DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.031

人工智能与机器人辅助医学发展研究

韩晓光[1]，朱小龙[2]，姜宇桢[1]，何达[1]，刘文勇[3]，段星光[2]，田伟[1*]

（1. 首都医科大学附属北京积水潭医院，北京 100035；2. 北京理工大学医学技术学院，北京 100081；
3. 北京航空航天大学生物与医学工程学院，北京 100083）

摘要：我国人口老龄化严重，医疗需求持续攀升，加之医疗资源分布尚不均衡，对医疗保障能力建设提出重大挑战。将人工智能（AI）与机器人技术运用于人类医学健康领域，将为医生、研究者、患者提供理论与诊疗方面的创新支持，有助于提升诊疗效果、降低医疗成本、促进医疗资源均衡分布。本文从手术机器人、康复和护理机器人、辅助远程医疗、医学 AI 4 个方面出发，提炼了 AI 与机器人在医学领域中的典型应用，梳理了 AI 与机器人辅助医学发展现状和政策情况。在对我国 AI 与机器人辅助医学发展面临挑战的认知基础上，阐述了阶段性发展目标，指出了未来重点发展方向：迈向差异化、小型化、智能化的手术机器人，坚持以人为本的康复和护理机器人，多任务与高临场感的辅助远程医疗，促进医疗健康创新的医学 AI。研究建议，确定具有前景的手术机器人研究方向，开展手术机器人核心部件国产化，探索适合国情的商业化模式，提高产品应用的覆盖率，注重专业化人才队伍建设，实施以临床需求为导向的技术创新，加强监管以减少医疗事故并保障数据隐私，以此促进我国 AI 与机器人辅助医学领域的高质量发展。

关键词：智慧医疗；人工智能；手术机器人；康复和护理机器人；辅助远程医疗

中图分类号：R-1　　**文献标识码：**A

Development Strategies for Artificial Intelligence and Robotics in Medicine

Han Xiaoguang[1], Zhu Xiaolong[2], Jiang Yuzhen[1], He Da[1], Liu Wenyong[3], Duan Xingguang[2], Tian Wei[1*]

(1. Beijing Jishuitan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100035, China; 2. School of Medical Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: China is facing significant challenges in healthcare owing to a severe aging population, continuously increasing healthcare demands, and uneven distribution of healthcare resources. The application of artificial intelligence (AI) and robotics in the human medical and health field can provide innovative support in theory and diagnosis for surgeons, researchers, and patients, contributing to improved clinical outcomes, reduced medical costs, and the promotion of balanced distribution of healthcare resources. This paper starts from four aspects: surgical robots, rehabilitation and nursing robots, assisted telemedicine, and medical AI, extracts the typical applications of AI and robots in the medical field, assesses the current status of AI and robotics in medicine, and evaluates pertinent policies, laws, and regulatory frameworks. Based on the understanding of the challenges faced in the development of AI and robotics in medicine in China, it delineates

收稿日期：2023-04-28；**修回日期：**2023-07-02

通讯作者：*田伟，首都医科大学附属北京积水潭医院主任医师，中国工程院院士，研究方向为脊柱外科、人工智能、骨科手术机器人；E-mail: tianweijst@vip.163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“人工智能与机器人辅助医学发展战略研究”(2022-XY-42)；北京自然科学基金项目(L202032)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

phased development goals and identifies future key directions: advancing toward differentiated, miniaturized, and intelligent surgical robotics; emphasizing patient-centered rehabilitation and nursing robotics; achieving multi-tasking and high situational awareness in assisted telemedicine; and promoting medical AI for healthcare innovation. This paper suggests determining promising research directions for surgical robotics, promoting domestic production of core components, exploring commercially viable models that align with national conditions, expanding the coverage of product applications, focusing on the development of specialized talent pools, implementing technology innovation driven by clinical demands, and strengthening regulations to reduce medical accidents and safeguard data privacy. These measures are expected to foster high-quality development of AI and robotics in medicine in China.
Keywords: smart healthcare; artificial intelligence; surgical robotics; rehabilitation and nursing robotics; assisted telemedicine

一、前言

当前，我国人口老龄化严重，医疗需求逐步增加，而医疗资源分布存在着不平衡现象[1]。根据国家统计局数据，2022年全国医疗卫生机构的诊疗人数为84亿人次，三级医院的诊疗人数超过了一级和二级医院的总和。发展智慧医疗，能够优化医疗资源利用率、增加医疗资源的总供给量，也是改善当前医疗资源不平衡的关键举措，有助于切实优化偏远地区居民的优质医疗资源供给。

人工智能（AI）与机器人为医疗领域带来了更高效、更准确、更安全的技术解决方案，可显著提升诊疗效果、降低医疗成本、促进医疗资源均衡化，促进医学领域的重大变革。例如，AI在医学图像处理、疾病诊断、药物研发等方面的应用成效突出：通过深度学习算法，对医学图像进行自动分析和识别，形成针对病灶的自动识别能力[2]；通过机器学习算法，在分析大量病例数据的基础上，辅助医生制定更准确的诊断和治疗方案[3]；通过大数据分析及计算模拟，加速新药研发过程并实现更快上市[4]。机器人技术则在外科手术、康复方面获得广泛应用，以精确的操作、完备的数据记录来支持手术成功率、患者康复效果显著提高[5]。

建立和健全辅助医学产品的研发体系，增强AI自主创新与应用水平，将促进AI与机器人在医学领域的应用和发展。本文围绕AI与机器人辅助医学体系化发展目标，概括应用类别、梳理发展现状、辨识面临挑战、明确重点方向，进而提出技术突破与应用发展建议，以期为AI与机器人辅助医学的技术探索、应用研究、产业升级等提供参考。

二、人工智能与机器人辅助医学的典型应用

（一）手术机器人

机器人辅助手术指将机器人技术应用到外科手术方向，辅助外科医生或自主完成复杂的外科手术。手术机器人根据特殊的手术环境与临床需求，依据制定方案、特定流程来执行特定动作[6~8]。机器人辅助手术涉及医学、机器人学、材料学、计算机科学、图像处理、AI等诸多学科中的技术，通过机器人系统的准确定位、自主规划、精准动作控制，完成或辅助完成手术操作，成为临床外科、医疗保健方向的发展前沿[9~11]；常用于狭小的手术部位，可实现超越医生能力范围的手术器械精准操控。相较传统的外科手术，机器人辅助手术的操作更精确、更灵活、更可控，可实现切口更小、缩短恢复时间、降低并发症风险、减少失血和疼痛。尤为重要的是，医生使用手术机器人可以执行更为精细和复杂的手术[12]。

机器人辅助手术驱动了外科手术从开放式转向微创型，也将手术的精度、有效性、可行性提升到全新高度。以机器人辅助手术为代表，以智能化、信息化处理为特征的新外科手术时代已经来临。手术机器人应用范围较广，如胸腹腔、骨科、神经外科、眼科、泌尿科、颅颌面外科的手术[13~19]。随着AI、物联网等技术的迅速发展与普及，机器人辅助手术的智能化程度进一步提高。通常将手术机器人的智能水平分为6个等级[20]：第0级手术机器人不存在智能，第1级手术机器人可执行简单的辅助动作，第2级手术机器人可自动完成医生指定的任务，第3级手术机器人可自动完成手术中的某些步骤，第4级手术机器人具有相当于一般外科医生的自动化水平，第5级手术机器人可完全自动地进行手术而无需人工干预。当前，手术机器人还处于发展期，多数手术机器人系统的智能化等级还局限在第0级或第1级。

（二）康复和护理机器人

康复机器人是具有辅助肢体功能恢复或重建功能的智能化装备，可自动执行指令任务以代替或协

助人体某些功能；相应研究与应用较多面向脑卒中[21]、脊髓损伤[22]等造成的神经损伤患者（典型症状如偏瘫、截瘫）。采用对患肢实施运动训练、功能性电刺激的方法，对患者受损的中枢神经形成反馈，刺激损伤神经的再生或者未损伤神经对损伤功能的代偿，从而达到神经康复的目的。康复机器人按照工作方式分为工作站型康复机器人、基于轮椅的康复机器人、移动服务类康复机器人、肢体功能增强型康复机器人[23]，按穿戴形式分为穿戴式外骨骼机器人、悬吊式训练机器人、智能假肢；按训练部位主要分为上肢辅助康复机器人、下肢辅助康复机器人，还可细分为手指辅助康复机器人、手腕辅助康复机器人、踝关节辅助康复机器人等。

护理机器人指为护理对象生活需求、为护理人员工作提供支援的装备[24]。鉴于人口老龄化加深、痴呆症等慢性病患者增多的实际情况，护理机器人的研究与应用对象主要是老年人、痴呆患者，能够减轻家庭或者医疗保健机构的工作压力，为行动不便的残疾人、老年人提供必要的护理以保障安全和相对便捷的生活。护理机器人从形态上分为人形护理机器人、动物形态护理机器人，从功能上分为转运护理机器人、社会交流辅助机器人（细分为服务机器人、陪伴机器人）。目前，护理机器人的行业应用逐渐增多，主要涉及物品传送、患者转运、康复护理、饮食护理、老年人照护等方面。

（三）辅助远程医疗

辅助远程医疗是一类以远程通信网络为信息传递载体，将机器人、虚拟现实、医学传感器、AI等技术集成应用于临床的医学新模式，能够快速部署优势医疗资源，优化分级诊疗路径，提升远程救治效率及质量，加速诊疗服务均质化发展[25]。根据医生与患者的交互关系，辅助远程医疗在实现形式上分为远程指导、远程规划、远程操作，主要应用场景有远程手术[26]、远程急救[27]、远程康护[28]等。辅助远程医疗的核心要素是机器人、通信网络。随着网络技术的快速发展，带宽、传输速度的制约大为减少，促成了辅助远程医疗的发展热潮。

远程监测、远程指导是当前辅助远程医疗的常见类型。在远程监测方面，可以实时监测患者的生理参数、病情变化以及医疗设备的运行状态，以减少医生、患者之间直接接触的方式，降低突发传染病暴发或灾难情况下的感染风险。在远程指导方面，通过虚拟现实技术、远程互动平台来弥补地域差异，提高医学生的专业素养和实践技能，便于医学知识的传播和共享。

（四）医学人工智能

AI是让机器能与人类一样具有智能和学习能力的科学技术[29]，旨在赋予机器以类人的感知、推理、学习、交流等智能活动能力，实现智能化的决策、控制和处理。实现AI涉及机器学习、自然语言处理、计算机视觉、知识表示与推理等领域的知识。具体到医疗领域，医学AI指AI技术在医学领域（包括且不限于医学数据分析、疾病预测与诊断、治疗方案设计、临床决策支持）中的应用，

医学AI的独特之处在于，通过AI算法处理并分析大量的医疗数据（如医学图像、病历记录、基因组学数据），可以辅助医生快速且准确地作出诊断和治疗决策；也可依托自然语言处理、机器学习等技术，从海量的医学文献中快速提取有价值的信息，为医生提供前沿进展与治疗方案建议。随着AI技术的加速发展，医学AI应用更为丰富，甚至变革了疾病的检测、诊断、治疗模式，成为居民健康的增量保障。

三、人工智能与机器人辅助医学的发展现状

（一）产品应用现状

1. 手术机器人

手术机器人可过滤医生手部固有的震颤，降低操作失误的风险，在医生参与的基础上提高精细化水平和手术效果；带有光学导航系统，可指示植入物的放置位置，显著减少X光片的使用数量，有利于减少医生的辐射暴露伤害，在各类放射手术中适应性良好。从临床医学的应用角度看，手术机器人可分为腹腔镜手术机器人、骨科手术机器人、经皮穿刺手术机器人、血管介入手术机器人、神经外科手术机器人、经自然腔道手术机器人等，相关应用现状及代表性企业如表1所示。

2. 康复和护理机器人

康复和护理机器人的市场需求较大，最早应用于医疗、军事、工业等领域，逐渐聚焦于残疾人、患者、老年人的生活需求。与基本国情和社会需求

表1　研制手术机器人的代表性企业及其产品

类别	国家	企业名称	代表产品
腹腔镜手术机器人	美国	直觉外科公司	达芬奇Xi
	中国	山东威高手术机器人有限公司	妙手S
	中国	上海微创医疗机器人（集团）股份有限公司	图迈
	中国	哈尔滨思哲睿智能医疗设备股份有限公司	康多机器人
	中国	深圳市精锋医疗科技股份有限公司	MP1000
骨科手术机器人	美国	史塞克公司	RIO关节置换手术机器人
	中国	北京天智航医疗科技股份有限公司	天玑II骨科手术机器人
	中国	元化智能科技（深圳）有限公司	锟铻全骨科手术机器人
	中国	上海微创医疗机器人（集团）股份有限公司	鸿鹄骨科手术机器人
	以色列	美敦力公司	MAZOR X
	美国	捷迈邦美控股公司	ROSA Knee
经皮穿刺手术机器人	印度	Perfint Healthcare公司	MAXIO
	奥地利	iSYS Medizintechnik GmbH	Micromate
	以色列	XACT机器人公司	ACE
	中国	上海介航机器人有限公司	Mona Lisa前列腺穿刺机器人
血管介入手术机器人	德国	西门子医疗系统有限公司	CorPath GRX
	法国	Robocath公司	R-One
	美国	Hansen Medical公司	Sensei X
	中国	北京唯迈医疗设备有限公司	ETcath
	中国	易度河北机器人科技有限公司	鲁班微创血管介入手术机器人
神经外科手术机器人	英国	雷尼绍公司	NeuroMate
	美国	Prosurgics Limited	Pathfinder
	中国	北京柏惠维康科技股份有限公司	Remebot
	中国	华科精准（北京）医疗科技有限公司	Q300微型机器人导航系统

相适应，各国研发的康复和护理机器人具有特色和差异性；更多国家增加了对护理机器人的支持力度，驱动了康复和护理机器人的种类细化、从临床走进家庭应用。

20世纪80年代，最具代表性的康复机器人是英国Mike Topping公司研制的Handy1康复机器人；2000年，瑞士HOCOMA公司研发了Lokomat机器人。各国对康复医疗的重视程度逐渐提高，消费者对轻型康复医疗设备的需求稳步增长，驱动了可穿戴康复+辅助行走的外骨骼机器人的出现；以色列外骨骼机器人公司2012年推出的Rewalk系列机器人具有代表性。2015年，大艾机器人公司研制了“艾康”机器人，用于各类型下肢功能障碍患者的早中期康复训练，可实现原地步行、步态训练、功能评估等功能。2016年，上海傅利叶智能科技有限公司发布了Fourier-M2上肢协作型康复机器人。2020年，北京软体机器人科技公司在手部康复领域引入软体机器人技术，研发了SRT软甲手部康复机器人；对患者患肢进行主被动组合训练，刺激患者的神经、肌肉以协助患肢恢复功能。2020年，新西兰Rex Bionics公司瞄准专业康复诊所、个人家庭护理需求开发了Rex系列外骨骼康复机器人，成为市场上唯一不需要拐杖支持的外骨骼康复机器人。

护理机器人发展于20世纪80年代。美国Tingley Rubber公司研发了HelpMate护理机器人，具有导航及避障能力，可在医院行走并替代护士发放食物和药物。德国Stuttgart自动化研究院设计了Care-O-Bot家庭护理机器人、ARTOS自主移动护理机器人。从20世纪90年代起，护理机器人的服务对象聚焦于家庭。日本八乐梦公司、美国Hill-Rom公司分别推出了护理床式机器人。日本企业开发了Paro陪护机器人，帮助老年人降低孤独感、提高社交能

力，在部分养老机构获得应用。日本NEC公司推出了PaPeRo机器人，可进行面部识别并通知用户收取即时信息，还可发送视频消息、表演跳舞、玩游戏、遥控其他电子设备。2017年，日本松下公司研发了Resyone机器床椅，可将病人在病床和轮椅之间进行位置交换。2021年，广东铱鸣智能医疗科技有限公司发布了YMFJ-B2电动护理床，可满足患者翻身、洗澡等日常生活需求。

3. 辅助远程医疗

机器人在远程医疗中具有独特优势和广阔前景。随着第五代移动通信（5G）网络基础设施的快速部署，5G远程医疗机器人手术的临床应用、示范推广正在快速发展。2019年，福建医科大学团队采用国产的康多机器人系统，在福州市域内开展了5G远程机器人手术的活体动物实验；基于妙手机器人系统，在山东省青岛市、贵州省安顺市之间（相距约3000 km）开展了活体动物实验，验证了5G的远范围通信性能。在国外，施乐辉公司在与Rods & Cones公司合作，为客户提供用于远程手术协助的智能手术眼镜；CMR Surgical公司与SurgEase Innovations公司合作，为手术培训提供远程虚拟支持。

从2020年开始，国产腔镜手术机器人开始进入临床应用，相应产品有妙手、图迈、术锐、康多等品牌。利用妙手机器人，在青岛大学附属医院、贵州省安顺市西秀区人民医院之间（相距约3000 km）为一例膀胱癌患者实施了膀胱根治性切除手术。在赛诺威盛科技（北京）有限公司的支持下，内蒙古自治区肿瘤医院的专家远程指导赤峰松山医院的医生，完成了国内首台“5G+机器人”远程肝脏穿刺活检手术。在新疆克州人民医院、江苏省人民医院之间，采用图迈机器人完成了5G机器人远程泌尿外科手术。在上海长海医院、嘉兴第一人民医院之间，采用术锐机器人完成了单孔腔镜机器人前列腺癌根治手术。康多机器人在“5G＋固网专线”多点协同远程临床实时交互教学手术中获得成功应用。

北京积水潭医院在2019年率先提出了“一站对多地”的5G远程骨科机器人手术模式，基于天玑骨科手术机器人，在北京市和烟台、嘉兴、天津、张家口、克拉玛依等城市之间完成了多例临床手术；2020年在北京市、安徽省宿州市之间开展了我国首例5G远程骨科机器人辅助创伤手术；截至2021年年底，共完成163例骨科机器人5G远程手术；2022年进一步开展了远程全膝关节置换手术、远程创伤骨科手术等机器人远程手术应用。系列远程临床手术充分验证了5G机器人手术的临床可行性和可推广性，是骨科机器人远程手术实用化的标志性进展。

4. 医学人工智能

20世纪70年代即出现医疗领域相关的AI技术，英国利兹大学研发（1972年）、用于腹部剧痛辅助诊断的AAPHelp是医疗领域最早出现的AI系统，美国斯坦福大学研发（1976年）、用于感染性疾病患者诊断的MYCIN产品也具有代表性。20世纪80年代，一些应用系统开始商业化，能够依据临床表现提供诊断方案，如Open Clinical公司研发的Quick Medical Reference、美国哈佛医学院开发的DX plain。20世纪90年代，随着计算机技术、深度学习方法的快速发展，医学AI正式进入初步发展阶段。计算机辅助诊断（CAD）系统可在一定程度上支持医生进行疾病诊断，如X射线图像经CAD处理后，肿瘤、结节、空洞、炎症、纤维化病变等的检出率得到明显提高。

2000年前后，AI技术开始发挥商业价值，医学AI由此进入商业化、产品化发展阶段。2015年，国际商业机器公司设立了Watson Health部门，旨在利用认知计算系统，为医疗健康行业提供疾病解决方案；构建的AI系统对大量临床知识、基因组数据、病历信息、医学文献等进行深度学习，形成了基于证据的临床辅助决策支持系统。2016年，谷歌公司成立的DeepMind Health部门，与英国国家健康体系合作开发了Streams软件，为患者提供肾功能监控能力；与伦敦摩菲眼科医院合作开发了辨识视觉疾病的机器学习系统，通过一张眼部扫描图即可辨识出视觉疾病的早期症状，从而支持视觉疾病预防。

随着计算机算力的大幅提升，医学AI产品获得了爆发式增长，表现出大模型的发展趋势。ChatGPT是基于自然语言处理的生成式对话模型，具有强大的语言理解与生成能力，在医疗领域能够支持智能问诊系统、医患沟通辅助工具、医学知识库的构建。以色列Aidoc公司开发的医疗AI平台，利用深度学习、计算机视觉技术进行医学影像的自动分析和标记，辅助医生快速且准确地诊断疾病。美国Butterfly Network公司开发的便携式超声成像

设备，通过智能应用程序实现即时超声图像的获取和分析，支持多种疾病的快速筛查与诊断。

我国科技公司密切跟踪医学AI的国际前沿。深圳市腾讯计算机系统有限公司推出的AI医疗产品（觅影），能够识别、标记医学影像中的病变区域，为医生提供快速且准确的诊断结果。华为技术有限公司在华为云AI、大数据技术的基础上，为基因组分析、药物研发、临床研究提供专业的AI研发平台。科大讯飞股份有限公司发布的iFlytek AI Doctor，利用自然语言处理、语音识别技术，提供线上的医疗咨询、病症辨识、疾病诊断支持。北京深睿博联科技有限责任公司推出的AI医学辅助诊断系统，已在肺癌和乳腺癌的早期筛查、脑卒中辅助评估、儿童生长发育评估等方面获得了较多应用。2020年以来，国内多款医疗AI产品获批国家药品监督管理局（NMPA）三类医疗器械证书，多家相关企业递交招股书，进入商业化探索阶段。

（二）国内外发展政策

当前，许多国家面临着医疗资源不充分、不平衡，就医效率低下的难题。AI与机器人技术的结合，在医学领域不仅能提高医生的诊疗效率，还能提高复杂病症的治愈可能性，将在促进医学健康发展方面发挥重要作用。发达国家和地区的AI与机器人辅助医学发展较早，规制相对成熟。我国正在积极开展相关布局，旨在促进AI与机器人辅助医学的创新发展。

1. 发达国家和地区

美国在机器人辅助医学领域布局最早、重视程度最高，长期将AI和机器人列为重点发展方向，孵化了以直觉外科公司为代表的一批优势企业，在诸多方向上长期处于垄断地位。美国是世界最大的医疗机器人市场、机器人辅助医学领域的第一大技术来源国，手术机器人的专利申请量超过世界总量的70%；发布了《2016美国机器人发展路线图——从互联网到机器人》《无尽的前沿法案》（2020年），力图保持相关技术的领先地位。欧洲的医疗机器人市场规模仅次于美国。欧洲各国拥有相对好的医疗条件，但依然重视机器人辅助医学技术研发，积极发布政策以促进医疗机器人产业发展，也形成了很多优秀的医疗机器人企业。日本是世界工业机器人的最大生产国，具有先发优势；但因手术机器人的技术风险较高，相关企业态度较为消极，导致起步偏晚。在日本政府发布《机器人新战略》（2015年）后，相关企业才开始研制手术机器人，如川崎重工业株式会社、安川电机公司等。以色列是创新型国家，人均医疗器械专利数量居世界首位，涌现了一批手术机器人公司，如Memic创新手术公司、Tamar机器人公司等；《国家级人工智能计划》（2019年）的发布，进一步激励了机器人辅助医学领域的研究和应用。

在医学AI领域，美国的专利申请量约占世界总量的20%，在医学AI规划中强调研究AI给社会就业带来机遇和挑战的重要性，积极探讨AI对经济社会的影响；《国家人工智能研究与发展战略规划》（2019年）提出，更加注重AI在医疗保健、医学研究方面的应用，开放数据集并创建公共医疗保健数据平台，在利用大量医疗数据进行模型训练的基础上推动图像识别、新药研发的发展。

2. 中国

我国人口老龄化严重，患者数量庞大，需要应用机器人技术进行康复、护理以及常规微创伤手术，以缓解越来越大的就医压力。2012年以来，国家制定了一系列鼓励医疗机器人发展创新的政策，医疗机器人的技术研究和产业化成为热潮。《“十四五”医疗装备产业发展规划》（2021年）提出了我国医疗机器人发展的总体目标，“十四五”时期国家延续了支持医疗健康行业发展的政策导向。在国家政策支持、市场需求增长的驱动下，我国医疗机器人的市场规模将进一步扩大，医疗机器人和医疗服务行业也将迎来发展机遇期。整体来看，我国医疗机器人的普及率仍处于较低水平，但在政策引导、老龄化加剧、消费群体增加、产业化提速等因素的共同作用下，医疗机器人有望保持高速发展态势。需要注意的是，由于发达国家可能对我国手术机器人企业进行技术封锁与打压，应及时研究和制定促进手术机器人产业上、中、下游协调发展的政策，保护并增强我国医疗机器人产业链。

在医学AI方面，2012年以来我国发布了多项旨在推动AI技术发展的政策，为完善和发展医学AI创造了便利条件。在国家层面的规划中，针对AI领域的基础理论、关键共性技术、基础支撑平台、具体应用形态等都做出了明确部署，如《新一代人工智能发展规划》（2017年）提出了我国AI发

展的顶层设计。《中国人工智能发展报告2018》《中国人工智能发展报告（2019—2020）》《中国人工智能2.0发展战略研究》等研究成果先后发布，支持形成了以推动AI产业化快速发展为主要目标的战略与政策体系。

四、我国人工智能与机器人辅助医学发展面临的挑战

（一）产品标准和审批依据不足

健全的审批标准与安全认证，是促进AI与机器人辅助医学产业化发展的重要保障。手术机器人、康复机器人作为机器人技术在医学领域的典型应用，相应审批过程采用的仍是有源医疗器械通用标准，而针对智能化、机器人的约束文件存在不足[30]。对于AI与机器人辅助医学产品，既缺少包括性能指标体系、测试细则在内的系统性标准文件，也缺少诸如智能化的边界、手术机器人与传统医疗导航系统之间的边界等范围界定类规定。在审批流程方面，AI与机器人辅助医学产品面临极为严格的准入机制，尤其是在康复和护理机器人方向，我国要求任何产品的认证都需通过临床试验（发达国家未作相关要求）。康复和护理机器人的相关严格要求，增加了市场化过程的涉及环节，抬高了产业化门槛，加长了资本投入与市场扩张的周期，对创新型企业的可持续发展能力提出了极高要求。

在辅助远程医疗方面，国内已有的临床评估方法存在明显不足：评估指标侧重于具体适应证，缺乏具有一定通用性的规范性指标及评价体系；机器人辅助远程医疗的应用规模整体而言还很小，相关指标及评价体系缺乏有效的统计学证据。此外，存在着诊疗操作标准不规范、评估方法不完备的问题，规范且具有领域通用性的机器人辅助远程医疗体系也有待建设和完善。

在医学AI方面，我国尚未出台相关法律规章进行有效监管，也未建立适用于医学AI的质量标准评估体系，因而无法对医疗AI产品进行有效验证和评价。需要完善的法制框架来对医疗数据采集及使用进行约束，而相关内容尚属空白。

（二）专业化人才队伍不完备

AI与机器人辅助医学的功能精细复杂，需要持续优化，相应研发过程涉及医学、机械、AI、大数据等学科/技术，迫切需要具备多学科知识的复合型人才。在不同学科领域交叉与融合还较少、跨学科人才培养和引进也显困难的背景下，AI与机器人辅助医学相比其他领域的技术专业性更强，医学人才培养体系更为漫长和严格。国内在技术应用型人才、科技转化型人才方面存在较大缺口，遑论前沿AI医疗理论研究人才。

国内高校的相关学科设置不够健全，AI与机器人辅助医学的对口人才培养数量远不能满足社会需求，因而AI与机器人辅助医学的复合型人才培养任务紧迫。AI与机器人辅助医学技术的研发与应用，必然涉及法律规章、伦理规范、标准制度，对此有深入理解和熟练应用的专业人才也是亟需。

AI与机器人辅助医学技术的更新和迭代速度很快，要求医疗行业从业者具备不断学习、快速更新知识及技能的能力。但当前的医学教育体系存在明显短板，培养的医学人才普遍缺乏对前沿技术及知识的理解和应用能力，难以适应AI与机器人辅助医学快速发展的客观需要。

（三）临床数据安全保障缺乏

AI与机器人辅助医学产品的开发及工作流程，都将征询临床数据并总结成临床诊疗指南、临床路径，故临床数据收集是手术机器人进入临床诊疗的关键支撑，其重要性是显然的。临床数据的难点在于其完整性，形成过程也受到个体和局部因素的影响。应用AI与手术机器人离不开精确、经过标注、高质量的训练数据，而在当前国内信息化建设条件下，符合要求的数据很难获得；关键设备、5G网络等基础设施的不完备，也使相关临床数据的获取效率偏低。

在实施精准化、个性化、定制化的诊疗服务过程中，AI与机器人辅助医学将产生大量的医疗数据（如患者资料、临床信息、医疗记录）。医疗数据可能面临潜在的医院网络攻击风险，因而保护患者隐私、防止医疗数据泄露成为迫切需要解决的问题。从监管的角度看，临床AI系统在大规模应用之前需要获得认证。监管机构在将有越来越多医学AI、手术机器人系统上市的预期下，需要及时制定标准，提高数据验证的可行性、系统运行的质量；面临的独特挑战之一是基于机器学习的模型，因为模

型可以随着更多的数据和用户反馈而迅速演化，但如何评估伴生的影响是难题。

（四）可行的商业模式有待建立

AI与机器人辅助医学的技术研究、产品开发需要大量的资金和人力投入，而商业上的成功不仅依赖技术发展，还需建立可行的商业模式与生态系统，才能促成新兴技术的推广应用。目前，AI与机器人辅助医学领域的商业化模式、生态系统等不够完善。

对于手术机器人，在主流的商业模式下，业务收入分为系统、耗材、服务；耗材、服务的利润率更高，收入更为可观，也将随着系统销售数量的增长而持续增加。以达芬奇Xi手术机器人为例，单台系统设备费用为5×10^5~2.5×10^6美元，手术耗材的平均费用为600~3500美元/台手术，维修/培训/保养等费用为8×10^4~1.9×10^5美元/年。主流的商业模式适用于具有高福利制度的国家，而我国机器人辅助手术尚未纳入医保范围；高昂的手术费用限制了患者的使用，也制约了手术机器人产业的发展。寻找并构建适合国情的商业模式，是AI与机器人辅助医学发展的直接挑战。

五、我国人工智能与机器人辅助医学的重点发展方向

我国人工智能与机器人辅助医学通过长期发展，产业综合实力将进入国际主流水平，也将实现医疗机器人核心部件的全面国产化、产品临床应用自主化，构建示范性创新中心或医疗综合体；最终将AI辅助医学产品普及到各类医院，支持AI与机器人辅助医学建成支柱性产业。为此，需要在以下方面进行创新突破。

（一）具有差异化、小型化、智能化特征的手术机器人

面向我国庞大的医疗需求，坚持走差异化的发展路线。在软组织器官穿刺诊疗、关节置换、脊柱微创手术、血管介入、眼科手术、口腔颌面外科、狭窄空间自然腔道手术、人机协同智能操作手术系统等方面加快技术开发和产品转化速度，形成具有产业特色的专科手术机器人体系。

随着技术发展与革新，多孔或单孔腔镜手术机器人逐步发展为面向人体口腔、咽喉、气管、食管、尿道、直肠等自然腔道的手术机器人。小型化是手术机器人更好发挥其特点与优势的关键方面，将扩大手术机器人的应用场景、综合性地降低手术机器人的使用成本，因而成为未来发展的主要方向之一。

智能化是手术机器人技术发展的核心，将进一步提高自主手术机器人的工作效率、一致性和安全性。但当前的手术机器人缺乏在动态手术环境中识别和跟踪目标的视觉系统、可执行复杂手术任务的智能算法，主要还是作为医生手、眼功能的延伸。随着AI技术进步，新型手术机器人有望针对特定的疾病与手术方式，实现完全自主的手术操作能力。

（二）以人为本的康复和护理机器人

康复和护理机器人为身体不便的患者提供康复训练、行动辅助、日常护理，与人类进行密切的互动。以人为本突出人机互动性和舒适性，以人为本的康复和护理机器人是未来需求的重点、发展的必然趋势。

在人机交互过程中，康复和护理机器人既可被动接受指令，更需基于语音识别、面部表情识别、手势识别等技术来主动识别患者的行为意图，从而以更加智能化的方式与人类进行互动。可进一步发展多模态运动意图识别功能，使康复和护理机器人兼顾康复训练、实时在线检测的需要。在人机交互过程中，康复和护理机器人需对环境和人类进行精准感知，故感知技术也是重要发展内容；可应用激光雷达、红外线感知等先进技术，增强对环境、人体的感知能力。

康复和护理机器人的设计应贴近人体工学以显现舒适性，如采用串联弹性驱动、变刚度驱动等柔顺驱动方式，使用软材料、柔性结构等技术；外观设计可更加个性化，让用户按需选择不同的类型和体积；使用操作可更为简化，节省护理人员的工时和投入。仿人机器人更易被患者所接受，在进行接触护理时会提高患者的认同感和信任度。

（三）多任务、高临场感的辅助远程医疗

随着通信网络建设与应用水平的提升，辅助远程医疗逐步从“一对一”主从单点远程控制发展到

“一对多”“多对一”多任务网络化协同模式，支持1名临床专家同步进行多位患者的远程诊疗、多名临床专家开展协作诊疗。未来的辅助远程医疗将更显多元化、网络化特征，以多任务网络化协同方式实现优势医疗资源的共享和优化利用；提高医生与患者的沟通效率、远程医疗的效率及精度，从而为患者提供更高质量和效率的医疗服务。

辅助远程手术缺乏临场感是目前存在的严重问题，不利于手术精度的提高，制约着辅助远程手术的发展。采用虚拟现实技术可为远程手术提供更加逼真的场景、更加真实的手术体验。例如，医生使用虚拟现实头盔等设备，可实时感受手术现场气氛，从而增强远程手术的真实性和临场感。机器人手术技术能够实现远程手术操作，但在操作时医生缺乏手感和触觉反馈，无法感受手术现场的实际情况。因此，未来的辅助远程医疗重在开发具有手感和触觉反馈的机器人手术设备，赋予医生远程手术操作时的真实性、紧张感、临场感。

（四）促进医疗健康创新的医学人工智能

医学AI创新蛋白质结构预测。蛋白质结构预测取决于数据集的质量和数量，而医学AI将侧重蛋白质结构数据集的构建和扩充，如从基因组数据中预测蛋白质结构、从已知蛋白质结构中构建新的蛋白质结构等。医学AI可与其他生物数据（如基因组、转录组、代谢组的数据）结合进行多模态研究，显著提高蛋白质结构预测精度和应用效果。

医学AI创新生物技术研究。深度学习技术将在生物技术研究中发挥重要作用，可应用的研究方向有基因组学中的基因识别、基因变异分析，代谢组学中的代谢通路分析，蛋白质组学中的蛋白质互作网络分析等。AI技术与单细胞技术结合也是重要的研究方向，可挖掘和分析单细胞的数据，深入研究细胞的发育、分化、生长过程，为疾病诊断与治疗提供新的思路和方法。

医学AI创新生物医药研发。通过不断创新和完善的算法与技术，基于AI的药物设计能够提高药物研发的效率和成功率，加快推动新药开发和上市。利用AI技术对大量的临床数据进行分析和挖掘，可为临床试验设计及优化提供支持和指导。AI技术在医学影像诊断、辅助决策方面发挥着越来越重要的作用，支持医生快速且准确地确定诊疗方案。

医学AI创新脑科学研究。在脑科学研究中，应用AI技术开展大规模数据的处理和分析，能够快速进行病因分析、诊断以及制定治疗方案，从而实现精准医疗。AI技术与神经科学、脑机接口技术、脑成像技术等的结合，将促进脑科学研究更高效地创新与突破。

六、人工智能与机器人辅助医学发展建议

（一）确定具有前景的手术机器人研究方向

通过前期十多年的努力，AI与机器人辅助医学产品率先获得硬骨组织（以骨科、神经外科、牙科种植为代表）方面的临床应用。目前，面向软组织器官的辅助医学产品正在进入产品化阶段，有望在“十四五”时期形成面向多类软组织器官的诊疗手术机器人产品，从而填补国内空白。专科型手术机器人是主导发展方向。可与微创与无创技术相结合，发展面向人体口腔、咽喉、气管、食管、尿道、直肠等自然腔道的手术机器人，从而形成新的研究方向。随着5G甚至新一代通信技术的发展应用，在不远的将来更加安全且放心实施的远程手术将成为手术机器人进行远程诊疗和手术的重要形式，也将成为地区之间、城乡之间均衡医疗资源的有力手段。

（二）开展手术机器人核心部件国产化

手术机器人核心部件的自主可控能力及水平是保障AI与机器人辅助医学产业构建及可持续发展的重要方面。目前，国产手术机器人的核心部件，如腔镜手术机器人的视觉成像芯片、微型直流精密电机等底层核心元件，骨科手术机器人的协作型机械臂、光学定位系统等，较多依赖进口；应用量较大的核心部件多源于工业化产品，而在医用场景下还需解决消毒、灭菌、遮挡、辐射、安全、电磁兼容等方面的临床问题。尽管核心部件的国产化工作取得了阶段性进展，形成了国产化核心部件体系的雏形，但相比进口产品，在关键性能指标、应用可靠性方面差距依然存在，在可靠性试验验证方面更为滞后。因此，从未来产业化角度看，需要产业链上、下游协同联动，提高自主技术水平与加速国产化进程兼顾，从而支撑高端医疗装备发展、增强整体医疗水平。

（三）探索适合国情的商业化模式

AI与机器人辅助医学的产品定价，既要让患者负担得起，也需满足各级别医院内部盈亏平衡的要求。手术机器人可采取系统免费、耗材与服务收费的方式，既便于普及系统，也能通过耗材与服务收费来确保手术机器人公司的合理利润。研究将耗材纳入医保范围，在帮助患者控制诊疗费用的同时，以稳定收益的方式激励手术机器人公司为医院和患者提供更好的技术服务。随着手术机器人应用的普及，中高难度手术可在基层医院开展，将促进医疗资源利用的公平化，也可推动手术机器人相关的系统、耗材、服务形成商业闭环；到后期，耗材将占据整个手术机器人市场50%以上的经营份额。

对于医学AI产品，宜制定差异化的竞争策略、探索多元化的商业运行模式、支持投入方的可持续经营，从而确保医学AI市场的良性发展。通过医院–企业合作，满足临床需求并提高付费意愿是基础形式。医疗AI企业可寻求扩大与付费机构的合作规模，从而收集高质量的数据集，优化深度学习算法模型，提高诊断准确率、智能推理判断水平；应专注于核心业务和优势技术，据此扩充产品线，在更多医疗细分方向进行技术创新和场景深耕，从而构建多元化的盈利模式，提高技术、人才、数据、市场的资源整合与利用效率。

（四）提高产品应用的覆盖率

建设医院–高校–企业创新型合作的综合服务平台，以关联各方的深入合作促进AI与机器人辅助医学产业的稳健发展。合理扶持具有高研发投入特征的手术机器人公司，形成国产手术机器人精品；完善高校科研成果转化机制，减少产品化、成果转化等环节的资源耗散，促成高水平、可持续的科研成果。AI与机器人辅助医学产品的推广进度与价格强关联，在产品开发阶段即可权衡功能和价格，采取精简功能以降低价格的差异化定价方式；在“医用版”基础上简化形成“家用版”，在确保应用安全性、功能稳定性的前提下，实现产品硬件、软件部分的便捷“拆解”“安装”。建议给予AI与机器人辅助医学产品的政策性支持，如对于足够年龄的老年人或者拥有医院证明需要康复、护理治疗的患者，可给予一定的补贴，补贴额度与患者病情程度、是否为永久性等相关；支持发展面向患者或老年人的康复机器人租借服务。

（五）注重专业化人才队伍建设

AI与机器人辅助医学是涉及医学、机器人、AI的交叉学科，需要高水平的人才队伍和完善的培养机制。增加AI与机器人辅助医学相关的本科生和研究生教育项目，培养更多兼具专业知识、实践经验的专业人才，提高新兴发展行业的技术支撑水平。打破传统高校中过度学科化所形成的协同育人壁垒，提倡跨学科教育和人才交流，在康复学领域的学生培养计划中加强机器人学等工科知识的教育力度。建立医学–工学、医生–工程师等维度的协作模式，支持护理、康复领域的专业人员融入机器人辅助康复和护理的科研团队，提高跨学科团队的专业性，精准引导机器人功能研发。在规模化的临床应用阶段，由护理、康复专业人员与用户进行沟通交流，促进新产品的顺畅推广与便捷应用。

（六）实施以临床需求为导向的技术创新

以临床需求为导向，加强多学科交叉融合背景下的技术创新和临床转化研究。支持研发机构积极布局，尽快构建以AI与机器人技术为支撑的多领域、多层次技术创新体系。针对计算机视觉、机器学习、自然语言处理等医学应用潜力突出的技术，可结合医学应用特征进行专门优化，增强医学应用的综合效果。从疾病诊断、治疗规划、手术辅助等方面出发，开展以AI与机器人技术为基础的创新医学应用研究。鼓励临床采用AI与机器人技术，尤其是在复杂疾病诊断及治疗、精准医学、手术辅助等方向。依托现有的AI与机器人技术研究机构，建设以科研院所、高校为主体的源头创新，以企业为主体的技术创新，医院–高校–企业深度融合的网络化创新体系。优选基础条件良好、研究方向明确、资源保障稳定、研发力量较强的企业，建设创新型医学应用孵化基地，加快AI与机器人辅助医学产品的研发进程。注重支持原始创新、基础理论研究，开展AI与机器人辅助医学应用的原创技术探索，增强科学认识、技术研发方面的储备厚度。

（七）加强监管以减少医疗事故并保障数据隐私

国内和国际上已有机械、医疗器械方面的管理条例和安全条例，但都属于通用要求；对于各种结

构、不同功能的康复和护理机器人，功能层面的稳定性、安全性评估标准没有统一，甚至存在一些潜在的安全问题。机器人功能稳定性、安全性评估标准制定方面的主要障碍之一是临床实验数据比较少。护理机器人安全要求自2014年以来一直没有更新。在医学领域专业人员的参与下，制定AI与机器人辅助医学领域的功能稳定性、安全性统一评价标准，设立专业组织来检验相关产品的有效性及可靠性，从而将安全风险降到最低。

加强AI与机器人辅助医学的伦理研究，严格界定机器人和医生互动角色的划分，确保临床数据隐私安全、患者对机器人辅助远程医疗的知情权。开展机器人辅助医疗的风险和技术事故损害评估，建立标准化的责任判定、法律风险预测程序，避免机器人技术误用、滥用，为伦理指南、法律规章制定提供理论基础。适时完善AI与机器人辅助医学的配套政策，细化相关的操作规范、责任认定、激励机制、服务收费、费用报销等内容，探索并建立以市场化为导向、适应国情的AI与机器人辅助医学服务模式及运营机制。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 28, 2023; **Revised date:** July 2, 2023

Corresponding author: Tian Wei is a chief physician from the Beijing Jishuitan Hospital, Capital Medical University and a member of Chinese Academy of engineering. His major research fields include department of spinal surgery, artificial intelligence, and orthopedic surgical robot. E-mail: tianweijst@vip.163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Development Strategy of Artificial Intelligence and Robotics in Medicine” (2022-XY-42); Beijing Natural Science Foundation project (L202032)

参考文献

[1] 陈晶. 国家卫健委: 持续推进优质医疗资源扩容下沉和区域均衡布局 [N]. 人民政协报, 2023-04-19 (05).
Chen J. National Health Commission: Continue to promote the expansion and sinking of high-quality medical resources and the balanced layout of regions [N]. CPPCC Daily, 2023-04-19 (05).

[2] Panayides A S, Amini A, Filipovic N D, et al. AI in medical imaging informatics: Current challenges and future directions [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2020, 24(7): 1837–1857.

[3] Shi F, Wang J, Shi J, et al. Review of artificial intelligence techniques in imaging data acquisition, segmentation, and diagnosis for COVID-19 [J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2020, 14: 4–15.

[4] Mak K K, Pichika M R. Artificial intelligence in drug development: Present status and future prospects [J]. Drug Discovery Today, 2019, 24(3): 773–780.

[5] 陈妍, 吴秋蓬, 曾德威, 等. 机器人流程自动化在医疗领域面临的机遇与挑战 [J]. 医学信息学杂志, 2023, 44(3): 69–73.
Chen Y, Wu Q P, Zeng D W, et al. Opportunities and challenges of robotic process automation in healthcare [J]. Journal of Medical Informatics, 2023, 44(3): 69–73.

[6] 杜志江, 孙立宁, 富历新. 医疗机器人发展概况综述 [J]. 机器人, 2003, 25(2): 182–187.
Du Z J, Sun L N, Fu L X. An review of medical robots [J]. Robot, 2003, 25(2): 182–187.

[7] 赵新刚, 段星光, 王启宁, 等. 医疗机器人技术研究展望 [J]. 机器人, 2021, 43(4): 385.
Zhao X G, Duan X G, Wang Q N, et al. Prospect of the medical robotics research [J]. Robot, 2021, 43(4): 385.

[8] Soomro N A, Hashimoto D A, Porteous A J, et al. Systematic review of learning curves in robot-assisted surgery [J]. BJS Open, 2020, 4(1): 27–44.

[9] 黎文娟, 马泽洋, 曾磊, 等. 国内外医疗机器人发展现状及趋势 [J]. 机器人产业, 2022 (6): 72–86.
Li W J, Ma Z Y, Zeng L, et al. Development status and trends of medical robots at home and abroad [J]. Robot Industry, 2022 (6): 72–86.

[10] 杨丽晓, 侯正松, 唐伟, 等. 近年手术机器人的发展 [J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(1): 1–12.
Yang L X, Hou Z S, Tang W, et al. Development of surgical robots in recent years [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2023, 47(1): 1–12.

[11] 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.
Liu Z, Shi J, Lin Y D, et al. Intelligent Medicine and beyond [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(10): 1165–1181.

[12] 韩晓光, 刘亚军, 范明星, 等. 骨科手术机器人技术发展及临床应用 [J]. 科技导报, 2017, 35(10): 19–25.
Han X G, Liu Y J, Fan M X, et al. Development and clinical application of the orthopaedic surgical robot [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(10): 19–25.

[13] 王树新, 王晓菲, 张建勋, 等. 辅助腹腔微创手术的新型机器人“妙手A” [J]. 机器人技术与应用, 2011 (4): 17–21.
Wang S X, Wang X F, Zhang J X, et al. A new robot “MicroHand A” for assisting abdominal minimally invasive surgery [J]. Robot Technique and Application, 2011 (4): 17–21.

[14] 田伟, 范明星, 张琦, 等. 中国骨科手术机器人的发展 [J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 1–6.
Tian W, Fan M X, Zhang Q, et al. Development of orthopaedic surgical robots in China [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(1): 1–6.

[15] Khanna O, Beasley R, Franco D, et al. The path to surgical robotics in neurosurgery [J]. Operative Neurosurgery, 2021, 20(6): 514–520.

[16] Ebrahimi A, Sefati S, Gehlbach P, et al. Simultaneous online registration-independent stiffness identification and tip localization of surgical instruments in robot-assisted eye surgery [J].

IEEE Transactions on Robotics, 2022, 39(2): 1373–1387.

[17] Cacciamani G E, Rajarubendra N, Artibani W, et al. Robotic intracorporeal urinary diversion: State of the art [J]. Current Opinion in Urology, 2019, 29(3): 293–300.

[18] Xiao X, Li C, Gu X, et al. A tubular dual-roller bending mechanism toward robotic transurethral prostate biopsy [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 26(5): 2483–2494.

[19] 段星光, 高亮, 李建玺, 等. 颅颌面外科手术机器人空间配准及实验 [J]. 机器人, 2018, 40(1): 64–71.
Duan X G, Gao L, Li J X, et al. Spatial registration of a craniomaxillofacial surgery robot and its experiments [J]. Robot, 2018, 40(1): 64–71.

[20] Yang G Z, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy [J]. Science Robotics, 2017, 2(4): eaam8638.

[21] 毕文倩, 张锴文, 刘金, 等. 智能机器人康复手套对脑卒中偏瘫患者手功能的疗效 [J]. 中国康复, 2023, 38(3): 131–135.
Bi W Q, Zhang K W, Liu J, et al. Effectiveness of intelligent robotic rehabilitation gloves for stroke-induced hemiplegic hands [J]. Chinses Journal of Rehabilitation, 2023, 38(3): 131–135.

[22] 庞洪波, 李励, 王艳武. 脊髓损伤患者步行功能康复设备的应用进展 [J]. 黑龙江医学, 2022, 46(24): 3070–3072.
Pang H B, Li L, Wang Y W. Progress in the application of rehabilitation equipment for walking function in patients with spinal cord injury [J]. Heilongjiang Medical Journal, 2022, 46(24): 3070–3072.

[23] Argall B D. Autonomy in rehabilitation robotics: An intersection [J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2018, 1: 441–463.

[24] Jiang J G, Huang Z Y, Huo B, et al. Research progress and prospect of nursing robot [J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2018, 11(1): 41–57.

[25] 韩晓光, 张琦, 何达. 远程医疗机器人手术研究进展 [J]. 邵阳学院学报 (自然科学版), 2022, 19(5): 103–107.
Han X G, Zhang Q, He D. Progress of telerobotic surgery [J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2022, 19(5): 103–107.

[26] Lacy A M, Bravo R, Otero-Piñeiro A M, et al. 5G-assisted telementored surgery [J]. British Journal of Surgery, 2019, 106(12): 1576–1579.

[27] Zhai Y K, Xu X, Chen B Z, et al. 5G-network-enabled smart ambulance: Architecture, application, and evaluation [J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 190–196.

[28] Zhang Y G, Chen G C, Du H, et al. Real-time remote health monitoring system driven by 5G MEC-IoT [J]. Electronics, 2020, 9(11): 1753.

[29] Hamet P, Tremblay J. Artificial intelligence in medicine [J]. Metabolism, 2017, 69: S36–S40.

[30] 段星光, 李长胜, 靳励行, 等. 手术机器人: 机遇与挑战并存 未来前景可期 [J]. 前沿科学, 2020, 14(3): 50–55.
Duan X G, Li C S, Jin L X, et al. Surgical robots: Opportunities and challenges coexist, future prospects can be expected [J]. Frontiers Science, 2020, 14(3): 50–55.