

初探5G/6G终端

摘要

伴随着5G的商用化,2019年通信界已广泛开启下一代移动通信技术(6G)的研究工作。根据国际电信联盟,下一代移动通信预计在2030年开始商用。据ITU网络2030工作组介绍,下一代移动通信系统将包括三大场景:甚大容量(VLV)与极小即时通信(TIC),超越尽力而为(BBE)与高精度通信(HPC),融合多类网路(ManyNets)。从上述场景可以看出,未来网络将提供更高速率、更低时延、更多连接数、更广覆盖的通信服务。

但对于未来终端(B5G/6G终端),目前业界尚未提供清晰地描述。本白皮书试图初步探索B5G/6G终端,希望通过本白皮书抛砖引玉,能引起业界广泛讨论探讨B5G/6G终端,为后续明晰地定义B5G/6G终端奠定坚实的基础。

本白皮书的第二章节,首先对B5G/6G终端形态发展趋势和需求展开分析,而后分别从面向消费者和面向工业这两个层面介绍了B5G/6G终端类型和具体需求。第三章节,从通信能力、计算能力、显示/交互/传感能力、续航能力四个方面探索B5G/6G终端应具备的能力。第四章节,重在探索未来终端技术发展路线,试图明晰出一些潜在的技术发展路线。

目录

| | |
|--------------------------------|----|
| 摘要 | 1 |
| 1 引言 | 3 |
| 2 终端形态 | 3 |
| 2.1 B5G/6G 终端形态发展趋势和需求分析 | 3 |
| 2.2 B5G/6G 终端分类与具体需求 | 5 |
| 2.2.1 面向消费者的终端 | 5 |
| 2.2.1.1 个人处理中心 | 5 |
| 2.2.1.2 可穿戴设备 | 9 |
| 2.2.1.3 消费物联网设备 | 11 |
| 2.2.2 面向工业的终端 | 12 |
| 2.2.2.1 智能机器设备 | 12 |
| 2.2.2.2 多智能体系统 | 14 |
| 2.2.2.3 微型传感器 | 18 |
| 3 终端能力 | 19 |
| 3.1 通信能力 | 19 |
| 3.2 计算能力 | 20 |
| 3.3 显示 / 交互 / 传感能力 | 21 |
| 3.4 续航能力 | 22 |
| 4 终端通用技术 | 23 |
| 4.1 高频通信技术 | 23 |
| 4.2 多 SIM 卡技术 | 24 |
| 4.3 半导体工艺技术 | 26 |
| 4.4 计算架构技术 | 27 |
| 4.5 柔性显示材料 | 30 |
| 4.6 机电一体化 | 31 |
| 4.7 惯性导航 | 33 |
| 4.8 3D 传感技术 | 34 |
| 4.9 新材料电池 | 37 |
| 4.10 新型充电技术 | 40 |
| 4.11 终端省电技术 | 42 |
| 5 参考文献 | 44 |
| 致谢 | 45 |
| 缩略语 | 45 |

1 引言

1973 年，马丁库伯发明了第一部手机，蜂窝移动通信技术快速普及并在近年加速发展。手机形态的终端

主宰了 2G/3G/4G 时代，经历了模拟手机，数字键盘手机，到智能手机时代，手机越来越轻薄、易用，而且美观时尚、功能强大。可以预测地是，到了 5G 时代，智能手机将越来越变为我们日常生活中不可缺失的一部分，且终端类型将更为多样化。

随着 5G 商用化，通信业界已开始转向下一代通信技术研究。比如：由 University of Oulu 联合其他大学、机构成立的 6G Flagship Ecosystem，已于 2019 年 3 月份召开了第一届 6G 无线峰会，并于 2019 年 10 月份发布了据称为世界第一本 6G 白皮书；ITU-T 成立的 Network 2030 网络焦点组（Focus group on Network 2030），旨在探索面向 2030 年及以后的网络技术发展，从 2018 年起至今已召开了 5 次相关讨论会。

但目前甚少有关于未来终端的探讨，更多是在网络层面进行探索，或者探讨的不够全面。本白皮书立足于终端，试图勾绘出未来终端形态，并结合未来应用场景，明确出未来终端在通信、计算、显示 / 传感 / 感知、续航方面的能力需求，最后列举出一些潜在的技术路线以满足上述能力需求，包括高频通信技术、多 SIM 卡技术、半导体工艺、计算架构、柔性显示材料、机电一体化、惯性导航、3D 传感技术、新材料电池、节电技术等。

作为 B5G/6G 终端白皮书第一版，本文或许还不够全面，或许还存在某些不准确的地方，欢迎提出修改意见和建议，也欢迎业界同仁后续加入 B5G/6G 终端讨论中。随着时间的推移，新的研究内容可能会被加入到后续的版本中。

2 终端形态

2.1 B5G/6G 终端形态发展趋势和需求分析

随着蜂窝通信系统连接能力的提升，终端形态也逐渐的扩展和变化，预计 B5G/6G 时代，手机将不再是蜂窝系统中数量最多的终端，未来的 B5G/6G 终端将呈现如下趋势：泛在化，智能化，轻量化，共享化，融合化的趋势。

1) 趋势 1: 泛在化

随着蜂窝移动通信技术的快速发展，其应用的领域和范围逐渐扩展到社会各行各业，未来 B5G/6G 终端形态呈现泛在化的趋势。除去手机外，将出现 AR/VR 眼镜，智能手表等可穿戴设备；由于 B5G/6G 系统吞吐能力更强，家庭 / 社区网关设备等网关型产品将成为连接万物的重要设备；B5G/6G 将连接汽车、机器人、工厂设备等众多行业终端，一方面需要结合行业终端应用场景、满足诸如低时延高可靠等特定需求；另一方面，终端的模组化成为趋势，可以尽量最大化的提升规模效应，降低成本。B5G/6G 将进一步扩大连接范围，构建数字化的物理信息系统，未来大量低成本低功耗小尺寸的物联网终端将散布在我们周围，提供智能家居、环境监测、公共服务、资产监控等众多功能。

2) 趋势 2: 智能化

计算能力一直按照摩尔定律飞速发展，B5G/6G 时代，终端的计算能力将进一步提升几百到 1000 倍。终端算力的提升，为智能化奠定了很好的基础，同时，借助 B5G/6G 系统大带宽低延迟的特点，可以把更强运算需求的任务放到云端或者网络的边缘。借助边缘计算、云计算和本地的 CPU/GPU 以及专用 AI 加速硬件，未来的终端在泛在化的同时，将更加智能化。借助 AI 技术的持续发展，未来的终端将具备强大的智能和智慧，提升服务体验，提高生产效率，完成更多的任务。

3) 趋势 3: 轻量化

B5G/6G 通信终端将应用在各种场景，在很多移动场景和野外场景下，受到应用场景的限制，终端的重量、体积、功耗以及成本都有严格要求，所以终端技术在增加天线数目，增加带宽，提升发射功率的同时，轻量化成为 B5G/6G 终端的重要发展方向。通过增强的系统设计和优化的链路预算，实现终端在轻量化的同时，尽量不降低速率、时延等用户体验是终端轻量化的重要研究方向。

4) 趋势 4: 共享化

随着共享经济模式的成熟，和 B5G/6G 带来的万物互联能力的成熟，B5G/6G 终端将出现并具备日益成熟的共享化能力。在原来私有终端的基础上，配合以生物识别，个性化场景的智能自动配置以及隐私保护技术，B5G/6G 终端可以便捷快速和无障碍的授权给使用请求人，使得请求人可以随时随地的享用共享终端。共享 B5G/6G 终端形式可以包括供租用的汽车，供租用的含智能家居的酒店住房，或者其他在公共场所可以供租用的拥有显示和运算能

力的终端设备。

5) 趋势 5: 融合化

随着 B5G/6G 通信领域的不断扩展，包括从地面蜂窝移动通信扩展到广播通信系统，空域无人机 / 高空飞艇平台通信系统，天域卫星通信系统，并且信息设备功能不断丰富、性能不断提升，B5G/6G 终端将迎来进一步融合化的趋势。B5G/6G 终端的单个终端将可以胜任以前若干不同种类终端的能力，包含融合以前不具备通信能力的终端和具备通信能力的终端，以及融合以前具备不同通信能力的多种终端。

2.2 B5G/6G 终端分类与具体需求

2.2.1 面向消费者的终端

2.2.1.1 个人处理中心

目前个人处理中心主要包括三大智能终端设备：智能手机，平板电脑，和个人电脑（PC）。智能手机目前已基本进入全屏化、AI 化时代：全屏幕手机逐渐取代市场存量非全屏手机，成为市场上智能手机的主流。异形屏、伸缩摄像头、屏下指纹、屏下摄像头等新技术的崛起逐步使能全屏智能手机。此外，AI 语音助手亦已成为主流智能手机的标配，智能手机芯片均已 AI 化。

平板电脑逐步由娱乐化场景向生产力方面进行演进，生产力功能和性能朝个人电脑逼近。随着智能手机全屏化、AI 化之后，平板电脑亦有全屏化和 AI 化的趋势。为了增强平板电脑的生产力能力，相关生产力配件已逐步成熟，例如蓝牙鼠标、蓝牙键盘、电子笔、绘图转盘、绘画板等。

另一方面，个人电脑作为发展时间最长的终端设备，目前仍是能力最全面的个人处理中心，覆盖影音娱乐、生产、办公、差旅、游戏等各个应用场景。个人电脑中笔记本电脑已发展为个人电脑中的主流，台式机电脑已逐步退化到游戏和部分办公场景。个人笔记本电脑逐步轻薄化、高性能化，并吸收了智能手机全屏化和 AI 化的优势。世界第一款搭载折叠屏幕的笔记本电脑（属于 Lenovo ThinkPad X1 系列），和世界第一款 5G 化的笔记本电脑（由美国高通和 Lenovo 在 COMPUTEX2019 展会上公布）均已出现。目前看来，三大智能终端设备的功能和性能已有趋同的苗头。

B5G/6G 终端将以个人为中心,提供各种融合多功能终端,除了个人私有终端如智能手机、平板电脑和个人电脑等外,还将广泛存在泛在共享终端,如图 1 所示。

泛在共享终端作为个人处理中心,拥有输入输出设备,为个人提供随时随地的超高清、沉浸式、大数据速率、超低时延、超高可靠的通信能力。比如交通工具上配置的终端,包含私家车、公共交通工具(出租车、公共汽车、火车、飞机等);办公室用智能显示与交互系统、智能白板;其他公共场所的共享终端,如路侧智能显示与交互系统、公共空间(公园,医院,商场等)智能显示与交互系统。其输入技术包括并不限于声音输入、图像输入、键盘指令输入、触摸输入、脑电波输入等;其输出技术包括并不限于超高清屏幕、AR/VR/MR 技术、全息影像、3D 音场输出、触觉输出、脑电波输出等。作为个人处理中心,其使用信息处理和传输过程需保证个人信息保护,适当使用用户身份识别、数据远程安全存储和调用、用户使用痕迹可擦除等技术。



图 1 个人处理中心

随着移动通信技术的发展,未来 B5G/6G 时代的个人处理中心会出现多形态、泛连接、以及云雾化的发展趋势:

- 多形态化

在 B5G/6G 时代,三大智能终端设备的形态将随着材料技术、软件技术、人工智能技术的发展而持续演进,并呈现出以下的几大类特点:

- 超高清显示技术及全息影像:屏幕以及显示技术将会持续快速发展,超高清屏幕显示,

悬浮 3D 显示，全息影像等技术将会涌现、成熟并普及到智能终端设备上。多种形态的显示技术会适用于不同的智能终端设备和场景，例如悬浮显示或全息投影可扩展智能手机的屏幕，个人电脑的超高清显示将有利于图像 / 视频处理，工业设计，以及影视娱乐。全息投影更有助于人与人之间的互相交流、会议。

- 进阶柔性屏幕：目前柔性可折叠屏幕已开始应用于智能手机，并将应用于个人电脑。在未来时代，柔性屏幕技术将成熟化，并将普及于所有三大智能设备之中。柔性屏幕技术将使得智能终端设备更加便携，更适应于不同场景的应用

- 高可持续电力：电池已成为制约智能终端设备发展的一大障碍。特别是小型化智能终端设备，电力的不足会阻碍智能终端算力、超高清显示、高速无线连接等技术的普及和应用。未来随着物理学和材料学的发展，超高容量电池例如使用石墨烯技术的电池将成熟化商业化，大幅提升电池能量密度，使能智能终端设备的高可持续性使用，并助力智能终端其他技术的发展。

- 包含多种生物识别的安全技术：目前生物识别主要为指纹识别和 3D 面容识别。在未来，多种生物识别技术将融合使用，将个人终端设备的安全性提升到前所未有的高度。例如虹膜识别，植入体内芯片的细胞识别等生物识别技术将全面发展

- 多形态交互方式：目前交互方式主要依靠触摸、配件设备、语音等方式。未来随着悬浮 3D 显示技术和全息投影技术的发展，手势交互将成为主流交互方式的一种。此外，脑电波、眼球动作等交互方式也将迎来快速发展，并可应用于例如需要高度安静的场景，或提升残障人士与智能设备交互的便利程度

- 高级人工智能：目前人工智能已落地应用到个人智能终端设备，并已完成了初步的发展。未来智能终端上的人工智能将更加高级，除了对人的各种需求进行被动反馈外，人工智能会主动与人进行交互，主动帮助人进行各项事务的处理，主动为人提供各类建议。

- 除了三大智能设备的持续演进，个人处理中心也将扩展到其他形态的设备，例如机器人，汽车，智能家居设备，智能穿戴设备等，未来多种形态的个人智能终端将协同工作，形成多形态智能终端设备支持的逻辑上的个人处理中心

- 泛连接化

随着移动通信技术发展到了 B5G/6G 时代，世界将进入到人与设备，设备与设备，人与信息，人与人等万物互联的泛连接时代。那么，上文中提到的多种形态智能终端支持的逻辑上的个



图 3 云雾化示意图

2.2.1.2 可穿戴设备

目前较为普及的可穿戴设备，包括可穿戴手环，可穿戴手表，AR/VR 等头显设备等。

- 可穿戴手环。当前的可穿戴手环用于简单的定时、计步、心跳检测功能。未来可定制化个人功能，实现与其他可穿戴设备的互联互通。

- 可穿戴手表。当前的可穿戴手表具有类似智能手机的功能，用于通信、拍照等。未来的可穿戴手表将与手机功能相当，可折叠，可扩展成较大型屏幕。

- AR/VR 等头显设备。目前个人穿戴设备，尤其是 AR/VR 等 XR 设备等头显设备在用户体验方面还需要较大改善。在重量体积方面，电池和计算平台导致头显设备重量大，体积大，影响用户佩戴舒适感。目前已发布的多款瘦客户终端部分解决了该问题，但这些终端目前需要依赖有线与通信和计算平台连接，同时实现供电，依然会对用户体验造成一定影响。随着电池技术，个人短距离无线通信技术，以及无线能源传输技术的发展，未来的可穿戴设备将有能力进一步解决上述问题，进一步提高用户使用体验。头显设备的显示技术改进也是对用户体验有重大影响的部分。现有技术仍然需要在分辨率，响应速度，视场角度等多个方面进一步改进。例如，在视场扩展方面，DOCOMO 今年联合相关厂商发布了大视场角头显技术 [1]，弥补了用户视野中边缘部分的显示缺失，提高了用户的临场感。新的头显设备效果和传统设备效果对比，如图 4 所示。

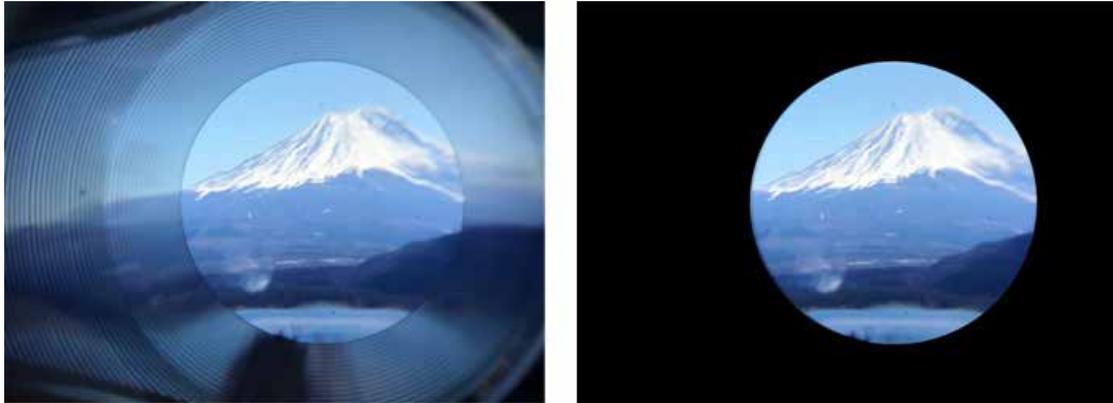


图 4 新的头显设备效果和传统设备效果对比：

左侧为扩展视场显示效果，右侧为传统 VR 视场显示效果^[1]

在未来可预期的 10-15 年，可穿戴设备呈现出加外形多样化，功能定制化的特点。B5G/6G 的可穿戴终端包含外戴终端和植入终端，可穿戴设备不仅方便携带，而且利用与人体本身的贴近和融合，实现更人性化输入输出方式，实现医疗 / 健康等扩展功能，具体包括如下新形态的可穿戴设备：

- 可穿戴首饰，将首饰与智能设备融合，实现珠宝饰品的升级，例如将手镯、项链等引入可拆卸智能设备设计，避免穿戴繁琐的同时，提升观赏性和功能实用性。

- 可穿戴运动设备，用于跑步，游泳，登山或者其他极限运动的设备，实时搜集身体各项信息，运动指标信息，辅助穿戴者做出运动选择，或者输出运动辅助信息。例如，针对登山运动，可穿戴登山拐杖可提前收集自然信息，根据穿戴者身体实时情况，给出登山建议信息等。此类设备，还需要具备轻便，可靠性高，抗摔打、防水、抗压等物理特性。具体形态，还包括智能鞋、智能滑轮，智能泳衣，智能头盔等。在特定运动项目领域，为了达到极致的用户体验，会出现各种完成特定功能的定制设备。例如图 5 中的多人轮椅运动竞赛系统。由于轮椅运动为残疾人运动项目，一般公众参与人数少，实际体验少，因此收视率较低。为了让一般公众体验该项目的特点，提高项目关注度，DOCOMO 和相关供应商联合开发了轮椅运动远程体验系统。基于专用的设备，个人用户可以在室内体验运动的特点，并且和其他体验用户展开远程竞赛。未来类似设备会不断出现，提供丰富多彩的功能体验。

- 可穿戴监护设备，可用于监护老人各项身体指标，监护儿童周围环境等。向监护人实时

报备被监护人的情况。



图 5 利用 5G 网络实现多人轮椅运动项目的体验和竞赛^[2]

- 可穿戴医疗设备，根据具体医疗项目，设计具体设备，并且在设备内增加病人疾病指标收集，医疗诊断反馈功能。比如，可穿戴体态纠正设备，可穿戴眼镜保护设备，植入终端如智能假肢，智能人工脏器，智能内耳蜗等。

2.2.1.3 消费物联网设备

随着 B5G/6G 终端轻量化的趋势，连接的成本也越来越低，传统的家电、家居以及消费电子产品，在具

备计算和可编程能力的同时，通过 B5G/6G 网络连接将成为必然趋势。连接网络后的消费物联网设备，将打破原有的功能边界和出厂限制，不断的提升功能和性能，并通过与物联网设备间，物联网与管理系统间，以及物联网与手机之间的连接，实现联动和共享，提供更加智能化、人性化的功能。例如：电冰箱连接网络后、可以智能的感知冰箱内食物的情况，提醒主人及时采购，甚至进一步认识食物的营养成分等，给出膳食推荐等。

消费级物联网设备的主要需求包括：

- 1) 互联互通性强，消费类物联网设备需要与后台智能系统、个人信息中心（如，智能手机）之间具备可靠的连接性，实现数据共享、管理控制、功能补充、设备联动等功能，从而更好的，更聪明的为消费者提供服务升级。

- 2) 操作简易，对于消费级电子产品，每增加一步操作，就会让一个功能的渗透率大打折扣，所以连接操作简单性非常重要。

3) 安全性要求高。因为消费电子涉及到个人生活的方方面面，大量个人隐私的泄露的风险，在便捷的互联互通的同时，通信的安全性和私密性要求更高。

4) 通信速率范围广，对于未来的专业数码映像 / 全息设备，通信速率的要求高到 100Gps，而对于冰箱、洗衣机、电饭锅、窗帘等家具设备，只需要少量的状态监管、菜单更新等低速率需求。

5) 通信覆盖深度要求高，为了连接大量的家具类物联网设备，要求在低层室内建筑等房间的各个角落都具备良好的覆盖和可靠的通信。

6) 连接密度高，单位面积流量需求大。随着消费类电子的广泛普及，一个家庭将达到上百个连接，在我国超大型城市的密集居住区内，1 平方公里约 10 万人，3 万户，假设每户有 100 个消费级物联网设备连接，这样将超过 300 万个连接 / 平方公里，其中还有大量高速率的连接需求。

2.2.2 面向工业的终端

2.2.2.1 智能机器设备

智能制造系统，借助计算机模拟的人类专家的智能活动，是一种在制造过程中能自主进行数据分析、推理、判断、构思和决策等智能活动的人机一体化系统。同时，它还可以收集、存储、完善、共享、继承和发展人类专家的制造智能。通过人机智能交互，可以扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。在制造过程的各个环节，广泛应用人工智能技术，使得制造自动化向智能化方向发展。智能制造日益成为未来制造业发展的重大趋势和核心内容。

智能制造源于人工智能的研究和发展。随着产品性能的完善化及其结构的复杂化、精细化，以及功能的多样化，促使产品所包含的设计信息和工艺信息量猛增，随之生产线和生产设备内部的信息流量增加，制造过程和管理工作的信息量也必然剧增，因而促使制造技术发展的热点与前沿，转向了提高制造系统对于爆炸性增长的制造信息处理的能力、效率及规模上。先进的制造设备离开了信息的输入就无法运转，制造系统正在由原先的能量驱动型转变为信息驱动型，这就要求制造系统不但要具备柔性，而且还要表现出智能，否则是难以处理如此大量而复杂的信息工作量的。其次，瞬息万变的市场需求和激烈竞争的复杂环境，也要求制

造系统表现出更高的灵活、敏捷和智能。因此，智能制造越来越受到高度的重视。

智能机器设备，也就是智能机器人，它给人的最深刻的印象是一个独特的进行自我控制的“活物”。其实，这个自控“活物”的主要器官并没有像真正的人那样微妙而复杂。智能机器人具备形形色色的内部信息传感器和外部信息传感器，如视觉、听觉、触觉、嗅觉。除具有感受器外，它还有效应器，作为作用于周围环境的手段。这就是筋肉，或称自整步电动机，它们使手、脚、长鼻子、触角等动起来。由此也可知，智能机器人至少要具备三个要素：感觉要素，运动要素和思考要素。智能机器人是一个多种新技术的集成体，它融合了机械、电子、传感器、计算机硬件、软件、人工智能等许多学科的知识，涉及到当今许多前沿领域的技术。

除了位于工厂厂房的智能制造等应用场景，未来工业互联网应用还将包含大量高移动性终端，如基于无人机的相关应用等。如图 6 的无人机路桥巡检系统，可以达到人工巡检很难达到的路桥部分，进行远程巡检；图 7 的高空高分辨率球形显示系统，可以在高空中显示大量信息，应用在多种场景中。在这些应用中，终端设备除了需要具备强大的通信能力外，对功耗，重量，体积等也有较高的要求，以提高实际使用续航能力。为实现上述功能，需要通信，电池，计算平台，和面向应用的专用技术等系统联合进行优化，提高设备的实用性。



图 6 无人机路桥巡检^[3]

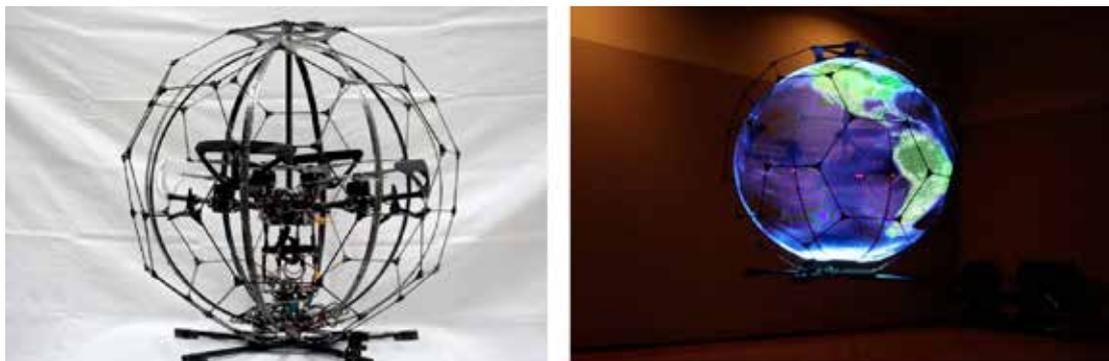


图 7 高空高分辨率显示（左图：设备；右图：显示时效果）^[4]

2.2.2.2 多智能体系统

“多智能体系统”章节会面向未来多形态智能终端组成的系统（大规模系统）的场景，将从另一个层面扩展对终端新形态的探索。

根据维基百科的定义，机器人是可自动完成复杂行为的可编程机器。少数机器人具有类人的外形，但大部分机器人并不限于其外部形态，从工业制造机器人、医疗手术机器人、家庭服务 / 休闲 / 娱乐机器人、到智能家电、智能音箱、自动驾驶车船、无人机都可被看作机器人，有统计说，2018 年全球机器人数量约为 5700 万，且将以每年 20% 的速度，在 2033 年超过全球人口。随着机器人（Robotics）产业和机器学习（Machine Learning, ML）技术和的快速发展，预计具有机器学习能力的智能体（Intelligent Agent）的数量将出现快速增长。因此，初步预测，具有大规模交互能力的终端将是未来一种终端类型，且智能体之间的智能交互需求也将成为下一代宽带移动通信系统的重要设计目标之一。

为了实现智能体之间的协同操作和合作学习，需要在智能体之间交互机器学习相关的智能数据。根据不同的智能交互场景，所需交互的智能数据可能包括 ML 模型、ML 训练集、机器感知（Machine perception）数据。下面将结合具体的交互场景探讨智能体的具体交互及处理能力：。

- 协同机器感知（Collaborative machine perception）场景

机器感知的目的是赋予智能体“类人的”观察、感知世界的的能力，进而可以像人类那样思考、理解即行动，包括对图像、声音等环境因素的感知。在机器人技术中，机器感知是机器人进行决策推理和动作控制的重要依据。在传统机器人技术中，机器人获取的感知数据只在本地

处理。但随着机器人承担任务的日益复杂化和对动作实时性的要求日益提升，机器人的本地处理能力已不足以在要求的时延内完成对感知数据的处理和学习，并形成实时决策和行动，因此通过云端或边缘计算系统（MEC）分流计算能力已成为必须。如图 8 所示，智能体将感知数据实时上传到云端或 MEC，在完成 Cloud/MEC 完成推理运算后，将动作控制指令（对于没有机器学习能力的机器人）或深度神经网络（对于有机器学习能力的机器人）下载给智能体。或智能体之间交互感知数据，以便智能体能够获取更全面的感知数据。因此，需要支持感知数据在智能体与 Cloud/MEC 之间（通过 Uu 接口）、智能体之间（通过 Sidelink）实时传输。

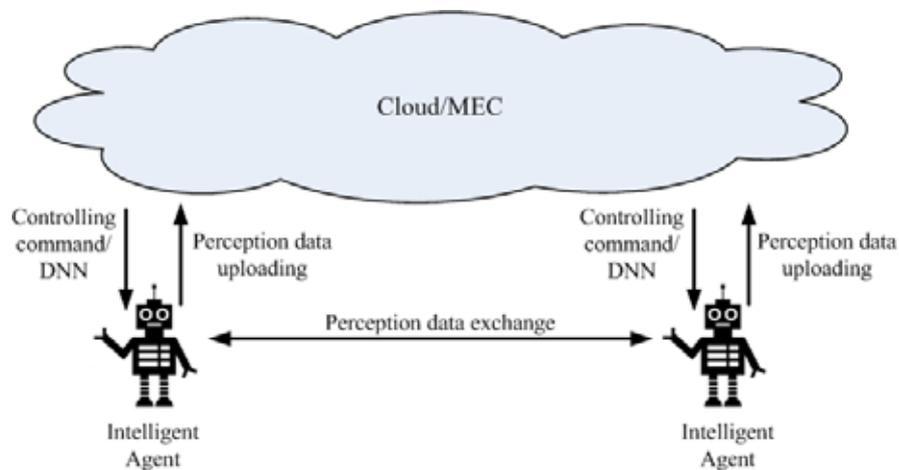


图 8：协作机器感知场景

•DNN 交互场景

在如下场景中，需要智能体与 Cloud/MEC 之间（通过 Uu 接口）、智能体之间（通过 Sidelink）实时传输 DNN。

- DNN 下载。此场景下，Cloud/MEC 将训练好的 DNN 下载到智能体。之所以要实时下载 DNN，是因为所需完成的任务和智能体所处的环境紧密相关，无法用一个通用的静态 DNN 适用各种环境，而智能体的存储空间不足以将所有可能的 DNN 都存储在本地，智能体需要根据环境的变化实时下载适合的 DNN，如图 9 所示。

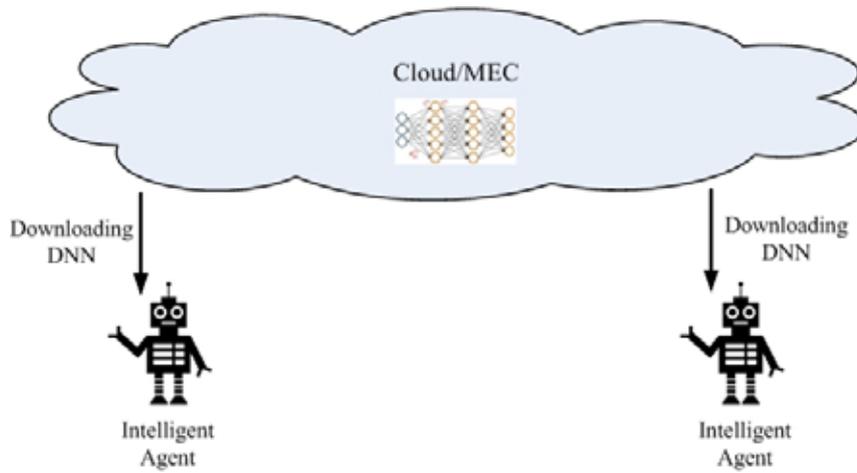


图 9: DNN 下载场景

- 协作学习 (Collaborative ML)。在两种情况下需要协作学习：一是每个智能体的计算能力不足，不足以单独完成 DNN 的训练，需要多个智能体、或智能体与 Cloud/MEC 分工完成 DNN 训练。二是不同智能体所处的环境不同，可以获取的训练集 (training set) 不同，单个智能体无法单独获取 DNN 训练所需的完整训练集，且由于信息安全与隐私保护的要求，智能体不能将自己的感知数据或训练集共享给其他智能体或上传到 Cloud/MEC，此时需要智能体基于自身环境完成各自的 Local DNN 训练，然后上传到 Cloud/MEC (通过 Uu 接口)，或在智能体之间交互 DNN (通过 Sidelink)，如图 10 所示。

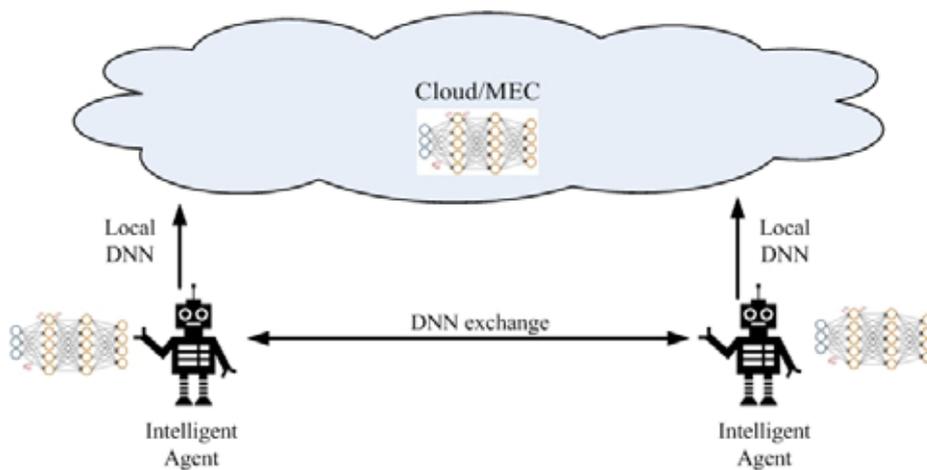


图 10: 协作学习场景

- 联邦学习 (Federated ML)。联邦学习与协作学习的区别，在于先由 Cloud/MEC 向

各个智能体下载一个 Global DNN，然后再由各个智能体基于 Global DNN 分别训练 Local DNN，然后将 Local DNN 上传到 Cloud/MEC，形成新的 Global DNN，如图 11。

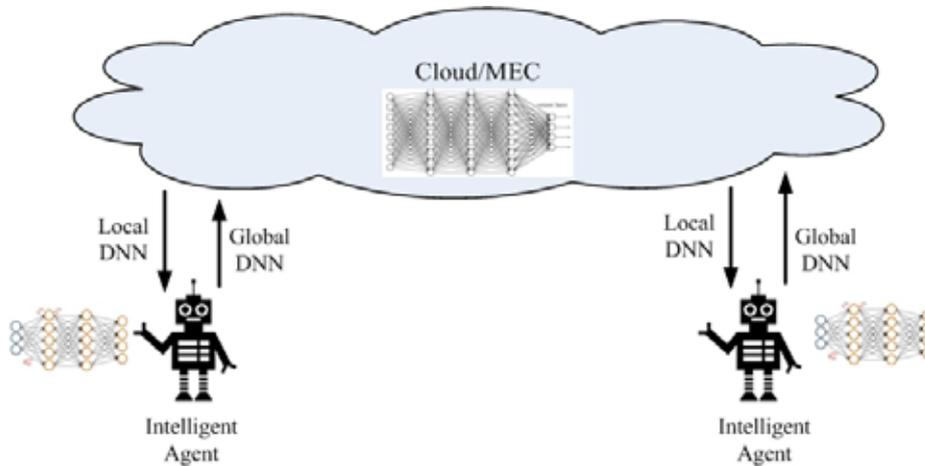


图 11：联邦学习场景

•ML 训练集交互场景

在不同类型的智能体之间（如不同功能的机器人之间），可能不能直接交互 DNN，而需要进行训练集的交互。一种类型的智能体通常不具备对与自身任务无关的 ML 模型的训练能力，因此无法将另一种智能体类型所需的 ML 模型训练好再传输给对方。如图 12 所示，类型 A 智能体不具备将收集到的数据训练成类型 B 智能体所需 DNN 的能力，将与 B 智能体相关的训练集或背景数据共享给 B 智能体，或上传到 Cloud/MEC，由类型 B 智能体或 Cloud/MEC 完成训练。随着机器人的功能增强、类型多样化和在非结构化环境中工作的需求日益增长，训练集背景数据的交互将变得越来越重要。

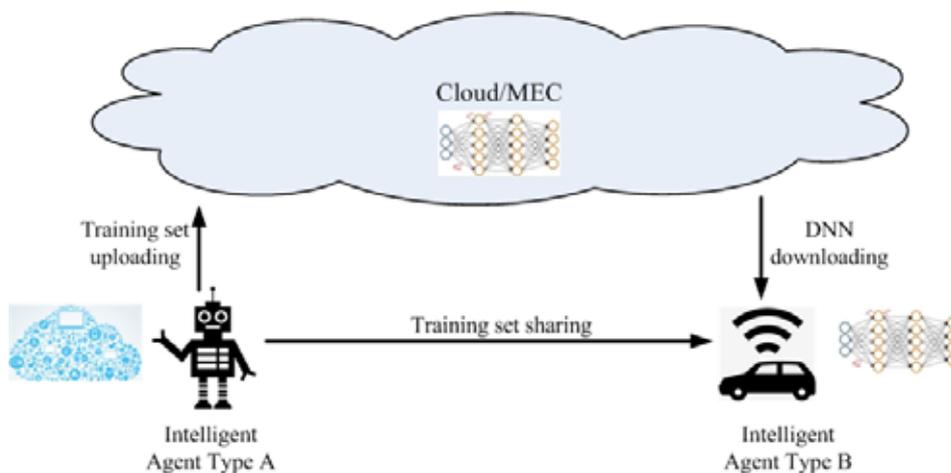


图 12：ML 训练集交互场景

2.2.2.3 微型传感器

传感器是物体感知世界的媒介，通过传感器，可以让物体拥有视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉等，是实现万物互联、万物智联的基础。微型传感器具有微型化、智能化、低功耗、易集成等特点，在未来的 B5G/6G 终端中，一个终端设备可以配备一个或多个微型传感器，这些微型传感器将赋予终端五大感官，可以让未来的 B5G/6G 终端获取更多的有用信息，结合其他技术，实现真正的智能化。

- 光敏微型传感器——视觉

光敏微型传感器是利用光敏元件将光信号转化为电信号的微型传感器。光敏微型传感器可以在自动控制、家用电器中应用，如电视机中的亮度自动调节、照相机中的自动曝光、防盗报警装置等。在智能终端中，光敏微型传感器也能极大提升用户体验，如目前已经实现的打电话时人脸靠近手机，屏幕自动熄灭，或者手机屏幕根据周围环境的亮度自动调节屏幕亮度等。在工业中，利用光敏传感器可以实现流水线上的自动化，如位置检测、自动包装、质量检测等，也可以用于安全警报，如烟雾式火灾报警器等。

- 声敏微型传感器——听觉

声敏微型传感器是将在气体、液体或固体中传播的机械振动转换为光信号的微型传感器。

在 B5G/6G 中，智慧医疗依旧会是很重要的一个应用场景，在医疗中，为了诊断疾病，经常会检测体内各个器官所发出的声音，如心脏的跳动声、心杂音等，此时会用到如心音计、心音导管尖端式传感器等，随着声敏微型传感器的进一步发展，大量的声敏微型传感器可以内置在各种可穿戴设备、手持终端或者其他设备中，作为健康检测的一个很重要的数据来源。此外，超声波的各种测量，如超声波测距、超声波障碍物检测、超声波探伤、超声波流量检测等，都需要用到声敏微型传感器，这些都会极大扩展未来终端的应用范围。

- 化学 / 气敏微型传感器——味觉 / 嗅觉

化学微型传感器是对各种化学物质敏感并将其浓度转换为电信号的微型传感器。类比于人的感觉器官，化学传感器大体对应于人的嗅觉和味觉器官。但并不是单纯的人体器官的模拟，还能感受人的器官不能感受的某些物质，如 H₂、CO。气敏微型传感器主要是将气体种类及浓度等信息转化为电信号的微型传感器，可以是化学作用或生物作用，也可以是物理吸附等。化学 / 气敏微型传感器比较直接的应用是有毒气体、液体的检测等，如 CO 检测，实现报警，保证人身安全。也可以应用到如机器人厨师上，让机器人更加高效的判断饭菜的优

劣，而不仅仅是实现自动炒菜。此外，传统的通信基本上传播的是音视频和图像，即传播的是视觉和听觉方面的信息，对于未来的 B5G/6G 终端，可能会将嗅觉、味觉信息作为一种重要信息进行传播，此时化学 / 气敏微型传感器就可以采集想要传播的嗅觉、味觉信息，结合其他技术将采集到的信息恢复为实际的气味或者直接刺激大脑产生对应的嗅觉、味觉来实现对应信息的传播。

- 压敏、温敏、流体微型传感器——触觉

压敏、温敏微型传感器是利用对压力、温度敏感的元件将压力、温度等转化为电信号的微型传感器，流体微型传感器的测量值可能包括流体的温度、压力、密度等，特殊的流体还可能包括粘性等特殊参数，该类微型传感器可能是压敏、温敏、声敏等微型传感器的集合，也可以是利用导电介质的导电性实现流量测量等。此类传感器应用范围较广，如传统的测重、测温、流量监控等，此类微型传感器内置在智能终端中，可以实现更丰富的人机交互、体温监测等，内置在床垫内，可以实现睡眠质量监测等。

3 终端能力

3.1 通信能力

总体来说，B5G/6G 要求终端具备实现相关愿景对应的通信能力。对于高达 64K 分辨率的数字影院要求 256Gbps 的能力；对于全息影像，数据量要达到 1GByte/cm³，超高清 VR 要求 13.6Gbps 的能力。相应的，对比 5G 的峰值速率 20Gbps，用户体验数据率 100M~1Gbps 的要求 [ITU-R document 5D/TEMP/625]，B5G/6G 的通信能力应再相应提高 12~15 倍。

而在提高通信能力的同时，由于相对于 3G/4G 系统，5G/B5G/6G 的基站会采用更高频段，因此基站的覆盖半径会更小。为了达到和 4G 一样的覆盖半径，B5G/6G 基站的密度需求会更大。更大的基站密度需要更多开销。为降低运营商在部署网络中的开销，减少基站部署的数量，可以采用一种多跳中继的方式达到同样的覆盖半径。另外，这种多跳中继可以适用于没有基站基础设施的地方实现远距离的终端通信。这种中继网络没有固定基础架构，移动节点通过中继节点彼此通信，是一种自组织网络。这种网络的特点是可以快速组建，便于迁移，易于扩展。这种带有自组织功能的网络可以运用于安全通信领域，例如：某区域的基础设施遭到毁坏无法使用，终端之间的通信可以利用中继功能实现；也可以用于小区域内的终端间的联网游戏或者 VR。

3.2 计算能力

互联网、移动互联网、云计算、大数据、物联网、人工智能、自动驾驶、VR/AR、下一代移动通信等 ICT 领域重大技术发展，加速推进社会迈入万物互联、万物感知、万物智能时代，逐步集聚和盘活海量数据资源，同时，数据结构趋于多元化，由传统文本等结构化数据扩展至图像、音频等不规则、非结构化数据，其中近三分之一的数据将具有大数据开发价值，由此终端计算需求呈现极速递增态势，从而对终端计算技术提出更高要求。

一是应用创新带来数据量的激增，对终端计算性能提出更高要求。人工智能方面，大型人工智能算法所用算力约每 3.5 个月即翻倍；自动驾驶方面，满足 L4 的需求现有计算能力仍需提升 50 倍；VR/AR 方面，现有高端 GPU 芯片的游戏渲染能力难以实现虚拟真实场景的高像素填充率和画面流畅度，图像处理性能至少需要提升 7 倍；5G 方面，终端若实现 5G 峰值速率超过 2Gbps、端到端延迟降至毫秒级别，现有基带处理能力仍需提升 10 倍。

二是 B5G/6G 终端应支持不同的应用场景，如 B5G/6G 的终端将具有很强的音频、图像、视频的处理分析能力，智能技术的发展可以方便用户实现与设备的无障碍沟通和提供更逼真的场景体验。

- 语音识别：终端应能够识别用户语言且识别率达到 99% 以上。通过语音识别，人向设备说话以发送指令；并且借助强大的后台云服务，可以支持方言、多国语言的识别。
- 图像处理：支持大图片的实时处理能力以及超高清视频的播放。
- 图像理解：支持对图像的理解和内容的提取，比起传统的人工具有更高的准确度和更高的效率。
- 场景重建：通过图像的分析以及场景建模构建出虚拟的 3D 场景。
- 健康监测：通过更多的传感器，B5G/6G 终端设备可以更加全面地监控人体生理状况，通过长时间的数据量保证生理指标反馈的准确性

三是不同应用场景对计算能力的需求差异巨大，如物联网应用对计算性能要求适中但对低功耗需求强烈，自动驾驶应用要求低延迟、高并发以保证实时性，VR/AR 则需要高性能和低功耗兼顾。面向差异化应用需求，一方面是通过软硬件技术优化提升终端计算系统性能，另一方面则是摒弃既往通用化发展的思路，面向不同应用计算需求采用专用加速的模式以保证计算对应用创新的支撑作用。

3.3 显示 / 交互 / 传感能力

B5G/6G 终端应当具有更友好的用户界面，用户享受身临其境的快感，同时通过简单的操作即可实现系统功能。具体地讲，B5G/6G 终端的用户界面应该支持包含但不限于以下的体验：

- 全息成像：利用干涉和衍射原理来记录并再现物体真实的 3D 图像技术，通过全息成像，用户可以 360 度无死角地感受到真切的 3D 效果。

- 真 3D：通过包括狭缝式液晶光栅、柱状透镜等技术实现裸眼 3D 效果，如目前讨论比较火热的 3D 光场显示器（3D Light Field Display，3D LFD）。通过真 3D 技术，尤其是 3D LFD，终端在可以赋能或增强更多的应用，如汽车导航、数字医疗等。

- 体感、手势识别：利用光学、运动传感器，设备可以感知人体或手指的运动，随着识别算法精度的提高，体感、手势识别将广泛应用在终端设备中。基于此，人可以控制虚拟屏幕，完成远程精密加工和远程手术等操作。

- 自然语言交互：自然语言处理（NLP）是人工智能中最困难的问题之一，随着人工智能的发展，近年来语音识别技术也得到了飞速的发展，人机之间通过语音沟通不再成为障碍。通过海量词库的建立，设备将突破噪声、口音、多语言混杂等现有问题，保证人机自然语言交互的通畅。

- 增强现实：增强现实技术是一种将虚拟信息与真实世界巧妙融合的技术，随着图像分析和理解技术的发展，以及大数据后台的支撑，用户可以通过专用设备，享受从实景中自动提取有用信息的方便与乐趣，并支持实时检索、路径规划等具体应用场景。

- 虚拟现实：虚拟现实技术是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统，随着图像重建技术的演进，未来用户可以通过专用的设备，在虚拟场景中进行沉浸式的联网游戏。

- 身份识别：随着图像分析技术的发展，未来更多的生物特征可以被用来作为身份鉴定的手段，结合多重验证，可以提高安全性以及便捷性。

- 多维多点触控：苹果新发布的 3D Touch 已经将触摸屏的感知从 2 维变成 3 维，未来触控技术将向更高维度发展，用户只需要一根手指便可完成复杂的操作，从而真正享受触摸带来的便捷。

未来的终端可以支持上述多种能力，不同能力之间的结合可以进一步提升用户体验，但

这些能力在带给用户极致的用户体验同时，对通信能力和计算能力提出了新的挑战。以全息成像为例，使用全息成像，数据速率是远大于 1Gbps[5]，对于普通手机类终端屏幕大小的动态全息，约为 12.6Gbps，对于电视类终端屏幕大小的动态全息，则约为 1.9Tbps，这对终端支持超大带宽 / 高速率的能力提出了巨大的挑战。

3.4 续航能力

B5G/6G 终端需要支持极高的数据处理和传输速度，这使得终端的能耗将会进一步提升，为了保证良好的用户使用体验，B5G/6G 终端应当具有更强的续航能力。具体增强终端续航能力的技术可包括，但不限于下述技术：

- 采用新型电池材料。利用新型电池材料，可有效提升电池容量，如石墨烯材质电池。相同体积下石墨烯材质电池容量更高，其重量仅为传统电池的 50%，且其成本将比传统锂电池低 77%；从充电性能来看，石墨烯锂电池充电一次，耗时相比传统锂电池可缩减十倍 [6]。

- 配置新的充电技术。通过配置新型充电技术，如太阳能充电、按压充电、运动充电和无线充电等，拓宽 B5G/6G 终端充电方式，可有效提升用户的感知，延长终端的续航能力。

- 通信过程节能。通信过程中，终端可以根据自身数据传输状态主动或被动调整一部分传输参数使得终端可以进入一种低功耗的节能状态；且可借助于 AI 技术感知用户的日常生活和终端使用习惯，从而在不同的时刻和环境下，释放部分不被使用或者小概率被使用的软硬件所占用的资源，节约电能。

- 采用更先进的终端硬件及设计。先进的终端芯片在工艺尺寸越小时有更快处理速度并更低功耗 [7, 8]；通过采用高速存储器和接口传输，增加数据的数传效率，在尽可能短的时间内完成数据传输，降低终端的激活时长以节省终端能耗；通过精巧的内部空间设计和优化，并在进一步提高元件集成度的情况下，可以把更多的空间留给电池并用于散热，增强 B5G/6G 的终端的续航能力。

4 终端通用技术

4.1 高频通信技术

5G 时代已支持高频通信技术，但业界预期 6G 将支持更高频率的通信，如太赫兹通信。高频段带来大量频谱资源和高速率的同时，也给高频终端设计带来的独特的挑战，从高频技术和终端实现角度需要采用与低频不同的技术和实现方案。

为了克服高频通信深衰落、移动和遮挡等带来的移动连接的可靠性问题，可以从以下几个方面来增强高频通信的移动连接可靠性：

- 1) 基带自适应波束赋形及波束跟踪技术来保证较高的链路性能和移动连接可靠性；
- 2) 根据高频终端形态指标要求，结合天线增益、极化增益等对射频链路进行指标预算分析，合理设计终端上天线阵列的个数，提升高频信号覆盖性能；
- 3) 多射频天线模块在高频终端上分布提高信号空间覆盖，并可灵活选取天线射频模块来获取较好的连接质量；

高频终端中核心是终端芯片实现，主要包含基带芯片、中频芯片、射频芯片及相控阵列，所涉及的主要设计点如下图 13 所示。

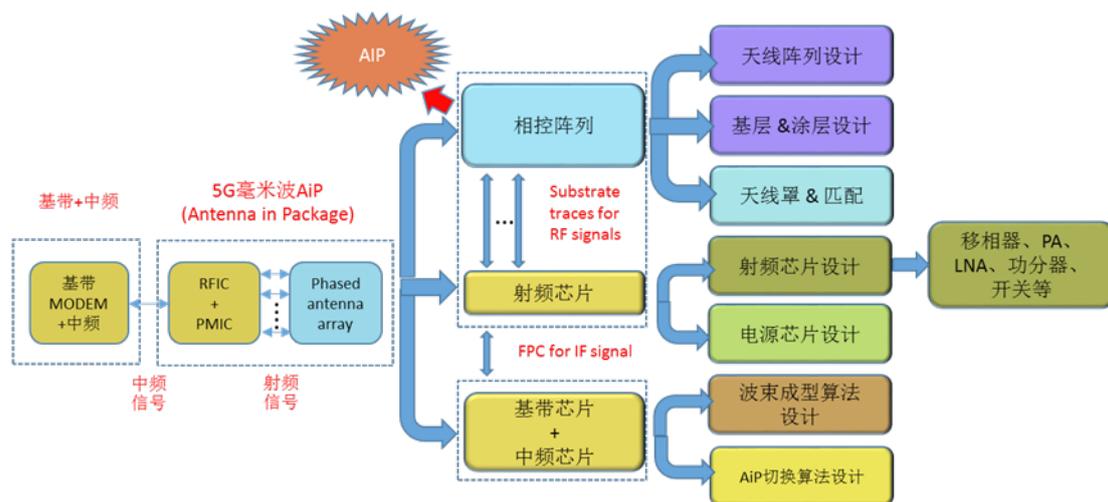


图 13 高频终端芯片示意

随着 CMOS 硅基工艺集成度不断提高，晶体管特征尺寸不断缩小，高频能力不断提高。CMOS 器件完全可以工作于 26GHz 或者 39GHz 终端毫米波频段，为移动终端高频芯片高集

成度、小尺寸、低成本提供了可能，基带芯片、中频芯片及射频芯片均可采用 CMOS 工艺。

目前业界采用 AiP 进一步实现相控阵列和射频芯片集成，具有高度集成且尺寸紧凑，减小天线阵列与毫米波射频芯片之间的连接损耗。AiP 是基于封装材料与工艺，将天线与芯片集成在封装内，实现系统级无线功能的技术。AiP 技术顺应了硅基半导体工艺集成度提高的趋势，兼顾了天线性能、成本及体积，代表着近年来天线技术的重大成就及 5G 毫米波频段终端天线的技术升级方向。同时在毫米波终端上会在不同位置放置多个 AiP 模块，可保证毫米波终端覆盖范围需求。

4.2 多 SIM 卡技术

目前多 SIM 卡技术进入 3GPP 研究阶段，主旨在于为下列用例提供服务：

- 启用对具有多个 USIM 的终端的支持及多 USIM 卡的关联
- 支持被叫业务
- 紧急呼叫和会话的处理

具体来说，可以包括以下场景：

- 当用户设备正在与 USIM B 进行通信时，向 USIM A 传送寻呼的机制。
- 避免 UE 的 USIM A 和 USIM B 之间的寻呼冲突的机制。
- 允许暂停（或释放）和恢复与 USIM A 关联的 3GPP 系统中正在进行的连接的机制，以使用户可以暂时离开与 USIM A 关联的 3GPP 系统，然后以网络控制的方式返回 3GPP 系统。研究应确定网络如何处理挂起的连接上的 MT 数据或 MT 控制面激活。

- 处理紧急呼叫和会话。
- 业务优先级的处理，即研究应确定在接收寻呼信息时，用户的行为是否由 USIM 配置或用户偏好或两者共同驱动。

现阶段，研究应限于单接收 / 单发送、双接收 / 单发送和双接收 / 双发送 UE。同时研究的重点是基于多个 USIM 共享的公共无线电和基带组件实现多个 USIM。研究结论将同时适用于 5GS 和 EPS，但 5GS 和 EPS 的解决方案不必相同。多 USIM 设备的系统启用程序将适用于多个 USIM 归同一个或不同的 MNO 的情况。

支持终端启用多 USIM 及多 USIM 卡的关联，当一个设备支持由相同或不同的 PLMN 提供的多个 USIM 时，3GPP 系统必须指定如何支持这些终端，同时在服务优先级和终端功能方面注册多个 USIM。用户将第二个 USIM 卡安装在手机的第二个卡槽中。当移动终端检测到多个 USIM 时，它会请求用户提供用户输入，以获取用户对两个 USIM 上服务优先级的偏好。当用户完成用户的输入时，终端使用安装在第二个卡槽中的 USIM 注册到网络，同时通知网络侧该注册的卡与之前注册的卡与同一终端关联。用户可以通知网络两个 USIM 卡关联同一终端寻呼和业务优先级，目前，对具有多 USIM 的设备的支持是以特定于实现的方式处理的，从而导致各种实现和用户行为。当使用在多个 USIM 之间共享的公共无线电和基带组件时，UE 需要偶尔检查与 USIM B 相关的其他系统，同时主动与 USIM A 相关的第一个系统通信，例如，为了监视寻呼信道，执行信号测量，或读取系统信息。为了保持已建立通信的质量，同时避免潜在的呼叫丢失，如果网络能够帮助用户决定是否响应与另一个活跃的 USIM 相关联的其他系统的寻呼请求，这将是有益的。通过在 UE 中配置服务优先级策略，还可以进一步帮助准确的 UE 行为。

寻呼冲突，不同 USIM 的寻呼时机在时间域上重叠，可能导致寻呼丢失。在 E-UTRA 系统中，用于计算寻呼时机的输入很简单，包括 UE_ID/N, nB, UE DRX 等，UE_ID/N, nB, UE DRX 由核心网指示给接入网。在 NR 系统中，寻呼时机的配置比 E-UTRA 更灵活。但是，用于计算寻呼时机的输入变得相当复杂。除了从 E-UTRA 继承的一些参数外，还引入了其他参数。例如，引入参数 PF-offset，使不同的小区能够配置从不同的无线帧开始的寻呼时机。对于带有双 USIM 的 UE，是否发生寻呼冲突也与 UE 所在的两个小区的配置 PF-offset 有关。不同小区的 PF-offset 是不同的，在用户移动过程中，在不同的寻呼时机可能会导致寻呼冲突。

业务中断，第一个系统中正在进行的服务，可能在不同情况被中断：UE 偶尔切换到第二系统（例如，读取寻呼、执行测量或读取系统信息）UE 在第二系统中启动高优先级服务（例如，响应来自第二系统的寻呼或在第二系统中启动语音呼叫）。当 UE 建立到一个系统的双重连接时，具有双重 Rx/Tx 的 UE 可能存在类似问题。针对业务中断的场景我们需要给出详细分析和解决方案。

紧急呼叫，在多 USIM 设备的支持下，3GPP 系统必须明确业务需求，以确保紧急业务的提供，并避免多个 USIM 之间发起紧急呼叫和接听紧急回拨的冲突行为。多 USIM 用户应能够选择 USIM，可以采用下列优先顺序发起紧急呼叫：USIM 正常工作，USIM 处于有限服务状态。针对紧急呼叫的多 USIM 设备要合理设计机制保证紧急呼叫可以最大程度保证。

4.3 半导体工艺技术

B5G/6G 终端需要满足多元化的数据采集和交互场景、大规模低时延数据传送、端云深度协作数据处理模式、人工智能数据模型的高效推理等需求，更高计算能力、更低时延、更高复杂度、更多存储等需求对终端元器件的实现工艺技术提出更高要求和挑战。

半导体工艺尺寸微缩已经逼近物理极限，工艺升级难度日益加大。2018 年先进集成电路制造厂商再次减员，全球第四大代工厂格罗方德宣布放弃 7 纳米及以下节点技术研发，将资源集中在现有的 14/12 纳米制程产品；同期台湾联电也宣布停止 12 纳米以下工艺的研发。目前，全球仍有 7 纳米及以下节点研发计划的只剩下台积电、三星、英特尔三家企业。作为集成电路行业标杆的英特尔也已废止了两年一循环的“制程 - 架构”产品研发周期，自 10 纳米后开始采取“制程 - 架构 - 优化”三年三步走策略。

台积电、三星、英特尔三大巨头持续推动着先进半导体工艺技术的研发及规模应用。一是目前已全面进入 10/7 纳米工艺节点。台积电 2018 年 4 月量产 7 纳米工艺，相比上一代 10 纳米工艺，芯片功耗降低 40%，性能提升 15%，核心面积缩小 37%，目前华为麒麟 980、苹果 A12 均采用该工艺实现量产。英特尔最新 10 纳米工艺的晶体管密度可达到 100.8M/mm²，仍然是先进工艺的最有力竞争者。二是 EUV 等新技术即将迈入应用阶段。台积电于 2018 年 10 月完成了首次 7 纳米 EUV 流片，相比初代 7 纳米工艺性能提升 15% 以上。三星也已完成 7 纳米 EUV 工艺的研发，并同时宣布了技术发展路线图，将 3 纳米节点提上研发日程。

晶体管结构创新加速，推进芯片制造工艺能力升级。晶体管技术创新从未停止，从 90 纳米到 10 纳米先后经历了引入应力、加入高 κ 栅介质、采用鳍式场效应晶体管 FinFET 结构以及改变栅极接触位置等创新材料 / 技术的应用。目前已有多家厂商开始针对 5 纳米及以下节点工艺制程的晶体管结构进行研发，IBM 和三星分别针对 5 纳米和 3 纳米工艺提出了 Nanosheet 和 MBCFET 结构，二者的优势在于通过构建多沟道环栅结构，使晶体管的电流驱动能力以及栅极对载流子的控制能力得以提升，预计将于 2024 年代替 FinFET 结构成为主流。此外，更为多样化的晶体管结构创新仍在不断探索中，采用 III - V 族化合物半导体作为晶体管沟道材料，可提升电子迁移率，使晶体管获得更大的电流驱动能力；新型隧穿晶体管（TFET）利用载流子隧穿原理实现超陡亚阈摆幅，达到降低晶体管功耗，提升能效比的效果；垂直纳米线结构可进一步减小单个晶体管所占面积，大幅提升集成度，推动制造工艺迈向更小节点。

目前三维结构在存储领域已经有所应用，三维堆叠本质是提升集成密度，等效于延续摩尔定律。三维存储结构 3D NAND 通过增加存储叠层而非缩小单个存储单元的尺寸实现了存储密度的增长，解决了传统二维半导体存储芯片中存储单元不断缩小导致的成本上升以及相邻存储单元之间的串扰问题，成为未来实现存储芯片容量可持续增长的关键技术。2018 年，三星、东芝、美光、海力士等存储器厂商先后发布 96 层 3D NAND 存储器产品，存储密度达到 4Gb/mm² 以上，与 16nm 工艺条件下二维 NAND 存储器相比，存储密度提高 4 倍以上。据最新国际半导体技术路线图（ITRS2.0）预测，未来三维叠层结构还将在多功能复合芯片等领域发挥关键作用，复合芯片将聚合传感器、新兴存储器和硅基电路，在一颗芯片上实现信息采集、存储、计算和输出等功能。

系统级设计和多质多维封装同步深化，加速芯片多功能集成创新。通过面向更多功能需求的设计及封装技术，以进一步提高芯片集成度、降低整体功耗、推动多功能异构的发展。芯片设计方面，采用片上系统（SoC）设计方式实现各关键功能部件的片上集成，达到降低功耗、减小电路面积、提高系统各部件之间通信速度的效果，目前片上系统设计技术已非常成熟，是移动互联网、物联网等领域芯片设计的主流思路。先进封装技术方面，通过将多个功能芯片通过封装技术以达到提高芯片集成度的效果，可分为系统封装（SiP）、3D 堆叠封装以及一体化 3D 封装，其中：SiP 封装可将各种工艺下、不同种类的芯片进行集成，该技术开发周期短、成本低；3D 堆叠封装将多个芯片按垂直堆叠的方式进行封装，并利用垂直通孔（TSV）技术实现层间连接，相比系统封装可进一步提高芯片的集成度，但目前较为成熟的工艺仅能通过金丝球焊以及焊接球的方式实现两层电路之间的连接，对于三层以上电路的封装，工艺尚未成熟；一体化 3D 封装是采用更为密集的垂直互连方式将位于各层的晶体管按照设计规则相连组成功能电路，以最大限度利用垂直维度，达到节省芯片面积的目的，该方法对集成电路制造工艺要求较高，目前仍处于实验室阶段，进入商用尚需时日。

4.4 计算架构技术

一方面，智能硬件常规通用计算芯片正迎来新一轮架构创新浪潮，ARM 的新版 CPU 架构 Cortex-A75 和 GPU 架构 Mali-G72，较前代版本性能提升 15% 和 40%，引入的多核并行计算技术 DynamIQ，可灵活配置和调度 CPU 簇，提高对各类复杂任务的处理能力。

另一方面，围绕特定计算需求的 ASIC（特定用途集成电路）计算芯片研发和应用逐步增多。尤其是面向神经网络所需的矩阵乘运算，ASIC 芯片通过与模型紧耦合能够提供比 CPU、GPU 更高的性能。安防、汽车等领域的智能硬件已开始应用 ASIC 芯片提高图像、语音等数据的处理能力。如 Mobileye 的第四代 ADAS 视觉处理器 EyeQ4 将于明年应用于商用车上。FPGA 在离线的 AI 推理中也正在成为 CPU、GPU 等通用架构之外的重要补充。此外，“即时启用”等高灵敏性硬件应用场景也在推动存储器件技术的换代，LPDDR4 等新一代存储技术的商用进程进一步加快。

在冯诺依曼架构体系下，与数据处理相关的运算器和控制器、与数据存储相关的各类存储模块、以及数据在上述两大单元间实现交互的通信类接口和模块是构成计算设备和计算系统的主要功能模块，也是构成计算技术体系的三大重点单元。

CPU、GPU、FPGA 是目前通用计算领域的三大主流计算芯片。CPU 芯片兼顾控制和计算，是构成笔记本、智能终端及服务器计算硬件主体。CPU 芯片架构中“缓存 - 控制 - 计算”三者兼顾，其中 70% 晶体管作为缓存和控制单元，控制单元用于实现分支预测、流水线等复杂逻辑等，大量缓存单元降低数据读取时间以降低延时；30% 晶体管作为计算单元，可在 1-3 个时钟周期内完成双精度浮点乘加等运算操作。GPU 芯片适合通用并行处理，应用领域由早期图像处理逐步拓展至通用加速。GPU 芯片内置大量计算单元和高速缓存，逻辑控制单元相对简单。控制单元负责将串行计算任务拆分成多个相对简单的并行任务，缓存单元配合进行数据高速转发，最终由大量的计算单元完成分拆任务的计算并返回最终结果。因而 GPU 架构适合逻辑相对简单的大批量高密度同构计算任务，但因密集执行计算会带来大量功耗和发热。FPGA 芯片具备可重构特性，可根据客户需求灵活定制计算架构，更适合于需求量偏少的航空航天、车载、工业等细分行业。FPGA 芯片具备可编程的数字基本门电路，可依据应用灵活配置底层架构，由于无需指令和软件控制，直接采取晶体管电路实现应用算法，相比于 CPU、GPU 芯片响应更快，更适合于流式计算密集型任务。但 FPGA 芯片编程要使用专门的硬件描述语言，技术门槛相对较高，大规模应用也不具备成本优势。

三大计算芯片技术创新依然活跃。一方面持续挖掘传统架构技术潜力。CPU 不断优化现有架构技术能力，采用乱序执行、超标量流水线、多级缓存等技术提升整体性能表现；GPU 持续探索高效的图形处理单元、流处理单元和访存存取体系等，并优化编程框架降低 GPU 编程和应用程序移植难度；FPGA 不断强化应用功能的丰富完善，升级芯片内部组件以适应广泛的加速场景，并发展基于 C/C++、OpenCL 等软件工具开发生态，降低开发者门槛。另

一方面均通过引入专用计算能力迎合人工智能等新兴领域的计算需求。当前，受摩尔定律发展趋势趋缓以及功耗墙限制等影响，单纯依赖升级制造工艺、增加处理器核数、提高时钟频率等传统升级路线带来的性能提升幅度有限，业界开始转变技术发展思路，借助专用计算单元提升专用领域的适用性。CPU 围绕深度学习计算需求增加专用计算指令，如 ARM 公司最新 Cortex-A76 芯片通过优化缩减深度学习常见的乘法累加运算周期等，实现边缘侧人工智能性能相较于上一代产品提升接近 4 倍；GPU 持续优化针对人工智能计算的专用逻辑运算单元，英伟达图灵架构 GPU 芯片内置全新张量计算核心，利用深度学习算法消除低分辨率渲染问题；FPGA 提升面向各类工作负载需求的异构计算能力，以实现边缘智能等更多场景的规模应用。

随着万物互联和大数据时代的到来，异构计算已成为突破计算能力和功耗瓶颈的有效途径之一。异构计算共历经四大发展阶段，分别是单纯挖掘并行潜力、添加专用加速单元、针对特定应用领域定制、多种平台的高效融合。

目前异构计算的发展重心已经从硬件开发转移到深化应用、软硬件融合创新阶段，软件对异构计算的支撑作用越来越明显。计算系统会应用到多种硬件体系结构，例如搜索、解析等有大量控制代码的程序主要运行在 CPU 上；大量数据处理的程序适合运行在 GPU、DSP 等矢量体系结构处理芯片上；大量专用计算的应用适合在 FPGA、ASIC 等针对应用进行优化的芯片上执行。为了提高程序执行性能，需要标准化的异构编程框架，来完成跨平台的并行编程任务，从而实现对底层多种硬件平台的高效利用。

CPU+GPU 计算平台是目前比较成熟的异构平台，可满足高并行和高吞吐的计算需求，适用于计算密集、高并行、SIMD 应用，擅长图形图像、矩阵计算以及深度学习相关应用。FPGA 异构计算则具有更高的效能，并且并行模式更宽泛，支持数据并行和任务并行，计算密度和灵活性较高。

通过强化多核异构动态调度实现计算能力的按需调用，如采用智能资源管理器，管理整个 SoC 芯片的不同配置，将各项任务分配给 CPU、GPU、DSP、ISP 等执行，实现单线程性能优化并提升多线程执行效率。

CPU、GPU 等通用计算芯片加快完善对第三方加速器的接口和能力共享，为丰富的异构计算框架体系的构建奠定基础。如 ARM 的新架构全面提升了对第三方加速器的接口支持，允许 A75 或 A55 核内的 L3 缓存与外部加速芯片实现共享，提高加速芯片与通用芯片之间的

数据交换速度。通过多计算节点互联互通、内存计算、计算存储融合等异构计算新技术的创新，提升系统内部及系统集群间的数据交互能力，缓解冯诺依曼瓶颈的局限性。另外，通过对多元专用计算技术的整合，提升产品构建整体计算技术解决方案平台的能力，实现在无人机、VR、自动驾驶汽车等更多智能硬件产品和场景中的应用。

经典计算架构一旦确定即不可改变，应用需根据计算结构的特性进行优化以实现最优的效能表现。可重构计算是一种函数化的硬件架构，允许系统硬件架构和功能随软件变化而变化，以满足软件不断变化的计算需求。可重构计算并非全新概念，上世纪六十年代加州大学洛杉矶分校的 Gerald Estrin 教授即提出：计算机可以通过一个主处理器加上一组可重构硬件组成，主处理器负责控制可重构硬件的行为，可重构硬件根据任务的计算特点，通过剪裁、重组等方式，达到加速执行某一特定任务的目标。

随着摩尔定律接近物理极限，仅提升单一处理性能的代价越来越高，横向拓展异构计算变得愈发重要，移动芯片企业也正在不断加速 CPU+GPU+DSP+xPU 的移动异构计算平台升级。异构计算在终端领域已得到广泛应用，通过在移动平台集成 DSP 向量处理器、GPU 视觉处理器、NPU 神经网络处理单元和 CPU 等全系统融合优化的多核异构计算核心，面向不同类型的功能、基于不同类型的数据、在不同的计算精度水平上，提供更高效的计算解决方案。

4.5 柔性显示材料

柔性显示材料可以在一定范围内任意弯曲，而不会损害其功能，具有耐冲击、轻薄、耐用、可收卷等优势。柔性显示材料大致可以分为三种：电子纸、柔性 OLED (Organic Light-Emitting Diode, 有机电激光显示)、柔性 LCD (Liquid Crystal Display 液晶显示器)，其中电子纸在便携式电子书、电子报纸等方面具有较为成功的应用，柔性 OLED 在目前的柔性显示材料中较为主流，同时柔性 LCD 也在同步发展。B5G/6G 技术与柔性显示材料结合，将会大大缓解用户对屏幕分辨率的高要求与显示设备便携性之间的矛盾。

- 电子纸

电子纸显示技术具有类似纸张印刷显示效果的新型平板显示技术的一种统称，由于其显示效果接近自然纸张效果，可以减缓阅读疲劳，在电子书行业发展较快，并扩展到其他行业。

目前主流的电子纸显示技术主要包括：电泳显示技术 (EPD)、胆固醇液晶显示技术

(Ch-LCD)、双稳态向列液晶技术 (Bi-TNLC)、电润湿显示技术 (EWD)、电流体显示技术 (EFD)、干涉调制技术 (iMod)。其中电泳显示技术最具代表性，工艺较为成熟，成本低、性能高，与传统纸张形态最为接近。其工作原理是靠浸在透明或彩色液体之中的电离子移动，即通过翻转或流动的微粒子来使像素变亮或变暗。但目前电泳技术还存在响应速度慢、转换速度慢、制造工艺复杂等缺点。

• 柔性 OLED

OLED 采用自发光显示技术，无需背光源，相应时间段、亮度高，在需要快速响应的应用场景下，用户体验优于电子纸。柔性 OLED 以柔韧性好、具有良好透光性的材料代替普通的 OLED 玻璃衬底，其结构和发光原理与普通玻璃衬底的 OLED 器件相似。

OLED 按照显示驱动方式可以分为主动式 (AMOLED) 和被动式 (PMOLED) 两大类。PMOLED 制程较简单，但大尺寸化比较困难；MOLED 相对于 LCD，由于无需背光，显示面板更薄，在设计成品时，可以节省更多空间，但 AMOLED 对色彩的还原度不如 LCD；

• 柔性 LCD

LCD 需要背光，在厚度上一般相较于 OLED 较厚，但是在色彩、寿命、量产效率和成本方面相比 OLED 都有一定优势。柔性 LCD 最大的挑战在于要有在高温支撑下保持光学透明并且不出现双折射，这样的基底材料较少，并且一般价格较为昂贵。

Organic TFT(OTFT) 技术已经在等离子显示器上实现商业化，不过它同样可以用在柔性的 OLCD 上，OTFT 的性能目前已经有了极大进步，其电子迁移率和稳定性已经超过了传统的非晶硅 TFT。这种低温制程允许使用 TAC 膜作为基底，而 TAC 材料本身也是偏光片的基底，使用同一种 TAC 作为背光和偏光片基底为降低显示屏的厚度打开了空间，这样制造的 OTFT 也同样很稳定，其稳定性可以用栅极偏置电压测试来衡量。

总体来说，目前电子纸显示技术、柔性 OLED 和柔性 LCD 各有优缺点，适用于不同的应用场景，从技术成熟度来说，柔性 LCD 略有不足。

4.6 机电一体化

机电一体化技术是将机械技术、电工电子技术、微电子技术、信息技术、传感器技术、

接口技术、信号变换技术等多种技术进行有机地结合，并综合应用到实际中去的综合技术，现代化的自动生产设备几乎可以说都是机电一体化化的设备。机械与电子相结合，将数字化与智能化的技术应用到机械制造、装备和控制领域，例如数控机床、加工中心、工业机器人等。

在机电一体化技术从上世纪 70 年代的产生到现在，其内涵也随着时代的不断发展而演变。最初的机电一体化是电子、机械相结合，其产品也相对比较简单。从 80 年代起，高性能微处理器的出现在机电一体化中得到应用以后，便大大提高了机电产品的自动化与智能化程度，大大的改善了产品使用性能。之后随着技术的发展以及在经济、军事和社会生活等领域的渗透，机电一体化的发挥在哪更是产生了巨大的变化。与此同时，机电一体化也不单单是机械装置与电子装置的简单组合，而是光学、信息技术、机械、控制、电子和计算机技术等多学科的学科交叉与发展。目前，机电一体化正在向着智能化、模块化、微型化、网络化、人性化等方向发展。

• 智能化

所说的“智能化”是对机器行为进行的描述，是在控制理论的基础上，吸收人工智能、运筹学、计算机科学、模糊数学等新思想、新方法，使它具有判断推理、逻辑思维及自主决策等能力，以求的更高的控制目标。虽然智能化不可能具备人完全相同的智能，但是高性能、高速度的微处理器使机电一体化产生富有低级智能或者人的部分智能，则是完全可能的。

• 模块化

模块化是一项重要而艰巨的工程。由于机电一体化产品种类和生产厂家繁多，研制和开发具有标准机械接口、电气接口、动力接口和环境接口等机电一体化产品单元是一项十分复杂而又重要的事情。如研制集减速、智能调速、机电于一体的动力单元，具有视觉、图像处理、识别和测距等功能控制单元。有了这些标准单元就可以迅速开发出新产品，同时也可以扩大生产规模。

• 微型化

微型化指的是机电一体化向微型化机器和微观领域发展的趋势。可称其为微电子机械系统（MEMS），泛指几何尺寸不超过的机电一体化产品，并向微米，纳米级发展。微机电一体化产品体积小，能耗少，运动灵活，在生物医疗、军事、信息等方面具有无可比拟的优势。微机电一体化发展的瓶颈在于微机械技术。微机电一体化产品的加工采用精细加工技术，即超精密技术，它包括光刻技术和蚀刻技术两类。

- 网络化

20 世纪 90 年代，网络技术的兴起和飞速发展，给科学技术、工业生产、政治、军事等日常生活带来极大的变革。各种网络将全球经济、生产连成一片，企业的竞争也将全球化。由于网络的普及，基于网络的各种远程控制和监视技术方兴未艾，而远程控制的终端设备本身就是机电一体化产品。现场总线和局域网络技术的应用使家用电器网络化已成大势，利用家庭网络将各种家用电器连成以计算机为中心的计算机集成家电系统，使人们呆在家里就可以分享各种高技术带来的便利。因为机电一体化产品无疑将朝着网络化方向发展。

- 人性化

未来的机电一体化设计将会使得操控者更加的舒适简洁，更加注重机电一体化产品与人的协调统一。因此机电接口的设计应更多的关注人的生理、心里特征和人机的协调性，实现人机功能的合理分配，提高产品舒适性、安全性，使得人与系统有机地融为一体。

4.7 惯性导航

惯性导航 (INS, Inertial Navigation System) 是 20 世纪中期发展起来的完全自主式的导航技术。惯性导航设备可以通过测定加速度，完成路径的计算。惯性导航技术的最大特点是可以离线计算，是对传统定位技术的辅助，大大拓展室内定位的准确度，以及增加对 3D 定位的支持。

目前比较常见的几种导航技术，包括天文导航、惯性导航、卫星导航、无线电导航等等，其中，只有惯性导航是自主的，既不向外界辐射东西，也不需要额外的参照物或接收外部的信号，其隐蔽性是最好的。惯性导航是不依赖外部信息，并且不易受到干扰的自主式导航系统。惯性导航是 AGV (Automated Guided Vehicle, AGV) 通过测量载体在惯性参考系的加速度，然后自动进行运算，从而获得物体的瞬间加速度和位置等数据，并且将其运用到导航坐标系中，从而得到在导航坐标系中的速度，偏航角以及位置等数据。惯性导航系统一般由以下三部分组成：

- 惯性测量装置：惯性测量装置包括加速器与陀螺仪，又称惯性导航组合。
- 计算机：计算机根据测得的加速度信号计算出运载体的速度与位置参数。
- 控制显示器：控制显示器显示了各种导航参数。

由于惯性导航有固定的漂移率，这样会造成物体运动的误差，因此射程远的武器通常会采用指令、GPS 等对惯导进行定时修正，以获取持续准确的位置参数。惯导系统目前已经发展出挠性惯导、光纤惯导、激光惯导、微固态惯性仪表等多种方式。陀螺仪也由传统的绕线陀螺发展到静电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、微机械陀螺等。激光陀螺测量动态范围宽，线性度好，性能稳定，具有良好的温度稳定性和重复性，在高精度的应用领域中一直占据着主导地位。由于科技进步，成本较低的光纤陀螺（FOG）和微机械陀螺（MEMS）精度越来越高，是未来陀螺技术发展的方向。

惯性导航在移动通讯设备中也有非常广泛的应用。在 GPS 导航过程中失去 GPS 信号的情况下，手机能够利用自带的加速度与陀螺仪进行惯性导航。例如，在进入隧道的时候，终端设备可以通过自带的惯性导航系统进行导航。近年来定位技术不仅用于安全应用，也用于大众市场，比如，运行载体的追踪，宠物的防丢失等，惯性导航定位技术在这些场景中可以发挥很好的作用。此外，在物流仓储搬运装卸场景中，人工搬运一般耗时长、且所需费用也大。为了降低成本并提高效率，自动搬运技术的采用势在必行，因而惯性导航的发展受到越来越多的关注。在众多的搬运技术中，AGV 以其独特的优越性，成为物流仓储最佳解决方案。因此，AGV 的运用越来越普遍，AGV 作为载体，配合整体物流系统实现货物的自动传输和运输，AGV 惯性导航的应用实现了仓储物流或工厂的自动化、智能化、信息化管理，大大提高了管理效率，降低出错率。

4.8 3D 传感技术

随着信息技术的飞速发展，人们在生活的方方面面都可以感受到人机交互带来的便利。随着时代的发展，人机交互的模式也从传统的鼠标键盘等发展成为语音、动作等新兴的更加敏捷简便的交互模式。下面将分别介绍几种典型的 3D 传感技术：

- 手势识别 / 肢体识别

手势识别技术的发展，可以粗略分成二维手势识别和三维手势识别。手势识别的应用非常广泛，例如在车载场景中，手势交互可以实现接挂电话、调节音量、歌曲选择、控制导航的功能 [9]。

传统的手势识别是基于二维彩色图像的识别技术，二维的手势识别技术只能识别出几个静态的手势动作，而且这些动作必须要预先定义好。相比较传统的手势识别技术，三维的手

势识别技术增加了一个 z 轴的信息，可以识别不同的手型、手势和动作。手势识别技术中最关键的包含对手势动作的追踪以及后续的计算机数据处理。手势识别的动作的追踪主要是通过光学和传感器两种方式来实现，手势识别推测的算法包括模板匹配技术，通过统计样本特征以及深度学习神经网络技术实现。这种包含一定深度信息的手势识别，需要特定的硬件来实现。3D 肢体识别的硬件技术大致可以分成三类：

- 结构光：

这种技术的原理是，加载一个激光投影器，在激光投影器外面放一个刻有特定图样的光栅，激光通过光栅进行投射成像时会发生折射，从而使得激光最终在物体的表面上的落点产生位移。当物体和激光投射器的距离比较近的时候，折射而产生的位移就会比较小，相反，当物体和激光投射器之间的距离比较远的时候，折射而产生的位移就会相应的变大。这时候使用一个摄像头来检测采集投射到物体表面的图样，通过图样的位移变化，就能够用算法计算出物体的位置和深度的信息，进而可以恢复出三维空间。结构光技术是依赖于激光折射后产生的落点的位移，所以如果距离太近，会导致折射的位移不明显，不能精确得出深度信息。

- 光飞时间

这种技术的原理是加载一个发光的元件，发光元件发出的光子在碰撞到物体的表面后会反射回来。使用一个特殊的传感器来捕捉这些由发光元器件发出又从物体的表面反射回来的光子，经能够得到光子的飞行时间。根据得到的光子的飞行的时间可以推算出光子的飞行的距离，也就能够得到物体的深度信息。该技术的整体性能良好，到那时分辨率不高。

- 多角成像：

多角成像技术的基本原理是使用两个或者是两个以上的摄像头同时摄取图像，通过对比这些摄像头在同一时刻获得的图像的差别，使用算法来计算深度信息，从而实现多角度三维成像。

多维成像是 3D 肢体识别技术中硬件要求最低的，同时也是最难实现的。多角成像完全是依赖于计算机视觉算法来匹配两张图片的相同目标。相比较光结构和光飞时间这两种技术，多角成像能够需要的成本代价比较低。

- 面部识别

面部识别又称人脸识别、面像识别，面容识别等，通常是使用通用的摄像机作为识别信

息获取的装置。

通过非直接接触的方式获取并识别面部图像，计算机系统将获取的图像与数据库图像后进行对比识别。

传统面部识别就是通过测量面部各个点之间的距离，来识别个体。一次完整的面部识别大约需要测量 80 个左右的节点的信息，一旦面部特征被完整的录入数据库，就会与数据库中该面容的主人的身份信息进行绑定。目前的面部识别技术在安全性和准确性上存在一系列的挑战：一个方面是该识别系统存在很多的不确定性，受到光照、表情、姿态等众多因素的影响，另一个是保证人脸识别的正确性，能否识别出用户是一个真实的人，而不是一张照片或者视频，需要有极高的人脸活体检测和人脸识别技术。其次 2D 人脸识别技术仅仅通过 2D 摄像头平面成像，无法接收物理世界第三维信息（尺寸和距离等几何信息）。

针对以上信息，引入 3D 人脸识别技术，3D 人脸识别通过 3D 摄像头立体成像，能够识别视野空间的每个

点的三维坐标的信息，从而能够识别出伪造图片、视频、面具等干扰因素，适合应用在金融领域和智能手机安全等安全级别比较高的领域。3D 人脸识别的硬件原理和 3D 肢体识别的硬件原理类似，其技术算法有如下几种：

- 基于图像特征的方法：

首先匹配人脸整体尺寸轮廓和三维空间方向；然后，在保持姿态固定的前提下，去做脸部不同特征点的局部匹配。伴随着人脸姿态的变化，需要不断重新搜索特征点的坐标。

- 基于模型可变参数的方法：

通过通用人脸模型的 3D 变形和基于距离映射的矩阵迭代最小相结合，去恢复头部姿态和 3D 人脸。伴随着人脸姿态的变化，该方法只需要调整 3D 变形模型的参数。

- 基于深度学习的算法：

基于 3D 结构光设备采集图像的颜色、红外、获取 3D 人脸训练数据，但是该技术受 3D 训练数据、成本、时间等问题的限制，深度 3D 人脸识别算法还存在较大的挑战。

3D 人脸识别能够广泛应用于物联网、移动互联网、银行、安防、交通等场景，更好的提升攻击预防的效果，全面提升人脸识别的准确度，但是该技术受到很多限制因素的影响，如 3D 人脸识别往往需要特定的采集机，3D 的建模过程计算量大等等。相信随着芯片技术和传

感技术的发展，3D 人脸识别技术会取得重要的突破，该技术的应用会是未来的主流。

- 脑电波

如今，人们即使身处不同的大陆，也可以通过手机、互联网等毫无障碍地进行通信，视频交流，但是

语言的交流仍然是受到限制的，一些抽象概念和情感不能通过文字来进行准确的表达，一部分的残障人士没办法无法通过语言等方式与正常的人进行交流，尽管他们的思维能力与常人没有差异。未来的脑电波通信能够更大的释放人类的潜能，也能够进一步为残障人士与他人的交流带来更大的便利。

大量的心灵感应实例，尤其是双胞胎的心灵感应现象告诉我们，脑电波可以像无线电设备一样交互通

信。人的大脑在工作时，大脑的神经元会发射电子脉冲，这就是脑电波，不同的脑电波对应的是不同的想法。人们很难测量到单个的神经元的电子脉冲，但是许多的神经元共同放电产生的集体的电波是可以通过头皮外捕捉测量得到。

目前的脑电波通讯更多的应用在医疗的行业，可以用来诊断癫痫、睡眠障碍、昏迷、脑病以及脑死亡。

在未来，基于脑电波的通信，我们可以根据一个人的大脑信号，让另一个人的大脑产生特定的神经活动模式，比较直接的方式是通过脑电图技术，在发送者的头皮上安装很多电极，记录人的脑电波。从记录到的活动中提取出包含人类思维的信号，通过网络发送给接受者，换句话说，这个提取发送的信号决定了给接受者的大脑施加的电刺激。因为神经元之间是通过电信号相互交流作用的，我们可以通过施加电流或者磁场的方式，影响大脑内部的信息传导过程。

在不久的将来，脑电波通讯设备将会像目前 PC 设备一样不可或缺。

4.9 新材料电池

电能平常的生活中被人们作为二次能源，可以在电池中进行存储，电池作为一种设备，可以凭借电极向外部提供一些电能。电池主要包含一次及二次电池，不可进行充电的电池为一次电池，相反，二次电池可以被人们用来进行多次的充放电，原理主要是根据电池内部发

生的氧化反应及还原反应产生的电子迁移。二次电池，从镍镉电池到镍氢电池，从镍氢电池到锂离子电池，人们不断寻找原子量更小的元素充当氧化剂、还原剂、支持结构，以提升电池的能量密度。锂离子电池是目前应用最广的储能技术，广泛应用于各种个人电子产品、可穿戴设备中，而固态锂离子电池所具备的种种优势，有望取代锂离子电池成为下一代电池技术。因此，锂离子电池和全固态锂电池将成为未来短期和长期的重要发展方向。

锂离子电池体系中，正极材料、负极材料、电解质以及隔膜是锂离子电池中的四个不可或缺的组成部分，对于全固态锂电池，固态电解质将取代液态电解质以及隔膜。针对电池各部分，通过对原有材料结构进行调整，引入新材料对原有材料进行改性，引入新材料对原有材料进行替代，以及优化、革新制备过程中技术方法等方式，是从材料学的角度对电池进行优化提升的重要路径。

材料的微观可控性，包括材料的微观结构和微观形貌在电池各部分的改性中十分重要。氧化钛，氧化锆，氧化铝，氧化锌等纳米结构的金属氧化物材料具有稳定的微观结构，良好的导电性以及热稳定性，通过分散包覆等方法，有助于减少电极材料与电解质产生副反应。碳基纳米材料一直不断地在电池中被研究和应用，石墨烯作为最优异的碳基纳米材料，具有六角晶格稳定结构，理论层数为单原子层的二维材料，具有超高的载流子迁移率，同时其二维结构削减了晶界声子散射，声子在面内进行弹道传输，具有相对较长平均自由程，因此石墨烯具有超强导电性和导热性并且微观可控。石墨烯作为电极的修饰材料具有十分巨大的潜力。脂肪族聚碳酸酯具有较高的室温离子电导率，通过对链段以及侧链官能团的选择和调整能够减弱阴阳离子的相互作用，并且碳酸酯基团具有强极性，介电常数高，包括聚三亚甲基碳酸酯、聚碳酸乙烯酯、聚碳酸丙烯酯等，有望应用在全固态锂电池中。锂离子电池的隔膜中，通过纳米陶瓷颗粒等材料的引入，与传统聚烯烃聚合物隔膜相结合，能够有效的提升安全性，并降低电池厚度。对于电池各部分性能的改进也需要技术方法的优化和革新，包括材料的均匀包覆，包覆复合材料的制备，离子掺杂，固体电解质制备，界面修饰等等。技术方法的选择同样决定着电池的最终性能。

锂离子电池正极材料，通常为可逆脱锂以及嵌锂的过渡金属氧化物，是锂离子电池的重要组成部分之一，通常正极材料包括传统正极材料 LiCoO_2 (LCO)， LiMn_2O_4 (LMO)， LiFePO_4 (LFP) 等，三元材料 LiNiCoMnO_2 ， LiNiCoAlO_3 等。对于传统正极材料钴酸锂 (LCO) 以及三元材料，在终端领域具有成熟的应用优势，在包覆结构，表面改性等方面具有研究价值，是目前终端应用中值得改性的首选正极材料。在正极改性中涉及多种高性能纳米材料。

石墨烯等具有超强导电性纳米新材料，应用到正极材料的修饰、新包覆结构的复合材料引入、纳米材料微观结构调整以及微观表面形貌改性等方法，将可以提升正极比容量、倍率、循环性、电化学及热稳定性等性能。具有良好导电性和稳定性纳米金属氧化物材料，如氧化锆、氧化钛等，可以阻止正极中过渡金属溶解，提高粒子表面活性，抑制电极与电解液的副反应，提升循环性。新材料在正极改性中具有巨大的应用潜力。另外，正极替代材料，一系列的过渡金属氟化物、氧化物、硫化物以及氮化物被证实可以实现多电子转移，实现很高的容量。基于转化反应机制而实现储锂功能的电极材料具有比基于锂离子嵌入脱出机制的传统锂离子电池电极材料高出 2 ~ 4 倍以上的比容量，但在通往商业化的路上仍存在很多瓶颈问题亟待解决。

锂离子电池负极材料，通常为可逆脱锂以及嵌锂的碳基材料或非碳基材料，也是锂离子电池的重要组成部分之一。对于目前锂离子电池负极材料，存在枝晶、粉化、固体电解质膜 (SEI) 不稳定、表面副反应等诸多问题，通过新材料的应用，有望削减或消除这些问题，同时提高能量密度，循环性以及稳定性。新型负极材料 Fe, Ge, Sn, Si 等围绕着包覆，表面改性，纳米化，复合化等方向以期降低其体积膨胀而能形成稳定的 SEI 膜，其中 Si 理论比容量最高，具有取代石墨负极的潜力，是锂离子电池理想的负极材料，但由于膨胀粉化，析晶和 SEI 不稳定等原因一定程度上制约了其发展。通过 Si 的纳米化与纳米微观结构调整有助于改善原本问题，提高循环性能。硅纳米线，作为一维材料，有望克服电子与零维材料产生的界面势垒，并从微观缓冲体积膨胀，并且具有相对较高的比表面积，能够提升与电解质的接触面积。通过材料的纳米化等方式，能够逐渐帮助新材料替代石墨等传统负极材料，提升电池的整体性能。

液态电解质，目前大多采用 LiPF₆、EC 加一种或几种线性碳酸酯作为溶剂，通过加入不同的添加剂和采用不同的溶剂以及替换不同的锂盐，以适应各种类型和场合。隔膜材料，聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE) 在隔膜中具有广泛的应用，通过纳米陶瓷颗粒等无机非金属材料微观结构控制，提升电池的安全性。但液态电解质与隔膜材料所组成的锂离子电池仍存在很多技术阻碍与安全性问题，在未来发展趋势下两者极有可能被固态电解质材料取代。

全固态锂电池具有超高安全性能，高能量密度和高循环性能。并且，其工作温度宽，电化学窗口宽，具有可卷曲的柔性特点。具有十分明显的优势，但具体到固态电解质的电导率、电池倍率、电池制备效率、成本控制方面，全固态电池仍然有一段路要走。然而，对于面向 B5G/6G，随着高带宽场景的出现，传输速度的提升不断刺激着人们对于视频体验的需

求，终端形态很有可能逐渐趋向于大体积。而基于终端便携性与大体积的兼容性，柔性可折叠、可卷曲的终端设备可以满足便携需求。因此，这种柔性需求也更倾向于全固态锂电池的电池技术。固态锂电池的电解质材料包括聚合物全固态电池和无机全固态电池。无机固态电解质分为氧化物和硫化物电解质。全固态聚合物电解质目前需要加强失效机制的控制能力，并提高离子电导率。聚碳酸酯基、聚硅氧烷基等聚合物材料具有较强的离子电导率，通过调整链段结构，侧链官能团以及取代基等，可以进一步提升其电导率。部分氧化物固体电解质如 $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ 以及三元硫化物固体电解质 Li_2S , P_2S_5 和 MS_2 ($\text{M}=\text{Si}, \text{Ge}, \text{Sn}$ 等)，同样具有较高的电导率，具有应用潜力。在全固态电解质的基础上，通过高离子迁移率（接近 1）的新锂盐的开发，高比容量正负极材料的制备相结合，例如负极引入金属锂的纳米合金材料，将有利实现更加轻量化，更高能量密度，更加安全，并且兼具柔性的全固态锂电池。

锂硫电池，锂金属电池，钠离子电池等其他电池技术方向，虽然有技术突破，但由于部分瓶颈问题前景并不乐观。因此，如文章开头所述，对锂离子电池的各个部分的改性与全固态锂电池技术突破是未来短期和长期重要的发展方向。众多新材料的引入，包括石墨烯等碳基材料，氧化锆，氧化铝等纳米金属氧化物，纳米陶瓷颗粒等无机非金属材料，聚碳酸酯基等高分子聚合物，以及众多方法的革新，包括包覆技术，制备技术，掺杂技术等，将对 B5G/6G 终端电池性能的提升产生重要的影响。

4.10 新型充电技术

除配备新型电池外，B5G/6G 终端还可配置新型的充电技术以延长终端的续航能力。配置新充电技术的同时还需要采用相应的材料，使得 B5G/6G 终端能够回收以下能源：

- 太阳能：得益于太阳能薄膜技术的发展与进步，太阳能充电组件可进一步小型化且其能量转化效率得到进一步提高。在 B5G/6G 终端上，太阳能装置以一层薄膜的形式呈现，其附着在 B5G/6G 终端背面或屏幕表面，使得太阳能成为移动能源，让 B5G/6G 终端保持长久续航。

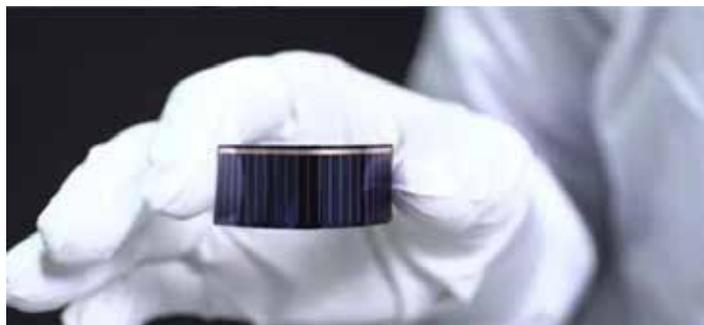


图 14 太阳能充电组件 [10]

- 机械能 1 - 按压发电：通过充电薄膜，实现手指按压、触控屏幕即发电的过程。按压触摸发电基于新型柔软有机离子二极管的机械能传感器，它由两个纳米复合电极组成，其带相反电荷的移动离子被聚碳酸酯膜隔开。电极是一种填充有碳纳米管并注入离子液体的聚合物基质，纳米管改善了电极的导电性和机械强度。当施加机械力（例如，手指的按压）时，离子穿过薄膜扩散，产生了连续的直流电。同时，内在电势产生，抵抗离子扩散直至达到平衡。整个完整的循环以十分之一赫兹的频率或每 10 秒一次的频率操作，较为符合用户按压手机的操作频率 [11]。配置了按压充电薄膜的 B5G/6G 终端可以在操作终端的同时为终端带来电能，增加终端的续航。



图 15 按压发电 [11]

- 机械能 2 - 运动发电：在 B5G/6G 终端内装入微型机械能发电装置，通过用户携带终端走路、跑步、骑自行车或者只是进行终端的拿放，机械能发电装置都能将这些运动转化为电能，机械能发电装置支持输出从 3.3 伏到 15 伏的宽幅直流 [12]。用户在平时可将装配有机机械能发电装置的 B5G/6G 终端随身携带，内部的发电机可以感应到相应的运动，也就是用户

只要在活动，就无需过分担心 B5G/6G 终端的续航问题。

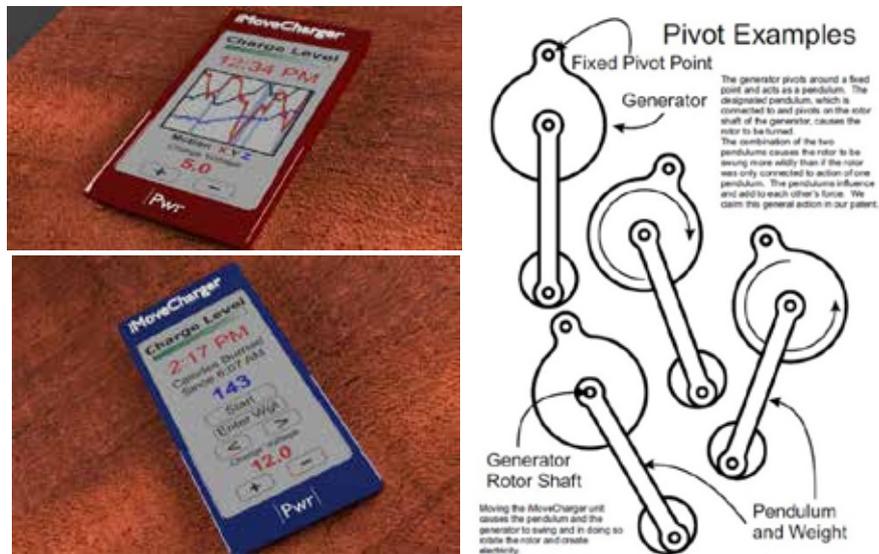


图 16 机械能发电装置 [12]

4.11 终端省电技术

使用新型电池来扩展电池容量或应用先进的充电技术可以延长 B5G/6G 终端的续航时长，但从终端消耗电能的通信过程和软硬件设计上做进一步的节能考虑，可以更深层次地增强终端的续航能力。

在通信过程中，终端可以根据自身数据传输状态主动或被动调整一部分传输参数使得终端可以进入一种低功耗的节能状态。如终端可以在没有数据传输时主动关闭部分已激活的小区连接或者将服务小区的有效带宽减小，进入一种小带宽运行的状态，这时终端可以仅开启部分耗电量较小的射频单元，终端的能耗可以大大降低。另外，终端可以在传输时延不敏感的业务时采用一个较大的调度间隙，使得终端的处理器可以处于一个较低的工作电压和较小的时钟频率，节省能耗。另外，终端也可以根据业务状态适时调整激活的天线数、减少对控制信道的监听、降低终端在低速时的无线资源管理测量频率、向基站建议合理的节能相关的参数配置如 CDRX（连接态非连续接收）参数配置和 MIMO 层数等，通过更加精确的控制终端的行为降低终端的能耗，延长终端的续航。为解决可穿戴设备小电池和长续航的矛盾，可穿戴设备的 UE 可支持更小的带宽，如 10MHz 或 20MHz，更少的接收、发射天线数，例如 1 收或者 2 收，以及更少的发射天线数如 1 发。

除依照业务进行主 / 被动调整传输参数外，B5G/6G 终端可以利用 AI 技术感知用户的日常生活和终端使用习惯，从而在不同的时刻和环境释放部分不被使用或者小概率被使用的软硬件所占用的资源，节约电能。除依照业务进行主 / 被动调整传输参数外，B5G/6G 终端可以利用 AI 技术感知用户的日常生活和终端使用习惯，从而在不同的时刻和环境释放部分不被使用或者小概率被使用的软硬件所占用的资源，节约电能。B5G/6G 终端可以利用自身所配置的各类传感器，感知所处的环境。如用户携带 B5G/6G 终端在山区地带登山时，温度传感器、海拔传感器、定位传感器等可以判断用户所处的生活和自然环境状态，进而关闭与此场景无关的应用和 / 或部分硬件设备以节能。再如，用户每天的生活习惯是晚 11 点至早 8 点进入睡眠，若在此期间用户没有软件使用习惯，B5G/6G 终端可以将所有软件后台和相应的硬件设备关闭，进入一个仅保持了基本寻呼功能的节能模式。早餐期间根据用户习惯仅开启新闻和天气软硬件；午餐期间仅开启美食，支付等软硬件；下午会议时间仅开启办公相关软硬件；下班期间仅开启地图导航等出行相关软硬件，与对应时间段的用户行为无关的软硬件可被终端自行关闭。B5G/6G 终端可较为准确的预判用户在不同时刻的终端使用习惯和行为，从而避免不必要的电能浪费，延长终端续航。

此外，上行发射在终端通信系统功耗中占据了不可忽视的部分，所以降低终端发射功率，对提高终端电池续航能力非常关键。通过降低终端的发射功率等级，有助于实现终端基带和射频采用相同的芯片工艺（例如 CMOS 工艺），集成度更高，减少器件连接的插损，低等级功放效率也会更高，以上因素都可以显著降低终端的功耗。同时，单片集成基带和射频，还有利于减少终端面积、降低终端成本。

除了上述通信过程和 AI 方面的省电外，B5G/6G 终端的芯片设计和制造以及存储设备的演进同样对终端续航能力的提升有着重要作用。由于晶体管在切换电子信号时的动态功率消耗与电容成正比，因此芯片才可以在元器件间距越小时有更快处理速度并更加省电。除决定元件间距的制程工艺外，采用更加先进的芯片架构也可以使得能耗进一步降低。B5G/6G 终端的芯片有望采用更极致的制程工艺和更优秀的架构，提升芯片处理能力的同时降低芯片能耗。此外，B5G/6G 终端应该有着更加高速的 ROM 和 RAM，增加数据的数传效率，在尽可能短的时间内完成数据传输，降低终端的激活时长以节省终端能耗。

B5G/6G 终端的空间设计优化也是提升续航能力的关键。首先，整机的空间设计决定了设备可以容纳的电池体积，一定程度上影响了设备的续航。B5G/6G 的终端将会是极致轻薄、便携的设计，在非常轻薄的外观下 B5G/6G 的终端也应该有着较好的电池体积占比。同

时，B5G/6G 的终端的电池可以有多种形态，不再局限于长方体这一类形态。另外，精巧的空间设计可以使得 B5G/6G 终端的散热效率更高，终端温度将会保持在一个合理的范围内，终端温度的控制对终端续航也有着不小的影响。所以，提升 B5G/6G 的终端主板的元件集成度、缩小 PCB 的面积，是提升终端电池体积占比的有效手段。通过精巧的内部空间设计和优化，并在进一步提高元件集成度的情况下，可以把更多的空间留给电池并用于散热，增强 B5G/6G 的终端的续航能力。

5 参考文献

- [1] NTT DOCOMO, https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2019/04/17_00.html
- [2] NTT DOCOMO, https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2019/topics_190529_00.pdf
- [3] NTT DOCOMO, https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2018/topics_180413_01.pdf
- [4] NTT DOCOMO, https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2018/topics_180419_01.pdf
- [5] NET2030-O-017, Updated version of the Sub-Group 1 deliverable “Use Cases and Requirements for Future Networks”, output of the 4th FG NET2030 meeting, ITU
- [6] 腾讯科技, <https://tech.qq.com/a/20171224/000838.htm>
- [7] 搜狐科技, http://www.sohu.com/a/127336637_505877
- [8] 电科技, <http://www.diankeji.com/pingce/28368.html>
- [9] 郑中华, 基于肢体动作的人体姿态识别研究, 西安工业大学, 2015.05.1
- [10] 腾讯新闻, <https://new.qq.com/omn/20181130/20181130A1EK5E00>
- [11] 搜狐科技, https://www.sohu.com/a/123247267_234017
- [12] iMoveCharger - Charge Smart Phones & Tablets as you move, <https://www.indiegogo.com/projects/imovecharger-charge-smart-phones-tablets-as-you-move#/>

致谢

诚挚的感谢如下人员对本白皮书做出的贡献：

编辑：

紫光展锐

王化磊

贡献单位与人员（排名不分先后）：

紫光展锐

苗润泉，王钰华，雷珍珠，赵思聪，李维成，朱勇旭，王化磊

都科摩北京通信技术研究中心

王新，刘凯频

维沃移动通信有限公司

秦飞，杨晓东，岳然，姜大洁

OPPO 广东移动通信有限公司

沈嘉，田文强

联想

韩晶，时洁，雷海鹏，吴联海，郭欣

北京三星通信技术研究有限公司

孙程君，吴越

中国移动通信有限公司研究院

马力克

缩略语

| | | |
|------|--|-------------|
| 5G | The fifth-Generation mobile communications | 第 5 代移动通信系统 |
| 6G | The sixth-Generation mobile communications | 第 6 代移动通信系统 |
| AGV | Automated Guided Vehicle, AGV | 自动导航设备 |
| AI | Artificial Intelligence | 人工智能 |
| AR | Augmented reality | 增强现实 |
| ASIC | Application-specific integrated circuit | 特定用途集成电路 |
| B5G | Beyond 5G | 后 5G 时代 |
| BBE | Beyond Best Effort | 超越尽力而为 |
| CPU | Central Processing Unit | 中央处理器 |

| | | |
|------|---------------------------------------|---------|
| DNN | Deep Neural Networks | 深度神经网络 |
| GPU | Graphics Processing Unit | 图形处理器 |
| HPC | High-Precision Communications | 高精度通信 |
| ITU | International Telecommunication Union | 国际电信联盟 |
| INS | Inertial Navigation System | 惯性导航 |
| LCD | Liquid Crystal Display | 液晶显示器 |
| MR | Mixed reality | 混合现实 |
| ML | Machine Learning | 机器学习 |
| MEC | Mobile Edge Computation | 移动边缘计算 |
| OLED | OrganicLight-Emitting Diode | 有机电激光显示 |
| ROM | Read only memory | 只读存储器 |
| RAM | Random access memory | 随机存储器 |
| TIC | Tiny Instant Communications | 极小即时通信 |
| VLV | Very Large Volume | 甚大容量 |
| VR | virtual reality | 虚拟现实 |

Future FuTURE 论坛致力于先进技术和应用的研究，其研究内容相对超前，因而不可避免在某些技术路线和方法上存在争议。论坛鼓励各种观点的充分表述和广泛交流。论坛所发布白皮书中的内容代表参与单位的一致意见，获得论坛多数成员的支持成为共识，进而成为论坛的观点，但不一定代表论坛所有成员的共识。

欢迎各界专家学者踊跃参加 FuTURE 后续各工作组会议及交流研讨活动，诚邀各位积极参与 FuTURE 系列白皮书撰写工作。



扫码获取电子版