Effectiveness of the compensatory strategy adopted by older drivers: Difference between professional and non-professional drivers[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 77: 168-180.

[37] CHEN T, SZE N N, BAI L. Safety of professional drivers in an ageing society – A driving simulator study[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019, 67: 101-112.

[38] PAMMER K, BLINK C. Visual processing in expert drivers: What makes expert drivers expert?[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2018, 55: 353-364.

[39] MAYHEW D R, SIMPSON H M, WOOD K M, *et al*. On-road and simulated driving: Concurrent and discriminant validation[J]. Journal of Safety Research, 2011, 42(4): 267-275.