

# 农业物联网体系结构与应用领域研究进展

郑纪业<sup>1,2</sup>, 阮怀军<sup>2</sup>, 封文杰<sup>2</sup>, 许世卫<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081; <sup>2</sup>山东省农业科学院科技信息研究所, 济南 250100)

**摘要:** 农业物联网是计算机、互联网、移动通信等信息技术在农业领域的高度集成和具体应用, 是农业信息化、智能化的必要条件。随着农业物联网产业发展, 各种农业物联网系统层出不穷, 由于缺乏对整个农业物联网系统层次结构的分析, 导致当前各农业物联网应用呈现出碎片化、垂直化、异构化等问题。如何从农业物联网各种应用需求中统一抽取出系统的组成部件以及它们之间的组织关系, 建立农业物联网体系结构, 实现农业物联网设计与实现方法的统一是当前急需解决的问题。文中从农业物联网的概念发展、基本特征、体系结构研究现状等方面进行深入分析后认为, 当前各个国家与机构制订的物联网发展和管理计划对科研人员从事物联网研究与应用开发起到了很好的引导作用, 但是都没有指出设计与实现物联网系统的具体方法, 并且农业生产环境的多样性和生产流程的复杂性决定了必须统筹考虑农业各行业的实际应用特点来建立农业物联网体系结构。为此在文章中首先讨论了农业物联网体系结构构建原则包括可扩展性、可复用性、安全性和可靠性等, 在此基础上结合农业产业的具体需求及工程实践经验, 进一步划分农业物联网的基本结构, 提出五层农业物联网结构模型, 该模型由下至上划分为感知层、接入层、网络层、数据层及应用层五层, 各层对应不同的通信协议, 农业物联网层次结构模型与协议体系的配套构成了农业物联网体系结构。该体系结构与传统的三层、四层物联网体系结构相比, 增加的农业物联网接入层针对泛在环境中多数物体的资源和计算能力受限问题, 着重强调了底层异构感知网络与网络层的无缝连接, 可以有效屏蔽底层异构感知网络的复杂性, 并提供统一的抽象管理接口, 为农业物联网硬件感知系统的快速搭建提供便利。增加的农业物联网数据共享层, 主要针对当前农业物联网系统存在垂直化、封闭化导致不同系统之间农业数据资源无法共享, 农业生产、经营、管理、服务历史数据无法得到充分利用, 形成信息孤岛问题, 通过面向服务的数据资源共享架构, 为各农业物联网应用系统间数据交换与共享提供有效解决方案。五层农业物联网体系结构中各层功能更加清晰独立, 有利于各层服务器之间的网络负载均衡, 降低企业网络的通信负担。随后提取农业各行业应用的共性问题, 按照监测对象的不同, 分析了农业生产环境监控物联网、动植物生命信息监控物联网、农产品质量安全追溯物联网、农机作业监控物联网等不同应用的研究现状和涉及的主要技术。从农业物联网体系结构角度出发, 可以发现当前农业物联网各领域研究与应用存在两方面的问题, 一方面是异构网络接入层硬件网关研究较多, 嵌入式网关中间件研究应用相对较少的问题; 另一方面是农业物联网数据共享层研究应用严重缺失, 各应用系统通常将感知层获取的数据直接发送至农业物联网应用层, 缺乏对感知数据的深度挖掘和分析, 难以达到进一步指导农业生产的效果。最后讨论了未来农业物联网技术研究和应用发展的重点方向。

**关键词:** 农业物联网; 体系结构; 层次模型; 应用领域; 发展方向

## Agricultural IOT Architecture and Application Model Research

ZHENG JiYe<sup>1,2</sup>, RUAN HuaiJun<sup>2</sup>, FENG WenJie<sup>2</sup>, XU ShiWei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; <sup>2</sup>S&T Information Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100)

收稿日期: 2016-07-27; 接受日期: 2016-12-02

基金项目: 国家科技支撑计划 (2014BAD08B05)

联系方式: 郑纪业, E-mail: jiy Zheng@163.com. 通信作者许世卫, E-mail: xushiwei@caas.cn

**Abstract:** Agricultural Internet of Things (AIoT) is the highly integrated information technology such as computer, internet and mobile communication's application in agricultural field, and it is the essential condition for the agricultural informatization and intelligent. With the development of AIoT industry, there appears an endless stream of AIoT application systems, because of the lack of analysis for AIoT system's whole architecture, the current AIoT application presents the fractional, vertical and heterogeneous characteristics. Extracting the system components and their relationship from various AIoT applications, and establishing AIoT system architecture, to achieve the AIoT's design and realization method's unification are urgent problems need to be solved. The paper analyzed the AIoT's concepts, basic features and system structure research status, and found that the IoT development and management plans from different countries and institutes played good guidance for the related researchers, however, they didn't give the specific methods that can design and realize the IoT systems, and furthermore agricultural environment's diversity and complexity determine that AIoT architecture's establishment must consider agricultural industries characteristics as a whole. Therefore, the paper firstly discussed the agricultural architecture building principles including extensibility, reusability, safety and reliability and so on, then combined with the specific needs of agricultural industry and experiences from engineering practices, put forward an AIoT hierarchical structure model, the model is divided into five layers from the bottom to the up, they are perception layer, access layer, network layer, data layer and application layer, respectively, and each layer corresponds to different communication protocols. And pointed out that AIOT hierarchical model and the corresponding protocol architecture constitute the AIoT architecture. Compared with the traditional three layers and four layers architecture, the proposed architecture added the access layer and data layer. Aiming at the problem that the majority objects in the ubiquitous environment have limited resources and computing power, the access layer emphasized that the underlying heterogeneous sensor networks can connect to the network layer seamlessly, it provides a unified abstract management interface to shield the complexity of the underlying heterogeneous sensor networks, and reduces the difficulty of building AIOT perception system. For the problem of agricultural data can not be fully used in current AIoT systems, and formed the information islands, the data layer designed and realized a service oriented architecture to solve the data exchange and sharing problems among different AIoT systems. Overall the five layers architecture's functionalities are more independent, it is advantageous to the network load balancing between each layer, and reducing the burden of enterprise network communications. Aiming at the common problems of the application of agricultural industries, according to the different objects to be monitored, analyzed the agricultural production environment monitoring IoT, plant and animal life information monitoring IoT, agricultural products quality detection and the quality safety tracing IoT, agricultural machinery operation monitoring IoT's present research situation and main technologies involved. From the perspective of agricultural application architecture, it was found that the current researches are more concentrated on the gateway hardware, and the embedded gateway middleware application is relatively few on the one hand, on the other hand the AIOT data sharing layer's research is seriously lacking, each application system usually sent the perceive data directly to the AIOT application layer, therefore it is difficult to achieve the effect of further guiding to agricultural production for the lack of data mining and analysis. Finally, the paper discussed the further research and application direction of the AIoT technology.

**Key words:** agricultural internet of things; system structure; architecture model; application area; development direction

## 0 引言

从工业 4.0 概念的提出到中国的“互联网+”行动计划,都把未来产业发展指向新的方向,以信息化带动工业化、城镇化和农业现代化的深度融合,由此打破传统的行业界限,带来跨行业重组融合,并产生技术模式、管理模式和理念的创新。农业物联网作为“互联网+”农业的一个重要发展方向,可实现对农业生产的全面感知、智能决策分析和预警,为农业生产提供精准化种植、可视化管理和智能化决策服务。目前无论国内还是国外,农业物联网的研究与应用都还处于初级阶段,不同应用领域的专家学者对物联网研究

的起点各异,关于农业物联网的概念特征、系统模型、体系结构和关键技术都还缺乏清晰化的界定<sup>[1]</sup>。本文从农业物联网的概念、体系结构现状、应用领域等方面进行了深入分析,抽象出农业物联网的应用类型和应用场景,探讨建立农业物联网体系结构,为农业信息化从业人员设计和实现农业物联网系统提供理论和技术指导。

## 1 农业物联网概念及其特征

物联网的概念最早在 1999 年由美国麻省理工学院(MIT)自动识别中心(Auto-ID Labs)提出的网络无线射频识别(RFID)系统演变而来,目的是利用射

频识别等信息感知技术把所有物品与互联网连接起来, 实现智能化识别和管理。早期农业物联网的研究主要以农产品仓储和物流监控为主要应用方向, 通过射频识别技术实现仓储物流系统的智能化管理。随着新的信息技术的应用与发展, 物联网的内涵及外延发生了较大变化。2005 年在突尼斯举行的信息社会世界峰会 (WSIS) 上国际电信联盟 (ITU) 发布了《ITU Internet reports 2005—the Internet of things》, 给出了物联网的具体定义, 并进一步介绍了物联网的特征、相关的技术、面临的挑战和未来的市场机遇。

农业物联网是物联网技术在农业生产、经营、管理和服务全产业链中的具体应用, 对改造传统农业、加快农业现代化发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。目前, 不同领域的研究者对农业物联网从不同侧重点出发提出了农业物联网的定义。余欣荣<sup>[3]</sup>从狭义和广义两方面给出了农业物联网的定义, 李瑾等<sup>[4]</sup>从技术角度和管理角度分别给出了定义, 认为农业物联网是指通过农业信息感知设备, 采集农业系统中动植物生命体、环境要素、生产工具等物理部件和各种虚拟“物件”的相关信息, 按照约定的协议进行信息交换和通讯, 实现对农业生产对象和过程的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。李道亮<sup>[5]</sup>从农业物联网感知、传输、处理的层次结构方面给出了详细的定义, 认为农业物联网是指综合运用各类传感器、RFID、视觉采集终端等感知和识别设备, 广泛采集畜禽养殖、水产养殖、大田种植、设施园艺、农产品物流等不同行业的农业现场信息; 按照约定数据传输和格式转换方法, 集成无线传感器网络、电信网和互联网等信息传输通道, 实现多尺度农业信息的可靠传输; 最后将获取的海量农业信息进行融合、处理, 并通过智能化操作终端实现农业的自动化生产、最优化控制、智能化管理、电子化交易, 进而实现农业集约、高产、优质、高效、生态和安全的目标。

尽管不同研究者视角各异, 也没有一个公认的统一农业物联网定义, 农业物联网的内涵与外延也在不断发展完善, 但从农业全生育期、全产业链、全关联因素方面考虑, 运用系统论的观点对农业“全要素、全过程、全系统”的全面感知、可靠传输、智能处理和自动反馈控制是农业物联网具备的基本特征<sup>[2]</sup>。

## 2 农业物联网体系结构研究现状

由于缺乏对整个农业物联网系统层次结构的分

析, 导致当前各农业物联网应用呈现出碎片化、垂直化、异构化等问题。农业物联网体系结构可用精确地定义系统的各组成部分及各部分之间的连接关系, 引导应用开发人员遵循这些原则来实现系统, 使得最终建立的系统符合预期的需求。因此, 农业物联网体系结构是设计与实现农业物联网系统的首要基础。为此, 国内外的研究人员也对物联网体系结构进行了广泛深入的研究, 提出了多种具有不同样式的体系结构。

欧盟第七框架计划 (Framework Program 7, 简称 FP 7) 专门设立了两个关于物联网体系结构的项目, 一个是 SENSEI<sup>[6]</sup>, 将互联网看作是连接物理世界与数字世界的包罗万象的基础设施, 其目标是整合无线射频识别技术 (RFID)、无线传感与执行网络 (WSANs) 及网络嵌入式设备等技术, 建立开放的基于业务驱动的真实世界互联网 (real world internet, RWI) 结构, 通过统一的接口来提供服务和应用; 另一个是 IoT-A<sup>[7]</sup>, 主要制定了物联网参考模型 (IoT reference model) 和物联网参考结构 (IoT reference architecture), 其目标是建立物联网体系结构参考模型和定义物联网关键组成模块, 该参考结构模型是物联网机理的抽象集而不是某个具体应用的结构, 从而为不同应用领域的研究人员开发更好兼容性的物联网结构提供了最佳范例。此外, 美国麻省理工学院和英国剑桥大学<sup>[8]</sup>、日本东京大学<sup>[9]</sup>、韩国电子与通信技术研究所 (ETRI)<sup>[10]</sup>、美国弗吉尼亚大学、欧洲电信标准组织 (ETSI)、法国巴黎第六大学<sup>[11]</sup>以及北京航空航天大学<sup>[12]</sup>和苏州大学<sup>[12]</sup>都从不同角度对物联网体系结构进行了探讨和设计。DUQUENNOY 等<sup>[13]</sup>和纪阳等<sup>[14]</sup>提出了一种物联网结合 Web 技术演化而成的 WoT (web of things) 开放结构。沈苏彬等<sup>[15]</sup>比较了物联网与下一代网络、网络物理系统 (Cyber-Physical System, CPS)、泛在网络 (ubiquitous networking)、机对机通信 (M2M) 及无线传感器网络的区别与联系, 并从已经构建的物联网应用系统和应用实例出发, 研究了物联网的体系结构。钱志鸿等<sup>[16]</sup>认为物联网网络通信协议、物联网网络控制平台、物联网应用终端平台构成了物联网体系结构。于君等<sup>[17]</sup>总结了物联网应用实践的案例, 分析了物联网体系结构和相关技术, 并指出电信运营商在物联网体系中的作用与价值。GUBBI 等<sup>[18]</sup>提出一种以用户为中心基于云计算的物联网实现架构, 不仅可以降低物联网系统的实现成本, 而且具有很强的可伸缩性。通过云计算提供基础设施、平台、软件等形式的服务, 充分挖掘用户的创造力。

AL-FUQAHA 等<sup>[19]</sup>着重研究了物联网的使能技术、协议和应用问题,给出了物联网研究的总体概况,分析了物联网存在的主要挑战,探索了物联网和其他新兴技术包括大数据分析、计算云及雾计算之间的关系。SICARI 等<sup>[20]</sup>从物联网安全性、隐私性和信任机制方面出发,阐述了当前研究存在的挑战和物联网领域已经存在的解决方案,并给出了物联网未来研究方向。

当前,各个国家与机构制订的物联网发展和管理计划对科研人员从事物联网研究与应用开发起到了很好的引导作用<sup>[21]</sup>,但是都没有指出设计与实现物联网系统的具体方法。并且农业生产环境的多样性和生产流程的复杂性决定了其必须针对不同的应用场景(大田、设施、畜禽、水产等)考虑不同的网络通信和控制方式,因而对不同应用的农业物联网系统的设计要求也不尽相同。

### 3 农业物联网体系结构

现行农业物联网主要集中于单体的应用,其特点是闭环于一个具体的应用,导致整个系统的可伸缩性、可扩展性、模块化和互操作性不能满足农业物联网日益发展的需求。如何从各种应用需求中统一抽取出现系统的各组成部件以及它们之间的组织关系,进而指导农业物联网体系结构的建立与实现是目前农业物联网研究领域亟待解决的问题之一。

对于农业物联网体系结构的研究应遵循 ITU 采用的相关研究方法,首先抽象农业物联网的应用类型和应用场景,作为设计和验证农业物联网结构的主要依据<sup>[15]</sup>;然后提出农业物联网体系结构的通用原则和总体需求;之后进一步划分农业物联网的基本结构,确定通用框架和功能结构模型<sup>[1]</sup>。

#### 3.1 农业物联网体系结构构建原则

**3.1.1 可扩展性** 扩展性是指农业物联网系统能够扩展自身并未包含的功能。随着各种异构智能终端设备接入、退出系统,或在物联网中的位置移动,都可能引起网络拓扑结构发生变化,这就要求系统能够自动进行网络运行环境配置,对系统中新增加的数据采集节点,在不会导致其他节点或者服务端的应用改变的情况下能够快速建立数据采集程序而不影响整个系统的运行,这就要求依据农业物联网体系结构建立的农业物联网系统具有良好的可扩展性。

**3.1.2 可复用性** 复用性是指采集层提供的各种数据资源能够重复应用在多个工程当中。农业物联网是个

复杂的系统工程,不同的农业物联网应用,使用的智能设备不尽相同,不同智能设备需要的采集程序也不一样,因此需要对采集层获取的数据资源进行清洗、转换等操作,实现资源的高度聚合与共享,这样能够大大缩短工程的开发周期和减少开发成本。

**3.1.3 安全性和可靠性** 安全和可靠是对系统的基本要求,也是农业物联网体系结构设计所追求的主要目标之一。由于农业生产环境复杂多变,特别是信息感知和传输环节,要充分考虑系统的可靠性,一方面要选用稳定、可靠、集成度高的感知和传输设备,另一方面应从体系结构上增加事件管理、任务调度、权限管理等方式进一步保障系统的可靠性和安全性。

#### 3.2 五层农业物联网体系结构

根据物联网体系结构构建原则及农业产业的具体需求,结合工程实践经验,提出农业物联网层次结构模型,该模型由下至上划分为感知层、接入层、网络层、数据层及应用层五层,各层对应不同的通信协议。农业物联网层次结构模型与协议体系的配套构成了农业物联网体系结构,如图 1 所示。

感知层主要由 RFID、条形码、遥感技术及各类传感器终端构成,通过 GPRS、WiFi、ZigBee 等协议将采集的实时数据发送至接入层;接入层主要由硬件网关及内置的软件中间件等构成,中间件可以有效的屏蔽底层异构感知网络的复杂性,并提供统一的抽象管理接口,为农业物联网业务应用的快速建立提供基础;网络层通过互联网协议 IP、移动通信网络协议等将数据向上层传递;农业物联网数据共享层相当于一个巨大的数据池,实现各类监测数据的集成共享,本层主要使用 TCP、UDP 等传输协议;应用层通过 HTTP、FTP 等协议从数据共享层获取数据并构建相应的农业物联网系统。此外,协议体系还包括贯穿模型各层的物联网安全协议、隐私保护协议等。本文提出的五层农业物联网体系结构相对于传统物联网三层模型主要增加了异构网络接入层和农业物联网数据共享层,下面将给出此两层的具体功能设计。

**3.2.1 异构网络接入层** 随着信息及通信技术的发展,物联网技术在农业各行业得到广泛应用,大量传感设备部署于各应用场地,由于商业、技术成熟度或者历史原因,这些感知设备的功能、接口和数据传输协议等都存在着明显差异。感知设备通过 CAN 总线或者 485 总线等有线方式,以及蓝牙、WiFi、zigbee、RFID 等无线传感器网络方式获取监测对象的相关信息,再通过 GPRS、WiFi、以太网等形式传送到远端

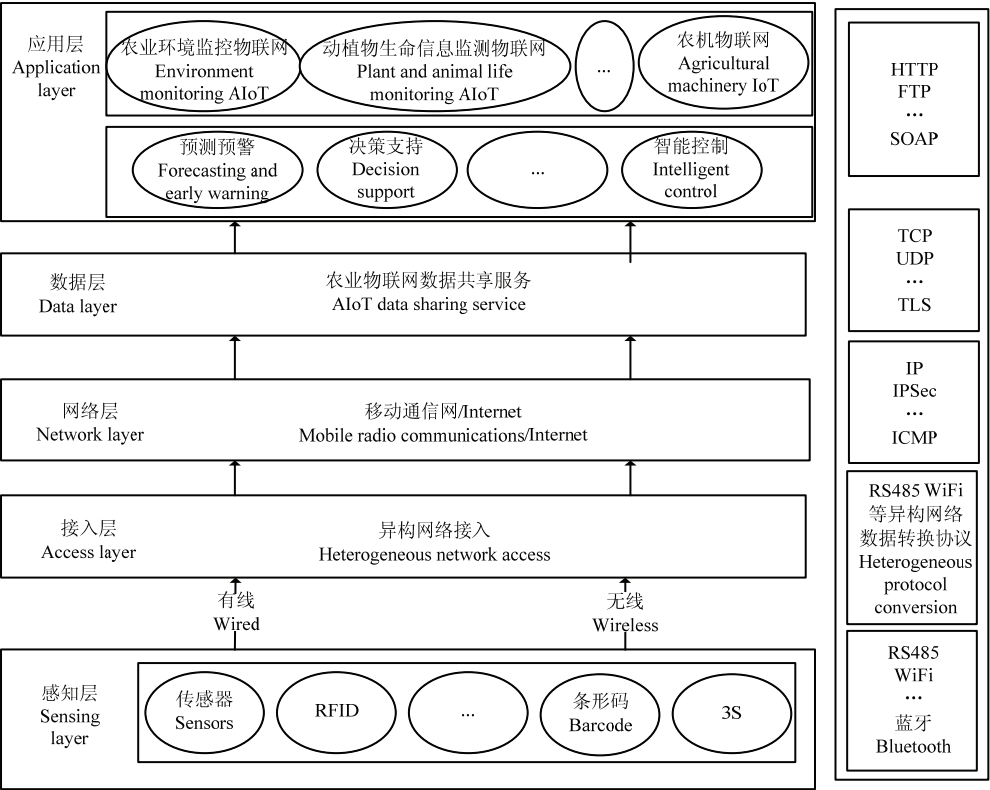


图 1 农业物联网体系结构

Fig. 1 Agricultural internet of things architecture

服务器<sup>[22]</sup>。无线传感器网络、总线网络、互联网等网络之间的数据结构、传输方式等各不相同，这就使得用户必须针对各种感知网络进行单独开发，加大了上层应用程序开发的难度和复杂度，如何有效地实现不同网络不同设备间的互联互通以及获取所需的各类服务是农业物联网应用中的一个核心问题。

本文描述的接入层将对数据采集设备进行一个标准化的描述和统一的资源访问管理，主要由硬件网关接口、接口驱动及嵌入式中间件等构成。硬件网关输入接口包括 RS232、RS485、WiFi 等，方便不同接口感知设备的接入，输出接口包括 WiFi、RJ45、GPRS、LTE 等方式，可让用户根据应用场景的实际条件选择输出方式。驱动层主要功能为上层中间件程序提供外部设备的操作接口，并且实现设备的驱动程序。上层程序可以不管所操作设备的内部实现，只需要调用驱动的接口即可。中间件主要功能包括感知终端数据采集配置、通信协议转换、数据融合、数据封装等功能，可以有效的屏蔽底层异构感知网络的复杂性，并提供统一的抽象管理接口，为农业物联网业务应用的快速

建立提供基础，同时中间件还可用于执行数据的压缩、融合等操作，从而节省网络层特别是使用电信网络时的数据传输量；接入层系统结构如图 2 所示。

**3.2.2 农业物联网数据共享层** 在目前的农业物联网行业应用中，物联网设备通常由不同的设备制造商提供，并且基于这些设备的应用和服务都是独立开发的，使得数据格式兼容性较差，信息在各系统之间无法融合而彼此形成信息孤岛，使得企业之间的数据分享和服务协同变得异常困难。同时农业物联网感知层将产生数以万计的海量信息，如果将这些海量的原始数据直接发送给上层应用，势必导致上层应用系统计算处理量的急剧增加，甚至引起系统崩溃。因此，在农业物联网应用层之前构建农业物联网数据共享层对海量传感信息进行过滤和分析处理，进而为上层应用程序的开发提供更为直接和有效的支撑是大势所趋。

农业物联网数据共享层位于网络层和应用层之间，它是整个农业物联网系统的数据中心，是所有应用层程序获取数据或者提供数据访问服务的服务中



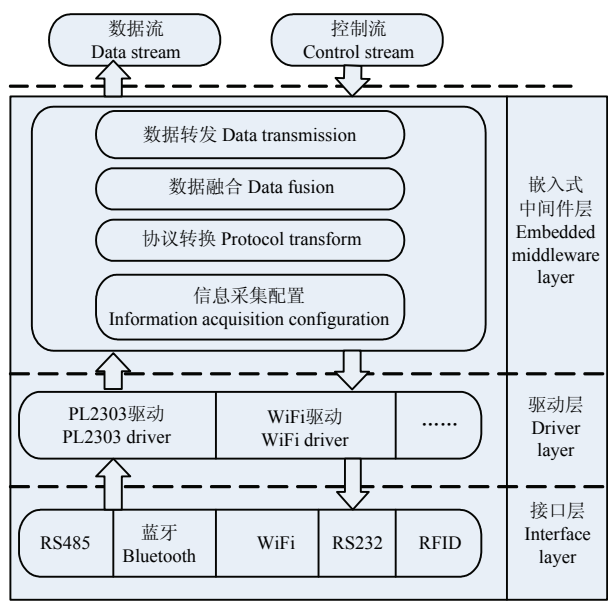


图 2 异构网络接入层功能结构图

Fig. 2 Heterogeneous network access layer structure

心。该层采用基于服务的架构（service oriented architecture, SOA），利用 Web Service 为通信接口，以 XML 作为数据交换的中间载体建立共享的数据与业务服务来降低上层农业物联网应用系统集成的难度，满足各系统对访问速度和数据共享的要求。农业物联网数据共享中心功能包括权限管理、服务管理、数据管理、事件管理、通信管理、服务发布订阅管理、调度管理等，其系统结构如图 3 所示。

需要申请或发布信息的应用系统首先必须通过服务注册接入到数据共享中心，再由该中心提供的 Web 服务接口进行数据的交换与共享。具体来说，当上层农业物联网应用申请共享数据时，通过数据采集接收接口向数据交换与共享中心提出服务请求，由数据交换与共享中心进行服务查找，并向相应的服务提供者发出请求，获得服务提供者提供的响应，再将共享数据返回给提出申请的应用系统；当上层农业物联网应用系统需要发布数据时，首先通过交换数据的数据采集接收接口发布到数据交换与共享中心，而数据交换

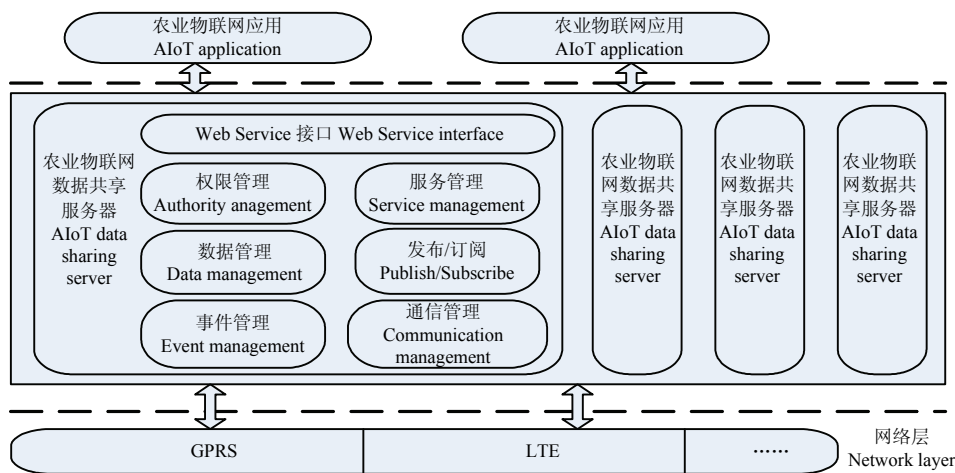


图 3 农业物联网数据共享层结构图

Fig. 3 Agricultural IoT data sharing layer structure

服务的需求方,通过订阅数据交换与共享的相应服务,将会收到服务提供者推送的发生变化的源数据。

从以上数据请求与发布过程可以看出,通过服务提供和服务请求的分离,可以对松散耦合的各种服务进行分布式部署、组合和使用,从而实现对各种粒度松耦合服务的集成,为各农业物联网应用系统间数据交换与共享提供有效的解决方案。在农业物联网数据共享系统实现过程中,应结合具体业务

流程来设计服务粒度,从而实现服务之间的低耦合性和高可重用性。

## 4 农业物联网应用领域

随着技术方案的逐渐成熟,农业物联网在大田种植、设施园艺、畜禽养殖、水产养殖、农产品溯源、农机监控等典型农业领域广泛应用。遵循农业物联网的层次模型,分析各行业应用的共性问题,

按照监测对象的不同,可以进一步分为农业生产环境监控物联网、动植物生命信息监控物联网、农机作业监控物联网、农产品品质检测与质量安全追溯物联网等。

#### 4.1 农业生产环境监控物联网

农业生产环境监控物联网主要指利用传感器技术采集和获取农业生产环境各要素信息,如种植业中的光照、温湿度、二氧化碳浓度、土壤肥力、土壤含水量等参数,水产养殖业中的酸碱度、溶解氧、氨、氮、浊度和电导率,畜禽养殖业中的氨气、二氧化硫、粉尘等有害物质浓度等参数<sup>[23]</sup>,通过对采集信息的分析决策来指导农业生产环境的调控,实现种养殖业的高产高效。

农业生产环境复杂,需要在高温、高湿、低温、雨水等恶劣多变环境下连续不间断运行,且传感器节点布置稀疏不规则<sup>[24]</sup>,布线不方便,而无线传感器网络组网简单、无需布线,具有低成本、灵活的优势,成为当前农业生产环境监控系统主要应用方式。

典型的无线传感器网络环境监控系统包括三部分:上位机、协调器、传感器网络节点,其典型结构如图4所示。其中传感器网络节点也称为终端节点,是构成无线传感器网络的基本单位,主要进行本地信息的收集和数据处理,同时发送自己采集的数据给相邻节点或将相邻节点发过来的数据进行存储、管理和融合,并转发给路由节点。无线传感器网络的节点通常由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和电源模块构成<sup>[25]</sup>。

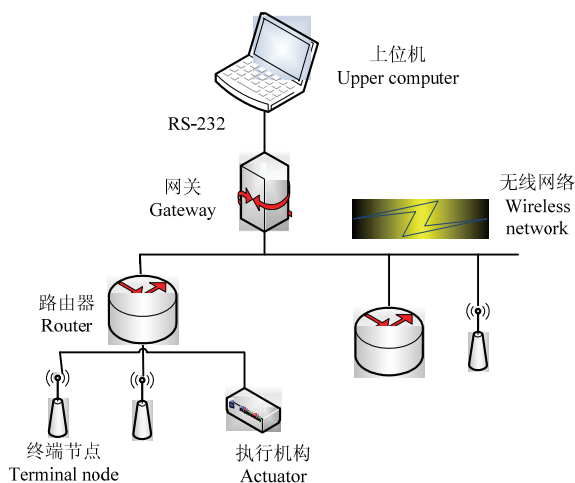


图4 无线传感器网络监控系统

Fig.4 WSN monitoring system

目前国内研究无线传感器网络多以 2.4GHz 和 433MHz 频段为主,工作在 2.4GHz 频段的主要通信技术包括 Zigbee、WIFI、蓝牙、无线 USB 等。屈利华等<sup>[26]</sup>分析了温室数据采集系统的发展现状,详细论述了 Zigbee 技术在温室数据及多媒体信息采集系统的具体应用。章伟聪等<sup>[25]</sup>基于 CC2530 及 ZigBee 协议栈设计了无线网络传感器节点。陈华凌等<sup>[27]</sup>设计了基于 ZigBee 无线传感器网络的水环境监测系统,实现了大范围的水环境监测,提高了水环境监测的实时性,并且降低了部署和维护成本。QI 等<sup>[28]</sup>研究利用 ZigBee 无线传感器网络收集数据传送至网关,网关通过 Wifi 将农业生产的信息传送至远端服务器。相比 2.4GHz 频段,433MHz 工作频率低,具有更强的绕射和穿透能力,传输时耗损小,在传输距离上明显优于 ZigBee。李小敏等<sup>[29]</sup>针对兰花大棚环境中无线传感器网络节点部署的要求及其应用环境的特性,以 433 MHz 为载波频率,研究了无线射频信号的传播特性和无线信号与影响因素之间的关系,为今后无线节点布置与组网提供依据。张传帅等<sup>[30]</sup>采用 433MHz 射频进行信息传输,无线传感器节点和汇聚节点分别采用 MSP430F149 和 LPC2478 作为微控制器,实现温室环境信息的实时采集、信息汇聚和数据融合。为了确保饮用水的安全供应,VIJAYAKUMAR 等<sup>[31]</sup>设计开发了低成本实时水质监控物联网系统,监测参数包括水温、pH、浊度、电导率、溶解氧等,并通过核心控制系统对监测数据进行处理,监测数据可以通过互联网进行查看。LIN 等<sup>[32]</sup>提出了一种利用可再生的、低成本的土壤能量进行自给的无线环境监控系统,使用该项技术进行远程农田环境监控可以降低人工和传感器电池更换的成本。SRBINOVSKA 等<sup>[33]</sup>提出了针对蔬菜温室的无线传感器网络架构,通过分析温室环境特点,设计了基于无线传感器网络技术的低成本、实用的温室环境监控系统,结合专家系统指导,采取远程控制滴灌等适当的措施,实现了科学栽培和降低管理成本。

#### 4.2 动植物生命信息监控物联网

对植物信息采集的研究主要包括表观可视信息的获取和内在信息的获取,表观信息如作物苗情长势、病虫害、果实膨大状况、生物量、茎干直径、叶面积等信息,内在信息包括叶绿素含量、作物氮素、光合速率、种子活力、叶片温湿度等,主要监测手段为光谱技术及图像分析等;对动物生命信息的监测主要包括动物的体温、体重、行为、运动量、取食量、疾病

信息等,通过相关监测,了解动物自身的生理状况和营养状况以及对外界环境条件的适应能力,确保动物个体健康生长,主要监测手段包括动物本体监测传感器、视频分析等。

何勇等<sup>[24]</sup>从植物养分信息监测技术、植物生理生态信息动态监测技术、植物病害及农药等非生物胁迫信息检测技术、植物虫害信息检测技术等方面总结了光谱技术在农业信息感知中的应用及核磁共振成像技术在农业信息感知中的应用。倪军等<sup>[34]</sup>根据作物生长指标的光谱监测机理,研制了一种四波长作物生长信息获取多光谱传感器,较好地实现作物冠层反射光谱的实时在线检测。谭昌伟等<sup>[35]</sup>应用卫星遥感数据获取大田种植作物“面状”苗情信息,研究了孕穗期冬小麦关键苗情参数与籽粒品质参数、产量及卫星遥感变量之间的定量关系,构建了冬小麦孕穗期关键苗情参数遥感反演模型,实现了农情信息的快速获取。HANDCOCK 等<sup>[36]</sup>利用地面传感器结合卫星遥感图像来研究动物行为及与环境的交互情况。NAGL 等<sup>[37]</sup>利用脉搏血氧计、呼吸传感器、体温传感器、环境传感器及 GPS 模块构建了牛科动物移动观测系统,为防止疾病在畜群中传播提供了监测手段。熊本海等<sup>[38]</sup>针对繁殖母猪及泌乳奶牛精细饲养所涉及的物联网关键技术,从智能标识技术、智能发情检测技术、智能设备装备与控制的饲喂技术方面分析了国内外研究进展。刘双印等<sup>[39]</sup>以南美对虾养殖为研究对象,融合养殖环境实时数据、对虾疾病图像数据和专家疾病诊治经验等多种信息,构建了基于物联网的南美对虾疾病远程智能诊断系统。GONZÁLEZ 等<sup>[40]</sup>通过在牛身上安装运动颈圈和 GPS 传感器,观察和记录牛的觅食,反刍、走动、休息和其他活动的行为(包括与物体磨蹭、摇头、梳理皮毛),开发了一种能够执行无监督的行为分类方法,对于准确掌握动物个体行为,提升动物和生态环境管理水平及整个畜牧业具有重要意义。KUMAR 等<sup>[41]</sup>开发了基于 ZigBee 的动物健康监控系统,监测动物的反刍、体温、心率等生理参数和畜舍温湿度等环境参数,并且可以根据热湿度指数分析畜禽的应激水平。

#### 4.3 智能农机物联网

近年来随着土地流转的进行,农机作业范围不断扩大,农机作业信息滞后、时效性差、缺乏有效的监管手段,机收的组织者和参与者对信息快捷、准确、详细的要求难以满足等问题逐渐突显。如何通过技术手段有效地进行农机作业远程监控与调度,提高工作

效率和作业质量尤其是保障农机夜间作业质量和农机装备的智能化水平,是农机物联网发展的迫切需求之一。农机物联网主要研究方向包括农机作业导航自动驾驶技术、农机具远程监控与调度、农机作业质量监控等方面。

李洪等<sup>[42]</sup>将精确算法应用于农机调度问题的求解过程中,以取得全局最优解,为农机作业提供一种切实有效的调度手段,设计并实现了一种基于 GPS、GPRS 和 GIS 技术的农机监控调度系统。在农业机械作业监控与联合收获机自动测产等方面,国家农业信息化工程技术研究中心研发了基于 GNSS(global navigation satellite system)、GIS 和 GPRS 等技术的农业作业机械远程监控指挥调度系统,有效避免了农机盲目调度、极大地优化了农机资源的调配<sup>[23]</sup>。胡静涛等<sup>[43]</sup>分析了农业机械自动驾驶技术的研究现状及存在的问题,并对未来农机导航技术的发展做出了展望,指出采用卫星导航技术,开展农机地头自动转向控制、障碍物探测及主动避障、多机协同导航等高级导航技术研究,以及引入先进的物联网技术,是现代农机自动驾驶技术发展的主要趋势。BACKMAN 等<sup>[44]</sup>针对传统的路径生成方法 Dubins 路径没有考虑最大转向速率问题,提出了曲率和速率连续的平滑路径生成算法,该算法平均计算时间为 0.36 秒,适合实时和模拟方式来使用。ENGLISH 等<sup>[45]</sup>通过一对前置的立体相机获取图像的颜色、纹理和三维结构描述符信息,利用支持向量机回归分析算法,估计作物行的位置,开发了基于机器视觉的农业机器人自动驾驶系统。2013 年农业部在粮食主产区启动了农业物联网区域试验工程,利用无线传感、定位导航与地理信息技术开发了农机作业质量监控终端与调度指挥系统,实现了农机资源管理、田间作业质量监控和跨区调度指挥<sup>[46]</sup>。

#### 4.4 农产品质量安全追溯物联网

农产品信息感知技术主要包括农产品颜色、大小、形状及缺陷损伤等外观信息和农产品成熟度、糖度、酸度、硬度、农药残留等内在品质信息。在农产品质量安全与追溯方面,农业物联网的应用主要集中在农产品仓储及农产品物流配送等环节,通过电子数据交换技术、条形码技术和 RFID 电子标签等技术实现物品的自动识别和出入库,利用无线传感器网络对仓储车间及物流配送车辆进行实时监控,从而实现主要农产品来源可追溯,去向可追踪的目标。



孙通等<sup>[47]</sup>概述了近红外光谱分析技术在水果、鱼类、畜肉类、牛奶、谷物以及奶酪酒精发酵上的在线品质检测/监控应用上的研究进展,指出了近红外光谱分析技术尚存在的问题,并对今后的近红外光谱分析技术作了展望。COSTA 等<sup>[48]</sup>阐述了 RFID 技术在农产品质量安全与追溯方面的发展现状,分析了 RFID 技术面临的机遇和挑战,指出了其未来研究的方向。刘寿春等<sup>[49]</sup>研究了检测冷却猪肉物流环节主要腐败菌和病原菌的数量变化,设计基于统计过程控制的均值-极差控制图,为监控猪肉冷链物流过程或操作工序的微生物污染提供科学的管理和控制方法。杨信廷等<sup>[50]</sup>以蔬菜初级产品为研究对象,从信息的角度构建了一个以实现质量追溯为目的的蔬菜安全生产管理及质量追溯系统。KUMARI 等<sup>[51]</sup>讨论了 RFID 标签的相关知识,包括标签的类型、数据传输频率范围和标准等,并对农产品管理中各种 RFID 的实现和阻碍其广泛采用的障碍进行了分析。BADIA-MELIS 等<sup>[52]</sup>对各种最新的射频识别技术进行了总结,包括能够促进面粉销售的创新性应用、通过同位素分析或者 DNA 序列分析了解食品的真实性应用,同时阐述了食品追溯领域的一些先进概念,包括集成了当前的技术规则,实现机构、环境记录器及产品三者之间互联互通的物联网系统通用框架,以及能够获取产品温度、剩余保质期信息的智能追溯系统等。

#### 4.5 各应用领域存在问题分析

从农业物联网体系结构角度出发,可以发现当前农业物联网各领域研究与应用存在两方面的问题,一方面是异构网络接入层硬件网关研究较多,嵌入式网关中间件研究应用相对较少的问题;另一方面农业物联网数据共享层研究应用严重缺失,各应用系统一般直接将感知层获取的数据发送至农业物联网应用层,缺乏对感知数据的深度挖掘和分析,难以达到进一步指导农业生产的效果。同时可以看出,农业生产环境监控物联网目前发展较为成熟,其应用部署又分为单机应用和远程监控模式;动植物生命信息监控物联网中植物生命信息监控及农产品信息感知物联网研究与应用方面主要集中在数据获取与单机处理方面,系统完整的网络化应用还不多见;智能农机物联网的研究与应用更多集中在几个单向技术的突破方面,综合各项技术的智能农机监控系统正在逐步推广应用;动植物生命信息监控物联网中动物生命信息监控物联网及农产品质量安全追溯物联网的研究与应用最为成熟,特别是在 RFID 应用方面,但也存在单个生产

环节应用较好,全产业链物联网监控应用有待进一步加强的问题。

## 5 展望

农业物联网作为新的技术浪潮和战略新兴产业得到了中国党和政府的高度重视,面临前所未有的发展机遇,但同时中国农业物联网的发展正处于初级阶段,农业物联网技术、产品以及运营模式等还不成熟,农业物联网的发展仍然处于探索和经验积累过程中,特别是农业物联网标准体系的缺失导致各应用系统的兼容性、互换性比较差,对农业物联网的投入造成很大浪费。本文提出的农业物联网体系结构为农业物联网系统的设计与实现提供了一定的参考,但仍有很多细节需要完善,特别是底层向上层提供的调用接口的定义、接口的性能描述等,以期在具体应用系统的开发提供更多规范。

未来农业物联网的研究应紧密围绕发展现代农业的重大需求,在农业物联网体系结构基础上,加强基于 RFID 的识别技术与基于传感器的感知技术获取信息的无缝整合研究,实现农业生产、流通、加工、消费全产业链的信息深度融合与挖掘。面向不同应用对象,进一步精炼系统实现结构,利用大数据思维构建农业知识决策模型和阈值控制模型,开发成本低、易用性强的终端智能装备,在重点区域和典型产业进行应用示范,推动农业物联网持续快速健康发展。

## References

- [1] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 范春晓, 孙娟娟. 物联网: 概念、结构与关键技术研究综述. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.  
SUN Q B, LIU J, LI S, FAN C X, SUN J J. Internet of Things: Summarize on concepts, architecture and key technology problem. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(3): 1-9. (in Chinese)
- [2] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222-230.  
GE W J, ZHAO C J. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 222-230. (in Chinese)
- [3] 余欣荣. 关于发展农业物联网的几点认识. 中国科学院院刊, 2013, 28(6): 679-685.  
YU X R. Perspectives on developing agricultural internet of things in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(6): 679-685. (in Chinese)

- [4] 李瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 200-209.  
LI J, GUO M R, GAO L L. Application and innovation strategy of agricultural internet of things. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(Suppl.2): 200-209. (in Chinese)
- [5] 李道亮. 农业物联网导论. 北京: 科学出版社, 2012.  
LI D L. *Introduction to Internet of Things in Agriculture*. Beijing: Press of Science, 2012. (in Chinese)
- [6] PRESSER M, BARNAGHI P M, EURICH M. The sensei project: Integrating the physical world with the digital world of the network of the future. *Ieee Communications Magazine*, 2009, 47(4): 1-4.
- [7] JOACHIM W W. Initial architectural reference model for IoT. EU FD 7 Project, Deliverable Report: D1.2, 2011.
- [8] SARMA S, BROCK D L, ASHTON K. The networked physical world: Proposals for engineering the next generation of computing, commerce & automatic-identification//mit auto-id center, 2010: 76-77.
- [9] KOSHIZUKA N, SAKAMURA K. Ubiquitous id: Standards for ubiquitous computing and the internet of things. *Ieee Pervasive Computing*, 2011, 9(4): 98-101.
- [10] ITU-T(Y.2221). Requirements for support of USN applications and services in NGN environment. 2010.
- [11] Pujolle G. An autonomic-oriented architecture for the internet of things//Proceedings of the Ieee John Vincent Atanasoff 2006 International Symposium on Modern Computing: Ieee Computer Society, 2006: 163-168.
- [12] NING H S, WANG Z. Future internet of things architecture: Like mankind neural system or social organization framework? *Ieee Communications Letters*, 2011, 15(4): 461-463.
- [13] DUQUENNOY S, GRIMAUD G, VANDEWALLE J J. Smews: Smart and mobile embedded web server//2010 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, 2009: 571-576.
- [14] 纪阳, 成城, 唐宁. Web of things: 开放的物联网系统结构研究. 数字通信, 2012, 10(5): 14-19, 54.  
JI Y, CHENG C, TANG N. Web of things: Open real networking system schema. *Digital Communication*, 2012, 10(5): 14-19, 54. (in Chinese)
- [15] 沈苏彬, 范曲立, 宗平, 毛燕琴, 黄维. 物联网的体系结构与相关技术研究. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, 29(6): 1-11.  
SHEN S B, FAN Q L, ZONG P, MAO Y Q, HUANG W. Study on the architecture and associated technologies for internet of things. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2009, 29(6): 1-11. (in Chinese)
- [16] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.  
QIAN Z H, WANG Y J. IoT technology and application. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 1023-1029. (in Chinese)
- [17] 于君, 王洋, 张雪英. 物联网技术应用实践及其体系结构. 自动化仪表, 2012, 33(3): 42-45, 49.  
YU J, WANG Y, ZHANG X Y. The internet of things technology application practice and its system structure. *Automation Instrumentation*, 2012, 33(3): 42-45, 49. (in Chinese)
- [18] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, PALANISWAMI M. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [19] AL-FUQAH A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, ALEDHARI M, AYYASH M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *Ieee Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [20] SICARI S, RIZZARDI A, GRIECO L A, PORISINI A C. Security, privacy and trust in internet of things: The road ahead. *Computer Networks*, 2015, 76: 146-164.
- [21] 陈海明, 崔莉, 谢开斌. 物联网体系结构与实现方法的比较研究. 计算机学报, 2013, 36(1): 168-188.  
CHEN H M, CUI L, XIE K B. A comparative study on architectures and implementation methodologies of internet of things. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(1): 168-188. (in Chinese)
- [22] 陈美镇, 王纪章, 李萍萍, 周金生, 夏得峰. 基于 Android 系统的温室异构网络环境监测智能网关开发. 农业工程学报, 2015, 31(5): 218-225.  
CHEN M Z, WANG J Z, LI P P, ZHOU J S, XIA D F. Development of intelligent gateway for heterogeneous networks environment monitoring in greenhouse based on Android system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 218-225. (in Chinese)
- [23] 陈晓栋, 原向阳, 郭平毅, 宁娜, 郭美俊, 兰艳亭. 农业物联网研究进展与前景展望. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 8-16.  
CHEN X D, YUAN X Y, GUO P Y, NING N, GUO M J, LAN Y T. Progress and prospect in agricultural internet of things. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(2): 8-16. (in Chinese)
- [24] 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感器研究进展. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216-226.  
HE Y, NIE P C, LIU F. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 216-226. (in Chinese)
- [25] 章伟聪, 俞新武, 李忠成. 基于 CC2530 及 ZigBee 协议栈设计无线

- 网络传感器节点. 计算机系统应用, 2011, 20(7): 120, 184-187.
- ZHANG W C, YU X W, LI Z C. Wireless network sensor node design based on CC2530 and Zig Bee protocol stack. *Computer Systems & Applications*, 2011, 20(7): 120, 184-187. (in Chinese)
- [26] 屈利华, 赵春江, 杨信廷, 陈明, 孙传恒, 周超. ZigBee无线传感器网络在温室多源数据采集系统中的应用综述. 中国农机化, 2012(4): 179-183.
- QU L H, ZHAO C J, YANG X T, CHEN M, SUN C H, ZHOU C. Application of ZigBee wireless sensor network in multiple-source data acquisition system of greenhouse. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012(4): 179-183. (in Chinese)
- [27] 陈华凌, 陈岁生, 张仁政. 基于 ZigBee 无线传感器网络的水环境监测系统. 仪表技术与传感器, 2012, 1(1): 71-73.
- CHEN H L, CHEN S S, ZHANG R Z. Water environment monitoring system based on ZigBee wireless sensor networks. *Instrument Technique and Sensor*, 2012, 1(1): 71-73. (in Chinese)
- [28] QI L, ZHANG J, XU M, FU Z T, CHEN W, ZHANG X S. Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 53(11): 2162-2172.
- [29] 李小敏, 臧英, 罗锡文, 李腾, 刘永鑫, 孔庆军. 兰花大棚内无线传感器网络 433MHz 信道传播特性试验. 农业工程学报, 2013, 29(13): 182-189.
- LI X M, ZANG Y, LUO X W, LI T, LIU Y X, KONG Q J. Experiment of propagation characteristics based on 433MHz channel of WSN in orchid greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 182-189. (in Chinese)
- [30] 张传帅, 张天蛟, 张漫, 刘刚, 王辉, 于亮亮, 李婷. 基于 WSN 的温室环境信息远程监测系统. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 168-173.
- ZHANG C S, ZHANG T J, ZHANG M, LIU G, WANG H, YU L L, LI T. Remote environmental monitoring system for greenhouse based on WSN. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(5): 168-173. (in Chinese)
- [31] VIJAYAKUMAR N, RAMYA R. The real time monitoring of water quality in Iot environment//2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS), 2015: 1-5.
- [32] LIN F T, KUO Y C, HSIEH J C, TSAI H Y, LIAO Y T, LEE H C. A Self-powering wireless environment monitoring system using soil energy. *Ieee Sensors Journal*, 2015, 15(7): 3751-3758.
- [33] SRBINOVSKA M, GAVROVSKI C, DIMCEV V, KRKOLEVA A, BOROZAN V. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 88: 297-307.
- [34] 倪军, 王婷婷, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 作物生长信息获取多光谱传感器设计与试验. 农业机械学报, 2013, 44(5): 207-212.
- NI J, WANG T T, YAO X, CAO W X, ZHU Y. Design and experiments of multi-spectral sensor for rice and wheat growth information. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 207-212. (in Chinese)
- [35] 谭昌伟, 杨昕, 罗明, 马昌, 严翔, 陈亭亭. 以HJ-CCD影像为基础的冬小麦孕穗期关键苗情参数遥感定量反演. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2518-2527.
- TAN C W, YANG X, LUO M, MA C, YAN X, CHEN T T. Quantitative inversion of key seedling condition parameters in winter wheat at booting stage using remote sensing based on HJ-CCD images. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2518-2527. (in Chinese)
- [36] HANDCOCK R N, SWAIN D L, BISHOP-HURLEY G J, PATISON K P, WARK T, VALENCIA P, CORKE P, O'NEILL C J. Monitoring animal behavior and environmental interactions using wireless sensor networks, Gps collars and satellite remote sensing. *Sensors*, 2009, 9(5): 3586-3603.
- [37] NAGL L, SCHMITZ R, WARREN S, HILDRETH T S, ERICKSON H, ANDRESEN D. Wearable sensor system for wireless state-of-health determination in Cattle// Proceedings of the 25th Annual International Conference of the Ieee, Engineering in Medicine and Biology Society, 2003, 17: 3012-3015.
- [38] 熊本海, 罗清尧, 杨亮. 家畜精饲料物联网关键技术的研究. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 19-25.
- XIONG B H, LUO Q Y, YANG L. Studies on key thing internet technology for precise livestock feeding. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(5): 19-25. (in Chinese)
- [39] 刘双印, 徐龙琴, 李道亮, 段青玲, 魏晓华. 基于物联网的南美白对虾疾病远程智能诊断系统. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 189-195.
- LIU S Y, XU L Q, LI D L, DUAN Q L, WEI X H. Research on remote system for disease diagnosis of *Penaeus vannamei* based on internet of things. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(2): 189-195. (in Chinese)
- [40] GONZÁLEZ L A, BISHOP-HURLEY G J, HANDCOCK R N, CROSSMAN C. Behavioral classification of data from collars containing motion sensors in grazing cattle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 110: 91-102.
- [41] KUMAR A, HANCKE G P A. A Zigbee-based animal health monitoring system. *Ieee Sensors Journal*, 2014, 15(1): 610-617.
- [42] 李洪, 姚光强, 陈立平. 基于 GPS、GPRS 和 GIS 的农机监控调度

- 系统. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 119-122.
- LI H, YAO G Q, CHEN L P. Farm machinery monitoring and scheduling system based on GPS, GPRS and GIS. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(Suppl.2): 119-122. (in Chinese )
- [43] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 李逃昌, 刘晓光. 农业机械自动导航技术研究进展. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
- HU J T, GAO L, BAI X P, LI T C, LIU X G. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- [44] BACKMAN J, PIIRAINEN P, OKSANEN T. Smooth turning path generation for agricultural vehicles in headlands. *Biosystems Engineering*, 2015, 139: 76-86.
- [45] ENGLISH A, ROSS P, BALL D, UPCROFT B, CORKE P. Learning crop models for vision-based guidance of agricultural robots//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015: 1158-1163.
- [46] 许世卫. 我国农业物联网发展现状及对策. 中国科学院院刊, 2013, 28(6): 686-692.
- XU S W. Current status of agricultural IOT in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(6): 686-692. (in Chinese)
- [47] 孙通, 徐惠荣, 应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 122-126.
- SUN T, XU H R, YING Y B. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(1): 122-126. (in Chinese)
- [48] COSTA C, ANTONUCCI F, PALLOTTINO F, AGUZZI J, SARRIÁ D, MENESATTI P. A Review on agri-food supply chain traceability by means of RFID technology. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(2): 353-366.
- [49] 刘寿春, 赵春江, 杨信廷, 王国利, 钟赛意. 冷链物流过程猪肉微生物污染与控制图设计. 农业工程学报, 2013, 29(7): 254-260.
- LIU S C, ZHAO C J, YANG X T, WANG G L, ZHONG S Y. Microbial contamination of chilled pork in cold chain logistics and its control chart design. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 254-260. (in Chinese )
- [50] 杨信廷, 钱建平, 孙传恒, 赵春江, 王俊英, 台社红, 侯彦林. 蔬菜安全生产管理及质量追溯系统设计与实现. 农业工程学报, 2008, 24(3): 162-166.
- YANG X T, QIAN J P, SUN C H, ZHAO C J, WANG J Y, TAI S H, HOU Y L. Design and application of safe production and quality traceability system for vegetable. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 162-166. (in Chinese )
- [51] KUMARI L, NARSAIAH K, GREWAL M K, ANURAG R K. Application of RFID in agri-food Sector. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(2): 144-161.
- [52] BADIA-MELIS R, MISHRA P, RUIZ-GARCÍA L. Food traceability: New trends and recent advances. a review. *Food Control*, 2015, 57: 393-401.

(责任编辑 杨鑫浩)