

人工智能在智慧医疗中的应用研究综述

陈援帅¹, 罗斐斐², 周黎³, 吴勇⁴, 蒋卫芳⁵, 张巩¹, 梁俊¹

(1. 浙江大学医学院附属第二医院, 浙江杭州 310009; 2. 第903医院, 浙江杭州 310000;
3. 北京东方计量测试研究所, 北京 100000; 4. 浙江省肿瘤医院; 5. 浙江大学校医院, 浙江杭州 310000)

摘要: 随着人工智能技术的快速发展, 智慧医疗已成为提高医疗质量和效率的关键途径。系统性搜集、筛选和综合分析近年来发表的相关研究文献, 深入剖析人工智能在智慧医疗领域的技术应用、现存挑战以及其未来的发展方向。研究发现, 虽然人工智能在提高疾病诊断准确性、治疗效率和改善患者管理方面展示出巨大潜力, 但仍面临数据隐私保护、跨平台数据整合以及医疗专业人员对新技术的接受度等挑战。人工智能在医疗行业的进一步发展依赖于政策规划者、技术开发者与医疗服务提供者的紧密协同, 同时需充分考虑法律伦理。未来研究应聚焦于相关技术的持续优化与创新, 尤其是保障数据安全与促进跨领域合作方面。

关键词: 智慧医疗; 人工智能; 大型语言模型; 数据隐私保护; 数据安全

DOI: 10.11907/rjdk.241562

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2025)004-0207-07



A Review of Artificial Intelligence Applications in Smart Healthcare

CHEN Yuanshuai¹, LUO Feifei², ZHOU Li³, WU Yong⁴, JIANG Weifang⁵, ZHANG Gong¹, LIANG Jun¹

(1. The Second Affiliated Hospital Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310009, China;
2. NO. 903 Hospital, Hangzhou 310000, China; 3. Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100000, China;
4. Zhejiang Cancer Hospital; 5. The Hospital of Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the rapid development of artificial intelligence technology, smart healthcare has become a key way to improve medical quality and service efficiency. Systematically analyze relevant research literature published in recent years, deeply analyze the technical applications, existing challenges, and future development directions of artificial intelligence in the field of smart healthcare. Research has found that although artificial intelligence has shown great potential in improving disease diagnosis accuracy, treatment efficiency, and patient management, it still faces challenges such as data privacy protection, cross platform data integration, and the acceptance of new technologies by medical professionals. The further development of artificial intelligence in the healthcare industry relies on close collaboration between policy planners, technology developers, and healthcare service providers, while fully considering legal ethics. Future research should focus on continuous optimization and innovation of related technologies, especially in ensuring data security and promoting cross disciplinary cooperation.

Key Words: smart healthcare; artificial intelligence; large language models; data privacy protection; data security

0 引言

随着“健康中国2030”规划的推进, 基于人工智能(Ar-

tificial Intelligence, AI)技术的智慧医疗成为推动医疗行业变革的重要力量。智慧医疗不是传统医疗服务的简单数字化, 而是通过先进技术的融合应用实现医疗服务全流程、全方位智能化。2023年, 全球迎来AI驱动的生产革

收稿日期: 2024-07-01

扫描二维码阅读全文:



基金项目: 浙江省科技厅基础公益研究计划项目(LY22H180001); 浙江省教育厅科研基金项目(自然科学类)(Y202352097)

作者简介: 陈援帅(1989-), 男, 硕士, CCF会员, 浙江大学医学院附属第二医院工程师, 研究方向为人工智能; 罗斐斐(1983-), 女, 硕士, 第903医院高级工程师, 研究方向为信息技术、人工智能; 周黎(1986-), 男, 硕士, CCF高级会员, 北京东方计量测试研究所工程师, 研究方向为信息安全; 吴勇(1975-), 男, 硕士, 浙江省肿瘤医院高级工程师, 研究方向为信息技术、医疗器械设备管理; 蒋卫芳(1976-), 女, 浙江大学校医院副主任护师, 研究方向为医院感染管理、医学信息学; 张巩(1990-), 男, 硕士, 浙江大学医学院附属第二医院主管技师, 研究方向为临床检验诊断、信息技术; 梁俊(1981-), 男, 硕士, 浙江大学医学院附属第二医院正高级工程师, 研究方向为医学信息学。本文通讯作者: 梁俊。

命,预训练大模型的技术架构在多模态路径下优化底层模型的训练,使决策式AI与生成式AI共同推动AI产业发展。国内大模型的应用逐渐增多,行业大模型进入爆发期,医疗界是典型的应用领域。本文通过系统性分析近年来发表的AI应用于医疗信息系统领域的文献,回顾相关研究进展并追踪重点议题,同时展望未来发展趋势。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

国外针对医院信息系统的研究主要集中在医疗数据处理、医疗资源整合以及技术应用方面。欧美等发达地区已经建立了较为完善的智慧医疗体系,例如美国的电子健康记录系统广泛应用于各级医疗机构,有效提升了医疗数据的管理效率和质量;远程胎儿监护技术的应用不仅实现了对孕妇妇女健康状态的实时监控,从而优化围产期医疗服务的响应效率和准确性,而且能为医疗服务提供者提供

重要的数据支持^[1];Gil等^[2]对远程医疗系统进行了研究,全面分析实际应用中遇到的关键问题、制约因素以及需要遵守的法律规范,提出了相应的风险缓解措施,并对患者隐私保护的法律责任进行了探讨。国外关于AI医学伦理的研究主要集中在模型及其构建过程的透明度、模型输出的责任归属、潜在的模型偏见以及隐私风险等方面^[3-4]。例如,Hathaliya等^[5]认为医疗保健行业已从1.0革命性地发展到4.0,其中医疗保健1.0更加以医生为中心,医疗保健4.0则使用云计算、雾计算、物联网和远程医疗保健技术在各利益相关方之间共享数据。然而,不安全的技术可能会导致医疗保健数据泄露,黑客可以完全访问患者的电子邮件账户、信息和报告。

通过文献计量法评估Health Informatics研究领域的文献绩效,用于了解该领域的发展趋势和热点问题。根据CiteScore找到排名前十的期刊,如表1所示,有6个期刊为OA期刊,平均影响因子超过9.1,这表明数字健康研究文献的开放获取可能有助于成果的及时传播与利用。

Table 1 The ten most influential journals in the field of health informatics

表1 Health Informatics领域影响力最大的10个期刊

序号	杂志名	影响因子	自引率/%	JCI期刊引文指标	cite score	年文章数	研究类文章比/%	h-index
1	The Lancet Digital Health	23.8	2.07	5.10	41.2	75	85.33	31
2	npj Digital Medicine	12.4	3.18	3.40	25.1	212	83.49	32
3	Medical Image Analysis	10.7	5.60	2.43	22.1	256	98.44	33
4	GigaScience	11.8	1.72	2.17	15.5	102	97.06	12
5	Artificial Intelligence in Medicine	6.1	5.07	1.31	15.0	179	86.59	20
6	Journal of the American Medical Informatics Association	4.7	10.91	1.48	14.5	214	86.92	17
7	Journal of Medical Internet Research	5.8	5.96	1.68	14.4	961	77.00	29
8	Implementation Science	8.8	4.52	2.52	14.3	62	66.13	18
9	Journal of Telemedicine and Telecare	3.5	11.14	1.41	14.1	114	78.07	11
10	JMIR Public Health and Surveillance	3.5	3.64	1.60	13.7	250	93.60	14

1.2 国内研究现状

近年来,国内智慧医疗的研究与应用取得了显著进展,主要包括人工智能技术辅助医生进行疾病诊断、大数据技术优化医疗资源配置与业务流程等方面。例如,尹嘉娃等^[6]将混合现实技术应用到医学实验教学中,利用HoloLens 2设备改善人与机器之间的交互效果,激发了学生对智慧医疗的兴趣;Yang等^[7]对元宇宙、人工智能和数据科学在医疗健康领域的发展和进行了概述,指出了未来研究方向;Zhang等^[8]提出一种新颖的医学语音分析系统架构,采用主动硬件、主动软件和人机交互实现智能且可进化的语音识别;Zhou等^[9]设计了一种人机辅助方案,通过块设计技术混淆来自医院和智能可穿戴设备的健康指标,并引入人机交互实现对智慧医疗平台健康报告的隐私访问。

在CNKI数据库中检索组合关键词“医学人工智能”和“智慧医院系统”,发文量分析如图1所示。可以看出,2012-2016年期间相关文献数量较少,自2017年开始显著增加。近年来,人工智能技术在医学领域的关注度逐渐上升,研究者开始挖掘其在疾病诊断、治疗中的应用,为智慧

医院的发展提供了坚实的学术支持。

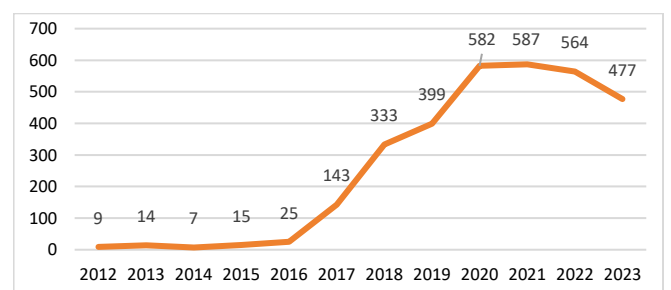


Fig. 1 Analysis of publications on medical artificial intelligence in the CNKI database

图1 CNKI数据库中医学AI发文量分析

2 AI在医疗领域的应用

目前AI在医疗领域的支撑技术一般包括智能算力(云计算技术)、大数据(数据科学与大数据技术)、算法(视觉技术、时序信号分析等)、人机智能交互和数据安全(数据处理系统建立、技术和管理安全保护)。具体如表2所示。

Table 2 Supporting technologies of artificial intelligence in the medical field

表2 人工智能在医疗领域的支撑技术

技术	智能化诊疗系统			软件应用系统		
	数字化 成像	医疗机 器人	AI辅助 诊断	数据采集 系统	信息管理 系统	科普学习 系统
智能算力			√		√	
大数据	√	√	√	√		
算法	√	√	√		√	
人机交互		√	√	√		√
数据安全			√	√	√	

2.1 AI诊断疾病

AI模型通过大量数据(病历、化验结果和病理图像)的训练来识别和学习疾病模式。例如,卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)被广泛应用于病理图像的分析,通过提取图像特征来识别病变区域。具体来说, CNN通过多层处理从基本的边缘检测到复杂的图形识别,逐渐提取出对诊断有用的特征^[10]。然而, AI通过分析大量变量识别非线性关联,并识别新的风险因素,不能解决因果推理的问题,即使能给出较为准确的结果,也无法在生理角度提供证明^[11]。

2.2 AI推荐治疗方案

AI系统可综合患者的遗传因素、生活方式、病历和最新医疗研究等信息推荐个性化治疗方案。例如,循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)^[12]和长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)^[13]能够处理时间序列数据,对患者的病程进展进行预测,为治疗方案的调整提供参考。然而,高度复杂的AI模型往往难以阐明其决策过程,医生与患者均需明了AI系统如何形成治疗方案,如何对这些结果产生信任并加以采纳。因此,提升AI技术的可解释性与可靠性是当前亟需解决的关键问题。

2.3 AI分析医疗影像

影像分析是AI应用最成功的医疗领域之一, AI模型可以极高的准确性和速度帮助医生检测和诊断疾病。具体来说,首先采用数万张标注影像数据训练CNN模型,使其自动识别和分类X光片、CT和MRI影响中的异常结构;然后采用迁移学习技术,利用预先训练的模型(如VGG-Net、ResNet)在特定医疗影像数据集上进行微调,可提高分析的准确性和效率^[14]。例如, Mohammed等^[15]建立了3D CNN模型对阿尔茨海默病进行分类,在不同分类任务中的F1值为0.75~0.94; Shen等^[16]提出3D深度层级语义网络模型预测CT中肺结节的特征和恶性程度,输出文字报告特征(如毛刺、实性、钙化等)和恶性评分,辅助医生解读模型预测结果; Cui等^[17]设计了一种基于深度学习的肺结节辅助检测系统,检测准确率高于部分放射科医生。然而, AI图像识别技术面临多种社会挑战和潜在风险,如诊断结果被用于非法或不道德目的,可能威胁个人隐私和社会安全;部分医生和患者对AI的信任度不足等。因此,确保医疗数据的安全性和隐私性,提高医生和患者对AI技

术的信任度是AI医疗影像分析中亟需解决的问题。

2.4 智能医疗设备的开发与应用

智能成像系统通过集成机械臂控制成像探头灵活运动,能适应复杂的成像环境,生成的图像清晰详尽,视觉效果优良^[18]。该技术不仅捕捉了灰度信息,而且记录了深度信息,大大拓宽了光学相干断层扫描图像的应用范围^[19]。智能医疗机器人通常运行在专门的操作系统上,如ROS(Robot Operating System)^[20]。这些系统提供了必要的软件框架和工具,支持机器人进行实时数据分析、任务调度和多任务处理。压力传感器、温度传感器、位置传感器等是智能医疗机器人的基础组件,这些传感器帮助机器人感知周围环境信息和患者的生理状态,确保操作的安全性和精确性^[21-22]。智能医疗设备虽具有诸多优势,但在实际应用中仍存在以下问题:①高成本。智能医疗设备的研发、制造、维护及更新升级费用非常高,限制了其普及性;②技术复杂性。智能医疗设备的操作和维护需要专业的技术知识,医疗人员需要接受额外的培训来熟悉操作;③技术依赖性。医生过度依赖智能技术可能导致基本的临床技能退化;④隐私泄露风险。智能医疗设备处理大量患者数据,包括敏感的健康信息,有数据泄露的风险,需要通过更严格的管控措施限制权限;⑤技术局限性。智能医疗设备无法处理所有类型的医疗情况,特别是在复杂或非标准化的医疗场景中,无法完全替代人类医生的直觉和经验;⑥法律和伦理问题。智能医疗设备的使用引发了众多伦理和法律问题,如机器人错误造成的医疗事故责任归属,以及在处理和使用时患者信息时的伦理考量;⑦患者接受度。一些患者可能对智能设备进行医疗操作持怀疑态度,担心其缺乏人类医生的专业判断。

3 智慧医院发展历程与AI应用演变

3.1 智慧医院的发展历程

2010年之前,医疗信息化建设是医院的主要关注点。2010年开始出现“智慧医院”的概念。2011年,医院电子病历系统建设正式启动,智慧医院建设随之展开。2015~2018年期间,电子病历开始实现共享,打破了医院之间的信息孤岛,互联网医院这一新业态也应运而生,医疗服务从线下向线上延伸。2019年,医院智慧服务分级评估试行标准出台,国家卫健委首次提出“智慧医院”的定义,标志着医院从信息化升级为智慧化,医疗服务的质量和效率全面提升。2021年,医院智慧管理分级评估标准体系出台,进一步推动公立医院高质量发展。

根据医院智慧服务分级评估标准,医院的智慧服务水平分为0~5级,主要评估医院在信息化应用中的功能和患者的体验效果。2018年,国家公布了电子病历系统应用水平分级评价标准,将其分为0~8级^[23],全国医院电子病历系统应用的平均水平由2018年的1.74提升至2022年的

3.57,三级医院基本达到了4级电子病历的水平。2018–2022年国内医院电子病历评级情况如图2所示。2023年,国家卫健委医院管理研究所发布《关于2021、2022年度医院智慧服务分级评估3级及以上医院结果公示的通知》,全国共有45家医院通过3级及以上评估。

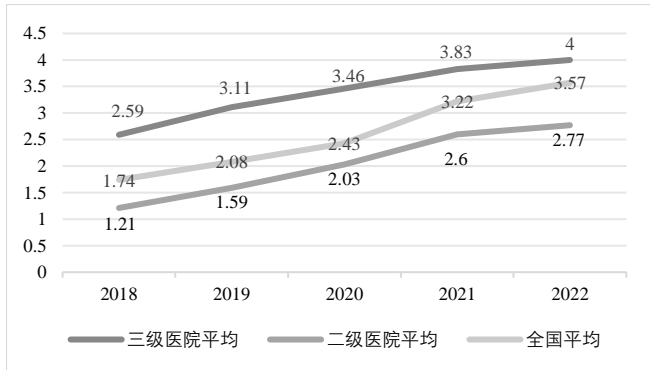


Fig. 2 Electronic medical record ratings in Chinese hospitals from 2018 to 2022

图2 2018–2022年国内医院电子病历评级情况

3.2 大语言模型与医疗

在过去的几十年中,美国医院通过电子健康记录系统积累了大量患者数据,包括结构化数据(如疾病诊断、药物医嘱)和非结构化数据(临床叙述)^[24]。系统中的结构化数据虽然在科研、统计分析上有诸多优势,但是临床医生仍然更倾向于使用临床叙述,以方便记录患者信息,包括家庭病史等。目前,越来越多的医疗AI系统正在探索利用临床叙述中丰富、细致的数据信息^[25]。然而,自由文本叙述难以直接用于需要结构化数据的计算模型,研究人员正尝试采用自然语言处理(Natural Language Processing, NLP)技术帮助医疗AI系统理解医疗领域特有的语言^[26]。例如,Wu等^[27]针对文档中的多标签预测问题提出一种新颖且有效的监督关系主题模型,该模型结合了词语特征与关系特征,通过一个统一的概率模型增强了词语属性空间与关系空间的交互,从而提高了模型的准确性;Wang等^[28]提

出一种结合网络正则化的多属性关系学习生成模型,该模型不仅能有效利用不同属性视图中的信息,而且能对网络结构信息进行预测,即使标记数据数量发生变化,其仍能保持稳健的性能;Trieu等^[29]提出BioVAE模型,使用OPTIMUS框架在大量生物医学文本上进行训练,与现有公开生物医学Product Lifecycle Management系统相比,该模型在多项生物医学文本挖掘任务中表现出领先性能,生成的生物医学句子比原始OPTIMUS模型更为准确。

3.3 AI助力优化医疗服务

国家统计局数据显示,截至2023年,中国人口老龄化率(65岁以上占比)已由2018年的11.9%上升至15.4%。同时,国家卫健委统计数据显示全国超过1.9亿老年人患有慢性病。老龄化和患病率的上升导致潜在医疗需求群体规模逐步扩大。除疫情期间医院诊疗受到影响外,我国每年诊疗人次和人均诊疗次数均在增加,医院面临巨大压力。缓解该压力的方法之一就是借助AI技术提高医院服务效率。例如,杨先碧等^[30]通过基于全程管理平台的智能电话随访系统,结合智能机器人随访功能设计了肺结节随访话术和流程,完成随访量约为人工的9.5~14.3倍,极大提高了随访效率;浙江省目前已建立健康数据平台“浙里健康e生”,可以查询到个人在各家医疗机构的病历、检查报告、疫苗接种以及社区签约信息等。

AI优化医疗服务在技术上通过抽取转化装载(Extract, Transform and Load)实现数据采集与共享^[31];使用企业服务总线进行消息交换,从而实现业务的实时协同^[32];同时还会用到XML共享文档技术等^[33]。

3.4 临床辅助决策系统演化

临床决策支持系统(Clinical Decision Support Systems, CDSS)是一种帮助医疗人员在诊断、治疗和管理患者过程中作出更好决策的系统,在该系统中应用AI技术能极大提高其性能和智能化水平。通过分析相关文献可将CDSS的发展分为5个阶段,具体如表3所示。

Table 3 Various stages of the evolution of CDSS

表3 CDSS发展的各个阶段

阶段	类别	特点	缺陷	代表性产品
1	孤岛版本的CDSS	独立于其他系统	成本高,无法主动进行提示警示	MYCIN(1974) ^[34]
2	集成版本的CDSS	与各临床信息系统集成,基于主动触发机制来提醒	共享性变差,难以将知识与设计代码分离	Wiz Order(1994) ^[35]
3	标准化的CDSS	为解决知识共享问题,用标准语法来表示、编码、存储和共享	扩展性和兼容性问题;标准较多,难以确定	GLIF(1998) ^[36]
4	基于服务的CDSS	将独立组件从集成的临床信息系统中分离出来,并通过API向临床信息系统提供服务	处理非事件驱动时灵活性不够;实施和维护复杂度较高	SEBASTIAN(2003) ^[37]
5	基于NLP+AI的CDSS	能够处理和整合非结构化数据,提供个性化治疗建议和诊疗指南	依赖于知识图谱,缺乏寻找隐藏在已有数据外知识的能力	Watson(2017)

4 AI在智慧医疗领域的发展方向

4.1 不断改进医疗数据处理算法

智慧医疗的发展依赖于大量数据,包括患者的遗传信息、生活习惯和治疗反应等。通过对这些数据进行分析,

医生能够为患者提供更加精准的治疗方案,减少误诊和误治的可能性。数据处理算法可以快速有效地从大量医疗数据中挖掘出有用信息,从而提升医疗服务的质量和效率。然而,不准确或不完整的数据可能导致错误的医疗决策和研究结果。不断改进数据处理算法有助于解决数据质量和完整性问题,更好地清洗和整合数据,确保其准确

性和可靠性。例如,黄祎等^[38]提出一种基于改进粒子群优化—支持向量机的智能化医疗数据处理技术,有效解决了众多医疗机构采用传统统计或报表的方式处理数据而导致效率低下、准确率不足且难以发现数据之间深层信息等问题;高晓娟等^[39]提出一种基于改进神经网络的医疗大数据智能处理算法,有效解决了计算机难以处理电子病历中大量非结构化数据而导致无法挖掘其潜在信息的问题;谭倩梅等^[40]基于 Synthetic Minority Over-Sampling Technique 算法对急性一氧化碳中毒迟发性脑病进行预警,效果优于传统的 Logistic 回归模型;傅唯佳等^[41]通过分析数据平台构建相关文献及政策法规,以及开展区域合作医疗机构的医疗业务调研,构建了包含数据来源、数据采集、数据安全等多层架构的儿科区域数据共享平台,大大提升了机构间数据互联互通的效率;Sorayya 等^[42]提出预测心肌缺血损伤指数的智能算法,该算法使用梯度提升技术在急诊环境下快速诊断非 ST 段抬高型心肌梗死,从而辅助评估治疗时间和患者预后。

4.2 进一步加强数据安全

AI在医疗系统中的应用引发了一些法律和伦理问题,包括数据隐私、责任归属等。在保护患者隐私方面可引入联邦学习机制,其是一种分布式机器学习方法,允许在多个本地数据拥有者之间共同训练机器模型,而不需要将个人或敏感数据上传至中央服务器,每个本地数据库贡献的是对模型的改进(通常是模型的参数更新或梯度),而非原始数据^[43]。连接客户端(数据拥有者)与中心服务器的通道可使用安全加密协议,如传输层安全性协议(Transport Layer Security),以防止黑客攻击和数据监听^[44]。同时,联邦学习可与安全多方计算协议结合使用,允许多方协同计算一个共同函数,而不泄露各自的输入数据,这可以用于在聚合模型更新时保护参与者的数据^[45]。在实际应用中,可首先建立一个区块链网络,囊括联邦学习的各参与者,如数据拥有者和模型训练者,并设置区块链节点执行任务^[46];然后,定义模型更新的条件和验证逻辑,自动注册并验证每个参与者,确保其按照预定义规则进行模型参数的更新与聚合。参与者下载初始全局模型,并在本地数据上进行训练,生成模型参数更新。更新通过区块链广播,并在发送前加密以保障隐私。智能合约接收更新后,运行验证脚本确保更新合法并符合格式或值域要求。验证后,聚合节点的模型更新生成新的全局模型参数,这些信息被记录在区块链中,确保不可篡改。每次更新聚合后创建新区块,并通过共识算法(如工作量证明^[47]、权益证明^[48])验证。一旦新区块被确认,其会被不可逆地添加到链上。经过多轮本地更新、验证、聚合和记录后,全局模型逐渐优化至预期性能水平。

4.3 不断研发新的医疗 AI 技术

新的医疗 AI 技术可以提升医疗服务的质量和效率,实现个性化治疗和健康管理,优化医疗资源配置。例如,

纳米医疗技术多用于药物递送系统,以提高治疗效果和减少副作用,也被用于制造高度敏感的诊断工具^[49]。过去 15 年,纳米安全相关论文数量呈增长趋势。然而,医疗器械领域尚缺乏明确的纳米材料风险指导原则。为加速纳米技术在医疗器械领域的应用,监管部门和科研机构需加强合作,制定系统的安全性和有效性评价指导规范^[50];可植入医疗设备,如心脏起搏器、脑深部刺激器等,可以内置智能系统实时监控和调节生理功能,但是需要精确定位植入区域,可利用神经导航技术辅助外科医生根据成像数据准确地将电极刺入目标位置^[51];智能可穿戴设备可监测患者的生命体征、病情和服药情况,例如 Giorgio 等^[52]通过可穿戴传感器监测个体生理参数变化,从而早期识别急性呼吸道感染,减少疾病传播与恶化;现代针灸机器人配备高级传感器和成像技术,如高清摄像机、红外线传感器等,可以帮助机器人精确定位人体穴位,然后使用先进的机械臂进行自动针刺,利用力学传感器精确控制施针力量,以避免损伤皮肤或其他组织^[53]。

4.4 拓展跨机构应用

未来的智慧医疗系统会逐步融入智慧城市系统的服务体系,可通过一卡通、政务专网、交互平台等统一接入^[54]。具体对应关系设想如表 4 所示。

Table 4 Proposed correspondence between smart healthcare and smart cities

表 4 智慧医疗系统与智慧城市系统对应关系设想	
智慧医疗系统	智慧城市系统
电子健康卡(电子凭证)	社会一卡通
融合 5G 网络	融合 6G 立体网络 ^[55]
全民健康信息平台	智慧城市管理运营平台
健康档案库、电子病历 2 个库	人口、空间、物品、时间、事件、资产 6 个库
智慧医疗一卡通、区块链综合管理、远程智能诊断、智慧公共卫生监测及管理、智慧卫生健康行业监管 6 个业务系统	政务、医疗健康、交通、教育、社会保障、电子商务、物流、旅游、经济金融分析等 N 个业务系统
网络信息安全防护、数据及患者隐私保护 2 个标准体系	个人隐私及公共服务数据、网络信息安全防护 2 个标准体系

5 结语

本文深入分析了 AI 在智慧医疗领域的研究现状和发展趋势。可以看出,随着信息技术的持续进步,AI+医疗系统正在逐渐突破传统局限,实现高度个性化和精准化的诊疗,有效优化了医疗资源分配和管理流程。未来,医学 AI 仍需克服数据安全与隐私保护、跨学科合作、法律法规与伦理等诸多挑战。相信随着技术的成熟和相关政策法规的完善,智慧医疗将开启人类健康管理的新纪元,不仅仅是在疾病治疗中,更是在疾病预防、健康管理 and 生活质量提升方面发挥至关重要的作用。社会应积极鼓励跨领域创新,促进医疗技术的健康发展,做到“以人为本”与“智能向善”^[56]。

参考文献:

- [1] ATKINSON J, HASTIE R, WALKER S, et al. Telehealth in antenatal care: recent insights and advances[J]. *BMC Medicine*, 2023, 21(1):332.
- [2] GIL MEMBRADO C, BARRIOS V, COSIN-SALES J, et al. Telemedicine, ethics, and law in times of COVID-19: a look towards the future[J]. *Rev Clin Esp (Barc)*, 2021, 221(7):408-410.
- [3] KAREN K W, THADDEUS S, GUNNAR M, et al. Automated cooling tower detection through deep learning for Legionnaires' disease outbreak investigations: a model development and validation study[J]. *The Lancet Digital Health*, 2024, 6(7):e500-e506.
- [4] JASMINE O, SHELLEY C, WASSWA W, et al. Ethical and regulatory challenges of large language models in medicine [J]. *The Lancet Digital Health*, 2024(6):e428-e432.
- [5] HATHALIYA J J, TANWAR S. An exhaustive survey on security and privacy issues in Healthcare 4.0[J]. *Computer Communications*, 2020(3):311-335.
- [6] YIN J W, YANG Y. Comprehensive experimental design of intelligent medicine system [J]. *Modern Education Equipment in China*, 2024(3):21-25.
尹嘉娃, 杨毅. 智慧医疗综合实验教学系统实验设计[J]. *中国现代教育装备*, 2024(3):21-25.
- [7] YANG Y, SIAU K, XIE W, et al. Smart health: intelligent healthcare systems in the metaverse, artificial intelligence, and data science era [J]. *Journal of Organizational and End User Computing*, 2022(34):1-14.
- [8] ZHANG J, WU J Y, QIU Y Y, et al. Intelligent speech technologies for transcription, disease diagnosis, and medical equipment interactive control in smart hospitals: a review [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2023, 153:1-29.
- [9] ZHOU T Q, SHEN J, HE D B, et al. Human-in-the-loop-aided privacy-preserving scheme for smart healthcare[C]//*IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2022:6-15.
- [10] MA X Y, XU J D, NI M Y. Remote sensing image segmentation based on multi-scale feature fuzzy convolutional neural network [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Edition)*, 2024(3):1-11.
马翔悦, 徐金东, 倪梦莹. 基于多尺度特征模糊卷积神经网络的遥感图像分割[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2024(3):1-11.
- [11] CAO Y H, LI C, YANG J J, et al. Application status of AI in diagnosis and treatment of cardiovascular diseases [J]. *Life Sciences*, 2022, 34(8):918-928.
曹一挥, 李超, 杨俊杰, 等. AI在心血管疾病诊疗中的应用现状[J]. *生命科学*, 2022, 34(8):918-928.
- [12] HU C, LIN Y Y. Pattern recognition of motor imagery EEG signals based on convolutional cyclic neural network [J]. *Journal of Luoyang Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 34(1):50-55.
胡存, 林叶晔. 基于卷积循环神经网络的运动想象脑电信号模式识别[J]. *洛阳理工学院学报(自然科学版)*, 2024, 34(1):50-55.
- [13] JU W, WANG R. Multidimensional time series prediction based on quaternion long short-term memory network[J]. *Industrial Control Computer*, 2024, 37(2):129-130.
鞠巍, 王瑞. 基于四元数长短记忆网络的多维时间序列预测[J]. *工业控制计算机*, 2024, 37(2):129-130.
- [14] KHAN A S, KHAN A B, ULLAH M, et al. A computational classification method of breast cancer images using the VGGNet model[J]. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2022(16):1-17.
- [15] MOHAMMED G. Alzheimer's disease diagnostics by a 3D deeply supervised adaptable convolutional network [J]. *Front Biosci*, 2018, 23(2):584-596.
- [16] SHEN S, HAN S X, ABERLE D R, et al. An interpretable deep hierarchical semantic convolutional neural network for lung nodule malignancy classification[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 128:84-95.
- [17] CUI X N, ZHENG S Y, HEUVELMANS M A, et al. Performance of a deep learning-based lung nodule detection system as an alternative reader in a Chinese lung cancer screening program[J]. *European Journal of Radiology*, 2022, 146:110068.
- [18] BARIGALI A, ASWIN P R, KHADAR S, et al. Optical coherence tomography: angiography visualization of retinal oxalosis in primary hyperoxaluria, a case report [J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2022(7):2716-2720.
- [19] LIU F, ZENG W F, ZHANG W T, et al. OCT fingerprint characterization attack detection based on frequency domain dissociation features [J]. *Journal of Computer Science*, 2024, 47(2):323-336.
刘凤, 曾文锋, 张文天, 等. 基于频域解离特征的OCT指纹表征攻击检测[J]. *计算机学报*, 2024, 47(2):323-336.
- [20] DILUOFFO V, MICHALSON W R, SUNAR B. Robot operating system 2: the need for a holistic security approach to robotic architectures [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(3):1-15.
- [21] YUAN Y T, LIANG X. Study on the learning curve of robot assisted pancreaticoduodenectomy [J]. *Journal of Robotic Surgery (Chinese and English)*, 2024, 5(1):75-79.
袁亦挺, 梁霄. 机器人辅助胰十二指肠切除术的学习曲线研究[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2024, 5(1):75-79.
- [22] LIU W, SHI X. Analysis of preventive maintenance measures in intelligent medical devices [J]. *Application of Integrated Circuits*, 2023, 40(7):160-161.
刘炜, 石霄. 智能医疗设备中的预防性维护措施分析[J]. *集成电路应用*, 2023, 40(7):160-161.
- [23] LU J J, XIN Z Y, YU J R. Current status of electronic medical record system construction in Guangdong province and its impact on medical record quality [J]. *Chinese Hospital Statistics*, 2022, 29(3):228-231.
卢建军, 辛子艺, 余俊蓉. 广东省电子病历系统建设现状及对病案质量的影响[J]. *中国医院统计*, 2022, 29(3):228-231.
- [24] ADLER-MILSTEIN J, HOLMGREN A J, KRALOVEC P, et al. Electronic health record adoption in US hospitals: the emergence of a digital 'advanced use' divide [J]. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2017, 24:1142-1148.
- [25] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. *Nature*, 2015, 521:436-444.
- [26] XI Y. A large language model for electronic health records [J]. *Npj Digital Medicine*, 2023, 5(1):1-9.
- [27] WU C Y, LIN W X. PMC-LLaMA: toward building open-source language models for medicine [J]. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2024, 31(9):1833-1843.
- [28] WANG S, YE Y, LI X, et al. Semi-supervised collective classification in multi-attribute network data [J]. *Neural Process Letter*, 2016, 45(1):1-20.
- [29] TRIEU H T, MAKOTO M, ANANIADOU S. BioVAE: a pre-trained latent variable language model for biomedical text mining [J]. *Bioinformatics*, 2022, 38(3):872-874.
- [30] YANG X B, CHENG Y, LIU Q, et al. Design and application of intelligent telephone follow up system for comprehensive management of pulmonary nodules [J]. *Journal of Medical Informatics*, 2024, 45(3):77-82.
杨先碧, 程越, 刘青, 等. 肺结节全程管理智能电话随访系统设计与应用[J]. *医学信息学杂志*, 2024, 45(3):77-82.
- [31] ZENG G W, LIANG H S, ZHONG L. Research on batch intelligent development platform based on big data ETL engine [J]. *Telecommunications*

- Engineering Technology and Standardization, 2024, 37(3):20-25.
- 曾国文,梁华生,钟玲. 基于大数据ETL引擎的批量智能开发平台研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(3):20-25.
- [32] WANG X Q, MENG N. An automatic generation method for electronic medical record sharing documents[J]. China Digital Medicine, 2019, 14(8):103-105.
- 王兴强,孟娜. 一种电子病历共享文档的自动生成方法[J]. 中国数字医学, 2019, 14(8):103-105.
- [33] LIANG X H, YANG J Q, XIANG Z Q. Two stage BSO-SA algorithm for solving multi vehicle VRP problem with unilateral soft time window[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2024, 48(1):19-24.
- 梁学恒,杨家其,向子权. 两阶段BSO-SA算法求解带单边软时间窗的多车型VRP问题[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(1):19-24.
- [34] MIDDLETON B, SITTING D F, WRIGHT A. Clinical decision support: a 25 year retrospective and a 25 year vision[J]. Yearbook of Medical Informatics, 2016(Suppl 1): S103-116.
- [35] GEISSBUHLER A, MILLER R A. Clinical application of the UMLS in a computerized order entry and decision-support system [C]//American Medical Informatics Association Annual Symposium, 1998:320-324.
- [36] OHNO-MACHADO L, GENNARI J H, MURPHY S N, et al. The guideline interchange format: a model for representing guidelines[J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 1998, 5(4):357-372.
- [37] WRIGHT A, DEAN F S. A framework and model for evaluating clinical decision support architectures [J]. Journal of Biomedical Informatics, 2008, 41(6):982-990.
- [38] HUANG Y, WANG J Z, SUN M Q, et al. Research on intelligent medical data processing technology based on improved PSO-SVM [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(3):83-87.
- 黄祎,王金珠,孙梦琪,等. 基于改进PSO-SVM的智能化医疗数据处理技术研究[J]. 电子设计工程, 2024, 32(3):83-87.
- [39] GAO X J, ZHANG A H, YANG J. Design of intelligent processing algorithm for medical big data based on improved neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(9):34-38.
- 高晓娟,张爱华,杨媛. 基于改进神经网络的医疗大数据智能处理算法设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(9):34-38.
- [40] TAN Q M, YANG J, LI Q P. Construction of a risk warning model for delayed encephalopathy of acute carbon monoxide poisoning based on SMOTE algorithm [J]. Journal of Nursing Management, 2023, 23(9):760-763, 780.
- 谭倩梅,杨静,李秋萍. 基于SMOTE算法的急性一氧化碳中毒迟发性脑病风险预警模型的构建[J]. 护理管理杂志, 2023, 23(9):760-763, 780.
- [41] FU W J, FENG R, GE X L, et al. Construction of a pediatric regional medical data sharing platform based on blockchain technology [J]. China Medical Device Information, 2023, 29(17):47-51, 110.
- 傅唯佳,冯瑞,葛小玲,等. 基于区块链技术的儿科区域医疗数据共享平台建设[J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(17):47-51, 110.
- [42] SORAYYA M, SAZZLI K. Advancing non-ST-elevation myocardial infarction risk assessment with artificial intelligence-based algorithms [J]. The Lancet Digital Health, 2024(7):e434-e435.
- [43] JI S X, TAN Y. Emerging trends in federated learning: from model fusion to federated X learning [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2024(4):1-22.
- [44] LI M F, NIAN X Y. Multi party computation protocol for hospital HIS system data security based on cloud simulation platform [J]. Information Technology, 2024(2):180-184.
- 李明飞,年晓莹. 基于云仿真平台的医院HIS系统数据安全多方计算协议[J]. 信息技术, 2024(2):180-184.
- [45] CHEN C Q, SHANG Y Q. Anti leakage methods for complex network information data under homomorphic encryption [J]. Computer Simulation, 2024, 41(2):482-486.
- 湛昌强,尚永强. 同态加密下复杂网络信息数据防泄露方法[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2):482-486.
- [46] SHEN Y T, HUI H H, CHEN J Y. Research on empowering data intelligence with blockchain technology system [J]. Radio Engineering, 2024, 54(4):782-790.
- 沈宇婷,惠怀海,陈金勇. 区块链技术体系赋能数据智能研究[J]. 无线电工程, 2024, 54(4):782-790.
- [47] YI L, LU X Y, TANG K, et al. A review of blockchain consensus algorithm research [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(6):161-170.
- 易黎,卢新宇,汤鲲,等. 区块链共识算法研究综述[J]. 电子设计工程, 2024, 32(6):161-170.
- [48] CHEN M J. Comparison on proof of work versus proof of stake and analysis on why Ethereum converted to proof of stake [C]//The 2nd International Conference on Business and Policy Studies, 2023:201-205.
- [49] CHEN K, DOU K F, CHEN Q H, et al. Nanotechnology applied in medical devices: progress in regulatory science research by the National Medical Products Administration [J]. Basic Sciences of China, 2022, 24(2):39-44.
- 陈宽,窦凯飞,陈清华,等. 医疗器械中应用的纳米技术:国家药品监督管理局监管科学研究进展[J]. 中国基础科学, 2022, 24(2):39-44.
- [50] ZHU S, LI L, GU Z, et al. 15 years of small: research trends in nanosafety [J]. Small, 2020, 16(36):1-10.
- [51] ZHAO C S, WANG Y Q, CHEN M, et al. Application of multimodal image fusion and neuro navigation technology in pediatric neurosurgery teaching [J]. Education and Teaching Forum, 2024(5):49-52.
- 赵崇舜,王勇强,陈氏,等. 多模态影像融合及神经导航技术在小儿神经外科教学中的应用[J]. 教育教学论坛, 2024(5):49-52.
- [52] GIORGIO Q, ERIN C, JORGE V, et al. Feasibility of wearable sensor signals and self-reported symptoms to prompt at-home testing for acute respiratory viruses in the USA (DETECT-AHEAD): a decentralised, randomised controlled trial [J]. The Lancet Digital Health, 2024, 6(8):e546-e554.
- [53] SU J B, ZHU Y, ZHU M. Hand-eye-force coordination of acupuncture robot [J]. IEEE Access, 2019(7):82154-82161.
- [54] LONG T, XING Z Y, HUANG D Y. New smart city construction system [J]. China Science and Technology Information, 2024(7):114-115, 118.
- 龙腾,邢中玉,黄德毅. 新型智慧城市建设体系[J]. 中国科技信息, 2024(7):114-115, 118.
- [55] WANG N W, QUAN Z A, ZHAI L J, et al. Multi dimensional network capacity analysis method for 6G air space integration [J]. Radio Communication Technology, 2021, 47(6):746-752.
- 王妮炜,金子傲,翟立君,等. 6G空地一体化多维立体网络容量分析方法[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6):746-752.
- [56] ZHU Y, YE J Y. A review of research on artificial intelligence-generated content (AIGC): international progress and hot topics [J]. Information and Management Research, 2024(7):14-28.
- 朱禹,叶继元. 人工智能生成内容(AIGC)研究综述:国际进展与热点议题[J]. 信息与管理研究, 2024(7):14-28.