

doi: 10.7690/bgzd.2025.06.001

## 多感官联动式战场适应性模拟训练系统

罗超元, 梁涛, 许建中  
(陆军步兵学院, 南昌 330103)

**摘要:** 针对步兵开展战场适应性训练缺少有效训练手段的问题, 构建一种基于多感官虚拟现实的模拟训练系统。以训练需求为切入点, 提出战场生理适应、心理适应、生存适应和危机适应 4 层面的训练需求, 基于需求设计典型作战环境模拟、载具乘员舱模拟、武器效应模拟、人员任务体态模拟、知觉环境模拟、数据采集与分析、训练管理 7 类功能; 采用层次化集成化的系统架构、多级防护、分步运行模式和反馈式的数据管理等设计构建功能完备的系统, 并制定多感官模拟的关键技术路线。结果表明, 该系统能有效指导新型战场适应性模拟训练系统的研发。

**关键词:** 多感官虚拟现实; 模拟训练; 系统架构; 战场环境

**中图分类号:** TP391.9; E83 **文献标志码:** A

## Multi-sensory Organ Linkage Type Battlefield Adaptability Simulation Training System

Luo Chaoyuan, Liang Tao, Xu Jianzhong  
(Army Infantry Academy, Nanchang 330103, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of lacking effective training methods in infantry battlefield adaptability training, a simulation training system based on multi-sensory virtual reality is constructed. Taking the training requirements as the breakthrough point, this paper puts forward four levels of training requirements, including battlefield physiological adaptation, psychological adaptation, survival adaptation, crisis adaptation. Based on the requirements, seven functions are designed, including typical combat environment simulation, vehicle crew cabin simulation, weapon effect simulation, personnel task posture simulation, perceptual environment simulation, data collection and analysis, training management; Hierarchical and integrated system architecture, multi-level protection, step-by-step operation mode and feedback data management are used to design and construct a fully functional system, and the key technical route of multi-sensory simulation is formulated. The results show that the system can effectively guide the research and development of the new battlefield adaptability simulation training system.

**Keywords:** multi-sensory virtual reality; simulation training; system architecture; battlefield environment

### 0 引言

随着认知科学的发展, 关于多感觉信息整合的脑机制研究成果在不断丰富, 诸多研究表明: 通过多种感官感知外界环境信息能够强化人类体验<sup>[1-2]</sup>。基于该结论, 虚拟现实技术突破了单一视觉刺激的局限, 开始追求全方位、多感官的体验。多感官虚拟现实在各领域的应用逐渐传播, 如旅游推荐系统<sup>[3-5]</sup>、图书阅读系统<sup>[6]</sup>、消防模拟系统<sup>[7]</sup>等, 主要以提升用户体验感为原则进行系统设计与研发<sup>[8-9]</sup>。

多感官虚拟现实技术尚未在军事训练领域得到广泛应用, 典型的应用仅有张志勇等<sup>[10]</sup>设计的沉浸式战场适应性训练系统。在这种研究背景下, 考虑到步兵兵种的使命任务决定了作战人员需要在最残酷的一线战场展开作战行动, 面对残酷的战场环境

需要强大的心理承受能力和身体素质。笔者从一线作战人员战场环境适应训练需求出发, 基于对训练需求的梳理, 从功能、架构、安全、运行模式、数据管理等角度进行系统设计, 并对关键的技术实现路线进行分析, 构建基于多感官虚拟现实的战场环境适应性训练系统, 以期提升作战人员对作战环境的适应能力。

### 1 需求分析

步兵分队的作战人员常处于战争或冲突一线, 为提高步兵对战场环境的耐受能力、临机指挥能力及危机情况处置能力, 需要构建用于步兵分队人员战场生理适应、心理适应、生存适应、危机适应训练的作战环境适应性训练系统。

1) 战场生理适应训练。需要面向主要作战方向,

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2024-09-17

基金项目: 军内科研项目(LJ20212A011267)

第一作者: 罗超元(1995—), 男, 湖北人, 硕士。

分别构建海岛、热带丛林、高寒山地 3 类典型的特殊自然环境, 在 3 种环境下分别设置片段式的战争场景, 锻炼作战人员对艰苦环境的生理耐受性。

2) 战场心理适应训练。需要构建特殊的作战情景, 包括血腥、幽闭、密集、高空、巨响、剧烈振动 6 类场景, 展开血腥适应训练、密集恐惧适应训练、恐高适应、载具幽闭适应、载具振动噪声适应、爆炸震颤适应、眩晕适应等训练。

3) 战场生存适应训练。需要构建海岛、热带丛林、高寒山地 3 种自然条件下的特殊情景, 开展战场情况临机处置、方向辨识、生物侵袭防护、有毒/可食植物辨识等训练。

4) 战场危机适应训练。需要营造特殊的作战情景, 突出单兵作战过程中的危机困境、绝境, 包括尸横遍野、敌方力量占据压倒性优势的、遭遇自然灾害、面临突然袭击、猛兽围攻、团队信任危机等情景。

## 2 功能设计

系统以训练方舱为核心, 在方舱内集成各种感官刺激生成设备, 实现对各种作战训练环境的模拟功能。为提升战场适应性训练的有效性, 主要设计典型作战环境模拟、载具乘员舱模拟、武器效应模拟、人员任务体态模拟、知觉环境模拟、数据采集与分析、训练管理 7 方面的功能, 训练方舱如图 1 所示。



图 1 训练方舱

### 2.1 典型作战环境模拟功能

根据典型作战地域下的训练需求, 依托软硬件构建海岛、热带丛林、高寒山地 3 种地理环境。基于硬件构建 3 种地理环境下的温度、风场环境要素; 基于软件构建地形、地貌、气象、水文、植被、工事障碍等环境要素。同时, 能够调用预设的虚拟战场环境。

### 2.2 载具乘员舱模拟功能

乘员舱模拟功能包括陆战车辆平台、直升机、船艇 3 种载具的乘员舱视觉场景模拟功能和载具运动状态模拟功能。运动状态模拟包括俯仰、滚转、偏转、上下、前后、左右 6 自由度的运动模拟, 以及 3 自由度的震动模拟, 主要分为:

1) 陆战车辆平台模拟。具备通用陆战车辆平台加速、转弯、刹车、起伏等机动状态模拟; 武器发射和碰撞、噪声引起的震动状态模拟。

2) 直升机舱模拟。具备直升机悬停、平飞、爬升、下滑、前飞、侧飞、后退飞行的机动状态模拟; 武器发射及投放、着陆接地及碰撞、功率下降、大气紊流及风引起的抖动状态模拟; 涡环、失速、尾桨失效、动态侧翻等特情状态模拟。

3) 船艇模拟。具备船艇加减速、转弯、航行等机动状态模拟; 功率下降、遇袭引起的振动状态模拟; 海浪引起的起伏等状态模拟。

### 2.3 武器效应模拟功能

武器效应模拟功能是指对典型武器装备的发射效果、爆炸效果、杀伤效果的模拟。包括轰-6、F-16、直-10、UH-60、ZTZ-96A、M1A2 等武器的发射特征; 93 式 60 mm 迫击炮、W86 式 120 mm 迫击炮、PF97 式 93 mm 单兵云爆火箭等武器爆炸特征模拟; 95 式 5.8 mm 自动步枪子弹发射特征模拟; 冷兵器, 如 95 式刺刀杀伤特征模拟。

### 2.4 人员任务体态模拟功能

根据步兵人员承载载具、地面行进、地面隐藏 3 种作战行动状态的需要, 系统支持人员以坐姿、站姿、卧姿 3 种状态执行任务。坐姿模拟用于人员承载载具执行任务, 站姿模拟用于人员地面行进或原地站立执行任务, 卧姿模拟用于人员地面隐蔽执行任务。

### 2.5 知觉环境支持功能

提供视觉、听觉、嗅觉、体感、前庭觉等知觉环境支持功能, 让参训人员在高度真实的虚拟环境中参与训练。

1) 视觉环境支持功能。实现沉浸式的视景环境模拟, 模拟载具的方位、炮弹爆炸、武器打击等常见功能; 作战行动中伤、亡、残等血腥场景; 硝烟弥漫、烈火燃烧等场景。

2) 听觉环境支持功能。实现沉浸式的听觉环境, 还原真实战场中, 载具运行声音、风雨雷自然

环境声音、武器系统声音、作战人员对话声音。

3) 嗅觉环境支持功能。实现沉浸式的嗅觉环境，与其他感官信息配合，模拟血腥味、硝烟味、腐尸味、海腥味其中一种或多种混合嗅感。

4) 体感环境支持功能。构建体感环境，包括温度、震动、风速风向方面的感觉。

5) 前庭觉环境支持功能。模拟载具的加减速运动、多轴运动和振动对人体前庭器官——半规管、耳石产生刺激。

## 2.6 数据采集与分析功能

数据采集与分析主要实现系统运行数据、参训人员生理数据的采集及分析评估功能。

1) 系统运行数据采集。主要采集载具平台运动和振动加速度、训练视频、温度、适度、声强、安全等数据。

2) 参训人员生理数据采集。心率、心电、脉搏、呼吸波、皮肤电、血压、血氧等生理参数动态实时监测数据。

3) 监测分析与评估。根据生理数据统计分析参训人员在不同环境条件下生理数据的变化，以及生理变化与训练时长和环境等因素的关系，支持训练评估标准编辑和评估算法的导入，同时，可以进行训练档案的实时读写。

## 2.7 训练管理功能

训练管理功能实现训练资源的调度和训练内容的综合管理，提供各种情况下的安全机制，保证训练进程的推进，其主要功能分为导调控制、系统控制和资源管理 3 方面。

1) 导调控制。支持在中央控制台进行训练过程干预和导调，包括训练条件设置、训练模式选择、训练数据管理。

2) 系统控制。包括载具平台运动和震动、温度、风场、气味、声效、排风、照明、通信、安全方面的控制。

3) 资源管理。对系统运行所需的各类数据和模型等资源进行分类存储和管理，支持以多种方式检索查询、修改数据和模型资源。

## 3 系统架构设计

系统在架构设计上采用层次化的结构，在集成设计上以模拟方舱为主体，结合多种感官刺激生成设备以及软件，各部分相互配合实现对战场环境的模拟。

## 3.1 体系架构

系统采用层次化架构方式，由基础设备层、硬件资源层、软硬件结合层、仿真应用层 4 层次组成，从功能上构建一个有机整体，体系架构如图 2 所示。

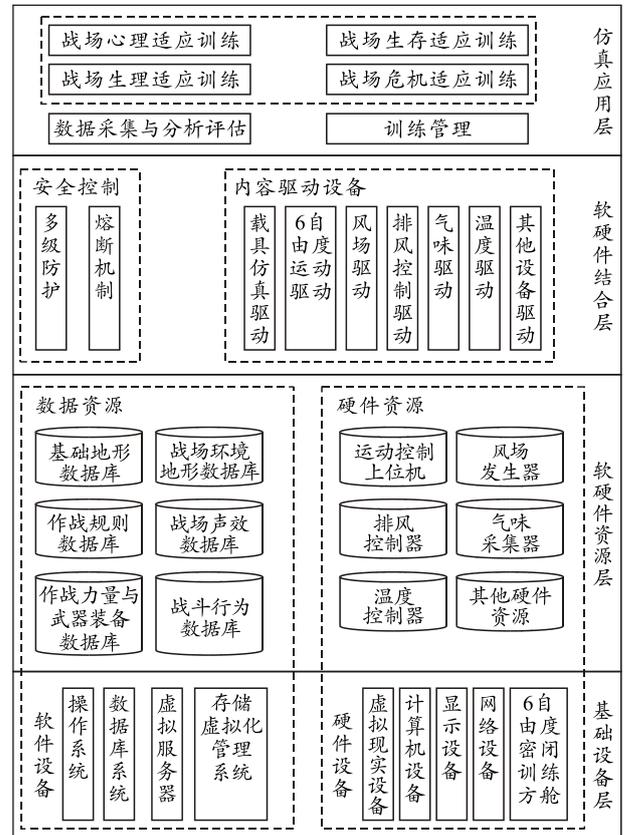


图 2 体系架构

1) 硬件基础设备层。提供系统运行的虚拟现实设备、计算机设备、显示设备、网络设备、6 自由度密闭训练方舱等硬件设备支持。

2) 软件基础设备层。包括操作系统、数据库系统、虚拟服务器、存储虚拟化管理系统等系统级的软件环境，为整个系统提供基础软件运行支持。

3) 软硬件资源层。包括硬件资源和数据资源。硬件资源包括运动控制上位机、风场发生器、排风控制器、气味采集器、温度控制器、其他硬件资源等。数据资源包括基础地形数据库、战场环境地形数据库、作战规则数据库、作战力量与武器装备数据库、战斗行为数据库。

4) 软硬件结合层。包括安全控制和内容驱动设备。安全控制包括多级防护、熔断机制；内容驱动设备包括载具仿真驱动、6 自由度运动驱动、风场驱动、排风控制驱动、气味驱动、温度驱动、其他设备驱动等。

5) 仿真应用层。该层是系统所能支撑的典型应用层, 包括战场心理适应性训练、战场生理适应性训练、战场生存适应训练和战场危机适应性训练 4 类训练。

### 3.2 系统组成

系统以模拟方舱为主体, 在舱体内部集成多种感官刺激生成设备, 通过网络将设备控制功能集成到中央控制台, 构成战场环境适应训练系统。主要有以下部分组成:

1) 6 自由度运动平台。由 6 自由度电动缸组成, 具备陆战车辆/直升机/船艇等步兵乘载载具的 6 自由度模拟功能, 能够模拟 6 自由度运动的体感。

2) 轻型密闭方舱。由训练席位、设备间、维护通道组成, 方舱中集成感官模拟设备, 包括气温、气味、风场、视景、声效等模拟设备。

3) 温度模拟系统。由加热装置、制冷装置、温度控制器、温度传感器、平台集成控制板卡构成, 温度控制范围:  $-5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ , 低温环境用于模拟高原温度环境, 高温环境用于模拟热带丛林和海岛温度环境。

4) 风场模拟系统。由风机、风速控制器、风速传感器、平台集成板卡构成, 风场范围: 风向上下、左右、前后, 最大风力可达 7 级。

5) 气味模拟系统。由压缩气瓶、气味盒、微加热装置、气味控制阀门、平台集成控制板卡组成, 用于生成硝烟味、血腥味、腐尸味、海腥味、植物腐败味。

6) 声效模拟系统。由声学环境还原计算机、扬声器、声学环境监测设备、平台集成控制板卡组成, 通过声音的采集与还原, 模拟子弹声、坦克轰鸣声、炮弹航弹爆炸声、直升机发动声等, 声强范围 75~100 dB。

7) 视景模拟系统。由 VR 眼镜和 VR 训练软件构成, 通过软件还原真实海岛、热带丛林、高寒山地 3 类场景, 软件根据视景内容同步驱动其他感官刺激生成系统, 完成多感官联动环境模拟的功能。

8) 数据采集与评估分析分系统。由数据采集分析软件及传感器组成, 通过传感器采集系统运行数据、人员生理数据, 并进行分析。

9) 训练管理分系统。该部分主要是软件, 用于支持整个系统的运行, 包括资源调度和训练内容管理及训练过程导调干预。

### 3.3 系统结构

按照功能可把系统分解为 6 自由度训练方舱、训练管理分系统、数据采集与分析评估分系统 3 个主要构成部分, 其核心部分为:

1) 6 自由度训练方舱的核心是 6 自由度密闭方舱和训练内容中姿态数据的有机结合。

2) 训练管理分系统核心是中控端和受训端, 以及方舱独立控制服务端和各硬件的控制器。

3) 数据采集与分析评估系统核心是数据分析服务端和参训人员的生理数据采集器。

按照信号传输流程可将系统划分为 2 个信号区域:

1) 中控端、受训端、方舱独立控制服务端、数据分析服务端组成的网络信号区域。

2) 由各硬件的控制器、生理数据采集器、6 自由度密闭训练方舱组成的硬件信号区域。

方舱独立控制服务端和数据分析服务端通过信号转换原理桥接 2 个信号区域, 从而将网络信号区域受训端的软件命令转换为虚拟训练舱内硬件能够执行的命令。

## 4 其他设计

### 4.1 安全机制设计

系统主要采用多级防护和熔断机制保证系统运行安全。多级防护是指设置多重级别的安全防护:

- 1) 在系统服务端做双保险, 在服务端发生故障时对安全防护功能进行转移, 增加服务端故障的容错率;
- 2) 在异常数据处理上, 设置多个数据阈值, 实现多级异常处理逻辑。

在训练过程中, 当系统运行达到紧急情况时, 自动触发熔断机制, 强制退出训练过程, 达到保护参训人员的目的。多级安全防护机制设置如图 3 所示。

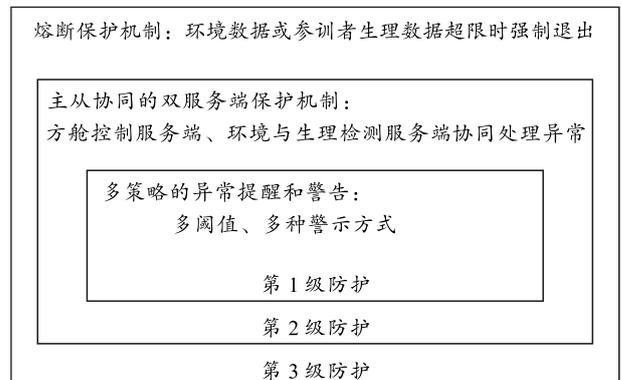


图 3 多级安全防护机制

## 4.2 系统运行模式设计

系统运行流程整体分为就绪前、就绪时和就绪后 3 部分。

1) 就绪前：保证各设备正常运行。主要是检测中控端、受训端、数据分析服务端、环境监控服务端、受训员信息管理服务端、方舱独立控制服务端是否准备就绪。

2) 就绪时：训练端接受训练项目的控制命令，执行训练项目启动，等待参训者进入；数据分析服务端等待参训者登录，获取实时生理数据；环境监控服务端获取方舱内实时环境数据，检测是否达标，如果达标，则把方舱状态修改为已准备状态；参训者信息管理服务端：参训者登陆后，向中控传递参训基础数据，并告诉参训者对应的训练编号；方舱独立控制服务端在操控人员导调下，控制方舱内的环境数据变化。

3) 就绪后：操控人员向参训者发送文字信息，查看参训者的实时生理数据和环境数据，必要时发出导调命令；参训者请求退出时，操控人员根据数据进程判断，决定是否终止训练；参训者生理数据或环境数据超出阈值时，自动强制退出训练。

## 4.3 训练数据管理流程设计

训练数据管理是指通过数据采集建立参训人员训练档案，实现对训练全过程的跟踪，并根据数据分析结果进行训练反馈，具体过程如图 4 所示。

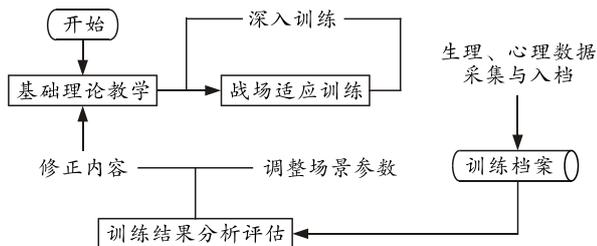


图 4 训练反馈过程

训练数据的管理流程包括：

1) 数据管理和应用支撑。采集参训者在训练中生理、心理波动数据，建立身体和心理状态数据库，有效管理计划任务、规划部署、仿真过程、分析评估等数据内容，实现对仿真工具、参训者、需求、过程、结论以及相关规范和标准的全要素、全流程和全周期管理。

2) 数据采集。硬件采集数据，支持心率、呼吸波、训练视频等要素采集。

3) 数据存储。提供大量数据的并行加载、处理和存储。支持对数据进行分类整理、剔除规则的信

息、形成有索引的结构化数据。

4) 数据管理。按统一目录树结构管理各类数据和资源，提供数据权限管理，提供系统数据的备份机制和数据恢复机制。

5) 数据预处理。提供图形化、可配置的管理工具，支持用户对采集数据的清理、变换，为进一步的数据分析和挖掘提供数据基础。

6) 数据分析。提供全文检索、数据统计等通用方法的统计分析方法，建立分析评估模型，对数据进行高速、有效的分析评估计算，对多样本、多方案的评估结果进行纵横对比分析。

7) 数据录制回放。支持方舱训练过程视频录制，对重要仿真实体和战场态势进行分析，为在线和事后数据分析、回放提供支撑。

## 5 关键技术路线设计

技术路线重点关注多种感官刺激的模拟与控制，刺激的模拟由特定的设备生成，刺激的控制主要思路是：将各种感官刺激生成设备分别与各自的控制器进行链接，控制器根据不同的信号控制设备执行不同的结果，达到控制刺激生成与调整的目的。

### 5.1 体感模拟

体感模拟主要基于运动平台和方舱实现，方舱舱体采用钢铝结构的舱体骨架、舱体侧壁、地板骨架等焊接形成，底座铺设多层板侧壁按照 3 种不同载具设置 2 座座椅，座椅设置 5 点固定安全带。运动平台和方舱结合形成 6 自由度运动平台，平台与运动、振动控制器进行连接，控制器可以接受信号，根据不同信号控制硬件执行不同结果。在需要时，软件将网络数字信号转换为能接受的信号，达到控制平台运动的目的。

### 5.2 温度模拟

温度模拟主要基于加热装置、制冷装置的实现。加热装置采用工业高温恒温器，安装在舱内下方，并确保不与 6 自由度平台发生运动干涉；制冷装置采用工业制冷机组，由 3P 谷轮半封闭制冷主机、冷风机、电化霜、膨胀阀、微电脑制冷控制柜组成，制冷装置主机安装在设备间，出风口设置于舱内上方。温度控制器采用 2 种控制方式：1) 通过遥控器控制；2) 依托计算机通过平台集成控制板卡进行数模转换后实施控制。温度传感器对舱内温度实施监控，当温度超出安全范围或达到某场景预设温度时，温度控制器中止热源或冷源工作。

### 5.3 风场模拟

风场模拟由风机、风速控制器、风速传感器、平台集成控制板卡组成。风机布设于舱体后方、侧面和顶部。为保证气密性，舱内后方、侧面与顶部安装导风板风门，模拟风场时，风门侧向平移开启。风速控制器依托计算机通过平台集成控制板卡进行数模转换后实施控制。风速传感器对舱内风速实施监控，风速达到指定风速时，风速控制器相应软件给出的风速控制指令。

### 5.4 气味模拟

气味模拟由压缩气瓶、气味盒、微加热装置、气味控制阀门、平台集成控制板卡组成。压缩气瓶采用压缩空气作为介质，采用打气机进行充气。气味盒存储血腥味、硝烟味、海腥味干燥颗粒，通过微加热装置加快气味干燥颗粒分子运动，通过气味控制阀门开启。气味阀门依托计算机通过平台集成控制板卡进行数模转换后实施控制，当训练场景涉及某种气味时，气味控制阀门响应训练软件给出的气味控制阀门开启命令。

### 5.5 声效模拟

声学环境还原计算机存储有预先采集的载具运行声音、自然声音、武器系统声音、作战人员对话声。由扬声器播放音频信息，声音监测设备采用数字声级计。

## 6 结束语

多感官虚拟现实的发展创新了战场适应性训练的手段，笔者基于战场适应性训练的需求，设计了具备多种感官体验的战场环境适应性训练系统。在明确了训练需求的前提下，对系统功能、架构、安全机制、运行模式、数据管理流程等进行了设计，

并对系统核心功能的技术实现路线进行了分析，对于构建新式作战环境适应性训练工具起到了较强的指导作用。在未来的研究中，仍需要结合认知科学、人机工效学的基础研究成果，指导系统的设计与研发，使系统能够最大化参训者的感官体验。

### 参考文献：

- [1] 刘睿, 王莉, 蒋毅. 意识与多感觉信息整合的最新研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(1): 2-11.
- [2] 孙小方, 赵婧羽, 饶培伦. 多感官信息对虚拟现实中心知控制的影响[J]. 人类工效学, 2022, 28(4): 10-15.
- [3] MELO M, GONCALVES G, MONTEIRO P, et al. Do Multisensory stimuli benefit the virtual reality experience—A systematic review[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020, 28(2): 1428-1442.
- [4] HOPF J, SCHOLL M, NEUHOFER B, et al. Exploring the Impact of Multisensory VR on Travel Recommendation: A Presence Perspective[C]// Information and Communication Technologies in Toursim. Surrey: Springer Verlag, 2020: 169-180.
- [5] PRODINGER B, NEUHOFER B. Multisensory VR Experiences in Destination Management[C]//Information and Communication Technologies in Toursim. Surrey: Springer Verlag, 2022: 162-173.
- [6] 莫逸伟, 孙雨莹. 多感官通道整合理论下的交互设计——以 AR 图书为例[J]. 科技传播, 2022, 14(11): 87-89, 104.
- [7] 杨海峰. 多感官交互火灾虚拟现实平台开发及其主体沉浸感评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2021.
- [8] 梅佳琪, 陈强. 基于虚拟现实的多感官视觉交互界面生成方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 212-216.
- [9] 沈志鹏. 多感官交互增强现实系统设计及用户体验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 张志勇, 王涵, 朱虹旭, 等. 沉浸式军人战场适应性训练系统的设计与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 24-26.