

数字孪生技术在卫勤保障中的应用现状与展望

刘鸿飞¹,李晖凤²,严枫³,郑隽¹,黎蔚华²

(1.中国人民解放军南部战区总医院 门诊部,广东 广州 510010;

2.中国人民解放军南部战区总医院 护理部;3.中国人民解放军南部战区总医院 医学信息数据室)

现代战争中,有效的医疗救治是维持部队战斗力和保障作战任务完成的关键支撑^[1]。美国陆军未来指挥部(army futures command)2022 战略报告指出,未来多域作战将产生大规模伤员,可能使医疗能力不堪重负^[2]。数字孪生(digital twins)是现实世界中物理对象或过程的一种虚拟映射,利用传感器将物理实体进行数字化建模^[3],从而预测实体未来状态,并通过修改变量或实时数据优化模型的预测轨迹。凭借其经济高效等显著优势,数字孪生技术在容错率极低的军事领域备受关注^[4]。本研究旨在阐述该技术在军事卫勤保障中的应用现状,探讨其创新潜力,以期对未来军事医疗建设提供参考。

1 数字孪生技术的概述

1.1 数字孪生的发展 数字孪生思想源于1961年美国阿波罗计划,通过地空飞行器数据同步实现物理实体与虚拟模型的双向连接^[5-6],2002年,密歇根大学的 Michael Grieves 教授提出的“conceptual ideal for product lifecycle management(产品生命周期管理的概念模型)”^[7],被视为数字孪生概念的正式起源。该模型的核心是构建一个与物理实体相对应的虚拟数字模型,并通过数据链接维持二者全生命周期同步。2011年,digital twin 这一正式名称确立并被广泛接受。随着计算能力与大数据技术的发展,其应用领域不断拓展,凭借着精准预测、个性化治疗、优质资源分配法以及强大的计算能力,数字孪生技术在医疗领域广泛应用并不断发展^[8]。

1.2 数字孪生技术的优势与局限性 数字孪生技术具有集约高效、精准预测与高保真度3大优势。在成本效益方面,该技术通过模拟测试能显著缩短产品开发周期^[9]。Rahmim 等^[10]研究表明,数字孪生技术可解决约80%临床试验因患者入组困难导致的延误。在预测能力上,通过构建虚拟患者模型可预测治疗方案的效果与风险,促进医疗的整体安全性^[11]。在军事应用中,数字孪生技术仅需70%的预算即可在开发早期构建高保真仿真系统,大幅提

升系统可靠性^[12]。然而,数字孪生技术的深度应用仍面临系统性挑战^[13],具体包括模型构建缺乏深度整合、数据获取受限于传感器精度、网络传输的实时性与安全性、数据存储与分发机制的高要求,共同制约了数字孪生的规模化推广。

2 数字孪生的关键要素与框架体系

数字孪生通过实时数据驱动,在虚拟空间建立物理实体的动态镜像,并实现两者全生命周期内的双向交互与闭环优化^[13],其包含3个关键要素^[14]:一是物理实体,是指客观存在的对象,是反馈数据的动态来源^[15];二是数字孪生体,指采用人工智能算法、计算机图形学等技术构建的多维度虚拟模型,并能随物理实体状态实时调整^[16];三是数据处理,负责数据的采集、传输与反馈,实现对物理实体的实时监测和预测^[17]。为使数字孪生在军事领域的应用更具系统性,Li 等^[18]提出数字孪生在军事领域的应用框架自上而下可分为实体层、传输层、数据层、服务层与应用层。结合卫勤保障特点,可构建现有体系:实体层涵盖伤员、医护、设备等物理实体及其对应的虚拟孪生模型;传输层融合无线传感器网络、军事数据链等多种网络,按数据重要性与密级传输数据;数据层集成伤情、生理参数、护理记录等多源异构数据支撑系统运行;服务层提供模型构建、决策辅助、数据管理等核心服务;应用层则通过组合各类服务,构建伤亡分诊、护理方案规划、训练模拟等业务系统,满足战场决策与保障需求。

3 数字孪生技术在卫勤保障中的应用

3.1 战场伤亡感知与医疗分配 Pamplin 等^[4]于2024年提出伤亡数字孪生模型(casualty digital twins,CDTs),是一种针对伤员和治疗系统的数字孪生模型。该模型通过对关键信息如环境、损伤、资源及任务等信息综合分析,动态预测伤员对血液、手术、药物及后送等需求,并与可用资源相匹配。该模型功能主要体现在3个方面:一是战场医疗态势感知,实时监测与评估对伤员分布、伤情及医疗资源;二是救治资源优化调配,帮助医护人员根据伤情的紧急程度、严重程度以及康复可能性等因素合理分配资源;三是系统适用性增强,能快速适应战场环境

【收稿日期】 2025-11-29 【修回日期】 2026-01-22

【作者简介】 刘鸿飞,硕士,护师,电话:020-88686261

【通信作者】 黎蔚华,电话:020-88686009

变化与新型伤情,灵活调整保障策略。标志着数字孪生技术在军事卫勤领域已从理论迈向具体应用,为实现智能精准的战场医疗保障提供了可行路径。

3.2 战斗人员生理状态监测与预测 数字孪生技术可实时监测与预测战斗人员生理状态。借助可穿戴传感器整合任务期间心率、肌肉疲劳、水合水平等健康数据,创建战斗人员数字孪生体,通过分析数据和深度学习评估作战人员的生理状态预测其作战能力^[19]。此外,该技术可用于早期疲劳预警,并推荐调整任务、强制休息、补充水或营养等标准化干预方案^[20]。数字孪生通过分析战斗人员的历史数据,可预测伤员的治疗需求并与后续治疗条件匹配,确保伤员能够在最佳时机得到最合适的治疗^[21]。在任务规划阶段,数字孪生技术可通过模拟战斗人员在不同任务场景下的生理反应,预测其在新任务中的身体和生理表现,辅助指挥决策,提升任务执行效率和人员安全性^[22]。

3.3 伤员评估与救治 在危险战场环境下,数字孪生技术通过救援机器人搭载的传感器实时获取伤员的生命体征、位置及环境数据,并同步至其数字孪生模型,可动态优化救援路径、降低二次伤害风险^[4,23]。在医疗评估方面,Hoekstra等^[24]提出了“虚拟生理人体数字模型”,该模型集合了人体机械、物理和生物等多维度伤员数据,为构建可计算的生理与损伤模型提供了方法论基础。美国陆军与内华达大学合作,创建了细胞级士兵全身虚拟数字模型,根据数字孪生数据制造所需骨骼和器官,实现精准修复与治疗^[18]。此外,Talley等^[25]研究表明,数字孪生模型可用于生成个体化治疗方案并优化救治流程。上述研究表明,数字孪生技术在战场救治中已从理论探索进入方法构建与验证阶段,为后续实战化应用奠定了技术基础。

3.4 改善训练方式提高救治水平 现代战争作战方式多样,损伤类型繁多且复杂,传统的训练方式难以满足对医疗救治的高需求。数字孪生技术通过构建高保真环境为改善训练方式、提高救治水平提供了新的解决方案。在环境模拟方面,通过构建高度逼真的虚拟战场,模拟爆炸伤、烧伤等复杂伤情,使医护人员获得沉浸式救治体验。这与美军“仿真综合环境”等系统相似,该系统通过构建虚拟仿真训练场景,使部队在演习中的成功率有所提升^[26]。在伤情演示方面,伤员数字孪生体的3D解剖模型,能够动态呈现不同伤情下的病理变化及操作对周围组织和器官产生的影响,帮助医护人员直观理解创伤机制与干预效应^[21]。在过程优化方面,系统可实现对训练操作的实时监测与数据采集,通过分析操作流

程、决策时间与干预效果,提供个性化的评估与反馈,实现训练效果的闭环提升。

3.5 医疗产品的适配与管理 物资的适配性是卫勤保障较为突出的问题,由于适配率低导致服装及装备浪费率高^[26]。Rahmim等^[10]指出,基于数字孪生构建的人体测量学和人体工程学模型,能够依据战斗人员的个性化数据实现医疗产品、防护装具的精准定制,从而提升装备的适配性和防护性能,减少因装备不匹配导致的作战效能降低和受伤风险。同时,通过构建装备数字孪生体,可实现对关键部件状态的实时监测与故障预测,变被动维修为主动维护。据报道^[27],美军为F-35战斗机与“黑鹰”直升机舰队创建数字孪生,优化了每年高达750亿美元的维护成本,印证了数字孪生技术在资源优化、成本控制方面具有普适性价值。

4 数字孪生技术在卫勤保障中的发展趋势

4.1 技术融合与创新驱动模型精准化 数字孪生技术在军事卫勤保障中展现出巨大潜力,但其深入应用仍面临严峻的数据挑战,直接影响模型的精准度与可靠性。现有研究^[25]指出,其主要问题在于“数据偏差”,由于真实战场伤员护理数据的极度稀缺,模型构建常依赖于民用医疗数据作为训练来源。然而,战场与日常环境在受伤类型、严重程度、救治条件上差异显著,基于民用数据训练的模型极易导致“预测漂移”,即在模拟测试中表现良好,但在真实战场环境下其预测可靠性急剧下降。为此,当前研究主要采取分阶段、多技术融合的路径。在模型构建上,通过融合历史战伤记录、模拟训练数据及重伤案例合成数据,构建初始模型,并结合迁移学习与模型优化,以减少日常数据与军事场景的差异。例如Andrews等^[28]通过利用历史数据库为试验者匹配“数字孪生体”并成功构建预测模型。在模型验证上,利用虚拟现实技术构建高保真医疗模拟环境,将模型置于虚拟战伤救治场景中进行大规模测试与迭代优化^[25]。未来,应开发具备自主学习能力的数字孪生体与建立标准化伤情模型库,为跨层级的精准医疗预测建立技术基础。

4.2 标准化与规范化构建可信数据基石 数字孪生技术的有效性高度依赖数据质量,数据的一致性与准确性直接影响模型的可靠性与决策的科学性^[29]。然而,在实际应用却存在“数据孤岛”,即战伤数据、部队训练数据与后方临床数据通常分属不同系统,标准不一,数据不准确、不完整,格式分散,导致数据难以有效融合,无法形成统一、完整的数据视图^[30]。为应对此挑战,现有研究从架构与技术层

面提出了若干路径。在标准化方面,卞文超等^[31]提出采用数字孪生定义语言等规范进行统一语义描述,以支持模型之间的互操作与集成。在技术实现层面,加强多源异构数据融合技术,在可控容错范围内实现联合建模,打通战伤记录、训练模拟与后方临床等多源异构数据之间的壁垒。在管理应用层面,确保数据主权与隐私的前提下,实现关键医疗信息在授权范围内的可追溯、不可篡改流转^[32]。通过统一语义描述规范、层次化融合架构与闭环数据治理,可为数字孪生系统构建可信、贯通的数据基础。

4.3 全链条集成与人机协同的智能化决策机制

当前,数字孪生技术在卫勤保障中的应用多集中于伤亡预测、生理状态监测等单一环节。其发展趋势正向覆盖“健康管理-战前预测-战中救治-战后评估”的全生命周期智能协同生态系统演进^[33]。这一转型以工业 5.0 所倡导的人机协作为引领^[34],旨在贯通从现场急救到后方医院的完整链条,推动卫勤保障由分散、被动的响应模式,向一体化、前瞻性的精准保障模式转型。为实现这一目标,全生命周期健康管理的理论框架要求服务必须延伸为涵盖预防、诊疗、康复的连续闭环^[35]。通过整合战斗人员日常健康管理、模拟演习、战时救治及后方康复等多元数据,建立单兵全域健康档案数字孪生,使模型具备从健康基线预测损伤风险、规划现场救治流程、设计个性化康复方案的能力。最终,形成“机器智能研判,人类最终决断”的高效人机协同模式^[34],实现保障效能最大化。

4.4 复合型卫生人才培养与能力重塑

数字孪生技术的研发、应用与维护涉及多学科交叉,需要具备跨学科背景的复合型人才。然而,现有研究^[36]指出,当前人才培养体系不完善、实践机会缺乏,人才短缺问题日益凸显。Rovati 等^[37]研究发现,数字孪生复杂的技术在一定程度上限制了其在临床中的推广应用。为此,有临床工作者提议将使用数字孪生应用实践纳入现有教育体系^[38]，“智能卫勤系统应用”相关培训,提高护理人员的模型数据解读能力、人机协作判断能力、系统流程优化能力等“数字素养”,培养具备战伤救护能力并能与工程技术团队协作的新型军事护理人才。

4.5 数据安全防控与伦理规范的建立

卫勤数字孪生系统涉及大量个人健康与军事医疗等敏感信息,其安全与隐私保护至关重要。Zhang 等^[39]指出,构建涵盖技术、管理与伦理的全生命周期安全框架至关重要。技术防护层面,Laubenbacher 等^[40]提出可采用设备认证与数据加密、安全专用网络传输及建立严格的访问审核机制,保障数据在采集、传输、

存储与使用各环节的安全性。同时,刁晓峰等^[26]提出可借助区块链技术,为关键医疗数据的授权访问与流转建立不可篡改、可追溯的存证机制。在伦理规范层面,Akbarialiabad 等^[41]强调需制订明确的数据标准与伦理准则,并落实知情同意原则,明确数字孪生模型在决策辅助中的界限^[42],确保医护人员的最终决策权。针对军事应用场景,应建立常态化的安全评估与应急响应预案,以抵御渗透攻击,切实保护战斗人员隐私与军事安全。

5 小结

在现代战争中,卫勤保障面临伤亡规模大、战场环境复杂、医疗资源有限等诸多挑战,数字孪生技术正推动军事卫勤从“经验驱动”向“数据驱动”转型。然而,技术的深入应用仍面临数据偏差、信息孤岛以及人才缺口等现实瓶颈。未来,必须不断攻坚数据瓶颈,建设高质量战伤数据资源库,促进技术与系统的融合创新,加快建设复合型人才培养与标准伦理建设,从而构建一个真正智能、可靠、实用的卫勤保障体系。

【关键词】 数字孪生;卫勤保障;军事护理;应用现状

DOI:10.3969/j.issn.2097-1826.2026.03.025

【中图分类号】 R473.82;R823 【文献标识码】 A

【文章编号】 2097-1826(2026)03-0104-04

【参考文献】

- [1] 谢燕鹏,刘娟,邹渝,等.美国陆军医疗后送力量体系及启示[J].创伤外科杂志,2024,26(11):807-811.
- [2] ARMY FUTURES COMMAND. Army medical modernization strategy [R/OL]. [2025-11-15]. <https://api.army.mil/e2/c/downloads/2023/10/07/2cc0bedb/2022-army-medical-modernization-strategy.pdf>.
- [3] ANTOUN M, ELHAJJ I H, SAYOUR M, et al. Interactive digital twins enabling responsible extended reality applications [J/OL]. [2025-11-15]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12494812/>. DOI: 10.1038/s41598-025-17855-9.
- [4] PAMPLIN J C, REMONDELLI M H, THOTA D, et al. Revolutionizing combat casualty care: the power of digital twins in optimizing casualty care through passive data collection [J]. Mil Med, 2024, 190(1-2):27-32.
- [5] FERKO E, BUCAIONI A, BEHNAM M. Architecting digital twins[J]. IEEE Access, 2022, 10(10):50335-50350.
- [6] MIKE S, MICHAEL C, RICH D, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap [J]. NASA, 2002(32):1-38.
- [7] GITHENS G. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking by Michael Grieves[M]. New York: McGraw Hill, 2005:1-5.
- [8] CHU Y, LI S, TANG J, et al. The potential of the medical digital twin in diabetes management: a review [J/OL]. [2025-11-12]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10397506/>. DOI: 10.3389/FMED.2023.1178912.

- [9] BORDUKOVA M, MAKAROV N, RODRIGUEZ-ESTEBAN R, et al. Generative artificial intelligence empowers digital twins in drug discovery and clinical trials[J]. *Expert Opin Drug Discov*, 2024, 19(1): 33-42.
- [10] RAHMIM A, BROSCHE-LENZ J, FELE-PARANJ A, et al. Theranostic digital twins for personalized radiopharmaceutical therapies: reimagining theranostics via computational nuclear oncology[J/OL]. [2025-11-12]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9797662/>. DOI: 10.3389/FONC.2022.1062592.
- [11] BENSON M. Digital twins for predictive, preventive personalized, and participatory treatment of immune-mediated diseases [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2023, 43(3): 410-416.
- [12] JONES D, SNIDER C, NASSEHI A, et al. Characterising the digital twin: a systematic literature review[J]. *CIRP J Manuf Sci Technol*, 2020(29): 36-52.
- [13] YAO J, YANG Y, WANG X, et al. Systematic review of digital twin technology and applications[J]. *Vis Comput Ind Biomed Art*, 2023, 6(10): 1-20.
- [14] 杨一帆, 邹军, 石明明, 等. 数字孪生技术的研究现状分析[J]. *应用技术学报*, 2022, 22(2): 176-184.
- [15] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(7): 41-45.
- [16] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [17] 杨光亮, 来孝楠, 何西旺, 等. 面向飞机机翼数字孪生的在线加速度积分方法[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(2): 342-355.
- [18] LI S, YANG Q, XING J, et al. Preliminary study on the application of digital twin in military engineering and equipment [C/OL]. 2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020: 7249-7255. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9326911>. DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9326911.
- [19] LLOYD D G, SAXBY D J, PIZZOLATO C, et al. Maintaining soldier musculoskeletal health using personalised digital humans, wearables and/or computer vision[J]. *J Sci Med Sport*, 2023, 26(Suppl 1): S30-S39.
- [20] TERPSMA R, CARLSEN R W, SZALKOWSKI R, et al. Head impact modeling to support a rotational combat helmet drop test [J]. *Mil Med*, 2023, 188(3-4): e745-e752.
- [21] CHENG Z, ZIENTARA P G, HOYT W R. Warfighter digital twin [C/OL]. MODSIM WORLD 2022 Conference, 2022: 1-11. https://modsimworld.org/papers/2022/MODSIM_2022_paper_10.pdf.
- [22] SAGGIO G. From the Human Digital Twin (HDT) to the banching of the augmented soldier robotic twin (ASRT) [C/OL]. STO Meeting Proceedings: Human Factors and Medicine, 2024: KN4-1-KN4-20. <https://www.sto.nato.int/document-author/saggio-g/>. DOI: 10.14339/MP-HFM-MSG-375-KN4-PDF.
- [23] DELMERICO J, MINTCHEV S, GIUSTI A, et al. The current state and future outlook of rescue robotics[J]. *J Field Robot*, 2019, 36(7): 1171-1191.
- [24] HOEKSTRA A G, VAN BAVEL E, SIEBES M, et al. Virtual physiological human 2016: translating the virtual physiological human to the clinic[J/OL]. [2025-11-12]. <https://royalsocietypublishing.org/rsfs/article/8/1/20170067/64183>. DOI: doi.org/10.1098/rsfs.2017.0067.
- [25] TALLEY M J, GURNEY J M, PAMPLIN J C, et al. Automating the survival chain and revolutionizing combat casualty care: Human technology teaming on the future battlefield[J]. *Mil Rev*, 2024, 104(3): 120-130.
- [26] 刁晓峰, 童大权, 金路特, 等. 数字孪生赋能军事训练的应用与思考[C]. 第三十七届中国仿真大会, 2025: 384-387.
- [27] DOROTHY P. Fast forward; this tech accelerator is bringing digital twins to America's capital [EB/OL]. [2025-12-15]. <https://www.ge.com/news/reports/fast-forward-ge-aviations-accelerator-bringing-digital-twins-americas-military-washington-dc>.
- [28] ANDREWS D, GOLCHI S, COLLINS D L. A digital twin methodology using real patient data for sample size reduction in Alzheimer's disease randomized controlled clinical trials[J/OL]. [2025-12-24]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12636686/>. DOI: 10.1101/2025.10.28.25338899.
- [29] 任璐英, 马梦. 数字孪生在未来军事中的应用与影响浅析[J]. *军民两用技术与产品*, 2025, 38(11): 10-17.
- [30] ONAJI I, TIWARI D, SOULATIANTORK P, et al. Digital twin in manufacturing conceptual framework and case studies[J]. *Int J Comput Integr Manuf*, 2022, 35(8): 831-858.
- [31] 卞文超, 温晓健, 王新厚, 等. 基于大语言模型的数字孪生模型语义重构方法[J/OL]. 1-20 [2025-11-10]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.240>. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.240.
- [32] 陈逸灵, 方钢, 崔浩. 多源信息融合与数字孪生赋能的军事物流智能感知系统研究[J]. *物流技术*, 2025, 44(12): 66-74.
- [33] KRUPAS M, KAJATI E, LIU C, et al. Towards a human-centric digital twin for human-machine collaboration: a review on enabling technologies and methods[J/OL]. [2026-01-06] <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11013982/>. DOI: 10.3390/S24072232.
- [34] ADEL A. Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas [J/OL]. [2025-12-22]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36101900/>. DOI: 10.1186/s13677-022-00314-5.
- [35] 李永斌, 汪文新, 杨肖光, 等. 从疾病治疗到全生命周期健康管理医疗范式的转型[J/OL]. [2025-11-04]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1222.R.20250917.1608.002>. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2025.0190.
- [36] 毛翠, 姚水洪, 甘椿椿, 等. 智慧康养虚拟仿真实训教学体系的构建与实践研究[J]. *中华护理教育*, 2024, 21(9): 1059-1065.
- [37] ROVATI L, GARY P J, CUBRO E, et al. Development and usability testing of a patient digital twin for critical care education: a mixed methods study[J]. [2025-12-23]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10808677/>. DOI: 10.3389/fmed.2023.1336897.
- [38] PEACOCK J G, COLE R, DUNCAN J, et al. Transforming military healthcare education and training: AI integration for future readiness[J]. *Mil Med*, 2025, 190(9-10): e1905-e1912.
- [39] ZHANG K, ZHOU H, BAPTISTA-HON D T, et al. Concepts and applications of digital twins in healthcare and medicine [J/OL]. [2025-12-12]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11368703/>. DOI: 10.1016/j.patter.2024.101028.
- [40] LAUBENBACHER R, MEHRAD B, SHMULEVICH I, et al. Digital twins in medicine[J]. *Nat Comput Sci*, 2024, 4(3): 184-191.
- [41] AKBARIALIABAD H, PASDAR A, MURRELL D F, et al. Enhancing randomized clinical trials with digital twins [J/OL]. [2025-11-04]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12494699/>. DOI: 10.1038/s41540-025-00592-0.
- [42] 俞申婧, 王毅欣, 刘畅, 等. 数字孪生技术在护理领域中的应用进展[J]. *军事护理*, 2025, 42(6): 74-78.