

T/COS

团 体 标 准

T/COS 030-2025

基于元宇宙的陆战场仿真环境构建

Construction of Land Battlefield Simulation Environment

Based on Metaverse

2025-11-20 发布

2025-11-20 实施

中国兵工学会 发布

目录

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	1
5 基本原则	2
5.1 高保真映射	2
5.2 沉浸式交互	2
5.3 开放互联协同	2
5.4 持续迭代升级	2
6 系统架构	2
7 构建步骤	3
7.1 需求分析与规划	3
7.2 基础能力搭建	3
7.3 多模态交互功能实现	3
7.4 用户管理功能实现	3
7.5 核心仿真功能实现	3
7.5 测试优化与迭代	4
8 基础域要求	4
8.1 仿真场景	4
8.2 异构算力平台	4
8.3 实体模型	5
8.4 环境数据采集平台	5
9 交互域要求	5
9.1 多模式交互	5
9.2 装备训练模拟器交互	6
10 核心域要求	6
10.1 仿真层级	6
10.2 数据规范	6
10.3 核心运用模式	9
11 用户域要求	9
11.1 用户类别	9
11.2 身份认证机制	9
12 跨域功能要求	10
12.1 测试与评估	10
12.2 安全与伦理	12
12.3 实施与维护	12
参考文献	13

前言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中兵智能创新研究院有限公司提出。

本标准由中国兵工学会归口。

本标准主要起草单位：中兵智能创新研究院有限公司、北京大学计算机学院元宇宙所（北京微视威信息科技有限公司）、长春理工大学、北京科技大学。

本标准主要起草人：刘勇、冯付勇、党睿娜、苏治宝、韩乐、杨剑雄、冀翰钰、董庆丽、宋威龙、刘斯诺、王振皓、王泽、王迪、余雪玮、安旭阳、杨婷婷、张馨元、海思源、王志一、孙禹启、周子洪、于子涵、田泽宇、瓢正泉、王潇扬、王子涵、景佳奇、盖孟、董立龙、蒋振刚、陈纯毅、尹春玲、黄天珑、耿牧锦、汤音子、栗晓喆。

基于元宇宙的陆战场仿真环境构建

1 范围

本文件规定了基于元宇宙的陆战场仿真环境构建的基本原则、系统架构与构建步骤，并规定了基于元宇宙的陆战场仿真环境基础域、交互域、核心域、用户域以及跨域功能要求。

本文件适用于基于元宇宙的陆战场仿真环境构建及接入服务。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 45993-2025 元宇宙 参考架构

GB/T 43441.1-2023 信息技术 数字孪生 第1部分:通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

元宇宙 Metaverse

由完整稳定运行的技术、内容、经济、协作和治理子系统构成的,具有高度沉浸、实时永续、自主创造、开放互联等特征的,虚拟与现实融合交互的新型社会生态系统。

[来源: GB/T 45993-2025,3.1]

3.2

数字孪生 Digital Twin

具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步的数据连接的特定目标实体的数字化表达。

[来源: GB/T 43441.1-2023,3.4]

3.3

实体 Entity

具体或抽象的事物,包括这些事物之间的关联。

[来源: GB/T 43441.1-2023,3.1]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AI: 人工智能(Artificial Intelligence)

API: 应用程序编程接口 (Application Programming Interface)

AR: 增强现实(Augmented Reality)

CPU: 中央处理器(Central Processing Unit)

GIS: 地理信息系统(Geographic Information System)

GNSS: 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System)

GPU: 图形处理单元(Graphics Processing Unit)

gRPC: 谷歌远程过程调用 (Google Remote Procedure Call)

ISO 8601: 日期和时间的表示方法国际标准 (Data elements and interchange formats)

JSON: JavaScript 对象表示法 (JavaScript Object Notation)

MR: 混合现实 (Mixed Reality)

RTSP: 实时流协议 (Real Time Streaming Protocol)

TCP: 传输控制协议 (Transmission Control Protocol)

UDP: 用户数据报协议 (User Datagram Protocol)
UTM: 通用横轴墨卡托网格系统 (Universal Transverse Mercator Grid System)
VR: 虚拟现实 (Virtual Reality)
WGS84: 世界大地坐标系系统 (World Geodetic System 1984)
XML: 可扩展标记语言 (Extensible Markup Language)
3D: 三维 (Three-Dimensional)

5 基本原则

5.1 高保真映射

仿真环境构建应遵循数字孪生理念, 实现对陆战场物理要素的高保真动态映射。地理空间、气象环境、电磁频谱、实体外观及行为逻辑等关键要素应基于真实数据与物理规律进行建模, 确保仿真结果与真实世界具有高度一致性与可信度。

5.2 沉浸式交互

仿真环境应提供支持多模态感知融合的深度沉浸体验, 通过集成视觉、听觉、触觉等感官通道, 并利用 VR/AR、动作捕捉等交互技术, 实现符合人类行为习惯的自然化人机交互, 使受训者产生强烈的临场感。

5.3 开放互联协同

仿真环境应具备开放性与互联性, 须定义标准化的接口与通信协议, 确保不同类型的陆战装备模拟器、指挥信息系统等异构节点能够无缝接入并实现数据互操作, 支持跨兵种、跨平台的规模化体系对抗与联合训练。

5.4 持续迭代升级

仿真环境应为可扩展式, 确保仿真平台的功能、模型与内容具备可持续的迭代与升级能力, 能够灵活集成新技术、适配新战法、纳入新装备, 形成可持续演进的生命周期。

6 系统架构

按照 GB/T 45993-2025《元宇宙 参考架构》第 6 条对功能域的划分, 系统架构 (见图 1) 包括“基础域、交互域、核心域、用户域”四域以及跨域功能:

- a) 基础域: 提供仿真场景、异构算力平台、实体模型、环境采集平台等基础设施;
- b) 交互域: 实现多模式人机交互以及陆战装备训练模拟器接入;
- c) 核心域: 实现不同层级仿真、数据规范管理以及仿真环境的核心运用模式;
- d) 用户域: 支持不同类别用户, 实现用户身份认证管理与动态权限管理;
- e) 跨域功能: 提供验证测试支撑、安全伦理管理、实施维护等协同能力。

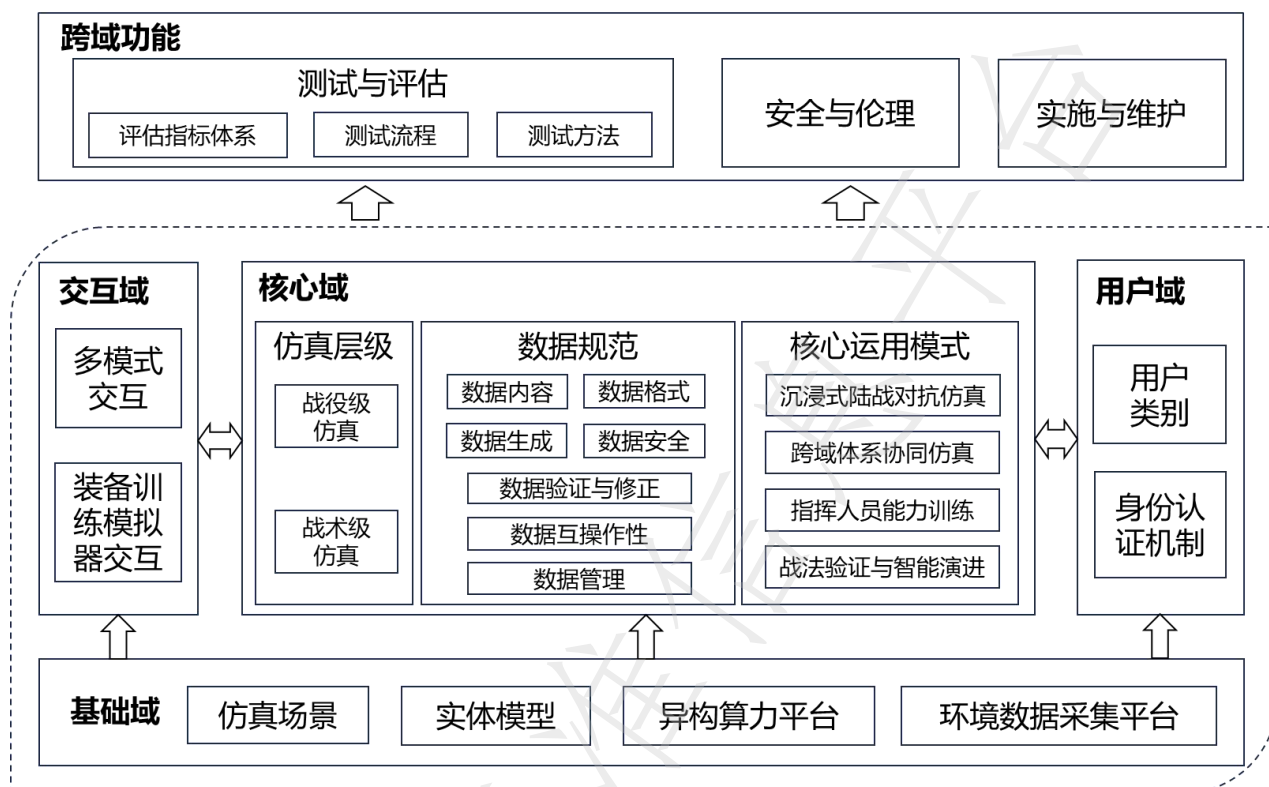


图 1 系统架构图

7 构建步骤

7.1 需求分析与规划

明确仿真环境的使用目的、功能需求、核心性能指标等，制定构建规划和方案。

7.2 基础能力搭建

面向基础域，搭建软硬件基础环境，形成异构算力平台并支持传感器采集设备接入；构建高精度、多分辨率的三维数字地形，并集成环境模型，形成与物理世界一致的陆战场空间基底；对各类实体进行高保真三维建模并根据类别注入智能行为。

7.3 多模态交互功能实现

结合交互域，搭建多通道融合的交互框架，兼容各类交互硬件，设计直观、自然的交互逻辑，为用户提供沉浸式、可操作、可动态切换的虚拟化身体验，确保实时交互效能。

7.4 用户管理功能实现

结合用户域，构建统一的身份认证与权限管理体系，为不同类别的用户创建数字身份，并实施动态权限控制与行为审计，确保仿真活动安全、可控、可追溯。

7.5 核心仿真功能实现

面向核心域，确立从战役级到战术级的仿真层级体系，形成清晰的分工与集成框架；构建统一的数

据管理平台与接口标准，确保多源数据全生命周期的互联与可控；设计并实现核心运用模式，形成可重用、可扩展、可按需组合的运用模板，支撑仿真环境为陆战赋能。

7.5 测试优化与迭代

结合各域功能进行跨域联合测试，评估仿真环境各项指标，依据测试结果进行持续迭代优化。

8 基础域要求

8.1 仿真场景

8.1.1 场景要素

支持对陆域场景各类要素的建模与模拟：

- a) 环境要素包含地形、天候、电磁环境；
- b) 建模要素包含各类建筑物和建筑物内部结构。

8.1.2 地形建模

地形应包括山地、平原、丘陵、城市、森林、水文等多种类型：

- a) 地形建模应精确到足以支持战术级别的仿真需求、支持地形的动态变化，如爆炸坑、建筑倒塌；
- b) 能根据装备动作进行真实模拟的力学反馈。

8.1.3 天候模拟

模拟各种天气条件，如晴、雨、雾、雪等：

- a) 支持环境因素的动态变化，如风速、温度、湿度等；
- b) 支持模拟不同时间和季节的光照条件；
- c) 支持作战对抗环境的模拟，如模拟烟雾等。

8.1.4 电磁信号模拟

电磁信号模拟需构建高保真、动态变化的虚拟电磁空间：

- a) 可基本覆盖陆域电磁频谱；
- b) 可模拟复现从信号发射、环境传播到对抗干扰的全过程；
- c) 能与仿真平台中的实体行为和战场态势实时互动、双向驱动。

8.1.5 建筑物建模

对建筑物轮廓、内部结构、重要设施、模型细节和动态过程建模提出要求：

- a) 建筑物轮廓应准确反映其真实尺寸和形状；
- b) 建筑物内部结构应合理，包括墙壁、地板、天花板等；
- c) 对于重要建筑（军事设施等）应包含内部细节，包括楼梯、电梯、房间布局等；
- d) 支持根据仿真需求提供不同层次的细节模型，远距离观察使用低细节模型，近距离观察使用高细节模型；
- e) 支持模拟建筑物损坏坍塌的过程。

8.2 异构算力平台

采用异构算力平台架构：

- a) 具备 CPU、GPU 等多种算力协同的处理体系；
- b) 具备大规模的协同计算能力、高效的实时图形渲染能力、智能化的数据处理能力以及稳定低延迟的网络通信能力；
- c) 支持异构算力的灵活调度、池化重构和智能分配。

8.3 实体模型

实体模型需具备高保真外观，人员、装备实体还需具备智能化行为内核：

- a) 模型类别：包含作战人员、陆战装备、各类传感器及其它关键设施等实体模型。
- b) 外观高保真：三维模型需在几何尺寸、表面纹理上与实物保持一致。
- c) 行为智能化：作战人员、陆战装备采用 AI 智能体架构，赋予实体自主感知、认知、决策与行动能力。
- d) 逻辑模块化：实体行为规则应模块化设计，支持按想定灵活配置与组合。
- e) 交互标准化：实体间交互需遵循统一的通信协议与数据标准。
- f) 数据可追溯：关键参数与行为日志需完整记录，支持事后分析与验证。

8.4 环境数据采集平台

支持接入多源战场环境数据采集设备：

- a) 支持可见光相机、红外相机、激光雷达等环境感知设备接入；
- b) 并支持异构设备协议转换、提供相关数据预处理能力（噪声过滤、时空对齐等）。

9 交互域要求

9.1 多模式交互

9.1.1 交互模式分类

交互模式包括视觉、语音、动作、触屏以及脑机接口：

- a) 视觉交互：支持 VR/AR/MR 多模态显示。
- b) 语音交互：语音识别准确率 $\geq 95\%$ 、支持多语种、方言及军事术语库。
- c) 动作交互：
 - 1) 手势识别操作响应延迟 $\leq 500\text{ms}$ ，支持战术手势库；
 - 2) 方向盘、油门踏板等部件需具备力反馈功能。
- d) 触屏交互：
 - 1) 精准识别多指触控与复杂手势；
 - 2) 交互逻辑须符合战场环境下用户的直觉与高效性原则。
- e) 脑机接口
 - 1) 设备识别准确率 $\geq 80\%$ ；
 - 2) 指令集简化至战术级操作（如“紧急撤退”等），触发阈值 $\leq 500\text{ms}$ 。

9.1.2 跨模式融合

从多模态同步与上下文感知方面提出要求：

- a) 多模态同步
 - 1) 视觉-听觉-触觉反馈时延差 $\leq 500\text{ms}$ （如爆炸声、闪光、震动同步触发）；
 - 2) 支持跨模态纠错（如语音指令模糊时，眼动焦点辅助确认目标）。
- b) 上下文感知：支持根据仿真阶段自动切换主导交互模式，平时训练进行多模态设觉交互和高自由度动作交互，战时高压简化语音指令、快捷触屏并设置脑机应急通道。

9.2 装备训练模拟器交互

9.2.1 硬件接口要求

支持各类陆战装备模拟器硬件接入。

9.2.2 基本功能要求

对接入仿真环境的装备模拟器的基本功能提出要求：

- a) 性能模拟：可模拟装备动力系统（如发动机功率、油耗）、武器系统（射程、射速、杀伤范围）、通信系统（传输距离、抗干扰能力）等核心功能；
- b) 交互要求：与仿真场景通过建立双向标准化的数据交互通道，可融入虚拟战场、能与仿真环境中其他实体（人员、智能体、其它装备、地形、电磁环境等）进行实时动态互动；
- c) 故障注入：支持虚拟装备故障设置（如发动机熄火、通信中断等）；
- d) 操作记录：自动记录学员操作步骤、响应时间、错误率等训练数据。

10 核心域要求

10.1 仿真层级

10.1.1 战役级仿真

验证师/旅级作战计划，优化战役阶段任务执行：

- a) 典型场景：包括但不限于联合火力打击效能分析、电子战体系对抗推演等。
- b) 时间分辨率：仿真步长 1min 至 1h，支持实时与超实时模式切换。
- c) 实体模型粒度：仿真主要参数。
- d) 交互方式：多屏协同指挥台（显示战场态势、后勤状态、情报汇总），支持 AI 参谋建议反馈。

10.1.2 战术级仿真

训练单兵、班组级、连排级和营级作战技能，评估装备实时交互效能：

- a) 典型场景：包括但不限于城市巷战、野外攻防对抗、无人编队协同侦察打击、机动路径规划、协同监视值守等。
- b) 时间分辨率：仿真步长 $\leq 1\text{s}$ ，强制实时运行（1:1 时间比例）。
- c) 实体模型粒度：完全解聚模型（单兵、单装备独立建模），包含平台动力学模拟、个体行为差异、传感器精确模拟。
- d) 交互方式：多屏协同、VR/AR 沉浸式交互（手势识别、语音指令）、力反馈设备等。

10.2 数据规范

10.2.1 数据内容

10.2.1.1 基础数据

基础数据包含地理信息数据和实体参数：

- a) 地理信息数据：
 - 1) 地形高程数据、道路网络拓扑、建筑物 3D 模型；
 - 2) 可调节气象数据（温度、湿度、风速、雾、雨、雪、沙尘等）；
 - 3) 电磁环境参数（干扰源分布、频谱占用）；
 - 4) 环境参数（植被覆盖度、路面材质等）；
 - 5) 全局地图与 GNSS 参数；
- b) 实体参数：
 - 1) 作战人员属性参数（体能等级、单兵战术动作等）；
 - 2) 装备性能参数（机动性能、载荷参数、能量消耗模型等）；
 - 3) 传感器实体参数（安装位姿、探测范围、不同传感器特定参数等）。

10.2.1.2 动态数据

动态数据包括实时状态数据和交互日志数据：

- a) 实时状态数据：
 - 1) 实体位置（经纬度、高程）、运动轨迹、健康状态（弹药余量、毁伤程度等）；
 - 2) 行为与事件数据（爆炸坐标、通信中断时间戳等）。
- b) 交互日志数据：
 - 1) 用户操作记录（指令下达、模式切换等）；
 - 2) AI 决策过程（行为触发条件等）；
 - 3) 仿真过程数据。

10.2.2 数据格式

数据格式分为实体模型格式、地理信息数据格式、行为与事件数据格式以及其它自定义数据格式：

- a) 实体模型格式：
 - 1) 实体 3D 模型采用通用格式；
 - 2) 雷达数据：遵循点云数据标准，可选择雷达设备型号与精度等级；
 - 3) 相机数据：遵循图片数据通用格式。
- b) 地理信息数据格式：
 - 1) 支持 WGS84、UTM 等常用坐标系，并给出转换标准；
 - 2) 时间戳：采用 ISO 8601 扩展格式（含时区与毫秒精度）。
- c) 行为与事件数据：
 - 1) 结构化数据：基于 JSON 定义实体行为逻辑（攻击、移动、通信等动作参数）；
 - 2) 流数据协议：支持 RTSP 等常见流数据解析。
- d) 其它自定义数据格式
 - 1) 形成可自定义数据格式框架（如 gRPC、TCP、UDP 等），形成标准的自定义数据 API。

10.2.3 数据生成

数据生成方法包括数据采集、参数化建模、AI 生成以及数据合成：

- a) 数据采集：
 - 1) 物理采集：包括激光雷达扫描数据、相机拍摄数据、装备实测数据（通过装备接口获取装备实时性能参数、运动数据等）；

- 2) 虚拟采集：XR 设备动作捕捉数据、操控员眼动追踪数据。
- b) 参数化建模：
 - 1) 装备性能库基于 XML 等结构化描述；
 - 2) 选用合适的地形生成算法，符合军事想定需求。
- c) AI 生成：虚拟实体行为数据通过生成对抗网络、自博弈等智能模型生成模拟战术数据。
- d) 数据合成：
 - 1) 多源数据通过卡尔曼滤波或粒子滤波等算法实现时空对齐与融合；
 - 2) 动态战场事件注入需标注置信度等级（如“模拟数据-90%置信区间”）。

10.2.4 数据验证与修正

数据验证与修正包括静态验证、动态验证以及人工复核：

- a) 静态验证：
 - 1) 几何精度：3D 模型与实物扫描点云对比；
 - 2) 逻辑校验：行为规则通过形式化验证工具确保无矛盾。
- b) 动态验证：
 - 1) 仿真一致性测试；
 - 2) 实体运动状态与实际装备物理采集设备数据记录比对。
- c) 人工复核：
 - 1) 军事专家对关键参数进行实战经验校准。

10.2.5 数据互操作性

数据互操作性包括跨平台兼容与版本管理：

- a) 跨平台兼容：
 - 1) 支持地理元数据标准，确保 GIS 平台无缝接入；
 - 2) 支持在不同指定平台进行联合仿真。
- b) 版本管理：
 - 1) 数据版本号遵循语义化版本规范；
 - 2) 旧版本数据需提供迁移工具（如 Python 转换脚本等）。

10.2.6 数据安全

数据安全要求包括加密与脱敏和访问控制：

- a) 加密与脱敏：
 - 1) 敏感数据（兵力部署、装备参数）采用算法加密存储；
 - 2) 训练用仿真数据需脱敏处理（模糊化真实坐标与装备编号等）。
- b) 访问控制：
 - 1) 根据人员分类实施分级别访问控制；
 - 2) 调取日志记录需进行身份权限鉴别。

10.2.7 数据管理

数据管理要求包括数据存储策略与元数据标注：

- a) 数据存储策略：
 - 1) 分级存储：支持热数据与冷数据的存储；
 - 2) 数据生命周期：动态数据保留 ≥ 30 天，基础数据永久存档。
- b) 元数据标注：

- 1) 标注数据来源（采集设备型号、生成算法版本）、置信度、责任人；
- 2) 元数据格式遵循统一标准。

10.3 核心运用模式

10.3.1 沉浸式陆战对抗仿真

为单兵、单装或班、排级分队提供高强度的沉浸式战术级对抗训练，功能要求包括：

- a) 个体沉浸感：受训者通过 VR/AR 设备、训练模拟器等接入，以“虚拟化身”形式进入仿真环境，确保受训者产生强烈的现场感和紧张感；
- b) 智能蓝军：敌方实体需具备高度智能化的战术行为，能够根据战场态势灵活运用战术，而非依赖预设脚本；
- c) 实时裁决与复盘：具备对交战过程的自动、精准裁决能力，并能提供多视角回放。

10.3.2 体系协同仿真

将地、空、天、电等多要素作战单元模型、模拟器集成到统一的仿真环境中，进行战役级大规模体系协同训练，功能要求包括：

- a) 开放式架构：支持异构系统的标准接口接入与数据互操作；
- b) 统一时空基准：确保所有参演实体处于同一仿真时间线和统一的地理空间坐标下。

10.3.3 指挥人员能力训练

指挥人员从仿真环境中接收信息、进行决策规划并反馈执行效果，训练和评估指挥人员的谋略水平与指挥能力，功能要求包括：

- a) 海量信息注入与呈现：呈现接近实战强度的多源信息，具备战场态势融合与可视化能力；
- b) 敏捷想定编辑：提供灵活的想定编辑与初始化工具，能够快速构建多种场景；
- c) 智能化导调控制：导调方能够实时干预仿真进程，动态调整过程要素。

10.3.4 战法验证与智能演进

通过运行大量并行仿真实验对新型装备、作战概念、战术战法进行量化评估与验证，并利用 AI 智能体进行自我对抗、学习演进，功能要求包括：

- a) 并行仿真能力：支持大规模仿真并行运行；
- b) 数据处理能力：能够记录仿真中的关键事件、实体状态与交互数据，并具备数据分析工具；
- c) 内置 AI 沙盒环境：提供标准接口，便于集成和训练各类 AI 算法，实现战术演进。

11 用户域要求

11.1 用户类别

用户可分为个人用户、装备用户和系统用户：

- a) 个人用户：直接接入仿真环境的有机个体；
- b) 装备用户/系统用户：接入仿真环境的关键数字化装备、AI 智能体和信息化系统等，其操作/运维人员通过现实世界的行为间接参与仿真环境内的活动。

11.2 身份认证机制

11.2.1 统一身份管理

统一身份管理包括数字身份管理与身份绑定：

- a) 数字身份管理：为每位用户、每台设备、每个模拟器节点分派全局唯一的数字身份标识，实现生命周期的全流程管理。
- b) 身份绑定：用户在仿真环境中的每一个虚拟身份、每一次操作行为，都必须与其后台的真实数字身份强关联，确保虚拟世界中的任何动作均可追溯到责任人。

11.2.2 动态权限控制

通过动态权限确保权限分配与仿真任务的实时匹配：

- a) 最小权限原则：仅授予用户完成其训练或任务所必需的最低级别访问权限和操作权限。
- b) 基于角色的动态授权：能够根据用户在当前仿真场景中的角色动态授予其相应的数据权限、操作指令集和交互范围。

12 跨域功能要求

12.1 测试与评估

12.1.1 评指标体系

评估指标体系包括功能指标、性能指标、人因功效指标、可靠性指标、安全性指标：

- a) 功能指标：
 - 1) 场景还原度：包括地形地貌精度、实体模型精度、物理效应逼真度、电磁环境可信度；
 - 2) 规则符合性：作战规则、物理定律、逻辑约束是否被正确遵守，统计逻辑违反事件（如违背条令的行为、不符合物理规律的交互）发生次数。
- b) 性能指标：
 - 1) 实时性：包括不同操作的响应延迟时间，不同层级仿真的推演步长误差，分布式多节点状态同步延迟；
 - 2) 并发能力：包括并发实体数量、在线用户节点数量、CPU/GPU 负载率。
- c) 人因功效指标：
 - 1) 用户体验：用户操作舒适度、便捷性和满意度，包括晕动症发生率、交互界面友好度、任务完成效率；
 - 2) 训练有效性：仿真环境对提升战术技能、决策能力的实际效果。
- d) 可靠性指标：
 - 1) 系统可用性：年均故障时间；
 - 2) 容错能力：在硬件故障、网络异常、软件错误等情况下的服务连续性、数据完整性及恢复时间。
- e) 安全性指标：
 - 1) 数据安全：包括数据加密强度、加密破解耗时、数据防篡改能力、访问控制有效性；
 - 2) 抗干扰能力：指定带宽、指定信噪比下的通信误码率。

12.2.2 测试流程

12.2.2.1 测试准备

构建支撑测试的软硬件环境与测试想定：

- a) 测试环境构建：
 - 1) 硬件配置：约定服务器集群性能要求，约定边缘计算节点接入要求，约定节点组网要求；
 - 2) 软件工具链准备：包括但不限于指挥导调模块、数据分析工具链、效能评估模块等。
- b) 测试想定：测试想定覆盖典型、边界及异常情况，并包含相应的初始化数据、模型参数及测试用例。

12.2.2.2 测试执行

按递进顺序组织测试：

- a) 单元测试：测试功能性指标，针对单个实体模型、算法、智能体、交互接口等最小可测试单元进行测试，覆盖率 $\geq 90\%$ ；
- b) 集成测试：测试性能指标和可靠性指标，将多个单元进行组合，测试单元间数据交换的实时性、稳定性、资源利用率，通过模拟异常初步检验容错能力；
- c) 系统测试：测试安全性指标和用户体验指标，针对全集成的仿真环境进行全面测试，重点评估数据加密、访问控制、抗干扰能力，并邀请用户参与测试，收集主观体验数据，评估人因功效指标。
- d) 实战化测试：对全部五类指标进行综合性测试验证，结合陆战任务测试想定与仿真环境核心运用模式，全面评估整体表现，重点关注其训练有效性指标。

12.2.2.3 问题追踪与改进

对测试中发现的问题进行全生命周期管理：

- a) 使用缺陷管理工具，对测试中发现的问题进行记录、分类、定级（如致命/严重/一般），并指派责任人持续跟踪。
- b) 每轮测试后生成《测试评估报告》，明确改进措施与责任人，《测试评估报告》要求包括：
 - 1) 报告内容：含测试想定描述、各类指标满足情况、专家评审意见与改进建议。
 - 2) 交付格式：电子版报告需符合长期存档标准、关键数据附原始日志。

12.1.3 测试方法

对各类指标分别设计测试方法：

- a) 功能指标测试：
 - 1) 静态验证：将各类实体模型参数、精度与物理实测数据进行对比，通过形式化方法验证规则有无矛盾性；
 - 2) 动态验证：采用蒙特卡洛仿真测试，随机生成覆盖不同气象、电磁条件的作战场景，统计实体行为异常率；邀请军事专家进行实战符合性评分。
- b) 性能指标测试：
 - 1) 压力与负载测试：逐步增加并发实体数和交互频率，监测系统实时性、并发能力及资源负载，找到性能拐点。
- c) 人因功效指标测试：
 - 1) 用户调研：招募真实用户进行测试，通过问卷、访谈、生物特征数据（匿名化）采集，评估用户体验和训练有效性。
- d) 可靠性指标测试：
 - 1) 持续运行测试：进行长时间高负荷稳定性测试，统计系统可用性及平均无故障时间；

- 2) 故障注入测试：主动模拟节点故障、网络中断等异常，验证系统的容错与恢复能力，记录如恢复时间、数据丢失情况等。
- e) 安全性指标测试：
 - 1) 渗透测试与漏洞扫描：模拟网络攻击，检验系统在数据加密、访问控制、抗干扰等方面的防护能力。

12.2 安全与伦理

安全与伦理应严格遵循以下基本原则：

- a) 军事敏感信息需采用国密算法加密；
- b) AI 智能体、作战行为决策模型及各类 AI 算法模型需通过伦理审查；
- c) 个人生物特征数据需 100%匿名化处理

12.3 实施与维护

仿真环境版本支持向后兼容（旧版本数据可迁移），每 12 个月迭代技术指标，兼容新型装备接入。

参考文献

IEEE 1278.1 分布式交互仿真

GB/T 39786 信息安全技术 信息系统密码应用基本要求

IEEE 1516-2010 建模与仿真高层体系结构（HLA）框架与规则

MIL-STD-3022 模型与仿真 VV&A 文档规范

全国团体标准信息平台