

【专题：高端装备智能人机交互设计】

载人航天人机交互界面色彩设计方法研究

姚湘, 龙茜*, 陈淇琪, 王美琪
(湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

摘要: **目的** 对载人航天人机交互界面的色彩设计方法流程进行了梳理和分析。**方法** 遵循“以人为中心”的设计原则, 从色彩空间与模型、色彩设计与人因、航天色彩设计范围、载人航天器色彩设计模型, 以及载人航天器色彩设计与人因评价体系等方面, 对载人航天器人机交互界面色彩设计方法流程体系进行了探讨。**结果** 构建了载人航天色彩设计模型, 阐述了完整的载人航天色彩设计方法流程体系。**结论** 针对载人航天人机交互色彩设计方法的研究为航天员在轨环境中的生活品质及工作效能等相关领域的提高提供了有力支持, 进一步增强了航天领域色彩设计与人因工程的重要性。

关键词: 载人航天; 人机交互界面; 色彩设计; 人因工程

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)04-0016-17

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.04.002

Color Design Methods for Human-computer Interaction Interface
in Manned SpaceflightYAO Xiang, LONG Xi*, CHEN Qiqi, WANG Meiqi
(Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China)

ABSTRACT: The work aims to sort out and analyze the color design method and process of human-computer interaction interface in manned spaceflight. Based on the "human-centered" design principle, the process system of color design method for human-computer interaction interface of human spacecraft was discussed from the spacecraft color space and model, color design and human factors, aerospace color design scope, manned spacecraft color design model, and manned spacecraft color design and human factors evaluation system. A manned spaceflight color design model was constructed, and a complete manned spaceflight color design method process system was elaborated. The research on color design methods for human-computer interaction in manned spaceflight provides strong support for related fields to improve the quality of life and work efficiency of astronauts in the orbital environment, and further enhances the importance of color design and human factors engineering in the aerospace field.

KEY WORDS: manned spaceflight; human-computer interaction interface; color design; human factors engineering

载人航天工程是当今世界高新技术发展水平的集中展示, 是衡量一个国家综合国力的重要标志^[1]。随着我国载人航天事业的不断发展, 航天员需进行的信息加工越来越多, 其中色彩是视觉感知信息最快的途径^[2]。载人航天环境充满着各种应激源, 包括物理、生理、心理和人际关系等方面, 如微重力、振动、噪声、限制、隔离、工作单调与刺激等^[3]。在特因环境下, 宇航员的生理、心理, 以及认知功效都可能受到

多种影响。

色彩作为视觉信息的重要组成部分, 对人体的影响表现出多样性与复杂性, 其不仅产生视觉现象, 还对情绪、心理、行为产生影响。经大量研究发现, 人机交互界面的色彩深深地影响着航天员的工作和生活。色彩可以帮助航天员提高自身的工作效率、调整身心状态, 使航天员更好地适应航天特因环境, 从而提升心理舒适度^[4-7]。在航天设计中, 色彩是航天空

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52375269); 国家社会科学基金艺术学一般项目 (20BG115)

*通信作者

间适居性设计非常关键的因素,其影响着空间环境的可居住性水平,对人的生理参数、认知、执行能力和心理因素的影响尤为深刻^[8]。

目前,国内外学界对人机界面的相关研究主要集中在人机界面空间布局上,以优化作业人员的可操作性。本文重点关注载人航天人机交互界面色彩设计方法的研究,针对载人航天色彩设计的各步骤进行总结分析,不仅为载人航天的色彩设计提供了科学依据,也为制定空间环境与情感适居性支持方案提供重要参考。

1 色彩设计相关概念

1.1 色彩空间与模型

色彩空间又称作色域,是用于表示和描述颜色的数学模型,通常是一个三维或更高维的空间。常见的色彩空间有 RGB 色彩空间、CMYK 色彩空间、CIELAB 色彩空间等^[9]。不同的色彩空间适用于不同的应用场景。例如:RGB 色彩空间适用于电子屏幕;CMYK 色彩空间适用于印刷^[10];CIELAB 颜色空间是由国际照明委员会(CIE)制定的一种色彩模式^[11-12],其涵盖了人类色彩感知的整个范围,且具有感知上的均匀性,而理论分析认为 CIELAB 颜色空间是一种较适合用于图像背景主色提取的颜色空间^[13]。

1.2 色彩设计与人因

色彩设计是空间环境适居性设计的重要内容,色彩经由视觉产生心理联想或生理反应,对人的心理、情感、健康及视觉功能等均有较大影响^[14-16]。在长期空间飞行的特殊环境下,载人航天器色彩设计对乘员的影响主要体现在生理、心理及认知功效三个方面。

1) 在生理上,色彩作为视觉信息的重要组成部分,通过人的眼睛对光产生视知觉反应,从而在大脑中产生特殊的感受。色彩不仅产生视觉现象,也对人

体产生多样性与复杂性的影响。研究表明^[17-19],色彩变化会对表面皮肤电反应(GSR)、脑电图(EEG)、心率、呼吸率、血压等生理反应存在关联的方面产生影响^[20]。

2) 在心理上,色彩可以影响人的情绪、精神和心理活动。在生活或者工作环境中,不同的色彩会对人类产生不同的情绪影响。从色彩心理学的内容来看,色彩心理被定义为人从对色彩的视觉感受转变为心理感受的整个过程。色彩会对人体心理感受产生直接作用,人在不同色彩的刺激下,由于主观心理因素而对某种色彩产生带有感情的心理变化和活动,主要包括:轻重感、冷暖感、空间感^[21]。此外,色彩也可以对人体心理产生间接反应,也就是色彩具有一定的联想性,会让人联想到相关事物^[22]。

3) 在认知功效上,色彩在信息可视化中是一种重要的编码元素,具有较强的可编码性、良好的识别度和区分度。色彩编码在航空航天、空中交通等工业领域的人机交互界面设计中具有关键作用。大量研究证实了色彩属性(如色相、明度和饱和度)在前景和背景选择、信息重要性排序,以及视觉显著性方面的认知效果和影响,为人机交互界面的色彩编码提供了指导依据,有助于实现更高效、更直观、更美观的界面设计^[23-29]。

1.3 航天器色彩设计范围

航空航天中的美学在很大程度上与整个航天器中涉及人类互动的部分有关。因此,航天器色彩设计的范围基本上包含航天器所有的内部部分。在太空环境中,色彩设计的重要性体现在航天器的不同功能区域,如工作区、生活区和休息区,需要考虑航天员的心理和生理需求。例如,对于生活(居住)舱室,考虑到这是航天员休息和睡眠的地方,色彩设计应选择简单、和谐的颜色,避免纷乱、艳丽的色调,以创造宁静舒适的环境。图 1 为天 and 核心舱不同功能的分区展示。

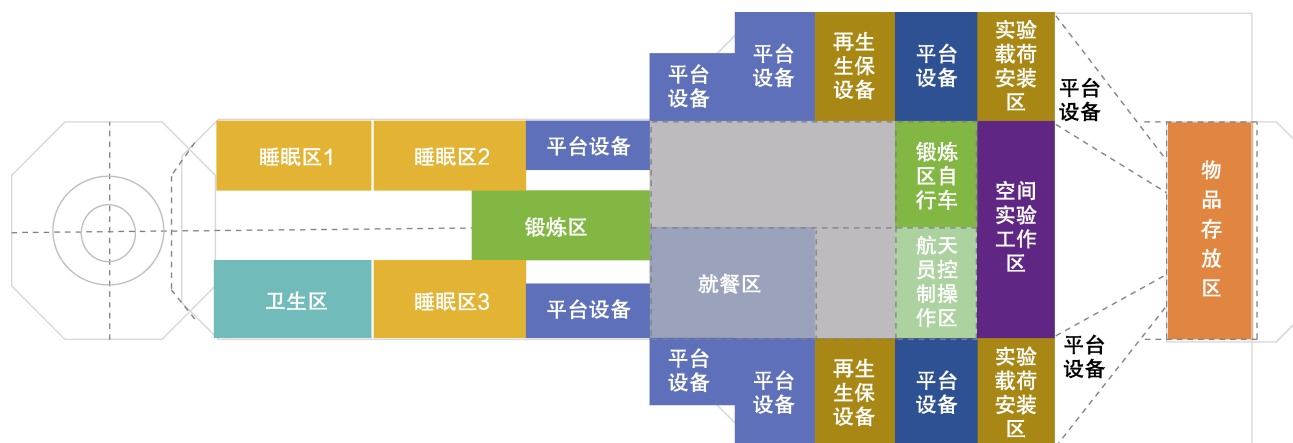


图 1 天和核心舱不同功能分区

Fig.1 Different functional divisions of Tianhe core module

在上述不同的舱室中,要进行色彩设计的公共部位是地板、天花板、接口板、机架、柜面等。NASA 在 2001 年给出的规范文件《国际空间站内部配色方案》^[30]中定义了将在所有美国加压元件内部使用的配色方案。这些方案建议适用于空间站的所有可居住元素。总结该规范中实验舱、生活舱、节点舱和观测舱中的配色方案,可以得出舱室内配色基本以白色为主,蓝色为对比色,明度较高、彩度较低、可扩大视觉空间。而不同舱室的接口板配色基本各不相同,以便航天员在空间站中快速地定位。由此可知,对于同一部件或区域,在不同的功能需求下,其配色也随之有所不同。对色彩的研究在改善航天器单调的视觉环境过程中起着关键作用,同时也获得了定位、宽敞性、方向性和识别性方面的功能作用。

2 载人航天器人机界面设计方法与色彩设计方法研究

为了贯彻“以人为中心”的设计理念,本文综合马斯洛层次需求^[31]、“以人为中心”的设计^[32-33]、用户体验设计^[34]、系统设计^[35-37]等理论,总结出了一套载人航天器人机交互界面工业设计的设计方法与流程,包含:任务立项、概念开发、系统设计、详细设计、评估、改进六个阶段,主要开展载人航天器的色彩设计模型框架及流程方法探索。

2.1 载人航天器色彩设计模型构建

人的色彩感觉信息由光源、彩色物体通过眼睛和大脑通道进行传输。这些因素使人类能够感知色彩,同时也是人类对色彩做出准确判断的先决条件^[38]。色彩是光、人类视觉系统,以及心理属性的综合体现。在载人航天器中,人员与航天器之间的色彩交互主要涉及:视觉空间与人眼的适配性、控制器与显示器的配色方式、助力措施和设备的颜色设置、信息获取与效率、安全颜色类型、照明颜色要求、舱内各操作界面的颜色匹配性等方面。

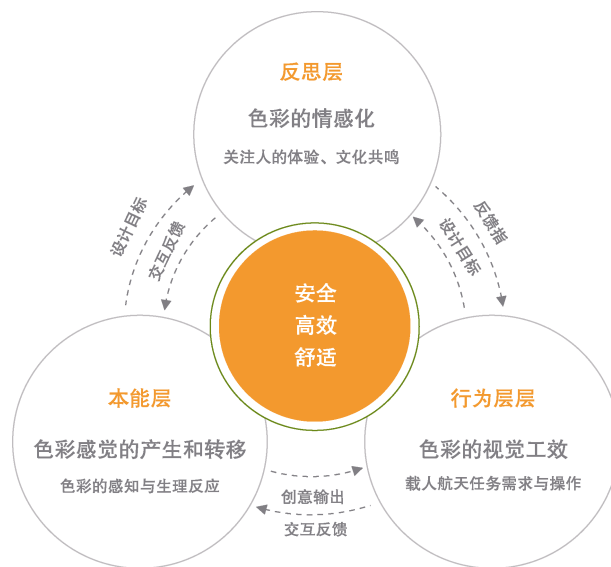
通过深入分析航天员在载人航天器中的视觉感知过程、影响乘组人员认知行为的因素及其作用机制,本文构建了载人航天器色彩设计模型,该模型包括体验层次中的色彩设计机制、人因工程中的色彩设计机制,见图 2。这一结构梳理了在载人航天器色彩设计中,如何考虑视觉感知和人因工程以实现功能性、美观性和用户体验的统一。

2.1.1 色彩交互的体验层次

体验层次中的色彩设计机制包括三个子要素:本能层的色彩设计要素、行为层的色彩设计要素和反思层的色彩设计要素。

2.1.1.1 色彩交互的本能层次

本能层次源于人的感官,包括视觉、听觉、触觉、



味觉、嗅觉交织而成的外部世界的情感体验,使人具有感性的个性^[39]。色彩感知通过视觉系统进行加工。从色彩感知过程中的生理加工和心理加工两个方面分析,建立本能层次的色彩感知过程模型。在载人航天器内部界面中,本能层次的色彩设计更加关注乘组人员对不同界面的色彩偏好,以达到缓解孤立和单调的目的。基于对色彩偏好的评价,将人的偏好需求转化为设计,强调用人的感觉进行设计,使人产生直观和主观的心理反应,通过创造令人愉悦、舒适的视觉环境和界面来满足乘组人员的需求。

2.1.1.2 色彩交互的行为层次

在色彩交互中的行为层次是指附着在界面/产品上的色彩在实用和功能方面能否优化人与产品间的交互体验^[40]。在行为层次的色彩设计中,关注色彩配置在视觉感知、空间尺寸、稳定性、识别性和功能性方面对乘组人员的影响。这样做的目标是优化与航天器内部界面交互的体验,帮助乘组人员进行任务活动时快速、准确地实现他们的行为目的和任务,提高操作可靠性和效率。

在载人航天器内部环境中,行为层次的色彩设计需要重点考虑以下几个方面:(1)考虑航天器特点,如狭小、拥挤、隔离等极端环境要素,通过色彩设计营造一个平静、凉爽、有秩序的环境;(2)优化空间感,利用色彩规律创造具有深度感和宽敞感的视觉效果;(3)增加稳定性,通过合理的颜色搭配增强室内环境稳定感;(4)优化识别性,通过统一和规律的配色区分不同功能设备,并采用鲜明的色彩对比强化操作和标识识别能力;(5)功能化配置,根据不同功能区域或舱室创造定制化颜色方案。

2.1.1.3 色彩交互的反思层次

在色彩交互中的反思层次通常被定义为高层次

的色彩情感化。高层次的色彩情感化关注色彩所赋予载体的情感、体验、内在含义, 以及设计理念。在载人航天器色彩设计中, 考虑协调性、品牌化、民族和国家文化特性、风格与符号等因素, 旨在为乘组人员创造具有审美意义且符合期待的舱内体验, 也反映航天器所属国家和民族的文化特征和形象^[41]。

在反思层次的色彩交互中, 需要重点考虑以下几个方面。

1) 协调性: 在航天器内部界面上统一和协调各个颜色载体和元素。

2) 品牌化: 建立与航天器品牌相符的视觉效果和色彩配方。

3) 民族和国家文化特性: 使航天器内部环境色彩与乘组人员的文化背景相协调。

4) 风格和符号: 通过色彩搭配表现独特的主题、风格和时代感。

2.1.2 色彩设计与人因工程

人因工程中的色彩设计分别包含以安全、高效、舒适为目标的设计要素^[42-44]。在载人航天器中, 提高乘组人员长时间飞行的心理适应能力、稳定性和可靠性已成为航天工效学研究热点^[45]。航天器设计师需要创造出没有视觉障碍的航天器环境。通过深入分析航天器舱内活动工效学要求指标, 挖掘出色彩设计中的主要研究包括: 报警和故障应急的安全色彩设计; 提高工作效率的高效色彩设计; 优化环境适居性的舒适色彩设计, 具体如下。

1) 报警和故障应急的安全色彩设计: 在航天器内部设计中, 色彩在航天器安全研究中的占比很低。绝大多数报警和故障应急界面设计没有积极考虑色彩。通过颜色和应急相关的文献可知, 颜色会影响警告的显著性和记忆, 从而影响遵从行为和传达的危险程度^[46-47]。尽管各国对警示颜色的适当使用有明确的规定, 但航天器内部标识往往不符合这些标准, 其主要的问题是在产品警示中使用了不协调的颜色。此外, 颜色与书面警告在人的认知过程中并不一致, 这种情况会影响警示信息的传播和人们对警示的遵守。

2) 提高任务效率的色彩设计: 颜色对工作效率的影响已被广泛认可, 环境颜色可显著影响任务表现和效率^[48-52]。自载人航天开始以来, 航天员任务表现的调查与评价一直是各国航天员训练中心的研究重点。寻找最佳训练方法以提高人类在太空中的表现已成为载人航天任务的重要干预措施。

3) 舒适色彩设计: 在人因工程学中, 舒适(或称安逸)是一种身体或心理上的轻松感。颜色在环境中的应用可以影响居住者的生产力、自我满意度、整体舒适度和情绪^[53-55]。在类似航天器内部环境的一些封闭舱室中的颜色研究表明, 人在不同的色彩环境或彩色照明环境中会产生不同的视觉和热舒适性。

通过考虑这些关键方面可知, 采取专门的色彩设

计策略有助于优化载人航天器中乘组人员的操作交互和体验, 最大限度地提高安全性、效率和舒适度。

3 载人航天器色彩设计与人因评价流程体系

秉承“以人为中心”的设计理念, 以载人航天任务需求为导向, 载人航天器色彩设计总体分为“三模块、三节点、十二活动”的迭代式闭环设计流程。其中, 三个核心模块分别为: 任务分析与色彩定位、航天人因测试、色彩设计与评估; 三个关键节点包含: 色彩设计定位、色彩设计策略、色彩设计归档; 十二活动包含: 航天任务需求分析、视觉感知能力需求分析、色彩设计需求分析、色彩设计目标等, 总体流程见图 3。

3.1 任务分析与色彩定位

以载人航天任务需求为导向, 运用工业设计相关方法, 对每个航天任务下的色彩需求进行分析。依托色彩心理学、航天员视觉感知能力要求、色彩调和等色彩领域相关原理对任务分区下的色彩需求进行整理, 并得出色彩定位, 为色彩设计做理论依托。

3.1.1 任务需求分析

航天员在执行空间飞行任务时需要完成一系列复杂且精细的任务。根据国外载人航天实践经验, 航天员的飞行任务可分为四个方面: 航天器系统运行管理任务、航天员生活与工作管理任务、载荷试验与管理任务、交会对接与出舱活动任务^[56]。这些任务涵盖了航天器运行监督、航天员生活健康管理、实验设备操作与管理, 以及舱外活动等多个方面的内容。

在载人航天器色彩设计任务之前, 分析航天员任务是至关重要的。它可能影响航天器色彩设计任务的成败和航天员安全。首先, 需确定总任务目标和基本内容。然后将任务分解为具体操作。为了对每项工作和具体操作进行分工, 需要对人与人、人与机器之间的状况和需求做出剖析。同时, 需要对完成任务有影响的环境因素及人的身心状态进行剖析。最后, 明确每一个作业的措施、步骤, 以及时间, 同时提出有关操作人员的挑选和训练的标准。

通过对各项航天任务的剖析, 以满足载人航天任务目标和标准为基础, 便可以对色彩实施初步设计, 进而产生多种色彩方案以进行选择。这样的分析和设计将有助于提高航天器色彩设计方案的合理性, 以确保任务的顺利进行和航天员的安全。

3.1.2 视觉感知能力变化

以往的研究从人与系统之间的交互过程出发, 将航天员的作业能力需求划分为如下三方面, 见图 4。

1) 感知能力: 借助人的感知器官, 实现对外界环境及机器系统状态的感知, 涉及人的视觉、听觉、触觉等方面。

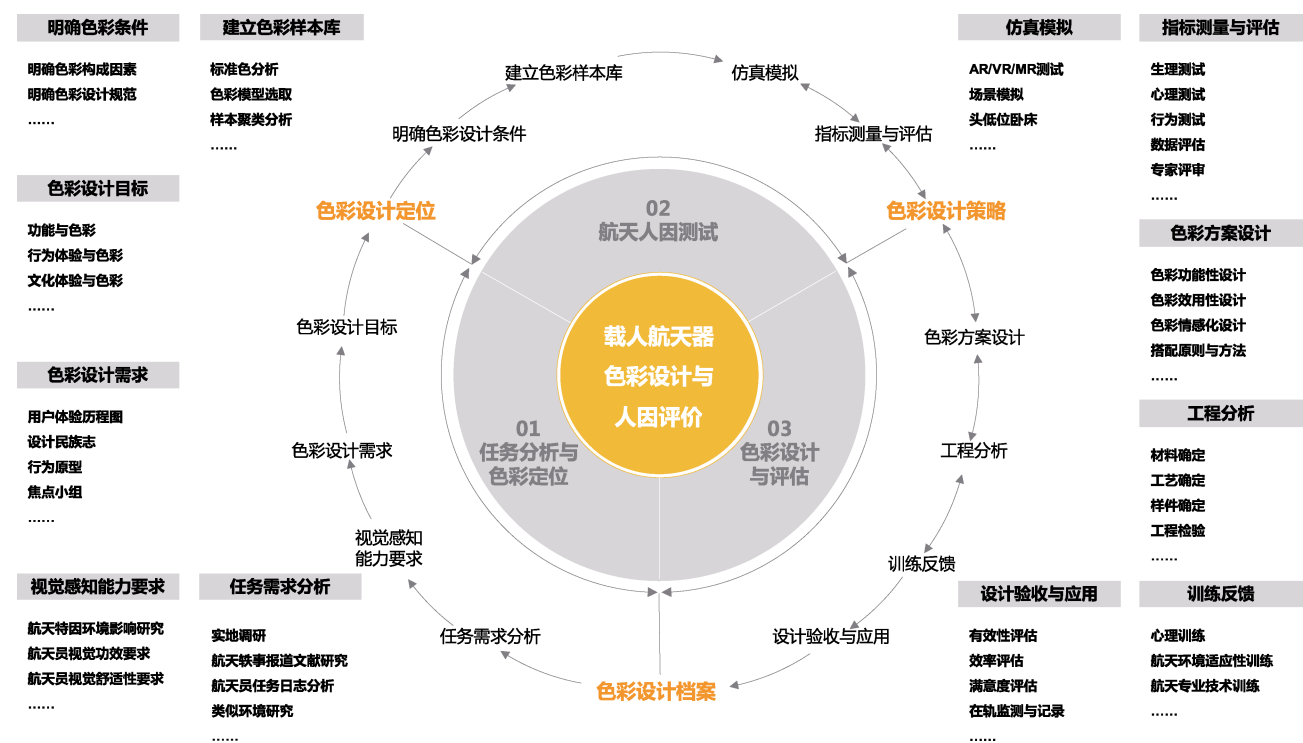


图 3 载人航天器色彩设计与 人因评价流程
Fig.3 Manned spacecraft color design and human factors evaluation process

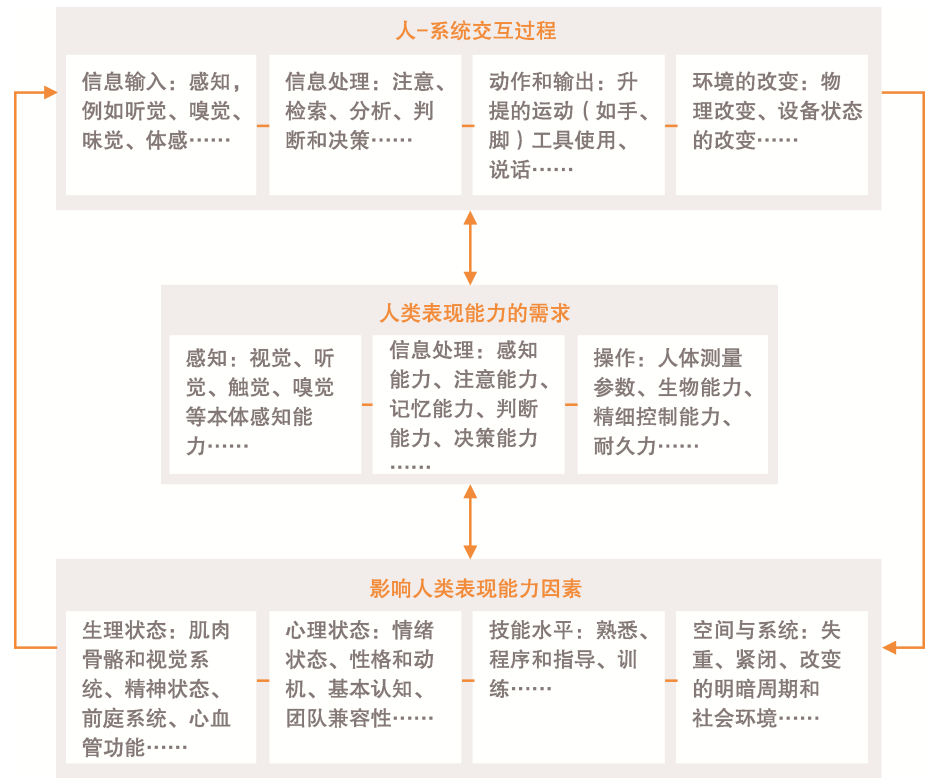


图 4 空间飞行中人作业能力需求
Fig.4 Human operation capability requirements for space flight

2) 信息处理能力: 借助人的认知决策能力对所获取的信息进行分析判断, 形成操作决策, 主要包括知觉、注意、记忆、决策等能力。

3) 操作能力: 根据形成的决策, 驱动人的肢体、

发声器官等形成对外界的操作或交流, 涉及人体参数和生物力学特性等^[57]。

本研究团队在此部分主要讨论航天员在特因环境下的视觉感知能力特性。视觉是人类主要感知外部

信息的途径,对辨别物体的形状、大小、颜色等属性,以及判断物体在空间中的方向、距离、位置等方面具有重要作用。此外,视觉也是人类进行空间导向、有效行走和活动的主要支持。鉴于航天任务中经常面临复杂的场景、非合作性目标,以及各种未预料到的情况,当前的系统自主性尚不能完全胜任所有任务,因此需要人的介入。在这种情境下,航天员的能力特质显得尤为关键。色彩在航天员执行任务时的信息传递中扮演着重要的角色,采用高对比度的色彩设计能够有效提升人的注意力和警觉性。因此,开展载人航天器色彩设计研究,需要根据航天操控任务需求,尤其与视觉相关的能力需求,构建或模拟操控环境,根据特因环境对视觉的感知能力要求和约束制定相应的指标与规范^[58]。

3.1.3 色彩设计需求

运用工业设计相关分析方法,分析不同的航天任务操作所涉及的舱室区域及操作流程特点,并结合航天员视觉感知能力特性,综合两者进行航天器色彩设计需求分析,针对不同舱室区域分析不同色彩的需求。

首先,需要对色彩设计涉及的空间舱段区域(如工作区、科研实验区、锻炼区、睡眠舱等)进行基础的用户行为调研,以全面了解航天员在这些区域内的基本操作。其次,运用同理心,从航天员的角度感知操作过程中的细节及其遇到的痛点,并详细记录设计思路。在此阶段,可以初步考虑通过优化色彩设计解决航天员部分痛点问题。通过采用多种调研方法(如问卷调查法、访谈法、生活经验感受法、观察法、桌面研究法等)分析航天员在特定任务情景下的操作过程和痛点。最后,根据航天员在特殊环境下视觉感知能力特性的变化,综合分析总结航天员在特定任务情境中的色彩设计需求。这样的分析和设计考量将有助于提高航天员在执行任务过程中的操作效率和舒适度,从而确保任务的成功进行和航天员的安全。

3.1.4 色彩设计目标

在航天器色彩设计中,通过对上一步的色彩设计需求进行提炼与思考,以安全、舒适、高效这三个航天工业设计的总体目标为中心,针对不同功能分区提出具体的色彩设计目标。本研究团队围绕这三个总体目标,提炼出三大主要目标:色彩功能性目标、色彩舒适性目标和色彩体验性目标。

1) 功能性目标:航天器系统合理的色彩设计可降低飞行员对色彩的混淆,增强对关键飞行信息的注意力,显著提高飞行安全性^[58]。NASA的一项实验研究了颜色亮度的差异作为身体方向的线索,有效地通过色彩设计提高了航天员的视觉空间定位感知能力。因此,笔者提出航天器色彩功能性目标,利用色彩的对比度、色差、亮度、饱和度等属性,为提高航天员视觉功效、在轨作业能力的绩效,以及更好地完成空

间作业任务而服务。

2) 舒适性目标:色彩作为视觉信息的重要组成部分,对人体具有多样性与复杂性的影响,包括情绪、心理及行为上的影响。航天器设计应有效利用色彩设计的情感调控功能,调整航天员的情绪,改善工作效率,改善空间居住质量,并为制定空间环境与情感适居性支持方案提供参考^[59]。

3) 体验性目标(文化与用户体验):由于色彩受到世界地域因素影响,如政治、气候、文化,人们对不同色彩的喜好与禁忌有所不同,使得常见色彩在不同国家象征的意义有所不同^[60]。因此,航天器色彩设计需要兼顾不同国家及地区的航天员对色彩的喜好与禁忌。在设计时,可以适当地调整航天器内部的色彩标准,以增强航天员的文化与用户体验感受,创造富有文化地域性和个性化的舱室色彩空间,以便航天员进行在轨作业与居住。

综上所述,航天器色彩设计应在满足安全、舒适、高效三个总体设计目标的基础上,综合考虑航天员在不同功能分区的需求,形成具体的色彩设计目标,从而为航天员创造一个符合需求的空间舱室环境。

3.2 航天人因测试

航天人因测试为载人航天器色彩设计理论研究阶段,其目的是研究不同色彩的生理和心理影响作用,从而选择满足航天员安全工作和舒适生活的色彩区间进行设计。在载人航天器色彩设计中,人因测试的内容有色彩绩效、生理心理影响、主观体验、安全性等,测量的方法有主观测量法、生理测量法和行为测量法。载人航天人因测试流程包括:明确色彩设计条件、建立色彩样本库、模拟仿真、指标测量与评估四个活动。

3.2.1 明确色彩设计条件

以色彩设计定位为基础,来明确色彩设计的前提条件,其中包括色彩构成因素和色彩设计规范两部分内容,为后续的方案提供设计平台和设计规范。

3.2.1.1 明确色彩构成因素

目的是确定能够传递色彩信息的组件。载人航天器由不同的组件构成,组件所构成的视觉环境存在于人的前、后、上、下、左、右等所有目光能及的地方,由真实的空间和表面,以及带有各种形状、肌理和色彩的材质构成。色彩通过这些组件对人的视觉感知产生影响。因此,无论是空间环境的色彩设计,还是人机界面的色彩设计,都需要明确色彩设计所涉及的组件。

在分析色彩构成因素中,首先根据航天任务需求和色彩设计定义,明确需要进行色彩设计的组件;然后对其进行分类处理;最后分析其材质特性,分析如何将色彩设计定位落到具体的对象上。本研究团队通过对太空站睡眠舱进行色彩分析,可将构成因素大致

分为主色调、装饰色、指引色和警示色四个部分，所涉及的材质除了金属、塑料外，还有被褥等编织材料（如表 1 所示），见图 5。这些色彩与材质的组合搭配，为睡眠舱的视觉环境设计提供了开阔的设计平台。



图 5 太空站睡眠舱的舱内色彩构成因素分析示例
Fig.5 Example of analysis of color components inside the sleeping cabin of the space station

表 1 太空站睡眠舱色彩构成因素
Tab.1 Color components of the sleeping cabin of the space station

构成因素	组成构件	材料
主色调	米黄色（侧壁、天花板、底板）、蓝紫色	碳纤维复合材质、编织材料
装饰色	红色（国旗）	编织、塑料
指引色	黑色/白色（固定带）	编织材料
警示色	红色/黄色（警告色）	印刷材质

在分析色彩构成因素的过程中，由于航天任务需求的不同，色彩构成要素的分析方法也不同。当涉及人的视觉感知设计时，不能简单地将各个设计平面展

开，而是需要以人为中心，计算各部分所占的视觉色彩面积，即从人眼的角度出发，计算视觉范围内的各个色彩部分的面积比例。

3.2.1.2 明确色彩设计规范

目的是使设计中所使用的色彩样本能够符合载人航天器色彩设计标准，参考现有的载人航天器色彩设计经验，避免设计方案脱离实际应用需求。根据美国航空航天局和欧洲航天局等官方设计文件，整理并列举了空间站中典型的色彩设计规范如下。

1) 航天器隔离环境色彩规范。为了达到健康、定位和空间任务支持的目的，美国航空航天局和欧洲航天局确定了在空间隔离环境的色彩设计开发中的关键要求^[61-62]，如表 2 所示。

表 2 航天器隔离环境色彩规范
Tab.2 Spacecraft isolation environment color specifications

安全	颜色和装饰应符合安全要求
可见性	颜色和装饰应该满足每一个视觉的需求
灵活性	色彩和装饰应该考虑到其身心影响及多功能作用，应该满足日常生活和工作中的使用需求
变化	环境必须在时间上是变化的，必须能够刺激自然条件下的感官，以保持感知、注意力和智力活动的正常状态
多样性	颜色和装饰应该创造一个可变的多样环境，对乘员的心理－生理产生积极影响
定制	颜色和光线应根据个人需求、工作需求和审美品位而变化，特别是在乘员宿舍等个人区域上

2) 舱内装饰色彩设计规范。乘员的审美和心理反应是空间舱室内设计和装饰的重要考虑因素。舱内装饰设计中关于色彩设计的一般注意事项，见表 3。

表 3 航天器隔离环境色彩规范
Tab.3 Spacecraft isolation environment color specifications

简单	室内设计（装饰）应简单，即颜色过多、视觉图案复杂、大面积度饱和的颜色或过多的织物变化可能会导致视觉或感官的过饱和。这种处理对大多数观察者来说是一种烦恼，尤其是在长时间的暴露中
多样	极端的简单性可能会走得太远。单调、单一的颜色或完全中性（例如全灰色）的配色方案和光滑、无纹理的表面是单调的，会导致无聊并最终对平淡无奇的视觉环境感到刺激。舱内不同的隔间使用不同的方案是实现多样性的有效方法。在每个隔间内，一般使用少量颜色（不超过 4~5 种）优于单一颜色。也可以通过使用稍微不同的基本表面的色调和阴影来获得多样性，一种用于设备机架，另一种用于控制面板
位置和方向编码	在某些情况下，颜色的使用可能有助于帮助机组人员更快地识别房间类型或他们在房间中的方向。较浅的颜色可用作指示，作为局部垂直设计的提示
饮食区和梳妆区的颜色	饮食区和梳妆区的配色方案应包括增强食物外观和人肤色的颜色
反射率	颜色会影响从表面反射的光量。漫反射是可取的，尤其是在工作站。高反射率会导致恼人的眩光
装饰的维护	使用多种颜色、纹理、材料和配件会使内务、维修和更换的问题增多

3) 乘员界面上的色彩设计规范。首先是硬件控制器上的色彩编码,其应该用于控制器标识而非控制器本身。控制器的颜色应该介于灰色和黑色之间,以便通过座舱观察是统一的。每个控制器的关联标识通过座舱观察起来,应该是不同的,标识需为每个控制器提供功能信息和描述性信息。如果需要进行颜色编码,不能超过 5 种颜色。只能使用以下几种颜色用于颜色编码:红色、绿色、橘黄色、白色、蓝色(仅在确实需要一种附加颜色时使用)。当镜面反射或低摩擦力会降低任务性能时,控制器上不应使用带光泽的罩面漆。颜色编码应该与预期进行任务的环境光相一致。视觉显示器上的色彩编码,其为当前大部分显示技术及其应用程序中较重要的属性之一。图形和字符显示也经常使用颜色作为信息编码,在对视觉信息进行组织和分段时,使用颜色是特别有效的,可以提高视觉搜索效率。在设计过程中应该考虑到乘员的颜色感觉能力。颜色编码不应作为传递信息、指导行动、提示响应、区别视觉元素等的唯一手段。对于其他编码,颜色编码应该作为一种冗余手段。颜色是一种有效标记显示器和控制器的强烈特征,应自始至终使用颜色对显示器和控制器进行分组。有些颜色,如代表紧急的红色,应该预留作专用指示,且不能用于其他目的。在执行任务时,为了防止使用过多炫彩的颜色造成使用人员对其任务分心,应避免使用太多颜色。颜色是定向时一个非常重要的因素,应该用来促进任务,而不是影响任务。颜色对比应足够明显,颜色分组编码的目的是非常明显的,同时选择的颜色应使得即使是存在颜色缺陷的人也能进行区分。

4) 标识的色彩设计规范。色彩是一种帮助告知用户项目功能的有用方法。在选择标识颜色时,设计师应该考虑一些重要因素。载人航天器标识设计中的色彩注意事项包括:每一个功能应只用一种颜色,当同样的颜色用于两个不同的功能时,功能不容易被用户区分;每个标识使用的颜色数量应限制在 9 种内(包括黑色和白色);两个包含太多颜色的标识很难被区分,因为用户必须查看存在或不存在某种颜色或色彩的图案,这需要用户方面的认知计算,应避免这种设计而使用一种更简单的设计;标识选择配色时应充分考虑环境光照条件,需要充分照明才能区分的颜色应该在时刻有照明的地方使用;对于驾驶舱等地点,乘组人员可能需要使用低光照条件下的标识,颜色应包含高对比度色彩并易于相互区别;应防止视觉缺陷者的混淆,在颜色方案中有 6 种以上颜色时不要使用绿色,不要同时使用红色和绿色;应考虑标识的背景色,以确保标识上的其他颜色与背景有足够的对比度,便于识别;有些标识需要特定的颜色来表示它们的功能或可能存在的危害。对最常见的颜色应考虑

表 4 常见颜色的常规用途
Tab.4 Common uses of common colors

颜色	常规用途
红	紧急使用物品、警告、总警报灯;安全控制;要求迅速识别的关键控制器、紧急停机、具有关键紧急属性的控制面板框
黄色	注意;低一级紧急情况的安全控制
黄黑条纹	立即访问;退出释放
橘黄	危险运动部件;机械;启动开关
绿色	重要的、频繁操作的控制器;无急迫或紧急的含义;急救和生存
蓝	说明(一般不推荐使用)
紫色(洋红色)	辐射危害
白	说明(反式照明设备)

3.2.2 建立色彩样本库

色彩样本库是航天器人机界面色彩方案设计的重要参考资料,应考虑国际标准色、行业标准色等对色彩编码与功能的要求,对类似环境进行样本聚类提取,也可考虑适合的民族文化与新技术材料,拓展色彩样本,形成色彩设计参考案例库。载人航天器色彩设计样本库的建立,不仅包括航天舱室,还包括类似舱室,如空间站、飞机、高铁、航天飞机、舰艇等,以及相似舱室的环境色、操作面板色、操作按钮及文字色等。

色彩样本库建立的基本原则为:明确标准色与功能的结合;色彩选择与人的认知规律相符合;确定色彩模型和色彩表征要素;对色彩样本进行筛选以避免重复并切实可行。建立色彩样本库,首先需要提取颜色样本,包括标准色的选取、色彩模型的选取和类似空间的聚类提取三个内容;然后对提取的色彩样本进行分类筛选和优化;最后形成可行样本,建立色彩样本库。色彩样本提取的方法如下。

3.2.2.1 从标准色中提取色彩样本

标准色彩样本提取是指让研究者了解航空航天领域中视觉信息、听觉信息、触觉信息的人机工程设计准则,了解色彩编码与功能赋色,从而在相关标准中对色彩样本进行直接选取,能够将色彩的标准使用与实际操作功能相结合,进行色彩设计和实。例如,在相关色彩原理中标准色有红、橙、黄、绿、青、紫 6 项,另有黑、白、灰中性色,在航空装备 HB20097-2012 标准^[63]中列出了信息显示色彩使用所要遵循的规范及在不同情境下的色彩编码(如表 5 所示)。

3.2.2.2 从色彩模型中提取色彩样本

此动作旨在让研究者了解色彩模型的相关理论,在色彩样本选取的过程中能够了解相关要素。例如,对于 RGB 模型,实验者可从 R、G、B 3 个色彩通道

表 5 国标中规定的色彩使用和含义
Tab.5 Uses and meanings of color specified
in national standards

颜色	相关意义	对比度良好的颜色
红	不安全、危险、警告	白
黄	易爆、注意、异常	黑、深灰
绿	安全、满意、正常、打开	白
黑、灰	背景	白、黄

着手，按照定量或随机的方法进行色彩样本选取，参数在 0~255，以 64 为单位间隔变化，每个原色轴得到 5 个区间，最终能产生 125 个色彩样本。样本量的多少取决于参数大小的变化。HSB 色彩模型中的色彩样本选取从 H（360°色相环）选取色相，再通过 S（饱和度 100%）、B（明度 100%）数值的变化进行选择。

3.2.2.3 从类似空间中提取色彩样本

对类似舱室空间的人机界面图像资源进行获取，如对空间站、飞机、高铁、舰艇、航天飞机等的人机界面运用爬虫或者网页插件进行图像获取，对图片进行分类整理并通过预处理分析相关色彩模式和色彩

量化方法技术，对图片进行色彩提取，获取已经实际应用的色彩样本，分析其共性、个性色彩，根据色彩要素进行色彩样本拓展，丰富色彩样本库。建立色彩数据库基本流程如下：样本收集；确定典型样本；划分取色区域；源图像计算机取色；获取代表性样本及色库，具体见图 6。

其中，针对现有较为成熟的色彩量化方法进行分析，运用相关实现方式和原理，进行类似舱室空间的色彩挖掘。目前，主要的色彩量化技术有：K-means 聚类算法^[64]、Median cut 算法、八叉树算法^[65]。提取出色彩样本之后，为避免色彩样本重复，对从标准色、色彩模型、类似空间几类选取的色彩样本进行归类，去除和人的认知规律、色彩功效等不符的色彩样本，对色彩样本库进行优化。对空间站人机操作界面的样本聚类分析如图 7 所示。

随后，本研究团队对整合后的国际空间站人机控制界面用 K-means 聚类算法进行色彩量化，其中 K 值为 15，量化后的色彩样本数量也为 15 个。本研究团队对色彩分布空间图和色彩占比饼状图进行导出。提取后其主要色彩为深灰色和浅绿色，按键多为同灰色系。其中，有部分亮光屏幕显示色为蓝色，熄屏状

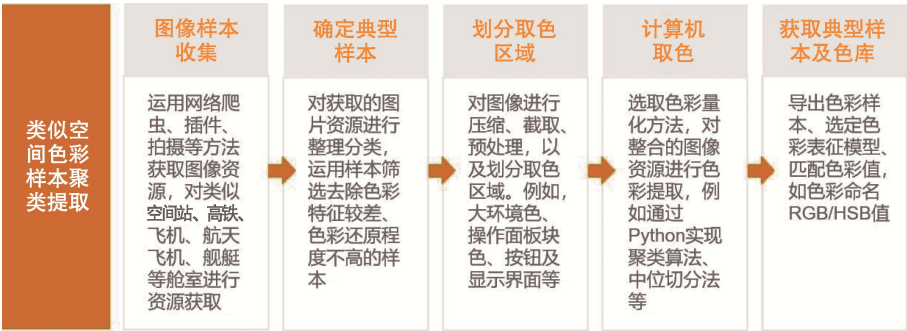


图 6 类似空间色彩样本提取流程及大致方法
Fig.6 Similar space color sample extraction process and general method



图 7 国际空间站人机界面整合
Fig.7 Human-machine interface integration in international space station

态下为深灰色和黑色。而字体部分多为黑色，与灰白色按键对比较为明显，色彩较为统一，按键中有少许红色与橙黄色。

3.2.3 仿真模拟

训练仿真模拟（模拟训练）是指运用现代科学技术手段构建虚拟场景或特殊条件进行训练的手段，具

有高仿真度、强针对性、高安全性和高训练效率等特点^[66]。仿真模拟的目标是通过搭建航天模拟环境，针对不同色彩设计目标开展人因测试实验，以研究色彩在不同目标定位下对人的影响。仿真模拟的航天环境分为航天特因环境和色彩环境，航天特因环境和色彩环境模拟的方法分别如表 6~7 所示。

表 6 航天特因环境模拟方法
Tab.6 Aerospace specific environment simulation methods

类别	方法	目的
多层次的地面模拟环境实验体系	头低位卧床实验、隔离密闭实验、睡眠剥夺实验、悬吊、气浮台等 ^[16]	分析各类地面模拟环境的特异性和对人能力研究的适应性，模拟航天环境下人生理、心理、情绪、决策、生物节律的变化规律及其机制 ^[16]
物理模拟器	中性浮力水槽、失重飞机、在轨实验等模拟失重或微重力状态的试验设施或装置	开展航天作业人因测试与研究，获取不同压力状态、不同任务环境下的人因特性变化规律 ^[16] 针对舱外活动进行动力学仿真分析，分析人认知决策能力变化及脑机制，缺点是无法模拟舱外活动的真实环境、成本昂贵
计算机仿真系统	ADAMS 仿真软件、能力评估工作站（PAWS）、Windows 在轨认知评估工具（WinSCAT）、在轨飞行疲劳监测的个性化实时神经认知评估工具（Neuro CATS）等	能够弥补物理模拟器的缺点，相对经济且快速地执行太空方案，不受时间和工作空间的限制

表 7 色彩环境模拟方法
Tab.7 Color environment simulation method

方法	优点
虚拟现实技术（VR）	是一种系统仿真环境模拟方法与人机交互技术的结合，对观察者的生理及心理进行全方位观察是目前较为普遍的环境模拟方法，能够更加方便、容易地搭建所需的色彩环境，进而对被试者进行各项指标测量
可视化仿真（VS）	可视化的、灵活的仿真分析环境 使色彩的可视性更强，更加能够感受到色彩对人的生理、心理及行为产生的变化
多媒体仿真（MS）	不仅实现色彩环境对人的可视化，还突出了各类多媒体的集成 增强视觉感知与其他感知因素（如听觉）的联系，放大感知程度，使色彩与环境联系更加紧密，被试者对色彩的感知和体验形式更加丰富
虚拟现实仿真（VRS）	突出沉浸式的人机交互体验，让人在虚拟现实的色彩环境中有投入感 模拟的场景更加逼真，能够使被试者更加投入测试，对色彩的感知更加敏锐
组合视景系统（CVS）	提供补充外部场景的视图，增强周围地形、障碍物，以及相关人文特征（包括周围环境、建筑物等） 使被试者在感知色彩环境的同时能够更好地了解 and 应对不同的外部环境，提高情境意识
.....	

模拟训练的主要流程包括确定合适的研究方法和实验基本设计流程，构建模拟环境，进行实验测试与数据分析，得出仿真模拟测试结果，并进行讨论。该过程旨在了解在航天环境下，不同色彩环境对人生理、心理和行为变化的影响，判断所设计的色彩方案是否适合航天员在特定环境下的工作与生活，最终得出符合实际需求的载人航天器色彩设计的结论和建

议。通过模拟仿真训练，研究人员能够评估不同色彩方案对航天员在航天环境下的适应性，为科学有效地制定载人航天器的色彩设计方案提供理论依据和实践指导。

3.2.4 指标测量与评估

在针对不同的色彩设计目标开展人因测试实验

的过程中，指标测量与评估主要包括生理、心理及行为等一系列的指标测量，通过各项指标数据的变化，确定色彩对不同目标（安全、高效、舒适）的影响情况，从而更加高效、准确地进行人因评估分析，提高复杂人机系统的人因设计效率、降低系统在全生命周期内的人因评估成本，并为复杂人机系统的人因设计提供有效支撑^[66]。载人航天器色彩设计人因测量与评估方法如表 8 所示。

表 8 载人航天器色彩设计人因测试与评估方法
Tab.8 Human factors testing and evaluation methods for color design of manned spacecraft

类别	方法	具体内容
主观测量	情绪测量量表	SAM 量表、VAS 量表、PrEmo（Product Emotion Measurement）、被试口头报告、焦虑自评量表（SAS）、抑郁自评量表（SDS）、汉密尔顿焦虑量表（HAMA）、汉密尔顿抑郁量表（HAMD）等 ^[67]
	脑力负荷量表	NASA-TLX 量表、主观负荷评价技术（SWAT）和修正的库柏哈柏法（MCH） ^[68]
		
物理测量	自主神经系统（ANS）测量	皮肤电阻、心率、血压、心电图、呼吸、肌电图等
	中枢神经系统（CNS）测量	脑电图（EEG）、事件相关电位（ERP）、功能性磁共振成像（fMRI）、正电子发射断层扫描（PET）等 ^[67]
	眼动指标（Eye Movement）测量	水平或垂直眼动的程度和速度、眨眼率、定位持续时间及瞳孔直径、眨眼频率（Blinking Frequency）、双眼视觉功能（Binocular Vision）、固视微动（Involuntary Eye Movement）、H 点眼椭圆
行为测量	面部表情、语音语调、肢体运动	图像识别、视频识别、面部肌肉活动编码系统（FACS）、最大限度辨别面部肌肉运动编码系统（Max）、表情辨别整体判断系统（Affex） ^[67]
	主任务操作方法	测量对目标进行搜索和觉察的速度和准确性
	次任务操作方法	选择反应时任务、数学计算、记忆任务、搜索任务和跟踪任务等 ^[68]
		

指标测量需要根据测量的目的和范围建立适当的指标体系，选择与评估目标相对应的人因指标集，并选取最适合本次实验的具体指标进行实验测量。通过测量出的各项指标数据结果，确定在航天模拟环境下色彩对人生理、心理和行为的影响变化情况，以满足人因工效学需求，打造安全、高效、舒适的载人航天器色彩设计方案。对于复杂人机系统，指标范围较大，指标间可能存在非线性或不确定关系。若要确保测量结果准确、完整地反映评价对象的整体特性，应在指标测量得出结论后再次进行专家评审，以提高结论的准确性和可用性。专家评审适用于定性分析指标，但其主观性较强^[69]。色彩设计方案评审应在不同层次上进行，涵盖元件、部件、装置、设备、系统和总体等方面。全面、综合、整体地评估整个系统是最终和最重要的评价环节。这是对系统安全、高效、舒适 3 个设计目标的整体评估，可以判断系统的整体和谐性，但这种评价绝对离不开其他层次上的评价。

3.3 色彩设计与评估

色彩设计与评估为载人航天器色彩设计从开发与实现的核心模块。本研究团队从色彩设计定位出发，基于色彩设计策略，包含：明确色彩方案设计、

工程分析、训练反馈、设计验收与应用 4 个关键活动，最终输出色彩设计档案，为之后的设计迭代提供材料支持。

3.3.1 色彩方案设计

色彩方案设计对色彩设计定位的实现，也是色彩设计策略的应用。在载人航天器的色彩设计中，首先根据设计定位，结合色彩设计范围，划分不同色彩设计层级，并在色彩设计策略的指导下，根据色彩的不同功能属性、航天器的不同层级进行色彩设计，得到初步的设计方案，然后结合色彩匹配的方法和原则，对初步方案进行设计优化，最终得到载人航天器的色彩设计方案。

3.3.1.1 色彩设计原则

1) 色彩功能性设计。色彩对人的生理、心理产生作用并传达信息，赋予“功能色彩”的意义，色彩的功能与人机界面的功能并不矛盾，适当地运用色彩能够改善人机界面形态，并使其功能趋于完美。在色彩功能性设计中应根据具体情况体现出“标准色和安全色”“能见度与注目性”“保护与掩护功能”。例如，识别电缆的制造和电流方向，红色代表火线、蓝色或绿色代表零线、黄色或者白色代表接地线，不仅能够

便于区分提醒，更加便于操作。针对航天器人机界面的色彩功能性设计要考虑人机界面中各个部件的功能，例如：开关、紧急提醒、操作按键、控制旋钮等，其中开启件宜用绿色，停止键宜用红色，提醒注意宜用橙色。

2) 色彩效用性设计。良好的人机交互界面色彩搭配不仅有利于人体身心健康，还能帮助工作人员提高作业效率及自身的作业技能，更好地完成工作^[70]。在载人航天器人机界面色彩设计中应充分考虑视觉功效、认知功效、行为功效。色彩对操作人员效率的影响也较大，例如船舶舱室要考虑色彩的人机功效^[71]。

3) 色彩情感化设计。产品色彩情感化设计是一种通过挖掘用户情感意向信息，并将其转换为产品色彩设计要素的设计方法^[73]。现阶段产品色彩情感化设计的研究热点主要集中在借助各种智能工具构建相关研究理论与方法方面^[74]。色彩情感化设计要与人们的经验视觉认知相结合，为色彩样本匹配其独有的色彩情感，了解色彩的联想和象征。例如，色彩的冷暖、

进退、胀缩、轻重、软硬、强弱、明快忧郁、华丽质朴。在载人航天器人机界面色彩设计中要考虑深空环境下对人心理状态的影响，从整体的环境色彩对操作人员的心理情感调节功能，到各个操作界面或辅助设计的赋色、文化偏好等。例如，对于深空环境中的方向定位，应选用浅色（给人轻的感觉）表示上方位，选用大地或者深色（给人重的感觉）表示下方位。航天器人机界面的信息显示层级也可以根据色彩的心理情感感受进行区分，让环境与人机界面相协调。例如，红色给人强的、暖的、胀大的视觉心理感受，可突出显示，让人感觉到紧急警告。可根据各个舱室不同的功能分区划分给环境及人机界面赋色，提升人的主观情感感受和适居性。根据色彩情感拓展色彩样本库。

3.3.1.2 色彩搭配原则与方法

为确保载人航天器的舱室设计与人的视觉舒适、心理状态和功能需求相适应，本文提出了包含和谐性、统一性等色彩搭配的十大原则与方法，见表 9。

表 9 色彩搭配原则与方法
Tab.9 Principles and methods of color matching

原则	方法
色彩和谐性原则	要求舱室色彩搭配具备和谐性，以提供视觉舒适和心理放松的感受，其中邻近色与互补色被认为是较为和谐的搭配方式
色彩稳定性原则	根据色彩明度上浅下深或者上轻下重的原则搭配色彩，以在长期失重环境中缓解航天员的不稳定方位感，为操作人员提供稳定感和方位感
色彩同一性原则	建议工作舱和睡眠舱采用同一色系或相邻色系，以满足工作效率和身心健康需求
色彩冷暖性原则	中色调或稍偏冷色调适用于工作舱，以保持头脑清醒，提高操作人员作业能力；暖色调或偏暖中性色适用于生活舱和睡眠舱，以助航天员休息放松、舒缓心境和疲劳感
色彩深浅性原则	结合不同舱室功能需求进行色彩搭配，强调功能区分，例如：工作舱色彩相对浅且冷；生活舱色彩相对深且暖
明度差原则	建议舱室色彩搭配时，明度差在 1.5~3，以实现柔和、稳重的形象，避免过大的视觉冲击
色彩与照明协调原则	在色彩搭配时充分考虑照明灯光的作用和效果，以确保舱室照明需求得到满足
安全性原则	运用具有安全含义的颜色，即安全色。为确保安全标志的效力，需要充分考虑对比色、形状和文字等多重因素。在舱室安全用色方面，色彩装饰材料需遵守相关标准，经过毒性评价规程检测，以确保非金属材料的毒性达到规定标准
功能性原则	舱室色彩搭配应充分考虑功能需求，通过色彩体现舱室各功能作用，例如：工作舱色彩有利于保持作业能力；餐厅色彩有利于促进食欲；住舱色彩有利于身心放松
全舱色彩相互协调原则	让各个舱室色彩不仅拥有共性，也能表现出各自的不同点，关注整个舱室的色彩在整体上的协调性

通过以上原则，可以在航天器舱室色彩设计中实现对操作人员视觉舒适度和心理感受的影响，从而最大限度地优化人机界面设计。此外，针对功能性需求，如工作舱、餐厅、住舱等不同功能区域，色彩搭配应充分考虑如何促进乘员的工作效率、食欲，以及身心放松等方面。综合来看，采用这些原则与方法对航天器舱室色彩进行搭配，可提高航天员的舱室舒适度和工作效率，为载人航天器内部色彩设计提供理论

依据。

3.3.2 工程分析

通过基于色彩方案的工程分析来确定设计方案的细节，包括色彩、材料、工艺，以及样件的确定。在经过工程检验后，得到最终设计方案，并为人因测试与评估阶段提供色彩设计原型。工程分析共分为细节确定和工程检验两个阶段，具体如下。

1) 细节确定。在得到具体的色彩设计方案后,需要将设计方案从效果表达层面转化为真实环境中的色彩。为了获得真实的色彩感觉体验,需要进行样本制作,涉及色彩校对及材料和工艺的确定。材料和工艺会影响色彩的表达,因此在选择颜色时需要充分考虑材料和工艺对颜色的影响。使用专业测色仪器对色彩进行测量和标定,并由专业人员针对色彩、材料、

工艺进行设计,最终制作成色彩设计原型,作为后续工程检验的对象。

2) 工程检验。在确定色彩方案的最后阶段,需要使用色彩设计核查清单进行分析和检验,全面审视整体的统一感,如有需要则进行修改。该步骤是非常重要的流程环节。核查色彩方案时,建议参照如表 10 所示的色彩设计核查清单。

表 10 色彩设计原型方案工程检验清单
Tab.10 Engineering inspection checklist for color design prototype scheme

检查对象	检查项目	详细内容	是/否
色彩设计原型	基本概念的确	是否符合色彩设计的基本概念	
	法律、条例的确	确认相关条例对色彩设计的制约条件、特别手续	
	标准色确认	是否包含标准色的使用,以及检验标准色的取色范围	
	安全性	安全色使用标准确认,以及是否遵循载人航天使用规范,并应避免有害材料的使用	
	视认性	色彩方案是否符合视觉认知	
	表色系统的确认	表色系统选用是否合适	
	材料和表面处理工艺的确认	根据 BOM 的材质进行确认	
	装饰清洁和维护	所有表面都应易于清洁和维护	
	装饰耐久性	装饰材料应耐磨损、耐刚蹭,并能抵抗不良污染物、溢出的化学品、油脂、身体排泄物、真菌、湿气、阳光直射、臭氧、空气中的颗粒、清洁剂和去污剂的吸收	
	反射率	颜色会影响表面反射的光量,高反射率会导致眩光的产生,而粗糙的表面则有助于减少眩光	
	颜色多样性	一个密闭空间不应该始终是颜色单一的	

3.3.3 训练反馈

航天员是载人航天器色彩设计的真正用户,其对色彩设计的评估和反馈对设计的更新迭代至关重要。色彩设计方案首先应用于训练场景中,而非最终的载人航天器。在训练过程中,航天员的主观反馈方式包括用户体验量表、访谈日志等;客观反馈方式则包含生理参数测量、行为参数测量等。

色彩设计方案可以应用于航天员训练中的多个方面。列举的 3 个典型训练项目如下。

1) 心理训练。该训练旨在提高航天员心理素质和团队协作能力。利用心理学原理和方法进行训练,色彩设计方案可应用于心理放松训练、狭小空间隔离训练、错觉心理训练等项目。

2) 航天环境因素适应性训练。在模拟的航天特因环境中,宇航员需要通过相关适应性训练来提高自身的耐力水平,并且在训练中获得防护技能,其目的是为了航天员们在不同环境下拥有极强的适应能力。色彩设计方案可应用于前庭功能训练、失重适应性训练(失重飞机飞行训练、血液重新分布适应性训练、头低位卧床体验等)及航空飞行训练等项目^[75]。

3) 航天专业技术训练。通过讲解和实际操作来

使航天员熟练掌握载人航天飞行所需的专业知识与操作技能^[76]。训练内容主要取决于航天器系统和航天飞行任务需求,包括:航天器技术训练、飞行任务技术训练、有效载荷训练、出舱活动训练和交会对接训练等^[75]。色彩设计方案通过在人机交互界面中的体现,参与训练过程,涵盖显示界面、操作界面、环境色、装饰色、安全色等设计环节。

综上所述,以综合性评估为基础,收集航天员对色彩设计方案的反馈,从而在训练场景中实现色彩设计方案的有针对性实施。通过分析航天员在各个训练项目中的意见和建议,为色彩设计方案提供关键改进方向,使其更好地满足载人航天器舱室的设计需求。

3.3.4 设计验收与应用

该部分旨在系统地验收和评估色彩设计方案,并将其应用到实际的载人航天器中,是整个色彩设计流程中的系统验收评估阶段。载人航天器色彩设计方案的验收应结合“以人为中心”的评估原则,包括人的回路测试和基于模型的人-系统性能评估等,并且邀请专家与航天员参与评估。评估内容包括:有效性评估、效率评估、满意度评估等。若设计方案通过评估,则将其应用于载人航天器,并对系统性能体验进行在

轨监测与记录;若未通过评估,则返回前一设计步骤进行内部迭代与优化。无论评估结果如何,整个设计流程都将被存档记录为色彩设计档案。系统验收评估可分为单项目(指标)评估和多项目(指标)综合评估,更为重要的是在某次载人航天飞行任务完成后的综合评价。

本研究强调针对实际飞行结果进行全面、认真且深入的评价,同时充分考虑航天员与工程设计人员的意见,全面评估航天器色彩设计。评价的基础依据航天员的满意度、系统的效率和存在问题,并提出改进措施。评估成果需结合主观与客观两方面数据,并涵盖人、机、环境三大要素。

5 总结与展望

5.1 总结

载人航天人机交互界面色彩设计对航天员的心理、生理、工作效率等会产生较大的影响。因此,载人航天人机交互界面的色彩设计方法的研究对载人航天交互界面色彩的合理设计显得至关重要。在载人航天人机交互界面色彩设计方法的研究中,首先对载人航天的任务进行分析与色彩定位,这为色彩设计提供了理论基础。总结分析载人航天器设计方法和“以人为中心”的工业设计方法,综合现有内饰环境和人机界面中的色彩设计方法,得出载人航天人机界面工业设计方法。通过总结与归纳体验层次中的色彩设计机制,以人因工程中的色彩设计机制为基础,构建了载人航天器色彩设计模型。在目前的研究过程中,航天人因测试尚且处于载人航天色彩设计理论研究的层次,致力于探究不同色彩设计对生理与心理的影响。最终,对载人航天人机交互界面进行色彩设计与评估。综上所述,形成了一套完整的载人航天器色彩设计方法流程体系。然而,目前的载人航天人机交互界面色彩设计方法仍有不足之处。例如航天人因测试中的仿真模拟,模拟的特因环境与真实的环境还有一定的差距,得到的结果会与实际情况有所偏差。

综上所述,以色彩设计为载体,航天器内部为对象,研究面向情绪适居性的中国空间站航天色彩设计机制,为国内空间站的色彩设计提供了科学的依据,创造了具有中国特点的适合太空居住的环境。同时,合适的色彩设计还可以调整航天员的情绪,改善工作效率,改善空间居住质量,为制定空间环境与情感适居性支持方案提供重要参考。

5.2 展望

载人航天任务的人机交互界面色彩设计是一项极为重要的任务,它直接影响到宇航员在太空中执行任务的效率和安全性。未来载人航天人机交互界面色彩设计有望朝着更智能、更人性化、更适应极端环境的方向发展。人机交互界面可能会具备智能调整功

能,根据宇航员的身体状况、心理状态和任务需求动态调整色彩方案。系统可能通过生理传感器获取数据,实时调整界面颜色以提高宇航员的注意力或缓解疲劳。随着虚拟和增强现实技术的不断发展,未来的载人航天界面可能变得更加沉浸式。色彩设计可能会与虚拟环境融合,提供更直观、全面的信息展示,以增强宇航员的感知和操作能力。未来的设计可能会更注重可持续性和环保。选择环境友好的色彩材料,减少对宇航员和太空环境的影响,是未来设计的一个潜在方向。

总体而言,未来的载人航天人机交互界面色彩设计将更加注重创新性、智能化和个性化,以提高宇航员的任务效率、心理健康水平和整体工作体验。

参考文献:

- [1] 周建平. 我国空间站工程总体构想[J]. 载人航天, 2013, 19(2): 1-10.
ZHOU J P. Overall Concept of My Country's Space Station Project[J]. Manned Spaceflight, 2013, 19(2): 1-10.
- [2] 沈艳, 姚湘, 江奥, 等. 航天器报警界面警示色反应绩效关联研究[J]. 载人航天, 2023, 29(3): 378-385.
SHEN Y, YAO X, JIANG A, et al. Research on Performance Correlation of Warning Color Response on Spacecraft Alarm Interface[J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(3): 378-385.
- [3] 张其吉, 白延强. 载人航天中的若干心理问题[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(2): 69-73.
ZHANG Q J, BAI Y Q. Several Psychological Issues in Manned Spaceflight[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 1999, 12(2): 69-73.
- [4] BLUTH B. Social and Psychological Problems of Extended Space Missions[C]// International Meeting and Technical Display on Global Technology. Berlin: IET, 2000.
- [5] SCHLACHT I L, BRAMBILLASCA S, BIRKE H. Color Perception in Microgravity Conditions: The Results of CROMOS Parabolic Flight Experiment[J]. Microgravity Science and Technology, 2009, 21: 21-30.
- [6] JIANG A, YAO X, SCHLACHT I L, et al. Habitability Study on Space Station Colour Design[C]// Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Aspects of Transportation. Berlin: Springer International Publishing, 2020: 507-514.
- [7] 王子莹, 巴剑波, 王川. 工作环境色彩对人体心理、生理和作业绩效的影响[J]. 人类工效学, 2021, 27(3): 76-82.
WANG Z Y, BA J B, WANG C. The Impact of Working Environment Color on Human Psychology, Physiology and Work Performance[J]. Ergonomics, 2021, 27(3): 76-82.
- [8] JIANG A, YAO X, FOING B, et al. Integrating Human

- Factors into the Colour Design of Human-machine Interfaces for Spatial Habitat[C]// EGU General Assembly conference abstracts. Vienna:EGU, 2022: 622.
- [9] 李海燕, 张校亮, 李晓春. 基于颜色主波长与补色波长的比色法定量检测[J]. 分析测试学报, 2016, 35(11): 1403-1408.
- LI H Y, ZHANG X L, LI X C. Colorimetric Quantitative Detection Based on Dominant Color Wavelength and Complementary Color Wavelength[J]. Journal of Analysis and Testing, 2016, 35(11): 1403-1408.
- [10] 王玉珏. 计算机色彩模型应用[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(6): 1458-1460.
- WANG Y J. Application of Computer Color Model[J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(6): 1458-1460.
- [11] 胡威捷. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- HU W J. Principles and Applications of Modern Color Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
- [12] 韩晓微. 彩色图像处理关键技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- HAN X W. Research on Key Technologies of Color Image Processing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [13] 张玉发, 刘尊洋, 余大斌, 等. 颜色空间在图像主色提取方面的应用[C]// 第九届全国光电技术学术交流会论文集(上册). 北京: 中国航天科工集团公司, 2010: 5.
- ZHANG Y F, LIU Z Y, YU D B, et al. Application of Color Space in Image Main Color Extraction [C]// Proceedings of the 9th National Optoelectronic Technology Academic Exchange Conference (Volume 1). Beijing: China Aerospace Science and Industry Corporation, 2010: 5.
- [14] SAVAVIBOOL N, GATERSLEBEN B, MOORAPUN C. The Effects of Colour in Work Environment: A Systematic Review[J]. Asian Journal of Behavioural Studies, 2018, 3(13): 149.
- [15] STONE N J, ENGLISH A J. Task Type, Posters, and Workspace Color on Mood, Satisfaction, and Performance[J]. Journal of Environmental Psychology, 1998, 18(2): 175-185.
- [16] JIANG A, FOING B H, SCHLACHT I L, et al. Colour Schemes to Reduce Stress Response in the Hygiene Area of A Space Station: A Delphi Study[J]. Applied Ergonomics, 2022, 98: 103573.
- [17] LIU Y, SOURINA O, NGUYEN M K. Real-time EEG-based Emotion Recognition and Its Applications[J]. Transactions on Computational Science XII: Special Issue on Cyberworlds, 2011(12): 256-277.
- [18] JACOBS K W, HUSTMYER J F E. Effects of Four Psychological Primary Colors on GSR, Heart Rate and Respiration Rate[J]. Perceptual and Motor Skills, 1974, 38(3): 763-766.
- [19] NOGUCHI H, SAKAGUCHI T. Effect of Illuminance and Color Temperature on Lowering of Physiological Activity[J]. Applied Human Science, 1999, 18(4): 117-123.
- [20] 周红. 园林植物色彩对人的生理和心理的影响[J]. 美术教育研究, 2017(7): 100-101.
- ZHOU H. The Impact of Garden Plant Colors on Human Physiology and Psychology[J]. Art Education Research, 2017(7): 100-101.
- [21] 陈瑶, 潘炫谚, 何碧莹. 基于色彩心理学的巴塞罗那圣保罗医院空间环境研究[J]. 中国医院建筑与装备, 2021, 22(2): 94-95.
- CHEN Y, PAN X Y, HE B Y. Research on the Spatial Environment of San Paolo Hospital in Barcelona Based on Color Psychology[J]. Chinese Hospital Architecture and Equipment, 2021, 22(2): 94-95.
- [22] 张波, 李震, 姚竞争. 色彩心理学在船舶内装设计中的应用[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(9): 120-123.
- ZHANG B, LI Z, YAO J P. Application of Color Psychology in Ship Interior Design[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(9): 120-123.
- [23] VAN L D L. Colour Coding with Visual Layers can Provide Performance Enhancements in Control Room Displays[C]// 2001 People in Control. The Second International Conference on Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres. Berlin: IET, 2001: 228-233.
- [24] WU J H, YUAN Y. Improving Searching and Reading Performance: The Effect of Highlighting and Text Color Coding[J]. Information & Management, 2003, 40(7): 617-637.
- [25] PUHALLA D M. Perceiving Hierarchy through Intrinsic Color Structure[J]. Visual Communication, 2008, 7(2): 199-228.
- [26] 张杰, 高子童, 刘旭峰, 等. 不同颜色视标对黑背景色的认知绩效比较研究[J]. 山西医科大学学报, 2011, 42(7): 542-550.
- ZHANG J, GAO Z T, LIU X F, et al. Comparative Study on the Cognitive Performance of Different Color Visual Targets on Black Background[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2011, 42(7): 542-550.
- [27] 李晶, 薛澄岐. 基于视觉感知分层的数字界面颜色编码研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 201-208.
- LI J, XUE C Q. Research on Digital Interface Color Coding Based on Visual Perception Layering[J]. Transactions of the Chinese Society of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 201-208.
- [28] 胡泽铭. 数字界面视觉信息认知 ERP 实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- HU Z M. ERP Experimental Research on Visual Information Cognition in Digital Interfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [29] 白婷. 头盔瞄准界面色彩的认知工效学研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- BAI T. Research on Cognitive Ergonomics of Helmet Aiming Interface Color[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

- [30] National Aeronautics and Space Administration. International Space Station Interior Color Scheme Non-book Material: SSP 50008[S]. Houston: Johnson Space Center, 2001.
- [31] 马斯洛. 马斯洛人本哲学[M]. 成明, 译. 北京: 九州出版社, 2003.
MASLOW. Maslow's Humanistic Philosophy[M]. CHENG M, translated. Beijing: Jiuzhou Publishing House, 2003.
- [32] 布朗 T. IDEO, 设计改变一切[M]. 侯婷, 何瑞青, 译. 杭州: 浙江教育出版社, 2019.
BROWN T. IDEO, Design Changes Everything[M]. HOU T, HE R Q, translated. Hangzhou: Zhejiang Education Press, 2019.
- [33] 何人可. 工业设计史[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE R K. History of Industrial Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [34] 诺曼 D A. 设计心理学[M]. 梅琼, 译. 北京: 中信出版社, 2003.
NORMAN D A. Design Psychology[M]. HE Q, translated. Beijing: CITIC Press, 2003.
- [35] 常冰瑜. 产品系统设计研究——博朗与乌尔姆设计合作核心[J]. 包装世界, 2015(6): 18-19.
CHANG B Y. Research on Product System Design: The Core of Design Cooperation between Braun and Ulm[J]. Packaging World, 2015(6): 18-19.
- [36] 王受之. 世界现代设计史[M]. 北京: 中国青年出版社, 2002: 290-291.
WANG S Z. History of Modern Design in the World[M]. Beijing: China Youth Publishing House, 2002: 290-291.
- [37] 初冬, 张建设. 乌尔姆系统设计理论对现代设计的启示[J]. 艺术教育, 2013(9): 168.
CHU D, ZHANG J S. Enlightenment of Ulm System Design Theory on Modern Design[J]. Art Education, 2013(9): 168.
- [38] 马晓华. 产品设计中色彩的应用表达[J]. 湖南包装, 2013(3): 32-35.
MA X H. Application Expression of Color in Product Design[J]. Hunan Packaging, 2013(3): 32-35.
- [39] 徐丹. 心随景迁, 情随景变[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
XU D. The Heart Changes with The Scenery, and the Feelings Change with the Scenery[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [40] 诺曼 D A. 情感化设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
NORMAN D A. Emotional Design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.
- [41] ZHI J Y, WANG C. A Research of Train Interior Color Design Based on Passenger Experience[C]// 2010 IEEE 11th International Conference on Computer-aided Industrial Design & Conceptual Design 1. Piscataway: IEEE, 2010, 1: 439-442.
- [42] NANKI N, ARCHANA S. Creativity 5.0 the Pink City Design Confluence[C]// Colours, Visual Display Design and Ergonomics Theme: Form, Reform, Transform. Jaipur: ARCH College of Design&Business, 2022.
- [43] BRAUN C C, KLIN P B, SILVER N. C. The Influence of Colour on Warning Label Perceptions[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1995, 15: 179-187.
- [44] KUO W L, CHANG T, LAI C C. Research on Product Design Modeling Image and Color Psychological Test[J]. Displays, 2022, 71: 102108.
- [45] 周前祥, 曲战胜, 王春慧, 等. 虚拟乘员舱布局工效学设计中颜色匹配性的实验研究[J]. 航天医学与医学工程, 2001(6): 434-438.
ZHOU Q X, QU Z S, WANG C H, et al. Experimental Study on Color Matching in Ergonomic Design of Virtual Crew Cabin Layout[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2001(6): 434-438.
- [46] MARKUS H, ZAJONC R B. The Cognitive Perspective in Social Psychology[J]. Handbook of Social Psychology, 1985, 1: 137-230
- [47] 杨欢, 李义娜, 张康. 可视化设计中的色彩应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(9): 1587-1596.
YANG H, LI Y N, ZHANG K. Color Application in Visual Design[J]. Journal of Computer-aided Design and Graphics, 2015, 27(9): 1587-1596.
- [48] ZTÜRK E, YILMAZER S, URAL S E. The Effects of Achromatic and Chromatic Color Schemes on Participants' Task Performance and Appraisals of an Office Environment[J]. Color Research and Application, 2012, 37(5): 359-366.
- [49] POURBAGHER S, AZEMATI H R, SALEH S P B. Class room Wall Color: A Multiple Variance Analysis on Social Stress and Concentration in Learning Environments[J]. International Journal of Educational Management, 2021, 35(1): 189-200.
- [50] AL-AYASH A, KANE R T, SMITH D, et al. The Influence of Color on Student Emotion, Heart Rate and Performance in Learning Environments[J]. Color Research and Application, 2016, 41(2): 196-205.
- [51] KWALLEK N, LEWIS C M, LIN-HSIAO J WD, et al. Effects of Nine Monochromatic Office Interior Colors on Clerical Tasks and Worker Mood[J]. Color Research and Application, 1996, 21(6): 448-458.
- [52] KWALLEK N, LEWIS C M. Effects of Environmental Colour on Males and Females: A Red or White or Green Office[J]. Applied Ergonomics, 1990, 21(4): 275-278.
- [53] CASTILLA M D M, DOMINGOÁLVAREZ J, DIAZ F R, et al. Comfort in Buildings[M]// Comfort Control in Buildings. London: Springer, 2014.
- [54] SONG Y, MAO F B, LIU Q. Human Comfort in Indoor Environment: A Review on Assessment Criteria, Data Collection and Data Analysis Methods[J]. IEEE Access, 2019 (7): 119774-119786.
- [55] 姜颖, 洪军, 王巍, 等. 面向 VDT 显示界面的视觉舒适度客观描述方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 77-83.
JIANG Y, HONG J, WANG W, et al. Objective Description Method of Visual Comfort for VDT Display Inter-

- face[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2017, 48(1): 77-83.
- [56] 王德汉, 黄伟芬. 航天员任务分析[J]. 航天医学与医学工程, 1996(6): 66-71.
WANG D H, HUANG W F. Astronaut Mission Analysis[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 1996(6): 66-71.
- [57] 陈善广, 王春慧, 陈晓萍, 等. 长期空间飞行中人的作业能力变化特性研究[J]. 航天医学与医学工程, 2015, 28(1): 1-10.
CHEN S G, WANG C H, CHEN X P, et al. Research on the Changing Characteristics of Human Working Ability during Long-term Space Flight[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2015, 28(1): 1-10.
- [58] 刘相, 刘玉庆, 朱秀庆, 等. 基于虚拟现实的航天员舱内导航训练方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(1): 101-107.
LIU X, LIU Y Q, ZHU X Q, et al. Astronaut Cabin Navigation Training Method Based on Virtual Reality[J]. Journal of Computer-aided Design and Graphics, 2017, 29(1): 101-107.
- [59] 江奥. 基于情绪适居性的空间站卫生区色彩设计研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
JIANG A. Research on Color Design of Space Station Health Area Based on Emotional Habitability[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [60] 马洁帆. 家用医疗产品 CMF 设计研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
MA J F. Research on CMF Design of Household Medical Products[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [61] National Aeronautics and Space Administration. NASA Human-system Integration Process Handbook Non-book Material: NASA-HDBK-3001[S]. Washington: NASA, 2010.
- [62] ESA. Human Factors Engineering Non-book Material: ECSS-E-ST-10-11C[S]. Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2008.
- [63] 中国航空工业集团公司. 航空装备信息显示人机工程设计准则 非书资料: HB 20097-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
China Aviation Industry Corporation HB 20097-2012, Ergonomic Design Criteria for Aviation Equipment Information Display Non-book Material: HB 20097-2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2013
- [64] 曾如明. K-means 聚类算法的改进及其应用研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2022.
ZENG R M. Research on the Improvement and Application of K-means Clustering Algorithm[D]. Nanchong: West China Normal University, 2022.
- [65] 耿国华, 周明全. 常用色彩量化算法的性能分析[J]. 小型微型计算机系统, 1998(9): 47-50.
GENG G H, ZHOU M Q. Performance Analysis of Commonly Used Color Quantization Algorithms[J]. Small Microcomputer Systems, 1998(9): 47-50.
- [66] 姜志勇. 基于人工智能技术的运动员训练仿真模拟系统[J]. 信息技术, 2022(2): 95-99.
JIANG Z Y. Athletes Training Simulation System Based on Artificial Intelligence Technology[J]. Information Technology, 2022(2): 95-99.
- [67] 郝洛西, 曹亦潇, 崔哲, 等. 光与健康的研究动态与应用展望[J]. 照明工程学报, 2017, 28(6): 1-15.
HAO L X, CAO Y X, CUI Z, et al. Research Trends and Application Prospects of Light and Health [J]. Transactions of the Chinese Society of Illuminating Engineering, 2017, 28(6): 1-15.
- [68] 柳忠起, 袁修干, 刘涛, 等. 航空工效中的脑力负荷测量技术[J]. 人类工效学, 2003(2): 19-22.
LIU Z Q, YUAN X Q, LIU T, et al. Brain Load Measurement Technology in Aviation Ergonomics[J]. Ergonomics, 2003(2): 19-22.
- [69] 王奥博. 复杂人机系统人因工程评估指标体系动态构建技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
WANG A B. Research on Dynamic Construction Technology of Human Factors Engineering Evaluation Index System for Complex Human-machine Systems[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [70] 李中付, 丁猛, 余浩, 等. 基于色彩心理与工效的船舶舱室色彩搭配原则[J]. 船舶工程, 2015, 37(S1): 203-205.
LI Z F, DING M, YU H, et al. Principles of Ship Cabin Color Matching Based on Color Psychology and Ergonomics[J]. Ship Engineering, 2015, 37(S1): 203-205.
- [71] 李中付, 余浩, 时粉周, 等. 船舶舱室色彩搭配对船员工效影响研究[J]. 船舶工程, 2014, 36(1): 82-86.
LI Z F, YU H, SHI F Z, et al. Research on the Impact of Ship Cabin Color Matching on Crew Efficiency[J]. Ship Engineering, 2014, 36(1): 82-86.
- [72] DING M, WEI D. Product Color Emotional Design Considering Colorlayout[J]. Color Research & Application, 2019, 44(2): 285-295.
- [73] ZHANG X X, YANG M G. Color Imagine Knowledge Model Construction Based on Ontology[J]. Color Research & Application. 2019, 44(4): 651-662.
- [74] 丁满, 袁云磊, 张新新, 等. 基于深度学习的产品色彩情感化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(5): 1647-1656.
DING M, YUAN Y L, ZHANG X X, et al. Product Color Emotional Design Based on Deep Learning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(5): 1647-1656.
- [75] 吴斌, 陈善广. 航天员选拔与训练[J]. 科学, 2008, 60(6): 43-46.
WU B, CHEN S G. Astronaut Selection and Training[J]. Science, 2008, 60(6): 43-46.
- [76] 沈羨云. 提高航天员工作效率的几项措施[J]. 中国航天, 1996(3): 36-40.
SHEN X Y. Several Measures to Improve The Work Efficiency of Astronauts[J]. China Aerospace, 1996(3): 36-40.