doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.09.001

数字孪生技术在农业生产管控中的应用现状与展望

王纪章　王　涛　付益辉　袁俊杰　胡永光
(江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 数字孪生技术作为一种多尺度、多物理的技术手段,能够实现物理世界与信息世界的实时同步和高保真度的数据交互与融合,因此这项技术在实现生产过程中的实时监控、预测分析和决策优化方面具有巨大发展潜力,开始初步应用于农业生产过程管控中。为了分析数字孪生技术在农业生产管控中的应用现状和发展趋势,本文概括并分析了数字孪生技术在大田、果园、温室、畜牧以及农业装备等不同生产场景中的应用实例,探讨了其发展现状。然后探讨了农业生产过程中的数字孪生五维模型,并分析了物理实体数据感知、虚拟实体构建和虚实交互与数据驱动等关键技术。最后,根据现有应用和关键技术分析,提出了数字孪生技术应用于农业生产智慧管理的发展趋势为:必须跳出单一场景和阶段的应用框架,实现对农业生产全过程的数字孪生与智慧管控服务。

关键词: 数字孪生; 农业生产; 智慧管控; 综述
中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2024)09-0001-20　　**OSID**:

Application Status and Development Prospects of Digital Twin Technology in Agricultural Production Process Control

WANG Jizhang　WANG Tao　FU Yihui　YUAN Junjie　HU Yongguang
(*School of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Digital twin technology, a sophisticated multi-scale and multi-physical methodology, facilitates the real-time synchronization and high-fidelity data exchange and integration between the physical and informational realms. Owing to its immense potential in real-time monitoring, predictive analytics, and decision optimization, this transformative technology has begun to see preliminary applications in the management of agricultural production processes, offering unprecedented opportunities for enhancing efficiency and productivity. To elucidate the current application landscape and future trajectory of digital twin technology in agricultural management, various application instances across diverse production settings, including arable fields, orchards, greenhouses, livestock farming, and agricultural machinery were enumerated and scrutinized. Following this, five-dimensional model of digital twins in agricultural processes was delved, offering an in-depth analysis of pivotal technologies such as data acquisition, virtual scenario construction, cyber-physical interaction, and data analytics. Ultimately, informed by the evaluation of current applications and critical technologies, the developmental trends of digital twin technology in the intelligent management of agricultural production were posited. Through the comprehensive discourse and analysis, it aimed to furnish valuable insights for the advancement and deployment of digital twin technology in the intelligent control of agricultural production processes, paving the way for a more sustainable and efficient agricultural future. Based on the analysis of current applications and key technologies, the development trend of digital twins applied to intelligent control in agricultural production is: It is essential to move beyond the application framework of a single scenario and stage, and realize digital twin and intelligent control services for the entire agricultural production process.

Key words: digital twin; agricultural production; intelligent management and control; review

收稿日期: 2024-06-28　修回日期: 2024-07-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(32171896)、江苏省重点研发计划项目(BE2002327)和江苏省农业自主创新资金项目(CX(2023)1008)
作者简介: 王纪章(1981—),男,副研究员,博士生导师,主要从事农业信息技术研究,E-mail: whxh@ujs.edu.cn

0 引言

农业生产是维持社会稳定与发展的基础,随着人口增长与资源压力上升,提升农业生产的效率与可持续性显得尤为重要。随着第四次工业革命的快速发展,信息科学技术和多领域科学技术深度融合,促进新的产业技术革命。新一代信息科技与农业的深度融合发展,孕育了第三次农业绿色革命——农业数字革命,使农业进入了网络化、数字化、智能化发展的新时代[1]。

近年来,数字孪生(Digital twin)技术作为一种高级的计算机模拟技术,具有实时监控、预测分析及决策优化的潜力,初步开始应用于农业生产过程中[2]。在现阶段农业生产过程中,通过物联网、大数据分析、人工智能等技术,实现了一定程度的自动化和智能化管理,然而在如何把控作物的精准状态、提前预知作物生长面临的风险、提高资源利用效率等方面仍存在诸多不足。数字孪生技术的出现,为现代农业提供了一个数据整合分析平台,以农业数据为驱动开发出集农业种植、过程管理与分析决策为一体的可视化平台,能够实现对农业动植物生长环境感知、设备控制、生长过程监控以及数据实时、高效分析与反馈,对于农业生产全过程的数字化管理、智能化决策、可视化交互具有重要意义[3]。

数字孪生技术最初应用于工业制造和航空航天领域,目的是通过创建物理系统的数字副本,实现对复杂系统的监控、分析和优化。但相比于工业零件和工厂环境,农业作物具有更复杂的形态特征和生理变化,农业环境也有着复杂的作业场景,因此数字孪生在农业上的应用还面临着很多挑战,如在如何获得精准的农作物数据、多模态的数据整合、提高孪生模型在异构场景下决策的智能性以及提高数字孪生在农业作物各生命周期的适用性等方面仍具有较大的发展潜力。

因此本文通过对农业数字孪生相关文献进行检索分析,总结农业数字孪生的研究进展情况与关键技术,指出数字孪生技术在农业生产过程管控中应用现状与发展展望,为农业生产过程的数字孪生研究提供参考。

1 农业生产过程数字孪生文献分析

基于中国学术期刊网络出版总库平台(CNKI)的文献数据,检索主题设置为“数字孪生 * 农业”,时间跨度设置为 2014—2024 年,筛选后获取了相关中文学术文献 40 篇。中国知网(CNKI)检索结果如表 1 所示,从 2018 年开始出现数字孪生技术在农业中的应用可能性分析的文献,到 2020 年开始出现相关研究性文献。

表 1 中国知网(CNKI)检索结果

Tab. 1 Search results from China National Knowledge Infrastructure

年份	2018	2019	2020	2021	2022	2023
论文数	1	0	2	4	11	22

基于 Web of Science 的文献数据,检索主题设置为“agriculture * digital twin”,时间跨度设置为 2014—2024 年,获取了相关英文学术文献 74 篇。结果如表 2 所示,与中文文献相同,2018 年开始出现第 1 篇文献,近 3 年开始快速上升,文献也从一开始的综述(Review)到研究型(Research article)论文。截至 2024 年 6 月 30 日,本年度相关文献达到 29 篇,说明数字孪生技术正在被该领域的研究人员所重点关注。

表 2 Web of Science 检索结果

Tab. 2 Web of Science search results

年份	2018	2019	2020	2021	2022	2023
论文数	1	5	3	13	19	33

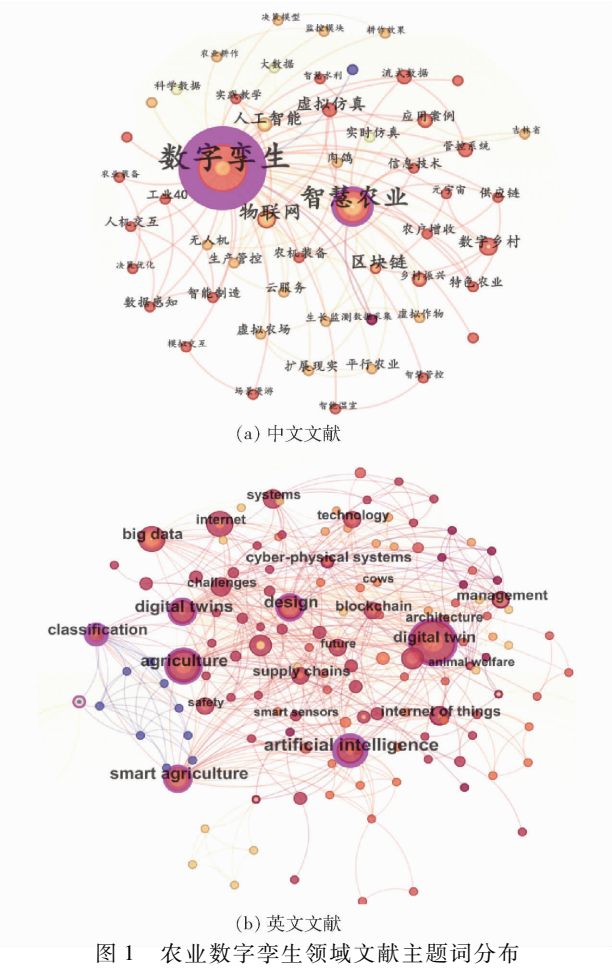
图 1 为所检索的中英文文献的农业数字孪生领域研究高频关键词,主要有数字孪生(digital twins)、智慧农业(smart agriculture)、人工智能(artificial intelligence)、物联网(Internet of Things)、大数据(big data)等,表明该领域目前研究重点在于利用先进的人工智能、物联网、大数据、云计算等技术手段实现农业生产过程的可视化仿真与运行,来提高农业生产效率,实施农业生产过程的智慧管控。

2 数字孪生技术在农业生产过程管控的典型应用场景

表 3 为数字孪生技术在农业生产过程管控的典型应用场景,主要包括大田、果园、温室、养殖业,以及农业装备和农产品产后供应链等方面。

2.1 大田生产

在大田农业生产过程中,数字孪生技术主要通过空-天-地感知数据获取生产过程的数据信息,驱动整个作物生长周期的模拟,预测作物产量,实现生产过程精准管控,如种植管理、病虫害防治、水肥管理,以及农产品营销等服务功能。如梁晨光[4]基于数字孪生农业技术理论搭建了稻田环境监测系统,如图 2 所示,该系统包括了农业实体层、感知控制层和智能应用层等农业应用模块,尤其在田间昆虫自动检测和分类应用方面取得了显著进展。这一系统



(a) 中文文献

(b) 英文文献

图 1　农业数字孪生领域文献主题词分布

Fig. 1　Distribution of subject words in agricultural digital twin field literature

不仅提高了农业生产的智能化水平，还为科学管理农田提供了可靠的数据支持。SKOBELEV 等[5]提出了一个基于本体论和多智能体技术的概念性植物模型，通过形成植物发展的本体和知识库、利用多智能体系统进行阶段性规划和调整来优化作物产量。WECKESSER 等[6]开发了以冬小麦氮肥供应为例的农业数字知识库和集成决策支持系统（Decision-making support system，DSS），通过调查、专家访谈和原型测试来确定作物种植和作物生长的需求，利用网页应用程序“作物门户”集成专家知识来提高咨询服务的效率，并利用实测数据评估了该系统的实用性和用户满意度。蔡正武[7]基于数字孪生设计的大田农业数字化生产营销系统，通过 PC 客户端与小程序可以方便地参观特色农业种植基地，从而助力特色农业主体进行产品的推广，达到种植、仓储、加工全过程的数字化和透明化。

2.2　果园生产

在果园生产中，通过应用数字孪生模型，果农能够了解果树的生长状况，优化修剪、水肥管控和病虫害处理，提高果品品质和产量。为了获得虚拟果园

表 3　农业生产过程数字孪生典型应用场景

Tab. 3　Typical application scenarios of digital twins in agricultural production processes

应用场景	案例	文献序号	发表年份
大田生产	数字孪生的稻田环境监测系统	[4]	2020
	大田作物规划优化模型	[5]	2020
	大田作物氮素管理的数字孪生系统	[6]	2022
	大田农业数字化生产营销系统	[7]	2022
果园生产	果园作物冠层密度分析	[8]	2021
	果园生产管理	[9]	2022
	葡萄园数字孪生平台	[10]	2023
	葡萄园精准灌溉调度	[11]	2024
	荔枝果园数字孪生交互系统	[12]	2023
	葡萄园灰霉病预测	[13]	2024
设施园艺生产	玻璃温室数字孪生模型	[14]	2023
	温室环境栽培装备监控系统	[15]	2023
	温室微气候的最优控制系统	[16]	2020
	温室番茄作物数字孪生模型	[17]	2020
	商业温室生产过程的数字孪生	[18]	2020
养殖业生产	猪圈的能耗分析	[19]	2024
	水产养殖系统数字孪生	[20－21]	2022
	草场放牧的数字孪生系统框架	[22]	2022
	基于数字孪生技术的猪舍环境监测系统	[23]	2023
	猪肥育过程的数字孪生模型	[24]	2019
	猪肉生产过程进行监测与评估	[25]	2023
	猪场监控和生物安全管理	[26]	2022
农业装备作业	基于数字孪生的农业耕作监控系统	[28]	2022
	大功率拖拉机湿式离合器压力控制	[29－30]	2023
	云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统	[31]	2023
	联合收获机轻量级数字孪生系统	[32]	2024
农产品供应链	芒果果实的冷藏运输和储存数字孪生	[33]	2019
	新鲜水果供应链的监控	[34]	2022
	基于工业互联网的大米供应链数字孪生系统	[35]	2023

场景数据，LOWE 等[8]开发并评估了一种新型的农场车载 3D SLAM 技术，通过创建葡萄园的三维射线云数字孪生和冠层密度估计，来提高多年生园艺作物田间规模的空间和时间上的监测精度。王红军等[9]提出了基于数字孪生的果园虚拟交互系统架构，并以广东省惠州镇隆山顶村荔枝园为应用场景，构建基于数字孪生的果园虚拟交互系统，验证了模型的有效性和合理性。EDEMETTI 等[10]提出了 DIWINE 项目，通过结合 5G、无人机、边缘/云计算、机器学习等技术，创建了葡萄园数字孪生平台，以实现葡萄园生产过程的精确管理，减少农场水资源浪费，减少农药消耗，并提高盈利能力，支持可持续农业发展，场景及信息展示如图 3 所示。BELLVERT 等[11]利用数字孪生和物联网技术验证了自动化调

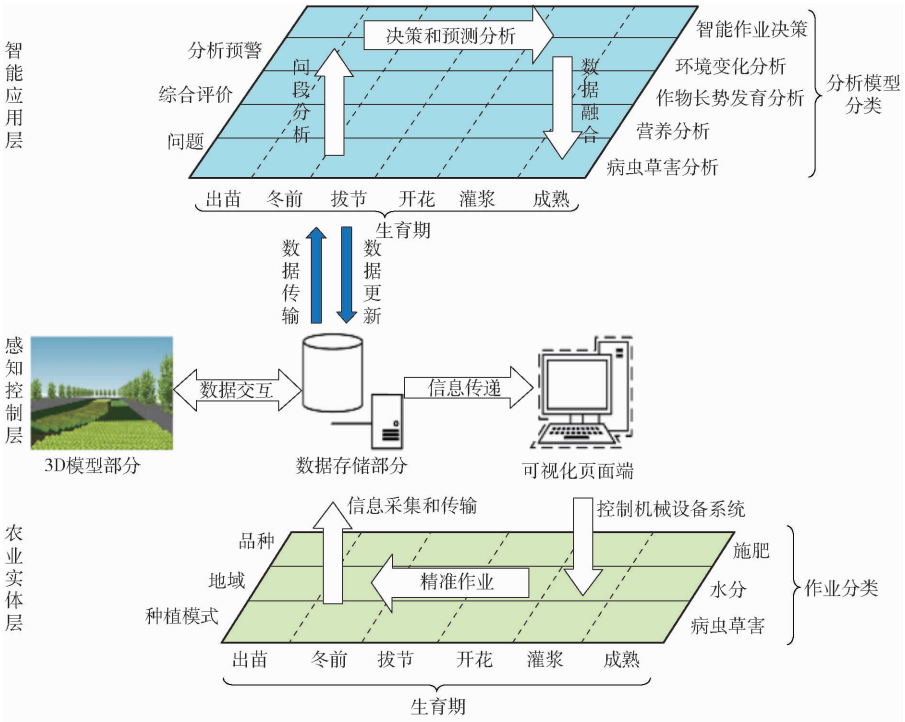


图 2 稻田农业数字孪生业务体系框架

Fig. 2 Digital twin business system framework for rice field agriculture

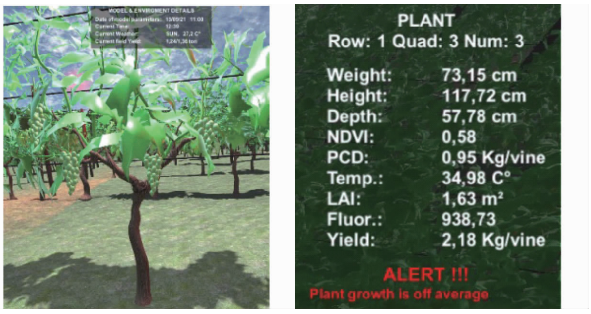


图 3 葡萄园数字孪生平台信息展示

Fig. 3 Vineyard digital twin platform information display

度受控调亏灌溉(Regulated deficit irrigation,RDI)策略在商业葡萄园中的可行性,并通过对比数字孪生模型与遥感数据,证明了精准灌溉调度在实际应用中的精确性和灵活性。郭涛等[12]针对果园生产管理的需求,以果园管理为场景需求,综合运用移动地理信息系统(Geographic information system,GIS)、数据库和 AI(Artificial intelligence)目标检测等技术,实现生产服务、咨询服务、果园管理和数字采集等功能,可以作为智慧农业的信息服务管理基础支撑平台,为数字果园的数据采集、数据展示、数据分析与应用提供有效的手段。ZANCHIN 等[13]通过数字孪生和形态分析有效地预测了葡萄串的灰霉病风险。

2.3 设施园艺生产

在设施园艺生产中,主要是以温室为场景,将温室生产过程中各个环节在虚拟世界内进行数字化映射,并在虚拟系统中模拟、监控、反馈、预测、决策、控制温室实体在现实世界中的状态,进而使温室生产更加智能化。田乾龙[14]通过构建三维可视化的玻璃温室数字孪生模型并将其与物理温室和控制系统相结合,可以实时反映和调控温室环境,通过可视化技术和即时数据交互增进了用户体验和操作效率。赖禄安等[15]针对现有温室大棚环境监控系统的不足,应用数字孪生技术设计实现了基于数字孪生的温室大棚可视化监控系统,结果表明,系统可以方便种植户实时监控温室大棚环境参数、查看历史数据、发出预警信息和场景漫游,提高了管理效率。温室区别于大田的特点是通过人工调节温室的环境以满足作物生长的需求,因此对于温室环境的模拟是温室控制的一个重要方面。为了从机理上分析温室环境的变化,计算流体动力学(Computational fluid dynamics,CFD)分析方法被应用于温室的环境模拟中,如 KAVGA 等[16]研究通过设计一个数字孪生温室并采用计算流体动力学分析与模糊逻辑控制结合,实现了温室微气候的优化控制系统,并将其部署在 Arduino 开发板上以提高温室生产的效率。同时基于温室环境的可控性,通过协同作物的生长发育、环境调控的成本和市场对农产品的需求,可以使得整个温室生产达到经济最优化的目标,如 REZVANI 等[17]公开了瓦赫宁根大学的数字孪生温室运营,其主要目标是通过使用人工智能技术控制温室气候和作物,实现净利润最大化。该数字孪生系统将番茄作物模型和动态温室气候模型相结合,用于计算每个分区的预测产量以及光、空气温度和 CO_2 控制策

略变化的影响，模型如图 4 所示。HOWARD 等[18]连续 3 年致力于研究商业温室生产过程的数字孪生，使用大数据和物联网来优化温室生产过程，实现通过使用来自数据库、传感器和现货市场的过去和实时数据来估计温室的未来状态。

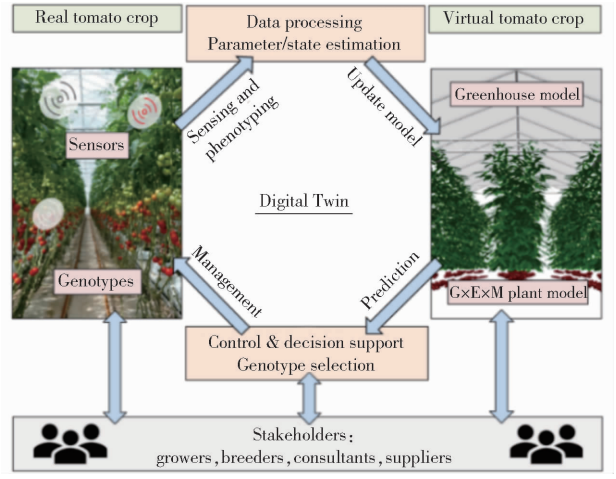


图 4　温室番茄数字孪生模型

Fig. 4　Digital twin model for greenhouse tomatoes

2.4　养殖业生产

数字孪生在养殖业中的应用主要从养殖场环境系统及个体虚拟系统两方面展开。养殖场环境数字孪生系统，一般通过物联网设备对畜禽生长环境进行模拟构建，同时与环境控制系统相结合，对真实的养殖场环境进行调控。JO 等[19]提出了数字孪生技术用于模拟猪圈的能耗，为优化猪圈设计提供决策支持。REYES 等[20]开发了水产养殖系统数字孪生的框架，并通过实时监控水体 pH 值、电导率、温度以及空气相对湿度、温度和光照强度等参数，同时该框架还支持使用人工智能技术预测水产的鲜重以及生长率。TTEIXEIRA 等[21]于 2022 年通过部署水产养殖农场的数字孪生来控制包括温度、溶解氧含量(DO)、pH 值、浊度和氨氮含量等水质参数，基于 AI 的控制来检测、模拟和优化水产养殖过程。王芳[22]将数字孪生技术应用于草场放牧领域，设计了面向草场放牧的数字孪生系统框架，建立了草场放牧模型和放牧路径规划机制，并通过实验验证了提出方法的有效性。陈斌[23]应用数字孪生技术开发了猪舍环境监测系统，通过三维建模和系统设计提升监测效果，更好地保护猪只的健康和安全。

关于养殖个体的数字孪生，一般通过对个体基本信息和活动信息的采集进行构建，由构建的孪生系统进行个体的监督和预测。VIKTOR 等[24]将数字孪生应用于智能畜牧业中的猪肥育过程中，创建了猪肥育过程的数字孪生模型，用以模拟猪只平均饲料消耗、体质量增长并计算特定育种阶段的体质量。唐辉荣[25]利用 5G 技术和视觉技术，研发图像处理算法实现对生猪目标进行实时检测和跟踪，绘制生猪目标运动轨迹，识别猪群扎堆状态以及评估生猪健康状况，实现生猪生长过程中的生长信息管理，利用数学模型、数字孪生技术驱动数据，实现对猪肉生产过程进行监测与评估的猪肉智慧生产系统。祁钊等[26]结合数字孪生和知识图谱技术，实现了对猪场的远程可视化管理和诊断功能，以及基于数据驱动的疫病预警系统，优化了猪场监控和生物安全管理。

2.5　农业装备作业

数字孪生的最大优势是可以解决复杂系统运维管控、复杂机械装备研发制造、农机装备操作模拟等问题，已体现出显著的实用价值。因此，在农机装备的设计优化、精准农业操作、实时监测与维护等方面发挥了更大的作用，为实现农业生产的全面数字化和智能化提供有力支撑[27]。在农业生产过程中，农田环境的不确定性为农机装备作业过程的精准控制带来了困难，而数字孪生技术通过模拟田间的作业环境，为农机装备的优化设计和作业过程控制提供依据。如熊祥盛等[28]针对农业耕作环境复杂多变、耕作过程切削状态不清晰、耕作方案经验化、主观化等问题，构建了基于数字孪生的农业耕作监控系统，以全面、实时地监控整个耕作过程，实现智慧化的农业耕作。张延安等[29]针对大功率拖拉机动力换挡变速箱(Power-shift transmission，PST)湿式离合器压力控制不准确、响应迟滞等问题，引入数字孪生的理念，提出了一种数字孪生驱动的时变比例微分自适应控制(Digital twin driven time-varying proportional integral adaptive control，DT－TVPIA)方法。2024 年张延安等[30]又提出了一种基于数字孪生的自适应换挡策略，在实时动态精准建模和换挡策略自动生成两个机制的协同作用下，实现换挡策略的自适应调整，为数字孪生技术在复杂非线性系统优化控制方面的应用提供了参考。郭大方等[31]基于数字孪生和农业装备的特点，融合五维模型和移动边缘计算技术，提出一种云-雾-边-端协同的数字孪生系统架构与运行机制。以籽粒直收型玉米联合收获机为对象，针对脱粒过程中籽粒破碎率高的问题，开发大型联合收获机的数字孪生原型系统，实现模型预测、模型更新、实时监测和优化决策等功能，并开展田间试验。马博文等[32]针对现有农机装备数字孪生系统开发难度大、配置要求高以及资源占用过高的问题，提出基于轻量级网络的联合收获机数字孪生系统构建方法，包含物理、虚拟、数据交互、模型计算以及人机交互等多个子系统的实现方法，基于数字孪生的技术特点和联合收获机的作业特性，设计了一

种基于 JavaScript 语言的轻量级数字孪生系统框架，框架流程图如图 5 所示。

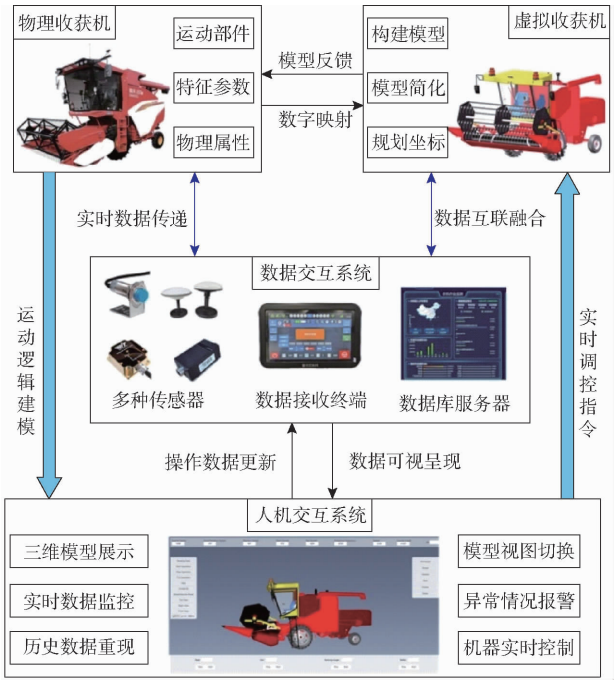


图 5 联合收获机轻量级数字孪生系统设计框架流程图

Fig. 5 Flowchart of design framework for lightweight digital twin system of combine harvester

2.6 农产品供应链

数字孪生在诊断和预测农产品供应链中存在的食品质量降低问题具有较大的应用潜力，通过高频关键词“区块链”、“supply chains”、“Blockchain”可知数字孪生已经初步应用于农产品供应环节。调查显示，数字孪生的应用主要针对农业生产或食品运输阶段，大部分的应用场景都用于监测农产品的质量问题，其中主要是对新鲜水果和蔬菜质量的监测。如 DEFRAEYE 等[33]开发了一种数字孪生系统用于模拟和量化芒果在整个冷链过程中温度的变化和质量演变，从而优化芒果的运输和冷藏过程。SHOJI 等[34]通过对新鲜水果供应链的监控，利用数字孪生将水果的温度数据转换为质量损失和剩余保质期等指标，有效地优化冷链管理，从而帮助零售商更好地利用温度数据来进行相关决策以减少损失。许继平等[35]构建基于工业互联网标识解析技术的粮食供应链数字孪生系统。以大米供应链为典型对象，显著提高了粮食供应链的智能化监管能力和决策效率，为产业数字化转型提供了有效的技术支持和实践案例，整体框架如图 6 所示。

由此可见数字孪生的应用不仅提高了农产品供

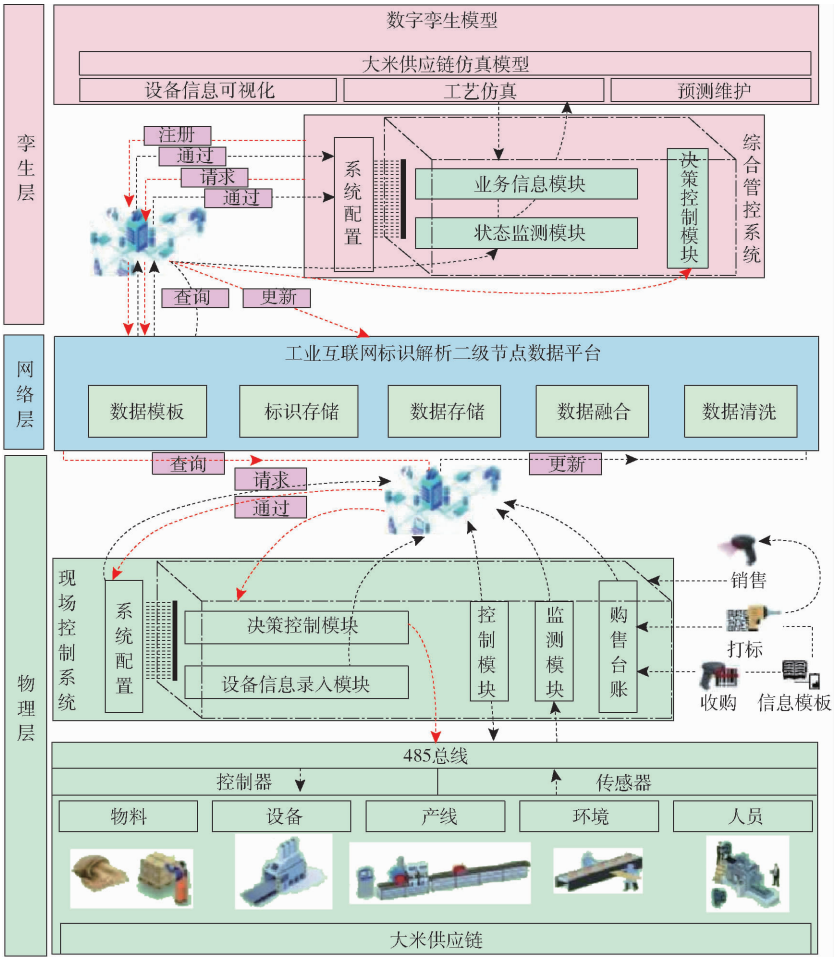


图 6 基于工业互联网的大米供应链数字孪生系统

Fig. 6 Digital twin system structure of rice supply chain based on industrial Internet

应链的透明度和响应速度，还增强了其抵御风险的能力，比如及时应对天气变化、疫情爆发或市场需求波动的能力。此外，通过优化供应链操作，数字孪生技术还有助于减少浪费和提高整体的环境可持续性，这对于促进全球食品安全和实现农业的可持续发展目标至关重要。

通过上述的案例分析可知，近年来，数字孪生技术开始在农业生产过程中应用，尽管有部分数字孪生技术已达到实地部署或生产级别，但大多数仍处于探索阶段。现阶段主要的应用包括虚拟场景的构建、基于虚拟模型的管控，主要的服务支持也只是集中在提供动植物的生长状态检测、环境数据监测分析以及农业知识服务等方面，而在基于孪生数据驱动的生产模拟与决策支持等方面仍有较大的发展空间。此外，目前的农业生产过程的数字孪生技术仅仅实现了生产过程的某个或者某几个环节的数字孪生，而数字孪生技术最大的特点是通过构建虚拟模型与实际生产过程的高度同步，进而构建完整的闭环管理系统，实现农业生产全流程的监控与优化。完整的农业数字孪生应当包括：生产过程的完整性，包括产前规划、生产过程中实时监控与调控，以及产后决策分析。生产要素的完整性，应该统筹作物、环境、土壤和设备等每一个要素，构建一个全面的、各要素相互影响相互作用的数字孪生模型，而不是仅限于环境监测或个体监测。只有实现这两方面的完整性，才能充分发挥数字孪生技术在农业中的潜力，提升农业生产的智能化、精细化和高效化水平。

分析原因有以下几点：

（1）与工业生产过程相比，农业领域的数字孪生技术研究刚起步，技术积累和应用经验相对不足。其中农产品供应链和农机装备设计制造的数字孪生通过借鉴工业产品供应链和机械产品制造业的应用经验，其应用成果相对完善[35-36]。总的来说目前农业生产过程的数字孪生，主要还是借鉴工厂生产管控过程的数字孪生[9,12,14-15]，尚未形成完整的技术体系。

（2）农业领域涉及复杂的动植物生理的孪生体系统、农业场景中多样化的环境因素和气候变化等因素，不仅增加了技术应用的难度，还对建模的准确性和实时性提出了更高的要求[37]。

（3）数据获取的成本较高，特别是在广泛的农业场景下，实现全面的数据采集和监测需要投入大量的资源，这在一定程度上限制了数字孪生技术在农业中的普及和应用[38]。

但是随着近年来农业传感器、动植物表型、农机机器人、农业大模型和农业智能控制等智慧农业关键技术的快速发展，尤其无人农场的发展，数字孪生技术作为实现智能农业管理、精细化作业和全生命周期监控的集成技术，具有广阔的发展前景和应用潜力。通过不断推进这些关键技术的发展和应用，农业数字孪生技术有望逐步克服现有的难点，实现更加全面和高效的农业生产管理[39-40]。

3　关键技术分析

3.1　数字孪生五维模型框架

目前数字孪生模型框架影响最大的是以陶飞为主的北航数字孪生研究团队对现有的数字孪生的三维模型进行了扩展[41]，增加孪生数据和服务两个维度，从而提出了数字孪生五维模型的概念。王红军等[9]基于陶飞的车间数字孪生系统五维模型增加了学习和决策模块，提出了面向种植管理过程的果园数字孪生系统六维模型，并阐述了系统模型构建理论与技术体系。本文借鉴陶飞数字孪生五维模型的思想，建立农业生产过程的数字孪生五维模型，如图 7 所示。具体内容包括物理实体（Physical entity，PE）、虚拟实体（Virtual entity，VE）、孪生数据（Digital data，DD）、服务（Services，SS）和连接（Connections，CN）。

3.1.1　物理实体

农业生产过程的物理实体按照功能及结构划分成单元级、系统级和复杂系统级 3 个层级。各种动植物、空气、土壤及作业设施设备可视为单元级，是功能实现的最小单元；根据作业场景不同划分为大田、果园、温室、农场等，由多个单元级实体组成相互关联的较大实体，通过这些实体共同完成农业生产功能可视为系统级；由各个子系统组成的涵盖不同生产对象、不同生产环境的整体，同时包括各个子系统的物质、能量与信息的综合体视为复杂系统级。

3.1.2　虚拟实体

农业生产过程的虚拟实体包括几何模型、物理模型、行为模型和规则模型，这些模型从不同尺度描述物理实体的几何参数、物理属性和行为响应，确保虚拟实体与物理实体的时空一致性，从而实现对农业系统的实时监控、预测分析和决策支持。几何模型包括作业对象、场景和设备的三维模型，通常通过三维建模软件或三维扫描仪创建。物理模型在几何模型基础上增加物理属性和约束，如土壤特性、动植物生理生长、气候条件及设备状态等。行为模型描述物理实体在外部环境与干扰下的实时响应，涉及演化行为、动态功能行为和性能退化行为。规则模型基于历史数据和隐性知识总结经验，并依据相关标准与准则，指导农业活动，如作物生长模型、病虫

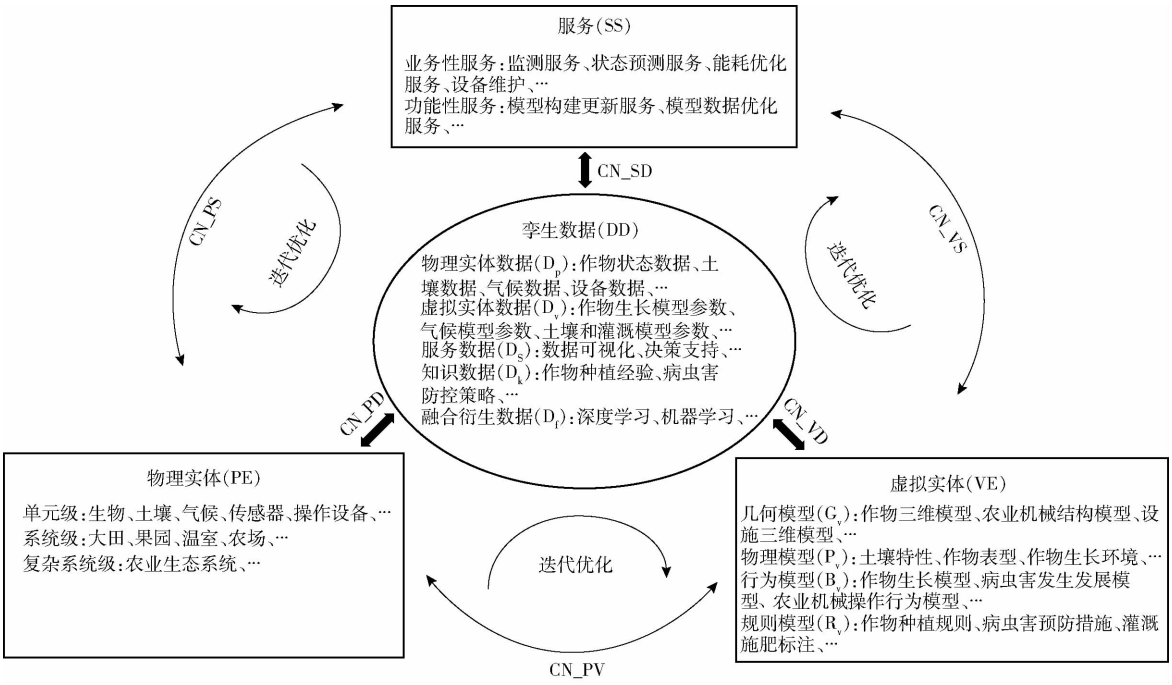


图 7 农业生产过程数字孪生五维模型

Fig. 7 Five dimensional model of digital twin in agricultural production process

害预警模型,以及应对极端天气的经验,确保农业活动符合安全和质量要求。

3.1.3 孪生数据

孪生数据是数字孪生的驱动,主要包括物理实体数据、虚拟实体数据、服务数据、知识数据以及融合衍生数据。

在农业生产过程数字孪生中,物理实体数据主要体现作业对象的真实信息,主要包括:动植物生理生长信息、土壤信息、病虫草害信息、气候环境信息、作业设备信息等,这些数据主要通过各类传感器直接从实际农业环境中采集。

虚拟实体数据涵盖与虚拟实体相关的各类关键数据,包括几何模型相关数据(如农田布局、作物植株几何尺寸、作业设备装配关系及位置等)、物理模型相关数据(如土壤和作物的物理属性、环境特征等)、行为模型相关数据(如作物生长驱动因素、气候环境扰动、农业操作运行机制等)、规则模型相关数据(如农作物生长约束、农业生产规程、系统关联关系等)。

服务数据主要包括功能性服务相关数据(如算法、模型、数据处理方法等)与业务性服务相关数据(如企业管理数据、生产管理数据、产品管理数据、市场分析数据等)。

知识数据包括农业领域的专家知识、行业标准、规则约束及常用数据集、算法库。

融合衍生数据通过对上述各类数据的转换、预处理、分类、关联、集成与融合,反映更全面与准确的信息,实现信息共享与增值。

3.1.4 服务

服务是指对数字孪生应用过程中所需各类数据、模型、算法、仿真、结果进行服务化封装,主要包括以工具组件、中间件、模块引擎等形式支撑数字孪生内部功能运行与实现的“功能性服务”,以及以应用软件、移动端 APP 等形式满足不同用户不同业务需求的“业务性服务”。

在农业生产过程数字孪生中,功能性服务主要包括:面向虚拟实体的模型管理服务,即模型的更新和一致化分析,如几何模型更新(如作物生长周期形态改变、作业设备模型变更等)、物理模型和行为模型参数更新(如土壤、气候物理属性的实时更新等)、规则模型补充与修正。业务性服务主要包括:产前的育种;产中的作物可视化、作业设备调控维护、病虫害防治、栽培管理;产后的农产品市场分析、商业推广、农产品溯源、虚拟培训服务等。

3.1.5 连接

在农业生产过程数字孪生系统中,连接(CN)实现了各组成部分的互联互通。具体而言,CN_PD 通过各种农业传感器和通信方式(如 WiFi、LoRa、NB-IoT),实现物理实体和数据空间之间的实时数据采集与传输,优化农田管理;CN_PV 通过物理实体与虚拟实体之间的映射,使物理实体与虚拟实体之间的交互更加高效,实时更新作物生长和环境模型,并将模型预测、决策结果生成的控制指令反馈至实际农业生产过程中,进行智慧管控;CN_PS 连接物理实体与农业服务系统,利用数据更新服务系统,为农

户提供精准的操作指导和决策支持；CN_VD 通过数据库接口，实现虚拟实体与数据空间的数据交换，驱动虚拟模型进行动态仿真和优化农业过程；CN_VS 利用软件接口实现虚拟实体与服务系统的双向通信，确保农业服务系统能够实时调用虚拟模型进行决策支持；CN_SD 通过数据库接口，连接服务系统与数据空间，实现数据的存储和读取，支持农业服务系统的高效运行和优化。通过这些高效的连接，农业数字孪生系统能够实现数据和信息的实时共享和协同优化，提高农业生产的智能化水平和管理效率。

3.2　主要关键技术

在上述农业生产过程数字孪生的五维模型基础上，结合现有不同领域农业生产过程数字孪生系统的案例，农业生产过程的数字孪生系统整体架构如图 8 所示，目前农业生产过程的数字孪生的关键技术主要包括物理实体数据感知、虚拟实体构建、虚实交互与数据驱动，以及面向农业产前、产中和产后生产全周期的决策与服务等。



图 8　农业生产过程数字孪生系统整体架构

Fig. 8　Instance system overall architecture

3.2.1　物理实体数据感知

物理实体数据获取的主要对象包括作物、环境、土壤和机器系统等信息。这是实现虚拟空间内模型驱动的重要依据。

（1）动植物生长信息获取

目前对于动植物生长信息获取主要是通过传感器技术实现对动植物生长发育过程生长和生理信息的获取。在作物生长信息获取方面，主要是对形态参数的获取，随着近年来植物表型信息获取研究的发展，一方面，机器视觉技术得到了广泛运用，植物表型性状获取技术正向着多样化、自动化和高通量的方向发展[42]，通过立体视觉[43]、断层扫描技术[44]、三维激光扫描[45]等技术可以快速获取植株冠层、根系等三维形态数据，实现对作物表型性状的提取。另一方面，具有柔性、光学透明性的有机植物电子皮肤传感器也开始应用于植物表型数据的获取[46]。作物生理信息获取方面，通过对作物生长过程的光合、蒸腾、茎流等生理参数的实时感知，为作物的生长及环境的反馈调控提供依据。近年来通过与生长表型的结合，利用可见光成像[47-48]、近红外成像[49]、红外（热）成像[50-51]、多光谱成像[52-53]、叶绿素荧光成像[54-56]等技术与颜色-深度传感器技术相结合，实现了作物生理过程的三维表征，可以提供植物在不同环境条件下的动态生长情况，进一步揭示植物对环境的响应机制。在畜禽、水产等动物生理和生长信息获取方面，主要集中在生理参数、行为模式和健康状况等方面。近年来，随着传感器技术和数据分析技术的发展，畜禽生长信息获取逐渐向

自动化和智能化方向发展。一方面,生理参数的获取主要通过佩戴式和植入式传感器来实现。例如,利用心率监测器、体温传感器和呼吸频率传感器等,可以实时监测动物的基本生理状态[57-59]。同时红外热成像技术也被广泛应用,通过测量动物体表温度,可以评估其健康状况和应激反应[60-62]。另一方面,行为模式的监测主要依靠视频监控系统和动作传感器。通过对动物活动轨迹[63]、进食行为[64]、休息时间[65]、叫声[66]以及表情等数据的分析,可以评估其生长状况和健康水平。在水产养殖方面,常用的方法包括水质监测、声学监测和视觉监测等。水质监测仪器可以实时监控水体中的温度、溶解氧含量、pH 值等关键参数,确保水环境的适宜性[67]。声学监测技术则可以通过记录和分析水中鱼类的声音,判断其行为和健康状况[68]。视觉监测技术,例如水下摄像头和图像处理技术,可以实时观察鱼类的生长情况、活动状态和健康水平[69-71]。

(2)空-天-地一体化的环境信息获取

在现代农业生产过程中,信息获取的方式主要包括了空、天、地 3 方面,通过地面传感器、无人机和卫星遥感等技术手段,可以实现实时获得土壤湿度、盐分浓度和 pH 值等土壤参数[72-77],气候环境方面的温度、湿度、降水量、风速、太阳辐射等关键气象参数。另外通过无人机和地面传感器结合人工智能等技术也能够提供大范围、高时空分辨率的病虫草害信息,实现快速覆盖农田,进行自动识别和分类病虫草害[78-84],提高识别精度和效率。

(3)机器作业过程信息获取

在农业数字孪生领域,农业机器设备作业过程中的信息获取和管理是提升农场作业效率和精准农业实施的核心部分。现代农业机器设备,如拖拉机、收获机和播种机等,已广泛配备了各种传感器和通信模块,用于实时采集和传输作业过程中的重要数据。这些传感器主要包括全球导航卫星系统定位单元、惯性测量单元(Inertial measurement unit,IMU)、力学传感器等,通过这些设备,可以获取机器位置[85]、稳定性[86]、作业路径[87-90]等关键参数。同时不同类型的农业机械在信息获取方面有其特定的需求和重点。例如,喷雾机在农药喷雾过程中需要监测和优化喷雾的雾化性能,以及通过残留测试设备检测农药残留量。这些特定信息的获取对于确保农药有效覆盖、减少浪费和环境影响具有重要意义[91]。

3.2.2 虚拟实体构建

(1)动植物生长发育模型

作物生长发育模型作为农业数字孪生虚拟实体的主要组成部分,是对作物相关的几何、物理、行为、规则模型的整合,通过对作物品种特性、生长环境及人为管理等进行设定,建立相关的数学模型来反映作物的形态以及生理参数的变化,从而实现对作物物理实体的一致性描述[92-94]。目前常用的方法包括基于过程的模型,如 DSSAT(Decision support system for agrotechnology transfer)[95]、APSIM(Agricultural production systems simulator)[96]、EPIC(Executive-process/interactive control)[97]等通过对作物生长的生理过程(如光合作用、呼吸作用、养分吸收和转运等)进行建模和数据驱动的建模方法(如机器学习模型)。数据收集方面,可以通过地面观测、无人机或卫星遥感等手段获取作物生长的真实数据。模型的发展还依赖于高精度的传感器网络,实时收集环境变量和作物生长状态数据,以调整和优化生长模型的参数和算法。

在动物生长发育模型中,通过对动物品种特性、生长环境及人为管理等进行设定,建立相关的数学模型来反映动物的形态以及生理参数的变化,从而实现对动物物理实体的一致性描述。目前常用的典型生长模型包括:Brody 生长模型、Gompertz 模型[98]、Logistic 模型[99]和 Von Bertalanffy 模型[100-101]。

(2)环境模型

在构建农业数字孪生环境模型时,需要建立一个涵盖从土壤到大气的完整系统。这个系统应包括土壤中的水分和养分通过植物根部表皮进入根系,然后通过植物茎的木质部向上运输,直至到达叶片。在叶片中,水分和气体通过气孔扩散到稳定的空气层,最终与大气进行湍流交换。这个过程形成了一个整体的、相互反馈的动态连续系统,即土壤-植物-大气连续体模型(Soil-plant-atmosphere-continuum,SPAC)[102]。

设施农业生产中,主要是要建立设施环境变化模型,如设施园艺中的温室温度、湿度、光照强度、CO_2 浓度变化模型以及土壤基质的水肥运移等[103-105];设施养殖中的畜禽舍内温度、湿度、光照强度以及有害气体排放模型[106];而对于设施水产养殖,开放式养殖主要是水体温度、溶解氧含量等环境变化,而全封闭式养殖中,还要考虑水产设施内的温度、湿度、光照强度等环境的变化[107]。

在构建环境模型时,首先要收集大量的多维环境数据,包括土壤含水率、温度、养分含量以及大气参数(如温度、相对湿度、CO_2 浓度等)。现代的环境监测技术,如物联网传感器网络,可以实时采集这些数据,利用这些数据进行模型参数的标定和验证,建立基于物理过程的环境动态模型。近年来,随着

计算机模拟技术的发展，通常采用数值模拟方法[108]，结合高性能计算平台（如云计算）进行大规模、多尺度的环境模拟，以精确预测环境变量的动态变化。此外，利用获取的历史数据，机器学习和深度学习方法也被用于构建环境模型[109]。

（3）农业场景构建

在农业数字孪生中，虚拟场景构建是建立精确、动态和交互式农业模型的关键技术。其中主要包括几何模型、物理模型、规则模型、行为模型的构建，之后通过将收集的实时数据与创建的农业模型相结合来构建一个能够反映实际农业生产过程的动态虚拟环境，辅助研究人员和农户观测不同农业操作对作物生长、病害扩散等环节的影响，进行预测和模拟[110]。

目前国内外大部分数字孪生中的虚拟场景都是通过三维建模软件结合游戏引擎（例如 Unity、Unreal 等）实现虚拟场景中的模型搭建和可视化展示[111-112]。同时这些平台还逐渐融入虚拟现实（Virtual reality，VR）和增强现实（Augmented reality，AR）技术为用户提供更直观的数据展现方式和模拟操作，增强用户的参与感并提升决策效率[113]。

3.2.3　虚实交互与数据驱动

虚实交互与数据驱动的前提是稳定实时的数据传输，现阶段农业生产过程数据传输主要依赖有线和无线通信技术，无线通信包括 4G、5G、NB－IoT 等远程数据传输以及 WiFi、ZigBee、蓝牙、LoRa 等，这些技术用于将分布在田间地头的各种传感器、气象站、无人机等设备收集到的数据，实时传输到中央数据平台进行处理和分析。特别是 5G 技术的快速发展[114]，提供了更高的带宽和更低的时延，使得大规模、高速率的数据传输成为可能，从而支持实时监控与远程控制。此外，卫星通信和地面基站相结合的混合传输网络也在逐渐应用，以覆盖更大范围的农业区域，确保数据传输的连续性和稳定性。边缘计算技术[115-117]的引入也是一项关键突破，通过在靠近数据源的地方进行初步数据处理和过滤，减少了不必要的数据流量，提升了传输效率，同时保障了数据的实时性和可靠性。

农业数字孪生虚实交互与数据驱动是通过对物理实体（如农田、作物、农业设备等）的数字化映射，创建与之对应的能够模拟和再现物理实体的各种状态和过程的虚拟实体，形成一种双向反馈机制，使得通过收集、分析来自各种传感器、卫星图像、气象站等获得的多源数据在两者之间流动和转换，从而提高决策的准确性和效率。这不仅能够实时反映物理世界状态，还能利用大数据分析、机器学习等方法，对这些数据进行深度处理和分析，从而补充和扩展那些在物理实体上难以直接获取的数据，不断更新和优化虚拟模型，提高整体数字孪生模型的准确性，同时通过可视化平台实现虚拟世界中的操作在真实物理世界得到反馈展示[118-119]。

3.2.4　农业生产过程知识服务

农业生产过程知识的构建依赖于系统化的数据收集、整理和分析。首先，需要通过建立农业知识库，收集文献、专家经验、农业种植手册和生产记录等多源知识数据，利用自然语言处理技术（Natural language processing，NLP）进行文本数据的结构化和知识抽取，生成结构化的知识图谱[120]。知识图谱通过关联不同的知识点（如作物品种、生长环境、管理措施等），构建完整的知识体系，之后为了实现农业知识体系转变成农业生产过程的知识服务，还需要综合分析感知识别、知识耦合、推理决策等农业知识智能服务技术，构建由云计算支撑环境、大数据处理框架、知识组织管理工具、知识服务应用场景组成的农业知识智能服务平台，形成一种基于知识规则和事实案例相结合的农情解析与生产推理决策方法，构造产前规划、产中管理、收获作业、产后经营等全链条知识智能应用场景[121]。目前，常用生产推理决策方法包括基于统计和机器学习的数据驱动决策支持系统（如随机森林、支持向量机）[122-123]和基于优化的模型（如线性规划、遗传算法）[124-125]。具体实践中，首先收集和整理多维度的数据，如历史产量、气象数据、土壤数据、作物实时状态数据和市场信息等涵盖作物生长全周期的信息，通过大数据平台进行数据清洗、预处理和特征提取，然后利用深度学习等先进算法构建预测模型和决策模型。这些模型在云计算平台上进行训练和部署，通过构建的知识体系对整个生产过程进行决策优化，如产前基于市场历史数据重新规划生产计划[18]；产中根据生产场景中的实时数据预测下阶段的作物或设备状态进行调整和优化，确保生产过程的顺利进行[16-17]；产后，可以根据市场需求和作物质量监测进行预测分析优化销售策略，最大化收益[35]。

4　数字孪生技术在农业生产过程中应用发展趋势

4.1　动植物表型技术是数字孪生的基础

在农业数字孪生的实施过程中，物理实体的信息感知是数字孪生系统的基础，只有实现了农业生产过程的动植物生长、环境和设施设备的信息感知，才能实现农业生产过程的数字孪生。目前对于农业生产环境、设施装备的作业状态信息感知已经有较

好的研究。而对于动植物的生长状态的感知,特别是生理生长信息的感知还相对缺乏,作物或牲畜的数字孪生模型不仅依赖于环境或土壤等外在因素,更是需要更深层次的生物学特性,包括植物的光合、呼吸、蒸腾和动物的呼吸、脉搏等生理参数。在现行的数字孪生模型中,这些细节化和个体化的表型信息往往难以准确获取和表征,这直接影响到虚拟模型的准确性和可靠性。虽然近年来关于动植物表型技术的发展,为动植物生理生长信息感知提供了相关的技术与方法[126-127],但大部分需要在特定监测平台或实验室环境下进行,限制了实际应用范围和效率。动植物表型技术一方面可以为数字孪生系统提供动植物生长过程的孪生数据,通过数字孪生获得环境、设施设备作业状态信息,结合表型获取的动植物生长信息,可以实现对虚拟实体的动植物生长和环境模型进行迭代优化;另一方面,利用孪生获得的数据,利用大数据分析方法可以对动植物品种特性、农业生产管控措施、设施设备的作业过程进行评价分析,为品种选育、管控措施优化、设施设备设计和控制提供依据[128]。因此,更灵活、适用于广泛场景的作物表型信息采集方法是实现农业生产过程数字孪生的基础[129-130]。

4.2 虚实融合驱动是数字孪生的关键

数字孪生的目标是通过信息感知技术获取物理实体的信息,实现虚拟实体中各类模型的驱动。但是由于技术和手段的限制,物理实体中的信息无法感知或者感知不全面,而虚拟实体中构建了各个虚拟实体的几何、物理、行为和规则模型。为了实现虚拟实体中各类模型的驱动,需要建立物理实体与虚拟实体各类之间的映射关系,结合物理实体的感知信息和虚拟实体中的模型信息,实现虚实融合驱动[131-132]。如在获取黄瓜等高秆作物的形态数据时,由于相互的遮挡,无法获取到完整的叶片信息。而通过虚拟植物模型可以获得整个植株的形态,通过提取获取的三维点云的信息提取作物的形态参数与虚拟植物之间的映射关系,利用虚拟植物模型进行点云的补全,通过虚实融合,可以实现作物生长过程的数字孪生[133]。

4.3 异构场景智能决策是数字孪生的核心

在农业数字孪生中,异构场景的智能决策是实现精准农业和高效管理的核心要素。农业生产涉及多种不同类型的场景,包括各种不同的农业环境(大田、温室、果园等)、多种农产品类型(小麦、水稻、玉米、果蔬茶、畜禽和水产等),以及各种设施设备(如灌溉系统、温室、畜禽舍等农业生产设施、耕种管收作业装备、养殖设备等)。为了在这些复杂多样的场景中做出智能决策,需要有效地管理和生成统一的模型。通过建立这些精细化的模型,可以真实地反映出实际生产中的各种情况,通过数据融合与分析,能够形成一个统一的农业生产全景图,为智能决策提供基础[134-137]。在拥有详细模型数据的基础上,智能决策的关键在于融合多种资源库的数据、模型和知识。通过将这些多源数据进行融合,可以帮助生成综合的决策支持方案。这一过程要求有效的数据集成技术,能够将不同来源的数据进行无缝整合,并且需要数据清洗和预处理,以保证数据的准确性和一致性[138]。在数据、模型和知识整合的基础上,应用先进的人工智能方法来进行数据分析和决策支持是实现智能决策的核心手段。机器学习和深度学习等人工智能技术可以对融合后的多源数据进行深入挖掘,发现其中隐含的模式和规律,从而生成优化的决策方案[139-140]。例如,通过分析不同作物在不同环境条件下的生长数据,可以预测最佳的种植时间和条件,或者通过分析历史气象数据和作物产量的关系,可以优化灌溉和施肥策略,同时应用人工智能可以帮助实时监控和调整模型,及时应对突发情况,提高决策的灵活性和应变能力[141-143]。

4.4 全生命周期孪生与服务是数字孪生的目标

在农业数字孪生的应用发展和服务方面,已有研究开始利用数字孪生技术进行农作物生长监测、农业资源管理、病虫害预警和精准农业操作等领域的探索[4-35]。然而农业数字孪生技术服务的核心应是对农业作物全生命周期的贯穿式服务。通过对农业生产过程全生命周期的数字孪生可以获取生产全过程的数据,通过对数据进行融合、挖掘等数据分析方法,可以对虚拟实体中的各类模型进行迭代与优化,提高模型的准确性和适用性[144-145]。此外,通过全生命周期的数据孪生还可以对动植物的生长过程和农机装备作业过程进行迭代与优化。

动植物生长过程的全生命周期数字孪生,可以为品种筛选、种养模式优化、环境调控和机械作业提供服务。如通过收集和分析作物在市场上的经济表现(包括过去和实时数据),作为作物生产和管理的数据支持和决策依据,从而调整当前的生产计划和管理策略,甚至可以反馈至作物的育种阶段,进而促进农业作物结构的优化调整,对决策模型进行迭代优化,提升作物整体产量和产品质量[18]。

农业作业装备的全生命周期数字孪生技术,通过设计、制造和服务一体化管理,实现全过程的优化。在设计阶段,数字孪生技术可以模拟装备的工作状态和性能,优化设计方案,减少设计缺陷和错

误；在制造阶段，通过数字孪生，可以实时监控生产过程，优化制造工艺，提高生产效率和产品质量[146]；在服务阶段，通过数字孪生技术，可以对装备进行实时监控和远程诊断，提前预知故障和维护需求，延长设备使用寿命，降低维护成本[147-149]。

因此要充分发挥农业数字孪生技术的优势，须跳出单一场景和阶段的应用框架，向着覆盖农业作业对象的全生命周期综合服务体系方向发展。

参 考 文 献

[1] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6):1-7.
ZHAO Chunjiang. Current situation and future prospects of smart agriculture[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6):1-7. (in Chinese)

[2] VERDOUW C N, KRUIZE J W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals[C]//7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture, Hamilton, 2017.

[3] VERDOUW C, TEKINERDOGAN B, BEULENS A, et al. Digital twins in smart farming[J]. Agricultural Systems, 2021, 189: 103046.

[4] 梁晨光. 基于数字孪生的稻田环境监测系统研究及实现[D]. 长沙:湖南农业大学,2020.
LIANG Chenguang. Research and implementation of rice field environmental monitoring system based on digital twin[D]. Changsha:Hunan Agricultural University,2020. (in Chinese)

[5] SKOBELEV P, LARYUKHIN V, SIMONOVA E,et al. Multi-agent approach for developing a digital twin of wheat[C]//2020 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP). IEEE, 2020.

[6] WECKESSER F, BECK M, HÜLSBERGEN K J, et al. A digital advisor twin for crop nitrogen management[J]. Agriculture, 2022, 12(2):302.

[7] 蔡正武. 大田农业数字化生产营销系统应用研究[D]. 武汉:武汉轻工大学,2022.
CAI Zhengwu. Research on the application of production marketing system of field agricultural digital production[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022. (in Chinese)

[8] LOWE T, MOGHADAM P, EDWARDS E, et al. Canopy density estimation in perennial horticulture crops using 3D spinning LiDAR SLAM[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(4):598-618.

[9] 王红军, 林俊强, 邹湘军, 等. 基于数字孪生的果园虚拟交互系统构建[J]. 系统仿真学报,2024,36(6):1493-1508.
WANG Hongjun, LIN Junqiang, ZOU Xiangjun, et al. Construction of a virtual interactive system for orchards based on digital twins[J]. Journal of System Simulation, 2024,36(6):1493-1508. (in Chinese)

[10] EDEMETTI F, MAIALE A, CARLINI C, et al. Vineyard digital twin: construction and characterization via UAV images-diwine proof of concept[C]//2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2022:601-606.

[11] BELLVERT J, PELECHÁ A, PAMIES-SANS M, et al. Assimilation of Sentinel-2 biophysical variables into a digital twin for the automated irrigation scheduling of a vineyard[J]. Water, 2023, 15(14):2506.

[12] 郭涛, 李宗南, 何泽涛,等. 智慧果园移动管理服务平台设计与实现[J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(11): 5-8,12.
GUO Tao, LI Zongnan, HE Zetao, et al. Design and implementation of a mobile management service platform for smart orchards[J]. Journal of Smart Agriculture, 2023, 3(11): 5-8,12. (in Chinese)

[13] ZANCHIN A, SOZZI M, GIORA D, et al. Digital twins analysis as a tool to find new descriptors for grapevine bunch morphology categorisation and grey mould infection risk evaluation[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 71-82.

[14] 田乾龙. 基于数字孪生的玻璃温室环境控制系统研究[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
TIAN Qianlong. Research on environmental control system of glass greenhouse based on digital twin[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[15] 赖禄安, 陈婷, 常杰, 等. 基于数字孪生的温室大棚可视化监控系统研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(2): 128-131.
LAI Lu'an, CHEN Ting, CHANG Jie, et al. Research on visualization monitoring system of greenhouse based on digital twin [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(2): 128-131. (in Chinese)

[16] KAVGA A, THOMOPOULOS V, PISCHINAS E, et al. Design and simulation of a greenhouse in a computational environment (ANSYS/FLUENT) and an automatic control system in a LABVIEW environment[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2023, 129:102837.

[17] REZVANI S M E, SHAMSHIRI R R, HAMEED I A, et al. Greenhouse crop simulation models and microclimate control systems, a review[M]//REDMOND R S. Next-Generation Greenhouses for Food Security, London:IntechOpen, 2021:1-22.

[18] HOWARD D A, MA Z, AASLYNG J M,et al. Data architecture for digital twin of commercial greenhouse production[C]//RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies,2020.

[19] JO S K, PARK D H, PARK H,et al. Energy planning of pigsty using digital twin[C]//2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC),2019:723-725.

[20] REYES Y A, ABBASI R, MARTINEZ P, et al. Digital twinning of hydroponic grow beds in intelligent aquaponic systems[J]. Sensors, 2022, 22:7393.

[21] TTEIXEIRA R, PUCCINELLI J, GUTERRES B D V, et al. Planetary digital twin: a case study in aquaculture[C]//37th Annual Acm Symposium on Applied Computing, 2022: 191 - 197.
[22] 王芳. 基于数字孪生技术的草场放牧系统研究[D]. 天津:天津科技大学,2022.
WANG Fang. Research on pasture grazing system based on digital twin technology[D]. Tianjin:Tianjin University of Science and Technology,2022. (in Chinese)
[23] 陈斌. 基于数字孪生技术的猪舍环境监测系统研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
CHEN Bin. Research on pig house environment monitoring system based on digital twin technology[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2023. (in Chinese)
[24] VIKTOR E, LÁSZLÓ J. Digital twin and shadow in smart pork fetteners[J]. International Journal of Engineering and Management Sciences, 2019,4(1):515 - 520.
[25] 唐辉荣. 基于数字孪生的猪肉智慧生产多尺度协同智能分析平台架构与应用[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(4): 134 - 137.
TANG Huirong. Multi-scale collaborative intelligent analysis platform architecture and application of smart pork production based on digital twin[J]. Digital Technology & Application, 2023, 41(4): 134 - 137. (in Chinese)
[26] 祁钊, 李思奇, 李峰, 等. 规模化猪场智慧生物安全防控系统设计[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(23): 13 - 15.
QI Zhao, LI Siqi, LI Feng, et al. Design of intelligent biosecurity prevention and control system for large-scale pig farms[J]. Journal of Smart Agriculture, 2022, 2(23): 13 - 15. (in Chinese)
[27] 邓凡杰, 司乔瑞, 李方忠, 等. 山区和边远灾区应急供水系统提水装备发展现状[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(6): 614 - 623,48.
DENG Fanjie, SI Qiaorui, LI Fangzhong, et al. Review on water carrying equipment for emergency water supply system in mountain and remote disaster areas[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(6): 614 - 623, 48. (in Chinese)
[28] 熊祥盛, 许静, 陈平录. 基于数字孪生的农业耕作监控系统[J]. 农业技术与装备, 2022(3): 78 - 80.
XIONG Xiangsheng, XU Jing, CHEN Pinglu. Agricultural farming monitoring system based on digital twin[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(3): 78 - 80. (in Chinese)
[29] 张延安, 杜岳峰, 毛恩荣, 等. 基于数字孪生的大马力拖拉机湿式离合器压力控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(13): 268 - 279.
ZHANG Yan'an, DU Yuefeng, MAO Enrong, et al. Pressure control method of wet clutch in high-powered tractor based on digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(13): 268 - 279. (in Chinese)
[30] 张延安, 王东青, 杜岳峰, 等. 基于数字孪生的动力换挡拖拉机换挡策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 440 - 448.
ZHANG Yan'an, WANG Dongqing, DU Yuefeng, et al. Shift strategy for powershift tractors based on digital twins[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 440 - 448. (in Chinese)
[31] 郭大方, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 133 - 141.
GUO Dafang, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Digital twin system for agricultural machinery with cloud - fog - edge - terminal architecture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 133 - 141. (in Chinese)
[32] 马博文,刘孟楠,尹彦鑫,等.联合收获机轻量级数字孪生系统构建方法研究[J].农业机械学报,2024,55(5):108 - 120.
MA Bowen, LIU Mengnan, YIN Yanxin, et al. Construction method and application example of lightweight digital twin system of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 108 - 120. (in Chinese)
[33] DEFRAEYE T, TAGLIAVINI G, WU W, et al. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 149: 778 - 794.
[34] SHOJI K, SCHUDEL S, ONWUDE D, et al. Mapping the postharvest life of imported fruits from packhouse to retail stores using physics-based digital twins[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 176: 105914.
[35] 许继平,孔德政,王昭洋,等.基于工业互联网的大米供应链数字孪生系统构建[J].农业机械学报,2023,54(3):372 - 381.
XU Jiping, KONG Dezheng, WANG Zhaoyang, et al. Construction of digital twin system for rice supply chain based on industrial internet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):372 - 381. (in Chinese)
[36] PYLIANIDIS C, OSINGA S, ATHANASIADIS I N. Introducing digital twins to agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 105942.
[37] 张建华,姚琼,周国民,等.作物农艺性状与形态结构表型智能识别技术综述[J].智慧农业(中英文),2024,6(2):14 - 27.
ZHANG Jianhua, YAO Qiong, ZHOU Guomin, et al. Intelligent identification of crop agronomic traits and morphological structure phenotypes: a review[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(2): 14 - 27. (in Chinese)
[38] 阮俊虎,刘天军,冯晓春,等.数字农业运营管理:关键问题、理论方法与示范工程[J].管理世界,2020,36(8):222 - 233.
RUAN Junhu, LIU Tianjun, FENG Xiaochun, et al. Digital agriculture operation management: key issues, methodology and demonstration projects[J]. Management World, 2020, 36(8): 222 - 233. (in Chinese)
[39] 李道亮,李震.无人农场系统分析与发展展望[J].农业机械学报,2020,51(7):1 - 12.
LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farm[J]. Transactions of the Chinese Society

for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1 - 12. (in Chinese)
[40] 兰玉彬,赵德楠,张彦斐,等.生态无人农场模式探索及发展展望[J].农业工程学报,2021,37(9):312 - 327.
LAN Yubin, ZHAO Denan, ZHANG Yanfei, et al. Exploration and development prospect of ecological unmanned farm model [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 312 - 327. (in Chinese)
[41] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1 - 18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1 - 18. (in Chinese)
[42] 何勇, 李禧尧, 杨国峰, 等. 室内高通量种质资源表型平台研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 127 - 141.
HE Yong, LI Xiyao, YANG Guofeng, et al. Research progress and prospects of indoor high-throughput germplasm phenotyping platforms[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 127 - 141. (in Chinese)
[43] ZHU T, MA X, GUAN H, et al. A calculation method of phenotypic traits based on three-dimensional reconstruction of tomato canopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204:107515.
[44] GUO Xinyu, DENNIS B, WANG Jinglu, et al. Fast analysis of maize kernel plumpness characteristics through micro-CT technology[C]//International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture, Springer, Cham, 2017.
[45] 唐丽玉, 张浩, 黄洪宇, 等. 基于点云数据的树木三维重建方法改进[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 186 - 194.
TANG Liyu, ZHANG Hao, HUANG Hongyu, et al. Improved method for 3D reconstruction of tree model based on point cloud data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 186 - 194. (in Chinese)
[46] YANG Y, HE T, RAVINDRAN P, et al. All-organic transparent plant e-skin for noninvasive phenotyping[J]. Science Advances, 2024, 10(7): eadk7488.
[47] 曲怡铃,唐燕,周忠生,等.基于无人机可见光影像的毛竹相对叶绿素含量反演研究[J].江西农业大学学报,2022,44(1): 139 - 150.
QU Yiling,TANG Yan, ZHOU Zhongsheng,et al. Study on model simulation of relative chlorophyll content of moso bamboo based on UAV visible light image[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2022,44(1):139 - 150. (in Chinese)
[48] 张慧春,田啟飞,边黎明,等.基于多视角图像形态颜色纹理特征融合的生物量获取[J/OL].农业机械学报:1 - 16[2024 -06 - 27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20240618.1749.002.html.
ZHANG Huichun, TIAN Qifei, BIAN Liming, et al. Plants biomass acquisition based on morphological, color, and texture features of multi-view visible images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery: 1 - 16[2024 - 06 - 27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20240618.1749.002.html. (in Chinese)
[49] 刘小丹, 冯旭萍, 刘飞, 等. 基于近红外高光谱成像技术鉴别杂交稻品系[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 189 - 194.
LIU Xiaodan, FENG Xuping, LIU Fei, et al. Identification of hybrid rice strain based on near-infrared hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 189 - 194. (in Chinese)
[50] 徐衍向. 基于红外热成像和深度学习的作物早期病害检测研究[D].淄博:山东理工大学, 2023.
XU Yanxiang. Research on early crop disease detection based on infrared thermal thermography and deep learning[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2023. (in Chinese)
[51] 刘又夫, 周志艳, 田麓弘, 等. 红外热成像技术在农业中的应用[J]. 农业工程, 2019, 9(11): 102 - 110.
LIU Youfu, ZHOU Zhiyan, TIAN Luhong, et al. Application of infrared thermal imaging technology in agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(11): 102 - 110. (in Chinese)
[52] 杨锡震, 陈俊英, 张秋雨, 等. 基于小波特征和冬小麦生理参数的土壤水分高光谱模型优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 66 - 75.
YANG Xizhen, CHEN Junying, ZHANG Qiuyu, et al. Optimization of soil moisture hyperspectral model based on wavelet features and physiological parameters of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 66 - 75. (in Chinese)
[53] 马玲,马倩,王静,等.基于高光谱成像技术的番茄叶片含水量检测研究[J/OL].南京农业大学学报:1 - 14[2024 - 06 - 27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240221.1304.004.html.
MA Ling, MA Qian, WANG Jing, et al. Detection of water content in tomato leaves based on hyperspectral imaging technology [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024: 1 - 14. [2024 - 06 - 27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240221.1304.004.html. (in Chinese)
[54] ZHAO R, TANG W, AN L, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence extraction based on heterogeneous light distribution for improving in-situ chlorophyll content estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108405.
[55] GRISHINA A, SHERSTNEVA O, ZHAVORONKOVA A, et al. Comparison of the efficiency of hyperspectral and pulse amplitude modulation imaging methods in pre-symptomatic virus detection in tobacco plants[J]. Plants, 2023, 12(22):3831.
[56] 岑海燕, 姚洁妮, 翁海勇, 等. 叶绿素荧光技术在植物表型分析的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3773 - 3779.
CEN Haiyan, YAO Jieni, WENG Haiyong, et al. Applications of chlorophyll fluorescence in plant phenotyping: a review[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(12): 3773 - 3779. (in Chinese)
[57] NEETHIRAJAN S. Recent advances in wearable sensors for animal health management[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2017, 12(C): 15 - 29.
[58] ZHANG B, LIU Jingqin, ZHEN Wei, et al. A wearable system for olfactory electrophysiological recording and animal motion

control[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2018, 307:221 – 229.
[59] 张小栓, 张梦杰, 王磊, 等. 畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 1 – 14.
ZHANG Xiaoshuan, ZHANG Mengjie, WANG Lei, et al. Research status and development analysis of wearable information monitoring technology in animal husbandry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 1 – 14. (in Chinese)
[60] 崔佳亮. 基于红外热成像技术与卷积神经网络技术的羊只体温测量方法与研究[D]. 保定:河北农业大学, 2023.
CUI Jialiang. Method and research on sheep body temperature measurement based on the combination of infrared thermography and convolutional neural network technology[D]. Baoding:Hebei Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[61] 孟霞, BEHAN J, COOK N J,等. 红外热成像在猪生物监测中的应用[J]. 国外畜牧学(猪与禽), 2022, 42(5): 23 – 26.
MENG Xia, BEHAN J, COOK N J, et al. Application of infrared thermal imaging in pig biological monitoring[J]. Animal Science Abroad(Pigs and Poultry), 2022, 42(5): 23 – 26. (in Chinese)
[62] 赵一帆, 孙伟岩, 翟婉尧,等. 一种新型畜牧业红外热成像诊断仪设计[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2022, 38(11): 94 – 96.
ZHAO Yifan, SUN Weiyan, ZHAI Wanyao, et al. Design of a new type of infrared thermal imaging diagnostic instrument for animal husbandry[J]. Journal of Jilin Engineering Normal University, 2022, 38(11): 94 – 96. (in Chinese)
[63] OKINDA C, LU M, LIU L,et al. A machine vision system for early detection and prediction of sick birds: a broiler chicken model[J]. Biosystems Engineering, 2019, 188:229 – 242.
[64] NASIRAHMADI A, STURM B, OLSSON A C,et al. Automatic scoring of lateral and sternal lying posture in grouped pigs using image processing and support vector machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156:475 – 481.
[65] 郑国生, 施正香, 滕光辉. 基于不同行为时间的奶牛健康状况评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 238 – 244.
ZHENG Guosheng, SHI Zhengxiang, TENG Guanghui. Health assessment of cows based on different behavior time[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 238 – 244. (in Chinese)
[66] HUANG W Z, TIE M. Method for detecting avian influenza disease of chickens based on sound analysis[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180:16 – 24.
[67] 刘世晶, 李国栋, 刘晃,等. 中国水产养殖装备发展现状[J]. 水产学报, 2023, 47(11): 190 – 203.
LIU Shijing, LI Guodong, LIU Huang, et al. Current development status of aquaculture equipment in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(11): 190 – 203. (in Chinese)
[68] 胥婧雯. 面向鱼类行为分析的声音与视觉特征融合技术研究[D]. 大连:大连海洋大学,2023.
XU Jingwen. A study of the fusion technology of sound and visual features for fish behavior analysis[D]. Dalian:Dalian Ocean University,2023. (in Chinese)
[69] 陈科,周勇,薛明洋,等. 基于机器视觉和改进 YOLOv5s 的鲫病害轻量级无损检测模型[J]. 水生生物学报,2024, 48(7):1141 – 1148.
CHEN Ke, ZHOU Yong, XUE Mingyang, et al. Lightweight nondestructive detection model of crucian carp disease based on machine vision and improved YOLOv5s[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(7): 1141 – 1148. (in Chinese)
[70] 隋金柱. 基于机器视觉的珍珠龙胆石斑鱼摄食行为研究[D]. 天津:天津农学院,2023.
SUI Jinzhu. Research on feeding behavior of the pearl gentian grouper based on machine vision[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University,2023. (in Chinese)
[71] 陈香枝. 基于深度学习的鱼类异常行为检测方法[D]. 上海:上海海洋大学,2023.
CHEN Xiangzhi. The method of fish abnormal behavior detection based on deep learning[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023. (in Chinese)
[72] 齐江涛, 王凯晨, 包志远, 等. 基于 Wenner 和 Schlumberger 双组态融合的土壤电导率测量装置[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 90 – 99.
QI Jiangtao, WANG Kaichen, BAO Zhiyuan, et al. Measuring soil electrical conductivity using dual-array fusion of Wenner and Schlumberger[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 90 – 99. (in Chinese)
[73] 李露,葛玉卿,赵建龙. 基于二硫化钼的电容式土壤湿度传感器[J]. 智慧农业(中英文),2024,6(1):28 – 35.
LI Lu, GE Yuqing, ZHAO Jianlong. Capacitive soil moisture sensor based on MoS2[J]. Smart Agriculture, 2024,6(1):28 – 35. (in Chinese)
[74] 周海洋, 孙卿峰, 夏鹏凯, 等. 根区土壤氧气检测技术与方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2024,40(3):1 – 13.
ZHOU Haiyang, SUN Qingfeng, XIA Pengkai, et al. Advances in oxygen detection technologies and methods for the root zone soil[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(3):1 – 13. (in Chinese)
[75] 张霞, 孙友鑫, 尚坤, 等. 基于有机质特征谱段的土壤 Cd 含量高光谱遥感反演[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 186 – 195.
ZHANG Xia, SUN Youxin, SHANG Kun, et al. Soil Cd content retrieval from hyperspectral remote sensing data based on organic matter characteristic spectral bands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 186 – 195. (in Chinese)
[76] 鄂高阳, 韩芳, 秦秉希, 等. 遥感技术在农业资源与土壤环境综合监测上的应用[J]. 山东农业科学, 2024,56(3):

163 – 170.
E Gaoyang, HAN Fang, QIN Bingxi, et al. Application of remote sensing technology on integrated monitoring of agricultural resources and soil environment[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024,56(3):163 – 170. (in Chinese)
[77] 靳亚红, 吴鑫淼, 甄文超, 等. 基于采样点光谱信息窗口尺度优化的土壤含水率无人机多光谱遥感反演[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 316 – 327.
JIN Yahong, WU Xinmiao, ZHEN Wenchao, et al. UAV multispectral remote sensing inversion of soil moisture content based on window size optimization of spectral information at sampling points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 316 – 327. (in Chinese)
[78] 胡根生, 谢一帆, 鲍文霞, 等. 基于轻量型网络的无人机遥感图像中茶叶枯病检测方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 165 – 175.
HU Gensheng, XIE Yifan, BAO Wenxia, et al. Lightweight network for tea leaf blight detection in UAV remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 165 – 175. (in Chinese)
[79] 张楠楠, 张晓, 白铁成, 等. 基于 CBAM – YOLO v7 的自然环境下棉叶病虫害识别方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 239 – 244.
ZHANG Nannan, ZHANG Xiao, BAI Tiecheng, et al. Identification method of cotton leaf diseases and insect pests in natural environment based on CBAM – YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 239 – 244. (in Chinese)
[80] 王卫星, 刘泽乾, 高鹏, 等. 基于改进 YOLO v4 的荔枝病虫害检测模型[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 227 – 235.
WANG Weixing, LIU Zeqian, GAO Peng, et al. Detection of litchi diseases and insect pests based on improved YOLO v4 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 227 – 235. (in Chinese)
[81] 谢州益, 冯亚枝, 胡彦蓉, 等. 基于 ResNet18 特征编码器的水稻病虫害图像描述生成[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 197 – 206.
XIE Zhouyi, FENG Yazhi, HU Yanrong, et al. Generating image description of rice pests and diseases using a ResNet18 feature encoder[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(12): 197 – 206. (in Chinese)
[82] 薛悦平, 胡彦蓉, 刘洪久, 等. 基于多模态预训练模型的水稻病虫害图像描述生成研究[J/OL]. 南京农业大学学报: 1 – 11[2024 – 06 – 27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20231229.1612.004.html.
XUE Yueping, HU Yanrong, LIU Hongjiu, et al. Research on image description generation of rice diseases and pests based on multi-mode pre-training model[J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University: 1 – 11[2024 – 06 – 27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20231229.1612.004.html. (in Chinese)
[83] 慕君林, 马博, 王云飞, 等. 基于深度学习的农作物病虫害检测算法综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 301 – 313.
MU Junlin, MA Bo, WANG Yunfei, et al. Review of crop disease and pest detection algorithms based on deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 301 – 313. (in Chinese)
[84] 王宇航, 曹洪武. 计算机视觉技术在农业领域的应用[J]. 现代农业科技, 2024(4): 178 – 181.
WANG Yuhang, CAO Hongwu. Application of computer vision technology in the filed of agriculture[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(4): 178 – 181. (in Chinese)
[85] 尚业华, 王昊, 孟志军, 等. 基于激光雷达的稻麦收获边界检测与自动对齐系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 19 – 28,46.
SHANG Yehua, WANG Hao, MENG Zhijun, et al. Rice and wheat harvesting boundary detection and automatic alignment system based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 19 – 28,46. (in Chinese)
[86] 吕金庆, 崔鹏飞, 竹筱歆, 等. 大垄宽幅马铃薯中耕机纵横稳定性优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 88 – 96,154.
LÜ Jinqing, CUI Pengfei, ZHU Xiaoxin, et al. Optimal design and test of longitudinal and lateral stability of large monopole wide potato cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 88 – 96,154. (in Chinese)
[87] 张振国, 郭全峰, 蒋贵菊, 等. 玉米免耕播种自动调偏系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 40 – 52.
ZHANG Zhenguo, GUO Quanfeng, JIANG Guiju, et al. Design and test of automatic deviation adjustment system for no-tillage sowing of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 40 – 52. (in Chinese)
[88] 郑路, 张啸, 王建国, 等. 基于宏微结合的田间作业机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 13 – 26.
ZHENG Lu, ZHANG Xiao, WANG Jianguo, et al. Path planning of field robot based on macro-micro combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 13 – 26. (in Chinese)
[89] 杨丽丽, 王新鑫, 李元博, 等. 基于机器学习的小麦收获机掉头轨迹识别[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 27 – 34.
YANG Lili, WANG Xinxin, LI Yuanbo, et al. Identifying turning trajectories of wheat harvester based on machine learning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 27 – 34. (in Chinese)
[90] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1 – 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key

technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1 - 18. (in Chinese)

[91] 郑加强, 张慧春, 徐幼林, 等. 农药喷雾全过程性能分析及其测试技术研究进展[J]. 林业工程学报, 2022, 7(1): 1 - 10.
ZHENG Jiaqiang, ZHANG Huichun, XU Youlin, et al. Development and prospect on performance analysis and measurement techniques of pesticide spraying process[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(1): 1 - 10. (in Chinese)

[92] 蒙继华, 王亚楠, 林圳鑫, 等. 作物生长模型研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 1 - 15,27.
MENG Jihua, WANG Ya'nan, LIN Zhenxin, et al. Progress and perspective of crop growth models[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 1 - 15,27. (in Chinese)

[93] 黄健熙, 黄海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 144 - 156.
HUANG Jianxi, HUANG Hai, MA Hongyuan, et al. Review on data assimilation of remote sensing and crop growth models[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 144 - 156. (in Chinese)

[94] BOUMAN B A M, KEULEN H V, LAAR H H V, et al. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview[J]. Agricultural Systems, 1996, 52(2): 171 - 198.

[95] PORTER C H, JONES J W, ADIKU S, et al. Erratum to: modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT v4.5[J]. Operational Research, 2014, 10(3):247 - 278.

[96] ZHOU J, LI W F, XIAO W H, et al. Calibration and validation of apsim for maize grown in different seasons in southwest tropic of China[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2022, 82(4): 586 - 594.

[97] WANG Xiaobo, WANG Shaoqiang, CHEN Jinghua, et al. Modelling potential productivity of Chinese super hybrid rice in Bangladesh, India and Myanmar[J]. Acta Geographical Sinica, 2018, 28(7): 1020 - 1036.

[98] 李金辉, 张暖暖, 田星哲, 等. 肉羊生长模型构建及生长性能预测[J]. 动物营养学报, 2021, 33(11): 6462 - 6473.
LI Jinhui, ZHANG Nuannuan, TIAN Xingzhe, et al. Construction of growth model of mutton sheep and prediction of growth performance[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(11): 6462 - 6473. (in Chinese)

[99] 万雨. 江南白鹅早期生长发育规律的分析研究[D]. 扬州:扬州大学,2021.
WAN Yu. Study of early growth and development patterns of Jiangnan White Geese[D]. Yangzhou: Yangzhou University 2021. (in Chinese)

[100] 陈蓉. 云上黑山羊早期生长曲线拟合及 CNTD1 基因表达研究[D]. 昆明:云南农业大学, 2023.
CHEN Rong. Studies on early growth curve fitting and CNTD1 gene expression of Yunshang black goat[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[101] NARINÇ D, NARINÇ N Ö, AYGÜN A. Growth curve analyses in poultry science[J]. World's Poultry Science Journal, 2017, 73(2): 395 - 408.

[102] PHILIP J R. Plant water relations: some physical aspects[J]. Annual Review of Plant Biology, 1966, 17: 245 - 268.

[103] 张芳. 基于 IoT 的植物生长环境适宜度模型的建立与研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2020.
ZHANG Fang. The establishment and study of the suitability model of plant growth environment based on IoT[D]. Hangzhou:Zhejiang A&F University,2020. (in Chinese)

[104] 原桂霞, 张涛, 温江丽. 不同时间尺度下温室西瓜蒸腾与环境因子关系[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(10): 1051 - 1057.
YUAN Guixia, ZHANG Tao, WEN Jiangli. Relationship between transpiration of greenhouse watermelon and environmental factors at different time scales[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(10): 1051 - 1057. (in Chinese)

[105] 星玲. 日光温室环境参数的变频采集及预测模型研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.
XING Ling. Study on variable frequency acquisition and prediction model of environmental parameters in solar greenhouse[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2022. (in Chinese)

[106] LEE S Y, LEE I B, KIM R W, et al. Dynamic energy modelling for analysis of the thermal and hygroscopic environment in a mechanically ventilated duck house[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 431 - 449.

[107] MOURA R S T D, HENRY-SILVA G G. Food web and ecological models used to assess aquatic ecosystems submitted to aquaculture activities[J]. Ciência Rural, 2019, 49(2):e20180050.

[108] 蒋建辉, 闫浩芳, 张川, 等. 基于冠气温差的温室黄瓜蒸散量模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(5): 532 - 540.
JIANG Jianhui, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Simulation of greenhouse cucumber evapotranspiration based on canopy-air temperature difference[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(5): 532 - 540. (in Chinese)

[109] 王坤. 基于深度注意力网络的环境场预测与重建方法研究[D]. 济南:山东大学, 2023.
WANG Kun. Research on forecasting and reconstruction of environmental field using deep attention neural networks[D]. Ji'nan: Shandong University,2023. (in Chinese)

[110] LIU X, JIANG D, TAO B, et al. A systematic review of digital twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55: 101876.

[111] 王进峰, 闫丛川, 花广如, 等. 基于 Unity3D 的数控机床数字孪生系统设计与实现[J]. 中国工程机械学报, 2023,

21(5)：443－448.
WANG Jinfeng, WEN Congchuan, HUA Guangru, et al. Design and implementation of a digital twin system for CNC machine tools based on Unity3D[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(5): 443－448. (in Chinese)
[112] 熊邦国. 基于数字孪生的机械臂故障诊断系统研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2023.
XIONG Banguo. Research and implementation of fault diagnosis system for robotic arm based on digital twin[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2023. (in Chinese)
[113] SLOB N, HURST W, VAN DE ZEDDE R, et al. Virtual reality-based digital twins for greenhouses: a focus on human interaction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208: 107815.
[114] 贾敬敦, 鲁相洁, 黄峰, 等. 远程控制与无线通信技术在农业中的应用分析与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 351－359.
JIA Jingdun, LU Xiangjie, HUANG Feng, et al. Review of remote control technology and wireless communication technology in agricultural applications[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 351－359. (in Chinese)
[115] 蒋玲. 基于边缘计算的小麦病害检测方法研究与实现[D]. 扬州:扬州大学,2023.
JIANG Ling. Research and implementation of wheat disease detection method based on edge computing[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)
[116] 黄明奇. 基于边缘计算的滴灌施肥智能控制方法研究[D]. 石河子:石河子大学,2023.
HUANG Mingqi. Research on intelligent control method of drip irrigation and fertilization based on edge computing[D]. Shihezi:Shihezi University,2023. (in Chinese)
[117] 孙传恒, 袁晟, 罗娜, 等. 基于区块链和边缘计算的水稻原产地溯源方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 359－368.
SUN Chuanheng, YUAN Sheng, LUO Na, et al. Traceability method of rice origin based on blockchain and edge computing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 359－368. (in Chinese)
[118] 张建钦. 基于数字孪生的运动冗余九自由度混合并联机构虚实交互技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2023.
ZHANG Jianqin. Research on virtual-real interaction technology of kinematically redundancy parallel 9-DOF hybrid mechanism based on digital twin[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2023. (in Chinese)
[119] 杨泞宁,王志坚. 数字孪生驱动的滚动轴承虚实交互研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(2):160－163,168.
YANG Ningning, WANG Zhijian. Research on virtual-real interaction of digital twin driven rolling bearings[J]. Modular Machine Tools & Automatic Manufacturing Technique, 2023(2): 160－163,168. (in Chinese)
[120] 侯琛,牛培宇. 农业知识图谱技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2024,55(6):1－17.
HOU Chen, NIU Peiyu. Review of research status and prospects of agricultural knowledge graphs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):1－17. (in Chinese)
[121] 赵春江. 农业知识智能服务技术综述[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(2): 126－148.
ZHAO Chunjiang. Agricultural knowledge intelligent service technology: a review[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(2): 126－148. (in Chinese)
[122] 徐春晓. 基于随机森林和 Markov 算法的云南省撂荒耕地提取和预测方法研究[D]. 昆明:云南师范大学,2023.
XU Chunxiao. Extraction and prediction methods of abandoned farmland in Yunnan Province based on random forest and Markov algorithm[D]. Kunming:Yunnan Normal University, 2023. (in Chinese)
[123] 张文聪. 基于随机森林的农作物遥感分类与温室信息提取[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
ZHANG Wencong. Remote sensing classification of crops and greenhouse information extraction based on random forest[D]. Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2023. (in Chinese)
[124] 张延安, 杜岳峰, 孟青峰,等. 基于改进遗传算法的湿式离合器压力自适应控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(3): 852－864.
ZHANG Yan'an, DU Yuefeng, MENG Qingfeng, et al. Adaptive control of wet clutch pressure based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(3): 852－864. (in Chinese)
[125] 彭小莉, 周苏红, 尹峥,等. 基于遗传算法的农田智能灌溉控制系统设计[J]. 水利技术监督, 2024(3): 38－40,55.
PENG Xiaoli, ZHOU Suhong, YIN Zheng, et al. Design of intelligent irrigation control system for farmland based on genetic algorithm[J]. Techenical Supervision in Water Resources, 2024(3): 38－40,55. (in Chinese)
[126] 温维亮, 郭新宇, 张颖,等. 作物表型组大数据技术及装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 227－238.
WEN Weiliang, GUO Xinyu, ZHANG Ying, et al. Technology and equipment of big data on crop phenomics[J]. Engineering Science, 2023, 25(4): 227－238. (in Chinese)
[127] 张建华, 姚琼, 周国民, 等. 作物农艺性状与形态结构表型智能识别技术综述[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(2): 14－27.
ZHANG Jianhua, YAO Qiong, ZHOU Guomin, et al. Intelligent identification of crop agronomic traits and morphological structure phenotypes: a review[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(2): 14－27. (in Chinese)
[128] 赵春江. 植物表型组学大数据及其研究进展[J]. 农业大数据学报, 2019, 1(2):6－18.
ZHAO Chunjiang. Big data of plant phenomics and its research progress[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(2):

6 – 18. (in Chinese)

[129] RUI Z, ZHANG Z, ZHANG M, et al. High-throughput proximal ground crop phenotyping systems—a comprehensive review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109108.

[130] MANSOOR S, FAROOQ I, HAMADANI A, et al. Integrating artificial intelligence and high-throughput phenotyping for crop improvement[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(6): 1787 – 1802.

[131] WANG P, LUO M. A digital twin-based big data virtual and real fusion learning reference framework supported by industrial internet towards smart manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58(A): 16 – 32.

[132] 张旭辉,白琳娜,杨红强. 基于虚实融合数据的悬臂式掘进机截割部故障预警技术研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 9 – 19.
ZHANG Xuhui, BAI Linna, YANG Hongqiang. Research on fault warning technology for cutting part of cantilever roadheader based on virtual and real fusion data[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(8): 9 – 19. (in Chinese)

[133] ZHU B, ZHANG Y, SUN Y, et al. Quantitative estimation of organ-scale phenotypic parameters of field crops through 3D modeling using extremely low altitude UAV images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107910.

[134] BADJI A, BENSEDDIK A, BENSAHA H, et al. Design, technology, and management of greenhouse: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 378: 133753.

[135] ROSILLON D J, JAGO A, HUART J P, et al. Near real-time spatial interpolation of hourly air temperature and humidity for agricultural decision support systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223: 109093.

[136] DREES L, DEMIE D T, PAUL M R, et al. Data-driven crop growth simulation on time-varying generated images using multi-conditional generative adversarial networks[J]. Plant Methods, 2024, 20: 93.

[137] ZHANG Chenglong, XUE Min, LI Gang, et al. A simulation-based multi-objective two-level optimization decision-making approach for supporting balanced irrigation water management[J]. Agricultural Water Management, 2024, 284: 108344.

[138] CHIN S W, RUBAMBIZA G, ZHAO Yifan, et al. Realtime optimization and management system (ROAM): a decision support system for digital agriculture systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 8: 100452.

[139] XIE N F, ZHANG X F, SUN W, et al. Research on big data technology-based agricultural information system[C]// Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA 2015). ACSR-Advances in Computer Science Research, 2015: 388 – 390.

[140] ZHAO J C, GUO J X. Big data analysis technology application in agricultural intelligence decision system[C]// Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA), Chengdu, 2018: 209 – 212.

[141] KAYATZ B, BARONI G, HILLIER J, et al. Supporting decision-making in agricultural water management under data scarcity using global datasets-chances, limits and potential improvements[J]. Agricultural Water Management, 2024, 296: 108803.

[142] TOMMASO A, LUCIO C, GIOVANNI D, et al. Crop planting layout optimization in sustainable agriculture: a constraint programming approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109162.

[143] FELIPE G, LUCAS A F, RODRIGO C, AgrOptim: a novel multi-objective simulation optimization framework for extensive cropping systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109119.

[144] 柳林燕,杜宏祥,汪惠芬,等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536 – 1545.
LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Huifen, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536 – 1545. (in Chinese)

[145] 魏一雄,郭磊,陈亮希,等. 基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 352 – 363.
WEI Yixiong, GUO Lei, CHEN Liangxi, et al. Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data-driven[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 352 – 363. (in Chinese)

[146] 王纪章, 刘哲, 高志恒, 等. 基于数字孪生的拖拉机混流装配智能排产仿真评价[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 385 – 393.
WANG Jizhang, LIU Zhe, GAO Zhiheng, et al. Intelligent scheduling simulation evaluation of tractor mixed-model assembly based on digital twin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 385 – 393. (in Chinese)

[147] 李福兴,李璐燨,彭友. 基于数字孪生的船舶预测性维护[J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊): 117 – 120, 396.
LI Fuxing, LI Luxi, PENG You. Ship predictive maintenance based on digital twins[J]. Ship Engineering, 2020, 42(Supp.): 117 – 120, 396. (in Chinese)

[148] 张旭辉,鞠佳杉,杨文娟,等. 基于数字孪生的复杂矿用设备预测性维护系统[J]. 工程设计学报, 2022, 29(5): 643 – 650, 664.
ZHANG Xuhui, JU Jiashan, YANG Wenjuan, et al. Predictive maintenance system for complex mining equipment based on digital twin[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(5): 643 – 650, 664. (in Chinese)

[149] 叶伦宽. 基于数字孪生的旋转设备故障诊断技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
YE Lunkuan. Research on fault diagnosis technology of rotating equipment based on digital twin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019. (in Chinese)