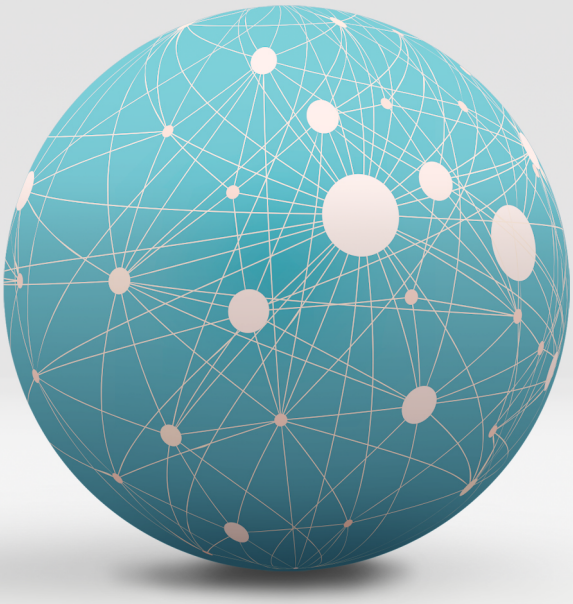
HUAWEI

通信网络 2030



构建万物互联的智能世界

目录

产业趋势 P01

未来网络场景 P03

下一代人机交互网络：以人为中心的超现实体验

XR：虚实的完美结合，自然的交互体验

裸眼3D：逼真的影像再现，全新的视觉体验

数字触觉：多维的体感交互，可触摸的互联网

数字嗅觉：深层的感官交互，可品味的互联网

住行合一网络：相同宽带体验的第三空间

卫星宽带互联网：地面到空中的宽带覆盖

工业互联网：消费、办公与生产一张网

算力网络：面向机器认知的新型网络

认知网络：向高等生命进化的网络

网络愿景与关键技术特征 P13

网络愿景

关键技术特征

立体超宽

1) 空天地一体：无缝立体的连续宽带体验

2) 3个万兆接入：个人、家庭、组织共同迈入万兆时代

3) 超宽全T网络：接入、骨干、数据中心网络全面进入T时代

确定性体验

1) 三级时延圈：100ms/10ms/1ms时延圈满足差异化业务诉求

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

3) 5个9高可靠：满足行业生产控制系统要求，使能企业全要素上云

通信感知融合

安全可信

智能原生

1) 自动驾驶网络：网络向L4/L5高级智能化方向持续演进

2) 边缘智能原生：通过云原生和AI技术重构智能边缘

绿色低碳

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

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

总结与技术展望

倡议 P22

附录A：缩略语 P23

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%以上的中小企业应具备数字技术的基本水平，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年应加大对数据、软件、计算、网络的投资，以保持其在数字经济领域的竞争力。

行业智能化首先对企业网络的改造提出了明确的要求，在中国政府印发的《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。在欧盟数字化欧洲工业（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。

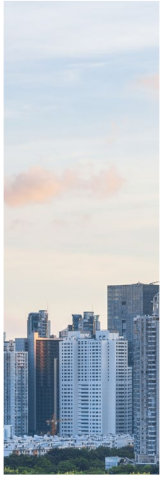
面向行业智能化的需求，全球领先电信运营商纷纷行动起来，开始在不同程度上探索“联接+”的业务发展方向。中国移动提出5G+AICDE（AI、IoT、Cloud Computing、Big Data、Edge Computing）的发展战略。中国电信提出2030年要构建云网一体的融合架构。中国联通发布CUBE-Net3.0，明确提出联接+计算+智能的新发展方向。德国电信在2030展望中提出面向B2B业务要成为数字使能者（Digital Enabler），提供网络+IoT+云和数字化的综合服务。根据GSMA的调研，面向工业、金融、健康、能源、农业的B2B、云、IoT

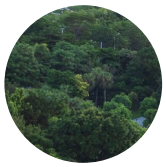
场景将成为全球电信运营商未来“联接+”最具发展潜力的领域。

畅想2030年，人们可以依托高灵敏的生物传感器与智能硬件，通过宽带网络实时获取及跟踪身体各项指标，并在云端安全存储海量历史健康数据，将有能力自主驱动个人健康，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，导致网络管理更加复杂，需要网络更加智能，未来10年如何通过软件技术创新，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，工业、农业无人值守、自动驾驶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！



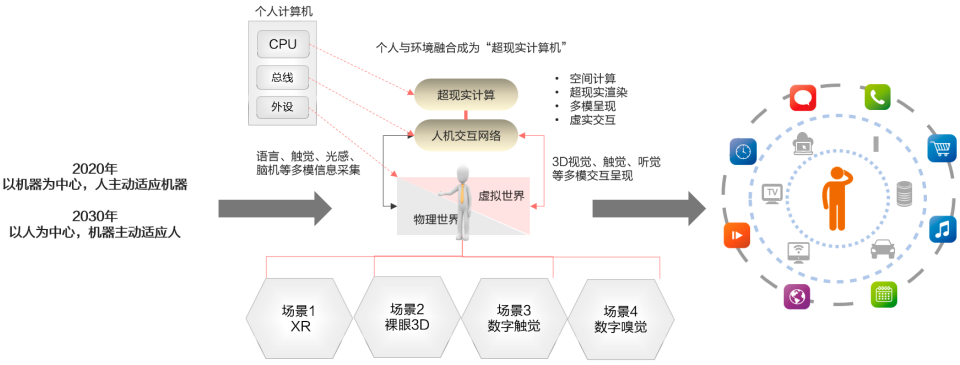


未来网络场景

从1837年摩尔斯发明有线电报到今天，通信网络从联接个人、家庭扩展到联接组织，通信网络需要不断被创新才能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；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5.5G/6G、F5G向F5.5G/F6G、IPv4/MPLS向

图1 超现实人机交互体验



IPv6+、自动驾驶网络从L2向L5持续演进之外，各种新型的网络场景也将不断涌现。

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）

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

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，一些厂家已经发布更加轻便的隐形AR眼镜，并计划在2年内上市。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）

当前，XR还处于部分沉浸体验阶段，主要表现为2K单眼分辨率、100-120度视场角、

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	
感知交互	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

百兆码率、20ms MTP（Motion To Photons，头动到显示画面）时延，如果内容渲染全部在云端实现，20ms是保障不头晕的基础要求。

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。如果全部渲染还在云端，则需要5ms的MTP时延，如果通过技术方式，将容易引起头晕的环境内容放在本地渲染，则时延只与内容的类型相关。如果是流媒体类弱交互内容，20ms时延就可以满足要求；如果是游戏类强交互内容，则仍然需要5ms的时延。

因此，支持XR业务未来10年的发展，网络需要具备1Gbps带宽和5~20ms的网络时延能力。

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，如果希望大面积使用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-light-modulator，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）

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，一些厂商已经在展示相关的创新产品，我们判断到2025年就会在娱乐、商业领域出现大量实用案例，对带宽的需求在1Gbps左右，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

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
网络传输	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 强交互：5ms	弱交互：5ms 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	
	手势交互	手势识别	
	移动交互	跟踪位置，空间计算	
可用性		声音：3个9 图像：5个9	

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

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，要超过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。

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）

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。

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	视频	5个9	10-20	1-100Mbps
		声音	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					

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。

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。

住行合一网络：相同宽带体验的第三空间

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，车内和家庭都将出现多屏、3D、全息的应用场景，家庭8K/16K大屏、车内MR将逐渐普及。

从5G/F5G/WiFi 6开始，移动和固定宽带基本上同步迈入千兆时代，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4 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。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。

人们在移动第三空间（车内）的业务场景也将包含多屏、3D、全息教学和XR。

表4 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（180英寸屏幕）	1.6Gbps	50ms	1.6Gbps，20ms（16K XR）
游戏	10年内	360° 24K 3D VR/AR	4.4Gbps	5ms	4.4Gbps，5ms（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（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 5个9~6个9可用

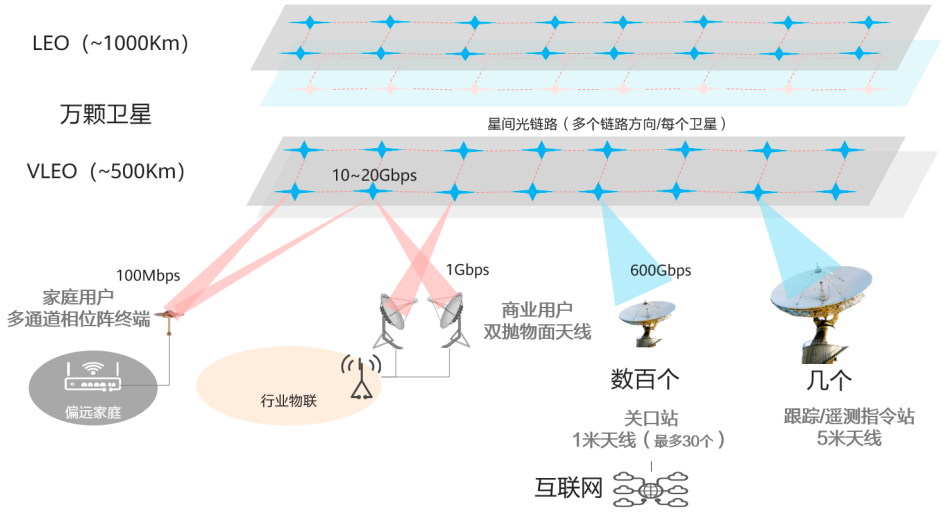
未来10年，对网络带宽的主流需求是支持1Gbps~10Gbps，网络时延也要小于5ms。考虑到自动驾驶依托网络的车路协同场景，对网络的可用性也提出了更高要求，可用性要大于5个9，并支持10cm的定位精度。

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。

卫星宽带互联网：地面到空中的连续宽带覆盖

未来10年网联无人机将更加普及，并带来千亿规模的新产业空间，将出现更多的城市载人飞行器，数万颗低轨宽带卫星将运行在天空中。卫星宽带将具备规模商用能力，载人太空旅行和深海探索将成为热门的娱乐项目。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，需要像空气一样随时可获取。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 卫星宽带网络）

图2 卫星宽带网络



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，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光传输链路，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。在蜂窝网覆盖之外的地区，卫星宽带可面向使用多通道相位阵天线的消费者提供百兆宽带能力，向使用双抛物面天线的企业客户提供千兆宽带能力，并经过星光传输链路将数据传送到全球数百个关口站与互联网连接，相当于形成一张全球立体覆盖、时延在100ms以内的准4G网络。

目前低轨卫星宽带的终端天线尺寸还比较大，尚无法满足个人移动性的需求，主要场景是面向偏远地区的家庭、企业、轮船等，业界已经出现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。未来随着卫星宽带的普及，有可能出现支持高移动性的卫星宽带场景（终端），如网联汽车、小型化的个人终端等，满足人和物从家庭WiFi到城市蜂窝网，再到无缝覆盖的卫星网连续宽带体验需求。

工业互联网：面向智能制造、服务于人机协同的新网络

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。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”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。

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、WiFi、短距通信的联接数约1000亿。工业领域除了海量的压力、光

表5 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															
		每个企业的联接数量	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》

电、温湿度传感器外，大量的智能摄像头、智能汽车、无人机、机器人也将接入到网络中，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+、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（Any-Workplace）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）

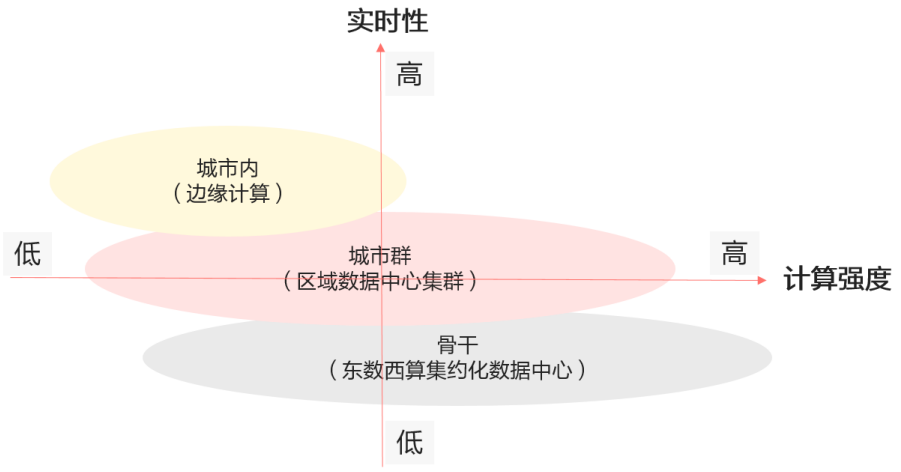
根据每种业务的典型带宽和时延要求，结合对2030年企业各种终端的数量预测，可以判断未来一个大中型企业需要100Gbps的网络带宽，单用户最大带宽要达到10Gbps，网络时延根据不同业务存在1ms/10ms/100ms多种需求，并存在网络安全、可信的需求。

算力网络：面向机器认知，联接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。

图3 面向机器数据服务的三级计算资源



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。

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，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，面向机器认知的新型网络需要支持在边缘侧进行数据分析和处理，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/10ms/100ms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）

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。

认知网络：向高级智能进化的网络

学术界经常将物理世界的变化进行拟人化描述，以便于人们更容易理解技术对世界的影响。1877年德国哲学家卡普在《技术哲学纲要》中首次提出“工具和器物是人体器官投影”的概念和理论。1964年媒介理论家麦克卢汉在《理解媒介》一书中提出“机械技术时代是人类身体的延伸，电子技术时代是人类神经系统的延伸”的观点。1995年罗素在《地球脑的觉醒》（The Global Brain Awakens）一书中提出“人类的各种连接，正在使地球成为类人脑组织，地球正在觉醒”的观点。从身体到神经再到大脑，整个数字世界正在向着高等生命进化。

通信网络已经诞生一百多年，早期的电报网、模拟电话网已经消失或被替代。

过去50年，移动通信网、光通信网、数据通信网通过不断的代际演进，保持了蓬勃的生命力，与光纤管线、机房站点一起构成了网络强健的身体。

最近10年，网络最大的变化是出现了神经系统的进化。人的神经系统既包含实现自主应激反应、可以闭环管理的基础神经系统，也包含具备分析思考和主动认知能力的高级神经系统（大脑）。从软件定义网络（SDN）到自动驾驶网络（ADN），网络已经逐渐进化出了自己的基础神经系统。

未来10年，网络神经系统将向两个方向持续进化：一个方向是具备通信感知融合能力（无线感知、WiFi感知、光感知等），另一方向是还将进化出大脑，一个可以构建虚拟世界，并自主完成推理和决策的数字孪生系统，这将是网络进化为高等生命、具备认知智能的标志。

认知智能本身是一个工程与数学结合的问题，要求系统可实时感知各种外部和内部变化，通过自主分析预测，主动做出管理。

认知智能的构建将包含两个维度：时间维度和功能维度。

时间维度：根据历史信息（如T1、T2），通过学习，能够推测出未来（T3）的变化，典型的如L5自动驾驶网络，可以根据历史性能和告警，对将出现的性能劣化给出准确的预测。

功能维度：根据多个环境功能（如A、B）的信息，通过学习，能够判断出网络功能（如C）的变化，典型的如认知无线系统、网络安全等，可以根据用户位置、信道的变化预测出用户将发生的切换，可以根据报文的行为异常，判断安全态势的改变等。

认知网络概念的提出已经有很多年，世界一些知名的大学、研究机构和公司都在进行相关研究，但一直没有突破性进展。认知技术最早用于无线网络，2004年IEEE成立了802.22标准组，是业界基于认知的第一个无线标准。近年来伴随着AI在多场景的突破，如在无人驾驶场景，基于实际道路的无人驾驶里程已经超过百万公里；在生产质量控制场景，借助AI视觉能够大大缩短质检时间；在农业场景，智能采摘机器人的采摘苹果效率可以达到人工的两倍以上等，通信产业也开始探索如何将AI应用于网络，希望在未来10年，借助AI和数字孪生技术的结合，在认知网络方面获得突破性进展，可以通过对多维度数据信息的分析、推理，大幅度提升对网络未知状态的预测和判断能力。

作为即将觉醒的数字世界的一部分，通信网络未来将具备融合感知能力和认知智能，像高等生命一样，四肢发达、感觉敏锐、头脑灵活。

网络愿景与关键技术特征

网络愿景

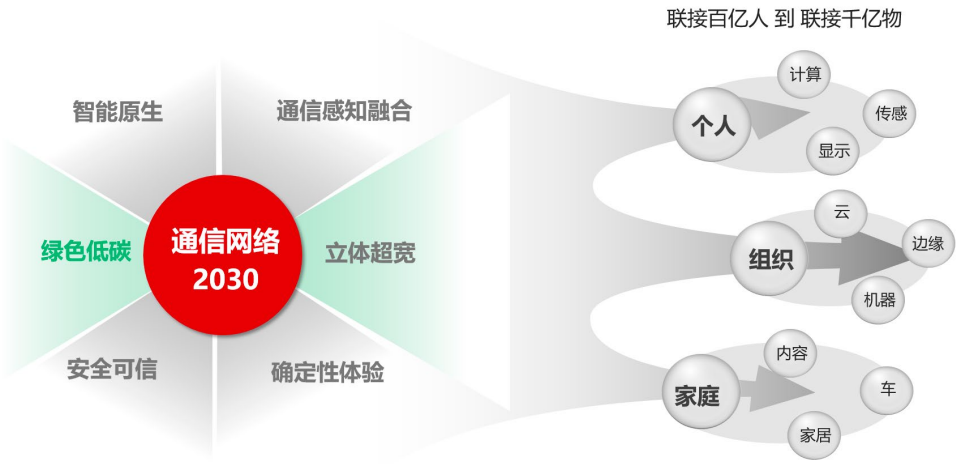
从联接百亿人到联接千亿物，一个智能原生、安全可信，具备确定性体验和通信感知融合能力的立体超宽、绿色网络是未来网络发展的方向。（图4 通信网络2030的愿景）

关键技术特征

通信网络2030具备6大技术特征和15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4 通信网络2030的愿景



立体超宽网络

未来十年，网络性能将持续提升，从今天的3个千兆（5G/F5G/WiFi 6）增长到3个万兆（6G/F6G/WiFi 8）。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55%和23%，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天地一体。

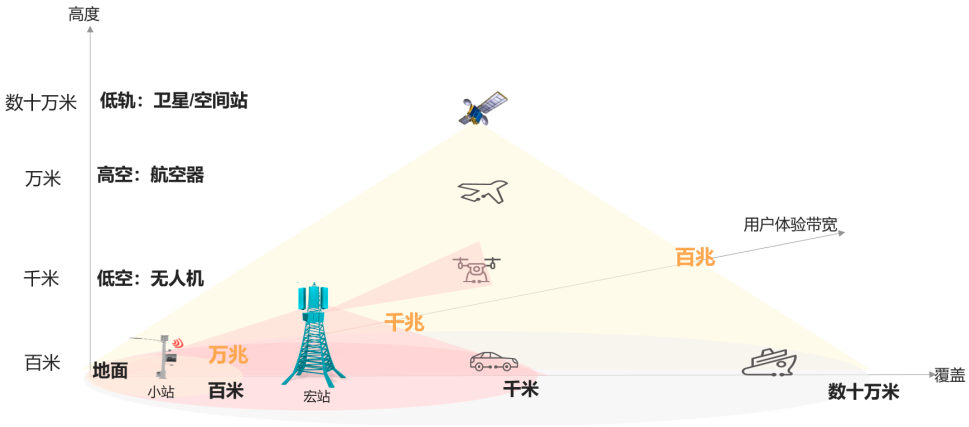
1） 空天地一体：无缝立体的连续宽带体验

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。立体网络将由覆盖半径100m的小站、1~10Km的宏站和300Km~400Km的低轨卫星共同组成，分别为用户提供万兆、千兆、百兆的连续宽带体验。（图6 立体宽带网络）

在卫星与地面接入域，网络需要支持终端自由接入地面和空间网络；需要研究深衰落、大时延和高动态的新空口技术；需要研究面向

图5 通信网络2030的关键技术特征

图6 立体宽带网络



负载均衡的星内、星间的波束赋形，将激活的用户均匀分配在不同波束中，实现资源高效利用；需要研究抗干扰技术，提升频谱复用率；需要研究全球巨量切换请求和复杂切换条件下的快速决策框架，以及基于有限地面站的移动性管理框架等技术。

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以上的带宽能力；需要研究工业产品如何航天化、相控阵列天线小型化、激光传输动态跟瞄等技术。

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，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新动态路由协议，支持空天地一体智能切换的超分布融合核心网等实现空天地一体化。

2） 3个万兆接入：个人、家庭、组织共同迈入万兆时代

未来10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Sub100GHz频谱的灵活应用和Massive MIMO的持续演进。目前3GPP R16标准中，5G NR已经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，正在定义的R17标准中，52.6GHz以上频谱用于5G NR已经成为了重要课题之一，这标志着100GHz以下频谱向5G全面演进已经成为业界共识。

为实现万兆园区宽带接入能力，未来还需要研究支持毫米波和高密度MIMO的下一代WiFi技术，正在定义的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。

3） 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、个人和企业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、数据中心网络多个环节进入全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200G/400G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。

同时骨干波分设备也需要突破单纤100T的长途传输能力，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、从C波段扩展到L和S波段的新型光放大器技术等。

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：100ms/10ms/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100ms、10ms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。

无线接入的场景下，实时业务对空口瞬时速率要求高，但由于单载波多用户的复用而频谱受限，实时性很难得到保障。未来业界需要研究多载波聚合技术，通过载波配置和传输解耦，在多频段的广义载波内提升业务在时延约束下的带宽。

云化的无线核心网则需要研究实时操作系统（Real-Time OS），强化系统确定性调度框架，保障业务的实时性。

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。

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TSN、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。物理隔离技术有光层硬管道，通过不同的波长或单波长内的ODUk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。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，提供有界时延和零丢包的物理切片技术、小颗粒度的FlexE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5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。

智能原生

1） 自动驾驶网络：网络向L4/L5高级智能化方向持续演进

自动驾驶网络作为网络神经系统发展的高级阶段，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，具备部分和有条件自治的能力，系统可以根据AI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级智能持续演进，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6 自动驾驶网络的分级定义）

为了支撑自动驾驶网络向L4/L5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

表6 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

参考：TMF 2020

功能实现的架构演进到基于目标的决策架构，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。

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，当前仅适用于非关键任务。

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。

第二，在网元层面，从把AI用于运维到把AI用于网元算法和功能重构，实现AI Native网元。针对网元设备的实时状态数据，自动驾驶网络通过基于AI的实时分析和处理，可以动态补偿和优化参数，提高网络设备算法精确度，实现智能超宽带，如认知无线、认知光网络等，需要将设备计算能力提升十倍。

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。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。

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5.5G/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：5.5G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；当前对0.3THZ以上频段的信道建模还处于空白状态，需要加强研究太赫兹远/近场传播模型，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；加强对超大规模太赫兹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年全球万兆企业WiFi渗透率将达到40%，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。

安全可信：6级安全可信框架构筑网络安全新底座

一方面安全本身正在从传统集中式防护、外挂式的架构向网络内生安全新架构演变，另一方面从消费互联到工业互联将要求网络不仅安全，而且可信。

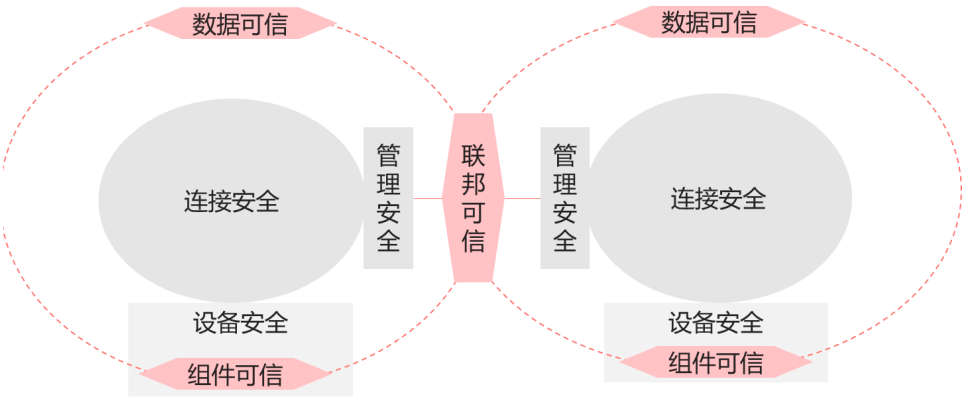
安全可信包含组件可信（芯片/操作系统）、设备安全、连接安全、管理安全、联邦可信、数据可信六个层次。其中设备安全、连接安全和管理安全属于网络安全的范畴，组件可信、数据可信和联邦可信属于可信的范畴，二者之间有侧重，也有协同。安全可信是一个系统工程，涉及跨平台可信操作系统和芯片、网络内生安全、云安全大脑、多智能体跨域可信联邦、数据差分隐私处理等层次化安全可信技术。（图7 具备六级安全可信框架的网络）

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

图7 具备六级安全可信框架的网络



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。

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。

绿色低碳

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，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）、交换、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-in-One全频谱天线、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，并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。

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。

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。

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、工业化的万兆园区网络、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。

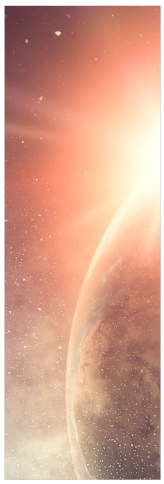
未来通信网络将面向行业智能化的确定性业务体验需求，在用户到多级计算资源之间构建起城市内1ms、城市群10ms、骨干100ms三级时延圈，并支持大于5个9的网络可用性，构建安全、可信的网络能力，支持全行业、全要素上多云的需求。

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。



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，从泛在千兆到立体万兆，6G/F6G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L5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
5GtoB	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
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
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
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
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
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
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

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 2021。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。