

分类号: TS 941.17

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210410101

题 目 基于脑认知科学的卫衣设计情感分析与建模

英文并列

题 目 HOODIE EMOTION ANALYSIS AND

MODELING BASED ON DRAIN

COGNITIVE SCIENCE

学生姓名: 张海燕

指导教师: 袁惠芬

专 业: 纺织科学与工程

研究方向: 服装设计与工程

答辩日期: 2024年05月24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后果由本人承担。

学位论文作者签名：张海燕

日期：2024 年 6 月 3 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： 张海燕

日期：2024 年 6 月 3 日

指导教师签名： 曹惠芬

日期：2024 年 6 月 3 日

基于脑认知科学的卫衣设计情感分析与建模

摘 要

在消费升级和情感体验高度重视的今天，服装消费市场也正在经历重大变革和转型升级。服装情感化设计成为品牌链接消费者的关键，不仅要满足功能性和美观性的基本属性需求，还要满足消费者的高阶情感需求。款式、色彩和图案作为消费者反馈的第一视觉信号，在考虑消费者情感的服装设计中扮演着重要角色，但现有研究主要为设计元素创新设计及单一元素，缺乏各元素间的相互作用对消费者情感体验的影响研究。而研究方法主要以主观测量方法为主，虽然为理解消费者情感反应提供了一定的支持，但受限于主观表达，缺乏对消费者情感变化的内在认知及变化机制的研究。因此引入眼动追踪、脑电波等先进技术能提供更客观的数据，揭示消费者的即时反应和情感认知。同时，联合不同设计元素能更准确地理解和预测服装设计对消费者情感体验的影响，为设计提供更有效的指导。

基于此，本文提出基于脑认知科学的服装情感设计方法，主要从服装款式、色彩、图案三大设计要素着手，将 PAD 情绪模型（P 愉悦度、A 激活度、D 优势度）眼追踪技术及脑电技术相结合，采用多模态测量手段，收集用户主客观情绪指标数据，开展用户情感认知的机理研究，为服装情感化设计研究提供新的理论模型和方法，并为实现通过生理指标预测用户的情感状态提供实验支持。本文以女士卫衣为

例，验证以上理论方法的可行性。同时本文提出的方法具有普适性，也适用于其他产品情感化设计，具体内容如下：

（1）针对卫衣款式、色彩及图案设计要素对用户情感影响的问题，在现有服装情感研究的基础上，综合考虑卫衣的款式、色彩及图案设计要素构建卫衣样本案例库。通过调查问卷收集消费者对卫衣的偏好，从而确定卫衣款式、色彩及图案实验样本设计要素。其中款式数目包含廓形、袖型及领型三水平，色彩搭配数目包含单色、双色及三色三水平，图案数目包含图案大小及图案位置两水平。采用 CorelDRAW X8 共绘制 50 款不同卫衣样本，作为卫衣情感认知实验的刺激材料。

（2）针对如何获取用户对卫衣的主观情绪变化问题，本研究以上一阶段设计制作的 50 款卫衣刺激材料为基础，采用 PAD 情绪模型作为测量工具。通过评估用户在观察不同款式、色彩及图案的卫衣时的情绪反应，收集其主观情绪指标，并构建了反映用户情感认知的主观数据集，对其进行不同维度的相关性分析。结果表明，用户在不同设计元素卫衣中情感类别存在显著差异；卫衣款式、色彩及图案各设计要素在不同情感维度上均存在差异性。说明服装设计元素作为情感表达的媒介，能够激发用户愉悦度、激活度及优势度等一系列复杂的情感反应。

（3）针对如何获得用户情感变化的内在认知机制问题，运用多模态测量手段，以上一阶段制作的刺激材料为基础，采集用户在观看

卫衣设计方案时的眼动指标和脑电信号，并构建了反映用户情感认知的生理数据集，对其进行相关性分析和生理指标的提取。结果表明，用户对不同卫衣的生理认知机制中存在显著差异。同时，主观与客观的情感认知存在一定的偏差。说明服装设计与人类感知之间存在复杂的相互作用，人对服装的情感不仅仅通过直观的视觉审美来判断，还涉及到更为复杂的生理和心理层面的反应。

（4）针对实验操作复杂且成本高耗时的问题，构建了基于前馈神经网络（Feedforward Neural Network, FNN）的卫衣情感识别模型。依据上一阶段多模态测量中获取的用户主客观数据集，通过重复测量方差分析、主成分分析及相关性分析确定与用户情感显著相关的主客观指标，并采用 FNN 搭建卫衣情感识别模型。结果表明，将眼动及脑电生理指标作为输入量，主观情绪作为输出量，构建的卫衣情感识别模型可以精准地对用户情感进行识别，模型的识别准确高达 98%。说明将主客观情绪相结合进行量化，采用 FNN 构建服装情感识别模型，可以获得较好的分类性能，更好的实现服装情感识别。

本研究综合考量服装设计元素，并配合客观的生理测量技术，通过在感性工学和认知心理学的理论框架下构建服装情感识别模型，即有效地拓展了服装情感化设计的理论边界；也节约了实验成本有效辅助了服装产品的情感化设计，为企业提供多模态的情感测量方法，从而帮助设计师创造出更符合消费者情感需求的服装产品。

关键词:情感识别, PAD 情绪量表, 眼动追踪, 事件相关电位(ERPs),
前馈神经网络

HOODIE EMOTION ANALYSIS AND MODELING BASED ON BRAIN COGNITIVE SCIENCE

ABSTRACT

Today, consumer upgrades and emotional experience attach great importance to, and the clothing consumer market is also experiencing major changes and transformation and upgrading. The emotional design of clothing has become the key to brand link consumers. It must not only meet the basic attributes of functionality and aesthetics, but also meet consumers' high-level emotional needs. As the first visual signal of consumer feedback, styles, colors and patterns play an important role in the costume design of consumer emotions, but the existing research is mainly for design elements and single elements. Research on the Emotional Experience of Consumer Emotion. The research method is mainly based on the method of observation. Although it provides some support for understanding consumers' emotional response, it is limited by subjective expression and lacks research on the inherent cognition and change mechanism of consumer emotional changes. Therefore, advanced technologies such as eye tracing and brain waves can provide more objective data, revealing consumers' instant response and emotional cognition. Meanwhile, combining different design elements can more accurately understand and predict the impact of clothing design on consumer emotional experience, and provide more effective guidance for design.

This article proposes the emotional design method based on brain recognition science. It mainly starts with the three major design elements of clothing style, color, and pattern. Combining technology, adopting multi-mode measuring methods, collecting user-objective emotional indicators data, conducting mechanism research on user emotional cognition, providing new theoretical models and methods for clothing emotional design research, and predicting users through physiological indicators to predict users through physiological indicators Emotional status provides experimental support. This article takes the women's sweater as an example to verify the feasibility of the above theoretical methods. Meanwhile, the method proposed in this article is universal, and it is also suitable for the emotional design of other products. The specific content is as follows:

(1) Building on the foundation of existing research on the emotional impacts in clothing design, a comprehensive approach was taken to construct a hoodie sample library by considering the design elements of style, color, and pattern. Consumer preferences for sweatshirts were determined through a survey questionnaire, which then guided the selection of design elements like style, color, and pattern for the experimental sample designs of the sweatshirts. The number of styles included three levels: silhouette, sleeve type, and collar type; the color matching included three levels: monochrome, two-color, and three-color; and the pattern number included two levels: pattern size and pattern placement. Using CorelDRAW X8, 50 different hoodie samples were created as stimulus materials for the hoodie emotional cognition experiment.

(2) Addressing the issue of how to capture users' subjective emotional changes towards hoodies, this study, based on the 50 hoodie stimulus materials designed and produced in the previous phase, employed the PAD

emotional model as a measurement tool. By assessing users' emotional reactions when observing hoodies of different styles, colors, and patterns, their subjective emotional indicators were collected, and a subjective dataset reflecting users' emotional cognition was constructed. The dataset was analyzed for correlations across different dimensions. The results showed that there were significant differences in the categories of emotions among users when exposed to hoodies with different design elements; differences were found across all design elements of hoodie style, color, and pattern in various emotional dimensions. This indicates that clothing design elements, as mediums of emotional expression, can evoke a series of complex emotional reactions in users, including pleasure, arousal, and dominance.

(3) In response to the issue of how to obtain the intrinsic cognitive mechanism of user emotional changes, multimodal measurement methods were used. Based on the stimulus materials produced in the previous stage, eye movement indicators and EEG signals of users when viewing hoodie design schemes were collected. A physiological dataset reflecting user emotional cognition was constructed, and correlation analysis and extraction of physiological indicators were carried out. The results indicate that there were significant differences in the physiological cognitive mechanisms of users towards different hoodies. Meanwhile, there was a certain deviation in subjective and objective emotional cognition. There was a complex interaction between clothing design and human perception, and human emotions towards clothing were not only judged through intuitive visual aesthetics, but also involved more complex physiological and psychological responses.

(4) To address the complexity, high cost, and time-consuming nature of experimental operations, a hoodie emotion recognition model based on

Feedforward Neural Network (FNN) was constructed. Based on the user subjective and objective datasets obtained from the multimodal measurement in the previous phase, significant subjective and objective indicators related to user emotions were identified through repeated measures ANOVA, principal component analysis, and correlation analysis. These indicators were used to develop the hoodie emotion recognition model using FNN. The results showed that by using eye movement and brainwave physiological indicators as inputs and subjective emotions as outputs, the constructed hoodie emotion recognition model could accurately identify user emotions, with an identification accuracy of up to 98%. This indicates that quantifying both subjective and objective emotions and employing FNN to construct a clothing emotion recognition model can achieve better classification performance and more effectively realize clothing emotion recognition.

The study comprehensively considered clothing design elements and combined them with objective physiological measuring techniques. Through Constructing a clothing emotion recognition model within the theoretical framework of sensory engineering and cognitive psychology, it effectively expanded the theoretical boundaries of emotional design in clothing. This approach not only saved experimental costs but also effectively assisted in the emotional design of clothing products, providing businesses with multimodal emotional measurement methods. Consequently, it aided designers in creating clothing products that better meet the emotional needs of consumers.

Zhang Haiyan((Textile Science and Technology)

Supervised by Yuan Huifen

KEY WORDS: emotion recognition, pad emotion scale, eye tracking, event-related potentials (ERPs), feedforward neural network

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	V
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状及不足	2
1.2.1 情绪评估在情感识别中的研究现状	2
1.2.2 眼动信号在情感识别中的研究现状	4
1.2.3 脑电信号在情感识别中的研究现状	5
1.2.4 机器学习在情感识别中的研究现状	6
1.3 研究内容及方法	8
1.3.1 研究内容	8
1.3.2 主要研究方法	9
1.4 研究技术路线及创新点	10
1.4.1 研究技术路线	10
1.4.2 研究创新点	10
第 2 章 卫衣设计元素的主观情绪测量及分析	12
2.1 卫衣认知及审美偏好调研	12
2.1.1 问卷调研目的	12
2.1.2 问卷调研设计	12
2.1.3 问卷被试选择	12
2.1.4 问卷调研结果	13
2.2 卫衣设计元素情绪评估实验	13
2.2.1 实验样本标注	13
2.2.2 实验评估模型选择	14
2.2.3 情绪评估实验	15
2.3 实验结果及分析	17
2.3.1 卫衣 PAD 情绪类别分析	17
2.3.2 卫衣 PAD 多维度相关性分析	20
2.3.3 卫衣 PAD 多维度影响规律分析	21
2.4 本章小结	26

第 3 章 卫衣设计元素眼动指标特征提取及分析	27
3.1 实验部分	27
3.1.1 实验准备	27
3.1.2 实验流程	28
3.2 指标提取	28
3.2.1 指标相关性分析	29
3.2.2 指标主成分分析	31
3.3 实验结果及分析	37
3.3.1 指标差异性分析	37
3.3.2 眼动追踪图差异性分析	40
3.3.3 眼动指标与情绪评分相关性分析	42
3.4 本章小结	46
第 4 章 卫衣设计元素脑电指标特征提取及分析	47
4.1 实验部分	47
4.1.1 实验准备	47
4.1.2 实验流程	48
4.2 数据预处理	48
4.3 指标提取	50
4.3.1 指标相关性分析	51
4.3.2 指标主成分分析	53
4.4 实验结果及分析	60
4.4.1 早期成分分析	61
4.4.2 中期成分分析	67
4.4.3 晚期成分分析（P3 成分）	72
4.4.4 脑电指标与情绪评分的相关性分析	75
4.5 本章小结	78
第 5 章 服装情感模型构建及分析	79
5.1 前馈神经网络	79
5.1.1 前馈神经网络基本原理	79
5.1.2 前馈神经网络结构	80
5.2 前馈神经网络训练	81
5.2.1 训练样本准备	81
5.2.2 前馈神经网络搭建	82
5.2.3 模型训练	84
5.3 模型训练结果评估	85

5.3.1 迭代次数	85
5.3.2 混淆矩阵	86
5.3.3 ROC 曲线.....	86
5.3.4 训练误差	87
5.4 本章小结	88
第 6 章 结论与展望	89
6.1 研究结论	89
6.2 研究的不足与展望	90
参考文献	92
附录 1 卫衣喜好度调查问卷	100
附录 2 卫衣喜好度问卷调查结果	106
附录 3 模型运行代码	110
攻读学位期间所取得的相关科研成果	112
致谢	113

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

在消费升级和情感体验高度重视的今天，服装消费市场也正在经历着重大变革和转型升级，为了适应服装市场和消费者偏好的转变，服装设计与生产领域被迫采取灵活战略^[1]。在上述背景下，注重情感的设计理念显得尤为重要，其已成为连接世界各地消费者和市场的重要纽带，是助力品牌在激烈的市场竞争中脱颖而出^[2]的关键。因此，服装设计不仅要满足基本的功能性和美观性，更要深层次地探索并满足消费者对情感表达、文化身份认同以及环境可持续性的深刻需求。这种方法不仅对品牌的可持续发展战略至关重要，而且对营造一个健康、可持续的行业生态系统具有重要意义。而服装的款式、色彩和图案等视觉要素成为影响消费者购买决策的关键因素^[3-5]。因此，准确把握消费者对服装的情感需求成为提高服装设计成功率的核心，服装的情感设计已经成为企业和设计师关注的焦点，是实现服装价值的重要体现之一^[6]。

针对服装的情感化设计研究，当前比较主流的研究方法是感性工学理论，以消费者的情感需求为出发点，针对服装产品进行消费者的情感认知与偏好研究，探索服装与消费者情感需求的相关^[4]。然而，鉴于消费者情感认知的复杂性，传统的调查问卷方法在捕捉消费者的真实情感时存在局限性，难以从生理角度准确获取消费者内在的情感认知机制^[7]。随着现代认知科学的发展，生理测量技术如眼动追踪和脑电图分析等^[8]，带来了客观的生理测量手段，能够精准捕捉消费者在不同情感状态下的生理响应^[1]。眼动技术可以通过监测瞳孔大小等参数来追踪被试情绪的变化，同时，其生成的视觉路径和热力图揭示了被试对设计元素的兴趣集中区域。而在脑电图分析中，事件相关电位（ERP）方法利用成分分析、平均波幅、延迟时间、波形特征及脑电地形图等数据，揭示了被试在处理认知任务时的情绪态度^[9]。因此，利用眼动追踪和脑电技术作为生理指标测量工具，在认知科学领域中评估用户情绪反应，为服装设计的情感化测量提供了新的途径。

综上所述,传统的问卷调查或访谈等方法虽然能够了解用户的情感认知,但由于其高度主观性,往往会导致准确度不足和数据模糊。而随着生理测量技术的进步,研究者能够获得更加客观和准确的生理反应数据,弥补了传统方法在数据客观性方面的缺陷。因此本文就如何更好的表达服装与消费者情绪之间的关联,根据已有的情感计算在设计领域的应用研究,通过利用生理测量方法来研究和量化消费者的情绪感知,并搭建基于脑认知科学的服装情感识别模型。

1.1.2 研究意义

本研究采用主观与客观相结合的方式捕捉消费者对服装不同设计元素的内在情感机制,研究价值如下:

(1) 理论价值

消费者对于服装的情感认知是复杂的大脑活动过程^[10],本研究基于感性工学和认知心理学的理论,旨在开发一种服装情感识别模型,结合客观的生理测量技术,提出基于多模态测量的服装情感化设计方法。本课题通过量化服装设计元素与消费者情感反应之间的关系,理论上支持了服装情感化设计的研究,有效扩展了其理论范围。

(2) 实际应用价值

本研究在感性工学和认知心理学等理论研究背景下,采用 PAD 情绪测量、眼动追踪及脑电实验,综合服装设计要素、生理指标与消费者情感认知之间的映射关系,构建服装情感识别模型,节约了实验成本,有效的辅助服装产品情感化设计。此外,研究为企业提供了多模态情感测量的方法,增强了设计师掌握消费者情绪的精准度,具有显著的实用价值。

1.2 国内外研究现状及不足

1.2.1 情绪评估在情感识别中的研究现状

情绪在人类交流中扮演着至关重要的角色,一种由内外部因素触发的综合性心理和生理反应,涉及思维、感知和行为的各个方面^[11]。因此,情绪评估成了连接设计与人类情感的桥梁,旨在创造出能够引发情感共鸣或满足消费者情感需求的产品和服务。“情感计算”一词由日本学者 Nagamachi 提出,将消费者对产品的情感反应和意向转化为具体的设计要素,通过现代计算技术量化人类复杂、非

定性的情感反应，形成了感性数据库和相关知识库^[12]。1986 年，山本健一提出“感性工学”一词，随后发展为一个研究领域。长町三通过发表大量论文，进一步阐述了感性工学的理论、技术方法和应用规则，极大地推动了该领域的发展^[13-14]。感性工学是一种以用户为中心的设计方法，它侧重于捕捉用户对产品的情感反应和需求，并将这些反应和需求转化为与设计要素相联系的设计策略。随着“情感设计”研究领域在西方国家获得显著关注，“设计与情感国际学会”于 1999 年在荷兰的代尔夫特理工大学正式成立。这一事件象征着越来越多的研究人员开始投身于该研究方向^[15]。Hong-Bin Yan 等^[16]采用语义差异法和语言变量评估产品的 Kansei 属性，并通过以目标为导向的决策分析方法量化产品，满足消费者偏好，研究发现该方法有效地评估和量化产品的感性设计，满足不同消费者的心理需求。Min-Feng Lee 等^[17]在情感色彩数据的挖掘中，采用 Thayer 情绪模型，从使用价值和唤醒两个向量对情绪进行分类，并以 RGB 作为输入来收集情绪颜色，计算和预测了用户情绪。Tomio Jindo 等^[18]将感性工学理论应用到汽车内饰的造型和设计中。采用主观评价和语义差异法进行分析，收集有关印象和造型特征之间的关系，了解用户产生印象的条件，并将类似的造型设计方法应用到其他行业产品。我国情绪评估在设计领域的应用研究始于 2003 年，由李砚祖教授引入情感计算的研究方法^[19]。至此我国各个领域学者积极投入到有关研究中。汤凌洁^[20]、王松琴^[21]、沈羽中^[22]、罗仕鉴等^[23]分别对感性工学的研究方法、研究内容以及研究现状进行了详细的归纳整理；陈奕菲等人^[24]将情绪测量应用到文胸的设计研究中，从不同情感维度分析了消费者对文胸设计的喜好度。陈洋^[25]通过提取和转化情感意象词和服饰设计要素，对苗族耳饰进行创新设计，最终设计出符合现代消费者审美和情感需求的苗族特色服饰。侯佳等^[26]基于情感化设计理念，将红色文化进行整理，研究消费者情感需求和文化转译方法，构建了基于情感化设计理念的红色文创产品实践模型。景丽娜^[27]、刘璐瑶^[28]、张沛^[29]、王敏等^[30]，将基于情绪体验的设计原则应用于产品设计，探讨如何在不同设计领域内实施情绪化设计，包括植物景观、现代居住环境、软件用户界面以及家居纺织品设计等方面的应用。

国内外众多杰出学者对情绪评估在设计实践中的应用进行了系统的探索,并提出了一系列具有创新性的理论观点。这些研究从不同维度切入,拓展了情感评估方法在设计学科中应用的深度与广度。但在服装设计领域,研究者常将焦点聚集于色彩配比、图样创作规律等对视觉感知影响显著的设计元素,并探讨其对消费者情绪的影响。然而,这些研究往往倾向于从定性视角分析服装与人类情感的联系,缺乏将消费者对服装情绪反应进行量化的研究。因此,如何将人类情绪理论融入服装情感化设计,并构建出一套科学且有效的情绪评估方法,仍然是当前研究领域所亟待解决的课题,具有广阔的探索前景和理论价值。

1.2.2 眼动信号在情感识别中的研究现状

人类情绪的产生和表达是一个复杂的过程,而单纯依靠表情等外部行为来识别情绪往往不够准确,容易受到多种因素的影响^[31],而眼动追踪技术可以捕捉到更为微妙和深层的信息,包括一些不自觉的眼部活动,从而提供关于个体情绪状态的重要线索。通过分析眼动数据,研究者能够揭示个体在特定情境下的情绪反应,这不仅增强了情绪识别的准确性,也为理解情绪的复杂性开辟了新路径^[32]。目前,研究者们利用眼动技术深入探究情感识别,通过精细化的眼动分析,尝试解锁人类情绪表达的深层次机制,提升我们对情绪如何在不同环境下表达和变化的理解。O'Dwyer J 等^[33]将语音和眼睛注视特征相结合,用于连续情感预测,结果表明该组合方法在唤醒预测上提高 3.5 %,证明多模态分析在提高连续情感预测准确性方面的有效性。Black 等^[34]通过系统回顾 54 项符合入选标准的眼动追踪(ET)和脑电图(EEG)研究,探讨自闭症谱系障碍(ASD)患者面部情绪识别(FER)的神经基础和注意力相关性。研究揭示了 ASD 患者在视觉处理途径上的差异,并指出社交大脑功能的变化是如何影响其在整个发育轨迹中对面部情绪的处理。高杨等^[35]对眼动数据进行分析,针对服装定制平台的页面设计进行指导,增强服装定制小程序的消费导向能力。初建杰等^[36]通过形状文法设计实验和眼动实验,分析并验证了主观评价与眼动生理指标之间的高相关性,为服装纹样布局方案提供更加客观的评价方式。张宇红^[37]以智能冰箱的界面设计为研究案例,通过眼动追踪技术,分析用户在使用过程中出现的无意识认知评价和可用性指标,以此来指导智能冰箱界面的改进。刘春丽^[38]关注学龄前儿童对产品的直观

感受,利用眼动技术分析儿童观察产品时的反应,建立针对学龄前儿童的产品设计要素与感知映射模型,为设计师提供设计针对该年龄段儿童产品时的参考依据。

眼动追踪技术,作为一种凭借记录眼部动作来揭示认知过程的先进技术,其在用户界面设计、产品设计以及用户体验评价等多个领域的应用证明了其作为一种研究工具的独特价值。通过分析眼动指标和其他生理数据,研究者能够在一定程度上推断出消费者的情感状态和认知过程。但在利用该技术进行服装情绪识别的领域内,相关研究仍然相对匮乏,标志着该技术在服装情绪识别研究中尚处于起步阶段。深入探讨眼动数据与情绪之间的细致联系,以及如何更准确地通过眼动特征来区分不同的情绪状态,是目前研究中亟待解决的问题。因此,扩展眼动追踪技术在服装情绪研究中的应用,不仅对推动情绪识别领域的理论发展有重大意义,同时也对进一步利用生理数据来优化服装情感设计、提升服装产品体验具有实际应用价值。

1.2.3 脑电信号在情感识别中的研究现状

情感活动涉及到大脑中多个区域的交互和信息传递,其中神经细胞的活动聚集在人类大脑皮层,而与情感相关的大脑活动可以从脑电信号中检测到^[39]。通过脑电技术获得的特定生理指标能直接反映用户大脑的内部处理过程^[40]。在认知科学领域,事件相关电位技术通过分析波幅、成分、波形和地形图等脑电特征,已经成为测量和理解用户情绪变化的关键方法之一。研究者们通过刺激任务与脑电信号之间的关联,从中获取与被试者情感认知、判断及记忆等相关的 ERP 成分。Ding 等^[41]将手机造型作为研究用户偏好的载体,研究发现用户在最后的认知选择时能够引发较大的 LPP 成分。Lin 等^[42]通过调查网络语义,记录事件相关电位,被试者对桌椅套装进行风格匹配判断,发现不同设计风格的桌椅诱发的 ERP 表现出可靠的 N400 成分。Meza-Kubo V 等^[43]为了验证评估老年人使用认知刺激应用程序时的可行性,通过脑电实验,从脑电信号中识别愉快和不愉快的情绪,并将研究结果来评估老年人用户体验的可行性,构建了基于用户体验的神经网络模型。林丽等^[44]将眼动和脑电实验联合对消费者的行为进行脑电数据的时频分析及 ERP 中 P300 成分的提取,确定与意象相关的脑电指标,并构建岭回归产品形态的感性工学模型。杨程等^[45]通过结合行为学和脑电学实验,研究了形

状、颜色和材料等设计要素如何影响产品的辨识度。孙雪等^[46]采用事件相关电位方法，探索了软件更新行为的激励模式及机制，表明在软件更新的界面设计中，情绪唤醒度显著影响用户更新行为。胡梓煊等^[47]提出了一种基于 mRMR 特征优选方法的脑电信号情绪识别，对数据集中预处理后的脑电信号提取时域、频域、非线性、Hjorth 特征，构建特征向量。任佳园等^[48]系统介绍了脑电技术的原理和评价相关指标，归纳总结了事件相关电位在服装舒适性领域的应用现状，将脑电技术运用其中，从热环境、热感情绪变化及认知程度等方面提供技术帮助。李东等^[49]研究设计一种基于脑电技术的服装触感捕捉刺激器，利用 ERP 脑电分析验证其多次实验中的可重复性，成功标识出面料与皮肤接触时的情绪感受。陈东生等^[50]分析了脑电在服装舒适性评价中的应用原理，提出脑电波与服装情感之间的定量关系，最终达到用客观量值对人们的主观服装舒适性认识进行评价的目的，为满足舒适性要求的服装产品设计提供思路与方法。

脑电图（EEG）技术，作为一种凭借捕捉大脑电活动变化以探究认知和情绪过程的方法，已在产品设计、认知评估、用户体验以及产品效果评价等众多领域得到了广泛应用。但在服装情感化设计领域，该技术的研究仍然处于初级阶段。针对服装设计而言，脑电信号的分析可以提供一种创新途径，用于捕捉并理解消费者情感认知在大脑加工过程中的细微变化，这对于探索消费者对服装设计的情感反应和偏好具有潜在的价值。因此，加强对脑电技术在服装情感化设计应用的研究，不仅对于深化我们对服装设计中情感认知加工机制的理解具有理论意义，同时也对推动基于用户情感需求的个性化服装设计具有实际应用价值。

1.2.4 机器学习在情感识别中的研究现状

近年来，机器学习技术的融合极大地推动了情感识别领域的进步，它通过模仿人类的情感理解能力，使机器能够识别并响应人类的情绪状态。这一跨学科的研究领域结合了心理学、计算机科学、人机交互和数学等领域的知识^[51]。目前，国外的研究学者们利用机器学习技术研究如何更准确地理解和预测人类情绪，包括语言^[52]、面部表情^[53]、生理信号^[54]等。视觉和声音信号因易获取在实践中被广泛研究，而对于生理信号如脑电、心率或皮肤肌电等研究则因为设备要求更高、数据处理的复杂性，而研究相对较少。然而，生理信号因其不易被伪造和控制的

特征，在某些应用场景中得到了重视和发展。与此同时，情感识别的研究也逐渐应用于设计领域^[55]。设计师们开始尝试从情感的角度来研究产品设计问题，比如服装设计、界面设计等。利用机器学习技术来分析用户对设计元素的情感反应，进而优化设计，使其更贴近用户的情感需求^[56]。研究者们在这一领域也取得了一定的研究成果。例如，甘开宇^[57]通过机器学习方法分析脑电（EEG）数据，提出一种新的即时情感强度标记框架以探索人类情感状态变化。宋美佳^[10]提出一种结合多模态测量和 BP 神经网络模型的产品色彩情感化设计方案，对用户对产品色彩的情感进行有效预测。史英杰等^[58]基于机器学习的时尚穿搭推荐技术利用互联网时尚社区的海量穿搭数据学习穿衣搭配技巧，实现个性化的时尚穿搭推荐服务于时尚产业。胡新荣等^[59]提出了一种基于多层注意力机制的 BiGRU-SD-Attention 算法模型，通过精细化的情感特征提取与加权计算，有效提升了服装电商评论文本情感分析的准确率，达到了 94.23 %。

机器学习技术在情感识别领域已经取得显著进展，尤其在语音和面部表情情感分析以及算法及其性能的优化方面。这些成果为理解和预测人类情感状态开辟了新路径，对于提高人机交互的自然性和有效性具有重要意义。然而，目前的研究主要集中于这些传统的情感识别途径，而在应用机器学习技术于服装设计领域中，尤其是结合眼动追踪、脑电图技术（EEG）与主观情绪评估来进行模型训练的研究，则相对匮乏。这种研究不足限制了我们对于服装如何影响个人情感和认知过程的理解，也阻碍了服装情感化设计理念的进一步发展和应用。因此，利用机器学习技术，通过综合眼动追踪数据、脑电波特征以及用户的主观情绪报告，能够构建更为精细化和多维度的服装情感识别模型。这种跨学科的方法有望为理解消费者对服装设计的情感反应提供新的视角，并为基于情感驱动的个性化服装设计提供科学依据。开展此类研究不仅能够促进机器学习、心理学、时尚设计等多领域的融合与进步，而且对于推动服装设计向更为智能化、个性化发展方向转变具有实际意义。

综上所述，本课题旨在以卫衣作为研究载体，探究服装设计元素如何影响消费者的情绪反应。采用眼动追踪技术与脑电信号相结合的方法，获取关于个体在观察卫衣时的客观生理反应，同时采用 PAD 情绪测量方法获取主观情绪反应，

将眼动脑电指标数据相结合作为前馈神经网络模型的输入量,情感类别作为输出量,进行情感识别模型训练。不仅可以丰富情感计算与设计研究领域的理论基础和应用实践,还能为服装设计提供一种新的科学评价方法,量化分析人与服装之间情感的互动。本研究有望帮助设计师更好地了解并预测目标消费群体的情感需求和偏好,指导设计出更符合市场和消费者期待的服装。此外,本研究提出的技术与方法,亦可应用于广泛的产品和界面设计中,促进人机交互界面的优化,增加产品的情感价值,提升用户体验。因此,本研究的意义不仅在于科学探索,亦在于实际应用,对推动设计创新和人工智能领域有着重要的贡献。

1.3 研究内容及方法

1.3.1 研究内容

本文通过探讨服装设计元素与人类情绪反应之间的关联,在现有对服装情绪研究方法、研究现状分析基础上,以服装设计三要素款式、色彩、图案作为主要研究要素。以视觉感受进行眼动及脑电实验,结合 PAD 情感测量模型,以女士卫衣作为研究载体,对提出的服装情绪计算进行研究,构建以情感计算为基础的情感识别模型。本文拟展开的主要研究内容如下:

(1) 卫衣设计元素提取及情绪评估

通过对网络购物平台、时尚期刊等资料的收集整理,将女式卫衣的款式、图案、色彩三大版块的设计元素进行分析归纳,结合调查问卷收集现代消费者审美期望,对其进行设计元素的分析提取,进行实验样本图绘制用于后续研究。运用 PAD 情绪评估模型,结合 E-prime 心理实验技术,对参与者进行情绪评估,收集被试对卫衣各设计要素的主观情绪数据。然后对卫衣各设计元素进行主观情绪标注,采用相关性和描述性分析,探索被试对卫衣各设计要素在不同维度上的情感变化和特征,寻找卫衣各设计要素与消费者主观情绪之间的关联。

(2) 卫衣设计元素的眼动指标选取及分析

在研究内容(1)的基础上,采用眼动追踪技术对被试的视觉行踪变化进行记录,收集被试的眼动数据。对收集的眼动数据进行相关性和主成分分析,提取出与被试情感相关的具有代表性的眼动指标。然后对其进行描述性分析,探索被试在观看卫衣各设计要素时眼动指标的基本分布规律和差异性;将具有代

表性的指标与主观情绪之间进行相关性分析，探讨被试对卫衣设计元素的视觉特征在情感上的差异。

（3）卫衣设计元素的脑电指标选取及分析

在研究（1）的基础上，采用脑电技术对被试的实时脑电位变化进行记录，收集被试的脑电数据。对收集的脑电数据进行预处理，提取出卫衣的事件相关电位。对其进行相关性和主成分分析，提取出具有代表性的脑电指标。然后对其进行重复测量方差分析，探索被试在观看卫衣各设计元素时产生的脑电成分的基本规律和差异；将具有代表性的脑电指标与主观情绪之间进行相关性分析，探讨被试对卫衣各设计元素的脑电信号在情感上的差异。

（4）搭建卫衣情感识别模型

在研究（1）、研究（2）及研究（3）的基础上，确定用于构建情感建模的 PAD 情绪测量主观指标和眼动、脑电相关的客观生理指标。通过 PAD 情绪评估模型测量对卫衣情绪进行的情感类别划分作为输出量，眼动、脑电指标作为输入量，采用机器学习方法，利用前馈神经网络对卫衣的情感类别进行识别，搭建卫衣情感识别模型。

1.3.2 主要研究方法

（1）PAD 情绪评价法

通过对文献资料的研究及理论学习，了解卫衣设计元素特征，熟悉 PAD 情绪评估实验的相关研究理论和情绪方法，对不同设计元素卫衣进行主观情绪测量，将不同卫衣设计元素进行情绪标注，划分设计元素的情绪类别。

（1）生理测量法

绘制卫衣样本刺激图，通过被试的眼动追踪及脑电测量实验，获取被试对不同设计元素卫衣的眼动数据及事件相关电位，从客观角度分析被试对卫衣不同设计元素的情绪差异。

（3）联合分析法

通过联合分析法，将被试的主观情绪评估值与客观的生理测量值相结合，从多方面对服装整体设计元素中的情绪进行分析，将客观指标作为输入量，主观情绪类别作为输出量，并利用前馈神经网络搭建卫衣情感识别模型。

1.4 研究技术路线及创新点

1.4.1 研究技术路线

对应主要的研究内容，本文研究工作的技术路线如图 1-1 所示。

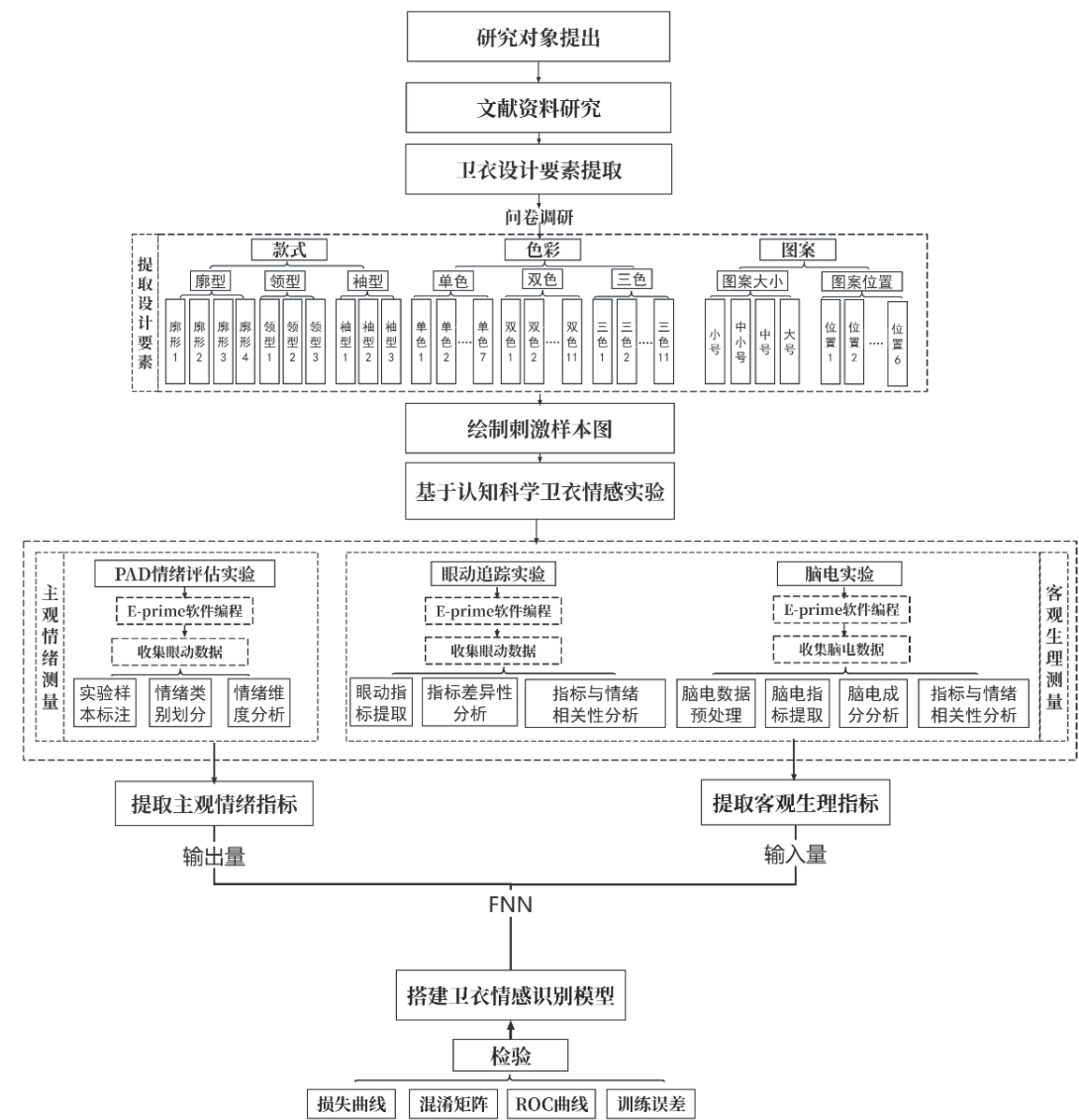


图 1-1 技术流程图

Fig. 1-1 Technical roadmap

1.4.2 研究创新点

(1) 采用卫衣作为研究对象，系统性地分析和评估了款式、色彩及图案设计元素的相互作用，及其在整体设计中如何影响消费者的情感体验，为理解服装设计元素综合作用下的情感影响提供了新的视角，并拓宽了服装情感化研究领域的理论框架。

（2）采用眼动追踪和脑电技术相结合的方法，创新性地构建了服装情绪识别模型。将消费者的情绪反应转化为可量化的数学数据，有效地刻画了人与服装之间的情感联系，为服装设计的情感化提供了科学基础，并为企业提供多模态的情感测量方法。

第 2 章 卫衣设计元素的主观情绪测量及分析

卫衣作为百搭的服饰单品，其设计不仅关乎外观美感，更深刻影响穿着者的情绪。为了更好的理解现代消费者对卫衣的喜好度及其情绪反应，本章首先通过调查问卷了解现代消费者对卫衣的喜好度和设计偏好。调查涵盖卫衣的款式、色彩及图案，通过问卷结果的统计分析，全面把握消费者对卫衣设计的整体偏好，为后续情绪测量提供参考。然后通过心理学实验 PAD 情绪测量，要求被试评价不同卫衣设计元素在愉悦度、激活度、优势度三个维度上的情绪感受。通过实验数据的收集和分析，将探究不同设计元素对消费者情绪状态的具体影响，为卫衣设计提供实践指导和改进建议。

2.1 卫衣认知及审美偏好调研

2.1.1 问卷调研目的

本文调研主要目的是为了了解现代消费者对女士卫衣的认知和审美偏好，消费者偏好哪些卫衣款式、色彩搭配及图案设计，从而根据调研结果挑选具有代表性的设计元素进行研究样本的设计，确保后续实验的研究意义。

2.1.2 问卷调研设计

本次调研以调查问卷为主要形式。首先通过服装时尚网站及网络购物平台收集具有代表性和销售量高的卫衣，对其所包含的设计元素进行分类，其中分为款式、色彩、图案三大类。然后根据设计元素的分类结果进行问卷内容设计。问卷具体包括简介和测试两部分，简介主要告知被试本次实验目的，测试内容为不同设计元素的女士卫衣名称及图片，被试需要根据自己的喜好在所列的选项中勾选他们喜好偏向的卫衣种类。问卷详细信息见附录 1。

2.1.3 问卷被试选择

实验参与者年龄主要集中在 18 至 30 岁之间，包括在校大学生和研究生。卫衣作为流行的休闲穿搭，在年轻群体中特别流行，它不仅舒适实用，同时也是年轻人表达自我的特定社交方式^[60]。18 至 30 岁的大学生及研究生是时尚消费的活跃群体，经常追求个性化和差异化的产品，因此，他们对卫衣的设计偏好可以为

市场提供宝贵的信息，指导卫衣的创新及定位。

2.1.4 问卷调研结果

本次调查共发出 200 份问卷，成功回收 186 份，其中 170 份问卷有效，有效回收率达到 91 %，无效问卷因明显敷衍而被排除。根据有效问卷结果提取选择基数大的设计元素作为卫衣的设计元素，对其进行进一步分类设计，具体分类设计如表 2-1 所示。

表 2-1 女士卫衣设计元素分类

Tab. 2-1 Classification of design elements for women's hoodies

设计要素	设计项目	设计目录
款式	领型	圆领、连帽领、半开领、V 领、POLO 领
	袖型	正肩袖、插肩袖、落肩袖
	廓型	开衫拉链型、短款茧型、OVERSIZE 型、结构直身型
色彩	单色	黑色、白色、灰色、黄色、蓝色、绿色、红色
	双色	黑白、黑红、黑蓝、红蓝、白灰、白红、白蓝、黄灰、灰蓝、
	三色	黑白灰、黑白红、黑白蓝、黑蓝红、黄蓝黑、白蓝绿、灰红
图案	图案大小	小号、中小号、中号、大号
	图案位置	中间、袖部、右上角、右下角、左上角、左下角

2.2 卫衣设计元素情绪评估实验

2.2.1 实验样本标注

本研究旨在分析女性卫衣的设计元素如何影响消费者的情绪体验，以探讨消费者对这些设计元素的情感连接及其情绪反应的正负面极性。利用 PAD 情绪模型，测量了参与者对卫衣样本的情绪反应，进一步通过情绪分类方法识别了不同样本引发的具体情绪类型及其极性，实现了对情绪反应的分类和标记。研究结果不仅揭示了参与者的情绪类别，还从愉悦度（P）、激活度（A）、优势度（D）三个维度探讨了各设计元素如何影响情绪。通过分析不同卫衣设计元素对被试情绪的影响，可以更加全面地了解消费者对卫衣设计元素的情感需求。根据 2.1 问卷调研结果提取实验样本设计元素，总共划分款式、色彩、图案三类设计元素，分别对其进行廓形、袖型、领型、肩型、单色、双色、三色、图案大小、图案位置进行

设计,共计 50 个具有代表性实验样本用于后续实验测评。样本编号如表 2-2 所示,表 2-3 为部分实验样本示例。

表 2-2 实验样本编号

Tab. 2-2 Experimental sample numbers

设计元素	编号
领型	L ₁ -L ₄
袖型	X ₁ -X ₃
廓型	K ₁ -K ₄
单色	D ₁ -D ₆
双色	S ₁ -S ₁₁
三色	H ₁ -H ₁₁
图案大小	T ₁ -T ₄
图案位置	W ₁ -W ₆

表 2-3 实验样品及编号（示例）

Tab. 2-3 Experimental samples and numbers (example)

			
K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
			
X ₂	X ₃	H ₃	D ₄

2.2.2 实验评估模型选择

本研究主要利用 PAD 情绪模型来评价参与者对实验样本的情绪响应。PAD 模型作为一个多维情绪理论框架,在社会和心理学的研究中被广泛采用^[61]。PAD 情绪模型是在 1974 年由 Mehrabian 等人提出^[62],主要用于评估被试正负情感状况,其中 P 表示愉悦度(Pleasure-Displeasure); A 表示激活度(Arousal-Nonarousal); D 表示优势度(Dominance-Submissiveness)。根据这三个维度正负极性可将人类情绪划分为八种具有不同情感的空间区域如表 2-4 所示。

表 2-4 PAD 值与情绪类别和极性转化关系

Tab. 2-4 Relationship between pad values and emotional category and polarity transformation

P	A	D	情绪类别	情绪极性
+P	+A	+D	高兴的	积极的
+P	+A	-D	依赖的	
+P	-A	+D	放松的	
+P	-A	-D	温顺的	
-P	-A	-D	无聊的	消极的
-P	-A	+D	蔑视的	
-P	+A	-D	焦虑的	
-P	+A	+D	敌意的	

2.2.3 情绪评估实验

(1) 实验工具

本实验采用的是中文版本的 PAD 简化情绪评分量表, 包含 12 项指标来衡量三大情绪维度: 愉悦度 (P)、激活度 (A) 和优势度 (D)。每个维度通过两组情感对立的词语定义, 而在另外两维度上保持一致性。参与者根据自己的情绪体验, 对每项指标进行 -4 至 4 的打分, 分为 9 个级别, 0 代表中性。分数的绝对值越高, 说明参与者对该情绪的认同感越强。情绪得分最终通过特定的标准化计算公式确定, 该公式利用了 12 个评分项中的第 n 项评分 (En) 来计算。

表 2-5 PAD 三维度归一化公式

Tab. 2-5 PAD three-dimensional normalization formula

情绪维度	归一化公式
愉悦度 P	$P = En1 - En4 + En7 - En10$
激活度 A	$A = -En2 + En5 - En8 + En11$
优势度 D	$D = En3 - En6 + En9 - En12$

(2) 实验设备

实验程序采用 E-prime3.0 (Experimenter's Prime) 软件编程实现, 内置自动记录程序, 自动记录被试在每一个项目上的评分。该软件是由美国 PST (Psychology Software Tools, Inc) 公司开发, 用于行为研究计算软件系统。软件

主要包括实验设计、毫秒数据记录收集以及数据初步分析等^[63]。研究者可根据试验要求定制视觉刺激的颜色、尺寸和图形等，展示在显示屏上，并确定被试者的响应方法，比如使用鼠标或键盘等。

（3）实验环境

本实验在环境为 $20\pm 25^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度在 $25\%\pm 35\%$ ，室内照明强度符合标准要求，确保光线温和且无屏幕反射，同时对室内进行声音隔离，确保环境安静。

（4）实验被试

本研究通过有偿方式招募了 30 位大学及研究生志愿者，包括 11 位男性和 19 位女性，年龄介于 18 至 30 岁之间，该年龄段参与者通常具备较高的认知能力。所有参与者均为自愿报名，具备正常视力或矫正后的正常视力，不包括色盲、色弱或患有其他精神疾病的个体。

（5）实验流程

实验开始前，由实验人员向被试讲解 PAD 情绪量表测量词汇含义，使其了解实验相关情绪评估标准。讲解结束后，被试端坐在于电脑前，与电脑屏幕保持 50-60 cm 的距离，右手放在鼠标上，所有评估通过鼠标点击相应分数完成实验。在正式实验开始电脑屏幕会随机播放 5 张刺激图作为练习，使被试熟习操作流程以及刺激反应方式。

实验利用 E-prime3.0 软件展示了 50 张图像，每张独立显示在带有白色背景的画面中央，以最小化干扰。流程简述如下：首先显示指导语，参与者读后点击鼠标开始。每个刺激前，画面中央会短暂出现“+”以集中注意力，持续 1000 ms，随后是 2000 ms 的白屏，以掩盖刺激，接着是 3000 ms 的刺激图像展示。图像消失后，画面显示 PAD 情绪量表题目，分三轮进行，每轮 4 题，参与者根据感受评分，系统自动进行题目切换直至完成所有评估。实验结束以结束语提示。具体流程如图 2-1 所示。

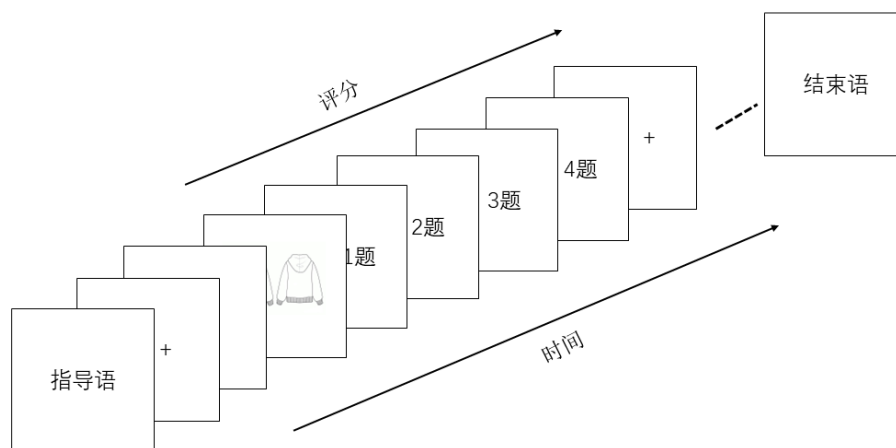


图 2-1 卫衣设计元素 E-prime 情绪评估实验流程

Fig. 2-1 Experimental process for e-prime emotional assessment of sweater design elements

2.3 实验结果及分析

本研究共收集了 18000 份原始数据(每个样本 12 个问题*50 份样本*30 位参与者)，实验数据利用 E-prime3.0 软件进行记录并转存至 Microsoft Excel 中。数据处理和分析则通过 Microsoft Excel 与 SPSS26.0 完成。

2.3.1 卫衣 PAD 情绪类别分析

(1) 样本 PAD 值与情绪类别标注结果

在本研究中，50 个包含款式、色彩和图案等元素的卫衣设计样本被使用于实验中，通过 E-prime3.0 软件收集参与者的评估数据。通过计算每个评分项的平均值，接着应用 PAD 归一化公式来计算样本的 P、A、D 值，进而进行情绪类别的分类并对每个样本的情绪类别进行标记。特别说明，若 PAD 值计算中某维度为 0，则将该样本划分至相应的两个情绪类别中的一个，本研究中默认选择大于 0 的类别进行归类。50 个实验样本刺激图通过评分最终获得 PAD 值及所属的情绪类别标注结果如表 2-6 所示。

表 2-6 50 个实验样本所得 PAD 值及所属情绪类别标注

Tab. 2-6 PAD values and emotional category labels obtained from 50 experimental samples

样本 编号	愉悦度 P	激活度 A	优势度 D	情绪类 别	样本 编号	愉悦度 P	激活度 A	优势度 D	情绪类 别
K ₁	0.80	0.13	0.17	高兴的	S ₈	1.33	-0.60	-0.03	温顺的

续表 2-6 50 个实验样本所得 PAD 值及所属情绪类别标注

Tab. 2-6 PAD values and emotional category labels obtained from 50 experimental samples

样本 编号	愉悦度 P	激活度 A	优势度 D	情绪类 别	样本 编号	愉悦度 P	激活度 A	优势度 D	情绪类 别
K ₂	0.33	0.27	0.07	高兴的	S ₉	1.00	1.63	1.30	高兴的
K ₃	0.97	-0.63	-0.07	温顺的	S ₁₀	0.27	1.60	0.83	高兴的
K ₄	0.37	-0.90	0.18	放松的	S ₁₁	0.27	1.00	-0.37	依赖的
X ₁	0.47	-0.57	-0.23	温顺的	H ₁	-0.33	0.17	1.43	敌意的
X ₂	0.07	0.37	-1.17	依赖的	H ₂	0.28	1.83	1.90	高兴的
X ₃	0.37	0.23	0.33	高兴的	H ₃	0.09	1.40	1.10	高兴的
L ₁	0.60	-0.23	0.43	放松的	H ₄	-0.24	0.10	1.00	敌意的
L ₂	0.30	0.13	0.37	高兴的	H ₅	0.47	0.70	1.70	高兴的
L ₃	1.10	0.63	0.07	高兴的	H ₆	0.27	-1.00	1.23	放松的
L ₄	1.33	-0.40	-0.43	温顺的	H ₇	0.25	1.67	0.77	高兴的
D ₁	-0.17	-1.57	1.63	蔑视的	H ₈	0.23	1.50	1.03	高兴的
D ₂	0.33	0.27	1.03	高兴的	H ₉	0.51	-0.50	1.07	放松的
D ₃	0.47	-1.37	-0.47	温顺的	H ₁₀	-0.04	0.77	0.83	敌意的
D ₄	0.84	1.33	1.87	高兴的	H ₁₁	0.17	0.93	0.67	高兴的
D ₅	0.93	1.43	0.07	高兴的	T ₁	0.57	0.37	-1.67	依赖的
D ₆	0.53	1.57	1.43	高兴的	T ₂	0.53	1.47	0.50	高兴的
D ₇	0.50	1.23	1.40	高兴的	T ₃	0.60	0.97	1.27	高兴的
S ₁	0.03	-0.27	1.20	放松的	T ₄	0.63	0.77	0.77	高兴的
S ₂	0.43	1.47	1.40	高兴的	W ₁	1.23	1.37	1.23	高兴的
S ₃	-1.70	-0.60	1.87	蔑视的	W ₂	0.70	1.37	-1.30	依赖的
S ₄	1.53	0.97	1.13	高兴的	W ₃	0.80	0.73	-1.17	依赖的
S ₅	1.80	-1.20	-0.80	温顺的	W ₄	0.97	1.67	-0.33	依赖的
S ₆	1.47	1.10	-1.90	依赖的	W ₅	1.20	1.53	-0.20	依赖的
S ₇	1.30	1.60	1.63	高兴的	W ₆	0.57	0.97	0.13	高兴的

(2) 样本 PAD 值的描述性分析

由表 2-7 可知，款式中所有设计元素 P 值的均值为 0.610，标准差为 0.372；A 值均值的均值为-0.088，标准差为 0.438；D 值的均值为-0.025，标准差为 0.438。色彩中所有设计元素的 P 值的均值为 0.442，标准差为 0.674；A 值的均值为 0.592，标准差为 1.033；D 值的均值为 0.895，标准差为 0.872。图案中所有设计元素的 P 值的均值为 0.780，标准差为 0.250；A 值的均值为 1.122，标准差为 0.400；D 值的均值为-0.077，标准差为 0.966。

表 2-7 设计元素均值标准差

Tab. 2-7 Mean standard deviation of design elements

	均值			标准差		
	P	A	D	P	A	D
款式	0.61	-0.09	-0.03	0.37	0.46	0.44
色彩	0.44	0.59	0.89	0.67	1.03	0.87
图案	0.78	1.12	-0.08	0.25	0.40	1.00

(3) 不同设计元素在 PAD 空间分布

由图 2-2 可知，其中 (b)、(c)、(d) 分别是以 PD、PA、AD 三个维度坐标轴通过两两组合得到的二维平面。以图 (b) PD 面为例，从图 (b) 中可以看出色彩设计元素主要集中在 PD 面的右上角，图案设计元素主要集中在 PD 面的右下方，款式设计元素整体分布在 PD 面靠右方。由此能直观看到实验样本的 PAD 值根据设计元素类型的不同而不同。

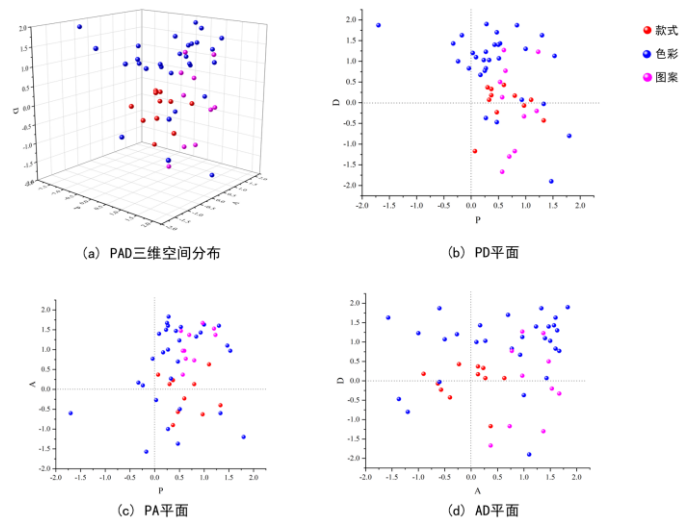


图 2-2 不同设计元素在 PAD 空间中的分布

Fig. 2-2 Distribution of different design elements in PAD space

(4) 样本情绪类别标注结果分析

由表 2-4 情绪分类和表 2-6 不同设计元素情绪类别标注结果可知, 在款式设计元素中领型、廓型及袖型获得的情绪类别均属于积极情绪类别, 说明卫衣在整体款式风格中受消费者喜爱对其接受度较高。在色彩设计元素中单色和双色设计大数获得的情绪类别属于积极情绪类别, 只有纯黑色和黑蓝搭配获得情绪类别属于消极情绪类别; 三色搭配中获得消极情绪类别大于单色和双色, 但大部分仍属于积极情绪类别, 说明在卫衣色彩设计中, 消费者更偏向于简洁单一的单色或双色搭配, 过多色彩元素被消费者接受的程度具有不确定性, 需要设计师在卫衣色彩设计方面需要谨慎对待。在图案设计元素中单一图案的大小及图案位置的设置获得的情绪类别均属于积极情绪类别, 说明简洁的图案在卫衣设计中受消费者接受度较高, 消费者受图案大小和位置的影响较小。

2.3.2 卫衣 PAD 多维度相关性分析

通过对 PAD 三维度的相关性分析, 从而量化不同维度之间的关系强度, 了解服装设计元素对消费者情绪反应的影响程度和方向^[64]。由表 2-8 可知, 在卫衣款式设计中愉悦度 P 和优势度 D 呈现较弱的正相关, 相关系数为 0.08; 而激活度 A 和愉悦度 P 及优势度 D 之间均呈现负相关, 相关系数分别为-0.13、-0.07, 说明不同款式卫衣使消费者的舒适感和自信感可以同时得到满足。由于卫衣款式有着更强的活动性和运动感的设计元素使其降低穿着者的愉悦度和支配感^[65]。卫衣色彩设计中愉悦度 P 和优势度 D 之间呈现负相关, 相关系数为-0.47; 激活度 A 与愉悦度 P 及优势度 D 之间均呈现正相关, 相关系数分别为 0.17、0.18, 说明在卫衣色彩搭配中当色彩设计愉悦度增加时, 会降低穿着者的支配感, 当卫衣色彩较为活跃时会增加穿着者的愉悦度和优势度, 活跃的色彩可以带来一种积极的情绪体验, 让穿着者感到更加愉快和自信^[66]。卫衣图案元素设计中愉悦度 P 与激活度 A、优势度 D 之间均呈现正相关, 相关系数分别为 0.54、0.14, 激活度 A 和优势度 D 之间呈正相关, 相关系数为 0.28, 说明卫衣图案大小和位置的设计在愉悦度、激活度以及优势度上均能增加穿着者的活跃度, 使穿着者更加自信和有控制力。

表 2-8 PAD 三维度相关性

Tab. 2-8 Correlation of the PAD Dimensions

元素	P	A	D	维度
款式	1.00	-0.13	0.08	P
	-0.13	1.00	-0.07	A
	0.08	-0.07	1.00	D
色彩	1.00	0.17	-0.47	P
	0.17	1.00	0.18	A
	-0.47	0.18	1.00	D
图案	1.00	0.54	0.14	P
	0.54	1.00	0.28	A
	0.14	0.28	1.00	D

2.3.3 卫衣 PAD 多维度影响规律分析

(1) 款式设计元素 PAD 不同维度影响规律

由图 2-3 可知, 愉悦度 P 在不同款式元素中均为正值, 在卫衣款式设计中整体带给穿着者的情绪感受为积极和愉快。根据款式设计元素的不用, 所有款式样本所得 P 值由大到小的顺序为 L₄ 圆领>L₃ 半开领>K₃ 结构直身>K₁ 开衫拉链>L₁V 领>X₁ 正肩>K₄OVERSIZE 型>X₃ 插肩袖>K₂ 短款茧型>落肩袖, 即圆领卫衣给被试带来的愉悦度最高, 而落肩袖卫衣给被试带来的愉悦度最低。结构直身、OVERSIZE 型、正肩袖、V 领及圆领的激活度 A 值均为负值, 其中款式 OVERSIZE 型的激活度最低, 说明其带给被试的兴奋度和唤醒度最低; 其余款式元素的激活度 A 值均为正值, 其中 L₃ 半开领>X₂ 落肩袖>K₂ 短款茧型>X₃ 插肩袖>K₁ 开衫拉链, 说明半开领卫衣能带给被试的兴奋度和唤醒度最高, 带给穿着者更加活跃和自由的感受。优势度 D 在结构直身、正肩袖、落肩袖及圆领中均为负值, 其中落肩袖的优势度最低, 说明带给被试情绪状态的主观控制程度最低; 其余款式元素的优势度均为正值, 其中 L₁V 领>L₂POLO 领>X₃ 插肩袖>K₄OVERSIZE 型>K₁ 开衫拉链>K₂ 短款茧型, 说明 V 领卫衣带给被试的情绪状态具有更高的主观控制程度。

综上所述, 在卫衣款式设计中, 不同款式设计在 P 愉悦度上均带给被试较为

愉悦和积极的主观情绪感受，在 A 激活度和 D 优势度上领型设计的影响小于廓型和袖型的影响，卫衣的激活度在廓型上变化幅度最大，优势度在袖型上变化幅度最大，说明卫衣的激活度受廓型影响显著，优势度受袖型影响显著。

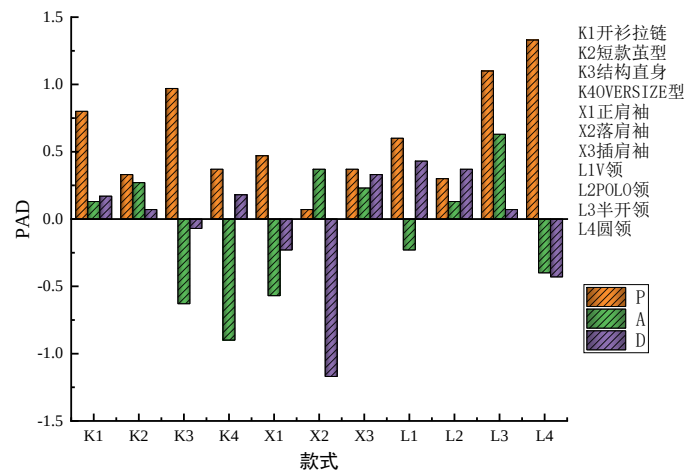


图 2-3 款式不同设计元素

Fig. 2-3 Different design elements in different styles

（2）色彩设计元素 PAD 不同维度影响规律

①单色设计元素 PAD 不同维度影响规律

由图 2-4（a）可知，单色设计中愉悦度 P 在黑色中获得负值，说明黑色卫衣带给被试一种较为不愉快的情绪感受；其余单色中均为正值，其中 D₅ 黄色 > D₄ 红色 > D₆ 蓝色 > D₇ 绿色 > D₂ 白色，其中黄色 P 值最高其次是红色，而蓝色、绿色和白色相对较低，主要由于黄色和红色属于暖色调，通常与阳光、活力、激情等相关，能提升被试的愉悦度^[67]，而蓝色、绿色冷色调更多的是与稳定、简洁和平静相关，能够引起被试积极地情绪反应，但没有黄色和红色显著。激活度 A 在黑色和灰色中获得负值，其余色彩中均为正值，且 D₆ 蓝色 > D₅ 黄色 > D₄ 红色 > D₇ 绿色 > D₂ 白色，说明黑色和灰色卫衣在激活度上引起被试较低的情绪反应，带给被试低沉或平静的情绪感受，由于黑色通常给人的感觉是低沉、威严的，灰色是一个中性颜色，通常与中立、平衡和沉静的感觉相关，因此在情绪上不会激发强烈的情绪反应。其余颜色在色彩心理学中表明给人一种放松、活跃有激情的感受，所以其主体唤醒度要高^[68]。优势度 D 在灰色中为负值，其余色彩均为正值，其中 D₄ 红色 > D₁ 黑色 > D₆ 蓝色 > D₇ 绿色 > D₂ 白色 > D₅ 黄色。灰色一般被

感知为不具有权威和控制力的颜色，相对于其他颜色比较保守、中性^[69]，带给被试的主导性和控制感较低；红色优势度最高，由于红色通常被认为与力量、激情和积极性特征有关；黑色优势度中等，由于黑色通常与权威、优雅和力量有关，因此，在优势度上有较高位置是可以预期的，但比红色稍低，表明在特定的情境中，红色可能被视为更具有主导性或引人注目。蓝色与信任 and 安全感相关，绿色与和谐及平衡相关，白色通常与纯洁和简洁的感觉相关，黄色一般被认为具有不可控制力的颜色^[70]，因此，蓝色、绿色、白色和黄色的优势度一定程度上反应了在特定情境中具有不同程度的权威和影响力。

②双色设计元素 PAD 不同维度影响规律

由图 2-4 (b) 可知，愉悦度 P 在黑蓝配色中获得负值，其余双色配色中均为正值，其中 S_5 白灰 $> S_4$ 红蓝 $> S_6$ 白红 $> S_8$ 黄蓝 $> S_7$ 白蓝 $> S_9$ 灰蓝 $> S_2$ 黑红 $> S_{10}$ 蓝黄、 S_{11} 绿灰 $> S_1$ 黑白，黑色和蓝色均属于稳重、沉静的颜色，搭配一起带给被试低沉较为消极的情绪感受，白灰配色 P 值最高，带给被试更加积极愉悦的情绪感受，黑白配色的愉悦度较低。由于白灰配色的卫衣在视觉上更加平衡和谐，带给被试明亮轻快的情绪感受^[71]，因而在双色搭配中获得最高的愉悦度。黑白色通常是最基础的颜色搭配，具有普遍性，对被试缺乏新颖性，导致在特定情境中获得的愉悦度较低，同时相对于红蓝、白红、黄灰等双色搭配对被试的视觉吸引力较低，因此，愉悦度相对于其他双色搭配较低。激活度 A 在黑白、黑蓝、白灰及黄蓝配色中为负值，表明这些配色引起被试较低的生理和心理激活状态，带给被试平静、放松或抑郁的感觉。其余双色配色中均为正值，其中 S_9 灰蓝 $> S_{10}$ 蓝黄、 S_7 白蓝 $> S_2$ 黑红 $> S_6$ 白红 $> S_{11}$ 绿灰 $> S_4$ 红蓝，表明这些配色在视觉上更加活泼、引入注意，使被试获得较高的生理和心理激活感。优势度 D 在白灰、白红及绿灰配色中获得负值，表明这些配色使人感觉较少的控制或自主性，白色、灰色及绿色在色彩心理学中通常被视为纯洁、和平静或比较中性的色彩，不会激发强烈的情感或控制感，视觉影响力较弱^[72]。白红配色中虽然红色具有力量和活力，但与白色结合可能稀释了这种效果。在其余配色中均为正值，其中 S_3 黑蓝 $> S_7$ 白蓝 $> S_2$ 黑红 $> S_9$ 灰蓝 $> S_1$ 黑白 $> S_4$ 红蓝 $> S_{10}$ 蓝黄，表明这些配色在视觉上具有力量感、积极性或明确性，从而提升了个体的主导感，带给被试更多的控制感

或自主性。

③三色设计元素 PAD 不同维度影响规律

由图 2-4 (c) 可知, 愉悦度 P 在黑白灰、黑蓝红及蓝绿红中为负值, 黑色和灰色通常被认为使消极和中性的颜色, 而红、蓝、绿视觉对度强, 因此在搭配中带给被试的愉悦度较低。其余三色配色中均为正值, 其中 H_9 灰蓝黄 $> H_5$ 黄蓝黑 $> H_2$ 白黑红 $> H_6$ 白蓝绿 $> H_7$ 灰红黄 $> H_8$ 灰红蓝 $> H_{11}$ 蓝绿黄 $> H_3$ 白黑蓝, 灰蓝黄的愉悦度最高, 其次是黄蓝黑和白黑红, 这表明灰蓝黄和黄蓝黑等配色在视觉上更有吸引力, 能够激发被试更多的愉悦感和满足感。激活度 A 在白蓝绿和灰蓝黄配色中为负值, 带给被试的主观控制程度较低。其余配色中均为正值, 其中 H_2 黑白红 $> H_7$ 灰红黄 $> H_8$ 灰红蓝 $> H_3$ 白黑蓝 $> H_{11}$ 蓝绿黄 $> H_{10}$ 蓝绿红 $> H_5$ 黄蓝黑 $> H_1$ 白灰黑 $> H_4$ 黑蓝红, 表明被试获得更高的主观控制度; 黑白红的激活度最高, 其次是灰红黄、灰红蓝。优势度 D 在三色搭配中均为正值, 其中 H_2 黑白红 $> H_5$ 黄蓝黑 $> H_1$ 白灰黑 $> H_6$ 白蓝绿 $> H_3$ 白黑蓝 $> H_9$ 灰蓝黄 $> H_8$ 灰红蓝 $> H_{10}$ 蓝绿红 $> H_7$ 灰红蓝 $> H_{11}$ 蓝绿黄, 其中黑白红优势度最高, 蓝绿黄优势度最低, 三色搭配中优势度均为正值表明三色配色在视觉上更加突让人感到有支配力。

综上所述, 单色和双色搭配中的 P (愉悦度) 普遍高于三色搭配, 且双色搭配的愉悦度高于单色, 表明双色搭配能带给被试更加愉悦积极的情绪感受; 三色搭配的愉悦度整体较低, 但 A (激活度) 和 D (优势度) 两维度三色搭配普遍高于单色和双色搭配, 表明三色搭配更多的是激起被试的注意力和支配感, 被试的自身情绪更多偏向于主观控制力, 愉悦感较低。

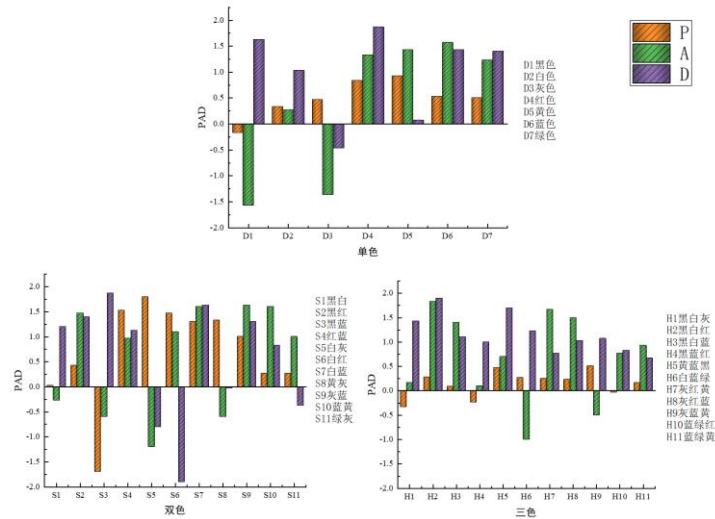


图 2-4 色彩不同设计元素

Fig. 2-4 Design elements with different colors

(3) 图案设计元素 PAD 不同维度影响规律

由图 2-5 可知,愉悦度 P 和激活度 A 两个维度在图案设计元素中均获得正值,其中 A 值普遍高于 P 值。卫衣图案大小及图案位置变化带给被试愉悦的视觉体验,能够提供积极的情绪感受,图案设计元素能够吸引被试的视线,提供美感^[73]。其中图案大小变化的愉悦度相差不大,图案位置变化中 W₁ 袖部、W₅ 左上角及中间高于其他位置设计,表明卫衣图案在袖部、左上角和中间的位置能带给被试更高的愉悦感;图案大小变化的激活度差异高于图案位置变化的差异,在一定程度上图案大小的变化更能激发被试的兴奋和好奇心,从而引起情绪上的激活。整体图案设计元素变化中带给被试的激活度高于愉悦度,表明在在卫衣设计中,图案元素能够带来愉悦感,但更容易引起被试的注意和情绪反应,激起被试的兴奋或注意力。优势度 D 在小号、右上角、右下角、中间及左上角中获得负值,其中小号、右下角及右上角明显低于中间及左上角,小号的图案和卫衣图案常见位置设计在视觉上相对于其他图案元素设计较为弱化缺乏支配力,导致较低的支配感和控制感。其他图案设计中为正值,其中 T₃ 中号>W₁ 袖部>T₄ 大号>T₂ 中小号>W₆ 左下角,表明具有一定的突出性和支配力;其中图案大小中号设计和图案位置袖部设计明显高于其他图案元素设计,表明中号的图案和袖部的图案在尺寸和位置上与整体设计更加协调,能够引起被试的注意和兴趣,从而产生更高的支配感。

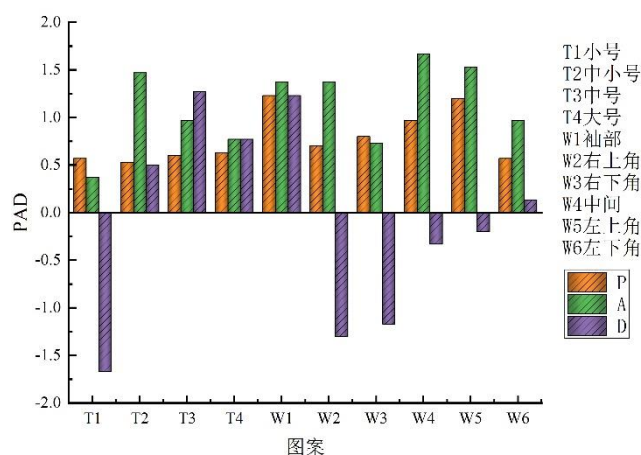


图 2-5 图案不同设计元素

Fig. 2-5 Different design elements of patterns

综上所述，卫衣图案元素通常能够提升穿着者的愉悦感，吸引穿着者视线，带给穿着者积极愉悦的情绪感受。同时，图案位置变化产生的愉悦度高于图案大小变化产生的愉悦度；小号 and 常见图案位置如右上角在视觉上较为弱化，对优势度的影响较低，图案大小变化的优势度高于图案位置变化的优势度，表明图案的大小更能引起被试的支配感。

2.4 本章小结

本章首先通过调查问卷调研方法对女士卫衣设计元素喜好度进行调研，选取典型设计元素进行实验样本的绘制。然后，采用 PAD 情绪测量方法进行主观情绪测量和样本情绪类别划分，主要包括实验准备、实验设计及实验流程。最后，将实验样本获得的情绪类别进行极性划分，从款式、色彩及图案设计元素的 PAD 相关性、不同设计元素在 PAD 三维空间分布及不同维度对卫衣设计元素的影响规律方面进行分析。

第3章 卫衣设计元素眼动指标特征提取及分析

在第二章中，通过调查问卷和 PAD 情绪实验，探讨了消费者对卫衣设计的喜好度及情绪反应。为了进一步完善对卫衣设计元素的认知，本章继续以卫衣为研究载体，采用眼动实验对设计元素进行眼动指标的特征提取和分析。通过眼动实验，收集被试在观看卫衣时的眼动数据，并从中提取关键的眼动指标，如注视点、扫视路径等，以揭示不同设计元素在被试视觉注意力分配中的差异和规律。结合第二章的情绪测量结果，深入地理解消费者对卫衣设计元素的视觉认知与情感反应之间的关系。

3.1 实验部分

3.1.1 实验准备

(1) 实验设备

采用 Tobii Pro X3-120 遥测式眼动仪设备，是一种遥测式眼动设备，由 Tobii Pro 公司生产，用于记录和分析人类眼动的专业设备，具有高精度的眼动追踪技术，能够准确记录和分析眼动的运动轨迹和注视点，如图 3-1 所示。该仪器集成了实验设计、数据收集、即时监控、数据呈现和分析功能，支持全面追踪测试流程、分析扫描路径、生成热力图、编辑感兴趣区域和评估关键视觉指标等多种功能。

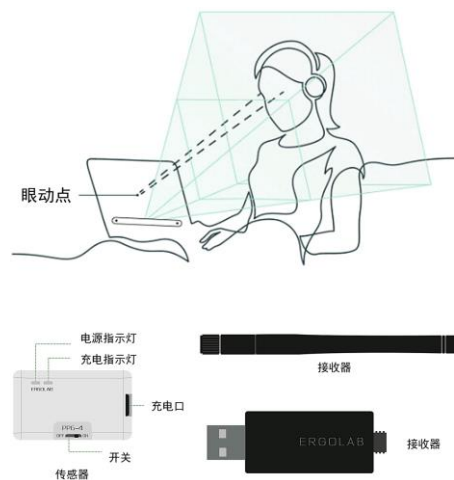


图 3-1 Tobii Pro X3-120 遥测式眼动仪设备

Fig. 3-1 Tobii Pro X3-120 Telemetry Eye Mover Equipment

（2）实验环境

实验环境与第二章 2.2.3（4）实验环境相同。

（3）实验被试

实验被试与第二章 2.2.3（5）实验被试相同

（4）实验刺激图

实验刺激图与第二章 2.2.1 实验样本标注相同

3.1.2 实验流程

在本实验中，参与者首先进入实验室，坐在计算机前，保持与遥测眼动仪的距离在 60-70 cm。他们需要在实验软件中录入自己的基础信息，姓名、年龄和性别。屏幕和桌面的角度设置为 120° ，以减轻直视屏幕时的眼部和颈部负担。接着，实验指导人员向参与者介绍实验流程，并在开始实验之前进行视线校准。校准完毕后，实验正式开始，屏幕中央先是展示简短的实验介绍。实验中，50 张卫衣设计样本随机单独展示在屏幕中央，背景为白色，目的是要求参与者仔细观察每张图片。展示流程包括：屏幕中央首先出现“+”标志，持续 1000 ms 引导参与者注视，随后是 2000 ms 的白屏，接着是一张卫衣图片的展示，持续 3000 ms。每个刺激结束后，再次出现“+”标志，进入下一张图片，直至所有图片展示完毕。实验结束以屏幕上的结束语为标志，整个过程约 10 分钟，期间不设休息。



图 3-2 眼动实验流程

Fig. 3-2 Eye movement experiment process

3.2 指标提取

在眼动跟踪研究中，虽然可以收集众多眼动数据，但不是所有指标都对研究分析至关重要。在审查相关文献并考虑研究目的后，选定了注视次数、总注视时间、平均注视时间、平均瞳孔直径、最小和最大瞳孔直径、平均距离、眨眼次数、

扫视次数以及扫视总时间 10 种眼动测量指标。这些数据以 Excel 格式输出，随后使用 SPSS 26.0 软件进行了数据的分析及相关性验证。通过这一过程，将高相关性系数的眼动指标筛选出来，为研究提取重要的眼动测量指标。

3.2.1 指标相关性分析

由表 3-1 可知，在卫衣款式设计元素的眼动指标中平均瞳孔直径与最小瞳孔直径及最大瞳孔直径的相关系数为 0.94、0.95，同时最大瞳孔直径与最小瞳孔直径相关性系数为 0.83；扫视次数与总扫视时间相关性系数为 0.94。

表 3-1 款式设计元素眼动指标相关性

Tab. 3-1 Correlation of eye movement indicators with style design elements

	注视 次数	总注 视时 间	平均 固定 时间	平均 瞳孔 直径	最小 瞳孔 直径	最大 瞳孔 直径	平均 绝对 距离	眨眼 次数	扫视 次数	总扫 视时 间
注视次数	1.00	0.66	0.02	0.46	0.35	0.44	0.40	-0.52	0.18	0.17
总注视时间	0.66	1.00	0.73	0.61	0.55	0.53	0.34	-0.60	-0.37	-0.38
平均固定时间	0.02	0.73	1.00	0.44	0.44	0.36	0.06	-0.38	-0.59	-0.61
平均瞳孔直径	0.46	0.61	0.44	1.00	0.94	0.95	0.32	-0.54	-0.19	-0.18
最小瞳孔直径	0.35	0.55	0.44	0.94	1.00	0.83	0.28	-0.44	-0.28	-0.28
最大瞳孔直径	0.44	0.53	0.36	0.95	0.83	1.00	0.27	-0.50	-0.09	-0.09
平均绝对距离	0.40	0.34	0.06	0.32	0.28	0.27	1.00	-0.33	0.09	0.22
眨眼次数	-0.52	-0.60	-0.38	-0.54	-0.44	-0.50	-0.33	1.00	-0.05	-0.01
扫视次数	0.18	-0.37	-0.59	-0.19	-0.28	-0.09	0.09	-0.05	1.00	0.94
总扫视时间	0.17	-0.38	-0.61	-0.18	-0.28	-0.09	0.22	-0.01	0.94	1.00

由表 3-2 可知，在色彩设计元素的眼动指标中总注视时间与平均瞳孔直径、最小瞳孔直径及最大瞳孔直径的相关性系数分别为 0.90、0.82 和 0.78；平均瞳孔直径与最小瞳孔直径及最大瞳孔直径的相关性系数分别为 0.92、0.88；扫视次数与总扫视时间的相关性系数为 0.73。

表 3-2 色彩设计元素眼动指标相关性

Tab. 3-2 Correlation of eye movement indicators with color design elements

	注视 次数	总注 视时 间	平均 固定 时间	平均 瞳孔 直径	最小 瞳孔 直径	最大 瞳孔 直径	平均 绝对 距离	眨眼 次数	扫视 次数	总扫 视时 间
注视次数	1.00	0.54	-0.28	0.58	0.48	0.54	0.60	-0.39	0.18	0.28
总注视时间	0.54	1.00	0.59	0.90	0.82	0.78	0.12	-0.46	-0.23	-0.21
平均固定时间	-0.28	0.59	1.00	0.46	0.48	0.33	-0.45	-0.21	-0.29	-0.46
平均瞳孔直径	0.58	0.90	0.46	1.00	0.92	0.88	0.12	-0.53	-0.03	-0.05
最小瞳孔直径	0.48	0.82	0.48	0.92	1.00	0.70	0.03	-0.54	-0.03	-0.06
最大瞳孔直径	0.54	0.78	0.33	0.88	0.70	1.00	0.24	-0.49	-0.18	-0.10
平均绝对距离	0.60	0.12	-0.45	0.12	0.03	0.24	1.00	0.05	0.19	0.64
眨眼次数	-0.39	-0.46	-0.21	-0.53	-0.54	-0.49	0.05	1.00	0.07	0.12
扫视次数	0.18	-0.23	-0.29	-0.03	-0.03	-0.18	0.19	0.07	1.00	0.73
总扫视时间	0.28	-0.21	-0.46	-0.05	-0.06	-0.10	0.64	0.12	0.73	1.00

由表 3-3 可知,在图案设计元素的眼动指标中注视次数与平均瞳孔直径、最小瞳孔直径、最大瞳孔直径、平均绝对距离、扫描次数、总扫描时间的相关性系数分别为 0.87、0.86、0.95、0.83 和 0.84;总注视时间与平均瞳孔直径相关性系数为 0.73;平均瞳孔直径与最小瞳孔直径、最大瞳孔直径及总扫视时间的相关性系数分别为 0.94、0.94、0.80;最小瞳孔直径与最大瞳孔直径和总扫视时间的相关性系数分别为 0.91、0.83;最大瞳孔直径与扫视次数及总扫视时间的相关性系数分别为 0.86、0.92;平均绝对距离与总扫视时间的相关性系数为 0.90;扫视次数与总扫视时间的相关性系数为 0.93。

表 3-3 图案设计元素眼动指标相关性

Tab. 3-3 Correlation of eye movement indicators with pattern design elements

	注视 次数	总注 视时 间	平均 固定 时间	平均 瞳孔 直径	最小 瞳孔 直径	最大 瞳孔 直径	平均 绝对 距离	眨眼 次数	扫视 次数	总扫 视时 间
注视次数	1.00	0.70	-0.45	0.88	0.86	0.95	0.83	-0.58	0.79	0.84

续表 3-3 图案设计元素眼动指标相关性

Tab. 3-3 Correlation of eye movement indicators with pattern design elements

	注视 次数	总注 视时 间	平均 固定 时间	平均 瞳孔 直径	最小 瞳孔 直径	最大 瞳孔 直径	平均 绝对 距离	眨眼 次数	扫视 次数	总扫 视时 间
总注视时间	0.70	1.00	0.25	0.73	0.65	0.58	0.43	-0.68	0.26	0.36
平均固定时间	-0.44	0.25	1.00	-0.23	-0.38	-0.48	-0.63	-0.18	-0.58	-0.60
平均瞳孔直径	0.87	0.73	-0.23	1.00	0.94	0.94	0.75	-0.66	0.70	0.80
最小瞳孔直径	0.86	0.65	-0.38	0.94	1.00	0.91	0.81	-0.58	0.69	0.83
最大瞳孔直径	0.95	0.58	-0.48	0.94	0.91	1.00	0.85	-0.53	0.86	0.92
平均绝对距离	0.83	0.43	-0.63	0.75	0.81	0.85	1.00	-0.27	0.72	0.90
眨眼次数	-0.58	-0.68	-0.18	-0.66	-0.58	-0.53	-0.27	1.00	-0.29	-0.29
扫视次数	0.79	0.26	-0.58	0.70	0.69	0.86	0.72	-0.29	1.00	0.93
总扫视时间	0.84	0.36	-0.60	0.80	0.83	0.92	0.90	-0.29	0.93	1.00

3.2.2 指标主成分分析

将卫衣不同设计元素的眼动指标导入 SPSS.26.0 软件进行因子分析，进一步明确卫衣设计元素眼动指标的提取。由表 3-4 可知，KMO 检验系数为 0.628>0.500，Bartlett 的显著性 0.000<0.005，数据呈球形分布，各个变量在一定程度上相互独立，可知变量间显著相关，说明各个眼动指标适合做因子分析。

表 3-4 款式眼动指标 KMO 和 Bartlett 检验

Tab. 3-4 KMO and Bartlett's test for eye movement indicators of styles		
KMO 取样适切性数量		0.628
Bartlett 球形度检验	近似卡方	1209.132
	自由度	45
	显著性	0.000

运用主成分分析的方法提取主要因子，由表 3-5 可知，初始特征值描述了初始因子情况，第一个因子的特征值为 4.846，解释了原有 10 个眼动指标的 30.934 %；第二个因子的特征值为 1.981，解释了原有 10 个眼动指标的 29.402 %；第三个因子的特征值为 1.03，解释了原有 10 个眼动指标的 18.234 %，三个因子的累计贡献

率达到 78.569 %，且其因子特征值均大于 1，对因子解释的损失比较小。

表 3-5 款式眼动指标特征值和方差贡献率

Tab. 3-5 Characteristic values and variance contribution rates of eye movement indicators for styles

因子 编号	特征根			旋转前方差解释率			旋转后方差解		
	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%
1	4.846	48.459	48.459	4.846	48.459	48.459	3.093	30.934	30.934
2	1.981	19.807	68.266	1.981	19.807	68.266	2.94	29.402	60.335
3	1.03	10.303	78.569	1.03	10.303	78.569	1.823	18.234	78.569
4	0.962	9.624	88.193	-	-	-	-	-	-
5	0.648	6.48	94.673	-	-	-	-	-	-
6	0.308	3.083	97.757	-	-	-	-	-	-
7	0.148	1.477	99.233	-	-	-	-	-	-
8	0.047	0.468	99.701	-	-	-	-	-	-
9	0.017	0.166	99.867	-	-	-	-	-	-
10	0.013	0.133	100	-	-	-	-	-	-

选择最大方差法对因子载荷矩阵实施正交旋转，如表 3-6 所示。在旋转后的矩阵表中，眼动指标的绝对值越大，表示这个眼动指标与因子越接近，即这个眼动指标对因子起到的贡献率越大。由表 3-6 可知，在因子 1 上，注视次数、总注视时间、平均固定时间、平均绝对距离、眨眼次数和扫视次数的载荷系数较大；在因子 2 上，平均瞳孔直径、最小瞳孔直径、最大瞳孔直径、眨眼次数和扫视次数较大，表明这些眼动指标与款式设计元素的注意力分配、情感反应和认知过程有较强的相关性。

表 3-6 款式眼动指标旋转后因子载荷系数

Tab. 3-6 Factor loading coefficients for rotated eye movement indicators of styles

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
注视次数	-0.001	0.133	0.912	0.849

续表 3-6 款式眼动指标旋转后因子载荷系数

Tab. 3-6 Factor loading coefficients for rotated eye movement indicators of styles

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
总注视时间	0.691	0.266	0.621	0.933
平均固定时间	0.845	0.288	0.094	0.806
平均瞳孔直径	0.201	0.928	0.265	0.972
最小瞳孔直径	0.253	0.898	0.159	0.895
最大瞳孔直径	0.072	0.906	0.273	0.900
平均绝对距离	0.073	0.292	0.036	0.092
眨眼次数	-0.091	-0.406	-0.651	0.596
扫视次数	-0.943	-0.135	0.011	0.907
总扫视时间	-0.943	-0.112	-0.053	0.905

由表 3-7 可知，KMO 检验系数为 $0.572 > 0.500$ ，Bartlett 的显著性 $0.000 < 0.005$ ，数据呈球形分布，各个变量在一定程度上相互独立，可知变量间显著相关，说明各个眼动指标适合做因子分析。

表 3-7 色彩眼动指标 KMO 和 Bartlett 检验

Tab. 3-7 KMO and Bartlett's test for color eye movement indicators

KMO 取样适切性数量		0.572
Bartlett 球形度检验	近似卡方	281.865
	自由度	45
	显著性	0.000

运用主成分分析的方法提取主要因子，由表 3-8 可知，初始特征值描述了初始因子情况，第一个因子的特征值为 4.507，解释了原有 10 个眼动指标的 44.371 %；第二个因子的特征值为 2.65，解释了原有 10 个眼动指标的 20.417 %；第三个因子的特征值为 1.061，解释了原有 10 个眼动指标的 17.394 %，三个因子的累计贡献率达到 82.183 %，且其因子特征值均大于 1，对因子解释的损失比较小。

表 3-8 色彩眼动指标特征值和方差贡献率

Tab. 3-8 Characteristic values and variance contribution rates of color eye movement indicators

因子 编号	特征根			旋转前方差解释率			旋转后方差解释率		
	特征根	方差解	累积%	特征根	方差解	累积%	特征根	方差解	累积%
		释率%			释率%			释率%	
1	4.507	45.074	45.074	4.507	45.074	45.074	4.437	44.371	44.371
2	2.65	26.497	71.57	2.65	26.497	71.57	2.042	20.417	64.789
3	1.061	10.612	82.183	1.061	10.612	82.183	1.739	17.394	82.183
4	0.75	7.505	89.688	-	-	-	-	-	-
5	0.415	4.148	93.836	-	-	-	-	-	-
6	0.287	2.868	96.704	-	-	-	-	-	-
7	0.207	2.072	98.776	-	-	-	-	-	-
8	0.076	0.758	99.535	-	-	-	-	-	-
9	0.035	0.347	99.882	-	-	-	-	-	-
10	0.012	0.118	100	-	-	-	-	-	-

选择最大方差法对因子载荷矩阵实施正交旋转，如表 3-9 所示。在旋转后的矩阵表中，眼动指标的绝对值越大，表示这个眼动指标与因子越接近，即这个眼动指标对因子起到的贡献率越大。由表 3-9 可知，在因子 1 上，注视次数、总注视时间、平均瞳孔直径、最小瞳孔直径和最大瞳孔直径的载荷系数较大；在因子 2 上，平均固定时间、平均绝对距离的载荷系数较大，而在因子 3 上扫视次数和总扫视时间的载荷系数较大，表明这些眼动指标与卫衣色彩设计的注意力分配和视觉认知有较强的相关性。

表 3-9 色彩眼动指标旋转后因子载荷系数

Tab. 3-9 Factor loading coefficients of color eye movement indicators after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
注视次数	0.588	0.690	0.109	0.834
总注视时间	0.922	-0.042	-0.200	0.891
平均瞳孔直径	0.980	0.008	0.016	0.96

续表 3-9 色彩眼动指标旋转后因子载荷系数

Tab. 3-9 Factor loading coefficients of color eye movement indicators after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
最小瞳孔直径	0.926	-0.099	0.070	0.871
最大瞳孔直径	0.859	0.176	-0.183	0.803
平均固定时间	0.500	-0.725	-0.197	0.814
平均绝对距离	0.077	0.882	0.167	0.812
眨眼次数	-0.647	0.000	0.032	0.419
扫视次数	-0.057	0.059	0.961	0.930
总扫视时间	-0.100	0.464	0.811	0.883

由表 3-10 可知，KMO 检验系数为 $0.619 > 0.500$ ，Bartlett 的显著性 $0.000 < 0.005$ ，数呈球形分布，各个变量在一定程度上相互独立，可知变量间显著相关，说明各个眼动指标适合做因子分析。

表 3-10 图案眼动指标 KMO 和 Bartlett 检验

Tab. 3-10 KMO and Bartlett's test for pattern eye movement indicators

KMO 取样适切性数量		0.619
Bartlett 球形度检验	近似卡方	1108.539
	自由度	45
	显著性	0.000

运用主成分分析的方法提取主要因子，由表 3-11 可知，初始特征值描述了初始因子情况，第一个因子的特征值为 4.612，解释了原有 10 个眼动指标的 30.175 %；第二个因子的特征值为 2.118，解释了原有 10 个眼动指标的 30.009 %；第三个因子的特征值为 1.108，解释了原有 10 个眼动指标的 18.195 %，三个因子的累计贡献率达到 78.379 %，且其因子特征值均大于 1，对因子解释的损失比较小。

表 3-11 图案眼动指标特征值和方差贡献率

Tab. 3-11 Characteristic values and variance contribution rates of pattern eye movement indicators

因子 编号	特征根			旋转前方差解释率			旋转后方差解释率		
	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%
1	4.612	46.124	46.124	4.612	46.124	46.124	3.017	30.175	30.175
2	2.118	21.177	67.301	2.118	21.177	67.301	3.001	30.009	60.183
3	1.108	11.078	78.379	1.108	11.078	78.379	1.82	18.195	78.379
4	1.006	10.062	88.441	-	-	-	-	-	-
5	0.603	6.03	94.471	-	-	-	-	-	-
6	0.307	3.067	97.538	-	-	-	-	-	-
7	0.139	1.391	98.929	-	-	-	-	-	-
8	0.057	0.57	99.499	-	-	-	-	-	-
9	0.035	0.352	99.851	-	-	-	-	-	-
10	0.015	0.149	100	-	-	-	-	-	-

选择最大方差法对因子载荷矩阵实施正交旋转，如表 3-12 所示。在旋转后的矩阵表中，眼动指标的绝对值越大，表示这个眼动指标与因子越接近，即这个眼动指标对因子起到的贡献率越大。由表 3-12 可知，在因子 1 上，总注视时间、平均固定时间、扫视次数和总扫视时间的载荷系数较大；在因子 2 上，平均瞳孔直径、最小瞳孔直径及最大瞳孔直径的载荷系数较大，而在因子 3 上注视次数、总扫视时间和眨眼次数的载荷系数较大，表明这些眼动指标与卫衣图案设计的注意力转移和情感反应有较强的相关性。

表 3-12 图案眼动指标旋转后因子载荷系数

Tab. 3-12 Load factors of pattern eye movement index after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
注视次数	0.160	0.076	0.866	0.781
总注视时间	-0.626	0.402	0.622	0.941
平均固定时间	-0.781	0.349	0.083	0.738

续表 3-12 图案眼动指标旋转后因子载荷系数

Tab. 3-12 Load factors of pattern eye movement index after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
平均瞳孔直径	-0.263	0.923	0.210	0.966
最小瞳孔直径	-0.366	0.851	0.183	0.892
最大瞳孔直径	-0.084	0.939	0.162	0.914
平均绝对距离	0.312	0.388	0.173	0.278
扫视次数	0.889	-0.144	0.110	0.823
眨眼次数	0.095	-0.287	-0.727	0.619
总扫视时间	0.940	0.001	-0.045	0.885

综上所述，根据对卫衣款式、色彩、图案的眼动指标进行相关性分析和主成分分析，最终，选取注视次数、平均瞳孔直径、眨眼次数、扫视次数及总注视时间 5 个眼动指标作为卫衣不同设计元素的主要分析指标。这 5 个眼动指标涵盖了对卫衣款式、色彩及图案的视觉感知、注意力分配和情感反应的重要方面，以及在相关文献中作为注意力和情感测量的有效指标的广泛认可。通过对这些指标的分析，可以深入理解消费者对卫衣的视觉注意力和感知偏好，为卫衣设计和优化提供有针对性的建议和指导。

3.3 实验结果及分析

3.3.1 指标差异性分析

通过对卫衣不同设计元素款式、色彩、图案的眼动数据进行综合比较分析，揭示特定视觉属性如何影响消费者的注意力分配。通过差异性分析，期望建立更加精准的视觉效果与消费者认知之间的联系，从而为理解视觉设计如何影响消费者行为提供新的学术见解。

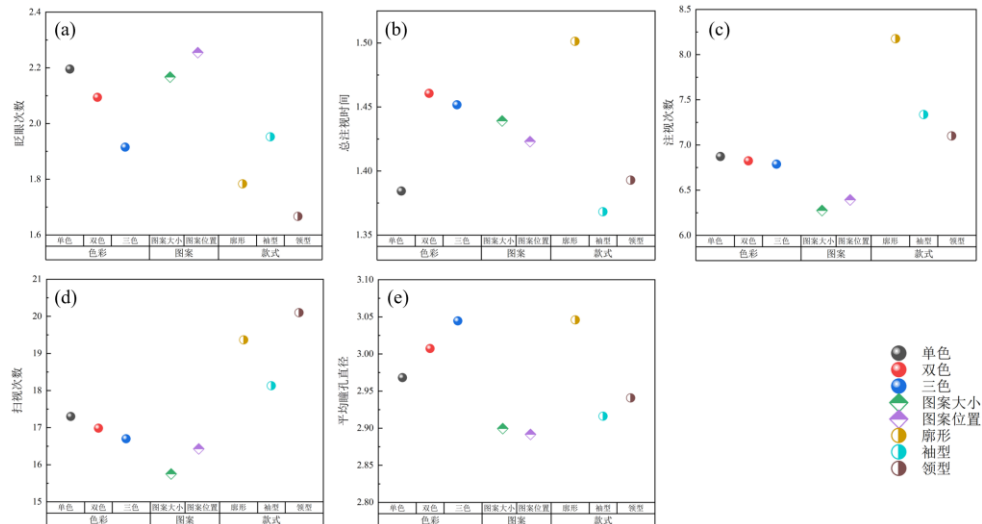


图 3-3 不同设计元素眼动指标

Fig. 3-3 Eye tracking indicators for different design elements

(1) 眨眼次数

由图 3-3 (a) 可知, 色彩元素和图案元素的眨眼次数总体高于款式设元素, 色彩和图案通常在视觉上具有更强的吸引力, 能够更快引起被试的注意, 而款式元素通常是卫衣的整体形状设计, 相对于色彩和图案更加稳定和一致, 对被试的吸引力较小; 色彩元素和款式元素之间的眨眼次数变化幅度大于图案元素, 能够引起被试更多的注意力转移和认知负荷。而图案位置和大小更容易适应和处理, 从而导致眨眼次数的变化幅度较小。眨眼次数在色彩元素中单色 > 双色 > 三色, 单色卫衣具有简洁和一致颜色, 能够更容易引起被试注意, 相比之下, 双色和三色卫衣的颜色多样性会导致被试的注意力分散, 从而降低眨眼次数; 款式元素中袖型 > 廓形 > 领型, 领型和廓形的设计特征变化相对于袖型设计的变化更加明显, 更容易引起被试强烈的情感反应, 导致被试更加专注于观察, 从而减少眨眼次数; 图案元素中图案位置 > 图案大小, 图案位置的变化更加明显和引入注目, 相比之下, 图案大小变化主要集中在卫衣中间位置, 被试更容易适应和处理, 从而导致眨眼次数较低。

(2) 总注视时间

由图 3-3 (b) 可知, 色彩和款式设计元素的总注视时间差异大于图案设计元素, 色彩在视觉中刺激中最直接和显著的元素之一, 具有很强的情感和认知影响力, 款式通常具有独特的形状和结构, 而图案大小和位置元素相对于色彩和款式

通常具有一致性和重复性^[74]。相比之下,色彩和款式设计元素更易给被试带来新颖感和变化,从而引起更多的注视时间。在色彩元素中总注视时间双色>三色>单色,单色总注视时间明显小于双色和三色,双色和三色总注视时间之间的差异性较小,双色和三色组合相对于单色在视觉上更加丰富多样,容易引起被试的情绪激发。多样颜色的组合增加了被试的认知负荷,从而增加了对它的注视时间^[75]。在款式中总注视时间廓形>领型>袖型,廓形明显大于领型和袖型,廓形作为卫衣的整体轮廓,占据视觉场景中的较大面积,人们在审视服装时会从整体到部分的认知策略,廓形相对于领型和袖型会成为早期主要的注视焦点^[76]。同时,卫衣的廓形在审美和风格上起到决定性作用,袖型和领型更多的是细节上的变化,因此人们在评估服装时更多关注整体印象影响较大,会花更多时间来处理这一信息。在图案元素中总注视时间图案大小>图案位置,图案大小变化在带给被试的视觉冲击力要大于图案位置的变化,图案大小变化占据更大的视觉空间,具有更高的对比度和细节,而图案位置变化在视觉冲击力和吸引力相对较弱,在视觉场景的影响较小^[77]。

(3) 注视次数

由图 3-3 (c) 可知,色彩设计元素和图案设计元素的注视次数小于款式设计元素的注视次数,且元素之间的整体差异性较小,款式中廓形的注视次数明显大于袖型和领型,袖型和领型之间的注视次数差异性较小。款式设计中不同的廓形、领型及袖型在设计中注重不同的细节变化,与卫衣的整体外观和风格相关,从而在视觉处理中往往拥有较高的优先级,是消费者评价服装的重要因素,吸引更多的注视次数。在款式中廓形的变化比袖型和领型的变化更加显著。袖型和领型虽然也是重要设计元素,但在不同款式的卫衣中它们的变化可能没有廓形强烈或显眼。人们的视觉注意力容易被差异度大的元素吸引。

(4) 扫视次数

由图 3-3 (d) 可知,款式设计元素的扫视次数整体高于色彩设计元素和图案设计元素,廓形的扫视次数>领型>袖型,三种元素之间差异性明显,在款式设计元素中包含更多的细节和结构变化,需要更多的认知加工来理解和分析,相比之下,色彩设计元素和图案设计元素易于直观感知和处理。其中在色彩元素中单

色>双色>三色,人脑在加工视觉信息时,会尝试在视觉场景中辨认模式,单色卫衣在视觉上的模式更为清晰和简洁,更容易被认知系统加工和识别,而双色和三色卫衣,颜色越多增加了决策的难度,从而提高心理负荷,导致心理负担,这种心理负担可能导致决策疲劳,从而人们更倾向于简单的选项,即单色卫衣吸引更多的扫视。在图案设计元素中图案位置>图案大小,图案位置变化更容易抓住视觉注意力,位置变化可以引起注意的转移和视觉系统的重新寻找,而图案大小在视觉场景中的对比不够显著,从而图案位置的变化导致被试产生更多的扫视。

(5) 平均瞳孔直径

由图 3-3 (e) 可知,色彩设计元素的平均瞳孔直径整体大于图案设计元素和款式设计元素,颜色有影响情绪和兴奋水平,根据瞳孔对情绪反应的研究,兴奋或情绪激动的视觉可能会导致瞳孔扩张。卫衣的颜色设计元素更能吸引注意力,或者更有情绪共鸣,导致瞳孔直径增加。同时,颜色组合提供更多的视觉信息,从而引起更大的视觉刺激,相对于图案和款式设计,颜色元素因视觉刺激的复杂性和吸引力而导致更大的瞳孔直径。在色彩和款式不同设计元素之间的平均瞳孔直径差异性较大,其中色彩元素中瞳孔直径三色>双色>单色;款式元素中廓形>领型>袖型,色彩设计元素提供的视觉信息量通常比图案和款式设计元素更多。颜色层次从单色到三色的增加,引入了更丰富和更复杂的视觉信息。而款式设计元素中,廓形比领型和袖型局部设计在视觉上更为复杂和显著。视觉系统在处理更复杂或信息量更大的刺激时,瞳孔直径可能会变大,这与更高的认知负荷与情感反应有关。图案位置和图案大小之间的平均瞳孔直径差异性不明显,当被试评估卫衣上的图案位置和图案大小时,他们可能使用相似的认知过程来处理这些视觉信息。由于这些过程相似,它们可能产生相似的瞳孔反应。同时,图案位置和图案大小造成的视觉显著性变化不如颜色和款式变化显著,能够深入触及个人情感,图案通常只是卫衣上的一个装饰元素,在观察者视线中的重要性可能并不如色彩和整体结构关键。因而,在情感激发方面有限,导致瞳孔直径变化不明显。

3.3.2 眼动追踪图差异性分析

(1) 眼动追踪轨迹图

由图 3-4 (a) 可知, 在图案设计中被试的注视点主要集中在图案设计上; 由图 3-4 (b)、(c) 和 (d) 可知无图案的卫衣设计, 被试注视点主要集中在领部, 在设计感较强的短款茧型中被试的注视点在领部和下摆之间来回跳跃。

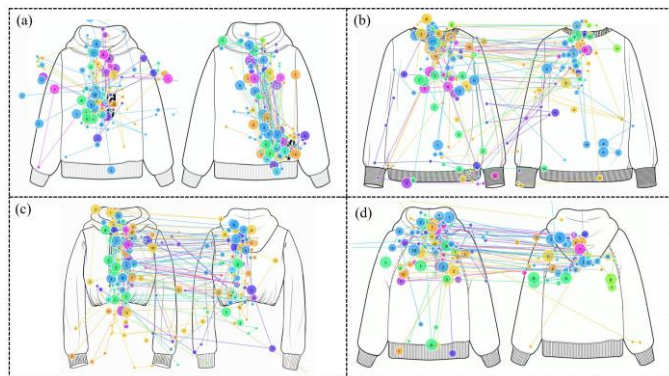


图 3-4 款式图案元素眼动追踪轨迹图

Fig. 3-4 Eye tracking trajectory diagram of pattern elements in styles

由图 3-5 可知, 在不同色彩配置中, 被试的注视点主要集中在领部位置。由图 3-5 (a) 可知, 在单色配置中深色卫衣被试的注视点相对于浅色卫衣分散度要高; 由图 3-5 (b) 可知, 双色搭配中深色卫衣的扫描路径主要集中在领口和胸前上半部分, 浅色搭配的卫衣的注视点分散且扫描路径复杂; 由图 3-5 (c) 可知, 三色搭配中深色配置的卫衣被试的注视点较为分散且扫描路径复杂, 浅色卫衣的扫描路径和注视点要少于深色配置的卫衣。

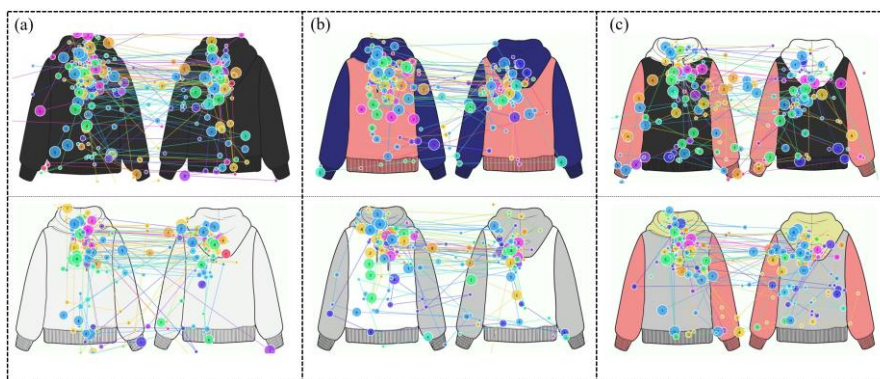


图 3-5 色彩设计元素眼动追踪轨迹图

Fig. 3-5 Color design element eye tracking trajectory diagram

(2) 眼动追踪热点图

眼动追踪热点图通过观察者注视的密集区域标记为颜色较为激烈的区域, 来展示观察者在卫衣设计上的视觉集中度。红色表示在特定区域集中注视的频率较

高，绿色表示被试的注意力分散。由图 3-6 可知，在款式图案设计元素中被试的注意主要集中在领部和图案上，连帽卫衣的设计比圆领设计受到被试更多的关注度，且连帽设计和图案设计的卫衣样本热点集中且热力值较高，说明被试对刺激的停留时间较长。由图 3-7 可知，被试的注意力主要集中在领部；浅色配置卫衣的注视点热力高于深色配置卫衣且热点分散，热力值较高。

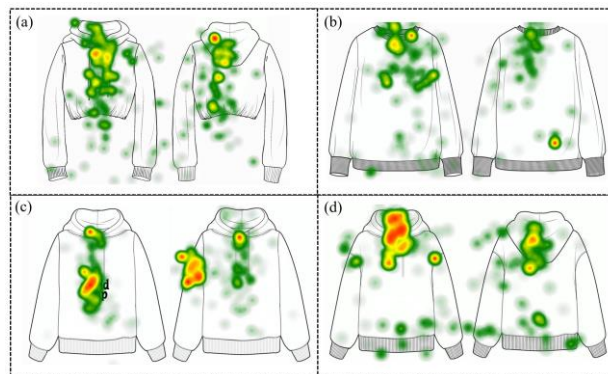


图 3-6 款式图案设计元素眼动追踪热点图

Fig. 3-6 Style pattern design elements eye tracking hotspot image

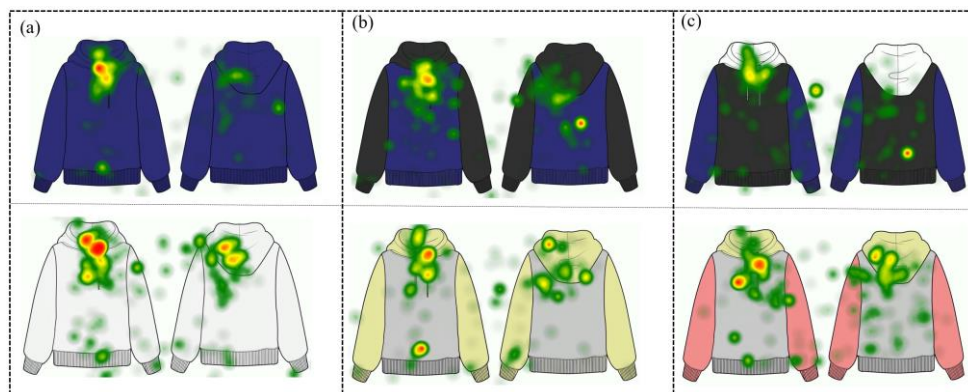


图 3-7 色彩设计元素眼动追踪热点图

Fig. 3-7 Color design elements eye tracking hotspot map

3.3.3 眼动指标与情绪评分相关性分析

将选取的卫衣不同元素的眼动指标与情绪评分进行相关性分析，探究视觉处理和认知情绪状态之间的潜在联系。眼动追踪技术能够精准的捕捉视觉注意力的动态变化，反映出个体在观看卫衣图片时的认知加工特征。通过与情绪评分的关联研究，揭示特定视觉刺激（款式、色彩、图案）如何影响消费者情感反应及其内在机制，有利于帮助更好的了解消费者的审美偏好和情绪体验过程，进而为卫衣的设计与市场营销提供科学依据，使产品更贴合消费者的情感需求，提升用户

体验。同时，将眼动指标与情绪评分进行相关性分析，可丰富视觉认知与情绪心理领域的理论体系，提高人类对视觉信息加工和情感调节复杂交互作用的认识。通过采用斯皮尔曼相关系数对不同的服装设计元素（款式、色彩、图案）与情绪评分之间的关系进行了量化分析。

表 3-13 款式眼动指标与情绪评分相关性

Tab. 3-13 Correlation between style eye movement index and emotional score

	廓形		袖型		领型	
	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性
注视次数	0.853	-0.017	-0.017	-0.002	0.938	0.007
总注视时间	0.909	0.011	0.011	0.040	0.624	-0.045
平均瞳孔直径	0.661	-0.041	-0.041	0.046	0.861	0.016
眨眼次数	0.881	0.014	0.014	-0.158	0.452	0.069
扫视次数	0.428	-0.073	-0.073	-0.016	0.991	-0.001

由表 3-13 可知，款式眼动指标与情绪评分的相关性在不同的服装设计特征上表现出差异。首先，注视次数与廓形的相关性最强(斯皮尔曼相关系数为 0.853，显著水平为-0.017，这表明在廓形元素设计上投入更多的视觉关注与情绪的积极性呈正相关，即视觉注意力越集中在廓形上，给予的情绪评价越高。然而，袖型和领型在注视次数上的相关性较弱，显著性水平也并不显著(均为-0.002 和 0.007)，表明袖型和领型没有廓形能显著影响到被试的情绪评分。总注视时间在廓形上的斯皮尔曼相关系数为 0.909，具有较高的相关性和正向显著性（0.011），此结果进一步印证了廓形特征变化对情绪评价的重要性。在袖型和领型上，相关性降低，领型上的相关性最低（-0.045）。平均瞳孔直径作为一个生理指标，能够在一定程度上反映情绪强度，在廓形特征上的相关性为 0.661，并呈现负向显著性（-0.041），说明当廓形设计较为突出时，可能对被试的情绪激发更为显著。而领型的相关性为 0.861，显著性为正（0.016），表明领型设计同样在视觉上能够显著激发情绪反应。眨眼次数与情绪评分相关性在表中也显示出一定的规律。在廓形特征上相关性较高（0.881），且显著性正向（0.014）。这一指标可能暗示廓形设计引起了较为频繁的眨眼动作，其与情感体验也较为显著。扫视次数与各款式

设计元素的相关性相对较低，在廓形上为 0.428，并有负向显著性（-0.073），而在领型上的相关性几乎接近完美（0.991），但显著性接近于 0（-0.001），这意味着扫视次数不如其他眼动指标在情绪评分对设计特征的反映上敏感。

表 3-14 色彩眼动指标情绪评分相关性

Tab. 3-14 Correlation between emotional scores of color eye movement indicators

	单色		双色		三色	
	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性
注视次数	0.418	0.056	0.292	-0.060	0.383	0.049
总注视时间	0.230	0.083	0.295	-0.06	0.637	-0.027
平均瞳孔直径	0.111	0.110	0.431	-0.045	0.666	0.024
眨眼次数	0.512	-0.046	0.217	0.070	0.787	0.015
扫视次数	0.824	0.015	0.949	-0.004	0.396	0.048

由表 3-14 可知，卫衣色彩配置对于情绪评分的影响表现出不同的相关性，注视次数在单色卫衣中与情绪评分的斯皮尔曼系数为 0.418，显著性为 0.056，表明单色卫衣能在一定程度上吸引被试的注意力，并可能与较为积极的情绪评价相关。而在双色和三色配置中，相关系数分别降至 0.292 和 0.383，并且显著性有所降低（分别为-0.060 和 0.049），揭示色彩的复杂性可能对注视行为的情绪指向性产生影响。总注视时间中，三色卫衣（相关系数 0.637，显著性-0.027）比单色（相关系数 0.230，显著性 0.083）和双色（相关系数 0.295，显著性-0.060）的相关性要高出许多，揭示了色彩复杂性可能在保持被试视觉注意力上扮演更加重要的角色。平均瞳孔直径的相关性，在双色（0.431）和三色（0.666）配置中有显著增加，显著性分别为-0.045 和 0.024，这表明随着色彩配置由单色向更复杂变化时，相关的情绪刺激也相应增强。眨眼次数作为反应情绪强度和认知负荷的指标，在三色卫衣中达到了最高的相关系数（0.787），显著性为 0.015，这一点表明复杂的色彩搭配会引发更加多样化且强烈的情绪反应。扫视次数，双色配置与情绪评分相关性最高（0.949），但显著性接近 0（-0.004），可能表明在双色配置中，被试的扫视行为更加频繁，但这并不直接导致显著的情绪评价变化。相

较之下，单色和三色配置的扫视次数显著性差异不大（分别为 0.015 和 0.048），但仍显示出与情绪评分的一定相关性。

表 3-15 图案眼动指标情绪评分相关性

Tab. 3-15 Correlation between emotional scores of pattern eye movement indicators

	图案大小		图案位置	
	斯皮尔曼相关系数	显著性	斯皮尔曼相关系数	显著性
注视次数	N	-.203*	0.978	0.002
总注视时间	0.381	-0.091	0.693	-0.033
平均瞳孔直径	0.385	-0.090	0.645	0.038
眨眼次数	0.436	0.081	0.233	0.099
扫视次数	0.622	-0.051	0.390	0.071

由表 3-15 可知，卫衣图案的眼动指标与情绪评分之间的相关性表现出图案大小和位置因素对被试情感响应有不同的影响。注视次数，图案位置的斯皮尔曼相关系数几乎为 0（0.002），且显著性高（0.978），表明图案位置可能对于被试的注视次数不产生显著影响。总注视时间中，图案大小和位置都显示出与情绪评分有正向的相关性（分别为 0.381 和 0.693），且在图案位置中显著性更低（-0.033），这表明图案位置可能是决定情感评分的更重要因素，并可能促使被试更长时间的注视。平均瞳孔直径与情绪评分的相关性在图案大小（0.385）和图案位置（0.645）上均呈现正向关系，但在位置变化中的显著性更高（0.038），这意味着图案位置的改变对情感激发作用更直接。眨眼次数与图案大小的相关性（0.436）稍高于图案位置（0.233），虽然两者在显著性上均未达到通常的统计显著标准（0.05），但图案大小对情绪体验的影响要高于图案位置。扫视次数中图案大小与情绪评分有着较高的相关性（0.622），且显著性较低（-0.051），图案位置的相关性较低（0.390），但显著性上有所提升（0.071），表明被试对图案位置的扫视行为和相关的情感体验有一定的影响。

综上所述，在款式设计元素中廓形作为服装设计的主要元素，其在情绪平静方面的影响最为显著，而领型与情绪之间也存在较强的相关性；色彩配置与情绪方面的影响最为显著，而领型与情绪之间也存在较强的相关性；色彩配置与情绪

之间的关系复杂多样，并不完全随着色彩数量的增加而线性变化，多色搭配虽然增加视觉刺激的复杂度，可能提升了理论上的情绪激发潜力，但单色配置在特定条件下也有可能产生强烈的情绪反应；卫衣图案的大小和位置在情感体验构建中发挥关键作用。特别是图案位置，在吸引消费者注视和维持视觉关注上起到更加重要的作用。

3.4 本章小结

本章对卫衣不同设计元素进行了眼动追踪实验，具体描述了实验步骤、眼动追踪实验设备、实验设置及实验流程。卫衣设计元素眼动指标提取部分，通过相关性和主成分定量分析法提取了各项关键眼动指标。对提取的关键眼动指标进行差异性分析，对比了不同卫衣设计的眼动数据，通过统计方法探究了眼动指标与观察者的情绪评分之间的相关性，揭示了卫衣设计的视觉因素与正面或负面情绪评价的相关性。最后结合眼动追踪轨迹图和热点图比较分析不同卫衣设计的视觉关注模式，进一步验证设计元素如何操作视觉注意分布。通过系统的实验方法和细致的分析，为设计出更加吸引注意力和富有情感表达的卫衣提供了实证依据和具体指导。

第4章 卫衣设计元素脑电指标特征提取及分析

在第二章及第三章的研究中，通过问卷调查、PAD 情绪测量和眼动实验，深入探讨了现代消费者对卫衣设计的喜好度、情绪反应及视觉注意力分配情况。为了进一步了解卫衣设计元素对个体认知加工的影响，本章采用脑电（EEG）技术，探索被试在观察卫衣不同设计要素时的脑电反应。揭示各设计元素如何对大脑的认知加工及情绪响应产生影响，增强对服装设计如何与认知和情绪过程相互作用的理解。以第二章和第三章实验绘制的样本作为刺激材料，对其进行脑电实验，并对前额区、中区及后枕区的 ERPs 早期成分、中期成分和晚期成分进行分析，提取出与情绪加工过程相关的 ERPs 成分和脑区特征。早期成分呈现在 100-200 ms 之间的 N1 成分和 P1 成分；中期成分呈现在 200-300 ms 之间的 N2 成分和 P2 成分；晚期成分呈现在 300-700 ms 的 P3 成分。

4.1 实验部分

4.1.1 实验准备

（1）实验设备

采用武汉格林泰克科技有限公司生产的 Smarting Pro 脑电仪进行数据采集工作。Smarting Pro 脑电帽仪是一款高端的多通道脑电信号采集系统，该仪器的核心设备为配备 32 导联的电极帽（CM-TZ01-2032 电极帽），电极帽设计遵循国际 10-20 系统布局，确保覆盖大脑各关键区域的电极的精准定位和稳定接触。数据采集和分析软件 mbtStreamer 是专门为 Smarting Pro 脑电仪开发的，它支持实时信号采集、信号的视觉监测以及记录过程中的数据存储。

（2）实验环境

实验环境与第二章 2.2.3（4）实验环境相同。

（3）实验被试

实验被试与第二章 2.2.3（5）实验被试相同

（4）实验刺激图

实验刺激图与第二章 2.2.1 实验样本标注相同

4.1.2 实验流程

实验开始之前，我们将脑电 ERP 系统的放大器与 32 导联的电极帽连接好，并将展示样本刺激图电脑上的 E-prime3.0 软件与连接脑电帽和放大器电脑的软件 mbtStreamer 在同一个网域下进行连接，并进行系统校准确保数据采集的准确性。被试在接受简要说明和训练后，需要佩戴上已连好的电极帽。电极帽的配置严格遵循国际 10-20 系统的标准，以确保电极与大脑表面正确和稳定的接触。在成功为参与者戴上电极帽后，为了降低电极与头皮接触电阻，会在每个电极位置施加适量的导电胶。然后，通过监测电极与头皮之间的阻抗，确保每个电极的阻抗值保持在 0 至 10 千欧姆之间，确保信号的稳定传输。在实验中一共有 100 张图像，其中 50 张为卫衣设计的样本图像（刺激图），另外 50 张图形为“+”字符号（非刺激图）。每张刺激图的呈现时间为 2000 ms，之后紧跟的非刺激图呈现时间为 500 ms，进入休息时间，使被试清除前面记忆，集中注意力观察下一张样本刺激图。为了避免被试的注意力持续降低和记忆效应，整个实验设计为三组连续的实验组，每组包含相同的 50 张样本刺激图，为确保数据连贯性和避免被试在实验中产生过度疲劳，每组样本刺激图在循环播放 3 遍后，都会安插一个 30 秒的空白页面供被试休息。休息结束后，下一组实验会自动开始，直到三组所有样本刺激图展示结束。整个实验约 20 分钟，实验流程图如图 4-1 所示。

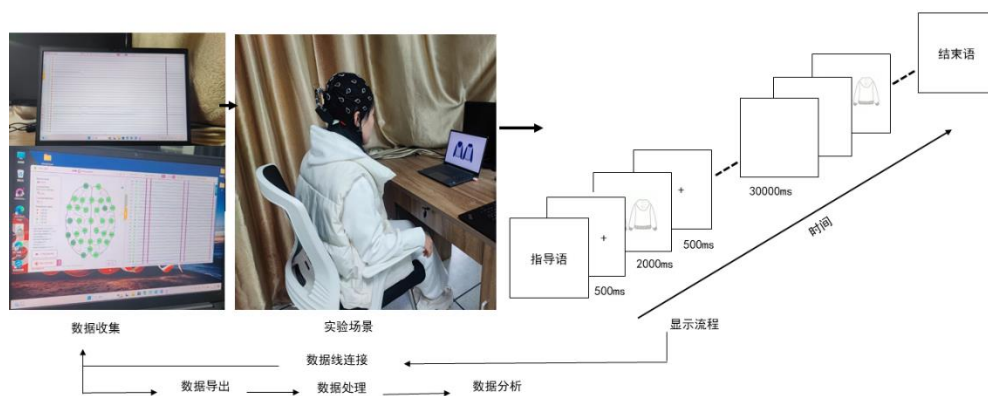


图 4-1 脑电实验流程图

Fig. 4-1 EEG experimental flowchart

4.2 数据预处理

(1) 数据导入与初步检查

在实验完成后，被试的原始脑电数据被导入专业的数据分析软件环境 MATLAB2021a 中。使用 EEGLABv2023 脑电数据分析工具进行数据处理。首先，对所有被试的原始数据进行初步检查，查阅数据文件的完整性与一致性，确保数据未在传输或保存过程中的损坏。

（2）参考电极的选取和转换

为了减少实验环境和被试头皮对脑电数据的影响，通常需要将原始数据转换到一种更加稳定的参考。本研究中，使用双侧乳突（FT9、FT10）作为参考电极，这种参考方式认为左右两侧乳突骨处的活动较为稳定，可认为是非脑电活动，从而提高脑电数据的信噪比。

（3）重采样与数字滤波

随后，对数据进行重采样，将采样率统一调整为 500 Hz，这既能保留大部分认知相关脑电活动的频带信息，也可降低数据处理的计算量。采用数字滤波器对信号进行带通滤波，设置高通滤波为 0.5 Hz，低通滤波为 30 Hz，以去除直流分量以及高频噪音，并抑制工频干扰。

（4）独立成分分析（ICA）

采用独立成分分析（ICA）方法对脑电波信号中的干扰成分，比如眼电干扰（包括眨眼和眼动引起的信号）以及肌电干扰（源自面部肌肉的信号），进行识别和剔除。ICA 作为一种盲信号分离技术，能够在假定信号源之间统计独立的前提下，分解混合信号。挑选出反映伪迹特征的成分，并将数据集中去除这些成分，得到清洁的脑电信号。

（5）事件分段与基线校正

在实验中，每一张卫衣刺激图呈现时刻会同步记录一个特定事件标记（Marker），基于这些标记和创建好的 Bins，对数据进行分段，即将连续的卫衣脑电记录分割成与标记同步的时间窗口。本实验选择样本刺激图出现前的静默期 -200 ms 至 0 ms 作为基线，并将每个分段数据与基线的平均值进行修正，以消除基线时期的电位变化对实验数据分析的影响。

（6）叠加平均与二次数字滤波

在基线校正后，对所有截取的分段在锁定的事件上进行叠加求平均，以增强事件相关脑电活动并进一步降低噪声。求平均后，为了清理最终的 ERP 波形，再进行一次数字滤波，以便舍弃叠加过程中可能产生的低级噪声。

（7）各被试数据的总平均

最后，将所有参与实验的被试的 ERP 波形进行总平均，得到一个反映整体样本反应趋势的平均波形。总平均能更好地概括样本集合对特定事件的典型脑电响应，用于后续的统计分析和解释。

4.3 指标提取

尽管脑电实验中包含 32 导或更多电极，但有效性的考量促使研究者集中注意力于最相关的电极。前额叶区域：这一区域，特别是额叶皮层与情绪调节和表达密切相关^[24]。总所周知，前额叶与决策、情绪加工及社交互动有强烈的联系。特别是前额叶区域的不对称性活动已被发现与个体情绪状态相关，如正面情绪倾向与左侧前额叶活动增强相关，而消极情绪倾向与右侧前额叶活动增强相关^[78]。顶叶和中央区：顶叶涉及多种感觉信息的整合、注意力控制以及与空间处理有关的功能。中央区域通常包括与运动相关的中央沟的区域，这些区域特别重要，因为它们可以捕获身体姿态和动作的变化，这些变化可能与情感体验相关联。后枕叶区域：后枕叶区域主要与视觉处理有关^[79]。卫衣设计元素首先通过视觉被认知和处理，这使得后枕叶区域的脑电活动成为捕获视觉审美体验和情感反应的关键指标。选取这些特定区域的电极，可以有效提取与情绪处理直接相关的脑电指标，同时避免因过多非特定区域信息而导致数据复杂化。

针对卫衣设计元素进行脑电指标提取的过程中，首先采用相关性分析揭示不同脑电电极记录的神经活动之间的统计关联。通过对各电极间的相关系数进行分析，确定哪些神经生理信号在感知与处理卫衣设计元素方面表现出同步性或一致性的变动。接着采用主成分分析（PCA）被实施以降维和提炼重要的脑电特征。通过相关性和主成分分析得以量化和理解脑电数据在卫衣设计感知过程中的结构性模式，识别在情绪、认知和美学评估中功能协调的电极，揭示设计属性与脑电活动之间的复杂交互，提供一个整合性的神经认知框架。

4.3.1 指标相关性分析

由表 4-1 可知，在不同脑区电极之间的相关性中，前额叶区内电极（F3、F4 和 FZ）表现出极高相关性，F3 与 FZ 的相关系数为 0.93，F4 与 FZ 的相关性系数为 0.91，显示出卫衣款式设计元素测试期间，前额叶区域功能的一致性和协同作用。中央区域电极 C3 与 CZ 之间的相关性为 0.94，表明这部分脑区在卫衣情绪感知中活跃且关联性强。后顶区域的电极 P4 与 PZ 展现了较高的相关性，其值为 0.86，这指示了卫衣情绪感知期间的综合信息处理。卫衣款式对应的情绪感知主要与前额叶（F3, F4, FZ）、中央区域（C3, CZ）和部分顶叶区域（P4）的大脑活动相关性较高，O1 和 O2 电极与其他区域电极的相关性相对较低。

表 4-1 款式脑电指标相关性

Tab. 4-1 Correlation of EEG indicators in different styles

	F3	F4	C3	C4	P3	P4	O1	O2	FZ	CZ	PZ
F3	1.00	0.88	0.87	0.72	0.68	0.40	-0.20	-0.35	0.93	0.86	0.65
F4	0.88	1.00	0.83	0.88	0.77	0.46	-0.19	-0.35	0.91	0.89	0.52
C3	0.87	0.83	1.00	0.85	0.86	0.67	-0.13	-0.08	0.83	0.94	0.83
C4	0.72	0.88	0.85	1.00	0.91	0.75	0.06	0.05	0.75	0.90	0.70
P3	0.68	0.77	0.86	0.91	1.00	0.65	0.01	0.01	0.64	0.82	0.68
P4	0.40	0.46	0.67	0.75	0.65	1.00	0.22	0.60	0.44	0.69	0.86
O1	-0.20	-0.19	-0.13	0.06	0.01	0.22	1.00	0.56	-0.24	-0.11	0.26
O2	-0.35	-0.35	-0.08	0.05	0.01	0.60	0.56	1.00	-0.31	-0.07	0.39
FZ	0.93	0.91	0.83	0.75	0.64	0.44	-0.24	-0.31	1.00	0.92	0.62
CZ	0.86	0.89	0.94	0.90	0.82	0.69	-0.11	-0.07	0.92	1.00	0.79
PZ	0.65	0.52	0.83	0.70	0.68	0.86	0.26	0.39	0.62	0.79	1.00

由表 4-2 可知，在前额叶区域，F3 与 F4 之间的相关系数达到 0.90，表明这两个电极位置的活动在参与者观看不同色彩卫衣时具有强烈的同步性，这与情绪调节和价值判断功能有关。此外，C3 与 CZ 之间的相关性系数为 0.85，C4 与 CZ 为 0.85，这些指标对情绪体验中的理解和感知进行了映射。中央区域通常涉及到身体感觉的处理，但在色彩认知和情绪体验中显示出关键的作用，尤其是当情绪体验与视觉刺激紧密相连时。顶叶区域的 P3 与 PZ 之间的相关性为 0.78，而 P4

与 PZ 的相关性为 0.78，这提供了有力证据，表明这些脑区间存在相互作用，在处理色彩触发的情绪相关信息相关，这与顶叶在注意力控制和感知整合中的角色相符。

表 4-2 色彩脑电指标相关性

Tab. 4-2 Correlation of color EEG indicators

	F3	F4	C3	C4	P3	P4	O1	O2	FZ	CZ	PZ
F3	1.00	0.90	0.85	0.73	0.65	0.47	0.33	0.32	0.90	0.80	0.64
F4	0.90	1.00	0.72	0.76	0.49	0.42	0.15	0.27	0.91	0.78	0.55
C3	0.85	0.72	1.00	0.83	0.82	0.56	0.39	0.39	0.82	0.85	0.75
C4	0.73	0.76	0.83	1.00	0.65	0.59	0.18	0.46	0.79	0.85	0.64
P3	0.65	0.49	0.82	0.65	1.00	0.65	0.47	0.42	0.63	0.75	0.78
P4	0.47	0.42	0.56	0.59	0.65	1.00	0.62	0.69	0.53	0.71	0.78
O1	0.33	0.15	0.39	0.18	0.47	0.62	1.00	0.65	0.23	0.36	0.59
O2	0.32	0.27	0.39	0.46	0.42	0.69	0.65	1.00	0.31	0.48	0.66
FZ	0.90	0.91	0.82	0.79	0.63	0.53	0.23	0.31	1.00	0.84	0.62
CZ	0.80	0.78	0.85	0.85	0.75	0.71	0.36	0.48	0.84	1.00	0.82
PZ	0.64	0.55	0.75	0.64	0.78	0.78	0.59	0.66	0.62	0.82	1.00

由表 4-3 可知，前额叶区域的电极（F3、F4、FZ）显示出较高的相关性，特别是 F3 电极与 F4 电极之间的相关性达到了 0.76，与 FZ 电极的相关性为 0.82，这表明前额叶在处理图案设计时扮演着重要的角色。中央区域的电极（C3、C4、CZ）之间也存在较高的相关性，其中 C4 与 CZ 的相关性达到 0.94，这表明中央区域能够在图案刺激中表现出一致性。顶叶区域的电极（P3、P4、Pz）之间同样显示出较高的相关性，特别是 P3 与 PZ 的相关性为 0.89，与 P4 的相关性为 0.83，这暗示顶叶区域能够在整合和处理图案刺激时表现出活跃。

表 4-3 图案脑电指标相关性

Tab. 4-3 Correlation of pattern EEG indicators

	F3	F4	C3	C4	P3	P4	O1	O2	FZ	CZ	PZ
F3	1.00	0.76	0.86	0.59	0.20	-0.10	-0.25	-0.17	0.82	0.75	0.23
F4	0.76	1.00	0.71	0.80	0.11	0.21	-0.20	0.14	0.95	0.89	0.35

续表 4-3 图案脑电指标相关性

Tab. 4-3 Correlation of pattern EEG indicators

	F3	F4	C3	C4	P3	P4	O1	O2	FZ	CZ	PZ
C3	0.86	0.71	1.00	0.63	0.55	0.35	0.12	0.15	0.74	0.68	0.58
C4	0.59	0.80	0.63	1.00	0.41	0.48	0.17	0.39	0.74	0.94	0.68
P3	0.20	0.11	0.55	0.41	1.00	0.68	0.48	0.42	0.03	0.22	0.89
P4	-0.10	0.21	0.35	0.48	0.68	1.00	0.69	0.80	0.12	0.30	0.83
O1	-0.25	-0.20	0.12	0.17	0.48	0.69	1.00	0.61	-0.30	0.00	0.54
O2	-0.17	0.14	0.15	0.39	0.42	0.80	0.61	1.00	0.07	0.27	0.68
FZ	0.82	0.95	0.74	0.74	0.03	0.12	-0.30	0.07	1.00	0.85	0.26
CZ	0.75	0.89	0.68	0.94	0.22	0.30	0.00	0.27	0.85	1.00	0.48
PZ	0.23	0.35	0.58	0.68	0.89	0.83	0.54	0.68	0.26	0.48	1.00

4.3.2 指标主成分分析

将卫衣不同设计元素的脑电指标导入 SPSS.26.0 软件进行因子分析,进一步明确卫衣设计元素脑电指标的提取。由表 4-4 可知, KMO 检验系数为 $0.619 > 0.500$, Bartlett 的显著性 $0.000 < 0.005$, 数据呈球形分布, 各个变量在一定程度上相互独立, 可知变量间显著相关, 说明各个脑电指标适合做因子分析。

表 4-4 卫衣款式设计元素 KMO 和 Bartlett 的检验

Tab. 4-4 Verification of KMO and Bartlett design elements for sweater styles

KMO 取样适切性数量		0.85
Bartlett 球形度检验		近似卡方
		440.434
		自由度
		55
		显著性
		0.000

由表 4-5 可知, 前三个因子的特征根大于 1, 旋转前第一个因子的特征根为 7.676, 解释了原始数据方差的 69.779 %, 这说明它包括了大部分设计元素的变异性。第二个和第三个因子解释了更少的方差, 分别为 14.061 %和 7.166 %, 这使得前三个因子累积解释了 91.005 %的总方差。这表明绝大多数的设计元素变异性能够被前三个因子很好地解释。旋转后, 第一个因子的方差解释率降至 43.239 %, 而第二个因子的方差解释率增加至 34.508 %。旋转的目的通常是为了

获取更加清晰、解释性更好的因子结构，即使单个因子解释的方差有所降低。经过旋转后，前三个因子累积解释了 91.005 % 的总方差，与旋转前相同。

表 4-5 卫衣款式设计元素方差解释率

Tab. 4-5 Explanation rate of variance in hoodie style design elements

因子 编号	特征根			旋转前方差解释率			旋转后方差解释率		
	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%
1	7.676	69.779	69.779	7.676	69.779	69.779	4.756	43.239	43.239
2	1.547	14.061	83.84	1.547	14.061	83.84	3.796	34.508	77.747
3	0.788	7.166	91.005	0.788	7.166	91.005	1.458	13.258	91.005
4	0.394	3.578	94.584						
5	0.193	1.753	96.337						
6	0.12	1.089	97.425						
7	0.092	0.834	98.259						
8	0.068	0.623	98.882						
9	0.056	0.513	99.396						
10	0.041	0.373	99.768						
11	0.025	0.232	100						

选择最大方差法对因子载荷矩阵实施正交旋转，如表 4-6 所示。在旋转后的矩阵表中，脑电指标的绝对值越大，表示这个脑电指标与因子越接近，即这个脑电指标对因子起到的贡献率越大。由表 4-6 可知，在因子 1 上 F3、C3 和 FZ 呈现高度关联，载荷系数分别为 0.887、0.896 和 0.94；在因子 2 上，P4 和 PZ 具有强关联，其载荷系数分别为 0.88 和 0.802；而在因子 3 上 O1 的载荷最高，载荷系数为 0.921，表明这些脑电指标与卫衣款式设计元素的注意力转移和情感反应有较强的相关性。

表 4-6 卫衣款式设计元素旋转后因子载荷系数

Tab. 4-6 Load factors of sweater style design elements after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
F3	0.887	0.142	0.302	0.899
F4	0.719	0.46	0.344	0.846
C3	0.896	0.252	0.080	0.872
C4	0.757	0.618	0.066	0.959
P3	0.516	0.787	0.16	0.911
P4	0.358	0.88	0.178	0.935
O1	0.214	0.233	0.921	0.948
O2	-0.1	0.781	0.528	0.898
FZ	0.94	0.238	-0.041	0.942
CZ	0.71	0.601	0.197	0.903
PZ	0.49	0.802	0.114	0.897

将卫衣色彩不同设计元素的脑电指标导入 SPSS.26.0 软件进行因子分析, 进一步明确卫衣设计元素脑电指标的提取。由表 4-7 可知, KMO 检验系数为 0.844 > 0.500, Bartlett 的显著性 $0.000 < 0.005$, 数据呈球形分布, 各个变量在一定程度上相互独立, 可知变量间显著相关, 说明各个脑电指标适合做因子分析。

表 4-7 卫衣色彩设计元素 KMO 和 Bartlett 的检验

Tab. 4-7 Verification of KMO and Bartlett color design elements for sweatshirts

KMO 取样适切性数量	0.844
近似卡方	341.438
Bartlett 球形度检验	自由度
	55
	显著性
	0.000

由表 4-8 可知, 在旋转前, 第一个因子的特征根为 7.293, 解释了 66.297 % 的总方差, 突显了因子 1 在解释色彩设计元素上的主导地位。第二因子和第三因子的特征根分别为 1.717 和 0.564, 分别贡献了 15.609 % 和 5.124 % 的方差解释, 表明在色彩设计元素中同样扮演重要角色。旋转后, 因子的解释能力有所变化。

第一个因子的方差解释率降至 44.774%，但依然是所有因子中最大的。第二因子的解释率提升至 26.66%，第三因子则微降至 15.596%，这种变化是为了获得一个更为简洁和解释性更强的因子结构。

表 4-8 卫衣色彩设计元素方差解释率

Tab. 4-8 Explanation rate of variance of hoodie color design elements

因子 编号	特征根			旋转前方差解释率			旋转后方差解释率		
	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%
1	7.293	66.297	66.297	7.293	66.297	66.297	4.925	44.774	44.774
2	1.717	15.609	81.906	1.717	15.609	81.906	2.933	26.66	71.434
3	0.564	5.124	87.03	0.564	5.124	87.03	1.716	15.596	87.03
4	0.512	4.654	91.684						
5	0.294	2.675	94.36						
6	0.213	1.934	96.293						
7	0.145	1.321	97.614						
8	0.086	0.781	98.395						
9	0.077	0.701	99.096						
10	0.065	0.587	99.683						
11	0.035	0.317	100						

选择最大方差法对因子载荷矩阵实施正交旋转，如表 4-9 所示。在旋转后的矩阵表中，脑电指标的绝对值越大，表示这个脑电指标与因子越接近，即这个脑电指标对因子起到的贡献率越大。由表 4-9 可知，在因子 1 上 F3、F4 和 FZ 呈现高度关联，载荷系数分别为 0.861、0.953 和 0.914；在因子 2 上，O2 具有强关联，其载荷系数 0.922；而在因子 3 上 P3 的载荷最高，载荷系数为 0.787，表明这些脑电指标与卫衣色彩设计元素的注意力转移和情感反应有较强的相关性。

表 4-9 卫衣色彩设计元素旋转后因子载荷系数

Tab. 4-9 Factor load factors of sweater color design elements after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
F3	0.861	0.165	0.315	0.868
F4	0.953	0.104	0.053	0.922
C3	0.727	0.243	0.569	0.912
C4	0.835	0.274	0.201	0.813
P3	0.437	0.338	0.787	0.924
P4	0.36	0.767	0.287	0.8
O1	-0.03	0.795	0.356	0.761
O2	0.22	0.922	-0.054	0.9
Fz	0.914	0.156	0.237	0.915
Cz	0.787	0.379	0.366	0.897
Pz	0.474	0.639	0.477	0.861

将卫衣图案不同设计元素的脑电指标导入 SPSS.26.0 软件进行因子分析, 进一步明确卫衣设计元素脑电指标的提取。由表 4-10 可知, KMO 检验系数为 0.865 > 0.500, Bartlett 的显著性 $0.000 < 0.005$, 数据呈球形分布, 各个变量在一定程度上相互独立, 可知变量间显著相关, 说明各个脑电指标适合做因子分析。

表 4-10 卫衣图案设计元素 KMO 和 Bartlett 的检验

Tab. 4-10 Verification of KMO and Bartlett in sweater pattern design elements

KMO 取样适切性数量		0.865
Bartlett 球形度检验	近似卡方	505.602
	自由度	55
	显著性	0.000

由表 4-11 可知, 在旋转前, 第一因子的特征根达到 6.358, 解释了 57.799 % 的总方差。表明第一因子捕捉了卫衣图案设计元素变异性的最大部分。第二因子具有显著的特征根 (3.111), 解释了 28.283 % 的总方差。第三因子的解释力较低, 特征根为 0.463, 解释了 4.213 % 的方差。综合这三个因子, 累积解释了卫衣

图案设计元素变异性的 90.295 %。旋转后，第一因子特征根略有降低，解释率变为 49.253 %，但仍是所有因子中最大的解释力。第二因子的解释率略有上升至 28.321 %，累积解释率为 77.574 %。重要的是旋转后第三因子的解释率提升显著，达到 12.721 %，使累积解释率仍保持在 90.295 %。

表 4-11 卫衣图案设计元素方差解释率

Tab. 4-11 Explanation rate of variance of hoodie pattern design elements

因子 编号	特征根			旋转前方差解释率			旋转后方差解释率		
	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%	特征根	方差解 释率%	累积%
1	6.358	57.799	57.799	6.358	57.799	57.799	5.418	49.253	49.253
2	3.111	28.283	86.082	3.111	28.283	86.082	3.115	28.321	77.574
3	0.463	4.213	90.295	0.463	4.213	90.295	1.399	12.721	90.295
4	0.396	3.595	93.891						
5	0.161	1.466	95.357						
6	0.145	1.32	96.677						
7	0.109	0.989	97.666						
8	0.091	0.824	98.49						
9	0.082	0.742	99.231						
10	0.047	0.429	99.66						
11	0.037	0.34	100						

由表 4-12 可知，F3、F4、C3 和 FZ 显示出在因子 1 上有极高的因子载荷，均超过 0.9，表明这些元素在因子 1 上有极强的相关性。P4 的载荷系数在因子 2 上最高（0.917），P3 在因子 2 上也有较高的载荷（0.762），表明它们与因子 2 高度相关，O1 在因子 3 上有非常高的载荷（0.888），并且 O2 的载荷系数也在因子 3 上有较强的相关性（0.64），F3（0.926）、C3（0.932）和 CZ（0.936）的共同度数值较高，这意味着因子分析模型有效捕捉了这些设计元素的方差。

表 4-12 卫衣图案设计元素旋转后因子载荷系数

Tab. 4-12 Factor load factors of sweater pattern design elements after rotation

	因子载荷系数			共同度
	因子 1	因子 2	因子 3	
F3	0.957	0.097	0.012	0.926
F4	0.941	0.069	-0.048	0.893
C3	0.942	0.211	-0.025	0.932
C4	0.799	0.518	-0.012	0.907
P3	0.341	0.762	0.288	0.78
P4	0.111	0.917	0.251	0.916
O1	-0.067	0.4	0.888	0.953
O2	-0.18	0.632	0.64	0.842
FZ	0.959	0.074	-0.042	0.926
CZ	0.915	0.301	-0.092	0.936
PZ	0.41	0.842	0.206	0.92

综上所述, 根据对卫衣款式、色彩、图案的脑电指标进行相关性分析和主成分分析, F3 在所有卫衣设计元素中呈现极高的相关性和因子载荷系数, 是情绪建模得关键指标; F4 与 F3 一样, 在所有卫衣设计元素中具有很高得表现, 并且在色彩设计元素中, F4 给出了最高的相关性和因子载荷系数; CZ 作为中央的参考电极, CZ 在所有卫衣设计元素中表现出良好的相关性和因子载荷系数, 是可以在卫衣设计元素间提供稳定性的电极; O1 和 O2 在图案设计元素中表现突出, O1 具有很高的因子 3 载荷系数 0.888, 共同度 0.953; O2 也有较高的因子 2 载荷系数 0.632, 共同度 0.842, 因此可作为评估卫衣图案如何影响情绪的重要指标。综合分析, 选取 F3、F4、CZ、O1 和 O2 这 5 个脑电指标作为卫衣不同设计元素的主要分析指标用于卫衣情感模型的构建。可以覆盖前额区、中央区域及后枕区域, 并且每个电极都展现了对款式、色彩或图案设计元素的高度敏感性, 能够为卫衣情感建模提供丰富的信息。

4.4 实验结果及分析

本实验主要探究卫衣款式（廓形、领型、袖型）、色彩（单色、双色、三色）以及图案设计（图案大小、图案位置）对消费者情感审美的影响。在数据处理与分析阶段，从 F3、F4、O1、C4、C3、O2 六个电极中提取的 N1/P1、N2/P2 和 P3 脑电波成分。通过对被试的 ERPs 数据进行统计分析，发现卫衣不同设计元素会影响感知情绪和审美偏好，在卫衣的款式、色彩及图案设计元素中都产生了明显的早期成分 N1/P1、中期成分 N2/P2 及晚期成分 P3 如图 4-2、图 4-3 及图 4-4 所示。对各个 ERPs 成分峰值进行重复测量方差分析，从而探究各设计元素在被试脑电图反应中的峰值是否存在显著差异。重复测量方差因素脑区（两个水平：左半球、右半球），电极位置（三个水平：F3/C3/O1，F4/C4/O2）。在款式设计元素（三个水平：廓形、领型、袖型）、色彩设计元素（三个水平：单色、双色、三色）、图案设计元素（两个水平：图案大小、图案位置）。

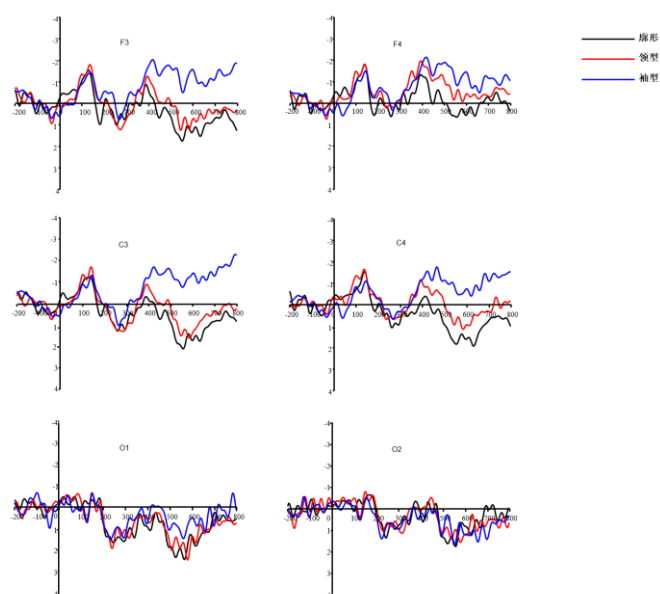


图 4-2 款式不同元素诱发的 ERP 总平均波形图

Fig. 4-2 The overall average waveform of ERP induced by different elements in different styles

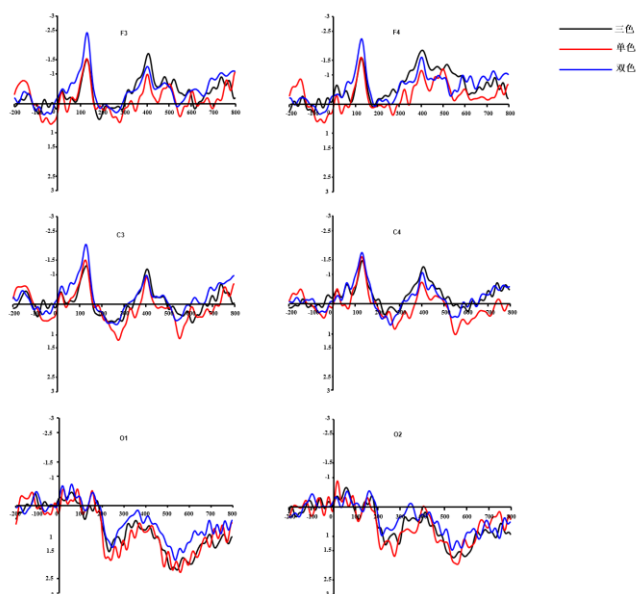


图 4-3 色彩不同元素诱发的 ERP 总平均波形图

Fig. 4-3 Total average waveform of ERP induced by different color elements

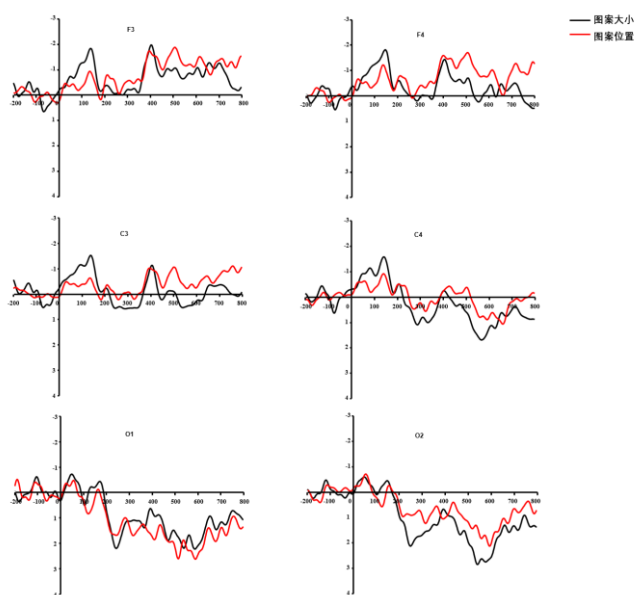


图 4-4 图案不同元素诱发的 ERP 总平均波形图

Fig. 4-4 Total average waveform of ERP induced by different elements in the pattern

4.4.1 早期成分分析

(1) N1 成分

由表 4-13 可知,款式效应的分析未显示出显著差异, $F(1.87)=0.545$, $P=0.653$, 表明不同款式元素对神经活动的影响较小; 脑区的主效应未显示出显著差异, $F=1.363$, $P=0.264$, 脑区的影响在整体上较小; 电极位置的主效应未有显著差异, $F=0.058$, $P=0.007$, 不同电极记录的神经活动没有显著; 款式和脑区的交互作用、

款式和电极位置之间的交互作用,以及脑区和电极位置之间的交互作用均未呈显著性,表明这些因素的交互作用对神经活动的影响不显著。

表 4-13 款式 N1 成分方差分析表

Tab. 4-13 Analysis of variance for N1 components of styles

源	III 类平方和	均方	F	Sig	偏 Eta 方
款式	32.866	10.955	0.545	0.653	0.018
误差 (款式)	1750.271	20.118			
脑区	19.214	9.607	1.363	0.264	0.0449
误差 (脑区)	408.903	7.050			
电极	0.089	0.089	0.058	0.077	0.002
误差 (电极)	44.440	1.532			
款式 * 脑区	35.466	5.911	1.620	0.144	0.052
误差 (款式*脑区)	634.703	3.648			
款式 * 电极	1.791	0.597	0.454	0.715	0.015
误差 (款式*电极)	114.320	1.314			
脑区 * 电极	2.050	1.025	0.560	0.574	0.019
误差 (脑区*电极)	106.178	1.831			
款式 * 脑区 * 电极	12.330	2.055	1.531	0.171	0.050
误差 (款式*脑区*电极)	233.541	1.342			

由表 4-14 可知,脑区具有显著的主效应, $F=4.814$, $P=0.012$,偏 Eta 方=0.018,表明左右脑区间 N1 成分具有显著差异。然而,色彩单独的主效应并未显示出显著性, $F=0.473$, $P=0.907$,偏 Eta 方=0.045,表明卫衣色彩变化并未对 N1 的振幅产生显著影响;脑区与色彩之间的交互作用接近显著性, $F=1.592$, $P=0.049$,偏 Eta 方=0.053,表明不同色彩搭配在不同的脑区内对 N1 成分的影响有所不同;电极位置的主效应及其与其他因素的交互作用,均为发现显著性,在不同电极位置测量的 N1 成分变化并不受色彩搭配或其与脑区交互作用的显著影响。

表 4-14 色彩 N1 成分方差分析表

Tab. 4-14 Analysis of variance for color N1 components

源	III 类平方和	均方	F	Sig	偏 Eta 方
脑区	142.923	71.462	4.814	0.012	0.018
误差 (脑区)	860.950	14.844			
色彩	127.054	12.705	0.473	0.907	0.045
误差 (色彩)	7781.718	26.834			
电极	3.124	3.124	0.848	0.365	0.002
误差 (电极)	106.820	3.683			
脑区 * 色彩	180.522	9.026	1.592	0.049	0.053
误差 (脑区*色彩)	3288.484	5.670			
脑区 * 电极	10.380	5.190	1.173	0.317	0.015
误差 (脑区*电极)	256.621	4.425			
色彩 * 电极	18.150	1.815	1.078	0.379	0.050
误差 (色彩*电极)	488.122	1.683			
脑区 * 色彩 * 电极	35.029	1.751	1.029	0.425	0.05
误差 (脑区*色彩*电极)	987.001	1.702			

由表 4-15 可知, 图案元素对 N1 成分的影响并不显著, 表明图案不同大小及位置对 N1 成分反应没有显著差异; 脑区因素的主效应具有显著性, $F=5.308$, $P=0.008$, 偏 Eta 方=0.016, 表明不同脑区的 N1 成分反应有显著的不同, 揭示了脑区域之间在处理图案刺激上具有功能差异; 电极位置因素的主效应、图案与脑区的交互影响、脑区与电极位置因素之间的交互作用及图案、脑区及电极位置的三因素交互均未呈现显著性, 表明卫衣图案设计元素并不影响脑区的 N1 成分反应; 然而, 图案与电极位置之间的交互作用显著性明显, $F=4.714$, $P=0.001$, 偏 Eta 方=0.039, 表明卫衣图案不同大小和位置在电极位置水平上造成了 N1 成分的显著差异, 图案在大脑不同位置产生影响的具体途径可能会根据电极记录点的不同而有所变化。

表 4-15 图案 N1 成分方差分析表

Tab. 4-15 Analysis of variance for N1 pattern components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
图案	116.431	23.286	0.793	0.557	0.142
误差 (图案)	4259.793	29.378			
脑区	121.470	60.735	5.308	0.008	0.016
误差 (脑区)	663.689	11.443			
电极	5.918	5.918	2.141	0.154	0.028
误差 (电极)	80.152	2.764			
图案* 脑区	63.455	6.345	0.878	0.554	0.052
误差 (图*脑区)	2094.859	7.224			
图案* 电极	27.114	5.423	4.714	0.001	0.039
误差 (图*电极)	166.802	1.150			
脑区 * 电极	13.757	6.879	2.839	0.067	0.034
误差 (脑区*电极)	140.546	2.423			
图案* 脑区 * 电极	24.649	2.465	1.676	0.086	0.031
误差 (图案*脑区*电极)	426.505	1.471			

(2) P1 成分

由表 4-16 可知, 款式并未呈现出对 P1 成分有显著影响的主效应, $F=1.272$, $P=0.289$, 偏 Eta 方=0.042, 表明不同款式卫衣对脑电波 P1 成分的幅度无差异性影响; 脑区对 P1 成分的主效应未达到显著性, $F=0.163$, $P=0.850$, 偏 Eta 方=0.005, 表明不同脑区间 P1 成分的振幅不会因为卫衣款式设计的不同而发生显著变化; 电极位置对 P1 成分显示出接近显著性的主效应, $F=4.194$, $P=0.050$, 偏 Eta 方=0.127, 这表明了不同款式设计元素在不同电极位置的 P1 振幅可能存在某种程度的差异; 在交互作用方面, 款式与脑区的交互效应呈显著性, $F=2.599$, $P=0.019$, 偏 Eta 方=0.082, 表明款式设计元素对 P1 成分的影响在不同脑区之间不同; 款式与电极位置的交互作用、脑区与电极位置的交互作用以及款式、脑区与电极位置的三因素交互作用均未达到显著性水平。

表 4-16 款式 P1 成分方差分析表

Tab. 4-16 Analysis of variance for P1 components of styles

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
款式	121.420	40.473	1.272	0.289	0.042
误差 (款式)	2767.567	31.811			
脑区	5.017	2.509	0.163	0.850	0.005
误差 (脑区)	891.081	15.363			
电极	9.192	9.192	4.194	0.050	0.127
误差 (电极)	63.555	2.192			
款式 * 脑区	97.983	16.330	2.599	0.019	0.082
误差 (款式*脑区)	1093.147	6.282			
款式 * 电极	7.659	2.553	1.092	0.357	0.036
误差 (款式*电极)	203.374	2.338			
脑区 * 电极	3.700	1.850	0.358	0.701	0.012
误差 (脑区*电极)	299.988	5.172			
款式 * 脑区 * 电极	23.871	3.978	1.741	0.114	0.057
误差 (款式*脑区*电极)	397.508	2.285			

由表 4-17 可知, 卫衣色彩搭配影响未呈现显著性, $F=0.961$, $P=0.477$, 偏 Eta 方=0.028; 脑区因素的主效应呈现显著性, $F=4.148$, $P=0.050$, 偏 Eta 方=0.111, 表明不同脑区间在处理卫衣色彩搭配时存在差异; 电极位置的主效应未达到显著性水平, $F=0.620$, $P=0.541$, 偏 Eta 方=0.018, 这意味着各个测试电极位置对 P1 反应的波动没有显著差异; 色彩和脑区交互效应、电极与脑区交互效应及脑区、色彩及电极的三因素交互效应均为呈现显著性, 表明这些因素组合对 P1 反应的影响没有显著的交互影响; 色彩与电极的交互作用达到显著水平, $F=2.042$, $P=0.005$, 偏 Eta 方=0.058, 表明卫衣色彩对 P1 成分的影响是在不同电极位置上变化的, 显示出电极的测量位置在色彩处理中起到重要作用, 揭示了在不同电极记录点下视觉处理的复杂性。

表 4-17 色彩 P1 成分方差分析表

Tab. 4-17 Analysis of variance for color P1 components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
色彩	306.117	30.612	0.961	0.477	0.028
误差 (色彩)	10510.888	31.851			
脑区	22.680	22.680	4.148	0.050	0.111
误差 (脑区)	180.447	5.468			
电极	41.015	20.508	0.620	0.541	0.018
误差 (电极)	2183.423	33.082			
色彩 * 脑区	35.315	3.531	1.017	0.429	0.030
误差 (色彩*脑区)	1146.263	3.474			
色彩 * 电极	292.308	14.615	2.042	0.005	0.058
误差 (色彩*电极)	4724.298	7.158			
脑区 * 电极	4.892	2.446	0.446	0.642	0.013
误差 (脑区*电极)	362.046	5.486			
色彩 * 脑区 * 电极	36.613	1.831	0.817	0.694	0.024
误差 (色彩*脑区*电极)	1478.288	2.240			

由表 4-18 可知，在卫衣图案设计元素中脑区因素的主效应表现出显著性， $F=4.518$ ， $P=0.041$ ，偏 Eta 方=0.120，表明不同脑区之间在处理卫衣图案设计时存在差异；其余因素及其交互效应均为呈现出显著性水平，表明在卫衣图案处理的条件下，卫衣图案大小、图案位置以及脑区和电极位置对 P1 成分的反应影响有限。

表 4-18 图案 P1 成分方差分析表

Tab. 4-18 Analysis of variance for pattern P1 components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
图案	190.070	38.014	1.147	0.338	0.034
误差 (图案)	5468.446	33.142			
脑区	39.004	39.004	4.518	0.041	0.120
误差 (脑区)	284.883	8.633			

续表 4-18 图案 P1 成分方差分析表

Tab. 4-18 Analysis of variance for pattern P1 components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
电极	108.891	54.446	2.406	0.098	0.068
误差 (电极)	1493.676	22.631			
图案 * 脑区	11.499	2.300	0.610	0.692	0.018
误差 (图案*脑区)	621.919	3.769			
图案 * 电极	54.454	5.445	0.502	0.888	0.015
误差 (图案*电极)	3581.163	10.852			
脑区 * 电极	3.853	1.926	0.586	0.560	0.017
误差 (脑区*电极)	217.139	3.290			
图案 * 脑区 * 电极	15.059	1.506	0.888	0.544	0.026
误差 (图案*脑区*电极)	559.352	1.695			

4.4.2 中期成分分析

(1) N2 成分

由表 4-19 可知, 款式的主效应、脑区因素及脑区与电极位置之间的交互效应均未呈现显著性; 电极位置因素的主效应呈现显著性水平, $F=3.539$, $P=0.035$, 偏 Eta 方=0.092, 表明 N2 反应幅度在不同电极位置上有显著的差异, 反映了脑电活动在不同测量点的变化; 款式和脑区的交互效应, $F=0.227$, $P=0.877$, 偏 Eta 方=0.001, 以及款式和电极位置的交互效应, $F=2.690$, $P=0.016$, 偏 Eta 方=0.032, 表明卫衣款式设计元素对 N2 成分的影响在不同电极位置之间存在显著的交互作用。

表 4-19 款式 N2 成分方差分析表

Tab. 4-19 Analysis of variance for N2 components in styles

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
款式	178.125	59.375	1.536	0.210	0.033
误差 (款式)	3826.458	38.651			
脑区	7.339	7.339	1.332	0.257	0.038
误差 (脑区)	181.845	5.510			

续表 4-19 款式 N2 成分方差分析表

Tab. 4-19 Analysis of variance for N2 components in styles

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
电极	92.193	46.096	3.539	0.035	0.092
误差 (电极)	859.634	13.025			
款式 * 脑区	3.537	1.179	0.227	0.877	0.001
误差 (款式*脑区)	513.940	5.191			
款式 * 电极	131.841	21.973	2.690	0.016	0.032
误差 (款式*电极)	1617.207	8.168			
脑区 * 电极	0.448	0.224	0.083	0.921	0.002
误差 (脑区*电极)	178.325	2.702			
款式 * 脑区 * 电极	10.907	1.818	0.935	0.471	0.011
误差 (款式*脑区*电极)	384.778	1.943			

由表 4-20 可知, 色彩搭配设计的主效应、脑区因素及色彩与脑区之间的交互效应、脑区和电极位置的交互效应和色彩、脑区、电极三因素交互效应均不显著; 电极位置因素的主效应呈显著性水平, $F=4.411$, $P=0.016$, 偏 Eta 方=0.118, 表明不同电极位置监测到的 N2 反应存在显著差异, 反映了不同电极对于视觉刺激的处理不同, 在进行交互作用时, 色彩和电极位置之间的交互效应显著性较小, $F=1.592$, $P=0.049$, 偏 Eta 方=0.046, 表明在不同电极位置下色彩搭配对 N2 成分产生了不同程度的影响。

表 4-20 色彩 N2 成分方差分析表

Tab. 4-20 Analysis of variance for color N2 components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
色彩	396.181	39.618	0.991	0.451	0.029
误差 (色彩)	13194.511	39.983			
脑区	21.166	21.166	1.428	0.241	0.042
误差 (脑区)	488.984	14.818			
电极	404.340	202.170	4.411	0.016	0.118
误差 (电极)	3025.245	45.837			

续表 4-20 色彩 N2 成分方差分析表

Tab. 4-20 Analysis of variance for color N2 components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
色彩 * 脑区	56.484	5.648	1.109	0.354	0.033
误差 (色彩*脑区)	1680.683	5.093			
色彩 * 电极	305.323	15.266	1.592	0.049	0.046
误差 (色彩*电极)	6327.938	9.588			
脑区 * 电极	1.343	0.671	0.068	0.935	0.002
误差 (脑区*电极)	655.645	9.934			
色彩 * 脑区 * 电极	38.331	1.917	0.605	0.910	0.018
误差 (色彩*脑区*电极)	2089.226	3.165			

由表 4-21 可知, 卫衣图案大小和位置的设计元素的主效应均不显著, 在 N2 成分的幅度上, 卫衣设计中不同的图案大小和位置搭配没有产生显著差异; 脑区作为独立变量, 也未显示出对 N2 成分的显著影响, 表明在所观察的脑区内, N2 成分的幅度对不同图案设计的反应差异不大; 相比之下, 电极位置的主效应显著性明显, $F=21.390$, $P<0.001$, 偏 Eta 方=0.400, 表明在不同电极位置监测到的 N2 成分的幅度变化显著, 揭示了电极位置在记录 N2 成分时涉及不同的神经生理过程; 在因素交互作用方面, 图案和脑区的交互效应、图案和电极位置的交互效应以及三因素图案、脑区和电极位置的交互作用均不显著。

表 4-21 图案 N2 成分方差分析表

Tab. 4-21 Analysis of variance for N2 components in patterns

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
图案	0.200	0.200	0.019	0.891	0.000
误差 (图案)	332.411	10.388			
脑区	0.017	0.017	0.013	0.909	0.004
误差 (脑区)	40.510	1.266			
电极	259.512	129.756	21.390	0.000	0.400
误差 (电极)	388.237	6.066			
图案 * 脑区	1.344	1.344	1.287	0.265	0.039

续表 4-21 图案 N2 成分方差分析表

Tab. 4-21 Analysis of variance for N2 components in patterns

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
误差 (图案*脑区)	33.419	1.044			
图案 * 电极	2.488	1.244	0.678	0.511	0.020
误差 (图案*电极)	117.413	1.835			
脑区 * 电极	2.005	1.002	1.041	0.359	0.031
误差 (脑区*电极)	61.645	0.963			
图案 * 脑区 * 电极	3.378	1.689	2.851	0.065	0.082
误差 (图案*脑区*电极)	37.919	0.592			

(2) P2 成分

由表 4-22 可知, 款式设计元素和脑区因素对 N2 成分的主效应均不显著; 电极位置对 N2 成分的主效应显著性明显, $F=3.814$, $P=0.028$, 偏 Eta 方=0.113, 表明不同电极位置在捕捉 N2 成分的反应上存在显著差异; 在交互作用方面, 款式与脑区之间的交互作用、款式与电极位置间的交互作用以及三因素交互款式、脑区和电极位置均未呈显著性。

表 4-22 款式 P2 成分方差分析表

Tab. 4-22 Analysis of variance for P2 components of styles

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
款式	21.935	10.968	1.186	0.312	0.038
误差 (款式)	554.668	9.244			
脑区	6.084	6.084	2.035	0.164	0.064
误差 (脑区)	89.681	2.989			
电极	61.624	30.812	3.814	0.028	0.113
误差 (电极)	484.728	8.079			
款式 * 脑区	5.613	2.806	2.135	0.127	0.066
误差 (款式*脑区)	78.858	1.314			
款式 * 电极	10.312	2.578	1.691	0.157	0.053
误差 (款式*电极)	182.974	1.525			

续表 4-22 款式 P2 成分方差分析表

Tab. 4-22 Analysis of variance for P2 components of styles

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
脑区 * 电极	3.106	1.553	1.144	0.325	0.037
误差 (脑区*电极)	81.423	1.357			
款式 * 脑区 * 电极	1.761	0.440	0.718	0.581	0.023
误差 (款式*脑区*电极)	73.594	0.613			

由表 4-23 可知, 色彩因素和脑区因素的主效应未显示显著, 表明色彩和脑区对 P2 成分幅度的影响无显著差异; 电极位置的主效应显示显著性, $F=4.774$, $P=0.012$, 偏 Eta 方=0.127, 表明不同电极位置记录的 P2 成分有显著差异, 暗示电极位置在 P2 成分上的表现有着重要作用; 在交互效应方面, 色彩与脑区、色彩与电极位置以及色彩、脑区和电极位置的交互效应均不显著。

表 4-23 色彩 P2 成分方差分析表

Tab. 4-23 Color P2 component analysis of variance table

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
色彩	254.300	42.383	0.794	0.576	0.024
误差 (色彩)	10569.987	53.384			
脑区	8.132	8.132	1.083	0.306	0.032
误差 (脑区)	247.795	7.509			
电极	300.674	150.337	4.774	0.012	0.127
误差 (电极)	2078.326	31.490			
色彩* 脑区	62.400	10.400	2.387	0.030	0.067
误差 (色彩*脑区)	862.649	4.357			
色彩* 电极	177.477	14.790	1.762	0.052	0.051
误差 (色彩*电极)	3323.703	8.393			
脑区 * 电极	6.959	3.480	0.569	0.569	0.017
误差 (脑区*电极)	403.592	6.115			
色彩 * 脑区 * 电极	61.720	5.143	1.556	0.102	0.045
误差 (色彩*脑区*电极)	1308.852	3.305			

由表 4-24 可知，卫衣图案的主效应呈显著， $F=5.038$ ， $P=0.032$ ，偏 Eta 方 $=0.144$ ，图案的不同大小和位置的变化对 P2 成分产生显著的影响；不同电极位置对 P2 成分的影响显著， $F=9.768$ ， $P<0.001$ ，偏 Eta 方 $=0.013$ ；在交互因素中图案和脑区之间交互作用呈显著；其余因素及交互作用之间均不显著。

表 4-24 图案 P2 成分方差分析表

Tab. 4-24 Analysis of variance for pattern P2 components

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
图案	74.334	74.334	5.038	0.032	0.144
误差 (图案)	442.684	14.756			
脑区	0.627	0.627	0.385	0.539	0.013
误差 (脑区)	48.849	1.628			
电极	94.116	47.058	9.768	0.000	0.246
误差 (电极)	289.065	4.818			
图案 * 脑区	2.997	2.997	4.357	0.045	0.127
误差 (图案*脑区)	20.638	0.688			
图案 * 电极	0.111	0.055	0.027	0.974	0.000
误差 (图案*电极)	125.268	2.088			
脑区 * 电极	3.903	1.952	2.096	0.132	0.065
误差 (脑区*电极)	55.867	0.931			
图案 * 脑区 * 电极	1.249	0.625	1.110	0.336	0.036
误差 (图案*脑区*电极)	33.769	0.563			

4.4.3 晚期成分分析 (P3 成分)

由表 4-25 可知，脑区的影响表现显著， $F=7.367$ ， $P=0.010$ ，偏 Eta 方 $=0.008$ ，不同脑区之间存在显著差异；电极位置的影响显著， $F=4.288$ ， $P=0.018$ ，偏 Eta 方 $=0.115$ ，不同电极位置在对被测量的因变量有不同的影响，指示不同脑区的表现受到电极位置的影响；款式与脑区的交互作用不显著，但款式与电极之间的交互作用显著， $F=2.866$ ， $P=0.011$ ，偏 Eta 方 $=0.040$ ，表明不同款式设计元素在不同电极位置的效应具有差异性；脑区与电极位置的交互作用以及所有变量的交互作用均不显著。

表 4-25 款式 P3 成分方差分析表

Tab. 4-25 Analysis of variance for P3 components of styles

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
款式	4.105	1.368	0.027	0.994	0.000
误差 (款式)	5012.451	50.631			
脑区	38.296	38.296	7.367	0.010	0.008
误差 (脑区)	171.522	5.199			
电极	84.085	42.042	4.288	0.018	0.115
误差 (电极)	647.058	9.804			
款式 * 脑区	17.177	5.726	1.358	0.260	0.115
误差 (款式*脑区)	417.445	4.217			
款式* 电极	172.321	28.720	2.866	0.011	0.040
误差 (款式*电极)	1984.441	10.022			
脑区 * 电极	3.911	1.956	0.982	0.380	0.029
误差 (脑区*电极)	131.437	1.991			
款式 * 脑区 * 电极	34.327	5.721	1.986	0.069	0.057
误差 (款式*脑区*电极)	570.418	2.881			

由表 4-26 可知, 色彩因素和脑区因素对 P3 成分的影响均没有显著性; 电极位置因素对 P3 成分显著影响, $F=10.856$, $P<0.001$, 偏 Eta 方=0.248, 表明电极位置变量在影响 P3 成分的变异中起到较为重要的作用; 色彩与脑区的交互作用具有显著差异, $F=2.295$, $P=0.036$, 偏 Eta 方=0.065; 色彩与电极位置、脑区与电极位置的交互作用以及色彩、脑区和电极位置的三重交互作用均未达到显著水平。

表 4-26 色彩 P3 成分方差分析表

Tab. 4-26 Color P3 component analysis of variance table

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
色彩	667.260	111.210	1.810	0.099	0.052
误差 (色彩)	12162.177	61.425			
脑区	5.446	5.446	1.048	0.314	0.031
误差 (脑区)	171.566	5.199			

续表 4-26 色彩 P3 成分方差分析表

Tab. 4-26 Color P3 component analysis of variance table

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
电极	303.769	151.884	10.856	0.000	0.248
误差 (电极)	923.359	13.990			
色彩 * 脑区	77.057	12.843	2.295	0.036	0.065
误差 (色彩*脑区)	1107.943	5.596			
色彩 * 电极	136.244	11.354	1.223	0.265	0.036
误差 (色彩*电极)	3677.045	9.285			
脑区 * 电极	4.221	2.110	0.715	0.493	0.021
误差 (脑区*电极)	194.748	2.951			
色彩 * 脑区 * 电极	26.495	2.208	0.850	0.598	0.025
误差 (色彩*脑区*电极)	1028.267	2.597			

由表 4-27 可知,图案变化对脑电反应产生的影响不显著, $F=0.532$, $P=0.472$,图案大小和位置的变化没有引起显著的脑活动差异;脑区因素的 $F=0.954$, $P=0.337$,脑区对图案的反应没有显著差异;相比之下,电极因素的 $F=12.715$, $P<0.001$,表明不同电极之间的脑电反应存在显著差异。电极因素的偏 Eta 方为 0.298,表明电极变化对脑电反应有中等程度的影响;在交互效应方面,图案与脑区之间的交互作用在统计上不显著,尽管偏 Eta 方达到 0.078,表明有小幅度的实际效应。同样,图案与电极之间的交互效应不显著,且影响较小;然而,脑区与电极之间交互作用的 $F=4.362$, $P=0.017$,表明这种交互作用有中等的效应大小,不同脑区对图案的反应结合了电极的不同,从而产生了显著的反应变化;三者的交互作用不显著,且偏 Eta 方较低,暗示三者间的交互作用对脑电反应的影响较小。

表 4-27 图案 P3 成分方差分析表

Tab. 4-27 Analysis of variance for P3 components of patterns

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
图案	11.946	11.946	0.532	0.472	0.017
误差 (图案)	674.277	22.476			

续表 4-27 图案 P3 成分方差分析表

Tab. 4-27 Analysis of variance for P3 components of patterns

源	III 类平方和	均方	F	显著性	偏 Eta 方
脑区	2.613	2.613	0.954	0.337	0.031
误差 (脑区)	82.193	2.740			
电极	165.567	82.784	12.715	0.000	0.298
误差 (电极)	390.653	6.511			
图案 * 脑区	2.911	2.911	2.535	0.122	0.078
误差 (图案*脑区)	34.454	1.148			
图案 * 电极	2.320	1.160	0.533	0.589	0.018
误差 (图案*电极)	130.475	2.175			
脑区 * 电极	16.826	8.413	4.362	0.017	0.127
误差 (脑区*电极)	115.714	1.929			
图案 * 脑区 * 电极	1.113	0.556	0.704	0.499	0.023
误差 (图案*脑区*电极)	47.411	0.790			

4.4.4 脑电指标与情绪评分的相关性分析

将卫衣不同设计元素的脑电指标与主观评分的相关性进行细致的探讨和分析,通过定量的方法,结合行为神经学和心理学评量手段揭示两者之间潜在的联系,并对设计元素如何影响情绪体验进行理论上的阐述。

表 4-28 款式脑电指标与情绪评分相关性

Tab. 4-28 Correlation between Style EEG indicators and emotional scores

	廓形		袖型		领型	
	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性
F3	0.067	0.469	-0.133	0.211	.260**	0.004
F4	0.066	0.475	-0.136	0.202	0.069	0.455
O1	-0.043	0.640	0.045	0.673	0.005	0.961
O2	-0.017	0.851	0.138	0.194	0.007	0.942
CZ	-0.007	0.938	-0.145	0.172	.225*	0.013

由表 4-28 可知，廓形对 F3 脑电电极的斯皮尔曼相关系数为 0.067，其显著性水平为 0.469，表明廓形与 F3 脑电指标间的相关性并不显著，即廓形变化对前额叶的神经活动没有显著影响。同理，F4、O1、O2 以及 CZ 脑电极点的相关系数与显著性也表明，廓形与这些点的脑电活动之间缺乏显著的相关性。袖型中所有电极点的斯皮尔曼相关系数均表现出负向或接近零的关联，而显著性测试表明这些相关性在统计上同样不具有显著性。表明被试对不同袖型的感知与主观情绪评分，与他们的脑电指标变化在统计上并无显著关联。领型与 F3 脑电极点的斯皮尔曼相关系数为 0.260，且显著性水平为 0.004，这揭示了正向显著性关系。这表明领型造成的视觉刺激在前额叶所引发的神经活动变化，与情绪评分之间有显著的正向相关。同样，CZ 脑电极点的情况也显示出相似的趋势，斯皮尔曼相关系数为 0.225，显著性水平为 0.013。因此，可以推断出领型对于中央脑电极点的活动也有显著影响，且整体表现为正向关联。

表 4-29 色彩脑电指标与情绪评分相关性

Tab. 4-29 Correlation between Color EEG indicators and emotional scores

	单色		双色		三色	
	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性	斯皮尔曼 相关系数	显著性
F3	-0.018	0.793	0.031	0.569	-0.056	0.307
F4	-0.013	0.854	0.092	0.096	-0.085	0.125
O1	.164*	0.017	-0.056	0.312	0.065	0.235
O2	.187**	0.007	-0.082	0.137	0.018	0.745
Cz	0.092	0.182	0.043	0.433	-0.059	0.284

由表 4-29 可知，F3 和 F4 脑电极点对于不同色彩组合的反应均未表现出显著性。尽管 F4 在双色组合下呈现出较为接近显著性的正相关($r=0.092$, $p=0.096$)，但并没有达到通常认为的统计显著的水平($p<0.05$)。枕叶区域的 O1 和 O2 极点在单色下表现出显著的正相关性，O1 和 O2 的斯皮尔曼相关系数分别为 0.164 ($p=0.017$) 和 0.187 ($p=0.007$)，表示单色色彩在这一区域有显著影响，表明简单色彩组合的卫衣更能影响与视觉处理有关的枕叶区域的情绪反应。对于双色和三色组合，在 O1 和 O2 极点上未观察到类似的显著性，显示色彩复杂性的增加

并没有使这些电极点产生显著的神影响。表明当色彩组合变得复杂时，其对情绪的影响可能不如单色组合那么直接或显著。CZ 极点对所有色彩组合的反应均为显示出显著性，但在单色组合下呈现出正相关（ $r=0.092, p=0.182$ ）表明需要进一步探究 CZ 电极点的响应如何受到色彩的影响。

表 4-30 图案脑电指标与情绪评分相关性

Tab. 4-30 Correlation between pattern EEG indicators and emotional scores

	图案大小		图案位置	
	斯皮尔曼相关系数	显著性	斯皮尔曼相关系数	显著性
F3	-0.132	0.150	-0.015	0.844
F4	-0.133	0.148	-0.098	0.189
O1	.251**	0.006	-0.078	0.295
O2	0.058	0.531	-0.128	0.086
CZ	-0.054	0.555	-0.008	0.911

由表 4-30 可知，图案大小与 F3 和 F4 前额叶区域的情绪评分斯皮尔曼相关系数分别为-0.132 和-0.133，显示了轻微的负向相关，但相关性 P 值分别为 0.150 和 0.148，这表明图案大小的神经活动和情绪评分之间的相关性不明显；图案位置的脑电指标与情绪评分之间也无明显相关性。图案大小设计在 O1 与情绪评分之间呈现出显著的正向相关，且 P 值为 0.006，明显低于 0.05 的显著性水平，表明图案大小明显影响 O1 脑区的情绪反应，在 O2 脑区的相关系数为 0.058，表明存在极为轻微的正相关。然而，由于显著性水平 P 值为 0.531，表明图案大小与 O2 脑区并没有显著的相关性。图案位置在 O1 和 O2 处的相关性均较低，相关系数分别为-0.078 和-0.128，表明图案位置设计在后枕区域的神经活动与主观情绪之间并无显著相关性。图案大小和图案位置的 CZ 中央脑区神经活动与主观情绪之间的斯皮尔曼系数分别为-0.054 和-0.008，显著性分别为 0.555 和 0.911，表明其脑区神经活动对主观情绪没有显著的影响。

综上所述，领型作为设计元素，在统计上对情绪评分具有显著的影响；廓形和袖型的脑电指标对情绪评分的影响不明显；色彩在生理情绪反应上有显著影响，尤其是在枕叶区域，单色组合与情绪评分为正相关，意味着简单色彩在引发情绪反应方面更为有效。然而，随着颜色数量的增加，色彩对脑电活动的影响可能会

减弱；图案大小在 O1 脑区对情绪评分有显著的影响，而其他脑区的情况则各不相同，图案位置对情绪评分的影响在大部分脑区并不显著。

4.5 本章小结

本章主要探究了卫衣不同设计元素脑电指标的影响差异，并分析了脑电相关指标与情绪评分之间的相关性，旨在客观地理解卫衣设计元素对人类情绪反应的影响。首先通过收集被试在观看不同设计元素卫衣的脑电活动数据，通过应用信号处理计算，如滤波、去除伪迹、叠加平均等，确保从原始数据脑电波形中提取准确的指标数据；通过脑电指标与情绪评分之间的相关性分析，揭示了哪些脑电指标与情绪维度具有显著的相关性；最后通过重复测量方差分析（ANOVA）对提取的脑电指标进行深入分析，证明了卫衣不同设计元素对人们脑电活动具有不同显著影响。

第 5 章 服装情感模型构建及分析

在情感识别领域，卫衣情感预测对个性化服装设计 & 情绪测量具有重要意义。研究发现，卫衣穿着舒适度与用户情感状态密切相关，但情感状态的多变性和生理信号的复杂性使得构建精准的预测模型极具挑战，因此本章致力于构建一种基于前馈神经网络算法的卫衣情感识别模型。通过前三章对卫衣设计元素的情感研究，提取了主观情绪指标和眼动及脑电生理指标。本章将眼动和脑电生理指标作为输入量，情绪类别作为输出量，采用前馈神经网络对卫衣情感识别模型训练，从而评估用户对卫衣的情感状态。图 5-1 为卫衣情感识别模型的建模流程。

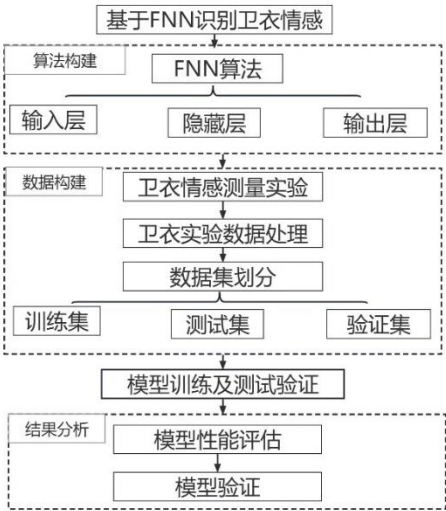


图 5-1 卫衣情感建模流程

Fig. 5-1 Sweater sentiment modeling process

5.1 前馈神经网络

5.1.1 前馈神经网络基本原理

前馈神经网络（Feedforward Neural Network，FNN）是机器学习算法中的一种重要算法，属于人工智能的一个分支，并被用于根据大规模数据形成复杂的非线性的映射关系^[80]。神经网络有数据驱动的训练过程，被训练用以解决分类、回归、聚类 and 图像识别等多种任务。

前馈神经网络作为最初广泛使用的人工神经网络类型之一，其架构主要由多

个层次构成，涵盖输入层、若干隐藏层及输出层。每层包括众多神经元或节点。在这种网络中，数据信号的传递路径是单向的，即从输入层开始，逐层向隐藏层传递，最终达到输出层。前馈神经网络内每个神经元与前序层中的神经元均存在连接，并且每个连接都被分配以权重。权重的大小决定了神经元对信号的作用强度^[81]。神经元累加来自上层传递的加权信号，然后通过一个非线性激活函数（例如 sigmoid 函数），以生成输出信号，该信号随后被送往下一层作为输入信号^[82]。

前馈神经网络经常被用来处理分类与回归问题，并且它的训练属于有监督学习类型。在训练阶段，网络接收输入数据，并产生输出预测。预测值与实际目标进行比较，根据它们之间的差距，采用反向传播（Backpropagation）算法调整网络中的权重^[83]。通常，在前馈网络中输出层使用线性激活函数，而隐藏层采用 sigmoid 激活函数^[84]。前馈神经网络能够达到显著的数据拟合和特征提取效果，为机器学习领域中各种应用提供强大的工具。

5.1.2 前馈神经网络结构

前馈神经网络（FNN）由三个核心部分构成：输入层、若干隐藏层及输出层。每层内部包含多个神经元，其中每个神经元都与上一层中的每个神经元建立了连接，如图 5-2 所示。输入层负责接收外界信号，无需进行处理，直接将信号传递给后面一层。隐藏层的任务是从数据中提取特征，它通过接收上一层的输出作为输入，并结合激活函数对加权和进行处理以实现非线性变换。根据需要，网络中可以包含一个或多个这样的隐藏层。输出层是网络的最后一层，它接收来自最终隐藏层的信号，并产生模型的预测输出。

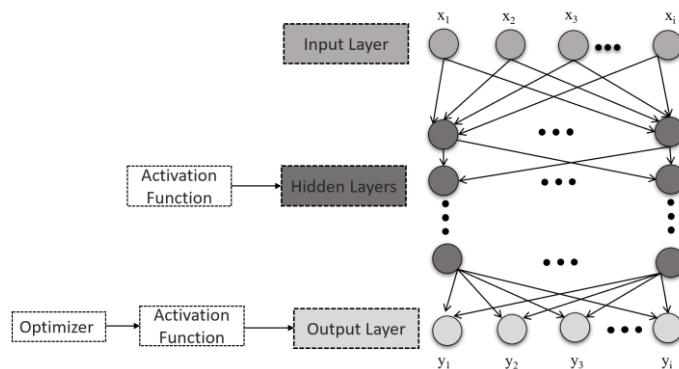


图 5-2 前馈神经网络基础结构

Fig. 5-2 Basic structure of feedforward neural network

在前馈神经网络中，每个神经元的输出计算通过以下步骤获得：

(1) 加权求和 (Weighted Sum)：对于第 l 层的第 j 个神经元，它的加权求和值($z_j^{[l]}$)是前一层所有神经元的输出值($a_j^{[l-1]}$)与对应的权重($w_{ij}^{[l]}$)相乘的总和，再加上一个偏置项($b_j^{[l]}$)。

$$z_j^{[l]} = \sum_i w_{ij}^{[l]} \cdot a_j^{[l-1]} + b_j^{[l]} \quad (5-1)$$

(2) 激活函数 (Activation Function)：然后应用激活函数($g(\cdot)$)到加权求和的结果上，得到该神经元的输出值($a_j^{[l]}$)。激活函数用来引入非线性，使得网络能够学习和模拟非线性关系。

$$a_j^{[l]} = g(z_j^{[l]}) \quad (5-2)$$

激活函数的选择可以是 Sigmoid 函数、双曲正切函数 (tanh)、修正线性单元 (ReLU) [85]。对于输入层到第一个隐藏层的每个神经元，是直接将输入 x_i 代入公式，因为输入层没有激活函数。最终，当信号到达输出层，通常会应用与隐层不同的激活函数，因为输出层的激活函数应该与问题类型相匹配，比如，对于二分类问题大多数使用 Sigmoid 如公式 (5-3)，而多分类问题更多使用 Softmax 函数如公式 (5-4)。

$$\hat{y} = \sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (5-3)$$

$$\text{Softmax}(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_k e^{z_k}} \quad (5-4)$$

在神经网络的训练过程中，所有的权重和偏置都会在监督学习的框架下得到优化，通常使用梯度下降法进行优化，目标是最小损失函数，如均方误差 (MSE) 或交叉熵损失 (Cross-Entropy Loss)。

5.2 前馈神经网络训练

5.2.1 训练样本准备

(1) 数据整合和预处理

在本研究中，通过眼动追踪和脑电实验获取用户对卫衣不同设计元素的生理性指标，并对其数据进行滤波、降噪、去伪迹等预处理。同时，采用 PAD 情绪模型获取了用户对卫衣的主观情绪评分，通过归一化公式对其进行情绪类别的划

分。在前文章节中对卫衣的眼动和脑电指标进行了相关性分析，提取出对卫衣情感影响显著的生理指标，提取 5 眼动指标（注视次数、总注视时间、平均瞳孔直径、眨眼次数、扫视次数）和 5 个脑电指标（F3、F4、O1、O2、CZ）；并对主观情绪测量评分模型进行情感分类（积极性、消极性）。

（2）训练样本构建

将提取的眼动指标（注视次数、总注视时间、平均瞳孔直径、眨眼次数、扫视次数）和脑电指标（F3、F4、O1、O2、CZ）作为输入特征值 x_i ，构造了一个输入特征向量，每个向量共有十个维度，按照眼动和脑电的次序排列，将其对应的 PAD 情绪测量情绪分类（积极性、消极性）作为输出特征值 y_i ，构造一维的目标输出。这样，对于每一款卫衣都有一个具体的输入特征向量 $x \in R^{10}$ ，以及相对应的情感类别标签 $y \in \{1,2\}$ ，将所有特征向量和情感标签整合形成一个由输入-输出对构成的数据矩阵（5-5）。

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & y \\ x_{1,1} & x_{2,1} & x_{3,1} & x_{4,1} & x_{5,1} & x_{6,1} & x_{7,1} & x_{8,1} & x_{9,1} & x_{10,1} & y_{-1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} & x_{3,2} & x_{4,2} & x_{5,2} & x_{6,2} & x_{7,2} & x_{8,2} & x_{9,2} & x_{10,2} & y_{-2} \\ x_{1,3} & x_{2,3} & x_{3,3} & x_{4,3} & x_{5,3} & x_{6,3} & x_{7,3} & x_{8,3} & x_{9,3} & x_{10,3} & y_{-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1,n} & x_{2,n} & x_{3,n} & x_{4,n} & x_{5,n} & x_{6,n} & x_{7,n} & x_{8,n} & x_{9,n} & x_{10,n} & y_{-n} \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

式中：每一行代表一个样本， $x_{i,j}$ 表示第 j 个样本的第 i 个特征值， y_{-j} 表示第 j 个样本的情感类别输出（1 或 2）。

5.2.2 前馈神经网络搭建

（1）激活函数：Sigmoid 函数

激活函数用于控制神经元的输出，提高前馈神经网络对非线性问题的学习能力。本研究选择 Sigmoid 函数（公式 5-6）作为神经元的激活函数，处理眼动和脑电指标与情感类别之间的映射关系。特征于其平滑的非线性特性和输出值域(0, 1) 间，负责将加权输入信号转化为一个界定于积极和消极情感类别之间的预测概率值。

$$\hat{y} = \sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (5-6)$$

Sigmoid 函数的平滑性质允许梯度信息在反向传播算法中有效地流动，而其连续可微分的特征使得网络能够利用梯度下降等优化算法来调整权重和偏差

[86]。尽管在深度网络中，Sigmoid 函数可能会遇到梯度消失的问题，但在本实验的神经网络结构中，其显示出了较好的性能和稳定的收敛特性。通过将眼动和脑电指标作为输入层，情感类别作为输出层并利用 Sigmoid 函数进行激活，网络能够有效地在输入空间与期望输出之间划分出非常复杂地边界，这对于情感识别领域地研究具有重要的参考价值。

（2）损失函数：交叉熵

在前馈神经网络进行情感类别预测的任务中，输出层采用 Sigmoid 激活函数，将眼动和脑电指标通过网络进行非线性变换，并将其转化为情感类别（积极和消极）的概率值。损失函数主要是衡量模型和实际标签之间的差异，为了量化预测误差，并提供反向传播过程中梯度的依据，本研究选用交叉熵（Cross-Entropy）作为损失函数（公式 5-7）。此损失函数能够将标签和预测值之间直接建立一个概率框架，使得损失非常小时，预测结果与真实标签高度一致，而损失较大时，则表明预测结果与真实情况有很大偏差。

$$L(y, \hat{y}) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)] \quad (5-7)$$

式中：N 是样本数量； y_i 是第 i 个样本的实际标签，通常为 0 或 1； $\hat{y}_i$ 是网络对第 i 个样本预测为 1 的概率。

（3）优化器：量化共轭梯度法

本文选用基于量化共轭梯度法（Quantized Conjugate Gradient, QCG）的优化器，以有效调整神经网络权重参数，使损失函数达到最小值。量化共轭权重参数是共轭梯度法的改进版本，它通过引入量化策略来减少计算资源的需求，并提高收敛速度[87]。该优化器特别适用于处理大规模数据集或复杂模型结构，因此对于使用卫衣眼动脑电指标作为高维输入量的情境，QCG 方法显得尤为合适。在每次迭代过程中，优化器更新模型参数以最小化交叉熵损失函数，旨在提升网络区分积极和消极情感类别的能力。量化共轭梯度法通过精心设计的量化机制，能够对梯度信息进行有效编码，同时减小内存占用和计算成本。同时，利用历史梯度信息来加速梯度下降过程，从而在保持梯度下降稳定性的同时，加快模型收敛[88]。经过多次迭代训练后，采用 QCG 优化器的神经网络模型能够有效降低损失函数值，同时保证模型在真实数据熵的泛化性和鲁棒性。

5.2.3 模型训练

在建立神经网络模型进行情感识别研究时网络参数的设置对于保证模型有效性和预测精度至关重要。本实验中，使用 MATLAB 软件作为卫衣情感模型建立前馈神经网络，图 5-3 为神经网络示意图，训练过程如下：

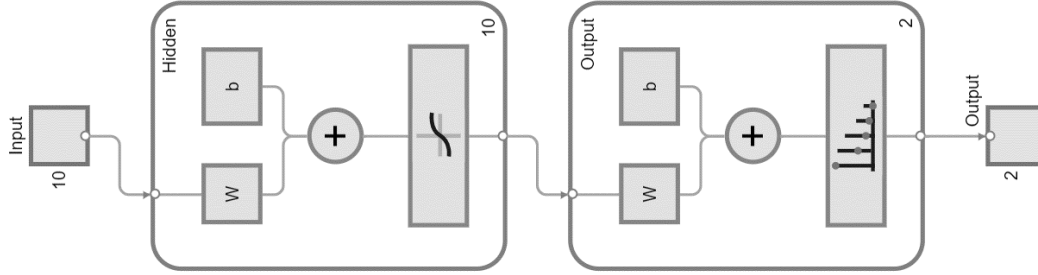


图 5-3 神经网络示意图

Fig. 5-3 Schematic diagram of neural network

(1) 输入层。设 $(x_1, x_2, x_3 \dots, x_n)$ 为神经网络的 n 个输入，表示为向量形式如下：

$$X = [x_1, x_2, x_3 \dots, x_n]^T \quad (5-8)$$

(2) 第一隐层。①权值和阈值：输入层至第一隐层权重矩阵表示为 W_1 ，其中元素 w_{ij}^1 代表第 i 个输入神经元到第 j 个隐层神经元的权重。每个隐层神经元有一个阈值，整体的向量形式如下：

$$b_1 = [b_1^{(1)}, b_2^{(1)}, b_3^{(1)} \dots, b_m^{(1)}]^T \quad (5-9)$$

其中 m 为第一隐层神经元的数量。

②加权求和与激活：每一个隐层神经元将输入信号进行加权求和，加上阈值偏置后通过激活函数进行非线性变换，生成输出为：

$$h_1 = f_1(W_1^T X + b_1) \quad (5-10)$$

(5-10) 式中 f_1 为激活函数，本研究选用激活函数是 Sigmoid 函数，其数学表述为：

$$\hat{y} = \sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (5-11)$$

将通过随机抽样的方式将整个数据集划分为三部分：70 % 的数据用于训练，15 % 的数据用于验证，15 % 的数据用于测试，设置交叉熵作为性能函数。为了有

效防止模型过拟合，增强模型在未知数据上的适用性，训练过程中调整权重和偏差，直到验证数据集收敛，停止网络训练，获得网络即可用于数据的处理和情感预测中。

5.3 模型训练结果评估

5.3.1 迭代次数

在模型训练阶段，损失曲线显示了模型在不同迭代次数下的性能变化。由图 5-4 训练迭代损失曲线图可知，在训练初期（迭代次数为 0 到 7 轮），训练损失、测试损失以及验证损失均从一个较高水平快速下降。表明模型学习过程是有效的，并且在迭代过程中模型的泛化能力得到持续提高。在第 7 轮迭代时，模型达到了验证集上的最佳性能，验证损失为 0.086854，这一结果揭示了模型在经过初期的快速学习后，逐渐接近其泛化性能的瓶颈。随后，随着迭代次数增加，在接近 12 轮时，三条损失曲线变得平缓，表明模型的学习速率放缓，进一步的性能提升变的有限。这一趋势表明，在进行足够数量的训练迭代之后，模型开始达到收敛状态，进一步增加迭代数未必能够带来显著的性能提高，甚至可能导致过度拟合。因此，为了实现最佳的泛化性能，模型在第 7 轮迭代训练后停止进一步训练，避免资源浪费和计算过度，同时保障了模型在尚未经历过度拟合的情况下达到其性能潜力的高效利用。

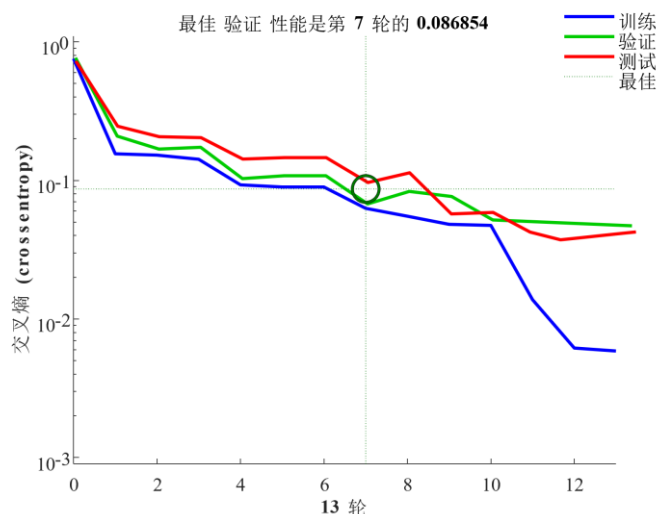


图 5-4 FNN 训练迭代损失曲线图

Fig. 5-4 FNN training iteration loss curve

5.3.2 混淆矩阵

训练好的神经网络输出结果，无法直接的展示识别效果缺乏直观性，需要引入混淆矩阵^[89]。混淆矩阵是评估不同神经网络结构识别准确率的有效工具，不仅展示了每个类别被正确识别的频次，还清晰地揭示了分类错误的情况，从而提供一种量化模型分类性能的有效方法。由图 5-5 可知，在训练混淆矩中 85.3 %为一类情感，11.8 %为二类情，在一类情感识别中模型的准确率为 96.7 %，二类情感的识别准确率为 100%，训练集模型的总准确率达 97.1 %；在验证混淆矩阵中一类情感和二类情分别为 87.5 %和 12.5 %，两种情感的模型识别准确率均为 100 %；在测试混淆矩阵中识别 100 %一类情感，模型的识别准确率为 100 %；在全部混淆矩阵中一类情感 88 %全部识别，二类情感正确识别为 10 %，模型整体准确率在一类情感中为 97.8 %，二类情感中准确率为 100 %，卫衣情感识别模型整体准确率高达 98 %，说明了模型训练良好，能够有效准确的进行卫衣情感识别。

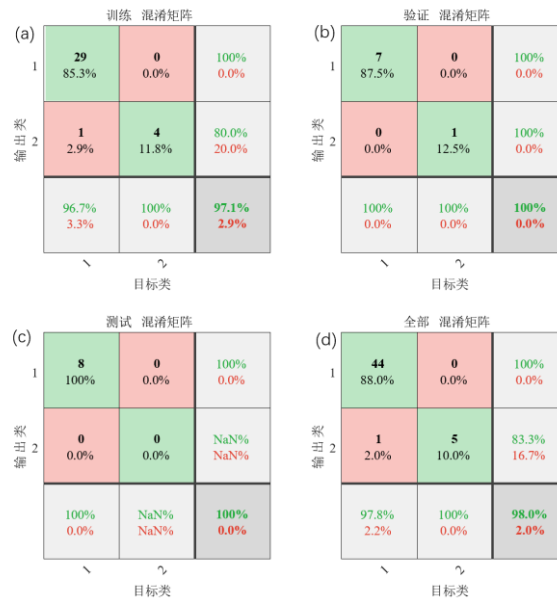


图 5-5 FNN 训练混淆矩阵

Fig. 5-5 FNN training confusion matrix

5.3.3 ROC 曲线

在评估卫衣情感识别任务的 FNN 模型中，接收者操作特征（ROC）曲线提供了重要的性能度量指标。由图 5-6ROC 曲线可知，训练 ROC 曲线在真阳性率(FPR)从 0.3 至 0.4 区间开始沿 y 轴迅速攀升至 0.9 至 1 区间，其间曲线的假阳性率相对较低，从 0 到 0.3。曲线显示出模型具备极高的能力以较小的 FPR 捕捉大部分的

正面情感。然而，曲线在真阳性率达到一个平台后沿 x 轴水平延伸至假阳性率大约为 0.7，表明在增加 FPR 的情况下，模型能够识别正面情感的能力无显著提升。对于类 2，ROC 曲线从 0 开始快速上升，指示了模型在低 FPR 时对负面情感有很好的敏感性。在曲线到达真阳性率接近 0.4 的位置时，有一小段向内折，该折点显示模型在这个区域的分类性能略有回退。随后，ROC 曲线继续上攀至接近 1 的真阳性率。然而，曲线随后平行于 x 轴增长至 FPR 为 1，说明在增加错误正面情感的接受程度时，模型的性能提升不再显著。验证和测试 ROC 曲线均从 0 开始上升，曲线上攀至 1 形成“L”形，表明模型有高度的区分能力。模型整体的 ROC 曲线中，类 1 和类 2 从 0.2 开始沿着 y 轴上升，直至接近 1，其间曲线的假阳性率较低，从 0 上升至 0.2。表明模型具有极高的能力和较小的 FPR 捕捉大部分的正负面情感。整体 ROC 曲线表明该前馈神经模型在卫衣情感识别任务上表现出良好的性能。尽管存在一定的误判，总体上模型对于正负面情感均具有较高的识别能力。

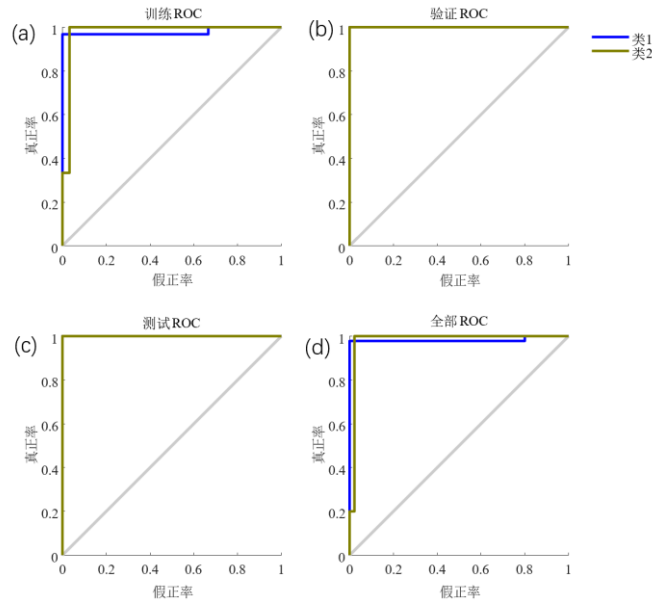


图 5-6 ROC 曲线

Fig. 5-6 ROC curve

5.3.4 训练误差

误差直方图是一个关键的可视化工具，可以揭示模型在预测数据时的准确度以及误差的一致性。理想情况下，预测完全准确时误差为零，故直方图以零为中心对称的正态分布。由图 5-7 可知，在直方图绝对值为 0.03354 中心附近，高度在 30 到 35 之间，这一区间的数据密集程度表明模型在该范围内的预测接近实际

值，显示了模型的高准确性和稳定性，模型处理误差较小。随着误差的增加，实例高度快速下降，高度降至 5 以下，表明模型在更大的误差区间的预测出现的次数减少，从而表明模型的预测能够集中在较小误差区间的范围内。卫衣情感识别模型的误差直方图整体显示出较好的对称性，大多数的误差值均集中在零点附近，尾部相对较低，表明该模型对卫衣情感的预测结果有较高的准确度。

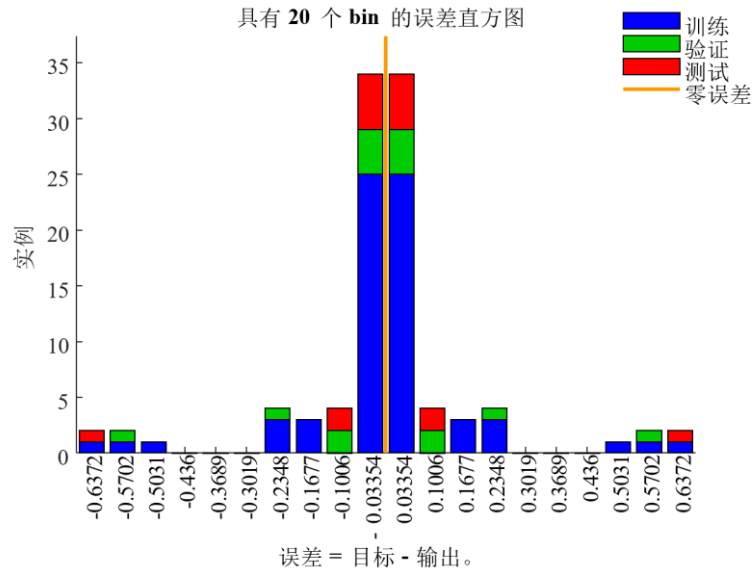


图 5-7 训练误差直方图

Fig. 5-7 Training error histogram

5.4 本章小结

本章主要将客观的生理指标和主观的情感类别相结合，构建卫衣情感预测模型。将眼动和脑电生理指标作为输入量，情感类别作为输出量，使用前馈神经网络对卫衣情感识别进行训练，搭建了基于前馈神经网络的卫衣情感识别模型。通过对迭代次数、混淆矩阵、ROC 曲线以及误差对模型训练效果进行分析，结果表明该模型对卫衣情感的识别具有较高的识别能力和准确率。

第 6 章 结论与展望

6.1 研究结论

本文研究采用眼动脑电技术以及 PAD 情感模型对不同设计元素的卫衣进行主客观的情感数据采集。利用 SPSS 和 MATLAB 软件对采集的数据进行预处理, 并采用相关性分析、方差分析以及主成分等分析方法对卫衣情感进行分析。同时, 提取眼动脑和电指标, 划分不同设计元素卫衣的情感类别, 利用 MATLAB 软件搭建前馈神经网络, 采用损失迭代次数、混淆矩阵、ROC 曲线以及误差作为模型评价依据, 搭建了卫衣情感识别模型。本文研究的主要结论如下:

(1) 采用 PAD 情绪测量对不同设计元素的卫衣进行主观情绪测评, 结果表明: 在卫衣款式设计中领型和袖型设计元素的积极情绪大于廓形设计; 色彩搭配中单色和双色的搭配大部分属于积极情绪类别, 少数黑色和蓝色的搭配获得消极情绪, 三色搭配中消极情绪大于积极情绪; 图案设计元素中图案大小和位置的设计均获得积极情绪。卫衣的款式风格受到消费者的喜爱度较高, 在色彩搭配中消费者更偏向于简洁的单色或双色搭配; 图案的设计对消费者喜爱卫衣的影响程度相对较小。

(2) 采用眼动追踪技术获取被试对不同设计元素卫衣的眼球运动情况, 获取被试的生理指标数据。结果表明: 在卫衣眼动实验中注视次数、总注视时间、平均瞳孔直径、眨眼次数以及扫视次数对卫衣情感反应有显著相关性。色彩元素和图案元素的眨眼次数总体高于款式元素, 更能快速引起被试注意; 色彩和款式设计元素在总注视时间上的差异大于图案设计元素; 色彩和图案设计元素的注视次数小于款式设计元素, 且元素之间的整体差异性较小; 款式设计元素的扫视次数整体高于色彩和图案设计元素, 款式中包含更多的细节和结构变化, 需要更多的认知加工来理解和分析; 色彩设计元素的平均瞳孔直径高于款式和图案设计元素, 瞳孔的扩张变化, 表明色彩相对于款式和图案更能快速吸引注意力, 产生情绪上的共鸣。

(3) 通过脑电实验采集被试对卫衣情感的脑电信号, 对其进行预处理, 提取出相关性脑电指标。结果表明: 前额区 F3、F4, 中央区域的 C3、CZ 以及后枕区 O1、O2 电极在卫衣实验中表现出显著的神经活动变化, 并诱发了明显的 N1、P1、N2、P2 及 P3 成分; 卫衣款式诱发的 P1 成分在不同脑区上的交互性显著, N2 和 P2 成分在不同电极位置之间存在显著的交互作用, P3 成分在脑区和电极的效应具有差异性; 卫衣不同色彩搭诱发的 N1 成分在不同脑区具有显著差异, 而诱发的 P1、N2、P2 以及 P3 成分均在电极位置上具有显著差异; 卫衣图案设计元素诱发的 N1 和 P1 成分在不同脑区上存在差异, N2 和 P3 成分的差异主要在电极位置上, 而 P2 成分在图案、电极以及图案和脑区的交互作用中均存在差异性。

(4) 将眼动指标和脑电指标分别于主观情绪评分进行相关性分析。眼动指标与情绪相关性结果表明: 平均瞳孔直径、注视次数及总注视时间在卫衣款式设计元素情绪评价中具有显著相关性; 眨眼次数和扫视次数与色彩搭配情绪相关性相对较高; 在图案设计元素中注视次数、平均瞳孔直径与图案位置设计的情绪评价之间有显著相关性, 其他眼动指标与图案设计元素之间的情感评分相关性较小。脑电指标与情绪相关性结果表明: 领型在前额区和中央区域的电极 F3 和 CZ 与情绪评分之间具有正向显著相关性, 其余款式设计元素的脑电区域与情绪评分之间未呈现显著相关性; 色彩搭配中后枕区电极 O1 和 O2 以及中央电极 CZ 在单色搭配中与情绪评分呈现出显著相关性, 其余均无显著相关性, 表明单色组合的卫衣更能影响与视觉处理有关的枕叶区域的情绪反应; 图案大小设计在 O1 与情绪评分之间呈现出相关性, 而其他设计元素在脑电指标与情绪评分之间的相关性不显著。

(5) 将卫衣的眼动指标与脑电指标作为输入量, 情感类别作为输出量, 基于前馈神经网络构建卫衣情感识别模型, 通过迭代曲线、混淆矩阵、ROC 曲线和误差对模型的检验分析, 结果表明将客观的生理指标与主观指标相结合构建卫衣情感识别模型, 该模型对卫衣情感识别具有较高的识别能力和 98 % 准确率。

6.2 研究的不足与展望

本课题研究的不足及展望主要有以下 2 点:

（1）本课题以卫衣作为载体对服装情感进行主客观测量，从款式、色彩及图案三方面进行分析，但研究样本种类较少覆盖面较小，故在存在一定的局限性。但研究的方法和结果可为服装设计师和服装企业提供参考，有兴趣的研究学者可在今后的研究中进一步完善此部分内容；

（2）本课题搭建的服装情感识别模型，尽管在基于眼动和脑电指标的卫衣情感二分类问题上取得了一定的成就，但并未考虑学习率大小、局部极值对情感识别的影响，样本数量偏小，卫衣划分的情绪类别数量分布不均衡，对情感识别准确率产生一定的影响。有兴趣的研究学者可以扩充样本数量和类别，进一步提升基于眼动和脑电指标的情感识别系统在实际应用场景中的可用性和有效性。

参考文献

- [1] 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(05): 26-33.
- [2] 程琳. 基于情感化的现代服装设计研究[J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(01): 163-165.
- [3] 张伟萌, 李晓英, 郭子轩, 等. 女风衣领型与廓形搭配的感性意向评价[J]. 毛纺科技, 2022, 50(05): 110-116.
- [4] 张俊, 胡嵩, 童梦霞, 等. 感性工学在纺织服装领域的研究进展[J]. 纺织学报, 2023, 44(11): 240-249.
- [5] 相婕, 项钰慧, 姜雪儿, 等. 服装风格量化方法研究现状与进展[J]. 天津纺织科技, 2023(06): 29-33.
- [6] 方蕾蕾. 感性工学在服装领域中的研究进展可视化分析[J]. 纺织科技进展, 2022(07): 19-25+30.
- [7] 宋莹, 阮胜坤. 基于数量化理论I的男衬衫设计要素感性评价[J]. 丝绸, 2023, 60(03): 105-112.
- [8] 陈田, 蔡从虎, 袁晓辉, 等. 基于多尺度卷积和自注意力特征融合的多模态情感识别方法[J]. 计算机应用, 2024, 44(02): 369-376.
- [9] 王崴, 赵敏睿, 高虹霓, 等. 基于脑电和眼动信号的人机交互意图识别[J]. 航空学报, 2021, 42(02): 292-302.
- [10] 宋美佳. 基于多模态测量的产品色彩情感化设计模型与方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
- [11] 杨知毅. 基于脑电和眼动数据融合的多模态情绪识别研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
- [12] Nagamachi M. Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development[J]. Applied Ergonomics, 2002, 33(03): 289-294.

- [13] Nagamachi M, Okazaki Y, Ishikawa M. Kansei engineering and application of the rough sets model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2006, 220(08): 763-768.
- [14] Nagamachi M. Kansei Engineering: A new ergonomic consumer-oriented technology for product development[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1995, 15(01): 3-11.
- [15] 薛海安, 彼得·M.A.德斯梅特, 史蒂文·福金加, 等. 设计与情感 (1999—2023): 一个 21 世纪的荷兰 (全球) 设计 (研究) 运动[J]. 装饰, 2023(04): 29-34.
- [16] Yan H-B, Huynh V-N, Murai T, etc. Kansei evaluation based on prioritized multi-attribute fuzzy target-oriented decision analysis[J]. Information Sciences, 2008, 178(21): 4080-4093.
- [17] Lee M-F, Chen G-S, Hung J C, etc. Data mining in emotion color with affective computing[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(23): 15185-15198.
- [18] Jindo T, Hirasago K. Application studies to car interior of Kansei engineering[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1997, 19(02): 105-114.
- [19] 李砚祖. 设计新理念:感性工学[J]. 新美术, 2003(04): 20-25.
- [20] 汤凌洁. 感性工学方法之考察[D]. 南京: 南京艺术学院, 2009.
- [21] 王松琴, 何灿群. 感性工学:以用户为导向的工效学技术[J]. 人类工效学, 2007(03): 47-48.
- [22] 沈羽中. 产品设计中感性因素的定位方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [23] 罗仕鉴, 潘云鹤. 产品设计中的感性意象理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2007(03): 8-13.
- [24] 陈弈菲, 刘驰, 杨萌. 基于情绪测量的文胸结构情感计算研究[J]. 现代纺织技术, 2022,30(02): 208-215.
- [25] 陈洋. 基于眼动联合脑电的苗族银饰工艺品创新设计[D]. 贵州: 贵州大学, 2019.

- [26] 侯佳, 谢臻, 夏敏燕, 等. 在地实践语境下的上海红色文创产品情感化设计探析[J]. 包装工程, 2022, 43(04): 376-382+422.
- [27] 景丽娜. 浅析植物景观空间情感化设计[J]. 江西建材, 2017(01): 189-190.
- [28] 刘璐瑶. 情感化设计在居住空间界面装饰材料中的应用研究[J]. 美与时代(上), 2023(08): 42-44.
- [29] 张沛, 李义. 情感化设计在软件界面设计中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2014(24): 70.
- [30] 王敏. 关于家居纺织品设计的情感化研究[J]. 戏剧之家, 2016(23): 153-154.
- [31] Bulling A, Ward J A, Gellersen H, etc. Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(04): 741-753.
- [32] Widmann A, Schröger E, Wetzel N. Emotion lies in the eye of the listener: Emotional arousal to novel sounds is reflected in the sympathetic contribution to the pupil dilation response and the P3[J]. Biological Psychology, 2018, 133: 10-17.
- [33] O'Dwyer J, Flynn R, Murray N. Continuous Affect Prediction Using Eye Gaze and Speech[EB/OL]. arXiv.org. doi:10.1109/BIBM.2017.8217968. 2018-03-05/2024-01-02.
- [34] Black M H, Chen N T M, Iyer K K, etc. Mechanisms of facial emotion recognition in autism spectrum disorders: Insights from eye tracking and electroencephalography[J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2017, 80: 488-515.
- [35] 高杨, 杜劲松, 朱建龙, 等. 服装定制小程序用户界面消费需求导向研究[J]. 丝绸, 2023, 60(11): 96-102.
- [36] 初建杰, 杨建国, 丁宁. 基于眼动实验的服装纹样布局方案意象评价模型[J]. 包装工程, 2023, 6(25): 1-12.
- [37] 张宇红, 朱昊. 基于眼动仪的智能冰箱人机界面评估方法研究[J]. 包装工程, 2019, 40(24): 223-227.

- [38] 刘春丽, 王爱红. 基于眼动实验的学龄前儿童机器人设计[J]. 包装工程, 2019, 40(24): 210-216.
- [39] A Systematic Review for Human EEG Brain Signals Based Emotion Classification, Feature Extraction, Brain Condition, Group Comparison | Journal of Medical Systems[EB/OL]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10916-018-1020-8>. 2024-01-02.
- [40] Knörzer L, Brünken R, Park B. Facilitators or suppressors: Effects of experimentally induced emotions on multimedia learning[J]. Learning and Instruction, 2016, 44: 97-107.
- [41] Ding Y, Guo F, Zhang X, etc. Using event related potentials to identify a user's behavioural intention aroused by product form design[J]. Applied Ergonomics, 2016, 55: 117-123.
- [42] Lin M, Wang C, Cheng S, etc. An event-related potential study of semantic style-match judgments of artistic furniture[J]. International Journal of Psychophysiology, 2011, 82(02): 188-195.
- [43] Meza-Kubo V, Morán A L, Carrillo I, etc. Assessing the user experience of older adults using a neural network trained to recognize emotions from brain signals[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2016, 62: 202-209.
- [44] 林丽, 尹鑫, 郭主恩, 等. 基于眼动赋权及脑电意象认知的产品形态感性工学模型研究[J]. 包装工程, 2022, 43(14): 37-44.
- [45] 杨程, 曾静, 陈辰, 等. 基于脑电探究外观特征对产品识别的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(09): 1385-1394.
- [46] 孙雪. 用户软件更新行为的激励因素及其机制研究——基于 ERP 分析的实证研究[J]. 上海管理科学, 2023, 45(06): 94-98.
- [47] 胡梓煊, 张光旭, 张圣杰, 等. 基于 mRMR 特征优选与 SVM 的脑电信号的情绪识别[J]. 自动化应用, 2023, 64(21): 8-11.
- [48] 任佳园, 郑晶晶, 金剑. 脑电技术在消防内衣舒适性领域的研究现状[J]. 毛纺科技, 2023, 51(03): 123-130.

- [49] 李东,万贤福,汪军等. 基于脑电技术的面料触感捕捉刺激器的设计与开发[J]. 纺织器材, 2016,43(05): 6-10.
- [50] 陈东生, 刘运娟. 脑电在服装舒适性评价中的应用[J]. 服装学报, 2016, 1(01): 21-25.
- [51] 范馨文. 人工神经网络模式识别的机理与意义[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020.
- [52] Efficient Feature-Aware Hybrid Model of Deep Learning Architectures for Speech Emotion Recognition | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore[EB/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9334975>. 2024-03-01.
- [53] Barzilay R, Israel N, Krivoy A, etc. Predicting Affect Classification in Mental Status Examination Using Machine Learning Face Action Recognition System: A Pilot Study in Schizophrenia Patients[J]. Frontiers in Psychiatry, Frontiers, 2019, 10(06): 1664-0640.
- [54] Ensemble Machine Learning-Based Affective Computing for Emotion Recognition Using Dual-Decomposed EEG Signals | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore[EB/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9652403>. 2024-03-08.
- [55] Retracted Fuzzy Logic-Based Machine Learning Algorithm for Cultural and Creative Product Design[EB/OL]. <https://www.hindawi.com/journals/cin/2022/7747192/>. 2024-03-08.
- [56] 屈庆星, 郭伏. 基于机器学习的用户情感意象多模式测量方法研究[J]. 人类工效学, 2022, 28(04): 1-9.
- [57] 甘开宇, 尹钟. 基于脑电信号和瞬时情感强度标签的情感识别方法[J]. 电子科技, 2023, 61(12): 1-8.
- [58] 史英杰, 杨珂,王建欣, 等. 基于机器学习的时尚穿搭推荐研究综述[J]. 计算机应用研究, 2022,39(04): 978-985.
- [59] 胡新荣, 王哲, 刘军平, 等. 基于多层注意力机制的服装电商评论情感分析[J]. 计算机技术与发展, 2022,32(01): 67-72.

- [60] 梁立立. 休闲女装中的解构设计表现与应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [61] 蒋旒, 李然, 刘春尧, 等. PAD 情感模型在用户情感体验评估中的应用[J]. 包装工程, 2021, 42(22): 413-420.
- [62] 宋静. PAD 情绪模型在情感语音识别中的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [63] 陈庆荣, 单艳红, 邓铸. E-Prime 实验系统及其在心理学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2006, 25(12): 1488-1491+1618.
- [64] 刘烨, 陶霖密, 傅小兰. 基于情绪图片的 PAD 情感状态模型分析[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(05): 753-758.
- [65] 陈弈菲, 刘驰, 杨萌. 基于情绪测量的文胸结构情感计算研究[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(02): 208-215.
- [66] 吴天宇, 赵祎乾. 基于多维情绪测量的产品色彩意象感知研究[J]. 美术大观, 2020, 135(04): 135-137.
- [67] 李炜玮. 插画设计中色彩的运用对情绪和认知的影响研究[J]. 纺织报告, 2023, 42(7): 58-60.
- [68] Color visual communication on consumer mood disorders in cultural product design | CNS Spectrums | Cambridge Core[EB/OL]. <https://www.cambridge.org/core/journals/cns-spectrums/article/color-visual-communication-on-consumer-mood-disorders-in-cultural-product-design/8E761FAAA576D86FDD1172EED2F0F404>. 2024-01-11.
- [69] Effects of Illuminance and Correlated Color Temperature on Daytime Cognitive Performance, Subjective Mood, and Alertness in Healthy Adults - Yingying Zhu, Minqi Yang, Ying Yao, etc. 2019[EB/OL]. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0013916517738077>. 2024-01-11.
- [70] Yildirim K, Akalin-Baskaya A, Hidayetoglu M L. Effects of indoor color on mood and cognitive performance[J]. Building and Environment, 2007, 42(09): 3233-3240.

- [71] Sakuragi S, Sugiyama Y. Effect of Partition Board Color on Mood and Autonomic Nervous Function[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2011, 113(03): 941-956.
- [72] Yu C-E, Xie S Y, Wen J. Coloring the destination: The role of color psychology on Instagram[J]. *Tourism Management*, 2020, 80: 104110.
- [73] 高婷. 基于图像智能识别的韩国礼服形式及情感模型的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- [74] Gong R, Wang Q, Hai Y, etc. Investigation on factors to influence color emotion and color preference responses[J]. *Optik*, 2017, 136: 71-78.
- [75] Elliot A J. Color and psychological functioning: a review of theoretical and empirical work[J]. *Frontiers in Psychology*, 2015, 6.
- [76] 李丹丹, 高晓平, 刘运娟. 基于眼动技术的服装视觉评价研究[J]. *纺织科技进展*, 2021(08): 45-49+53.
- [77] 魏文达. 扭曲视错服装图像的视觉效果主客观评价研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [78] 王军博. 挫折情绪下无意识注意分散策略对情绪面孔识别的影响[D]. 上海: 上海体育学院, 2023.
- [79] 石晶玉. 基于脑电信号的织物触感与主观情绪的相关性研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- [80] 谢正泰, 樊佳亮, 刘梅, 等. 基于神经网络的机器人学习与控制: 回顾与展望[J]. *信息与控制*, 2023, 52(01): 37-58.
- [81] 吕文琪, 马骁, 简夜明, 等. 基于多层感知机的轻量级遥感影像语义分割方法研究[J]. *软件导刊*, 2024, 23(01): 173-181.
- [82] 李秋红. 基于改进粒子群算法的前馈神经网络识别用户窃电行为[J]. *电气技术*, 2022, 23(11): 44-48.
- [83] 缪云飞, 邹铭敏, 盛书丽, 等. 基于机器学习的二氧化碳卫星反演方法[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(S1): 20-27.
- [84] 何天成. 基于多权值神经网络的语音情感识别的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.

- [85] 韩智超. 基于空-时神经网络的脑电情感识别研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [86] 汤学民, 吴晓云. 基于前馈神经网络电子病历辅助诊断系统的研究[J]. 中国数字医学, 2023, 18(03): 42-48.
- [87] 万鹏程. 基于共轭梯度的机器学习分类方法研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2022.
- [88] 王琳荣. 基于极限学习机的非线性系统神经网络建模[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [89] 汪东升, 袁惠芬, 王虹, 等. 基于三维人体数据的青年男性下肢体型分类[J]. 服装学报, 2020, 5(05): 398-404.

附录 1 卫衣喜好度调查问卷

您好，感谢您参与这次关于卫衣偏好的市场调研。我们希望通过几分钟的问卷了解您对卫衣的喜好及购买意向。现在就让我们开始吧！

*您的性别是：

☐ 男

☐ 女

*您的年龄是：

☐ 15-20

☐ 21-25

☐ 26-30

☐ 31-35

*您因为什么原因会购买卫衣（多选题）：

☐ 时尚流行

☐ 版型

☐ 单品百搭

☐ 自己喜欢

*您一般会选择什么样廓形的卫衣（多选题）：

☐ 时髦短款

☐ 中领 H 型

☐ OVERSIZE 型

☐ 收口茧型

☐ 结构直身

☐ 开衫拉链

*您一般会选择什么领型的卫衣（多选题）

☐ 连帽卫衣

☐ 半开领卫衣

☐ 圆领卫衣

☐ V 领卫衣

☐ POLO 领卫衣

*您一般会选择什么袖型的卫衣（多选题）

☐ 插肩袖

☐ 落肩袖

☐ 正肩袖

☐ 蝙蝠袖

☐ 其他

*卫衣颜色您偏向于冷色系还是暖色系（下图仅供参考）：

☐ 暖色系



☐ 冷色系



*您喜欢几种颜色组合的卫衣（多选题）：

☐ 单色

☐ 双色

☐ 三色

☐ 其他

*卫衣颜色您偏向哪一组（下图仅供参考）：

☐ 低饱和度低明度



☐ 中饱和度低明度



☐ 高饱和度低明度



*卫衣颜色您偏向哪一组（下图仅供参考）：

☐ 中饱和度低明度



☐ 中饱和度中明度



☐ 中饱和度高明度



*卫衣颜色您偏向哪一组（下图仅供参考）：

☐ 低饱和度低明度



☐ 低饱和度中明度



☐ 低饱和度高明度



*卫衣图案位置您偏向哪一组（下图仅供参考）：

☐ 衣身上半身位置



O 衣身中间位置



O 衣身下摆位置



O 衣身袖子位置



*卫衣图案大小您偏向哪一组（下图仅供参考）：

O 图案较大



O 图案中等

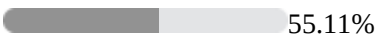
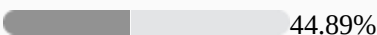


O 图案较小

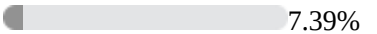
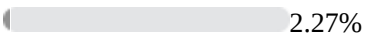


附录 2 卫衣喜好度问卷调查结果

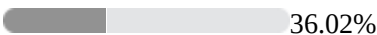
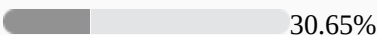
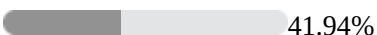
您的性别： [单选题]

选项	小计	比例
男	97	 55.11%
女	79	 44.89%
本题有效填写人次	186	

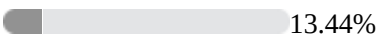
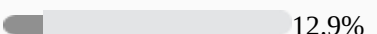
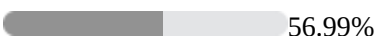
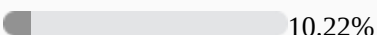
您的年龄段： [单选题]

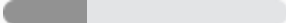
选项	小计	比例
18 岁以下	13	 7.39%
18~25	159	 90.34%
26~30	4	 2.27%
本题有效填写人次	186	

您因为什么原因会购买卫衣？ [多选题]

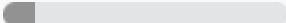
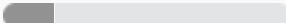
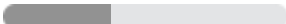
选项	小计	比例
款式流行	67	 36.02%
版型	57	 30.65%
单品穿搭	78	 41.94%
自己喜欢	132	 70.97%
本题有效填写人次	186	

您一般会选择什么样廓形的卫衣？ [多选题]

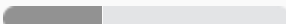
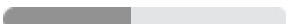
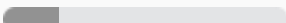
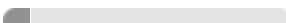
选项	小计	比例
时髦截短	25	 13.44%
中领 H 型	24	 12.9%
OVERSIZE	106	 56.99%
收口茧型	19	 10.22%

解构直身	91	 48.92%
开衫拉链	56	 30.11%
本题有效填写人次	186	

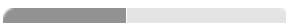
您一般会选择什么领型的卫衣？ [多选题]

选项	小计	比例
连帽卫衣	128	 68.82%
半开领卫衣	21	 11.29%
圆领	91	 48.92%
V 领	33	 17.74%
polo 领	71	 38.17%
本题有效填写人次	186	

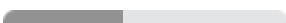
您会选择哪几种袖型的卫衣？ [多选题]

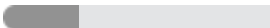
选项	小计	比例
插肩袖	92	 49.46%
落肩袖	65	 34.95%
正肩袖	85	 45.7%
蝙蝠袖	37	 19.89%
其他	18	 9.68%
本题有效填写人次	186	

卫衣颜色您偏向于冷色系还是暖色系？（下图颜色仅供参考） [多选题]

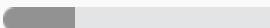
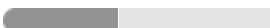
选项	小计	比例
暖色系	76	 43.18%
冷色系	124	 70.45%
本题有效填写人次	186	

下面几组卫衣您更偏向于哪一组颜色的卫衣？（颜色仅供参考） [多选题]

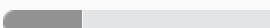
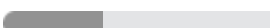
选项	小计	比例
低饱和度低明度	75	 42.61%

中饱和度低明度	85	 48.3%
高饱和度低明度	48	 27.27%
本题有效填写人次	186	

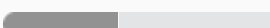
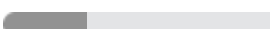
下面几组卫衣您更偏向于哪一组颜色的卫衣？（颜色仅供参考） [多选题]

选项	小计	比例
中饱和度低明度	100	 56.82%
中饱和度中明度	45	 25.57%
中饱和度高明度	71	 40.34%
本题有效填写人次	186	

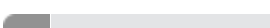
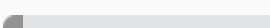
下面几组卫衣您更偏向于哪一种颜色的卫衣？（颜色仅供参考） [多选题]

选项	小计	比例
高饱和度低明度	93	 52.84%
高饱和度中明度	49	 27.84%
高饱和度高明度	63	 35.8%
本题有效填写人次	186	

下面几组卫衣您更偏向于哪一组颜色的卫衣？（颜色仅供参考） [多选题]

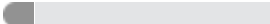
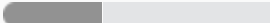
选项	小计	比例
低饱和度低明度	84	 47.73%
低饱和度中明度	71	 40.34%
低饱和度高明度	53	 30.11%
本题有效填写人次	186	

您喜欢几种颜色组合的卫衣？ [多选题]

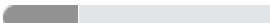
选项	小计	比例
一种	85	 45.7%
二种	133	 71.51%
三种	31	 16.67%
其他	14	 7.53%

本题有效填写人次	186	
----------	-----	--

卫衣图案位置您更偏向于哪一组？（图案仅供参考） [多选题]

选项	小计	比例
衣身上半身位置	97	 55.11%
衣身中间位置	82	 46.59%
衣身下摆位置	19	 10.8%
袖子部分	61	 34.66%
本题有效填写人次	186	

卫衣图案大小您更偏向于哪一组？（图案仅供参考） [多选题]

选项	小计	比例
图案较大	97	 55.11%
图案中等	81	 46.02%
图案较小	47	 26.7%
本题有效填写人次	186	

附录 3 模型运行代码

```
data = xlsread('shuju.xlsx');
X = data(:, 1:10); % 输入数据
Y = data(:, 11); % 输出数据
T = full(ind2vec(Y, 2)); % 把 Y 转换为 one-hot 编码
hiddenLayerSize = 10;
net = patternnet(hiddenLayerSize);
% 设置训练算法为量化共轭梯度法
net.trainFcn = 'trainscg';
% 设置数据集分割比例
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
% 设置性能函数为交叉熵
net.performFcn = 'crossentropy';
net.trainParam.epochs = 1000; % 迭代次数
% 训练网络
[net, tr] = train(net, X, T);
% 测试网络
outputs = net(X);
errors = gsubtract(T, outputs);
performance = perform(net, T, outputs);
% 查看网络结构
view(net);
% 评估性能
[~, predictedTargets] = max(outputs);
[~, actualTargets] = max(T);
```

```
accuracy = sum(predictedTargets == actualTargets) / length(actualTargets);  
disp(['Accuracy: ' num2str(accuracy * 100) '%'])
```

攻读学位期间所取得的相关科研成果

- [1] 张海燕,袁惠芬,韦玉辉.半身裙搭配效果影响因素的多模态分析[J].服装学报 (录用)
- [2] 张海燕,袁惠芬,汪洋,等. 面向 C 端的服装定制平台设计及其用户体验过程行为分析[J].河南工程学院学报 (自然科学版) (录用)
- [3] 张海燕,韦玉辉,袁惠芬,唐欣,许仲童 ,吴开明.羽绒材料表面不同污渍吸附规律分析[J].河南工程学院学报(自然科学版),2023,35(03):13-17.
- [4] Yuhui Wei, **Haiyan Zhang**, Zhaowei Su, Siqi Tao, Xuejiao Cao, Zihao Wan, Wei Pan. Develop an optimal daily washing care for technical jacket by balancing washing efficiency and functional degradation [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2023, 18(1):1-16. (SCI 检索)
- [5] 袁惠芬, 张海燕, 韦玉辉.基于眼动脑电技术的卫衣情感分析与建模[J].丝绸 (审稿中)
- [6] 袁惠芬, **张海燕**, 韦玉辉等。一种具有衣物抖散功能的高效烘干设备及其方法, [P]. 中国: CN202210524322.0 (2023.11.03 授权)
- [7] 2022 年安徽省纺织服装创意设计大赛三等奖

致谢

在我学术生涯的这个重要时刻，从心底里表达那些在我硕士学位旅程中给予帮助和支持的人们的感激之情。

特别感谢袁惠芬和韦玉辉两位老师，二位敬爱的老师不仅是我的学术指路人，更是在我迷茫和困顿时给予我激励的良师益友。在你们的悉心指导和不懈鼓励，让我能够克服研究中遇到的种种难题，坚持走在探究真理的道路上，引导我驶向知识的彼岸。

我亦要向我的家人，尤其是我的父母表示最深厚的感谢，是你们无条件的爱和支持，为我提供了坚实的后盾。在备受学业压力之时，你们对我的理解与包容，成为我最可靠的避风港。家人的鼓励是我不断前进的动力，我所取得的每一点成就都凝聚着家人的辛劳与期望。

我也要向 D116 实验室的小伙伴们致以诚挚的谢意，感谢你们在这段时光里的陪伴与支持。在学术的探索和人生的旅途中，是你们的友谊与互助，使得这段经历更加丰富和愉悦，我珍视我们共同度过的每一刻。

此外，对于那些为我提供学术资源、技术支持、以及实验指导的老师和专家们，表达我衷心的感谢。没有你们的悉心帮助，这份论文不可能有条理和质量上的提升。

最后，我会怀着感激之心，记着每一步都有你们的陪伴和帮助。虽然硕士学位的征途已经结束，但它开启了我人生新的篇章，我期待着将所学实践于未来的工作和挑战中。再次感谢所有人，感谢你们与我同行。