

空间智能发展报告



工业和信息化部元宇宙标准化技术委员会（筹）

中国电子工业标准化技术协会元宇宙工作委员会

二〇二六年三月

编委会

指导委员会

范书建 范科峰

编写人员

王志鹏	杨梦培	王典威	罗肖飞	龚才春
谷 森	孙 蕾	戴炳荣	潘志庚	李淑玲
陈春明	张素勤	盖 孟	王可娴	韩 鹏
王 乐	徐 毅	胡 松	赵起超	李芳慧
鲁 静	陈芊妤	喻伟东	纪尧华	李升波
楚俊生	施文哲	刘 园	马菲莹	陈姝宇
黄华锟	杨青林	赵凌君	周雨芹	朱润亚
单 纯	林 森	徐赫唯	旷志光	周子茗
刘亭杉	毛超逸	王晓达	吕将男	陈 晨
谢云龙	吴小平	尹慧明	董正浩	杨 晶
王 倩	石 磊	王瑞平	黄明游	

编写单位（排名不分先后）

中国电子技术标准化研究院
北京信息产业协会元宇宙专委会
中国第一汽车股份有限公司
上海微电子设计有限公司
上海计算机软件技术开发中心

北京航空航天大学杭州国际创新研究院

清华大学车辆与运载学院

中国科学院计算技术研究所

内蒙古会展经济科学发展研究会

咪咕新空文化科技（厦门）有限公司

杭州平勤信息工程咨询有限公司

歌尔股份有限公司

北京微视威信息科技有限公司

上海软中智链数字科技有限公司

西北工业大学

上海雅虹文化传播有限公司

北京津发科技股份有限公司

北京数原数字化城市研究中心

杭州炽橙数字科技有限公司

中兴通讯股份有限公司

广州大学

中国联通智能城市研究院

联通数据智能有限公司

上海市数字证书认证中心有限公司

广东技术师范大学

远光软件股份有限公司

序：从“读万卷书”到“行万里路”：空间智能开启人工智能新纪元

空间智能是实现“具身智能”的基石，它将语言指令、视觉感知与物理动作融为一体，形成“感知—思考—行动”的完整闭环，赋予机器物理世界的“常识”。它让AI的“思考”有了锚定真实世界的“身体”和“感官”，在复杂、不确定的物理环境中，通过实践去学习并解决问题。

“读万卷书，不如行万里路”——这句古老的中国智慧，此刻获得了全新的时代内涵。大模型代表“读万卷书”的路径，已接近极限；空间智能开启“行万里路”的新征程，刚刚起步。当智能体走出文本的洞穴，在真实的三维世界中行走、感知、试错、修正，它获得的将不再是人类知识的影子，而是与世界直接对话生成的新知。

正是基于这一判断，工业和信息化部电子第四研究院组织编写了这本《空间智能发展报告》。报告系统梳理了空间智能的技术架构，深入分析了典型应用场景，全面调研了产业发展现状，并对生态构建提出了前瞻性思考。这是国内首份从产业视角系统审视空间智能的权威报告，必将对我国空间智能的发展产生深远影响。

作为亲历人工智能三起两落的研究者，我深感我们正站在一个新纪元的门槛上。从符号主义到连接主义，从“读万卷书”到“行万里路”——人工智能的每一次范式转换，都在向人类智能的本质靠近一步。空间智能或许不是终点，但它无疑是通往通用人工智能的必经之路。愿这份报告，能为这条路上的探索者点亮一盏灯。

丁文华 中国工程院院士

2026年3月



序：打开物理世界人工智能殿堂的金钥匙

人类技术史的每一次重要跃迁都根植于我们对世界认知方式的变革。从蒸汽机改变了人类利用能量的方式，到计算机革新了人类处理信息的方式，再到人工智能深刻革新了人类理解世界的方式。而今，我们正站在一个新的交汇点：随着以空间认知为核心能力的全新技术范式——空间智能——磅礴兴起，智能技术不再局限于数字比特的逻辑推演，而是开始深度介入物理世界的广阔疆域、重塑我们与世界的关系。

空间智能技术能够赋予智能系统（无论是物理世界的机器人、自动驾驶系统，还是数字世界的虚拟智能体）像人类一样理解、推理并主动与三维物理世界进行交互的能力，使智能系统能够精准地感知环境、理解空间关系与物理规律、预测场景演化，最终做出合理决策并与环境互动。这正是我们这些在物理人工智能领域深耕探索的学者们所期望的愿景：让智能系统真正拥有“物理直觉”和“空间心智”。这种转变不仅意味着数字系统从“计算工具”向“智能主体”的跃升，更标志着数字世界与物理世界之间的边界正在被重新定义。

空间智能之所以在当下显得尤为重要，源于其不仅是人工智能迈向物理世界的关键路径，更是构建新一代数字空间、实现万物智联的底层基础能力。无论是智能制造中对生产系统的高效协同与柔性生产，智慧城市中对复杂环境的精细化治理与公共服务优化，抑或是低空经济、具身智能等新兴领域对全域感知、精准定位与自主决策的迫切需求，都无不指向空间智能这一核心能力。可以预见，谁能够率先形成完善的空间智能技术体系和产业生态，谁就将掌握未来人工智能产业竞争的战略主动权，占据更为有利的制高点。

当前，空间智能仍处于快速演进的关键阶段，机遇与挑战并存，诸多关键问题有待深入探索，例如如何构建高可信、全覆盖的空间感知体系，如何实现大规模、实时、动态的空间建模与语义理解，如何赋予机器更加稳定可靠的“物理直觉”，以及如何在开放复杂环境中实现安全、鲁棒的智能决策。这些挑战，正是驱动下一阶段技术突破与产业创新的强大动

力，也是我们科研工作者义不容辞的使命。

在这一背景下，工业和信息化部元宇宙标准化技术委员会（筹）和中国电子工业标准化技术协会元宇宙工委共同起草的这本《空间智能发展报告》，其发布具有重要意义。这份报告以其系统性、前瞻性和深度，为我们描绘了一幅清晰而全面的空间智能发展图景。它立足技术演进与产业实践，从核心概念的厘清，到技术体系的解构，从全球发展态势的洞察，到国内实践路径的剖析，再到未来趋势的展望与政策建议，内容涵盖广泛、论述深入浅出，为学术界和产业界提供了一份重要的参考指南。特别是报告中对空间智能在制造、文旅、教育、城市、低空、医疗等多个领域的实践案例与未来趋势的探讨，充分展现了其赋能千行百业的巨大潜力，也为我国在这一战略高地上的发展提供了系统性的思考框架和行动指引。

面向未来，空间智能的发展需要更加紧密的跨学科协同，也需要产业界与学术界的共同努力。期待更多科研机构、企业与创新主体参与其中，在关键技术突破、标准体系建设和应用生态培育等方面持续推进，使空间智能真正成为推动数字经济高质量发展的重要力量。

谨此推荐。向这份报告的发布表示热烈祝贺，并向所有为空间智能发展付出努力的同仁致以崇高敬意。

郭嵩 加拿大工程院院士、欧洲科学院外籍院士
香港科技大学讲席教授

2026 年 3 月

郭嵩

引言

在新一代信息技术与实体经济深度融合的进程中，空间智能作为融合人工智能、高精感知与空间计算等关键技术综合体现，正以其对物理世界的深度认知与交互能力，为千行百业的数字化、智能化转型注入新质动能。当前，全球空间智能领域创新活跃，市场潜力巨大，其作为产业升级新引擎的战略地位日益凸显。据市场研究机构预测，与空间智能相关的机器人与空间计算全球市场规模将呈现高速增长态势，预计在 2030 年前后跨越 5000 亿美元门槛，正加速成为全球数字经济竞争的新焦点。

空间智能是抢占未来产业发展制高点、构建现代化产业体系的关键支撑。在政策上，工业和信息化部联合多部门印发的《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023-2025 年）》《关于推动未来产业创新发展的实施意见》《“人工智能 + 制造”专项行动实施意见》推动空间智能等跨领域技术的交叉创新，促进空间智能等前沿技术的成果转化，加快空间智能技术在工业元宇宙、低空经济、具身智能等新兴场景中深度应用。在标准方面，工业和信息化部发布《元宇宙产业综合标准化体系建设指南（2026 版）》（征求意见稿），将空间计算、数字孪生等空间智能相关技术纳入到元宇宙产业标准体系框架中，为空间智能的产业落地创造了良好政策环境。

为系统梳理我国空间智能发展脉络，精准把握其发展规律与未来趋势，助力我国在新一轮产业变革中抢占先机，工业和信息化部元宇宙标准化技术委员会（筹）联合中国电子工业标准化技术协会元宇宙工委，以及产学研用各方力量，在前期研究基础上，聚焦技术前沿、产业应用与生态构建，深入开展产业调研，总结实践经验，剖析挑战机遇，最终形成本报告。期望以此报告凝聚行业共识，推动“政产学研用金”高效协同，共同营造健康可持续发展的产业生态，为全球空间智能产业发展贡献中国智慧与中国方案。

编写组

目录

第1章 核心本质	1
1.1 概念内涵：智能体的三维认知与决策能力	1
1.2 关键特征：空间思维、实时推演、自主化	3
1.3 技术演进：从静态建模迈向实时演化阶段	4
1.4 战略定位：未来数字产业竞争的关键变量	9
1.5 现实挑战：多维发展问题制约规模化应用	13
第2章 全球发展情况	15
2.1 全球政策加速布局，国内统筹协同推进	15
2.2 国外基础研究领先，国内技术创新提速	19
2.3 国外场景深度渗透，国内落地更具规模	24
2.4 国际标准未成体系，国内布局初步建立	32
第3章 技术体系	36
3.1 技术架构：感知理解协同，决策交互一体	36
3.2 关联关系：学科交叉融合，技术协同演进	48
第4章 实践路径	50
4.1 空间智能 + 制造：降本增效与高质发展的核心引擎	50
4.2 空间智能 + 文旅：体验升级与文化传承的关键支撑	54
4.3 空间智能 + 教育：资源均衡与教学创新的重要载体	57
4.4 空间智能 + 城市：精细治理与宜居建设的数字底座	60

4.5	空间智能 + 低空：规范运营与产业腾飞的关键基石	63
4.6	空间智能 + 医疗：精准诊疗与健康普惠的技术赋能	65
第 5 章	十大未来发展趋势	69
5.1	趋势一：感知能力升级，进入主动感知阶段	69
5.2	趋势二：定位网络泛在，支撑全域位置服务	69
5.3	趋势三：重建引擎迭代，迈向实时动态仿真	70
5.4	趋势四：推理能力跃迁，赋予机器物理直觉	70
5.5	趋势五：交互技术融合，重塑沉浸门户体验	70
5.6	趋势六：世界模型升级，创造共生平行宇宙	71
5.7	趋势七：记忆体系演进，构建全球数字档案	71
5.8	趋势八：群体智能升维，革新智能体互联网	71
5.9	趋势九：安全能力内生，构筑智能安全防线	72
5.10	趋势十：应用模式创新，赋能千行百业发展	72
第 6 章	发展建议	73

第 1 章 核心本质

当前,新一轮科技革命和产业变革深入发展,全球科技创新进入空前密集活跃的时期,高技术领域成为国际竞争最前沿和主战场。空间智能作为数字世界与物理世界融合的前沿技术,正深刻影响着元宇宙等未来产业的发展。2025 年 8 月 27 日,国务院发布《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》,明确指出要加快人工智能与元宇宙等技术融合和产品创新,探索智能产品新形态。作为“AI+ 元宇宙”领域的核心使能技术,空间智能在元宇宙场景构建、实时空间感知、虚实交互协同以及智能决策优化等方面应用前景广阔,能够为沉浸体验、城市治理、低空运行、工业制造等多元场景提供统一的空间认知框架和智能计算底座,成为推动数字经济向更高层级跃迁的关键基础能力。

1.1 概念内涵：智能体的三维认知与决策能力

2024 年 5 月,斯坦福大学李飞飞教授在 TED 演讲中提到空间智能,在全球学术界与产业界激起了对空间智能技术的广泛共鸣与深刻讨论。事实上,空间智能的理念与技术雏形早已在计算机视觉、机器人学、地理信息系统及计算机图形学等领域萌芽并得到持续应用,其核心目标是赋予机器感知和理解物理世界,并进行未来推演和智能决策的能力。在“AI+ 元宇宙”融合发展的时代背景下,空间智能成为连接环境感知与物理行动,支撑产业数字化进程中虚实融合与交互的核心技术。

1.1.1 定义

空间智能 (Spatial Intelligence) 是智能体在三维空间中感知、理解、推理、决策、交互的能力。它依托多模态世界模型,让智能体能够精准感知物理/虚拟空间、理解空间关系及物理规律、推理预测场景演化,做出合理决策,并最终实现与环境的互动。

1.1.2 内涵

空间智能技术的内涵涵盖“核心框架、能力支柱、应用价值”三大维度，形成“技术支撑生态、产业反哺技术”的完整理念体系。

核心框架 空间智能是元宇宙实现高保真虚实交互的核心技术底座，也是适配产业多样化场景需求的能力中枢，区别于传统 3D 引擎或地理信息系统，具备四大兼顾元宇宙与产业化的关键特性：

- **多模态融合能力**：整合视觉（图像）、触觉（力反馈）、声学（环境音、碰撞声）等非文本数据，既突破大语言模型的文本单一输入局限，为元宇宙提供沉浸式多感官交互基础，也可适配产业场景中多源空间数据的综合采集需求，如工厂设备状态、城市环境参数。
- **物理一致性约束**：模型生成与推理必须遵循真实物理定律（碰撞反弹、重力、光影传播），既确保元宇宙虚拟场景的真实感与交互合理性，也保障产业场景中智能决策的可靠性，如虚拟人物动作符合力学规律、机器人作业安全合规等。
- **时空连贯性**：不仅还原静态空间结构，更能精准预测场景动态演化，既解决元宇宙长时程交互“场景割裂”痛点（如虚拟活动连续推进），也满足产业场景中动态监测需求（如城市交通流量预测、工厂产线物料流转跟踪）。
- **语义-几何双维表征**：既理解“建筑”“设备”等语义概念，也掌握其 3D 形状、属性及交互方式，既实现元宇宙中“概念-实体”的快速映射（如文字描述生成虚拟物体），也支撑产业场景中空间资源的精准管理（如仓库货物分类、建筑设备定位）。

能力支柱 空间智能既精准匹配元宇宙沉浸式、交互性的生态需求，也充分适配产业场景高效化、精准化的实操需求，构成技术内涵的核心骨架。它拥有以下三大核心能力目标：

- **想象力**：让 AI 具备虚拟空间生成与场景演化模拟能力，既可为元宇宙创作者提供高效工具（如基于文字描述生成 360 度高保真虚拟场景、预演虚拟活动流程），也可服务产业创意设计场景（如建筑虚拟样板间生成、产品空间布局模拟）。
- **敏捷性**：对应元宇宙虚实联动需求与产业智能需求，让 AI 在动态、不

确定环境中快速感知、决策并行动。在元宇宙中，可实现虚拟人实时响应物理世界指令、虚拟场景与现实事件同步；在产业场景中，通过 ReKep（关系关键点约束）等技术，让智能体在工厂、仓库等场景精准完成物料搬运、设备维护等操作，解决传统机器人预编程依赖与元宇宙虚实联动滞后的双重局限。

- **严谨性**。让 AI 以精确的数学与物理模型进行空间推理，既可为元宇宙生态运营提供数据支撑（如虚拟空间人流分布优化、交互体验迭代），也能为产业决策提供量化依据（如城市管网布局优化、农田精准种植规划、工厂产线空间资源配置）。这一能力是元宇宙生态可持续运营与产业高质量发展的核心，已在智慧农业、智慧城市等产业化场景中初步验证。

应用价值 空间智能作为元宇宙的使能技术，其核心价值在于构建虚拟世界与现实世界的精准交互接口。它通过高精度空间感知、场景理解、实时空间推理与决策，以及虚实交互能力，使虚拟世界不仅能精准复刻现实，还能实时理解、响应并反作用于现实，从而破解元宇宙在实时场景构建、交互体验和实际应用中的关键难题。空间智能借助多模态数据融合与空间协同，支撑多人实时交互与跨平台信息互通，有效解决虚拟场景中的空间定位偏差、环境关系理解不足及交互延迟等问题。此外，空间智能加速元宇宙与各行业深度融合，在智能制造、沉浸式文旅、智慧城市等领域，通过实时理解场景语义、动态推演空间演化，实现生产资源自主调度、游客体验智能引导及公共服务动态优化，以更低成本、更高效率赋能行业数字化转型，进一步拓展元宇宙的应用边界与产业价值。

1.2 关键特征：空间思维、实时推演、自主化

空间智能的典型技术特征深刻植根于其核心使命——使智能体能够像人类一样，在一个三维、动态且充满语义的物理世界中理解、导航与交互。斯坦福大学李飞飞教授在其空间智能文章中精准地指出了这一范式的关键转变，它不仅是算法的进步，更是从对世界的被动识别到空间中的主动推理与行动的根本性跨越。其技术特征可系统阐述如下：

- **从要素独立到模型统一的多维建模**。一个真正的世界模型，其内部模型绝非仅有几何点云或网格。它必须将环境的几何信息，与物体的类

别、功能等语义信息，以及质量、刚性等物理属性进行深度关联。这种统一表征使智能体理解场景的功能与物体的潜在用途，从而支撑起符合常识与物理规律的推理。

- **从静态快照到动态场景的时空融合。**智能体必须理解事件与行动在时间维度上的连续性。因此，其技术核心在于处理连续时序中的空间信息流，将瞬时感知与历史状态相融合，并能够预测未来时刻空间关系的演化，例如运动物体的轨迹。这种动态的时空建模能力，是系统实现实时规划与决策的基础。
- **从被动感知到自主决策的闭环认知。**智能体不仅需要理解三维空间的结构关系，更必须基于此做出自主的任务规划与行动决策。它将空间认知升维为可操作的意图——判断物体间的功能关联、评估行动路径的可行性、选择与环境目标相匹配的行为策略，从而在没有人类干预的情况下独立完成复杂任务。

其终极目标是实现智能体在物理/虚拟空间中的自主行为能力，所有感知、建模与计算最终都导向在特定空间内执行具体任务，例如移动、操控或导航，并能在行动过程中根据空间状态的反馈进行实时调整与学习，从而形成“感知-思考-行动”的持续交互闭环。

综上所述，空间智能的技术特征可概括为空间思维、实时推演与自主化。其核心在于构建并利用一个融合几何、语义、物理与时间等多模态信息的动态三维世界模型，从而支撑智能体在实时演化的空间中进行自主决策与行动。

1.3 技术演进：从静态建模迈向实时演化阶段

空间智能是融合计算机视觉、三维几何、人工智能、传感器技术的交叉学科，呈现从“几何建模”到“实景重建”，再到“语义认知”，最终迈向“虚实融合与智能交互”的演进脉络。

1.3.1 阶段一：理论奠基与几何建模阶段（20 世纪 60 年代至 90 年代末）

核心特征：本阶段以静态几何建模为核心目标，技术体系依托经典数学与早期计算机视觉理论构建，聚焦于从二维视觉信号中恢复三维空间的几何结构，尚未形成动态感知与交互能力。研究以“确定性几何推

理”为核心范式，通过建立三维物体识别、多视图几何约束、空间不确定性估计等基础理论，为机器感知三维空间奠定方法论框架；实现从二维图纸到三维数字模型的转化，完成空间智能技术从“概念”到“工具”的初步落地。

1963 年 - 20 世纪末 里程碑

- 1963 年，Lawrence G. Roberts 提出基于积木世界的三维物体识别方法，开创计算机视觉三维建模先河。
- 1965 年，Ivan Sutherland 提出“沉浸式显示/交互”的思想原型，为后来的 AR/VR/空间计算提供概念源头。
- 1970 年，Berthold K. P. Horn 在《Shape from Shading》中首次提出明暗恢复形状算法，实现单张图像的三维形状推理。
- 1982 年，Autodesk 推出了首款商业化计算机辅助设计（CAD）软件 AutoCAD，实现二维图纸到三维几何模型的数字化建模，满足机械、建筑领域的空间设计需求。
- 1993 年，Olivier Faugeras 建立多视图几何约束理论，为多相机三维重建提供数学依据。
- 1999 年，David G. Lowe 提出局部不变特征思想，其提出的 SIFT（尺度不变特征变换）算法，为处理复杂环境下的物体识别提供了核心方法，对后续三维重建、位姿估计和 SLAM 等空间智能技术产生深远影响。Dassault Systèmes 正式发布 CATIA V5，引入统一的三维数字样机（DMU），实现了从几何建模到装配、干涉检测与虚拟验证的一体化空间表达，让产品在进入物理世界生产之前在虚拟空间中完成了全生命周期推演。

1.3.2 阶段二：感知融合与三维重建阶段（21 世纪初至 2010 年）

核心特征：本阶段迈入动态感知与实时重建的技术新阶段，核心逻辑从“静态几何表示”转向“动态场景感知”，多传感器融合与统计概率模型成为技术核心。视觉 SLAM 技术的诞生与成熟，实现了相机位姿估

计与三维地图构建的实时同步；基于互联网图像的结构自运动（SfM）方法，突破了受控环境的限制，开启大规模非结构化场景三维重建的研究范式。消费级硬件的普及成为关键转折点，以 Kinect 深度相机、Wii 体感设备为代表的产品，将三维感知成本大幅降低，推动空间智能技术从工业领域拓展至大众娱乐、实景地图采集等消费级场景，完成技术从“专业”到“普惠”的关键跨越。

21 世纪初 - 2010 年 里程碑

- 2000 年，Michael J. Black 团队引入概率模型与多源观测融合思想，将统计估计方法引入动态场景三维感知与重建过程，推动了计算机视觉领域“感知融合”范式的形成。
- 2001 年，Vicon 推出基于多摄像机的光学动作捕捉系统，实现毫米级精度的人体与物体三维运动重建，广泛应用于影视、游戏与生物力学研究，是早期高精度空间感知的典型产品。
- 2003 年，索尼推出 EyeToy 视觉交互设备，利用单目摄像头与图像处理实现人体动作感知，首次将视觉感知引入大众娱乐交互，降低了空间感知技术的使用门槛。
- 2006 年，Steven M. Seitz 提出基于互联网照片的结构自运动（SfM）方法，通过特征匹配与捆绑调整实现大规模、非受控条件下的稀疏三维重建，开创了“互联网级三维重建”的研究范式。同年，任天堂 Wii 体感设备，通过内置的加速计和红外传感器实现人体姿态检测与空间交互，开创消费级空间感知硬件先河。
- 2007 年，谷歌推出 Google Street View（街景）服务，率先实现全球范围的实景三维地图采集，为空间智能提供大规模真实场景数据支撑。
- 2010 年，微软发布 Kinect 深度相机，将三维感知成本降至千元级别，首次实现消费级设备的实时人体姿态捕捉与空间交互。

1.3.3 阶段三：认知赋能与场景理解阶段（2011 年至 2020 年）

核心特征：本阶段以深度学习驱动的空间认知为核心标志，技术重

心从“三维空间的几何重建”升级为“三维场景的语义理解”，空间表示形式从“几何地图”演进为“语义地图”。研究的核心突破在于，将深度学习技术与三维感知数据融合，通过 RGB-D 大规模标注数据集、点云深度学习模型、神经辐射场（NeRF）等技术，实现对空间目标的实例级分割、分类与真实感重建，赋予机器“看懂”空间的能力；产业实践则聚焦于智能驾驶与智慧城市两大核心场景，以大疆 Phantom、特斯拉 Autopilot、百度 Apollo、商汤 SenseCity 为代表的产品与系统，实现了道路场景、城市空间的三维感知与语义理解，推动空间智能技术从“感知工具”升级为“决策支撑系统”。

2011 年 - 2020 年 里程碑

- 2012 年，Nathan Silberman 发布 NYU Depth V2 数据集，首次建立大规模室内场景的 RGB-D 语义标注基准。
- 2015 年，Jonathan Long 提出全卷积网络（FCN），首次将深度学习用于空间语义分割，推动空间地图从“几何地图”向“语义地图”升级。同年 4 月，大疆发布 Phantom 3 系列无人机，搭载视觉定位系统（VPS），实现室内无 GPS 环境下的稳定悬停，开启消费级空间智能应用。
- 2016 年，特斯拉推出 Autopilot 2.0 系统，采用多摄像头视觉与毫米波雷达融合感知，实现道路场景的三维目标检测与路径规划，开启智能驾驶的空间智能时代。
- 2017 年，百度发布 Apollo 1.5 平台，集成了多传感器融合的空间感知技术，达到高精度的车道线识别和障碍物检测效果，推动国内智能驾驶开源生态的发展。同年，Kaiming He 在《Mask R-CNN》中首次提出实例级语义分割算法，实现图像级实例分割，为三维空间目标识别与定位提供重要视觉基础。Charles R. Qi 首次提出基于点云的深度学习模型，打破三维数据的特征提取瓶颈。
- 2018 年，清华大学团队提出动态 SLAM 算法，实现动态场景下的实时空间建图与定位，解决传统 SLAM 无法处理移动物体的难题。2018

年，David Ha 和 Jürgen Schmidhuber 将世界模型（World Model）定义为一个生成式模型，该模型能够理解和模拟环境，学习行为策略，并将学到的知识迁移到新的情境中，提出的 V-M-C（Vision Model-Memory Model-Controller）架构为早期世界模型的研究与实践提供了核心蓝图。

- 2019 年，小鹏汽车发布 XPILOT 2.5 智能驾驶系统，融合视觉与毫米波雷达的空间感知技术，实现高速场景下的自动跟车、车道保持与自动变道功能，推动国内造车新势力的智能驾驶技术落地。

1.3.4 阶段四：虚实共生与智能交互阶段（2021 年至今）

核心特征：本阶段进入虚实融合与智能体的技术新纪元，核心目标是构建“可感知、可理解、可交互、可生成”的虚实共生空间，人工智能与元宇宙的融合成为技术发展的核心驱动力。神经辐射场技术的优化（如 Mip-NeRF）提升了虚拟场景的真实感与渲染效率；基于多模态提示的具身智能框架（如 VIMA）打通了“感知-理解-行动”的技术链路，赋予智能体在虚实融合空间中执行复杂任务的能力；以苹果 Vision Pro 为代表的空间计算设备，实现了高精度虚实对齐与自然交互；腾讯混元、World Labs 的 Marble 等世界模型产品的落地，推动空间智能技术从“被动感知”转向“主动生成与协同”，加速迈向虚实共生的智能新形态。

2021 年 - 至今 里程碑

- 2021 年，Jonathan T. Barron 提出 Mip-NeRF 算法，解决 NeRF 的分辨率与抗锯齿问题，提升虚拟空间渲染的真实感。
- 2022 年，小鸟看看开发了 Pico 4 系列头显，搭载自研的空间定位追踪算法与手势交互系统，实现毫秒级虚实空间对齐与精准手势控制，通过更具竞争力的价格显著降低了 6DoF 手势交互和 4K 高清 VR 头显的准入门槛。腾讯开源 NeRF-China 算法，优化神经辐射场渲染效率，推动高精度三维场景重建在数字孪生、虚拟人领域的应用。
- 2023 年，宇树科技推出 Unitree H1 人形机器人，搭载多模态空间感

知套件（激光雷达 + 深度相机 + IMU），可实时构建物理空间三维地图，并与虚拟空间的数字孪生体实现动作同步，支持在虚实融合场景下完成自主导航、物体抓取与协同作业，推动人形机器人成为空间智能的实体交互终端。苹果发布 Vision Pro 头显，开创性的“眼神 + 手势”（Look and Tap）交互方式省去了物理控制器，利用实时 3D 重建技术将虚拟应用窗口锁定在物理空间中，真正实现了虚实融合的“透视”（Passthrough）体验。华为首发 BEV+Transformer 空间感知架构，彻底重构自动驾驶空间感知体系，实现厘米级空间定位与动态语义理解。

- 2024 年，OpenAI 发布了视频生成模型 Sora，将视频生成从简单的“画面拼接”提升到了对物理世界模拟的高度，为元宇宙空间的自动化建模提供了全新思路。
- 2025 年，李飞飞提出“空间智能：AI 的下一个十年”的观点，构建以三维世界建模、具身感知与物理交互为核心的统一研究框架，强调从二维感知向“可行动、可推理、可交互”的三维世界模型跃迁，其初创公司 World Labs 推出了商业化世界模型产品 Marble，引发业界对空间智能广泛关注。同年，国内首个开放实时体验的世界模型，腾讯混元世界模型 1.5 发布，实现输入文字描述或者图片即可创建专属的互动世界。高德推出“AI 停车雷达”，基于空间智能提供沉浸式引导。

1.3 战略定位：未来数字产业竞争的关键变量

如果说大语言模型是人类知识的数字容器，主要解决了“信息生成与语义理解”的问题；那么空间智能则是智能体理解与行动于三维空间的认知框架，其核心是解决“空间理解与交互”的问题，是赋能智能体在物理世界与数字空间中自主导航、操作与创造的关键。作为元宇宙的核心使能技术，空间智能的战略定位可从底层支撑、产业赋能、生态构建、国家竞争四个维度进行系统性剖析。

1.4.1 底层技术基座：空间智能夯实元宇宙智能根基

在元宇宙从概念加速走向产业化落地的进程中，其核心瓶颈并非单一算法能力，而在于缺乏一种统一、符合物理规律、可感知、可推理、可交互的智能技术。空间智能正是突破这一瓶颈的关键使能技术，它以统一框架连接数字世界与物理世界，支撑智能体在三维空间中的理解、决策与行动，成为元宇宙构建“可计算空间”的坚实底座。

构建元宇宙核心空间能力体系。空间智能通过三维重建、实时定位、语义分割、动态建模等核心技术，为元宇宙搭建起“感知-理解-交互”的完整技术链路，解决了虚拟空间与物理空间的对齐、动态更新等核心难题，让数字世界能够精准复刻物理世界的结构与动态变化，为元宇宙的场景落地提供基础技术支撑。

赋能元宇宙智能体自主运行。元宇宙中的数字人、虚拟机器人、自动驾驶仿真体等智能体，其自主导航、交互、决策能力均依赖空间智能的赋能。空间智能赋予智能体对三维空间的理解能力，使其能够识别空间位置、物体属性、交互规则，实现从“被动响应”到“主动行动”的升级，是元宇宙实现“自主化”的核心技术支撑。

筑牢元宇宙跨场景协同根基。空间智能通过统一的空间感知与交互规范，结合坐标映射、空间对齐技术，破解元宇宙不同场景、终端的坐标与感知标准不兼容问题，实现空间信息互通，避免生态碎片化，为元宇宙规模化扩展、跨平台协同落地提供核心支撑。

空间智能不仅是“人工智能+”的能力延伸，更是元宇宙实现可感知、可推理、可交互运行的使能技术，是数字世界迈向真实自治系统的关键支撑。

1.4.2 产业升级引擎：空间智能引领工业生产变革

工业自动化的终极瓶颈，在于机器缺乏对非结构化物理环境的实时理解与自适应能力。传统自动化系统依赖预设的程式与精确的工装，无法应对现实生产中必然存在的差异与变化。空间智能的融入，正是破解这一核心困境、将刚性产线升级为自适应系统的关键。

驱动制造范式从自动化迈向自主化。 空间智能通过对物理世界的三维感知、定位与理解，实现物理空间与数字空间的精准同步，为元宇宙在工业场景落地提供基础环境支撑。它赋予机器人环境感知、实时决策与手眼协调能力，使其不再局限于预设程序，而是在虚实融合的空间中自主调整轨迹与作业逻辑。这打破了自动化对严格结构化环境的依赖，让机器人可在复杂车间、开放仓库、动态检修现场等元宇宙典型应用场景中执行柔性任务。

破解劳动力结构性短缺的长期挑战。 随着全球老龄化加剧，蓝领劳动力短缺成为各国制造业的痛点。空间智能为人形机器人、协作机器人提供全域空间感知与精细操作能力，使其在工业元宇宙中复刻人类作业逻辑，替代人工完成复杂任务。这既缓解制造业劳动力缺口，又推动元宇宙从虚拟体验走向实体产业赋能，实现数字世界对物理生产的有效驱动。

驱动资源调度迈向全局智能化 空间智能将工厂、仓库、运输网络数字化，构建起可计算、可推演、可预测的工业元宇宙镜像。在此基础上，生产排程、库存调拨、设备运维不再依赖经验与静态计划，而是基于实时状态数据进行动态优化。无论是 AGV 路径规划、产线节拍调整，还是跨厂区资源调配，均可实现算法驱动的全局协同，从而将工业系统的效率与韧性提升至全新高度。

1.4.3 生态演进驱动：空间智能激活虚实融合新场景

元宇宙作为融合虚拟与现实、具备持续性与互操作性的下一代数字社会形态，其发展正面临两大根本性瓶颈：三维数字内容的高昂生产成本，以及虚实空间之间生硬、割裂的交互体验。这不仅限制了其规模应用，更阻碍了其作为新型社会与产业平台潜能的释放。空间智能的成熟，正系统性地成为破解这些核心难题、将宏大愿景转化为可运营现实的关键技术，从而奠定其驱动未来数字生态繁荣的战略基础。

推动三维世界生成进入工业化阶段。 传统 3D 建模高度依赖专业人工，成本高昂、效率低下，是制约虚拟世界规模的核心障碍。以 NeRF（神经辐射场）和 4DGS（4D 高斯泼溅）为代表的新一代空间智能技术，正在将现实世界的数字化过程自动化。三维内容的创造将从手工依赖向自动化、规模化生产方式的转变，成本呈数量级下降，为构建大规模、高丰

富度的虚拟世界提供了可持续的内容生产力。

重新定义人机交互智能化体验范式。 过往的 XR 体验常因虚拟内容与物理环境割裂而缺乏真实感。空间智能通过实时环境理解与空间计算，赋予设备（如 AR 眼镜）精准感知物理空间结构的能力，使数字信息更自然地融入到物理环境中。这将人机交互升维为三维场景中的空间性操作与自然对话，这种场景交互的普及，将彻底释放生产力与创造力，催生全新的社交、娱乐、办公与商业形态。

总结而言，空间智能通过解决三维内容自动化生成与虚实空间无缝融合两大根本问题，正在将元宇宙从概念与愿景，扎实地推向可运营、可增殖的产业现实。它不仅是构建虚拟世界的工具，更是驱动数字内容生产革命与下一代互联网交互范式变革的核心引擎，其价值将直接体现在未来数字经济的规模与活力之上。

1.4.4 国家战略基石：空间智能塑造未来核心竞争力

空间智能的战略意义已超越单纯的技术演进范畴，正成为关乎国家长期发展、产业安全与国际竞争格局的关键技术与战略制高点。

巩固物理空间的国家安全与行动自主。 在国防安全领域，空间智能是突破传统作战边界的核心。它使未来的无人系统能在卫星通信中断的复杂环境下，依靠自主环境感知与决策完成关键任务，从根本上改变攻防平衡，是构建决胜于未战的非对称优势的关键技术。同时，该技术赋能对国家电网、交通枢纽、通信干线等命脉设施的自动化、智能化巡检与预警，是从被动防护转向主动韧性防御，保障经济社会稳定运行的基石。

掌控数字空间的认知优势与决策权。 未来的情报优势与战略决策将日益依赖对海量空间数据的实时解译。空间智能能够从卫星影像、无人机视频等数据中，自动重构三维战场、识别伪装目标、预测行动轨迹，将信息优势转化为可计算、可推演的认知优势。这不仅是防务领域的变革，更关乎在重大危机（如自然灾害、公共卫生事件）中，为国家决策层提供超越传统的时空分析与态势预判能力。

主导技术融合时代的产业创新源头。 空间智能是人工智能与实体经济深度融合的关键接口，是孵化自动驾驶、具身智能机器人等颠覆性产业的核心驱动力。自主掌握该技术体系，意味着能够控制从技术研发到

产业应用的完整价值链，确保国家在高端制造、智能装备等核心产业领域的技术主权与供应链安全，从而在全球新一轮产业变革中占据战略制高点。

因此，发展空间智能是保障主权安全、维护发展自主、参与塑造未来世界秩序的基础性战略能力。对此领域的布局深度与推进速度，将直接影响一个国家在智能时代的战略地位。

1.5 现实挑战：多维发展问题制约规模化应用

尽管空间智能已成为驱动产业变革与技术升级的重要方向，但其规模化落地仍面临多重现实制约。当前，我国空间智能发展在政策标准、技术创新、生态体系与监管治理等层面存在诸多瓶颈，既影响技术效能释放，也制约产业高质量发展。系统梳理并破除这些瓶颈，是推动空间智能从技术探索走向成熟应用的关键所在。

1.5.1 政策标准：政策体系与标准规范滞后

一是专项政策匮乏。当前针对空间智能技术的专项扶持政策供给不足，未形成覆盖技术研发、场景落地、产业培育的全链条支持体系；二是基础标准缺失。作为新兴领域，空间智能尚未建立统一的术语定义、系统架构、功能要求等基础性规范，导致技术体系混乱；三是核心技术标准缺位。空间感知精度、实时交互延迟、三维重建质量等缺乏行业公认标准，制约产业规模化发展。

1.5.2 技术创新：顶层设计与体系存在短板

一是技术战略布局不清晰。空间智能领域缺乏系统性的技术发展路线图，各技术方向的研究重点与发展路径尚未明确，导致创新资源分散、重复建设。二是关键共性技术攻关机制不健全。基础算法框架、开发工具链、评测验证环境等共性支撑平台建设滞后，产学研用协同攻关机制尚未形成。三是创新资源配置与产业需求脱节。现有投入多聚焦单一技术点突破，缺乏对系统性创新的整体谋划，基础研究与应用转化之间存在断层。

1.5.3 生态体系：基础工具与协同机制不足

一是基础研发平台薄弱。缺乏通用基础模型与公共开发平台等底层支撑，研发资源分散、技术门槛高企，制约创新效率。二是空间数据流通机制缺失。数据权属、价值评估、流通制度尚不健全，优质数据供给不足，制约上层应用创新。三是成果产业化链条不畅。技术到产品的转化机制不完善，复合型人才储备不足，创新成果市场转化难，尚未形成良性产业循环。

1.5.4 监管治理：安全隐私与伦理亟待完善

一是空间数据监管面临挑战。高精度空间数据的采集、存储和使用涉及国家安全，现有防护体系对动态交互场景下的数据跨境流动、实时共享等缺乏有效的技术监管手段；二是个人隐私数据泄露风险。空间数据可能涉及个人的精确位置、运动轨迹、空间行为等隐私信息，防止这些信息被滥用或泄露面临挑战。三是空间智能算法治理与伦理规范缺失，算法决策缺乏透明度与可问责性，可能导致空间资源分配不公、空间行为歧视等伦理风险。

第2章 全球发展情况

空间智能作为构建元宇宙虚实融合世界的核心技术支柱，其发展深度关联着元宇宙与人工智能、三维感知、交互及建模技术的系统集成，已成为驱动全球数字化转型与下一代互联网形态演进的关键竞争领域。空间智能是数字经济与实体经济融合的一个有效抓手，在一定程度上反映了国家的数字经济发展水平和城市治理能力，为行业数字化转型升级提供基础技术支持。以下从政策引导、技术创新、行业应用、标准规范四大维度，系统剖析国内外空间智能产业的发展态势、核心特征与差异化格局，为产业高质量发展提供参考依据。

2.1 全球政策加速布局，国内统筹协同推进

当前，空间智能已成为全球科技竞争与数字经济发展的关键赛道，世界主要经济体纷纷从国家战略层面加快政策布局，在技术创新、产业应用、安全合规等方面同步发力，推动空间感知、定位导航、虚实融合、智能决策等核心技术快速落地。我国立足新型工业化与数字中国建设总体部署，坚持顶层设计与地方实践相结合、技术自主与场景开放相统筹，形成多部门协同、全链条支撑的政策推进体系，为空间智能产业高质量发展提供了坚实制度保障。

2.1.1 国际政策布局——创新合规同步、各国加快布局

全球主要经济体纷纷将空间智能纳入战略布局，以政策红利推动技术研发与产业落地，形成各具特色的发展导向，部分国家还通过跨区域合作、专项基金扶持等方式强化产业竞争力。

美国：系统性战略布局与多领域协同发展。以“技术霸权与市场驱动”为双核心，未出台专门针对空间智能的专项政策，而是依托顶层设计与系统性战略布局，间接扶持空间智能核心技术突破与产业落地。2025年7月，美国政府发布《赢得竞赛：美国人工智能行动计划》，将人工智能定位为下一代制造业变革核心引擎，强化算力、算法与数据基础设施

建设，为空间智能提供底层技术支撑，推动智能制造、自动驾驶等空间感知与物理交互类创新。美国信息技术与创新基金会发布《行动时刻：加强美国机器人产业政策》报告，聚焦破解机器人产业“研发强、产业弱”瓶颈，呼吁出台国家机器人战略。机器人高度依赖环境建模、定位导航、动态交互等空间智能能力，该政策从产业转化层面强化空间智能技术应用。2025年4月，美国交通部发布《关于自动驾驶车辆豁免计划的国内豁免》政策，放宽本土自动驾驶车辆安全准入要求，简化豁免流程，加速无人车上路测试与部署。政策直接驱动高精度定位、全域空间感知、动态路径规划等空间智能核心技术规模化落地。《美国沉浸式技术领导法案》推动VR/AR/MR等沉浸式技术研发与应用，支持虚实融合、三维空间重建、人机空间交互技术发展，夯实空间智能在消费与工业场景的技术生态基础。

欧盟：跨国协同与绿色转型双重牵引。2025年4月9日，欧盟委员会发布《人工智能大陆行动计划》，致力于成为全球AI领导者。该计划旨在加速战略行业AI应用（制造业、医疗等）。早在2021年，欧盟委员会发布《2030数字罗盘：欧洲数字十年之路》，将元宇宙和XR技术视为未来数字经济的核心组成部分，提出到2030年推动欧盟在数字主权、数据共享和虚拟空间应用方面成为全球领导者；2023年出台的“地平线欧洲计划”包含了虚拟世界的候选项目，这些项目可能在2025年开始，以促进研究并为虚拟世界开发工业和技术路线图。例如，欧盟“智慧城市和社区创新伙伴关系”项目已资助20余个跨国智慧城市试点，通过空间智能技术实现能源消耗优化、交通流量调度、环境质量监测等目标；“欧洲高性能计算联合计划”（EuroHPC）构建的20个超算节点，为空间智能模型训练、三维场景渲染提供算力支撑，其中LUMI超算以100%绿电供应成为全球绿色算力标杆。

加拿大：主权安全框架下的审慎发展路径。加拿大未出台空间智能专项政策，但相关智能领域政策为空间智能发展提供了间接支撑。2024年，加拿大颁布《泛加拿大人工智能战略》《加拿大主权人工智能计算战略》，通过两项战略的协同布局，构建了从核心技术研发到产业落地的完整创新链条。2025年初，加拿大交通部发布《加拿大互联和自动驾驶汽车安全框架2.0》，推动自动驾驶落地，而自动驾驶所需的高精度定位、全域空间感知等，正是空间智能关键技术，倒逼技术迭代落地。此外，加拿

大更新《加拿大投资法》，对 VR 等互动数字媒体领域外国投资实施严格审查，VR 依赖的三维空间重建、虚实融合等技术属于空间智能范畴，该政策既保障本土空间智能安全，也推动其与沉浸式技术协同发展。

沙特阿拉伯：国家战略牵引与资本驱动并进。沙特以“沙特愿景 2030”为国家顶层战略，将空间智能作为摆脱石油依赖、构建数字经济的重要抓手，走出一条“战略统领 + 资本投入 + 超级项目承载”的跨越式发展路径。其特点体现在三个层面：一是以国家级机构统筹推进，由数据与人工智能局（SDAIA）统一规划，将空间智能嵌入智慧城市、文旅升级、农业现代化等国家战略优先领域；二是以大规模资本投入换时间，投入超 200 亿美元建设数字基础设施，吸引微软、华为等全球科技巨头设立区域研发中心，快速引入前沿技术与产业生态，缩短技术追赶周期；三是以超级项目为场景载体，NEOM 未来城、红海旅游项目等巨型工程为空间智能提供试验场，推动空间智能与元宇宙技术融合，目标直指中东地区数字经济枢纽。

日本：社会问题驱动的精细化实施路径。日本是全球智慧城市建设的先行者，其国家战略以社会 5.0 为核心愿景，通过空间智能驱动网络空间与物理现实的高度融合，在推动经济增长的同时，系统性应对少子老龄化、城市过密化等空间治理难题。东京都都市整备局 2022 年 3 月发布《面向自动驾驶社会的城市构想》，以空间智能相关技术重构道路资源配置与城市空间利用，通过高精度定位、车路协同与动态空间调度技术，释放更多公共空间并激活道路活力。2024 年，日本相继出台可落地的《智慧城市建设路线图》，并配套发布作为空间智能数据底座的《地理空间数据合作基础》，标志着其智慧城市体系进入以空间数据治理、三维城市模型、全域空间感知为核心的精细化实施阶段。

韩国：城市数字化先行引领应用落地。韩国政府于 2024 年发布《第四次智慧城市建设综合规划（2024-2028 年）》，标志着其智慧城市战略进入了全新的发展阶段。该规划提出了四大核心战略，包括扩大可持续空间模型、构建由 AI 和数据驱动的城市基础、创建对市民友好的产业生态系统、推动智慧城市全球化。早在 2022 年 1 月韩国发布《元宇宙新产业引领战略》加强数字基础设施的建设，2023 年建立了 S-Map（Virtual Seoul），其功能包括分析空间环境情况、模拟和预测空间变化、基于空间

数据构建市民参与式个性化服务等。

2.1.2 国内政策环境——顶层设计引领、地方特色落地

我国空间智能产业政策呈现“顶层设计引领、地方特色落地、跨部门协同推进”的鲜明特征，形成全方位、多层次的政策支持体系，既注重核心技术自主化，也强调场景规模化落地。

国家层面：场景驱动与体系化布局并举。 工信部等五部门印发《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023—2025 年）》，提出工业元宇宙+工厂，布局建设工厂级元宇宙平台，打造低时延、高保真、智能决策的数字孪生系统，推动了制造业向数智化发展的深度转型；打造适用元宇宙的智能内容生产工具，发展智能采集、智能渲染、智能生成，提高内容生产效率和质量，促进了元宇宙中智能内容生产技术的体系化创新；这一计划加速了数字空间构建与物理世界经济的融合进程，为中国抢占未来智能产业的制高点筑牢了根基。2024 年，工信部等七部门发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》，指出加快工业元宇宙、生物制造等新兴场景推广，以场景创新驱动制造业转型升级。通过推广新兴场景应用，带动相关智能技术与产业深度融合，为后续空间相关智能技术的落地创造有利环境。

2025 年 8 月，国务院发布《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》，提高空天地海一体化动态感知和国土空间智慧规划水平，强化资源要素优化配置。提升人工智能驱动的监测预测、模拟推演、问题处置等能力，推动构建智能协同的精准治理模式。加快人工智能与元宇宙、低空飞行等技术融合和产品创新，探索智能产品新形态。通过推动多技术融合创新，进一步完善空间相关智能技术的应用生态。2025 年 11 月，国务院办公厅发布《关于加快场景培育和开放推动新场景大规模应用的实施意见》，在办公、社交、消费、娱乐等领域探索应用元宇宙、虚拟现实、智能算力、机器人等技术创新应用场景，推动实体经济和数字经济深度融合。加强仓配运智能一体化、数字孪生等技术应用，创新无人运输、无人装卸、无人配送、智慧仓储等应用场景。以多领域场景创新为抓手，推动空间相关技术与实体经济深度结合。

2025 年 12 月，工信部联合七部门出台《“人工智能+制造”专项行

动实施意见》，并配套制定了行业转型指引和企业应用指南。加强对类脑智能、世界模型等前沿技术探索。形成一批具备感知、决策和执行能力的工业智能体，推动智能制造从“自动化”向“自主化”演进。通过前沿技术探索与工业智能体培育，持续完善空间智能技术的感知、决策与执行能力。

地方层面：探索起步，重点省市率先布局。 空间智能作为新兴技术领域，各地方省市针对空间智能的专项政策仍较为稀缺，仅少数地区出台相关配套举措，多数省市仍处于探索阶段。2025 年 12 月，江苏省印发《江苏省“人工智能+”行动方案》，提出探索建设自动驾驶空间智能与世界模型创新平台，鼓励新型模型底层架构研发应用，加快世界模型、空间智能等前沿新技术发展。上海市规划和自然资源局印发《上海城市空间治理领域人工智能应用暨量子城市空间智能建设工作实施方案（2026—2027 年）》，提出建设城市空间治理大模型，研发空间生成和仿真推演类场景。将空间智能技术与城市治理相结合，实现城市安全底线保障与监测预警。深圳市工信局印发《深圳市加快打造人工智能先锋城市行动计划（2025—2026 年）》，提出支持企业加强高效推理模型、全模态模型、空间智能模型等核心突破，已取得核心技术领跑的显著成效，为深圳智能化产业升级与全球先锋城市建设注入了强劲动能。

2.2 国外基础研究领先，国内技术创新提速

空间智能技术正处于“数据驱动+模型驱动”双轮驱动的爆发期，核心技术体系围绕 3D 视觉处理、空间理解、世界模型、空间交互构建四大核心板块持续迭代升级，已构建起从数据采集到场景应用的完整技术体系，推动元宇宙从数字领域向虚实融合深度渗透。随着高精度传感、三维重建、空间大模型等技术的升级与融合，空间智能技术正实现从静态建模向动态交互、从单一场景适配向多元场景协同、从被动感知向主动决策的跨越式发展，算力瓶颈持续缓解，应用门槛不断降低，为产业规模化落地奠定了坚实的技术基础。

2.2.1 空间感知与三维重建：高精度数据采集与建模体系日趋成熟

空间感知与三维重建是空间智能技术的基础支撑环节，核心使命是通过多源传感器融合与算法优化，将物理空间信息转化为机器可识别、可处理的三维数据，为后续空间计算、数字孪生构建及人机交互提供精准数据底座。

一、技术突破方向

在核心技术发展过程中，聚焦多传感器融合技术优化、即时定位与地图构建（SLAM）技术升级、三维重建技术革新等技术核心取得一系列重点突破。

多传感器融合技术优化：当前形成以激光雷达（LiDAR）、视觉传感器（双目/ToF）、惯性导航（IMU）与卫星定位（GNSS）为核心的融合感知体系，通过数据互补提升在弱光、动态、大尺度等复杂场景下的感知鲁棒性与精度。

即时定位与地图构建 SLAM 技术升级：从传统视觉/激光 SLAM 向语义 SLAM、动态 SLAM 演进，实现同步定位、建图与场景语义理解，支撑机器人、AR 设备等在动态环境中的自主导航与交互。

三维重建技术革新：基于运动恢复结构（SFM）、多视图立体视觉（MVS）的传统建模技术已实现规模化应用，而 3D 高斯点云（3DGS）、神经辐射场（NeRF）等新兴技术的突破，大幅提升了三维建模的精度、效率与渲染效果，可实现毫米级场景细节还原，打破了传统技术在复杂纹理、动态物体建模中的瓶颈。

二、技术进展现状

当前硬件层面，LiDAR 设备实现成本大幅下降、体积微型化，消费级终端已逐步搭载 ToF 与结构光传感器，硬件普及度显著提升；算法层面，深度学习技术与点云处理、动态物体追踪深度融合，弱纹理区域、复杂光照环境下的数据匹配能力显著增强，建模准确率与实时性同步提升；应用层面，已在自动驾驶环境感知、工业部件精密检测、文物数字化保护、建筑工程建模等领域形成成熟应用方案，落地成效显著。

未来实时动态三维重建、轻量化建模算法、跨尺度建模（从微观物体到城市级宏观场景）将成为核心研发方向，旨在进一步提升感知系统的

普适性、高效性与精准度，推动空间感知技术从专业领域向消费级、民生级场景渗透。

2.2.2 空间理解与推理决策：实时语义解析与决策能力持续升级

空间理解与推理决策是空间智能的核心能力，也是元宇宙空间交互、自主智能体、虚实融合系统的关键中枢。它不再局限于三维几何的解析与重建，而是通过对空间结构、物体关系、环境规则与行为意图的统一建模，实现从观察到“理解-推演-决策”的能力跃迁，为元宇宙交互、自主导航、机器人作业、沉浸式体验提供底层智能支撑。

一、技术突破方向

空间关系解析技术完善：从传统几何拓扑分析，升级为基于三维表征的空间关系理解，可自动识别物体间的位置、遮挡、支撑、可达性、连通性等结构化关系，形成人类可理解、机器可执行的空间知识表达，为路径规划、避障、人机协同、空间交互提供基础依据。

语义场景理解技术升级：依托多模态大模型与三维视觉技术，实现从像素、点云识别到场景语义化理解。可自动区分空间功能、危险区域、作业区域、通行区域，将物理空间转化为带语义、带规则、带意图的可交互场景，支撑自然语言操控、智能空间推荐与沉浸式体验。

空间推理与前瞻决策：不再依赖传统单一路径规划算法，而是转向基于世界模型的动态推理与反事实仿真：通过对环境变化、物体运动、多主体行为进行实时推演，预判空间趋势与潜在风险，实现更鲁棒的动态避障、多智能体协同与自主任务决策，显著提升复杂开放场景下的可靠性。

空间大模型与统一空间表征：以空间基础模型（SFM/Spatial Foundation Model）为代表，融合多源空间数据，具备统一空间表征、跨场景泛化、少样本空间理解、定位与补全能力，成为空间智能的通用空间大脑，替代传统单一功能算法，支撑从微型场景到城市级空间的理解与决策。

二、技术进展现状

当前，空间理解与推理决策已从实验室走向智能制造、具身机器人、自动驾驶等真实场景。多模态数据的实时语义解析效率大幅提升，对复杂动态环境的适应能力显著增强，可满足这些应用场景对实时性、自主

性的需求。空间大模型与地理信息系统（GIS）深度融合，推动 GIS 软件从传统手动操作向自然交互、自主执行方向转型，空间智能体已在城市管理、地理勘测等行业场景初步应用。

未来空间基础模型与大语言模型（LLM）深度协同，将实现自然语言驱动的空间理解、推理与操控，大幅降低元宇宙与空间智能的使用门槛；同时强化时空联合推理与世界模型实时迭代，提升对动态、开放、长时序场景的预判与决策能力，支撑更高自主性、更高沉浸感的下一代空间智能生态。

2.2.3 世界模型与仿真演化：动态仿真与生成式建模能力逐步完善

世界模型与仿真演化是空间智能技术的核心应用载体，其核心是构建物理实体的全要素虚拟副本，通过实时数据同步、物理规则仿真与推演优化，实现对物理系统的全生命周期监控、预测与管控，是打通虚实融合的关键环节。

一、技术突破方向

世界模型构建技术迭代：融合激光扫描、倾斜摄影、多视图重建与空间多模态数据，依托生成式空间智能实现三维场景自动化建模与持续进化，可支撑 LOD3 级以上高精度空间表征；通过动态时序更新与空间一致性约束，实现虚拟世界与物理空间的精准对齐，为元宇宙提供可生长、可交互的空间底座。

实时数据同步技术更新：依托物联网（IoT）设备实现物理系统运行状态、环境参数的全面采集，结合边缘计算技术降低数据传输延迟，构建“物理采集 - 边缘处理 - 云端同步 - 模型更新”的实时数据链路，确保虚拟模型与物理实体的动态同步。

物理引擎仿真技术突破：内嵌重力、碰撞、运动、流体等物理规则与空间因果逻辑，构建高可信仿真推演环境；支持物体交互、行为预测、事件演化、工程工况的精准模拟，为元宇宙中的方案验证、风险预演、体验交互提供可推理、可预测、可复现的虚拟试验场。

二、技术进展现状

世界模型与仿真演化技术已成为元宇宙落地的核心支撑，在数字空间构建、沉浸式交互、产业元宇宙、XR 内容生产等领域规模化应用。元

宇宙园区、虚拟场馆、沉浸式文旅、工业仿真演练等场景，均基于世界模型完成可交互空间搭建与动态推演，显著提升场景真实感、交互自由度与运行效率。三维空间建模工具、实时渲染引擎、多模态空间大模型持续迭代，在生成效率、几何精度、物理一致性、长时序稳定等指标达到商用标准，大幅降低元宇宙内容开发与部署成本。未来将以统一空间表征为基础，推进跨场景世界模型互联互通，构建全域协同的元宇宙空间体系；强化世界模型的自主理解、动态推理与泛化能力，支撑更沉浸、更智能、更开放的下一代元宇宙生态。

2.2.4 空间交互与虚实融合：自然协同与沉浸式交互技术持续突破

空间交互与虚实融合是空间智能技术的落地接口，核心是构建人与三维空间、虚拟世界与物理世界的高效交互通道，通过技术创新实现自然化、沉浸式、协同化交互体验，持续拓展空间智能技术的应用边界。

一、技术突破方向

扩展现实（XR）交互技术成熟：AR/VR/MR 设备逐步实现轻量化、高清化、低延迟化，眼动追踪、手势识别、语音交互等自然交互技术日趋成熟，可实现虚实物体的精准叠加、实时交互，打破传统交互的空间局限，为 3D 类内容原生消费打开更大市场空间。

具身智能交互技术实现突破：智能机器人、无人机等具身智能体融合空间感知、路径规划与力觉反馈技术，可与人协同完成精密装配、医疗手术、危险环境作业等复杂任务，实现人机交互从“指令操作”到“协同协作”的升级。目前具身智能整体成熟度较低，头部企业即将启动生产环境实验，未来有望成为空间智能规模最大的应用领域。

空间智能体应用逐步普及：基于自然语言处理与空间计算能力，可响应人类自然语言指令，自主完成地图绘制、空间分析、任务规划与工具调用，大幅降低空间智能技术的应用门槛，提升交互效率。

二、技术进展现状

XR 设备已成为消费级市场热点，同时在工业培训、医疗教学、数字文旅等领域形成专业化应用方案；具身智能交互技术在工业协作、医疗辅助等场景逐步落地，人机协同效率显著提升；空间智能体与 GIS、办公软件的融合加速，推动传统软件从手动操作向智能化服务转型，进一步



图 2.1: 空间智能产业图谱

拓展了空间智能技术的应用场景。

后续将重点突破脑机接口、神经交互等前沿技术，进一步提升空间交互的自然度与精准度；同时持续拓展虚实融合应用场景，推动虚拟办公、数字文旅、智能座舱等场景的规模化落地，构建“虚实共生”的全新生产生活方式。

2.3 国外场景深度渗透，国内落地更具规模

空间智能产业已形成结构清晰、协同联动的“上游核心硬件与算力—中游技术研发与集成—下游行业应用与服务”的全产业链体系。空间智能的产业图谱如图2.1所示。

2.3.1 国际市场：聚焦前沿创新与应用消费端变革

国际市场空间智能产业链由全球科技巨头主导，呈现出“上游核心技术垄断、中游平台生态壁垒、下游消费与工业双轮驱动”的鲜明特征。上游以美国、欧洲、日本企业为核心，掌控高端传感器、AI 芯片及云基

基础设施的技术标准与供给；中游凭借达索系统、西门子、Unity 等工业软件与三维引擎平台，构建了从基础算法到数字孪生的完整工具链；下游应用则聚焦前沿技术商业化，在自动驾驶、工业数字化、虚拟现实等领域引领全球创新浪潮。

典型代表方面：上游硬件与算力层包括法雷奥（车载激光雷达）、Trimble（高精度定位）、英伟达（AI 训练芯片）、索尼（消费级传感器）以及亚马逊 AWS、微软 Azure、谷歌云（云端算力）；中游平台与集成层涵盖达索系统（3DEXPERIENCE）、西门子（Xcelerator 与 MindSphere）、Unity 和 Epic Games（三维引擎）、OpenAI（AI 世界模型）及 Waymo（空间推理算法）；下游应用层则涌现出 Waymo 与 Cruise（自动驾驶）、特斯拉（量产车 FSD）、Meta 与苹果（XR 生态）、西门子与达索（工业数字孪生）等标杆企业，共同推动空间智能技术从实验室走向大规模商用场景。

2.3.2 国内市场：赋能实体经济与产业数字化转型

国内空间智能应用呈现出鲜明的“政策引导-技术支撑-场景落地-产业升级”发展特征，强调技术对实体经济的深度赋能。在国家“东数西算”、“数字中国”等战略工程推动下，空间智能技术已在城市治理、低空经济、工业能源等国计民生关键领域形成规模化落地，商业化进程全面加速。

2.3.2.1 上游产业：核心硬件与算力，筑牢产业技术根基

上游是空间智能产业的动力源泉与基础载体，核心涵盖硬件端的算力、存储、网络、传感器等基础设施与数据，以及软件端的引擎技术，软硬件技术能力直接决定产业运行的精度、效率与稳定性，形成“高端技术垄断、中低端技术普惠”的分层竞争格局。

(1) 基础设施与数据厂商

空间智能的基础设施可分为算力、存储、网络、传感网络四类，每一类均有国内主要厂商布局，因此，基础设施与数据可根据其核心产品与技术路线进一步细分如下：

- **算力厂商**：通用计算与 AI 加速芯片：华为（Ascend 系列 AI 芯片、MDC 车载平台）、海光信息（DCU 系列）、壁仞科技（BR100 系列）。

专用 AI 芯片：寒武纪（云边端全系列）、沐曦集成电路（高效推理芯片）云端算力与服务：阿里云（含光）、腾讯云（紫霄）、华为云、百度智能云（昆仑芯），以及字节跳动、小鹏汽车等垂直整合的自研芯片厂商。

- **存储厂商**：存储介质与芯片：长江存储（NAND 闪存）、长鑫存储（DRAM 内存）。全栈存储系统：华为、浪潮信息、新华三、宏杉科技、曙光信息。云存储与软件定义存储：阿里云、腾讯云、百度智能云的对象存储服务；XSKY 星辰天合、杉岩数据的分布式存储软件。
- **网络厂商**：华为、中兴通讯（核心路由交换、5G 接入）、新华三、锐捷网络（企业级与数据中心网络）、信锐技术（Wi-Fi 与物联网接入）。
- **传感器厂商**：激光雷达：禾赛科技、速腾聚创（车载及机器人市场）、北醒光子、览沃科技（高端测绘与工业领域）。视觉传感器：豪威集团、格科微（CMOS 图像传感器）、海康威视、大华股份（工业相机与智能视觉解决方案）。毫米波雷达：德赛西威、华域汽车（前装车载雷达）、森思泰克（高级辅助驾驶雷达）、几何伙伴、纵目科技（4D 成像雷达等前沿方向）。定位与惯性导航：司南导航、导远电子（高精度 GNSS 模块与车规级 IMU）、芯动联科、北京开拓航宇（高性能航空与工业级 IMU）、北云科技、戴世智能（组合导航定位）。
- **数据厂商**：阿里云依托 Ganos 全空间位置智能引擎，提供成熟的空间智能托管服务；腾讯云以时序数据库 CTSDB、WeMap 产业版及智驾云图，聚焦轨迹时序、高精地图与智驾时空数据全链路管理。华为、浪潮、苍穹数码、新华三提供专用软硬件一体机，适配不同规模空间智能场景。

(2) 关键引擎厂商

在空间智能体系中，关键引擎是构建数字世界的基础设施。根据其核心功能，可划分为以下四类：

- **几何引擎**：国内已形成商业内核、开源新兴内核与实时引擎内置几何系统三大自主可控体系。商业内核代表有华天软件 DGM、中望软件 OverDrive、九韶智能 AMCAX、数码大方 CAXA 鲲鹏，具备完整几何建模与约束求解能力，应用于航空航天、汽车等高端领域。开源与新兴内核以 AnyCAD、求解科技 DM-Pillar 为代表，支撑科研与工业

软件开发。实时引擎内置几何系统如三岳数维 i3D Act、Cocos、网易 Messiah，满足数字孪生、AR/VR 等场景的轻量化实时建模需求。

- **渲染引擎**：负责将空间数据转化为可视化、可交互的三维场景，核心价值在于大规模空间信息可视化、实时交互支撑及多终端适配。国内知名渲染引擎包括：北京微视威 ViWo 引擎（专注虚拟仿真与三维可视化）、光线云 RAYSENGINE（端云协同架构平衡性能与成本）、渲光科技 Lumverse 3D（覆盖游戏、智慧城市、数字孪生，已通过信创认证）。
- **物理（规则）引擎**：通过复刻现实世界物理法则（碰撞、重力、流体等）并定义空间行为规则，实现虚实联动与决策支撑。国内代表有：松应科技 ORCA 物理 AI 系统（国内唯一对标英伟达 Omniverse，成本仅为国外 1/3，已商业化）、字节跳动 Seed3D 1.0（兼具物理模拟精确性与可扩展性的 3D 基础模型）、云境智仿 Simversus（首款云原生高性能 CAE 协同仿真平台）。
- **交互规划引擎**：为机器人或智能体生成动作序列，解决“如何安全高效完成交互任务”。华为（ModelArts Robotics 云端协同）、腾讯（Robotics X 灵巧操作与导航算法）、宇树科技与大疆（整机厂商自研高性能实时规划软件）等均有深度布局。

2.3.2.2 中游产业：技术研发与系统集成，打通技术落地通道

中游产业是技术产品化与方案化的关键环节，致力于将上游的硬件与算力能力，转化为面向下游具体场景的、稳定可靠的解决方案。该环节竞争格局分散，既有全球性的工业软件与平台巨头，也有大量聚焦垂直领域的专业集成商。

（1）空间感知主要厂商

在空间智能的感知层，主要厂商根据技术专长分类如下：

- **高精度定位与导航**：千寻位置提供厘米级定位服务；华为、华测导航聚焦车载高精度融合定位；腾讯、百度、高德通过高精地图提供定位基准。
- **多传感器融合算法**：华为 MDC 平台集成完整融合软件；百度 Apollo 自研 L4 级全栈融合算法（以整车方案交付）；Momenta 以视觉为核

心融合多传感器，提供感知 + 决策方案。

- **激光雷达**：禾赛科技、速腾聚创已大规模量产，应用于智驾与低空经济；图达通作为蔚来核心供应商，适配高阶自动驾驶。
- **视觉传感器**：豪威集团、海康威视、大华股份提供智能视觉方案与工业相机，适配空间监测与安防。
- **毫米波雷达**：德赛西威、华域汽车深耕车载毫米波雷达；德赛西威与华为同时是 4D 成像雷达核心厂商。

(2) 空间建模主要厂商

在空间智能的建模层，主要厂商根据核心技术方向分为三类：

- **空间表征技术**：实时 3D 引擎 LayaAir、腾讯 QuickSilver 提供广泛应用的交互与表征平台；广联达、构力科技 PKPM-BIM 定义 BIM 专业标准；CAXA 材质云、影眸 Hyper3D 主导 3D 材质与资产创作管理。
- **场景生成技术**：腾讯混元 3D、字节 Seed3D 研究图像到 3D 生成；智谱 AI、生数科技引领文本 / 图像到 3D 方向；昆仑万维 Matrix-Zero 提供 AI 场景布局工具；创业公司 Tripo AI、Neural4D 专注 2D 转 3D 模型。
- **空间重建技术**：大疆智图提供无人机影像实景三维建模；瞰景科技 Smart3D 为领先实景建模软件；商汤琮宇 SenseSpace 支持点云与照片重建；天际航 DP-Smart、众趣科技提供从影像到实景模型服务；奥比中光 3D 扫描方案专注三维扫描重建。

(3) 空间认知主要厂商

根据功能方向，主要厂商可分为以下三类：

- **感知与场景解析**：云服务商（阿里云、腾讯云、百度智能云）提供通用视觉 API；研究机构（商汤科技、智谱 AI）以多模态大模型推动开放世界理解。
- **物理功能与规则理解**：工业软件（中望软件、索辰科技、安世亚太）内置物理建模能力；机器人公司（宇树科技、智元机器人、逐际动力）通过具身交互实现物理功能理解；AI 实验室（智谱 AI、百度飞桨）在基于物理的推理上取得突破；AI 企业（科大讯飞、腾讯 AI Lab）正积极探索常识知识与物理推理的融合路径。
- **动态交互与行为预测**：自动驾驶企业（华为 ADS、地平线、小鹏 XNGP）

在轨迹预测与交互理解方面持续突破，学术机构（清华大学、北京大学）与开源社区（智源研究院）在基础算法层面保持前沿输出，机器人公司（追觅科技、小米）已将交互决策能力落地于消费级产品中。

(4) 空间决策主要厂商

在空间智能的决策层，核心技术集中于以下三类厂商：

- **意图理解与认知**：大模型与 AI 平台（智谱 AI、百度）提供多模态意图理解基础；自动驾驶公司（小马智行、蘑菇车联、百度 Apollo）在动态场景中实现实时意图预测；人机交互巨头（科大讯飞、华为小艺、小米小爱同学）专注语音、手势指令理解。
- **仿真验证与前沿研究**：仿真平台（智身科技 MATRiX）提供高保真物理环境；游戏引擎（LayaBox、Cocos 引擎）用于快速原型；前沿实验室（复旦大学可信具身智能研究院、天府绛溪实验室交互人形机器人前沿研究中心）以仿真驱动决策算法研究。
- **规划决策系统**：自动驾驶标杆（百度 Apollo、华为 ADS）的规划决策方案；数据驱动决策代表（蘑菇车联）；机器人整机（智元机器人、宇树科技、智身科技）集成实时决策能力。

(5) 空间交互主要厂商

在空间智能的交互层，核心技术绑定于机器人、自动化与 XR 硬件，主要厂商分为三类：

- **运动规划与控制框架**：开源平台（越疆科技 MyCobot OpenSDK）是国内机械臂开源领域标杆；仿真训练平台（光轮智能仿真平台/格物具身智能仿真平台）提供强化学习支持；公司自研方案（华为 ADS/机器人、智元机器人、宇树科技）集成于自身硬件。
- **核心执行部件**：伺服电机与控制器（汇川技术、埃斯顿）；机器人整机控制系统（宇树科技、智元机器人）实现一体化执行。
- **力觉感知与反馈**：力传感器（蓝点触控、海伯森技术）；柔顺执行器（柔触机器人）；力控反馈（傲鲨智能）应用于交互反馈与末端控制。

2.3.2.3 下游产业：行业应用与服务，实现技术价值变现

下游是产业链价值变现的核心环节，依托上游硬件算力与中游技术集成能力，空间智能技术已广泛渗透至国民经济和大众生活的多个领域。

相较于国际市场侧重深度应用开发与创新，国内更强调技术对实体经济的赋能。

(1) 自动驾驶主要厂商

在自动驾驶领域，主要厂商根据其技术路线和商业模式，可划分为四大阵营：

- **科技巨头与全栈方案商**：华为提供从芯片、传感器、MDC 域控制器到智驾算法、云服务的全栈式解决方案，并面向车企提供高阶智驾方案，以技术供应商模式深度合作。百度 Apollo 是中国自动驾驶开拓者，坚持“车企赋能”与 Robotaxi（萝卜快跑）双线并行。
- **传统车企与一级供应商**：上汽智己、广汽埃安是传统车企通过自主研发或独立子品牌进军高阶自动驾驶。宁德时代、德赛西威作为顶级 Tier 1，提供从传感器、执行器到域控制器的完整子系统。
- **特定场景与新兴力量**：小马智行、文远知行是中国 Robotaxi 领域的头部创业公司，已开展商业化运营。图森未来专注于干线物流场景的 L4 级自动驾驶卡车公司。毫末智行、大疆车载以前装量产、渐进式路线为核心，快速将智能驾驶功能搭载于量产车型。
- **关键部件与生态伙伴**：华为 MDC、地平线征程芯片是绝大多数高端智能驾驶汽车的计算平台标准。禾赛科技、速腾聚创是全球车载激光雷达市场的核心供应商。

(2) 智能制造主要厂商

在空间智能赋能的智能制造领域，主要厂商根据其技术路线和商业模式，可划分为三大阵营：

- **全栈方案商**：华为提供从空间感知硬件、工业级数字孪生平台到 AI 算法的全栈方案，深度赋能生产全流程。
- **制造龙头与智能升级引领者**：徐工集团深度融合空间智能与工业互联网，打造精益智能领航工厂，形成露天矿山、地下空间等场景的智能施工一体化方案；三一重工依托“18 号厂房”与根云平台，实现重型机械柔性生产与全流程可视化管控，全球建成超 35 座智能工厂；海尔通过卡奥斯 COSMOPlat 工业互联网平台，融合空间智能实现数字孪生重建与 AI 自适应优化，并对外输出解决方案，累计参与打造 17 座全球灯塔工厂。

- **特定场景与新兴力量**：飞渡科技以 DTS 数字孪生引擎和峥嵘空间智能大模型，提供多源空间数据融合与实时仿真服务，覆盖智慧工厂等场景，国内市场覆盖率达 78%。

(3) 智慧城市主要厂商

在智慧城市应用层，从事城市综合运营、环境监测与应急、智慧安防与治理的核心厂商，根据其技术路线与商业模式，可划分为以下四大阵营：

- **平台型科技巨头与全栈方案商**：华为以“城市数字孪生平台”与“一网统管”为核心，整合 GIS、BIM、IoT 数据，提供城市态势感知与模拟推演的技术底座。阿里云从“城市大脑”延伸至全周期运营，通过数据智能优化公共资源配置。腾讯“数字孪生云”聚焦低代码、高渲染的可视化运营，支撑指挥中心与智慧园区。科大讯飞依托“城市超脑”，以 AI 能力赋能政务服务与城市管理的智能化闭环处置。
- **城市级总包与集成商**：软通智慧、神州数码等头部集成商，承接整体智慧城市项目，提供从顶层规划、建设实施到运营维护的全链条服务，是项目落地的关键组织者。
- **专业领域解决方案商**：航天宏图、中科星图是国内遥感应用龙头，基于卫星遥感数据提供生态环境与灾害的宏观动态监测。辰安科技专注于公共安全与应急，其城市生命线监测预警平台是燃气、桥梁、供水等安全运行的核心系统。先河环保、雪迪龙通过地面传感网络，实现大气与水污染的精细化监测与溯源。大疆利用无人机搭载多光谱、热成像传感器，提供快速、灵活的环境勘查与应急指挥手段。
- **智能感知与垂直治理厂商**：海康威视、大华股份作为全球安防龙头，构建从前端摄像头、雷达到视频云平台的完整感知网络，覆盖社会治安与交通治理。宇视科技深耕视频物联，在社会综合治理领域积累深厚。高新兴、天地伟业等集成商深度结合公安业务，提供“雪亮工程”与社会面防控等专项方案。三大电信运营商依托 5G/光纤及物联网平台，为大规模视频联网与移动警务提供基础网络与云网服务。

(4) 空间智能体主要厂商

在空间智能体领域，主要厂商根据其技术路线和商业模式，可划分为两大阵营：

- **具身智能体**：宇树科技以高运动性能和低成本推出消费级双足、四足机器人；云深处科技的绝影机器狗主打工业级高防护、长续航、强环境适应；智元机器人强调具身智能与实用化。专用场景机器人方面，极智嘉、海康机器人主导 AMR 物流仓储自动化；云鲸智能、追觅科技从家用扫地机器人向移动机器人延伸。工业自动化与协作机器人方面，新时达深耕工业机器人领域，布局工规级具身智能机器人；优傲机器人开创协作机器人；中国节卡、遨博作为协作机器人提供商，发展迅速。
- **数字智能体**：垂直应用与全栈服务——腾讯 NExT Studios 提供高保真数字人与云渲染能力，应用于教育、文旅等行业；商汤科技、魔珐科技利用 CV 和 AI 驱动技术，提供从形象生成到多模态交互的全栈服务；百度希壤专注虚拟化身与数字身份生态；小冰公司依托 AI 情感计算框架推出深度对话和内容生成的数字人。

2.4 国际标准未成体系，国内布局初步建立

空间智能已成为虚实融合领域的核心使能技术，标准化是产业协同与规范发展的关键。当前国际尚未形成统一体系，相关工作分散于元宇宙、空间计算等领域，多组织分头推进；国内已完成顶层统筹，构建起层级清晰、协同推进的标准格局。本章分别梳理国内外进展并开展对比分析，为我国空间智能标准化体系建设提供支撑。

2.4.1 国际标准——多组织协同、技术导向鲜明

国际空间智能标准的研制主要聚焦空间建模、空间渲染、智能推演等核心环节，由 ISO、IEC、ITU 等权威机构主导，形成体系化与分层化布局，构建跨行业、跨技术路线的通用基础与互联互通框架。现阶段，ISO 空间智能相关研究主要在各分技术领域，如人工智能（ISO/IEC JTC1 SC42）、云计算（ISO/IEC JTC1 SC38）、空间建模相关的（ISO/IEC JTC 1/SC24 计算机图形、图像处理和图像数据表示和 SC29 音频、图像、多媒体和超媒体信息）等技术委员会及工作组承担，尚未有组织系统性开展空间智能标准化研究。

元宇宙标准论坛（Metaverse Standards Forum，简称 MSF）成立于 2022

年6月，创始成员包括Meta、微软、Epic Games、Adobe、英伟达、索尼、Unity、阿里巴巴、华为等科技巨头。这些公司和组织共同致力于制定行业标准，推动元宇宙的互操作性。MSF关注的关键技术和领域包括3D资产和渲染、AR和VR、分布式信任和存储、互操作的3D物体和虚拟形象。MSF成员驱动元宇宙互操作项目的研究和讨论，如Siemens和NVIDIA等牵头成立的工业元宇宙互操作工作组。Telefonica等牵头成立的元宇宙的伦理原则及其实施探索组。Microsoft、Inclusive Reality、XR Access牵头设立元宇宙中的可访问性探索组等。

2022年9月IEEE标准协会(IEEE SA)的标准理事会批准了原IEEE虚拟现实与增强现实标准委员会(IEEE Virtual Reality and Augmented Reality Standards Committee)正式更名为IEEE元宇宙标准委员会，这是全球主要标准组织中第一个专注于推进元宇宙相关技术和应用的委员会，在研标准关注元宇宙术语、定义和分类，移动设备增强现实标准，元宇宙身份框架，元宇宙系统符合道德的设计和操作系统标准等内容。

开放元宇宙联盟(Open Metaverse Alliance of Web3，简称OMA3)于2022年7月成立，旨在实现元宇宙在统一系统下的运作，让用户能够自由跨界转移资产。成员单位包括Animoca Brands、The Sandbox、Decentraland等多家行业巨头，涵盖游戏、区块链和NFT等众多领域，致力于推动元宇宙的开放性与互操作性。OMA3以去中心化自治组织(DAO)形式运作，设立多个工作组，如门户与映射、资产转移和法律工作组，支持虚拟土地、身份、数字资产和服务的高度互操作性，并确保社区透明度。

2023年1月12日，IEC/SMB(国际电工委员会/标准化管理委员会)批复成立IEC SEG 15(元宇宙标准化评估组)，以探索IEC在元宇宙领域的标准化机会，任命中国专家和美国专家担任联合召集人。同年4月，IEC SEG 15转为ISO/IEC JSEG 15(ISO/IEC元宇宙联合标准化评估组)，目前评估组已形成研究报告，未涉及空间智能核心研究。2023年7月4日，OMA3创建名“Inter-World Portaling System”的项目，即构建世界间门户系统(IWPS)，旨在建立行业标准，支持可互操作的元宇宙，以帮助用户在元宇宙中的区块链游戏之间互动游行。

万维网联盟(World Wide Web Consortium，简称W3C)成立了元宇宙互操作性社区组(Open Metaverse Interoperability Group)，目标是通过

设计和促进围绕身份标识、社交图谱、库存的协议来桥接虚拟世界。除技术工作外，该小组还致力于创建一个由艺术家、创建者、开发人员和其他创新者组成的社区，以探索围绕虚拟世界设计和开发的概念。当前探索的领域涵盖身份、好友列表/社交图谱、库存/交易虚拟项目、形象化符号 (Avatars)、3D 内容、可移植脚本对象/场景。

国际组织尚未系统化推进空间智能标准工作，但在空间感知、空间建模、空间理解、空间认知和空间交互等空间智能核心底层方面已开展技术及标准研究。

2.4.2 国内标准体系

国内空间智能标准正加速研制。全国信标委、工信部科技司及中国电子工业标准化技术协会分别成立元宇宙标准化组织，围绕空间智能领域陆续发布相关研究报告，并推动国家标准、行业标准及团体标准的研制与立项，为空间智能的技术创新与产业应用奠定了标准化基础。

2022 年 2 月，中国电子工业标准化技术协会批复成立中国电子工业标准化技术协会元宇宙工作委员会，推动元宇宙产业高质量发展。2022 年 5 月，全国信息技术标准化技术委员会决定成立全国信息技术标准化技术委员会元宇宙标准研究组，旨在统筹元宇宙标准化研究工作，通过充分调动现有标准技术组织资源，研究元宇宙关键技术和标准化需求，制定元宇宙标准化规划、体系和政策措施，已发布 GB/T 45993-2025《元宇宙 参考架构》国家标准，推动立项《虚拟空间计算指南》国家标准（计划号：20251304-T-469）并形成征求意见稿，为空间智能的标准化提供引领。

2024 年，为做好元宇宙行业标准的组织制定和宣贯实施工作，推动元宇宙标准化工作高质量发展，工信部科技司批复成立了元宇宙标准化工作组，研究分析元宇宙领域标准化需求方向，提出元宇宙领域行业标准制修订建议。目前，该组织已立项 18 项元宇宙领域行业标准，《元宇宙 使能技术 空间智能通用规范》《元宇宙 使能技术 空间计算分级要求》两项空间智能行业标准在立项中。

2024 年以来，元宇宙工委相继发布了《链接元宇宙：技术与发展》《链接元宇宙：应用与实践》《空间计算发展报告（2024 年）》研究报

告。此外，还推动立项了《元宇宙 空间智能通用要求》《元宇宙 空间计算参考架构》等多项空间智能领域团体标准。

2.4.3 国际与国内标准对比分析

国内外空间智能标准在路径、重心与形态上呈现出显著的差异性演进与功能性互补。国际标准由 ISO/IEC、IEEE 等主导，强调跨领域共识与技术通用性，形成以技术框架和工程协议为核心的全球化底座；国内标准则通过国、行、团标分层推进，与具体应用场景及工程实践深度耦合，具有极强的落地属性。国际标准深耕基础层与支撑层（如空间模型、网络协议、交互机制），致力于统一结构性基础；国内标准则聚焦应用规范与能力评估，通过量化分级将技术能力转化为可实施的工程要求。

双方在技术架构与实践应用上高度互补。国内垂直场景的深厚积累为国际标准提供了落地样板，而国际通用的互操作协议则为国内构建开放生态提供了底层遵循。这种协同态势为未来全球标准的深度衔接奠定了坚实基础。

国内目前已在空间智能标准化工作占据先手，系统开展空间智能及其底层技术的标准编制，而国际目前更多还从空间智能底层开展研究。我国有望将国内研究成果输出至国际，引领国际空间智能标准化进程。

第3章 技术体系

空间智能致力于使机器能够理解、推理并与真实的三维物理世界进行交互，其核心在于将复杂的视觉数据、环境结构与动态变化转化为可操作的空间认知模型。支撑这一前沿趋势的技术体系，涵盖了从感知真实世界的三维重建与神经渲染技术，到编码物理规律与空间关系的多模态大模型与世界模型，再到实现自主决策与行动的空间计算与空间智能体操作系统。这些技术共同构建起一个从环境感知、认知理解到自主交互的完整技术闭环，揭示了空间智能如何为智能制造、人机共生乃至元宇宙构建奠定全新的技术基石。

3.1 技术架构：感知理解协同，决策交互一体

随着体系化架构不断完善，空间智能正由支撑能力向元宇宙基础设施层级跃迁。为了使智能体可以感知、理解、认知现实的三维世界，并与之交互，空间智能从技术上可以分为基础设施与数据层、关键引擎层、核心层、应用层等。同时，由于空间智能直接作用于现实世界，相比在数字世界分析和处理数据的大模型，其伦理和法律问题将更加凸显。因此，空间智能的服务与监管尤为重要。空间智能的技术架构如图3.1所示。

3.1.1 基础设施与数据层

如图3.1所示，空间智能的最底层是基础设施与数据，为空间智能提供算力支持、存储支持、通信网络、传感网络，以及时空数据的支撑。

(1) 基础设施

基础设施由算力、存储、网络、传感四大核心模块协同构成，是支撑三维空间感知、建模、计算与交互的底层支撑：算力以CPU、GPU、TPU、FPGA等多元芯片为核心，结合云计算、边缘计算、雾计算形成协同算力网络，支撑空间智能全局建模与实时感知交互；存储采用高速缓存与内存、主存储、归档存储的分层架构，通过智能管理实现热温冷数据自动调度，保障空间数据低延迟读写与海量长期存储；网络构建有线、Wi-Fi、



图 3.1: 空间智能技术架构

5G/6G、低功耗广域网、卫星及 TSN 等混合异构网络，实现不同场景下空间数据高带宽、低延迟、广覆盖传输与智能调度；传感作为空间智能的末梢神经，通过异构网络对物理世界进行多维度、大规模数据采集，为空间模型的构建与认知提供源数据，筑牢空间智能理解与决策的底层基础。

(2) 空间数据

空间数据是空间智能的记忆与知识核心，由环境基础模型数据、智能体元数据、知识库与语料库、历史行为数据及仿真训练、外部上下文等多类数据构成统一数据体系：其中环境基础模型数据提供三维几何、物理属性与空间规则的数字化空间基底，智能体元数据支撑任务调度与状态管理，知识库与语料库实现语义理解、常识推理及多模态交互，历史行为数据作为系统经验记忆为强化学习与策略优化提供依据，再结合仿真衍生数据与外部知识，共同形成从原始感知到高层认知的全栈数据链条，在统一框架下保障数据一致性与可追溯性，既支撑实时感知、规划与控制，又为空间智能的持续学习、仿真推演、因果分析与长期进化提供核心数据养料，是空间智能从执行程序走向经验积累与智慧增长的关键基础。

3.1.2 关键引擎层

关键引擎层作为空间智能技术的中枢，由四大核心引擎协同驱动，共同构建虚实共生的智能底座：

(1) 几何引擎

几何引擎是空间智能技术栈中处理二维、三维空间结构与形状的“数

学内核”和“操作大脑”。几何引擎作为底层支撑，将原始的感知数据（如点云）转化为可计算、可分析、可交互的精确三维模型，是实现精准空间认知与操作的数学基础。其核心功能可概括为三个方面：

- **几何构建与表示**：将抽象的数学定义（如 NURBS 曲面、体素、多边形网格）转化为计算机可精确计算和显示的数字模型。
- **几何运算与推理**：执行复杂的布尔运算（交、并、差）、空间查询（碰撞检测、距离计算）、形变与偏移等，是进行虚拟装配、路径规划、物理仿真的基础。
- **数据交换与修复**：在不同建模标准和文件格式（如 STEP, IGES, OBJ）间进行高保真转换，并自动修复导入模型中的几何错误，确保数据流的通畅与质量。

(2) 渲染引擎

渲染引擎作为空间智能的核心技术模块，支持对 2D 及 3D 图形的实时渲染处理，是一套具备图形计算、光照模拟、纹理映射、材质渲染、特效渲染、实时交互能力的软件框架，能够输出符合人眼视觉习惯的 2D/3D 图像或动态画面。渲染引擎依托分层加速结构与降噪算法，呈现实时光线追踪、全局光照等电影级视觉效果。渲染引擎还需要支持在画质表现与运行性能之间达成高效平衡，通过高度逼真的视觉表现增强用户空间代入感，同时渲染性能的平衡能避免因画面延迟、帧率波动引发的眩晕问题，增强用户在虚拟空间或虚实融合场景中的体验流畅度与沉浸深度。

渲染引擎负责大规模空间场景的加载、调度与优化，将点云、卫星影像等空间数据转化为直观的三维场景。其次，空间智能的核心价值还包括实时交互支撑，支持用户在虚拟空间进行移动、切换视角等操作，实现空间交互。最后，空间智能的核心价值是多终端适配。渲染引擎为 LED 屏、投影、XR/AR/VR 设备、桌面显示器提供低延迟、高保真的渲染输出，支撑沉浸式空间感知。

(3) 物理引擎

物理引擎（亦称物理规则引擎）通过复刻现实世界物理法则（含碰撞检测、重力作用、流体动力学等核心功能），为虚拟空间中的对象赋予符合经典物理学定律的动态行为。物理引擎具备实时高效的物理参数可智能设计、仿真效果可控可设计能力，满足大规模三维数字孪生场景高

效高精度交互仿真的需求。物理引擎中的数字孪生表面模型的可微神经网络动力学求解器以及云化计算方法，解决大规模场景的高效仿真难题。支持复杂几何形体交互、布料及软组织动力学模拟，以及物体破坏效果的高精度仿真，让用户在虚拟或虚实融合空间中的操作获得与现实一致的物理反馈。区别于负责视觉呈现的渲染引擎，它专注于模拟现实世界的物理规律与定义空间内实体的行为规则，是实现数字孪生、虚拟仿真、智能交互的关键技术底座。

物理引擎在空间智能中的价值，集中体现为“让虚拟空间具备现实逻辑”：

- **动力学模拟**：计算物体在力（重力、推力等）和扭矩作用下的运动轨迹（刚体动力学），以及柔性体的变形与运动（软体动力学）。
- **碰撞检测与响应**：实时、精确地检测虚拟物体之间或与环境之间的接触与穿透，并据此计算真实的碰撞反馈，如反弹、滑动或停止。
- **约束求解**：模拟关节（如铰链、滑块）、弹簧、绳索等约束关系，是模拟机械装置、机器人结构与复杂交互的基础。
- **特定物理效应模拟**：高级引擎还集成流体力学、布料模拟、粒子系统（如烟雾、爆炸）等，以营造高度逼真或符合特定专业需求的环境。

在空间智能中，物理引擎与几何引擎紧密协同。几何引擎定义了物体“是什么形状”，而物理引擎则决定了它“如何运动与相互作用”。两者共同确保数字世界中的虚拟实体或对现实世界的预测能够遵循物理规律，是数字孪生、机器人仿真、自动驾驶测试和沉浸式交互体验得以实现的基石。

(4) 交互计划引擎

交互规划引擎是空间智能的“决策执行官”，负责在复杂动态环境中，为实现特定交互目标（如抓取、避障、协作）生成安全、高效、可执行的动作序列。其核心功能与定位如下：

- **任务分解与序列规划**：将高级交互指令（如“泡一杯咖啡”）分解为一系列可操作的子任务和连贯的动作步骤。
- **运动路径规划**：在几何与物理约束下，为机械臂、移动机器人或空间数字人计算从起点到目标点的无碰撞运动轨迹，通常需兼顾平滑性、能耗与效率。

- **实时避障与重规划**：基于实时感知数据，动态预测环境中障碍物的运动，在遭遇突发干扰时快速避障并重新规划路径，保障交互的安全与鲁棒性。
- **协同与社交规划**：在多智能体或人机共融场景中，规划符合社交规范或协作协议的行为，如排队、礼让、协同搬运。

在技术栈中，交互规划引擎依赖几何引擎提供的空间模型进行碰撞检测，并依据物理引擎模拟的动力学约束优化动作。其实时规划能力常基于搜索算法（如 A*）、采样算法（如 RRT）或新兴的机器学习方法实现。它是具身机器人等完成灵巧操作、自动驾驶车辆进行并线超车、空间数字人实现拟人化互动的核心技术模块，最终将空间的智能认知转化为安全、自然的物理世界交互行为。

3.1.3 核心层

核心层完成空间感知、空间建模、空间理解、空间认知和空间交互等空间智能的核心功能。

(1) 空间感知

空间感知是空间智能的“感官系统”，其核心功能是从物理世界中实时、精确地捕获原始多维数据，为整个系统提供信息输入源泉。空间感知一般通过多传感器融合实现。激光雷达获取高精度三维点云，构建环境几何骨架。视觉传感器（摄像头）提供丰富的纹理、颜色与语义信息。惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，简称 IMU）与全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，简称 GNSS）等则提供位姿、加速度等动态参数。空间感知的关键技术在于多源异构数据的时空同步与标定，以及基于即时定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping，简称 SLAM）技术，在未知环境中实时估算自身运动并构建初步环境地图。

空间感知模块输出的不仅是原始数据流，更是经过初步处理的结构化感知结果，包括物体检测框、语义分割图、深度图及自身位姿信息。这为后续的空间建模与理解奠定了可计算的感知基础，是空间智能得以“看见”并“定位”于物理世界的根本前提。其核心功能与定位如下：

- **空间定位**：空间智能感知体系的“本体定锚”核心，旨在实时确定智能体自身在环境中的精确位置与姿态。它主要通过多源传感器融合

实现。SLAM 技术作为基础，利用激光雷达或视觉特征在未知环境中同步建图与定位。全球导航卫星系统（如 GPS、北斗）提供绝对地理坐标。惯性测量单元则通过积分计算高频的相对运动，弥补卫星信号遮挡时的定位空白。同时，超宽带（Ultra Wide Band，简称 UWB）、Wi-Fi 往返时延（Round-Trip Time，简称 RTT）等无线信号可辅助室内精确定位。该模块的最终输出是带时间戳的六自由度位姿，为后续的多模态感知数据提供统一的时空参考基准，是确保所有感知信息能准确“落”在三维空间中的先决条件，直接决定空间建模与交互的精度与可靠性。

- **融合对齐**：将多源数据在时间与三维空间上进行对齐与融合，为后续空间建模与推理提供可靠输入，也是必不可少的环节。比如摄像头的视频数据或者 IOT 的位置我们都会统一对齐到三维的空间上面。
- **多模态感知**：空间智能的“全景感官”，旨在通过协同多种异构传感器，全面捕获物理世界的三维几何、表面属性与动态语义信息。它同步采集并处理视觉（2D 图像）、激光雷达（3D 点云）、声学、毫米波雷达等多源数据。其核心在于挖掘不同模态数据的互补优势：视觉提供丰富纹理与语义，点云呈现精确几何结构，雷达则对光照变化及恶劣天气鲁棒。通过早期或中期的融合处理，该模块输出时空对齐、带语义标签的综合性环境表征，如带有物体类别和实例 ID 的稠密三维点云地图。这为空间理解提供了更丰富、更可靠、可互为验证的感知输入，是实现精细环境交互与决策的关键数据基础。

(2) 空间建模

空间建模通过三维重建与三维生成构建可计算的三维世界模型，不仅包含高质量几何信息，还包含语义、物理属性等，同时还需要针对不同的场景建立空间表征，为数字孪生、具身智能、仿真模拟与合成数据生成提供核心支撑，为后续的推理预测提供可靠的数据基础。

空间建模包括三个技术模块：

- **空间生成**：基于文本、图像等多模态输入生成三维内容，可用于场景补全、资产生产与合成数据。
- **空间重建**：对真实环境进行几何与语义重建，并支持建图/更新/重定位等持续维护。

- **空间表征**：将三维空间组织为可查询、可推理的表示形式，统一承载几何、语义与关系（例如语义地图/Scene Graph）等，供理解、规划与交互模块调用。

(3) 空间认知

空间认知是空间智能从“几何世界”通往“语义与功能世界”的桥梁，其核心任务是对已构建的空间模型进行深层解析，赋予其可被认知和利用的语义与交互内涵。它基于感知与建模的成果，通过融合知识图谱、物理定律和交互经验，实现环境的三重解析：

- **场景布局理解**：识别与分类环境中的实体及其关系，回答“这是什么，构成了什么场景”。
- **物理功能理解**：推断物体的物理属性、潜在用途与操作方式，回答“它能用来做什么”。
- **动作交互理解**：预测和评估不同动作可能引发的状态变化与结果，回答“如何与它安全有效地交互”。

空间认知输出的是一个富含语义、功能与因果关系的可操作环境模型，为高层推理决策（如任务规划）和交互提供了直接依据。

(4) 空间决策

空间决策是空间智能的“思维中枢”，其核心作用在于基于深度理解，进行记忆、推理、预测与规划。它不再停留在“是什么”或“怎么用”，而是解决“现在该怎么办”以及“未来会怎样”的问题。

具体而言，它整合长期记忆（历史经验、知识库）与当前理解，构建动态的心智模型，实现跨时空的因果推理（如“若移动此物，将影响后续操作”）、情境预测（如“行人五秒后将进入危险区”）以及复杂任务规划（如“规划出兼顾效率与安全的装配序列”）。

简而言之，空间决策是将丰富的空间知识转化为可执行策略和前瞻性判断的高级智能过程，是连接环境理解与最终交互行为的决策桥梁。空间决策包括三个模块：意图识别、推演仿真和行为决策。这三个模块构成了从“理解意图”到“生成行动”的完整认知闭环。

- **意图识别模块**：其核心任务是解读其它智能体（包括人类）在特定空间场景中表现出的目标、愿望或需求。它接收来自感知层和理解层的信号（如人的手势、语言指令、注视焦点、移动轨迹），并结合知识库

中的上下文（任务背景、社会规范、个人习惯）进行推理。例如，当观察到一个人走向工具台并注视一把螺丝刀时，该模块能结合“当前正在进行设备维修”这一任务背景，推断出“其意图是获取螺丝刀”而非“整理工具”。它依赖于多模态融合、自然语言理解和活动预测技术，将原始行为信号转化为结构化、可操作的意图表示，为后续决策提供明确的输入。

- **推演仿真模块**：这是空间决策的内部试验场，其核心功能是在虚拟空间中，对多种潜在的候选动作方案进行前瞻性推演与评估。它基于当前的环境模型、物理规则和识别出的意图，快速模拟执行不同动作后可能产生的状态变化、交互结果和代价。例如，为了满足“将水杯从 A 点移动到 B 点”的意图，该模块会在数字孪生环境中，快速仿真“直接推过去”、“绕过障碍物”、“先抬起再移动”等多种路径和方式的物理过程，并预计算各自的成功概率、能耗、时间成本及可能的风险（如碰撞、溅洒）。这实质上是利用计算资源进行“思想实验”，以低代价评估高价值行动。
- **行为决策模块**：是空间决策的最终输出端，扮演决策者角色。它综合意图识别的目标、动作仿真的预测结果，并结合预设的优化目标（如效率最高、能耗最低、最安全）、策略约束和实时状态，从所有仿真的可能性中，选择并生成一个最优的、可立即执行的行为指令序列。承接上例，行为决策模块会对比各仿真方案的评估指标，可能判定“绕过障碍物”虽路径较长但最安全可靠，从而将该方案确定为最终决策，并生成具体的运动控制指令（如轨迹点）。它通常由优化算法、强化学习策略或规则引擎驱动，确保决策在满足意图的同时，符合系统的整体目标和约束。

这三个模块形成了一个从感知输入到行动输出的智能化链路：意图识别定义“要做什么”，动作仿真预测“做了会怎样”，行为决策最终裁定“现在怎么做”。它们共同赋予空间智能系统以深度理解、前瞻思考和审慎行动的高级决策能力。

(5) 空间交互

空间交互是空间智能技术栈的最终输出与闭环形成环节，其核心作用是将内部的空间认知转化为对外部物理或虚拟世界的安全、有效、可

适应的实际作用。它不仅限于简单执行动作，更是一个包含空间锚定、多模态沟通与动态反馈的交互循环，是实现人机自然共融与智能体自主行动的关键。

空间交互模块充当智能体“思维”与“行动”之间的桥梁，确保经过认知决策的意图能够被安全、精准地执行，并根据执行结果进行即时调整与长期优化。它直接决定了智能体在真实世界中的实用性、鲁棒性和协作能力。

- **三维注册模块**：是空间交互的“空间基准锚定器”。它负责将虚拟信息（如 AR 指示、数字标签、机器人任务目标）精确对齐到物理世界的三维坐标中，或将不同智能体、不同传感器所感知的空间坐标系进行统一。三维注册模块通过视觉 SLAM、点云配准、高精度定位等技术，建立并维护虚拟内容与物理空间的刚性对应关系，确保所有后续交互行为建立在准确的空间参照系之上。它输出的空间锚点与坐标变换关系，是多模态交互与反馈能够正确进行的前提。
- **多模态交互模块**：是空间交互的“沟通中枢”，负责理解人类用户或外部环境的多模态输入（手势、语音、眼动、触控等），并生成相应的多模态输出（动作、显示、语音、力觉等），实现自然、高效的沟通与协作。它融合语音识别、手势解析、意图理解等技术，将人类指令转化为可执行的任务目标；同时，通过虚拟化身、机器人姿态、增强现实提示等方式，将智能体的响应与意图以符合人类认知习惯的方式呈现。多模态交互模块是构建人机友好关系的核心界面。
- **交互反馈模块**：是空间交互的“感官回路”与“学习引擎”，负责实时监测交互执行结果，并生成结构化反馈以关闭交互环路。它收集来自视觉、力觉、触觉、距离等多模态传感器数据，与预期状态进行对比，评估交互效果（如抓取是否成功、指令是否被正确执行）。即时反应用于触发交互策略的在线调整（如修正抓取姿态、重新规划路径）；长期反馈（如成功/失败样本、效率指标）则回流至认知与理解层，用于优化模型、更新知识库，驱动系统持续进化与自适应。

这三个模块构成一个“锚定-沟通-感知-学习”的紧密闭环：三维注册提供交互的几何基准，多模态交互负责理解与表达意图，交互反馈则评估结果并驱动优化，共同使空间智能从被动的环境观察者，进化为能主

动、精准、安全地与物理及数字世界沟通协作的行动者。

3.1.4 应用层

空间智能技术架构的应用层是其价值实现的最终舞台，它将底层的感知、认知与交互能力封装为解决具体领域问题的解决方案。

(1) 自动驾驶

自动驾驶是空间智能在垂直领域的集大成者，其本质是赋予移动载具在开放、动态的物理空间中，全栈式实现自主感知、认知、决策与交互控制的能力。

其技术架构完美映射了空间智能的核心层次：通过多模态感知（激光雷达、摄像头、毫米波雷达融合）构建车辆周围的实时三维环境模型；利用空间理解与认知技术识别道路语义（车道线、交通标志）、预测他者（行人、其它车辆）意图，并基于此进行毫秒级的行为决策（跟车、换道、避让）与交互规划（生成安全、舒适、合规的行驶轨迹），最终通过精确的线控执行系统将数字世界的规划转化为物理世界的转向、加速与制动。

自动驾驶让汽车从传统的交通工具演变为一个具有空间智能的自主移动智能体，是验证空间智能技术成熟度、复杂性与实用性的终极场景之一。

(2) 智能制造

智能制造是空间智能赋能实体产业的核心战场，其本质是将物理工厂的生产要素（人、机、料、法、环）全面数字化、模型化与智能化，构建起可感知、可认知、可推演、可干预的智能生产空间。

其技术架构深度嵌入空间智能的各个层级：通过工业相机、激光雷达、IoT 传感器等构建车间级的实时三维环境模型，实现对设备状态、物料流动、人员行为的精准感知；利用空间认知技术识别生产场景的语义信息（如工件位姿、装配关系、异常事件），并基于数字孪生模型进行工艺仿真与生产调度推演；最终通过机器人、AGV、机械臂等执行单元，将最优决策转化为物理世界的精准操作与协同作业。

从柔性装配线到无人值守产线，从质量在线检测到预测性维护，空间智能正推动制造业从“自动化”迈向“智能化”，使工厂具备自感知、自决策、自执行的能力，成为物理世界与数字空间深度融合的典型范本。

(3) 智慧城市

空间智能在智慧城市领域的应用聚焦于宏观复杂系统的模拟、监测与决策支持。主要包括：

- **智慧城市运营**：构建城市级数字孪生，用于交通流仿真优化、公共安全应急模拟、基础设施（如桥梁、管网）的健康监测与管理；
- **环境监测与应急响应**：通过空天地一体化感知网络，对自然灾害、环境污染进行实时监测与评估，并规划最佳救援或处置路径；
- **智慧安防与治理**：在公共空间实现基于视频理解的异常行为分析、人流统计与疏导，提升公共安全与管理效率。

(4) 空间智能体

空间智能体是指具备环境感知、认知理解、自主决策与交互执行能力的智能实体，既可存在于物理世界，也可栖身于数字空间，是空间智能技术的终极载体与具象化体现。其核心在于将人工智能与“身体”（物理的或虚拟的）深度融合，使其能够像生物一样与三维环境进行主动、动态、有目的的互动。

根据存在形态与应用场景的不同，空间智能体主要分为两类：

- **物理世界的空间智能体**：具身机器人、机器狗、工业机械臂等都是空间智能在物理世界的延伸，其目标是在非结构化的真实环境中，通过多模态感知理解三维场景与物体属性，利用空间认知进行任务推理与运动规划，最终通过高精度控制与力位交互执行复杂操作（如抓取工具、开门、装配）。人形机器人作为其高级形态，因仿人结构能无缝适应人类环境，但也对动态平衡与全身协同提出极致挑战。从工业分拣到家庭服务，具身机器人正将人工智能从数字世界带入物理现实，成为连接虚拟认知与实体行动的桥梁。
- **数字世界的空间智能体**：数字人、非玩家角色（NPC）等是生活在三维数字空间（如元宇宙、数字孪生环境）中的智能实体，其核心在于具备与物理世界智能体相当的感知、认知与交互能力：通过虚拟传感器实时感知三维空间的几何结构、物体分布与其他智能体状态；基于虚拟身体进行路径规划与任务决策；不仅能响应用户指令，更能主动发起符合上下文的社交交互（如协作、避让、示意）。它由空间智能技术（几何引擎、渲染引擎、物理引擎、多模态 AI 模型）驱动，是

构建未来沉浸式元宇宙、实现人机深度共生的关键数字主体。

无论是物理的机器人还是虚拟的数字人，其技术内核均统一于空间智能体系：多模态感知理解三维世界，空间认知进行推理决策，智能交互实现动态协同。空间智能体为智慧城市、智能制造、沉浸式体验等场景提供了统一的智能单元，推动虚拟与现实的无缝连接与协同进化。

3.1.5 服务与监督

在空间智能技术体系中，服务与监督是不可或缺的治理与保障层。它确保整个系统在安全、可靠、合规且合乎伦理的框架内健康发展与部署，是从技术构建迈向社会化应用的关键环节。

- **网络安全**：核心是保障空间智能系统的数据、通信与控制安全。三维空间数据、实时交互指令及多模态模型均需加密传输与存储；需防御针对传感器、网络与决策模块的恶意攻击（如数据投毒、对抗样本），防止系统被误导或劫持，尤其在自动驾驶、智慧城市等关键领域。
- **内容安全**：主要监管空间智能系统生成或交互的数字内容。这包括防止在 AR/VR 环境或由数字人生成有害、虚假信息；确保交互内容符合法律法规与文化规范；并对基于空间数据的生成结果（如伪造三维场景）进行真实性鉴别与标识。
- **伦理审查**：旨在确保系统的决策与行为符合人类价值观与社会伦理。需建立审查机制，评估并规避算法偏见、隐私侵犯（如过度空间监控）及责任归属不清等问题。重点在于为系统的自主决策（如紧急避让中的选择）设定伦理边界与优先级框架。
- **审计**：提供事后的可追溯性与问责依据。通过完整记录智能体的感知数据、决策逻辑、行为日志，在发生意外或争议时，可回溯事件全过程，分析系统状态，明确技术故障或人为责任，保障透明度与可信度。
- **监管与治理**：一种主动、实时、深入的监管模式。监管机构利用技术手段（如监管科技）直接接入系统关键节点，实时监控其运行状态、数据流与决策过程，并能在风险发生时实施干预或熔断。这尤其适用于金融、能源等高风险领域的空间智能应用。

服务与监督层构成了空间智能可持续发展的“免疫系统”与“交通规则”，是技术信任与社会接纳的基石。

3.2 关联关系：学科交叉融合，技术协同演进

空间智能作为一个综合性前沿技术，与多个既有学科存在密切关联，也容易产生概念上的交叉与混淆。空间智能并非一个孤立的新学科，而是在人工智能、计算机视觉等基础上，深度融合地理信息科学、认知科学、图形学等知识，并以解决三维物理空间与元宇宙虚拟空间中的智能认知与交互问题为明确导向的交叉技术。它既是这些学科成果的集成应用，也因其明确的问题焦点而形成了独特的技术栈与理论框架。

3.2.1 元宇宙：空间智能的终极应用生态愿景

一个成熟的元宇宙需要其内的数字实体（数字人、虚拟物品）具备空间智能，才能实现自然且有真实感的虚实交互。空间智能为元宇宙提供“物理世界认知引擎”，让虚拟空间可以感知物理世界、理解物理关系、推理和决策物理行动，因此，空间智能被认定为元宇宙的使能技术之一。

3.2.2 人工智能：空间智能是其走向三维理解的核心跃迁

传统人工智能聚焦于文本、图像等二维信息的理解与生成，而空间智能将其能力延伸至三维空间维度——对物理世界的几何结构、位置关系、环境语义与动态变化进行建模、推理与交互，它是人工智能从理解信息走向认知空间的关键突破。

3.2.3 具身智能：空间智能是其核心认知基座

空间智能与具身智能构成“理解空间—执行行动—反馈优化”的完整闭环。空间智能负责三维环境感知、场景建模与空间关系推理，为智能体提供可行动的世界模型；具身智能则通过物理实体与环境交互，在运动、操作中验证并更新空间认知，让静态空间理解转化为动态智能行为。没有空间智能，具身智能无法精准导航与操作；脱离具身交互，空间智能难以落地真实物理任务。

3.2.4 数字孪生：空间智能的具象载体与交互界面

空间智能以统一时空基准、三维感知与空间分析能力，为数字孪生提供精准定位、几何建模与动态关联，解决“空间在哪、关系如何、如何

推演”的核心问题；数字孪生则将物理实体一比一映射为可交互的虚拟镜像，让空间智能的分析、预测与决策能力得以落地呈现。

3.2.5 计算机视觉：空间智能的感知输入端

计算机视觉负责从图像/视频中提取物体、纹理、特征等二维信息，是空间智能的基础输入；空间智能进一步将视觉信息与几何推理、三维重建、位姿估计结合，实现从“看见”到“看懂空间”的升级，完成位置、距离、姿态、拓扑关系与动态交互的理解。二者协同，构成智能体感知物理世界、实现自主导航与场景交互的关键技术链条。

3.2.6 地理空间智能：空间智能在地理领域的工程化落地

空间智能是更广义、跨领域的智能能力，核心是对空间位置、关系、结构、场景的感知、理解、推理与决策；地理空间智能则是面向地理场景的垂直分支，以地球空间为载体，依托地理信息、地图、遥感、定位等技术，实现对地理环境的分析、建模与应用。空间智能为地理空间智能提供理论与算法支撑，地理空间智能则是空间智能最典型、最成熟的应用方向之一。

3.2.7 认知科学与心理学：空间智能的灵感之源

人类的空间认知能力“心理地图、路径整合、空间记忆”是空间智能研究的重要灵感来源。认知科学为机器如何“理解”空间提供了认知模型参考，而空间智能则从工程和技术角度构建机器的空间能力。两者共同探索“空间认知”这一命题，但前者研究人类心智，后者构建机器智能。

第4章 实践路径

空间智能技术正从理论探索与实验室研发，快速走向规模化、场景化的产业实践阶段。其核心价值不再局限于技术本身的突破，更在于如何将其物理理解、未来推演、行为决策的能力，转化为解决实体经济关键问题、塑造未来数字生态的切实路径。通过系统梳理空间智能在不同行业的典型应用场景与实践模式，剖析其从技术赋能到价值创造的完整闭环，可揭示其作为驱动产业升级和构建元宇宙核心支柱的落地逻辑与发展趋势。

4.1 空间智能 + 制造：降本增效与高质发展的核心引擎

工业领域是空间智能应用最深入的场景之一，其核心价值在于“降本增效 + 质量提升”。

4.1.1 空间智能赋能汽车制造，驱动柔性生产与质量极致化

在汽车产业向电动化、智能化转型的过程中，高端新能源汽车正面临定制化程度高、配置组合复杂、产品迭代迅速等新挑战。传统制造方式难以在保持高节拍生产的同时兼顾产品质量，混线生产的不稳定性加剧，工艺参数的设定往往依赖经验，供应链与物流系统对产线造成扰动，库存控制与生产效率之间的平衡也难以实现。这些问题使得企业难以在高节拍、多品种、强定制并存的生产环境中，维持稳态运行与质量一致性。

空间智能通过空间感知技术、工位-设备-产品空间协同、数据全链路闭环，将生产节拍、工艺参数、物流路径、质量节点统一纳入数字化空间体系：实现机器人与产线的精准空间协同作业，稳定工序一致性；构建产品-工位-工艺的空间绑定与追溯能力，支撑质量与工艺迭代；以柔性空间调度支持多车型共线混流，适配定制化需求，如图4.1所示；通过全域可视、异常定位与能耗空间优化，同步提升生产效率、质量稳定性与低碳制造水平，把高节拍、高定制从临时能力变成稳态常态。

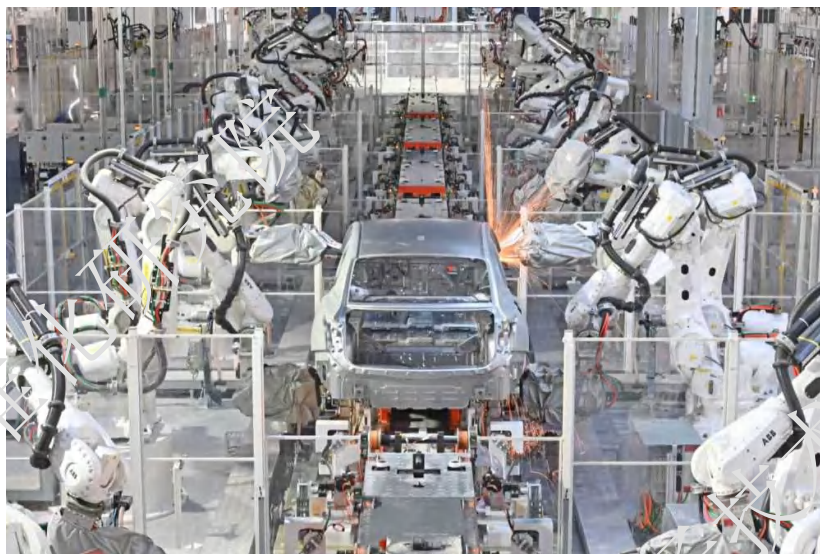


图 4.1: 空间智能优化汽车生产线调度

专栏 4.1

中国一汽红旗繁荣厂区使用空间智能技术优化产线装配调度，通过工业机器人协同空间定位，推动 739 台焊装机器人实现 100% 自动化同步作业，压缩作业时间；将工位-车辆-工艺参数等空间数据进行融合绑定，利用空间决策算法优化生产节拍，实现生产波动压缩、低碳高效协同的生产目标，使整车下线时间降至 54 秒/辆，单车碳排下降 32%。

广汽埃安智能生态工厂运用空间智能技术实现订单驱动的高节拍个性化生产，核心通过定制需求前置校验、线边物流节拍与空间推演技术协同，避免“可卖不可造/不可供”的系统风险，结合柔性混线设计，实现整车下线时间降至 53 秒/辆，单辆车生产周期约 16 小时，生产效率提高 50%、交付时间缩短 33%、一次验收合格率提高 8%、制造成本降低 58%，可支撑 10 万多种选装方案的柔性生产。

4.1.2 空间智能赋能离散装备制造，攻克复杂装配与生产排程难题

离散装备制造面临的共性问题核心是“高复杂度”与“高节拍”的矛盾，具体表现为工序繁琐、零部件繁多、生产路径灵活且变更频繁，单工序优化难以实现全局高效；同时存在订单波动大、离散度高、物流错配、在制品堆积等痛点，生产排程依赖经验、协同效率低，易出现质量波动与

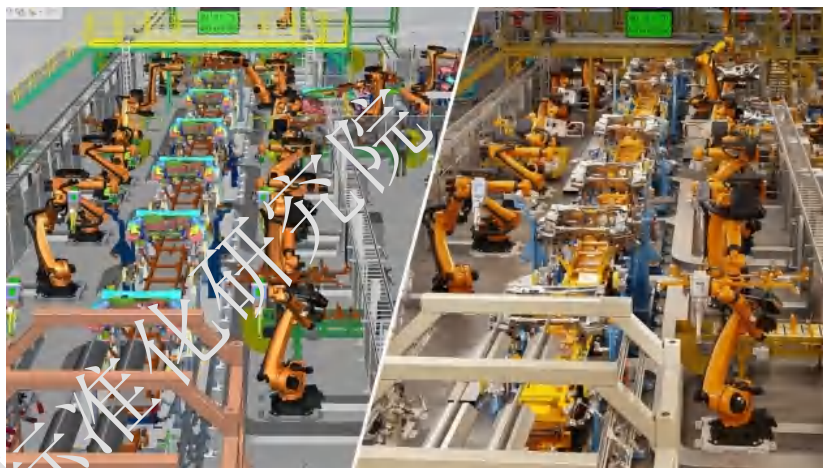


图 4.2: 空间智能实现生产链路可视化、优化生产排程

交付滞后，难以平衡定制化需求与规模化生产的效率。

空间智能技术融合工业互联网、数字孪生、5G 全连接等技术，整合订单、工艺、产线、物流等多维度数据，实现生产全链路可视化，如图4.2所示；通过多模态感知优化排程与工序稳定性，用智能物流绑定工位节拍，压缩波动源；以数据沉淀与虚拟推演实现异常溯源、风险预警与持续迭代，推动离散装备制造从“经验驱动”向“数据驱动”转变，实现效率提升、成本降低与交付提速。

专栏 4.2

中联重科聚焦重型装备小批量定制痛点，空间智能技术主要赋能端到端流程重构与生产协同环节，依托空间智能与 AI 融合技术进行流程管控，把订单拆解为工序级任务包实现规则排产与实时纠偏，同时以空间定位与多模态感知技术赋能关键工序，搭配柔性机器人减少质量波动，实现生产一台挖掘机时间压缩至约 6 分钟，全流程生产周期约 6.5 天。

三一重工使用空间智能技术赋能物流调度与全流程管控环节，通过空间定位、路径规划技术构建端到端智能物流系统，实现产线人员减少近 2/3，产能翻倍，泵车约 45 分钟下线，全流程周期从 31 天降至 12.7 天，单台制造成本降低 29%。徐工重型中，空间智能技术赋能全链路可视化与虚拟推演环节，融合数字孪生技术构建生产全流程虚拟映射，赋能排程优化、资源冲突预演与风险预警，实现订单交付周期缩短 55%，海外订单响应时间从 45 天压缩至 15 天。

4.1.3 空间智能赋能高端电子制造，实现精密管控与节能升级

高端电子制造（光电、面板、光通信等领域）的共性问题核心是“工艺极致化”需求与“过程波动难管控”的矛盾，具体表现为生产过程中温度、洁净度、张力等关键变量的可控窗口极窄，微小波动即影响产品质量；同时存在供应链响应滞后、工艺试错成本高、人工干预易引发偏差、订单碎片化下系统切换难度大等痛点，难以兼顾良率、稼动率、成本与绿色发展的多重目标。

空间智能技术深度融合数字孪生、全光连接，构建起虚实融合的智能制造体系：在虚拟空间中，通过数字孪生将工艺过程与设备能力精准映射为虚拟模型，固化工艺窗口并开展虚拟寻优，大幅降低真实产线的试错成本；在生产过程中，借助算法对过程参数进行实时自适应控制，以微米级精密管控替代传统人工经验；在全域连接上，依托全光网络与工业互联网贯通供应链与生产全链路数据，实现透明化协同与数据贯通；同时，该技术将质量、成本、绿色指标纳入智能优化闭环，有力推动高端电子信息制造向精密化、高效化与绿色化升级。

专栏 4.3

长飞光纤依托空间智能技术，将拉丝关键设备、工艺变量及空间环境参数纳入统一控制闭环，通过空间化数据实时采集与分析，实现过程参数的动态自适应优化，实现 2000℃ 以上高温环境下的微米级精度管控，拉丝速度提升至每分钟 3500 米。

武汉京东方借助空间智能融合工业互联网与数字孪生技术，通过虚拟空间推理寻优减少真实产线试错成本，有效提升生产稳定性，将玻璃基板利用率提升至 95%。

光迅科技通过数智化供应链的空间协同调度，实现了跨地域、多级供应商的计划与物料精准对接，有效破解了订单碎片化带来的信息孤岛与系统切换难题。同时，依托生产工艺的全流程数字化映射，将质量、成本及碳排放指标纳入实时优化模型，驱动工艺参数动态调优。最终实现生产成本降低 17%，年度碳排放减少近 2000 吨。



图 4.3: 空间智能融合全真虚拟现实技术构建沉浸文旅空间

4.2 空间智能 + 文旅：体验升级与文化遗产的关键支撑

文旅行业是空间智能赋能体验经济的典型场景，其核心价值在于“沉浸式交互 + 文化数字化传承”。

4.2.1 空间智能赋能存量空间活化，驱动文旅体验升级

在商业综合体更新与工业遗存活化等文旅场景中，普遍存在内容同质化、游客停留时间短暂、消费转化率低，以及项目与周边业态联动不足、难以形成高附加值品牌体验等核心挑战。如何将空间转化为具有持续吸引力与消费深度的目的地，而不仅仅是短暂的“过境点”，成为行业升级的关键。

以全真虚拟现实（RVR）为核心的空间智能与沉浸式呈现技术，为解决上述问题提供了系统性框架。该技术路径通过融合高仿真虚拟场景、巨幕投影系统、多感官环境控制（如声、光、风效）及动线设计，能够构建出一个多维融合、全然包裹的沉浸式体验空间。这种深度沉浸环境不仅极大地丰富了内容呈现的维度与感染力，有效延长游客驻留时间，更能将独家 IP 内容与在地文化元素进行无缝融合，塑造出独一无二的差异化体验品牌。其核心价值在于，通过技术将“空间”本身转化为可叙事、可探索的“目的地”，从而为商业体与历史空间注入全新的内容活力与客流引力，实现从单纯“场地租赁”到“体验运营”的模式跃升。

专栏 4.4

上海雅虹文化以空间智能为核心，融合 RVR 与巨幕技术，构建全域数字化、可交互的沉浸式文旅空间，如图 4.3 所示。依托空间智能技术，对场景布局、游客动线、实时客流及文化内容进行实时建模与动态调度，大幅延长游客停留时长至 4.5 小时，北京首钢园项目本地复购率达 20%；空间智能打通了沉浸体验与商业动线，带动两地项目周边及景区消费分别增长 25%、30%。项目将 IP 与在地文化深度融合，北京项目半年即回本，树立了高盈利标杆，充分证明空间智能驱动文旅高附加值升级的可行路径。

4.2.2 空间智能赋能自然景区运营，构建沉浸交互与运营管理新范式

当前，文旅行业在高质量发展中面临三重核心瓶颈：在游客体验侧，存在寻路难、讲解灌输化、互动形式单一的“浅层观光”困境；在运营管理侧，人力依赖度高、数据洞察盲区大、客流调度响应慢导致效率低下；在产业融合侧，则存在空间规划协同弱、文化资源活化不足、商业价值挖掘不深的“物理叠加”难题。这些痛点相互交织，制约了游客满意度、运营效能与产业价值的全面提升。

空间智能技术通过构建“感知-建模-决策-交互”的闭环体系，为系统破解上述难题提供了数字化路径。其核心在于，综合利用 VPS 视觉定位、SLAM、数字孪生、AR 与大数据 AI 等技术，将物理文旅空间进行高精度数字化复刻与实时动态映射。借此，一是可实现厘米级精准导航与虚实融合的场景叠加，将静态文化转化为可交互、可探索的沉浸式叙事，破解“体验浅”难题；二是通过多源感知网络采集全量游客轨迹与行为数据，并基于数字孪生进行仿真预测与智能调度，实现从经验决策到数据驱动运营模式转变，破解“管理盲”与“调度难”；三是通过全域空间数据底板，支撑跨区域、跨部门的规划协同，并利用 AR 等交互技术激活存量空间与文化资源的价值，推动文旅融合从简单叠加走向深度共生。

专栏 4.5

中国移动咪咕打造的“鼓浪屿元宇宙”与“云游·大足石刻”项目，以空间智能为技术底座，融合毫米级三维重建、AR/XR 交互与



图 4.4: 空间智能赋能鼓浪屿文旅

8K 云端渲染等前沿技术，构建了高精度、可交互、可运营的文化遗产数字空间。该技术路径成功将世界文化遗产转化为可沉浸体验、可持续运营的鼓浪屿元宇宙（如图4.4所示）线上曝光超 50 亿次，并入选联合国教科文组织典型案例；大足石刻线上访问量超千万次，极大拓展了文化的传播边界与体验深度。两大项目充分证明，以空间智能重塑文旅体验，能够有效提升文化价值传播、优化运营效率，并为文化遗产的活化利用与产业智能化升级提供可复制的创新范式。

4.2.3 空间智能赋能文化遗产保护，提供沉浸式体验与可持续保护

在文化遗产保护与旅游开发领域，普遍存在三大核心痛点：一是珍贵的古迹与遗址面临着自然风化与人为损害的长期威胁，传统的记录与保护手段（如测绘、拍照）精度有限且难以动态更新；二是文化展示形式多以静态的标牌、展柜为主，形式单一，难以生动传达其历史脉络与文化内涵；三是游客体验同质化严重，多为“走马观花”式的参观，缺乏深度互动与情感共鸣，导致文化吸引力不足、客群粘性低，难以实现社会价值与经济效益的平衡。

空间智能技术的应用为系统性地解决这些问题提供了新路径。通过“低门槛、高精度”的数字化技术方案，可利用无人机、手机等普及设备，结合如三维高斯重建（3DGS）等先进算法，对文化遗产进行厘米级精度

的数字化采集与建模，生成可永久保存、复现与在线传播的高保真数字资产，为保护与研究奠定核心数据基础。同时，针对复杂户外环境中增强现实（AR）体验不稳定、定位精度差的行业难题，可通过融合视觉定位系统（VPS）、SLAM 与 GPS 等多源信息，实现厘米级（如位置误差 <2 厘米）的秒级精准定位与稳定跟踪。这使得历史场景（如古代商贸运输、关隘守备等）能够以生动的 AR 形式精准叠加于现实遗址之上，将被动参观转化为可交互、可探索的沉浸式文化体验，从根本上创新了文旅产品的呈现与体验模式。

案例 4.6

北京数原在京西古道水峪嘴村，以空间智能为核心，紧扣“空间智能赋能城乡融合”主题，自主研发 UniCity 城市空间智能交互原型系统，构建乡村文旅数字智能运营体系。该系统依托全域高精度三维建模，将京西古道的物理空间转化为可计算、可交互的数字底座；通过人-地-产多源数据联动与动态优化，实现对游客动线、消费场景与文化内容的智能调度。项目上线 7 个月，直接数字产品收入达 115 万元，带动景区客流及周边消费提升约 40%；上线首月即吸引超 5000 名实名“云村民”，形成数字身份与实体乡村的情感连接与价值共创。该项目成为科技助农现象级案例，为京西古道申遗提供数字化支撑，验证了空间智能驱动下“技术普惠+可持续运营”模式在文化遗产领域的可行性与潜力。

4.3 空间智能 + 教育：资源均衡与教学创新的重要载体

教育领域是空间智能重构教学形态的前沿阵地，其核心价值在于“虚实融合教学 + 个性化学习赋能”。

4.3.1 空间智能赋能教育数字化，破解资源供给与学习体验多重痛点

教育领域普遍面临优质资源供给不均、区域与学段差距显著；技能实训存在设备昂贵、风险高、场景稀缺等门槛，难以实现规模化高频练习；终身学习资源碎片化、获取成本高、学习支持不足，且资源呈现形式单一，缺乏交互性，无法满足“做中学、探究学”的需求。

空间智能技术打破传统教育的空间与场景限制，将二维资源升级为可交互的三维学习空间，构建标准化、可共享的资源供给体系；通过虚拟仿真实训场景降低技能训练门槛，实现低风险、高频次练习；依托空间智能的全域建模与数据联动能力，整合碎片化资源，优化学习场景与服务体验，推动教育资源从“数量堆砌”向“质量提升”转型，实现普惠化、高质量教育服务。

专栏 4.7

国家智慧教育公共服务平台将虚拟实验、三维演示等融合了空间智能技术的资源纳入供给，推动优质资源从二维升级为可交互三维学习空间，实现全国普惠共享，累计注册用户约 1.78 亿。

国家职业教育智慧教育平台打造虚拟仿真实训中心，依托空间智能技术实现实训过程数字化与智能化，破解高成本、高风险难题，服务用户超 2200 万。

国家终身教育智慧教育平台与国家开放大学借助空间智能技术推动学习场景数字化，使用空间理解等技术拆解复杂技能、整合碎片化资源，累计服务学习者数千万人次，三者协同完善了教育数字化普惠体系。

4.3.2 空间智能赋能区域课堂教学，破解差异化痛点实现优质教育普惠

课堂教学智能化升级面临核心瓶颈，基础教育存在班级授课制下难以兼顾学生个体差异、因材施教难以规模化落地的问题；大城市教育系统规模大、学校类型多样，单校单点应用难以形成系统智能能力；欠发达地区则面临优质教育资源匮乏、城乡教育鸿沟明显，且探究式学习场景不足，难以培养学生高阶思维与实践能力的困境。

依托空间智能技术，将传统单一的知识讲授场景，升级为可交互、可探究的三维学习场景，让学生在场景化实践中提升高阶思维与实践能力；同时联动学习数据，支撑分层教学、精准辅导与资源高效共享，推动教学从“讲授式”向“探究式”转型，助力实现规模化因材施教，缩小城乡教育鸿沟，完善课堂教学、教研与治理协同体系。

专栏 4.8

上海闵行依托空间智能的过程数据采集与三维建模能力，革新作业形态，将虚拟实验、三维建模融入教学，把学习评价从“对错判断”升级为“过程轨迹记录”，形成个性化学情数据，助力规模化因材施教，目前已覆盖超 150 所中小学、惠及十余万学生。

深圳聚焦科学教育，融合空间智能打造高保真虚拟实验与三维探究空间，还原物理规律、支持多模态交互，推动教学向“探究式”转型，平台覆盖 897 所学校，日均服务约 200 万人次，成为科学教育数字化核心载体。

宁夏借助空间智能交互技术将沉浸式学习资源引入在线互动课堂，补齐薄弱地区探究场景短板，通过过程数据沉淀助力优质资源落地，累计开设网络互动课堂约 95.6 万堂，有效缩小城乡教育鸿沟。

4.3.3 空间智能赋能智慧校园治理，破解安防与服务核心难题

智慧校园建设普遍存在“重设备、轻场景”的误区，高校校园空间广阔、人员密集、管理场景复杂，传统安防系统割裂、数据不通、联动不足，导致安全管理成本高、响应慢；师生办事存在流程繁琐、跨部门跑腿、信息重复填报等痛点，体验差且管理效率低；校园空间资源、服务与安全治理缺乏协同，未能实现一体化管控。

通过空间智能技术，将校园空间、人员、车辆、设备等核心要素映射为数字化空间，实现安全风险从事后处置前移至事前预警，提升安全治理精细化水平；依托空间智能联动数据与流程，推动校园服务流程再造，实现空间资源、行政服务与安全治理的一体化协同，提升校园运行效率与师生体验。

专栏 4.9

山东财经大学打造“物信融合三维可视化平安校园”，依托空间智能将校园空间与安全要素数字化，实现人员/车辆精准定位与动态预警，推动安全管理从事后处置转向过程监测，同时复用既有设施显著节约运维成本。

山东大学以“全域数据库+一网通办”为核心，借助空间智能

构建校园空间资源治理底座，联动实验室预约、实训资源管理与人员轨迹，夯实“一站式服务”的数据与空间协同支撑，大幅提升师生办事效率。

济南大学升级“一网通办”平台，依托空间智能打通统一身份与数据中心，将教室预约、车辆通行等空间类服务纳入统一入口，联动空间感知与安防系统，构建“服务—空间—安全”一体化治理体系，全面提升校园管理与服务效能。

4.4 空间智能 + 城市：精细治理与宜居建设的数字底座

城市治理是空间智能发挥中枢作用的综合试验场，其核心价值在于“精细感知治理 + 公共服务优化”。

4.4.1 空间智能赋能城市统管落地，推动治理精细化与协同化升级

城市治理普遍面临“看得见、管不住、推不动”的核心痛点，超大城市事项繁杂、跨部门协同成本高，山地城市空间结构复杂、灾害风险叠加，基层治理存在“最后一公里”打通难等问题；各部门数据割裂、口径不一，风险源难以精准定位，事件流转缺乏标准化流程，指挥调度与督办问效难以形成闭环，治理多处于“运动式整治”而非“日常化运营”状态。

空间智能技术破解城市“一网统管”建设的核心瓶颈，构建统一的城市时空底座，将人、房、地、事、物及风险源精准落位到空间维度，实现风险可视化、可追溯；依托空间智能联动跨部门数据与流程，固化事件处置标准流程，实现资源精准调度、风险提前预警、处置闭环管理，推动城市治理从“部门条线管理”向“全域一盘棋”转型，提升治理精细化与应急协同能力。

专栏 4.10

成都“智慧蓉城”以空间智能为核心底座，构建统一时空底图与城市数字体征体系，通过地理编码、空间关联技术，将 1929 项城市运行核心指标、56 项风险监测指标精准落位至具体空间单元，联动 2393.31 万台终端设备，依托实时感知与轨迹追溯能力，实现异常精

准定位、源头可溯，构建全流程监管闭环，推动治理从“被动应对”向“主动预判”、“碎片化”向“场景化闭环”转型。

重庆“运管服平台”深度运用空间智能技术，通过空间叠加分析、地理定位等核心能力，打造 300 层专题图层与统一空间底图，将 166 项重点风险源按空间属性分级分类精准落位，实现风险清单化管理与“风险—任务—资源—督办”的空间联动闭环，累计闭环处置各类治理问题近 70 万件。

南京以空间智能技术为核心纽带，运用空间数据融合、空间关联匹配技术，将 13 亿余条各类数据与 1.2 万个综治网格、1600 余个应急网格进行空间绑定，通过标准地址库实现“人、房、地、事、物”精准空间落位，同时推动地下空间风险可视化，实现城市运行与安全治理一体化升级。

4.4.2 空间智能赋能数字城市建设，实现跨部门协同与数字资产复用

智慧城市建设中普遍存在时空基准不统一、数据分散割裂、部门协同低效、模型与数据难以复用、治理被动响应等痛点，各系统自成体系，无法实现城市级统筹与高效联动。

通过空间智能技术，建立统一城市时空坐标系，将道路、建筑、管网、人口、事件等全要素在统一时空维度下汇聚、治理与复用；通过数据主数据化、能力服务化、模型资产化、流程数字化，实现城市状态可计算、可推演、可回放，推动治理从“图上看”升级为“图上管、图上办、主动预演”，从分散建设走向一体化运营。

专栏 4.11

上海以“时空一张图”为牵引，依托空间智能技术构建全市统一时空数据底座，通过空间数据标准化、接口封装等核心能力，将底图、空间分析等基础能力封装为可复用 API，破解部门间数据版本分裂、空间基准不一的痛点，高效支撑 164 个应用系统建设，累计服务调用超 43 亿次，以空间智能打破数据壁垒，显著提升跨部门协同治理效率。

雄安新区借助空间智能技术打造覆盖 1770 平方公里的三维数字

引擎，运用空间建模、模拟推演等核心能力实现“先算后建、先演后用”，通过数字空间复刻物理城市、预判建设与治理风险，推动城市治理从被动响应转向主动推演，同步依托空间关联技术实现区块链资金监管全覆盖，监管金额超 1300 亿元，彰显空间智能在城市规划建设中的前置赋能价值。

广州以 CIM 平台为抓手，运用空间智能技术贯通二维地图、三维模型与建筑 BIM 成果，通过空间关联、规则嵌入等能力，将日照分析、退界校核等治理规则精准嵌入审批场景，推动空间智能从“可视化展示”向“实质性治理”转型，实现城市更新与模型迭代的自动触发，让城市数字底座“常用常新”，筑牢城市长效治理的数字底盘。

4.4.3 空间智能赋能城市生命线防控，构建风险预警与管控体系

城市生命线安全建设面临以下问题：一是地下设施隐蔽性强，管网、管廊等分布广，隐患排查难度大，易出现重复开挖、施工风险；二是风险研判缺乏精准性，多依赖经验判断，难以实现提前预警，事故处置多处于“事后抢险”阶段；三是跨部门、跨主体协同效率低，数据分散、联动不畅，应急响应滞后，治理成本偏高。

空间智能技术借助多源传感器实现地下设施与风险的精准感知，依托三维地理信息平台、CIM 平台、BIM+GIS 数字底座，实现设施可视化与“一图统览”；通过 AI 算法、专业模型将经验判断转化为精准评估，搭建联动处置机制，推动风险防控从“事后”前移至“事前”，同时整合跨部门数据、优化协同流程，降低运维与治理成本，实现城市生命线安全的主动防控与高效治理。

专栏 4.12

合肥聚焦地下管网、桥梁等重点领域，依托空间智能技术构建“预警—联动—处置”体系，通过近 10 万套前端传感器实现精准感知，结合多模态空间模型精准研判风险，形成多方联动处置机制，累计预警各类险情 728 起，风险隐患排查效率提升 70%、事故发生率下降 60%，节约探测费用约 6 亿元。

厦门在综合管廊领域，通过空间智能技术，融合 BIM+GIS 三维

数字孪生底座，结合 AI 边缘计算与泛在感知设备，实现管廊实景实时映射与异常风险秒级识别，应急响应时间从 2 小时缩短至 5 分钟，运维成本降低 30%，年均节约资金超 600 万元，形成可复制的“平台+硬件+服务”体系，技术推广至 20 多个城市，对外输出合同额超 1.5 亿元。

4.5 空间智能 + 低空：规范运营与产业腾飞的关键基石

低空经济是空间智能拓展产业边界的新兴赛道，其核心价值在于“空域资源管理 + 训练模式革新”。

4.5.1 空间智能赋能低空安全治理，构建全域感知新体系

在低空经济快速发展的背景下，传统安全管理模式面临普遍性挑战：对“低慢小”航空器目标缺乏有效监测手段，发现与识别困难；事件响应依赖人工巡查与上报，处置滞后且协同效率低下；管理方式多以被动响应和单点处置为主，难以实现系统性的主动预防与全域治理，成为制约行业安全、规模化发展的关键瓶颈。

空间智能与无人化集群技术的融合，为构建新一代低空安全治理体系提供了系统化解决方案。其核心在于，通过部署由自动机场、车载移动平台及专用通信网络（如 1.4G 专网）构成的智能感知基础设施，形成一张全域覆盖、全天候值守的低空感知网。结合多种 AI 识别与三维建模算法，该系统能够自动完成对低空目标的实时探测、精准识别、跟踪定位与三维重建，实现从“发现”到“识别”的自动化闭环。更进一步，通过打通与警务、政务等地面处置系统的数据通道与业务流程，可建立“空天地”一体化的协同指挥与任务派单机制，从而将离散的监测数据转化为系统化的处置行动，推动低空安全管理从被动响应向主动预警、从事后处置向过程管控的根本性转变。

专栏 4.13

杭州滨江低空经济安全保障运维项目以空间智能为核心支撑，依托“一网统管”系统与无人机全域感知体系，构建全域三维实景



图 4.5: 空间智能赋能低空安防

地图与实时空天地一体化空间感知能力，如图4.5所示。通过空间定位、多源融合与AI轨迹推演，实现低空目标精准监测、冲突预警与空地协同调度，打通政务与警务数据通道。项目日均执飞118架次，空地协同处置效率提升36.7%，年直接经济效益超400万元，为低空经济与城市安全治理提供了空间智能规模化赋能的实践样本。

4.5.2 空间智能赋能eVTOL沉浸式训练，打造全场景高安全训练新路径

在低空经济，特别是电动垂直起降航空器（eVTOL）等新兴业态的规模化发展过程中，行业普遍面临核心训练瓶颈：高风险、高难度的特殊场景（如极端天气、城市楼宇间、复杂山区）难以在真实环境中安全、低成本地复现用于训练；传统的实飞培训严重依赖宝贵空域与实体飞行器，导致培训周期长、经济成本高昂，且无法让学员在安全无虞的情况下反复进行全场景、全要素的深度演练。

空间智能与混合现实（MR）技术的融合，为系统性地构建新一代沉浸式飞行训练平台提供了关键解决方案。其核心路径在于，利用高性能三维空间智能引擎，实时生成与驱动高逼真度的360度全景虚拟飞行视景与环境动力学仿真。通过MR头显设备，系统可将飞行员座舱内的真实操作界面与外部完全虚拟的飞行场景进行精准、稳定的实时融合，创造出“物理座舱+虚拟世界”的高度沉浸式训练环境，如图4.6所示。这

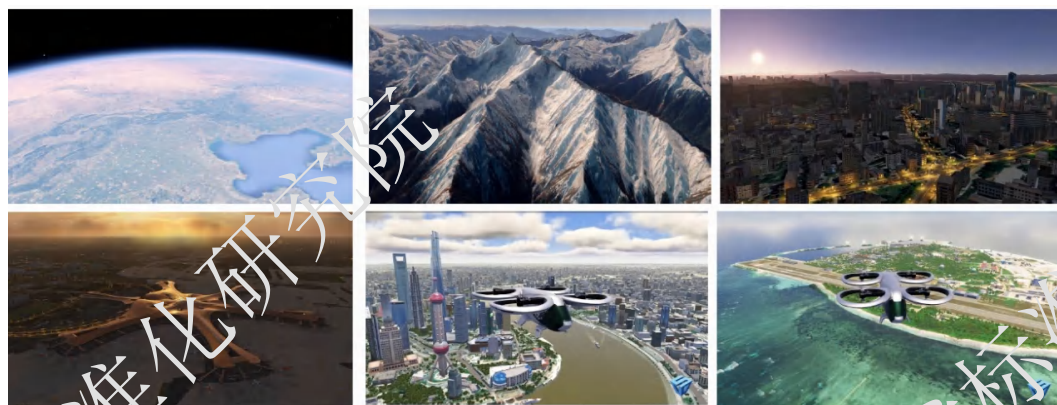


图 4.6: 智能渲染技术实时渲染的场景效果

一技术从根本上突破了物理空间与安全限制，使得任何气象条件、任何地理环境、任何突发故障都能在可重复、可配置的虚拟空间中安全模拟，从而为飞控及管理人员提供了一个涵盖全任务周期、支持无限次演练与精细化任务规划的革命性训练平台。

专栏 4.14

北京微视威公司以空间智能为核心，依托自研国产三维空间智能引擎 ViWo 与 MR 头显设备，打造 eVTOL 飞行模拟器视景成像系统，如图 4.6 所示。借助三维场景实时重建、空间交互等空间智能技术，将高风险飞行训练科目转移至虚拟空间，实现精准模拟、安全实训，相较于传统教学与简易模拟器，训练效果提升 50% 以上、训练周期缩短 40%。同时，大幅降低实飞训练的燃油消耗、设备损耗及维护成本，规避安全事故，成为 eVTOL 低空新业态安全规模化发展的核心训练基础设施，凸显空间智能在低空实训领域的降本增效与技术支撑价值。

4.6 空间智能 + 医疗：精准诊疗与健康普惠的技术赋能

医疗健康是空间智能守护生命健康的特殊场景，其核心价值在于“精准诊疗辅助 + 医疗资源普惠”。

4.6.1 空间智能赋能医疗数据互认，实现跨院互通与精准诊疗协同

在当前的医疗健康领域，数据孤岛现象严重，跨机构互联互通不畅，导致患者重复检查、就医资料繁琐、医生跨院调阅历史数据困难，不仅增

加了患者的诊疗负担，也浪费了宝贵的医疗资源。尽管各地推进全民健康信息平台建设，但多源异构数据尤其是影像等三维空间数据的标准化治理与共享调用仍是瓶颈，无法实现连续、精准的诊疗决策支持。

空间智能技术通过构建标准化的三维影像数据底座，将分散在不同机构的影像资料转化为统一格式、统一索引的可计算空间数据，实现跨院直接调阅与三维重建；同时利用时空锚点（如时间戳、机构编码）对多源检验数据进行精准对齐，将互认条件、有效期等规则固化为系统智能逻辑，从而打破时空限制，让医生在诊疗现场能够实时获取患者完整的历史空间数据与生化数据，支撑连续病情观察、疗效对比与精准诊疗，切实推动检查检验结果互认落地。

专栏4.15

江苏以“省级统一、全域覆盖”模式搭建影像云与检验互认体系，依托空间智能的三维建模、数据标准化技术，将传统科室影像文件升级为可重建、可对比的标准化三维空间数据，实现历史影像即时调阅，打破诊疗数据空间壁垒，截至目前已汇聚近3亿份检验报告，互认超350万次，赋能医疗诊疗高效协同。

甘肃以省级平台牵引互认落地，借助跨域数据传输与空间智能的三维影像重建，支撑三维影像数据跨院无缝调用，在兰州大学第二医院试点中日均互认约7400项，互认比例达70%，单次就诊可为患者节省费用200元以上，凸显空间智能在医疗便民、降本增效中的核心价值。

4.6.2 空间智能赋能院前急救时空协同，实现秒级响应与救治闭环

在院前急救场景中，医院无法实时获取其生命体征与位置状态，导致院内急救资源无法提前准备，患者到院后仍需重复问诊与检查，宝贵的救治窗口期在无效等待中流逝。这种空间上的隔离与时间上的错配，使得急救流程始终滞后于病情变化，难以应对卒中、胸痛等时间窗敏感型急危重症。

空间智能技术通过将急救车辆、患者与医疗资源转化为可定位、可计算的动态对象，在统一时空图上融合实时位置、路况构成的“空间约束”与生命体征、病种识别构成的“风险约束”，实现急救调度的智能决

策与路径优化。院前采集的数据实时回传后，系统自动对齐“车上分钟”与“院内分钟”，提前触发绿色通道并智能调度CT、导管室等资源，让医院从“被动接诊”转变为“主动迎接”，真正实现“上车即入院”的秒级协同救治闭环。

专栏 4.16

深圳以“市级统一调度+全流程数据联动”推进智慧急救建设，空间智能将车辆实时位置与患者生命体征融合计算，生成最优资源匹配与行驶路径，实现派车效率与协同深度双提升，10秒接听率提升至约98.5%，接听-派车平均反应时间缩短约20秒。

江苏徐州升级5G救护车并搭建一体化平台，空间智能将急救全流程转化为可计算的时空链，实现从“被动接诊”到“主动迎接”的转变，目前主城区4家核心医院联网运行，卒中、胸痛等时间窗敏感病种的救治效率显著提升。

4.6.3 空间智能赋能辅助诊断升级，实现诊疗效率与准确性双提升

在医疗辅助诊断领域，医生长期被大量重复性的影像阅片、病理筛查工作占据精力，且传统二维阅片方式难以充分利用三维医学影像中的深层空间信息，导致诊断效率受限、微小病灶易漏诊，医生也难以将核心精力聚焦于复杂病例的临床决策。此外，病理切片等微观尺度的诊断高度依赖个人经验，缺乏标准化的质控与可追溯的诊疗记录。

空间智能技术通过赋予系统对三维医学影像的“空间理解”能力，将CT、病理切片等数据从传统平面图像升级为可计算、可定位的空间结构。具体而言，空间智能可在大幅面病理切片中精准定位可疑病变区域（空间定位），提取病灶的形态学特征并与知识库匹配（空间感知），对同一患者的历次影像进行纵向时间对比与横向组织评估（时空分析），同时将整个诊断过程沉淀为可追溯的结构化记录，从而让系统从单纯的“看图识别”进化为辅助医生进行“空间结构分析”的智能诊疗伙伴，显著提升诊断效率与准确性。

专栏 4.17

深圳宝安区人民医院以宫颈液基细胞学筛查为突破口，依托空间智能将病理切片转化为高维空间图像，实现在微观尺度上精准定位可疑病变区域并提取形态学特征，累计完成 98000 余例样本诊断，系统敏感度达 99.9% 特异度达 85.7%。

河北省胸科医院在肺部疾病诊疗中引入 AI 影像系统，借助空间智能将胸部 CT 三维体数据转化为可计算的空间结构，实现肺结节的秒级定位、量化标注与历次影像的时空对比，将传统 10 分钟的人工阅片压缩至 5 秒内完成初筛，为医生提供包含几十项参数的细颗粒度报告，大幅降低漏诊风险。

第5章 十大未来发展趋势

空间智能作为数字经济与实体经济深度融合的核心支撑，是国家科技竞争力的重要体现。以下将立足当前国内外发展格局，结合技术迭代趋势与产业应用需求，对中国空间智能未来发展方向进行系统展望，以期行业高质量发展提供路径指引。未来10年，中国空间智能将进入“技术融合深化、应用场景泛化、产业生态优化”的战略机遇期，并将沿着以下十大趋势演进，深刻变革各行各业，为元宇宙的坚实底座构建提供核心驱动力。

5.1 趋势一：感知能力升级，进入主动感知阶段

当前的感知范式正经历从“多传感器数据融合”向“认知系统”的深刻转型。未来的智能感知系统将集主动感知、语义理解与场景建模于一体：传感器不再是被动的数据采集器，而是能依据初步理解动态调整策略的主动单元。结合空间智能大模型，系统实现了从“识别物体”到“理解场景”的认知跃迁，构建了富含上下文信息的空间认知基座。这一基座不仅是构建高保真、可交互数字世界的核心——为元宇宙的动态光影、物理模拟及NPC行为提供环境上下文，更成为驱动产业数字化的关键技术，支撑着智慧城市的数字基座、工厂的可视化管控，以及自动驾驶高精地图的动态更新。

5.2 趋势二：定位网络泛在，支撑全域位置服务

定位技术将从提供离散坐标点的服务，发展为构建全域覆盖、室内外无缝衔接的空间定位网络。其核心在于深度融合GNSS、UWB、视觉SLAM与通信信号（5G/6G），并引入大模型对复杂遮挡环境进行空间拓扑预测与补全。终端将向无感化发展（集成于穿戴设备、物联网模块），使精准位置成为像网络连接一样的基础服务。为元宇宙实现虚实无缝导航与基于空间位置的区域性社交提供核心技术。在物理世界，将催生全新

的商业模式：基于厘米级定位的室内导航、仓储物流货物到人的精准对接、公共场所的紧急救援引导，彻底消除室内外定位的盲区与体验割裂。

5.3 趋势三：重建引擎迭代，迈向实时动态仿真

三维重建技术将从追求静态场景的几何与纹理保真度，迈向实时、动态、可语义编辑的新阶段。神经辐射场（NeRF）等技术与物理引擎、空间大模型结合，不仅能实时更新场景变化，更能理解场景的语义构成，并支持用户对数字模型进行自然语言指令编辑。这是低成本、高效率构建元宇宙内容的核心。用户可快速扫描并数字化自己的房间、店铺，并在虚拟世界中进行修改与装扮。在产业中，将极大加速城市元宇宙空间、工业元宇宙空间的构建与更新周期，使其从静态档案变为动态沙盘，支持实时模拟与规划。

5.4 趋势四：推理能力跃迁，赋予机器物理直觉

空间推理将突破基于固定规则和简单轨迹预测的局限，通过物理常识注入的大模型与神经符号（Neuro-Symbolic）系统结合，实现对空间事件因果链的推断与幻想（反事实）场景的模拟，使系统具备初步的物理直觉和时空逻辑推演能力。空间推理赋予元宇宙虚拟世界符合物理规律的真实感和合理性，是构建沉浸式体验的核心。在自动驾驶仿真测试、城市应急管理预案模拟、复杂物流系统优化等领域，将提供强大的决策支持与风险评估能力。

5.5 趋势五：交互技术融合，重塑沉浸门户体验

交互技术将从离散的语音、手势、眼动控制，融合升维为统一、无感、沉浸式的空间门户体验。通过融合 XR 眼镜、空间音频、触觉反馈、肌电感应乃至脑机接口，系统将捕捉用户的自然意图，并通过对环境的认知，提供恰到好处的信息反馈。交互技术定义了用户进入和体验元宇宙的核心方式，是虚实融合的入口和交互层。它让远程协作如同共处一室，让数字内容获得实体质感。在工业维修、医疗培训、高端零售等领域，将催生新一代的远程临场服务和沉浸式体验经济。

5.6 趋势六：世界模型升级，创造共生平行宇宙

从数字孪生的单向映射升级为状态实时同步、指令双向贯通的共生系统，让世界模型在虚实交互中持续进化。物理世界的任何变化瞬间反映于虚拟模型，虚拟世界的仿真推演结果直接控制物理设备执行。这不仅是数据同步，更是世界模型与现实世界相互验证、持续优化的核心机制。从智慧城市运营、工业智能制造到个人生活管理，人类可通过元宇宙这一直观、交互式门户，高效地管理、优化和体验物理世界，实现虚拟与现实从融合到共生的根本性跨越。

5.7 趋势七：记忆体系演进，构建全球数字档案

空间知识图谱将演变为一个持续自我更新、具有时空版本管理能力的分布式空间记忆体系。它能自动记录空间中实体状态的历史变化轨迹（如记录一棵树过去五年的生长变化），并关联多源信息（如该时期的天气、养护记录），形成可查询、可溯源、可推理的全球尺度空间数字档案。该体系为元宇宙构建连续、可信的历史时间线，是虚拟世界文明感和真实感的重要来源。在城市治理、环境监测、文化遗产保护等领域，提供前所未有的宏观洞察与微观追溯能力。

5.8 趋势八：群体智能升维，革新智能体互联网

智能体相互链接协同，演化升级形成虚实融合、自主协作的全域智能体互联网生态系统。物理世界中的智能体实时采集环境变化并进行自主响应与协同作业；虚拟空间中的智能体基于时空记忆体系进行历史回溯、模拟预判与策略优化。二者通过双向数据闭环与任务协同，共同构建持续进化的智能体互联网络，使空间智能从自主演化升级为动态交互与协同推演，最终实现物理世界与数字空间的无缝映射与协同演进，为智慧交通、智慧城市、智能制造等领域提供全域感知与协同决策优化的全新能力。

5.9 趋势九：安全能力内生，构筑智能安全防线

安全技术从边界防护、数据加密，转向内嵌于系统设计本身包含隐私计算、对抗训练、可解释人工智能与动态信任评估的一体化框架。系统能在数据采集端进行脱敏，在算法层面抵抗物理对抗攻击，并能向用户解释关键决策的依据，构建可验证、可审计的信任机制。空间安全是元宇宙经济系统、社会系统得以成立的基石。确保虚拟空间中的财产、隐私和交互安全，防止新型空间犯罪，是产业健康发展的生命线。

5.10 趋势十：应用模式创新，赋能千行百业发展

空间智能将重塑人、机、物三元融合世界的运行逻辑，诞生以空间数据为生产资料、以空间算力为生产力、以空间交互界面为生产关系的全新应用模式。这一趋势不仅为元宇宙构建了虚实共生的经济系统与价值闭环，更将推动数字系统从二维屏幕迈向三维空间的质变，深度赋能农业、工业、服务业乃至社会治理的全链条，使“空间即界面，世界即界面”成为现实，开启万亿级规模的泛智能应用市场。

第6章 发展建议

当前，以元宇宙、人工智能等技术深度融合为特征的空间智能，正成为全球科技竞争与产业变革的新制高点。我国凭借在数字孪生、即时通讯、地理信息等领域的坚实基础，空间智能发展取得了显著进展，初步构建了从数据获取、处理到应用服务的产业链条。然而，与全球领先水平相比，我国空间智能发展仍处于爬坡过坎的关键阶段。面对当前空间智能发展中存在的政策标准滞后、技术创新能力低、生态体系不完善、监管治理机制不健全等问题，结合未来发展趋势，提出以下对策建议，为行业高质量发展提供保障。

一、加强政策引导，健全标准体系

研究制定空间智能专项发展规划，明确发展目标、重点任务和保障措施。设立空间智能发展专项资金，对关键核心技术攻关、示范应用项目给予财政补贴和税收优惠。鼓励地方结合区域优势建设空间智能产业集聚区，在用地、人才、金融等方面提供配套支持，培育特色产业集群。同时，依托元宇宙标准化组织，加快元宇宙体系建设，统筹推进空间智能国际国内标准化工作，积极参与国际标准制定，统一数据格式、接口规范等核心标准，优先研制空间感知精度、实时交互延迟等关键技术标准，为产业规模化发展奠定基础。

二、优化创新体系，提升攻关效能

强化空间智能技术战略布局，明确其作为元宇宙核心使能技术的战略定位，制定系统性发展路线图，推动空间感知、实时构建、虚实交互等技术方向与元宇宙应用需求深度对接。优化关键共性技术攻关机制，围绕空间智能基础算法框架、开发工具链、评测验证环境等共性需求，引导产学研用协同创新，加快形成支撑元宇宙规模化应用的技术底座。建立需求导向的创新资源配置机制，以元宇宙典型场景开放牵引技术迭代，推动基础研究与应用转化有效衔接，为元宇宙从概念走向落地提供系统性技术支撑。

三、构建产业生态，强化人才引进

加快研发空间智能通用基础模型与开发工具链，形成统一的开发框架和接口标准，避免重复造轮，降低技术门槛和研发成本。探索空间数据资产化与流通机制，明确数据权属、评估标准和交易规则，建立合规高效的数据交易平台，促进优质数据供给。构建产学研用协同创新平台，联合企业与高校开展共性技术攻关，加强空间智能领域高端人才引进与培养，设立交叉学科，完善人才梯次结构，打通从实验室到产业化的转化通道。设立空间智能产业基金，引导社会资本投向初创企业和创新项目，定期举办空间智能创新创业大赛和应用场景开放对接活动，激发市场活力。

四、完善治理体系，筑牢安全防线

建立动态交互场景下的空间数据监管体系，针对数据跨境流动、实时共享等环节强化技术防控手段，探索建设空间数据安全监测与预警平台。健全个人隐私保护机制，规范精确位置、运动轨迹、空间行为等敏感信息的采集、使用与留存，推广应用隐私计算、差分隐私等技术。推动空间智能算法透明度与可问责性建设，建立算法备案、评估、公示制度，制定算法伦理规范指南，防范空间资源分配不公和空间行为歧视等伦理风险。鼓励行业自律，建立多方参与的治理机制，在保障安全的前提下为产业创新留足空间。

中国电子技术标准化研究院

通信地址：北京市东城区安定门东大街1号（100007）

系 人：罗肖飞

联系电话：010-64102801

