



XXXX

VR/AR与超高清视频产业体系安全研究

鲍有能¹, 贺禹涵¹, 冯大权¹, 王振中²

(1. 深圳大学数字创意研究中心, 深圳 518060;

2. 中央广播电视总台技术局, 北京 100020)

摘要: 在5G-A持续演进和6G沉浸式通信研究推进背景下, VR/AR与超高清视频产业体系安全已由单点产品供给问题转化为关键能力、平台接口和跨层业务连续性共同作用的系统问题。本文从产业链主体和业务技术架构两个互补层面分析VR/AR与超高清视频产业体系安全。在产业链层面, VR/AR产业可划分为上游器件基础、中游终端系统和下游内容应用; 超高清视频产业可划分为前端采集制作、中端内容分发和终端呈现消费。在跨产业比较中, 二者统一映射至上游—中游—下游框架。基于公开资料, 本文梳理主要发达经济体的产业布局及其优势、局限与启示, 分析我国2020—2025年超高清视频产业的年度统计序列, 并构建国内外企业组成的双线案例矩阵。研究发现, 我国在终端制造、网络基础设施、显示与制播、场景应用等方面已形成较好基础, 但VR/AR在XR专用核心器件供给、适人化终端和优质沉浸内容方面, 超高清视频在专业制播工作流、跨平台分发和终端呈现质量方面, 仍面临集中于特定产业链环节的关键能力约束。据此, 本文提出以联合验证为主线、以标准协同和开放生态为支撑、以风险监测和韧性恢复为保障的改进路径。

关键词: 虚拟现实; 增强现实; 超高清视频; 产业链; 产业体系安全; 通信—计算—媒体协同

中图分类号: TN919.8

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Industrial system security in the VR/AR and ultra-high-definition video industries

Bao Youneng¹, He Yuhan¹, Feng Daquan¹, Wang Zhenzhong²

1. Digital Creative Technology Research Center of Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

2. Technology Bureau of China Media Group, Beijing 100020, China

Abstract: Against the backdrop of the continuous evolution of 5G-Advanced and the advancement of immersive communication research toward 6G, the industrial system security of VR/AR and ultra-high-definition (UHD) video has evolved from a single-point product supply issue into a systemic issue jointly shaped by key capabilities, platform interfaces, and cross-layer business continuity. This paper analyzes the industrial system security of VR/AR and UHD

收稿日期: 2026-06-25; 修回日期: 2026-09-04

通信作者: 冯大权, fdquan@szu.edu.cn

基金项目: 中国工程院咨询项目“提升新兴产业体系安全的若干重大问题研究”(项目编号: 2025-PP-11-10)

Foundation Items: Chinese Academy of Engineering Advisory Project "Several Major Issues in Enhancing the Security of Emerging Industrial Systems" (Project No. 2025-PP-11-10)



video from two complementary perspectives: industrial-chain stakeholders and the service-oriented technical architecture. At the industrial-chain level, the VR/AR industry is divided into upstream component foundations, midstream terminal systems, and downstream content and applications, while the UHD video industry is divided into front-end acquisition and production, midstream content distribution, and terminal presentation and consumption; in cross-industry comparisons, the two chains are uniformly mapped onto an upstream – midstream – downstream framework. Based on publicly available sources, this paper reviews the industrial layouts of major developed economies together with their advantages, limitations, and implications, analyzes the annual statistical series of China's UHD video industry from 2020 to 2025, and constructs a two-track case matrix composed of domestic and foreign enterprises. The results show that China has established a solid foundation in terminal manufacturing, network infrastructure, display and broadcast production, and scenario-based applications; however, the VR/AR industry still faces critical capability constraints concentrated in specific industrial-chain segments in the systematic supply of XR-specific core components, ergonomic terminals, and high-quality immersive content, while the UHD video industry faces similar constraints in professional production workflows, cross-platform distribution, and terminal presentation quality. Accordingly, this paper proposes an improvement path with joint verification as the main thread, standard coordination and open ecosystems as supporting mechanisms, and risk monitoring and resilience recovery as safeguards.

1 引言

在 5G-A/6G、算力网络和媒体业务智能化持续演进的背景下，虚拟现实（virtual reality, VR）/增强现实（augmented reality, AR）与超高清视频的应用边界正由单一终端场景向沉浸式通信、智慧家庭、工业协同和公共文化服务等领域拓展[1-3]。与传统视频业务相比，这类业务同时依赖终端算力、编解码、网络传输、云边协同和内容平台，其体验连续性受带宽、时延、抖动、同步、计算卸载和内容安全等多重因素影响。因此，这些产业既是数字创意产业的重要组成部分，也直接关系到信息通信网络的业务承载、媒体处理和服务保障能力。

已有研究围绕移动 VR/AR 的通信与计算融合、视频处理与传输、IPTV 业务架构和 5G-Advanced 扩展现实增强，形成了较为系统的工程认识[4-7]。相关工作表明，终端能力只有通过网络、算力、媒体处理与安全机制的协同，才能转化为稳定的业务体验；关键器件、基础软件和跨层接口的约束也应置于端到端系统中加以识别。因此，衡量 VR/AR 与超高清视频产业体系安全，不能只考察某一产品或单一企业的供给状态。

主要经济体已将沉浸式技术、超高清视频和虚拟世界纳入科技竞争、信息基础设施与数字治理议程。美国持续通过法案倡议推动建立沉浸式技术协调机制；日本围绕 4K/8K 制播，韩国围绕虚拟融合产业，欧盟围绕 Web 4.0 与互操作治理，分别推进相关布局[8-12]。我国也通过《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022—2026 年）》以及超高清视频产业相关行动计划，推动技术、网络和应用场景协同发展[13-14]。由此，国际竞争已从单点设备扩展为由芯片、软件、平台、网络、内容和规则共同构成的系统竞争。

为统一分析口径，本文采用图 1 所示的“上游—中游—下游”三段式划分。VR/AR 产业链的上游为器件基础，涵盖专用芯片、操作系统、开发引擎、感知交互、光学模组和近眼显示；中游为终端系统，包括 VR 一体机、AR 眼镜以及与终端运行直接相关的云计算服务和内容平台；下游为内容应用，包括游戏娱乐、教育培训、医疗健康和工业制造等。超高清视频产业链则依次划分为前端采集制作、中端内容分发和终端呈现消费三个环节；在跨产业比较中，这三个环节分别对应上游、中游和下游。该划分用于识别各类能力的供给者和控制者。

本文将“产业体系安全”定义为：在外部冲击、技术迭代和业务规模变化的条件下，关键器件与软件仍可获得，跨层业务能够持续运行，异构系统能够互操作，风险可监测，关键功能可替换、可恢复。这一概念不追求完全本地化，而是考察关键能力是否存在单一控制点、替代接口是否可用、迁移成本是否可控，以及运行与恢复链条是否闭合。

需要说明的是，上述供给可获得性、业务连续性、互操作性、风险监测和功能可替代性，主要承接供应链韧性研究对冲击准备、响应与恢复的基本关注，并非本文独立提出的新维度。本文的领域化处理在于，VR/AR 与超高清视频的最终价值不是由单项产品的可获得性决定，而要通过器件、软件、网络、云边计算、内容平台和终端呈现等多主体、多环节协同兑现；关键接口、软件版本或平台控制点的变化，可能沿业务技术架构传导至业务连续性和 QoE。相关理论依据与识别规则见第 4.1 节。

现有研究较少同时处理以下三个问题：一是

将三段式产业链主体与业务技术运行机制联系起来；二是将政策节点、国内年度序列、企业公开披露和标准接口纳入同一证据框架；三是区分企业公开事实、作者的机制推断和尚待验证的工程建议。因此，部分产业研究往往停留在战略罗列层面，技术研究则通常缺少对供给连续性、跨层协同和生态控制点的解释。

据此，本文从产业链主体和业务技术架构两个互补层面展开分析：前者依据图 1 所示三段式框架，识别上游、中游和下游的能力供给主体及国内外关键控制点；后者解释采集制作、媒体处理、网络传输、云边计算、终端渲染和 QoE 反馈如何共同支撑业务运行。产业链回答“能力由谁供给或控制”，业务技术架构回答“这些能力如何协同运行”。本文的分析价值主要体现在三个方面：一是将产业链主体与业务技术架构进行双层映射，识别单一链位之外的跨层依赖；二是为政策、统计、企业披露、技术资料 and 标准设置不同的证据角色与校准边界；三是建立“公开事实—依赖机制—风险场景—响应措施”分析链条。

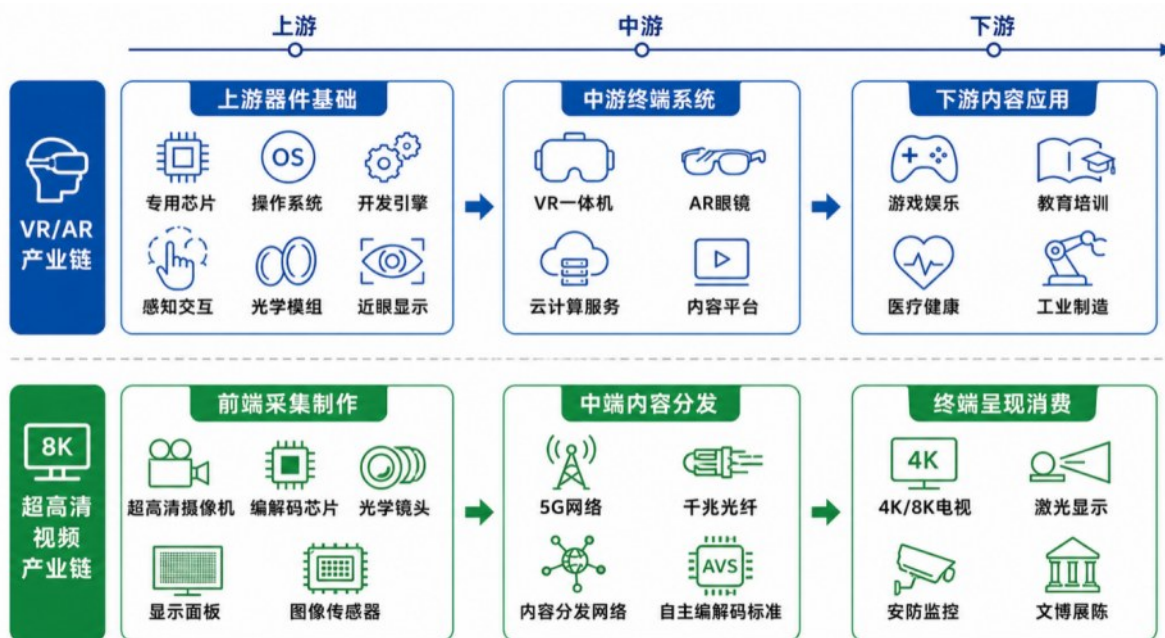


图1 VR/AR和超高清视频产业链示意图



本文不构造缺乏同口径数据支撑的综合指数，也不报告未开展的实验结果。

2 发达经济体产业布局与启示

发达经济体已将VR/AR、超高清视频及其延伸出的虚拟世界、沉浸式媒体和数字内容平台纳入科技竞争、产业升级、信息基础设施与数字治理框架。尽管各经济体的产业基础和政策工具不同，其布局重点均已由单点终端或内容支持转向关键技术、网络条件、平台生态、标准接口和治理规则的协同。图2以四条轨道分别呈现各经济体的政策演进，各节点标注时间与政策事项，节点形状、填充状态和轨道线型的含义见图注。具体政策内容见第2.1—2.4节。下文重点比较各经济体的产业布局、主要优势、现实局限及其对我国的启示，不以政策节点数量衡量政策强度。

2.1 美国：平台生态、网络能力与提案式协调

美国采取组合式布局，涵盖关键技术立法、频谱与广播网络规则、公私试验协同以及沉浸式技术专门法案倡议。在产业层面，关键控制点集中于XR专用SoC与GPU、基础软件和开发引擎、云服务、终端操作系统及内容分发平台。平台企

业借助开发接口、硬件参考设计和应用分发机制，将上游计算能力、中游终端系统和下游内容生态连接起来。在政策层面，图2同时呈现已生效的关键技术与网络措施、公私协同计划以及提案式协调机制。2025年3月25日，美国众议院和参议院分别提出与沉浸式技术领导力相关的法案H.R. 2321和S. 1106，并将其转交有关委员会审议；截至证据核验日，两项法案仍处于提案阶段，不能表述为已经出台或实施的法律[8]。

美国的主要优势在于关键软硬件控制点、开发者生态和内容分发渠道构成了相互增强的平台体系，使单项技术能够较快转化为跨终端服务。这种集中化结构也存在局限：专门的联邦协调机制尚未完成立法，闭源平台、专有扩展和应用分发规则可能增加第三方的适配与迁移成本，平台企业自身也受到制造能力、云容量和跨供应商协同等因素的制约。我国不能仅补强终端产品，还需同步提升上游芯片、基础软件和开发工具能力，中游终端、云网与分发能力，以及下游内容供给和开发者生态，并通过开放接口与联合业务验证机制降低单一平台锁定风险。

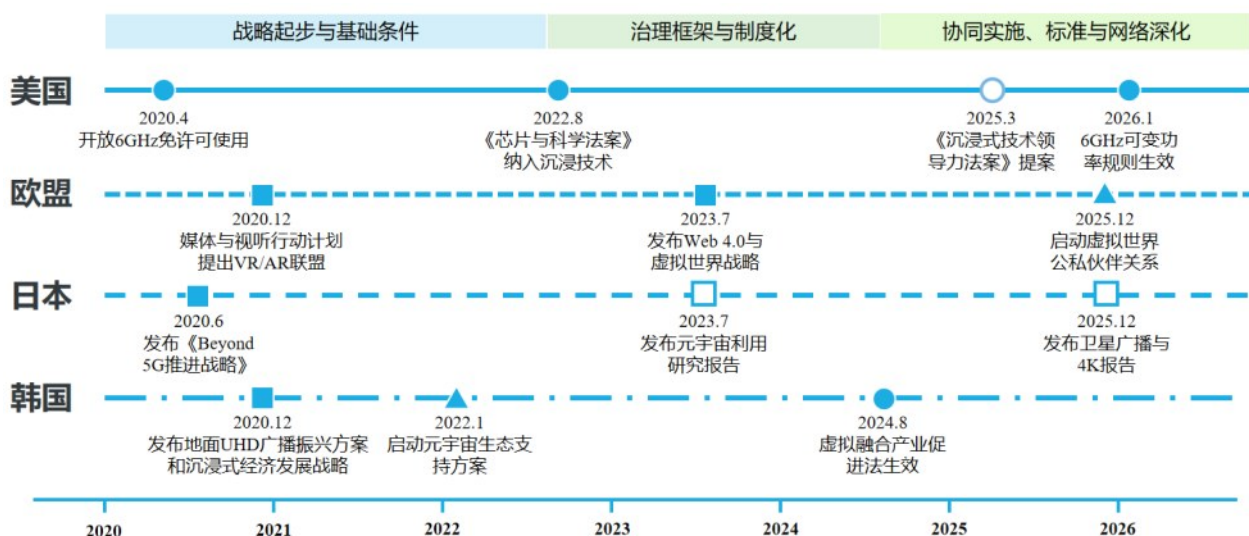


图2 2020—2026年主要经济体沉浸式技术与媒体网络政策工具演进。注：不同轨道线型分别对应美国、欧盟、日本和韩国；圆形表示法律、规则或国际标准类工具，方形表示战略、行动计划、备忘录或报告类工具，三角形表示公私协同、支持计划、观测或试验平台类工具；

2.2 日本：超高清工作流与精密制造协同

日本长期围绕4K/8K制播、专业摄录、显示终端和内容工业建设超高清体系[9]。从图2所列政策节点看，其布局随后进一步拓展至元宇宙互操作、数据治理与安全可信机制、卫星广播与4K业务模式，以及化身界面标准等领域。研究会报告与卫星广播工作组总结均属于非约束性政策建议，国际标准的发布也不等同于国内强制法规。由此，日本形成了连接上游图像传感器、精密光学和专业设备，中游摄录、制作与显示工作流，以及下游内容IP和传播场景的产业体系。

日本的主要优势在于精密制造与专业工作流的长期协同，传感器、光学、摄录设备和内容生产之间具有较强的工程衔接能力。与其在器件、设备和制作流程方面的优势相比，现有证据不足以表明日本对跨平台基础软件和全球内容分发平台具有同等控制力；部分治理安排也仍停留在建议性文件层面。这一经验表明，我国应协同推进高端器件、专业设备与内容能力建设：既提高上游关键器件和专业装备的可获得性，也完善中游制作软件与 workflows 适配，并增强下游优质内容和文化IP的持续开发与转化能力。

2.3 韩国：网络、终端、内容与制度联动

韩国以沉浸式经济发展战略为基础，将网络基础设施、显示与终端、内容应用、人才培育和制度供给纳入同一政策框架[10]。其中的产业规模、企业数量、人才规模和投入规模等表述属于目标或计划，不能视为已经实现的产业绩效。

韩国的优势在于将上游技术供给、中游网络和终端建设、下游内容应用与制度保障纳入同一推进框架，并以场景项目连接政策与产业主体。但政策目标、预算安排和示范项目本身不能证明核心器件、基础软件和商业化成效已经形成稳定闭环；公开证据也不足以说明全部计划均达到预期绩效。我国可借鉴其跨部门协同和场景牵引机制，同时为每项政策工具设置可复核的技术、部

署和应用指标，避免以规划目标替代实际能力、以项目数量替代业务连续性。

2.4 欧盟：互操作治理与数字主权

欧盟的布局由产业对话逐步走向制度化协同：2020年媒体与视听行动计划提出VR/AR产业联盟，2022年形成产业协同路线，2023年发布Web 4.0与虚拟世界战略[11-12]，此后通过公私伙伴关系、产业观测数据和标准讨论推动实施。图2显示，后续政策已将关注点扩展至产业依赖监测以及XR芯片与组件等议题。联盟声明、行动计划和伙伴关系安排不具有强制性法规效力，规划资金也不等于已经完成的实际支出。XR芯片与组件试验线仍处于研讨和概念设计阶段，不宜表述为已建成设施。

欧盟的优势主要体现在开放互操作、数据治理、平台责任、公共接口和供应链依赖识别等制度与规则能力。这些规则可能通过标准接入、数据处理和合规要求影响企业的迁移成本与市场准入。但多项工具仍属于非约束性战略、联盟共识或待实施的合作机制，不能仅根据政策体系的完整程度直接推断产业设施与企业绩效。我国应将标准参与、数据治理和安全合规前置于产业链建设，同时保留可替代接口和跨平台迁移能力，避免在产品国际化阶段再被动开展规则适配。

2.5 比较启示

从三段式产业链看，美国突出对上游计算与软件平台、中游终端系统和下游开发生态的纵向控制；日本突出上游精密器件与中游专业制作工作流的协同；韩国突出上游、中游和下游产业组织与制度供给的联动；欧盟则突出跨链位互操作与可信治理。这些路径共同表明，产业体系安全已由单点产品问题演变为技术供给、接口规则、业务验证和治理能力共同作用的系统问题。我国不宜机械复制相关政策工具，而应围绕上游关键能力、中游跨主体协同、下游内容应用和横向治理要求建立可验证的闭环。



结合我国现状，上游和中游的优先方向不是笼统扩大终端产量，而是把关键器件、基础软件与终端系统纳入共同验收。行业主管部门可围绕XR专用SoC、光学与微显示、专业摄录设备和基础软件建立关键能力、接口依赖与备选来源清单；企业、运营商、云平台和第三方测试机构则在统一业务负载下开展样机、接口、版本与多来源适配验证。可验收结果应包括关键依赖清单、接口一致性报告、版本兼容矩阵和备选方案覆盖情况，而非仅以项目数量或产品发布数量衡量进展。

下游和横向治理应通过需求侧工具促进内容、平台与终端能力协同兑现。政府采购和示范应用可将跨平台兼容、持续维护和故障恢复纳入验收条件；行业组织可推动测试结果互认、开放接口和标准实施评估；平台企业可通过开发工具、内容扶持和透明的版本策略降低开发者迁移成本。由此形成“场景提出需求—标准规定接口—联合验证能力—市场选择方案—运行数据反馈治理”的闭环，使国外经验转化为适合我国现有产业基础的实施路径。

3 我国数字创意重点领域产业体系的发展现状与案例分析

3.1 资料来源与分析方法

本文采用基于公开资料的目的性多案例研究方法。资料主要来自政府部门和监管机构发布的统计公报、标准组织文件、企业年报与公告、企业官方技术资料、行业研究报告及同行评审文献。样本选择综合考虑其与VR/AR或超高清视频的直接相关性、对图1所示三段式产业链关键环节的覆盖程度、资料可获得性和事实可复核性。国内趋势分析采用国家广播电视总局2020—2025年的连续年度数据；国外政策分析选取制度属性和实施状态明确的时间节点；企业层面选取7家国产企业和5家国外企业建立双线证据矩阵，分

别见表1和表2，并按“主链位+跨层协同”进行标注。

为统一不同来源的证据，本文采用“来源识别—口径对齐—交叉核验—结论分级”的处理过程。官方统计仅在统计对象、时间、地域、品类和分母一致时进行直接比较；政策文件用于确认政策目标和制度状态，不替代实施绩效；标准用于界定技术对象、接口和测试要求，不直接证明产业采用程度；企业年报仅在审计披露范围内使用，集团收入不外推为XR或超高清视频专项能力；产品技术资料只说明标称支持，不等同于真实业务负载下的性能。

企业公开披露还可能受到合并口径、选择性披露和商业动机影响。对此，本文对关键判断至少使用两类不同来源进行交叉核对，并将证据划分为三个层级：来源可直接支持的内容记为“直接事实”，由多类材料相互印证的内容记为“交叉判断”，由事实进一步推导且仍需测试验证的内容记为“作者机制推断”。

3.2 VR/AR产业发展现状

从政策文件、产业报告和企业案例看，我国VR/AR产业已由概念导入和单点示范阶段逐步转向终端迭代、行业应用拓展与区域培育并行的发展格局。《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022—2026年）》从关键技术、终端产品、内容供给和行业应用等方面作出系统部署[13]；多地也围绕整机制造、内容制作、公共服务平台和示范应用推进产业布局。当前，VR/AR应用已覆盖工业制造、教育培训、文旅展示、传媒娱乐和医疗健康等领域，终端形态也由VR头显扩展至MR设备、AR眼镜和空间计算终端[26-27]。由于各地统计口径和公开程度不一，本文仅对多点布局作结构性判断，不对地区产业规模和竞争力进行排序。

按照图1，上游器件基础包括专用芯片、操作系统、开发引擎、感知交互、光学模组和近眼

表1 国产产业链三段式企业案例(7家)

企业	主要链位—细分环节	规模/地位	直接能力	关键依赖
晶晨半导体[15]	上游—媒体 SoC	2025 年营收 67.93 亿元；芯片销量超过 1.74 亿颗	S928X 支持多种格式的 8Kp60 解码；SoC 自研功能模块占比超过 70%	依赖 IP 授权、EDA 工具授权以及少数晶圆代工厂。公司具备媒体处理集成能力，但制造环节和工具授权仍会影响供给连续性。
京东方[16]	上游—XR 显示/超高清系统	2025 年显示器件收入 1664.17 亿元；大尺寸 LCD 市场份额为 36.2%	产品覆盖 Micro OLED、Fast LCD 模组；建成“8K+5G+22.2”转播车	XR 微显示的产能、良率和材料来源未披露。大尺寸 LCD 的市场地位不能外推为 XR 微显示市场份额。
歌尔股份[17]	中游—XR ODM/JDM 与精密制造	2025 年智能硬件收入 537.69 亿元，占营收 55.69%	业务覆盖 MR/AR 器件、模组及整机；基于 Qualcomm 平台开展参考设计	整机集成依赖上游芯片、材料、设备以及大客户协同。歌尔光学不再纳入合并报表后，相关能力边界需相应更新。
PICO	中游—XR 终端/运行时	未公开经审计单体收入；不纳入跨企业规模比较。	终端运行时与企业级设备管理能力。	通用 XR 芯片平台、标准接口与专有扩展并存。
中国电信[18]	中游—运营商云网边	2025 年天翼云收入 1207 亿元；自有及接入智能算力达 91 EFLOPS	形成云边协同推理网络；业务覆盖天翼超高清、云 VR 和视联网	未披露 XR/UHD 专项资源规模、SLA 和部署规模。通用云网规模尚不能直接证明专项业务的连续性。
腾讯云[19]	中游—媒体云/云渲染/分发	CDN 节点超过 3200 个；2025 年云服务经调整经营利润为 50 亿元	云渲染支持 Cloud VR；实时超高清服务支持 8K/144 FPS 以及 HEVC、AV1	GPU 供给和 Cloud VR 的适配范围构成约束，可能影响峰值算力调度以及 AR/MR 业务连续性。
芒果超媒/芒果 TV[20]	下游—内容生产/应用（跨中游制播平台）	2025 年芒果 TV 收入 111.72 亿元；有效会员 7560 万	超高清内容储备达 5.5 万小时；完成 4K 双 Vivid 直播	自研与软件投入增强了内容—制播—分发协同，但核心软硬件来源未披露，不能据此认定外部依赖已消除。

表2 国外关键控制点企业案例(5家)

企业	主要链位—细分环节	规模/地位	直接能力	关键依赖
Qual-comm[21]	上游—XR 专用 SoC/软件平台	XR 专用 SoC 与软件平台覆盖多类终端生态。	XR 专用芯片与软件生态协同支持终端接入。	采用 Fabless 模式，制造供给以及 OEM/OS 协同共同影响落地连续性。
Sony[22]	上游—传感器/专业摄录/虚拟制作	图像传感器与专业影像业务按分部披露。	覆盖传感、摄录与制作的相关产品和工作流。	移动应用与专业影像等业务应按分部边界分别解读。
Unity[23]	上游—实时 3D 引擎/XR 工具链	2025 财年 Create Solutions 收入 6.214 亿美元	XR Interaction Toolkit 提供组件化交互能力；OpenXR Plugin 支持跨设备接入	开放标准可降低适配成本，但第三方平台、云服务、应用商店和专有扩展依赖仍存在。
Meta[24]	中游—XR 终端/OS/平台（延伸下游内容）	Reality Labs 为涵盖 XR 硬件、软件和内容的报告分部。	覆盖 XR 终端与平台生态。	分部口径不能外推为单一产品市场份额；部分业务依赖第三方平台。
NVIDIA [25]	上游—GPU/媒体 SDK（跨中游 CloudXR）	2026 财年收入 2159.38 亿美元，研发投入 184.97 亿美元；开发者超过 750 万	CloudXR 连接 GPU、网络 and XR 客户端；Video Codec SDK 覆盖 8K 与 AV1	晶圆、存储、先进封装、云容量和出口管制等风险可向 XR/UHD 工作流传导。

显示。国产样本中，晶晨半导体提供了媒体处理 SoC 能力的公开证据，京东方提供了 XR 显示与超高清系统能力的公开证据；歌尔股份的精密制造和模组能力则为中游整机集成提供了上游协同支撑。公开资料表明，国内已在媒体处理、显示

模组、精密制造和部分感知交互环节形成工程能力。但在 XR 专用 SoC 与工具链、高端光学与微显示的良率和材料来源，以及基础软件与开发接口等方面，公开证据仍不充分，部分环节还面临外部协同约束。已有单点产品不能直接证明上游



关键能力已全部实现自主可控。

中游终端系统由VR一体机、AR眼镜以及与终端运行直接相关的云计算服务和内容平台构成。PICO体现了XR终端与运行时(runtime)能力,歌尔股份体现了整机集成能力;中国电信和腾讯云则通过云网、媒体处理与云渲染提供跨层支撑。国内在终端制造、产品集成和供应组织方面已形成较好基础,但国外样本中的Qualcomm、Unity、Meta和NVIDIA分别体现了XR芯片平台、开发引擎、终端—操作系统—内容生态以及GPU/媒体SDK等关键控制点。除PICO、Sony和Meta采用同一来源、同一季度的XR出货份额可直接对照外,其余收入、累计设备量、节点数量和产品参数仅用于说明各自链位,不能进行机械横向比较。

下游内容应用已从游戏娱乐扩展至教育培训、工业制造、文化旅游、医疗健康和公共服务。中国电信、腾讯云和芒果超媒/芒果TV等样本连接网络、云服务、媒体处理、内容制播和场景运营,表明国内已具备将终端能力整合为行业解决方案的基础。综合政策、链位与案例证据,现阶段可概括为:硬件与终端的发展快于基础软件和开发生态;行业应用的公开证据较多,而大众消费市场已实现稳定规模化发展的证据仍有限;局部能力建设快于跨平台生态闭环的形成。此处的“快于”仅是基于公开证据覆盖情况和能力闭环完整度所作的阶段性归纳,并不表示本文已经完成全行业增长率或市场规模比较。

以XR应用跨平台迁移为例,表1中的PICO用于说明终端运行时与设备管理能力,表2中的Unity用于说明开发引擎、交互工具和OpenXR插件能力;二者与XR专用SoC、终端操作系统及云网资源共同构成从应用开发到设备执行的依赖链。这里的企业材料用于标注不同位置的公开能力,并不表示所列企业已经组成同一联合部署项目。

从机制上看,OpenXR等开放接口能够降低基础功能的重复移植成本,但平台专用SDK、扩展接口、系统版本、驱动和设备特性仍可能形成适配依赖。当其中一个接口或版本变化而缺少替代路径时,风险可能表现为功能回退、应用迁移受阻或业务恢复时间增加;这属于依据公开信息识别的待验证风险场景,不是对已经发生的供应中断或业务事故的认定。相应措施包括开展接口一致性测试,维护版本兼容矩阵和平台专用能力清单,执行跨设备回归与资产/API迁移检查,并为非核心功能设置可接受的降级与恢复方案。

3.3 超高清视频产业发展现状

《超高清视频产业发展行动计划(2019—2022年)》实施后,我国围绕内容采集制作、网络传输、终端呈现和行业应用持续推进全链条建设[14]。此后,国家和地方继续推动卫视频道超高清化,提升重点节目制作、网络承载和终端接收能力,应用场景也由广播电视扩展至家庭视听、体育赛事、文博展示、医疗影像、安防监控和工业检测。综合现有资料,我国超高清视频产业呈现“终端先行、网络跟进、内容提质、行业应用扩散”的阶段特征。下文以官方年度序列和企业案例检验这一判断,不采用缺乏同口径数据支撑的产业规模估计。

按照图1,超高清视频产业包括前端采集制作、中端内容分发和终端呈现消费三个环节。前端已有4K/8K内容制作、直播和制播系统案例,公开资料也记录了部分国产8K摄像与显示产品以及图像传感产品。但专业摄录体系还涉及HDR/HFR、同步、IP传输和实时制作 workflow,现有证据不足以证明高端专业设备和软件已实现全面替代。中端方面,AVS3等自主编码标准持续推进[28],5G、IPTV、有线网络、内容分发网络和云制播为超高清业务提供了承载基础;终端方面,电视、显示面板和专业显示应用已形成较强的制造基础。三个环节的能力不会自然同步发

展,终端规模与网络资源也不能单独证明前端设备、专业软件和端到端业务连续性已达到同等水平[28-31]。

国家广播电视总局年度统计显示,2020—2025年全国超高清电视频道数量依次为6、9、10、10、10和18个[32]。其中,2020年仅统计4K频道,2021年起统计4K与8K频道合计,两个阶段之间存在口径断点。图3已明确标出这一断点,因此不能将整段序列解释为全程同口径的增长。

节目生产端的年度序列更为连续。2020—2025年,新闻资讯类电视节目高清和超高清制作

比例由49.60%升至93.19%,综艺益智类由45.20%升至91.61%[32]。两条序列均在同一节目类别内进行年度比较,不代表全部电视节目。这些数据反映了相关节目制作高清化和超高清化水平的持续提升,但频道数量和节目比例仍不能单独证明专业摄录设备、软件工具或端到端传输能力已同步具备自主供给能力。

随着终端能力、网络环境和制播组织不断改善,超高清视频已不再局限于电视清晰度升级,而是逐步拓展为支撑高质量数字影像生产、分发和呈现的基础能力。企业案例中,晶晨半导体、京东方、中国电信、腾讯云和芒果超媒/芒果TV

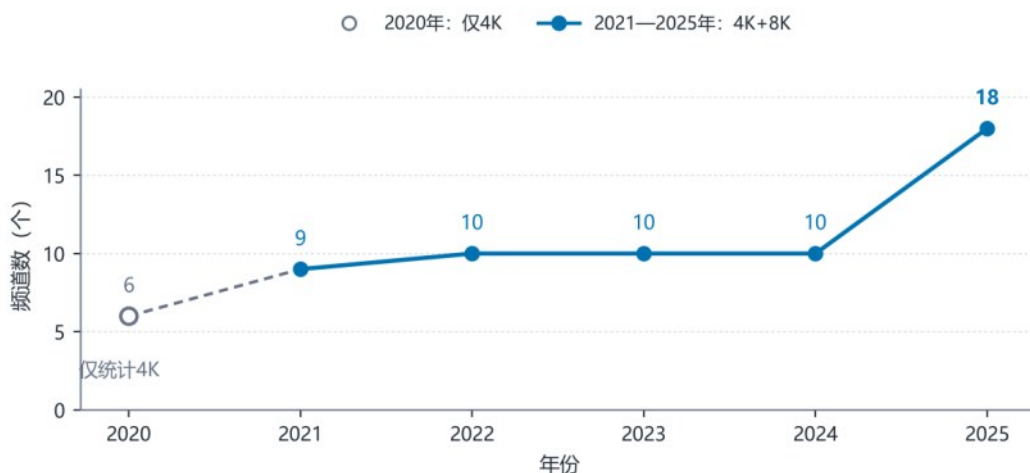


图3 2020—2025年全国4K/8K超高清电视频道数量变化



图4 2020—2025年两类电视节目高清和超高清制作比例



分别提供了媒体处理、显示系统、云网承载、实时分发与内容制播等环节的能力证据。结合年度序列和企业案例,我国在终端制造、网络承载、显示以及制播场景组织方面已具备较好基础;但支持高端专业摄录设备实现全面替代的证据仍不充分,专业软件与工作流适配、高品质内容持续供给以及跨主体端到端验证也有待加强。产业竞争由此从单一显示设备扩展至前端制作、中端分发和终端体验的综合协同。

3.4 三段式双线案例的比较判断

综合产业现状、年度序列和企业案例,我国三段式产业链已形成不同程度的能力基础:上游可观察到媒体 SoC、显示器件和精密制造能力,中游已形成终端集成、运营商云网、媒体云与内容分发能力,下游已形成内容制播和行业场景组织能力。与此同时,国外样本对 XR 专用 SoC、传感器与专业摄录、开发引擎、终端操作系统及 GPU/媒体 SDK 等关键控制点仍具有较强影响力。部分企业横跨多个环节,本文仅标注其主链位和协同关系,不将其另列为新的产业链层级。

国产线与国外线并非一一配对,也不用于判定国家整体强弱。设置两条线旨在将国内上游、中游和下游的供给主体与国外关键控制点并置,识别国内能力基础与外部平台、接口、制造供给及运维条件之间的关联。除同源、同季度、同品类的 XR 出货份额外,其他企业数据均为异质指标,只能支持各自链位的事实说明。在这一证据边界下,下一章将沿图 1 所示两条产业链的上游、中游和下游链位,分析六项主短板及其形成原因。

4 产业体系安全分析框架与产业链关键短板

4.1 链位识别框架与分析边界

本文的安全维度建立在既有供应链韧性、全球价值链治理和生态系统结构研究基础上。供应

链韧性研究强调系统面对扰动时的准备、响应与恢复能力[33];全球价值链治理研究从交易复杂度、可编码性、供应能力及权力不对称解释不同主体之间的协调和控制关系[34];生态系统结构研究则以活动、主体、位置和连接刻画多边协同及其对价值实现的影响[35]。本文并不将这些一般维度表述为原创概念,而是将其落实到 VR/AR 与超高清视频的实时业务、跨层接口、软件版本和 QoE 连续性上。

在操作层面,图 1 所示上游—中游—下游仅用于定位能力供给主体,图 6 用于追踪能力在终端/采集、网络传输、边缘计算、云/媒体处理、分发平台和应用/QoE 之间的传导。某一问题只有同时满足以下条件时才被识别为“主短板”:承担关键业务功能;存在集中控制或跨层接口依赖;缺少经过验证的替代接口、备选来源或恢复路径;其失效可能传导至业务连续性或用户可感知质量。该规则用于从公开材料中筛选需要优先验证的问题,不用于形成不同链位之间的数值排名。

据此,本文在 VR/AR 上游器件基础、中游终端系统和下游内容应用,以及超高清视频前端采集制作、中端内容分发和终端呈现消费六个单元中,分别识别影响关键能力稳定供给或有效兑现的主短板及其形成原因。企业收入、单项产品参数、标准发布或用户规模只在其原始口径内使用;“主短板”不表示该链位不存在其他能力基础,也不构成不同链位之间的强度排序。图 5 据此将六项判断映射至图 1 所示的产业链位置。

4.2 上游环节:供给基础的能力短板

上游环节承担核心器件、专业装备和制作基础能力的供给任务。对于 VR/AR, XR 专用核心器件的系统化供给仍是主约束。高性能 VR 头显处理器仍主要由国外企业主导,而 XR 体验同时依赖专用处理、近眼显示、光学、空间感知和多传感器融合等器件与模块在功耗、散热、体积和

量产条件下协同工作[13][27]。因此，问题不在于是否存在单项芯片或显示器件，而在于这些器件与模块能否面向XR负载形成可验证的系统化供给。从安全机制看，若专用处理、光学显示或感知模块中的关键环节受限且缺少经过整机验证的替代方案，局部供给变化就可能通过功耗、时延和交互链条影响终端持续运行。

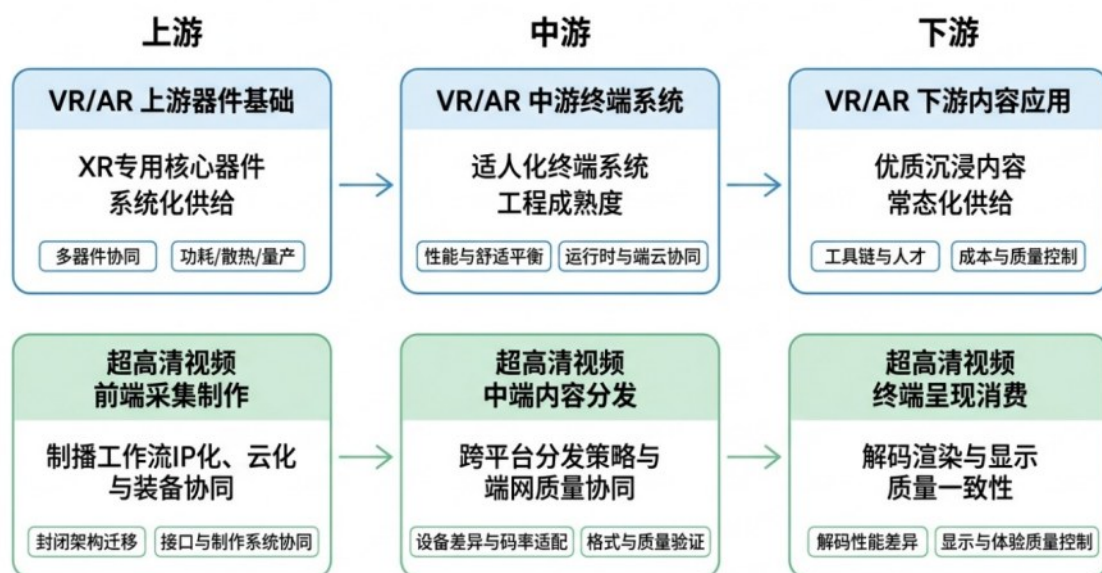
对于超高清视频，专业制播工作流的IP化、云化改造及装备协同仍是前端采集制作的主约束。传统制播体系对专用硬件和封闭架构的依赖会带来建设成本高、部署周期长和弹性不足等问题；4K频道建设还要求摄像机、切换台、IP网关、交换路由、控制监测和制作系统按照HDR/SDR、12G-SDI/IP、NMOS、PTP、元数据和冗余等技术要求进行协同配置[36]。广播级超高清摄像机标准进一步说明，专业装备只有与同步机制、控制体系、接口规范和制作流程实现系统级协同，才能稳定兑现其技术能力[37]。其产业安全含义因此不是单台设备能否工作，而是跨厂商设备、同步协议、控制系统和制作流程在替换或

故障条件下能否保持连续。

4.3 中游环节：系统集成能力短板

中游环节承担将上游单点能力组织为可运行系统的任务。对于VR/AR，适人化终端系统的工程成熟度仍是主约束。现有研究已将终端价格、体积与形态、视觉质量和端云协同列为影响VR发展的重要因素；相关行动计划也将终端体积、续航、散热、画面质量、智能感知和多任务VR操作系统列为需要协同优化的方向[13][27]。因此，终端短板不在于是否已有头显或眼镜产品，而在于性能表现、轻量化与舒适性、自然交互、运行时能力和端云协同能否共同达到可持续使用的工程水平。当运行时、驱动、热设计或端云接口之间缺少版本兼容和降级机制时，单项能力不足会转化为整机可用性和应用连续性风险。

对于超高清视频，跨平台分发策略与端网质量协同仍是中端内容分发的主约束。面向移动终端的分发标准将格式、技术质量和验证要求延伸至系统设计、生产、验收、运行和维护全过程[38]。由此可见，问题不在于网络或平台是否存



每个单元仅突出主短板及形成原因，不表示短板强度、排序或定量差距。

图5 VR/AR与超高清视频产业链各环节的主要短板及形成原因



在，而在于不同平台、网络条件和终端能力下能否稳定保障一致的超高清质量。若媒体格式、质量元数据、网络调度和终端能力之间缺少一致的监测与回退规则，平台切换或网络波动就可能造成质量不可预测地下降。

4.4 下游环节：价值实现的能力短板

下游环节承担将产业链能力转化为持续内容供给和可感知体验的任务。对于VR/AR，优质沉浸内容的常态化供给能力仍是主约束。已有研究指出，内容制作基地和专业开发人员不足、制作成本较高，会限制优质VR内容供给；三维场景编辑、云端实时渲染、VR融合制播、沉浸式音频和动作捕捉等环节共同构成内容生产能力[13][18][27]。因此，判断重点不在于应用场景的数量，而在于高质量内容能否在成本可控的条件下，依托成熟的工具链和专业化组织方式持续生产。当工具链、资产格式和平台分发规则缺少可迁移接口时，内容生产成本和平台依赖会共同限制供给恢复速度。

对于超高清视频，终端解码、渲染与显示质量的一致性仍是终端呈现消费的主约束。相关标准分别从移动终端分发格式和4K超高清机顶盒的技术要求与测量方法出发，对解码、渲染、显示和质量验证提出约束[38-39]。同时，全国有线电视高清和超高清用户规模持续增长，说明该短板不应被表述为终端覆盖或用户基础缺失，而应聚焦不同终端条件下的呈现质量一致性[32]。若解码、渲染、显示和质量测量之间缺少端到端校准，同一内容在不同终端上的差异就难以监测，也难以在设备替换后保持一致体验。

4.5 产业链短板的综合判断

六项判断表明，两条产业链不能被归结为一组脱离具体链位的抽象短板。VR/AR的约束依次表现为XR专用核心器件的系统化供给不足、适人化终端的工程成熟度不高，以及优质沉浸内容的常态化供给能力不足；超高清视频的约束则依

次表现为专业制播 workflow 协同不足、跨平台分发与端网质量协同不充分，以及终端呈现质量一致性不足。前者强调多类器件、多学科技术与用户体验的协同成熟，后者强调从采集制作到分发呈现的质量连续性。图5仅呈现六个链位的主短板及其形成原因，不作强度排序或定量差距比较[13][27][32][31]。

图5与图6分别描述产业链和业务技术架构两个维度：图5回答“各链位的主短板及其形成原因”，图6呈现终端/采集、接入/传输、边缘计算、云/媒体处理、分发/平台和应用/QoE之间的能力映射。图6不构成第二条产业链，也不改变六项链位判断。

5 面向上中下游协同的产业体系安全验证路径

本章围绕图1所示六个链位的主短板组织验证路径。前四节分别提出关键器件—终端—应用联合验证、光学—显示—摄录与制作 workflow 协同验证、基础软件与开发生态验证，以及云—网—边—端—媒体跨层验证方法；这些路径服务于第4章的六项链位判断，不构成另一套短板分类。第五节提出各链位均应遵循的供应链与安全治理要求。

在进入具体验证路径前，该框架可按“确定关键业务场景—分解不可中断功能—映射产业链主体与技术控制点—检查供给、连续性、互操作、监测和替代恢复能力—识别单点依赖与替代缺口—形成监测、替代和恢复措施”的顺序使用。政策制定部门可据此形成需要公共验证和联合攻关的关键能力清单；行业组织可形成接口测试矩阵、认证规则和风险信息通报项目；企业可形成供应来源、软件版本/API、备选接口与故障切换台账。该过程采用场景化规则分级，不以异质公开数据计算统一风险分数。

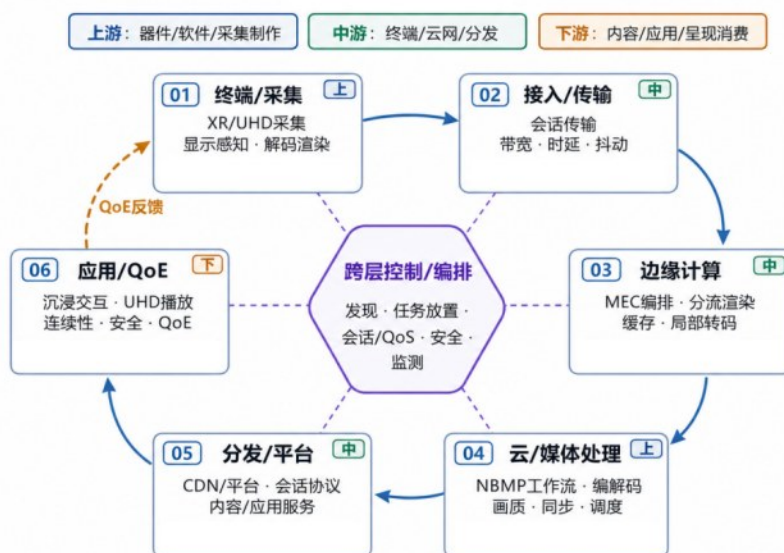


图6 VR/AR与超高清视频的通信—计算—媒体业务技术架构及产业链能力映射

5.1 上游芯片—中游终端—运行时联合验证

针对XR专用芯片，需建立贯通上游芯片、中游终端和下游应用的可验收联合验证链条。在统一业务负载下，应对参考设计、功耗和热约束，以及GPU、NPU、ISP、编解码器和传感融合能力进行验证，并通过OpenXR一致性测试[40]、跨设备回归测试、真实应用适配和多来源兼容性测试，检验芯片能力能否稳定转化为终端与应用能力。验收对象包括样机、接口一致性、应用兼容性、持续版本维护能力和可替换性，不以缺乏同口径数据支撑的国产化率承诺作为验收依据。

5.2 上游光学—显示—摄录与中游制作 workflow 协同验证

应建立联合测试链，覆盖上游光学引擎、微显示封装和量产校准，以及前端专业摄录环节的传感器、镜头、色彩、同步、编码记录与后期制作，并将终端呈现和内容应用作为下游验收场景。不同厂商的规格仅作为能力边界参考；关键指标需在统一测试条件下比较，并结合样机测试结果、良率区间和长期供货证据，依据广播级测

量方法开展分级验收，避免由单项“量产突破”直接推断行业整体供给已经成熟。

5.3 上游基础软件的互操作、跨层迁移与安全维护

基础软件的治理与验证应覆盖上游运行时、3D引擎和开发工具，以及贯穿中、下游的媒体框架、制作工具和分发体系，并建立持续维护机制。验证内容包括OpenXR一致性测试[40]、资产格式、插件/API兼容性、跨设备回归和安全更新。可验收对象包括跨设备测试矩阵、版本兼容性、资产迁移成本、漏洞修复时效以及对标准组织或开源项目的贡献；“自研”或“支持标准”只能说明局部能力状态，不能替代可维护性证据。

5.4 中游枢纽牵引的云—网—边—端—媒体跨层测试

应以中游终端系统、内容分发和云网平台为协同枢纽，按具体业务场景定义QoE/SLA，并利用分离式渲染（split rendering）、MEC联邦（MEC federation）、网络化媒体处理（NBMP）和跨层遥测[41-43]，实现媒体任务、网络资源、算



力资源与下游应用的贯通。在此基础上，应开展跨运营商、跨厂商的真实负载测试和故障测试。验收对象包括面向场景的时延分解结果、抖动与丢包、画质、任务迁移、资源利用率和故障恢复数据。在缺少同场景、同终端、同负载对照的情况下，不设置跨场景统一阈值。

5.5 供应链与安全治理的横向要求

上述路径均应贯穿上游、中游和下游，并满足来源多样性、接口可替换性、软件物料清单与版本记录、供应状态监测、数据与内容安全、DRM/水印/可信执行以及应急恢复等要求。这些要求是嵌入各条路径的横向约束，不构成另一条技术路线。区块链、自动溯源或接入单一平台均不能替代分层安全治理和恢复演练。

6 实施保障与治理机制

实施保障需同时与图1所示的三层产业链和图6所示的业务技术架构相对应：政策工具应按链位明确支持对象与责任主体，跨层机制则应围绕接口协同、联合验证和恢复闭环进行组织。

6.1 公共工程验证与分级评价

财政支持、政府采购和示范应用等政策工具的配置应以可复核的工程目标为依据，重点支持覆盖上游器件与软件、中游终端与分发、下游内容应用的公共测试床建设，以及样机验证、跨平台适配、广播级测试、真实业务负载测试和第三方复核。评价应围绕接口一致性、业务连续性和替换恢复能力分级开展。上述内容属于政策安排建议，不表示相关专项或采购机制已经设立。

在顶层组织上，可由相关行业主管部门明确关键业务场景、公共验证任务和跨部门信息共享边界，标准组织与第三方测试机构负责维护接口、测试方法和认证基线，企业负责报告产品版本、供应变化和故障恢复证据。对跨链位问题，应明确牵头主体、参与主体、验证对象、更新周期和异常升级路径，形成从政策支持、工程验证

到运行反馈的责任闭环。

6.2 标准、认证与开放生态协同

标准与认证用于建立上游、中游和下游的互操作基线，不能替代工程验证。应分层采用现行国际标准、国家标准和行业标准，统一术语与接口，支撑跨主体协同以及场景化一致性与安全评价；同时，持续参与OpenXR规范以及3GPP、ITU-T、ISO/IEC和ETSI等组织的标准制定与治理[40-45]。标准化任务应按链位、场景和接口推进，避免笼统表述为“补齐全部空白标准”。

6.3 企业—高校—科研机构联合攻关与人才支撑

联合攻关应围绕六个链位的主短板及其形成原因设置可验收任务，并由第五章提出的关键器件、专业制播、基础软件和跨层系统验证路径提供工程支撑。企业负责产品迭代并提供工程数据，高校和科研机构负责机理分析、测试方法和跨学科支撑，公共平台负责长期维护和跨主体联合验证。样本企业仅用于能力映射和案例参照，不作为政策指定对象。人才培养与支持应重点提升系统工程、长期软件维护、广播制作和跨学科协作能力。

除联合攻关外，还应通过市场机制降低新技术首次应用和跨平台适配的成本。政府采购、运营商集采和示范项目可把接口一致性、持续维护、第三方复核和恢复演练作为验收条件；认证结果和公共测试数据可为供需双方提供可比较依据；平台企业则可通过开放接口、长期版本支持、开发者工具和知识产权协同，降低内容与应用在不同终端之间的迁移成本。相关工具用于改善进入和采用条件，不替代企业的产品竞争和市场选择。

6.4 风险监测、法规合规与韧性恢复

风险监测应覆盖上游关键产品、软件与API状态，中游供应来源、网络运行、漏洞与版本状态，以及下游个人数据与生物特征数据、内容真

实性与版权风险，并与故障切换和恢复演练相衔接。合规要求还需与替代接口和应急机制联动，使关键业务在局部链位或技术模块受限时，仍能做到状态可监测、服务可切换、功能可恢复。产业体系安全不等同于完全本地化，其核心在于关键状态可监测、关键能力可替代、关键功能可恢复。

短期（1—2年）应以建立可复核底账和完成重点场景试点为目标：形成关键功能、供应来源、软件版本/API和接口依赖清单，选择代表性XR与超高清视频场景开展跨厂商一致性测试，建立异常通报、备选方案和基础恢复演练。短期成效以清单完整性、测试覆盖、问题闭环和备选方案可执行性评价，不设置缺乏同口径数据支撑的产业规模目标。

中长期（3—5年）应把试点机制转化为常态能力：推动关键环节形成多来源供给和可替代接口，将跨平台认证、版本维护和恢复演练纳入采购与运行管理，持续更新风险台账和标准实施评估，并依托真实业务数据检验改进措施对连续性和QoE的作用。中长期目标是形成可监测、可切换、可恢复的制度与市场协同机制，而非追求形式上的完全本地化。

6.5 结论

公开证据表明，我国已在图1所示的三段式产业链上形成不同程度的能力基础：上游具备媒体SoC、显示器件和精密制造等能力，中游形成终端集成、网络基础设施、媒体云与内容分发能力，下游形成内容制播和行业场景组织能力。但VR/AR在XR专用核心器件供给、适人化终端和优质沉浸内容方面，超高清视频在专业制播 workflow、跨平台分发和终端呈现质量方面，仍面临集中于特定产业链环节、需要持续验证和改进的关键能力约束。本文结合发达经济体产业布局、国内年度序列、12家企业双线案例（表1和表2）和标准接口锚点，形成了“产业链主体—业务技

术架构”的双层映射，并建立可复核的“公开事实—依赖机制—风险场景—响应措施”分析链条，为弥补纯战略性产业分析在方法、数据和技术机制方面的不足提供了基础。

本研究仍受公开资料可得性和证据边界的限制：企业披露指标的口径不一，部分跨层企业只能按主链位归类，且缺少统一场景下的测试床数据和同负载对照，因此无法据此给出行业因果估计、综合短板排名或统一性能阈值。后续研究应在同场景、同终端和同负载条件下，验证六个链位主短板的工程边界和改进措施的实际效果，并持续更新关键证据来源、接口版本和业务恢复数据。

参考文献：

- [1] 赵沁平, 周彬, 李甲, 等. 虚拟现实技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 71-75.
ZHAO Q P, ZHOU B, LI J, et al. A brief survey on virtual reality technology[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 71-75.
- [2] 丁文华. 中国数字创意产业的发展——在BIRTV2017主题报告会上的演讲[J]. 现代电视技术, 2017(9): 26-28.
DING W H. The development of China's digital creative industry—Speech at the BIRTV2017 theme report conference[J]. Advanced Television Engineering, 2017(9): 26-28.
- [3] WANG H, DONG H, EL SADDIK A. Immersive multimedia communication: State-of-the-art on extended reality streaming[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2025, 21(7): 1-33. DOI: 10.1145/3721292.
- [4] 周一青, 孙布勒, 齐彦丽, 等. 面向通信与计算融合的5G移动增强/虚拟现实[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 19-33.
ZHOU Y Q, SUN B L, QI Y L, et al. Mobile AR/VR in 5G based on convergence of communication and computing[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 19-33. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018241.
- [5] 董振江, 张东卓, 黄成, 等. 虚拟现实视频处理与传输技术[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 45-52.
DONG Z J, ZHANG D Z, HUANG C, et al. Technology of virtual reality video processing and streaming[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 45-52. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017244.



- [6] 李峰, 杨琛, 李兴达. IPTV 架构下 VR 业务关键技术与解决方案[J]. 电信科学, 2018, 34(11): 119-125.
LI F, YANG C, LI X D. Key technologies and solutions of VR based on IPTV[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(11): 119-125. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018281.
- [7] 肖扬. 5G-Advanced 扩展现实增强技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 160-169.
XIAO Y. Study on extended reality enhancement technology in 5G-Advanced[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 160-169. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024093.
- [8] U. S. CONGRESS. United States Leadership in Immersive Technology Act of 2025: H. R. 2321 (IH) S. 1106 (IS), 119th Congress[EB/OL]. (2025-03-25)[2026-09-03]. <https://www.govinfo.gov/app/details/BILLS-119hr2321ih>; <https://www.govinfo.gov/app/details/BILLS-119s1106is>.
- [9] OKUMURA F. The promised 8K industry in Japan (1)[R/OL]. CDI Technology Management Report Update, 2016(5) [2026-09-03]. https://www.cdi-japan.co.jp/wp/wp-content/uploads/2016/02/CDIPPP5_EN.pdf.
- [10] MINISTRY OF SCIENCE AND ICT. Immersive economy development strategy (Beyond Reality, Extend Korea) [EB/OL]. (2020-12-10) [2026-09-03]. <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?bbsSeqNo=42&mId=4&mPid=2&nttSeqNo=476&pageIndex=&sCode=eng&searchOpt=ALL&searchTxt=>.
- [11] VIGKOS A, BEVACQUA D, TURTURRO L, et al. The virtual and augmented reality industrial coalition: Strategic paper[R/OL]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022[2026-09-03]. DOI: 10.2759/197536. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9aaef6fd-28db-11ed-8fa0-01aa75ed71a1/language-en>.
- [12] EUROPEAN COMMISSION. An EU initiative on Web 4.0 and virtual worlds: A head start in the next technological transition: COM(2023) 442 final[R/OL]. (2023-07-11)[2026-09-03]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023DC0442>.
- [13] 工业和信息化部, 教育部, 文化和旅游部, 等. 虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022—2026 年)[EB/OL]. (2022) [2026-09-03].
MINISTRY OF INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY, MINISTRY OF EDUCATION, MINISTRY OF CULTURE AND TOURISM, et al. Action plan for the integrated development of virtual reality and industry applications (2022—2026)[EB/OL]. (2022)[2026-09-03]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/dzs/wjfb/art/2022/art_3ebd54d32dd04668abe4066182578032.html.
- [14] 工业和信息化部, 国家广播电视总局, 中央广播电视总台. 超高清视频产业发展行动计划(2019—2022 年)[EB/OL]. (2019) [2026-09-03].
MINISTRY OF INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY, NATIONAL RADIO AND TELEVISION ADMINISTRATION, CHINA MEDIA GROUP. Action plan for the development of ultra-high-definition video industry (2019—2022)[EB/OL]. (2019) [2026-09-03]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5419224.htm.
- [15] 晶晨半导体(上海)股份有限公司. 晶晨股份 2025 年年度报告[R/OL]. (2026-03-31)[2026-09-03].
AMLOGIC (SHANGHAI) CO., LTD. Annual report 2025[R/OL]. (2026-03-31) [2026-09-03]. https://static.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2026-03-31/688099_20260331_ZQP1.pdf.
- [16] 京东方科技集团股份有限公司. 2025 年年度报告[R/OL]. (2026-04-01)[2026-09-03].
BOE TECHNOLOGY GROUP CO., LTD. Annual report 2025 [R/OL]. (2026-04-01)[2026-09-03]. <https://static.cninfo.com.cn/finalpage/2026-04-01/1225068510.PDF>.
- [17] 歌尔股份有限公司. 2025 年年度报告[R/OL]. (2026-04-24) [2026-09-03].
GOERTEK INC. Annual report 2025[R/OL]. (2026-04-24) [2026-09-03]. <https://static.cninfo.com.cn/finalpage/2026-04-24/1225160177.PDF>.
- [18] CHINA TELECOM CORPORATION LIMITED. Annual report 2025[R/OL]. (2026) [2026-09-03]. <https://www.chinatelecom-h.com/en/ir/report/annual2025.pdf>.
- [19] TENCENT. 2025 fourth quarter and annual results presentation [R/OL]. (2026-03-18)[2026-09-03]. <https://static.www.tencent.com/uploads/2026/03/18/2804dbdae364ca25b82d21bc8304f1d3.pdf>.
- [20] 芒果超媒股份有限公司. 2025 年年度报告[R/OL]. (2026-04-25)[2026-09-03].
MANGO EXCELLENT MEDIA CO., LTD. Annual report 2025[R/OL]. (2026-04-25) [2026-09-03]. <https://static.cninfo.com.cn/finalpage/2026-04-25/1225178669.PDF>.
- [21] QUALCOMM INCORPORATED. Form 10-K for fiscal year ended September 28, 2025[R/OL]. (2025)[2026-09-03]. https://s204.q4cdn.com/645488518/files/doc_financials/2025/q4/QCOM-09-28-25-FY2025-10-K-Final.pdf.
- [22] SONY GROUP CORPORATION. Form 20-F for the fiscal year ended March 31, 2026[R/OL]. (2026-06-18)[2026-09-03]. https://www.sony.com/en/SonyInfo/IR/library/FY2025_20F_PDF.pdf.
- [23] UNITY SOFTWARE INC. Form 10-K for year ended December 31, 2025[R/OL]. (2026)[2026-09-03]. <https://www.sec.gov/>

- Archives/edgar/data/1810806/000181080626000026/q42025form10-kfiled.pdf.
- [24] META PLATFORMS, INC. Annual report on Form 10-K for fiscal year ended December 31, 2025[R/OL]. (2026)[2026-09-03]. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1326801/000162828026003942/meta-20251231.htm>.
- [25] NVIDIA CORPORATION. 2026 annual report on Form 10-K [R/OL]. (2026)[2026-09-03]. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1045810/000104581026000021/nvda-20260125.htm>.
- [26] 中国信息通信研究院. 虚拟(增强)现实研究报告(2025年)[R/OL]. (2026-01-26)[2026-09-03]. CHINA ACADEMY OF INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY. Virtual (augmented) reality research report (2025) [R/OL]. (2026-01-26) [2026-09-03]. <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202601/P020260121572153557031.pdf>.
- [27] 袁茜茜, 吕星月, 冯大权, 等. 基于技术驱动与服务创新的虚拟现实产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 35-44. YUAN Q Q, LV X Y, FENG D Q, et al. Development of virtual reality industry based on technology drive and service innovation[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2024, 26(1): 35-44. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.01.007.
- [28] MA S W, ZHANG L, WANG S Q, et al. Evolution of AVS video coding standards: Twenty years of innovation and development[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(9): 192101. DOI: 10.1007/s11432-021-3461-9.
- [29] 王贺珍, 何仲强. 广东省超高清视频显示产业标准化路线图研究[J]. 中国标准化, 2025(11): 91-94. WANG H Z, HE Z Q. Study on the standardization roadmap of ultra-high-definition video display industry in Guangdong[J]. China Standardization, 2025(11): 91-94.
- [30] 中国电子信息产业发展研究院, 中国超高清视频产业联盟政策工作组. 超高清视频产业发展白皮书(2021年)[R/OL]. (2021-05-21)[2026-09-03]. CHINA CENTER FOR INFORMATION INDUSTRY DEVELOPMENT, POLICY WORKING GROUP OF CHINA ULTRA HD VIDEO INDUSTRY ALLIANCE. White paper on the development of ultra-high-definition video industry (2021) [R/OL]. (2021-05-21)[2026-09-03]. <https://www.future-forum.org.cn/cn/leon/a/upfiles/file/202105/20210521163544744474.pdf>.
- [31] 中国电子信息产业发展研究院. 超高清视频产业年度发展研究(2024年)[R/OL]. (2024-11-08)[2026-09-03]. CHINA CENTER FOR INFORMATION INDUSTRY DEVELOPMENT. Annual development research of ultra-high-definition video industry (2024)[R/OL]. (2024-11-08)[2026-09-03]. https://epaper.cena.com.cn/pc/content/202411/08/content_11978.html.
- [32] 国家广播电视总局. 2025年全国广播电视行业统计公报[R/OL]. (2026-05-13)[2026-09-03]. NATIONAL RADIO AND TELEVISION ADMINISTRATION. Statistical bulletin of China's radio and television industry in 2025[R/OL]. (2026-05-13)[2026-09-03]. https://www.nrta.gov.cn/art/2026/5/13/art_113_73265.html.
- [33] PONOMAROV S Y, HOLCOMB M C. Understanding the concept of supply chain resilience[J]. The International Journal of Logistics Management, 2009, 20(1): 124-143. DOI: 10.1108/09574090910954873.
- [34] GEREFFI G, HUMPHREY J, STURGEON T. The governance of global value chains[J]. Review of International Political Economy, 2005, 12(1): 78-104. DOI: 10.1080/09692290500049805.
- [35] ADNER R. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy[J]. Journal of Management, 2017, 43(1): 39-58. DOI: 10.1177/0149206316678451.
- [36] 国家广播电视总局. 4K超高清频道建设指南(2024版)[R/OL]. (2024-12-19)[2026-09-03]. NATIONAL RADIO AND TELEVISION ADMINISTRATION. Guide to 4K ultra-high-definition channel construction (2024 edition)[R/OL]. (2024-12-19)[2026-09-03]. https://www.nrta.gov.cn/art/2024/12/19/art_113_69844.html.
- [37] 国家广播电视总局. GY/T 425—2025 广播级超高清摄像机技术要求和测量方法[S/OL]. (2025-10-13)[2026-09-03]. NATIONAL RADIO AND TELEVISION ADMINISTRATION. GY/T 425—2025 technical requirements and measurement methods for broadcast ultra-high-definition cameras[S/OL]. (2025-10-13)[2026-09-03]. https://www.nrta.gov.cn/art/2025/10/13/art_3715_71725.html.
- [38] 国家广播电视总局. GY/T 427—2026 面向移动终端的超高清视频分发格式规范[S/OL]. (2026-05-14)[2026-09-03]. NATIONAL RADIO AND TELEVISION ADMINISTRATION. GY/T 427—2026 specification for ultra-high-definition video distribution formats for mobile terminals [S/OL]. (2026-05-14)[2026-09-03]. https://www.nrta.gov.cn/art/2026/5/14/art_3715_73293.html.
- [39] 国家广播电视总局. GY/T 408—2024 4K超高清度插入式微型机顶盒技术要求和测量方法[S/OL]. (2024-10-16)[2026-09-03]. NATIONAL RADIO AND TELEVISION ADMINISTRATION. GY/T 408—2024 technical requirements and measurement methods for 4K ultra-high-definition plug-in miniature set-top boxes[S/OL]. (2024-10-16)[2026-09-03].



https://www.nrta.gov.cn/art/2024/10/16/art_3715_69160.html.

- [40] KHRONOS GROUP. OpenXR specification: Version 1.1.62[S/OL]. (2026-07-31) [2026-09-03]. <https://registry.khronos.org/OpenXR/specs/1.1/html/xrspec.html>.
- [41] 3GPP. TS 26.567: Split rendering over IMS[S/OL]. Version 19.1.0, (2026-07-06)[2026-09-03]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=4303>.
- [42] ISO/IEC. ISO/IEC 23090-8: 2025 Information technology—Coded representation of immersive media—Part 8: Network based media processing[S/OL]. 2nd ed., (2025-06) [2026-09-03]. <https://www.iso.org/standard/83651.html>.
- [43] ETSI. ETSI GS MEC 040 V3.3.1: Multi-access Edge Computing (MEC); Federation enablement APIs[S/OL]. (2025-03) [2026-09-03]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/040/03.03.01_60/gs_MEC040v030301p.pdf.
- [44] ITU-T. Recommendation G.1035: Influencing factors on quality of experience for virtual reality services[S/OL]. (2021-11-29) [2026-09-03]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1035-202111-I>.
- [45] ITU-T. Recommendation G.1036: Quality of experience influencing factors for augmented reality services[S/OL]. (2022-07-29) [2026-09-03]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1036-202207-I>.

202207-I.

[作者简介]



鲍有能（1982年1月—），男，博士，深圳大学丁文华院士数字创意团队助理教授、硕士生导师。主要研究方向为超高清视频编码与沉浸式通信技术。



贺禹涵（1999年5月—），男，硕士，深圳大学电子与信息工程学院博士研究生。主要研究方向为三维沉浸式通信。



冯大权（1986年7月—），男，博士，深圳大学丁文华院士数字创意团队特聘教授、博士生导师，广东省哲学社会科学重点实验室（文化数字化与文化创新发展）副主任。主要研究方向为沉浸式通信技术。



王振中（1982年1月—），男，硕士，中央广播电视总台技术局技术规划研究部副主任。长期从事4K/8K超高清制播与融合媒体传播领域的发展规划、标准研制和技术创新工作。作为总台代表，长期参与ITU等国际标准组织的相关工作，并参与多项国际、国家和行业技术标准的制定。