

# 数智时代下工业工程理论与方法在医疗健康管理领域的 创新应用综述

罗 利, 廖虎昌, 向 杰, 房圆晨

(四川大学 商学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 工业工程理论与方法在医疗健康管理领域的应用贯穿于医院设施规划、医疗流程优化、医疗资源管理和疾病诊断等各个环节, 为医疗服务改进和效率提升提供了有力支撑。随着物联网、云计算、大数据和人工智能等新一代信息技术的发展, 工业工程理论与方法在医疗健康管理领域的应用也发生了改变。本文基于 2014~2023 年医疗健康管理文献中的 4 个热门话题——全生命周期健康管理、医疗资源调度与优化、医院运营管理和医疗物流及供应链管理, 回顾工业工程关键技术的相关话题中的应用; 归纳和分析新一代信息技术在医疗健康管理领域中的应用创新, 阐明数智时代下工业工程理论与方法在医疗健康管理领域的技术赋能和管理赋能; 对数智时代下工业工程理论与方法在医疗健康管理信息化、精细化和智能化等方面的应用前景进行展望。

**关键词:** 工业工程; 医疗健康管理; 全生命周期健康管理; 医疗资源管理; 医院运营管理; 医疗物流与供应链

中图分类号: F403.6; C93

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)01-0010-15

## Innovative Applications of Industrial Engineering Theory and Methods in Healthcare Management: A Review in the Data and Intelligence Era

LUO Li, LIAO Huchang, XIANG Jie, FANG Yuanchen

(Business School, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** The application of industrial engineering theory and methods in healthcare management runs through various aspects, including hospital facility planning, medical process optimization, medical resource management and disease diagnosis, providing strong support for the improvement of medical services and efficiency. With the development of new generation information technologies such as the internet of things, cloud computing, big data and artificial intelligence, the application of industrial engineering theory and methods in healthcare management has undergone significant transformations. Based on four hot topics of literature from 2014 to 2023 in the field of healthcare management, i.e., full life cycle health management, medical resource scheduling and optimization, hospital operation management, and medical logistics and supply chain management, this paper reviews the application of key industrial engineering technologies in these topics. Then, we summarize and analyze the innovation of new generation information technology application in the field of healthcare management, clarifying the technical and management empowerment of industrial engineering theory and methods in this field and the era of data and intelligence. Finally, we envision the application prospects of industrial engineering theory and methods in the informationization, refinement and intelligence of healthcare management in this new era.

**Key words:** industrial engineering; healthcare management; full life cycle health management; medical resource management; hospital operations management; medical logistics and supply chain

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72342014, 72371176); 四川省科技计划重点研发资助项目 (2023YFS0317)

作者简介: 罗利 (1968—), 女, 四川省人, 教授, 博士, 主要研究方向为医院运营管理。

通讯作者: 向杰 (1989—), 男, 湖北省人, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为医药物流与供应链。

Email: jxiexiang@scu.edu.cn

人民健康是衡量民族昌盛和国家强盛的重要标准。习近平总书记始终强调要把保障人民健康放在优先发展的战略位置。将健康产业总规模从2020年的大于8万亿元增长到2030年的16万亿元;将城乡居民达到《国民体质测定标准》合格以上的人数比例提升至92.2%,是《“健康中国2030”规划纲要》重要要求。我国开展了一系列“强基层、补短板、优布局”医疗改革举措,并在“十三五”期间取得积极成效。然而,我国医疗健康服务面临的形势依旧严峻,尤其是近年来受到突发公共卫生事件的冲击、人口老龄化的加剧以及疾病谱向慢性病转变的影响,医疗健康管理需求侧呈现出不确定性、持久性、多样性等特点。同时,供给侧的优质医疗资源配置不均衡等结构性问题也亟待改善。因此,我国将推动公立医院高质量发展作为“十四五”时期医疗系统改革的重要任务,目标是建成优质高效整合型医疗卫生服务体系,实现全方位全周期的健康服务与保障。在这样的背景下,工业工程理论与方法为实现医疗健康管理系统“提质增效”技术赋能和管理赋能。

工业工程是一门将工程技术、管理学和社会科学应用于设计、改善系统、优化流程和资源的学科,强调将技术和管理相结合以提高系统效率、优化生产流程、降低成本并改善质量。尽管工业工程起源于生产制造系统,但它在医疗健康领域的应用已经有了深厚的历史。早在20世纪40年代,工业工程先驱Lillian Gilbreth便提出“The hospital as a factory”的观点。如今,工业工程的理论和方法包括精益管理、六西格玛、流程管理、设施规划等,已广泛地应用于医院设施规划、医疗流程优化、医疗资源调度优化、医护人员排班、医疗服务质量管理以及临床决策优化等场景<sup>[1-5]</sup>。事实证明,工业工程理论和方法在节约医院成本、提高医疗资源利用率以及提高患者满意度等多个方面发挥重要作用。

随着科技的飞速发展,尤其是物联网、云计算、5G网络、大数据和人工智能等新一代信息技术突破性的发展,催生了工业工程学科理论和方法的创新,同时也加速了医疗健康服务和管理模式的转变。如何将这些新兴的信息技术与方法应用到医疗健康管理领域,已成为当前医疗改革的重要议题。在国家战略层面,2016年发布的《“健康中国2030”规划纲要》中,将数字医疗健康上升到了国

家战略层面。随后,国务院相继印发《关于促进“互联网+医疗健康”发展意见》和《数字中国建设整体布局规划》等政策文件,进一步加快数智与医疗的深度融合,规范“互联网+医疗”发展。在最近10年的发展中,工业工程数智化技术为医疗健康管理的数字化、网络化和智能化转变提供强大支撑,不仅为应对医疗领域老龄化、慢性病和突发公共卫生事件的新挑战提供解决方案,更为实现高效、精准、智能化的智慧医疗健康服务提供关键技术路径和管理方法论。

综上所述,工业工程理论和方法在医疗健康管理改革中发挥着重要作用。随着医疗健康管理理念从“以疾病为中心”向“以患者为中心”转变,以及从“以治病为中心”向“以人民健康为中心”转变,预防保健、健康促进、康复和长期照护等方面的改革和创新受到重视。新一代信息技术促使工业工程相关理论和方法在医疗健康领域的应用不断演变和革新,为满足日益复杂和多样化的医疗需求提供新机会。基于文献的综合分析,本文选取全生命周期健康管理、医疗资源管理、医院运营管理和医疗物流及供应链管理4个方面进行详细综述和分析。在此基础上,对工业工程数智化技术在智慧医疗健康管理的创新应用进行展望,阐明工业工程理论和方法在医疗健康管理领域的技术和管理赋能。

## 1 文献统计与分析

为详细了解工业工程理论和方法在医疗健康管理领域的研究和应用,本文在Web of Science和中国知网两个数据库中,就工业工程学科的主要学术期刊进行检索。检索表达式包括“industrial engineering/information technology/internet/big data/machine learning/internet of things/cloud computing/5G/blockchain/artificial intelligence”等工业工程和信息技术关键词和“medical service/healthcare management/resource management/disease management/treatment/health logistics/health supply chain management”等医疗服务相关关键词及其对应的中文检索词。检索2014~2023年的文献,时间跨度为10年,共得到357篇英文文献和1321篇中文文献。整理分析可以发现,近10年来工业工程技术方法在医疗领域的关注度明显上升(见图1),这表明学术界对于工业工程在医疗领域的应用给予了越来越多的关注。

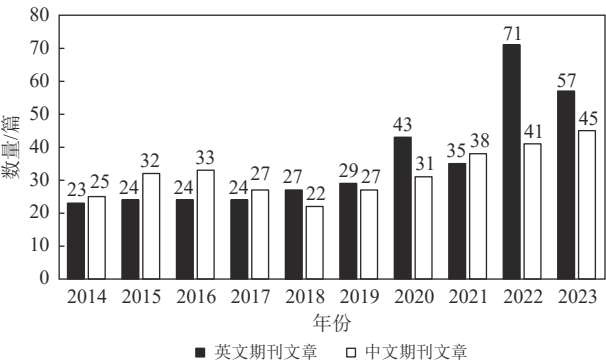


图 1 期刊文献发表数量 (2014 ~ 2023 年)

Figure 1 The number of journal publications in 2014 ~ 2023

在诸如 Operations Research, Management Science 和 Production and Operations Management 等管理

学英文顶级期刊 (UTD-24 期刊), 以及《中国管理科学》、《管理科学学报》、《系统工程理论与实践》、《工业工程与管理》、《工业工程》等中文高质量期刊上, 也有不少文章关注工业工程理论与方法在医疗健康管理领域的应用。本文对检索得到的文献进行主频词分析, 总结发现“全生命周期健康管理”、“医疗资源管理”、“医院运营管理”和“医疗物流及供应链管理”吸引了大量学术研究, 同时发现上述研究主题也是医疗健康服务管理中的核心内容。在此基础上, 基于医疗健康参与者视角, 本文构建健康管理服务框架图, 如图 2 所示。

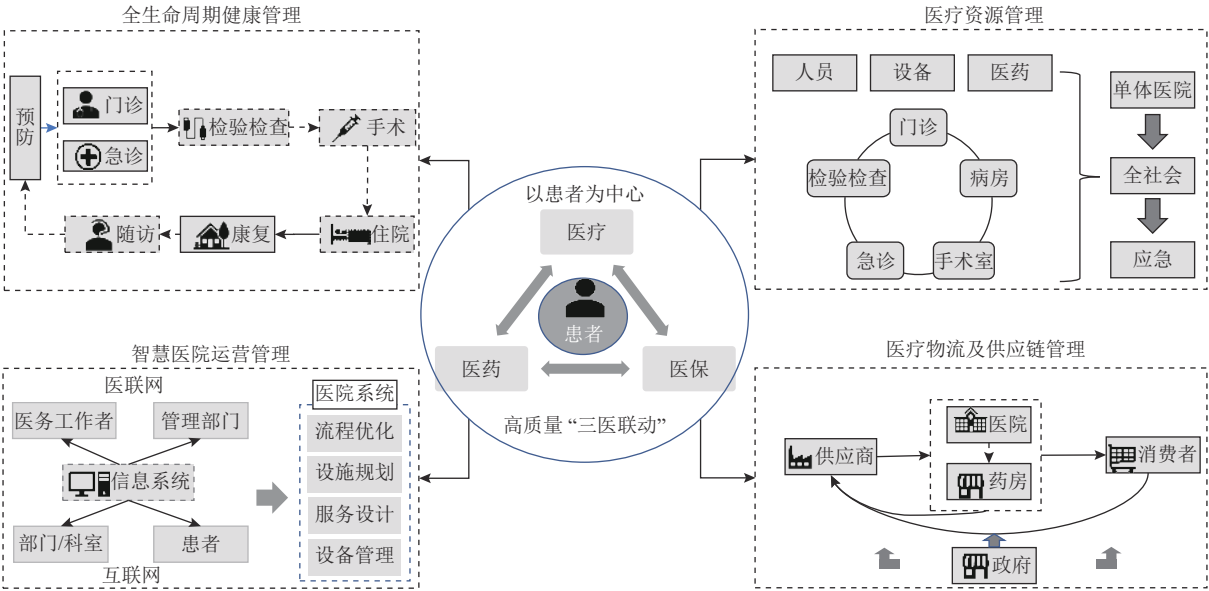


图 2 医疗健康管理核心研究框架图

Figure 2 The framework of core research in healthcare management

该结构体现了以患者为中心的价值医疗体系, 以高质量医保体制改革、卫生体制改革与药品流通体制改革的“三医联动”发展导向, 以四大板块协调发展为管理重点。虽然各部分管理内容和对象不同, 但又存在着紧密的内在联系, 相互影响, 共同构建起医疗健康管理核心研究框架图。四大板块涉及的研究内容较多, 为了尽可能详细地展示四大板块中的工业工程方法论和实现路径, 本研究将以“以患者为中心的慢性病全生命周期健康管理”、“单体医院-全社会医疗-应急资源的医疗资源管理”、“以医联网和互联网为核心的智慧医院运营管理”、以及“医药物流与供应链”4 个板块的经典场景展开

分析。因此本研究以“慢病管理/chronic disease management”、“医疗资源配置与调度/resource allocation and scheduling”、“互联网+医疗运营管理/internet + healthcare operation management”、“医药物流与供应链/medical logistics and supply chain”为关键词, 最终筛选出 73 篇文献, 如图 3 所示。

## 2 工业工程关键技术在医疗健康管理领域中的研究回顾

工业工程理论和方法在医疗健康管理领域的应用, 为传统以经验为主的医院管理注入科学的管理

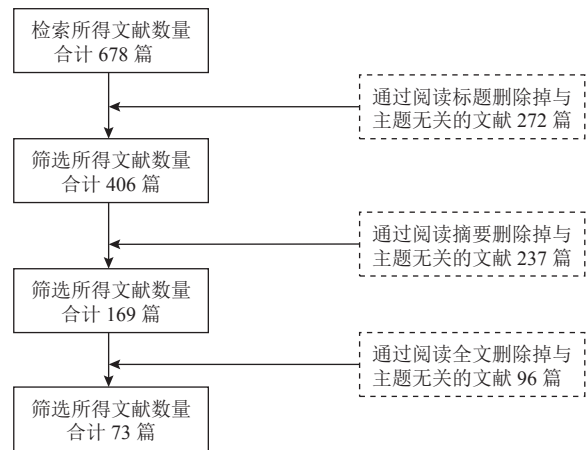


图 3 文献检索和筛选流程图

Figure 3 The flow chart of literature searching and screening

理念和技术手段。Dai 等<sup>[4]</sup>从医疗参与者生态系统的角度分析了各主体的管理重点和技术的应用; 江志斌等<sup>[5]</sup>对现代医院管理中的工业工程技术进行了回顾与展望; 简祯富等<sup>[6]</sup>也探讨了工业工程技术在我国台湾医院的应用。本文将从医疗健康管理核心内容的角度展开综述, 更全面地了解其在医疗健康管理中的重要运用方式和成果, 并从新的视角对医院健康管理研究进行展望, 为未来的发展提供有价值的参考。

2.1 以患者为中心的慢性病全生命周期健康管理

健康管理是对个体或群体整体健康状况及影响的危险因素进行全面监测、评估、干预与连续跟踪服务的过程。然而目前正面临着护理服务碎片化、以患者为中心的需求以及价值主张不明确等重大挑战<sup>[7]</sup>, 国际社会的卫生治理理念也正逐步向全面、整合型的方式转变。因此, 集疾病预防、健康宣教、筛查、诊断、治疗、术后康复为一体的慢性病全生命周期健康管理逐渐兴起。通过建模仿真、机器学习等关键技术和方法, 旨在提供最优质的医疗服务, 以实现最佳的健康管理效果。

1) 慢性病患者的风险因素识别

医学顶刊 Lancet 综述了各种慢性疾病相关的风险因素, 如慢性阻塞性肺疾病是由暴露于吸入的有毒颗粒引起的, 特别是烟草烟雾恶化污染物<sup>[8]</sup>。然而不同人群具有不同的特征, 面临的风险千差万别, Tse 等<sup>[9]</sup>从个体角度建立香港男性普通人群肺癌的风险预测模型。从文献可以看出, 慢性病存在区域和个体之间的差异, 因此需要精准识别每个个体面临的风险因素, 从而有针对性地采取预防措施。

2) 慢性病患者的早期筛查

对慢性病患者实施早期筛查以提高早诊早治至关重要。Ali 等<sup>[10]</sup>通过理论证明了卫生公共政策对早筛的重视程度是影响疾病发展的重要因素。学者们从不同角度展开提高筛查准确性的相关研究, 但是不同国家或地区对同一疾病的界定标准不同, 这与流行病学特征、地域、人口、经济特征均可能相关。因此, 提高公共卫生政策对早筛的激励, 以及提升筛查效率和准确性需要深入研究。

3) 慢性病患者的诊疗决策

筛选高危患者后, 需进一步诊断确定疾病种类和分期, 然后采取治疗措施。个性化诊疗逐渐成为研究热点, 马尔可夫决策过程 (Markov decision process, MDP) 为这一研究领域的发展提供了全新的视角。Hajjar 等<sup>[11]</sup>开发的随机建模框架能为患有慢性病或有患慢性病风险的患者提供个性化的疾病筛查决策, 并提供精确的解决方案。徐伟锋等<sup>[12]</sup>则将 MDP 模型应用于类风湿关节炎患者的治疗过程中, 为患者提供个性化的治疗方案。然而, 大范围的筛查会带来较大经济负担以及一定的身体伤害, 如何判断精准的诊疗时机仍有待深入研究。

4) 慢性病患者的康复随访

治疗后的慢性病患者并未完全康复, 如肺癌易复发和转移的特点是术后死亡的主要原因, 因此术后随访计划非常关键。在预后管理中, 患者仍有较多诸如生理和心理方面的需求未得到满足, 为此, Jackson 等<sup>[13]</sup>通过医疗补助索赔数据构建变量, 探究对病情复杂程度不同的患者进行医院随访的最佳时机。除此之外, 合并症、药物治疗等因素可能加重预后症状, 因此综合考虑患者需求、基础病治疗等因素, 提供个性化、动态的综合管理策略非常重要。

2.2 医疗资源调度与优化

工业工程中的生产计划与控制是把事先确定的生产目标和任务通过生产计划的方式进行全面安排和动态控制, 保证生产系统有效产出。其在医院管理场景中, 则是应用调度优化的基本原理和科学方法, 对医疗健康资源进行合理计划、组织和控制, 实现最佳的协调与配置, 通过降低医疗服务成本和满足医疗顾客需求来提高社会效益和经济效益的过程<sup>[14]</sup>, 多借助作业研究、流程管理、排程优化、人因工程等方法论, 对医院的设施、人力和设备进行



运作管理。随着“价值医疗”理念的逐步深入，以治病为中心转变为以人民健康为中心，医疗资源调度优化也正从单体医疗机构资源扩展到全社会医疗资源，从常态医疗资源延伸至应急状态医疗资源。因此，这部分从单体医疗机构、全社会和应急医疗资源调度优化三方面展开论述，如图 4 所示。

源，从常态医疗资源延伸至应急状态医疗资源。因此，这部分从单体医疗机构、全社会和应急医疗资源调度优化三方面展开论述，如图 4 所示。

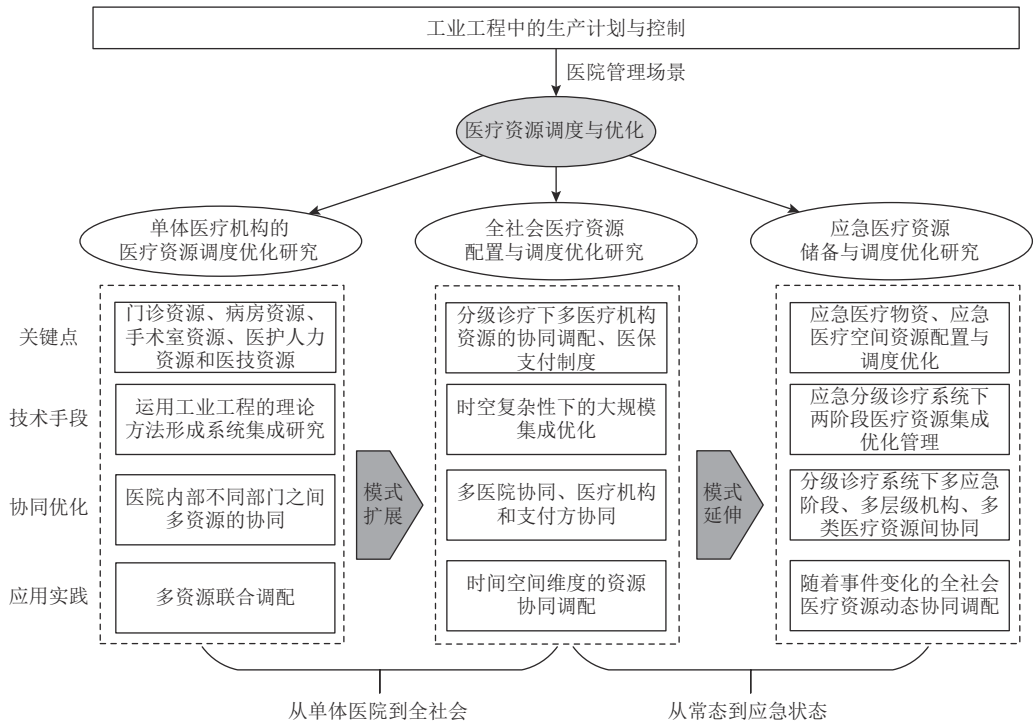


图 4 工业工程在医疗资源调度与优化的应用

Figure 4 Applications of industrial engineering to medical resource scheduling and optimization

1) 单体医疗机构的医疗资源调度优化

单体医疗机构中医疗资源的调度，主要包括门诊资源、病房资源、手术室资源、医护人力资源和医技资源等关键医疗资源的调度优化。

门诊资源中，现有研究考虑服务时间随机性和服务序列异质性，通过整合数学规划、排队模型、仿真和多目标禁忌搜索方法，优化门诊患者调度，以实现系统成本最小化<sup>[15]</sup>。

床位计划与控制中，现有研究运用排队论模型描述病人在医院各部门之间的流动情况，在保持入院延迟率低水平下，通过控制病床的利用率和病人的损失率来优化床位结构并降低成本<sup>[16]</sup>。

关于手术室资源调度优化，现有研究从问题描述和技术特征角度进行综述回顾，提出不确定环境下的手术排程及手术排程中的多种资源协同优化是值得研究的两个方向<sup>[17]</sup>。

医护人力资源包括医生和护士两类，最新研究从考虑患者和 workflows 随机性的角度出发，建立随机混合整数规划和两阶段整数规划模型，动态决策

医护数量<sup>[18]</sup>。

医技设备的研究范围很广，包括设备更新、维护、效能评价等。在医技设备排队系统中聚焦病人的到达率、设备使用程度、平均等待队长等要素，以病人等待时间和医院成本最小化为目标，利用马尔科夫过程转化为线性的动态规划模型等进行求解<sup>[19]</sup>。

2) 全社会医疗资源配置与调度优化

随着世界卫生组织 (WHO) 整合医疗健康服务和我国分级诊疗政策提出，以分级诊疗模式为主的医疗联盟出现使得医疗资源不再局限于单体医院，国内外学者开始关注区域医疗资源配置问题，立足于全社会角度，以价值医疗为导向，研究需方、供方、支付方和机构方四方的互动关系，通过时空复杂性下的大规模集成优化方法，协同管理全社会有限医疗健康资源<sup>[20]</sup>。

多医疗机构资源的协同调配是全社会医疗资源配置与调度优化的重要研究内容。一方面，聚焦多个医疗健康中心的区位分配问题，实现患者访问成本最小化。另一方面，为改善分层医疗服务体系的转诊及资源配置问题，对患者的复诊率、上级医院

转诊率、下级医院资源利用率等因素进行分析, 实现上下转诊协同<sup>[21]</sup>。

医保支付是有效推进全社会医疗资源配置与调度的重要抓手。部分学者据此从医保支付的角度, 通过建立嵌入拥塞效益的优化模型、多目标数学模型等方法, 探索不同支付方案对医疗系统中不同主体和运营绩效的影响, 协调医疗机构之间的资源配置<sup>[22]</sup>。

### 3) 应急医疗资源储备与调度优化

新冠肺炎疫情等重大突发公共卫生事件下, 无论从决策目标还是决策条件都与常规运作不同, 增加了医疗资源储备与调度难度。其中, 应急医疗物资储备与调度优化, 以及应急医疗空间资源配置与调度优化研究, 是两个重要研究议题。

应急医疗物资配置的研究内容主要包括: 仓库或医疗服务设施的选址、应急物资的储备和补充、应急物流规划等。现有研究主要围绕灾前应急物资的预定位和灾后应急物资的转运和采购等问题, 利用两阶段随机规划模型等, 规划应急医疗服务站, 预测物资需求, 最小化预期总成本和缺货率两个供应目标, 以实现资源优化配置<sup>[23]</sup>。

应急医疗空间资源是指公共卫生事件期间收治病人的场所和空间, 包括医院、床位等资源。在短期内此类医疗资源扩充的难度较高, 并且由于此类医疗资源的价值较高, 在平时若单纯进行资源储备会造成高价值医疗资源的浪费。相关研究主要基于扩展 SEIR (Susceptible-Exposed-Infectious-Recovered) 传染病模型, 定量分析医院床位扩容对疫情演化的影响, 探讨包括床位规模、相应人员配备等医疗空间资源的规划配置方案<sup>[24-25]</sup>。

## 2.3 以数字化医疗信息系统为核心的智慧医院运营管理

智慧医院是指依托于信息技术集成患者、医务工作人员、医院部门、设备、机构、信息传播渠道以及智慧医疗服务模式的复杂环境(见图5)。其便捷性、高效性、智能化、整合性等特点, 不仅有助于减少医疗工作人员的负担, 还能够帮助打破医疗服务的时空限制, 缓解日益增长的医疗卫生健康需求, 减轻线下医疗服务压力, 改善区域医疗资源分配不均等问题, 甚至在突发公共卫生事件中发挥缓解医疗资源挤兑的重要作用<sup>[26]</sup>。

### 1) 智慧医疗信息系统搭建

医院信息系统是实现医疗信息化的基础, 利用

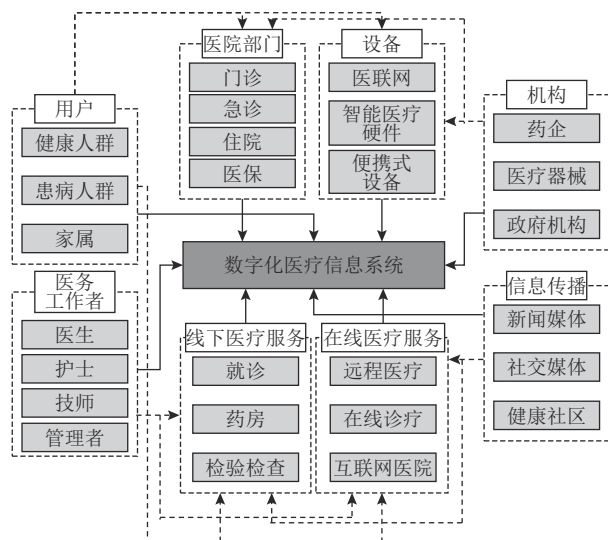


图5 智慧医院架构示意图

Figure 5 Smart hospital architecture

计算机软硬件技术和网络通信技术等现代化手段, 对各部门的人流、物流、财流进行综合管理, 对医疗活动各阶段产生的数据进行采集、存储、处理、提取、传输、汇总, 加工形成各种信息, 从而为医院的整体运行提供全面的自动化管理及各种服务的信息系统, 在打破信息孤岛现象, 在流行病预防、作业排程、人流管理等方面有重要作用<sup>[27]</sup>。医院信息系统已发展到数字化信息系统建设阶段, 包含以医疗信息化系统为核心面向病人管理的新医院信息系统、以电子病历和临床路径为核心面向医护人员的临床信息系统、以人财物为核心的面向管理的医疗运营管理系统。该系统改变了医患访问数据、处理信息和管理知识的方式<sup>[28]</sup>, 近年来学者们也开始致力于区块链技术在信息系统搭建中的使用<sup>[29]</sup>。

### 2) 医疗设备智能化

工业工程智能制造能够深度融合并贯穿医疗系统、产品及健康管理各个环节, 尤其是医联网、智能医疗硬件设施、便携式设备和可穿戴设备等产品的应用, 实现医疗系统的数字化、网络化、智能化, 以降低成本、提升运营效率。中国工程院杨善林院士于2021年提出“医联网”概念<sup>[30]</sup>, 有助于提高系统集成优化。此外, 机器人手术助手、康复机器人以及智能诊断等医疗硬件设施创新响应了医疗器械和制药行业对智能化、精细化和一体化的要求。检验检查设备图像分类、AI患者引导系统、流行病监控等新技术在医院中也被广泛使用<sup>[31]</sup>。便携式设备和可穿戴设备等产品则在健康管理过程中发挥重

要作用,如监控身体指标和个性化护理等。

工业工程的质量和可靠性分析技术也是保障智能医疗设备使用效率和效果的重要手段。基于相关理论和方法, Mishra 等<sup>[32]</sup>对 715 家美国医院的信息技术实施等面板数据进行分析,探讨了信息技术与传统应用的互补性,及其对医院绩效的影响。

### 3) 医疗服务智能化

医疗服务智能化也是目前发展的重点,它是指在新一代信息技术下产生的新的健康管理模式,如远程医疗、在线医疗以及公立医院互联网医院等项目<sup>[33]</sup>。其中,远程医疗主要是依托线下医疗机构,使患者能够接受到远距离优质医疗资源服务。通常情况下,该服务需要医院之间建立合作关系才能开展;在线诊疗则是患者通过在线问诊平台开展疾病诊断和治疗服务,不需要医院层面的调度安排,多是患者自发的行为。相关平台包括好大夫、春雨医生等第三方在线问诊平台。而公立医院互联网医院多为实体医院构建的医疗服务平台,患者能够在该平台上实现挂号、预约、问诊、买药等一系列服务。以上新兴业态的产生,改变了患者的就诊行为。面向这类产品,工业工程的计量分析、收益管理等方法被广泛使用,比如评价临床诊疗效果、节约成本能力、提高医疗可及性、加强医患沟通,以及分析患者和医生的行为选择等<sup>[34-35]</sup>。

## 2.4 医药物流及供应链管理

越来越多的学者也开始关注医疗物流与供应链管理领域的研究问题,并产生丰富的理论研究成果和应用实践。Narayana 等<sup>[36]</sup>以及 Singh 等<sup>[37]</sup>对医药供应链的相关管理研究进行综述和分析。相比于其他产业,医疗“救死扶伤”特性使得医疗物流与供应链的运作更加复杂和关键,如图 6 所示。在保障医疗资源安全和稳定供应的前提下,需要尽可能提升医疗机构的效率和资源的利用率,这给研究者以及管理者带来了极大挑战。

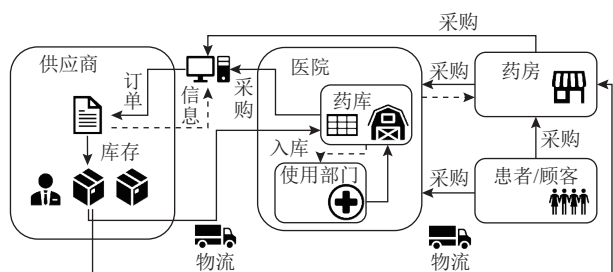


图 6 医药物流及供应链框架

Figure 6 The framework of medical logistics and supply chains

### 1) 药品采购与库存管理

在药品采购和库存管理领域,药品短缺问题是众多学者关注的焦点和重点问题。Iyengar 等<sup>[38]</sup>聚焦于药品特别是疫苗的短缺问题,定性分析了其产生的相关原因和对应管理方案。Jia 等<sup>[39]</sup>也同样聚焦与美国的药物短缺问题,并提出一种基于帕累托改进的合同设计方案,有助于减轻药物短缺、提高制造商和采购组织的利润,同时减少政府支出和医疗成本。上述研究多聚焦于探索药品短缺背后的原因和逻辑,从理论和定性角度对该问题进行分析 and 探索,能够帮助管理者更好地理解短缺的形成机理并制定相应策略。

### 2) 医疗物流与供应链绩效与评价

医疗物流与供应链的绩效评价也同样受到大量学者的关注。Moons 等<sup>[40]</sup>对医院内部物流绩效评价相关的研究文献进行系统综述,指出建立一个通用框架以衡量医院内部物流绩效是未来一个重要研究方向。Kim 等<sup>[41]</sup>则利用数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 方法比较分析医疗供应链的各参与方的效率,并探究这些不同类型效率之间的关系,最终寻求优化医疗供应链的途径。另外, Mandal<sup>[42]</sup>基于动态能力理论分析医院的可感知性、学习、协调和整合对医院-供应商合作的影响,并研究医院-供应商合作对医院供应链绩效的影响。

### 3) 可持续医疗供应链

可持续理念正在越来越多地影响不同领域的研究和实践,医疗供应链也不例外。Ding<sup>[43]</sup>系统回顾了数智化制药工业情境下,构建可持续药品供应链的主要挑战。Veleva 等<sup>[44]</sup>从美国、欧盟、中国和印度选择了 34 家大型制药公司展开研究。研究发现,提供新药的时间压力和法规风险是采用绿色化学的主要障碍,而节约成本和环境管理是主要的驱动因素。这表明在制药领域推动可持续发展需要克服时间和法规上的障碍,并注重成本效益和环境友好的实践。Scavarda 等<sup>[45]</sup>以巴西里约热内卢的一家私立医疗机构为研究对象,提出一个基于可持续视角的管理框架,主要从理论、实践和政策 3 个方面呈现出新的可持续应用前景。

### 4) 医疗供应链信息管理

信息技术的发展也给医疗供应链管理带来巨大机遇和挑战。Zhong 等<sup>[46]</sup>对大数据在供应链管理领域的应用进行系统性回顾,指出医疗健康领域也是



大数据应用的重要领域。Mackey 等<sup>[47]</sup>则系统回顾了如何利用新兴信息技术打击国际贩卖假药的相关研究, 并提出相应的解决方案。Kochan 等<sup>[48]</sup>研究云计算作为电子供应链管理系统 (e-SCMs) 的推动者, 在促进多级医院供应链中协同信息共享的作用。基于云计算的信息共享提高了医疗供应链的可见性和医院的响应能力。

### 3 数智时代下工业工程技术在医疗健康管理领域的创新应用

随着新一代信息技术的飞速发展, 医疗健康管理领域正在经历一场前所未有的革新, 使得医疗健康服务更加高效、精准和智能化。如何深度融合数智技术和医疗健康管理一直是学术界和业界的热点研究内容。现有研究中, 余玉刚等<sup>[49]</sup>对智慧健康医疗管理研究热点进行分析, 详细介绍了信息技术赋能健康医疗管理、医疗制度改革和机制创新等各个方面。Jiang 等<sup>[50]</sup>则综述了人工智能技术在医疗管理中的应用和展望。本部分将聚焦智能技术在上文提到的4个场景中的具体应用, 以展示其巨大的潜力和价值。

#### 3.1 全生命周期数智化慢性病及其共病管理

人口老龄化、疾病谱变化等诸多问题向我国医疗服务与健康管理的发起了挑战, 而医疗健康产业数智化转型将是应对这一重大挑战的必由之路。随着人工智能、大数据、5G 等新一代技术发展, 传统医疗健康运作模式发生根本性变革。世界顶级杂志均发表了新技术在医学应用中的相关研究。医学期刊 Nature Index 于 2021 年刊登了我国妙健康平台利用“AI+人工、线上+线下”模式, 实现个性化的慢性病健康管理创新方案——全面、主动、连续的“非药物”慢病干预服务<sup>[51]</sup>。管理学期刊 Operations Research 于 2021 年刊文介绍了数据分析方法在癌症分期决策中的应用, 有助于将漏诊转移性疾病的患者比例限制在 1% 以下<sup>[52]</sup>。由此可见, 依托大数据、人工智能、互联网等新技术, 赋能慢性病及健康管理是未来必然趋势, 精准化、个性化、规范化成为其追求的目标。随着年龄增长和疾病进程的发展, 多种慢性病共发成为慢性疾病病程发展中的一大特征, 而共病的诊断与治疗的复杂性和难度更大。因此在考虑慢性病全程健康管理的过程中, 还应重点关注慢性病共病患者群体, 如图 7 所示。

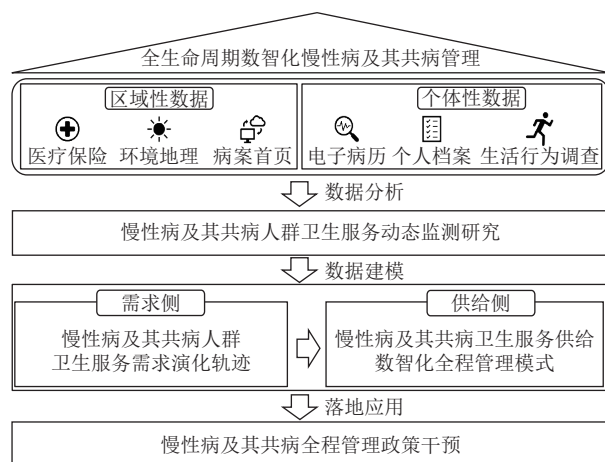


图 7 全生命周期数智化慢性病及其共病管理模式

Figure 7 The model of full life cycle digital intelligent chronic disease and comorbidity management

#### 1) 慢性病及共病患者卫生服务动态监测研究

结合慢性病及共病患者的多源多模态医疗卫生数据进行信息表征, 刻画患者的健康状况变化和医疗卫生服务利用情况, 标准化慢性病及其共病群体卫生服务动态监测路径并在不同区域内开展动态监测, 是数智时代慢病管理的新方向。例如, Figgatt 等<sup>[53]</sup>评估来自健康中心网络的电子健康记录的有效性, 用于在城市环境中服务不足的人群进行慢性病监测。Roger 等<sup>[54]</sup>在数字技术、电子健康记录和移动医疗的基础上, 强调心血管健康和心血管疾病监测系统对于获取足以支持实施和评估的信息的重要性。

#### 2) 慢性病及共病患者卫生服务需求演化轨迹

从疾病-患者的角度深入研究慢性病演化路径的人群和地域差异性, 探讨基于疾病网络分析的共病模式以及共病演化路径, 刻画不同慢性病及其共病人群的医疗卫生服务需求随时间变化的轨迹, 以便优化卫生服务供给的按需分配和动态调整。目前共病网络结构提供了多种疾病共现的总览, 在慢性病及其共病研究<sup>[55-56]</sup>中发挥重要作用。然而基于数据驱动的疾病演化轨迹研究多集中在西方国家, 针对中国人群、以患者区域的全量健康医疗数据为驱动的慢性病及其共病进展轨迹研究还存在空白。

#### 3) 慢性病及共病卫生服务供给数智化全程管理模式

从全生命周期视角出发, 基于慢性病及共病群体的信息表征、疾病演化轨迹和卫生服务需求动态预测结果, 构建排队网络模型解决全程管理中的问题。根据风险特征将患者归入不同队列, 并采取不



同策略进行队列管理。Dong 等<sup>[57]</sup>提出的新排队模型考虑了住院病房患者流动力学的特征,包括周期性出院决策和出院延迟。肖丽萍等<sup>[58]</sup>建立优先级带堵塞排队网络模型,以总成本最小化为目标,探讨短期和长期两种情形下,医联体运行的优化策略。排队网络模型能够评估不同诊疗策略和资源配置方案对全过程管理的整体影响,并做出提高整体系统效率的最佳决策。

4) 慢性病及共病全程管理信息干预

在慢性病及共病的管理中,通过电话、电子邮件等提供健康信息帮助患者更好地理解和管理病情的信息干预,能够有效促进健康和预防疾病<sup>[59]</sup>,同时提高患者的自我管理能力,改善其生活质量,降低医疗费用,并减少因慢性病引起的死亡率<sup>[60]</sup>。然

而,信息干预效果会受到许多因素的影响,如患者年龄、教育水平、健康状况等。因此,在进行信息干预时,还需根据患者的具体情况进行个性化的设计和实施。

3.2 数据驱动的医疗资源调度与优化

数智时代下,医疗健康大数据具有多源异构、规模庞大、高维稀疏、可及性差等属性,同时医疗资源调度呈现出时空复杂性、多决策主体性、大规模性和不确定性的特性。通过构建数智时代下医疗资源配置与调度创新应用框架,能够更好地解决超大规模单体医院内部间多类型的协同高效利用、区域内多主体协同下时空维度的资源协同调配以及重大突发事件下医联体内全社会资源动态协同调配的难题,如图 8 所示。

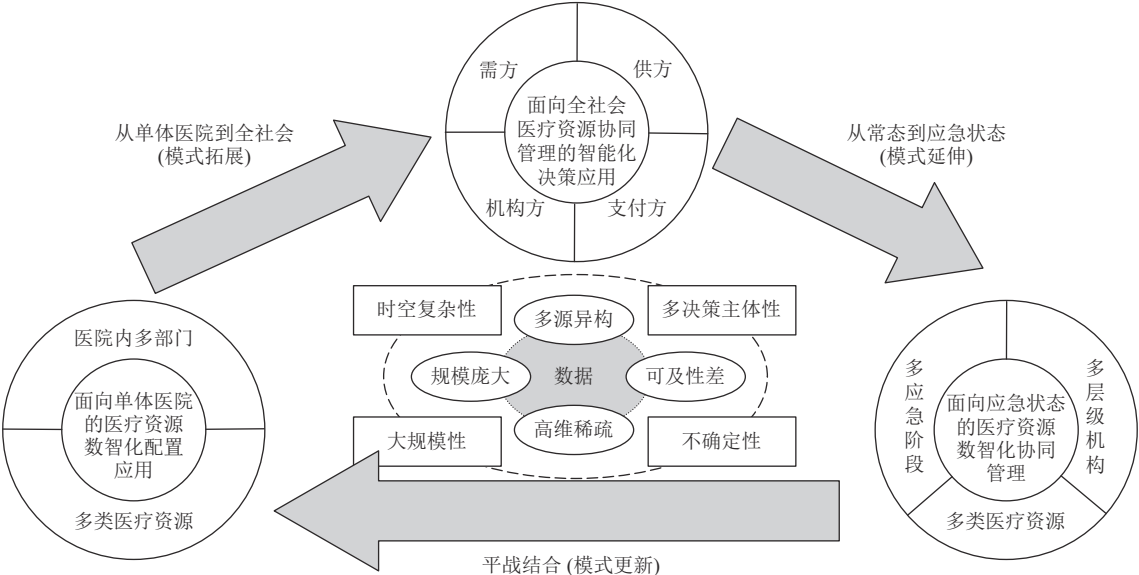


图 8 数智时代下医疗资源配置与调度创新应用框架

Figure 8 The innovative application framework of medical resource allocation and scheduling in the era of data and intelligence

1) 面向单体医院的医疗资源数智化配置应用

大数据、人工智能技术的高速发展引爆了智慧医疗健康对传统医疗健康行业的革新。利用关键资源协同管理二次优化方法,结合新一代信息技术对单体医疗机构的慢病管理体系、检验检查产能分配、医生排班计划等进行智能优化,评估不同诊疗方案各个流程(诊断、治疗、康复)的效果(疗效/成本),从床位资源、医疗技术资源和手术室资源的资源调度角度切入,改善患者传统就医模式。Xie 等<sup>[61]</sup>针对单体医院内不同部门、不同类型医疗资源之间的协同问题,结合数据分析、排队论和凸优化方法设计平方根分配规则,提出具有渐进最优性能的嵌

套分配策略。

2) 面向全社会医疗资源协同管理的智能化决策应用

时空复杂性是全社会医疗健康资源管理面临的重要特性,是在医院关键资源管理多维不确定性上的延展。在数智时代下,传统假设先行的优化模型面临大规模性和不确定性两大挑战难题。通过将机器学习和人工智能等技术嵌入优化模型,形成预测与决策集成优化方法能较好地应对以上挑战<sup>[62]</sup>。

3) 面向应急状态的医疗资源数智化协同管理

基于我国现有的常态化分级诊疗体系,紧紧围绕“防-控-治”一体化管理的应急医疗资源配置与调

度优化问题, 需要借助可穿戴设备、人工智能、5G技术和区块链等新兴技术收集和整合个人健康数据, 综合多利益主体视角探索多层级医疗资源储备策略与体系, 深入研究兼顾多医疗机构、多医护人员、多类型医疗物资、多类型患者的医疗资源配置与调度优化问题, 实现不同“人-物”和“人-人”配置关系, 形成一体化医疗资源管理策略<sup>[63]</sup>。

### 3.3 智慧医院的运营管理模式创新

智慧医院背景下的信息系统、智能设备以及互联网服务对传统医疗系统来说还是一个新兴事物。除了对相关的场景进行管理外, 管理者们还需要充分利用其智能化、远距离服务等特点, 形成一系列新的健康管理模式。

#### 1) 风险监控和预测

数字化医疗信息系统天然的数据积累, 为疾病风险预测和检测提供宝贵资源。Nature 和 Science 等国际顶级期刊多次发表文章, 分析数据分析、人工智能技术在疾病诊断和治疗中的运用。比如, Tsima<sup>[64]</sup>描述 AI 在自动化肺癌诊断、败血症早期诊断, 以及重症监护室中的作用。此外, 智慧医院集成了社会环境数据, 还可用于监控和预测突发公共卫生事件的发生。比如, Shah 等<sup>[65]</sup>改进 LDA (latent Dirichlet allocation) 和 CrystalFeel 情感分析技术, 来识别新冠病毒爆发早期阶段在线医疗平台中主题以及情绪变化趋势, 为政策提供疫情监控系统。目前, 相关数据的挖掘还存在数据不平衡、多源异构等难点, 需要方法论上的持续创新。

#### 2) 智慧医院资源管理模式

业界和学术界十分关注智慧医院新体系下资源管理模式的改变。Zhong 等<sup>[66]</sup>基于排队模型, 聚焦于在线门诊和线下门诊的转诊问题, 评估互联网医院转诊策略对线下排队等待时间、服务时间的均值、方差, 以及对医护人员工作负荷的影响。Ozdemir<sup>[67]</sup>运用博弈论模型, 研究有限供给专家提供线上咨询服务的最优策略沟通数量和工作时间。还有部分学者则关注缺席率、服务规则、线下辅助等对系统资源的影响<sup>[68]</sup>。从以上研究可以发现, 资源的管理不再局限线下服务场景, 更偏向于线上和线下渠道的相互结合。相关的理论和方法需要进一步考虑互联网医疗特色。

#### 3) 智慧医院医患关系分析和管理

智慧医院中的“互联网+医疗”为患者提供了在

线评论、在线健康社区、论坛等场所, 一方面为收集患者对医生的反馈提供良好的数据场所; 另一方面, 医护关系的分析有助于该类新服务的可持续发展。很多学者关注评价信息以挖掘医患关系。Ko 等<sup>[69]</sup>将计量经济学模型与文本分析技术相结合, 利用患者对医生的评分及其定性评论叙述来衡量运营效率和患者满意度之间的关系, 并探索影响患者满意度的各类因素与病人就诊等待时间的关系。Xu 等<sup>[70]</sup>利用数据挖掘技术与随机因子选择模型探索在线评论与医疗用户需求之间的关系。这类研究致力于分析患者使用智慧医疗服务的影响机制, 以提高使用率和使用效率。

#### 4) 公共卫生舆情管理

数据的汇总为社会舆情管理提供了良好的资源。比如, 郭凤仪等<sup>[71]</sup>结合 LDA 与时间序列分析, 观测在线健康社区在突发公共卫生事件下用户关注的事件话题和情感的演化进程。当前研究主要集中于公共卫生事件主题内容挖掘与情感演化分析, 以及公共卫生决策时的流行病学信息大数据研究, 如病例数量变化预测和疾病传播链路等, 而对于社会公众对互联网医院在危机中的反馈和参与程度, 包括对在线医疗服务的接受程度、对信息的信任度等相关研究还较少。

### 3.4 数智时代下医药物流及供应链管理创新

新一代数智化技术的应用, 同样有助于药品供应链管理的创新, 从而更好地保障药品和其他医疗资源的供给, 助力健康中国战略的实施。

#### 1) 基于多源异构大数据的药品采购与库存管理

信息系统能够整合来自不同源头的信息, 如销售数据、供应链数据、市场趋势等; 基于数据分析技术可实现对药品需求的准确预测, 为构建智能化的采购决策模型提供数据依据, 以最优药品批量采购和库存管理, 提高效率并减少浪费。大数据技术对建立更具韧性的药品供应链发挥重要作用。如在突发公共卫生事件时, 通过分析公共卫生事件对供应链的冲击, 提出相应的韧性策略。

#### 2) 全生命周期背景下的医疗物流与供应链绩效评价

医疗物流与供应链需要有效和可靠的绩效评价指标, 包括但不限于交付时间、库存周转率、订单履行率等, 以确保全面评估医药供应链的运营效果。系统需要构建可适用于不同医疗环境的绩效评

价模型,考虑到医疗的特殊性,例如对药品的特殊处理和运输要求,将医疗物流与供应链的绩效评价纳入大健康视角;考虑从生产制造到最终患者使用的全生命周期,以更全面地评估供应链的绩效。探索整合健康数据,评估医疗物流与供应链对患者健康的影响,以及供应链在医疗过程中的整体表现。如 Seifert 等<sup>[72]</sup>开发一个概念框架,用于确定医院达成可持续绩效目标的供应链管理方案。该框架包含了经济、环境和社会三类绩效评价指标,并且明确了医院可持续供应链管理实践与绩效之间的关系。

### 3) 可持续医疗供应链

新一代信息技术和方法同样有助于推动医疗行业的可持续发展,减少生产对环境的不良影响,在提高生产效率的同时降低对资源的依赖。具体包括使用可持续原材料,研究制药和医疗器械制造商使用可再生和可持续原材料的潜在途径;研究推动医疗产品包装材料的可持续发展,以及减少包装材料的使用和采用可降解材料。研究分销商开展逆向物流与产品回收管理,设计和实施高效的产品回收管理系统,减少废弃物并最大程度地延长产品生命周期。还可以从政府和企业角度实施激励措施,研究政府和企业实施激励措施的效果,以促使医疗供应链各参与方更加积极地投入可持续发展。

### 4) 医疗供应链信息管理

从机制设计角度来看,如何打通医疗数据信息壁垒也是重点和难点问题。构建相应的信息存储、共享和保护机制,促进医疗大数据的流通,确保医疗机构及其他利益相关方乐于信息的交换和共享。新兴技术也给予了医疗管理者更强大的工具,以实现更多医疗供应链信息的管理。如何利用这些新兴技术也是未来的重点问题。同时,健康大数据、人工智能等新兴技术在医疗供应链信息管理中的应用也有了新的发展<sup>[73]</sup>。特别是随着可穿戴设备等的快速发展,无论是个人还是人群里,所累积的健康相关数据呈指数级增长。如何利用好健康大数据资源以有效提升医疗与健康的管理效率,是未来非常值得探讨且具有挑战性的任务之一。

## 4 未来展望

新一代信息技术的运用不仅为医疗健康管理领域带来全新的医疗设备和创新的医疗服务,还提供

了更为高效的管理理论和方法。但是,相关技术的应用和管理模式的改变还处于探索阶段,数智化技术带来的挑战也不容忽视。结合以预防为主、以人本为中心和以社会为中心的健康管理要求,工业工程理论与方法有望在以下医疗健康管理领域实现突破。

### 1) 基于数智技术的全生命周期健康管理模式创新

通过建立患者电子健康档案,实现患者健康信息的全面记录和管理;利用大数据分析和人工智能技术对患者的健康数据进行深度挖掘和分析,发现潜在的健康问题和风险,为患者提供个性化的健康管理方案;利用移动互联网和可穿戴设备等技术,实现患者健康数据的实时监测和传输,为患者提供更加便捷的健康管理服务。另外,人工智能生成内容 (artificial intelligence generated content, AIGC) 作为一种基于人工智能技术的医疗创新模式,涉及文本、音频、视频等多种媒体内容,将推动医疗技术的革新和进步。例如,在诊断方面,AIGC 从大量医学数据中快速准确地诊断疾病,提供更精准的诊疗方案;在个性化治疗中,AIGC 根据患者的个体差异和基因信息,为患者提供个性化的用药建议;在医疗数据分析中,AIGC 根据医疗数据的特点,预测疾病的发展趋势和风险,为医生提供个性化的医学建议。总之,从辅助诊断、治疗方案制定到医学影像解读,再到手术规划和导航、个性化医疗以及医疗教育和培训等,其身影无处不在。随着科技的不断进步,AIGC 将助力医疗领域,实现更加精准、高效和可持续发展目标。

### 2) 基于数字孪生技术的复杂医疗系统资源管理模型构建

医疗系统可概述为存在供方、需方、支付方和机构方相互联系的复杂系统。依靠管理者的经验或局部的数据观测,难以实现整体效用的最大化。数字孪生等技术可以通过构建虚拟的医疗系统模型,实现对真实医疗系统的实时监测、预测和优化。在医疗健康管理领域,利用数字孪生技术可以构建复杂的医疗系统资源管理模型,实现医疗资源的优化配置和高效利用。可以通过对医疗设备的运行状态、患者的需求、医护人员的工作情况等进行实时监测和分析,构建数字孪生模型,预测未来资源需求,智能化制定科学合理的资源配置方案。同时,



可以利用优化算法对模型进行求解, 决策最优的资源管理策略, 提高医疗系统的运行效率和服务质量。此外, 依托复杂医疗系统数字孪生系统, 实施准确的疫情研判与预测、及时的医疗救治与患者隔离、高效的疫苗与药物研发、全面的民众健康与心理干预、合理的疫情与舆情管理等也是重大突发事件下应急医疗资源配置的重要举措。

### 3) 全方位数字化医疗信息系统机制和规范设定

尽管医疗行业在数字化转型方面取得了一定的进展, 但医疗信息共享仍然面临诸多问题。目前, 医疗信息共享程度整体不高, 许多医疗机构和部门之间存在信息壁垒, 导致信息无法顺畅流通。此外, 医疗信息的管理机制仍不完善, 缺乏统一的标准和规范, 信息的准确性和可靠性难以保证。而且, 医疗信息的共享水平还存在不均衡的问题, 一些地区的医疗机构可能存在较高的信息共享水平, 而其他地区则相对较低。在未来的研究中, 信息标准化、数据治理保障、信息共享激励等方面将得到更多的关注, 成为全方位数字化医疗信息系统搭建的热点问题, 有望解决当前医疗信息共享中存在的现实难题, 提升医疗服务的水平和效率。

### 4) 大健康背景下医疗供应链管理

在大健康背景下, 医疗供应链管理同样重要和关键。基于多源异构大数据, 结合人工智能等分析和决策方法, 提升药品采购和库存管理的效率和柔性, 结合全生命周期和大健康管理要求, 设计提出有效的供应链绩效评价指标, 助力智慧医疗供应链管理。此外, 探索医疗供应链各个主体的可持续发展战略, 研究提出相应的激励和促进机制, 提升医疗供应链可持续发展水平。加强信息整合、数据治理和信息共享机制等方面的研究和实践, 推动医疗供应链信息管理的持续发展, 为医疗行业的数字化转型和升级提供有力支持。总之, 医疗供应链管理是保障“健康中国”战略实施, 提升人民群众健康生活水平, 实现全生命周期健康管理的关键环节。

## 5 总结

在数智化时代, 工业工程与医疗健康管理的结合展现出巨大的潜力和前景。随着 5G、云计算、大数据以及人工智能等新一代信息技术的迅猛发

展, 它们在医疗健康服务领域的应用也在不断拓展。这些技术不仅为医疗健康服务改革提供强大的技术赋能, 推动医疗设备和服务的创新, 更为复杂集成医疗系统进行管理赋能, 开创数智化资源管理和健康管理模式的新纪元。

综上所述, 工业工程在医疗健康管理中的应用能够显著提高医疗服务的质量和效率, 降低医疗成本, 为患者带来更加便捷、个性化的医疗体验。这种跨界融合助力“健康中国”等国家战略的实施, 能为整个医疗健康行业注入新的活力。随着技术的不断进步和应用的深入拓展, 工业工程在医疗健康管理领域将发挥越来越重要的作用。它将继续引领医疗健康行业的发展潮流, 为建设更加智能、高效的医疗服务体系提供强大的支撑。

### 参考文献:

- [1] KESKINOCAK P, SAVVA N. A review of the healthcare-management (modeling) literature published in manufacturing & service operations management[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, 22(1): 59-72.
- [2] 杜少甫, 谢金贵, 刘作仪. 医疗运作管理: 新兴研究热点及其进展[J]. *管理科学学报*, 2013, 16(8): 1-19.  
DU Shaofu, XIE Jingui, LIU Zuoyi. Progress and prospects in an emerging hot topic: healthcare operations management[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(8): 1-19.
- [3] 罗利, 呼万哲, 蒋艳, 等. 医院护理人力资源能力规划与控制研究进展[J]. *工业工程与管理*, 2023, 28(5): 184-198.  
LUO Li, HU Wanzhe, JIANG Yan, et al. Research progress on hospital nursing workforce capacity planning and control[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2023, 28(5): 184-198.
- [4] DAI T, TAYUR S. OM forum — Healthcare operations management: a snapshot of emerging research[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, 22(5): 869-887.
- [5] 江志斌, 戚建华, 苏强, 等. 现代医院管理中的工业工程: 回顾与展望[J]. *中国医院管理*, 2006, 26(6): 15-17.  
JIANG Zhibin, QI Jianhua, SU Qiang, et al. A review and perspective on industrial engineering in modern hospital management[J]. *Chinese Hospital Management*, 2006, 26(6): 15-17.
- [6] 简祯富, 赵立忠, 朱珮君. 工业工程在台湾医院管理之研究与应用[J]. *工业工程*, 2013, 16(1): 1-8.  
JIAN Zhenfu, ZHAO Lizhong, ZHU Peijun. Research and application of industrial engineering to hospital management in Taiwan[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2013, 16(1): 1-8.
- [7] WANG P, VIENNEAU M, VOGELI C, et al. Reframing value-based care management: beyond cost reduction and toward patient centeredness[J]. *JAMA Health Forum*, 2023, 4 (6): e231502-e231502.
- [8] CHRISTENSON S A, SMITH B M, BAFADHEL M, et al. Chronic obstructive pulmonary disease[J]. *The Lancet*, 399

- (10342): 2227-2242.
- [9] TSE L A, WANG F, WONG M C, et al. Risk assessment and prediction for lung cancer among Hong Kong Chinese men[J]. *BMC Cancer*, 2022, 22(1): 1-9.
  - [10] ALI N, LIFFORD K J, CARTER B, et al. Barriers to uptake among high-risk individuals declining participation in lung cancer screening: A mixed methods analysis of the UK lung cancer screening (UKLS) trial[J]. *BMJ Open*, 2015, 5(7): e008254.
  - [11] HAJJAR A, ALAGOZ O. Personalized disease screening decisions considering a chronic condition[J]. *Management Science*, 2023, 69(1): 260-282.
  - [12] 徐伟锋, 曹平. 马尔可夫决策过程在类风湿关节炎治疗中的应用研究[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(9): 150-156.  
XU Weifeng, CAO Ping. Application of markov decision process to the treatment of rheumatoid arthritis[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(9): 150-156.
  - [13] JACKSON C, SHAHSAHEBI M, WEDLAKE T, et al. Timeliness of outpatient follow-up: An evidence-based approach for planning after hospital discharge[J]. *The Annals of Family Medicine*, 2015, 13(2): 115-122.
  - [14] 罗利, 石应康. 医疗服务资源调度优化理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
  - [15] ZENG B, TURKCAN A, LIN J, et al. Clinic scheduling models with overbooking for patients with heterogeneous no-show probabilities[J]. *Annals of Operations Research*, 2010, 178: 121-144.
  - [16] GORUNESCU F, MCCLEAN S I, MILLARD P H. A queueing model for bed-occupancy management and planning of hospitals[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2002, 53: 19-24.
  - [17] CARDOEN B, DEMEULEMEESTER E, BELIËN J. Operating room planning and scheduling: A literature review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 201(3): 921-932.
  - [18] LUO L, ZHOU Y, HAN B T, et al. An optimization model to determine appointment scheduling window for an outpatient clinic with patient no-shows[J]. *Health Care Management Science*, 2019, 22: 68-84.
  - [19] PATRICK J, PUTERMAN M L, QUEYRANNE M. Dynamic multipriority patient scheduling for a diagnostic resource[J]. *Operations Research*, 2008, 56(6): 1507-1525.
  - [20] 罗利, 张伟. 大数据驱动的智慧医疗健康全社会资源管理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
  - [21] WANG J J, LI Z P, SHI J J. Hospital referral and capacity strategies in the two-tier healthcare systems[J]. *Omega-International Journal of Management Science*, 2021, 100: 102229.
  - [22] RAJAGOPALAN S, TONG C. Payment models to coordinate healthcare providers with partial attribution of outcome costs[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2022, 24(1): 600-616.
  - [23] LUO L, WANG Y, JIANG P, et al. Emergency medical service planning considering dynamic and stochastic demands of infected and non-infected patients during epidemics[J/OL]. *Journal of the Operational Research Society*, 2023 (2023-04-18). <https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2199769>.
  - [24] 罗利, 万心滢, 赵淑珍, 等. 传染性疫情下考虑就诊潜在感染风险的门诊号源配置优化研究[J]. *管理学报*, 2022, 19(10): 1543-1554.  
LUO Li, WAN Xinying, ZHAO Shuzhen, et al. An optimization study on outpatient service capacity planning considering potential Infection risk during epidemics[J]. *Chinese Journal of Management*, 2022, 19(10): 1543-1554.
  - [25] HE X, LUO L, TANG X, et al. Optimizing large-scale COVID-19 nucleic acid testing with a dynamic testing site deployment strategy[J]. *Healthcare*, 2023, 11(3): 393.
  - [26] DAI T, ABRÀMOFF M D. Incorporating artificial intelligence into healthcare workflows: Models and insights[J/OL]. *Tutorials in Operations Research: Advancing the Frontiers of OR/MS: From Methodologies to Applications*, 2023 (2023-10-13). <https://doi.org/10.1287/educ.2023.0257>.
  - [27] LAL A, ASHWORTH H C, DADA S, et al. Optimizing pandemic preparedness and response through health information systems: lessons learned from Ebola to COVID-19[J]. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2022, 16(1): 333-340.
  - [28] ABBATE S, CENTOBELLI P, CERCHIONE R, et al. Investigating healthcare 4.0 transition through a knowledge management perspective[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022, 70(9): 3297-3310.
  - [29] SOLTANISEHAT L, ALIZADEH R, HAO H, et al. Technical, temporal, and spatial research challenges and opportunities in blockchain-based healthcare: A systematic literature review[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2020, 70(1): 353-368.
  - [30] 杨善林, 范先群, 丁帅, 等. 医联网与智慧医疗健康管理[J]. *管理科学*, 2021, 34(6): 71-75.  
YANG Shanlin, FAN Xiangun, DING Shuai, et al. Internet of healthcare systems and smart medical health management[J]. *Journal of Management Science*, 2021, 34(6): 71-75.
  - [31] RAJPURKAR P, CHEN E, BANERJEE O, et al. AI in health and medicine[J]. *Nature Medicine*, 2022, 28(1): 31-38.
  - [32] MISHRA A N, TAO Y, KEIL M, et al. Functional IT complementarity and hospital performance in the united states: a longitudinal investigation[J]. *Information Systems Research*, 2022, 33(1): 55-75.
  - [33] 杨善林, 丁帅, 顾东晓, 等. 医联网: 新时代医疗健康模式变革与创新发展[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(10): 1-11.  
YANG Shanlin, DING Shuai, GU Dongxiao, et al. Internet of healthcare systems (IHS): Revolution and innovations of healthcare management in the new era[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(10): 1-11.
  - [34] RAJAN B, TEZCAN T, SEIDMANN A. Service systems with heterogeneous customers: Investigating the effect of telemedicine on chronic care[J]. *Management Science*, 2019, 65(3): 1236-1267.

- [35] ÇAKICI Ö E, MILLS A F. On the role of teletriage in health-care demand management[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2021, 23(6): 1483-1504.
- [36] NARAYANA S A, ELIAS A A, PATI R K. Reverse logistics in the pharmaceuticals industry: a systemic analysis[J]. *The International Journal of Logistics Management*, 2014, 25(2): 379-398.
- [37] SINGH R K, KUMAR R, KUMAR P. Strategic issues in pharmaceutical supply chains: a review[J]. *International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing*, 2016, 10(3): 234-257.
- [38] IYENGAR S, HEDMAN L, FORTE G, et al. Medicine shortages: a commentary on causes and mitigation strategies[J]. *BMC Medicine*, 2016, 14(1): 1-3.
- [39] JIA J, ZHAO H. Mitigating the US drug shortages through Pareto-improving contracts[J]. *Production and Operations Management*, 2017, 26(8): 1463-1480.
- [40] MOONS K, WAEYENBERGH G, PINTELON L. Measuring the logistics performance of internal hospital supply chains—a literature study[J]. *Omega*, 2019, 82: 205-217.
- [41] KIM C, KIM H J. A study on healthcare supply chain management efficiency: Using bootstrap data envelopment analysis[J]. *Health Care Management Science*, 2019, 22: 534-548.
- [42] MANDAL S. The influence of dynamic capabilities on hospital-supplier collaboration and hospital supply chain performance[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2017, 37(5): 664-684.
- [43] DING B. Pharma industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 119: 115-130.
- [44] VELEVA V R, CUE JR B W, TODOROVA S. Benchmarking green chemistry adoption by the global pharmaceutical supply chain[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(1): 2-14.
- [45] SCAVARDA A, DAÚ G L, SCAVARDA L F, et al. A proposed healthcare supply chain management framework in the emerging economies with the sustainable lenses: The theory, the practice, and the policy[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141: 418-430.
- [46] ZHONG R Y, NEWMAN S T, HUANG G Q, et al. Big data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 101: 572-591.
- [47] MACKEY T K, NAYYAR G. A review of existing and emerging digital technologies to combat the global trade in fake medicines[J]. *Expert Opinion on Drug Safety*, 2017, 16(5): 587-602.
- [48] KOCHAN C G, NOWICKI D R, SAUSER B, et al. Impact of cloud-based information sharing on hospital supply chain performance: A system dynamics framework[J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 195: 168-185.
- [49] 余玉刚, 王耀刚, 江志斌, 等. 智慧健康医疗管理研究热点分析[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 58-66.
- YU Yugang, WANG Yaogang, JIANG Zhibin, et al. Analysis of research hotspots of intelligent health care management[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(8): 58-66.
- [50] JIANG F, JIANG Y, ZHI H, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future[J/OL]. *Stroke and Vascular Neurology*, 2017(2017-06-22). <https://www.nature.com/articles/d42473-021-00191-7>.
- [51] MIAO HEALTH, Canada Wellness Institute. Chronic disease management's digital future[J]. *Nature Index*, 2021 (2021-05-26). <https://www.nature.com/articles/d42473-021-00191-7>.
- [52] SELIN M, CHRISTINE L B, BRIAN T D, et al. OR practice-data analytics for optimal detection of metastatic prostate cancer[J]. *Operations Research*, 2021, 69(3): 774-794.
- [53] FIGGATT M, CHEN J, CAPPER G, et al. Chronic disease surveillance using electronic health records from health centers in a large urban setting[J]. *Journal of Public Health Management and Practice*, 2021, 27(2): 186-192.
- [54] ROGER V L, SIDNEY S, FAIRCHILD A L, et al. Recommendations for cardiovascular health and disease surveillance for 2030 and beyond: a policy statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2020, 141(9): e104-e119.
- [55] DIVO M J, CASANOVA C, MARIN J M, et al. COPD comorbidities network[J]. *European Respiratory Journal*, 2015, 46(3): 640-650.
- [56] AGUADO A, MORATALLA-NAVARRO F, LÓPEZ-SIMARRO F, et al. MorbiNet: multimorbidity networks in adult general population. Analysis of type 2 diabetes mellitus comorbidity[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 2416.
- [57] DONG J, PERRY O. Queueing models for patient-flow dynamics in inpatient wards[J]. *Operations Research*, 2020, 68(1): 250-275.
- [58] 肖丽萍, 李加莲, 邵雪焱等. 分级诊疗下基于排队网络的医联体系统优化[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(9): 186-195.
- XIAO Liping, LI Jialian, SHAO Xueyan, et al. Medical alliance system optimization based on queuing network under hierarchical diagnosis and treatment[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(9): 186-195.
- [59] REYNOLDS R, DENNIS S, HASAN I, et al. A systematic review of chronic disease management interventions in primary care[J]. *BMC Family Practice*, 2018, 19(1): 11.
- [60] VIANESSA T, DIGNA R, EMILY D M. Results of a culturally directed asthma intervention program in an inner-city Latino community[J]. *Chest*, 2005, 128(3): 1163-1167.
- [61] XIE J, ZHUANG W, ANG M, et al. Analytics for hospital resource planning—two case studies[J]. *Production and Operations Management*, 2021, 30(6): 1863-1885.
- [62] LIN S, ZHANG Q, CHEN F, et al. Smooth Bayesian network model for the prediction of future high-cost patients with COPD[J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2019, 126: 147-155.



- [63] LUO L, WAN X, WANG Q. A multi-period location-allocation model for integrated management of emergency medical supplies and infected patients during epidemics[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 173: 108640.
- [64] TSIMA K. The reproducibility issues that haunt health-care AI[J]. *Nature*, 2023, 613: 402-403.
- [65] SHAH A M, YAN X, QAYYUM A, et al. Mining topic and sentiment dynamics in physician rating websites during the early wave of the COVID-19 pandemic: Machine learning approach[J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2021, 149: 104434.
- [66] ZHONG X, HOONAKKER P, BAIN P A, et al. The impact of e-visits on patient access to primary care[J]. *Health Care Management Science*, 2018, 21(4): 475-491.
- [67] OZDEMIR Z D. Optimal multi-channel delivery of expertise: An economic analysis[J]. *International Journal of Electronic Commerce*, 2007, 11(3): 89-105.
- [68] JI M, WANG S, PENG C, et al. Two-stage robust telemedicine assignment problem with uncertain service duration and no-show behaviours[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108226.
- [69] KO D G, MAI F, SHAN Z, et al. Operational efficiency and patient-centered health care: A view from online physician reviews[J]. *Journal of Operations Management*, 2019, 65(4): 353-379.
- [70] XU Y, ARMONY M, GHOSE A. The interplay between online reviews and physician demand: An empirical investigation[J]. *Management Science*, 2021, 67(12): 7344-7361.
- [71] 郭凤仪, 纪雪梅. 突发公共卫生事件下在线健康社区突发话题与情感的共现关联分析[J]. *情报理论与实践*, 2022, 45(4): 190-198.
- GUO Fengyi, JI Xuemei. Co-occurrence and correlation analysis of emergent topics and emotions in online health communities under public health emergencies[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 45(4): 190-198.
- [72] SEIFERT C, KOEP L, WOLF P, et al. Life cycle assessment as decision support tool for environmental management in hospitals: a literature review[J]. *Health Care Management Review*, 2021, 46(1): 12-24.
- [73] NÚÑEZ-MERINO M, MAQUEIRA-MARÍN J M, MOYANO-FUENTES J, et al. Information and digital technologies of Industry 4.0 and lean supply chain management: a systematic literature review[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(16): 5034-5061.

(责任编辑: 郑德华)

## · 简讯 ·

### 《工业工程》2021~2023 年度优秀审稿专家

《工业工程》期刊是中国机械工程学会工业工程分会会刊, 由广东工业大学主办, 中国机械工程学会协办。自 1998 年创刊以来, 《工业工程》在主管单位广东省教育厅和主办单位广东工业大学的正确领导下, 在编委会、审稿专家、广大作者和读者的大力支持下, 办刊水平不断提高。《工业工程》始终坚守办刊宗旨, 坚持质量第一, 多次被评为“中国高校优秀科技期刊”“广东省优秀科技期刊”。2023 年度再次被收录为“中国科技核心期刊”, 被 EBSCO 国际数据库收录, 获评“第六届广东省优秀期刊提名奖”。这些成绩的取得与广大审稿专家的辛勤劳动和无私奉献密不可分。在此, 编辑部谨向所有审稿专家致以崇高的敬意及衷心的感谢!

《工业工程》编辑部根据 2021~2023 年度审稿次数、审稿周期、审稿质量等, 评选出优秀审稿专家 80 名, 在此予以表彰! 《工业工程》2021~2023 年度优秀审稿专家名单如下(排名不分先后, 按姓氏拼音排序)。

曹政才	曾敏刚	车阿大	陈洪转	陈敬贤	陈伟达	陈志祥	程发新	程海芳	崔南方
达庆利	党耀国	丁雪峰	董明	傅惠	甘卫华	高本河	高举红	郭伏	郭钢
何曙光	侯艳	霍艳芳	戢守峰	纪颖	贾晓霞	姜连馥	孔繁森	黎展滔	李波
李从东	李豪	李军祥	李蓉	李艳婷	梁工谦	刘光富	刘建军	刘林	刘琼
刘松先	刘子先	罗党	苗瑞	慕银平	倪得兵	聂佳佳	钮建伟	裴小兵	彭建良
屈绍建	石岩然	苏平	孙华丽	覃燕红	田军	王丹力	王道平	王凯波	王能民
王文宾	王小明	魏杰	吴昌旭	吴迪	徐素秀	杨宏安	杨建华	杨磊	杨敏
杨朋	姚锋敏	姚佼	易平涛	于兆勤	张旭梅	张则强	赵道致	周炳海	周一帆

《工业工程》编辑部