

随机任务驱动的乘员任务负荷模拟平台研制

徐 蔚 郭书文 张卓成 谭国桢 薛元超 万 红

兵器工业卫生研究所 中国兵器工业集团人-机-环境重点实验室 陕西 西安 710000

摘 要: 针对特种车辆乘员在驾驶、目标搜索与射击等复合任务中易出现认知负荷升高和疲劳累积的问题, 研制一种随机任务驱动的乘员任务负荷模拟平台。平台由模拟操控单元、多模态生理参数采集单元和任务绩效测评单元组成, 可根据天气、昼夜、地形、驾驶路段、目标类型及打击顺序等参数自动生成驾驶—射击复合任务, 降低固定科目训练中的熟悉效应。系统同步采集心电、脑电、脉搏、呼吸、体温及心率变异性等指标, 并记录任务时长、完成率、命中情况和操作错误等绩效数据, 形成生理—绩效综合报告。原型联调结果表明, 平台具备随机任务生成、动态生理采集、绩效评定和报告输出能力, 可为乘员疲劳诱发、状态评估、训练优化及岗位选拔提供实验支撑。

关键词: 随机任务生成; 乘员疲劳; 模拟训练; 生理监测; 任务绩效

引言

现代特种车辆任务环境复杂, 乘员常需在有限空间内同时完成驾驶控制、目标搜索、火力打击和信息判断等操作。此类任务持续时间长、注意分配要求高, 容易造成认知资源消耗和作业疲劳, 进而影响反应速度、操纵精度和态势判断。国外战术车辆训练事故报告显示, 驾驶注意不集中、监督不足和训练短板是非战斗训练事故的重要诱因之一^[1]。因此, 构建能够稳定诱发任务负荷、同步采集生理状态并量化绩效变化的模拟培训平台, 对乘员疲劳评估和训练安全管理具有现实意义。

现有模拟训练系统多以固定路线、固定目标和预设流程为主, 适合技能训练和动作熟悉, 但用于疲劳研究时存在明显不足: 一是受试者多次训练后容易记住路径和目标出现规律^[2], 任务负荷随熟练程度下降; 二是系统通常侧重操作结果评价, 缺少对心电、脑电、脉搏等生理状态的同步记录; 三是主观量表可用于事后评价, 但难以描述疲劳形成过程中的动态变化^[3]。驾驶疲劳检测研究表明, 行为表现、生理信号和主观量表均可作为疲劳识别提供依据, 但单一指标容易受个体差异和场景干扰影响^[4]。

为此, 本文研制随机任务驱动的乘员任务负荷模拟平台。平台通过环境条件、驾驶子任务、射击目标和打击顺序的随机组合, 形成每次不同的驾驶—射击复合任务, 以提高不确定性和持续负荷; 同时集成背心、腕表、头盔等多模态采集设备, 实现生理数据、操作数据和绩效数据的同步记录。本文重点介绍平台总体架构、关键模块设计、原型实现与功能验证情况。

1 平台总体设计

平台按照“任务诱发—状态采集—绩效评定—数据

管理”的思路设计, 主要包括模拟操控单元、生理参数采集单元和任务绩效测评单元, 系统结构见图1。模拟操控单元由驾驶模拟器、操纵杆、踏板及显示终端组成, 用于模拟特种车辆驾驶、转向、越障、涉水和射击等操作。该单元向测评软件实时上传操纵指令、姿态状态、碰撞事件和射击结果, 为绩效评价提供基础数据。

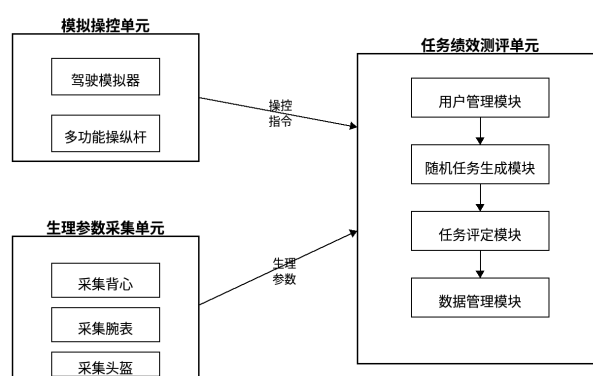


图1 系统结构示意图

生理参数采集单元采用可穿戴设备组合, 包括采集背心、采集腕表和采集头盔。背心主要采集心电、呼吸、体温和心率变异性相关数据; 腕表主要采集脉搏波、脉率、皮温和辅助呼吸信息; 头盔主要采集脑电波形及 α 、 β 、 θ 等频段特征, 同时可接入脉搏和温度传感模块。不同设备通过统一通信协议接入测评主机, 系统按时间戳对齐任务事件与生理数据, 便于分析疲劳变化与任务节点之间的关系。

任务绩效测评单元是平台的计算与管理核心, 主要包含用户管理、随机任务生成、实时评定和数据管理四个模块。用户管理模块记录受试者基本信息, 可扩展人格或岗位适应性量表; 随机任务生成模块负责配置环

境、路线、目标和难度参数；实时评定模块根据任务规则计算完成时间、通过率、命中率、错序率和超时次数；数据管理模块保存原始数据、特征数据和报告文件。平台支持单次任务和多轮任务测试，可根据研究需要设置任务时长、路段长度和目标数量。

2 关键模块设计

2.1 随机任务生成模块

随机任务生成是平台区别于固定科目模拟系统的核心。系统将任务参数划分为环境参数、驾驶子任务和射击子任务三类。环境参数包括天气、昼夜、能见度和地形地貌；驾驶子任务包括陡坡通过、窄路规避、S形限制路、T形限制路、涉水路段、车辙桥通过、原位转向和障碍规避等；射击子任务包括移动目标、隐藏目标、空中目标和无人平台目标等。多属性任务电池等经典复杂任务范式提示，多任务并行和任务要素变化有助于研究操作绩效与工作负荷^[5]，因此本平台将路线、目标、顺序和限时规则共同纳入随机生成过程。

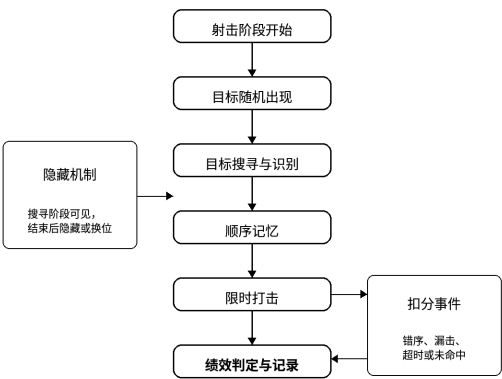


图2 射击任务流程图

在射击阶段，平台设置目标搜寻、顺序记忆和限时打击等规则，流程见图2。目标可在搜寻阶段短时显示，随后隐藏或改变位置，要求受试者记忆目标位置和打击顺序；若出现错序、漏击或超时，系统自动记录为绩效扣分事件。驾驶阶段与射击阶段可交替出现，使受试者在操纵控制、空间判断、目标识别和工作记忆之间持续切换。该设计能够减少重复训练造成的路径熟悉和策略固化，更接近实战环境中的不确定性负荷。

2.2 多模态生理采集模块

生理采集模块面向长时间动态任务，重点解决多设备同步、运动伪迹抑制和特征提取问题。心电数据用于计算心率、RR间期和HRV指标；脑电数据用于提取 α 、 β 、 θ 等频段功率及其比值；脉搏波用于补充脉率、脉搏波形变化和外围循环状态；呼吸、体温和皮温用于辅助判断负荷水平和环境影响。HRV标准化研究为时域、频

域指标的选取提供了基础，国内驾驶疲劳研究也验证了HRV、脉搏波等指标与疲劳状态的关联。

考虑到驾驶和射击动作会带来较多干扰，平台在采集端和软件端均设置质量控制环节。采集端通过柔性电极、贴合结构和稳定佩戴方式降低接触不良；软件端通过滤波、异常点剔除和信号质量标记减少运动伪迹影响。对于质量不足的数据段，系统可在报告中标注，避免将明显异常信号直接用于疲劳分析。

2.3 绩效评定与数据管理模块

绩效评定模块围绕“时间、准确、稳定”三个维度设计指标。时间类指标包括总任务时长、各子任务完成时间和反应时间；准确类指标包括驾驶通过率、碰撞次数、目标命中数、打击顺序正确率和超时次数；稳定性指标包括连续失误次数、关键节点操作波动和任务后段绩效下降幅度。系统通过规则引擎自动评分，并保留原始事件日志，便于人工复核。

数据管理模块采用结构化存储方式，将受试者信息、任务配置、绩效记录、生理原始波形、生理特征和报告文件分别保存。测试结束后，系统自动生成综合报告，内容包括任务配置、绩效统计、生理趋势曲线和关键事件标注。研究人员可据此分析不同任务难度、不同阶段和不同个体之间的疲劳差异，也可将数据导出用于后续模型训练。

3 原型实现与功能验证

平台原型已完成硬件集成和软件联调。模拟操控部分采用驾驶模拟设备与多功能操作杆，能够完成典型路段驾驶和目标打击操作；生理采集部分采用背心、腕表和头盔组合，支持多源信号同步上传；测评软件部署于计算机终端，集成任务生成、数据接收、实时评分、数据库管理和报告导出功能。系统界面包括受试者信息录入、任务参数设置、实时状态显示、历史数据查看和报告生成等页面，便于训练组织和实验管理。

功能验证围绕随机性、同步性、评分准确性和报告完整性开展。随机性验证中，在相同参数范围内连续生成多组任务，子任务顺序、目标位置和隐藏时机均能保持差异，未出现固定路径重复问题。同步性验证中，系统能够将任务事件与多设备生理数据按时间戳统一记录，满足后续事件相关分析需要。评分验证中，系统自动记录的完成时间、目标打击结果和错误事件与人工复核结果基本一致。报告验证中，软件可在测试结束后自动输出绩效统计和生理趋势结果，减少了人工整理数据的工作量。

内部试用表明，随机复合任务较固定任务更容易引

起持续注意和工作记忆负荷,受试者在目标隐藏、顺序记忆和驾驶一射击切换阶段更容易出现反应延迟、错序打击或操作波动。该结果初步说明平台能够为疲劳诱发和状态评估提供可控场景。但目前验证仍以功能测试和小规模试用为主,尚不能替代大样本实证研究。后续需结合NASA-TLX量表、标准疲劳量表和多轮生理数据,进一步验证平台诱发负荷的稳定性和疲劳识别指标的有效性。

讨论与应用前景

与传统固定科目训练系统相比,本平台的主要优势在于将随机任务生成、生理监测和绩效评定集成到同一流程中。随机任务能够降低熟悉效应,使受试者难以依靠记忆完成训练;多模态生理采集能够从自主神经活动、脑电节律和外周循环等多个角度记录状态变化;绩效评定则为生理变化提供行为学参照。三类数据同步积累后,可进一步用于建立疲劳水平、任务难度和操作风险之间的关联模型。

在军事训练中,平台可用于高负荷科目目前的状态评估、夜间训练前后的疲劳对比、不同岗位乘员的耐受性分析和训练方案优化。通过调整随机任务难度,可形成由低负荷技能巩固到高负荷疲劳耐受考核的分级训练模式。在岗位选拔方面,平台输出的生理—绩效报告可作为辅助指标,帮助识别在复杂任务中表现稳定、恢复较快的人员。在装备研发方面,平台积累的数据也可为车载疲劳预警算法提供训练和验证样本。

平台仍存在进一步完善空间。首先,当前任务难度主要依靠人工设置,尚未形成基于实时生理状态和绩效变化的自适应调节机制;其次,生理数据分析仍以特征

提取和趋势展示为主,疲劳等级判别模型有待建立;再次,当前原型以单人测试为主,对车组协同、通信负荷和多人交互的模拟还不充分。后续可引入机器学习方法构建个体化疲劳评估模型,并扩展多人协同和实车数据接口,提高平台的实战适配性。

结论

本文研制了一种随机任务驱动的乘员任务负荷模拟平台。平台通过随机生成驾驶一射击复合任务,提高任务不确定性和认知负荷;通过背心、腕表、头盔等可穿戴设备同步采集多源生理数据;通过绩效评定和数据管理模块实现任务过程记录、自动评分和报告输出。原型验证表明,平台具备随机任务生成、生理监测、绩效评价和数据归档能力,可为特种车辆乘员疲劳诱发、训练评估和岗位选拔研究提供工程化实验条件。后续应扩大样本量,完善疲劳判别模型,并开展与实车训练数据的对照验证。

参考文献

- [1]张驰,马广露,朱国华. 驾驶疲劳检测技术概述[J]. 交通工程, 2018(1): 18-21, 27.
- [2]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): 204-211.
- [3]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, 44(1): 46-50.
- [4]李鑫,张晖,吴超仲,张琦,孙一帆. 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.
- [5]靳慧斌,张静,吕川. HRV在管制员疲劳检测中的适用性[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(11): 2292-2298.