



中国人工智能系列白皮书

——智能农业

中国人工智能学会

二〇一六年九月

《中国人工智能系列白皮书》编委会

主任：李德毅

执行主任：王国胤

副主任：杨放春 谭铁牛 黄河燕 焦李成 马少平 刘宏
蒋昌俊 任福继 杨强 胡郁

委员：陈杰 董振江 杜军平 桂卫华 韩力群 何清
黄心汉 贾英民 李斌 刘民 刘成林 刘增良
鲁华祥 马华东 马世龙 苗夺谦 朴松昊 乔俊飞
任友群 孙富春 孙长银 王轩 王飞跃 王捍贫
王万森 王卫宁 王小捷 王亚杰 王志良 吴朝晖
吴晓蓓 夏桂华 严新平 杨春燕 余凯 余有成
张学工 赵春江 周志华 祝烈煌 庄越挺

本书编写组

本书编写组(按拼音字母排序)

陈梅香	陈子文	段青玲	冯青春	高荣华
顾静秋	何东健	黄文倩	吉增涛	姜凯
李道亮	李瑾	李江波	李淼	李明
李南	李伟	刘蕾蕾	卢彩云	罗清尧
孟志军	缪祎晟	孙传恒	孙明	孙想
汤亮	王秀	温江丽	吴华瑞	熊本海
许童羽	杨亮	张瑞瑞	张馨	赵春江
周艳兵	朱华吉	朱艳	邹伟	

目 录

第 1 章 智能农业发展背景	1
1.1 人工智能在农业领域中的应用历程	1
1.2 智能农业及其发展趋势	8
第 2 章 农业智能分析	12
2.1 农业数据挖掘	12
2.1.1 农业数据挖掘特点	12
2.1.2 农业网络数据挖掘	13
2.1.3 农业数据挖掘应用	16
2.2 农业数据语义分析	18
2.2.1 农业数据语义模型	18
2.2.2 农业数据存储模型	19
2.2.3 农业数据知识发现	20
2.2.4 农业数据语义检索	21
2.2.5 分布式农业知识协同构建	21
2.3 农业病虫害图像识别	22
2.3.1 基于机器视觉的农业病虫害自动监测识别系统框架	23
2.3.2 农业病虫害图像采集方法	24
2.3.3 农业病虫害图像预处理	26
2.3.4 农业病虫害特征提取与识别模型构建	27
2.3.5 农业病虫害模式识别	28
2.4 动物行为分析	29
2.5 农产品无损检测	34
2.5.1 农产品的无损检测	35
2.5.2 农产品无损检测主要方法与基本原理	36
2.5.3 无损检测在农产品质量检测中的应用	38

2.5.4 问题与展望.....	38
第3章 典型农业专家系统与决策支持	40
3.1 作物生产决策系统.....	40
3.1.1 作物生产决策支持系统的概念与功能	40
3.1.2 作物决策支持系统的发展	41
3.1.3 我国作物决策支持系统发展状况	41
3.1.4 作物生产决策支持系统的发展趋势.....	42
3.1.5 作物生产决策支持系统的存在问题.....	43
3.1.6 作物生产决策支持系统的发展措施建议 错误!未定义书签。	
3.2 作物病害诊断专家系统.....	45
3.2.1 病害诊断知识表达.....	45
3.2.2 作物病害描述模糊处理.....	47
3.2.3 病害诊断知识推理.....	47
3.2.4 基于图像识别的作物病害诊断.....	48
3.3 水产养殖管理专家系统.....	49
3.3.1 问题与挑战.....	49
3.3.2 主要进展.....	51
3.3.3 发展趋势..... 错误!未定义书签。	
3.4 动物健康养殖管理专家系统.....	54
3.4.1 妊娠母猪电子饲喂站.....	54
3.4.2 哺乳母猪精准饲喂系统.....	56
3.4.3 个体奶牛精准饲喂系统.....	57
3.4.4 畜禽养殖环境监测系统.....	58
3.5 多民族语言农业生产管理专家系统.....	59
3.5.1 多民族语言智能农业即时翻译系统结构.....	59
3.5.2 多民族语言农业智能信息处理系统机器翻译流程..	60
3.5.3 多民族语言农业信息平台中的翻译关键技术.....	62

3.5.4 多民族语言农业智能信息处理系统机器翻译结果..	63
3.6 农业空间信息决策支持系统.....	66
第4章 典型农业机器人	71
4.1 茄果类嫁接机器人.....	74
4.1.1 研究背景意义.....	74
4.1.2 国内外研究现状.....	74
4.1.3 关键技术与研究热点.....	76
4.1.4 案例分析.....	77
4.1.5 存在问题与发展策略.....	78
4.2 果蔬采摘机器人.....	79
4.2.1 研究背景意义.....	79
4.2.2 国内外研究现状.....	79
4.2.3 关键技术与研究热点.....	80
4.2.4 案例分析.....	81
4.2.5 存在问题与发展策略.....	82
4.3 大田除草机器人.....	83
4.3.1 研究背景意义.....	83
4.3.2 国内外研究现状.....	84
4.3.3 关键技术与研究热点.....	84
4.3.5 存在问题与发展策略.....	86
4.4 农产品分拣机器人.....	87
4.4.1 农产品分拣机器人发展现状.....	88
4.4.2 农产品分拣机器人的应用特点和支撑技术.....	90
4.4.3 主要问题和建议.....	92
第5章 农业精准作业技术	94
5.1 拖拉机自动驾驶.....	94
5.2 农机作业智能测控.....	97

5.3 果树对靶施药.....	101
5.3.1 我国果园施药作业现状.....	101
5.3.2 基于靶标探测的智能施药.....	102
5.3.3 靶标探测技术.....	102
5.3.4 对靶施药的经济性与环保性.....	106
5.4 设施蔬菜水肥一体化.....	106
5.4.1 水肥一体化在设施蔬菜中的应用.....	107
5.4.2 智能灌溉施肥设备.....	108
5.4.3 设施蔬菜水肥一体化发展趋势.....	110
5.5 设施环境智能调控.....	112
5.5.1 温室环境与作物信息采集.....	112
5.5.2 温室作物生长发育模型和小气候预测模型.....	115
5.5.3 温室智能环境控制理论.....	116
5.5.4 测控装备及平台构建方面.....	117
5.6 农用无人机自主作业.....	117
5.6.1 农用无人机自主作业需求背景.....	117
5.6.2 农业无人机自主作业技术特点.....	118
5.6.3 农业无人机自主作业发展现状.....	119
5.6.4 抓住机遇迎接挑战人工智能技术的挑战.....	122
第6章 智能农业展望.....	123
6.1 当前农业发展需求分析.....	123
6.2 发展重点与建议.....	123

第 1 章 智能农业发展背景

中国农业经历了原始农业、传统农业、现代农业、智能农业的逐渐过渡。智能农业充分应用现代信息技术成果，集成应用计算机与网络技术、物联网技术、音视频技术、3S 技术、无线通信技术及专家智慧与知识，实现农业可视化远程诊断、远程控制、灾害预警等职能管理。本章从人工智能在农业领域的应用历程与智能农业发展趋势两方面阐述了智能农业作为一种高新技术与农业生产相结合的产业，是农业可持续发展的重要途径，通过高科技投入和管理，获取资源的最大节约和农业产出的最佳效益，实现农业的科学化、标准化、量化、高效化。

1.1 人工智能在农业领域中的应用历程

人工智能（Artificial Intelligence, AI）是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能理论、方法、技术及应用系统的一门学科。人工智能是计算机科学的一个分支，它试图了解智能的实质，并生产出一种新的能以人类智能相似的方式做出反应的智能机器，该领域研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。人工智能从诞生以来，理论和技术日益成熟，应用领域也不断扩大，农业是其重要的应用领域之一。

现代农业的发展已离不开以人工智能为代表的信息技术的支持，人工智能技术贯穿于农业生产产前、产中、产后，以其独特的技术优势提升农业生产技术水平，实现智能化的动态管理，减轻农业劳动强度，展示出巨大的应用潜力^[1]。将人工智能技术应用于农业生产中，已经取得了良好的应用成效。比如农业专家系统^[2]，农民可利用它及时查询在生产中所遇到的问题；农业机器人^[3]，可代替农民从事繁重的农业劳动，在恶劣的环境中持续劳动，大大提高农业生产效率，节省劳动力；计算机视觉识别技术能用于检验农产品的外观品质，检验效率高，可替代传统人工视觉检验法，从而提高农业劳动效率^[4-6]。

人工智能在农业领域中的应用历程可以分为以下几个阶段：

第一阶段：萌芽期（20 世纪 70 年代末至 80 年代末）

20 世纪 70 年代末，美国为代表的欧美国家率先开始了农业信息化的应用研究，以专家系统为代表的人工智能应用开始在农业领域萌芽。专家系统之父 Edward A. Feigenbaum 提出：农业专家系统 AES（Agriculture Expert System）也称为以知识库为基础的系统（Knowledge Based System, KBS），是一个（或一组）智能计算机程序，运用人工智能并集成了地理信息系统、信息网络、智能计算、机器学习、知识发现、优化模拟等多方面高新技术，汇集农业领域知识、模型和专家经验等，采用适宜的知识表示技术和推理策略，运用多媒体技术并能以信息网络为载体，向农业生产管理提供咨询服务，指导科学种田，在一定程度上代替农业专家，对于提高作物产量，改善品质，提高农业管理的智能化决策水平具有重要意义。这一阶段的发展研究，以欧、美及日本等发达国家为主，开发系统主要是面向农作物的病虫害诊断。最早是美国伊利诺斯大学的植物病理学家和计算机学家于 1978 年共同开发的大豆病害诊断专家系统 LPANT/ds。20 世纪 80 年代中期至 80 年代末，农业专家系统从单一的病虫害诊断转向生产管理、经济分析决策、生态环境、农产品市场销售管理等。如 COMAX/GOSSYM 是美国最为成功的一个农业专家系统，用于向棉花种植者推荐棉田管理措施。日本对人工智能在农业上的作用给予了高度重视，如东京大学西红柿栽培管理专家咨询系统、培养液管理专家系统、温室黄瓜栽培管理专家系统等。

这一阶段开始，农业机器人和计算机视觉技术等人工智能技术也开始应用于农业领域，并取得了一定的成果。在农作物种子质量检测取得较大进展。1985 年，Zayas 等通过采集的种子图像，利用种子表面光的特性，基于统计图像的处理分析与识别技术来区分小麦品种。1986 年，Gunasekaran 等在对玉米籽粒裂纹的研究中发现，运用计算

机视觉检测技术中的高速滤波法可将裂纹与其他部位进行识别区分，其检测精度高达 90%。在农产品分级与加工方向，早在 1984 年，Thylor 等运用模拟摄像机和线扫描进行苹果自动损伤判定试验，证明了将计算机视觉技术应用于自动分级的可行性。在随后几年中，Thylor 等不断开展此方面的相应研究，但其分级效率仍较低。1985 年，Sarkar 等首次将数字图像分析与模式识别技术运用于西红柿的品质分级，并取得了较好的精确度，但其速度较慢。1989 年，Miller 等在桃的分级研究中，运用图像亮度校正和区域分割的方法，采用近红外方式对没有明显边缘损伤的图像进行识别，其自动分级效果达到了当时美国农业部的相关标准，并得到推广应用。20 世纪 80 年代，我国农业专家系统开始起步，虽起步较晚，但发展很快，涉及作物栽培、品种选择、育种、病虫害防治、生产管理、节水灌溉、农产品评价等方面。在 20 世纪 80 年代初，浙江大学进行过蚕育种专家系统的研究，1985 年由中国科学院人工智能所开发的“砂姜黑土小麦施肥专家咨询系统”在安徽省淮北平原得到很好的推广应用。其后，各地高校、研究所和农科院相继开发了许多农业专家系统。

第二阶段：快速发展期（20 世纪 90 年代）

20 世纪 90 年代，伴随着人工智能技术的蓬勃发展，人工智能在农业中的应用也进入快速发展期。在专家系统领域，陆续出现了美国哥伦比亚大学梯田专家系统，日本的温室控制专家系统，英国 ESPRIT 支持下的水果保鲜系统，德国的草地管理专家系统，埃及农垦部支持的黄瓜栽培与柑橘栽培生产管理专家系统，希腊的六种温室作物病虫害和缺素诊断的多语种专家系统等。为加快农业专家系统开发效率，一些辅助农业专家系统开发平台应运而生，如 CALEX SELECT、PALMS、MICCSFARMSCAPE、PCYield、GLA & NUTBAL、WHEATMAN 等，大大缩短了专家系统开发的周期，成为农业专家系统研究的重要方向。

这一阶段计算机视觉技术在农业中取得了较大进展，如在农产品分级方向，1992年，Liao等在玉米籽粒的分类中引入了神经网络方法来提高其分类的准确率。1994年，Liao等对玉米粒的颜色及表面缺陷进行实时分级研究，其分级速度仍较慢。1997年，Ni等通过图像处理技术获取三维信息的方法对玉米籽粒进行分级，但该系统的检测精度及用时离实际应用仍有较大距离。1998年，Choi等将彩色图像处理技术运用于番茄品质的分级，其分级效率高于人工检测。1999年，Chtioui等以粗糙集理论作为模式分类工具，通过计算机视觉技术检测评价蚕豆品质，其分类结果具有较好的一致度。在农产品的加工应用中，Ling等于1991年开始研究鲜虾图像的形态学特征和频谱特征，发现根据频谱特征确定下刀位置较为有效，为鲜虾去头加工的自动化提供了可靠依据。1995年，Moconnell等利用计算机视觉技术对颜色的识别来控制烘烤食品的质量，并取得了较好效果。Seida等对机器视觉技术运用于饮料容器质量检测的可行性进行了研究。Jia等提出将图像处理算法应用于鳍类鱼的加工。1998年，Tao等运用计算机视觉技术进行鸡肉中骨头碎片及污染物的无损快速检测，并研制出相关设备。在植物生长监测方向，1995年，Shinizu等利用机器视觉和近红外光连续采集植株图像，成功分析得出其白昼的生长率。1996年，Casady等利用数字图像处理技术获得了水稻植株的高度等形态特征信息，使利用计算机视觉获得植株高度成为可能。在农作物病虫害检测方向，1995年，Woebbecke等研究发现叶片的形态学特征可用于识别双子叶与单子叶植物，准确率在60%~80%；此外还研究发现，彩色图像的R-G-B特征能很好地区分非植物与植物的背景，从而将其运用于田间杂草的探测控制。Zhang等提出同时使用形状和颜色分析识别小麦田间杂草的方法。1997年，Giles等研制出一种装有机器视觉导向系统的喷雾装置，能对成行作物实施精量喷雾，该系统不仅节约农药，提高施药效率，还可大大减少对环境的污染。基于

机器视觉的杂草识别技术在国外已经进入实用阶段。1999年，Lee等研制出由计算机视觉系统、精准喷施系统等构成的智能杂草控制系统，该系统可根据植物形状特征的差异识别作物和杂草，并确定杂草的位置以进行精准喷施。Burks等利用彩色共生矩阵法和神经网络技术对土壤和5种杂草进行识别研究，分类准确率达93%。在机器人领域，融合了计算机视觉技术，果蔬采摘机器人成为人工智能的新兴领域。1991年，日本Kubota公司成功研制出用于橘子采摘机器人的机械手。1995年，周云山等将计算机视觉技术应用于蘑菇识别，使蘑菇生产从苗床管理到收获分类的全过程基本实现自动化，但离实际推广应用仍有一定距离。1996年，近藤等研制出采用双目视觉方法定位果实的番茄采摘机器人，能准确识别果实与树叶，而当可采摘番茄被茎叶遮挡时，机械手难以避开茎叶等障碍物完成采摘。1997年，德田胜等研制出一套运用机器视觉技术检测西瓜成熟度的机器视觉系统，用于控制采摘机器人适时自动采摘西瓜。中国农业大学为国内农业机器人技术早期研发单位之一，研制出的自动嫁接机器人已成功进行了试验性嫁接生产，解决了蔬菜幼苗的柔嫩性、易损性和生长不一致性等难题，可用于黄瓜、西瓜、甜瓜等幼苗的嫁接，形成了具有自主知识产权的自动化嫁接技术。

我国1996-2005年期间，在国家863计划的持续支持下，系统开展了以农业专家系统为核心的智能化农业信息技术应用示范工程，该项目以智能信息技术直接服务“三农”为目标，按照智能系统开发平台、共性关键技术、应用示范区和研发基地建设四个层次进行组织实施。全国共研发出5个农业智能系统开发平台，70多个应用框架，200多个本地化农业专家系统，涉及粮食、果树、蔬菜、畜牧、水产等不同农业领域，建立了23个省级应用示范区，取得了重大的社会效益，形成了我国特有的“电脑农业”，全面推动了我国农业智能信息技术的应用发展。2003年12月，“中国863电脑农业

（Agricultural Expert System in China）”在日内瓦举办的世界信息首脑峰会上获峰会大奖（World Summit Award），标志着我国利用智能化农业信息技术改造传统农业做出的巨大贡献得到了世界的承认。

第三阶段：规模应用期（2000 至今）

进入 21 世纪，农业劳动力不断向其他产业转移，农业劳动力结构性短缺和日趋老龄化渐已成为全球性问题，通过人工智能技术，提高生产力，成为农业领域的研究与应用热点，人工智能在许多农业领域出现了规模应用。

设施农业、精确农业和高新技术的快速发展，特别是人工作业成本的不断攀升，为农业机器人的进一步发展提供了新的动力和可能。如果蔬采摘不仅季节性强、劳动量大，而且作业费用高，人工收获的费用通常占全程生产费用的 50% 左右，因此采摘机器人在日本、美国、荷兰等国家已有初步使用。例如，2000 年，荷兰农业环境工程研究所研制出移动式黄瓜采摘机器人样机，在实验室和温室中的采摘试验效果良好。VanHenten 等对温室黄瓜收获机器人机械手的运动结构进行优化设计，并提供了一种评价和优化该运动机构的客观方法、优化结果发现，4 臂 4 自由度 PPRR 机器人最适合于温室黄瓜的收获。计算机视觉的应用进一步成熟。到 2011 年，Zapotoczny 采用神经网络的方法对春、冬季不同质量等级的 11 个小麦品种进行试验，使用图像处理分析技术进行分类鉴别的准确率高达 100%。近十几年来，我国科研人员对计算机视觉技术在农作物种子质量检测的应用方面作了大量研究。2004 年，周红等运用计算机视觉技术提取玉米种子的外形轮廓，为玉米种子的进一步分级识别提供依据。2008 年，万鹏等提出利用计算机视觉系统代替人眼识别整粒及碎大米粒形的方法，并设计了一套基于计算机视觉技术的大米粒形识别装置，该装置对完整米粒、碎米的识别准确率分别为 98.67%、92.09%。在农产品分级方面，计算机视觉水果分级自动化系统得到了广泛应用，国外已将部

分成果应用于实际生产中。2002 年，Yun 等成功研制出一种谷粒快速分级系统，每分钟检测 200 颗谷粒，其分级准确率达 98.9%。2011 年，Mathanker 等发现使用机器学习分类器 AdaBoost 和支持向量机 (Support Vector Machine,SVM) 的方法可提高核桃分级检测的精度。我国将计算机视觉技术应用于水果等的检测分级相对较晚，但由于借鉴了其他国家的研究成果，发展速度比较快。研究大田作物病虫害的自动识别与测定技术，建成自动化控制系统以防治田间杂草与病虫害，也是计算机视觉技术在作物生产中较为重要的应用研究领域。农业航空是现代农业人工智能应用的重要组成部分，农业无人机在美国、日本等发达国家早已使用，应用在农田植被数据监测、农田土壤分析及规划、农田喷洒方面的研究等多个方面。我国自 2008 年无锡汉和第一架植保无人机面试以来，无人机行业如雨后春笋般的发展。主要应用在土壤湿度监测、农田喷洒、植被覆盖度的监测等方向^[7]。

在这一时期，特别是 2009 年“感知中国”的目标提出后，作为人工智能集成应用的农业物联网和无人机开始迅速发展。物联网、移动互联、大数据、云计算、空间信息技术、智能装备技术开始进行深入融合，人工智能成为核心技术承担优化、决策的任务。2010 年国家发改委启动了物联网产业化规划，规划未来我国十年到二十年的物联网发展重大专项，其中将精细农牧业列为规划专项的一个很重要的内容。随后国家发改委、农业部、财政部决定在黑龙江农垦开展大田种植物联网应用示范、北京市开展设施农业物联网应用示范、江苏省无锡市开展养殖业物联网应用示范，并将这 3 个项目作为国家物联网应用示范工程智能农业项目，农业部在天津、上海、安徽三省市组织实施了农业物联网的区域试验工程，这些国家和部委项目的实施引领与促进了人工智能技术在农业领域中的规模化应用发展，提高了我国农业现代化水平。

人工智能技术在我国农业领域广泛应用，把农业带入数字化、信息化和智能化的崭新时代。但人工智能在农业领域应用研究任重道远，离我们追求的目标还有很大距离，核心技术有待重大突破，应用成本需要大幅度降低。以人工智能技术为核心的现代信息技术及智能装备技术在农业领域的应用，逐渐形成了现代农业发展的新业态—智能农业，这是农业未来的一场深刻变革。

1.2 智能农业发展趋势

智能农业按照工业发展理念，充分应用现代信息技术成果，以信息和知识为生产要素，通过互联网、物联网、云计算、大数据、智能装备等现代信息技术与农业深度跨界融合，实现农业生产全过程的信息感知、定量决策、智能控制、精准投入和工厂化生产的全新农业生产方式与农业可视化远程诊断、远程控制、灾害预警等职能管理，是农业信息化发展从数字化到网络化再到智能化的高级阶段，是继传统农业（1.0）、机械化农业（2.0）、生物农业（3.0）之后，中国农业 4.0 的核心内容^[8]。

1.2.1 智能农业在中国的研究进展

智能化农业信息技术研究始于 80 年代初，包括施肥专家咨询系统、栽培管理专家系统等。其中，施肥专家咨询系统是根据实测的土壤理化参数或土壤肥力、地力参数以及地理分布，评估肥力水平，利用施肥量与各种农作物产量的关系，土壤区划、土壤类型以及不同生态条件下肥料运筹、施肥时期与施肥方法，化肥投入与产出比的肥效，非正常情况下的补救措施等。栽培管理专家系统是根据各个农作物的不同生育期、生理特点、不同的生态条件、作物品种、播种期、密度、灌水等进行科学的农事安排，包括品种选择、种子筛选准备、整地、播种、田间管理与收获等栽培部分，优化肥料与产量关系的施肥部分，合理灌排、优化水分与产量关系的灌溉部分，病虫害发生发展规律和

消长关系的植保部分，农业气候的发生规律、气候与农作物生长期的产量关系的气象服务部分等，指导农民进行科学生产和管理。

我国农业正向知识高度密集型的现代农业发展，相继出现了“有机农业”、“生态农业”、“持续农业”、“智能农业”等替代型现代农业，智能农业的出现为现代农业的发展指明了方向^[9-11]。我国“智能农业”技术的应用较发达国家要落后 20 年以上，甚至有些地方还是一片空白。近年来，信息技术飞速发展，其在农业上的应用也得以重视。目前，我国北京、上海等地已开展了智能农业的研究应用，例如，在京郊小汤山智能农业基地，由北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心、中国科学院地理科学与资源研究所热红外遥感实验室以及北京市农林科学院联合实施的大型定量遥感联合试验和北京农业信息技术研究中心，根据国家 973 项目与智能农业示范项目的总体要求，在小麦病害的高光谱遥感检测和预测预报试验等方面，都取得了大量试验数据。但目前我国关于智能农业的研究应用还处于起步阶段。

1.2.2 智能农业存在的问题

智能农业已成为合理利用农业资源、提高农作物产量和品质、降低生产成本、改善生态环境及农业可持续发展的前沿性农业科学研究热点之一^[12-14]。目前，我国农业仍处于由传统农业向现代农业转变的过程中，与国外智能农业条件比较,还存在诸多不利因素。例如地形复杂,机械化和集约化水平不高，信息技术及其装备薄弱，农民素质不高等；此外，实施智能农业，前期的仪器、设备、装置等的成本投入相对过高，也影响了智能农业在我国的发展。

1. 我国智能农业科技含量、发展水平较低

我国智能农业相关领域的研究起步比较晚，投入低，较农业发达国家而言仍具有不小的差距。同时，智能农业的产业链仍比较单薄，相关设备的生产、安装、实施、维护一整套环节都比较薄弱，整体农

业机械化水平与发达国家相比仍有不小的差距，科技含量低，导致农业自动化程度、集约化水平偏低。

2. 农业生产方式、效率较落后

我国智能农业起点较低，效率仍处于一个较低水平，如生产效率、劳动生产率、资源利用率等一些农业生产核心数据都可以反映出这个问题的严重性。另一方面，我国资源短缺与资源利用率低的矛盾日益加剧，这就要求我国走一条集约化的、可持续发展的现代化农业道路。

3. 农业抵御自然灾害能力较弱

我国是一个农业自然灾害频发的国家，由于设备陈旧，防灾设施缺乏，农业抵御自然灾害的能力较低，看天吃饭的尴尬处境仍未得到有效改变，一旦发生大规模的自然灾害，将会造成重大损失，粮食产量大幅下降，甚至绝收等。

4. 农业科研投入、相关领域人才储备缺乏

无论是从科研经费，还是其他的奖励政策来说，国家历来对农业与工业的重视度不在同一水平线上，客观上导致了我国农业长期处于落后的现状。我国智能农业起步比较晚，并且受传统观念影响，只有极小部分科研人员愿意投入到这一领域，导致相关领域的技术人员储备不足，影响了智能农业事业的迅速崛起。

1.2.3 智能农业的发展前景

智能农业已成为合理利用农业资源、提高农作物产量和品质、降低生产成本、改善生态环境及农业可持续发展的前沿性农业科学研究热点之一。目前，我国农业仍处于由传统农业向现代农业转变的过程中，与国外智能农业条件比较，还存在诸多不利因素。例如地形复杂，机械化和集约化水平不高，信息技术及其装备薄弱，农民素质不高等；此外，实施智能农业，前期的仪器、设备、装置等的成本投入相对过高，也影响了智能农业在我国的发展。

针对上述问题，我国发展智能农业必须分步推行，从应用较为成熟、投资较小的阶段性成果开始，逐步配套提高精准程度^[15]。在技术上，首先发展 3S 集成技术，开发应用软件，再研制智能控制的装备和农机具；在技术实施过程中，先进行人工采集信息，常规机械操作，逐步过渡到半自动化、自动化作业；在推广上，先在受自然条件影响小、时空差异不大和工业化程度较高的设施农业生产中应用，在大规模的农场和农业高新技术综合开发试验区实践，然后才向有条件的农村和农户渗透。这样，既可使我国的智能农业与国际接轨，又符合我国的国情，逐步形成自身特点。

在农业生产环节，智能农业技术对农业生产各种要素实行数字化设计、智能化控制、精准化运行、科学化管理，促进生产要素的优化配置，提高农业生产力，推动农业生产向集约化、规模化、精准化转变；在农业经营环节，智能农业通过“互联网+”电子商务等模式，发展农业新业态，促进农业一二三产业融合发展，促进农民收入持续较快增长；在农村信息服务方面，智能农业技术可以实现农业农村信息服务的个性化、精准化，提高服务效能。随着我国土地流转、农业规模化发展、新型农业经营主体壮大，智能农业技术必将成为我国发展现代农业、改变传统农业生产方式、提高效率和效益、推进农业三产融合发展的重大选择。

在智能农业装备方面，主要集中在农业专用传感器与仪器仪表、农业大数据与云计算、智能化植物生产工厂、农业机器人、农业精准作业与智能装备、农业物联网等智能化农机装备构建技术研究，逐步从粗放式过渡到智能化、自动化为标志的集约化发展及制造业转型的阶段^[16,17]。按照智能制造试点示范所包含的智能工厂、数字化车间、智能装备、智能新业态、智能化管理、智能化服务等六个维度的要求来构建智能化农机装备制造体系，是未来智能装备发展的方向，为智能化农机发展提供支撑与保障。

第2章 农业智能分析

物联网、互联网等技术与农业生产、加工、流通等各环节紧密结合，产生了大量多源异构的农业数据，并且这些数据仍在呈指数方式增长。如何采用数据挖掘与智能分析与手段发现或提取其中的有效信息与潜在价值，实现农业生产经营过程的整体信息化管控，在一定程度上加速转变农业生产方式，提高生产水平与效率，对于发展与实现现代农业具有重要意义。本章在分析综合分析农业数据挖掘的现状和需求基础上，从农业数据语义分析、农业病虫害图像识别、动物行为分析以及农产品无损检测等方面介绍讨论了农业典型数据挖掘的知识模型、处理方法与分析技术，并对未来的发展方向进行展望。

2.1 农业数据挖掘

现代农业发展过程中数据呈爆炸式增长，尤其是随着移动互联网和物联网技术的发展，在农业生产、流通与交易过程中，农业资源、环境、多样化的生产经营方式不断产生全量超大规模、多源异构、实时变化的农业数据，产生的大量数据既包含价值密度低的数据块，也包含价值密度高的数据块，需要从这些数据中寻求科学规律、有用知识，快速抽取出模式、关联、变化、异常特征与分布结构，利用自然语言处理、信息检索、机器学习等技术挖掘抽取知识，把数据转化为智慧的方法学，指导农业生产经营是农业数据挖掘的价值所在。

2.1.1 农业数据挖掘特点

农业数据挖掘可称为数据库中的知识发现，是指从农业数据库的大量数据中揭示出隐含的、先前未知的并有潜在价值的信息的过程。原始农业数据可以是结构化的，如关系数据库中的数据；也可以是半结构化的，如文本、图形和图像数据；甚至是分布在网络上的异构型农业数据，如农业技术、农产品市场价格、农业视频等。

通过数据挖掘发现的知识可以被用于：精准农业生产，提高农业生产过程中的科学化管理、精准化监控和智能化决策；农业水资源、农业生物资源、土地资源以及生产资料资源的优化配置、合理开发以实现高效高产的可持续绿色发展；农业生态环境管理，实现土壤、水质、污染、大气、气象、灾害等智能监测；农产品和食品安全管理与服务，包括市场流通领域、物流、产业链管理、储藏加工、产地环境、供应链与溯源等精准定位与智能服务；设施监控和农业装备智能调度、远程诊断、设备运行和实施工况监控等。

2.1.2 农业网络数据挖掘

农业网络数据挖掘就是以 WEB 信息资源为对象，以信息检索的方式为用户提供所需信息，它包括信息收集、信息过滤、信息存取、信息索引、信息检索等环节。互联网上存有海量的农业信息资源，据不完全统计，在国内农业领域现有各种网站 3 万余个，内容涉及实用技术、供求信息、价格信息、农业资讯、农业视频等多个主题。这些农业资源网站信息集中，专业性强，服务有针对性。另外，一些综合类和商务类网站，如阿里巴巴、淘宝、阿拉丁等提供了大量的农产品供求、农资市场、农业设备等特定的农业数据，对网络中海量存在的数据进行挖掘入库，后期进行智能分析对于现代农业发展具有现实意义。

农业网络数据挖掘工具的典型代表有美国农业网络信息中心（AGNIC）与美国普林斯顿建立的 Agriscape Search，法国的 Hyltel Multimedia，中国科学院合肥智能机械研究所研发的“农搜”、华南农业大学的“华农在线”、中国农业科学院“农搜”、国家农业信息化工程技术研究中心的“Agso”等。最早网络数据抓取采用基于 Html 网页库的关键词匹配方法，由于网页里包含了很多广告、与当前页面无关的链接等垃圾信息，导致查准率较低。因此，在抓取网页的同时进行 Web 信息抽取（Web Information Extraction）使“Agso”等工具信息的查准率大幅提高。

Web 信息抽取技术能够从 Web 页面所包含的非结构或半结构的信息中识别用户感兴趣的数据，并将其转化为更为结构化、语义更为清晰的格式。常用的信息抽取模型有基于隐马尔可夫模型 Hidden Markov Model (HMM) 的抽取方法，该方法要求大量的训练实例，处理速度较慢；基于本体的抽取方法是利用本体这个比较成熟的刻画领域的技术手段，对抽取页面的类型进行描述及设计匹配规则，该方法与抽取的 Web 页面格式无关，但本体库的构建工作量非常大；基于规则的文本信息抽取模型也需要先构造抽取规则，从手工标记的训练例中推导出一个抽取规则集。

目前“Agso”已经整合了农业科技、特色农产品、农业生产资料、农业社会经济、农业自然资源、农业产品、农产品市场、农民专业合作社、农业企业、农业视频等 14 个分类，59 个主题信息库，6.8TB 数据资源，实现了农产品数据集市挖掘、基于规则的包装器专题信息抽取模型、农业信息专题词库更新算法、无序数据的大样本学习机制等技术的应用，为农业知识来源的最大频繁项目集和信息熵集合提供了数据仓库基础。

2.1.3 农业感知数据挖掘

除了农业网络数据之外，在农业产业链前端以及农业生产过程中，农业生产活动也产生了大量的农业过程数据，该部分的数据主要通过各类物联网感知设备、自动控制设备、智能农机具包括人工操作记录等方式进行采集与收集，这里统称为农业感知数据。不同于农业网络数据，农业感知数据的来源繁多，数据结构与类型复杂多样，多维特征间关联十分紧密，这些都对农业感知数据挖掘提出了很高的要求。

农业生产过程的主体是生物，存在多样性、变异性和不确定性，因此农业感知数据存在季节性、地域性、时效性、综合性、多层次性等特点；而在具体应用场景上也涉及不同专业的多个领域，如气象、

动植物育种、土地管理、产量分析图、畜禽饲养、土壤水肥、植物保护等。随着物联网数据的不断积累，挖掘分析方法对大数据的处理方法与传统小样本的分析方法有着本质的不同，而且对挖掘深度、数据可视化与实时性等方面都有了更高的要求。

美国的农场主通过安装 Climate Corporation 公司的气象数据软件，可以获得农场范围内的实时天气信息，如温度、湿度、风力、雨水等，同时结合天气模拟、植物构造和土质分析得出优化决策，帮助农场主从生产规划、种植前准备、种植期管理、采收等各环节做出优化决策。来自美国硅谷的 Solum 公司致力于提供精细化农业服务，其开发的软硬件系统能够实现高效、精准的土壤抽样分析，以帮助种植者在正确的时间、正确的地点进行精确施肥，帮助农民提高生产效益。美国 FarmLogs 公司帮助农民通过移动终端，如 Pad 就可以实现上传农场数据，并获取分析结果，使农场管理更加便捷，同时正在开发基于大数据分析，具备智能预测功能的农作物轮作优化的产品。由国家信息化工程技术研究中心等研发组建的“金种子育种云平台”，面向科研单位和育种企业需求，在采集试验状态、谱系等相关数据的上，提供包括种质资源管理、试验规划、性状采集、品种选育、系谱管理、数据分析等育种过程数据分析与服务，并在隆平高科、山东圣丰种业等成功应用。

目前农业感知大数据挖掘主要还是针对不同领域利用数据挖掘技术解决生产中的问题。其基本架构包括三部分：农业数据挖掘模型、农业数据挖掘工具集和农业数据挖掘服务。其中，农业数据挖掘模型主要用于数据的特征提取与模型构建；农业数据挖掘工具集提供了大量的数据预处理算法和数据挖掘算法；农业数据挖掘服务则以服务的形式提供了针对不同领域、不同用户的个性化数据挖掘与推荐方法。

2.1.4 农业数据挖掘应用

2.1.4.1 育种数据挖掘

在人类早期简单的种植和采收活动中，就开始孕育作物驯化育种的思维。在源于西欧的近代育种技术和理论出现之前，作物育种都是通过天然杂交和变异产生一些符合人类生产需求的作物品种。随着遗传学、分子生物学、生物统计学等学科发展，作物育种研究产生了海量多种类型的数据，整合和最大化利用这些生物学数据，无疑对现代育种研究具有不可估量的重要意义。据不完全统计，我国现有的农作物资源中含有水果、蔬菜等 200 种作物，其中包含的品种数更是达到 40 万种，人们可以通过数据挖掘技术根据丰富的种植经验和积累从这些众多的品种资源数据库中挖掘出适宜、优质的品种来进行培育。

农作物品种选育呈多元化发展态势，高产是新品种选育的永恒主题，品质改良是新品种选育的重点，病虫害抗性是新品种选育的重要选择，非生物逆境是新品种选育的重要方向，养分高效利用是品种选育的重要目标，适宜机械化作业是新品种选育的重要特征。育种相关数据包括基因组测序数据、转录组测序与分子标记数据、作物表型检测数据、田间数据和农业环境数据等。国内外学者基于经典遗传学、数量遗传学和群体遗传学原理，采用关联、分类和聚类算法，挖掘种质资源农艺性状、品质、抗逆、抗病虫等特征特性的关联知识，实现育种关联知识发现、野生种质预测、核心种质筛选等典型业务服务。

2.1.4.2 作物生产数据挖掘

在作物耕作过程中土壤情况、施肥量和气候等因素都会影响整个农作物的生产过程，从而带来产量上的差异。农业数据和信息具有很强的地域性和时效性，围绕农作物生产过程的关键环节开展数据挖掘工作，发现苗、水、肥、土、虫、气象、灾害数据背后隐藏的信息，实时提供相关的预测、时令性和指导性的信息是数据挖掘技术在农业领域应用的重要需求。

基于实时墒情、气象、土壤肥力和大宗粮食作物栽培数据的数据挖掘分析，能够支撑农业精准生产管理，提高化肥、水、农药等合理投入。例如吉林省农安县的玉米试验田就采用了基于神经网络集成的 6-x-1 施肥模型，通过收集来自于试验田不同养分的测试点的数据，采用肥料效应函数法对每个测试点的土壤养分含量和产量进行分析比较，从而得出玉米生产过程中施肥量对其最后产量的影响。

数据挖掘可以对农作物的整个生产过程进行风险评估，通过对农作物病害、杂草、品种抗性以及相关的地理环境等元素分析，降低气候异常、病虫害等对粮食安全生产的影响。例如利用 GIS 技术对蝗虫爆发和土壤类型、降雨情况以及它们的群种和密度进行研究，通过画出蝗虫爆发的程度空间分布图来对其进行统计预测。根据山东省 1999-2013 年玉米田第四代棉铃虫发生程度采集的数据，采用支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 算法，构建了玉米田第四代棉铃虫发生程度与其关联因子间的非线性关系模型，实现了棉铃虫有效防控。

2.1.4.3 养殖数据挖掘

先进技术已经成为智能化养殖发展的重要推动力，能够从养殖个体、群体、环境、投入品等各个方面采集全方位、实时、高频度的养殖信息，通过数据挖掘判定畜禽个体健康情况、饲料配比营养状况，对不同生育期内最佳养殖环境模拟、个体行为预警等特征抽取、分类、聚类、预测、关联规则发现、统计分析等，支持高层次的决策分析，保障养殖产品的繁育和生产效率。

数据挖掘在养殖效益分析中的应用。根据养殖原始数据、价格和投入量等，运用数理统计模型、关联分析模型、确定目标函数的具体形式，进行趋势预测和定量分析，例如利用改进的粒子群算法 BP 神经网络挖掘生猪适时出栏量，分析社会资源需求、自然资源、生态环境、畜禽养殖业与其他行业关系等内在数据联系等。

数据挖掘在养殖管理中的应用。采用联机分析处理（On-Line Analytical Processing, OLAP）技术切片、钻取和旋转多维数据，挖掘不同时期养殖个体营养需要和采食量的内在关系，实现饲料的精准配比与自动补饲。例如采用视频动态监控与图像特征图，根据不同单位圆内鱼的密集度，评价鱼群对饲料的需求度。通过数据挖掘寻优技术挖掘饲料成本、个体生长速率、销售情况、养殖环境等数据关系。对犊牛活跃度、采食次数、睡觉时长、呼吸率等生理及行为信息挖掘，实现犊牛身体状态自动监测和调节。

2.2 农业数据语义分析

农业领域数据所蕴含的知识通常以自由文本、表格、图片、视频、数据库等形式载体存在，且多以自然语言形式存在于文本载体之中。自然语言形式的特点是非结构化，对于处理结构化数据的计算机来说是巨大的挑战，导致有效的农业知识无法得到有效的应用。随着 Internet 的发展，农业知识共享和交互需求越来越广泛，使得面向农业知识共享的语义分析技术得到研究。

2.2.1 农业数据语义模型

利用 FAO (Food and Agriculture Organization) 农业本体的农业词汇表和常用术语之间的语义关系，对农业生产技术、病虫害诊断和防控、畜禽疾病、农产品市场销售信息等最为广泛的农业生产知识进行建模，建立基于本体的知识描述，涵盖了农产品分类、农业化学用品、种植技术、生长阶段、生物部位、病虫害防控等农业生产中的核心知识点，并对相关概念进行了细化，对语义进行了梳理。同时，为了更好地描述密切影响农业生产的外部条件和客观环境，在农业领域本体中还引入了行政地理、自然地理、农产品市场基本资料等与农业生产、销售密切相关的其他应用领域的知识体系和本体描述。陌生的词组在实例维中被拆分成基本语义单元进行比较，匹配后在类维中根据相应类之间的相互关系找到更高层的类，通过查找该高层类已有的实例判

断陌生词组与现有词组之间的相似程度，从而完成概念的聚合和匹配。

在农业本体建模方面，联合国粮农组织构造了渔业本体、食品安全领域本体和食物、营养与农业本体等原始本体。Lauser 等构建了生物安全本体模型，提出首先构建核心本体，然后基于启发式方法对核心本体进行扩展的理论，重用已有的本体，为领域通用本体模型的构建提供了依据。Maliappis 针对园艺学领域构造了本体模型，Kokla 研究了地理信息本体构建中的知识获取问题。国内中国农科院信息所构造了花卉学、土壤学领域本体模型，广东农科院参与渔业本体构建，上海海洋大学构建了东海鱼类本体，中国农业大学构建了农资商品本体，安徽农大开展了茶学领域本体建模，中科院合肥智能所开展了基于本体智能检索技术研究，国家农业信息化工程技术研究中心研发了基于语义分析的知识建构系统与计算服务平台，实现了农业知识协同构建与海量资源服务。

2.2.2 农业数据存储模型

考虑农业数据资源海量性和语义复杂性，基于自上而下的分类方法，采用 XML 元数据约束与语义标注相结合的机制，建立农业海量数据逻辑存储模型。该方法在数据存储领域已得到了广泛应用，但存储的性能与效率主要取决于元数据的组织方式以及语义标注的准确性。在农业海量数据逻辑存储管理中每一个资源信息必须包含元数据（{领域类别，元数据类别，资源名称，标注信息}）类别字段和农业领域类别字段，其分别指定资源信息必须符合的资源描述规范，以及在农业领域层次分类中的逻辑位置。

同时为了提高数据资源的检索效率，在逻辑资源管理框架中引入索引技术，建立资源信息的全局索引表，维护了资源信息的基本字段。用户注册知识资源时，需选择资源元数据分类并填写元数据所对应的资源描述字段，一方面将在该元数据对应的管理区域内建立资源信息

XML 文件，另一方面将注册信息加入资源索引表，建立关键描述字段、领域分类、元数据分类、物理存储位置之间的关联，有效提高资源信息检索灵活性和有效性。

2.2.3 农业数据知识表示

农业领域知识具有复杂性和主观性，当前领域知识的构建依赖领域专家的参与和专家之间的协作，面向海量非结构化农业资源的知识挖掘过程中，关联规则的发现占了很重要的地位，通过语义关联规则挖掘方法，可以有效提高细粒度知识获取的效率。该方法主要包括：

(1) 针对能代表农业领域概念的词汇获取和代表农业领域概念的词汇聚类（同义词或定义特征近似）进行概念级知识发现，面向农业元数据（农业气象、土壤、作物品种、生产资料、农产品价格等）级别的数据聚类、分类、关联关系挖掘模型，这个阶段包含分析数据源、查找术语（原语）和定义全局本体三个主要步骤。

(2) 针对海量知识中的概念（包括常识、农业专业知识、农业新闻流通领域等方面）、概念与词汇之间的对应关系（同构的或非同构的），按不同概念的某些属性类来进行聚类；建立基于本体的农业知识资源概念获取模型，实现农业概念词汇的获取、聚类。这个阶段包含分析数据源和定义局部本体两个主要的步骤。

(3) 概念之间的关系获取，采用上下位、特征因子等方法逐层展开进行挖掘，建立农业知识资源概念间关系的获取模型。在算法研究方面，将统计学习理论、模糊集、粗糙集、贝叶斯网络、基于案例推理（Case-based reasoning, CBR）等有关理论与方法结合，定义全局本体和局部本体之间的概念的映射（和关系）。这个阶段必须解决语义异构问题，农业异质数据资源的语义异构包括很多种，如命名、属性、外延异构等。这些类型异构可以通过前述本体定义时解决，也可以通过 OWL 在本体与本体、本体与信息源的映射中解决。

2.2.4 农业数据语义检索

农业数据语义检索是建立在农业本体之上，解决农业数据和知识资源的有效定位、自动检索、推理与交互问题。查询条件由 Web 本体语言、分布式动态逻辑基础定义的类和复杂类来表示，并通过类的包含和等价关系在库中实现查询功能。查询条件首先经过一个本体翻译器，转换为用 Web 本体表示的查询条件表达式。该查询条件表达式实际上是一个复杂类定义的公式。库中复杂类是定义某种情况下具有某种值，体现为角色及角色值的定义。查询条件表达式首先进行精确查询，当库中没有匹配的案例时，查询条件借助推理引擎进行推理，获得新的查询条件，再次进行精确查询。

语义检索是目前数据分析与挖掘的常用技术，而分词是语义检索的基础，以英文为代表的拉丁语系语言有其天然的优势，并已经有了较大的突破。而中文里词、词组等边界模糊，形成了双字词、多字词、短语等分割与语义模型建立的困难。而且英文语句虽结构复杂，但环环相扣，语义清晰；对应的中文重语义轻结构，在采用计算机方法进行分词时存在技术难度与挑战，目前中文多采用结合上下文的语义分析检索方法。

2.2.5 分布式农业知识协同构建

分布式知识协同构建包含农业本体协同构建、专家知识库协同构建与知识模型管理、农业知识构建等。采用基于增量迭代的本体协同构建方法，为分布在各地的领域专家协同编辑领域本体提供一种有效的工作方式。以增量迭代的方式使得领域专家可以灵活、方便地参与本体片断的构建工作，同时保证整个领域本体的增量构建能够有序、高质量地进行。

1. 农业本体协同构建

农业本体协同构建既提供了对农业领域本体的增量式维护，也支持对领域知识决策库的定义和维护。在协同构建领域本体过程中，每

个领域专家在相对独立的个人工作区中对自己的领域本体片断进行编辑并阶段性地提交编辑内容，同时通过统一的协同本体开发过程控制和版本管理实现整个领域本体统一、有序的增量演化。核心专家组控制整个本体的阶段性评估和增量发布工作。

2. 专家知识库构建与知识模型管理

通过开放的交互式的知识构建和维护空间，农业专家可协同构建不同区域，不同种类的农业专家系统知识库。同时可对知识库进行内容编辑，模型管理，基础数据导入，以及知识求精等操作。

3. 农业知识构建

农业知识构建为用户提供数据挖掘、知识规则产生和规则管理的服务。用户自定制挖掘任务，获得数据挖掘结果，对数据挖掘的结果（规则）进行管理。

2.3 农业病虫害图像识别

中国是个农业大国，农业在国民经济中占有举足轻重的地位。进入 21 世纪以来，受全球气候、耕作制度变化和农产品贸易激增等因素影响，我国农作物重大有害生物呈持续重发态势^[18]。以 2009 年为例，全国农作物因病、虫、草、鼠为害造成产量损失分别高达 368 亿公斤以上，直接经济损失超过 1000 亿元人民币，对农业生产造成了严重的影响。农业病虫害发生信息的获取是病虫害监测预警和精准防治的重要前提。目前，农作物病虫害监测信息的采集主要采取虫情测报灯监测、病虫观测场调查和大田普查相结合的方式，大部分数据都要通过测报技术人员深入田间调查计数。传统的调查方法费时费力，难以达到准确预测预报的效果。为了解决病虫害监测数据获取上费时费力的问题，新兴的自动识别与计数技术不断被探索，目前主要的监测技术有图像识别、红外传感器监测、声音特征检测、雷达监测等^[19]，这些技术的发展提高了病虫害自动识别与计数的效率。基于图像的病虫害识别技术具有分类准确率高和智能化等优点，目前已成为农业病虫害

害识别研究的热点。研究步骤一般包括图像采集、图像预处理、特征提取、模式识别，其中图像特征提取、模式识别是图像识别技术的核心^[20,21]。

2.3.1 基于机器视觉的农业病虫害自动监测识别系统框架

基于机器视觉的农业病虫害自动监测识别系统框架如图 2-1 所示。

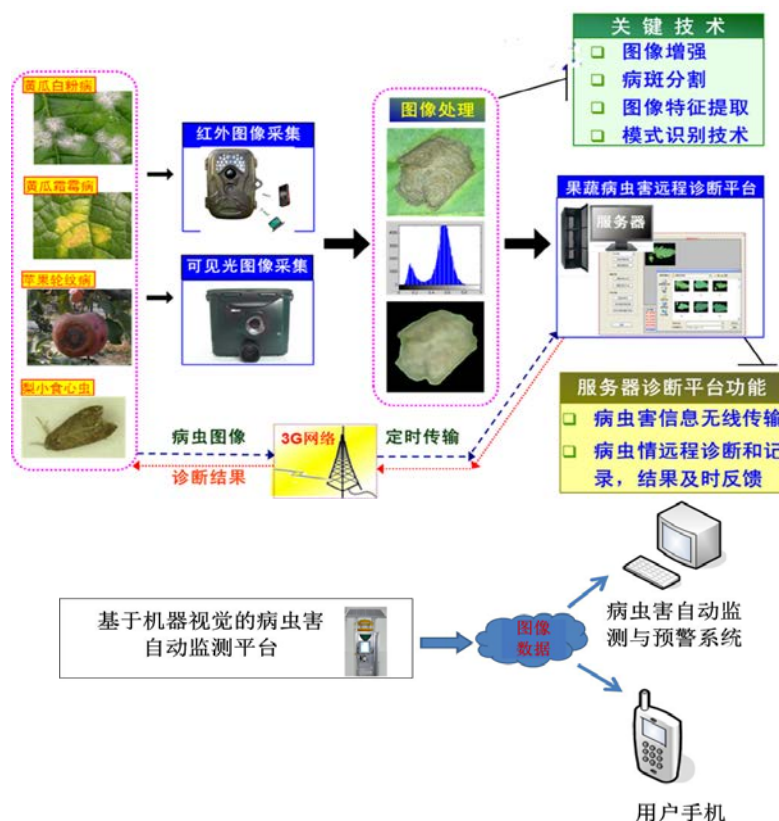


图 2-1 农业病虫害自动监测识别系统框架

基于机器视觉的病虫害自动监测平台进行图像信息获取，通过传输网络将病虫害图像数据上传到病虫害自动监测与预警系统或用户手机。此外，病虫害自动监测与预警系统通过气象站进行害虫生长环境信息获取；基于手机、PDA、计算机等进行寄主植物生长状态信息获取；基于机器视觉以及手机、计算机等进行寄主植物田间管理信息的获取^[22]。通过融合病虫害种类与数量信息、发生程度以及寄主植物

生长环境信息、生长状态信息、田间管理信息等进行农业病虫害的预测预报。主要应用 Matlab 进行害虫图像处理，并将害虫识别算法编译生成动态连接库，然后在 Visual studio.Net 平台下进行调用；在 Visual studio.Net 平台中应用支持向量机进行害虫种类识别，完成系统软件的开发。

2.3.2 农业病虫害图像采集方法

2.3.2.1 室内病虫害图像采集方法

室内病虫害图像采集主要是将田间的病虫害材料采集到室内，通过拍照获取图像。为获取清晰的图像需应用图像采集箱完成拍照工作。

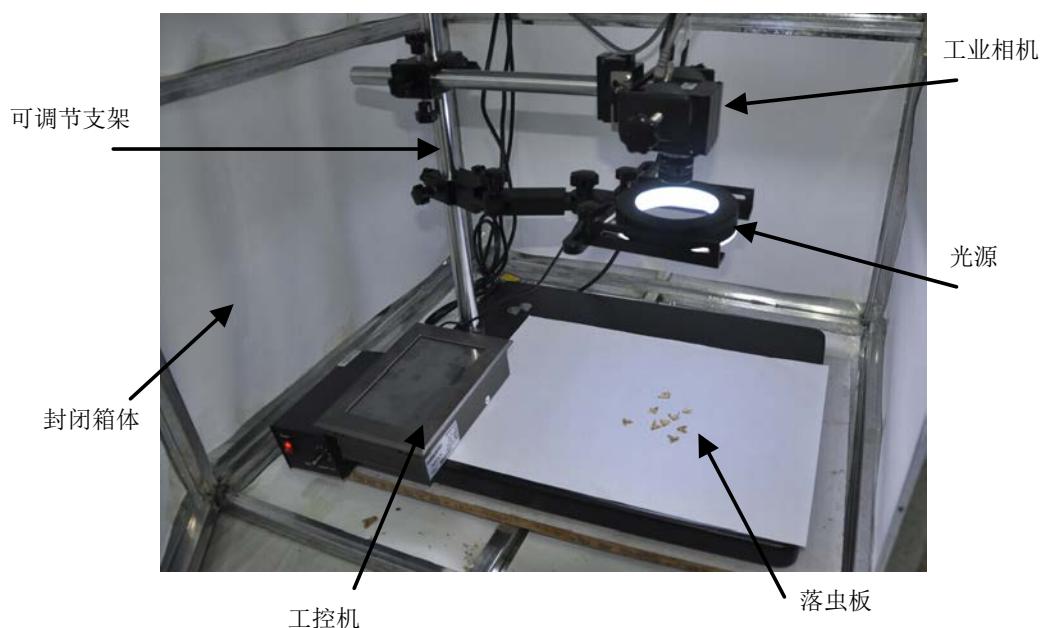


图 2-2 图像采集系统

如图 2-2 所示，图像采集箱主要包括可调节支架、工业相机（DH-SV2001GC）、光源（RL-120-30-W）、工控机和密闭箱体。在箱体内部用白色纸张进行覆盖，避免箱体内部材料反射光对图像采集区域光线影响。其中可调节支架主要是为了方便调节相机与落虫板之间距离以及相机与光源相对位置，获取清晰图像。试验中 DH-SV2001GC 相机通过网线与工控机相连，通过软件对图像进行采集操作。

2.3.2.2 田间病虫害图像采集方法

田间病虫害图像采集可直接应用野外相机正对寄主植物进行监测，或应用监测装置进行图像采集。如图 2-3 所示，用立柱和固定环将相机安装在离目标果实的正前方，每隔 2 个小时定时拍照。相机为索尼公司的 JV205 型号相机，图像分辨率为 4608×3456 像素，采用自动模式拍摄，光圈值 $f=3.2$ 。图中参照物采用的是黄色乒乓球，用来标定果实的实际大小。应用野外相机监测苹果整个生长过程以及果实病虫害发生发展动态。



图 2-3 苹果果实病虫害自动监测

如图 2-4 所示，应用监测装置进行害虫图像采集。图 2-4a 为简易害虫监测装置，诱捕架分为上、下两部分。诱捕架下面部分包括底板、诱芯固定装置、支架，粘虫板置于底板上，并用弹片固定，粘虫板距地面的高度为 150 厘米。诱芯固定装置与支架相连，位于底板的上方。诱捕架上面部分包括用于固定机器视觉的支架、四周的盖板以及顶盖等。固定机器视觉的支架高度依据不同类型的机器视觉进行设计，要

求能获取清晰的整个粘虫板的害虫图像。顶盖为可活动部件，供于安装机器视觉。

图 2-4b 为自动更换粘虫板的害虫监测装置，该装置包括诱捕部分、图像采集部分和处理控制部分；诱捕部分位于监测装置的中央位置，采用性诱剂与粘虫板相结合，实现害虫诱捕；图像采集部分位于诱捕部分的上方，用于采集粘虫板图像；处理控制部分分别控制诱捕部分和图像采集部分，通过获取粘虫板图像，对粘虫板图像处理分析得到害虫数量、粘着物面积；通过电机控制实现粘虫板的自动更换，或通过定时设置控制电机工作，实现粘虫板自动更换，该装置结构简单，易于操作，提高了害虫监测效率。



a 简易害虫自动监测装置



b 自动更换粘虫板的害虫自动监测装置

图 2-4 基于机器视觉的害虫监测装置

2.3.3 农业病虫害图像预处理

原始的害虫图像分辨率高，图像大，不适合进行大批量的图像算法处理。为了加快处理速度，只针对害虫目标区域进行处理，利用自动裁剪程序，通过选取害虫目标边缘为起点，沿水平向右方向、垂直向下方向截取 440×355 大小的范围进行处理。由于监测装置在田间获取害虫图像，图像受光照影响大，采用稳定性较强的 HSV 颜色空间进行图像处理。将采集到的图像应用图像差分法进行害虫分割。如

图 2-5 所示，图 2-5a 为背景图像，图 2-5b 为梨小食心虫图像，将图 2-5b 与图 2-5a 图像进行差分，通过消除部分背景噪声，得到图 2-5c。通过应用面积、延伸率、复杂度阈剔除非靶标物质，获得靶标害虫梨小食心虫，如图 2-5d。

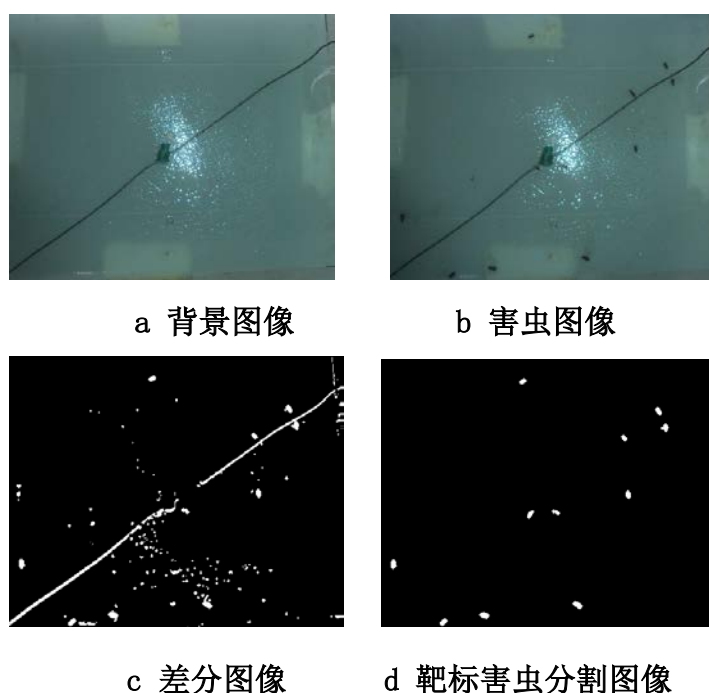


图 2-5 基于图像差分的害虫分割

2.3.4 农业病虫害特征提取与识别模型构建

在田间环境下监测害虫，靶标害虫种类多，需提取害虫特征，以构建害虫识别模型，实现靶标害虫种类的区分^[23]。利用 Matlab 环境下的特征提取算法，通过交叉编译，在 .Net 平台下进行函数调用，完成靶标害虫特征数据的提取。如图 2-6 所示，害虫的特征提取包括面积、周长、标准积、延伸率、复杂度、占空比、H、S、V 颜色分量 9 个形态学、颜色特征。将所提取的害虫特征值加入特征库，用于识别模型的建立。在将特征值加入到数据库之前，需要选择训练样本的类型，如梨小食心虫。若需要新增一种害虫类别，需要在“新增加种类”栏中输入新害虫类别名称。这样能够保证在特征数据库中类别标签与

类别特征数据的对应。特征库建立完毕后，利用类别标签和类别特征进行基于支持向量机 SVM 的模型训练，将训练得到的模型保存到数据库中，用于后续的害虫识别与计数^[24]。

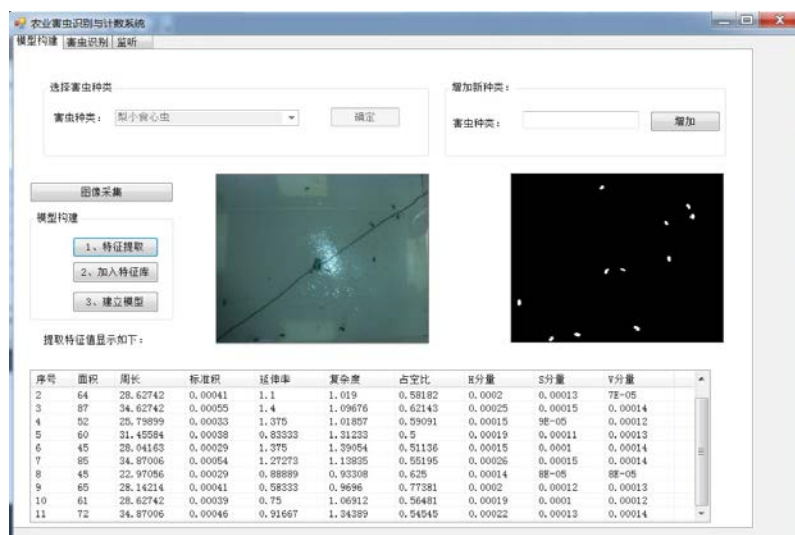


图 2-6 害虫特征提取

2.3.5 农业病虫害模式识别

首先获取待识别的害虫图像，通过图像的预处理实现害虫分割，通过特征提取获取害虫特征值，将害虫特征值输入害虫识别模型实现害虫识别与计数^[25-27]。如图 2-7 所示为梨小食心虫图像识别与计数软件界面图。选择常见的果树害虫梨小食心虫 *Grapholithamolesta* (Busck)、桃蛀螟 *Conogethespunctiferalis* (Guenee)、苹小卷叶蛾 *Adoxophyesorana* Fisher von Roslerstamm 进行系统测试，害虫的识别准确率达 90% 以上。

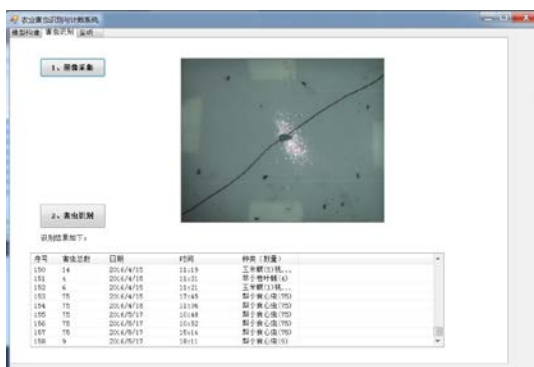


图2-7 害虫识别与计数

2.4 动物行为分析

动物行为学（Ethology）是专门研究动物行为的学科，以研究动物与环境 and 群体内个体之间的关系以及和其他生物的互动等为主要内容，并在动物行为本身、行为维系群体的作用、个体发育进化史、行为的控制及社会性组织等方面研究进行了扩展^[28]。

目前，动物行为学已逐渐与多个学科发生了相关性，在国外动物行为学已经逐渐发展成为畜牧学中一门成熟的分支学科^[29]。许多行为学原理被应用于各种畜牧生产实践中，动物行为在动物福利养殖中起着举足轻重的作用。

行为特征提取的目的是区分不同的动物基本行为，所谓基本行为是指诸如休息、采食等能够持续一定时间的独立行为。复杂行为也可称为动物行为模式分析，由一个或多个具有时空关联的基本行为组成，其主要工作是挖掘动物基本行为间或基本行为与环境间的内在联系。动物行为模式是发现动物反常行为的基础，而反常行为是动物个体出现健康异常或环境发生突变的外在表现。动物反常行为的及时发现可用于动物疾病或环境调节预警。

在实际的畜牧生产中，对动物行为的研究主要是依靠人为观察的方法记录动物行为活动，由于工作量较大且枯燥、乏味，观察过程中易出错，影响研究结果^[30,31]。

随着现代信息技术的快速发展，涌现出许多畜牧信息智能化监测方法和技术，精准采集畜牧养殖信息的同时，注重挖掘信息所蕴藏的

动物健康水平、动物对养殖环境的适应度等深层含义，为动物疾病预警、养殖环境反馈调节提供低成本、高精度的解决方案，动物行为监测与分析当前主要有音频分析技术、计算机视觉技术、无线传感器网络技术，超声波成像技术，云计算与大数据技术也是未来的发展趋势^[32-35]。

1. 音频分析技术

动物叫声与其情绪状态、生理健康状况密切相关，利用音频分析技术处理动物叫声可实现动物健康、动物福利水平的自动评估，也可实现散养动物采食行为的智能监测^[36,37]。

动物声音音频采集需要针对不同动物种类设计相应的采集方案，对于性情温顺动物而言可使用便携式麦克风采集声音信息，不限制动物活动范围，对于性情暴躁动物宜构建声音采集室，屏蔽外界噪声干扰，确保声音信号质量。广义上的动物健康可分为生理健康及情绪健康，音频分析技术一般都是针对患有呼吸道疾病的动物咳嗽声音进行处理，实现生理健康监测。预处理步骤对声音信号做适当放大和增益控制并消除干扰信号；特征提取步骤主要完成提取反映声音信号特点的若干参数；参考模式库构建步骤对特征参数形式表示的声音含义进行处理，获得表示识别基本单元（如动物饥饿、感染呼吸道疾病、牛只咀嚼行为等）共性特点的标准数据，以此构成参考模板，将所有能识别的基本单元的参考模板结合在一起形成参考模式库；在识别阶段，将待识别的声音信号经过特征提取后与模式库中的各参考模板匹配，找出最相近的参考模板对应的基本单元。

2. 计算机视觉技术

在畜牧养殖领域，动物行为与动物健康状况、生存舒适度密切相关，利用动物行为来自动分析动物的健康及舒适度状况相比人工观察而言结果更加客观。随着计算机技术、图像传感器技术和图像处理技术等领域的进步，带动了计算机视觉技术不断发展。计算机视觉技术

本质上是基于视觉系统，使用图像传感器件进行非接触感知，自动获取和解释一个真实场景的图像，利用图像自动分类、分析、检测获取信息或过程的一种方法。计算机视觉识别的一些研究成果已经应用于实际生产生活的多个领域，比如文字识别、虹膜识别、指纹识别、人脸识别、医疗图像识别等。机器视觉技术在数字化农业领域已经进行了广泛应用，近年来，研究人员开始涉足基于视频自动分析动物行为及动物生存舒适度的研究领域^[38-40]。国外，特别是欧洲，由于动物福利的立法要求，相应地在养殖领域取得了一定的研究成果。

仅从畜牧信息的无损监测角度而言，基于机器视觉技术的动物行为监测是目前最好的方法，这种技术以无接触方式记录动物行为信息，对动物活动没有任何影响，不会产生动物的应激反应。计算机视觉技术在人脸识别等领域已取得显著成果，但在动物行为分析方面仍相对薄弱。德国Biobserve公司的Trackit系统，分别从2维和3维空间的位置和朝向自动跟踪动物行为，并对其进行分析，跟踪处理能力可以达到50f/s。南开大学的学者通过红外成像方法分析群养猪睡眠姿势评估其舒适度状况，并研究环境因子和条件对猪生长的影响。

由于计算机视频方法的技术实现难度较大，受现场光照条件影响大，摄像机视距、拍摄范围有限，一般用来监测圈养动物信息。研究中除了需要针对动物行为进行更精确的行为建模外，还需要解决养殖动物个体识别与跟踪的问题，如何在海量视频信息中识别跟踪某一异常行为个体是需要重点解决的问题。

动物的采食、健康、福利和表现等对于个体状态来说是重要的监测指标。采用单色摄像头，应用背景减除法，构建了单个动物的计算机视觉跟踪系统和实时图像处理系统，用于检测动物的运动，并依据圈养动物休息的行为模式对其温度舒适状态进行分类。

通过在动物舍顶部架设摄像头获取动物图像，引入椭圆匹配算法来分割个体，并通过在每只动物背部绘制不同形状的标记为计算机视

觉识别个体提供图像特征，实现个体的计算机视觉定位。其将圈舍划分成采食区、饮水区、休息区和排泄区，根据计算机图像处理结果记录的个体的区域来统计动物的行为。

采用直接序列图像差分提取前景像素变化情况作为视觉图像特征分析动物行为。在基于计算机视觉的动物异常行为监测方面，通过在动物体表绘制数字标识以辅助计算机图像处理识别个体，建立了一套基于计算机视觉的排泄行为监测试验系统。

目前的研究中，多采用可见光图像采集设备，采集俯视或侧视动物图像或视频，应用图像处理技术对采集图像进行图像分割处理，提取动物前景目标。提取特征识别采食、饮水、排泄以及躺卧等行为，开展动物福利状况评价，以保障动物的采食、饮水、环境舒适等。同时，建立采食、饮水量的异常变化与动物罹患疾病间的潜在关系，以便做出预警。

3. 无线传感器网络技术

无线传感器网络是由部署在监测区域内众多的微型传感器节点组成，通过无线通信方式形成的一个自组织无线网络系统，可用于监测复杂多变的环境条件，如温度、湿度、噪声等级等，也可监测节点附着对象的运动特征，如速度、加速度、运动方向等。无线传感器网络丰富的传感器资源使其在畜牧信息监测应用中具有巨大的优势，无线通信方式不仅解决了养殖现场布线困难的问题，而且使得网络节点可以穿戴在养殖动物躯体上，能够满足动物行为、体征等参数信息监测的连续性和实时性要求。

爱尔兰Diarymaster公司将传感器应用于牛群中，通过各通道处的射频识读器识别牛只颈圈上的RFID标签，实现门控式分群管理和牛群体温等智能监控，改善牛群生活环境，提高产量。该公司还研发了一种加速度传感器，用以监测母牛排卵时的焦躁不安，并通过网络将信息推送至用户手机应用。澳大利亚研究人员通过在饮水槽周围部署

项圈识别设备，对奶牛饮水的时间以及周期进行监测，用以指导生产，该数据还可作为牛只的疫病预警的参考。在国内，华南农业大学设计的奶牛监测系统通过在奶牛颈部安装无线传感器节点获取奶牛的体温、呼吸频率和运动加速度等数据，实现对牛行为特征的监测，对奶牛发情以及健康状态等进行自动识别。

对于传感器网络监测到的动物生理指标参数信息，通过设计养殖专家知识库自动分析生理指标所蕴含的动物健康状况，对健康异常个体进行报警。对于监测到的动物行为数据，利用动物行为模型实现行为自动分类，解决传感器数据与行为类型之间的关联问题。

加速度传感器采集动物行为数据并通过分析处理后来识别其活动模式，可识别5种行为模式：高活跃、中等活跃、左侧躺、右侧躺、趴卧。将三轴加速度传感器应用于舍养动物的行为监测，运用无线网络传输通信技术验证了4种基本行为（走、跑、跳、静）的监测。

4. 超声波成像技术

超声成像技术最初在医学诊断领域得到了极其广泛的应用，上世纪80年代后开始在工业材料检测上逐渐得到了应用。目前超声波成像技术可以应用在动物行为监测上，将超声波聚焦在动物身上，部分穿过的声波将会携带动物姿态、行为等信息（舍养动物的不同姿态对超声波的反射、吸收、散射程度等参量的不同），再通过汇聚装置将透过声波聚焦在接收器上，经过相应的信号预处理和放大后扫描成像在显示器上，实时监测该动物的行为姿态。

超声波成像技术在农业领域上的应用，克服了计算机视觉在信息采集上的二维局限性与易受遮挡的缺陷。可以较好的体现动物的三维姿态特征，而且几乎不受建筑、动物之间的遮挡问题影响。相对于无线传感器技术而言，超声成像技术无需在所有动物上部署感知设备，在动物群体较大时，成本相对更低，而且也无需解决动物不断移动下的复杂通信问题。但超声成像的不足之处也是显而易见的，声音信号

的反射特征被提取还原为现场的“声像”，并通过一定方式转化为人眼可见的图像，但转化后的超声图像并不完全符合通常意义上的现场图像。所以在对超声影像的处理分析上，原有计算机视觉的方法并不完全适用。所以超声成像技术在声波的散射理论、超声探头器件、成像映射机制以及影像模式识别等方面还有待进一步研究与发展。

5. 云计算与大数据

随着动物行为数据的不断积累，其维度与数据量已超出人工或是单台计算机可以处理的量级。云计算极大降低了普通用户的前期硬件投入，节约了计算时间成本，提高了资源整合度，使得资源可以合理分配利用，同时降低碳排量，间接保护环境。云计算技术是大数据时代的必然要求与选择。而且在大数据的背景下，通过云计算技术可以充分挖掘与发现原先未知的信息关联性，这与动物养殖管理中的饲养、繁殖、疫病、行为等多维数据间存在的潜在关联性不谋而合。未来基于大数据和云计算的动物行为分析技术势必成为一种高效的动物行为监测管理手段，将其运用在动物行为监测领域可挖掘更多的有效信息，增加行为监测的准确性，提高监测效率。

2.5 农产品无损检测

农业是支撑整个国民经济不断发展与进步的保障。随着我国加入世贸组织和人民消费物质的不断丰富，人类对可食农产品的要求不再满足于农产品的数量，也不再满足于农产品的安全、卫生，而是对农产品的外观、风味和营养等品质问题越来越关注，要求越来越高。在同等安全、卫生的情况下，选择食用优质农产品渐渐成为一种消费观念和消费文化，这使得对农产品按质量要素进行等级划分，实行以质论价、优质优价就变得切实可行。同时，在国际化竞争日益激烈的背景下，农产品能否进入国际市场，取决于农产品品质的优劣，因此农产品品质的检测就显得非常重要。农产品品质检测是保证农产品质量和安全的关键环节，但是，无论是采用化学分析还是仪器分析方法，

其实验本身的耗时性及对物料的破坏性是许多场合所不允许的，迫切需要一些新技术、新方法对农产品进行快速无损检测。

2.5.1 农产品的无损检测

无损检测技术（Nondestructive Determination Technologies, NDT）是一门新兴的综合性应用学科，它是在不损坏被检测对象的前提下，利用被测物外部特征和内部结构所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化探测其性质和数量的变化。根据检测原理不同，无损检测大致可分为光学特性分析法、声学特性分析法、机器视觉技术检测方法、电学特性分析法、电磁与射线检测技术等五大类，涉及近红外光谱、射频识别（Radio Frequency Identification Determination ,RFID）、超声波、核磁共振、X光成像、X光衍射、机器视觉、高光谱成像、电子鼻、生物传感器等技术。农产品的品质检测主要包括水果、蔬菜的检测与分级；畜禽、水产品类的检测与分级；经济作物的检测与分级（烟叶、茶叶、咖啡、蜂产品）；谷物籽粒的检测与分级（如大豆、花生、玉米、芝麻、大米）等；根据农产品品种及其物理特性的多样性，不同的农产品需要用不同的无损检测方法和检测装置来检测。对于农产品而言，其品质的无损检测方法通常是从外部给农产品以光、声、电、力等类型的能量，利用相应的传感器得到从检测对象中输出的能量，将输出能量与对象品质有关的物理化学信息进行关联并建立数学模型，从而在不破坏农产品品质有关的物理化学信息进行关联并建立数学模型，在不破坏农产品的情况（即在无损状态）下检测出定性或定量的品质信息^[41]。无损检测具有如下优点：（1）所用的对象可以反复使用，便于必要的连续跟踪测定；（2）可检测外观品质，也可检测内在品质；（3）检测速度快，能够实现农产品品质的在线检测；（4）操作简便，无需具备专业知识；（5）节约试剂，绿色、环保。

2.5.2 农产品无损检测主要方法与基本原理

2.5.2.1 光学特性分析法

由于农产品的内部成分和外部特性不同,在不同波长光线照射下会有不同的吸收或反射特性,即农产品的分光反射率或吸收率在某一特定波长内会比其他部分大,根据此特性结合光学检测装置能实现农产品品质的无损检测。目前用于农产品质量的光学检测主要有3种方法:规则反射光法、漫反射光法和透射光法^[42]。

2.5.2.2 声学特性分析

利用农产品的声学特性对其品质进行无损检测是20世纪80年代以来发展形成的新技术^[43]。农产品的声学特性是指农产品在声波作用下的反射特性、散射特性、透射特性、吸收特性、衰减系数和传播速度及其本身的声阻抗与固有频率等,反映了声波与农产品相互作用的基本规律。故根据农产品的声学特性即可判断其品质如何,并据此进行分级。利用农产品声学特性对其品质进行无损检测和分级是生物学、声学、农业物料学、电子学、计算机等学科在农产品生产和加工中的综合应用,该技术适应性强,检测灵敏度高,对人体无害,成本低廉,易实现自动化,是农产品无损检测技术发展的重点领域。

2.5.2.3 计算机视觉检测技术

计算机视觉是以计算机和图像获取部分为工具,以图像处理技术、图像分析技术、模式识别技术、人工智能技术为依托,处理所获取的图像信号,并从图像中获取某些特定信息。计算机视觉技术无需接触特定对象便可从获取的图像中得到大量的信息,通过对这些信息的分析得到物体尺寸、表面缺陷、外观形状、表面色度等具体信息,进而实现外观质量的综合评价^[44]。近年来,机器视觉系统不仅在可见光区域,而且扩展到了紫外、近红外、红外等区域。

2.5.2.4 电学特性分析

物质介电特性是指生物分子中的负电荷对外加电场的响应特性。农产品的生理变化伴随着电介质特征参数变化，而这一变化可通过对宏观介电特性参数的检测感知。因此，利用农产品的介电特性，可实现对农产品含水率、损伤、品质等快速检测^[45]。

2.5.2.5 核磁共振检测技术

核磁共振技术（NMR）是一种探测浓缩氢质子的技术，它对农产品中的水、脂的混合团料状态下的响应变化比较敏感^[46]。如果以适当频率的电磁波照射在外加磁场中的自旋核，这时处于低能态的自旋核就会吸收电磁波的能量，从低能态跃迁到高能态，这种现象称为核磁共振。此时，核产生一种核磁共振信号，给出核磁共振谱，即NMR谱。根据此核磁共振谱可反映分子中原子所处的状态，进而可以对农产品的内部品质进行综合评价。

2.5.2.6 X射线检测技术

X射线具有穿透能力，物质的密度大小影响X射线的穿透量的多少，通过对穿透量的分析，探明物质内部的情况。因农产品的密度与金属等物质相比要小得多，所需X射线强度很弱，通常称其为软X射线。近几年，软X射线已被成功地运用于农产品的自动化无损检测分级中^[47]。

2.5.2.7 光谱成像技术

光谱成像技术（Spectral Imaging）是20世纪80年代发展起来的新技术，综合了光学、电子学、信息处理、计算机科学等领域的先进技术，把传统的二维成像技术和光谱技术有机地结合在一起。集图像分析和光谱分析于一身，在农产品质量安全检测方面具有独特的优势。光谱图像是一个三维数据块，指在特定光谱范围内，利用分光系统获得的一系列连续波长下的二维图像。在每个特定波长下，光谱数据都能够提供一个二维图像信息，而同一像素在不同波长下的灰度又提供了光谱信息，其中，图像信息表征农产品的大小、形状和颜色等外观

特征；光谱信息能反映农产品内部结构、成分含量等特征。由此可见，光谱成像技术能够对农产品内对外部品质进行可视化分析，在农产品品质与安全性检测中应用高光谱图像检测技术是一种重要发展趋势[48-50]。

2.5.3 无损检测在农产品质量检测中的应用

利用近红外光谱、机器视觉、X射线、超声波等方法，实现了对农产品营养成分（蛋白质、脂肪、淀粉、糖度等）、功能成分（维生素、生物碱等）、有害成分（硫甙、芥酸、焦油、毒素）等内部品质以及大小、颜色、缺陷、形状、病害等外部品质指标的检测^[51-54]，如表2-1。

表 2-1 农产品无损检测技术的应用

产品类别	检测指标
谷物和油料作物	蛋白质、含油量、淀粉(直链淀粉和支链淀粉)、水分、各种氨基酸、纤维素等以及作物产地、季节等品质
乳制品、肉类、鱼类、蛋类	蛋白质、乳糖、脂肪、乳酸、固型物、水分、酪蛋白、盐分、热量、氨基酸、脂肪酸、纤维素、新鲜及冷冻程度、碘价、酸值、黄色素、红色素、酒精、乳酸、谷氨酸、葡萄糖、产品种类、真伪
水果蔬菜	酸度、含糖量、维生素、水分、纤维素、可溶性固形物等品质、产地鉴定、分类定性判别
饲料	干物质、粗蛋白、粗纤维、灰分、消化能、代谢能、氨基酸、植酸磷、喹乙醇等品质
烟草、茶叶	总氮、游离氨基酸、水分、尼古丁、烟碱、茶多酚、咖啡碱、总糖、还原糖、灰分、香料、保湿剂等，产地、登记分类
红酒、白酒、啤酒、饮料、咖啡	乙醇、含氮量、pH值、麦芽糖、咖啡因、葡萄糖、果糖、蔗糖、酸度、有机酸、产地、真伪等品质
转基因食品	蛋白或 DNA 的变化以及标记基因的转变、转基因食品的鉴定

2.5.4 问题与展望

农产品无损检测具备不破坏被检样品、检测速度快、污染少、可实现自动化等优势，在现代农业检测技术中占有重要地位。农产品无损检测技术除了上述主要技术外，还有基于嗅觉、味觉等无损传感技术，各种无损检测方法各有优缺点。与传统分析方法相比，目前的无

损检测技术存在着两大不足：分析精度低和研究基础薄弱。分析精度低：与经典化学分析方法相比，多数无损检测技术都不同程度地存在分析精度方面不足，最低检出限、有效检测范围、方法精密度、准确度和重复检测稳定性等是多数新型无损检测技术的主要问题；研究基础薄弱是限制其发展的另一个重要问题。目前多数农产品无损检测仪器设备均依赖国外技术，仪器设备价格高，基础数据库和应用软件依赖程度更高，技术上受限，其次，国内在农产品无损检测方面尚没有建立标准，第三，农产品无损检测技术没有形成理论完善的学科，导致研究方向散乱，阶段成果难以共享，相关学科交流困难，资源浪费。

无损检测技术是一门新兴的科学检测技术，以多学科交融为基础，具有高度优越性。随着无损检测技术的发展，数据处理技术、自动控制技术以及计算机技术在农产品无损检测中将发挥越来越重要作用。许多高新技术在农产品无损检测领域的应用，使检测技术由半自动化向自动化转化、外部品质向内部品质转化、规格由文字化向数字化转化、单项目检测向综合全方位检测转化，设备结构由复杂化向便携、数字、智能方向迈进。实现多目标在线无损检测技术，多种传感器融合技术，对提高农产品品质，增强参与国际竞争的能力，降低工人的劳动强度，具有重要的理论意义和实际意义，并能创造较大的经济效益和社会效益。因此，要特别重视高新技术的新成果向农产品生产加工应用领域转移的研究工作，尤其是要加强工业无损检测技术在农产品加工中的应用研究，推动农产品无损检测领域的快速发展。

第3章 典型农业专家系统与决策支持

农作物生产的各个环境都用到专家系统，随着计算机应用的日益普及与农业智能互联网技术的发展，建设农业专家系统成为加快农业科技知识和农业信息传播的重要手段，促进农业快速发展。本章围绕作物生产、病害诊断、水产养殖、动物健康养殖与多民族语言农业生产管理几个方面，应用人工智能的专家系统技术，在整理一个或多个农业专家提供的特殊领域知识和技术经验的基础上，用计算机模拟专家的智能，通过推理和判断，为农业生产中某一复杂的问题提供决策。

3.1 作物生产决策系统

作物生产具有分散性、区域性、时变性、经验性、稳定性和可控制程度低等特征，而农业信息化建设为克服这种弱势提供了有力的技术支持。对各种信息采集、分析和处理，是农业生产决策必不可少的环节，运用现代信息技术收集、开发、利用和处理农业信息资源，可实现农业信息资源的高度共享。20世纪60年代后期和70年代初期发展起来的决策支持系统（Decision Support System, DSS），是在传统的管理信息系统（Management Information System, MIS）理论上发展起来的一门适用于不同领域的、概念和技术都是全新的信息系统发展分支，也是目前发展最为迅速的一个分支。根据农业生产系统的自组织特征，日益复杂的作物生产信息处理需要现代信息技术的支持，作物决策支持系统成为了信息时代指导作物生产的重要技术手段。

3.1.1 作物生产决策支持系统的概念与功能

作物生产决策支持系统针对作物生产具有时空性、动态性，且易受气候、土壤和社会经济投入等综合因素影响的特点，在作物模型、专家系统、智能算法、“3S”技术等关键技术的基础上，根据系统的设计目标及要求，综合应用农学、生态学、空间信息技术、环境科学、统计学以及计算机科学等基本理论与方法，通过广泛收集与分析农业

基础数据（气象、土壤、品种、种植、经济及地图等数据）的特征，建立了包括空间数据和属性数据的农业数据库；将模拟模型的预测功能、专家系统的推理决策功能、智能算法的数据挖掘与知识表达功能、以及“3S”技术的实时定位监测与分析功能进行融合，具有综合性、智能化、通用性、网络化、标准化的特点，能对不同环境条件下的作物生长状况作出实时预测并提供优化管理决策，实现作物生产的高产、优质、高效、安全和持续发展。作物生产决策支持系统的快速发展和广泛应用为农业生产管理的现代化和信息化提供了技术平台，对农业科技和作物生产产生深刻的影响，成为农业信息技术的突出标志和重要支柱。

3.1.2 作物生产决策系统的发展

作物生产决策支持系统是在农业信息系统、作物模拟模型和农业专家系统的基础上发展起来的。近年来，作物决策支持系统的向多样化发展，包括基于生长模型的决策支持系统、基于知识规则的决策支持系统（专家系统）、基于知识模型的决策支持系统、基于生长模型和知识模型的决策支持系统等。上述每一类决策支持系统又可按结构特点和应用目的再分为不同的亚类。如农业专家系统可分为专家系统开发平台、专家系统开发工具、实时控制专家系统、基于模型的专家系统、基于知识的专家系统、专家数据库系统等。

1. 我国作物决策支持系统发展状况

近年来，我国作物决策支持系统研究大有后来居上之势。北京市农林科学院赵春江等、中国科学院合肥智能机械研究所熊范纶等在20世纪80、90年代建立了多个农业专家系统，为作物生长施肥、病虫害管理等提供了智能化决策支持。90年代，江苏省农科院高亮之等研制了的水稻计算机模拟优化决策系统（Rice Clutivational Simulation Optimization Decision Making System, RCSODS），江西农业大学戚昌瀚等开发的水稻生长日历模拟模型的调控决策支持系统，为水稻生长

管理的预测与管理提供依据。21世纪以来，南京农业大学曹卫星等利用先进作物建模理论与决策支持技术，开发了基于生长模型和基于知识模型的稻麦棉油花决策支持系统，实现了4个作物的生长发育与产量预测、产前管理方案的设计与产中管理调控，系统界面更友好，结果更准确，适用性更强。

2. 作物生产决策支持系统的发展趋势

(1) 和机理性的统一。随着未来作物模型机理性研究不断的拓宽和深化，模型机理性得到增强，有助于进一步了解生态环境和栽培技术措施与作物生长发育和产量形成的内在关系，进行不同生长条件和管理方式下的决策分析，进一步完善作物生产决策支持系统。然而复杂的模型增加了人们对系统理解的难度，增加了输入参数，使用者面临了系统输入难以获取，系统运行难以理解，结果难以分析等问题。未来的作物生产决策支持系统将更需注重系统的实用性及使用的人性化，使系统易于操作和理解，输入资料便于获得，提高人们对作物决策系统的使用兴趣，实现作物生产决策支持系统的全方位应用。

(2) 生长模型和决策支持系统的综合化。现代农业信息技术的发展，已经不能满足于决策一个作物生长一个季节的决策支持系统，需要研制多作物、多年连续的生长管理决策支持，作物生长模型（DSSAT）和农田生产系统模型（APSIM）是其中的杰出代表，但还在不断充实与完善；注重土壤过程，如土壤养分和水分以及有机质过程的密切关系，明确土壤养分动态关系与作物生长的机理过程；注重轮作序列、休闲、地面留茬以及同土壤有关的土壤侵蚀、土壤结构衰退和土壤酸化等过程的定量化。从而增强作物生产决策支持系统的综合性决策能力。

(3) 多学科合作和交叉将日益受到重视。在作物生长模拟模型、专家系统、知识模型、智能算法、神经网络、“3S”技术等关键技术基础上，将模拟模型预测功能、知识模型决策功能、智能算法黑箱功

能及“3S”技术空间信息管理功能相融合，最终建立综合性、通用性、数字化、标准化的作物管理决策支持系统，实现从点到面的作物生长发育与产量动态预测、作物生产智能管理。

3. 作物生产决策支持系统的存在问题

(1) 作物模型本身的问题。目前作物模型包含了作物生长发育及产量品质形成的一些基本过程，然而，由于作物生长系统中的部分机理过程并没有完全被理解，因此大多数作物生长模型仅限于对作物光温生产潜力、以及水分和氮素限制条件下作物生长发育过程进行模拟，关于极端气候条件对作物生长发育过程的定量影响、作物冠层结构对太阳辐射的利用、磷钾及氮磷钾等养分的互作对作物生长的调控、病虫害等生物灾害对作物生产力的影响等，不同的模型虽然有不同程度的涉及，但机理过程不强，尚缺少系统、完整而统一的科学理论与数据支持，需要相关学科的协同发展以及相应的试验研究来支持模型的构建。

(2) 作物生产决策支持系统输入的问题。作物生产决策支持系统决策的准确性取决于模型输入参数的可靠性。通常情况下，一个综合性的机理模型所需要的输入参数包括逐日气候要素、土壤理化特性、品种遗传特征和管理技术措施4大类，其中管理技术措施方面的信息较容易获取，但土壤理化特性和作物品种遗传特征需要通过查找文献资料获取。作物的生长发育受到实时气象条件的影响很大，作物生产力在很大程度上受到当年气象条件的制约，尽管气象要素的长期预测不断取得进步，但10天以上的长期预测，目前在世界范围内并没有达到令人满意的水平，因此决策存在不确定性。

(3) 系统过于注重科学研究而忽视实际应用。由于作物模型和智能算法过于复杂，大部分的系统对于非农业领域专家来说很难理解，因而难以应用。在系统设计上，很多系统并没有按现代软件工程的思想来实现，运用的编程软件比较滞后，界面不够友好，存在难以理解

把握的术语与输入。同时，对决策问题结构的了解不够深入，特别是尚无处理不良结构问题的、行之有效的方法和得心应手的工具。在系统输入方面，没有生成输入参数行之有效的办法与工具，例如需要提供可靠的气象资料生成工具、品种参数调试工具，大批量气象土壤数据的导入工具等。

3.1.3 作物生产决策农业数据库

农业信息数据库的建设是作物生产决策的基础性工作，对这些农业信息数据进行分析，对不同环境、不同作物品种、不同作物生育期生长状况作出实时预测并提供优化管理决策。目前，国内农、林、水、气、土地和环境等部门都在开展信息技术应用工作，而任何部门开展这项工作的第一步就是建立基础数据库。为避免低水平的重复，特别是要发挥数据库作用，关键是保持数据库内容的真实性和统一性，而各种环境资源状况是不断变化的，必须及时更新以保持数据库内容的现实性，否则数据库就不能发挥作用。因此，将农、林、水、土地等部门都需要的一些基础数据库，例如将农业资源信息、社会经济信息和科技信息等集中起来，统一建设农业信息综合基础数据库，由一个部门负责建设、管理，各部门共享，节省大量资金，并可集中力量维护以保持其现势性。

3.1.4 作物生产决策模型

作物生产具有复合性、复杂性和开放性，在进行作物生产管理过程中，需要了解作物自身依赖外界环境（天气、土壤等）的生长发育规律（建立作物模拟模型），然后根据这些规律性，人为地对作物生长平衡进行调整（建立作物生长决策专家系统），结合作物生理学、生态学、气象学、土壤学和农学等相关学科的关键技术，在综合量化作物生长发育过程及其与环境和技术关系的基础上，建立多个综合性作物生长模型，对作物生长系统中的主要机理过程进行较好的解释和量化，构建集适应性广、机理性强、预测性好于一体的作物生产力预

测模型，提高我国作物生产决策支持系统的决策应用性与可靠性，达到作物高产、稳产、优质、高效目的。

3.1.5 农机农艺结合的作物生产决策系统

作物决策支持系统作为一种软件系统，其发展速度完全滞后于农业信息技术相关的硬件技术的发展，例如农田机械装备、农业物联网技术的发展。然而，农业生产的机械化与自动化需要基于模型和智能算法的作物生产决策支持系统的智能决策。紧密结合作物决策支持系统与农业智能机械、农业物联网技术，综合考虑大气-土壤-作物相互作用的过程，对精确定量的播种、施肥、灌溉、喷农药等进行智能化决策，推动现代农业机械在作物生长决策中的快速发展，形成农机农艺相结合的基于作物-大气-土壤过程模型的作物生产决策支持系统，推动我国智能农业发展。

3.2 作物病害诊断专家系统

作物在整个生长发育过程中，由于受到病原物的侵染或不良环境条件的影响，致使生理和外观上发生异常变化出现病害，对作物的产量和质量都有很大破坏。由于基层专家匮乏，作物病害得不到及时准确的诊断，因此，急需快捷的技术手段将农业专家的知识传递到农民手中，提供对作物病害及时准确的诊治服务。专家系统作为人工智能的分支，在作物病害诊断领域已得到了广泛应用。随着物联网技术发展，结合传感器采集数据、作物生育数据、图像数据进行作物病害诊断的专家系统也越来越受到基层农技人员的欢迎。

3.2.1 病害诊断知识表达

病害诊断系统的构建需要大量且描述准确的诊断知识。系统诊断知识主要来源于植保专家、植保专业技术人员和各种资料。对知识进行特征提取，将其标准化。

病害诊断知识的知识表达具有以下层次化描述模型：

(1) 农作物病虫害组织层包括根、茎、叶、花果实等基本组织结构以及农作物的其他部位。

(2) 农作物的表观层主要包括农作物遭遇病虫害后的颜色、气味等属性，因此农作物的表观层的特性可以通过图像、视频等对比确认。

(3) 农作物周围环境层主要包括农作物周围的土壤环境、气象环境等属性，通过传感器来感知。

(4) 农作物种类层主要包括农作物属于哪一科目、种植季节、生长周期等。

农作物病害的诊断主要从以下几个方面进行分析：

(1) 农作物组织层。主要针对各种农作物组织器官的致病危害性，进行形式化分析，如一种病理现象出现在根茎处，它的危害程度肯定要大于叶表面处，因此其权重也就比较大。

(2) 表观层分析。通过分析农作物的外观，主要是气味、及颜色、病理所呈现出的形态变化等，比如，颜色属性的深浅、气味的浓重、病斑的形状和大小等这些特性都需要进行量化的分析。

(3) 周围环境层。一种农作物疾病的致病原因与周围的环境是密切相关的，因此周围的温度、湿度也都是定位疾病的一个很重要的知识。

(4) 农作物整体描述层。农作物的科目、大小、作物的生长时间以及种植季节，可以通过农作物的整体属性来定位病虫害的类别，减小搜索范围。

作物病害知识表示是为描述病害所做的一组约定，是知识的符号化、形式化、模型化表达。任意知识单元或事实可运用“对象-属性-值”三元组法来描述，结合产生式规则对知识进行知识表示。

事实1：蔬菜作物是白菜

事实2：发病时期在包心期

事实3：发病部位为叶片

规则：IF $V(\text{蔬菜作物}) \wedge T(\text{发病时期}) \wedge P(\text{发病部位}) \in \alpha$ Then $V(\text{病害名称})$

IF 病斑形状：多角形（0.3） \wedge 病斑颜色：黄褐色（0.08） \wedge 发病部位：叶部（0.15） \wedge 病部特征物质：潮湿时病斑背面生白色霉层（0.33）Then

白菜霜霉病0.86

白菜霜霉病获病概率：0.86

白菜细菌性角斑病获病概率：0.33

白菜软腐病获病概率：0.23

条件阈值：0.5

其中，条件项括号中数字为逻辑子式权重，患病概率为该条规则的运行结果，条件阈值为对规则运行结果进行筛选的临界值。

3.2.2 作物病害描述模糊处理

选取一种模糊化的算法，把病害诊断专家知识库里病害症状进行模糊处理。在层次化模型的基础上构造一个模糊矩阵，以矩阵形式来描述农作物病情。

采用模糊均值聚类算法（Fuzzy C-means Algorithm, FCM）来对农业病害进行诊断，聚类以后根据隶属度矩阵R值以及聚类中心C把所有对农作物病情的描述就变成一个模糊化的效果，这样的表达易于理解和描述。例如：根（腐烂程度）模糊为严重、很重、一般、有点、稍微五个级别。

3.2.3 病害诊断知识推理

作物病害诊断问题具有特殊的复杂性和模糊性，（1）事实的模糊性：如病斑颜色深浅、病斑大小、病害发生程度等。（2）获取事实的准确程度：如环境温湿度、土壤水分含量等。（3）专家知识的模糊性：

如根据发病部位、形状大小、颜色、味道、表观等推理出病害。(4) 推理结论或动作的模糊性。

植保专家诊断病害推理过程通常经过下面3步，第1步区分症状，利用已有经验和查询来的资料对症状进行区别，获得典型症状或综合各种症状初步诊断发生病害的可能性；第2步利用病体、病原和症状诊断三要素的关系进一步确定病害及病原；第3步依据上述结论，结合环境要素和生产管理要素最终确定病害并决定防治方法。

即在判断可能发生的病害时期后，给出病害部位及可能的病害症状，再根据详细症状，确定具体的病害类型。这一过程从典型症状，再到详细症状均为正向推理过程。从病害名称到病害症状、病害时期、部位逆推，将可能病害的详细症状对照用户输入病害的典型症状相比较，这些过程则属于反向推理过程。只有经过正反向推理的结合，才能使最终的诊断结果更符合实际，从而增加专家系统的有效性和实用性。

3.2.4 基于图像识别的作物病害诊断

病虫害图像分割方法主要包括：利用亮度、清晰度筛选算法，提取出清晰度、亮度适中的作物诊断图像；运用中值滤波算法，滤除图像噪音，并运用高帽变换和低帽变换对目标图像进行增强处理，增强后的图像对比度明显高于原始图像，且目标病斑更加鲜明；基于RGB彩色原理，通过变换色彩空间，将叶片绿色部分分割出来，分别交替运用灰度二值化、形态学膨胀、腐蚀、开运算、闭运算、小面积、孔洞填充和边缘平滑等算法将叶片部分进行分割，最终获得可能存在病虫害的疑似病灶部位。

病虫害图像特征提取方法主要包括：利用病斑提取后图像的形状差异提取面积特征信息；运用RGB色彩空间分析病斑颜色，提取疑似病灶部位RGB颜色分量均值，模糊标准化后获得颜色特征向量。根据作物纹理粗细程度，提取高频或低频能量，得到病害图像的纹理特征。

采用基于支持向量机与多特征选择的作物彩色病斑边缘检测方法分割并提取病斑区域的颜色、纹理、形态特征；利用双编码遗传算法与支持向量机的病害识别模型对特征降维，以获取有效特征，并对有效特征归一化处理；计算出颜色、纹理、形态特征的相似度，计算综合特征的相似度；对图像知识库中所有图像检索后返回结果。

3.3 水产养殖管理专家系统

3.3.1 水产养殖管理存在问题与发展趋势

水产养殖管理专家系统是指采用智能信息处理技术、先进传感技术、智能传输技术，通过对养殖水质及环境信息的智能感知，安全可靠传输，智能处理以及控制机构的智能控制，实现对水质和环境信息的实时在线监测、异常报警与水质预警和智能控制，健康养殖过程精细投喂，疾病实时预警与远程诊断。水产养殖管理专家系统是通过信息技术改变传统水产养殖业存在的养殖现场缺乏有效监控手段、水产养殖饵料和药品投喂不合理、水产养殖疾病频发等问题，促进水产养殖业生产方式转变，提高生产效率^[55]。

1. 存在问题

我国是水产养殖大国，水产品总量连续20余年位居世界第1位，水产养殖业在改善民生，增加农民收入方面发挥了重要作用。当前我国已进入由传统渔业向现代渔业转变的关键时期，现代渔业要求养殖模式由粗放式放养向精细化喂养转变，以工厂化养殖和网箱养殖为代表的集约化养殖模式正逐渐取代粗放式放养模式，但集约化养殖模式需要对水产养殖环境进行实时调控、对养殖过程饵料投喂和用药进行科学管理、对养殖过程疾病预防预警进行科学管控，这需要以信息化、自动化和智能化技术为保障，其中，人工智能技术可以有效地提升现代水产养殖业的信息化、自动化、智能化水平。

水产养殖管理专家系统包括水产养殖环境监控模块、精细喂养决策模块、疾病预防与远程诊断模块、生产管理信息化模块四部分内容。

(1) 水产养殖环境监控模块主要指通过物联网技术，实现对水质和环境信息的实时在线监测、异常报警与水质预警。从而保持水质稳定，为水产品创造健康的水质环境。其中，智能感知和优化控制模型是实现智能监控的关键技术。

(2) 精细喂养决策模块通过建立养殖品种的生长阶段与投喂率、投喂量间定量关系模型，实现水产品的按需投喂，从而降低饵料损耗，节约成本。该部分关键技术是饲料配方模型和精细投喂模型，重点解决“喂什么、喂多少、何时喂”的问题。

(3) 疾病预警与远程诊断系统是基于水环境因素和非水质环境因素，对水产疾病进行实时预警和远程诊断。该部分的核心问题是预警及时有效，疾病诊断自动准确。

(4) 生产智能管理子系统主要是将大数据技术应用到水产生产中，通过对生产、经营数据进行分析，给水产养殖提供决策依据。目前，在各专家系统中，存在着“数据丰富，知识贫乏”的问题，因此，生产经营数据分析模型一直是本领域的研究重点和热点。

经过多年的研究，水产养殖管理专家系统已初步形成了从关键技术研究、产品研发、平台建设、应用示范为一体的发展技术路线^[56]。目前我国水产养殖管理专家系统所存在的挑战主要表现在农业物联网关键技术不成熟、产业化程度低、标准规范缺失等方面。

2. 发展趋势

利用信息技术实现水产养殖健康养殖过程信息化监测、科学化管理、智能化决策、自动化控制是现代渔业未来发展趋势，如何提高信息感知的精度、完善精细投喂知识库、扩展疾病预警与诊断在不同养殖类型中的应用是信息化技术水产养殖领域应用的关键。采用信息技术，实现水产养殖全程信息可测、可控，健康养殖过程精细化喂养，疾病实时预警与网络化远程诊断，提高水产养殖生产管理效率，降低

养殖风险，促进传统生产方式转变，实现水产养殖高效、安全、健康、环保和可持续发展必将成为水产养殖业未来发展趋势。

从技术角度看，水产养殖管理专家系统是多种技术的协同工作，涵盖了身份识别、物联网架构、通信、传感器、搜索引擎、信息安全、信号处理和电源与能量存储等关键技术。将朝着规模化、协同化和智能化方向发展。需要更深入的感知、更全面的互联互通、更深入的智慧服务和更优秀的集成。

3.3.2 水产养殖环境监控

水产养殖环境监控是解决我国现有的水产养殖场缺乏有效信息监测技术和手段，水质在线监测和控制水平低等问题。其主要功能是保持水质稳定，为水产品创造健康的水质环境。水产养殖环境监控在我国一些大型的集约化养殖场已有一定的应用基础^[57,58]。

水产养殖环境监控系统通常由智能水质传感器、水产养殖无线监控网络和水质智能调控模块组成。其中结构如下图3-1所示。

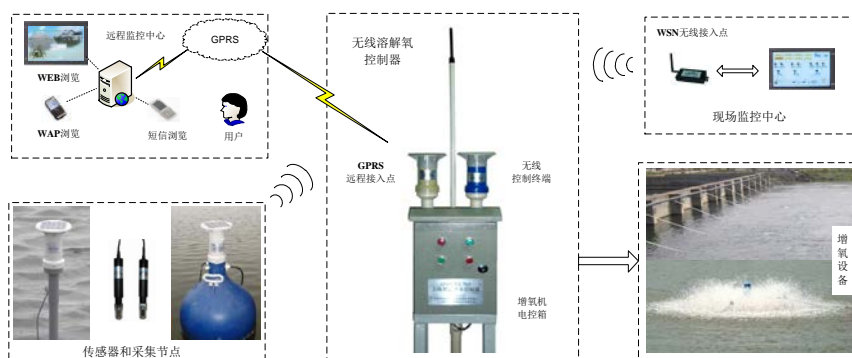


图 3-1 水产养殖环境监控模块

目前的传感器多采用智能传感器，智能传感器多采用IEEE1451智能传感器设计思想，使传感器具有自识别、自标定、自校正、自动补偿功能；智能传感器还具有自动采集数据并对数据进行预处理功能，双向通讯、标准化数字输出等其他功能。

无线传感网络可实现2.4GHz短距离通讯和GPRS通信，现场无线覆盖范围3公里；采用智能信息采集与控制技术，具有自动网络路由选择、自诊断和智能能量管理功能^[59]。

在水产养殖中水质是水产养殖最为关键的因素，水质好坏对水产养殖对象的正常生长、疾病发生甚至生存都起着极为重要的作用，因而在水产养殖场的管理中，水质管理是最为重要的部分。水质智能调控系统通过对水产养殖物联网实时监测溶氧、温度、pH、盐度、水温、气压、空气温湿度、光照数据进行分析，揭示水质参数变化趋势及规律，采用智能算法实现对水质溶解氧等参数变化趋势进行预测预警，以解决水质参数预测的难题。

3.3.3 精细喂养决策

精细喂养决策是根据各养殖品种长度与重量关系，通过分析光照度、水温、溶氧量、浊度、氨氮、养殖密度等因素与鱼饵料营养成分的吸收能力、饵料摄取量关系，建立养殖品种的生长阶段与投喂率、投喂量间定量关系模型，实现按需投喂，降低饵料损耗，节约成本。

精细喂养决策的核心技术主要包括：饲料配方优化模型和精细喂养决策。饵料配方优化模型是通过分析不同养殖对象在不同生长阶段对营养成分的需求情况，在保证养殖对象正常生长所需养分供给的情况下，根据不同原材料的营养成分及成本，采用遗传算法、微粒群等优化设计方法，优化原材料配比，降低饵料成本。目前大型的水产养殖企业已有比较成熟的配方和模型。精细喂养决策模型主要根据各养殖品种长度与重量关系，光照度、水温、溶氧量、浊度、氨氮、养殖密度等因素鱼饵料营养成分的吸收能力、饵料摄取量关系，研究不同养殖品种的生长阶段与投喂率、投喂量间定量关系模型。目前主要有一些海珍品的投喂模型。

3.3.4 疾病预警和远程诊断

疾病预警主要包括分为水环境预警模块和非水环境预警模块两部分。水环境预警模块通常采用的方法是利用专家调查方法，确定集约化养殖的主要影响因素为溶氧、水温、盐度、氨氮、pH、等水环境参数为准的预测预警。对于每一个影响因子，根据专家调查的方法，综合多个水产养殖专家的意见，来确定每个水质参数的无警、中警、重警的边界点，进而确定每一个警级的区间。水环境趋势预警模块是利用数据挖掘模型，根据当前水环境各个参数数值，预测两个小时或三个小时后的水环境各个参数数值，然后再利用状态预警的方法得出两个小时和三个小时后的警级大小和预警预案。非水环境预警模块是通过对饵料质量、鱼体损伤等因素的评价，确定当前的警级大小和预警预案。其中鱼体损伤根据无损伤、轻损伤和重损伤所占百分比来确定此因素的警级区间，而其他因素则同样按专家调查方法确定每个因素的警级区间，非水环境预警主要是对单因子进行评价，当某一个因素超过确定的警限就输出相应的预警预案。

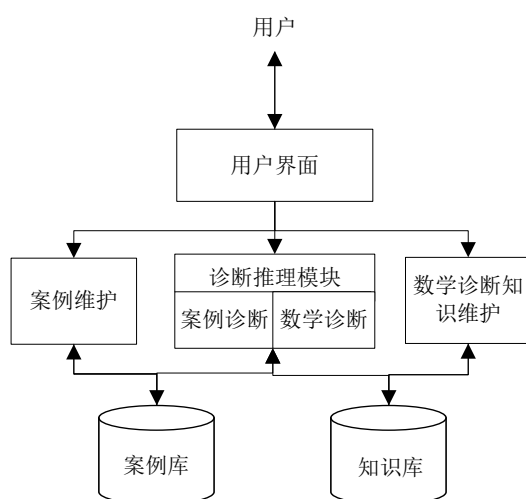


图 3-2 疫病诊断流程

如图3-2所示，疾病诊断通过案例诊断和数值诊断，对疾病进行综合推理并得出结论，最后将诊断结果返回给用户。其中，案例诊断

与数学诊断方法所用到的知识信息分别从案例库和数值诊断知识库中得到。

3.3.5 水产生产智能管理

水产养殖智能管理是将大数据技术应用到水产生产中，针对水产品养殖、经营过程中存在的问题，采用数据挖掘、指数预警、统计预警和模型预警等方法，构建预测分析和预警模型，为管理者和养殖户提供生产和销售决策支持。在生产方面主要包括上面已经提到的精细投喂、环境控制等功能，在经营方面主要包括市场价格预测、个性化服务等功能。目前，各专家系统中，普遍存在着“数据丰富，知识贫乏”的问题，因此，生产智能管理的广泛研究一直是研究重点和热点。

3.4 动物健康养殖管理专家系统

3.4.1 妊娠母猪电子饲喂站

我国是养猪业大国，目前每年出栏的商品猪数量已达7亿头以上，居世界第一。而繁殖母猪的数量经过不断的结构性调整，目前存栏大约在4000万头左右，大约占生猪存栏数量的10%左右，这意味着在我国需要饲养较多的繁殖母猪才能保证出栏商品猪的数量。总体而言，我国生猪养殖水平有一定程度的提升，生产力日益提高，但是整体水平仍远远落后于欧美等发达国家。据Agri-stats 2010年提供的母猪生产力行业基础报告，在国际上母猪繁殖力即生产力较高的国家如荷兰、丹麦、爱尔兰、法国等，一头繁殖母猪，年产窝数在2.3~2.5之间，一年能够提供的断奶活仔数高达24~26头，母猪死亡率为6.8%，断奶日龄提前到18.7天，断奶仔猪重量也能达到5.6kg。在如此高的母猪生产力水平下，断奶均匀度基本一致的仔猪在其后的饲养过程中，饲喂管理方便，发育健康，发病率及淘汰率低，保证了最终上市猪只数量及猪肉数量的稳定供给，维护了猪肉价格的稳定。

目前我国的母猪繁殖力相比存在巨大的差距。据农业部有关部门统计，目前母猪年产窝数一般为2，一头母猪年产活仔数大约为15~20

头，但能够提供的断奶活仔数仅为14头左右，为欧洲发达水平的56%左右，最终能提供出栏的商品猪头数大约在12头以上。这就意味着要提供相同数量的出栏猪只数量，则需要饲养的繁殖母猪的数量大约是高繁殖力国家的1.7倍以上，不仅需要多耗费大量的人力、物力及饲料资源，而且由此造成的排放及污染问题更加严重。提高繁殖母猪的生产力，提供健康及体重均匀度较好的断奶仔猪，是保证商品猪饲养的关键，不仅是养殖场的核心竞争力，也是一个国家养殖业水平的关键性指标。

目前，我国饲养的商品猪都是经过遗传改良后的大三元杂交品种，如杜洛克、长白、大约克等品种杂交而来，在遗传潜力上几乎同质化而无差异，引起母猪生产力差异的根本原因在于对母猪的精细饲喂与管理、护理上。而对规模化母猪场的精细饲养，随着劳动力成本的增加，也越来越离不开自动智能化设备的采用。为此，在现代养殖领域，尤其是针对母猪的饲喂技术上，智能化、精确化的饲喂技术已经成为必然发展的趋势，尤其是随着我国劳动力的结构及成本悄然发生了颠覆性变化，生猪养殖模式已经从散养、家庭饲养迅速向集约化及规模化、标准化的模式转变，具有智能化、自动化及精细化的养殖技术成为行业发展的迫切需求^[60]。

妊娠母猪电子饲喂站利用母猪采食行为特性与接近传感器的协同工作，控制饲喂器的精确下料，只有当母猪采食完预设的初次下料量并继续具有采食需求时，通过传感器的距离感知，才能继续驱动下料装置下料，一是保证系统计算的或设定的采食量能采食完，二是严格保证基本不出现剩余料的状况发生，避免不同猪只采食量计量的相互干扰，从而保证不同个体一次或多次实际采食量累计计量的准确性，同时提高设备的利用效率。同时还采用低频RFID技术实现对母猪个体的自动识别；通过全机械式通道，实现对母猪单头进入与离开

的连锁控制；通过饲喂控制器的模块设定、无刷电机的单圈旋转与接近传感器的协同控制，实现对定量饲喂剩余料量的最小化控制。

该智能设备的先进性在于采用了针对动物行为的感知技术与饲喂电子精确控制技术的有效结合，实现基于母猪个体营养需求的差异性饲喂。创新性在于：

(1) 母猪采食量的设定与采食量的动态模型结合起来，最大限度满足妊娠胎儿生长对养分需求的动态变化；

(2) 摒弃了过去的进入门为纯机械门，以及出口门与进入门连锁工作的思路，采用进口处传感感知与电动门结合的协同模式，控制进口猪只的依次有规律进入，提高设备的利用效率，为智能设备的实际推广应用解决技术控制屏障问题。整个设备在剩余料的智能控制及如何提高设备的利用效率上达到国际同类产品的先进水平。

3.4.2 哺乳母猪精准饲喂系统

研究发现，通过饲喂设备的研发，最大程度的发挥哺乳母猪的采食量，与提高仔猪的成活率及断奶重量有直接的关系。因此，研究解决母猪饲喂系统的一些关键问题具有实际意义。

哺乳母猪精准饲喂系统利用哺乳母猪采食曲线与中央控制器的协同工作，控制下料装置的精确下料，只有当母猪采食完预设的上次的下料量后，才能在规定的时间内继续下次采食，一是保证系统计算的或设定的采食量能按一定的程序采食，较少或根本不出现剩余料，二是均匀地采食，最大限度促进哺乳母猪的采食潜力，满足哺乳母猪及仔猪的营养需求。采用预设的个性化的采食量模型与无刷电机的精确旋转电子控制技术，实现对预设饲喂量的准确投料；通过储料仓的料位控制设备及设置的人工观察孔，可保持缓冲料仓日粮的新鲜度及减少结拱。智能饲喂系统采用4次/天的饲喂频率及与采食曲线的协同工作，与人工饲喂对比，能显著促进采食量的增加和显著提高平均日增重 ($p < 0.05$)。系统采用机电协同工作可行，无需传感器及电

子识别系统，设备控制简单，维护方便，可视化性能好，对环境适应性强，与进口设备比较成本具有明显优势，适合在我国中、小型的种猪繁育场的哺乳车间推广应用。

该智能设备的先进性在于结合了不同哺乳母猪个体及哺乳仔猪的数量，动态计算个体日粮供给量，与饲喂电子精确控制技术相结合，实现基于哺乳母猪个体营养需求的差异性饲喂。创新性在于：

（1）母猪采食量的设定与采食量模型及抚养的小猪数量结合起来，最大限度满足哺乳母猪对养分需求的动态变化；

（2）系统自动记录每台哺乳的采食量及采食量的节律，为今后开启哺乳母猪的采食行为大数据分析提供了数据在线平台。

整个系统通过智能设备控制与母猪的采食内在规律结合，最大限度实现哺乳母猪采食量最大化的技术实现上达到国际先进水平。

3.4.3 个体奶牛精准饲喂系统

在进行泌乳奶牛的精细饲喂和性能测定的研究中，需要准确计量每头奶牛每天的实际采食量，甚至每次的采食量与采食的时间。在获得每头牛的采食量后，结合每天计量的泌乳牛的产量，才能评价测定对象—泌乳牛的生产性能及产乳潜力，并获得完整的DHI（奶牛性能）数据，为制定泌乳牛的营养调控及品种改良计划提供基础数据支撑。但是，国内外一直以来只是通过对奶牛的单笼饲喂，人工称量每天每头牛的剩余采食量，计算单头奶牛每天的采食量。这种最为传统的饲喂量的计量方法，当饲喂的奶牛头数较多时，工作量大，难免会出现人为的错误，其次，也无法记录每头奶牛每天的采食规律。

随着现代信息技术，包括个体电子标识技术，自动感知（如近红外、RFID技术等）技术及自动控制技术的快速发展，为研究基于奶牛个体的自动饲喂及自动计量技术提供了可能^[61]。若能结合上述技术，提供一种能够自动识别奶牛身份并记录其采食量的饲喂装置，则可以大大提高数据准确性，为科研生产提供助力。

个体奶牛精准饲喂系统能够根据奶牛身份编号和服务器通信，获取奶牛进食情况，以此判定是否开放阻挡单元，允许奶牛进食，满足科学饲养、个性化饲喂的要求。在研究国际同类装置的基础上，集成物联网核心技术，即电子标识技术、无线感知技术与自动控制技术，实现了对奶牛个体的自动识别、自动计量饲喂，并能获得个体采食量规律曲线，为奶牛的精准饲喂技术的创新提供了基础的研究平台。

3.4.4 畜禽养殖环境监测系统

畜禽养殖环境监测系统将计算机技术与多种传感器数据融合技术，对畜禽舍内温度、相对湿度、光照强度、氨气和硫化氢等五种数据进行实时采集，通过Socket方式实现对服务器的实时监控，实现多传感器的集成应用；当感知的环境数据超过系统预设值时，系统可自动开启相应的通风设备、降温设备等；用户可通过手机远程对畜禽舍内各种数据进行实时监控、对比分析，并可通过移动手机端APP软件远程修改环境参数预设值，实现畜禽舍环境智能化管理^[62]。畜禽养殖环境监测系统基于ARM M3单片机智能化猪、奶牛养殖环境监测和控制系统，系统主要由环境控制箱、系统服务器端和移动软件端。环境控制箱由单片机、铁电、SIM卡模块、继电器、显示屏、电子变频器等多种硬件组成，主要实现三个功能，分别是采集功能、控制功能和通讯功能。

畜禽养殖环境监测系统创新性在于：

(1) 实时采集并保存畜禽养殖环境的五种环境参数，自动生成数日内不同监测指标数据曲线对比图；

(2) 系统对环境参数进行了预设值设定，当实际采集的数据达到预设值时，系统将通过自动打开或关闭风机等装备对畜禽舍环境进行智能化控制。

整个设备在畜禽养殖环境监测数据的采集及智能控制相关设备从而改变畜禽舍环境方面达到国际同类产品的先进水平。

3.5 多民族语言农业生产管理专家系统

针对民族地区群众在应用农业信息技术过程中的特殊性和薄弱性，通过模块构件集成应用，利用农业领域翻译模板抽取技术、汉民语料库技术、即时翻译技术、翻译模型构造技术、语言模型训练即时、统计机器翻译的编/解码器技术、民族语言显示和编码转换技术、软件工程技术、多民族语言知识获取与推理技术等，对现有“农业信息处理与知识管理平台”进行多民族语言知识获取、多语言文字适应、系统强壮性、平台可扩展性等几个方面的改造和提高，构建了多民族语言农业智能信息处理系统。本文以汉/蒙、汉/藏、汉/傣、汉/维和汉/彝双语农业智能信息专家系统为例，介绍具体实现与应用，获得构建多民族语言农业智能信息专家系统的一般方法。

3.5.1 多民族语言智能农业即时翻译系统结构

针对民族地区对民语即时翻译的需求，考虑到多种民族语言的不同特点，采用了“有限词汇”和“动态翻译”的技术路线，以基于统计的机器翻译方法，开放性的结构设计思想研制了多民族语言即时翻译系统。开放结构分为三个部分：一是将“有限”范围限制在农业领域内，建立多民族平行专业词典和语料骨架，供不同民族语言的使用者进行对应翻译，作为基础语料使用；二是在知识获取阶段，采用统计机器翻译思想，利用不同民族地区的农业知识库构造了语言模型部分、翻译模型以及解码器；三是在知识推理阶段，首先对每一条汉语语句进行断句、分词处理，然后通过解码器对应民族语言进行翻译处理，最后显示处理，针对未被翻译的词条进行未登陆词学习。

多民族语言智能农业即时翻译系统结构如图3-3所示，系统由六个模块组成，各个模块及其功能如下：

(1) 显示界面模块，利用网页中表格设置的技术，分别显示汉语和民族语言的推理结果。其中民族语言的结果按民族语言的显示习惯以弹出对话框的形式出现。

(2) 推理机模块，采用Agent技术基于模型知识表示和案例推理的方法，把用户在多种编辑器下写好的专业领域知识(也称知识库)“转变”成计算机应用软件，这个应用软件将模拟专家思维过程，提出专家咨询意见。

(3) 翻译请求模块，利用客户机服务器技术，主要是完成翻译的前期工作和后期的多语言显示可能需要的工作。前期工作主要是对源语言(汉语)进行文本断句，然后进行汉语分词，再进行相应的预处理，把结果发送给服务模块。

(4) 翻译服务模块，利用客户机服务器技术，主要完成解码的工作，由解码器构成。解码器就是把客户端发送来的预处理的结果进行解码，解码成所需的目标语言。

(5) 多民族语言显示模块，根据各个民族语言的特点并以网页的形式显示其推理结果。

(6) 知识库模块，主要存储农业领域的专家知识。

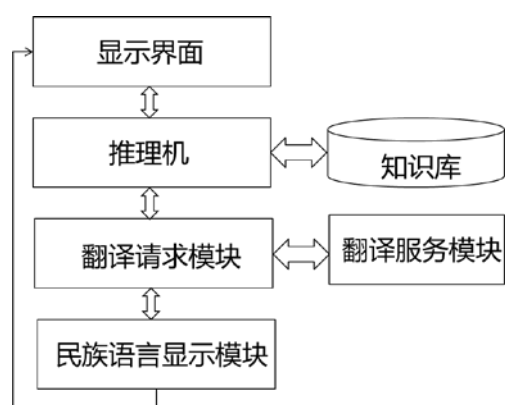


图 3-3 多民族语言智能农业即时翻译系统结构图

3.5.2 多民族语言农业智能信息处理系统机器翻译流程

农业智能信息处理系统知识推理过程中的汉/民机器即时翻译，采用改进的基于短语的统计机器翻译方法。

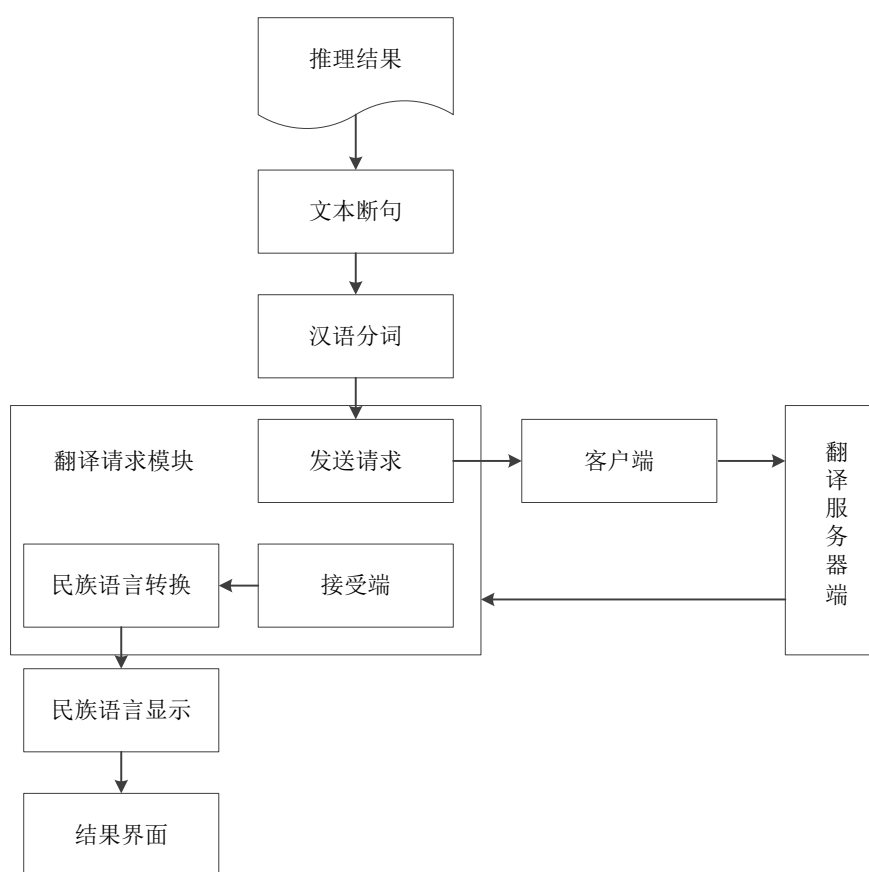


图 3-4 多民族语言农业智能信息处理系统机器翻译流程图

如图3-4所示，翻译流程主要可分为以下六个步骤：

- (1) 首先把咨询工作中所用的汉语知识进行文本断句；
- (2) 把进行文本断句的结果进行汉语分词；
- (3) 分词后的结果交给发送请求模块，然后发送请求模块对分词后的结果进行打包。建立客户端，通过客户端向翻译服务模块发送要翻译的文件；
- (4) 翻译服务器端响应翻译请求，把应答的结果返回给接收端。应答的结果即为翻译后的拉丁转写形式的民族语言；
- (5) 接收端接收到翻译后的结果进行民族语言的编码转换，即把民族语言拉丁转写形式转化成民族语言传统的书写形式；

(6) 民族语言转换后以网页的形式显示在推理机界面上，获得推理后的最终咨询结果。

3.5.3 多民族语言农业信息平台中的翻译关键技术

3.5.3.1 农业领域翻译模板抽取技术

以农业术语为枢纽，借鉴土耳其Bilkent大学Guvenir&Cicekli的TTL(Translation Template Learner)启发式方法，从两对互译的汉民双语对齐实例中，通过比较两个实例句子中的相同部分和不同部分，将相同部分作为常量，不同部分作为变量，再建立源语言和目标语言变量之间的对应关系，构建农业领域词汇的短语模板。

3.5.3.2 翻译模型构造技术

在知识获取阶段，增加语言模型构造部分，利用统计机器翻译思想，对不同民族农业语料库对齐训练以及语言翻译模型的构造；配套开发了词语对齐的提炼工具、词语评分工具、短语抽取和短语评分工具。

3.5.3.3 语言模型训练

采用统计机器翻译领域公认的成熟开源语言模型训练工具SRILM进行N-gram语言模型的训练；训练开始时选择了各种不同的平滑算法，这样训练结束后，就可以生成不同的语言模型；同时训练开始时还选择了生成的目标语言模型的文本和二进制文件两种格式。

3.5.3.4 基于统计机器翻译的解码器

根据学习得到的模型信息寻找汉语语句中最可能的民族语言目标译文。在常用的柱搜索解码算法基础上，增加了短语空间中搜索过程中的动态剪枝、预剪枝和改进的位置重排限制策略，提高了搜索速度和精度。此外，针对农业领域术语翻译唯一性问题提出“领域翻译模型”的概念，通过构建术语翻译表的方法，对农业领域术语的目标短语进行唯一指定，同时忽略该术语对应的翻译模型信息，保证了在

搜索过程中领域术语只存在唯一的翻译选择，提高了领域术语翻译的准确性。

3.5.3.5 民族语言显示和编码转换技术

根据民族语言文字的特征，并结合已公布的少数民族语言文字相关国家/国际标准，以统一规范的民族语文形式显示（如，蒙文以从上到下，竖显；维文、藏文、傣文和彝文以从右到左，横显）。编码转换主要是针对传统民文到拉丁民文的显示以及拉丁民文到传统民文之间的转换。

3.5.3.6 基于词平面的现代汉语高效分词技术

词平面分词系统以词为基础，针对目前分词系统中存在的问题，提出了以多元融合的词典结构、一体化全切分分词框架、局部歧义词网格、基于斐波那契堆的最优路径生成算法，解决了词检索速度、碎词过滤、歧义分析、最短路径等问题。

3.5.3.7 模板和统计的双层翻译技术

在基于短语的统计机器翻译方法的基础上，结合使用基于模板的翻译方法，每一个输入的源语言句子的翻译流程有三层：第一层为基于模板的翻译处理过程；第二层为基于模板和统计两者相结合的翻译处理过程，即首先调用基于模板的翻译处理，对剩余部分的处理采用基于统计的方法；第三层是传统的基于短语的统计机器翻译处理过程，解决了农业常用语的翻译问题。

3.5.4 多民族语言农业智能信息处理系统机器翻译结果

在上述系统结构和关键技术研究基础上，以汉/蒙机器翻译为例，构建了汉蒙农业智能信息处理系统机器翻译平台，在此平台中开展了汉/蒙农业咨询即时翻译系统的实验，针对蒙文的特点，该平台前期语料库的预处理中，增加了蒙文语料库、拉丁蒙文词性标注工具，汉蒙双语词语对齐工具，拉丁蒙文语料库词性标注采用改进的基于转换的错误率驱动算法实现。

平台界面由三大模块构成，分别是推理路径显示窗、交互视图和最终推理结果视图，如图3-5所示。最终的推理结果包括两部分，一是汉语的推理结果，以网页的形式显示；二是蒙文的推理结果，采用对话框的形式，对话框中的蒙文也是以网页的形式显示。推理结束时汉语和蒙文的推理结果同时显示。对话框中显示蒙文的推理结果，对话框下面覆盖的是汉语的推理结果，移动对话框即可以看到。

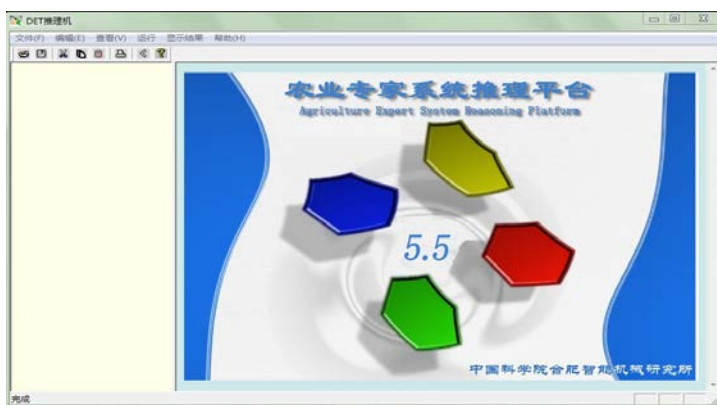


图 3-5 多民族语言农业智能信息处理平台

此外，两种语言的推理结果分别有保存和打印的功能。汉蒙语言农业智能信息处理系统推理结果如图3-6所示。



图 3-6 汉蒙马铃薯智能专家系统推理结果

多民族语言农业智能信息处理系统中的自动翻译系统，不仅可以用于汉蒙翻译，同样还可以应用在其他双语（如汉/藏、汉/傣、汉/维和汉/彝等）的翻译，在此基础上配合其他民文的农业领域语料库，

以及相应的字库和显示方法，开发形成多民族语言的农业智能信息处理即时翻译系统。目前以同样的方法，已经成功开发出汉/维、汉/彝、汉/藏、汉/傣等多语言农业智能信息处理即时翻译系统。基于此多民族语言农业智能信息处理平台，开发了水稻、玉米、小麦、马铃薯、青稞、茶叶和橡胶等汉/维、汉/彝、汉/藏、汉/傣双语农业智能系统，如图3-7、3-8、3-9、3-10所示。



图 3-7 汉维番茄智能专家系统推理结果

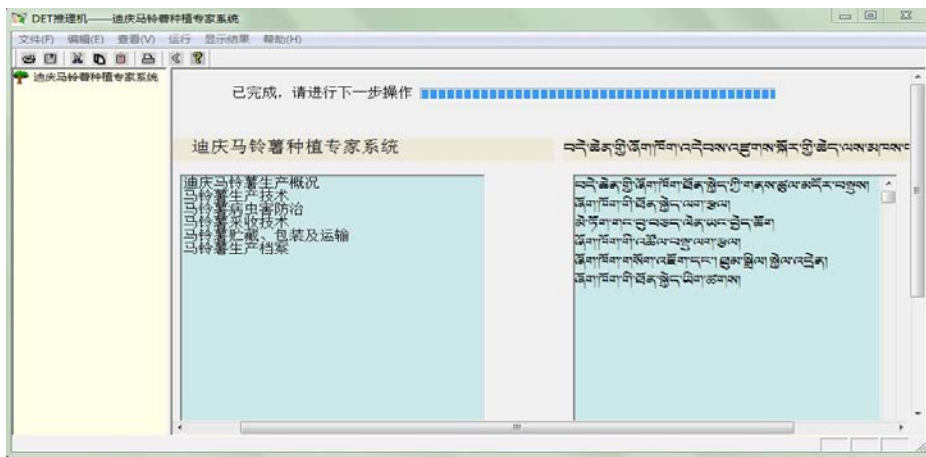


图 3-8 汉藏马铃薯智能专家系统推理结果

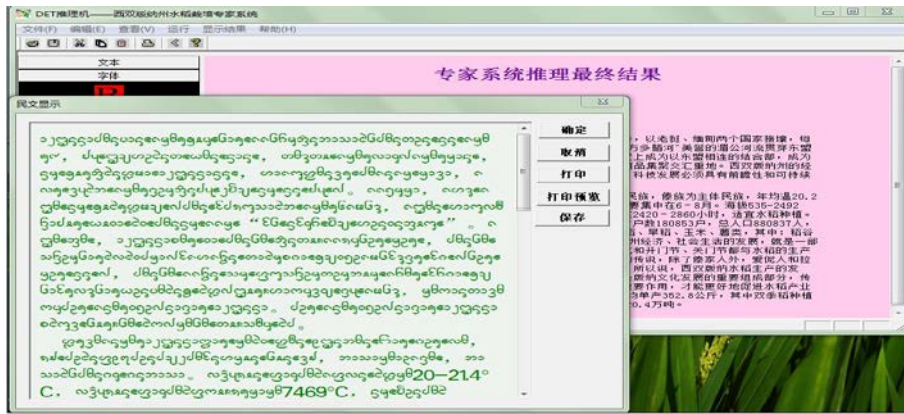


图 3-9 汉傣水稻智能专家系统推理结果



图 3-10 汉彝水稻智能专家系统推理结果

目前这些多民族语言农业智能系统，在内蒙古自治区赤峰市的巴林左旗地区、新疆维吾尔自治区、云南迪庆藏族自治州、楚雄彝族自治州、版纳傣族自治州等地开展了示范应用，取得了良好的社会效益和经济效益。

3.6 农业空间信息决策支持系统

农业空间信息决策支持系统是指利用遥感（Remote Sensing, RS）、地理信息系统（Geographic Information System, GIS）、全球导航定位系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）、计算机通讯网络等高新技术，对农业生产环境、生产活动等过程和或现象进行定期获取农业空间信息，建立农业空间资源数据库，结合地理学、农学、生态学、植物生理学、土壤学等基础学科，建立农业空间信息决策分析模型，对农业空间信息、农业生产过程和现象进行可视化表达、分

析与模拟，达到高效、合理配置农业资源，科学指导农业生产、农业产业结构调整以及农业产业布局等决策目的。

农业空间决策支持系统的技术支撑在于地理信息系统，其理论基础是系统论和协同论，其技术基础是空间数据仓库，是对海量时空数据的自组织、处理更新、分析，以及多源异构数据的协同和融合。从结构组成来讲。农业空间信息决策支持系统至少包含农业空间数据采集、农业空间数据库建库、农业空间信息决策分析模型、农业空间信息决策系统四个组成部分。

在农业空间数据采集方面。利用3S技术获取农业空间数据是目前的主要手段，从技术研究和成品研发也取得了丰硕的成果。如在农田空间信息采集方面，开发了基于GPS的移动式田间信息采集和基于高分影像数据的在线编辑系统。随着我国北斗定位系统逐步建成和推广应用以及在高分影像卫星发射能力的不断提高，未来基于国产定位系统和高分影像数据的农业空间信息采集技术和产品研发是重点方向。

在农业空间数据库建库方面。由于农业空间数据具有多源、多尺度和海量的特点。因此分析农业空间数据的特点，按照数据结构、主题应用、数据服务等内容研究是构建农业空间数据库建库的重要内容。在多源特征方面，农业空间数据表现两个层次。一是数据来源的多样性，如农业空间数据包含空间定位数据、遥感监测数据和大田、设施农业空间分布等多种空间地理数据。二是数据获取手段的多样性。如空间定位数据可以是GPS数据，也可以是北斗卫星定位数据。遥感监测数据可以是国产航空、航天影像数据，如中巴资源卫星数据，高分影像数据。也可以是国外的航空、航天影像数据，如MODIS数据、QuickBird数据、Landsat数据等；尺度是空间数据的重要特征，是数据表达空间范围的相对大小和时间的相对长短，不同尺度所表达的信息密度有很大的差异。在农业空间尺度方面，农业空间数据的多尺度可以从两方面说明：（1）空间多尺度。空间数据以其表达的空间范围

大小，分为不同的层次，即不同的尺度。这种特征表现在数据的可综合上，亦即根据数据内容表达的规律性、相关性及其自身规则，有相同的数据源形成再现不同尺度规律的数据。（2）时间多尺度。时间多尺度是指数据表示时间周期及数据形成周期。

在农业空间信息决策分析模型方面。由于农业行业的复杂特征，区域特征等方面影像，结合主题应用研究专用的农业空间信息决策模型一直是农业空间新决策分析的难点。随着地学空间分析能力不断提高，融合地理学、农学、生态学、植物生理学、土壤学等农业相关学科，也研发了大量的农业空间信息决策分析模型。比如农作物区域种植适宜性评价模型、重大动物疫情防控指挥决策模型、林火蔓延时态模型、空间分层采样和加密采样等模型。随着农业资源数据的不断积累以及大数据分析技术的快速发展，未来农业空间信息决策分析模型研究应该是跨主题、跨行业应用和分析，而不再局限于单个主体。

在农业空间信息决策支持系统方面，从农业过程角度看，可以涵盖农业规划、生产、经营、管理等多个方面。从行业角度看，可以涵盖种植业、养殖业、林业、农村经济、气象等多个行业。经过地理空间信息技术和现代农业信息技术的多年融合与应用，在系统建设方面，开发了大量的且应用成效较好的农业空间信息决策支持系统。以下重点介绍农业资源管理决策、重大动物疫情防控决策、农业环境评价等方面农业空间信息决策支持系统。

1. 面向农业资源管理的空间信息决策系统

针对现代农业发展的需要，基于空间信息技术、专家系统、通信技术、虚拟现实技术、现场视频等先进技术，整合涉农市场底牌、资源底牌、科技支撑、资金支撑四大方面的综合性农业信息，面向消费者、生产者、经营者和管理者，开发集农业综合信息查询、决策和综合服务等功能为一体的都市型现代农业221信息平台，有效协同集成农村经济信息、市场行情、产供销及影像地图服务、远程视频监控等

分布式异构软件系统，以报表、动态统计图和专题地图、虚拟现实等多样化、形象化展示、查询和分析农业空间信息，提升了农业信息化管理水平和决策水平。

2. 面向重大动物疫病防控应急指挥决策系统

面向各级动物疫病防控部门的重大动物疫病防疫和应对疫病突发事件的应急决策服务，集网络GIS、GPS、计算机网络和现代通信技术为一体的重大动物疫病防控与应急决策支持平台，主要功能包括防疫信息管理、疫情信息快速采集、疫点快速确定和疫区快速划定、疫情耗费评估、应急处置分析、废弃物掩埋选址、疫情个案信息管理与分析等功能。

3. 农业环境评价信息管理系统

农业环境评价信息管理系统，是在农业环境数据调查与数据库建设的基础上，结合农业环境监测与评价业务发展需要，实现对农业环境监测数据的存储、管理、查询、统计分析和定期数据更新。系统基于网络GIS技术和Web Services技术，采用模块化、低耦合度、开放性的设计思路进行设计与开发。系统主要功能包括：实现农产品产地监测点和耕地污染监测点的数据管理、查询、报表输出、统计分析和数据定期更新，产地环境质量和耕地环境质量评价、评价标准维护管理、评价结果地图展示、农业环境质量预测分析、生产区域划分和信息发布等功能。系统建设能为用户提供可查询、可分析、可决策的网络化的农业产地环境安全和耕地污染预警监控平台，可提高相关管理工作的科学性与效率。

4. 基本菜田管理信息系统

基本菜田信息管理系统是基于基本菜田划定结果，采用地理信息系统技术、网络服务技术和数据库技术等先进技术，开发集数据管理、编辑更新、数据共享与交换、数据查询统计分析、空间分析与可视化等功能为一体的基本菜田信息管理平台。系统主要功能有：基本菜田

信息管理功能、基本菜田信息展示功能、基本菜田占补平衡分析功能、数据共享与交换功能等。通过系统建设，实现了基本菜田划定信息的直观展示和动态管理，并为基本菜田占补平衡管理及蔬菜产业精准化和高效化管理提供信息支撑。

5. 污染源普查数据分析系统

污染源普查数据分析系统是利用污染普查原始数据，按业务需求对种植业、养殖业普查内容开展灵活的污染源数据空间分析与决策。系统主要功能有：分析种植业在不同地域范围内的数量和空间分布特征；分析不同类型耕地（水田、旱田）、保护地、园地面积、地块数量和空间分布情况；分析不同坡度、不同耕作方式的耕地面积、地块数量和空间分布情况。制作以乡镇为最小单元的化肥、农药、地膜单位面积的施用量空间分级分布图。根据畜禽养殖业污染源普查分区，分析不同地区畜禽养殖业污染物产生、排放情况，展现不同区域畜禽养殖业污染源分布情况。

总体来说，近年农业产业结构宏观调整、动物疫情监控和应急快速响应、农业资源综合利用等需求发展势头迅猛，农业管理决策的需求变化较为频繁，农业管理部门面临着管理决策滞后、不准确等问题。要解决这些问题，还需进一步深化空间信息技术和现代农业信息融合，为现代农业空间信息决策提供技术支撑。

第4章 典型农业机器人

2016年3月，随着“阿尔法狗”（Alpha Go）在与韩国围棋名将李世石的世纪大战中轻松胜出，人工智能的旋风又一次席卷全球。拥有“深度学习”（Deep Learning）能力的智慧机器人能否在更多的领域为人类服务，能否在智能方面最终超越人类，以及会不会对人类产生威胁等成为大家讨论的热点话题。农业是关系国计民生的“第一产业”，将智能机器人技术应用到农业领域，使用农业机器人帮助农民实现更加轻松、更加高效的农业生产，是非常值得期待的智能农业场景，农业机器人作业假想图如图4-1所示。



图 4-1 未来农业机器人作业假想图

事实上，农业机器人并不是一个新生事物。最早的农业机器人可以追溯到20世纪七八十年代的自动驾驶拖拉机。日本科学家近藤直认为农业机器人起源于农业机械，是一种新型的多功能农业机械，是在农业机械中加入智能属性的结果。截至目前，各种农业机器人不断涌现，如剪羊毛机器人、挤奶机器人、移栽机器人、嫁接机器人、采收机器人、除草机器人等。各种智能化技术，如GPS导航、机器视觉等

也开始大量应用于农业机器人。根据用途和作业特点，现有的农业机器人大致可以划分为畜牧管理机器人、大田耕作管理机器人、果蔬采收机器人、种苗培育机器人、农产品分拣机器人等。受制于农业作业场景、作业任务的复杂性以及当前软硬件技术发展水平，农业机器人虽然种类和样机较多，但是真正达到产品化水平，能够有效提高作业效率的案例屈指可数。较为成功的农业机器人案例要么类似于工业流水线要么类似于大型农机，例如挤奶机器人、农产品分拣机器人、自动驾驶拖拉机、除草机器人等。不得不说，无论是与以灵巧机械臂为代表的工业机器人相比，还是与人们传统观念中高智能的变形金刚相比较，农业机器人的发展水平仍存在较大的差距。

由于农业机器人在作业效率方面仍然难以实现对人工和大型农机的全面超越，部分科学家开始转换思路、寻找新的农业机器人应用点和作业模式，期望充分挖掘机器人在农业领域的优势和特长。在此背景下，农业信息采集机器人和农业人机协同作业模式逐步成为当今农业机器人研究的热点。机器人在农业信息采集应用中有着显著的先天性优势：无论是人工还是大型农机，都会受到作业人员易疲劳这一问题的制约，难以实现24小时不间断高效运转，从而影响信息采集的及时性和持续性；而农业机器人不存在疲劳的概念，因此在病虫害监测、测产估产等需要连续观测、及时反应的农田信息采集应用中效率优势突出。采用人机协同的作业模式是当前快速提高农业机器人作业效率的有效途径。农业场景复杂、作业对象多样，对农业机器人的智能算法提出了更高的要求。采用人机协同的作业模式，能够充分发挥人类在目标（如被遮挡的果实、杂草等）识别定位、作业路径规划等方面的智慧优势，结合机器人在动力、耐疲劳等方面的优势，实现降低农民劳动强度的高效农业生产。各国研究人员在以上两个热点方向开展了大量的工作，其中较为知名的成果包括德国博世（Bosch）公

司的BoniRob农业信息采集机器人和日本久保田（Kubota）公司的农业作业辅助外骨骼，如图4-2、图4-3所示。



图 4-2 德国博世公司的 BoniRob 农业信息采集机器人



图 4-3 日本久保田公司的农业作业辅助外骨骼

近年来，我国科研人员在农业机器人研发方面付出了坚持不懈的努力，并在飞行植保机器人、嫁接机器人、果蔬采摘机器人、大田除草机器人、农产品分拣机器人等方面取得了可喜的进步。本章将对茄果类嫁接机器人、果蔬采摘机器人、大田除草机器人和农产品分拣机器人等方面的研究进展进行详细介绍。

4.1 茄果类嫁接机器人

嫁接机器人是采用工业化流水线模式替代人工嫁接作业的机器人技术典型应用案例，其成功应用能够有效降低嫁接作业劳动强度、提高嫁接作业效率，对设施园艺的集约化种苗培育方式具有重要的影响。

4.1.1 研究背景意义

我国设施蔬菜栽培已超过33万亩，年商品种苗需求量达4000多亿株，市场需求空间巨大^[63]。设施育苗连年种植产生的连作障碍和病虫害问题日趋加剧，已严重影响生产。人工嫁接效率低、嫁接苗质量难以保证，加之人口老龄化和务农人员的严重缺乏，人工嫁接无法满足于工厂化育苗的生产需求。因此，自动化嫁接育苗已成为解决我国当前蔬菜种苗周年供应和育苗产业可持续发展的重要方式。

嫁接要解决的问题是换根，进而实现作物抗病和增效。基于机器人技术的自动化嫁接对育苗标准化要求较高，能够实现被嫁接秧苗的切口标准化切削、高精度的切口对接，以及自动切口固定等作业，具有智能、高效、环保等特点。因此，研究自动化嫁接作业生产方式和装备是工厂化育苗发展的必然趋势，具有重要意义。

4.1.2 国内外研究现状

自20世纪80年代起，蔬菜嫁接技术在日本、韩国、中国和欧美各国开始普及。调查显示，日本设施栽培西瓜100%、黄瓜95%、甜瓜90%均采用了嫁接育苗技术，而我国嫁接技术应用比重不足20%。目前，嫁接育苗技术逐渐获得重视，在山东寿光、北京郊区、海南三亚及东北地区已开始采用嫁接技术，并获得了较高的经济效益。虽然嫁接技术在日本、荷兰、法国等农业发达国家已广泛应用，但仅有少数国家开展自动化嫁接技术研究。1986年，日本最先开展自动化嫁接技术研究，韩国在90年代初也紧随其后开展相关研究，日本和韩国的嫁接机器人均实现商品化^[64,65]。中国相关研究起步较晚，技术研究大多集中

在高校和研究所，但均处于实验室样机阶段，尚未实现嫁接机器人的商品化。

由于茄果类作物的砧木和接穗差异性小，茎端面结构简单均为实心体结构，有利于采用机器人技术实现自动化嫁接。目前日本、荷兰、西班牙和意大利等发达国家针对番茄、茄子以及辣椒的嫁接机器人研究处于国际领先地位，其全自动嫁接生产效率为1000-1200株/h，成功率95%以上，半自动嫁接生产效率为300-400株/h，成功率98%以上。其中日本的研究成果最早最多，主要集中在20世纪90年代初到21世纪初，主要由TGR研究所、日本洋马公司、生研机构等单位主导^[66,67]。日本嫁接机器人具有如下特点：（1）以砧木和接穗穴盘整盘上苗为作业方式，对秧苗进行整列统一处理；（2）嫁接方法有贴接法和平接法两种；（3）切口固定采用嫁接夹和瞬干粘合剂固定方式，智能化程度高、效率高、技术水平相对较高。2012年荷兰ISO Group公司陆续开发出Graft1100、1200型嫁接机机器人，该类型产品技术最为先进，采用平接法嫁接，使用可降解专用硅胶嫁接夹进行固定，自动化程度高、结构最为复杂，要求按照欧洲硬质穴盘进行专业育苗。2010年意大利Tea公司推出了Grafting 1000、HYPERGRAFT 500型系列嫁接机，设置了可调节的切削机构和自动消毒系统，采用一种不干胶材料固定和瞬干粘合剂固定嫁接苗。2012年西班牙Conic公司推出一种自动上硅胶套管的半自动嫁接机，切口角度一致性高，是半自动嫁接的典型代表。

20世纪末我国开展茄果类蔬菜嫁接机器人研究以来，尽管在样机作业对象、工作效率和精度方面紧跟国际先进水平，但是在系统整体构型设计和样机试验应用方面，仍然以跟踪模仿为主，与我国当前农艺管理条件缺乏充分结合。国家农业智能装备工程技术研究中心、华南农业大学、浙江大学、西北农林科技大学等对茄果类嫁接方法进行研究，突破了一系列关键技术，但尚未实现商品化应用^[68-71]。

4.1.3 关键技术与研究热点

嫁接机器人是当今应用较为成功的农业机器人技术之一，其关键技术主要涉及茄果类茎秆标准化切削、秧苗切口匹配与精准对接、以及新型育苗方法与自动化生产系统集成等。

4.1.3.1 茎秆标准化切削技术

茎秆标准化切削能够获得高质量的切口，是完成自动化嫁接作业的前提。人工切削角度不一致，且随着作业时间的延长切削质量下降，影响嫁接质量。自动化切削技术能够实现秧苗切削速度、切削力、切削轨迹等参数的标准化作业，可大大提高秧苗切口切削质量。针对茎秆标准化切削技术的研究，应与秧苗生理物理、特性相结合，对实现嫁接机器人柔性作业具有重要意义。

4.1.3.2 针对秧苗切口匹配与精准对接技术

与工业机器人作业对象相比，农业机器人的作业对象是具有生命的植物，作业难度更高。秧苗切口匹配技术要求被嫁接的两个植株茎秆茎径误差在0.5mm以内。秧苗切口匹配技术针对茄果类作物的生长特点，构建作物标准生长模型，利用机器视觉技术识别嫁接匹配选择，可实现优质快速的嫁接配对选择。被嫁接作物切口精准对位与固定是嫁接的核心，该项技术研究可大大提高机器人嫁接作业的成活率 and 安全性。

4.1.3.3 新型育苗方法与自动化生产系统集成

传统育苗方式与农业机器人的生产技术要求不匹配，包括作业环境、育苗方式和管理方法等。嫁接机器人要求按照新型的育苗方式提供标准化秧苗，遵从农机与农艺相结合的研发理念，从种子处理、育苗方式、种植模式和作物品种选育等方面入手，全面提高嫁接机器人与作业对象的适配程度。新型育苗方法与自动化生产作业模式相结

合，系统集成后将有助于提高嫁接机器人作业生产效率和应用可靠性。

4.1.4 案例分析

我国是蔬菜产销大国，每年仅茄果类商品苗需求量达数千亿株，务农技术人员严重缺乏，生产成本与产能矛盾突出，集约化种苗产业急需农业机器人技术装备提升产品质量和功效，以适应现代农业发展需求，因此开展嫁接机器人系统研究和生产应用具有重要意义。

我国研制的茄果类嫁接机器人能够实现茄果类和瓜类作物的通用嫁接，系统实物如图4-4所示。



图 4-4 茄果类嫁接机器人系统

该系统由柔性夹持手机构、秧苗快速切削机构、自动对接与上夹机构、控制系统以及嫁接夹自动供应装置等构成，研发目标瞄准了嫁接方法的通用性，具备很好的实用性。

茄果类嫁接机器人生产效率可达600株/小时，是人工嫁接的3~4倍，嫁接成活率95%以上，配套制定了一系列的新型育苗方法来适应机器人嫁接作业，可大幅提高秧苗品质和产能，广泛适用于各大育苗工厂。

4.1.5 存在问题与发展策略

4.1.5.1 存在问题

嫁接的作业对象是种苗，现有传统种苗生产模式大多仍以人工作业为主，各生产环节与机器人嫁接要求不匹配，是制约嫁接机器人走向成熟应用的瓶颈。因此，需要从农艺环节颠覆传统生产模式，改造升级新型育苗方法和生产模式，为机器人嫁接提供结构化标准化作业环境，是农业机器人技术突破和广泛应用发展的必要前提。

当前国内外蔬菜嫁接机器人技术研究已取得了重大突破，国外育苗环境控制技术和生产模式相对完善，但由于嫁接机器人研究成本高，以及需求量稍弱等限制，尚未实现产业化应用，在作业功效和可靠性、适应性方面仍需进行深入研究。另外，我国现有的生产模式短期内全部改造升级实现困难，将农艺种植模式与嫁接机器人技术研究相结合极为重要，在探索种苗生长特性、柔性末端执行器和控制系统等方面开展研究探索，优化现有技术、开发低成本、可靠性高及实用性强的蔬菜嫁接机器人，全面适应我国特有的生产模式和管理方法为机器人嫁接应用奠定基础。

4.1.5.2 发展策略

农艺与农技相结合的产品设计理念是提高嫁接机器人适用性的关键。新型育苗生产模式可为嫁接机器人生产作业提供标准化的作业对象，在提高产品质量的同时提升产能。集成机电一体化技术、机器视觉技术和多传感器融合技术，综合生产成本和作业效率等因素，研究性能优异的执行机构和智能控制系统，是实现嫁接机器人高效作业的有效手段。针对被嫁接种苗的生理、物理特性研究则可利用光谱成

像技术探索嫁接愈合机理，从而为嫁接机器人技术研究提供理论基础。然后，通过对嫁接机器人平台构型进行优化设计，形成具备多功能嫁接的作业系统。

4.2 果蔬采摘机器人

鲜果自动化采摘机器人，是先进工业技术和装备在农业生产环境进行创新应用的经典案例，在基础理论研究和系统集成应用方面的研究成果，将对现代农业生产的节约高效发展具有重要影响。

4.2.1 研究背景意义

随着全球人口老龄化和城镇化进程的不断深入，农业人口流失、人力成本上涨与农产品生产供给需求之间的矛盾，已成为当前农业生产可持续发展面临的重要问题。研发能够代替人类作业的高效率、高质量、低成本的自动化作业机械，是从工程技术角度应对当前形势的重要手段^[72]。

由于鲜食果蔬需要具备良好的外观和口感，采收过程中需要对每个果实进行成熟度判断和精准采摘操作，依靠人工采摘劳动强度大、生产成本低，以草莓为例人工采收成本占总生产成本25%以上^[73]。因此从鲜食果蔬采收这一劳动密集型环节着手，研究自动化作业生产方式和装备，对于果蔬产品的安全供应和产业可持续发展具有重要意义。

4.2.2 国内外研究现状

目前日本、荷兰和美国等发达国家研究的针对番茄、黄瓜以及苹果采摘的机器人处于国际领先地位^[74-77]，其果实目标定位误差小于10mm，识别准确率85%以上，不同对象条件下每工作循环为10~50s。其中日本的研究成果最多，而且主要集中在20世纪90年代初到21世纪初，主要由东京大学、冈山大学等单位主导。日本农业机器人具有如下特点：（1）农业机器人本体类似于工业机器人，结构紧凑；有的直

接采用了工业机器人机械臂本体（2）智能化程度高，自由度较多，灵活度高；（3）采用的机器视觉技术比较先进。其典型代表的是冈山大学的西红柿采摘机器人，采用了7自由度工业机械手，彩色摄像机视觉技术，具有避障能力，较为先进。但实用性不高，到目前为止都没有实现商业化，主要是因为运行速度低、采摘成功率低和成本高，而目前最接近商业化的可能是冈山大学的Kondo N等人研制的草莓采摘机器人，从该机器人从1999年至今一直在不断改进。该草莓机器人采用履带导轨式导航，适合在温室或者大棚条件下规范化种植的情况。它采用双目视觉技术，在规范种植下它的采摘时间已达到8秒每个，正致力于推向市场。美国的农业机器人更类似于大型自动化联合收获机械，因为其收获效率很高，这有利于实现商业化，应用到真正的作业环境中，以柑橘收获机器人为代表。美国的Vision Robotics公司正在研制一款最新的橙子采摘机器人。其视觉扫描系统由一组立体摄像机组成，装在多轴机械臂的末端，利用其创建橙子树的虚拟三维图像，将橙子的大小与位置反馈回来，实现八个机械手的采摘运动。

20世纪末我国开展蔬果收获机器人以来^[78,79]，尽管在样机作业对象、工作效率和精度方面紧跟国际先进水平，但是在系统整体构型设计和样机试验应用方面，仍然以跟踪模仿为主，与我国当前农艺管理条件结合度不高。此外我国在解决此类复杂农业环境下目标识别方法研究还没有形成可行的技术方案，国外在此方面的研究取得了一定进展，如日本针对草莓和番茄采摘机器人设计的人工补光策略研究，克服温室多变光学环境；荷兰研究的黄瓜叶片自动识别定位测量方法，有效减少了果实目标受到叶片遮挡无法识别的情况。

4.2.3 关键技术与研究热点

采摘机器人的研究应用是农业智能装备技术领域的前沿热点，主要涉及农业复杂环境下作业目标视觉信息稳定获取、针对生物组织的

柔性无损操作以及融合农机农艺的生产系统集成等，这些问题也是限制当前农业机器人走出实验室进行产业应用的主要技术瓶颈。

4.2.3.1 农业非结构环境下作业目标信息获取

农业环境下不稳定太阳光照、作物丛生无序以及作业对象形态各异等工况条件，极大增加了作业信息获取的难度，是制约农业机器人研究和应用的关键难点之一。针对农业环境下视觉信息的获取方法和装备的研究也是国内农业智能装备技术领域的研究热点。

4.2.3.2 针对柔嫩果蔬的柔性操作手爪

相对工业机器人，农业机器人的作业对象是生物体，形状尺寸各异，作业环境多变，目标对象位置姿态随机分布。这样对于农业机器人末端操作部件设计需要满足各种需求，实现对目标的无损柔性操作。采用的多传感融合手爪、真空吸附和柔性夹持的方式可对特定作业对象实现无损柔性操作，同时研究农业作业对象的新材料，对于解决农业机器人的柔性操作也具有重要意义。

4.2.3.3 农机农艺融合的生产系统集成

以人工作业为主体的传统农业生产条件，与机器人对结构化作业环境的要求不相匹配，是制约农业机器人走出实验室进入农田作业的重要因素。基于农机农艺结合的产品设计理念，综合考虑生产效率和成本，改造作物生产种植模式和作物品种特性，提高农业机器人对作业工况的适应性，是促进新型农业智能装备实现产业应用的重要途径。

4.2.4 案例分析

中国是番茄生产和消费大国，全国番茄种植面积达146万公顷，其中鲜食番茄种植面积约占50%。中国番茄消费主要集中在鲜食番茄的消费上，人均消费量高达21公斤，占全国番茄消费总量90%。然而番茄依靠人工采摘费用约1.05万元/亩，占总生产成本30%以上^[80]，而

且劳动强度大，因此面对当前农业人口流失、生产成本高涨的客观现实，开展番茄采摘机器人系统的研究和应用具有重要意义。

我国研制的番茄智能采收系统如图4-5所示，系统主要由移动底盘、升降平台、视觉单元、机械臂、采摘手爪、控制系统以及其他辅助单元等构成。作为一种采摘机器人通用平台，可用于高架立体栽培模式下不同高度、层次的果实采收，提高了智能采收机器人的实用性。



图 4-5 番茄智能采收系统

机器人视觉系统对果串内果粒识别的平均准确率为83.5%，对果粒视觉对靶的平均偏差为8.38像素，果串长度测量平均误差为8.25毫米，宽度测量平均误差为5.25毫米^[81]。当前机器人采摘成功率为83%，单次作业耗时12秒。

4.2.5 存在问题与发展策略

4.2.5.1 存在问题

以人工作业为主体的传统农业生产条件，与机器人对结构化作业环境的要求不相匹配，是制约农业机器人走出实验室进入农田作业的重要因素。相对工业结构化环境，农业生产环境中太阳光照多变、作物丛生无序以及作业对象柔嫩易损等特殊工况条件，是机器人在农业环境下作业所面临的客观问题。

尽管当前国内外在采摘机器人样机的开发和试验应用取得了一定进展，但是在作业效率和可靠性方面依然无法达到产业化应用的要求。主要原因在于：面对非结构环境下的具有生物特性的作业对象，工业化机器人技术在信息获取和高效作业方面的应用受到极大限制。另外，在机器整体构型设计的改进和突破以及从农艺技术角度针对我国农业环境和需求方面的研究和分析较少，开发低成本、工作时间长、性能可靠以及容易操作的自动采收机器人是促进其走出实验室、进入农田作业的重要条件。

4.2.5.2 发展建议

集成多种信息感知单元，在获取作业环境可见的色彩、空间视觉信息基础上，通过融合光谱和激光探测技术，丰富机器人信息感知部件对环境特征的判别依据，克服非结构环境工况条件对机器人信息获取的干扰。

基于农机农艺结合的产品设计理念，综合考虑生产效率和成本，改造作物生产种植模式和作物品种特性，提高农机对作业工况的适应性，是促进新型农业智能装备实现产业应用的重要途径。通过对采摘机器人平台构型进行优化设计，扩展信息感知和任务执行部件，形成具备多种功能的通用作业平台。

4.3 大田除草机器人

随着人们对食品安全要求的提高及农业可持续发展的需求，有机农业生产及农产品越来越受到人们的关注。除草是农业生产中的重要环节，非化学方式除草是摒弃除草剂、生产有机农产品的重要保障。

4.3.1 研究背景意义

传统的中耕锄草机主要解决行间锄草问题。由于株间苗草集聚，机械锄草难度较大，目前主要依靠人工，导致劳动成本高且效率低。智能株间锄草机器人是一种能够实时识别作物行和苗草信息，并能控

制株间锄草刀高速作业的自动锄草装备，具有智能、高效、环保等特点，可大大减少劳动力，提高锄草效率^[82]。

4.3.2 国内外研究现状

智能株间锄草技术的研究多见于欧洲，原因是其政府对除草剂使用的限制，并规划在2005年前将5~10%的土地实现有机种植，同时日益增加的市场需求也促进了该技术的发展^[83]。近年来，美国、日本、加拿大以及中国等国也相继开展株间智能锄草的研究。

2002年瑞典哈尔穆斯塔德大学的Aastrand等研制了一种基于机器视觉的锄草机器人移动平台，导航误差为±2厘米^[83]。2003年英国克兰菲尔德大学Home研制了一种摆动株间锄草系统，平均株距为300毫米，前进速度在4千米/小时以下时锄草效果良好，8千米/小时情况下有17%的作物根区域被锄刀入侵^[84]。2014年西班牙塞维利亚大学的Pérez等设计了一款协作株间锄草机器人，1.2千米/小时为最佳的工作速度，8小时连续作业伤苗率为0.5%^[85]。

国内在智能株间锄草机方面的研究起步较晚，现阶段主要以研究部分关键技术为主。苗草信息获取方面，中国农业大学张春龙等提出基于机器视觉的最小耗时最大包容准确度的作物信息获取方法，试验表明该方法检测平均误差±5毫米，平均耗时小于20毫秒^[86]。中国农业机械化科学研究院的毛文华等人采用基于多特征的田间杂草识别方法，识别率为89-98%，耗时为157~252毫秒^[87]。株间锄草装置及运动控制方面，胡炼等研制了一款爪齿株间锄草装置，伤苗率小于8%^[88]。中国农业大学黄小龙设计的一种旋转盘株间锄刀，锄草率为88.6%，伤苗率为1.6%^[89]。

4.3.3 关键技术与研究热点

4.3.3.1 对行技术

对行技术，是指控制机具或拖拉机实时沿作物行方向运动，且锄刀相对作物行的横向偏差应控制在不会伤害作物范围内。对行分为人

工对行和自动对行，人工对行主要依赖于拖拉机驾驶员的驾驶技术。自动对行技术分为锄草机载体导航技术和锄草机自主对行技术。锄草机载体导航技术主要依赖GPS或机器视觉对载体进行路径规划和导航。锄草机自主对行技术使用主动横移装置对机器相对作物行的横向偏差进行实时补偿，横向偏差可通过机器视觉和GPS获得。

4.3.3.2 苗草信息获取技术

苗草信息获取技术可分为3类：机器视觉技术、地理信息系统（GIS）技术和近距离传感器实时检测技术。杂草和作物的辨别主要依靠机器视觉技术实现^[90-92]。

机器视觉技术是通过实时采集、处理、分析图像，辨别作物与杂草，并计算作物的位置信息。机器视觉优点在于在大田现场环境下可以对作物和杂草进行实时识别和定位，精度较高，硬件成本相对较低。缺点是视觉信息会受到光线、阴影、遮挡、作物大小、杂草密度、机械振动等其他因素的影响。

GIS技术是采用装配GPS的播种机或移栽机记录每棵作物的位置信息，整合并绘制成地理种子地图。作物GPS坐标配合里程值信息对作物位置进行实时跟踪，并控制株间锄刀相应动作。GIS方法对作物定位不会受到外界因素的影响，提高了定位精度，但该方法使用前需绘制的地理种子地图，由于地图绘制与锄草作业并不在同一个时间段，因此锄草作业现场出现的新问题无法及时获取；且该方法增大前期投入成本，对机器配套使用提出更高要求；整个系统对里程器的要求大大提高。

近距离传感器检测技术主要是通过使用近距离传感对作物进行识别和定位，此类传感器的优点是成本较低，操作方便，系统简单。但该类传感器只有当作物靠近时才能检测出来，因此无预判功能；且对机器响应速度提出更高要求；同时机器前进速度受到限制。

4.3.3.3 锄草装置

锄草末端执行器的性能直接影响锄草的效率。耙和铲仍然是人工锄草的主要工具；中耕除草提高了锄草效率，但只能清除行间杂草。根据株间锄草装置是否有动力源可分为被动锄草装置和主动锄草装置。被动株间锄草装置包括指状锄草刀、弹性锄草齿、垂直轴刷式锄草刀等，当作物相对杂草更健壮时，采用被动锄草即能满足锄草要求同时成本低。主动株间锄草装置可实现避苗和锄草动作，根据其运动形式分为摆动式、旋转式及两种方式的混合。其中摆动式主要由液压缸或气压缸带动锄刀进行往复运动，根据摆动轴线的位置，可分为左右摆动和上下摆动；旋转式根据旋转轴位置分为垂直轴旋转和水平轴旋转，垂直轴旋转方式包括带豁口锄刀、爪齿摆线锄刀等。

4.3.5 存在问题与发展策略

4.3.5.1 存在问题

国内对智能株间锄草技术的研究目前还处于初级阶段，主要针对苗草识别理论研究，没有系统地将科研产品与实际应用相结合，存在的问题主要包括：（1）机器视觉识别算法耗时过长。对于处理复杂状况，如杂草过多、作物过小等情况，复杂算法使图像处理时间增加，系统实时性降低；（2）视觉标定方法复杂。采用机器视觉获取作物位置信息，需要准确地标定像素点与实际距离的关系，在大田非结构环境下增加了标定的难度，准确度降低；（3）锄草装置的研制过于简单。目前国内外主要将重心放在苗草识别及锄刀运动控制的研究上，忽视了锄草执行机构的研制，锄草执行机构直接影响锄草效果、伤苗数量以及作物周边土壤流动状况，对作物生长和产量有直接影响；（4）液动锄草系统油源易受污染。液压供应主要通过拖拉机配备的液压输出，其输出油液为传动润滑两用油，在拖拉机内起润滑作用，因此油液污染较快，对应用电液比例阀进行调速控制的锄草系统有较严重影响；（5）电驱和气动锄草系统，受到能源供给的限制，续航能力弱，不适宜大田锄草作业；（6）系统集成性能不能满足田间大负载、高速

锄草需求。动力系统与锄草机器人速度匹配研究较少，实际这是目前提高锄草精度与效率的关键点。系统整体的鲁棒性较差，实验样机与实际应用差距较远。

4.3.5.2 发展建议

基于存在的主要技术问题，参考国外发展的里程和趋势，我国的大田除草机器人发展建议包括以下几点：（1）提高系统实时性，采用不同的苗草信息获取方法，减少作物识别和定位的耗时；（2）采用非结构环境下的相机标定方法研究，提高视觉系统的稳定性和准确性；（3）针对特定土质或作物研制专用锄草装置，并将实际锄草效果作为衡量指标；（4）基于株间锄草作业速度与对作物影响的研究，给株间锄草机的时速设计提供依据，（5）开展整机的研制与试验，不局限于关键技术点的研究，将技术点进行有机整合，研制功能齐全的智能株间锄草机器人；（6）面向用户。针对中国农业环境和农户要求，研制实用性强、种类多的株间锄草机；（7）通过优化现有技术，将作业效率作为研究重点，研制高效作业的株间锄草机器人。

4.4 农产品分拣机器人

我国是一个农业大国，随着我国社会的进步、生活节奏的加快、饮食结构的变革和加入世贸组织后参与国际竞争，消费者必然对进入市场的农产品的质量标准和分级包装等有更高的要求。我国目前已经逐步重视对农产品的拣选、分级和包装。农产品产后商品化处理是提高产品竞争力和产品价值的重要手段。通过产后商品化处理，可大幅提高农产品的外观和内部品质，提高其商品价值，是农产品从数量型向质量型、健康型发展的需要，是增强市场竞争力的需要，是进入国际市场、扩大出口的需要。高档次、洁净化的农产品如水果、蔬菜等往往需要按照大小尺寸及品质等级标准进行拣选、分类和包装。在分选的过程中，被分选产品的外观形状、内部品质、成熟程度和伤病等特征复杂，人工拣选时对产品等级的判断是根据个人经验、瞬间得出判断结果，其结果往往因人而异，将机器人引入农产品加工车间，可

以大幅度提高分选的一致性，降低产品的破损率、提高成产率、降低生产成本和改善劳动条件。农产品分拣机器人是一种新型的智能农业机械装备，它是人工智能检测、自动控制、图像识别技术、光谱分析建模技术、感应器、柔性执行等先进技术的集合^[93]。目前，农产品分拣机器人已经有了很大的发展，在农产品生产中广泛使用分拣机器人，将会极大地改变传统农业的劳作模式，降低了对大量劳动力的依赖，实现从传统农业向现代农业转变。

4.4.1 农产品分拣机器人发展现状

4.4.1.1 发达国家农产品分拣机器人的研发概况

发达国家对农产品分拣机器人的研制起步早、投资大、发展快，这些国家农业规模化、多样化、精确化的快速发展，有效地促进了农产品产后分拣机器人与其他智能化农业机械的发展。自20世纪80年代开始，发达国家根据本国实际，纷纷开始农产品分拣机器人的研发，并相继研制出了适用于不同水果和蔬菜等多种农产品质量品质分级分拣装备。日本是农产品分拣机器人研究最早、同时也是市场发育最为成熟的国家之一。目前，日本在果蔬分拣系统及果蔬拣选机器人的研究开发和使用方面居世界领先地位。英国研制的分拣机器人，采用光电图像识别和提升分拣机械组合装置，把大的西红柿和小的樱桃加以区别，然后分拣装运；也能把土豆进行分类，且不擦伤外皮。意大利UNITEC公司开发出一系列用于水果及蔬菜采摘后进行体积、尺寸和颜色识别的专用分拣机，能使径向尺寸小于40毫米的水果分拣速度达到18个/秒，大于40毫米的水果达12个/秒。1995年美国研制成功的Merling高速主频计算机视觉水果分级系统，生产率约为40吨/小时，已广泛用于苹果、桔子、桃和西红柿等水果的分级。目前，外国基于计算机视觉技术的农产品尤其是水果外观品质分拣技术与装备研究已经较为成熟，公司主要有澳大利亚的GP graders、法国Maf/Roda集团、荷兰Aweta集团、新西兰Compac公司、意大利尤尼泰克Unitec group、荷兰Greef、美国FMC和意大利Sammo等。

除了农产品外观品质分拣机器人外，在内部品质在线检测分拣设备研发方面国外也遥遥领先，这方面的研制工作主要集中于国外工厂和制造商。1990年日本首先推出采用近红外传感器的水果分选系统，90年代中期该系统开始应用于水果甜度分选。1996年日本FANTEC公司开发了透射式近红外光谱测试技术，可同时测定水果的成熟度、含糖度、含酸度、苹果中的糖蜜等多种指标，并推出袖珍式FRUIT 5装置，测定速度达到5个/秒，从而保证了日本国产水果在市场上的销售质量。1998年日本Mitsui Mining公司的Kawano等人研发了基于近红外传感器的水果分级线。自此很多制造商也开始进入农产品自动化分拣这一领域，目前，基于近红外传感的农产品内部品质分级系统较为成熟并已经商品化，主要供应商包括Aweta（荷兰）、Greefa（荷兰）、Shibuya-Seiki（日本）、Maf-Roda（法国）、FANTEC（日本）、Unitec（意大利）、Taste Tech（新西兰）等公司^[94]。

4.4.1.2 国内农产品分拣机器人的研发概况

20世纪90年代中期，我国开始了水果分拣机器人技术的研发，由于起步晚，与发达国家相比差距明显，农产品分选机器人的应用和发展还面临观念和技术两方面的挑战。但随着中国科技和经济的快速发展，尤其是国家对农产品产后质量的重视和不断加大农业机械化发展扶持力度，中国农机化事业进入了前所未有的良好发展时期，也为农产品分拣机器人提供了良好发展机遇。国内的研究单位主要有浙江大学、江苏大学、中国农业大学、国家农业智能装备技术研究中心等，已取得了良好的研究进展，并开发出了相应的产品，尤其是以浙江大学应义斌团队和江苏大学赵杰文团队为代表率先研发出了我国拥有自主知识产权的农产品分拣机器人，其项目“基于计算机视觉的水果品质智能化实时检测分级技术与装备”和“食品、农产品品质无损检测新技术和融合技术的开发”均获得国家发明二等奖。除此之外，目前国内也出现了一些农产品分拣机器人制造企业比如江西绿盟、北京福

润美农、江苏福尔喜、合肥美亚光电等^[95-97]。但是，这些厂家或机构所开发的农产品分拣机器人其分拣对象通常都是水果，指标主要是外观品质。除外部品质分拣机器人外，目前，国内关于农产品内部品质在线检测方面的研究尽管起步较晚，但经过国内相关研究单位的不懈努力，也已取得了一定的成果，研究单位主要包括浙江大学应义斌团队、中国农业大学韩东海团队、江苏大学赵杰文团队、华东交通大学刘燕德团队、国家农业智能装备技术研究中心黄文倩团队等^[98-103]，但是目前对农产品内在品质在线检测分拣机器人的市场应用还没有可见报道。

综上所述，农产品尤其是水果内部品质在线无损检测和分级技术具有广泛的应用前景。国外的研究起步较早，其部分农产品分拣机器人已迅速从实验室研究走向产品化实现。我国也有部分针对农产品外观品质分拣的机器人投入市场，就内部品质分拣机器人而言，相对于国外的进展，我国目前仍处于实验研发阶段，技术还不成熟，更没有自主知识产权的装备投放市场，仍然存在很多关键问题没有充分解决。

4.4.2 农产品分拣机器人的应用特点和支撑技术

4.4.2.1 农产品分拣机器人的应用特点

1. 作业季节性较强

农产品生产季节性较强，因此农产品分拣机器人使用也具有较强的季节性，并且农产品分拣机器人针对性也较强、功能相对单一，造成农产品分拣机器人利用率较低，增加农产品分拣机器人使用成本。

2. 分拣对象非标准

不同于工业材料，农产品通常具有容易受损的特点，而且由于其是自然生物体，其种类繁多多样，形状、大小变化较大，甚至同一种农产品物料其个体之间大小差异性很大，造成农产品分拣机器人的稳定性和适应性变差。

3. 操作对象的特殊性

分拣机器人操作者通常为农民，不具备较高的机械电子知识水平，因此农产品分拣机器人还须具备高可靠性和操作简单的特点。

4. 价格的特殊性

农产品分拣机器人的前期投入较大，结构复杂、研发制造成本较高，导致价格昂贵，超出一般农民的承受能力，如果不具备价格优势，就很难得到普及应用。

4.4.2.2 农产品分拣机器人的支撑技术

农产品分拣机器人涉及机械设计、信息论、计算机、传感器、控制工程、人工智能等学科，是20世纪发展起来的具有代表性和综合性的高新技术。同工业标准化产品分拣机器人相比，农产品分拣机器人还需要以下技术的支撑：

1. 机器视觉和图像处理技术

机器视觉技术是实现农产品质量品质检测自动化必不可少的技术。通常农产品外观品质的检测分拣均依赖于分拣机器人对所获取的农产品图像特征的正确分析、识别，它是实现农产品外观品质分选最为有效、最普遍的技术。

2. 生物传感器技术

研究生物的化学、光学、声学等特性，开发新的生物传感器，是提高农产品分拣机器人工作可靠性的重要手段。

3. 光谱建模分析技术

目前光谱技术是被证明最为有效的农产品内部品质检测分拣技术之一，研究有效光谱选择、分析、建模、优化等先进技术，提高模型在农产品分拣机器人工作中的稳定性和可靠性，有助于研发先进的农产品内部质量品质分拣机器人。

4. 智能控制技术

对于农产品特征的复杂性，进行数据建模比较困难，因此，基于模糊逻辑、神经网络和智能模拟技术的自学习功能十分必要，农产品分拣机器人可以在工人的辅助下，不断进行学习，并记忆学习结果，形成自身处理复杂情况的知识库。

5. 关键机械结构设计优化技术

机械体是农产品分拣机器人实施分拣任务的基础组成部分，在满足农产品分拣机器人功能前提下，运用现代设计手段优化设计机械构件，使其尽可能的轻巧、简单、紧凑、防损伤，从而达到农产品分拣机器人更强的可靠性、降低损伤以及减少控制系统复杂性的目的。

4.4.3 主要问题和建议

目前，农产品分拣机器人发展虽取得了较大进步，但是普及率还很有限，未来要加大农产品分拣机器人的应用，还有很多工作要做。

1. 防损问题

大部分农产品非常容易损伤，农产品在快速拣选的过程中会经过多个分拣功能段，比如清洗、上料提升、输送、分拣卸料、包装等，功能段与功能段之间的过渡很容易造成农产品的损伤，农产品一旦损伤，其存贮期将会缩短，也影响其经济价值。

2. 功能单一

目前农产品分拣机器人所完成的功能相对单一。广泛研究的是基于计算机图像处理的机器视觉技术，然而，该方法仅仅能够实现外观大小、颜色、形状及表皮缺陷等的检测，而农产品内部质量品质的检测对农产品分拣机器人而言仍然存在很多关键技术需要解决。以水果品质分选为例，无论国际市场还是国内市场，消费者在选购水果时不仅注重大小、颜色和外观形状等外部品质，更重视内部品质如糖度、酸度等指标。因此，应采用多种方法并用、配备多种传感器多信息融合开发农产品综合品质分拣机器人。

3. 集成度低

目前的农产品分拣机器人侧重于分拣功能，而作为农产品产后加工整套环节而言，还应该包括贴标、包装等环节，而这些环节目前主要还仍然靠人工完成，整体产后加工环节集成度较低。

4. 适应普遍性较差

目前研制出来的农产品分拣机器人大都只针对某一类农产品，甚至某一类农产品的某一种分拣指标，造成了农产品分拣机器人的使用效率低，间接地增加了农产品分拣机器人的成本。同时，农产品分拣机器人通常研究投入成本高，其性价比不能满足市场的需要，成为制约农产品分拣机器人商业化和进一步研究应用的瓶颈问题。

5. 农产品分拣机器人种类少

目前所研发的农产品分拣机器人主要针对苹果、柑橘等产量较大的水果，而对于一些特色水果比如芒果、菠萝等也有很大需求，但是相应的研究却很少，针对蔬菜等其他农产品分拣机器人的研究则更少。

第5章 农业精准作业技术

5.1 拖拉机自动导航

国外先进农业机械装备技术已开始融合现代微电子技术、仪器与控制技术、信息技术，加速向智能化、机电一体化方向快速发展，已拥有现代农业生产技术装备及配套生产管理技术，形成了系列的智能农业机械化作业装备和高效的生产监控管理体系。各种电子监视、控制装置已应用于复杂农业机械上，光机电液一体化的信息、控制技术在农业装备中的应用，有效提高了农业装备的作业性能和操作性能。在基于GNSS精密定位的农田作业机械自动导航系统研究方面，早在20世纪80年前，Willrodt就开始了对农用车辆的自动导航的研究。最近20年来，随着计算机和传感器技术的迅猛发展，农业车辆自动导航技术引起了越来越多学者的兴趣。一般来说，车辆导航系统至少由以下三部分组成：提供系统位置信号的传感器；产生系统特定校正信号的控制器；改变系统位置、方位状态的激励器。根据所采用定位传感器的不同，农用车辆导航方法可大致分为基于机械触头导航、激光导航、GPS导航、机器视觉导航、地磁导航、惯性导航等。其中，以GPS、机器视觉在导航技术中应用最为广泛，并且具有巨大潜力。GPS卫星定位系统是对机器本身的绝对定位，适用面广，不限制用户数量，在自动导航中可以与地理信息系统（GIS）的数字地图联合使用，来确定机器自身位置和方向。有两种厘米级精度的GPS在农业车辆导航系统中被广泛采用^[104-106]。一种实时动态RTK DGPS（Real Time Kinematics Differential GPS）能每隔0.2s刷新定位数据，精度达到2cm。另一种基于载波相位的CPDGPS（Carrier Phase Differential GPS），误差约为1cm。美国Stanford大学研究者率先把用于航天器的CPDGPS引入农用车辆自动导航领域，并以此建立了以John Deere 7800大型拖拉机为平台的导航控制系统。闭环直线跟踪的试验表明车速为3.25km/h时横向偏差的标准差小于2.5cm。之后，许多研究者对基于GPS的农

用车辆导航控制进行过研究。研究的对象包括插秧机、拖拉机、喷药机、农用小货车、割草机等，研究的重点主要集中在导航控制方法的设计，如PID（Proportion Integration Differentiation）控制、模糊控制、最优控制、神经网络控制、复合控制等。另外，也有一些对路径规划和避障技术进行过研究。如一些学者提出了一种动态路径搜索算法用于农用智能拖拉机沿目标路径和地头掉头时的自动导航。他们利用RTK GPS和陀螺仪来确定拖拉机的当前位置，用拖拉机的动力学模型来预测其在下一个时间点的位置。动态路径搜索算法的输出为拖拉机的横向偏差和所需的横摆角。根据这些输出，智能控制器将会产生适当的转向角操纵拖拉机沿着参考路径行驶。为了保证导航的精度和鲁棒性，Noguchi和Reid应用多传感器融合技术，开发了一套集RTK GPS、陀螺仪和机器视觉于一体的拖拉机自动导航系统。德国Hohenheim大学采用两个Trimble 7400型RTK GPS定位系统在饲料收割机上实现了自动导航。德国Halle-Wittenberg大学也在GPS导航和多传感器信息融合方面取得了研究成果。芬兰Modulaire Ltd公司采用DGPS和陀螺仪控制静液压驱动的橡胶履带拖拉机，使它能够按照任意预先给定的全局路径作业。荷兰农业与环境研究所采用RTK GPS技术对农具的工作轨迹进行控制，减少了农具在工作中的偏移^[107-109]。

国外对农用车辆自动导航技术的研究起步较早，已经取得了一些成果，而且有一些技术已经转化为商品。农机自动导航设备生产商以美国天宝（Trimble）公司和加拿大Hemisphere公司的农机作业GPS导航自动驾驶系统。美国Trimble公司的Autopilot自动驾驶系统由中文彩色显示器（内置一体化GPS接收机）、GPS卫星天线、方向传感器和液压控制组件等组成，作业精度是 $\pm(50\sim 100\text{mm})$ 。加拿大Hemisphere公司的Outback S3自动驾驶系统由A220双频GPS接收器、Outback S3农用导航仪和eDriveTC自动驾驶仪等组成，主要差分模式为OmniSTAR HP/XP和SBAS/DGPS，行间精度是100mm。

国内基于卫星导航技术的农机自动导航系统的开发研究起步相对较晚，始于上世纪90年代，大多借鉴了美国和日本的先进经验。浙江大学对基于GPS和传感器技术的农用车辆自动导航系统进行了研究，利用低成本GPS和固态惯性传感器技术为农用作业机械提供亚米级定位精度的定位信息，同时建立了农用作业机械运动学和动力学模型以估计其运动轨迹和操纵控制，这一农用作业机械模型在导航控制研究领域具有一定的通用性。为了提高导航定位精度和定位数据输出频率，开发了基于PVA模型和多传感器信息融合技术的Kalman滤波器，仿真结果显示，该Kalman滤波器可以提供高达50Hz的定位数据输出频率，定位误差在0.1~0.5m。华南农业大学将GPS技术、计算机技术、传感器技术进行集成，研制了一种以蓄电池为电源、电动机为动力的农用智能移动作业平台，以DGPS、电子罗盘为主要导航传感器，在样机模型上建立了DGPS导航控制系统，设计了基于预瞄跟随的导航控制算法，其核心是由航向偏差线性决定驱动轮速度差，使用该导航控制系统，农用智能移动作业平台样机模型可以实现预定义路线跟踪，直线跟踪精度在1米以内，曲线跟踪误差较大，达到2米。中国农业大学研究了在铁牛654拖拉机上搭建DGPS自动驾驶系统的硬件组成及关键技术，重点设计了自动驾驶控制的软件系统^[110-115]。

国外农机自动导航技术的研究开发应用已被广泛重视，商品化产品已广泛应用。日本等国家根据资源短缺、涉农人员减少、老龄化等现实，提高管理水平和劳动生产率，实现省力化，研究开发了多种基于GNSS技术的高性能农机自动导航系统。随着我国现代农业的快速发展，新的农业生产模式和新技术的应用，对农机自动导航技术在农业生产中的应用需求逐步显现。由于农业生产的季节性、农产品的价格、农业作业的复杂性等特点对农机自动导航系统的性价比、智能提出较高的要求，成为制约农机自动导航技术研究应用的瓶颈问题。基于GNSS精密定位技术的农业机械自动导航技术朝着高精度和无人驾

驶方向发展，作业控制系统研究开始应用网络化、光机电液一体化、智能化控制技术并逐步成熟。因此，结合典型农田作业环节，将GNSS高精度导航定位技术应用于农业智能装备领域，开展基于GNSS的农田作业机械自动导航关键技术研究开发，将能有效的推动农业领域技术进步和农业智能装备技术应用水平，缩短与发达国家在本领域的差距，促进农田作业机械自动导航技术实用化^[116-119]。

5.2 农机作业智能测控

我国农机装备行业发展迅速，但农机装备产品的技术水平和质量与发达国家有较大差距，现有主要农机产品可靠性低、作业质量差。如我国拖拉机的平均无故障作业时间为100h左右，发达国家拖拉机无故障作业时间高于300h；我国自走式联合收割机的平均无故障作业时间一般在30~40h，发达国家自走式联合收割机的平均无故障作业时间一般在70~100h。广泛应用现代信息、传感与控制技术是国外农业装备质量较高的主要原因。卫星导航、现代液压技术、控制技术、微电子技术和信息技术在国外农业装备上随处可见，使得国外现代农业装备向着智能化、机电一体化方向快速发展。装备作业故障在发生早期就由各种监测传感器实时监测，以便作业人员及早处理。智能作业装备作业过程信号实时监测也使得作业人员能使得作业装备尽可能运行在最佳工况，这是提高设备寿命和无故障率的重要手段。

联合收割机在农业发展过程中发挥着越来越重要的作用，高自动化和高智能化已经成为了近些年联合收割机的发展趋势。各种电子仪表监视装置以及电器、液压控制和液压驱动等先进技术也更多的应用到联合收割机上。如纽荷兰、迪尔等公司的收割机上使用了电子信息、电子驾驶操纵等系统来监测控制随机工作性能参数，如实际行驶速度、发动机转速、滑转率、动力输出轴、转速、作业面积、作业效率及工作时间等。日本在小型收割机研究上投入了大量资源力量，久保田研制的PR0208半喂入式联合收割机对输送螺旋杆处堵塞、集装箱

装满、水温、发动机油温、燃油油位等参数进行监测，从而实现监控报警和自动控制功能。我国联合收割机的监测系统起步较晚，机械自动化及电子技术水平相对落后，与国际水平尚有一定差距。

在拖拉机的智能产品研发方面，约翰迪尔、凯斯等国外品牌研制了激光平地设备、播种监控设备、精量喷药设备、拖拉机自动驾驶导航系统、实时收获测产系统等一批智能化作业装备，虽然其已经在我国黑龙江农垦、新疆建设兵团等规模化农场推广应用，但这些设备几乎都被美国天宝公司、拓普康公司、迪尔公司等国外公司产品所垄断，这种完全依赖进口农业装备支撑的规模化大农业生产方式，对保障国家粮食安全暗藏着巨大隐患。

化学肥料的合理使用是我国各地减少环境污染和降低农业生产成本的重要途径。利用处方图变量施肥是实现肥料合理利用的有效手段，但由于处方图制作过程复杂，因此实际生产中还无法大面积应用普及，随着传感技术的发展，针对作物的具体长势，通过对作物生长信息实现动态施肥管理，利用传感器根据作物冠层信息进行活体在线监测，实现大田作物实时在线诊断和机械化变量施肥，可以有效地提高化学肥料的利用效率和增加单位面积的粮食产量。另外由于我国农业生产方式从南到北存在着较大的差异，农户的生产规模也存在分散、小规模、中等规模和大规模种植四种方式，单一形式的智能化变量施肥装置无法实现各种规模种植条件下的所有施肥作业。分散经营农户由于土地经营面积小，无法实现机械辅助作业下的变量施肥作业，但农民又迫切需要根据种植作物品种，实现均衡化营养施肥，因此需要研发一种装置可以结合作物长势，通过冠层现场测试，为他们提供一种特殊配比的化学肥料，实现小面积土壤上的平衡施肥。而对于可以利用小型装备进行小规模种植的农户，则可实现传感器实时测定，机载变量同步作业的工作方式。另外也有一些机械化种植作业的农户，种植地块土壤内部不同养分的含量缺乏程度差异较大，在进行

农田作业的同时迫切需要完成机械化处方图多种肥料的变量施肥；而对于中等经营规模的农户，若采用小规模农户机械化平衡施肥方式，则作业效率较为低下，农户积极性低，因此必须针对他们的生产方式，开发出与他们生产方式配套的机械化施肥方式。

作物的苗全苗状是粮食高产的基本保证，作物播种时种子处在良好的苗床环境中是精准播种的重要指标，随着种子化肥价格的日益上涨，播种时过量投入种肥，既增加了生产的投入，同时也为后续作业增加了劳动量。合理的播种深度要求开沟深度稳定，播深均匀一致，播得太深，种子发芽时所需的空气不足，幼芽不易出土；播得太浅，会造成水分不足而影响种子发芽。基于电液控制的播深调节技术，不仅能够保证播深均匀一致，保证作物的发芽生长，而且能够实现精准播种作业，大量节约种子，从而提高播种作业的工作效率。同时，播种过程中堵漏监测技术一直未能在国内播种机上真正实用化，之前的研究开发也未能解决传感器和监测装置的可靠性问题。特别是随着保护性耕作机具的推广应用，原茬地和不同土壤条件下播种作业的高可靠性堵漏监控是一个亟待解决的问题。同时，播种过程没有明显地上导航标志，如何提高播种质量，避免重播、漏播也是精准播种技术解决的问题。因此，从技术和应用需求角度上看，亟需解决免耕或原茬地条件下播种作业过程中播种作业易堵漏、播种深度不一、重播漏播等关键技术问题，开发相应先进适用的技术产品。

随着农业生产方式由传统农业向现代农业的转变，农机装备也加速向大型化、智能化、集群化的方向发展。通过对农机田间作业工况进行实时采集来实现农机集群的远程监控和维护，对于农机产品运维和服务方式的转变，具有十分重要的意义^[120-122]。传统的农业机械运行维护主要是分散式、救火队式、严重依赖于人工经验的服务模式，当农机发生故障之后再采取措施进行处理。随着大型农机装备数量的快速增长和农业机械集群化的发展趋势，有经验的农机机手和维护人

员越来越短缺，传统的农业机械运维服务模式已经不能跟上农业装备现代化发展的步伐。因此迫切需要研究农业机械集群远程运维服务技术，建立远程运维平台，对农业机械集群进行高效的运维服务^[123-125]。

农业技术装备在人类社会发​​展、保障世界食物安全和农业现代化进程中具有极其重要的战略地位。发达国家在20世纪70年代中期开始，加快了农业机械装备与应用电子技术的研究及产业化开发，一批机电液一体化技术产品迅速开发出来并装备到农业机械上，实现了农业机械化作业的高效率、高质量、低成本和农田作业的舒适性与安全性^[126-128]。进入20世纪90年代，为大幅度提高生产效率，智能拖拉机与田间自动导航的自走式农业机械和农业机器人逐步在生产中得到应用，进一步提高了农业生产效率。我国目前正处于农业装备的快速发展阶段，但是智能化水平较低。2002年，全国机械化耕播收综合机械化水平仅为30.5%，耕地、播种、收获水平分别为47.1%、26.6%和18.3%。农业劳动生产率低于世界平均水平，与发达国家相差几十倍甚至上百倍。目前，我国农业装备的综合技术水平仅相当于发达国家20世纪60-70年代的水平，研发和创新的技术储备严重缺乏，适用品种少、水平低、可靠性差，远不能适应现代农业生产发展的需要，严重滞后于农业生产技术的发展，国家每年不得不花费数十亿元进口农业智能装备。全国人大常委会第十次会议于2004年6月25日通过了《中华人民共和国农业机械化促进法》，并自2004年11月1日起施行，开始了我国农业装备事业发展新的战略机遇期，积极开展农业智能装备技术的研究开发，符合我国未来农业发展的国家战略需求。保障国家食物安全，巩固和提高农业综合生产能力，迫切需要突破产业发展的技术“瓶颈”。人口增长、资源约束、人民生活质量提高和农村劳动力转移，对农业生产能力提出更高的要求^[129-130]。要确保农产品有效供给，提高品质和质量，保障农产品质量安全，必须依靠科技创新，深入挖掘生物遗传潜力，创新种养模式，大幅度提高土地生产率。现代

农业技术装备是现代农业发展的物质基础，我国农业机械化研究和应用已经取得了相当成绩，但是在农业机械装备的自动化、信息化和智能化等技术方面的研究尚处于起步阶段，而且由于经济、地理等诸多因素的影响各地区间及主要农业作业项目间发展极不平衡，与欧美、日本等发达国家相比更是相差甚远，这就迫切需要我们加快农业发展的步伐，大力开展农业机械装备的自动化、信息化和智能化等技术方面的研究，提高农用移动作业机械的智能化水平。

5.3 果树对靶施药

根据2014年全国水果生产形势分析会发布数据，我国果园种植面积接近1.89亿亩，已成为世界第一大水果生产国。长期以来，果园种植模式主要以小面积个体经营为主，果木种植不规范，园区作业缺乏合理的规划，导致果园作业无法引入智能机械，果园作业机械化程度低。

5.3.1 我国果园施药作业现状

果园病虫害防治是果园中最主要的、劳动强度最大的作业，一般每年要喷药8~12次^[140]。目前果园中大多采用高压喷枪作淋洗式的喷雾方法，沉积到果树上的药液量不到20%，其余的大量农药流失到土壤和周围的环境中使环境受到污染，而且操作人员的劳动强度大、条件差、生产效率低。喷药作业的方式直接影响着果树生长、产量、果品质量、经济效益及生活环境。以北京市为例，全市231万亩果园有动力喷雾机26777台，平均86亩果园有一台，其中多数以简易人力或电动喷药机为主，这些机械远不能满足果园病虫害的防治需求。

随着先进理念的引进以及人力成本的增加，我国果园经营方式开始发生转变，中大型果园逐渐引入西方种植模式。成规模的果园无法承受人工增加所带来的成本压力，而人工效率低下造成的病虫害防治不及时导致果品品质下降，这些因素导致果园迫切需要引入果园智能喷药机，提高果园喷药的机械化和智能化水平。而规范的果木分布与完善的配套设施也为果园喷药机的应用提供了有利条件。

5.3.2 基于靶标探测的智能施药

精细农业果园生产管理中，单棵果树是最小的作业单元，果树的位置、树冠大小是果树施肥、灌溉和果树病虫害防治中确定投入量多少的重要依据^[132-134]。无靶标喷施造成的靶标以外大量农药沉积是果园农药残留的主要原因之一，对靶喷药技术是降低农药残留的有效手段，其关键技术是靶标探测技术^[135-137]。目前果园靶标探测主要采用红外、图像和超声等探测技术感知果树冠层形状及位置信息，该方法能准确判断稠密树冠存在与否，甚至能很好地探测出靶标外形轮廓^[138-139]。

国内靶标探测器已经能够实现农作物探测、喷雾动作执行等一系列动作，动作灵敏，初步能够满足生产要求，但仍然存在着一系列问题，即探测器探测到任何靶标时都会动作，包括一些非植物障碍物，如枯树、电线杆、栅栏、麦茬等，给这些靶标喷施农药也会造成浪费和环境污染。由于作物植株之间有空间，一般还有不等株距和缺苗现象，喷在植株之间的药液不能有效地沉积在植株上，形成无效喷药，不仅影响了喷药防治效果，且浪费药液，增加防治成本，加剧了对环境的污染。解决传统的连续喷药效率低的有效途径之一是将连续喷药变为按需间歇喷药。为此，将自动化技术与喷雾技术相结合，根据对植株目标的自动识别和控制，实现对靶喷药，达到只对目标物实施喷药的目的。

5.3.3 靶标探测技术

5.3.3.1 靶标光谱探测技术

靶标光谱探测基于红外光漫反射探测原理，采用红外发光器发射红外光，通过果树靶标叶面反射，远距离聚光，光敏原件接收反射光，经过自然光降噪和电路处理，将检测到的靶标信息转换为电压信号。

北京农业智能装备技术研究中心的邓巍等通过优化红外发射电源系统，形成了包括正弦波振荡器、整流电桥、直流偏置、加法器、

窄带滤波器和大功率压控电流源组成的电源系统，使光强度可以正弦方式变化、光强稳定且波形失真小、正弦信号较纯净。在红外探测光路上增加了凸透镜和颜色传感器及对红外发射进行不同编码的调制等其他辅助方法来提高红外靶标探测的性能，减少其他信号的干扰，增加红外探测的距离和精度。

南京农业大学的何雄奎等人利用红外发射模块与红外接收模块搭建的靶标探测电路来探测靶标的有无，通过红外自动对靶系统分别分布在靶标高度范围的上中下3段探测当前对应高度靶标的有无来控制喷头电磁阀的动作，实现对靶施药，如图5-1所示。



图 5-1 基于红外靶标探测的对靶喷药机

采用红外靶标探测技术易受环境条件影响，靶标信息量获取单一，难以满足精准施药的要求。

5.3.3.2 超声靶标探测技术

超声靶标探测主要利用超声波回波原理，通过分布在不同高度位置的超声波传感器在移动中对靶标，冠层边缘进行距离扫描测量，根据靶标冠层的距离扫描值绘制出靶标冠层的直径及外形轮廓信息。

北京农业智能装备技术研究中心王秀、西北农林科技大学的翟长远等利用超声波传感器技术进行果树靶标的探测，用多个超声波传感

器对果树靶标进行冠层扫描，根据距离扫描值计算获取了靶标的体积信息。

华南农业大学的俞龙等在超声波探测基础之上结合了姿态航向参考系统 (Attitude and Heading Reference System, AHRS)，通过AHRS可实现车辆坐标系到大地坐标系的空间坐标的旋转和平移转换，由此直接获得基于大地坐标的果树靶标的距离点阵信息。通过坐标转换获得的靶标体积更为准确。

实际作业过程中，为提高探测精度，采用前置的若干超声波传感器组成探测列阵，信号经过滤波以及转换电路，传输给控制器集中处理，结合拖拉机作业状态，实现了对果树树冠的动态体积测量。基于超声靶标探测的对靶喷药机如图5-2所示。



图 5-2 基于超声靶标探测的对靶喷药机

超声靶标探测技术依赖于传感器本身的精度和传感器的数量，基于有定点位置和有限点探测，对于不同的果树靶标，需要重新校验，难以适应果园的复杂环境，测量精度也不高。

5.3.3.3 激光靶标探测技术

激光靶标探测采用连续波相位式激光测距扫描，根据波段的频率对激光束进行幅度调制并测定调制光往返测线所产生的相位延迟和

调制光的波长，换算探测距离。采用旋镜技术实现在二维扫描，结合拖拉机的运动状态，实现对靶标的三维扫描。

国外学者在激光靶标探测方面做了深入研究。莱里达大学的Joan R. Rosell等利用二维激光雷达扫描果树靶标，能够快速地进行非破坏性获取靶标的三维结构，包括几何形状、大小、高度、截面等等信息，获得的数字化靶标三维结构模型与真正的靶标有着良好的一致性。Joan Ramon等同样利用激光雷达进行了非破坏性的靶标体积测量，构建了三维数字模型，获得了树的树面积指数，再由树面积指数计算获得靶标的LAI（Leaf Area Index），同时与进行破坏性试验的数据进行比较获得了作物叶面积。

国内研究人员也开展果园靶标激光探测技术的研究。北京农业信息技术研究中心王秀、胡培等设计了激光靶标体积检测系统，通过上位机调节步进电机的转速及激光传感器的扫描频率，利用步进电机带动激光传感器精确运动来检测果树体积。耿顺山利用激光扫描仪扫描作业面，当扫描到有靶标存在时，控制喷头打开进行喷药，没有靶标时控制喷头关闭。刘华、俞龙等利用激光传感器和激光扫描仪进行靶标测距与扫描，对靶标进行距离扫描，并根据距离重构靶标三维模型。

激光传感器适于远距离工作，激光束的方向性极好，抗干扰。采用激光扫描进行靶标探测，较红外探测以及激光探测具有更大探测距离和更高探测精度，但是成本比较高。

5.3.3.4 基于图像处理的靶标探测技术

基于图像处理的靶标探测技术主要采用CCD（Charge Coupled Device）相机拍照与图像处理相结合的方法探测靶标信息。

国内有一些学者进行这一技术的探索性研究。贵州大学的张富贵等人通过相机静态拍摄靶标，利用MatLab进行图像处理获得靶标的树叶稀密程度。

在靶标的体积探测方面，华南农业大学的李松等人利用单幅靶标图像处理获得无背景的二值化图像，对果树靶标采用旋转体模型，获得果树靶标的冠形轮廓。由单幅图像重构的靶标三维模型能够较好地符合实际的靶标外形；但当靶标外形不对称时，重构的靶标三维模型会有较大的误差。

新疆农业大学的王磊等人利用多幅图像测量靶标的冠层体积和叶面积指数，在靶标旁放置一个长度已知的木棒作为标尺，以靶标为中心在一定拍摄半径上围绕靶标拍摄若干图像，通过靶标图像中标尺大小和实际的标尺长度计算出靶标冠层体积；将靶标冠层中一定高度范围内的叶片采摘形成空层，由上述方法计算其体积。

基于图像技术的靶标探测技术可以反映靶标的特征信息，但图像技术对光照条件和信息提取要求较高，图像处理速度还不能满足实际作业要求。

5.3.4 对靶施药的经济性与环保性

果树对靶施药主要通过拖拉机牵引，采用不同的靶标传感探测技术精确探测果树靶标，结合拖拉机的作业状态，利用微计算机控制喷洒喷头，实现根据靶标信息智能变量施药的目的。整个系统自动作业，只需一人操作，降低人力成本，可有效提高农药利用率，降低药液损失和降低防治成本，同时减少环境污染，降低水果农药残留，符合国家环保和“三农”政策。

5.4 设施蔬菜水肥一体化

我国是蔬菜生产和消费大国，近年来，对蔬菜需求量呈现快速增长的趋势，蔬菜播种面积以每年2%的速度增长，2014年达到2140.5万公顷^[140]。与种植粮食作物的农田相比，设施蔬菜地具有施肥量大、灌溉频繁的特点，平均每公顷施氮量是大田作物的4.5~10倍，灌溉量达到4~7倍^[141]，特别是灌溉施肥配套技术落后、过量施用化肥及不合理的灌溉管理措施造成土壤酸化、次生盐渍化、硝态氮淋失、养分比

例失调以及有害微生物的大量繁殖，从而导致蔬菜产量、品质降低，不仅造成了水分和肥料的大量浪费，同时也产生了突出的土壤退化及农业面源污染等生态与环境问题，已成为限制我国设施蔬菜可持续发展的主要因素^[141-145]。

水肥一体化是利用压力和管道灌溉系统，将可溶性固体肥料或液体肥料溶解在水中通过滴头和管道形成滴灌供应给作物吸收利用的一项农业技术^[142-143,146-150]。这项技术具有节水、节肥、省工等众多优点，是迄今较为先进的农田灌溉新技术之一^[142,146]。水肥一体化技术可以大幅提高水肥利用率，并且可以根据蔬菜作物各生育时期对水肥的需求规律，实现作物各生育期水肥的定量、精准供给^[149-152]。

5.4.1 水肥一体化在设施蔬菜中的应用

水肥一体化技术是现代农业发展的必然，在设施蔬菜生产中具有重要的作用。温室大棚是设施农业最基本的技术实现形式之一，由于它是一个相对封闭的空间，无法直接利用降雨，设施蔬菜生长所需水分完全依靠引水灌溉进行供应^[153-154]。灌溉施肥设备是设施蔬菜的重要组成部分，良好的灌溉施肥技术是设施蔬菜生产的基本保证^[149,155]。由于设施作物与农田作物相比，其生产环境有较大差别，一些适合露地栽培的节水技术（如大型喷灌技术等）并不适宜在温室大棚等设施生产中使用。温室大棚作为一种现代高效农业栽培设施，采用节水灌溉技术除了能节水外，对其增产、增收等效果也提出了更高的要求^[153,158]。

水肥一体化技术被认为是现阶段最适用于设施蔬菜的一种灌溉施肥技术，在温室大棚栽培和无土栽培灌溉施肥应用中占有重要的地位^[157-158]。当前，以色列、美国、日本等许多发达国家设施蔬菜的生产已经广泛采用水肥一体化技术。其中，以色列设施蔬菜内部环境因素大部分实现了微机控制。美国、日本等设施蔬菜栽培中的灌溉施肥方式绝大多数应用了高效的滴灌施肥技术，实现农业生产现代化。

随着城乡“菜篮子”工程的迅速发展，我国大力推广和发展设施蔬菜。我国设施蔬菜生产多数采用传统的灌溉技术，水肥利用率低下，因此发展与设施蔬菜相配套的水肥一体化技术尤为重要^[153-154]。水肥一体化技术的广泛应用，既有助于破解当前在发展现代农业过程中面临水资源匮乏难题，又可改善蔬菜等设施作物的生产环境、降低生产成本、提高经济效益，实现资源节约和环境友好的目标^[152,157,159-162]。随着工农业技术的进步，设施蔬菜生产已开始采用各种数控（自动化控制）系统，极大地提高了灌溉施肥工作的效率和水肥管理水平^[163-164]。水肥一体化系统已逐渐成为设施蔬菜灌溉施肥系统中的重要基本配套设备。

随着设施蔬菜的发展，现代农业高效用水的需要对设施蔬菜生产水分管理的要求越来越高^[153-154]。近年来，许多国家一直将设施蔬菜中的灌溉施肥技术作为一项重要研究课题，进而开展大量的研究和试验工作，尤其是设施蔬菜中水肥一体化系统的自动化控制及其在作物上应用效果研究^[155,157-158,165]。经过二十多年的发展，我国设施蔬菜水肥一体化技术有了很大的进步，但总体上我国设施节水灌溉技术在诸多方面相比发达国家仍存在较大差距仍需要引进和吸收国外的先进技术。

5.4.2 智能灌溉施肥设备

目前很多先进国家水肥一体化设备采用互联网技术、EC/pH综合控制、气候控制系统、循环加热降温系统、自动排水反冲洗系统、喷雾控制系统等，达到全自动混配肥、精准、智能化灌溉施肥管控一体化的产品已成规模化生产^[142,155,158]。以色列Eldarshany公司提供Frtimix，Fertigal，Fertijet自动灌溉施肥器等产品，在先进的Galileo/Elgal系列计算机控制系统，结合灵活多变的组态化操作界面能够为用户提供专家级灌溉施肥服务^[166]。耐特菲姆（Netafim）公司的灌溉施肥产品NETAJET，FERTIKIT已经标准化，规格化。需要的

器件设备都可进行灵活组装，完整的组建设备和控制器是电脑控制，快速方便，全部自动化。运行全新的混肥技术无空气混肥，功耗低，水、肥参数控制非常稳定。荷兰Priva公司的NuterFit、Nutriflex和Nutrijet三种系列灌溉施肥机。全部实现了在水肥一体化工作的精确性，作物一对一管理，无须水泵，标准模块组件，多种科学水肥配比方案^[167-168]。

截至目前，我国现代化设施蔬菜栽培中采用的先进灌溉设备几乎都引自设施农业发达的欧美国家，但系统设备成本高，扩展性差，操作繁琐，英文界面，技术门槛高^[157-158]。国内正在开展自动化精量灌溉施肥机研制与开发，采用PLC（Programmable Logic Controller）控制技术、PWM（Pulse Width Modulation）调节技术、模糊逻辑控制，在线监测系统，实现精确配肥与灌溉^[156,163-165]。天津水利科学研究所研制的FICS型温室滴灌施肥机，采用人工干预，定时定量，条件控制三种方式，功能性强。北京农业信息技术研究中心早期研制的“肥能达”施肥机，高效自动化精量灌溉，施肥模式逻辑性强，中文界面、统一软件管理，旁路安装。以上产品实现了自动化的水肥灌溉，但智能程度不高，系统控制方式单一，以定时控制系统为主，功能不全面、可靠性，稳定性，EC/pH长期准确度差、通用性差^[155,158,165]。近年来，国家农业智能装备工程技术研究中心针对不同生产区域、栽培作物、作物品种、栽培模式、管理体系等需求研发了系列水肥一体化综合管理系统与智能装备，如M-WF型、AWF型水肥一体化智能装备，在北京、内蒙、重庆、江西等地示范推广，取得了良好的示范效应和用户好评。同时，应北京、宁夏、新疆等有机蔬菜生产基地的特殊需求，研发了有机水肥一体化智能装备及控制系统，在人机交互操作下，通过可编程控制系统对有机营养液制备、营养液配比与灌溉的智能管控，应用于设施、大田及果园作物的有机生产中，实现有机水肥一体化智能管理。在以上研究开发的基础上，针对我国大型农业园区的水

肥施用量普遍偏高,过多的灌溉导致作物根系缺氧、田间病虫害严重、养分淋洗损失、地下水污染等问题^[141,145,153]。开发了基于物联网技术的大型园区分布式水肥管理系统,以实现高产高效、节水低耗为目标,融节水灌溉技术、农艺节水技术、管理节水技术为一体,谋求经济效益、社会效益、生态环境效益等综合效应的最佳,以不同作物生育期内水肥管理为研究对象,结合不同作物生理发育时间、水肥需求规律,进行环境、生态因子特征指数选取与调整,构建以不同作物生长发育模型为基础的水肥一体化决策模型和水肥一体化装备的配套高效高产栽培技术体系。实现大型设施蔬菜生产基地的水肥管理的互联互通,管理所有的“物联网”精准灌溉控制系统,建立大型园区或基地的设施蔬菜水肥管理网络,实现设施蔬菜生产基地的少人化管理,降低生产成本,提高设施蔬菜的产量和品质,提高园区综合经济效益,促进设施农业的信息化和智能化发展。

5.4.3 设施蔬菜水肥一体化发展趋势

5.4.3.1 设施蔬菜水肥一体化向科学化方向发展

1. 设施蔬菜水肥需求特征大数据分析 with 一体化控制策略研究

通过收集整理国内外关于设施蔬菜水肥需求特征的海量数据,融合设施蔬菜温室内实时获取的环境因子数据,采用在线分析处理(On-Line Transaction Processing, OLAP)、多源数据回归、数据智能筛分等大数据分析技术,挖掘形成典型设施蔬菜的水肥吸收规律定量化分析结果及控制阈值。基于大数据的整理剖析,提出基于设施蔬菜生育期的水肥需求规律,从定植或播种开始,按照作物生育期的进展,结合生长环境因子的变化构建水肥应用的控制策略,在实际应用中进行验证和调整,逐步完善优化不同栽培种类和栽培环境的水肥需求优化控制策略。

2. 设施蔬菜水肥一体化专用高效肥料筛选与开发

根据不同栽培季节、不同作物种类的养分吸收规律，结合提高作物生长后期土壤根际微生物活性的要求，针对性地研发可溶性强、养分浓度高、营养配比合理的水肥一体化专用肥料和全溶性的营养液肥^[157,162]。以有机物料为发酵原材料，根据设施有机栽培中主要作物生育规律和养分需求特征，发酵富含有益微生物的高N、高P、高K有机液肥；再通过对有机液肥中微量营养元素的补充与调配^[151,169]，继而开发多功能蔬菜专用性有机液肥。

3. 设施蔬菜水肥一体化技术将向智能化发展

以设施蔬菜优质高产、大幅度降低水肥消耗为基本目标，基于设施蔬菜集群水肥耦合机理构建的智能决策模型，采用分布式管道与专用管道相结合的水肥通道，构建由中央控制系统、肥料配比系统、管道输送系统以及局部监测系统部分组成的水肥一体化精准管理系统体系；借助物联网技术和最优化管道设计理念，开展配套的水肥一体化智能装备升级的研究，实现对集群设施蔬菜水分和肥料的集中管理和配比；并根据不同作物种类、不同土壤肥力、不同生育期以及不同栽培茬口的作物水肥需求特征，建立分布式的控制模块单元，采集并分析作物生长特征与环境因子信息，实现对控制单元中作物水肥的一体化精确管控。

5.4.3.2 设施蔬菜灌水肥一体化向着标准化体系发展

1. 设施蔬菜水肥一体化系统向着节水器材标准规范化生产

目前，市场上节水器材规格参差不齐，严重制约了我国节水灌溉事业的发展。因此在未来的发展中，通过节水器材技术标准、技术规范和管理规程的编制，逐步形成行业标准和国家标准，以规范节水器材生产，减少因为节水器材不规范而引起的浪费，提高水肥利用效率。

2. 水肥一体化技术规范标准化的逐渐形成

目前的水肥一体化各个施肥环节没有形成统一标准，效率低下，因而在未来的水肥一体化进程中，应对设备选择、设备安装、栽培、施肥、灌溉制度等各个环节进行规范，以此形成技术标准，提高效率。

5.4.3.3 设施蔬菜水肥一体化向规模化、区域化和产业化发展

当前设施蔬菜水肥一体化技术已经由过去局部试验示范发展为大面积推广应用，辐射范围由华北地区扩大到西北干旱区、东北寒温带和华南亚热带地区，覆盖了设施栽培、无土栽培等多种栽培模式。华南地区利用灌溉注入有机液肥等技术形式使水肥一体化技术日趋丰富和完善。

另外，设施蔬菜水肥一体化技术未来发展方向表现为由过去单体设施结构或者小面积的管理系统，发展为大型园区或生产基地的设施蔬菜水肥一体化的集中综合管理，可以进一步升级实现更大区域的若干个园区或生产基地作物水肥一体化的集中综合管理，既便于小范围的控制，也便于宏观控制和生产管理决策。

5.5 设施环境智能调控

温室是农业生产摆脱自然条件制约，实现反季节生产，提高土地出产率、增加作物产量的重要现代化农业设施。一切生物都有其生长所需的适宜环境。对于作物而言，其生长发育、代谢水平、物质合成与积累除取决于其本身的遗传特性外，还决定于其在一定时间尺度内所交互的各个环境因子。现代温室之所以能够获得速生高产、优质高效的农产品，就在于其能够在很大程度上摆脱地域、季节或恶劣气候等自然条件的制约，构造出一个相对独立且近乎理想的人工气候小环境，从而实现周期性、全天候、反季节的工厂化规模生产。

5.5.1 温室环境与作物信息采集

1994年，S. Blackmore首次阐述了利用信息采集技术辅助农业生产的方法^[173]。文中提到了应用无线传感器网络进行环境信息采集的思路，认为昂贵的价格阻碍了其在农业领域的大范围应用。

21世纪以来,各种新技术的快速发展,降低了无线传感器网络的成本,推动了其在路由、能源优化、数据融合等基础领域的研究,促进了其在农业生产中的应用^[171,189]。基于无线传感器网络的研究成果,国内外学者对农业场景下的无线传感器网络信息采集方法、信号传输效果和系统架构等都进行了大量的研究工作。欧洲的Lofar Agro Project项目组利用无线传感器网络对农业环境中的杀虫剂含量与土地肥力进行实时监测^[172]。2008年,Tate等研究了大田中作物生长及冠层对无线传感器网络信号传输的影响。2007年,Konstantinos等研究了无线传感器网络在精准农业应用中的拓扑优化方法。无线传感器网络以其节点设置灵活、数据采集兼容性强、布线和维护成本低等优势,在温室信息采集和环境控制领域也获得了广泛应用^[176]。2009年,Pawlowski等提出了一种基于无线传感器网络事件驱动控制的温室气候监控模拟方法^[181]。韩国学者研究了基于无线传感器网络的温室露点凝结预防监测与自动控制系统。2010年,Agarkar等预测到2020年基于无线传感器网络的温室小气候智能控制将成为现实^[170]。

现有温室内无线传感器网络信息采集研究主要集中在路由协议、网络拓扑的实验模拟和农业监控策略的实现两方面。向温室环境调控提供有效反馈的研究较少,针对日光温室环境、信息特点的无线传感器网络相关理论研究也处于起步阶段。

根据植物的需求调控微气候环境因子和肥水供给是设施生产的最高形式,因为生理信息比环境信息更能反映作物的生理需求,与作物的生长关系更直接。SPA (Speaking Plant Approach) 概念由Hashimoto、Tantau、Challa等定义并提出。2009年,Hashimoto等通过图像处理系统用于测量作物长势,红外测温系统测量叶面温度、二氧化碳分析仪用于测量叶片光合作用、叶片水势、茎秆含水量等获取西红柿生理信息,通过遗传算法获得最优调控参数并控制灌溉使作物的光合速率处于较高的水平。2010年,日本爱媛大学仁科弘重研发出温

室移动植物诊断设备监测植物热成像、茎秆长度、荧光成像、光合成速度、蒸散速度实现生长状态、光合机能、叶温蒸散机能、生长收获诊断并提供对应栽培管理建议。近年来国外用红外技术测量植物冠层温度，以图像方式记录作物生长信息，通过计算机图像处理的途径实现实时或定时自动监测。荷兰Wageningen于1980年前就开始研究温室中植物环境生理反馈，很少直接用于环境调控指导，近年来，Silke Hemming经过多年研究将“植物胁迫多重成像系统”(Multiple Imaging Plant Stress, MIPS)应用与温室植物监测，通过图像对植物早期病虫害，环境因子胁迫进行分析并指导生产；德国汉诺威大学Hans-Jürgen Tantau领导的“ZINEG”项目(2009-2014)包括节能方法对产品的品质与产量的影响、光合监测反馈等技术研究，具体采用荷兰PHENOSPEX公司研发的Plant Eye开展相关研究实现栽培管理，Arizona大学生物系统工程系Murat Kacira教授也正在开展类似的研究工作。2011年，Li Ming等于日本千叶大学开始在密闭植物工厂中开展将操作人员呼吸考虑进去的二氧化碳施肥利用效率、二氧化碳交换速率、以水汽跟踪计算换气速率等实验，实验结果表明在密闭式人工光植物工厂中利用气体平衡、能量平衡等原理监测群体生理可行。

监测设备方面以色列Phytalk公司开发了一种植物生理监测仪，可监测株高、果实膨大、茎粗变化、茎流量、叶片大小厚薄、叶面温度和湿度、二氧化碳浓度等。综合利用这些信息，可以分析植物生长状况，进而可以利用其来进行温室内温度、湿度、光照度、二氧化碳浓度、水肥营养的调控。但目前这些研究结果仅限于研究和辅助决策，还未真正应用的温室的控制系统中；荷兰Grow-inIT公司开发的Growwatch系统通过测量相对湿度、二氧化碳浓度、作物体温、光合速率、光量子等参数，观测作物生长，优化气候设置，以达到高产、提升生产潜力作用；2013年，荷兰Priva公司提出“Crop Top”系统采用对栽培植物上中下三层环境和植物表体温度测量分析比较作物生

长状态,判定具体胁迫类型并实施环境调控,以获得较高产量和品质。以上商用设备都处于商业试水阶段,还没有被广大用户接受,很多停留在科研应用上。

国内关于生理信息的采集和利用研究相对滞后。2007年,谢强等用照相的方式对葡萄果粒和新梢径的日变化进行了详细测定,利用时间顺序理论,与根域土壤水势的变化进行了耦合分析,提出了不同发育时期,葡萄根域土壤灌水的临界土壤水势值,为利用生物信息进行土壤灌溉的智能调控奠定了基础。2000年,王忠义选择植物电信号为主要生理指标,并探索在设施环境调控的应用;2009年,王成等开发植物生理生态监测系统,主要测量叶温、茎流量、果实膨大等参数。国内很多是孤立研究植物生理特性或直接开发相关传感器,未能将生理反馈应用到设施环境调控中。

5.5.2 温室作物生长发育模型和小气候预测模型

温室设计是一个多因素优化问题,它依赖于温室作物的经济效益和温室建设、实施、维护的成本之间的定量权衡。1999年,根据Baille的建议,在适于世界气候条件的温室设计中,结合物理、生物和经济模式的系统化方法成为当前最有前途的战略决策。

温室小气候数值模拟研究始于20世纪60年代初期。Takakura首次用非稳态热平衡模型建立了玻璃温室的热环境模型,为后来温室气候模型的研究奠定了基础。随后,国外学者开始采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术模拟温室微气候环境,包括具有不同通风口形状及位置温室室内气流及温度状况^[180],通风情况下温室内温度、湿度的分布特点等^[178,186]。目前国外温室园艺作物模型的典型代表有TOMGRO、TOMSIM和HORTISIM^[177]。采用CFD技术模拟温室小气候的边界条件处理、模拟求解方法的选择等对我国日光温室的相关研究具有很好的借鉴作用。

我国温室作物生长发育模型与小气候预测模型的研究开展较晚。罗新兰等和李天来等对番茄、黄瓜和甜瓜的发育期及干物质生产与分配进行了初步研究^[193-194]。孟力力等基于室外气候条件，将温室空气、覆盖物、墙体、后坡、土壤各层视为均匀厚度，预测各部分的温度。以上温室环境模型都基于集总参数法，即认为所选择的各部分温度均匀，实际日光温室空间、土壤内部及温室围护结构内部各点温度存在梯度^[195]。而佟国红等模拟了晴天、阴天日光温室温度随时间及空间变化，但没考虑调控措施的影响^[187]。已有的温室环境模型研究主要基于大型现代连栋温室，温室作物生长发育模型研究多集中于单一环境因子，针对人为调控措施下的日光温室小气候预测模型研究较少。

5.5.3 温室智能环境控制理论

温室环境控制理论研究始于20世纪90年代。国外温室大部分采用PID控制。在通风系统中，由角度反馈机构实现通风窗开启角度的伺服控制，控制温室通风量^[174]；在温室加温系统中，由阀位反馈机构实现阀门位置的伺服控制，控制暖水管的出水温度^[183]。针对温室小气候大时滞、强耦合、非线性等特点，杜尚丰等采用模糊控制、人工神经网络、智能控制等算法对环境因子进行控制^[191]。朱丙坤等采用相容控制设计了温室温度控制的优化控制算法^[198]。

我国温室小气候系统的被控输出（如室内温湿度）、扰动输入（如室外温湿度）为连续值，控制量为逻辑变量（调控设备开/关），古典控制理论和现代控制理论不适于描述这一类系统^[196]。Witsenhansen于1966年提出了混杂系统的概念^[188]。目前，混杂系统的研究主要包括：混杂系统模型、混杂系统的切换、混杂系统的分析综合^[184]及优化控制^[190]。混杂系统已在工业系统有成功应用，但在国内外农业应用中鲜有研究。秦琳琳等采用混合逻辑动态模型描述现代温室，实验证明该模型能够较好地模拟和预测系统行为。但该算法求解耗时长，无法满足温室实时控制的需求^[197]。

现有的温室环境控制理论弱化了作物环境模型在控制系统中的地位，未基于温室小气候环境模型展开控制理论研究，对温室环境控制系统同时具有连续变量和逻辑变量的特性考虑不充分。

5.5.4 测控装备及平台构建方面

随着传感技术、微型计算机技术的迅速发展，设施农业自动监测控制技术研究取得了重大进展，先是采用模拟式组合仪表，采集现场信息并进行指示、记录和控制。80年代末研发出基于工控机、PLC的集散式控制系统，实现了分散控制、集中管理、集中监视的目标。随后现场总线控制技术也被应用于植物工厂测控系统中，实现了在各种测控设备之间双向、数字化、多节点的串行通信，简化了集散式体系结构，构成了分布式控制系统，具有可靠性高、操作性强等特点，目前已被广泛应用，此时单因子调控。90年代初开始，基于以太网技术或工业以太网的温室控制系统得到了迅速发展，并逐步与温室模型或作物模型结合起来，并在以上控制算法研究基础上，开发多因子综合控制系统，可以根据温室作物的生长发育规律，对温室内光照、温度、水、气、肥等因子进行自动控制。当前移动互联网络技术、物联网技术蓬勃发展，日本东海大学星岳岩提出普适控制系统（Ubiquitous Environment Control System, UECS）每个控制设备都能够以一定的标准连接到网络上，改变了植物工厂传统通讯供电及控制方式。国内亦大力推广物联网技术在设施农业的应用，已经具备了一定市场规模。而相关控制系统和应用软件很多是直接来自工业领域引用，提及庞大、价格昂贵，系统拼凑痕迹重，先进控制算法难以集成其中，缺少专用控制设备与系统。

5.6 农用无人机自主作业

5.6.1 农用无人机自主作业需求背景

近年来无人机技术飞速发展，其在农业航空应用领域表现出了巨大的潜力，搭载先进传感器、又相对廉价的农业无人机位列美国MIT

Technology Review杂志评选出的2014年十大突破科学技术之首。具有自主作业能力的植保无人机，作为空中施药平台，搭载专用药剂对作物进行精准高效的喷施作业，与传统的人工、半机械化植保作业相比，植保无人机喷洒效率可提升近30倍，可节省20%~40%农药使用量，节约90%的用水量，其综合收益约为人工手动喷施作业20倍，为半机械化作业的3~5倍，作业经济效益非常显著，美、日等发达国家超过50%的农业植保作业由飞机或无人机完成。我国有18亿亩农田需要进行农业植保作业，且随着土地流转政策的推进和农村劳动人口日趋减少，农业无人机自主作业需求巨大。同时我国丘陵山区占土地总面积的61%，丘陵山区是我国水稻、油菜等主要农作物的主产区，而在丘陵山区采用普通的地面装备进行农业病虫害防治难度较大，劳动力成本巨大，需要具有自主作业能力的农业无人机替代人工和地面机械进行作业。2014年中央一号文件首次提出要“加强农用航空建设”以来，2015年中央一号文件也强调：要强化农业科技创新驱动作用，在智能农业等领域取得突破，同时十三五规划中，十大产业被重点提及，其中就包括智能农机装备。各级政府也均积极响应中央的号召：生产端出台相关技术标准、销售端提供补贴、使用端建立规范。《全国农业可持续发展规划》中明确的“一控二减三基本”方针，即严格控制农业用水总量，减少化肥、药施用量，地膜、秸秆、畜禽粪便基本资源化利用。力争到2020年，实现农作物化肥、农药使用量零增长。在这些政策牵引下，农业无人机将发挥巨大作用^[104,199-201]。

5.6.2 农业无人机自主作业技术特点

农业无人机应具有如下技术特征：

1. 作业过程自主飞行控制

无人机不需要专业飞行员操作，通过软件设置飞行轨迹，无人机可自动沿设定轨迹飞行，正常情况下无需人工干预飞行过程。

2. 自主智能执行作业任务

农业无人机作业为低空、超低空飞行，必须自动与作物保持设定的相对高度，依据GIS信息和导航信息，自动实现对靶精准作业，避免人工操作带来的误差。

3. 自主识别各种安全风险

农业无人机飞行高度低，使用环境复杂，需要对周围的人员、障碍物、地形地物等影响飞行安全的物体和突发事件进行识别和规避。

4. 自主作业规划

在作业之前系统自主规划任务流程，统筹作业计划，实现最优的作业任务安排，减小能源消耗和作业时间。

5. 自主作业信息统计

自动收集无人机作业信息，并统计作业量，并运用大数据技术，实现对农情和农务信息进行宏观的把握。

综上所述，农业无人机自主作业过程必将向着智能化方向发展，将人工智能技术引入到农业无人机系统中已成为必然的发展趋势，推广应用具有自主飞行、自动规划作业路径、自动施药控制、智能作业监控的自主作业植保无人机，将极大的提高农业作业效率，减轻人员作业负担，避免频繁发生的作业人员中毒现象，保证作业质量和作用效果的一致性。

5.6.3 农业无人机自主作业发展现状

5.6.3.1 智能飞行控制技术

受限于成本控制因素，目前国内市场上植保无人机飞行控制系统主要采用半自主控制技术，此类飞行控制系统集成多种传感器，实现自动增稳、航线飞行、自动起降功能，其控制律通常采用经典增益调节控制方法。典型代表为汉和航空开发的直升机自动飞行控制系统，该系统能实现全自动、半自动飞行状态自动切换；具有气压传感、GPS传感、加速传感融合能力；可规划航路，定高飞行（精度达到

0.5m)。此类控制系统具备了自动飞行控制功能，但是缺乏对外部作业环境突发事件的自主应对能力和对不同机型和作业过程中遇到的控制系统扰动缺乏适应性。由于农业无人机作业过程的复杂性，国内一些相关的科研机构开展了基于人工智能技术的飞行控制方法研究。南京航空航天大学张立珍运用计算智能方法，提出了改进型动态逆算法和基于函数连接神经网络的轨迹线性化控制算法，最大限度上实现无人机的自主控制，在此基础上设计基于多智能体的无人机自主飞行控制系统的分层递阶结构，并对结构中的任务管理部分、决策协调部分和控制执行部分智能体的结构和功能进行了详细地研究^[202]。针对农业植保无人机作业过程药液带来的控制系统扰动问题，王大伟等设计自适应反步终端滑模姿态控制器，依据Lyapunov稳定性理论，证明了控制系统稳定性，经过仿真和试验验证，该方法能抑制药液晃动干扰的影响，有效减小系统姿态控制误差^[203]。

5.6.3.2 智能植保无人机喷洒控制技术

农业无人机变量喷雾是实现精准植保施药的一种重要技术方式。它通过获取作物的病虫草害、形貌和密度等喷雾对象信息，以及喷雾机位置、速度和喷雾压力等机器状态信息，并依据这些信息，智能喷洒系统压力、流量、喷洒时机的控制。美国、西欧等发达国家已经在变量喷雾技术及其无人机系统集成上取得了重要进展，我国也开展了相应的探索性研究。大疆MG-1采用压力式喷洒系统，可根据不同的药剂，更换喷嘴，灵活调整流量和雾化效果。标配的扇形喷嘴，精密耐磨损，能长时间保持高效喷洒效果。全机搭载4个喷头，位于电机下方。旋翼产生的下行气流，作用于雾化药剂，让药剂到达植物根部和茎叶的背面，喷洒穿透力强。药剂喷洒泵采用精准控制的无刷电机，针对不同的农作物和药剂能实施合适的喷洒方案^[204]。中国农业大学王玲设计了微型无人机脉宽调制型变量喷药系统，并利用风洞的可控多风速环境，通过荧光粉测试方法对悬停无人机变量喷药的雾滴沉积

规律进行了试验研究。变量喷药系统由地面测控单元和机载喷施系统两部分组成，基于Lab Windows/CVI的地面测控软件，采用频率为10Hz、占空比可调的脉冲信号经无线数传模块远程控制机载喷施系统；机载喷施系统接收地面控制信号实时调节电动隔膜泵电动机转速，以改变系统喷雾压力和喷药量，实现变量喷雾调节^[205]。华南农业大学工程学院徐兴等设计的小型无人机机载农药变量喷洒系统，主要由药箱、喷头、液泵及喷洒控制器组成，通过调整PWM喷洒控制信号的占空比，改变液泵的工作时长，从而实现变量喷洒^[206]。喷洒控制系统的出现，使无人机在任务处理过程不再依赖操作人员，为进一步实现的远程超视距的智能作业控制，提供了技术支撑。

5.6.3.3 智能作业路径规划技术

在作业航线规划方面，徐博等在多目标约束条件下，研究基于作业方向和多架次作业能耗最小的不规则区域智能作业航线规划算法，在不规则作业区域已知的情况下，根据指定的作业方向和作用往返总能耗，可快速规划出较优的作业航线，使整个作业过程能耗和药耗最优，减少飞行总距离和多余覆盖面积，节省无人机的能耗和药液消耗^[207-208]。

5.6.3.4 智能避障与地形跟踪技术

由于农田中存在电线杆、树木、人员混杂的情况，其作业环境复杂，必须考虑障碍物规避的问题。张逊逊等人提出了一种基于改进人工势场的避障控制方法，将地表障碍物划分为低矮型和高杆型，并制定不同的避障策略，将无人机与障碍物的相对运动速度引入到人工势场中，给出基于改进人工势场的智能避障控制算法^[209]。

5.6.3.5 智能作业管理统计

北京农业智能装备技术研究中心根据植保作业需要，开展了航空植保作业信息统计研究工作。运用大数据技术和网络通信技术，对有人机和无人机实时作业过程进行远程监控，智能统计作业量和作业参数。通过该系统，可以从宏观上把握一个区域的作业规模、药剂使用、

以及作物病害发生情况，为相关管理部门的农情决策提供可靠的数字依据。

综上所述，智能技术已经被逐步引入我国农业无人机自主作业领域，但由于技术起点低和成本控制苛刻的原因，其装备智能化水平低，尚不能满足自主作业需求。**5.6.4 抓住机遇迎接挑战人工智能技术的挑战**

随着人工智能在复杂系统应用领域的推广，其展现出巨大的技术优势和革命性的科技推动力，在植保无人机自主作业领域也已经表现出巨大的潜力，在今后的几年里随着无人机植保作业的普及，人工智能技术将对飞行控制、作业导航、对靶施药、作业规划等自主作业技术领域产生深远的影响。

第6章 智能农业展望

6.1 当前农业发展需求分析

国内外现代农业发展的实践表明，在智能农业技术的作用下，农业生产力的三要素：劳动者、劳动工具和劳动对象均已发生本质性变化，是引领农业发展方式转变的革命性力量。在美国，80%的大农场已经普及了农业物联网技术，大农场对物联网设备技术的采用率高达80%；3个人可以完成1万英亩土地的管理和玉米收割，预计到2020年，美国平均每个农场将拥有50台连接设备。在日本，人工光植物工厂被用于蔬菜的商业化生产，每年每单位面积销售量大约是露地生产的100倍，截至到2012年12月，日本商业化运营的植物工厂已经超过120家，植物工厂将在大都市健康安全叶菜的地产地销中扮演很重要的角色。

我国经济发展进入新常态，农业发展面临着农产品价格封顶、农业生产成本抬升、进口农产品冲击、农业资源过度利用与紧缺双重约束等多方面的巨大变化和多重挑战。在“四化同步”的大背景下，发展智能农业技术，实现现代信息技术与农业产业的深度融合，变革传统农业发展方式，走集约、高效、安全、持续的现代农业发展道路，是推进我国农业现代化的客观要求和必然选择。

6.2 发展重点与建议

以解决智能农业技术发展中的重大科学问题，突破重大关键共性技术和产品，引领我国农业走集约、高效、安全、持续的现代农业发展道路为目标，按照“突破核心技术、创制重大产品、支撑现代农业”的发展思路，重点构建以农业物联网技术和智能化精准作业技术为核心的大田精准生产技术系统，显著提高农业资源（土、肥、水、药）利用效率和劳动生产率；构建以农业机器人技术为核心的果园及设施农业智能化生产技术系统，显著提高土地产出率和劳动生产率；构建以植物工厂、智能化动物养殖设施为核心的动植物周年连续生产高效

农业智能系统，显著提高非耕地资源利用效率；构建以农业大数据、农业云服务为核心的农产品全程质量安全控制技术体系，显著提升农产品流通效率和质量安全水平。

一是面向大田精准生产技术系统构建。重点研究植物生长环境信息、生命信息特征识别新原理、新方法，开展土壤-动植物-生态环境与机器集成融合应用基础研究，突破基于北斗的导航与机器自动控制、变量作业与数字化管控、农用航空等核心技术；研制联合整地、精益制种、精密播栽、精量施药、高效收获等粮经作物生产重大装备，显著提升耕地、良种、肥料、农业、灌溉用水的利用效率和高效生产。

二是面向果园及设施农业智能化生产技术系统构建。重点突破柔性设计、仿生、模式识别、自主导航重大关键技术，研制专用基础作业部件；研制果园除草、施药、修剪、收获机器人和设施农业播种、嫁接、移栽、施药、采摘、肥水实施等机器人，显著提高土地产出率和劳动生产率，降低农业从业人员劳动强度。

三是面向动植物周年设施生产高效农业系统构建。研究主要畜禽水产动物基于生长发育规律的环境与营养调控模型，研制动物行为无应激判别、饲料自动投喂、奶牛自动挤奶、粪便自动清除等智能设备，研发全自动动物周年高效生产技术系统；研究全封闭条件下植物-环境-养分互作机理模型，研制基于植物生长发育规律的环境-养分自适应调控技术与养分循环利用技术，构建适合我国不同地区的全封闭植物工厂。显著提高沙漠地区、矿产开采区、废弃耕地、沿海盐碱地、海岛与海上等非耕地资源利用效率。

四是面向农产品质量安全全程控制技术体系构建，重点研究农产品产地环境质量动态监测与预警、农产品品质与质量快速检测、农产品智能包装与数字化物流、农产品电子商务、农产品溯源与监管云平台等技术系统，显著提高农产品流通效率和质量安全水平。

五是积极推进农业电子商务。建立电子交易和结算方式的新模式，研究农业电子商务大数据系统与云服务技术，建立农产品产销信息服务平台，完善部门间、区域间监管信息共享衔接机制，整合批发市场银行、税务、工商领域信用信息，推动龙头企业与电子商务、网络金融等互联网业态的深度融合。

参考文献

- [1] 刘现,郑回勇,施能强等. 人工智能在农业生产中的应用进展. 福建农业学报,2013, 28(6):609-614. [期刊]
- [2] 谢小婷,胡汀. 专家系统在农业应用中的研究进展. 电脑知识与技术,2011, 07(6):1329-1330. [期刊]
- [3] 易中懿,胡志超. 农业机器人概况与发展. 江苏农业科学, 2010(2):390-393. [期刊]
- [4] 李永奎,刘冬. 计算机视觉技术在农业生产中的应用. 农业科技与装备,2011(6):58-60. [期刊]
- [5] 陈桂珍,龚声蓉. 计算机视觉及模式识别技术在农业生产领域的应用. 江苏农业科学, 2015(8):409-413[期刊].
- [6] 宁纪锋,龙满生,何东健,等. 农业领域中的计算机视觉研究. 计算机与农业, 2001(1):1-3. [期刊]
- [7] 冯江. 无人机技术在现代农业生产中的应用. 农业技术与装备, 2014(5):26-28. [期刊]
- [8] 李道亮. 城乡一体化发展的思维方式变革——论现代城市经济中的智慧农业. 人民论坛·学术前沿,2015,(17): 39-47. [期刊]
- [9] 李道亮. 智慧农业:中国的机遇和挑战. 高科技与产业化,2015,11(5):42-45. [期刊]
- [10] 李道亮. 物联网与智慧农业. 农业工程,2012,2(1):1-7.[期刊]
- [11] 严佳婧. 智慧农业时代的挑战与机遇. 华东科技,2014,(11):56-58. [期刊]
- [12] 李强. 智能农业. 科技信息. 2013,(22):256-257. [期刊]
- [13] 路顺涛,林珂,蒋玲,等. 智慧农业发展趋势浅析. 中国管理信息化,2016,19(5):170-171. [期刊]
- [14] 杨瑛,崔运鹏. 我国智慧农业关键技术与未来发展. 信息技术与标准化,2015,(6): 34-37. [期刊]
- [15] 周国民. 浅议智慧农业. 农业网络信息,2009,(10):5-7, 27. [期刊]
- [16] 姬江涛,郑治华,杜蒙蒙,等. 农业机器人的发展现状及趋势. 农机化研究,2014,(2): 1-4, 9. [期刊]
- [17] 林欢,许林云. 中国农业机器人发展及应用现状. 浙江农业学报,2015,27(5):865-871. [期刊]
- [18] 刘万才,刘宇,龚一飞. 论重大有害生物数字化监测预警建设的长期任务.中国植保导刊. 2011, 31(1): 25-29. [期刊]
- [19] Fukatsu T, Watanabe T, Hu H M, et al. Field monitoring support system for the occurrence of *Leptocorisachinensis* Dallas (Hemiptera: Alydidae) using synthetic attractants, Field Servers, and image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*.2012, 80: 8-16. [期刊]
- [20] 吕军,姚青,刘庆杰,等. 基于模板匹配的多目标水稻灯诱害虫识别方法的研究. 中国水稻科学. 2012, 26(5): 619-623. [期刊]
- [21] 蔡小娜,黄大庄,沈佐锐,等. 利用翅的数学形态特征对蛾类昆虫进行分类鉴定的系统研究_在总科级阶元上的应用. 中国农业大学学报. 2013, 18(4): 96-104. [期刊]
- [22] 韩瑞珍,何勇. 基于计算机视觉的大田害虫远程自动识别系统. 农业工程学报. 2013, 29(03): 156-162. [期刊]
- [23] 李文勇,李明,钱建平,等. 基于形状因子和分割点定位的粘连害虫图像分割方法. 农业工程学报,2015,31(5):175-180. [期刊]

- [24] 陈梅香,杨信廷,石宝才,等. 害虫自动识别与计数技术研究进展与展望.环境昆虫学报,2015,37(1):176-183. [期刊]
- [25] Park J, Holguin G, Medeiros H. Automatic monitoring of insect populations .WO 2012/054397 A1.[专利]
- [26] 韦雪青,温俊宝,赵源吉,等. 害虫声音监测技术研究进展. 林业科学. 2010,46(5): 147-154.[期刊]
- [27] 张云慧,张智,李超,等. 东北地区粘虫的季节性迁飞行为. 昆虫学报,2013,56(12):1418-1429.[期刊]
- [28] 陆明洲,沈明霞,丁永前,等. 畜牧信息智能监测研究进展.中国农业科学, 2012,45(14):2939-2947. [期刊]
- [29] 郁厚安,高云,黎焯,等. 动物行为监测的研究进展.中国畜牧杂志, 2015,51(20):66-75. [期刊]
- [30] 邱建飞,李晨光,李亚敏.奶牛体征参数监测系统设计.农机化研究,2012,1:107-110. [期刊]
- [31] 郭浩,张胜利,马钦,等.基于点云采集设备的奶牛体尺指标测量.农业工程学报,2014,30(5):116-122. [期刊]
- [32] 张新亮,马爱霞,胡士林.物联网技术在畜牧业领域的应用研究.山东畜牧兽医, 2016,37(229):47-48. [期刊]
- [33] 陆东林,马连山.奶牛行为学及其在生产中的应用.中国乳业,2009,7:52-56. [期刊]
- [34] 冯涛,郭勇,白佳桦,等.一种基于奶牛反刍时间的发情鉴定新技术. 中国畜牧兽医,2013,40(7):198-200. [期刊]
- [35] 钱蓉,詹凯,王重龙.基于机器视觉技术的动物行为自动识别和分类. 中国家禽,2016,38(3):55-57. [期刊]
- [36] 荣风梅.动物行为学原理在福利型畜牧业生产中的应用分析.畜牧与饲料科学,2011,32(5):123-124. [期刊]
- [37] 齐琳,包军,李剑虹.动物行为学研究在动物福利养殖中的应用.中国动物检疫,2009,26(9):68-69. [期刊]
- [38] 沈明霞,刘龙申,闫丽等.畜禽养殖个体信息监测技术研究进展.农业机械学报,2014, 45(10):245-251. [期刊]
- [39] 张敏.基于体态识别的动物行为自动分析研究与应用.博士,浙江大学,2005.[学位论文]
- [40] 陆铖.基于视频的动物行为智能分析系统关键技术研究.硕士,西北农林科技大学,2008. [学位论文]
- [41] 刘木华.农产品质量安全光学无损检测技术及应用. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.[专著]
- [42] Schaare, P.N., Fraser, D.G. Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*). *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 20: 175-184. [期刊]
- [43] 王书茂,焦群英,籍俊杰.西瓜成熟度无损检验的冲击振动方法. 农业工程学报, 1999, 15(3): 241-145. [期刊]
- [44] Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., et al. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables. *Food Bioprocess Technol*, 2011, 4: 487-504. [期刊]
- [45] 商亮,谷静思,郭文川.基于介电特性及ANN的油桃糖度无损检测方法. 2013, 29(17): 257-264. [期刊]
- [46] Patel, K.K., Khan, M.A., Kar, A. Recent developments in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce-an overview. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(1): 1-26. [期刊]

- [47] Herremans, E., Verboven, P., Bongaers, E., Estrade, P., Verlinden, B.E., Wevers, M., Hertog, M., Nicolai, B.M. Characterisation of 'Braeburn' browning disorder by means of X-ray micro-CT. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 75: 114-124. [期刊]
- [48] Liu, D., Zeng X.A., Sun, D.W. Recent developments and applications of hyperspectral imaging for quality evaluation of agricultural products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 12(55): 1744-1757. [期刊]
- [49] 黄文倩,李江波,陈立平等. 以高光谱数据有效预测苹果可溶性固形物含量. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(10): 2843-2846. [期刊]
- [50] Wenqian Huang, Jiangbo Li, Qingyan Wang, Liping Chen. Development of a multispectral imaging system for online detection of bruises on apples. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 62-71. [期刊]
- [51] Nicolai, B.M., Defraeye, T., De Ketelaere, B., Herremans, E., Hertog, M., Saeys, W., Torricelli, A., Vandendriessche, T., Verboven, P. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2014, 5: 285-312. [期刊]
- [52] Alander, J.T., Bochko, V., Martinkauppi, B. A Review of Optical Nondestructive Visual and Near-Infrared Methods for Food Quality and Safety. 2013, (2013):36. [期刊]
- [53] Alfatni, M.S.M., Shariff, A.R.M., Abdullah, M.Z., et al. The application of internal grading system technologies for agricultural products – Review. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116:703-725. [期刊]
- [54] Zhang Baohua, Huang Wenqian, Li Jiangbo, et al. Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Research International*, 2014, 62: 326-343. [期刊]
- [55] 李道亮,王剑秦,段青玲,等.集约化水产养殖数字化系统研究.中国科技成果,2008,(2):8-11. [期刊]
- [56] 苏移. 宜兴物联网水产养殖基地运行良好.江苏通信,2011,(5):70-70. [期刊]
- [57] 王贵荣,李道亮,吕钊钦,等. 鱼病诊断短信平台设计与实现.农业工程学报,2009,25(3):130-134. [期刊]
- [58] 于承先,徐丽英,邢斌等.集约化水产养殖水质预警系统的设计与实现.计算机工程,2009,35(17):268-270. [期刊]
- [59] 李道亮等. 农业物联网导论. 北京: 科学出版社, 2012. 10[书籍]
- [60] 刘波.基于多源图像的生猪体表温度和步态特征提取方法的研究.博士,江苏大学,2014. [学位论文]
- [61] 李艳,宁素恒,赵国丽,等.奶牛养殖信息化技术的发展与应用.中国乳业,2016,171:16-19. [期刊]
- [62] 李丽华.蛋鸡体温与生产性能参数动态监测关键技术研究与应用.博士,河北农业大学,2014. [学位论文]
- [63] 别之龙.我国瓜类作物嫁接育苗生产的现状、问题与对策.长江蔬菜, 2009(2b):1-5. [期刊]
- [64] 罗军,高英武,何幸保. 自动嫁接机的研究现状与展望. 湖南农机, 2010,37(3):1-2. [期刊]
- [65] 辜松. 蔬菜嫁接机的发展现状. 农业工程技术(温室园艺), 2012,(5):26-28. [期刊]
- [66] Lee J M, Kubota C, Tsao S J. Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation. *Scientia Horticulturae*.2010, 127:93-105. [期刊]
- [67] Chiu Y C, Chang M Y. Development of an automatic outward-feature properties measurement system for grafted tomato seedlings. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008,24(1):101-114. [期刊]
- [68] 姜凯,郑文刚,张骞,等.蔬菜嫁接机器人研制与试验.农业工程学报,2012,28(4):8-14.[期刊]
- [69] 姜凯,张骞,王秀,等.嫁接夹自动排序供夹装置设计.农业机械学报, 2012,43(Z1):256-261. [期刊]

- [70] 刘凯, 初麒, 辜松. 茄科蔬菜自动嫁接机的研究现状. 农机化研究, 2011(2):230-233. [期刊]
- [71] 谭妮克, 张铁中, 杨丽. 蔬菜嫁接机器人砧、穗木套管式接合装置的设计. 中国农业大学学报, 2005, 10(5):85-88. [期刊]
- [72] 张铁中, 杨丽, 陈兵旗, 等. 农业机器人技术研究进展. 中国科学, 2010, 40(增刊):71-87. [期刊]
- [73] Feng Q C, Cheng W, Zhou J J, et al. Design of structured-light vision system for tomato harvesting robot. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(2):19-26. [期刊]
- [74] Van Henten E J, Van Tuiji B A J, Hemming J, Kornet J G, Bontsema J, Van Os E A. Field test of an autonomous cucumber picking robot. Biosystems Engineering, 2003, 86(3):305-313. [期刊]
- [75] Tarrío P, Bernardos A M, Casar J R, et al. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision. 4th World Congress Conference on Computers in Agriculture and Natural Resources, Florida, 2006. 270-275.[会议]
- [76] Tabb A L, Peterson D L, Park J. Segmentation of apple fruit from video via background modeling. ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon, 2006.[会议]
- [77] Mehta S S, Burks T F. Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 102:146-158. [期刊]
- [78] 冯青春, 袁挺, 纪超, 等. 黄瓜采摘机器人远近景组合闭环定位方法. 农业机械学报, 2011, 42(2):154-157. [期刊]
- [79] Feng Q C, Wang X, Zheng W G. A new strawberry harvesting robot for elevated-trough culture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2012, 5(2):1-8. [期刊]
- [80] 张建伟. 我国番茄产业国际竞争力分析. 硕士学位论文, 江南大学, 2009.[学位论文]
- [81] 冯青春, 赵春江, 王晓楠, 等. 基于视觉伺服的樱桃番茄果串对靶测量方法. 农业工程学报, 2015, 31(16):206-212. [期刊]
- [82] 陈子文, 张春龙, 李南, 等. 智能高效株间锄草机器人研究进展与分析. 农业工程学报, 2015, 31(5):1-8. [期刊]
- [83] Astrand B, Baerveldt A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. Autonomous Robots, 2002, 13(1):21-35. [期刊]
- [84] Hague T, Tillett N D. Navigation and control of an autonomous horticultural robot. Mechatronics, 1996, 6(2):165-180. [期刊]
- [85] Perez-Ruiz M, Slaughter D C, Gliever C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80:41-49. [期刊]
- [86] 张春龙, 黄小龙, 刘卫东, 等. 苗间锄草机器人信息获取方法的研究. 农业工程学报, 2012, 28(9):142-146. [期刊]
- [87] 毛文华, 张银桥, 王辉, 等. 杂草信息实时获取技术与设备研究进展. 农业机械学报, 2013, 44(1):190-195. [期刊]
- [88] 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于余摆运动的株间机械除草爪齿避苗控制算法. 农业工程学报, 2012, 28(23):12-18. [期刊]
- [89] 黄小龙, 刘卫东, 张春龙, 等. 苗间锄草机器人锄草刀优化设计. 农业机械学报, 2012, 43(6):42-46. [期刊]
- [90] Tillett N D, Hague T, Marchant A. A robotic system for plant-scale husbandry. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 69(2):39-50. [期刊]
- [91] Sun H, Slaughter D C, Perez-Ruiz M, et al. RTK GPS mapping of transplanted row crops. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(3):32-37. [期刊]

- [92] Marchant T, Briovt R. Real time tracking of plant rows using a Hough transform. *Real Time Imaging*, 1995,5(1):363-371. [期刊]
- [93] 林欢,许林云. 中国农业机器人发展及应用现状. *浙江农业学报*, 2015,27(5):865-871. [期刊]
- [94] 高荣杰. 水果糖度可见/近红外光谱在线检测方法研究. 硕士学位论文, 华东交通大学, 2012.[学术论文]
- [95] <http://www.nongjitong.com/company/1438.html>
- [96] <http://www.friway.cn/show.asp?uver=cn>
- [97] <http://www.china-flourish.com/>
- [98] <http://www.chinameyer.com/>
- [99] 韩东海,王加华. 水果内部品质近红外光谱无损检测研究进展. *中国激光*, 2008,35(8):1123-1131. [期刊]
- [100] Jie D F, Xie L J, Rao X Q, Ying Y B. Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids content of watermelon in an on-line detection system. *Postharvest Biology and Technology*, 2014,90:1-6. [期刊]
- [101] 刘燕德, 彭彦颖, 高荣杰,等. 基于 LED 组合光源的水晶梨可溶性固形物和大小在线检测. *农业工程学报*, 2010, 26(11):338-343. [期刊]
- [102] 赵杰文, 毕夏坤, 林颢, 等. 鸡蛋新鲜度的可见-近红外透射光谱快速识别. *激光与光电子学进展*, 2013,5:1-8. [期刊]
- [103] Huang W Q, Li J B, Wang Q Y, Chen L P. Development of a multispectral imaging system for online detection of bruises on apples. *Journal of Food Engineering*, 2015,146:62-71. [期刊]
- [104] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 194-201. [期刊]
- [105] 陈文良, 谢斌, 宋正河,等. 拖拉机电控液压动力转向系统的研究. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 122-125. [期刊]
- [106] 陈无畏, 施文武, 王启瑞,等. 新型自动引导车导航与控制系统. *农业机械学报*, 2002, 33(2):70-73. [期刊]
- [107] 陈无畏, 施文武, 王启瑞,等. 基于位置信息融合的自动引导车路径跟踪研究. *农业机械学报*, 2003, 34(2):69-72. [期刊]
- [108] 李建平, 林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展. *农业工程学报*, 2006, 22(9):232-236. [期刊]
- [109] 李磊, 曹志强, 侯增广,等. 基于行为的轮式移动机器人导航控制. *控制与决策*, 2004, 19(6):707-710. [期刊]
- [110] 李晓庆, 张仲民, 蒋增福. 拖拉机构造. 北京:机械工业出版社, 2001. [书籍]
- [111] 吕安涛, 毛恩荣, 宋正河,等. 一种拖拉机自动驾驶复合模糊控制方法. *农业机械学报*, 2006, 37(4):17-20. [期刊]
- [112] 田海清, 应义斌, 张方明. 农业车辆导航系统中自动控制技术的研究进展. *农业工程学报*, 2005, 36(7):148-151. [期刊]
- [113] 王子, 林良明, 颜国正. 基于包容结构的移动机器人混合式控制结构. *机器人*, 2002, 24(2):270-275. [期刊]
- [114] 张智刚, 罗锡文, 周志艳,等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计. *农业机械学报*, 2006, 37(7):95-97. [期刊]
- [115] 张智刚, 罗锡文, 李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究. *农业工程学报*, 2005, 21(11):77-80. [期刊]
- [116] 周俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统. *农业机械学报*, 2005, 36(3):90-94. [期刊]

- [117] 刘国旺, 王业伟. 黑龙江为省级支持组建的农机合作社配 GPS 装置. 北京:中国财经报, 2011.
- [118] 杨鸿博. “三夏”跨区机收开启“信息化时代”. 河南:中国农机化导报, 2012.
- [119] Bochtis D D, Sørensen C G C, Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering*, 2014, 126(39):69-81. [期刊]
- [120] 朱洪波, 杨龙祥, 朱琦. 物联网技术进展与应用. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2011, 31(1): 1-9. [期刊]
- [121] 武建佳, 赵伟. WInternet:从物网到物联网. 计算机研究与发展, 2013, 50(6): 1127-1134. [期刊]
- [122] 王慧平, 刘卉, 陈竞平, 付卫强, 吴才聪. 农机远程监管服务系统的设计与实现--基于 ArcGIS Server. 农机化研究, 2014, (2): 192-196. [期刊]
- [123] 郭鸿鹏, 冯甘雨. 农机作业监控与优化调度系统结构设计-基于北斗卫星导航系统. 农机化研究, 2014, (2): 188-191. [期刊]
- [124] 史国滨, 王熙, 庄卫东. 基于 GoogleMaps 的农业机械作业轨迹监测系统. 农业机械学报, 2012, 43(11): 231-236. [期刊]
- [125] 王少农, 庄卫东, 王熙. 农业机械远程监控管理信息系统研究. 农机化研究, 2015, (6): 264-268. [期刊]
- [126] 程学旗, 王元卓, 靳小龙. 网络大数据计算技术与应用综述. 科研信息化技术与应用, 2013, 4 (6):3-14. [期刊]
- [127] 王元卓, 靳小龙, 程学旗. 网络大数据:现状与挑战. 计算机学报, 2013, 36(6): 1-15. [期刊]
- [128] 袁芬, 徐从富. 基于机会协作的农业物联网大数据处理系统设计. 计算机应用, 2014, 34(7): 2136-2139. [期刊]
- [129] 苑进, 胡敏, Kesheng Wang,等. 基于高斯过程建模的物联网数据不确定性度量与预测. 农业机械学报, 2015, 46(5): 265-272. [期刊]
- [130] 孙忠富, 杜克明, 郑飞翔,等. 大数据在智慧农业中研究与应用展望. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 63-71. [期刊]
- [131] Claudio Piciarelli, Christian Micheloni, Gian Luca Foresti. Trajectory-Based Anomalous Event Detection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(9): 1544-1554. [期刊]
- [132] 王万章, 洪添胜, 李捷,等. 果树农药精确喷雾技术. 农业工程学报, 2004, 20(6) : 98-101. [期刊]
- [133] Walklate P J, Cross J V, Richardson G M. Comparison of Different Spray Volume Deposition Models Using LIDAR Measurements of Apple Orchards. *Bio-systems Engineering*, 2002, 82(3) : 253-267. [期刊]
- [134] 王万章, 洪添胜, 陆永超,等. 基于超声波传感器和 DGPS 的果树冠径检测. 农业工程学报, 2006, 22(8): 158-161. [期刊]
- [135] Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Lu Yongchao, etal. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(6): 98-101. [期刊]
- [136] 李丽, 宋坚利, 何雄奎. 农作物喷雾靶标自动探测器设计与应用. 农业机械学报, 2010, 41(7) : 54-56.[期刊]
- [137] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性. 农业机械学报, 2009, 40(1) : 74-78.[期刊]
- [138] 邹建军, 曾爱军, 何雄奎,等. 果园自动对靶喷雾机红外探测控制系统的研制. 农业工程学报, 2007, 23(1):129-132. [期刊]

- [139] 翟长远, 赵春江, 王秀,等. 树型喷洒靶标外形轮廓探测方法. 农业工程学报, 2010, 26(12):173-177. [期刊]
- [140] 中华人民共和国国家统计局, 2015. <http://www.stats.gov.cn/>.
- [141] 杜连凤, 吴琼, 赵同科,等. 北京市郊典型农田施肥研究与分析. 中国土壤与肥料, 2009(3):75-78. [期刊]
- [142] 关新元, 尹飞虎, 陈云. 滴灌随水施肥技术综述. 新疆农垦科技, 2002(3):43-44. [期刊]
- [143] 郝玮琳, 彭熙伟, 耿庆波,等. 基于 ARM 的智能灌溉控制系统. 中国农村水利水电, 2006(5):24-26. [期刊]
- [144] 马福生, 刘洪禄, 吴文勇,等. 设施滴灌无土栽培红掌耗水规律研究. 灌溉排水学报, 2011, 30(6):61-64. [期刊]
- [145] 张永丽, 于振文. 灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响. 水土保持学报, 2007, 21(5):155-158. [期刊]
- [146] 邓兰生, 涂攀峰, 张承林,等. 水肥一体化技术在香蕉生产中的应用研究进展. 安徽农业科学, 2011, 39(25):15306-15308. [期刊]
- [147] 黄燕, 汪春, 衣淑娟. 液体肥料的应用现状与发展前景. 农机化研究, 2006(2):198-200. [期刊]
- [148] 李代红, 傅送保, 操斌. 水溶性肥料的应用与发展. 现代化工, 2012, 32(7):12-15. [期刊]
- [149] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏,等. 基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验. 农业工程学报, 2012, 28(8):105-110. [期刊]
- [150] 刘东红. 安徽茂施大量元素水溶肥在青菜上的应用研究. 现代农业科技, 2012(2):294-295. [期刊]
- [151] 李涛. 一种含腐殖酸的水溶性肥料的制备方法:CN, 200710017334, 2007-02-01. [专利]
- [152] 屈玉玲, 胡朝霞, 李武. 设施蔬菜应用水肥一体化技术的试验研究. 山西农业科学, 2007(10). [期刊]
- [153] 原保忠, 康跃虎. 浅谈滴灌在日光温室中的应用. 节水灌溉, 1999(4):16-17. [期刊]
- [154] 周长吉. 温室灌溉原理与应用. 北京:农业出版社, 2007.[书籍]
- [155] 杨仁全, 杨春园, 吴松,等. 精密施肥机的设计与应用. 见: 2008 农业生物环境与能源工程国际论坛. 2008.[论文集]
- [156] 王永涛, 吴艳英, 李家春,等. 基于 GPRS DTU 的农业灌溉施肥智能化控制系统的应用研究. 中国农村水利水电, 2013(12):93-97. [期刊]
- [157] 吴玉发. 水肥一体化自动精准灌溉施肥设施技术的研究和实现. 现代农业装备, 2013(4):46-48. [期刊]
- [158] 徐志龙, 乔晓军. 自动监控技术在设施农业生产中的应用系列(三) 自动灌溉施肥机在设施生产中的应用. 农业工程技术·温室园艺, 2008(6):15-17. [期刊]
- [159] 钱佳, 马永刚. 液体肥料的应用与发展. 安徽化工, 2009, 35(1):17-19. [期刊]
- [160] 汪家铭. 水溶肥发展现状及市场前景. 氮肥技术, 2011, 36(12):27-31. [期刊]
- [161] 王军. 水溶肥现状及存在问题—访中国农业大学资源与环境学院教授陈清. 北京: 农资导报, 2011.
- [162] 王云霞. 液体肥料的应用现状与发展趋势. 化肥设计, 2003, 41(4): 10-13. [期刊]
- [163] 周亮亮, 柯建宏. 基于模糊控制的温室灌溉施肥控制系统. 浙江农业科学, 2012, 1(12):1648-1652.[期刊]
- [164] 邹升, 毛罕平, 左志宇. 基于 VB 的灌溉施肥机上位机软件系统设计. 安徽农业科学, 2011, 39(7):4237-4240.[期刊]
- [165] 俞卫东, 刘永华, 孔德志,等. 基于 PLC 的智能灌溉施肥机的研制. 中国农机化学报, 2013, 34(6):177-179.[期刊]

- [166] SNEH M. The history of fertigation in Israel. Haifa, Israel: Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation, 1995, 1-10. [书籍]
- [167] Neto A J S, Zolnier S, Lopes D D C. Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2014, 103(2):17-25. [期刊]
- [168] Dougherty Mark, et. al. Precision fertilization using sub-surface drip irrigation (SDI) for site-specific management of cotton. In: 2007 ASABE Annual International Meeting, United States American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007:11-13.[论文集]
- [169] 关新元, 尹飞虎, 李永生, 等. 水溶性腐植酸多元固体肥料及其生产方法: CN, 200910130413, 2009-04-04. [专利]
- [170] Agarkar S A, Kulat D K D, Dr R V K. WSN based Low Cost and Low Power EPM Design and Field Micro-Climate Analysis using Recent Embedded Controllers. *International Journal of Computer Applications*, 2010, 12(6):24-28.[期刊]
- [171] Anastasi G, Conti M, Francesco M D, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3):537-568.[期刊]
- [172] Baggio A. Wireless sensor networks in precision agriculture. In: *Proceedings of the ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks*. Sweden: ACM, 2005.[论文集]
- [173] Blackmore S. Precision Farming: An Introduction. *Outlook on Agriculture*, 1994, 23(4):275-280.
- [174] Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, H., and Van De Braak, N. J. *Greenhouse Climate Control*. Wageningen: Wageningen Pers, 1995.[论文集]
- [175] Ioslovich I, Gutman P O, Linker R. Hamilton - Jacobi - Bellman formalism for optimal climate control of greenhouse crop. *Automatica*, 2009, 45(5):1227-1231. [期刊]
- [176] Konstantinos K, Apostolos X, Panagiotis K, et al. Topology Optimization in Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture Applications. In: *International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2007. Sensorcomm. Valencia, 2007:526-530. [论文集]
- [177] Marcelis L F M, Elings A, Visser P H B D, et al. Simulating Growth and Development of Tomato Crop. *Acta Horticulturae*, 2009, 2009:101-110.[期刊]
- [178] Nebbali R, Roy J C, Boulard T. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renewable Energy*, 2012, 43:111-129. [期刊]
- [179] Khaoua S A O, Bournet P E, Migeon C, et al. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(1):83-98. [期刊]
- [180] Park D H and Park J W. Wireless sensor network-based greenhouse environment monitoring and automatic control system for dew condensation prevention. *Sensors*, 2010,11(4): 3640-3651. [期刊]
- [181] Andrzej P, Luis G J, Francisco R, et al. Simulation of Greenhouse Climate Monitoring and Control with Wireless Sensor Network and Event-Based Control. *Sensors*, 2009, 9(1):232-52.[期刊]
- [182] Qin L, Shi C, Ling Q, et al. Predictive control of greenhouse temperature based on mixed logical dynamical systems. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2010, 16(6):1207-1214. [期刊]
- [183] Setiawan A, Albright L D, Phelan R M. Application of pseudo-derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2000, 26(3):283-302.[期刊]
- [184] Santis E D, Benedetto M D D, Pola G. A structural approach to detectability for a class of hybrid systems. *Automatica*, 2009, 45(5):1202-1206.[期刊]

- [185] Tate R F, Hebel M A, Watson D G. WSN Link Budget Analysis for Precision Agriculture. In: Proceedings of the 2008 ASABE Annual International Meeting. Rhode Island: 2008.[论文集]
- [186] Teitel M, Liran O, Tanny J, et al. Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate. Biosystems Engineering, 2008, 101(1):111-122.[期刊]
- [187] Tong G, Christopher D M, Li B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 68(1):129-139.[期刊]
- [188] Witsenhausen H. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(2):161-167.[期刊]
- [189] Ning W, Zhang N, Wang M. Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. Computers & Electronics in Agriculture, 2006, 50(1):1-14.[期刊]
- [190] Xia Y, Zhang J, Boukas E K. Control for discrete singular hybrid systems. Automatica 44(10), 2635-2641.[期刊]
- [191] 杜尚丰, 王一鸣, 马承伟,等. 温室环境温度智能控制算法研究. 计算机测量与控制, 2003, 11(11):850-852.[期刊]
- [192] 李天来. 我国日光温室产业发展现状与前景. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(2):131-138.[期刊]
- [193] 李天来, 颜阿丹, 罗新兰,等. 日光温室番茄单叶净光合速率模型的温度修正. 农业工程学报, 2010, 26(9):274-279.[期刊]
- [194] 罗新兰, 李天来, 仇家奇, 高西宁, 韩亚东. 北方日光温室长季节番茄茎节生长模拟模型. 农业工程学报, 2009, 25(8), 174-179. [期刊]
- [195] 孟力力, 杨其长, Gerard.EA.Bot,等. 日光温室热环境模拟模型的构建. 农业工程学报, 2009, 25(1):164-170.[期刊]
- [196] 秦琳琳, 石春, 吴刚,等. 基于混杂系统的温室天窗温度系统建模. 系统仿真学报, 2010, 22(4):833-836.[期刊]
- [197] 王子洋, 秦琳琳, 吴刚,等. 基于切换控制的温室温湿度控制系统建模与预测控制. 农业工程学报, 2008, 24(7):188-192.[期刊]
- [198] 朱丙坤, 徐立鸿, 胡海根,等. 基于节能偏好的冲突多目标相容温室环境控制. Journal of System Simulation, 2011, 23(1):95-99.[期刊]
- [199] 周志艳, 臧英, 罗锡文,等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略. 农业技术与装备, 2013(24):1-10.[期刊]
- [200] 蒙艳华, 周国强, 吴春波,等. 我国农用植保无人机的应用与推广探讨. 中国植保导刊, 2014(S1).[期刊]
- [201] 温源, 薛新宇, 邱白晶,等. 中国植保无人机发展技术路线及行业趋势探析. 中国植保导刊, 2014(S1).[期刊]
- [202] 张立珍. 无人机自主飞行控制系统的设计. 硕士, 南京航空航天大学, 2011.[学位论文]
- [203] 王大伟, 高席丰. 植保无人机药箱建模与姿态控制器设计. 排灌机械工程学报, 2015(11): 1006-1012.[期刊]
- [204] <http://news.mydrivers.com/1/474/474896.htm>.
- [205] 王玲, 兰玉彬, W Clint Hoffmann,等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究. 农业机械学报, 2016, 47(1):15-22. [期刊]
- [206] 徐兴, 徐胜, 刘永鑫,等. 小型无人机机载农药变量喷洒系统设计. 广东农业科学, 2014, 41(9): 207-210. [期刊]
- [207] 徐博, 陈立平, 谭彧,等. 多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究. 农业机械学报, 2015, 46(11):36-42. [期刊]

- [208] 徐博, 陈立平, 谭彧,等. 基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证. 农业工程学报, 2015(23):173-178. [期刊]
- [209] 张逊逊, 许宏科, 朱旭. 低空低速植保无人直升机避障控制系统设计. 农业工程学报, 2016(2):43-50. [期刊]