

平行医学：从医学的温度到智慧的医学

王飞跃

(中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 如何将智能科技与医疗健康结合, 在传统医学和现代医学的基础上创建更加高效的智慧医学, 是一项意义重大的历史性任务。针对医学的科学性、人文性和社会性等复杂问题, 集复杂性医学、跨学科医学和系统智能医学多个角度于一体, 利用人工社会建模、计算实验分析、平行执行管控, 提出平行医学的基本概念、框架和流程, 力图建立将医学研究的小数据演化生成医学大数据, 再凝练、验证形成医学深智能的医学数据智能生成过程。

关键词: 平行智能; 平行医学; 智慧医学; 复杂性医学; 跨学科医学; 系统智能医学

中图分类号: R3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202101

Parallel medicine: from warmth of medicare to medicine of smartness

WANG Fei-Yue

The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems,
Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: How to combine intelligent technology with medical health and create more efficient intelligent medicine on the basis of traditional medicine and modern medicine is a historic task of great significance. Aiming at the complex problems of science, humanity and sociality of medicine, integrating complexity medicine, transdisciplinary medicine, and systems intelligence medicine, by using artificial societies for modeling and representation, computational experiments for verification and validation, parallel execution for management and control, the basic concepts, frames and processes of parallel medicine were proposed. As a systematic approach for smart medicine, the parallel medicine will produce medical big data from medical small data, and then generate medical smart data from medical big data.

Key words: parallel intelligence, parallel medicine, smart medicine, complexity medicine, transdisciplinary medicine, systems intelligence medicine

1 引言

从 Jeopardy 到 IBM Watson 的健康系统, 从 AlphaGo 到 AlphaFold, 从深度学习到深度医疗, 近年来机器学习和人工智能的深入与普及, 已使基于智能科技的医学医疗智能化成为人类社会的共同期盼, 并希望以此迅速提高人们的医疗与健康水平^[1-6]。有些专家信心十足, 甚至声称其人工智能方

法已全面超越人类医生, 并开始罗列最有可能被人工智能取代的几类人类医生, 这除了引起业界的混乱, 还导致民众对智能医学医疗有过急过高的期望。

目前, 人们对高水平医疗健康的需求同现有的服务水平之间的差距已成为现阶段社会矛盾的重要组成部分^[7], “病不起” “因病致贫” “因疾返贫” 等不可忽视, 因此, 面向人民生命健康已成为国家

收稿日期: 2021-03-06; 修回日期: 2021-03-10

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61533019)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61533019)

“四个面向”的战略方向之一。在这一背景之下，如何以智能科技建设更加高效的智能医学医疗体系来服务民众，是一项十分重要且具有战略意义的历史性任务。

医疗健康的复杂性因素如图1所示^[1,4]。人类的健康及其医学研究和医疗服务涉及难以尽数的复杂因素，单凭技术无法完全解决生命健康问题。为此，必须突破原有思维模式，以新的系统性思维和研究范式，结合智能科技，在传统医学和现代医学成果的基础上，创立新的智能医学医疗体系。例如，作为医学科学基础的现代生物学，其面临的重要挑战是“来自研究者的决定论思维和生命偶然性特征之间的冲突”^[8]，必须寻求合适的途径予以有效解决。本文就是沿着这一思路，集复杂性医学（complexity medicine）、跨学科医学（transdisciplinary medicine）和系统智能医学（systems intelligence medicine）于一体，基于ACP^[9-10]（即人工社会（artificial societies）、计算实验（computational experiments）、平行执行（parallel execution））方法初步提出平行医学的基本概念、框架和流程，希望以此抛砖引玉，引发讨论和深入研究，使医学向融合了医学的科学性、人文性、社会性的智慧医学迈进，造福人类。

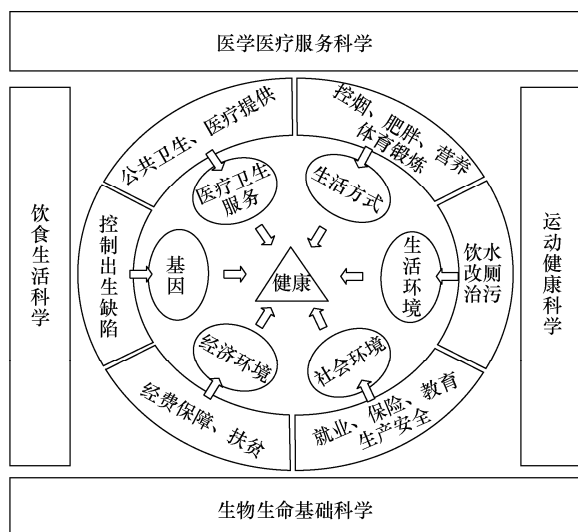


图1 医疗健康的复杂性因素

2 医学的温度和医学的复杂性

“哦，医学是有温度的！”这曾是一个年幼患者对医生自然的心灵感知。医学的温度首先是医学的人性和人文特色，就是将医护工作者的温情化为患

者心灵上的温暖。医学的温度也是社会性的，其不但在人们的心灵深处“留下了一片柔软的地方”，更为人类社会“留下了一种特别的美，一种爱的美丽”。有史以来，无论是什么时代，什么社会，“医生就是一个高尚的职业，公认是由高贵的人从事的。要求医生具有美德，已经成为传统。”^[11]今天，医生学习的第一课往往从《希波克拉底誓言》开始，宣誓保护病人，而从业行医的准则已被铭记于特鲁多医生的墓志：有时去治愈，常常去帮助，总是去安慰（to cure sometimes, to relieve often, to comfort always）。

实际上，这一切都是医学的人文性和社会性的自然显现。然而，为了保证医学能够有效地“有时去治愈”，并使医学的温度总是处在让人舒适健康的范围之内，必须依靠医学的科学属性。为此，经过人类漫长的追求与探索，医学终于成为现代科学的核心内容之一。在中国，从《黄帝内经》《难经》《伤寒杂病论》《神农本草经》到近代中西医结合，传统医学与现代医学正在进一步整合。在西方，从希波克拉底、盖仑到文艺复兴时期的解剖学、生理学、病理学、微生物学、免疫学、遗传学等医学基础学科的兴起，再到当今的基因信息学和分子生物学等，医学由宗教的安慰、匠人的帮助、医生的救治，正迈向集预防（preventive）、主动（proactive）、个性化（personalized）和精准（precision）于一体的“P4”医学^[11-12]。

然而，在医学科学与医疗技术飞速发展的同时，开始出现一些技术至上的现象。正如《医学的温度》一书所指出的：医学日渐趋离其人文和社会属性。具体表现如下。

（1）医学与病人的距离越来越远。医生倾听病人主诉的时间越来越少，主要依靠仪器设备与化验检查结果，过度依赖药物与手术，越来越忽视病人的心理因素。

（2）见病不见人，只顾局部不顾整体。随着临床专业的细分，几乎形成“一种医生面对一个器官”的局面，没有充分深入地考虑器官组织之间的相互影响，忽视整体自然力及其复杂性。

（3）过度治疗发展到令人吃惊的地步。精准地确定什么是合适的治疗的确是一个非常困难的问题，但不妨回想一下引入“医学伤害（medical harm）”概念的奥地利哲学家伊凡·伊里奇（Ivan Illich）的发问：健康是人类应对死亡、疼痛和疾病

的能力，科技可以帮忙，但是发动一场消灭疼痛、疾病和死亡的“神圣”战争，医学似乎走得太过了^[13]。

(4) 医学与市场紧密结合。医院趋利行为膨胀，药商、医院经营者与医生形成商业联盟，出现“用更昂贵的治疗方法，治疗更少人的疾病”的发展趋势。

(5) 医患关系紧张，医患关系物化。一些人视医患关系为消费关系、合约关系。这样的关系一旦成立，必然出现不负责任的医生与不信任医生的患者。

(6) 医学的根本目的被淡化。医学似乎只考虑维持病人的生命，不愿考虑勉强维持生命可能给病人带来的痛苦，也难以考虑如何促使人们健康幸福地生活；往往只考虑新技术的发明和应用，而暂未考虑有多少人能享用这些技术，忽视人们的经济承受能力以及对社会的不良影响。

总之，医学本身及医疗技术的发展只能解决能否做到的问题，而不能解决需要做什么的问题。医学呼唤人文，医学必须与人文紧密结合，才能保持正确的发展方向，真正造福人类。

显然，医学的温度是其科学的温度、人文的温度、社会的温度之纠缠整合，就像量子纠缠在“塌陷”之前状态不明一样，人们难以说清医学的温度的本源与本质，只能自己去体验和理解。但当“科学的冷漠”取代人性的温情，当人与人的交流变得奢侈，当诊疗成为流水线上机械的动作时，医学就不可避免地蜕变成被药物和仪器役使的工具，医患关系也会随之由亲密转为紧张，医学也就失去了暖心的温度。为此，人们不可忘记“医学是人学，医道重温度”，必须在现代化进程中寻求传统医学与现代医学整合发展的更好、更有效的方向和途径，创立以人为本同时考虑医生患者及其社会的新医学。

实际上，医学的温度不但是其科学性、人文性和社会性的象征，更是医学的“UDC”，即不定性（uncertainty）、多样性（diversity）和复杂性（complexity）的高度概括。首先，人体本身是一个具有生命的开放复杂的系统，是由粒子、原子、分子、基因、细胞、组织、器官、系统逐级生成的一个有机整体，具有自适应、自平衡、自组织等智能体征，人们对它的认识，也从宏观（macroscopic）到中观（mesoscopic）再到微观（microscopic），再回到宏观，不断循环，不断递进。医学的使命和温度就是把健康问题的 UDC 特征转化为医疗手段的

AFC 功能，即灵活敏捷地处理不同患者的不同疾痛（agility）、综合平衡地向任务聚焦（focus）、坚定不移地向健康的整体目标收敛（convergence）^[3]。为此，人们必须梳理清楚医学在科学性、人文性和社会性方面面临的复杂性问题。

2.1 医学的科学性

(1) 还原困境

从分子到量子，还原论是主导现代医学的研究范式。然而，还原的路径无穷无尽，不但经济上无法穷尽，即使能够穷尽，之后在智力上也难以整合^[1]。生命承受不起“滴水见大海”的比喻，不能大而化之，不能将群体与个体的数据或行为混淆。生活更难以忍受不断的科目细分，不应该让无尽的还原成为医生、患者和社会的沉重负担。

(2) 循证困境

现代医学是循证医学，必须进行严格的医学实验和结果验证。然而，人们往往难以在有了足够的证据之后才看病，医生的经验仍旧是关键。尽管医学经验的标准流程和临床指南提供了相当大的科学保障，但这并非严格意义下的循证医学。而且，即使按临床流行病学的循证医学过程确定了诊断准确率和治疗有效率，其结果还是群体概率，难以判定具体的某个病人是在概率之内还是概率之外。对此，仍需要医生根据经验加以决策。因此，传统医学的整体观和经验性依然有用，诚如“现代医学之父”威廉·奥斯勒（William Osler）所言：行医是一种以科学为基础的艺术。

2.2 医学的人文性

(1) 价值的主观性

“医学的价值，既有客观标准，又有主观标准”。人们很容易对医学价值的客观标准形成统一认识，如减少痛苦、延长寿命、改善生活质量、提高生产力等，但对其主观判断却难以一致。不同年龄阶段、不同发展地区、具有不同人文倾向的人，不但对医疗的要求不同，对医学价值的判断也不同，具有相当大的主观性，甚至出现《剑桥医学史》^[11]的作者罗伊·波特（Roy Porter）所说的“认知困境”：医学从来没有这么成就斐然。然而矛盾的是，医学也从来没有像今天这样招致人们强烈的怀疑和不满。

(2) 效果的心理性

“医生既要治病，又要治心”。希波克拉底曾说过：了解一个什么样的人得了病，比了解那个人得了什么病更重要。而且，帮助创办北京协和医院的

近代美国传奇医生毕宝德 (Peabody) 认为: 照护好患者的秘诀就在照护的过程之中^[14-15]。虽然心理学和心理治疗得到了空前的发展, 但与常规治疗的融合目前几乎还是空白的。近年提出的“叙事医学 (narrative medicine)”^[16]要求医生不仅关注病人的生理变化及其病理机制, 还要关心其心理状态和环境因素等, 这是向治病且治心迈出的重要一步^[1]。

(3) 应用的有界性

明确“医学有边界”的原则。随着现代医学的成功和人们对其期望的不断提高, 医学已经被赋予了过度的使命。如从美容、养生到“返老还童”, 造成泛滥的医学生活化, 还有把健康的“危险因素”当成“疾病”对待的过度医疗。不知医学边界为何, 忘记医学从何而来, 又是如何走到了现在。

2.3 医学的社会性

(1) 发展的一致性

医学与技术经济的发展水平密切相关, 整个社会与自然环境中的各种因素共同影响并决定了人们的健康和医疗水平。

(2) 发展的伦理性

医学科学水平和医疗技术发展必须首先保证广大群众的基本健康需求, 确保社会公平公正。必须制止有害社会的“用更昂贵的治疗方法, 治疗更少人的疾病”的医学技术发展方向。

(3) 发展的资本性

健康产业已成为国民经济的支柱产业, 发达国家的医疗工业产值接近国内生产总值 (GDP) 的 20%, 健康产业在中国也发展迅猛。大量的资本进入医疗健康市场, 在促进医疗创新和产业升级的同时, 资本的逐利本性也带来许多负面的问题, 难免有时成了人类健康的“双刃剑”。如非常昂贵的价格给病人造成极重的经济负担, 并助长了医疗设备药品耗材领域的腐败, 甚至出现“医学杂志背后的幽灵”为医疗企业炮制不实论文, 从而进行虚假宣传。为此, 英国皇家全科医生学院 (Royal College of General Practitioners) 前院长希思 (Heath) 女士曾警告说: 美好愿望与经济利益联合, 弄不好就是毒药。

3 建立系统智能医学: 跨学科医学与复杂性医学

如何面对并尽可能解决或改善这些问题? 物联网、大数据、云计算、机器人、区块链、人工智

能, 这些引人注目的时代新技术自然会在脑海中涌现出来, 给人无限的遐想。然而, 解决这些复杂的医学问题, 单凭技术还远远不够, 人们更需要新的思维、新的范式、新的体系。否则, 会出现医学医疗技术越来越复杂的现象, 导致所谓的智能医学医疗系统对医生和患者及整个社会提出越来越高的要求, 甚至达到“非分”的程度。为此, 笔者认为, 除了现行方法与实践, 在医学科技中引入复杂科学研究的新思路、交叉学科融合的新范式、系统智能技术的新体系, 是促进传统医学与现代医学进一步整合发展, 开创医学智能新时代的一条可行途径。

3.1 基于复杂性科学的医学研究思路

(1) 还原与活力的对立统一

人类对生命的认识随着还原论和活力论 (或整体论) 两种不同观点的反复争辩而不断深入。通过细胞学, 人们认识到整个身体和生命源自一个细胞的分化、组织、结构与系统, 之后就开始有了统一还原论和活力论的思想。法国哲学家和古生物学家德日进 (Pierre Teilhard de Chardin) 曾称: 生命就是复杂化的物质, 这是明确将复杂性置于从非生物体到生物体这一过程的关键。什么是复杂? 复杂到何种程度非生物就成了生物体? 这依然是现代科学的不解之谜, 也是近代复杂性科学兴起的主要动因。如何将复杂性科学引入医学研究, 是一个十分值得探索的方向。“所谓复杂, 就是对立统一”, 加上传统中医的辨证思维, 以及人工智能的各种计算辩证推理方法, 特别是人工系统建模及其数字孪生技术, 可为还原论方法与整体论综合的对立统一和复杂性医学的研究提供新的思路和途径, 进而推动解除医学的“还原困境”。

(2) 虚与实的反馈纠缠和闭环互动

如何将医学的“硬”科学知识“软”化, 使生活在人文和社会中的人类有效地接受并利用起来, 同时让人文社会的“软”经验知识“硬”化, 使其可以协调一致地被纳入科学方法的分析体系, 应是复杂性医学的一个主要研究方向。物联网、云计算、数据库、知识库、知识图谱、知识范畴和知识本体等人工智能技术, 加上概率图模型、范畴数学等理论工具, 为虚实软硬知识之间的转换、纠缠、反馈提供了手段, 也为物理实际医疗系统和软件虚拟医疗系统之间的实时闭环互动提供了保障。让虚实对立统一, 加快建设虚实一体的医学医疗系统, 降低成本, 提高效益, 是一项十分迫切的任务。

（3）涌现与收敛的机制和技术

涌现和收敛都是复杂性科学的基本概念和机制。如何通过涌现的方法将不同时间、不同地点、不同疾病所涌现出的数据和知识，有效地聚集到所关注的具体医学问题，并正确地收敛于所需要的解决方案之中，是复杂性医学必须回答并完成任务。边缘计算、云端推理、虚拟增强混合现实技术，特别是平行智能将边缘之涌现与云端之收敛能力通过计算实验和平行执行的方法统一成一体，为实现分布混合式医学医疗系统（distributed hybrid medical system, DHMS）提供了技术基础和实施条件，可在一定程度上缓解甚至解除现代医学的“循证困境”。

3.2 基于交叉学科的医学融合范式

（1）面向引导性知识的平行哲学

医学智能技术的兴起，必然改变医疗的效果、人们的期望和社会的成本，进而重构医学的科学性、人文性和社会性之间的相互关系。对此，不妨从一切的根源，即哲学的角度思考这些问题，重新分析、规范、标定三者的关系，使之合理和谐地适应于时代。现有的哲学体系主要围绕存在（being）和变化（becoming）两个核心理念展开，衍生出科学、人文、社会的现代化研究，但目前医疗的商品化和资本化，医患关系的异化和恶化，都迫切表明信任（believing）必须被纳入时代哲学的核心范畴，形成智能时代的新哲学。平行哲学就是一种基于卡尔·波普尔（Karl Popper）物理、心理、人工的3个世界认知，集关于 being、becoming、believing 的描述性、预测性、引导性（prescriptive）知识于一体，利用诺伯特·维纳（Norbert Wiener）的循环因果（circular causality）进行逻辑推理的有机智能哲学。相对于其他哲学，平行哲学之新在于引入了独立的引导性知识体系，其相应的引导功能（即 prescription）不但与医生的处方是同一个英文单词，而且在认知理念和实施过程上也是一致的。此外，与许多“形而上”的哲学不同，平行哲学利用智能技术，如密码学、区块链、非同质化通证（或称防替通证）（non fungible token, NFT）、智能合约、分布式自主组织（decentralized distributed organization, DAO），从技术和工程上将信任和契约变“真（true）”：可信（trusted）、可靠（reliable）、可用（useful）、高效（effective+efficient），使之直接成为面向大众的“形而下”医学知识系统和医疗服务产品，从而破除医学的“认知困境”，推动医疗健康

人文性和社会性难题的解决^[17-18]。

（2）医学知识工程的新基建 CPSS

为了建立与智能科技和平行哲学相匹配的医学新范式和医疗新文化，使数据之力、计算之力、算法之力、网络之力和区块链之力能够有效地汇聚于一体，确保“五力合一”成为医学的新活力，必须首先变革现代医学知识和医疗系统的基础设施。为此，国际上已视数字孪生（digital twins）和相应的信息物理系统（cyber-physical systems, CPS）为工业制造业升级换代的核心基础设施。与此对应，对于涉及生物生命体的医学，逻辑上平行系统和相应的信息物理社会系统（cyber-physical-social systems, CPSS）就是其新一代基础设施的自然之选。平行系统由一个或多个对偶的主体系统和影像系统组成，其中影像系统主要由人工系统构成，而包括数字孪生等各个层面的孪生技术是生成人工系统的主要方法。相对于 CPS，CPSS 的核心是集人机物于一体，突出人及其社会因素在建模中的关键作用，强调“人是万物的度量”，置人于系统之中，而不是之外，使人机交互和人机混合智能有效，以此确保人在决策中的核心和主导地位^[19]。对于事关生命与健康的医学医疗问题，守护人性底线的人类医生不可替代。正因如此，CPSS 的这一特性对新一代医学至关重要。而且，方兴未艾的边缘感知、云计算、物联网、智联网等新技术，是实现医学知识工程的新基建 CPSS 的有力保障。

（3）医学知识自动化的新范式

基于仪器和机器的物理自动化或工业自动化，现代医学和医疗已经发展到了灿烂的今天，但如果要走向更加辉煌的明天，必须依靠医学知识自动化，变革医学知识的生成、管理、传播、解析和应用。显然，平行哲学、平行系统和 CPSS，将为这一新的自动化进程在结构上提供软硬环境的支撑。近年来，IBM 公司的沃森人工智能健康项目，DeepMind 的 AlphaGo 及 AlphaFold 等，已沿此方向做出了十分有影响的尝试。实际上，在此之前，许多医学初创公司就开始了医学教科书和医疗案例的知识图谱工程，并在特定疾病的诊断和治疗上取得了成功的实践。随着知识表示、自然语言处理和情感心理计算等智能技术的进一步成熟普及，医学知识自动化必将成为新的医学医疗范式，使多学科、交叉学科和跨学科医学逐渐地成为标准，并不再向医生提出非分的智力和体力要求，不再为患者

增加额外的心理和经济负担。

3.3 基于系统智能的医学医疗体系

(1) 基于模型的医学系统工程

系统工程对于提高医学研究和医疗水平至关重要,近年来西方各国纷纷制定计划和政策促进系统思维与系统工程在医学医疗中的应用,从各个层面在疾病的研究、治疗、康复以及日常健康的引导、维护等环节落实系统工程方法和技术,声称取得了“戏剧性的正面结果”,令人“十分满意”^[20]。基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)是新一代系统工程技术的代表,是医学知识自动化的工程基础,也是医疗机器人过程化的技术保障。通过建模的形式化应用,MBSE可以从开始的概念设想阶段一直到开发和后面各个生命周期阶段,连续地支撑系统需求、设计、分析、验证、核实等活动。相对于面向物理或工业自动化的传统基于文件的系统工程(document-based systems engineering, DBSE),MBSE是面向知识自动化,走向引导性医疗系统的必由之路。目前,基于功能的系统工程(function-based systems engineering, FBSE)和基于引导的系统工程研究(prescription-based systems engineering, PBSE)正在兴起。人们希望MBSE、FBSE和PBSE的结合,可为基于模型、功能和引导的医学医疗系统提供相关技术,改进医学医疗系统不同利益方之间的交流与合作,提高管控复杂性的水平,提升产品的质量与可靠性,加强知识获取和信息再利用的能力,改善学习和传授医学知识和医疗技能的效率。

(2) 医学机器人过程自动化

目前机器人过程自动化(robotic process automation, RPA)主要被用于服务、商务和管理过程的自动化,但RPA对医疗服务、管理和监控过程的自动化具有巨大的潜力,是医学研究和医疗技术自动化及智能化无法绕过的环节。RPA也被称为软件机器人学(software robotics),主要思想是利用软件机器人(software robots或bots)及更广义的人工智能“数字人”来完成信息的获取和知识的应用,并使RPA系统具有处理不确定、多样性、复杂化任务的能力。加速开发面向医学医疗的RPA,包括从基于模型、功能和引导的医学医疗系统到软件定义的医学研究流程和医疗服务流程、数字医务工作者、虚拟在线医护人员交流群体、数字患者、虚拟在线患者支持群体等,是一项十分具有挑战性却非

常重要和迫切的工作。

(3) 基于ACP的平行智能医学

集成基于模型、功能和引导的医学医疗工程与医学医疗机器人过程自动化技术后,人们就可以利用ACP方法,首先通过验证核实的有限数据构造人工医学系统,即不同层次不同粒度上的影像或孪生系统(包括数字孪生)。然后,利用人工医学系统进行虚拟的医学医疗计算实验,产生大数据,进一步验证核实设计的医学研究或医疗方案的有效性及其性价比,形成具体的精准知识和深度智能。最后,利用实际和人工医学系统之间的虚实互动与平行执行,以及数据驱动和知识驱动的平行驱动,产生虚实之间的纠缠反馈,形成虚实之间的双层闭环,实施精准的管理与控制,实现预防、主动、个性化、精准(“P4”)平行系统智能医学与医疗,即“P5”医学与医疗。平行医学医疗的框架与流程,将在下一节进一步讨论。

总之,复杂性医学的目标是利用复杂性科学的研究,将复杂性任务交给虚拟的人工系统解决,而医学工作者的工作必须尽可能简单化,最终希望人只处理高心智却简单的人文性和社会性任务。跨学科医学的任务是建设新的医学基础设施,培养新的医学范式和医疗文化,实现交叉学科医学知识自动化,其目的依然是减轻医生和患者的负担,提高医疗效益。系统智能医学就是希望利用数据智能和智能科技,通过人机结合虚实平行的方式,将复杂性医学和跨学科医学的理念、方法、技术、流程付诸实践,成为可信、可靠、好用、高效的分布式自主自动化医学医疗组织和系统,变革现行医学医疗和健康体系,更多更好地服务人类。

4 平行医学:迈向智慧的医学

所谓平行医学,就是利用平行系统和平行智能方法研究与医学和医疗相关的问题的方法与体系,主要由基于ACP方法的医学医疗流程和并行医学框架平台组成。首先,需要构建与实际现行的医学研究和医学服务对应的人工或虚拟医学研究步骤和医学服务过程模型,即将其软件化定义或数字化孪生。一般而言,一个或多个实际医学系统(实际系统)可以对应于一个或多个人工医学系统(人工系统),一是完成医学医疗模型的形式化和知识表示,二是将模型的功能从传统的分析转化为数据生成。在人工系统的基础上,开展医学医疗的计算实

验，将具体问题的“小数据（small data）”，通过这一实验过程和对生成等方法变成“大数据（big data）”，再利用机器学习和各种人工智能方法凝练出针对具体问题的精准知识、深智能或“小智慧（smart data）”，如同 AlphaGo 针对围棋博弈所完成的那样。医学医疗的最终任务是解决患者的问题，所以，最后还需要在人工系统和计算实验的基础上实施平行执行：实际系统与对应的人工系统各行一步，然后交换其结果并进行比较，根据差别进行虚实反馈，实现虚实闭环，如此反复进行，利用虚实平行互动，形成虚实之间的双反馈和双闭环。

平行医学的基本思路就是：利用虚实的相互作用，由“单一世界”转变到“多重世界”，完成对实际医学医疗过程的管理与控制，包括对有关医学人员的培训和系统学习，对相关医学决策和行为的实验与评估，使过去“摸着石头过河”的实践方式升华到科学化、系统化、精细化水平的科学管理，并能够以可计算、可实验、可验证的方式不断改善、不断提高。

平行医学系统的基本框架如图 2 所示，主要由实际医学系统和人工医学系统所构成的平行系统，以及学习与培训、实验与评估、管理与控制 3 个功能平台组成。利用平行系统的虚实互动和平行驱动，对虚实之间的行为进行交换、对比和分析，完成对各自未来状况的“借鉴”“预估”和“优化”，相应地调节各自的运行管理与控制方式，实现相关人员和算法的学习与培训、相关决策和行为的实验与评估、相关过程与服务的管理与控制。

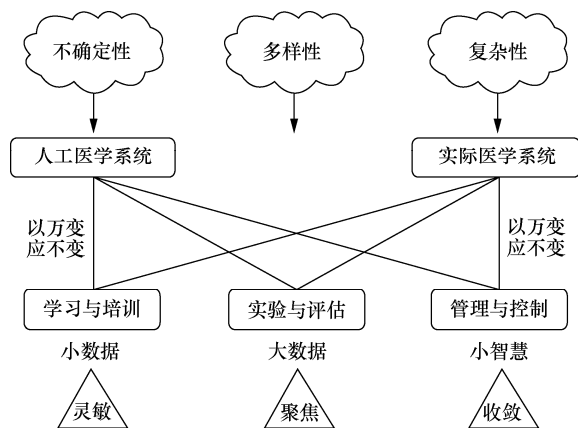


图 2 平行医学系统的基本框架

（1）学习与培训

人工医学系统是一个医务工作者学习与培训的平台，各种各样的人工智能可视化和虚拟加强现

实技术可在此发挥重要作用。实际和人工医学系统的多种多样的组合与联结，可以使医务工作者加速并有效地掌握相关知识和处理各种复杂情况，也可以将其作为各种手术的训练系统。在条件允许的情况下，应该以与实际医学系统相同的流程来管理控制人工医学系统，将人工医学系统作为实际医学系统的备用系统，即“热备份”，便于紧急情况下的切换应急，增加平行医学系统，提升其可靠性和应急能力。

（2）实验与评估

针对不同的复杂性水平和精度要求，人工医学系统可以通过数学或数字孪生、软件孪生或软件定义、虚拟孪生或代理建模等技术实现。人工医学系统主要被用来形式化知识表示和数据生成，进而进行医学医疗的计算实验。计算实验可分为仿真（emulation）实验、仿效（simulation）实验或仿制（imitation）实验，用来分析了解各种复杂医学系统在各种环境下的行为和反应，并对不同医疗方案的效果进行评估，评估结果作为选择和支撑医学医疗决策的依据。

（3）管理与控制

人工医学系统试图尽可能地逼近实际医学系统的行为，预测其下一步的可能情况，并进行评估，从而对具体疾病的医疗方案进行分析和引导，作为决策的依据。进一步的，通过观察实际医学系统和人工医学系统的状态差别，产生误差和反馈信息，形成虚实闭环，并对人工医学系统的评估方式或参数进行修正，根据场景相互逼近，减少差别，反复循环，完成医学决策生成、决策推荐、决策支持等功能。

尽管在科学上已取得了许多重大进展，但医学医疗在本质上还是一门实验学科，依然按照“吃一堑，长一智”的方式进化发展。在相当意义下，平行医学就是“吃一堑，长一智，换了世界”：利用信息和智能技术，把在物理世界“吃一堑”，换成在物理世界或虚拟世界“吃一堑”，把在认识知识上“长一智”，换成在物理世界的实践上“长一智”，特别是虚拟的“吃一堑”可以通过知识自动化的形式大量大范围地快速进行实验，把医学的小数据变成大数据，再炼成深智能，实现低成本、高效益、广智慧。目前，这一平行系统和平行智能的方法已在军事、国防、经济、制造、教育等领域得到广泛的应用^[21-25]，并开始在痛风、皮肤、眼科、

手术、制药和医学图像等方面进行了一系列的初步探讨^[26-32], 值得进一步开展更加深入细致的系统化研究与实践。

5 结束语

平行医学必将推动智能医学的深入发展, 从“P4”医疗到最终的智慧医学医疗, 这一进程必将对现存的医学和健康生态体系造成变革性的冲击。

首先, 平行医学将引发医学医疗数字孪生技术的广泛应用。数字医生、数字护士、数字患者等通过软件定义构成的医学医疗知识机器人将成为智能医学医疗系统的标准产品, 改变现有的医学知识的表示与学习方式, 改善目前的医疗服务的过程与实施方法。必须指出的是, 这一变革不是排除人类医生或物理形态的医疗机器人, 而是大大地减轻他们的负荷与消耗, 使他们以更加人性、舒适、高效的方式从事医学医疗工作。

其次, 平行医学将变革现有医学研究和医疗服务的组织与运营模式, 虚实互动的平行医学研究院和平行医院将以不同的形式涌现, 联邦数据、联邦控制、联邦服务、联邦管理、联邦学习、联邦智能等新的人工智能方法将构成既保护各方隐私与权益, 又能提高安全与效率的新联邦医学医疗生态体系, 例如联邦智能医院, 其技术基础就是区块链和DAO方法, 可以为新医学生态提供安全、共识、激励和智能合约等手段^[33-36]。

最后, 平行医学的体系不但可以提升人类自身的健康保障水平, 也可被用于改善人类社会的群体生态健康。广义的平行医院, 是指将人类医院(hospital, h代表人类human)的模式和实践经验推广到解决各种社会问题的过程中, 形成社会医院(sospital, s代表社会society)、经济医院(eospital, e代表经济economics)和金融医院(fospital, f代表金融finance), 推动人类世界向“6S”智慧社会发展: 物理世界安全(safety)、网络空间安全(security)、整个生态的可持续(sustainability)、个性优化(sensitivity)、全面服务(service)和全面智慧化(smartsness)。

致谢:

在相当程度上, 本文是结合自己的工作学习《医学的温度》一书的体会与思考, 这本书让我从一个全新的角度去感受和认识医学和医疗。非常感谢此书作者北京大学医学部教授韩启德先生在百忙之中

多次长时间的指教和帮助, 使我决心花更多的精力研究智能科技与医学医疗相结合的有效途径。在此, 对近一年来给予我和家人很大帮助的许多医学专家深表谢意, 特别是中国人民解放军总医院的桑福金、张旭、许百男、张志成, 北京协和医院的李汉忠、金征宇、薛华丹, 首都医科大学附属北京天坛医院的杨俊、贾文清、王拥军、管仲军, 北京和睦家医院的朱刚、田江克, 以及英国国立神经病学科神经外科医院(NHNN)的James Allibone, 美国匹兹堡大学医学中心的Dade Lunsford和德国雷根斯堡大学医学院的Burger Maxiwillan等医生, 他们在提供专业帮助之余, 更让我了解了医学和医疗的本质与现实。

参考文献:

- [1] 韩启德. 医学的温度[M]. 北京: 商务印书馆, 2020.
HAN Q D. The warmness of medicare[M]. Beijing: The Commercial Press, 2020.
- [2] WANG F Y, WONG P K. Intelligent systems and technology for integrative and predictive medicine: an ACP approach[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2013, 4(2): 1-6.
- [3] 王飞跃. 平行医学与平行健康: 迈向智能医学和智慧健康的智能科技[R]. 2014.
WANG F Y. Parallel medicine and parallel health: smart technology towards smart medicine and smart health[R]. 2014.
- [4] WANG F Y. Parallel healthcare: robotic medical and health process automation for secured and smart social healthcare[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2020, 7(3): 581-586.
- [5] 弗朗西斯·柯林斯. 生命的语言: DNA和个体化医学革命[M]. 杨焕明, 等译. 湖南: 湖南科学技术出版社, 2018.
COLLINS F. The language of life: DNA and individualized medical revolution[M]. Translated by YANG H M, et al. Hunan: Hunan Science and Technology Press, 2018.
- [6] ERIC T. Deep medicine: how artificial intelligence can make healthcare human again[M]. [S.l.:s.n.], 2019.
- [7] 王小宁. 不许生病[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
WANG X N. Don't get sick[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [8] 吴家睿. 生物学是什么[M]. 北京: 北京大学出版社, 2021.
WU J R. What is biology[M]. Beijing: Peking University Press, 2021.
- [9] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489.
- [10] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial society, computational experiments, parallel systems—a discussion on the study of the calculation of complex socio-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [11] 罗伊·波特. 剑桥医学史[M]. 张大庆, 李志平, 刘学礼, 译. 长春: 吉林人民出版社, 2000.
PORTER R. Cambridge illustrated history of medicine[M]. Translated

- by ZHANG D Q, LI Z P, LIU X L. Changchun: Jilin People's Publishing House, 2000.
- [12] HOOD L, FRIENDS H. Predictive, personalized, preventive, participatory (P4) cancer medicine[J]. Nature Reviews Clinical Oncology, 2011, 8(3):184-187.
- [13] IVAN I. Medical nemesis: the epidemiology and community health[M]. [S.l.:s.n.], 1982.
- [14] FRANCISW P. The department of medicine at the Peking union medicine college[J]. Science, 1922, 56(1447): 317-320.
- [15] FRANCISW P. The care of the patient[J]. The Journal of American Medical Association, 1927(1): 1-6.
- [16] GIULLAMARINIM. Narrative medicine: bridging the gap between evidence-based care and medical humanities[M]. [S.l.]: Springer Verlag, 2016.
- [17] 王飞跃. 平行哲学与智能科学: 从莱布尼茨的 Monad 到区块链之 DAO[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(12): 1055-1065.
- WANG F Y. Parallel philosophy and intelligent science: from Leibniz's Monad to blockchain's DAO[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 33(12): 1055-1065.
- [18] 王飞跃. 平行哲学: 智能产业与智慧经济的本源及其目标[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 308-318.
- WANG F Y. Parallel philosophy: origin and goal of intelligent industries and smart economics[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(3): 308-318.
- [19] WANG F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
- [20] 王飞跃. 智能系统加速提升医疗保健水平[N]. 中国科学报, 2014-06-27.
- WANG F Y. Intelligent system accelerates the improvement of healthcare[N]. China Science Daily, 2014-06-27.
- [21] 王飞跃. 面向赛博空间的战争组织与行动: 关于平行军事体系的讨论[J]. 军事运筹与系统科学, 2012, 26(3): 5-10.
- WANG F Y. War organization and action for cyberspace: a discussion of parallel military systems[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2012, 26(3): 5-10.
- [22] 王飞跃. 国防装备与系统的未来变革: 从 3D 打印到平行军事体系[J]. 国防科技, 2013, 24(3): 1-9.
- WANG F Y. The coming revolution in national defense weaponry and systems: from 3D printing to parallel military systems[J]. National Defense Science and Technology, 2013, 24(3): 1-9.
- [23] WANG F Y. Parallel economics: a new supply-demand philosophy via parallel organizations and parallel management[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2020, 7(4): 840-848.
- [24] 王飞跃. 从社会计算到社会制造: 一场即将来临的产业革命[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(6): 658-669.
- WANG F Y. From social computing to social manufacturing: the coming industrial revolution and new frontier in cyber-physical-social space[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(6): 658-669.
- [25] 王飞跃. 如何培养人工智能人才: 从平行教学到智慧教育[J]. 科技导报, 2018, 36(11): 9-12.
- WANG F Y. How to cultivate artificial intelligence talents: from parallel teaching to smart education[J]. Science and Technology Review, 2018, 36(11): 9-12.
- [26] 王飞跃, 李长贵, 国元元, 等. 平行高特: 基于 ACP 的平行痛风诊疗系统框架[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(12): 1057-1068.
- WANG F Y, LI C G, GUO Y Y, et al. Parallel gout: an ACP-based system framework for gout diagnosis and treatment[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 30(12): 1057-1068.
- [27] 王飞跃, 苟超, 王建功, 等. 平行皮肤: 基于视觉的皮肤病分析框架[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(7): 577-588.
- WANG F Y, GOU C, WANG J G, et al. Parallel skin: a vision-based dermatological analysis framework[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(7): 577-588.
- [28] 王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 等. 平行眼: 基于 ACP 的智能眼科诊疗[J]. 模式识别与人工智能, 2018, 31(6): 495-504.
- WANG F Y, ZHANG M, MENG X B, et al. Parallel eyes: an ACP-based smart ophthalmic diagnosis and treatment[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2018, 31(6): 495-504.
- [29] 王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 等. 平行手术: 基于 ACP 的智能手术计算方法[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(11): 961-970.
- WANG F Y, ZHANG M, MENG X B, et al. Parallel surgery: an ACP-based approach for intelligent operations[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 30(11): 961-970.
- [30] 张梅, 陈鸽, 王飞跃, 等. 平行胃肠: 基于 ACP 的智能胃肠疾病诊疗[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(12): 1061-1071.
- ZHANG M, CHEN L, WANG F Y, et al. Parallel gastrointestinal: an ACP-based approach for intelligent operations[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(12): 1061-1071.
- [31] 王飞跃. 平行药物与智能药学[R]. 2014.
- WANG F Y. Parallel drugs and smart pharmacy[R]. 2014.
- [32] 王飞跃, 金征宇, 苟超, 等. 基于 ACP 方法的平行医学图像智能分析及其应用[J]. 中华放射学杂志, 2021(3): 309-315.
- WANG F Y, JIN Z Y, GOU C, et al. ACP-based parallel medical imaging for intelligent analytics and applications[J]. Chinese Journal of Radiology, 2021(3): 309-315.
- [33] WANG F Y, WANG Y F. Parallel ecology for intelligent and smart cyber-physical-social systems[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2020, 7(6): 1318-1323.
- [34] 王飞跃, 王艳芬, 陈慧竹, 等. 联邦生态: 从联邦数据到联邦智能[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(4): 305-313.
- WANG F Y, WANG Y F, CHEN Y Z, et al. Federated ecology: from federated data to federated intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(4): 305-313.
- [35] WANG J, WANG X, GUO Y, et al. A parallel medical diagnostic and treatment system for chronic diseases[C]//Proceedings of the 2020 Chinese Automation Congress. [S.l.:s.n.], 2020: 412-416.
- [36] WANG S, WANG J, WANG X, et al. Blockchain-powered parallel healthcare systems based on the ACP approach[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2018, 5(4): 942-950.

[作者简介]



王飞跃 (1961—), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能以及知识自动化。