

分类号: C939

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220720109



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于多模态测量的服务机器人多感官
拟人化设计对用户认知的影响研究

论 文 作 者 张翊

指 导 教 师 操雅琴 教授

学 科 (专 业) 管理科学与工程

研 究 方 向 智慧管理与人工智能

论文提交日期: 2025 年 5 月 16 日

分类号: C939

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220720109

题 目 基于多模态测量的服务机器人多感官拟人化设计对用户
认知的影响研究

英文并列

题 目 The effects of multisensory anthropomorphic design in
service robots on user cognition based on multimodal
measurement methods

学生姓名: 张翊

指导教师: 操雅琴 教授

专 业: 管理科学与工程

研究方向: 智慧管理与人工智能

论文答辩日期: 2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：张翔

日期：2025年5月16日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：张翊

日期：2025 年 5 月 16 日

指导教师签名：操邦华

日期：2025 年 5 月 16 日

基于多模态测量的服务机器人多感官拟人化设计

对用户认知的影响研究

摘 要

近年来，服务机器人作为人工智能的重要应用领域，正在全球范围内快速发展，并广泛应用于家庭、商业、医疗和教育等多个场景。随着技术进步和政策支持，服务机器人产业迎来了前所未有的发展机遇。在 2025 年央视春节联欢晚会上，人形机器人“福兮”表演了舞蹈节目《秧 BOT》，引发了全国范围内的广泛热议。这一事件标志着人形机器人从实验室走向大众视野，成为其发展历程中的重要里程碑。尽管功能设计、外观设计和交互设计一直是提升服务机器人交互质量的重点，但现有研究多局限于单一维度，缺乏对机器人外观多维度划分及多感官视听组合的深入探讨，尤其是从不同拟人化外观维度及多感官交互模式的角度分析服务机器人对用户认知影响机制的研究仍较为匮乏。

本文通过整合主观评价、眼动追踪和近红外脑功能成像等多模态测量方法，系统揭示了多维度外观以及多感官拟人化设计对用户主观评价和生理指标的影响机制。研究内容及结论如下：

（1）基于网络调查的服务机器人关键拟人化外观维度研究。通过文献梳理划分服务机器人外观特征，并结合网络销售数据分析发现，拟人化特征、面部特征及身体特征显著提升了服务机器人销售量，由

此确定面部和身体特征为关键外观维度。

（2）多维外观拟人化因素对用户接受意愿的调节机制研究。通过设计问卷并检验信效度，结合结构方程模型分析发现，感知温暖和感知能力显著正向影响用户情感体验及接受意愿，且情感体验发挥了中介作用。面部拟人化更显著增强感知温暖对接受意愿的影响，而身体拟人化更显著提升感知能力的作用。面部拟人化通过愉悦度增强感知温暖对接受意愿的中介效应优于身体拟人化。

（3）多维外观拟人化因素对用户主观评价及眼动特征的影响。通过设计不同外观组合的服务机器人图像并进行眼动实验，发现面部和手臂拟人化能有效吸引用户注意力并引发积极评价。面部拟人化同时增强用户对机器人能力和温暖的感知，而手臂拟人化主要提升能力感知。圆形头部和圆柱形躯干设计更受青睐，方形头部虽吸引注意力但易引发负面偏见。

（4）多感官交互设计因素对用户主观评价及大脑激活的影响。近红外脑功能成像实验表明，情感声音显著增强愉悦度、唤醒度与满意度，并提升对机器人温暖感与能力感的认知。在无表情符号时，情感语音有助于缓解不适；而在表情符号呈现时，若声音缺乏情感，易引发感知冲突。声音情绪不足时，视觉表情符号具有补偿作用；声音情感丰富时，视觉表情符号边际作用减弱。情感机器人在主观任务中增强用户积极评价和脑激活水平，在客观任务中优势减弱。

关键词：服务机器人，多维度外观拟人化，多感官交互设计，眼动追踪，近红外脑功能成像，多模态测量

THE EFFECTS OF MULTISENSORY ANTHROPOMORPHIC DESIGN IN SERVICE ROBOTS ON USER COGNITION BASED ON MULTIMODAL MEASUREMENT METHODS

ABSTRACT

In recent years, service robots, as a crucial application area of artificial intelligence, have been rapidly developing worldwide and are widely used in various scenarios such as households, commerce, healthcare, and education. With technological advancements and policy support, the service robot industry has ushered in unprecedented opportunities for growth. At the 2025 CCTV Spring Festival Gala, the humanoid robot “Fuxi” performed a dance program titled “YangBOT,” marking a significant milestone in the transition of humanoid robots from laboratories to the public eye. Although functional design, appearance design, and interaction design have always been key to improving the quality of human-robot interaction, existing research has largely been confined to single dimensions, lacking in-depth exploration of multi-dimensional appearance divisions and multi-sensory audiovisual combinations. Particularly, studies

analyzing the impact of service robots on user perception and cognition from the perspectives of different anthropomorphic appearance dimensions and multi-sensory interaction modes remain scarce.

This paper systematically reveals the impact mechanism of multidimensional appearance and multisensory anthropomorphic design on user subjective evaluation and physiological indicators by integrating multimodal measurement methods such as subjective evaluation, eye-tracking, and near-infrared brain functional imaging. The research content and conclusions are as follows:

(1) Research on key anthropomorphic appearance dimensions of service robots based on online surveys. By reviewing the literature to classify the appearance features of service robots and combining online sales data analysis, it was found that anthropomorphic features, facial features, and body features significantly increased the sales volume of service robots. Thus, facial and body features were identified as key appearance dimensions.

(2) Study on the moderating mechanism of multidimensional anthropomorphic appearance factors on user acceptance intention. By designing a questionnaire and testing its reliability and validity, and analyzing with a structural equation model, it was found that perceived warmth and perceived competence significantly positively affect user emotional experience and acceptance intention, with emotional experience

playing a mediating role. Facial anthropomorphism more significantly enhances the impact of perceived warmth on acceptance intention, while body anthropomorphism more significantly improves the role of perceived competence. The mediating effect of perceived warmth on acceptance intention through pleasure is stronger for facial anthropomorphism than for body anthropomorphism.

(3) Impact of multidimensional anthropomorphic appearance factors on user subjective evaluation and eye-tracking characteristics. By designing images of service robots with different appearance combinations and conducting eye-tracking experiments, it was found that facial and arm anthropomorphism can effectively attract user attention and trigger positive evaluations. Facial anthropomorphism simultaneously enhances users' perception of the robot's competence and warmth, while arm anthropomorphism mainly improves competence perception. Circular head and cylindrical torso designs are more favored, while square heads, although attracting attention, can easily trigger negative biases.

(4) Effects of multisensory interaction design on users' subjective evaluations and neural activation. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) results indicate that emotional vocal cues significantly enhance users' pleasure, arousal, and satisfaction, as well as their perceptions of the robot's warmth and competence. In the absence of emojis, emotional speech helps alleviate discomfort; however, when

emojis are presented, the lack of emotional tone in speech can lead to perceptual conflict. When emotional expression in speech is insufficient, visual emojis serve a compensatory function, whereas their marginal utility decreases when emotional vocalization is rich. Emotional robots elicit more favorable subjective evaluations and heightened brain activation during affective tasks, although this advantage diminishes in non-affective, objective tasks.

KEY WORDS: service robots, multidimensional anthropomorphic appearance, multisensory interaction design, eye-tracking, functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), multimodal measurement.

目 录

第 1 章	绪论.....	1
1.1	研究背景及目的.....	1
1.2	研究意义.....	3
1.2.1	理论意义.....	3
1.2.2	实践意义.....	4
1.3	研究内容和创新点.....	4
1.3.1	研究内容.....	4
1.3.2	特色和创新.....	7
1.4	研究方法与技术路线.....	8
1.4.1	研究方法.....	8
1.4.2	技术路线.....	9
1.5	论文结构安排.....	10
第 2 章	相关理论和文献综述.....	12
2.1	相关理论.....	12
2.1.1	恐怖谷理论.....	12
2.1.2	刺激-有机体-反应（S-O-R）理论	12
2.1.3	刻板印象内容模型.....	13
2.1.4	认知-情感-意愿（CAC）框架.....	14
2.2	文献综述.....	14
2.2.1	服务机器人多维外观拟人化研究综述.....	14
2.2.2	服务机器人多感官交互设计研究综述.....	15
2.2.3	服务机器人用户认知的多模态测量方法研究综述.....	16
2.3	已有研究的贡献与不足.....	19
2.3.1	主要贡献.....	19
2.3.2	不足之处.....	19

2.3.3 对本文研究的启示.....	20
第 3 章 基于网络调查的服务机器人关键拟人化外观维度研究.....	21
3.1 服务机器人拟人化外观维度特征研究.....	21
3.2 基于网络销售数据的服务机器人关键外观维度确定.....	22
3.3 主要结论.....	23
3.4 本章小结.....	24
第 4 章 多维外观拟人化因素对用户接受意愿调节机制研究.....	25
4.1 研究目的与研究变量.....	25
4.2 假设模型的构建.....	25
4.2.1 感知温暖和感知能力对接受意愿的影响.....	25
4.2.2 服务机器人外观拟人化维度的调节作用.....	26
4.2.3 情感体验的中介作用.....	27
4.3 问卷设计与数据采集.....	28
4.3.1 问卷设计.....	28
4.3.2 数据收集与样本特征.....	30
4.3.3 信度与效度检验.....	30
4.4 假设模型的验证与分析.....	31
4.4.1 感知温暖、感知能力及情感体验的直接效应检验.....	31
4.4.2 多维外观拟人化的调节效应检验.....	32
4.4.3 用户情感体验的中介效应检验.....	33
4.5 讨论.....	34
4.5.1 感知温暖、感知能力及情感体验的直接效应.....	34
4.5.2 拟人化维度的差异化影响.....	34
4.5.3 情感体验的中介作用.....	35
4.6 结论与建议.....	35
4.6.1 研究结论.....	35
4.6.2 研究建议.....	36
4.7 本章小结.....	36
第 5 章 多维外观拟人化因素对用户主观评价及眼动特征的影响.....	37

5.1 研究背景与目的.....	37
5.2 研究方法.....	37
5.2.1 刺激材料.....	37
5.2.2 被试与实验流程.....	39
5.2.3 测量.....	41
5.2.4 实验数据的处理与分析.....	42
5.3 用户主观评价与眼动特征结果的比较与分析.....	43
5.3.1 多维外观拟人化因素对用户主观评价的影响.....	43
5.3.2 多维外观拟人化因素对用户眼动特征的影响.....	46
5.3.3 服务机器人多维度拟人化外观的综合评价.....	51
5.4 讨论.....	52
5.4.1 头部形状对用户主观评价及眼动特征的影响.....	52
5.4.2 躯干形状对用户主观评价及眼动特征的影响.....	52
5.4.3 手臂特征对用户主观评价及眼动特征的影响.....	53
5.4.4 面部特征对用户主观评价及眼动特征的影响.....	53
5.5 结论与建议.....	54
5.5.1 研究结论.....	54
5.5.2 研究建议.....	54
5.6 本章小结.....	55
第 6 章 多感官交互设计因素对用户主观评价及大脑激活的影响.....	56
6.1 研究背景与目的.....	56
6.2 研究方法.....	57
6.2.1 实验设计与刺激材料.....	57
6.2.2 实验设备和测量量表.....	58
6.2.3 被试与实验流程.....	62
6.2.4 实验数据处理.....	64
6.3 研究结果.....	65
6.3.1 多感官设计要素与用户主观评价的关系.....	65
6.3.2 多感官设计要素与用户大脑激活的关系.....	69

6.4 讨论.....	72
6.4.1 多感官设计要素对用户主观评价和大脑激活的影响.....	72
6.4.2 任务类型与情感类型对用户主观评价和大脑激活的影响.....	74
6.5 结论与建议.....	75
6.5.1 研究结论.....	75
6.5.2 研究建议.....	76
6.6 本章小结.....	76
第 7 章 结论与展望.....	78
7.1 主要结论.....	78
7.1.1 关键拟人化外观维度的确定.....	78
7.1.2 多维外观拟人化对用户接受意愿的调节机制.....	79
7.1.3 多维外观拟人化对主观评价及眼动特征的影响.....	79
7.1.4 多感官交互设计对主观评价及大脑激活的影响.....	79
7.2 研究局限.....	80
7.3 研究工作展望.....	80
参考文献.....	81
附录.....	95
攻读硕士学位期间参与的科研项目工作及研究成果.....	103
致谢.....	104

第1章 绪论

1.1 研究背景及目的

服务机器人作为智能家居和智慧城市建设的重要组成部分，其拟人化设计对用户体验至关重要。拟人化是指服务机器人通过模仿人类的动作、行为、视觉、触觉及听觉等特征，使其更贴近人类的表现形式，从而提升用户的交互体验^[1]。随着人工智能（Artificial Intelligence, AI）与物联网（Internet of Things, IoT）技术的迅猛发展，服务机器人展现出广阔的应用前景。在工业 4.0 浪潮和消费者需求不断升级的双重驱动下，服务机器人市场正迎来快速增长的契机。《中国制造 2025》明确要求聚焦医疗、家庭、教育等重点领域，积极研发新型服务机器人产品，拓展应用场景。服务机器人被定义为“基于系统的自主和适应性接口，与组织客户进行互动、沟通并提供服务”^[2]，正深刻变革零售、酒店、医疗保健等服务行业^[3,4]。随着行业竞争的加剧，全球已有超过 1000 家公司涉足机器人技术^[4]，且市场规模预计将在 2030 年达到 900 至 1700 亿美元^[5]。在这种竞争激烈的环境中，服务机器人生产商、服务型企业 and 研究人员需要探索如何使服务机器人满足用户期望。尽管服务机器人逐步融入人们的日常生活，其外观特征和多感官交互模式的日益多样化也带来了新的挑战。

多感官交互是评估机器人智能化水平的重要指标之一，对提升人机交互过程的流畅性和交互质量具有关键作用^[6]。近年来，随着机器人逐渐融入社交场景，满足用户情感需求成为研究热点，越来越多的学者强调机器人应具备拟人化行为特征。在与类人服务机器人交互时，用户往往将其视为具有自主能力的社会个体，并赋予其特定的社会角色^[7]。因此，在不同服务场景中，需综合考虑机器人的外观设计、情感表达等多感官交互方式，以优化用户体验。

机器人的多感官交互是一个复杂系统，通过视觉、听觉、触觉等通道的组合实现，涵盖身体动画、灯光颜色、语音交流及非语言线索等多种形式。在视觉方面，用户首要关注机器人外观。研究表明，与其他形式的服务机器人相比，类人机器人在建立用户信任和接受方面具有独特优势^[8]。然而，现有研究多聚焦于整

体拟人化效果或单一维度（如手部）的拟人化作用^[9]，尚未系统探讨不同外观维度拟人化效果对用户影响的差异。因此，揭示多维度外观拟人化因素如何影响用户主观评价、情感体验及接受意愿，并厘清其内在因果关系，成为本研究的关键问题之一。

在外观拟人化设计中，细化不同维度的拟人化特征能够更全面地揭示用户对机器人的主观评价与情感反应机制。例如，面部特征、头部形状、躯干形状以及手臂特征等外观细节，均可能在交互过程中对用户的主观评价与情感体验产生差异化影响。此外，这些细化维度的设计还显著影响用户的视觉注意模式，决定其对机器人外观特征的关心程度及偏好。然而，现有研究对外观细化维度与用户主观评价、情感体验及眼动特征之间的交互效应探讨不足。如何通过不同外观拟人化细化维度优化用户体验，揭示其对用户主观评价、情感体验及眼动特征的综合影响，是本研究需要解决的关键问题之二。

在机器人多感官交互系统中，除外观设计外，听觉因素和视觉方面的非语言线索同样至关重要。例如，语音交流、声音特征以及表情符号的动态显示，能够在交互中传递情感信息，增强用户体验。然而，现有研究多聚焦于单一感官因素（如外观、听觉或触觉）的影响，针对多感官融合的系统性研究仍较为缺乏。多感官交互模式的构建不仅能够提升人机交互质量，还能满足用户在不同场景中的复杂情感需求。因此，探讨如何构建综合的多感官交互模式，并深入研究视听融合中声音特征、表情符号显示等因素对用户主观评价、情感反应及大脑激活的影响，是本研究需要解决的关键问题之三。

综上所述，本研究聚焦于服务机器人多感官交互设计中的关键问题，具体包括以下方面：如何科学构建基于机器人多维度外观设计的用户接受意愿模型？如何细化不同拟人化外观维度，深入探究用户在交互过程中的主观评价与眼动特征？以及如何整合多感官交互设计因素，探讨视听结合等交互模式对用户主观评价、情感体验及大脑激活的综合影响？这些问题不仅是服务机器人多感官交互设计理论不断发展所面临的核心挑战，也是人机交互领域亟待解决的重要课题，对提升服务机器人的用户体验和实际应用具有重要意义。

针对上述问题，本研究以用户主观评价、情感体验及接受意愿为切入点，基于多模态数据深入探讨服务机器人多感官交互设计的影响机制。具体研究内容包

括以下四个方面：（1）基于网络销售数据的服务机器人关键拟人化外观维度调查，确定关键外观特征；（2）多维外观拟人化因素对用户接受意愿的调节机制研究，揭示感知温暖与感知能力的作用路径；（3）服务机器人多维度外观拟人化细化因素对用户主观评价及眼动特征的影响，探讨不同外观维度因素对用户认知的差异化作用；（4）服务机器人多感官交互模式对用户主观评价及大脑激活的影响，分析视听结合等交互模式对用户体验的优化机制。

1.2 研究意义

服务机器人在各种服务场景中都扮演着重要角色。它们具备多种特征，涵盖视觉、触觉、听觉和交互方式等方面。然而，当前大部分研究侧重于单一感官通道，例如视觉感官，却忽略了多感官通道对用户的影响。本研究旨在从情感体验角度探究服务机器人视觉和听觉的多感官交互特征对用户接受意愿的影响机制，并考察这些机制在不同服务场景下的变化。因此，本研究在理论和实践层面都具有重要意义。

1.2.1 理论意义

机器人多感官交互设计是人机交互及界面设计领域的重要研究方向。本研究的理论意义如下：

（1）拓展了刻板印象模型在服务机器人领域的应用。现有研究多聚焦感知温暖维度，而忽视了感知能力的作用。本研究同时考察感知温暖与感知能力对用户情感体验及接受意愿的影响，为利用刻板印象的双重属性优化用户体验提供了实证支持。

（2）推动了拟人化理论、S-O-R 理论与 CAC 框架在服务机器人用户认知研究中的整合应用。结合 CAC 框架验证情感体验的中介作用，并基于 S-O-R 理论探讨不同拟人化维度的刺激效果，弥补了以往研究在情感体验中介机制及拟人化维度差异影响方面的不足，为相关理论的拓展提供了新依据。

（3）揭示了多维度外观拟人化对用户认知的影响机制。与以往研究仅关注整体或单一维度不同，本研究比较了面部与身体拟人化的差异影响，通过操纵头部、面部、躯干和手臂的拟人化程度，揭示不同外观维度对用户认知的作用，丰富了“恐怖谷”现象的理论解释。

（4）验证了多模态认知测量方法的有效性。从主观评价、眼动特征及脑活

动多角度解析拟人化视听特征对用户认知的影响,避免了单一测量指标的局限性,丰富了多模态认知测量方法。

1.2.2 实践意义

(1) 本研究为服务机器人多维外观拟人化设计提供指导。服务企业在引入机器人前,需综合考虑使用场景与用户需求,有针对性地选择面部拟人化或身体拟人化设计。研究强调了情感体验在主观评价与接受意愿间的关键中介作用,同时提示企业关注头部形状、面部特征、手臂特征及躯干特征等多维度外观拟人化设计对用户认知的交互影响。

(2) 为服务机器人多感官交互设计提供实践建议。制造商应优先考虑情感化语音设计,并注重多感官通道的协同效应,而非单一感官维度的优化。此外,过度拟人化的情感表达未必能带来积极效果,需通过适度调节视听情感表达以缓解“恐怖谷”现象。最后,应根据不同任务情境对机器人情感表达进行定制化设计,以提升用户体验。

(3) 本研究倡导采用多模态测量方法弥补主观数据的局限性。本研究通过眼动追踪与近红外脑功能成像技术,有效捕捉用户情感体验、眼动特征等方面的客观数据,相关结论难以通过单一主观问卷获得。这为服务机器人用户体验评估提供了更科学、全面的测量方法。

1.3 研究内容和创新点

1.3.1 研究内容

主要围绕以下四大研究内容展开,主要研究内容及其相互关系见图 1-1。

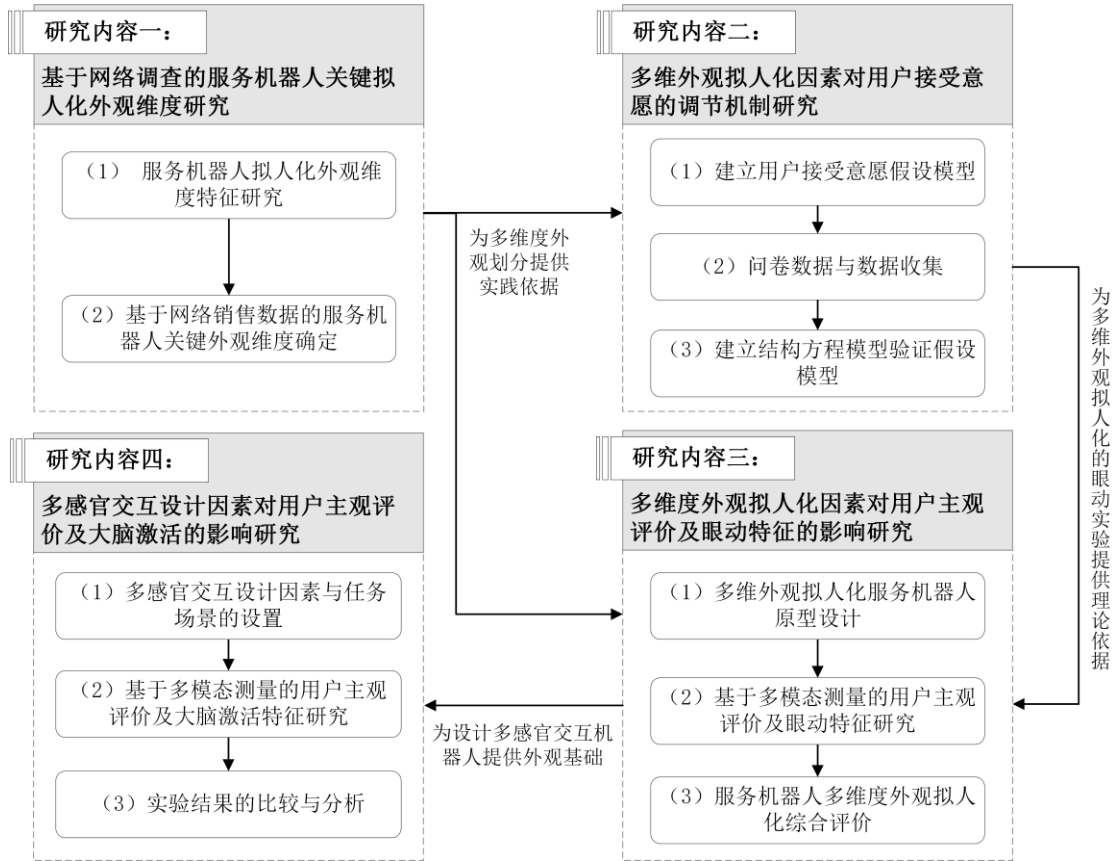


图 1-1 研究内容关系图

研究内容一：基于网络调查的服务机器人关键拟人化外观维度研究

(1) 服务机器人拟人化外观维度特征研究

参考相关文献，分解机器人不同外观维度特征；采用 Python 爬取主流购物网站的服务机器人相关销售数据，通过销量排名前十的服务机器人图片，筛选重要外观维度特征。

(2) 基于网络销售数据的服务机器人关键外观维度确定

对 320 条网络销售数据进行分析，根据销售量确定服务机器人外观拟人化的关键维度，为后续研究提供实践基础。

研究内容二：多维外观拟人化因素对用户接受意愿的调节机制研究

(1) 建立用户接受意愿假设模型

基于研究内容一提出的关键外观维度划分，结合 S-O-R 理论和 CAC 框架，构建多维外观拟人化服务机器人的用户接受意愿假设模型。

(2) 问卷数据与数据收集

采用问卷调查法收集用户对服务机器人外观拟人化设计的主观评价数据。通

过设计不同面部维度和身体维度拟人化特征的机器人原型开展问卷调查,系统评估不同外观拟人化维度对用户接受意愿的调节机制。

(3) 建立结构方程模型验证假设模型

以用户情感体验为中介变量,面部和身体拟人化为调节变量,感知温暖与感知能力为自变量,用户接受意愿为因变量,建立结构方程模型。基于问卷数据,分析不同拟人化设计对用户情感体验和接受意愿的作用路径及影响强度,揭示各因素间的内在因果关系,为优化机器人设计提供理论依据。

研究内容三: 多维外观拟人化因素对用户主观评价及眼动特征影响的研究

(1) 多维外观拟人化服务机器人原型设计

基于研究内容二提出的理论模型,将多维度外观拟人化设计因素进行细化。面部拟人化维度包括头部形状和面部特征;身体拟人化维度包括躯干形状和手臂特征。结合这些因素设计多种外观维度组合的机器人原型,以满足实验需求。

(2) 基于多模态测量的用户主观评价及眼动特征研究

采用眼动追踪技术与问卷调查相结合的方法,评估用户对服务机器人不同外观设计的主观评价与情感反应。通过记录注视点分布、注视时间、瞳孔直径等眼动特征,揭示用户对机器人外观的视觉注视模式。同时,通过问卷收集用户在不同拟人化设计下的情感体验数据,分析各维度设计对用户温暖感知、能力评价和情感共鸣的影响。实验旨在明确不同设计要素对用户视觉特征、情感体验以及用户主观评价的综合作用。

(3) 服务机器人多维度外观拟人化综合评价

结合眼动实验与问卷调查结果,对不同外观特征的服务机器人进行综合评价。在温暖感知、能力感知、用户偏好及拟人化感知等方面,对各设计组合进行量化分析,筛选用户体验最佳的拟人化特征组合。同时,结合实验数据提出外观设计优化建议,为后续研究多感官交互模式和实际机器人开发提供明确方向。此过程不仅为服务机器人设计标准化提供参考,也为实际场景中的人机交互优化奠定基础。

研究内容四: 多感官交互设计因素对用户主观评价及大脑激活的影响研究

(1) 多感官交互设计因素与任务场景的设置

基于研究内容二和三的外观设计成果,进一步扩展至实体机器人的多感官

交互设计探索。具体而言,通过操控机器人在视觉和听觉两种感官交互模式下的特征表现,构建多感官交互系统。与此同时,依据文献分析和实际应用需求,将服务场景合理划分为不同任务类型。

(2) 基于多模态测量的用户主观评价及大脑激活特征研究

实验设计采用近红外脑功能成像(fNIRS)技术与用户主观报告相结合的多模态测量方法。在实验中,参与者与多感官交互机器人进行对话,包括主观对话任务和客观对话任务。通过fNIRS技术实时记录用户在交互过程中的大脑激活区域及血氧浓度变化。此外,使用问卷记录用户的主观评价,包括情绪体验、社会属性评价和满意度等。通过结合主观评价和fNIRS数据,捕捉多感官交互设计对用户认知的综合影响。

(3) 实验结果的比较与分析

实验数据分析将从多角度展开,重点探讨多感官交互模式与服务场景对用户主观评价和大脑激活的影响规律。通过对fNIRS数据进行统计分析,探究特定脑区在不同交互模式下的激活模式及强度差异,揭示多感官交互设计对脑区活动的调节机制。比较不同任务类型下机器人多感官交互设计对用户主观评价的差异性影响,为优化交互设计提供科学依据。

1.3.2 特色和创新

(1) 研究特色

1) 研究对象方面。本文聚焦于服务机器人拟人化外观设计以及多感官交互设计对用户主观评价与脑功能响应的影响,选取不同的外观维度以及情感语音与表情符号这两类多感官交互要素作为研究对象,具有显著的前沿性与实践意义。

2) 研究方法方面。本文综合运用问卷调查、眼动追踪技术以及近红外脑功能成像(fNIRS)实验,采用主观与客观相结合的双重数据采集路径,增强了研究结论的信度与说服力。

3) 研究视角方面。突破传统研究仅关注机器人静态外观特征的局限,将动态视觉特征、听觉特征等多感官交互特性纳入研究范畴。强调多模态感知下的用户体验与神经认知机制之间的关联,拓展了人机交互设计领域的研究维度。

(2) 研究创新

1) 多感官拟人化特征的细化与优化。现有研究多采用高、中、低等级划分

机器人外观拟人化特征，难以全面揭示各维度设计对用户体验的具体影响。本研究细化多维度外观拟人化特征，分解面部特征、头部形状、躯干结构及手臂设计等维度，系统探讨其对用户主观评价与情感反应的影响机制，并探索通过细化设计减少“恐怖谷”现象的负面影响。此外，本研究将视觉感官通道与听觉感官通道相结合，拓展多感官设计的研究范畴。通过设计用户与真实机器人交互的实验，模拟实际场景，提升研究结果的实践价值，这是本研究的核心创新之一。

2) 多感官交互中的用户评价与多模态测量。现有研究多集中于单一视觉通道的感知分析，缺乏对视觉、听觉等多模态感知的系统性探索。本研究综合采用眼动追踪、近红外脑功能成像及主观问卷等多模态测量方法，全面分析用户对多感官交互特征的主观评价及客观生理指标。重点探讨视觉与听觉通道的整合机制及其对用户体验的影响，提出了一种实时、多通道、多模态的用户感知测量方法，为服务机器人在人机交互中的实际应用提供了精确的数据支持与方法指导。

1.4 研究方法与技术路线

1.4.1 研究方法

(1) 文献研究

通过系统检索和阅读服务机器人多感官交互设计相关领域的文献，深入学习情绪理论、人机交互模型和实验方法，梳理近年来的研究热点和发展趋势。重点关注服务机器人外观拟人化、多感官交互模式及情绪测量的相关研究成果，分析现有研究的不足与未来发展方向。在此基础上，明确本研究的具体内容、研究目的、研究意义及技术路线，为后续实验和模型构建奠定理论基础。

(2) 网络数据采集

利用 Python 3.7 编写网络爬虫程序，对主流购物网站进行数据爬取，获取服务机器人在市场上的主要信息，包括品牌、销量、图片、标题、价格等内容。通过数据清洗与分析，提取服务机器人外观设计特征（如头部形状、颜色、结构比例等）与销量、用户评价的关联性，为后续研究提供量化依据。同时，这些数据将为服务机器人外观拟人化设计的原型构建及市场需求分析提供参考支持。

(3) 问卷调查

设计针对用户主观评价、情感体验及接受意愿的问卷，并通过信度和效度检验确保问卷内容的科学性与合理性。在线上发放问卷收集用户数据，涵盖不同年

龄、性别、职业和使用经验的样本群体。基于问卷结果，运用统计学方法分析各变量间的关系，构建服务机器人外观设计、多感官交互与用户体验的相关模型，为验证理论假设提供数据支持。

（4）实验研究

本实验研究从主观与客观两个层面同步开展，以提升研究的系统性与全面性。在主观层面，通过主观认知评价与情绪量表对用户体验进行定量评估。在客观层面，借助某高校工效学实验室的多参数生物反馈系统，采集用户的眼动数据，包括注视点位置、注视时间和瞳孔直径等关键指标，用以分析其视觉注意分布特征。同时，通过功能性近红外脑成像（fNIRS）技术记录被试大脑区域的血氧水平变化，捕捉脑部激活模式，揭示用户在不同交互条件下的情绪反应与认知机制。最后，通过对眼动与脑成像数据的综合分析，筛选反映用户情感变化的关键指标，为优化服务机器人多感官交互设计提供科学依据。

1.4.2 技术路线

本研究以服务机器人多感官交互设计中的核心问题为切入点，通过系统的理论梳理与文献综述，明确研究内容与关键方向。研究初期，基于网络销售数据分析，提取服务机器人外观设计的关键要素。随后，设计并发放问卷，采集用户对不同维度外观拟人化的主观评价，构建服务机器人接受意愿的结构方程模型，探索多维度外观设计对用户主观评价与情感体验的影响机制。在实验研究阶段，采用眼动追踪技术，分析外观细化维度对用户眼动特征和主观评价的影响，揭示不同外观设计对用户体验的优化机制。同时，运用功能性近红外脑成像技术，记录多感官交互过程中用户的脑部血氧信号变化，重点探讨视听多感官交互设计对用户主观评价及大脑激活的影响机制。具体技术路线见图 1-2。

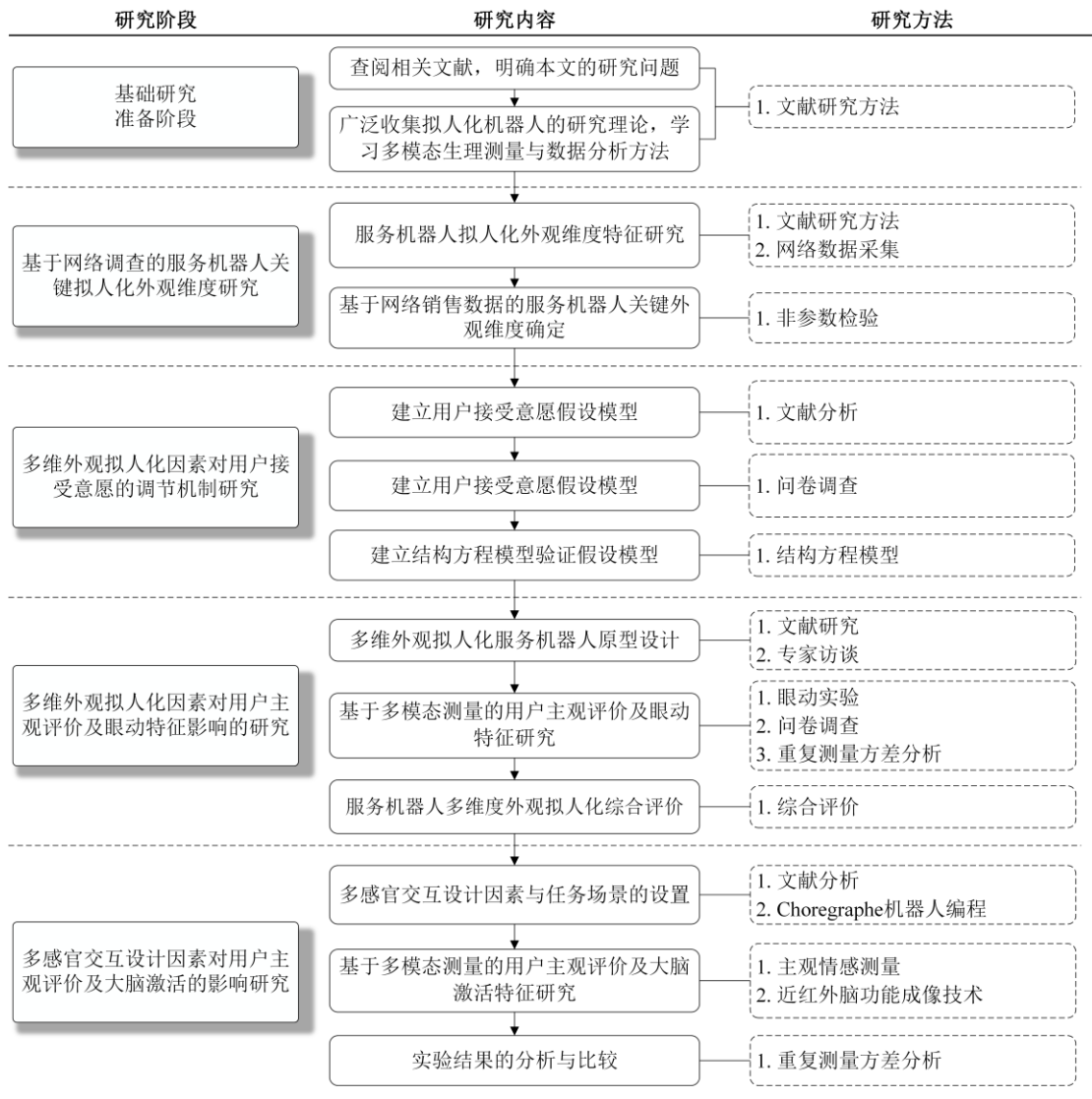


图 1-2 技术路线图

1.5 论文结构安排

论文预计由 7 章构成，具体说明如下：

第一章：绪论。阐述研究背景与理论依据，明确研究问题的提出思路，强调研究目的与意义，确定研究内容与方法，指出研究的创新点，并规划技术路线。

第二章：相关文献评述。系统梳理服务机器人拟人化多维度外观特征、多感官交互设计、用户情感测量方法、刻板印象内容模型及服务机器人接受度等相关理论，评述现有研究成果与不足，为后续研究奠定理论基础。

第三章：基于网络调查的服务机器人关键拟人化外观维度研究。通过爬取网络销售数据，分析不同外观拟人化维度对服务机器人销售量的影响，确定关键外观拟人化维度。

第四章：多维外观拟人化因素对用户接受意愿的调节机制研究。基于第三章结论，设计面部与身体维度拟人化的服务机器人作为实验刺激材料。通过问卷数据构建结构方程模型，分析机器人多维外观拟人化、用户主观评价、情感体验及接受意愿之间的内在因果关系。

第五章：多维外观拟人化因素对用户主观评价及眼动特征的影响研究。细化面部与身体特征维度，设计不同外观拟人化的服务机器人原型。通过眼动实验与主观问卷，分析不同外观拟人化特征对用户主观评价、情感体验及眼动特征的影响，综合评价各外观设计，得出较优外观类型。

第六章：多感官因素对用户主观评价及大脑激活的影响研究。以较优拟人化外观的实体服务机器人为基础，设计多感官（视觉、听觉）交互模式，并结合不同任务类型（主观、客观）场景，开展多模态测量实验，考察用户 fNIRS 数据、主观评价及情感体验。

第七章：结论与展望。对本论文的主要研究成果和研究结论进行总结，指出研究的局限以及进一步需要开展的研究工作。

第2章 相关理论和文献综述

2.1 相关理论

2.1.1 恐怖谷理论

恐怖谷理论 (Uncanny Valley theory) 是机器人拟人化特征研究的经典理论。它是由 Masahiro Mori^[10]在 1970 年提出的, 随着机器人科学的发展, 它在人机交互以及人工智能领域逐渐受到重视。恐怖谷理论通过两个非单调函数, 讨论了静止和运动状态下机器人实体的拟人化程度和感知亲和力之间的关系。该理论指出, 高度拟人化的机器人会诱发一种怪异的情感体验, 就像从喜爱迅速坠入厌恶的山谷, 机器人的运动将强化这种情感体验。

2.1.2 刺激-有机体-反应 (S-O-R) 理论

刺激-有机体-反应 (Stimulus-Organism-Response, 简称 S-O-R) 理论是环境心理学领域的经典理论框架, 由 Mehrabian 和 Russell 于 1974 年首次提出^[11]。该理论旨在解释外部环境刺激如何通过影响个体的内部心理状态 (有机体), 进而引发其行为反应。S-O-R 理论的核心在于将个体的行为反应视为外部刺激与内部心理过程共同作用的结果, 而非单纯由外部刺激直接驱动。

在 S-O-R 理论中, 刺激 (Stimulus) 指的是外部环境中能够引发个体感知的物理或社会因素, 例如视觉、听觉、触觉等感官输入。这些刺激可以是具体的物理对象 (如服务机器人的外观设计), 也可以是抽象的社会情境 (如服务场景的氛围)。在本研究中, 刺激变量包括机器人多维度拟人化外观及多感官交互模式。有机体 (Organism) 代表个体在接收外部刺激后产生的内部心理状态, 包括认知、情感和态度等。Mehrabian^[12]提出了情感的三维结构模型, 包括愉悦度 (Pleasure)、唤醒度 (Arousal) 和优势度 (Dominance)。然而, 由于在测量过程中用户较难理解优势度的含义, 因此在现有研究中情感状态的量化分析通常聚焦于愉悦和唤醒两个维度^[13,14]。基于此, 本研究重点考察了用户在与多维度外观拟人化机器人及多感官表达机器人交互过程中的主观情感体验。反应 (Response) 则是个体在心理状态驱动下表现出的行为结果, 例如接受、回避或使用某种服务, 本研究中的

行为结果即为用户对多维外观拟人化机器人的接受意愿。

S-O-R 理论在服务机器人研究中的应用具有重要意义。服务机器人的外观设计、交互方式以及服务场景等外部刺激，能够通过影响用户的感知温暖、感知能力等认知评价，以及愉悦度、唤醒度等情感体验，最终决定用户的行为反应（如接受意愿或使用行为等）。例如，Zhang 等人^[15]基于 S-O-R 理论，研究了不同拟人化程度的服务机器人对用户情感体验及接受意愿的影响，发现中等拟人化的机器人能够有效提升用户的积极情感体验，进而增强其接受意愿。

综上所述，S-O-R 理论为研究服务机器人用户行为提供了坚实的理论基础。通过将外部刺激（如机器人外观、交互设计）与用户内部心理状态（如感知温暖、情感体验）相结合，能够更全面地揭示用户行为反应的驱动机制，为服务机器人的设计与优化提供理论支持。

2.1.3 刻板印象内容模型

刻板印象内容模型（Stereotype Content Model, SCM），由 Fiske 等人（2002）^[16]开发，解释了人们是如何通过温暖和能力来描述他人的。Fiske 等人指出，温暖维度反映了意图的特征，如友好、真诚、激情和可信度；能力维度捕捉了能力的特征，如能力、智力、技能和效能^[17]。

刻板印象内容模型（Stereotype Content Model, SCM）由 Fiske 等学者于 2002 年提出，旨在揭示社会认知中个体对他人或群体进行评价的核心维度及其内在机制^[16]。该模型指出，人们倾向于通过温暖（Warmth）和能力（Competence）两个基本维度对目标对象进行社会性判断，二者分别反映了目标对象的意图特质与效能特质^[16]。

温暖维度聚焦于目标对象的动机与道德属性，具体包括友好、真诚、可信性以及利他倾向等特征，其核心在于判断对方是否具有善意的意图^[17]。例如，在服务场景中，用户可能通过机器人的微笑表情或柔和的语音语调感知其温暖特质，进而推断其服务动机的友好性。能力维度则关注目标对象实现目标的能力，涵盖智能、效率、专业性及技术熟练度等属性，主要用于评估对方能否有效完成特定任务^[17]。例如，用户可能通过机器人精准的动作响应或复杂任务的处理表现，形成对其能力的正向评价。

2.1.4 认知-情感-意愿（CAC）框架

认知-情感-意愿（Cognitive-Affective-Conative, CAC）框架由 Bagozzi^[18]提出，其理论基础源于认知评估理论（Cognitive Appraisal Theory）与情绪的认知-动机-关系理论（Cognitive-Motivational-Relational Theory of Emotion）^[19]。该框架通过评估过程（Cognitive Appraisal）、情绪反应（Affective Response）与应对反应（Conative Response）三阶段的递进逻辑，系统阐释了个体从环境感知到行为决策的动态心理机制，为人机交互领域的研究提供了重要范式。

评估过程是 CAC 框架的认知起点，指个体基于内部需求或外部情境对目标对象的属性与潜在结果进行理性分析的过程^[19]。在文献中，认知评估通常通过个体对对象属性的感知来体现，例如感知能力等^[20]。情绪反应是认知评估向行为转化的情感中介，表现为个体对交互体验的主观感受（如愉悦、焦虑或信任感）^[21]。应对反应是 CAC 框架的最终行为输出，反映了个体为适应环境而采取的趋近（Approach）或回避（Avoidance）策略^[19]。根据 Bagozzi 的界定，当个体的评估结果与内在需求一致时（即结果-欲望满足），会激发积极情绪并驱动趋近行为（如使用意愿、推荐意愿）^[18]。反之，若评估结果与需求冲突（即结果-欲望冲突），则可能引发消极情绪并触发回避行为（如拒绝使用、负面评价）^[19]。

2.2 文献综述

机器人技术领域通过人工智能（AI）和机器学习的整合取得了巨大进展，这导致了具有潜在影响力的服务机器人的出现，可能对所有主要利益相关方产生显著影响^[2]。拟人化是指将人类特征附加于非人个体，使其被看作是有生命、有感觉和思想的人^[22]。对机器人进行拟人化是根植于各种心理机制之中的，例如行动启动机制、引发的代理知识以及社交动机，这些机制驱使个体将人类特质、意图和情绪归因于非人类实体^[23]。Waytz 等人^[24]总结了拟人化的两种基本方式，一是将拟人的物理特征赋予非人类个体（面孔、双手等），二是将人类的思想赋予非人类个体（意图、意识、情绪等）。基于此分类方法，本研究将服务机器人的拟人化划分为多维度外观和多感官交互两个方面。本文将通过多维度外观设计表达人类的物理特征，通过多感官交互设计表达人类思想。

2.2.1 服务机器人多维外观拟人化研究综述

Phillips 等人^[25]确定了人型机器人的四个外观维度，包括表面外观（如睫毛、

头发、皮肤、性别、鼻子、眉毛和服装)、身体操纵器(包括手、臂、躯干、手指和腿)、面部特征(包括面部、眼睛、头部和口)以及机械运动(包括轮子和履带/轨道)。这些维度在预测机器人的人类相似度以及人们对拟人化方面的感知方面起着关键作用(ABOT 网站, <http://www.abotdatabase.info/>)。需要注意的是,拟人化程度并非总是与用户接受度呈正相关^[26,27]。Mori^[10]在 1970 年提出的“恐怖谷”现象表明,随着机器人拟人化程度的提高,用户可能对其产生更多好感,然而,一旦机器人在不达到真实人类外观的某一阈值之前变得过于人类化,人们的情感可能会突然转向厌恶。根据 Phillips 等人^[25]提供的见解,本研究认为通过操控机器人不同身体部位的拟人化效果,可能识别出能够缓解“恐怖谷”现象的最佳拟人化设计。

Chung 等人^[28]提出,在人型机器人单一模态外观设计和接受方面,情感、功能和关系可以作为中介因素。先前关于探索机器人不同身体外观维度的研究,也支持了这个观点。就面部特征维度而言,研究表明个体可以在极短时间内准确处理面部信息,并形成社交属性的初步印象^[29,30]。例如,当机器人的面部特征类似于婴儿时,可以增强用户的信任感^[31]。面部带有脸颊的机器人似乎更受欢迎^[32]。此外, Ren 和 Guo^[33]的研究表明,机器人面部的圆形眼睛与更高的信任度相关。另一方面,人们往往会根据机器人的外观形成对其功能和能力的期望,尤其是在设计身体特征方面^[34]。例如,智能感知和侵略性等特征与运动器或腿的数量以及机器人是否有手臂相关^[34]。拥有人形躯干和圆柱形肢体的机器人被认为勤奋,使其更适合于服务机器人的外观^[7]。

2.2.2 服务机器人多感官交互设计研究综述

多感官交互(Multisensory Interaction, MI)是指一种过程,即来自一个感觉模式的信息与另一个感觉模式中呈现的线索的感知相互作用,这些感觉输入如何融合以形成统一的知觉是其关键特征^[35]。心理学和神经科学的研究通过行为实验、功能性神经影像(fMRI)和脑电图(EEG)等方法,探索了面孔与声音之间^[36]、肢体动作与声音^[37]以及身体动作和声音刺激之间的多感官交互效应^[38]。这些研究结果表明,视觉和听觉信息的相互作用会对认知过程和情感判断产生影响。在人-机器人交互(Human-Robot interaction, HRI)领域中,大多数的研究集中在机器人的情感表达方面,并且是在比较单模态和双模态情感刺激的研究上。先前

的研究已经证明,用户对具有多感官交互的机器人有更高的评价。例如, Costa 等人^[39]表明手势对于识别机器人面部表情是有价值的补充。另一项研究使用语音、头部-手臂手势和面部表情,显示了由头部-手臂手势和语音组成的双模态表达被参与者评价为比仅包含语音的单模态表达更易观察到^[40]。Salem 等人^[41]表明当手和手臂的手势与语音同时展示时,机器人的评价更为积极。

少数人机交互研究关注了复杂的互动情境。比如,一些研究分析了机器人在存在情境不一致时的面部表情感知^[42-44]。研究中通过展示情绪引发的图片或影片,或者播放带有正面或负面情感的新闻片段来调节情境。随后参与者需对机器人的面部表情进行评分(与情境是否一致)。总体来看,结果表明,在一致的情境下,人们对机器人的面部表情认知更准确,相比没有情境或不一致情境下的情况。事实上,提供不一致的情境可能比没有情境更为糟糕^[44]。此外, Zhang 等人^[43]还发现,当机器人的表情与情境不匹配时,被试的判断更多受到情境的影响,而非表情本身。最后,有研究指出,当机器人的情绪反应与用户的情感状态不符时,人们对机器人的信任也会下降^[42]。

文献研究表明,在服务机器人的用户主观评价研究中,目前主要关注于视觉感官通道,而对于听觉、触觉等其他通道的研究相对较少。在服务机器人外观拟人化研究中,大部分关注点放在了机器人整体拟人化程度的高低上,然而,关于各维度外观拟人化之间的交互作用对用户主观评价的影响方面的研究尚显不足。通常,对用户主观评价及情感的研究采用主观认知判断、客观的眼动、生理指标、近红外脑功能成像指标等。但目前针对用户多模态测量方法以及多通道感官融合机理的研究还相对匮乏。

2.2.3 服务机器人用户认知的多模态测量方法研究综述

(1) 主观测量方法

1) 服务机器人的用户主观评价研究

在现代社会中,机器人的角色已从单一任务执行扩展到社交互动领域,其功能日益受到重视^[45]。从理论角度来看,“计算机是社交行为者”(CASA)范式指出,人类倾向于将机器人视为社交行为者^[46]。因此,通过测量用户的主观认知评价来优化服务机器人的交互体验,已成为设计中的关键考量。例如, Carpinella 等人^[47]基于刻板印象内容模型^[16]开发了机器人社交属性量表(RoSAS),用于评估

机器人的社交属性，涵盖温暖、能力与不适等维度。Dou 等人^[48]运用 RoSAS 验证了机器人声音在互动情境中的相关性，特别强调了“不适感”在人机交互中的重要性。Wirtz 等人^[2]指出，用户对服务机器人的接受程度取决于其满足功能需求（与能力相关）和社会情感需求（与温暖相关）的能力，以实现角色一致性。尽管机器人本质上是程序化机器^[49]，但当其具备类人特征时，用户倾向于将其与温暖特质联系起来^[27]。

2) 服务机器人的用户情感体验研究

在认知心理学领域，情感体验的测量主要基于离散情感理论和连续情感理论。离散情感理论方面，Tomkins^[50]提出人类具有八种基本情绪，包括恐惧、愤怒、痛苦、喜悦、厌恶、惊讶、情感和羞耻。而连续情感理论则以 Mehrabian 和 Russell^[11]提出的 PAD 三维模型为代表，将情感划分为愉悦度(Pleasure)、唤醒度(Arousal)和优势度(Dominance)，这一模型被广泛应用于情感研究领域。例如，李森等人^[51]基于 PAD 量表建立了产品外观情感预测模型，用于评估用户的主观情感状态。此外，SAM 自我评估模型^[52]在 PAD 模型基础上，通过 9 张表情图片评估情感反应的三个维度。Chen 等人^[53]则运用 SAM 量表探讨了移动客户端功能设计对用户满意度的影响。

情感体验对用户行为意图具有显著影响^[54]。在与机器人的交互中，积极情感可能促使用户产生接近倾向，而消极情感则可能导致回避行为^[55]。因此，设计师优先考虑通过外观设计营造积极的情感体验。研究表明，拟人化特征能够引发积极的情感反应^[56]。Hwang 等人^[7]的研究进一步指出，人形躯干设计在激发愉悦情感方面表现尤为突出。关于整体拟人化水平，Zhang 等人^[15]认为，适度拟人化的机器人能够提升用户的审美偏好，并引发愉悦与兴奋感。然而，Kim 等人^[57]发现，在完成复杂任务时，内向女性与非拟人化机器人交互时体验到更高的愉悦感和更低的唤醒度，这表明用户个体差异对情感体验的影响不容忽视。

(2) 客观测量方法

客观测量通常包括眼动特征、近红外脑功能成像等指标。人类情感或认知的变化往往伴随着这些上述客观指标的变化，且这些变化几乎不受人类主观意志的控制，因此，通过相关记录仪记录这些指标的变化，有助于了解情感改变的程度或者其他认知变化的相关机制，从而获得比主观评价更准确的情绪信息。

1) 眼动追踪技术

眼动追踪技术是指通过测量眼睛的注视点位置或者眼球相对头部的运动而实现对眼球运动的追踪,眼动追踪技术可以用于用户情感体验、人机交互、消费行为等研究^[58]。在眼动特征相关研究中,李强等^[59]发现负面情绪图片和正面情绪图片的注视点总数显著高于中性图片。Simola 等^[60]通过对高低唤醒度的正性和负性情绪图片对比研究,发现情感效价与唤醒之间的相互作用,即高唤醒条件下,负性图片的注视率和注视时间均高于正性图片,而低唤醒条件下,两种图片的注视率和注视时间均较高。

在眼动技术测量用户情感的应用方面,Khalighy 等^[61]借助眼动技术建立了眼动特征与审美偏好之间的关系,为产品审美偏好提供了客观的方法和预测指标。Tzafilkou 等人^[62]基于网页终端研究用户的感知和接受过程,建立了眼动特征与网页感知特征之间的关系,如瞳孔直径的增大与风险感知之间的关系,为预测用户接受度提供了客观指标。

2) 近红外脑功能成像技术

近红外脑功能成像技术 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 是一种基于光学原理的非侵入式脑功能监测技术,可通过测量脑组织中血氧水平的变化来反映脑区的活动状态。fNIRS 通过记录血红蛋白浓度的动态变化,揭示神经血管耦合过程中由脑活动引起的血流动力学反应。与功能性磁共振成像 (fMRI) 相比, fNIRS 具有便携性强、成本较低以及对被试运动限制较少的优势,因此在情绪研究和人机交互领域中得到了广泛应用。在情绪相关研究中, fNIRS 被用于探讨脑区活动与情绪变化的关系。例如, Hu 等^[63]利用 fNIRS 技术分析了前额叶皮层 (PFC) 的血流动力学反应,识别了正性情绪和负性情绪的差异。研究发现, PFC 具有情绪侧化效应,左侧 PFC 主要参与正性情绪处理,而右侧 PFC 与负性情绪处理相关^[64,65]。此外,左侧背外侧前额叶皮层 (DLPFC) 的激活可能与任务外思维有关,而左布罗卡区的激活则与知觉和认知过程密切相关^[66],尤其在需要更多认知资源的条件下反应更强^[67]。同时,布洛卡区在语言和韵律处理方面发挥了重要作用。左布洛卡对语音生成^[68]和音位分割^[69]至关重要,而右布洛卡区则可能在韵律特征感知过程中被激活^[70]。这种功能分工进一步说明 fNIRS 在研究情绪、认知和语言处理机制中的重要性。

文献研究表明,尽管在多模态测量方面有相当数量的研究,但机器人外观设计和多感官交互设计的用户认知测量主要仍采用语义差异法(SD)、PrEmo法等主观评价测量方法。目前,使用近红外脑功能成像测量技术、眼动追踪技术等进行用户认知测量的研究较少,且对不同模式测量指标有效性缺乏充分的分析。因此,多模态测量应该是关于机器人认知研究和实践发展的趋势。

2.3 已有研究的贡献与不足

2.3.1 主要贡献

(1) 在服务机器人多维度外观拟人化研究中,现有文献通过解构拟人化特征及其对用户认知的差异化影响,为设计实践提供了理论依据。例如,Phillips等人提出的多维外观模型不仅量化了拟人化设计的关键维度,还结合“恐怖谷”现象揭示了拟人化程度与用户接受度的非线性关系,为规避高拟人化设计的潜在风险(如用户厌恶)提供了优化方向。此外,研究进一步验证了情感、功能等中介因素的作用。

(2) 在服务机器人多感官交互领域,现有研究通过跨学科理论整合,系统论证了多通道信息融合对用户体验的协同增益效应,为机器人情感化设计提供了理论框架与实践启示。研究界定了多感官交互(MI)的概念内涵,揭示了视觉、听觉等多感官通道协同作用对用户认知与情感判断的强化路径,例如多感官表达较单感官显著提升情感识别自然度等。提出情境一致性是机器人情感表达有效性的关键调节变量,为动态调整机器人行为模式以匹配环境需求提供了设计原则。

(3) 文献从宏观上阐明了服务机器人的用户多模态测量方法:主观测量和客观测量。主观测量包括主观评价、情感体验等,通过量表(如RoSAS、PAD、PANAS、SAM)对机器人社交属性、情感体验等进行主观描述;客观测量则利用眼动、脑功能成像等技术捕捉认知及情感等变化的生理指标。

2.3.2 不足之处

(1) 外观拟人化各维度交互作用探讨不够

现有的服务机器人外观拟人化研究大多侧重于整体拟人化程度的量化和提升,较少关注外观各维度之间的相互作用。如何通过协同设计各个维度,进而有效缓解“恐怖谷”现象并提升用户的亲和感和信任度,仍是亟待深入探索的问题。

(2) 感官通道研究的局限性

当前的用户认知研究主要集中在视觉通道，而对于听觉、触觉等其他感官通道的关注明显不足。这种单一感官通道的研究忽略了多感官信息整合对情感和认知判断的重要影响，同时也限制了对机器人多模态交互效果的全面理解。

（3）用户认知测量方法依赖主观评估，客观测量应用不足

目前在服务机器人外观设计和多感官交互设计中，用户认知主要采用语义差异法（SD）等主观测量方法，尽管部分研究尝试结合多种模式，但整体上依然以主观方法为主。相比之下，利用眼动追踪、近红外脑功能成像等客观测量技术的应用较少，对不同主观测量指标的有效性和互补性分析也不充分。因此，发展多模态测量方法和探讨多通道信息融合机理，成为未来用户认知测量理论与实践的重要发展方向。

2.3.3 对本文研究的启示

（1）外观拟人化各维度协同效应的深入探讨

目前大部分研究聚焦于机器人整体拟人化程度，而较少关注外观各维度之间的交互作用。本文研究可以从不同外观维度入手，探讨其协同效应如何影响用户的情感和认知反应，从而为缓解“恐怖谷”现象和提升用户接受度提供理论支持。

（2）多感官通道的综合考虑

文献显示，用户对服务机器人认知的研究大多侧重于视觉通道，而对听觉、触觉等其他感官通道的探讨相对欠缺。在机器人交互设计与评估中，有必要充分整合多感官信息，探讨跨感官协同作用对整体用户体验的提升效果。

（3）多模态测量方法的融合应用

文献综述显示，用户认知测量主要依赖于主观评估方法，客观测量手段（如眼动追踪、fNIRS 数据等）的应用较少。这为本文研究提供了启示，即在用户认知测量中应尝试整合主观与客观两种方法，构建多模态测量评估体系，以期获得更准确和全面的用户认知数据，推动用户认知测量理论与实践的发展。

第3章 基于网络调查的服务机器人关键拟人化外观维度研究

本章旨在通过对服务机器人网络销售数据的调查,通过分析不同拟人化外观维度在销售量方面的差异,确定关键拟人化外观维度,为后续的研究奠定实践基础。首先,依靠相关文献,划分不同外观拟人化维度;其次,利用 Python 3.7 对主流购物网站关于服务机器人的 320 条数据进行提取,并对数据添加标签;最后,对多维度外观拟人化服务机器人销售数据进行分析,确定关键外观拟人化维度。

3.1 服务机器人拟人化外观维度特征研究

Phillips 等人^[25]在构建的拟人化机器人数据库(ABOT)中将拟人化外观特征划分为四个维度:面部特征维度、身体特征维度、表面外观维度以及机械运动维度,各维度的具体特征详见表 3-1。

表 3-1 拟人化机器人外观特征的四个维度

维度	因素
面部特征	头部、面部、眼睛、嘴巴
身体特征	躯干、腿、胳膊、手、手指
表面外观	性别、头毛、皮肤、鼻子、眉毛、睫毛、服装
机械运动	车轮、胎面

基于此分类框架,采用 Python 3.7 编程语言对主流电子商务平台中涉及服务机器人的 320 条商品数据进行了系统性采集。数据采集内容涵盖商品标题、价格、付款人数、店铺名称、机器人品牌、商品详情页信息以及商品图片等关键字段。为确保数据标注的准确性和可靠性,研究团队组织 3 名经过培训的小组成员对采集的机器人图片进行独立评估与标注,具体包括:(1)区分拟人化机器人与非拟人化机器人;(2)识别具有面部特征(如眼睛、鼻子、嘴等)的机器人与无面部特征的机器人;(3)标注具有身体特征(如手臂、腿等)的机器人与无身体特征的机器人。该标注过程为后续的量化分析提供了可靠的数据基础。

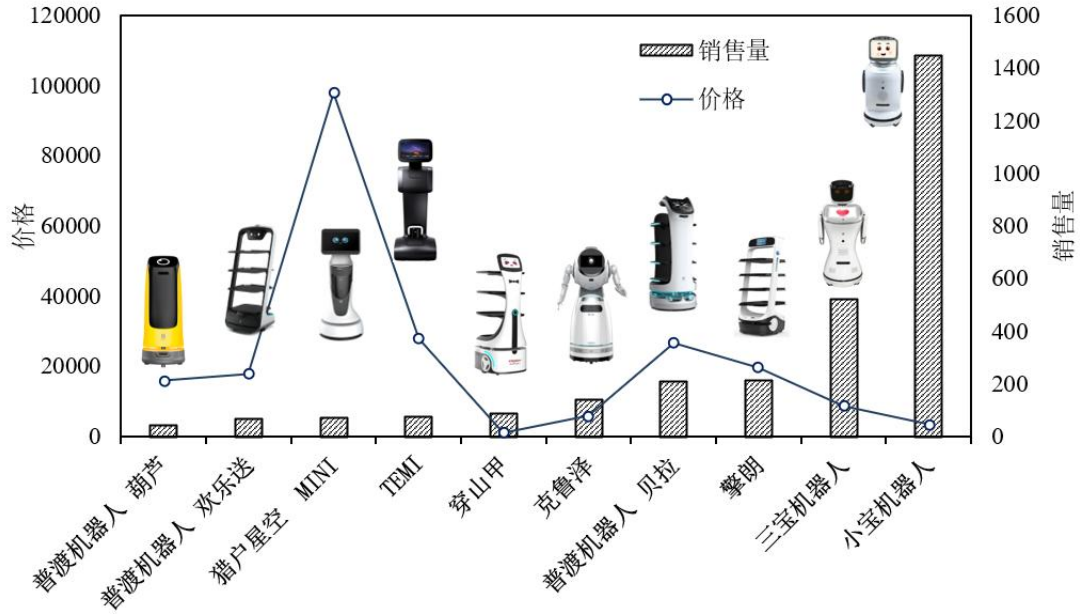


图 3-1 销售量前十的服务机器人品牌

为探究最受欢迎的服务机器人外观特征分布情况，对采集的商品数据进行了系统性整理，依据服务机器人品牌进行数据汇总，最终得出销售量排名前十的品牌分布情况，如图 3-1 所示。通过可视化分析可以发现，销售量位居前两位的服务机器人均具有拟人化特征，且呈现出不同程度的身体拟人化特征。值得注意的是，在排名第三和第四的送餐服务机器人中，“普渡机器人贝拉”展现出显著的面部特征。排名第五的“克鲁泽”机器人展现出显著的身体拟人化特征，具体表现为其具备类人的肢体结构。相比之下，排名后五位的机器人中有三例不具备拟人化特征。总体而言，销售量排名前十的服务机器人在拟人化程度、面部特征及身体特征的组合模式上呈现出差异性。基于此，初步对筛选出面部特征及身体特征为关键拟人化外观维度。

3.2 基于网络销售数据的服务机器人关键外观维度确定

对服务机器人的销售量和价格进行正态性检验，结果显示两者均不符合正态分布 ($p < 0.05$)，故采用非参数 Mann-Whitney U 检验。以销售量为因变量，分别以是否拟人化、有无面部特征、有无身体特征为分组变量进行检验。

表 3-2 及图 3-2 展示了销售量的检验结果。拟人化机器人的销售量显著高于非拟人化机器人 ($p < 0.001$)。具有身体特征的机器人销售量显著高于无身体特征组 ($p < 0.05$)。

表 3-2 销售量中位数、四分位数与 Mann-Whitney 检验表

		销售量	Z	p
是否拟人化	拟人化	17 (11~26.75)	-4.870	0.000
	非拟人化	6.5 (2~14.75)		
面部特征	有	18.5 (11~26.5)	-4.021	0.000
	无	11.5 (2~16.75)		
身体特征	有	16 (11~27)	-3.011	0.003
	无	12 (2.5~20.5)		

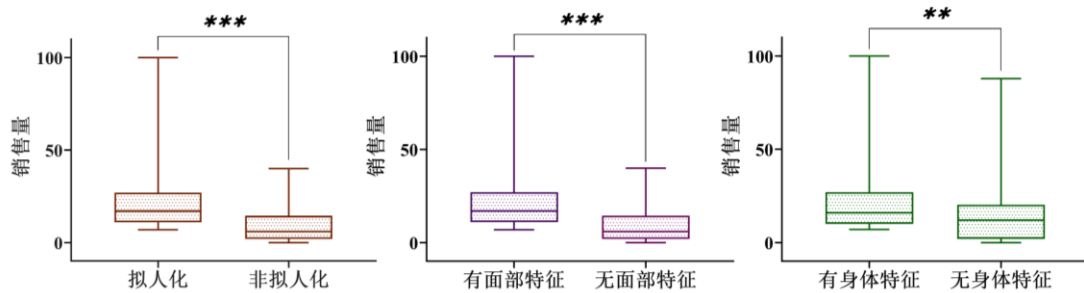


图 3-2 销售量汇总箱线图

这些结果表明，将机器人设计成更像人类的形态和行为，可能会增强顾客的亲和力和信任感，从而促进销售。这可能是因为拟人化机器人让顾客更容易建立起情感联系，这种联系可能会提高顾客的忠诚度和购买意愿。

同样地，当服务机器人按照面部特征分类以及身体特征分类时，Mann-Whitney 检验显示具有面部特征以及具有身体特征的机器人和没有面部、身体特征的机器人之间的销售量存在显著差异。具体而言，具有面部特征以及具有身体特征的机器人销售量较高。这可能是因为面部特征以及身体可以使机器人看起来更加人性化和友好、更具有立体感和真实感，因此更容易吸引消费者的注意和兴趣、更容易与其产生情感共鸣，而增加销售量。基于以上研究发现，本章确定面部特征和身体特征是服务机器人拟人化外观设计的关键维度，为后续的研究提供实践基础。

3.3 主要结论

基于网络爬取的服务机器人销售数据，本章节在不同外观维度视角下对服务机器人的销售量进行了分析。研究结果表明，在服务机器人销售排名中，位居前五位的均为具有面部特征与身体特征拟人化的服务机器人。通过对服务机器人外观特征的分类比较发现，拟人化服务机器人销售量显著高于非拟人化机器人；同时，具备面部特征、身体特征的服务机器人，其销售量显著高于无面部特征以及

无身体特征的机器人。基于此，确定关键拟人化外观维度为面部外观维度以及身体外观维度。

3.4 本章小结

本章为后续研究奠定了实践基础。整合文献分析法和网络销售数据挖掘技术，对服务机器人外观拟人化进行了多维度解构，并实证探究了不同拟人化外观维度对销售绩效的影响机制。具体研究工作如下：

（1）阅读相关文献，对服务机器人外观拟人化的多维度划分理论进行梳理与整合，建立理论基础框架。

（2）运用网络爬虫技术采集主流电商平台的服务机器人销售数据，对高销量服务机器人的基本特征进行分析。

（3）采用定量分析方法探究不同拟人化维度与销售量之间的相关性，据此确定服务机器人外观拟人化的关键维度划分标准。

第4章 多维外观拟人化因素对用户接受意愿调节机制研究

第3章调查了多维外观拟人化对网络销售数据的影响，并确定了服务机器人关键多维度外观特征。基于此，本章旨在深入探究服务机器人多维度拟人化外观对用户接受意愿的内在调节机制。重点考察感知温暖和感知能力两个关键认知维度对用户接受意愿的影响路径。特别关注拟人化维度的调节效应以及用户情感体验在其中的中介作用。依据现有理论和文献，设计问卷并开展调查，然后检验问卷的信度和效度，最后通过结构方程模型分析验证假设。

4.1 研究目的与研究变量

本章的研究旨在探讨感知温暖及感知能力对用户接受意愿的影响，重点分析不同拟人化维度的调节效应及情感体验的中介作用。

基于 Fiske 等人^[17]提出的刻板印象内容模型(Stereotype Content Model, SCM)，本研究将感知温暖（关怀、友好、信任等特质）与感知能力（胜任、熟练等特质）纳入统一分析框架。现有文献表明，用户对服务机器人的刻板印象显著影响其感知、评价和行为^[71,27,8]，但多数研究偏重温暖维度，缺乏对能力维度的深入探讨。因此，本研究将系统考察这两个维度对用户接受意愿的影响路径。

研究表明，拟人化设计虽有助于建立用户信任^[72,15]，但过度拟人化可能引发“恐怖谷”现象^[27]。现有研究多聚焦于整体或单一维度的拟人化^[9,15]，缺乏对多维度差异影响的系统探讨。因此，服务机器人外观拟人化维度被确定为本章的关键变量。

此外，基于情感体验与接受意愿之间存在一定相关性的研究^[5,73]，本章将这两个变量确定为核心研究构念。其中，情感体验操作化定义为用户交互过程中的主观情感反应（愉悦度、唤醒度），接受意愿则指用户未来使用拟人化服务机器人的行为倾向。

4.2 假设模型的构建

4.2.1 感知温暖和感知能力对接受意愿的影响

先前的研究指出，与服务机器人接触过程中，有诸多因素影响用户的接受意

愿,包括服务机器人的形态^[74]、类人特征^[75]、刻板印象^[8]等。特别地,服务机器人的形态是影响用户对机器人感知的关键因素^[74],同时,刻板印象等用户感知会影响用户对服务机器人的接受意愿^[8]。

一方面,服务机器人的感知温暖对用户的接受意愿产生重要影响。人工智能助手可爱的外表带来了较高的感知温暖评价,并能够增加用户对服务故障的容忍度^[76]。同样地,研究表明,当医疗服务机器人展现出的温暖感知较高时,用户会表现出积极的反应^[77]。另一方面,服务机器人的感知能力也会对用户的接受意愿产生影响。研究发现,用户更倾向于选择具有更高能力的服务提供者^[78]。例如,具有类人双手的机器人厨师对食品质量的预测更为积极^[9]。此外,用户更喜欢感知能力较高的安全机器人^[77]。

综上所述,感知温暖与感知能力在用户对服务机器人的认知评价过程中起着重要作用,并对用户接受服务机器人并与之进行交互产生积极作用。基于此,本研究提出如下假设。

H1: 服务机器人的感知温暖和感知能力正向影响用户的接受意愿。

4.2.2 服务机器人外观拟人化维度的调节作用

S-O-R 理论表明,外部刺激会对用户的生理和心理产生影响,继而影响用户的接受意向^[11]。人们会通过外表建立起对服务机器人的感知和判断^[79]。根据 S-O-R 理论,用户是否接受机器人服务的过程包括:初次观察服务机器人外观形态,形成某种第一印象,并以此为刺激产生内部机体感知^[74],最后,形成趋近或回避反应。

在服务机器人的研究中,先前的文献也讨论了机器人不同形态外观对感知温暖和感知能力的影响。当服务机器人的外观拟人化程度逐渐提高时,用户会产生更高的温暖判断^[27],认为它们更友好、善于交际、讨人喜欢和善良^[80]。而对于已经具有拟人化外观的服务机器人,有研究表明,娃娃脸更具有感知温暖,成人脸更具感知能力^[8,31]。大部分研究更关注机器人的面部拟人化,少部分学者探讨了拟人化身体(手臂、躯干等)产生的影响。身体拟人维度反映了用户对服务机器人操作周围物体的期待^[25]。例如,厨师机器人手部的拟人化为感知能力带来了积极影响^[9]。

因此,服务机器人外观拟人化的不同维度可能会调节感知温暖和感知能力对

用户接受意愿的影响。具体而言,在服务机器人面部拟人化的外观刺激下,用户可能会更加重视其感知温暖;相比之下,在服务机器人身体拟人化的外观刺激下,用户可能会更加重视其感知能力,从而影响其接受意愿。基于此,本研究提出以下假设。

H2a: 当服务机器人面部拟人化时(vs. 身体拟人化),其感知温暖对用户接受意愿的影响更强。

H2b: 当服务机器人身体拟人化时(vs. 面部拟人化),其感知能力对用户接受意愿的影响更强。

4.2.3 情感体验的中介作用

根据 CAC 框架,在研究认知和行为意愿的关系时,情感体验成为影响行为意愿的一个重要因素^[81]。个体对事件的认知评估塑造了他们的情绪反应,进而影响他们的行为^[18]。

将 CAC 框架置于用户对服务机器人的接受意愿情境中,用户对服务机器人的认知是指用户初次与机器人交互过程中对服务机器人的感知(感知温暖与感知能力)。同时,关于人工智能体的使用意愿^[54]、接受意愿^[55]的相关研究发现,用户积极情感是促进其使用行为意愿的重要因素。根据以往研究中对意愿¹(conative)的界定,本研究中的“意愿”是指用户对服务机器人的接受意愿。

在 Huang 等人^[73]对服务机器人接受意愿模型的研究中,确认了用户的积极情感和消极情感在评价服务机器人的可爱、礼貌和实用等认知方面起到了关键作用,并对用户的接受意愿产生了重要影响。朱翊敏等人^[5]证实了顾客融入中的情绪投入在服务机器人感知可爱、感知智能对顾客满意、惠顾意愿等的影响中发挥的中介效应。综上,本研究提出以下假设:

H3: 服务机器人的感知温暖和感知能力正向影响用户情感体验(愉悦度和唤醒度);同时,情感体验正向影响用户接受意愿。

H4: 用户情感体验(愉悦度、唤醒度)在服务机器人感知温暖、感知能力对用户接受意愿影响之间发挥了中介效应。

此外,为了探究服务机器人拟人化维度的调节作用对情感体验中介作用的影

¹ 不同的研究中对 CAC 模型中“conative”一词的翻译不同,“conative”一词的英文原意为“意动的”,但多数研究在使用该模型时将该词译为“意愿”或“意向”,在测量该变量时,“意向”和“意愿”二词并无差别^[81]。因此,在本研究中将“conative”一词统称为“意愿”。

响，本研究还需确定面部拟人条件下，愉悦度是否更大程度地中介了感知温暖对接受意愿的影响，而在身体拟人条件下，唤醒度是否更大程度地中介了感知能力对接受意愿的影响。已有相关研究发现，感知温暖能够积极影响愉悦或快乐相关的情感价值^[82]，服务机器人的可爱形象能使顾客感到放松、愉悦与亲切^[83]。基于此，本研究提出以下假设：

H5a: 服务机器人面部拟人化时（vs. 身体拟人化），用户情感的愉悦度对服务机器人的感知温暖与用户接受意愿之间正向关系的中介效应更大。

H5b: 服务机器人身体拟人化时（vs. 面部拟人化），用户情感的唤醒度对服务机器人的感知能力与用户接受意愿之间正向关系的中介效应更大。

综上所述，模型框架如图 4-1 所示。

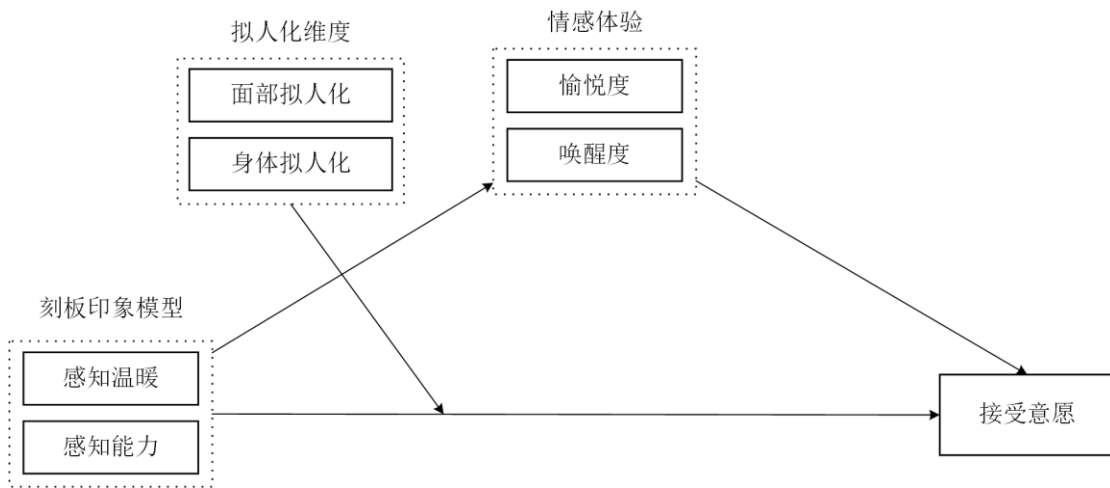


图 4-1 模型框架图

4.3 问卷设计与数据采集

4.3.1 问卷设计

本研究采用问卷调查方法，操纵服务机器人不同的外观拟人化维度，并测量服务机器人具有不同拟人化维度时用户的感知温暖、感知能力、情感体验（愉悦度、唤醒度）以及接受意愿等变量。验证服务机器人的感知温暖与能力对接受意愿的影响在面部拟人条件和身体拟人条件下是否具有差异，同时考察用户情感体验是否在用户感知与行为意愿中具有中介效应。

问卷包含人口统计学变量和核心研究变量两大部分。人口统计学变量涵盖性别、年龄、学历、职业、婚姻状况以及服务机器人使用经验。核心研究变量包括刺激变量、心理感知变量和行为变量：其中刺激变量为服务机器人的不同拟人化

维度，如图 4-2，参考市面已存在的服务机器人 Pepper 及 Sanbot，分别设计面部拟人和身体拟人机器人作为刺激材料。心理感知变量包含情感体验、感知温暖和感知能力；行为变量则为用户接受意愿。

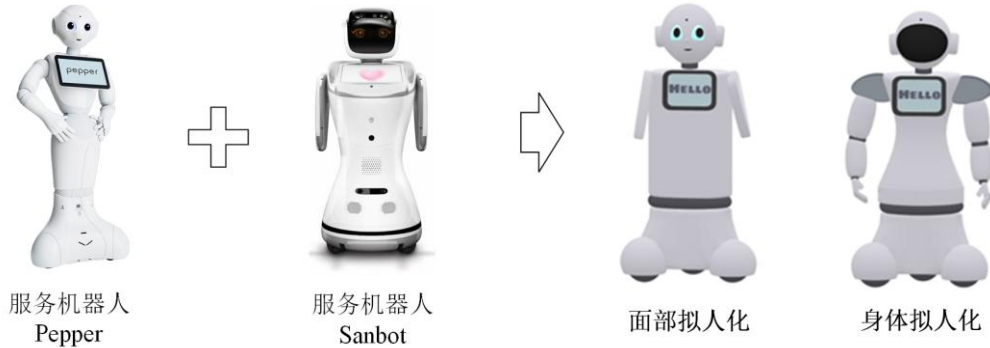


图 4-2 面部维度拟人及身体维度拟人的服务机器人

情感体验的测量采用 Bradley 和 Lang (1994)^[84]开发的情绪自我评定量表 (Self-Assessment Manikin, SAM)，该量表为 9 分制评分，包含愉悦度、唤醒度和优势度三个维度。鉴于优势度概念较难理解，且已有多数研究已删除该维度测量^[85,14]，本研究同样仅保留愉悦度与唤醒度两个维度。感知温暖和感知能力的测量均改编自国外权威量表^[16,86,27]，采用 Likert 七点量表，各包含 4 个题项。接受意愿的测量则改编自 Chi 等人^[20]的研究，采用 Likert 七点量表，共 3 个题项。问卷详情见附录 1。

采用 Chi 等人^[20]使用的分组调查研究范式，被试被分为两组 ($N_{\text{面部拟人组}} = 141$ ； $N_{\text{身体拟人组}} = 143$)，分别观看不同的服务机器人刺激材料。

利用方差分析对服务机器人不同的拟人化维度进行操纵检验。结果表明，服务机器人面部拟人条件下被试对面部拟人化的评分 ($M_{\text{面部拟人组}} = 4.67$ ， $SD_{\text{面部拟人组}} = 1.65$) 显著高于身体拟人条件下被试对面部拟人化的评分 [$M_{\text{身体拟人组}} = 2.67$ ； $F(1, 58) = 28.681$ ， $p < 0.001$]。且服务机器人身体拟人条件下的被试对身体拟人化的评分 ($M_{\text{身体拟人组}} = 4.90$) 显著高于面部拟人条件下被试对身体拟人化的评分 [$M_{\text{面部拟人组}} = 3.03$ ； $F(1, 100) = 26.670$ ， $p < 0.001$]。因此，本研究对于服务机器人面部拟人和身体拟人的操纵是有效的。

本研究采用组间设计，具体的问卷调查流程如下。

实验分组。被试被随机分配至两组——面部拟人组 ($N_{\text{面部拟人组}} = 141$)：观看面部拟人化服务机器人图片并填写对应问卷；身体拟人组 ($N_{\text{身体拟人组}} = 143$)：观

看身体拟人化服务机器人图片并填写对应问卷。

基础信息采集。被试依次填写性别、年龄、教育背景等基本信息及是否使用过服务机器人等人口统计学信息。

情景启动。两组被试均阅读统一情景描述——“想象您与朋友在商场餐厅聚餐，您希望活跃气氛时，服务机器人向您驶来”。

刺激呈现与测量。各组观看对应拟人化机器人图片，并完成相同的变量测量量表。

4.3.2 数据收集与样本特征

通过“问卷网”平台（www.wenjuan.com）进行在线调查，共收回问卷 306 份，依据以下标准筛选有效数据：（1）完成时间 ≥ 200 秒（基于预实验平均时长）；（2）答案不完全重复；（3）IP 地址无重复。最终获得 268 位有效问卷，其中女性 150 人（56.69%），男性 118 人（44.03%）。人口统计特征结果见表 4-1。

表 4-1 人口统计学变量

变量	类别	频数	百分比	变量	类别	频数	百分比
性别	男	118	44.03%		初中	10	3.73%
	女	150	55.97%		高中	18	6.72%
年龄	<25	78	29.10%	学历	专科	50	18.66%
	25~30	118	44.03%		本科	164	61.19%
	31~40	56	20.90%		硕士	26	9.70%
	41~50	16	5.97%	职业	全日制学生	50	18.5%
	>50	0	0%		事业单位工作人员	30	11.1%
婚姻状况	已婚	132	44.4%		政府机构工作人员	20	7.4%
	未婚	136	55.6%		企业工作人员	120	44.4%
是否体验过服	是	164	61.19%		个体工商户	30	11.1%
务机器人	否	104	38.81%		其他	20	7.4%

4.3.3 信度与效度检验

信度、效度检验结果如表 4-2 所示。使用 AMOS 26 进行验证性因子分析，结果显示模型的各项拟合指标如下： $\chi^2/df=2.116<3$, $p < 0.001$; $CFI=0.972$, $GFI=0.937$, $RMSEA=0.063<0.07$ ，数据与模型的拟合程度较好。所有测量项目的因子载荷均大于 0.6，各个测量变量的平均变异量抽取值(AVE)均大于 0.5，组合信度(CR)均大于 0.7。

表 4-2 信度和收敛效度检验

测量项目	因子载荷	CR（AVE）
感知温暖（ <i>Cronbach's α = 0.883</i> ）		
PW1. 我认为这个服务机器人是温暖的	0.84	0.88（0.65）
PW2. 我认为这个服务机器人是有善意的	0.78	
PW3. 我认为这个服务机器人是值得信赖的	0.81	
PW4. 我认为这个服务机器人是真诚的	0.80	
感知能力（ <i>Cronbach's α = 0.883</i> ）		
PC1. 我认为这个服务机器人是能干的	0.80	0.88（0.65）
PC2. 我认为这个服务机器人是有效率的	0.82	
PC3. 我认为这个服务机器人是灵巧的	0.77	
PC4. 我认为这个服务机器人是聪明的	0.83	
情感体验（ <i>Cronbach's α = 0.736</i> ）		
P. 愉悦度（Pleasure）	0.88	0.75（0.61）
A. 唤醒度（Arousal）	0.66	
接受意愿（ <i>Cronbach's α = 0.839</i> ）		
WA1. 我很愿意使用这个服务机器人	0.80	0.84（0.64）
WA2. 我很愿意接受该服务机器人的服务	0.79	
WA3. 我计划下次继续使用该服务机器人	0.81	

4.4 假设模型的验证与分析

4.4.1 感知温暖、感知能力及情感体验的直接效应检验

利用 Amos 26 软件，通过结构方程模型的路径分析对 H1 和 H3 进行检验。模型的各项拟合指标良好 ($\chi^2/df = 1.766 < 3$, $p < 0.001$; $CFI = 0.981$, $GFI = 0.948$, $RMSEA = 0.052 < 0.06$)。

结构方程模型路径系数如图 4-3 所示，结果显示，感知温暖对用户愉悦度 [$\beta = 0.63$, $p < 0.001$]、唤醒度 [$\beta = 0.15$, $p = 0.04$] 以及接受意愿 [$\beta = 0.29$, $p < 0.001$] 具有显著的正向影响。同样的，服务机器人的感知能力对用户愉悦度 [$\beta = 0.20$, $p = 0.02$]、唤醒度 [$\beta = 0.49$, $p < 0.001$] 以及接受意愿 [$\beta = 0.35$, $p < 0.001$] 具有显著正向影响。综上，H1 得到支持。此外，用户情感体验的愉悦度 [$\beta = 0.26$, $p < 0.001$] 和唤醒度 [$\beta = 0.12$, $p = 0.033$] 对用户接受意愿均具有显著的正向影响。因此，H3 得到支持。

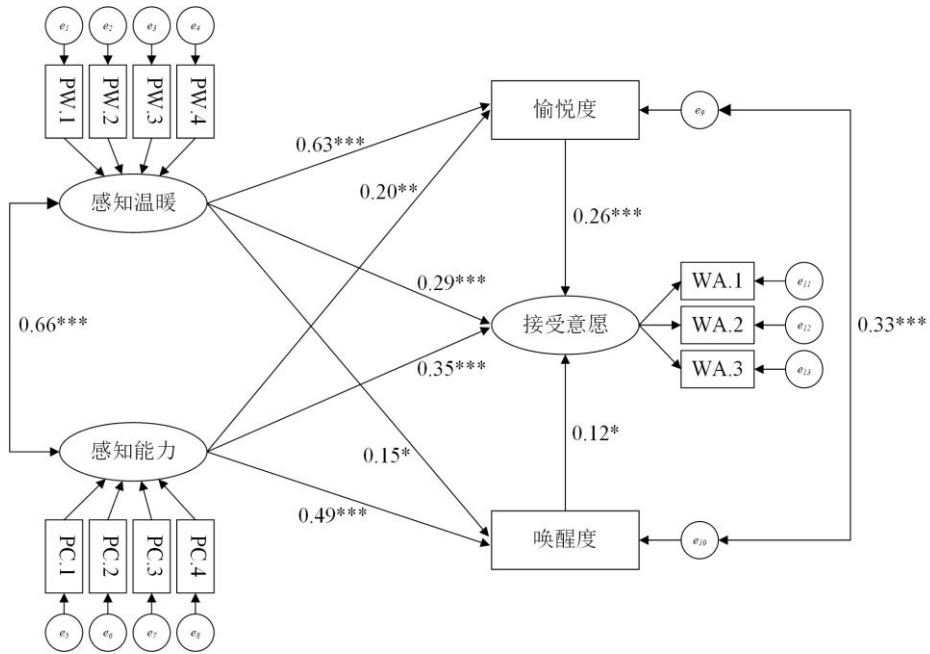


图 4-3 结构方程模型直接效应分析结果

注: ***表示 $p < 0.001$, **表示 $p < 0.01$, *表示 $p < 0.05$; 系数为标准化后的值

4.4.2 多维外观拟人化的调节效应检验

通过结构方程模型的多群组比较检验服务机器人不同拟人化维度在感知温暖和感知能力对用户接受意愿影响中的调节效应 (H2a 和 H2b), 多群组比较结果见图 4-4。

对于服务机器人面部拟人组和身体拟人组两组不同的样本, 感知温暖对接受意愿的影响以及感知能力对接受意愿的影响都存在显著差异。具体地, 相比身体拟人组样本, 在面部拟人组样本中, 感知温暖对用接受意愿 ($z = 3.514, p < 0.001$) 的影响更强。因此, 当用户受服务机器人面部拟人化外观的刺激时, 感知温暖能够产生更强的接受意愿, H2a 得到支持。而相比面部拟人组样本, 身体拟人组样本中, 感知能力对接受意愿 ($z = 3.819, p < 0.001$) 的影响更强。因此, 当用户受服务机器人身体拟人化的刺激时, 感知能力产生更积极的接受意愿, H2b 得到支持。

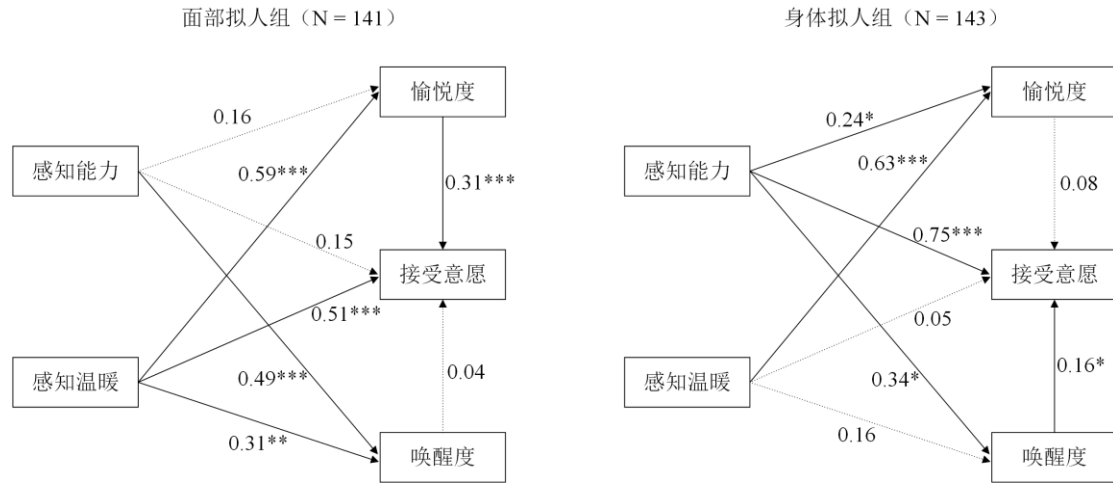


图 4-4 多群组分析结果（拟人化维度分组）

4.4.3 用户情感体验的中介效应检验

中介效应检验使用 SPSS 24.0 软件完成。首先，采用 Hayes^[87]编制的 SPSS Process 宏中的 Model 4，检验简单中介模型。结果如表 4-3 所示，愉悦度和唤醒度分别作为感知温暖、感知能力对接受意愿影响的中介效应的 95%置信区间的上、下限均不包含 0，这表明感知温暖以及感知能力均能够通过愉悦度或唤醒度的中介作用预测用户的接受意愿，由此，H4 得到支持。

表 4-3 中介效应检验结果

路径	效应值	Boot SE	Boot CI 下限	Boot CI 上限
感知温暖→愉悦度→接受意愿	0.304	0.054	0.201	0.414
感知温暖→唤醒度→接受意愿	0.131	0.028	0.079	0.189
感知能力→愉悦度→接受意愿	0.237	0.039	0.185	0.333
感知能力→唤醒度→接受意愿	0.131	0.032	0.071	0.196

其次，采用 Hayes^[87]编制的 SPSS Process 宏中的 Model 8（抽取 5000 个 Bootstrap 样本），分别以感知温暖与感知能力为自变量，愉悦度和唤醒度为中介变量，接受意愿为因变量，对有调节的中介模型进行检验。结果如表 4-4 所示，在拟人化维度不同水平上的中介效应检验结果表明，相较于身体拟人化，当服务机器人面部拟人化时，愉悦度在感知温暖对接受意愿影响的中介效应更大（面部拟人组： $\beta = 0.319$, $Boot SE = 0.065$, $95\% Boot CI = [0.200, 0.452]$ ；身体拟人组： $\beta = 0.287$, $Boot SE = 0.049$, $95\% Boot CI = [0.191, 0.385]$ ）。此外，当服务机器人面部拟人化时（vs. 身体拟人化），唤醒度作为感知温暖对接受意愿影响的中介效应更大（面部拟人组： $\beta = 0.205$, $SE = 0.045$, $95\% Boot CI = [0.122, 0.295]$ ；

身体拟人组: $\beta = 0.087$, $Boot SE = 0.026$, $95\% Boot CI = [0.040, 0.142]$)。由此, H5a 得到支持。

类似地, 相较于身体拟人化, 感知能力在服务机器人身体拟人化时, 愉悦度的中介效应更大(身体拟人组: $\beta = 0.299$, $Boot SE = 0.051$, $95\% Boot CI = [0.201, 0.401]$; 面部拟人组: $\beta = 0.180$, $Boot SE = 0.042$, $95\% Boot CI = [0.105, 0.270]$)。然而, 感知能力在服务机器人身体拟人化时(vs. 面部拟人化), 唤醒度的中介效应更小(身体拟人组: $\beta = 0.111$, $Boot SE = 0.031$, $95\% Boot CI = [0.055, 0.175]$; 面部拟人组: $\beta = 0.164$, $Boot SE = 0.037$, $95\% Boot CI = [0.098, 0.241]$)。因此, H5b 没有得到支持。

表 4-4 在拟人化维度不同水平上的中介效应

因变量: 接受意愿	拟人化维度	效应值	Boot SE	Boot CI 下限	Boot CI 上限
自变量: 感知温暖					
中介作用: 愉悦度	面部拟人组	0.319	0.065	0.200	0.452
	身体拟人组	0.287	0.049	0.191	0.385
中介作用: 唤醒度	面部拟人组	0.205	0.045	0.122	0.295
	身体拟人组	0.087	0.026	0.040	0.142
自变量: 感知能力					
中介作用: 愉悦度	面部拟人组	0.180	0.042	0.105	0.270
	身体拟人组	0.299	0.051	0.201	0.401
中介作用: 唤醒度	面部拟人组	0.164	0.037	0.098	0.241
	身体拟人组	0.111	0.031	0.055	0.175

4.5 讨论

4.5.1 感知温暖、感知能力及情感体验的直接效应

本章研究丰富了刻板印象模型在服务机器人领域的应用。现有研究多关注感知温暖维度^[8], 而忽视了感知能力作为机器人固有属性^[88]的影响。本章同时考察了感知温暖与感知能力对用户情感体验及接受意愿的作用, 为利用刻板印象的双重属性优化服务机器人的用户体验和接受行为提供了实证支持。研究结果表明, 服务机器人的感知温暖和感知能力显著正向影响用户的接受意愿及情感体验(包括愉悦度和唤醒度), 而情感体验进一步正向影响用户的接受意愿。这一发现揭示了感知温暖与感知能力在用户接受意愿形成中的直接作用, 同时强调了情感体验作为关键中介变量的重要性。

4.5.2 拟人化维度的差异化影响

本章研究揭示了面部与身体拟人化对用户感知的差异化影响。过去的研究大

多单独考虑机器人整体拟人化程度^[27]或单一拟人维度^[9]对感知温暖、感知能力以及接受意愿的影响。其结论往往为机器人单一面部^[8,31]或单一身体^[9]的拟人化程度对用户感知的影响,缺少比较不同拟人化维度对用户认知造成的结果差异。本章研究发现,面部拟人化更显著增强感知温暖对接受意愿的影响,这与面部特征通常与信任、真诚等特质相关的研究结论一致^[32,31,8]。相比之下,身体拟人化更显著提升感知能力对接受意愿的作用,这可能源于身体特征与勤快、智能、效率等特质的关联^[34,7]。这一发现为服务机器人拟人化设计提供了重要指导,表明不同拟人化维度在用户感知中具有独特作用。因此,在设计服务机器人时,需根据具体目标(如增强温暖感知或能力感知)有针对性地选择拟人化策略。

4.5.3 情感体验的中介作用

本章基于认知-情感-行为(CAC)框架验证了情感体验在感知温暖、感知能力与接受意愿之间的中介效应,并结合刺激-机体-反应(S-O-R)理论探讨了不同拟人化维度的刺激效果。研究发现,情感体验(尤其是愉悦度)在感知温暖与接受意愿之间的中介效应在面部拟人化条件下更强,进一步揭示了情感体验在用户接受意愿形成中的关键作用。这一结论为 S-O-R 理论与 CAC 框架在服务机器人领域的应用提供了新的实证依据,拓展了相关理论的研究边界。此外,研究还表明,情感体验在感知能力与接受意愿之间的中介效应同样显著,但受拟人化维度的影响较小。这一发现为未来研究提供了新的方向,即进一步探索不同拟人化维度对情感体验中介效应的调节机制。

4.6 结论与建议

4.6.1 研究结论

本章的研究以情感体验为中介变量,机器人拟人化维度为调节变量,针对服务机器人感知温暖、感知能力对用户接受意愿的影响,构建了一个有调节的中介模型,结论如下:(1)服务机器人的感知温暖和感知能力正向影响用户的接受意愿以及用户的情感体验(愉悦度和唤醒度);情感体验正向影响接受意愿。(2)服务机器人面部拟人条件下(vs. 身体拟人),感知温暖对用户接受意愿的影响更强;而服务机器人身体拟人条件下(vs. 面部拟人),感知能力对用户接受意愿的影响更强。(3)用户情感体验在服务机器人感知温暖、感知能力对用户接受意愿影响之间发挥了中介效应,并且,服务机器人面部拟人时(vs. 身体拟人),用户

愉悦度作为感知温暖和接受意愿之间的中介效应更大。

4.6.2 研究建议

本章的研究发现对服务型企业的实际操作具有一定的指导作用。

第一，研究证明了服务机器人的感知温暖及感知能力有助于提升用户情感体验及接受意愿。服务机器人生产商以及服务企业可以通过提高服务机器人的感知温暖及感知能力，提升用户的使用体验，促进服务机器人的推广。

第二，研究发现在服务机器人不同拟人化维度的刺激下，感知温暖和感知能力对接受意愿的作用有明显的差异。因此，服务企业在引入服务机器人前，需要重点考虑使用场景及用户需求，有侧重地在面部拟人化机器人以及身体拟人化机器人之间做出选择。例如，对于度假酒店、餐厅等场所，通过突出服务机器人的面部拟人化特征，为用户带来更高的温暖感知，以此提升其情感体验及接受意愿；对于商务、叫需要安保的服务场所，应该优先考虑身体特征拟人化的机器人，以此提高感知能力对情感及接受产生的作用。

第三，用户情感体验被证实为感知评价与接受意愿的中介效应。服务性企业同样需要考虑用户情感体验的重要作用。提高用户在与服务机器人交互过程中的愉悦、快乐、兴奋等情感体验，有助于提高接受意愿，促进用户积极行为。

4.7 本章小结

本章利用结构方程模型，系统分析了服务机器人拟人化外观对用户主观评价及接受意愿的影响，并得出了理论与实践价值。具体研究工作如下：

（1）系统梳理服务机器人外观拟人化、多维度刻板印象等相关文献，提炼既有研究的模型变量、假设检验方法及问卷测量项，在此基础上，结合本研究目标，科学设计问卷，并实施问卷发放与回收。

（2）对回收数据进行信度与效度检验，运用描述性统计方法分析用户特征，并基于结构方程模型（SEM）对核心变量间的关系进行建模分析，以验证研究假设的合理性。

（3）深入探讨本研究的结果得出结论，并针对我国服务机器人设计提出优化建议。

第5章 多维外观拟人化因素对用户主观评价及眼动特征的影响

第3章通过网络销售数据分析确定了服务机器人关键外观维度；第4章构建了服务机器人多维拟人化外观因素的用户接受意愿假设模型。本章的主要目标是通过多模态测量实验，深入探讨不同维度拟人化外观特征组合对用户主观评价和客观眼动特征的影响机制。具体研究步骤如下：首先，基于相关文献和机器人数据库，设计了包含不同维度拟人化外观特征（面部、头部、躯干、手臂）组合的服务机器人原型图片。接着，设计并实施了多模态测量实验，采集用户的主观评价数据（如情感体验和认知评价）以及客观眼动特征（如注视时间、注视次数和瞳孔直径）。最后，通过数据分析，揭示了不同维度的拟人化外观特征对用户主观评价和眼动特征的具体影响，从而为服务机器人外观设计提供理论依据和实践指导。

5.1 研究背景与目的

机器人外观设计在塑造用户初始印象方面具有决定性作用^[72,15]。相较于其他形式的服务机器人，拟人化设计在建立用户信任等方面展现出独特优势^[89,8]。现有研究表明，高拟人化水平能够显著增强用户的情感体验^[27,9]。然而，部分研究结果支持“恐怖谷”现象^[10]，表明过度拟人化可能导致用户不适，适度拟人化反而更易获得用户青睐^[28,15]。针对这一分歧，本章通过细化服务机器人外观拟人化维度，旨在探索拟人化特征的最佳组合模式，以增强用户体验与设计效果。

5.2 研究方法

5.2.1 刺激材料

本章的研究采用 $2 \times 2 \times 2 \times 2$ 的被试内实验设计，旨在调查服务机器人多维度拟人外观特征对用户认知反应和情感体验的影响。所选的服务机器人外观拟人化设计变量包括头部形状（圆头、方头）、面部特征（类人面部、非类人面部）、躯干形状（类人躯干、圆柱形躯干）和手臂特征（类人手臂、非类人手臂）。参考

了 Li 等人^[90]的研究结果，用户的注意力最容易被吸引到机器人的头部，其次是躯干，然后是手臂，最后是腿部。因此，删除设计变量“腿部类型”，以避免刺激材料过多。在选择变量水平时，躯干和头部形状的水平是根据 Hwang 等人^[7]的研究选择的，而面部特征则是基于 Chen 和 Jia^[32]的工作选择的。

刺激材料根据市面已有的服务机器人 Pepper 的整体外观进行改编，同时融入了 Asimo 和三宝机器人的某些细节（图 5-1）。具体来说，外观特征的参考如下：圆头、类人面部、类人手臂和类人躯干来源于 Pepper 机器人。非类人面部和方头来自三宝和 Asimo 机器人，圆柱形躯干来自 Asimo 机器人，非类人手臂来自三宝机器人。



图 5-1 市面已有的服务机器人 Pepper、Asimo 以及三宝机器人

据此，本章的研究将 4 组设计要素的每两个水平进行组合，共创建了 16 个服务机器人的渲染图像，见表 5-1。每个渲染图像都呈现为电子图像，所有图像保持了一致的位置、大小和统一的白色背景。

表 5-1 服务机器人的 16 组刺激材料

		C1 非类人手臂		C2 类人手臂	
		D1 类人面部	D2 非类人面部	D1 类人面部	D2 非类人面部
A1 圆头	B1 圆柱形 躯干	#01	#02	#03	#04
					
		#05	#06	#07	#08
					
	B2 类人 躯干	#09	#10	#11	#12
					
		#13	#14	#15	#16
					

5.2.2 被试与实验流程

本部分的调查集中于大学生群体,因为大学生通常具有较高且相似的教育经历,更容易接触和倾向于接受新技术^[91,92]。实验调查所需的样本量使用 G*Power 3.1 计算得出^[93]。采用重复测量方差分析(Repeat measure Analysis of Variance, rm-ANOVA)作为统计方法,具体参数如下:被试内重复测量 rm-ANOVA,效应大小 $f = 0.25$, $\alpha = 0.05$, $1 - \beta = 0.95$,组数 = 1,测量次数 = 16,重复测量之间的相关性 = 0.5,得出结果样本量为 15 人。据此,随机招募了 30 名大学生(其中 13 名女性),年龄在 21 至 26 岁之间($M_{\text{年龄}} = 23.97$ 岁, $SD_{\text{年龄}} = 1.16$),均来自

同一所大学。此外，被试中没有人熟悉刺激材料，但有 21 人（70%）接触过服务机器人，5 人（17%）接触过类人服务机器人。

具体实验流程如下。

实验在人因工程实验室进行，室内温度为 24℃，灯光照度为 300lux，噪音强度为 49dB。被试在进入实验室前，实验人员会向其详细说明实验流程。被试被安排坐在一台高清晰度液晶显示器前（24 英寸，1920×1080 像素，60 赫兹），显示器下方安装了一台采样率为 1200 赫兹的 Tobii Pro Spectrum 眼动仪。被试坐在距离显示器约 60 厘米的人体工程学椅子上。实验采用被试内设计，使用自由观看范式，如图 5-2 所示。

在实验正式开始前，实验人员向被试详细介绍实验内容，随后被试阅读并签署知情同意书。接着，被试需填写 PANAS 量表（Positive and Negative Affect Schedule）以评估其初始情绪状态。该量表用于测量被试在实验前的积极情感和消极情感水平，确保后续实验结果不受被试初始情绪的影响。

在完成初始情感测量后，被试进行一次练习实验。练习实验的目的是帮助被试熟悉实验流程，包括眼动仪的使用、刺激图像的呈现方式以及问卷的填写方法。通过练习实验，被试能够更好地理解实验任务，减少正式实验中的操作误差，确保实验数据的准确性和可靠性。

正式实验中，被试首先需完成眼动仪的校准，校准成功（眼睛位置偏差小于 0.5 毫米）后，实验开始呈现刺激材料。在刺激呈现前，被试被引导进入一个主观消费场景：“你正在市区购物中心的餐厅与朋友共进晚餐。用餐过程中，你决定为就餐氛围增添一些活力。此时，一台带有餐厅标志的服务机器人向你走来。你准备点击屏幕，让服务机器人为你提供音乐播放服务。”被试沉浸在该场景后，按下“空格”键开始呈现刺激图像，16 个服务机器人图像将以随机顺序一个接一个地出现在屏幕中央，每张图像呈现 5 秒钟。在刺激呈现期间，被试被要求自由观察图像。每次刺激呈现前，屏幕上会显示一个带有“+”标志的空白屏幕，持续 1000 毫秒，以确保被试的视线重新聚焦到屏幕中心。

每次刺激呈现结束后，被试需通过 Excel 2010 中的问卷（见图 5-2）评估其对类人机器人外观的社会认知和情感体验，问卷通过鼠标点击完成。随后，实验人员会对眼动仪进行重新校准，以确保跟踪误差低于 0.5 微米。实验过程中，被

试被要求避免做出大幅度的动作。

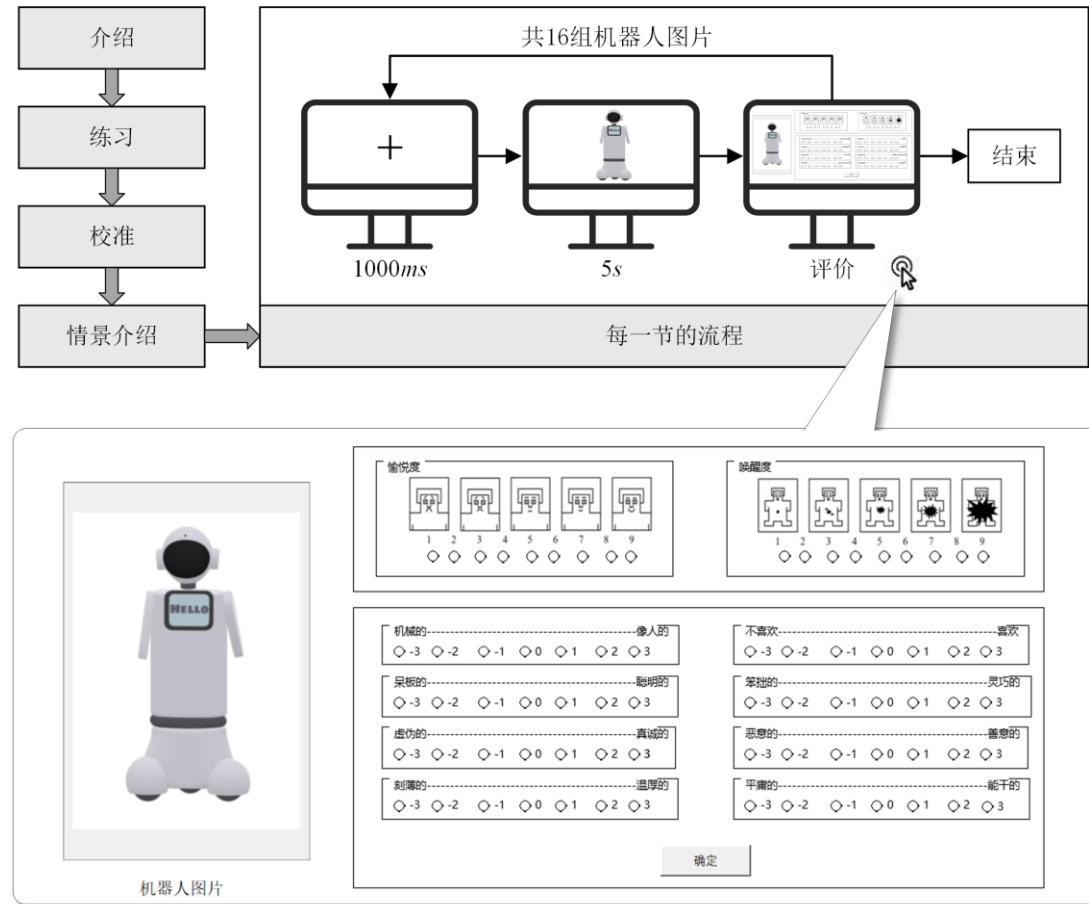


图 5-2 眼动实验流程

5.2.3 测量

(1) 主观评价测量

情绪自我评定量表(Self-Assessment Manikin, SAM)由 Bradley 和 Lang(1994)^[84]开发,能够直接测量人对各种刺激的情感反应,包括愉悦、唤醒和优势,本研究仅考虑愉悦和兴奋的二维情感空间。愉悦度测量的是用户看到机器人后的情绪愉悦程度,得分从笑脸(得分为9)到皱眉脸(得分为1)。唤醒度是指用户看到机器人后的兴奋程度,得分从兴奋的人(得分为9)到放松的人(得分为1)。

感知温暖与感知能力。采用语义差异(SD)方法来调查。每个项目都是通过7点李克特量表进行评估,范围从-3到3。通过三个项目来评估温暖和能力的感知,这些项目是从先前研究中改编而来^[16,86,27,9]。温暖感知的3个项目度量的内部一致性是令人满意的(Cronbach's $\alpha = 0.911$),能力感知的3个项目度量的内部一致性也是令人满意的(Cronbach's $\alpha = 0.902$)。

偏好和拟人化感知分别用一个项目来衡量。文献研究表明,在评估第一印象时,单项指标的可靠性足够^[94,95]。偏好自 Liu 等人^[96]的研究改编而来,拟人化感知是从 Godspeed 量表^[97]中提取的。

(2) 客观眼动特征测量

基于眼动追踪技术的相关文献以及实验室配备的眼动设备性能,本研究选取了以下三项眼动特征进行分析:注视持续时间、注视次数和瞳孔直径。

注视持续时间 (fixation duration)。注视持续时间是指瞳孔注视点在某一个位置停留的时间,单位为毫秒 (ms)。这一指标能够直接反映被试对服务机器人视觉特征的关注程度。注视时间越长,表明该特征的复杂度越高或吸引力越强^[98]。

注视次数 (fixation count)。注视次数是指眼睛在某一区域内停留约 200-300 毫秒的行为次数,单位为次 (count)。在与视觉刺激的交互过程中,注视次数反映了视觉区域内情感信息的数量以及个体的认知加工过程。某一区域内的注视次数越高,表明该区域包含的情感信息越丰富,被试在潜意识中分配了更多的注意力以识别和分类这些情感信息^[98]。

瞳孔直径 (pupil diameter)。瞳孔直径是指瞳孔的大小,其变化由虹膜括约肌的收缩和舒张控制,单位为毫米 (mm)^[99]。研究表明,瞳孔直径受情感愉悦度和唤醒度的影响。通常,高愉悦度和高唤醒度的情感(如激动和恐惧)会导致瞳孔直径增大,而低愉悦度的情感(如厌倦和疲惫)则会使瞳孔直径缩小^[100]。

5.2.4 实验数据的处理与分析

眼动数据使用 Tobii Lab 软件进行分析。在软件中定义了四个感兴趣区域 (Areas of Interest, AOI)。AOI1 到 AOI3 涵盖了类人机器人外观的不同区域,包括头部、躯干和手臂(见图 5-3)。AOI4 覆盖了整个机器人,旨在捕捉用户对整体外观的平均瞳孔直径。从每个外观区域提取了眼动指标,例如注视次数、注视持续时间和平均瞳孔直径。这三个度量指标通过将每个 AOI 的覆盖面积(AOI 大小在刺激总面积中的百分比)除以 AOI 的大小来标准化到相同的比例尺上,因为 AOI 的大小可能会影响眼动度量^[101]。

服务机器人的不同维度拟人化特征为被试内因素,采用重复测量方差分析对主观情感体验、眼动特征和生理指标进行统计分析。当假设检验的结果违反球形假设时,将使用 Greenhouse-Geisser 修正进行修正。所有统计分析均在 SPSS 22

中完成。 α 水平设置为 0.05。

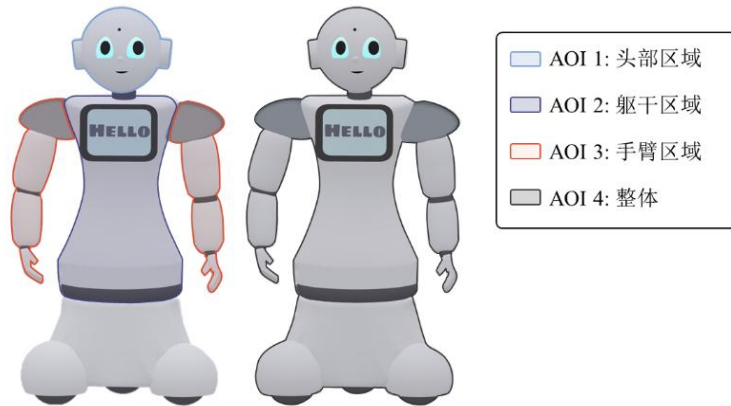


图 5-3 不同兴趣区划分

5.3 用户主观评价与眼动特征结果的比较与分析

5.3.1 多维外观拟人化因素对用户主观评价的影响

表 5-2 列出了与用户主观感受有关的描述性结果。包括感知温暖、感知能力、愉悦感、唤醒度、拟人化感知以及偏好。

表 5-2 用户主观报告的平均值和标准偏差

因变量		头部形状		躯干形状		手臂特征		面部特征	
		RH	SH	CT	HT	NA	HA	NF	HA
感知温暖	<i>M</i>	4.62	4.60	4.67	4.55	4.55	4.66	4.21	5.01
	<i>SD</i>	1.40	1.35	1.41	1.34	1.37	1.38	1.21	1.42
感知能力	<i>M</i>	4.38	4.11	4.18	4.31	4.00	4.49	3.99	4.50
	<i>SD</i>	1.57	1.40	1.50	1.50	1.39	1.56	1.48	1.47
愉悦度	<i>M</i>	5.42	5.15	5.31	5.26	5.11	5.46	4.85	5.71
	<i>SD</i>	2.03	1.90	1.98	1.96	1.98	1.94	1.94	1.91
唤醒度	<i>M</i>	5.21	4.90	5.00	5.10	4.85	5.25	4.55	5.56
	<i>SD</i>	2.10	2.09	2.09	2.11	2.07	2.12	2.02	2.06
拟人化感知	<i>M</i>	4.50	4.00	4.21	4.28	4.05	4.44	3.66	4.83
	<i>SD</i>	1.91	1.77	1.81	1.91	1.77	1.92	1.80	1.74
偏好	<i>M</i>	4.30	4.08	4.30	4.08	4.02	4.36	3.81	4.57
	<i>SD</i>	1.74	1.61	1.68	1.68	1.68	1.67	1.62	1.66

注：RH 表示圆头，SH 表示方头；CT 表示圆柱形躯干，HT 表示类人躯干；NA 表示非类人手臂，HA 表示类人手臂；NF 表示非类人面部，HF 表示类人面部。

(1) 多维拟人化外观对主观评价影响的主效应

重复测量方差分析的结果显示，服务机器人头部形状对感知能力 $[F(1,29) = 4.765, p = 0.037 < 0.05, \eta^2 = 0.141]$ 、唤醒度 $[F(1,29) = 4.919, p = 0.035, \eta^2$

=0.145] 和拟人化感知 [$F(1,28) = 14.5, p < 0.001, \eta^2 = 0.341$] 的主效应显著。自变量为头部形状的配对比较结果如图 5-4 (a) 所示, 相较于方头, 圆头的服务机器人具有更高的感知能力 ($p = 0.037$), 更高的唤醒度 ($p = 0.035$), 并引发了更强的拟人化感知 ($p < 0.001$)。

躯干形状对偏好 [$F(1, 29) = 5.169, p = 0.031, \eta^2 = 0.151$] 的主效应显著。有关躯干形状的配对比较结果见图 5-4 (b), 与类人躯干相比, 参与者对圆柱形躯干机器人表现出更大的偏好 ($p = 0.031$)。

服务机器人的手臂特征对用户主观评价的影响在多个维度上产生了显著效应: 感知能力 [$F(1, 29) = 7.527, p = 0.01, \eta^2 = 0.206$]、唤醒度 [$F(1, 29) = 6.815, p = 0.014, \eta^2 = 0.19$]、拟人感知 [$F(1, 28) = 6.787, p = 0.015, \eta^2 = 0.195$] 和偏好 [$F(1, 29) = 4.273, p = 0.048 < 0.05, \eta^2 = 0.128$]。如图 5-4 (c) 中的配对比较所示, 与非类人手臂相比, 服务机器人的类人手臂能激发更大的感知能力 ($p = 0.01$)、唤醒度 ($p = 0.014$)、拟人感知 ($p = 0.015$) 和偏好 ($p = 0.048$)。

面部特征明显影响用户的主观感受, 对感知温暖 [$F(1, 29) = 22.388, p < 0.001, \eta^2 = 0.436$]、感知能力 [$F(1, 29) = 22.388, p = 0.006, \eta^2 = 0.236$]、愉悦度 [$F(1, 29) = 12.182, p = 0.002, \eta^2 = 0.296$]、唤醒度 [$F(1, 29) = 21.583, p < 0.001, \eta^2 = 0.427$]、拟人化感知 [$F(1, 28) = 38.797, p < 0.001, \eta^2 = 0.581$] 和偏好 [$F(1, 29) = 9.285, p = 0.005 < 0.01, \eta^2 = 0.243$]。如图 5-4 (d) 所示, 配对比较结果表明, 具有类人面部特征的服务机器人比非类人面部具有更多的感知温暖 ($p < 0.001$)、感知能力 ($p = 0.006$)、拟人感知 ($p < 0.001$)、愉悦度 ($p = 0.002$)、唤醒度 ($p < 0.001$) 和偏好感 ($p = 0.005$)。

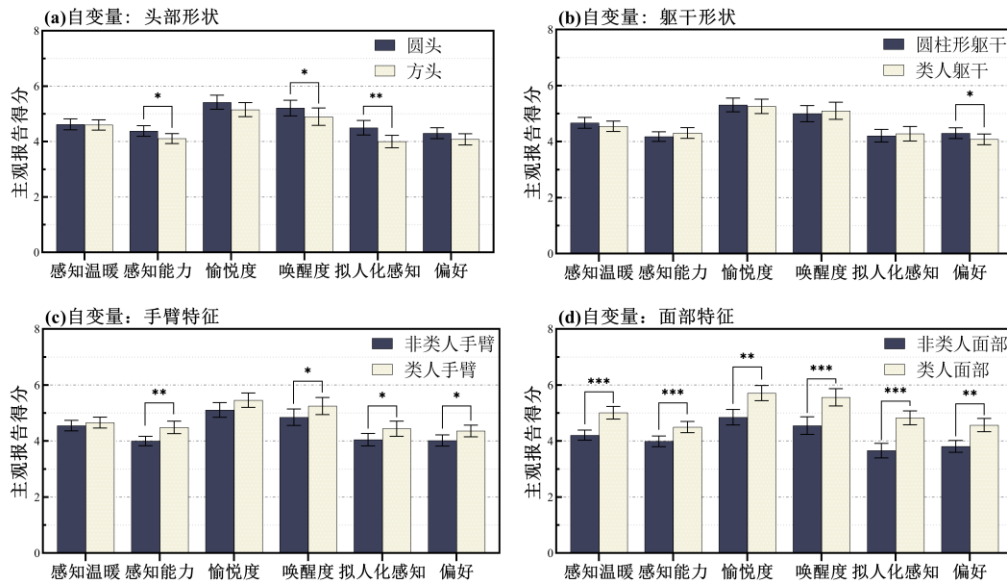


图 5-4 服务机器人在不同主观评价维度上的配对比较

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$; 误差条代表 SEM

(2) 多维拟人化外观对主观评价影响的交互效应

统计分析显示,在感知温暖的主观报告中,面部特征和手臂特征之间存在显著的交互效应[$F(1, 29) = 7.133, p = 0.012, \eta^2 = 0.197$].在图 5-5 (a) 中,类人面部服务机器人的感知温暖都显著大于非类人服务机器人,这在类人手臂组 ($p < 0.011$) 和机器人专用手臂组 ($p < 0.001$) 都有统计学意义。此外,无论服务机器人面部是否拟人化,手臂拟人化对温暖感知的影响都不显著 ($p = 0.059$; $p = 0.775$)。

在拟人化感知的主观报告中,躯干形状和面部特征之间存在显著交互作用[$F(1, 29) = 13.119, p = 0.001, \eta^2 = 0.311$].在图 5-5 (b) 中,当面部特征非类人时,躯干类人的服务机器人与圆柱形躯干相比,表现出更高的拟人化感知 ($p = 0.004$)。然而,当机器人的面部特征与人类相似时,躯干形状对拟人化感知的影响变得不明显 ($p = 0.22$)。此外,在圆柱形躯干组和类人躯干组中,类人面部都明显提高了拟人化感知 ($p < 0.001$; $p < 0.001$)。

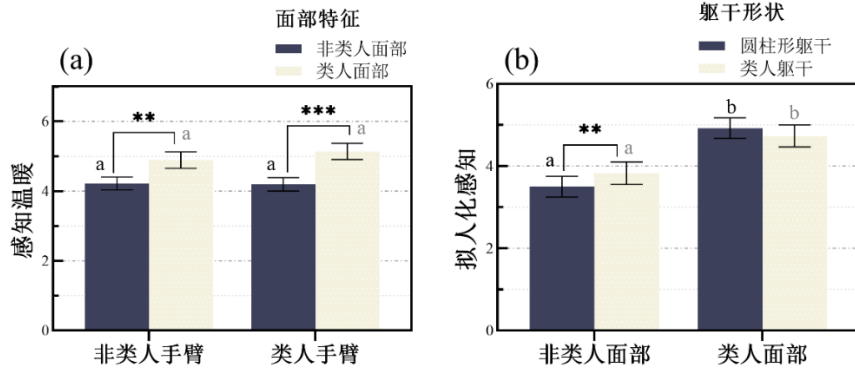


图 5-5 感知温暖和拟人化感知评估中的交互作用结果

(a) 温暖感中的面部特征 × 手臂特征；(b) 拟人化感知中的躯干形状 × 面部特征

注：“ab”为字母标注法，相同字母表示差异不显著，不同字母表示差异显著；

* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ；误差条代表 SEM

5.3.2 多维外观拟人化因素对用户眼动特征的影响

表 5-3 显示了用户眼动特征的描述性统计结果。因变量眼动特征包括注视时间 (Fixation duration)、注视次数 (Fixation count) 和平均瞳孔直径 (Average Pupil diameter)。注视时间和注视次数分别测量了头部、躯干和手臂的兴趣区 (AOI)，而瞳孔直径测量的是服务机器人整体区域的 AOI。

表 5-3 用户眼动特征的平均值和标准偏差

因变量	AOI		头部形状		躯干形状		手臂特征		面部特征	
			RH	SH	CT	HT	NA	HA	NF	HF
注视时间 (ms)	头部	M	1407	1516	1430	1493	1516	1408	1180	1744
		SD	891	941	927	907	949	882	775	962
	躯干	M	1844	1751	1805	1790	1838	1757	2002	1593
		SD	750	852	815	793	832	773	771	784
	手臂	M	133	106	123	117	41	199	144	96
		SD	274	233	235	273	130	317	286	215
注视次数 (n)	头部	M	4.49	4.92	4.53	4.88	4.79	4.62	4.02	5.39
		SD	2.70	2.73	2.72	2.72	2.73	2.71	2.38	2.87
	躯干	M	7.75	7.19	7.48	7.47	7.70	7.25	8.10	6.85
		SD	2.97	3.09	3.06	3.03	3.16	2.90	3.03	2.93
	手臂	M	0.58	0.45	0.51	0.51	0.17	0.86	0.60	0.43
		SD	1.17	0.86	0.94	1.11	0.50	1.28	1.12	0.92
平均瞳孔直径 (mm)	整体	M	2.71	2.71	2.72	2.70	2.71	2.71	2.74	2.68
		SD	0.32	0.34	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.32

注：RH 表示圆头，SH 表示方头；CT 表示圆柱形躯干，HT 表示类人躯干；NA 表示非类人手臂，HA 表示类人手臂；NF 表示非类人面部，HF 表示类人面部。

(1) 眼动追踪的热点图

图 5-6 反映了不同拟人化组合的服务机器人的用户注视分布情况。红色代表注意力最集中的区域，黄色和绿色代表注意力不太集中的区域。从热点图中可以直观地看出，在所有服务机器人图像中，用户主要表现出垂直的注视模式，注意力主要集中在机器人的上半部分。此外，在具有不同拟人化特征组合的服务机器人上也能观察到不同的注视模式。例如，对 9 号机器人和 10 号机器人的对比分析表明，9 号机器人的面部注意力更集中，其特征是具有类似人类的面部特征（图 5-6）。

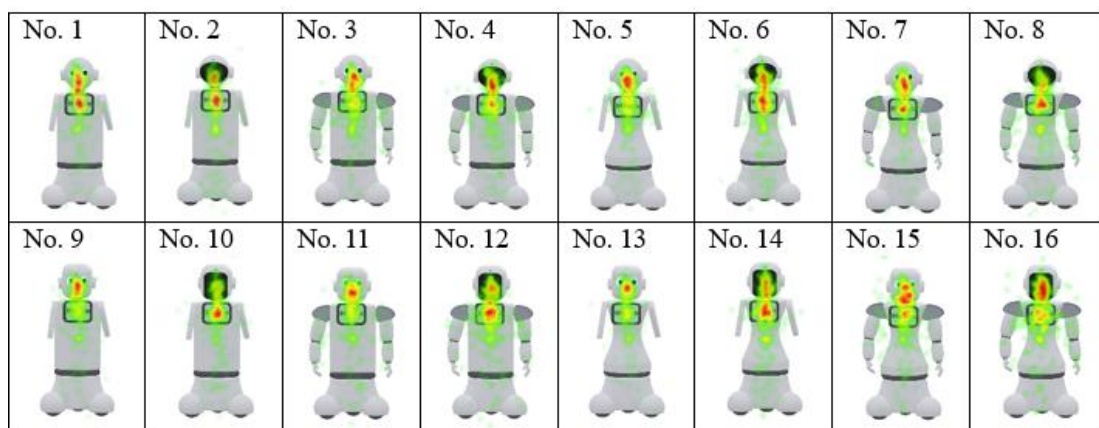


图 5-6 不同服务机器人外观的注视热点图

(2) 多维拟人化外观对眼动特征影响的主效应

重复测量方差分析表明，头部形状显著影响头部的注视时间 $[F(1, 25)=4.803, p=0.038, \eta^2=0.161]$ 、头部的注视次数 $[F(1, 25)=9.516, p=0.005, \eta^2=0.276]$ 和躯干的注视次数 $[F(1, 25)=7.27, p=0.012, \eta^2=0.225]$ 。如图 5-7 示，方形的头部会吸引更多的注视时间（ $p=0.038$ ）和注视次数（ $p=0.005$ ）。而圆形头部会使参与者产生更多的躯干注视次数（ $p=0.012$ ）。

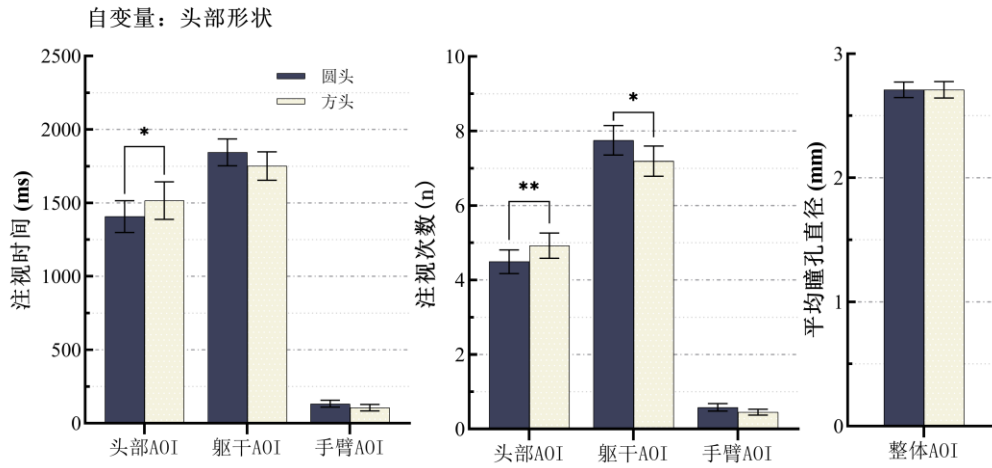


图 5-7 圆头和方头服务机器人在不同 AOI 中眼动特征的配对比较

注：* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ；误差条代表 SEM

躯干形状对头部注视次数 [$F(1, 25) = 5.668, p = 0.025, \eta^2 = 0.185$] 和平均瞳孔直径 [$F(1, 25) = 5.716, p = 0.025, \eta^2 = 0.186$] 的主效应显著。图 5-8 中的事后配对比较显示，与圆柱形躯干相比，参与者对类人躯干服务机器人的头部注视次数更多 ($p = 0.025$)。相比之下，圆柱形躯干引起更大的平均瞳孔直径 ($p = 0.025$)。

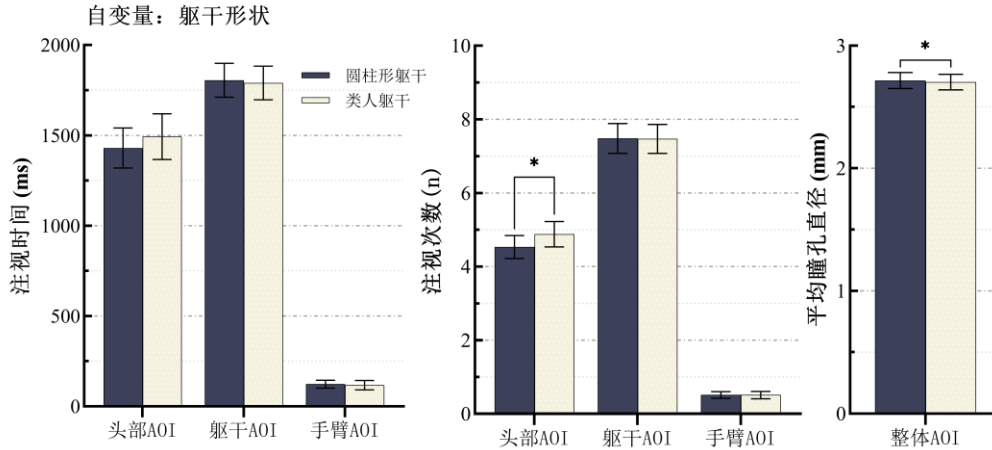


图 5-8 圆柱形躯干和类人躯干的服务机器人在不同 AOI 中眼动特征的配对比较

注：* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ；误差条代表 SEM

服务机器人的手臂特征显著影响了手臂注视时间 [$F(1, 25) = 20.971, p < 0.001, \eta^2 = 0.456$]、躯干注视次数 [$F(1, 25) = 6.06, p = 0.021, \eta^2 = 0.195$] 和手臂注视次数 [$F(1, 25) = 26.014, p < 0.001, \eta^2 = 0.51$]。具体而言，如图 5-9 所示，对于具有类人手臂的服务机器人，参与者的手臂注视时间 ($p < 0.001$) 和手臂注视次数 ($p < 0.001$) 更多。另外，如果服务机器人具有非类人手臂时，躯干注视次数也会显

著增加 ($p = 0.021$)。

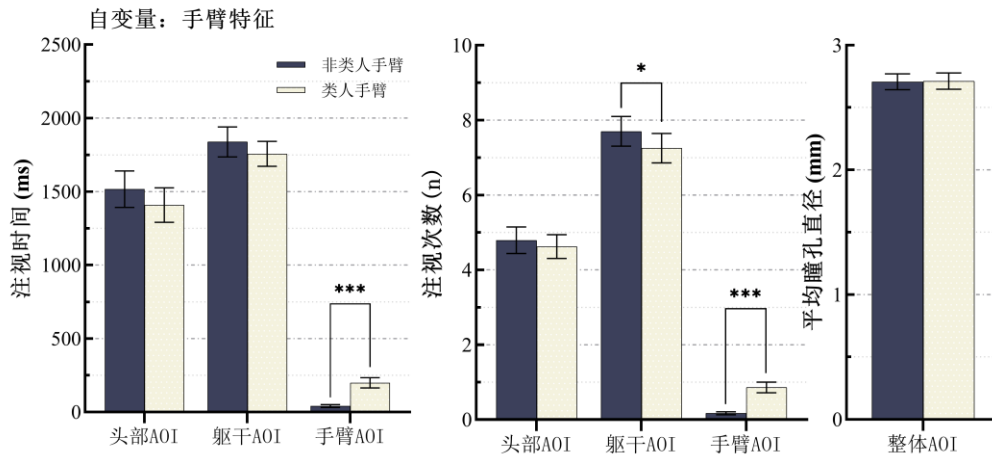


图 5-9 非类人手臂和类人手臂的服务机器人在不同 AOI 中眼动特征的配对比较

注：* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ；误差条代表 SEM

面部特征显著影响头部注视时间 [$F(1, 25) = 126.953, p < 0.001, \eta^2 = 0.835$]、躯干注视时间 [$F(1, 25) = 36.465, p < 0.001, \eta^2 = 0.593$]、头部注视次数 [$F(1, 25) = 35.293, p < 0.001, \eta^2 = 0.585$]、躯干注视次数 [$F(1, 25) = 42.859, p < 0.001, \eta^2 = 0.632$]和平均瞳孔直径 [$F(1, 25) = 91.683, p < 0.001, \eta^2 = 0.786$]。在图 5-10 中，与非类人面部特征相比，类人面部特征显著增加了头部注视时间 ($p < 0.001$) 和头部注视次数 ($p < 0.001$)。而非类人面部特征则增加了躯干的注视时间 ($p < 0.001$) 和躯干的注视次数 ($p < 0.001$)。此外，在观看带有非类人面部特征的服务机器人时，参与者的平均瞳孔直径更大 ($p < 0.001$)。

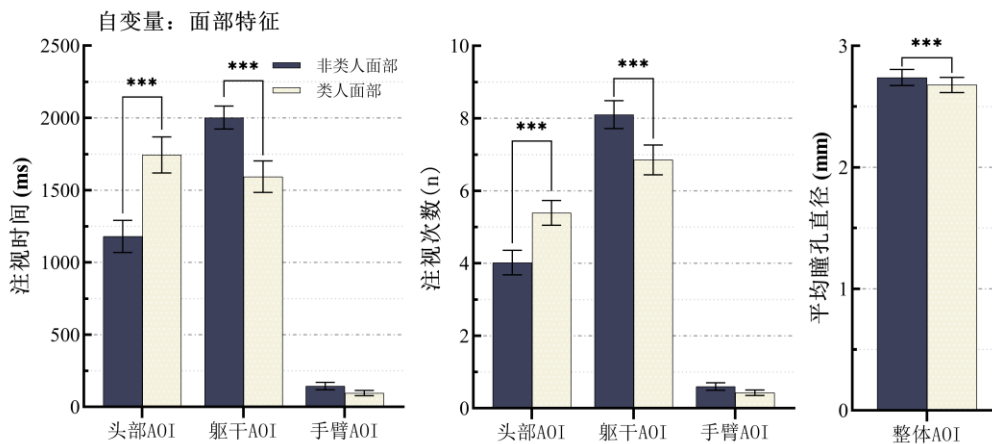
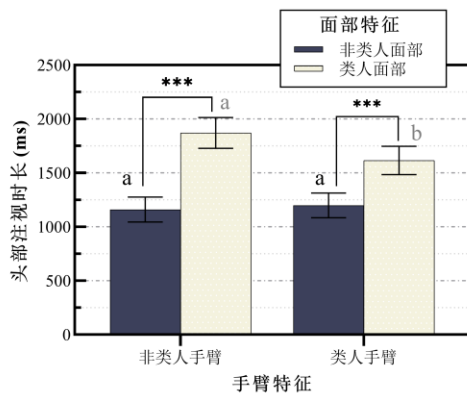


图 5-10 非类人面部和类人面部的服务机器人在不同 AOI 中眼动特征的配对比较

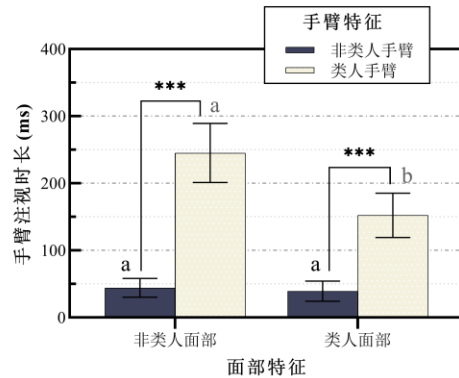
注：* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ；误差条代表 SEM

(3) 多维拟人化外观对眼动特征影响的交互效应

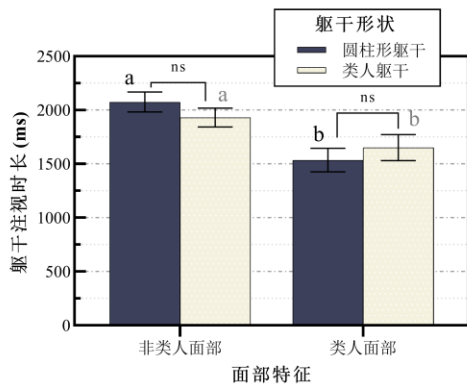
面部特征和手臂特征对头部注视时间 [$F(1, 25) = 7.786, p = 0.01, \eta^2 = 0.237$] 和手臂注视时间 [$F(1, 25) = 7.255, p = 0.013, \eta^2 = 0.224$] 具有显著的交互作用。如图 5-11 (a) 所示, 当配备非类人手臂 ($p < 0.001$) 或类人手臂 ($p < 0.001$) 时, 具有类人面孔的服务机器人都吸引了更多的头部注视时间。此外, 当机器人面部特征为类人时, 具有类人手臂的机器人头部注视时间明显较少 ($p = 0.026$)。而当机器人面部特征为非类人时, 具有不同手臂特征的机器人头部注视时间的变化在统计学上并不显著 ($p = 0.513$)。如图 5-11 (b) 所示, 无论机器人面部是否类人, 类人手臂的服务机器人吸引了更多的手臂注视时间 ($p = 0.004; p < 0.001$)。当机器人手臂类人时, 如果面部类人, 则用户在手臂上的注视时间显著较少 ($p = 0.012$), 而当手臂非类人时, 这种差异则不显著 ($p = 0.823$)。



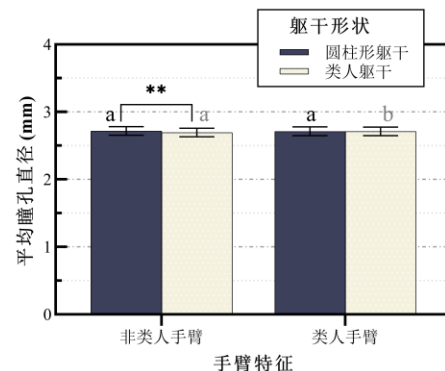
(a) 面部特征和手臂特征对头部注视时长的交互影响



(b) 面部特征和手臂特征对手臂注视时长的交互影响



(c) 躯干形状和面部特征对躯干注视时间的交互影响



(d) 躯干形状和手臂特征对平均瞳孔直径的交互影响

图 5-11 服务机器人拟人化维度对眼动特征的交互效应

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$; 误差条代表 SEM

面部特征和躯干形状之间对躯干注视时间 [$F(1, 25) = 4.688, p = 0.04 < 0.05$,

$\eta^2=0.158$]的交互作用显著。如图 5-11 (c) 所示, 躯干注视时间的简单效应分析显示, 当服务机器人面部类人时 (vs. 非类人), 无论其躯干为圆柱形 ($p<0.001$) 还是类人 ($p=0.01$), 躯干的注视时间均显著减少。相反, 面部非类人 ($p=0.108$) 或类人时 ($p=0.13$), 类人躯干和圆柱形躯干之间的躯干注视时间没有显著差异。

手臂特征和躯干形状对平均瞳孔直径的影响之间也存在重要的交互作用 [$F(1, 25) = 4.423, p = 0.046, \eta^2 = 0.15$]。如图 5-11 (d) 所示, 对瞳孔直径的简单效应分析显示, 当服务机器人手臂非类人时, 对圆柱形躯干的平均瞳孔直径显著大于类人躯干 ($p = 0.001$)。相反, 当服务机器人手臂类人时, 不同躯干形状之间的平均瞳孔直径没有显著差异 ($p = 0.734$)。此外, 在服务机器人躯干类人的情况下, 具有类人手臂的平均瞳孔直径显著大于非类人手臂的 ($p = 0.031$)。然而, 当服务机器人具有圆柱形躯干时, 这种差异并不显著 ($p = 0.556$)。

5.3.3 服务机器人多维度拟人化外观的综合评价

为了清晰地查看每个机器人的设计优点, 并确定不同认知维度和情感偏好的最佳设计, 通过绘制了雷达图来展示每个机器人的认知得分。如图 5-12 所示, 选择了每个维度中得分最高的两个机器人 (1 号、3 号、7 号和 11 号, 共四个) 进行展示。用户对这四个机器人中最不喜欢的是机器人#1, 但它并不是每个其他维度中得分最低的机器人。可以注意到, 1 号机器人只在脸部和头部采用了拟人化设计。尽管 3 号机器人的躯干不是拟人化设计, 但它被用户认为是最受欢迎和最拟人化的机器人。7 号机器人对用户的情感体验影响最强, 愉悦度和唤醒度水平最高, 而且给人的认知能力感知最强。它的每个身体维度都采用了拟人化设计。11 号机器人因其方形头部而被用户认为是最温暖的, 但同时也被认为是最不具备能力的, 尽管它的手臂和脸部都采用了拟人化设计。

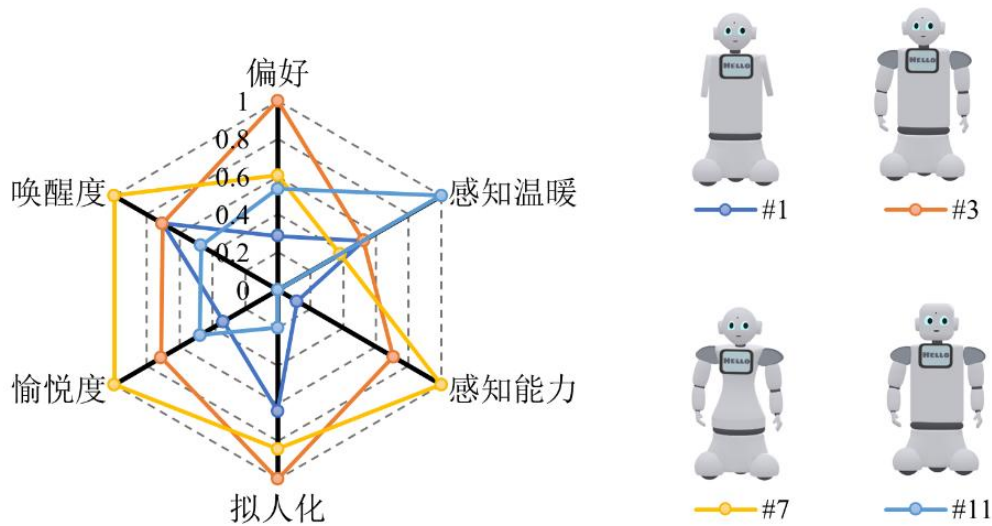


图 5-12 服务机器人拟人化外观评分雷达图（评分值已标准化）

5.4 讨论

5.4.1 头部形状对用户主观评价及眼动特征的影响

主观评价结果表明，圆头显著增强了用户的能力感知、唤醒度和拟人化感知。然而，眼动数据显示，对圆头的注视时间和次数明显低于方头。这与之前的研究结果一致，表明圆头看起来更类似人类、友好和智能^[32]，比方头更容易给人积极印象^[102]。方头受到负面偏见的影响，吸引了更多的注意力^[90]。研究发现，圆头、类人躯干、类人面部和类人手臂的组合产生了最高水平的愉悦度和唤醒度。这与此前的研究结果相反，Hwang 等人^[7]认为长方体头部和类人躯干的组合带来的愉悦度与唤醒度更高。这种差异可能来自于他们对机器人整体外观形状的强调，忽视了面部特征等详细设计元素。因此，可以得出结论，虽然方头吸引了更多的视觉注意力，但圆头为用户提供了更强的感知能力、唤醒度和拟人化感知。特别地，在综合评价中，大多数排名靠前的服务机器人都具有圆头外观。因此，在大多数情况下，圆头的设计元素对于服务机器人更可取。

5.4.2 躯干形状对用户主观评价及眼动特征的影响

主观评价结果表明，躯干形状和面部特征之间对拟人化感知存在显著的交互作用。服务机器人面部非类人时，类人躯干比圆柱形躯干更具拟人化。然而，在面部类人时，不同躯干形状的拟人化感知并没有显著差异。也许是因为面部特征强烈吸引用户^[32,90,33]，服务机器人躯干的拟人化影响不像面部特征那样显著。此外，服务机器人的躯干形状对用户偏好有显著影响。用户更喜欢圆柱形躯干而不

是人形躯干。

平均瞳孔直径数据显示,当机器人手臂非类人时,对圆柱形躯干的平均瞳孔直径显著大于类人躯干机器人。先前研究表明,瞳孔直径随着对刺激物更强烈的评价而增加,无论是积极的还是消极的^[103]。在服务机器人手臂非类人的情况下,用户可能更反对躯干被设计为类人形,因为这是一种不一致的拟人化设计,会产生不协调感。因此,与不一致的拟人化相比,当手臂和躯干都设计为非类人时,用户偏好更大。与 Li 等人^[90]的猜测相反,躯干形状的变化并没有引起用户眼动数据的显著变化。本研究的结果显示,当用户对特定设计元素,如手臂、头部或面部特征失去兴趣时,他们对躯干的注视次数显著增加。这种对躯干投以更多的注视的结果可能表明了一种补偿机制。躯干位于屏幕中央位置^[90],当其他特征无法维持用户兴趣时,躯干充当中性或中介的焦点。

5.4.3 手臂特征对用户主观评价及眼动特征的影响

在手臂特征方面,手臂类人(vs. 非类人)在感知能力、唤醒度、拟人化感知和偏好方面评价更高。与先前的研究结果一致,强调了机器人手臂设计对用户拟人化感知方面的积极影响^[102]。Zhu 和 Chang^[9]也发现,机器人厨师手部的拟人化积极影响了用户的感知能力。

在躯干类人时,类人手臂的平均瞳孔直径显著高于非类人手臂,而在圆柱形躯干组中这种差异不显著。这表明参与者更喜欢类人手臂,导致了更为显著的情感唤醒。此外,类人手臂和人形躯干反映了一致的拟人化设计。先前的研究已经强调了一致的拟人化设计所带来的积极结果^[104,105]。因此,本研究得出躯干和手臂的一致拟人化设计可能会在提高用户情感唤醒方面产生重要的协同作用这一结论。此外,眼动特征数据强调了手臂特征中拟人化的关键作用,用户对类人手臂的注视时间更长,注视次数更多。

5.4.4 面部特征对用户主观评价及眼动特征的影响

在面部特征方面,主观评价结果突显了在各个评价维度上面部拟人化的显著优势,包括感知温暖、感知能力、愉悦度、唤醒度、拟人化感知和偏好。研究支持了 Liu 等人^[72]的观点,即面部特征是最显著的特征。此外,先前的研究也强调了面部细节的存在与否,或者特定类型的面部细节对用户感知的重要影响。Luria 等人^[106]建立了逼真眼睛设计与提高机器人质量之间的联系;Ferstl 等人^[107]认为

较大的眼睛传达了诚实的感觉。此外，嘴巴的存在有助于增加机器人的拟人化程度^[33]，其中微笑的嘴巴更可信^[108]。与这些主观报告相辅相成，本研究的眼动数据强调了类人面部的优势。用户对类人面部的注视时间更长，注视次数更多。此外，观看非类人面部会导致较大的平均瞳孔直径，这似乎表明面部的非拟人化会在用户中引起负面情绪^[103]。

此外，面部特征和手臂特征之间存在着显著的相互作用，影响着头部和手臂AOI上的注视时间。具体地，当机器人的面部拟人化时，受到手臂拟人化的影响，头部注视时间会减少。同样，手臂拟人化时，由于面部特征的拟人化，对手臂的注视时间也会减少。机器人的面部细节包括眼睛、嘴巴和鼻子等元素，而手臂的拟人化特征包括上臂、前臂、手指和其他组件。用户通常会对机器人进行基于特征的分类，将其归为类人或非类人类别^[109]。根据连续的共同印象形成模型，这种“分类”行为可能会触发用户的注意力分配过程^[90]。因此，当机器人同时在其面部和手臂中展现出拟人化特征时，这两个区域将以不同程度吸引用户的注意力。

5.5 结论与建议

5.5.1 研究结论

基于上述讨论，本章得出以下主要结论：（1）服务机器人面部或手臂的拟人化能更有效地引发积极评价、吸引更多注意力；（2）面部和手臂的拟人化可能用户对刻板印象产生不同的影响，手臂的拟人化主要增强了对能力的感知，而面部的拟人化同时增强了用户对其能力和温暖的感知；（3）服务机器人方形的头部虽然吸引了更多注意力，但其受到了偏见的负面影响；相对而言，圆头则受到了积极评价；（4）圆柱形躯干的用户偏好更高，躯干和手臂一致的拟人设计导致了瞳孔直径的增加；（5）当其他外观特征无法吸引用户注意力时，躯干成为了中心焦点，吸引了更多关注。

5.5.2 研究建议

本章的研究得出的实践启示反映在三个方面，都为服务机器人设计者或服务企业提供了建议。首先，面部特征拟人化设计对感知温暖的积极影响以及手臂拟人化对感知能力的积极影响，强调了设计者或服务企业需要根据不同情境需求调整关注点的必要性。其次，面部特征的拟人化吸引用户关注服务机器人的脸部，减少对其他身体部位的关注；相反，当手臂、头部和面部的设计风格未能引起用

户兴趣时，用户将更加关注机器人的躯干。因此，设计者应特别强调服务机器人设计的面部和躯干方面。最后，研究发现尽管方形头部吸引了更多的用户注意力，但其整体评价减弱，这归因于负面偏见的影响。设计者或服务企业应注意这种不利影响，并优化设计以减轻负面印象。

5.6 本章小结

本章采用多模态测量方法，结合主观问卷与眼动追踪技术，系统探究了不同外观拟人化维度对用户主观评价及交互体验的影响。通过分析用户对头部形状、躯干形状、手臂特征及面部特征等拟人化维度的反应，揭示了各维度对用户认知的作用机制。具体研究工作如下：

（1）基于文献梳理，选取主观测量与眼动追踪指标，设计包含不同拟人化维度的服务机器人原型，并制定实验任务。

（2）利用眼动追踪技术，采集被试观看 16 种拟人化组合图像时的主观评价及眼动特征方面的多模态数据。

（3）基于多模态数据，分析各拟人化维度对主观评价与眼动特征的影响，探讨维度间的相互作用机制，并对不同组合进行综合评价，为服务机器人外观设计优化提供理论与实践指导。

第6章 多感官交互设计因素对用户主观评价及大脑激活的影响

第3章通过网络销售数据挖掘,识别了用户偏好的关键拟人化外观维度;第4章进一步构建了基于这些维度的用户接受意愿假设模型;第5章则借助眼动实验,揭示了不同外观特征对用户视觉注意与主观评价的影响。前三章主要从视觉静态维度出发,探索服务机器人外观设计对用户行为和态度的影响。本章则进一步拓展研究视角,聚焦于视觉与听觉交互因素的整合效应,尝试从多感官交互的角度揭示人机交互过程中用户的主观体验与神经反应机制。具体而言,首先基于前期外观设计成果,开发具备多感官交互能力的实体机器人;其次,结合近红外脑功能成像技术(fNIRS),设计实验任务并选取关键脑区作为测量指标;最后,系统分析不同视觉表情与情感语音交互模式对用户主观评价以及脑部激活模式的影响。此举不仅拓展了服务机器人交互设计的研究维度,也为理解多模态感知条件下的人机情感联结机制提供了神经科学证据支持。

6.1 研究背景与目的

技术进步推动了人机交互从单一任务执行向多维度功能整合的复杂系统转变^[45]。这一转变的核心驱动力在于多感官通道(如视觉、听觉、触觉等)的整合,使机器人能够以更自然、高效的方式传递情感并交换信息,从而促进无缝协作^[105,110]。多感官线索不仅提升了交互效率,还塑造了用户对服务机器人的整体感知,影响其对机器人能力与意图的评估^[111]。

声音作为机器人交互中的重要社会线索,显著影响用户的感知、交互行为及情感体验。例如,Dou等人^[48]研究发现,男性、女性和儿童声音对用户的社会属性感知具有显著影响,进而影响其对机器人的信任与接受度。Li等人^[55]进一步探讨了机器人外观与声音的多感官整合,表明这些因素显著影响用户的情感偏好与视觉注意力。然而,关于机器人声音情感表达的研究仍较为有限。

表情符号作为视觉感官要素,在非言语交流中扮演着关键角色^[112]。现有研究多集中于聊天机器人等虚拟代理,表明表情符号等视觉线索能有效增强情感强

度感知^[113]并影响社会归因（如热情感知）^[114]。然而，实体机器人（如 Pepper）中表情符号的情境应用及其对听觉情感线索的增强潜力仍需深入探索。

任务类型是影响机器人情感表达有效性的关键情境因素^[2]。客观任务（如金融产品推荐、导航计算）以规则和逻辑分析为特征，强调精确性与效率；而主观任务（如礼物选择、艺术欣赏）则依赖直觉与情感判断，注重情感参与^[115]。然而，用户通常对基于聊天机器人的主观任务服务表现出抵触情绪，认为人工智能缺乏此类任务所需的情感能力^[116]。因此，主观任务中机器人多感官情感表达是否对用户积极评价具有增强作用，以及客观任务中情感表达的必要性仍需进一步讨论。

基于上述背景，本章研究目的包括以下两方面：

（1）探究声音类型和表情符号对人机交互的影响

采用 2（情感声音 vs. 正常声音）× 2（有表情符号 vs. 无表情符号）多因素组内设计。实验材料顺序随机呈现。

（2）探究任务类型和机器人情感类型对人机交互的影响

采用 2（客观任务 vs. 主观任务）× 2（情感机器人 vs. 中性机器人）多因素组内设计。实验材料顺序随机呈现，对话内容包括主观任务和客观任务类型。

6.2 研究方法

6.2.1 实验设计与刺激材料

本研究基于语音对话任务^[117,48,105]，系统探究机器人声音类型与表情符号呈现对人机交互的影响机制。实验设计框架包含以下核心维度：

在对话内容设计方面，本研究采用“国内城市旅行规划”情境模拟，要求被试基于指定城市获取行程规划信息。参照 Li 等人^[105]的研究范式，将对话任务划分为客观任务（objective tasks）与主观任务（subjective tasks）两个维度。客观任务涉及航班、天气及酒店等标准化信息查询；主观任务则包含景点推荐、餐饮建议及购物场所推荐等个性化内容（详见附录 2）。该设计基于 Castelo 等^[118]的研究发现，即智能体情感表达能力对主观任务的增益效果更为显著。为确保实验效度，两阶段对话脚本在保持结构相似性的同时进行内容差异化设计，以控制内容效应并避免被试疲劳。

在声音情感性设计方面，本研究采用腾讯云智能语音合成系统

(<https://cloud.tencent.com/product/tts>) 生成具有情感差异的男声普通话语音。为控制音色、响度及语速等变量, 选定编号 ID 为“爱小航”的男声音色进行情感风格调校, 最终生成“正常声音(neutral voice)”与“情感声音(emotional voice)”两种类型。为验证声音情感性操纵的有效性, 使用“见数”平台(<https://www.credamo.com>)发布问卷, 对 20 名被试进行了调查, 并采用重复测量方差分析对所得数据进行统计检验。结果显示: 情感声音的情感性评分($M = 4.154$, $SD = 0.222$)显著高于正常声音($M = 3.077$, $SD = 0.366$)($p = 0.007$); 正常声音的单调性评分($M = 3.214$, $SD = 0.366$)显著高于情感声音($M = 1.643$, $SD = 0.133$)($p < 0.001$)。两种语音类型的偏好度无显著差异($p = 0.510$)。经有效性验证后, 选定该语音参数进行实验对话脚本合成。

本研究所使用的服务机器人为 SoftBank Robotics 研发的 Pepper (标准型号)。Pepper 是一款具备高度拟人外观和多模态交互能力的社会型机器人, 身高约 1.21 米, 重量约 28 公斤, 配备了 20 个自由度的关节。其胸部显示屏不仅用于呈现对话字幕, 还作为表情符号显示的控制界面。在无表情符号条件下, 屏幕仅显示对话文本; 而在有表情符号条件下, 屏幕会在文本末尾添加相关表情符号(见图 6-1)。

此外, 本研究将情感机器人(emotional robot)定义为具有情感表达的机器人, 其情感性通过上文生成的情感性声音和屏幕中显示的表情符号得以体现。中性机器人(neutral robot)则被定义为不具备情感表达的机器人, 通过正常声音和无表情符号的显示来呈现其中性特征。

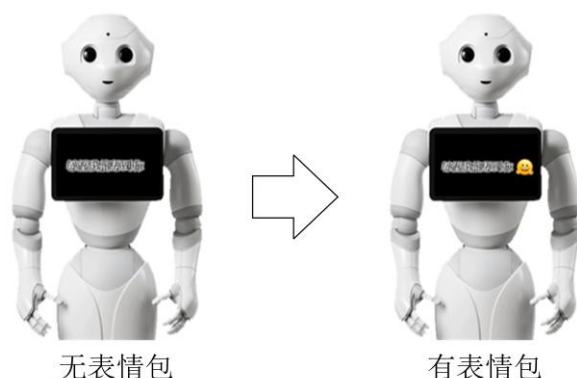


图 6-1 机器人屏幕上无表情符号(左)与显示表情符号(右)

6.2.2 实验设备和测量量表

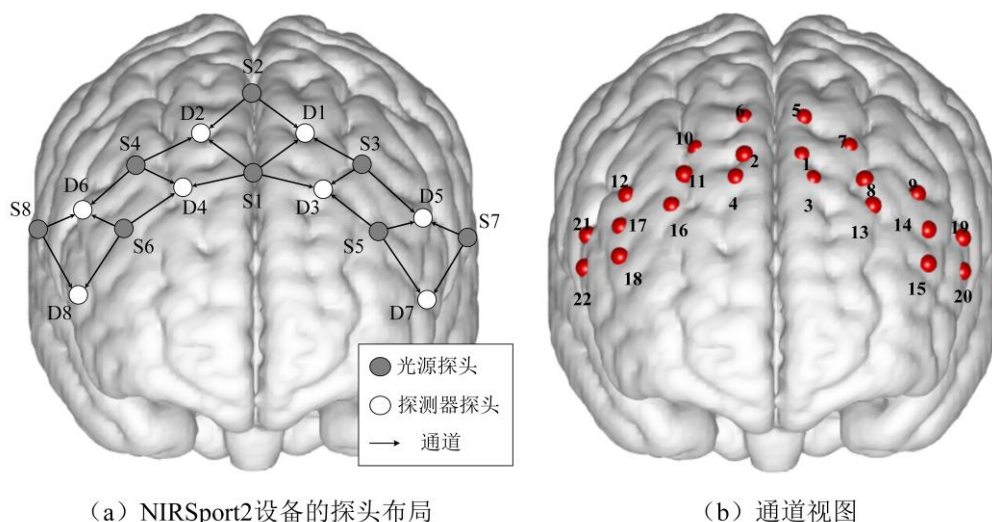
(1) 实验设备

实验采用 NIRSport2 功能性近红外光谱成像系统(NIRx Medical Technologies LLC, Los Angeles, CA, USA) 进行数据采集, 如图 6-2 所示。



图 6-2 近红外脑功能成像实验设备

系统配置包含 8 个双波长 (760 nm 和 850 nm) 光源探头 (Source, S) 及 8 个探测器探头 (Detector, D), 通过 3 cm 固定间距的源-探 (S-D) 配对形成 22 个有效测量通道 (Channel, CH)。采样频率设置为 10.173 Hz, 确保时间分辨率满足神经活动监测需求。探头阵列依据国际 10-20 脑电定位系统, 对称覆盖双侧前额叶皮层区域 (具体布局详见图 6-3)。



(a) NIRSport2设备的探头布局

(b) 通道视图

图 6-3 探头布局 (a) 及通道可视化 (b)

为精确映射功能激活区域, 采用五点参考定位法 (鼻根点 Nz、枕外隆突点 Iz、左右耳前点 AR/AL 及中央顶点 Cz) 记录各探头三维坐标。通过非线性配准

算法将原始坐标转换至蒙特利尔神经科学研究所（Montreal Neurological Institute, MNI）标准脑空间坐标系。基于 NIRS_KIT 工具箱（v2.0）的光子传输模拟功能，计算各通道在 Brodmann 分区内的光子覆盖百分比^[119]。根据 MNI 坐标系的解剖学映射结果，本研究定义六个双侧对称的感兴趣区（Region of Interest, ROI）：背外侧前额叶皮层（Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC）：BA9 区；布洛卡区（Broca's Area）：BA45 区；额叶眼动区（Frontal Eye Field, FEF）：BA8 区。各 ROI 的 MNI 坐标范围详见表 6-1。

表 6-1 基于 MNI 坐标的 fNIRS 通道与脑区映射

ROI	通道	S	D	BA	MNI 坐标			光子覆盖率
					X	Y	Z	
左侧 DLPFC	CH03	S1	D3	BA 9	-11	46	52	0.775
	CH08	S3	D3	BA 9	-27	38	49	0.851
	CH13	S5	D3	BA 9	-30	45	43	0.876
右侧 DLPFC	CH04	S1	D4	BA 9	13	47	52	0.776
	CH11	S4	D4	BA 9	30	38	51	0.757
	CH16	S6	D4	BA 9	34	45	43	0.857
左侧布洛卡区	CH14	S5	D5	BA 45	-47	37	33	0.78
	CH15	S5	D7	BA 45	-47	45	24	0.759
	CH20	S7	D7	BA 45	-58	26	16	0.763
右侧布洛卡区	CH17	S6	D6	BA 45	50	36	34	0.739
	CH18	S6	D8	BA 45	50	43	26	0.894
左侧额叶眼动区	CH01	S1	D1	BA 8	-7	39	58	0.813
	CH05	S2	D1	BA 8	-8	25	66	0.792
	CH07	S3	D1	BA 8	-22	32	58	0.885
右侧额叶眼动区	CH02	S1	D2	BA 8	11	40	58	0.789
	CH06	S2	D2	BA 8	11	25	66	0.787
	CH10	S4	D2	BA 8	26	32	58	0.819

（2）脑区功能描述

1）背外侧前额叶皮层（Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC）

DLPFC 是前额叶皮层的重要组成部分，主要参与高级认知功能和情绪调控。DLPFC 的活动与情绪调节、社会互动中的认知评估相关^[120]。先前关于情绪处理的研究表明，积极情绪可能激活左侧 DLPFC，而消极情绪可能激活右侧 DLPFC^[121]。

2）布洛卡区（Broca's area）

布洛卡区在语言处理中具有多种功能。具体来说，它负责韵律特性的感知处理^[70]，语音生产^[68]，以及音位分割^[69]。左布洛卡区在语音产生^[68]和音位分割^[69]

中起着至关重要的作用，而右布洛卡区则可能在韵律特征的感知加工中被激活^[70]。这些研究结果表明，布洛卡区的不同部分在语言处理的不同方面发挥着重要作用。

3) 额叶眼动区 (Frontal Eye Field)

FEF 是一个多功能的脑区，不仅在眼动控制中起着关键作用，还参与视觉认知、注意力导向和视觉意识等高级认知功能^[122]。FEF 的核心功能是执行眼动^[123]，它参与视觉场景的分析和选择，有助于形成引导注意力的机制，从而在复杂的视觉环境中有效地选择和处理信息^[124]。

(3) 实验场地布置

图 6-4 显示了实验设备和机器人位置的示意图以及实验现场。实验在实验室环境中进行，实验设备包括三台计算机和四台显示器。电脑 1 负责管理功能性近红外光谱 (fNIRS) 数据的采集，并通过显示器 1 实时显示 fNIRS 波形数据，供实验者监控。电脑 2 主要运行 E-Prime 2.0 软件，fNIRS 设备通过触发线与计算机 2 连接，用于向 E-Prime 2.0 发送实验标记点。人形机器人 Pepper 固定于被试的正前方，并通过电脑 3 进行无线操作。实验过程中，被试使用放置在桌子 3 上的 11 英寸 iPad Pro 2020 (分辨率为 2388×1668) 查看服务任务场景以及完成相关问卷。此外，桌子 2 上的扬声器用于向被试提供音频提示，指示其何时开始休息、进行对话或完成问卷。

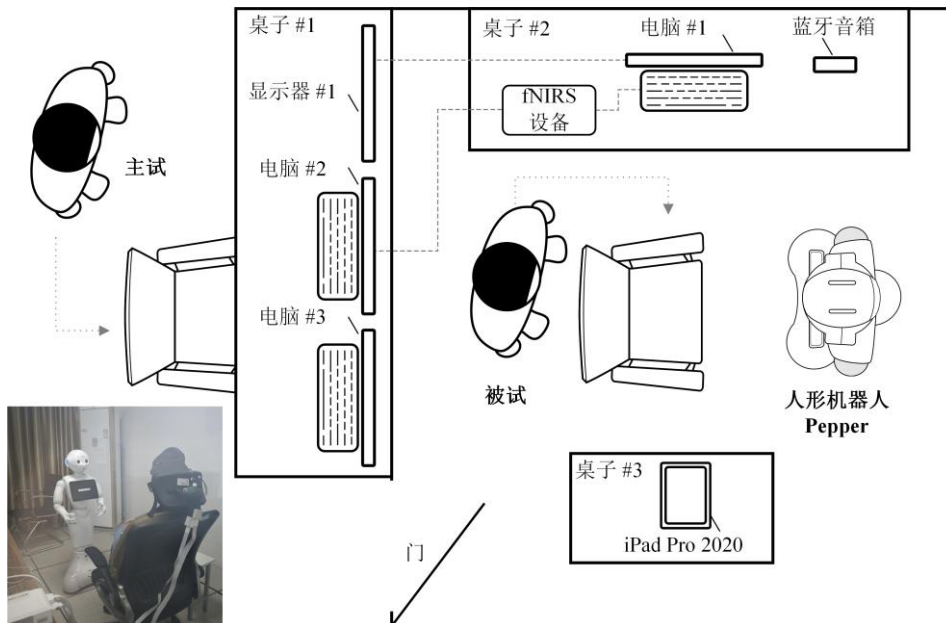


图 6-4 实验场地布置图及实验现场

(4) 测量量表

情绪反应采用 Mehrabian 开发的 PAD 情绪量表的修订版进行评估^[12]。参与者在 5 点量表上对愉悦 (Pleasure) 和唤醒 (Arousal) 两个维度的感受进行评分。愉悦维度包括四对反义词 (不开心-开心, 恼怒-满意, 不满-满意, 绝望-有希望)。同样, 唤醒维度包括四对反义词 (放松-兴奋, 平静-激动, 克制-惊讶, 困倦-敏锐)。由于支配 (Dominance) 概念的复杂性和潜在的混淆性, 本研究仅关注二维情绪空间, 评估中不包括支配维度。

机器人社会属性量表 (RoSAS) 用于评估机器人的社会属性, 涵盖三个维度: 温暖、能力和不适^[47]。温暖维度包括诸如“我认为这个机器人是快乐的、社交的、有情感的和富有同情心的”等陈述。能力维度包括: “我认为这个机器人是有能力的、反应灵敏的、可靠的和知识渊博的。”不适维度包括: “当机器人与我交流时, 它让我感觉恐怖、危险、尴尬和奇怪。”问卷采用 5 点李克特量表。

参考 Yu 和 Zhao^[114]的研究, 采用 5 点李克特量表来衡量个体对机器人的满意度。条目包括“我对这项服务感到满意”, “机器人提供的服务很好”, 以及“我对这项服务感到开心”。

6.2.3 被试与实验流程

通过公告招募大学在校学生作为实验被试。所有被试在实验前均签署由学校伦理审查委员会批准的知情同意书, 并被告知可随时无条件退出实验。通过使用 G Power 3.1 软件计算, 为了达到 0.9 的统计效能 ($\text{power} = 0.9$), 所需的样本量为 31 名被试。初筛阶段排除存在色觉障碍、矫正视力异常 (裸眼视力 ≥ 0.8)、听力损伤及神经精神疾病史的个体, 最终纳入 37 名健康被试 (女性 18 人, 男性 19 人)。实验过程中因功能性近红外光谱采集设备异常排除 1 名被试数据, 最终有效样本量为 36 人 (女性 18 人, 男性 18 人), 年龄分布 21-30 岁 ($M=24.73$, $SD=1.64$), 其中本科生 22 人, 硕士研究生 14 人。所有被试均为右利手, 母语为汉语, 且未参与过类似人机交互实验。完成实验任务后, 被试获得 50 元人民币基础报酬。

实验在某大学神经工程实验室 (温度控制: $23\pm 1^\circ\text{C}$; 背景噪声 $< 35\text{ dB}$) 进行, 实验环境设置严格遵循人因工程学标准。实验室采用模块化隔音设计 (隔声量 $\geq 45\text{ dB}$), 照明系统照度为 300-350 lux, 确保视觉刺激呈现的标准化。

被试抵达实验室后，研究者首先通过标准化指导语说明研究目的、流程及注意事项，随后在独立观察室签署经伦理审查委员会批准的知情同意书，该文件包含隐私保护条款、数据使用范围及紧急中止程序。采用头模定位法安装 22 通道 fNIRS 设备，同步记录背外侧前额叶皮层、布洛卡区以及额叶眼动区的血氧动力学信号。

实验采用组块（Block）设计，通过 E-prime Professional 2.0（Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA, USA）编程呈现，包含以下标准化流程（见图 6-5）：

（1）设备校准阶段（约 5 分钟）：完成 fNIRS 光极阻抗检测（阈值 $<10\text{ k}\Omega$ ），进行 5 点法空间配准，同步采集 30 秒静息态数据作为基线参照。

（2）情景想象：在平板电脑中显示文字性描述以辅助情境想象：“接下来请您想象以下情景：目前您拥有一段长假，计划前往不同城市游玩。现在您身处合肥某智能酒店，恰好一个服务机器人向您驶来，你想向它询问不同城市的航班、天气、游玩等信息。”

（3）练习环节（1 trials）：采用 Pepper 机器人内置默认声音与被试交流，帮助被试熟悉实验流程与交互节奏。

正式实验阶段：

（1）任务提示期：平板电脑中显示城市提示：“假设您已经向服务机器人询问了关于某地的航班信息、天气情况、酒店信息。接下来您仅需等待机器人回答。”

（2）基线记录期（60s）：黑屏状态下的静息采集被试大脑皮层区域的血氧变化信息。

（3）注意定向期（1s）：机器人屏幕中央呈现黑底白色的“+”符号。

（4）交互任务期：参考 Li 等人^[105]的实验设计，每一个组块（block）中包含 3 段对话试次（trial），即航班、天气、酒店信息咨询（客观任务）或景点、美食、购物推荐（主观任务）。组块 1 至 4 为客观任务，要求被试与四种不同声音类型（正常声音 vs. 情感声音）和表情符号显示情况（有表情符号 vs. 无表情符号）的服务机器人进行交互。组块 5 至 6 为主观任务，被试需要与中性机器人（正常声音且无表情符号）以及情感机器人（情感声音且有表情符号）进行交互。每个试次均控制在 17 秒，试次之间要求被试休息 15 秒。组块间要求被试休息 60 秒。

(5) 评估阶段：通过 5 点 Likert 量表（在平板电脑中呈现）在对话结束后采集情感效价、唤醒度及社会属性等评分。

采用 Wizard-of-Oz 控制范式：主试在独立控制间（通过玻璃观察）使用机器人控制台（Choregraphe-suite-2.5.11.13-win32-vs2013）操纵机器人行为，控制指令通过 Wi-Fi 6 传输，端到端延迟控制在 200ms 以内。

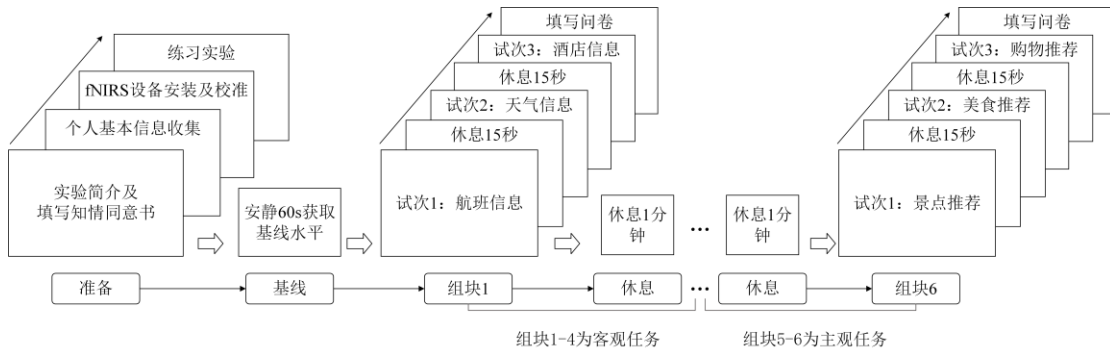


图 6-5 实验流程

6.2.4 实验数据处理

原始数据在 MATLAB R2022b 平台通过 NIRS_KIT 工具箱进行标准化预处理^[125]，具体流程如下：

(1) 血氧信号转换：应用改进型 Beer-Lambert 定律（modified Beer-Lambert law, MBL）将光密度数据转换为氧合血红蛋白（HbO₂）和脱氧血红蛋白（HbR）浓度变化量^[126]；

(2) 运动伪影校正：采用三阶多项式回归模型消除头部运动及环境噪声干扰，结合时间导数分布修复算法（temporal derivative distribution repair, TDDR）进行运动伪影补偿^[127]；

(3) 信号滤波处理：使用 0.01-0.08 Hz 带通有限冲激响应（finite impulse response, FIR）滤波器消除低频生理噪声（如呼吸、心跳）及高频环境干扰；

(4) 统计建模分析：基于实验范式的时间序列特征构建广义线性模型（general linear model, GLM），为每个实验条件生成 6 个预测因子矩阵。

在个体水平分析中，通过 GLM 回归获取各实验条件相对于基线的 β 值参数。采用 SPSS 25.0 统计软件进行组水平分析，使用重复测量方差分析（repeated-measures ANOVA）检验不同实验条件间的血氧信号差异，所有统计检验均采用 Greenhouse-Geisser 法校正球形假设违例。

6.3 研究结果

6.3.1 多感官设计要素与用户主观评价的关系

(1) 声音类型和表情符号对用户主观评价的影响

表 6-2 展示了在不同声音类型与表情符号条件下，用户主观评价各维度的描述性统计结果，包括愉悦度、唤醒度、满意度、温暖感、能力感和不适感的均值（*M*）和标准差（*SD*）。基于这些数据，本研究采用重复测量方差分析对声音类型与表情符号存在性的双因素实验条件进行统计检验，以分析其对用户主观评价的影响。具体分析结果的汇总数据详见表 6-3。

表 6-2 声音类型与表情符号对用户主观评价影响的描述性统计结果

		声音类型		表情符号	
		情感声音	正常声音	有表情符号	无表情符号
愉悦度	<i>M</i>	3.886	3.607	3.743	3.750
	<i>SD</i>	0.119	0.102	0.096	0.092
唤醒度	<i>M</i>	3.583	3.087	3.337	3.333
	<i>SD</i>	0.140	0.137	0.123	0.137
满意度	<i>M</i>	3.809	3.533	3.743	3.750
	<i>SD</i>	0.128	0.117	0.096	0.092
温暖	<i>M</i>	3.449	2.774	3.116	3.107
	<i>SD</i>	0.164	0.128	0.126	0.136
能力	<i>M</i>	3.919	3.573	3.751	3.740
	<i>SD</i>	0.119	0.137	0.121	0.126
不适	<i>M</i>	2.221	2.360	2.296	2.286
	<i>SD</i>	0.173	0.148	0.166	0.157

表 6-3 声音类型与表情符号条件下用户主观评价的重复测量方差分析结果

测量项	因素	$F(1, 29)$	p	η^2
愉悦度 (P)	声音类型 (VT)	4.322	0.045	0.113
	表情符号 (EI)	0.012	0.915	<0.01
	VT×EI	0.031	0.862	0.001
唤醒度 (A)	声音类型 (VT)	15.699	<0.001	0.316
	表情符号 (EI)	0.003	0.959	<0.01
	VT×EI	2.929	0.096	0.079
满意度 (S)	声音类型 (VT)	5.845	0.021	0.147
	表情符号 (EI)	0.107	0.745	0.003
	VT×EI	0.004	0.948	<0.01
温暖 (W)	声音类型 (VT)	18.907	<0.001	0.357
	表情符号 (EI)	0.011	0.917	<0.01
	VT×EI	0.002	0.969	<0.01
能力 (C)	声音类型 (VT)	11.801	0.002	0.258
	表情符号 (EI)	0.026	0.873	0.001
	VT×EI	0.494	0.487	0.014
不适 (D)	声音类型 (VT)	10.518	0.003	0.236
	表情符号 (EI)	1.466	0.234	0.041
	VT×EI	10.951	0.002	0.244

表 6-2 及表 6-3 的结果显示，在情感反应维度上，情感声音相较于正常声音显著提升了用户的愉悦感 ($p = 0.045$) 和唤醒度 ($p < 0.001$)。然而，表情符号的呈现与否对用户愉悦度 ($p = 0.915$) 以及唤醒度 ($p = 0.959$) 的影响并不显著。

就满意度而言，情感声音条件下的用户满意度显著高于正常声音条件 ($p = 0.021$)。此外，结果显示，表情符号是否存在对用户满意度的影响没有差异， $p = 0.745$ 。

在机器人社会属性感知方面，结果显示声音类型对用户评价具有显著影响，而表情符号的主效应未达显著水平。具体而言，情感声音条件下的机器人温暖评分 ($p < 0.001$) 以及能力评分 ($p = 0.002$) 均显著高于正常声音条件。然而，表情符号的呈现与否对温暖评分 ($p = 0.917$) 和能力评分 ($p = 0.873$) 的影响均不显著。此外，正常声音条件下的不适感评分显著高于情感声音条件 ($p = 0.003$)。值得注意的是，虽然表情符号的主效应不显著 ($p = 0.234$)，但声音类型与表情符号在不适感维度上存在显著交互作用，见图 6-6。简单效应分析表明，在缺乏表情符号支持时，正常声音会显著增加用户的不适感 ($p = 0.047$)；而当引入表情符号后，两种声音类型的不适感差异不再显著 ($p = 0.737$)。

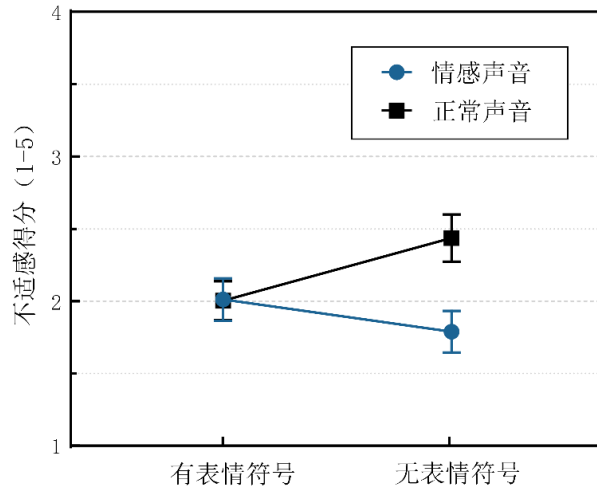


图 6-6 不同声音类型（情感声音 vs. 正常声音）和表情符号条件（有表情符号 vs. 无表情符号）下的用户不适感得分。误差线表示标准误（SEM）。

（2）任务类型和服务机器人情感类型对用户主观评价的影响

表 6-4 呈现了不同任务类型与机器人情感类型条件下用户主观评价各维度的描述性统计结果。采用双向重复测量方差分析对任务类型与机器人情感类型双因素实验条件的主观测评得分进行统计检验，分析结果的汇总数据详见表 6-5。

表 6-4 任务类型与机器人情感类型对用户主观评价影响的描述性统计结果

		任务类型		机器人情感类型	
		客观任务	主观任务	情感机器人	正常机器人
愉悦度	<i>M</i>	3.753	3.734	3.961	3.750
	<i>SD</i>	0.099	0.099	0.116	0.112
唤醒度	<i>M</i>	3.583	3.087	3.337	3.333
	<i>SD</i>	0.140	0.137	0.123	0.137
满意度	<i>M</i>	3.809	3.533	3.743	3.750
	<i>SD</i>	0.128	0.117	0.096	0.092
温暖	<i>M</i>	3.449	2.774	3.116	3.107
	<i>SD</i>	0.164	0.128	0.126	0.136
能力	<i>M</i>	3.919	3.573	3.751	3.740
	<i>SD</i>	0.119	0.137	0.121	0.126
不适	<i>M</i>	2.221	2.360	2.296	2.286
	<i>SD</i>	0.173	0.148	0.166	0.157

表 6-5 任务类型与情感类型对用户主观评价影响的重复测量方差分析结果

测量项	因素	$F(1, 29)$	p	η^2
愉悦度 (P)	任务类型 (TT)	0.047	0.829	0.001
	情感类型 (ET)	9.493	0.004	0.218
	TT×ET	5.821	0.021	0.146
唤醒度 (A)	任务类型 (TT)	0.366	0.549	0.011
	情感类型 (ET)	18.848	<0.001	0.357
	TT×ET	1.593	0.215	0.045
满意度 (S)	任务类型 (TT)	0.143	0.708	0.004
	情感类型 (ET)	22.381	<0.001	0.397
	TT×ET	2.551	0.119	0.070
温暖 (W)	任务类型 (TT)	1.197	0.282	0.034
	情感类型 (ET)	9.256	0.005	0.214
	TT×ET	0.007	0.932	0.000
能力 (C)	任务类型 (TT)	5.060	0.031	0.130
	情感类型 (ET)	5.222	0.029	0.133
	TT×ET	0.518	0.477	0.015
不适 (D)	任务类型 (TT)	2.531	0.121	0.069
	情感类型 (ET)	17.166	<0.001	0.336
	TT×ET	7.496	0.010	0.181

研究结果显示,在情感反应的愉悦感维度上,任务类型(客观任务与主观任务)间无显著差异,但情感机器人相较于中性机器人引发了显著更高的愉悦感($p=0.004$)。交互作用分析(见图 6-7)进一步表明情感机器人在完成主观任务时诱发的愉悦感显著高于中性机器人($p<0.001$),而在客观任务中情感机器人与中性机器人愉悦感评分无显著性差异($p=0.314$)。在唤醒度维度上,任务类型的主效应($p=0.549$),以及任务类型和情感类型的交互作用($p=0.215$)都不显著,但情感机器人显著提升了唤醒度水平($p<0.001$)。

在用户满意度维度,客观任务与主观任务间未呈现显著差异($p=0.121$),但情感机器人引发的用户满意度显著高于中性机器人($p<0.001$)。进一步分析发现任务类型与机器人类型存在显著交互效应(见图 6-7),具体表现为情感机器人组在主观任务中的满意度显著优于客观任务($p<0.001$),而中性机器人组的任务类型差异未达显著水平($p=0.314$)。

在社会属性评估方面,温暖维度($p=0.708$)与能力维度($p=0.873$)的任务类型主效应均不显著,但情感机器人组在温暖($p<0.001$)和能力($p=0.005$)两个维度均显著优于中性机器人组。客观任务较主观任务引发更强的不适体验(p

= 0.031)，同时中性机器人组较情感机器人组产生更显著的不适感 ($p = 0.031$)。

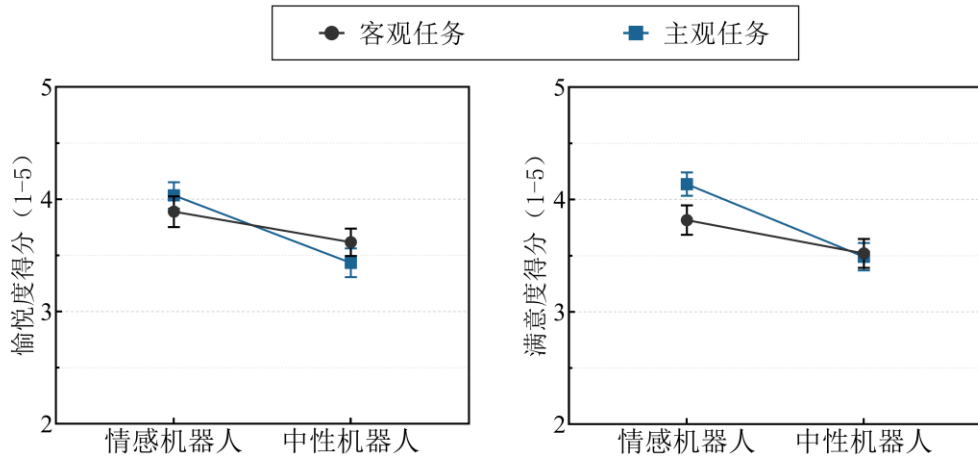


图 6-7 任务类型（客观任务 vs. 主观任务）和情感类型（情感机器人 vs. 中性机器人）

条件下愉悦度和满意度得分。误差条表示标准误差 (SEM)。

6.3.2 多感官设计要素与用户大脑激活的关系

(1) 声音类型和表情符号对用户大脑激活水平的影响

基于个体水平 GLM 分析，图 6-8 呈现了四种视听刺激条件下 BOLD 信号 β 值的空间分布特征。 β 值作为神经激活强度的量化指标，直接反映了不同条件下特定脑区的血流动力学响应强度。可视化结果显示，在“正常声音+有表情符号”与“情感声音+无表情符号”两种条件下，服务机器人均引发更强的脑区激活（图 6-8）。表 6-6 进一步通过重复测量方差分析量化了视听组合对 β 值的差异性影响。

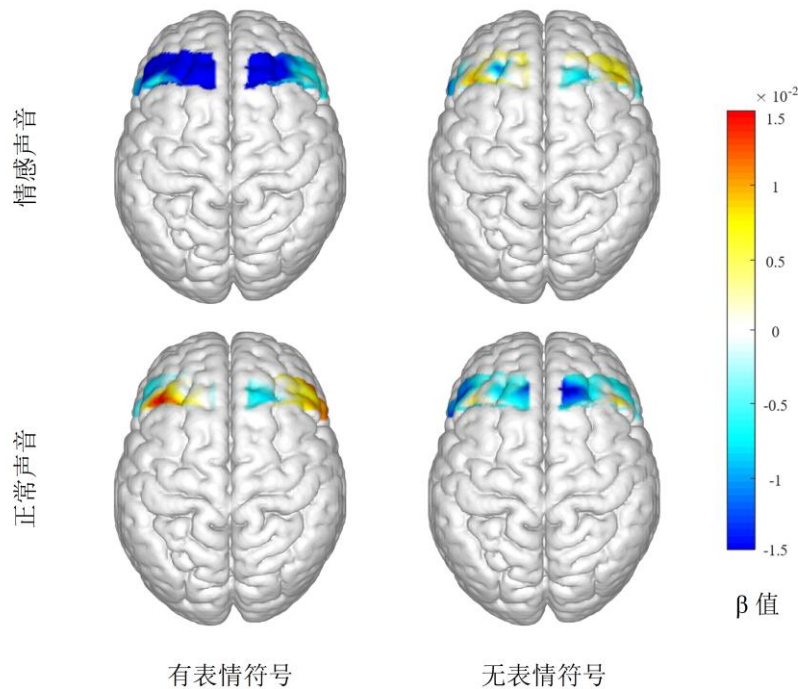


图 6-8 不同视听刺激条件下用户的脑区激活特征

表 6-6 声音类型与表情符号条件下用户脑区激活水平（ β 值）的重复测量方差分析

脑区（通道）	因素	$F(1, 29)$	p	η^2
左侧 DLPFC（ch3, ch8, ch13）	声音类型（VT）	0.823	0.371	0.023
	表情符号（EI）	0.636	0.431	0.018
	VT×EI	4.392	0.043	0.111
右侧 DLPFC（ch4, ch11, ch16）	声音类型（VT）	0.354	0.556	0.010
	表情符号（EI）	0.930	0.342	0.026
	VT×EI	3.304	0.078	0.086
左侧布洛卡区（ch14, ch15, ch20）	声音类型（VT）	0.389	0.537	0.011
	表情符号（EI）	0.324	0.573	0.009
	VT×EI	2.581	0.117	0.069
右侧布洛卡区（ch17, ch18）	声音类型（VT）	0.062	0.805	0.002
	表情符号（EI）	0.360	0.552	0.010
	VT×EI	5.558	0.024	0.137
左侧额叶眼动区（ch1, ch5, ch7）	声音类型（VT）	0.573	0.454	0.016
	表情符号（EI）	0.565	0.457	0.016
	VT×EI	5.148	0.030	0.128
右侧额叶眼动区（ch2, ch6, ch10）	声音类型（VT）	0.309	0.582	0.009
	表情符号（EI）	0.406	0.528	0.011
	VT×EI	3.414	0.073	0.089

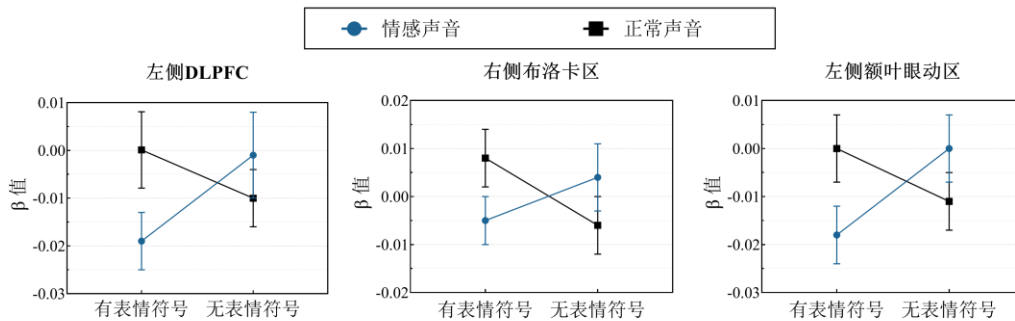


图 6-9 不同声音类型（情感声音 vs. 正常声音）和表情符号条件（有表情符号 vs. 无表情符号）下的不同脑区 β 值。误差线表示标准误（SEM）。

研究通过 fNIRS 数据分析揭示了声音类型与表情符号条件对大脑神经活动的交互影响（见图 6-9），具体表现为以下三个关键脑区的显著激活模式差异：

左侧 DLPFC。重复测量方差分析显示，声音类型与表情符号条件对左侧 DLPFC 的 β 值产生显著交互作用 [$F(1, 30) = 4.392, p = 0.043, \eta^2 = 0.111$]。简单效应分析表明，在表情符号呈现条件下，正常声音引发更强的血流动力学反应（ $M = 0.000097, SD = 0.0078$ ），显著高于情感声音条件（ $M = -0.0192, SD = 0.0059$ ）（ $p = 0.023$ ）；而在表情符号缺失时，两种声音类型的 β 值差异不显著（正常声

音: $M = -0.0096, SD = 0.0056$; 情感声音: $M = -0.0012, SD = 0.0089; p = 0.394$ 。

右侧布洛卡区。声音类型与表情符号条件对右侧布洛卡区 β 值存在显著交互效应 [$F(1, 30) = 5.558, p = 0.024, \eta^2 = 0.137$]。进一步分析发现, 正常声音条件下, 表情符号呈现时的神经激活水平 ($M = 0.0083, SD = 0.0059$) 显著高于缺失条件 ($M = -0.0064, SD = 0.0057$) ($p = 0.010$); 而在情感声音条件下, 表情符号存在 ($M = -0.0049, SD = 0.0046$) 与缺失 ($M = 0.0044, SD = 0.0068$) 的激活差异未达显著水平 ($p = 0.244$)。

左侧额叶眼动区。该脑区同样观察到声音类型与表情符号条件的显著交互作用 [$F(1, 30) = 5.148, p = 0.030, \eta^2 = 0.128$]。具体而言, 情感声音条件下, 表情符号缺失引发更强的神经激活 ($M = -0.0004, SD = 0.0071$), 显著高于表情符号呈现条件 ($M = -0.0176, SD = 0.0059$) ($p = 0.048$); 而在正常声音条件下, 表情符号存在 ($M = -0.0001, SD = 0.0071$) 与缺失 ($M = -0.0107, SD = 0.0058$) 的 β 值差异不显著 ($p = 0.111$)。

(2) 任务类型和服务机器人情感表达对用户大脑激活的影响

图 6-10 显示了任务类型和情感类型对左侧 DLPFC 和左侧布洛卡区激活 (β 值) 的交互作用。然而, 在其他脑区未观察到主效应或交互效应。

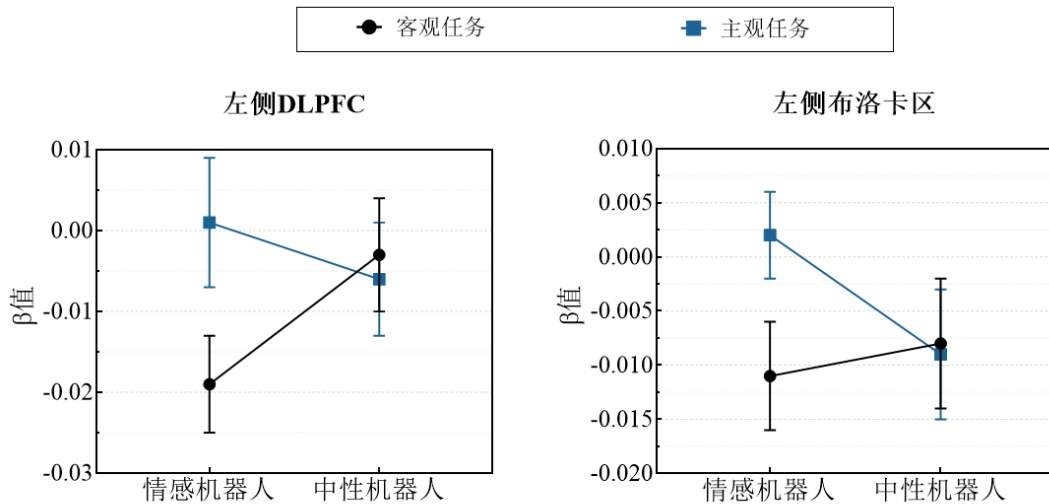


图 6-10 任务类型 (客观任务 vs. 主观任务) 和情感类型 (情感机器人 vs. 中性机器人) 条件下各脑区的 β 值。误差条表示标准误差 (SEM)。

左侧 DLPFC。通过重复测量方差分析发现, 任务类型和情感类型对参与者左侧 DLPFC 的 β 值存在显著的交互作用 [$F(1, 30) = 5.092, p = 0.030, \eta^2 = 0.127$]。

进一步进行简单效应分析表明：在客观任务中，中性机器人引发了更强的血流动力学反应（ $M=0.000097$ ， $SD=0.0078$ ），显著高于情感机器人（ $M=-0.019$ ， $SD=0.006$ ）， $p=0.028$ 。在主观任务中，情感机器人（ $M=0.001$ ， $SD=0.008$ ）与中性机器人（ $M=-0.006$ ， $SD=0.007$ ）之间的 β 值无显著差异， $p=0.395$ 。此外，与情感机器人互动时，主观任务引发的血流动力学反应（ $M=0.001$ ， $SD=0.008$ ）显著强于客观任务（ $M=-0.019$ ， $SD=0.006$ ）， $p=0.023$ 。对于中性机器人，客观任务（ $M=-0.003$ ， $SD=0.007$ ）与主观任务（ $M=-0.006$ ， $SD=0.007$ ）之间的 β 值无显著差异， $p=0.795$ 。

左侧布洛卡区。同样，重复测量方差分析显示，任务类型和情感类型对左侧布洛卡区的 β 值存在显著的交互作用 [$F(1, 30)=4.259$ ， $p=0.047$ ， $\eta^2=0.108$]。简单效应分析表明：与情感机器人互动时，主观任务在左侧布洛卡区引发的血流动力学反应（ $M=0.002$ ， $SD=0.004$ ）显著强于客观任务（ $M=-0.011$ ， $SD=0.005$ ）， $p=0.005$ 。与中性机器人互动时，客观任务（ $M=-0.008$ ， $SD=0.006$ ）与主观任务（ $M=-0.009$ ， $SD=0.006$ ）之间的 β 值无显著差异， $p=0.938$ 。

6.4 讨论

6.4.1 多感官设计要素对用户主观评价和大脑激活的影响

主观评价的研究结果表明，相较于正常声音，情感声音显著提升了用户的主观体验，具体表现为更高的愉悦感、唤醒度和满意度评分，同时增强了用户对机器人温暖度和能力的感知。这一发现与已有研究一致^[110]，进一步证实情感声音作为重要的社交线索，能够促进人机交互中的情感共鸣和社会联结。相反，正常声音显著增加了用户的不适感，表明缺乏情感表达的语音设计可能削弱机器人的社交存在感，引发冷漠或僵化的感知。在神经层面，情感声音并未引发显著的皮层激活主效应，可能与听觉信息在自然语境下的自动加工特点及其刺激强度较低有关。相比之下，研究发现显著的视听交互作用，表明多模态输入能增强大脑对刺激的整合与情绪加工，从而诱发更明显的神经响应。这一结果凸显感官整合在提升用户认知与情感参与中的关键作用，强调服务机器人应注重多模态信息的协同优化，以提升整体交互质量。

尽管表情符号作为视觉线索未在主观评价或脑区激活中表现出显著主效应，但在与语音信息共同作用时，展现出显著的视听交互效应：当机器人不显示表情

符号时,情感声音相较于正常声音降低了用户的不适感;而在呈现表情符号的条件下,语音是否具有情感特征对不适感的影响则不再显著。这一结果凸显了表情符号作为补充性社交线索在情绪调节中的关键作用^[114]。这一交互效应突显了多感官整合在人机交互中的重要性,说明用户对系统情感响应的评估源于视觉与听觉线索的协同作用,而非单一通道。

在脑区激活方面,声音类型与表情符号的交互显著调节了与情感处理、听觉处理及眼动处理的相关脑区活动,如左侧 DLPFC、右侧布洛卡区及左侧额叶眼动区(FEF)。

在呈现表情符号的条件下,正常声音(即缺乏情感色彩的语音)引发了更强的左侧 DLPFC 激活。尽管左侧 DLPFC 通常与积极情绪和认知控制相关,但在本情境中,其激活增强未必意味着用户体验改善,反而可能暗示大脑对感知矛盾的应对。

已有研究表明,当多模态信息之间存在不一致时,DLPFC 的激活水平会显著上升。例如,Yorgancigil 等人^[128]发现,相较于机械面孔-机械声音的匹配条件,人脸与机械声音的不匹配组合更易引发左侧 DLPFC 的强烈活动,并被受试者普遍评为不适与不协调。Wittfoth 等人^[129]亦在冲突任务中观察到该区域的激活增强,认为 DLPFC 在冲突监测中发挥核心作用。Uno 等人^[130]的磁共振功能成像(fMRI)研究亦指出,当面部表情与语音信息不匹配时,与 DLPFC 邻近的额下回也会表现出显著激活,进一步支持了多模态“错配”引发神经调控机制的观点。综合来看,在本研究中,静态表情符号(富含情绪特征)与正常声音(不具有情绪特征)之间的“不一致”可能激活了大脑的冲突处理机制,引发 DLPFC 的代偿性认知调节反应,而非反映更高的情绪积极性。

右侧布洛卡区亦表现出显著的交互激活模式。已有研究表明,该脑区不仅参与语言加工,也在处理语音情绪与非语言社交信息中发挥重要作用。在多项被动聆听研究中,情绪语调(如恐惧、愤怒、快乐)显著增强了右侧布洛卡区的激活,相较于中性语调或静息状态^[131]。这表明情感声音本身可强烈驱动右侧布洛卡区的响应。当语音中的情绪成分已高度显著时,再添加表情符号等视觉提示对其激活不再产生显著增益,这也解释了在情绪语音条件下,视觉线索的边际效应为何会减弱。情绪声音作为语者身份的“听觉延伸”在情绪识别中的作用,通常优于

视觉模态^[132]，进一步印证了这一点。

另一方面，当机器人语音为正常声音时，受众对机器人情感意图的感知可能受限，此时对非语言视觉线索的依赖性显著增强。已有研究指出，文本或图形表情符号以及面部表情处理通常都会引发右侧布洛卡区的激活，表明该区域对情绪线索具有敏感性^[133]。当言语的字面意义中性或模糊时，听者往往更依赖语调、表情等非语言信息来识别情绪意图^[134]。在本研究情境中，表情符号作为一种富有情感特征的视觉线索，有效补偿了中性语音在情绪表达上的不足，增强了多模态信息的整合效率，从而激活右侧布洛卡区。综上所述，当语音缺乏情绪信息时，为提升交互的情感表达与亲和力，视觉表情设计的介入具有重要意义。

额叶眼动区（Frontal Eye Field, FEF）虽传统上被视为调控眼球运动与视觉空间注意的核心区域，但近年来研究发现，其在听觉空间定位任务中亦发挥关键作用。Smith 等人采用重复经颅磁刺激（rTMS）暂时抑制受试者 FEF 功能，发现视觉提示对听觉目标定位的促进作用明显削弱，表明 FEF 参与了跨模态注意的调节过程^[135]。

多模态信息加工受到大脑有限注意资源的制约，需通过跨皮层网络实现整合协调^[136]。在听觉与视觉信息共现时，它们既可能竞争注意资源，也可能形成互补加工机制。听觉信息，尤其是具备情绪成分的语音，常具有较强的注意捕获能力。眼动追踪研究发现，情绪语音更易引导个体注视与之情绪一致的视觉目标^[111]。fMRI 研究亦证实，额顶网络中的 FEF 与顶间沟（IPS）在处理视觉、听觉或视听整合的空间任务中时均被激活^[137]。

结合本研究结果可见，在情感声音条件下，当缺乏表情符号等明确的视觉情绪线索时，左侧 FEF 激活显著增强，可能反映了大脑在面对单一模态（听觉）信息时，为弥补视觉情绪线索的缺失而加大视觉注意资源调配的努力。这种增强的 FEF 激活或可视为一种代偿机制，即大脑通过提升对视觉区域的注意，以促进对听觉情绪的跨模态整合。

6.4.2 任务类型与情感类型对用户主观评价和大脑激活的影响

研究进一步探讨了任务类型（主观任务与客观任务）与服务机器人情感表达之间的交互作用，重点分析其对用户主观评价及脑功能活动的影响。通过对比情感机器人与中性机器人在不同任务场景中的表现，结果显示：在主观任务情境下，

情感机器人显著提升了用户的愉悦感、唤醒度和整体满意度，而在客观任务中，此优势则相对减弱。

这一结果在用户认知心理研究中已有理论支持。**Bower** 和 **Steyvers**^[138]指出，在需要主观判断的任务中，如电影或音乐偏好选择，用户更倾向于信任具有情感属性的人机表达；而在逻辑推理、数据判断等客观任务中，则更依赖机器的效率和准确性。这说明任务类型在调节用户对情感机器人的接受度中起到了关键作用，情感型机器人的效能在情感参与强烈的交互中更为突出^[138]。

在神经层面，本研究通过近红外脑功能成像（fNIRS）发现，任务类型与情感表达之间存在显著的交互作用。在客观任务中，中性机器人更易激活左侧背外侧前额叶皮层（left DLPFC），该脑区通常与认知控制和目标导向型任务有关。研究者如 **Panidi** 等^[139]验证了 DLPFC 在主观价值权衡和风险决策中的关键作用，表明其在信息加工和判断中的主导地位。

相比之下，在主观任务中，情感机器人更显著激活了左侧布洛卡区（Broca's area）。布洛卡区通常与语言加工和社交信息处理密切相关。**Guha** 等^[140]的 fMRI 研究表明，该脑区在情绪干扰任务中可对杏仁核形成有效连接，发挥情绪调控的顶-下控制机制。此外，**Maier** 等^[141]利用脑电研究发现，机器人所携带的情绪背景信息会调节用户面孔加工中的神经反应，尽管其激活程度略低于对人类面孔的反应，但其依然引发用户对意图归属的神经活动变化。这些神经反应的变化再次印证了情感机器人对用户主观体验的调节作用，尤其在主观性任务中表现得更为显著。

综上所述，任务类型显著影响服务机器人情感表达的用户感知与神经响应。在主观任务中，情感机器人能够更好地满足用户的情感需求和交互预期，增强语言加工相关脑区的活动；而在客观任务中，中性表达机器人更契合用户对效率和准确性的认知期待。这一发现为服务机器人在具体场景中的适应性设计提供了理论基础和神经科学证据。

6.5 结论与建议

6.5.1 研究结论

本研究基于主观评价与神经响应双重维度，系统探讨了服务机器人中听觉与视觉设计要素对用户体验的影响机制，并得出以下结论：（1）情感声音作为关键

社交线索，显著增强用户的愉悦度、唤醒度与满意度，同时提升机器人在“温暖度”与“能力”维度的社会认知评价。(2) 服务机器人在缺乏表情符号显示的情境中，情感声音具有显著的情绪调节功能，能够有效缓解用户的负面情绪反应；而在呈现表情符号的条件下，若机器人声音缺乏情感特征，则易导致用户产生感知冲突与不协调感。(3) 在声音情感线索不足的条件下，表情符号可发挥补偿效应，增强交互的情感表达力；而在语音情绪特征丰富时，视觉提示的边际作用减弱，表明听觉韵律在传达社交意图方面具有更强主导性。(4) 情感交互的效能受到任务类型调节：在主观评价任务中，机器人的情感设计显著提升用户积极评价与大脑激活水平；而在客观任务中，其优势相对减弱，表明任务类型对机器人情感表达的效用具有调节作用。

6.5.2 研究建议

基于上述研究结论，服务机器人在情感交互设计中应注重多模态信息的协同优化，尤其需在不同任务情境和交互目标下，灵活配置听觉与视觉要素的表达策略。具体建议如下：

(1) 增强语音情感表达设计：情感声音在促进用户愉悦体验与社交认知中具有核心价值，建议在语音合成与语调调控中引入更为自然、生动的情绪参数，强化语音的社交意图传达功能，提升整体人机亲和感。

(2) 注重多模态一致性：为避免感知冲突，视觉与听觉元素应在情感表达维度上保持协调一致，特别是在机器人已经呈现出视觉情感表达时(如表情符号)，设计者需要设计情感声音来保持一致。

(3) 根据任务类型调整情感信息密度：在用户主观评价型交互场景中，可适当增强情感语音与视觉表达的丰富度，以促进积极情绪唤起与神经激活；而在客观任务或信息传达为主的场景中，应控制情感输入的强度，避免干扰用户认知加工。

(4) 推动情感交互系统的个性化与智能适配：结合用户实时情绪状态与任务背景，构建基于情境感知的情感调节模型，实现视觉与听觉表达方式的动态匹配与智能调控，有助于提升服务机器人的交互智能水平与用户接受度。

6.6 本章小结

本章以实体机器人 Pepper 为交互载体，构建了多种视听多感官交互模式，

并针对主观任务与客观任务两类服务场景设计了实验任务。研究采用多模态测量方法，结合主观问卷评估与功能性近红外光谱成像（fNIRS）技术，系统探究了不同视听交互设计、任务类型以及机器人情感表达类型对用户主观评价及脑区激活水平的影响。具体研究工作如下：

（1）基于文献综述，以 **Pepper** 机器人为实验平台，设计了多种视听组合的多感官交互模式，并开发了符合研究目标的实验任务框架。

（2）利用 fNIRS 技术采集被试在不同交互条件下的大脑激活数据，同时结合主观问卷评估，获取多维度的用户认知与情感反应数据。

（3）基于多模态数据，系统分析了多感官交互模式及任务类型对用户主观评价和脑区激活水平的影响，深入探讨了多感官信息融合对人机交互体验的作用机制。

第7章 结论与展望

7.1 主要结论

在 2025 年央视春晚“扭秧歌机器人”亮相的热潮背景下，本文围绕服务机器人多维度拟人化外观特征及多感官交互模式对用户主观评价与情感体验的影响展开系统研究。研究内容涵盖网络销售数据分析、用户接受意愿模型构建、多模态测量实验及神经机制探讨。

基于服务机器人网络销售数据，确定了关键拟人化外观维度，并构建了多维外观拟人化因素的用户接受意愿假设模型。该模型依托 S-O-R 理论与 CAC 框架，采用结构方程模型验证了多维外观拟人化因素、用户感知温暖与感知能力、情感体验及接受意愿之间的影响机制。

设计并开展了多模态测量实验，以头部形状、面部特征、躯干形状及手臂特征为核心变量，构建了 16 种不同拟人化外观组合的服务机器人原型。通过主观情感体验指标及眼动特征作为因变量，运用重复测量方差分析，探讨了不同拟人化视觉特征对用户主观评价、情感体验及眼动特征的影响，并对各外观类型进行综合评价，揭示了最优拟人化设计方案。

基于综合评价得分较高的 Pepper 实体机器人，构建了不同视听组合的多感官交互模式，并结合不同任务类型的服务场景，开展了近红外脑功能成像实验。实验以声音类型、表情符号存在性、机器人情感性及任务类型为自变量，以主观评价及脑区激活水平为因变量，采用重复测量方差分析，揭示了视听表达及任务类型对用户交互体验的神经机制。

通过上述研究，本文得出以下主要结论：

7.1.1 关键拟人化外观维度的确定

销售量排名前五的服务机器人均具备面部与身体特征的拟人化设计。拟人化机器人的销售量显著高于非拟人化机器人，且具备面部和身体特征的机器人销售量显著高于无面部或无身体特征的机器人。因此，面部与身体外观维度被确定为服务机器人拟人化设计的关键维度。

7.1.2 多维外观拟人化对用户接受意愿的调节机制

(1) 服务机器人的感知温暖和感知能力正向影响用户的接受意愿以及用户的情感体验（愉悦度和唤醒度）；情感体验正向影响接受意愿。

(2) 服务机器人面部拟人条件下（vs. 身体拟人），感知温暖对用户接受意愿的影响更强；而服务机器人身体拟人条件下（vs. 面部拟人），感知能力对用户接受意愿的影响更强。

(3) 用户情感体验在服务机器人感知温暖、感知能力对用户接受意愿影响之间发挥了中介效应，并且，服务机器人面部拟人时（vs. 身体拟人），用户愉悦度作为感知温暖和接受意愿之间的中介效应更大。

7.1.3 多维外观拟人化对主观评价及眼动特征的影响

(1) 服务机器人面部或手臂的拟人化能更有效地引发积极评价、吸引更多注意力。

(2) 面部和手臂的拟人化可能对用户刻板印象产生不同的影响，手臂的拟人化主要增强了对能力的感知，而面部的拟人化同时增强了用户对其能力和温暖的感知。

(3) 服务机器人方形的头部虽然吸引了更多注意力，但其受到了偏见的负面影响；相对而言，圆头则受到了积极评价。

(4) 圆柱形躯干的用户偏好更高，躯干和手臂一致的拟人设计导致了瞳孔直径的增加。

(5) 当其他外观特征无法吸引用户注意力时，躯干成为了中心焦点，吸引了更多关注。

7.1.4 多感官交互设计对主观评价及大脑激活的影响

(1) 情感语音作为关键社交线索，显著提升用户的愉悦度、唤醒度和满意度，并增强对机器人“温暖感”与“能力感”的认知评价。

(2) 在缺乏表情符号时，情感声音有助于缓解用户的不适；而在表情符号呈现条件下，若声音缺乏情感特征，易引发感知冲突与不协调感。

(3) 声音缺乏情绪特征时，视觉表情符号可有效提升情感表达力；而当声音情绪丰富时，视觉提示作用减弱，表明听觉韵律在传达社交意图中更具主导性。

(4) 情感交互效果受任务类型调节：在主观任务中情感设计显著增强用户

评价与大脑激活，在客观任务中效应相对减弱。

7.2 研究局限

(1) 初始印象的局限性。研究仅关注用户对服务机器人的初始印象，未考虑长期交互中用户态度的动态变化以及感知温暖与感知能力可能产生的相互作用。

(2) 服务场景的局限性。研究仅考察了单一服务场景，未涵盖多样化场景的差异，比较场景差异对用户主观评价和行为的影响。

(3) 拟人化设计元素的不足。研究采用的拟人化设计元素和变化范围有限，未能全面探索最佳拟人化设计方案。未来研究可结合感性工程学原则，扩展设计元素，将用户情感需求转化为更优化的设计原型。

(4) 自变量的局限性：研究仅关注语音类型和表情符号的影响，未考虑用户个性特征、文化背景和社会情境等因素。未来研究应综合考虑多种影响因素，构建更系统的人机交互理论框架。

7.3 研究工作展望

(1) 长期交互研究。通过纵向实验或自然场景下的长期跟踪调查，探索用户与服务机器人在长期互动中的情感动态变化及行为影响，揭示持续交互中的情感塑造机制。

(2) 多样化服务场景研究：扩展研究至不同服务场景（如医疗、教育、零售等），比较场景差异对用户主观评价、情感体验和接受意愿的影响，为不同场景下的机器人设计提供针对性指导。

(3) 拟人化设计的优化：运用感性工程学原则，扩展服务机器人的设计元素（如声音、运动特征等），探索更符合用户情感需求的拟人化设计方案，并验证其在不同交互情境中的效果。

(4) 多因素综合研究：综合考虑用户个性特征、文化背景、社会情境等因素，探索其在水机情感交互中的作用，构建更系统和完善的水机交互理论框架，为情感机器人设计与应用提供更具实践指导意义的理论支撑。

参考文献

- [1] 许丽颖, 喻丰. 机器人接受度的影响因素[J]. 科学通报, 2020, 65(6): 496-510.
- [2] Wirtz J, Patterson P G, Kunz W H, et al. Brave new world: Service robots in the frontline[J]. Journal of Service Management, 2018, 29(5): 907-931.
- [3] Mahdi H, Akgun S A, Saleh S, et al. A survey on the design and evolution of social robots - Past, present and future[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 156: 104193.
- [4] Noble S M, Mende M. The future of artificial intelligence and robotics in the retail and service sector: Sketching the field of consumer-robot-experiences[J]. Journal of the Academy of Marketing Science, 2023, 51(4): 747-756.
- [5] 朱翊敏, 梁嘉明, 吴继飞. 聪明, 还是可爱——服务机器人属性对顾客满意的影响[J]. 营销科学学报, 2023, 3(4): 41-59.
- [6] 袁雪纯. 面向情感识别的类人型机器人动作交互设计研究[D]. 河北: 河北工业大学, 2021.
- [7] Hwang J, Park T, Hwang W. The effects of overall robot shape on the emotions invoked in users and the perceived personalities of robot[J]. Applied Ergonomics, 2013, 44(3): 459-471.
- [8] Liu X, Yi X, Wan L C. Friendly or competent? The effects of perception of robot appearance and service context on usage intention[J]. Annals of Tourism Research, 2022, 92: 103324.
- [9] Zhu D H, Chang Y P. Robot with humanoid hands cooks food better?: Effect of robotic chef anthropomorphism on food quality prediction[J]. International Journal of Contemporary Hospitality Management, 2020, 32(3): 1367-1383.
- [10] Mori M. Bukimi no tani [the uncanny valley].[J]. Energy, 1970, 7: 33.
- [11] Mehrabian A, Russell J. An approach to environmental psychology[M]. Mass: The MIT Press, 1974.
- [12] Mehrabian A. Pleasure-arousal-dominance: A general framework for describing

- p>and measuring individual differences in Temperament[J].
- Current Psychology*
- , 1996, 14(4): 261-292.
- [13] Russell J A, Ward L M, Pratt G. Affective quality attributed to environments: A factor analytic study[J]. *Environment and behavior*, 1981, 13(3): 259-288.
- [14] Donovan R, Rossiter J. Store atmosphere: an environmental psychology approach[J]. *Journal of retailing*, 1982, 58(1): 34-57.
- [15] Zhang Y, Cao Y, Proctor R W, et al. Emotional experiences of service robots' anthropomorphic appearance: a multimodal measurement method[J]. *Ergonomics*, 2023, 66(12): 2039-2057.
- [16] Fiske S T, Cuddy A J C, Glick P, et al. A model of (often mixed) stereotype content: competence and warmth respectively follow from perceived status and competition[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 2002, 82(6): 878-902.
- [17] Fiske S T, Cuddy A J C, Glick P. Universal dimensions of social cognition: warmth and competence[J]. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 2007, 11(2): 77-83.
- [18] Bagozzi R P. The Self-Regulation of Attitudes, Intentions, and Behavior[J]. *Social Psychology Quarterly*, 1992, 55(2): 178-204.
- [19] Lazarus R S. *Emotion and Adaptation*[M]. Oxford University Press, 1991.
- [20] Chi O H, Gursoy D, Chi C G. Tourists' Attitudes toward the Use of Artificially Intelligent (AI) Devices in Tourism Service Delivery: Moderating Role of Service Value Seeking[J]. *Journal of Travel Research*, 2022, 61(1): 170-185.
- [21] Mano H, Oliver R L. Assessing the Dimensionality and Structure of the Consumption Experience: Evaluation, Feeling, and Satisfaction[J]. *Journal of Consumer Research*, 1993, 20(3): 451-466.
- [22] 许丽颖, 喻丰, 邬家骅, 等. 拟人化: 从“它”到“他” [J]. *心理科学进展*, 2017, 25(11): 1942-1954.
- [23] Epley N, Waytz A, Cacioppo J T. On seeing human: A three-factor theory of anthropomorphism.[J]. *Psychological Review*, 2007, 114(4): 864-886.
- [24] Waytz A, Epley N, Cacioppo J T. Social cognition unbound: Insights into anthropomorphism and dehumanization[J]. *Current Directions in Psychological*

- Science, 2010, 19(1): 58-62.
- [25] Phillips E, Zhao X, Ullman D, et al. What is human-like? decomposing robots' human-like appearance using the anthropomorphic robot (ABOT) database[J]. IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction, 2018: 105-113.
- [26] Duffy B R. Anthropomorphism and the social robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 42(3): 177-190.
- [27] Kim S Y, Schmitt B H, Thalmann N M. Eliza in the uncanny valley: anthropomorphizing consumer robots increases their perceived warmth but decreases liking[J]. Marketing Letters, 2019, 30: 1-12.
- [28] Chung H, Kang H, Jun S. Verbal anthropomorphism design of social robots: Investigating users' privacy perception[J]. Computers in Human Behavior, 2023, 142: 107640.
- [29] Stirrat M, Perrett D I. Valid facial cues to cooperation and trust: Male facial width and trustworthiness[J]. Psychological Science, 2010, 21(3): 349-354.
- [30] Todorov A, Olivola C Y, Dotsch R, et al. Social attributions from faces: determinants, consequences, accuracy, and functional significance[J]. Annual Review of Psychology, 2015, 66: 519-545.
- [31] Song Y, Luximon A, Luximon Y. The effect of facial features on facial anthropomorphic trustworthiness in social robots[J]. Applied Ergonomics, 2021, 94: 103420.
- [32] Chen C H, Jia X. Effects of head shape, facial features, camera, and gender on the perceptions of rendered robot faces[J]. International Journal of Social Robotics, 2023, 15(1): 71-84.
- [33] Ren Z, Guo F, Li M, et al. The effect of robot's facial features on users' perception: Evidence from subjective, pupillometry, and electroencephalography measures[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2023, 40(22): 7375-7388.
- [34] Sims V K, Chin M G, Sushil D J, et al. Anthropomorphism of robotic forms: A response to affordances?[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics

- Society Annual Meeting, 2005, 49(3): 602-605.
- [35] Godfroy-Cooper M, Sandor P, Miller J, et al. The interaction of vision and audition in two-dimensional space[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2015, 9.
 - [36] Collignon O, Girard S, Gosselin F, et al. Audio-visual integration of emotion expression[J]. *Brain Research*, 2008, 1242: 126-135.
 - [37] Stienen B M C, Tanaka A, De Gelder B. Emotional voice and emotional body postures influence each other independently of visual awareness[J]. *PloS One*, 2011, 6(10): e25517.
 - [38] Vines B W, Krumhansl C L, Wanderley M M, et al. Cross-modal interactions in the perception of musical performance[J]. *Cognition*, 2006, 101(1): 80-113.
 - [39] Costa S, Soares F, Santos C. Facial Expressions and Gestures to Convey Emotions with a Humanoid Robot[C]//HERRMANN G, PEARSON M J, LENZ A, et al. *Social Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2013: 542-551.
 - [40] Aly A, Tapus A. Multimodal adapted robot behavior synthesis within a narrative human-robot interaction[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2015: 2986-2993.
 - [41] Salem M, Rohlfing K, Kopp S, et al. A friendly gesture: Investigating the effect of multimodal robot behavior in human-robot interaction[C]//2011 RO-MAN. 2011: 247-252.
 - [42] Cramer H, Goddijn J, Wielinga B, et al. Effects of (in)accurate empathy and situational valence on attitudes towards robots[C]//2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). 2010: 141-142.
 - [43] Zhang J, Sharkey A J C. It's not all written on the robot's face[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(11): 1449-1456.
 - [44] Bennett C C, Šabanović S, Fraune M R, et al. Context congruency and robotic facial expressions: Do effects on human perceptions vary across culture?[C]//The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. 2014: 465-470.
 - [45] Savela N, Turja T, Oksanen A. Social Acceptance of Robots in Different

- Occupational Fields: A Systematic Literature Review[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2018, 10(4): 493-502.
- [46] Nass C, Moon Y. Machines and Mindlessness: Social Responses to Computers[J]. *Journal of Social Issues*, 2000, 56(1): 81-103.
- [47] Carpinella C M, Wyman A B, Perez M A, et al. The Robotic Social Attributes Scale (RoSAS): Development and Validation[C]//*Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017: 254-262.
- [48] Dou X, Wu C F, Lin K C, et al. Effects of Different Types of Social Robot Voices on Affective Evaluations in Different Application Fields[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2021, 13(4): 615-628.
- [49] Yogeewaran K, Złotowski J, M L, et al. The interactive effects of robot anthropomorphism and robot ability on perceived threat and support for robotics research[J]. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2016, 5(2): 29-47.
- [50] Tomkins S S. Affect, imagery, consciousness: Vol. I. The positive affects[M]. Oxford, England: Springer, 1962.
- [51] 李森, 李明明, 郭伏, 等. 基于眼动追踪和脑电技术的多维设计特征产品外观的用户情感预测模型[J]. *人类工效学*, 2019, 25(5): 26-33.
- [52] Lang P J. The Cognitive Psychophysiology of Emotion: Fear and Anxiety[M]. London, England: Routledge, 1985.
- [53] Chan M. Mobile-mediated multimodal communications, relationship quality and subjective well-being: An analysis of smartphone use from a life course perspective[J]. *Computers in Human Behavior*, 2018, 87: 254-262.
- [54] Guo F, Cao Y, Ding Y, et al. A multimodal measurement method of users' emotional experiences shopping online[J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2015, 25(5): 585-598.
- [55] Li M, Guo F, Fang C, et al. Multisensory integration effect of humanoid robot appearance and voice on users' affective preference and visual attention[J]. *Behaviour & Information Technology*, 2023, 42(14): 2387-2406.
- [56] Zhang T, Kaber D B, Zhu B, et al. Service robot feature design effects on user

- p perceptions and emotional responses[J].
- Intelligent Service Robotics*
- , 2010, 3(2): 73-88.
- [57] Kim L H, Domova V, Yao Y, et al. Effects of a co-located robot and anthropomorphism on human motivation and emotion across personality and gender[C]//2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). 2022: 155-162.
- [58] Pantanowitz A, Kim K, Chewins C, et al. Addressing the eye fixation problem in gaze tracking for human computer interface using the vestibulo-ocular reflex[J]. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2020, 21: 100488.
- [59] 李强, 侯艳红, 苗丹民, 等. 不同情绪模式图片眼动特征的研究[J]. *中国行为医学科学*, 2006(12): 1121-1122.
- [60] Simola J, Le Fevre K, Torniainen J, et al. Affective processing in natural scene viewing: Valence and arousal interactions in eye-fixation-related potentials[J]. *NeuroImage*, 2015, 106: 21-33.
- [61] Khalighy S, Green G, Scheepers C, et al. Quantifying the qualities of aesthetics in product design using eye-tracking technology[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015, 49: 31-43.
- [62] Tzafilkou K, Protogeris N. Diagnosing user perception and acceptance using eye tracking in web-based end-user development[J]. *Computers in Human Behavior*, 2017, 72: 23-37.
- [63] Hu X, Zhuang C, Wang F, et al. fNIRS Evidence for Recognizably Different Positive Emotions[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13.
- [64] Wheeler R E, Davidson R J, Tomarken A J. Frontal brain asymmetry and emotional reactivity: A biological substrate of affective style[J]. *Psychophysiology*, 1993, 30(1): 82-89.
- [65] Guo F, Fang C, Li M, et al. How do Robot Touch Characteristics Impact Users' Emotional Responses: Evidence from ECG and fNIRS[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2024, 16(3): 619-634.
- [66] Lu X, Li T, Xia Z, et al. Connectome-based model predicts individual differences in propensity to trust[J]. *Human Brain Mapping*, 2019, 40(6): 1942-1954.

- [67] Duncan J, Owen A M. Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands[J]. *Trends in Neurosciences*, 2000, 23(10): 475-483.
- [68] Heim St, Opitz B, Müller K, et al. Phonological processing during language production: fMRI evidence for a shared production-comprehension network[J]. *Cognitive Brain Research*, 2003, 16(2): 285-296.
- [69] Burton M W, Small S L, Blumstein S E. The Role of Segmentation in Phonological Processing: An fMRI Investigation[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000, 12(4): 679-690.
- [70] Friederici A D, Alter K. Lateralization of auditory language functions: A dynamic dual pathway model[J]. *Brain and Language*, 2004, 89(2): 267-276.
- [71] Kunda Z, Spencer S J. When do stereotypes come to mind and when do they color judgment? A goal-based theoretical framework for stereotype activation and application[J]. *Psychological Bulletin*, 2003, 129(4): 522-544.
- [72] Liu Y, Li F, Tang L H, et al. Detection of humanoid robot design preferences using EEG and eye tracker[C]//2019 International Conference on Cyberworlds (CW). Kyoto, Japan: IEEE, 2019: 219-224.
- [73] Huang D, Chen Q, Huang S (Sam), et al. Consumer intention to use service robots: a cognitive–affective–conative framework[J]. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 2024, 36(6): 1893-1913.
- [74] Park S. Multifaceted trust in tourism service robots[J]. *Annals of Tourism Research*, 2020, 81: 102888.
- [75] Murphy J, Gretzel U, Pesonen J. Marketing robot services in hospitality and tourism: the role of anthropomorphism[J]. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, 2019, 36(7): 784-795.
- [76] Lv X, Liu Y, Luo J, et al. Does a cute artificial intelligence assistant soften the blow? The impact of cuteness on customer tolerance of assistant service failure[J]. *Annals of Tourism Research*, 2021, 87: 103114.
- [77] Tay B, Jung Y, Park T. When stereotypes meet robots: The double-edge sword of robot gender and personality in human–robot interaction[J]. *Computers in Human Behavior*, 2014, 38: 75-84.

- [78] Kirmani A, Hamilton R W, Thompson D V, et al. Doing Well versus Doing Good: The Differential Effect of Underdog Positioning on Moral and Competent Service Providers[J]. *Journal of Marketing*, 2017, 81(1): 103-117.
- [79] Gorn G J, Jiang Y, Johar G V. Babyfaces, Trait Inferences, and Company Evaluations in a Public Relations Crisis[J]. *Journal of Consumer Research*, 2008, 35(1): 36-49.
- [80] Tussyadiah I P, Park S. Consumer Evaluation of Hotel Service Robots[C]//STANGL B, PESONEN J. *Information and Communication Technologies in Tourism 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 308-320.
- [81] 张昆, 任怡林. 情感的中介效应: 网络游戏用户认知与使用行为意向[J]. *新闻与传播评论*, 2020, 73(1): 32-46.
- [82] Kolbl Ž, Diamantopoulos A, Arslanagic-Kalajdzic M, et al. Do brand warmth and brand competence add value to consumers? A stereotyping perspective[J]. *Journal of Business Research*, 2020, 118: 346-362.
- [83] Nenkov G Y, Scott M L. “So Cute I Could Eat It Up”: Priming Effects of Cute Products on Indulgent Consumption[J]. *Journal of Consumer Research*, 2014, 41(2): 326-341.
- [84] Bradley M M, Lang P J. Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential[J]. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 1994, 25(1): 49-59.
- [85] Cao Y, Proctor R W, Ding Y, et al. Is an anthropomorphic app icon more attractive than a non-anthropomorphic one? A case study using multimodal measurement[J]. *International Journal of Mobile Communications*, 2022, 20(4): 419-439.
- [86] Harris-Watson A M, Larson L E, Lauharatanahirun N, et al. Social perception in Human-AI teams: Warmth and competence predict receptivity to AI teammates[J]. *Computers in Human Behavior*, 2023, 145: 107765.
- [87] Hayes A. PROCESS : A Versatile Computational Tool for Observed Variable Mediation , Moderation , and Conditional Process Modeling 1[C]. 2012.

- [88] Choi S, Mattila A S, Bolton L E. To Err Is Human(-oid): How Do Consumers React to Robot Service Failure and Recovery?[J]. *Journal of Service Research*, 2021, 24(3): 354-371.
- [89] Chang Y, Zhang C, Li T, et al. Social cognition of humanoid robots on customer tolerance of service failure[J]. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 2024, 36(7): 2347-2366.
- [90] Li M, Guo F, Ren Z, et al. A visual and neural evaluation of the affective impression on humanoid robot appearances in free viewing[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2022, 88: 103159.
- [91] Burleigh T J, Schoenherr J R, Lacroix G L. Does the uncanny valley exist? An empirical test of the relationship between eeriness and the human likeness of digitally created faces[J]. *Computers in Human Behavior*, 2013, 29(3): 759-771.
- [92] Kwak S S, Kim J S, Choi J J. The effects of organism-versus object-based robot design approaches on the consumer acceptance of domestic robots[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2017, 9(3): 359-377.
- [93] Faul F, Erdfelder E, Lang A G, 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.
- [94] Bergkvist L, Rossiter J R. The predictive validity of multiple-item versus single-item measures of the same constructs[J]. *Journal of Marketing Research*, 2007, 44(2): 175-184.
- [95] Lindgaard G, Fernandes G, Dudek C, et al. Attention web designers: You have 50 milliseconds to make a good first impression![J]. *Behaviour & Information Technology*, 2006, 25(2): 115-126.
- [96] Liu L, Guo F, Zou Z, et al. Application, Development and Future Opportunities of Collaborative Robots (Cobots) in Manufacturing: A Literature Review[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2022, 40(4): 915-932.
- [97] Bartneck C, Kulić D, Croft E, et al. Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2009, 1: 71-81.

- [98] TOGAMI H. Affects on visual search performance of individual differences in fixation time and number of fixations[J]. *Ergonomics*, 1984, 27(7): 789-799.
- [99] Andreassi J L. *Psychophysiology: Human Behavior and Physiological Response*[M]. New York: Psychology Press, 2010.
- [100] Henderson R R, Bradley M M, Lang P J. Emotional imagery and pupil diameter[J]. *Psychophysiology*, 2018, 55(6): e13050.
- [101] Guo K, Tunnicliffe D, Roebuck H. Human spontaneous gaze patterns in viewing of faces of different species[J]. *Perception*, 2010, 39(4): 533-542.
- [102] Rosenthal-von Der Pütten A M, Krämer N C. How design characteristics of robots determine evaluation and uncanny valley related responses[J]. *Computers in Human Behavior*, 2014, 36: 422-439.
- [103] Janisse M P. Pupil size, affect and exposure frequency[J]. *Social Behavior and Personality: an international journal*, 1974, 2(2): 125-146.
- [104] Ham J, Cuijpers R H, Cabibihan J J. Combining robotic persuasive strategies: The persuasive power of a storytelling robot that uses gazing and gestures[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2015, 7(4): 479-487.
- [105] Li M, Guo F, Wang X, et al. Effects of robot gaze and voice human-likeness on users' subjective perception, visual attention, and cerebral activity in voice conversations[J]. *Computers in Human Behavior*, 2023, 141: 107645.
- [106] Luria M, Forlizzi J, Hodgins J. The effects of eye design on the perception of social robots[C]//2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). 2018: 1032-1037.
- [107] Ferstl Y, Kokkinara E, Mcdonnell R. Facial features of non-player creatures can influence moral decisions in video games[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2017, 15(1): 1-12.
- [108] Kalegina A, Schroeder G, Allchin A, et al. Characterizing the design space of rendered robot faces[C]//Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018: 96-104.

- [109] 张赞. 服务机器人拟人化视觉特征对用户接受度的影响机制研究——从情感体验的视角[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.
- [110] Tsiourti C, Weiss A, Wac K, et al. Multimodal Integration of Emotional Signals from Voice, Body, and Context: Effects of (In)Congruence on Emotion Recognition and Attitudes Towards Robots[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2019, 11(4): 555-573.
- [111] Gerdes A B M, Alpers G W, Braun H, et al. Emotional sounds guide visual attention to emotional pictures: An eye-tracking study with audio-visual stimuli[J]. *Emotion (Washington, D.C.)*, 2021, 21(4): 679-692.
- [112] Gendron M, Crivelli C, Barrett L F. Universality reconsidered: Diversity in making meaning of facial expressions[J]. *Current Directions in Psychological Science*, 2018, 27(4): 211-219.
- [113] Glikson E, Riordan M A. Beneficial outcomes of (appropriate) nonverbal displays of negative affect in virtual teams[J]. *Computers in Human Behavior*, 2024, 154: 108165.
- [114] Yu S, Zhao L. Emojifying chatbot interactions: An exploration of emoji utilization in human-chatbot communications[J]. *Telematics and Informatics*, 2024, 86: 102071.
- [115] Inbar Y, Cone J, Gilovich T. People's intuitions about intuitive insight and intuitive choice[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 2010, 99(2): 232-247.
- [116] Wang C, Li Y, Fu W, et al. Whether to trust chatbots: Applying the event-related approach to understand consumers' emotional experiences in interactions with chatbots in e-commerce[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2023, 73: 103325.
- [117] Babel F, Kraus J, Miller L, et al. Small Talk with a Robot? The Impact of Dialog Content, Talk Initiative, and Gaze Behavior of a Social Robot on Trust, Acceptance, and Proximity[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2021, 13(6): 1485-1498.
- [118] Castelo N, Bos M W, Lehmann D R. Task-dependent algorithm aversion[J].

- Journal of Marketing Research, 2019, 56(5): 809-825.
- [119] Makowski D, Pham T, Lau Z J, et al. NeuroKit2: A Python toolbox for neurophysiological signal processing[J]. Behavior Research Methods, 2021, 53(4): 1689-1696.
- [120] Balconi M, Fronda G, Bartolo A. Affective, Social, and Informative Gestures Reproduction in Human Interaction: Hyperscanning and Brain Connectivity[J]. Journal of Motor Behavior, 2021, 53(3): 296-315.
- [121] Gray J R, Braver T S, Raichle M E. Integration of emotion and cognition in the lateral prefrontal cortex[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(6): 4115-4120.
- [122] Vernet M, Quentin R, Chanes L, et al. Frontal eye field, where art thou? Anatomy, function, and non-invasive manipulation of frontal regions involved in eye movements and associated cognitive operations[J]. Frontiers in Integrative Neuroscience, 2014, 8.
- [123] Paus T. Location and function of the human frontal eye-field: A selective review[J]. Neuropsychologia, 1996, 34(6): 475-483.
- [124] Muggleton N G, Juan C H, Cowey A, et al. Human Frontal Eye Fields and Visual Search[J]. Journal of Neurophysiology, 2003, 89(6): 3340-3343.
- [125] Hou X, Zhang Z, Zhao C, et al. NIRS-KIT: a MATLAB toolbox for both resting-state and task fNIRS data analysis[J]. Neurophotonics, 2021, 8(1): 010802.
- [126] Cope M, Delpy D T. System for long-term measurement of cerebral blood and tissue oxygenation on newborn infants by near infra-red transillumination[J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 1988, 26(3): 289-294.
- [127] Fishburn F A, Ludlum R S, Vaidya C J, et al. Temporal Derivative Distribution Repair (TDDR): A motion correction method for fNIRS[J]. NeuroImage, 2019, 184: 171-179.
- [128] Yorgancigil E, Yildirim F, Urgen B A, et al. An exploratory analysis of the neural correlates of human-robot interactions with functional near infrared spectroscopy[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2022, 16: 883905.
- [129] Wittfoth M, Schardt D M, Fahle M, et al. How the brain resolves high conflict

- p>
situations: double conflict involvement of dorsolateral prefrontal cortex[J]. NeuroImage, 2009, 44(3): 1201-1209.
- [130] Uno T, Kawai K, Sakai K, et al. Dissociated roles of the inferior frontal gyrus and superior temporal sulcus in audiovisual processing: top-down and bottom-up mismatch detection[J]. PloS One, 2015, 10(3): e0122580.
- [131] Becker K M, Rojas D C. Prosodic influence in face emotion perception: evidence from functional near-infrared spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 14345.
- [132] Brancucci A, Lucci G, Mazzatenta A, et al. Asymmetries of the human social brain in the visual, auditory and chemical modalities[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 364(1519): 895-914.
- [133] Kim K W, Lee S W, Choi J, et al. Neural correlates of text-based emoticons: a preliminary fMRI study[J]. Brain and Behavior, 2016, 6(8): e00500.
- [134] Li Z, Gao X, Zhang Y, et al. A Functional Trade-off between Prosodic and Semantic Cues in Conveying Sarcasm: Interspeech 2024[J]. Proceedings of Interspeech 2024, 2024: 1070-1074.
- [135] Smith D T, Jackson S R, Rorden C. Repetitive transcranial magnetic stimulation over frontal eye fields disrupts visually cued auditory attention[J]. Brain Stimulation, 2009, 2(2): 81-87.
- [136] 恒刘, 欣赵. 视-听注意神经机制研究综述[J]. 心理学进展, 2023, 13(3): 1039.
- [137] Ning M, Duwadi S, Yücel M A, et al. fNIRS dataset during complex scene analysis[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2024, 18.
- [138] Bower A H, Steyvers M. Perceptions of AI engaging in human expression[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 21181.
- [139] Panidi K, Vorobiova A N, Feurra M, et al. Dorsolateral prefrontal cortex plays causal role in probability weighting during risky choice[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 16115.
- [140] Guha A, Spielberg J, Lake J, et al. Effective connectivity between Broca's area

and amygdala as a mechanism of top-down control in worry[J]. Clinical psychological science : a journal of the Association for Psychological Science, 2020, 8(1): 84-98.

- [141] Maier M, Leonhardt A, Blume F, et al. Neural dynamics of mental state attribution to social robot faces[J]. Social Cognitive and Affective Neuroscience, 2025, 20(1): nsaf027

附录

附录 1

服务机器人接受意愿调查

尊敬的女士/先生：您好！非常感谢您参加这次有关商场服务机器人接受度的调查。此次调查只需花费您大约 5 分钟的时间。我们非常珍视您的意见，也保证对所有数据进行保密，所以请您放心填写。感谢您的支持和配合！

1、您的年龄？【单选题】

- ☐ 18 岁以下
- ☐ 18~24 岁
- ☐ 25~30 岁
- ☐ 31~40 岁
- ☐ 41~50 岁
- ☐ 51~60 岁
- ☐ 61 岁及以上

2、您的性别？【单选题】

- ☐ 男
- ☐ 女

3、您的最高学历（含目前在读）是？【单选题】

- ☐ 小学及以下
- ☐ 初中
- ☐ 高中/中专/技校
- ☐ 大学专科
- ☐ 大学本科
- ☐ 硕士研究生及以上

4、您目前的婚姻状况： 【单选题】

- ☐ 已婚
- ☐ 未婚

5、您目前从事的职业： 【单选题】

- ☐ 全日制学生
- ☐ 事业单位工作人员
- ☐ 政府机构工作人员
- ☐ 企业工作人员
- ☐ 个体工商户
- ☐ 其他

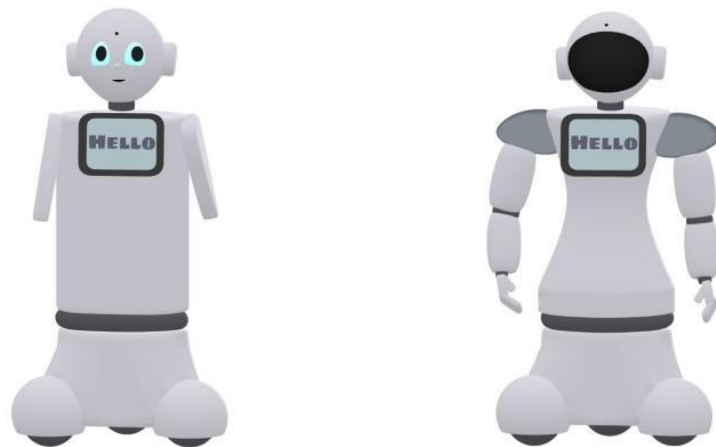
6、您的月收入情况： 【单选题】

- ☐ 4000 元以下
- ☐ 4000-6000 元
- ☐ 6000-8000 元
- ☐ 8000-10000 元
- ☐ 10000 元以上

7、是否使用过或体验过商场服务机器人 【单选题】

- ☐ 是
- ☐ 否

情景介绍：想象一下您与朋友在一家商场的餐馆里聚餐，此时，您想活跃一下聚餐的氛围，接着服务机器人向您驶来。请分别对两种类型的机器人进行评价：



一号机器人:



8、看到此服务机器人后，您觉得自己的愉悦程度（不愉悦-愉悦：1-9） 【打
分题】（请填 1-9 数字打分）

看到机器人后，觉得自己愉快或不愉快。1 分为非常不愉悦,9 分为非常愉悦，您
的评分是 ____分

9、看到此服务机器人后，您觉得自己的唤醒程度（不兴奋-兴奋：1-9） 【打
分题】（请填 1-9 数字打分）

看到机器人后，觉得自己兴奋、激动或提不起精神。1 分为非常不兴奋,9 分为非常兴奋，您的评分是 ____分

10、【打分题】请填 1-7 数字打分

我认为这个服务机器人是温暖的_____

我认为这个服务机器人是有善意的_____

我认为这个服务机器人是值得信赖的_____

我认为这个服务机器人是真诚的_____

11、【打分题】请填 1-7 数字打分

我认为这个服务机器人是能干的_____

我认为这个服务机器人是有效率的_____

我认为这个服务机器人是灵巧的_____

我认为这个服务机器人是聪明的_____

12、【打分题】请填 1-7 数字打分

我很愿意使用这个服务机器人_____

我很愿意接受该服务机器人的服务_____

我计划下次继续使用该服务机器人_____

二号机器人：



13、看到此服务机器人后，您觉得自己的愉悦程度（不愉悦-愉悦：1-9）【**打分题**】（请填 1-9 数字打分）

愉悦度：看到机器人后，觉得自己愉快或不愉快。1 分为非常不愉悦,9 分为非常愉悦，您的评分是 ____分

14、看到此服务机器人后，您觉得自己的唤醒程度（不兴奋-兴奋：1-9）【**打分题**】（请填 1-9 数字打分）

唤醒度：看到机器人后，觉得自己兴奋、激动或提不起精神。1 分为非常不兴奋,9 分为非常兴奋，您的评分是 ____分

15、【**打分题**】请填 1-7 数字打分

我认为这个服务机器人是温暖的____

我认为这个服务机器人是有善意的____

我认为这个服务机器人是值得信赖的____

我认为这个服务机器人是真诚的____

16、【**打分题**】请填 1-7 数字打分

我认为这个服务机器人是能干的____

我认为这个服务机器人是有效率的____

我认为这个服务机器人是灵巧的____

我认为这个服务机器人是聪明的____

17、【**打分题**】请填 1-7 数字打分

我很愿意使用这个服务机器人____

我很愿意接受该服务机器人的服务____

我计划下次继续使用该服务机器人____

附录 2

4 个不同目的地的对话脚本

对话脚本 1（目的地：烟台）

客观任务	
发言人	对话内容
用户:	Pepper, 请查看下周一去烟台的航班。
机器人:	好的, 下周一从合肥到烟台的航班包括, 深圳航空 ZH6620, 上午 9 点十五起飞, 10 点半到达, 票价 320 元, 以及中国航空 CA8832, 下午 3 点半起飞, 5 点十分到达, 票价 380 元。还有什么需要我做的吗?
用户:	查看下周一烟台的天气。
机器人:	好的, 下周一烟台的天气将是阴天, 大概率不会降雨, 温度在 17 到 24 摄氏度之间, 西南风 3 到 4 级, 空气质量指数良好, 紫外线强度 5 级, 请注意防晒, 湿度为百分之 61, 体感较为舒适。还有什么需要我做的吗?
用户:	搜索烟台机场附近的酒店。
机器人:	好的, 我已经筛选出以下烟台机场附近的酒店。汉庭酒店距离机场 8 公里, 乘车大约需要 13 分钟, 每晚至少 260 元。如家酒店距离机场 11 公里, 乘车大约需要 20 分钟, 每晚至少 210 元。还有什么需要我做的吗?
主观任务	
用户:	为我推荐愉快的景点游玩攻略。(主观任务)
机器人:	好的, 以下是为您推荐游玩攻略。我猜您想前往蓬莱阁风景区, 在这里体验自然与人文结合的美景。或者前往烟台山的老城区, 了解烟台的历史与文化。还推荐您前往月亮湾, 享受迷人的海景。还有什么需要我做的吗?
用户:	为我推荐一些特色美食。(主观任务)
机器人:	好的, 以下是为您推荐的美食。我猜您可能想前往天天渔港老烟台饭馆, 很多当地人推荐这里。您可能喜欢这里的烟台焖子、蓬莱小面、胶东鲅鱼水饺等, 这些都是烟台当地有名的特色美食。还有什么需要我做的吗?
用户:	为我推荐一些购物娱乐地点。
机器人:	好的, 以下是为您推荐购物娱乐地点。我猜您可能想前往芝罘区大悦城, 在这里享受购物、休闲、娱乐带来的美好时光。还推荐您前往养马岛上的海岛来信精品店, 在这购买烟台特色文创产品。还有什么需要我做的吗?

对话脚本 2（目的地：太原）

客观任务	
发言人	对话内容
用户:	Pepper, 请查看下周一去太原的航班。
机器人:	好的, 下周一从合肥到太原的航班包括, 深圳航空 ZH9707, 上午 9 点四十起飞, 11 点四十到达, 票价 400 元, 以及中国航空 CA8420, 下午 6 点半起飞, 8 点四十到达, 票价 480 元。还有什么需要我做的吗?
用户:	查看下周一太原的天气。

机器人:	好的,下周一太原的天气将是多云,大概率不会降雨,温度在 17 到 29 摄氏度之间,西北风 3 到 4 级,空气质量指数良好,紫外线强度 7 级,请注意防晒,湿度为百分之 66,体感较为舒适。还有什么需要我做的吗?
用户:	搜索太原机场附近的酒店。
机器人:	好的,我已经筛选出以下太原机场附近的酒店。汉庭酒店距离机场 14 公里,乘车大约需 24 分钟,每晚至少 180 元。如家酒店距离机场 10 公里,乘车大约需要 18 分钟,每晚至少 220 元。还有什么需要我做的吗?
主观任务	
用户:	为我推荐愉快的景点游玩攻略。(主观任务)
机器人:	为您推荐以下游玩景点。我猜您想前往晋祠景区,在这里可以参观古建雕塑和园林杰作。或者前往山西博物院,了解三晋大地的文明史。还推荐您前往双塔公园,在这里欣赏山水美景。希望我能帮到你。
用户:	为我推荐一些特色美食。(主观任务)
机器人:	为您推荐以下特色美食。我猜您可能想前往老太原菜馆,很多太原当地人推荐这里。您可能喜欢这家餐厅的太原过油肉、糖醋丸子以及百花烧麦等,这些都是太原当地有名的特色美食。希望我能帮到你。
用户:	为我推荐一些购物娱乐地点。
机器人:	为您推荐以下购物地点。我猜您可能想前往茂业天地,在这里享受购物、休闲、娱乐带来的美妙时光。还推荐您前往钟楼街晋礼,在这购买具有太原特色的文创纪念品和非遗手工。希望我能帮到你。

对话脚本 3 (目的地:温州)

客观任务	
发言人	对话内容
用户:	Pepper, 请查看下周一去温州的航班。
机器人:	好的,下周一从合肥到温州的航班包括,深圳航空 ZH7501,早上 7 点五十起飞,12 点五十到达,票价 450 元,以及中国航空 CA6324,下午 4 点十五起飞,9 点半到达,票价 480 元。还有什么需要我做的吗?
用户:	查看下周一温州的天气。
机器人:	好的,下周一温州的天气将是阴天,大概率不会降雨,温度在 20 到 27 摄氏度之间,西北风 1 到 2 级,空气质量指数良好,紫外线强度 5 级,请注意防晒,湿度为百分之 63,体感较为舒适。还有什么需要我做的吗?
用户:	搜索温州机场附近的酒店。
机器人:	好的,我已经筛选出以下温州机场附近的酒店。汉庭酒店距离机场 15 公里,乘车大约需要 26 分钟,每晚至少 210 元。如家酒店距机场 9 公里,乘车大约需要 16 分钟,每晚至少 280 元。还有什么需要我做的吗?
主观任务	
用户:	为我推荐愉快的景点游玩攻略。(主观任务)
机器人:	为您推荐以下游玩景点。我猜您想前往雁荡山风景区,在这里能感受瀑布的壮丽景色。或者前往墨池坊,感受温州的历史文化。还推荐您前往江心屿,在这里体验瓯江蓬莱的自然美景。希望我能帮到你。
用户:	为我推荐一些特色美食。(主观任务)

机器人:	为您推荐以下特色美食。我猜您可能想前往温州的益展坊餐馆，很多当地人推荐这里。您可能会喜欢这家餐厅的温州鱼丸、敲虾面以及猪脏粉等，这些都是温州当地有名的特色美食。希望我能帮到你。
用户:	为我推荐一些购物娱乐地点。
机器人:	为您推荐以下购物地点。我猜您可能想前往五马街，在这里享受购物、娱乐、休闲带来的美妙时光。还推荐您前往南塘书盒，收集老城印象明信片等文创品，以及温州特色纪念品。希望我能帮到你。

对话脚本 4（目的地：贵阳）

客观任务	
发言人	对话内容
用户:	Pepper, 请查看下周一去贵阳的航班
机器人:	好的，下周一从合肥到贵阳的航班包括，深圳航空 ZH3656，上午 8 点起飞，13 点五十到达，票价 500 元，以及中国航空 CA6451，下午 2 点四十五起飞，8 点二十到达，票价 520 元。还有什么需要我做的吗？
用户:	查看下周一贵阳的天气。
机器人:	好的，下周一贵阳的天气将是多云，大概率不会降雨，温度在 18 到 27 摄氏度之间，西北风 3 到 4 级，空气质量指数良好，紫外线强度 6 级，请注意防晒，湿度为百分之 64，体感较为舒适。还有什么需要我做的吗？
用户:	搜索贵阳机场附近的酒店。
机器人:	好的，我已经筛选出以下贵阳机场附近的酒店。汉庭酒店距离机场 20 公里，乘车大约需要 24 分钟，每晚至少 200 元。如家酒店离机场 30 公里，乘车大约需要 50 分钟，每晚至少 160 元。还有什么需要我做的吗？
主观任务	
用户:	为我推荐愉快的景点游玩攻略。（主观任务）
机器人:	好的，以下是为您推荐游玩攻略。我猜您想前往天河潭风景区，感受山与水的自然美景。或者前往甲秀楼，让您了解贵阳的历史与文化。还推荐您前往黔灵山公园，体验自然与城市的和谐共处。还有什么需要我做的吗？
用户:	为我推荐一些特色美食。（主观任务）
机器人:	好的，以下是为您推荐的美食。我猜您可能想前往贵阳的柒食贵阳味餐厅，很多当地人推荐这里。您可能会喜欢这家餐厅的酸汤鱼、牛肉粉以及肠旺面等，这些都是贵阳当地有名的特色美食。还有什么需要我做的吗？
用户:	为我推荐一些购物娱乐地点。
机器人:	好的，以下是为您推荐购物娱乐地点。我猜您可能想前往国贸逸天城，在这里体验购物、娱乐、休闲带来的美妙时光。还推荐您去青云集市，在这里您可以找到许多具有贵阳特色的文创产品。还有什么需要我做的吗？

攻读硕士学位期间参与的科研项目工作及研究成果

已发表或录用的论文

- [1] Zhang, Y., Cao, Y., Liu, Y., et al. Intelligent Human-Computer Interaction Interface: A Bibliometric Analysis of 2010–2022[C]// Lecture Notes in Computer Science. 2023: 590–604.
- [2] 张翊, 操雅琴. 类人服务机器人感知温暖与感知能力对接受意愿的影响——拟人化维度的调节作用[J]. 洛阳师范学院学报, 2024, 43(08): 31-35.

致谢

时光荏苒，岁月如梭。硕士研究生阶段即将结束，回首三年求学时光，感慨良多。于此论文完成之际，谨向在学术道路上给予我支持与帮助的师长、亲友致以最诚挚的谢意。

首先，衷心感谢我的导师操雅琴教授。操老师治学严谨、学识渊博，始终以高度的责任感和深厚的学术素养引领我前行。在科研过程中，她悉心指导、耐心倾听，帮助我不断突破思维瓶颈，攻克研究难题。她言传身教，不仅使我学术上不断成长，更让我明晰了为人处世之道。在此，我向操老师致以最深切的感谢！

感谢学院各位教师的悉心教诲与无私奉献。课堂上的深入讲解、课后的悉心指导，使我在专业学习与研究实践中不断进步。你们的言传身教，将成为我今后职业与人生道路上的宝贵财富。

感谢我的父母。你们始终是我最强有力的后盾，是我不断追求理想与前行的动力源泉。无论顺境或逆境，你们的理解与鼓励始终伴我左右。感恩你们多年来的辛劳与付出，我会以更坚定的步伐回报你们的养育之恩。

感谢在学习与生活中给予我支持与陪伴的同学与朋友，是你们的关心与鼓励使我在求学路上充满温暖与动力。感谢师兄师姐以及学弟学妹们，在实验的准备与实施过程中，你们提供了大量宝贵的帮助，保障了研究工作的顺利开展。特别感谢我的女友汪思琦，在我迷茫与困顿之际，你始终不离不弃，给予我坚定的支持与温柔的鼓励，帮助我走出低谷，重新坚定信念，与你一同迎接更加美好的未来。同时，也要感谢所有参与实验的同学，没有你们的积极配合，我无法顺利获取本研究所需的关键数据。感谢你们三年来的陪伴与支持，愿我们都能在各自的旅程中收获成长与幸福。

最后，我要感谢所有评审专家，感谢你们在百忙之中抽出时间审阅我的论文，并提出宝贵的意见和建议。你们的专业和严谨让我受益匪浅，也让我对未来的研究之路充满了信心。感谢教育部人文社科规划基金项目（24YJA630003），安徽省自然科学基金面上项目（2208085MG183）提供的资金支持。

“追风赶月莫停留，平芜尽处是春山。”研究生阶段虽已接近尾声，人生之路仍在继续。衷心感谢所有的遇见，愿大家在各自的征程中前程似锦、万事顺遂。