

# 面向 6G 的触觉互联网关键技术 技术与挑战

## Key Technologies and Challenges of 6G-Oriented Tactile Internet

尤子硕 /YOU Zishuo, 李强 /LI Qiang, 唐冰 /TANG Bing, 葛晓虎 /GE Xiaohu

(华中科技大学, 中国 武汉 430074)

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)



**摘要:** 为了顺应 6G 网络发展趋势, 围绕触觉互联网 (TI) 超低时延、超高可靠的关键性能需求, 从网络架构、信息传输、资源管理 3 个层面系统性地提出了 TI 关键使能技术框架。在网络架构方面, 提出基于软件定义网络 (SDN) / 网络功能虚拟化 (NFV) 和人工智能 (AI) 赋能的新型网络架构; 在信息传输方面, 提出采用多模态通信增强沉浸体验, 并利用语义通信促进智能体间的达意通信; 在资源管理方面, 提出通过通信 - 计算 - 存储多维资源融合调度来提高网络服务承载能力。最后, 探讨了 TI 在发展和应用中存在的问题、挑战以及可能的解决思路。

**关键词:** 触觉互联网; 网络架构; 多模态通信; 语义通信; 通信 - 计算 - 存储融合调度

**Abstract:** Following the development trend of 6G networks and focusing on the key performance requirements of the tactile Internet (TI) for ultra-low latency and ultra-high reliability, TI's key enabling technology framework is systematically proposed from three levels including network architecture, information transmission, and resource management. In terms of network architecture, a new network architecture based on software defined-network (SDN)/network function virtualization (NFV) and artificial intelligence (AI) is proposed. In terms of information transmission, it is proposed to use multi-modal communication to enhance the immersive experience, and to use semantic communication to promote idea-passing communication between agents. In terms of resource management, it is proposed to improve the carrying capacity of network services through the integration of communication-computing-caching multi-dimensional resource scheduling. Finally, the problems, challenges, and possible solutions in TI's development and application are discussed.

**Keywords:** tactile Internet; network architecture; multimodal communication; semantic communication; communication-computing-caching fusion scheduling

DOI: 10.12142/ZTETJ.202106004

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20211208.0943.006.html>

网络出版日期: 2021-12-09

收稿日期: 2021-11-10

随着智能终端设备的普及与移动高清视频、虚拟现实 (VR) / 增强现实 (AR) 等业务的不断涌现, 全球移动业务数据流量呈爆炸式增长, 预

计 10 年后将达到 5G 网络的极限。与此同时, 5G 网络在数据传输速率、覆盖范围、接入密度等方面面临瓶颈, 无法充分满足车联网、工业互联网、远程医疗、远程教育等新兴业务的发展需求。为了进一步打破现实世界和虚拟世界的界限, 缩小现实世界与数字世界的鸿沟, 全球主要国家和经济

体已启动 6G 的研究探索。6G 将极大满足人与人、人与物、人与环境之间的沟通交互需求, 提供不受时间、空间限制的完全沉浸化交互体验<sup>[1]</sup>。这将有助于构建一个平行于现实世界的开放数字虚拟世界, 促进人类社会的数字化转型<sup>[2]</sup>。

6G 时代新技术的应用, 使得实时

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61971461); 湖北省重点研发项目 (2020BAA002); 湖北省重点研发项目 (2021BAA015)

传输触觉控制信息的触觉互联网 (TI) 成为可能。区别于传统网络信息传输, TI 通过对触觉控制信息的传输和反馈来进行精细的动作控制, 通过与实际或虚拟的物体进行远程实时交互来实现“技能传输”。英国咨询公司 IDTechEx 的报告显示: 触觉反馈技术市场正呈指数级增长, 预计到 2025 年市场规模将接近 50 亿美元。此外, TI 技术将使 VR/AR 更具有沉浸感, 感官互联预期将成为未来主流的通信方式。这将为移动通信、制造业、医疗健康等新兴行业的发展带来更多、更大的市场机遇。

目前, TI 作为 B5G/6G 的关键应用, 已经引起学术界和工业界的广泛关注。国际电信联盟 (ITU) 和电气与电子工程师协会 (IEEE) 等国际标准化组织已经开始 TI 相关领域的标准制定<sup>[3-4]</sup>。文献 [5] 指出借助 TI 可以实时控制真实或虚拟对象, 从而构建新一代信息物理系统。文献 [6] 比较了 5G、物联网、TI 3 种网络, 指出 TI 区别于传统网络的关键在于利用触觉设备实现人-机 (H2M) 通信。文献 [7] 提出了 TI 的一些关键性能要求, 包括: 极低时延极高可靠性、安全性、多感官的整合。文献 [8] 提出了一些 TI 潜在应用场景, 包括医疗健康领域的外骨骼、远程教育中的交互式虚拟现实体验、自动驾驶中的远程汽车控制, 以及智能制造中机器人参与大规模装配生产线等。文献 [9] 指出实现 TI 面临的挑战, 包括设计能够提供触觉和触觉信号反馈并且能与蜂窝网络自由通信的触觉设备, 开发实现触觉数据压缩的触觉编码器, 融合具有不同采样/传输速率和延迟需求的视觉、听觉、触觉多模态信息等。文献 [10] 提出, TI 需要在共享的基础设施上实现实时控制与网络边缘高效计算能力的结合。文献 [11] 提出一种基于多层云

的蜂窝系统以支持 TI 应用, 该系统包含微云单元、负责管理区域内的微云单元并形成边缘计算架构的小型云、负责管理网络内所有小型云的核心网络云以及作为大型数据中心的远程公共云。文献 [12] 提出一种面向软件定义网络 (SDN)/网络功能虚拟化 (NFV) 的多层云 TI 结构, 有助于降低时延, 提高系统性能。文献 [13] 提出一种基于用户体验质量 (QoE) 的感知模型, 可用于工业物联网中触觉应用的动态资源分配。

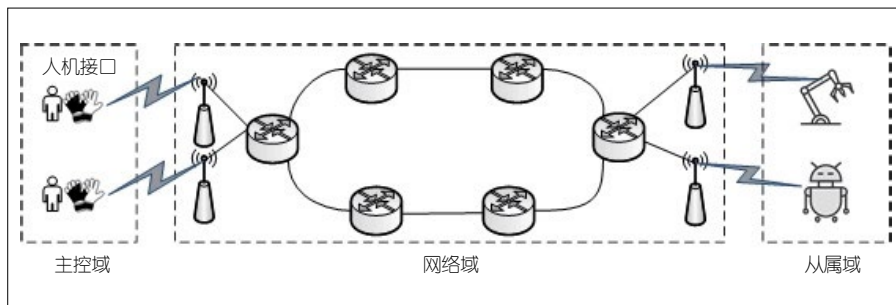
如上所述, 现有研究工作大多从应用场景、网络架构、编/译码器等单一角度研究 TI。然而, TI 作为一个系统工程, 需要从不同层面开展关键使能技术的融合创新。基于网络架构、信息传输以及资源管理这 3 个不同层面, 本文提出了 TI 关键使能技术框架。为了满足触觉控制和反馈信息的实时、可靠传输, 需要设计基于 SDN/NFV 和人工智能 (AI) 赋能的新型网络架构, 通过提供灵活的网络功能和基于本地的服务保证时延、可靠性等关键性能要求; 为了促进多感官信息融合, 需要利用多模态通信技术实现多感官信息的传输、接收和重建, 并借助语义通信技术融合提取多模态信息的语义特征, 减少数据冗余, 提高通信有效性; 为了灵活匹配网络资源, 需要设计通信、计算、存储等多维网络资源融合调度机制, 在提高用户沉浸式体验的同时提高网络资源利用率。

## 1 TI 网络范式

下一代移动网络 (NGMN) 联盟将 TI 定义为: “通过互联网远程提供对真实或虚拟对象以及物理触觉体验的实时控制的能力”<sup>[14]</sup>。为了在沉浸式远程教育、高精度远程医疗诊断、工业控制和自动化等新兴触觉应用领域提供对真实或虚拟对象实时的控制交互能力, TI 应具备以下的网络范式。

如图 1 所示, TI 网络范式主要包括 3 个部分: 主控域、网络域、从属域<sup>[15-16]</sup>。主控域主要包含操作者和操作系统接口, 操作系统接口或人机接口通常是一个触觉设备, 可以通过各种编码方案将操作者的输入转换为触觉输入信息并将其发送到网络域。从属域由远程操作设备构成, 受主控域中各种命令信号直接控制, 可以和远程环境中的各种对象进行交互, 同时将触觉反馈信息返回给主控域。网络域为主控域和从属域之间的双向控制通信提供媒介, 可以将操作者动态地耦合到远程环境。理想情况下, TI 网络可以让操作者拥有远程环境中沉浸式的体验感受, 从而实现物理世界的数字化重现。

视觉、听觉、触觉等不同感官信号的传输需要保持实时性、可靠性、一致性和协调性<sup>[9]</sup>。为了更好地支持这些关键性能需求, 需要为 TI 设计灵活、智能的网络架构以提供超低时延、超高可靠和稳定的网络连接, 为 TI 设计高效的多模态信息传输技术以促进



▲ 图 1 触觉互联网网络范式

多感官信息的融合,为 TI 设计多维网络资源融合调度策略以在充分保证业务性能要求的基础上提高网络资源利用率。以下我们将从网络架构、信息传输、资源管理这 3 个方面探讨 6G 背景下新型 TI 的关键使能技术。

## 2 TI 关键使能技术

### 2.1 基于 SDN/NFV 的新型 TI 架构

传统的网络采用逻辑控制与数据传输紧密耦合的方式,网络节点同时进行控制决策和数据传输,无法满足 TI 超低时延、超高可靠的关键性能需求。实现触觉通信的关键在于设计一个灵活、高效、能提供一致性 QoE 保障的网络架构,实现网络的统一管理与资源的动态调度,使网络资源可以基于物理基础设施在不同的服务和应用之间有效切分、共享,从而降低数据传输时延,提高可靠性。

如图 2 所示,本文提出一种基于 SDN/NFV 和 AI 赋能的 TI 3 层架构。感知层通过感知设备收集环境和用户数据,然后将其上传至网络层,同时接收来自网络层的控制信号。网络层通过 SDN 和 NFV 实现逻辑控制与数据传输分离、虚拟资源与硬件资源分离,促进了对虚拟网络资源的统一管理和动态配置,提高了 TI 架构的灵活性。控制平面通过在网络的不同层级(如云计算中心和边缘计算平台等)构建网络控制器,如 SDN 控制器、域控制器、边缘控制器等,可以构建集中和分布协同的多层级网络(如云边融合网络),有效弥补网络空隙,提高网络弹性。一方面,集中式架构可以提供稳定的网络连接,从而满足确定性组网需求和服务质量保证;另一方面,分布式架构可以实现以用户为中心的控制和管理,灵活适应新业务新场景的需求。数据平面根据控制平面下达的指令,

利用移动基础设施提供连接和计算服务,实现高效的信息传输与业务交付。应用层基于分布式与集中式融合的云边协同网络,为 TI 用户提供差异化、多维度、确定性服务。根据不同的应用需求,应用层可以通过嵌入不同的 AI 引擎实现 TI 网络的智能部署、智能运维、智能优化、智能管理,从容应对各种实时的变化,实现网络的自学习、自运行、自维护。在此基础上,通过融合内生智能技术,并充分利用网络通信、感知、计算、存储等能力,应用层能够更好地承载大规模智能分布式协同服务,实现从传统的云 AI 向网络 AI 转变。

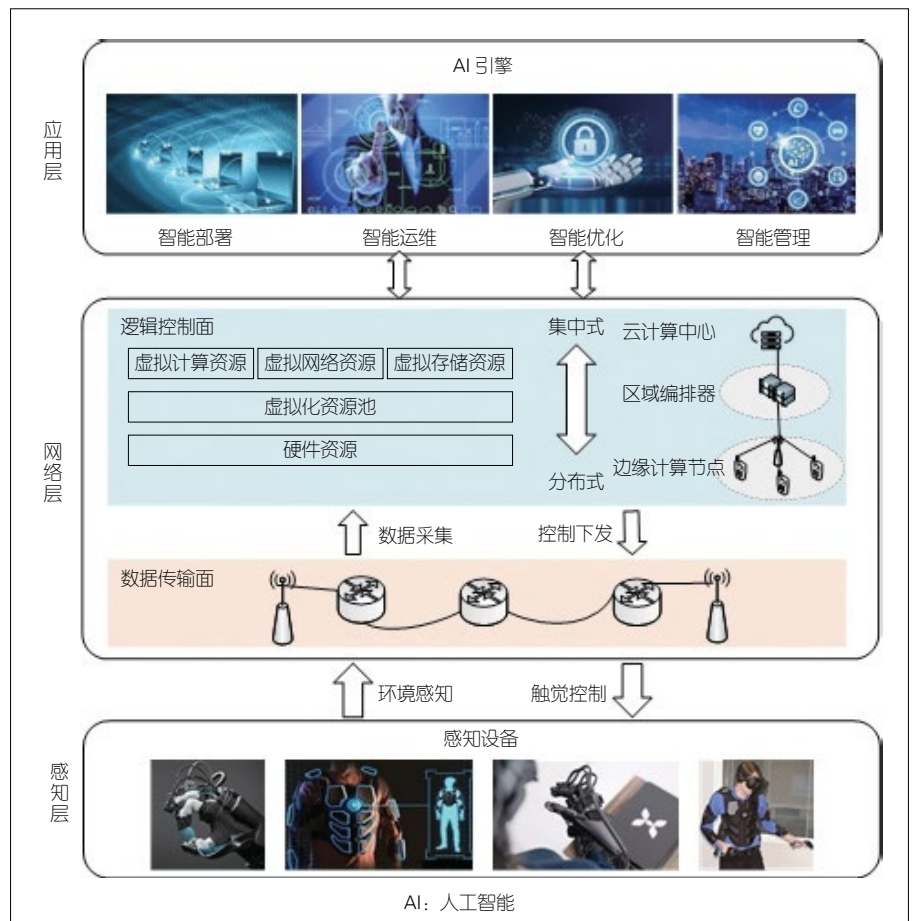
如上所述, TI 3 层网络架构能够有效结合云、网、边、端的算力资源和能力,对不同业务进行智能分发处

理。例如,将需要大量计算资源的 TI 场景渲染放在云计算中心集中处理,将多模态信号的编解码放在边缘的分布式节点进行处理,实现集成分存、分布自治的新型网络架构<sup>[1]</sup>。

### 2.2 多模态语义通信

多模态通信是一种通过文字、图片、音频、视频等多种信息载体进行信息交互的方式。在面向 6G 的 TI 中,除了音、视频等传统的信息模态,还需要进行触觉信息的传输。因此,为了提供沉浸式体验,必须结合 TI 应用特点,设计相应的多模态通信系统,实现视觉、听觉、触觉等多感官信息的高效传输与融合<sup>[17]</sup>。

多模态通信过程包含多模态信号编码、传输以及恢复重建 3 部分<sup>[18]</sup>,



▲ 图 2 基于软件定义网络 / 网络功能虚拟化和人工智能赋能的触觉互联网架构

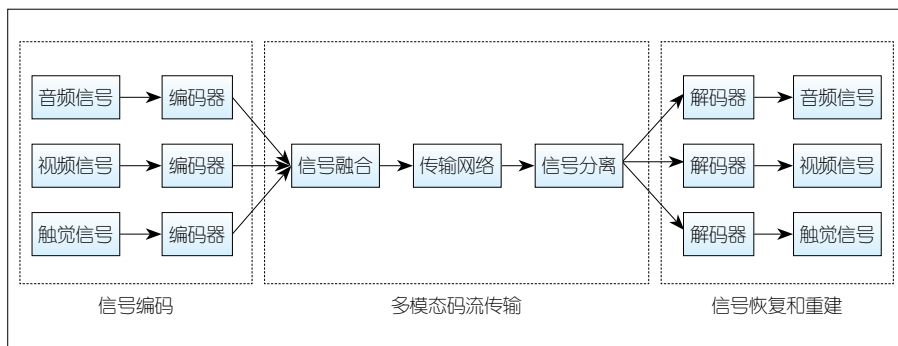


如图 3 所示。同一对象的多模态信号之间通常具有一定的相关性，在传输前需要进行跨模态编码<sup>[17]</sup>。在跨模态编码中，如何对多模态信号特征进行提取压缩，从而降低冗余、提高传输效率是亟待解决的问题。

传统的香农信息论主要关注信息的形式，而用户更为关注的是信息的内容和价值，由此引出了语义信息的概念<sup>[19]</sup>。语义通信泛指不同的智能体之间进行的以“达意”为目的的通信，这里的“智能体”可以是人类或机器<sup>[20]</sup>。鉴于 TI 应用中存在广泛的智能体之间的会意交互应用，语义通信可被用于传输相应的触觉控制指令，这将有助于实现超低时延、超高可靠的关键性能要求。提取、融合、传输多模态联合信息的语义特征为提高 TI 传输效率、满足用户沉浸式体验需求提供了一种新思路。

语义通信的关键在于设计实现语义特征提取与恢复的语义编译器。因为 TI 应用中通常需要传输多模态信号，所以对多模态信息的表征学习是 TI 中实现语义通信的关键技术之一。目前常用的多模态信息表征学习方法有联合表示、编解码器架构、协同表示等<sup>[21]</sup>。联合表示旨在将单模态的表示映射到一个共享语义子空间中，以融合多模态特征<sup>[22]</sup>；编解码器架构早期用于自然语言处理中的机器翻译<sup>[23]</sup>等任务，现广泛应用在将一种模态映射到另一模态的跨模态任务中；协同表示将多模态的信息分别映射到各自的表示空间中学习，但映射后的向量之间满足一定的相关约束性<sup>[24]</sup>。由于不同模态中包含的信息是不平等的，学习分离表征有助于保持独有的有用模态特定特征。采用高效的多模态信息表征方法能够更好地解决数据冗余问题。

在对多模态信号进行语义特征提



▲ 图 3 多模态通信过程

取和编码的基础上，还需要满足一定的传输时延和带宽要求。不同模态信号的通信带宽、可靠性等需求不同，因此在多模态码流传输时需要设计合适的传输策略<sup>[18]</sup>。借助边缘计算和云边融合架构，可以将网络核心的计算处理功能下沉到网络边缘；通过在网络边缘对多模态信号进行处理和传输，能够有效缩短与用户的距离，进一步提高多模态通信的效率。

多模态码流经过传输和解码后会有一定程度的损耗，因此对接收到的多模态信息进行高效恢复重建也是影响 TI 用户体验的关键技术。现存方法多基于深度学习模型，例如 WEI X.<sup>[25]</sup>等使用迁移学习和生成对抗网络的方法从不同的模态中提取、迁移和融合信息，恢复损坏的信号，提升接收器的渲染效果。

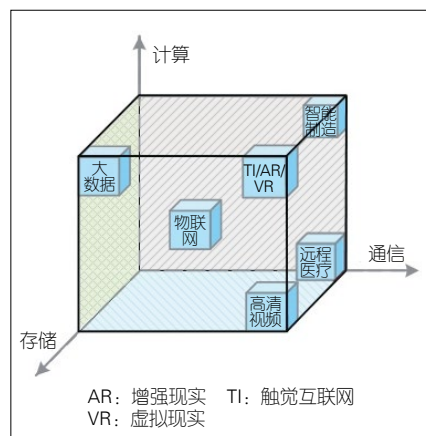
### 2.3 通信、计算、存储资源联合调度

传统网络以连接为中心，旨在通过匹配相应的通信资源（如带宽等）实现端到端的可靠连接。新型业态的不断涌现，如自然语言处理、VR/AR、人脸识别等应用稳步发展，不仅要求高通信数据速率，还要求通信系统提供足够强大的存储和计算资源。通信不再是网络提供的唯一核心业务，通信能力也不再等同于网络的服务能力。为了提供全面沉浸化的 TI 服务，往往需要融合调用通信、计算、存储

等网络多维资源，如图 4 所示。

因此，为了满足用户“身临其境”的沉浸式体验需求，同时避免由于网络单一类型资源匮乏导致的 TI 业务服务质量的不确定性，需要为 TI 设计网络多维资源的融合调度策略。具体来说，为了实现高速率、低时延的传输触觉控制和反馈信息，需要为 TI 匹配相应的通信资源；为了进行多模态信号的编译码、语义特征的提取与融合重建，需要为 TI 匹配相应的计算资源；为了提高计算和通信效率、存储语义库以及多模态信息的编译码映射信息，需要为 TI 匹配相应的存储资源。值得注意的是，多维资源之间存在折衷互补特性。针对由于某种类型资源匮乏导致业务需求无法满足的情况，可以通过通信、计算、存储资源的深度交互、融合进行补足和增强。

例如，通过提取语义特征进行多



▲ 图 4 通信、计算、存储资源融合

模态信息的压缩编码,可以有效降低数据冗余度,提高通信效率,实现“以计算换通信”;反过来,通过将数据分析和计算任务卸载到边缘计算节点或云端进行协作处理,可以有效提高计算效率,实现“以通信换计算”。通过将某些热点流行内容,如音频、视频等,预先存储在网络边缘,能够有效降低网络传输时延,提升用户体验,实现“以存储换通信”。此外,通过缓存某些中间计算结果和相关数据,在进行类似业务处理时能够快速响应、缩短处理时延,实现“以存储换计算”。

6G 时代, TI 作为典型应用, 将通过融合通信、计算、存储等网络多维资源, 构建“算网一体”“存网一体”的网络新格局。在实时感知网络状态和资源占用情况的基础上, 通过网络多维资源的动态分配和调整, 可以将业务流量匹配至最优节点。这将有助于缓解甚至消除资源竞争状况, 赋能一致化、确定性用户体验, 保证用户的沉浸化服务质量需求。

### 3 存在的问题

#### 3.1 多模态信息的编码传输与融合重建

在多模态通信中, 视听编码技术已经较为成熟, 而触觉信号由于种类繁多、感知机理复杂, 目前尚没有成熟的编码方案。文献 [17] 提出了一种基于韦伯的显著差异定律的感知盲区方案来解决触觉信号编码问题, 并提出了基于波形信号的压缩、数据驱动下的特征提取两种编码方案来解决触觉信号编码问题。由于现实应用场景下两种信号相互作用、影响, 需要结合触觉和触觉信息来开发普适的标准触觉编解码器。视听流的稳定传输需要基于高带宽、低抖动, 而触觉信号的传输则有着低时延、高可靠性的要

求。现有传输方案大多仅关注触觉流<sup>[9]</sup>或视听流<sup>[26]</sup>, 严重影响用户沉浸式体验。在实际的多模态通信中, 传输环境是动态的, 网络资源是有限的, 因此设计自主的跨模态协同传输方案是 TI 保证用户沉浸式体验的关键所在<sup>[25]</sup>。此外, 对接收跨模态信号进行恢复, 一般只能得到和发送端分辨率相同的信号, 无法实现全息远程通信的沉浸式体验和虚拟现实下高精度渲染场景。通过深度学习的方法, 可以实现多模态信号从低分辨率到超高分辨率的重建, 从而增强用户在 TI 下身临其境的体验<sup>[18]</sup>。如 C. LEDIG<sup>[27]</sup> 等从照片感知角度出发, 通过生成对抗网络来进行超高分辨率重建, 提高了图像超高清重建真实感。

#### 3.2 多模态信息的语义特征提取与压缩

由于 TI 中视觉、听觉、触觉多感官信息存在一定的相关性, 因此需采用多模态信息联合编码压缩冗余、提高通信有效性。与此同时, 多模态信息也具有差异互补性, 多种感官信息的充分融合给用户带来“身临其境”的体验。为了在提高通信效率的基础上增强沉浸式的体验, 多模态语义信息提取的准确性与有效性显得尤为重要。多模态语义信息的最佳表示是什么? 什么是无损语义压缩? 如何量化评估语义保真度和体验沉浸度? 这些问题的解决对实现多模态语义通信、提高 TI 用户体验感至关重要。J. BAO<sup>[28]</sup> 等分析了无损语义压缩, 在特定的假设下建立了无损语义数据压缩的理论界限, 然而在实际多模态语义通信过程中这些假设都难以成立。至于如何量化评估语义保真度还存在很多困难。针对文本传输的评估量化, 现有方法多使用机器翻译任务中的 BLEU<sup>[29]</sup> 指标。该指标虽然能在一定程度上反映传输准确率, 但是无法评估

传输前后的语义一致性。值得借鉴的做法是文献 [30] 提出的新的度量: 利用预训练好的语言模型和传输文本的语义信息来描述它们的语义相似度。

#### 3.3 安全性

传统集中式网络架构缺乏安全内生设计, 用户隐私数据泄露问题难以解决。同时, 网络安全与 TI 业务各成体系, 安全投入高。基于分布式技术设计 AI 赋能的 TI 网络, 实现去中心化的安全可信机制, 能够有效提高 TI 的安全自治能力。分布式技术在数据产生的地方进行数据处理, 无须将数据全部发往云计算中心, 这能够在一定程度上缓解隐私数据泄露的问题。网络 AI 可以实现主动免疫、弹性自治、安全泛在、智能协同, 为 TI 助力网络安全内生。此外, 语义通信需要交换双方感知的知识信息, 并协同更新双方的知识库, 这可能会带来本地隐私数据泄露的风险。如何开发一种通信参与者之间的高效协调机制, 而不造成任何私人数据泄露, 仍是一个亟待解决的问题<sup>[31]</sup>。由于区块链技术具有高冗余存储、去中心化、公开透明和高安全性等特点, 利用区块链技术来存储 TI 中本地隐私数据, 可以在一定程度上避免因中心化机构遭受攻击造成的数据泄露<sup>[32]</sup>。

### 4 结束语

为了顺应 6G 时代全面沉浸化的发展需求, 本文从研究背景与现状、网络范式、关键使能技术、存在的问题等方面对 TI 进行了系统介绍, 并从网络架构、信息传输、资源管理 3 个方面对 TI 关键使能技术进行了探讨。虽然 TI 在多模态信息编码传输与融合重建、语义特征提取与压缩、安全性等方面仍然存在很多需要解决的问题与挑战, 但随着新技术的发展, 相信

在不久的将来 TI 作为 6G 关键技术将发挥越来越重要的作用。

#### 参考文献

- [1] IMT-2030(6G) 推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [EB/OL]. (2021-09-16) [2021-10-25]. <http://www.caict.ac.cn/>
- [2] 刘子涵. 元宇宙: 人类数字化生存的高级形态 [J]. 新闻阅读, 2021(9): 78-79
- [3] TU-T FG NET2030. New services and capabilities for network 2030: description, technical gap and performance target analysis [EB/OL]. [2021-10-25]. [https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/Deliverable\\_NET2030.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/Deliverable_NET2030.pdf)
- [4] HOLLAND O, STEINBACH E, PRASAD R V, et al. The IEEE 1918.1 "tactile Internet" standards working group and its standards [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 256-279. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2885541
- [5] 胡泳. 所到之处皆媒介: 5G 对媒体产业的影响分析 [J]. 新闻记者, 2020(7): 59-69. DOI: 10.16057/j.cnki.31-1171/g2.2020.07.006
- [6] MAIER M, CHOWDHURY M, RIMAL B P, et al. The tactile Internet: vision, recent progress, and open challenges [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(5): 138-145. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7470948
- [7] 王凌豪, 王淼, 张亚文, 等. 未来网络应用场景与网络能力需求 [J]. 电信科学, 2019, 35(10): 2-12. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.20191223
- [8] FETTWEIS G P. The tactile Internet: applications and challenges [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2014, 9(1): 64-70. DOI: 10.1109/MVT.2013.2295069
- [9] AIJAZ A, DOHLER M, AGHVAMI A H, et al. Realizing the tactile Internet: haptic communications over next generation 5G cellular networks [J]. IEEE wireless communications, 2017, 24(2): 82-89. DOI: 10.1109/MWC.2016.1500157RP
- [10] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987. DOI: 10.1360/N112019-00033
- [11] ATEYA A A, VYBORNOVA A, KIRICHEK R, et al. Multilevel cloud based tactile Internet system [C]//Proceedings of 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2017: 105-110. DOI: 10.23919/ICACT.2017.7890067
- [12] 魏萌, 吕廷勤. 基于软件定义网络的触觉互联网端到端系统 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(12): 3760-3763. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2019.09.0549
- [13] AAZAM M, HARRAS K A, ZEADALLY S. Fog computing for 5G tactile industrial Internet of Things: QoE-aware resource allocation model [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2019, 15(5): 3085-3092. DOI: 10.1109/TII.2019.2902574
- [14] NGMN. 5G white paper [EB/OL]. (2016-04-26) [2021-10-25]. <http://www.ngmn.org/5g-white-paper.html>
- [15] 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. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525398
- [16] GE X H, ZHOU R, LI Q. 5G NFV-based tactile Internet for mission-critical IoT services [J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(7): 6150-6163. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2958063
- [17] 周亮, 袁哲. 跨模态编码 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2020, 40(5): 95-100. DOI: 10.14132/j.cnki.1673-5439.2020.05.010
- [18] 高赞, 魏昕, 周亮. 跨模态通信理论及关键技术初探 [J]. 中国传媒大学学报 (自然科学版), 2021, 28(1): 55-63. DOI: 10.16196/j.cnki.issn.1673-4793.2021.01.009
- [19] 钟义信. 信息生态学与语义信息论 [J]. 图书情报知识, 2017(6): 4-11. DOI: 10.13366/j.dik.2017.06.004
- [20] 石光明, 李莹玉, 谢雪梅. 语义通讯-智能时代的产物 [J]. 模式识别与人工智能, 2018, 31(1): 91-99. DOI: 10.16451/j.cnki.issn1003-6059.201801008
- [21] GUO W, WANG J, WANG S. Deep multimodal representation learning: a survey [J]. IEEE access, 2019, 7(99): 63373-63394. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916887
- [22] BALTRUSAITIS T, AHUJA C, MORENCY L P. Multimodal machine learning: a survey and taxonomy [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2017, 41(2): 423-443. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2798607
- [23] CHO K, MERRIENBOER V B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation [EB/OL]. (2014-09-03) [2021-10-25]. <https://arxiv.org/abs/1406.1078>
- [24] HE Y, XIANG S, KANG C, et al. Cross-modal retrieval via deep and bidirectional representation learning [J]. IEEE transactions on multimedia, 2016, 18(7): 1363-1377. DOI: 10.1109/TMM.2016.2558463
- [25] WEI X, ZHOU L. AI-enabled cross-modal communications [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(4): 182-189. DOI: 10.1109/MWC.001.2000448
- [26] LIU L, HU H, LUO Y, et al. When wireless video streaming meets AI: a deep learning approach [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 127-133. DOI: 10.1109/MWC.001.1900220
- [27] LEDIG C, THEIS L, HUSZÁR F, et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network [C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2017: 105-114. DOI: 10.1109/CVPR.2017.19
- [28] BAO J, BASU P, DEAN M, et al. Towards a theory of semantic communication [C]//2011 IEEE Network Science Workshop. IEEE, 2011: 110-117. DOI: 10.1109/NSW.2011.6004632
- [29] PAPANENI K, ROUKOS S, WARD T, et al. BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation [C]//Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics - ACL '02. Association for Computational Linguistics, 2001: 311-318. DOI: 10.3115/1073083.1073135
- [30] XIE H Q, QIN Z J, LI G Y, et al. Deep learning enabled semantic communication systems [J]. IEEE transactions on signal processing, 2021, 69: 2663-2675. DOI: 10.1109/TSP.2021.3071210
- [31] SHI G M, XIAO Y, LI Y Y, et al. From semantic communication to semantic-aware networking: model, architecture, and open problems [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(8): 44-50. DOI: 10.1109/MCOM.001.2001239
- [32] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望 [J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494. DOI: 10.16383/j.aas.2016.c160158

#### 作者简介



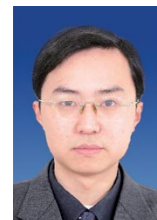
**尤子硕**, 华中科技大学电子信息与通信学院在读硕士研究生; 研究方向为触觉通信、边缘计算/雾计算、边缘缓存。



**李强**, 华中科技大学教授、IEEE GLOBECOM 2019 分会联合主席; 主要研究方向为无线协作通信、物联网、认知无线电、触觉通信、边缘计算/雾计算、边缘缓存等; 承担了国家级和省部级科研项目 10 余项; 发表论文 70 余篇, 获授权专利 20 余项。



**唐冰**, 华中科技大学电子信息与通信学院在读硕士研究生; 研究方向为视频内容理解、语义通信。



**葛晓虎**, 华中科技大学教授、博士生导师, 国家绿色通信与网络国际联合研究中心主任, 国际信息处理联合会 (IFIP) 中国代表和联合国咨商信息与通信技术专委会委员, 国家科技部和国家自然科学基金委评审专家, 湖北省科技厅评审专家, IET Fellow, 中国通信学会会士; 主要研究方向为绿色通信与网络、超密集网络、大规模 MIMO、毫米波通信技术等; 主持完成了 20 余项国家级科研课题和多项国际高水平科技合作项目; 发表论文 200 余篇, 获授权专利 50 余项。