

认知工作分析在智能交互设计教学中的应用

王建民^{1,4}, 许忆芊¹, 付倩文³, 杨洁琪¹, 王萍¹, 由芳^{1,2}

(1. 同济大学 艺术传媒学院, 上海 201804; 2. 同济大学 智能型新能源汽车协同创新中心, 上海 201804;
3. 同济大学 设计创意学院, 上海 200092; 4. 中山大学 深圳研究院, 深圳 518057)

摘要:复杂系统人机交互是汽车人机交互设计教学中的重要一环。依托用户体验实验室多年智能汽车交互研究背景及设备环境条件,在传统的设计教学模式基础上,以智能座舱交互设计为主题,将认知工作分析方法引入研究生课程。课程中,学生自主选择设计载体及交互对象,以城市空中交通(UAM)智能座舱交互设计为例,学生将实地调研、桌面调研、用户调研与认知工作分析方法相结合,推导界面功能架构图,落实到界面原型设计。此外,在实验室的支持下,基于高保真原型,进行UAM智能座舱HMI可用性测试,证明了设计方案的初步可用性与易用性,并进行设计迭代。学生通过课程实践掌握复杂系统交互设计中的分析方法和工具,为后续自主开展相关研究奠定基础。

关键词:认知工作分析; 智能座舱; 复杂系统人机交互

中图分类号:G 642

文献标志码:A

文章编号:1006-7167(2025)01-0171-06



Application of Cognitive Work Analysis in Intelligent Interaction Design Education

WANG Jianmin^{1,4}, XU Yiqian¹, FU Qianwen³, YANG Jieqi¹, WANG Ping¹, YOU Fang^{1,2}

(1. College of Arts and Media, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Intelligent New Energy Vehicle Collaborative Innovation Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. College of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shenzhen Research Institute, Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

Abstract: Complex system human-machine interaction (HMI) is a crucial part of automotive HMI design education. Building on the UXLAB's extensive research and equipment, cognitive work analysis (CWA) is integrated into graduate courses, and it focuses on intelligent cockpit interaction design. In this course, students independently choose their design platforms and interaction subjects. Urban Air Mobility (UAM) intelligent cockpit interaction design is used as an example, students combine field research, desk research, user research, and CWA methods to complete the design. This approach enables the creation of interface function architecture diagrams and the development of interface prototypes. With laboratory support, usability testing of UAM intelligent cockpit HMI is conducted using high-fidelity prototypes, demonstrating preliminary usability and facilitating iterative design improvements. Through this course, students master the analytical methods and tools needed for complex system interaction design, preparing them for future research in the field.

Key words: cognitive work analysis (CWA); intelligent cockpit; complex system human-machine interaction

收稿日期:2024-06-20

基金项目:科技部高端外国专家计划项目(G2022133031L, G2023133041L);深圳市协同创新科技计划-国际科技合作项目(GJHZ20220913142401002);四川音乐学院数字媒体艺术四川省重点实验室资助项目(23DMAKL01, 23DMAKL12)

作者简介:王建民(1973-),男,内蒙古凉城人,博士,教授,博士生

导师,现主要从事智能媒介、智能汽车交互设计和虚拟仿真。

Tel.:18001778386;E-mail:wangjianmin@tongji.edu.cn

通信作者:由芳(1974-),女,山东临清人,博士,教授,现主要从事智能交互设计、汽车交互设计和数字媒体设计。

Tel.:18121427615;E-mail:youfang@tongji.edu.cn

0 引 言

随着智能化的发展,人类与复杂系统交互的需求逐渐增加。复杂人机系统的设计不当容易影响工作绩效、降低用户接受度和信任度、甚至造成人身威胁。面对不断变化的人机交互环境,交互设计课程通过理论与实践的有机结合,旨在培养学生掌握认知工作分析方法,以及建立全面的人-机-环境思维意识。

简单系统设计或改良设计可以通过用户观察和访谈、问卷调查、身体风暴等传统设计工具,获取用户痛点和需求,并应用到设计中^[1]。但是应用在交通、医疗、军事等领域,事关用户人身安全的复杂系统设计,需要对人-机-环境关系的严肃考虑,在设计阶段就尽量规避可能存在的人因失误,创建更安全可靠的人机系统。认知工作分析(Cognitive Work Analysis, CWA)为全面考虑复杂动态物理环境限制、认知主体能力限制、团队合作限制提供了理论工具。引入CWA到交互设计课程中,有助于学生后续开展对复杂人机系统的设计推导和研究工作。

本文引用的案例“城市空中交通(Urban Air

Mobility, UAM)智能座舱交互设计”是研究生交互设计课程内容。课程引入了CWA中的抽象层次结构(Abstraction Hierarchy, AH)和决策梯(Decision Ladder, DL)模型,帮助学生分析复杂人机系统的客观条件和信息需求,完成交互设计和评估。课程首先让学生自由选择研究方向,并明确设计场景,进行相关调研。然后,指导学生利用AH确定设计目标、粗粒度功能模块和载体,同时使用DL分析用户的信息需求。根据分析结果,学生绘制功能架构图并展开界面设计。最后,通过简单的可用性测试评估设计方案的可行性。

1 CWA 的定义与优势

1.1 CWA 的定义

CWA由Jens Rasmussen提出,用于分析、设计和评估复杂人机系统的框架。CWA通过约束行为主体(包括人和机器)建立适应于各种可能工况的稳健系统。CWA具有5个不同的维度,分别是工作域分析、控制任务分析、策略分析、社会组织与合作分析和工作者能力分析。根据牛可等^[2]和Naikar^[3]的总结,各维度的分析对象、分析目的和建模工具如表1所示。

表 1 CWA 的 5 个维度

维度	分析对象	分析目的	建模工具
工作域分析	约束(包括5个抽象层次结构;功能目的;价值和优先考虑;与目的的相关功能;物理功能;物理形式)	明确设计目标,确定设计边界和约束条件	抽象分解空间、抽象层次结构
控制任务分析	常发性任务(结合考虑行为主体的信息处理和人机系统的任务目标)	分析专家和新手用户面对人机系统特定任务的不同处理特征,帮助洞察特定任务下的信息需求	关联的活动模板、决策梯
策略分析	行为主体的潜在策略(利用动词反向连接工作域抽象维度层次)	分析系统约束下行为主体可能产生的策略	信息流图、决策分析图
社会组织与合作	人机任务划分(包括人类团队、机器系统内部的职能划分)	关注动态过程中工作分配可能性的限制	工作组织可能性图
工作者能力分析	行为主体的能力需求(包括3种能力分类:基于技能的行为、基于规则的行为和基于知识的行为)	确保工作需求不超过行为主体的能力极限	技能、规则和知识分类、SRK详细目录

不同维度的建模工具为复杂人机交互界面设计提供了基础。工作域(Work Domain Analysis, WDA)和控制任务是使用频率较高的CWA分析维度^[2],AH和DL分别是这两个维度常用的建模工具。设计调研为CWA提供信息,CWA分析结果支持信息功能架构图的建立,输出的低保真和高保真原型为设计评估提供材料。

AH以层次结构的形式描述了行为主体(包括人类和非人类)解决问题的环境,其中从功能目的到物理对象的分析模式符合用户抽象到具象、粗粒度到细粒度的问题处理模式。AH中各个层次间是“为什么-是什么-怎么做”的关系^[4]。

如图1所示,DL建模了行为主体的任务决策过

程,它针对常发性任务的细粒度分析,可以看作是对WDA中某个子系统的最细粒度分析^[5]。DL由圆形的知识状态节点和方形的信息处理活动节点连接组成。正如命名,DL像“^”形的梯子一样,左侧代表行为主体通过观察行为理解任务情况的过程,顶点是行为主体产生对任务选项以及响应结果的判断,以支持决策,右侧则是行为主体通过一系列动作执行任务的过程。总体来说,DL符合人类信息处理系统的基本逻辑,从刺激感知,到思维与决策,最后是反应执行。根据行为主体的经验和对系统的熟悉程度,以及使用自动化的程度,行为主体可以走捷径跳过大部分决策过程,捷径的4种类型^[2]如图1所示。

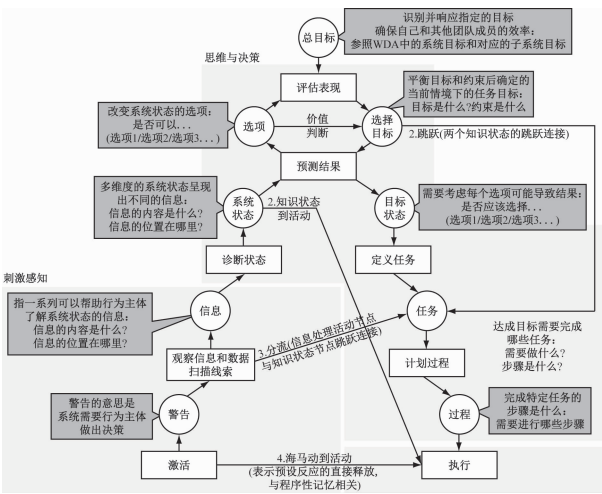


图1 DL模型结构解释

1.2 CWA 的应用

为系统了解 CWA 的研究热点,本研究采用文献计量法^[6],以 Citespace 为可视化工具,聚焦 Web of Science 核心合集中 SSCI、A&HCI、SCI-Expanded、CPCI-S 和 CPCI-SSH 五大高质量引文索引数据源,检索关键词全称及其缩写,如“Cognitive Work Analysis”和“CWA”或“Work domain Analysis”和“WDA”或“Decision Ladder”和“DL”,以提高检索结果的相关性,限定文献类型为“论文”或“会议论文”。最终,通过 Citespace 去重处理后,获得有效样本文献 81 篇,涉及的学科领域包括工程、心理学、计算机科学、行为科学、运输等。

通过 Citespace 对高频关键词进行共现聚类结果如图 2 所示,主要分为 9 个集群:限制、CWA、任务分析、推理、AH、认知系统工程、道路界面设计、CWA。按照引用次数排名,集群 2 中的 CWA 排名最高,CWA 是设计高风险领域的一种适用方法,被用于研究空中交通管理^[7]、工业 4.0 中的人机协作系统^[8]、驾驶行为^[9]等。其次是集群 0 中的设计,CWA 可以与用户参与式设计结合使用以提高用户体验^[10]。集群 3 中的复杂系统、集群 7 中的生态界面设计

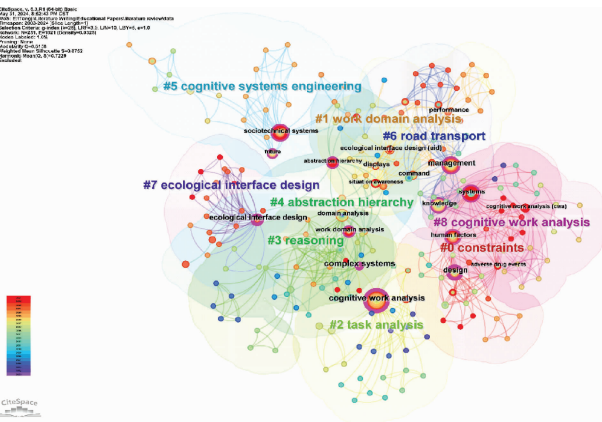


图2 CWA 研究高频关键词共现聚类结果

(Ecological Interface Design, EID)、集群 4 中的 WDA 排名相同。WDA 是 CWA 的基础阶段,通常与专家访谈结合使用,为理解和设计复杂系统提供了一个平台,利用 WDA 帮助研究的复杂系统包括医疗急诊系统^[11]等。EID 与 CWA 都源于生态心理学,强调从整体和系统的角度进行考虑和分析,关注用户的认知需求和体验,追求人-环境的和谐与可持续发展。EID 被用于开发航空风险管理界面^[12]、车辆控制显示器设计^[13]等,并被证明可以显著提高显著性和降低工作负荷。

2 教学目标及方法探索

2.1 教学目标

为使学生深刻掌握复杂人机系统的交互设计精髓,需在传统设计工具的基础上,坚持“以用户为中心”的核心设计理念,并引入系统分析人-机-环境交互关系的理论框架,以此全面培养学生的复杂人机系统分析与设计能力。本课程面向研究生层次,依托学院在智能汽车交互领域长期积累的研究背景,以“智能座舱交互设计”为核心议题,鼓励学生根据个人兴趣和研究需求自主选择研究方向。课程的教学目标设置如下:

(1) 通过实践环节,旨在巩固和深化研究生的设计调研能力。鼓励学生综合运用问卷调研、深度访谈、桌面调研、实地调研等多种设计调研工具,形成全面而深入的调研报告。这一环节旨在使学生深入理解复杂人机系统的内在逻辑,明确系统的设计目标,为后续的系统分析奠定坚实的理论基础。

(2) 教授学生 CWA 中的 AH 和 DL 建模工具的使用方法。通过 AH 分析,学生将学会如何将复杂的人机系统解构,明确设计边界、设计载体和设计功能;而 DL 分析则侧重于帮助学生理解设计应用场景,洞察任务发展过程中的用户信息需求,从而基于任务知识状态的发展分析进行精准设计。

(3) 引导学生将复杂系统的分析结果转化为具体的界面设计方案,并教授如何利用课程资源进行初步的可用性测试。这一环节旨在通过完整的设计实践让学生体验“设计调研-设计分析-原型设计-设计评估”的全流程,以全面提升学生的设计实践能力。

2.2 教学方法探索

教学方法采用“5E”教学模式,从吸引(Engagement)、探索(Exploration)、解释(Explanation)、迁移(Elaboration)和评价(Evaluation)5个步骤,在巩固传统设计方法应用的同时,将新的理论工具纳入复杂人机系统设计流程,帮助学生在设计实践中掌握新的理论工具,充分发挥学生的主观能动性^[14]。各步骤的教学方法探索如下:

(1) 吸引。设计工具教学与往期课程案例分享。

通过理论与案例相结合的讲课方式,介绍常用设计工具及其应用手段和预期成果,完善学生的设计工具知识库。此外,依托文献资料讲解 CWA 的分析思路,并着重介绍 AH 和 DL 的应用方法,提供复杂人机系统设计的分析工具。

(2) 探索。自主选择选题与设计载体。在“智能座舱交互设计”的大方向下,学生可根据自身学科背景自主选择研究方向,并以小组的形式开展设计工作。确定选题后,学生被要求利用课上学习巩固的设计工具展开前期调研,并使用 AH 和 DL 进行复杂人机系统分析。

(3) 解释。学生小组分享选题思路、介绍调研过程与结果、交流 AH 与 DL 分析结果。以设计阶段划分课程学时,分为选题和前期调研、设计分析、原型设计、设计评估与迭代 4 个阶段。每阶段结束后,学生团队以 PPT 等形式汇报阶段产出,教师和其他学生团队可以对各阶段进展情况提出改进意见。

(4) 迁移。将新的理论工具与传统设计工具相结

合,输出界面与交互设计方案。根据 AH 和 DL 分析得到的信息需求要点,学生需要建立功能架构图,并基于此依次完成低保真和高保真原型设计。

(5) 评价。学生小组互相充当被试,利用学院设备环境资源,各小组展开设计原型的简单可用性测试,并进行设计迭代。

3 课程设计实践

3.1 选题和前期调研

学生团队自主确定选题为“UAM 智能座舱交互设计”,应用背景是 UML5-6 等级,飞行器具备较为成熟的自动驾驶能力,载运具驾驶采用远程 M 对 N 机队管理控制模式^[15]。为获取飞行驾驶过程中飞行器座舱 HMI 功能与形式的基础知识,学生团队前往位于中国上海的 CityFlight 上海飞行体验馆进行实地调研,记录飞行驾驶的交互操作动线,并结合其他桌面调研资料 and 用户调研结果,总结归纳得到飞行器座舱 HMI 六大功能模块和主要的子功能模块,如表 2 所示。

表 2 飞行器座舱 HMI 功能模块和子功能模块

功能模块	子功能模块
载具监控功能	姿态仪、高度表、升降速度表、空速表、航向仪、气压表、汽化器温度表、能源状态(油量/电量)、载具维护情况(上次检修时间)、座舱硬件检测(车门启闭情况/安全带解系情况等)……
导航功能	GPS(包括航空器图标、航迹、速度矢量显示等基本元素)、剩余行程时间、天气状况……
通信功能	内话机、通信电台、应答机、与人工客服或远程驾驶员的实时通信通道、AI 客服的答疑解惑……
自动/辅助驾驶功能	速度控制、航向控制、高度控制、爬升高度控制、驾驶模式显示(自动驾驶模式/手动驾驶模式/远程驾驶模式)……
安全功能	警告信息(短期冲突警告、危险区侵入警告、低高度警告等)、警告灯(一氧化碳警告灯、低燃油面警告灯等)、关键仪表备份(额外的备用机械式仪表、同一显示屏通过按键切换显示不同仪表界面等)、主副油箱设置、误触防护(需要额外的操作步骤开启或解除自动驾驶状态等)、应急定位发射、紧急求生的设备位置与使用说明……
调节控制功能	座舱加温设置、座舱通风设置、界面显示设置……

斜体表示用户调研得到的信息需求

3.2 设计分析与原型设计

根据用户调研(问卷调研和深度访谈),确定系统功能目的为“提升用户 UAM 出行安全感”,参考前期实地和桌面调研得到的物理对象,学生推导整理出 WDA 的 AH 结构,如图 3 所示。基于实地调研过程中

对现役飞行员的访谈结果,结合考虑对普通新手用户的深度访谈和问卷调研信息,学生确定“警告激活状态下联系远程机长”为确保出行安全的关键性任务,并绘制 DL,如图 4 所示。

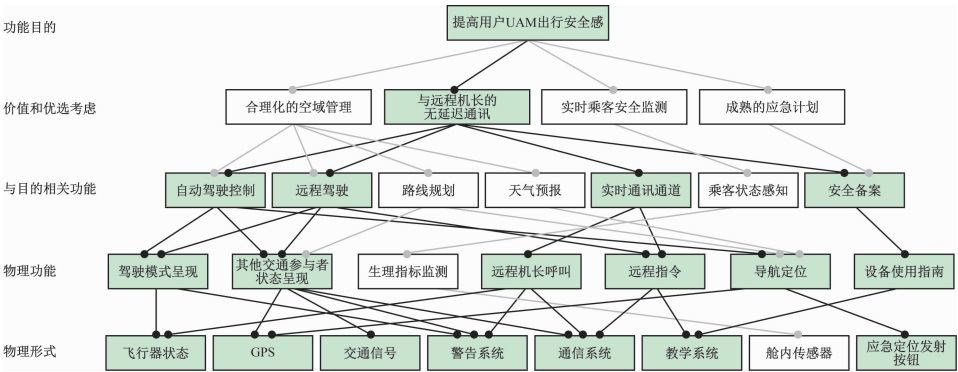


图 3 以“提升用户 UAM 出行安全感”为功能目的的抽象层次结构推导过程

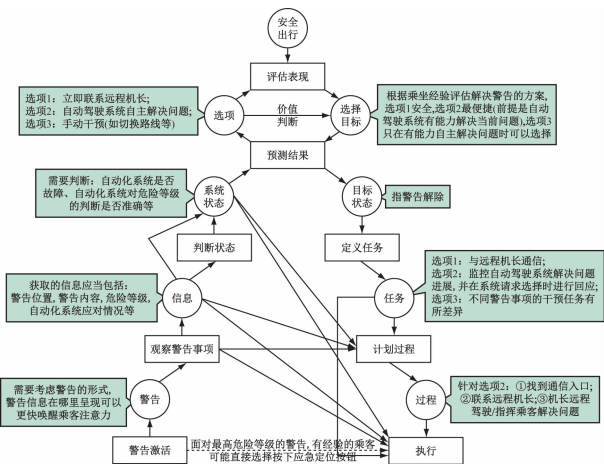


图4 DL分析结果



(a) 主页面

(b) 选择页面

(c) 通信页面

(d) 虚拟机长通信页面

图6 设计的高保真原型

根据 AH 分析明确的设计边界以及 DL 分析获取的用户信息需求,参考汽车座舱交互屏布局,学生团队选取中控屏为设计载体,梳理归纳得到 UAM 智能座舱中控屏的功能架构图,如图 5 所示。设计的高保真原型如图 6 所示,从图 6(a)到(d)分别是主页面、远程机长通信选择页面(根据事态严重性选择联系真人远程机长或询问虚拟机长,同时充当误触防护)、真人远程机长通信页面和虚拟机长通信页面。

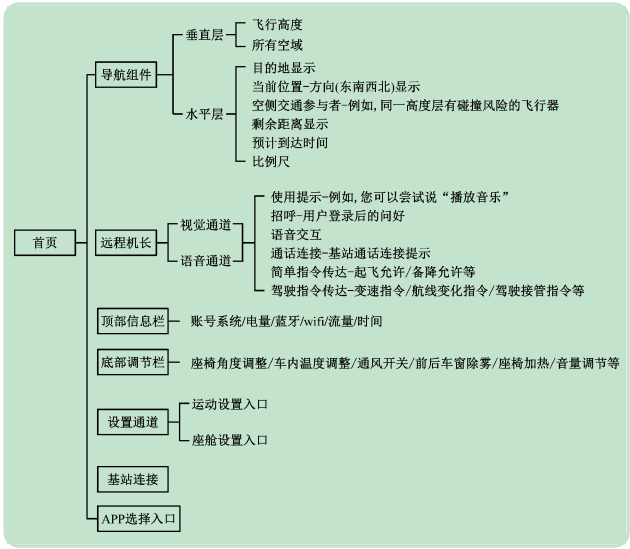


图5 中控屏功能架构图



图7 实验设备与环境

材料包括访谈录音设备、摄影机等。共有 6 名具备车辆驾驶经验的被试参与了实验,其中男性 3 名,女性 3 名,平均年龄 23 岁($SD = 0.63$)。

(2) 实验设计与流程。实验设计由学生团队提出,用到的测试方法包括绿野仙踪和实时探针。实验任务围绕“联系远程机长”展开,分为 3 个子任务,分别是在警告激活时找到通信入口并呼叫远程机长、根据远程机长指令完成特定操作杆操作(包括前俯、后仰、左倾、右倾)以及找到特定 icon 结束通信,实验流程如图 8 所示。实验中的因变量为被试完成任务 1 的客观时间和 SUS 量表主观得分。

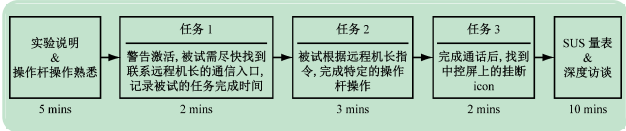


图8 实验设计与流程

3.3 可用性测试

为了验证设计与用户的心智模型是否匹配,可用性测试需要在设计的各个阶段进行,以洞察设计误区。可用性测试主要测量 3 个方面:效率(用户完成特定任务所需的时间)、有效性(用户是否能完成特定任务)和用户满意度。

(1) 实验设备与被试。如图 7 所示,实验设备包括分别呈现仪表盘和中控屏的 2 台电脑、飞行驾驶操作杆模拟器、警告屏纸上原型(用于模拟飞行器座舱的警告灯系统)以及扮演远程机长的演员。其他实验

4 数据分析

4.1 客观数据分析

参与实验的用户均顺利完成了所有任务,充分证明了中控 HMI 的设计有效性。任务 1 完成时间如图 9(a)所示,分为完成任务总时间和 2 个阶段的完成时间,第 1 阶段指从任务指令发出到被试在主页面[见图 6(a)]找到通信入口的时长,第 2 阶段指从第 1 阶段结束到正确选择通信类型并进入界面的时长[见

图 6(b)]。结果发现任务 1 的完成总时间平均值为 12.04 s ($SD = 5.92$), 其中第 1 阶段的平均完成时间为 5.96 s ($SD = 6.11$), 而第 2 阶段则为 7.29 s ($SD = 4.18$)。总体来说, 任务 1 的整体完成时间较长, 尤其是在第 2 阶段耗时较为显著, 这可能与选择页面中过多的文字内容有关, 导致用户在处理信息时出现了延迟。鉴于警告激活状态下与远程机长的联系属于安全关键性任务, 其完成效率对于整个系统的安全性至关重要。因此, 在后续的设计优化中, 报警按钮的显著性需要提升, 通过调整其大小、形状和颜色等视觉元素, 以主动吸引用户的注意力, 从而提高任务的完成效率和安全性。

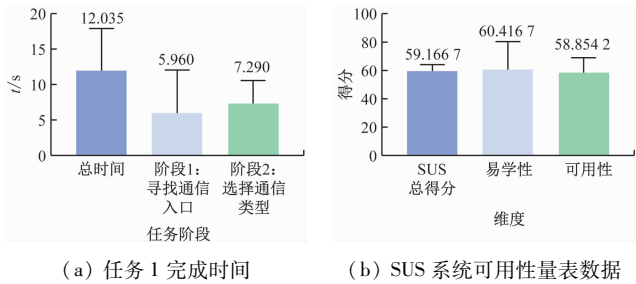


图 9 客户完成时间及量表数据实验结果

4.2 主观数据分析

根据被试填写的 SUS 可用性量表数据, 得到 SUS 总得分、易学性、可用性三个维度的得分。如图 9(b) 所示, 中控原型的 SUS 总得分、易学性得分与可用性得分平均值分别为 59.17、60.41 和 58.85。对照 Bangor 等提出的评级量表, 中控原型的可用性与易用性都达到了“OK”, 说明系统已经达到了初步的可用性与易用性, 处于中等水平, 但仍需进一步探索。

4.3 实验结果与设计迭代

学生团队的中控原型设计在探索未来概念性设计的道路上取得了初步的成效, 说明 AH 与 DL 分析帮助推导复杂系统功能架构具有一定的成效。虽然用户满意度 (SUS) 得分没有达到理想状态, 但考虑到这是一个探索性实验, 这样的结果仍具有一定的价值。在课程的最后, 学生团队根据可用性测试中暴露出来的问题, 对中控设计进行了迭代。

5 结 语

本文选取学生交互设计课程方案, 选题为“UAM 智能座舱交互设计”, 通过传统设计调研方法与 CWA 中 AH 和 DL 分析方法相结合的方式, 推导以“警告激活状态下高效联系远程机长”为目的的 UAM 智能座舱中控屏的功能架构图, 产出高保真原型设计方案。基于实验室提供的飞行驾驶操作杆设备, 使用绿野仙踪、实时探针的方法进行可用性评测, 实验任务的客观完成效率与 SUS 可用性量表数据证明, 通过 CWA 推

导得出的界面设计方案达到了初步的可用性。基于可用性测试结果, 学生团队进行了设计迭代。

该课程以学院深厚的科研背景为依托, 紧密融合专业特色, 旨在提升学生的复杂系统人机交互界面设计能力和评测技能。在教学实施过程中, 教师采用了“5E”教学模式, 通过案例分析的方式, 有效激发了学生的学习热情与积极性。此外, 课程鼓励学生自主选题并开展设计实践活动, 以培养其问题识别与解决的能力。同时, 为确保设计方案的可行性, 课程提供了丰富的实验环境和设备支持, 用于方案的可用性测试。通过定期的学术交流与讨论, 课程不仅促进了设计迭代的推进, 还激发了学生对汽车人机交互设计领域的兴趣, 并提升了其实验能力, 为学生未来独立进行深入研究奠定了坚实的基础。

参考文献 (References):

[1] Lim Y, Casalegno F. Contextual evaluation of digital media through experience-focused participatory bodystorming in a full-scale spatial prototype [C]//Stephanidis C. Communications in Computer and Information Science. Orlando: Springer, 2019: 32-40.

[2] 牛 可, 方卫宁, 郭北苑, 等. 复杂人机系统设计中认知工作分析理论、技术与应用研究进展 [J]. 中国科学 (技术科学), 2018, 48(6): 596-615.

[3] Naikar N. Cognitive work analysis: An influential legacy extending beyond human factors and engineering [J]. Applied Ergonomics, 2017, 37(9): 528-540.

[4] 由 芳, 杨伟光, 郑贵锋, 等. 工作域分析在智能交互界面教学中的应用 [J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(7): 194-199.

[5] Hoffman R R, McCloskey M J. The macrocognitive decision ladder [J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2013, 57(1): 245-249.

[6] 郭凤香, 曲思柔, 万华森, 等. 分心驾驶研究文献计量学分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 26-39.

[7] Lundberg J, Arvola M, Westin C, et al. Cognitive work analysis in the conceptual design of first-of-a-kind systems-designing urban air traffic management [J]. Behaviour & Information Technology, 2018, 37(9): 904-925.

[8] Guerin C, Rauffet P, Chauvin C, et al. Toward production operator 4.0: modelling Human-Machine cooperation in industry 4.0 with cognitive work analysis: ifac papersonline [C] //Leonidas Tsiopoulos. 14th International-Federation-of-Automatic-Control (IFAC) Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human Machine Systems (HMS). Tallinn: Elsevier Science, 2019: 73-78.

[9] Stanton N A, Allison C K. Driving towards a greener future: an application of cognitive work analysis to promote fuel-efficient driving [J]. Cognition Technology & Work, 2020, 22(1): 125-142.

[10] Saadati P, Abdelnour-Nocera J, Clemmensen T. Co-designing prototypes for user experience and engagement in automation [C] // Bhutkar G, Barricelli B R, Xiangang Q, et al. 6th IFIP WG 13.6 Working Conference on Human Work Interaction Design (HWID). Beijing: Springer, 2022: 158-177.

鲜明的时代背景,有望缓解国家面临的固体废弃物磷石膏长期堆存导致的环境污染问题,实现磷石膏的资源化利用。该实验课题紧扣国家科技战略需求,切合环境保护时代背景,实验设计内容形式多样,能更贴切的并有效激发学生探索求知欲,这种将科学研究渗透到实验教学的理念和方法将赋予实验教学生机与活力。通过这个综合化学实验,不仅提升了学生知识与技能,还培养了学生科研素养和团队协作能力,能更好地了解化学知识在实践中的应用场景,增强学生解决实际问题的能力,有助于培养出具备扎实知识、良好技能和科研素养的化学专业人才,推动化学相关行业如制药、材料、环保等领域的发展,为社会创造更多的价值,促进科技进步和社会经济的可持续发展。

参考文献 (References):

[1] 单树楠,李 娴,张 雷,等. 基于学科交叉的综合化学实验的教学设计[J]. 实验室研究与探索,2021,40(11):145-149.

[2] 罗娅君,胡晓黎,李 松,等. 探索综合化学实验培养学生综合创新能力[J]. 实验室研究与探索,2011,30(11):100-102.

[3] 吴彦东,费 峥,邱明强,等. 骆驼宁 F 一锅全合成的创新型综合实验设计及教学实践[J]. 化学教育(中英文),2023,44(2):55-61.

[4] 庄欠粉,王 勇. 碳点光学检测金(III) 离子的分析化学综合实验设计与教学实践[J]. 实验室研究与探索,2021,40(9):162-168.

[5] 戴昉纳,王继乾. 金属-有机框架 PCN-250 的合成及表征综合化学实验[J]. 实验室研究与探索,2021,40(3):208-211.

[6] 宋红杰,张立春,吕 弋. 大学化学综合设计实验的教学探索

(上接第 135 页)

[8] 李 杨,郭梓晗. 德国科研管理体制与科技创新政策及启示[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊),2021(6):115-117.

[9] 葛春雷,裴瑞敏,张秋菊. 德国科研机构协同创新组织模式研究[J]. 中国科学院院刊,2024,39(2):345-357.

[10] 德国科技创新态势分析报告课题组. 德国科技创新态势分析报告[M]. 北京:科学出版社,2014:57-58,258-262.

[11] 德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会运营分析[J]. 中国科技信息,2014(14):22-24.

[12] 刘德娟,沈 力,薛慧彬. 外国国立科研机构的运营特征及其启

(上接第 176 页)

[11] Austin E E, Blakely B, Salmon P, *et al.* Eadem Sed Aliter. Validating an emergency department work domain analysis across three hospital configurations[J]. Applied Ergonomics, 2024, 117: 104240.

[12] King B J, Read G, Salmon P M. Clear and present danger? Applying ecological interface design to develop an aviation risk management interface [J]. Applied Ergonomics, 2022, 99: 103643.

[13] Lee S W, Nam T S, Myung R. Work domain analysis (WDA) for

[J]. 实验技术与管理,2015,32(7):197-201.

[7] Qi J, Zhu H, Zhou P, *et al.* Application of phosphogypsum in soilization: a review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 20 (9): 10449-10464.

[8] Chernysh Y, Yakhnenko O, Chubur V. Phosphogypsum recycling: A review of environmental issues, current trends, and prospects [J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11 (4): 1575.

[9] 邓 华,侯硕旻,李中军,等. 磷石膏综合利用现状及展望 [J]. 无机盐工业,2024,56(1):1-8.

[10] 张 娟,许 力,张文鹏. 固相微萃取—气相色谱检测多环芳烃的仪器分析教学实验设计 [J]. 实验室研究与探索,2023,42(7):156-160

[11] Xu L, Hu W, Wu F S, *et al.* In situ growth of porous organic framework on iron wire for microextraction of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Talanta, 2023, 264: 124732.

[12] 周建钟,郭 明,吴荣晖,等. 基于专业特色的气相色谱技术模块构建与流程式教学研究 [J]. 实验室研究与探索,2017,36(7):196-198.

[13] 李 航,刘心韵,付 海,等. 三种硅烷偶联剂改性磷石膏在 HDPE 中的应用 [J]. 塑料工业,2019,47(6):137-140.

[14] Xu L, Hu W, Zhang J. A novel fiber prepared from waste phosphogypsum for SPME of polycyclic aromatic hydrocarbons by GC? FID [J]. Chemical Papers, 2023, 77: 6947-6957.

[15] 贾 琼,马玖彤,许 海. 仪器分析综合实验:固相微萃取纤维的制备及在有机氯农药富集和分析中的应用 [J]. 化学教育(中英文),2021,42(24):54-58.

[16] 王 辉,丁益民,赵永梅,等. 邻菲罗啉铜配合物的综合化学实验设计与教学分析[J]. 实验室研究与探索,2023,42(2):196-199.

示[J]. 科学管理研究,2022,40(6):147-156.

[13] 李建强,赵加强,陈 鹏. 德国弗朗霍夫学会的发展经验及启示(上)[J]. 中国高校科技,2013(8):54-58.

[14] 张志勤. 欧盟大型科研基础设施概述及政策走向[J]. 全球科技经济瞭望,2015(6):7-15.

[15] 潘彩霞,陶爱荣,丁永健. 德国科研机构管理体制研究及启发[J]. 机电信息,2016(33):152-153.

[16] 章熙春,柳一超. 德国科技创新能力评价的做法与借鉴[J]. 科技管理研究,2017,37(2):77-83.

ecological interface design (EID) of vehicle control display [C] // Vladareanu L, Chiroiu V, Bratu P, *et al.* 9 th WSEAS International Conference on Automation and Information. Wisconsin: WSEAS, 2008: 387-392.

[14] Obbo J, Dillmann B, Adorno D P. A SE-based learning experience to introduce concepts relevant in Quantum Physics[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2727: 012014.

[15] 李诚龙,屈文秋,李彦冬,等. 面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35-54.