## 一、 任务背景和必要性

### 1.1 国内外现状与技术发展趋势

全球范围内，新一轮科技革命与产业变革正在深入推进，**智能制造**与**机器人技术**已成为重塑全球竞争格局的关键力量。工业系统与机器人正从单点应用向大规模、协同化、智能化方向演进，对仿真技术提出了前所未有的高阶需求。

在智能制造领域，我国正加速建设“制造强国”，全力推进“智能制造”。数字孪生作为实现智能制造的核心技术，其效能高度依赖于底层物理仿真引擎的保真度与实时性。高精度实时仿真引擎是实现产品虚拟验证、产线虚拟调试、生产全过程可视化监控与优化的基础，能够大幅降低智能制造系统的试错成本、缩短部署周期、提升运营柔性。

在机器人及其集群领域，机器人技术已从单一单元操作向集群协同（如仓储物流机器人群、工业多臂协作）和复杂具身智能方向发展。研发先进的机器人系统需要海量的、多样化的训练数据与测试场景，这在现实世界中耗时耗力且成本极高。因此，“机器人训练场”的概念应运而生，它要求仿真引擎必须能提供高并发、高保真、物理一致的虚拟环境，以支持单机器人强化学习训练，多机器人集群协同算法验证和仿真效果迁移等功能实现。

物理仿真引擎作为数字孪生、虚拟调试、机器人仿真训练的核心基础软件，其重要性日益凸显。国际上，以NVIDIA Omniverse（Isaac Sim）、Unity、ANSYS等为代表的厂商已构建起技术生态，通过GPU加速计算与AI深度融合，在高精度实时仿真领域取得领先优势，并形成了软硬件一体的商业闭环。旨在为智能制造和机器人提供完整的仿真训练解决方案。国内，相关研究多集中于高校和科研院所，工业界虽有一定积累（如索辰科技等），但在面向智能化的“高精度+实时性+多物理场+AI原生”的全栈式仿真引擎方面，仍存在显著差距，高端市场长期被国外产品垄断，无法满足自主可控的智能制造与机器人产业发展需求。从现阶段的发展状况来看，未来，物理仿真引擎主要包含以下趋势：

* 1. **从离线到实时**：仿真结果用于在线控制和硬件在环测试。
  2. **从单一到多物理场**：刚体、软体、流体等多物理现象的统一耦合仿真成为刚需。
  3. **从物理驱动到物理与AI融合驱动**：利用AI技术提升仿真速度、生成逼真数据、自动校准模型，已成为核心发展方向。

### 1.2 国家战略与政策支持

机器人技术与系统研究是世界各国的重要战略性计划。世界各国正大力推进智能机器人技术的发展，欧盟提出了“地平线2020”和Robotics4EU等战略计划，旨在推动智能机器人在科研、项目建设和成果转化中的应用。德国的“高科技战略2025”、日本的“机器人新战略”、韩国的“智能机器人开发和供应促进法”等，均致力于促进智能机器人的创新性发展。此外，美国发布的《机器人路线路：从互联网到机器人》系列报告，持续探讨了机器人在未来5-15年作为关键经济促进者的作用，并明确了智能机器人系统的技术发展目标。

发展机器人技术与系统是我国的国家战略。以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》的总体部署，并落实《“十四五”机器人产业发展规划》的重点任务，国家积极推进“机器人+”应用行动，加速机器人技术的应用拓展。立足国家重大战略需求，聚焦工业应用、医疗康复、深空深海等领域，系统推进从机器人本体设计、精密驱动、运动规划控制、人机交互到具身智能等关键技术研究，取得系统性创新成果，以满足社会民生改善和经济发展的迫切需求。

本项目的实施，正是响应国家“制造强国”、“人工智能+”等重大战略，攻克智能制造与机器人发展中的核心基础软件瓶颈，对于保障产业安全、赋能产业升级具有至关重要的战略意义。

### 1.3 产业链痛点

国内物理仿真技术存在以下问题：

* 1. **“卡脖子”风险：高端工业仿真软件依赖进口，存在供应链安全与数据安全风险。**
  2. **Sim-to-Real Gap：传统仿真与真实世界存在差异，导致在仿真中训练的算法无法有效迁移到真实机器人上。**
  3. **成本高、周期长：物理试错和实物调试成本高昂，严重拖慢研发创新周期。**
  4. **缺乏评测体系：国内虽然有很多机构在研发物理仿真引擎，但是实际仿真效果是否准确可靠，仍缺乏系统的评价指标。**
  5. **缺乏多维度感知仿真：多数仿真引擎只提供“完美”的物理数据，缺乏对机器人“感官”（如相机、激光雷达、力传感器）的逼真模拟。**
  6. **无法支撑集群仿真：现有开源方案在并发性和保真度上难以平衡，无法有效模拟大规模机器人集群的协同作业。**

### 1.4 项目战略价值与紧迫性

本项目的成功实施，将：

1. **突破关键核心技术**：攻克高精度实时多物理场仿真与AI融合的技术难题，实现国产化替代，保障产业安全。
2. **赋能产业升级**：为工业智能装备、服务机器人、自动驾驶等领域提供先进的数字化研发工具，显著降本增效，加速创新迭代。
3. **契合国家战略**：紧密对接“制造强国”、“人工智能+”等国家战略，是发展工业互联网和新质生产力的关键基础设施。

### 1.5 拟解决的关键技术问题

1. 高精度物理计算与实时计算性能之间的矛盾。
2. 多物理场（刚体、软体、流体）统一耦合求解的数值稳定性与效率问题。
3. 仿真环境与真实世界之间的感知差距与物理差距。
4. 仿真模型的自动化校准与验证。
5. 支撑大规模机器人集群仿真的高并发技术架构。

## 二、 任务建设方案

### 2.1 总体建设思路

本项目旨在研制一款国产自主可控的、面向工业与机器人应用的高精度实时物理仿真引擎。以“物理一致性”为基石，以“AI赋能”为核心手段，以“缩小Sim-to-Real差距”为终极目标，通过攻克多物理场精准求解、感知一致性仿真、智能闭环校准等关键技术，构建覆盖技术中台、产品平台和行业应用的完整生态体系。项目将始终坚持国产化设计，优先适配国产软硬件环境。同时，为了验证仿真引擎的可行性和仿真结果的准确性，同步搭建实验测试环境。实验初期，以实际搬运工业场景为例，搭建人形机器人测试平台，在实际场景中获取机器人的视觉和相关力学数据。通过对比仿真和实际结果，不断优化和完善物理仿真系统。实验中期，继续完善物理仿真模型，逐步增加其他工业场景并搭建实验平台进行验证。实验后期，通过对多场景模拟和验证，期望获得性能优异的具备高并发实时性的物理仿真智能系统。

**拟形成的产品及服务**：

1. **核心引擎**：具有自主知识产权的物理仿真引擎SDK/API。
2. **云服务平台**：提供在线仿真、AI训练、数字孪生应用托管的一站式云服务。
3. **行业解决方案**：针对特定工业场景（如智能装配、产线虚拟调试）的标准化解决方案。

### 2.2 任务目标

1. 研发基于生成式AI的虚拟传感器模型库与标准化评测基准。
2. 构建具备时空一致性的多场景感知仿真系统。
3. 开发基于强化学习智能体的物理参数自动化闭环校准验证框架。
4. 研制具备物理一致性的通用刚体-软体-流体耦合力学仿真系统。
5. 建成具备高并发实时计算能力的云原生分布式智能仿真平台。

### 2.3 考核指标

| **类别** | **考核指标** | **目标值** |
| --- | --- | --- |
| **物理精度** | 特定基准场景（如NVIDIA Flex/Warp基准）动力学指标误差 | < 3% |
| **感知真实性** | 生成图像与真实图像的FID分数 | < 20 |
| **校准效果** | 经校准后，机器人抓取等任务的Sim-to-Real成功率提升 | > 25% |
| **实时性** | 复杂场景（>1000个刚体）下单实例仿真速率 | ≥ 1×(实时) |
| **并发性** | 在128卡国产算力集群上，支持并发仿真实例数 | > 2000个 |
| **国产化** | 支持国产AI芯片（昇腾/寒武纪）和操作系统 | 全面适配 |
| **知识产权** | 申请发明专利、软件著作权数量 | ≥ 15项 |

### 2.4 技术路线/研究内容

#### 技术架构

本项目采用分层解耦、云原生的技术架构：

1. **资源层**：基于Kubernetes容器编排，纳管国产算力与GPU算力，实现弹性调度。
2. **计算层**：集成CUDA/OpenCL及国产芯片算子库，提供高性能并行计算能力。
3. **核心层**：
   1. **统一数据表示**：采用OpenUSD框架描述场景、物理属性与仿真状态。
   2. **多物理场求解器**：刚体（基于PBD/XPBD）、软体（FEM/MPM）、流体（SPH/网格法）及耦合求解。
   3. **感知仿真层**：基于Diffusion/NeRF等生成式AI模型，渲染逼真且一致的传感器数据。
4. **AI层**：
   1. **校准智能体**：基于PPO、SAC等算法训练，自动调节物理参数。
   2. **合成数据生成**：利用域随机化技术生成大规模训练数据集。
5. **应用层**：提供Python/C++ API、ROS/ROS2接口、Web可视化界面，支持多种应用集成。

#### 创新性设计

1. **AI原生仿真循环**：将AI作为内在组件，而非外挂工具，深度嵌入仿真流程（AI加速求解、AI生成内容、AI驱动校准）。
2. **“感知-物理”双引擎驱动**：感知仿真与物理计算并行执行，并通过统一时钟和状态管理确保全局一致性。
3. **云原生分布式架构**：采用微服务设计，仿真任务可动态伸缩、容错迁移，极大提升资源利用率和并发能力。

#### 研究内容

1. **高保真多物理场求解算法**：研究适用于实时计算的MPM、XPBD等先进算法及其高效GPU实现。
2. **生成式感知仿真**：研究基于扩散模型的传感器数据生成技术，解决光照、材质、噪声的逼真度和一致性难题。
3. **自动校准智能体**：研究基于元学习或贝叶斯优化的RL算法，提升校准智能体的样本效率和泛化能力。
4. **云原生仿真调度**：研究仿真任务的切片、调度与资源分配算法，以实现万级实例的高效并发。
5. **仿真物理引擎评价体系：研究仿真结果的准确性和可靠性，保证仿真性能的评价客观准确。**

### 2.5 创新点

1. **范式创新**：提出“物理计算-感知仿真-自动校准”三位一体的全链路仿真新范式，系统性解决Sim-to-Real差距问题。
2. **技术创新**：
   1. 首创**基于生成式AI的虚拟传感器标准化训练与评测框架**，为感知仿真建立客观量化标准。
   2. 实现**多物理场扰动下的感知一致性建模技术**，保证动态场景中传感器输出的连续性。
3. **架构创新**：设计**基于云原生和国产硬件的智能仿真系统架构，**实现高性能、高可用与自主可控的统一。

### 2.6 风险评估与应对措施

可能存在的风险以及应对措施如表所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 风险 | 内容 | 对策 |
| **技术风险** | 多物理场耦合算法复杂度高，难以收敛。 | 与顶尖力学国重实验室合作，聘请领域专家顾问；采用成熟开源求解器（如Warp）进行改进和集成；设立并行技术路线攻关。 |
| **供应链风险** | 高端GPU采购受限。 | 硬件方案采用“国产为主，多元备份”策略，优先深度适配昇腾等国产芯片；与国产芯片厂商建立联合实验室。 |
| **进度风险** | 研发周期超出预期。 | 采用敏捷开发模式，分阶段设定里程碑，优先交付核心模块（刚体仿真+AI传感）；定期进行集成测试，及早发现问题 |
| **市场风险** | 生态薄弱，用户迁移成本高。 | 与国内头部机器人企业（如新松、埃斯顿）共建生态，优先满足其需求；提供完善的API文档、教程和迁移工具。 |

### 2.7 工作机制设计方案

1. **组织机制**：采用“**揭榜挂帅**”与“**赛马机制**”相结合。
   1. 成立项目总体组，负责规划与协调。
   2. 对核心模块（如流体求解、AI传感）公开张榜，内部团队或外部合作单位均可揭榜。
   3. 对同一技术难点（如校准框架），允许2-3个小分队并行开发，定期评比，择优选用。
2. **合作机构遴选**：
   1. **标准**：在计算机图形学、计算力学、机器人学、人工智能任一领域具有国内领先的研究水平和工程能力。
   2. **模式**：项目联合攻关，知识产权共享，成果收益按约定分配。拟遴选2-3所高校实验室和1家业界领先的AI公司。
3. **内部团队**：组建由博士、博士后为技术骨干，硕士生为开发主力的跨学科研发团队，涵盖物理、计算机、自动化、数学等专业。

### 2.8 分阶段实施计划（示例）

**第一阶段（2025.Q3-Q4）：技术预研与原型开发**

1. 里程碑：完成技术调研报告；搭建基础仿真环境（刚体）；实现基础AI传感器原型（图像）。
2. 交付：技术可行性验证报告、原型系统Demo。

**第二阶段（2026.Q1-Q2）：核心模块攻关**

1. 里程碑：完成软体/流体求解器模块开发；完成感知一致性系统搭建；设计校准框架。
2. 交付：多物理场求解器模块、感知仿真模块。

**第三阶段（2026.Q3-Q4）：系统集成与验证**

1. 里程碑：完成引擎系统集成；完成自动化校准功能；在典型场景（机器人抓取）完成仿真与实物对比验证。
2. 交付：Alpha版仿真引擎、校准验证报告。

**第四阶段（2027.Q1-Q2）：性能优化与示范应用**

1. 里程碑：实现云原生部署与并发优化；与1-2家合作企业开展示范应用。
2. 交付：Beta版云服务平台、示范应用案例报告。

**建设期管理**：每月提交项目简报，每季度进行里程碑评审。

### 2.9 技术资源保障方案

1. **技术路线**：采用“AI增强的多物理场仿真”技术路线，核心技术特点为生成式AI、云原生、统一数据表示（OpenUSD）。
2. **软硬件支撑**：
   1. **软件**：Linux, Docker, Kubernetes, Python, C++, CUDA, MindSpore/PyTorch。
   2. **硬件**：初期采用现有GPU服务器进行开发。中后期需采购或租用算力集群：
      * **方案一（优选）**：采购基于昇腾910B的国产算力集群（约16节点）。
      * **方案二（备份）**：租用市场化GPU云服务器（如阿里云、华为云）。
3. **原则**：新建算力原则上采用国产芯片。

### 2.10 运营服务方案

1. **组织建设**：项目完成后，建议成立专门的“仿真创新实验室”或进行科技成果转化，孵化创业公司进行商业化运营。
2. **运营机制**：初期以面向重点企业提供技术支持和定制化开发服务为主；中期打造标准化的云服务平台（SaaS模式）；远期构建开发者生态。
3. **服务模式**：提供引擎授权、云服务订阅、行业解决方案、技术咨询等多种服务模式。
4. **助推作用**：为下游用户提供高效、低成本的研发工具，助推其产品创新速度提升50%以上，研发成本降低30%以上。

### 2.11 各项建设条件落实情况

1. **能耗与碳排放**：本项目为算力密集型研发项目，主要能耗来源于计算设备。
   1. **年度碳排放总量预测**：约 [待填写] 吨（根据采购/租用的服务器数量、功率和使用率估算）。
   2. **减排路径**：
      * **设备选型**：优先采用能效比高的国产服务器和液冷技术。
      * **资源利用**：通过云原生和容器化技术提高服务器资源利用率，避免空闲能耗。
      * **绿电采购**：数据中心机房优先采购绿色电力。
   3. **影响分析**：通过采取节能措施和使用绿电，本项目单位算力的碳排放强度将低于行业平均水平，对地区碳达峰碳中和目标影响轻微。

### 2.12 项目财务分析、经济分析及主要指标

1. **投资估算**：项目总投资约为 [待填写] 万元，主要包括设备购置费、研发人力成本、合作经费、云计算资源租赁费等。
2. **经济效益分析**：
   1. **直接收益**：通过技术转让、服务订阅等方式获得收入。
   2. **间接收益**：突破国外垄断带来的产业链安全价值无法估量。为应用企业节省的研发成本和带来的效率提升价值巨大。
3. **社会效益分析**：
   1. 培养一批交叉学科的高端人才。
   2. 提升我国在工业软件领域的自主创新能力和国际竞争力。
   3. 赋能制造业转型升级，社会效益显著。
4. **主要财务指标**：
   1. **投资回收期**：约 [待填写] 年（考虑商业化运营后）。
   2. **内部收益率(IRR)**: > [待填写]%。