

FPGA 技术在中药智能制药中的应用探讨

李小莉^{1,2,3}, 薛启隆^{1,2,3}, 苗坤宏^{1,2,3}, 赵倩^{1,2,3}, 于洋^{1,2,3*}, 李正^{1,2,3*}

1. 天津中医药大学中药制药工程学院, 天津 301617

2. 省部共建组分中药国家重点实验室, 天津 301617

3. 现代中医药海河实验室, 天津 301617

摘要: 传统中药制造业正不断向数字化、信息化、智能化升级, 这对智能化硬件提出了更高的要求。现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 具有多通道同步信号采集、快速数据处理、高性能、低功耗等优势, 在社会生产的诸多领域已被广泛应用。对 FPGA 组成和工业应用优势进行介绍, 结合中药制药工业应用场景的原理和领域知识, 对 FPGA 技术在中药智能制药中的应用进行探讨研究, 主要涉及制药过程信号采集、图像处理、深度学习 3 个方面, 以期为中药制药行业过程控制、工艺优化等提供技术参考。

关键词: 现场可编程门阵列; 中药智能制药; 信号采集; 图像处理; 深度学习

中图分类号: R28 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2023)01-0283-09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.01.030

Discussion on application of FPGA-based technologies in smart manufacturing for traditional Chinese medicine

LI Xiao-li^{1,2,3}, XUE Qi-long^{1,2,3}, MIAO Kun-hong^{1,2,3}, ZHAO Qian^{1,2,3}, YU Yang^{1,2,3}, LI Zheng^{1,2,3}

1. College of Pharmaceutical Engineering of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

2. State Key Laboratory of Component Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

3. Haihe Laboratory of Modern Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

Abstract: Traditional Chinese medicine (TCM) manufacturing industry is constantly upgrading to digitization, informatization and intellectualization, which put forward higher requirements for intelligent hardware. Field programmable gate array (FPGA) has the advantages of multi-channel synchronous signal acquisition, fast data processing, high performance and low power consumption, and it has been widely used in many fields of social production. Composition and application advantages of FPGA were introduced in this paper. The application of FPGA technology in smart manufacturing for TCM including process signal acquisition, image processing and deep learning was discussed, combining the principle and domain knowledge of application scenario of TCM pharmaceutical industry, in order to provide technical support to TCM manufacturing industry and development of modern industry.

Key words: field-programmable gate array; smart manufacturing for traditional Chinese medicine; signal acquisition; image processing; deep learning

随着经济的发展和科学技术的进步, 为了满足人民群众对于生活品质的需求, 如何进一步提升中药产品质量已经成为中药制药行业亟需解决的关键工业问题。中药物质组成和制药过程具有复杂性, 导致其质量控制较为困难^[1]。一方面, 由于中药制

药的原料来源于田间的农业种植, 受到土壤、气候等多种因素的影响, 批次间相关组分浓度存在一定的波动, 这就从源头上对中药制药过程质量控制输入了不确定因素; 另一方面, 中药制药过程涵盖多种工艺, 涉及物质组分以及能量传递等多种复杂物

收稿日期: 2022-09-08

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2018KJ006)

作者简介: 李小莉, 硕士研究生, 研究方向为中药制药工程。E-mail: 1527328624@qq.com

*通信作者: 于洋, 助理研究员, 研究方向为中药制药工程技术与产业转化。E-mail: yuyang@tjutcm.edu.cn

李正, 研究员, 研究方向为中药制药工程技术与产业转化。E-mail: lizheng@tjutcm.edu.cn

理过程,工业现场对于相关过程的传递机制模型以及生产运行关键工艺参数认知较为模糊。这2个主要原因直接影响中药最终产品的质量均一性控制。

基于质量源于设计(quality by design, QbD)的质量风险管理理念,有必要从生产投料开始对中药产品质量在各个单元工艺中的变化过程进行客观和科学的检测。结合现代过程检测技术,开发适用于中药制药的过程检测技术与装备,已经成为一个重点的技术研究方向^[2]。通过相关技术的研究,可以面向中药制药动态生产过程,实现以产品质量一致性为核心的中药制药生产过程质量控制和工艺优化^[3]。目前,结合先进人工智能的软硬件技术,包括机器视觉、机器嗅觉、信息融合、知识图谱等逐渐被国内学者提出并实践,如在药材前处理过程中利用机器视觉及机器嗅觉对药材的真伪鉴定、优劣鉴别^[4-7],提取浓缩过程中利用信息融合技术形成产品的预测控制模型^[8]、干燥过程中基于多元统计的信息融合对于干燥产品物质含量和水分含量的快速检测^[9]、制剂过程中通过机器视觉对于丸质量的控制以及异物的检测等^[10-11],这些新技术从复杂的数据出发,基于成熟的工业传递机制模型,深入挖掘原料信息和过程信息之间的有机联系,从而进一步提升了对于中药制药传递过程的认知,实现了投料-生产过程-产品质量之间的数字空间映射关系,为制药过程质量检测与控制问题提供了新思路。

作为过程分析技术(process analytical technologies, PAT)的硬件基础,现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)已经在数据多通道采集和并行处理技术领域发挥着不可替代的技术优势^[12-18]。结合FPGA自身技术优势开发适用于中药制药的PAT技术,将能深入认知中药制药过程的原理与规律,实现中药制药的绿色智能制造和柔性制造,为提升中药制药整体的技术水平提供必要的技术支撑。

1 FPGA技术的概念和主要技术优势

1.1 FPGA的概念和组成

FPGA是在可编程阵列逻辑(programmable array logic, PAL)、通用阵列逻辑(generic array logic, GAL)、可擦除可编程逻辑器件(erasable programmable logic device, EPLD)和复杂可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)等相关可编程器件的技术基础上进一步完善和发展所得到的通用型工业逻辑电路开发平台。它规避了

定制电路由于应用场景局限性所带来的开发成本较大的难题,为满足不特定的工业需求所提供的半定制的开发电模块。结合原有的PAL较大自由度开发的技术优势和CPLD高速逻辑计算的能力,又基于EPLD实现了多次擦写的功能,FPGA已经成为了目前工业中应用最为广泛可编程逻辑器件的模块。

FPGA内部逻辑电路的主要组成结构如图1所示。在图1中,1个完整的FPGA模块主要由若干逻辑单元阵列(logic cell array, LCA)组成。每个LCA都是由可配置逻辑模块(configurable logic block, CLB)、输入输出模块(input output block, IOB)和内部连线组成^[19-21]。CLB是FPGA逻辑计算的核心,通过CLB间的排列组合从而实现FPGA不同的输入/输出的运行逻辑。IOB是FPGA与外界交互的模块,外界的声、光、电和磁通过相关的信号转化装置转变为相应的电信号后通过IOB输入至FPGA,而后FPGA根据运行后的结果通过IOB发出电信号指令驱动相关的动作系统对输入信号进行相应的动作反馈^[21-22]。内部连线连接了内部的CLB实现其相对应的逻辑组合^[23]。

1.2 FPGA在工业场景的一般使用流程

在一般工业场景中,为了解决复杂的工业应用问题,工艺工程师往往需要根据具体问题具体分析,定制化地开发特定的FPGA逻辑运行程序。因此,FPGA的基本使用流程:(1)工艺工程师根据现场的应用场景,在上位机编写相应的程序,实现输入到输出的逻辑运算;然后通过烧录(即把原程序经编译处理后加载到计算机中,让其执行相应的程序)软件,将已经编写好的运行程序输入FPGA中,烧

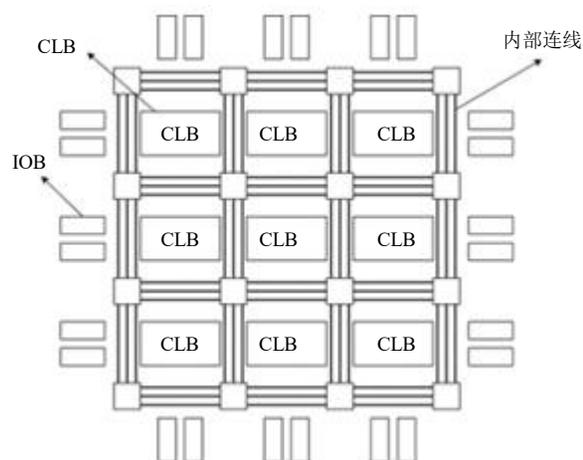


图1 FPGA芯片的基本结构

Fig. 1 Basic structure of FPGA chips

录软件根据软件需求,智能计算并调度 CLB 的排列组合方式,根据 FPGA 的生产厂家不同,CLB 的调度方式有所差异;FPGA 会根据软件需求将 IOB, CLB 和静态随机存取存储器 (static random-access memory, SRAM) 间的数据读取和存储地址进行匹配并固化。(2) 当 FPGA 的软件运行程序烧录固化后,工艺工程师根据现场的需求和程序中所使用的 IOB, 将传感器的信号输出线接入 FPGA 相对应的引脚上,实现输入和输出数据与计算程序的一一对应,保证了采集和输出数据的精度。(3) 根据现场 FPGA 输出结果进行分析判断,保证其输出信息是工艺设计预期的目标,否则对 FPGA 的运行程序进行排错,重新编译运行。

FPGA 芯片反复的擦写正是其技术优势的一个重要方面^[24]。正是其可以根据现场需求实现芯片逻辑的快速部署,从而实现了目标信息采集到控制的低成本定制化开发,降低了开发难度和开发周期,也使其可以满足中药制药工业多品种、高复杂度的应用场景。

1.3 FPGA 的工业应用优势

FPGA 技术是为了解决复杂的工业应用问题,降低定制化大规模电路芯片成本而进行开发的^[25]。随着半导体技术的发展,FPGA 工业应用技术优势愈发增强。对比现有的工业信号采集处理系统,其具有以下明显的技术优势。

1.3.1 采集信号频率、精度高 信号采集就是对传感器输出的模拟信号进行采集,然后通过模数转换器对输入模拟信号采样、量化成为数字信号输入到计算机进行计算和处理从而实现控制。信号的采集频率直接决定了信号采集的精度。FPGA 安装有高主频的晶振时钟,其可以通过时钟分频技术实现各

个信号采集引脚对于时钟信号的独立处理,每一个引脚都可以使用相对独立的高频时钟实现信号的高精度采集,避免了信号间的干扰^[26];且 FPGA 系统中搭载了各种时钟分频和倍频设计,从而保证了各个引脚按照信号采集的需求独立使用完全不同的时钟信号,实现了采集信号的连续性,避免了关键信息的丢失^[27]。FPGA 高频率、高精度的信号采集优势使其具备在较低的工艺成本条件下满足智能控制所需要的实时性的严苛要求。

1.3.2 多通道同步信号采集,独立数模转化 目前工业上一般采用可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 实现信号的采集和处理。但随着采集信号的种类增多,现有技术中采用 PLC 进行信号采集和处理方式已暴露出其缺点,其串行的扫描方式导致了所采集的数据不具备时间同步性,无法根据时间来对数据进行分析,在大型的工艺生产操作中,为相关的数据分析、处理带来了困难。

FPGA 采用的是并行化和流水线算法结构设计^[28-29],因此电路在执行不同任务时可同时发生,并且彼此之间相互独立,互不干扰,打破了传统的串行执行模式,实时流水线运算使任务分段,段与段之间又可同时执行,可以说在熟知 FPGA 的设计原理及准则前提下,基于 FPGA 的电路优势和实际需求,设计出一种高效、并行、流水的逻辑结构(图 2),能够大大提升数据的处理速度和效率,满足工业生产中诸多应用场景中对于实时性的要求。

1.3.3 高性能、成本低、功耗低,适宜大规模使用 无论是性能还是在成本控制方面,FPGA 的优势也相当明显^[30-31]。可重构的特性使其可根据不同需求改变内部逻辑,缩短设计周期,从而减少大量的开发成本。在功耗方面,FPGA 拥有更低的能耗,

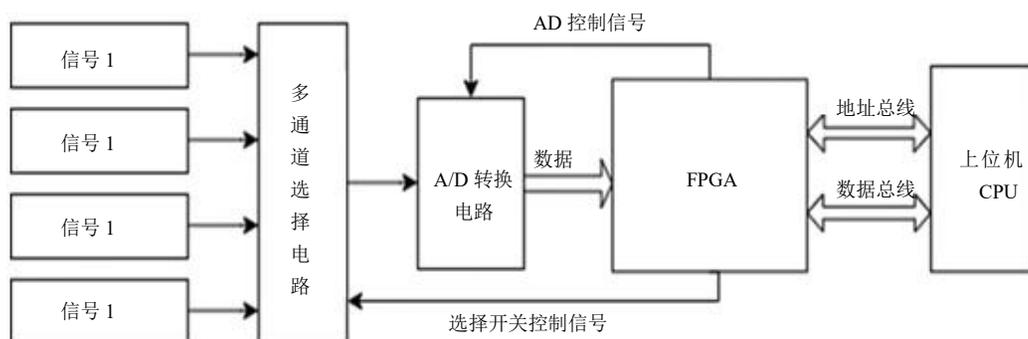


图 2 基于 FPGA 的多通道同步信号采集硬件结构图

Fig. 2 Hardware architecture of FPGA-based multi-channel synchronous signal acquisition

适宜大规模开发和利用。因此, FPGA 技术所具备的高精度、高实时性的数据处理能力是非常贴合中药制药间歇式、多批次的制药工艺特点。通过 FPGA 在中药制药工艺中应用的研究, 将有助于提升中药制药整体智能化水平, 实现精准的生产工艺控制。

针对中药制造过程技术痛点问题, 中药智能制造借助传感器技术、图片处理技术、深度学习等信息技术可实现信息化与工业化的深度结合, 极大促进中药智能制造的高质量发展模式^[32]。近些年, 生产领域应用的需求多样化, FPGA 技术在信号采集、图像处理、深度学习等多个方面扮演着越来越重要的角色, 成为电子系统中不可或缺的一部分。

2 FPGA 在中药智能制造过程信号采集中的应用

为了严格把控产品质量批次间一致性, 中药制药生产过程对于工艺参数的实时性采集存在较高的要求, 需要 FPGA 有多通道、高精度和高采集频率的信号采集和处理能力。朱紫萌等^[33]设计了一种基于 FPGA 的多源信号采集系统, 该系统可以满足十路异源信号的并行采集, 满足弹载设备高速、高精度信号采集的需求。杨栋等^[34]设计了以 FPGA 为核心的多路数据采集系统, 可实现对多路热电偶信号、光电信号及 1 路冷端补偿信号的实时采集, 且测量误差满足目标。霍道强^[35]设计了以 FPGA 为核心的高性能多通道高速数据同步采集设备, 实现了多通道数据同步采集功能, 通道间同步误差小于 1.8° 。下面以中药制药的色谱工艺和浓缩工艺为例, 讨论并分析 FPGA 在工业领域的具体应用过程。

2.1 FPGA 在中药浓缩过程工艺参数采集中的应用

中药浓缩工艺是中药制药过程中常见的生产工艺流程, 通过外界加热使中药提取液的溶剂受热蒸发, 从而得到较高浓度的浓缩液作为下游生产工艺的投料。因此, 浓缩液的质量势必影响下游产品的一致性, 成为中药自动化生产流程中重要的一环。浓缩过程中为达到防止料液过度受热以及提升生产过程能源利用率等研究目的, 精确的进料速率是目前控制环节中的主要控制变量。在中药浓缩工艺中, 列管换热器是比较常用的换热蒸发设备。其管程中流动着中药料液, 壳程内流动着加热用的工作流体, 如饱和蒸汽等。在实际生产过程中, 壳程内的蒸汽发生冷凝, 其液化产生的相变能量通过管壁传递给管程中流动的中药料液; 在高真空度条件下, 中药料液的沸点降低, 吸收到壳程内传递的热量发生沸腾作用, 溶剂从液相汽化为气相; 当气液混合物流

入气液分离室后, 在重力作用下气液分离, 蒸汽从分离室的顶端排出, 液相继续进入换热器进行沸腾蒸发。

在 FPGA 中部署当前浓缩生产物料的物性计算数据库, 主要包括溶质浓度-密度-温度方程、溶质浓度-黏度-温度方程、溶质浓度-表面张力-温度方程、溶质浓度-导热率-温度方程等。FPGA 系统根据同一时刻下检测得到的溶液密度、系统真空度和温度数据, 计算得到此刻的料液溶质浓度, 并以此计算得到其他物性数据。在获知全部所需物性数据的基础上, FPGA 再根据化工典型的传质/传热方程, 计算得到本预测周期内溶剂蒸发速率。计算系统结合当前时刻的液位高度换算得到本预测周期内的补料量进而进行补料, 从而实现整个浓缩过程的预测控制。在整个浓缩过程中, 由于溶剂浓度随时间变化较为明显, 浓缩工艺参数在不同时刻检测数据差异较大等因素, 料液密度、真空度、温度以及料液动态液位高度必须要在同一时刻内进行采集用于计算, 避免采样时间差对于计算精度的影响, 并且由于涉及各种复杂物理方程的计算, 因此浓缩现场还需满足对于计算速度和计算精度的较高要求。

综上所述, 浓缩过程相关工艺参数必须要结合 FPGA 的实时同步高速采样特性, 对参数进行实时跟踪调整, 减小药液浓缩过程参数控制回路的滞后性^[36]。且相关数据直接在 FPGA 内利用其高速计算的特性, 在本地或设备侧进行运算, 直接根据事前输入的方程换算成进料质量流率的逻辑控制关系, 构建检测参数与控制参数间的控制逻辑关系。通过参数的同步实时检测与控制, 从而实现对给料的精确定量实时控制。并且在浓缩过程的自动化控制中, 为了取得理想的控制效果, 改变算法也是常用的一种方式^[37], FPGA 强大的并行高效处理能力以及可重构性使算法更易实现, 大大减少开发成本与周期, 降低能耗。

2.2 FPGA 在中药色谱过程工艺参数采集中的应用

中药色谱利用吸附剂对不同物质的选择性分配而实现多组分混合物的分离方法。工业色谱过程中, 完成上样后, 通过输送管道完成不同浓度洗脱剂的配比输送到色谱柱中进而实现目的组分的洗脱分离。随着目标组分在洗脱剂和吸附剂间的不断进行固液平衡, 直至关键组分随着洗脱液与其他无效组分分离, 流出色谱柱完成其纯化处理。

在色谱过程中, 关键组分的出峰时间是相对短

暂的, 如何通过准确预测洗脱工艺得到较好的组分出峰峰形, 防止拖尾带出其他无关组分提高目的组分纯度是色谱工序的核心工作。色谱系统中的色谱柱前、后的液体压力关系着溶剂在柱中的体积流量, 洗脱液质量、流量关系着洗脱液比例组成, 色谱柱的温度关系着填料的吸附能力, 这些参数对色谱系统的纯化能力有着较为重要的影响。在 FPGA 中构建溶质在填料和溶液之间的组分传递平衡方程并对其精确计算, 利用溶质浓度作为输入值得到溶质在填料和溶液中的分配比, 从而预测性得到溶液浓度组分变化, 再根据实时检测的参数获得当前的色谱柱内部状态, 为下一时刻的洗脱工艺参数进行预测性调节, 最终实现色谱过程中目的组分的高纯度洗脱^[38-39]。与浓缩工艺过程控制要求一样, 色谱过程的工艺参数在线检测也需满足实时性的要求, 各个参数必须基于 FPGA 的同步采样优势进行实时同步采集、传输和计算, 以此实时获取色谱柱全方位、立体、长时间的信号信息来实现对色谱工艺的精确控制, 提升色谱组分的纯度, 并为相关过程分析提供数据支撑。因此, FPGA 的多通道并行采集技术可以在色谱系统中进行广泛的应用。

总而言之, 由于中药制药工艺是半连续半间歇的生产工艺流程, 其关键工艺阶段对于工艺参数的实时性采集存在较高的需求。基于 FPGA 在信号获取上多通道同步采集的优势, 可从根源上解决串行参数测量对于工艺控制造成时间上的错位的问题, 精确获取质量控制的关键参数信号数据。因此, FPGA 技术必然要在中药制药领域发挥更大的数据采集作用, 帮助中药制药解决工艺参数在时间上的逻辑关联性, 提升产品质量控制水平。

3 FPGA 在中药智能制药过程图像处理中的应用

以 FPGA 为核心的图像处理系统已经逐渐进入工业应用, 并展现出其强大的优越性^[40]。何昌鸿^[41]利用 FPGA 强大的并行数据处理能力, 研究了一种基于 FPGA 的 GigE 高速图像采集及处理系统, 这种图像处理系统能够进行实时图像处理, 完成图像特征的高速提取。基于 FPGA 高速的硬件计算和并行运算的优势, 罗林^[42]完成了一种快速图像处理算法的设计, 实现了图像处理技术和快速执行的目标。姚丹^[43]提出了一种以 FPGA 技术为核心的表面缺陷在线检测系统, 通过采集及分析待检产品表面图像数据来判断是否存在裂痕等瑕疵, 实现了在线实时缺陷检测, 能够有效判断产品是否合格。

中药材由于品种、产地繁多, 且存在掺假、假冒等现象使得鉴别困难, 采用传统的鉴别方法虽然成本较低, 但易受主观因素影响, 缺乏客观量化的统一标准。对于中药的质量控制, 通常以成品质量的检验为核心, 然而对于其制药过程中的内在规律却存在不清晰、不明确等情况, 因此造成生产过程监管困难、质控成本高等问题。针对这些问题可以通过中药制造方法结合图像处理技术得到部分解决, 实现从原料到成品的生产过程监测, 从大量图像数据中挖掘其蕴藏的丰富质量信息^[44]。然而这种图像处理通常有着较高的实时性技术要求, 并涉及大量的重复运算, 因此需要很高的数据采集速度和传输带宽, 不仅如此, 对于图像数据的处理能力也有很高的要求。利用 FPGA 技术可以很好地解决上述问题, 基于 FPGA 内嵌的并行同步求解矩阵计算能力, 实现在采集设备边缘直接进行图像处理, 避免大量数据传送对于设备间带宽的占用, 降低了设备数据处理压力, 为中药制药创新技术提供最基本的硬件支撑。

3.1 FPGA 与可见光技术结合在中药表面缺陷检测中的应用

中药表面往往存在霉斑、虫蛀和破损等影响质量的区域。这些区域在可见光光源的照射下可以进行识别。马博^[45]用 LED 作为光源, 设计了一种基于机器视觉技术的红枣缺陷检测和分选系统, 实现了红枣裂纹和表面损伤缺陷的检测。弋伟国^[46]用 LED 作为光源, 设计了一种基于机器视觉的枸杞分级分选机控制系统, 能够准确检测有损伤的枸杞。

在缺陷检测图像处理中, 利用视觉手段获取的目标信息越来越多, 大大提升了视觉检测的准确性, 然而传感器性能的提高却并未对基于视觉的高精度检测和测量带来巨大的推动, 其原因在于, 由于图像精度过高、算法执行太过耗时、数据量太过庞大等问题使后续的加速处理技术无法与之相适应, 使得在实际应用中, 高分辨的视觉检测系统仍然停留在低速处理的尴尬境地, 虽然有一些专用的处理器芯片用来改变这个现状, 然而又存在成本较高、功耗严重等问题^[47-48]。采用 FPGA 并行执行的优点, 结合流水线思想能够极大提高运算效率, 缩短图像处理周期。

利用 FPGA 高速图像采集和处理能力可以快速将图像进行增强、切分, 识别图像内不正确的区域, 从而对中药表面进行快速检测分析。但是由于表面

检测只能识别药材面向检测器的一面,因此就需要把药材翻面后重新进行检测,以实现药材的全检。虽然药材需要经过 2 次检测才能最终对其质量进行判定,但是由于 FPGA 的计算速度快,所以药材整体处理量较大,可以满足生产的需要。同时, FPGA 随时可以更改程序且功耗较低,既可以灵活应对制药过程中不同场景的图像处理,又满足了工厂对节能减排的需求。

3.2 FPGA 与 X 光技术结合在中药内部缺陷检测中的应用

中药材内部往往存在空洞,这些空洞可能是由于内部腐烂或虫蛀等原因造成,但是从外观难以进行分辨。X 光能够穿透物体产生透视图像,通常被应用在医疗、工业检测、公共安全等领域^[49],并逐渐开始应用到中药质量检测中,利用 X 光在线检测设备对中药进行内部拍摄,在不破坏其外部形状情况下得到其内部投影图像,从而获知其内部质量情况。本课题组开发了一种利用人工智能图像分类技术检测胖大海 *Sterculiae Lychnophorae Semen* 内部结构的 X 射线检测系统,该系统能准确识别胖大海内部缺陷^[50]。

X 射线对于不同物质吸收程度不同,由于药材结构多样,大小、厚度、密度不一,因此 X 射线穿透药材后会呈现黑白不一的灰度图像,通过 FPGA 的图像处理能力,可以快速在图像中识别并定位灰度异常区域,通过二极化和网格化处理技术,实现异常图像的分类与筛选,提高 X 光图像的分选精度和速度,保证处理质量。

基于 X 光的药材在线检测分析技术无须对药材进行翻面即可实现对其内部结构的检测分析。基于 FPGA 的高精度计算处理能力,可以实现对其内部缺陷的高精度分析,实现药材快速无损的内部质量判定。

3.3 FPGA 与高光谱技术结合在中药异物分选检测中的应用

高光谱成像技术是中药异物分选无损检测中一种有效手段,其成像本质是二维成像技术和光谱技术的结合体,能同时提供关于检测对象外部和内部品质的空间信息和光谱信息^[51-52]。高光谱成像系统的光学元件把输入的宽带光分散成不同频率的单色光,并将其投射到 CCD 相机上实现光谱成像,得到高光谱图像是一段连续波段的光学图像组成的立体三维图像,包含着物品形状大小、缺陷、内部品质

等信息,由于物品变化会影响反射光谱,因此实现异物分选检测^[53]。胡翠英等^[54]利用光谱成像技术对红花、西红花和菊花进行检测后,发现它们的特征光谱曲线显著不同。赵静等^[55]利用光谱成像技术快速实现香加皮等 5 种皮类药材的鉴别和分选。吴文辉等^[56]利用光谱成像技术构建药用珍珠粉的指纹图谱,能准确识别不同品系的珍珠产品及其真伪鉴别。

在使用高光谱进行异物分选过程中,待样品在传送带上完成扫描后,利用 FPGA 并行计算能力,对相机采集的图像分别进行快速及时的图像处理和数据处理,从而实时得到待测物体的光谱学信息,并挖掘出样品之间的高光谱差异性进而分析目标是否存在待分选的异物以及空间坐标信息,同时为下游的气动分选系统提供驱动信息,最终实现异物的空间识别与智能捕捉。该方法可基于 FPGA 快速的数据处理能力,结合高光谱成像技术即可批量、快速、无损的对中药进行检测鉴别,加强中药质量监测。

FPGA 为数字图像实时处理提供了新的思路,其较高的数据采集频率可以实现数据高速采集,并行和流水线的算法结构使得图像中每个像素单元都可以实施单独重复操作,实现了图像处理算法快速执行的目标,因此可以完全满足中药制药生产工艺对于图像实时处理的工艺技术要求。

4 FPGA 在中药智能制药过程深度学习中的应用

深度学习算法是以数据处理为核心,计算量庞大,需要与其计算量相适应且高性能、低功耗的硬件支撑。FPGA 以其高度并行计算、低功耗、高性能、可重复编程等特性在众多硬件中脱颖而出。Wang 等^[57]用 FPGA 作为硬件核心,设计了深度学习加速器单元,不仅具有较大的速度提升,而且功耗更低。Ponnusamy 等^[58]利用 FPGA 平台计算密集型操作,提出了基于深度学习神经网络的 X 射线图像分类用于海关机场等场合行李扫描,解决处理延迟问题。朱彬如^[59]将深度学习的心律失常自动分类方法结合 FPGA 硬件加速方案,有效解决了传统分类方法导致的实时性不高等问题。

中药制药过程影响质量的因素众多,“控什么”和“如何控”是中药制药工程面对的科学问题和技术问题^[60]。采用深度学习算法研究中中药制药过程变化规律,洞察引起药品质量波动的因素,并基于实时产生的工业大数据不断地自我学习得到基于控制参数与产品质量参数的预测控制模型,适时优化调整中成药生产制造方式,实现对制药过程的预测和

实时控制是中药制药过程质量控制的新模式。

4.1 基于 FPGA 技术的干燥工艺参数预测

干燥过程作为制药过程中的常见单元操作，具有多变量、非线性、强耦合的特征^[61]。工业通常以合格的物料含水率、较高的能量利用率作为干燥工艺质量输出的核心需求和干燥过程中优化的核心目标。中药真空带式干燥工艺的生产效率受多个工艺参数的影响^[62-63]，如传送带速度、给料质量流量和加热温度等。其中，提升加热温度可以有效的维持产品出口含水率，在此种条件下，为了优化能量消耗，就必须提升传送带速度和给料速率，但是此时随着物料增厚和系统停留时间的降低，出口含水率便会有增加的趋势；与之相对的是，当加热温度降低，就需要提升物料在系统中的停留时间，此时则会降低生产效率，与此同时，生产能耗也会随着生产时间的推移而增加。因此，为了更好分析多因素间的耦合作用关系对干燥工艺的影响，本课题组采用深度学习的技术分析各个工艺间的作用关系，并基于 FPGA 的计算基础实现中药制药干燥工艺参数的优化预测。

首先，在 FPGA 模块中部署真空带式干燥仿真模拟数字孪生系统，以实现基于输入的物性数据和设定的出口含水率，计算输出符合要求的真空带式干燥操作工艺，如进料速度、多段加热温度和传送带速度等。其次，在上位机中部署基于深度强化学习算法开发的真空带式干燥工艺的深度强化学习模型用于干燥工艺参数的自主决策。深度强化学习模型以最大化收益支出比为目标，智能体对多种符合要求的工艺参数组合进行筛选，进而完成生产工艺的调优。最后，将数字孪生系统与强化学习算法结合，数字孪生系统为强化学习模型提供数据支持，读取设备实时工艺参数及产品质量作为初始状态，以初始状态为优化起点快速完成工艺参数的调优并给出工艺决策建议。数字孪生模型每次运算产生的数据将与实际生产进行对比，通过数据积累不断对误差进行修正，数字孪生模型将逐渐完善，与此同时工艺参数将不断被优化改进。

基于 FPGA 的信号处理能力和系统运算能力，可以把生产设备的工艺信息、操作信息和物料信息进行在线采集，并结合自身的智能算法对于所采集的信息进行分析计算，从而得到目标生产设备的最优操作工艺参数，以此来降低来源于中药原料的批次质量差异对于下游产品质量的影响，实现最终产

品质量的相对一致性。

4.2 基于 FPGA 技术的生产线整体优化工艺预测

依照单个工艺参数预测模型的构建模式可以完成对生产线上多种单元工艺进行建模。将多个单元工艺进行组合排列即可构建出生产线的数字孪生模型。中药制药生产线多智能体模型由若干个单元工艺单智能体模型组成。各个单智能体模型相互协作，在保证单元设备在较优状态先运行的同时对生产线的整体目标进行优化。此种方法避免了在组合生产工艺中产生的局部优化问题。在整体工艺调优的基础上可以利用多智能体强化学习进一步挖掘潜在知识，如各生产工艺之间的能源分配、物料转运和人员流转等问题。

依靠 FPGA 自身携带的网络通讯能力，可以实现多个边缘计算系统的数据互通，以产品生产线的整体优化为计算目标，从上及下，从整体到个体进行优化计算，并根据现有的计算结果进行实施部署，实现数据的高度互通。

因此，基于 FPGA 的数据高速处理能力，可以开发适用于中药制药工艺特定的边缘计算系统，以此来解决中药制药生产过程中批次间差异的关键工艺问题，实现从数据源头出发，融合历史生产数据来提升未来产品质量。

5 结语和展望

中药工业是我国医药健康产业的重要组成部分，推动传统中药制造工业数字化、智能化的升级研究尚处于起步阶段。面对新一轮工业革命的机遇与挑战，如何引领我国中药工业迈向智能化时代面临的技术难题考验着业界有关人员的智慧和能力。中药智能制造不是简单的一个口号，而是切实解决在中药制造过程中面对的具体问题。

FPGA 技术自发明以来逐渐在各领域发挥着举足轻重的作用，然而其在中药制药领域的应用尚未见相关报道。针对中药制药过程中的参数混杂问题，创建先进适用的实时检测技术是实现参数可测性的关键手段，参考 FPGA 在其他领域信号采集的创新应用，充分利用其多通道同步信号采集的技术优势，实现相应数据的全面、精确获取或将成为解决这项难题的对症之药。面对制药过程产生的海量数据，快捷、低能耗的数据处理技术成为工厂的迫切需求，将 FPGA 运用到中药智能制造中是现实和形势所需。生产运行过程中，工业大数据连续产生。FPGA 虽然优势明显，归根结底只是一种技术工具，针对

中药智能制造工艺中存在的各类错综复杂的信息变量,如何剔除无关变量,聚焦关键物料属性变量与过程参数变量是今后需要解决的核心问题,从而切实提高中药制药产业整体质量与效益。

总而言之,推动中药制造工业升级转型不是一蹴而就的事情,面对此过程的问题与挑战,仍需相关科学技术人员对该领域进行持续的关注及研究,广泛借鉴新科技加强制药工程技术创新研究,突破制药技术发展瓶颈问题,激发中药产业发展的新活力,逐步完成制药过程升级改造,从而构建中药制药的高质量发展的新模式。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 董晓旭,蔡梦如,张志勤,等.论中药制剂工艺参数与质量参数的关联性协调性[J].中国新药杂志,2022,31(13):1248-1253.
- [2] 杨艳玲,李花花,黄嘉怡,等.基于质量源于设计(QbD)理念的经典名方桃红四物汤的提取工艺研究[J].中草药,2022,53(2):403-412.
- [3] 程翼宇,瞿海斌,张伯礼.中药工业4.0:从数字制药迈向智慧制药[J].中国中药杂志,2016,41(1):1-5.
- [4] 钱丹丹,周金海.基于计算机视觉的中药饮片检测与分级研究[J].时珍国医国药,2019,30(1):203-205.
- [5] 余亦婷,赵乙萌,袁曦,等.Heracles Neo超快速气相电子鼻对不同产地、生长年限及采收期黄芪药材品质评价研究[J].中草药,2022,53(5):1328-1337.
- [6] 李昱,宫静雯,费程浩,等.快速气相电子鼻结合人工神经网络对3种五味子饮片快速识别及气味差异标志物研究[J].中草药,2022,53(5):1303-1312.
- [7] 朱广飞,王静,钱怡洁,等.基于Heracles Neo超快速气相电子鼻对广藿香饮片的快速鉴别及气味指纹图谱研究[J].中草药,2022,53(5):1320-1327.
- [8] 张娜,徐冰,贾帅芸,等.丹参提取过程多源信息融合建模方法研究[J].中草药,2018,49(6):1304-1310.
- [9] 王璧璇,司梦兰,缪培琪,等.基于数据驱动的制药干燥过程智能控制技术的研究进展[J].天津中医药大学学报,2020,39(6):604-611.
- [10] 金斌杰.基于机器视觉的中药滴丸过程控制方法研究与应用[D].杭州:浙江大学,2021.
- [11] 姚冠宇,钟芳松.中药口服液瓶可见异物移动检测系统研究[J].计算机测量与控制,2017,25(10):15-18.
- [12] Ohkawa T, Yamashina K, Kimura H, et al. FPGA components for integrating FPGAs into robot systems[J]. *IEICE Trans Inf Syst*, 2018, 101(2): 363-375.
- [13] Guo Y, Yan W, Huang Y R, et al. Research progress of FPGA technology in biomedical imaging[J]. *Prog Biochem Biophys*, 2020, 47(6): 483-497.
- [14] Sun X, Xue C J, Yu J H, et al. Accelerating data filtering for database using FPGA[J]. *J Syst Archit*, 2021, 114: 101908.
- [15] da Costa A L X, Silva C A D, Torquato M F, et al. Parallel implementation of particle swarm optimization on FPGA[J]. *IEEE Trans Circuits Syst II Express Briefs*, 2019, 66(11): 1875-1879.
- [16] 贺嘉诚,张玉玺,王俊,等.基于FPGA的多通道雷达数据采集系统[A]//第十三届全国DSP应用技术学术会议论文集[C].北京:中国电子学会,2021:38-41.
- [17] 钟瑜,吴明钦.一种高性能并行计算架构的FPGA实现[J].电讯技术,2019,59(7):829-835.
- [18] 白圆.并行硬件简介[J].中国新通信,2016,18(16):44.
- [19] 阳文敏.FPGA动态配置机制研究及应用[D].无锡:江南大学,2014.
- [20] 陈木.浅谈FPGA技术的优势及其应用[J].电子世界,2015(13):199-200.
- [21] 邓涛.FPGA芯片功能剖析及应用优势[J].数字通信世界,2017(4):157-158.
- [22] 杨波.基于FPGA的火箭飞控软件测试平台的设计与实现[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [23] 韦智康,梁嘉琳.FPGA技术应用于核电领域的优势及缺陷分析[J].仪器仪表用户,2013,20(6):90-93.
- [24] 郑志旺.基于国产FPGA的数据采集存储系统的研究与设计[D].太原:中北大学,2021.
- [25] 焦李成,孙其功,杨育婷,等.深度神经网络FPGA设计进展、实现与展望[J].计算机学报,2022,45(3):441-471.
- [26] Rajpal R, Mandaliya H, Patel J, et al. Embedded multi-channel data acquisition system on FPGA for Aditya Tokamak[J]. *Fusion Eng Des*, 2016, 112: 964-968.
- [27] 王旭东,陈涛,郑磊.基于FPGA的多通道数据采集系统设计应用[J].数字技术与应用,2021,39(10):190-192.
- [28] 王莹莹,牟军,周鹏.FPGA技术优势及编程实践经验总结[J].信息记录材料,2020,21(9):83-84.
- [29] 李鑫,闫雪梅,高媛媛,等.FPGA发展现状和行业应用分析[J].信息通信技术与政策,2022(7):65-72.
- [30] 王小强,李斌,余永涛,等.高端芯片技术特点及测评难点分析[J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(3):100-106.
- [31] Chen R Q, Wu T Y, Zheng Y C, et al. MLoF: machine learning accelerators for the low-cost FPGA platforms[J]. *Appl Sci*, 2021, 12(1): 89.
- [32] 王莹,肖莉,陈伟,等.中药智能制造的发展与展望[J].中医药导报,2022,28(3):37-39.
- [33] 朱紫萌,于洵,王刚,等.一种多源多通道信号采集系统设计[J].电子设计工程,2022,30(2):126-132.
- [34] 杨栋,江虹,罗颖,等.基于FPGA的多路传感信号采

- 集系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2022(6): 75-79.
- [35] 霍道强. 基于 FPGA 的多通道数据采集单元设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [36] 滕琦, 刘庆阁. 基于自整定模糊 PID 算法的浓缩工艺温度控制研究 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2021, 44(2): 80-85.
- [37] 陈玉宣, 张居宾, 俞文光, 等. 中药浓缩过程控制思路与方法 [J]. 世界中医药, 2021, 16(23): 3409-3413.
- [38] Nikita S, Tiwari A, Sonawat D, *et al.* Reinforcement learning based optimization of process chromatography for continuous processing of biopharmaceuticals [J]. *Chem Eng Sci*, 2021, 230: 116171.
- [39] Subraveti S G, Li Z K, Prasad V, *et al.* Can a computer “learn” nonlinear chromatography: Physics-based deep neural networks for simulation and optimization of chromatographic processes [J]. *J Chromatogr A*, 2022, 1672: 463037.
- [40] 李航. 基于 FPGA 和千兆以太网 (GigE) 的图像处理系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [41] 何昌鸿. 基于 FPGA 的 GigE 高速图像采集及处理系统的研究与应用 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2019.
- [42] 罗林. 基于 FPGA 的快速图像处理算法的研究与实现 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [43] 姚丹. 基于 FPGA 的表面缺陷在线检测系统应用研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [44] 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造中的应用展望 [J]. 天津中医药大学学报, 2020, 39(4): 365-373.
- [45] 马博. 基于机器视觉的红枣缺陷检测及分选系统的研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
- [46] 弋伟国. 基于机器视觉的枸杞分级分选机控制系统研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [47] 潘银飞. 视觉检测中特征提取的 FPGA 加速技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [48] 郭常青. 基于 FPGA 的实时图像预处理技术研究与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [49] 梁添汾, 张南峰, 张艳喜, 等. 违禁品 X 光图像检测技术应用研究进展综述 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(16): 74-82.
- [50] Xue Q L, Miao P Q, Miao K H, *et al.* X-ray-based machine vision technique for detection of internal defects of *Sterculia* seeds [J]. *J Food Sci*, 2022, 87(8): 3386-3395.
- [51] 陈玲, 程国东, 徐建航, 等. 基于高光谱技术的水果新鲜度检测可行性研究 [J]. 电子测试, 2021(24): 41-43.
- [52] 蔚栓. 高光谱成像多特征信息在草莓品质分析中的应用 [D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [53] 贾敏, 欧中华. 高光谱成像技术在果蔬品质检测中的应用 [J]. 激光生物学报, 2018, 27(2): 119-126.
- [54] 胡翠英, 马骥, 庞其昌, 等. 基于光谱成像技术的红花快速鉴别与质量评价 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2013, 15(2): 57-59.
- [55] 赵静, 马骥, 庞其昌, 等. 香加皮等 5 种皮类中药的光谱成像技术比较鉴别与分析 [J]. 时珍国医国药, 2012, 23(1): 188-190.
- [56] 吴文辉, 郭丽芬, 叶美颜, 等. 光谱成像指纹图谱在药用珍珠鉴定中的应用研究 [J]. 药物分析杂志, 2015, 35(6): 1087-1091.
- [57] Wang C, Gong L, Yu Q, *et al.* DLAU: A scalable deep learning accelerator unit on FPGA [J]. *IEEE Trans Comput Aided Des Integr Circuits Syst*, 2017, 36(3): 513-517.
- [58] Ponnusamy V, Marur D R, Dhanaskodi D, *et al.* Deep learning-based X-ray baggage hazardous object detection-an FPGA implementation [J]. *Revue D'intelligence Artif*, 2021, 35(5): 431-435.
- [59] 朱彬如. FPGA 加速深度学习心律失常分类研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
- [60] 程翼宇, 张伯礼, 方同华, 等. 智慧精益制药工程理论及其中药工业转化研究 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5017-5021.
- [61] Xue Q L, Miao K H, Yu Y, *et al.* A novel method for vacuum belt drying process optimization of licorice [J]. *J Food Eng*, 2022, 328: 111075.
- [62] 王仁杰, 王凯玉, 何昕炜, 等. 乌梅浸膏真空带式干燥工艺的优化 [J]. 中成药, 2021, 43(2): 468-471.
- [63] 左斌, 孙辉, 胡鹏程. 胆宁片浸膏真空带式干燥不同加热温度下粉体学研究 [J]. 上海医药, 2017, 38(15): 79-82.

[责任编辑 崔艳丽]