



数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的技术、应用与挑战综述

林雨嘉 李金海 宁焕生 石飞飞

Review of technology, application, and challenge of digital twins in smart healthcare

LIN Yujia, LI Jinhai, NING Huansheng, SHI Feifei

引用本文:

林雨嘉, 李金海, 宁焕生, 石飞飞. 数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的技术、应用与挑战综述[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(9): 1812–1824. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.12.30.002

LIN Yujia, LI Jinhai, NING Huansheng, SHI Feifei. Review of technology, application, and challenge of digital twins in smart healthcare[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(9): 1812–1824. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.12.30.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.12.30.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特种变压器生产车间数字孪生系统构建方法

Development of a digital twin system in a special transformer production workshop

工程科学学报. 2023, 45(11): 1948 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.26.005>

基于深度强化学习的无人机集群数字孪生编队避障

Digital twin–based obstacle avoidance method for unmanned aerial vehicle formation control using deep reinforcement learning

工程科学学报. 2024, 46(7): 1187 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.28.005>

基于数字孪生的工件装夹机械臂路径规划仿真分析

Simulation analysis of path planning for workpiece clamping robots based on digital twin technology

工程科学学报. 2025, 47(6): 1285 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.08.21.002>

基于少测点数据驱动的大规模锂电池模组温度实时预测

Real–time temperature prediction of large–scale lithium battery module driven by data based on few measurement points

工程科学学报. 2025, 47(5): 1103 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.05.23.002>

基于数据融合的智能医疗辅助诊断方法

Intelligent medical assistant diagnosis method based on data fusion

工程科学学报. 2021, 43(9): 1197 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.01.12.003>

“健康中国”行动下的智慧医疗

$\${suggestArticle.titleEn}$

工程科学学报. 2021, 43(9): 1137 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.09.01.020>

数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的技术、应用与挑战综述

林雨嘉¹⁾, 李金海¹⁾, 宁焕生²⁾, 石飞飞²⁾✉

1) 中共淳安县委党校, 杭州 311700 2) 北京科技大学, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: shifeifei@ustb.edu.cn

摘要 随着人工智能、云计算、5G 等先进技术的发展, 数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的应用日益广泛, 医疗数字孪生的概念随之应运而生. 在这一新兴领域中, 患者作为医疗数字孪生研究的核心与难点, 对其进行研究可以更好地挖掘并满足患者医疗需求, 为个性化医疗服务增质提效. 因此, 本文首先详细调研了医疗数字孪生的国家政策导向、学术研究动态以及国际组织情况. 其次, 聚焦患者群体构建了医疗数字孪生的综合技术框架, 详细剖析了数字支撑技术、孪生体构建技术与人机交互技术这三类关键技术. 第三, 本文详细阐述了医疗数字孪生的五大主要应用: 运动训练、疾病预测、临床治疗、康复管理及医药试验. 最后, 本文对数字孪生技术在智慧医疗与健康领域存在的数据异构、经验主义、安全隐私等问题进行讨论和分析, 并提出了针对性的对策.

关键词 数字孪生; 智慧医疗与健康; 医疗数字孪生; 疾病预测; 个性化医疗

分类号 TG142.71

Review of technology, application, and challenge of digital twins in smart healthcare

LIN Yujia¹⁾, LI Jinhai¹⁾, NING Huansheng²⁾, SHI Feifei²⁾✉

1) Party School of the Chunan County Committee, Hangzhou 311700, China

2) University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: shifeifei@ustb.edu.cn

ABSTRACT With the rapid advancement of technologies such as artificial intelligence (AI), cloud computing, and 5G, the application of digital twins within the smart healthcare domain has become increasingly widespread. This growth has led to the emergence and development of medical digital twins. Patients are at the core of medical digital twin research; however, studying them presents significant challenges. Therefore, this study conducted a detailed investigation of national policy orientations, academic research trends, and international organizations related to medical digital twins. In recent years, numerous governments have placed great emphasis on medical digital twins, including legislation on remote healthcare services in America, mobile healthcare in England, AI hospitals in Japan, and technology-enabled smart healthcare in China. Moreover, this paper proposes a patient-centric comprehensive technical framework for medical digital twins, with a detailed analysis of three key technologies: digital support, digital twin construction, and human-computer interaction. The Internet of Things (IoT) and 5G constitute digital support technologies that underpin the connection between physical space and cyberspace. Devices such as sensors and smart terminals in IoT enable information collection and state perception in the physical world. 5G transmission technology ensures rapid and accurate transmission of collected data. Together, AI, big data, and cloud computing technologies form the core of digital twin construction technology. Cloud computing provides computing power and storage support for big data operations, and massive amounts of data collected by IoT terminal sensors are stored on cloud platforms. AI algorithms, such as machine and deep learning, further enhance the data processing capabilities and system optimization

收稿日期: 2024-12-30

levels of digital twins. In addition, as key components of human-computer interaction technology, VR and AR technologies play significant roles at the application level of digital twins. Next, this paper examines five primary applications of medical digital twins. For instance, in sports medicine, digital twin technology is used to optimize the performance of elite athletes. In disease prediction, recent research has shown that integrating environmental and medical data in digital twin models can significantly improve the prediction accuracy for cancer and infectious diseases. Finally, this paper discusses the challenges of applying digital twin technology in the smart healthcare domain, including data heterogeneity, empiricism, security and privacy, ethics and morality, and the digital divide. For example, questions regarding who is responsible when an AI-based digital twin system makes an incorrect diagnosis must be addressed. To tackle data heterogeneity, ontology technology is being developed to enable seamless data integration. To counter the overreliance on data-driven decision-making, hybrid models that combine AI with clinical guidelines and expert knowledge are being explored. For security and privacy, technologies such as blockchain and federated learning have been proposed to protect patient data, ensuring that only authorized parties can access and process it. In summary, this paper contributes to the theoretical foundation and practical implementation of digital twin technology in smart healthcare, propelling the development of a more efficient, accessible, and personalized medical service ecosystem.

KEY WORDS digital twin; smart healthcare; medical digital twin; disease prediction; personalized healthcare

当前,我国的智慧医疗与健康产业蓬勃发展,该产业融合了物联网、大数据、人工智能等先进科学技术,旨在通过健康管理的数字化、远程监控的实时化以及医疗资源的优化配置,实现医疗服务向个性化、高效化的方向改进,提升医疗服务质量和患者满意度,推动着医疗行业向更加智能化与人性化的方向迈进^[1]。在医疗与健康产业数字化进程中,数字孪生技术作为一项连接物理空间与数字空间的先进技术,逐渐展现出其在该领域的巨大潜力。在此背景下,医疗数字孪生这一新兴概念应运而生。然而,当前智慧医疗与健康领域的数字孪生技术研究大多聚焦于特定病症的数字孪生体构建,缺乏对数字孪生技术赋能智慧医疗与健康在关键技术、核心应用及未来挑战方面的整体综述。

本文旨在研究数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的关键技术、主要应用和面临挑战。首先,本文阐述了医疗数字孪生的概念与内涵。其次,通过调研医疗数字孪生的相关政策,分析医疗数字孪生在国家层面的研究现状与未来布局;通过检索医疗数字孪生相关文献,分析其在学术层面的发展态势;通过调研医疗数字孪生的国际组织,分析医疗数字孪生技术的研发和应用现状。第三,本文从物理空间层面、数字空间层面、服务与交互层面介绍了医疗数字孪生的数字支撑技术、孪生体构建技术与人机交互技术。第四,本文详细论述了疾病预测、临床治疗、术后康复、运动训练和医药试验这五大医疗数字孪生应用。最后,本文探讨了医疗数字孪生在数据异构、经验主义、安全隐私、伦理道德、数字鸿沟这五个方面面临的挑战,

并给出了相应的对策。

1 医疗数字孪生的概念与内涵

数字孪生技术指基于物理世界中的实体原型,在数字世界中构建物理实体完整映射状态下的全生命周期虚拟孪生体模型,通过集成多学科、多物理性、多尺度的模拟与仿真,实现物理实体与虚拟数字孪生体间的交互反馈、监测评估、分析预测、控制优化等功能^[2]。当前,数字孪生技术在智能制造、智慧城市、航空航天等领域已成为研究热点,在推动产业数字化转型中发挥了重要作用^[3]。在智能制造领域,数字孪生技术主要用于生产过程的实时监控与优化。通过构建物理生产系统的虚拟模型,企业实时获取生产线上设备的运行状态、产品质量数据等信息,提前预测设备故障,优化生产流程,提高生产效率和产品质量。例如,德国西门子公司在其工业自动化生产线上引入数字孪生技术,实现了生产效率提升 20%,次品率降低 15%。在智慧城市建设方面,数字孪生技术为城市规划、管理和运营提供了全新的视角和方法。通过整合城市中的各类数据,如交通流量、能源消耗、环境监测等,构建城市的数字孪生模型,城市管理者可以对城市的运行状态进行实时模拟和分析,制定更加科学合理的城市发展策略。例如,新加坡利用数字孪生技术打造了虚拟城市模型,实现了对城市交通流量的精准调控,有效缓解了交通拥堵问题。而较上述领域相比,数字孪生技术在智慧医疗与健康领域的研究仍处于初步发展状态。

随着研究人员对数字孪生在智慧医疗与健康

领域的研究不断深入, 医疗数字孪生这一新兴概念应运而生. 医疗数字孪生是一种创新的医疗管理系统, 它通过对患者、医生、医疗设备以及医院这四类实体进行数字化重构, 实现医疗流程的虚拟映射与优化.

具体而言, 患者数字孪生基于个体生理数据、医疗影像、电子病历及基因组信息等, 利用数据标准化、3D 重建及机器学习等技术, 模拟患者健康状况与疾病发展, 实现对患者疾病发展的精准化预测、健康状况的个性化治疗、以及医疗决策的智能化支持; 医护人员数字孪生则依托专业技能、经验及 VR/AR 交互界面, 结合人工智能辅助决策, 增强诊疗精准度与效率; 医疗设备数字孪生通过物联网、大数据分析及 3D 建模技术, 实时监测设备状态, 优化运维管理; 医院数字孪生整合建筑环境、人员流动及诊疗流程数据, 运用地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)、云计算等手段, 实现医院运营智能化^[4]. 在上述四类医疗数字孪生实体中, 患者是医疗数字孪生服务的对象和主体, 患者数字孪生体直接关联个体健康状态与治疗效果, 既是关注度最高的, 也是数字孪生模型的构建过程最复杂的. 患者数字孪生模型的构建需要引入“以人为本”的理念, 综合数据采集过程中外在因素(如身高、体重、BIM 等)、内在生理因素(如心率、肌电信号、血压等)、社会行为因素(社交关系网络、作息习惯等)、以及相关环境因素(如温度、湿度等)等多维度因素的影响, 还需要考虑年龄、性别、遗传背景等个体差异, 以及人体各器官与系统之间的相互作用关系等^[5]. 从患者群体出发进行医疗数字孪生研究, 能够更好的挖掘并满足患者的健康需求, 为个性化医疗服务增质提效, 促进智慧医疗与健康领域的高质量发展. 因此, 本文主要聚焦于患者群体, 研究医疗数字孪生的技术框架, 展示了其在核心技术、应用场景及挑战方面的最新进展.

2 医疗数字孪生的研究现状

2.1 医疗数字孪生的国家政策

随着 AI、云计算、数字孪生等技术的发展, 智慧医疗已经成为全球医疗领域的重要趋势.

(1) 美国.

2024 年是美国远程医疗服务立法的关键年, 美国政府将远程医疗纳入法律框架中, 不仅提高了医疗服务的可及性, 还有效降低了诊疗成本, 减

轻患者经济负担, 同时也优化了医疗资源配置, 改善患者就医体验.

(2) 英国.

英国将移动医疗作为智慧医疗产业的发展方向, 2023 年在雷丁大学召开了 Berkshire 地区医疗研究合作会议, 展示各研究机构在医疗领域最前沿的创新成果, 巩固学术界和工业界的密切合作, 为英国移动医疗的持续发展注入强大动力, 推动智慧医疗产业稳步向前.

(3) 日本.

日本政府于 2018 年提出联合产业界、大学及研究机构, 打造“人工智能医院”, 2022 年建成 10 家导入“AI 医疗”系统的示范医院, 累计在智慧医疗领域投入超过 100 亿日元(约 6 亿元人民币). 大规模的投入与实践探索, 促使日本在智慧医疗的 AI 应用方面取得良好成效, 为患者提供更精准、高效的医疗服务.

(4) 中国.

中国在二十大中提出促进数字经济和实体经济深度融合, 打造具有国际竞争力的数字产业集群, 为国内医疗行业从提供医疗保障到提供数字化普惠服务提供重大转型机遇. 近年来, 中国出台了科技赋能智慧医疗的相关指导性政策, 为数字孪生技术赋能智慧医疗奠定了坚实的基础, 具体的政策内容如表 1 所示. 中国对于数字孪生技术赋能智慧医疗与健康领域在政策上呈现逐步深化与细化趋势. 此外, 中国还强调了数字孪生技术在医疗健康领域的标准化体系建设和规范化发展.

2.2 医疗数字孪生的文献综述

为了探索数字孪生在医疗健康领域的研究前景, 本文在 IEEE、Elsevier 和 Springer 三个数据库中, 使用“Digital Twin”和“Healthcare”两个关键词进行了文献检索, 对 2020~2024 年这五年的相关文章发表数量进行统计, 其结果如图 1 所示. 这三个数据库的检索结果共同揭示了数字孪生技术在医疗健康领域的文献研究逐年递增趋势. 由此可见, 随着全球健康意识的提高和医疗技术的不断发展, 研究人员和专家学者已经认识到数字孪生在改变医疗保健服务、患者护理和医学研究等方面的潜力, 他们对在医疗健康相关领域探索和使用数字孪生技术的重视程度日益增加.

此外, 本文还探究了数字孪生领域中医疗健康研究的占比情况, 以进一步分析该领域的发展趋势. 本文在 IEEE、Elsevier 和 Springer 三个数据库中使用“Digital Twin”作为关键词, 进行文献检

表1 中国数字孪生赋能智慧医疗与健康政策表

Table 1 Policies on digital twin empowering smart healthcare in China

Time	Organization	Policies	Relevant content
2023.02	State Council of the People's Republic of China	"Overall Layout Plan for Building a Digital China"	Promote universal access to digital public services, vigorously implement the national strategy for digitalization of education, improve the national smart education platform, develop digital health, and regulate the development of online consultations and internet hospitals.
2022.12	National Development and Reform Commission	"Implementation Plan for Expanding Domestic Demand during the 14th Five-Year Plan Period"	Carry out pilot projects on digitization in key areas, such as intelligent transportation, smart logistics, smart energy, smart healthcare, and smart healthcare and elderly care, and vigorously develop the third-party big data service industry.
2022.03	State Council of the People's Republic of China	"Notice on Printing and Distributing the 14th Five-Year Plan for the Development of Traditional Chinese Medicine"	Promote the construction of smart traditional Chinese medicine hospitals featuring smart healthcare, smart services, and smart management as a trinity.
2021.12	National Development and Reform Commission	"14th Five-Year Plan for Public Services"	Actively develop smart healthcare, encourage medical institutions to enhance informatization and intelligence levels, and support the development and application of medical health big data resources.
2021.09	National Health Commission of the People's Republic of China, National Administration of Traditional Chinese Medicine	"Action Plan for Promoting High-Quality Development of Public Hospitals (2021–2025)"	The country will build smart hospitals featuring smart healthcare, smart services, and smart management as a trinity. By 2025, a number of smart hospitals that play a leading and demonstrative role will be established, an integrated online and offline medical service model will be formed, and the regional balance of medical services will be further enhanced.

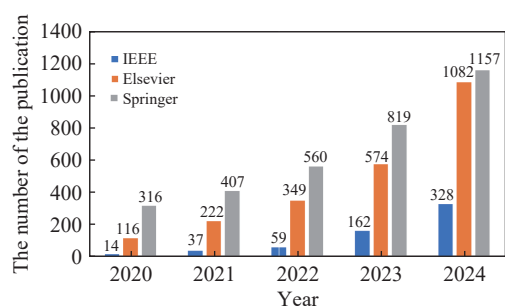


图1 数字孪生在医疗健康领域发表文章数量统计结果

Fig.1 Statistical results for the numbers of publications on digital twins in healthcare

索, 随后计算了每年数字孪生技术在医疗健康领域发表文章数量占该年数字孪生研究文章的比例. 数字孪生 (Digital twin, DT) 和医疗数字孪生 (Medial digital twin, MDT) 发表文章数量如表2所示, 这五年来, 医疗数字孪生领域文章数量在数字孪生发表文章数量占比的逐年增长, 且在2023年和2024年的占比增长更加快速. 这一趋势不仅反映了计算机科学与医疗科学之间跨学科合作的不断加强, 也预示着数字孪生技术在医疗健康等领域的应用与创新将步入一个全新的发展阶段.

表2 数字孪生与医疗数字孪生出版物数量研究表

Table 2 Statistics on the numbers of publications on digital twins and medical digital twins

Year	IEEE			Elsevier			Springer		
	DT	HDT	Percentage/%	DT	HDT	Percentage/%	DT	HDT	Percentage/%
2020	634	14	2.21	902	116	12.86	2277	316	13.88
2021	1209	37	3.06	1587	222	13.99	2932	407	13.88
2022	2292	59	2.57	2672	349	13.06	3811	560	14.69
2023	3146	162	5.51	3671	574	15.64	4753	819	17.23
2024	5040	328	6.51	5889	1082	18.37	5605	1157	20.64

2.3 医疗数字孪生国际组织

医疗数字孪生技术逐渐成为推动医疗领域创新和进步的重要力量. 近年来, 全球范围内的医学界、工业界, 以及学术界共同成立了一批医疗数字孪生组织, 进行医疗数字孪生技术的研发和应用,

推动医疗领域革新. 本文调研了 Swedish Digital Twin Center、Empa Research Center、MEDITWIN 和 DIGIPREDICT 等 6 个典型的医疗数字孪生组织, 并根据各组织的特点和研究方向对其进行分类, 将其分为个性化医疗类、疾病预测与预防类、临

床诊断类这三类, 结果如表 3 所示.

3 医疗数字孪生的关键技术

本文对物联网、5G、AI 等医疗数字孪生关键技术进行分析与研究, 各层面关键技术的相互作用和联系关系如图 2 所示.

其中, 物联网和 5G 技术共同组成了数字支撑技术, 支撑了物理世界与虚拟世界的连接^[6]. 物联网中的传感器、智能终端等设备实现了物理世界信息采集和状态感知的功能^[7]; 5G 传输技术保障了采集数据快速准确传输^[8]. AI、大数据与云计算技术共同构成了孪生体构建的核心, 基于这些技术, 数字孪生体实时分析所获取的信息, 对海量数据进行挖掘, 制定最优解决方案, 实现了实时分析与智能决策的功能. 其中, 云计算技术为大数据运算提供了算力和存储支持, 物联网终端传感器采集到的海量数据存储于云平台中. 机器学习、深度

学习等人工智能算法进一步增强了数字孪生体的数据处理能力和系统优化水平^[9]. 此外, VR 与 AR 技术作为人机交互技术的关键组成部分, 在数字孪生体的应用层面发挥着重要作用. 它们通过创建直观的可视化交互界面, 为医生等用户提供即时的反馈与决策支持, 使医生能够根据现实世界的动态变化, 对虚拟世界中的数字孪生体进行持续的监督与优化.

3.1 数字支撑技术

数字支撑技术指的是物联网等感知采集技术和 5G/6G 等传输通信技术. 基于感知采集技术, 借助传感器、可穿戴设备等智能设备, 实时、准确地捕捉患者生理参数、医疗设备状态等关键信息. 基于传输通信技术, 采用 5G、Wi-Fi 6 等高速通信技术, 结合网络切片、边缘计算等技术, 保障数据的即时传输与共享. 通过网络切片技术, 为医疗数据传输划分专用的网络资源, 确保数据传输的低时

表 3 国际医疗数字孪生组织表

Table 3 International medical digital twin organizations

Category	Organization name	Alliance members	Research content	Research objectives
Personalized Medicine	Swedish Digital Twin Center	Swedish medical, industrial, and scientific research communities	Framework based on single-cell RNA sequencing	Achieving personalized therapeutic biomarkers, new drug candidates, and time-dependent personalized drug combination prescriptions.
	Empa Research Center	Swedish and international medical and industrial communities	Digital twin system for opioids and transdermal drug delivery	Optimizing drug dosages for chronic pain patients and improving treatment outcomes.
Disease Prediction & Prevention	DIGIPREDICT	Research and medical institutions from Germany, the Netherlands, and Belgium	Digital twin predictions for cardiovascular diseases, infectious diseases, and COVID-19	Preventing the progression of infectious and cardiovascular diseases through early intervention and improving patient survival rates.
	Human Digital Twin One Planet Research Center	Interuniversity Microelectronics Centre, Wageningen University & Research, Radboud University and Radboud University Medical Center	Identification of gut microbiota, nutrition, behavior, and lifestyle-related diseases	Optimizing diet and lifestyle, preventing diseases, and enhancing human health levels.
Clinical Diagnosis	MEDITWIN	Seven top-level universities, research centers, hospitals, and three SMEs in Europe	Developing new medical practice in neurology, cardiology, and oncology	Providing personalized virtual twins for organs, metabolism, and cancer.
	MAI Medical Augmented Intelligence Digital Twin	Medical institutions from the United States and China	Converting 2D medical images into 3D virtual images	Providing education to enhance the medical knowledge level of patients and doctors and to assist in clinical decision-making.

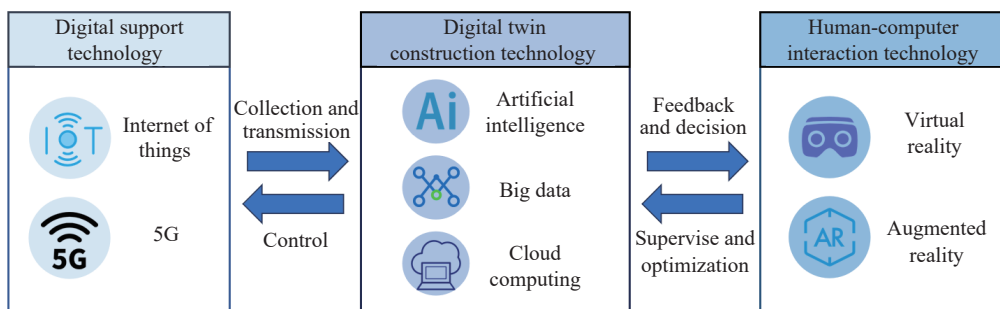


图 2 医疗数字孪生关键技术图

Fig.2 Key technology diagram of medical digital twins

延和高可靠性; 利用边缘计算技术, 在靠近数据源的网络边缘进行数据处理和分析, 减少数据传输量, 提高数据处理效率^[10]。

物联网技术使得任何电子设备都可以通过无线通信连接到互联网, 它连接了物理实体与数字世界, 实现了物理实体的数字化过程中对物理世界的工作动态和对相关数据的感知。在医疗健康领域, 物联网技术通过部署各类传感器和执行器, 实时、准确地捕捉患者的生理参数和医疗设备状态等关键信息。传感器可以分为两类, 其一是光敏传感器、温湿度传感器等传感器, 用以测量位置、温度、光线等环境数据^[11]; 其二是智能手机等智能传感器, 例如 GPS、加速度计、相机、麦克风, 用于测量患者的身体与生理数据^[12]。此外, 社交网络也可以作为传感器, 反应现实世界人类的社交关系网络, 用以分析患者的状态和行为^[1]。当前消费级可穿戴设备可以实现实时提供连续指标(包括心率、睡眠持续时间和身体活动水平等数据)的功能。Apple Watch 和 Fitbit Sense 等设备还可以捕获呼吸频率、心率变异性、皮肤温度、血氧饱和度数据和心电图监测^[13]。通过这些智能传感器识别, 可持续监测患者的心率、血压、血糖等生理指标, 并将这些数据实时传输至云端, 为医生提供全面的患者健康数据支持。此外, 由于不同厂家生产的传感器、医疗设备所采集的数据格式、协议各不相同, 医疗数字孪生也面临着数据异构问题。为解决这一问题, 可采用数据标准化和中间件技术。通过建立统一的数据标准, 如医疗信息交换标准、数字成像和通信标准等, 规范数据的格式和接口, 使不同来源的数据能够相互兼容。通过中间件技术在不同设备和系统之间搭建桥梁, 实现数据的转换和交互^[10]。

5G 数据传输技术为数字孪生技术在医疗健康领域的应用提供了通信保障。5G 技术以其高速度、低时延、大连接的特性, 实现了医疗数据的即时传输与共享^[14]。5G 技术将物联网设备采集的实时数据传输至云端进行存储和分析。然而, 在实际应用中, 5G 技术可能受到网络覆盖、信号干扰等因素的影响。因此, 可进一步优化 5G 网络的部署和管理, 提高网络的稳定性和可靠性。例如, 采用分布式基站、智能天线等技术, 增强信号覆盖和抗干扰能力。此外, 5G 数据传输面临着更高的安全风险, 如中间人攻击、数据篡改等, 可采用区块链技术, 确保数据传输的安全性和完整性^[15]。

通过物联网、5G 等数字支撑技术, 实现了医

疗数据的广泛采集与实时传输功能, 通过捕捉患者的生理参数、医疗设备状态以及环境信息等多模态、多来源数据, 为医疗数字孪生体的建模提供了更丰富、准确的数据基础, 有助于构建更加精准的数字孪生体模型, 推动医疗服务向更加个性化、高效的方向发展。

3.2 数字孪生体技术

数字孪生体模型构建包括几何模型、仿真模型、数据模型和业务模型四类, 反映了实体对象的物理结构与生物行为特征。孪生体构建技术指的是 AI、大数据、云计算等模拟仿真技术, 通过这些技术完成对数字孪生体模型的构建, 通过数字孪生模型挖掘和分析患者医疗数据, 揭示患者的健康风险、疾病发展趋势等信息。

AI 技术是医疗数字孪生的核心技术之一, 主要用于数据处理和分析决策。医疗数据往往存在噪声、缺失值等问题, 从而影响算法的准确性和可靠性。AI 技术不仅能够采用数据清洗算法去除噪声数据, 利用数据增强技术扩充数据量, 提高模型的泛化能力, 还能模拟人体各器官、系统之间的相互作用和关联关系, 帮助医生分析与理解数字孪生模型决策过程^[16]。例如, Wan 等^[17]回顾了半监督支持向量机(SVM)在脑图像融合数字孪生中的特征检测、诊断和预测性能, 并提出了一种处理脑图像中大量未标记的数据的半监督 SVM 方法。韩国天主教大学医学院利用机器学习方法分析了 3 家医院的前列腺癌患者的临床数据库, 采用信息增益法进行特征选择, 利用随机森林方法建立医疗数字孪生模型, 预测前列腺癌的生化复发概率^[18]。Hussain 等^[19]采用 SVM, 结合卒中患者的临床数据构建数字孪生模型, 预测脑卒中的心电图生物标志物及其阈值测量值, 作为疾病诊断和治疗的临床辅助系统。Chakshu 和 Nithiarasu^[20]采用多层感知器和递归神经网络构建分诊肺炎患者系统的数字孪生体, 对患者是否收入重症监护室、是否使用呼吸机和是否停止重症监护和呼吸机这 3 种状态进行识别、判断、分类及预测。

云计算技术通过虚拟化、弹性计算等技术, 为数字孪生体的构建提供强大的计算能力和存储资源。例如, 利用亚马逊弹性计算云和简单存储服务, 实现对医疗数据的弹性存储和计算。通过云计算平台, 实现对海量医疗数据的快速处理和分析, 同时保证数据的安全性和可靠性。云计算的弹性扩展能力也使得数字孪生体能够随着医疗数据的不断增长而持续优化和升级^[21]。

大数据技术通过分布式存储、并行计算等技术,实现对海量医疗数据的高效管理和分析.例如,采用 Hadoop 分布式文件系统和 MapReduce 计算框架,对大规模医疗数据进行存储和处理,揭示出患者的健康风险、疾病发展趋势等关键信息,为数字孪生体的建模提供更为准确和全面的数据支持^[22].此外,为进一步解决为解决医疗数字孪生的数据安全和隐私保护问题,可采用同态加密、差分隐私等技术,在保证数据可用性的前提下,保护数据的隐私安全.例如,采用同态加密技术,对数据进行加密处理后再进行大数据计算,确保数据在计算过程中的安全性;利用差分隐私技术,在数据发布时添加噪声,使攻击者难以从数据中推断出患者的个人信息^[23].

通过 AI、大数据、云计算等孪生体构建技术,不仅提高了数字孪生体的建模精度和实时性,还为数字孪生体提供了数据挖掘和分析能力,有助于医生制定更为精准、个性化的诊疗方案,为患者带来了更加便捷、高效的医疗服务体验,推动了医疗健康领域的智能化发展.

3.3 人机交互技术

人机交互技术指的是通过 VR、AR 等可视化技术,建立物理空间的患者实体与数字空间的孪生体的联系,通过数字孪生体为医生诊断患者、制定治疗方案提供反馈,通过物理实体的监督与评价提供孪生体的持续优化方向.

VR 技术以其沉浸式的体验,在医生诊断患者、技能培训等方面起到重要作用.例如,VR 不仅被用于训练自闭症儿童,帮助他们获得社交和生活技能,还被引入认知行为疗法,帮助患者治疗慢性疼痛、焦虑甚至精神分裂症等病症.再如,基于 VR 的精神病疗法通过给患者提供一个安全无威胁的环境,通过构建医生的数字孪生体虚拟形象,在无真人环境下为其缓解恐惧情绪,治疗精神病症.基于 VR 技术的数字孪生临床决策支持系统支持智能系统和医生之间进行交互式通信,当患者开始偏离基线或风险分类发生变化时,医生可以收到智能警报,警报为医生提供风险变化的基本原理,并提供降低风险特征的建议^[12].此外,VR 耳机已被用于医生培训中,为其提供与虚拟世界高仿真人体数字孪生体的接触与交互渠道,加深他们对人体工作原理的了解.智能手机有着便携性和易访问性等特点,使得基于数字孪生技术的移动健康应用程序被认为是促进健康生活方式和改变行为的最佳方式^[24].

近年来,AR 技术在医疗数字孪生中的应用也持续增长.例如,通过使用美国 AccuVein 公司的 AR 医疗器械,医生可以获取到实时的患者信息,如血流热信号等,从而在注射等操作中更加精准地定位静脉,提高治疗效率.微软公司的全息透镜系统被用于外科手术室,该系统使外科医生能够在手术过程中接收到关于所见物体的实时信息,并与其他专业人员或学生分享视角,极大地提升了手术的精准度与安全性^[20].

通过 VR、AR 等人机交互技术,实现了患者实体与数字孪生体之间的反馈决策与监督优化.通过数字孪生体的反馈,医生可以为患者制定出个性化的治疗方案,并通过物理实体的监督与评价,不断优化孪生体的性能,为患者带来更加精准、高效的医疗服务.

4 医疗数字孪生的应用

数字孪生在智慧医疗与健康的领域应用广泛,通过运用人工智能、大数据等技术赋能医疗数据可视化,覆盖了诊前、诊中、诊后患者就医的全流程,并深入药物开发与试验环节,提高医疗机构服务效率和临床诊疗质量.基于数字孪生在智慧医疗领域的应用的时间顺序和对象差异,本文将其应用分为 5 个类别,如图 3 所示,具体包括疾病预测、临床诊治、术后康复、运动训练和医药试验.

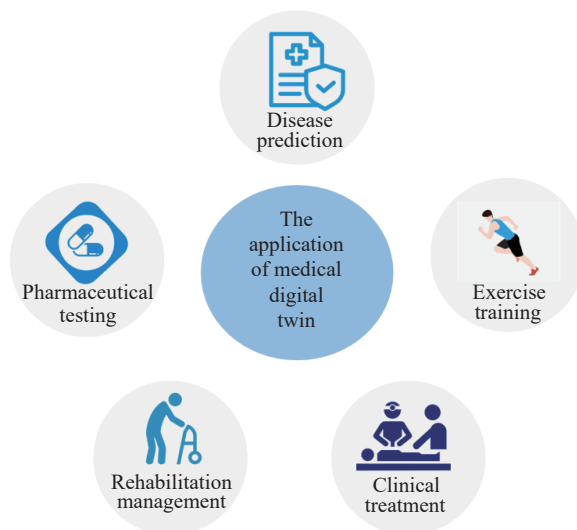


图 3 医疗数字孪生的五大应用

Fig.3 Five major applications of medical digital twins

4.1 疾病预测

在疾病预测领域,基于多时空尺度、多维数据,为患者构建患者数字孪生体,实时采集患者生活方式、环境、身体状态等数据,对比与分析患者

日常状态,持续调整和优化数字孪生体,分析患者生理机能情况,提升医疗团队监测患者疾病的动态发展的能力,对疾病,特别是肿瘤与癌症的预后管理以及慢性疾病进行长期跟踪管理与反馈,从而提高预测疾病进展的准确率,为后续患者制定个性化的治疗方案提供科学依据。

Mourtzis等^[25]提出了一种专门用于分析磁共振成像扫描的数字孪生,基于复杂的生物特征数据对患者状况进行实时监测,预测肿瘤的动态进展。Barbiero等^[26]提出了一个结合数学建模与人工智能的数字孪生框架,为全面分析患者当前生理病理状态提供了可靠的依据,并基于该框架展示了如何使用生成式对抗网络(Generative adversarial networks, GAN)生成血液和肺的多组织表达数据,探究了受肾素-血管紧张素通路中基因表达条件的细胞因子之间的关联。此外,Thiong'o和Rutka^[27]提出利用数字孪生识别儿童癌症神经系统并发症的预测因子,为该病症的预测与诊治提供有效的研究思路。Kim等^[18]通过基于机器学习的数字孪生技术,对前列腺癌的生化复发预后标志物进行预测,准确率高达96.25%。Lin等^[28]基于马尔科夫模型构建结肠癌随机对照试验的数字孪生,通过计算粪便免疫化学测试筛查的过度诊断比例,得出了结肠癌免疫化学测试服务筛查危害可忽略不计的结论。在老年慢病管理方面,张捷等^[29]结合视觉传感器、人工智能和深度学习等技术,设计了基于数字孪生的老年人实时监测报警系统,通过实时监控与预测,有效缓解了老年人跌倒受伤。

4.2 临床治疗

手术作为一个高度复杂且具有风险的过程,存在许多可能导致患者遭受不良乃至致命后果的易差错环节。数字孪生技术的发展,为手术预案的优化与风险降低提供了有力支持。术前利用数字孪生体,在虚拟环境中模拟仿真手术过程,既拓展了手术视野,使医生能够全方位、精细地洞察病灶位置,还可以多角度、多模块验证手术方案可行性,警示潜在手术风险,有效缩减了手术过程中医生的决策时间,降低了手术的整体风险系数。

数字孪生体已被应用于经导管主动脉瓣置换术外科手术^[30]等复杂的肝脏、骨科等手术中,帮助医生术前预测医疗植入物的排斥反应,并根据患者个体化特征选择最佳稳定方法和最佳术后治疗。Ahmadian等^[31]提出的基于生成对抗网络(GAN)的小梁骨数字孪生体模型,在模拟椎体成形术及其对椎骨骨折响应的影响方面发挥了重要

作用。Walsh等^[32]提出中将数字孪生技术应用于多发性硬化症患者管理,使用玻尔兹曼机模型计算临床试验中受试者的表征与其疾病进展之间的协变量关系,生成预测该受试者就诊期间潜在临床诊治结果轨迹,进而优化诊断流程、治疗方案、管理策略。Barbiero等^[26]使用GAN合成临床数据,补充图神经网络(Graph neural networks, GNN)构建的人体基因-细胞-组织-器官多层次映射模型,从而构建患者的个性化数字孪生体,实现了对患者临床结果的预测。Aubert等^[33]提出了一种基于数字孪生技术的个性化骨折模型构建方法,通过整合骨骼碎片、材料特性和患者特定负荷条件,有效量化了骨骼愈合各阶段生理机能的变化。Hagmann等^[34]为微创机器人手术提出了一种创新的训练方法,该方法利用数字孪生技术提供背景信息,加速了初级外科医生对机器人系统的掌握,借助触觉辅助不仅提升了外科医生的临床能力,还降低了执行此类手术所需的专业技能门槛和认知负担。

4.3 术后康复

基于数字孪生技术的术后康复通过采集患者的康复训练数据、基本信息和医疗信息,利用这些数据构建数字孪生体,通过传感器和实时反馈系统监测患者康复进展,将患者的数字孪生体与预测的恢复轨迹进行比较。一旦患者出现与预期康复轨迹存在差异或者身体机能状态下降的现象,系统会立即反馈给医生,以便医生及时采取干预措施,为患者提供个性化的康复指导,使患者尽快恢复到术前基线。

Low^[35]设计的数字孪生模型,通过基于传感器的个性化物理治疗计划,帮助患者管理术后和慢性疼痛康复。该模型能够识别患者先前的行为模式,据此制定与既有日常活动、天气变化及疼痛程度相匹配且兼容的活动规划。Brennan等^[36]强调,患者日常康复过程的结果将被实时反馈到数字孪生模型中,任何生理机能的下滑均可能被视为实际康复效果与预期数字孪生模型恢复轨迹的偏差,提示医护人员及时实施适应性干预。范春和徐一涵^[37]基于数字孪生技术设计了一个防血栓康复训练系统。该系统一方面通过康复训练踏板装置采集患者的踏板深度、时长及次数等康复训练数据,另一方面通过患者的电子病历系统收集其基本信息、医疗记录及血栓相关指标,以此为基础构建患者的防血栓康复训练数字孪生体,实现对个体康复训练过程的全方位监测与精准干预。Aleksyev等^[38]设计了一种评估患者步行技能恢

复情况的数字孪生系统. 该系统依据步行技术的时序特征评估结果, 对患者康复趋势进行追踪, 以在康复期间改善患者的运动技能. Chen 等^[39]提出了一个康复期间自动实施患者评估与任务规划的方法, 设计了一个捕捉患者的运动控制过程的运动控制模型, 生成并实时更新患者数字孪生模型, 通过数字孪生模型了解患者的适应水平及康复进度, 以个性化指定患者康复任务. 该方法不仅有效降低了患者康复评估的不确定性和模糊性, 还提升了患者在康复过程中的适应能力.

4.4 运动训练

在体育医学领域, 训练环境、运动计划、日常饮食等运动相关数据, 和运动员的各项生理数据一起被用于构建数字孪生模型, 将人体相关信息数字化, 高保真度模拟人体结构, 在数字环境中持续监控和预测运动员身体状态和运动机能变化趋势, 以降低运动员过度训练风险, 为调整训练强度和优化训练计划提供了科学依据.

Díaz 等^[40]设计了一个名为 DTCoach 的数字孪生应用程序, 该程序是一个以用户为中心的智能教练, 是用户在锻炼过程中的健康管理指导者, 根据表征用户能力与状态的测量结果, 指导用户调整锻炼姿势. Barricelli 等^[41]建立了用于运动员的身体状况的 SmartFit 框架. 通过连续数天观察和采集运动员的行为信息, 构建运动员数字孪生模型, 进而分析他们的身体状态, 评估他们的运动和饮食计划是否最优. Cheng 等^[42]提出将神经反馈技术与数字孪生技术相结合, 通过脑电图神经反馈采集运动员心理状态信息, 与数字孪生收集的体能训练数据形成互补. 该方法将身体表现指标与认知训练相结合, 显著的提升了运动员的运动能力. Fister 等^[43]探讨了使用数字孪生技术揭示训练数据中复杂模式和相关性的方法. 例如, 通过分析网络结构和关联规则, 识别促进运动员最佳表现提升的特定训练条件或练习组合. 该方法为教练提供无法通过传统方式观察到的细微影响因素, 有助于教练更深入地了解运动员的运动生涯发展情况. 此外, Eriksson 等^[44]提出在数字孪生中使用遗传算法和随机树算法, 为游泳运动员生成个性化的每周训练计划. 该方法不仅匹配专业教练的训练风格, 而且适应个体游泳运动员的具体需求和进步, 确保每个运动员都能接受个性化和有效的训练计划. 同样, Feely 等^[45]为马拉松运动员开发的基于案例的推理系统, 根据运动员的训练历史和相似跑步者的经验, 为运动员提供个性化的训

练建议.

4.5 医药试验

2022 年福布斯双周刊提出了医疗健康领域的五大技术趋势, 其中包含了“数字孪生取代动物实验”. 在虚拟的人类数字孪生体上进行医药试验, 在受试者的分子、细胞层面模拟药物测试和临床试验, 在网络空间中用数千种药物数据来计算处理这些数字孪生体, 解决了传统医药试验存在成本高、耗时长等问题, 降低了昂贵的人体或动物试验成本, 大幅度缩短了药物研发周期. 目前, 基于数字孪生技术研发与试验的许多药物已进入市场, 为患者治疗各种疾病, 其中包括人类免疫缺陷病毒(HIV)-1 的抑制药物(阿扎那韦、沙奎那韦、茚地那韦和利托那韦)、抗癌药(雷曲塞)和抗生素(诺氟沙星)等^[46].

Subramanian^[47]提出通过整合来自医学理论和临床的知识, 在数字孪生体中构建复杂和动态的生物网络, 用于药物发现和研究、生物标志物鉴定、测试开发、筛选和临床试验优化. Atos 和西门子与 GSK 等制药公司合作, 基于制药实验室流程的设计了数字孪生模型, 优化药物制造流程^[48]. 日本跨国制药公司 Takeda Pharmaceuticals 基于数字孪生技术模拟药物研发过程中的各种潜在的生化反应, 以缩短药物开发周期^[21]. 此外, 各国家与组织通过解析和重构患者疾病机制相关的所有分子、表型和环境因素, 来探索人体不同器官出现疾病的原因, 并进行针对性治疗试验. 美国食品药品监督管理局和达索系统于 2014 年启动了“SIMULIA Living Heart”项目, 该项目旨在创建一个开源的人类心脏的“数字孪生”, 评估仿真心脏模型在测试医疗设备上的使用情况, 提高诊疗效果, 是第一项专门使用数字孪生技术来观察身体与药物相互作用的研究^[49]. 欧盟 2013 年启动的“神经孪生”项目, 通过模拟人类大脑电场的相互作用, 对完整的人脑进行模拟仿真, 以改善癫痫和帕金森病的治疗措施^[50].

5 数字孪生赋能智慧医疗的挑战与对策

5.1 数据异质

数字孪生涉及与人类多模态、多来源信息的存储和分析, 如社会属性、物理行为、生理信号等^[51]. 这些信息不仅以多样化的形式呈现, 如图像、文本、音频等, 还广泛分散存储在 Windows、Unix、Linux 等多种操作系统中. 这种形式多样且分散存储的方式极易产生数据异质, 导致数据整合困难,

形成“信息孤岛”,限制数据的有效利用,降低医疗数字孪生系统的可维护性与可移植性。

基于本体技术构建的数字孪生本体模型,为人体信息数据提供统一范式,使得不同来源、不同形式的数据能够在统一的框架下进行描述和整合,有望成为解决数据异质性的有效方案^[52]。Steinmetz等^[53]使用本体技术在信息物理系统中构建数字孪生模型,初步验证了本体可以有效地整合多个数据源,检验了本体技术是解决数据异质问题的有效途径。Singh等^[54]探讨了数据多样性、数据挖掘和动态分析等数据管理过程面临的挑战,提出了一个数字孪生本体模型,对数据进行了有效的组织和整合,解决了数据多样性、数据挖掘和动态分析等数据管理过程中面临的挑战。

5.2 经验主义

数据经验主义指在决策过程过分依赖数据分析和数字模型,忽视其他信息价值的认知倾向,而大数据新经验主义更是认为,基本定律是不存在的,也不需要什么理论,而是用相关性代替因果性^[55]。这正是医疗数字孪生领域面临的困境,患者、甚至医护人员缺乏对于医疗数字孪生系统决策所使用的算法黑箱运作具体原理的了解,这加深了患者对医疗数字孪生系统生成的辅助诊断、医疗决策等的担忧。此外,当临床医疗实践意外发生,这种未知性将会对患者的生命安全造成严重影响^[56]。

为缓解医患群体对医疗数字孪生系统的担忧问题,提高他们对系统决策的信任度,可以从提升系统决策的准确性和可视化决策黑盒两方面入手。其一为通过整合国内外权威医学文献、临床指南及专家经验,建立完整、系统的医疗知识图谱和知识体系,为数字孪生系统的决策提供丰富的先验医疗知识背景,提高决策的准确性和可信度。其二为通过基于大数据分析的循证医学支持机制,挖掘医疗数据之间的关联性,并进一步验证其因果性,强化对循证医学、知识推理等黑盒难题的可视化表达,实现从分析数据的相关性到验证其因果性^[36]。

5.3 安全隐私

医疗数字孪生模型的构建,需要采集、存储和整合大量与患者相关的历史数据和实时数据,其中涉及患者的基本信息、既往病史、诊疗记录、检查结果等敏感信息。一旦这些数据被盗用或滥用,这将严重侵害患者的个人隐私,同时对医疗服务提供者带来极大的企业信誉问题与法律责任风险^[57]。

强化医疗数字孪生在数据方面的安全与验

证,保证数字孪生技术赋能智慧医疗与健康产业的可持续发展,可以通过隐私计算、联邦学习、区块链等技术创新医疗数据的使用模式来实现。例如,区块链技术具有去中心化和不可篡改的特性,广泛应用于数字孪生医疗领域,并取得了显著成效。Dong等^[58]提出了一种双区块链框架,提高数字孪生的数据可信度,该框架包括用于控制操作安全的授权区块链和保障数据内容安全的数据区块链。此外,基于联邦学习的方法不仅保护了患者隐私,还促进了医疗资源的优化配置。通过联邦学习技术,数据无需传输,模型训练在本地客户端进行,训练所得参数最终上传至中央服务器,从而降低数据泄露风险^[59]。欧洲的多家医院和研究机构通过联邦学习开发疾病预测模型,在不共享患者敏感数据的前提下,通过本地训练将模型参数更新反馈到中央服务器,实现提高疾病预测的准确性。

5.4 伦理道德

医疗数字孪生的伦理道德问题主要表现为医疗孪生体及其数据信息归属权问题。De Maeyer和Markopoulos^[60]针对当患者治疗(意外)终止后,应如何处理数字孪生模型以及相关数据信息,的问题向群众进行调研,大多数受访者表示,他们希望在去世后删除自己的数字孪生。然而,目前我国民法典尚未对数字孪生体的归属权问题进行明确规定,其他法律法规对该问题的表述也比较模糊。

医疗数字孪生领域的持续发展,依赖有类似健康问题的数字孪生体的数据分享与持续优化,因此,采用患者“一刀切式”决定其数字孪生体保留与否,并不是患者医疗孪生数据的伦理归属问题的最优解。医疗数字孪生伦理道德治理并非赋予单一主体的数据控制力,而是通过医院、患者和社会多方共同协商,设计出更复杂的组织机制,同时适时跟进相关法律法规,保障多元利益间的平衡^[55]。

5.5 数字鸿沟

医疗数字孪生需要关注数字鸿沟问题,其主要体现在“接入沟”、“使用沟”和“区域沟”三个方面。首先,“接入沟”为患者物质条件与设备经济成本限制,并非所有患者都能承担使用可穿戴设备监测生理病理数据的支出。其次,“使用沟”为患者对治疗方案的理解程度受限,这取决于患者自身的认知理解能力与医护人员的解释程度。最后,“区域沟”表现为不同地区数字孪生技术在诊断过程中参与程度的差异,区域沟在我国突出表现为东西部地区、城乡之间的发展不平衡问题^[56]。

解决医疗数字孪生的数字鸿沟问题需要社会各方共同协作。首先, 加大技术研发力度, 降低设备使用成本, 提高患者的设备可及性, 构建更广泛的数字孪生模型应用基础, 以解决“接入沟”问题。其次, 针对“使用沟”问题, 应该加强患者的数字素养教育, 提升其理解数字孪生技术的能力, 同时鼓励医护人员需通过更加通俗易懂方式为患者解释数字孪生决策生成的疾病诊治方案^[56]。最后, 解决“区域沟”问题, 需要政府加强宏观调控, 优化医疗资源配置, 推动区域间医疗服务的均衡发展, 以缓解东西部、城乡之间的差距。

6 结论

本文围绕数字孪生技术赋能智慧医疗与健康领域进行研究。首先, 从国家政策层面和学术层面对医疗数字孪生进行详细的调研与分析。通过调研国家政策, 本文发现中国政府正将数字孪生技术在医疗健康领域的应用进行逐步细化与标准化, 以应对人口老龄化、医疗资源不均等挑战。同时, 学术界也在不断探索医疗数字孪生的关键技术、应用场景及未来发展趋势, 为数字孪生技术在医疗健康领域的应用奠定坚实理论基础。其次, 本文从患者群体出发, 提出了一个包含数字支撑技术、数字孪生体技术和人机交互技术三个层面的医疗数字孪生综合技术框架, 明确了医疗数字孪生的核心技术要素, 并对其关键技术进行研究。第三, 本文详细论述了医疗数字孪生的五大主要应用, 包括疾病预测、临床治疗、术后康复、运动训练、医药试验, 通过调研医疗数字孪生在这些领域的应用, 展示了数字孪生技术在提高医疗服务效率和提供个性化医疗方面的潜力。最后, 本文探讨了医疗数字孪生在数据异构、经验主义、安全隐私、伦理道德以及数字鸿沟等方面面临的挑战, 并提出了相应的对策和建议, 以促进数字孪生技术在医疗健康领域的未来发展。

本文通过构建医疗数字孪生的技术框架、分析其主要应用以及挑战与对策, 为数字孪生技术赋能智慧医疗与健康领域提供了理论支持, 为推动医疗数字孪生的发展做出了积极的贡献。未来, 数字孪生技术将持续应用与医疗健康领域, 为构建更加高效、便捷和个性化的医疗服务体系贡献力量。与此同时, 医疗数字孪生也将面临一些技术限制, 需要从数据、基础设施等领域进行技术突破与创新。

从应用前景角度来看, 数字孪生技术有望深

度融入远程医疗体系, 实现偏远地区患者与医疗专家的实时、精准互动, 让优质医疗资源得以跨越地域限制, 真正做到医疗服务的公平可及。同时, 在疾病预防领域, 通过对大量人群的数字孪生模型进行长期监测和数据分析, 能够提前预测疾病的爆发趋势, 为公共卫生决策提供有力依据, 实现从疾病治疗到疾病预防的重大转变。

从技术突破角度来看, 在数据处理方面, 亟待研发更高效的数据融合算法, 以进一步解决数据异构问题, 实现多源医疗数据的实时对接与深度挖掘。在硬件设备上, 可以持续推动可穿戴设备和医疗传感器的小型化、智能化发展, 降低成本的同时提高数据采集的精度和全面性, 为数字孪生模型提供更丰富、准确的数据支持。同时, 未来需要加强对人工智能可解释性算法的研究, 让医疗数字孪生系统的决策过程更加透明、可信, 消除医患对算法黑箱的担忧。

参 考 文 献

- [1] Martinez-Velazquez R, Gamez R, El Saddik A. Cardio Twin: A Digital Twin of the human heart running on the edge // 2019 *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*. Istanbul, 2019: 1
- [2] Glaessgen E, Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles // 53rd *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Honolulu, 2012: 1818
- [3] Li T, Feng H X. International experience and reference from the development of digital health. *J Med Inform*, 2021, 42(5): 2
(李韬, 冯贺霞. 数字健康发展国际经验与借鉴. 医学信息杂志, 2021, 42(5): 2)
- [4] Liu D, He L, Yang D, et al. Advances in digital twins technology of human skeletal muscle. *J Biomed Eng*, 2023, 40(4): 784
(刘丹, 何玲, 杨砥, 等. 人体骨骼肌数字孪生体技术研究进展. 生物医学工程学杂志, 2023, 40(4): 784)
- [5] Lin Y J, Chen L M, Ali A, et al. Human digital twin: A survey. *J Cloud Comput*, 2024, 13(1): 131
- [6] Ning H S, Ye X Z, Bouras M A, et al. General cyberspace: Cyberspace and cyber-enabled spaces. *IEEE Internet Things J*, 2018, 5(3): 1843
- [7] Ning H S, Lin Y J, Wang W X, et al. Cyberology: Cyber-physical-social-thinking spaces-based discipline and interdiscipline hierarchy for metaverse (general cyberspace). *IEEE Internet Things J*, 2023, 10(5): 4420
- [8] Bouras M A, Farha F, Ning H S. Convergence of computing, communication, and caching in internet of things. *Intell Converged Netw*, 2020, 1(1): 18
- [9] Zhang Z M, Ning H S, Farha F, et al. Artificial intelligence in

- physiological characteristics recognition for Internet of Things authentication. *Digit Commun New*, 2024, 10(3): 740
- [10] Xu L, Li S, Ning H S. Concept, connotation, technology and development status of Web 3. 0. *Chin J Eng*, 2023, 45(5): 774 (徐蕾, 李莎, 宁焕生. Web 3. 0 概念、内涵、技术及发展现状. 工程科学学报, 2023, 45(5): 774)
- [11] Feng S B, Farha F, Li Q J, et al. Review on smart gas sensing technology. *Sensors*, 2019, 19(17): 3760
- [12] De Benedictis A, Mazzocca N, Somma A, et al. Digital twins in healthcare: An architectural proposal and its application in a social distancing case study. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2023, 27(10): 5143
- [13] Lonsdale H, Gray G M, Ahumada L M, et al. The perioperative human digital twin. *Anesth Analg*, 2022, 134(4): 885
- [14] Ma X H, Zhang Y Y, Zhang W M, et al. Research on the application of new generation information technology in medical and health industry. *Comput Knowl Technol*, 2024, 20(21): 132 (马晓红, 张圆圆, 张文谋, 等. 新一代信息技术在医疗健康产业中的应用研究. 电脑知识与技术, 2024, 20(21): 132)
- [15] Li W, Sun L, Wang J Q, et al. Key technologies to enable 5G and TSN coordination for industrial automation. *Chin J Eng*, 2022, 44(6): 1044 (李卫, 孙雷, 王健全, 等. 面向工业自动化的 5G 与 TSN 协同关键技术. 工程科学学报, 2022, 44(6): 1044)
- [16] Zhang T H, Fan S L, Guo X X, et al. Intelligent medical assistant diagnosis method based on data fusion. *Chin J Eng*, 2021, 43(9): 1197 (张桃红, 范素丽, 郭徐徐, 等. 基于数据融合的智能医疗辅助诊断方法. 工程科学学报, 2021, 43(9): 1197)
- [17] Wan Z B, Dong Y Q, Yu Z C, et al. Semi-supervised support vector machine for digital twins based brain image fusion. *Front Neurosci*, 2021, 15: 705323
- [18] Kim J K, Lee S J, Hong S H, et al. Machine-learning-based digital twin system for predicting the progression of prostate cancer. *Appl Sci*, 2022, 12(16): 8156
- [19] Hussain I, Hossain M A, Park S J. A healthcare digital twin for diagnosis of stroke // 2021 *IEEE International Conference on Biomedical Engineering, Computer and Information Technology for Health (BECITHCON)*. Dhaka, 2021: 18
- [20] Chakshu N K, Nithiarasu P. An AI based digital-twin for prioritising pneumonia patient treatment. *Proc Inst Mech Eng H*, 2022, 236(11): 1662
- [21] Katsoulakis E, Wang Q, Wu H, et al. Digital twins for health: a scoping review. *NPJ Digit Med*, 2024(7): 77
- [22] Chen Y F, Liu Q, Guan S, et al. The method and application of digital twinning in medicine. *Med J Peking Union Med Coll Hosp*, 2023, 14(6): 1155 (陈亚飞, 刘琼, 关双, 等. 医学数字孪生方法及其应用. 协和医学杂志, 2023, 14(6): 1155)
- [23] Chen P, Li Q, Zhang D Z, et al. A survey of multimodal machine learning. *Chin J Eng*, 2020, 42(5): 557 (陈鹏, 李擎, 张德政, 等. 多模态学习方法综述. 工程科学学报, 2020, 42(5): 557)
- [24] Poole E S. HCI and mobile health interventions: How human-computer interaction can contribute to successful mobile health interventions. *Transl Behav Med*, 2013, 3(4): 402
- [25] Mourtzis D, Angelopoulos J, Panopoulos N, et al. A smart IoT platform for oncology patient diagnosis based on AI: Towards the human digital twin. *Procedia CIRP*, 2021, 104: 1686
- [26] Barbiero P, Viñas Torné R, Lió P. Graph representation forecasting of patient's medical conditions: Toward a digital twin. *Front Genet*, 2021, 12: 652907
- [27] Thiong'o G M, Rutka J T. Digital twin technology: The future of predicting neurological complications of pediatric cancers and their treatment. *Front Oncol*, 2022, 11: 781499
- [28] Lin T Y, Chiu S Y, Liao L C, et al. Assessing overdiagnosis of fecal immunological test screening for colorectal cancer with a digital twin approach. *NPJ Digit Med*, 2023, 6(1): 24
- [29] Zhang J, Qian H, Zhou H Y. Application and research of digital twin technology in safety and health monitoring of the elderly in community. *Chin J Med Instrum*, 2019, 43(6): 410 (张捷, 钱虹, 周宏远. 数字孪生技术在社区老年人安全健康监测领域的应用探究. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(6): 410)
- [30] Obaid D R, Smith D, Gilbert M, et al. Computer simulated "Virtual TAVR" to guide TAVR in the presence of a previous Starr-Edwards mitral prosthesis. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(1): 38
- [31] Ahmadian H, Mageswaran P, Walter B A, et al. A digital twin for simulating the vertebroplasty procedure and its impact on mechanical stability of vertebra in cancer patients. *Int J Numer Meth Biomed Eng*, 2022, 38(6): e3600
- [32] Walsh J R, Smith A M, Pouliot Y, et al. Generating digital twins with multiple sclerosis using probabilistic neural networks[J/OL]. *arXiv preprint (2020-02-04) [2024-12-29]*. <https://arxiv.org/abs/2002.02779>
- [33] Aubert K, Germaneau A, Rochette M, et al. Development of digital twins to optimize trauma surgery and postoperative management. *A case study focusing on tibial plateau fracture*. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9: 722275
- [34] Haggmann K, Hellings-Kuß A, Klodmann J, et al. A digital twin approach for contextual assistance for surgeons during surgical robotics training. *Front Robot AI*, 2021, 8: 735566
- [35] Low C A. Harnessing consumer smartphone and wearable sensors for clinical cancer research. *NPJ Digit Med*, 2020, 3: 140
- [36] Brennan L, Kessie T, Caulfield B. Patient experiences of rehabilitation and the potential for an mHealth system with biofeedback after breast cancer surgery: Qualitative study. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2020, 8(7): e19721
- [37] Fan C, Xu Y H. Anti-thrombus rehabilitation training and clinical research application based on digital twinning. *Shanghai Informatization*, 2024(1): 38 (范春, 徐一涵. 基于数字孪生的防血栓康复训练与临床科研研

- 用. *上海信息化*, 2024(1): 38)
- [38] Alekseyev V V, Vizgirda A S, Nefedyev D I, et al. Measuring systems for monitoring the human state: Human digital twins based on a kinematic portrait. *J Phys: Conf Ser*, 2021, 1889(5): 052029
- [39] Chen Y L, Wang W T, Diao J Y, et al. Digital-twin-based patient evaluation during stroke rehabilitation // *Proceedings of the ACM/IEEE 14th International Conference on Cyber-Physical Systems (with CPS-IoT Week 2023)*. San Antonio, 2023: 22
- [40] Díaz R G, Laamarti F, El Saddik A. DTCoach: Your digital twin coach on the edge during COVID-19 and beyond. *IEEE Instrum Meas Mag*, 2021, 24(6): 22
- [41] Barricelli B R, Casiraghi E, Gliozzo J, et al. Human digital twin for fitness management. *IEEE Access*, 2020, 8: 26637
- [42] Cheng M Y, Yu C L, An X, et al. Evaluating EEG neurofeedback in sport psychology: A systematic review of RCT studies for insights into mechanisms and performance improvement. *Front Psychol*, 2024, 15: 1331997
- [43] Fister I, Galvez A, Osaba E, et al. Discovering dependencies among mined association rules with population-based metaheuristics // *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. Prague, 2019: 1668
- [44] Eriksson R, Nicander J, Johansson M, et al. Generating weekly training plans in the style of a professional swimming coach using genetic algorithms and random trees // *Proceedings of the 9th International Performance Analysis Workshop and Conference & 5th IACSS Conference*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 61
- [45] Feely C, Caulfield B, Lawlor A, et al. Modelling the training practices of recreational marathon runners to make personalised training recommendations // *Proceedings of the 31st ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*. Limassol, 2023: 183
- [46] Shaker B, Ahmad S, Lee J Y, et al. In silico methods and tools for drug discovery. *Comput Biol Med*, 2021, 137: 104851
- [47] Subramanian K. Digital twin for drug discovery and development—the virtual liver. *J Indian Inst Sci*, 2020, 100(4): 653
- [48] Erol T, Mendi A F, Doğan D. Digital transformation revolution with digital twin technology // *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. Istanbul, 2020: 1
- [49] Baillargeon B, Rebelo N, Fox D D, et al. The Living Heart Project: A robust and integrative simulator for human heart function. *Eur J Mech A/solids*, 2014, 48: 38
- [50] Yang J, Yao C F. Interpretation of the strategies of artificial intelligence countries: European brain project. *Telecommun Netw Technol*, 2017(2): 50
(杨婕, 姚财福. 人工智能各国战略解读: 欧盟人脑计划. *电信网络技术*, 2017(2): 50)
- [51] Connor A A, Gallinger S. Pancreatic cancer evolution and heterogeneity: Integrating omics and clinical data. *Nat Rev Cancer*, 2022, 22(3): 131
- [52] Radhi A M. Adaptive learning system of ontology using semantic web to mining data from distributed heterogeneous environment. *Iraqi J Sci*, 2022: 740
- [53] Steinmetz C, Rettberg A, Ribeiro F G C, et al. Internet of Things ontology for digital twin in cyber physical systems // *2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*. Salvador, 2018: 154
- [54] Singh S, Shehab E, Higgins N, et al. Data management for developing digital twin ontology model. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf*, 2021, 235(14): 2323
- [55] Li F. The risk and governance of health data in medical digital twin. *J Inf Secur Res*, 2024, 10(7): 682
(李飞. 医学数字孪生场景下健康数据的风险与治理. *信息安全研究*, 2024, 10(7): 682)
- [56] Diao H Y, Li S Q, Liu Y F. Ethical issues in model-based digital twin healthcare research. *Med Philos*, 2023, 44(13): 28
(刁宏宇, 李思琦, 刘玉峰. 基于模型的数字孪生医疗的伦理问题研究. *医学与哲学*, 2023, 44(13): 28)
- [57] Yao X X, Farha F, Li R Y, et al. Security and privacy issues of physical objects in the IoT: Challenges and opportunities. *Digit Commun Netw*, 2021, 7(3): 373
- [58] Dong W Y, Yang B, Wang K, et al. A dual blockchain framework to enhance data trustworthiness in digital twin network // *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. Beijing, 2021: 144
- [59] Qammar A, Karim A, Ning H S, et al. Securing federated learning with blockchain: A systematic literature review. *Artif Intell Rev*, 2022, 56(5): 3951
- [60] De Maeyer C, Markopoulos P. Are digital twins becoming our personal (predictive) advisors // *Human Aspects of IT for the Aged Population. Healthy and Active Aging (HCII 2020)*. Copenhagen, 2020: 250