

DOI: 10.3901/JME.2023.11.117

智能头盔的多模态交互评价与优化设计

彭 坚 王雪鹏 季 铁 陈鋈纯

(湖南大学设计艺术学院 长沙 410082)

摘要: 随着智能可穿戴装备的快速发展,其交互模态的选择越来越多,简单的交互模态叠加既不能满足交互需求,还造成了用户信息过载、认知负荷提高等交互问题。因此,智能可穿戴设备的多模态交互评价与优化设计的重要性也日益凸现。以军警智能头盔为例,提出基于交互效能、用户感知、交互成本的多模态交互评价(Efficiency、user experience、cost, EUC)方法,基于此方法对军警智能头盔的交互模态配置进行单一产品的关键性能优化设计。其中,交互评价测试基于任务绩效测量(任务完成时间、错误率、操作次数)和用户感知测量(感知可用性、感知工作负荷),并利用方差分析等方法研究交互指标与变量之间的关联性和影响度,完成了军警智能头盔在边界工况和多姿态下多种模态组合方式的交互评价。最终依据评价结果,实现了对军警智能头盔的优化设计并提出了其交互模态灵活配置的解决方案。

关键词: 可穿戴装备; 多模态融合; 交互成本; 交互评价; 优化设计

中图分类号: TP302

Multimodal Interactive Evaluation and Optimization Design of Intelligent Helmet

PENG Jian WANG Xuepeng JI Tie CHEN Junchun

(School of Design, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: With the development of intelligent wearable equipment, an increasing number of interaction modalities can be selected. Simple interaction modal superposition not only fails to meet interaction needs, but also causes interaction cost issues such as user information overload and increased cognitive load. Therefore, the importance of multi-modal interaction evaluation and optimal design of smart wearable devices has become increasingly prominent. Taking the intelligent helmet as an example, a multi-modal interactive evaluation method (EUC method) based on efficiency, user experience, and cost is proposed. And optimize the design for the modal selection of military and police intelligent helmets based on EUC method. Among them, the interactive evaluation test is based on task performance measures (i.e., task completion time, error rate and number of operations) and user perception measures (i.e., perceived usability and workload), as well as using ANOVA and other methods to study the correlation and influence between interaction indicators and variables to complete the effectiveness of multiple modal combinations under boundary conditions and multiple postures. Finally, the optimal design suggestions and solutions for the multi-modal flexible configuration are proposed for the military and police intelligent helmets based on evaluation results.

Key words: wearable equipment; multi-modal fusion; interaction cost; interaction evaluation; optimal design

0 前言

数字化战场中,底层作战的将是用高科技装备和手段武装起来的数字化士兵系统,要具备数字化作战能力,意味着我方所有装备都需具备数据的接

收和分发能力,同时每一个装备平台,也是一个信息接收和处理中心,能够实时熟悉战场态势感知。因此,军警头盔作为单兵关键装备的智能化发展和多模态融合需求显著,但军警头盔自重较大且有严格的重量限制,同时应用场景和交互特点上与传统智能设备并不相同,因此基于多模态交互评价的交互单元选择和多模态交互灵活配置将是军警智能头盔的优化设计的重要切入点。单一模态输入在

极端工况下的交互效能易受影响,且任务越复杂,多模态交互的可用性评级就越高^[1],多模态组合的人机交互方式可以综合单一模态交互的优势^[2],实现多种输入方式的优势互补^[3-5],但与此同时,出于交互成本、重量和人机性能考虑,交互模组并不能简单叠加集成。此外,“虚拟-现实”等技术的发展也给人机交互的模态选择带来了更多可能性^[6]。当前,国内外学者针对交互流程中“输入-识别/处理-输出/反馈”等不同阶段的主要研究如表 1 所示^[7-28]。

表 1 现有研究总结

输入	识别/处理	输出/反馈
TRIANTAFYLIDIS 等 ^[7] 针对多模态组合对操作的影响进行比较,评估认知工作量和系统可用性,以评估整体性能	CHO 等 ^[8] 研究了模式、设备和任务差异对语音激活虚拟助手的感知人类相似性和态度的影响	SHWARZ 等 ^[9] 使用增强现实作来对驾驶员提供多模态的交互反馈以提示警告信息
NUOVO 等 ^[10] 研究了老年人对多模态输入界面的使用意愿和系统可用性,实验证实了多模态输入提高其可接受性,并可能成为人们广泛接受机器人服务的必要条件	CAROLIS 等 ^[11] 的研究通过识别和监测用户情绪、态度、好恶等情感反馈因素来改进系统的信息过滤流程,且实验结果表明,系统可以在没有明确反馈的情况下分析用户并提高推荐性能	REN 等 ^[12] 研究了音频、触觉等非视觉交互模式对交互任务执行的影响,并针对增强现实和混合现实的应用提出了音频和触觉显示设计指南
MERKOURIS 等 ^[13] 针对教育场景,研究了多模态实体交互和虚拟交互对学生学习效果的影响,并发现了物理操作有更好的效果	WANG 等 ^[14] 提出了一种新型的基于人类认知的交互式 AR 装配指导系统,研究了增强现实如何针对用户认知过程的不同阶段提供指导	NUAMAH 等 ^[15] 发现视觉反馈的任务性能高于视觉与触觉组合,但视觉的反馈效能更容易被认知压力影响
HEPPERLE 等 ^[16] 针对不同任务,研究了在沉浸式环境中的每个输入模态的优势和劣势,以此来制定最为有效的交互策略	WANG 等 ^[14] 提出了一种新型的基于人类认知的交互式 AR 装配指导系统,研究了增强现实如何针对用户认知过程的不同阶段提供指导	MONTUWY 等 ^[18] 针对老年人感知和认知能力下降的特点,评估了视觉、听觉和触觉反馈的用户体验
WANG 等 ^[19] 研究了协作虚拟环境中,语音、触觉和两者组合的通信效率,发现语音和触觉组合输入的效率显著高于触觉	PAU 等 ^[17] 研究了视觉、听觉、触觉三种模态及多模态组合对用户阅读负担的影响,研究表明,听觉对用户阅读的影响最大	LUZIO 等 ^[21] 基于机器人辅助康复的场景,评估了多模态反馈的有效性、接受度和绩效
KIM 等 ^[22] 研究了在网球比赛远程专家指导的场景中,不同模态单一或组合输入的效率及对注意力的影响	DOUKAKIS 等 ^[23] 研究了多模态交互反馈的分配方案,并发现了用户倾向于优先考虑视觉反馈的质量	HELLER 等 ^[25] 发现触摸反馈相较于语音反馈更能刺激消费者的支付意愿
SCHÜSSEL 等 ^[24] 基于多模态输入研究了用户性别、个性特征对交互选择和处理的影响	HELLER 等 ^[25] 发现触摸反馈相较于语音反馈更能刺激消费者的支付意愿	BAJPAI 等 ^[27] 研究了不同模态反馈,并发现触觉反馈降低了任务故障率和用户反应时间
XIAO 等 ^[26] 开发了 MRTouch 用于头戴式混合现实系统的多点触控输入并在 Microsoft HoloLens 上实现了高输入精度	ESTEVES 等 ^[20] 针对凝视输入比较了五种选择技术,发现手动点击和位置停留在识别精确度、速度和体力负荷的指标上最佳	RAU 等 ^[28] 基于虚拟现实场景,提出了一种探索复杂信息流容量和适用性的方式

现有研究主要集中于交互系统的开发和对现有交互模态的改良,基于交互效能或可用性的设计研

究多针对单一模态,少数基于多模态可用性的设计研究并未设定多变量实验。智能头盔作为头戴式智能终端,与传统智能设备在应用场景和功能特点上存在显著差异,其应用场景的工况相较于传统设备更复杂,对交互效率和可用性的要求更高,同时,智能头盔大多集成了状态检测、视野增强等的辅助功能,导致其在交互模态选择和交互逻辑设计上与传统智能设备存在不同。当前,智能头盔的应用研究正在各个领域进行,如军警作战、采矿安全、建筑施工等,其部分案例的研究现状及核心技术特点如表 2 所示^[29-47]。

表 2 智能头盔发展现状总结

参考案例	时间	应用场景	核心功能集成
C-Thru ^[29]	2013	军警作战	增强现实;智能图像识别;热成像
Helon 360 ^[30]	2019	军警作战	360°热成像;图像传输;氧气水平监测
Striker II ^[31]	2016	军警作战	夜间全彩显示;透明座舱;姿态感知
F-35 Helmet ^[32]	2015	军警作战	夜视技术;透明座舱;姿态感知
IVAS ^[33]	2019	军警作战	夜视技术;混合现实;姿态感知
CHENG 等 ^[34]	2009	采矿安全	有害气体检测;湿度检测;温度检测
NITHYA 等 ^[35]	2018	采矿安全	有害气体检测;温湿度检测;危机预警
KIM 等 ^[36]	2018	采矿安全	工作状态检测
LI 等 ^[37]	2014	采矿安全	姿态感知;脑电监测;运动检测
WANG C 等 ^[38]	2020	建筑施工	事故检测;压力检测
PIRKL 等 ^[39]	2016	建筑施工	温湿度检测;亮度检测;有害气体检测;火灾探测
LEE 等 ^[40]	2019	建筑施工	有害气体检测;事故检测
MOHAMMED 等 ^[41]	2020	医疗健康	温度检测
BISIO 等 ^[42]	2017	医疗健康	脑电波检测
SHAHIDUZZAMAN 等 ^[43]	2019	医疗健康	危机检测及预警
RASIL 等 ^[44]	2013	骑行安全	启动控制;超速提醒
MELCHER 等 ^[45]	2015	骑行安全	生命体征检测
MOHANAROOPA 等 ^[46] , RAO 等 ^[47]	2020	骑行安全	头盔磨损检测;酒精检测;事故检测;位置检测

军警智能头盔的工作场景经常为复杂环境或极端工况,单一模态难以满足交互需求,因此其多模态交互的融合趋势尤为明显。当前,对以智能头盔为载体,在极端工况下的多模态交互设计指南和交互形式因素讨论尚少^[48]。此外,在现有的交互评价和设计研究中,极少考虑交互成本问题,交互组件的简单集成和叠加导致大量智能设备出现模态使用效率低、信息过载等问题,因此智能设备交互模态的合理配置和选择是亟待解决

的问题。孙启玉等^[49]将交互成本分为感觉成本、认知成本、操作成本，简单的模态组件叠加导致设备的交互成本和硬件成本上升，因此需要结合设备的应用场景和交互特征对模态进行灵活选择。本文将研究交互输入模态的组合效能问题，以期降低设备交互成本并建立军警领域中智能头盔的交互评价指标。

1 研究思路

本文在多模态交互评价的基础上对于军警智能头盔进行优化设计，交互评价采用实验和量化分析的方法，以智能头盔为载体，研究交互模态对交互效能的影响机理。本文在场景选择和目标制定上，以适用于军警领域的单兵智能头盔为载体，分析该领域的工况特点以设定不同程度的声、光场景，并针对常用于智能头盔的交互模态进行声、光环境下的可用性测试，选择能够在极端工况下保持效能的交互模态进行进一步研究。在此多模态组合交互效能的研究中，参与者将在增强现实环境下完成多模态组合输入效率评估测试，测试将采用三因素(3×3×2)的方式使每位参与者在任务中进行 18 次测试，综合任务完成时间、错误率、交互次数和标准差等因素量化评估结果，并采集、量化用户的主观评价，基于量化结果综合分析身体姿态、输入模态组合和工况对交互效能的影响。同时，本文将基于交互优化实验的对比和评价结果，综合客观任务绩效测量、主观用户感知测量和交互成本，从交互模态配置和硬件配置两方面对军警智能头盔展开设计实践。

2 多模态交互评价方法

2.1 交互可用性测试

测试设备将采用搭载头戴式增强现实(Augmented reality, AR)设备显示设备的一代军警智能头盔原型机，此设备为集成了多种交互模态组件的光学透视 AR 头戴式显示器(Head-mounted display, HMD)，设备在使用过程中存在重量过大、交互信息过载、部分交互组件使用率低、使用体验差等问题。基于对现有产品和文献的研究及对微软 HoloLens2 交互设计指南的分析，多模态可用性测试选定了三种最为常用且被广泛设备支持的交互输入方式，分别为语音、触控和按键输入。由于智能

头盔的应用场景中的复杂工况对交互可用性的影响较大，为保证测试顺利进行，我们将在开始前对标定的三种交互输入模态进行不同声光环境下的交互可用性测试，考虑到军警领域使用的特殊性，测试要求参与者在触控和按键输入条件下使用单手完成测试。

如表 3 所示，通过在不同程度声、光环境下的输入模态可用性测试，发现在强噪音环境下设备对于语音输入的识别度下降，但在降噪语音开启后可以正常完成语音输入，三种输入方式均可满足实验需要。

表 3 不同声、光环境下交互输入模态可用性测试

交互环境	语音	触控板	按键
弱噪音环境	√	√	√
正常声环境	√	√	√
强噪声环境	普通语音输入受到干扰，降噪语音正常完成	√	√
弱光环境	√	√	√
正常光环境	√	√	√
强光环境	√	√	√

2.2 评价实验设计

交互评价结果的优化并不依赖于交互模态的简单叠加，此前已有研究结果表明三种交互模态叠加的组合方式可能有更好的效率，但同时会提高用户的精神需求和认知负荷^[50]，即交互成本中的感觉成本和认知成本。在军警智能头盔工作的复杂工况中，交互成本的上升可能会对交互效能产生较大影响，并导致用户体验下降，因此交互组合方式选择为两两组合。基于实验的对比和评价结果，结合军警领域的应用特点，从三种交互模态的组合中选择更优的组合方式，并应用于最终的设计实践。

交互评价采用三因素被试内实验设计，包括三种军警智能头盔应用场景中常见的身体姿态(站立姿态、跑步姿态、俯卧姿态)，三种交互组合方式和两种工况(标准工况、非标准工况)。身体姿态的选定参考了 RAZZAK 等^[51]基于集成军事头盔的军事应用可用性实验，方法参考了 WEISS 等^[52]提出的 USUS(Usability; social acceptance; user experience; societal impact)人机交互评价方法，选择了该研究推荐的基于实验室(Laboratory-based)的用户研究法用于评估交互效能，并在此方法的基础上考虑用户体

验和交互成本因素,提出 EUC(Efficiency; user experience; cost)交互评价方法,以期获得更准确的交互评价结果。

数据采集指标包括任务绩效测量(任务完成时间、错误率、操作次数)和用户感知测量(感知可用性和感知工作负荷),用户感知测量主要针对交互过程的可用性、基于身体姿态和交互模态组合方式进行评估。任务完成时间指参与者从开始交互操作到任务完成所花费的时间,错误率计算为发生误操作的任务比例,操作次数计算为用户的全部交互次数(包括设备无响应操作和误操作次数)。感知可用性能够测量用户的主观评价,问卷的评价指标参考了计算机系统可用性问卷(CSUQ)^[53]、虚拟现实疾病问卷(VRSQ)^[54]和 LOU 等^[55]的交互研究,最终感知可用性测量指标选定为准确性评价(可以准确选择交互目标)、速度评价(可以快速完成交互任务)、不适感评价(在任务过程中没有眩晕、视力模糊、恶心等不适感)、疲劳度评价(可以轻松完成评价任务)和难易程度评价(评价任务对我来说很简单),任务结束后利用 Likert-10 评价法(1=完全不同意, 10=完全同意)量化用户感知可用性,感知工作负荷用 10 点 NASA 任务负荷指数(NASA-TLX)^[56]进行量化计算,该指数已成为各种人机交互任务中广泛使用的主观工作负荷评估工具。

2.3 评价参与者

基于此前相关研究的最小样本量及 G*Power^[57]软件根据 80%统计功效、5%显著性水平及效应大小为 0.25 的计算结果,选定 20 名大学生(平均年龄 27.1, 方差 1.86)参与测试,男女各 10 名,普通话标准且无已知运动障碍,通过 Edinburgh handedness inventory^[58]测试所有被试者的利手性并确认所有用户都为右利手用户。参与者报告了对 AR HMD 交互或手势交互的使用经验,有 3 次以上使用经验的 1 人(5%), 1 到 3 次使用经验的 1 人(5%),完全没有相关经验的 18 人(90%)。此外,使用 Likert-7 量表对参与者进行交互模态熟悉程度的调研,结果显示,在四种交互模态中,参与者对基于触摸屏或触摸板的交互熟悉度最高(量表平均分数 6.1, $SD=0.5$),对基于手势的交互熟悉程度最低(量表平均分数 1.8, $SD=1.2$)。

2.4 评价环境

参与者在受控环境中进行测试,测试场所的互

动空间尺寸为 470 cm×240 cm。测试环境在标准工况下布置了 2700k 且光照强度充足的受控外部光源,安静或弱噪音环境(40~60 dB);非标准工况下布置了弱光光源并伴随强噪音(90~120 dB)。跑动姿态下的任务初始位置被标记在地板上,参与者可以在空间内自由移动以完成目标任务。

2.5 评价任务及流程

任务设定时参考了 PIUMSOMBOON 等^[59]的 AR 交互任务分类研究、RAZZAK 等^[51]对军事应用可用性的评价研究和 ISO 9241-411—2012 推荐的用于评价交互设备可用性的人机任务,由于交互评价任务需要多模态融合交互,因此设定为实际应用任务。

任务一(T1)设定为主动建立与其他作战单元的协作;任务二(T2)设定为接收其他作战单元的视频推流。

任务一的复杂程度及所需交互次数明显高于任务二。在任务开始前,将对设备中的协作软件进行预设置,提前录入协作者的用户信息,省略了测试过程中查找用户和验证的过程,同时,测试开始前对参与者进行了设备交互的演示和培训,并允许参与者尝试操作以熟悉设备和交互方式。参与者需要完成两项任务共 36 次测试(3 个姿势×3 种模态组合方式×2 种工况×2 个任务)。

3 多模态交互评价结果

测试数据将通过 IBM SPSS 26 版本进行数据分析,通过 Shapiro-Wilk 验证了任务绩效测量和用户感知数据的正态性($p>0.05$),通过重复测量方差分析以检测身体姿态、多模态组合方式和工况对交互效能的影响并进行组间比较。

3.1 任务完成时间

如表 4 所示数据,分析结果表明身体姿态和工况在复杂任务(T1)和简单任务(T2)中对于交互任务的完成时间都有显著影响($p<0.001$)。在复杂任务(T1)中,交互模态的组合方式对交互完成时间有显著影响($F=5.763$, $p=0.003$),语音和触控板的组合方式平均用时明显低于其他两种模态组合,按键和语音输入的组合方式受身体姿态影响较大,在奔跑动态下的任务用时明显高于其余两种交互组合方式,因此总体标准差较大($SD=4.823$)。在简单任务(T2)中,三种交互组合方式的平均任务完成时间和标准差相当,对任务完成时间无显著影响($F=1.024$, $p=0.36$)。

表 4 身体姿态、交互模态和工况对任务完成时间 (s) 的影响

		T1(主动建立与其他作战单元的协作)				T2(接收其他作战单元的视频推流)			
		描述性分析		方差分析		描述性分析		方差分析	
		平均时间	标准差(SD)	F 值	p 值	平均时间	标准差(SD)	F 值	p 值
身体姿态	站立	12.5	2.19			5.21	1.074		
	奔跑	20.41	3.584	289.335	<0.001	10.32	2.162	377.231	<0.001
	俯卧	13.64	2.257			5.85	1.26		
交互模态	按键+语音	15.55	4.13			7.17	2.774		
	按键+触控板	16.46	4.823	5.763	0.003	7.35	2.77	1.024	0.36
	语音+触控板	14.54	4.171			6.85	2.755		
工况	标准工况	13.95	4.118			6.3	2.467		
	非标准工况	17.08	4.21	50.977	<0.001	7.96	2.81	35.469	<0.001
身体姿态×交互模态				18.871	<0.001			4.543	0.001
身体姿态×工况				3.306	0.038			5.726	0.004
交互姿态×工况				54.514	<0.001			27.217	<0.001

3.2 错误率

如表 5, 在 T1 和 T2 任务中, 交互模态的组合方式对任务错误率都未产生明显影响($p>0.05$), 身体姿态对交互错误率的影响最显著($F=7.483$, $p=0.006$; $F=11.983$, $p=0.001$), 奔跑姿态下用户的交互操作错误率明显高于其他两

种静态姿态, 此外, 工况变化对复杂任务(T1)执行时的错误率影响较大($F=5.59$, $p=0.031$), 在弱光、噪音环境的非标准工况下语音输入的错误率明显上升, 在标准工况下, 带有语音输入的交互组合方式平均错误率为 0.083, 非标准工况下为 0.192, 上升幅度 131.3%。

表 5 身体姿态、交互模态和工况对任务错误率的影响

		T1(主动建立与其他作战单元的协作)				T2(接收其他作战单元的视频推流)			
		描述性分析		方差分析		描述性分析		方差分析	
		错误率	标准差(SD)	F 值	p 值	错误率	标准差(SD)	F 值	p 值
身体姿态	站立	0.09	0.066			0.017	0.026		
	奔跑	0.2	0.071	7.483	0.006	0.125	0.052	11.983	0.001
	俯卧	0.07	0.052			0.042	0.038		
交互模态	按键+语音	0.15	0.095			0.083	0.082		
	按键+触控板	0.08	0.061	0.953	0.408	0.033	0.041	1.061	0.371
	语音+触控板	0.13	0.074			0.067	0.052		
工况	标准工况	0.08	0.062			0.039	0.055		
	非标准工况	0.16	0.086	5.59	0.031	0.083	0.061	2.639	0.124
身体姿态×交互模态				0.246	0.912			0.153	0.962
身体姿态×工况				0.027	0.973			0.153	0.858
交互姿态×工况				0.846	0.43			0.458	0.633

3.3 交互次数

如表 6、图 3 所示, 语音输入在非标准工况下

的识别度下降, 导致交互错误率升高, 在复杂任务(T1)中尤为明显, 交互模态对 T1 的任务交互次数产

生了显著影响($p<0.05$),而在两个任务中,身体姿态的变化对任务交互次数没有显著影响($p=0.195$, $p=0.224$)。在三种模态组合中,按键和触控板组合的输入方式在平均交互次数上明显多于其他两种交

互组合,而由于非标准工况对于按键和触控的影响程度低,在两种工况下的交互时间、错误率和操作次数都没有明显变化,因此交互次数的标准差较低($SD=1.43$, $SD=1.028$)。

表 6 身体姿态、交互模态和工况对任务交互次数的影响

		T1(主动建立与其他作战单元的协作)				T2(接收其他作战单元的视频推流)			
		描述性分析		方差分析		描述性分析		方差分析	
		平均交互次数	标准差(SD)	F 值	p 值	平均交互次数	标准差(SD)	F 值	p 值
身体姿态	站立	13.51	3.065			5.93	1.711		
	奔跑	13.88	3.18	1.642	0.195	6.33	1.997	1.501	0.224
	俯卧	13.16	2.942			6.07	1.841		
交互模态	按键+语音	12.18	2.601			5.21	1.408		
	按键+触控板	16.7	1.43	213.702	<0.001	7.95	1.028	174.07	<0.001
	语音+触控板	11.67	2.031			5.17	1.491		
工况	标准工况	13.19	3.052			5.92	1.923		
	非标准工况	13.84	3.06	4.071	0.044	6.3	1.772	3.87	0.05
身体姿态×交互模态				2.737	0.029			0.358	0.839
身体姿态×工况				0.106	0.9			0.614	0.542
交互姿态×工况				2.499	0.84			2.015	0.135

3.4 感知工作负荷

如表 7 所示,通过 10 点 NASA 任务负荷指数(NASA-TLX)统计,用户的身体姿态对于体力需求有显著影响($F=6.552$, $p=0.005$),对其余指标没有显著影响,交互模态对于感知工作负荷的各个指标都未发现显著影响。在任务期间,参与者在跑动姿态下的 NASA-TLX 平均分数为 29.6($SD=3.78$),显著

高于其他两种姿态且标准差较小,因此可以判断在跑动姿态下的感知工作负荷最高。在交互模态组合方式上,按键和触控板结合的交互方式平均分数为 26.7($SD=4.08$),语音和触控板结合的交互方式平均分数为 24.1($SD=4.12$)且各项评价指标均为最低值,因此语音和触控板结合的交互方式可能为感知工作负荷最低的交互组合方式。

表 7 身体姿态、交互模态对感知工作负荷的影响

		心智需求		体力需求		时间需求		自我绩效		努力程度		受挫程度		总计	
		平均值 (SD)	F 值 (p 值)	平均值 (SD)	F 值 (p 值)	平均值 (SD)	F 值 (p 值)	平均值 (SD)	F 值 (p 值)	平均值 (SD)	F 值 (p 值)	平均值 (SD)	F 值 (p 值)	平均值 (SD)	F 值 (p 值)
身体姿态	站立	3.9 (1.73)		4.4 (1.26)		4.5 (1.51)		4.4 (1.9)		5.1 (1.52)		3.6 (1.08)		25.9 (5)	
	跑动	4.1 (1.2)	0.61 (0.941)	6.1 (1.37)	6.552 (0.005)	5.2 (1.48)	0.685 (0.513)	5.1 (1.37)	0.784 (0.467)	5.4 (1.71)	0.097 (0.98)	4.2 (1.55)	0.533 (0.582)	29.6 (3.78)	2.531 (0.098)
	俯卧	3.9 (1.45)		4.4 (0.97)		4.6 (1.35)		4.2 (1.75)		5.2 (1.4)		3.8 (1.23)		26.1 (4.38)	
交互模态	按键+语音	3.6 (1.65)		4.5 (1.51)		4.4 (1.35)		4.1 (1.52)		5.2 (1.62)		3.7 (1.16)		25.5 (4.43)	
	按键+触控板	3.7 (1.06)	0.043 (0.958)	4.8 (1.23)	0.241 (0.787)	4.6 (1.43)	0.191 (0.827)	4.5 (1.08)	0.839 (0.443)	5.2 (1.69)	0.13 (0.878)	3.9 (1.6)	0.27 (0.766)	26.7 (4.08)	0.953 (0.398)
	语音+触控板	3.5 (1.78)		4.4 (1.3)		4.2 (1.55)		3.7 (1.49)		4.9 (1.2)		3.4 (1.78)		24.1 (4.12)	
身体姿态×交互模态			0.957 (0.332)		1.285 (0.262)		1.003 (0.321)		1.392 (0.243)		0.121 (0.729)		0.31 (0.58)		2.411 (0.126)

3.5 感知可用性

如表 8 所示，通过 Likert-10 量表统计，任务期间的身体姿态对用户主观的准确性评价、速度评价、不适感评价和难易度评价都有显著影响($p<0.05$)，对疲劳度评价未见影响($p=0.405$)。交互模态对于参

与者的速度评价有显著影响($F=5.29$, $p=0.012$)，在按键和触控板结合的测试中，参与者的速度评价显著低于其余两种组合方式，但准确性评价最高。语音和触控板组合测试的感知可用性评价的平均得分最高。

表 8 身体姿态、交互模态对感知可用性的影响

		准确性		速度		不适感		疲劳度		难易度	
		平均值 (SD)	F 值/p 值	平均值 (SD)	F 值/p 值	平均值 (SD)	F 值/p 值	平均值 (SD)	F 值/p 值	平均值 (SD)	F 值/p 值
身体姿态	站立	7.1 (1.37)		6.1 (1.37)		6 (1.87)		6.6 (1.35)		6.9 (1.6)	
	跑动	3.7 (1.16)	15.777 (<0.001)	4.1 (1.52)	5.307 (0.011)	3.8 (2.04)	5.668 (0.009)	5.7 (1.83)	0.936 (0.405)	4.7 (2.21)	5.071 (0.013)
	俯卧	6.7 (1.83)		6.2 (1.93)		6.1 (1.2)		6.3 (1.25)		6.9 (1.45)	
交互模态	按键+语音	5.8 (1.69)		6.2 (1.81)		6.5 (1.58)		6.5 (1.9)		6.7 (1.83)	
	按键+触控板	7.2 (2.14)	1.661 (0.209)	4.4 (1.65)	5.29 (0.012)	6.5 (1.35)	0.13 (0.987)	6.4 (1.43)	0.037 (0.964)	6.4 (1.71)	0.13 (0.879)
	语音+触控板	6 (1.7)		6.9 (1.85)		6.4 (1.9)		6.6 (1.58)		6.8 (1.93)	
身体姿态×交互模态			0.934 (0.338)		0.537 (0.466)		6.374 (0.014)		0.566 (0.455)		0.906 (0.345)

4 优化设计

4.1 优化设计方法

当前复杂装备优化设计的主要方法有三种。第一，多工艺参数优化。主要研究包括多目标优化^[60]、人工神经网络与遗传算法相结合的优化^[61]、灰色模糊田口(Taguchi)方法多质量稳定特性稳健优化^[62]等；第二，多工况运维优化。主要研究包括交互控制策略与生产调度、优化工艺流程、非线性预测控制模型等。第三，多装置集成优化。主要包括分层映射、集成控制策略等。提高产品性能和优化使用体验是复杂装备设计的关键目标^[63]。

在产品性能上，本文在多模态交互效能评估的基础上，参考多装置集成优化方法对智能军警头盔进行单一产品的关键性能优化设计^[64-65]，在用户感知测量的基础上加强产品的用户域^[66]研究，在用户体验上进行设计优化，在交互成本上主要实现认知成本和操作成本的设计优化。

4.2 交互模态配置

根据多模态交互评价测试，在军警头盔的应用中，身体姿态会对交互完成时间和错误率产生显著影响，尤其是在奔跑姿态下的任务所需时间和错误率有明显上升，同时，身体姿态与用户主观评价中的准确性、不适感、难易程度及体力需求评价有显著影响，因此在奔跑姿态下并不适合 AR HMD 的复

杂交互操作。

交互模态的选择对 T1 完成时间以及 T1、T2 交互次数的测试结果产生了明显影响，交互错误率则更多受身体姿态和工况的影响，同时交互模态的选择还对用户主观的速度评价有明显影响，在测试中配有语音交互的交互组合方式用时明显较短，可以推断语音输入在交互速度和简化操作上的总体效能更为优异，此外，在三种交互模态的组合方式中，语音和触控板组合的交互模态平均用时和平均操作次数最低。

工况对于任务完成时间和复杂任务中的错误率、操作次数有显著影响，非标准工况中的强噪音环境会明显使语音输入的效率 and 识别度下降，导致错误率和操作次数上升，因此在非标准工况下按键或触控板为更合适的交互输入方式，同时与语音交互具有良好的互补性。总体而言，语音和触控板组合的交互方式在三个影响因子中的效能表现最为优异，因此，语音和触控板组合的交互模态可能更加适合军警智能头盔的使用场景和交互特点。

4.3 硬件配置

根据研究结果，综合考虑交互效能、用户评价和交互成本，多模态军警智能头盔在硬件上将集成智能语音模组(输入模块、识别模块)和触摸板模块以满足交互需求。图 1 所示，现有头戴式 AR 显示设备的常规组件有面罩、功能按钮(亮度、声音、电

源等)、USB-C 端口或耳机端口、语音交互模块(麦克风阵列、扬声器等)、空间交互模块(光相机、红

外相机、深度传感器等),在场景和交互形式上并不适合用于军警智能头盔。

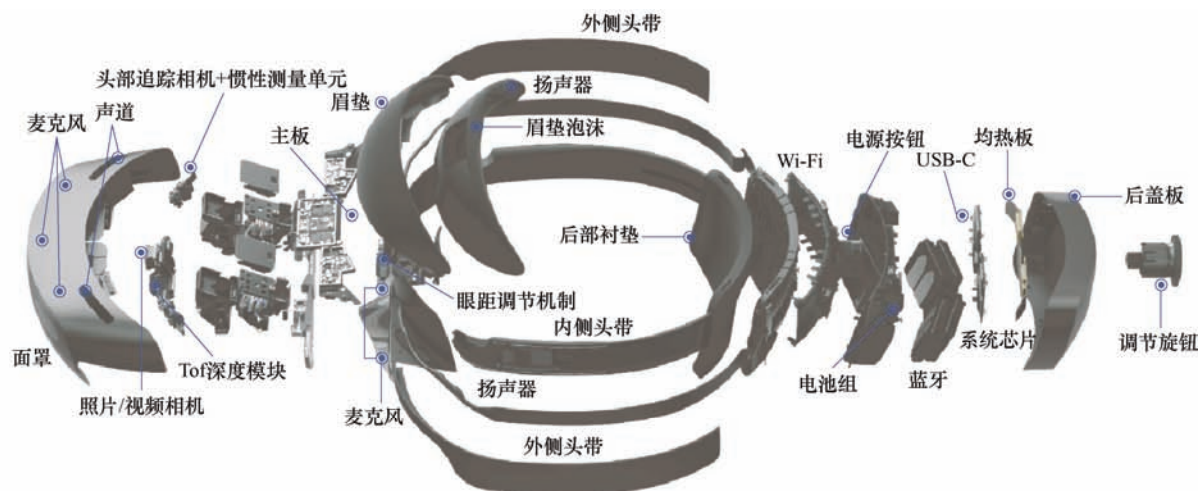


图 1 现有头戴式 AR 显示设备结构图(Microsoft HoloLens2)

当前对于 AR 头戴式显示器的设计主要有一体式和分体式两种,军警智能头盔有抵抗强外力冲击、热辐射、穿刺等功能需求,因此需要较高强度的防护材料,一体式设备在头盔中硬件集成过多容易造成重量过大的问题,无法保证士兵在任务过程中的舒适度和灵活性,同时考虑到军警作战需长时间佩戴头盔且工况复杂,一体式设计

可能导致操作时疲劳感增加、颈部压力过大等问题,因此军警智能头盔更适合采用分体式设计。如图 2 所示,将触控交互单元、信息计算和图形处理等单元集成于分体设备,头戴装备中仅配置语音交互单元,解决装备超重的问题,士兵根据工况和姿态选择效能最高的交互方式,实现交互模态的灵活配置。



图 2 单兵智能头盔优化设计

军警智能头盔可在智能显示设备上简化眼动追踪、深度传感器等配置,同时把处理器、触控板、

电池等单元集成于分体设备,有助于减轻装备重量,在保证交互效能、模态灵活配置的前提下降低交互

成本、提高人机性能。

5 结论

智能可穿戴设备的智能化、集成化发展导致其交互模态的选择越来越多,但是交互模态的简单叠加不仅无法满足交互需求,还造成了用户操作和认知成本增加的问题,鉴于此问题,本文提出了 EUC 交互评价方法。

(1) 交互评价测试设定了身体姿态、交互模态和工况三组变量,在三因素实验中采集了多模态交互任务绩效数据(任务完成时间、错误率、操作次数)和用户感知数据(感知可用性,感知工作负荷),并利用方差分析等数据分析方法研究交互指标与变量之间的关联性和影响度,完成了军警智能头盔的多模态组合交互评价,明确了语音和触控板组合的交互模态可能更加适合军警智能头盔的使用场景和交互特点。

(2) 基于交互组合评价的结论,实现了对军警智能头盔的优化设计并发现了将语音交互单元配置于头戴装备中,将触控交互单元、信息计算和图形处理等单元集成于分体设备可能为更加合理的灵活配置方案。该方案还可以适配于应急救援、警务执勤、单兵作战等其他领域的多模态交互 HMD 设计实践。

参 考 文 献

- [1] JÖST M. Multimodal interaction for pedestrians: an evaluation study[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent User Interfaces, January 10-13, 2005, San Diego, California. New York: Association for Computing Machinery, 2005: 59-66.
- [2] 孙瀚. 基于多模态生物电信号人机交互技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
SUN Han. Research of human-computer interaction technology based on multi-modal biopotentials[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [3] COHEN P. Synergistic use of direct manipulation and natural language[C]// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 30 - June 4, 1989, Austin, Texas. New York: Association for Computing Machinery, 1989: 227-233.
- [4] OVIATT S. Advances in robust multimodal interface design[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2003, 23(05): 62-68.
- [5] OVIATT S. When do we interact multimodally? Cognitive load and multimodal communication patterns[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces, October 13-15, 2004, State College PA. New York: Association for Computing Machinery, 2004: 129-136.
- [6] 袁晓东. 模块化智能头盔的应用设计研究[J]. 包装工程, 2015, 36(22): 88-91, 115.
YUAN Xiaodong. The application design of modular intelligent helmet[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(22): 88-91, 115.
- [7] TRIANTAFYLIDIS E, MCGREAVY C, GU Jiacheng, et al. Study of multimodal interfaces and the improvements on teleoperation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 78213-78227.
- [8] CHO E, MOLINA M, WANG Jinping. The effects of modality, device, and task differences on perceived human likeness of voice-activated virtual assistants[J]. Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking, 2019, 22(8): 515-520.
- [9] SCHWARZ F, FASTENMEIER W. Augmented reality warnings in vehicles: Effects of modality and specificity on effectiveness[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 101: 55-66.
- [10] NUOVO A, BROZ F, WANG Ning, et al. The multi-modal interface of robot-era multi-robot services tailored for the elderly[J]. Intelligent Service Robotics, 2018, 11(1): 109-126.
- [11] CAROLIS B, GEMMIS M, LOPS P, et al. Recognizing users feedback from non-verbal communicative acts in conversational recommender systems[J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 99: 87-95.
- [12] REN Gang, WEI Side, O'NEILL E, et al. Towards the design of effective haptic and audio displays for augmented reality and mixed reality applications[J]. Advances in Multimedia, 2018, 2018: 1-11.
- [13] MERKOURIS A, CHORIANOPOULOU B, CHORIA-NOPOULOS K, et al. Understanding the notion of friction through gestural interaction with a remotely controlled robot[J]. Journal of Science Education and Technology, 2019, 28(3): 209-221.
- [14] WANG Xiangyu, ONG S, NEE A. Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface[J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30(3): 406-421.
- [15] NUAMAH J, MANTOOTH W, KARTHIKEYAN R, et

- al. Neural efficiency of human-robotic feedback modalities under stress differs with gender[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13: 287.
- [16] HEPERLE D, WEIS Y, SIESS A, et al. 2D, 3D or speech? A case study on which user interface is preferable for what kind of object interaction in immersive virtual reality[J]. *Computers & Graphics*, 2019, 82: 321-331.
- [17] RAU P, ZHENG Jian, WEI Yi. Distractive effect of multimodal information in multisensory learning[J]. *Computers & Education*, 2020, 144: 103699.
- [18] MONTUWY A, DOMMES A, CAHOUR B. Helping older pedestrians navigate in the city: comparisons of visual, auditory and haptic guidance instructions in a virtual environment[J]. *Behaviour & Information Technology*, 2019, 38(2): 150-171.
- [19] WANG Jinling, CHELLALI A, CAO C. Haptic communication in collaborative virtual environments[J]. *Human Factors*, 2016, 58(3): 496-508.
- [20] ESTEVES A, SHIN Y, OAKLEY I. Comparing selection mechanisms for gaze input techniques in head-mounted displays[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2020, 139: 102414.
- [21] LUZIO F, LAURETTI C, CORDELLA F, et al. Visual vs vibrotactile feedback for posture assessment during upper-limb robot-aided rehabilitation[J]. *Applied Ergonomics*, 2020, 82: 102950.
- [22] KIM Y, HONG S, KIM G J. Augmented reality-based remote coaching for fast-paced physical task[J]. *Virtual Reality*, 2018, 22(1): 25-36.
- [23] DOUKAKIS E, DEBATTISTA K, BASHFORD-ROGERS T, et al. Audio-visual-olfactory resource allocation for tri-modal virtual environments[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, 25(5): 1865-1875.
- [24] SCHÜSSEL F, HONOLD F, WEBER M. Influencing factors on multimodal interaction during selection tasks[J]. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2013, 7(4): 299-310.
- [25] HELLER J, CHYLINSKI M, RUYTER K, et al. Touching the untouchable: Exploring multi-sensory augmented reality in the context of online retailing[J]. *Journal of Retailing*, 2019, 95(4): 219-234.
- [26] XIAO R, SCHWARZ J, THROM N, et al. MRTouch: Adding touch input to head-mounted mixed reality[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(4): 1653-1660.
- [27] BAJPAI A, POWELL J, YOUNG A, et al. Enhancing physical human evasion of moving threats using tactile cues[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2019, 13(1): 32-37.
- [28] RAU P, ZHENG Jian. Modality capacity and appropriateness in multimodal display of complex non-semantic information stream[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2019, 130: 166-178.
- [29] HACIOMEROGLU O. C-Thru; Smoke Diving Helmet [EB/OL]. [2022-03-16]. <https://www.qwake.tech/>.
- [30] HELD B, ALJUNEIDI S, PHAM V, et al. Helon 360: A smart firefighters' helmet Integrated augmented reality and 360° thermal image data streaming[EB/OL]. (2019-09) [2022-06-12]. https://www.researchgate.net/publication/341764419_Helon_360_A_smart_firefighters_helmet_Integrated_Augmented_Reality_and_360_Thermal_Image_Data_Streaming.
- [31] CAMERON A, HOBSON R. Head-up, eyes-out in day and at night: striker HMD, evolution or revolution?[C]// *Degraded Visual Environments: Enhanced, Synthetic, and External Vision Solutions 2016*, 17-21 April, 2016, Baltimore, Maryland. Bellingham: SPIE Press, 2016: 246-256.
- [32] SCHRADIN R. The F-35 Helmet – a modern marvel that creates a unique maintenance challenge[EB/OL]. (2022-06-08) [2022-06-12]. <https://govdesignhub.com/2022/06/08/the-f-35-helmet-a-modern-marvel-that-creates-a-unique-maintenance-challenge/>.
- [33] U.S. Army Program Executive Office. Project manager integrated visual augmentation system (IVAS)[EB/OL]. (2022-02-19) [2022-06-13]. <https://www.peosoldier.army.mil/Program-Offices/Project-Manager-Integrated-Visual-Augmentation-System/>.
- [34] CHENG Qiang, SUN Jiping, ZHANG Zhe, et al. ZigBee based intelligent helmet for coal miners[C]// 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, 31 March - 2 April, 2009, Los Angeles, California. Washington: IEEE Computer Society, 2009: 433-435.
- [35] NITHYA T, EZAK M, KUMAR K, et al. Rescue and protection system for underground mine workers based on Zigbee[J]. *Int. J. Recent Res. Asp*, 2018, 4(4): 194-197.
- [36] KIM S, WANG C, MIN S, et al. Safety helmet wearing management system for construction workers using three-axis accelerometer sensor[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2400.
- [37] LI Ping, MEZIANE R, OTIS M, et al. A Smart Safety

- Helmet using IMU and EEG sensors for worker fatigue detection[C]// 2014 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE) Proceedings, October 16-18, 2014, Timisoara, Romania. New York: IEEE Press, 2014: 55-60.
- [38] WANG C, KIM Y, KIM D, et al. Smart helmet and insole sensors for near fall incidence recognition during descent of stairs[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2262.
- [39] PIRKL G, HEVESI P, AMARISLANOV O, et al. Smart helmet for construction site documentation and work support[C]// Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct, September 12-16, 2016, Heidelberg, Germany. New York: ACM, 2016: 349-352.
- [40] LEE A, MOON J, MIN S, et al. Safety Analysis System using Smart Helmet[C]// Proceedings on the International Conference on Internet Computing (ICOMP). July 29 - August 1, 2019, Las Vegas, Nevada. Athens: CSREA Press, 2019: 102-107.
- [41] MOHAMMED M, SYAMSUDIN H, AL-ZUBAIDI S, et al. Novel COVID-19 detection and diagnosis system using IOT based smart helmet[J]. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 2020, 24(7): 2296-2303.
- [42] BISIO I, FEDELI A, LAVAGETTO F, et al. Mobile smart helmet for brain stroke early detection through neural network-based signals analysis[C]// 2017 IEEE Global Communications Conference, December 4-8, 2017, Singapore. New York: IEEE, 2017: 1-6.
- [43] SHAHIDUZZAMAN K, HEI Xiaojun, GUO C, et al. Enhancing fall detection for elderly with smart helmet in a cloud-network-edge architecture[C]// 2019 IEEE Inter-national Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), 20-22 May, 2019, YiLan, Taiwan, China. New York: IEEE, 2019: 1-2.
- [44] RASLI M, MADZHI N, JOHARI J. Smart helmet with sensors for accident prevention[C]// 2013 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE), 4-5 December, 2013, Selangor, Malaysia. New York: IEEE, 2013: 21-26.
- [45] MELCHER V, DIEDERICH F, MAESTRE R, et al. Smart vital signs and accident monitoring system for motorcyclists embedded in helmets and garments for advanced eCall emergency assistance and health analysis monitoring[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 3208-3213.
- [46] MOHANAROOPA D, SOUJANYA N, VAISHNAVI V, et al. An IOT based smart helmet for accident detection and notification[J]. *Journal of Interdisciplinary Cycle Research*, 2020, 7: 1-7.
- [47] RAO P, SAI P, KUMAR N, et al. Design and implementation of smart helmet using IoT[C]// Inter-national Conference of Advance Research & Innovation (ICARI), 19 January, 2020, New Delhi, India. Delhi: International Journal of Advance Research and Innovation, 2020: 323-325.
- [48] GABBARD J, SWAN J. Usability engineering for augmented reality: Employing user-based studies to inform design[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(3): 13-525.
- [49] 孙启玉, 蒋晓. 交互成本在移动互联网产品设计中的应用研究[J]. *大众文艺*, 2015(2): 102.
- SUN Qiyu, JIANG Xiao. Application of interaction cost in mobile Internet product design[J]. *Popular Literature*, 2015(2): 102.
- [50] WANG Zhimin, WANG Haoifei, YU Huangyue, et al. Interaction with gaze, gesture, and speech in a flexibly configurable augmented reality system[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2021, 51(5): 524-534.
- [51] RAZZAK M, ISLAM M. Exploring and evaluating the usability factors for military application: A road map for HCI in military applications[J]. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety*, 2020, 4(1): 1-18.
- [52] WEISS A. The USUS evaluation framework for human-robot interaction[C]// AISB 2009, Proceedings of the Symposium on New Frontiers in Human-robot Interaction. April 8-9, 2009, Edinburgh, UK. Brighton: SSAISB, 2009: 11-26.
- [53] LEWIS J. IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use[J]. *International Journal of Human - Computer Interaction*, 1995, 7: 57-78.
- [54] SEVINC V, ILKER B. Psychometric evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environment[J]. *Applied Ergonomics*, 2020, 82: 102958.
- [55] LOU Xiaolong, PENG Ren, HANSEN P, et al. Effects of user's hand orientation and spatial movements on free hand interactions with large displays[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2018, 34(6): 519-532.

- [56] HART S, STAVELAND L. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research[J]. *Advances in Psychology*, 1988, 52: 139-183.
- [57] FAUL F, ERDFELDER E, LANG A, et al. G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences[J]. *Behavior Research Methods*, 2007, 39(2): 175-191.
- [58] VEALE J. Edinburgh handedness inventory—short form: a revised version based on confirmatory factor analysis[J]. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 2014, 19(2): 164-177.
- [59] PIUMSOMBOON T. User-defined gestures for augmented reality[C]// *Proceedings of the IFIP Conference on Human-Computer Interaction*. September 2-6, 2013, Cape Town, South Africa. New York: Springer, 2013: 282-299.
- [60] 张在房, 徐冯, 孙习武. 火箭贮箱箱底充液拉深成形工艺的多目标优化[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(5): 78-86.
- ZHANG Zaifang, XU Feng, SUN Xiwu. Multi-objective optimization of hydroforming process of rocket tank bottom[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(5): 282-299.
- [61] MARTOWIBOWO S, KASWADI A. Optimization and simulation of plastic injection process using genetic algorithm and moldflow[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(2): 398-406.
- [62] 万良琪, 陈洪转, 欧阳林寒, 等. 基于灰色模糊田口方法的复杂装备精密产品多质量特性稳健优化设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(6): 1427-1437.
- WAN Liangqi, CHEN Hongzhan, OUYANG Linhan, et al. Multi-quality characteristics robust optimization design of complex equipment compliant mechanism based on hybrid gray-fuzzy-Taguchi method[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(6): 1427-1437.
- [63] 王田田. 基于多域均衡的复杂装备能效优化设计方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- WANG Tiantian. Research on energy efficiency optimization design method and application of complex equipment based on multi-domain equilibrium[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [64] 谢友柏. 现代设计理论中的若干基本概念[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(11): 7-16.
- XIE Youbai. Some basic concepts in modern design theory[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(11): 7-16.
- [65] 闻邦椿. 产品全功能与全性能的综合设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- WEN Bangchun. Comprehensive design of product full function performance[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [66] SUH N, DO S. Axiomatic design of software systems[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2000, 49(1): 95-100.
-
- 作者简介: 彭坚, 男, 1986 年出生, 博士, 助理教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为复杂系统可诊断性设计与评价、单兵作战装备和外骨骼装备设计。
E-mail: jianpeng@hnu.edu.cn
- 季铁, 男, 1972 年出生, 教授、博士生导师。主要研究方向为地域文化研究、非遗保护、可持续设计与社会创新。
E-mail: 3599013@qq.com
- 陈懿纯(通信作者), 女, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为文化创新设计等。
E-mail: 77398557@qq.com