

· 综述 ·

传感器在中药生产中的应用及研究进展[△]李波^{1,2}, 刘小溪³, 韩东^{1,2}, 许刚^{3,4}, 王晓梅^{3,4}, 彭修娟^{2,4}, 刘峰^{1,2,3,4*}

1. 陕西中医药大学, 陕西 咸阳 712046;

2. 陕西国际商贸学院, 陕西 咸阳 712046;

3. 陕西步长制药有限公司, 陕西 西安 710075;

4. 陕西省中药绿色制造技术协同创新中心, 陕西 咸阳 712046

[摘要] 随着“中国制造 2025”国家战略的不断推进, 中药制造从机械化、自动化走向智能化。为保证药品的安全和品质, 需要对生产过程中的数据进行实时感知与传输, 这无疑是中药智能制造过程中的巨大挑战。因此, 作为数据感知源头的传感器技术在中药制备过程中的发展则变得至关重要。对近几年中药生产中常用的传感器类型进行总结, 重点分析了不同类型传感器从中药材前处理到药品包装的应用效果, 阐述了 5G 技术、人工智能联合传感器技术在中药智能制造中的优势, 并对传感器在中药智能制造中的应用进行了展望, 为制药企业智能制造的发展提供了信息化和智能化参考。

[关键词] 智能制造; 生产工艺; 中药; 传感器

[中图分类号] R282 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2022)10-2010-08

doi: 10. 13313/j. issn. 1673-4890. 20211214004

Sensors in Intelligent Manufacturing of Chinese Medicine

LI Bo^{1,2}, LIU Xiao-xi³, HAN Dong^{1,2}, XU Gang^{3,4}, WANG Xiao-mei^{3,4}, PENG Xiu-juan^{2,4}, LIU Feng^{1,2,3,4*}

1. Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China;

2. Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang 712046, China;

3. Shaanxi Buchang Pharmaceutical Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

4. Shaanxi Collaborative Innovation Center of Green Manufacturing Technology of Traditional Chinese Medicine, Xianyang 712046, China

[Abstract] Chinese medicine manufacturing enterprises are advancing from mechanization and automation to intelligent manufacturing as China is implementing the "Made in China 2025" national strategy. Real-time data-aware and data transmission are required in the manufacturing process to ensure the safety and quality of medicine, which is undoubtedly a grand challenge in the intelligent manufacturing. Therefore, as the source of data-aware, sensors become crucial in the manufacturing of Chinese medicine. This review summarized the types of sensors commonly used in the manufacturing of Chinese medicine in recent years. The application effects of different types of sensors from the pretreatment of Chinese medicinal materials to the packing of medicine were analyzed. Furthermore, this review introduced the advantages of sensors in combination with 5G technology and artificial intelligence and forecasted the prospect of the application of sensors in the intelligent manufacturing of Chinese medicine. This review provides information for the development of intelligent manufacturing of Chinese medicines in pharmaceutical enterprises.

[Keywords] intelligent manufacturing; manufacturing technique; Chinese medicine; sensors

随着新一轮技术革命和新兴产业的崛起, 世界制造业的发展将以绿色制造和智能制造为重点。德国

“工业 4.0”和美国“工业互联网”完善地阐述了数字化、网络化制造范式, 提出了实现数字化、网络

[△] **[基金项目]** 陕西省中药产业智能制造实施策略研究项目 (2019-ZZ-ZC009)

^{*} **[通信作者]** 刘峰, 主任药师, 研究方向: 中药新药开发和中药大品种技术升级改造; Tel: 029-88318318, E-mail: liufeng1720@163.com

化制造的技术路线^[1]；而“中国制造2025”和“中医药发展战略规划纲要（2016—2030年）”指出，今后中医药发展的主要方向是推进中药智能制造，注重信息化、智能化及工业化三者的相互融合^[2]。近年来，我国中药智能生产虽然取得了阶段性胜利，但在药材前处理、提取浓缩、灭菌干燥、制剂成型及包装等生产过程的数据难以获取、传输与处理^[3]，生产中的“数据孤岛”现象依然存在，这对中药智能生产的发展造成了极大的阻碍。

传感器是制造过程的感官系统，相当于人的眼睛、耳朵和鼻子等，是采集生产数据的源头，能够使数据实时传入和传出（图1）。因此，传感器技术的发展是智能制造过程的关键，并在一定程度上决定着智能制造的进程。如今，虽有文献介绍了传感器在中药部分生产过程中的应用，但其对在中药生产中传感器的具体类型和应用并未进行详细描述^[4-5]。基于此，根据国内外传感器技术的最新进展，结合中药生产全过程的应用情况，进一步思考传感器在中药智能制造的发展趋势，为推动我国中药智能生产的发展提供战略性构想和创新升级策略。

传感器技术的快速发展，使其独特优势得到了前所未有的关注，许多国家也将其归为新型重点技术。为了加快智能制造的发展，国内外研究者在传感器的材料和结构方面进行了优化^[6]，使其灵敏度提高、选择性提升、价格更低廉，并且使用寿命更长。同时，学者将传感器与神经网络等智能系统结合^[7-8]，

使传感器在中药生产过程具有自检与自诊断、智能校正与补偿等功能，推动现代中药制造传感器向智能化^[9]、微型化^[10]、网络化^[11]、新材料化^[12-13]方向的发展。如今，传感器已经广泛应用于食品^[14-16]、农产品^[17-19]、环境监测^[20-22]等领域。

1 传感器概述

1.1 定义

传感器是一种用来检测数据的装置，其能够检测被测量的信息，并将检测到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息进行输出，来满足信息的传输、处理、显示、存储、记录和控制等要求，传感器技术是实现智能检测和智能控制的首要环节^[4]。

1.2 主要类型

传感器位于生产设备的最前端，在智能制造领域中，能够更快速、更高效地提供智能生产过程中的各种参数，来实现对制造过程中的实时在线跟踪和控制，在工业生产中传感器依据以下5个方面进行分类：1）按运行原理可分为电阻式、光电式、红外、光导纤维、超声波、激光等传感器；2）按敏感材料可分为半导体、陶瓷、光导纤维、金属、高分子材料等传感器；3）按使用目的可分为测量用、分析用、诊断用、控制用等传感器；4）按输出信号可分为模拟传感器和数字传感器；5）按测量信号可分

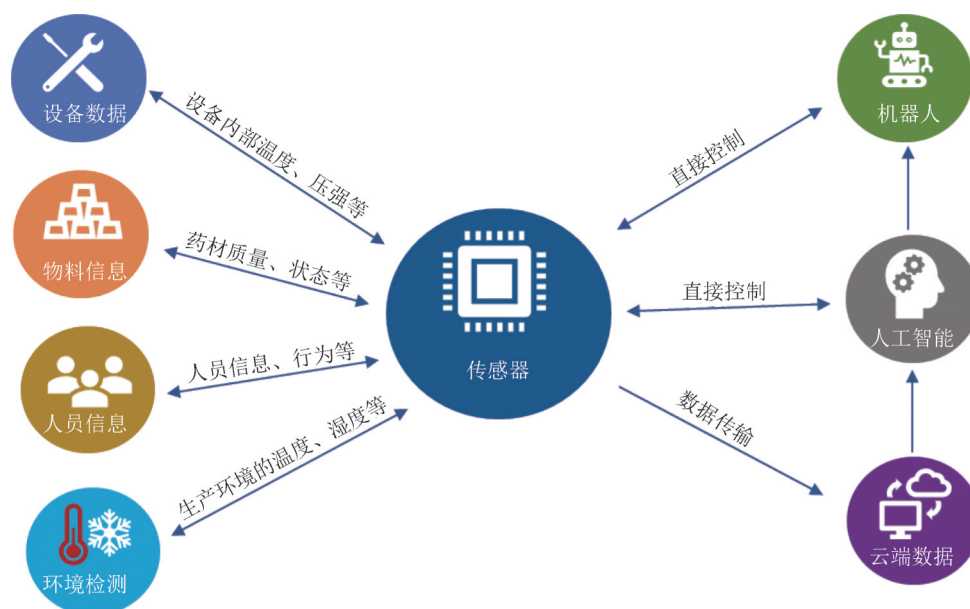


图1 传感器的应用

为力学量、光学量、热学量、化学量、生物量等。

2 中药常见传感器类型

2.1 红外传感器

以红外光与含氢基团(-CH、-NH、-OH等)振动的合频与倍频吸收为特点的红外传感器,可以将辐射能转换为电能,主要是利用红外辐射引起探测器的敏感元件变化,使相关参数发生变化(图2),实现快速、高效地分析检测^[23]。在中药领域中,红外传感器不仅可以无损地提取样本信息,而且还能对多种中药材进行真伪鉴别,对次品的掺入量进行预测,能够快速有效地对中药整体质量进行评价与鉴定。红外传感器还可以提高中药提取、分离纯化效率,提升提取物的质量,达到中药的高效率、高质量生产,从而降低生产成本^[24];Zhang等^[25]研究了一种使用近红外反射光谱(NIRS)快速测定脑塞通中2种人参皂苷的方法,此方法可用于人参中人参皂苷含量的快速测定;Sun等^[26]采用中红外光谱(MIR)和近红外光谱(NIR),对半夏与掺假半夏、炮制半夏与掺假半夏进行快速、可靠的鉴别。光学传感器的应用为中药智能制造中成药的质量评价提供了参考。

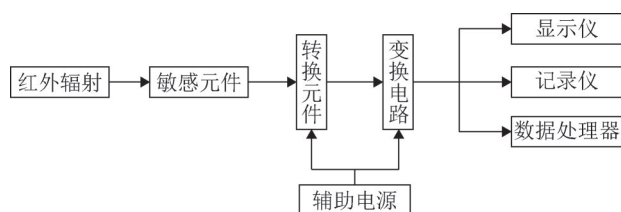


图2 近红外传感器组成

2.2 电学传感器和生物传感器

电学传感器的工作原理是将化学复合材料固定到电极表面,可特异性识别被测物,之后传感器转换信息的部分将识别的信息转变为可被检测的输出信号,其在食品安全、生物医学、环境监测等方面有着广泛的应用^[27]。生物传感器的敏感材料是用生物物质作为识别元件,可将生化反应转变成可定量的物理、化学信号,从而能够进行生命物质和化学物质检测和监控的装置^[28]。

基于电化学技术的生物传感器结合了两者的优点,具有响应速度更快、检测限更低等优点,应用在食品、药品的重金属快速检测领域将具有极大的研究价值。闫卉欣等^[29]制备的DNA电化学生物传感

器,具有较好的稳定性及重复性,能对动物药僵蚕中的汞离子(Hg^{2+})进行快速检测,这为快速筛查中药材基质中微量重金属及农药残留提供了新的思路,为中药智能制造生产提供了方向。

2.3 仿生传感器

中药饮片的质量鉴定采用“辨状论质”^[30],大致通过感官、理化、生物等方法进行鉴定,目前辨认饮片的优劣甚至真伪仍然依靠人的经验,主要通过其形、色、气、味等外观形状进行判断^[31]。但如今中药的染色、熏蒸等技能让经验鉴别方法很难辨别,“论质”如今面临着巨大的挑战^[32]。因此,将仿生传感器技术应用在中药饮片及炮制的“辨色”中,通过传感器提取样本数据,并进行识别判断,具有更高的准确性和安全性。

2.3.1 机器视觉 机器视觉是在传感器技术的基础上,对被检测物体通过图像来获取数据,随后进行分析处理,来实现生产过程的实时检测和控制^[33]。机器视觉技术主要以色泽作为评价标准,在农业领域,可用于水果成熟度鉴别及肉类新鲜度评价^[34];在中药领域,采收期的时间和产地的不同及炮制方法的差别,使得药材的色泽表现出的巨大的差异性,而机器视觉对这种差异性能快速、精确地检测。杨添钧^[35]建立了一种机器视觉系统,能够对枸杞子、大枣及丹参等多味中药颜色特征值进行模式识别,并统计多味中药颜色的取值范围,采用模式识别的方法,实现中药识别的数字化、智能化。

2.3.2 机器嗅觉 机器嗅觉又称电子鼻或者仿生嗅觉,是化学传感器与计算机结合的技术,能够对气味及挥发物进行研究和分析。目前主要应用于农业领域,如利用电子鼻实现对苹果低温贮藏时间及品质的预测^[36],也可实现中药及其中成药的鉴别分类,在质量评判分析、产品监控领域也大量应用。张超等^[37]采用电子鼻技术获取半夏及其不同种类与比例的掺伪样品气味指纹图谱,并结合多种化学计量学方法进行鉴定,结果显示,电子鼻技术能够根据气味快速鉴别半夏及其伪品;庄家俊等^[38]采用电子鼻技术对多组不同批次的中药进行检测,并对获取到的数据进行分析,结果显示有较高的正确率,可实现对中药不同批次的鉴别和分类。

2.3.3 机器味觉 机器味觉是一类智能味觉仿生系统,将传感器技术与计算机结合,模拟人的舌头,从待测样品中获取数据,随后进行分析、识别和判

断, 快速地反映出样品整体的质量信息, 实现对样品的识别和分类^[39-40]。陈栋杰等^[41]利用电子舌技术对不同产地的枸杞子样品进行检测, 结果显示, 电子舌传感器与感官评价结果响应值较好, 说明电子舌技术在未来能够替代人工实现对各类中药的味觉属性进行评价。

3 传感器在中药生产中的应用

传感器技术虽然已经比较成熟, 但在中药制药领域中仍处于发展阶段。制药过程中物料种类、状态、理化性质、物质基础都会对药品质量产生影响。各种在线、原位、非接触式传感器具备快速、灵敏、稳定、可靠等优点, 能够在生产过程中对各单元质量属性进行在线控制, 从而对整个加工过程进行更加有效的管理(表1)^[5]。

表1 中药生产各单元的质量属性

生产单元	质量属性
前处理	鉴别、等级、Q-marker
提取浓缩	浓度
干燥灭菌	水分、微生物
制剂	浓度、含量、可见异物
包装	条形码、标签

3.1 传感器在中药前处理中的应用

中药的前处理是中药制造加工过程的第一步, 包括挑选药材、洗药、润药、切药、干燥、粉碎等工序, 其与药品的质量和疗效密切相关。为实现DNA分子水平上对中药材浙贝母和川贝母的鉴定, 雷焱^[42]研制了石墨烯与金属纳米颗粒修饰的电化学传感器, 其具有灵敏度高、选择性好、重现性和稳定性高的特点, 在中药材的鉴定及挑选中具有较好的应用前景; 连传运等^[43]研发的质构仪针刺式压力传感器模拟感官系统, 对人参润制“药透水尽”进行客观化表征, 结果显示, 人参药材完全软化状态可达到传统经验判断的程度, 这为其他根茎类药材软化过程智能监控提供参考; Shi等^[44]为了防止中药掺假对药品质量的影响, 设计了一种纳米粗化的碳载金纳米结构阵列传感器, 结果显示, 通过DNA条形码能够快速准确地地区分藏红花和其他6种掺杂物, 这表明纳米结构阵列传感器在中药识别方面有巨大的潜力, 为中药在识别草药及其他杂质环节提供参考; Zhou等^[45]开发了一种结合化学计量学和神经网络的电子鼻, 并建立了数字和模式标准, 实现了样

品的气味质量控制为, 中药材质量鉴定、中药的气味定量表征及产地加工方式区分提供了一种新的技术手段。

3.2 传感器在中药提取浓缩中的应用

中药提取浓缩是制药过程中的重要环节之一, 其内部浓度、温度、流量等工艺参数不仅影响中药的利用率, 而且与药品的质量有着直接关系。而传感器技术的应用, 有利于保证药品生产过程的相对稳定, 提高生产效率, 降低生产成本, 避免数据的滞后而引起产品的质量差异, 使提取浓缩过程得到有效、科学、严格的控制。杨越^[46]利用NIR技术对金银花提取过程的在线监测, 并首次结合2种算法, 创建了一种新的算法, 将其成功应用到中药含量检测中, 实现了生产程控化和检测实时化; 周雨枫等^[47]建立了皂苷定量模型, 以超高效液相色谱法作为参比分析方法测定皂苷含量, 结合NIR分析技术, 建立一种可用于三七提取过程中的在线检测方法, 从而指导生产规模复杂中药体系提取过程的在线质量监控; 徐芳芳等^[48]将NIR在线检测技术与偏最小二乘法相结合, 建立了一种快速定量在线测定模型, 该模型能够实时监控浓缩过程中的变化, 加强对中药浓缩过程的了解和控制; 杨丽等^[49]为解决提取浓缩过程中离线分析结果滞后的缺陷, 研发了声光可调滤光器近红外光谱在淫羊藿浓缩过程的在线检测, 结果显示, 传感器能够实现实时对淫羊藿提取液的在线质量控制, 这不仅提升了中药生产效率和质量, 也为中药智能制造的发展提供新的方法和思路。

3.3 传感器在中药干燥灭菌中的应用

在中药生产过程中, 干燥灭菌能够保证中药产品的安全和卫生。为保证中药产品达到国家良好生产规范要求, 对温度、时间、辐照剂量、压力值、致死率、耐热参数等关键性工艺参数进行实时监测和调控至关重要。张婧等^[50]采用NIR的传感系统, 设计了一种中药水分检测系统, 具有快速、无损、准确的特点, 可以满足测定中药水分含量的要求; 王晴等^[51]基于在线NIR技术, 建立桂枝茯苓胶囊流化床干燥过程水分实时监测模型, 在生产中具有稳健、准确的预测性能; 张珉等^[52]基于微波原理和红外测温技术, 设计了恒温微波灭菌装置, 灭菌效果可靠、操作简单、低能耗, 保证了中药制剂的质量; 汤庆国等^[53]基于多种传感器的环氧乙烷灭菌监测系

统,利用传感器实时采集灭菌过程的温度、湿度和环氧乙烷浓度,能实现灭菌过程的实时监测;吴昊等^[54]根据被测样信号放大的策略,构建了一种高灵敏检测的化学发光适体传感器,该传感器操作简单、灵敏度高、特异性好,在中药材农药残留检测方面具有良好的应用前景。

3.4 传感器在中药制剂的应用

中药剂型主要有颗粒剂、片剂、丸剂、胶囊剂等,目前对于这些传统的成型制剂的质量评价还主要靠人识别,这种评价方法导致了药品不同批次间存在较大差异,不仅严重影响了药品质量,也增加了人力物力,严重制约了中药产业的可持续发展及国际化。Han等^[55]采用电子舌对中药黄连和荷叶进行苦度测试,量化结果显示出了良好的鉴别能力,为中药制药中苦味的定量和味觉掩蔽效应提供了一种选择;于佳琦等^[56]设计了在线浊度传感器,能够对溶液浑浊程度进行量化表征,目的是提升颗粒剂溶化性视觉评价的主观性,并且对已有的颗粒剂的溶化过程浊度进行数据分析,建立了颗粒剂溶化性的分级评价标准,这为中药智能化改进提供了明确的目标;相关研究采用NIR分析技术对天舒片包衣薄膜厚度及包衣终点进行测定,结果表明,近红外传感器可准确预测包衣薄膜厚度及包衣终点,不仅减小了批次间差异性和原料损耗,而且提高中药固体制剂的包衣生产效率和质量均一性,为中药片剂生产过程中包衣厚度及包衣终点的在线检测提供技术支持^[57-58];刘瀛等^[59]采用光纤传感器构建胶囊产量在线检测系统,在生产过程中,在线检测能够显示出合格胶囊数量。

3.5 传感器在中药包装的应用

在中药包装过程中传感器的视觉被广泛应用,能对产品进行实时检测与调控,并对包装过程进行实时筛选控制,以达到质量控制的目的,避免了手工操作控制不准确而且耗时耗力的问题,使产品生产更高效、快捷。李姿景^[60]为了提高包装效率及包装的正确率和安全性,通过机器视觉检测原理结合各种算法,设计了一套基于机器视觉的药品包装自动检测系统,能够实现药品包装生产线的自动检测,并能自动剔除不合格药品,保证生产安全;然而包装过程中漏粒问题也要重视,为此,张中然等^[61]针对实际检测中光照情况不稳定和药品包装表面复杂

的反射情况,设计开发了视觉检测系统与摄像机结合的传感器,结合图像分割算法可准确分辨药片位置,具有广阔的市场应用前景;魏宇楠等^[62]根据NIR设计的检测模型能够对是否带有玻璃纸的同仁牛黄清心丸水分含量具有良好的预测性能,并能够对大蜜丸水分含量进行快速、准确和无损定量分析,为中药制剂中水分关键化学属性的质量控制提供参考。

4 传感器在中药智能制造的发展趋势

中药产品的制造过程是一个复杂、多变的非线性反应过程,数据信息的延迟及不确定性会严重影响中药产品的质量。而传感器作为中药产品生产过程中信息、物理系统交互的枢纽,虽然能够解决生产过程中的复杂性和非线性等问题,但其在智能制造的发展中还亟须解决多方面问题:一是数据传输的稳定性和安全性;二是建模方法、图像处理算法及数据的筛选;三是多维度数据融合技术海量数据处理的问题。

5G技术和人工智能技术的发展为以上问题的解决指明了方向。5G技术的多接入边缘计算及切片技术功能,不仅可以降低传输时延,缓解网络拥塞,而且在保证数据安全的同时降低了运营成本;人工智能技术的神经网络和专家系统功能,具有强大的数据分析和信息提取能力,不但能够对数据进行分析、处理,还能对数据结果进行预测、判断(图3)。未来中药智能生产的发展模式可能是“3+融合”发展,即首先通过传感器采集数据,再依靠5G技术传输数据,最后通过人工智能综合分析。将其应用于中药产品制造过程中,使每个生产设备既是生产的组成部分又是独立个体,生产过程中都拥有实时监测、快速传输、自主决策等功能,这对于生产过程的提质增效、节能减排及中药产品质量控制与品质的提升具有极大的参考价值。尽管传感器技术与人工智能、5G技术的联合应用存在诸多问题和挑战,但在传感器技术的不断演进、人工智能与5G技术日益成熟的趋势下,三者技术的融合必将在中药智能制造的发展中发挥关键作用,为我国优质、保量、低耗、高效能的中药智能制造之路铺下基石。

5 结语

随着相关政策的出台,智能制造的发展已经成为趋势,中药智能化生产已成为必然走向。传感器

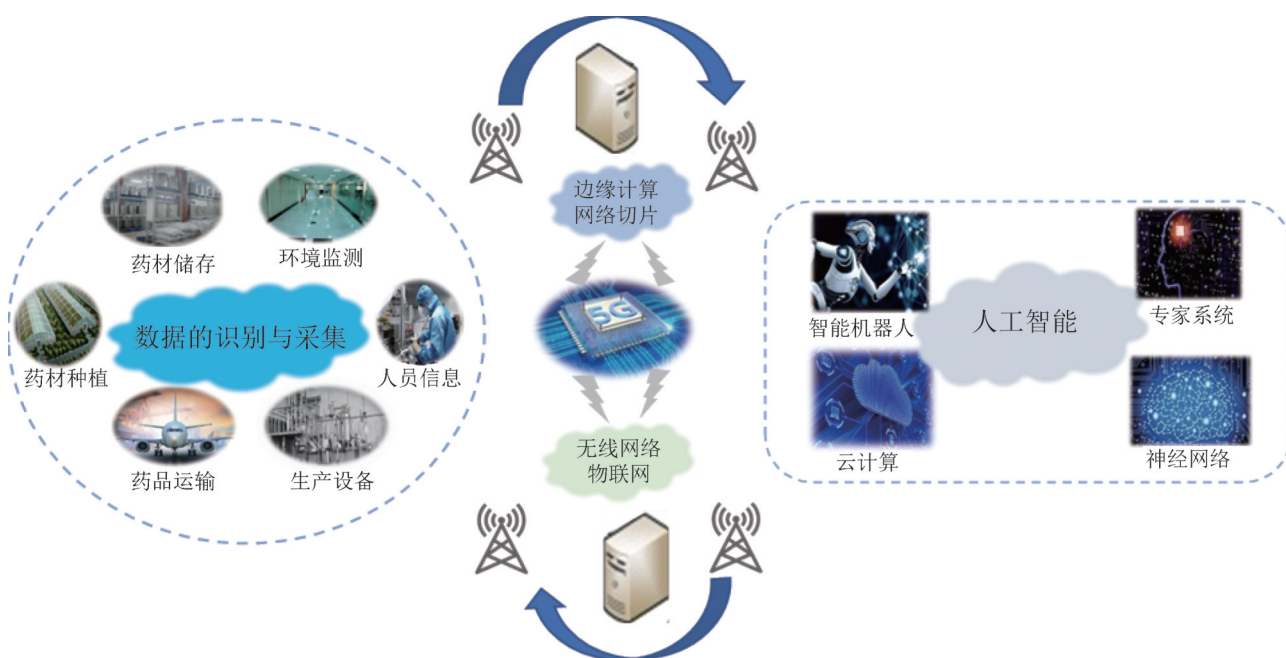


图3 未来传感器应用模式

作为智能制造信息系统和物理系统交互的桥梁，在推动智能制造的发展中具有核心地位。基于此，本文首先明确了传感器的相关概念，并对传感器在中药产品生产过程中根据运行原理和信号的不同进行了归类。从中药产品生产过程出发，阐述了传感器在生产过程的应用效果，并对传感器发展过程可能产生的问题提供了解决方案，期望能够对中药智能制造的发展提供参考。

在一定程度上，中药智能生产的发展状况和水平影响着整个中药产业的发展，是决定我国中药智能制造水平的重要标志。虽然我国中药产品智能生产已发展多年，智能化进程也不断推进，但由于数据感知、传输、分析等核心技术的限制，我国中药智能制造的整个产业链不完整这个问题非常突出，这严重阻碍了中药智能生产的发展。如今，在5G时代和人工智能时代的推动下，新一代的中药智能制造需要先进的制造技术，以及信息采集技术、移动互联网、人工智能多种技术平台融合，完善智能制造的产业链，实现具有绿色环保、高效节能的智能化生产。未来中药生产企业的发展将会以高速性、闭环性、安全性为基础，多技术融合为方向，实现具有智能化、柔性化、结构优化及绿色低碳等特征的高水平中药智能制造。

参考文献

- [1] 周济. 走向新一代智能制造[J]. 中国科技产业, 2018(6):20-23.
- [2] 杨明, 伍振峰, 王芳, 等. 中药制药实现绿色、智能制造的策略与建议[J]. 中国医药工业杂志, 2016, 47(9): 1205-1210.
- [3] 杭丽凤. 中药制药过程控制及集成化生产关键问题研究[J]. 北方药学, 2020, 17(8):184-185.
- [4] 臧振中, 管咏梅, 杨明, 等. 传感器技术在中药智能制造中的应用研究[J]. 中国医药工业杂志, 2017, 48(10): 1534-1538.
- [5] 欧祖勇, 高锡斌. 传感器技术在中药智能制造中的应用[J]. 自动化应用, 2018(11):126-127.
- [6] CHEN X R, WANG K Y, WANG Z H, et al. Highly stretchable composites based on cellulose [J]. Int J Biol Macromol, 2021, 170:71-87.
- [7] FEI C H, REN C C, WANG Y L, et al. Identification of the raw and processed Crataegi Fructus based on the electronic nose coupled with chemometric methods [J]. Sci Rep, 2021, 11(1):1849-1859.
- [8] WASILEWSKI T, KAMYSZ W, GEBICKI J. Bioelectronic tongue: Current status and perspectives [J]. Biosens Bioelectron, 2020, 150:111923-111971.
- [9] 黄孙新. 智能化光纤传感器系统设计与应用研究[J]. 科技创新与应用, 2017(18):64.
- [10] SONG P S, MA Z, MA J, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors [J]. Micromachines, 2020, 11(1):56-94.

- [11] 臧晶,赵常. IEEE1451.2 网络化智能传感器校正引擎的研究[J]. 沈阳理工大学学报,2016,35(2):44-47.
- [12] WANG C M, WEISSU L. Designing sensing devices using porous composite materials [J]. J Compos Sci, 2021, 5(1):35.
- [13] LI J, ORREGO S, PAN J J, et al. Ultrasensitive, flexible, and low-cost nanoporous piezoresistive composites for tactile pressure sensing [J]. Nanoscale, 2019, 11 (6) : 2779-2786.
- [14] MISHRA P, VERKLEIJ T, KLONT R. Improved prediction of minced pork meat chemical properties with near-infrared spectroscopy by a fusion of scatter-correction techniques[J]. Infrared Phys Technol, 2021, 113: 103643-103647.
- [15] VON GERSDORFF G J E, KULIG B, HENSEL O, et al. Method comparison between real-time spectral and laboratory based measurements of moisture content and CIELAB color pattern during dehydration of beef slices[J]. J Food Eng, 2021, 294: 110419-110428.
- [16] MAKINO Y, AMINO G. Digitization of broccoli freshness integrating external color and mass loss[J]. Foods, 2020, 9 (9):1305-1319.
- [17] 吉海彦,任占奇,饶震红. 高光谱成像技术鉴别菠菜叶片农药残留种类[J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1778-1784.
- [18] FAHEY T, PHAM H, GARDI A, et al. Active and passive electro-optical sensors for health assessment in food crops[J]. Sensors (Basel), 2020, 21(1):171-210.
- [19] WU D, ZHANG M, CHEN H Z, et al. Freshness monitoring technology of fish products in intelligent packaging[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2021, 61(8): 1279-1292.
- [20] LIU G Y, HUANG X D, LI L Y, et al. Recent advances and perspectives of molecularly imprinted polymer-based fluorescent sensors in food and environment analysis [J]. Nanomaterials (Basel), 2019, 9(7):1030-1049.
- [21] DU X F, ZHAI J Y, LI X A, et al. Hydrogel-based optical ion sensors: Principles and challenges for point-of-care testing and environmental monitoring [J]. ACS Sens, 2021, 6(6):1990-2001.
- [22] CHOJER H, BRANCO P T B S, MARTINS F G, et al. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements [J]. Sci Total Environ, 2020, 727: 138385-138439.
- [23] 刘东红,许唯栋,闫天一,等. 智能感知技术在食品制造过程中的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21 (3):1-10.
- [24] 丁海泉,高洪智,刘振尧. 近红外光谱分析技术在中药材鉴定和质量控制中的研究进展[J]. 现代农业装备, 2020, 41(3):11-16.
- [25] ZHANG W, QU Z Y, WANG Y P, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for rapid determination of ginsenoside Rg₁ and Re in Chinese patent medicine Naosaitong Pill [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2015, 139:184-188.
- [26] SUN F, CHEN Y, WANG K Y, et al. Identification of genuine and adulterated *Pinellia ternata* by mid-infrared (MIR) and near-infrared (NIR) spectroscopy with partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) [J]. Anal Lett, 2020, 53(6):937-959.
- [27] QIAN L T, DURAIRAJ S, PRINS S, et al. Nanomaterial-based electrochemical sensors and biosensors for the detection of pharmaceutical compounds [J]. Biosens Bioelectron, 2021, 175: 112836-112908.
- [28] 曾慧君,付诗慧,晏涛,等. 核酸适配体生物传感器在食源性致病菌检测中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17):277-284.
- [29] 闫卉欣,孔丹丹,范卓文,等. 特异性DNA 电化学生物传感器快速检测动物药中痕量 Hg²⁺ [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(22):5530-5536.
- [30] 谢宗万. 中药品种传统经验鉴别“辨状论质”论[J]. 时珍国药研究, 1994(3):19-21.
- [31] 师飘,郑祥明. 计算机视觉在中药饮片领域中的应用与展望[J]. 德州学院学报, 2020, 36(6):34-38.
- [32] 徐曼菲,吴志生,刘晓娜,等. 从辨色论质谈中药质量评价方法[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(2):177-181.
- [33] 缪培琪,王璧璇,司梦兰,等. 机器视觉检测技术及其在中药智能制药中的应用展望[J]. 天津中医药大学学报, 2020, 39(4):365-373.
- [34] 高嘉轩. 基于机器视觉的类圆形水果缺陷检测关键技术的研发与实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2020.
- [35] 杨添钧. 基于机器视觉技术的药材及饮片“辨色”研究[D]. 成都:成都中医药大学, 2014.
- [36] 李莹,任亚梅,张爽,等. 基于电子鼻的苹果低温贮藏时间及品质预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5):183-191.
- [37] 张超,杨诗龙,胥敏,等. 基于气味指纹分析的半夏及其伪品鉴别研究[J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2015, 17(11):2300-2305.
- [38] 庄家俊,骆德汉,邹宇华. 百草油鉴别分类的电子鼻实现方法研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(7):62-65.
- [39] CETÓ X, PÉREZ S. Voltammetric electronic tongue for vinegar fingerprinting[J]. Talanta, 2020, 219:121253.
- [40] RODRIGUES N, MARX Í M G, CASAL S, et al.

- Application of an electronic tongue as a single-run tool for olive oils physicochemical and sensory simultaneous assessment[J]. *Talanta*, 2019, 197:363-373.
- [41] 陈栋杰, 郭盛, 卢有媛, 等. 基于电子舌技术的不同产地枸杞子鉴别研究[J]. *南京中医药大学学报*, 2020, 36(5):615-622.
- [42] 雷焱. 基于石墨烯电化学生物传感器的构建及其在中药分析中的应用[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2016.
- [43] 连传运, 徐冰, 赵亚楠, 等. 基于针刺压力传感器的人参润制“药透水尽”科学内涵研究[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(2):267-273.
- [44] SHI R X, HU Z G, LU H, et al. Hierarchical nanostructuring array enhances mid-hybridization for accurate herbal identification via ITS2 DNA barcode[J]. *Anal Chem*, 2020, 92(2):2136-2144.
- [45] ZHOU H Y, LUO D H, GHOLAMHOSSEINI H, et al. Identification of Chinese herbal medicines with electronic nose technology: Applications and challenges[J]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(5):1073-1094.
- [46] 杨越. 基于近红外光谱技术的中药生产过程质量控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [47] 周雨枫, 周立红, 张凤莲, 等. 近红外光谱技术在三七提取过程中的在线控制[J]. *中药材*, 2019, 42(10):2367-2370.
- [48] 徐芳芳, 冯双双, 李雪珂, 等. 青蒿浓缩过程在线近红外快速检测模型的建立[J]. *中草药*, 2016, 47(10):1690-1695.
- [49] 杨丽, 李菁, 刘翠红, 等. AOTF近红外光谱技术在淫羊藿浓缩过程在线检测中的应用[J]. *中国医药导报*, 2014, 11(24):111-114.
- [50] 张婧, 付孟广, 王翌霏, 等. 中药水分检测系统的传感系统和采样装置设计[J]. *电子测试*, 2020(1):23-25.
- [51] 王晴, 徐芳芳, 张欣, 等. 在线近红外光谱监测桂枝茯苓胶囊流化床干燥过程水分的方法研究[J]. *中草药*, 2019, 50(22):5429-5438.
- [52] 张珉, 张俊钰, 王芳, 等. 恒温微波灭菌器设计及在中药制剂生产中的应用[J]. *医疗卫生装备*, 2014, 35(9):5-8.
- [53] 汤庆国, 刘国永, 刘迪. 基于多种传感器的环氧乙烷灭菌监测系统的设计[J]. *廊坊师范学院学报(自然科学版)*, 2020, 20(2):30-33.
- [54] 吴昊, 吴军, 王洪勇, 等. 基于酶辅助靶标循环的适体传感器灵敏检测中药中黄曲霉毒素B1[J]. *分析测试学报*, 2021, 40(1):92-98.
- [55] HAN X, JIANG H, HAN L, et al. A novel quantified bitterness evaluation model for traditional Chinese herbs based on an animal ethology principle[J]. *Acta Pharm Sin B*, 2018, 8(2):209-217.
- [56] 于佳琦, 徐冰, 李婉婷, 等. 两种在线传感器评价中药配方颗粒溶化性研究[J]. *中华中医药杂志*, 2020, 35(5):2395-2400.
- [57] 夏春燕, 徐芳芳, 张欣, 等. 近红外光谱快速预测天舒片包衣终点研究[J]. *中草药*, 2019, 50(21):5223-5230.
- [58] 夏春燕, 徐芳芳, 张欣, 等. 近红外光谱分析技术快速测定天舒片的包衣薄膜厚度[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2020, 26(1):118-124.
- [59] 刘瀛, 宁海, 王贵和. 基于STC89 C52的胶囊非接触在线检测系统[J]. *辽东学院学报(自然科学版)*, 2016, 23(1):27-31.
- [60] 李姿景. 基于机器视觉的药品包装生产线自动检测系统[J]. *包装工程*, 2018, 39(17):165-169.
- [61] 张中然, 焦波, 孙志勇, 等. 一般光照条件下铝塑泡罩药品包装检测系统[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2017, 22(5):65-69.
- [62] 魏宇楠, 黄兴国, 曾敬其, 等. 中药大品种制造关键质量属性表征: 水分含量化学属性的同仁牛黄清心丸 NIR 现场检测方法研究[J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(7):1592-1597.

(收稿日期: 2021-12-14 编辑: 王笑辉)