

文章编号:1009-6612(2026)04-0294-05  
DOI:10.13499/j.cnki.fqjwkzz.2026.04.294

·综述·

## 基于5G蜂窝网络的远程胸腹腔 内窥镜手术机器人系统端到端的技术研究

任海英<sup>1</sup>, 张雨<sup>1</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 李自刚<sup>1</sup>, 李静雯<sup>2</sup>

[1.中国信息通信研究院云计算与大数据研究所,北京,100191;2.上海微创医疗机器人(集团)股份有限公司]

**【摘要】** 远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统兼具医疗精准操作与通信稳定传输的双重技术属性,且5G蜂窝网络的低时延、高带宽等特性为该手术系统的远程化、商业化应用提供了核心支撑。远程胸腹腔内窥镜手术机器人端到端技术架构的构建与优化是保障系统临床可用性的关键前提。目前,面向该类手术机器人系统端到端技术的研究与落地方案仍存在空白,成为制约远程胸腹腔内窥镜手术推广普及的核心瓶颈。本文围绕5G蜂窝网络环境下远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统端到端技术展开深入研究,从系统组网架构、网络性能指标、远程测试方法等维度出发,构建了一套完整的端到端技术体系。该技术体系可实现医疗操作指令与手术影像数据的高效交互,保障远程手术的精准性与安全性,为5G远程手术机器人系统的技术突破与规模化应用提供理论与实践支撑。

**【关键词】** 机器人手术;内窥镜检查;远程医学;5G蜂窝网络;端到端;测试方法

**中图分类号:**R656 **文献标识码:**A

随着手术机器人技术的发展与应用,外科手术方式逐渐由微创手术演进至机器人辅助手术<sup>[1-5]</sup>。远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统是机器人技术及系统的经典应用<sup>[6-8]</sup>。通过操作医生操作台上的多个医生机械臂实现主刀医生对手术器械、三维腹腔镜的控制,解决了传统微创手术中眼-手运动不协调的缺陷,最大限度地还原了开放手术中医生的眼-手术器械-手部运动同步运动的情形,实现微创手术下眼-手协调运动的直觉运动映射。远程手术机器人系统中增加了运动比例缩放功能,将医生机械臂的运动按一定比例缩小后映射为患者机械臂的运动,最大程度地减小医生手部的自然抖动或无意识的移动,提升了远程手术中微创机器人精细操作的手术质量<sup>[9-12]</sup>。远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统通过主从式远程操作技术,使外科医生与患者间可保持一定的物理距离。自1990年以来,研究人员已开展了远程手术的探索性研究。2001年,林德伯格手术展示了远程手术的可行性,并揭示了开展远程手术所需的网络条件(如时延)<sup>[13-15]</sup>。随着5G通信技术的发展<sup>[16]</sup>,目前的5G蜂窝网络已能满足长距离、低时延传输的需求,通信质量与数据安全性可保障手术的安全与质量,从而使远程手术成为现

实<sup>[3,17-19]</sup>。截至目前,由我国自主研发的多款远程胸腹腔内窥镜手术机器人已在全国多家医疗机构应用,累计开展超过1150例远程临床手术,覆盖泌尿外科、妇科、胸外科等多个领域,涉及肝肿瘤切除术、胃癌根治术等多种术式,不仅打破了地域医疗资源的壁垒,使偏远地区的患者也能享受到顶级专家的诊疗服务,更在手术精准度、术后康复方面展现出显著优势,为我国远程外科手术的标准化、规模化发展奠定了坚实的实践基础<sup>[20-25]</sup>。与此同时,全球范围内远程医疗与智能手术技术也在加速演进,欧盟依托“5G-HEART”等创新计划<sup>[26]</sup>,推动了5G通信技术与急症远程诊疗服务的协同落地;美国直观医疗的达芬奇手术机器人系统持续引领微创外科机器人技术的发展,并积极开展远程化方案探索<sup>[27]</sup>。此外,直观、强生、Sovato、Teladoc等国际知名企业联合发布了远程机器人辅助手术与操作专家共识技术指南,定义了支持安全、有效、可互操作的远程机器人辅助手术与程序设计、实施与扩展的基本技术要求,以支持远程项目的全球扩展,也为国际远程手术机器人相关技术的深化与拓展提供了有利参考<sup>[28]</sup>。目前,5G网络环境下该系统的技术要求与检测标准仍处于界定模糊、体系缺失、标准不一的状态。这一

**基金项目:**国家重点研发计划资助(2023YFC2413400)

**通信作者:**王丹

现状不仅制约了5G技术与医疗手术机器人的深度融合,更给系统的研发迭代、安全验证及商业化落地带来了诸多不确定性。为此,本文聚焦5G蜂窝网络环境,以远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统的端到端技术为核心研究对象,从系统组网架构的优化设计、关键网络性能指标的精准界定、适配临床需求的远程测试方法构建等多个维度展开深入探讨。旨在通过系统性的研究,填补目前技术规范与检测体系的空白。本文所提出的远程测试方法,既能为相关企业的技术研发提供清晰的方向指引,为产品的合规上市提供科学的验证依据,更能推动行业形成统一、规范的技术标准,进而助力远程医疗手术机器人领域实现健康、有序、高质量的发展。

## 1 端到端组网架构

基于5G蜂窝网络的远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统由远程端控制患者本地端进行手术,实现主从手的控制、能量平台控制及腹腔镜视频信号的传输,在远程端与本地端手术间建立协作通路。此外,采用双无线备份方式,提供应急通信方案,保障手术安全顺利进行。

远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统架构主要包括以下部分:(1)手术机器人:医生远程操作台是手术机器人系统的控制中心,是该系统在远程医生端的交互平台。通过操作医生远程操作台上的多个医生机械臂实现主刀医生对手术器械、三维腹腔镜的控制。此外,远程手术机器人系统中的医生远程操作台还包含主端通讯控制箱,由工控机、显示器、控制器、图像处理器、键盘等组成。在远程手术主操作端,主端通讯控制箱与医生远程操作台连接使用,同时采集医生远程操作台各路信号传输给本地患者端,并接收本地患者端的传输信号及三维图像传输至医生远程操作台。(2)患者本地操作台:患者本地操作台是远程手术机器人系统辅助实施微创手术的执行部分,主要功能是为患者机械臂、图像臂提供支撑。远程手术过程中通常需要助手在无菌区内的患者本地操作台旁工作,负责更换手术器械与三维腹腔镜,辅助主刀医生完成手术。同样,患者本地操作台还包括从端通讯控制箱,由工控机、显示器、图像处理器、键盘等组成。远程手术的从操作端,从端通讯控制箱与患者操作台连接使用,接收远程主操作端的各路信号,并同时发送患者本地操作台各路信号及三维图像给远程主操作端。(3)5G端到端网络:5G网络为远程手术业务提供安全、高效可靠的网络环境,是进行远程手术系统运行的基础通信

网络;不具备5G通信能力的手术机器人与操控台可通过5G专用网关接入5G网络。

## 2 测试系统构建

### 2.1 测试总体要求

针对远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统的测试,应在满足规定网络配置要求的最不利网络情况下进行,以确保在网络最劣的情况下能安全、有效地满足要求。测试系统应包括功能完备且参数可调的5G蜂窝通信网、多输入多输出-空口暗室、电磁屏蔽室、高精度时间同步网络及医疗应用实景测试区,以体现各类组网方式端到端的网络特性,进行全面精细的验证与量化测评,屏蔽外界电磁干扰、非预期无线信号、随机事件的干扰。

测试系统的可调节性能参数应包括带宽、时延、抖动、丢包率、误码率等,能模拟远程胸腹腔手术机器人在远程距离、环境下所有可能遇到的网络情况,如模拟各种外界干扰情况、各种网络性能劣化、各种网络性能受限、跨运营商/跨地域连接等测试场景,用以检验腹腔镜手术机器人远程状态下的操作性能、音视频通信、网络安全、异常管控等远程应用功能及性能的有效性、安全性。

### 2.2 测试场景构建

#### 2.2.1 电磁屏蔽场景

构建电磁屏蔽场景时,需将本地端客户终端设备与远程端客户终端设备分别放置于空中传输暗室或电磁屏蔽室内。该电磁屏蔽场景具有以下优势:(1)可屏蔽电磁辐射,避免环境或测试设备带来的非预期干扰信号,从而保证测试的可靠性;(2)可吸收设备自身发射的电磁波,减少多径反射,从而提供封闭、纯净的测试环境,以确保测试精度;(3)部分测试项目只能在电磁屏蔽场景下进行,如最低信号强度、最低信号质量等。

#### 2.2.2 网络配置场景

测试过程中,基于空中传输暗室或电磁屏蔽室的网络环境,需通过联合调节5G基站、5G核心网、信道模拟器、功率放大器、天线及网络损伤仪,来调整带宽、时延、抖动、丢包率、误码率等网络性能参数。所使用的设备应进行测量与校准,以确保构建的网络干扰信号具有稳定性、可靠性。

#### 2.2.3 测试平台关键设备

基于5G蜂窝网络的端到端远程胸腹腔内窥镜手术机器人测试系统包括的测试关键设备及其设备功能见表1。

表1 测试关键设备

名称	功能
空中传输暗室、电磁屏蔽室	用于构建远程手术机器人测试系统的电磁屏蔽环境
5G基站、5G核心网	用于构建5G端到端网络,真实复现现网5G环境
网络损伤仪、信道模拟器	用于在实验室环境中精准模拟网络环境
5G客户终端设备	用于接收来自5G基站的信号,并将其转换为有线信号,使医疗设备能够接入5G网络
功率放大器单元	用于信号功率调节
服务器、交换机、防火墙	用于搭建测试网络

### 3 测试流程与内容

#### 3.1 测试流程

步骤1:搭建远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统的5G端到端测试网络。步骤2:根据实际系统,调整网络性能参数(带宽、时延、抖动、丢包率、误码率),并找到能正常建立业务连接的一组参数。步骤3:将该组参数作为测试的配置参数。步骤4:基于上述步骤执行测试,测试内容包括功能测试、性能测试及安全性测试。

#### 3.2 测试内容

结合远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统特性,测试内容包括功能测试、性能测试与安全性测试。以下测试项目既可组合测试,也可单独测试。

(1)功能测试内容:表2汇总了远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统应进行的功能测试项,目的主要是检验该系统是否满足相应网络、连通性、异常处理、远程控制与传输等要求。(2)性能测试内容:表

3汇总了远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统应进行的性能测试项,目的主要是检验该系统是否满足相应设备控制、内窥镜图像、会议系统、5G网络等性能要求。(3)安全测试内容:表4汇总了远程胸腹腔内窥镜手术机器人系统应进行的安全测试项,目的主要是检验该系统是否满足相应数据安全、网络安全、安全保障等安全要求。

表2 功能测试详细内容

功能测试类别	功能测试项目
网络要求	支持5G蜂窝通信、跨运营商通信、网络环境监测
连通性	远程网络连接/管理/断开、备份连接
异常处理	异常提示、本地端接管、紧急停止、异常恢复
远程控制与传输	远程控制参数、主从控制、内窥镜影像功能、会议系统

表3 性能测试详细内容

性能测试类别	性能测试项目
设备控制性能	主从控制位置精度、位置重复性、姿态精度、姿态重复性、机械臂有效操作力、末端夹持力、主从控制时延
内窥镜图像性能	视频性能(卡顿率、破损率、帧率、视频平均意见得分)
会议系统音视频性能	视频性能、音频平均意见得分、音视频同步性能
5G通信网络指标	最低信号强度(参考信号接收功率)、最低信号质量(信噪比或信干噪比)

表4 安全测试详细内容

安全测试类别	安全测试项目
数据安全	数据去标识化、数据存储保密性、数据传输保密性、数据传输完整性、数据备份与容灾
网络安全	授权访问管理、通信访问控制、用户身份验证
安全保障	网络安全加固、网络安全升级、网络安全审计

### 4 测试结果

#### 4.1 网络参数设置

本次测试基于空中传输暗室、电磁屏蔽室的网络环境,通过联合调节5G基站、5G核心网、信道模拟器、功率放大器、天线、网络损伤仪等,对带宽、时延、抖动、丢包率、误码率等网络性能参数进行调节,本次测试端到端网络预期参数见表5。需要说明的是,上述网络预期参数系基于工程实践经验设定,且

所列为网络单向参数设置,以时延指标为例,本网络环境下的端到端往返时延应为  $55\text{ ms} \times 2 = 110\text{ ms}$ 。试验结果表明,远程胸腹腔内窥镜手术机器人在表5所示的单向网络参数条件下运行稳定,各项指标均满足安全有效性要求。当单向网络性能劣于表5所示阈值时,系统响应出现滞后,影响操作流畅性与控制精度,工作状态无法得到保障。综上,表5所示参数作为网络预期配置,具有较强的可行性与

参考价值。

需要注意的是,经对网络本身的性能测试,在不接入任何远程医疗器械且不添加任何网络损伤时,本5G实验网络自身的单向时延均值约为12 ms、抖动约为17 ms、无丢包、误码,因此,为实现表5所预期的网络环境参数,添加网络损伤时,需分别在两端网络性能中减去本5G网络自身的时延、抖动,即需额外添加远程端与本地端网络损伤,见表6、表7。

表5 端到端单向网络预期参数设置

时延	丢包率	抖动	带宽	误码率
55 ms	0.1%	30 ms	30 M	$10^{-6}$

表6 本地端至远程端需额外添加的网络损伤

时延	丢包率	抖动	带宽	误码率
43 ms	0.1%	13 ms	30 M	$10^{-6}$

表7 远程端至本地端需额外添加的网络损伤

时延	丢包率	抖动	带宽	误码率
43 ms	0.1%	13 ms	30 M	$10^{-6}$

## 4.2 功能完备性测试

### 4.2.1 急停及网络监测功能

该手术系统可通过本地端或远程端按下急停按钮来触发急停,同时在急停状态下,本地端或远程端均可解除急停状态;该手术系统可实时、不间断地监测网络性能,如往返时延、丢包率、抖动、上下行带宽等。此外,调整端到端网络参数,数值相应改变,还会在网路状态极差的时候采取自动断开的保护措施。

### 4.2.2 网络劣化处理功能

在系统正常连接启动后,建立远程端医生控制台与本地端的连接,通过远程端医生控制台扶手用户界面操作获取控制权,进入主从操作,分别设置不同的端到端往返时延与丢包率,以验证系统异常管控功能。首先,分别设置端到端往返时延 $\leq 110$  ms、(110,200]ms、(200,1000]ms、 $>1000$  ms,观察各时延下主从状态及系统提示。端到端往返时延 $\leq 110$  ms时,状态显示为绿色,远程端可进入主从,操作正常,无异常提示信息;端到端往返时延处于(110,200]ms时,状态显示为黄色,远程端可进入主从,操作正常,偶尔有异常提示信息(如网络质量差、不建议手术等);端到端往返时延处于(200,1000]ms时,远程端保持权限但不能进入主从,有异常提示信息;端到端往返时延 $>1000$  ms且持续超过1 s时,状态显示为红色,控制权自动回归本地端并触发断网报错。其次,分别设置 $\leq 0.1\%$ 、(0.1%,0.2%] $>0.2\%$ 的网络丢包率,观察医生控制台扶手用户界面上的丢包率颜色提示。经测试,丢包率 $\leq$

0.1%时,状态显示为绿色;丢包率处于(0.1%,0.2%]时,状态为黄色;丢包率 $>0.2\%$ 时,状态为红色。

## 4.3 性能指标测试

### 4.3.1 音视频业务流畅度性能

远程胸腹腔镜手术机器人系统音视频业务流畅度测试结果显示,视频会议帧率、内窥镜图像帧率、音视频同步时延、视频会议延时等音视频业务流畅功能均在人体无感知范围内。见表8。

表8 音视频业务流畅度性能指标

序号	视频会议 帧率(fps)	内窥镜图像 帧率(fps)	音视频同步 时延(ms)	视频会议 延时(ms)
1	30	59.6	-43	171
2	29.9	59.5	-62	172
3	30	59.6	-50	129

### 4.3.2 能量控制响应性能

远程端获取控制权后,在远程端医生控制台进行能量激发操作,采集医生控制台能量激发脚踏激发信号与本地端图像台车的继电器信号,采用示波器显示信号响应时差为116 ms,符合能量控制响应不大于180 ms的预期。

### 4.3.3 图像延时性能

该手术系统从内窥镜图像处理器至远程端医生控制台输出的当前图像延时为153 ms,平均图像延时为169 ms,符合图像延时不大于170 ms的预期。

## 4.4 安全能力测试

该手术系统的系统用户信息、图片信息、日志信息等无任何医生或患者的个人隐私信息,实现了个人隐私数据去标识化;可通过账户密码登录远程系统,且高级权限用户可新建、编辑、删除用户。USB接口用于保存内窥镜图像,且非注册USB无法保存图像。

## 5 总结

本文聚焦5G蜂窝网络环境,围绕远程胸腹腔镜内窥镜手术机器人系统的端到端技术方案,从系统组网架构的优化设计、关键网络性能指标的精准界定、适配临床需求的远程测试方法构建等多个维度展开深入探讨。本研究搭建了集成远程端手术系统、本地端手术系统、5G基站、5G核心网、空中传输暗室及电磁屏蔽室的专用测试网络,该环境既能精准复现5G端到端网络特性,又能有效屏蔽各类干扰信号。此外,通过联合调节5G基站、5G核心网、信道模拟器、功率放大器、天线及网络损伤仪等设备,实现对带宽、时延、抖动、丢包率、误码率等网络性能参数的精准调控,构建贴近真实应用的测试网络环境。最后,结合远程胸腹腔镜内窥镜手术机器人

系统特性,研究设计了覆盖功能、性能与安全的完整验证体系,并给出了具有参考性的网络性能参数指标及相关测试结果。本文最终形成的端到端技术方

案,能为远程胸腔内窥镜手术机器人系统的稳定应用提供有力支撑,也能为相关领域的技术研发与产业转化提供参考。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马云涛,杨婧,李艳飞,等.《远程机器人手术操作指南(2025版)》计划书[J].兰州大学学报(医学版),2025,51(5):57-62,69.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘伟,赵潇,傅扬.医疗机器人研究、应用现状及发展趋势[J].中国医疗设备,2023,38(12):170-175.
- [6] 董海燕,李丰鑫,庞晓燕,等.达芬奇机器人辅助卵巢囊肿剥除术作为初始术式的探讨[J].腹腔镜外科杂志,2021,26(4):303-307.
- [7] 闫志远,梁云雷,杜志江.腹腔镜手术机器人技术发展综述[J].机器人技术与应用,2020(2):24-29.
- [8] Wang Y, Ai Q, Zhao W, et al. Safety and Reliability of a Robot-assisted Laparoscopic Telesurgery System: Expanding Indications in Urological Surgery[J]. Eur Urol, 2024, 85(5):506-507.
- [9] 闫志远,梁云雷,杜志江.远程手术机器人研究与关键技术分析[J].机器人技术与应用,2020(2):15-18.
- [10] 牛海涛.5G技术及机器人在远程泌尿外科手术中的应用[D].青岛:青岛大学附属医院,2022.
- [11] 田禹,黄佳,李剑涛,等.5G远程机器人辅助胸腔镜下肺叶切除术的动物实验研究[J].中国胸心血管外科临床杂志,2023,30(8):1112-1115.
- [12] 闵俊.解放军总医院成功完成5G远程外科手术测试[J].中华医学信息导报,2019,34(2):9.
- [13] Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al. Effects of communication delay in the dual cockpit remote robotic surgery system[J]. Surg Today, 2024, 54(5):496-501.
- [14] 郝睿.腹腔镜微创手术机器人远程控制的人机交互研究[D].沈阳:东北大学,2025.
- [15] 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.
- [16] Huo Y, Dong X, Xu W. 5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design[J]. IEEE Access, 2017, 5(99):13992-14010.
- [17] Ren H, Li M, Zhang Y, et al. A method for Orthopedic Robot Remote Operation Performance, December 20-23, 2023[C]. IEEE 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC), Hangzhou, 2023.
- [18] 艾青,王野,程强,等.超远程机器人辅助腹腔镜保留肾单位手术安全性和可行性的动物实验研究[J].微创泌尿外科杂志,2023,12(3):145-148.
- [19] 樊书波.国产康多内窥镜手术机器人在泌尿外科中的应用进展[J].中国微创外科杂志,2023,23(2):140-143.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 岳家斌.基于5G无线网络通讯技术下的远程机器人辅助腹腔镜前列腺癌根治术和肾部分切除术的临床研究[D].合肥:安徽医科大学,2025.
- [24] 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.
- [25] 李炎生,顾朝辉,张二伟,等.达芬奇机器人辅助腹腔镜与传统腹腔镜根治性前列腺切除术的临床应用对比研究[J].中华实验外科杂志,2021,38(6):1147-1150.
- [26] Kakkavas G, Diamanti M, Stamou A, et al. Design, Development, and Evaluation of 5G-Enabled Vehicular Services: The 5G-HEART Perspective[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(2):426.
- [27] Nagpure D, Asutkar S. Tele-surgery and remote procedures: The future of global surgical care[J]. Multidisciplinary Reviews, 2024, 8(5):2025147.
- [28] 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.

(收稿日期:2025-12-12)