

# 医学数字孪生应用研究与关键技术探析\*

赵霞

曹晓均

(解放军南部战区总医院信息中心 广州 510010)

(广州市妇女儿童医疗中心数据中心 广州 510623)

李小华

(解放军南部战区总医院信息中心 广州 510010)

**[摘要]** 介绍数字孪生定义及发展情况, 详细阐述数字孪生在医疗数字孪生和人体数字孪生两个领域的应用研究实例, 分析数字孪生信息建模、建模推理和模型迭代优化等方面的关键技术, 以及人体数字孪生建模的个体性、不确定性和复杂性等难点问题。

**[关键词]** 数字孪生; 医学; 应用研究; 关键技术

**[中图分类号]** R-058 **[文献标识码]** A **[DOI]** 10.3969/j.issn.1673-6036.2023.04.002

**Analysis of the Application Research and Key Technology of Medical Digital Twin** ZHAO Xia, Information Center, General Hospital of Southern Theatre Command, PLA, Guangzhou 510010, China; CAO Xiaojun, Data Center, Guangzhou Women and Children Medical Center, Guangzhou 510623, China; LI Xiaohua, Information Center, General Hospital of Southern Theatre Command, PLA, Guangzhou 510010, China

**[Abstract]** The paper introduces the definition and development situation of digital twin, elaborates the application research cases of digital twin in the field of healthcare digital twin and digital twin of the person, analyzes the key technologies of information modeling, modeling reasoning and model iterative optimization of digital twin, and introduces the difficulties of digital twin of the person modeling such as individuality, uncertainty and complexity.

**[Keywords]** digital twin; medicine; application research; key technology

**[修回日期]** 2022-11-21

**[作者简介]** 赵霞, 博士, 高级工程师, 发表论文 20 篇; 通信作者: 李小华, 博士, 高级工程师, 发表论文 30 篇。

**[基金项目]** 广东省基础与应用基础研究基金项目“医院绩效管理 with 数据模型研究”(项目编号: 2021A1515220186); 广州市基础与应用基础研究项目“健康信息标准方法研究”(项目编号: 20210208526)。

## 1 引言

数字孪生(digital twin, DT)作为新一代信息技术集成融合和创新应用,在国家科技、经济、社会持续发展和数字化转型中将发挥重大作用。当前全球积极布局数字孪生研究和应用,美国、日本以及西欧部分国家先后成立数字孪生联盟、协会等组织,加快构建数字孪生产业协同和创新生态。2021

年 12 月中央网络安全与信息化委员会发布《国家“十四五”信息化规划》，将数字孪生列为国家战略性、前沿性和颠覆性技术，要求加强战略研究布局和技术融通创新。

数字孪生是指在数字空间（虚拟空间）中构建一个可以映射现实世界（现实空间）物理实体的虚拟实体（数字孪生体）。通过物理实体的数据采集和分析，抽象出物理实体的属性、关系和过程，建立数据模型，在虚拟空间构建一个与物理实体完全对应的虚拟实体。物理实体与数字孪生体之间具备双向和动态的实时关联，在整个实体的生命周期中相互联系在一起，实现物理世界与数字世界的交互与融合。通过数字孪生体可以实现对物理系统的模拟、验证、预测、洞察、执行和控制<sup>[1]</sup>。

当前，智能制造、信息物理系统、人工智能、数智融合和智慧管网是数字孪生领域的热点，形成以航空航天、未来教育、智能制造为代表的研究聚类，数字孪生模型、虚拟车间、系统仿真等成为我国数字孪生研究的前沿主题<sup>[2]</sup>。

与航空航天、智能制造等领域数字孪生研究相比，医学领域的数字孪生还处于初级探索阶段，但已呈现出蓬勃发展势态。2020 年高德纳（Gartner）公司对 1 700 多种科学技术进行分析比较，发布了新兴技术周期曲线，人体数字孪生技术被列为 5 个独特趋势之一，预计在未来 5~10 年达到峰值<sup>[3]</sup>。

## 2 医学数字孪生应用研究

### 2.1 医学数字孪生

数字孪生与医学领域的融合应用为医学科学的深度发展提供创新技术支持。医学数字孪生研究领域可以分为两类：医疗数字孪生和人体数字孪生。医疗数字孪生指数字孪生技术在以患者为中心的医疗过程、医学仪器、医疗空间（院区、病房、手术室）等医疗实体场景应用的研究。通过采集医疗实体的相关数据建立数学模型，构建一个与实际医疗实体完全对应的虚拟医疗场景实体。医疗数字孪生通过人机接口等技术，对实际医疗过程进行仿真、预测、观察和控制，实现精准化医疗。人体数字孪

生是对人或人体器官的数字孪生研究，通过融合人或人体器官的生物机理、生理模型、基因组学和临床数据等，构建具备患者个体特征的数字孪生体，用于医学研究和疾病诊治，实现个性化医疗。人体数字孪生与早期的数字化人体相比，早期的数字化人体是利用人体成像数据重建人体数字化解剖模型，这个模型是整体（如男性/女性或成人/儿童）、静态、无生命体征的；而人体数字孪生是个体的实时镜像，是真实世界实体人在虚拟世界的的数据映射，人体数字孪生体可以实时反映真实人体的生命状态，从而为个体的疾病预防、诊断、治疗和预后带来全新解决思路。人体数字孪生除了实体的物理属性，还包括生理、心理和伦理等更多元属性，实现数字建模是数字孪生的关键环节，具有更高的复杂性。

### 2.2 医疗数字孪生实例

2.2.1 癌症患者数字孪生 美国斯坦福大学医学部和美国国家癌症研究所等提出癌症患者数字孪生（cancer patient digital twin, CPDT）框架<sup>[4]</sup>。该研究利用新兴计算和生物技术创建数字化个体表征，动态反映不同治疗和时间下个体患者的分子、生理和生活方式状态，用于癌症患者的治疗调整、反应检测 and 生活方式跟踪，见图 1。

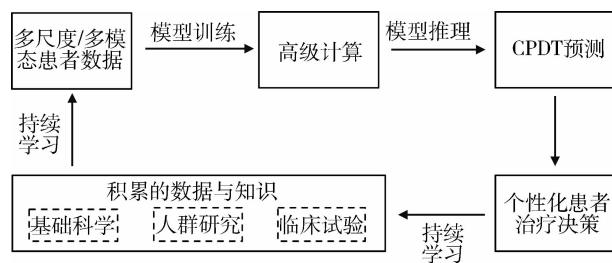


图 1 CPDT 的生命周期

CPDT 的创建与探索被设想为具有实时、动态的生命周期，涵盖癌症患者治疗和康复全过程。CPDT 通过对多尺度、多模态数据的采集和协调，在高级计算加持下完成模型训练和推理，创建 CPDT 的数学、统计、机理和人工智能等相关模型，从而实现癌症患者的个性化治疗预测和决策。同时将预测和决策结果作为临床试验数据加入到人群研

究知识库中，与人群研究、基础医学科学知识等其他因素相结合，构建患者群体的数字孪生，从而实现 CPDT 的持续学习过程。CPDT 无缝集成到医疗 workflows 中，以实现临床效用，使医生和患者能够通过直观的可视化探索治疗选项。

2.2.2 设备数字孪生 飞利浦公司将数字孪生技术用于磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)、电子计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 和介入 X 射线系统等大型医疗设备，通过安装在设备上的传感器，收集和分析设备数据，实现对设备的预防维护和性能改善<sup>[5]</sup>。设备数字孪生由设备数据、人工智能数据分析、设备知识和设备物理建模 4 个组件组成，见图 2。

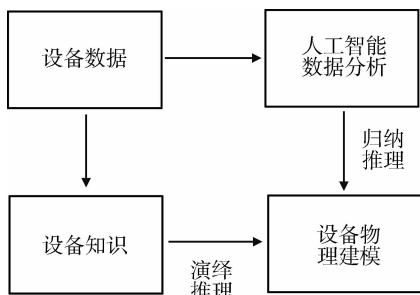


图 2 设备数字孪生组成

一台 MRI 设备每天平均可产生数 10 万条日志数据 (设备的技术参数, 而非患者检查数据), 设备数据组件负责获取这些设备数据。人工智能 (artificial intelligence, AI) 和数据分析组件采用机器学习和统计学技术, 对获取的数据进行分析和识别。设备知识组件利用已掌握的设备知识 (如设备原理、物理定律、已知模型等) 对设备数据做进一步确认。设备物理建模组件应用来自 AI、数据分析组件和设备知识组件的数据, 进行设备数字孪生建模, 为医疗设备维护和改善提供帮助。

### 2.3 人体数字孪生实例

2.3.1 心脏数字孪生模型 1 2020 年《欧洲心脏杂志》刊登伦敦皇家学院个性化数字心脏病学联盟心脏数字孪生研究论文<sup>[6]</sup>。该研究在心脏数字孪生建模中, 通过演绎推理方式, 应用物理和数学定律建立模拟心脏行为的机理模型, 见图 3。机理模型

经过校准、优化和验证循环迭代, 能够提供适宜的临床解释和预测; 应用归纳推理方式, 通过分析患者既往临床数据, 构建反映心脏在类似条件下的行为、预测随着时间推移表现的统计模型, 统计模型经过训练、测试和修正循环迭代, 能够实现已知参数的自动提取以及发现隐藏在数据中的新指标。

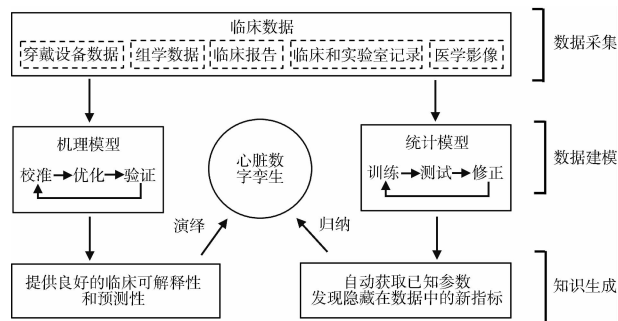


图 3 心脏数字孪生模型

通过增强获得患者多模态数据的能力和计算机算法的学习、推理能力, 不断优化数字孪生模型, 使诊断决策不仅能够根据当前患者健康状况进行调整, 还能够对未来治疗康复进行精准预测。

2.3.2 心脏数字孪生模型 2 奥地利格拉茨医科大学生物物理学研究中心采用临床 12 导联心电图数据构建患者心脏数字孪生 (cardiac digitaltwin, CDT)<sup>[7]</sup>, 用于为患者提供心脏电生理的临床观察。CDT 生成框架工作流程包括临床数据采集、解剖孪生建模和功能孪生建模 3 部分, 见图 4。

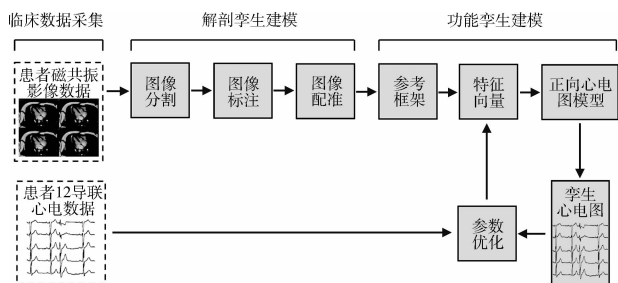


图 4 12 导联心电图心脏数字孪生生成框架

临床数据采集包括患者的磁共振影像数据和 12 导联心电图数据采集。磁共振影像数据用于解剖孪生建模, 心电图数据用于功能孪生建模。解剖孪生建模时磁共振图像数据被分割转换为离散的多标签解剖网格。该过程需要大量计算资源以及训练有素

的专家进行人工操作干预,才能准确表示所有感兴趣的解剖结构。功能孪生建模首先建立参考框架,用于编码 CDT 内位置、大小、长度和方向的描述。基于参考框架构建特征向量,并通过随机采样方法实现模型降维,以提高计算效率。正向心电图模型使用 Saltelli 采样实现个体患者的最佳参数功能配对,功能配对过程完全自动化。在参数优化环节,正向心电图模型的孪生(模型)心电图与临床心电图进行比较,通过参数优化迭代更新模型参数,以获得更好的孪生(仿真)精度。

### 3 医学数字孪生关键技术

#### 3.1 信息建模

通过以上实例可知,不论是医疗数字孪生还是人体数字孪生,都离不开信息模型基础。作为数字孪生的关键技术,建模是将物理世界对象数字化和模型化的过程<sup>[8]</sup>,也是实现数字孪生的源头和核心。通过建模,将物理对象表达为计算机和网络所能识别的信息模型,对物理世界或问题的理解进行简化和模型化。数字孪生建模需要完成多领域、多学科模型融合以实现物理对象各领域特征的全面刻画,建模后的虚拟对象会表征实体对象的状态、模拟实体对象在现实环境中的行为、分析物理对象的未来发展趋势。

数字孪生建模采用面向对象建模方法,用对象属性表示事物静态特征,用对象方法表示事物动态特征。对象的属性与方法结合为一体,成为一个独立的、不可分的实体。医学数字孪生建模需要基于已知知识(概念、机理、方程、模型),融合患者医学影像、电生理信号以及相关临床记录等多模态数据,运用机器学习和虚拟现实等新一代信息技术,才能构造出准确的医学数据孪生体。由于人体与一般的物理实体不同,除了具有温度(体温)、压力(血压)和搏动(脉搏)等物理特性外,还具有生理、心理、情绪等生物特性,其综合特征和层次关系复杂,建模难度比单纯的物理实体高。

#### 3.2 建模推理

3.2.1 演绎推理 数字孪生建模需要分析和判断

具有各种属性的对象之间的各种关系,这种分析和判断过程称为推理,医学数字孪生建模通常联合使用演绎推理和归纳推理方法。演绎推理是由一般到特殊的推理方法,即从一般性的前提出发,通过推导即“演绎”,得出具体陈述或个别结论的过程。推论前提与结论之间的联系是必然的,是一种确实性推理。演绎推理的逻辑形式对于理性的重要意义在于,它对人的思维保持严密性、一贯性有着不可替代的校正作用。演绎推理保证推理有效的根据并不在于内容,而在于形式。医学科学经历长期发展,积累了大量科学知识和科研成果,包括各种公式、函数、规则、模型、关系、图谱等,这些已知知识是医学数字孪生建模演绎推理的基础。

3.2.2 归纳推理 归纳推理是一种由个别到一般的推理。由一定程度的关于个别事物的观点过渡到范围较大的观点,由特殊具体的事例推导出一般原理、原则的解释方法。医学研究中的归纳推理通常采用概率推理方法,即通过计算概率值来判断事件发生的可能性。基于云计算、大数据和人工智能等新一代信息技术,可以对医疗过程产生的海量数据进行挖掘分析,发现其蕴含的知识和规律。在医学数据孪生建模推理中,可以运用机器学习的支持向量机、决策树、人工神经网络等算法,对数据进行分类、预测等归纳推理。

3.2.3 两种推理方法对比 在上述应用研究实例中,建模过程都采用演绎推理和归纳推理方法。例如前文图4的 CDT 解剖孪生建模需要训练有素的专家参与确定解剖结构,属于演绎推理方法;而 CDT 功能孪生建模主要采用随机采样处理,属于归纳推理方法。在通过演绎推理和归纳推理获取到知识后,还需要通过模型、符号、规则、程序等方式将知识表示出来,并实现知识在数字孪生建模中的进一步应用。从推理结果的预测性和解释性来讲,演绎推理的结果是可预测和可解释的,但归纳推理在这方面是缺乏的。例如,采用卷积、循环等神经网络进行的医学辅助诊断,其结果的可解释性还是当前学术界的热点问题。

#### 3.3 模型迭代优化

医学数字孪生建模是不可能一次完成的,需要

经历由浅入深、由易到难、由简到繁的研究和实践过程,先经由各种感知方法对特征获得感性认识,而后经各种认知过程进一步形成理性认识,再通过反复迭代,逐步优化,获取不断完善精准的数字孪生体<sup>[9]</sup>。例如,前文图 3 的心脏数字孪生模型中,机理模型经过校准、优化和验证循环迭代,提供良好的临床解释性和预测性。统计模型经过训练、测试和修正循环迭代,实现已知参数的自动提取,发现隐藏在数据中的新指标。前文图 4 的 CDT 在参数优化环节中,通过正向心电图模型的孪生心电图与临床心电图进行比较,实现参数优化迭代更新模型参数,以获得更好的孪生精度。

## 4 结语

尽管数字孪生是物联网、云计算、大数据、人工智能和虚拟现实等新一代信息的综合应用,但在数字孪生的语境中,模型是本体,物理实体是参照对象,数据是反映对象特征的信息,仿真是在模型基础上探索物理实体的方法,因此信息建模是数字孪生的核心任务<sup>[9]</sup>。医学数字孪生建模除了采用通用方法外,还需要结合医学特征,才能构建准确映射医学物理实体的医学数据孪生体。

目前医疗数字孪生展现较多应用场景,其为医疗机构临床沟通、危急警报、应急处理、患者参与、医患互动以及行政管理和成本计算提供创新技术,进而促进医疗机构能够在不中断服务和确保患者安全下进行调整和动态模拟,实现快速改进和优化,还能在正确的时间和地点将正确的信息提供给正确的人,从而在整个医疗机构中实现高度感知并进行决策。

而人体数字孪生尚处于研究阶段。其建模难点在于人体的复杂性,人的行为受到情绪、情感等各种心理因素影响,其建模不仅涉及计算机科学领域,还包括心理学和神经科学在内的其他领域,目前尚缺乏可以准确描述相关机制的模型。对于人的主观情绪,尽管目前已有一些技术可以根据人的面部表情、大脑活动、血压心率和外部刺激等因素进行测量,但其准确性还难以评估。对于表示个体的

人体数字孪生,使用来自不同人群大数据构建的情绪、情感模型,也还需要根据个体信息进行调整<sup>[10-11]</sup>。当前人体数字孪生应用研究主要还是集中在人体的组织器官层次,例如心脏数字孪生等。突破人体数字孪生建模的难点和技术限制,需要计算机科学与医学科学相关领域深度融合,在现有医学知识体系下,充分利用人工智能、大数据等新兴信息技术,构建人体的物理、生理和心理模型体系,并实现模型的深度融合与互操作,经过反复迭代优化,从而产生能真实映射的人体数字孪生体。

## 参考文献

- 1 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- 2 赵亮,许娜,张维.我国数字孪生研究的进展、热点和前沿[J].实验技术与管理,2021,38(11):96-104.
- 3 PANETTAK. 5 trends drive the Gartner hype cycle for emerging technologies, 2020 [EB/OL]. [2022-07-30]. <https://www.gartner.co.uk/en/articles/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020#:~:text=The%20Gartner%20Hype%20Cycle%20for%20Emerging%20Technologies%2C%202020,access%20many%20public%20and%20private%20spaces%20and%20services>.
- 4 HERNANDEZ-BOUSSARD T, MACKLIN P, GREENSPAN E J, et al. Digital twins for predictive oncology will be a paradigm shift for precision cancer care [J]. Nature medicine, 2021, 27(12): 2065-2066.
- 5 PHILIPS. The rise of the digital twin; how healthcare can benefit [EB/OL]. [2022-03-01]. <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html>.
- 6 CORRAL-ACERO J, MARGARA F, MARCINIAK M, et al. The 'digital twin' to enable the vision of precision cardiology [J]. European heart journal, 2020, 41(48): 4556-4564.
- 7 GILLETTE K, GSELL M A F, PRASSL A J, et al. A framework for the generation of digital twins of cardiac electrophysiology from clinical 12-lead ECGs [EB/OL]. [2022-03-01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361841521001262?via%3Dihub>.

(下转第 27 页)

时, 价值意味着以患者为中心, 改善患者就医体验, 满足患者就医需求; 当关注医疗机构时, 价值意味着提高效率, 优化服务流程<sup>[12]</sup>; 当关注医保机构等支付方时, 价值意味着以较小的支出获得较大的医疗健康成效。通过平台连接医疗机构、保险机构以及医生和会员等, 建立以价值为导向的激励机制, 吸引大量黏性会员。如凯撒医疗基于利益相关者联合建立起来的系统管理体系, 在某种程度上形成医疗机构、保险机构以及医生、患者多方共赢的利益机制, 助推其成为美国规模最大的健康维护组织。

## 5 结语

美国不同数字健康平台的发展模式表明, 数字健康是以人民健康为中心, 围绕人民群众全方位、全生命周期健康, 通过数字化、网络化、智能化技术赋能和平台支撑, 与传统医疗健康服务深度融合而形成的新型医疗健康服务模式, 可更好地提升医疗健康服务质量与效率, 促进医疗健康服务的普惠、均等、共享。无论是优化流程、提高效率、便民惠民服务, 还是保障核心医疗质量安全, 数字化转型在很多方面对传统医疗机构的发展起到了重要的支撑作用。为充分发挥数字技术在健康管理中的有效作用, 应在相对开放包容的政策环境下, 坚持以用户健康为中心的发展理念, 通过数字化手段和平台助力传统医疗机构的网络化、数字化、智能化转型, 促进医疗、医药、医保等体系的深度融合, 实现医疗健康服务价值增值、医疗服务流程再造、医保资金使用高效、公众获得感显著提升。

## 参考文献

- 1 范先群. 互联网+医疗健康 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
  - 2 李韬, 冯贺霞. 数字健康发展国际经验与借鉴 [J]. 医学信息学杂志, 2021, 42 (5): 2-8.
  - 3 符雨嫣, 宣建伟, 韩屹, 等. 美国“互联网+医疗”服务及对我国的启示 [J]. 中国卫生经济, 2020, 39 (4): 94-96.
  - 4 路娜娜, 徐伟, 杜雯雯, 等. 美国互联网医疗服务的医保支付政策及启示 [J]. 卫生经济研究, 2020, 37 (10): 37-41.
  - 5 李韬. 数字健康: 构建普惠均等共享的卫生健康共同体 [M]. 北京: 人民出版社, 2021.
  - 6 丁凤一, 刘婷, 陈静. 医疗健康大数据研究进展剖析 [J]. 信息资源管理学报, 2017, 7 (4): 5-16.
  - 7 孟群, 尹新, 梁宸. 中国“互联网+健康医疗”现状与发展综述 [J]. 中国卫生信息管理杂志, 2017, 14 (2): 110-118.
  - 8 徐文轩, 刘博言, 张雪. “互联网+”视域下美国健康医疗信息安全管理对我国的启示 [J]. 中国医学伦理学, 2021, 34 (3): 302-308.
  - 9 罗力, 芮绍炜, 杨帆, 等. 互联网医疗时代患者隐私保护的美国实践与探索 [J]. 华东科技, 2016, 4 (11): 60-63.
  - 10 王思敏, 徐伟, 崔子丹, 等. 价值医疗导向的医保支付方式初探——以中美典型按价值付费项目为例 [J]. 卫生经济研究, 2019, 36 (2): 9-12.
  - 11 LEE P, PAXMAN D. Reinventing public health [J]. Annual review of public health, 1997 (18): 1-35.
  - 12 ROSENBAUM L. The whole ball game - overcoming the blind spots in health care reform [J]. The New England journal of medicine, 2013, 368 (10): 959-962.
- 
- (上接第 16 页)
- 8 中移智库. 2021 数字孪生技术应用白皮书 [EB/OL]. [2022-06-01]. <http://www.100ec.cn/detail--6604418.html>.
  - 9 刘青, 刘滨, 张宸. 数字孪生的新边界——面向多感知的模型构建方法 [J]. 河北科技大学学报, 2021, 42 (2): 180-194.
  - 10 NTT Digital Twin Computing Research Center. The digital twin computing reference model version 2.0 [EB/OL]. [2022-08-25]. [https://www.rd.ntt/\\_assets/pdf/iown/reference-model\\_en\\_2\\_0.pdf](https://www.rd.ntt/_assets/pdf/iown/reference-model_en_2_0.pdf).
  - 11 KHAN S, ARSLAN T, RATNARAJAH T. Digital twin perspective of fourth industrial and healthcare revolution [EB/OL]. [2022-08-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9726212>.