·综　　述·

5G远程机器人在胆管癌治疗中的探索与应用前景

蒲宝红[1]，刘鹏[2]，崔佳明[1]，苟彤彤[1]，马世勋[1,2]，田宏伟[1,2]
1. 甘肃中医药大学第一临床医学院，甘肃 兰州 730000；2. 甘肃省人民医院普外科，甘肃 兰州 730000

［摘要］ 胆管癌，尤其是肝门部胆管癌，手术复杂，对专家资源依赖性强。5G远程机器人手术凭借低延时、高可靠的网络连接，使远端专家能够实施或指导精细操作，有望缓解医疗资源分布不均的问题。本文系统阐述了该技术的系统架构［主控端、网络传输层（5G网络）、从控端］、在胆管癌术前规划与远程操作中的具体应用及优势，并重点分析了当前面临的核心挑战，包括网络传输稳定性、力反馈情况、安全应急机制及法律法规等非技术壁垒。在此基础上，文章指出，融合人工智能、触觉互联网及专用化机器人将是未来的重要发展方向。现阶段该技术仍处于探索期，若要迈向常规临床应用，还需在技术可靠性、临床安全性及综合生态建设上取得进一步突破。

［关键词］ 5G网络；远程医疗技术；胆管癌；手术治疗；手术机器人系统
［中图分类号］R656　［文献标识码］A　**DOI**：10.3969/j.issn.1003-5591.2026.05.014

Exploration and application prospects of 5G-enabled telerobotic surgery in the treatment of cholangiocarcinoma

Pu Baohong[1], *Liu Peng*[2], *Cui Jiaming*[1], *Gou Tongtong*[1], *Ma Shixun*[1,2], *Tian Hongwei*[1,2]
1. *First Clinical Medical School*, *Gansu University of Chinese Medicine*, *Gansu Lanzhou* 730000, *China*; 2. *Department of General Surgery*, *Gansu Provincial Hospital*, *Gansu Lanzhou* 730000, *China*
Pu Baohong and Liu Peng contributed equally to this work
Corresponding author: *Tian Hongwei*, *Email*: *tianhw*18@163.*com*

［**Abstract**］ Cholangiocarcinoma, especially hilar cholangiocarcinoma, is a highly complex surgical disease that depends heavily on expert resources. Owing to its low latency and highly reliable network connectivity, 5G-enabled telerobotic surgery allows remote experts to perform or guide delicate procedures and may help alleviate the uneven distribution of medical resources. his article breaks down the system setup of this tech (main control unit, network layer, and slave control unit), how it′s used and helpful for planning surgeries and remote operations for bile duct cancer, and highlights the main challenges right now, like network stability, force feedback, emergency safety setups, and non-technical hurdles like regulations. On this basis, the article points out that the integration of artificial intelligence, the tactile internet, and specialized robotic systems will be important future directions. At present, this technology remains in the exploratory stage. To move toward routine clinical application, further breakthroughs are still needed in technical reliability, clinical safety, and the development of a comprehensive supporting ecosystem.

［**Key words**］ 5G network; Telemedicine technology; Cholangiocarcinoma; Surgical treatment; Surgical robotic system

---

基金项目：甘肃中医药大学研究生创新创业基金项目（2026CXCY-072）；甘肃省人民医院骨干和青年人才科研项目（GSWSQN2025-01）；甘肃省自然科学基金（25JRRA313）；甘肃省兰州市青年科技人才创新项目（2024-QN-139）

作者简介：蒲宝红，硕士研究生在读，主要从事普外科疾病微创治疗方面的研究，Email：2904231063@qq.com；刘鹏，住院医师，主要从事胃肠疾病诊治方面的研究，Email：2132507040@qq.com；蒲宝红、刘鹏为共同第一作者
通信作者：田宏伟，Email：tianhw18@163.com

胆管癌发病率呈逐年上升趋势。由于胆管解剖位置深在，毗邻重要血管（门静脉、肝动脉）且早期症状隐匿，多数病人确诊时已属晚期[1]。目前，手术切除仍是可能治愈胆管癌的唯一方式。尤其是肝门部胆管癌，其手术通常需要行联合肝叶切除的根治性手术，涉及肝门部骨骼化清扫、胆管成型、甚至血管重建，被视为肝胆外科领域最复杂、技术门槛最高的手术之一[2-4]。此类手术的成功极度依赖外科医生对复杂解剖的理解、精湛的双手操作技巧（包括缝合、打结等精细动作）和丰富的临床决策经验。目前国内能常规开展该类复杂手术的医疗资源主要集中在区域中心城市的大型三甲医院，不同地区的技术可及性仍存在一定差异，部分病人可能因诊疗路径衔接不畅，错过获得根治性手术的最佳时机。如何将顶尖外科专家的技术“输送”到医疗资源匮乏地区，成为一个亟待解决的全球性医疗难题。21 世纪初，以达芬奇手术机器人为代表的机器人辅助手术系统开启了微创外科的新纪元[5]。在肝胆外科领域，机器人系统已被广泛应用于肝切除、胰十二指肠切除等复杂手术，并显示出在胆管癌手术，特别是胆肠吻合等精细重建步骤中的潜在优势[6-7]。然而，传统的机器人手术仍然是“本地化”的，主刀医生必须与病人处于同一手术室内[8]。远程手术的概念则旨在打破空间的桎梏。5G 技术的出现，使得稳定、安全、高效的远程机器人手术从概念验证走向规模化临床实践成为可能。然而，目前该技术仍处于探索和初步应用阶段，其安全性、有效性和常规化应用仍面临诸多挑战，尤其是在肝门部胆管癌这类高风险手术中，如何确保病人安全是核心问题。本综述将聚焦于 5G 远程机器人手术这一前沿交叉领域，系统梳理其在胆管癌这一特定高难度手术中的应用基础、系统构成、当前实践、核心挑战与未来方向，并重点探讨其在保障病人安全方面的策略与局限。

一、5G 远程机器人手术系统的分类

参考日本《远程外科临床实践指南 2022 版》[9]和刘荣团队的《远程手术的分级》[10]，远程机器人手术系统可划分为四类操作模式（图 1）：（1）远程手术指导[11-13]；（2）远程手术监督[14]；（3）远程手术操作[15]；（4）智能化远程手术[16-17]。

二、5G 远程机器人手术系统的核心技术架构

参考《5G 远程控制机器人辅助结直肠癌手术中国专家共识（2025 版）》[18]和《远程机器人手术操作指南（2025 版）》[19]的规范定义，一个完整的 5G 远程机器人手术系统是一个复杂的信息物理系统，其系统核心构成[20-21]（图 2）为：主控端（控制中心）、网络传输层（5G 网络）、从控端（手术现场）。

（一）主控端（控制中心）

主控端是外科医生的“驾驶舱”，是手术决策和指令发出的源头[22]。其核心组件包括以下 4 个方面。（1）主操作台：医生在此操控主控制器，其手部动作被高精度传感器实时捕捉并数字化；系统通过运动缩放（将大幅动作转为微米级操作）与震颤过滤技术，极大提升操作稳定性，这对于胆管癌手术中精细的血管剥离与胆管吻合至关重要。（2）三维高清视觉系统：通过双目内窥镜为医生提供手术区域的实时、立体、高清视野；出色的深度感知能力，能清晰呈现胆管、血管与肿瘤的解剖层次，是完成高难度精准解剖的基础。（3）力反馈系统（发展中的关键技术）：此系统旨在让医生在操作时能“感知”到组织的触感与力度，理想的力反馈有助于在胆管癌手术中判断组织性质与控制缝合张力。目前该技术已有实验室原

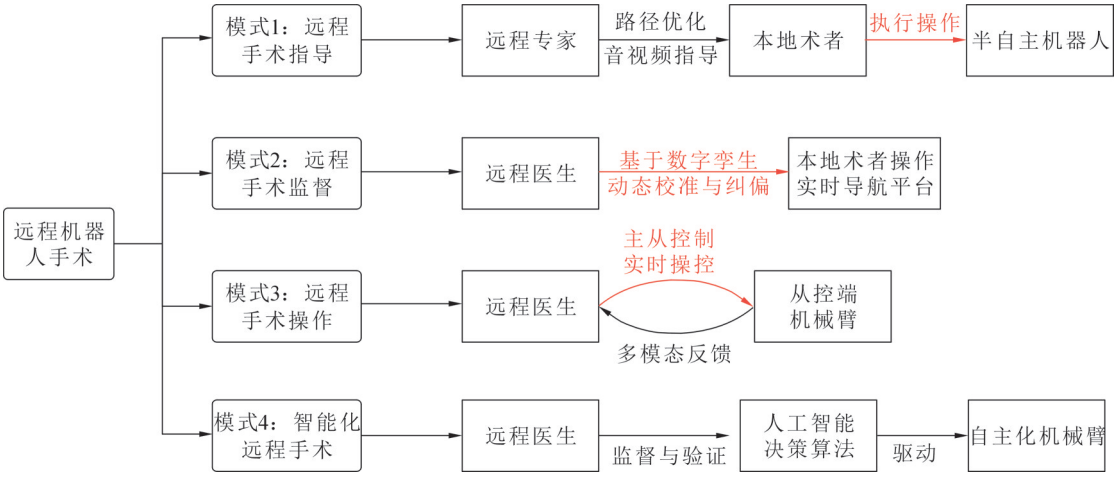


图 1　远程机器人手术系统分类



图 2　5G 远程机器人手术系统核心构架

型产品，但实现高保真、低延迟且符合临床安全标准的商业化落地应用，仍存在不少待突破的技术难点。(4)5G 通信与集成界面：基于 5G 网络，通过客户终端设备(CPE)或专线，实现指令与视频数据的高速、低延时传输。用户界面还集成了病人生命体征与术前影像，为医生决策提供全方位信息支持。

(二)网络传输层(5G 网络)

网络层是连接专家与病人的“生命线”，其性能直接决定手术的成败[23-26]。为满足远程手术的苛刻要求，5G 网络需要部署以下关键技术：(1)5G 独立组网(SA)网络：作为 5G-uRLLC 能力的基础，SA 架构提供端到端的独立 5G 路径，从根本上缩短并确定数据传输路径，为手术指令建立专属低时延通道。(2)网络切片技术：在公共 5G 网络中虚拟出一条逻辑隔离的“专属通道”，为远程手术业务预留带宽与时延资源；即使在同一基站下其他业务流量激增，也能绝对保障手术数据流的优先级与稳定性。(3)移动边缘计算：将计算能力下沉至网络边缘(如医院侧机房)，实现手术视频流与控制指令的就近处理与快速交换，有效减少数据往返核心网的时延。

参考《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)》[6]等相关规范，为确保远程手术安全，网络性能需达到特定技术指标。对于胆管癌手术，尤其是肝门部胆管癌根治术等高难度操作，通常要求端到端网络时延稳定在 100～200 ms 以内，理想情况下应低于 150 ms；上行/下行带宽需保障在 50～100 Mbps 以上，以确保多路高清视频(包括 3D 手术视野、生命监护影像等)的稳定流畅传输；网络可靠性(可用性)要求达到 99.99% 以上，并需具备冗余链路自动切换机制以应对突发中断。这些指标是远程手术得以安全开展的技术底线，也是当前临床探索中重点验证和保障的内容。

(三)从控端(手术现场)

从控端是指令的最终执行者，是直接作用于病人的物理实体[9]。(1)副操作台：核心功能是接收并执行主控端的数字指令，驱动病人体内的机械臂与手术器械完成精准动作；针对胆管癌手术，需配备专用显微器械，以满足精细的胆管解剖与吻合要求。(2)高清内窥镜系统：通常采用双路 3D 内窥镜，为主控端提供实时、立体的腹腔内视野；其成像质量需能清晰显示胆管黏膜的细微变化与血管走行，是完成高精度手术的视觉基础。(3)生命监护与辅助设备：实时监测病人心电、血压、血氧等关键生命体征，并与主机器人系统联动，构成一体化的手术安全监控网络。(4)本地备份团队：这是确保手术安全的核心冗余设计；团队负责术前准备与术中辅助，并在网络异常等紧急情况下，具备立即中止远程模式并接管手术的能力，是病人安全的最终保障。

三、远程模式下胆管癌手术的决策与规划

胆管癌(尤其是肝门部胆管癌)的手术治疗被视为一项极其复杂的外科挑战[2]。手术时机的确定远非一个简单的时间点，而是一个基于多维度评估的动态决策过程，其核心目标是在“肿瘤根治性切除”与“病人安全耐受”之间取得最佳平衡[27-28]。

(一)基于远程影像数据的精准评估

病人侧医疗机构将病人的薄层 CT、MRI 或磁共振胰胆管成像(MRCP)等原始 DICOM 影像数据通过安全网络传输至主控端。主控端专家利用三维重建软件，远程进行下列关键评估。(1)解剖学可切除性分析：精确计算剩余肝脏体积(future liver remnant，FLR)，评估门静脉、肝动脉的受侵情况与重建可行性，明确胆管癌的 Bismuth-Corlette 分型及 R0 切除可能。(2)虚拟手术规划：基于三维模型，预先规划肝切除平面、胆管切缘、淋巴结清扫范围以及可能的血管重建方案。这为远程手术提供了精确的“路线图”。

(二)术前状态的远程协同优化

远程专家可依托信息化平台，指导病人侧医疗团队完成系统性的术前优化。(1)肝功能储备与营养评估指导：远程分析病人的肝功能分级(如 Child-Pugh 评分)、吲哚菁绿清除试验(如有条件)及营养风险筛查 2002(NRS-2002)等数据，指导精准的营养支持方案与肝功能优化策略。(2)胆道引流策略制定：基于三维重建模型，指导选择性引流 FLR 侧的目标胆管，并设定个体化的目标胆红素水平，以优化肝功能。(3)门静脉栓塞的远程决策与会诊：当评估发现 FLR 不足时，远程专家可指导制定门静脉栓塞的方案(如栓塞范围、路径)，并与本地介入科团队进行远程多学科讨论[29]。(4)全身状况管理：通过共享电子病历，指导对高血压、糖尿病等合并症的围术期精细化管理，并明确手术时机选择的综合标准。通过上述系统性远程协同，专家得以在术前与基层团队共同完成全面的“虚拟备战”，将病人调整至最佳手术状态[30]。

四、5G 远程机器人在胆管癌手术中的具体应用场景与优势

(一)术前远程精准规划与方案指导

专家可远程完成基于三维重建的个体化手术方案制定，并通过视频会议与病人侧医疗团队深入讨论，明确手术步骤、风险预案及分工。这提升了病人侧医疗机构对于复杂胆管癌手术的认识和准备水平，已有远程指导机器人辅助肝胆胰手术的案例报道证实了其可行性[6-7,22]。

(二)突破地理空间限制，实现诊疗资源跨机构共享

5G 远程机器人手术的核心临床价值之一，在于依托低延迟的通信网络与机器人系统，不同医疗机构的术者可跨空间协同完成手术关键步骤操作，甚至全流程配合完成复杂手术[31-32]。该模式可减少病人跨区域长途就诊的奔波负担，降低因长距离转诊、等待床位导致的肿瘤进展风险[33]。从临床技术推广层面看，这一模式为复杂肝胆胰外科手术的规范化、均质化落地，提供了新的技术路径。

(三)提升手术精度与稳定性，克服人为局限

在本地机器人手术中，其优势已得到证实[34-35]。在远程模式下，这些优势得以保留：(1)视野优势，放大的 3D 高清视野使肝门区的复杂解剖结构更清晰，有助于辨识胆管与血管的变异；(2)操作优势，机械臂的颤抖过滤和运动缩放功能，

使得在毫米级的胆管上进行缝合、打结等操作更为稳定，有助于降低术后胆漏风险；(3)人体工学，医生可以坐在控制台前操作，有助于长时间保持注意力。

(四)赋能复杂术式与术中决策

(1)精准肝门解剖与血管重建：机器人器械的灵活性和精准性，结合专家经验，有利于在狭小空间内完成精细解剖；当需血管重建时，机器人的精细操作能提升缝合质效[35]；5G远程技术使得专家可远程指导或直接操作完成此类高难度步骤。(2)实时术中远程教学与会诊[8-9]：高带宽允许实时传输多路高清视频流；专家可远程指导不同地方的医生，或与病人端医生实时讨论，形成“远程操作＋实时会诊”的新模式。

(五)关于在急重症中应用的思考

关于将5G远程机器人用于急性梗阻性化脓性胆管炎(acute obstructive suppurative cholangitis，AOSC)的紧急引流，目前仍处于概念探索阶段。AOSC起病急、进展快，治疗关键是迅速解除胆道梗阻、控制感染。现阶段，超声或CT引导下经皮经肝穿刺胆道引流术(percutaneous transhepatic cholangial drainage，PTCD)或内镜下鼻胆管引流术因其操作相对简便、快捷，设备普及率高，仍是此类急症的首选治疗方式[36]。远程机器人手术用于AOSC引流，理论上可解决偏远地区诊疗水平不足的困境，但面临诸多现实挑战。(1)时效性：远程手术需提前部署设备、建立网络、调配团队，准备时间远超PTCD/内镜下鼻胆管引流术，可能延误抢救时机。(2)技术复杂性：在病人全身炎症反应重、血流动力学不稳定的情况下，远程操作的精准度和安全性面临更大考验。(3)成本效益：高昂的设备和通信成本与急诊处理的普惠性要求存在矛盾。因此，现阶段远程机器人技术在胆道急症中的应用，应优先考虑在非脓毒症期的复杂性胆道梗阻或作为PTCD失败后的备选方案进行探索性研究[37]。未来，随着设备小型化、部署便捷化及网络全覆盖的实现，其在急重症中的应用潜力或可进一步释放。

五、当前面临的核心挑战与应对策略(以胆管癌手术为中心)

尽管5G远程机器人手术前景广阔，但在迈向大规模常规临床应用前，仍需克服一系列严峻挑战。

(一)网络传输的绝对稳定性与安全性

此是制约当前远程手术发展的核心瓶颈。(1)延迟与抖动[38]：实际端到端延迟是多个环节的累加；对于肝门部胆管癌手术，任何不可预测的网络抖动都可能导致操作失误，必须通过SA组网、网络切片、边缘计算及冗余链路等技术，确保延迟稳定在安全阈值内(如＜150 ms)。(2)可靠性：需通过“双链路热备”、无缝切换等技术，构筑高可靠的通信防线，接近“零容错”要求。(3)网络安全[38]：必须防御黑客攻击导致的数据窃取、指令篡改或服务中断，需建立医院级的安全防护体系和数据加密传输协议。

(二)术中紧急意外情况的安全处理机制

针对肝门部胆管癌手术风险高、易出血等特点，必须建立完备的应急预案。(1)网络异常预案：系统需具备实时网络状态监控与预警功能，一旦延迟超标或链路中断，应自动触发视觉和听觉警报。病人端必须配备具备同等手术能力的本地备份团队，能够立即中止远程模式，接管手术。远程专家端应能通过备用通信渠道(如电话)进行语音指导。(2)术中突发大出血等危急情况处理：在远程手术开始前，必须制定详尽的出血控制预案。本地团队需熟练掌握压迫、钳夹等初步止血技术。当发生难以远程控制的大出血时，远程专家应果断指令本地团队立即接管，并转为开放手术止血。定期进行应急演练至关重要。

(三)技术与设备本身的局限性

(1)力反馈缺失：如前所述，当前主流的远程手术系统普遍缺乏有效的力反馈[39]，医生仅凭视觉信息进行判断，如同“隔着手套绣花”，与开放手术可直接感知组织张力和质地、甚至本地机器人手术可能存在的部分力觉提示相比，增加了在胆管癌精细吻合中判断缝合松紧度的难度，可能潜在地影响吻合口愈合质量；这不仅是技术差距，更是临床安全需要攻克的关键瓶颈。(2)设备兼容性与集成度：目前远程手术系统多为不同厂商的设备(机器人、通讯设备、影像设备)集成而成，存在兼容性问题和接口标准不统一的挑战；打造高度一体化、即插即用的专用远程手术平台是未来的方向。

(四)非技术类挑战

(1)法律法规与责任界定[40]：远程手术跨越了行政区域，一旦发生医疗纠纷，责任如何界定？是远程专家的责任，还是病人端医院的责任？通信运营商是否需承担连带责任？目前全球范围内缺乏完善的法律法规来规范和界定远程手术中的各方权责。(2)伦理与知情同意[41-42]：病人是否充分理解并接受远程手术可能存在的特殊风险(如网络中断)？知情同意过程需要更加细致和全面。(3)经济成本与支付体系：一套5G远程机器人系统成本高昂，且涉及持续的通信和维护费用[43]。如此高昂的成本如何回收？远程手术服务是否被纳入医保报销范围？这需要建立新的商业模式和支付体系来支撑其可持续发展。(4)医生培训与准入：远程手术对主刀医生提出了新的技能要求，不仅需要精湛的外科技艺，还需要熟悉远程系统的操作和网络异常的处理，需要建立专门的培训和资格认证体系。

六、未来在胆管癌治疗领域的发展方向

挑战意味着机遇。结合我国西部地区的医疗布局特点，5G远程机器人手术的推广可考虑分阶段实施：(1)初期，建立“省级核心医院-地市枢纽医院”的远程手术协作网，针对肝门部胆管癌等复杂手术，开展远程指导、关键步骤远程操作等高价值应用；(2)中期，探索基于区域医疗中心的“集中控制、多端执行”模式，提升优质医疗资源的辐射效率；(3)远期，通过人工智能(artificial intelligence，AI)辅助和系统自动化降低对远端专家持续操作的依赖，使技术更易向县级医院渗透；同时，需配套建立适应西部地区特点的远程手术培训体系、成本分摊机制及应急保障预案。5G远程机器人手术的未来发展将围绕以下几个方向展开。

（一）AI的深度融合：从辅助到协同

AI将在多个层面赋能远程手术[44-46]，AI与5G远程机器人手术的深度融合，正推动手术模式从“远程人工操作”向“远程智能协同”演进[47-48]。其核心赋能体现在：（1）智能术前规划与决策支持。深度学习算法可自动分割CT/MRI影像中的肝脏、肿瘤、血管及胆管结构，快速生成高精度三维模型，并自动计算最佳切除平面、FLR，甚至预测术后并发症风险，为远程专家提供量化决策依据[49]。（2）术中实时导航与增强现实。借助增强现实技术，可将术前规划虚拟模型（如肿瘤边界、重要脉管）实时、精准地叠加于术野视频流中，为远程操作者提供“透视”视野，尤其在肝门部复杂解剖中提升解剖精度与安全性[50]。（3）基于计算机视觉的术中预警与质控[51]。AI可实时分析手术视频流，自动识别关键解剖结构（如肝动脉、胆管切缘）和手术动作（如缝合、打结），在器械接近危险区域时发出预警，并可对关键步骤（如吻合口质量）进行初步评估，实现术中实时质量监控。（4）延迟补偿。高级AI算法可以预测医生的操作意图，并对因网络延迟造成的视频流进行智能预测和补偿，创造出一种“零延迟”的视觉体验。（5）迈向半自主/自主手术操作。在特定标准化、重复性高的步骤（如预定平面的组织离断、简单缝合），经过海量专家手术数据训练的AI模型，可在医生监督下执行部分自动化操作，或提供“驾驶辅助”般的运动补偿建议，以部分抵消网络延迟的影响，并减轻远程医生的操作疲劳。这代表了远程外科从“远程控制”向“远程监督智能体执行”的远期发展方向。

（二）触觉互联网与新一代通信技术

6G技术的研究已拉开序幕，其核心愿景之一便是“触觉互联网”，旨在实现包括触觉、视觉、听觉在内的多模态信息的实时同步传输[52]。届时，力反馈的难题将有望得到根本性解决，医生将能获得近乎真实的“临场感”。同时，6G将提供更高的可靠性、更广泛的覆盖和更集成的通信-感知-计算能力，为远程手术提供更坚实的基础。

（三）手术机器人的专用化与微型化

未来的手术机器人将针对胆道外科开发专用器械（如超细腕部器械、专用胆道缝合器械）和智能软件模块。更小型化、柔性化的单孔或自然腔道手术机器人系统也将被开发[53-55]，进一步减少创伤，并适应更复杂解剖路径下的胆管癌手术。

（四）标准化体系与生态建设

推动建立远程手术设备接口、通信协议、数据安全、临床操作规范和伦理法律框架的全球或国家级统一标准，是促进行业健康、互信发展的关键[56]。这需要医疗机构、设备厂商、通信运营商、保险支付方和卫生监管部门共同构建一个成熟的远程手术生态系统。

（五）从远程手术到远程介入

未来的应用将不局限于外科手术[29,45]。通过结合血管介入机器人，专家可以远程为肝门部胆管癌病人进行术前门静脉栓塞，或为晚期病人进行肝动脉灌注化疗，极大地扩展了远程精准治疗的范畴。

七、结语

5G远程机器人手术是外科医学与信息通信技术融合的前沿探索，它正为胆管癌这一复杂外科疾病的治疗格局带来新的变量。通过尝试将专家的技术能力跨地域投送，它为解决医疗资源分布不均的难题提供了新的思路。当前，这项技术仍处于发展的早期阶段，其在胆管癌手术中的应用更是以探索和示范为主，面临着网络稳定性、安全性、力反馈缺失以及法规伦理等多重挑战。特别是对于肝门部胆管癌这类高风险手术，确保病人安全是任何技术应用不可逾越的前提。未来，随着5G/6G网络的演进、AI技术的赋能、专科化机器人的发展以及相关标准的完善，远程手术有望从当前的初步探索，逐步走向更成熟、更安全的应用。然而，其最终能否成为胆管癌的常规治疗选项，仍取决于能否在技术可靠性、临床安全性和卫生经济学效益上取得实质性突破。

总之，5G远程机器人手术在胆管癌治疗中的应用，是技术驱动下医疗资源再分配的有益探索。然而，其发展绝非单纯的技术迭代，而是涉及技术可靠性、临床安全性、经济可行性、法规完备性及伦理可接受性的复杂系统工程。尤其在西部等医疗资源分布不均的地区，其推广必须与区域性医疗中心建设、本土化人才培养和可持续的运营模式创新相结合。未来，唯有在稳健解决核心挑战的基础上，进行审慎的临床验证与渐进式的模式探索，方能使这项前沿技术真正服务于提升胆管癌整体诊治水平的根本目标，而非停留在概念演示层面。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参　考　文　献

[1] Banales JM, Marin JJG, Lamarca A, et al. Cholangiocarcinoma 2020: the next horizon in mechanisms and management[J]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2020, 17(9): 557-588. DOI: 10.1038/s41575-020-0310-z.

[2] Dar FS, Abbas Z, Ahmed I, et al. National guidelines for the diagnosis and treatment of hilar cholangiocarcinoma[J]. World J Gastroenterol, 2024, 30(9): 1018-1042. DOI: 10.3748/wjg.v30.i9.1018.

[3] Ito F, Cho CS, Rikkers LF, et al. Hilar cholangiocarcinoma: current management[J]. Ann Surg, 2009, 250(2): 210-218. DOI: 10.1097/sla.0b013e3181afe0ab.

[4] Mansour JC, Aloia TA, Crane CH, et al. Hilar Cholangiocarcinoma: expert consensus statement[J]. HPB, 2015, 17(8): 691-699. DOI: 10.1111/hpb.12450.

[5] 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: 10.1097/00000658-200204000-00005.

[6] 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.

[7] Fan YX, Ma C, Wu XY, 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.

[8] Liu Q, Li MY, Gao YX, et al. Effect of robotic versus open pancreaticoduodenectomy on postoperative length of hospital stay and complications for pancreatic head or periampullary tumours: a multicentre, open-label randomised controlled trial[J]. Lancet Gastroenterol Hepatol, 2024, 9(5): 428-437. DOI: 10.1016/S2468-1253(24)00005-0.

[9] Committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan Surgical Society. Clinical practice guidelines for telesurgery 2022[J]. Surg Today, 2024, 54(8): 817-828. DOI: 10.1007/s00595-024-02863-5.

[10] 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.

[11] Newman JG, Kuppersmith RB, O'Malley BW. Robotics and telesurgery in otolaryngology[J]. Otolaryngol Clin N Am, 2011, 44(6): 1317-1331. DOI: 10.1016/j.otc.2011.08.008.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Lenihan J, 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.

[15] Zhou FH, Guo BH, Lv HD, 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.

[16] Cosío 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.

[17] 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. DOI: 10.1007/s00464-020-07823-x.

[18] 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. 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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,2023:1-52.

[24] Yang XC, Wang YH, 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.

[25] 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.

[26] Huang JY, Li LA, 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.

[27] 时付坤,舒俊杰,司佳萌,等.《原发性肝癌诊疗指南之肝内胆管癌诊疗中国专家共识(2022版)》影像学要点解读[J]. 中国医学影像学杂志,2025,33(12):1266-1271. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2025.12.003.

[28] 郭伟,李鑫,王明达,等.《肿瘤外科学年鉴:肝外胆管癌和胆囊癌临床诊疗指南》推荐意见[J]. 临床肝胆病杂志,2024,40(4):682-687. DOI:10.12449/JCH240407.

[29] 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.

[30] Lim P, Morris OJ, Nolan G, et al. Sham feeding with chewing gum after elective colorectal resectional surgery: a randomized clinical trial[J]. Ann Surg, 2013, 257(6): 1016-1024. DOI: 10.1097/sla.0b013e318286504a.

[31] 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):1075-1077,1080. DOI:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.09.18.

[32] Tian ZM, Lu WS, Wang TM, et al. Application of a robotic telemanipulation system in stereotactic surgery[J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2007, 86(1): 54-61. DOI: 10.1159/000110742.

[33] 田东旭,牛海涛. 远程手术的发展历史及现状[J]. 机器人外科学杂志(中英文),2022,3(5):343-350. DOI:10.12180/j.issn.2096-7721.2022.05.001.

[34] Dong SF, Jiang A, An SQ, et al. Comparison of robot-assisted, open, and laparoscopic-assisted surgery for cholangiocarcinoma: a network meta-analysis[J]. Langenbecks Arch Surg, 2024, 409(1): 336. DOI: 10.1007/s00423-024-03541-3.

[35] Aoyagi Y, Gaudenzi F, Wakabayashi T, et al. Robotic surgery for perihilar cholangiocarcinoma: a concise systematic review[J]. Surg Endosc, 2025, 39(4): 2701-2710. DOI: 10.1007/s00464-025-11650-3.

[36] Kiriyama S, Kozaka K, Takada T, et al. Tokyo Guidelines 2018: diagnostic criteria and severity grading of acute cholangitis (with videos)[J]. J Hepatobiliary Pancreat Sci, 2018, 25(1): 17-30. DOI: 10.1002/jhbp.512.

[37] Singh S, Talwalkar JA. Primary sclerosing cholangitis: diagnosis, prognosis, and management[J]. Clin Gastroenterol Hepatol, 2013, 11(8): 898-907. DOI: 10.1016/j.cgh.2013.02.016.

[38] 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.
[39] 赵邦博,王维斌,赵玉沛. 机器人胰腺手术应用现状与未来[J]. 协和医学杂志,2024,15(4):729-733. DOI:10.12290/xhyxzz.2024-0365.
[40] 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.
[41] 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.
[42] 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.
[43] 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):836-838,840. DOI:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.07.23.
[44] 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,2023,29(6):56-59.
[45] 曹悦,杨贺迪,缪淼,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.
[46] 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.
[47] Maier-Hein L, Vedula SS, Speidel S, et al. Surgical data science for next-generation interventions[J]. Nat Biomed Eng, 2017, 1(9):691-696. DOI:10.1038/s41551-017-0132-7.
[48] Ray TR, Kellogg RT, Fargen KM, et al. The perils and promises of generative artificial intelligence in neurointerventional surgery[J]. J Neurointerv Surg, 2023, 16(1):4-7. DOI:10.1136/jnis-2023-020353.
[49] Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. A survey on deep learning in medical image analysis[J]. Med Image Anal, 2017, 42:60-88. DOI:10.1016/j.media.2017.07.005.
[50] Fan XQ, Zhu QY, Tu PX, et al. A review of advances in image-guided orthopedic surgery[J]. Phys Med Biol, 2023, 68(2):02TR01. DOI:10.1088/1361-6560/acaae9.
[51] Moglia A, Georgiou K, Georgiou E, et al. A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery[J]. Int J Surg, 2021, 95:106151. DOI:10.1016/j.ijsu.2021.106151.
[52] 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.
[53] 白儒,胡三元,张光永,等. 单孔腹腔镜手术机器人执行臂运动学分析[J]. 机械设计与制造,2025(11):129-132,137. DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2025.11.026.
[54] 胡涛,高贺云,张文,等. 达芬奇Xi手术机器人辅助单孔腹腔镜治疗早产低体重儿十二指肠梗阻:全球首例报道(附手术视频)[J]. 机器人外科学杂志(中英文),2024,5(4):747-750,756. DOI:10.12180/j.issn.2096-7721.2024.04.046.
[55] 王家寅,姜乃晶,赵亚平,等. 一种新型单臂单孔微创腹腔镜手术机器人系统[J]. 中国医疗器械杂志,2023,47(1):13-18,25. DOI:10.3969/j.issn.1671-7104.2023.01.002.
[56] 贺杰,詹纳智,刘光平,等. 远程外科手术的研究进展和应用展望[J]. 解放军医学院学报,2025,46(8):729-736,753. DOI:10.12435/j.issn.2095-5227.25041402.

(收稿日期:2025-12-01)

(上接第406页)

[45] Heine A, Juranek S, Brossart P. Clinical and immunological effects of mRNA vaccines in malignant diseases[J]. Mol Cancer, 2021, 20(1):52. DOI:10.1186/s12943-021-01339-1.
[46] Huang X, Tang TY, Zhang G, et al. Identification of tumor antigens and immune subtypes of cholangiocarcinoma for mRNA vaccine development[J]. Mol Cancer, 2021, 20(1):50. DOI:10.1186/s12943-021-01342-6.
[47] Wan XS, Zhao J, Yang XB, et al. Therapeutic T cells with 3-in-1 strategy for the treatment of biliary tract cancer[J]. Cell Rep Med, 2025, 6(10):102349. DOI:10.1016/j.xcrm.2025.102349.

(收稿日期:2026-01-08)