

5G 移动远程机器人手术 1 例报告并文献复习

宋佳纯, 兰 彬, 刘帛岩, 邹贵军, 李松岩, 杜晓辉

解放军总医院第一医学中心普通外科医学部, 北京 100853

摘要: **背景** 5G 远程机器人手术能够为外科资源前移提供新方向, 但现有技术受限于固定场景, 移动远程手术模式尚未实践且潜力亟待探索。**目的** 探讨 5G 通信技术结合车载移动机器人手术系统进行移动远程机器人腹腔手术的安全性和可行性。**方法** 回顾分析 2024 年 9 月 27 日解放军总医院第一医学中心普通外科医学部团队通过 5G 无线网络应用车载移动远程机器人手术系统实施的跨越百公里(术者位于河北保定, 患者位于北京的固定手术室中)的腹腔探查、阑尾切除术临床资料。**结果** 患者, 女性, 40 岁, 主因“反复腹痛 9 个月余, 加重 1 d”就诊, 诊断为急性腹膜炎、慢性阑尾炎急性发作。手术过程顺利流畅, 用时 20 min, 无明显延迟及卡顿。术中出血量约 5 mL, 双向网络平均延迟 75 ms, 无断网、丢帧、网络攻击等不良事件。患者恢复顺利, 无出血、腹痛等并发症发生, 术后第 1 天排气, 第 2 天出院。**结论** 初步证明在 5G 无线网络支持下移动远程机器人手术安全可行。移动远程机器人手术系统为推动优质医疗资源下沉基层, 尤其为提升军队卫勤保障能力提供了新的平台和思路。

关键词: 移动远程机器人手术; 5G 网络; 军事医学; 阑尾切除术; 互联网医疗; 医学工程

中图分类号: R6; R-1

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)08-0754-05

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25021101

引用本文: 宋佳纯, 兰彬, 刘帛岩, 等. 5G 移动远程机器人手术 1 例报告并文献复习 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (8): 754-758.

5G mobile remote robotic surgery: A case report and literature review

SONG Jiachun, LAN Bin, LIU Boyan, ZOU Guijun, LI Songyan, DU Xiaohui

Department of General Surgery, the First Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Corresponding author: DU Xiaohui. Email: duxiaohui301@sina.com

Abstract: Background 5G-enabled remote surgery provides a novel direction for the forward deployment of surgical resources. However, current technologies remain constrained to fixed scenarios, and mobile remote surgical models have yet to be implemented, with their potential awaiting exploration. **Objective** To investigate the safety and feasibility of mobile remote robotic abdominal surgery utilizing 5G communication technology integrated with a vehicle-mounted mobile robotic surgical system. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data about a patient undergoing abdominal exploration and appendectomy by the General Surgery Department team of the First Medical Center of PLA General Hospital. The surgery was carried out over a distance of 100 kilometers using a 5G wireless network and a mobile remote robotic surgical system installed in a vehicle. The surgeon was positioned in Baoding, Hebei Province, while the patient was located in a fixed operating room in Beijing. **Results** A 40-year-old female patient presented with "recurrent abdominal pain for 9 months, aggravated for 1 day" and was diagnosed with acute peritonitis and acute exacerbation of chronic appendicitis. The surgery was completed smoothly in 20 minutes without significant latency or interruptions. Intraoperative blood loss was approximately 5 mL, with a bidirectional network latency averaging 75 ms. No adverse events, including network disconnections, frame loss, or cyberattacks, occurred. The patient recovered uneventfully, experiencing no postoperative complications such as hemorrhage or abdominal pain. Bowel function resumed on postoperative day 1, and the patient was discharged on day 2. **Conclusion** Preliminary findings indicate that mobile remote robotic surgery supported by 5G wireless networks is safe and feasible. This system provides a novel platform and approach for promoting the allocation of high-quality medical resources to the grassroots level, particularly for enhancing the medical support capabilities of military medicine.

Keywords: mobile remote robotic surgery; 5G network; military medicine; appendectomy; internet healthcare; medical engineering

Cited as: Song JCH, Lan B, Liu BY, et al. 5G mobile remote robotic surgery: A case report and literature review [J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(8): 754-758.

收稿日期: 2025-02-11

第一作者: 宋佳纯, 在读硕士, 医师。Email: 1811060@mail.nankai.edu.cn

通信作者: 杜晓辉, 博士, 主任医师, 教授, 博士生导师。Email: duxiaohui301@sina.com

新型高性能武器的广泛使用导致战场环境复杂、伤员救治难度加大, 凸显出将优质外科医疗资源前移至前线的迫切需求^[1]。与此同时, 偏远地区紧急医疗响应迟滞、灾害现场外科处置能力不

足等问题,反映出医疗资源跨时空调配的痛点。远程医疗正在成为解决这些问题的重要手段之一^[2]。远程机器人手术借助先进的网络通信技术,使医师能够通过操纵机器人手术系统为身处异地的伤员及时实施手术,从而提供更为便捷、高效的救治措施^[3-4]。目前,国内外报道了多专科远程机器人手术的临床案例,但均局限于固定手术室,存在一定的空间限制。长时间的伤员转运会延误救治时机,移动远程机器人手术作为一种新兴的医疗模式,依托可移动工具,能够将医疗救治能力以更便利的方式向偏远地区和战场一线前伸^[5-6]。目前,移动远程机器人手术尚无相关报道。解放军总医院第一医学中心普通外科医学部团队在顺利完成国内多例远程机器人手术的情况下^[7],首次采用5G通信技术支持的移动远程机器人手术系统为1例急性腹膜炎患者实施腹腔手术,初步验证了该技术在创伤救治中的安全性和可行性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

患者,女性,40岁,主诉为“反复腹痛9个月余,加重1d”。于2024年1月无明显诱因出现脐周及剑突下间断疼痛,无恶心、呕吐、腹胀、腹泻等症状。遂就诊于解放军总医院第一医学中心,予以抗感染、补液等对症支持治疗后症状缓解。2024年9月26日患者再次出现腹痛并就诊于解放军总医院第一医学中心急诊科,查体示右下腹压痛(+)、反跳痛(+),轻度肌紧张,Murphy氏征阴性,肠鸣音3次/min。血常规提示白细胞计数为 $13.42 \times 10^9/L$,中性粒细胞百分比为89.5%,白细胞介素-6为31.40 pg/mL。腹部超声提示右下腹阑尾区增粗,呈盲管样结构,考虑阑尾炎可能性大。急诊以“急性腹膜炎、慢性阑尾炎急性发作”收住于解放军总医院第一医学中心普通外科医学部,拟行手术治疗。术前完善各项检查检验,无明确手术禁忌。本例移动远程机器人手术经解放军总医院医学伦理委员会审批(编号:S2025-104-01号),患者及家属均知情同意。

1.2 移动远程机器人手术系统

本次手术使用图迈机器人手术系统[上海微创医疗机器人(集团)股份有限公司],其移动远程机器人手术工作站位于河北省保定市某集团军,外形尺寸11 000 mm×2 550 mm×3 980 mm(长×宽×高),为车载箱体设计,采用二类底盘加装。工作站内

集成医疗配套设备,主要包括救护设备、保障系统等,内置UPS电源、5G路由器、外科医师主系统控制台及音视频通讯系统,具备独立完整的能源供应体系,能够实现电源自持,保障手术系统在无外接电源环境下的持续稳定运行。外科医师主系统控制台配备左右双主控制臂,均集成指压开关。控制臂性能优越,关节误差稳态 $\leq 1 \mu\text{m}$,重复定位精度 $\leq 0.01 \text{ mm}$,操作力 $\leq 0.1 \text{ N}$,均匀性 $\leq 0.01 \text{ N}$,可满足精细手术操作的控制需求。此外,该系统具备5G网络动态接入能力,可在5G网络覆盖区域内实现即时部署与远程操控。整体平台设计高度模块化与便携,支持快速转运和现场展开,具有良好的环境适应性。外部结构兼具保温、防雨、防辐射、防沙尘等多重防护特性,适用于移动诊疗、灾后救援、战场救护及偏远地区临时医疗等复杂多变的环境条件,显著提升了移动远程医疗系统的实用性与应急响应能力。

1.3 网络连接

本例移动远程机器人手术仅通过5G无线网络(中国电信)实现主从数据的交互传输,IP地址由5G信号基站分配(图1)。采用3.5 GHz专用频段(n78频段),部署SA独立组网架构,基站侧配置URLLC(超可靠低时延通信)切片,预留专属20 MHz带宽。空口延时控制在15 ms内。室分基站与机器人距离 $\leq 3 \text{ m}$,RSRP(参考信号接收功率)信号强度 $\geq -85 \text{ dBm}$,SINR(信噪比) $\geq 33 \text{ dB}$ 。工作人员提前对网络进行了调试和加密,同时开启新一代防火墙,以保障手术信号的网络传输安全。手术过程中,通过远程手术演示系统将主、从系统的画面分屏投放至手术现场的3D显示屏上,患者的生命体征信息通过网络实时传输给术者,同时通过视频会议系统实现术者与助手的无障碍沟通。

2 结果

2.1 手术场景展示与沟通

移动远程机器人手术系统工程师团队在术前1 h启动设备,连接主、从系统的网络,并对带宽、延时、丢包率进行多次检测确认。通过演示系统展示手术现场画面,真实传输麻醉机、监护仪的参数信息,术中影像画面稳定清晰,无肉眼延迟,声音同步清楚无杂音。

2.2 移动远程手术情况

在确认设备器械状态良好及网络连接稳定后,开始实施全身麻醉。患者取分腿位,常规消毒术

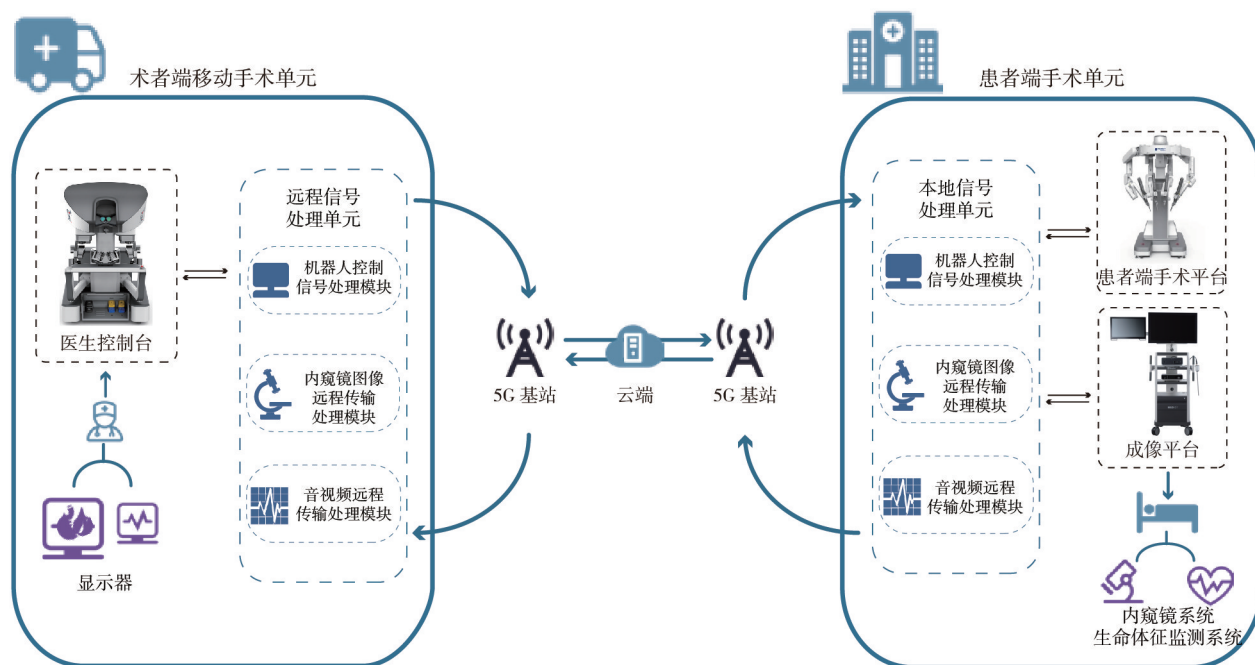


图1 移动远程手术机器人系统模式图

Fig. 1 Schematic diagram of mobile remote robotic surgical system

野皮肤并铺单，左下腹壁行长约8 mm切口，建立气腹(气腹压为12 mmHg)。探查见回盲部粘连，腹腔内肠管水肿，阑尾充血、肿胀，盆腔少量积液。于脐上、下5 cm处置入8 mm Trocar，左上腹壁置入13 mm Trocar。连接机器人机械臂，分别置入超声刀及无创钳。吸净盆腔积液，分离回盲部粘连，沿阑尾尖部用超声刀逐步游离，充分暴露阑尾根部，外科夹结扎阑尾动静脉并用超声刀离断，直线切割闭合器于根部切断阑尾并取出。创面彻底止血，湿纱布反复擦拭盆腔及结肠旁沟，清点器械、纱布无误后，撤出机械臂，缝合各切口。手术过程顺利，术中出血约5 mL，手术时间约20 min。

2.3 术中延迟及网络情况

手术过程中使用5G无线网络，平均双向网络延时约75 ms，丢帧率为0。术中术者操作无明显网络延迟感及卡顿感，主从一致性好，主从响应频率 $\geq 4\ 000$ Hz，术中解剖层次清晰，操作过程顺利流畅。

2.4 网络安全保障

该网络系统通信节点之间通过绑定的证书鉴别彼此身份，源头上屏蔽非法通信的接入，并且使用最新的TLS1.3加密协议动态协商临时密钥，实现通信加密。在网络质量上采用双网热备方案设计，在首选网络质量下降或中断时自动切换到备用网络，后在其恢复时自动切换到首选网络。

在术中施行实施网络质量检测，基于网络二层的快速循环编码和通讯质量检测技术，能够实时监测到网络异常并报警，从而避免手术远程操作不可信而造成手术安全问题。若术中出现网络问题，可利用术后日志分析在日志中查看并解析原因，后续进行问题规避。

2.5 术后情况

患者恢复顺利，术后第1天排气，第2天出院。病理检查结果为急性化脓性阑尾炎。

3 讨论

近年来，远程医疗凭借其独特优势，在诊断、监护及培训等领域均展现出广阔的应用前景^[8-9]。随着高速通信技术和机器人手术系统的快速发展，远程医疗的内涵不断丰富，远程机器人手术逐渐进入人们的视野^[10]。解放军总医院第七医学中心于2023年3月利用国产图迈手术机器人，成功实施了1例相距4 000 km的腹腔镜全子宫切除术^[11]。2024年1月，本团队结合国产手术机器人系统和5G通信技术，成功完成了1例跨越3 000 km的直肠癌根治术^[7]。这些案例充分显示了远程机器人手术在实际临床应用中的巨大潜力，以及移动远程操作的可行性。目前，移动远程手术已在极端环境下开展相关试验。如Doarn等^[12]通过M7外科手术遥控机器人成功缝合水下实验室中的皮肤模型，

但其临床实际应用未见报道。

本研究通过5G移动远程机器人手术系统成功实施腹腔镜手术,以阑尾炎手术为切入点,首次验证了该系统在紧急医疗场景中维持稳定操作与精准执行的核心性能,证实了移动化远程救治技术的可行性,可进一步扩展至普通外科急症与常规手术场景。手术全程耗时仅20 min,相比普通机器人手术及腹腔镜手术,时间大大缩短;出血量仅5 mL,优于常规腹腔镜手术和传统机器人手术,指标接近开放手术精度,凸显了移动信息技术与机器人手术系统的高效协同对患者临床结局的积极影响^[13]。在5G移动通信技术的支持下,0丢帧率和低延迟保障了移动远程手术的高灵活性和时效性,医师可以在任何有网络覆盖的地方进行手术操作,提高了手术的机动性和响应速度^[14]。在战地医疗、自然灾害现场及偏远地区等极端医疗场景中,移动远程机器人手术系统通过其可快速部署的技术特性,突出体系“移动”优势,为突破地理屏障与资源限制提供了创新解决方案。将传统救援模式下数小时的转运等待时间压缩至“零延迟”手术响应,移动模块构建及应用可随时随地展开手术,显著提升创伤患者的“黄金救治时间窗”救治成功率。这一模式不仅解决了偏远地区医疗资源分布不均的难题,而且通过模块化技术平台的多场景适配能力,可为灾难医学救援体系提供可扩展、高鲁棒性的技术支撑,进而助力“即时化、精准化、去中心化”的紧急医疗网络构建。

5G移动远程机器人手术具有显著优势,但也面临着一定的技术和应用挑战,拥有手术专业知识和强大的网络基础设施至关重要。这包括通信系统、机器人平台、可靠的连接、延迟管理和数据安全。远程手术的移动性很大程度上取决于5G移动网络的广泛覆盖和稳定连接,尤其是在突发公共事件和战场环境下。在移动远程机器人手术场景中,该系统很大程度上依赖于最小化延迟,以复制传统手术中的即时性和精确性。移动网络的速度、机器人系统的处理能力以及数据压缩和解压缩算法的效率等均影响整体手术的操作精度和时间,还会影响外科医师的整体操作效果。对于可能出现网络盲区、网络波动等不稳定状况,需结合其他通信技术如卫星通信或专家网络提高网络信号的稳定性^[15-16]。如可通过构建5G+卫星双链路冗余系统实现动态网络切换,并通过高频冗余数据传输技术实现关键指令的并行传输,确保至

少一条链路的有效通讯。移动远程网络开放和复杂的网络结构本身也会伴随着带来信号干扰、数据窃取与篡改等数据安全隐患,因此需要加强系统的加密技术与网络安全防护^[17-18],并通过区块链存证实现操作数据的全流程数据存证^[19]。当前的远程手术系统通常依赖于大型固定平台和设备,移动设备的便携性和部署速度是影响其在紧急场景中应用的重要因素^[20]。对于术者来说,如何在车辆、船舶、飞机等移动载体上连接设备、快速部署是一个亟待解决的问题。其中远程手术设备在移动场景下,特别是机器人、传感器和数据传输设备,对能源的需求较高,能源续航成为一大挑战。战场或紧急场景中,如何确保设备长时间稳定运行、模拟真实战场或灾害现场中的动态干扰(如颠簸、温湿度变化)对设备稳定性的影响,并进一步拓展至创伤急救、战地穿透伤清创等复杂术式模式,探索多场景适应性,是未来的研究重点。

为更好地适应环境复杂多样、形势瞬息万变、要素多元分散的未来局势,需要以科技赋能突破创伤救治瓶颈。救治技术与装备的创新应突出智能化、信息化、动态化、无人化特征,易于展开,便于操作使用,实现传统救治技能与远程医疗手段相结合^[21-22]。基于5G的移动远程机器人手术的成功开展为医疗资源统筹调配及创伤救治提供了新的可能性,突破固定场景限制,填补了移动场景下远程手术的空白,是移动远程机器人手术技术在国内急救场景的初步尝试,为后续通过不同媒介、针对多种复杂疾病及创伤救治提供了有益指导。随着5G通信技术、人工智能与机器人手术技术的深度融合,移动远程机器人手术将突破单一技术场景限制,逐步构建“全域覆盖、实时响应”的体系化卫勤保障能力,加速实现“外科资源前移”的战略目标。这一技术-战术融合模式不仅为时效性救治提供颠覆性解决方案,更为实现“高端医疗与士兵同在”的卫勤目标提供重要技术参考。

作者贡献 杜晓辉: 总体构思, 监督指导; 宋佳纯、兰彬: 研究设计, 数据收集, 数据整理, 撰写论文; 刘帛岩、邹贵军、李松岩: 方案实施, 审读修订。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

- 1 Katzman D, Kalman G, Almog O, et al. Deployment of physician resources and innovative medical strategies in the 2023-

- 2024 Israel-hamas war: Israel's strategy to deliver advanced life support and whole blood transfusion to the battlefield via forward medical teams and the impact on the case fatality rate [J]. *Mil Med*, 2024; usae553.
- 2 Madsen C, Poropatich R, Koehlmoos TP. Telehealth in the military health system: impact, obstacles, and opportunities [J]. *Mil Med*, 2023, 188 (Suppl 1): 15-23.
 - 3 Faris H, Harfouche C, Bandle J, et al. Surgical tele-mentoring using a robotic platform: initial experience in a military institution [J]. *Surg Endosc*, 2023, 37 (12): 9159-9166.
 - 4 Xia SB, Lu QS. Development status of telesurgery robotic system [J]. *Chin J Traumatol*, 2021, 24 (3): 144-147.
 - 5 Ahad A, Tahir M, Sheikh MA, et al. Technologies trend towards 5G network for smart health-care using IoT: a review [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20 (14): 4047.
 - 6 王野, 闫石, 常易凡, 等. 远程手术创新的现状和进展 [J]. *海军军医大学学报*, 2023, 44 (5): 627-630.
 - 7 李松岩, 闻巍, 戴飞翔, 等. 超远程手术机器人辅助直肠癌根治术临床初步研究 [J]. *中国实用外科杂志*, 2024, 44 (3): 308-311.
 - 8 Su ZY, Li CQ, Fu HT, et al. Development and prospect of telemedicine [J]. *Intell Med*, 2024, 4 (1): 1-9.
 - 9 Cui FF, Ma QQ, He XY, et al. Implementation and application of telemedicine in China: cross-sectional study [J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2020, 8 (10): e18426.
 - 10 王思喆, 孙旭, 李丁昌, 等. 智能医疗在腹部战创伤中的应用研究进展 [J]. *解放军医学杂志*, 2025, 50 (1): 22-27.
 - 11 顾成磊, 李立安, 王宁, 等. 5G远程机器人辅助腹腔镜全子宫切除术首例报道 [J]. *中国微创外科杂志*, 2023, 23 (8): 610-615.
 - 12 Doarn CR, Anvari M, Low T, et al. Evaluation of teleoperated surgical robots in an enclosed undersea environment [J]. *Telemed J E Health*, 2009, 15 (4): 325-335.
 - 13 Biondi A, Di Stefano C, Ferrara F, et al. Laparoscopic versus open appendectomy: a retrospective cohort study assessing outcomes and cost-effectiveness [J]. *World J Emerg Surg*, 2016, 11 (1): 44.
 - 14 Lacy AM, Bravo R, Otero-Piñero AM, et al. 5G-assisted telementored surgery [J]. *Br J Surg*, 2019, 106 (12): 1576-1579.
 - 15 Dohler M, Saikali S, Gamal A, et al. The crucial role of 5G, 6G, and fiber in robotic telesurgery [J]. *J Robot Surg*, 2024, 19 (1): 4.
 - 16 Ahad A, Ali Z, Mateen A, et al. A comprehensive review on 5G-based smart healthcare network security: taxonomy, issues, solutions and future research directions [J]. *Array*, 2023, 18: 100290.
 - 17 Seh AH, Zarour M, Alenezi M, et al. Healthcare data breaches: insights and implications [J]. *Healthcare (Basel)*, 2020, 8 (2): 133.
 - 18 Gupta R, Tanwar S, Tyagi S, et al. Tactile-Internet-based telesurgery system for healthcare 4.0: an architecture, research challenges, and future directions [J]. *IEEE Netw*, 2019, 33 (6): 22-29.
 - 19 Jain N, Gupta V, Dass P. Blockchain: A novel paradigm for secured data transmission in telemedicine [M] //Jude HD, Gupta D, Khanna A, et al. *Wearable telemedicine technology for the healthcare industry*. Academic Press, 2022: 33-52.
 - 20 Reichenbach M, Frederick T, Cubrich L, et al. Telesurgery with miniature robots to leverage surgical expertise in distributed expeditionary environments [J]. *Mil Med*, 2017, 182 (S1): 316-321.
 - 21 黄韵翰, 周逢海, 郭柏鸿. 基于5G通信技术的远程机器人手术应用研究进展及关键技术分析 [J]. *中国微创外科杂志*, 2024, 24 (2): 138-142.
 - 22 Iqbal J, Cortés Jaimes DC, Makineni P, et al. Reimagining healthcare: unleashing the power of artificial intelligence in medicine [J]. *Cureus*, 2023, 15 (9): e44658.

(责任编辑:施晓亚,潘越)

(上接第742页)

- 15 Acemoglu A, Peretti G, Trimarchi M, et al. Operating from a distance: robotic vocal cord 5G telesurgery on a cadaver [J]. *Ann Intern Med*, 2020, 173 (11): 940-941.
- 16 梁霄, 蔡秀军. 5G远程医疗机器人手术的现状和展望 [J]. *中华消化外科杂志*, 2024, 23 (4): 554-560.
- 17 王哲. 5G为智慧医疗赋能 [N/OL]. <http://www.chinareports.org.cn/djbd/2019/0617/9648.html>.
- 18 隋佳星, 桑庆华, 李海洋, 等. 外展嵌插件后倾型股骨颈骨折术中解剖复位或可接受复位的术后疗效分析 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2024, 26 (4): 330-336.
- 19 何立, 陈华, 易成腊. 骨盆解锁复位架联合智能可视化系统辅助复位与固定治疗Tile C1型骨盆骨折 [J]. *中华骨科杂志*, 2023, 43 (19): 1308-1315.
- 20 Szymiski D, Walter N, Lang S, et al. Incidence and treatment of intracapsular femoral neck fractures in Germany [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2023, 143 (5): 2529-2537.
- 21 陈华, 齐红哲, 朱正国, 等. 骨盆外架辅助复位联合通道螺钉固定治疗Tile C1型骨盆骨折 [J]. *中华创伤杂志*, 2018, 34 (10): 919-924.
- 22 唐佩福, 张浩, 李建涛, 等. 外科4.0: 数字化智能化外科赋能时代的来临 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2019, 21 (3): 185-188.

(责任编辑:施晓亚,潘越)