



专题：先进数据网络

基于未来应用的未来网络固定特征

张亚文¹, 王淼¹, 王凌豪¹, 张瀚文¹, 张玉军^{1,2}

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 越来越丰富的网络应用对网络功能和性能提出了更高的要求。车联网需要网络满足低时延和高可靠性要求; 远程医疗需要网络有确定性时延和安全保证; 工业互联网要求网络满足大连接要求; AR/VR 应用要求低时延和高带宽; 量子计算也对网络安全等方面提出了新的要求。现有的 IP 网络由于自身架构的局限性, 只提供尽力而为的服务, 无法满足未来网络应用需要。调研未来 20 年内的网络应用, 分析未来网络应该具有的功能和性能, 通过对车联网、远程医疗、工业物联网、AR/VR 和量子计算应用场景的描述, 分析满足这些场景分别需要的网络性能, 得出未来网络的性能指标。

关键词: 未来网络应用; 车联网; 远程医疗; 工业互联网; AR/VR 应用; 量子计算

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019198

Fixed features of future networks based on future applications

ZHANG Yawen¹, WANG Miao¹, WANG Linghao¹, ZHANG Hanwen¹, ZHANG Yujun^{1,2}

1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: More and more network applications place higher demands on the network functions and performance. Internet of vehicles requires the network to support low latency and high reliability, telemedicine requires it with deterministic latency and security assurance, the industrial internet requires networks to meet large connections and high reliability, AR/VR applications require low latency and high bandwidth, quantum computing also brings new challenges to network security. Due to the limitations of its own architecture, existing IP networks only provide best-effort services that cannot meet the needs of future network applications. Future network applications in the next 20 years were investigated, the functional and performance of the future network were analyzed. By describing the application scenarios of internet of vehicles, telemedicine, industrial internet AR/VR and quantum computing, the network performance to meet the needs of these scenarios was analyzed and the performance indicators of future networks were obtained.

Key words: future application, IoV, telemedicine, industrial internet, AR/VR application, quantum computing

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-07-31

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2016YFE0121500, No.2018YFB1800403); 国家自然科学基金资助项目 (No.61672500, No.61572474); 中国科学院战略性先导科技专项基金资助项目 (No.XDC02030500)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2016YFE0121500, No.2018YFB1800403), The National Natural Science Foundation of China (No.61672500, No.61572474), The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDC02030500)



1 引言

现有互联网假设用户和终端是可信和智能的,网络本身仅需要提供尽力而为的数据分组转发功能,当主流应用是网页、邮件、音频等形式时,网络应用以“轻载”的负荷比例在网络上传输,这种理念符合最初主机互联和资源共享的网络应用需求。随着应用模型日益丰富,互联网的主流应用模式逐渐转变成以视频分发等为主的内容获取服务^[1],网络传输路径承受的负荷压力越来越大,网络功能定位发生了巨大变化。例如,各种在线视频、视频点播业务逐渐盛行,对网络的传输时延、分组丢失率等提出更高要求,NDN(named data networking,命名数据网络)^[2]、边缘计算^[3]等新的网络架构和技术应运而生。新兴应用的出现对网络的传输能力、移动性、安全性等方面提出了更高的要求^[4],可见,应用的发展已逐渐成为网络发展的需求来源。

Kelly 预测^[5],未来 20 年内,技术与人工智能相关,会给社会带来根本性变革,自动驾驶、量子计算、虚拟现实(VR)等新技术将彻底改变人们的日常生活。本文将从应用驱动的角度来调研未来网络应该具有的特性,如自动驾驶需要网络满足低时延和高可靠、远程医疗需要网络有确定性时延和安全保证、工业互联网要求网络满足大连接等、网络应该能够稳定可控地按需提供服务等。

2 应用场景及性能需求

2.1 车联网

车联网实现了车内、车与车、车与路、车与人、车与服务平台的 V2X(vehicle to everything)全方位网络连接^[6],通过有效协同实现智能交通,它既是典型的 5G 低时延高可靠场景^[7],又是关键的人工智能和智能交通系统场景。

车联网是无人驾驶技术的基础,通过车联网,

既可以实现汽车的高度自动化,又可以让远端的机器人参与到决策中来,以下主要描述自动驾驶和远程驾驶两组应用场景^[7]。

2.1.1 自动驾驶

车联网通过车辆、行人、基础设施和云端的信息共享,辅助车辆进行环境感知,进而实现自动驾驶,如图 1 所示。在该场景下,车辆以队列的形式行驶,队列中的所有车辆与队列头的车辆(manager)共享本地信息,包括传感器信息、驾驶意向等,并接收从 manager 传来的消息,如图 2 所示。车与车之间、不同队列之间共享本地信息,获取全局视图,进行车辆间行驶轨迹的同步和协调,这是在网络边缘进行的操作,由于信息共享的实时性和车辆行驶的动态性,网络需要极短的接入时延;车辆将运行状态上传到云端,也在云端下载数据(如路况、影音娱乐等),为构建高精度地图及满足多媒体娱乐需求,网络边缘应该具有一定的缓存、计算能力和足够的带宽。此外,由于自动驾驶的级别不同,车辆间共享的数据类型也不同,参考文献[9]和参考文献[10]分别介绍了不同数据格式下的数据分组大小和毫米波在高宽带通信信道下数据传输的速率,接入网应该能适应不同的分组大小和形式。



图 1 联网 V2X 全方位连接场景^[11]

自动驾驶场景下,车辆与路边单元的协作发生在边缘网络,自动驾驶的自动化程度不同,车联网对边缘网络的性能需求也不同。当自动化程度较低时,发送的数据分组通常较小,为 300~400 byte,

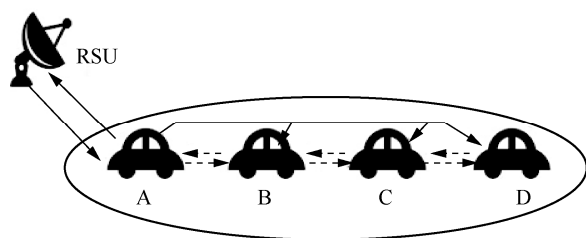


图2 车辆编队场景

最大时延为 25 ms, 可靠性一般高于 90%; 当自动化程度较高时, 为保证高于 99.99% 的可靠程度, 需交换的数据较详细, 由于机器的反应速度要快于人类, 车辆间距离更短, 通信范围也较小, 根据数据交换的格式, 分组大小为 50~6 500 byte, 最大时延为 10~20 ms, 当面对一些紧急场景, 如紧急轨迹对准时, 时延要求最低可以达到 3 ms, 可靠性大都在 99.99% 以上, 数据传输速率为 30~53 Mbit/s。

2.1.2 远程驾驶

远程驾驶需要跨核心网交换信息, 适用于乘客不能自己驾车或远程车辆处于危险环境等特殊场景。车辆通过核心网向远程控制中心发送远程操作请求, 同时将自身所处的环境发至远程控制中心, 包括摄像机、传感器、状态数据等, 远程控制中心可以是人类驾驶员或人工智能, 当它收到请求时, 根据现有状态进行下一步决策, 并向车辆发送命令, 如图 3 所示。该场景需要边缘设备与远程控制中心进行跨核心网的双向通信, 双向通信的时延为 1 ms^[12]。远程驾驶需要快速的反馈、高可靠性和低时延, 在最高绝对速度 250 km/h 的情况下, 要求不大于 5 ms 的端到端时延。因此, 网络应保证在移动过程中远程通信的高速传输速率, 合理支配上行和下载的带宽, 保证 99.999% 的可靠性。



图3 远程驾驶场景

由于跨核心网的通信距离长, 分组丢失是极有可能出现的, 为保证网络传输的高可靠和低时延, 网络应保证低分组丢失率, 这可以通过提高广播频率和适度冗余的方法实现。参考文献[13]实现了不同场景下对分组丢失的测量, 证明分组错误率和丢失率与传感器和接收端的距离以及传感器的位置有关, 距离越大, 分组错误率和丢失率越大, 大多数情况下, 系统分组错误率应低于 10%, 丢失率应不大于 3。远程驾驶场景还需要极高的安全性, 因此, 网络应提供内嵌的安全能力, 既可以对接入设备进行认证和权限审核, 又能够提供传输过程中的隐私保护。

2.1.3 小结

车联网场景对网络主要性能指标的需求总结见表 1。一般来说, 为保证车辆移动切换时的稳定性, 车联网要求接入时延、时延抖动均在 1 ms 内, 核心网传输时延在 ms 级, 一般在 10~20 ms, 根据紧急情况和自动化的程度从 3 ms 到 500 ms 不等; 网络带宽在 Mbit/s 级, 吞吐量在 Gbit/s 级, 峰值速率达 20 Gbit/s; 可靠性均在 90% 以上, 且大多数场景要求可靠性在 99.99% 以上; 移动过程中的稳定性还应保证较小的分组丢失率和分组错误率。

2.2 远程医疗

远程医疗通过计算机技术、通信技术和多媒体技术, 提供远距离的医疗信息与服务^[14]。

远程医疗基于视频、图像及物理设施与远端

表 1 车联网应用场景性能指标

场景	数据分组大小	接入时延	时延抖动	通信时延	峰值速率	传输速率	通信范围	可靠性
车联网	50~12 000 byte	1 ms	1 ms	3~500 ms	20 Gbit/s	0.5~1 000 Mbit/s	大于 50 m	99.99%



进行交互，主要应用于远程监控、远程诊断及会诊以及远程手术。

2.2.1 远程监控

远程监控利用传感器和互联网技术实时监测用户的生命体征数据，并能与医护人员进行实时通信，关键技术包括传感器的实现、数据采集、用户定位和数据传输，这是无线体域网^[15]的主要应用之一。

远程监控场景通过传感器在用户侧收集信息，利用本地路由器进行本地通信和移动网络的通信转换，并在云服务器中运行远程监控应用程序，实现本地与云服务器、医疗服务提供者的通信。AAL (active assisted living, 主动辅助生活)^[16]是一个典型的远程监控用例，它是针对独自生活在家的老年人或残疾人的远程监控。在用户与医护人员的通信过程中，用户可以控制与谁共享其信息且具有访问医疗服务提供者的权利（防止虚假设备和恶意用户）。因此，网络应该具备内嵌的安全体系，可以进行安全验证和隐私保护。

2.2.2 远程诊断及会诊

远程诊断及会诊通过视频或图像的交互，使一个或多个医生可以远程进行患者的病情诊断和会诊，进一步确认治疗方案。该场景通过医生和医生、医生和患者间线上的视频交流，为偏远地区提供先进的诊疗服务，如图4所示。

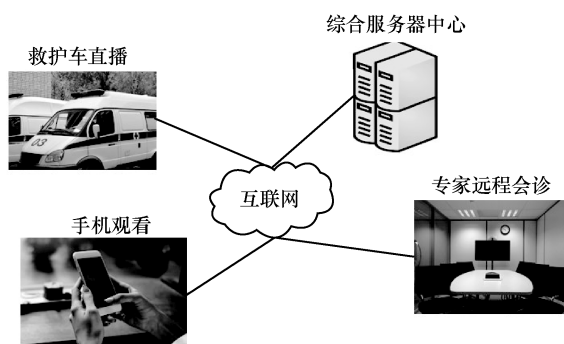


图4 远程诊断及会诊场景

远程诊断及会诊场景是远程医疗的重要场景，它对网络数据传输的带宽等性能提出了高的

要求。根据远程医疗中视频图像的要求不同，网络应能够提供从 Mbit/s 到 Gbit/s 不同级别的带宽，同时由于可靠性和时延保证，这个带宽或许应是专用的。远程医疗最低要求 1080P、30 f/s 以上的实时视频，这需要 6 Mbit/s 左右的带宽，当需要保证更好用户体验时，需要更高帧速率、更高分辨率的图像，如 4K 分辨率下能够产生 300 Mbit/s 的图像^[17]，16 K 视频要求的带宽在 2 Gbit/s 左右。2018 年，中国在乌镇搭建试验网并进行了远程 B 超的展示，该试验网的下行带宽为 2.5 Gbit/s。

2.2.3 远程手术

远程手术是指医生利用机械臂远程进行手术。网络的一端连接医生，另一端连接手术室，当医生利用虚拟现实技术实施手术时，手术室中的机械臂同步进行该操作，如图5所示。



图5 远程手术场景

2019 年 3 月 16 日，某医院医生通过中国移动搭建的 5G 网络，远程操控手术 3 h，成功为一名 68 岁的帕金森患者植入“脑起搏器”，在该用例中，网络需要提供 10 Gbit/s 的峰值传输速率，对单用户提供 1 Gbit/s 的峰值速率。参考文献[18]发现医生难以发现 30~150 ms 的执行时延，该时延为指令下达到执行指令的时延。

远程手术要求网络应能为用户提供相当一段时间内稳定可靠的传输，对于远程手术，时延一般应低于 5 ms。

2.2.4 小结

远程医疗场景对网络的性能需求见表2。远程医疗为保证手术的安全和稳定性，需要网络提供 ms 级的确定性时延，时延一般在 5 ms 以内，最多不超过 10 ms。远程医疗需要保证一段时间内稳定可

表 2 远程医疗应用场景性能指标

场景	时延	带宽	用户峰值速率	峰值速率	可靠性
远程医疗	5 ms	6~2 000 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s	99.99%

靠的数据传输, 为了保证远程通信过程中的低时延, 网络需要为单用户提供 1 Gbit/s 的峰值传输速率, 网络峰值速率 10 Gbit/s, 带宽与视频质量相关, 最低需要 6 Mbit/s, 最高可以超过 2 Gbit/s。同时, 网络应提供安全和可靠性保证, 可靠性不低于 99.99%, 安全性包括医疗信息的机密性和完整性, 因此, 网络需要内嵌的加密、验证和报警机制。

2.3 工业互联网

随着人工智能、物联网等新技术飞速发展, 将 CPS^[19]和物联网的思想应用于工业自动化领域, 就产生了工业 4.0 的概念^[20]。工业互联网以机器、原材料、控制系统、信息系统、产品和人之间的网络互联为基础, 通过对工业数字的全面深度感知、实时传输交换、高效计算, 形成科学决策和智能控制, 提高制造资源配置效率, 同时支撑智能制造、运营优化和生产组织方式变革^[21], 它是高可靠、低时延、大连接、低功耗的场景。

将工业互联网划分为现场级数据采集、工厂级数据管控和工厂间信息交互 3 个主要的应用场景并进行介绍。

2.3.1 现场级数据采集

现场级的数据采集是面向工业现场的操作场景, 工厂内部相当于一个局域网络, 通过有线和无线的方式进行数据采集, 由于现场环境可能较为复杂, 这一场景既要求高可靠性和实时性, 还要有抗干扰性和安全性。

数据采集包括时间关键应用和非时间关键应用两种场景^[22], 时间关键应用场景一般与远程操作、移动控制等场景有关, 需要及时的数据通信; 非时间关键应用场景是指普通的监控场景。恶劣和金属化的工业环境给传感器的数据采集和传递

造成了极大的干扰, 室内覆盖率和高可用性是关键要求, 时延要求相对宽松, 在 20~100 ms^[23]。因此, 网络应具备抗干扰能力, 有完善的数据分组容错机制。参考文献[24]发现, 无线网络中, 吞吐量越大, 丢失的数据分组数量就越多, 当传输速度为 10 Mbit/s 时, 800 KB 的数据分组会丢失 2 个, 80 MB 的数据分组丢失 16 个, 因此, 网络应能保证面对大吞吐量时的合理分组丢失数量。

数据采集场景下, 由于传感器及数据的作用不同, 数据可以是高清的视频信息, 也可以是普通的安全消息; 数据可以用于监控, 也可以用于控制操作。因此, 采集的数据类型和传输速率可以不同, 一些传感器可以在保证低时延和高可靠性的情况下以低比特率进行通信, 传输速率为 0.1 ~ 5 Mbit/s, 而视觉控制类的机器则需要可靠的高带宽通信, 数据传输速率从数百 Mbit/s 到 Gbit/s, 可靠性在 99.9%~99.999%。

2.3.2 工厂级数据管控

工厂级的数据管控是面向工厂的管理, 工厂内部与远端进行交互, 以实现移动办公、安全节能管理以及厂区内智能物料运输和配送等^[25], 如图 6 所示, 该场景涉及工厂内部与远端的交互, 包括远程操作、移动控制和远程指导与维护, 要求网络提供高可靠、安全性、高可用性和高带宽。

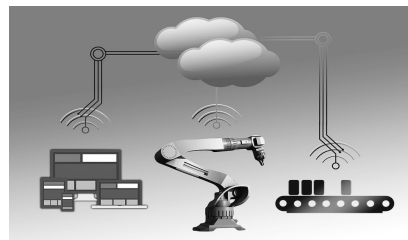


图 6 工厂级数据管控场景

在数据管控场景中, 远程操作和移动控制场



景需要机器、传感器与人的实时交互与协作，这个过程要求快速高可靠的接入和移动过程中的无缝连接，对时延和可靠性要求高：远程操作场景的网络时延一般不超过 10 ms，移动控制场景要求不超过 2 ms，最低可为 0.5 ms，它们的可靠性在 99.999%~99.999 99%。远程指导和维护场景对时延和可靠性要求较低：对时延的要求为 20~50 ms，可靠性达 99.99%~99.999%^[23]。由于远程指导和维护场景是视频支持的场景，网络需要支持大容量数据传输，如通过增强现实（AR），工人可以不经培训就能维护和维修机器，此时数据传输效率可达 500~1 000 Mbit/s，远程操作场景的数据传输速率在 100~200 Mbit/s，移动控制场景则在个位数 Mbit/s^[23]。此外，让机器允许远程控制还可能引入新的漏洞，比如恶意接管机器或设备，因此应提供安全和隐私保护。

2.3.3 工厂间信息交互

未来工业互联网不仅可以出售机器和部件，还能出售服务（如小时数等）。通过云端共享与计算，不同的企业和工厂可以共享基础设施、协调安排生产线，企业与企业连接形成更大范围的资产域。该场景需要高可靠和高可用性，同时为了适应瞬息万变的容量和移动性需求，不同接入技术间应能够灵活融合和无缝连接。

2.3.4 小结

工业互联网对未来网络的性能需求见表 3。各类业务对网络的性能要求不同。对于现场级数据采集类业务，要求网络具备高密度接入、抗干扰能力和安全性能，一般时延要求在 20~100 ms，对数据传输速率要求在个位数 Mbit/s；工厂级控制类业务要求网络具备高传输速率、高可靠和高

同步精度的能力，传输速率在几百至千 Mbit/s 不等，时延和可靠性要求高于数据采集业务；信息交互类业务要求网络具备低功耗、低成本和较高的传输速率。对于可靠性，远程、移动控制类应用要求最高可达 99.999 99%，其他场景在 99.99% 左右。此外，时间要求因行业和工厂的具体设置而异^[22]，运动控制场景要求最高，需要小于 1 ms 的双向通信时延和小于 1 μs 的抖动，发电厂等自动化产业时延要求则约 100 ms。

2.4 AR/VR 应用

AR 应用通过感知信息增强现实世界的对象，VR 应用通过计算机技术创建与现实隔离的虚拟世界。

AR/VR 应用需要密集的计算和交互、大量的通信带宽以及超低的时延^[26]。

2.4.1 AR 应用

AR 应用首先通过摄像头捕捉现实场景，然后对 3D 场景进行分析重构，建立现实场景与显示屏幕坐标系的映射，再通过软件编程进行虚拟场景融合，将融合后的信息显示在显示器上。在该过程中，虚拟映像数据存储云服务器内，当收到应用的请求时，云服务器检索虚拟对象并将其发送至应用程序。

现有的 AR 应用大多通过设备的预存储达到增强现实的效果，未来网络应该能够提供高速的数据传输和极低的时延保证，无需设备预存储，这需要网络具有边缘存储能力。

2.4.2 VR 应用

VR 应用利用多相机阵列获得多角度的视频，这些视频经过一系列处理后保存在云服务器上，当需要使用时，VR 设备从云服务端提取视频流，

表 3 工业互联网应用场景性能指标

场景	连接数	时延	带宽	时延抖动	同步精度	功耗 ¹	可靠性
工业互联网	百万/km ²	0.5~100 ms	0.1~1 000 Mbit/s	μs 级	100 ns	10 年	99.9%~99.999 99%

注 1：低端物联网设备需要满足低功耗要求，待机时间可达 10 年^[22]。

经过追踪和渲染操作呈现用户需要的3D视频^[27]。可见,VR应用同样需要高速的数据传输速率。参考文献[28]指出,SfM(structure from motion,运动恢复结构)使在人类没有不适的情况下实现逼真的AR/VR空间成为可能,这至少需要2.7 Tbit/s的带宽。为了降低视频传输所需要的带宽,可以使用网络编码、实时时变点云编解码器或ICN架构等方式^[29]。

2.4.3 小结

AR/VR场景对网络的性能需求见表4。由于应用需要更广的视角和更高的分辨率,网络应该具备Gbit/s级的传输速率;同时,为了避免头晕和恶心,网络需要保证小于20 ms的时延^[27],无缝VR体验的理想端到端时延不大于10 ms,其中包括视频渲染和显示器端的刷新^[30]。视频的分辨率和帧数还影响用户的沉浸感体验,分辨率和帧数越高,带宽要求越高,4K分辨率约需要400 Mbit/s带宽,高于8K分辨率则需要1 Gbit/s以上。

表4 AR/VR应用场景性能指标

场景	最大时延	理想时延	带宽
AR/VR应用	20 ms	10 ms	100~9 999 Mbit/s

2.5 量子计算

量子计算利用量子力学规律实现高速并行计算,通过控制原子或小分子的状态进行运算和存储,存储和运算能力远远超出现有计算机^[31]。

量子计算的强大算力一方面帮助更快速有效地进行海量数据的处理,如在自动驾驶中对最佳线路进行计算与优化和对复杂的交通状况进行分析预判,对于网络,强大的算力可以更好地帮助路由选择、资源分配等;另一方面,量子计算的强大算力冲击了现有的安全体系,因此网络需要具备向上兼容性,当量子计算冲击现有安全体系时,网络应能够支持新的、抗量子的安全体系。此外,当量子计算使网络的智能路由、资源分配等处理速度得到跨越式的提高时,网络的瓶颈可

能变成网络传输速度,网络的向上兼容性还应支持物理传输硬件上的更新。

3 功能特征

为满足未来主流应用的性能需要,未来网络应在功能架构上给予支持。从网络拓扑和网络内嵌的功能特性两方面进行介绍,提出未来网络可能具有的功能特征。

3.1 网络拓扑

在网络通信时,为了保证低时延,常需要架设密集的基站。同样地,未来的网络接入也可以采用分布式的集中管理拓扑,如图7所示,黑色实心的点表示小范围内的管理者,可以负责探索周围的设备并连接,这个点称作中心点,中心点通过接入核心网实现广域的通信;白色的点表示被中心点管理的邻近设备,它通过中心点与其他设备通信。通过这种拓扑,节点或者局域网可以通过自组织的方式加入网络,具有良好的可扩展性。

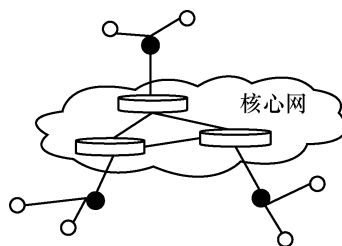


图7 网络拓扑

当设备被中心点发现并连接时,该设备被分配一个用于核心网通信的地址,由于设备可以移动,一个设备可以有多个地址。在地址中可添加应用标识字段,该字段用于为不同类型的应用提供差异化的网络服务,如自动驾驶应用需要低时延和高可靠、AR/VR应用需要低时延和高带宽等。中心点负责发现和管理地址,随着大数据和人工智能技术的成熟,未来网络可以基于这些技术在中心点进行合理的调度,包括路由、内容分配与堵塞控制、异常检测等。关于如何合理分配中心



点、是否需要冗余的信息支持移动通信等还需要进一步的研究。

3.2 其他功能特性

未来网络既应该满足基本的网络性能需要，又要能满足特定场景的特定需要，这需要网络具有虚拟化和分片的能力；为了保证低时延，网络节点可以具有内嵌的缓存能力，用于预缓存及行为预测，还可提供边缘计算能力；为了保证工业互联网等场景的精确控制，网络应该有针对多传感器的同步机制；同时，网络应具有可扩展性和内嵌的安全能力，如验证和加密传输，能够上下兼容，网络也可以利用区块链技术存储密钥等不可被篡改的共识信息。此外，网络应有一套完整的评价机制，包括如何评价网络的性能、功耗等。

为满足上述需要，未来网络在底层可利用 NFV (network function virtualization, 网络功能虚拟化) 技术，通过将实体网元的网络功能抽象以及软硬件的解耦，充分、灵活地共享 IT 资源，实现新业务的快速部署^[32]；在以太网层可利用 TSN (time sensitive network, 时间敏感网络)，保证确定性的时延和高占用率下内容的稳定传输^[33]；在 IP 层可利用 LISP (locator identifier separation protocol, 地址标识分离协议)，实现身份标识与位置表示的分离，提供移动性的服务^[34]；还可以利用 SDN (software defined networking, 软件定义网络^[32])，通过将控制平面与数据转发平面分离实现逻辑上的集中管控，同时提供多样的开放网络 API，利用数据分组的附加字段进行安全等级的标识，提供差异化的 QoS (quality of service, 服务质量) 保证。

4 结束语

本文从应用驱动的角度调研未来网络应该具有的特性。通过对车联网、远程医疗、工业互联网、AR/VR 和量子计算应用场景的描述，分析满足这些场景分别需要的网络性能，得出未来网络

的性能指标。不同场景需要网络提供的性能不同，未来网络应既能满足基本的网络性能需要，又能满足特定场景的特定需要。同时，为实现这些性能，提出了未来网络应该具有的功能和可能的网络架构。未来网络可以满足这些功能架构，也可以在保证性能的基础上进行创新。

参考文献：

- [1] ZHANG G Q, LI Y, LIN T. Caching in information centric networking: a survey[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(16): 3128-3141.
- [2] JACOBSON V, SMETTERS D K, THOMTON J D, et al. Networking named content[C]//The 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, 2009, New York, USA. New York: ACM Press, 2009: 1-12.
- [3] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 637-646.
- [4] 谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述[J]. *计算机学报*, 2012, 35(6): 1109-1119.
XIE G G, ZHANG Y J, LI Z Y, et al. A survey on future internet architecture[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(6): 1109-1119.
- [5] KELLY K. The inevitable: understanding the 12 technological forces that will shape our future[M]. New York: Viking, 2016.
- [6] 中国信息通信研究院. 车联网白皮书[R]. 2017.
CAICT. White paper of internet of vehicles[R]. 2017.
- [7] IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G concept white paper [S]. 2015.
- [8] 3GPP. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X Services(R15)[S]. 2017.
- [9] KIM S W, QIN B X, CHONG Z J, et al. Multivehicle cooperative driving using cooperative perception: design and experimental validation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 663-680.
- [10] CHOI J, VA V, GONZALEZ-PRELCIC N, et al. Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(12): 160-167.
- [11] 关于“车联网”的最强科普! [EB]. 2019.
About the strongest popular science of IoV[EB]. 2019.
- [12] SIMSEK M, AIJAZ A, DOHLER M, et al. 5G-enabled tactile internet[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(3): 460-473.
- [13] 李洁. 互联网汽车发展介绍及关键技术分析[J]. *电信科学*, 2016, 32(8): 34-38.
LI J. Introduction and critical technology analysis of internet of

- vehicle[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 34-38.
- [14] 牟岚, 金新政. 远程医疗发展现状综述[J]. 卫生软科学, 2012, 26(6):506-509.
- MOU L, JIN X Z. Summary of the development status of telemedicine[J]. Soft Science of Health, 2012, 26(6): 506-509.
- [15] SODAGARI S, BOZORGCHAMI B, AGHVAMI H. Technologies and challenges for cognitive radio enabled medical wireless body area networks[J]. IEEE Access, 2018(6): 29567-29586.
- [16] ETSI. Next Generation Protocols (NGP)[S]. 2019.
- [17] BASTUG E, BENNIS M, MEDARD M, et al. Toward interconnected virtual reality: opportunities, challenges and enablers[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(6): 110-117.
- [18] MEATIAN L. Hospital tests lag time for robotic surgery 1200 miles away from doctor[EB]. 2018.
- [19] 中国电子技术标准化研究院. 信息物理系统白皮书(2017)[R]. 2017.
- CESI. White paper on information physics systems(2017)[R]. 2017.
- [20] DRATH R, HORCH A. Industrie 4.0: Hit or hype?[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(2):56-58.
- [21] 工业互联网产业联盟. 工业互联网平台白皮书(2017)[R]. 2017.
- AII. White paper on industrial internet platform(2017)[R]. 2017.
- [22] 5GPP. White paper on factories-of-the-future vertical sector[S]. 2014.
- [23] ALJAZ A, SOORIYABANDARA M. The tactile internet for industries: a review[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 414-435.
- [24] 黄卫菊. IEEE 802.11ac 在智能电网自动化中的应用[J]. 电气应用, 2018, 37(12): 57-61.
- HUANG W J. Application of IEEE 802.11ac in smart grid automation[J]. Electro technical Application Journal, 2018, 37(12): 57-61.
- [25] 常洁, 王艺, 李洁, 等. 工业通信网络现有架构的梳理总结和未来运营商的发展策略[J]. 电信科学, 2017(11):129-139.
- CHANG J, WANG Y, LI J, et al. Summary of existing framework in industrial communication networks and future development strategies for communication operators[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 123-133.
- [26] SUKHMANI S, SADEGHI M, EROL-KANTARCI M, et al. Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile internet[J]. IEEE Multi Media, 2019, 26(1): 21-30.
- [27] SUN Y P, CHEN Z Y, TAO M X, et al. Communication, computing and caching for mobile VR delivery: modeling and trade-off[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018, May 20-24, Kansas City, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [28] YOU D, DOAN T V, TORRE R, et al. Fog computing as an enabler for immersive media: service scenarios and research opportunities[J]. IEEE Access, 2019(7): 65797-65810.
- [29] SCARLATO M, PERRAE C. Next generation architecture for real time multimedia applications[C]//2017 AEIT International Annual Conference, 2017, Sep 20-22, Cagliari, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [30] ELBAMBY M S, PERFECTO C, BENNIS M, et al. Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality[J]. IEEE Network, 2018(32): 78-84.
- [31] 阮利华. 量子计算和量子通信的发展研究及应用[J]. 信息系统工程, 2018(5): 153-155, 158.
- RUAN L H. Development and application of quantum computing and quantum communication[J]. CC News, 2018(5): 153-155, 158.
- [32] 蒋林涛. SDN/NFV 与网络技术的发展方向[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(6):2-6.
- JIANG L T. Development directions of SDN/NFV and network technologies[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(6): 2-6.
- [33] DITZEL G, DIDIER P. Time sensitive network (TSN) protocols and use in EtherNet/IP systems[C]//2015 ODVA Industry Conference, 2015, Dec 2, Frisco, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-24.
- [34] IETF. The locator / ID separation protocol (LISP)[S]. 2013.

[作者简介]



张亚文(1997-), 女, 中国科学院计算技术研究所硕士生, 主要研究方向为未来网络、网络体系结构。



王焱(1975-), 女, 博士, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 主要研究方向为未来网络、网络安全。

王凌豪(1996-), 男, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为未来网络、网络体系结构。

张瀚文(1981-), 女, 博士, 中国科学院计算技术研究所副研究员, 主要研究方向为区块链、网络体系结构。

张玉军(1976-), 男, 博士, 中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师, 中国科学院大学岗位教授, 主要研究方向为计算机网络。