



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250671
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.250671
China Journal of General Surgery, 2026, 35(2):376-383.

· 文献综述 ·

远程机器人手术的现状、风险特征与安全实施框架

孙涵, 蔡忠良, 嵇武

[南京大学医学院附属金陵医院(东部战区总医院) 全军普通外科研究所, 江苏南京 210002]

摘要

随着通信技术与手术机器人技术的发展, 远程机器人手术逐步由早期示范探索进入临床应用阶段。第五代移动通信、专网及低轨卫星通信的应用显著提升了远程操控的实时性与稳定性, 为跨区域开展外科手术提供了重要技术基础。近年来, 我国依托国产手术机器人平台, 在多学科、多场景开展了远程手术探索, 初步验证了其可行性与安全性。然而, 与本地机器人手术相比, 远程机器人手术在通信不确定性、双团队协作、并发症应急处置及培训体系等方面呈现新的风险特征, 现有研究多为病例报道或小样本研究, 循证证据仍有限。本文在梳理远程机器人手术关键技术与应用现状的基础上, 分析其操作模式与风险结构特点, 总结覆盖术前评估、术中安全控制、并发症处置及术后质量管理的安全实施框架, 并探讨其规范化推广面临的主要挑战, 以期远程机器人手术的临床应用与后续研究提供参考。

关键词

机器人手术; 远程医学; 移动通信技术; 最小侵入性外科手术; 综述
中图分类号: R61

Robotic telesurgery: current status, risk characteristics, and safety implementation framework

SUN Han, CAI Zhongliang, JI Wu

[Research Institute of General Surgery, Jinling Hospital (General Hospital of Eastern Theater Command), Medical School of Nanjing University, Nanjing 210002, China]

Abstract

With advances in communication technologies and surgical robotics, telerobotic surgery has gradually evolved from early feasibility demonstrations to exploratory clinical application. The implementation of fifth-generation mobile communication, dedicated networks, and low-Earth-orbit satellite communication has significantly improved the real-time performance and stability of remote manipulation, providing an essential technical foundation for cross-regional surgical practice. In recent years, China has accumulated growing experience in this field, with exploratory applications based on domestically developed robotic platforms across multiple surgical specialties, preliminarily demonstrating the feasibility and safety of telerobotic surgery. However, compared with local robotic surgery, telerobotic surgery presents distinct challenges, including communication uncertainty, dual-team

基金项目: 江苏省医学创新中心基金资助项目(CXZX202217); 江苏省南京市博士后基金资助项目(48143)。

收稿日期: 2025-11-26; 修订日期: 2026-02-15。

作者简介: 孙涵, 南京大学医学院附属金陵医院硕士研究生, 主要从事智能化技术在外科诊疗方面的研究。

通信作者: 嵇武, Email: jiwuvip@hotmail.com

coordination, emergency management of intraoperative complications, and limitations in current training systems. In addition, most available evidence is derived from case reports or small series, and the quality of evidence as well as the boundaries of clinical indications remain unclear. This article reviews the current technological and clinical progress in telerobotic surgery, analyzes its operational characteristics and risk structure, summarizes a safety-oriented implementation framework covering preoperative assessment, intraoperative safety control, complication management, and postoperative quality management, and discusses the major challenges for its standardized implementation.

Key words

Robotic Surgical Procedures; Telemedicine; Mobile Communication Technology; Minimally Invasive Surgical Procedures; Review

CLC number: R61

20世纪80年代腹腔镜技术问世,开启了微创外科新时代,其在降低手术创伤的同时,也存在器械活动受限、二维视野缺乏立体感、操作稳定性不足等局限^[1]。手术机器人技术的发展,通过多自由度机械臂、三维(3D)成像系统及人机工程学优化,有效弥补了上述不足^[2]。2001年世界首例跨洲远程胆囊切除术的成功,标志着外科手术远程化探索起步,此后远程机器人手术逐步应用于多个临床专科,初步证实了其可行性^[3-4]。与本地手术不同,远程机器人手术高度依赖通信网络,传输时延及稳定性直接影响操作实时性与安全性,成为核心瓶颈。

近年来,第五代移动通信(5G)、专网及低轨卫星通信技术的发展,优化了远程操控环境,推动远程机器人手术从示范应用进入临床探索阶段,拓宽了其应用边界^[5]。然而,技术突破不等于临床推广,远程机器人手术的核心挑战,是将网络不确定性、双团队协作、人机分离操作等因素纳入外科安全流程。现有综述多聚焦技术与应用现状,对安全流程和协作模式的系统探讨不足。基于此,本文围绕远程机器人手术的安全流程与协作模式展开综述,为其规范化应用提供参考。

1 远程手术的现状

现阶段,远程机器人手术多依托成熟的主从式手术机器人系统,由远程主控端、患者端执行系统、通信网络及监测与容错模块等组成^[6]。与本地机器人手术相比,其系统运行不仅取决于机械臂精度和视频质量,还高度依赖通信链路的稳定性与连续性^[7]。通信条件的引入使远程机器人手术

在系统架构、风险来源及实施流程等方面呈现出不同于传统手术的新特征,为后续技术演进与安全流程设计提供了针对性方向^[8]。

从通信条件的发展历程来看,早期远程机器人手术主要依赖高速光纤或异步传输模式等专用网络。尽管ZEUS系统在此基础上成功完成了“Lindbergh手术”等里程碑式探索,验证了跨洲远程手术的技术可行性,但其高延迟、高成本及系统复杂性显著限制了临床推广^[9]。随后,有研究通过卫星链路在较高延迟条件下完成动物实验,进一步证明了远程手术在非理想网络环境中的可行性,同时也凸显了降低时延与提升网络稳定性对临床应用的重要意义^[9-10]。

近年来,5G及专网通信的应用为远程机器人手术提供了更为稳定的网络基础^[11]。凭借较高带宽和较低时延,5G网络在多项动物实验和临床探索中支持了远程精准操控,使远程手术逐步由实验性示范进入多中心临床探索阶段^[12-14]。在此背景下,我国逐步形成了以国产手术机器人系统为代表的远程手术应用实践,显示出一定的技术成熟度和应用潜力^[15-16]。与此同时,低轨卫星通信凭借覆盖范围广、部署灵活的特点,在偏远地区医疗救治、应急救援等特殊场景中凸显潜在应用价值,进一步拓展了远程手术的空间覆盖边界^[17]。然而,不同通信方式在时延波动、丢包率及可靠性等方面仍存在差异,其性能表现受网络环境与部署条件影响。

从系统架构角度看,远程机器人手术通常由医生控制台、患者端机械臂系统、通信网络以及监测与容错系统等部分构成^[18]。医生控制台作为主控端,集成高分辨率3D成像系统和主手控制

器，为术者提供操作界面；患者端机械臂系统位于手术床旁，负责执行切割、分离、缝合及吻合等具体操作。通信中间件承担控制指令与视频数据的实时传输任务，其性能直接影响远程操作的连续性与精确性^[19]；监测与容错系统则通过网络状态监测、紧急暂停及链路切换等机制，为远程手术提供关键的安全保障^[20]。

在临床应用方面，现有研究显示远程机器人手术已在泌尿外科、胃肠外科及心脏外科等多个领域完成探索性实践，整体手术成功率较高，围手术期并发症发生率与本地机器人手术相近^[21-23]。然而，目前相关证据仍以病例报道和小样本研究为主，研究设计、评价指标及随访时间存在较大异质性，尚不足以支持其广泛推广^[24]。因此，在总结现有技术与应用经验的基础上，进一步明确远程机器人手术的适应证范围，并构建可复制、可验证的安全实施框架，仍是当前亟须解决的关键问题。

2 远程手术的关键特征

远程机器人手术并非传统机器人辅助手术的简单延伸，其本质特征在于术者与患者在空间上的分离，使通信网络成为手术系统不可或缺的重要组成部分^[25]。在此基础上，远程机器人手术进一步表现为信息传递与控制链条的重构。术者对手术场景的感知主要依赖视觉、听觉及潜在力反馈等信息通道完成，其发出的控制指令经通信网络传输至患者端执行系统，形成“感知-决策-执行”的远程控制闭环^[26]。相较于本地手术中相对直接的操控方式，远程手术更强调信息系统、控制系统与执行系统之间的协同运行，其稳定性建立在多系统整合基础之上^[27]。这种运行机制的改变，构成了远程机器人手术区别于传统手术模式的重要特征。

空间上的分离与控制链条的重构，使远程机器人手术在系统运行模式、团队协作架构及流程组织形式等方面均呈现出新的特点。基于这些特征，远程手术在临床实施过程中有必要构建覆盖术前评估、术中管理及术后随访的系统化安全实施框架，以保障跨空间操作条件下的流程稳定与患者安全。

3 远程手术的安全实施框架

鉴于远程机器人手术在操作模式和风险结构上的特殊性，其安全性不仅取决于手术机器人本身的性能，还高度依赖通信网络的稳定性以及远程—现场双团队的协同效率。因此，构建覆盖术前、术中及术后全过程的标准化安全流程，是推动远程机器人手术由探索性应用迈向规范化与常态化的关键。

3.1 术前评估与准备

与传统或本地机器人手术相比，远程机器人手术的术前评估需在常规外科评估基础上，进一步纳入通信条件与团队能力等要素。应严格把控手术适应证，优先选择解剖结构相对清晰、操作流程成熟、出血风险可控且具备明确本地接管路径的术式，以降低远程操作带来的潜在风险^[28]。同时，应对通信网络进行系统评估，包括平均时延、时延抖动、丢包率及连续中断风险等指标，避免仅以单一平均时延作为判断依据^[29-30]。此外，远程机器人手术需建立清晰的团队配置与职责分工。远程术者应具备丰富的本地机器人手术经验；现场团队除承担常规助手与麻醉管理职责外，还须具备在紧急情况下独立完成关键操作或转换手术方式的能力^[31-32]。通过术前多学科讨论与模拟演练，明确接管条件及操作流程，最大限度降低术中的不确定性^[33]。

3.2 术中安全控制

术中阶段是远程机器人手术安全控制的核心环节。除常规生命体征和手术操作监控外，远程模式下还需对通信质量和系统运行状态进行同步监测，并将时延、抖动、丢包和可用性等指标纳入手术安全评估体系^[34]。在此基础上，建立清晰的干预阈值与决策优先级尤为重要。当出现持续时延升高、明显抖动或通信中断等情况时，应根据预先设定的阈值采取分级处置策略，包括暂停操作、锁定机械臂、调整通信路径或启动现场团队接管^[35]。在任何情况下，患者安全均应优先于技术连续性，必要时果断终止远程操作并转换为本地或开放手术方式。

3.3 自主化功能的术中辅助作用

在远程机器人手术场景中，自主化功能的引入并非旨在取代术者，而是作为增强系统安全性与稳定性的辅助手段^[36]。多项研究一致认为，应

将发展重点由“完全自主手术”转向以术者为核心的“人机协作式”或“半自主控制”模式,在保留人工决策与控制权的前提下,提高操作一致性并降低系统风险^[37]。针对远程通信中不可避免的时延、抖动及短时中断等不确定性,有限的自主化控制可发挥“风险缓冲”作用,例如通过预测式或混合控制策略,将人机交互与机器人执行在时间尺度上适度解耦,从而在通信质量下降时维持操作连续性并减轻术者工作负荷^[38]。控制架构层面,动作平滑、速度限制以及被动性控制等机制,可在自主与遥操作模式切换过程中保持器械运动稳定,避免因延迟或异常切换导致的误操作^[39]。需要强调的是,上述自主化功能应始终嵌入既定的外科安全流程与可监管的人机协同框架之内,其决策权与最终控制权仍应由术者掌握,自主化仅作为远程机器人手术安全体系的技术补充,而非独立的手术执行主体。

3.4 术中并发症处理与应急处置

术中并发症的处置能力在很大程度上界定了远程机器人手术的安全边界。既往研究^[40]显示,术中出血、重要脏器损伤以及设备故障或通信异常等事件,均可能在远程操作过程中突然发生。在远程情境下,由于术者不在床旁,此类突发事件的安全应对更依赖于术前对并发症处置原则和接管触发条件设定^[41]。当出现需要即时干预的严重并发症时,临床共识普遍认为,应以现场团队快速接管并完成止血、修复或必要的手术方式转换作为首选策略^[42]。远程术者在此过程中可提供决策支持与技术判断,但其核心任务在于协助稳定局面并及时作出是否转换操作路径的决策,而不应因持续远程操作而延误现场处置^[43]。通过在术前明确各类并发症下的责任分工与操作路径,有助于避免紧急情况下因指挥权不清或决策迟滞而放大手术风险。

3.5 术后评估与质量控制

术后阶段不仅是患者恢复的重要时期,也是远程机器人手术开展质量控制与改进的关键环节。相较于传统手术机器人,远程手术的术后评估除常规围手术期结局和并发症指标外,还应纳入通信与系统层面的扩展数据维度,包括网络时延、抖动、丢包情况、是否发生通信中断等^[44]。同时,是否发生现场接管、接管的触发原因及并发症处理路径,也应作为重要流程变量进行系统记录^[3]。

对上述多维数据的回顾性分析,有助于识别潜在风险模式,并为后续手术的流程优化与培训重点提供依据。建立标准化、可追溯的数据记录与存储机制,是实现质量审计、责任界定及远程机器人手术规范化管理的重要基础^[45]。

4 远程手术面临的挑战

4.1 通信不确定性

通信网络是远程机器人手术安全运行的基础条件。研究表明,远程手术在100~250 ms范围内可以安全进行^[46]。然而,在临床操作中,远程手术不可避免地受到时延波动、抖动及突发中断等不确定因素的影响。值得注意的是,既往研究多以平均传输时延作为主要评价指标,而实际临床风险往往来源于短时峰值延迟或偶发通信异常等非连续事件,一旦发生于关键操作步骤,可能对手术连续性与安全性产生不利影响^[10]。因此,通信不确定性并非单纯的工程问题,而是可直接转化为临床风险的重要因素,有必要在远程机器人手术的安全评估中给予独立考量。

4.2 双团队能力适配度不足

远程机器人手术引入了远程术者与患者端团队协同工作的手术模式,对传统外科团队结构提出了新的要求。手术的顺利实施不仅依赖于远程主刀医生的操作经验,还高度依赖患者端护理人员、麻醉团队及工程技术支持的密切配合^[47]。在实际应用中,现场团队需承担器械准备、术中协助、应急处置及必要时的手术接管等关键职责。然而,不同医疗机构在人员配置、培训体系及应急处理能力方面客观存在差异,尤其在基层或偏远地区,专业团队建设相对薄弱,可能导致远程主刀端与患者端之间形成能力不对称^[48]。这种协作层面的差异在一定程度上增加了操作风险,也限制了远程机器人手术模式的复制性与规模化推广。

4.3 证据质量与适应证不足

尽管近年来远程机器人手术已在多种术式中完成探索性实践,但现有证据仍以病例报道、小样本队列及单中心经验为主,研究设计、评价终点及随访时间存在较大异质性^[49-50]。在此背景下,“手术成功率较高、并发症发生率与本地手术相近”等结论更多反映的是特定条件下的可行性验

证,而非普遍适用的临床结论。此外,目前远程机器人手术多优先选择流程成熟、风险相对可控的术式,其在复杂手术、高风险患者或突发并发症场景中的适用边界尚不清晰^[51]。未来研究有必要通过多中心前瞻性研究和标准化注册队列,统一关键评价指标与随访终点,并在明确安全接管与流程保障条件的前提下,逐步拓展术式与人群范围,从而为其临床常态化应用提供更具说服力的循证依据。

4.4 培训体系不完善

远程机器人手术在拓展医疗服务边界和教学覆盖范围的同时,也对传统外科培训路径与人才培养模式提出了新的结构性挑战^[52]。既往研究指出,机器人平台弱化了术者对床旁助手的依赖,初级医生在牵拉、暴露和镜头控制等参与式学习中的角色被显著压缩,易由“操作者”转变为“观察者”,尤其在住院医师规范化培训阶段更为明显^[53]。远程或双主控模式下,若关键步骤长期由专家远程完成,亦可能进一步减少本地医生在真实病例中的主控机会,从而影响其触觉感知、空间判断及并发症处置能力的系统形成。针对上述问题,应通过制度化设计将远程机器人手术纳入分级培训体系。可结合模拟训练、双主控平台,形成由低风险训练向真实病例逐步过渡的培养路径,并通过分步授权与详细评价标准,保障学员在确保患者安全的前提下获得必要的操作机会^[54]。

5 前景展望

在过去十余年间,以达芬奇系统为代表的手术机器人凭借操作精细度高、创伤小和恢复快等优势,已在多个学科获得广泛应用和临床认可。随着我国在手术机器人研发以及网络通信基础设施方面的持续投入,相关系统及耗材成本有望进一步降低,国产化与自主化的进程也日益加快。当前,远程手术仍处于探索阶段,但在缩小区域医疗资源差距、提升基层医疗能力以及应对突发灾害和战时救援等方面已展现出重要潜力。未来,伴随通信技术的持续升级、人工智能与自主控制能力的提高,以及政策、医保和法律体系的逐步完善,远程机器人手术有望由局部验证走向常态化开展,推动外科诊疗模式进一步发展,并为构建更加均衡、可持续的医疗体系提供新的动力。

作者贡献声明:孙涵负责论文的整体构思、理论框架设计及初稿撰写;蔡忠良参与文献检索和初稿修改;嵇武负责研究方向的总体把控与论文的学术指导,对稿件进行了关键性修改并最终定稿。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Komatsu H, Hiratsuka Y, Yamamoto K, et al. Advances and challenges in robotic-assisted gynecologic surgery: a comprehensive review of port strategies, surgical platforms, and learning curves in Japan[J]. *J Obstet Gynaecol Res*, 2025, 51(10): e70089. doi:10.1111/jog.70089.
- [2] Wong SW, Crowe P. Visualisation ergonomics and robotic surgery[J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(5): 1873-1878. doi:10.1007/s11701-023-01618-7.
- [3] Wang Y, Buehler M, Farritor S, et al. Expert consensus-based technical guidelines for remote robotic-assisted surgery and procedures[J]. *World J Surg*, 2025, 49(7): 1708-1721. doi:10.1002/wjs.12653.
- [4] Pavone M, Goglia M, Rosati A, et al. Unveiling the real benefits of robot-assisted surgery in gynaecology: from telesurgery to image-guided surgery and artificial intelligence[J]. *Facts Views Vis Obgyn*, 2025, 17(1):50-60. doi:10.52054/FVVO.2024.13522.
- [5] Mahendran V, Turpin L, Boal M, et al. Assessment and application of non-technical skills in robotic-assisted surgery: a systematic review[J]. *Surg Endosc*, 2024, 38(4): 1758-1774. doi: 10.1007/s00464-024-10713-1.
- [6] Li J, Zhang C, Guan B, et al. Network delay forecast and master-slave consistency enhancement for remote surgical robots[J]. *Robotics Computer Surgery*, 2025, 21: e70048. doi: 10.1002/rcs.70048.
- [7] Mohan A, Wara UU, Arshad Shaikh MT, et al. Telesurgery and robotics: an improved and efficient era[J]. *Cureus*, 2021, 13(3): e14124. doi:10.7759/cureus.14124.
- [8] Rousseau PN, Bazin PL, Steele CJ. Pontine functional connectivity gradients[J]. *Cerebellum*, 2025, 25(1):1. doi:10.1007/s12311-025-01943-7.
- [9] Nguan C, Miller B, Patel R, et al. Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype[J]. *Robotics Computer Surgery*, 2008, 4(4):304-309. doi:10.1002/rcs.210.
- [10] Barba P, Stramiello J, Funk EK, et al. Remote telesurgery in humans: a systematic review[J]. *Surg Endosc*, 2022, 36(5):2771-2777. doi:10.1007/s00464-022-09074-4.
- [11] 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, et al. 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.
- [12] 刘荣, 赵国栋, 孙玉宁, 等. 5G远程机器人手术动物实验研究[J]. 中华腔镜外科杂志: 电子版, 2019, 12(1):45-48. doi:10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2019.01.008.
- Liu R, Zhao GD, Sun YN, et al. Animal experiment for 5G remote robotic surgery[J]. Chinese Journal of Laparoscopic Surgery: Electronic Edition, 2019, 12(1): 45-48. doi: 10.3877/cma. j. issn.1674-6899.2019.01.008.
- [13] 艾青, 王野, 程强, 等. 超远程机器人辅助腹腔镜输尿管损伤修复术动物模型的构建及安全性验证[J]. 微创泌尿外科杂志, 2023, 12(5):289-292. doi:10.19558/j.cnki.10-1020/r.2023.05.001.
- Ai Q, Wang Y, Cheng Q, et al. Construction of an animal model of robotic telesurgery for ureteral injury repair and verification of surgical safety[J]. Journal of Minimally Invasive Urology, 2023, 12(5):289-292. doi:10.19558/j.cnki.10-1020/r.2023.05.001.
- [14] Yu S, Tao J, Guo B, et al. Application of 5G robotic telesurgery in urology: a multicenter study in the real world[J]. Surg Endosc, 2025, 39(9):5613-5622. doi:10.1007/s00464-025-11969-x.
- [15] Zhang M, Hu M, Yang J, et al. A pilot study on the clinical feasibility of 5G remote robot-assisted gastrectomy[J]. World J Surg Oncol, 2025, 23(1):117. doi:10.1186/s12957-025-03780-8.
- [16] 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.
- [17] Chepkoech M, Malila B, Mwangama J. Telementoring for surgical training in low-resource settings: a systematic review of current systems and the emerging role of 5G, AI, and XR[J]. J Robot Surg, 2025, 19(1):525. doi:10.1007/s11701-025-02703-9.
- [18] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics-Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy[J]. Sci Robot, 2017, 2(4): eaam8638. doi: 10.1126/scirobotics.aam8638.
- [19] Li Y, Raison N, Ourselin S, et al. AI solutions for overcoming delays in telesurgery and telementoring to enhance surgical practice and education[J]. J Robot Surg, 2024, 18(1): 403. doi: 10.1007/s11701-024-02153-9.
- [20] Wang Y, Ai Q, Shi T, et al. Influence of network latency and bandwidth on robot-assisted laparoscopic telesurgery: a pre-clinical experiment[J]. Chin Med J, 2025, 138(3): 325-331. doi: 10.1097/CM9.0000000000003257.
- [21] 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.
- Pu BH, Cui JM, Zhang X, et al. Current status, challenges, and future trends of 5G-enabled remote robotic surgery in general surgery[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(11):2469-2479. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250350.
- [22] 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.
- [23] 吴小凤, 陈丽茹, 冯钰, 等. 超远程国产单孔机器人辅助腹腔镜肾囊肿去顶减压术1例报告[J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(11): 1510-1513. doi:10.16781/j.CN31-2187/R.20250102.
- Wu XF, Chen LR, Feng Y, et al. Ultra-long-distance single-port robotic-assisted laparoscopic renal cyst decortication using a domestic robotic system: a case report[J]. Academic Journal of Naval Medical University, 2025, 46(11):1510-1513. doi:10.16781/j.CN31-2187/R.20250102.
- [24] 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.
- [25] Morohashi H, Hakamada K, Kanno T, et al. Social implementation of a remote surgery system in Japan: a field experiment using a newly developed surgical robot via a commercial network[J]. Surg Today, 2022, 52(4):705-714. doi:10.1007/s00595-021-02384-5.
- [26] 童静, 储呈晨, 李斌. 血管介入手术机器人及其力反馈技术研究进展[J]. 中国普通外科杂志, 2023, 32(6):915-922. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013.
- Tong J, Chu CC, Li B. Vascular interventional surgery robot and its force feedback technology[J]. China Journal of General Surgery, 2023, 32(6):915-922. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2023.06.013.
- [27] Hara T, Morihiro Y, Horise Y, et al. Toward safe clinical deployment of remote robotic surgery in Japan: five-year validation of the hinotori™ system using 5G wireless communication[J]. Int J

- Clin Oncol, 2025, 30(12): 2389–2398. doi: 10.1007/s10147-025-02874-3.
- [28] Milone M, Anoldo P, de'Angelis N, et al. The role of RObotic surgery in EMergency setting (ROEM): protocol for a multicentre, observational, prospective international study on the use of robotic platform in emergency surgery[J]. World J Emerg Surg, 2024, 19(1):20. doi:10.1186/s13017-024-00542-x.
- [29] Akasaka H, Hakamada K, Morohashi H, et al. Impact of the suboptimal communication network environment on telerobotic surgery performance and surgeon fatigue[J]. PLoS One, 2022, 17(6):e0270039. doi:10.1371/journal.pone.0270039.
- [30] Ebihara Y, Oki E, Hirano S, et al. Tele-assessment of bandwidth limitation for remote robotics surgery[J]. Surg Today, 2022, 52(11): 1653–1659. doi:10.1007/s00595-022-02497-5.
- [31] De'Angelis N, Khan J, Marchegiani F, et al. Robotic surgery in emergency setting: 2021 WSES position paper[J]. World J Emerg Surg, 2022, 17(1):4. doi:10.1186/s13017-022-00410-6.
- [32] Brian R, Sterponi L, Murillo A, et al. Ambiguity in robotic surgical instruction: lessons from remote and in-person simulation[J]. Adv Health Sci Educ Theory Pract, 2025, 30(5): 1387–1401. doi: 10.1007/s10459-024-10408-1.
- [33] Patki S, Nathan A, Lyness C, et al. Development of a high fidelity, multidisciplinary, crisis simulation model for robotic surgical teams[J]. J Robot Surg, 2023, 17(5): 2019–2025. doi: 10.1007/s11701-023-01612-z.
- [34] Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al. Verification of delay time and image compression thresholds for telesurgery[J]. Asian J Endosc Surg, 2023, 16(2): 255–261. doi: 10.1111/ases.13150.
- [35] Motiwala ZY, Desai A, Bisht R, et al. Telesurgery: current status and strategies for latency reduction[J]. J Robot Surg, 2025, 19(1): 153. doi:10.1007/s11701-025-02333-1.
- [36] 张旭, 马鑫, 贾通宇, 等. 机器人自主手术研究现状及展望[J]. 临床泌尿外科杂志, 2025, 40(1): 1–5. doi: 10.13201/j.issn.1001-1420.2025.01.001.
- Zhang X, Ma X, Jia TY, et al. Autonomous robotic surgery: research status and future prospect[J]. Journal of Clinical Urology, 2025, 40(1):1–5. doi:10.13201/j.issn.1001-1420.2025.01.001.
- [37] Battaglia E, Boehm J, Zheng Y, et al. Rethinking autonomous surgery: focusing on enhancement over autonomy[J]. Eur Urol Focus, 2021, 7(4):696–705. doi:10.1016/j.euf.2021.06.009.
- [38] Rivero-Moreno Y, Rodriguez M, Losada-Muñoz P, et al. Autonomous robotic surgery: has the future arrived? [J]. Cureus, 2024, 16(1):e52243. doi:10.7759/cureus.52243.
- [39] Kim JWB, Chen JT, Hansen P, et al. SRT-H: a hierarchical framework for autonomous surgery via language-conditioned imitation learning[J]. Sci Robot, 2025, 10(104): eadt5254. doi: 10.1126/scirobotics.adt5254.
- [40] Morohashi H, Hakamada K, Kanno T, et al. Construction of redundant communications to enhance safety against communication interruptions during robotic remote surgery[J]. Sci Rep, 2023, 13(1):10831. doi:10.1038/s41598-023-37730-9.
- [41] Carlos G, Saulan M. Robotic emergencies: are you prepared for a disaster? [J]. AORN J, 2018, 108(5): 493–501. doi: 10.1002/aorn.12393.
- [42] Wathieu N, Ajouz H, Abbas AE. Intraoperative complications during robotic thymectomy and their management: a narrative review[J]. Mediastinum, 2025, 9:19. doi:10.21037/med-24-43.
- [43] Kalipershad SNR, Peristerakis I. The introduction of an emergency safety protocol coupled with simulation training in robotic surgery, has enabled a more cohesive and efficient response to emergencies[J]. Surgeon, 2022, 20(3): 151–156. doi: 10.1016/j.surge.2021.03.007.
- [44] 邢兆东, 汤坚强. 机器人复杂直肠癌手术探索与思考[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(10): 2068–2083. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250552.
- Xing ZD, Tang JQ. Exploration and reflection on robotic complex rectal cancer surgery[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(10):2068–2083. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250552.
- [45] 中国医师协会外科医师分会微创外科专家工作组, 中华医学会外科学分会腹腔镜与内镜外科学组, 中国医师协会外科医师分会机器人外科专家工作组, 等. 5G远程控制机器人辅助肝胆胰外科手术中国专家共识(2025版)[J]. 中国实用外科杂志, 2025, 45(6):601–610. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2025.06.01.
- Minimally Invasive Surgery Expert Group, Branch of Surgery, Chinese Medical Doctor Association; Laparoscopic & Endoscopic Surgery Group, Chinese Society of Surgery, Chinese Medical Association; Robotic Surgery Expert Working Group of the Surgical Physicians Branch of the Chinese Medical Doctor Association, et al. Chinese expert consensus on 5G remote robotic hepatobiliary and pancreatic surgery(2025 edition) [J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2025, 45(6):601–610. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2025.06.01.
- [46] Aldousari S, Almarzouq A, Hassan A, et al. The era of telesurgery: insights from ultra-long-distance Asia to Middle East human telesurgery robotic assisted radical prostatectomy[J]. J Robot Surg, 2025, 19(1):108. doi:10.1007/s11701-025-02274-9.
- [47] 4th Godley F, Fer D, Patel AD, et al. Remote robotic surgery: implementing a technology 20 years in the making[J]. Surg Endosc, 2025, 39(4):2743–2747. doi:10.1007/s00464-025-11604-9.
- [48] Poulsen JL, Bruun B, Oestergaard D, et al. Factors affecting workflow in robot-assisted surgery: a scoping review[J]. Surg

- Endosc, 2022, 36(12): 8713-8725. doi: 10.1007/s00464-022-09373-w.
- [49] 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.
- [50] 代永鸿, 杨匡洋, 曾焰辉, 等. 5G远程机器人在骨盆骨折中的应用疗效分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2025, 39(4):391-398. doi:10.7507/1002-1892.202501052.
- Dai YH, Yang KY, Zeng YH, et al. Effectiveness analysis of 5G remote robotic surgery in pelvic fracture treatment[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2025, 39(4):391-398. doi:10.7507/1002-1892.202501052.
- [51] Muaddi H, El Hafid M, Choi WJ, et al. Clinical outcomes of robotic surgery compared to conventional surgical approaches (laparoscopic or open): a systematic overview of reviews[J]. Ann Surg, 2021, 273(3):467-473. doi:10.1097/SLA.0000000000003915.
- [52] 陈磊, 陈宏广, 顾东强, 等. 远程教育在关节镜手术临床教学中的研究[J]. 中国继续医学教育, 2023, 15(10):115-119. doi:10.3969/j.issn.1674-9308.2023.10.026.
- Chen L, Chen HG, Gu DQ, et al. Research on clinical teaching research in arthroscopic surgery[J]. China Continuing Medical Education, 2023, 15(10): 115-119. doi: 10.3969/j.issn.1674-9308.2023.10.026.
- [53] Lazar DJ, Ferzli GS. Is the robotic revolution stunting surgical skills? [J]. Surg Open Sci, 2024, 19: 63-65. doi: 10.1016/j.sopen.2024.03.009.
- [54] Azadi S, Green IC, Arnold A, et al. Robotic surgery: the impact of simulation and other innovative platforms on performance and training[J]. J Minim Invasive Gynecol, 2021, 28(3):490-495. doi: 10.1016/j.jmig.2020.12.001.

(本文编辑 姜晖)

本文引用格式:孙涵,蔡忠良,嵇武. 远程机器人手术的现状、风险特征与安全实施框架[J]. 中国普通外科杂志, 2026, 35(2):376-383. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250671

Cite this article as: Sun H, Cai ZL, Ji W. Robotic telesurgery: current status, risk characteristics, and safety implementation framework[J]. Chin J Gen Surg, 2026, 35(2): 376-383. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250671