

## 复杂环境下远程医疗的通信网络关键技术应用与进展

王瑞青<sup>1,2</sup>, 董敬<sup>1,3</sup>, 李涛<sup>1,3</sup>, 曹德森<sup>4</sup>, 罗进<sup>5</sup>, 宋一敏<sup>1</sup>, 汪安安<sup>1,3</sup>, 李志海<sup>6</sup>, 徐子雯<sup>1</sup>, 胡苹<sup>1,3</sup>, 王华涛<sup>1</sup>, 何昆仑<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>解放军总医院医学创新研究部, 北京 100853; <sup>2</sup>第82集团军医院医学工程科, 河北保定 071000; <sup>3</sup>医疗大数据应用技术国家工程研究中心, 解放军总医院医学工程实验室, 北京 100853; <sup>4</sup>解放军总医院医疗保障中心, 北京 100853; <sup>5</sup>解放军总医院服务保障中心, 北京 100853; <sup>6</sup>清华大学药物警戒信息技术与数据科学创新中心, 北京 100080

**摘要:** 远程医疗技术在复杂环境下的应用具有重要意义, 但容易受到网络波动、数据包丢失等影响, 从而降低远程医疗服务质量。本文对远程医疗关键技术的发展历程进行回顾分析, 介绍了国内外远程医疗技术最新应用情况, 并对远程医疗通讯网络关键技术进行了分析和展望, 旨在为远程医疗技术研究提供参考, 以促进未来技术的改进和临床实践的优化。

**关键词:** 复杂环境; 远程医疗; 服务质量; 5G; 软件定义网络; 确定性网络

中图分类号: R-05; TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)02-0146-07

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.24071005

引用本文: 王瑞青, 董敬, 李涛, 等. 复杂环境下远程医疗的通信网络关键技术应用与进展 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (2): 146-152.

### Advances and applications of critical communication network technologies in complex telemedicine environments

WANG Ruiqing<sup>1,2</sup>, DONG Jing<sup>1,3</sup>, LI Tao<sup>1,3</sup>, CAO Desen<sup>4</sup>, LUO Jin<sup>5</sup>, SONG Yimin<sup>1</sup>, WANG An'an<sup>1,3</sup>, LI Zhihai<sup>6</sup>, XU Ziwen<sup>1</sup>, HU Ping<sup>1,3</sup>, WANG Huatao<sup>1</sup>, HE Kunlun<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Medical Innovation Research Department of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>2</sup>Medical Engineering Department, 82nd Group Army Hospital, Baoding 071000, Hebei Province, China; <sup>3</sup>National Engineering Research Center for Medical Big Data Application Technology, Medical Engineering Laboratory of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>4</sup>Medical Supplies Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>5</sup>Service Supplies Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; <sup>6</sup>Pharmacovigilance Information Technology&Data Science Innovation Center, Tsinghua University, Beijing 100080, China  
Corresponding author: HE Kunlun. Email: kunlunhe@plagh.org

**Abstract:** The significance of telemedicine technology in complex environments has been widely acknowledged, although its application is susceptible to network fluctuations and packet loss, thereby compromising the quality of remote medical services. A comprehensive review and analysis of the development history of key telemedicine technologies have been conducted in this paper. The latest applications of telemedicine technology in domestic and international contexts have been systematically presented, with particular emphasis on critical communication network technologies. Through comparative evaluation and prospective analysis, this study aims to establish theoretical foundations for telemedicine research while offering practical guidance for technological optimization and clinical implementation improvements. The research outcomes are expected to serve as valuable references for future advancements in telemedicine infrastructure development and operational efficiency enhancement.

**Keywords:** complex environment; telemedicine; quality of service; 5G; software defined network; deterministic network

**Cited as:** Wang RQ, Dong J, Li T, et al. Advances and applications of critical communication network technologies in complex telemedicine environments[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(2): 146-152.

远程医疗的概念最早由美国学者 Polishuk 于 1976 年提出, 指医疗机构通过远程通信技术、计算机技术和多媒体技术等对医疗服务过程中产生的文本、图像和视频等资料进行远距离传输, 实

现专家与患者、专家与医务人员之间异地“面对面”的会诊, 其最终目的是实现医疗资源的优化配置, 为医疗资源相对薄弱的偏远地区以及特殊点位(船舶、岛屿、高原等), 或应急转运过程中的危重伤员提供高质量的医疗服务<sup>[1]</sup>。远程医疗的实施能够改善区域性医疗资源的分配不均, 降低患者医疗成本并节省就医时间, 提高疾病监测、诊断和治疗的时效性<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 省部级课题

第一作者: 王瑞青, 博士, 技师。Email: wangruiqing@plagh.org

通信作者: 何昆仑, 博士, 主任医师, 教授, 博士生导师。Email: kunlunhe@plagh.org

历经几十年, 远程医疗的发展大致可以分为4个阶段。20世纪60年代出现了第1代远程医疗, 主要使用双向闭路微波电视/双向视听系统简要地传输人体生理参数(血压、心电图、听诊器声音等), 通信方式为卫星和微波<sup>[3]</sup>; 20世纪80年代末期, 现代通信新技术推动了第2代远程医疗的发展, 主要使用卫星通信技术和综合性业务数据网(integrated services digital network, ISDN)实现了可视化通话, 同时在远程视频传输、远程会议和远程会诊等医疗服务中取得了较大的发展<sup>[4]</sup>; 进入21世纪的前10年, 移动通信、对等网络(peer to peer, P2P)、服务处理单元(service processing unit, SPU)等新技术推动了第3代远程医疗的发展, 以视频会议为框架的各项远程医疗服务开始流行<sup>[5]</sup>, 同时远程手术服务也逐步开展<sup>[6-7]</sup>; 2010年至今, 移动通信、物联网、互联网、云计算等新技术推动了第4代远程医疗的发展, 远程影像、远程急救、远程超声、远程手术等远程医疗服务通过实时通信(real-time communication, RTC)的方式获得了长足的发展<sup>[8]</sup>; 同时远程医疗也逐步走向社区和家庭, 能够面向个人提供精准、个性化的服务。国内外远程医疗大致经历的4个阶段见表1, 可以看出, 随着通信技术的发展, 远程医疗系统在可视性、成本和覆盖面等层面取得了快速发展, 同时逐步实现了较高度度的互操作性。

远程医疗的发展离不开信息通信技术的进步。然而远程医疗在复杂环境下容易受到网络波动、数据包丢失和延时抖动等影响, 从而导致数据传输的实时性、稳定性以及服务质量降低。本文系统阐述了复杂环境下国内外远程医疗的最新应用情况, 探究了网络传输技术应用于远程医疗的研究成果, 以期加深临床工作者和工程技术人员对远程医疗的认识, 为复杂环境下的远程医疗实践

提供参考。

## 1 远程医疗在复杂环境中的应用

大规模事故和灾难往往在不可预知的情况下突然发生, 给众多人员带来不同程度的伤害, 这便迫切需要持续且迅速的医疗救治<sup>[9]</sup>。医疗援助常面临救援现场条件差、患者人数多以及医务人员和医疗资源有限等困难, 可能导致患者治疗延误, 甚至死亡。同时, 爆炸、火灾、地震等重大灾害也可能破坏受灾地区的基础设施, 如道路和通信设施, 进一步阻碍外部救援, 包括国家支援、人道主义组织和专业医疗机构输送的医务人员和医疗物资<sup>[10]</sup>。在这些复杂情况下, 远程医疗是保障医疗救援的最佳解决方案<sup>[11]</sup>。目前, 关于互联网医院、不同等级医院间远程问诊等常规情境下的远程医疗服务在国内外已有很多报道<sup>[12-13]</sup>。然而, 针对复杂医疗环境下远程医疗实践的报道仍相对稀缺。在探讨医疗体系面临的挑战时, 复杂医疗环境这一概念显得尤为重要, 远程医疗中的复杂环境可以从医疗条件、技术应用和地理位置等维度进行分类, 本文从上述3个角度对远程医疗的国内外应用情况进行了回顾分析。

### 1.1 医疗条件复杂环境下的远程医疗应用

医疗条件复杂环境是指某些区域因经济制约、人口分布不均、突发性紧急灾难等因素, 出现医疗资源配置严重失衡现象, 从而受到医疗设备陈旧匮乏、专业医护人员数量不足及分布不均、交通网络不畅导致的医疗救援效率低下, 以及医疗设施基础薄弱等系统性问题困扰。远程医疗作为一种创新性医疗服务模式, 通过先进的通信技术与信息技术手段, 有效促进了医疗资源的跨地域整合与共享, 实现了优质医疗资源的精准下沉与高效配置, 进而为偏远和医疗资源匮乏地区的患

表1 远程医疗关键技术回顾与分析

Tab. 1 Review and analysis of key technologies in telemedicine

年代	典型技术	特点	可视性	互操作性	成本和覆盖
20世纪60年代初期到80年代中期	卫星和微波通信技术、基于双向闭路微波电视/双向视听系统的互联通道	开始出现。信息通信不发达、数据传输极为有限, 只能传输简单的人体生理指标	不可视	不支持	成本很高, 覆盖很低
20世纪80年代后期到90年代后期	卫星和微波通信技术、ISDN网、光纤通信技术	发展缓慢。通过非同步传输协议和各种光缆专线传输医疗信息	可视, 非实时, 清晰度低	不支持	成本高, 覆盖低
2000—2010年	移动通信、互联网、P2P、SPU	发展较慢。利用P2P、SPU等实时通信技术开展远程医疗服务	可视, 实时性和清晰度逐渐提高	用光纤做远程手术示范	成本逐渐降低, 覆盖逐渐广泛
2010年至今	移动通信、云计算、物联网、卫星通信技术	发展快速。利用RTC、远程协同等技术开展远程医疗	可视, 实时, 高清	交互操作程度逐渐提升	成本低, 全球覆盖

者带来了及时、专业的医疗援助。

1985年墨西哥城发生毁灭性自然灾害后,美国国家航空航天局首次使用电信技术提供救灾援助。灾害中断了墨西哥城的所有陆基通信,应用技术卫星(applications technology satellite, ATS-3)为美国红十字会和泛美卫生组织的国际救援工作提供了重要的语音通信支持<sup>[14]</sup>。随后,美国-俄罗斯联合成立了美国-苏联空间桥梁项目,在1988年亚美尼亚地震灾害后,使用了该项目的卫星通信技术实现了从亚美尼亚到美国的双向互动音频和单向全动态视频传输,从而向亚美尼亚的几家地区医院提供了临床咨询服务<sup>[15]</sup>。1994年美国NASA发射了先进通信技术卫星(advanced communication technology satellite, ACTS),该卫星能够以高达1.544 Mbps的速率传输医疗记录、图像和实时视频,为偏远地区提供更快、更具成本效益的优质临床和信息服务<sup>[16]</sup>。1996年,美国国防部在波斯尼亚建立了一个医疗网络,将陆军战地医院与美国5个地区的军事医疗中心连接起来,提供了实时语音和视频会诊服务<sup>[17]</sup>。作战一线的医师能够利用该网络向军事医疗中心传送X线、超声、CT等医学图像和全动态视频<sup>[18]</sup>。我国为应对突发公共卫生事件建立了一系列的应急救援平台,如河南省建立了突发公共卫生事件数字化指挥与救治平台,该平台能够通过3G/4G网络或卫星网络,将急救现场患者伤情等视频信息和电子病历信息传至后方医院,并建立一线医务工作人员和后方专家的双向音视频通道<sup>[19]</sup>。解放军总医院医学创新研究部团队依托科研项目建立了方舱医院并部署至平均海拔为4 500 m的西藏某地,通过北京与西藏地区的远程医疗专线,将解放军总医院的优质医疗资源服务于医疗资源短缺的偏远地区。

## 1.2 复杂技术应用环境下的远程医疗实践

远程医疗涉及的医疗技术种类繁多,依赖于稳定的网络通信环境。复杂技术应用环境是指不同地域间在带宽容量、数据传输延迟及稳定性等方面存在显著网络环境差异,这些差异关系到远程医疗技术应用的实时性、连续性和服务质量,进而对医疗效果产生显著影响。作为复杂技术应用环境的典型场景,移动救援需要利用专门的移动医疗交通工具,如救护车、医疗直升机、水上医疗救援艇等,在复杂、多变的环境中快速响应各类紧急医疗事件,通过部署这些移动医疗工具

上的远程医疗系统,将患者的实时情况(包括高清图像、生命体征数据等)传输给远端的医疗专家或医院进行远程会诊,从而为患者提供及时的现场救治和转运服务。移动救援常发生于偏远地区、远海地区以及交通不便的山区等,这些地方的医疗资源相对匮乏,且网络和通讯条件有限,这类技术应用复杂场景给远程医疗的实施带来极大挑战。

3G网络通常不足以保障救护车在运送伤员过程中进行可靠的音视频通信<sup>[20]</sup>。随着4G移动通信的发展,布鲁塞尔齐肯豪斯大学基于4G网络开展了一项院前脑卒中研究和试点测试<sup>[21]</sup>。测试过程中远程会诊医师与移动救护车之间医疗数据传输的最大上传速度和平均上传速度分别为196 kbs和40 kbs,最大下载速度和平均下载速度分别为407 kbs和127 kbs,每次咨询的总数据量中值为上传37 Mb和下载176 Mb,能够满足音视频传输所需的带宽要求。北约于2017年2月建立了多国远程医疗系统(multinational telemedicine system, MnTS),该系统通过互联网、光纤和移动网络等通信网络技术将多个国家的医疗系统联系在一起,以支持移动救援中的远程医疗<sup>[22]</sup>。我国的学者对远程会诊车进行了研发,刘丹丹<sup>[23]</sup>通过综合集成卫星通信、自组织网(self-organizing network, SON)、微波、蓝牙、WIFI等多种通信方式,实现了异构网络协同传输,并构建了一种新型远程会诊车系统,满足了应急机动条件下视频、音频及数据实时双向传输的需要。在实际使用中,该远程会诊车以1.5~2 Mb/s的速率实现了实时图像、语音的高质量双向动态传输,并成功传递了多种医学影像资料。2023年,海南移动通过5G智能化改造、赋能了“15分钟医疗救治急救圈”项目,旨在提升海南省的医疗急救能力。该项目涉及131辆救护车,这些救护车经过了5G智能化改造,包含开发新监护设备、新心电设备、新监控设备的服务接口,并接入海南省120调度指挥平台。通过5G网络,这些救护车能够将监护数据上传到指挥平台,为医院远程制定紧急治疗方案提供全面的生理数据。

## 1.3 复杂地理环境条件下的远程医疗应用

复杂地理环境是一个综合性概念,涉及自然地理和人文地理等多方面因素。从远程医疗应用的角度来看,复杂地理环境通常是指地形复杂、气候恶劣、自然灾害频发、基础设施薄弱等对远

程医疗构成显著挑战和困难的环境特征。通常可以分为常规复杂地理环境和突发性自然灾害形成的复杂地理环境。

昭通市彝良县地处乌蒙山区腹地，地理环境复杂，山高坡陡，交通不便。2017年以前，该县卫生事业发展滞后，医疗资源总量不足，基层医疗机构服务能力弱，群众看病极不方便。为了解这一难题，彝良县构建了覆盖县、乡、村三级医疗机构的卫生专网，建立了“基层检查、上级诊断，上级开方、基层治疗”的远程医疗服务模式，积极探索并实施了远程医疗技术，实现了远程医疗县、乡、村全覆盖，彻底打通了看病就医的“最后1公里”。2017年，四川省阿坝州九寨沟地震后，四川大学华西医院利用灾区保存较为完整的互联网络开展远程会诊、网络门诊、网络图文咨询等远程医疗救援<sup>[24]</sup>。如果灾区基础设施破坏严重，电力和网络不能保证，远程医疗救援只能通过远程医疗会诊车上卫星通讯的方式实现。2008年汶川地震救灾中，上海卫生系统运用远程医疗监护技术，开辟了灾区外救援的“第二战场”，使千里之外的灾区重伤员得到了及时有效的诊治。陆军军医大学西南医院派出基于卫星通信的远程医疗会诊车至汶川县映秀地区，远程救援过程中，传输的声音较为清晰，图像质量较佳<sup>[25]</sup>。

在医疗条件复杂、技术应用复杂和地理环境复杂的多重挑战下，远程医疗展现出了独特的价值和潜力。目前复杂环境下远程会诊方式一般是以提前传输的文字、图片以及静态或动态图像资料为基础，对伤员病情进行音视频讨论，缺乏对伤员“面对面”的救助，在远程手术、远程超声等方面的作用不明显。此外，远程通信网络的传输速率和稳定性尚有待提高，大容量的数据传输也存在障碍，这给远程医疗服务的开展带来诸多挑战。随着通信网络技术的发展，远程医疗将通过先进的通信和信息技术，打破地域限制，实现医疗资源的跨地域整合与共享，为复杂环境地区的患者提供及时、专业的医疗援助。这些应用将进一步提升医疗服务的可及性和效率，促进医疗技术的交流与传播，为全球医疗应急救援体系的建设与发展提供有力支持。

## 2 远程医疗应用中的通信网络关键技术

在远程医疗领域，服务质量(quality of service,

QoS)技术、5G技术、软件定义网络(software defined network, SDN)技术和确定性网络(deterministic network, DetNet)技术共同为实现高效稳定的医疗数据传输提供了关键的支持。这几种技术之间存在着密切的关联和互补关系，共同构成了当下远程医疗网络技术的核心，见图1。这些网络技术的结合使用，为远程医疗提供了从本地到全球范围内的无缝、高效和可靠的网络连接，极大地提升了远程医疗服务的质量和可达性。

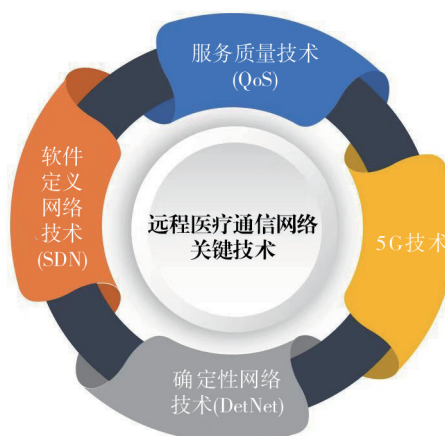


图1 远程医疗应用中的通信网络关键技术

Fig. 1 Key communication network technologies in telemedicine applications

### 2.1 服务质量技术

QoS技术是一种网络机制，用于控制和管理数据包的传输，以确保网络在不同的远程医疗服务和应用程序之间分配带宽。用于评估远程医疗网络的一些重要QoS参数包括传输速率、延时和丢包率等<sup>[26]</sup>。远程医疗服务中不同类型的数据对于网络QoS的要求见表2<sup>[27]</sup>。

Shah等<sup>[28]</sup>针对远程医疗系统中QoS的关键挑战，提出了一种基于QoS感知的动态数据处理和传输策略，以提高远程医疗数据传输的可靠性、速度和安全性。Younas等<sup>[29]</sup>探讨了物联网边缘设备在远程医疗领域中进行QoS监控的作用和重要性，物联网边缘设备的引入能够在源头处理和分析数据，从而减少延迟和带宽使用。Bardalai等<sup>[30]</sup>提出了一种名为OpenHealthQ的管理框架，该框架以OpenFlow网络通信协议为基础，实现网络流量的细粒度控制，能够在软件定义的雾计算环境中动态调整网络资源，实现医疗数据的快速、可靠传输，为远程医疗系统中的QoS管理提供了一种创新性解决方案。

表2 远程医疗中不同类型数据的QoS要求

Tab. 2 QoS requirements of different types of data in telemedicine

流量类型	数据速率/kbps	最大延时/ms	最大丢包率/%
音频			
语音	4~25	150~400	10
诊断声音	32~256	100~300	1
控制信号			
操控遥感	150	100	0
视频			
一般视频	640~5 000	150~400	10
感兴趣区域	5 000	100~300	0
数据			
ECG	200	200	0
心跳	200	200	0
血压	200	200	-
数字图像	几十~上百 Mbps	3 000	0

## 2.2 5G技术

5G技术是现代通信技术领域中的前沿技术,具备更大的带宽、更低的延迟、更广泛的连接密度以及更高的可靠性和安全性。在5G技术支撑下,远程医疗的智慧化程度进一步增强,不仅系统融合了人工智能、物联网、云计算等技术,而且形成了由终端层、网络层、平台层和应用层协同作用的智慧医疗体系构架,进而顺利开展了远程手术、远程超声、远程监护等的应用<sup>[31]</sup>。2024年6月7日,解放军总医院第三医学中心张旭院士团队,通过5G+互联网专线成功完成并演示了跨亚欧大陆“全球最远距离”的远程前列腺癌根治手术<sup>[32]</sup>。Wu等<sup>[33]</sup>在新冠疫情之初,应用基于5G网络的超声机器人对新冠肺炎患者进行远程超声检查(心脏和肺部),并进行了实时人工智能辅助诊断。依托中国电信5G医疗定制网技术方案,北京积水潭医院打造了一个智慧医疗新型数字化底座,通过定制化的“5G+云+边+用+服+安全”的融合服务,将远程医疗业务属性与场景需求相结合<sup>[34]</sup>。此外,“5G+医疗信息安全”也势在必行,Tong等<sup>[35]</sup>建立了5G云技术支撑平台,不仅完成了对携带心血管植入式电子设备患者的术后随访,而且能够在临床安全和网络安全方面保护患者的安全。

## 2.3 软件定义网络技术

SDN是一种新型网络创新架构,是网络虚拟化的一种实现方式。其核心技术OpenFlow将网络设备的控制面与数据面分离开来,能够根据远程

医疗服务的QoS需求动态管理网络,以适应远程医疗的多样化需求并确保关键医疗数据的优先传输。Wu等<sup>[36]</sup>开发了一个用于医疗服务的虚拟现实(virtual reality, VR)流媒体服务模型,探索了通过SDN来动态管理带宽的可行性。Altamirano等<sup>[37]</sup>提出了一种基于SDN和深度强化学习的网络自我管理架构,该架构可以自适应操作条件以满足网络服务的QoS需求。Parsaei等<sup>[38]</sup>以SDN为骨干网,定期收集远程手术期间的网络资源统计信息,然后根据QoS需求使用蚁群算法来计算医师与患者之间的最佳路径,该方法改善了平均端到端延迟、丢包率和峰值信噪比3个重要的QoS参数。Aswanth等<sup>[39]</sup>探索了一种基于SDN的策略,该策略可以根据链路上的可用带宽和从源到目的地路径上的总延迟来跟踪路由,以提供端到端延迟和带宽要求不同的远程医疗服务。此外,受到SDN构架的启发,Wang等<sup>[40]</sup>提出了一种面向远程医疗的覆盖网络模型(overlay network for telemedicine, ONTM),并应用于远程会诊、远程超声、远程手术等场景,在ONTM调控下北京与海南之间开展了远程脑起搏器手术,手术中电生理信号和高清视频可以顺利传输,平均延时为76 ms,丢包率为0。

## 2.4 确定性网络技术

DetNet是一种网络架构,旨在提供可预测的、一致的和可靠的数据传输服务。与传统“尽力而为”(best-effort)网络服务不同,确定性网络强调对数据传输延时、抖动、丢包率等性能指标的严格控制和保证<sup>[41]</sup>。确定性网络的应用场景通常包括工业自动化、实时控制系统、金融交易、远程医疗、自动驾驶汽车等对网络性能有严格要求的领域。在这些场景中,网络的不确定性可能会导致严重的后果,因此需要确定性网络来提供可靠的服务。2022年,Zhang等<sup>[42]</sup>在5G无线网络和DetNet模式下进行了单侧肾切除术,平均网络延迟为27 ms,丢包率为0。

综上所述,QoS技术、5G技术、SDN技术以及DetNet技术不仅是现代通讯网络的关键技术,也是推动远程医疗发展的重要基石。QoS通过保障网络服务质量,确保远程医疗中的高清视频传输、实时数据监测等关键应用的稳定性和可靠性,但也可能面临配置复杂、网络高度动态变化时性能受限等不足;5G技术的高速率和低延迟特性,让远程手术、远程会诊等高精度医疗操作成为可能,

极大地扩展了医疗服务的范围，但也在一定程度上存在成本高、覆盖范围不足等缺点；SDN通过灵活配置网络资源，实现了远程医疗系统的快速部署与调整，提高了医疗服务的响应速度和效率，然而也需要专门的配置和复杂的维护；DetNet虽确保了医疗数据传输的确定性和可控性，但相比于公共网络，其建设和维护成本通常更高。而拓展灵活、稳定的覆盖网络则显示了其应用于远程医疗广域网络传输的巨大潜力。

### 3 结语

在当今医疗环境中，远程医疗的应用具有深远的意义，特别是在医疗条件、技术应用的地理环境复杂的背景下。远程医疗为患者提供了跨越地理障碍的医疗资源，提高了医疗服务的可及性，尤其是在偏远或资源匮乏的地区。然而，远程医疗系统的有效运行高度依赖于网络的稳定性和可靠性，网络带宽的波动、数据包丢失等因素都可能对医疗服务质量产生不利影响，从而影响患者的治疗效果和满意度。

本文详细阐述了不同阶段远程医疗的网络通信技术和优缺点，探讨了从基础技术到前沿创新的演变过程，并详细介绍了复杂环境下远程医疗技术的国内外应用案例。通过对远程医疗通讯网络关键技术应用案例的深入分析，揭示了现有技术的优势和局限性，并展望了未来技术发展的可能方向。本文旨在为远程医疗技术的进一步研究和开发提供理论支持和实践指导，以期促进相关技术的不断进步和临床应用的优化，最终实现远程医疗服务质量的全面提升。

**作者贡献** 王瑞青、董敬、宋一敏、徐子雯、王华涛、汪安安：调查研究，撰写初稿；曹德森、罗进、胡革、李志海：审读和修订；何昆仑、李涛：审读和修订，监督指导。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

### 参考文献

- Polishuk P. Telecommunications policy making and institutions of the US government [J]. *Telecommun Policy*, 1976, 1 (1): 52-67.
- Behmanesh A, Sadoughi F, Mazhar FN, et al. Tele-orthopaedics: a systematic mapping study [J]. *J Telemed Telecare*, 2022, 28 (1): 3-23.
- 阎洁, 刘志国, 任旭东, 等. 基于卫星通信的机动远程医疗站点的构建与思考 [J]. *医疗卫生装备*, 2019, 40 (11): 62-66.
- 任桂英, 胡婷婷, 孙妙, 等. 我国远程医疗发展瓶颈及突破策

- 略 [J]. *卫生软科学*, 2024, 38 (3): 21-24.
- Fatehi F, Armfield NR, Dimitrijevic M, et al. Technical aspects of clinical videoconferencing: a large scale review of the literature [J]. *J Telemed Telecare*, 2015, 21 (3): 160-166.
- 韩贝贝. 远程应急会诊系统的建设 [J]. *医学信息*, 2023, 36 (17): 64-68.
- 吴晓芬, 董宁欣, 邵蕾. 基于5G网络的消化内镜远程手术示教研究初探 [J]. *外科研究与新技术*, 2022, 11 (1): 60-63.
- Zheng JL, Wang YH, Zhang J, et al. 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China [J]. *Surg Endosc*, 2020, 34 (11): 5172-5180.
- 张涛, 周虹, 金长明, 等. 灾害环境下现场医学救援理论的演进 [J]. *中国急救复苏与灾害医学杂志*, 2020, 15 (11): 1334-1336.
- 梁东, 杨旭, 向珍君, 等. 灾害事故现场批量伤员检伤分类方式研究进展 [J]. *中华卫生应急电子杂志*, 2024, 10 (2): 124-127.
- Martinelli M, Moroni D, Bastiani L, et al. High-altitude mountain telemedicine [J]. *J Telemed Telecare*, 2022, 28 (2): 135-145.
- Kiburg KV, Turner A, He MG. Telemedicine and delivery of ophthalmic care in rural and remote communities: drawing from Australian experience [J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2022, 50 (7): 793-800.
- Zhang W, He D, Wang G, et al. Analyzing national telemedicine policies in China from the perspective of policy instrument (1997-2020) [J]. *Int J Med Inform*, 2022, 166: 104854.
- Verrico John, Good Andrew. NASA satellite aids in Mexico City rescue effort [J]. *COSPAR Inf Bull*, 1986, 1986 (105): 83.
- Gao JH, Ma QQ, Sun DX, et al. Telemedicine in the battle with 2019 novel coronavirus disease (COVID-19) in Henan Province, China: a narrative study [J]. *Telemed J E Health*, 2023, 29 (8): 1211-1223.
- Tedeschi C. Ethical, legal, and social challenges in the development and implementation of disaster telemedicine [J]. *Disaster Med Public Health Prep*, 2021, 15 (5): 649-656.
- Garshnek V, Burkle FM Jr. Applications of telemedicine and telecommunications to disaster medicine: historical and future perspectives [J]. *J Am Med Inform Assoc*, 1999, 6 (1): 26-37.
- Xiong W, Bair A, Sandrock C, et al. Implementing telemedicine in medical emergency response: concept of operation for a regional telemedicine hub [J]. *J Med Syst*, 2012, 36 (3): 1651-1660.
- Zhai YK, Gao JH, Chen BZ, et al. Design and application of a telemedicine system jointly driven by videoconferencing and data exchange: practical experience from Henan Province, China [J]. *Telemed J E Health*, 2020, 26 (1): 89-100.
- Liman TG, Winter B, Waldschmidt C, et al. Telestroke ambulances in prehospital stroke management: concept and pilot feasibility study [J]. *Stroke*, 2012, 43 (8): 2086-2090.
- Espinoza AV, Van Hooff RJ, De Smedt A, et al. Development and pilot testing of 24/7 in-ambulance telemedicine for acute stroke: prehospital stroke study at the universitair ziekenhuis Brussel-project [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2016, 42 (1/2): 15-22.
- Doarn CR, Latifi R, Poropatich RK, et al. Development and validation of telemedicine for disaster response: the North Atlantic treaty organization multinational system [J]. *Telemed J E Health*, 2018, 24 (9): 657-668.
- 刘丹丹. 基于多种通信方式的一种新型远程会诊车硬件系统设

- 计与实现 [J]. 医疗卫生装备, 2013, 34 (5): 35-37.
- 24 叶枫, 崔鑫宇, 胡诗玮, 等. 远程医疗技术在地震救援中应用的分析 [J]. 中国卫生信息管理杂志, 2018, 15 (2): 166-169.
- 25 汪鹏, 李刚荣. 远程医疗会诊车在抗震救灾中的应用 [J]. 中国医疗设备, 2009, 24 (3): 55-57.
- 26 Zardari NA, Ngah R, Hayat O, et al. Adaptive mobility-aware and reliable routing protocols for healthcare vehicular network [J]. *Math Biosci Eng*, 2022, 19 (7): 7156-7177.
- 27 De La Torre Diez I, Alonso SG, Hamrioui S, et al. Systematic review about QoS and QoE in telemedicine and eHealth services and applications [J]. *J Med Syst*, 2018, 42 (10): 182.
- 28 Shah T, Yavari A, Mitra K, et al. Remote health care cyber-physical system: quality of service (QoS) challenges and opportunities [J]. *IET Cyber-phys Syst*, 2016, 1 (1): 40-48.
- 29 Younas MI, Iqbal MJ, Aziz A, et al. Toward QoS monitoring in IoT edge devices driven healthcare-a systematic literature review [J]. *Sensors*, 2023, 23 (21): 8885.
- 30 Bardalai P, Medhi N, Bargayary B, et al. OpenHealthQ: OpenFlow based QoS management of Healthcare Data in a Software-Defined Fog environment [C] // ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Montreal: IEEE, 2021.
- 31 陆恺鑫. 5G 通信技术在远程医疗中的应用分析 [J]. 中国新通信, 2023, 25 (20): 68-70.
- 32 从罗马到北京, 张旭院士团队完成跨洲际远程机器人手术 [EB/OL]. <https://www.301hospital.com.cn/want/news/Medical/detaol/12121.html>.
- 33 Wu SZ, Li KY, Ye RZ, et al. Robot-assisted teleultrasound assessment of cardiopulmonary function on a patient with confirmed COVID-19 in a cabin hospital [J]. *Adv Ultrasound Diagn Ther*, 2020, 4 (2): 128.
- 34 李英忠. 基于 5G 医疗定制网的远程手术的实践与思考 [J]. 电信科学, 2021, 37 (11): 104-114.
- 35 Tong L, Long Y, Xiong S, et al. Application of Postoperative Remote Follow-Up of CIED Based on the 5G Cloud Technology Support Platform in Areas With Underdeveloped Medical Resources [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 894345.
- 36 Wu EHK, Chen CS, Yeh TK, et al. Interactive medical VR streaming service based on software-defined network: design and implementation [C] // 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan). Taiwan (China): IEEE, 2020.
- 37 Altamirano JC, Slimane MA, Hassan H, et al. QoS-aware Network Self-management Architecture based on DRL and SDN for remote areas [C] // 2022 IEEE 11th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wireless and Wired Networks (PEMWN). Rome: IEEE, 2022.
- 38 Parsaei MR, Mohammadi R, Javidan R. A new adaptive traffic engineering method for telesurgery using ACO algorithm over Software Defined Networks [J]. *Eur Res Telemed/ La Recherche Eur En Télémedecine*, 2017, 6 (3/4): 173-180.
- 39 Aswanth A, Manoj E, Rajendran K, et al. Meeting Delay guarantee in Telemedicine service using SDN framework [C] // 2021 IEEE 9th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). Bangalore: IEEE, 2021.
- 40 Wang RQ, Zhang J, He SL, et al. Design and application of a novel telemedicine system jointly driven by multinet network integration and remote control: practical experience from PLAGH, China [J]. *Healthc Technol Lett*, 2023, 10 (6): 113-121.
- 41 高方方, 陈焱, 刘美慧, 等. 确定性网络技术研究 [J]. 电子技术应用, 2024, 50 (2): 10-16.
- 42 Zhang Z, Wang YH, Zhang ZL, et al. Application of deterministic networking for reducing network delay in urological telesurgery: a retrospective study [J]. *Int J Med Robot*, 2022, 18 (2): e2365.

(责任编辑: 孟晓彤)

(上接第 145 页)

- 10 蒋文秀, 张冬梅, 张芮, 等. 整体性治理下我国县域医共体信息化建设现状分析 [J]. 中国医院管理, 2023, 43 (1): 57-60.
- 11 徐萍萍, 赵静, 李春晓, 等. 基于数据包络分析的基层医疗卫生资源配置效率分析 [J]. 现代预防医学, 2023, 50 (6): 1075-1079.
- 12 Al-Rawashdeh M, Keikhosrokiani P, Belaton B, et al. IoT adoption and application for smart healthcare: a systematic review [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22 (14): 5377.
- 13 Zhou BG, Yang GH, Shi Z, et al. Natural language processing for smart healthcare [J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2022, 17: 4-18.
- 14 Brossard PY, Minvielle E, Sicotte C. The path from big data analytics capabilities to value in hospitals: a scoping review [J]. *BMC Health Serv Res*, 2022, 22 (1): 134.
- 15 Javaid M, Haleem A, Pratap Singh R, et al. Significance of machine learning in healthcare: features, pillars and applications [J]. *Int J Intell Netw*, 2022, 3: 58-73.
- 16 Yang DM, Chang TJ, Hung KF, et al. Smart healthcare: a prospective future medical approach for COVID-19 [J]. *J Chin Med Assoc*, 2023, 86 (2): 138-146.
- 17 Tse G, Lee Q, Chou OHI, et al. Healthcare big data in Hong Kong: development and implementation of artificial intelligence-enhanced predictive models for risk stratification [J]. *Curr Probl Cardiol*, 2024, 49 (1 Pt B): 102168.
- 18 袁靖, 赵韡, 卜天. 信息化迈向智慧化助推临床高质量发展 [J]. 中国卫生信息管理杂志, 2022, 19 (1): 12-17.
- 19 张莉娜, 王勇, 胡红濮, 等. 北京市智慧院前医疗急救信息平台顶层设计 [J]. 医学信息学杂志, 2023, 44 (6): 16-21.

(责任编辑: 孙菲)