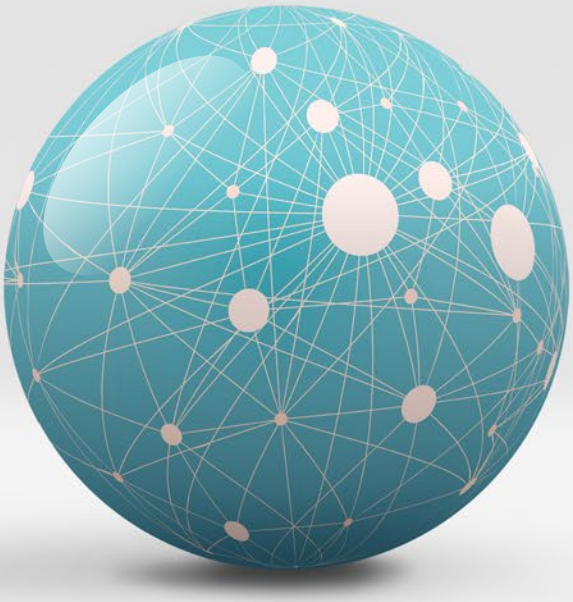
HUAWEI

2024 版

# 通信网络 2030



构建万物互联的智能世界

# 目 录

01
产业趋势 01

02
未来网络场景 03

2.1 下一代人机交互网络：以人为中心的超现实体验 ..... 03
2.1.1 XR：虚实的完美结合，自然的交互体验 ..... 05
2.1.2 裸眼 3D：逼真的影像再现，全新的视觉体验 ..... 04
2.1.3 数字触觉：多维的体感交互，可触摸的互联网 ..... 07
2.1.4 数字嗅觉：深层的感官交互，可品味的互联网 ..... 08
2.1.5 AI Agent( 智能体 )：类真人级交互，独立的个人助理 ..... 09
2.2 住行合一网络：相同宽带体验的第三空间 ..... 10
2.3 空天地全域立体网：提供全球无缝覆盖的无边界宽带体验 ..... 12
2.3.1 地面网络 ..... 12
2.3.2 NTN 网络 ..... 13
2.4 工业互联网：面向智能制造、服务于人机、机机协同的新网络 ..... 14
2.5 算力网络：面向机器认知，联接智算中心、海量用户数据与多级算力服务 ..... 15
2.6 自智网络：无人值守自进化网络 ..... 18

## 03 未来网络关键技术特征 19

**3.1 未来网络技术发展方向 ..... 19**

**3.2 关键技术特征 ..... 20**

3.2.1 立体超宽网络 ..... 21

3.2.2 确定性体验 ..... 24

3.2.3 智能原生 ..... 26

3.2.4 通信感知融合：通信技术外延的全新领域 ..... 28

3.2.5 安全可信：6 级安全可信框架构筑网络安全新底座 ..... 29

3.2.6 绿色低碳 ..... 31

**3.3 总结与技术展望 ..... 32**

## 04 倡议 34

**附录 A：缩略语 ..... 35**

**附录 B：2024 年版本刷新说明 ..... 38**

01

# 产业趋势

今天，智能化已经成为全社会未来 10 年的主要发展方向，中国、欧盟、美国都发布了新的愿景。中国在“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要中将行业智能化作为重要的发展方向，并围绕制造、能源、农业、医疗、教育、政务等给出了明确的发展目标。欧盟在其发布的《2030 Digital Compass》计划中提出 2030 年 75% 的企业将使用云计算、大数据和人工智能服务，90% 以上的中小企业应达到基本数字化水平，并宣布为实现上述目标将加大能源和数字基础设施的投资。美国国家科学理事会（National Science Board）在其《2030 愿景报告》（Vision2030）中也建议未来 10 年必须对人工智能领域加大投入，同时持续投资相应的数字基础设施，包含大数据、软件、计算、网络等，以保持其在智能化时代的竞争力。

行业智能化对企业网络的改造提出了明确的要求，在工信部印发的《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023）》中提出，需要加快工业设备网络化改造、推进企业内网升级，推动信息技术（IT）网络与生产控制（OT）网络融合，建设工业互联网园区网络；探索云网融合、确定性网络、IPv6 分段路由（SRv6）等新技术的部署。在欧盟欧洲工业数字化（Digitising European Industry）的平台规划中，提出要将纳米光电子、AI、5G、IoT 等作为未来工业网络领域的关键使能技术并加大投资，期望在未来获得领导地位。

近几年，生成式人工智能成为全球热点，被认为是使能行业智能化的关键要素之一。生成式人工智能训练依赖庞大的算力基础设施，而网络作为连接算力基础设施的“管道”，对算力的高效利用起至关重要的作用。在工信部牵头印发的《算力基础设施高质量发展行动计划》中提出，为推动算力基础设施高质量发展，应加强重点应用场所光传送网（OTN）覆盖率，

提升 SRV6 等创新技术使用占比，落地枢纽节点数据中心间网络低时延连接。

面向行业智能化的需求，全球领先电信运营商纷纷行动起来，开始在不同程度上探索“联接+”的业务发展方向。中国移动提出 5G+AICDE（AI、IoT、Cloud Computing、Big Data、Edge Computing）的发展战略；中国电信提出 2030 年要构建云网一体的融合架构。中国联通发布 CUBE-Net3.0，明确提出联接 + 计算 + 智能的新发展方向，发布《互联网 2030 白皮书》，凝聚产业共识推进下一代互联网技术和产业演进；德国电信在 2030 展望中提出面向 B2B 业务要成为数字使能者（Digital Enabler），提供网络 +IoT+ 云和数字化的综合服务。根据 GSMA 的调研，面向工业、金融、健康、能源、农业的 B2B、云、IoT 场景将成为全球电信运营商未来“联接 +”最具发展潜力的领域。另一方面，运营商网络自身也在智能化转型，领先运营商们纷纷提出相应的“AI+”战略，比如中国移动全面推进“AI+”行动，目标 2025 年迈上 L4 级自智网络。

畅想 2030 年，人们可以依托高灵敏的生物传感器与智能硬件，通过宽带网络实时监测身体各项指标，并借助 AI 分析端云安全存储的海量历史健康数据，自主驱动个人健康，减少对医生的依赖，提高健康水平与生活质量；人们可以基于万兆家庭宽带、全息通信等新技术，实现更人性化的人机交互体验；人们将基于空地覆盖的立体网络，实现交通工具的网联化，满足自由出行、智慧出行和低碳出行的需求；人们可以利用无处不在的感知技术、有线 / 无线万兆宽带、普惠 AI 和面向千行百业的应用，构建更加宜居的城市数字基础设施；人们可以通过通信感知融合、自动化和智能化的技术实现高效的环境治理；人们可以利用协作机器人、AMR、数字员工等新型劳动力，结合工业互联网，使得从需求提出到生产交付的全过程更准确、更低成本，并提升制造产业的韧性；人们可以将能源物联网和智能电网相结合，构建“源网荷储”全链路数字化的绿色能源互联网，零碳数据中心和零碳站点也有望成为现实。人们可以将区块链、数字水印、AI 打假、隐私增强的计算与内生安全的网络相结合，以保障数字安全可信。

面向 2030 年，通信网络将从连接百亿人向连接千亿物的方向发展。首先，通信网络规模还将持续增长，网络管理将更加复杂，未来 10 年如何通过软件技术创新，让网络可以自配置、自修复、自优化，实现在网络规模持续增加的情况下运营维护成本基本不变，将极具挑战；其次，工农业无人值守、汽车端到端自动驾驶、低空载人飞行、低空无人机外卖和货运等物联场景对网络的覆盖能力、质量保障能力和安全可信提出更高的要求，未来 10 年如何通过协议和算法创新，实现网络能够承载多种业务，同时满足高质量和灵活性的要求将极具挑战；最后，由于摩尔定律放缓，量子计算等新技术还不成熟，计算、存储、网络能效的持续提升已经出现了瓶颈，未来 10 年如何通过基础技术创新构建一个绿色低碳的网络，实现网络容量增加数十倍的同时能耗基本保持不变将极具挑战。

---

通信网络已经成为推动未来世界发展的主导力量之一，与传统产业不同，通信网络经过近两个世纪的发展，依然看不到任何放缓的迹象，短短 30 年，通信技术就实现了从 2G 到 5G 的快速升级，从 ADSL 到千兆光纤家庭的规模部署，未来 10 年通信网络将持续探索新的场景和技术，迎接智能世界的全面到来！

---

# 未来网络场景

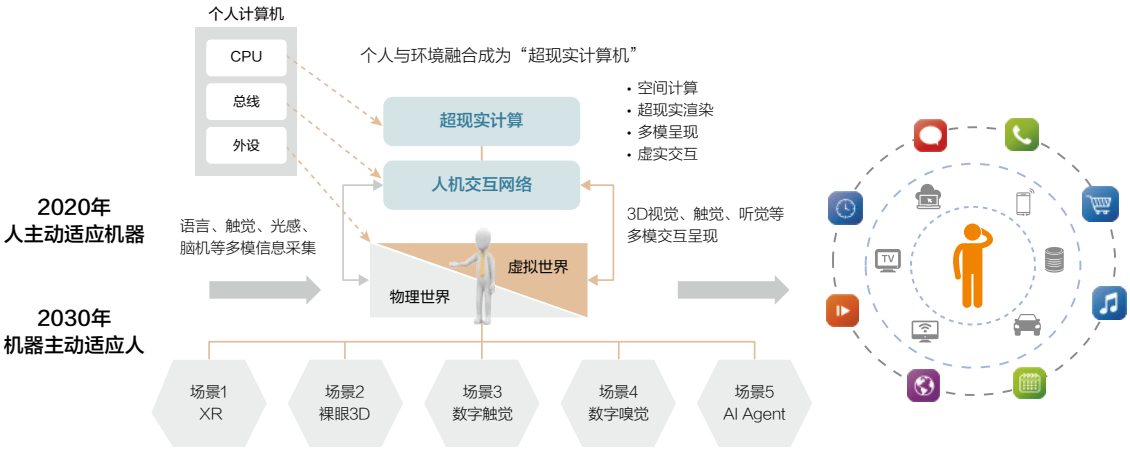
从 1837 年摩尔斯发明有线电报至今，从联接个人、家庭扩展到联接组织，从有线到无线，通信网络不断创新来适应业务的多样性和快速变化。未来 10 年，通信网络将不仅要联接个人，还要联接与个人相关的各种感知、显示和计算资源以及 AI Agent（智能体）；不仅要联接家庭用户，还要联接与家庭相关的家居、车和内容资源；不仅要联接组织里的员工，还要联接与组织相关的机器、边缘计算和云资源，以满足智能世界丰富多样的业务需求。

随着网络联接对象的扩展，业务需求的变化，未来 10 年除了业界已有共识的 5G 向 5G-A/6G、F5G 向 F5G-A/F6G、IPv6+ 向 Net5.5G/Net6G、自智网络从 L2 向 L4+ 持续演进之外，各种新型的网络场景也将不断涌现。

## 2.1 下一代人机交互网络：以人为中心的超现实体验

当虚拟世界还是冰冷机器的时候，人机交互方式是人要主动适应机器，PC 时代我们学习使用鼠标和键盘，智能手机时代我们学习使用触摸屏，传统汽车时代我们需要学习操作按键和旋钮。当虚拟世界达到高级智能阶段的时候，人机交互方式将转变为机器能主动适应人，机器（智能大屏、智能家居、智能汽车、智能外骨骼等）能够理解人的自然语言、手势、眼神，甚至脑电波，实现虚拟世界与物理世界更加自然的融合，为人机交互带来超现实的感官体验。（图 1 超现实人机交互体验）

图 1 超现实人机交互体验




未来 10 年，通信网络需要支持 XR、裸眼 3D、数字触觉、数字嗅觉、AI Agent（智能体）等全新的人机交互体验。这对通信网络提出更高的要求。

### 2.1.1 XR：虚实的完美结合，自然的交互体验

虚拟现实（Virtual Reality，VR，指已经包装好的视觉、音频数字内容的渲染版本）、增强现实（Augmented Reality，AR，指用其他信息或人工生成的内容，覆盖当前环境的图像）、混合现实（Mixed Reality，MR，AR 的高级形式，虚拟元素融入物理场景中）、扩展现实（eXtended Reality，XR，由计算机技术和可穿戴设备生成的所有真实和虚拟环境及人机交互，包含了 VR、AR 和 MR）业务以其三维化、自然交互、空间计算等不同于当前互联网终端的特性，被认为是下一代个人交互的主要平台。

2020 年疫情造成社交隔离，激发了 VR 游戏、虚拟会议、AR 测温等需求爆发，美国数字游戏发行平台 Steam 的 VR 活跃用户翻倍增长，一些厂家也已经发布更加轻便的 AR 眼镜。随着 5G、WiFi 6、光纤等“三千兆”宽带的普及，未来 10 年 XR 业务将迎来快速发展期。据华为预测，2030 年 XR 用户数将达到 10 亿。

中国信息通信研究院在《虚拟（增强）现实白皮书》中，将 XR 的技术架构分为五个部分，包括近眼显示、感知交互、网络传输、渲染处理和内容制作，并对 XR 发展阶段进行了预测，得到了产业界一定的认同。（表 1 XR 业务对网络的需求）

表 1 XR 业务对网络的需求

| 技术体系 | 技术指标 | 部分沉浸 2021 | 深度沉浸 2022-2025 | 完全沉浸 XR 2026-2030 |
|---|---|---|---|---|
| 近眼显示 | 单眼屏幕分辨率 | 2K | 4K | 8K |
| | 视场向（FOV） | 120° | 140° | 200° |
| | 角分辨率（PPD） | 20 | 30 | 60 |
| | 可变焦显示 | 否 | 是 | 是 |
| 内容制作 | 360° 全景视角分辨率（弱交互） | 8K | 12K | 24K |
| | 游戏（强交互） | 4K | 8K | 16K |
| 网络传输（平均值） | 弱交互（Mbps） | 90 | 290 | 1090 |
| | 往返时延：弱交互 | 20 | 20 | 20 |
| | 往返时延：强交互 | 5 | 5 | 5 |
| | 传输媒介 | 有线 / 无线 | 无线 | |
| 渲染处理 | 渲染计算 | 4K/90 FPS | 8K/120 FPS | 16K/240 FPS |
| | | / | 注视点渲染 | |
| 交互设计 | 眼球互动 | / | 眼球追踪 | |
| | 声音交互 | 沉浸声 | 个性化沉浸声 | |
| | 触觉交互 | 触觉反馈 | | 精细化触觉反馈 |
| | 移动交互 | 虚拟移动（行走重定向） | | 高性能虚拟移动 |

当前，XR 逐渐步入深度沉浸体验阶段。2024 年初，Apple Vision Pro 正式发售，屏幕双目分辨率达到 2300 万像素，单眼分辨率超 4K，提供了优秀的清晰度、色彩准确性和视觉体验。我们预测，2030 年 XR 将达到完全沉浸体验，主要表现为 8K 单眼分辨率、200 度视场角、千兆码率。

XR 显示效果的提升必然会对内容提出更高的要求，如果内容渲染在云上实现，则端云 MTP（Motion To Photons，头动到显示画面）交互对承载 XR 业务的网络传输往返时延（RTT）要求是 20ms。如果是流媒体类弱交互的业务，用户晃动较少，则 RTT 时延 20ms 可以满足要求；如果是游戏类强交互的业务，用户晃动频繁，则时延必须控制在 5ms。

因此，为支持 XR 业务未来 10 年的发展，网络需要具备超千兆带宽和 5~20ms 的网络时延能力。

### 2.1.2 裸眼 3D：逼真的影像再现，全新的视觉体验

裸眼 3D 的技术实现主要包含三个环节：对 3D 物体的数字化、网络传输、利用光学或者计算重建显示。

根据显示方式不同，裸眼 3D 可以分成两大类。一类是光场显示（Lenslet），利用双眼视差产生 3D 视觉效果，包括视差障碍、柱状透镜、指向光源等多种技术。这些技术对观赏角度有苛刻要求，需要结合对用户观看位置的实时捕捉，并动态地进行调节。第二类是空间光调制器（spatial-lightmodulator，SLM），利用干涉方法将三维物体表面散射光波的全部振幅和相位信息存储在记录介质中，当用同样的可见光照射全息图时，由于衍射原理，可以再现原始物体光波，为用户提供“栩栩如生”的视觉感受。（表 2 裸眼 3D 对网络的需求）

表 2 裸眼 3D 对网络的需求

| 技术体系 | 技术指标 | Lenslet（2021-2025） | SLM（2025-2030） |
|---|---|---|---|
| 成熟度预判 | | 规模成熟 | 少量应用 |
| 显示 | 尺寸 | 70 寸大屏 | 10 寸小屏 ~70 寸大屏 |
| | 分辨率 | 16K | 16K |
| 交互设计 | 带宽 | ~1Gbps | 10Gbps~1Tbps（10X10cm 物体，就需要 4K@60 帧，10Gbps） |
| | 双向网络时延 | 弱交互：20ms<br>强交互：5ms | 弱交互：5ms<br>强交互：1ms |
| | 传输媒介 | 有线 / 无线 | |
| 交互设计 | 声音交互 | 跟踪位置，空间声场<br>Spatial Sound | |
| | 手势交互 | 手势识别 | |
| | 移动交互 | 跟踪位置，空间计算<br>Spatial Compute | |
| 可用性 | | Audio：3 个 9<br>Video：5 个 9 | |

参考：《IEEE1981.1 触觉互联网》、《Digital Holography and 3D Display》

近几年，基于光场显示的裸眼 3D 通过与用户位置感知和计算技术结合，发展的很快，一些厂商已经商用相关的创新产品，我们判断到 2025 年会在娱乐、商业领域出现大量实用案例，对带宽的需求超千兆，对实时交互的要求较高，在强交互下需要网络时延小于 5ms，商业应用需要 5 个 9（99.999%，1 年内不能工作时间少于 5 分 15 秒）的网络可用性。

基于光学重建的全息技术近几年也出现一些突破，业界已经诞生厚度 10 厘米、投影尺寸在 100 平方厘米左右的产品原型。我们判断未来 10 年，这类小型的全息产品将可以实现商用，用于展会、教学和个人便携终端等场景，对带宽的需求在 10Gbps 左右，对时延的要求为 1~5ms，网络可用性要满足商业 5 个 9 的要求。真人级的全息产品对带宽的要求更高，会过 1Tbps，但是我们判断 2030 年还不具备规模商用的能力。

因此，从裸眼 3D 的需求看，未来 10 年网络需要支持每用户 1~10Gbps 带宽、1~5ms 时延和 5 个 9 的可用性。

### 2.1.3 数字触觉：多维的体感交互，可触摸的互联网

IEEE 在触觉互联网（tactile Internet）架构中，将数字触觉技术分为用户层、网络层和化身层三个层面。用户层输入位置、速度、力度、阻抗等信息，经过网络数字化后变成指令数据提供给化身层；化身层采集到触觉、听觉、本体感受数据，经过互联网提供给用户层，用于用户实时决策。

根据交互方式又可以划分为两大类：第一类是机器控制，应用场景如远程驾驶、远程控制等；第二类是精细交互，应用场景如电子皮肤、远程手术等。（表 3 数字触觉对网络的需求）

表 3 数字触觉对网络的需求

| 交互方式 | 流量方向 | 流量类型 | 可靠性 | 网络时延( ms ) | 带宽 |
|---|---|---|---|---|---|
| 机器控制 | 用户 - 化身 | 触觉 | 5 个 9 | 1-10 | 2Mbps |
| | 化身 - 用户 | Video | 5 个 9 | 10-20 | 1-100Mbps |
| | | Audio | 3 个 9 | 10-20 | 512Kbps |
| | | 触觉反馈 | 5 个 9 | 1-10 | 20Mbps (100 DOFs) |
| 精细交互 | 化身 - 用户 | 触觉反馈 | 5 个 9 | 1-10 | 1~10Gbps（电子皮肤） |

主动认知能力：网络层还需要支持性能动态监测、任务认知、3D 地图构建等服务

参考《IEEE1981.1 触觉互联网》

机器控制在工业领域拥有大量应用场景，对网络可用性要求高于 5 个 9，部分行业甚至要求达到 7 个 9（99.99999%），根据不同业务场景，网络时延在 1~10ms，带宽在 100Mbps 以内。

精细交互中基于柔性电子的电子皮肤是未来最具发展空间的场景，电子皮肤集成了大量精细的压力、温度等传感器。根据英国萨里大学（University of Surrey）的相关分析，每平方英寸电子皮肤就需要 20~50Mbps 的带宽，每个手掌需要 1Gbps。在电子皮肤场景下，用户层不一定是人类，也有可能是智能机器，可以根据化身层的电子皮肤采集到的海量数据信息进行分析、计算和决策，对化身层进行控制。用户层也有可能直接通过脑机或者肌电神经接口与人连接，实现沉浸式的远程交互体验。我们判断在精细交互的场景下，将需要 1~10Gbps 的网络带宽。

因此，从数字触觉的需求看，根据不同业务场景，网络需要支持每用户 1~10Gbps 的带宽、1~10ms 时延和大于 5 个 9 的可用性。

### 2.1.4 数字嗅觉：深层的感官交互，可品味的互联网

人类的五种感官由远及近可以分为非接触的（视觉、听觉、嗅觉）和需要接触的（触觉、味觉）。与视觉和听觉比较，嗅觉是非接触体验中较深层次的感官。

数字嗅觉包含三个技术环节：气味的感知、网络传输、气味的重现。

气味的感知目前已经有一些应用案例，比如利用复合材料组成条形码，可以根据味道产生化学反应，并产生颜色的变化，然后通过深度卷积神经网络算法（DCNN）识别条形码与气味的关系，在一些特定场景，如危险品检测、食物新鲜度检测中已经有应用。气味的重现业界已经有一些商业化的产品，如 VR 气体发生器，可以使用 5 种气味墨盒，然后根据 VR 游戏场景释放相应的味道，如海洋、火药、木材、土壤等，在一些研究报告中也提出未来可以基于脑机接口更直接和准确地让人感知到气味。

我们将气味感知（电子鼻）与气味重现结合起来，可以构建一个不仅闻其声、观其影，还能知其味的数字嗅觉互联网。数字嗅觉对网络带宽和时延的需求目前还不清晰，但是对计算的需求比较明确。

综上，下一代人机交互网络将支持 XR、裸眼 3D、数字触觉、数字嗅觉等全新体验，对用户网络的需求将是带宽 10Gbps、网络时延 1ms、可用性要达到 5 个 9。

### 2.1.5 AI Agent( 智能体 )：类真人级交互，独立的个人助理

随着 AI 的发展，AI 应用走向 Agent 化，仅需给定一个目标，AI Agent 会根据给定的任务，详细拆解出每一步子业务流，并依靠来自外界的反馈和自主思考，自己创建对应子业务流的 Prompt（提示词），闭环子业务流任务，最终实现给定任务目标，完成用户意图。

AI Agent 从四个方面影响物理世界：

- 对象变化：网络的服务对象新增硅基（智能体）连接，智能体作为独立的个体使用网络。未来物理世界交互的对象将从人与人扩展到人与数字人、人与机器人，人与家庭服务机器人、机器人与机器人等。
- 体验变化：传统网络主要针对下行流量进行网络覆盖和容量设计，AI 智能体引入后，对网络带来时延和上行速率的要求。
- 内容变化：交互的模态将 2D 音视频扩展到环境信息、通话双方 3D 场景等，例如两个人远程虚拟现场谈话，AI 实时生成两个人谈话的 3D 场景，让通话双方感受到相同的场景和温度，使人身临其境。
- 范围变化：过去网络服务是以人为中心设计的，围绕人的活动范围确定网络的服务能力，未来要考虑类人智能体的活动能力和活动范围，提供全时全域的在线服务能力。

在人与 AI Agent 交互的过程中，AI Agent 端到端响应时延至关重要，时延如果太大，用户体验差，势必会影响 AI Agent 发展。响应时延包含两部分：一部分是 AI 处理内容时延，另一部分是网络传输时延。根据华为预测，AI agent 端到端时延在 400ms 内可以达到真人面对面交流体验，2024 年 OpenAI 发布的 ChatGTP-4o，用户提问到 AI 反馈，端到端时延约 700ms，体验已经接近真人级。

根据华为预测，在 2030 年人与 AI Agent 交互过程中，平均 1s 内会有 3 张图片随语音一起传输，如果想获得优秀体验，则网络保障速率至少 10-20Mbps，如果想获得极致体验，则需要 32-64Mbps。（表 4 AI Agent 网络时延和带宽的需求）

表 4 AI Agent 网络时延和带宽的需求

| | 图片大小 | 网络时延 | 保障带宽 |
|---|---|---|---|
| 优秀体验 | 200KB（小图） | 200ms | 10Mbps |
| | 400KB（大图） | | 20Mbps |
| 极致体验 | 200KB | 70ms | 32Mbps |
| | 400KB | | 64Mbps |

未来，每个人可能有 N 个 AI Agent。华为预计，到 2030 年无线 AI Agent 活跃用户数将达 60 亿，不仅包括虚拟世界中的数字分身，还包括物理世界的具身智能，比如工业机器人，服务机器人，陪伴机器人，自动无人机，自动驾驶汽车等。这些 AI Agent 将以独立的身份运行，成为独立的社会参与个体。

## 2.2 住行合一网络：相同宽带体验的第三空间

随着华为 ADS（Advanced driving system）高阶智能驾驶辅助系统、特斯拉 FSD（Full Self-Driving）自动化辅助驾驶系统大规模落地商用，百度萝卜快跑无人出租车在武汉火爆出圈，可以预见的是，到 2030 年，汽车端到端自动驾驶将成为新常态，汽车从停车场驶出自动接客、沿途自动驾驶、到目的后自动泊车，汽车驾驶员的大脑、眼睛、手和脚将被解放。在对未来自动驾驶汽车的畅想中，最具有吸引力的就是在汽车里面也可以享受到和在家庭环境一样的沉浸式影音娱乐、社交、办公体验。车内和家庭当前都已经出现多屏应用场景，未来将会有 3D、全息的应用场景，家庭 8K/16K 大屏、车内 MR 将逐渐普及。

从 5G-A/F5G-A/Net5.5G 开始，移动和固定宽带基本上同步迈入超千兆时代，这也支持了住行合一的体验实现。

自动驾驶的汽车在未来将成为家庭、办公室之外的“第三空间”，未来用户可以享受到从家庭到出行，再到办公室的连续宽带业务体验。（表 5 家庭和出行对网络的需求）

人们在家庭和办公室的业务场景包含大屏、多屏、3D、全息教学和 XR。随着具身智能和人形机器人技术不断发展，机器人会更聪明、更类人，能执行更多的实体任务。视觉感知能力作为机器人“眼睛”，是多模态交互和环境感知的重要组成。机器视觉要实现对环境的全量感知，需要高空间分辨率、高帧率和宽泛的感光范围，这将导致图像信息量大幅提升。同时为了满足类人互动的高实时性，对网络提出新要求：网络带宽需百倍提升，网络需满足超低时延要求。考虑到真人级全息会议在 2030 年普及率不高，家庭和办公业务的主流宽带需求还是 1~10Gbps、时延小于 5ms。未来家庭和办公网络将不仅提供宽带的无缝覆盖，还将支持居家办公、场所安全和机器人等全新生活场景。家庭网络基于通信感知融合能力，能够感知用户位置、室内空间、环境安全等，为人们构建一个更加人性化的居住和办公环境。到 2030 年每月平均家庭网络流量达到 1.3TB。

据企业业务市场洞察显示，90% 以上城市居民工作与生活在各类园区，80% 以上的 GDP 和 90% 以上的创新在园区内产生。人们在政务、

表 5 家庭和出行对网络的需求

| 场景分类 | 商用时间 | 家庭 | | | 车 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 业务 | 峰值带宽 | 往返时延 | 业务 |
| 影院 | 10 年内 | 16K 视频<br>（180 英寸屏幕） | 1.6Gbps | 50ms | 1.6Gbps，20ms<br>（16K XR） |
| 游戏 | 10 年内 | 360°24K 3D VR/AR | 4.4Gbps | 5ms | 4.4Gbps，5ms<br>（24K XR） |
| 全息教学 | 10 年内 | 10 英寸全息 | 12.6Gbps | 20ms | 12.6Gbps，20ms |
| 全息会议 | 10~20 年 | 真人级全息 (70 英寸） | 1.9Tbps | 1~5ms | 12.6Gbps，1~5ms<br>（微缩全息，10 英寸） |
| 自动驾驶 | 10 年内 | 家庭机器人 | 10cm 定位 | 5 个 9 可用性 | 5~20cm 定位<br>5 个 9~6 个 9 可用 |
| 云电脑 | 2~3 年内 | 极速 GPU 云电脑<br>（浅压缩编码，4K 60fps) | 500Mbps | 15ms | — |
| 存储 | 1~2 年内 | 极速融合存储<br>（类本地化体验） | 5Gbps | 5ms | — |
| 家庭安防 | 2~3 年内 | 3D 光感知<br>(1024*768 30fps) | 1Gbps | 20ms | — |

金融、工厂制造、能源、交通等领域的生产活动中越来越多的依赖云技术和 AI 技术。根据权威机构统计，人均终端数量从 2022 年的人均 1 台增加到了 2025 年的人均 3-5 台，加上海量的物联终端和哑终端通过无线方式接入到网络中，未来到 2030 年无线终端增长将超过 10 倍。视频会议作为企业远程沟通和混合办公的重要工具，高清视频会议作为关键增长点，预计全球市场每年将增长 10%。对于企业场景，提供 Wi-Fi 7 和 10Gbps 能力基础设施，为企业提供更好的云计算和 AI 服务将非常重要。

人们在移动第三空间（车内）的业务场景也将包含 3D、全息教学和 XR。未来 10 年，对网络带宽的主流需求是支持 1Gbps~10Gbps，网络时延也要小于 5ms。考虑到自动驾驶依托网络的车路协同场景，对网络的可用性也提出了更高要求，可用性要大于 5 个 9，并支持 10cm 的定位精度。同时，随着自动泊车、自动接客等场景不断完善，对停车场等车辆启停位置的网络覆盖和速率，也提出了明确的要求。

除了沉浸式影音娱乐，未来家庭还有云电脑、家庭安防、云存储 /NAS 等丰富的业态。云电脑是在云网融合趋势下催生的重要云业务，其利用云渲染技术，将本来在终端侧的计算和渲染转移到云端，用户使用轻终端即可享受电脑业务。家庭安防，除了已有的家庭智能摄像头，其他感知技术也在向着升维和融合的方向不断演进，逐渐出现了如 3D 光感知康养等新的安防方案。家庭存储在向着极速、融合、应用集成等方向发展，极速云存储不仅可实现数据存储及备份等基础业务的类本地化体验，还支持文件在线编辑、在线视频即点即播等极速速率体验，并可集成文档协作、智能相册等丰富的在线应用等。

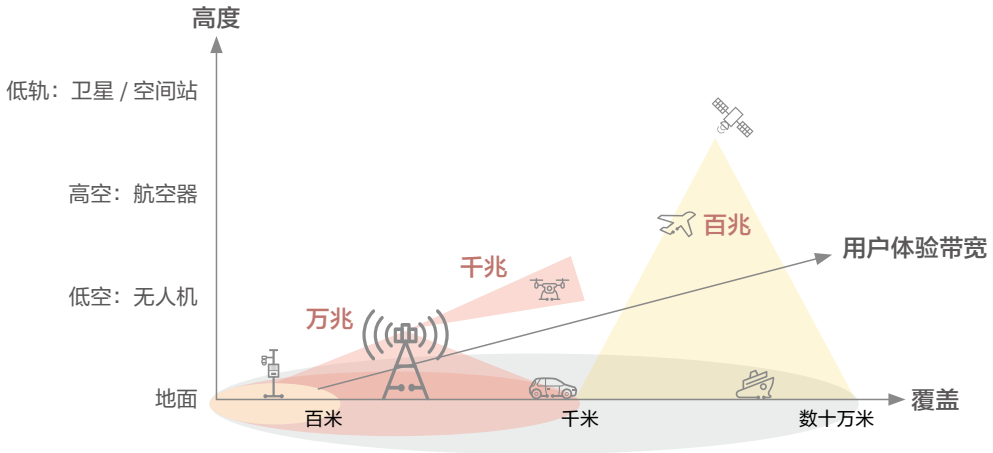
华为预测到 2030 年全球家庭云存储个人云盘渗透率将达到 35%，家庭云电脑业务渗透率将达到 17%，具有隐私保护功能的 3D 雷达光感知家庭健康看护渗透率达到 8%，家庭看家和安防摄像头在中国渗透率将达 24%，全球也将达到 15%。随着全球固网光纤网络代际发展，到 2030 年 F5G-A 将形成主流，全球光纤宽带用户数量达 16 亿，千兆及以上家庭宽带渗透率达到 60%，对应 F5G-A 万兆家庭宽带渗透率达 25%，FTTR-H 家庭光纤渗透率达到 31%，面向中小企业 FTTR-B 宽带渗透率达到 41%。

综上，面向未来家庭、办公室、自动驾驶汽车三个空间，需要构建住行合一的万兆网络新能力。

## 2.3 空天地全域立体网：提供全球无缝覆盖的无边界宽带体验

未来宽带将不仅在地面，还将延伸到空中，从小于千米高度的无人机、低空载人飞行器到万米高度的航空飞行器，再到数百公里高度的低轨航天飞行器都需要宽带连接。空天地全域立体网络将由覆盖半径 100m 的小站、1~10Km 的宏站和 300Km~1000Km 的低轨卫星网络共同组成，分别为用户提供万兆、千兆、百兆的连续立体无缝宽带体验。宽带将成为生活不可分割的一部分，伴随着人类娱乐和生活的足迹，也伴随着工业、农业智能化的无人值守需求，走向海洋、大漠和天空。一张由天空和地面交织的宽带网络，将为人类新生活体验、行业万物智能化提供服务。（图 2 全域立体宽带网络）

图 2 全域立体宽带网络




### 2.3.1 地面网络

回望无线网络的发展历史，我们已经见证了无线蜂窝网络技术进步带动数字经济发展的关键作用，及其带来的巨大经济和社会价值。为使能多样化的新兴业务体验，地面网络能力持续向更快和更深拓展。

更快：为了支撑 XR、裸眼 3D 等极致业务体验，5G-A 在 5G 基础上进一步将下行速率 1Gbps 提升到 10Gbps，上行速率从 100Mbps 提升到 1Gbps，带宽能力提升 10 倍；

超宽带频谱是万兆能力的基础，设备能力向多频化、宽带化方向发展。在现有近 100MHz FDD 频段与 100~200MHz TDD 频段基础上，引入具备更大带宽的 U6G 频段，能够提供 200-400MHz 可用频谱；引入毫米波频段，能够提供高达 800MHz 的频谱资源。不同区域可以结合业务需求和网络建设节奏，分梯次的采用 Sub6G，U6G 频段和毫米波的频谱组合进行网络建设。由于无线基站站址资源的稀缺性和高价值特征，在现有宏站、微站站址基础上进行叠加频段升级是最经济和高效的建设模式，因此一方面对设备的多频能力提出了更高的要求，另外一方面，也要求提升 U6G 频段和毫米波频段的覆盖能力，以便最大程度的复用现有基站站址资源。

更深：无线网络用户分布符合二八原则，20% 在室外，80% 在室内，无线网络要具备深度覆盖能力。一方面可采用室内数字化方案，借助 DMIMO 等极致容量能力充分满足室内的高容量场景需求，如机场、体育场馆、Shopping Mall 等。另一方面，也可以在 Sub6G 频段引入 FDD MM、SDL、SUL 等技术来提升室外宏站 O2I 覆盖室内的网络能力，从而满足大部分室内场景的体验需求。

### 2.3.2 NTN 网络

广袤的地球表面，陆地面积只占 29%，71% 被海洋覆盖。陆地上也存在崇山峻岭、戈壁荒漠等人迹罕至、人类无法生存的地方，这些地方长期无地面宽带网络覆盖。随着经济全球化不断发展、人类不断探索自然、开采自然资源，过去的无人区内，越来越多的出现人和物联网设备的足迹，因此在无人区有宽带覆盖的诉求也越来越强烈。卫星处在高空，以低轨卫星为例，其处在离地 300-2000 千米距离，可以轻松实现超大范围的信号覆盖，为无人区、人烟稀少的地方等提供服务。因此，卫星宽带 / 窄带通信越来越受青睐。近 10 年，随着火箭回收技术的不断成熟，卫星单位发射成本不断下降，不少企业开始或计划大规模部署低轨卫星，在蜂窝网覆盖之外的地区，面向家宽用户提供百兆宽带能力。

但是，卫星网络受频谱资源限制和干扰因素影响，单颗低轨卫星的实际峰值容量约 10~20Gbps，宽带接入单用户体验速率 100-200Mbps。假设 1 万颗卫星组成覆盖全球的卫星网络，分布在超低轨道（VLEO）到低轨道（LEO）的多个轨道平面上，每颗卫星与多个方向的卫星基于 100Gbps 以上的激光通信组成多路由星间光链路，考虑到卫星实际经过的地区至少一半是海洋、沙漠等宽带需求极低的区域，实际全球宽带卫星网络有效容量将在 100Tbps 左右，容量密度小于 2.5Mbps/km$^2$（相当于地面 4G 普通城区网络容量密度的几十分之一）。

标准层面，3GPP 正在积极定义全球统一的面向 NTN 网络的移动通信协议标准，Rel-17 发布了第一个基于 5G 标准的透明转发技术标准，Rel-18 提升了 IoT-NTN 覆盖与性能、完成空口传输链路增强等特性研究，Rel-19 正在研究支持星上再生的网络架构和星间链路技术以进一步提升卫星网络的性能和效率，预计 Rel-20 将正式发布 NTN 手持宽带智能终端的新标准。

和地面网络相比，卫星网络的星间连接和拓扑具有随时间持续动态变化的特点，因此在卫星组网技术上需要考虑由于时变动态性带来的新挑战。IETF 正在积极制定与动态网络相关的标准，包括成立时变路由（Time-Variant Routing）工作组，对具有时变动态特征的网络应用场景、功能需求以及网络管理模型进行讨论和标准化，而卫星网络是 TVR 的重要应用场景之一。

终端层间，随着低轨通信卫星宽带的终端尺寸持续优化，业界最新推出的小型化便携式宽带卫星 CPE 产品重量降低至 1.1kg，尺寸小至可以装入背包中携带，借助电池供电，可基本满足个人移动性的需求，如：网联汽车、野外露营和勘探工作等。可以预见未来卫星通信将作为 5G-A 网络的网络边缘补充，满足人和物从窄带到宽带的业务需求，实现全球普遍覆盖的无边界体验。

## 2.4 工业互联网：面向智能制造、服务于人机、机机协同的新网络

工业互联网（Industrial Internet）是信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施，通过对人、机、物、系统等的全面连接，构建起覆盖全产业链、全价值链的全新制造和服务体系，为工业乃至产业数字化、网络化、智能化发展提供了实现途径。传统工业互联网体系包含工业控制、工业软件、工业网络、信息安全四个关键组成，其中工业网络是整个体系的基础。

传统工业网络基于 ISA-95 金字塔模型构建。这个架构已经存在了 20 多年，是一个服务于“以人为核心”的制造体系。随着智能制造的发展，未来需要一个面向智能制造、“服务于人机（机器人）协同、机机协同”的新架构。

新架构以人、机器人、智能平台（云 / 边缘计算）三者对等构建，私有的工业总线将被支持实时性的通用化工业网络和开放的数据层所替代，智能平台将汇聚人和机器人的各项数据，实时分析和决策，支撑人与机器人工作的有效协同。

为支撑工业互联网平稳发展，网络需满足以下三点要求：

- 网络确定性时延：工业领域的自动化控制、运动控制等场景对网络数据传输的时延、抖动、可靠性等方面需要有严格要求。

- 网络可靠性：工业现场的控制业务往往都在毫秒级，因此为保障网络故障不影响业务，网络倒换要更快，要达到亚毫秒级。

- 运维管理智能：工业网络运维管理的一个基本原则就是“0”工作量，即简单直接，不能给工业生产带来额外的负担

据华为的预测，2030 年全球总联接数将会达到 2000 亿，其中无线、无源联接数约 1000 亿，基于有线、Wi-Fi、短距通信的联接数约 1000 亿。工业领域除了海量的压力、光电、温湿度传感器外，还有大量的智能摄像头、无人机、工业机器人也将接入到网络中。随着 AI 时代的到来，华为预测到 2030 年全球将有 2000 万工业机器人加入先进智能制造领域。随之而变的是，工业网络将从传统的多种窄带技术走向更加通用化的宽带技术。

通用化的工业网络，将打破传统消费、办公和生产业务的边界，基于 5G、TSN、IPv6+、Wi-Fi7 工业光网等确定性宽带网络和切片技术实现融合承载，满足任意人 / 物（Any-Workforce）的互联，以及消费、办公和生产系统全要素上云的需求。

通用化的工业网络还将实现同厂家办公与生产系统之间、同行业不同厂家之间、不同行业相关业务之间的数据按需分享和工作无缝协同，满足任意业务（Any-Workload）的宽带互联、多云数据共享需求。

通用化的工业网络将更加智能，面向无边界、移动性、跨行业、跨云需求，支持基于意图驱动的网络自动化管理和基于 AI 的主动式安全和隐私保护，满足任意地点（AnyWorkplace）的业务安全可信的需求。

每个企业都存在多种业务类型，要求通用化的工业网络满足业务可用、安全、可信三类需求，如智能医疗包含远程诊疗、监测护理和远程手术等业务；智能电网包含视频巡检、电网控制和无线监测等业务；智能制造包含工厂环境监控、信息采集和操作控制等业务。（表 5 智能化企业对网络的需求）

表 6 智能化企业对网络的需求

| 行业 | 业务类型 | 业务对网络的要求 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 数量 | 业务可用（单用户、单业务） | | | | | | | | | | 安全 | | 可信 | | |
| | | | 带宽需求 / 单用户（Mbps） | | | | | 业务时延需求（ms） | | | | | | | | | |
| | | | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | S1 | S2 | M1 | M2 | M3 |
| | | | 1~10 | 10~20 | 20~50 | 50~100 | >100 | 50~100 | 20~50 | 10~20 | 5~10 | <5 | 逻辑隔离 | 物理隔离 | 可视 | 可管 | 可运营 |
| 智能医疗 | 16K 远程诊疗 | 10 | | | | | 1G | | | | | | | | | | |
| | 监测护理 | 2K | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 全息远程手术 | 5 | | | | | 10G | | | | | | | | | | |
| 智能电网 | 视频巡检 | - | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 电网控制 | - | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 无线监测 | - | | | | | | | | | | | | | | | |
| 智能制造 | 工厂环境 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 信息采集 | 10K | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 操作控制 | 1K | | | | | | | | | | | | | | | |

参考 信通院《5G 端到端切片行业 SLA 需求研究报告》

根据每种业务的典型带宽和时延要求，结合对 2030 年企业各种终端的数量预测，可以判断未来一个大中型企业需要 100Gbps 的网络带宽，单用户最大带宽要达到 10Gbps，网络时延根据不同业务存在 1ms/5ms/20ms 多种需求，并存在网络安全、可信的需求。

## 2.5 算力网络：面向机器认知，联接智算中心、海量用户数据与多级算力服务

通信网络带给社会的价值体现在其承载的业务，过去网络帮助人们建立了沟通渠道，承载了通讯服务；今天网络连接了端和云，带给人们丰富的内容，承载了内容服务。

今天的网络还是面向人类认知设计的系统，例如视频内容的帧率选择考虑到人类对运动物体的视觉感知力，定义为 30 帧 / 秒，采集的音频也利用了人类认知系统的掩盖效应机制。对于人类的认知，这样的编码质量可以被认为是精细的质量，但是对于需要超越人类的用例则远远不够，如机器人的监控系统可以从超过人类可听频率的声音中检测到异常。普通人看到事件时的响应速度约为 100ms，因此很多应用基于这个时延进行设计，但是人类之外的应用，如紧急停车系统，则需要进一步缩短响应时间。

相对于今天面向人类设计的网络，根据 IOWNGF《面向 2030 愿景和技术研究报告》的分析，未来面向 XR、机器视觉、自动驾驶等智能机器的网络将从四个方面提升性能：首先是增强感知力，能够捕捉物理世界更加精细、精确和多维度的数据，如在工业异常检测场景下，将视频采集的帧率提升到 120 帧 / 秒；其次是响应速度，如在面向机器控制的场景下，将端到端响应时间缩减到 10ms；再次是支持资源的可扩展性，目的是在动态工作负载情况下实现网络和计算资源的高效利用，如支持资

源动态线性扩展的能力；最后是能效，主要是提升计算资源的使用效率，需要将目前多数企业采取的固定配置的计算资源使用方式改变为云共享服务方式，未来进一步提升为事件驱动的无服务器模式，实现能效的大幅提升。

智能机器将产生更加精确的数据，包含网络时钟、地理定标（用于数字世界的精确建模），从而摆脱数据的处理和计算对于今天高度集中的互联网平台的依赖，应用程序将向以数据为中心转变，实现数据与计算、通信的解耦。

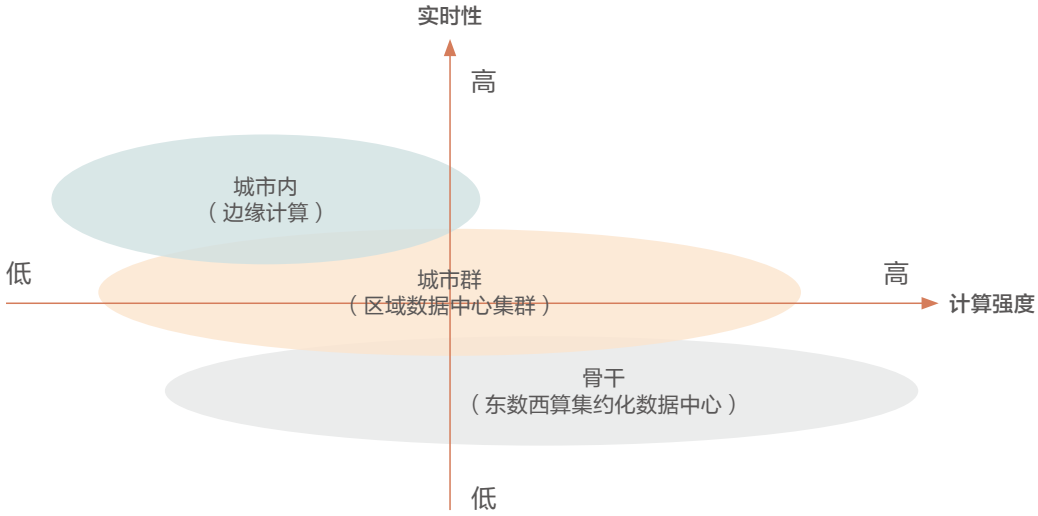
面向机器认知的网络，将需要适应海量的机器数据采集和传输、非常严格的时延要求，以及大量用户订阅的需求，可以根据系统整体状况和重要程度的不同，控制数据发布者的数据生成和注入，可以在网络中的通信、计算节点之间存储和共享数据，可以提供精确的时间和位置标记，能够确保数据安全、隐私和完整性，支持数据在不同协议之间的代理服务，并可以跨越多个不同的网络。

数据中心层面，随着 AI 大模型的发展，模型参数将发展到万亿、十万亿、乃至百万亿，单体智算中心难以有效应对大模型的发展。现阶段，常见的单体智算中心算力规模通常在 1 万至 5 万卡之间；先进的单体智算中心算力上限约为 6 万卡。从技术层面看，当算力需求超过 8 万卡时，单体智算中心在供电稳定性、散热效率、网络带宽等方面都会面临巨大挑战。这些技术瓶颈使得单体智算中心难以实现 10 万 + 卡的算力规模。因此，面对 AI 日益增长的高算力需求，跨数据中心分布式算力协同成为必然趋势，数据中心网络将持续向超融合数据中心网络演进，从以前的多技术以太、IB、FC 等多种网络技术向超融合以太演进，并提供一个支持大规模、高吞吐、高可靠的数据中心网络。

终端层面，随着摩尔定律的放缓，终端算力在超过 128 核之后，经济性将面临瓶颈，同时受制于体积和功耗的约束，终端本地算力势必无法支撑超大大模型的运行。同时，云数据中心受到传输带宽成本和时延的影响，也无法满足未来智能机器海量强实时业务的处理需求。因此，面向机器认知的新型网络需要支持在边缘侧部署大模型进行数据分析处理、推理等功能，而不必将数据全部传到中心云。

未来网络将联接云、边、端，将海量机器数据传输到各级算力基础设施，根据不同业务 1ms/5ms/20ms 的时延要求，实时地将数据调度到城市内分布式的边缘计算、城市群的数据中心集群、骨干的集约化大数据中心等三级计算资源。（图 3 面向机器数据服务的三级计算资源）

图 3 面向机器数据服务的三级计算资源



计算的效率、可信度与网络的带宽、时延、安全性、隔离度都存在相关性，计算与网络需要相互协同。主流运营商已经发布了计算与网络融合服务的新商业愿景，并提出了“算力网络”的全新理念，希望将云边端多样的算力通过网络化的方式连接与协同，实现多级算力服务的按需调度和高效共享。算力网络代表了从“面向人的认知”向“面向机器认知”的网络设计理念的重要变化。

中国政府在《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》中明确提出：“随着各行业数字化转型升级进度加快，全社会数据总量爆发式增长，数据资源存储、计算和应用需求大幅提升，迫切需要推动数据中心合理布局、供需平衡、绿色集约和互联互通，构建数据中心、云计算、大数据一体化的新型算力网络体系，促进数据要素流通应用，实现数据中心绿色高质量发展”，并提出要“通过引导数据中心集约化、规模化、绿色化发展，在国家枢纽节点之间进一步打通网络传输通道，加快实施‘东数西算’工程，提升跨区域算力调度水平”。

为支持算力网络标准工作的积极开展，ITU-T 开启 Y.2500 系列编号，以 Y.2501 “Computing Power Network- framework and architecture” 为首个标准，将形成算力网络系列标准，并与中国通信标准化协会（CCSA）算力网络系列标准相互呼应，算力网络已经纳入了很多运营商 6G 与未来网络技术研究的范畴，是未来 10 年通信网络演进的关键场景。

华为预测，到 2030 年，为支撑城市内应用 1ms 入云入算，城市内光联接将延伸至家庭、楼宇、企业、 5G 基站等城市全场景，每万人将会拥有 4 个全光 OTN 锚点，其中 100G 锚点会占据 25%；政府机构，金融机构，重点院校和科研机构，大型医院，大型工业企业所在场所以及县以上开发区和产业园区的传送网 OTN 覆盖率将达到 100%。

## 2.6 自智网络：无人值守自进化网络

回顾波澜壮阔的通信行业发展史，关键技术的持续创新，促进了运营商网络能力的不断跃升。网络能力的跃升激发了多样化业务创新，促进了各行各业繁荣，同时，网络自身也提出了业务敏捷发放、用户体验精准保障、跨领域高效运维的高阶智能化目标。随着生成式 AI 取得突破，通信大模型等关键技术快速发展，电信行业在迎来新流量、新连接、新业务的巨大发展机遇的同时，网络的智能进程也将会显著加速。未来，运营商根据自身情况，结合 AI 智能体、数字助理，面向客户提供零故障、零等待、零接触的极致服务体验，面向网络实现自配置、自保障、自优化的运营运维，对内促进业务创新增收、对外赋能行业构建新质生产力。华为预计，领先运营商的网络自智水平将在 2025 年后陆续实现 L4 级别，到 2030 年，全球大多数运营商的网络将达到 L4 级别。

从技术维度来看，L4 级自智网络的关键特征是以机器作为运维的主体，人在关键任务 / 场景提供决策辅助。在未来大部分场景中，机器使用 AI 来理解人的意图，然后生成下一步网络规划和优化的建议，并使用决策式 AI 模型完成智能决策，实现以机器为主的自智网络。

同时，TM Forum 也给出了从业务价值维度定义的自智网络 L4 的特征，供产业参考并有序地迈向 L4 级自智网络。（表 7 自智网络代际特征）

通信大模型是实现自智网络 L4 的关键使能技术，通信大模型通过打造 AI 智能体和数字助理，端到端重塑网络能力，可以有效支撑运营商智能化目标达成。AI 智能体可以充分利用通信大模型的意图理解和逻辑推理能力，实现电信领域复杂问题的分解和最优方案的决策，再调用系统能力，完成面向特定场景的自治，带来全新的网络运营运维体验。AI 数字助理可以充分利用通信大模型的自然语言理解能力，为不同角色量身打造个人数字助理，通过自然语言完成复杂的人机交互工作，一方面降低员工的学习难度，提升员工学习效率，另一方面将海量知识和数据按需提供给员工，提升其运营运维效率。

随着 AI 智能体和 AI 数字助理逐步应用于网络的“规、建、维、优、营”全生产流程，通信网络 2030 年将迎来四个方面的重塑：

- 重塑运维模式：基于自然语言打造全新的交互运维模式
- 重塑系统能力：围绕感知 - 分析 - 决策 - 执行，全面提升现有系统能力
- 重塑业务流程：以机器为中心设计业务流，端到端流程自动化，缩短业务上市时间
- 重塑集成模式：摆脱传统 API 集成模式，通过大模型实现自助式集成，缩短业务 TTM

表 7 自智网络代际特征

| 视角 | 维度 | 代际特征 | |
|---|---|---|---|
| | | L3 / 机器辅助人 | L4 / 人辅助机器 |
| 面向客户 | 零等待 | 业务发放自动化 | 业务交付自动化 |
| | 零故障 | 体验可感可视 | 体验可评估可保障 |
| | 零接触 | 可视 | 可交互 |
| 面向网络 | 自配置 | 配置自动下发 | 事前仿真、事后验证 |
| | 自修复 | 精准诊断 | 隐患预测预防 |
| | 自优化 | 单目标专项优化 | 多目标协同优化 |

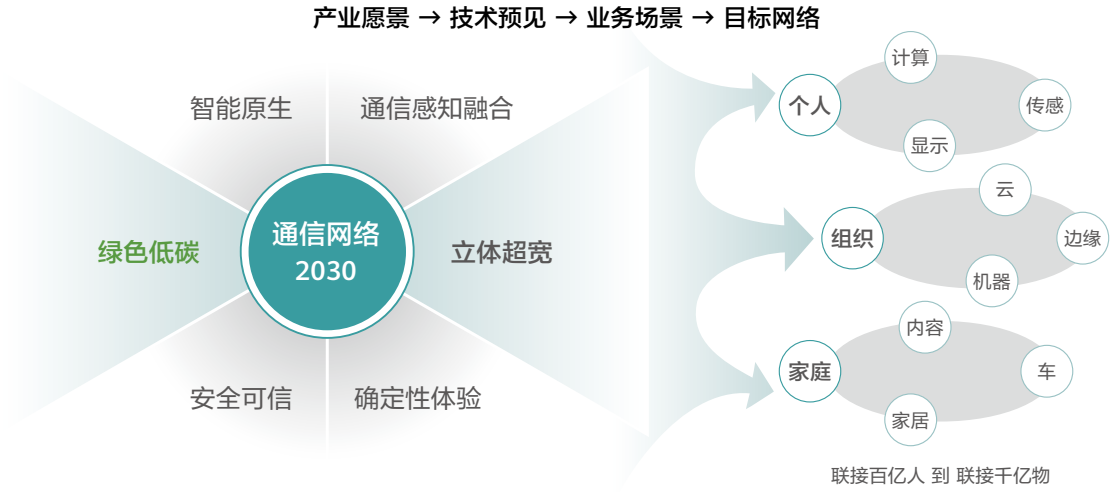
03

# 未来网络关键技术特征

## 3.1 未来网络技术发展方向

从联接百亿人到联接千亿物，一个智能原生、安全可信，具备确定性体验和通信感知融合能力的立体超宽、绿色网络是未来网络发展的方向。（图 4 通信网络 2030 的愿景）

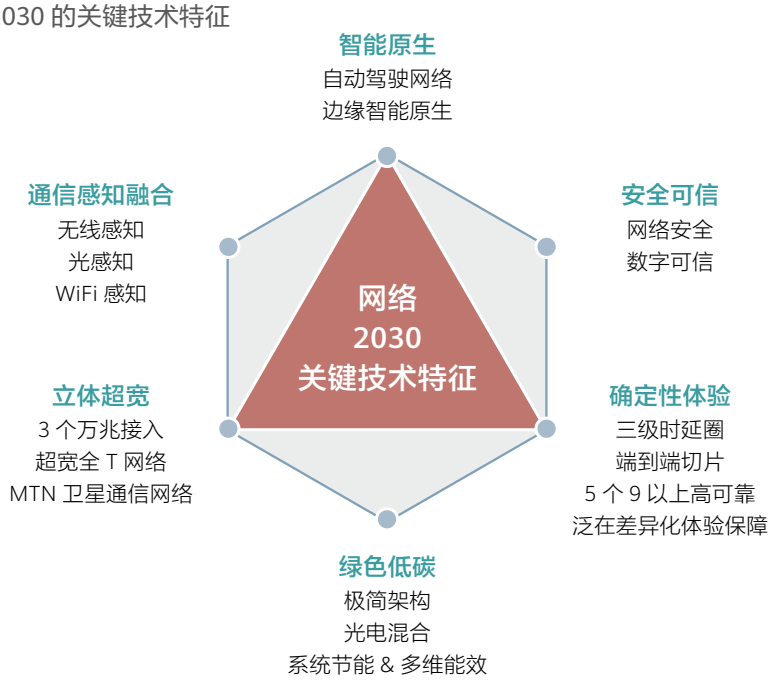
图 4 未来网络技术发展方向



## 3.2 关键技术特征

通信网络 2030 具备 6 大技术特征和 17 项关键技术，每个关键技术又包含多项未来需要研究的技术点。（图 5 通信网络 2030 的关键技术特征）

图 5 通信网络 2030 的关键技术特征



### 3.2.1 立体超宽网络

未来几年，网络性能将持续提升，从今天的泛在千兆增长到泛在万兆。根据华为预测，2030 年全球人均月无线蜂窝网络流量增长 40 倍，达到 600GB。全球千兆以上及万兆家庭宽带网络渗透率分别达到 60% 和 25%，家庭月均网络流量 增长 8 倍，达到 1.3TB。网络接口将从 400G 升级到 800G/1.6T，单纤容量突破 100T，在网络覆盖能力上要从地面走向**空间立体网络**。

#### 1) 3 个万兆接入：个人、家庭、组织共同迈入万兆时代

到 2030 年，随着全球各国光纤网络的广泛部署，有线和无线将从今天的家庭、个人、园区三千兆共同迈入三万兆时代。

支持万兆家庭宽带，光接入网络预期 2027 年 50GPON 会超百万端口，2030 会需要用到 200G PON 的技术。传统用于 WDM 的相干检测技术将用于 PON 领域，可以显著提高接收器灵敏度，并支持更高频谱速率的调制格式，如 QPSK、16-QAM 等，实现更高的数据速率。

为实现万兆个人宽带能力，移动网络主要研究方向是充分发挥 Sub100GHz 频谱组合优势和 Massive MIMO的持续演进,标志性创新技术如下:

- ELAA-MM（Extremely Large Antenna Array-Massive MIMO）：增强高频段（如毫米波、6GHz 频段）的覆盖，实现无处不在的下行 10Gbps 体验。
- MBSC（Multi-band Serving Cell）：把多个频段绑定成一个虚拟大载波，共享控制信道，节省控制信道资源，提升下行用户体验约 30%，提升小区容量约 20%。
- FSA（Flexible Spectrum Access）：通过灵活的上下行时隙资源配比，有效缓解上行资源瓶颈，实现上行 1Gbps 体验。

3GPP Rel-16 标准中，5G NR 定义了两个频率范围 FR1 和 FR2，涵盖了从 450MHz 到 52.6GHz 的所有 IMT 频谱；Rel-17 标准中新标识了 6GHz 授权频谱（n104）；Rel-18 标准的正式冻结标志着成功开启 5G-A 时代，6GHz 授权频谱已经完成 6425-7125 MHz（n104）频段的明确定义；Rel-19 涵盖了 5G-A 进一步演进的重要方向，首批立项涵盖：AI 空口技术、通感融合（信道研究）、Ambient IoT 无源物联等新业务及技术方向，并启动新频谱 7-24GHz 的信道模型研究。这标志着 100GHz 以下频谱向 5G 全面演进已经成为业界共识。

面向 Massive MIMO 的持续演进，Rel-17 标准中定义了 FDD CSI 增强，TDD SRS 扩容标准特性；Rel-19 中立项了 U6G 新频段混合波束赋形（HBF）、子带全双工、FDD 64T/128T Massive MIMO 等多天线相关的重要课题。

为实现万兆园区宽带接入能力，未来还需要研究全光以太技术万兆和百 GE 接入、支持毫米波和高密度 MIMO 的下一代 WiFi 技术，WiFi 7 理论上可以支持万兆的用户接入能力，由于无线空口技术已经逼近香农极限，未来 WiFi 和移动网的发展都需要引入更大的频谱空间，而频谱又属于稀缺资源，业界也在讨论未来 WiFi 8 与 6G 融合的可行性。

### 2) 超宽全 T 网络：接入、骨干、数据中心网络全面进入 T 时代

综合考虑家庭、个人、企业、AI 训推等场景人与物的宽带需求，在流量驱动下，未来网络接入层将出现 T（Tbps，1Tbps=1024Gbps）级别的接口，骨干设备每槽位将支持 40~100T 的接入容量，数据中心将出现每槽位 400T 的网络设备。

2030 年，运营商在千万人口规模城市的宽带通信网络，将在接入、骨干、数据中心内和互联网多个环节进入全 T 时代。

为满足业务发展需求，数通设备需要研究 800G/1.6T 的高速以太网接口技术，和 200GE/400GE 接口相比，800G 以太网是一个全新的技术，还没有完成标准化工作，目前有两种技术路线，一是继续采取可插拔的模式，二是采取光电合封的技术（CPO），两种技术路线未来都会占据一定的市场空间。预计超过 800G 的可插拔光模块将遇到功率和密度问题，光电合封的技术将成为主流选择。

同时波分设备也需要突破单系统 100T 的传输能力，未来需要一系列的技术突破才能满足新的需求，包括研究高波特率的电光调制器材料、空分复用传输系统与器件、从 C 波段扩展到 L 和 S 波段的新型光放大器技术等。

### 3) NTN 卫星通信网络：地面网络覆盖有效补充

低轨卫星宽带接入主要面向偏远地区的家庭、企业、轮船等场景，以及将卫星宽带作为回传链路与地面蜂窝网、WLAN 网络结合，面向偏远地区的乡村或者企业提供宽、窄带覆盖的应用案例。

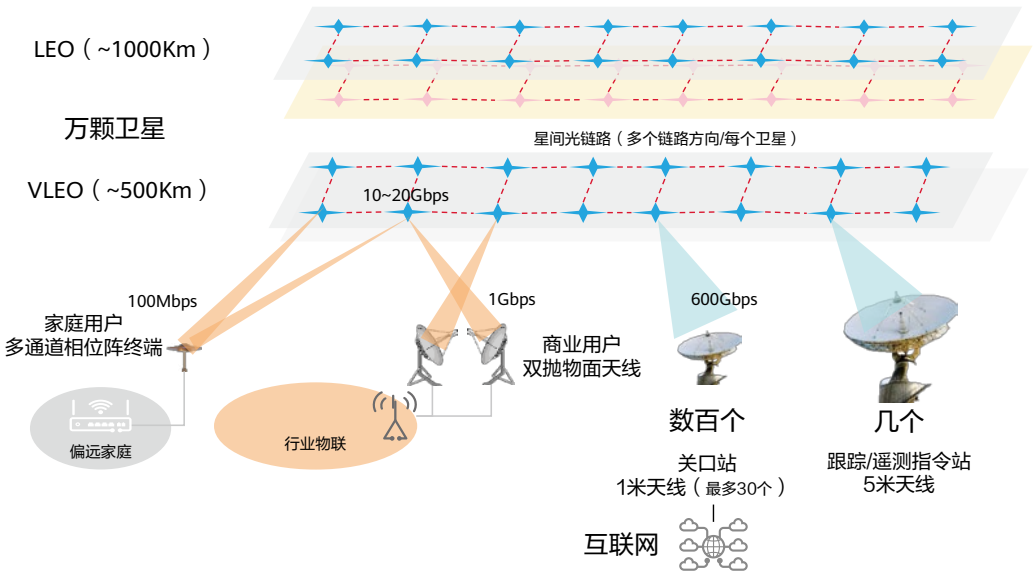



图 6 卫星通信网络

在星地之间传输域，由于要支持宽带 CPE 终端和手持 NTN 终端高效接入卫星网络，需要研究深衰落、大时延、超高多普勒频移和高动态的新空口技术；需要研究针对空口随机接入和高速切换的时频同步技术、面向星地链路特点优化的编解码 / 波形 / 调制 / 多址等关键空口技术，实现高可靠的接入、高效的多址和无线传输、高速移动性管理。

为了提升卫星的覆盖能力和网络谱效，需研究高性能的多天线波束赋形技术，突破超大孔径高增益多天线技术，具备超多波束并发的空分复用能力和波束的高速切换能力，满足高性能宽带 CPE 终端和 Rel-20 智能手持终端的接入需求；同时还需要研究星内波束间、星间协同抗干扰技术，提升空间频谱复用率和谱效；需要研究多层低轨星座下，针对星地链路的时频空功多维度资源的多用户统一调度技术，实现网络资源的充分高效利用；需要研究大带宽星地激光技术，满足日益增长的馈电带宽需求，需要解决激光传输抗大气湍流等技术。

在卫星之间传输域，不同轨道高度的卫星构成多层星座，每层星座内通过星间链路组网。同轨、同层、邻层卫星之间按需建设星间链路，形成空间立体网络。星间链路将采用激光、太赫兹等技术，支持 100Gbps 以上的速率；需要研究工业产品如何航天化、相控阵列天线小型化、星间光动态跟瞄等技术。

在网络的管理和控制域，包括运控中心、网管中心、信关站和融合的核心网，为完成星网管理、用户管理和服务支撑等任务，需要研究地面关口站与星座网络间的弹性高效动态路由协议，支持多层卫星星座智能切换的超分布融合核心网等**新技术**。

### 3.2.2 确定性体验

为满足家庭场景下办公和学习等业务需求、企业场景下安全和可靠性生产的需求，通信网络要能做到确定性体验。

#### 1）三级时延圈：20ms/5ms/1ms 时延圈满足差异化业务诉求

未来 10 年，互联网流量模型将发生颠覆性的变化，从目前服务消费娱乐的“自上而下”内容流量转变为服务全行业智能化的“自下而上”数据流量，智能机器产生的大量数据需要在数据中心处理。为协调电力和算力的发展，构建全社会绿色算力，网络需要服务于未来数据中心的集约化布局，根据不同的业务需求，以用户为中心构建骨干、城市群、城市内三级时延圈，满足 20ms、5ms 和 1ms 的不同业务诉求，并可以根据业务属性通过网络层面直接进行实时调度，实现全社会算力的绿色和高效。

除了通过网络架构构建三级时延圈，对业务时延进行系统性保障，业界还需要对网络端到端的确定性技术进行研究。

城市内光联接延伸至家庭、楼宇、企业、 5G 基站等城市全场景。全光传输向大型企业、楼宇、5G 基站等末端延伸，万兆接入支撑各行业数字化转型，1ms 入云入算，赋能 F5G-A+X，5G 2B 等行业应用扩展。到 2030 年，政府机构，金融机构，重点院校和科研机构，大型医院，大型工业企业所在场所以及县以上开发区和产业园区的传送网 OTN 覆盖率将达到 100%。

家庭宽带、政企、5G、数据中心等业务的汇接点，由全光网统一传送，实现多技术协同，业务智能分流，支持各类业务的一跳入云入算。到 2030 年，每万人将会拥有 4 个全光 OTN 锚点，其中 100G 锚点会占据 25%。

无线接入的场景下，随着算力 / 数据向边缘下移，无线部分的时延在整个端到端网络时延中的占比可达到 30%~60%，缩减无线部分时延成为改善端到端会话体验的重点。但无线空口的共享特性决定了多用户复用资源导致实时性和高速率难以得到保障。未来业界需要研究多载波聚合技术、多天线空分技术，通过载波配置和空口容量提升，运用差异化分层分级调度策略，在多频段广义载波内提升业务在时延约束下的带宽，为应用提供确定性体验；智能化的核心网需要建立智能闭环体验保障机制，做到实时体验的感知和调度，保障业务的确定性体验。

光纤接入的场景下，目前基于时分复用（TDM）的 PON 技术上行采取突发模式来防止冲突，难以满足低时延的要求，未来需要研究频分复用（FDMA）技术，允许多个 ONT 终端并发，从根本上保障低时延要求。同时 PON 与 OTN 结合，P2P 或 P2MP 的联接方式，让用户接入带宽可以达到 100G 以上，一跳入云减少时延。

广域网络则需要改变目前尽力而为的转发机制，需要研究 PHY、MAC 层的协议改进，集成 SRv6、iFit、RDMA 广域无损、确定性 IP 的新技术，实现端到端时延可按需保障。

#### 2）端到端切片：为垂直行业打造更加适配的逻辑“专网”和服务

端到端切片为各行业提供独立运行、相互隔离的定制化专网服务，是服务垂直行业的关键切入点。端到端切片是一种有 SLA 保障的网络虚拟化技术，在网络基础设施上隔离出不同的逻辑或物理网络，满足不同行业、不同业务的 SLA 诉求，包含无线切片、承载网切片、核心网切片技术及端到端的管理与服务。

无线切片技术: 无线切片可分为硬切片、软切片。硬切片通过资源隔离实现，如为特定切片静态预留 RB（Resource Block）、载波隔离等；软切片通过资源抢占实现，如基于 QoS 的调度、动态预留 RB 等。目前网络已经实现了基于优

先级为不同切片提供速率保障，需要进一步研究针对不同切片提供最合适的 PHY/MAC/RLC/PDCP 层无线协议，比如针对 URLLC（超可靠低延迟通信）切片提供具有低时延编码方式的 PHY 层、HARQ 机制优化的 MAC 层。

承载网切片技术：承载网切片分为物理隔离、逻辑隔离。物理层隔离技术有光层的 fgOTN(Fine-grain OTN)，通过不同的波长或单波长内的 fgODU 承载不同的业务；有 MAC 层的 FlexE(Flex Ethernet)，通过时隙调度实现业务隔离。逻辑隔离技术有 IP 层 SRv6 Slice-ID、流量工程（TE）、VPN 等，通过标签与网络设备资源预留方式实现业务逻辑隔离。物理层隔离和逻辑层隔离技术上互补，可以为承载网提供确定性和灵活性兼顾的网络能力。未来业界需要进一步研究 FlexE 与 TSN、DetNet 的拥塞管理机制、面向时延的调度算法、高可靠冗余链路等技术的融合，以及 PON+OTN/IP E2E 切片能力，提供确定性时延和零丢包的物理切片技术、小颗粒度的接口等。

核心网切片技术：在 5G SA 架构中，微服务是核心网网络功能的最小模块化组件。未来业界需要结合三级时延圈的要求，支持将微服务按业务需求灵活编排形成不同的切片，并根据时延带宽需求，把切片微服务灵活部署在不同的网络位置。

端到端管理与服务：3GPP 中定义了端到端的切片管理功能 NSMF（Network Slicing Management Function），通过 NSMF 拉通各子域 NSSMF，形成端到端自动化切片，满足切片业务的弹性开通、扩缩容诉求。面向 2030，业界需要进一步研究切片 SLA 的感知、精确度量和调度，实现切片的自动化闭环控制。此外，切片能力还需要面向垂直行业提供服务，让行业客户能够灵活按需定制，未来如何满足行业客户对切片的 CRUD（Create/Read/Update/Delete）诉求，切片与客户专网、边缘业务的配置协同等问题，仍需继续研究增强。

### 3) 5 个 9 以上高可靠：满足行业生产控制系统要求，使能企业全要素上云

传统企业管理和生产系统以“人”为中心，基于 ISA-95 金字塔模型构建，包含 ERP、MES、SCADA、PLC 等多个系统，未来智能化企业将以“人 - 物”协同为基础，构建云、边、物、人扁平化新架构。

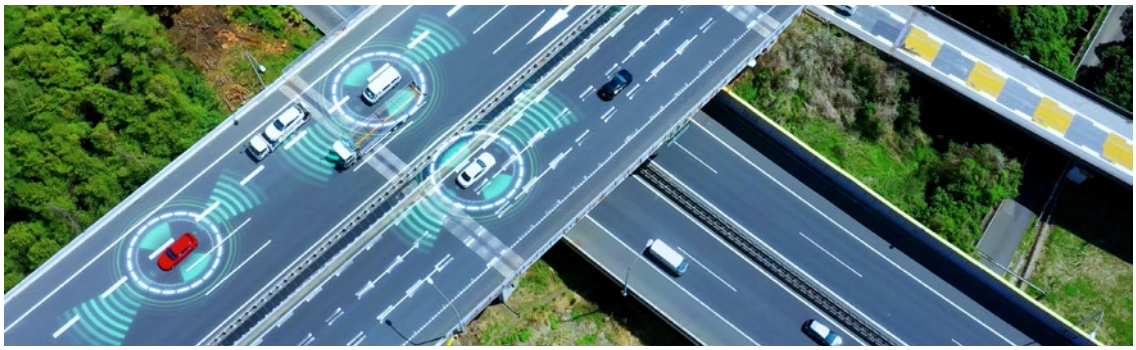
当前企业云化主要需求是非实时的 ERP 和 MES 系统，对云网的可用性要求为 3 个 9（99.9%）。2030 年，随着企业全要素上云，实时系统如 SCADA、PLC 对云网（边）的可用性要求将大于 6 个 9。

提升无线接入网络可用性是未来主要研究方向，目前 5G 已经提供了 URLLC 的基础可靠性，在港口、煤矿等场景下可用性已经可以达到 4 个 9（99.99%），未来移动网络将通过引入 AI 技术，更好地预测信道衰落特征，识别信道变化的包络，提升单位频谱可支持的 URLLC 连接数，通过智能化预测和干扰跟踪以及 E2E 协同等方式将移动网络可用性提升到 5 个 9。

单一数据中心受限场地规模、电力供应等问题，无法持续扩充算力硬件，通过与其它数据中心协同进行分布式训练，可有效突破算力瓶颈，是未来算力发展的方向。相应的网络连接需要达到 6 个 9 及以上的可靠性，确保模型训练的高效可靠，大幅减少因为数据传输中断或重传带来的时间和成本损失。

### 4) 泛在差异化体验保障

未来沉浸式通信、多模态通信、云游戏、云手机将会普及，这些业务对带宽、时延都有额外的要求，与目前常见的视频、Web 等应用对网络的需求有很大差异，需要有智能差异化的体验保障机制，能够基于用户类型、终端类型、应用类型、时间忙闲、场景区域等进行差异化保障，在满足新应用网络需求的同时，实现网络效率最大化。



### 3.2.3 智能原生

#### 1）自动驾驶网络：网络向 L4+ 高阶智能化方向持续演进

自动驾驶网络作为网络自动化发展的高级阶段，通过数据与知识驱动的智能极简网络，实现网络自动、自愈、自优、自治，使能新业务并实现极致客户体验、全自动运维、最高效资源和能源利用。

当前自动驾驶网络还处于 L2~L3 的发展阶段，具备部分和条件自治的能力，系统可以根据 AI 通信大模型在特定的外部环境中面向特定单元使能闭环运维。未来自动驾驶网络还将向高阶智能持续演进，可以在更加复杂的跨域环境中，面向多业务实现整个生命周期的闭环自动化能力。（表 8 自动驾驶网络的分级定义）

为了支撑自动驾驶网络向 L4+ 等级演进，我们需要研究以下关键技术方向。

第一，在管理和运营层面，通过统一数据建模，使数据和功能 / 应用解耦，数据跨层保持一致性；构建网络的数字孪生，结合仿真技术实现对真实网络的分析和操控。具体业界需要对以下技术点进行研究。

- 基于目标的自适应决策架构：从传统面向功能实现的架构演进到基于多目标的决策架构，构筑应对复杂不可预测环境的系统能力。需要重点解决如下几个关键挑战：系统多个目标之间可能相互冲突、提高环境的可预测性、自治系统与其他自治系统或人类一起协作。例如：通道级 / 模块级 / 设备级 / 网络级的节能需要突破时间、空间、频率、功率等多目标协同优化算法。从网络视角需要同时兼

表 8 自动驾驶网络的分级定义

| 等级 | L0: 人工运维 | L1: 辅助运维 | L2: 部分自治 | L3: 条件自治 | L4: 高度自治 | L5: 完全自治 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 业务 | 不涉及 | 单个用例 | 单个用例 | 可选多个用例 | 可选多个用例 | 任意 |
| 执行 | 人工 | 人工 / 自动 | 自动 | 自动 | 自动 | 自动 |
| 感知 | 人工 | 人工 | 人工 / 自动 | 自动 | 自动 | 自动 |
| 分析 / 决策 | 人工 | 人工 | 人工 | 人工 / 自动 | 自动 | 自动 |
| 意图 / 体验 | 人工 | 人工 | 人工 | 人工 | 人工 / 自动 | 自动 |

顾用户吞吐率和网络整体节能效果，未来需要进一步在保障多用户的 SLA 确定性服务的前提下，同时满足网络和终端节能的多目标优化需求。

- 模型驱动和数据驱动混合架构：模型驱动要求在设计阶段完成详尽的风险分析，识别各种有害事件，其优点是可信任、可解释，适用于关键任务。数据驱动通过机器逐步取代人类的态势感知和适应性决策能力，应对复杂的不确定性场景，是迈向自动驾驶网络的第一步，其优点是性能高，缺点是与训练样本空间相关、可解释性差，以及跨网元和场景的泛化性问题。

- 基于语义的意图：自动驾驶网络自治系统间通过意图化接口极简交互，对外屏蔽内部差异化的实现过程，开箱即用。不关心彼此的实现，只关心结果的目标达成，实现系统间的解耦，包括用户意图、业务意图、服务意图和资源意图等四个类别。

- 网络数字孪生：在数据感知方面，研究高性能网络近似测量，实现近似零误差测量。在建模与预测层，构造高精度近似仿真模型，研究通过网络演算、排队论，提供有理论保障的 SLA 高性能仿真。在控制管理方面，通过快慢控制结构理论求解网络巨系统的资源分配与优化问题。

自动驾驶网络 L4/L5 能力达成不仅取决于软件系统的进步，还必须结合网络架构、协议、设备、站点和部署方案的简化，以极简架构抵消网络连接复杂性。

### 2) 边缘智能原生：通过云原生和 AI 技术重构智能边缘

在通信网络 2030 架构中，云核心网将综合云原生的灵活、开放以及 AI 面向业务的感知能力构建边缘智能原生。

边缘智能原生要支持基于 AI 的业务感知能力：一方面，面向消费者的个人网络将针对全感全息类通信业务提供高效编解码、传输优化、体验保障、协同调度的能力，同时面向大模型应用为终端提供算力卸载。另一方面，面向行业的专用网络则可基于确定性操作系统，强化系统调度框架，为千行百业提供业务保障。如基于 MEC 的 5G ToB + AI 推理服务，以机器视觉处理为例，在边缘侧采用 AI 图像特征识别的处理方式，可以降低骨干传输带宽要求，并提高业务实时性。

边缘智能原生要支持 Mesh 互联和水平算力调度：网络将连接多级算力资源池，为实现算力的高效使用，网络将需要能够对各种算力资源进行感知。首先，算力感知要研究如何对 AI 业务的算力需求进行度量、建模。算力网络中计算芯片多种多样，如 CPU、GPU、ASIC、TPU、NPU 等，需要准确度量上述芯片的算力大小、适用的业务类型；其次，算力网络中的计算节点需要将其算力资源信息、算力服务信息、位置信息发送到网络节点，实现网络对算力、存储等多维度资源和服务的感知，需要研究新型算力路由控制和转发技术，如基于 IPv6+ 的算力状态通告、算力需求感知和算力路由转发等；最后，网络不仅要感知算力，还要能够灵活匹配不同物联网终端的场景，根据华为预测，2030 年全球 IPv6 的渗透率要超过 90%，以满足万物互联的需求，需要研究层次化 IPv6 地址架构和超大规模的高速寻址和转发的创新技术，既满足轻量级协议需求，又能兼容传统 IP 网络，实现从数据到计算的全球可达。

---

同时随着智慧家庭和企业的快速发展，基于 FTTR 联接底座可延伸感存算控等新能力，并结合 AI 技术进一步提升用户的应用体验，如基于 AI 的全屋 Wi-Fi 调优、基于 AI 的 FTTR+NAS 实现照片的自然语言搜索和 AI 时光相册、基于 AI 的语音识别和语义理解等。

---

### 3.2.4 通信感知融合：通信技术外延的全新领域

在 1G 至 5G 时代，通信和感知是独立存在的，例如 4G 通信系统只负责通信，雷达系统只负责测速、感应成像等功能。这样分离化设计存在无线频谱与硬件资源的浪费，功能相互独立也会带来信息处理时延较长的问题。

进入 5G-A/6G 时代，通信频谱将迈向毫米波、太赫兹、可见光，未来通信的频谱会与传统的感知频谱重合，通信感知融合可以方便实现通信与感知资源的联合调度，从技术角度又可分为三类。

无线感知：5G-A 新推出的三大场景之一就是融合通信感知（HCS），主要应用在车联网、无人机的自动驾驶场景，R16 定义的定位能力在商用场景能达到米级精度，未来演进的目标是将定位精度提高到厘米级。同时随着无线向毫米波、太赫兹高频方向演进，未来通信感知融合也可以应用在智慧城市、气象预报、环境监测、医疗成像等场景。

无线通信感知技术还在起步阶段，未来业界需要加强基础理论研究，如通信感知折中优化理论；复杂信道环境下的电磁波传播、空间目标反射、散射、绕射模型，空间稀疏感知模型等；加强对高性能、低功耗射频芯片和器件的研究；加强对超大规模阵列天线结构的研究；加强对高效分布协同感知算法的研究，如主动雷达照射、环境电磁调控、多点协同收发、目标成像、场景重建、信道反演等。

WiFi 感知：802.11bf 定义了 WiFi 的感知标准，可应用在室内、室外、车内、仓库、货场等场景，提供高精度定位、姿态 / 手势识别、呼吸检测、情绪识别、周界安防等功能。未来 WiFi 感知需要加强物理层技术研究，设计新的信号、波形、序列；需要加强 MAC 层技术研究，如 CSI/SNR 感知模式下，测量结果反馈与感知精度的折中；单 / 双 / 多站雷达模式下，节点间同步与协调；多协议（802.11az、802.11be、802.11ay）的协作感知机制等。

光感知：光感知可以分为光纤传感和激光雷达感知。光纤传感主要应用在能源、电力、政府、交通等行业，感知温度、震动、应力的变化，提供火灾监控预警，设备 / 管线故障诊断，环境和设施受力监控等。激光雷达感知可应用于家庭和车场景，提供环境空间感知、高精度定位、姿态手势识别等功能。目前光纤传感在复杂的环境下经常出现较高的误报率，未来需要研究如何通过 AI 和大数据分析降低误报率。激光感知需要加强三维全景建模算法技术的研究，基于激光雷达感知数据，进行多雷达坐标系配准。

根据华为预测，2030 年全球企业千兆及以上 WiFi 渗透率将达到 98%（其中万兆、超万兆为 84%），F5G 大中型企业的渗透率将达到 42%，5G 行业专网在大中型企业的渗透率将达到 35%，通信网络在为企业提供宽带服务之外，还可以利用通信感知融合能力采集静态信息（空间环境、通信盲区、障碍物）和动态信息（人、车、物的位置、运动轨迹、姿态、手势等），进行数据建模，并基于数字孪生进行仿真、识别及预测变化，为千行百业赋能。通信感知融合是通信技术外延的全新领域，未来发展空间很大。

### 3.2.5 安全可信：6 级安全可信框架构筑网络安全新底座

未来网络趋向丰富性、多样性发展，随着网络云化和泛在化演进、ToB 和 ToC 业务融合，网络暴露面不断增加，传统网络安全的“边界”进一步模糊，网络攻击手段持续升级，未来网络难以通过传统的边界隔离，外挂安全能力的被动防御模式来保障安全，需要推动网络安全体系向原生内嵌、安全可信、智能灵活的主动防御模式演进。

安全可信包含组件可信（芯片 / 操作系统）、设备安全、连接安全、管理安全、联邦可信、数据可信六个层次。其中设备安全、连接安全和管理安全属于网络安全的范畴，组件可信、数据可信和联邦可信属于可信的范畴，二者之间有侧重，也有协同。安全可信是一个系统工程，涉及跨平台可信操作系统和芯片、网络内生安全、云安全大脑、多智能体跨域可信联邦、数据差分隐私处理等层次化安全可信技术。（图 7 具备六级安全可信框架的网络）

组件可信：可信的数据源是安全可信的基础，组件（芯片和操作系统）层面的可信执行环境（Trusted Execution Environment）是被广泛认知且应用的方案，未来网络将在网元设备中引入芯片级的可信计算技术，在网元底层基础上构建一个可信、安全的软硬件运行环境，实现从芯片、操作系统到应用的逐级验证，确保数据的真实性。

设备和连接安全：通过对通信协议和网络设备改造，在 IPv6 报文头部嵌入可信标识和密码凭证，网络设备可以基于标识的验证来确认请求的真实性和合法性，防止伪造与假冒，构建细粒度的接入验证和溯源能力。

管理安全：首先，未来网络要构建云网安一体化的安全服务架构，将各类安全功能组件化和微服务化，实现集约化编排，实现安全能力的敏捷部署；其次，由于用户规模扩大和复杂度

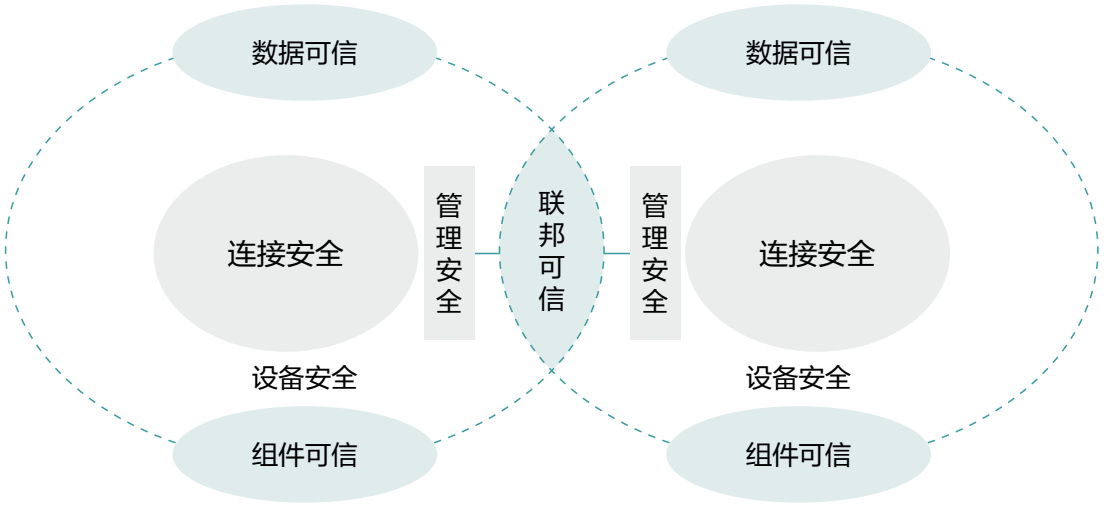



图 7 具备六级安全可信框架的网络

增加，安全策略的数量呈指数级增长，传统人工模式的规划管理将无法适应，未来需要研究流量与业务特征自学习及建模技术、基于特征模型的风险预测和安全策略编排技术、安全策略冲突检测及自动优化技术等。

联邦可信：为满足未来多网多云的安全可信要求，未来网络需要以区块链技术来构建网络基础数字资源（包含联接、计算等）的可信服务体系，通过分布记账、共识机制、去中心化的秘钥分配等，保证资源所有权和映射关系的真实性，防止匿名篡改、非法劫持等安全可信问题。以移动通信网络为例，基础设施的中心化信任模型存在着中心节点权限过大、单点权威失效等问题，其自身无法成为牢固的安全可信基础，存在一定网络的安全性、可靠性和平等性风险。面向下一代网络构建去中心化、透明可审计、可信的身份管理等基础设施，可从根本上消除当前基础设施存在的可信问题。

数据可信：网络在用户接入和业务感知点将接触到用户数据，必须在保障用户信息安全方面增强透明化的能力。业界需要研究对用户的 ID、通信数据等信息强化加密传输的技术，并通过假名化、密态计算等技术最终实现用户信息全透明。

最后，伴随量子技术的飞速发展，在未来网络到来之时，极有可能出现破坏公钥密码体系安全性的新量子算法。量子计算机具有比经典计算机快得多的搜索和分解能力，一旦公钥密码算法的数学原理被破解，现有公钥密码算法将形同虚设，即使增大参数长度也毫无用处，因此未来网络需要引入后量子密码算法来抵抗量子攻击。同样对于对称密码算法，量子计算机也会降低其算法的安全性，因此未来网络仍需要优化对称密码算法，提升算法性能，满足高通量高并发数据的加解密服务。

### 3.2.6 绿色低碳

随着世界范围能源危机和环境恶化的不断加剧，全球对绿色低碳的述求越来越强烈。

当前欧洲领先运营商对其自身碳排放提出了明确目标：2030 年的碳排放在 2020 年的基础上要降低 45%~55%。同时欧洲领先运营商对设备供应商也提出了组织级和产品级两个方面明确的减碳诉求。针对这些要求，设备商可以从极简架构、光电混合、系统节能 & 多维能效三个方面助力运营商完成绿色低碳目标。

#### 1）极简架构：通过基础网、云网和算网的极简架构实现网络低碳

传统网络按照专业划分，造成运营维护的条块分割，已经越来越难以适应网络自动化和 智能化的发展。未来网络需要按照业务本质进 行重构，构建起基础网、云网和算网三层极简网络架构。

基础网：用于实现设备端口级互联，采用 IP+ 光极简架构，在 100% 光纤到站和支持全光交叉（OXC 或者 ROADM）的光底座基础上，构建接入（有线 / 无线）、承载、核心端到端网络，提供大带宽、低时延和高可靠的宽带服务，基于 All-inOne 全频谱天线、WiFi 7/WiFi 8 万兆园区网，高运力智能承载网、全融合核心网、极简协议、极简运维实现网络的绿色低碳。

云网：用于云和端租户级互联，基于端到端切片技术，Overlay 在基础网络之上提供敏 捷和开放、有 SLA 保障的虚拟网络，通过一网多用提升网络使用率，达到网络节能的目的。

算网：用于数据与算力的业务级互联，为数据处理提供算力路由服务和可信保障，基于分布式、开放的协议构建，通过对数据的灵活调度，实现多级算力基础设施的合理布局、绿色集约。在数据中心内采用超融合以太，部分超大规模智算中心向全光交换 + 超融合以太演进；在数据中心间使用 IP+ 全光交换。

三层网络之间存在依赖性，算网为了实现数据与算力之间实时、弹性的连接，需要云网 提供敏捷的虚拟管道建立能力和开放的可以按需驱动的接口，算网最重要的低时延和大带宽 特征也需要基础网络的支持。

### 2) 光电混合：光电技术融合将带来通信网络设备架构及能效的深刻变化

通信网络产业中光与无线、数通等各专业技术传统上相对独立，但随着网络向高速、高频、高能效方向的发展，传统电子技术即将遇到距离、功耗等可持续发展的瓶颈，光电技术将出现融合的趋势。

未来 10 年，我们可以看到，为提升电子器件的高速处理能力并降低功耗，将出现芯片出光、光电合封等新产品形态；为了提升数通设备高速端口的传输距离，将引入光的相干技术；为降低基站的重量和功耗，将出现直接出光纤的新型天线；为实现低轨卫星之间的高速数据传输，将采用激光替代微波；为满足水下移动设备的通信需求，将采用穿透力更高的可见光替代无线电磁波覆盖；为实现脑电波的准确探测，将采用透过率更高的远红外光技术；为训练超大 AI 模型，将在数据中心内采用光交换连接各交换机服务器，将在数据中心间使用全光交叉连接。

光电混合是结构性提升设备能效的发展方向，预计到 2025 年之前，基于光总线的光电合封芯片就会实现商用。一些学术机构也正在研究可以替代电交换网的光 Cell 交换技术，预计到 2030 年之前将出现采用光总线和光 Cell 交换技术的设备级光电混合产品。在更远的未来，产业还将出现采用光计算和光 RAM 内核与通用计算内核混合的芯片级产品。

采用网络级、设备级、芯片级的三级光电混合技术，可以持续提升通信设备的能效，实现未来网络容量增加、能耗基本不变的绿色网络目标。

### 3) 系统节能 & 多维能效：通过系统级节能构建节能和性能双优网络

绿色节能始终是建设高质量网络中不可或缺的一部分。随着未来网络演进，业务场景复杂化，业务类型多样化，对节能的场景化策略制定及差异化业务保障都提出了新的要求。同时，面对日趋复杂的网络和设备系统，需要从软件到硬件，从主设备到配套设备，从单点优化到整体寻优，构建一个端到端的高能效系统。具体能效提升可以从能量流，业务流，控制流三个视角着手。

能量流视角：针对“源、路、载”三个节点，分别从能量的供给，传输和使用出发，降低全链路能量损耗，打造高能效链路。通过供电架构优化（如乐高电源），简化拓扑等提升能量供给效率。通过减少电压种类，减少转换级数等降低线路传输损耗。通过分区供电，动态关断等提升负载用能效率。在持续优化单节点转化效率的同时，基于全链路视角，通过跨节点协同联动，实现整体最优。

业务流视角：基于“业务、资源、能耗”三者间的映射关系，通过精准分配、按需用能。基于未来多样化业务的体验保障需求，及业务的时空动态变化，对资源按需精确分配，实时弹性伸缩。同时，提升设备关断的深度，速率，精准度和灵活度，从而不断向“0 bit，0 watt”的目标逼近。

控制流视角：针对动态变化的复杂系统，需要一整套面向能效的“调优 - 管控 - 评测”机制。一方面针对网络级，站点级，设备级，芯片级进行分层自治，提升各自能效，另一面通过软硬协同，端管芯协同等跨层互助，垂直整合，实现系统级最优。而在定义能效中“效”的评价模型时，既要考虑业务量维度，如流量，覆盖面积，又要考虑业务质量维度，如体验速率，时延，可靠性等。兼顾能耗、业务量、业务质量之间多维权衡，在网络级和设备级分别构建智能化的多目标综合寻优能力，打造节能和性能双优网络。

## 3.3 总结与技术展望

2030 年将出现一个“多网多云”的世界，通过由人性化的万兆家庭网络、高品质的万兆园区网络、超现实体验的万兆个人网络和全球覆盖的卫星宽带组成的“立体网络”，百亿人和千亿物将接入公有云、行业云、电信云等多云共存的智能世界。

未来通信网络的基础层，将基于网络级、设备级、芯片级光电混合不断提升网络的能效；将通过端到端虚拟切片在基础网之上构建起打通专业网络的“断点”、面向不同租户需求、提供差异化 SLA 能力的云网层；将通过 IP 网络协议创新，面向智能业务需求，提供数据与算力之间高动态的算网层；通过三层极简网络、三级光电融合实现网络的绿色低碳。

未来通信网络将面向行业智能化的确定性业务体验需求，在用户到多级计算资源之间构建起城市内 1ms、城市群 5ms、骨干 20ms 三级时延圈，并支持大于 5 个 9 的网络可用性，构建安全、可信的网络能力，支持全行业、全要素上多云的需求。

未来通信网络将支持智能原生，通过网元状态数据与 AI 结合，通过算法创新，逼近理论极限，将“不确定”变为“确定性”，提升网络性能；通过网络运维数据与 AI 结合、大数据分析和闭环优化，全面提升网络自动化水平和全场景服务能力；通过边缘智能原生，感知千行百业多样性的业务需求，提升业务体验。

未来通信网络将支持通信感知融合，通过无线、光等多模态感知技术，采集环境数据，与数字孪生技术结合，面向行业构建全新的融合感知服务能力。

20 多年前，IP 技术重构了通信网络转发架构。10 多年前，云技术深刻影响了网络管理控制架构。未来 10 年，AI 技术将嵌入网络各层架构，推动网络向高等智能体进化。为支持未来网络智能化的发展，网络将在联接技术的基础上增强计算能力，未来还将采用光电混合技术实现通信网络的绿色低碳。

综上所述，立体超宽、确定性、智能原生、通信感知融合、安全可信、绿色低碳是通信网络 2030 架构演进的方向。

04

# 倡 议

著名科幻小说家，《神经漫游者》的作家威廉·吉布森曾讲过这么一句话：“未来已来，只是尚未流行”。智能世界虚拟与现实世界融合的关键技术 AR 是由英国海军 60 年前发明的，并被用于战斗机的瞄准器；而早在上世纪 80 年代麻省理工学院就已经成立了媒体实验室，致力于改变人与电脑的交互方式，实现人性化的数字体验。

通信技术与计算技术同根同源，1981 年 IBM 推出首部个人电脑之后不到 5 年就诞生了首台路由器设备，通信设备与计算机的主要差异是增强了光、无线和网络协议接口。

影响通信网络未来发展的 3 个关键技术云、AI 和光，也正在重构计算产业，除了我们熟悉的云和 AI 技术之外，最近 10 年，光技术也开始深度影响计算产业的发展。业界在光计算领域目前有两个研究方向：一是利用光学器件替代电子器件，构建光电混合计算机；二是利用其并行处理能力，构建算力增强百倍、极低功耗的光学神经网络。未来网络在设计绿色低碳架构时也可以借鉴光在计算领域应用的经验。

对于目标网络，我们现在还无法用一个准确的关键词来完全代表。如果基于网络自身的能力，从泛在千兆到立体万兆 5G-A/F5G-A/Net5.5G，6G/F6G/Net6G 可能是关键词；如果基于网络外在的表现，从面向消费互联到面向工业互联，工业互联网可能是关键词；如果基于业务实质的变化，从面向人的认知到面向机器的认知，联接海量用户数据与多级算力服务，算力网络可能是关键词；如果基于底层技术变迁，从电子技术到光子技术，全光网络可能是关键词；如果基于网络智能的提升，从 L3 到 L4+ 的自动驾驶，认知网络或者数字孪生网络也可能是关键词。

未来 10 年，通信网络既充满想象空间，也存在很多不确定性，需要全产业共同努力，共同探索这些新技术方向，共建通信网络 2030！

# 附录 A：缩略语

| 缩略语 | 英文全称 | 中文全称 |
|---|---|---|
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project | 第三代合作伙伴计划 |
| 5G | 5th Generation of mobile communication | 第五代移动通信 |
| 5G NR | 5G New Radio | 5G 新空口 |
| 5G SA | 5G Standalone | 5G 独立组网 |
| 5GtB | 5G to Business | 5G 到企业 |
| 6G | 6th Generation of mobile communication | 第六代移动通信 |
| ADSL | Asymmetric Digital Subscriber Line | 非对称数字用户线路 |
| AI | Artificial Intelligence | 人工智能 |
| AMR | Automated Mobile Robot | 自走机器人 |
| ADN | Autonomous Driving Network | 自动驾驶网络 |
| API | Application Programming Interface | 应用编程接口 |
| AR | Augmented Reality | 增强现实 |
| ASIC | Application-Specific Integrated Circuit | 专用集成电路 |
| B2B | Business to Business | 企业到企业 |
| CCSA | China Communications Standards Association | 中国通信标准化协会 |
| CPO | Co-Packaged Optics | 光电合封 |
| CPU | Central Processing Unit | 中央处理单元 |
| CRUD | Create, Read, Update, Delete | 增加、查询、更新和删除 |
| CSI/SNR | Channel State Information/Signal-to-Noise Ratio | 信道状态信息 / 信噪比 |
| DCNN | Deep Convolutional Neural Network | 深度卷积神经网络 |
| DetNet | Deterministic Networking | 确定性网络 |
| DoF | Degrees of Freedom | 自由度 |
| E2E | End to End | 端到端 |
| ERP | Enterprise Resource Planning | 企业资源计划 |

| 缩略语 | 英文全称 | 中文全称 |
| --- | --- | --- |
| F5G | 5th Generation Fixed Network | 第五代固网 |
| F6G | 6th Generation Fixed Network | 第六代固网 |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access | 频分多址 |
| FlexE | Flexible Ethernet | 灵活以太 |
| FOV | Field Of View | 视场角 |
| FPS | Frames Per Second | 视频帧率 |
| FR1/FR2 | Frequency Range_1/Frequency Range_2 | 频率范围 1/ 频率范围 2 |
| GIV | Global Industry Vision | 全球 ICT 产业愿景 |
| GPU | Graphical Processing Unit | 图形处理单元 |
| GSMA | GSM Association | GSM 协会 |
| HCS | Harmonized Communication and Sensing | 通信感知融合 |
| IMT | International Mobile Telecommunications | 国际移动通信 |
| IoT | Internet of Things | 物联网 |
| IOWNGF | Innovative Optical and Wireless Network Global Forum | 创新光和无线网络全球论坛 |
| IPv6+ | IPv6 enhanced innovation | IPv6 增强创新 |
| ISA-95 | International Society of Automation 95 | 国际自动化学会 95 |
| ITU-T | International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector | 国际电联电信标准化部门 |
| LEO | Low-Earth Orbit | 低轨 |
| MAC | Media Access Control | 媒体接入控制 |
| Massive MIMO | Massive Multiple-Input Multiple-Output | 大规模 MIMO |
| MEC | Multi-access Edge Computing | 多接入边缘计算 |
| MES | Manufacturing Execution System | 制造执行系统 |
| MR | Mixed Reality | 混合现实 |
| MTP | Motion-to-Photon | 头动响应 |

| 缩略语 | 英文全称 | 中文全称 |
| --- | --- | --- |
| NPU | Neural Processing Unit | 神经处理单元 |
| NSMF | Network Slice Management Function | 网络切片管理功能 |
| NSSMF | Network Slice Subnet Management Function | 网络切片子网管理功能 |
| ODUk | Optical channel Data Unit-k | 光通道数据单元 k |
| ONT | Optical Network Terminal | 光网络终端 |
| O2I | Outdoor to indoor | 室外覆盖室内 |
| PDCP | Packet Data Convergence Protocol | 分组数据汇聚层协议 |
| PHY | Physical Layer | 物理层 |
| PLC | Programmable Logic Controller | 可编程逻辑控制器 |
| PON | Passive Optical Network | 无源光网络 |
| PPD | Pixel Per Degree | 角度像素密度 |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation | 正交幅度调制 |
| QoS | Quality of Service | 服务质量 |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying | 四相相移键控 |
| RAM | Random Access Memory | 随机存取存储器 |
| RB | Resource Block | 资源块 |
| Real-Time OS | Real-Time Operating System | 实时操作系统 |
| RLC | Radio Link Control | 无线链路控制 |
| SCADA | Supervisory Control And Data Acquisition | 监控与数据采集 |
| SDN | Software-Defined Network | 软件定义网络 |
| SLA | Service Level Agreement | 服务水平协议 |
| SLM | Spatial Light Modulator | 空间光调制器 |
| SRv6 Slice-ID | SRv6 Slice Identifier | SRv6 切片标识 |
| TDM | Time Division Multiplexing | 时分复用 |

| 缩略语 | 英文全称 | 中文全称 |
|---|---|---|
| TE | Traffic Engineering | 流量工程 |
| TOPS/W | Tera Operations Per Second/Watt | 每瓦每秒万亿次运算 |
| TPU | Tensor Processing Unit | 张量处理器 |
| TTM | Time to market | 上市时间 |
| TSN | Time Sensitive Networking | 时延敏感网络 |
| URLLC | Ultra-Reliable Low-Latency Communication | 超高可靠性超低时延通信 |
| VLEO | Very Low-Earth Orbit | 超低轨 |
| VPN | Virtual Private Network | 虚拟专用网络 |
| VR | Virtual Reality | 虚拟现实 |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing | 波分复用 |
| Wi-Fi 6 | Wireless Fidelity 6 | 无线保真 6 |
| Wi-Fi 7 | Wireless Fidelity 7 | 无线保真 7 |
| Wi-Fi 8 | Wireless Fidelity 8 | 无线保真 8 |
| WLAN | Wireless Local Area Network | 无线局域网 |
| XR | eXtended Reality | 扩展现实 |

# 附录 B：2024 年版本刷新说明

华为积极与业界知名学者、客户、伙伴深入交流，投入对智能世界的持续探索。我们看到智能世界的进程明显加速，新技术和新场景不断涌现，产业相关参数指数级变化。为此，华为对 2021 年发布的《通信网络 2030》进行系统刷新，展望面向 2030 年的场景、趋势，并对相关预测数据进行了调整。

**华为技术有限公司**
深圳龙岗区坂田华为基地
电话：+86 755 28780808
邮编：518129
www.huawei.com

**商标声明**
HUAWEI，HUAWEI，是华为技术有限公司商标或者注册商标，在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其它商标，产品名称，服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

**免责声明**
本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

**版权所有 © 华为技术有限公司 2024。保留一切权利。**
非经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。