



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250350

<http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.250350>

China Journal of General Surgery, 2025, 34(11):2469-2479.

· 文献综述 ·

5G赋能远程机器人手术在普通外科的应用现状、挑战与未来趋势

蒲宝红¹, 崔佳明¹, 张旭³, 马世勋², 刘鹏¹, 麻月琴¹, 朱君怡¹, 苗长丰², 房伟², 田宏伟^{1,2}, 郭天康²

(1. 甘肃中医药大学第一临床医学院, 甘肃 兰州 730000; 甘肃省人民医院 2. 普通外科 3. 内镜诊疗中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要

5G通信技术的突破,使远程机器人手术从概念探索迈入临床应用阶段,为普通外科复杂手术提供了新的解决范式。其通过低时延、高可靠网络支撑,实现了跨区域、跨距离的实时主从控制,显著提升了手术的精细化与空间自由度。在胃肠、肝胆胰及甲状腺等多领域,远程手术已完成从单病例验证到多中心应用的过渡,手术表现出低出血量、低并发症发生率和快速康复等优势,国产手术机器人系统的可靠性也得到初步验证。然而,远程手术仍受到网络稳定性、设备冗余、法律伦理规范及支付体系缺乏等多因素制约。未来,随着AI决策、数字孪生和6G通信的深度融合,远程机器人手术将在智能化、自主化及跨洲际协作方面实现突破,并重塑急救医疗模式与分级诊疗体系。总体而言,远程机器人手术将推动普通外科迈向精准化、智能化和可及化的新阶段。

关键词

外科手术; 机器人手术; 远程医学; 5G网络; 综述

中图分类号: R61

Current status, challenges, and future trends of 5G-enabled remote robotic surgery in general surgery

PU Baohong¹, CUI Jiaming¹, ZHANG Xu³, MA Shixun², LIU Peng¹, MA Yueqin¹, ZHU Junyi¹, MIAO Changfeng², FANG Wei², TIAN Hongwei^{1,2}, GUO Tiankang²

(1. First Clinical Medical College, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China; 2. Department of General Surgery; 3. Endoscopic Diagnosis and Treatment Center, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, China)

Abstract

Advances in 5G networks have enabled remote robotic surgery to transition from technical exploration to clinical implementation, providing a new paradigm for complex general surgical procedures. Supported by low-latency and high-reliability data transmission, telesurgical systems achieve real-time master-slave control across long distances, significantly improving surgical precision and operational flexibility. Applications in gastrointestinal, hepatopancreatobiliary, and thyroid surgery have progressed from single-case demonstrations to multi-center practice, consistently demonstrating low intraoperative blood loss, reduced complication rates, and enhanced postoperative recovery. Domestic robotic platforms have also

基金项目: 甘肃省兰州市城关区人才创新创业基金资助项目 (2022RCCX0014); 甘肃省人民医院人才库科研启动基金资助项目 (2024KYQDJ-A-18)。

收稿日期: 2025-06-21; **修订日期:** 2025-11-14。

作者简介: 蒲宝红, 甘肃中医药大学第一临床医学院硕士研究生, 主要从事肝胆胰胃肠疾病诊断和治疗方面的研究。

通信作者: 田宏伟, Email: tianhw18@163.com

shown reliable performance in early clinical evaluations. Despite these achievements, telesurgery still faces challenges related to network stability, system redundancy, regulatory and ethical clarity, and the absence of a mature reimbursement framework. Looking ahead, the integration of AI-assisted decision-making, digital twins, and emerging 6G technologies will further drive telesurgery toward intelligent automation, intercontinental collaboration, and innovative emergency-care models. Overall, remote robotic surgery is expected to promote a new era of precision, intelligence, and equitable access in general surgery.

Key words

Surgical Procedures, Operative; Robotic Surgical Procedures; Telemedicine; 5G Network; Review

CLC number: R61

20世纪80年代,腹腔镜技术的问世开创了微创外科的新纪元,显著降低了患者的手术创伤。然而,受限于技术瓶颈,传统腹腔镜手术仍面临诸多挑战:一方面,器械活动自由度不足导致手术视野存在盲区,增加了组织重建和缝合的操作难度;另一方面,二维视觉系统缺乏立体感,加之镜头稳定性欠佳,这些问题共同制约了手术质量的提升^[1-2]。2001年,医疗领域取得重大突破—世界首例远程胆囊切除术成功实施^[3],这标志着外科手术正式迈入远程化新时代。截至2025年,全球远程机器人手术量已突破千例,应用范围扩展至心脏外科、泌尿外科、胃肠外科等多个专科领域。值得注意的是,远程手术的实施效果高度依赖网络性能,特别是传输速率和延迟时间等关键参数,这些因素直接决定了实时远程操作的精准性和安全性^[4]。2019年11月1日,上海微创公司的图迈®腹腔镜手术机器人在上海市东方医院成功完成1例高难度前列腺癌根治术^[5]。该手术是中国首例由国产自主研发手术机器人实施的临床手术,标志着国产腹腔镜手术机器人实现了“从0到1”的关键突破。然而,随着5G通信技术的突破性发展,新一代手术机器人已能依托高速、低延迟的5G网络实现远程精准操作。这一技术革新不仅有效突破了传统远程手术的局限性,更将微创外科推进至前所未有的新高度—在确保手术安全性的同时,实现了操作精准度和智能化水平质的飞跃^[6]。

1 技术原理与系统构成

根据《5G远程控制机器人辅助结直肠癌手术中国专家共识(2025版)》^[7]的规范定义,现代远程机器人手术系统采用模块化架构设计,主要由

四大核心组件构成:远程主控医生操作台(主系统)、本地辅助医生操作台(副系统)、患者端手术执行平台,以及集成化的多模态人机交互系统(含高清影像传输与实时音视频通讯平台)(图1)。主系统作为远程手术的核心操作终端,通过高精度主从控制架构实现术者对远端机械臂的实时精准操控,完成各类复杂手术动作^[8]。其工作流程可概括为以下闭环控制系统:术者通过主控台输入操作指令,经5G远程控制系统编码转换为数字控制信号;该信号通过低延时网络传输至本地患者手术平台,驱动机械臂执行精确的手术操作。与此同时,集成化图像处理平台同步实现双重功能:一方面为操作者提供多视角的手术场景监视,另一方面将内窥镜采集的高清三维(3D)视觉信号实时回传至主控台显示系统。这种双向数据交互架构确保了术者能够基于(通过端到端环回时间测试测得)亚秒级延迟的4K/3D可视化反馈,实现对远端机械臂的实时闭环控制,最终形成“指令-执行-反馈-修正”的智能化手术操作闭环^[9-14],该主从控制系统的性能依赖于一系列关键工程技术参数。例如,控制回路频率通常需稳定在500~1 000 Hz,以确保操作的平滑性与实时响应。通信带宽要求则根据影像质量浮动,传输1 080 p/3D视频流约需15~20 Mbps,而4K/3D视频则可能要求>50 Mbps的稳定带宽。在稳定性算法层面,除经典的比例-积分-微分控制器用于保证基础运动跟踪性能外,更先进的策略如模型预测控制正被探索用于预测网络延迟并补偿其影响,或基于李雅普诺夫函数的自适应控制用于处理系统模型的不确定性^[15],从而在复杂环境下增强系统的鲁棒性。在技术性能方面,国产手术机器人系统(如图迈®)与国际主流系统(如达芬奇)在核心操作精

度上已相当接近^[16-17]。例如,图迈®系统在实验室条件下的重复定位精度可达<1 mm,与达芬奇系统报道的亚毫米级精度处于同一量级。在关键的主从控制延时方面,在 5G 网络保障下,国产系统亦能实现<100 ms 的端到端延迟,满足远程手术的实时性要求。国产系统的优势在于更贴合国内临床

需求的定制化功能设计、更具竞争力的成本以及更快捷的本土技术服务支持,为技术普及奠定了基础。副系统则需配备完整的机器人手术系统及专业团队来应对突发状况,确保在任何突发情况下都能维持手术的连续性,为患者安全提供保障^[18]。



图1 机器人远程手术示意图
Figure 1 Schematic of remote robot surgery

2 远程机器人手术的分类

刘荣等^[19]《远程手术的分级》,远程机器人手术系统可划分为以下四类操作模式(表1)。

根据日本《远程外科临床实践指南 2022 版》^[18]和

表1 远程手术技术分类及特征对比
Table 1 Classification and characteristics of remote surgery technologies

类型	技术架构	核心功能	临床保障机制
远程手术指导 ^[20-23]	5G 实时音视频交互系统	全流程操作监护、人机协同控制、术式执行验证	多模态生理数据同步传输、实时可视化呈现
远程手术监督 ^[24]	数字孪生导航平台	毫米级轨迹校准、预测性纠偏、亚秒级响应监护	多参数生命体征监测、物理-数字空间耦合
远程手术操作 ^[25]	主从式控制架构(5G 双向数据链路)	亚毫米级机械臂操控、分布式人机协同	多参数生命监护系统、全术程生理可视化
智能化远程手术 ^[26-27]	人机共融智能架构(AI 决策+数字孪生)	亚毫米级 AI 规划执行、动态异常阻断、七自由度机械臂控制	多模态感知融合系统、亚秒级跨空间同步

3 普外科典型应用场景

3.1 胃肠外科领域

远程机器人手术在胃肠外科领域的应用已取得显著进展。麦克马斯特大学 Anvari 等^[28-29]在 2003 和 2005 年,先后完成了 43 远程机器人手术,其中包括腹股沟疝修补术、胃癌根治术(图 2)、腹股沟疝修补术、左/右半结肠切除等术式,在其所有手术过程中均无严重并发症发生,且无需中转开放手术,患者术后状态良好,平均住院时间与三级医疗机构的腹腔镜手术住院时长几乎相同。中国詹渭鹏等^[30-31]在 2023 年 5 月成功实施了全球首例 5G

远程国产图迈®腔镜手术机器人辅助胃癌根治术。此例手术首创了“3+2”模式机器人胃癌手术,全程采用标准化七步法淋巴结清扫,主从控制时间 190 min(总时长 250 min),术中出血量仅 50 mL,术中零并发症且术后 10 d 顺利出院(短期随访),验证 5G 远程肿瘤手术可行性。张文涛等^[32]使用国产手术机器人成功实施了 1 例 5G 远程机器人辅助结肠癌根治术,在此手术中网络性能稳定,全程无中断,最高延迟 84.2 ms(测量方法:网络性能监测系统实时记录),平均丢包率 0.01%,主从连接时间 7 min,有效操作时间 108 min,总手术时间 250 min,术中出血量仅 10 mL,验证了使用国产机

机器人系统实施5G远程结肠癌手术的安全性,为推广远程肿瘤手术提供实证依据。Cadière等^[33]通过随机对照试验证实,远程手术方法在尼森胃底折叠术等先进腹腔镜手术中是可行的(成功率100%)。而中国田文等^[34]在2024年8月成功实施全球首例跨2 200 km(北京—广州)远程机器人辅助食管裂孔疝修补联合胃底折叠术,此远程机器人手术系统运用5G+专线双通道冗余网络,平均延迟(测量方法:端到端环回时间测试):39 ms,零网络中断/丢帧事件,手术时间78 min,术中出血量仅为10 mL,主从控制精度为0.1 mm(依据ISO 9283标准在实验室条件下测得的重复定位精度),患者术后6 d出院(短期随访),此手术案例验证了复杂上消化道实施机器人远程手术的可行性,同时证实了双网络架构可靠性。2023年12月王晓鹏

等^[35]成功实施首例5G远程(75.6 km)机器人袖状胃切除术,采用国产图迈系统实现双主刀操作,手术120 min完成,网络延迟(55.16 ± 25.33) ms(测量方法:连续采样统计),丢包率0.01%~0.1%,验证了机器人远程代谢手术的安全可行性。李松岩等^[12]报道了我国成功完成首例3 000 km(北京—三亚)超远程5G机器人直肠癌根治术,手术90 min完成,术中出血量20 mL,术后7 d出院(短期随访),病理显示根治彻底,证实了对直肠癌实施机器人远程手术的可行性。综上所述,远程机器人手术在胃肠外科领域展现出广泛的应用前景,其安全性和有效性已得到充分验证。该技术不仅突破了传统手术的地理限制,为基层医院开展复杂手术提供了创新的远程协作解决方案,同时也验证了国产手术机器人技术的可靠性和先进性。

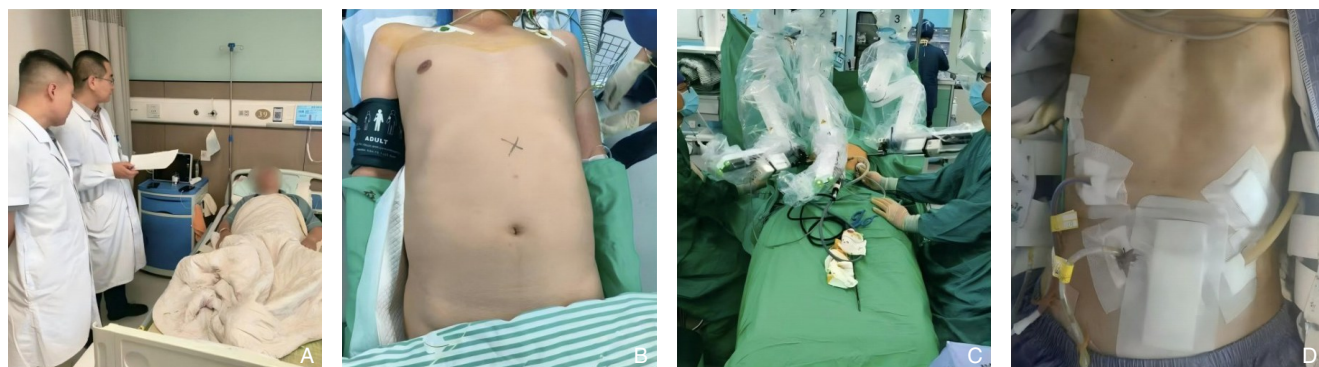


图2 远程机器人胃癌根治术治疗过程 A:术前访视,医生与患者沟通并评估病情;B:术前标记,确定手术切口位置;C:术中操作,采用远程机器人辅助手术系统进行胃癌根治术;D:术后腹部切口情况,患者腹部切口已缝合并包扎,连接监护设备,确保安全恢复

Figure 2 Treatment process of remote robotic radical gastrectomy A: Preoperative visit—communication with the patient and clinical assessment; B: Preoperative marking—determination of the planned incision sites; C: Intraoperative procedure—performance of radical gastrectomy using a remote robotic-assisted surgical system; D: Postoperative abdominal incision—incision closed and dressed, with monitoring devices connected to ensure safe recovery

3.2 肝胆胰外科领域

2001年Marescaux等^[3]成功实施世界首例远距离胆囊切除,手术在54 min内顺利完成,没有出现任何困难或并发症,平均传输时滞为155 ms(根据当时卫星通信链路实测)。患者术后恢复顺利,患者在术后2周内就恢复了正常活动。中国Fan等^[36]回顾性分析5例(3例胆囊切除术;1例肝血管瘤切除术和1例保留脾脏的胰腺切除术)跨4 670 km(杭州—阿拉尔)5G远程国产机器人肝胆胰手术,中位手术时间39 min,中位术中出血量2 mL,网络延迟73 ms(测量方法:端到端传输延迟测试),并发症发生率20%,证实了使用国产机

器人进行5G远程机器人辅助肝胆胰外科手术是安全可行的,然而,目前该领域的临床案例报道数量较少(如本研究仅5例),样本量小的局限使得其结果的外推性受限,尚需更大样本的多中心研究进一步验证其长期疗效与普适性。综上所述,5G远程机器人手术在肝胆胰外科领域具有显著的应用价值,其安全性和有效性已得到充分验证。借助5G技术的低延迟、高稳定性优势,该技术成功突破了传统手术的地理限制,实现了高精度远程微创操作,为基层医疗机构提供了安全、高效的技术赋能新模式,进一步推动了优质医疗资源的普惠化发展。

3.3 其他普外科领域

远程机器人手术在甲状腺外科领域也被广泛应用,田文等^[37]成功完成首例2 200 km(北京—广州)5G远程机器人甲状腺癌根治术,手术时间115 min,术中出血量10 mL,网络延迟39 ms(测量方法:网络延时检测工具实时监控),无并发症的发生,患者术后5 d出院,证实该技术可安全实现甲状腺精细化操作,疗效等同常规机器人手术。Zhang等^[38]比较757例远程经双侧腋窝-乳房入路机器人手术与经乳晕入路内镜手术的甲状腺切除术效果。结果显示:机器人组手术时间更短(140 min vs. 165 min, $P<0.001$)、住院时间更短 $[(3.04\pm0.44)\text{ d vs. } (3.67\pm0.89)\text{ d}, P<0.001]$ 、一过性声带功能障碍发生率更低(2.9% vs. 8.0%, $P=0.003$),两组在淋巴结清扫效果及甲状旁腺功能方面无显著差异,研究表明远程机器人手术安全可行且具有部分优势。朱捷等^[39]利用混合现实(mixed reality, MR)技术平台,将MR技术、机器人微创手术、远程指导相结合,成功完成了1例MR平台远程协作机器人经腹腔右侧腹膜后肿瘤切除术,手术过程顺利,患者术后状态良好。综上所述,5G远程手术机器人突破了传统腹腔镜的视野局限,以精准化、智能化的操作模式为外科手术提供了新范式。该技术不仅为偏远地区高质量医疗资源的下沉提供了创新解决方案,同时也为复杂甲状腺手术的远程实施奠定了技术基础,有效推动了优质医疗资源的跨区域共享与普惠化发展。

4 现存技术挑战与解决方案

远程机器人手术系统的稳定运行高度依赖于高性能的通讯网络和可靠的硬件设备系统。在临床操作过程中,潜在的不良事件主要源于两大技术风险因素:网络传输稳定性(如延迟、丢包等)及设备运行可靠性(包括机械故障、系统错误等)^[40-41]。根据已发表的远程手术案例汇总分析,严重的、导致手术中断的网络通信问题(如延迟持续 $>300\text{ ms}$ 或连接中断)发生率较低,文献报道多低于1%。然而,轻微的网络抖动(延迟短暂升高)或单次数据包丢失事件在纯无线网络环境中仍有发生,但通过5G/光纤混合冗余架构及数据重传机制,大多能被系统自动补偿或快速恢复,未对手术安全构成实质性威胁。关于设备可靠性,以达芬奇系统为例的大型回顾性研究显示,其器

械相关故障率约为0.4%,其中绝大多数($>90\%$)可通过更换器械解决,不会导致严重并发症。国产机器人系统的长期故障率数据仍在积累中,初期报道显示其稳定性符合设计预期。建立系统性的术中风险监测日志和术后分析制度,是获取更精确风险发生率数据、持续优化安全预案的关键。

4.1 设备的可靠性

根据日本《远程外科临床实践指南2022版》^[18]的规范要求,远程手术系统的临床应用必须满足以下三项核心资质条件:首先,手术机器人设备需获得医疗器械监管机构的正式认证;其次,该机器人系统必须通过专项审批,明确其适用于远程手术场景;此外,还需配置符合医疗标准的高带宽、低延迟网络通信系统,以确保手术过程的稳定性和可靠性。

4.2 网络传输的稳定性

如今5G通信技术的革命性突破—其毫秒级延迟和千兆级带宽特性—为远程手术提供了关键的技术支撑,使外科专家能够突破地理限制,在数千公里外以近乎实时的精准度操控机器人手术系统,实现与本地手术无差异的操作体验^[17]。当前远程手术的网络传输解决方案主要采用以下三种技术路线:5G无线网络、光纤有线专网以及5G与专线网络的混合架构^[42-44]。但现有研究表明,远程手术系统的网络延迟参数存在明确的临床安全阈值:理想操作延迟应控制在100 ms以内(基于人机交互感知阈值与操作安全性实验),当延迟达到150~300 ms区间时,虽然术者可感知到明显延迟,但仍能通过适应性调整保证手术安全进行,而一旦延迟超过300 ms临界值,则可能引发操作失误等安全隐患,影响手术质量^[17]。

4.3 非技术类挑战

远程机器人手术除技术因素外,还面临一系列制度与应用层面的挑战。首先,法律与责任界定仍不够清晰^[45]。远程手术往往跨越行政区域,一旦出现医疗纠纷,责任主体的划分在现行体系中尚缺乏明确依据,涉及远程操作者、患者所在医疗机构以及通信服务提供方等多方主体,其权责边界亟待规范化标准支持。其次,伦理及知情同意流程仍需进一步完善^[46-47]。患者对远程手术所特有的风险(如网络延迟、通信中断等)往往难以形成充分、全面的理解,当前的知情同意模式尚不足以覆盖所有潜在风险情境。再次,远程机器人手术的经济成本较高,包括设备购置、通信

通道维护及系统运维等费用^[48]，而相应的支付体系与医保支持机制尚未建立，缺乏可持续的成本回收模式，限制了其大规模推广应用。上述非技术因素构成远程手术持续发展的关键制约点，需要从法律政策、伦理规范与支付机制等层面形成整体化解决方案。

4.4 紧急状况处置预案

作为远程手术安全保障体系的重要组成部分，有线网络传输技术被列为关键冗余方案，可在5G无线网络出现异常时提供可靠的备用连接，确保手术操作的连续性^[25,49]。在远程手术操作过程中，若主刀医师的操作速度或幅度超出系统设定的安全阈值，将导致主从控制系统的运动失同步现象，具体表现为^[17,41]：(1) 远程主控台操作臂与本地从端机械臂出现运动偏差；(2) 系统自动触发安全保护机制，包括：立即暂停机械臂运动；激活视觉及听觉报警信号；(3) 应急处理流程：需执行系统复位操作（响应时间 ≤ 5 s）；经错误确认后恢复手术进程。例如，在1例远程机器人辅助前列腺切除术中，曾因局部网络波动导致主从控制出现短暂卡顿。系统立即触发安全机制：(1) 主控台触觉反馈消失并发出持续蜂鸣警报；(2) 患者端机械臂自动锁定于当前位置；(3) 本地辅助医生通过副系统监视器确认机械臂未发生非预期运动。全程耗时约3 s完成系统自检与复位，主刀医生确认图像与机械臂状态一致后，手术继续进行，未对患者造成损伤。该案例体现了预设应急流程的有效性。机器人手术平台的远程通信监测系统可对手术全流程及网络状态进行实时动态监控。为确保手术安全，需遵循以下应急管理预案^[18,36,50-55]：当出现网络延迟、通信中断或设备故障等突发情况导致远程操作无法继续时，本地团队可立即接管手术进程——既可通过本地控制台继续完成机器人辅助手术，亦可随时转换为传统开放手术模式，这种双重保障机制通过预设的应急响应预案，确保了在任何突发情况下都能维持手术的连续性，为患者安全提供终极保障。

5 未来发展方向

5.1 智能通信融合架构

5G/6G 通信网络凭借其突破性的传输性能（实现亚 10 ms 级时延和接近零丢包率的传输特性），将彻底突破现有远程手术的地理限制，实现跨洲

际的精准手术操作，有效解决传统通信技术在传输稳定性和实时性方面存在的根本性局限^[56]。深度集成的 AI 算法系统可实现三大核心功能突破：(1) 实时动态优化：基于术中影像导航数据；自动规划最优手术路径（常用模型包括基于卷积神经网络的语义分割模型，如 U-Net 及其 3D 变体，用于识别关键解剖结构；路径规划可能结合 A* 算法、快速探索随机树等路径规划算法^[57-59]）。(2) 风险预警预测：通过机器学习模型^[60]；提前识别并发症发生风险[常用模型包括循环神经网络及其变体长短记忆网络，用于处理时序性的生理数据；或梯度提升决策树算法如极限梯度提升，常用于基于结构化数据的风险预测]。(3) 决策支持增强：整合多模态生理参数^[61-63]，整合多模态生理参数，并通过构建患者个体的数字孪生模型进行术前模拟。该系统的构建通常依赖于对患者术前计算机断层扫描与磁共振成像影像数据进行 3D 重建，以生成高保真器官模型^[60]。其训练数据来源于大型、多中心的医学影像数据库，并需进行严格的标注与质量校验。

5.2 创新驱动与临床应用延伸

新一代手术机械臂系统通过革命性的自由度扩展（可达 10 个以上运动维度）和智能运动控制技术，将彻底突破现有腔镜手术器械的操作局限性^[63-64]，实现：(1) 高级腔内操作能力：完成多平面复杂组织解剖（操作精度达 0.1 mm 级）；支持多器械空间协同作业（3D 环境下同步操作）。(2) 跨学科手术应用突破：神经外科领域：远程精准脑深部电刺激术电极植入（误差 <0.3 mm）；微创脊髓神经修复重建手术；颅底及脑干区肿瘤切除术。心血管领域：远程冠状动脉精细吻合；心脏瓣膜微创修复。(3) 关键技术支撑：亚毫米级实时运动控制；多模态术中导航系统；AI 辅助操作决策算法。

5.3 分级诊疗体系

依托 5G 通信技术与云端手术平台的深度融合，远程机器人手术为分级诊疗体系的优化提供了全新的技术路径。通过构建多层级协同的远程手术网络，可实现优质外科资源在不同医疗层级间的有效流动，从而推动分级医疗由“制度设计”向“技术驱动”转变。在该模式下，三级医院专家可借助远程机器人系统和数字孪生技术，对基层医疗机构开展实时手术指导与协同操作。专家端不仅能够对手术关键步骤进行精准操控和动态

干预，还可结合人工智能辅助决策系统，对手术质量进行实时评估与风险预警，从而确保远程手术的安全性与规范性。与此同时，基层医院通过同步执行专家指令，在机器人系统与增强现实（augmented reality，AR）可视化技术的辅助下，可显著降低复杂手术的技术门槛，提升本地医疗团队的操作能力和整体诊疗水平。随着病例数据的持续积累与云端平台的不断完善，远程手术系统还有望形成覆盖多区域、多中心的协同网络，实现手术流程标准化、数据共享与质量可追溯。这种以远程机器人手术为核心的分级医疗新模式，不仅有助于提升基层医疗机构对复杂疾病的处置能力，也为构建更加均衡、高效的医疗服务体系提供了现实可行的技术支撑。

5.4 重塑急救医疗服务模式

基于5G通信技术的智能救护车系统通过以下创新实现了急救模式的革命性突破^[65-68]（图3）：(1) 核心技术整合：集成5G通信模块（传输速率≥1 Gbps）；搭载多参数生命监护系统（ECG/血氧/血压等12项指标）；配备高清视频会诊终端（4K/30 fps实时传输）。(2) 功能实现：院前急救数据实时回传（延迟<50 ms）；急诊专家远程可视化指导（AR标注+语音交互）；AI辅助诊断系统自动预警（准确率>95%）。(3) 临床价值：急救响应时间显著缩短；实现“移动ICU”功能；电子病历自动生成。(4) 系统优势：打破“急救孤岛”困境；构建连续救治链条；提升抢救成功率。

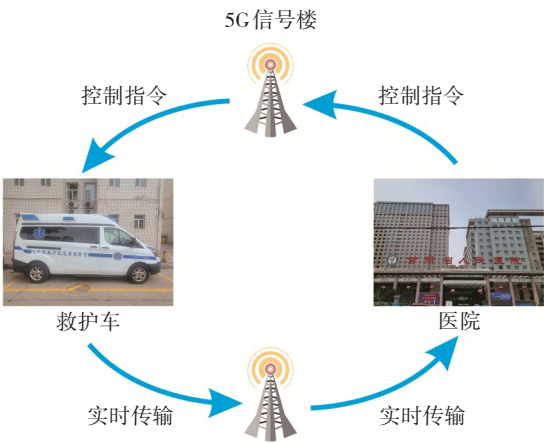


图3 远程智能救护车系统
Figure 3 Remote intelligent ambulance system

6 小结与展望

远程机器人手术在普外科领域的快速发展，标志着外科技术迈向智能化、精准化的新阶段。现有临床实践证实，该技术在胃肠、肝胆胰及甲状腺等复杂手术中展现出卓越的安全性（术中出血量<50 mL、并发症发生率低）与临床效能（住院时间缩短30%），成功突破传统手术的地理限制，通过5G网络实现跨3 000 km的精准操作（延迟<100 ms）。国产手术机器人系统的成熟应用（如图迈®系统）与“双网络冗余架构”等技术突破，为基层医疗机构提供了高质量手术解决方案。需要指出的是，本文引用的多数临床案例为个案报告或小样本回顾性研究，虽然为技术的初期安全性和可行性提供了重要证据，但尚缺乏大规模、多中心、前瞻性的随机对照试验数据来系统性评估其长期疗效、成本效益以及对不同医疗中心的普适性。未来研究需向更高证据等级的研究设计过渡。当前挑战集中于网络稳定性阈值（临界延迟300 ms）及设备可靠性，通过智能通信融合（5G/6G+AI动态优化）、十自由度机械臂研发及分级诊疗体系构建，未来将实现跨洲际手术协作与急救医疗模式革新。随着亚毫米级操作精度（0.1 mm）与AI决策系统的深度整合，远程机器人手术将重塑全球医疗资源分布格局，加速优质医疗资源的普惠化进程，最终构建“跨区域外科协作新生态”。

作者贡献声明：田宏伟与郭天康负责理论框架和结构设计；蒲宝红与崔佳明共同参与了论文撰写；张旭与马世勋参与了文献检索和筛选；刘鹏、麻月琴、朱君怡参与了论文图表的制作；苗长丰与房伟负责初稿修改。所有作者都同意对工作的各个方面负责。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

[1] Du R, Wan Y, Shang Y, et al. Robotic versus laparoscopic gastrectomy for gastric cancer: the largest systematic reviews of 68, 755 patients and meta-analysis[J]. Ann Surg Oncol, 2025, 32(1): 351-373. doi:10.1245/s10434-024-16371-w.

[2] 臧璐, 李树春, 郑民华. 腹腔镜胃癌外科手术30年:感悟与展望[J]. 中国实用外科杂志, 2023, 43(9):975-980. doi:10.19538/j.

- cjps.issn1005-2208.2023.09.04.
- Zang L, Li SC, Zheng MH. 30 years of laparoscopic resection of gastric cancer: Reflections and prospects[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2023, 43(9): 975-980. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2023.09.04.
- [3] Marescaux J, Leroy J, Rubino F, et al. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications[J]. Ann Surg, 2002, 235(4): 487-492. doi: 10.1097/0000658-200204000-00005.
- [4] Pandav K, Te AG, Tomer N, et al. Leveraging 5G technology for robotic surgery and cancer care[J]. Cancer Rep (Hoboken), 2022, 5(8): e1595. doi: 10.1002/cnr.2.1595.
- [5] 国产腹腔镜机器人产品研发获突破[J]. 技术与市场, 2020, 27(2): 3. Breakthrough in Development of Domestic Laparoscopic Surgical Robots[J]. Technology and Market, 2020, 27(2): 3.
- [6] Wang JQ, Li JQ, Wang Y, et al. Remote orthopedic robotic surgery: make fracture treatment no longer limited by geography[J]. Sci Bull (Beijing), 2023, 68(1): 14-17. doi: 10.1016/j.scib.2022.12.016.
- [7] 中华医学会外科学分会结直肠外科学组, 中华医学会外科学分会腹腔镜与内镜外科学组, 中国研究型医院学会结直肠肛门外科专业委员会, 等. 5G远程控制机器人辅助结直肠癌手术中国专家共识(2025版)[J]. 中国实用外科杂志, 2025, 45(2): 149-155. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2025.02.04.
- Chinese Society of Colorectal Surgery, Chinese Society of Surgery, Chinese Medical Association; Chinese Society of Laparoscopic & Endoscopic Surgery, Chinese Society of Surgery, Chinese Medical Association; Chinese Research Hospital Association Colorectal and Anal Surgery Special Committee. Chinese expert consensus on 5G remote-controlled robot-assisted surgery for colorectal cancer(2025 edition)[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2025, 45(2): 149-155. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2025.02.04.
- [8] 梁霄, 郑俊浩, 李哲勇, 等. 5G远程手术机器人辅助肝胆胰外科手术初步研究[J]. 中国实用外科杂志, 2024, 44(11): 1291-1294. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2024.11.20.
- Liang X, Zheng JH, Li ZY, et al. Preliminary study on 5G remote surgical robot for hepatobiliary and pancreatic surgery[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2024, 44(11): 1291-1294. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2024.11.20.
- [9] 苑航. 基于5G无线网络通讯技术下的远程机器人辅助腹腔镜肾上腺切除术的临床研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2023. doi: 10.27262/d.cnki.gqdau.2023.004067.
- Yuan H. Clinical study of remote robotic-assisted laparoscopic adrenalectomy based on 5G wireless communication technology[D]. Qingdao: Qingdao University, 2023. doi: 10.27262/d.cnki.gqdau.2023.004067.
- [10] 王树新, 刘玉亮, 李进华, 等. 腹腔微创手术机器人远程控制平台开发及实验[J]. 天津大学学报, 2015, 48(12): 1041-1049. doi: 10.11784/tdxbz201409075.
- Wang SX, Liu YL, Li JH, et al. Development and Experiment of a Tele-Operated Platform for Minimally Invasive Laparoscopic Surgery Based on MicroHand Robot[J]. Journal of Tianjin University, 2015, 48(12): 1041-1049. doi: 10.11784/tdxbz201409075.
- [11] Yang X, Wang Y, Jiao W, et al. Application of 5G technology to conduct tele-surgical robot-assisted laparoscopic radical cystectomy[J]. Int J Med Robot, 2022, 18(4): e2412. doi: 10.1002/rcs.2412.
- [12] 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. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2024.03.15.
- Li SY, Wen W, Dai FX, et al. Clinical study of ultra-remote surgical robot-assisted radical resection of rectal cancer[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2024, 44(3): 308-311. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2024.03.15.
- [13] Huang J, Li L, Cheng J, et al. Feasibility and safety evaluation of ultra-remote robot-assisted laparoscopic hysterectomy[J]. Intell Surg, 2024, 7: 74-79. doi: 10.1016/j.isurg.2024.09.001.
- [14] 何达, 张琦, 赵经纬, 等. 基于5G技术的机器人辅助远程胸腰椎内固定手术的应用效果[J]. 中华骨科杂志, 2024, 44(15): 995-1001. doi: 10.3760/cma.j.cn121113-20230704-00355.
- He D, Zhang Q, Zhao JW, et al. Effectiveness of 5G-based robot-assisted remote thoracolumbar internal fixation surgery[J]. Chinese Journal of Orthopaedics, 2024, 44(15): 995-1001. doi: 10.3760/cma.j.cn121113-20230704-00355.
- [15] 孙哲, 陈易洲, 周袁, 等. 基于积分障碍李雅普诺夫函数的下肢康复机器人柔顺控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2647-2653. doi: 10.13195/j.kzyjc.2024.1178.
- Sun Z, Chen YZ, Zhou Y, et al. Compliant control of lower limb rehabilitation robots based on integral barrier Lyapunov function[J]. Control and Decision, 2025, 40(9): 2647-2653. doi: 10.13195/j.kzyjc.2024.1178.
- [16] 马世勋, 狐鸣, 马云涛, 等. 基于5G网络的图迈®手术机器人远程动物实验研究[J]. 机器人外科学杂志: 中英文, 2025, 6(1): 12-17. doi: 10.12180/j. issn. 2096-7721.2025.01.003.
- Ma SX, Hu M, Ma YT, et al. Remote animal experiments with Toumai® surgical robot based on 5G network[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(1): 12-17. doi: 10.12180/j. issn. 2096-7721.2025.01.003.
- [17] 周翔, 王家寅, 朱祥, 等. 超远程5G机器人辅助腹腔镜下精索静脉曲张高位结扎术2例报道及文献复习[J]. 中华男科学杂志, 2022, 28(8): 696-701. doi: 10.13263/j.cnki.nja.2022.08.004.
- Zhou X, Wang JY, Zhu X, et al. Ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery for varicocele through 5G network; Report of two cases and review of the literature[J]. National Journal of Andrology, 2022, 28(8): 696-701. doi: 10.13263/j. cnki. nja.2022.08.004.
- [18] Mori M, Hirano S, Hakamada K, et al. Clinical practice guidelines for telesurgery 2022: committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan surgical society[J]. Surg Today, 2024, 54(8): 817-828. doi: 10.1007/s00595-024-02863-5.

- [19] 刘荣, 王子政, 王斐. 远程手术的分级[J]. 中华腔镜外科杂志: 电子版, 2019, 12(6): 321-323. doi: 10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2019.06.001.
- Liu R, Wang ZZ, Wang F. Classification of remote surgery[J]. Chinese Journal of Laparoscopic Surgery: Electronic Edition, 2019, 12(6): 321-323. doi: 10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2019.06.001.
- [20] Netto NR Jr, Mitre AI, Lima SV, et al. Telementoring between Brazil and the United States: initial experience[J]. J Endourol, 2003, 17(4): 217-220. doi: 10.1089/089277903765444339.
- [21] Newman JG, Kuppersmith RB, O'Malley BW Jr. Robotics and telesurgery in otolaryngology[J]. Otolaryngol Clin North Am, 2011, 44(6): 1317-1331. doi: 10.1016/j.otc.2011.08.008.
- [22] Snyderman CH, Gardner PA, Lanisnik B, et al. Surgical telementoring: a new model for surgical training[J]. Laryngoscope, 2016, 126(6): 1334-1338. doi: 10.1002/lary.25753.
- [23] 孔祥朋, 付君, 陈继营, 等. 5G通信技术远程指导机器人辅助全髋关节置换术两例[J]. 中国修复重建外科杂志, 2020, 34(11): 1492-1493. doi: 10.7507/1002-1892.202004097.
- Kong XP, Fu J, Chen JY, et al. Two cases of 5G-based remote guidance for robot-assisted total hip arthroplasty[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2020, 34(11): 1492-1493. doi: 10.7507/1002-1892.202004097.
- [24] Lenihan J Jr, Brower M. Web-connected surgery: using the Internet for teaching and proctoring of live robotic surgeries[J]. J Robot Surg, 2012, 6(1): 47-52. doi: 10.1007/s11701-011-0304-5.
- [25] Zhou F, Guo B, Lv H, et al. Application of 5G remote robotic-assisted laparoscopy in urological surgery: a small sample analysis[J]. Urology, 2025, 197: 110-114. doi: 10.1016/j.urology.2024.11.019.
- [26] Cosio FA, Padilla Castañeda MA, Sevilla Martínez PR. Computer assisted prostate surgery training[J]. Int J Human Robot, 2006, 3(4): 485-498. doi: 10.1142/s0219843606000916.
- [27] Zheng J, Wang Y, Zhang J, et al. 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China[J]. Surg Endosc, 2020, 34(11): 5172-5180. doi: 10.1007/s00464-020-07823-x.
- [28] Anvari M. Remote telepresence surgery: the Canadian experience[J]. Surg Endosc, 2007, 21(4): 537-541. doi: 10.1007/s00464-006-9040-8.
- [29] Anvari M, McKinley C, Stein H. Establishment of the world's first telerobotic remote surgical service: for provision of advanced laparoscopic surgery in a rural community[J]. Ann Surg, 2005, 241(3): 460-464. doi: 10.1097/01.sla.0000154456.69815.ee.
- [30] 郭玺, 马雕龙, 杨国渊, 等. "3+2"模式"七步法"在1例5G远程机器人远端胃癌根治术中的应用[J]. 中国普外基础与临床杂志, 2024, 31(12): 1462-1465. doi: 10.7507/1007-9424.202407002.
- Guo X, Ma DL, Yang GY, et al. Application of the "3+2" model and the "seven-step method" in a case of 5G remote robotic distal gastrectomy for gastric cancer[J]. Chinese Journal of Bases and Clinics in General Surgery, 2024, 31(12): 1462-1465. doi: 10.7507/1007-9424.202407002.
- [31] 詹渭鹏, 马于祺, 狐鸣, 等. 5G远程机器人辅助远端胃癌根治术一例报道(附手术视频)[J]. 机器人外科学杂志: 中英文, 2025, 6(1): 18-23. doi: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.004.
- Zhan WP, Ma YQ, Hu M, et al. 5G remote robot-assisted radical gastrectomy for distal gastric cancer: a case report (with surgical video)[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(1): 18-23. doi: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.004.
- [32] 张文涛, 苗长丰, 狐鸣, 等. 5G远程机器人辅助结肠癌根治术一例报道并文献复习(附手术视频)[J]. 机器人外科学杂志: 中英文, 2025, 6(1): 28-32. doi: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.006.
- Zhang WT, Miao CF, Hu M, et al. 5G remote robot-assisted radical colectomy for colon cancer: a case report and literature review (with surgical video)[J]. Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(1): 28-32. doi: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.006.
- [33] Cadière GB, Himpens J, Vertruyen M, et al. Evaluation of telesurgical (robotic) NISSEN fundoplication[J]. Surg Endosc, 2001, 15(9): 918-923. doi: 10.1007/s004640000217.
- [34] 田文, 王冰, 姚京, 等. 5G远程手术机器人辅助食管裂孔疝修补及胃底折叠术临床初步研究[J]. 中国实用外科杂志, 2024, 44(10): 1171-1173. doi: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.10.18.
- Tian W, Wang B, Yao J, et al. Preliminary clinical study of remote surgical robot assisted repair of hiatal hernia and gastric fundus folding[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2024, 44(10): 1171-1173. doi: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.10.18.
- [35] 王晓鹏, 王艳, 马云涛, 等. 5G远程机器人辅助袖状胃切除术首例报道[J]. 中国微创外科杂志, 2025, 25(1): 46-51. doi: 10.3969/j.issn.1009-6604.2025.01.008.
- Wang XP, Wang Y, Ma YT, et al. 5G Remote Robot-assisted Sleeve Gastrectomy: First Case Report[J]. Chinese Journal of Minimally Invasive Surgery, 2025, 25(1): 46-51. doi: 10.3969/j.issn.1009-6604.2025.01.008.
- [36] Fan Y, Ma C, Wu X, et al. 5G remote robot-assisted hepatobiliary and pancreatic surgery: a report of five cases and a literature review[J]. Int J Med Robot, 2025, 21(1): e70027. doi: 10.1002/rcs.70027.
- [37] 田文, 姚京, 王冰, 等. 5G远程手术机器人辅助甲状腺癌根治术初步研究[J]. 中国实用外科杂志, 2024, 44(9): 1075-1077. doi: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.09.18.
- Tian W, Yao J, Wang B, et al. Preliminary study on 5G remote robot-assisted radical thyroidectomy[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2024, 44(9): 1075-1077. doi: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.09.18.
- [38] Zhang D, Wang C, Sui C, et al. Robotic bilateral axillo-breast versus endoscopic bilateral areola thyroidectomy outcomes of 757 patients[J]. Front Endocrinol: Lausanne, 2022, 13: 1029845. doi: 10.3389/fendo.2022.1029845.
- [39] 朱捷, 沈诞, 刘启明, 等. 混合现实平台远程协作机器人微创手术1例报告[J]. 微创泌尿外科杂志, 2018, 7(4): 278-281. doi: 10.19558/j.cnki.10-1020/r.2018.04.015.
- Zhu J, Shen D, Liu QM, et al. A case report of remote collaborative

- robotic minimally invasive surgery using a mixed-reality platform[J]. *Journal of Minimally Invasive Urology*, 2018, 7(4): 278–281. doi:10.19558/j.cnki.10-1020/r.2018.04.015.
- [40] 苑航, 骆磊, 焦伟, 等. 远程手术机器人辅助腹腔镜根治性肾切除术第一助手的配合[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2024, 5(6): 1221–1224. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.06.035.
- Yuan H, Luo L, Jiao W, et al. First assistant in the cooperation work of remote robot-assisted laparoscopic radical nephrectomy for renal cancer[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2024, 5(6): 1221–1224. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.06.035.
- [41] 中国研究型医院学会移动医疗专委会, 中华医学会数字医学分会, 中国老年医学学会普外科分会, 等. 远程机器人手术操作指南(2025版)[J]. *中华普通外科杂志*, 2025, 40(7): 505–512. doi:10.3760/cma.j.cn113855-20250520-00287.
- Mobile Medicine Committee of the Chinese Research Hospital Association, Digital Medicine Branch of the Chinese Medical Association, General Surgery Branch of the Chinese Society of Geriatrics, et al. Guideline for remote robot surgery operation (2025 edition)[J]. *Chinese Journal of General Surgery*, 2025, 40(7): 505–512. doi:10.3760/cma.j.cn113855-20250520-00287.
- [42] 古宏兵, 程根, 杨勇飞, 等. 安徽省内首例5G远程机器人辅助根治性前列腺切除术(附手术视频)[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2025, 6(5): 759–763. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2025.05.012.
- Gu HB, Cheng G, Yang YF, et al. 5G remote robot-assisted radical prostatectomy: the first case report in Anhui province (with surgical video)[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2025, 6(5): 759–763. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2025.05.012.
- [43] Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al. Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations[J]. *Surg Endosc*, 2023, 37(8): 6071–6078. doi:10.1007/s00464-023-10061-6.
- [44] 范明星, 张琦, 房彦名, 等. 远程机器人辅助经皮椎体后凸成形术临床效果研究[J]. *北京生物医学工程*, 2022, 41(2): 174–178. doi:10.3969/j.issn.1002-3208.2022.02.010.
- Fan MX, Zhang Q, Fang YM, et al. Clinical outcomes of telerobot-assisted percutaneous vertebral kyphoplasty[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2022, 41(2): 174–178. doi:10.3969/j.issn.1002-3208.2022.02.010.
- [45] 邱智翔. 远程手术机器人医疗损害责任研究[J]. *经济师*, 2025, (8): 66–68. doi:10.3969/j.issn.1004-4914.2025.08.029.
- Qiu ZX. Study on medical liability in remote robotic surgery[J]. *China Economist*, 2025, (8): 66–68. doi:10.3969/j.issn.1004-4914.2025.08.029.
- [46] 李红强, 殷德涛. 5G远程机器人手术临床应用相关问题思考[J]. *医学与哲学*, 2025, 46(9): 36–39. doi:10.12014/j.issn.1002-0772.2025.09.07.
- Li HQ, Yin DT. Reflections on the Clinical Application of 5G Remote Robotic Surgery[J]. *Medicine & Philosophy*, 2025, 46(9): 36–39. doi:10.12014/j.issn.1002-0772.2025.09.07.
- [47] 郭成旺, 张铭泽, 郭玺, 等. "双中心"背景下5G远程机器人外科的发展机遇与挑战[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2025, 6(1): 6–11. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.002.
- Guo CW, Zhang MZ, Guo X, et al. Development opportunities and challenges of 5G remote robot-assisted surgery in the context of double-center construction[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2025, 6(1): 6–11. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.002.
- [48] 张泽平, 李祖曦, 乔吉灵, 等. 5G远程机器人手术应用现状及前景[J]. *中国实用外科杂志*, 2024, 44(7): 836–838. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.07.23.
- Zhang ZP, Li ZX, Qiao JL, et al. Status and prospects of 5G remote robotic surgery applications[J]. *Chinese Journal of Practical Surgery*, 2024, 44(7): 836–838. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.07.23.
- [49] Guo H, Tian Y, Shi J, et al. Pioneering case: Robot-assisted remote radical distal gastrectomy for gastric cancer based on 5G communication technology[J]. *Intell Surg*, 2024, 7: 22–26. doi:10.1016/j.isurg.2024.01.004.
- [50] 左庄, 唐旭, 陈文龙, 等. 5G远程机器人辅助胸腔镜手术五例[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2025, 32(5): 594–597. doi:10.7507/1007-4848.202412026.
- Zuo Z, Tang X, Chen WL, et al. Five patients undergoing 5G remote robot-assisted thoracoscopic surgery[J]. *Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2025, 32(5): 594–597. doi:10.7507/1007-4848.202412026.
- [51] 戴飞翔, 杜晓辉. 远程手术在胃肠外科领域应用的初步探索[J]. *中华胃肠外科杂志*, 2024, 27(8): 779–783. doi:10.3760/cma.j.cn441530-20240419-00145.
- Dai FX, Du XH. Preliminary exploration of telesurgery applied in the field of gastrointestinal surgery[J]. *Chinese Journal of Gastrointestinal Surgery*, 2024, 27(8): 779–783. doi:10.3760/cma.j.cn441530-20240419-00145.
- [52] Tian Y, Lv H, Jumai A, et al. Ultra-remote robot-assisted right upper lobectomy between the Shanghai and Kashi Prefectures: a case report[J]. *J Thorac Dis*, 2024, 16(12): 8823–8830. doi:10.21037/jtd-24-1605.
- [53] Bernadotte A. Cyber security for surgical remote intelligent robotic systems[C]//2023 9th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). February 10–12, 2023, Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2023: 65–69. doi:10.1109/ICARA56516.2023.10126050.
- [54] Sebangang H, Trudeau P, Dougall A, et al. The role of telementoring and telerobotic assistance in the provision of laparoscopic colorectal surgery in rural areas[J]. *Surg Endosc*, 2006, 20(9): 1389–1393. doi:10.1007/s00464-005-0260-0.
- [55] 吕海迪, 张冲, 郭柏鸿, 等. 中国西部首例5G远程机器人辅助肾脏手术(附视频)[J]. *机器人外科学杂志:中英文*, 2024, 5(1): 91–95. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.01.016.
- Lu HD, Zhang C, Guo BH, et al. 5G remote robot-assisted laparoscopic kidney surgery: the first case report in the west of China (with video)[J]. *Chinese Journal of Robotic Surgery*, 2024, 5

- (1):91-95. doi:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.01.016.
- [56] 景武堂, 万浩浩, 苗长丰, 等. 5G远程机器人手术的应用现状及展望[J]. 机器人外科学杂志:中英文, 2025, 6(1): 1-5. doi: 10.12180/j.issn.2096-7721.2025.01.001.
- Jing WT, Wan HH, Miao CF, et al. Current status and prospects of 5G remote robot-assisted surgery[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(1): 1-5. doi: 10.12180/j. issn. 2096-7721.2025.01.001.
- [57] 杨世珍, 胡海洁. 人工智能在胆道肿瘤诊疗中的应用进展与展望[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(8):1751-1757. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250452.
- Yang SZ, Hu HJ. Clinical applications of artificial intelligence in biliary tract cancers: progress and prospects[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(8):1751-1757. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250452.
- [58] 林文俊, 陶海粟, 方驰华, 等. 数智赋能胰腺外科:技术创新及临床实践[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(9):1882-1891. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250523.
- Lin WJ, Tao HS, Fang CH, et al. Digital intelligence empowering pancreatic surgery: technological innovation and clinical practice[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(9):1882-1891. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250523.
- [59] 张津银, 谭清泉, 柯能文, 等. 人工智能在胰腺癌诊疗领域的应用现状及前景[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(3):418-427. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250013.
- Zhang JY, Tan QQ, Ke NW, et al. The current status and prospects of artificial intelligence in the diagnosis and treatment of pancreatic cancer[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(3):418-427. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250013.
- [60] 李波, 刘冠男. MRI影像组学结合临床特征的机器学习模型对结肠癌肝转移的预测价值[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(7): 1410-1420. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240611.
- Li B, Liu GN. The predictive value of MRI imaging omics combined with clinical features in machine learning models for colorectal cancer liver metastasis[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(7): 1410-1420. doi: 10.7659/j. issn. 1005-6947.240611.
- [61] 刘春华. 外科手术协作机器人发展现状和未来方向[J]. 厦门科技, 2023, (6):56-59.
- Liu CH. Development Status and Future Directions of Collaborative Surgical Robots[J]. Xiamen Science & Technology, 2023, (6):56-59.
- [62] 刘哲, 石钰, 林延带, 等. 智能医学的现状与未来[J]. 科学通报, 2023, 68(10):1165-1181. doi:10.1360/TB-2022-1240.
- Liu Z, Shi Y, Lin YD, et al. Current status and future prospects of intelligent medicine[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(10): 1165-1181. doi:10.1360/TB-2022-1240.
- [63] 曹悦, 杨贺迪, 缪森, 等. 医疗手术机器人的现状与未来[J]. 中国科技信息, 2021, (10): 123-125. doi: 10.3969/j. issn. 1001-8972.2021.10.041.
- Cao Y, Yang HD, Miao M, et al. Current status and future perspectives of surgical robots[J]. China Science and Technology Information, 2021, (10): 123-125. doi: 10.3969/j. issn. 1001-8972.2021.10.041.
- [64] Nelson BJ, Bendok BR, Turcotte EL, et al. Remote magnetic navigation enables precision telesurgery[J]. Sci Robot, 2024, 9(87): eado3187. doi:10.1126/scirobotics.ado3187.
- [65] 俞波. 基于5G技术的智慧急救平台架构研究[J]. 江苏通信, 2025, 41(1):18-20. doi:10.3969/j.issn.1007-9513.2025.01.005.
- Yu B. Study on the architecture of an intelligent emergency medical service platform based on 5G technology[J]. Jiangsu Communication, 2025, 41(1): 18-20. doi: 10.3969/j. issn. 1007-9513.2025.01.005.
- [66] 杨文界, 彭小菊, 向海平, 等. 5G远程重症监护协同平台在急救和远程会诊中的实践与应用[C]//2024第六届智慧医院建设与发展大会会议论文集. 苏州:2024第六届智慧医院建设与发展大会, 2024:36-39. doi:10.26914/c.cnkihy.2024.021670.
- Yang WJ, Peng XJ, Xiang HP, et al. Application of a 5G-based remote intensive care collaboration platform in emergency care and teleconsultation[C]//Proceedings of the 6th Smart Hospital Construction and Development Conference 2024. Suzhou: 2024 6th Smart Hospital Construction and Development Conference, 2024: 36-39. doi:10.26914/c.cnkihy.2024.021670.
- [67] 邓傲, 姬忠良, 李琴, 等. 5G+救护车在院前急救救援中临床应用[J]. 创伤与急危重病医学, 2024, 12(1):5-8. doi: 10.16048/j.issn.2095-5561.2024.01.02.
- Deng A, Ji ZL, Li Q, et al. Clinical application of 5G+ ambulance in pre-hospital emergency[J]. Trauma and Critical Care Medicine, 2024, 12(1):5-8. doi:10.16048/j.issn.2095-5561.2024.01.02.
- [68] 吴世菊, 姚萌, 陈丽娟, 等. 5G+院前急救与急诊账户模式在急性ST段抬高型心肌梗死患者救治中的应用[J]. 山东医药, 2024, 64(32):71-73. doi:10.3969/j.issn.1002-266X.2024.32.016.
- Wu SJ, Yao M, Chen LJ, et al. Application of the 5G-enhanced prehospital emergency and emergency department collaborative model in the management of patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction[J]. Shandong Medical Journal, 2024, 64(32):71-73. doi:10.3969/j.issn.1002-266X.2024.32.016.

(本文编辑 熊杨)

本文引用格式:蒲宝红,崔佳明,张旭,等. 5G赋能远程机器人手术在普通外科的应用现状、挑战与未来趋势[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(11):2469-2479. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250350

Cite this article as: Pu BH, Cui JM, Zhang X, et al. Current status, challenges, and future trends of 5G-enabled remote robotic surgery in general surgery[J]. Chin J Gen Surg, 2025, 34(11): 2469-2479. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250350