



专题：先进数据网络

未来网络场景及需求分析综述

戴彬¹, 曹园园¹, 莫益军²

(1. 华中科技大学电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074;
2. 华中科技大学计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 面对现今网络在可扩展性、移动性、服务质量保障、管理性等方面的严峻挑战, 通过对未来网络应用场景的分析, 归纳总结了未来网络的关键能力需求, 提出了未来网络的主要功能和性能指标。最后, 对未来网络的发展演化趋势进行了展望。

关键词: 未来网络; 应用场景; 功能需求; 性能指标

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019197

A survey on future networks: application scenarios and requirements analysis

DAI Bin¹, CAO Yuanyuan¹, MO Yijun²

1. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Faced with the severe challenges of today's network in terms of scalability, mobility, QoS guarantee and manageability, the essential capability requirements of future networks were summarized by analyzing application scenarios of future networks, and the key functional requirements and performance indicators of future networks were proposed. Finally, the development trend of the future networks was forecasted.

Key words: future network, application scenario, functional requirement, performance indicator

1 引言

随着现有网络的应用规模不断扩大, 复杂度持续增长, 传统互联网在可扩展性、移动性、服务质量、管理性、灵活性等方面已经逐渐暴露出严重问题, 难以满足经济与社会发展对网络发展

的迫切需求。主要存在以下几方面的问题。

- 可扩展性问题: 在现有的互联网体系架构下, 网络流量被逐步汇集到核心骨干网络, 会导致核心骨干网络的压力过大, 已严重影响到互联网的可扩展性。
- 移动性问题: 互联网的 IP (internet protocol,

收稿日期: 2019-06-01; 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.2018YFB1800103)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1800103)



网络协议)地址设计并没有考虑到终端移动性的要求,而目前补丁式解决方案导致IP协议栈越来越冗杂,处理效率低下。

- 服务质量问题:随着互联网新业态的不断涌现,网络的动态性显著增加,粗粒度的网络服务质量保障机制已无法保障复杂应用场景下的服务质量,严重影响了互联网的用户体验。
- 管理性问题:目前互联网的管控主要依赖于人工配置,但随着新兴互联网业务的不断涌现,网络日趋异构化、规模化、复杂化,人为管控的方式已难以适应网络的高速发展。

针对当前网络暴露出的问题,未来网络的发展需要向支持广泛连接、全面感知、高质量服务、智能管控的新型网络的方向进化。未来网络应主动感知各类连接,智能分析网络运行数据,支持网络的快速迭代,这将成为未来网络发展的方向^[1]。

本文将会从未来网络的应用场景、功能需求和性能需求3个方面入手进行阐述和分析,进一步指出未来网络的演进趋势,从而为未来网络的框架设计提供依据。

2 应用场景

现如今互联网已经逐渐融入社会的各个领域,随着经济、政治、生产、教育、医疗等各类领域的发展及应用规模的扩张,新兴应用场景不断涌现,对未来网络提出了新的需求。

未来网络的应用场景可以分为消费类应用和

生产类应用。在消费类应用场景中,未来网络将为普通用户提供消费互联网服务,网络需要具备可扩展性、易管理性、安全性、动态性,网络需要具备智慧化能力,满足各类用户和各类应用的服务质量需求。其中,消费类应用的典型场景包括AR/VR(augmented reality/virtual reality,增强现实/虚拟现实)、车联网、远程医疗等。在生产类应用场景中,未来网络将为各类企业提供产业互联网服务,网络需要具备大带宽、大连接、高可靠、低时延。生产类应用的典型场景包括智能电网、工业互联网、基因工程等。未来应用场景对网络的需求如图1所示。

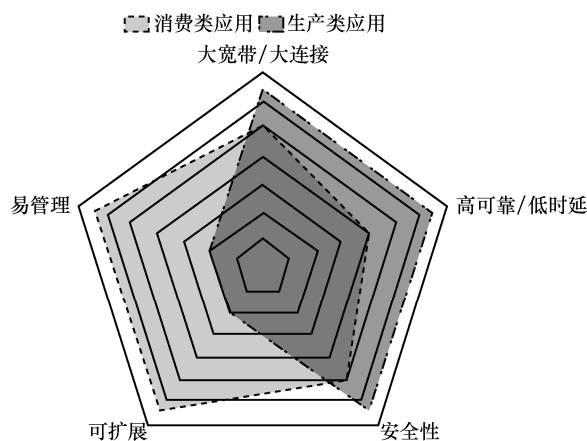


图1 未来应用场景对网络的需求

2.1 消费类应用场景

2.1.1 AR/VR

AR/VR应用可根据用户和环境的交互程度分为两大类^[2]:弱交互式AR/VR和强交互式AR/VR。根据强弱交互的不同,AR/VR应用在不同阶段对网络的需求见表1和表2。

表1 弱交互式AR/VR需求

	入门级 AR/VR	高级 AR/VR	终极 AR/VR
数据率	40 Mbit/s (2D) /63 Mbit/s (3D)	340 Mbit/s	2.34 Gbit/s
RTT	30 ms (2D) /20 ms (3D)	20 ms	10 ms
分组丢失率	2.40×10^{-5}	10^{-6}	10^{-6}
实现时间	约 2020 年	约 2025 年	约 2030 年

表2 强交互式 AR/VR 需求

	入门级 AR/VR	先进 AR/VR
数据率	120 Mbit/s (2D) / 200 Mbit/s (3D)	1.40 Gbit/s
RTT	10 ms	5 ms
分组丢失率	10^{-6}	10^{-6}
实现时间	约 2020 年	约 2025 年

2.1.2 车联网

车联网通过移动互联网实现车辆信息的交换,包括 V2V (vehicle-to-vehicle, 车与车)、V2I (vehicle-to-infrastructure, 车与基础设施)、V2N (vehicle-to-network, 车与互联网)的信息交互^[3]。车联网的应用场景包括很多方面:辅助驾驶、道路安全保障、节能减排、辅助交通管理等^[4]。车联网是未来汽车产业升级转型与交通管理信息技术变革的重要支撑和承载网络。当前汽车产业正在从辅助驾驶向半自动驾驶甚至全自动驾驶技术演进,需要实现包括编队行驶、自动超车、透视/鸟瞰、防碰撞等在内的关键功能,对未来网络提出了高可靠、低时延和高带宽的需求^[5]。车联网应用场景的网络需求见表3。

表3 车联网应用场景的网络需求

	时延	分组丢失率	带宽	可靠性
自动超车	10 ms	10^{-5}	-	>99%
防碰撞	10 ms	10^{-5}	-	>99%
编队行驶	10 ms	10^{-5}	-	>99%
透视/鸟瞰	50 ms	-	40 Mbit/s	95%

2.1.3 远程医疗

远程医疗^[6]是指医生与患者分别处于不同的地理位置,医生借助于视频、音频、图像、触觉等临场感的装备与技术远程参与和开展问诊、手术等医疗的过程。远程医疗可以解决病患在复杂环境下,包括海上环境、水下环境、太空环境、战场环境等的医疗诊治难题,但复杂环境也对网络传输提出了挑战。在远程手术等应用场景下,

要求网络数据传输实时化,传输时延小于 5 ms,消除感觉反馈和远程操作指令的时差阻滞。

2.2 生产类应用场景

2.2.1 智能电网

智能电网带来了发电和配电系统的巨大转变。一方面,通过在发电和配电中使用先进的传感器,电网运营商可以监控系统的健康状况,检测故障并更快地恢复电力传输;另一方面,来自电网的最新数据能够使操作人员更深入地了解电力设施的性能,使其能更快地对发电组合、极端天气或安全问题给予响应^[7]。当前智能电网的主要应用场景包括:互连的燃气表和水表、分布式能源、智能电动汽车充电、实时数据管理等。

随着电网现代化水平的日益提高,智能电网中末端传感设备的部署会越来越广泛和密集,分布式能源对于智能电网的管控、快速响应提出了更为严苛的同步实时性要求。对未来传输网络提出了更高的要求^[8]:每户家庭的电网传输带宽大于 1 kbit/s,连接密度大于 1 000 户/km²;主变电站与控制中心之间端到端时延为毫秒级,支持无缝故障转移;端到端分组丢失率低于 10^{-9} ;可靠性要求大于 99.999%。

2.2.2 工业互联网

工业互联网的目标是实现更高水平的运营效率、生产力以及自动化。工业互联网的关键基本原则包括云/内联网、数据集成、灵活适应、智能自组织、互操作性、制造流程优化、安全通信和面向服务。网络作为工业互联网的重要基础支撑,涉及的关键技术包括移动计算、云计算、大数据和物联网。工业互联网的主要应用场景包括智能工厂和制造、智能产品、智慧城市等^[9]。工业互联网对未来网络的需求包括:网络传输时延小于 5 ms;网络节点能耗极低,电池寿命大于 10 年;海量终端连接,每个 AP 连接超过 30 万台终端;网络可靠性超过 99.99%。

2.2.3 基因工程

人类 DNA 由大约 30 亿个碱基对组成,一个



人的基因组数据量约为 100 GB^[10]。自从世纪之交人类基因组计划完成以来，基因组序列数据量出现了前所未有的激增，随着基因组测序的成本越来越低，测序频率越来越高，这些数据呈指数增长。其中 NGS（next generation sequencing，下一代基因组测序）技术在单次检测运行中会产生高达 1 PB 的数据^[11]，这些数据需要在不同位置之间高效地进行传输，生物学家依靠云计算及相关服务来交换、处理和分析这些数据。此外，基因组测序数据传输的安全和隐私保护也非常重要。基因组测序数据直接关系到个人隐私，必须确保数据在传输过程中不会泄露个人隐私和被篡改。因此，基因组测序的海量数据传输对于未来网络的需求包括：高效的网络传输协议，提升长肥网络的传输效率；提供端到端的隐私保护能力。

随着互联网与经济、政治、生产、教育、医疗等领域的深度融合，在互联网与传统行业的融合发展过程中，工业制造、能源、经济、医疗、交通等领域对网络的实时性、服务等级等方面提出了一系列新的挑战；此外，新的网络需求也越来越多样化和个性化，如物联网、车联网、工业互联网、虚拟现实网络等发展带来的新业务形态不断涌现。然而，仅仅关注通信的传统网络不能满足这些应用场景的需求，因此迫切需要技术先进、自主可控、安全可信的网络体系与核心设备。未来网络不仅应具备大带宽、大连接、高可靠、低时延等特性，而且应具备智能化的特点，能够更灵活地使用网络资源，具备根据不同的业务需求提供个性化服务的能力。

3 未来网络需求分析

3.1 功能需求

综合未来网络应用场景的分析，未来网络应满足以下 3 个方面的网络能力要求。

- 连接：未来网络应保证各种应用场景下的海量终端（包括人、物、服务、计算）能

够接入网络进行通信。

- 感知：未来网络应具备网络感知能力，可以主动地感知各类接入终端，感知网络状态和用户需求等，再依据网络当前的系统资源（包括带宽、计算、存储等）智能地配置网络资源，按需提供服务。
- 计算：未来网络应由“以数据为中心”向“以计算为中心”转变，网络的智慧化需要计算能力作为基础支撑，通过网络中无处不在的计算能力，实现网络的智能化、自主化和自动化。

为了满足这 3 个方面的网络能力要求，未来网络应具备接入同步功能、高效传输协议、确定性服务功能、智能路由功能、自主管理功能、网络测量功能、业务开放功能等功能指标。未来网络能力需求关系如图 2 所示。

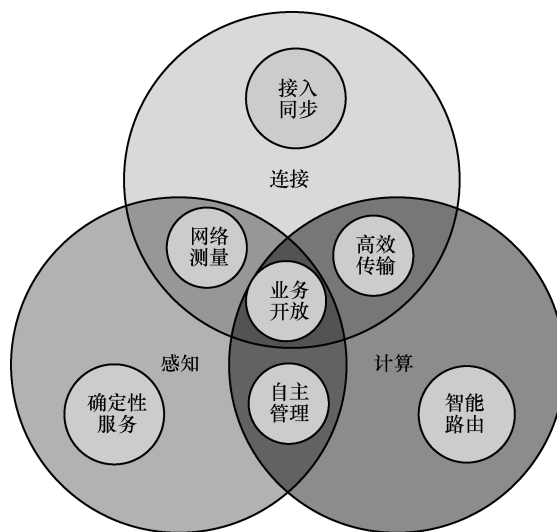


图 2 未来网络能力需求关系

3.1.1 接入同步功能

海量接入的物联网设备如何实现时钟的一致性未来网络面临的重大挑战，特别是有着低功耗需求的物联网。如果设备的时钟与网络中其他设备的时钟不同步，会导致消息丢失，甚至与其他设备发送的消息发生冲突，恢复同步也会带来能量损耗。除此之外，接入物联网设备的失步还

会造成网络中存在大量过期消息,浪费网络资源和能量;对于室内定位等实时性敏感的应用场景,协同设备间的快速同步能力至关重要;时钟的强同步性对于网络安全(如交换密钥的反发现和欺骗)也十分重要^[12]。

因此,为了保持未来物联网的高效运行,必须要解决海量接入物联网设备间的同步管理问题,以满足物联网各种应用场景的需求。

3.1.2 高效传输协议

传统互联网 IP 地址的固定分组头设计存在很大的局限性,严重制约了互联网的信息传输效率,在超轻量级信息传输中会造成带宽资源的严重浪费^[13]。未来网络的应用场景可能要求网络地址将不仅仅用来标识位置和身份,还需要标识网络功能、用户需求、应用类型等更多内容,这会造成更大的带宽资源浪费。为了有效地支持未来海量、异构通信实体的互联需求,灵活可变长的寻址名字空间及字段表示方法是未来网络发展的需求之一。

针对由于 IP 地址的二重表达导致的移动 IP 协议冗余和处理效率低下的问题,未来网络需要实现位置和标识分离的网络通信机制,根据网络通信机制进行相应的标识与路由的转换,既实现主机多宿主等网络功能,又不会导致核心路由表的扩张,为网络移动性提供支撑。

3.1.3 确定性服务功能

现有网络的分层设计原则中,上层用户和底层网络之间缺乏有效的沟通机制,导致用户无法及时准确地感知网络的状态,比如网络的转发路径、网络拥塞程度、网络时延等,网络也无法感知用户的具体服务需求,比如用户的时延容忍门限、带宽需求等,网络难以根据用户和业务的需求提供确定性的服务保障。因此,未来网络需要增加用户和网络接口,通过用户网络接口,用户可以及时准确地感知网络状态,定义网络功能需求,网络可以理解业务和用户传递的需求特征,

更好地为 AR/VR、自动驾驶等新兴业务提供确定性的高品质服务^[14]。

3.1.4 智能路由功能

由于未来网络通信主体的多样性、路由标识的多样性、确定性服务的需求,从网络资源合理配置的需求出发,路由的智能化必然是未来网络的基本要求。智能路由需要关注如何将网络路由问题表述为一个机器学习过程^[15-16],解决智能路由问题可以采用监督学习、强化学习^[17-18]及非监督学习技术。监督学习主要通过带标签的数据来对机器进行训练,从而更高概率地由网络信息输入预测出合理的路由策略;强化学习可以在一个未知的网络中通过一个智能体不断地与外界环境交互、熟悉环境,从而做出正确的抉择;通过智能路由策略实现更优的通信主体标识路由控制,从而优化网络资源的配置。同时,智能路由功能也对未来网络的计算能力提出了更高的要求。

3.1.5 自主管理功能

随着网络业务的快速迭代,网络的管理(包括配置、监视和控制网络元素或服务)日益复杂,面对网络设备的海量运维数据,网络管理的智能化、自主化和自动化已经成为提升网络运维效率的必经途径。未来网络的管理系统(包括网络和服务)应由异构的组件组成,每个组件都具有一定程度的本地自主功能^[19],可以自主反馈丰富的使用数据,管理系统根据服务使用和资源利用率的变化通过交互操作逐步改进管理策略,指导快速的服务创新,使企业应用程序管理系统能够重新配置软件组件,从而更好地使应用程序适应当前的网络状况,更有效地管理与复杂事务有关的业务。

3.1.6 网络测量功能

目前网络性能测量^[20-22]基本都依赖带外信令测量的方法,带外信令数据和网络业务数据流的转发路径有可能不完全一致,使得网络测量的结果并不能完全准确反映实际的业务数据流的转发



路径和网络性能。同时，如果带外信令测量数据的收集频率低，则网络测量的实时性差；反之则可能影响网络中的业务数据流的转发。已有的网络测量方法缺乏对网络全面、实时、准确的感知能力，会对网络的自主管理、智能路由、确定性服务等功能产生负面影响。为保障各类业务的性能指标，未来网络必须具备精准的网络性能指标测量和诊断的能力，运用主动测量、被动测量、混合测量等方法^[23]，支持各类接入终端流量、多样化的业务流量、未知特征的网络流量的精准测量。

3.1.7 业务开放功能

未来网络接入终端、业务形态、服务需求的多样化，给网络架构、管理模式和业务运营等方面带来了新的挑战。现有互联网结构技术耦合度高、业务流程固化、系统开放程度低，导致新技术、新模式和新业务的部署周期长、成本高、不灵活^[24]。未来网络的业务系统、业务管理和业务运营应开放更多的能力，提供开放式接口，实现海量异构终端的接入，各类网络资源的接入（包括计算能力、网络功能等），从而简化网络管理和控制的复杂度，提升新业务部署运营的效率。

3.2 性能指标

未来网络可分为消费类的应用和生产类的应用，消费类应用需求为易扩展、易管理、安全性和动态性；生产类应用需求为大带宽、大连接、高可靠、低时延、智能性。基于这些需求，可以从连接类指标（如带宽速率指标、时延抖动指标等）、业务类指标（如同步指标、能耗指标、SLA（service-level agreement，服务等级协议）指标等）、弹性和可靠性指标（如连接率、加权效率等）来对未来网络进行性能需求分析。

3.2.1 连接类指标

（1）带宽速率指标

带宽速率描述了连接节点之间传递数据量的速率，受几方面因素的制约^[25]。例如，TCP 的流

量控制算法可以限制流量的吞吐量，以避免拥塞伙伴节点。由于该速率由拥塞窗口预定义，其与 RTT（round trip time，往返时延）成反比，给定当前窗口大小 $cnwd$ 和 RTT，可以使用式（1）估计当前网络带宽速率 B ：

$$B = cnwd / RTT \quad (1)$$

另外，基于时间单位测量带宽速率的另一个度量是数据传输时间，定义为从第一个数据段开始发送到最后一个数据段到达客户端结束的时间间隔。

（2）连接密度指标

连接密度包括连接数密度和流量密度两个层面，连接数密度是指单位面积上支持的在线设备总和，流量密度是指单位面积区域内的总流量。比如 5G 网络需要支持 100 万/km² 的连接数密度和数十 Tbit/(s·km²) 的流量密度^[22]。

（3）时延抖动指标

用于评估连接质量和响应性的 KPI（key performance indicator，关键性能指标）包括其时延的时间度量，时延长则严重影响连接的性能，衡量网络时延的指标具体包括往返时延 RTT 和 CST（connection setup time，连接建立时间）^[26]。在网络上连续传输的数据分组即便使用相同的路径，也会有不同的时延，变化的时延被称作抖动，抖动大多起源于网络中的队列或缓冲，抖动会导致分组丢失和网络拥塞，所呈现的用户体验形式可能为用户正在观看视频并且画面变成像素化。

（4）移动性指标

移动性指标是指连接在满足一定性能要求（包括网络时延、吞吐量等）时，收发双方间的最大相对移动速度。

3.2.2 业务类指标

（1）同步指标

时间同步是将共同的时间参考基准分配至通信网的各实时时钟，网络中所有相关联的节点访问关于时间的信息并共享一个共同的时标，这些

共同的时标包括 UTC (协调世界时)、国际原子时 (TAI)、协调世界时+偏差 (如本地时间)、GPS 时间、PTP 时间和本地任意时间等, 衡量时间同步的性能主要为时间精度、时间稳定度与守时精度。

网络的节点需要交互数据实现通信、管理、系统的测量和控制功能, 时间同步是交互数据的必要项, 尤其实时感知功能对时间的要求更高, 若网络中各个模块的时间出现偏差, 会导致数据时延甚至冲突。不同业务场景对时间同步的精度要求不同, 例如电信通信领域的同步精度一般要求在 ms 甚至 μs 级别; 电力系统要求同步精度至少为 $1\ \mu\text{s}$ ^[27]; 运动控制 (如飞行控制) 因不同的安全考虑或控制精确性的要求, 同步精度通常需要达到 100 ns 以下; 高频测试的精度要求达到 1 ns^[28]。

(2) 能耗指标

能耗指标是反映能源消耗量的数据指标, 用来描述能源消耗量的大小和种类^[29]。通信网络业务流量与能耗的比值为通信网络 EE (energy efficiency, 能源效率), 通信网络 EE 指标进一步分解为 TEEE (telecommunication equipment energy efficiency, 通信设备能效) 和 IEE (infrastructure energy efficiency, 基础设施能效), 可使用式 (2) 计算。

$$EE = TEEE \times IEE \quad (2)$$

(3) SLA 指标

SLA (网络服务等级) 指标可以从时间、空间和可用性 3 个维度来评估^[30]。

时间: 可以根据一段时间内网络性能的变化来评估其稳定性, 高性能的网络应当提供平稳的服务性能。比如, 服务等级高的网络文件传输服务的最佳和最差传输速度之间只存在很小的差异, 方差越小, 则表示网络流量高峰时段的影响越小, 最终用户性能的保障越好。

空间: 空间一致性也是衡量 SLA 的关键指标, 即确保所有地理位置的用户所得到的网络服务的性能一致。通常, 更接近服务提供者的用户得到

的网络服务更好, 而距离较远路径的用户则会得到较差的服务体验, SLA 需要确保路径较远的用户也能获得良好的网络服务。

可用性: 网络性能最重要的因素是网络的可用性, 它表示网络在任何给定时刻成功地将数据从 A 点转移到 B 点的能力。比如, 目前网络宽带连接的平均可用性为 97.97%。相比之下, 高性能覆盖网络的整体可用性超过 99.9%。

3.2.3 弹性和可靠性指标

未来网络的弹性和可靠性可以采用连接率、加权效率和重传率 3 个指标来评估^[31]。

(1) 连接率

用图论表示网络拓扑结构, 通过计算连接率来测量网络性能, 网络中最大连通子图 (即最大连通分量) 的大小可以反映网络中有多少节点可以相互传输物质、信息、能量或提供服务。连接率为相互连接的节点对的数量与所有节点对的数量之比, 如式 (3) 所示:

$$C_r = \frac{2n_{cp}}{N(N-1)} \times 100\% \quad (3)$$

其中, n_{cp} 表示相互连接的节点对的数量, $N(N-1)/2$ 表示所有节点对的数量。全局耦合网络的连接率等于 1。

(2) 加权效率

用图论表示网络拓扑结构, 加权效率考虑了边的权重对网络性能的影响, 在加权网络中, 最短路径是一对节点间所有路径中权重之和最小的路径。例如在权重代表传输容量的网络中, 权重越大意味着路由越宽和越快, 所以可以用权重的倒数来计算最短加权路径。用所有节点对之间的最短加权路径构成方阵, 加权效率是该方阵中所有值的平均值。

(3) 重传率

可靠性可以通过检测在传输过程中由分组丢失导致的重传来评估, 重传的常见原因是网络拥塞, 每次重传都会导致额外的时延。流的 RR



表 4 未来网络性能需求

未来网络 场景	连接类指标				弹性可靠性指标	业务类指标
	带宽速率	数据量密度	连接数密度	移动性	可靠性	往返时间
购物中心 (高密度)	300 Mbit/s	170 Gbit/(s·km ²) 5.6 TB/h	0.1/m ²	低	95%	5 ms
车载 AR/VR	100 Mbit/s~ 2.5Gbit/s	60 Gbit/(s·km ²) 53 GB/(个·h)	-	<350 km/h	95%	10 ms E2E
驾驶安全类	100 kbit/s	0.1 Gbit/(s·km ²) (高速) 0.01 Gbit/(s·km ²)	1 000/km ² (高速) 100/km ²	120 km/h	99.999%	5 ms E2E
全息通信	2~10 Tbit/s	-	-	-	-	1 ms
智能导航	>20 Mbit/s	-	-	-	-	-
工业互联网	1~10 Gbit/s	-	-	-	99.99%	5 ms
智能电网	>100 kbit/s	-	>1 000/km ²	-	99.999%	1 ms

(retransmission rate, 重传率) 为重传的段的数量 r 与发送的段的总数 t 的比值, 如式 (4) 所示:

$$RR = \frac{r}{t} \quad (4)$$

3.3 未来网络性能需求

未来网络性能需求见表 4。

4 未来网络演进趋势

(1) 超大容量与超低时延

未来网络必然对带宽和时延要求更高, 呈现出超大带宽/吞吐量 (>1 Tbit/(s·人)) 与超低时延 (<1 ms) 的趋势^[32]。未来网络需要支持 1~10 Gbit/s 的用户体验速率、100 万/km² 的连接数密度、毫秒级的端到端时延、100 Tbit/(s·km²) 的流量密度和用户 500 km/h 的移动速度。未来网络应采用更高效的传输协议和更智能的路由技术来提升网络容量, 减小网络时延。

(2) 超大规模连接

未来网络的另一个演进趋势是超大规模连接 (大于万亿连接)。未来网络正在由“人人互联”向“万物互联”演进, 终端数量将会达到空前的规模, 其接入的应用程序也将数以百万计^[33]。未来网络体系架构中应当更多地设置具有灵活性和

可扩展性的接口, 向着简单开放的方向发展, 满足大规模的用户需求, 保证新的应用程序以及新的网络节点可以在未来网络架构上直接部署运行。

(3) 超高可靠性与安全性

提升网络的可靠性与安全性是未来网络研究的关键, 需要解决由业务场景不同、网络接入方式不同、终端能力参差不齐、协议多种多样和缺乏统一标准等因素所导致的安全漏洞问题, 只有确保了用户的网络安全, 未来网络才能有更大的发展市场。要提升未来网络的安全性与可靠性, 还需要从网络架构设计上提供更好的保障机制, 如采用去中心化的网络结构和内生的安全机制等^[34]。

(4) 超强计算力

未来网络的智能路由技术、自主管理功能、网络测量和确定性服务等能力的实现都依赖于对海量网络数据的快速精准分析, 必须有超强的网络计算能力作为支撑。网络和计算能力的融合会成为未来网络发展的趋势, 传统网络单纯的转发模式逐步向未来网络的“计算-转发”模式转变, 网络和计算的一体化将为未来网络提供无处不在的计算和智能化服务的能力。

5 结束语

当前互联网的体系架构在一定程度上陷入了僵化。随着网络规模的不断扩大,未来网络所面临的一大挑战将是数以百亿计的接入需求、海量内容的可靠传输以及高服务质量保证与网络基础设施所能提供的各种资源之间的矛盾。本文分别介绍和分析了未来网络的应用场景、功能需求和性能需求,归纳了未来网络的指标需求,并进一步指出未来网络的演进趋势,为未来网络的框架设计提供参考。

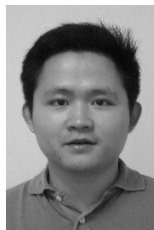
参考文献:

- [1] 孙远芳, 段翠华, 张培颖. 大数据驱动的未来网络: 体系架构与应用场景[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017(5): 25-30.
SUN Y F, DUAN C H, ZHANG P Y. Big data driven future network: architecture and application scenario[J]. Journal of China Academy of Electronics Science, 2017(5): 25-30.
- [2] MAIMONE A, GEORGIU A, KOLLIN J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 8501-8516.
- [3] 朱文平, 贾斌. 车联网发展现状及未来展望[J]. 电子技术与软件工程, 2018, 132(10): 32.
ZHU W P, JIA B. Development status and future prospects of vehicle networking[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2018, 132(10): 32.
- [4] 陈山枝, 胡金玲, 时岩, 等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018, 34(4): 1-11.
CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. Technologies, standards and applications of LTE-V2X for vehicular networks[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(4): 1-11.
- [5] 5G-PPP white paper on automotive vertical sector[R]. 2015.
- [6] DEFRE G M. Telemedicine in rehabilitation[J]. Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America, 2019, 30(2): 473-483.
- [7] 刘建明, 赵子岩, 季翔. 物联网技术在电力输配电系统中的研究与应用[J]. 物联网学报, 2018, 2(1): 88-102.
LIU J M, ZHAO Z Y, JI X. Research and application of internet of things in power transmission and distribution system[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(1): 88-102.
- [8] Modernizing the grid to make it more resilient and reliable through technology[EB]. 2018.
- [9] 李洁, 张东, 常洁, 等. 面向智能制造的工业连接现状及关键技术分析[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 146-153.
LI J, ZHANG D, CHANG J, et al. Situation description and critical technology analysis for industrial connection of intelligent manufacturing[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 146-153.
- [10] O'DRISCOLL A, DAUGELAITE J, SLEATOR R D. 'Big data', Hadoop and cloud computing in genomics[J]. Journal of Bio-medical Informatics, 2013, 46(5): 774-781.
- [11] LANGMEAD B, NELLORE A. Cloud computing for genomic data analysis and collaboration[J]. Nature Reviews Genetics, 2018, 19(4): 208.
- [12] BURNS P. 5 reasons you should care about synchronizing the IoT[EB]. 2017.
- [13] YUAN H, CROWLEY P. Reliably scalable name prefix lookup[C]//Eleventh ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking & Communications Systems, May 7-8, 2015, Oakland, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 111-121.
- [14] 刘韵洁, 张娇, 黄韬, 等. 面向服务定制的未来网络架构[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(1): 1-8.
LIU Y J, ZHANG J, HUANG T, et al. Future network architecture for service-oriented customization[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2018, 30(1): 1-8.
- [15] KATO N, FADLULLAH Z M, MAO B, et al. The deep learning vision for heterogeneous network traffic control: proposal, challenges and future perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(3): 146-153.
- [16] TANG F, MAO B, FADLULLAH Z M, et al. On removing routing protocol from future wireless networks: a real-time deep learning approach for intelligent traffic control[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(1): 154-160.
- [17] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. Nature, 2015, 518(7540): 529.
- [18] 丁瑞金, 高飞飞, 邢玲. 基于深度强化学习的物联网智能路由策略[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 56-63.
DING R J, GAO F F, XING L. IoT intelligent routing strategy based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Internet of Things, 2019, 3(2): 56-63.
- [19] SERRANO M, DAVY S, JOHNSON M, et al. Review and designs of federated management in future internet architectures[M]. New York: ACM Press, 2011.
- [20] IETF. IPv6 performance and diagnostic metrics (PDM) destination option: RFC 8250[S]. 2017.
- [21] LI Y, KIM C. FlowRadar: a better NetFlow for data centers[C]//13th USENIX Conference on Networked Systems Design & Implementation, March 16-18, 2016, Santa Clara, CA, USA. New York: ACM Press, 2016.
- [22] KIM C, SIVARAMAN A, KATTA N, et al. In-band network telemetry via programmable dataplanes[C]//ACM SIGCOMM, August 18-21, 2015, London, UK. New York: ACM Press, 2015.
- [23] IETF. Active and passive metrics and methods (with hybrid



- types in-between): RFC 7799[S]. 2016.
- [24] 王计艳, 王晓周, 吴倩, 等. 面向 NB-IoT 的核心网业务模型和组网方案[J]. 电信科学, 2017, 33(4): 148-154.
- WANG J Y, WANG X Z, WU Q, et al. Core network service model and networking scheme oriented NB-IoT[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(4): 148-154.
- [25] BRZOZA P. Key performance indicators of TCP flows[J]. Network Architectures and Services, 2018(9).
- [26] TRIPATHI P S M, PRASAD R. Spectrum for 5G services[J]. Wireless Personal Communications, 2018(3): 1-17.
- [27] GUO H, CROSSLEY P. Design of a time synchronization system based on GPS and IEEE 1588 for transmission substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2091-2100.
- [28] 李培基, 李卫, 朱祥维, 等. 网络时间同步协议综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(3): 35-43.
- LI P J, LI W, ZHU X W, et al. Overview of network time synchronization protocol[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(3): 35-43.
- [29] 杨万辉. 通信网络能耗分析与节能技术应用[J]. 通讯世界, 2019, 26(3): 38-39.
- YANG W H. Communication network energy consumption analysis and energy-saving technology application [J]. Communication World, 2019, 26(3): 38-39.
- [30] YARDEN H. SaaS acceleration: what exactly is “good” internet performance?[EB]. 2019.
- [31] PAN X, WANG H X, ADRIANA B L. Resilience of and recovery strategies for weighted networks[J]. PloS One, 2018, 13(9).
- [32] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
- ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [33] 谭建荣. 制造业与互联网融合的趋势和实践[J]. 物联网学报, 2018, 2(4):1-4.
- TAN J R. Trends and practices in the integration of manufacturing and the internet[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(4): 1-4.
- [34] 方滨兴. 定义网络空间安全[J]. 网络与信息安全学报, 2018, 4(1): 1-5.
- FANG B X. Define cyberspace security[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2018, 4(1): 1-5.

[作者简介]



戴彬 (1977-), 男, 博士, 华中科技大学电子信息与通信学院副教授, 主要研究方向为智能路由、边缘计算。



曹园园 (1996-), 女, 华中科技大学电子信息与通信学院硕士生, 主要研究方向为机器学习、SDN。



莫益军 (1976-), 男, 博士, 华中科技大学计算机科学与技术学院副教授, 主要研究方向为机器学习、网络优化。