

平行麻醉：从麻醉自动化走向智慧型全周期麻醉平台

赵毅飞 申乐 叶佩军 王静 王飞跃

Parallel anesthesia: from anesthesia automation to intelligent full-cycle anesthesia platform

ZHAO Yifei, SHEN Le, YE Peijun, WANG Jing, WANG Fei-Yue

引用本文：

赵毅飞, 申乐, 叶佩军, 等. 平行麻醉：从麻醉自动化走向智慧型全周期麻醉平台[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 234-246.

Yifei ZHAO, Le SHEN, Peijun YE, et al. Parallel anesthesia: from anesthesia automation to intelligent full-cycle anesthesia platform[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 234-246.

您可能感兴趣的其他文章

平行车间调度模型构建和系统设计

Parallel workshop scheduling model and system design

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 254-266

平行设计：面向平行制造体系的非标机械方案设计流程

Parallel design: non-standard mechanical scheme design procedure in parallel manufacturing

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 274-284

平行医疗机器人

Parallel surgical robots

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 222-233

基于深度学习的自动驾驶多模态轨迹预测方法：现状及展望

Deep learning-based multimodal trajectory prediction methods for autonomous driving: state of the art and perspectives

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 180-199

行人轨迹预测方法关键问题研究：现状及展望

Key problems and progress of pedestrian trajectory prediction methods: the state of the art and prospects

智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 143-162

平行电池：智能生态化电池技术与服务体系的框架和流程

Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services

智能科学与技术学报. 2021. 3(4): 521-531

平行麻醉：从麻醉自动化走向智慧型全周期麻醉平台

赵毅飞¹, 申乐¹, 叶佩军², 王静², 王飞跃^{2,3}

(1. 中国医学科学院北京协和医院麻醉科, 北京 100730;

2. 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;

3. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049)

摘要: 基于平行医疗理论提出了平行麻醉理论及方法, 该理论旨在通过人工系统建模、计算实验分析及人机交互的平行执行等方式, 构建由生物人(医护人员)、机器人(机械自动化设备)及数字人(数字医护)构成的有机统一的智慧型全周期麻醉平台。首先从当前麻醉学科发展的现状及面临的瓶颈入手, 从临床麻醉、危机管理、科学研究、教育教学及运营管理等方面构想平行麻醉系统中由生物人、数字人、机器人共同构建的多个智能化场景模式, 并分析生物人在每个场景中的作用及三者相辅相成的关系。重点介绍了平行麻醉通过计算实验及虚实结合的修正模式对患者医疗安全及医护工作效能的提升与改善。最后通过分析平行麻醉系统构建中的伦理问题, 分析自动化与智能设备在麻醉中参与的边界及规定, 以“尊重生命、公平透明、高效运转、节省劳力”为系统准则, 建立一个减少医护机械化重复劳动、增强智能决策辅助能力、提升精细化治疗水平和管理水平的智慧型全周期麻醉平台。

关键词: 平行麻醉; 智能医疗; 麻醉机器人; 数字医生; 个体化麻醉

中图分类号: TP29

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202324

Parallel anesthesia: from anesthesia automation to intelligent full-cycle anesthesia platform

ZHAO Yifei¹, SHEN Le¹, YE Peijun², WANG Jing², WANG Fei-Yue^{2,3}

1. Department of Anesthesiology, Peking Union Medical College Hospital, Beijing 100730, China

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

3. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Based on the parallel medical theory, this paper proposes the theory and method of parallel anesthesia, which aims to build an organic and unified intelligent full-cycle anesthesia platform composed of biological humans (medical personnel), robots (mechanical automation equipment) and digital humans (digital medical care) through artificial system modeling, computational experimental analysis and parallel execution of human-computer interaction. Starting from the current status quo and bottleneck of the development of anesthesiology, this paper first conceives multiple intelligent scene modes jointly constructed by biological humans, digital humans and robots in parallel anesthesia systems from the aspects of clinical anesthesia management, crisis management, scientific research, education and teaching, and operation management, and analyzes the role of biological humans in each scene and the complementary relationship between the

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-05-30

通信作者: 申乐, pumchshenle@163.com; 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 中央高水平医院临床科研专项2022年专科提升计划(No.2022-PUMCH-B-007); 国家自然科学基金项目(No.61533019); 英特尔智能网联汽车大学合作研究中心项目(No.ICRI-IACV)

Foundation Items: National High Level Hospital Clinical Research Funding (No.2022-PUMCH-B-007), The National Natural Science Foundation of China (No.61533019), Intel Collaborative Research Institute for Intelligent and Automated Connected Vehicles (No.ICRI-IACV)

three. At the same time, the improvement and improvement of parallel anesthesia on patients' medical safety and medical work efficiency through computational experiments and the implementation correction mode of virtual and real combination are introduced. Finally, by analyzing the ethical issues in the construction of parallel anesthesia system, analyzing the boundary and regulations of automation and intelligent equipment participation in anesthesia, and taking "respect for life, fairness and transparency, efficient operation and labor saving" as the system criteria, an intelligent full-cycle anesthesia platform is established to reduce the repetitive work of medical mechanization, enhance the ability of intelligent decision-making assistance, and improve the level of refined treatment and management.

Key words: parallel anesthesia, intelligent healthcare, anesthesia robot, digital doctor, personalized anesthesia

0 引言

医疗卫生事业关系着亿万人民的健康,是重要的关乎国计民生的事业。实现“病有所医”的愿望,不仅是提升人民健康水平的必然要求,更是人类社会的共同愿景。党的十九大报告提出“实施健康中国战略”,将医疗卫生事业的重要性提升至新的高度,从更高层面指引和统领行业的发展,以主动应对老龄化、少子化、人口区域分化对国家长远发展的挑战^[1]。解决好健康问题,不仅是为了保障和促进人的全面发展,也是为了提高我国的内生动能,以人口高质量发展支撑中国现代化发展^[2]。

麻醉科手术室作为医院内重要的平台科室,是开展手术及检查的重要空间,串联起医院各手术及操作科室。在大型医疗机构中,通常有近百个手术间和手术室外场所同时开展外科、妇产科、五官科等手术及心内科、呼吸科和消化科的检查操作,包括手术、麻醉医生,手术室护士,消毒、运维、后勤人员等近千人每日在此平台内工作,数千台设备和上万件手术及检查器械在此流转和运行,成为整个医院中固定资产价值及密度最高的部分^[3]。因此平台中人员复杂,物流众多,固定资产众多,并且对场所安全和无菌环境有较高要求。作为人流、物流、信息流三者交织的平台,麻醉科的运行顺畅是全院手术科室正常运转的保障,也是维护患者生命安全的一道重要防线和底线。将麻醉科管理运行好,是让医护合作更为顺畅,让患者更加安全,让医院更加高效运转的重要条件。

麻醉学作为学科的历史仅有一百多年,麻醉学科的发展也是现代医学发展的缩影。作为一对孪生兄弟,麻醉和手术的发展一直相辅相成。从近代化学和药学的蓬勃发展开始,麻醉最初的使命是让人们感受不到疼痛,从而能够有尊严地、顺利地开展更大规模的手术。随着手术技术的不断更新,麻醉

学科的使命也从让患者免于疼痛扩展出了更多的内涵,利用各种手段监测并维持好患者术中各器官功能和生命体征。近代之后,麻醉科更是把术中的监护理念延展至整个围术期,并在疼痛医学、危重症医学领域做出重要贡献,为患者提供更全面更优质的照护与治疗^[4]。

麻醉学科的发展与革命也与自动化息息相关。在20世纪中叶,麻醉机的出现实现了对患者呼吸条件的控制及稳定的吸入麻醉给药,将麻醉医师的双手从人工呼吸和给药中解放出来。随着信息技术的发展,患者包括血压、心率、体温、氧饱和度等在内的各项生命体征通过监护仪进行数据的实时监测和采集,提醒麻醉医生异常情况的发生。靶控输注和麻醉深度检测等工具帮助麻醉医生更精细化地调控患者术中状态,使得监测和调控的程度更加密集和平稳^[5]。尽管麻醉学科有了长足的发展,但随着老龄化人口和舒适化医疗需求的激增,麻醉医生在日常工作中仍然面临工作时间长、劳动力短缺、设备智能化程度低、精准和精细化治疗条件有限等现实问题^[6]。随着大数据、人机交互和人工智能浪潮的到来,麻醉学科也必将迎来更大的机遇和发展,通过信息化、自动化、智能化手段,建立智慧型麻醉医疗平台,将更大程度地解放麻醉医生的机械劳动,更好地辅助麻醉医生做好患者评估、临床决策、病情预判及精细化治疗。

平行系统理论由王飞跃教授于2004年提出,是用于管理和控制复杂系统的系统化框架。平行系统的核心是ACP方法,即人工社会(artificial societies)+计算实验(computational experiments)+平行执行(parallel execution),即平行系统通过对实际系统进行模拟和映射形成人工系统,通过对该系统进行计算实验可对实际系统中的任务进行预测与验证,通过两套系统间交互的平行执行对实际系统进行优化管理^[7-8]。平行系统理论在各行业的复杂

系统控制中已取得成功,如工农业生产管理、企业资源计划等。平行医疗是平行系统理论在医疗中的应用,即利用平行系统和平行智能方法解决与医学相关的问题,其主要由基于ACP方法的医疗流程和平行医疗框架平台组成^[9]。平行医疗理论^[10]已广泛应用于各个疾病领域,如平行痛风^[11]、平行皮肤^[12]、平行肠胃^[13]、平行医学影像^[14]等,平行医学^[15]、平行医院^[16]、平行医生^[17]等也被相继提出,为公立医院精细化管理提供了智能化解决方案。

本文依据平行医疗理念提出平行麻醉的概念,利用大数据、物联网及人工智能等先进技术将现行医护人员及医疗系统,高度机械化、自动化的智能设备系统,与高度智能化、数字化的智慧医疗资源系统整合为一个有机整体,从而建立一个高效运转、安全可靠、省时省力、各司其职的智能化麻醉手术平台,实现资源的高效配置、人员的优化运用、知识的高效输出,主动拥抱新时代麻醉学科的发展变革。

1 平行麻醉的内涵及构成

医疗系统的构成庞大、精密而复杂,其系统控制和管理的难度大,又因其涉及人的安全与伦理,每一项决策的变更都可能直接影响到患者的安全与健康,必须有周全预案和反复推演。借鉴平行系统及平行医疗的广泛运用,构建助力麻醉学科高质量发展的平行麻醉系统势在必行。平行麻醉系统可成为麻醉医生的得力助手、患者安全的有效保障、科室运转的核心智囊,系统可以实质性地提升麻醉的监护、诊疗、管理和运转水平。完备的平行麻醉系统主要由以下3个主要部分构成,每个主系统又由若干个子系统交互而成。

1.1 数字麻醉系统(数字人)

数字麻醉系统利用大数据、知识自动化、数字映射等建模手段,通过整合既有知识库及数据库,充当麻醉医生和科室运转的“辅助大脑”。一方面,为麻醉医生提供智力支持、决策辅助^[18],充当科研教学帮手,并通过大数据分析既往临床规律,提供基于真实世界的临床建议。另一方面,作为管理智囊,实时展示科室运转情况,自动统计分析手术量及变化趋势,并完成工作排班、成本核算、工作量统计等管理指标分析,跟踪质控、国考及DRG/DIP等考核指标并提出改进建议。

1.2 机械麻醉系统(机器人)

机械麻醉系统通过物联网、机器人等技术手段,将麻醉医护人员从机械性重复劳动中解放出来,以更节省人力及更精细化管理的方式,将药物配置、毒麻药管理、药物闭环输注、耗材取用、固定资产盘点、库存管理等重复机械劳动交给机器完成,把医护还给病人,将更多精力分配到临床诊治、患者照护及人文关怀。

1.3 麻醉医生和手术室护士(生物人)

人是医疗决策和行为的核心理,是医疗行为的负责人,是整个平行麻醉系统的关键。平行麻醉系统在建立了若干数字映射即人工系统后,通过反复的计算实验和平行执行优化既有的医疗决策和管理条件,在改进执行的同时优化模型的设置,从而实现良性的平行麻醉交互循环。运转良好的平行麻醉平台将能使生物人逐渐从体力劳动中解放出来,其职责更多地转变为监督和决策,同时也拥有更多精力用于患者沟通和照护,让医疗行为更安全、更有温度。在平行麻醉中,麻醉医护应充分掌握足够的医学和系统运行的知识,并应具有当数字人和机器人在闭环系统中出现故障时及时变闭环为开环,接管自动化系统,纠正偏离稳态,并保障患者安全的能力。

平行麻醉的构成及功能如图1所示。平行麻醉的3个主要部分环环相扣,相辅相成。数字人的经验和数据基石来源于生物人,同时给生物人更多的指导和辅助;机器人帮助生物人完成重复机械劳动,生物人也通过平行执行提高机器人的工作效率;生物人则是整个平行麻醉的核心,掌控并引领

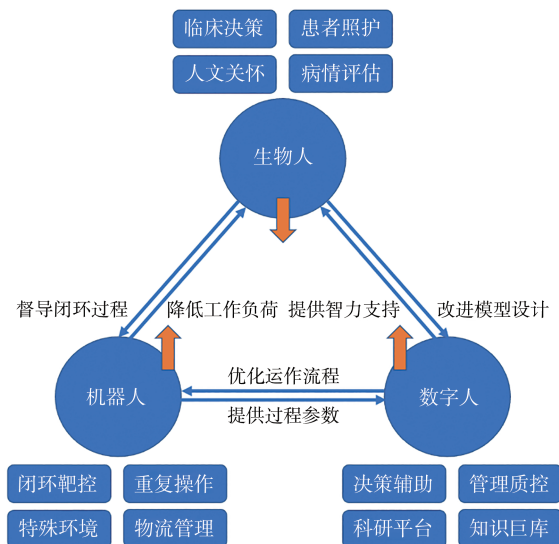


图1 平行麻醉的构成及功能

平行麻醉系统的发展。平行麻醉系统联合物联网、大数据及人工智能，将从根本上创新麻醉学科医疗、教学、科研、管理的模式，从多方面提升医疗精细化管理的水平，使医护和患者均从中受益。下面将从医疗、科研、教学、管理等多个方面详细阐明平行麻醉的应用场景及发展方向。

2 平行麻醉在临床医疗中的应用场景

临床医疗是医疗工作的核心，平行麻醉通过充足的知识储备、完善的辅助指引、可闭环反馈的精细化给药及以物联网为基础的可穿戴设备监测及救治流程的优化完善，辅助麻醉医生实现更精准化、个体化的麻醉。大数据、人工智能和物联网在麻醉学发展中的普及和应用，将为麻醉医生的工作方式带来革命性的变化。

2.1 以麻醉指南和麻醉大数据为支撑的临床决策支持系统

临床医学在过去较长一段时间内作为经验医学，由于个人经验的差异，易带有很强的个人色彩和风格。当人们逐渐重视到这些诊疗差异可能带来不同的临床结局时，循证医学的思想应运而生。但循证医学的发展需要一定的人力和智力支持，数据收集的完整度以及研究方案的设计，如回顾和前瞻性研究，都需有人收集信息。因此平行医疗的价值在于将客观的知识和众人的经验集中于一个平台中，以循证的理念进行归纳和整理，呈现出相对客观的知识和证据。平行麻醉可以带领麻醉医师从传统的经验麻醉和师徒相传的传统麻醉模式走向以大数据和大样本为依据的循证医学时代。

麻醉学科的宝贵经验已被整理成各类专著和指南，但是指南较为系统的行文方式及较长篇幅，导致存在一定学习壁垒，在临床中实际运用时无法迅速得到指南的智力支持。而系统中每个病种每年数千例的麻醉经验，以及麻醉数据库中庞大且不断更新的人群整体是循证医学良好的样本来源，但由于数据的整理和分析存在较高的人工和时间成本，这些数据仍有待挖掘^[19]。基于平行麻醉的临床决策支持系统（clinical decision support system, CDSS）可针对实际临床问题，通过指南检索和精炼快速给出建议，供临床医生学习和评判^[20]，其系统架构如图2所示。由于指南的推荐与本机构常规及其他实际情况可能有一定差异，在平行医疗后台，某些被较多检索但较少采纳的临床问题可以被定期分析

总结，甚至可以据此归纳出新的临床问题，进行相应的临床试验或流程优化。而基于大数据的麻醉病种分析可以归纳出每一种手术相应的特点、麻醉流程、特殊事件或不良事件的发生频率及处理，通过既往大数据优化和丰富麻醉管理方法。大数据也可根据平行系统中的既往数据在术中观察出病人“偏离稳态”的事件，通过系统适时给出相应提醒和建议，强化麻醉医生对风险事件的预判和准备，为临床救治争取更多的时间和先机。

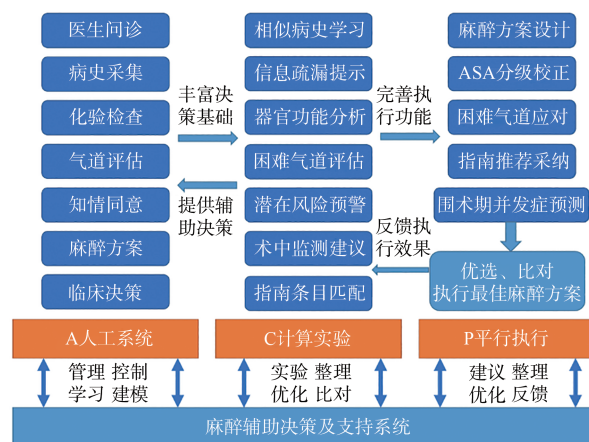


图2 基于平行麻醉的临床决策支持系统架构

在复杂手术和麻醉过程中，平行麻醉系统运用其丰富的知识库，可在多方面提出更加精细的管理建议。例如，平行麻醉数据库可用于各器官系统的术后并发症风险预警，如肺部并发症、术后感染、心脏不良事件、脑血管不良事件等。此外，平行麻醉系统可以给出术中维持器官功能的治疗建议和术中监测项目的建议，并可定时提醒需要加强监测的指征，如血气、血栓弹力图等。这些功能可以帮助医生更好地管理手术和麻醉过程，提高手术的安全性和成功率。

2.2 以可视化图像为基础的人工智能系统

近年来，以神经阻滞和超声心动图为代表的超声技术逐渐在麻醉领域普及，丰富了患者的镇痛、麻醉模式，增强麻醉可视化效果，但有经验的超声医生需要数年甚至数十年的时间培养。超声作为麻醉医生所需掌握的众多知识中的一部分，其学习壁垒和学习时间成本制约了麻醉医生的技术水平。以智能图像识别为代表的人工智能辅助手段，可以帮助麻醉医生识别超声提示的解剖结构，对典型解剖和重要血管神经进行提示，帮助麻醉医生寻找合适

的入路,并可通过做辅助线的方式提醒麻醉医生探头摆放的位置,利用图像强化和特征识别的方式帮助麻醉医生寻找针尖显影。在降低操作难度、提高识别率的同时减少阻滞并发症发生的概率,并可以根据图像及既往效果对阻滞进行评分^[21]。

经食道心脏超声同样是麻醉医生对围术期血流动力学进行判别的重要工具。要精通此技能,医生需熟悉心脏解剖的同时熟练掌握超声的技巧,平行麻醉系统可帮助中低年资麻醉医生加强对标准切面的识别和抓取,并在实际操作中提示满意平面所处位置。此外,超声心动图的实时图像中蕴藏很多血流动力学的关键信息,但目前仍主要通过医生的目视判断心脏的功能和运动。引入人工智能可以将心脏跳动的实时影像解构并组合成更多的维度^[22],通过参数的构建提取更多有临床意义的参数,超声图像的可读性和意义将大大增强。依此类推,在麻醉监测过程中的各类实时波形背后有很多代表患者功能实时状态的指标可待挖掘。例如,麻醉机的呼吸波形与患者肺部的顺应性等多项指标有关;有创动脉监测波形的形状、斜率、加速度及其重构指标与患者的血管张力、整体容量和心脏功能等都有关系。把图像转换为反映器官功能的可解读指标,不断丰富围术期监测的内容也是麻醉发展的重要方向之一^[23-24]。

气道管理是麻醉医生工作技能的重点,通常麻醉医生根据多个指标判断气道建立的困难程度,然而一些不典型的困难气道会对临床工作和患者安全造成损害。可使用人脸识别技术提取患者的面部关键信息,特别是脸下半部分的特征数据,这些数据与气道的困难程度将会有直接的联系,辅助系统将会提醒麻醉医生困难气道的可能性以及其可匹配的插管工具或气道建立方案,平行系统将辅助麻醉医生更好地开展气道管理^[25]。

此外,患者的面部表情和肌肉紧张程度可反映术后的疼痛程度^[26],从而将患者的面部信息转换为疼痛信息,根据图像智能分析的结果进行镇痛方案的建议,这将有助于对儿童或其他不能语言表达的人群更有针对性地开展围术期镇痛管理。

2.3 以闭环靶控监测为代表的可反馈麻醉自动化系统

麻醉药物的功能主要分为镇静、镇痛和肌肉松弛等,麻醉过程是这几种甚至更多种药物配合使用的结果。优秀的麻醉医生会配合手术的进程把握给

药的时机和速度,但初级医师不一定能理解和跟进手术进程,或对生命体征偏离稳态的信号不够敏感,从而造成麻醉过程的波动。此外,人工对于药物浓度的调节是有限的,麻醉医生无法根据监测的参数对麻醉药物的浓度进行实时的调整。因此,根据患者生命体征自动调节输液泵速度的闭环输注系统将比人工调控更为灵敏,通过减少波动使患者生命体征更加平稳的同时减少麻醉药物用量,避免过深或过浅麻醉为患者带来的不良影响^[27]。

以图像识别技术为基础的手术步骤和辅助系统的提示也可以帮助麻醉医生更好地识别手术进程,Xu等针对胃肠镜术中的图像开发了提示和倒计时系统,当系统自动识别胃肠镜的检查步骤时,系统会提醒麻醉医生检查结束的时间。结果显示,尽管药量没有显著差异,该组患者苏醒时间明显少于对照组,同时患者对镇痛的满意程度没有差别。未来术中图像识别可以提示麻醉医生关键步骤,以便中低年资的麻醉医生更好地做好药物的调整,也有利于麻醉医生配合手术过程^[28]。

智能化麻醉系统的发展一波三折,既有对传统系统的不信任,也有对成本和经济方面的顾虑,世界上首个医疗商用机器人是用于胃肠镜的麻醉系统^[29],其基于呼吸、血压等参数监测对进行胃肠镜的患者实施个体化给药,在生命体征偏离的同时自动停止给药并报警,其在美国、加拿大等发达国家有效降低了成本。但是在中低收入国家该系统成本仍然显著高于人工,制约了其继续发展的潜力。中国在麻醉医生人力缺乏的现实条件以及具有一定的替代人力的经济条件下,对麻醉机器人等自动化闭环设备进行推广具有一定的现实意义。在可接受的成本之下,麻醉机器人系统将更好地管理患者的药物输注,保证更平稳的麻醉过程。

同时,可进行闭环反馈的环节还包括麻醉机和呼气末氧气二氧化碳浓度联动进行调整的闭环麻醉机。理论上通过监测数据进行调整的监测项目都可以实现闭环,从而减轻麻醉医生的人工负荷和管理难度^[30]。血管活性药物也可以通过闭环进行给药,在建立了有创动脉监测的系统中,如果出现血压降低的情况,静脉泵可以根据既往患者的血管反应性开始自动给入负荷量和维持量,在该系统中能够比单次给药更好地控制血压的平稳程度^[31]。

2.4 以物联网为基础的流程优化和分析系统

物联网技术是指通过一系列信息传感设备,将

物体及其所属状态接入互联网，从而更智能化地识别、定位、监控和管理流程设备^[32]。正如手术机器人的发展解放了主刀医生的双手，物联网对麻醉安全性的提升和麻醉医生的负荷减轻都有积极的作用。从麻醉医生的角度来看，物联网的加入使麻醉医生的物理盲区减少，避免了上级麻醉医生同时管理多个房间时对其他房间的术中情况不可知的困境。同时，物联网的传输让以往固定在单一机器上的数据整合成为可能，麻醉医师在巡视过程中可以同时知晓多个房间患者的监护情况，并且可以由医生选择将这些信息显示在电脑手机或其他移动设备中。同时，由于一些麻醉和手术设备被整个手术室空间共享，而定位和借用这些设备往往会耽误一定时间，在紧急情况时甚至影响抢救过程和临床安全。而接入物联网的这些共享设备能够被清晰定位，同时能够实时追踪机器的保养和维修的状态，充分调动闲置的资源，提高设备的整体使用效率^[33]。

物联网在医疗中的运用也可以提高临床救治的效率，在绿色通道开启的情况下物联网可以对抢救路径以及准备的时间进行记录，在推荐最佳路径的同时也能够提前调配电梯、门禁开启以利于抢救。同时该定位还能便于事后的复盘和总结，总结每一个环节的用时措施以及可以提高的点^[34]。

可穿戴设备在麻醉临床中的应用潜力较大。其将多个模块和功能集合于一体，简化了以往的有线多模块的监测模式。传统监测模式不但可能造成患者的行动不便，从而影响其下地活动和早起康复，而且脱离监护仪活动可能会脱漏关键的临床事件，造成患者监测状态的缺失^[35-36]。可穿戴设备不但可以集成化地监测患者的生命体征，而且还能够自动上传患者的信息，患者在术前预康复和术后随访等方面都可借鉴该信息。

3 通过平行麻醉提升麻醉危机资源管理能力

在手术中，情况往往瞬息万变，时间单位往往是分钟和秒。这就需要麻醉医生同时具有过硬的专业知识和心理素质，以及团队协作和指挥的能力。罕见事件意味着麻醉医生在实际临床工作中很难有亲历和训练，普通治疗措施和处理流程对于应对危机作用有限，若处理不当会对患者安全造成不良影响^[37]。

平行麻醉可以通过麻醉危机管理模拟系统，利

用大数据平台与知识库对罕见病例进行总结，并从多个方面帮助麻醉医生应对危机。基于平行麻醉系统的麻醉危机管理模拟系统架构如图3所示。首先是帮助麻醉医生识别罕见情况并提出鉴别诊断的优先级和思路，供麻醉医生参考。其次是通过平行医院中对既往抢救和罕见事件的累积，能够再现病例发生时的情况，供麻醉医生进行学习和复盘，从而能够利用该系统进行模拟实战操作，使得麻醉医生真正面临突发情况时能够更从容和合理地处理及应对。最后是协调组织抢救的人力分配，平行麻醉系统中，能够自动将任务根据人数分配成合理的配比，从而更好地调动人力资源^[38]。因此，平行麻醉可以为麻醉危机管理带来较大的提升和帮助。

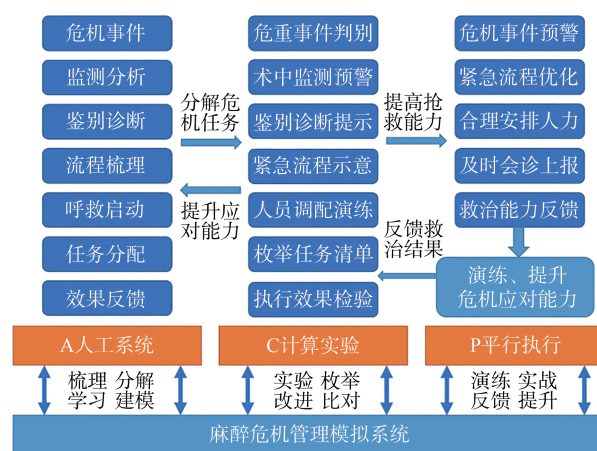


图3 基于平行麻醉系统的麻醉危机管理模拟系统架构

4 利用物联网智能系统进行平台管理运维

麻醉科及手术室作为医院重要的运行平台，每天除管理大量人员（手术医生、麻醉医生、手术室护士、器械厂家人员、运维人员、消毒供应室及保洁人员等）外，同时还运行着近百个手术间和手术室外麻醉场所，管理及维护各科室种类复杂、数量庞大及价格较高的手术设备、耗材和器械，是一个患者、人流、物流等多方面交织协作的平台，信息流的通畅对维持科室的正常运营尤为重要^[39]。物联网让固定资产和设备都接入了统一的平台，让设备的信息和状态都接入统一的网络，让科室的管理更加顺畅，以物联网技术为基础的麻醉平台管理系统架构如图4所示。

4.1 资源调配和利用

麻醉科手术室管理众多仪器和设备，固定资产



图4 以物联网技术为基础的麻醉平台管理系统架构

的盘点是手术室的日常工作，但核查盘点工作往往耗费大量时间和人力成本，同时，对于一些常规的急救设备（插管箱、除颤仪、剖宫产术间），以及特殊型号的耗材、器械等，每日盘点是保障临床安全的重要步骤。接入物联网的设备能够自动计数和定位，从而降低巡查的人力和时间成本。与物联网匹配的电子围栏系统更可保障贵重资产的安全，当设备被移出设定空间时将自动报警，对于临时借出的物品也可提醒归还，避免遗漏在外出地^[40]。此外，大量器械和手术设备可能同时被多个组使用，物联网的接入将便于共享资源的安排，更好地定位，减少沟通和寻找的成本，并对可能引起使用冲突的器械或设备进行提醒。接入物联网的设备和器械可根据使用次数对设备使用周期和频率进行统计，以避免某一单个设备因位置显眼而被过度使用。还可根据使用频次进行预防性维护，降低因某一设备突然及彻底损坏而影响手术进程和患者安全的几率^[40]。此外，以图像识别技术接入物联网的手术器械和冷链物品可在此系统下做到全流程可追溯，以便发生异常情况时及时报修停用，避免对临床安全和患者造成损害^[41]。

4.2 资产的管理和处理

物联网系统将对手术室庞杂的资产进行智能化全周期管理，对每一项资产从入库到淘汰的全过程进行分析，对其使用频率、预期寿命、维修需求及历史等数据实现自动记录。同时出入库时将自动生成拿取、归还记录，避免了传统繁复的扫码和反复清点库存的重复劳动。系统可自动生成档案及盘点报表，其中资产盘点的时间和人力可减少至原来的20%~30%，大量节省人力资源^[42]。同时，平行麻醉系统也将对这些资产的使用情况信息化，从而对器械、设备的利用频率进行分析，并根据这些数

据优化设备的布局，更好地采购更新下一代设备。基于物联网的库存管理也将对出入库进行有效的管理，对库存进行实时自动盘点，并支持不同规格的取、还等多种功能，实现药品及高值耗材的智能化

4.3 安全巡查及监护

手术室作为医院重地也肩负着重要的安全责任，不仅包括设备、环境的安全，也包括医护和患者在内全体患者的安全，物联网系统可监测手术室中的消防系统、水电系统、安全系统的状态，一旦有异常情况自动生成预警交由管理人员进行处理，如出现断电或火灾等情况可立即启动应急预案，并引导人员进行疏散或处理，同时基于医院的规章制度按照系统推荐的流程进行定期及节假日前的检查，自动生成检查项目及安全隐患报告，并且及时提醒跟踪整改情况^[43]。

4.4 运营分析

麻醉科手术室平台作为规模庞大的复杂系统，每天产生很多成本支出，每天产生数以万计的费用明细。既往的传统管理模式缺乏对运营成本细致分析的能力，对成本的把控不够敏锐，物联网管理将对每一项支出进行记录，并具有自动分析的能力，更可通过可视化，直观地反映支出的比例和成本。通过建模过程可对成本支出进行分析，对不合理或浪费的支出进行细致分析，并提出改进意见。目前患者在手术室的费用明细仍由人工录入，由于条目过多，以及手术、麻醉、护理对对方工作不完全了解，记账的准确度有限，容易造成漏项或多记，在后期可能造成资产流失或患者投诉。物联网的接入将对患者的记账进行自动生成，从药品器械的拿取开始便自动关联库存和账单。系统内置的模型也可对现有运营和管理模式进行分析，对与医保、成本及医院绩效考核相关的指标进行抓取，对运营管理的目标实现自动分析，助力精细化医疗管理^[44-45]。

4.5 手术资源及人力资源管理

人是麻醉科手术室平台的核心竞争力，作为一个复杂的平台，手术室人流复杂程度较高，实现智能化的排班及人力资源管理将极大解放管理者的时间。根据轮转规则、年资高低、既往工作量等多个因素进行加权排序，自动实现手术资源分配、麻醉医生和护理人员的排班，在轮转学习、提升进阶、危重及高难度手术管理方面使每一位员工都人尽其用、人尽其责。此系统还可以根据精细化计算的工

作量以及难度系数、职称年资、术中监测等指标进行更好的绩效核算和分配。此外，系统可根据手术时间及麻醉时间自动关联并计算工时和工作量，对人力资源的分配进行分析，根据既往数据提出改进建议，实现更合理的人力资源分配。此外，可根据每日的手术报表自动生成月季年度手术比例、麻醉方式及工作总量信息，实现管理要素数据的实时化和信息化，及时掌握手术量的变化趋势，并把相关信息与各手术科室及上级部门及监管机构共享，自动完成报表系统^[46-47]。

4.6 以平台建设为示范，加强信息化管理互联互通

物联网平台的建设并不局限于单一科室，以麻醉科手术室为平台和桥梁，可以搭建以手术（操作）为中心的患者数据库，实现多维度的数据共享，在保障数据安全的同时自动生成上报的报表及与同行业其他医院分享的信息，避免大量月末、年末填表时的重复劳动，以便相关负责人员可以将更多的精力投入管理中。

5 平行麻醉在临床教学中的作用

除日常临床工作外，麻醉学科还承担着培养麻醉医师的任务。麻醉学科的学员除了需要掌握基本的临床学科的知识外，还需要掌握包括危重症医学、药理学、医疗设备及仪器原理等多种知识。除了掌握基础知识，将这些知识与临床实际进行结合，用于病人的麻醉管理同样重要。平行麻醉系统也将承担麻醉医生的教学任务，并且通过教学反馈更好地归纳和收集数据，在教学模拟和实际操作中不断改进，提供更好的教学手段和工具^[48]。

5.1 以病种为中心的麻醉知识资料库

临床辅助决策系统不仅是辅助决策的工具，其背后也是麻醉理论知识和经验的总结。以该系统为基础的教学工具与临床使用时不同，其并不需要快速给出辅助决策，而是更多地传授和讲述做出决策的理由，并且呈现相关的指南、文献及背景知识。该系统可以根据手术种类进行相关麻醉案例的教学，并且呈现其基本步骤、麻醉关注点、与该病种有关的麻醉研究以及由既往麻醉数据整理出的大数据规律，帮助学员更好地理解 and 准备相关手术麻醉细节。

5.2 以特殊事件为引导的危重症医学

以危急事件为主的鉴别诊断和抢救是一名麻醉

医生应该具备的素质。但是麻醉医生在日常工作中鲜有预演和练习的机会。平行麻醉可将这类事件进行数字化并在模拟情景中重现。该功能以病例为基础，并且与学员进行互动式选择，每一种临床决策都代表危重症医学模拟练习的实际决策，麻醉医生可以在教学系统中实时学习每一个临床决策可能带来的后果和临床走向，从而提升鉴别诊断及处理危重症的能力。此外，平行麻醉教学系统还可以对危重症处理中一些关键环节进行分解，让麻醉医生分步骤掌握相关技能，从而在实战中能够进行全流程熟练操作，提升应对危机的临床技能。同时还可根据处理危机事件时的人员数量和任务数量进行任务分配，培训领导力及团队协作力，提升应对危机事件时的非医疗任务胜任力。

5.3 以循证医学为基础的知识储备库

麻醉数据库中有大量临床数据，构成了庞大的人群信息，从这些既往的数据中能够挖掘出很多人群中的信息，并建立罕见病—病种—人群多维度的临床信息和图谱。平行麻醉系统可据此整理出基于大数据、循证医学及真实世界的麻醉知识数据库，以本机构病例为基础从既往麻醉中吸取和总结经验，为住院医师的成长提供更便利的学习平台^[49]。

6 平行麻醉在科研数据系统中的作用

平行麻醉提倡在实体医疗场景的背后建立数字化的平行系统，让数据资源在云端交流和共享成为可能，但在实际建设中也会遇到一定的阻力和挑战。目前国内医疗机构的信息化程度参差不齐，每家医院都有自己的信息系统，每个科室甚至科室内部的分支都有自己的系统，实现医院平台上的信息整合已实属不易，实现更大范围乃至全国数据共享还需化解行政管理和数据安全方面的疑虑。此外，相似的数据命名、不同的单位和归档方式，可能会造成后期数据分析和共享时浪费大量的时间进行数据清洗。

平行麻醉中科研与教学系统相互促进的关系示意如图5所示。以麻醉系统数据为基础建立的围术期患者信息数据库将成为推动麻醉科研发展，提升患者安全的平台。国内每年进行手术万例，每个大的医疗中心每年可进行5万~15万台手术。在数年里数据库的人数可达百万级，如此大规模的人群数据是我国国情下的特殊优势。麻醉学科作为平台科室，能够整合并分析人群大数据，跨越单个科

室的壁垒,以几十万名患者为基础的数据将能更好地揭示人群普遍规律,同时也能够收纳更多罕见的特殊事件,并且归纳出一些从小规模样本中所不能得出的规律。

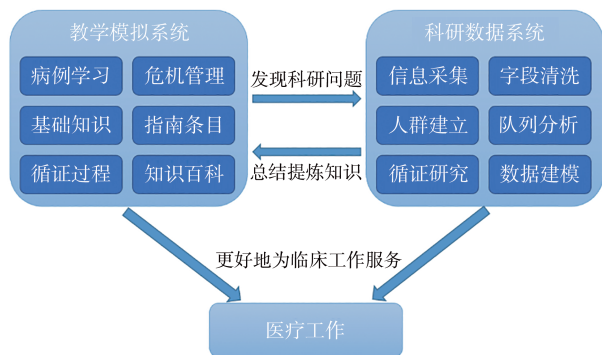


图5 平行麻醉中科研与教学系统相互促进的关系示意

同时,针对临床中发现的问题,平行麻醉将从各方面展开建模,提炼队列研究,并从同类手术或同类疾病患者的数据库中提取关键信息,从统计学的差异中发现人群规律,提炼临床问题。

7 平行麻醉打造贯穿围术期全程的随访及质控管理

7.1 构建及打通贯穿围术期全程的随访平台

患者的安全和康复只靠单一团队是远远不够的,患者围术期的很多体征和数据目前由多个平台共享,特别是一些经历了转科的患者,但患者的生命体征和治疗过程是连续的。目前一些密集监测的生命体征还没有电子化,因此该信息只有在病历中进行纸质化记录,不利于资源的共享。患者的监测和体征应该跨越平台的限制,以更友好的方式进行可视化,可以连续显示患者的病情变化。其次,对患者的关注和随访也不能仅局限于住院过程,在住院前对患者提前进行健康宣教和预康复,在术后继续对患者进行随访,都是提升医疗水平、延展医疗服务内涵的必由之路。利用围术期随访平台可以更好地对患者进行跟踪和随访,对可能需要干预的患者进行提前识别,在节约医疗资源的同时降低患者的时间和经济成本。

7.2 以物联网为基础建立的术后镇痛平台

术后镇痛指麻醉医师镇痛管理延续到术后的各类措施,对于对疼痛较为敏感的人群以及创伤较大的手术,患者自控镇痛泵具有在安全范围内可自控给药、持续不间断给药、单位时间内药量限制等

优点。

目前部分医疗机构使用一次性机械镇痛泵,其输注速度恒定,不同患者之间的差异主要通过调整药物浓度进行调节,药物总量固定,使用形式较为原始。尽管一些医院使用了具有内置程序的电子泵,恒定输注的量、自控按钮的频率以及时间也可进行调整,并且如果堵塞或药物剩余量较低时可以进行自动报警,但该系统有赖于人工的查房和收回,使用的情况及患者的感受也主要由人工记录,存在一定误差。如静脉泵自控系统接入物联网,可大量节省人力物力。如可在中央系统上实时看到泵运行的情况,了解每个泵的工作情况以及输注情况,则可及时处理异常情况。如患者有续泵需求,麻醉医生可以提前数小时进行预判,避免在临床工作异常忙碌时无法满足续泵需求。如自控次数多,麻醉医生也可以重点进行随访,避免查泵时的重复劳动,同时患者疼痛的数据可自我上报,并与病房护士及麻醉科进行共享,避免数据的重复收集和劳动。由此产生的医疗记录和文书还可以自动生成打印,并且主成分分析(principal component analysis, PCA)数据库的内容比人工一天两次的频率更加丰富,更可进行科学研究及队列生成,为优化镇痛方案提供可能性。

7.3 以平行麻醉系统为基础建立国家级质控平台及远程医疗平台

为了更好地反映医疗服务质量,国家卫生健康委员会建立了各专科的质控中心,并自上而下建立了省市级质控中心,以此为基础对全国医疗质量进行统计和把控。质控中心的指标是对麻醉质量的抽象化反映,也是由点及面地反映了每个医疗机构麻醉品质的差异。然而目前并非所有质控系统都能够自动生成报表上报,部分数据仍是手工统计,这影响了数据的准确性和时效性,在某种程度上也不能够代表质控水平。平行麻醉系统具有自动生成表单的功能,因此与质控相关的指标能够在系统中直接体现,并且在保证数据安全的基础上,能够将可以公开的指标与上级质控机构及兄弟医疗机构共享,从而督促和促进医疗水平和质控指标的提升。而质控部门也能从指标反馈的实际情况中分析出不同医疗机构背后的麻醉水平和完成度,从而寻找更多更好的指标衡量麻醉的效果,从而进行质量控制。

在医疗机构内部,平行麻醉也能够建立不良事件数据库,进行不良事件的分析和讨论。对于偶发

事件，可以在此基础上建立特殊事件的应急预案，对于较频繁发生的不良事件，可以进行队列研究，分析其发生的危险因素，根据PDCA（即计划、实施、检查、处理）理论提出其改进的意见，并且针对该类事件的处理方案建立标准作业程序（standard operation procedure, SOP）。

平行麻醉使优质的麻醉经验和医疗管理方案变得可复制。通过分析建模及计算方案，将优质医疗机构的经验推广至帮扶的医疗中心，并且根据当地情况进行不断改进。

8 平行麻醉中的伦理问题及应对

当生物人将更多的工作和权限交给机器和智能设备时，其面临的权责划分、执行边界及方案冲突也将带来一定的伦理问题。尤其当伦理问题涉及人的生命权和健康权时，解决方案需要尤为谨慎。

8.1 平行麻醉所遵从的主要伦理原则

在平行麻醉系统中，尊重生命权和健康权应该被视为第一原则。任何技术和算法都不应该逾越这一边界。即使算法和技术生成绝对准确的方案，但当与患者的生命权和健康权冲突时，这一方案也应予以否决^[50]。第二，应当坚持公平和公正的理念，包括对患者及对医护人员的公正公平。数字人和机器人的算法和工作程序中，可能会出现因注重效率而损害公平的歧视性算法，从人性的角度应当予以纠正和限制。第三，风险控制和预判，这也是平行麻醉的核心要义之一。当一项新决策准备上线时，需要在数字映射的人工系统及计算实验过程中反复推演预算，确保其在实际情况中安全可靠，并且准备好应对风险和突发情况的预案。第四，算法公开透明及可解释性。当算法越来越复杂，可能会出现能够精准预测情况，但是无法用现有临床知识解释的情况。任何新的算法都必须能被临床原则和医学知识所解释，否则从不可知的角度可能会对患者产生潜在影响。第五，人的最高决定权原则。当机器人、数字人与生物人决策产生冲突时，生物人拥有最高的决策权力，同时能够立即停止机器人和数字人的运转，避免对患者产生潜在的损害^[51]。

8.2 平行麻醉中产生的权责分割问题

虽然距离全面麻醉智能化的时代还有一定的距离，但处理生物人和机器人、数字人的关系已有先例。麻醉机是麻醉设备中最早机械化和智能化的设备，也是麻醉过程中使用时间最长、使用强度最大

的机器。在实际使用中，有一定几率会遇到自检不通过的情况，但麻醉一线及设备小组会在每天开始麻醉前处理好自检问题。在使用过程中，如遇到问题也会根据机器报警和提示进行积极处理。同时，每个手术间中备有手动的呼吸皮囊，以备麻醉机不工作时继续维持人工通气。因此在未来面对智能化和机械化的设备时，首先应该熟练机器和系统的操作方式，并对常见问题进行总结归纳，更好地进行人机互动；其次，应该与设计方或厂家保持沟通，对不适配现实情况的模型及时进行更新换代，对机器进行定期的保养和维护；第三，每一种设备都应该准备好彻底不工作时的设备和人员的应急预案，确保有能够继续维持相应麻醉功能设备的同时，麻醉医生也应当知晓如何在发生故障时及时停止并接管机器人和数字人的工作，仍然能够在突发情况下做好本职工作。

在以上案例中，医生和设备方同时对患者的安全负有责任，但具体案例仍应具体分析，逐步形成相应的权责划分。医护方有掌握好并正确使用机器的责任，有机器故障时及时停止的责任，也有在日常医疗中发现器械隐患的责任。设计方对机械及程序有反馈和优化的责任，当出现事故时应做好事故原因的分析 and 隐患的排除，不断迭代和优化产品的性能。患者在使用新技术时也应该对该技术的利弊及使用情况有充分的知情权和选择权^[52]。

8.3 平行麻醉中的权力及行为边界

未来，机器人和数字人可能会在一定程度上超越人的认知范围。随着人工智能技术的发展，机器程序是否会产生情感等问题仍有待争议。但生物人仍然需要牢牢掌握主动权和自主权。尽管未来人类将依靠机器人和数字人解决更多的问题，但绝不能过度依赖智能设备，甚至成为他们的附庸。当机器和人类的决策产生冲突时，我们需要知晓智能设备做出判定的依据。其次我们需要从法律和规则层面规定智能设备的权限。如果智能设备拥有了较高水平的思考和决策能力，那么它已经超越了传统的物的范畴。即便如此，其与健全人也有一定差距。此时医生、开发者或设备厂家是否应该承担一定责任，需要制定相关的共识或规定^[53]。此外，未来会有越来越多的数据上传至云端，如何保证这些数据的安全，保障患者的隐私，需要专门的技术去加密和防止窃取。从法律层面也应该进一步加大打击数据犯罪和隐私窃取的力度^[54-55]。

尽管智能医疗时代会带来一系列伦理问题,但面对麻醉中生产力和生产方式将产生的巨大变革,我们仍然要以积极的态度拥抱智能麻醉时代的到来。通过平行麻醉系统的反复计算测试及人工系统和现实情况之间的反复磨合,以尊重生命权和健康权为最高原则,在法律和伦理的框架下推进平行麻醉的建设,麻醉的智能化之路才能行稳致远。

9 总结与展望

平行医疗的理念在于抽象建模、虚实结合及并行优化。平行麻醉理念的形成和实践,将提升麻醉临床诊疗的水平,提升围术期全流程评估及随访质量,减轻麻醉医生和手术室护士的重复劳动的强度,实现生物人、机器人和数字人的有机统一。其关键是通过人与机器的协同,增强医务人员的智力价值,让他们把有限的精力用于更高级的思考和诊断,而将初筛和重复劳动的环节交给人工智能和机器模型,从而解放生物人的智力资源。同时,借助于机器的视角,我们将站在更高的维度总结和归纳医疗发展的规律,让那些过去根据几十年经验积累才能得出的直觉变得真实可信,并且以真实世界的大样本数据和规律来阐明系统性及普适性的经验。

平行医疗和并行麻醉理念的提出,也是我们回归初心的重要因素。机器人和数字人的引入不是让医生和患者的距离变得疏远,而是变得更加有温度。其不仅能让医疗行为更具专业性,同时也会助力医疗人文水平的提升。平行麻醉系统让医护有更多的时间思考患者体验的提升及流程的改善,同时有更多的机会对患者进行人文关怀,真正将医护还给病人。

平行麻醉的时代将为麻醉带来多方面的变革,在医疗、科研、教育和管理等众多方面为麻醉学科建设添砖加瓦。平行麻醉带来的智能化主要体现在以下4个方面。首先,平行麻醉将数据大融合。一方面,信息化的发展将丰富监测的种类和形式,为患者的安全提供更多层次的数据支撑。另一方面,现有的数据整合,使得各指标间不再是分布于多个机器上的独立数据,而是互相关联影响的整体。其次,平行麻醉将既往的宝贵经验从海量数据中总结提炼,从而将麻醉经验具象化、可视化。第三,机械和智能设备的普及将成为麻醉医护手和大脑的延伸,从而把现在徒手操作的过程转变为自动管理,

联动监测数据,实现患者的闭环和精细化管理。最后是临床决策的建模化,当多个参数指标并列时,我们将跨越感性认识对患者的评估和处理,通过科学计算的完备模型预测风险、执行决策,极大提升科学与安全性,让更多的决策都有证可循。

人工智能、大数据和物联网将对麻醉学的发展产生革命性的影响。但不管是哪种方式,机器人和数字人在很长一段时间内仍然处于辅助决策的地位。其作用是帮助医生减少重复劳动和进行基础判读。人工智能可做出初步的诊断,但是做出最终决断并对决断负责的仍然是医生本人。因此,尽管现代科技手段将为医生的工作提供很多的便利,但作为医疗行为的实施者和负责人,医护仍需熟练掌握自动化简化后的医疗原理和工作流程,以便当我们没有信息系统的时候仍然可以实施医疗行为。其次,当平行麻醉系统把时间更好地还给医生时,医生也需要将这些返还的时间更多地用于患者诊疗、方案制定、人文关怀等方面,更好地让技术造福于麻醉学科,造福于每一位患者。

参考文献:

- [1] 中国共产党中央委员会,中华人民共和国国务院.“健康中国2030”规划纲要[EB/OL]. 2016-10-25. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm.
CPC Central Committee, The State Council of PRC. “Healthy China 2030” blueprint [EB/OL]. 2016-10-25. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm.
- [2] 中华人民共和国国务院. 国务院关于实施健康中国行动的意见[N]. 人民日报, 2019-07-16.
The State Council of PRC. Guideline to implement the country's Healthy China initiative [N]. The People's Daily, 2019-07-16.
- [3] BELLINI V, GUZZON M, BIGLIARDI B, et al. Artificial intelligence: a new tool in operating room management. Role of machine learning models in operating room optimization[J]. Journal of medical systems, 2020, 44(1): 20.
- [4] ROBINSON D H, TOLEDO A H. Historical development of modern anesthesia[J]. Journal of Investigative Surgery, 2012, 25(3): 141-149.
- [5] CASAS-ARROYAVE F D, FERNÁNDEZ J M, ZULETA-TOBÓN J J. Evaluation of a closed-loop intravenous total anesthesia delivery system with BIS monitoring compared to an open-loop target-controlled infusion (TCI) system: randomized controlled clinical trial[J]. Colombian Journal of Anesthesiology, 2019, 47(2): 84-91.
- [6] YANG L, ZHU T, JIA-JIN L, et al. Anesthesia workforce and workload in China: a national survey[J]. Journal of Anesthesia and Perioperative Medicine (JAPM), 2017, 4(2): 67.
- [7] 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, 514.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5):485-489, 514.
- [8] 王飞跃. 平行管理: 复杂性管理智能的生态科技与智慧管理之DAO[J].

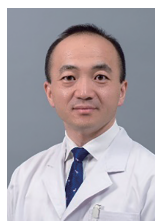
- 自动化学报, 2022, 48(11): 2655-2669.
- WANG F Y. Parallel management: the DAO to smart ecological technology for complexity management intelligence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(11): 2655-2669.
- [9] WANG S, WANG J, WANG X, et al. Blockchain-powered parallel healthcare systems based on the ACP approach[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2018, 5(4): 942-950.
- [10] 王飞跃. 数字医生与平行医疗: 从医疗知识自动化到系统化智能医学[J]. *协和医学杂志*, 2021, 12(6): 829-833.
- WANG F Y. Digital doctors and parallel healthcare: from medical knowledge automation to intelligent metasystems medicine[J]. *Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital*, 2021, 12(6): 829-833.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] SHEN T Y, GOU C, WANG J G, et al. Parallel medical imaging: an ACP-based approach for intelligent medical image recognition with small samples[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 226-229.
- [15] 王飞跃. 平行医学: 从医学的温度到智慧的医学[J]. *智能科学与技术学报*, 2021, 3(1): 1-9.
- WANG F Y. Parallel medicine: from warmth of medicare to medicine of smartness[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, 3(1): 1-9.
- [16] 王拥军, 王飞跃, 王戈, 等. 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统[J]. *自动化学报*, 2021, 47(11): 2585-2599.
- WANG Y J, WANG F Y, WANG G, et al. Parallel hospitals: from hospital information system (HIS) to hospital smart operating system (HSOS)[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(11): 2585-2599.
- [17] 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.
- [18] WANG F Y, YANG J, WANG X X, et al. Chat with ChatGPT on industry 5.0: learning and decision-making for intelligent industries[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(4): 831-834.
- [19] BHARGAVA H K, MISHRA A N. Electronic medical records and physician productivity: evidence from panel data analysis[J]. *Management Science*, 2014, 60(10): 2543-2562.
- [20] TAHERI MOGHADAM S, SADOUGHI F, VELAYATI F, et al. The effects of clinical decision support system for prescribing medication on patient outcomes and physician practice performance: a systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2021, 21(1): 1-26.
- [21] SHEN Y T, CHEN L, YUE W W, et al. Artificial intelligence in ultrasound[J]. *European Journal of Radiology*, 2021, 139: 109717.
- [22] ZHOU J, DU M, CHANG S, et al. Artificial intelligence in echocardiography: detection, functional evaluation, and disease diagnosis[J]. *Cardiovascular Ultrasound*, 2021, 19(1): 1-11.
- [23] KANG A R, LEE J, JUNG W, et al. Development of a prediction model for hypotension after induction of anesthesia using machine learning[J]. *PLoS One*, 2020, 15(4): e0231172.
- [24] VEN W H V D, VEELO D P, WIJNBERGE M, et al. One of the first validations of an artificial intelligence algorithm for clinical use: the impact on intraoperative hypotension prediction and clinical decision-making[J]. *Surgery*, 2021, 169(6): 1300-1303.
- [25] KOUL A, BAWA R K, KUMAR Y. Artificial intelligence techniques to predict the airway disorders illness: a systematic review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(2): 831-864.
- [26] McLennan K M, MILLER A L, DALLA COSTA E, et al. Conceptual and methodological issues relating to pain assessment in mammals: the development and utilisation of pain facial expression scales[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2019, 217: 1-15.
- [27] SETHI N, DUTTA A, PURI G D, et al. Evaluation of automated delivery of propofol using a closed-loop anesthesia delivery system in patients undergoing thoracic surgery: a randomized controlled study[J]. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, 2021, 35(4): 1089-1095.
- [28] XU C, ZHU Y, WU L, et al. Evaluating the effect of an artificial intelligence system on the anesthesia quality control during gastrointestinal endoscopy with sedation: a randomized controlled trial[J]. *BMC anesthesiology*, 2022, 22(1): 1-11.
- [29] GOUDRA B, SINGH P M. Failure of Sedasys: destiny or poor design?[J]. *Anesthesia & Analgesia*, 2017, 124(2): 686-688.
- [30] VANHONACKER D, VERDONCK M, NOGUEIRA CARVALHO H. Impact of closed-loop technology, machine learning, and artificial intelligence on patient safety and the future of anesthesia[J]. *Current Anesthesiology Reports*, 2022, 12(4): 451-460.
- [31] WINGERT T, LEE C, CANNESON M. Machine learning, deep learning, and closed loop devices—anesthesia delivery[J]. *Anesthesiology Clinics*, 2021, 39(3): 565-581.
- [32] KUMAR S, TIWARI P, ZYMBLER M. Internet of things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review[J]. *Journal of Big data*, 2019, 6(1): 1-21.
- [33] KRICHEN M, MECHTI S, ALROOBAEA R, et al. A formal testing model for operating room control system using internet of things[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2021, 66(3): 2997-3011.
- [34] USHIMARU Y, TAKAHASHI T, SOUMA Y, et al. Innovation in surgery/operating room driven by Internet of things on medical devices[J]. *Surgical Endoscopy*, 2019, 33(10): 3469-3477.
- [35] COPPENS M, VAN CAELENBERG E, DE REGGE M. Postoperative innovative technology for ambulatory anesthesia and surgery[J]. *Current Opinion in Anaesthesiology*, 2021, 34(6): 709-713.
- [36] JIN Z, LEE C, ZHANG K, et al. Utilization of wearable pedometer devices in the perioperative period: a qualitative systematic review[J]. *Anesthesia & Analgesia*, 2023, 136(4): 646-654.
- [37] BURDEN A. The history of crises and crisis management in anesthesia: prevention, detection, and recovery[J]. *International Anesthesiology Clinics*, 2020, 58(1): 2-6.
- [38] WILCOCKS K, KAPRALOS B, QUEVEDO A U, et al. The anesthesia crisis scenario builder for authoring anesthesia crisis-based simulations[J]. *IEEE Transactions on Games*, 2020, 12(4): 361-366.

- [39] ANDRAS I, MAZZONE E, VAN LEEUWEN F W B, et al. Artificial intelligence and robotics: a combination that is changing the operating room[J]. World Journal of Urology, 2020, 38(10): 2359-2366.
- [40] HASHIMOTO D A, WITKOWSKI E, GAO L, et al. Artificial intelligence in anesthesiology: current techniques, clinical applications, and limitations[J]. Anesthesiology, 2020, 132(2): 379-394.
- [41] GORDON L, GRANTCHAROV T, RUDZICZ F. Explainable artificial intelligence for safe intraoperative decision support[J]. JAMA Surgery, 2019, 154(11): 1064-1065.
- [42] OH A S. Development of a smart supply-chain management solution based on logistics standards utilizing artificial intelligence and the internet of things[J]. Journal of Information and Communication Convergence Engineering, 2019, 17(3): 198-204.
- [43] BATES D W, LEVINE D, SYROWATKA A, et al. The potential of artificial intelligence to improve patient safety: a scoping review[J]. NPJ Digital Medicine, 2021, 4(1): 54.
- [44] LEE D H, YOON S N. Application of artificial intelligence-based technologies in the healthcare industry: opportunities and challenges[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(1): 271.
- [45] WOLFF J, PAULING J, KECK A, et al. The economic impact of artificial intelligence in health care: systematic review[J]. Journal of Medical Internet Research, 2020, 22(2): e16866.
- [46] ABDELDAYEM M M, ALDULAIMI S H. Trends and opportunities of artificial intelligence in human resource management: aspirations for public sector in Bahrain[J]. International Journal of Scientific and Technology Research, 2020, 9(1): 3867-3871.
- [47] ACHCHAB S, TEMSAMANI Y K. Artificial intelligence use in human resources management: strategy and operation's impact[C]//Proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference on Pattern Recognition and Machine Learning (PRML). Piscataway: IEEE Press, 2021: 311-315.
- [48] BOGGS S D, LUEDI M M. Nonoperating room anesthesia education: preparing our residents for the future[J]. Current Opinion in Anesthesiology, 2019, 32(4): 490-497.
- [49] BOWNESS J, VARSOU O, TURBITT L, et al. Identifying anatomical structures on ultrasound: assistive artificial intelligence in ultrasound-guided regional anesthesia[J]. Clinical Anatomy, 2021, 34(5): 802-809.
- [50] RIGBY M J. Ethical dimensions of using artificial intelligence in health care[J]. AMA Journal of Ethics, 2019, 21(2): 121-124.
- [51] World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance[R]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [52] GERKE S, MINNSEN T, COHEN G. Ethical and legal challenges of artificial intelligence-driven healthcare[M]//Artificial Intelligence in Healthcare. Amsterdam: Elsevier, 2020: 295-336.
- [53] AMANN J, BLASIMME A, VAYENA E, et al. Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective[J]. BMC Medical Informatics and Decision Making, 2020, 20(1): 1-9.
- [54] CHAR D S, ABRÀMOFF M D, FEUDTNER C. Identifying ethical considerations for machine learning healthcare applications[J]. The American Journal of Bioethics, 2020, 20(11): 7-17.
- [55] FISKE A, HENNINGSSEN P, BUYX A. Your robot therapist will see you now: ethical implications of embodied artificial intelligence in psychiatry, psychology, and psychotherapy[J]. Journal of Medical Internet Research, 2019, 21(5): e13216.

[作者简介]



赵毅飞（1993—），男，博士，中国医学科学院北京协和医院麻醉科临床博士后，主要研究方向为围术期监测及治疗与预后关联建模。



申乐（1979—），男，医学博士与理学博士，中国医学科学院北京协和医院麻醉科常务副主任（主持工作），主要研究方向为围术期麻醉医疗质量管理与患者安全、疼痛与瘙痒的机制与生物干预。



叶佩军（1985—），博士，中国科学院自动化研究所副研究员，研究方向为认知计算、复杂系统管理与控制、智能交通。



王静（1992—），中国科学院自动化研究所工程师，主要研究方向为平行医疗理论与方法、智慧医疗系统的构建与应用。



王飞跃（1961—），男，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，主要研究方向为并行系统的方法与应用、社会计算、并行智能以及知识自动化。